

南京理工大学

---

博士学位论文

---

群体粒子场激光侧向散射性质研究及建模分析

---

姓名：袁兴起

---

申请学位级别：博士

---

专业：光学工程

---

指导教师：陈延如;赵琦

---

20071031

## 摘 要

随机分布群粒子入射激光复合散射特性研究在现代科学和工程中有着广泛的应用。本文研究了群体粒子场光学侧向散射特性及其数学模型描述。在用相同波长线偏振和圆偏振两种偏振状态的He-Ne激光束入射到一随机分布群粒子场以产生侧向散射光,并测得散射偏振光强的实验基础上,分析得到了群体粒子场激光侧向散射的特性规律,建立了Muller-Stokes算法数学模型来描述其散射特征,并验证了利用该模型得到的群体粒子场激光侧向散射规律与实验结果是相吻合的。

围绕着群体粒子场侧向散射光的性质分析,本文开展了一系列研究:设计了用于研究群体粒子场激光侧向散射特性的实验系统及实验方法;从实验上测量了不同偏振态入射光照射下不同直径粒子在不同体积分数浓度时侧向散射光的不同偏振态光强,通过相应的处理获得了散射光强度及其偏振度相对散射角的分布图样,分析得到了散射光强及偏振度相对散射角的变化规律;建立了多粒子散射的Muller-Stokes矩阵描述数学模型,利用模型阐明了群体粒子侧向散射的多种性质特征,验证了该模型得到的群体粒子场激光侧向散射规律与实验结果是相吻合的,从而用Muller-Stokes矩阵实现了对群粒子侧向散射现象的简化数学表示。用此算法对实验得到的数据进行计算得到的结果表明:散射光强呈轴对称分布;散射光偏振特性的变化及用于表示各种特性的矩阵的元素主要决定于散射粒子的大小;另外,群粒子场侧向散射系数亦随粒子直径的变化而变化明显。这种Muller-Stokes算法把散射场模拟成一个光学系统,对入射偏振光束的散射效果给以简明的描述,给出了垂直于入射光方向的平面上各种散射特征的信息。

本文对群粒子场激光侧向散射性质规律的研究结果及建立的群粒子散射数学模型在光散射研究领域尤其是多粒子激光散射的理论及应用方面有一定的价值,在激光散射技术具体应用方面如对糖尿病人血糖浓度的测量,对导弹或火箭羽烟的成分、浓度及其随时间空间的变化情况的测定,对沙尘暴天气进行早期的判断等等也是很有意义的。

**关键词:** 群体粒子场, 激光, 侧向散射, 微粒, 线偏振光, 圆偏振光, 偏振度, Muller-Stokes矩阵

## Abstract

The researches on the properties of a laser radiation side-scattered by the multiple particles distributed randomly have extensive applications in modern science and engineering. The light scattering properties of the multiple particles field and its mathematical model description are studied in this dissertation. The linearly polarized and circularly polarized He-Ne laser radiation having the same wave-length incidence the field of multiple particles distributed randomly to create side-scattering light and on the basis of the experiment of measuring the scattering light intensities, the properties of scattered radiation are acquired, and the Muller-Stokes matrix mathematical model is developed to describe the properties. The properties of the radiation side-scattered by the multiple particles distributed randomly deducing from the model are in accordance with the experimental results.

In order to realize the subjects, a series of research have been done as below: The experiment system used to study the properties of the side-scattered radiation in the multiple particles field is designed; the side-scattered radiation intensities of different polarizations are measured in experiments when using different polarization light incidence different volume concentration liquids consisted of particles of different diameters, the distributions of the intensities and the polarizations of the side-scattered radiation versus scattering angles are acquired and its variation regulations are studied; the mathematical model of the Muller-Stokes matrix to describe the multiple scattering is developed, many characteristics of the side-scattering radiation of the multiple particles field are revealed by the model, and the properties of the side-scattered radiation deducing from the model are in accordance with the experimental results, and then the simplified mathematical representation of the particle scattering is realized by using the Muller-Stokes matrix. By calculating the experimental data using this algorithm, the results show that the intensity of scattered radiation is axial symmetric, and the variations of the characteristics of scattered radiation and the matrix elements representing the scattering characteristics depend primarily upon particle size; in addition, the fraction of the scattering varies dramatically with particle diameters. This Muller-Stokes matrix algorithm regards the scattering field as an optical system, giving the simplified description of the scattering effect of the polarized incidence radiation, showing the information of the scattering characteristics in the plane perpendicular to the direction of the incidence light.

The researches of the properties of the side-scattered radiation in the multiple particles field and the developed mathematical model of the multiple scattering have important

reference value either for studying radiation scattering especially studying the theories and applications of multiple particles' laser radiation scattering or for practically applying the laser scattering technologies such as the measurement of the blood sugar concentration of the diabetics, the measurement of the missile or rocket plumes compositions, concentrations and its varying corresponding to time or space, and the forecast of the sandstorm weather, etc.

**Keyword:** multiple particles field; laser beam; side-scattering; particles; linearly polarized radiation; circularly polarized radiation; polarization; Muller-Stokes matrix

## 声 明

本学位论文是我在导师的指导下取得的研究成果，尽我所知，在本学位论文中，除了加以标注和致谢的部分外，不包含其他人已经发表或公布过的研究成果，也不包含我为获得任何教育机构的学位或学历而使用过的材料。与我一同工作的同事对本学位论文做出的贡献均已论文中作了明确的说明。

研究生签名：\_\_\_\_\_ 年 月 日

## 学位论文使用授权声明

南京理工大学有权保存本学位论文的电子和纸质文档，可以借阅或上网公布本学位论文的部分或全部内容，可以向有关部门或机构送交并授权其保存、借阅或上网公布本学位论文的部分或全部内容。对于保密论文，按保密的有关规定和程序处理。

研究生签名：\_\_\_\_\_ 年 月 日

# 1 绪论

## 1.1 研究背景与意义

光散射是指当一束光通过介质传播时, 其中一部分光偏离原来传播方向的现象。用物理语言描述, 就是在某种媒质中, 光的传播方向跟麦克斯韦方程式的宏观规律所预期的方向不同, 这种现象即为光的散射<sup>[1]</sup>。当光束通过均匀的透明(光学空虚)介质时, 从侧面看不到光线。如果介质是不均匀的(例如高聚物稀溶液、溶胶、悬浮液等), 就可从侧面看到一道清晰的光径, 这种所谓的 Tyndall 现象即是光被介质散射的结果。这些现象的本质是光波的电磁场与介质分子相互作用的结果。根据经典理论, 当光波射入介质时, 在光波电场的作用下, 分子或原子产生诱导极化, 并以一定的频率作受迫振动, 形成振动的偶极子, 这些振动的偶极子就成为二次光源, 向各个方向发出电磁波。在纯净的均匀介质中, 这些次波相互干涉的结果, 使光线只能在折射方向上传播, 而在其它方向上则相互抵消, 所以没有散射光出现。但当均匀介质中掺入进行着布朗运动的微粒后, 或者体系由于热运动而产生局部的密度或浓度涨落时, 就会破坏次波的相干性, 而在其它方向上出现散射光。

目前, 光散射的应用范围如此之大, 以至于要详尽无遗地来个列举几乎是不可能的。最早光散射的应用仅限于对诸如天空为什么是蓝色的, 旭日和夕阳为什么是红色的, 云为什么是白色的等一些自然现象的解释, 和用来作为测定 Avogadro 常数的一种手段。随着研究范围的扩大和实验手段的改进, 光散射技术的应用范围也不断扩大。特别是二十世纪六十年代中后期激光技术出现以后, 由于激光的亮度高, 单色性、相干性和准直性好, 因而为光散射实验研究提供了优良的光源。与此同时, 计算技术的发展大大提高了光散射数据处理的自动化; 再加上在小角范围测量散射光强度等一系列先进仪器的设计和分光技术的改进, 使光散射技术得到了迅速发展。就物质的聚集状态来说, 光散射技术目前可用于对气体(如大气微粒、烟、星际间尘埃等)、液体、溶液(如胶体溶液、悬浮液、乳状液及各种天然和合成的高分子溶液等)、固体、晶体及液晶的研究。就所涉及的工业科学领域来说, 光散射技术目前已成为石油化工、纺织纤维工业、橡胶、塑料工业、无机工业, 以及材料科学、矿物学、生物学、医学、固体物理学、半导体物理学、地球物理学及宇宙空间等方面研究的一种不可缺少的实验手段。例如, 光散射技术已用于人造卫星传感定向, 航空航天的光学环境监测, 宇宙尘埃及南极大气尘埃形状和浓度对气候的影响等方面的研究。又如, 利用激光束照射单细胞悬浮液流程时, 由于细胞中 DNA、RNA 和细胞体积的不同, 悬浮液流程发射出的散射光强度、退偏振性和角度分布就不相同, 根据此原理而设计的激光光散射细胞分析仪(若结合荧光染色同时测定荧光强度, 则效果更好), 可作为癌症早期诊断和研究放射治疗及化学药物作用机制的一种重要工具<sup>[2]</sup>。

光散射是一门多学科的综合性技术,目前它已成为许多科研和生产部门的重要工具之一,并形成成为一个活跃的、多学科交叉的研究领域,在从原子物理到医疗成像、地理科学及遥感等生活和科学研究多个方面都有着广泛的应用价值。光散射法不仅可以研究液体的性质,而且可研究晶体、液晶、和凝聚态物质的性质。光散射法越来越多的应用已使散射光学成为一门日益重要的现代科学,表现出日益强大的生命力。由于以上的这些研究,光的散射已成为认识物质结构的一个极重要的源泉。20世纪60年代激光出现以来,散射光学得到了极大的发展,如受激 Raman 散射和受激 Brillouin 散射的发现。但时至今日,这一段时间散射光学的发展主要是 Raman 散射和 Brillouin 散射在各种物质结构探测中的应用。另外,从上述可看出,目前光散射的应用研究要远远大于光散射的理论研究,散射的理论发展却进行缓慢,其中对多粒子散射的理论研究又远远少于对单粒子散射的理论研究。随着散射光学应用范围的不断扩大,多粒子散射模型的建立已成为一个日益迫切需要完成的研究课题。因此,本文所做工作是本研究领域的一个突破,从群体粒子场激光散射光的偏振、强度等多个方面进行了研究,以矩阵光学为基础,建立了一个比较完善的群体粒子场激光散射的理论数学模型,达到了本领域的前沿研究水平。由于在本课题所涉及的范围内现当代光学界有关群体粒子散射模型的建立文献显示基本不见,因此,本研究课题的创新性显而易见。

## 1.2 散射与介质粒子尺度的关系

光的散射与介质粒子的尺度有很大的关系。按照几何光学,光线在均匀介质中沿直线传播,除了正对着光线的方向外,其它方向应是看不到光亮的。从分子理论来看,当入射光波射在介质上时,将激起其中电子作受迫振动,从而发出相干的次波来。这与惠更斯—菲涅耳原理中所假设的次波稍有不同,这里的次波有真实的振源。理论上可以证明,只要分子的密度是均匀的,次波相干迭加结果,只剩下遵从几何光学规律的光线,沿其余方向的振动完全抵消。从微观的尺度( $10^{-10}\text{m}$ )来看,任何物质都由一个个分子、原子组成,没有物质是均匀的。这里所谓“均匀”分布,是以光波的波长( $10^{-7}\text{m}$ )为尺度来衡量的,即在这样大小的范围内密度的统计平均是均匀的。

如果介质的均匀性遭到破坏,即尺度达到波长数量级的邻近介质小块之间在光学性质上(如折射率)有较大差异,在光波的作用下它们将成为强度差别较大的次波源,而且从它们到空间各点已有不可忽略的光程差。这些次波相干迭加的结果,光场中的强度分布将与上述均匀介质情形有所不同。这时,除了按几何光学规律传播的光线外,其它方向或多或少也有光线存在,这就是散射光<sup>[4]</sup>。由此可见,尺度与波长可比拟的不均匀性引起的散射,也可看作是它们的衍射作用。若介质中不均匀团块的尺度达到远大于波长的数量级,散射又可看成是在这些团块上的反射和折射了。例如,图 1.1 右方的小障碍物使波发生散射,左方的较大物体使波发生反射,边缘部分发生衍射。

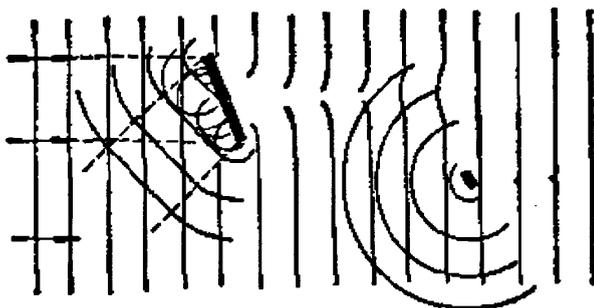


图 1.1 散射、衍射和反射

按不均匀团块的性质，散射可分为两大类：

(1) 悬浮质点的散射：如胶体，乳浊液，含有烟、雾、灰尘的大气中的散射属于此类；

(2) 分子散射：即使十分纯净的液体或气体，也能产生比较微弱的散射。这是由于分子热运动造成密度的局部涨落引起的。这种散射，称为分子散射。物质处在临界点时密度涨落很大，光线照射在其上，就会发生强烈的分子散射。这种现象叫做临界乳光。

### 1.3 几种典型的光散射模型

#### 1.3.1 Rayleigh 散射

1869 年 Tyndall 详细地研究了光束通过金溶胶时的光径，又使光线通过一个盛有亚硝酸盐丁酯和盐酸混合蒸汽的管子，制成了模拟的蓝色天空。他还发现在白光照射下，散射光是部分偏振的。1871 年 Rayleigh 详细地研究了 Tyndall 现象后指出：散射光强度与入射光强度、单位体积内的微粒数目及微粒的体积平方成正比，而与散射光波长的四次方成反比。这就是著名的 Rayleigh 定律。

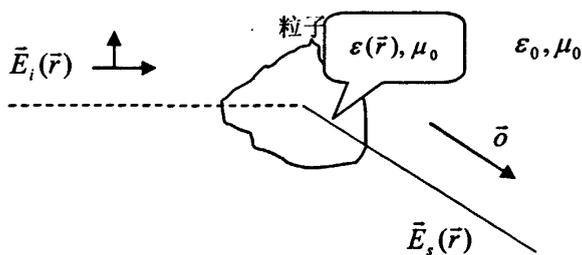


图 1.2 入射到散射体元上的平面波  $\vec{E}_i(\vec{r})$  和在  $\vec{\theta}$  方向上距离  $R$  处所观察到的散射场  $\vec{E}_s(\vec{r})$

假定一个线偏振平面电磁波在介电常数为  $\epsilon_0$  而磁导率为  $\mu_0$  的介质中传播, 它的电场强度为

$$\vec{E}_i(\vec{r}) = \vec{e}_i \exp(ik\vec{i} \cdot \vec{r}) \quad (1.1)$$

振幅  $|E_i|$  取为 1 (伏/米),  $k = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = 2\pi/\lambda$  是波数,  $\lambda$  为波在该介质中的波长,  $\vec{i}$  是波传播方向上的单位矢量,  $\vec{e}_i$  是波的偏振方向上的单位矢量。

这个波入射到一个粒子上, 如图 1.2 所示<sup>[5]</sup>,  $\epsilon(\vec{r})$  为粒子的介电常数。以粒子中某点为参考点, 在单位矢量  $\vec{o}$  方向上离这个参考点距离为  $R$  的电场强度是由两部分所组成的, 一部分是入射波的电场  $\vec{E}_i$ , 另一部分是粒子散射波的电场  $\vec{E}_s$ 。在  $R \gg D^2/\lambda$  ( $D$  是粒子的特征尺度, 例如粒子直径) 时, 我们把这样的观测点  $\vec{r}$  叫做粒子的远场, 这时散射场  $\vec{E}_s$  的特性就如同球面波一样, 可以表示成下列形式:

$$\vec{E}_s(\vec{r}) = \vec{f}(\vec{o}, \vec{i}) (e^{ikR}/R), \text{ 当 } R \gg D^2/\lambda. \quad (1.2)$$

$\vec{f}(\vec{o}, \vec{i})$  称作散射振幅。当沿  $\vec{i}$  方向传播的具有单位振幅的平面波照射到粒子上时,  $\vec{f}(\vec{o}, \vec{i})$  描述了远场处  $\vec{o}$  方向上散射波的振幅、相位和偏振。需要说明的是, 即使入射波是线偏振的, 一般散射波也是椭圆偏振的。

考察围绕粒子的各个方向上观测到的总散射能量, 产生这个总散射能量的粒子横截面叫做散射截面  $\sigma_s$ , 它由下式表示:

$$\sigma_s = \int_{4\pi} |\vec{f}(\vec{o}, \vec{i})|^2 d\omega, \quad (1.3)$$

式中  $d\omega$  是微分立体角。当粒子的尺度比波长小很多, 我们注意到散射场  $\vec{E}_s$  是由于粒子内部的场所致, 因而在距离  $R$  处  $\vec{E}_s$  正比于入射场  $\vec{E}_i$  和散射元的体积  $V$ :

$$|E_s| = |E_i| [aV/R] \quad (1.4)$$

这个等式中的常数  $a$  应该具有 (长度)<sup>-2</sup> 的量纲, 又由于它是波长的函数, 因此这个常数应该正比于  $\lambda^{-2}$ 。将这个等式与 (1.2) 式、(1.3) 式相比较, 就得到:

$$|E_s| \propto |E_i| \frac{V}{R\lambda^2} \propto |E_i| \frac{|\vec{f}(\vec{o}, \vec{i})|}{R} \quad (1.5)$$

因此,  $\sigma_s \propto |\vec{f}(\vec{o}, \vec{i})| \propto V^2/\lambda^4$ 。小粒子的这种特性通常就称为 Rayleigh 散射。

### 1.3.2 Mie 理论

各向同性的均匀球体对平面电磁波散射的精确解在 1908 年由 Mie 得到, 因而通常称作 Mie 理论。

线性偏振光入射到一很小的微粒 (直径  $\phi \ll \lambda$ ), 其散射如图 1.3 所示<sup>[6]</sup>, 散射粒子位于坐标原点  $O$  处,  $x$  轴方向为入射光的偏振方向,  $z$  为入射光的传播方向,  $OP$

为散射方向,  $OQ$  为  $OP$  在  $xy$  平面的投影。

根据 Mie 理论, 当非偏振光入射到半径为  $r_0$  的球形粒子上时,  $P$  点的散射光强为:

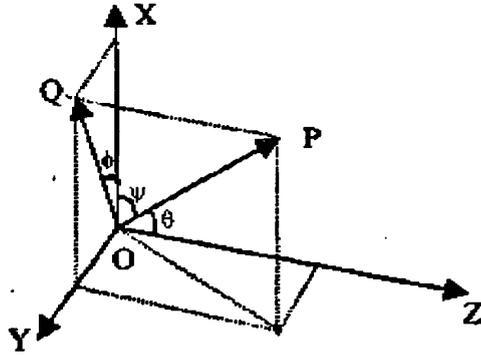


图 1.3 Mie 粒子散射几何关系

$$I_{\mu} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R^2} |S|^2 \quad (1.6)$$

其中  $|S|^2 = |S_1|^2 + |S_2|^2$ ,  $S_1$ 、 $S_2$  分别为在  $xz$  平面和  $xy$  平面的振幅函数:

$$S_1 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2i+1}{i(i+1)} [a_i \pi_i(\cos\theta) + b_i \tau_i(\cos\theta)] \quad (1.7)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2i+1}{i(i+1)} [b_i \pi_i(\cos\theta) + a_i \tau_i(\cos\theta)] \quad (1.8)$$

其中  $\pi_i(\mu)$  和  $\tau_i(\mu)$  为角函数:

$$\pi_i(\mu) = \frac{d}{d\mu} P_i(\mu) \quad (1.9)$$

$$\tau_i(\mu) = \mu \pi_i(\mu) - (1 - \mu^2) \frac{d}{d\mu} \pi_i(\mu) \quad (1.10)$$

$$P_i(\mu) = \frac{1}{2^i i!} \frac{d^i}{d\mu^i} (\mu^2 - 1) \quad (1.11)$$

系数  $a_i$  和  $b_i$  分别为:

$$a_i = \frac{A_i(Y)\psi_i(X) - n\psi'_i(X)}{A_i(Y)\zeta_i(X) - n\zeta'_i(X)} \quad (1.12)$$

$$b_i = \frac{nA_i(Y)\psi_i(X) - \psi'_i(X)}{nA_i(Y)\zeta_i(X) - \zeta'_i(X)} \quad (1.13)$$

其中:

$$\psi_j(X) = \left(\frac{\pi x}{2}\right)^{\frac{1}{2}} J_{i+\frac{1}{2}}(X),$$

$$\zeta_j(X) = \left(\frac{\pi x}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left[ J_{i+\frac{1}{2}}(X) + (-1)^j j J_{-i+\frac{1}{2}}(X) \right],$$

$$A_i = \frac{\psi'(Y)}{\psi(Y)}, \quad X = 2\pi \frac{r_0}{\lambda}, \quad Y = nx, \quad j = \sqrt{-1},$$

偏振度

$$P = \frac{|S_1|^2 - |S_2|^2}{|S_1|^2 + |S_2|^2} \quad (1.14)$$

散射截面是:

$$\frac{\sigma_s}{\pi r_0^2} = \frac{2}{r_0^2} \sum_{i=1}^{\infty} (2i+1) (|a_i|^2 + |b_i|^2) \quad (1.15)$$

### 1.3.3 Brillouin 散射

在 1912~1922 年间, Brillouin 对具有声波密度起伏的光散射谱进行了计算, 从理论上预言了这种效应<sup>[7]</sup>。直到 1930 年, E.Gross 在液体中首先观察到了这种现象: 当平面声波 (即  $\bar{u} = u_0 \exp[i(\omega t - \bar{q} \cdot \bar{r})] + c$ ,  $\bar{u}$  是小体元相对于平衡位置的小位移) 在介质中传播时, 因声波波长远大于晶格常数, 所以, 长波声学模所涉及的是单胞中所有原子的同位相的运动, 即约在 100 个单胞范围内, 原子位移近似相同。原子间相对位移引起的形变为  $\bar{u}_{ij}$ , 即第  $i$  个原子 (或元胞) 受到第  $j$  个原子 (或元胞) 的作用而发生的位移, 由此引起弹光系数的改变, 进而引发介电常数的变化 ( $\delta\epsilon$ ), 也就是折射率  $n$  出现同步的变化  $\delta n$ , 该过程可表示为以下的步 (步骤) 序:

$$u_0 \rightarrow u_{ij} \rightarrow \delta\rho \rightarrow \delta\epsilon \rightarrow \delta n$$

声波引起的正弦变化以声速  $v = \frac{\omega}{q}$  在介质中传播, 该作用如同光栅 (常称为相光

栅), 其光栅常数为  $b = \frac{2\pi}{|\bar{q}|}$ ,  $\bar{q}$  是声学声子 (或磁振子自旋波) 的波矢。入射 ( $\bar{k}_i$ )、

散射 ( $\bar{k}_s$ ) 及声子 (或磁振子) 的波矢间的几何关系如图 1.4 所示。

激发中的玻色子 (声子或磁振子) 引起的非弹性光散射就是 Brillouin 散射。对各向同性透明介质, Brillouin 散射的光散射特征可归纳如下: ①由横向声子散射的光是全退偏振的; ②散射平面内横向偏振声子不产生散射; ③背向散射中, 横向散射

声子的散射强度为零；④纵向散射的声子是全偏振的。

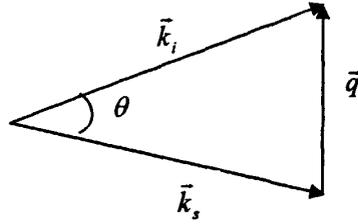


图 1.4 入、散射光及声子（或磁振子）的三波矢的几何关系

### 1.3.4 Raman 散射

当电矢量为  $\vec{E}$  的单色光入射到物质上时，组成物质的分子或原子的正负电荷分布将发生变化或形成电偶极矩。在某一入射光范围内，单位体积的感生偶极矩  $\vec{M}$  与入射电矢量  $\vec{E}$  成正比，即：

$$\vec{M} = \alpha \vec{E} \quad (1.16)$$

式中， $\alpha$  为极化率张量。在满足某一特定条件下，该振动着的电偶极子将再辐射电磁波，成为散射光。显然，散射光的频率、波矢都与入射光的频率、波矢不同。这可理解为电偶极矩被机械或声子“调制”的结果。这样出现的由物质分子或晶格引起的电偶极矩振动而产生的光散射，即为 Raman 散射<sup>[7-9]</sup>。根据经典理论， $\vec{M}$  可写成电场  $\vec{E}$  的级数表示式

$$\vec{M} = \alpha \vec{E} + \frac{1}{2!} \beta \vec{E} + \frac{1}{3!} \gamma \vec{E} + \dots + \frac{1}{n!} \xi \vec{E} \quad (1.17)$$

感生偶极矩  $\vec{M}$  的振动不仅有入射光频率  $\omega_L$ ，而且还有  $(\omega_L \pm \omega_q)$  两种对称分布在  $\omega_L$  两侧的新频率，它们起源于原子振动对电子极化率  $\alpha$  的调制。前者是相应的频率不变的弹性光散射，如 Rayleigh 散射；后者相应的是频率发生变化的非弹性光散射，即 Raman 散射。而频率减少的  $(\omega_L - \omega_q)$  称为 Stokes 频率，频率增加的  $(\omega_L + \omega_q)$  称为反 Stokes 频率。Raman 散射光的频率  $(\omega_s)$  和波矢  $(\vec{k})$ ：

$$\omega_s = \omega_L \mp \omega_q, \quad \vec{k}_s = \vec{k}_L \mp \vec{q}$$

分别表示非弹性 Raman 散射过程中所遵循的能量守恒和动量守恒定律。由此构成了 Raman 散射的选择定则。

### 1.3.5 其它散射理论

对于散射的理论研究，还有 Debye、Born 等人做出的贡献。目前利用量子方法对光散射的研究也有一定的进展。限于篇幅，这里就不一一列举了。

#### 1.4 目标光学散射国际国内研究现状分析

观察到光散射现象最早可追溯到 1802 年, 当时 Richter 就曾观察到光束通过金溶胶时的光径。1869 年 Tyndall 重新详细地研究这种现象, 并使光线通过一个盛有亚硝酸盐丁酯和盐酸混合蒸汽的管子, 制成了模拟的蓝色天空。他还发现在白光照射下, 散射光是部分偏振的。1871 年 Rayleigh 详细地研究了 Tyndall 现象后指出: 散射光强度与入射光强度、单位体积内的微粒数目及微粒的体积平方成正比, 而与散射光波长的四次方成反比。这就是著名的 Rayleigh 定律。应用定律就能解释在中午天空呈蓝色而早晚呈红色的现象。大气散射的小部分来自悬浮的尘埃, 大部分是由密度涨落引起的分子散射。后者的尺寸比前者要小得多, 所以散射光的强度与波长四次方成反比的规律更为明显。Mie (1908) 和 Debye (1909) 用球形质点为模型详细计算了电磁波的散射, 此理论适合于任何大小的球体, 并证明: 只有当  $2\pi r/\lambda < 0.3$  时 ( $r$  为球体半径,  $\lambda$  为入射光波长), Rayleigh 的  $\lambda^4$  反比定律才是正确的; 当  $2\pi r/\lambda$  值较大时, 散射强度与波长的关系就不很明显。Rayleigh 散射最初是针对处理一些独立的光学均匀的微粒, 即相互距离较远的一些光学各向同性的和比入射光波长要小的微粒。1944 年 Debye 将其扩展到高分子溶液中去, 从而使光散射技术得到了很快的发展。

Rayleigh 散射的特点是散射光的频率不变, 即, 光子的能量不变, 所以也称为弹性散射。1914 年 Brillouin 开始对散射光的频谱进行研究, 计算出散射体内存在声波引起介质密度涨落时散射光中的频率分布, 发现在入射光频率 (Rayleigh 谱线) 附近对称地分布着分离的谱线, Gross 于 1930 年首先在液体中观察到 Brillouin 双线。这种由声波引起的光散射称为 Brillouin 散射。1928 年 Raman 用汞灯照射液体苯时, 发现散射光谱中含有比汞灯更多的谱线, 这种由分子或晶格振动所引起的散射, 称为 Raman 散射。Brillouin 散射和 Raman 散射相对于入射光频率都发生了频移, 所以称为非弹性散射。Brillouin 散射的频移约为  $1 \sim 10^2 m^{-1}$ , Raman 散射的频移常为  $10^4 \sim 10^5 m^{-1}$ 。散射光的频谱如图 1.5 所示。

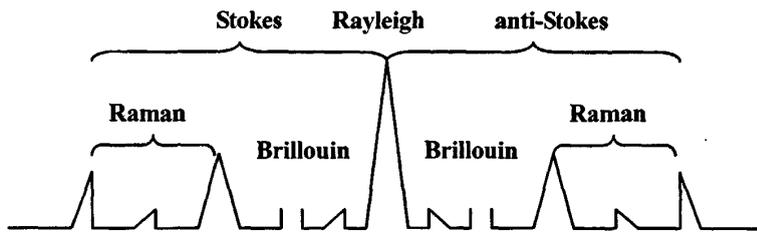


图 1.5 散射光的频谱示意图

M.斯莫鲁霍夫斯基的论文 (1908) 指出, 完全均匀的媒质是永远也不能实现散射的。A.爱因斯坦从斯莫鲁霍夫斯基的思想出发, 提出了液体中光的散射的定量的热力学理论。从 1918 年开始, 曼杰尔希达姆和他的学派, 进行了一系列散射光谱的研

研究工作,成功地把他的散射理论跟固体与液体的热容量理论联系起来,导致了一系列伟大的发现——光的联合散射的发现,以及古典散射的未发生位移的精细结构的发现。对于光散射现象的处理, Rayleigh 提出了干涉理论,对处理气体和一般溶液中的光散射现象是很成功的,这种方法后来被 Debye 成功地应用到那些没有很强相互作用的高聚物溶液中去。1910年前后,由 Einstein、Schmoluchowski、Gans 及其他作者提出了涨落理论,即由密度或浓度涨落而产生的介电常数涨落来处理光散射,该理论对于处理液体、浓溶液及存在着强相互作用体系的光散射是很有效的。Mie 曾对均匀介质中的均匀球形粒子在单色平行光照射下,按 Maxwell 方程严格求解得出了 Mie's 理论,可成功地用于研究粒子和介质的折射率相差很大的大粒子体系。这些理论是相关的,在特定条件下可以相互转换<sup>[2]</sup>。Smekal 于 1923 年发展了两个量子化能级体系对光散射的理论,这个理论包含了 1928 年由 Raman 以及 Mandelstam 分别独立地发现的现象的基本特征。这些新发现的效应是研究分子激发和分子结构的极好的工具。大约在 1940 年以前,这类研究一直在该领域占主导地位。在四十年代,利用光散射对分子结构的研究重点转移到了对单晶的研究,借以获得它们的晶格动力学半经验处理的信息。然而,由于散射截面小,实验是困难的。1960 年激光器的出现,相当急剧地改变了这种状况。激光的单色性、相干性、准直性和大功率,立即使光散射光谱学中用老的汞弧作为光源相形见绌。很快就发表了关于使用脉冲红宝石激光器 6942 埃谱线和照相记录的 Raman 散射的第一批报告。连续激光器的出现,使得用光子计数方法进行光电记录成为可能,从而使照相记录方法很快就被淘汰了。(自从激光器出现以来,光散射方面的进展就紧紧跟着激光技术的主要发展,这些发展包括连续氦-氖激光器、氩离子和氮离子激光器以及可调谐脉冲式和连续波染料激光器。)早期 Raman 散射的工作,只能够采用对散射辐射透明的材料来做。不透明的样品因受到吸收长度限制,散射体积太小,以至不可能进行观察。只是到了二十世纪以八十年代以来,由于使用了法布里-珀罗干涉仪,对不透明样品的 Brillouin 测量才成为可能<sup>[3]</sup>。

1978年7月,美国加利福尼亚州热光学散射委员会及航空公司基于非常光滑表面层中能量传输中涉及的散射问题,提出了典型的应用改进,其中包括对空间太空船的热冷却装置所做的镜辐射保护层等光学元件<sup>[10]</sup>。当时对于平滑表面层相关散射大小的问题进行了研究,并对散射特性进行了实验研究分析。实验利用复合散射测角器分别对波长 0.6328, 1.15, 3.39, 10.6  $\mu\text{m}$  四种激光散射角向分布进行了测量。入射光的角度可从  $1^\circ \sim 60^\circ$  变化。实验同时给出了粗糙表面的自相关函数。

1988年Case Western Reserve大学Rene Fernandez描述了一种用于测量各种表面双向反射分布函数的模型系统。这种测量可被广泛应用光学系统设计及测试中<sup>[11]</sup>。实验以氩离子激光作为实验光源,对不同表面的反射特性进行比较,并且用双向反射分布函数作了表示。

1996年美国国家航空和航天管理局陆地生态组织与马里兰大学会议中心合作创办了多角度反射方向的研究<sup>[12]</sup>。该研究着重于双向反射分布函数对于基于数学上的建模系统以及运算。实验中对双向反射分布函数以及它们对信号的作用进行了比较分析,海面光学协会James Jafolla博士认为对于地面低可见度物体的先进研究方法使得人们已经对平面光散射效应有了更深刻的理解。在所进行的实验中,研究人员对物质多角度散射状态的双向反射分布函数进行了测量,研究结果可以使对目标表面光学特征信号的模拟更加精确。实验结果表明,广泛应用的Sandford-Robertson模型对于表示多散射系统的双向反射分布函数并不合适。

2002年Florida大学机械工程学院Y. H. ZHOU和Z. M. ZHANG对半透明硅晶片的粗糙表面方向发射率的双向反射分布函数进行了研究<sup>[13]</sup>,用光辐射温度计监控该实验过程中晶片表面的温度,而晶片的发射率 $\epsilon$ 和 $\epsilon_{eff}$ 必须事先确定,当温度降低时,一个表面被擦光的晶片发射率不但取决于所掺杂质的浓度,而且和硅表面粗糙度有很大关系。这时双反射分布函数可以用来描述表面粗糙度的特性。

2005年美国亚特兰大乔治亚科技学院H.J. Lee, Q.Z. Zhu, and Z.M. Zhang对各向异性硅表面的光强度辐射特性进行了新的研究,并得到了新的成果<sup>[14]</sup>。结果显示在蚀刻的硅的表面光强是非高斯分布的,而且是非各向异性的。Z.M. Zhang提出了利用蒙特卡罗光线追踪方法来预测辐射的状态。实验结果显示预测平面上的双向反射分布函数值与利用三维自动电子散射仪所获得的实验数据吻合。而蒙特卡罗模拟结果表明对于不同各向异性分布的表面的二维空间双向反射分布函数,与事先估测的各向异性表面的热辐射度的误差率仅有3% (假设高斯分布情况下)。研究的成果不仅方便人们对粗糙表面辐射状态的理解,亦使得半导体制造业快速热处理过程中温度测量的精度得以增加。

2000年,美国加利福尼亚大学天文物理学院A Maradudin, I Simonsen, A Leskova and Mendez合作设计了单体空间的随机表面的Lambertian光散射体。在实验中进行了严格的计算机算法模拟,并得到理想的Fractional Brown motion(fBm) (表面分形布朗运动) 散射图像<sup>[15]</sup>。这种设计的随机表面其实和Lambertian散射体类似,但是特别在红外光谱范围工作,这正是试验者所需要得到的。研究者设计了解决方法,并在实验室进行了模拟。

2002年,表面分形科学研究室División de Física Aplicada等人设计出相当于圆形扩散体的二维随机表面<sup>[16]</sup>。实验者让分级的普通平面光波入射到表面上,结果显示散射光波强度在整个圆环上呈对称分布。这种设计方案可以用来设计Lambertian扩散体,实验者还在光阻材料上用计算机程序对此表面进行了仿真。

2003年-2004年,A. R. McGurnl与A. A. Maradudin对于任意排列的散射体发出的散射光的斑点进行相关的计算机模拟研究,并提出了分级差的光波近似处理<sup>[17]</sup>。实

验中对两组任意排列并绝缘的球形散射体发出的散射光斑进行了计算机模拟研究,实验所用的散射介质的直径远远小于入射光波长,并都进行了分级差的光波近似分析。在一组试验中,粒子浓度均一分布,没有任意两个粒子处于重叠状态。在另一组中,将大量复合粒子溶液放置在简单立方格子顶部,使得每个格子被占据。将两组溶液用大量真空中传播的光照射。在两组实验中容器中粒子浓度相同,外部为真空。研究者通过计算角强度相关方程  $C(q, k/q', k')$ , 得到了关于散射场的大量的统计学状态信息,并且间接测量了非圆形复杂高斯散射矩阵的统计值。最后得出结论:如果一个表面不是十分粗糙并且特征长度足够大,那么当入射角发生变化时,它的散射光斑图像将呈现相反的效果,而对于入射角固定的情形,那么图像分布将是对称的。

1987年5月, NASA发表了用于处理短距表面边缘数据的广义基尔霍夫方法,传统的基尔霍夫公式可看做这种方法在处理刚性表面模型时的近似,这种扩展的基尔霍夫公式可用于对各种运动表面的处理。该研究结果可能应用于航天等工程中目标辐射信号的处理<sup>[18]</sup>。

1996年5月, NASA的一份报告指出, GPS系统(全球定位系统)也可采用扩展的基尔霍夫表面衍射公式来修正信号传输过程中产生的多路定位误差<sup>[19]</sup>。

微扰法是通过分析各个微小元的散射特性来获得整体目标的散射特性,对于分析粗糙表面的光散射特性有很大的作用,但是条件要求比较苛刻,粗糙表面的粗糙程度要小于一个波长。微扰法很早就应用在光散射特性分析领域,早在60年代,美国航空航天管理局(NASA)就利用微扰法建立了激光在大气中传输的散射模型,成功解决了GT-7激光通信装置在激光大气传播中的空气颗粒造成的光散射,信息损失问题<sup>[20]</sup>。

对于粗糙表面散射光的建模和测量,可以利用FBM(分表布朗运动)模型进行完善地描述,不过,对于一些粗糙程度很小的目标,如金属材料,微扰法却可以发挥更大的作用。美国空军就投入了很多的人力物力去研究用微扰法测量金属介质的散射特性以来用于获得战斗机的飞行信息。

早在1970年代,美国空军就已经提出了关于微扰法在多层光学元件中粗糙表面的光散射特性的模型。不过这些是用于消除散射光对测量造成的影响的<sup>[21]</sup>。随着理论研究的深入,人们发现,散射光中带有大量的有用信息,于是展开了对散射光的特性研究,特别在空军军事应用方面,微扰法再一次地成为了人们研究金属粗糙表面的散射光特性的有力工具。

为了详细了解随机表面上散射光的特性,特别是金属表面上的光散射特性,国际上提出很多种微扰法模型,以能完整建立一个散射光识别系统,在军事上实现通过分析散射光模型对军事目标进行有效的识别,以及从背景光中提取有用的散射光信息来对军事目标进行探测。由于军用方面的要求比较苛刻,所以,发展出很多对微扰法模型的改进模型。

为了进一步更好的掌握在粗糙度小于一个波长的表面的光散射特性,美国华盛顿大学提出了一种新的微扰法模型——标准化微扰法模型,这种模型的应用大大弥补了一般微扰法模型的先天不足,它从最初级的散射光出发,与精确的传播方程的结果比较,发现这种微扰法模型可以在很大的表面参数变化范围内得到非常精确的双向光散射特性<sup>[22]</sup>。

美国加州大学进行了一项研究工作,就是对随机粗糙表面的光散射特性进行分析,通过一系列的工作建立了一维随机粗糙表面的散射光模型,并且进一步发展了一种新的微扰动理论模型,这种模型的微变参量是入射介质和散射介质之间的电介质常数<sup>[23]</sup>。

以上的种种对微扰法模型的完善都使美军在激光探测,目标环境识别的领域保持极大的优势。

1990年12月,NASA提出了使用以Mie散射理论为基础的多图像处理系统来处理燃烧场图像模型,通过采集同一燃烧场在多个波长下的图像模型,并使用大型计算机予以综合处理,可以从简单的图象中获得燃烧场的多个复杂参数<sup>[24]</sup>。

1995年7月,来自加州的一份报告阐述了使用Mie散射分析喷气式飞机尾流的时间分布模式的方法。此外大量的资料表明,NASA已经广泛地在喷气式飞机的相关研究中应用了以Mie散射为基础的工程方法<sup>[25]</sup>。

2006年,Hampton大学的Daniel Bivolaru等人发布了以Mie散射以及Rayleigh-Brillouin散射理论为基础,并结合软件分析,实现获得所测量气体微粒扩散速度的方法<sup>[26]</sup>。

以上几种物体散射光建模方式不可避免地会忽略很多的信息,随着偏振光学的发展,光的偏振态也作为一种获得信息的重要物理参数出现在光散射特性的研究,以下主要介绍下国外在散射光偏振态模型建立方面的研究。

国际上,光散射模型目前最热门的方法就是散射光的偏振态研究了。而用偏振态对于散射光的建模的主要应用依据就是Muller矩阵和Stokes矢量。

1979年,Texas大学的Randll C. Thompson教授等设计了一个能够精确测量Muller矩阵的装置,采用光电调制技术,用多个器件能同时测量到Muller矩阵的16个元素的参数<sup>[27]</sup>。

随着模型的建立,目标散射场中散射光偏振态所含有的信息趋于完善,偏振建模逐渐利用到各个方面。Tennessee州立大学的一份报告指出,利用散射光的偏振模型,可以用来实现多种激光探测目标<sup>[28]</sup>。

然而,作为一种新的建模手段,对于光散射的偏振模型的理论深度没有光强模型的理论模型那么深刻。Muller矩阵和Stokes矢量方法也基本上是应用在单粒子散射模型的分析中,对于多粒子散射场的分析研究目前国内外还很少能见到对于该方法的

应用的文献。在研究目标探测方面,目前,国际上利用一种偏振式悬浮体散射仪来测量 Muller 矩阵的各个分量,设计了三种系统来对目标表面进行测量,得到良好的试验效果,在军事上,能够很好地对目标散射光进行模拟,从而得到被测目标的详细信息<sup>[29]</sup>。

如今,对于物体光散射现象还有各种建模方法出现,特别是光强,偏振,频率的多参数建模和测量方式的出现,大大增加了光散射特性的可研究性。国外在这方面的研究已经展开了多方面的研究。

相关的研究还包括对 CCD 误差分析的改进<sup>[30]</sup>;通过液晶和磁场成像技术修正像素的误差;使用雷达技术分辨目标物体的二维特征的方法<sup>[31]</sup>;以 Mie 散射为基础的多波长测温技术<sup>[32]</sup>(在相关的文献中, Mie 散射理论被大量地应用在了对火箭,导弹,喷气式飞机发动机尾焰的燃烧场的测量中)等等。此外,还有在空间辐射数学模型的背景下对典型目标的建模分析<sup>[33]</sup>,其中包括了复合测量技术以及对目标信号的建模<sup>[34-35]</sup>;以及应用散射理论修正受云层厚度影响的可视角度的方法<sup>[36]</sup>。

由上述可见,国际上对光散射的研究已经不仅仅局限于对散射理论及其工程方法本身的探索,而是已经延伸到了散射环境,探测方法,目标特性等与光散射相关的周边技术及对象的理论和工程方法的研究。

激光目标的识别是激光应用的一个重要领域。它在军事和民用两个方面都有着广泛的应用前景。而激光目标的散射特性的研究是激光目标识别的基础。描述目标散射特性的物理量很多,例如:散射光的强度分布,散射光的偏振特性,双向反射分布函数,激光雷达截面,后向散射系数等等。双向反射分布函数是美国 D.K.Edwards 等人 1960 年在漫反射测量中第一次提出来,用来描述物体的方向反射特性的一个物理参数。激光雷达截面则是由微波雷达的目标雷达截面引申过来的一个物理量。它和双向反射分布函数是激光目标散射特性中两个非常重要的物理量。随着各种军民技术的发展,各种目标、环境的激光散射特性越来越受到重视。国内外学者对激光的可见、红外等各个波段的激光目标散射特性从理论、实验两方面进行了研究,积累了大量的数据,并发展了许多相应的理论。这些理论中,以激光面散射理论的发展最为典型。最早研究物体表面的散射规律及测量方法问题的是美国科学家 H.Davis, 20 世纪 50 年代初从研究雷达波在海面的散射规律出发研究了散射现象,于 1954 年发表了引人注目的研究成果。由于光波与雷达波在本质上都是电磁波,只是波长不同而已,所以 Davis 的研究成果很快就受到了光学界的注意,被引申到了光学领域。H.E.Bennet、E.L.Church、J.C.Stover、W.L.Wolfe、J.M.Elson 等人相继在这方面做了大量的研究工作。到目前为止,粗糙面电磁散射理论,已有 Kirchorf 法、微扰法、光栅基元法、相位微扰法、全角法等十来种方法。目前比较成熟且应用较广泛的是 Kirchorf 法和微扰法。

现代战争是高科技的战争,精确制导武器是战争中的杀手铜,各种精确制导武器层出不穷,激光制导武器是其大家族的重要一员。根据激光目标散射特性中的某个物理量对目标进行跟踪和识别,然后指挥武器打击目标是激光制导武器的基本原理。由此可见对激光目标散射特性研究的重要性。农业上,植被光学特性,主要是其反射率的研究,已被广泛应用于农作物产量的预计、农作物虫害的预报等方面。在工业生产中,根据 20 世纪 70 年代发展起来的测量表面粗糙度的可分辨角散射技术 (Angle Resolve Scattering, ARS),可以了解抛光表面的微观形貌特征,测定表面粗糙度,为研究超精细抛光技术提供检测手段,并有非接触测量的优点。通过物体表面散射测量可以监控和研究表面受污染的状况和规律,可以探测不透明硅、锆材料的内部缺陷,这对大规模集成电路生产有重要意义。在高功率激光加工、加热材料过程的研究中,往往也是对目标表面的反射率进行测量,从而推知金属材料的激光能量吸收特性。另外,随着激光生物医学的发展,组织光学作为一个令人瞩目的新兴科学分支,获得了长足的发展。它是光学与生命科学相互交叉、相互渗透的一个研究领域。组织体光学漫反射的测量是组织体光学特性的测定的重要方法之一,它也可以归于激光目标散射特性测量的范畴。激光目标的光散射理论还被应用于视觉系统中的结构分析中,它对机器人、工业过程监控、人工智能和模式识别等领域研究和应用水平的提高有重大的促进作用。随着激光目标散射特性研究的进一步深入,其测量方法的不断改进,它将有更为广泛的应用前景。

本文研究课题主要涉及光学理论与工程领域,同时又是与多个科学领域相交叉的学科。由于它在水下探测、大气分析、环境保护、军事光电对抗的隐身反隐身等多个高科技领域有极高的研究价值和广泛的应用前景,受到众多科学家的关注。国际上,美国、日本等国家在这方面开展工作较早<sup>[37-38]</sup>。八十年代末 Nelson 等提出用光散射的测量方法进行导弹羽烟分析<sup>[39]</sup>, Johnston 将其用于燃烧过程的研究<sup>[40]</sup>, Pal 等用偏振光散射方法研究烟尘中的粒子大小分布<sup>[41]</sup>, Look 等研究了粒子场浓度等多因素对散射光偏振态的影响<sup>[42,45,46]</sup>, Adams 在大气研究中讨论了偏振光散射问题<sup>[43]</sup>, Bickel 等讨论了 Stokes 参量、Mueller 矩阵及偏振光散射<sup>[44]</sup>。美国国家科学基金 NSF (National Science Foundation of America) 和国家航空和航天管理局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 等组织都投入大量财力资助这方面的工作。美国光学及航空和航天学会 AIAA (America Institute of Aeronautics and Astronautics) 每年都有许多和该课题有关的论文发表,是光学和工程热物理学交叉的热门课题<sup>[47-49]</sup>。

国内学者蔡小舒,沈建琪<sup>[50-51]</sup>等在光散射颗粒测量技术及仪器、超声颗粒测量技术、两相流在线测量技术及仪器、燃烧火焰监测和诊断技术、排放烟气烟尘在线监测技术、环境监测技术、汽轮机热力系统等方面进行了大量研究;喻雷寿,杨冠玲,何

振江,李仪芳等<sup>[52]</sup>研究了动态光散射颗粒测量的迭代 CONTIN 算法;李昂,赵志胜,张通,郑伟涛<sup>[53]</sup>研究一种高时间分辨率动态光散射的测量方法;邓勇,鲁强,骆清铭<sup>[54]</sup>研究了用基于方位分辨的漫后向散射光确定粒子尺寸分布及相对折射率;曹念文<sup>[55]</sup>研究了几种散射介质散射光解偏度的测量;仇英辉<sup>[56]</sup>研究了混浊介质中利用后向散射光偏振进行目标识别的;盛德仁<sup>[57]</sup>研究了激光角散射诊断气固两相流粒度及浓度;叶茂,王式名、徐益谦等<sup>[58]</sup>研究了光散射法测量微粒粒径分布的一种繁衍遗传算法;王国志等<sup>[59]</sup>用脉冲激光全息术测量喷雾场中的粒子分布;王杰、姚建铨等<sup>[60]</sup>研究了瑞利散射用于气体流场二维瞬态密度测量;杨冠玲等<sup>[61]</sup>研究脱硫塔内雾粒测定仪及其测试技术;邱建荣、马毓义<sup>[62]</sup>讨论了激光法测量湍流流场时散射粒子的选择,等等。

通过对以上尤其是国内的研究现状进行分析,可以看出目前粒子目标光学散射主要是通过通过对散射光强的研究来分析粒子场的各种状态参数并将之在实际科研生产中加以应用,而利用散射光的偏振情况对粒子散射尤其是多粒子散射场进行分析和建立散射模型和理论的文献尚不多见。随机分布多粒子入射激光复合散射特性研究在现代科学和工程中有着广泛的应用,用光学散射方法探测研究随机分布群粒子场特征(粒径大小、分布浓度等)已成为 20 世纪 80 年代以来国内外工程热物理等学术界研究的热门课题之一。群粒子光学散射特性和及其数学描述就成为本文研究的主要目标。

### 1.5 本文的主要工作及创新点

针对已有光散射模型主要是有关单粒子散射的研究并且多是从光强出发展开的讨论,本文重点从光强、偏振等多个方面对多粒子的散射进行了研究,用不同偏振态的偏振光入射一个粒子场,在多个不同角度同时检测该粒子场散射的光强变化与退偏振态分布,研究这些变化与分布,与颗粒尺寸、分布与浓度之间的关系,在大量实验的基础上,结合光学散射理论,分析散射光光强、偏振等数据和图样与粒子参数的关系,在对微米级群体粒子场侧向光散射特性研究的基础上本文建立了多粒子散射矩阵描述数学模型,从而用 Muller-Stokes 矩阵实现对实际未知的群体粒子场中粒子参数的测试和对群体粒子散射现象的简化数学表示。

本文围绕上述工作进行研究所取得的创新点主要体现在以下几个方面:

- (1) 以 Mie 散射原理为基础,设计了用于研究群体粒子激光侧向散射性质的实验装置系统,以不同偏振态的激光入射散射粒子场为出发点,设计了具体的实验方案和实验方法;
- (2) 对线性偏振光和圆偏振光分别入射到群体粒子场时的侧向散射光特性进行了研究,在对大量实验数据进行深入分析的基础上,获得了散射光中总、垂直偏振分量、水平偏振分量三种散射光强与粒子场体积分数浓度、探测深度、粒子直径等的相互关系,发现了两种偏振光分别入射到群体

粒子场时侧向散射光光强及退偏振态的许多特性规律;

- (3) 在对单粒子光散射的 Muller-Stokes 方法进行深入研究的基础上,把 Muller-Stokes 矩阵方法应用于群体粒子散射场侧向散射光性质的研究中,建立了群体粒子场目标光学侧向散射的 Muller-Stokes 矩阵数学模型,并利用该模型对实验数据进行了进一步的分析,所获得的结果与通过实验所得到的结论是相吻合的。

本文结构内容安排如下:

第一章综述了光散射现象及其技术的国内外研究现状,介绍了本文选题的研究背景和主要工作。

第二章介绍了各种单散射和多散射理论,详述了目前常用的散射问题的处理方法。

第三章对研究中所用到的实验系统、实验方案及实验原理进行了详细阐述。

第四章研究了线性偏振光入射到群体粒子场时的散射性质,获得了散射光中散射光强与粒子场体积分数、探测深度、粒子直径等参数的相互关系。

第五章研究了圆偏振光入射到群体粒子场时的散射性质,获得了散射光中散射光强与粒子场体积分数、探测深度、粒子直径等参数的相互关系。

在第六章中,利用第四、五章中所获得的初级结果,以单粒子光散射的 Muller-Stokes 方法为基础,建立了群体粒子场目标光学侧向散射的 Muller-Stokes 矩阵数学模型,并利用该模型对实验数据进行了深入的分析,获得了更多的群体粒子场侧向散射性质,验证了该模型所获得的结果与通过实验所得到的结论是相一致的。

第七章对全文的内容进行了总结,指出了有待进一步研究的问题,并对今后的研究工作提出了一些自己的见解。

## 2 散射基础理论及主要处理方法

### 2.1 散射基础理论

#### 2.1.1 球形微粒的 Mie 散射理论

1908年Mie深入地研究了颗粒对光的散射行为，他在Maxwell电磁理论的基础上对平行单色电磁波被位于均匀介质中任意粒径的各向同性小球散射的情形进行了求解，得到了严格的解析表达式。这在后来被称为Mie理论，也有很多人称之为Lorenz-Mie理论。Mie理论中不考虑电磁波波长发生改变的情况，即仅限于弹性散射。具体理论在本文第1.3.2节已给出，在此不再赘述。

#### 2.1.2 非球形微粒的散射理论

对于任意形貌微粒，通常有Muller计算方法。其散射过程被描述为Stokes参数线性传递矩阵<sup>[63]</sup>，如图2.1，其传递矩阵表示形式为：

$$\{E_s\} = \frac{1}{k^2} [S_{ij}] \{E_i\}, \quad (2.1)$$

即：

$$\begin{bmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{bmatrix} = \frac{1}{k^2} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} & S_{34} \\ 0 & 0 & -S_{34} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

其中

$$I = \langle E_i E_r^* + E_r E_i^* \rangle,$$

$$Q = \langle E_i E_i^* - E_r E_r^* \rangle,$$

$$U = \langle 2 \operatorname{Re}(E_i E_r^*) \rangle,$$

$$V = \langle -2 \operatorname{Im}(E_i E_r^*) \rangle,$$

并满足

$$I^2 \geq Q^2 + U^2 + V^2.$$

Van Der Hulst的数学讨论表明，一般来说矩阵元不仅与介质的特性有关，而且与散射角有关。只有在各向同性的介质中，才仅仅与散射角 $\theta$ 有关。对于均匀各向同性的球体，有

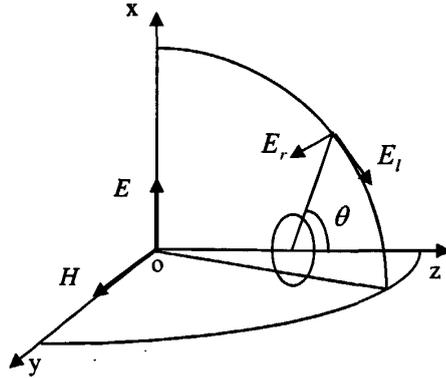


图2.1 微粒散射图

$$S_{11} = S_{22}, \quad S_{33} = S_{44}.$$

其中  $S_{ij}$  可以用Mie理论下的光强函数  $i_j$  表示, 其形式如下:

$$S_{11(m,x,\theta)} = S_{22(m,x,\theta)} = (1/2)[i_1 + i_2],$$

$$S_{12(m,x,\theta)} = S_{21(m,x,\theta)} = (1/2)[i_1 - i_2],$$

$$S_{33(m,x,\theta)} = S_{44(m,x,\theta)} = i_3,$$

$$S_{43(m,x,\theta)} = S_{34(m,x,\theta)} = i_4.$$

### 2.1.3 散射光与涨落

如果仅考虑不导电、非磁性的介质作为研究体系, 并以一束角频率为  $\omega_i$  的单色线偏振光作为入射光源, 沿 X 轴方向射入介质(见图 2.2)。如果把坐标原点置于散射介质中的某基准微粒上, 并在 R 方向观察散射光的强度, 则 R 和 X 轴的夹角  $\theta$  称为散射角。  $\vec{k}_i$  和  $\vec{k}_f$  分别为入射光和散射光的波矢量, 其模  $|\vec{k}| = 2\pi n / \lambda$ 。式中  $n$  为散射

介质的折射率,  $\lambda$  为入射光或散射光的波长。  $\vec{q} = \vec{k}_i - \vec{k}_f$  称为散射矢量。其模<sup>[2]</sup>

$$|\vec{q}| = \sqrt{|\vec{k}_i|^2 + |\vec{k}_f|^2 - 2|\vec{k}_i \cdot \vec{k}_f| \cos \theta}, \quad (2.3)$$

因为  $|\vec{k}| = |\vec{k}_f|$ , 所以

$$q = |\vec{q}| = \sqrt{2k_i^2 - 2k_i^2 \cos \theta} = \sqrt{4k_i^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}} = 2k_i \sin \frac{\theta}{2} = \frac{4\pi n}{\lambda_i} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (2.4)$$

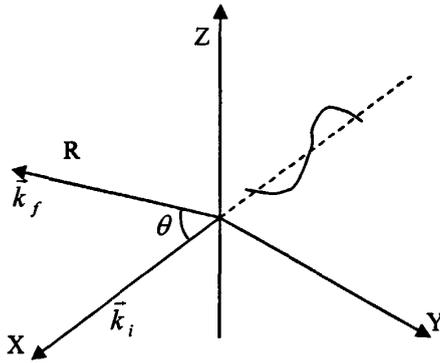


图 2.2 入射光和散射光方向示意图

当体系和光源确定后,  $q$  就只与散射角  $\theta$  有关。

角频率为  $\omega_i$  的单体线偏振光的电场强度  $\vec{E}_i$  可表示为:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{n}_i E_0 \exp i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega_i t), \quad (2.5)$$

式中  $\vec{n}_i$  为入射光电场方向的单位矢量,  $E_0$  为电场振幅。当此交变电场(假定  $\vec{n}_i$  与 Y 轴一致)沿 X 轴方向进入介质时, 则处在光路上的微粒在电场  $\vec{E}_i$  的作用下, 产生诱导极化, 其偶极矩  $\vec{\mu} = \alpha \vec{E}_i$ 。而交变的偶极子即成为二次光源, 向四周发射出球面电磁波。由于介质内部分子的热运动, 致使体系内局部介电常数  $\epsilon$  发生涨落, 即存在一个随时间、空间而改变的局部介电常数张量  $\bar{\epsilon}(\vec{r}, t)$ , 从而使体系内所有微粒所产生的散射光不能相互抵消而被观察到。从电磁理论可知, 在散射介质中, 所有坐标为  $\vec{r}$  的微粒在观察点 D 的散射光电场强度(见图 2.3)的迭加量  $\vec{E}_s$  可表示为

$$\vec{E}_s(\vec{R}, t) = \frac{E_0}{4\pi R \epsilon_0} \exp i k_f R \int d\vec{r} \exp i(\vec{q} \cdot \vec{r} - \omega_i t) \left\{ \vec{n}_f \left[ \vec{k}_f \times \vec{k}_f \times (\delta\bar{\epsilon}(\vec{r}, t) \cdot \vec{n}_i) \right] \right\}, \quad (2.6)$$

式中  $\epsilon_0$  为平均介电常数;  $\vec{n}_f$  为散射光电场方向(假定为 Y 轴方向)的单位矢量;  $\delta\bar{\epsilon}(\vec{r}, t)$  为在位置为  $\vec{r}$  和时间为  $t$  时的介电常数张量的涨落。

因为散射矢量为  $\vec{q}$  和时间为  $t$  时的介电常数张量涨落

$$\delta\bar{\epsilon}(\vec{q}, t) = \int d\vec{r} \cdot \exp i\vec{q} \cdot \vec{r} \cdot \delta\bar{\epsilon}(\vec{r}, t),$$

所以式 (2.6) 可写成:

$$\vec{E}_s(\vec{R}, t) = \frac{E_0}{4\pi R \epsilon_0} \exp i(k_f R - \omega_i t) \left\{ \vec{n}_f \left[ \vec{k}_f \times \vec{k}_f \times (\delta\bar{\epsilon}(\vec{q}, t) \cdot \vec{n}_i) \right] \right\}, \quad (2.7)$$

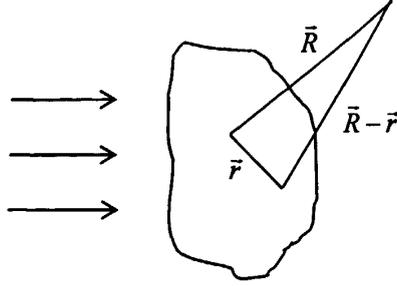


图 2.3 观测点 D 与距照射中心为  $r$  的微体积元  $d^3r$  间的距离矢量关系示意图

由图 2.2 可知,  $\vec{k}_f$  和  $\vec{n}_i$  间的夹角为  $\gamma$ , 所以  $\vec{R}$  方向散射光的电场强度为:

$$\vec{E}_s(\vec{R}, t) = -\frac{k_f^2 E_0}{4\pi R \epsilon_0} (\sin \gamma) \exp i(k_f R - \omega_i t) \delta \vec{\epsilon}_{if}(\vec{q}, t). \quad (2.8)$$

假设

$$I_{if}(\vec{q}, t, \vec{R}) = \langle E_s^*(R, 0) E_s(R, t) \rangle = \frac{k_f^4 |E_0|^2 \sin^2 \gamma}{16\pi^2 R^2 \epsilon_0^2} \langle \delta \vec{\epsilon}_{if}(\vec{q}, 0) \delta \vec{\epsilon}_{if}(\vec{q}, t) \rangle e^{-i\omega_f t}, \quad (2.9)$$

那么, 把式 (2.9) 经 Fourier 变换即可得散射光的频谱密度为:

$$I_{if}(\vec{q}, \omega, \vec{R}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \langle E_s^*(R, 0) E_s(R, t) \rangle e^{i\omega_f t} dt = \left[ \frac{I_0 k_f^4 \sin^2 \gamma}{16\pi^2 R^2 \epsilon_0^2} \right] \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \langle \delta \vec{\epsilon}_{if}(\vec{q}, 0) \delta \vec{\epsilon}_{if}(\vec{q}, t) \rangle e^{i(\omega_f - \omega) t} dt \quad (2.10)$$

式中  $I_0 = |E_0|^2$  为入射光强度。令  $A \equiv \frac{I_0 k_f^4}{16\pi^2 R^2 \epsilon_0^2}$  和  $\omega \equiv \omega_f - \omega_i$ , 则得:

$$I_{if}(\vec{q}, \omega, \vec{R}) = A \sin^2 \gamma \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \langle \delta \vec{\epsilon}_{if}(\vec{q}, 0) \delta \vec{\epsilon}_{if}(\vec{q}, t) \rangle e^{i\omega t} dt, \quad (2.11)$$

由式 (2.11) 可见, 散射光频率在入射光频率附近存在一个分布, 这种频率变化称为 Doppler 频移。Doppler 频移与散射质点的运动有关, 通常把散射质点平动引起 Doppler 频移的散射称为准弹性散射。式 (2.11) 的  $I_{if}(\vec{q}, \omega_f, \vec{R})$  随时间  $t$  而变, 故又称为动态

光散射。如果把  $I_{if}(\vec{q}, \omega_f, \vec{R})$  对  $\omega$  求积, 即:

$$I_{if}(\vec{q}, \vec{R}) = \int_{-\infty}^{\infty} I_{if}(\vec{q}, \omega_f, \vec{R}) d\omega = A \sin^2 \gamma \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \langle \delta \vec{\epsilon}_{if}(\vec{q}, 0) \delta \vec{\epsilon}_{if}(\vec{q}, t) \rangle e^{i\omega t} dt d\omega.$$

令  $\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} d\omega = \delta(t)$ ,  $\delta(t)$  称为 delta 函数, 此函数仅当自变量为  $t$  时其值为 1, 其余均为零。因此上述积分为:

$$I_{\nu'}(\vec{q}, \vec{R}) = A \sin^2 \gamma \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \langle \delta \vec{\varepsilon}_{\nu'}(\vec{q}, 0) \delta \vec{\varepsilon}_{\nu'}(\vec{q}, t) \rangle dt = A \sin^2 \gamma \langle |\delta \vec{\varepsilon}_{\nu'}(\vec{q})|^2 \rangle. \quad (2.12)$$

式中  $\delta \vec{\varepsilon}_{\nu'}(\vec{q}) = \vec{n}_i \cdot \delta \vec{\varepsilon}(\vec{q}) \cdot \vec{n}_f$ 。式(2.12)的  $I_{\nu'}(\vec{q}, \vec{R})$  已与时间无关, 相应地称之为静态光散射。在推导式(2.12)时, 实际上是假定散射光频率等于入射光频率, 这种散射称为弹性光散射, 习惯上又称 Rayleigh-Debye 散射。

当入射光为自然光时, 它可看成两束相互垂直而无固定位相关系的偏振光(令其电场方向为 Y 和 Z 轴方向)。现在考虑入射偏振光的电场方向在 Z 轴方向的散射光强。

如图 2-2 所示, 设  $\vec{k}_f$  和 Z 轴的夹角为  $\alpha$ , 则相应的自然光的  $I'_{\nu'}(\vec{q}, \vec{R})$  为:

$$I'_{\nu'}(\vec{q}, \vec{R}) = A \sin^2 \alpha \langle |\delta \vec{\varepsilon}_{\nu'}(\vec{q})|^2 \rangle. \quad (2.13)$$

如果自然入射光也是沿 X 轴方向射入时, 则其电场方向在 YZ 平面内的指向是随机的。因此, 自然入射光在某散射方向上的光强  $I_u$ , 将等于两束相互垂直的偏振入射光在该散射方向上总光强的平均值, 即

$$I_u = \frac{1}{2} [I_{\nu'} + I'_{\nu'}] = \frac{1}{2} A (\sin^2 \gamma + \sin^2 \alpha) \langle |\delta \vec{\varepsilon}_{\nu'}(\vec{q})|^2 \rangle$$

由图 2.2 可知,

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \gamma + \cos^2 \theta = 1,$$

或

$$(1 - \sin^2 \alpha) + (1 - \sin^2 \gamma) + \cos^2 \theta = 1,$$

即

$$\sin^2 \alpha + \sin^2 \gamma = 1 + \cos^2 \theta,$$

因此,

$$I_u = A \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \langle |\delta \vec{\varepsilon}_{\nu'}(\vec{q})|^2 \rangle. \quad (2.14)$$

如果把观察点置于 ZX 平面内(见图 2.2), 则 Y 方向的偏振入射光相应的  $I_{\nu'}(\vec{q})$  可用  $I_{\nu'}(\vec{q})$  表示, 因为此时  $\gamma = 90^\circ$ , 而且  $|\vec{k}_f| = |\vec{k}_i|$ , 因此式 (2.12) 可进一步简化为:

$$I_{\nu'}(\vec{q}) = A \sin^2 90^\circ \langle |\delta \vec{\varepsilon}_{\nu'}(\vec{q})|^2 \rangle = A \langle |\delta \vec{\varepsilon}_{\nu'}(\vec{q})|^2 \rangle = \frac{k_f^4 I_0}{16\pi^2 R^2 \varepsilon_0^2} \langle |\delta \vec{\varepsilon}_{\nu'}(\vec{q})|^2 \rangle. \quad (2.15)$$

同理, Z 方向的偏振入射光相应的  $I'_{\nu}(\vec{q})$  可用  $I_{H\nu}(\vec{q})$  表示, 因观察点同在 ZX 平面内, 所以  $\alpha = 90^\circ - \theta$ ,  $\sin \alpha = \sin(90^\circ - \theta) = \cos \theta$ , 代入式 (2.13) 中得

$$I_{H\nu}(\vec{q}) = A \cos^2 \theta \left\langle \left| \delta \bar{\epsilon}_{H\nu}(\vec{q}) \right|^2 \right\rangle = \frac{k_f^4 I_0}{16\pi^2 R^2 \epsilon_0^2} \cos^2 \theta \left\langle \left| \delta \bar{\epsilon}_{H\nu}(\vec{q}) \right|^2 \right\rangle. \quad (2.16)$$

如果令 Rayleigh 比  $R(\vec{q}) \equiv \frac{I}{I_0} R^2$ , 则式 (2.14)、(2.15)、(2.16) 的 Rayleigh 比分别为:

$$R_u(\vec{q}) = \frac{I_u}{I_0} R^2 = \frac{k_f^4}{16\pi^2 R^2 \epsilon_0^2} \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \left\langle \left| \delta \bar{\epsilon}_{\nu}(\vec{q}) \right|^2 \right\rangle \quad (2.17)$$

$$R_{\nu}(\vec{q}) = \frac{I_{\nu}(\vec{q}, \vec{R})}{I_0} R^2 = \frac{k_f^4}{16\pi^2 R^2 \epsilon_0^2} \left\langle \left| \delta \bar{\epsilon}_{\nu}(\vec{q}) \right|^2 \right\rangle \quad (2.18)$$

$$R_{H\nu}(\vec{q}) = \frac{I_{H\nu}(\vec{q}, \vec{R})}{I_0} R^2 = \frac{k_f^4}{16\pi^2 R^2 \epsilon_0^2} \cos^2 \theta \left\langle \left| \delta \bar{\epsilon}_{H\nu}(\vec{q}) \right|^2 \right\rangle \quad (2.19)$$

由此可见, 在某散射角  $\theta$  方向上的 Rayleigh 散射光强度直接与介质内局部介电常数涨落的大小有关, 而介电常数涨落又与体系中分子的热运动有关。分子热运动包括分子间的相对热运动和分子内部的相对热运动, 因此介电常数涨落张量一般包括以下三项 (式中下标  $d$  表示密度,  $c$  表示浓度,  $m$  表示分子内热运动相应产生的涨落):

$$\delta \bar{\epsilon} = (\delta \bar{\epsilon})_d + (\delta \bar{\epsilon})_c + (\delta \bar{\epsilon})_m \quad (2.20)$$

## 2.2 散射问题基本处理方法

### 2.2.1 双向反射分布函数

#### 2.2.1.1 概述

1960 年, 美国 D.K.Edwards 等人在漫反射测量中第一次提出反射分布函数一说。过了五年, F.E.Nicademus 又用双向反射分布函数 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 来描述漫射体的方向反射特性<sup>[64-67]</sup>。由于这一术语及其含义在表征方向特性上更为恰当、准确和全面, 因而逐渐被世界许多国家承认和采用, 使之成为一个非常重要的物理参数。近年来, 随着激光制导、跟踪、遥感等军民用技术的发展, 各种目标、环境表面的双向反射分布函数的研究越来越受到重视。近年来, 国内外有关论文的发表非常多。

#### 2.2.1.2 定义

我们知道, 对于任何一个漫射物体来说, 当入射角和观测角中有一个发生变化时, 其反射亮度都会随着变化, 郎伯体是一种理想化, 自然界中, 不发生此变化的漫反射体是不存在的。双向反射分布函数的提出正是为了描述这一变化关系, 其数学表达式为:

$$f_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (2.21)$$

式中,  $\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$  分别表示入射方向和反射方向的天顶角和方位角。下标字母  $b, i, r$  分别表示双向、入射和反射。

如图 2.4 所示, 双向反射分布函数  $f_b$  表示沿  $(\theta_r, \varphi_r)$  方向出射的辐亮度  $dL_r$  与沿  $(\theta_i, \varphi_i)$  方向入射到被测入射表面的辐照度  $dE_i$  之比。它由表面粗糙度, 介电常数, 照射或辐射波长, 偏振等因素决定。

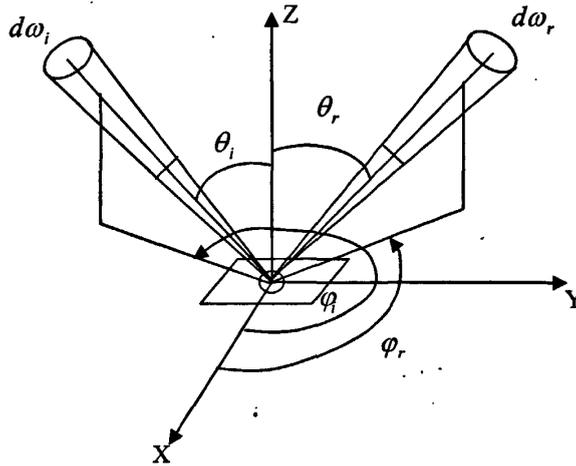


图 2.4 双向反射光路图

### 2.2.1.3 双向反射分布函数的测量

双向反射分布函数  $f_b$  的测量一般分为相对测量和绝对测量两种。相对测量指的是人们并不关心  $f_b$  的绝对值的大小, 而只关心  $f_b$  的响应值与本身某一特定条件下, 如  $(0^\circ/45^\circ)$  或  $(45^\circ/0^\circ)$  时响应值的比值。假设某特定角度响应值为  $V_{ref}$ , 而不同角度下响应值为  $V_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ , 可得相对测量时的比值为:

$$\alpha = V_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) / V_{ref}. \quad (2.22)$$

而绝对测量则要求获得样品  $f_b$  的实际大小。主要有以下几种方法:

#### (1) 通量法

国际照明协会 (CIE) 推荐参量中有一物理量称为反射比  $\rho$ , 定义为被反射的辐通量与其入射通量之比。其中双向反射比的数学表达式为:

$$d\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = d\phi_r(\theta_r, \varphi_r) / d\phi_i(\theta_i, \varphi_i), \quad (2.23)$$

$$d\phi_r = dL_r dA d\Omega_r, \quad (2.24)$$

$$d\phi_i = dL_i dA d\Omega_i, \quad (2.25)$$

则有:

$$d\rho = \frac{dL_r d\Omega_r}{dL_i d\Omega_i}, \quad (2.26)$$

又有入射到样品  $dA$  的照度为:

$$dE_i = dL_i d\Omega_i, \quad (2.27)$$

所以结合 (2.21), (2.26), (2.27) 式可得:

$$d\rho = f_b d\Omega_r, \quad (2.28)$$

根据 (2.28) 式可知, 双向反射分布函数就等于双向反射比除以探测器所对应的投影立体角, 即:

$$f_b(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{d\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{d\Omega_r}, \quad (2.29)$$

这样唯一要测的量就是  $d\rho$ 。对于一般漫射来说,  $\phi_i$  和  $\phi_r$  量级相差太大, 为此, 首先在样品位置放一已知衰减系数为  $k$  的衰减器, 用它接受全部入射通量  $\phi_i$ , 经衰减后, 若仪器指示为  $V_i$ , 则有  $V_i = \phi_i \cdot S_r \cdot k$ , 式中  $S_r$  为探测器电压探测度。然后移走衰减器, 换上样品, 探测器探测不同角度下来自样品的反射通量。这时仪器响应值为  $V_r$ , 且  $V_r = \phi_i \cdot d\rho \cdot S_r$ 。所以

$$f_b = \frac{V_r}{V_i} \cdot k \cdot (d\Omega_r)^{-1} \quad (2.30)$$

## (2) 模拟法

首先应有一均匀漫射体的标准, 其  $f_b^{ref} = \rho_{(2\pi)} / \pi$ , 这样, 待测样品和标准各测一次, 待测样品的响应量为  $V_s$ , 标准的响应量为  $V_{ref}$ , 则待测样品的双向反射分布函数为  $f_b = V_s / V_{ref} \cdot \rho_{(2\pi)} / \pi$ , 但实际上, 这里作为标准的漫射体并不可能是理想全反射漫射体, 该样品的  $f_b^{ref}$  并不全等于  $\rho_{(2\pi)} / \pi$ , 因此需对这个数值进行必要的修正, 使得:

$$f_b^{ref}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \rho_{(2\pi)} / \pi \cdot k(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r), \quad (2.31)$$

式中  $k$  是修正系数, 样品的双向反射分布函数则为:

$$f_b^s = \rho_{(2\pi)} \cdot V_s / (\pi \cdot k \cdot V_{ref}) \quad (2.32)$$

## (3) 测量条件

由辐度学基本概念出发, 我们可知测试双向反射分布函数装置必须满足以下条件:

- a. 入射光源亮度必须分布均匀;
- b. 入射光尽量接近平行光;
- c. 从待测样品中心看光源和探测器, 立体角尽量小, 以保证较好的方向性;
- d. 入射角, 反射角要在几乎整个半球空间可连续变化;
- e. 测量环境要稳定。

### 2.2.2 基尔霍夫 (Kirchhoff) 分析法

Kirchhoff 方法<sup>[68-69]</sup>的出发点就是电磁理论中远场近似下的积分方程。该方程的物理意义实质上就是惠更斯原理,即认为入射到粗糙表面的场将以球面波的形式散射出去,远区接受的散射场强度将取决于粗糙表面的面积分,这样散射场的求解便归结为表面场的处理,但表面场也很难求得。为了确定表面场,必须引入一定的近似条件,其中最常用的也是最简单的就是切平面近似,所以 Kirchhoff 方法又称为切平面方法。切平面近似就是认为粗糙表面上的任一点的表面场为该点切平面上入射场和反射场之和。也就是说,当粗糙表面随机起伏的尺度远大于波长时,粗糙面上每一点的曲面可用该局部的小切平面取代。由于该近似要求切平面上的入射场仅为外部发射机投射,并不包括粗糙面上其它点散射来的场,即忽略了表面的多次散射,这就导致在后向散射方向上不会出现交叉散射分量。

由于切平面近似的使用,确定了表面场,这样远区的散射场即可由表面场(此时其仅依赖于入射场和当地切平面的 Fresnel 反射系数)的积分求得,但由于粗糙表面的起伏为随机随机变量,所以必须进一步近似才能求得积分。常用的近似方法有两种:稳定相位近似(几何光学法)和标量近似(物理光学法)。

#### (1) 几何光学法

稳定相位近似从数学上讲就是仅考虑表面上稳定相位点对积分的贡献,其物理意义是远区的后向散射场仅来自粗糙表面上这样一些点,对这些点来说,其切平面的法向与入射方向相反(即正入射),这从几何光学的角度来看是显而易见的,所以这一近似方法又称为几何光学法。

在稳定相位近似下,如设粗糙表面随机起伏服从高斯分布,可以得到后向散射系数的表达式为:

$$\sigma_{pp} = \frac{|R_{pp}(0)|^2}{2m^2 \cos^4 \theta_i} \exp(-\tan^2 \theta_i / 2m^2), \quad (2.33)$$

$$\sigma_{pq} = 0 \quad (p \neq q), \quad (2.34)$$

其中  $p, q$  为  $H$  或  $V$ , 分别表示水平极化 ( $H$ ) 和垂直极化 ( $V$ ),  $\theta_i$  为相对基准平面法向而言的入射角,  $m = \sqrt{2} \frac{\sigma}{l}$  为表面斜率,  $\sigma, l$  分别为随机表面起伏的高度标准偏差和相关长度,  $|R_{pp}(0)|^2 = \left[ \frac{(\sqrt{\epsilon_r} - 1)}{(\sqrt{\epsilon_r} + 1)} \right]^2$  为正入射时平面的 Fresnel 反射系数,  $\epsilon_r$  为地表的相对介电常数。

#### (2) 物理光学法

当表面斜率变化较小时,经过近似处理可将矢量形式的积分方程化为标量形式,

这就是标量近似的由来。在标量近似下，将与当地入射角有关的切平面上的 Fresnel 反射系数，近似用基准平面的 Fresnel 反射系数几起修正项之和来代替，经过积分可以得到这一近似下的远区场，由于这一近似与物理光学的处理近似，所以又称为物理光学法。

同样，可以求得标量近似下高斯分布表面的后向散射系数为：

$$\sigma_{pp} = \sigma_{ppc} + \sigma_{ppn} + \sigma_{pps}, \quad (2.35)$$

$$\sigma_{pq} = 0 \quad (p \neq q). \quad (2.36)$$

对于同极化而言， $\sigma_{ppc}$  为相干分量，其只在镜向出现， $\sigma_{ppn}$  和  $\sigma_{pps}$  皆为非相干分量，其中  $\sigma_{ppn}$  由随机起伏引起， $\sigma_{pps}$  则为粗糙表面的斜率造成的，它们的表达式分别为：

$$\sigma_{ppn} = |R_{pp}|^2 (k_0 l \cos \theta_i)^2 e^{-2k_0 \sigma \cos \theta_i} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2k_0 \sigma \cos \theta_i)^{2n}}{n! n} \exp[-(k_0 l \sin \theta_i)^2 / n], \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{pps} = & \left( |R_{pp}|^2 \sin^2 \theta_i + \operatorname{Re} \{ R_{pp} R_{ppl}^* \} \cos^2 \theta_i \right) \\ & \times 8 \sin \theta_i (k_0^2 \sigma l)^2 e^{-(2k_0 \sigma \cos \theta_i)^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2k_0 \cos \theta_i)^{2(n-1)}}{n! n} \exp[-(k_0 l \sin \theta_i)^2 / n] \end{aligned} \quad (2.38)$$

其中， $k_0 = 2\pi / \lambda_0$  为自由空间波数，“\*”表示复共轭， $R_{pp}$  为基准平面的 Fresnel 反射系数， $R_{ppl}$  为粗糙表面引起的一阶修正项，它们分别为：

$$R_{HH} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}}, \quad (2.39)$$

$$R_{VV} = \frac{\varepsilon_r \cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\varepsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}}, \quad (2.40)$$

$$R_{HHl} = -R_{HH} \frac{2 \sin \theta_i}{\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}}, \quad (2.41)$$

$$R_{Vvl} = \frac{\sin \theta_i}{\varepsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}} [R_{VV} (\varepsilon_r + 1) - (\varepsilon_r - 1)], \quad (2.42)$$

从式 (2.37) 和 (2.38) 可以看出， $\sigma_{ppn}$  依赖于  $|R_{pp}|^2$ ， $\sigma_{pps}$  不仅依赖于  $|R_{pp}|^2$ ，而且还与  $R_{ppl}$  有关，如不是正入射 ( $\theta_i = 0$ )，则  $R_{HH}$  (或  $R_{HHl}$ ) 不同于  $R_{vv}$  (或  $R_{vvl}$ )，这样，在标量近似下， $\sigma_{HH}$  则不同于  $\sigma_{VV}$ ，出现了不同极化之间的差别，这比几何光学法又进了一步。

### 2.2.3 微扰法

与 Kirchhoff 方法不同的是,微扰法实际上是利用边界条件求解边值问题的过程,即设边界有随机起伏扰动时,入射区除入射场和反射场外,还存在边界扰动引起的散射场,透射区则除透射场外也存在这类散射场,然后利用边界连续性条件求散射场。但实际上这一边值问题是很难求解的,必须施加一定的近似条件。如表面随机起伏高度为一小量,可用微扰近似,也称摄动法<sup>[68, 70]</sup>。

在微扰近似下,用随机起伏高度微扰量展开边界上的场,这样可以求出相应于随机起伏高度一次和二次方的散射场的一阶和二阶解,对于同极化而言,一阶解就足以代表散射的主要部分,无须考虑二阶解,而对交叉极化来说,在后向散射方向,一阶解的交叉极化分量为零,则必须考虑二阶解。如设表面随机起伏服从高斯分布,则可以得到微扰近似下的后向散射系数:

同极化:

$$\sigma_{pp} = 4k_0^4 \sigma^2 l^2 \cos^4 \theta_i e^{-(k_0 l \sin \theta_i)^2} |\alpha_{pp}|^2 \quad (P=H \text{ 或 } V), \quad (2.43)$$

$$\text{式中 } \alpha_{HH} = R_{HH}, \quad \alpha_{VV} = \frac{[\varepsilon_r + (\varepsilon_r - 1) \sin^2 \theta_i] (\varepsilon_r - 1)}{(\varepsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i})^2}; \quad (2.44)$$

交叉极化:

$$\sigma_{VH} = \sigma_{HV} = \frac{\pi^2}{32} k_0^4 \sigma^2 l^2 \cos^4 \theta_i e^{-\frac{1}{2}(k_0 l \sin \theta_i)^2} (\varepsilon_r - 1) |R_{VV} - R_{HH}|^2 \times \int dk_p \frac{k_p^5}{|D(k_p)|^2} e^{-\frac{1}{2}k_p^2 l^2}, \quad (2.45)$$

$$\text{式中 } D(k_p) = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_r - k_p^2} + \varepsilon_r \sqrt{k_0^2 - k_p^2}. \quad (2.46)$$

### 2.2.4 Kirchhoff 方法和微扰法的适用范围

上两节讨论了求解粗糙表面散射系数的两种主要方法,其中 Kirchhoff 方法可用于解决水平粗糙度  $l$  大于垂直粗糙度  $\sigma$  的随机表面的散射问题。微扰法则用于处理表面起伏高度小于波长的表面的散射问题。表 2.1 给出了这两种方法的适用范围。

表 2.1 Kirchhoff 方法和微扰法的适用范围

模型		适用范围	
Kirchhoff 方法	几何光学法	$(2k_0 \sigma \cos \theta_i)^2 > 10$	$kl > 6$
	物理光学法	$m < 0.25$	$l^2 > 2.76\sigma\lambda$
微扰法		$k_0 \sigma < 0.3$ 和 $m < 0.3$	

### 2.2.5 Monte Carlo 模拟

Monte Carlo模拟方法属于计算数学的一个分支,又叫做随机模拟方法。它的基本思想可以追溯到19世纪法国科学家Buffon确定圆周率 $\pi$ 的近似值的随机投针实验。但直到20世纪40年代以后,在研制核武器的强烈需求下,随着计算机技术的进步, Monte Carlo方法才得到迅速的发展。Monte Carlo虽然在本质上应该归属于数值计算方法的范畴,但是与一般的数值计算方法不同的是,它不是对某一个特定问题进行直接的解析求解,而是将问题抽象成随机过程,通过对一系列的随机数来模拟这个过程,对模拟结果进行数理统计之后才得到问题的结果。因此, Monte Carlo模拟是随机过程的一个概率统计方法,只有大量的随机过程表现出来的整体特征才具有物理意义。它的基础是概率论和数理统计,并借用欧洲的著名赌城Monte Carlo为其命名。

建立在概率统计理论基础上的蒙特卡罗方法又叫统计实验方法,其基本思想是:把待研究的问题转化为求某事件的概率或某随机变量的数学期望,或与概率、数学期望有关的量,通过某种计算机模拟试验的方法,得到有限次试验条件下该事件的频率或随机变量若干个具体观察值的算术平均值,并将其作为问题的近似解<sup>[71-73]</sup>。

设随机变量 $Z$ 的 $N$ 个子样为 $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$ , 则其算术平均值

$$\langle Z \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i \quad (2.47)$$

为所求解的近似值。根据大数定律,若 $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$ 独立同分布且具有有限期望值,则当子样数 $N$ 充分大时,平均值以概率1收敛于期望值,即

$$P(\langle Z \rangle \xrightarrow{N \rightarrow \infty} E(Z)) = 1。$$

根据中心极限定理,蒙特卡罗方法近似值与真值的误差在 $1-\alpha$ 的置信水平下为

$\frac{x\sigma}{\sqrt{N}}$ , 即:

$$\varepsilon(\langle Z \rangle) = |\langle Z \rangle - E\langle Z \rangle| < \frac{x\sigma}{\sqrt{N}}。 \quad (2.48)$$

与置信水平 $1-\alpha=0.5, 0.95, 0.997$ 相应的置信限 $x$ 分别为0.6745, 1.96, 3。 $\sigma$ 为均方差,该值是未知的,可按下列式估算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i^2 - \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i \right)^2} = \sqrt{\langle Z^2 \rangle - \langle Z \rangle^2} \quad (2.49)$$

很多问题可表达成多维积分的计算形式。根据蒙特卡罗积分的基本理论,函数 $f$ 在多维体积 $V$ 上的积分可估计为<sup>[74]</sup>:

$$\int f(x)dV \approx V\langle f \rangle \pm V\sqrt{\frac{\langle f^2 \rangle - \langle f \rangle^2}{N}}, \quad (2.50)$$

$N$ 是体积 $V$ 内的抽样点数，式中的第二项是标准偏差，其中：

$$\langle f \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i), \quad \langle f^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f^2(x_i) \quad (2.51)$$

Monte Carlo模拟方法可以解决各种类型的问题，但总的来说，可以分为两类：第一类是确定性的数学问题；第二类是随机性问题。它的优点是：不受维数的限制，对高维问题，多重积分特别有效；不受几何形状的限制，对奇形或内部结构复杂的问题也特别有效<sup>[75]</sup>。因此，Monte Carlo模拟方法几乎已经被应用于数学、物理、经济、生物、医学等各个领域。

即使光的传输理论已经对解析理论作了大大的简化，但是由于光在高散射等介质中传输过程的复杂性，对于完全求解辐射传输方程至今尚无良策。幸运的是，光的多散射过程可以抽象成光子的一系列随机过程，从而可以方便地引入Monte Carlo模拟方法来研究光子在各种散射介质中的传输规律。理论上来说，只要光子与物质相互作用的微观物理过程已知，那么Monte Carlo模拟方法就可以准确地模拟光在介质中的宏观传输过程。在计算速度飞速提高的今天，作为突破解析方法限制的一种智能方法，Monte Carlo方法显得尤其不可或缺。迄今为止，Monte Carlo模拟方法已经进入了任何一个需要研究光的多散射现象的领域<sup>[76-89]</sup>。

用Monte Carlo方法总体上可以按照以下过程进行<sup>[90]</sup>：

第一步，根据入射条件确定光子的初始状态和起始跟踪点；

第二步，由相应变量的几率模型确定光子迁移方向和步长，并计算出下一步与粒子发生碰撞（散射和吸收）的位置；

第三步，根据光子与粒子碰撞的物理过程，计算出碰撞之后的光子状态；

第四步，返回第二步。

如此循环计算，直到光子逃逸出介质或者被完全吸收而湮灭在介质中为止，记录下有关的物理量，再开始下一个光子的计算。最后将所有记录的物理量进行数理统计分析，找出问题的特征。其基本的程序流程如图2.5所示。

早期提出的Monte Carlo模拟方法只把光子看成单一能量的载体，对于光子数的统计也即是对光能量的统计。这种方法无法考虑光的相位和偏振特性，只能统计光能量的分布状态，因此被称作 scalar Monte Carlo(SMC)模拟方法。但是该方法的数学模型最简单，程序实现起来也是非常容易，因此也是目前应用最广泛的算法。20世纪90年代初，L.V. Wang 与其合作者陆续发表了10多篇关于SMC的论文，几乎每一篇都有新的发展<sup>[88, 91-93]</sup>，特别是公布了他与S.L. Jacques合作完成的程序源代码之后<sup>[94]</sup>，

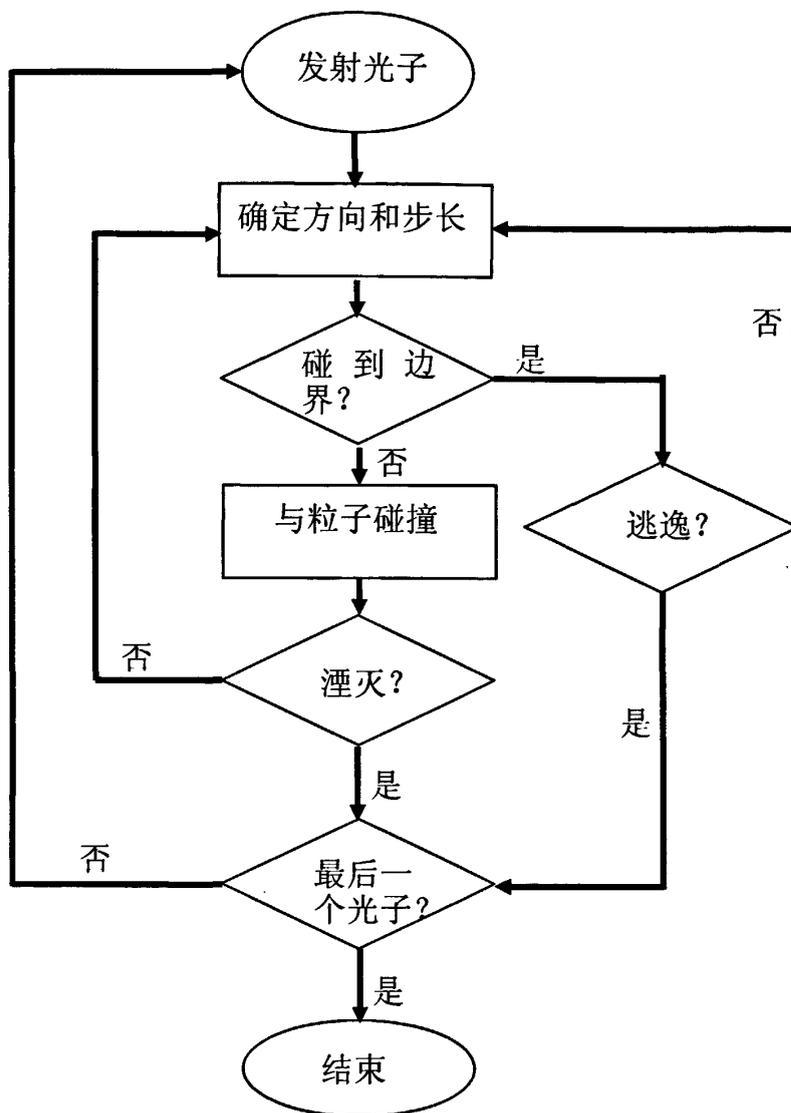


图2.5 Monte Carlo模拟程序流程图

他们的程序提供的处理方法被绝大部分的研究人员所采用。但是SMC方法最显然的缺点就是无法处理偏振光的问题，而随着偏振光在组织光学等多个领域表现出越来越强的潜力，光的偏振特性已经无法再被忽视了。于是，近年来研究人员已经开始将目光转向了矢量 Monte Carlo (Vector Monte Carlo, VMC) 模拟方法。VMC方法通过跟踪光子的Stokes矢量来考虑其偏振状态的变化过程，它将单一的光子能量的处理扩展

到带偏振状态的光子的处理<sup>[76, 79, 81, 84, 86, 88, 95-104]</sup>。MonteCarlo模拟方法的最新进展出现在2004年12月的《Optics Express》上, M. Xu 完成了电场Monte Carlo (Electric Monte Carlo, EMC) 模拟的程序, 并且公布了其源代码<sup>[77, 105]</sup>。EMC模拟方法不仅可以跟踪光子的偏振状态, 而且可以考虑光子的相位变化过程, 这样就使得Monte Carlo模拟方法处理多散射的相干性成为可能。该源代码的稳定性还需进一步得到验证。

### 2.3 本章小结

本章主要介绍了已有的有关粒子散射的基础理论和相关问题的一些处理方法。从上面的介绍可以看出, 目前存在的理论和方法主要是有关单粒子散射(如 Mie 散射)、或面散射(如 Kirchhoff 法、微扰法、Monte Carlo 模拟等)的光散射问题的处理, 而有关多粒子散射的理论和处理方法在现有的文献中尚不多见, 这一点正是本文所要展开讨论和研究的主要内容。在现有的有关单粒子散射和面散射的理论和处理方法的基础上, 本文在后面的章节中以实验为依据, 通过对群体粒子激光散射场散射光的光强、频谱、偏振等参数进行实验测量, 总结其规律, 然后建立了多粒子激光散射的矩阵模型, 对群体粒子激光散射的处理方法进行了创新性的有益的探索。

### 3 群体粒子散射实验系统方案及原理

#### 3.1 实验装置

本文所做研究工作的实验基础是：在纯净的蒸馏水中加入微米级球形粒子做为散射介质，用各种偏振态的激光对介质进行群体粒子侧向散射的参数测试和研究，然后分析总结散射规律，最后建立散射模型对群体粒子目标光学散射过程和散射规律进行表示和研究。

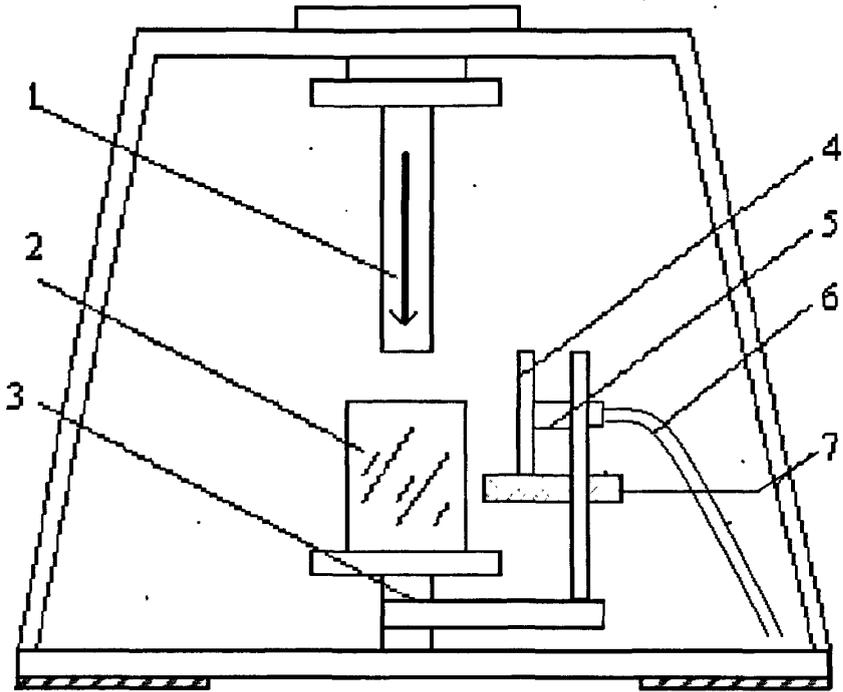
为了实现群粒子场侧向散射光的测量，在本课题研究中设计了专门的实验测量系统和实验方案。具体实验装置如图 3.1 所示：(a) 为实验系统实际装置，(b) 为装置示意图。整套装置置于隔震平台上并保持水平，以保证容器中的液体表面与入射激光束相互正交。

实验台俯视图如图 3.2 所示，转盘可以绕着散射场容器中心轴线在水平面内作  $360^\circ$  的转动，从而实现在与入射光垂直的平面内不同的角度处对散射场侧向散射光强的测量。偏振片联接于光纤前端的接收窗处以实现散射光不同成分的测量。

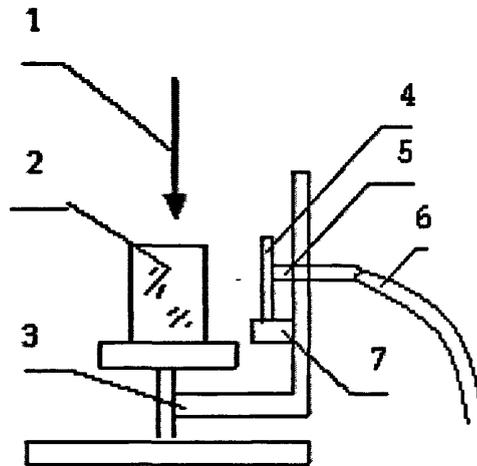
群体粒子目标光学散射场是一由透明器材控制粒子场的空间范围。如图 3.1 中装置 (2) 所示，在一光学透明有限长圆柱形容器内装入 2 次蒸馏的蒸馏水，水中掺入微米级聚合物微小球形微粒子构成悬浮液作为散射介质（散射场）（粒子由美国 Duke Scientific Corporation 生产，主要成分为聚甲醛丙烯酸脂、聚苯乙烯等，粒子相对折射率  $n_r$  为 1.197<sup>[106]</sup>），在本文各个实验中分别用到了直径各为  $0.065\ \mu\text{m}$ ， $0.123\ \mu\text{m}$ ， $0.220\ \mu\text{m}$ ， $0.360\ \mu\text{m}$ ， $0.494\ \mu\text{m}$ ， $1.240\ \mu\text{m}$  等几种粒子，并分别做成不同浓度（体积比）来进行实验。圆柱形器皿内外均严格清洗以去除杂物，放置于经黑色消光处理的转盘（图 3.1 中装置 (3)）上，散射场介质（圆柱形混合液）中心位于转盘转动轴中心。

实验所用入射光是波长  $\lambda$  为  $0.6328\ \mu\text{m}$  的 He-Ne 激光束，并根据各个具体实验的要求分别采用线性偏振和圆偏振两种偏振状态中的一种入射到圆柱形散射场。不同偏振态的偏振光是利用在散射场上方激光器激光出射端口（图 3.1 (a) 中 (1)）处与光束方向垂直放置不同的起偏振片获得的。散射场激光入射方向与圆柱形容器的轴重合并与混合液液面正交垂直（图 3.1 中 (1)）。

对入射光经过散射场中粒子散射后从散射场出射的侧向散射光的接收测量装置主要包括视角为  $2^\circ$  的光电接收窗、与接收窗相连的光纤（图 3.1 中装置 (5)、(6)）以及光纤另一端的固定的光电管。在接收窗前面与接收窗轴线垂直置一偏振片（图 3.1 中装置 (4)），偏振片可绕接收窗轴线旋转，当旋转  $90^\circ$  时可以分别测量散射光中的水平和垂直偏振成分，当取下偏振片时，则可测量总的侧向散射光强。

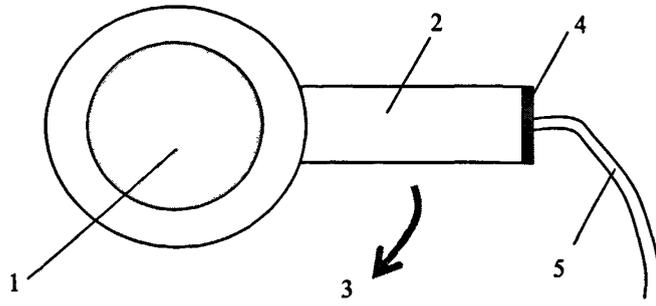


1—光束；2—散射场（粒子和水混合液）；3—转盘；  
4—偏振片；5—接收窗；6—光纤；7—垂直支架  
(a)



1—激光束 2—散射场 3—转盘 4—偏振片  
5—接收窗 6—光纤 7—垂直支架  
(b)

图 3.1 实验装置系统



1—散射场（粒子和水混合液） 2—转盘 3—转盘转动方向 4—偏振片 5—光纤

图 3.2 转盘转动俯视图

实验系统中的垂直支架（图 3.1 中装置（7））可以在与散射场轴线平行的方向（亦即入射激光方向）上上下下调整，以便探测不同深度的散射光。装置底部的转盘（图 3.1 中装置（3））转动中心轴与散射场轴线重合，以保证接收窗在平行于散射场液面的平面内绕轴线以任意角转动进行测量。

### 3.2 实验原理

本实验对散射场散射光测量，并依据 Mie 原理对散射光的退偏振情况进行实验研究，并对所测散射光的不同偏振成分的退偏振度进行了比较分析，从而获得群体粒子场目标光学散射性质的一些实验规律，为后面的群体粒子散射模型的建模提供数据和规律基础。

线性偏振光入射到一很小的微粒（直径  $\phi < \lambda$ ），其散射如图 3.3 所示，散射粒子位于坐标原点  $O$  处， $x$  轴方向为入射光的偏振方向， $z$  为入射光的传播方向， $OP$  为散射方向， $OQ$  为  $OP$  在  $xy$  平面的投影。

根据 Mie 理论，当非偏振光入射到半径为  $r_0$  的球形粒子上时， $P$  点的散射光强为：

$$I_{\mu} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R^2} |S|^2 \quad (3.1)$$

其中  $|S|^2 = |S_1|^2 + |S_2|^2$ ， $S_1$ 、 $S_2$  分别为在  $xz$  平面和  $xy$  平面的振幅函数：

$$S_1 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2i+1}{i(i+1)} [a_i \pi_i(\cos\theta) + b_i \tau_i(\cos\theta)] \quad (3.2)$$

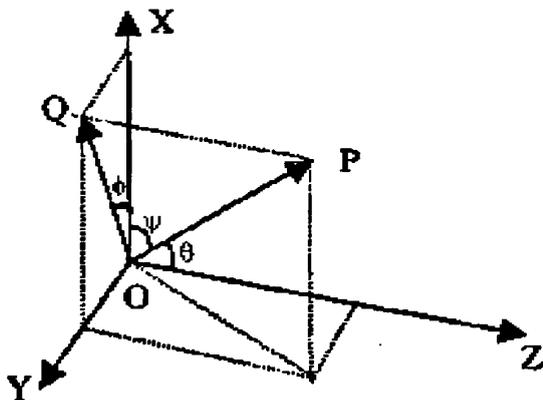


图 3.3 Mie 粒子散射几何关系

$$S_2 = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2i+1}{i(i+1)} [b_i \pi_i(\cos \theta) + a_i \tau_i(\cos \theta)] \quad (3.3)$$

其中  $\pi_i(\mu)$  和  $\tau_i(\mu)$  为角函数:

$$\pi_i(\mu) = \frac{d}{d\mu} P_i(\mu) \quad (3.4)$$

$$\tau_i(\mu) = \mu \pi_i(\mu) - (1 - \mu^2) \frac{d}{d\mu} \pi_i(\mu) \quad (3.5)$$

$$P_i(\mu) = \frac{1}{2^i i!} \frac{d^i}{d\mu^i} (\mu^2 - 1) \quad (3.6)$$

系数  $a_i$  和  $b_i$  分别为:

$$a_i = \frac{A_i(Y) \psi_i(X) - n \psi'_i(X)}{A_i(Y) \zeta_i(X) - n \zeta'_i(X)} \quad (3.7)$$

$$b_i = \frac{n A_i(Y) \psi_i(X) - \psi'_i(X)}{n A_i(Y) \zeta_i(X) - \zeta'_i(X)} \quad (3.8)$$

其中:

$$\psi_i(X) = \left( \frac{\pi x}{2} \right)^{\frac{1}{2}} J_{i+\frac{1}{2}}(X),$$

$$\zeta_i(X) = \left( \frac{\pi x}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ J_{i+\frac{1}{2}}(X) + (-1)^i j J_{-i+\frac{1}{2}}(X) \right],$$

$$A_i = \frac{\psi'(Y)}{\psi(Y)}, \quad X = 2\pi \frac{r_0}{\lambda}, \quad Y = nx, \quad j = \sqrt{-1},$$

偏振度

$$P = \frac{|S_1|^2 - |S_2|^2}{|S_1|^2 + |S_2|^2} \quad (3.9)$$

本文从实际应用出发, 所讨论的考察平面为  $xy$  平面,  $\theta = \frac{\pi}{2}$ , 入射光使用线偏振光时, 入射光振动方向为  $x$  方向, 则在与入射光垂直的平面 (即与图 3.3 中  $xy$  平面平行的平面) 内散射光强度分布为<sup>[107-108]</sup>:

$$I_i = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R^2} \{|S_1|^2 \sin^2 \phi + |S_2|^2 \cos^2 \phi\} \quad (3.10)$$

由于考察平面的限制,  $|S_1|^2$  和  $|S_2|^2$  为常量, 有:

$$I_i = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R^2} \{|S_1|^2 - |S_2|^2 \sin^2 \phi + |S_2|^2\} = PI_\mu \sin^2 \phi + \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R^2} |S_2|^2 \quad (3.11)$$

在所限的平面内观察到的散射图样应为双叶型 (类似于“8”字)<sup>[42, 45, 109]</sup>。于是有:

$$\frac{I_i(\phi)}{I_i(\phi=0)} = 1 + \left[ \frac{|S_1|^2}{|S_2|^2} - 1 \right] \sin^2 \phi = A(\phi) \quad (3.12)$$

上述都是对单个粒子而言, 更有实际意义的是一群粒子散射效果。显然, 群粒子多次散射的效应必将导致散射光强度分布和散射光偏振态的变化, 而这一变化是散射场中粒子大小、密度、场的空间范围的函数, 与粒子本身特性密切相关。本文为了考察  $A(\phi)$  与  $\phi$  的变化与和实际应用中的方便, 类似 (3.9) 式定义

$$P = \frac{A(\phi) - 1}{A(\phi) - 1 + 2 \sin^2 \phi} \quad (3.13)$$

来估算本文中散射光“退偏振”状态。

很显然, 如果散射光偏振度不变, 则  $A(\phi)$  必然随  $\phi$  的变化而变化, 以保持  $P$  为常数。

### 3.3 实验步骤与注意事项

(1) 将整个实验装置测量系统放置在隔震平台上, 将光纤两端分别与测量接收窗和光电倍增管联接好。检查隔震平台的水平度和整个装置的稳固性。

(2) 在清洗干净的圆柱形玻璃器皿内装入适量的经过 2 次蒸馏的蒸馏水，在蒸馏水中根据实验需要按一定的体积分数加入一定量的不同直径的微米级聚合物球形粒子形成混合液做为散射介质。将混合液容器置于实验装置转盘上，并使容器轴线与转盘中心轴重合。

(3) 激光束从散射场上方沿与液面垂直并与散射场轴线重合的方向向下入射到散射场。在激光器端口处放置不同的起偏振片以获得需要的偏振态激光束。

(4) 在容器的水平周边与液面平行的平面内任意选取一点作为  $\phi=0^\circ$  点来放置光纤接收窗进行散射光接收测量。实验时在散射介质的水平面下不同深度处（用垂直支架来调节探测深度），在与入射光相垂直的平面内，探测器接收窗按照预定的间隔（通过调整转盘）旋绕容器周边进行探测。在接收窗前放置不同的偏振片可测量侧向散射光的垂直、水平偏振强度和总偏振强度等各种所需实验数据。

(5) 整个实验均需在暗室中进行。

使用不同直径的粒子、采用不同体积分数的散射场、在不同的探测深度和不同的散射角方向上探测所测量到的实验数据附于本文后面的附录 A 和附录 B 中。

### 3.4 本章小结

在本章中详细阐述了本文所做实验所依据的理论原理，介绍了具体的实验装置、实验步骤和实验注意事项。后面各章中将不再分别赘述，而直接使用所测得的实验数据（附于附录 A、B 中）进行分析研究。

## 4 线偏振光入射群粒子场散射性质研究

### 4.1 实验条件

本章中研究内容所需实验装置和实验原理、实验步骤均如第三章中所述。在实验装置中入射激光采用波长  $\lambda$  为  $0.6328 \mu\text{m}$  的 He-Ne 线性偏振激光束入射（在激光器激光出射端口放置线性起偏振片获得线偏振入射光  $f$ ，所用粒子直径分别为  $0.065 \mu\text{m}$ ， $0.123 \mu\text{m}$ ， $0.220 \mu\text{m}$ ， $0.360 \mu\text{m}$ ， $0.494 \mu\text{m}$ ， $1.240 \mu\text{m}$ 。取散射场液面为探测器探测深度为  $0.0\text{cm}$  点，探测深度向下依次加深。在容器的水平周边与液面平行的平面内以入射光偏振方向（图 4.1 中  $x$  轴方向）为基准点定义为  $\phi=0^\circ$  点来放置光纤接收窗并每隔  $5^\circ$  取  $\phi$  值进行散射光接收测量<sup>[110-113]</sup>。在此条件下对获得的实验数据进行分析研究（具体实验数据详见附录 A）。在此要说明的是，由于实验中所测量得到的光强值是当量值，因此本文中包括附录部分里的光强值  $I$  均不带具体单位。

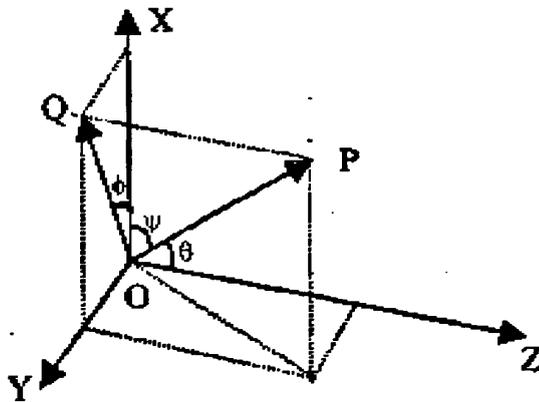


图 4.1 经典散射几何关系

### 4.2 线性偏振光入射时总侧向散射光强度性质研究

#### 4.2.1 总侧向散射光强度随粒子直径变化的关系

总侧向散射光强度是接收窗前不加偏振片时在与散射场液面平行的平面内所测量到的光强值。表 4.1 列出了五种直径的粒子在探测深度为  $0.00\text{cm}$ ，粒子体积分数浓度为  $0.00500\%$  时侧向散射总光强相对散射角（在与入射光垂直的散射场液面内的探测器测量观察角）的值。从表中的数据可以看出它们的区别和特点，而图 4.2 则把这些数据的变化更加形象化地表示了出来，在同一坐标系中可以明显地看出来粒子直径对侧向散射总光强的影响。由表 4.1 和图 4.2 我们可以直观地得到这样的结论：当线性偏振激光入射到群粒子散射介质场时，其侧向散射总光强相对入射光偏振方向

表 4.1 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数为  $0.00500\%$ )

粒子直径 散射角 $\phi$ (DEG)	$D/\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
-90		62.00	188.00	205.00	208.00	84.00
-75		59.00	179.00	193.00	180.00	84.00
-60		55.00	166.00	171.00	150.00	80.00
-45		49.00	150.00	144.00	111.00	69.00
-30		42.00	131.00	113.00	64.00	46.00
-15		37.00	120.00	90.00	32.00	40.00
0		35.00	117.00	82.00	15.00	34.00
15		37.00	120.00	90.00	32.00	40.00
30		42.00	131.00	113.00	64.00	46.00
45		49.00	150.00	144.00	111.00	69.00
60		55.00	166.00	171.00	150.00	80.00
75		59.00	179.00	193.00	180.00	84.00
90		62.00	188.00	205.00	208.00	84.00

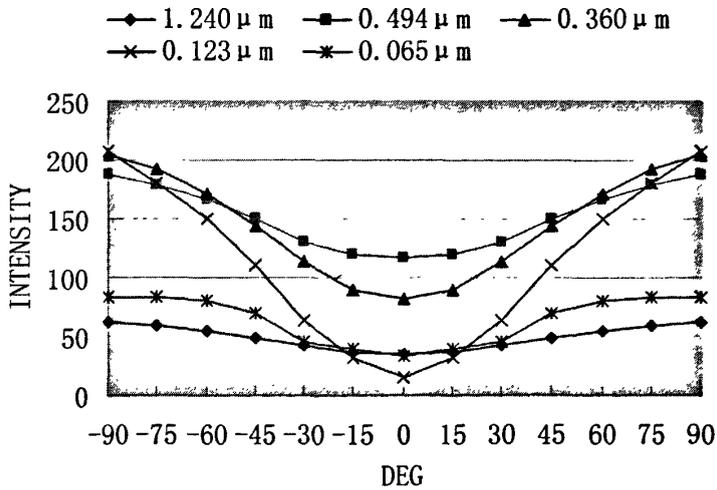


图 4.2 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数为  $0.00500\%$ )

表 4.2 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=1.50\text{cm}$ , 散射场体积分数比为 0.00500%)

粒子直径 散射角 $\phi$ (DEG)	$D/\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
-90		58.00	159.00	185.00	190.00	46.00
-75		55.00	154.00	173.00	178.00	44.00
-60		52.00	144.00	153.00	144.00	38.00
-45		46.00	131.00	128.00	106.00	29.00
-30		42.00	120.00	104.00	60.00	20.00
-15		39.00	114.00	89.00	30.00	12.00
0		38.00	111.00	85.00	13.00	7.40
15		39.00	114.00	89.00	30.00	12.00
30		42.00	120.00	104.00	60.00	20.00
45		46.00	131.00	128.00	106.00	29.00
60		52.00	144.00	153.00	144.00	38.00
75		55.00	154.00	173.00	178.00	44.00
90		58.00	159.00	185.00	190.00	46.00

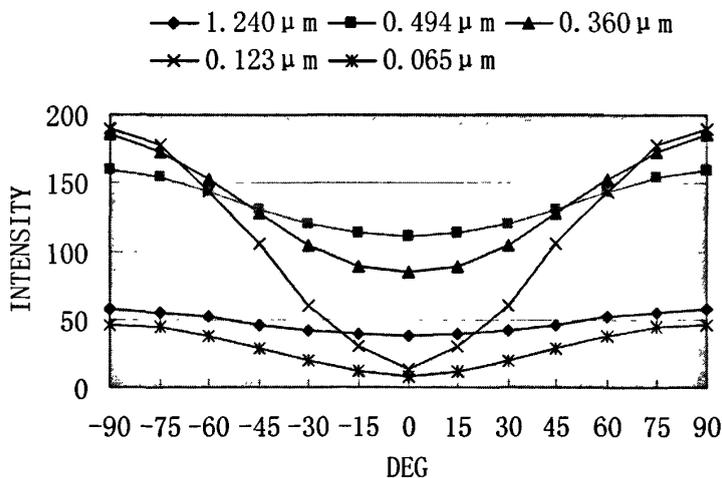


图 4.3 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=1.50\text{cm}$ , 散射场体积分数比为 0.00500%)

表 4.3 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=3.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

粒子直径 散射角 $\phi$ (DEG)	$D/\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
-90		51.00	111.00	132.00	114.00	42.00
-75		49.00	107.00	126.00	112.00	42.00
-60		47.00	102.00	113.00	96.00	38.00
-45		43.00	95.00	98.00	73.00	28.00
-30		39.00	88.00	82.00	43.00	16.00
-15		37.00	83.00	72.00	20.00	8.60
0		36.00	81.00	69.00	9.60	4.90
15		37.00	83.00	72.00	20.00	8.60
30		39.00	88.00	82.00	43.00	16.00
45		43.00	95.00	98.00	73.00	28.00
60		47.00	102.00	113.00	96.00	38.00
75		49.00	107.00	126.00	112.00	42.00
90		51.00	111.00	132.00	114.00	42.00

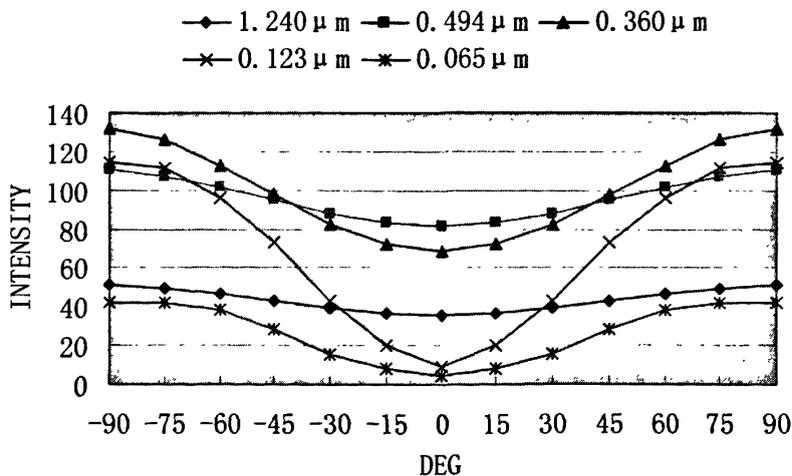


图 4.4 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=3.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

表 4.4 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00250\%$ )

粒子直径 散射角 $\phi$ (DEG)	$D/\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
-90		36.00	110.00	119.00	130.00	21.00
-75		34.00	106.00	110.00	128.00	20.00
-60		31.00	96.00	100.00	105.00	18.00
-45		27.00	83.00	81.00	77.00	15.00
-30		23.00	71.00	60.00	45.00	9.00
-15		21.00	63.00	45.00	23.00	4.70
0		19.00	61.00	40.00	11.00	2.80
15		21.00	63.00	45.00	23.00	4.70
30		23.00	71.00	60.00	45.00	9.00
45		27.00	83.00	81.00	77.00	15.00
60		31.00	96.00	100.00	105.00	18.00
75		34.00	106.00	110.00	128.00	20.00
90		36.00	110.00	119.00	130.00	21.00

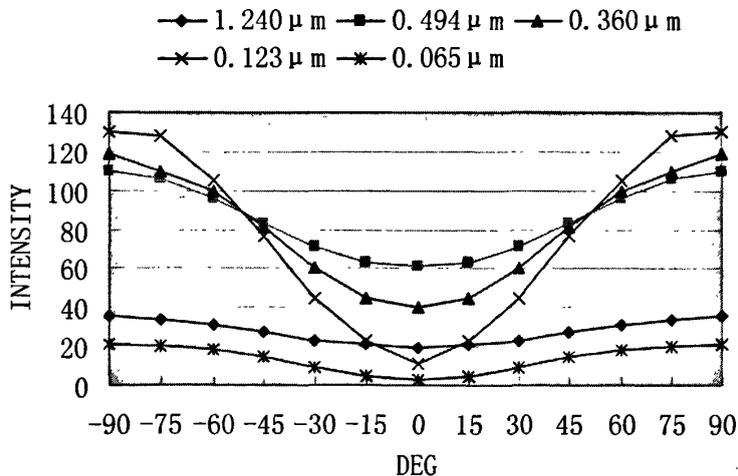


图 4.5 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00250\%$ )

成对称分布；在相同的粒子体积分数浓度和相同的探测深度下，散射场侧向散射总光强相对散射角的变化程度随粒子直径的减小（从  $1.240\ \mu\text{m}$  到  $0.123\ \mu\text{m}$ ）而变得更加明显；而当粒子直径进一步减小时（从  $0.123\ \mu\text{m}$  到  $0.065\ \mu\text{m}$ ），则此变化又趋于平缓。

表 4.2 与图 4.3、表 4.3 与图 4.4 分别为粒子体积分数比为 0.005% 而探测深度各为 1.50cm、3.00cm 的情况下五种粒子其侧向散射总光强相对散射角的变化情况。表 4.4 与图 4.5 为保持探测深度为 0.00cm 而粒子体积分数比更换为 0.00250% 的情况下五种粒子其侧向散射总光强相对散射角的变化情况。由后面的这些表和图可以明显地看出，即使更换探测深度或者更换粒子体积分数比浓度，当线性偏振激光入射到群粒子散射介质场时，其侧向散射总光强总是相对入射光偏振方向成对称分布；不同直径的粒子其散射场侧向散射总光强相对散射角的变化受粒子直径变化影响明显，其变化程度也始终呈现出这样的规律：侧向散射总光强相对散射角的变化程度随粒子直径的减小（从  $1.240\ \mu\text{m}$  到  $0.123\ \mu\text{m}$ ）而变得更加明显；而当粒子直径进一步减小时（从  $0.123\ \mu\text{m}$  到  $0.065\ \mu\text{m}$ ），则此变化又重趋于平缓。

#### 4.2.2 总侧向散射光强度随散射场粒子浓度变化的关系

表 4.5 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ ，散射场粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ )

粒子浓度 C 散射角 $\phi$ (DEG)	0.00500%	0.00250%
-90	62.00	36.00
-75	59.00	34.00
-60	55.00	31.00
-45	49.00	27.00
-30	42.00	23.00
-15	37.00	21.00
0	35.00	19.00
15	37.00	21.00
30	42.00	23.00
45	49.00	27.00
60	55.00	31.00
75	59.00	34.00
90	62.00	36.00

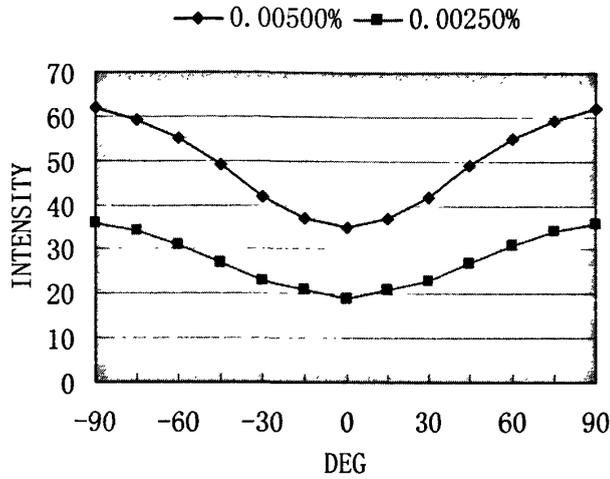


图 4.6 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ )

表 4.6 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=3.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ )

粒子浓度 C 散射角 $\phi$ (DEG)	0.00500%	0.00250%
-90	51.00	31.00
-75	49.00	30.00
-60	47.00	28.00
-45	43.00	25.00
-30	39.00	23.00
-15	37.00	21.00
0	36.00	20.00
15	37.00	21.00
30	39.00	23.00
45	43.00	25.00
60	47.00	28.00
75	49.00	30.00
90	51.00	31.00

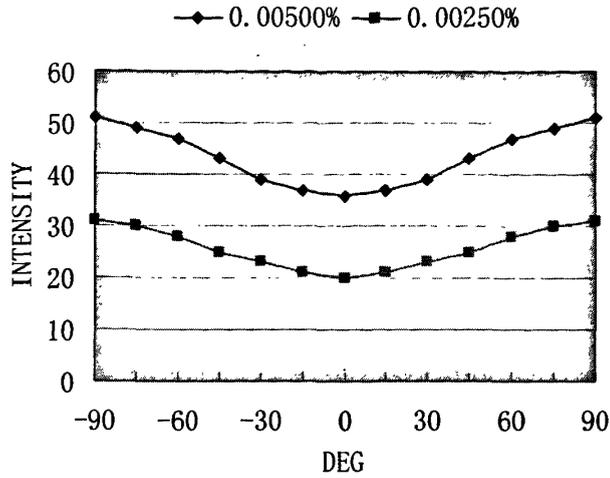


图 4.7 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=3.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $1.240\mu\text{m}$ )

表 4.7 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $0.360\mu\text{m}$ )

散射角 $\phi$ (DEG)	粒子浓度 C	
	0.00500%	0.00250%
-90	205.00	119.00
-75	193.00	110.00
-60	171.00	100.00
-45	144.00	81.00
-30	113.00	60.00
-15	90.00	45.00
0	82.00	40.00
15	90.00	45.00
30	113.00	60.00
45	144.00	81.00
60	171.00	100.00
75	193.00	110.00
90	205.00	119.00

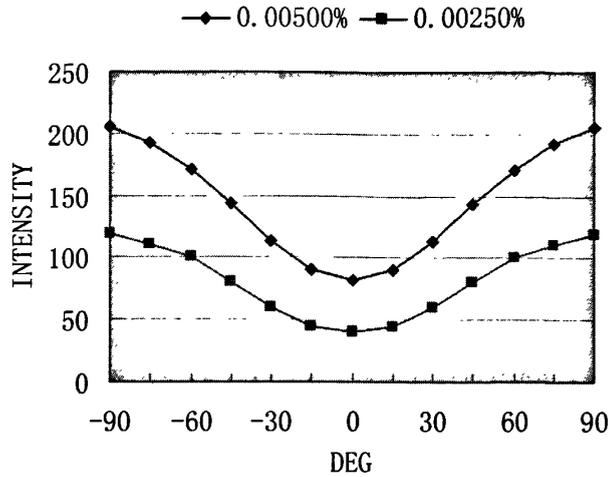


图 4.8 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $0.360\ \mu\text{m}$ )

本文中散射介质场粒子浓度一律采用体积分数比所构成的体积比例浓度。这一节对每一种直径的粒子在构成不同体积分数比的散射介质场时其侧向散射总光强相对散射角的变化情况进行研究。类似于上节，把相关的数据在表格中列出并在坐标图中画图表示，就可以很直观地看出一些规律特点。

从表 4.5 和图 4.6 可以很直观地看出，在线性偏振激光入射到群粒子散射介质场时，其侧向散射总光强依然相对入射光偏振方向成对称分布；当粒子体积分数比浓度改变时，其散射场侧向散射总光强相对散射角所测得的量值会随着浓度的降低而减小，但其变化规律基本不变，也即是说，群粒子场目标光学侧向散射总光强相对散射角的变化规律受粒子浓度的影响很小，不像受粒子直径变化影响那么明显：当粒子浓度改变时，侧向散射总光强相对散射角的变化规律基本不受影响，保持不变。改变探测深度（表 4.6 和图 4.7），或者换用其它直径的粒子（表 4.7 和图 4.8）进行实验，依然可以看出，粒子浓度对侧向散射总光强相对散射角变化规律的影响都是很微弱的：当粒子体积分数比浓度改变时，其散射场侧向散射总光强相对散射角所测得的量值会随着浓度的降低而减小，但其变化规律和变化趋势基本不变。

#### 4.2.3 总侧向散射光强度随散射场探测深度变化的关系

图表依然是最能直接形象化地表示出规律的工具了。本节中继续用图表工具来研究总侧向散射光强度随散射场探测深度变化的关系。从下列根据表 4.8 至表 4.10 画出的图 4.9 到图 4.11 中可以直观地看出这些规律来。

表 4.8 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角变化的测量值  
(粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为 0.00500%)

测量深度 $D/\text{cm}$ 散射角 $\phi$ (DEG)	0.00	1.50	3.00
-90	62.00	58.00	51.00
-75	59.00	55.00	49.00
-60	55.00	52.00	47.00
-45	49.00	46.00	43.00
-30	42.00	42.00	39.00
-15	37.00	39.00	37.00
0	35.00	38.00	36.00
15	37.00	39.00	37.00
30	42.00	42.00	39.00
45	49.00	46.00	43.00
60	55.00	52.00	47.00
75	59.00	55.00	49.00
90	62.00	58.00	51.00

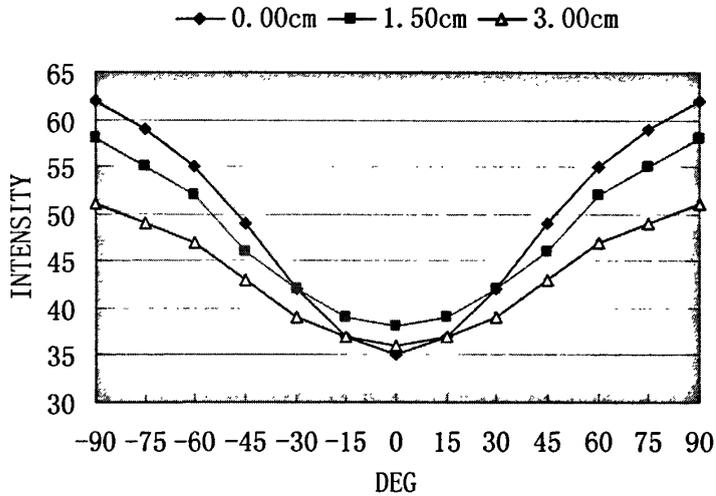


图 4.9 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化  
(粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为 0.00500%)

由图 4.9 可以看出, 对于同一种粒子在同种浓度下, 其侧向散射总光强相应散射

角的变化是相对线性偏振入射光的偏振方向成对称分布的,且随着探测深度增加而趋于平缓,但总体规律相对深度的变化不大。

表 4.9 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角变化的测量值  
(粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.00250\%$ )

测量深度 $D/\text{cm}$ 散射角 $\phi$ (DEG)	0.00	1.50	3.00
-90	36.00	35.00	31.00
-75	34.00	33.00	30.00
-60	31.00	30.00	28.00
-45	27.00	26.00	25.00
-30	23.00	23.00	23.00
-15	21.00	21.00	21.00
0	19.00	20.00	20.00
15	21.00	21.00	21.00
30	23.00	23.00	23.00
45	27.00	26.00	25.00
60	31.00	30.00	28.00
75	34.00	33.00	30.00
90	36.00	35.00	31.00

—◆— 0.00cm —■— 1.50cm —▲— 3.00cm

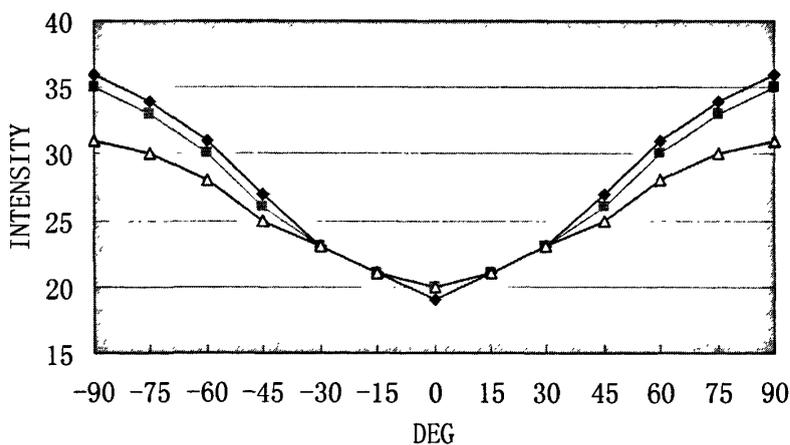


图 4.10 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化  
(粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.00250\%$ )

表 4.10 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角变化的测量值  
(粒子直径为  $0.360\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

测量深度 $D/\text{cm}$ 散射角 $\phi$ (DEG)	0.00	1.50	3.00
-90	205.00	185.00	132.00
-75	193.00	173.00	126.00
-60	171.00	153.00	113.00
-45	144.00	128.00	98.00
-30	113.00	104.00	82.00
-15	90.00	89.00	72.00
0	82.00	85.00	69.00
15	90.00	89.00	72.00
30	113.00	104.00	82.00
45	144.00	128.00	98.00
60	171.00	153.00	113.00
75	193.00	173.00	126.00
90	205.00	185.00	132.00

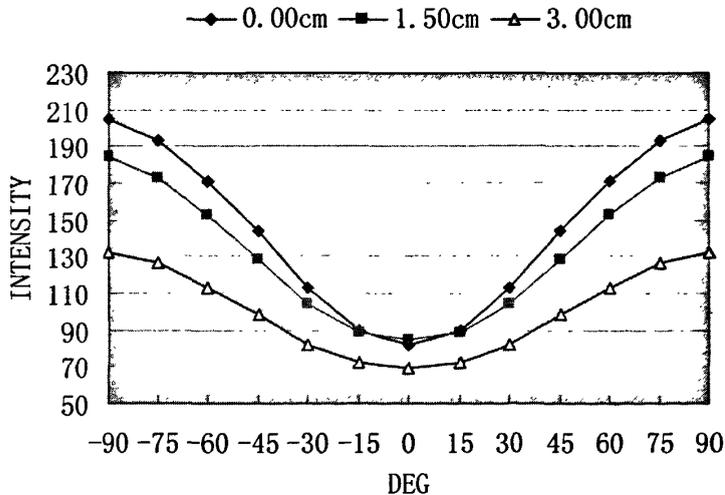


图 4.11 线性偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化  
(粒子直径为  $0.360\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

与图 4.9 相比, 图 4.10 保持粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ , 但散射场体积分数比调制成

为 0.00250%，把两图进行对比可知，两种情况下所表现出的规律完全一致：侧向散射总光强相应散射角的变化是相对线性偏振入射光的偏振方向成对称分布的，且随着探测深度增加而趋于平缓，但总体规律相对深度的变化不大。而且根据这两个规律图可以继续得到这个结论：线性偏振光入射到散射场时侧向散射总光强相应散射角的变化规律受散射场粒子体积分数比的影响较小。

与图 4.9 相比，图 4.11 保持散射场体积分数比为 0.00500%，但粒子直径换成为  $0.360 \mu\text{m}$ ，把两图进行对比可知，两种情况下所表现出的依然规律完全一致：侧向散射总光强相应散射角的变化是相对线性偏振入射光的偏振方向成对称分布的，且随着探测深度增加而趋于平缓，但总体规律相对深度的变化不大。但是根据这两个规律图可以发现：当散射场粒子直径变小时，其侧向散射总光强相应散射角的变化会变得起伏更大。这说明线性偏振光入射到散射场时侧向散射总光强相应散射角的变化受到粒子直径的影响要比受散射场粒子体积分数比的影响大。

#### 4.3 线性偏振光入射时总侧向散射光偏振度性质分析

本节中利用附录 B 中的数据二，即对直径分别为  $0.220 \mu\text{m}$  和  $0.494 \mu\text{m}$  的两种粒子所测得的数据，来进行比较研究线性偏振光入射时总侧向散射光偏振度性质的变化规律。

##### 4.3.1 总侧向散射光偏振度随散射场探测深度变化的关系

把附录数据二中对直径  $0.220 \mu\text{m}$  的粒子散射溶液所测得的侧向总散射光强相应

表 4.11 线性偏振光入射时侧向散射总光强偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.220 \mu\text{m}$ ，散射场体积分数比为 0.0025%)

散射角 $\phi$ (DEG) \n 探测深度(cm)	90	75	60	45	30	15	0
0.0	0.8868	0.8914	0.8953	0.8965	0.9000	0.8972	—
0.5	0.8775	0.8811	0.8902	0.8982	0.9118	0.9257	—
1.0	0.8585	0.8654	0.8742	0.8727	0.8888	0.8948	—
1.5	0.8351	0.8340	0.8500	0.8621	0.8789	0.8818	—
2.0	0.8280	0.8199	0.8442	0.8397	0.8666	0.8816	—
2.5	0.8181	0.8222	0.8400	0.8571	0.8666	0.8818	—
3.0	0.8000	0.8034	0.8285	0.8369	0.8521	0.8815	—
3.5	0.7949	0.7953	0.8210	0.8432	0.8425	0.8678	—

散射角  $\phi$  的数据按照式 3.13 来进行偏振度计算, 所得偏振度值列于表 4.11 中。即对直径  $0.220 \mu\text{m}$  的粒子, 浓度  $0.0025\%$  所构成的粒子场, 其侧向散射总光强相对  $\phi$  值的退偏振估计。表中八组值, 即不同探测深度所得结果。表中数值变化不大, 均在  $0.8$  左右。这说明, 一个有限的群体微粒子场侧向复合散射总光强的偏振度情况和单个粒子的散射偏振度的理论计算有很好的近似。

表 4.12 线性偏振光入射时侧向散射总光强偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.220 \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.0125\%$ )

散射角 $\phi$ (DEG)	90	75	60	45	30	15	0
探测深度(cm)							
0.0	0.7101	0.7171	0.7288	0.7493	0.7642	0.7706	—
0.5	0.6785	0.6769	0.6767	0.6875	0.6988	0.7393	—
1.0	0.6169	0.6076	0.6000	0.6124	0.6403	0.6982	—
1.5	0.5976	0.6043	0.6011	0.6063	0.6296	0.6599	—
2.0	0.5771	0.5812	0.5810	0.5983	0.6269	0.6215	—
2.5	0.5305	0.5388	0.5440	0.5689	0.6031	0.6417	—
3.0	0.4962	0.4951	0.5268	0.5516	0.5833	0.6319	—
3.5	0.4318	0.4423	0.2604	0.4898	0.5455	0.5443	—

表 4.12 中所测算出的偏振度值仍是采用直径  $0.220 \mu\text{m}$  的粒子作为散射场介质粒子, 但溶液体积百分数增大为  $0.0125\%$ 。把表 4.12 中的数据与表 4.11 相比较, 可以看出, 当散射场粒子直径不变而改变溶液浓度时, 其侧向激光散射总光强的偏振度相对深度的变化而出现幅度较大的改变: 散射场散射粒子体积百分数增大时, 其激光侧向散射总光强的偏振度相应随着测量深度改变而出现明显变化; 而散射场散射粒子体积百分数减小时, 其激光侧向散射总光强的偏振度随着测量深度的改变却变化平缓, 变化幅度很小。通过这个比较证明: 群体粒子场激光侧向散射总光强的退偏振程度随着散射场浓度增加而受场深度参数的影响增强, 随着浓度减小而受场深度参数的影响变弱。另外, 从两个表中均可以看出, 不管是哪一种场浓度, 在同一测量深度时, 其偏振度当测量的散射角改变时出现的改变很小。这也同时证明: 群体粒子场激光侧向散射总光强的退偏振受散射场浓度的影响比测量时的散射角的影响要明显大得多。

另外, 不管是采用哪种浓度, 其总光强的偏振度均随着测量深度的增加而逐渐地变小, 但整体上来讲, 相应深度的变化均不大。

### 4.3.2 总侧向散射光偏振度随散射场体积分数浓度变化的关系

仍然从表 4.11 和表 4.12 来进行分析。在第 4.3.1 节中已经分析发现：群体粒子场激光侧向散射总光强的退偏振程度随着散射场浓度增加而受场深度参数的影响增强，随着浓度减小而受场深度参数的影响变弱。侧向散射总光强的退偏振受散射场浓度的影响比测量时的散射角的影响要明显大得多。

另外，从这两个表中可以得出结论：在采用相同的测试粒子在相同的深度进行测量时，线性偏振光入射时侧向散射总光强偏振度相对散射角的测量值将随着介质浓度的增大而减小，随着浓度的减小而增大。而在相同的深度对相同的粒子在相同的体积分数比浓度时所得到的侧向散射总光强当测量的散射角改变时其偏振度却基本保持很相近的值而变化不大。

### 4.3.3 总侧向散射光偏振度随介质粒子大小变化的关系

对直径  $0.494 \mu\text{m}$  的粒子，浓度 0.0025% 所构成的粒子场，其侧向散射总光强相对散射角  $\phi$  值按照式 3.13 来进行偏振度计算，所得结果列于表 4.13 中。

表 4.13 线性偏振光入射时侧向散射总光强偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.494 \mu\text{m}$ ，散射场体积分数比为 0.0025%)

探测深度(cm) \ 散射角 $\phi$ (DEG)	90	75	60	45	30	15	0
0.0	0.3485	0.3645	0.3827	0.4413	0.5000	0.5110	—
0.5	0.3485	0.3645	0.3827	0.4413	0.4624	0.5110	—
1.0	0.3174	0.3326	0.3644	0.3902	0.4624	0.5110	—
1.5	0.2857	0.3001	0.3274	0.3464	0.3976	0.4925	—
2.0	0.2857	0.3001	0.3274	0.375	0.3976	0.4925	—
2.5	0.2857	0.2812	0.3088	0.3464	0.3506	0.4925	—
3.0	0.2674	0.2812	0.3088	0.3464	0.3506	0.4925	—
3.5	0.2509	0.2642	0.2857	0.3197	0.3506	0.3432	—

从本表所测算的数据，可以继续得到 4.3.2 节中所得到的相关结论。本节主要是对粒子直径大小对侧向散射总光强偏振度的影响来进行分析，因此把表 4.13 和表 4.11 来进行比较（两者具有相同的体积分数比浓度）。

通过对比可以发现：当散射场粒子直径变大时，其侧向散射总光强相对散射角的偏振度都将变小，退偏振程度明显；当散射场粒子直径变小时，其侧向散射总光强相对散射角的偏振度都将变大，退偏振程度趋弱。同时，当粒子直径变大时，其在同一

深度时相对不同散射角所呈现的偏振度和直径较小粒子相比变化较明显；而在同一散射角处在不同测量深度的偏振度和直径较小粒子相比也变化明显。实验和研究结果说明：线性偏振光入射时总侧向散射光偏振度受散射场介质粒子大小变化的影响明显，介质粒子大小是影响总侧向散射光退偏振度情况的一个重要的物理参数。

#### 4.4 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强度性质分析

在线性偏振激光入射到群体粒子场时，其侧向散射光中的水平偏振分量和垂直偏振分量不管是光强还是偏振度的变化都与总散射光表现出不尽相同的规律。对此分别给以研究分析。

##### 4.4.1 侧向散射水平偏振光强度随粒子直径变化的关系

群体粒子场侧向散射光中的水平偏振成分的光强是接收窗前加偏振片并且令偏振片透光轴平行于散射场溶液液面（即与图 4.1 中的  $xy$  平面平行）时在与散射场液面平行的平面内所测量到的光强值。表 4.14 列出了五种直径的粒子在探测深度为 0.00cm，粒子体积分数浓度均为 0.00500%时五种溶液侧向散射光水平偏振分量的光强相对散射角（在与入射光垂直的散射场液面内的探测器测量时的观察角）的值。从表中的数据可以看出它们的区别和特点，而图 4.12 则把这些数据的变化更加形象化地表示了出来，在同一坐标系中可以明显地看出来粒子直径对侧向散射光中水平偏振分量光强的影响。由表 4.14 和图 4.12 我们可以直观地得到这样的结论：当线性偏振激光入射到群粒子散射介质场时，其侧向散射光强中的水平偏振分量相对入射光偏振方向成对称分布；在相同的粒子体积分数浓度和相同的探测深度下，散射场侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化程度随粒子直径的减小（从  $1.240\ \mu\text{m}$  到  $0.123\ \mu\text{m}$ ）而变得更加明显；而当粒子直径进一步减小时（从  $0.123\ \mu\text{m}$  更换为  $0.065\ \mu\text{m}$  的粒子），则此变化又趋于平缓。这个规律特点与侧向散射光总光强的变化规律完全一样，这说明散射光中的水平偏振分量对总侧向散射光光强的规律性质影响很小。

表 4.15 与图 4.13、表 4.16 与图 4.14 分别为粒子体积分数比为 0.005%而探测深度各为 1.50cm、3.00cm 的情况下五种粒子其侧向水平散射光强相对散射角的变化情况。表 4.17 与图 4.15 为保持探测深度为 0.00cm 而粒子体积分数比更换为 0.00250%的情况下五种粒子其侧向水平散射光强相对散射角的变化情况。由后面的这些表和图可以明显地看出，即使更换探测深度或者更换粒子体积分数比浓度，当线性偏振激光入射到群体粒子散射场时，其侧向水平散射光强总是相对入射光偏振方向成对称分布；不同直径的粒子其散射场侧向水平散射光强相对散射角的变化受粒子直径变化影响明显，其变化程度也始终呈现出这样的规律：侧向散射光强水平偏振分量相对散射角的变化程度随粒子直径的减小（从  $1.240\ \mu\text{m}$  到  $0.123\ \mu\text{m}$ ）而变得更加明显；而当粒子直径进一步减小时（从  $0.123\ \mu\text{m}$  到  $0.065\ \mu\text{m}$ ），则此变化又重趋于平缓（其中在图 4.13 中直径  $0.065\ \mu\text{m}$  粒子的散射图线甚至于与直径  $1.240\ \mu\text{m}$  的实验所用最大粒子的

散射图线一样平缓且几乎重合)。

表 4.14 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

粒子直径 散射角 $\phi$ (DEG)	$D/\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
-90		42.00	122.00	140.00	139.00	45.00
-75		38.00	111.00	128.00	130.00	45.00
-60		32.00	95.00	107.00	108.00	40.00
-45		22.00	68.00	76.00	78.00	31.00
-30		14.00	44.00	47.00	42.00	18.00
-15		8.00	26.00	22.00	18.00	14.00
0		6.30	22.00	16.00	6.30	9.80
15		8.00	26.00	22.00	18.00	14.00
30		14.00	44.00	47.00	42.00	18.00
45		22.00	68.00	76.00	78.00	31.00
60		32.00	95.00	107.00	108.00	40.00
75		38.00	111.00	128.00	130.00	45.00
90		42.00	122.00	140.00	139.00	45.00

—◆—  $1.240\mu\text{m}$  —■—  $0.494\mu\text{m}$  —▲—  $0.360\mu\text{m}$   
—×—  $0.123\mu\text{m}$  —\*—  $0.065\mu\text{m}$

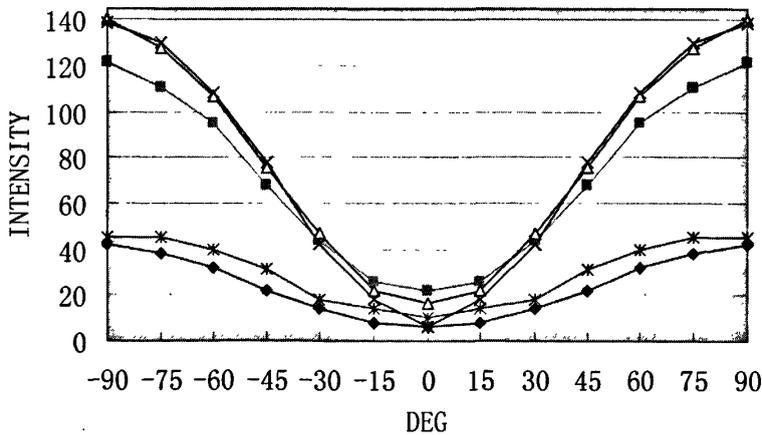


图 4.12 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

表 4.15 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=1.50\text{cm}$ , 散射场体积分数比为 0.00500%)

粒子直径 散射角 $\phi$ (DEG)	$D/\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
-90		33.00	98.00	124.00	140.00	32.00
-75		30.00	91.00	113.00	128.00	30.00
-60		26.00	78.00	96.00	104.00	26.00
-45		18.00	58.00	69.00	75.00	19.00
-30		11.00	37.00	43.00	41.00	12.00
-15		6.10	24.00	24.00	19.00	5.70
0		4.10	20.00	18.00	5.80	2.90
15		6.10	24.00	24.00	19.00	5.70
30		11.00	37.00	43.00	41.00	12.00
45		18.00	58.00	69.00	75.00	19.00
60		26.00	78.00	96.00	104.00	26.00
75		30.00	91.00	113.00	128.00	30.00
90		33.00	98.00	124.00	140.00	32.00

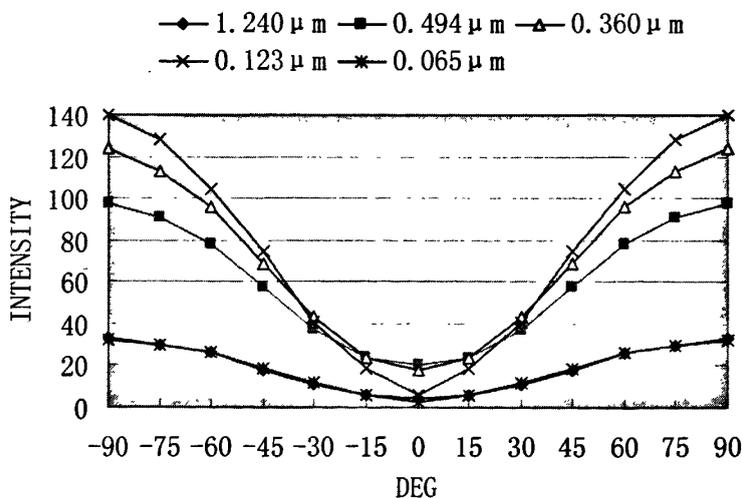


图 4.13 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=1.50\text{cm}$ , 散射场体积分数比为 0.00500%)

表 4.16 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=3.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

粒子直径 散射 角 $\phi$ (DEG)	$D/\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
-90		32.00	69.00	88.00	126.00	30.00
-75		30.00	65.00	82.00	119.00	30.00
-60		25.00	56.00	70.00	99.00	27.00
-45		18.00	44.00	51.00	73.00	20.00
-30		12.00	30.00	33.00	41.00	11.00
-15		7.50	23.00	20.00	16.00	5.50
0		6.30	20.00	17.00	6.90	2.70
15		7.50	23.00	20.00	16.00	5.50
30		12.00	30.00	33.00	41.00	11.00
45		18.00	44.00	51.00	73.00	20.00
60		25.00	56.00	70.00	99.00	27.00
75		30.00	65.00	82.00	119.00	30.00
90		32.00	69.00	88.00	126.00	30.00

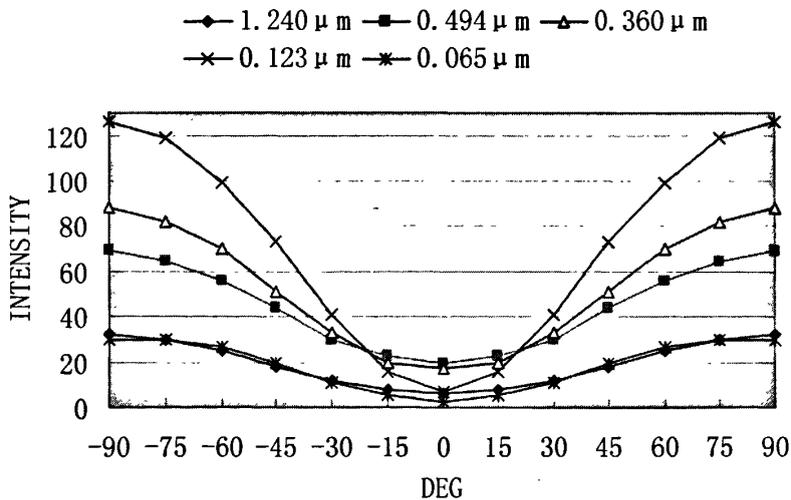


图 4.14 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=3.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

表 4.17 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00250\%$ )

粒子直径 散射角 $\phi$ (DEG)	$D/\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
-90		24.00	67.00	83.00	93.00	15.00
-75		22.00	61.00	76.00	93.00	14.00
-60		17.00	51.00	63.00	75.00	13.00
-45		11.00	36.00	44.00	52.00	11.00
-30		7.40	20.00	27.00	29.00	6.10
-15		4.90	11.00	12.00	12.00	2.90
0		3.90	7.70	7.30	4.40	1.40
15		4.90	11.00	12.00	12.00	2.90
30		7.40	20.00	27.00	29.00	6.10
45		11.90	36.00	44.00	52.00	11.00
60		17.00	51.00	63.00	75.00	13.00
75		22.00	61.00	76.00	93.00	14.00
90		24.00	67.00	83.00	93.00	15.00

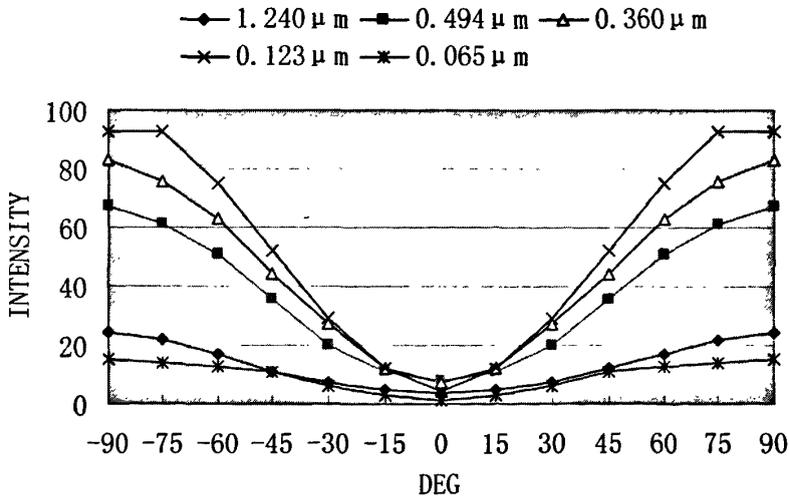


图 4.15 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00250\%$ )

## 4.4.2 侧向散射水平偏振光强度随散射场粒子浓度变化的关系

表 4.18 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ )

粒子浓度 C 散射角 $\phi$ (DEG)	0.00500%	0.00250%
-90	42.00	24.00
-75	38.00	22.00
-60	32.00	17.00
-45	22.00	11.90
-30	14.00	7.40
-15	8.00	4.90
0	6.30	3.90
15	8.00	4.90
30	14.00	7.40
45	22.00	11.90
60	32.00	17.00
75	38.00	22.00
90	42.00	24.00

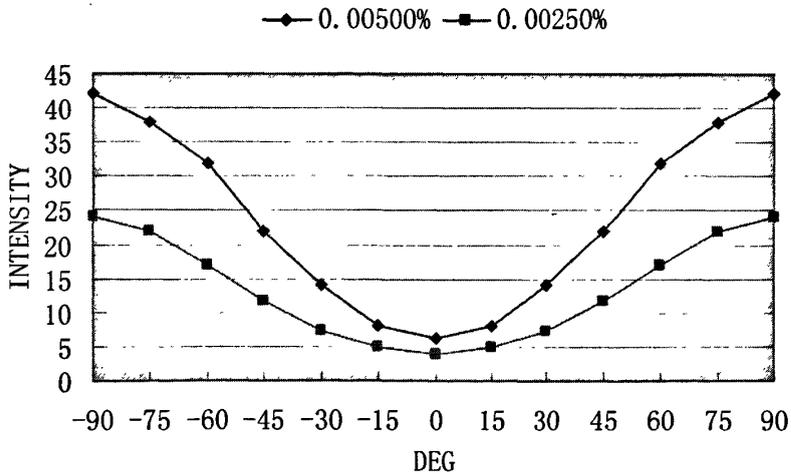


图 4.16 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ )

表 4.19 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=3.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ )

粒子浓度 C 散射角 $\phi$ (DEG)	0.00500%	0.00250%
-90	32.00	20.00
-75	30.00	19.00
-60	25.00	16.00
-45	18.00	12.00
-30	12.00	8.00
-15	7.50	5.40
0	6.30	4.80
15	7.50	5.40
30	12.00	8.00
45	18.00	12.00
60	25.00	16.00
75	30.00	19.00
90	32.00	20.00

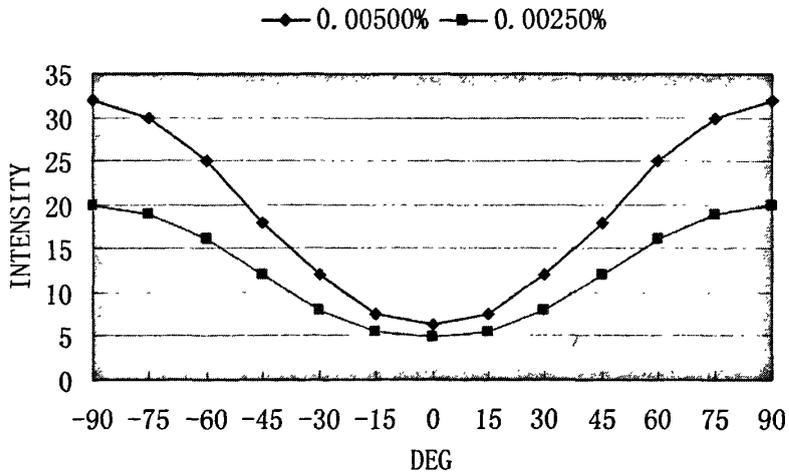


图 4.17 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=3.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ )

表 4.20 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $0.360\ \mu\text{m}$ )

散射角 $\phi$ (DEG) \backslash 粒子浓度 C	0.00500%	0.00250%
-90	140.00	83.00
-75	128.00	76.00
-60	107.00	63.00
-45	76.00	44.00
-30	47.00	27.00
-15	22.00	12.00
0	16.00	7.30
15	22.00	12.00
30	47.00	27.00
45	76.00	44.00
60	107.00	63.00
75	128.00	76.00
90	140.00	83.00

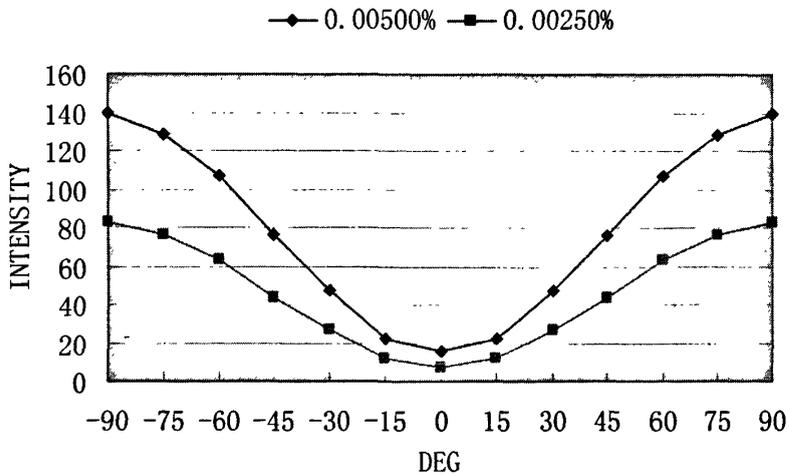


图 4.18 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $0.360\ \mu\text{m}$ )

这一节对每一种直径的粒子在构成不同体积分数比的散射介质场时其侧向散射水平偏振分量光强相对散射角的变化情况进行研究。类似于上节, 把相关的数据在表

格中列出并在坐标图中画图表示,就可以很直观地看出一些规律特点。

从表 4.18 和图 4.16 可以很直观地看出,在线性偏振激光入射到群粒子散射介质场时,其侧向散射水平光强依然呈现相对入射光偏振方向成对称分布的规律;当粒子体积分数比浓度改变时,其散射场侧向散射水平偏振光强相对散射角所测得的量值会随着浓度的降低而减小,但其变化规律基本不变,也即是说,群粒子场目标光学侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化规律受粒子浓度的影响很小,不像受粒子直径变化影响那么明显:当粒子浓度改变时,侧向散射水平光强相对散射角的变化规律基本不受影响,保持不变。改变探测深度(表 4.19 和图 4.17),或者换用其它直径的粒子(表 4.20 和图 4.18)进行实验,依然可以看出,粒子浓度对侧向散射水平偏振光强相对散射角变化规律的影响都是很微弱的:当粒子体积分数比浓度改变时,其散射场侧向散射水平偏振光强相对散射角所测得的量值会随着浓度的降低而减小,但其变化规律和变化趋势基本不变。群体粒子场侧向散射光强水平偏振分量随粒子体积分数比浓度变化所表现出来的以上的这些规律,与侧向散射总光强的规律非常相似(参见 4.2.2 节)。

#### 4.4.3 侧向散射水平偏振光强度随散射场探测深度变化的关系

本节中继续用图表工具来研究侧向散射水平偏振光强度随散射场探测深度变化的关系。从下列根据表 4.21 至表 4.23 画出的图 4.19 到图 4.21 中可以直观地看出这些规律来。

由图 4.19 可以看出,对于同一种粒子在同种浓度下,其侧向散射水平偏振光强相应散射角的变化是相对线性偏振入射光的偏振方向成对称分布的,且随着探测深度增加而趋于平缓,在同一散射角处其量值随深度增加而变化趋小(光强曲线接近重合)。其总体规律相对深度的变化不大。

与图 4.19 相比,图 4.20 保持粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ ,但散射场体积分数比调制成为  $0.00250\%$ ,把两图进行对比可知,两种情况下所表现出的规律完全一致:侧向散射水平偏振光强相应散射角的变化是相对线性偏振入射光的偏振方向成对称分布的,且随着探测深度增加而趋于平缓,但总体规律相对深度的变化不大。而且根据这两个规律图可以继续得到这个结论:线性偏振光入射到散射场时侧向散射水平偏振光强相应散射角的变化规律受散射场粒子体积分数比的影响很小。

与图 4.19 相比,图 4.21 保持散射场体积分数比为  $0.00500\%$ ,但粒子直径换成为  $0.360\ \mu\text{m}$ ,把两图进行对比可知,两种情况下所表现出的依然规律完全一致:侧向散射水平偏振光强相应散射角的变化是相对线性偏振入射光的偏振方向成对称分布的,且随着探测深度增加而趋于平缓,但总体规律相对深度的变化不大。但是根据这两个规律图可以发现:当散射场粒子直径变小时,其侧向散射水平偏振光强

相应散射角的变化会变得起伏更大。这说明线性偏振光入射到散射场时侧向散射水平偏振光强相应散射角的变化受到粒子直径的影响要比受散射场粒子体积分数比的影响大。这个规律也与侧向散射总光强所表现出来的相同。

表 4.21 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角变化的测量值  
(粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

测量深度 $D/\text{cm}$ 散射角 $\phi$ (DEG)	0.00	1.50	3.00
-90	42.00	33.00	32.00
-75	38.00	30.00	30.00
-60	32.00	26.00	25.00
-45	22.00	18.00	18.00
-30	14.00	11.00	12.00
-15	8.00	6.10	7.50
0	6.30	4.10	6.30
15	8.00	6.10	7.50
30	14.00	11.00	12.00
45	22.00	18.00	18.00
60	32.00	26.00	25.00
75	38.00	30.00	30.00
90	42.00	33.00	32.00

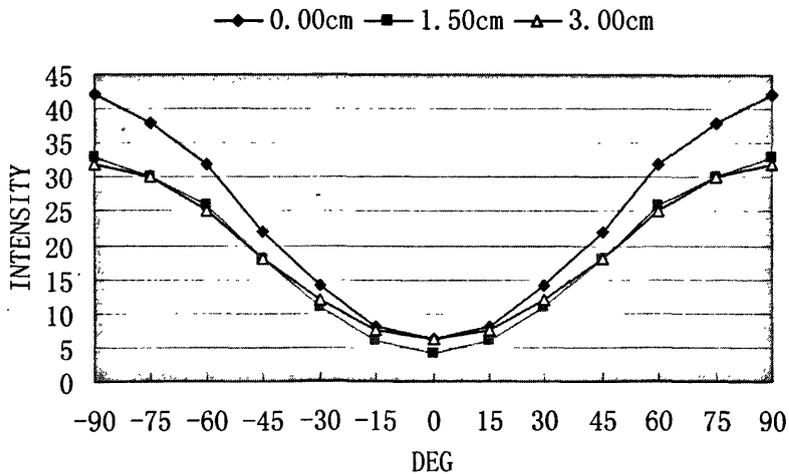


图 4.19 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化  
(粒子直径为  $1.240\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

表 4.22 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角变化的测量值  
(粒子直径为  $1.240 \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为 0.00250%)

测量深度 $D/\text{cm}$ 散射角 $\phi$ (DEG)	0.00	1.50	3.00
-90	24.00	23.50	20.00
-75	22.00	22.00	19.00
-60	17.00	18.50	16.00
-45	11.00	14.00	12.00
-30	7.40	8.70	8.00
-15	4.90	5.60	5.40
0	3.90	4.30	4.80
15	4.90	5.60	5.40
30	7.40	8.70	8.00
45	11.90	14.00	12.00
60	17.00	18.50	16.00
75	22.00	22.00	19.00
90	24.00	23.50	20.00

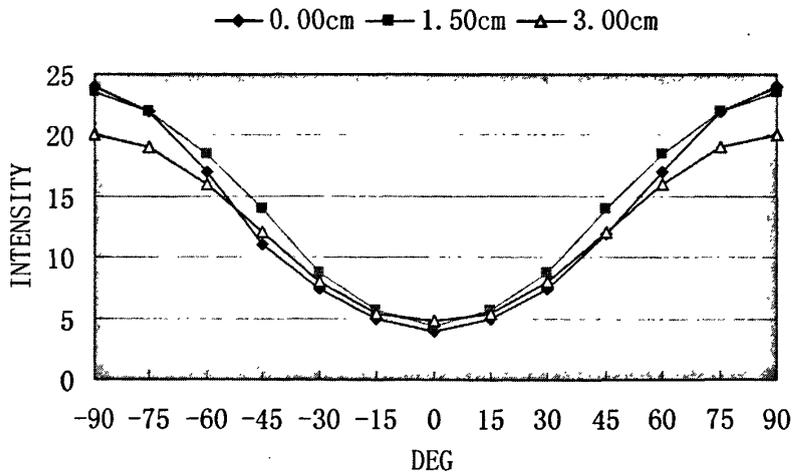


图 4.20 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化  
(粒子直径为  $1.240 \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为 0.00250%)

表 4.23 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角变化的测量值  
(粒子直径为  $0.360\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

测量深度 $D/\text{cm}$ 散射角 $\phi$ (DEG)	0.00	1.50	3.00
-90	140.00	124.00	88.00
-75	128.00	113.00	82.00
-60	107.00	96.00	70.00
-45	76.00	69.00	51.00
-30	47.00	43.00	33.00
-15	22.00	24.00	20.00
0	16.00	18.00	17.00
15	22.00	24.00	20.00
30	47.00	43.00	33.00
45	76.00	69.00	51.00
60	107.00	96.00	70.00
75	128.00	113.00	82.00
90	140.00	124.00	88.00

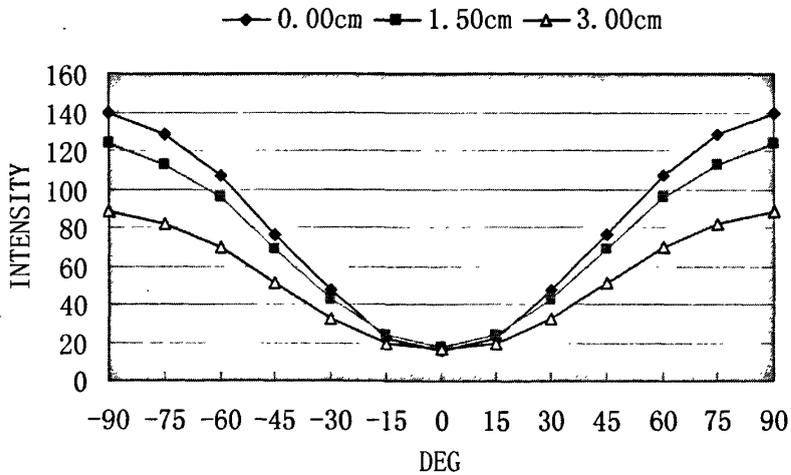


图 4.21 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化  
(粒子直径为  $0.360\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

#### 4.5 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光偏振度性质分析

本节中仍然利用附录中的数据二,即对直径分别为  $0.220\ \mu\text{m}$  和  $0.494\ \mu\text{m}$  的两种粒子所测得的数据,来进行比较研究线性偏振光入射时侧向散射光水平偏振分量偏振度性质的变化规律。

##### 4.5.1 侧向散射光水平偏振分量偏振度随散射场探测深度变化的关系

把附录数据二中对直径  $0.220\ \mu\text{m}$  的粒子构成的散射溶液所测得的侧向散射水平偏振光强相应散射角  $\phi$  的数据继续按照式 3.13 来进行偏振度计算,所得偏振度值列于表 4.24 中。即对直径  $0.220\ \mu\text{m}$  的粒子,浓度  $0.0025\%$  所构成的粒子场,其侧向散射水平偏振光强相对散射角  $\phi$  的值进行退偏振估计。表中八组值,即不同探测深度所得结果。表中数值变化不大,均在  $0.9$  左右。与表 4.11 相比较,可以发现,一个有限的群体微粒子场侧向复合散射光水平偏振分量的偏振度情况和总散射光的散射偏振度的情况非常地接近。

表 4.25 中所测算出的偏振度值仍是采用直径  $0.220\ \mu\text{m}$  的粒子作为散射场介质粒子,但溶液体积百分数增大为  $0.0125\%$ 。把表 4.25 中的数据与表 4.24 相比较,可以看出,当散射粒子直径不变而改变溶液浓度时,其侧向激光散射水平偏振分量的偏振度相对深度的变化出现幅度较大的改变:散射粒子体积百分数增大时,其激光侧向散射水平偏振分量的偏振度相应随着深度改变而出现明显变化;而散射场散射粒子体积百分数减小时,其激光侧向散射水平偏振分量的偏振度随着测量深度的改变却变化平缓,变化幅度很小。通过这个比较证明:群体粒子场激光侧向散射水平偏振分量的退偏振程度随着散射场浓度增加而受场深度参数的影响增强,随着浓度

表 4.24 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.220\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.0025\%$ )

散射角 $\phi$ (DEG)	90	75	60	45	30	15	0
探测深度(cm)							
0.0	0.9273	0.9279	0.9286	0.9310	0.9333	0.9372	—
0.5	0.8930	0.8951	0.8982	0.9103	0.9172	0.9266	—
1.0	0.9029	0.9011	0.9091	0.9138	0.9153	0.9127	—
1.5	0.8992	0.8994	0.9008	0.9161	0.9221	0.9266	—
2.0	0.8834	0.8824	0.8982	0.9103	0.9172	0.9266	—
2.5	0.8930	0.8903	0.8955	0.9103	0.9115	0.9266	—
3.0	0.8604	0.8650	0.8854	0.8920	0.9079	0.9223	—
3.5	0.8673	0.8650	0.8708	0.8962	0.9012	0.9132	—

表 4.25 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.220 \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为 0.01 25%)

散射角 $\phi$ (DEG) \n 探测深度(cm)	90	75	60	45	30	15	0
0.0	0.8274	0.8308	0.8352	0.8523	0.8466	0.8610	—
0.5	0.8000	0.8043	0.8029	0.8043	0.8233	0.8534	—
1.0	0.7506	0.7414	0.7492	0.7636	0.7817	0.8012	—
1.5	0.7706	0.7666	0.7671	0.7895	0.7976	0.8313	—
2.0	0.7392	0.7321	0.7427	0.6997	0.7475	0.7952	—
2.5	0.6820	0.6872	0.6882	0.7167	0.7368	0.7342	—
3.0	0.6599	0.6689	0.6951	0.7135	0.7423	0.7706	—
3.5	0.6101	0.6165	0.6342	0.6743	0.6667	0.7113	—

减小而受场深度参数的影响变弱。另外,从两个表中均可以看出,不管是哪一种场浓度,在同一测量深度时,其偏振度当测量的散射角改变时出现的改变很小。这也同时证明:群体粒子场激光侧向散射水平偏振分量的退偏振受散射场浓度的影响比测量时的散射角的影响要明显大得多。另外,不管是采用哪种浓度,其侧向散射水平偏振分量光强的偏振度均随着测量深度的增加而逐渐地变小,但整体上来讲,相应深度的变化均不大。

#### 4.5.2 侧向散射光水平偏振分量偏振度随散射场体积分数浓度变化的关系

仍然从表 4.24 和表 4.25 来进行分析。在第 4.5.1 节中已经分析发现:群体粒子场激光侧向散射水平偏振光强的退偏振程度随着散射场浓度增加而受场深度参数的影响增强,随着浓度减小而受场深度参数的影响变弱。侧向散射水平偏振光强的退偏振受散射场浓度的影响比测量时的散射角的影响要明显大得多。

另外,对表 4.24 和表 4.25 相比较,并对表 4.26 进行分析研究,可以得出结论:在采用相同的测试粒子在相同的深度进行测量时,线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光强的偏振度相对散射角的测量值将随着介质浓度的增大而减小,随着浓度的减小而增大。而在相同的深度对相同的粒子在相同的体积分数比浓度时所得到的侧向散射水平偏振光强当测量的散射角改变时其偏振度却基本保持很相近的值而变化不大。上述这些规律也与侧向散射总光强的偏振度相对散射角的变化规律相同。这再次证明微粒粒子场侧向复合散射光水平偏振分量的偏振度情况和总散射光的散射偏振度的情况非常地接近。

表 4.26 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.220 \mu\text{m}$ , 测量深度  $0.00\text{cm}$ )

散射角 $\phi$ (DEG) 浓度 C (%)	90	75	60	45	30	15	0
0.0125	0.8274	0.8308	0.8352	0.8523	0.8466	0.8610	—
0.0050	0.8918	0.8882	0.8947	0.9111	0.9161	0.9273	—
0.0025	0.9273	0.9279	0.9286	0.9310	0.9333	0.9372	—

#### 4.5.3 侧向散射光水平偏振分量偏振度随介质粒子大小变化的关系

对直径  $0.494 \mu\text{m}$  的粒子, 浓度  $0.0025\%$  所构成的粒子场, 将其侧向散射光水平偏振分量相对散射角  $\phi$  测得的光强值按照式 3.13 来进行偏振度计算, 所得结果列于表 4.27 中。

从表 4.27 所测算的数据, 可以继续得到 4.5.2 节中所得到的相关结论。本节主要是对粒子直径大小对侧向散射水平偏振光强偏振度的影响来进行分析, 因此把表 4.27 和表 4.24 来进行比较分析研究 (两者具有相同的体积分数比浓度)。

通过对比可以发现: 当散射场粒子直径变大时, 其侧向散射水平偏振光强相对散射角的偏振度都将变小, 退偏振程度明显; 当散射场粒子直径变小时, 其侧向散射水平偏振光强相对散射角的偏振度都将变大, 退偏振程度趋弱<sup>[111]</sup>。同时, 当粒子直径变大时, 其在一深度时相对不同散射角所呈现的偏振度和直径较小粒子相比变化较明显; 而在同一散射角处在不同测量深度的偏振度和直径较小粒子相比也变化明显。实验和研究结果说明: 线性偏振光入射时侧向散射光水平偏振分量的偏振度受散射场介质粒子大小变化的影响明显, 介质粒子大小是影响总侧向散射光退偏振度情况的一个重要的物理参数。这些规律也与侧向散射总光强的偏振度相对散射角的变化规律相同。这又一次证明微粒子场侧向复合散射光水平偏振分量的偏振度情况和总散射光的散射偏振度的情况非常地接近。

4.5 节的研究表明, 粒子场侧向复合散射光水平偏振分量的偏振度受各种参数的影响情况和总散射光的散射偏振度的情况非常地接近。这些特点说明, 总散射光的退偏振情况受水平偏振分量的影响很小。

表 4.27 线性偏振光入射时侧向散射水平偏振光偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.494 \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.0025\%$ )

探测深度(cm) \ 散射角 $\phi$ (DEG)	90	75	60	45	30	15	0
0.0	0.7392	0.7524	0.7585	0.8092	0.8322	0.8988	—
0.5	0.6970	0.7114	0.7369	0.7727	0.7934	0.8269	—
1.0	0.6774	0.6924	0.7170	0.7500	0.7573	0.7952	—
1.5	0.6865	0.6819	0.7070	0.7403	0.7596	0.8374	—
2.0	0.6865	0.6819	0.7070	0.7290	0.7449	0.7887	—
2.5	0.6454	0.6611	0.6869	0.7199	0.7354	0.7443	—
3.0	0.6248	0.6409	0.6667	0.6904	0.7059	0.7491	—
3.5	0.6248	0.6409	0.6403	0.6667	0.7059	0.7342	—

#### 4.6 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强度性质分析

##### 4.6.1 侧向散射垂直偏振光强度随粒子直径变化的关系

群体粒子场侧向散射光中的垂直偏振成分的光强是接收窗前加偏振片并且令偏振片透光轴垂直于散射场溶液液面（即与图 4.1 中的  $xy$  平面垂直而与散射场对称轴和入射激光方向平行）时在与散射场液面平行的平面内所测量到的光强值。表 4.28 列出了五种直径的粒子在探测深度为  $0.00\text{cm}$ ，粒子体积分数浓度均为  $0.00500\%$  时五种溶液侧向散射光垂直偏振分量的光强相对散射角（在与入射光垂直的散射场液面内的探测器测量时的观察角）的值。从表中的数据可以看出它们的区别和特点，而图 4.22 则把这些数据的变化更加形象化地表示了出来，在同一坐标系中可以明显地看出来粒子直径对侧向散射光中垂直偏振分量光强的影响。由表 4.28 和图 4.22 可以直接地得到这样的结论：当线性偏振激光入射到群粒子散射介质场时，其侧向散射光强中的垂直偏振分量相对入射光偏振方向成对称分布，但与总散射光及水平偏振分量不同的是，总散射光及水平偏振分量光强最大值所对应的散射角刚好是垂直偏振分量光强的最小值处；在相同的粒子体积分数浓度和相同的探测深度下，散射场侧向散射垂直偏振分量光强相对散射角的变化也与总散射光及水平偏振分量光强所表现出来的不同：除了最大直径和最小直径的粒子外，总散射光及水平偏振分量光强所表现出

表 4.28 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

粒子直径 散射角 $\phi$ (DEG)	$D/\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
-90		5.50	19.70	14.00	4.40	17.00
-75		6.70	24.30	17.00	4.40	18.00
-60		9.70	32.60	23.00	4.50	19.00
-45		14.00	43.60	31.00	4.60	19.00
-30		18.00	55.60	40.00	4.70	20.00
-15		21.00	64.60	45.00	4.80	20.00
0		22.00	68.20	47.00	4.80	21.00
15		21.00	64.60	45.00	4.80	20.00
30		18.00	55.60	40.00	4.70	20.00
45		14.00	43.60	31.00	4.60	19.00
60		9.70	32.60	23.00	4.50	19.00
75		6.70	24.30	17.00	4.40	18.00
90		5.50	19.70	14.00	4.40	17.00

—◆— 1.240  $\mu\text{m}$  —■— 0.494  $\mu\text{m}$  —▲— 0.360  $\mu\text{m}$   
 —×— 0.123  $\mu\text{m}$  —\*— 0.065  $\mu\text{m}$

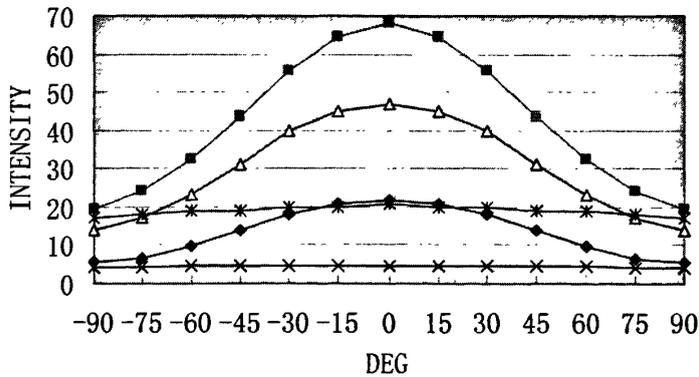


图 4.22 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

表 4.29 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=3.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

粒子直径 散射角 $\phi$ (DEG)	$D/\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
-90		6.20	17.00	14.00	4.60	1.40
-75		7.10	19.00	16.00	5.00	1.50
-60		9.50	23.00	19.00	5.00	1.60
-45		13.00	29.00	24.00	5.00	1.60
-30		17.00	36.00	30.00	5.10	1.60
-15		19.00	40.00	34.00	5.20	1.70
0		20.00	42.00	35.00	5.20	1.70
15		19.00	40.00	34.00	5.20	1.70
30		17.00	36.00	30.00	5.10	1.60
45		13.00	29.00	24.00	5.00	1.60
60		9.50	23.00	19.00	5.00	1.60
75		7.10	19.00	16.00	5.00	1.50
90		6.20	17.00	14.00	4.60	1.40

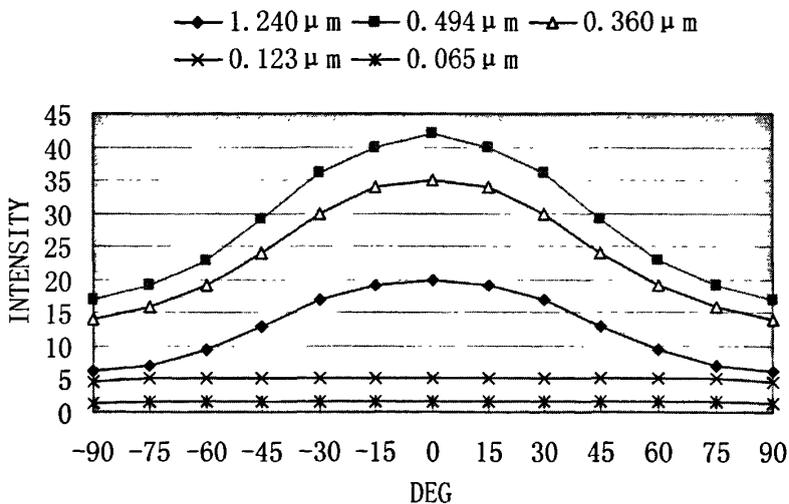


图 4.23 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=3.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

表 4.30 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为 0.00250%)

粒子直径 散射角 $\phi$ (DEG)	$D/\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
-90		3.20	7.00	6.00	3.70	0.92
-75		3.70	10.00	7.20	3.80	0.93
-60		5.30	14.00	10.30	4.20	0.94
-45		7.20	22.00	15.00	4.70	0.96
-30		9.20	28.00	20.00	4.90	1.00
-15		10.50	32.00	23.00	4.90	1.00
0		11.00	32.00	24.00	4.90	1.00
15		10.50	32.00	23.00	4.90	1.00
30		9.20	28.00	20.00	4.90	1.00
45		7.20	22.00	15.00	4.70	0.96
60		5.30	14.00	10.30	4.20	0.94
75		3.70	10.00	7.20	3.80	0.93
90		3.20	7.00	6.00	3.70	0.92

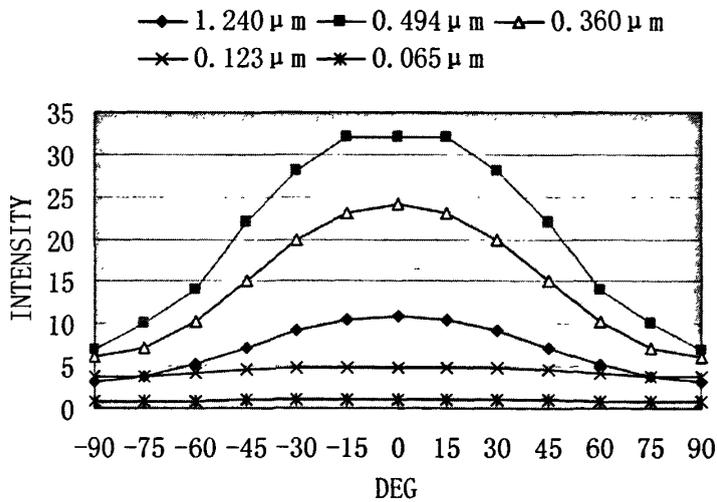


图 4.24 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为 0.00250%)

来的规律是光强变化程度随粒子直径的减小而变得更加明显且其光强值随粒子直径的减小而变大（参见图 4.4 和图 4.12），垂直偏振分量光强所表现出来的规律是光强变化程度随粒子直径的减小而变得更加平缓且其光强值随粒子直径的减小而减小；垂直偏振分量的这个规律特点与侧向散射光总光强的变化规律刚好相反，这说明散射光中的垂直偏振分量对总侧向散射光光强的规律性质的影响起着关键的重要作用。

表 4.29 与图 4.23 为粒子体积分数比为 0.005% 而探测深度为 3.00cm 的情况下五种粒子其侧向垂直散射光强相对散射角的变化情况。表 4.30 与图 4.24 为保持探测深度为 0.00cm 而粒子体积分数比改换为 0.00250% 的情况下五种粒子其侧向垂直散射光强相对散射角的变化情况。由后面的这些表和图可以明显地看出，即使改换探测深度或者改换粒子体积分数比浓度，当线性偏振激光入射到群体粒子散射场时，其侧向垂直散射光强依然总是相对入射光偏振方向成对称分布；不同直径的粒子其散射场侧向垂直散射光强相对散射角的变化受粒子直径变化影响明显，其变化程度也始终呈现出这样的规律：除了最大直径的粒子（直径  $1.240\ \mu\text{m}$  的粒子）外，侧向散射光强垂直偏振分量相对散射角的变化程度随粒子直径的减小（从  $0.494\ \mu\text{m}$  到  $0.065\ \mu\text{m}$ ）而变得更加平缓且其光强值随粒子直径的减小而减小；总散射光及水平偏振分量光强最大值所对应的散射角刚好是垂直偏振分量光强的最小值处。

#### 4.6.2 侧向散射垂直偏振光强度随散射场粒子浓度变化的关系

本节对同种直径的粒子在构成不同体积分数比的散射介质场时其侧向散射垂直偏振分量光强相对散射角的变化情况进行研究。类似于上节，把相关的数据在表格中列出并在坐标图中画图表示，就可以很直观地看出一些规律特点。

从表 4.31 和图 4.25 可以很直观地看出，在线性偏振激光入射到群粒子散射介质场时，其侧向散射垂直光强依然呈现相对入射光偏振方向成对称分布的规律；当粒子体积分数比浓度改变时，其散射场侧向散射垂直偏振光强相对散射角所测得的量值会随着浓度的降低而减小，但其变化规律基本不变，也即是说，群粒子场目标光学侧向散射垂直偏振光强相对散射角的变化规律受粒子浓度的影响很小，不像受粒子直径变化影响那么明显；当粒子浓度改变时，侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化规律基本不受影响，保持不变。改变探测深度，或者换用其它直径的粒子进行实验，依然可以得到相同的结论：粒子浓度对侧向散射垂直偏振光强相对散射角变化规律的影响都是很微弱的：当粒子体积分数比浓度改变时，其散射场侧向散射垂直偏振光强相对散射角所测得的量值会随着浓度的降低而减小，但其变化规律和变化趋势基本不变。群体粒子场侧向散射光强垂直偏振分量随粒子体积分数比浓度变化所表现出来的以上的这些规律，与侧向散射总光强及水平偏振分量光强的规律非常相似（参见 4.2.2 节与 4.4.2 节），但与侧向散射总光强及水平偏振分量光强

表 4.31 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角变化的测量值  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $0.360\ \mu\text{m}$ )

散射角 $\phi$ (DEG)	粒子浓度 C	
	0.00500%	0.00250%
-90	14.00	6.00
-75	17.00	7.20
-60	23.00	10.30
-45	31.00	15.00
-30	40.00	20.00
-15	45.00	23.00
0	47.00	24.00
15	45.00	23.00
30	40.00	20.00
45	31.00	15.00
60	23.00	10.30
75	17.00	7.20
90	14.00	6.00

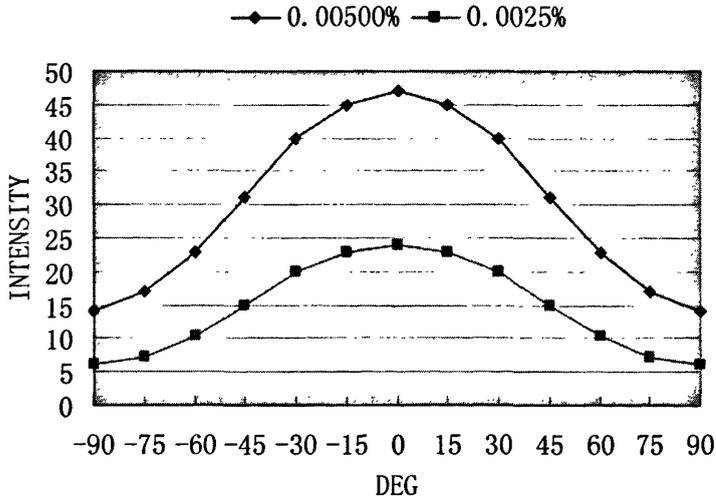


图 4.25 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场粒子直径为  $0.360\ \mu\text{m}$ )

显著不同的一点就是，总散射光及水平偏振分量光强最小值所对应的散射角依然刚好是垂直偏振分量光强的最大值处，总散射光及水平偏振分量光强最大值所对应的散射角刚好是垂直偏振分量光强的最小值处。

### 4.6.3 侧向散射垂直偏振光强度随散射场探测深度变化的关系

本节中继续用图表工具来研究侧向散射垂直偏振光强度随散射场探测深度变化的关系。从根据表 4.32 画出的图 4.26 中可以直观地看出这些规律来。

由图 4.32 可以看出,对于同一种粒子在同种浓度下,其侧向散射垂直偏振光强相应散射角的变化是相对线性偏振入射光的偏振方向成对称分布的,且随着探测深度增加而趋于平缓,在同一散射角处其量值随深度增加而变化趋小(光强曲线接近重合)。其总体规律相对深度的变化不大,并且在同一散射角处在不同深处测得的值非常接近,这说明垂直偏振分量散射光强受测量深度的影响很小。另外,与总侧向散射光强(图 4.11)和水平偏振分量侧向散射光强(图 4.21)所表现出来的规律刚好相反的是,总散射光及水平偏振分量光强最小值所对应的散射角依然刚好是垂直偏振分量光强的最大值处,总散射光及水平偏振分量光强最大值所对应的散射角刚好是垂直偏振分量光强的最小值处。改变散射场浓度,或者换用其它直径的粒子进行实验,依然可以得到相同的结论。

表 4.32 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角变化的测量值  
(粒子直径为  $0.360\mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

测量深度 $D/\text{cm}$ 散射角 $\phi$ (DEG)	0.00	1.50	3.00
-90	14.00	15.00	14.00
-75	17.00	18.00	16.00
-60	23.00	23.00	19.00
-45	31.00	31.00	24.00
-30	40.00	40.00	30.00
-15	45.00	43.00	34.00
0	47.00	45.00	35.00
15	45.00	43.00	34.00
30	40.00	40.00	30.00
45	31.00	31.00	24.00
60	23.00	23.00	19.00
75	17.00	18.00	16.00
90	14.00	15.00	14.00

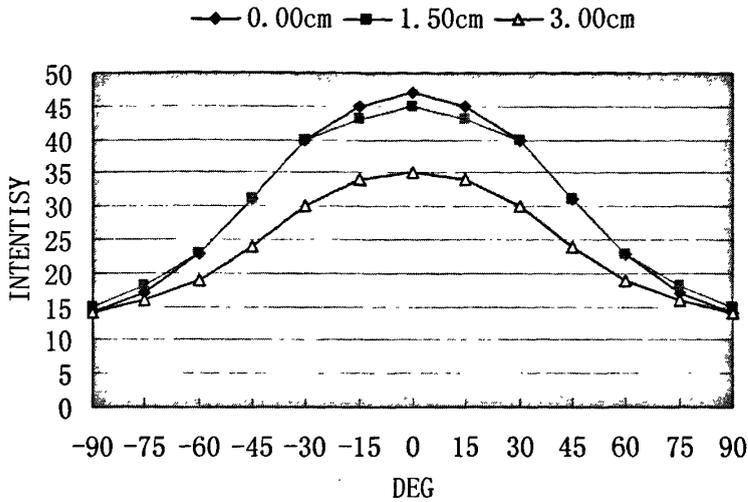


图 4.26 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角的变化  
(粒子直径为  $0.360\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.005000\%$ )

#### 4.7 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光偏振度性质分析

本节中仍然利用附录中的数据二, 即对直径分别为  $0.220\ \mu\text{m}$  和  $0.494\ \mu\text{m}$  的两种粒子所测得的数据, 来进行比较研究线性偏振光入射时侧向散射光垂直偏振分量偏振度性质的变化规律。

##### 4.7.1 侧向散射光垂直偏振分量偏振度随散射场探测深度变化的关系

把附录数据二中对直径  $0.220\ \mu\text{m}$  的粒子构成的散射溶液所测得的侧向散射垂直偏振光强相应散射角  $\phi$  的数据继续按照式 3.13 来进行偏振度计算, 所得偏振度值列于表 4.33 中。即对直径  $0.220\ \mu\text{m}$  的粒子, 浓度  $0.0025\%$  所构成的粒子场, 其侧向散射垂直偏振光强相对散射角  $\phi$  的值进行退偏振估计。表中八组值, 即不同探测深度所得结果。从列表中可明显看出, 不论是在同一深度相对不同散射角度的偏振度值, 还是在同一散射角处在散射场不同深度处测得的偏振度值, 与总散射光 (表 4.11) 或水平偏振散射光 (表 4.24) 相比, 其变化都很剧烈。另外, 与总散射光 (表 4.11) 或水平偏振散射光 (表 4.24) 相比, 侧向散射光垂直偏振分量的偏振度还具有下述规律: 在同一散射角处, 在深处为  $2.0\text{cm}$  左右时偏振度出现峰值, 再浅或再深处其值都会变小, 退偏振现象会更加明显; 在同一测量深度处, 在散射角从  $90^\circ - 0^\circ$  的变化过程中, 偏振度值均逐渐增大, 且变化幅值明显, 也即是说, 群体粒子场目标光学侧向散射垂直偏振分量的退偏振与散射角关系密切, 在不同散射角处退偏振情况与总侧向散射光和水平偏振分量散射光相比变化较大。这一点从单个粒子散射理论分析中是不能得到的, 这说明垂直偏振分量是影响侧向散射光性质的重要因素, 体现了复合散射的特点。改变散射场浓度, 或者换用其它直径的粒子进行实验, 依然可以得到相同的结论。

表 4.33 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光偏振度相对散射角的测量值.  
(粒子直径  $0.220 \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.0025\%$ )

散射角 $\phi$ (DEG) \n 探测深度(cm)	90	75	60	45	30	15	0
0.0	—	0.0362	0.0798	0.1667	0.3506	0.7113	1
0.5	—	0.0261	0.0683	0.1379	0.2958	0.7342	1
1.0	—	0.0968	0.1525	0.2481	0.4444	0.7782	1
1.5	—	0.1264	0.1803	0.2857	0.5146	0.8566	1
2.0	—	0.1264	0.2105	0.3197	0.5455	0.8566	1
2.5	—	0.0261	0.0683	0.1379	0.2958	0.7342	1
3.0	—	0.0261	0.0683	0.1379	0.3902	0.7342	1
3.5	—	0.0261	0.0683	0.1379	0.3421	0.7342	1

#### 4.7.2 侧向散射光垂直偏振分量偏振度随散射场体积分数浓度变化的关系

在表 4.34 中列出了直径  $0.220 \mu\text{m}$  的粒子在测量深度为  $0.00\text{cm}$  时在三种不同体积分数比浓度的散射场中测得的侧向散射垂直偏振分量偏振度值。对表中数据进行分析研究, 可以得出结论: 在采用相同的测试粒子在相同的深度进行测量时, 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强的偏振度相对散射角的测量值将随着介质浓度的增大而减小, 随着浓度的减小而增大, 这一点与侧向散射总光强和水平偏振分量光强的偏振度变化规律相同。而在相同的深度对相同的粒子在相同的体积分数比浓度时所得到的侧向散射垂直偏振光强当测量的散射角改变时其偏振度的变化却比总散射光强和水平偏振分量光强的偏振度剧烈得多。这也是由单个粒子散射理论分析中不能得到的能够体现复合散射性质的特点。

表 4.35 是改用直径  $0.494 \mu\text{m}$  的粒子在测量深度为  $0.00\text{cm}$  时在三种不同体积分数比浓度的散射场中测得的侧向散射垂直偏振分量偏振度值。对表中数据进行分析研究, 同样可以得出上述结论。

表 4.34 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.220 \mu\text{m}$ , 测量深度  $0.00\text{cm}$ )

散射角 $\phi$ (DEG) \n 浓度 C (%)	90	75	60	45	30	15	0
0.0125	—	0.0158	0.0384	0.0825	0.2187	0.5630	1
0.0050	—	0.0158	0.0322	0.1379	0.3055	0.6417	1
0.0025	—	0.0362	0.0798	0.1667	0.3506	0.7113	1

表 4.35 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.494 \mu\text{m}$ , 测量深度  $0.00\text{cm}$ )

散射角 $\phi$ (DEG) \n 浓度 C (%)	90	75	60	45	30	15	0
0.0125	—	0.0460	0.1620	0.3242	0.6527	0.8956	1
0.0050	—	0.1011	0.2610	0.4871	0.7433	0.9303	1
0.0025	—	0.0604	0.2147	0.4845	0.7537	0.9389	1

#### 4.7.3 侧向散射光垂直偏振分量偏振度随介质粒子大小变化的关系

对直径  $0.494 \mu\text{m}$  的粒子, 浓度  $0.0025\%$  所构成的粒子场, 将其侧向散射光垂直偏振分量相对散射角  $\phi$  测得的光强值按照式 3.13 来进行偏振度计算, 所得结果列于表 4.36 中。

从表 4.36 所测算的数据, 可以继续得到 4.7.1 节中所得到的大部分相关结论同, 但有一点不同的是, 直径  $0.494 \mu\text{m}$  的粒子所构成的粒子场在同一散射角处, 是在深处为  $0.0\text{cm}$  处 (即散射场液面) 时偏振度出现峰值, 再往深处其值会变小, 退偏振现象会更加明显。本节主要是对粒子直径大小对侧向散射水平偏振光强偏振度的影响来进行分析, 因此把表 4.36 和表 4.33 来进行比较分析研究 (两者具有相同的体积分数比浓度)。

通过对比可以发现: 当散射场粒子直径变大时, 其侧向散射垂直偏振光强相对散射角的偏振度都将变大, 退偏振程度趋弱; 当散射场粒子直径变小时, 其侧向散射垂直偏振光强相对散射角的偏振度都将变小, 退偏振程度愈为明显<sup>[111]</sup>, 这一点与总散射光强和水平偏振光的偏振度恰好相反。另外, 无论直径大或小的粒子, 其同一深度时相对不同散射角所呈现的偏振度和水平偏振光的偏振度相比变化均较明显。实验和研究结果说明: 线性偏振光入射时侧向散射光垂直偏振分量的偏振度受散射场介质粒子大小变化的影响明显, 介质粒子大小是影响总侧向散射光退偏振度情况的一个重要的物理参数。这些规律也与侧向散射总光强及水平偏振分量光强的偏振度相对散射角的变化规律相同。

表 4.36 线性偏振光入射时侧向散射垂直偏振光偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.494 \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为 0.00 25%)

探测深度(cm) \ 散射角 $\phi$ (DEG)	90	75	60	45	30	15	0
0.0	—	0.0604	0.2147	0.4845	0.7537	0.9389	1
0.5	—	0.0557	0.1758	0.4048	0.7159	0.9321	1
1.0	—	0.0557	0.1979	0.4253	0.7396	0.9338	1
1.5	—	0.0261	0.1803	0.4318	0.7409	0.9328	1
2.0	—	0.0509	0.2021	0.4152	0.7268	0.9311	1
2.5	—	0.0210	0.1667	0.3939	0.7006	0.9232	1
3.0	—	0.0210	0.1477	0.3789	0.6855	0.9190	1
3.5	—	0.0210	0.1429	0.3671	0.6753	0.9138	1

4.7 节的研究表明, 粒子场侧向复合散射光垂直偏振分量的偏振度受各种参数的影响情况和总散射光的散射偏振度的情况有很多不同。这些特点说明, 总散射光的退偏振情况受垂直偏振分量的影响与水平偏振分量相比要大得多。

#### 4.8 本章小结

本章对线性偏振光入射到群体粒子场时目标光学散射场的侧向散射光的总散射光、水平偏振分量、垂直偏振分量三种散射光的光强及退偏振情况进行了研究, 可以得到以下结论:

(1) 群体粒子场目标光学侧向散射的总光强、水平偏振分量光强、垂直偏振分量光强在与入射光垂直的平面内关于入射光偏振方向均呈对称分布;

(2) 侧向散射光中水平偏振分量和垂直偏振分量相对散射角  $\phi$  值有着完全不同的变化规律: 水平偏振分量的最大值和最小值的位置恰好对应垂直偏振分量的最小值和最大值, 其对称面相互垂直;

(3) 水平偏振分量和垂直偏振分量的光强值与粒子直径呈完全相反的关系: 直径小的粒子所对应的水平偏振光强值大于直径大的粒子, 而直径小的粒子所对应的垂直偏振光强值却相反小于直径大的粒子;

(4) 水平偏振分量和垂直偏振分量的偏振度的变化与粒子直径也呈完全相反的关系: 水平偏振分量的偏振度随粒子直径减小而增大, 垂直偏振分量的偏振度随粒子直径的减小而降低;

(5) 上述规律在所取不同浓度的粒子场侧向散射光中均相同。

## 5 圆偏振光入射群粒子场散射性质研究

### 5.1 实验条件

本章中研究内容所需实验装置和实验原理、实验步骤仍如第三章中所述。在实验装置中入射激光采用波长  $\lambda$  为  $0.6328 \mu\text{m}$  的 He-Ne 圆偏振激光束入射（在激光器激光出射端口放置一圆偏振镜片以获得圆偏振入射光。圆偏振镜是由一块普通线性偏振镜，再加上一块  $1/4$  波长的波片组成的起偏振片）。由于实验中在与入射光垂直的平面内对散射光强的测量值是时间平均量，入射圆偏振光的左旋或右旋方向对测量结果没有影响，因此实验中入射光不区分左旋或右旋。实验所用粒子直径分别为  $0.065 \mu\text{m}$ ,  $0.123 \mu\text{m}$ ,  $0.360 \mu\text{m}$ ,  $0.494 \mu\text{m}$ ,  $1.240 \mu\text{m}$ 。取散射场液面为探测器探测深度为  $0.0\text{cm}$  点，探测深度向下依次加深。在容器的水平周边与液面平行的平面内以任一方向（图 5.1 中选取  $x$  轴方向）为基准点定义为  $\phi=0^\circ$  点来放置光纤接收窗并每隔  $5^\circ$  取  $\phi$  值进行散射光接收测量<sup>[14]</sup>。在此条件下对获得的实验数据进行分析研究（具体实验数据详见附录 A，实验数据中光强值  $I$  为当量值）。

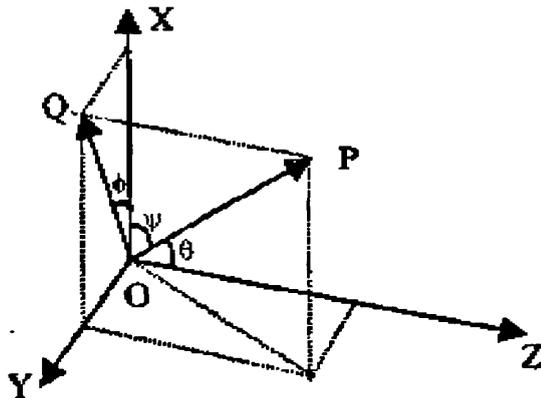


图 5.1 经典散射几何关系

### 5.2 圆偏振光入射时总侧向散射光强度性质研究

由附录 A 中所测量到的圆偏振光入射时各种直径的粒子所构成的散射场的总散射光强值可以看出，不论是改变粒子直径，或者是改变粒子场体积分数比浓度，亦或改变粒子场散射光强测量深度，所测量到的总侧向散射光强相对散射角的变化均起伏不大。图 5.2 中画出了几种粒子所构成的散射场体积分数比为  $0.00500\%$  时在深度为  $0.00\text{cm}$  处侧向散射总光强随散射角度的变化情况。从图中可以看出，当圆偏振光入射到群体粒子散射场时，无论取哪种直径的粒子来进行实验，其侧向散射总光强相对散射角的变化和线性偏振光入射时（图 4.2）相比均较为平缓。即使是

图 5.2 中变化最为明显的直径  $0.123 \mu\text{m}$  的粒子所构成的粒子散射场, 其与线性偏振光入射时相对散射角的变化相比较 (图 5.3 所示), 也要平缓得多。

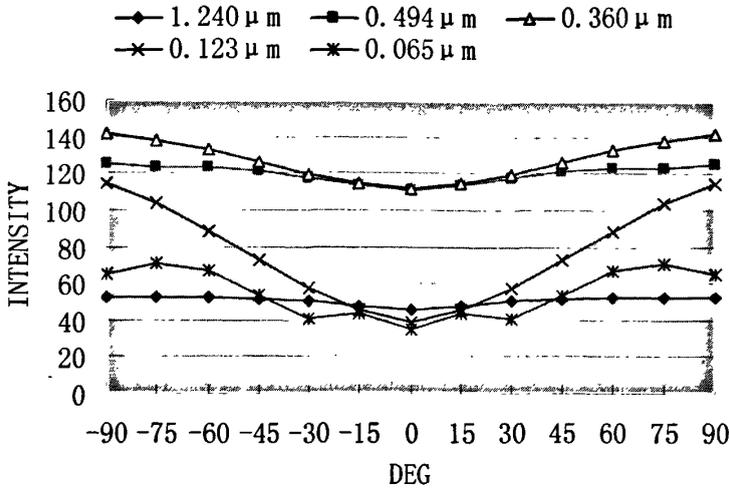


图 5.2 圆偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化 (测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

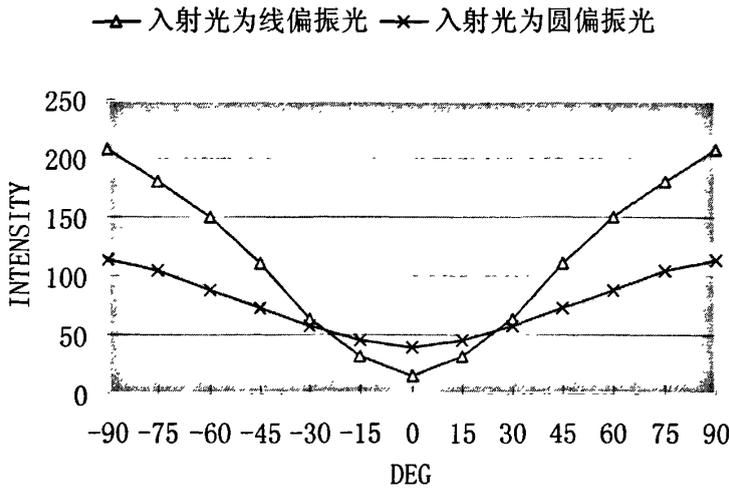


图 5.3 不同偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化比较 (粒子直径  $0.123 \mu\text{m}$ , 测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

但是, 虽然与线性偏振光入射时相比其侧向散射光随散射角的变化比较平缓, 但其仍具有一定的起伏度, 这与理论预测是不相符的。根据圆偏振光的散射理论, 绝对的圆偏振光入射时, 其在各个方向的散射光都应是完全一致相同的<sup>[115]</sup>, 而本实验研

究的结果是散射光出现了起伏,这充分说明入射光并不是完全圆偏振的,其中含有一定的线偏振光成份。这是与实际相符的,因为绝对的完全偏振光是不可能绝对实现的,包括线性偏振光也是如此。

另外,从图 5.2 中可以看出,圆偏振光入射到群体粒子散射场时,其侧向散射总光强呈现相对散射角对称分布的规律。光电探测器环绕散射场中轴线一周(360°)所测得的结果均是如此。同时,随着粒子直径的变小,在相同的粒子体积分数浓度和相同的探测深度下,散射场侧向散射总光强相对散射角的变化程度随粒子直径的减小(从 1.240 μm 到 0.123 μm)而变得更加明显;而当粒子直径进一步减小时(从 0.123 μm 到 0.065 μm),则此变化又趋于平缓。这一点与水平偏振光入射到散射场时所表现出的相同,这说明粒子直径在 0.123 μm 左右时是影响散射光分布规律的一个关键直径尺寸。

图 5.4 是对直径 0.360 μm 的粒子所构成的散射场在圆偏振光入射时其在不同深度处侧向散射总光强相对散射角的测量值画出的变化图。由图中依然可以看出,其侧向散射光随散射角的变化比较平缓,并呈现相对散射角对称分布的规律。另外,随着测量深度的增加,其在一同散射角处的光强值也随之减小。

图 5.5 是对直径 0.360 μm 的粒子所构成的两种不同体积分数比浓度的散射场在圆偏振光入射时其在深度为 0.00cm 处侧向散射总光强相对散射角的测量值画出的变化图。由图中依然可以看出,其侧向散射光随散射角的变化即使浓度不同也都比较平缓,并呈现相对散射角对称分布的规律。另外,随着粒子浓度的减小,其在一同散射角处的光强值也随之减小。

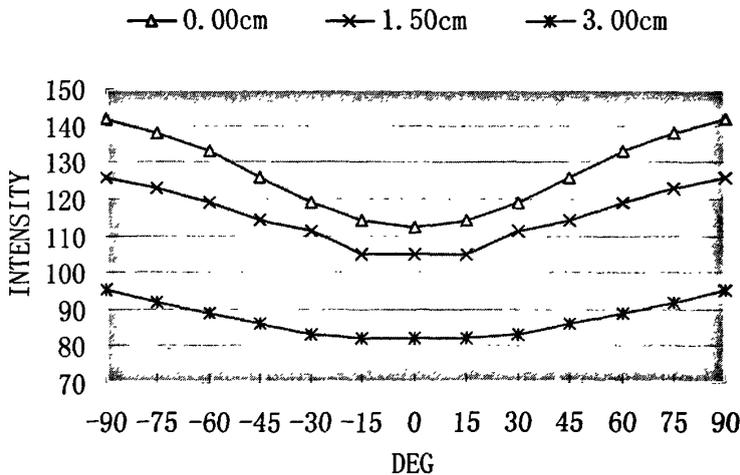


图 5.4 圆偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化 (粒子直径 0.360 μm, 散射场体积分数比为 0.00500%)

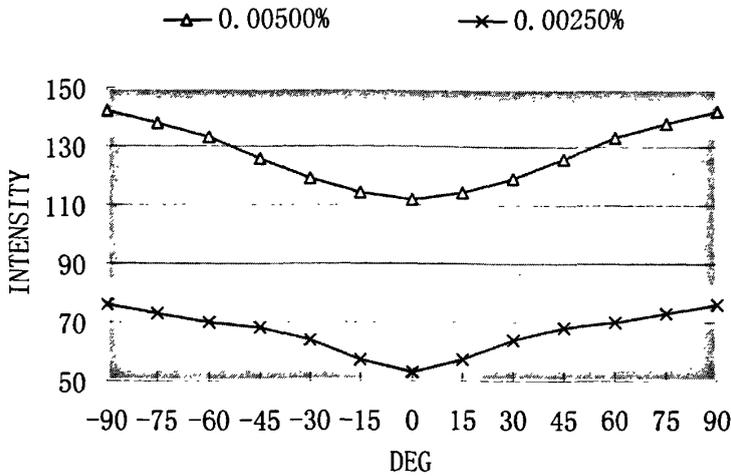


图 5.5 圆偏振光入射时侧向散射总光强相对散射角的变化  
(粒子直径  $0.360 \mu\text{m}$ , 测量深度  $D=0.00\text{cm}$ )

### 5.3 圆偏振光入射时总侧向散射光偏振度性质研究

把附录数据一中对直径  $0.360 \mu\text{m}$  的粒子散射溶液所测得的圆偏振光入射时侧向总散射光强相应散射角  $\phi$  的数据按照式 3.13 来进行偏振度计算, 所得偏振度值列于表 5.1 中。即对直径  $0.360 \mu\text{m}$  的粒子, 浓度 0.0025% 所构成的粒子场, 其侧向散射总光强相对  $\phi$  值的退偏振估计。表中三组值, 即不同探测深度所得结果。表中数值在深度为  $0.0\text{cm}$  时最大, 当深度增大时其值变小。而且除了在深度为  $0.0\text{cm}$  处的偏振度值相应散射角有一定变化外, 在散射场内部不同深度处的偏振度值均在 0.1000 左右, 变化不大。另外, 从所有表中数据看, 偏振度值均在 0.4 以下, 这说明, 圆偏振光入射到一个有限的群体微粒子场时其侧向复合散射总光强的退偏振情况比线性偏振光入射时的情况要明显大得多 (参见表 4.11)。

表 5.1 圆偏振光入射时侧向散射总光强偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.360 \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为 0.0025%)

散射角 $\phi$ (DEG)	90	75	60	45	30	15	0
探测深度(cm)							
0.0	0.1770	0.1692	0.1758	0.2188	0.2958	0.3739	—
1.5	0.1266	0.1140	0.1124	0.0909	0.1379	0.1830	—
3.0	0.1266	0.1182	0.1177	0.1379	0.2063	0.1299	—

表 5.2 中所测算出的偏振度值仍是采用直径  $0.360\ \mu\text{m}$  的粒子作为散射场介质粒子, 但取两种溶液体积百分数浓度来进行比较 (浓度分别为 0.0025% 和 0.0050%, 测量深度为 0.0cm)。由表 5.2 中的数据可以看出, 当散射场粒子直径不变而改变溶液浓度时, 其侧向激光散射总光强的偏振度会随着散射场散射粒子体积百分数增大而减小, 退偏振更加明显; 随着散射场散射粒子体积百分数减小而增大, 退偏振趋弱。但从整体上来看, 圆偏振光入射时侧向激光散射总光强的偏振度相应散射场散射粒子体积百分数改变时有一定变化但并不大, 也即是说, 其退偏振情况受散射场散射粒子体积百分数的影响不大。

表 5.2 圆偏振光入射时侧向散射总光强偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.360\ \mu\text{m}$ , 测量深度 0.0cm)

散射角 $\phi$ (DEG) \n 粒子浓度 C(%)	90	75	60	45	30	15	0
0.0025	0.1770	0.1692	0.1758	0.2188	0.2958	0.3739	—
0.0050	0.1189	0.1097	0.1124	0.1150	0.1071	0.1299	—

表 5.3 圆偏振光入射时侧向散射总光强偏振度相对散射角的测量值  
(散射场体积分数比为 0.0025% 粒子, 测量深度 0.0cm)

散射角 $\phi$ (DEG) \n 粒子直径 ( $\mu\text{m}$ )	90	75	60	45	30	15	0
0.360	0.1770	0.1692	0.1758	0.2188	0.2958	0.3739	—
0.494	0.1561	0.1579	0.1667	0.1936	0.2537	0.3432	—

表 5.3 是对两种直径的粒子在相同浓度和测量深度时的侧向散射总光强的偏振度进行比较。由表 5.3 可以看出, 当散射场粒子直径改变时, 其侧向激光散射总光强的偏振度会随随之出现很小的变化, 粒子直径变大时偏振度会变小, 粒子直径变小时偏振度会变大, 但从整体上来看, 与表 5.2 相比较, 其退偏振情况受散射场散射粒子直径的影响比受粒子体积百分数的影响更加微弱。

#### 5.4 圆偏振光入射时侧向散射水平偏振光强度性质分析

群体粒子场侧向散射光中的水平偏振成分的光强是接收窗前加偏振片并且令偏振片透光轴平行于散射场溶液液面 (即与图 5.1 中的  $xy$  平面平行) 时在与散射场液面平行的平面内所测量到的光强值。通过 4.4.1 节的研究已经知道, 线性偏振光入射到群粒子散射场时, 其侧向散射水平偏振分量光强与粒子直径大小有密切关系。图

5.6 绘出了圆偏振光入射到五种直径的粒子构成的不同的群体粒子场时侧向散射水平偏振分量光强在深度为 0.0cm, 浓度为 0.00500% 时相对散射角的变化情况。与图 4.12 相比较可以直观地得到同样的结论: 当圆偏振激光入射到群粒子散射介质场时, 其侧向散射光强中的水平偏振分量相对散射角依然成对称分布; 在相同的粒子体积分数浓度和相同的探测深度下, 散射场侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化程度随粒子直径的减小 (从  $1.240\ \mu\text{m}$  到  $0.123\ \mu\text{m}$ ) 而变得更加明显; 而当粒子直径进一步减小时 (从  $0.123\ \mu\text{m}$  改换为  $0.065\ \mu\text{m}$  的粒子), 则此变化又趋于平缓。这个规律特点与线性偏振光入射时侧向散射光水平偏振光强的变化规律一样, 但两者显著不同的是, 圆偏振激光入射时侧向散射光水平偏振光强的变化显然要比线性偏振光入射时平缓得多。

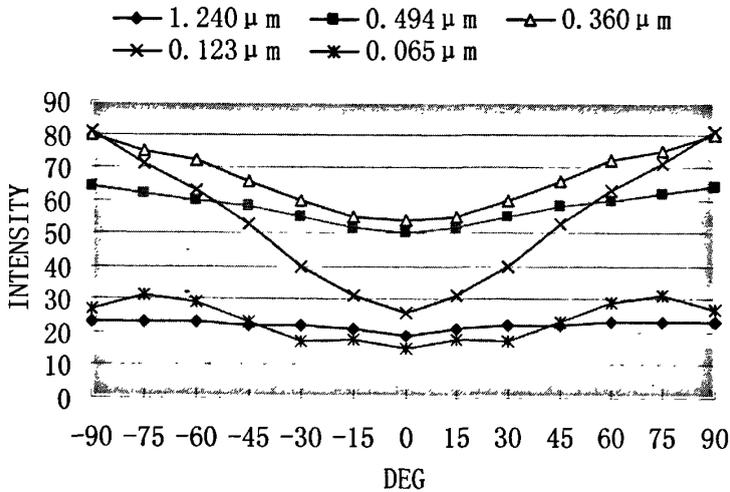


图 5.6 圆偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为 0.00500%)

图 5.7 是对直径  $0.360\ \mu\text{m}$  的粒子所构成的散射场在圆偏振光入射时其在不同深度处侧向散射水平偏振光强相对散射角的测量值画出的变化图。由图中依然可以看出, 其侧向散射光随散射角的变化比较平缓, 并呈现相对散射角对称分布的规律。另外, 随着测量深度的增加, 其在一同散射角处的光强值也随之减小。这一点与总侧向散射光强相同。

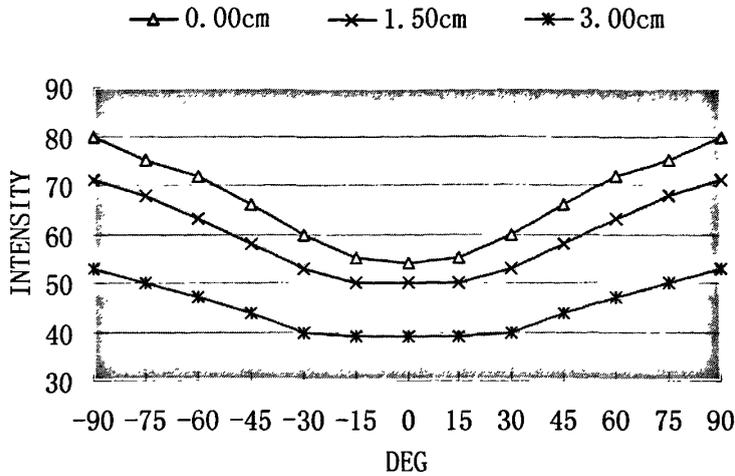


图 5.7 圆偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化 (粒子直径  $0.360\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

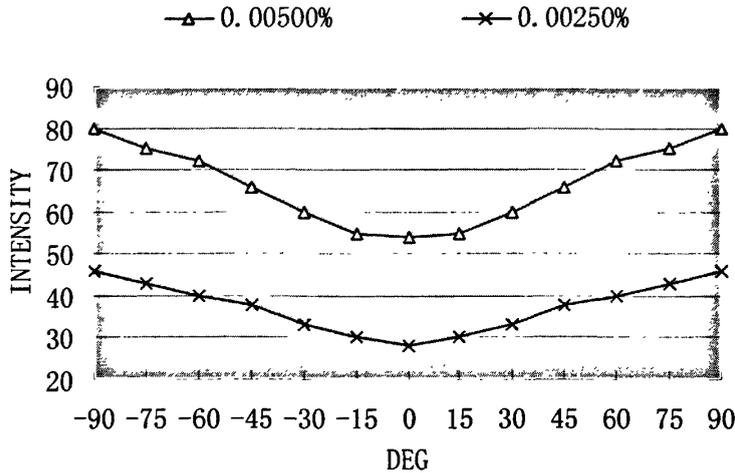


图 5.8 圆偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相对散射角的变化 (粒子直径  $0.360\ \mu\text{m}$ , 测量深度  $D=0.00\text{cm}$ )

图 5.8 是对直径  $0.360\ \mu\text{m}$  的粒子所构成的两种不同体积分数浓度的散射场在圆偏振光入射时其在深度为  $0.00\text{cm}$  处侧向散射水平偏振光强相对散射角的测量值画出的变化图。由图中依然可以看出，其侧向散射光随散射角的变化即使浓度不同也都比较平缓，并呈现相对散射角对称分布的规律。另外，随着粒子浓度的减小，其在同一散射角处的光强值也随之减小。这一点也与总侧向散射光强相同。

### 5.5 圆偏振光入射时侧向散射水平偏振光偏振度性质分析

把附录数据一中对直径  $0.360 \mu\text{m}$  的粒子散射溶液所测得的圆偏振光入射时侧向散射水平偏振光强相应散射角  $\phi$  的数据按照式 3.13 来进行偏振度计算, 所得偏振度值列于表 5.4 中。即对直径  $0.360 \mu\text{m}$  的粒子, 浓度 0.0025% 所构成的粒子场, 其侧向散射水平偏振光强相对  $\phi$  值的退偏振估计。表中三组值, 即不同探测深度所得结果。

表 5.4 圆偏振光入射时侧向散射水平偏振光强偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.360 \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为 0.0025%)

散射角 $\phi$ (DEG) \n 探测深度(cm)	90	75	60	45	30	15	0
0.0	0.2424	0.2244	0.2228	0.2647	0.2647	0.3432	—
1.5	0.1935	0.1729	0.1758	0.1150	0.1667	0.1830	—
3.0	0.1935	0.1692	0.1713	0.1936	0.6875	0.0000	—

表中数值在深度为 0.0cm 时最大, 当深度增大时其值变小。而且除了在深度为 0.0cm 处的偏振度值相应散射角有一定变化外, 在散射场内部不同深度处的偏振度值均在 0.1500 左右, 变化不大。另外, 从所有表中数据看, 除了一个奇点外, 偏振度值均在 0.4 以下, 这说明, 圆偏振光入射到一个有限的群体微粒子场时其侧向复合散射水平偏振光强的退偏振情况比线性偏振光入射时的情况要明显大得多 (参见表 4.24)。

表 5.5 中所测算出的偏振度值仍是采用直径  $0.360 \mu\text{m}$  的粒子作为散射场介质粒子, 但取两种溶液体积百分数浓度来进行比较 (浓度分别为 0.0025% 和 0.0050%, 测量深度为 0.0cm)。由表 5.5 中的数据可以看出, 当散射场粒子直径不变而改变溶液浓度时, 其侧向激光散射水平偏振光强的偏振度会随着散射场散射粒子体积百分数增大而减小, 退偏振更加明显; 随着散射场散射粒子体积百分数减小而增大, 退偏振趋弱。但从整体上来看, 圆偏振光入射时侧向激光散射水平偏振光强的偏振度相应散射场散射粒子体积百分数改变时有一定变化但并不大, 也即是说, 其退偏振情况受散射场散射粒子体积百分数的影响不大。

表 5.5 圆偏振光入射时侧向散射水平偏振光强偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.360 \mu\text{m}$ , 测量深度 0.0cm)

散射角 $\phi$ (DEG) \n 粒子浓度 C(%)	90	75	60	45	30	15	0
0.0025	0.2424	0.2244	0.2228	0.2647	0.2647	0.3432	—
0.0050	0.1935	0.1729	0.1803	0.1803	0.1803	0.1299	—

表 5.6 圆偏振光入射时侧向散射水平偏振光强偏振度相对散射角的测量值  
(散射场体积分数比为 0.0025% 粒子, 测量深度 0.0cm)

散射角 $\phi$ (DEG)	90	75	60	45	30	15	0
粒子直径 ( $\mu\text{m}$ )							
0.360	0.2424	0.2244	0.2228	0.2647	0.2647	0.3432	—
0.494	0.2509	0.2494	0.2574	0.3007	0.3671	0.4274	—

表 5.6 是对两种直径的粒子在相同浓度和测量深度时的侧向散射水平偏振光强的偏振度进行比较。由表 5.6 可以看出, 当散射场粒子直径改变时, 其侧向激光散射水平偏振光强的偏振度会随随之出现较小的变化, 粒子直径变大时偏振度会变大, 粒子直径变小时偏振度会变小, 但从整体上来看, 其受粒子直径的影响较小, 与表 5.5 相比较, 其退偏振情况受散射场散射粒子直径的影响比受粒子体积百分数的影响稍明显一些, 这一点与总散射光强的偏振度不尽相同。

5.6 圆偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强度性质分析

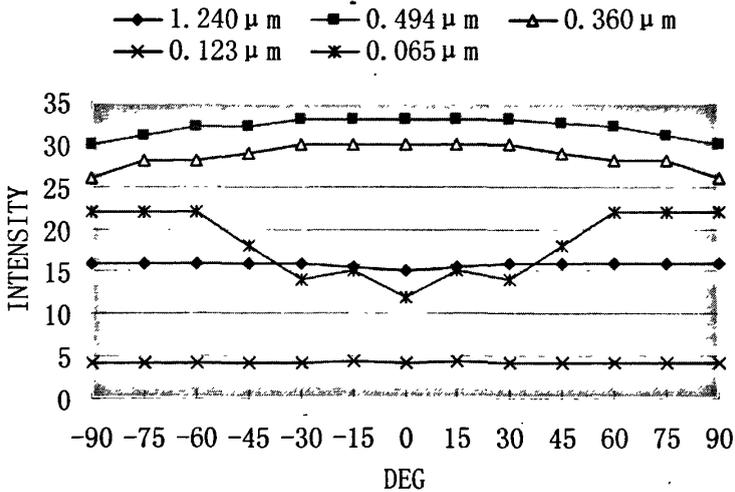


图 5.9 圆偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角的变化  
(测量深度  $D=0.00\text{cm}$ , 散射场体积分数比为 0.00500%)

群体粒子场侧向散射光中的垂直偏振成分的光强是接收窗前加偏振片并且令偏振片透光轴垂直于散射场溶液液面 (即与图 5.1 中的  $xy$  平面垂直) 时在与散射场液面平行的平面内所测量到的光强值。通过 4.6.1 节的研究已经知道, 线性偏振光入射

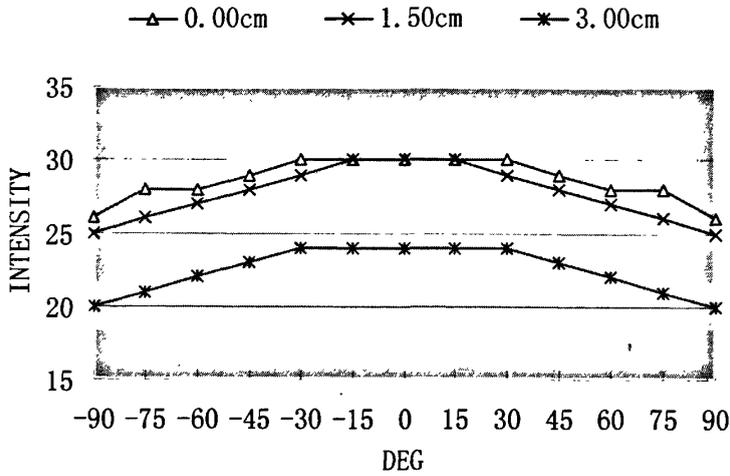


图 5.10 圆偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角的变化  
(粒子直径  $0.360\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.00500\%$ )

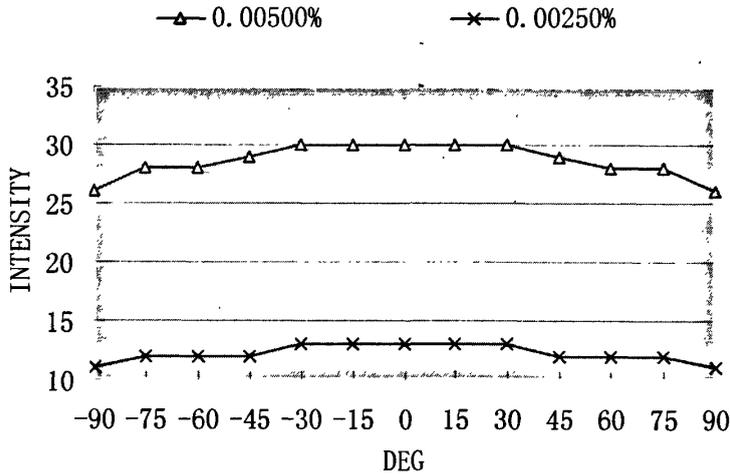


图 5.11 圆偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相对散射角的变化  
(粒子直径  $0.360\ \mu\text{m}$ , 测量深度  $D=0.00\text{cm}$ )

到群粒子散射场时, 其侧向散射垂直偏振分量光强与粒子直径大小有密切关系。图 5.9 绘出了圆偏振光入射到五种直径的粒子构成的不同的群体粒子场时侧向散射垂直偏振分量光强在深度为  $0.0\text{cm}$ , 浓度为  $0.00500\%$  时相对散射角的变化情况。与图 4.22 相比较可以直观地得到同样的结论: 当圆偏振激光入射到群粒子散射介质场时, 其侧向散射光强中的垂直偏振分量相对散射角依然成对称分布; 但两者显著不同的是, 圆

偏振激光入射时侧向散射光垂直偏振光强的变化显然要比线性偏振光入射时平缓得多。另外,与图 5.6 相比,垂直偏振分量相对散射角的变化要比水平偏振分量平缓,并且直径  $0.494\ \mu\text{m}$  和  $0.360\ \mu\text{m}$  的粒子所构成的散射场垂直偏振分量的最大值恰好对应水平偏振分量的最小值。图 5.10 是对直径  $0.360\ \mu\text{m}$  的粒子所构成的散射场在圆偏振光入射时其在不同深度处侧向散射垂直偏振光强相对散射角的测量值画出的变化图。由图中依然可以看出,其侧向散射光随散射角的变化比较平缓,并呈现相对散射角对称分布的规律。另外,随着测量深度的增加,其在同一散射角处的光强值也随之减小。这一点与总侧向散射光强及水平偏振分量光强相同。与总侧向散射光强及水平偏振分量光强随散射角的变化显著不同的是,侧向散射垂直偏振光强的最大值恰好对应总侧向散射光强及水平偏振分量的最小值,这说明垂直偏振分量对总侧向散射光光强的规律性质的影响起着关键的重要作用。

图 5.11 是对直径  $0.360\ \mu\text{m}$  的粒子所构成的两种不同体积分数浓度的散射场在圆偏振光入射时其在深度为  $0.00\text{cm}$  处侧向散射垂直偏振光强相对散射角的测量值画出的变化图。由图中依然可以看出,其侧向散射光随散射角的变化即使浓度不同也都比较平缓,并呈现相对散射角对称分布的规律。另外,随着粒子浓度的减小,其在同一散射角处的光强值也随之减小。这一点也与总侧向散射光强及水平偏振分量光强相同。但与总侧向散射光强及水平偏振分量光强随散射角的变化依然不同的是,侧向散射垂直偏振光强的最大值恰好对应总侧向散射光强及水平偏振分量的最小值,侧向散射垂直偏振光强的最小值恰好对应总侧向散射光强及水平偏振分量的最大值。

### 5.7 圆偏振光入射时侧向散射垂直偏振光偏振度性质分析

把附录数据一中对直径  $0.360\ \mu\text{m}$  的粒子散射溶液所测得的圆偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强相应散射角  $\phi$  的数据按照式 3.13 来进行偏振度计算,所得偏振度值列于表 5.7 中。即对直径  $0.360\ \mu\text{m}$  的粒子,浓度  $0.0025\%$  所构成的粒子场,其侧向散射垂直偏振光强相对  $\phi$  值的退偏振估计。表中三组值,即不同探测深度所得结果。

表 5.7 圆偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.360\ \mu\text{m}$ , 散射场体积分数比为  $0.0025\%$ )

散射角 $\phi$ (DEG)	90	75	60	45	30	15	0
探测深度(cm)							
0.0	—	0.0460	0.0566	0.0826	0.2647	0.5733	1
1.5	—	0.0411	0.0506	0.1453	0.3333	0.6511	1
3.0	—	0.0411	0.0506	0.1453	0.2537	0.5593	1

对表中数值进行比较可以出现,在同一散射角的不同测量深处,偏振度值均相差不大,这说明垂直偏振分量退偏振受深度影响很小,这一点与总侧向散射光及水平偏振分量均不同;而在同一深度处,随着散射角从 $90^\circ$ 至 $0^\circ$ 变化,其偏振度值均相应变大且变化幅值明显,也即是说,群体粒子场目标光学侧向散射垂直偏振分量的退偏振与散射角关系密切,在不同散射角处退偏振情况与总侧向散射光和水平偏振分量散射光相比变化较大。这一点从单个粒子散射理论分析中是不能得到的,这说明垂直偏振分量是影响侧向散射光性质的重要因素,体现了复合散射的特点。改变散射场浓度(表 5.8),或者换用其它直径的粒子进行实验(表 5.9),依然可以得到相同的结论。

表 5.8 中所测算出的偏振度值仍是采用直径  $0.360\ \mu\text{m}$  的粒子作为散射场介质粒子,但取两种溶液体积百分数浓度来进行比较(浓度分别为 0.0025%和 0.0050%,测量深度为 0.0cm)。由表 5.8 中的数据可以看出,当散射场粒子直径不变而改变溶液浓度时,其侧向激光散射垂直偏振光强的偏振度会随着散射场散射粒子体积百分数增大而减小,退偏振更加明显;随着散射场散射粒子体积百分数减小而增大,退偏振趋弱。但从整体上来看,圆偏振光入射时侧向激光散射垂直偏振光强的偏振度相应散射场散射粒子体积百分数改变时有一定变化但并不大,也即是说,其退偏振情况受散射场散射粒子体积百分数的影响不大。

表 5.8 圆偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强偏振度相对散射角的测量值  
(粒子直径  $0.360\ \mu\text{m}$ , 测量深度 0.0cm)

散射角 $\phi$ (DEG)	90	75	60	45	30	15	0
粒子浓度 C(%)							
0.0025	—	0.0460	0.0566	0.0826	0.2647	0.5733	1
0.0050	—	0.0411	0.0506	0.1071	0.2308	0.5283	1

表 5.9 圆偏振光入射时侧向散射垂直偏振光强偏振度相对散射角的测量值  
(散射场体积分数比为 0.0025%粒子, 测量深度 0.0cm)

散射角 $\phi$ (DEG)	90	75	60	45	30	15	0
粒子直径 ( $\mu\text{m}$ )							
0.360	—	0.0460	0.0566	0.0826	0.2647	0.5733	1
0.494	—	0.0106	0.0323	0.0909	0.1667	0.4509	1

表 5.9 是对两种直径的粒子在相同浓度和测量深度时的侧向散射垂直偏振光强的偏振度进行比较。由表 5.9 可以看出,当散射场粒子直径改变时,其侧向激光散射垂直偏振光强的偏振度会随之出现较小的变化,粒子直径变大时偏振度会变小,粒子直径变

小时偏振度会变大,这一点与水平偏振分量偏振度相应粒子直径的关系恰好相反(参见表 5.6)。但从整体上来看,其受粒子直径的影响依然较小,而与表 5.8 相比较,其退偏振情况受散射场散射粒子直径的影响比受粒子体积百分数的影响稍明显一些。

## 5.8 本章小结

本章对圆偏振光入射到群体粒子场时目标光学散射场的侧向散射光的总散射光、水平偏振分量、垂直偏振分量三种散射光的光强及退偏振情况进行了研究,可以得到以下结论:

(1) 群体粒子场目标光学侧向散射的总光强、水平偏振分量光强、垂直偏振分量光强在与入射光垂直的平面内相应散射角均呈对称分布;

(2) 侧向散射光中水平偏振分量和垂直偏振分量相对散射角 $\phi$ 值有着完全不同的变化规律:水平偏振分量的最大值和最小值的位置恰好对应垂直偏振分量的最小值和最大值,其对称面相互垂直;

(3) 无论是总散射光强,还是水平偏振分量或垂直偏振分量的光强值,与粒子直径都有着密切的变化关系:直径小的粒子相应散射角的变化幅度一般都要大于直径大的粒子,即直径越小的粒子其侧向散射光强随着散射角的改变而变化越明显;

(4) 水平偏振分量和垂直偏振分量的偏振度的变化与粒子直径也呈完全相反的关系:水平偏振分量的偏振度随粒子直径减小而降低,垂直偏振分量的偏振度随粒子直径的减小而增大;

(5) 在总散射光强中,水平偏振分量总是其主要的成份;

(6) 总散射光强,水平偏振分量或垂直偏振分量的光强值均随着浓度的降低而变小;而测量深度越深,其值一般也相应越小,但越往深处,其值基本保持不变;总散射光强,水平偏振分量或垂直偏振分量的光强值均受浓度及测量深度的影响不大;

(7) 圆偏振光入射散射场时总散射光强,水平偏振分量或垂直偏振分量的光强值相应散射角的变化均要比线性偏振光入射散射场时的变化平缓得多;

(8) 圆偏振光入射散射场时侧向散射光中总散射光强,水平偏振分量或垂直偏振分量的偏振度均较小,退偏振现象明显。

## 6 群体粒子散射场激光侧向散射光学系统 Muller-Stokes 矩阵模型的建立

### 6.1 偏振光

#### 6.1.1 偏振光与 Stokes 矢量

电磁场可用四个基本的场矢量  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{D}$  和  $\vec{B}$  来完全描述, 其相互之间的关系通过 Maxwell 方程组联系起来。光也是一种电磁波, 因此完全描述光波需要四个场矢量, 但是为了方便起见, 只选择电场矢量  $\vec{E}$  来确定光波的偏振状态, 这是因为在大多数光学介质中, 各种物理相互作用与电场相关。单色光在自由空间的传播过程中, 如果电振动矢量方向保持不变, 只是它的大小随相位改变, 这种光称为线偏振光; 如果电振动矢量的大小保持不变, 而方向绕传播轴转动, 端点的轨迹是一个圆, 这种光称为圆偏振光; 如果电振动矢量的大小和方向都有规律的变化, 端点的轨迹是一个椭圆, 这种光称为椭圆偏振光; 如果电振动矢量在各个方向上强度不等, 某一方向的振动比其他方向占优势, 这种光就是部分偏振光<sup>[117]</sup>。

在笛卡尔直角坐标系中, 假设单色偏振光波沿 +z 方向传播, 任意偏振状态的光都可以认为其由 x 轴 (水平轴) 和 y 轴 (垂直轴) 方向振动的叠加, 而且电场矢量  $\vec{E}$  随时间  $t$  做正弦变化。这样的单色平面波的电场矢量可以用复函数表示为

$$\vec{E} = (E_x \hat{x} + E_y \hat{y}) \exp[i(\vec{k}z - \omega t)] \quad (6.1)$$

$$E_x = A_x e^{-i\delta_x}, \quad E_y = A_y e^{-i\delta_y}$$

式中  $\hat{x}$  与  $\hat{y}$  分别表示单位矢量,  $A_x$  与  $A_y$  分别表示 x 轴与 y 轴方向上的振幅,  $\delta = \delta_x - \delta_y$  表示两个方向上分量的初位相差。沿 x 轴与 y 轴方向的两个偏振分量可表示为

$$\begin{cases} \vec{E}_x = A_x e^{-i\delta_x} \exp(-i\omega t) \\ \vec{E}_y = A_y e^{-i\delta_y} \exp(-i\omega t) \end{cases} \quad (6.2)$$

这两个分量的振幅比和位相差决定该偏振光的偏振态。

定义参数

$$\begin{cases} I = \langle \vec{E}_x \vec{E}_x^* + \vec{E}_y \vec{E}_y^* \rangle = A_x^2 + A_y^2 \\ Q = \langle \vec{E}_x \vec{E}_x^* - \vec{E}_y \vec{E}_y^* \rangle = A_x^2 - A_y^2 \\ U = \langle \vec{E}_x \vec{E}_y^* + \vec{E}_y \vec{E}_x^* \rangle = -2A_x A_y \cos \delta \\ V = \langle \vec{E}_x \vec{E}_y^* - \vec{E}_y \vec{E}_x^* \rangle = 2A_x A_y \sin \delta \end{cases} \quad (6.3)$$

则得到Stokes矢量<sup>[107,118-121]</sup>

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Stokes 矢量是由 G. G. Stokes 在 1852 年提出的, 可以完全描述平面波的偏振状态。矢量  $\vec{S}$  的  $I$  描述光波的强度,  $Q$ ,  $U$  和  $V$  描述光波的偏振状态,  $Q$  和  $U$  的值依赖于参考坐标系的选取。当参考坐标系顺时针旋转  $\varphi$  角度时(图 6-1), Stokes 矢量的转换公式为

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\varphi & -\sin 2\varphi & 0 \\ 0 & \sin 2\varphi & \cos 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-5)$$

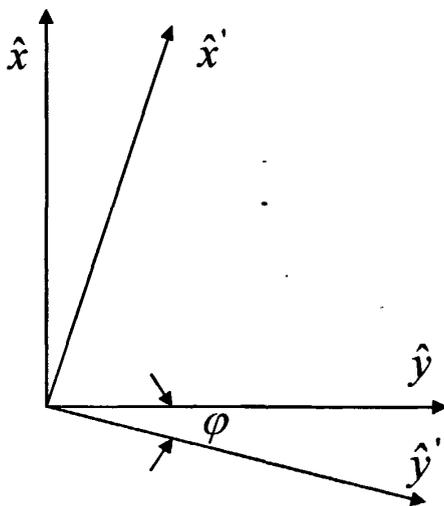


图 6.1 Stokes 矢量的旋转

Stokes 矢量的参数对于完全偏振光满足等式

$$I^2 = Q^2 + U^2 + V^2 \quad (6.6)$$

对于部分偏振光则满足不等式

$$I^2 > Q^2 + U^2 + V^2 \quad (6.7)$$

对于无偏光则  $I=1$ ,  $Q=U=V=0$ 。

由 Stokes 矢量定义的偏振度为:

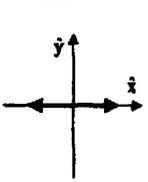
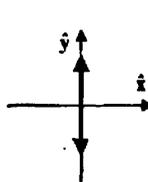
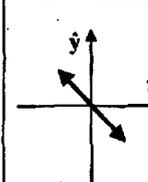
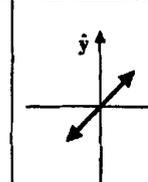
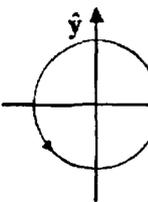
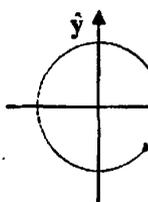
$$P_L = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (6.8)$$

$$\text{圆偏振度} \quad P_c = \frac{\sqrt{V^2}}{I} \quad (6.9)$$

$$\text{总偏振度} \quad P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (6.10)$$

表 6-1 给出了几种特殊偏振光的 Stokes 矢量。

表 6.1 偏振光的 Stokes 矢量

线偏振光			
	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$
圆偏振光			
	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

### 6.1.2 Stokes 矢量的实际测量

Stokes 矢量的四个参数都具有强度单位，可以用光电方法进行测定<sup>[121-123]</sup>。

当光分别通过一个水平线偏振器和一个垂直线偏振器时，透射光强分别为

$$\begin{aligned} I_0 &= \langle \vec{E}_x \vec{E}_x^* \rangle = A_x^2 \\ I_{\frac{\pi}{2}} &= \langle \vec{E}_y \vec{E}_y^* \rangle = A_y^2 \end{aligned} \quad (6.11)$$

当光通过一与  $x$  轴成  $\frac{\pi}{4}$  夹角的线偏振器时，透射光强为

$$I_{\frac{\pi}{4}} = \frac{1}{2} \langle (\vec{E}_x + \vec{E}_y)(\vec{E}_x^* + \vec{E}_y^*) \rangle = \frac{1}{2} (A_x^2 + A_y^2 + 2A_x A_y \cos \delta) \quad (6.12)$$

当光通过一个右旋圆检偏器时，则由于左旋圆偏振光被阻挡，此时，出射光强等于右旋偏振光强度

$$I_R = \frac{1}{2} \left\langle \left( i\vec{E}_x + \vec{E}_y \right) \left( -i\vec{E}_x^* + \vec{E}_y^* \right) \right\rangle = \frac{1}{2} (A_x^2 + A_y^2 + 2A_x A_y \sin \delta) \quad (6.13)$$

通过式(6-11)-(6-13)可以得到实际可测量的 Stokes 参数<sup>[124-128]</sup>

$$\begin{cases} I = I_0 + I_{\frac{\pi}{2}} \\ Q = I_0 - I_{\frac{\pi}{2}} \\ U = 2I_{\frac{\pi}{4}} - I \\ V = 2I_R - I \end{cases} \quad (6.14)$$

## 6.2 任意单粒子光散射的 Stokes-Mueller 方程

任意粒子的光散射过程都可以用一个 Stokes-Mueller 方程描述<sup>[107,118-121]</sup>。

在任意单粒子的光散射过程中, 各个物理参数的描述如图 6.2 所示。沿  $z$  轴方向传播的入射光被一个位于直角坐标系  $(x, y, z)$  原点  $O$  的粒子散射。正交的单位矢量  $\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$  分别对应  $x, y, z$  轴方向, 散射光的传播方向  $\hat{e}_r$  与入射光的传播方向  $\hat{e}_z$  确定的平面被定义为散射平面。当散射光与入射光方向不平行时, 散射平面可以由方向角  $\phi$  唯一确定; 而当散射光与入射光方向平行时, 包含  $z$  轴的任意平面都可以作为散射平面。为方便起见将入射光的电场矢量分解到  $\hat{e}_{//i}$  方向上(平行于散射平面)的分量  $\vec{E}_{//i}$ , 与  $\hat{e}_{\perp}$  方向上(垂直于散射平面)的分量  $\vec{E}_{\perp}$ , 则

$$\vec{E}_i = (E_{0//} \hat{e}_{//i} + E_{0\perp} \hat{e}_{\perp}) \exp(ikz - i\omega t) = E_{//i} \hat{e}_{//i} + E_{\perp} \hat{e}_{\perp} \quad (6.15)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$  表示入射光在介质中的波数,  $\lambda$  为入射光在介质中的波长。正交的单位矢量  $\hat{e}_{//i}$  和  $\hat{e}_{\perp}$  与  $(\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z)$  之间的几何关系为

$$\begin{cases} \hat{e}_{\perp} = \hat{e}_x \sin \phi - \hat{e}_y \cos \phi \\ \hat{e}_{//i} = \hat{e}_x \cos \phi + \hat{e}_y \sin \phi \\ \hat{e}_z = \hat{e}_{\perp} \times \hat{e}_{//i} \end{cases} \quad (6.16)$$

同时有

$$\begin{cases} \hat{e}_{\perp} = -\hat{e}_\theta \\ \hat{e}_{//i} = \hat{e}_r \sin \theta + \hat{e}_\phi \cos \theta \end{cases} \quad (6.17)$$

其中  $\hat{e}_r, \hat{e}_\theta, \hat{e}_\phi$  为球坐标系  $(r, \theta, \phi)$  中正交的单位矢量。因此, 在远场的散射电场可表示为

$$\vec{E}_s = E_{//s} \hat{e}_{//s} + E_{\perp s} \hat{e}_{\perp s} \quad (6.18)$$

单位矢量之间的关系还有

$$\begin{cases} \hat{e}_{//s} = \hat{e}_\theta \\ \hat{e}_{\perp s} = -\hat{e}_\phi \\ \hat{e}_r = \hat{e}_{\perp s} \times \hat{e}_{//s} \end{cases} \quad (6.19)$$

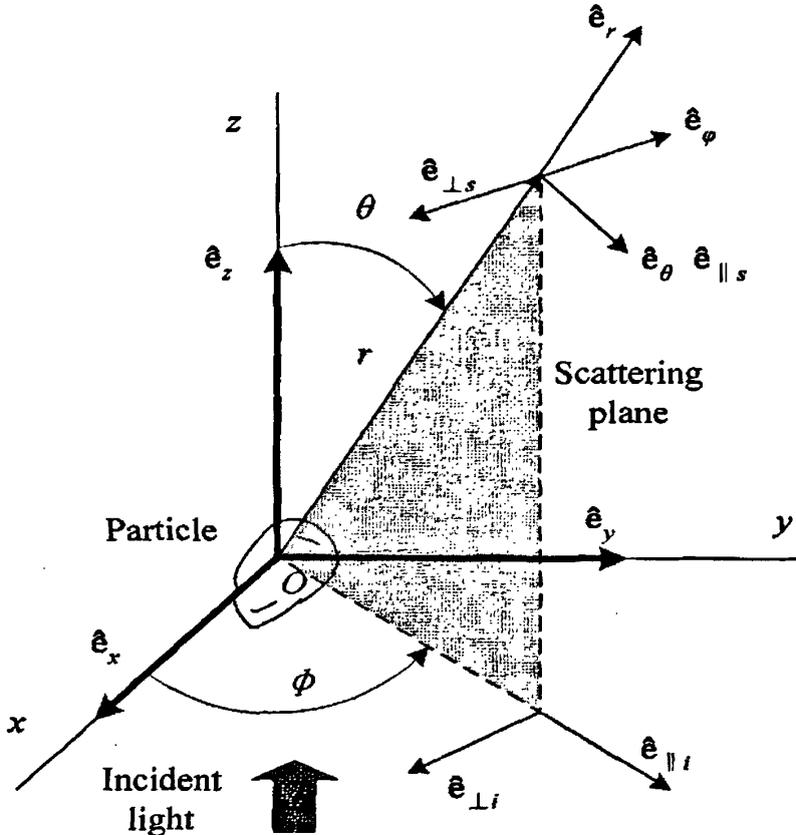


图 6.2 任意粒子的光散射

$\hat{e}_{//s}$ , 和  $\hat{e}_{\perp s}$  分别平行和垂直于散射平面。由边界条件的线性性质可知, 任意粒子的散射场振幅是入射场振幅的线性函数, 于是入射场与散射场振幅之间的关系可以方便地用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} E_{//s} \\ E_{\perp s} \end{bmatrix} = \frac{e^{ik(r-z)}}{-ikr} \begin{bmatrix} S_2 & S_3 \\ S_4 & S_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{//i} \\ E_{\perp i} \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

一般情况下, 转换矩阵中的元素  $S_j$  ( $j=1, 2, 3, 4$ ) 为散射角  $\theta$  与方向角  $\phi$  的复函数。式(6-20)中的转换矩阵被称为振幅散射矩阵(amplitude scattering matrix)。

为了得到振幅散射矩阵的各个元素, 必需对散射光电场的振幅和相位进行测量。由于对电场相位的测量是一项非常困难的工作, 振幅散射矩阵的四个元素几乎没有被实验测量过。所幸的是, Stokes 矢量的四个参数都只具有强度单位(6.1.2 节已经给出了其实际测量方法)。因此, 可以建立由 Stokes 矢量表示的入射光与散射

光之  $h_1$  的关系, 以代替由振幅表示的关系。

由式 (6.3) 和 (6.20) 可得

$$\begin{bmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{bmatrix} = \frac{1}{k^2 r^2} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \\ U_{in} \\ V_{in} \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

式中的  $4 \times 4$  矩阵为单个粒子光散射的 Mueller 矩阵, 也称为相位矩阵 (phase matrix), 式 (6.21) 则称为粒子散射的 Stokes-Mueller 方程。Mueller 矩阵的 16 个元素与振幅散射矩阵的 4 个元素之间的关系为

$$\begin{aligned} m_{11} &= \frac{1}{2} (|S_1|^2 + |S_2|^2 + |S_3|^2 + |S_4|^2), \\ m_{12} &= \frac{1}{2} (|S_2|^2 - |S_1|^2 + |S_4|^2 - |S_3|^2), \\ m_{13} &= \operatorname{Re}\{S_2 S_3^* + S_1 S_4^*\}, \\ m_{14} &= \operatorname{Im}\{S_2 S_3^* - S_1 S_4^*\}, \\ m_{21} &= \frac{1}{2} (|S_2|^2 - |S_1|^2 - |S_4|^2 + |S_3|^2), \\ m_{22} &= \frac{1}{2} (|S_2|^2 + |S_1|^2 - |S_4|^2 - |S_3|^2), \\ m_{23} &= \operatorname{Re}\{S_2 S_3^* - S_1 S_4^*\}, \\ m_{24} &= \operatorname{Im}\{S_2 S_3^* + S_1 S_4^*\}, \\ m_{31} &= \operatorname{Re}\{S_2 S_4^* + S_1 S_3^*\}, \\ m_{32} &= \operatorname{Re}\{S_2 S_4^* - S_1 S_3^*\}, \\ m_{33} &= \operatorname{Re}\{S_1 S_2^* + S_3 S_4^*\}, \\ m_{34} &= \operatorname{Im}\{S_2 S_1^* + S_4 S_3^*\}, \\ m_{41} &= \operatorname{Im}\{S_2^* S_4 + S_3^* S_1\}, \\ m_{42} &= \operatorname{Im}\{S_2^* S_4 - S_3^* S_1\}, \\ m_{43} &= \operatorname{Im}\{S_1 S_2^* - S_3 S_4^*\}, \\ m_{44} &= \operatorname{Re}\{S_1 S_2^* - S_3 S_4^*\}, \end{aligned} \quad (6.22)$$

显然, 这 16 个元素不是完全独立的, 而是 7 个独立自变量的函数。这 7 个自变量为振幅散射矩阵 4 个元素  $S_j$  的模  $|S_j|$  及他们之间的 3 个相位差。

### 6.3 群体粒子场目标光学侧向散射的 Muller-Stokes 矩阵模型建立

本节用矩阵元素表示偏振激光束入射时与入射方向垂直的平面上散射光的偏振特征, 把单粒子光散射的 Stokes-Mueller 方程进行适当的变换后运用到群体粒子散射场中, 从而实现对群体粒子场目标光学侧向散射光性质的研究<sup>[116]</sup>。

#### 6.3.1 准 Stokes 矢量与矩阵元素描述

在保持光的偏振状态不变的情况下, 定义准 Stokes 矢量元素为在与入射光束方向垂直的平面上在不同的角度所得到的散射强度的量值。对于给定的入射光的偏振状态, 令

$$\begin{aligned} I_s &= \Phi(\phi=0) + \Phi(\phi=\pi/2) \\ Q_s &= \Phi(\phi=0) - \Phi(\phi=\pi/2) \\ U_s &= \Phi(\phi=\pi/4) - \Phi(\phi=3\pi/4) \end{aligned}$$

$$V_s < [I_s^2 - Q_s^2 - U_s^2]^{\frac{1}{2}}$$

这里  $\Phi$  是实际测量的散射光强, 角度  $\phi$  表示在平面内的测量位置。

令  $I_i$ 、 $Q_i$ 、 $U_i$  和  $V_i$  为 Stokes 输入矢量的元素, 而  $I_s$ 、 $Q_s$ 、 $U_s$  和  $V_s$  是准 Stokes 输出矢量的元素。散射光 Stokes 矢量的元素是入射光 Stokes 矢量的 4 个元素的线性组合, 即为

$$\begin{pmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{pmatrix} \quad (6.23)$$

散射光场的特征由准 Stokes 矢量  $S_s = [I_s, Q_s, U_s, V_s]^T$  表示。这样, 散射的描述就可记为  $S_s = AS_i$ 。根据实验中入射光的 4 种偏振情况, Stokes 矢量有 3 种线性偏振形式 (在从原点算起的  $0, \pi/4, \pi/2$  处) 和一种圆偏振形式, 用来确定相应的散射光的准 Stokes 矢量。这些关系各表示如下:

$$\begin{pmatrix} I_{i_1} \\ Q_{i_1} \\ U_{i_1} \\ V_{i_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.24)$$

$$\begin{pmatrix} I_{i_2} \\ Q_{i_2} \\ U_{i_2} \\ V_{i_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.25)$$

$$\begin{pmatrix} I_{i_3} \\ Q_{i_3} \\ U_{i_3} \\ V_{i_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.26)$$

$$\begin{pmatrix} I_{i_4} \\ Q_{i_4} \\ U_{i_4} \\ V_{i_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6.27)$$

式 (6.24) — (6.26) 分别是在从原点算起的  $0, \pi/4, \pi/2$  处的线性偏振光入射时得到的关系式, 式 (6.27) 表示的是圆偏振光入射时的情形。

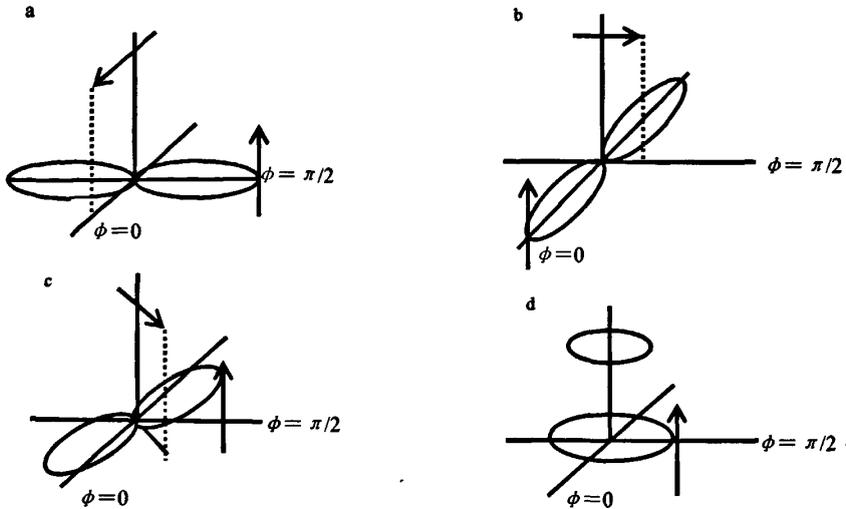


图 6.3 四种偏振光入射时的理想蝶形散射例示  
(散射光偏振方向与入射光传播方向平行)

为了分析散射特征, 首先考虑理想的散射情形产生的描述矩阵。参见图 6.3, 它表示所考虑的四种入射偏振情况的理想散射, 即谓蝶形。这些蝶形是当线性偏振光入射到均匀分布的小粒子上时所产生的。此时对于图 6.3a、b、c、d 中的情形, 散射光强值分别为  $\Phi_1、\Phi_2、\Phi_3、\Phi_4$ :

$$\Phi_1(\phi=0) = 0, \quad \Phi_1(\phi=\pi/4) = \Phi_1(\phi=3\pi/4) = b, \quad \Phi_1(\phi=\pi/2) = a.$$

$$\Phi_2(\phi=0) = a, \quad \Phi_2(\phi=\pi/4) = \Phi_2(\phi=3\pi/4) = b, \quad \Phi_2(\phi=\pi/2) = 0.$$

$$\Phi_3(\phi=0) = b = \Phi_3(\phi=\pi/2), \quad \Phi_3(\phi=\pi/4) = 0, \quad \Phi_3(\phi=3\pi/4) = a.$$

$$\Phi_4(\phi=0) = \Phi_4(\phi=\pi/4) = \Phi_4(\phi=\pi/2) = \Phi_4(\phi=3\pi/4) = c.$$

描述矩阵为

$$A = \begin{pmatrix} a & 0 & 2b-a & 2c-a \\ 0 & -a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a & 0 \\ 0 & 0 & <\sqrt{4b^2-a^2} & <2c \end{pmatrix} \quad (6.28)$$

此处的 “<” 只是给出了一个取值上限。

再考虑均匀散射, 所测量到的光强是个常数 (也即所有的  $\Phi=d$ ), 因此矩阵为:

$$A = \begin{pmatrix} 2d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ <2d & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.29)$$

综合考虑均匀散射和蝶形散射，矩阵就成为下式：

$$A = \begin{pmatrix} a+2d & 0 & 2b-a & 2c-a \\ 0 & -a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a & 0 \\ \langle 2\sqrt{d(a+d)} & 0 & \langle \sqrt{4(b+d)^2 - a^2} - 2\sqrt{d(a+d)} & \langle 2c+d - \sqrt{d(a+d)} \rangle \end{pmatrix} \quad (6.30)$$

为了估计散射系数，先把测得的散射输出假定为特定的蝶形散射（假定为长轴为“ $a$ ”短轴为“ $b$ ”的椭圆形式）和均匀散射（假定为半径为  $d$  的圆）。由这两种散射形式，可以得到长轴为  $a+d$  的另一种类椭圆形式的散射。与入射光垂直的散射平面上的面积，即这些散射类型的特征之一，可表为形式：面积（蝶形） $\approx \pi ab / \sqrt{2}$  和面积（均匀） $= \pi d^2$ 。

在这种情况下，蝶形散射的系数为

$$F = \frac{\pi b / \sqrt{2}}{(\pi b / \sqrt{2}) + \pi d^2 \sqrt{2}} = \frac{ab}{ab + d^2 \sqrt{2}} \quad (6.31)$$

当  $F=0$  时，就表示均匀散射，而当  $F=1$  时，则表示完全蝶形散射。

### 6.3.2 模拟光学系统 Muller 散射描述矩阵的确定

以粒子直径为  $1.24 \mu\text{m}$ ，浓度（体积比）为  $0.005\%$ ，探测深度为  $0\text{cm}$  为例，测量所得到的垂直偏振光强为  $\Phi_I(0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4) = 5.5, 14, 22, 14$ ，得到散射矢量为

$$\begin{pmatrix} I_{s_1} \\ Q_{s_1} \\ U_{s_1} \\ V_{s_1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ -16.5 \\ 0 \\ 22 \end{pmatrix} = 27.5 \begin{pmatrix} 1 \\ -0.60 \\ 0 \\ 0.8 \end{pmatrix} \quad (6.32)$$

在  $\frac{\pi}{4}$  方位角的情况下散射矢量为

$$\begin{pmatrix} I_{s_2} \\ Q_{s_2} \\ U_{s_2} \\ V_{s_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 28 \\ 0 \\ -16.5 \\ 22.62 \end{pmatrix} = 28 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -0.59 \\ 0.808 \end{pmatrix} \quad (6.33)$$

$\pi/2$  情况下根据同样的处理过程可得到

$$\begin{pmatrix} I_{s_3} \\ Q_{s_3} \\ U_{s_3} \\ V_{s_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 27.5 \\ 16.5 \\ 0 \\ 22 \end{pmatrix} = 27.5 \begin{pmatrix} 1 \\ 0.600 \\ 0 \\ 0.800 \end{pmatrix} \quad (6.34)$$

圆偏振光入射时, 散射光垂直偏振光强为  $\Phi_4(0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4) = 16, 16, 15, 16$ , 有

$$\begin{pmatrix} I_{s_4} \\ Q_{s_4} \\ U_{s_4} \\ V_{s_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 31 \\ 1.0 \\ 0 \\ 30.98 \end{pmatrix} = 31 \begin{pmatrix} 1 \\ 0.032 \\ 0 \\ 0.999 \end{pmatrix} \quad (6.35)$$

根据这些数据, 再由式 (6.23) ~ (6.27), 可以给出散射的描述矩阵元素为<sup>[115, 125-137]</sup>

$$A = 27.5 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0.018 & 0.127 \\ 0 & -0.600 & 0 & 0.036 \\ 0 & 0 & -0.600 & 0 \\ 0.800 & 0 & 0.023 & 0.327 \end{pmatrix} \quad (6.36)$$

比较式 (6.36) 和式 (6.30), 得到包括蝶形散射和均匀散射的量值:  $a=16.5, b=8.5, c=10.0, d=5.5$ , 因此  $F=0.77$ 。

### 6.3.3 Muller 散射描述矩阵模拟光学系统的结果与讨论

本节所述是在散射光垂直偏振输出时来确定描述矩阵的一种方法, 经过对实验测量所得到的数据进行处理来计算每一种偏振的描述矩阵的 16 个矩阵元素。表 6.1、表 6.2 具体给出了直径为  $1.24 \mu\text{m}$ , 浓度 (体积比) 为 0.005% 的粒子场, 在液面下 1.5cm 处测量时所获得的全部的描述矩阵元素。实验结果表明, 对于所有的数据,  $A_{ij} (i, j = 1, 2, 3, 4)$  依赖于散射角, 粒子直径, 百分比体积分数, 以及探测位置的深度。

(1) 观察表 6.1、表 6.2 中所列的数据, 当  $A_{1j}$  进行规范化后, 对所有的数据组, 有:  $A_{12}=A_{21}=0, A_{23}=A_{32}=0$ 。对所有粒子的矩阵元素, 均有  $A_{22}=A_{33}$ 。这些元素的特点均说明散射光强的分布是轴对称的, 这与实验直接得到的结果是相符的。

(2)  $A_{14}$  有一轻微变化趋势——对小直径粒子而言通常为小负数, 而当粒子直径变大时其值向正值变大;  $A_{44}$  变化趋势类似于  $A_{14}$ 。  $A_{41}$  三种大粒子的值稍小于二种小粒子的值,  $|A_{22}|、|A_{33}|$  三种大粒子的值要大于二种小粒子的值。这些元素的特点均说明, Muller 矩阵的元素与散射场粒子浓度、探测深度的关系并不密切, 而相对粒子直径的改变却变化明显, 这一点也与实验直接得到的结果是相吻合的。

(3) 粒子大小的变化对侧向散射光的特性参数  $a、b、c、d$  的变化也有明显的影响。在每一种偏振情况下, 其值对于小粒子来说均非常小, 但粒子直径变成较大值时, 其值有显著的增加 (在当  $D=0.36 \mu\text{m}$  变至  $0.494 \mu\text{m}$  时), 然后又随着粒子直径的变大而又变小。另外, 一般地, 有  $a>b>d>c$ 。

(4) 蝶形散射的系数  $F$ , 也相应随着粒子直径的改变而有着显著的变化。对于非常小的粒子来说, 散射主要是均匀散射。但是, 当  $D$  由  $0.123 \mu\text{m}$  变至  $0.36 \mu\text{m}$  时此

参数却显著地提高至  $F$  接近为一个常数。也即, 对大粒子来说, 蝶形散射系数是一个较大值; 而对小粒子来说, 这个系数却又是一个很小的值。

表 6.1 探测深度 1.5 cm, 粒子浓度 0.005% 时矩阵元素的计算值

直径/ $\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
$A_{11}$	1	1	1	1	1
$A_{12}$	0	0	0	0	0
$A_{13}$	0.053	0.068	0.033	0.070	0
$A_{14}$	0.386	-0.123	-0.083	0.047	0.119
$A_{21}$	0	0	0	0	0
$A_{22}$	-0.667	-0.534	-0.500	-0.093	-0.143
$A_{23}$	0	0	0	0	0
$A_{24}$	0	-0.055	-0.083	-0.023	0.214
$A_{31}$	0	0	0	0	0
$A_{32}$	0	0	0	0	0
$A_{33}$	-0.667	-0.534	-0.0500	-0.093	-0.143
$A_{34}$	0	0	0	0	0
$A_{41}$	0.745	0.845	0.866	0.996	0.990
$A_{42}$	0	0	0	0	0
$A_{43}$	0.069	0.080	0.038	0.070	0
$A_{44}$	0.641	0.030	0.047	0.051	0.109
a	15.2	39.0	30.0	0.8	0.6
b	8.02	22.0	16.0	0.7	0.3
c	12.0	15.0	12.5	-0.6	0.55
d	3.8	17.0	15.0	3.9	1.8
F	0.859	0.677	0.601	0.025	0.038

#### 6.4 本章小结

本节用矩阵元素表示偏振激光束入射时与入射方向垂直的平面上散射光的偏振特征, 把单粒子光散射的 Stokes-Mueller 方程进行适当的变换后运用到群体粒子散射场中, 在用线偏振和圆偏振两种偏振状态的 He-Ne 激光束 ( $\lambda$  均为  $0.6328 \mu\text{m}$ ) 入射到一随机分布群粒子场以产生侧向散射光, 并测得散射偏振光强的实验基础上, 用 Muller-Stokes 算法来描述散射特征, 以用作研究散射光性质的方法, 从而实现了对群体粒子场目标光学侧向散射光性质的研究。用此算法对实验得到的数

表 6.2 探测深度 1.5 cm, 粒子浓度 0.0025% 时矩阵元素的计算值

直径/ $\mu\text{m}$	1.240	0.494	0.360	0.123	0.065
A <sub>11</sub>	1	1	1	1	1
A <sub>12</sub>	0	0	0	0	0
A <sub>13</sub>	0.026	0.061	-0.003	0	0.058
A <sub>14</sub>	-0.013	-0.283	-0.103	-0.054	-0.091
A <sub>21</sub>	0	0	0	0	0
A <sub>22</sub>	-0.558	-0.616	-0.595	-0.143	-0.154
A <sub>23</sub>	0	0	0	0	0
A <sub>24</sub>	-0.065	-0.061	-0.100	0.018	-0.005
A <sub>31</sub>	0	0	0	0	0
A <sub>32</sub>	0	0	0	0	0
A <sub>33</sub>	-0.558	-0.616	-0.595	-0.143	-0.154
A <sub>34</sub>	0	0	0	0	0
A <sub>41</sub>	0.830	0.788	0.804	0.990	0.988
A <sub>42</sub>	0	0	0	0	0
A <sub>43</sub>	0.031	0.076	-0.004	0	0.058
A <sub>44</sub>	0.155	-0.073	0.087	-0.043	-0.079
a	8.6	24.4	17.9	0.8	0.32
b	4.5	13.4	8.9	0.4	0.22
c	4.2	6.6	7.4	0.25	0.065
d	3.4	7.6	6.1	2.4	0.88
F	0.703	0.8	0.752	0.038	0.06

据进行计算得到的结果表明, 散射光强的分布是呈轴对称的, 散射光各种偏振特性的变化及用于表示各种特性的矩阵的元素主要决定于散射粒子的大小。这些通过矩阵模型得到的结论与实验获得的结果是相吻合的。另外, 散射系数亦随粒子直径的变化而变化明显。这种 Muller-Stokes 算法把散射场比拟成一个光学系统, 对入射偏振光束的散射效果进行简明的描述, 给出了在与入射激光束方向相垂直的平面上散射特征的信息。这种方法避开了复杂的散射本身的物理产生机制, 直观地分析出散射光的表现规律从而得到随机分布群粒子场特征。

## 7 全文总结及未来工作展望

### 7.1 论文总结

本文在对群体粒子场侧向散射光特性研究的基础上建立了多粒子散射矩阵描述数学模型, 阐明了群体粒子侧向散射的多种性质特征, 用Muller-Stokes矩阵实现了对粒子散射现象的简化数学表示。

论文取得的研究成果主要体现在如下几方面:

- (1) 为了实现对群粒子场侧向散射光的测量, 设计了专门的实验测量系统、实验方法和具体实验方案;
- (2) 实验测量了不同偏振态入射光照射下不同直径粒子在不同体积分数浓度时侧向散射光的不同偏振态光强, 通过相应的图表处理获得了各种散射光强度的分布图样, 分析并获得了散射光强及其偏振度相对散射角的许多变化规律;
- (3) 在对群体粒子场侧向光散射性质规律研究的基础上, 建立了多粒子散射Muller-Stokes矩阵描述数学模型, 利用模型阐明了群体粒子侧向散射的多种性质特征, 从而用Muller-Stokes矩阵实现了对粒子散射现象的简化数学表示。用此模型分析得到的散射光表现规律与实验结果是相吻合的。这种矩阵模拟方法避开了复杂的散射本身的物理产生机制, 能够直观地分析出散射光的表现规律从而得到随机分布群粒子场各种特征。

### 7.2 今后的研究工作

目前群体粒子场目标光学侧向散射的偏振光散射理论、理论模型与计算机模拟、散射规律的实验研究等已经有了一些进展。但是与完善的理论和成熟应用之间, 还是有很大的距离。

在对于群体粒子场侧向散射光性质规律的研究方面, 目前大多都是从光强方面入手, 而本文即使开始尝试从光的偏振入手对其研究, 对于完全掌握复杂的粒子场激光散射规律来说还是远远不够的。在未来的研究工作中, 散射场入射激光和散射光的频率的变化及其对粒子场的影响将是一个重要的研究方向和工作方面。尤其对动态散射场的研究, 入射和散射光的频率将发挥巨大的作用。

在群体粒子场侧向散射系统的理论建模方面的研究, 还需要有新的突破。实际上, 本文只是开始尝试对简单的单分散各向同性介质的散射场进行了Muller-Stokes模型的理论研究, 对于更复杂介质的情况, 由于各种参数变得更加复杂多变, 事实上, 这方面的理论研究任重而道远。甚至可以预见, 在比较长的时期内在散射光学领域都不会有大的突破。相比较于理论模型研究, Monte-Carlo模拟方法的研究却是开展的红

红火火，研究成果层出不穷。Monte-Carlo算法唯一的缺点就是运算速度太慢，就目前而言，除了提高CPU的速度之外，似乎也没其他更好的方法。所幸的是，CPU的速度每天都在提高。现在这方面需要开展的工作主要是建立针对具体问题的算法模型。因为，具体的实际应用中所面对的介质肯定比理想情况下要复杂的多。而且还要考虑周围环境的影响，所以不可能存在一个通用的算法。

在实验研究方面需要开展的工作也非常多。首先就是对实验装置的改进，运用具有高动态范围和信噪比的光电探测器件以获得更准确的散射光光强及频率等各种参数的数据。其次是通过不同波长激光光源的应用，对更大浓度变化范围的散射场进行探测，以扩大散射粒子直径的有效范围。

事实上，群体粒子目标光学侧向散射这一课题方向在很多领域的应用研究都还是空白，或者说是刚刚有人涉足。因此，作者认为国内完全可以从某些特殊场合的应用研究入手，在比较短的时间内在国际上占据一席之地，或者说保持同步的研究水平。例如运用偏振光散射技术如何测量糖尿病人血糖浓度，如何测定导弹或火箭羽烟的成分、浓度及其随时间空间的变化情况，如何对沙尘暴天气进行早期判断等等。

## 致 谢

本文的全部工作是在导师的悉心指导下，在周围人们的热情帮助和支持下完成的。

首先，特别诚挚地感谢我的导师陈延如教授。导师严谨的治学态度、敏锐的学术洞察力、渊博的学识、诲人不倦的工作态度、以及宽容的待人风范，使我获益颇多，是我终身学习的楷模。没有导师这些年来的悉心指导和培养，就不会有我对光学工程学科现有的理解和认识，更不会有今后继续前进的基础。在他的精心指导、热情关怀和严格要求下，我的科研能力得到了很大的锻炼和提高。他严谨的科学态度、渊博的知识使我受益匪浅。在此，对导师陈延如教授再次表示衷心的感谢！

感谢我的导师赵琦副教授在数年的学习、工作、生活中，给我以无微不至的关怀和大力支持。赵老师在工作、学习、生活的点点滴滴中对我的关心、爱护和支持，使我在南理工数年的学习中为之深为感动、深感温暖、深受鼓舞。学生论文的完成凝聚着导师们大量的心血和汗水。

感谢刘满凡老师及其同事为本论文的编排装订付出的辛勤劳动。

感谢多年来与我朝夕相处、共同学习、工作并给予我多方帮助的周木春博士、祝永坚博士、赵炜博士、辛煜博士、温宏愿博士、张猛博士、许凌飞博士等同学和朋友们，他们对课题的实验和论文的完成付出了大量的时间和精力，做出了十分重要的贡献。

感谢我的父亲、岳母、妻子张辉、女儿袁紫莹及家庭所有成员，多年来在精神上和经济上给予我的支持和鼓励，使我能全身心地投入到科研、学习及工作中。本文的工作凝结着他们的巨大奉献。

最后，谨以此文献给最疼爱我的母亲郭方英女士。愿她的灵魂在天国安息！

袁兴起

2007年10月31日

于南京理工大学光学楼

## 参考文献

1. M.B.伏尔坚斯坦著, 王鼎昌译. 分子光学(上)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1958.
2. 赵择卿, 陆大年, 杨定超. 光散射技术[M]. 北京: 纺织工业出版社, 1989.
3. M. 卡多纳主编, 糜正瑜, 毛佩芬译. 固体中的光散射[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
4. 赵凯华, 钟锡华. 光学(下)[M]. 北京: 北京大学出版社, 1984.
5. A. 石丸著, 黄润恒, 周诗健等译. 随机介质中波的传播和散射[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
6. 陈延如, 赵琦. 随机分布粒子侧向散射光特性的实验研究[J]. 光学学报, 2003(9): 1110-1114
7. 程光煦. 拉曼 布里渊散射—原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
8. C. V. Raman. Ind[J].J.Phys.2, 387 (1928)
9. Anderson. The Raman Effect[M]. New York : M. Dekker, Inc., 1973.
10. S.R.SCHEELE . Multispectral Measurements of BRDF For Very Smooth Surfaces[A]. AIAA/ASME Thermophysics and Heat Transfer Conference, 1974.
11. Rene Fernandez, Richard G.Seasholtz. Comparison of the Bidirectional Reflectance Distribution Function of Various Surfaces[A]. NASA Technical Memorandum, August 14-19, 1988.
12. James Jafolla . A Comparison of BRDF Representations and their Effect on Signatures[A]. AIAA Conference Proceedings, October, 1998.
13. Y.H. Zhou, Z.M. Zhang. BRDF and Directional Emissivity of Semitransparent Silicon Wafers with a Rough Surface[A]. 8<sup>th</sup> AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 2002.
14. H.J. Lee, Q.Z. Zhu, Z.M. Zhang. Radiative Properties of Anisotropic Microrough Silicon Surfaces[A]. 38<sup>th</sup> AIAA Thermophysics Conference, 2005.
15. A. A. Maradudin, I Simonsen, T. A. Leskova, *et al.* Design of one-dimensional Lambertian diffusers of light[A]. Waves In Random Media, 2001.
16. A. A. Maradudina, E .R. M endezb, T. A. Leskova. Two-Dimensional Random Surfaces that Act as Circular Diffusers[A]. Waves In Random Media , 2002.
17. A. R. McGurn1, A. A. Maradudin. Computer simulation studies of the speckle correlations of light scattered from a random array of Scatterers: Scalar wave approximation [J] . Physical Review B, 2001, Volume 64, 165204.

18. F.Farassat,M.K.Myers. Extension of Kirchhoff's Formular to Radiation from Moving Surfaces[R]. NASA TM89149 ,May 1987.
19. Richard B. Statham. Multipath Analysis Diffraction Calculations[R]. NASA CR198314, May 1996.
20. S. B. Sample, S. J. Companella. A Study of Laser Wave Scattering Due to Refractive Index Perturbation in the Propagation Medium[R]. NASA REPORT 1965-1966.
21. J. Merle. Elson. Theory and Software for Light Scattering from Optical Components with Interfacial Roughness[R]. Naval Air Warfare Centre Weapons Division Report, October 1992.
22. Eric I. Thoros. Numerical and Theoretical Studies of Rough Surface Scattering. U.S. Army Office, December 28, 1994.
23. Alexei A. Maradudin. Optical Interactions at Randomly Roough Surface[R]. Report Number, March 10, 2003.
24. C. C. Wey, B. Ghorashi, C.J.Marek, C.Wey. An Imaging System for PLIF/Mie Measurements for a Combusing Flow[R]. NASA TM103714, Dec. 1990.
25. D. S. Liscinsky, J. D. Holdeman. Effects of Initial Conditions on a Single Jet in Crossflow[R]. AIAA-95-2988 ( also NASA TM107002), July 1995.
26. Daniel Bivolaru, Paul M. Danehy, Joseph W. Lee, *et al.* Single-pulse Multi-point Multi-component Interferometric Rayleigh Scattering Velocimeter[R]. NASA Langley Research Center, Hampton VA, 23681-2199, May 2003.
27. Ranadll C. Thompson, Jerold R. Bottiger, Edward S. Fry. Measurement of Polarized Light Interactions via the Muller Matrix[R]. ADA074431, 1979(4).
28. Patricia G. Hull . Experimental Apparatus for a Multi-purpose Laser Optic Laboratory[R]. Tennessee State University, December 29, 1995.
29. William S. Bickel, Gorden Videen. Polarized Light Scattering Applications and Measurements of Fundamental Systems[A]. SPIE Vol.1746, 14-21, 1992.
30. Frederick S. Felt. Failure Analysis of CCD Image Sensors using SQUID and GMR Magnetic Crrunt Imaging[R]. NASA Goddard Space Flight Cebter, May 2001.
31. Schramm, Jr.. Method and Apparatus for Reading Two Dimentional Identification Symbols Using Radar Techniques. United States Patent: US 6529154 B1, Mar. 2003.
32. Daniel Ng. Multiwavelength Pyrometry for Nongray Bodies[R]. NASA TM105285, Feb. 1992.
33. Janet Barth, Mike Xapsos, Jean-Marie Lauenstein *et al.* Radiation Environment Modeling for Spacecraft Design: New Model Developments[R]. NASA/GSFC, Sept.

- 2006.
34. W. D. Burnside, T. H. Lee, R. Rojas, *et al.* Target Signature Modeling and Bistatic Scattering Measurement Studies[R]. Department of Electrical Engineering Columbus, Ohio 43212, Aug. 1989.
  35. Harry F. Schramm, Jr. Winchester. Variable Distance Angular Symbology Reader[P]. United States Patent: US 7017812 B1, Mar. 2006.
  36. Tamas Varnai, Alexander Marshak. View angle dependence of cloud optical thicknesses retrieved by MODIS[R]. NASA/GSFC, Nov. 2005.
  37. R.G.W.Brown. Dynamic light scattering using monomode optical fibers [J] . Applied Optics, 1987 (26): 4846-4851.
  38. Yoichi Kitagawa, et al. . Fiber-Optic particle size monitor based on white-light scattering[J] . Applied Optics, 1992 (7): 859-864.
  39. Nelson, H. F. And Satish, B. V. . Radial Scattering of Laser Beam in Anisotropic Scattering media[J] . Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1988 (2): 104-109.
  40. Johnston, S. C. ,Dibble, R. W. , Schefer, R. W. , Schefer, R. W. . Laser measurements and Stochastic Simulations of Turbulent Reating Flows[J] . AIAA Journal, 1986 (24): 918-937.
  41. Carwell, A. I., and Pal, S. R. . Polarization Anisotropy in Lidar Mulpile Scattering From Atmospheric Clouds[J]. Applied Optics, 1985 (24): 3464-3471.
  42. Look D. C. Jr., Chen Y. R. . Study of Polarization of Laser Radiation Scattered 90 DEG[J] . Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1993 (4): 631-636.
  43. Adams C N. Effects of volume-scattering function on the errors induced when polarization is neglected in radiance calculations in an atmosphere[J] . Applied Optics, 1993 (24):4610-4617.
  44. Bickel, W. S. And Bailey, W. M. . Stokes Voctors, Mueller Matrices and Polarized Scattered Light[J] . American Journal of Physics ,1995(5): 468-487.
  45. Look D. C. Jr, Chen Y. R. . Examination of Scattering of 90° from a cylindrical volume Illuminated by Polarized Light[J] . Applied Optics, 1995 (1): 144-151.
  46. Look D. C. Jr. A Matrix Description of Multiple Scattering at 90° [C] . 33<sup>rd</sup> Thermophysics Conference, Norfolk, VA, USA, June, 1999.
  47. Romanov, VP, Churmakov, DY, Berrocal, E, Meglinskii, IV. Low-order light scattering in multiple scattering disperse media [J]. Optics and Spectroscopy, 2004 (5): 796—802.

48. Arne Grabmann, Franz Peters. Size Measurement of Very Small Spherical Particles by Mie Scattering Imaging (MSI) [J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2004 (5): 379-389.
49. Tahereh Mokhtari, Christopher M. Sorensen, Amit Chakrabarti. Multiple-scattering effects on static light-scattering optical structure factor measurements [J]. Applied Optics, 2005,44 (36): 7858-7861.
50. 徐峰, 任宽芳, 蔡小舒, 沈建琪. Extension of geometrical-optics approximation to on-axis Gaussian beam scattering. II. By a spherical particle with end-on incidence [J]. Applied Optics, 2006 (20): 5000-5009.
51. 沈建琪, 王乃宁, 蔡小舒. 透射光起伏谱分析颗粒测量技术[J]. 光学学报, 2006 (3): 383-388.
52. 喻雷寿, 杨冠玲, 何振江, 李仪芳. 用于动态光散射颗粒测量的迭代 CONTIN 算法[J]. 光电工程, 2006 (8): 64-69
53. 李昂, 赵志胜, 张通, 郑伟涛. 一种高时间分辨率动态光散射的测量方法[J]. 吉林大学学报(理学版), 2006 (5): 787-789.
54. 邓勇, 鲁强, 骆清铭. 用基于方位分辨的漫后向散射光确定粒子尺寸分布及相对折射率[J]. 光学学报, 2006 (8): 1214-1219.
55. 曹念文. 几种散射介质散射光解偏度的测量[J]. 物理学报, 2000 (4): 647-653.
56. 仇英辉. 混浊介质中利用后向散射光偏振进行目标识别的研究[J]. 量子电子学报, 2003 (1): 80-84.
57. 盛德仁. 激光角散射诊断气固两相流粒度及浓度的研究[J]. 激光技术, 2000(3): 163-166.
58. 叶茂, 王式名, 徐益谦. 光散射法测量微粒粒径分布的一种繁衍遗传算法[J]. 工程热物理学报, 1999 (5): 632-636.
59. 王国志等. 用脉冲激光全息术测量喷雾场中粒子的分布和运动速度[J]. 光学技术, 1995 (5): 24-27.
60. 王杰, 姚建铨等. 瑞利散射用于气体流场二维瞬态密度测量[J]. 光电子·激光, 2001 (1): 62-64.
61. 杨冠玲等. 脱硫塔内雾粒测定仪及其测试技术研究[J]. 光电工程, 1995 (3): 15-24.
62. 邱建荣, 马毓义. 激光法测量湍流流场时散射粒子的选择[J]. 激光技术, 1995 (3): 150-153.
63. H. C. Van der Hulst. Light scattering by small particles [M]. New York: Wiley, 1957.

64. 吴振森. 不同表面激光双向反射分布函数的实验研究[J]. 光学学报, 1996 (3): 262—268.
65. 黄润. 表征漫反射体反射特性的一个重要物理参数—双向反射分布函数[J]. 光学机械, 1988 (1): 9—15.
66. 魏庆农, 刘建国, 江荣熙. 双向反射分布函数的绝对测量方法[J]. 光学学报, 1996 (10): 1425—1430
67. 张百顺, 刘文清, 魏庆农, 等. 基于双向反射分布函数实验测量的目标散射特性的分析[J]. 光学技术, 2006 (2): 180—182.
68. Bechman P. and Spizzichino A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces[M]. Pergamon press, 1963.
69. 黄泽贵, 童创明, 胡国平, 等. 高斯介质粗糙表面电磁散射的高阶基尔霍夫法[J]. 系统工程与电子技术, 2006 (4): 509—512.
70. 任新成, 郭立新, 刘生春. 基于微扰法的高斯粗糙面电磁散射研究[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2006 (1): 26—30.
71. 裴鹿成, 张孝泽. 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
72. 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京: 原子能出版社, 1996.
73. 王梓坤. 概率论基础及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1976.
74. Press W H, et al. Numerical recipe (FORTRAN) [M]. Cambridge: University of Cambridge, 1989.
75. 李晖. 生物组织光学模型: 原理、测量技术及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
76. S .Bartel, A. H. Hielscher. Monte Carlo simulations of the diffuse backscattering Mueller matrix for highly scattering media [J]. Applied Optics, 2000 (10):1580-1588.
77. M. Xu. Electric field Monte Carlo simulation of polarized light propagation in turbid media [J]. Optics Express, 2004 (26): 6530-6539.
78. G.Yao, L. V. Wang. Propagation of polarized light in turbid media: simulated animation sequences [J]. Optics Express, 2000 (5):198-230.
79. X. Wang, L. V. Wang. Propagation of polarized light in birefringent turbid media: A Monte Carlo study [J]. Journal of Biomedical Optics, 2002 (3): 279-290.
80. X. Wang, L. V Wang. Propagation of polarized light in birefringent turbid media: time-resolved simulations [J]. Optics Express, 2001(5): 254-259.
81. X. Wang, G. Yao, L. V. Wang. Monte Carlo Model and Single-Scattering

- Approximation of the Propagation of Polarized Light in Turbid Media Containing Glucose [J]. *Applied Optics*, 2002 (4):792- 801.
82. X. Wang, L. V. Wang, C. Sun, *et al.* Polarized light propagation through scattering media: time-resolved Monte Carlo simulations and experiments [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2003 (4):608- 617. .
83. P. Yang, H. Wei, G. W. Kattawar, *et al.* Sensitivity of the backscattering Mueller matrix to particle shape and thermodynamic phase [J]. *Applied Optics*, 2003(2): 4389 - 4395.
84. G. W. Kattawar, G. N. Plass. Radiance and polarization of multiple scattered light from haze and clouds [J] . *Applied Optics*, 1968 (8): 1519-1527.
85. B. C. Wilson, G. Adam. A Monte Carlo model for the absorption and flux distribution of light in tissue [J] . *Medical Physics*, 1983 (6):824-830.
86. I. Lux, L. Koblinger. Monte Carlo particles transport methods: neutron and photon calculations [M] . Boca Raton: CRC Press, 1991. .
87. N. V. Voshchinnikov, V. V. Karjukin. Multiple scattering of polarized radiation in circumstellar dust shells [J] . *Astronomy and Astrophysics*, 1994 (3): 883-869. .
88. L. Wang, S. L. Jacques, L. Zheng. MCML—Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues [J] . *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 1995(2): 131 — 146.
89. T. Iwai, H. Furukawa, T. Asakura. Numerical analysis on enhanced backscattering of light based on Rayleigh –Debye scattering theory [J] . *Optical Review*, 1995(6): 413-419.
90. P. L. Chow, W. E. Kohler . Multiple Scattering and Waves in Random Media [C] . Proceedings of the U. S. Army Workshop Held in Blacksburg, Virginia, 24 -26 March, 1980.
91. L. Wang, S. L. Jacques. Hybrid model of Monte Carlo simulation and diffusion theory for light reflection by turbid media [J] . *Journal of the Optical society of America (A)*, 1993(8): 1746-1752. .
92. L. Wang, S. L. Jacques. Optimized radial and angular positions in Monte Carlo modeling [J] . *Medical Physics*, 1994 (7): 1081-1083.
93. L. Wang. Monte Carlo modeling of light transport in multilayered tissues [D] . USA: University of Texas M D Anderson Cancer Center, 1992.
94. <http://www.tamu.edu/~lwang>.
95. M. J. Rakovic, G. W. Kattawar, M. Mehrubeoglu, *et al.* Light backscattering

- polarization patterns from turbid media: theory and experiment [J] . *Applied Optics*, 1999 (15): 3399-3408.
96. A. Ambirajan, D. C. Look. A backward Monte Carlo estimator for the multiple scattering of an arrow light beam [J] . *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1996 (3): 317-336.
97. A. A.mbirajan, D. C. Look. A backward Monte Carlo study of the multiple scattering of a polarized laser beam [J] . *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1997 (2):171 — 192.
98. J. M. Schmit, A. H. Gandjbakhche, R. F. Bonner. Use of polarized light to discriminate short-path photons in a multiple scattering medium [J] . *Applied Optics*, 1992(30): 6535-6546.
99. P. Bruscaioni, G. Zaccanti, Q. Wei. Transmission of a pulsed polarized light beam through thick turbid media: numerical results [J] . *Applied Optics*, 1993(30): 6142-6150.
100. M. Moscoso, J. B. Keller, G. Papanicolaou. Depolarization and blurring of optical images by biological tissue [J] . *Journal of the Optical society of America(A)*, 2001(4): 948-960.
101. H .H .Tynes, G .W .Katawar, E .P .Zege, *et al.* Monte Carlo and Multicomponent Approximation Methods for Vector Radiative Transfer by use of E ffective Mueller M atrix Calculations [J] . *Applied Optics*, 2001 (3): 400-412.
102. B. K. aplan, G. Ledanois, B. villon. Mueller Matrix of Dense Polystyrene Latex Sphere Suspensions: Measurements and Monte Carlo Simulation [J] . *Applied Optics*, 2001(16): 2769-2777.
103. 王凌, 徐之海, 冯华君. 多分散高浓度介质偏振光后向扩散散射的 Monte Carlo 仿真[J] . *物理学报*, 2005(6): 2694-2698.
104. L Tsang, J A Kong, K-H Ding. *Scattering of Electromagnetic Waves*[M] . New York: John Wiley & Sons, 2000.
105. <http://www.sci.ccnycunyu.edu/>.
106. Nelson H F, Satish B V. Radial Scattering of Laser Beam in Anisotropic Scattering Media [J] . *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1988 (2): 104-109.
107. Van D H, H C. *Light scattering by small particles* [M] . New York: Wiley, 1957.
108. Kerker, M.. *The Scattering Light and Other Electromagnetic Radiation*[M]. New York: Academic Press, 1969.
109. Look, D. C., Jr., Chen Y. R. . *Linear Polarization Components Scattered 90°*

- [C] . AIAA 28<sup>th</sup> Thermophysics Conference, Orlando, Florida, USA, July, 1993.
110. 袁兴起, 赵琦, 陈延如, 周木春. 群粒子场粒子性质的侧向散射光分析[J] . 仪器仪表学报, 2005(8s):207-208;
111. YUAN X Q , ZHAO Q, CHEN Y R. Study On The Polarization Degree Of Radiation Side-scattered By The Multiple Particles Distributed Randomly [J]. J. Infrared Millim. Waves, 2005 (6): 401-404.
112. 袁兴起, 赵琦, 陈延如, 等. 散射光法探测微米群粒子场粒子性质的应用研究[J] . 光学 精密工程, 2005 (S) : 5-8.
113. 袁兴起, 陈延如, 赵琦, 等. 多粒子的侧向散射光偏振性质分析[J] . 仪器仪表学报, 2006(6s):1097-1098.
114. YUAN Xing-Qi, CHEN Yan-Ru, ZHAO Qi, *et al.* Experimental Study on the Angular Distribution of Radiation Side-scattered by the Multiple Particle Field Using Circularly Polarized Incident Light[J] . Journal of Light Scattering (光散射学报), 2007 (2): 179-184.
115. Cheung R L-T, Ishimaru A. Transmission, backscattering, and depolarization of waves in randomly distributed spherical particles [J] . Applied Optics,1982 (20): 3792-3798.
116. 袁兴起, 赵琦, 陈延如, 等. 随机分布群粒子侧向散射特性 Muller-Stokes 算法的描述[J] . 南京理工大学学报(自然科学版), 2007 (1) : 96-100.
117. 梁铨廷. 物理光学[M] . 北京: 机械工业出版社, 1983.
118. D. W. Scheman. Light Scattering by Irregularly Shaped Particles [M] . New York: Wiley, 1980.
119. C. F .Bohren, D .R .Huffman. Absorption and scattering of light by small particles [M] . New York: John Wiley & Sons Inc, 1983.
120. M. I. Mishchenko, L .D .Travis, A. A. Lacis. Scattering, absorption, and emission of light by small particles [M] . Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
121. S. Pine, G Dresselhouse. Lineshape Asymmetries in Light Scattering from Opaque Materials[C] . Proceedings of the 3rd International Conference on Light Scattering in Solid, Campinas, Brazil, 1975.
122. 新谷隆一. 偏振光[M]. 北京: 原子能出版社, 1994.
123. 孙萍. 透过高散射介质菲涅耳波带板扫描全息术成像研究[D] . 北京: 北京理工大学, 2004.
124. 王凌. 高散射介质的偏振光后向扩散散射研究[D] . 杭州: 浙江大学, 2005.
125. W. Heltler. The Quantum Theory of Radiation [M] . Oxford: Clarendon Press, 1954.

126. N. Bloembergen. Nonlinear Optics [M] . New York: Benjamin, 1965.
127. M. Cardona. Modulation Spectroscopy [M] . New York: Academic Press, 1969.
128. M. Cardona, F. H. Pollak. The Physics of Opto-Electronic Materials [M] . New York: Plenum Press, 1971.
129. R. Tsu, H. Kawamura, L. Esaki. Raman Scattering in the Depletion Region of GaAs [J] . Solid State Commun, 1974(15): 321.
130. R. Tubino, L. Piseri. A Bond-Polarizability Approach [J]. Phys. Rev, 1975(11): 5145.
131. H. C. Van der Hulst. Multiple Light Scattering, Tables, Formulas and Applications [M] . New York: Academic Press, 1980.
132. Nelson H F. Influence particulates on infrared emission from a cylindrical cloud of particles [J] . Journal of Spacecrafts and Rockets, 1984(21): 425—432.
133. Kostuk R K, Sincerbox G T. Polarization sensitivity of noise recorded in silver halide volume holograms[J] . Applied Optics, 1988 (14): 2993—2998.
134. Yamamoto S, Biwa S, Ohno N. Multiple scattering simulation of pure-mode shear wave in fiber-reinforced composites [J]. Journal of the society of materials Science, 2003 (9): 1122—1128.
135. 周志军, 李相银. 激光目标温度场与后向散射系数的关系[J]. -南京理工大学学报, 2001 (2): 186—189.
136. 是湘全, 杜颖刚. 信杂比极化散射矩阵的优化 [J]. 南京理工大学学报, 1999(6): 557—560.
137. 钱振明. 光弹性中的矩阵理论和散光法[M] . 北京: 科学技术文献出版社, 1990.

## 攻读博士期间发表的论文及著作

1. 袁兴起, 赵琦, 陈延如, 周木春. 群粒子场粒子性质的侧向散射光分析. 仪器仪表学报, 2005, 26(8s):207-208; (EI 收录)
2. YUAN X Q, ZHAO Q, CHEN Y R. Study On The Polarization Degree Of Radiation Side-scattered By The Multiple Particles Distributed Randomly. J. Infrared Millim. Waves, 2005,24(6): 401-404; (SCI 及 EI (核心版) 收录)
3. 袁兴起, 赵琦, 陈延如, 陈建仕, 周木春. 散射光法探测微米群粒子场粒子性质的应用研究. 光学 精密工程, 2005, 13(s1): 5-8; (EI (核心版) 收录)
4. 袁兴起, 陈延如, 赵琦, 周木春. 多粒子的侧向散射光偏振性质分析. 仪器仪表学报, 2006, 27(6s):1097-1098; (EI 收录)
5. 袁兴起, 赵琦, 陈延如, 周木春. 随机分布群粒子侧向散射特性 Muller-Stokes 算法的描述. 南京理工大学学报(自然科学版), 2007, 31(1): 96-100; (EI (核心版) 收录)
6. YUAN X Q, CHEN Y R, ZHAO Q, *et al.* Experimental Study on the Angular Distribution of Radiation Side-Scattered by the Multiple article Field Using Circularly Polarized Incident Light. CHINESE JOURNAL OF LIGHT SCATTERING, 2007, 19(2):179-184;
7. 赵琦, 陈延如, 王昀, 周木春, 袁兴起. 光强与图像信息在转炉炼钢终点判断中的应用. 仪器仪表学报, 2005, 26(8上):575-577; (EI 收录)
8. 周木春, 陈延如, 赵琦, 袁兴起, 王昀. 激光制导中偏振态动态检测技术研究. 仪器仪表学报, 2005, 26(8下): 87-89;
9. 王昀, 赵琦, 陈延如, 周木春, 袁兴起. 炉口光强特征用于转炉炼钢终点控制初探. 仪器仪表学报, 2005, 26(8下): 203-205;
10. 周木春, 陈延如, 赵琦, 袁兴起. 激光偏振编码制导中铈酸锂晶体编码技术研究. 光学学报, 2006, 26(2): 290-293; (EI (核心版) 收录)
11. 周木春, 陈延如, 赵琦, 袁兴起. 激光偏振编码制导中 CdTe 晶体编码技术研究. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 515-518;
12. 温宏愿, 陈延如, 赵琦, 周木春, 袁兴起. 利用 DirectShow 提取转炉炉口火焰图像特征信息. 华中科技大学学报(自然科学), 2007, 35(s1): 246-248; (EI (核心版) 收录)
13. Xin Y, CHEN Y R, ZHAO Q, Zhou M C, YUAN X Q. Changes of Spectrum of Light Scattering on Qusi-homogeneous Media[C](已录用). 第五届 SPIE 多谱图像处理与模式识别国际会议, 武汉, 2007, 11.

附录 A: 实验数据一 (表中光强均为当量值)

粒子直径: 1.240 μm 浓度: 0.00500% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>
0	62.00	1.77	42.00	6.67	5.50	1.00
15	59.00	1.69	38.00	6.03	6.70	1.22
30	55.00	1.57	32.00	5.08	9.70	1.76
45	49.00	1.40	22.00	3.49	14.00	2.55
60	42.00	1.20	14.00	2.22	18.00	3.27
75	37.00	1.06	8.00	1.27	21.00	3.82
90	35.00	1.00	6.30	1.00	22.00	4.00
105	37.00	1.06	8.00	1.27	21.00	3.82
120	42.00	1.20	14.00	2.22	18.00	3.27
135	49.00	1.40	22.00	3.49	14.00	2.55
150	55.00	1.57	32.00	5.08	9.70	1.76
165	59.00	1.69	38.00	6.03	6.70	1.22
180	62.00	1.77	42.00	6.67	5.50	1.00

粒子直径: 1.240 μm 浓度: 0.00500% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>
0	58.00	1.53	33.00	8.05	3.80	1.00
15	55.00	1.45	30.00	7.32	5.10	1.34
30	52.00	1.37	26.00	6.34	7.60	2.00
45	46.00	1.21	18.00	4.39	12.00	3.16
60	42.00	1.11	11.00	2.68	16.00	4.21
75	39.00	1.03	6.10	1.49	18.00	4.74
90	38.00	1.00	4.10	1.00	19.00	5.00
105	39.00	1.03	6.10	1.49	18.00	4.74
120	42.00	1.11	11.00	2.68	16.00	4.21
135	46.00	1.21	18.00	4.39	12.00	3.16
150	52.00	1.37	26.00	6.34	7.60	2.00
165	55.00	1.45	30.00	7.32	5.10	1.34
180	58.00	1.53	33.00	8.05	3.80	1.00

粒子直径: 1.240 μm 浓度: 0.00500% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>
0	51.00	1.42	32.00	5.08	6.20	1.00
15	49.00	1.36	30.00	4.76	7.10	1.15
30	47.00	1.31	25.00	3.97	9.50	1.53
45	43.00	1.19	18.00	2.86	13.00	2.10
60	39.00	1.08	12.00	1.90	17.00	2.74
75	37.00	1.03	7.50	1.19	19.00	3.06
90	36.00	1.00	6.30	1.00	20.00	3.23
105	37.00	1.03	7.50	1.19	19.00	3.06
120	39.00	1.08	12.00	1.90	17.00	2.74
135	43.00	1.19	18.00	2.86	13.00	2.10
150	47.00	1.31	25.00	3.97	9.50	1.53
165	49.00	1.36	30.00	4.76	7.10	1.15
180	51.00	1.42	32.00	5.08	6.20	1.00

粒子直径: 1.240  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	52.00	1.13	23.00	1.21	16.00	1.07
15	52.00	1.13	23.00	1.21	16.00	1.07
30	52.00	1.13	23.00	1.21	16.00	1.07
45	51.00	1.11	22.00	1.16	16.00	1.07
60	50.00	1.09	22.00	1.16	16.00	1.07
75	48.00	1.04	21.00	1.11	15.50	1.03
90	46.00	1.00	19.00	1.00	15.00	1.00
105	48.00	1.04	21.00	1.11	15.50	1.03
120	50.00	1.09	22.00	1.16	16.00	1.07
135	51.00	1.11	22.00	1.16	16.00	1.07
150	52.00	1.13	23.00	1.21	16.00	1.07
165	52.00	1.13	23.00	1.21	16.00	1.07
180	52.00	1.13	23.00	1.21	16.00	1.07

粒子直径: 1.240  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	49.00	1.02	22.00	1.10	15.80	1.01
15	49.00	1.02	22.00	1.10	15.70	1.01
30	49.00	1.02	22.00	1.10	15.60	1.00
45	49.00	1.02	22.00	1.10	15.70	1.01
60	48.00	1.00	21.00	1.05	15.90	1.02
75	48.00	1.00	20.00	1.00	15.90	1.02
90	48.00	1.00	20.00	1.00	15.80	1.01
105	48.00	1.00	20.00	1.00	15.90	1.02
120	48.00	1.00	21.00	1.05	15.90	1.02
135	49.00	1.02	22.00	1.10	15.70	1.01
150	49.00	1.02	22.00	1.10	15.60	1.00
165	49.00	1.02	22.00	1.10	15.70	1.01
180	49.00	1.02	22.00	1.10	15.80	1.01

粒子直径: 1.240  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	44.60	1.03	19.80	1.06	14.40	1.01
15	44.60	1.03	19.70	1.06	14.40	1.01
30	44.50	1.02	19.70	1.06	14.30	1.00
45	44.00	1.01	19.10	1.03	14.50	1.01
60	43.80	1.01	19.00	1.02	14.70	1.03
75	43.50	1.00	18.70	1.01	14.80	1.03
90	43.50	1.00	18.60	1.00	14.60	1.02
105	43.50	1.00	18.70	1.01	14.80	1.03
120	43.80	1.01	19.00	1.02	14.70	1.03
135	44.00	1.01	19.10	1.03	14.50	1.01
150	44.50	1.02	19.70	1.06	14.30	1.00
165	44.60	1.03	19.70	1.06	14.40	1.01
180	44.60	1.03	19.80	1.06	14.40	1.01

粒子直径: 1.240  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	36.00	1.89	24.00	6.15	3.20	1.00
15	34.00	1.79	22.00	5.64	3.70	1.16
30	31.00	1.63	17.00	4.36	5.30	1.66
45	27.00	1.42	11.90	3.05	7.20	2.25
60	23.00	1.21	7.40	1.90	9.20	2.88
75	21.00	1.11	4.90	1.26	10.50	3.28
90	19.00	1.00	3.90	1.00	11.00	3.44
105	21.00	1.11	4.90	1.26	10.50	3.28
120	23.00	1.21	7.40	1.90	9.20	2.88
135	27.00	1.42	11.90	3.05	7.20	2.25
150	31.00	1.63	17.00	4.36	5.30	1.66
165	34.00	1.79	22.00	5.64	3.70	1.16
180	36.00	1.89	24.00	6.15	3.20	1.00

粒子直径: 1.240  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	35.00	1.75	23.50	5.47	3.40	1.00
15	33.00	1.65	22.00	5.12	4.00	1.18
30	30.00	1.50	18.50	4.30	5.70	1.68
45	26.00	1.30	14.00	3.26	7.90	2.32
60	23.00	1.15	8.70	2.02	10.00	2.94
75	21.00	1.05	5.60	1.30	11.50	3.38
90	20.00	1.00	4.30	1.00	12.00	3.53
105	21.00	1.05	5.60	1.30	11.50	3.38
120	23.00	1.15	8.70	2.02	10.00	2.92
135	26.00	1.30	14.00	3.26	7.90	2.32
150	30.00	1.50	18.50	4.30	5.70	1.68
165	33.00	1.65	22.00	5.12	4.00	1.18
180	35.00	1.75	23.50	5.47	3.40	1.00

粒子直径: 1.240  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	31.00	1.55	20.00	4.17	3.90	1.00
15	30.00	1.50	19.00	3.96	4.40	1.13
30	28.00	1.40	16.00	3.33	5.50	1.41
45	25.00	1.25	12.00	2.50	7.50	1.92
60	23.00	1.15	8.00	1.67	9.60	2.46
75	21.00	1.05	5.40	1.13	11.00	2.82
90	20.00	1.00	4.80	1.00	11.50	2.95
105	21.00	1.05	5.40	1.13	11.00	2.82
120	23.00	1.15	8.00	1.67	9.60	2.46
135	25.00	1.25	12.00	2.50	7.50	1.92
150	28.00	1.40	16.00	3.00	5.50	1.41
165	30.00	1.50	19.00	3.96	4.40	1.13
180	31.00	1.55	20.00	4.17	3.90	1.00

粒子直径: 1.240  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	29.50	1.31	14.80	1.64	7.00	1.00
15	28.90	1.28	14.20	1.58	7.20	1.03
30	28.00	1.24	13.40	1.49	7.40	1.06
45	27.00	1.19	12.30	1.37	7.70	1.10
60	25.80	1.14	11.10	1.23	8.00	1.14
75	23.80	1.05	9.90	1.10	7.90	1.13
90	22.60	1.00	9.00	1.00	7.60	1.09
105	23.80	1.05	9.90	1.10	7.90	1.13
120	25.80	1.14	11.10	1.23	8.00	1.14
135	27.00	1.19	12.30	1.37	7.70	1.10
150	28.00	1.24	13.40	1.49	7.40	1.06
165	28.90	1.28	14.20	1.58	7.20	1.03
180	29.50	1.31	14.80	1.64	7.00	1.00

粒子直径: 1.240  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	27.20	1.17	13.50	1.42	7.10	1.00
15	26.90	1.15	13.00	1.37	7.20	1.01
30	26.30	1.13	12.50	1.32	7.30	1.03
45	25.70	1.10	11.70	1.23	7.60	1.07
60	24.60	1.06	10.70	1.13	8.10	1.14
75	23.90	1.03	9.90	1.04	8.40	1.18
90	23.30	1.00	9.50	1.00	8.10	1.14
105	23.90	1.03	9.90	1.04	8.40	1.18
120	24.60	1.06	10.70	1.13	8.10	1.14
135	25.70	1.10	11.70	1.23	7.60	1.07
150	26.30	1.13	12.50	1.32	7.30	1.03
165	26.90	1.15	13.00	1.37	7.20	1.01
180	27.20	1.17	13.50	1.42	7.10	1.00

粒子直径: 1.240  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	25.50	1.10	12.60	1.31	7.00	1.00
15	25.20	1.09	12.30	1.28	7.10	1.01
30	24.70	1.07	11.70	1.22	7.40	1.06
45	24.30	1.05	11.10	1.16	7.70	1.10
60	23.70	1.03	10.40	1.08	7.90	1.13
75	23.20	1.00	9.80	1.02	8.20	1.17
90	23.10	1.00	9.60	1.00	8.30	1.19
105	23.20	1.00	9.80	1.02	8.20	1.17
120	23.70	1.03	10.40	1.08	7.90	1.13
135	24.30	1.05	11.10	1.16	7.70	1.10
150	24.70	1.07	11.70	1.22	7.40	1.06
165	25.20	1.09	12.30	1.28	7.10	1.01
180	25.50	1.10	12.60	1.31	7.00	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	188.00	1.61	122.00	5.00	19.70	1.00
15	179.00	1.53	111.00	5.05	24.30	1.23
30	166.00	1.42	95.00	4.32	32.60	1.65
45	150.00	1.28	68.00	3.09	43.60	2.21
60	131.00	1.12	44.00	2.00	55.60	2.82
75	120.00	1.03	26.00	1.18	64.60	3.28
90	117.00	1.00	22.00	1.00	68.20	3.46
105	120.00	1.03	26.00	1.18	64.60	3.28
120	131.00	1.12	44.00	2.00	55.60	2.82
135	150.00	1.28	68.00	3.09	43.60	2.21
150	166.00	1.42	95.00	4.32	32.60	1.65
165	179.00	1.53	111.00	5.05	24.30	1.23
180	188.00	1.61	122.00	5.55	19.70	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	159.00	1.43	98.00	4.90	17.00	1.00
15	154.00	1.39	91.00	4.55	21.00	1.24
30	144.00	1.30	78.00	3.90	28.00	1.65
45	131.00	1.18	58.00	2.90	39.00	2.29
60	120.00	1.06	37.00	1.85	48.00	2.82
75	114.00	1.03	24.00	1.20	54.00	3.18
90	111.00	1.00	20.00	1.00	56.00	3.29
105	114.00	1.03	24.00	1.20	54.00	3.18
120	120.00	1.08	37.00	1.85	48.00	2.82
135	131.00	1.18	58.00	2.90	39.00	2.29
150	144.00	1.30	78.00	3.90	28.00	1.65
165	154.00	1.39	91.00	4.55	21.00	1.24
180	159.00	1.43	98.00	4.90	17.00	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	111.00	1.37	69.00	3.45	17.00	1.00
15	107.00	1.32	65.00	3.25	19.00	1.12
30	102.00	1.26	56.00	2.80	23.00	1.35
45	95.00	1.17	44.00	2.20	29.00	1.71
60	88.00	1.09	30.00	1.50	36.00	2.12
75	83.00	1.02	23.00	1.15	40.00	2.35
90	81.00	1.00	20.00	1.00	42.00	2.47
105	83.00	1.02	23.00	1.15	40.00	2.35
120	88.00	1.09	30.00	1.50	36.00	2.12
135	95.00	1.17	44.00	2.20	29.00	1.71
150	102.00	1.26	56.00	2.80	23.00	1.35
165	107.00	1.32	65.00	3.25	19.00	1.12
180	111.00	1.37	69.00	3.45	17.00	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	125.00	1.13	64.00	1.28	30.00	1.00
15	123.00	1.11	62.00	1.24	31.00	1.03
30	123.00	1.11	60.00	1.20	32.00	1.07
45	121.00	1.09	58.00	1.16	32.50	1.08
60	117.00	1.05	55.00	1.10	33.00	1.10
75	113.00	1.02	52.00	1.04	33.00	1.10
90	111.00	1.00	50.00	1.00	33.00	1.10
105	113.00	1.02	52.00	1.04	33.00	1.10
120	117.00	1.05	55.00	1.10	33.00	1.10
135	121.00	1.09	58.00	1.06	32.50	1.08
150	123.00	1.11	60.00	1.20	32.00	1.07
165	123.00	1.11	62.00	1.24	31.00	1.03
180	125.00	1.13	64.00	1.28	30.00	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度 /度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	114.00	1.07	57.00	1.19	30.00	1.00
15	113.00	1.06	56.00	1.17	30.00	1.00
30	113.00	1.06	55.00	1.15	31.00	1.03
45	111.00	1.04	53.00	1.10	32.00	1.07
60	109.00	1.02	51.00	1.06	33.00	1.10
75	108.00	1.01	48.00	1.00	33.00	1.10
90	107.00	1.00	48.00	1.00	34.00	1.13
105	108.00	1.01	48.00	1.00	33.00	1.10
120	109.00	1.02	51.00	1.06	33.00	1.10
135	111.00	1.04	53.00	1.10	32.00	1.07
150	113.00	1.06	55.00	1.15	31.00	1.03
165	113.00	1.06	56.00	1.17	30.00	1.00
180	114.00	1.07	57.00	1.19	30.00	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	91.00	1.07	45.00	1.18	25.00	1.00
15	91.00	1.07	45.00	1.18	25.00	1.00
30	90.00	1.06	43.00	1.13	25.50	1.02
45	89.00	1.05	42.00	1.11	26.00	1.04
60	87.00	1.02	40.00	1.05	26.50	1.06
75	86.00	1.01	39.00	1.03	27.00	1.08
90	85.00	1.00	38.00	1.00	27.00	1.08
105	86.00	1.01	39.00	1.03	27.00	1.08
120	87.00	1.02	40.00	1.05	26.50	1.06
135	89.00	1.05	42.00	1.11	26.00	1.04
150	90.00	1.06	43.00	1.13	25.50	1.02
165	91.00	1.07	45.00	1.18	25.00	1.00
180	91.00	1.07	45.00	1.18	25.00	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	110.00	1.80	67.00	8.70	7.00	1.00
15	106.00	1.74	61.00	7.92	10.00	1.43
30	96.00	1.57	51.00	6.62	14.00	2.00
45	83.00	1.36	36.00	4.68	22.00	3.14
60	71.00	1.16	20.00	2.60	28.00	4.00
75	63.00	1.03	11.00	1.43	32.00	4.57
90	61.00	1.00	7.70	1.00	32.00	4.57
105	63.00	1.03	11.00	1.43	32.00	4.57
120	71.00	1.16	20.00	2.60	28.00	4.00
135	83.00	1.36	36.00	4.68	22.00	3.14
150	96.00	1.57	51.00	6.62	14.00	2.00
165	106.00	1.74	61.00	7.92	10.00	1.43
180	110.00	1.80	67.00	8.70	7.00	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	109.00	2.06	76.00	8.44	7.60	1.00
15	104.00	1.96	69.00	7.67	10.00	1.32
30	94.00	1.77	57.00	6.33	15.00	1.97
45	81.00	1.53	39.00	4.33	21.00	2.76
60	66.00	1.25	21.00	2.33	27.00	3.55
75	56.00	1.06	11.00	1.00	31.00	4.08
90	53.00	1.00	9.00	1.00	32.00	4.21
105	56.00	1.06	11.00	1.22	31.00	4.08
120	66.00	1.25	21.00	2.33	27.00	3.55
135	81.00	1.53	39.00	4.33	21.00	2.76
150	94.00	1.77	57.00	6.33	15.00	1.97
165	104.00	1.96	69.00	7.67	10.00	1.32
180	109.00	2.06	76.00	8.44	7.60	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	92.00	1.61	62.00	5.17	10.00	1.00
15	89.00	1.56	57.00	4.75	12.00	1.20
30	83.00	1.46	50.00	4.17	16.00	1.60
45	74.00	1.30	35.00	2.92	21.00	2.10
60	65.00	1.14	21.00	1.75	27.00	2.70
75	59.00	1.04	14.00	1.17	30.00	3.00
90	57.00	1.00	12.00	1.00	31.00	3.10
105	59.00	1.04	14.00	1.17	30.00	3.00
120	65.00	1.14	21.00	1.75	27.00	2.70
135	74.00	1.30	35.00	2.92	21.00	2.10
150	83.00	1.46	50.00	4.17	16.00	1.60
165	89.00	1.56	57.00	4.75	12.00	1.20
180	92.00	1.61	62.00	5.17	10.00	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	63.00	1.37	35.00	1.67	12.10	1.00
15	62.00	1.35	34.00	1.62	12.30	1.02
30	60.00	1.30	32.00	1.52	12.70	1.05
45	57.00	1.24	30.00	1.43	13.30	1.10
60	54.00	1.17	27.00	1.29	13.30	1.10
75	49.00	1.07	23.00	1.10	13.40	1.11
90	46.00	1.00	21.00	1.00	13.20	1.09
105	49.00	1.07	23.00	1.10	13.40	1.11
120	54.00	1.17	27.00	1.29	13.30	1.10
135	57.00	1.24	30.00	1.43	13.30	1.10
150	60.00	1.30	32.00	1.52	12.70	1.05
165	62.00	1.35	34.00	1.62	12.30	1.02
180	63.00	1.37	35.00	1.67	12.10	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	63.00	1.37	35.00	1.75	13.00	1.00
15	60.00	1.30	33.00	1.65	13.60	1.05
30	58.00	1.26	30.00	1.50	14.40	1.11
45	54.00	1.17	26.00	1.30	15.20	1.17
60	51.00	1.11	23.00	1.15	15.90	1.22
75	48.00	1.04	21.00	1.05	15.90	1.22
90	46.00	1.00	20.00	1.00	15.40	1.18
105	48.00	1.04	21.00	1.05	15.90	1.22
120	51.00	1.11	23.00	1.15	15.90	1.22
135	54.00	1.17	26.00	1.30	15.20	1.17
150	58.00	1.26	30.00	1.50	14.40	1.11
165	60.00	1.30	33.00	1.65	13.60	1.05
180	63.00	1.37	35.00	1.75	13.00	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	58.00	1.23	31.70	1.59	12.70	1.00
15	56.00	1.19	30.00	1.50	13.20	1.04
30	54.00	1.15	27.00	1.35	13.90	1.09
45	52.00	1.11	25.00	1.25	15.00	1.18
60	51.00	1.09	23.00	1.15	15.60	1.23
75	48.00	1.02	210.00	1.05	15.70	1.24
90	47.00	1.00	20.00	1.00	15.20	1.20
105	48.00	1.02	21.00	1.05	15.70	1.24
120	51.00	1.09	23.00	1.15	15.60	1.23
135	52.00	1.11	25.00	1.25	15.00	1.18
150	54.00	1.15	27.00	1.35	13.90	1.09
165	56.00	1.19	30.00	1.50	13.20	1.04
180	58.00	1.23	31.70	1.59	12.70	1.00

粒子直径: 0.360  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	205.00	2.50	140.00	8.75	14.00	1.00
15	193.00	2.35	128.00	8.00	17.00	1.21
30	171.00	2.09	107.00	6.69	23.00	1.64
45	144.00	1.76	76.00	4.75	31.00	2.21
60	113.00	1.38	47.00	2.94	40.00	2.86
75	90.00	1.10	22.00	1.38	45.00	3.21
90	82.00	1.00	16.00	1.00	47.00	3.36
105	90.00	1.10	22.00	1.38	45.00	3.21
120	113.00	1.38	47.00	2.94	40.00	2.86
135	144.00	1.76	76.00	4.75	31.00	2.21
150	171.00	2.09	107.00	6.69	23.00	1.64
165	193.00	2.35	128.00	8.00	17.00	1.21
180	205.00	2.50	140.00	8.75	14.00	1.00

粒子直径: 0.360  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	185.00	2.18	124.00	6.89	15.00	1.00
15	173.00	2.04	113.00	6.28	18.00	1.20
30	153.00	1.80	96.00	5.33	23.00	1.53
45	128.00	1.51	69.00	3.83	31.00	2.07
60	104.00	1.22	43.00	2.39	40.00	2.67
75	89.00	1.05	24.00	1.33	43.00	2.87
90	85.00	1.00	18.00	1.00	45.00	3.00
105	89.00	1.05	24.00	1.33	43.00	2.87
120	104.00	1.22	43.00	2.39	40.00	2.67
135	128.00	1.51	69.00	3.83	31.00	2.07
150	153.00	1.80	96.00	5.33	23.00	1.53
165	173.00	2.04	113.00	6.28	18.00	1.20
180	185.00	2.18	124.00	6.89	15.00	1.00

粒子直径: 0.360  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	132.00	1.91	88.00	5.18	14.00	1.00
15	126.00	1.83	82.00	4.82	16.00	1.14
30	113.00	1.64	70.00	4.12	19.00	1.36
45	98.00	1.42	51.00	3.00	24.00	1.71
60	82.00	1.19	33.00	1.94	30.00	2.14
75	72.00	1.04	20.00	1.18	34.00	2.43
90	69.00	1.00	17.00	1.00	35.00	2.50
105	72.00	1.04	20.00	1.18	34.00	2.43
120	82.00	1.19	33.00	1.94	30.00	2.14
135	98.00	1.42	51.00	3.00	24.00	1.71
150	113.00	1.64	70.00	4.12	19.00	1.36
165	126.00	1.83	82.00	4.82	16.00	1.14
180	132.00	1.91	88.00	5.18	14.00	1.00

粒子直径: 0.360  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	142.00	1.27	80.00	1.48	26.00	1.00
15	138.00	1.23	75.00	1.39	28.00	1.08
30	133.00	1.19	72.00	1.33	28.00	1.08
45	126.00	1.13	66.00	1.22	29.00	1.12
60	119.00	1.06	60.00	1.11	30.00	1.15
75	114.00	1.02	55.00	1.02	30.00	1.15
90	112.00	1.00	54.00	1.00	30.00	1.15
105	114.00	1.02	55.00	1.02	30.00	1.15
120	119.00	1.06	60.00	1.11	30.00	1.15
135	126.00	1.13	66.00	1.22	29.00	1.12
150	133.00	1.19	72.00	1.33	28.00	1.08
165	138.00	1.23	75.00	1.39	28.00	1.08
180	142.00	1.27	80.00	1.48	26.00	1.00

粒子直径: 0.360  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	126.00	1.20	71.00	1.42	25.00	1.00
15	123.00	1.17	68.00	1.36	26.00	1.04
30	119.00	1.13	63.00	1.26	27.00	1.08
45	114.00	1.09	58.00	1.16	28.00	1.12
60	111.00	1.06	53.00	1.06	29.00	1.16
75	105.00	1.00	50.00	1.00	30.00	1.20
90	105.00	1.00	50.00	1.00	30.00	1.20
105	105.00	1.00	50.00	1.00	30.00	1.20
120	111.00	1.06	53.00	1.06	29.00	1.16
135	114.00	1.09	58.00	1.16	28.00	1.12
150	119.00	1.13	63.00	1.26	27.00	1.08
165	123.00	1.17	68.00	1.36	26.00	1.04
180	126.00	1.20	71.00	1.42	25.00	1.00

粒子直径: 0.360  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	95.00	1.16	53.00	1.36	20.00	1.00
15	92.00	1.12	50.00	1.28	21.00	1.05
30	89.00	1.09	47.00	1.21	22.00	1.10
45	86.00	1.05	44.00	1.13	23.00	1.15
60	83.00	1.01	40.00	1.03	24.00	1.20
75	82.00	1.00	39.00	1.00	24.00	1.20
90	82.00	1.00	39.00	1.00	24.00	1.20
105	82.00	1.00	39.00	1.00	24.00	1.20
120	83.00	1.01	40.00	1.03	24.00	1.20
135	86.00	1.05	44.00	1.13	23.00	1.15
150	89.00	1.09	47.00	1.21	22.00	1.10
165	92.00	1.12	50.00	1.28	21.00	1.05
180	95.00	1.16	53.00	1.36	20.00	1.00

粒子直径: 0.360  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	119.00	2.97	83.00	11.37	6.00	1.00
15	110.00	2.75	76.00	10.41	7.20	1.20
30	100.00	2.50	63.00	8.63	10.30	1.72
45	81.00	2.03	44.00	6.03	15.00	2.50
60	60.00	1.50	27.00	3.70	20.00	3.33
75	45.00	1.13	12.00	1.64	23.00	3.83
90	40.00	1.00	7.30	1.00	24.00	4.00
105	45.00	1.13	12.00	1.64	23.00	3.83
120	60.00	1.50	27.00	3.70	20.00	3.33
135	81.00	2.03	44.00	6.03	15.00	2.50
150	100.00	2.50	63.00	8.63	10.30	1.72
165	110.00	2.75	76.00	10.41	7.20	1.20
180	119.00	2.97	83.00	11.37	6.00	1.00

粒子直径: 0.360  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	102.00	2.32	71.00	9.22	6.10	1.00
15	96.00	2.18	65.00	8.44	7.60	1.25
30	89.00	2.02	55.00	7.14	10.00	1.64
45	76.00	1.73	36.00	4.68	15.00	2.46
60	60.00	1.36	20.00	2.60	20.00	3.28
75	47.00	1.07	11.00	1.43	23.00	3.77
90	44.00	1.00	7.70	1.00	24.00	3.93
105	47.00	1.07	11.00	1.43	23.00	3.77
120	60.00	1.36	20.00	2.60	20.00	3.28
135	76.00	1.73	36.00	4.68	15.00	2.46
150	89.00	2.02	55.00	7.14	10.00	1.64
165	96.00	2.18	65.00	8.44	7.60	1.25
180	102.00	2.32	71.00	9.22	6.10	1.00

粒子直径: 0.360  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	98.00	2.18	68.00	6.80	7.60	1.00
15	90.00	2.00	61.00	6.10	9.20	1.21
30	81.00	1.80	51.00	5.10	12.00	1.58
45	68.00	1.51	38.00	3.80	16.00	2.11
60	53.00	1.18	23.00	2.30	20.00	2.63
75	47.00	1.04	13.00	1.30	23.00	3.03
90	45.00	1.00	10.00	1.00	25.00	3.29
105	47.00	1.04	13.00	1.30	23.00	3.03
120	53.00	1.18	23.00	2.30	20.00	2.63
135	68.00	1.51	38.00	3.80	16.00	2.11
150	81.00	1.80	51.00	5.10	12.00	1.58
165	90.00	2.00	61.00	6.10	9.20	1.21
180	98.00	2.18	68.00	6.80	7.60	1.00

粒子直径:  $0.360\ \mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	76.00	1.43	46.00	1.64	11.00	1.00
15	73.00	1.38	43.00	1.54	12.00	1.09
30	70.00	1.32	40.00	1.43	12.00	1.09
45	68.00	1.28	38.00	1.36	12.00	1.09
60	64.00	1.21	33.00	1.18	13.00	1.18
75	57.00	1.08	30.00	1.07	13.00	1.18
90	53.00	1.00	28.00	1.00	13.00	1.18
105	57.00	1.08	30.00	1.07	13.00	1.18
120	64.00	1.21	33.00	1.18	13.00	1.18
135	68.00	1.28	38.00	1.36	12.00	1.09
150	70.00	1.32	40.00	1.43	12.00	1.09
165	73.00	1.38	43.00	1.54	12.00	1.09
180	76.00	1.43	46.00	1.64	11.00	1.00

粒子直径:  $0.360\ \mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	80.00	1.29	46.00	1.48	12.00	1.00
15	77.00	1.24	43.00	1.39	13.00	1.08
30	74.00	1.19	41.00	1.32	13.00	1.08
45	68.00	1.10	35.00	1.13	14.00	1.17
60	67.00	1.08	34.00	1.10	15.00	1.25
75	64.00	1.03	32.00	1.03	15.00	1.25
90	62.00	1.00	31.00	1.00	15.00	1.25
105	64.00	1.03	32.00	1.03	15.00	1.25
120	67.00	1.08	34.00	1.10	15.00	1.25
135	68.00	1.10	35.00	1.13	14.00	1.17
150	74.00	1.19	41.00	1.32	13.00	1.08
165	77.00	1.24	43.00	1.39	13.00	1.08
180	80.00	1.29	46.00	1.48	12.00	1.00

粒子直径:  $0.360\ \mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	72.00	1.29	43.00	1.48	12.00	1.00
15	70.00	1.25	40.00	1.38	13.00	1.08
30	67.00	1.20	38.00	1.31	13.00	1.08
45	65.00	1.16	36.00	1.24	14.00	1.17
60	63.00	1.13	61.00	2.10	14.00	1.17
75	57.00	1.02	29.00	1.00	14.00	1.17
90	56.00	1.00	29.00	1.00	14.00	1.17
105	57.00	1.02	29.00	1.00	14.00	1.17
120	63.00	1.13	61.00	2.10	14.00	1.17
135	65.00	1.16	36.00	1.24	14.00	1.17
150	67.00	1.20	38.00	1.31	13.00	1.08
165	70.00	1.25	40.00	1.38	13.00	1.08
180	72.00	1.29	43.00	1.48	12.00	1.00

粒子直径: 0.123  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	208.00	13.87	139.00	22.06	4.40	1.00
15	180.00	12.00	130.00	20.63	4.40	1.00
30	150.00	10.00	108.00	17.14	4.50	1.02
45	111.00	7.40	78.00	12.38	4.60	1.05
60	64.00	4.27	42.00	6.67	4.70	1.07
75	32.00	2.13	18.00	2.86	4.80	1.09
90	15.00	1.00	6.30	1.00	4.80	1.09
105	32.00	2.13	18.00	2.86	4.80	1.09
120	64.00	4.27	42.00	6.67	4.70	1.07
135	111.00	7.40	78.00	12.38	4.60	1.05
150	150.00	10.00	108.00	17.14	4.50	1.02
165	180.00	12.00	130.00	20.63	4.40	1.00
180	208.00	13.87	139.00	22.06	4.40	1.00

粒子直径: 0.123  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	190.00	14.62	140.00	24.14	3.90	1.00
15	178.00	13.69	128.00	22.07	4.00	1.03
30	144.00	11.08	104.00	17.93	4.50	1.15
45	106.00	8.15	75.00	12.93	4.60	1.18
60	60.00	4.62	41.00	7.07	4.70	1.21
75	30.00	2.31	19.00	3.28	4.70	1.21
90	13.00	1.00	5.80	1.00	4.70	1.21
105	30.00	2.31	19.00	3.28	4.70	1.21
120	60.00	4.62	41.00	7.07	4.70	1.21
135	106.00	8.15	75.00	12.93	4.60	1.18
150	144.00	11.08	104.00	17.93	4.50	1.15
165	178.00	13.69	128.00	22.07	4.00	1.03
180	190.00	14.62	140.00	24.14	3.90	1.00

粒子直径: 0.123  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	172.00	11.47	126.00	18.26	4.60	1.00
15	161.00	10.73	119.00	17.25	5.00	1.09
30	137.00	9.13	99.00	14.35	5.00	1.09
45	102.00	6.80	73.00	10.58	5.00	1.09
60	60.00	4.00	41.00	5.94	5.10	1.11
75	28.00	1.87	16.00	2.32	5.20	1.13
90	15.00	1.00	6.90	1.00	5.20	1.13
105	28.00	1.87	16.00	2.32	5.20	1.13
120	60.00	4.00	41.00	5.94	5.10	1.11
135	102.00	6.80	73.00	10.58	5.00	1.09
150	137.00	9.13	99.00	14.35	5.00	1.09
165	161.00	10.73	119.00	17.25	5.00	1.09
180	172.00	11.47	126.00	18.26	4.60	1.00

粒子直径: 0.123  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	114.00	2.92	81.00	3.12	4.20	1.02
15	104.00	2.67	71.00	2.73	4.20	1.02
30	88.00	2.26	63.00	2.42	4.20	1.02
45	73.00	1.87	53.00	2.04	4.20	1.02
60	57.00	1.46	40.00	1.54	4.10	1.00
75	46.00	1.18	31.00	1.19	4.30	1.05
90	39.00	1.00	26.00	1.00	4.10	1.00
105	46.00	1.18	31.00	1.19	4.30	1.05
120	57.00	1.46	40.00	1.54	4.10	1.00
135	73.00	1.87	53.00	2.04	4.20	1.02
150	88.00	2.26	63.00	2.42	4.20	1.02
165	104.00	2.67	71.00	2.73	4.20	1.02
180	114.00	2.92	81.00	3.12	4.20	1.02

粒子直径: 0.123  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	63.00 散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	106.00	2.21	75.00	2.50	4.40	1.00
15	95.00	1.98	68.00	2.27	4.40	1.00
30	83.00	1.73	58.00	1.93	4.40	1.00
45	71.00	1.48	48.00	1.60	4.40	1.00
60	60.00	1.25	40.00	1.33	4.60	1.05
75	50.00	1.04	33.00	1.10	4.60	1.05
90	48.00	1.00	30.00	1.00	4.60	1.05
105	50.00	1.04	33.00	1.10	4.60	1.05
120	60.00	1.25	40.00	1.33	4.60	1.05
135	71.00	1.48	48.00	1.60	4.40	1.00
150	83.00	1.73	58.00	1.93	4.40	1.00
165	95.00	1.98	68.00	2.27	4.40	1.00
180	106.00	2.21	75.00	2.50	4.40	1.00

粒子直径: 0.123  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	90.00	3.46	65.00	3.82	4.40	1.33
15	79.00	3.04	57.00	3.35	4.30	1.30
30	63.00	2.42	44.00	2.59	4.00	1.21
45	49.00	1.88	34.00	2.00	3.80	1.15
60	36.00	1.38	25.00	1.47	3.60	1.09
75	30.00	1.15	20.00	1.18	3.30	1.00
90	26.00	1.00	17.00	1.00	3.50	1.06
105	30.00	1.15	20.00	1.18	3.30	1.00
120	36.00	1.38	25.00	1.47	3.60	1.09
135	49.00	1.88	34.00	2.00	3.80	1.15
150	63.00	2.42	44.00	2.59	4.00	1.21
165	79.00	3.04	57.00	3.35	4.30	1.30
180	90.00	3.46	65.00	3.82	4.40	1.33

粒子直径: 0.123  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	130.00	11.82	93.00	21.14	3.70	1.00
15	128.00	11.64	93.00	21.14	3.80	1.03
30	105.00	9.55	75.00	17.05	4.20	1.14
45	77.00	7.00	52.00	11.82	4.70	1.27
60	45.00	4.09	29.00	6.59	4.90	1.32
75	23.00	2.09	12.00	2.73	4.90	1.32
90	11.00	1.00	4.40	1.00	4.90	1.32
105	23.00	2.09	12.00	2.73	4.90	1.32
120	45.00	4.09	29.00	6.59	4.90	1.32
135	77.00	7.00	52.00	11.82	4.70	1.27
150	105.00	9.55	75.00	17.05	4.20	1.14
165	128.00	11.64	93.00	21.17	3.80	1.03
180	130.00	11.82	93.00	21.14	3.70	1.00

粒子直径: 0.123  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	122.00	11.09	86.00	19.11	2.40	1.00
15	120.00	10.91	86.00	19.11	2.40	1.00
30	100.00	9.09	72.00	16.00	2.60	1.08
45	75.00	6.82	52.00	11.56	2.80	1.17
60	45.00	4.09	29.00	6.44	3.00	1.25
75	20.00	1.82	12.00	2.67	3.20	1.33
90	11.00	1.00	4.50	1.00	3.20	1.33
105	20.00	1.82	12.00	2.67	3.20	1.33
120	45.00	4.09	29.00	6.44	3.00	1.25
135	75.00	6.82	52.00	11.56	2.80	1.17
150	100.00	9.09	72.00	16.00	2.60	1.08
165	120.00	10.91	86.00	19.11	2.40	1.00
180	122.00	11.09	86.00	19.11	2.40	1.00

粒子直径: 0.123  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	114.00	11.88	85.00	17.71	2.70	1.04
15	112.00	11.67	83.00	17.29	2.70	1.04
30	96.00	10.00	70.00	14.58	2.60	1.00
45	73.00	7.60	52.00	10.83	2.70	1.04
60	43.00	4.48	30.00	6.25	3.00	1.15
75	20.00	2.08	12.00	2.50	3.00	1.15
90	9.60	1.00	4.80	1.00	3.00	1.15
105	20.00	2.08	12.00	2.50	3.00	1.15
120	43.00	4.48	30.00	6.25	3.00	1.15
135	73.00	7.60	52.00	10.83	2.70	1.04
150	96.00	10.00	70.00	14.58	2.60	1.00
165	112.00	11.67	83.00	17.29	2.70	1.04
180	114.00	11.88	85.00	17.71	2.70	1.04

粒子直径: 0.123  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	72.00	2.57	49.00	2.58	4.90	1.53
15	68.00	2.43	46.00	2.42	5.00	1.56
30	61.00	2.18	41.00	2.16	5.00	1.56
45	55.00	1.96	35.00	1.84	4.80	1.50
60	45.00	1.61	29.00	1.53	4.00	1.25
75	35.00	1.25	23.00	1.21	3.70	1.16
90	28.00	1.00	19.00	1.00	3.20	1.00
105	35.00	1.25	23.00	1.21	3.70	1.16
120	45.00	1.61	29.00	1.53	4.00	1.25
135	55.00	1.96	35.00	1.84	4.80	1.50
150	61.00	2.18	41.00	2.16	5.00	1.56
165	68.00	2.43	46.00	2.42	5.00	1.56
180	72.00	2.57	49.00	2.58	4.90	1.53

粒子直径: 0.123  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	67.00	2.09	46.00	2.19	2.70	1.04
15	63.00	1.97	44.00	2.10	2.70	1.04
30	58.00	1.81	40.00	1.90	2.70	1.04
45	52.00	1.63	35.00	1.67	2.70	1.04
60	43.00	1.34	29.00	1.38	2.70	1.04
75	36.00	1.13	24.00	1.14	2.60	1.00
90	32.00	1.00	21.00	1.00	2.60	1.00
105	36.00	1.13	24.00	1.14	2.60	1.00
120	43.00	1.34	29.00	1.38	2.70	1.04
135	52.00	1.63	35.00	1.67	2.70	1.04
150	58.00	1.81	40.00	1.90	2.70	1.04
165	63.00	1.97	44.00	2.10	2.70	1.04
180	67.00	2.09	46.00	2.19	2.70	1.04

粒子直径: 0.123  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	62.00	2.07	44.00	2.20	2.60	1.00
15	61.00	2.03	43.00	2.15	2.60	1.00
30	56.00	1.87	39.00	1.92	2.80	1.08
45	50.00	1.67	35.00	1.75	2.70	1.04
60	42.00	1.40	29.00	1.45	2.60	1.00
75	35.00	1.17	24.00	1.20	2.60	1.00
90	30.00	1.00	20.00	1.00	2.60	1.00
105	35.00	1.17	24.00	1.20	2.60	1.00
120	42.00	1.40	29.00	1.45	2.60	1.00
135	50.00	1.67	35.00	1.75	2.70	1.04
150	56.00	1.87	39.00	1.95	2.80	1.08
165	61.00	2.03	43.00	2.15	2.60	1.00
180	62.00	2.07	44.00	2.20	2.60	1.00

粒子直径: 0.065  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	84.00	2.47	45.00	4.59	17.00	1.00
15	84.00	2.47	45.00	4.59	18.00	1.06
30	80.00	2.35	40.00	4.08	19.00	1.12
45	69.00	2.03	31.00	3.16	19.00	1.12
60	46.00	1.35	18.00	1.84	20.00	1.18
75	40.00	1.18	14.00	1.43	20.00	1.18
90	34.00	1.00	9.80	1.00	21.00	1.24
105	40.00	1.18	14.00	1.43	20.00	1.18
120	46.00	1.35	18.00	1.84	20.00	1.18
135	69.00	2.03	31.00	3.16	19.00	1.12
150	80.00	2.35	40.00	4.08	19.00	1.12
165	84.00	2.47	45.00	4.59	18.00	1.06
180	84.00	2.47	45.00	4.59	17.00	1.00

粒子直径: 0.065  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度 角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	46.00	6.22	32.00	11.03	1.80	1.00
15	44.00	5.95	30.00	10.34	2.00	1.11
30	38.00	5.14	26.00	8.97	2.00	1.11
45	29.00	3.92	19.00	6.55	2.10	1.17
60	20.00	2.70	12.00	4.14	2.30	1.28
75	12.00	1.62	5.70	1.97	2.40	1.33
90	7.40	1.00	2.90	1.00	2.40	1.33
105	12.00	1.62	5.70	1.97	2.40	1.33
120	20.00	2.70	12.00	4.14	2.30	1.28
135	29.00	3.92	19.00	6.55	2.10	1.17
150	38.00	5.14	26.00	8.97	2.00	1.11
165	44.00	5.95	30.00	10.34	2.00	1.11
180	46.00	6.22	32.00	11.03	1.80	1.00

粒子直径: 0.065  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	42.00	8.57	30.00	11.11	1.40	1.00
15	42.00	8.57	30.00	11.11	1.50	1.07
30	38.00	7.76	27.00	10.00	1.60	1.14
45	28.00	5.71	20.00	7.41	1.60	1.14
60	16.00	3.27	11.00	4.07	1.60	1.14
75	8.60	1.76	5.50	2.04	1.70	1.21
90	4.90	1.00	2.70	1.00	1.70	1.21
105	8.60	1.76	5.50	2.04	1.70	1.21
120	16.00	3.27	11.00	4.07	1.60	1.14
135	28.00	5.71	20.00	7.41	1.60	1.14
150	38.00	7.76	27.00	10.00	1.60	1.14
165	42.00	8.57	30.00	11.11	1.50	1.07
180	42.00	8.57	30.00	11.11	1.40	1.00

粒子直径:  $0.065 \mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	65.00	1.86	27.00	1.80	22.00	1.83
15	71.00	2.03	31.00	2.07	22.00	1.83
30	67.00	1.91	29.00	1.93	22.00	1.83
45	53.00	1.51	23.00	1.53	18.00	1.50
60	41.00	1.17	17.00	1.13	14.00	1.17
75	44.00	1.26	18.00	1.20	15.00	1.25
90	35.00	1.00	15.00	1.00	12.00	1.00
105	44.00	1.26	18.00	1.20	15.00	1.25
120	41.00	1.17	17.00	1.13	14.00	1.17
135	53.00	1.51	23.00	1.53	18.00	1.50
150	67.00	1.91	29.00	1.93	22.00	1.83
165	71.00	2.03	31.00	2.07	22.00	1.83
180	65.00	1.86	27.00	1.80	22.00	1.83

粒子直径:  $0.065 \mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	29.00	1.93	18.00	1.98	2.80	1.47
15	27.00	1.80	18.00	1.98	2.80	1.47
30	24.00	1.60	15.00	1.65	2.70	1.42
45	22.00	1.47	14.00	1.54	2.70	1.42
60	19.00	1.27	12.00	1.32	2.00	1.05
75	17.00	1.13	11.00	1.21	2.00	1.05
90	15.00	1.00	9.10	1.00	1.90	1.00
105	17.00	1.13	11.00	1.21	2.00	1.05
120	19.00	1.27	12.00	1.32	2.00	1.05
135	22.00	1.47	14.00	1.54	2.70	1.42
150	24.00	1.60	15.00	1.65	2.70	1.42
165	27.00	1.80	18.00	1.98	2.80	1.47
180	29.00	1.93	18.00	1.98	2.80	1.47

粒子直径:  $0.065 \mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	25.00	2.08	18.00	2.22	1.50	1.00
15	24.00	2.00	17.00	2.10	1.50	1.00
30	21.00	1.75	15.00	1.85	1.50	1.00
45	19.00	1.58	13.00	1.60	1.50	1.00
60	15.00	1.25	11.00	1.36	1.50	1.00
75	13.00	1.08	8.90	1.10	1.50	1.00
90	12.00	1.00	8.10	1.00	1.50	1.00
105	13.00	1.08	8.90	1.10	1.50	1.00
120	15.00	1.25	11.00	1.36	1.50	1.00
135	19.00	1.58	13.00	1.60	1.50	1.00
150	21.00	1.75	15.00	1.85	1.50	1.00
165	24.00	2.00	17.00	2.10	1.50	1.00
180	25.00	2.08	18.00	2.22	1.50	1.00

粒子直径: 0.065  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	21.00	7.50	15.00	10.71	0.92	1.00
15	20.00	7.14	14.00	10.00	0.93	1.01
30	18.00	6.43	13.00	9.29	0.94	1.02
45	15.00	5.36	11.00	7.86	1.96	1.04
60	9.00	3.21	6.10	4.36	1.00	1.09
75	4.70	1.68	2.90	2.07	1.00	1.09
90	2.80	1.00	1.40	1.00	1.00	1.09
105	4.70	1.68	2.90	2.07	1.00	1.09
120	9.00	3.21	6.10	4.36	1.00	1.09
135	15.00	5.36	11.00	7.86	0.96	1.04
150	18.00	6.43	13.00	9.29	1.94	1.02
165	20.00	7.14	14.00	10.00	0.93	1.01
180	21.00	7.50	15.00	10.71	0.92	1.00

粒子直径: 0.065  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	25.00	6.76	17.00	13.08	0.88	1.00
15	25.00	6.76	16.00	12.31	1.00	1.14
30	22.00	5.95	14.00	10.77	1.10	1.25
45	17.00	4.59	11.00	8.46	1.10	1.25
60	11.00	2.97	6.40	4.92	1.10	1.25
75	6.40	1.73	3.00	2.31	1.10	1.25
90	3.70	1.00	1.30	1.00	1.20	1.36
105	6.40	1.73	3.00	2.31	1.10	1.25
120	11.00	2.97	6.40	4.92	1.10	1.25
135	17.00	4.59	11.00	8.46	1.10	1.25
150	22.00	5.95	14.00	10.77	1.10	1.25
165	25.00	6.76	16.00	12.31	1.00	1.14
180	25.00	6.76	17.00	13.08	0.88	1.00

粒子直径: 0.065  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	23.00	23.00	17.00	8.95	1.30	1.00
15	23.00	23.00	17.00	8.95	1.30	1.00
30	20.00	20.00	14.00	7.37	1.30	1.00
45	16.00	16.00	11.00	5.79	1.30	1.00
60	1.00	1.00	7.00	3.68	1.30	1.00
75	5.50	5.50	3.30	1.74	1.30	1.00
90	3.70	3.70	1.90	1.00	1.30	1.00
105	5.50	5.50	3.30	1.74	1.30	1.00
120	1.00	1.00	7.00	3.68	1.30	1.00
135	16.00	16.00	11.00	5.79	1.30	1.00
150	20.00	20.00	14.00	7.37	1.30	1.00
165	23.00	23.00	17.00	8.95	1.30	1.00
180	23.00	23.00	17.00	8.95	1.30	1.00

粒子直径: 0.065  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	12.00	2.03	8.70	2.23	0.90	1.01
15	11.50	1.95	8.10	2.08	0.90	1.01
30	10.50	1.78	7.40	1.90	0.90	1.01
45	9.50	1.61	6.60	1.69	0.90	1.01
60	8.00	1.36	5.40	1.38	0.90	1.01
75	6.80	1.15	4.60	1.18	0.90	1.01
90	5.90	1.00	3.90	1.00	0.89	1.00
105	6.80	1.15	4.60	1.18	0.90	1.01
120	8.00	1.36	5.40	1.38	0.90	1.01
135	9.50	1.61	6.60	1.69	0.90	1.01
150	10.50	1.78	7.40	1.90	0.90	1.01
165	11.50	1.95	8.10	2.08	0.90	1.01
180	12.00	2.03	8.70	2.23	0.90	1.01

粒子直径: 0.065  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度 方位	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	14.90	1.71	9.60	1.96	0.94	1.00
15	14.30	1.64	9.10	1.86	0.94	1.00
30	13.50	1.55	8.30	1.69	1.00	1.06
45	12.20	1.40	7.40	1.51	1.00	1.06
60	10.60	1.22	6.30	1.29	1.00	1.06
75	9.60	1.10	5.50	1.12	1.00	1.06
90	8.70	1.00	4.90	1.00	0.95	1.01
105	9.60	1.10	5.50	1.12	1.00	1.06
120	10.60	1.22	6.30	1.29	1.00	1.06
135	12.20	1.40	7.40	1.51	1.00	1.06
150	13.50	1.55	8.30	1.69	1.00	1.06
165	14.30	1.64	9.10	1.86	0.94	1.00
180	14.90	1.71	9.60	1.96	0.94	1.00

粒子直径: 0.065  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 圆偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	15.00	1.67	10.00	1.82	1.30	1.00
15	14.00	1.56	9.80	1.78	1.30	1.00
30	13.00	1.44	9.00	1.64	1.30	1.00
45	12.00	1.33	8.10	1.47	1.30	1.00
60	10.00	1.11	6.90	1.25	1.30	1.00
75	9.00	1.00	6.00	1.09	1.30	1.00
90	9.00	1.00	5.50	1.00	1.30	1.00
105	9.00	1.00	6.00	1.09	1.30	1.00
120	10.00	1.11	6.90	1.25	1.30	1.00
135	12.00	1.33	8.10	1.47	1.30	1.00
150	13.00	1.44	9.00	1.64	1.30	1.00
165	14.00	1.56	9.80	1.78	1.30	1.00
180	15.00	1.67	10.00	1.82	1.30	1.00

**附录 B: 实验数据二 (表中光强均为当量值)**

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$     浓度: 0.01250%    深度: 0.00cm    入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	84.00	1.31	38.00	3.17	11.60	1.00
15	82.00	1.28	35.00	2.92	12.60	1.09
30	79.00	1.23	32.00	2.67	15.00	1.29
45	75.00	1.17	25.00	2.08	17.60	1.52
60	70.00	1.09	19.00	1.58	22.50	1.94
75	65.00	1.02	13.00	1.08	24.90	2.15
90	64.00	1.00	12.00	1.00	25.50	2.20
105	65.00	1.02	13.00	1.08	24.90	2.15
120	70.00	1.09	19.00	1.58	22.50	1.94
135	75.00	1.17	25.00	2.08	17.60	1.52
150	79.00	1.23	32.00	2.67	15.00	1.29
165	82.00	1.28	35.00	2.92	12.60	1.09
180	84.00	1.31	38.00	3.17	11.60	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$     浓度: 0.01250%    深度: 0.50cm    入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	82.00	1.24	35.00	2.92	11.60	1.00
15	81.00	1.23	32.00	2.75	12.80	1.10
30	78.00	1.18	30.00	2.50	15.50	1.34
45	74.00	1.12	25.00	2.08	18.50	1.59
60	70.00	1.06	18.00	1.50	21.90	1.89
75	67.00	1.02	14.00	1.17	24.40	2.10
90	66.00	1.00	12.00	1.00	26.00	2.24
105	67.00	1.02	14.00	1.17	24.40	2.10
120	70.00	1.06	18.00	1.50	21.90	1.89
135	74.00	1.12	25.00	2.08	18.50	1.59
150	78.00	1.18	30.00	2.50	15.50	1.34
165	81.00	1.23	33.00	2.75	12.80	1.10
180	82.00	1.24	35.00	2.92	11.60	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$     浓度: 0.01250%    深度: 1.00cm    入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	79.00	1.23	35.00	2.69	12.00	1.00
15	77.00	1.20	31.00	2.38	13.60	1.13
30	75.00	1.17	29.00	2.23	14.90	1.24
45	72.00	1.13	24.00	1.85	17.30	1.44
60	68.00	1.06	19.00	1.46	21.60	1.80
75	65.00	1.02	14.00	1.08	24.00	2.00
90	64.00	1.00	13.00	1.00	24.30	2.02
105	65.00	1.02	14.00	1.08	24.00	2.00
120	68.00	1.06	19.00	1.46	21.60	1.80
135	72.00	1.13	24.00	1.85	17.30	1.44
150	75.00	1.17	29.00	2.23	14.90	1.24
165	77.00	1.20	31.00	2.38	13.60	1.13
180	79.00	1.23	35.00	2.69	12.00	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.01250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	75.00	1.25	32.00	2.67	10.90	1.00
15	72.00	1.20	30.00	2.50	11.40	1.05
30	69.00	1.15	27.00	2.25	13.60	1.25
45	67.00	1.12	25.00	2.08	15.80	1.45
60	63.00	1.05	17.00	1.42	19.50	1.79
75	61.00	1.02	14.00	1.17	21.60	1.98
90	60.00	1.00	12.00	1.00	22.50	2.06
105	61.00	1.02	14.00	1.17	21.60	1.98
120	63.00	1.05	17.00	1.42	19.50	1.79
135	67.00	1.12	25.00	2.08	15.80	1.45
150	69.00	1.15	27.00	2.25	13.60	1.25
165	72.00	1.20	30.00	2.50	11.40	1.05
180	75.00	1.25	32.00	2.67	10.90	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.01250% 深度: 2.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	63.00	1.21	28.00	2.80	9.50	1.00
15	61.00	1.17	27.00	2.70	10.10	1.06
30	60.00	1.15	24.00	2.40	11.90	1.25
45	58.00	1.12	20.00	2.00	13.90	1.46
60	55.00	1.06	16.00	1.60	16.60	1.75
75	53.00	1.02	12.00	1.20	18.40	1.94
90	52.00	1.00	10.00	1.00	19.60	2.06
105	53.00	1.02	12.00	1.20	18.40	1.94
120	55.00	1.06	16.00	1.60	16.60	1.75
135	58.00	1.12	20.00	2.00	13.90	1.46
150	60.00	1.15	24.00	2.40	11.90	1.25
165	61.00	1.17	27.00	2.70	10.10	1.06
180	63.00	1.21	28.00	2.80	9.50	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.01250% 深度: 2.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	54.00	1.20	24.00	2.67	8.50	1.00
15	53.00	1.18	23.00	2.56	9.00	1.06
30	52.00	1.16	20.00	2.22	10.60	1.25
45	50.00	1.11	17.00	1.89	12.20	1.44
60	48.00	1.07	13.00	1.44	14.60	1.72
75	46.00	1.02	10.00	1.11	16.10	1.89
90	45.00	1.00	9.00	1.00	16.70	1.96
105	46.00	1.02	10.00	1.11	16.10	1.89
120	48.00	1.07	13.00	1.44	14.60	1.72
135	50.00	1.11	17.00	1.89	12.20	1.44
150	52.00	1.16	20.00	2.22	10.60	1.25
165	53.00	1.18	23.00	2.56	9.00	1.06
180	54.00	1.20	24.00	2.67	8.50	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.01250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	47.00	1.24	21.00	2.33	7.40	1.00
15	45.00	1.18	20.00	2.22	7.70	1.04
30	44.00	1.16	18.00	2.00	9.40	1.27
45	43.00	1.13	15.00	1.67	10.90	1.47
60	41.00	1.08	12.00	1.33	12.70	1.72
75	39.00	1.03	10.00	1.11	13.80	1.86
90	38.00	1.00	9.00	1.00	14.30	1.93
105	39.00	1.03	10.00	1.11	13.80	1.86
120	41.00	1.08	12.00	1.33	12.70	1.72
135	43.00	1.13	15.00	1.67	10.90	1.47
150	44.00	1.16	18.00	2.00	9.40	1.27
165	45.00	1.18	20.00	2.22	7.70	1.04
180	47.00	1.24	21.00	2.33	7.40	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.01250% 深度: 3.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	39.00	1.22	16.00	2.29	6.60	1.00
15	38.00	1.19	17.00	2.43	6.90	1.05
30	36.00	1.13	15.00	2.14	8.00	1.21
45	35.00	1.09	12.60	1.80	9.20	1.39
60	34.00	1.06	10.00	1.43	10.50	1.59
75	32.00	1.00	8.00	1.14	11.40	1.73
90	32.00	1.00	7.00	1.00	11.70	1.77
105	32.00	1.00	8.00	1.14	11.40	1.73
120	34.00	1.06	10.00	1.43	10.50	1.59
135	35.00	1.09	12.60	1.80	9.20	1.39
150	36.00	1.13	15.00	2.14	8.00	1.21
165	38.00	1.19	17.00	2.43	6.90	1.05
180	39.00	1.22	16.00	2.29	6.60	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	48.00	1.71	23.00	5.11	3.80	1.00
15	47.00	1.68	22.00	4.89	4.60	1.21
30	44.00	1.57	19.00	4.22	5.80	1.53
45	41.00	1.46	17.00	3.78	7.40	1.95
60	35.00	1.25	11.00	2.44	9.30	2.45
75	30.00	1.07	6.80	1.51	10.602	2.79
90	28.00	1.00	4.50	1.00	11.70	3.08
105	30.00	1.07	6.80	1.51	10.60	2.79
120	35.00	1.25	11.00	2.44	9.30	2.45
135	41.00	1.46	17.00	3.78	7.40	1.95
150	44.00	1.57	19.00	4.22	5.80	1.53
165	47.00	1.68	22.00	4.89	4.60	1.21
180	48.00	1.71	23.00	5.11	3.80	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	48.00	1.60	23.00	4.60	4.10	1.00
15	47.00	1.57	22.00	4.40	4.30	1.05
30	45.00	1.50	20.00	4.00	5.70	1.39
45	42.00	1.40	16.60	3.32	7.50	1.83
60	37.00	1.23	11.00	2.20	10.20	2.49
75	32.00	1.07	7.30	1.16	12.10	2.95
90	30.00	1.00	5.00	1.00	13.60	3.32
105	32.00	1.07	7.30	1.46	12.10	2.95
120	37.00	1.23	11.00	2.20	10.20	2.49
135	42.00	1.40	16.60	3.32	7.50	1.83
150	45.00	1.50	20.00	4.00	5.70	1.39
165	47.00	1.57	22.00	4.40	4.30	1.05
180	48.00	1.60	23.00	4.60	4.10	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	48.00	1.60	23.00	4.60	4.10	1.00
15	47.00	1.57	22.00	4.40	4.30	1.05
30	45.00	1.50	20.00	4.00	5.70	1.39
45	42.00	1.40	16.60	3.32	7.50	1.83
60	37.00	1.23	11.00	2.20	10.20	2.49
75	32.00	1.07	7.30	1.16	12.10	2.95
90	30.00	1.00	5.00	1.00	13.60	3.32
105	32.00	1.07	7.30	1.46	12.10	2.95
120	37.00	1.23	11.00	2.20	10.20	2.49
135	42.00	1.40	16.60	3.32	7.50	1.83
150	45.00	1.50	20.00	4.00	5.70	1.39
165	47.00	1.57	22.00	4.40	4.30	1.05
180	48.00	1.60	23.00	4.60	4.10	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	47.00	1.57	23.00	4.51	4.20	1.00
15	47.00	1.57	23.00	4.51	4.50	1.07
30	45.00	1.50	20.00	3.92	5.50	1.31
45	42.00	1.40	17.00	3.33	7.10	1.69
60	37.00	1.10	12.00	2.35	9.60	2.29
75	32.00	1.07	7.30	1.43	11.40	2.71
90	30.00	1.00	5.10	1.00	12.50	2.98
105	32.00	1.07	7.30	1.43	11.40	2.71
120	37.00	1.10	12.00	2.35	9.60	2.29
135	42.00	1.40	17.00	3.33	7.10	1.69
150	45.00	1.50	20.00	3.92	5.50	1.31
165	47.00	1.57	23.00	4.51	4.50	1.07
180	47.00	1.57	23.00	4.51	4.20	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 2.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	46.00	1.53	23.00	4.69	4.30	1.00
15	46.00	1.53	23.00	4.69	4.80	1.12
30	44.00	1.47	21.00	4.29	5.90	1.37
45	41.00	1.37	16.00	3.27	7.50	1.74
60	36.00	1.20	10.00	2.04	9.90	2.30
75	32.00	1.07	6.40	1.31	11.90	2.77
90	30.00	1.00	4.90	1.00	12.60	2.99
105	32.00	1.07	6.40	1.31	11.90	2.77
120	36.00	1.20	40.00	2.04	9.90	2.30
135	41.00	1.37	16.00	3.27	7.50	1.74
150	44.00	1.47	21.00	4.29	5.90	1.37
165	46.00	1.53	23.00	4.69	4.80	1.12
180	46.00	1.53	23.00	4.69	4.30	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 2.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	43.00	1.54	21.00	4.38	4.30	1.00
15	43.00	1.54	21.00	4.38	4.60	1.07
30	41.00	1.46	19.00	3.96	5.70	1.33
45	38.00	1.36	14.50	3.02	7.20	1.67
60	34.00	1.21	10.00	2.08	9.30	2.16
75	30.00	1.07	6.50	1.35	11.00	2.56
90	28.00	1.00	4.80	1.00	11.90	2.77
105	30.00	1.07	6.50	1.35	11.00	2.56
120	34.00	1.21	10.00	2.08	9.30	2.16
135	38.00	1.36	14.50	3.02	7.20	1.67
150	41.00	1.46	19.00	3.96	5.70	1.33
165	43.00	1.54	21.00	4.38	4.60	1.07
180	43.00	1.54	21.00	4.38	4.30	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	40.00	1.48	19.00	3.88	4.30	1.00
15	40.00	1.48	19.00	3.88	4.40	1.02
30	38.00	1.41	17.00	3.47	5.30	1.23
45	36.00	1.33	14.00	2.86	6.60	1.53
60	31.00	1.15	10.00	2.04	8.40	1.95
75	28.00	1.04	6.80	1.39	10.00	2.33
90	27.00	1.00	4.90	1.00	11.00	2.56
105	28.00	1.04	6.80	1.39	10.00	2.33
120	31.00	1.15	10.00	1.04	8.40	1.95
135	36.00	1.31	14.00	2.86	6.60	1.53
150	38.00	1.41	17.00	3.47	5.30	1.23
165	40.00	1.48	19.00	3.88	4.40	1.02
180	40.00	1.48	19.00	3.88	4.30	1.00

粒子直径:  $0.494 \mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	37.00	1.48	18.00	3.75	4.20	1.00
15	37.00	1.48	17.00	3.54	4.40	1.05
30	35.00	1.40	16.00	3.33	4.90	1.17
45	32.00	1.28	13.30	2.77	6.00	1.43
60	29.00	1.16	9.10	1.90	7.70	1.83
75	26.00	1.04	6.10	1.27	9.30	2.21
90	25.00	1.00	4.80	1.00	10.00	2.38
105	26.00	1.04	6.10	1.27	9.30	2.21
120	29.00	1.16	9.10	1.90	7.70	1.83
135	32.00	1.28	13.30	2.77	6.00	1.43
150	35.00	1.40	16.00	3.33	4.90	1.17
165	37.00	1.48	17.00	3.54	4.40	1.05
180	37.00	1.48	18.00	3.75	4.20	1.00

粒子直径:  $0.494 \mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度 角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	29.00	2.07	14.00	6.67	1.70	1.00
15	29.00	2.07	14.00	6.67	1.90	1.12
30	27.00	1.93	12.00	5.71	2.40	1.41
45	25.00	1.79	11.00	5.24	3.30	1.94
60	21.00	1.50	7.30	3.48	4.30	2.53
75	16.00	1.14	4.60	2.19	5.20	3.06
90	14.00	1.00	2.10	1.00	5.40	3.18
105	16.00	1.14	4.60	2.19	5.20	3.06
120	21.00	1.50	7.30	3.48	4.30	2.53
135	25.00	1.79	11.00	5.24	3.30	1.94
150	27.00	1.93	12.00	5.71	2.40	1.41
165	29.00	2.07	14.00	6.67	1.90	1.12
180	29.00	2.07	14.00	6.67	1.70	1.00

粒子直径:  $0.494 \mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	29.00	2.07	14.00	5.60	1.90	1.00
15	29.00	2.07	14.00	5.60	2.10	1.11
30	27.00	1.93	13.00	5.20	2.50	1.32
45	25.00	1.79	11.00	4.40	3.20	1.68
60	20.00	1.43	7.30	2.92	4.30	2.26
75	16.00	1.14	4.10	1.64	5.40	2.84
90	14.00	1.00	2.50	1.00	5.70	3.00
105	16.00	1.14	4.10	1.64	5.40	2.84
120	20.00	1.43	7.30	2.92	4.30	2.26
135	25.00	1.79	11.00	4.40	3.20	1.68
150	27.00	1.93	13.00	5.20	2.50	1.32
165	29.00	2.07	14.00	5.60	2.10	1.11
180	29.00	2.07	14.00	5.60	1.90	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	27.00	1.93	13.00	5.20	1.90	1.00
15	27.00	1.93	13.00	5.20	2.10	1.11
30	26.00	1.86	12.00	4.80	2.60	1.37
45	23.00	1.64	10.00	4.00	3.30	1.74
60	20.00	1.43	6.40	2.56	4.60	2.42
75	16.00	1.14	3.80	1.52	5.50	2.89
90	14.00	1.00	2.50	1.00	6.10	3.21
105	16.00	1.14	3.80	1.52	5.50	2.89
120	20.00	1.43	6.40	2.56	4.60	2.42
135	23.00	1.64	10.00	4.00	3.30	1.74
150	26.00	1.86	12.00	4.80	2.60	1.37
165	27.00	1.93	13.00	5.20	2.10	1.11
180	27.00	1.93	13.00	5.20	1.90	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	27.00	1.80	14.00	5.38	2.10	1.00
15	27.00	1.80	13.00	5.00	2.20	1.05
30	26.00	1.73	12.00	4.62	2.80	1.33
45	23.00	1.53	10.00	3.85	3.70	1.76
60	20.00	1.33	6.70	2.58	5.10	2.43
75	17.00	1.13	4.40	1.69	6.00	2.86
90	15.00	1.00	2.60	1.00	6.40	3.05
105	17.00	1.13	4.40	1.69	6.00	2.86
120	20.00	1.33	6.70	2.58	5.10	2.43
135	23.00	1.53	10.00	3.85	3.70	1.76
150	26.00	1.73	12.00	4.62	2.80	1.33
165	27.00	1.80	13.00	5.00	2.20	1.05
180	27.00	1.80	14.00	5.38	2.10	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 2.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	27.00	1.80	14.00	5.38	2.10	1.00
15	27.00	1.80	13.00	5.00	2.30	1.10
30	26.00	1.73	12.00	4.62	2.90	1.38
45	24.00	1.60	9.60	3.69	3.60	1.71
60	20.00	1.33	6.40	2.46	4.90	2.33
75	17.00	1.13	3.90	1.50	5.90	2.81
90	15.00	1.00	2.60	1.00	6.40	3.05
105	17.00	1.13	3.90	1.50	5.90	2.81
120	20.00	1.33	6.40	2.46	4.90	2.33
135	24.00	1.60	9.60	3.69	3.60	1.71
150	26.00	1.73	12.00	4.62	2.90	1.38
165	27.00	1.80	13.00	5.00	2.30	1.10
180	27.00	1.80	14.00	5.38	2.10	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 2.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	27.00	1.80	13.00	4.64	2.30	1.00
15	26.00	1.73	13.00	4.64	2.40	1.04
30	25.00	1.67	12.00	4.29	3.00	1.30
45	23.00	1.53	10.00	3.57	3.80	1.65
60	19.00	1.27	6.70	2.39	5.00	2.17
75	17.00	1.13	3.90	1.39	6.00	2.61
90	15.00	1.00	2.80	1.00	6.50	2.83
105	17.00	1.13	3.90	1.39	6.00	2.61
120	19.00	1.27	6.70	2.39	5.00	2.17
135	23.00	1.53	10.00	3.57	3.80	1.65
150	25.00	1.67	12.00	4.29	3.00	1.30
165	26.00	1.73	13.00	4.64	2.40	1.04
180	27.00	1.80	13.00	4.64	2.30	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	26.00	1.73	13.00	4.33	2.30	1.00
15	26.00	1.73	13.00	4.33	2.40	1.04
30	25.00	1.67	12.00	4.00	2.90	1.26
45	23.00	1.53	9.70	3.23	3.70	1.61
60	19.00	1.27	6.60	2.20	4.80	2.09
75	17.00	1.13	4.20	1.40	5.80	2.52
90	15.00	1.00	3.00	1.00	6.40	2.78
105	17.00	1.13	4.20	1.40	5.80	2.52
120	19.00	1.27	6.60	2.20	4.80	2.09
135	23.00	1.53	9.70	3.23	3.70	1.61
150	25.00	1.67	12.00	4.00	2.90	1.26
165	26.00	1.73	13.00	4.33	2.40	1.04
180	26.00	1.73	13.00	4.33	2.30	1.00

粒子直径: 0.494  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	25.00	1.67	13.00	4.33	2.40	1.00
15	25.00	1.67	13.00	4.33	2.50	1.04
30	24.00	1.60	11.00	3.67	3.00	1.25
45	22.00	1.47	9.00	3.00	3.80	1.58
60	19.00	1.27	6.60	2.20	4.90	2.04
75	16.00	1.07	4.10	1.37	5.80	2.42
90	15.00	1.00	3.00	1.00	6.30	2.63
105	16.00	1.07	4.10	1.37	5.80	2.42
120	19.00	1.27	6.60	2.20	4.90	2.04
135	22.00	1.47	9.00	3.00	3.80	1.58
150	24.00	1.60	11.00	3.67	3.00	1.25
165	25.00	1.67	13.00	4.33	2.50	1.04
180	25.00	1.67	13.00	4.33	2.40	1.00

粒子直径: 0.220 μm 浓度: 0.01250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>
0	190.00	5.90	98.50	10.59	7.90	1.00
15	184.50	5.73	94.50	10.16	8.10	1.03
30	162.00	5.03	80.00	8.60	8.40	1.06
45	128.50	3.99	63.00	6.77	8.60	1.09
60	84.50	2.62	35.00	3.76	9.00	1.14
75	46.80	1.45	17.00	1.83	9.40	1.19
90	32.20	1.00	9.30	1.00	9.50	1.20
105	46.80	1.45	17.00	1.83	9.40	1.19
120	84.50	2.62	35.00	3.76	9.00	1.14
135	128.50	3.99	63.00	6.77	8.60	1.09
150	162.00	5.03	80.00	8.60	8.40	1.06
165	184.50	5.73	94.50	10.16	8.10	1.03
180	190.00	5.90	98.50	10.59	7.90	1.00

粒子直径: 0.220 μm 浓度: 0.01250% 深度: 0.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>
0	167.00	5.22	81.00	9.00	8.00	1.00
15	157.00	4.91	78.00	8.67	8.40	1.05
30	132.00	4.14	64.00	7.11	8.50	1.06
45	102.50	3.20	46.00	5.11	8.60	1.08
60	69.00	2.16	30.00	3.33	8.70	1.09
75	44.00	1.38	16.00	1.78	9.40	1.17
90	32.00	1.00	9.00	1.00	11.50	1.44
105	44.00	1.38	16.00	1.78	9.40	1.17
120	69.00	2.16	30.00	3.33	8.70	1.09
135	102.50	3.20	46.00	5.11	8.60	1.08
150	132.00	4.14	64.00	7.11	8.50	1.06
165	157.00	4.91	78.00	8.67	8.40	1.05
180	167.00	5.22	81.00	9.00	8.00	1.00

粒子直径: 0.220 μm 浓度: 0.01250% 深度: 1.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>	<i>I</i>	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>min</sub>
0	152.00	4.22	73.00	7.02	8.80	1.00
15	140.00	3.89	66.00	6.35	8.90	1.01
30	117.00	3.25	57.00	5.48	9.10	1.03
45	93.00	2.58	44.00	4.23	9.40	1.07
60	68.00	1.89	29.00	2.79	9.90	1.12
75	47.00	1.31	16.00	1.54	10.70	1.22
90	36.00	1.00	10.40	1.00	11.30	1.28
105	47.00	1.31	16.00	1.54	10.70	1.22
120	68.00	1.89	29.00	2.79	9.90	1.12
135	93.00	2.58	44.00	4.23	9.40	1.07
150	117.00	3.25	57.00	5.48	9.10	1.03
165	140.00	3.89	66.00	6.35	8.90	1.01
180	152.00	4.22	73.00	7.02	8.80	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.01250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	155.00	3.97	78.00	7.72	9.00	1.00
15	150.00	3.85	72.00	7.13	9.20	1.02
30	127.00	3.26	60.00	5.94	9.30	1.03
45	99.00	2.54	48.00	4.75	9.90	1.10
60	72.00	1.85	30.00	2.97	10.30	1.14
75	49.00	1.26	16.80	1.66	11.10	1.23
90	39.00	1.00	10.10	1.00	11.70	1.30
105	49.00	1.26	16.80	1.66	11.10	1.23
120	72.00	1.85	30.00	2.97	10.30	1.14
135	99.00	2.54	48.00	4.75	9.90	1.10
150	127.00	3.26	60.00	5.94	9.30	1.03
165	150.00	3.85	72.00	7.13	9.20	1.02
180	155.00	3.97	78.00	7.72	9.00	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.01250% 深度: 2.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	138.00	3.73	70.00	6.67	8.60	1.00
15	133.00	3.59	64.00	6.10	8.70	1.01
30	114.00	3.08	56.00	5.33	8.90	1.03
45	92.00	2.49	35.00	3.33	9.40	1.09
60	68.00	1.84	26.00	2.48	9.90	1.15
75	45.00	1.22	16.00	1.52	10.40	1.21
90	37.00	1.00	10.50	1.00	11.20	1.30
105	45.00	1.22	16.00	1.52	10.40	1.21
120	68.00	1.84	26.00	2.48	9.90	1.15
135	92.00	2.49	35.00	3.33	9.40	1.09
150	114.00	3.08	56.00	5.33	8.90	1.03
165	133.00	3.59	64.00	6.10	8.70	1.01
180	138.00	3.73	70.00	6.67	8.60	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.01250% 深度: 2.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	111.00	3.26	54.00	5.29	8.20	1.00
15	108.00	3.18	52.00	5.10	8.40	1.02
30	95.00	2.79	44.00	4.31	8.60	1.05
45	79.00	2.32	36.00	3.53	9.00	1.10
60	60.00	1.76	24.50	2.40	9.10	1.11
75	42.00	1.24	14.00	1.37	9.80	1.20
90	34.00	1.00	10.20	1.00	10.20	1.24
105	42.00	1.24	14.00	1.37	9.80	1.20
120	60.00	1.76	24.50	2.40	9.10	1.11
135	79.00	2.32	36.00	3.53	9.00	1.10
150	95.00	2.79	44.00	4.31	8.60	1.05
165	108.00	3.18	52.00	5.10	8.40	1.02
180	111.00	3.26	54.00	5.29	8.20	1.00

粒子直径:  $0.220 \mu\text{m}$  浓度: 0.01250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	89.00	2.97	42.00	4.88	7.00	1.00
15	85.00	2.83	41.00	4.77	7.10	1.01
30	80.00	2.67	38.00	4.42	7.50	1.07
45	67.00	2.23	30.00	3.49	7.80	1.11
60	51.00	1.70	21.00	2.44	8.30	1.19
75	37.00	1.23	12.50	1.45	8.80	1.26
90	30.00	1.00	8.60	1.00	9.00	1.29
105	37.00	1.23	12.50	1.45	8.80	1.26
120	51.00	1.70	21.00	2.44	8.30	1.19
135	67.00	2.23	30.00	3.49	7.80	1.11
150	80.00	2.67	38.00	4.42	7.50	1.07
165	85.00	2.83	41.00	4.77	7.10	1.01
180	89.00	2.97	42.00	4.88	7.00	1.00

粒子直径:  $0.220 \mu\text{m}$  浓度: 0.01250% 深度: 3.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	63.00	2.52	31.00	4.13	5.90	1.00
15	62.00	2.48	30.00	4.00	6.00	1.02
30	57.00	2.28	27.00	3.60	6.20	1.05
45	49.00	1.96	23.00	3.07	6.50	1.10
60	40.00	1.60	15.00	2.00	6.90	1.17
75	29.00	1.16	10.00	1.33	7.00	1.19
90	25.00	1.00	7.50	1.00	7.40	1.25
105	29.00	1.16	10.00	1.33	7.00	1.19
120	40.00	1.60	15.00	2.00	6.90	1.17
135	49.00	1.96	23.00	3.07	6.50	1.10
150	57.00	2.28	27.00	3.60	6.20	1.05
165	62.00	2.48	30.00	4.00	6.00	1.02
180	63.00	2.52	31.00	4.13	5.90	1.00

粒子直径:  $0.220 \mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	158.00	9.88	84.00	17.50	3.70	1.00
15	151.00	9.44	76.00	15.83	3.80	1.03
30	139.00	8.69	66.00	13.75	3.90	1.05
45	109.00	6.81	54.00	11.25	4.30	1.16
60	64.00	4.00	31.00	6.46	4.50	1.22
75	31.00	1.94	13.00	2.71	4.60	1.24
90	16.00	1.00	4.80	1.00	4.80	1.30
105	31.00	1.94	13.00	2.71	4.60	1.24
120	64.00	4.00	31.00	6.46	4.50	1.22
135	109.00	6.81	54.00	11.25	4.30	1.16
150	139.00	8.69	66.00	13.75	3.90	1.05
165	151.00	9.44	76.00	15.83	3.80	1.03
180	158.00	9.88	84.00	17.50	3.70	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 0.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	146.00	9.13	70.00	14.58	3.90	1.00
15	132.00	8.25	68.00	14.17	4.10	1.05
30	117.00	7.31	56.00	11.67	4.60	1.18
45	97.00	6.06	47.00	9.79	4.70	1.21
60	60.00	3.75	28.00	5.83	4.90	1.26
75	30.00	1.88	12.00	2.50	5.30	1.36
90	16.00	1.00	4.80	1.00	5.50	1.41
105	30.00	1.88	12.00	2.50	5.30	1.36
120	60.00	3.75	28.00	5.83	4.90	1.26
135	97.00	6.06	47.00	9.79	4.70	1.21
150	117.00	7.31	56.00	11.67	4.60	1.18
165	132.00	8.25	68.00	14.17	4.10	1.05
180	146.00	9.13	70.00	14.58	3.90	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	137.00	8.56	67.00	12.88	4.30	1.00
15	103.00	6.44	52.00	10.00	4.40	1.02
30	98.00	6.13	51.00	9.81	4.60	1.07
45	83.00	5.19	42.00	8.08	5.00	1.16
60	55.00	3.44	26.00	5.00	5.50	1.28
75	30.00	1.88	12.00	2.31	5.80	1.35
90	16.00	1.00	5.20	1.00	5.90	1.38
105	30.00	1.88	12.00	2.31	5.80	1.35
120	55.00	3.44	26.00	5.00	5.50	1.28
135	83.00	5.19	42.00	8.08	5.00	1.16
150	98.00	6.13	51.00	9.81	4.60	1.07
165	103.00	6.44	52.00	10.00	4.40	1.02
180	137.00	8.56	67.00	12.88	4.30	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	113.00	6.28	58.00	10.00	4.40	1.00
15	107.00	5.94	56.00	9.66	4.60	1.05
30	100.00	5.56	51.00	8.79	4.80	1.09
45	84.00	4.67	41.00	7.07	5.20	1.18
60	54.00	3.00	25.00	4.31	5.70	1.30
75	31.00	1.72	12.00	2.07	6.00	1.36
90	18.00	1.00	5.80	1.00	6.20	1.41
105	31.00	1.72	12.00	2.07	6.00	1.36
120	51.00	3.00	25.00	4.31	5.70	1.30
135	84.00	4.67	41.00	7.07	5.20	1.18
150	100.00	5.56	51.00	8.79	4.80	1.09
165	107.00	5.94	56.00	9.66	4.60	1.05
180	113.00	6.28	58.00	10.00	4.40	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 2.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	107.00	5.63	52.00	9.29	4.50	1.00
15	103.00	5.42	50.00	8.93	4.70	1.04
30	97.00	5.11	43.00	7.68	4.80	1.07
45	76.00	4.00	36.00	6.43	5.20	1.16
60	52.00	2.74	24.00	4.29	5.60	1.24
75	30.00	1.58	11.00	1.96	5.90	1.31
90	19.00	1.00	5.60	1.00	6.10	1.36
105	30.00	1.58	11.00	1.96	5.90	1.31
120	52.00	2.74	24.00	4.29	5.60	1.24
135	76.00	4.00	36.00	6.43	5.20	1.16
150	97.00	5.11	43.00	4.68	4.80	1.07
165	103.00	5.42	50.00	8.93	4.70	1.04
180	107.00	5.63	52.00	9.29	4.50	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 2.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	96.00	5.05	51.00	8.95	4.60	1.00
15	93.00	4.89	49.00	8.60	4.70	1.02
30	88.00	4.63	43.00	7.54	4.90	1.07
45	71.00	3.74	34.00	5.96	5.20	1.13
60	47.00	2.47	21.00	3.68	5.60	1.22
75	29.00	1.53	11.00	1.93	5.90	1.28
90	19.00	1.00	5.70	1.00	6.20	1.35
105	29.00	1.53	11.00	1.93	5.90	1.28
120	47.00	2.47	21.00	3.68	5.60	1.22
135	71.00	3.74	34.00	5.96	5.20	1.13
150	88.00	4.63	43.00	7.54	4.90	1.07
165	93.00	4.89	49.00	8.60	4.70	1.02
180	96.00	5.05	51.00	8.95	4.60	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	92.00	5.11	47.00	8.70	4.00	1.00
15	88.00	4.89	45.00	8.33	4.40	1.10
30	81.00	4.50	42.00	7.78	4.70	1.17
45	66.00	3.67	33.00	6.11	5.00	1.25
60	43.00	2.39	19.00	3.52	5.20	1.30
75	27.00	1.50	10.00	1.85	5.30	1.33
90	18.00	1.00	5.40	1.00	5.90	1.48
105	27.00	1.05	10.00	1.85	5.30	1.33
120	43.00	2.39	19.00	3.52	5.20	1.30
135	66.00	3.67	33.00	6.11	5.00	1.25
150	81.00	4.50	42.00	7.78	4.70	1.17
165	88.00	4.89	45.00	8.33	4.40	1.10
180	92.00	5.11	47.00	8.70	4.00	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00500% 深度: 3.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	81.00	4.50	42.00	8.08	4.20	1.00
15	78.00	4.33	41.00	7.88	4.30	1.02
30	71.00	3.94	36.00	6.92	4.60	1.10
45	57.00	3.17	27.00	5.19	4.70	1.12
60	39.00	2.17	18.00	3.46	5.10	1.21
75	24.00	1.33	9.00	1.73	5.30	1.26
90	18.00	1.00	5.20	1.00	5.60	1.33
105	24.00	1.33	9.00	1.73	5.30	1.26
120	39.00	2.17	18.00	3.46	5.10	1.21
135	57.00	3.17	27.00	5.19	4.70	1.12
150	71.00	3.94	36.00	6.92	4.60	1.10
165	78.00	4.33	41.00	7.88	4.30	1.02
180	81.00	4.50	42.00	8.08	4.20	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	100.00	16.67	53.00	26.50	1.50	1.00
15	98.00	16.33	50.00	25.00	1.60	1.07
30	83.00	13.83	41.00	20.50	1.70	1.13
45	58.00	9.67	29.00	14.50	1.80	1.20
60	33.00	5.50	16.00	8.00	1.90	1.27
75	13.00	2.17	6.00	3.00	2.00	1.33
90	6.00	1.00	2.00	1.00	2.30	1.53
105	13.00	2.17	6.00	3.00	2.00	1.33
120	33.00	5.50	16.00	8.00	1.90	1.27
135	58.00	9.67	29.00	14.50	1.80	1.20
150	83.00	13.83	41.00	20.50	1.70	1.13
165	98.00	16.33	50.00	25.00	1.60	1.07
180	100.00	16.67	53.00	26.50	1.50	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 0.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	92.00	15.33	46.00	17.69	1.90	1.00
15	89.00	14.83	44.00	16.92	2.00	1.05
30	79.00	13.17	37.00	14.23	2.10	1.11
45	59.00	9.83	29.00	11.15	2.20	1.16
60	37.00	6.17	17.00	6.54	2.30	1.21
75	16.00	2.67	7.00	2.69	2.60	1.37
90	6.00	1.00	2.60	1.00	2.70	1.42
105	16.00	2.67	7.00	2.69	2.60	1.37
120	37.00	6.17	17.00	6.54	2.30	1.21
135	59.00	9.83	29.00	11.15	2.20	1.16
150	79.00	13.17	37.00	14.23	2.10	1.11
165	89.00	14.83	44.00	16.92	2.00	1.05
180	92.00	15.33	46.00	17.69	1.90	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	92.00	13.14	49.00	19.60	1.50	1.00
15	91.00	13.00	45.00	18.00	1.80	1.20
30	80.00	11.43	40.00	16.00	1.90	1.27
45	55.00	7.86	29.00	11.60	2.00	1.33
60	35.00	5.00	16.00	6.40	2.10	1.40
75	15.00	2.14	6.00	2.40	2.20	1.47
90	7.00	1.00	2.50	1.00	2.50	1.67
105	15.00	2.14	6.00	2.40	2.20	1.47
120	35.00	5.00	16.00	6.40	2.10	1.40
135	55.00	7.86	29.00	11.60	2.00	1.33
150	80.00	11.43	40.00	16.00	1.90	1.27
165	91.00	13.00	45.00	18.00	1.80	1.20
180	92.00	13.14	49.00	19.60	1.50	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 1.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	89.00	11.13	49.00	18.85	1.50	1.00
15	83.00	10.38	46.00	17.69	1.90	1.27
30	76.00	9.50	38.00	14.62	2.00	1.33
45	58.00	7.25	31.00	11.92	2.10	1.40
60	37.00	4.63	18.00	6.92	2.30	1.53
75	16.00	2.00	7.00	2.69	2.70	1.80
90	8.00	1.00	2.60	1.00	2.90	1.93
105	16.00	2.00	7.00	2.69	2.70	1.80
120	37.00	4.63	18.00	6.92	2.30	1.53
135	58.00	7.25	31.00	11.92	2.10	1.40
150	76.00	9.50	38.00	14.62	2.00	1.33
165	83.00	10.38	46.00	17.69	1.90	1.27
180	89.00	11.13	49.00	18.85	1.50	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 2.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	85.00	10.63	42.00	16.15	1.50	1.00
15	76.00	9.50	39.00	15.00	1.90	1.27
30	73.00	9.13	37.00	14.23	2.10	1.40
45	57.00	7.13	29.00	11.15	2.20	1.47
60	34.00	4.25	17.00	6.54	2.40	1.60
75	16.00	2.00	7.00	2.69	2.70	1.80
90	8.00	1.00	2.60	1.00	2.90	1.93
105	16.00	2.00	7.00	2.69	2.70	1.80
120	34.00	4.25	17.00	6.54	2.40	1.60
135	57.00	7.13	29.00	11.15	2.20	1.47
150	73.00	9.13	37.00	14.23	2.10	1.40
165	76.00	9.50	39.00	15.00	1.90	1.27
180	85.00	10.63	42.00	16.15	1.50	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 2.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	80.00	10.00	46.00	17.69	1.90	1.00
15	77.00	9.63	42.00	16.15	2.00	1.05
30	71.00	8.88	36.00	13.85	2.10	1.11
45	56.00	7.00	29.00	11.15	2.20	1.16
60	34.00	4.25	16.00	6.15	2.30	1.21
75	16.00	2.00	7.00	2.69	2.60	1.37
90	8.00	1.00	2.60	1.00	2.80	1.47
105	16.00	2.00	7.00	2.69	2.60	1.37
120	34.00	4.25	16.00	6.15	2.30	1.21
135	56.00	7.00	29.00	11.15	2.20	1.16
150	71.00	8.88	36.00	13.85	2.10	1.11
165	77.00	9.63	42.00	16.15	2.00	1.05
180	80.00	10.00	46.00	17.69	1.90	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.00cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	72.00	9.00	36.00	13.33	1.90	1.00
15	69.00	8.63	35.00	12.96	2.00	1.05
30	66.00	8.25	34.00	12.59	2.10	1.11
45	49.00	6.13	25.00	9.26	2.20	1.16
60	31.00	3.88	16.00	5.93	2.50	1.32
75	16.00	2.00	7.00	2.59	2.60	1.37
90	8.00	1.00	2.70	1.00	2.70	1.42
105	16.00	2.00	7.00	2.59	2.60	1.37
120	31.00	3.88	16.00	5.93	2.50	1.32
135	49.00	6.13	25.00	9.26	2.20	1.16
150	66.00	8.25	34.00	12.59	2.10	1.11
165	69.00	8.63	35.00	12.96	2.00	1.05
180	72.00	9.00	36.00	13.33	1.90	1.00

粒子直径: 0.220  $\mu\text{m}$  浓度: 0.00250% 深度: 3.50cm 入射光偏振态: 线偏振

角度	散射光强度		水平偏振分量		垂直偏振分量	
	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$	$I$	$I/I_{\min}$
0	70.00	8.75	38.00	14.07	1.90	1.00
15	66.00	8.25	35.00	12.96	2.00	1.05
30	63.00	7.88	30.00	11.11	2.10	1.11
45	51.00	6.38	26.00	9.63	2.20	1.16
60	29.00	3.63	15.00	5.56	2.40	1.26
75	15.00	1.88	6.50	2.41	2.60	1.37
90	8.00	1.00	2.70	1.00	2.70	1.42
105	15.00	1.88	6.50	2.41	2.60	1.37
120	29.00	3.63	15.00	5.56	2.40	1.26
135	51.00	6.38	26.00	9.63	2.20	1.16
150	63.00	7.88	30.00	11.00	2.10	1.11
165	66.00	8.25	35.00	12.96	2.00	1.05
180	70.00	8.75	38.00	14.07	1.90	1.00