

学校代号：10255

作者代号：2110110

東華大學

硕士学位论文

非织造布空气过滤材料过滤性能的研究

A STUDY ON FILTRATION PERFORMANCE OF
NONWOVEN AIR FILTERING MATERIAL

专业：纺织材料与纺织品设计

作者：简小平

导师：张志奋 靳向煜 教授

日期：2013 年 12 月

东华大学学位论文原创性声明



本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：简小平

日期：2014年1月13日

东华大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权东华大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：简小平

日期：2014年1月13日

指导教师签名：[Signature]

日期：2014年1月13日

非织造布空气过滤材料过滤性能的研究

摘 要

由于我国环境污染的加剧,近年来各大城市不断出现沙尘暴和雾霾等天气,极大地威胁着人们的健康。人们对空气质量要求的不断提高,一系列严格的环保法规的颁布与实施,使空气过滤成为世界过滤市场中增长最快的部分;同时随着国内外高技术产业的发展需要,空气过滤设备的应用领域正加速发展,作为过滤设备核心的过滤材料,其研究和开发也得到了空前的重视,而非织造布材料以其优越的性能成为重中之重。

针对以上形势,本次研究首先在前人的基础上,通过对过滤理论的收集和整理,进一步深化对过滤机理的认识;同时根据空气过滤的理论公式和半经验公式,利用 Matlab 进行编程,对滤料进行理论计算和定性定量分析,努力揭示影响非织造布过滤材料过滤性能的因素,如气溶胶粒径、纤维直径、填充率、厚度、滤速和气溶胶浓度等,及其影响的方式,以期使过滤理论能够进一步指导实践。

接着采用电子扫描显微镜,PMI 孔径测试仪等对各非织造布过滤材料的结构进行研究,以探寻各结构因素对过滤性能的影响;以实验得到的各结构参数和实验条件为依据进行理论计算,预测各滤料的过滤性能;然后在 8130 滤料自动测试仪上分别采用 2 种气溶胶微粒

(NaCl, Paraffin Oil)对滤材的过滤特性进行测试,并验证通过理论计算预测的过滤性能的准确性。

通过上述理论分析可知各结构参数对过滤效率和过滤阻力的影响关系,通过实验研究找出过滤性能与各个因素之间的变化规律,可以更加合理的设定运行参数,达到增效减阻的目的。通过将实验值与理论值对比,找出实验值与理论值的差距和相同点,可以验证过滤理论对实际运用的指导作用。

由于过滤过程分为稳态过滤和非稳态过滤两个过程,基于稳态过滤条件的假设进行上述的理论和实验研究后,通过测试各滤料的容尘量和在达到容尘量过程中过滤效率和过滤阻力随时间的变化关系,探讨非稳态过滤下过滤材料过滤性能的变化过程。

由于普通非织造布过滤材料对 $<1\mu\text{m}$ 的微粒过滤效果不甚理想,不足40%。虽然增加厚度,提高填充率等能增加过滤效率,但相应的过滤阻力也会增大,而高运行阻力又会带来巨大的能源消耗。驻极是目前令滤料达到高效低阻的有效方法。本课题通过探讨驻极时间、驻极距离、驻极电压和热处理温度对驻极效果的影响,找到最佳驻极工艺参数,在此参数下对各滤料进行驻极,并测试驻极后的过滤性能。考虑到驻极滤料的稳定性和使用场合问题,从过滤效率,过滤速度,过滤阻力、容尘量和衰减性等5个方面进行考察,并通过驻极前后过滤性能的对比,为改善驻极滤料的过滤性能,以及对驻极滤料的进一步推广使用提供一定的参考。

以上研究对非织造布过滤材料在空气过滤领域的开发和应用打

下基础，对解决当前中国各大城市频繁出现的雾霾天气，控制空气中可吸入颗粒物浓度，保护国民身体健康具有重要的使用价值和社会意义。

关键词：非织造布，空气过滤，过滤机理，过滤性能，驻极滤料

A STUDY ON FILTRATION PERFORMANCE OF NONWOVEN AIR FILTERING MATERIAL

ABSTRACT

Due to the aggravation of the environmental pollution in our country, more and more big cities occur the dust storm and haze weather, threatening people's health tremendously. Whether in the aspect of industrial environmental protection or in the internal space of household and automobile, people are increasing their expectation of air quality and a series of strict environment protection laws and regulations are being issued and implemented, making the air filtering materials develop fastest in the market of filtering materials in the global world. With each country paying more and more emphasize on environmental protection and the developing requirement of high technology industry, the application fields of air filtering devices are enlarging. As the core part of air filtering devices, air filtering materials have gained unprecedented attention, in which the nonwoven materials have gained more than any other materials because of their superior performances.

According to the situation mentioned above, this research, firstly, based on the former people's research, is to further deepen the understanding of the filtration mechanisms by collecting and sorting out the existing theories. Meanwhile, to find the better way to apply the filtering theory, some theoretical calculation and qualitative and quantitative analysis have been made by using the Matlab program; the factors such as aerosol particle size, fiber diameter, filling rate, thickness, filtration rate and aerosol concentration, which influence the filtering performance investigate, are investigated; the ways they influence the filtering performance are revealed.

Secondly, by using the electron scanning microscope and PMI pore diameter tester, the structures of various nonwoven materials are tested in order to explore the influence on filtration performance of each structure factor. According to the structure parameters tested, calculations are made to predict the nonwoven materials' filtration performance. Lastly, the materials' filtration performance are tested in the TSI Model 8130 by adopting two kinds of aerosol particle, NaCl and

Paraffin Oil.

Through the theoretical analysis, we can know the relationship of various structure parameters with the filtration efficiency and filtration resistance. Through the experimental research, we can figure out the rules that filtration performance changes with each structure factor. By comparing the theoretical analysis and experimental researching result, we can find out the differences and similarities between them and verify the filtering theory's instructive function to the practical application.

Filtering process has two stages, which are stable filtrating period and unstable filtrating period. Under the assumption of stable filtrating, the theoretical analysis and experimental research have been made. By testing the dust holding capacity and testing the relationship of filtration efficiency and filtration resistance changing with the time, the change process of filtration performance during the unstable period is discussed.

Because the general nonwoven material without any treatment doesn't have a good filtration performance, say no more than 40%. Increasing the thickness and improving the filling rate can improve the filtration efficiency, but they also increase the filtration resistance largely and thus bring in huge energy consumption. Electrets treatment is an effective method to improve the filtration efficiency and lower the resistance. This topic, through discussing the influence of electrets time, electrets distance, electrets voltage and heat treatment temperature on electrets effect, find out the optimum technological parameter. Under this optimum technological parameter, the nonwoven materials were electrets treated and then the filtration performance was tested. In consideration of the stability and usage occasion of the filtering material with electrets treatment, filtration efficiency, filtration rate, resistance, dust holding capacity and attenuating property are investigated, and the performance with or without the electrets treatment is compared, offering the reference to improve the performance and promote the application of electrets filtering materials.

The research above lays a foundation for the development and application of nonwoven material in the air filtering field, and is of great importance to solve the air pollution and haze weather occurred frequently and control the inhalable particle concentration and protect the people's health.

KEY WORDS: Nonwoven, air filtering, filtering mechanism, filtration performance,
electrets treatment

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 引言	1
1.2 空气过滤材料的发展	1
1.3 空气过滤材料的性能测试.....	3
1.4 本课题的研究内容, 目的和意义	6
第二章 空气过滤特性参数的理论计算与分析.....	9
2.1 过滤特性参数.....	9
2.2 过滤机理.....	10
2.3 过滤效率的理论计算和分析.....	11
2.4 本章小结.....	25
第三章 实验装置及原理.....	26
3.1 滤料结构因素的实验确定.....	26
3.2 滤材物理性能的测试.....	27
3.3 滤材过滤性能测试	28
第四章 实验结果及分析.....	31
4.1 滤料结构实验结果.....	31
4.2 滤料的力学性能.....	40
4.3 滤料的透气性.....	41
4.4 滤料的过滤性能	43
4.5 滤料的容尘量.....	55
4.6 过滤材料过滤效率与过滤阻力随时间的变化.....	58
4.7 本章小结	59
第五章 驻极体滤料的实验研究.....	61
5.1 驻极体滤料简介.....	61
5.2 影响驻极效果的因素.....	64

5.3 影响驻极滤料过滤性能的因素分析	67
5.4 驻极滤料的容尘量	74
5.5 驻极滤料过滤效率和过滤阻力随时间的变化	74
5.6 驻极滤料衰减性的研究	76
5.5 本章小结	78
第六章 结论与展望	80
6.1 结论	80
6.2 展望	81
参考文献	82

第一章 绪论

1.1 引言

空气是维持生命存在的保障,空气中含有大量的有害气体和细小的悬浮颗粒物,对人类呼吸免疫功能的呼吸道、心血管和中枢神经系统等造成严重危害^[1],削减空气中悬浮颗粒物的排放量对于环境保护、保障人体健康是至关重要的。目前,随着工业的迅猛发展,人类生存环境不断受到挑战,其中之一就是空气污染;同时,现代科学和现代工业,特别是电子、精密机械、冶金、宇航、核能、化工等工业以及医疗、制药、食品等行业的发展,对工艺环境的空气洁净度也提出了更高的要求。目前,解决空气质量问题最有效的方法就是空气过滤^[2]。而过滤材料是空气过滤器中的重要元件,被称为过滤器的心脏,是直接关系到空气中颗粒物浓度是否达标的因素。

1.2 空气过滤材料的发展

过滤材料的产生是同劳动人民的生产、生活密不可分的。早在两千多年前,用真丝织成的筛网就被我国劳动人民用来过滤药材、染料等。在一世纪的罗马用粗麻制成的面具被人们用作提纯水银时的保护。

随着军事工业和电子工业的发展,空气过滤材料得到了迅猛发展。第一次世界大战期间,出现了以石棉纤维为滤料的防毒气面具。石棉纤维制成的过滤材料可以承受 350℃ 的高温,但由于其致癌性已不再使用。

1940 年,玻璃纤维空气滤材在美国问世,并获得美国专利。此后,玻璃纤维在空气过滤领域得到了快速发展。50 年代,美国对玻璃纤维过滤纸的生产工艺进行了深入的研究,并作为高温高效空气过滤介质。60 年代,以玻璃纤维为滤材的 HEPA (高效粒子空气过滤器) 在美国问世,用于特殊房间的空气净化。至 70 年代,采用超细玻璃纤维纸为过滤材料的 HEPA,对 $\geq 0.3\mu\text{m}$ 尘粒的过滤效率高达 99.9998%^[3]。70 年代末 80 年代初,美国和日本等发达国家先后研制和开发了 $0.1\mu\text{m}$ 的 ULPA (ultra low penetration air) 超高效空气过滤纸。90 年代初美国 Lydair 公司用超细玻璃纤维生产的 ULPA 过滤纸,对 $0.1\mu\text{m}$ 粒径尘埃的过滤效率高达 99.999999%,极大地促进了对室内空气洁净度有很高要求的电子、航天、精密机械等行业的发展。发展至今日,玻璃纤维已成为一种传统的过滤材料,用于多种过滤器材,像呼吸器、家用滤尘器以及 HVAC (供暖、通风及

空调)、HEPA 和 ULPA (超高效过滤器) 中的滤袋。依据制造工艺和工艺参数的不同, 玻璃纤维具有从亚微米到 $30\mu\text{m}$ 的直径范围。不同直径的纤维具有不同的过滤效率和压降, 因而有着不同的用途^[4]。

50 年代, 非制造工业在国际上开始迅速发展, 使空气过滤材料的发展翻开了新的一页, 特别是化纤业的迅速发展为空气过滤材料提供了丰富的可供选择的纤维原料。非织造滤材的生产手段几乎涵盖了所有的非织造加工技术, 最早成功用于滤材生产的是湿法造纸非织造技术, 还有化学粘合(浸渍法、喷洒法等)和针刺加固, 纺丝成网、热粘合及熔喷法则采用较晚。目前世界非织造滤材生产所采用的加工方法中针刺占第一位, 熔喷法由于其结构由超细纤维组成, 在滤料方面应用比重在这数十年中节节上升, 成为仅次于针刺法的第二大类^[5]。如粗效过滤材料选用针刺法和喷胶法的非织造布或两者混合应用, 中效过滤材料采用聚丙烯熔喷非织造布、SMS 复合非织造布和细旦纺粘非织造布^[6]。现在由于普遍对非织造滤料进行带静电的极化处理, 使空气过滤系统的过滤效果成倍增加, 因而非织造滤料在高效空气过滤的应用更为广泛, 用量不断上升。我国的非织造过滤材料起步于 60 年代末 70 年代初, 发展速度超过世界平均速度的 3%~5%, 潜在市场较大。

20 世纪 70 年代, 日本以粘胶、聚丙烯腈等为原料, 率先生产出活性碳纤维 (ACF), 具有形态多、有效吸附孔丰富、孔径分布均匀、吸附行程短、脱附速度快、吸附量大、易再生等优点, 被认为是 21 世纪最优秀的空气净化材料之一^[7]。

20 世纪 80 年代末, 纳米技术诞生。纳米是一种几何尺寸的量度单位, 长度仅为十亿分之一米, 略等于 4~5 个原子排列起来的长度^[8]。纳米材料进行空气净化可分为化学过程和物理过程, 化学过程是指纳米材料的表面效应, 使表面光生载流子的浓度加大, 增大了光催化的效率; 物理过程则指纳米材料的小尺寸效应使材料的比表面积变大, 从而提高了材料对空气中微粒的阻隔和吸附作用^[9]。在空气过滤领域, 纳米材料主要表现为纳米纤维。纳米纤维具有较大的比表面积、表面能和表面张力, 增加了空气中悬浮微小颗粒在其表面沉积的概率, 从而提高了其过滤效率。与传统植物纤维相比较, 在同等气压损失下, 纳米纤维在过滤过程中具有更为显著的拦截效应和惯性效应, 因此能提高过滤效率, 降低阻力, 延长使用寿命^[10]。静电纺丝法是目前制备纳米纤维最重要最直接的方法, 制得的纳米纤维由于其直径小, 纳米纤维毡的机械强度相对较低, 使用寿命短, 需将纳米纤维与基布复合, 可以直接将静电纺纳米纤维收集到普通的过滤材料上提高过滤性能。

90 年代中期研制成功的薄膜复合滤料, 是将 PTFE 覆盖在机织布、非织造布或玻璃纤维滤料上。它具有过滤效率高(对亚微米粉尘的过滤效率在 99.9%以上)、阻力低(比传统滤料低 30%~40%)、使用寿命长(可达传统滤料的 2-5 倍)、耐高温

(可达 280℃)、粉尘剥落率高的优点,在除尘净化、空调过滤行业得到了日益广泛的应用^[11]。

进入 21 世纪,纳米 TiO₂ 光催化材料是目前最有发展前景的消除有害气体的过滤材料。TiO₂ 在吸收紫外线后,在紫外线能量的激发下发生氧化还原反应,其表面形成强氧化性的氢氧自由基和超氧阴离子自由基,能有效地将 NH₃、NO_x、SO₂、CO 及 VOC 等有害气体降解为 CO₂、H₂O 和相应的无机离子,并在常温常压下就能反应,从而达到净化空气和杀菌等目的,无二次污染的优点^[12],并且不同的材料复合在一起可能会进一步提高室内空气净化效果。

空气过滤材料的应用范围从各类工业尾气处理逐步发展到人们日常工作和生活的室内空间的有害气体的去除。针对性和适用性强的功能性空气过滤材料将成为滤料今后的发展方向。利用纳米等科技技术开发多功能、高附加值的功能性过滤材料有着广阔的发展前景,如二氧化钛(TiO₂)光催化空气过滤材料,活性炭滤纸,膜和静电增强过滤材料,耐高温过滤材料,新型宽谱防护过滤材料等。

1.3 空气过滤材料的性能测试

由于过滤材料发展的速度远远超前于过滤材料产品标准的制定速度,无论是金属滤材、植物纤维滤材还是非织造布滤材都没有具体范围内的标准。由于滤材没有严格意义上的标准,过滤技术的发展与科研工作就受到影响。滤材销售商往往宣称自己的材料性能很好,却没有明确指明其测试指标使用的是什么方法,在实际应用中也达不到宣称的效果。许多来自发达国家的过滤技术不能在国内引起响应,阻碍了过滤技术的进步和发展。如果有一套完整的标准,又有明文规定的测试方法,许多问题就可得以解决^[13]。

过滤材料有很多测试指标,可分为过滤性能指标、物理指标和化学指标,这三类测试指标相互作用,综合反映了过滤材料的优劣。分析这些指标,对过滤材料的研究开发和合理选用非常重要。

1.3.1 过滤性能指标

反映过滤材料过滤性能的指标有过滤效率、透气性、容尘量、纤维迁移、孔径、压力损失(即过滤阻力)、初阻力等。

过滤效率是指某个尺寸以上的颗粒物被过滤材料捕集的效率。过滤材料捕集的粉尘量与未经过滤材料进行过滤的空气中的粉尘量之比为“过滤效率”,效率有 95%、99%或小数几个“9”,但没有 100%。粒径小于 0.1μm 的粒子主要做扩散运动,粒子越小,效率越高;大于 0.5μm 的粒子主要做惯性运动,粒子越大,

效率越高。在 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 粒径之间, 过滤效率有一最低点, 该粒径大小的粉尘最难过滤。

过滤阻力是测试过程中过滤材料进风口与出风口之间的压力差。纤维使气流绕行, 产生微小阻力。无数纤维的阻力之和就是过滤材料的阻力。过滤材料的阻力随气流流速的增大而提高, 通过增大过滤材料面积, 可以降低穿过滤料的相对风速, 从而减小过滤材料阻力。

容尘量并非过滤器报废时容纳大气粉尘的重量, 与过滤器实际容纳粉尘的重量没有直接对应关系, 它是过滤器在特定实验条件下容纳试验粉尘的重量, 因此孤立的容尘量数据对用户没有任何意义。只有在实验条件和试验粉尘相同时, 才能根据容尘量数据来估计哪只过滤器会比另一只的使用寿命更长。欧美一些标准中规定的试验终止条件是: (1) 阻力达到初阻力的 2 被或更高时; (2) 瞬时过滤效率低于最高效率的 85% 时。大多数过滤器的阻力只升不降, 只有用蓬松的粗纤维 ($\geq 10\mu\text{m}$) 材料制成的低效率过滤器可能出现第二种情况^[14]。

透气性直接影响过滤材料的流量阻力。国际上测定一般以在一定压力差条件下, 单位时间内通过试样单位面积的空气量表示。

孔径指滤料中孔隙的大小, 以微米表示。孔径测试方法在国际上是统一的, 即将滤材浸泡在试验液中, 在滤材一端施加微压气体, 用气体以气泡形式从滤材另一端溢出时的压力值计算溢泡点的微孔尺寸。

滤材在制成过滤器后, 使用过程中遇到的最严重的问题是有介质脱落。介质脱落可造成过滤效率下降, 容尘量减少, 同时介质脱落迁移到空气中还会形成有害物质, 进而造成空气污染。测定介质脱落的方法有计数法或称重法, 也有纤维镜观测法。

1.3.2 物理化学性能指标

滤材的基本物理性能指标有: 滤材厚度、密度、伸展性、刚性、拉伸强力、顶破强力、撕裂强力、耐磨性等。过滤材料的化学性能指标有: 耐酸碱性、耐腐蚀性等。

1.3.3 特殊性能指标

滤材的特殊性能指标要求是由过滤工艺性能决定的, 如化学稳定性、热稳定性、抗老化、耐日晒性, 便于清洗及卸下滤渣, 并具有一定的耐洗能力, 具有一定的寿命, 有的还需具有如阻燃性能、抗细菌性能、抗静电性能等特殊的安全性能^[15]。

1.3.4 过滤效率测试方法

过滤材料的检测标准及方法是随着过滤材料及其它相关检测技术的进步而逐步发展与演变的。目前国内外常用的滤料过滤效率测试方法各有不同，主要的不同点是所采用的标准尘源及分散度不同。国内常用氯化钠（固态，尘）、透平油（液态，雾），大气尘（大部分固态）作为尘源。国外如美、日、法采用 DOP（邻苯二甲酸二辛酯）、石蜡油、石英尘等尘源^[16]。值得注意的是，鉴定过滤材料的过滤效率，应根据过滤器的性质和用途来确定采用的标准尘源的类别。

（1）钠焰法

钠焰法起源于英国，是我国现行国家标准的测试方法之一，该法主要用于高效过滤器性能的测试，可测试的最大过滤效率可达 99.999%或更大。该法利用气溶胶中钠原子被氢气火焰激发后发出波长为 589 nm 的特征光，光的强度与气溶胶质量浓度成比例这一原理，通过检测被测过滤器前后光强度的比值来计算过滤器效率。国家标准规定的盐雾平均直径为 0.4μm，法国为 0.17μm，英国为 0.65μm。

过滤器的透过率 P，可用下式计算：

$$P = \frac{A_2 - A_0}{n(A_1 - A_0)} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中：P—过滤器透过率（%）；

A_1 —过滤器前气溶胶光电流值（μA）

A_2 —过滤器后气溶胶光电流值（μA）

A_0 —检测系统本底光电流值（μA）

n—过滤器前气溶胶稀释倍数。

然后可在微压计上直接读出实验风量下的过滤阻力。

（2）油雾法

油雾法的试验尘源为油雾。实验装置由发雾装置和测试装置两部分组成。在规定的实验条件下，通过发雾装置将油雾气溶胶充分混合，然后通过被测过滤器，由测试装置进行测试，采用浊度法测量过滤器前后的油雾浓度，根据测量出的油雾浓度就可以计算出过滤材料对该油雾的过滤效率。试验尘源为德国规定用石蜡油，油雾粒径为 0.3~0.5μm，中国标准规定的油雾平均重量直径为 0.28~0.34μm。过滤器的透过率 P 用下式表示：

$$P = \frac{C_2}{C_1} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 C_1 与 C_2 分别表示过滤器前后的油雾浓度，g/L(mg/m³)

（3）计数法

采用大气尘作为实验尘源时，用大气尘埃计数器测定滤材过滤效率。在额定

风量下,一般用两台粒子计数器同时测出受试过滤器上、下风侧空气中粒径 $\geq 0.50\mu\text{m}$ 、 $\geq 1.00\mu\text{m}$ 、 $\geq 2.00\mu\text{m}$ 和 $\geq 5.00\mu\text{m}$ 的粒子计数浓度;当受试过滤器对 $0.5\mu\text{m}$ 粒径档的计数效率小于90%时,也可以用一台粒子计数器进行测定。上、下风侧计数浓度之差与上风侧浓度之比,为受试滤材的大气尘计数过滤效率,以百分数表示。即:

$$P_i = \frac{N_{1i} - N_{2i}}{N_{1i}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中: P_i —粒径分组($\geq 0.50\mu\text{m}$, $\geq 1.00\mu\text{m}$, $\geq 2.0\mu\text{m}$, $\geq 5.00\mu\text{m}$)计数效率;

N_{1i} —上风侧大于或等于某粒径粒子计数浓度的平均值(粒/L);

N_{2i} —下风侧大于或等于某粒径粒子计数浓度的平均值(粒/L)。

(4) 计重法

将称量过的末端过滤器和受试过滤器安装在风道系统中,并向风道中送入一定重量的已知成分的人工尘。在一定的条件下通过受试滤材,大部分粉尘被受试滤材捕集到,穿过受试滤材的粉尘被末端过滤器捕集。然后取出末端过滤器,重新称量。根据发尘量和末端过滤器增加的质量计算受试滤材的人工尘计重效率。计重效率 A 以百分数表示如下:

$$P = \left(1 - \frac{W_2}{W_1}\right) \times 100\% \quad (1-4)$$

式中: W_2 —在发尘过程中,未被受试滤材捕集的人工尘质量(g);

W_1 —在发尘过程中,人工尘发尘量(g)。

从现今对于高效过滤器检测的发展看,计数扫描法有替代传统方法的趋势。扫描法的主要测量仪器为大流量激光粒子计数器或凝结核计数器。试验时用计数器对过滤器的整个出风面进行扫描,因此整个出风面上每一点上的粉尘的个数和粒径都能被计数器能测出^[17]。

1.4 本课题的研究内容,目的和意义

空气过滤实际上包括灰尘过滤和分子过滤两个方面,灰尘过滤是指从空气中把灰尘过滤出来,分子则是将有害的气体分子从空气分离出来。基于最近几年频繁出现的沙尘暴和雾霾天气,本课题主要讨论的是灰尘过滤。

早在二十世纪初期,科学家们就开始在城市、乡村、高山、大海上空、沙漠、工业区以及道路边等地进行空气采样,用统计学的方法分析其中所含灰尘的直径与数量之间的关系,得出了如下的对应关系:对于大气中直径 $\leq 1\mu\text{m}$ 的灰尘来说,可以清楚地得出如下结论:在重量上,只占到了灰尘总重量的30%,但在数量上,占到了灰尘总数量的99.9%。

因此,对于一般的过滤器来说,使用的根本目的是要滤除空气中数量占大部分的直径 $\leq 1\mu\text{m}$ 的小灰尘^[18]。普通的过滤材料过滤空气中的微粒时主要依靠布朗扩散、截留、惯性碰撞、重力沉降等机械阻挡作用,因此对于粒径小于 $1\mu\text{m}$ 的粒子过滤效果不能达到人们对于空气质量的要求。

由于中国环境污染的加剧,近年来中国各大城市频繁出现沙尘暴和雾霾天气,人们对大气环境和室内空气质量日益重视,加之一系列环保法规的颁布实施,使得空气过滤材料在环境治理中发挥着越来越重要的作用,引起了人们的重视,得到了长足的发展,具有巨大的发展前景。同时,过滤相关技术的应用也扩展到电子、医药、生物、食品和化妆品等行业。

当前空气过滤材料在国际过滤材料的六大市场中(包括液体滤芯、汽车滤清器、空气净化过滤、滤袋、膜过滤、液体过滤)已位居第三,成为国际过滤材料市场中增长最快的部分^[13]。空气净化过滤材料的研究和开发也得到了空前的重视,而非织造布材料以其优越的性能成为重中之重。在所有的非织造工艺中,熔喷法具有工艺流程短、成本低廉、来源广泛等优点,是一项年轻而有发展前途的新技术。

综上所述,当前对于空气过滤材料的多方面和多角度的需求,促使我们重新考虑利用过滤理论去指导相关产品的研发、生产和应用,因此我们需要对现有的过滤理论进行消化,吸收和创新;同时非织造布过滤材料在空气过滤领域的迅速崛起,也促使我们去研究和开发多功能、多用途、高效低阻的非织造布过滤材料,因此很有必要对影响非织造布过滤材料过滤性能的各因素进行分析,了解非织造布过滤材料的空气过滤特性,以进一步指导非织造布过滤材料的开发和在实际中的应用。

本课题以熔喷聚丙烯非织造布为代表原料来研究非织造布过滤材料的空气过滤性能。主要研究内容如下:

(1) 从经典过滤理论出发,分析滤料的各个结构因素对过滤性能的影响,对实际应用中如何改变相关因素以使过滤器达到增效减阻提出合理的建议。

(2) 在滤材测试系统 TSI8130 上采用 NaCl 和 Paraffin Oil 两种气溶胶对 5 种滤料进行了过滤性能的测试,如过滤效率,过滤阻力和容尘量等。

(3) 采用扫描电子显微镜,PMI 孔径测试仪等仪器进行测试,取得如纤维直径,填充率,厚度,孔径等结构参数,以测得的这些结构参数为基础,再次运用理论公式和半经验公式计算各滤料的过滤性能,与同样条件下的实验值进行比较,寻找两者之间的联系与区别,使得空气过滤理论在一定范围内能指导滤料的研究、生产和应用。

(4) 通过实验, 确定各外部因素如过滤风速, 气溶胶性质和气溶胶浓度对过滤性能的影响关系曲线, 以及测量过滤效率和过滤阻力随时间变化的关系, 从而明确滤料的使用寿命和使用场合, 为实际应用提供参考。

(5) 通过改变驻极工艺参数: 驻极电压、驻极距离、驻极时间和热处理温度的改变, 分析讨论不同工艺参数对熔喷材料表面静电势的影响, 确定最佳驻极工艺参数, 并在此基础上对各滤料进行驻极, 测量驻极后滤料的过滤性能。通过驻极前后的过滤性能对比分析, 测量表面静电势的衰减情况等, 为进一步改善驻极工艺提供指导, 从而加快我国高效和超高效滤料研发的进程。

第二章 空气过滤特性参数的理论计算与分析

影响非织造布过滤材料过滤过程的主要因素有过滤材料的性质、被过滤微粒的性质及其它们之间的相互作用。关于过滤理论的研究,前人主要将过滤过程分为两个阶段:清洁过滤阶段和含尘过滤阶段。清洁过滤阶段假设微粒与捕集表面的碰撞效率是 100%,即微粒一旦触及纤维就被捕集,以及沉积的微粒对于过滤过程没有进一步影响。在这种情况下,过滤效率和过滤阻力都与时间无关,因此过滤过程是稳态的(又称稳态过滤阶段)。而含尘过滤阶段是指由于粉尘沉积于过滤介质,使得过滤介质的结构发生变化,从而导致过滤效率、过滤阻力等参数随沉积粉尘的增加而相应变化,不再保持恒定,因此过滤过程是非稳态的(又称非稳态过滤阶段)。含尘过滤阶段是个动态过程,与清洁过滤阶段相比,更为复杂^[19]。

2.1 过滤特性参数

评价过滤材料,最重要的特性指标有四项:效率、阻力、滤速或面速和容尘量。本次理论研究中主要研究的是过滤效率和过滤阻力,在实验研究中有过滤效率、过滤阻力和容尘量三个参数。效率关系到能否满足使用要求,阻力关系到驱动设备及运行费用,容尘量关系到过滤器的使用寿命及使用方法。

2.1.1 过滤效率

过滤效率 η 是指进入滤料前侧的气溶胶总量与捕集量之比(%),可以用测定滤料前后气流中的气溶胶颗粒物计重浓度来表示。

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \quad (2-1)$$

式中: C_1 —过滤前的环境气溶胶颗粒物的计重浓度, mg/m^3 ;

C_2 —过滤后的环境气溶胶颗粒物的计重浓度, mg/m^3 。

2.1.2 过滤阻力

过滤阻力 ΔP 指滤料前后的全压差, Pa, 滤料前后测定截面流速较低, 截面积相等, 因此过滤阻力用静压差表示。

$$\Delta P = P_{j2} - P_{j1} \quad (2-2)$$

式中: P_{j1} —过滤前的管路中的压力, Pa;

P_{j2} —过滤后的管路中的压力, Pa。

2.2 过滤机理

非织造布过滤材料对空气中微粒的捕集机理十分复杂。如果简单地用筛滤作用来看待滤材对空气中粒子的过滤效果,就很难理解一些看起来蓬松、孔径或间隙量较大,看起来透亮,空气很容易通过的滤材,为什么对和其空隙相比尺寸很小的粒子,也有一定的过滤效果^[20]。根据现有的过滤理论,过滤机理至少有五种:扩散作用、惯性作用、拦截作用、重力作用和静电作用。

2.2.1 扩散作用

由于气体分子热运动对微粒产生作用力,微粒发生布朗运动,使运动粒子随流体流动的轨迹与流线有一定的偏移。在常温下, $0.1\mu\text{m}$ 的微粒每秒钟扩散距离可达到 $17\mu\text{m}$, 比纤维间距大几倍甚至几十倍,这就使粒子有更大的机会运动接触到纤维表面并沉积下来。对于直径大于 $0.3\mu\text{m}$ 的粒子布朗运动作用就会减弱许多,一般不足以靠布朗运动使其离开流线而碰撞到纤维的表面上去。粒子的尺寸越小,气流速度越小,布朗运动的强度越大,扩散作用也越明显。

2.2.2 惯性作用

由于纤维排列复杂,所以气流在纤维层内穿过时,其流线要屡经激烈的拐弯。在流线拐弯时,运动的微粒由于具有惯性,来不及跟随流线的变化绕过纤维,因而脱离流线撞向纤维,而被纤维捕集。微粒的粒径越大,气流速度越大,受到惯性力的作用也越大,越易脱离流线而与纤维发生碰撞。

2.2.3 拦截作用

在纤维层内纤维排列错综复杂,形成无数的网格。当某尺寸的微粒沿流线刚好运动到纤维表面附近时,假如从流线到纤维表面的距离等于或小于微粒的半径,微粒在范德华力作用下被粘住,微粒就在纤维表面沉积下来,这种作用称为拦截作用。比滤料孔隙大的颗粒的捕集称为筛子效应,它有时被单独称为过滤效应,但也可认为是拦截作用的一种。

有人认为截留效应不应被单独列为过滤机理,至少不是与扩散和惯性沉积并驾齐驱的过滤机理,因为在扩散机理的零扩散(大粒径粉尘)情况下,扩散纤维

效率蜕变为理想拦截效率；在惯性机理中，当粒径趋于零时，惯性纤维效率也会趋近理想拦截效率，因此拦截包括在惯性和扩散机理内。

2.2.4 重力作用

微粒通过纤维层时，在重力作用下发生脱离流线的位移，也就是因重力而沉积在纤维上。一般认为直径大于 $0.5\mu\text{m}$ 的粒子主要靠惯性作用沉积在纤维上。

2.2.5 静电作用

由于摩擦或其他种种作用，纤维和微粒都有可能带上电荷，带异性电荷的微粒相互吸引而形成较大的新颗粒，容易因惯性作用等被捕集，带同性电荷的微粒相互排斥，促成微粒作布朗运动等而被捕集，同时也有静电力作用而产生纤维吸引微粒效应，这些统称为静电作用。但若是在纤维处理过程中因摩擦而带电，或是因微粒感应而使纤维表面带电，则这种电荷不能长时间存在，而且电场强度也弱，产生的吸引力很小，可以忽略不计^[21]。

2.3 过滤效率的理论计算和分析

过滤材料对微粒的捕集作用主要通过上述几种作用进行，但是要精确推导出滤料对微粒过滤效率的数学关系式，是极其困难的。当前的研究工作主要是以经典过滤理论为基础，建立简化的模型，并结合大量的实验数据，得出半经验公式，对经典理论作一些系数修正，用它来定性分析过滤材料对微粒的过滤效率，然后比较不同条件下，各因素对效率的影响情况。

在经典过滤理论中，孤立圆柱法是研究纤维滤纸过滤效率的理论基础，由 I.Langmuir 提出，该方法的前提条件是假定：

- (1) 过滤器是由许多同种材料的单独的圆柱形纤维构成的均一体系。
- (2) 纤维垂直于气流分布，彼此相距足够远。
- (3) 微粒是球形的。
- (4) 纤维表面是干净的，因此只考虑第一阶段（清洁过滤阶段）的效率。
- (5) 接触并沉积于纤维的微粒不再飞散。

在孤立圆柱法的基础上，付克斯等从纯理论角度加以发展；而在高效滤纸过滤器方面，井伊谷等从实验方面做了补充研究。根据这些研究，对过滤材料过滤效率的计算一般按以下步骤进行：

- (1) 根据微粒性质、过滤材料的性能和试验条件，确定 5 种捕集作用中起主要作用的一种或几种（一般只考虑拦截、惯性和扩散作用）。

(2) 计算孤立的单根纤维在几种作用共同影响下的总捕集效率。

(3) 考虑相邻纤维间的干涉作用, 计算过滤器内 (不是孤立的) 单根纤维的总捕集效率。

(4) 根据对数穿透定律, 计算过滤器捕集微粒的总效率^[22]。

2.3.1 孤立单纤维捕集效率

由于本实验采用的微粒质量中值粒径为 $0.26\mu\text{m}$, 因此重力作用可忽略; 同时试验材料为熔喷聚丙烯非织造布, 未经过静电驻极处理, 因此不考虑静电作用。所以过滤机理主要考虑三个作用: 惯性作用, 拦截作用和扩散作用。若只考虑这三个作用的影响, 则单根纤维的总捕集效率为:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_I + \eta_D + \eta_R \quad (2-3)$$

式中, η_{Σ} —总捕集效率 (%);

η_I —惯性作用捕集效率 (%);

η_D —扩散作用捕集效率 (%);

η_R —拦截作用捕集效率 (%);

但是, 实际上这几种机理是相互作用, 共同影响的。在分析惯性力作用时, 把微粒看作质点, 而实际并非质点, 这样, 在惯性作用下, 微粒中心 (质点) 没有和纤维发生碰撞, 理应不被捕集, 但是实际上由于惯性力的作用, 微粒偏离原来的流线方向靠向纤维, 而进入距圆柱表面为粒子半径的轨迹, 与圆柱面接触被拦截。这种拦截作用改变了惯性作用的边界条件。因此许多研究者把惯性捕集合拦截捕集综合在一起给出惯性和拦截的综合捕集效率。

纤维附近的流场可以认为是平行流绕圆柱体的流动, 由于纤维过滤中气流的速度很小, 在小雷诺数下空气流动属于粘滞流动。对雷诺数 $\text{Re} < 1$ 时, 戴维斯 (Davies) 给出了近似的计算公式^[23]:

$$\eta_{I,R} = 0.16[R + (0.25 + 0.4R)\text{St} - 0.0263R\text{St}^2] \quad (2-4)$$

式中, R —截留参数, $R = \frac{d_p}{d_f}$;

d_p —气溶胶微粒直径, m ;

d_f —纤维直径, m ;

St —斯托克斯数, $\text{St} = \frac{\rho_p c d_p^2 v}{9\mu d_f}$;

ρ_p —微粒的密度, kg/m^3 ;

C —微粒的滑动修正系数: $C = 1 + \frac{2A\lambda}{d_p}$;

A —滑动修正系数中的比例常数, $A = \frac{1}{2 \times (2.00223 - \ln Re)}$;

λ —分子的平均自由行程, m;

V —流体的运动粘度, m^2/s ;

μ —流体的动力粘度, $kg \cdot s/m^2$ 。

同理, 在分析扩散作用下微粒轨迹没有能达到纤维表面, 而是达到距纤维表面为微粒半径的范围, 也将由于拦截作用而被捕集, 这就是扩散拦截效应。

W.H.Mcadams 以及 R.Dobry 和 P.K.Finn 根据气流扩散系数和温度传导率导出了扩散拦截效率:

$$\eta_{D,R} = \pi(1 + R) \frac{Sh}{ReSc} \quad (2-5)$$

式中, Sh —夏温多准则, $Sh = 0.557(ReSc)^{\frac{1}{3}}$;

Re —雷诺数, $Re = \frac{d_f V_0}{V}$, V_0 为气流速度, m/s ;

Sc —依米托准则, $Sc = \frac{V_0}{D}$;

D —粒子的扩散系数 (m^2/s), $D = \frac{kT\rho_p}{3\pi\mu d_p}$

因此, 孤立单纤维对微粒的总捕集效率一般用下式表示:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{I,R} + \eta_{D,R} \quad (2-6)$$

2.3.2 相邻纤维的干涉作用

滤材内纤维对微粒的捕集作用比孤立纤维要复杂得多。由于滤材内纤维的填充状况 (方向、密度、相互的组合方式等), 对纤维都有相互干涉作用, 需要对孤立单纤维对微粒的捕集效率进行修正。纤维间相互干涉作用对纤维捕集效率的修正方法有多种, 如有效半径法, 结构不均匀系数法, 实验系数法和半经验公式法等。本文采用实验系数法:

$$\eta_{\Sigma}' = \eta_{\Sigma} (1 + 4.5\alpha) \quad (2-7)$$

式中, α —滤材填充率。

该法由于用一系列单分散相气溶胶对各种填充率的纤维过滤器的实验为基础, 算出的值和实验值比较接近, 在许多文献中都采用这公式。

2.3.3 纤维过滤器的过滤效率

应用对数穿透定律,在计算单根纤维捕集效率之后,可以计算整个过滤器(即指的是多纤维组成的过滤材料)的效率。利用微积分推导得到透过率及效率的计算公式如下:

$$P = \exp\left(-\frac{4\alpha L\eta_{\Sigma}}{\pi(1-\alpha)d_f}\right) \quad (2-8)$$

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{4\alpha L\eta_{\Sigma}}{\pi(1-\alpha)d_f}\right) \quad (2-9)$$

式中: L 为过滤材料厚度, mm。

从该过滤效率的公式可以看出,理论上影响过滤效率的主要因素为微粒直径 d_p , 纤维直径 d_f , 滤速 V_0 , 填充率 α , 和厚度 L 。在理论计算过程中, 主要围绕这 5 个因素的变化, 探讨对过滤性能的影响, 从而进一步深化对空气过滤机理的认识。

2.3.4 气流通过纤维过滤器的阻力

Davis 用实验资料确定了阻力的经验式, 当 α 在 0.006-0.3 之间时

$$\Delta P = \frac{6\mu V_0 L}{d_f^2} \alpha^{1.5} (1 + 56\alpha^3) \quad (2-10)$$

从公式中可以看出, 过滤器的阻力和过滤速度 V_0 , 过滤器厚度 L 和纤维的填充率 α 成正比, 而和纤维直径 d_f 的平方成反比^[24], 在接下来的理论计算和实验研究中, 围绕这四个因素对过滤阻力的影响进行具体分析。

2.3.5 理论计算与分析

根据前述有关纤维过滤机理的基本理论得出的理论和经验公式, 进行 Matlab 编程理论计算, 获得了相关的图表和曲线。通过对这些图表和曲线的规律进行分析, 为研究非织造布过滤材料时预测性能和优化产品结构提供参考。

计算中采用的基本参数为: 一个标准大气压 (101325Pa), 常温 (293.15K), 由于在实验中采用的 8130 滤料测试仪能达到的气溶胶浓度为 15~20 mg/m³, 所以微粒密度采用 $15.6 \times 10^{-6} \text{kg/m}^3$, 其他参数则参照实际生产过程或实验过程中测得的数据进行选择^[25]。

表 2-1 各因素的选取

因素	1	2	3	4	5
微粒直径 $d_p(\mu\text{m})$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
纤维直径 $d_f(\mu\text{m})$	1	2	3	4	5
滤速 $V_0(\text{cm/s})$	3.5	5.3	7.3	10.0	11.7
填充率 α	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13
厚度 $L(\text{mm})$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0

2.3.5.1 微粒直径对过滤效率和过滤阻力的影响

表 2-2 为纤维直径 $3\mu\text{m}$ ，滤速 4.5cm/s ，填充率 0.09 ，厚度 0.2mm ，微粒直径分别取 $0.1\sim 0.5\mu\text{m}$ 时的过滤效率和阻力的计算结果。

表 2-2 微粒直径不同时的过滤效率和过滤阻力计算结果

$d_p(\mu\text{m})$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$d_f(\mu\text{m})$	3	3	3	3	3
$V_0(\text{cm/s})$	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
α	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
$L(\text{mm})$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Sc	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4
Re	0.519	0.519	0.519	0.519	0.519
Sh	16.80	16.80	16.80	16.80	16.80
R	0.03	0.07	0.10	0.13	0.17
$\eta_{D,R}$	1.98×10^{-3}	2.05×10^{-3}	2.11×10^{-3}	2.17×10^{-3}	2.25×10^{-3}
$\eta_{I,R}$	4.8×10^{-3}	11.2×10^{-3}	16×10^{-3}	20.8×10^{-3}	27.2×10^{-3}
η_Σ	6.78×10^{-3}	13.25×10^{-3}	18.11×10^{-3}	22.97×10^{-3}	29.45×10^{-3}
η_Σ'	9.53×10^{-3}	18.62×10^{-3}	25.44×10^{-3}	32.27×10^{-3}	41.38×10^{-3}
$\eta(\%)$	7.69	14.79	18.94	23.66	29.53
$\Delta P(\text{mm}\cdot\text{H}_2\text{O})$	1.82	1.82	1.82	1.82	1.82

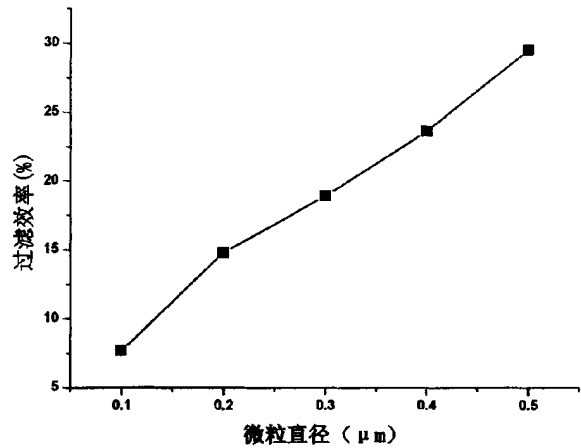


图 2-1 过滤效率与微粒直径的关系

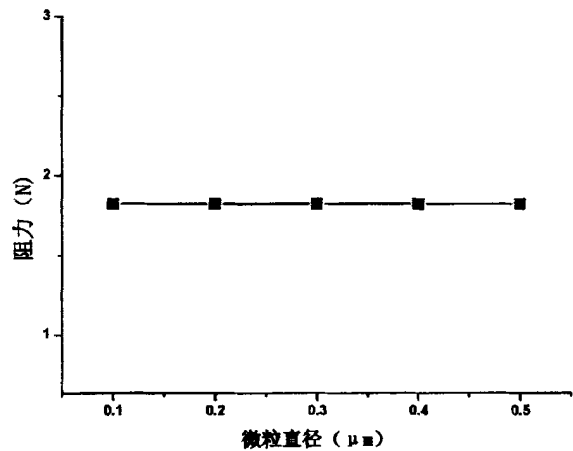


图 2-2 过滤阻力与微粒直径的关系

过滤材料主要依靠布朗扩散、截留、惯性碰撞、重力沉降等机械阻挡作用来过滤空气的微粒，因此对于粒径小于 $1\mu\text{m}$ 的粒子过滤效果不甚理想。从表 2-2 可知，过滤效率不到 30%足可证明这一点；同时从图 2-1 可以看出，过滤效率随着微粒直径的增大而增大。对数据的具体分析还可以看出，在微粒直径由 $0.1\mu\text{m}$ 增至 $0.2\mu\text{m}$ 时，过滤效率增大 7.1%，由 $0.2\mu\text{m}$ 增至 $0.3\mu\text{m}$ ，过滤效率则增至 4.15%，以此类推，分别为 4.72%、5.87%，由此可知，过滤效率的上升程度先变小后增

大，这是因为微粒直径为 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ 时过滤主要表现为小粒径粒子的扩散效应，这时扩散效应最大，同时随着微粒直径的增大，惯性效应和拦截效应增大，因此此阶段过滤效率增大程度最大；超过 $0.2\mu\text{m}$ 后，随着微粒直径的增大，虽然惯性效应和拦截效应进一步增大，但扩散效应会减小，因此使得整体的过滤效率增长幅度减小；超过 $0.3\mu\text{m}$ 后，扩散效应影响可忽略不计，此时过滤效率的增大主要表现为惯性效应和拦截效应的增大，因此变化幅度增大。从图 2-2 可以看出，过滤阻力则不随微粒直径而发生变化。因为过滤阻力主要取决于气流通过滤料的压力损失，而空气中的微粒对气流的压力影响不大，因此过滤阻力不随气溶胶粒径的变化而变化。

2.3.5.2 纤维直径对过滤效率和过滤阻力的影响

表 2-3 为滤速 4.5cm/s ，填充率 0.09 ，厚度 0.2mm ，微粒直径为 $0.3\mu\text{m}$ ，纤维直径发生变化时的过滤效率和阻力的计算结果。

表 2-3 纤维直径不同时过滤效率和过滤阻力的计算结果

$d_p(\mu\text{m})$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$d_f(\mu\text{m})$	1	2	3	4	5
$V_0(\text{cm/s})$	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
α	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
$L(\text{mm})$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Sc	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4
Re	0.173	0.346	0.519	0.692	0.865
Sh	11.65	14.68	16.80	18.49	19.92
R	0.3	0.15	0.10	0.075	0.06
$\eta_{D,R}$	5.20×10^{-3}	2.90×10^{-3}	2.11×10^{-3}	1.70×10^{-3}	1.45×10^{-3}
$\eta_{I,R}$	48×10^{-3}	24×10^{-3}	16×10^{-3}	12×10^{-3}	9.6×10^{-3}
η_{Σ}	53.20×10^{-3}	26.90×10^{-3}	18.11×10^{-3}	13.70×10^{-3}	11.45×10^{-3}
η_{Σ}'	74.75×10^{-3}	37.79×10^{-3}	25.44×10^{-3}	19.25×10^{-3}	16.09×10^{-3}
$\eta(\%)$	84.79	37.88	19.24	11.42	7.79
$\Delta P(\text{mm}\cdot\text{H}_2\text{O})$	16.35	4.09	1.82	1.02	0.65

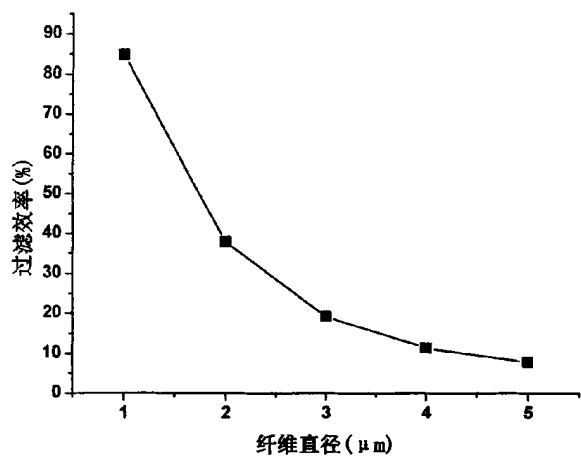


图 2-3 过滤效率与纤维直径的关系

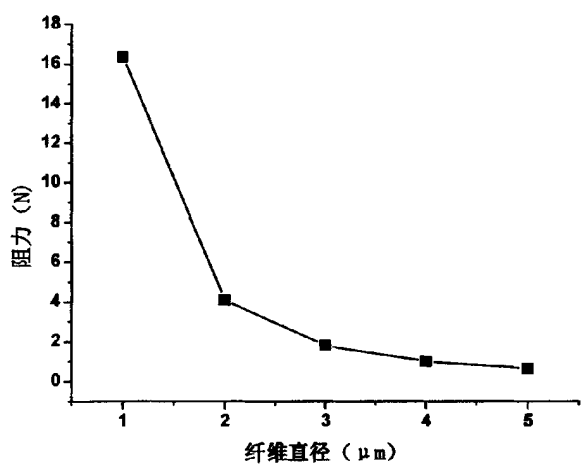


图 2-4 过滤阻力与纤维直径的关系

从图 2-3，图 2-4 可以看出，过滤效率和过滤阻力都随滤料纤维直径的增大而减小，当纤维直径由 $1\mu\text{m}$ 增大到 $2\mu\text{m}$ 时，过滤效率和过滤阻力的下降程度最大；从 $2\mu\text{m}$ 增大 $5\mu\text{m}$ ，下降程度越来越小，直至趋于平缓。这是因为随着过滤材料中纤维直径的下降，纤维的比表面积显著增加，纤维的毛细作用和纤维集合体之间产生的微细空隙，能显著提高过滤性能；纤维直径的增加，使随机排列的纤维网相对比较疏松，纤维与纤维之间的空隙大大增加，会造成对微粒的扩散作

用和惯性作用的下降,结果使整个滤料的过滤效率下降。但是当减少纤维细度时,过滤材料单位面积内的纤维根数就会随之增加,同时纤维之间的排列也会更加均匀,孔径减小,填充率增大,作为过滤层会造成阻力的明显增加,因此只能在阻力适中的情况下减少纤维直径。

2.3.5.3 滤速对过滤效率的影响

滤速是衡量过滤器通风能力的参数,是指通过滤纸时的气流速度,单位一般为 cm/s,反映气流在滤料中的通过能力。

$$v = \frac{L_1}{60F}$$

(2-11)

式中: L_1 —修正后经过滤料的风量, L/min;

F —滤料的过滤面积, cm^2 。 [26]

表 2-4 为纤维直径 $3\mu\text{m}$, 微粒直径为 $0.3\mu\text{m}$, 填充率 0.09, 厚度 0.2mm, 滤速变化时的过滤效率和阻力的计算结果。

表 2-4 滤速不同时过滤效率和过滤阻力的计算结果

$d_p(\mu\text{m})$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$d_f(\mu\text{m})$	3	3	3	3	3
$V_0(\text{cm/s})$	3.5	5.3	7.3	10.0	11.7
α	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
$L(\text{mm})$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Sc	4.11×10^4	6.23×10^4	8.58×10^4	11.75×10^4	13.75×10^4
Re	0.40	0.61	0.84	1.15	1.35
Sh	14.16	18.73	23.18	28.58	31.77
R	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$\eta_{D,R}$	2.97×10^{-3}	1.70×10^{-3}	1.11×10^{-3}	7.31×10^{-3}	5.91×10^{-3}
$\eta_{I,R}$	16×10^{-3}	16×10^{-3}	16×10^{-3}	16×10^{-3}	16×10^{-3}
η_{Σ}	18.97×10^{-3}	17.70×10^{-3}	17.11×10^{-3}	23.31×10^{-3}	21.91×10^{-3}
η_{Σ}'	26.65×10^{-3}	24.87×10^{-3}	24.04×10^{-3}	32.75×10^{-3}	30.78×10^{-3}
$\eta(\%)$	20.01	18.85	18.28	24.05	22.78
$\Delta P(\text{mm} \cdot \text{H}_2\text{O})$	1.41	2.14	2.95	4.04	4.72

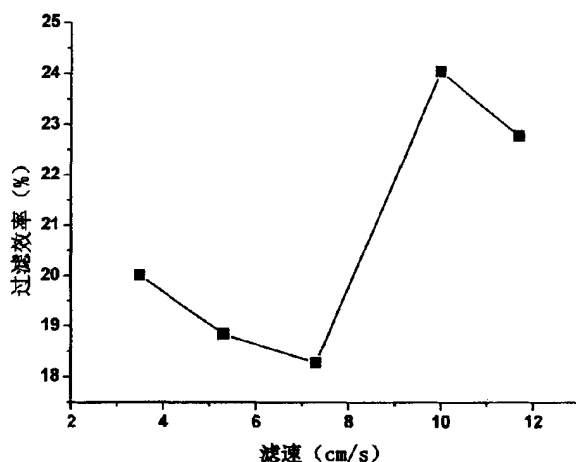


图 2-5 过滤效率与滤速的关系

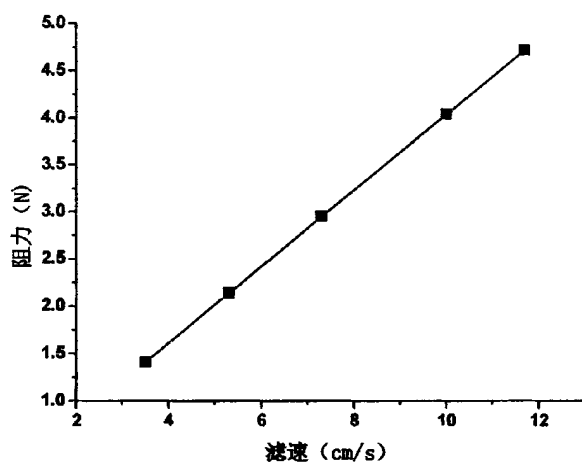


图 2-6 过滤阻力与滤速的关系

由图 2-5 可以看出，过滤效率随着滤速的增大先减小后增大，在 7.3cm/s 时过滤效率最低，为 18.28%，在 10cm/s 时达到最大，为 24.05%，随后又减小，存在一个最小临界过滤速度和最大临界过滤速度；最小临界速度的出现是由于过滤速度对扩散与惯性机理的影响相反。这是因为过滤速度越高，含尘气流经过滤料时，颗粒物不易被捕集，扩散效应减小。与之相反，当过滤速度增大时，粉尘来不及随流线的变化绕过纤维，而是脱离流线碰撞在纤维上被纤维捕集，因此惯性

效应和拦截效应增大。过滤速度较低时，扩散机理起主导作用；过滤速度较高时，惯性机理起主导作用。因此低过滤速度（ $<7.3\text{cm/s}$ ）时，起主导作用的扩散机理随着过滤速度的增加而降低，导致过滤效率必然下降；相反惯性机理的捕集效率随过滤速度的提高逐渐增强，在高过滤速度（ $7.3\text{cm/s}\sim10.0\text{cm/s}$ ）时，惯性机理起主导作用，捕集效率随着过滤速度增加而增大。这就出现了过滤效率随过滤速度增加而先减后增的现象。当过滤速率大于 10.0cm/s 时过滤效率又出现下降的趋势，这是因为过滤速率太大导致气溶胶粒子在滤料内停留的时间太短，导致扩散效应，拦截效应都下降。

从图 2-6 可以看出，过滤阻力随着滤速的增大而呈直线性的递增，是因为随着滤速的增大，气流通过滤料时与纤维的摩擦力也越大，压力损失越大，过滤阻力与压力损失成正比，因此随着滤速增大，过滤阻力也增大。

2.3.5.4 填充率对过滤效率的影响

表 2-5 为纤维直径 $3\mu\text{m}$ ，滤速 4.5cm/s ，微粒直径 $0.3\mu\text{m}$ ，厚度 0.2mm ，填充率变化时的过滤效率和阻力的计算结果。

表 2-5 填充率不同时对过滤效率和过滤阻力的计算结果

$d_p(\mu\text{m})$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$d_f(\mu\text{m})$	3	3	3	3	3
$V_0(\text{cm/s})$	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
α	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13
$L(\text{mm})$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Sc	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4
Re	0.519	0.519	0.519	0.519	0.519
Sh	16.80	16.80	16.80	16.80	16.80
R	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$\eta_{D,R}$	2.11×10^{-3}	2.11×10^{-3}	2.11×10^{-3}	2.11×10^{-3}	2.11×10^{-3}
$\eta_{I,R}$	16×10^{-3}	16×10^{-3}	16×10^{-3}	16×10^{-3}	16×10^{-3}
η_{Σ}	18.11×10^{-3}	18.11×10^{-3}	18.11×10^{-3}	18.11×10^{-3}	18.11×10^{-3}
η_{Σ}'	22.18×10^{-3}	23.81×10^{-3}	25.44×10^{-3}	27.07×10^{-3}	28.70×10^{-3}
$\eta(\%)$	9.44	14.12	19.24	24.73	30.53
$\Delta P(\text{mm}\cdot\text{H}_2\text{O})$	0.73	1.22	1.82	2.53	3.40

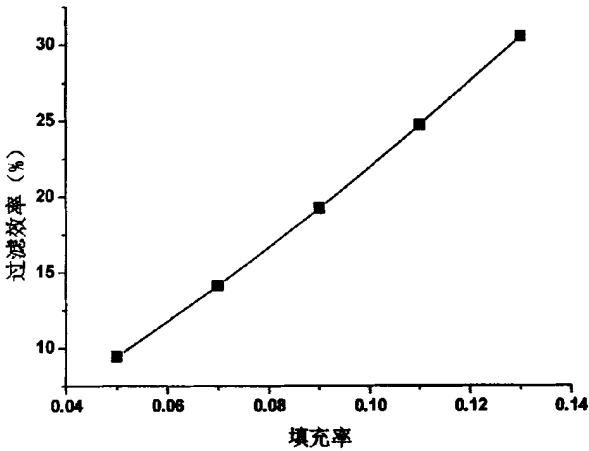


图 2-7 过滤效率与填充率的关系

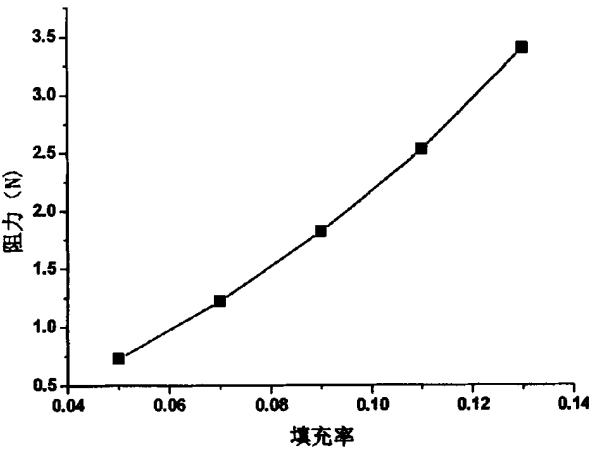


图 2-8 过滤阻力与填充率的关系

从图 2-7 可以看出，过滤效率随填充率的增大呈线性的增大，变化幅度依次为 4.98%，5.12%，5.49%，5.80%；从图 2-8 可以看出，过滤阻力随填充率的增大而增大，但前期变化幅度较小，随着填充率的进一步增大，阻力增大幅度也越来越大，依次为 0.49N，0.60N，0.71N，0.87N，这是因为增加填充率会使单位面积内纤维根数增多，孔径减小，因此整个滤料对微粒的吸附作用增强，但同时气流与纤维发生摩擦的机会也增多，致使过滤效率与阻力同步增大。由此可见，

增加填充率会提高过滤效率，但也会显著地提高过滤阻力，因此不能过分强调增加填充率来提高过滤效率。

2.3.5.5 厚度对过滤效率的影响

表 2-6 为纤维直径 $3\mu\text{m}$ ，滤速 4.5cm/s ，填充率 0.09 ，微粒直径 $0.3\mu\text{m}$ ，厚度成倍数增加时的过滤效率和阻力的计算结果。

表 2-6 厚度变化时过滤效率和过滤效果的计算结果

$d_p(\mu\text{m})$	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$d_f(\mu\text{m})$	3	3	3	3	3
$V_0(\text{cm/s})$	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
α	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
$L(\text{mm})$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Sc	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4
Re	0.519	0.519	0.519	0.519	0.519
Sh	16.80	16.80	16.80	16.80	16.80
R	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$\eta_{D,R}$	2.11×10^{-3}	2.11×10^{-3}	2.11×10^{-3}	2.11×10^{-3}	2.11×10^{-3}
$\eta_{L,R}$	16×10^{-3}	16×10^{-3}	16×10^{-3}	16×10^{-3}	16×10^{-3}
η_Σ	18.11×10^{-3}	18.11×10^{-3}	18.11×10^{-3}	18.11×10^{-3}	18.11×10^{-3}
η_Σ'	22.18×10^{-3}	23.81×10^{-3}	25.44×10^{-3}	27.07×10^{-3}	28.70×10^{-3}
$\eta(\%)$	17.00	32.97	47.33	59.73	70.04
$\Delta P(\text{mm} \cdot \text{H}_2\text{O})$	0.18	0.36	0.54	0.73	0.91

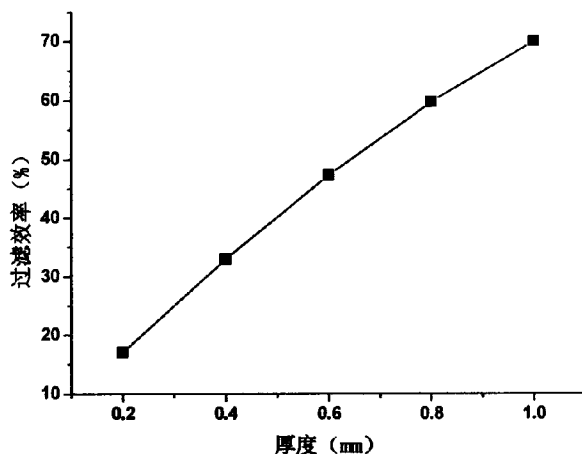


图 2-9 过滤效率与厚度的关系

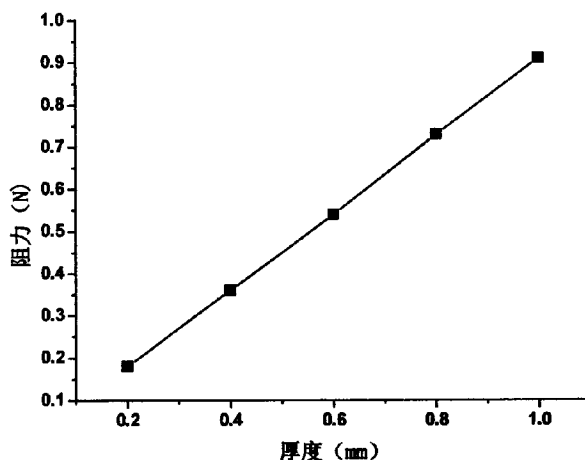


图 2-10 过滤阻力与厚度的关系

从图 2-9，图 2-10 可以看出，过滤效率和过滤阻力都随厚度的增大而增大，但过滤效率随厚度的增大变化幅度越来越小，依次为 15.97%，14.36%，12.40%，10.31%，这说明当滤料厚度增大到一定程度时，再继续增加厚度对过滤效率的提高并没有太大的帮助，但过滤阻力则随着厚度的增大几呈几何倍数的增大。这是因为过滤材料厚度增加时，当颗粒沿着流体的速度行进，通过过滤材料时，其路径变长，能使材料的接触面增大，提高了过滤效率，但是由于厚度加大的同时阻

力也大大增加,而且过滤效率的提高程度远远不如阻力的增大程度。这说明在实际生产中,增大滤材厚度无疑可以在一定程度上增大过滤效率,但同时也意味着过滤阻力的增大,能耗的增大,不利于节约能源和节约资源,因此不能只追求效率而增大厚度,要寻求两者的平衡,找到一个滤材的最佳厚度。

2.4 本章小结

(1) 对于微粒直径小于 $1\mu\text{m}$ 的粒子,计算出来的过滤效率不足 30%,证明了未经过处理的过滤材料对小于 $1\mu\text{m}$ 的粒子过滤效果不甚理想。过滤效率随着微粒直径的增大而增大,但增大幅度有一个先增大后减小的过程;过滤阻力则不随微粒直径而发生变化。

(2) 过滤效率和过滤阻力都随滤料纤维直径的增大而下降,下降程度越来越小,直至趋于平缓。即减小纤维直径,能增加过滤效率,但同时也会增大过滤阻力,因此只能在阻力适中的情况下减少纤维直径。

(3) 过滤效率随着滤速的增大先减小后增大,存在一个临界过滤速度;过滤阻力随着滤速的增大则呈直线性的递增,因此应尽量找到滤料的临界过滤速度,在临界过滤速度(即临界风速)下使用过滤材料。或者根据不同场合的风速选用不同的过滤材料。

(4) 过滤效率和过滤阻力都会随填充率的增大呈线性的增大,因此不能过分强调增加填充率来提高过滤效率。

(5) 过滤效率和过滤阻力都随厚度的增大而增大,但过滤效率随厚度的增大变化幅度越来越小,过滤阻力则一直呈几何倍数的增大。因此不能只追求效率而增大厚度,要寻求两者的平衡,找到一个滤材的最佳厚度。

(6) 在理论计算的过程中,笔者发现气溶胶浓度只影响斯托克系数 St ($St = \frac{\rho_p c_d p^2 v}{9\mu d_f}$),但由于本课题根据实验数据选取的气溶胶浓度太小,计算出来的 $\eta_{l,R}$ ($\eta_{l,R} = 0.16[R + (0.25 + 0.4R)St - 0.0263RSt^2]$) 中的 St 相对于 R 来说数量级别太小,几乎可以忽略不计,因此气溶胶浓度对过滤效率几乎没有影响,这与后面的实验过程中得到的结论是一致的。

第三章 实验装置及原理

本次研究采用五种滤料，五种滤料的材质均为聚丙烯（PP），制造工艺为熔喷，命名为 A、B、C、D、E。其中 A、B、C 三种滤料在东华大学工程实训中心制造，D、E 两种滤料来自国内某知名无纺布生产商。

3.1 滤料结构因素实验确定

过滤材料的微观结构及其自身性质是决定其过滤特性的关键因素。这些结构因素包括：克重，厚度，纤维直径，填充率，孔径。

3.1.1 克重的确定

依据标准：GB/T 2421.2-2009

测试仪器：圆盘取样机，FA2004A 型号的电子天平

测试过程：用圆盘取样机合理地取得过滤材料，如 100cm^2 滤材，然后用电子天平进行称量获取面密度。

3.1.2 滤材厚度的确定

依据标准：GB/T 24128.2-2009

测试仪器：YG141N 型数字式织物厚度仪

测试过程：压脚（上圆形板）的面积为 2500mm^2 ，基准板（下圆形板）的直径为 80mm，竖直杆与压脚板之间的距离，可上下移动；测量装置为游标卡尺，其游标与铁杆连结，可显示压脚与基准板之间的距离，精度为 0.02mm。测量时，拉起压脚，把裁好的样品放在基准板上，然后缓缓放下压脚，从游标卡尺上读出样品的厚度。

3.1.3 滤材表面形态的测试

测试仪器：JSM-5600LV 扫描电子显微镜

测试过程：这项工作是在东华大学测试分析中心的电子扫描显微镜下进行的。

3.1.4 滤材纤维直径的确定

测试标准：GB/T 10685-2007

测试仪器：BEION F6 纤维细度仪

测试过程：纤维直径的确定要通过电子扫描显微镜下成像后再对其进行统计分析。对五种滤材进行了随机的抽样，在每块滤材上随机抽取了三个点进行了电子显微镜扫描成像。利用 BEION F6 纤维细度仪测量扫描照片上 50 根纤维的直径，然后计算其平均值。

3.1.5 滤材孔径的确定

测试标准：FZ/T316-2003

测试仪器：PMI 孔径测试仪

测试过程：打开空压机电源，先插插座，然后是 ON，打开干燥器和阀。选用 2.5cm 直径的适配器，注意各个密封圈没有脱落，还有底部的密封圈，检查一下。材料浸润，于两个设配盘之间，盖上压塞后，旋紧盖子。进入软件界面做好修改保存路径文件，输入材料的厚度，然后进行测试，通过 data 快捷键，将实验数据拷出。

3.1.6 滤材填充率和孔隙率的确定

通过利用上面测得的铝材厚度和面密度，算出滤材的密度后除以丙纶纤维的密度，即可以得出滤材的填充率（ α ）。填充率（ α ）为过滤层密度和过滤层材料的密度比，孔隙率（ n ）是指多孔材料中孔隙所占体积与多孔材料总体积的比率。根据公式^[27]：

$$\alpha = \frac{m}{L \times \rho \times 10^3} \quad (3-1)$$

$$n = 1 - \frac{m}{L \times \rho \times 10^3} \quad (3-2)$$

计算得其填充率和孔隙率，其中： $\rho = 0.91\text{g/cm}^3$ 为聚丙烯纤维的比重。

3.2 滤材物理性能的测试

3.2.1 滤材拉伸强力的测试

测试标准：FZ/T60005-1991

测试仪器：HD026NS 电子织物强力仪

测试过程：将样品裁成 30cm 长和 5cm 宽的长条状；预加张力为 5N，夹持距离为 20cm，拉伸速度为 100mm/min，纵横向各测 5 次，取其平均值，测出拉伸强度。

3.2.2 滤材顶破强力的测试

测试标准：GB/T19976-2005

测试仪器：HD026NS 电子织物强力仪

测试过程：将织物裁成直径为 5cm 的圆状，隔距为 45cm，顶破速度为 108mm/min，测试 5 次，取其平均值，测得顶破强力。

3.2.3 滤材透气性测试

透气量是指在恒定温度和单位压力差下，在气体稳定透过时，单位时间内透过试样单位面积的气体的体积。

测试标准：GB/T 5453-199

测试仪器：FX3300Textest 透气测试仪

测试过程：压下夹紧手柄，打开实验头，将样品放在实验头上，抽吸泵自动启动。预先选择的实验压力能自动设置并保持不变，几秒钟后，实验样品的透气性将根据预先选择的测量单位显示出来。压下夹紧手柄 1 秒钟，试验样品被放松，抽吸泵关闭。测试气流压力 200Pa，喷嘴选择 6 档。

3.2.4 滤材静电势的测试

测试标准：FZ/T01042-1996

测试仪器：YG401 织物感应式静电测试仪

测试过程：采用 YG401 织物感应式静电测试仪对 3 块 45mm×60mm 的样品进行电晕驻极处理，驻极电压为 10kv，驻极时间为 30s，测试探头与试样间的距离为 15film，放置试样的转盘转速为 1500r/min。驻极完成后立即记录 60s 内的表面电压值，每 5s 记录 1 次数据。

3.3 滤材过滤性能测试

本实验测试的过滤性能主要有过滤效率，过滤阻力和容尘量。

测试标准：GB2626-2006

测试仪器：TSI8130 滤料测试仪

表 3-1 实验装置和实验方法

实验方法	实验台	试验用气溶胶
氯化钠法	TSI8130	NaCl, 质量中径 0.26 μm , 数量中径 0.075 μm
石蜡油法	TSI8130	Paraffin Oil, 质量中径 0.33 μm 数量中径 0.20 μm

根据 GB2626-2006，在测试过滤效率时，对于检测设备的主要技术参数要求如下：a) NaCl 颗粒物浓度不超过 200mg/m³，计数中位径为 (0.075±0.020) μm ，粒度分布的几何标准偏差不大于 1.86；DOP 或其他适用油类（如石蜡油）颗粒物浓度为 (50~200) mg/m³，计数中径为 (0.185±0.020) μm ，粒度分布的几何标准差不大于 1.60；b) 颗粒物检测器的动态范围为 (0.001~200) mg/m³，精度为 1%；c) 检测流量范围为 (30~100) L/min，精度为 2%；d) 过滤效率检测范围为 0~99.999%；e) NaCl 颗粒物过滤效率检测系统应具有能将所发生颗粒物的荷电进行中和的装置，油性颗粒物过滤效率检测系统没有这一要求。

检测方法如下：检测流量为 (85±4) L/min，若采用多重过滤元件，应平分流量，如对双过滤元件，每个过滤元件的检测流量为 (42.5±2) L/min。检测开始后，记录初始的过滤效率。检测应一直持续到过滤效率达到了最低点为止，或应一直持续到滤料上已经累积了 (200±5) mg 颗粒物为止^[28]。

8130 自动滤料测试仪由美国 TSI 公司于 1994 年研制成功，用于呼吸防护用品及滤料的粒子阻隔效率等关键指标的检测。该仪器有两类不同颗粒物发生器，一类为油性颗粒物发生器，使用油性颗粒物 DOP、石蜡油、DEHS 等油性物质；另一类为盐性颗粒物发生器，可产生 NaCl 颗粒物。由于它可同时产生油性颗粒物和盐性颗粒物，所以它的的滤料测试满足美国职业安全与健康局(NOISH, 42CFR, Part84)对呼吸器的测试要求。根据设备制造商提供的资料，TSI8130 可产生 NaCl 和 Paraffin Oil 的测试微粒，该设备产生的 Paraffin Oil 液滴的质量中径为 0.33 μm ，NaCl 质量中径为 0.26 μm ，流量范围为 15~100L/min，精度为 2%；采用分光光度计测量上下游气溶胶浓度，其测试效率可达 99.999%。由此可知，其技术规格完全满足 GB2626-2006 对过滤效率的测试要求。

对于 Paraffin Oil 法和 NaCl 法的实验，在 15~100L/min 的范围内选取了六个风量进行实验，这六个风量分别对应于 3.5~12cm/s 的六个滤速。对于每种滤速，测试其穿透率和阻力。

对于 TSI8130 滤料测试仪，其内部结构图如图 3-1 所示。

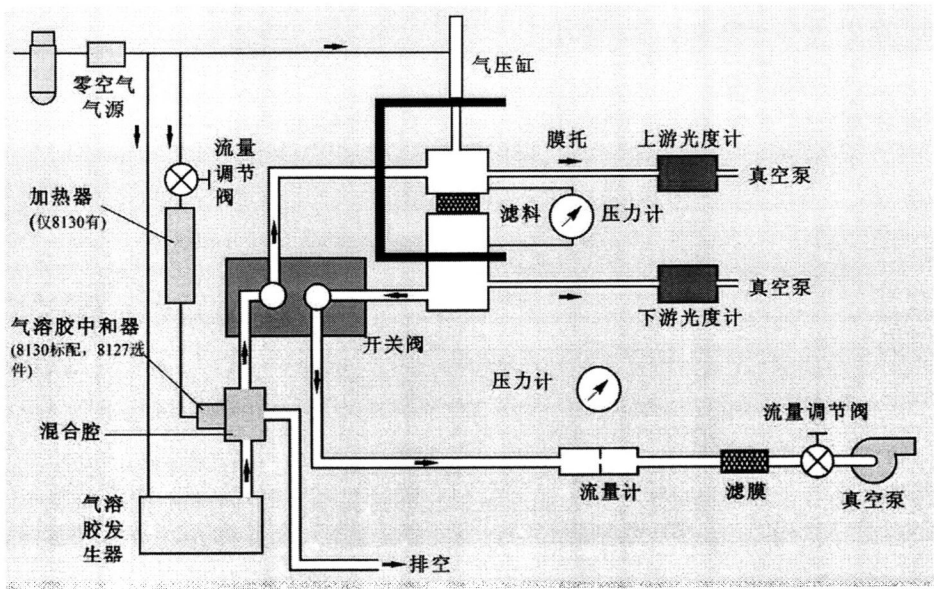


图 3-1 8130 内部结构图

测试过程：TSI8130 的测试过程比较简单。首先将滤料放置在夹具的下部，通过同时按下两个闭合按钮来关闭夹具。气压缸迅速将夹具上部压下封闭滤料，并开始检测。颗粒物发生器产生的颗粒物经过上部夹具并穿过滤料进入滤料下游，两个固态激光光度计同时检测滤料上游和下游的颗粒物浓度。滤料的穿透率通过上、下游颗粒物的浓度的比值得到，高灵敏度的电子压力传感器测定滤料的阻力和系统流量。

第四章 实验结果及分析

4.1 滤料结构实验结果

4.1.1 滤料克重

A、B、C 三种滤料的克重采用前述方法测验，取 5 个测量值计算其算术平均值，D、E 克重由厂家直接提供，分别为 25 g/m² 和 30 g/m²。实验结果如表 4-1 所示：

表 4-1 各滤料克重

滤料编号	A	B	C	D	E
克重(g/m ²)	12	16	20	25	30

4.1.2 滤料厚度

如前所述，利用 YG141N 型数字式织物厚度仪进行测量，取 10 次测量值的算术平均值作为计算厚度，实验结果如表 4-2 所示：

表 4-2 滤料厚度实验数据

滤料编号	A	B	C	D	E
1	0.218	0.317	0.212	0.2724	0.2776
2	0.212	0.349	0.246	0.2722	0.2778
3	0.208	0.381	0.221	0.2731	0.2778
4	0.202	0.320	0.228	0.2732	0.2781
5	0.212	0.315	0.254	0.2730	0.2776
6	0.218	0.307	0.228	0.2730	0.2779
7	0.206	0.299	0.232	0.2734	0.2777
8	0.212	0.298	0.222	0.2732	0.2779
9	0.216	0.355	0.240	0.2724	0.2780
10	0.220	0.328	0.228	0.2732	0.2779
平均值 (mm)	0.2124	0.3269	0.2311	0.2729	0.2778
CV (%)	0.58	2.69	1.25	0.42	0.16

由表 4-2 可知，B 滤料的厚度最大，但同时它的厚度均匀性最差，变异系数达到 2.69%，这可能是加工过程中成网不匀造成的。A、C、D、E 滤料则都是随着滤料克重的增大，厚度增大。因此，厚度与材料的面密度有直接的关系。

4.1.3 滤料纤维直径

采用扫描电子显微镜对非织造布形态结构进行观察，利用纤维细度分析仪对熔喷非织造布的纤维直径进行测量，得到下图4-1，4-2，4-3，4-4，4-5。

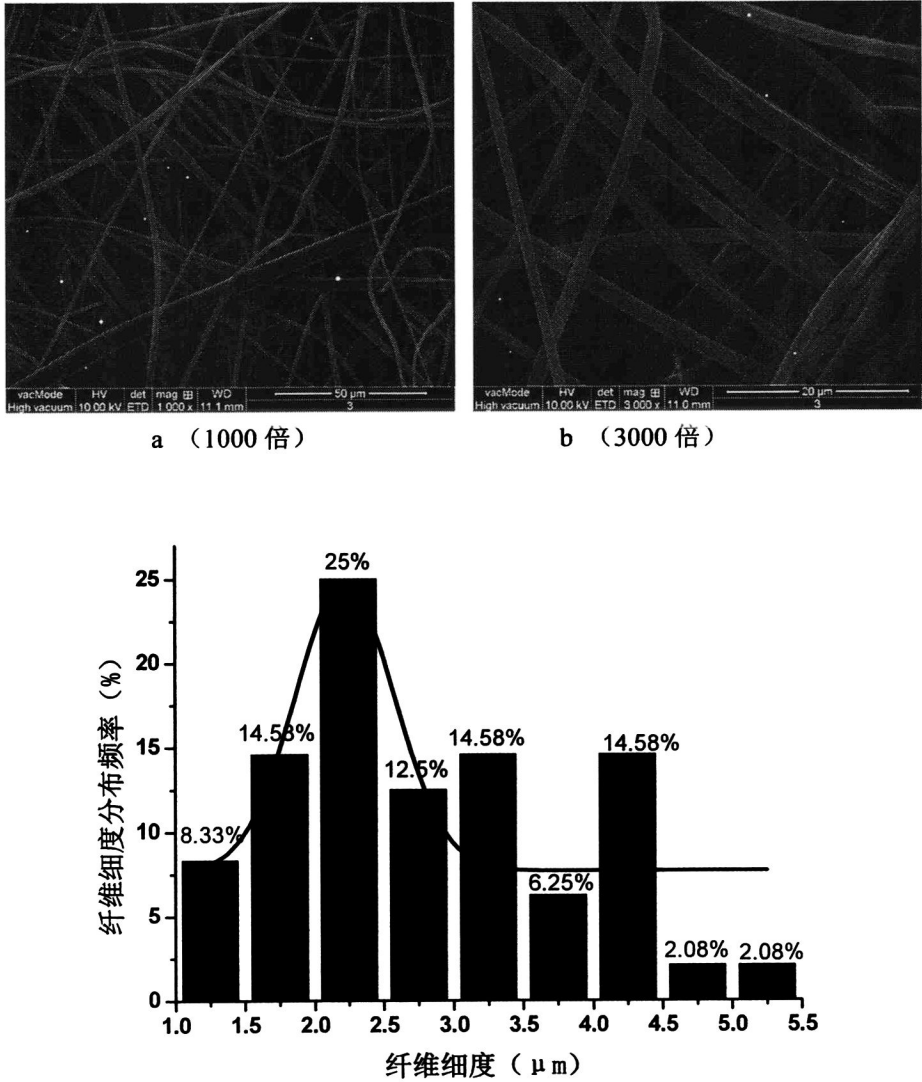


图 4-1 A 滤料扫描电镜图和纤维直径分布图

由图 4-1 可以看出, A 滤料的纤维直径在 1.0~4.5 μm 区间分布较多, 占 95% 以上, 且在这区间分布相对较均匀; 其中 1.0~2.5 μm 的纤维约占 50%, 2.5 μm ~4.0 μm 的纤维约占 32%; 最终得到滤料 A 的平均纤维直径为 2.81 μm 。

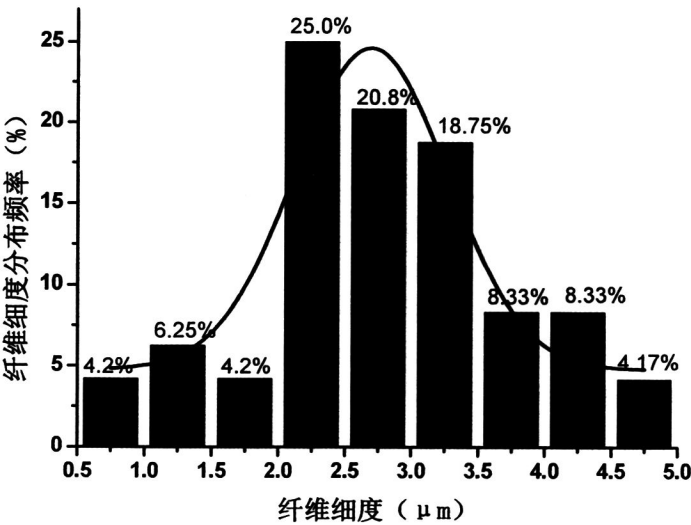
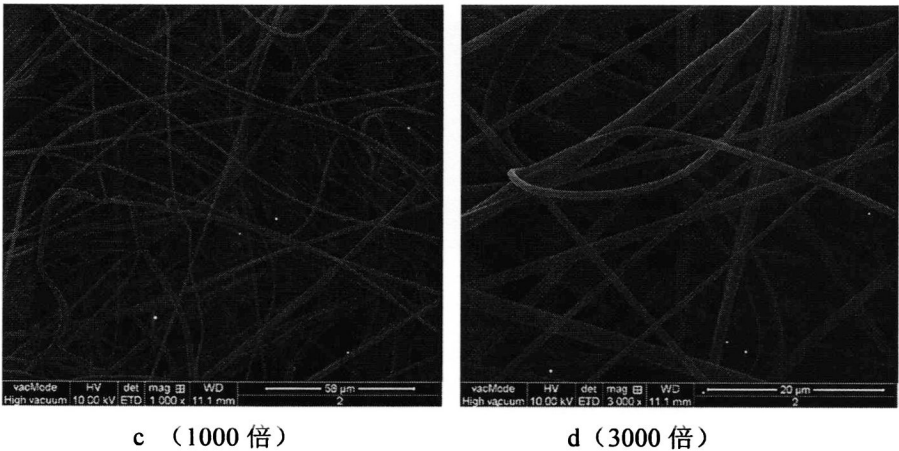


图 4-2 B 滤料扫描电镜图和纤维直径分布图

从图 4-2 可以看出, B 滤料的纤维直径在 2.0~5.0 μm 的纤维最多, 约占 85%; 但总体来说纤维集中分布在 2.0~3.5 μm 之间, 占 64%; 最后得到 B 滤料的平均纤维直径为 2.80 μm 。

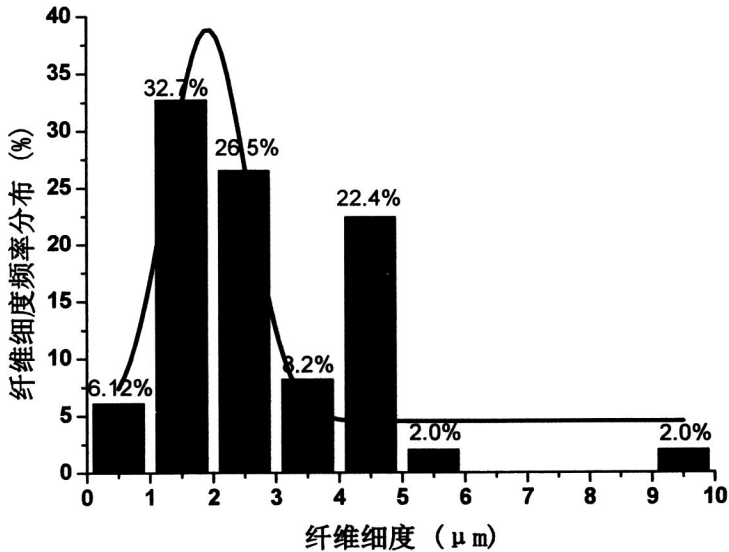
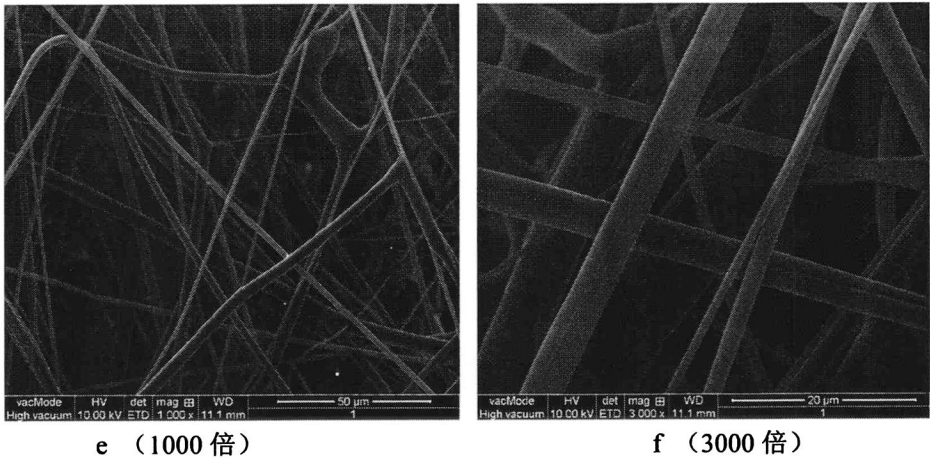


图 4-3 C 滤料的扫描电镜图和纤维直径分布图

从图 4-3 可以看出，C 滤料的纤维直径分布区间与 A、B 滤料相比偏大，最大的纤维接近 10 微米，占 2%，这一点从 3000 倍的扫描电镜图上也可以看出，图上有较粗的纤维。但纤维总体分布在 1~5 μm 之间，其中 1~3 μm 占 60%左右，3~5 μm 占 25%左右，最后算出的 C 滤料的平均纤维直径为 2.72 μm 。

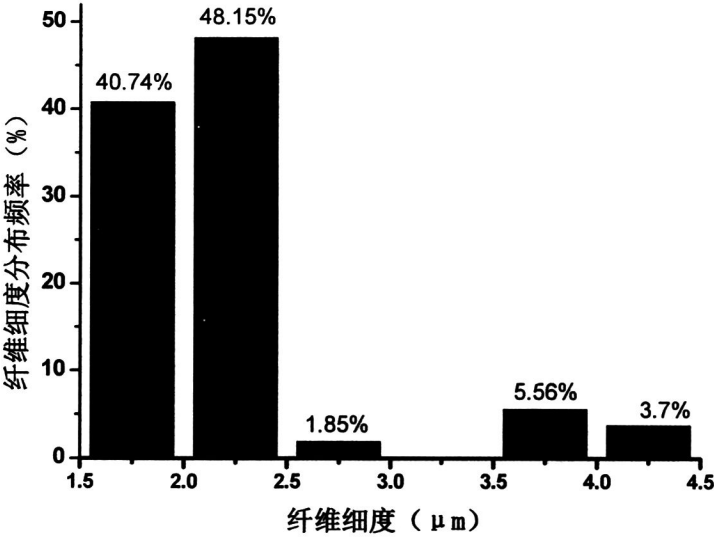
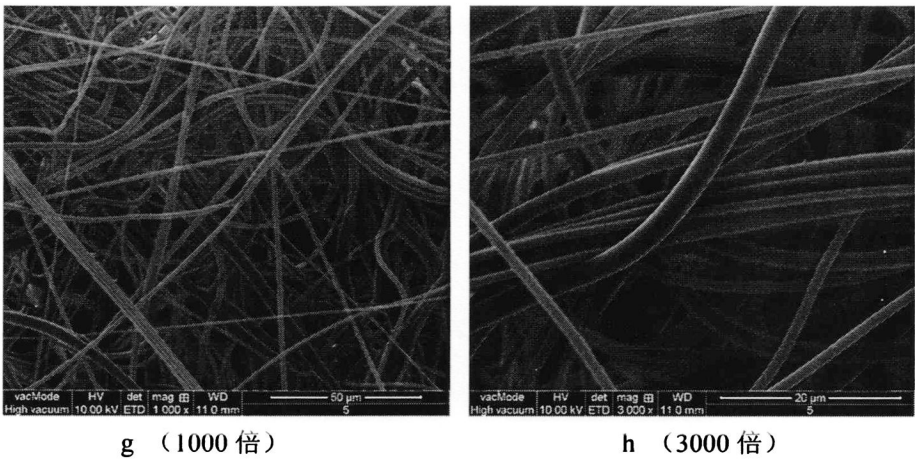


图 4-4 D 滤料的扫描电镜图和纤维直径分布图

从图 4-4 可以看出，D 滤料的纤维直径较小，纤维直径大多分布在 1.5~2.5 μm 之间，且分布非常均匀，约占 90%，因此算出 D 滤料的平均纤维直径为 2.22 μm 。

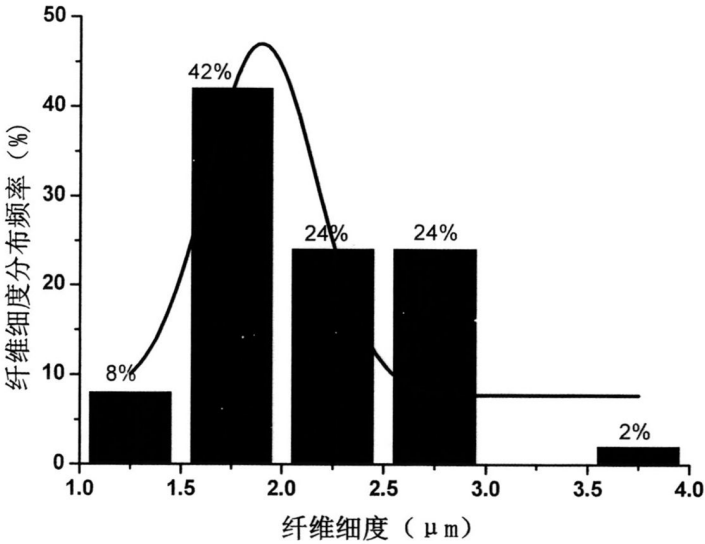
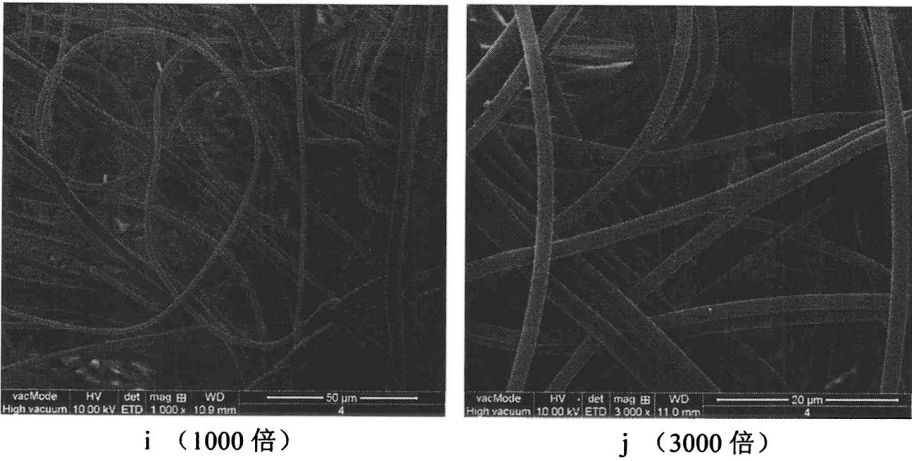


图 4-5 E 滤料的扫描电镜图和纤维直径分布图

从图 4-5 可以看出，E 滤料的纤维细度分布也很均匀，最粗的纤维不足 4.0 μm ，是这五种滤料中最小的。纤维大多分布在 1.5~3.0 μm 之间，约占 90%，平均纤维直径为 2.17 μm 。

这五组图片较好的反映出了滤材的结构。从照片中不难看出，纤维排列杂乱，纤维间主要靠热粘合、缠结、交叉形式结合。并且纤网中空隙较多，适合做过滤材料。构成滤材的纤维较细，直径大小不一，排布也不均匀，这一点也正好可以从各滤料的纤维直径分布图上可以看出。

综合这五组图片可以直观的看出 A、B、C 滤材与 D、E 滤材的结构上的差异。从 1000 倍的照片上可以看出，A、B、C 滤材的纤维排列杂乱程度不如 D、E 滤材，从 3000 倍的照片上可以看出，A、B、C 滤材的纤维有大有小，而 D、E 滤材的纤维大小比较均匀。因此，从纤维直径分布图上可以看出，A 滤料的纤维直径主要分布在 1~4.5 μm 之间，且在这段范围内分布比较均匀，最大的纤维有 5.5 μm ；B 滤料的纤维主要分布在 2~4.5 μm 之间，总体来说分布比较均匀，最大的纤维只有 5 μm 左右；C 滤料的纤维主要分布在 0~5 μm 之间，分布相对没有 A 滤料均匀，最大的纤维也接近 10 μm ；D 滤料的纤维主要分布在 1.5~2.5 μm 之间，最大的纤维接近 4.5 μm ；E 滤料的纤维主要分布在 1.0~3.0 μm 之间，纤维分布相对 D 滤料均匀些，最大纤维不足 4.0 微米。

从上述图片的对比中可知，自制的滤料与知名生产商生产的滤材存在较大的差距，知名生产商生产的滤材纤维直径明显要小，而且分布域更加集中。

经过电子扫描显微镜照相后，对于每张照片随机选取 50 根清晰的纤维进行纤维直径的统计，然后计算纤维的加权平均直径，由于并没有统计进入照片视野中的所有纤维，所以得出的计算纤维直径可能会存在一些误差，但由于取样的随机性和样本数量适合，所以该法得出的结果对于进一步的理论计算还是可行的。表 4-3 是经过统计和公式计算后得出的各滤料的平均纤维直径。

表 4-3 各滤料纤维直径

滤料编号	A	B	C	D	E
纤维直径 (μm)	2.81	2.80	2.72	2.22	2.17

从该表可进一步看出，生产工艺不同，得到的滤料纤维直径差距较大；自制 A、B、C 滤料的纤维直径相近，D、E 滤料的纤维直径相近，且 A、B、C 滤料的纤维直径相近明显大于 D、E 滤料。

4.1.4 滤料的孔径

作为过滤材料，孔径大小影响材料的透气性和过滤阻力。利用 PMI 孔径仪测得的各滤料的孔径分布如下图所示。

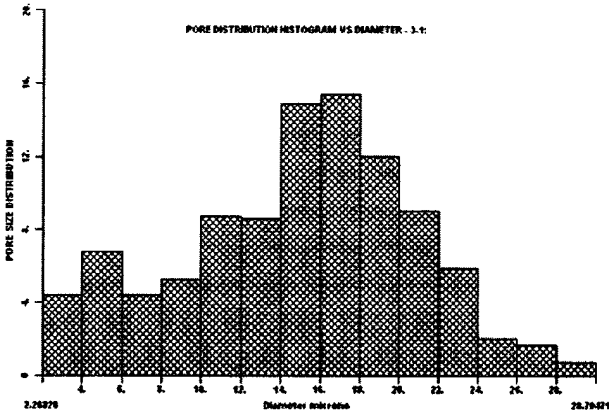


图 4-6 A 滤料孔径分布图

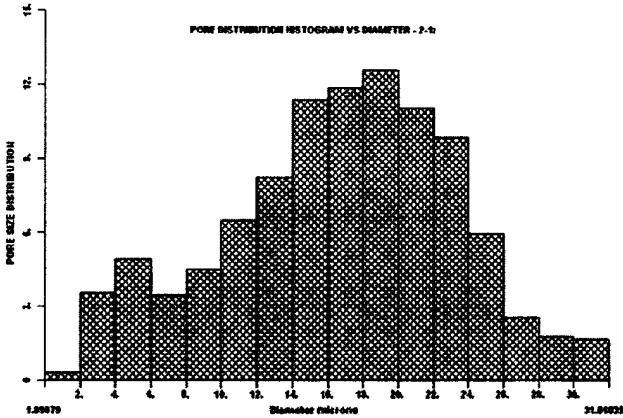


图 4-7 B 滤料孔径分布图

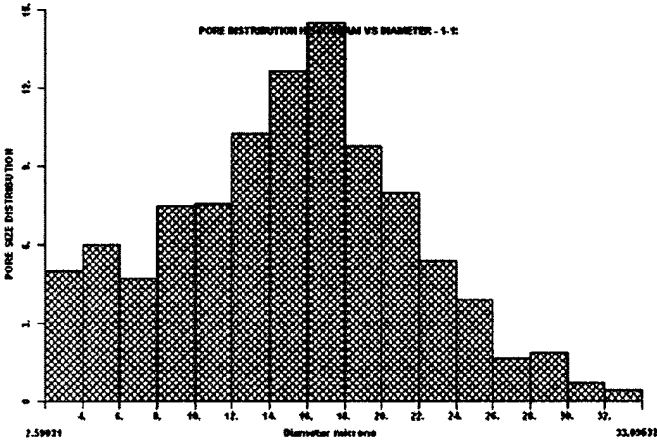


图 4-8 C 滤料孔径分布图

从图 4-6,4-7,4-8 可以看出,滤料的孔径大小与孔径分布与滤料的纤维直径分布密切相关。总体说来,纤维直径越小,分布越均匀,孔径也越小,孔径分布也越均匀。结合上述的纤维直径分布图具体分析可知,B 滤料的纤维直径在 2~5 μm 之间分布较均匀,因此图 4-7 中 B 滤料的孔径在 8~26 μm 之间分布均匀; C 滤料的纤维直径分布范围最广,因此 C 滤料的孔径分布范围最广,为 2.59~33.09 μm ; 同时 C 滤料的纤维直径分布相对不均匀,得到的孔径分布图也相对没有 A、B 滤料均匀。

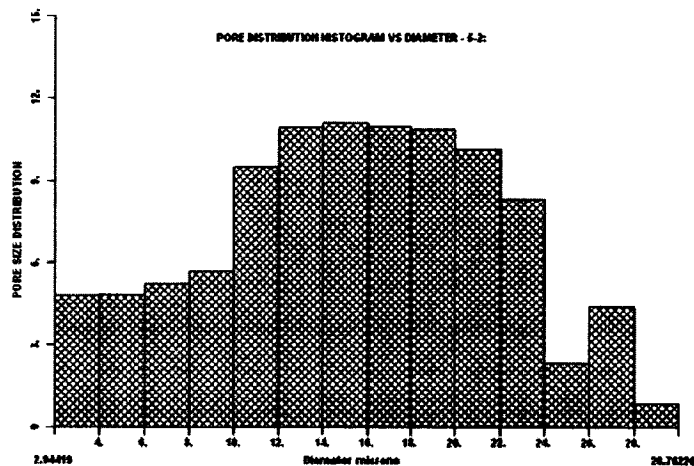


图 4-9 D 滤料孔径分布图

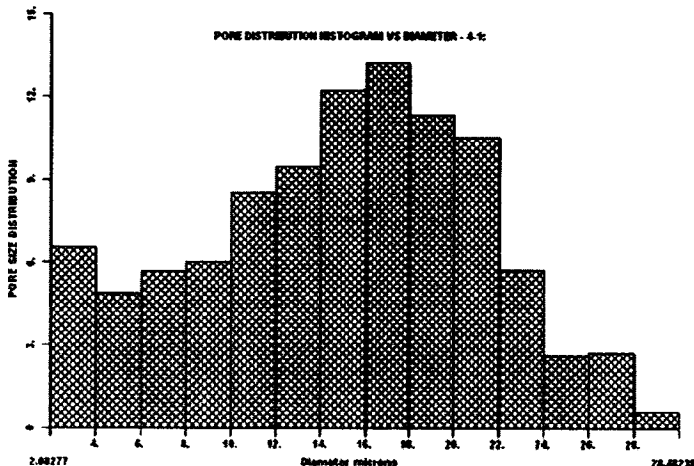


图 4-10 E 滤料孔径分布图

从图 4-9,4-10 可以看出, D、E 滤料的孔径分布范围较 A、B、C 滤料小, 为 2~28 μm , 且孔径分布明显较均匀些。对比 D、E 滤料的孔径分布图和纤维直径分布图可以看出, D 滤料的纤维直径较多分布在 1.5~2.5 μm 之间, 且分布均匀,

E 滤料在这一区间没有 D 滤料分布那么均匀，因此孔径分布在 10~24 μm 这一区间 D 滤料明显比 E 滤料更均匀。由此可知，孔径分布与纤维直径分布相对应，即纤维直径大小影响孔径大小与孔径分布。

利用与计算纤维直径相同的加权平均法，计算得出如表 4-4 所示的各滤料的孔径值。

表 4-4 各滤料的孔径

	A	B	C	D	E
最大孔径 (μm)	25.84	31.62	33.09	29.64	29.21
平均孔径 (μm)	13.99	17.27	15.39	15.99	15.49

结合图 4-6, 4-7, 4-8, 4-9, 4-10 和表 4-4 进行分析可知，A、B、C 滤料的孔径分布离散型大，D、E 滤料的孔径分布相对集中，虽然 A、B、C 滤料的平均孔径不一定比 D、E 滤料大，但最大孔径普遍要大一些，这也说明 A、B、C 滤料纤维排列的均匀度没有 D、E 滤料好，同时也进一步说明了 A、B、C 滤料的纤维直径大于 D、E 滤料。因为纤维直径越大，纤维之间的密合程度越差，那么纤维之间形成的空隙就会越大，

4.1.5 滤料的孔隙率和填充率

表 4-5 各滤料填充率

	A	B	C	D	E
填充率 (%)	6.2	4.7	7.6	9.9	12.1
孔隙率 (%)	93.8	95.3	92.4	90.1	87.9

由表4-5可看出，B滤料的填充率最小，滤料的填充率大体上随着滤料面密度的增大而增大，孔隙率变化则相反。结合孔径进行分析可知，对于A、B、C滤料组，B滤料的平均孔径最大，A次之，C最小，因此得到的填充率从小到大依次为B、A、C，对于D、E滤料组，D的平均孔径大于E，因此D的填充率小于E；所以填充率随着滤料平均孔径的增大而减小。熔喷非织造布的纤维直径很细，这是造成它具有较小的孔径及高孔隙率的直接原因。

4.2 滤料的力学性能

滤料的力学性能虽然对过滤效率影响不大，但在一定程度上影响着滤料的加工性能和使用寿命，良好的拉伸强度和顶破强力能使滤料在过滤风速较大时不会

发生变形或破坏，间接地增强了滤料的过滤性能。

4.2.1 滤料的拉伸强力

表 4-6 各滤料的拉伸性能

	A	B	C	D	E
强力 (N)	3.14	4.72	6.46	10.44	15.22
伸长 (mm)	71.102	101.384	48.69	92.212	87.264
伸长率 (%)	31.302	48.124	24.012	45.69	43.38
断裂功 (J)	0.024	0.058	0.038	0.116	0.164

由表 4-6 可以看出，随着克重的增大，滤料的拉伸强力增大，这是因为克重越大，滤料中的纤维越多，相互纠缠粘连的更多，造成拉伸强力增大。

4.2.2 滤料的顶破强力

表 4-7 各滤料的顶破性能

	A	B	C	D	E
顶破强力 (N)	3.28	5.58	4.62	13.18	15.48
顶破高度 (mm)	48.278	50.562	51.654	52.046	49.546
顶破功 (J)	0.010	0.012	0.014	0.022	0.020

由表 4-6 和表 4-7 可知，拉伸强力和顶破强力随着克重的增加而增大，A、B、C 滤料和 D、E 滤料的克重相差不大，但力学性能却存在着明显的差距。这在一定程度上与滤料内纤维的排列方向和排列杂乱度有关，对于非织造布纤维排列越杂乱，总体的力学性能越好，因此进一步证明了上述电镜照片上 D、E 滤料的纤维排列杂乱度比 A、B、C 滤料高，D、E 滤料的填充率比 A、B、C 滤料大。

4.3 滤料的透气性

透气性直接影响过滤器成品的流量阻力。尤其是在口罩过滤中，透气性是一项非常重要的指标，决定着口罩等过滤成品的呼吸阻力，因此对影响透气性的因素进行分析很有必要。表 4-8 为利用上述测试方法测得的各滤料的透气量。

表 4-8 各滤料透气量 (L/m² · s)

	A	B	C	D	E
1	1272.1	849.1	1072.8	512.23	485.71
2	1286.9	853.58	1111.8	493.91	454.68
3	1261.8	800.55	1023.7	498.40	464.06
4	1247.3	777.83	1141.1	496.97	469.89
5	1368.7	727.37	979.69	505.80	469.11
平均值	1287.36	810.69	1065.82	501.46	468.69

根据以上测得的透气量,以及测得各滤料的基本结构参数,可以绘出厚度,孔径和孔隙率等结构参数影响透气性的关系图,如图 4-11,4-12 所示。

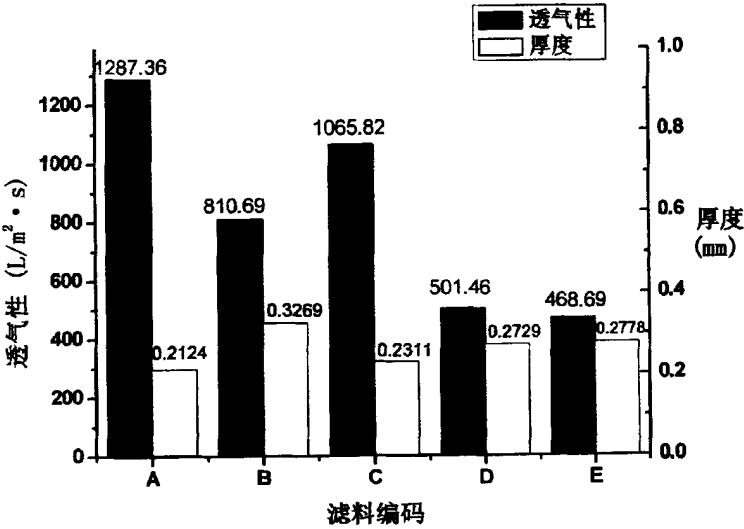


图 4-11 透气性与厚度关系图

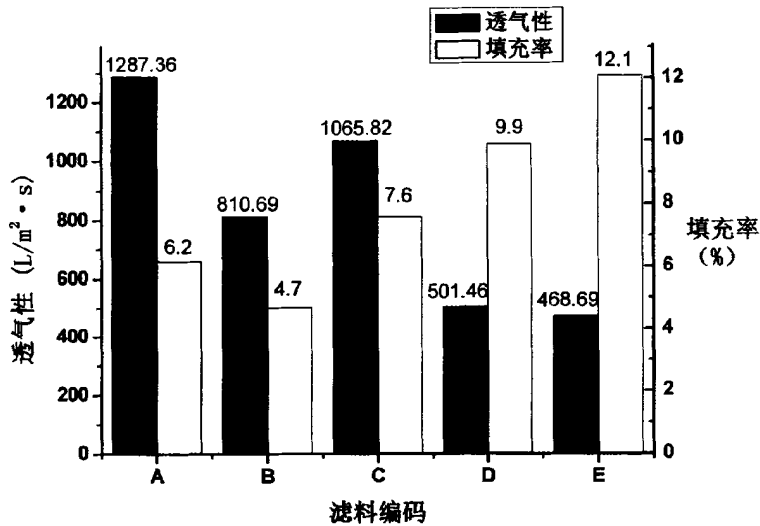


图 4-12 透气性与填充率关系图

结合图 4-11 和图 4-12 可以看出，对于 A、B、C 三种滤料，随着厚度的增加，透气量逐渐减小；除 B 滤料外，A、C 滤料填充率增大，透气性减小；由此可见，对于 B 滤料，厚度对透气性的影响大于填充率的影响，但也有可能是实验误差造成的。而对于 D、E 滤料，厚度相差不大，影响几乎可以忽略，因此随着填充率的增大，透气量减小。

4.4 滤料的过滤性能

滤材的过滤性能包括过滤效率，过滤阻力和容尘量，这三个性能一起决定着滤料的优劣。因为过滤效率好，但如果过滤阻力大，则意味着能耗大；滤材达到高效低阻，但容尘量很小，则意味着滤材使用寿命不长，需要经常更换滤料或清洗滤料，会浪费资源或者使用不方便。因此最好的办法是找到这三个指标平衡的各结构参数和使用方法。

4.4.1 滤料的过滤效率

在滤速为 4.5cm/s，气溶胶为盐性 NaCl 微粒时，测定了各滤料的过滤效率和过滤阻力，并在这个假设下通过上述理论计算公式计算了各滤料的理论上的过滤效率和过滤阻力，与实验结果进行了对比，实验结果和计算结果如表 4-9 所示。

表 4-9 各滤料过滤性能的理论计算结果和实验结果

$d_p(\mu\text{m})$	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
$d_f(\mu\text{m})$	2.8099	2.8046	2.7153	2.2255	2.1716
$V_0(\text{cm/s})$	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
α	0.062	0.047	0.076	0.099	0.121
$L(\text{mm})$	0.2124	0.3269	0.2311	0.2778	0.2729
Sc	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4	5.29×10^4
Re	0.486	0.485	0.470	0.385	0.376
Sh	16.44	16.43	16.26	15.21	15.09
R	0.093	0.092	0.096	0.117	0.120
$\eta_{D,R}$	2.19×10^{-3}	2.20×10^{-3}	2.25×10^{-3}	2.62×10^{-3}	2.67×10^{-3}
$\eta_{I,R}$	14.88×10^{-3}	14.72×10^{-3}	15.36×10^{-3}	18.72×10^{-3}	19.2×10^{-3}
η_Σ	17.07×10^{-3}	16.92×10^{-3}	17.61×10^{-3}	21.34×10^{-3}	21.87×10^{-3}
η_Σ'	21.83×10^{-3}	20.50×10^{-3}	23.63×10^{-3}	30.85×10^{-3}	33.78×10^{-3}
$\eta(\%)$	66.61	13.93	78.86	93.07	97.01
$\Delta P(\text{mm}\cdot\text{H}_2\text{O})$	1.22	1.24	1.96	5.36	7.79
过滤效率(%)	38.6	29.5	43.1	28.4	30.6
过滤阻力 ($\text{mm}\cdot\text{H}_2\text{O}$)	1.8	1.6	2.3	2.3	2.4

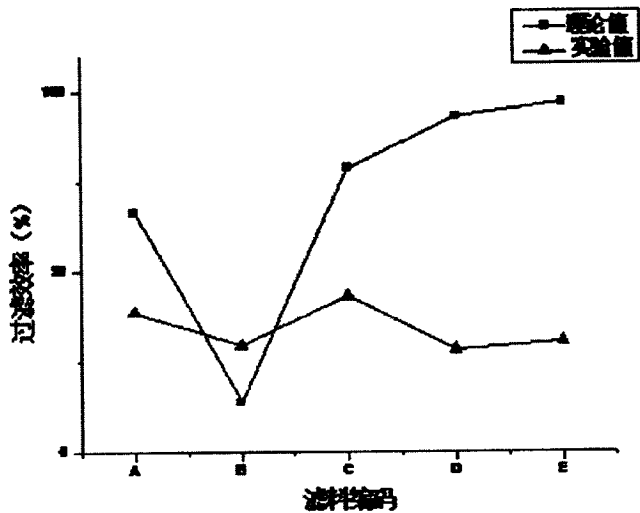


图 4-13 过滤效率理论值与实验值的对比图

从图 4-13 可以看出，理论计算的过滤效率和实验中测得的数值存在着较大的差距，但各滤料过滤效率的变化趋势是相同的，即在 A、B、C 三种滤料中，测得 C 的过滤效率最高，A 次之，B 最小，理论计算出的过滤效率也是 C 最高，A 次之，B 最小；对 D、E 滤料，E 的过滤效率比 D 稍大，理论计算结果也是如此。对于数值之间的差距，A、B、C 滤料的理论值与实验值的差距较 D、E 滤料小，这可能是因为 A、B、C 滤料的厚度和填充率这两个结构参数的变异系数太大造成的，致使计算得到的过滤效率偏小，更加接近实验值。

为了比较厚度、填充率和纤维直径等因素对过滤效率的影响，根据以上数据，以及测得的各滤料的基本结构参数，可以绘出厚度，填充率和纤维直径等结构参数影响过滤效率的关系图。其中的过滤效率为实际测得的过滤效率。绘制的柱状图如图 4-14,4-15,4-16 所示。

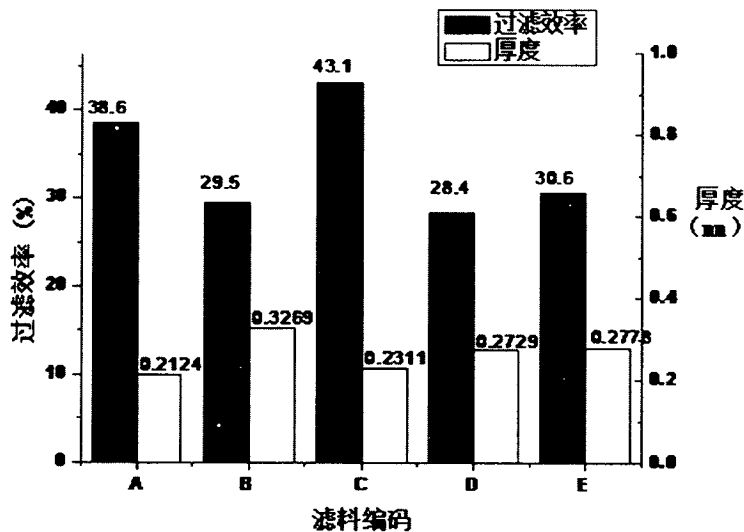


图 4-14 过滤效率与厚度的关系图

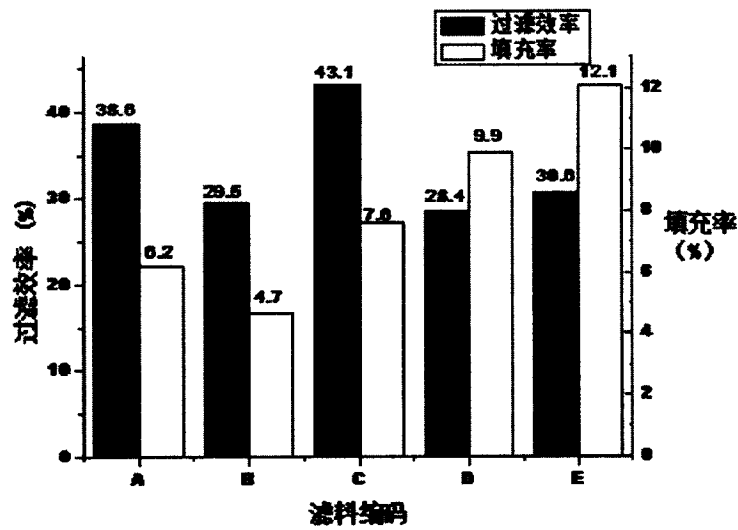


图 4-15 过滤效率与填充率的关系图

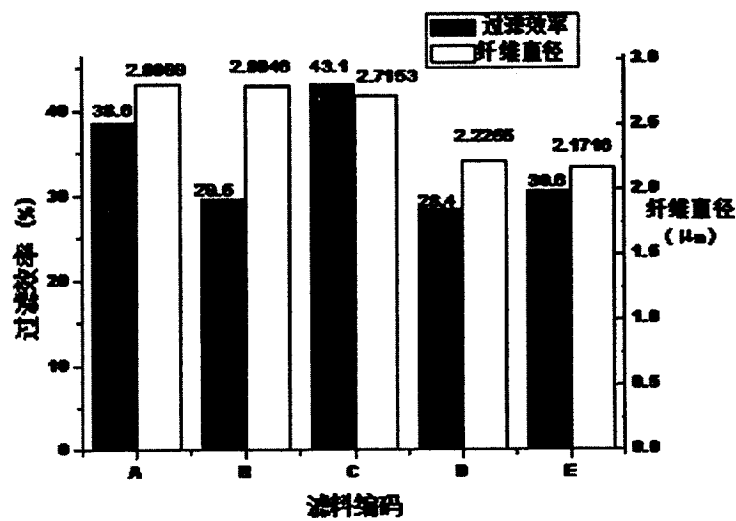


图 4-16 过滤效率与纤维直径的关系

从图 4-14,4-15,4-16 可以看出, A、B、C 滤料组和 D、E 滤料组的过滤效率的变化趋势与填充率相同,即随着填充率的增大,过滤效率增大;总体上随着纤维直径的减小,过滤效率增大,虽然在 A、B、C 滤料组中 B 滤料与这一趋势不符,但不排除是实验误差造成的或样品的不均匀性造成的。从图上可以看出,不论是 A、B、C 滤料组,还是 D、E 滤料组,它们过滤效率的变化趋势和厚度的变化趋势都是相反的,这是不符合规律的,只能说明在该 4 个结构参数的综合影

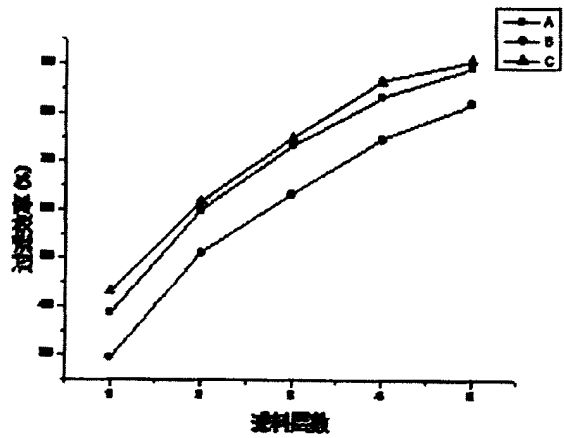
响中，其他三个结构参数的影响程度大于厚度的影响。

4.4.1.1 厚度对过滤效率的影响

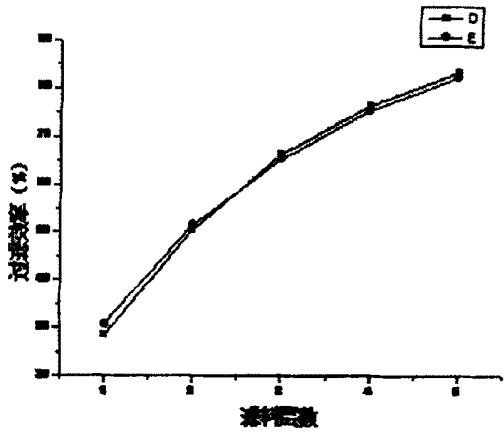
在滤速为 4.5cm/s，气溶胶粒子为 NaCl 时，测得的过滤效率随各滤料厚度变化的数据如下表 4-10 所示，根据该表数据绘出的过滤效率随厚度变化的关系如图 4-17 所示。

表 4-10 过滤效率随着厚度变化的数据 (%)

	A	B	C	D	E
1 层	38.6	29.5	43.1	28.4	30.6
2 层	59.8	51	61.7	50.6	51.7
3 层	73.3	63.3	74.7	66.3	65.5
4 层	83	74.4	86.3	76.9	75.7
5 层	89.2	81.7	90.5	83.6	82.6



a A、B、C 滤料



b D、E 滤料

图 4-17 过滤效率随厚度变化的关系图

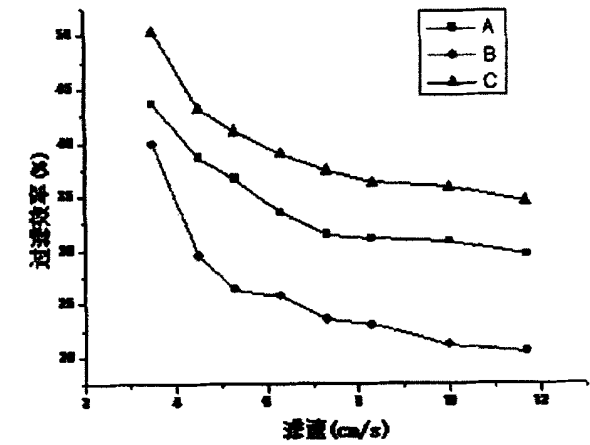
从图 4-17 可以看出，在滤速不变时，随滤材厚度的增大，过滤效率逐步提高。具体分析还可以看出，在滤材厚度由一层增至两层时，过滤效率的提高最为明显，有的甚至接近一层的两倍，由两层增至三层和四层的时候，过滤效率的变化幅度渐小；再继续增加层数，变化程度不明显，有的甚至已趋于平缓。该实验结果进一步证明了理论分析中的过度增加滤料厚度对提高过滤效率帮助不大。

4.4.1.2 滤速对过滤效率的影响

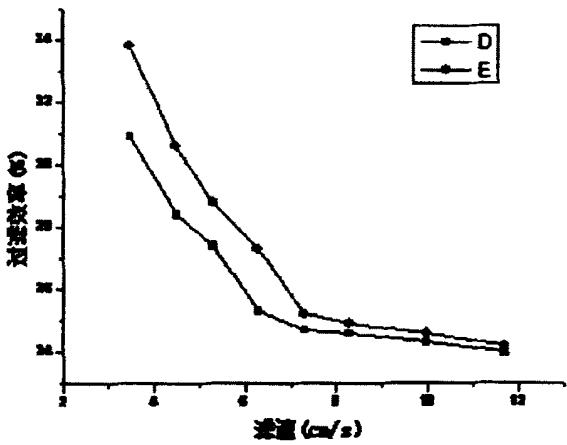
在气溶胶粒子为盐型 NaCl 微粒，滤材厚度为一层时，测得各滤料随滤速变化的过滤效率数据如表 4-11 所示以及根据该表数据，绘出各滤料在不同滤速下，过滤效率的变化关系曲线如图 4-18 所示。

表 4-11 过滤效率随着滤速变化的数据 (%)

滤速 (cm/s)	A	B	C	D	E
3.5	43.6	39.8	50.3	30.9	33.8
4.5	38.6	29.5	43.1	28.4	30.6
5.3	36.6	26.3	41	27.4	28.8
6.3	33.5	25.7	38.9	25.3	27.3
7.3	31.4	23.5	37.3	24.7	25.2
8.3	31	23	36.2	24.6	24.9
10.0	30.7	21.1	35.7	24.3	24.6
11.7	29.5	20.5	34.4	24	24.2



a A、B、C 滤料



b D、E 滤料

图 4-18 过滤效率随滤速变化关系

从图 4-18 可以看出，随着过滤速度的增加，过滤效率逐渐下降，且过滤效率都有一个先急剧下降后下降减缓的过程。对于 A、B、C 滤料，当过滤速率达到 8.5cm/s 左右时，开始出现这一转折过程；而对于 D、E 滤料，这一转折点则在 7cm/s 左右。气溶胶流速越慢，气溶胶粒子在过滤材料中滞留的时间越长，粒子有更多的机会撞击纤维，被纤维捕集的机会更多，同时气溶胶布朗运动强度也越大，扩散作用也越明显，因此过滤效率越高。而气流速度越大，受到的惯性作

用力越大，运动的微粒由于具有惯性，来不及跟随流线的变化绕过纤维，因而脱离流线撞向纤维，并在纤维上沉积下来的概率也越大。因此随着过滤速率的增大，扩散效应和拦截效应减弱，惯性效应增强，各种效应之间的此增彼减，最终导致过滤效率的下降减缓。

将图 4-18 与图 2-3 对比发现，虽然实验数据中没有出现理论计算数据中的临界过滤速度，但随着过滤速度从 2cm/s 增大到 8cm/s 的过程中，过滤效率都是逐渐下降的，只是理论计算中从 8cm/s 后过滤效率开始上升，而实际试验中则是趋向于不变，也许实际实验过程中继续增大滤速也会出现一个上升的过程，只是临界滤速相对于理论值偏大。

4.4.1.3 气溶胶性质对过滤效率的影响

为研究熔喷聚丙烯空气滤料对不同种类的气溶胶粒子的捕获特性，测定了油性气溶胶石蜡油颗粒和盐性气溶胶 NaCl 颗粒在不同克重的样品的过滤效率，测试时气溶胶流速为 4.5cm/s。测试结果如表 4-12 所示。

表 4-12 不同气溶胶下各滤料的过滤效率 (%)

	A	B	C	D	E
NaCl	38.6	29.5	43.1	30.4	30.6
Paraffin Oil	36.1	25.2	34.2	27.8	25.6

由表 4-12 可以看出，滤料对盐性气溶胶颗粒的过滤性能略优于油性气溶胶颗粒，差距在 2~10 个百分点。这是因为驻极前滤料对气溶胶颗粒的捕获完全取决于惯性效应和扩散效应。在 TSI8130 滤料测试仪中，产生的盐性气溶胶颗粒质量中值直径为 0.26 μm ，油性气溶胶颗粒为 0.33 μm 。经典单纤维过滤理论有最易透过粒径现象取决于小粒径粒子的扩散效应^[29]，粒子尺寸越小，扩散效应越明显，因此聚丙烯过滤材料对 NaCl 气溶胶颗粒的扩散效应稍强于石蜡油气溶胶，过滤效率也就略微大些。

4.4.1.4 气溶胶浓度对过滤效率的影响

为了研究气溶胶浓度对过滤材料过滤性能的影响，测试了该 5 种滤料在不同气溶胶浓度下的过滤效率，气溶胶粒子为盐式 NaCl 颗粒，过滤速度为 4.5cm/s，据了解，当北京的沙尘暴严重到中午汽车需要开大灯时，其浓度可高达 10~15mg/m³，因此本实验的测试浓度分别取值为 11.7mg/m³,13.5 mg/m³,15.6 mg/m³,17.3 mg/m³，实验结果如表 4-13 和图 4-19 所示。

表 4-13 各滤料不同气溶胶浓度的过滤效率 (%)

气溶胶浓度 (mg/m ³)	A	B	C	D	E
11.7	38.1	29.1	24.2	30	30.3
13.5	38.6	29.5	23.1	30.7	30.6
15.6	37.6	27.8	23.4	28.1	28.9
17.3	40.7	31	24.9	29.8	31.2

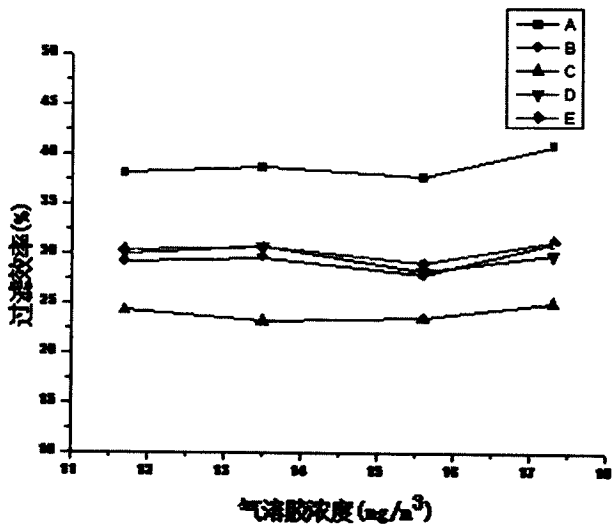


图 4-19 不同气溶胶浓度各滤料的过滤效率变化图

从图 4-19 可以看出，气溶胶浓度对熔喷聚丙烯过滤材料过滤性能的影响并没有一定的规律性，随着浓度的增大，过滤效率忽大忽小。

根据过滤效率的计算公式 $\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\%$ 可知，当气溶胶浓度增大时，上游浓度增大，虽然滤材拦截的粒子数增多，但透过滤材的微粒数也相对增多，即下游的气溶胶浓度也增大，由此气溶胶浓度的变化会引起所测试滤料的过滤效率变化。气溶胶浓度从 11.7 mg/m³ 上升到 13.5 mg/m³ 时，测试仪器上下游气溶胶浓度都增大，但是上游增大幅度略大于下游，故所测试熔喷聚丙烯滤料的过滤效率有所上升；但浓度从 13.5 mg/m³ 继续上升到 15.6 mg/m³ 时，测试仪器上游气溶胶颗粒增多相互碰撞机率增大，扩散效应减弱，到达下游气溶胶浓度相对下降，故导致过滤效率有所上升，当气溶胶浓度达到 15.6 mg/m³ 后过滤效率又略有上升。但总体来说，过滤效率变化不大，变化幅度不超过 2 个百分点，该结论从理论计

算中也可得到验证。既然气溶胶浓度增大，过滤效率不变，过滤材料在相同的时间内拦截的微粒数势必会增多，易堵塞滤料网孔影响滤料的使用寿命，因此相同滤材在空气微尘比较多的场所达到它的最大容尘量的时间相对短些，即使用寿命要相对短些，需要勤更换滤料。

4.4.2 滤料的过滤阻力

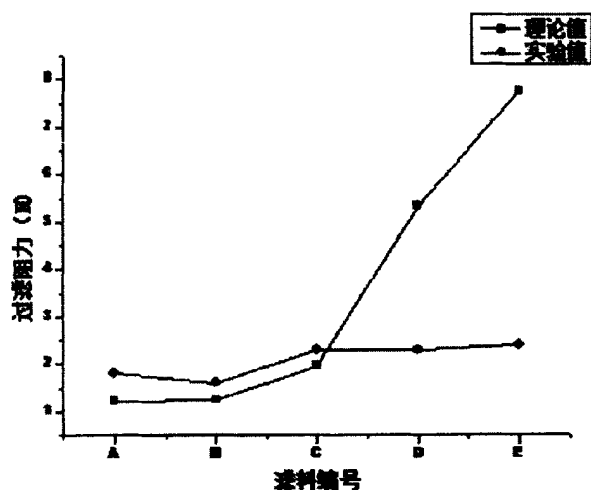


图 4-20 各滤料过滤阻力理论计算结果与实验结果的对比图

从图 4-20 可以看出，总体上来说，理论计算值与实际测试结果在变化趋势上是相同的；对于 A、B、C 滤料，理论与实验值相差不大，实验值比理论值稍大；但是对于 D、E 滤料，数值相差很大，且理论值比实验值大。这是因 D、E 滤料的各结构参数实验值与理论取值相差不大，差距反映理论与实践的不符合，而 A、B、C 滤料的结构参数有的偏大，有的偏小，造成实验误差，实验值偏大或者计算过程中分母变小而分子变大，使得理论计算值偏小。

4.4.2.1 厚度对过滤阻力的影响

在滤速为 4.5cm/s，气溶胶浓度为 15.6mg/m³，盐型 NaCl 气溶胶粒子下，测得的各滤料随着厚度变化的过滤阻力如表 4-14 和图 4-21 所示。

表 4-14 各滤料随厚度变化的过滤阻力 (mm·H₂O)

	A	B	C	D	E
1 层	1.8	1.6	2.3	2.3	2.4
2 层	3.7	3	4.1	4.8	4.7
3 层	5.5	4.5	6	7	7.2
4 层	7.4	6.4	8.6	9.4	9.6
5 层	9.5	8	10.3	11.8	12

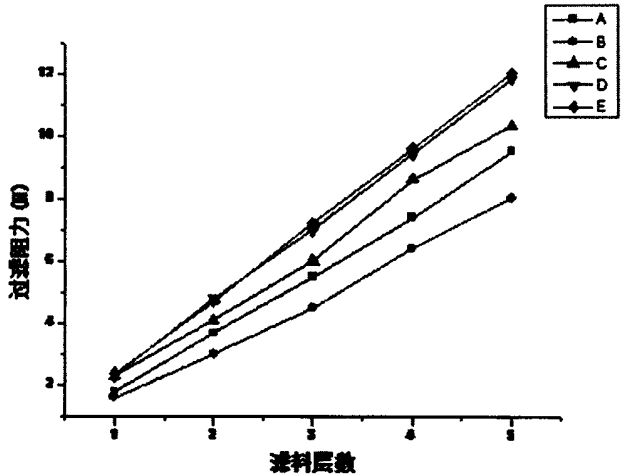


图 4-21 各滤料过滤阻力随厚度变化的曲线图

由图 4-21 可以看出，过滤阻力随着厚度的增大几乎呈线性增大，这一点与理论计算结果相一致。这是因为随着滤料厚度的增大，滤料的填充率增大，气流穿过滤料受到纤维的阻碍增大，与纤维发生摩擦的机会增加，因此过滤阻力增大。

4.4.2.2 滤速对过滤阻力的影响

在盐型 NaCl 气溶胶粒子，滤料厚度均为一层，气溶胶浓度为 15.6mg/m³ 时，测得各滤料随滤速变化的过滤阻力值如表 4-15 和图 4-22 所示。

表 4-15 各滤料随滤速变化的过滤阻力 (mm·H₂O)

滤速 (cm/s)	A	B	C	D	E
3.5	1.6	1.2	2	1.7	1.8
4.5	1.8	1.6	2.3	2.3	2.4
5.3	2.2	1.8	2.8	2.9	3.0
6.3	2.6	2.2	3.3	3.4	3.5
7.3	3.0	2.6	3.9	4.0	4.1
8.3	3.5	3.0	4.5	4.6	4.7
10.0	4.3	3.6	5.4	5.5	5.7
11.7	5.2	4.4	6.6	6.7	6.7

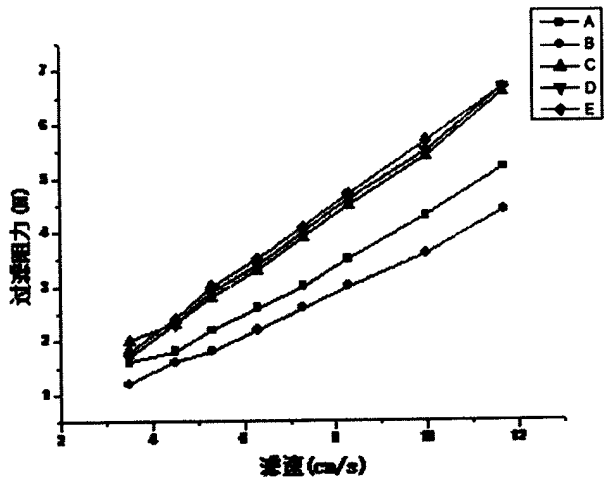


图 4-22 阻力随滤速变化关系图

从图 4-22 可知，过滤阻力随着滤速的增大呈线性关系的增大，由前述实验分析可知，过滤效率随着滤速的增大逐渐下降，综合过滤效率和过滤阻力分析可知，过滤速度越小越好，过滤速度越小，滤材达到高效低阻的效果越好。

4.4.2.3 气溶胶性质对过滤阻力的影响

在滤速为 4.5cm/s，气溶胶浓度为 15.6mg/m³，厚度为一层时，测得各滤料在不同气溶胶下的过滤阻力如表 4-16 所示。

表 4-16 各滤料在不同气溶胶下的过滤阻力 (mm·H₂O)

	A	B	C	D	E
NaCl	1.8	1.6	2.3	2.3	2.4
Paraffin Oil	2.2	1.7	2.3	2.5	2.4

由表 4-16 可看出, 气溶胶性质对过滤阻力的影响不大, 总体上 Paraffin Oil 的过滤阻力比 NaCl 的大, 但差距不明显, 这可能是因为 8130 滤料测试仪产生的 Paraffin Oil 粒子的粒径相对于 NaCl 大些, 穿过滤料时与纤维发生摩擦的机会大, 同时 Paraffin Oil 的粘滞性相对于 NaCl 颗粒大些, 导致阻力大。

4.4.2.4 气溶胶浓度对过滤阻力的影响

在滤速为 4.5cm/s, 盐型 NaCl 气溶胶粒子下, 厚度为一层时, 测得的各滤料随着气溶胶浓度变化的过滤阻力如表 4-17 所示。

表 4-17 各滤料不同气溶胶浓度的过滤阻力 (mm·H₂O)

气溶胶浓度 (mg/m ³)	A	B	C	D	E
11.7	1.9	1.1	1.4	2.4	2.4
13.5	1.8	1.6	1.3	2.3	2.4
15.6	1.4	1.4	1.1	2.3	2.5
17.3	1.9	1.4	1.1	2.4	2.5

由表 4-17 可看出, 气溶胶浓度对过滤阻力的影响也不大。因为 D、E 滤料的均匀性较好, 因此单看 D、E 滤料的阻力值可知这一点。虽然 A 滤料在浓度为 13.5 mg/m³ 和 15.6 mg/m³ 的阻力变化较大, 但这可能是滤料厚度不匀或气压不稳等因素造成。因此, 总体上气溶胶浓度不影响过滤阻力。

4.5 滤料的容尘量

过滤材料的容尘量是和使用期限有直接关系的指标。通常将使用中的过滤材料的终阻力达到其初阻力的 2 倍(的数值时, 或者效率下降为初始效率的 85%以下时(一般对于新的过滤材料来讲)过滤材料上的积尘量, 作为该过滤材料的标准容尘量, 简称容尘量。用 Δm 表示, 则

$$\Delta m = m_1 - m_0$$

(2-3)

55

式中： m_0 —过滤前滤材的重量，g；

m_1 —过滤阻力达到初阻力的 2 倍时，滤材的重量，g。

将每种过滤材料分别裁成大小为 $150\times 150\text{cm}^2$ 的正方形，在盐性气溶胶，流速为 4.5cm/s 下，通过测试过滤材料的终阻力达到其初阻力的 2 倍的数值时过滤材料上的积尘量确定的各滤料的容尘量，如表 4-18 所示，过滤后的滤料的扫描电镜图如图 4-23，4-24，4-25，4-26，4-27 所示。

表 4-18 各滤料的容尘量

	A	B	C	D	E
初始重量 (g)	0.3876	0.3541	0.2672	0.6760	0.5509
终重量 (g)	0.4004	0.3757	0.2818	0.6937	0.5723
增加的重量 (g)	0.0128	0.0216	0.0146	0.0177	0.0214
容尘量 (g/m^2)	0.57	0.96	0.65	0.79	0.95

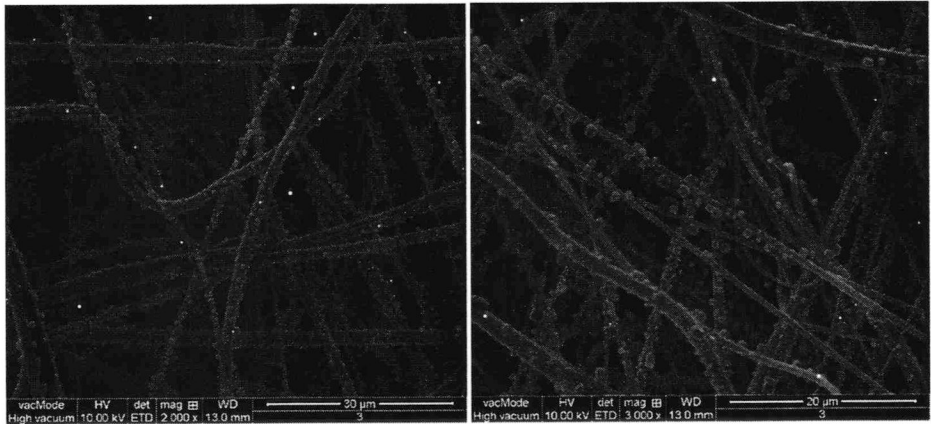


图 4-23 A 滤料过滤后电镜图

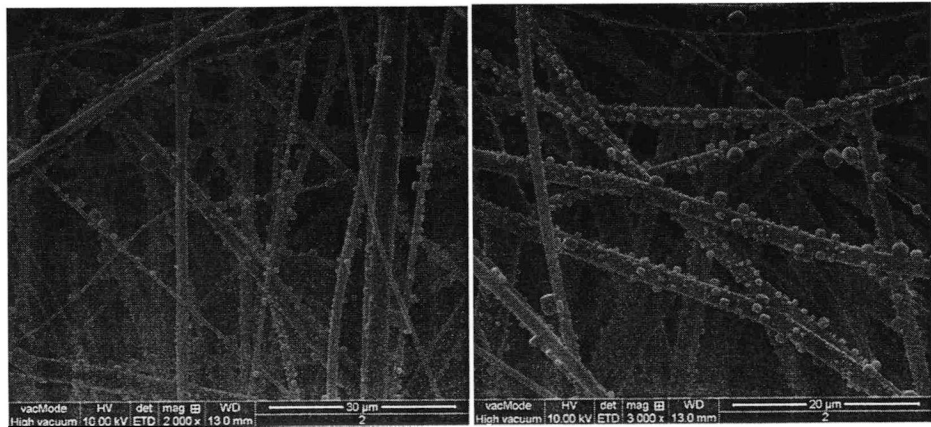


图 4-24 B 滤料过滤后电镜图

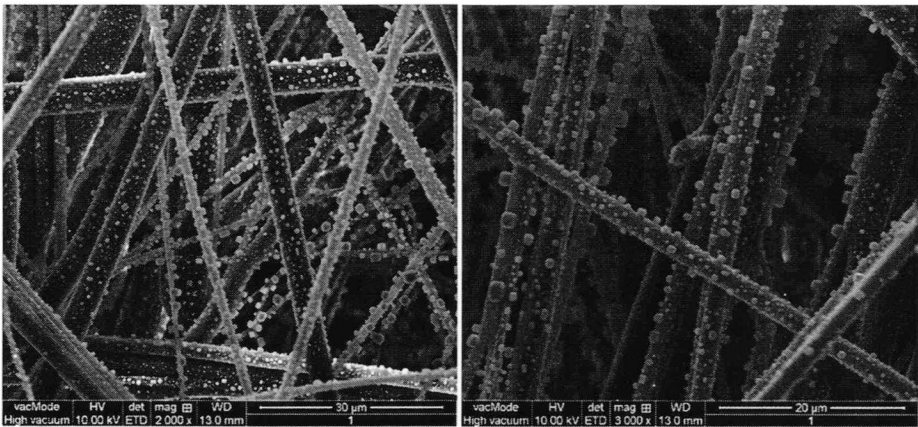


图 4-25 C 滤料过滤后电镜图

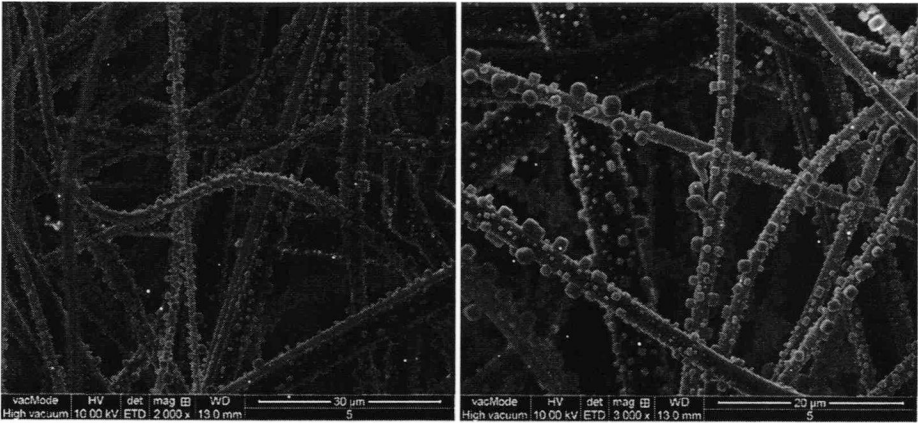


图 4-26 D 滤料过滤后电镜图

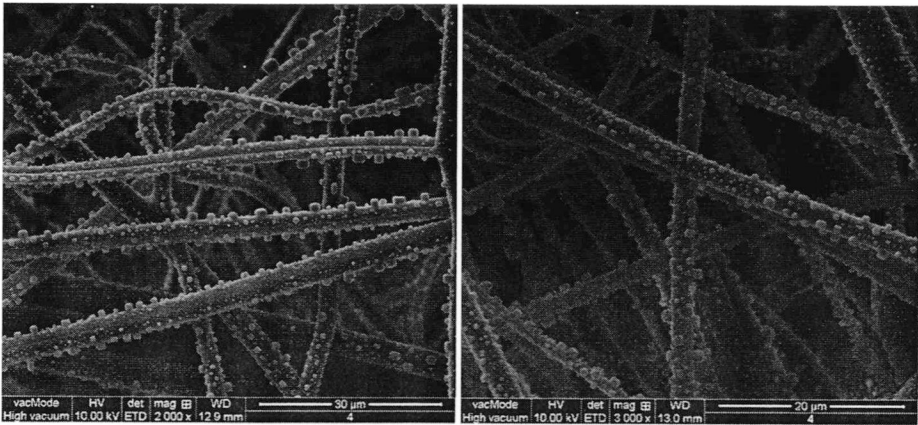


图 2-27 E 滤料过滤后电镜图

从表 4-18 可以看出，除 B 滤料外，对于 A、C、D、E 滤料组，随克重的增加，容尘量增大。再从其他结构参数分析可知，B 滤料的厚度最大，因此从厚度方面看，随厚度的增加，容尘量增大；从纤维直径来看，A、B、C、D、E 滤料的平均纤维直径逐渐减小，因此除 B 滤料外，随着纤维直径的减小，容尘量增大，这点也可从各滤料过滤后的电镜图片上看出，细纤维上捕集的颗粒比粗纤维多。同时还可从各滤料过滤后的电镜图上看，被捕集的颗粒物比滤料的孔隙要小得多，气溶胶微粒是凝聚在纤维的表面上的，并没有堵塞孔隙，因此可进一步说明过滤材料的孔径大小对过滤效率并没有多大的影响，孔径均匀性会影响填充率进而会影响过滤效率。粘住粉尘的力是范德瓦尔斯力，粉尘撞击过滤介质的动因是惯性和扩散。孔径均匀的材料对大颗粒物有筛阻效果，但它照样能过滤掉比孔径小得多的尘粒。

4.6 过滤材料过滤效率与过滤阻力随时间的变化

过滤过程可分为稳态过滤（清洁过滤）和非稳态过滤（含尘过滤）两个阶段。实际上的稳态过滤时间很短，意味着过滤过程中大部分时间都是非稳态过滤。在非稳态过滤阶段，过滤效率和过滤阻力都是不断变化的，本实验以滤料 D 和滤料 E 为代表滤料，研究了这两种滤料过滤阻力达到初始阻力的 2 倍过程中，过滤效率和过滤阻力随时间变化的关系，得到图 2-28 和图 2-29。其中气溶胶粒子为 NaCl，过滤速度 4.5cm/s，气溶胶浓度为 15.6mg/m³。

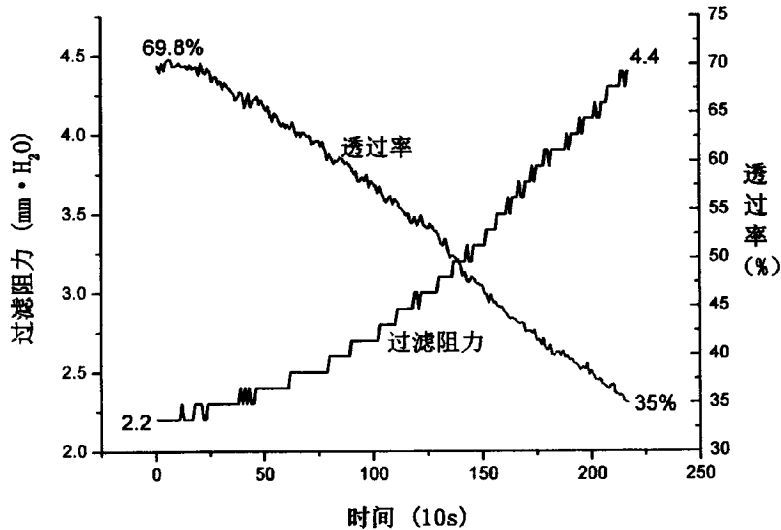


图 2-28 滤料 D 过滤效率与过滤阻力随时间变化图

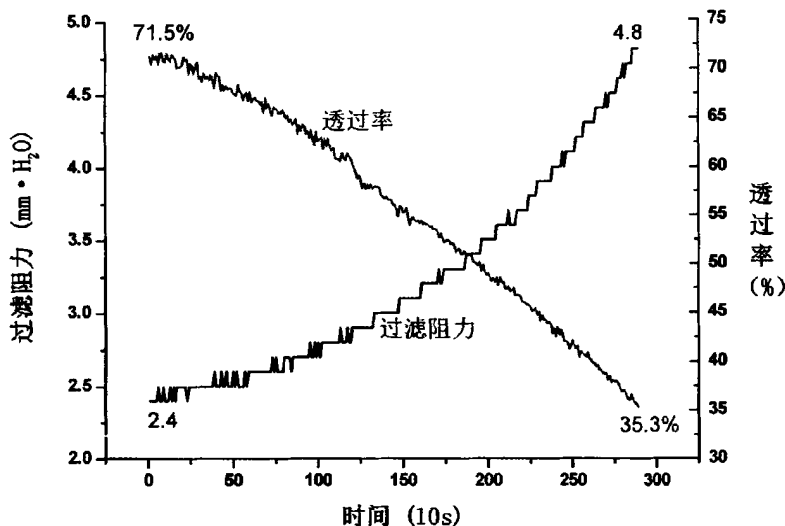


图 2-29 滤料 E 过滤效率与过滤阻力随时间变化图

从图 2-28 和图 2-29 可以看出,对于滤料 D,在过滤阻力 ($4.4 \text{ mm} \cdot \text{H}_2\text{O}$) 达到初始阻力 ($2.2 \text{ mm} \cdot \text{H}_2\text{O}$) 的 2 倍的过程中,未驻极过滤材料 D 的透过率由 69.8% 逐渐下降到 35%,即过滤效率上升了 34% 左右;对于滤料 E,在过滤阻力 ($4.8 \text{ mm} \cdot \text{H}_2\text{O}$) 达到初始阻力 ($2.4 \text{ mm} \cdot \text{H}_2\text{O}$) 的过程中,未驻极过滤材料 E 的透过率由 71.5% 逐渐下降到 35.3%,即过滤效率上升了 36% 左右。同时从这两个图上还可看出,过滤阻力在前期上升速度比较缓慢,随着时间的增加,过滤过程的持续进行,过滤阻力上升速度越来越快;过滤效率在前期变化波动较大,后期变化波动较小。这是因为在过滤初期,一部分微粒穿过滤料而进入下游气溶胶中;另一部分则被滤料捕集,凝聚在纤维上(如图 4-26 和图 4-27 所示)。凝聚在纤维上的微粒使滤料中的孔隙通道减小,因此随着时间的增加,越来越多的微粒凝聚在纤维上,使得孔隙通道越来越小,滤料的填充率逐渐增大,由图 4-15 可知,滤料的过滤效率随填充率的增大而增大,因此造成过滤材料的捕集效率提高,相应的过滤材料的压力损失也增大,过滤阻力逐渐增大。到了后期,微粒的沉积使得滤料的孔径分布均匀性变好,孔径进一步变小,因此过滤阻力急剧增大,过滤效率变化波动性变小。

4.7 本章小结

(1) 滤材的纤维越细,分布越均匀,则滤料的力学性能越好;同时滤料厚

度越小，孔径和孔隙率越大，则透气性越好。

(2) 随滤材厚度的增大，过滤效率逐步提高，增加到一定程度后，再继续增加厚度对过滤效率的提高作用不明显，但过滤阻力还是会继续呈几何倍数的增大，因此不能过分靠增加滤材厚度来增加过滤效率。

(3) 随着过滤速度的增加，过滤效率逐渐下降，且过滤效率都有一个先急剧下降后下降减缓的过程，但不同的过滤材料这一转折点不同，虽然实验过程中没有出现理论计算的临界过滤速度，但继续增大实验过滤速度，也许会出现这一临界滤速，只是实际临界滤速相对于理论值偏大。过滤阻力随滤速的增大呈线性关系的增大，由此可见过滤速度越小越好。

(4) 滤料对盐性气溶胶颗粒 ($0.26\mu\text{m}$) 的过滤性能略优于油性气溶胶颗粒 ($0.33\mu\text{m}$)，差距在 2~10 个百分点，但过滤阻力相差不大，与理论研究中微粒直径对过滤性能的影响一致。

(5) 气溶胶浓度对熔喷聚丙烯过滤材料过滤性能的影响并没有一定的规律性，随着浓度的增大，过滤效率忽大忽小。但总体来说，过滤效率变化不大，变化幅度不超过 2 个百分点；对过滤阻力的影响也不大，与理论相符。

(6) 容尘量随克重的增大而增大，随纤维直径的减小而增大，且气溶胶颗粒凝聚在纤维的表面上，并没有堵塞空隙，因此孔径对过滤效率的影响不大。

(7) 随着时间的增加，未驻极的过滤材料过滤阻力和过滤效率都逐渐提高，过滤阻力前期上升缓慢，后期上升速度加快；过滤效率前期波动较大，后期波动较小，呈逐渐上升的趋势。

(8) 理论研究与实验研究得到的结果在变化趋势上是相同的，但数值存在着较大的差距，说明过滤理论对实际有一定的指导作用，但需进一步完善。

第五章 驻极体滤料的实验研究

如前所述,传统的过滤材料只能阻隔粒径较大的粒子,当为了增大过滤效率添加层数,增大填充率时,阻力就会增大。通过研究发现,经过驻极处理的熔喷材料可以有效的解决这个问题。熔喷滤料有着独特的三维网状结构,粒子通过的路径弯曲复杂,增大了滤料的过滤效率,同时通过驻极处理,不仅不会增大阻力,而且静电作用可以吸附极化微小的颗粒,也能抑制细菌的繁殖。因此对驻极材料的研究具有极大的价值。

5.1 驻极体滤料简介

通常气溶胶颗粒物在产生时便可荷电,干燥的固体颗粒物在扩散时,会由于与不同材料接触而产生电荷。但是,通常自然荷电强度很弱,而且使用中由于颗粒物的导电性、荷电颗粒物的沉降及气流的湿润等原因都会使荷电强度逐渐减弱。

荷电纤维过滤材料是借助颗粒物和过滤纤维之间的静电效应来提高捕尘效率的一种过滤材料,由于在普通滤尘机理的基础上附加了静电效应,故而效率有所提高而阻力却不增加。纤维荷电后,中性粉尘在靠近纤维时会感应产生符号相反的镜像电荷,从而在两者之间产生吸引力,使效率提高^[30]。

5.1.1 电晕驻极法概述

驻极体的制备方法很多,常用的有热极化法、电晕充电法和低能电子束轰击法等。本实验采用的是电晕驻极法对上述熔喷材料中的D、E滤料进行驻极。

电晕驻极法是在低压空气下,对针形电极施加数千伏高压,使针尖附近形成很强的电场,在针尖附近的空气分子被电离成正负离子,这些正负离子会频繁的发生复合,电极尖端就会辐射出淡紫色的电晕光辉,此时针尖下的材料就会受到电场的作用,产生驻极效果(如图5-1)。由于电晕场对气隙离子激发十分有限的束能,因此电晕充电的电荷仅能沉积于样品的表面和近表面^[31]。

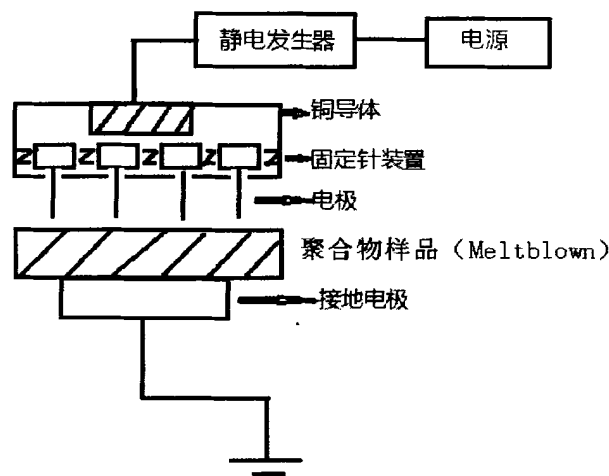


图 5-1 电晕驻极法原理示意图

如果在电极加正电压，则在大气中，电晕电离形成正离子被注入介质材料中，电晕的电极可以是单针点电晕充电，或者是针端位于同一水平面内以阵列分布的多针充电，亦或者是以刀口型、弦丝型的线状电极的电晕充电。多针、刀口、弦丝电极的电晕充电可以扩大充电范围，改善了充电效率，是工业驻极体生产中极化工艺常用的电极模式。

5. 1. 2 熔喷聚丙烯滤料的极化原理

极化原理有多种，由于本实验所用材料为聚丙烯熔喷布，因此这里只对聚丙烯滤料的极化原理进行分析。

根据驻极体电荷的来源和性质，聚丙烯驻极体布中的电荷可分为空间电荷和极化电荷。

(1) 空间电荷的产生

空间电荷：主要是从介质外面经施加的电场排斥，沉积到介质表面或注入到介质表层一定深度，被介质表面或内部的各种陷阱所捕获的带电粒子，也被称为驻极体的捕获电荷。

聚丙烯空间电荷的捕获可以在 2 种结构层次上发生：1) 电荷被束缚在相邻分子间的原子基团内，可由这些基团的电子亲合势来约束和捕获电荷，而捕获电荷的稳定性随分子结构密度的增加而增加，随着分子链支化程度的上升而减少；2) 聚丙烯由于其内部结构的不均匀性，结晶区和非结晶区是交错在一起的。结晶区通常是一些微小的晶粒，而当极化电流通过介质时，电荷将在聚合物高度有

序的晶区内或晶相与非晶相的界面处积聚从而被捕获。

(2) 极化电荷的产生

极化电荷：是通过冻结取向偶极子和界面极化所形成的，这种电荷被束缚在分子内，所以不能脱离分子转移到其他位置，也称束缚电荷。在没有外加电场作用时，聚丙烯中分子偶极子的取向是各向均等的，对整个电介质而言成电中性；当介质处于电场中时，每个偶极子转向电场的方向，介质表面就呈现出带电特性，通过一定手段将这种有序取向冻结，再撤去外加电场就形成了驻极体。聚丙烯的极化电荷主要有一个来源：当电流通过介质的时候，晶粒的两个端面产生 Maxwell-Wagner 效应，积聚相反电荷，形成与取向极化类似的极化，也称界面极化^[32]。

5.1.3 熔喷驻极聚丙烯滤料的电荷分布

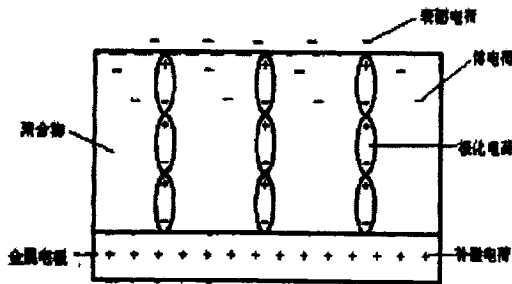


图 5-2 驻极滤料电荷分布示意图

图 5-2 是聚丙烯非织造布通过电晕驻极后驻极体的电荷分布情况示意图。对图中各类电荷的说明如下。

(1) 表面电荷：聚丙烯表面总是存在杂质、氧化物、被切断的分子链以及吸附的其他分子，这些缺陷都会使聚合物形成表面陷阱，从而可能捕获正电荷或负电荷，被表面陷阱所捕获的电荷称为表面电荷。

(2) 极化电荷：在未极化时，聚丙烯分子主链或侧链上的极性基团的排列是杂乱无章的，它们在各自的平衡位置附近作着无规则的热摆动。偶极子的每一个平衡位置对应着位能的一个极小值，即为一个位阱。由于电场的作用使位阱偏斜，所以就跳出了原有的位阱，并沿着电场方向整齐排列，冷却后，偶极子就被“冻结”在电场方向附近的陷阱中，形成介质的永久极化，使介质表面或体内出现极化电荷。这种电荷的极性与相邻极化电极的极性是相反的，称为异号电荷。

(3) 体电荷(又称为空间电荷)：聚丙烯内部是有晶体和无定形区域的界面，长分子链的折转、卷曲或切断等，从而形成了电子或空穴的陷阱。在外电场作用

下，正负离子将向着两极分离，并且可能被陷阱捕获，外界的电荷也可能进入介质体内的陷阱中，造成介质体内永久性荷电，称为体电荷。离子向两电极的移动形成空间电荷的异号电荷。它们一般是不稳定的外界注入的空间电荷的极性与相邻极化电极同号，称之为同号电荷。当今稳定驻极体的电荷都是同号电荷^[33]。

5.2 影响驻极效果的因素

影响驻极效果的因素主要有充电工艺参数、充电和热处理的温度、环境温湿度、充电方法、材料的表面结构、材料的分子结构等，本课题着重从驻极电压、驻极距离、驻极时间、热处理温度这四个方面进行分析讨论。

5.2.1 驻极电压对驻极效果的影响

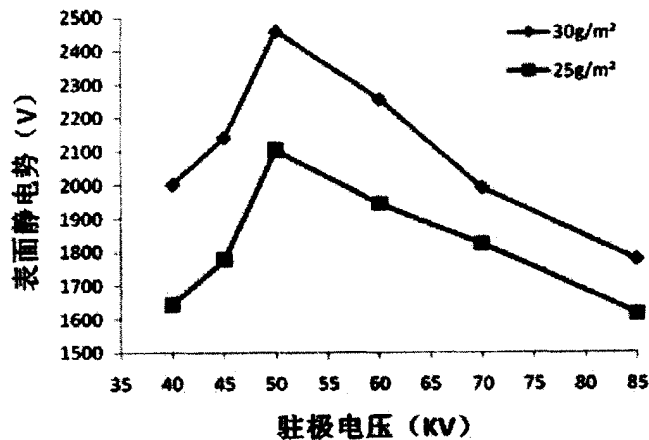


图 5-3 驻极电压对表面静电势的影响

从图 5-3 可以看出，驻极电压在 40KV~85KV 间变化时，熔喷非织造布的表面静电势波动较大，随着电压的增大，熔喷布的表面静电势增大，并在电压 50KV 时达到最大，这说明随着电压的增大，产生载流子的能量增强，除了可以直接沉积到熔喷非织造布的表面被表面陷阱捕获外，它还可以穿过熔喷布的孔隙，达到表层一定深度后被熔喷布内部的各种陷阱捕获，因此熔喷非织造布的表面电荷随着驻极电压增大而增加。但是随着电压的继续增大，熔喷布的表面静电势减小，分析其中的原因可能是，电压继续增大后，产生载流子的能量增大到一定程度，发生了轻微的击穿现象，即离子除了被捕获外，能量大的离子不再被熔喷布捕获，而是直接穿透它而被导走，使熔喷非织造布的表面静电势减小。在本实验过程中，最佳的驻极电压为 50KV。

5.2.2 驻极距离对驻极效果的影响

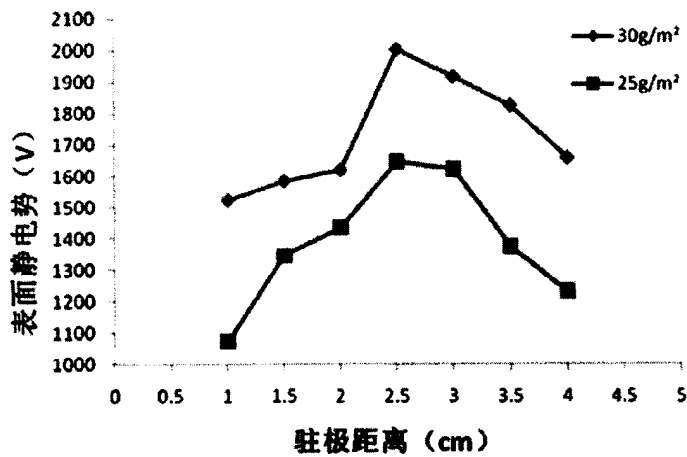


图 5-4 驻极距离对表面静电势的影响

从图 5-4 我们可以看出，驻极间距在 1cm~4cm 间变化时，熔喷非织造布的表面静电势波动较大，说明驻极间距是影响驻极效果的重要因素之一，驻极间距在 1~2.5cm 之间变化时，随着驻极间距的增大，熔喷非织造布的表面静电势增大。当超过 2.5cm 后，其表面静电势减小。由此说明，驻极间距不能太小，太小容易很快击穿熔喷非织造布；但驻极间距也不能太大，驻极距离越大，驻极效果会变差，因此要选择合适的驻极间距，在本实验过程中，最佳的驻极间距为 2.5cm。

5.2.3 驻极时间对驻极效果的影响

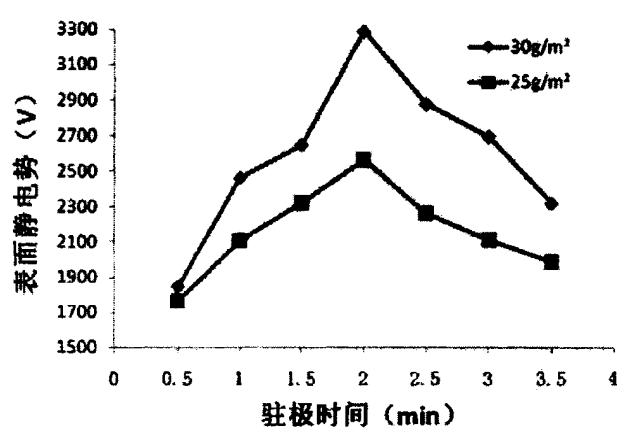


图 5-5 驻极时间对表面静电势的影响

从图 5-5 可以看出,随着驻极时间的增加,表面静电势在 1700~3300V 之间变化,一开始随着驻极时间的增加而增大,在 2min 时达到最大,随着驻极时间的继续增长,表面电荷反而减小。这说明随着驻极时间的增加,由离子束轰击电介质产生的载流子增多,从而被熔喷非织造布捕获的电荷增多,但随着时间的继续增大,表面电荷有所减小。分析其原因可能为熔喷布在离子束较长时间作用下,熔喷非织造布的击穿现象较严重,导电性能增强,导走的电荷较多。在本实验过程中,最佳的驻极时间为 2min。

5.2.4 热处理温度对驻极效果的影响

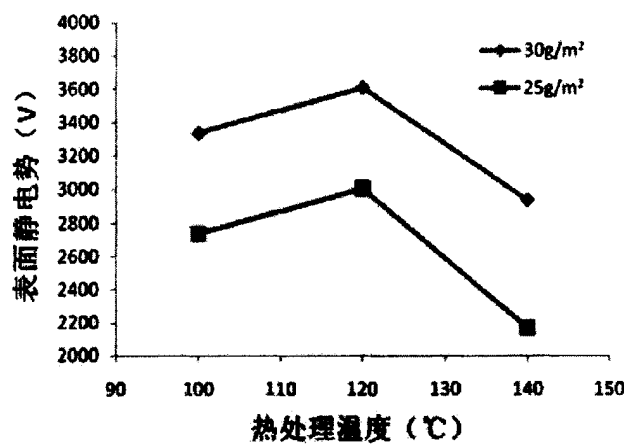


图 5-6 热处理温度对表面静电势的影响

从图 5-6 可以看出,随着热处理温度的提高,非织造布的表面静电势增大,但增大到一定数值时,非织造布的表面静电势呈下降的趋势。分析其原因是热处理可以使熔喷聚丙烯纤维的拟六方不稳定晶型向热力学稳定的 α 晶型转变,100℃处理试样时,试样的拟六方晶已经开始转变,但转变不完善;120℃处理试样时,纤维中 α 晶继续生长,晶粒尺寸也相应增大;140℃处理的试样时,纤维中已经形成了较为完善的 α 晶型。所以从结果来看,晶粒较大且结晶完善的 α 晶和拟六方晶的电荷捕捉能力和稳定性不及含有不完善结晶 α 晶的混晶。因此本实验最佳热处理温度为 120℃。

通过上述实验确定了最佳驻极工艺后,在此工艺下对 A、B、C、D、E 滤料分别进行驻极处理,然后对各滤料的过滤性能进行测试,测试结果如表 5-1 所示。

表 5-1 驻极前后熔喷非织造布过滤性能测试结果对比

滤料编码	处理工艺	过滤效率(%)	过滤阻力 (mm · H ₂ O)
A	驻极前	38.6	1.8
	驻极后	82.4	1.8
B	驻极前	29.5	1.6
	驻极后	86.4	1.8
C	驻极前	43.1	2.3
	驻极后	78	2.4
D	驻极前	28.4	2.3
	驻极后	91.8	2.3
E	驻极前	30.6	2.4
	驻极后	92.77	2.4

由表 5-1 可以看出，驻极过滤材料由于利用了静电捕集，其捕集效率比普通纤维过滤材料的捕集效率要高得多，对于各滤料驻极后的过滤效率普遍比驻极前提高了 50~70%，而过滤阻力几乎没有发生变化。因此驻极是空气过滤中达到高效低阻的一种有效工艺。

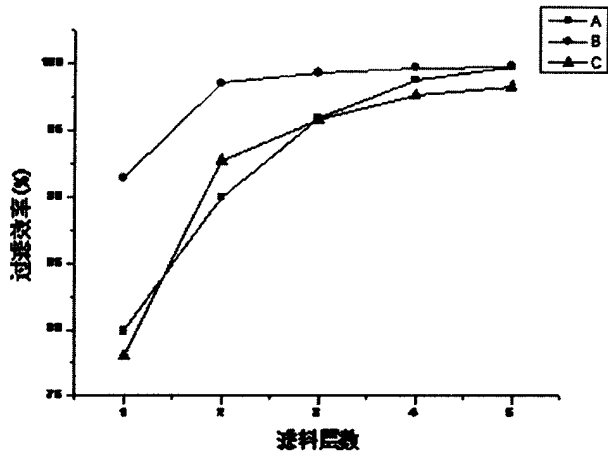
5.3 影响驻极滤料过滤性能的因素分析

5.3.1 厚度的影响

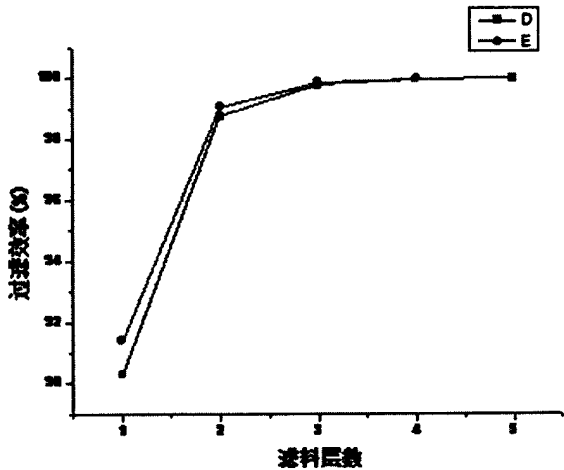
气溶胶粒子为 NaCl 微粒，滤速为 4.5cm/s，气溶胶浓度为 15.6mg/m³ 时，测得的在不同厚度下各滤料的过滤效率如表 5-2 和图 5-8 所示，过滤阻力如表 5-3 所示。

表 5-2 不同厚度下各滤料的过滤效率 (%)

	A	B	C	D	E
1 层	79.9	91.46	78	90.29	91.41
2 层	90.0	98.6	92.76	98.74	99.06
3 层	95.96	99.41	95.87	99.78	99.86
4 层	98.94	99.82	97.72	99.97	99.97
5 层	99.95	99.94	98.43	99.99	99.99



a A、B、C 滤料



b D、E 滤料

图 5-7 厚度变化时各驻极过滤材料的过滤效率

从图 5-7 可以看出，随着厚度的增加，各驻极过滤材料的过滤效率先增大后不变。具体分析可知，由 1 层增至 2 层时，过滤效率变化幅度最大，再继续增加滤料层数，过滤效率几乎不变。

表 5-3 不同厚度下各滤料的过滤阻力 (mm·H₂O)

	A	B	C	D	E
1 层	2	3.1	2.4	2.3	2.4
2 层	3.3	5.9	4.3	4.5	4.8
3 层	4.8	7.2	5.2	6.8	7.3
4 层	6.7	9.5	6.5	9.1	9.7
5 层	7.7	11.2	7.2	11.7	12.2

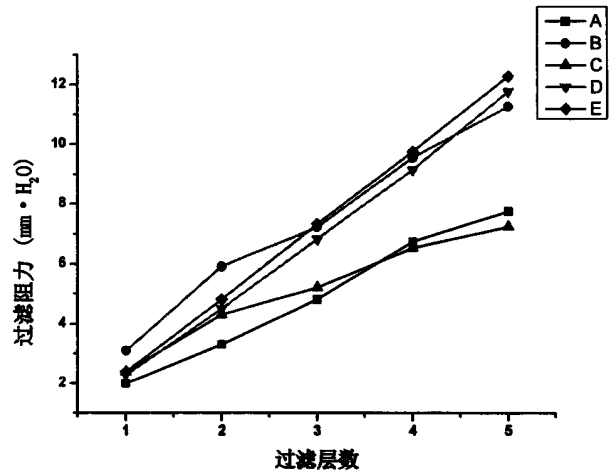


图 5-8 厚度变化时各驻极过滤材料的过滤阻力变化

从图 5-8 可以看出，驻极过滤材料的过滤阻力随着厚度的增加线性增大。过滤材料由 3 层增至 5 层时，过滤效率几乎不变，过滤阻力仍继续增大。由此可知，对于驻极过滤材料，1 层和 2 层为最佳厚度，完全没必要再继续增加厚度。

5.3.2 滤速的影响

气溶胶粒子为 NaCl 微粒，气溶胶浓度为 15.6mg/m³ 时，测得的在不同滤速下各滤料的过滤效率如表 5-4 和图 5-9 所示，过滤阻力如表 5-5 和图 5-10 所示。

表 5-4 不同滤速下各驻极滤料的过滤效率 (%)

滤速 (cm/s)	A	B	C	D	E
3.5	84.1	94.28	79.1	92.54	93.69
4.5	79.9	91.46	78	90.29	91.41
5.3	76.6	90.44	74.3	88.1	89.1
6.3	74.3	84.8	70.7	86.1	87.4
7.3	71.2	87.4	67.2	85.7	85.2
8.3	66.4	84.6	65.6	81.2	83.2
10.0	64.2	82.4	63.2	78.1	80.3
11.7	59.8	81.6	60.6	75.6	77.7

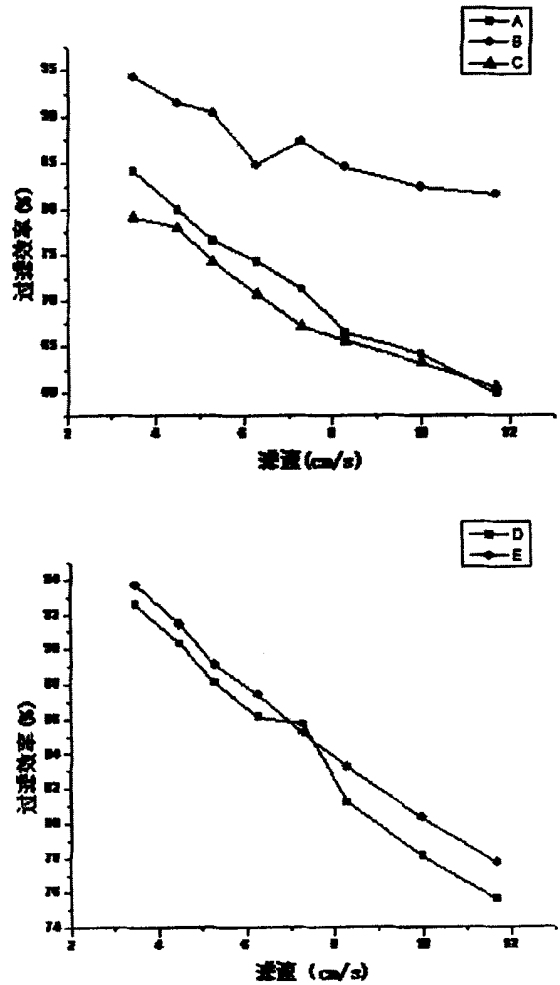


图 5-9 滤速变化时各驻极过滤材料的过滤效率

由图 5-9 可以看出, 经过驻极后的熔喷聚丙烯过滤材料, 其过滤效率随着滤速的增大直线下降, 和未驻极的过滤材料的先直线下降后保持不变的过程不一样。这主要是因为驻极过滤材料的过滤过程中, 静电效应占主导作用, 其它过滤效应相对于静电效应微乎其微, 滤速越大, 气溶胶粒子在过滤材料中停留的时间越短, 使得粒子被纤维吸引的几率较小, 同时滤速越大, 带异性电荷的粒子不易相互吸引形成较大的粒子因惯性作用而被纤维拦截, 因此对于驻极滤料, 随着滤速的增大其过滤效率逐渐减小。

表 5-5 不同滤速下各驻极滤料的过滤阻力 (mm · H₂O)

滤速 (cm/s)	A	B	C	D	E
3.5	1.6	1.2	1.6	1.7	1.9
4.5	2	1.5	2.4	2.3	2.4
5.3	2.5	2	2.8	2.8	3
6.3	3.1	2.1	3.5	3.4	3.7
7.3	3.6	2.8	4	4	4.3
8.3	4.1	3.2	4.8	4.4	4.8
10.0	5.2	3.7	6	5.5	6
11.7	6.1	4.8	7	6.6	7.2

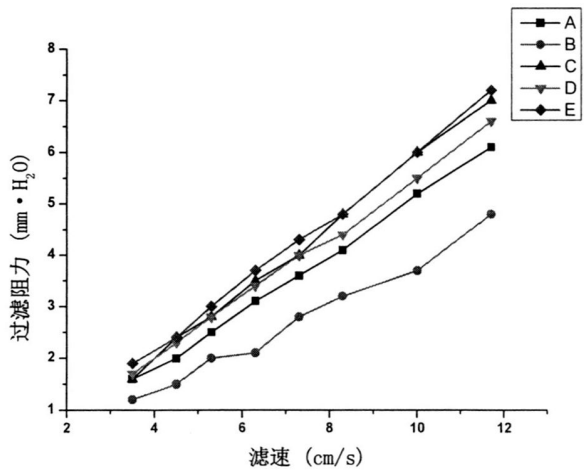


图 5-10 滤速变化时各驻极过滤材料的过滤阻力

由图 5-10 可以看出, 驻极滤料的过滤阻力随着滤速的增大而增大, 与未驻极滤料一样; 但对比图 5-10 和图 4-22 可知, 驻极后过滤阻力随着滤速增大而增

大的幅度大于未驻极滤料，这可能是因为驻极后滤料对微粒的吸附能力增强，在同样滤速下驻极滤料吸附的粒子多，使得滤料的空隙率降低，因而使气体通过滤料的压力损失上升，因而过滤阻力相对大于同等滤速下未驻极滤料，但对比表 5-5 和 4-15 可知，差距并不大，因此驻极对滤料过滤阻力的影响不大。

5. 3. 3 气溶胶性质的影响

滤速为 4.5cm/s，气溶胶浓度为 15.6mg/m³ 时，各驻极滤料在盐型 NaCl 粒子和油型 Paraffin Oil 粒子下的过滤效率如表 5-6 所示。

表 5-6 不同气溶胶下各驻极滤料的过滤效率（%）

	A	B	C	D	E
NaCl	79.9	91.46	78	90.29	91.41
Paraffin Oil	66.1	75.2	64.2	74.2	75.6

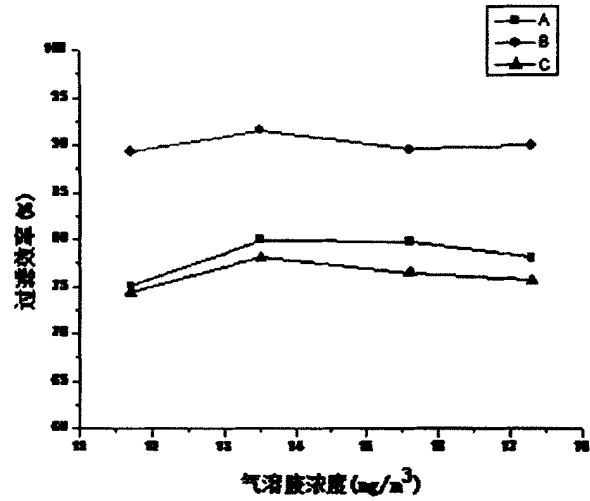
由表 5-6 可以看出，驻极后，熔喷聚丙烯空气过滤材料对盐型 NaCl 气溶胶颗粒的过滤性能明显优于石蜡油，过滤效率之间的差距增大近 20 个百分点。这是因为 NaCl 为离子型化合物，无论粒子大小，气溶胶粒子都是带电荷的，气溶胶与驻极体之间存在着强烈的静电作用，过滤以静电效应为主；而石蜡油为极性非离子型化合物，由于分子间的库仑作用，溶胶粒子通常是电中性的，当与驻极空气过滤材料接触时，在驻极体静电场的作用下，溶胶粒子因极化而带电，所以石蜡油粒子在整个过滤过程中还是以惯性效应和扩散效应为主，只有在微粒与滤材接触时才产生静电效应，以静电效应为辅，因此驻极后两者过滤效率都提高，而对盐型 NaCl 粒子的过滤效率增强效果明显优于石蜡油粒子。

5. 3. 4 气溶胶浓度的影响

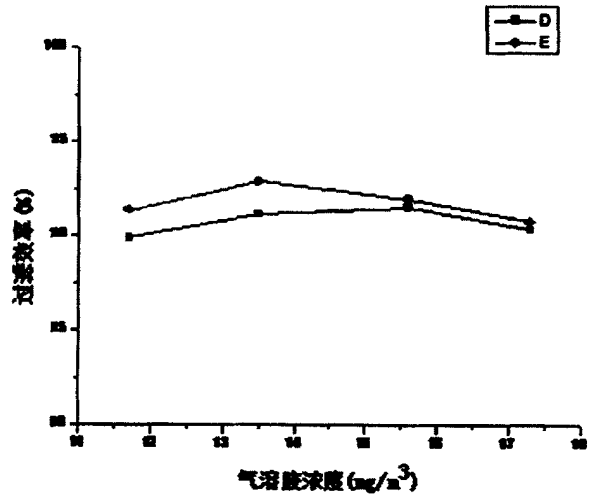
气溶胶粒子为 NaCl 微粒，滤速为 4.5cm/s 时，各驻极滤料在不同气溶胶浓度时过滤效率如表 5-7 所示，对比图如图 5-11 所示。

表 5-7 不同气溶胶浓度下各驻极滤料的过滤效率（%）

气溶胶浓度 (mg/m ²)	A	B	C	D	E
11.7	75.1	89.3	74.4	89.9	91.35
13.5	79.9	91.46	78	91.14	92.87
15.6	79.7	89.4	76.4	91.53	91.96
17.3	78	89.8	75.6	90.36	90.76



a A、B、C 滤料



b D、E 滤料

图 5-11 气溶胶浓度变化时各驻极滤料的过滤效率

从图 5-11 可以看出，气溶胶浓度对驻极滤料过滤效率的影响与对未驻极滤料的影响是一样的。即变化具有随机性，且总体上来过滤效率的变化不大。

表 5-8 各滤料不同气溶胶浓度的过滤阻力 (mm·H₂O)

气溶胶浓度 (mg/m ²)	A	B	C	D	E
11.7	1.9	1.5	1.1	2.3	2.8
13.5	2	1.6	1.2	2.6	2.8
15.6	2.2	1.5	1.2	2.4	2.8
17.3	2.2	1.6	1.2	2.4	2.8

从表 5-8 可以看出，气溶胶浓度对过滤阻力的影响也不大。对比表 5-8 和表 4-17 还可看出，驻极后过滤阻力在不同的气溶胶浓度下与驻极前相差不大。

5.4 驻极滤料的容尘量

在盐性气溶胶，滤速为 4.5cm/s，气溶胶浓度为 15.6mg/m³ 下，通过测试过滤材料的终阻力达到其初阻力的 2 倍的数值时过滤材料上的积尘量确定驻极后各滤料的容尘量，如表 5-9 所示。

表 5-9 驻极后各滤料的容尘量

	A	B	C	D	E
初始重量 (g)	0.5057	0.4556	0.3897	0.8492	0.6728
终重量 (g)	0.5362	0.5104	0.4458	0.9171	0.7178
增加的重量 (g)	0.0305	0.0458	0.0561	0.0679	0.0450
容尘量 (g/m ²)	1.76	2.07	1.47	2.00	3.02

对比表 5-9 和表 4-18 可知，驻极后滤料的容尘量大大增加，是驻极前的 2 倍多，由此可见驻极使得滤料对微粒的吸附能力大大增强。

5.5 驻极滤料过滤效率和过滤阻力随时间的变化

依照为驻极滤料的测试方法和测试条件，测得的驻极后滤料 D 和滤料 E 的过滤效率和过滤阻力随时间的变化关系如图 5-12 和图 5-13 所示。

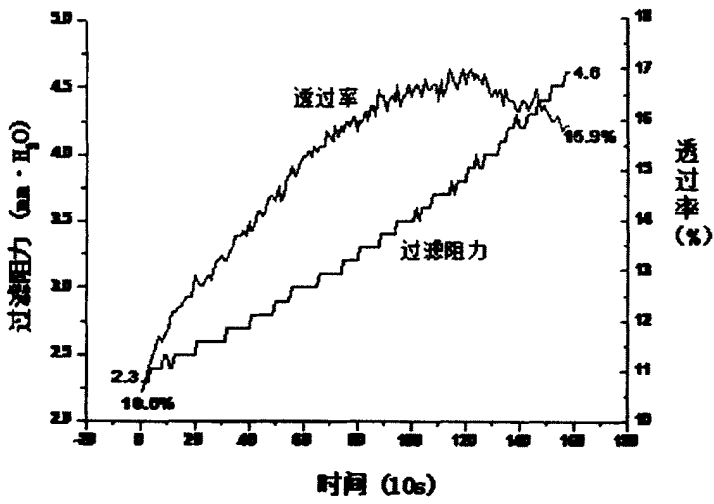


图 5-12 驻极滤料 D 过滤效率与过滤阻力随时间变化图

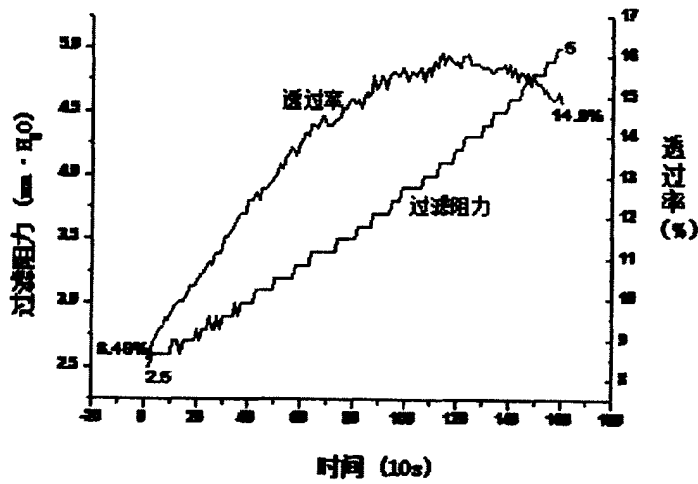


图 5-13 驻极滤料 E 过滤效率与过滤阻力随时间变化图

由图 5-12 和图 5-13 可以看出，过滤材料经过驻极后，随着时间的增加，过滤阻力的变化关系没有发生变化，依然是前期上升缓慢，后期上升速度加快；而过滤效率的变化关系发生变化。驻极后，透过率随着时间的增加先增大后减小，即过滤效率先减小后增大，在减小过程中前期波动较小，后期波动较大。这是因为驻极过滤材料主要依靠静电效应进行过滤，过滤前期，随着微粒在纤维上的沉

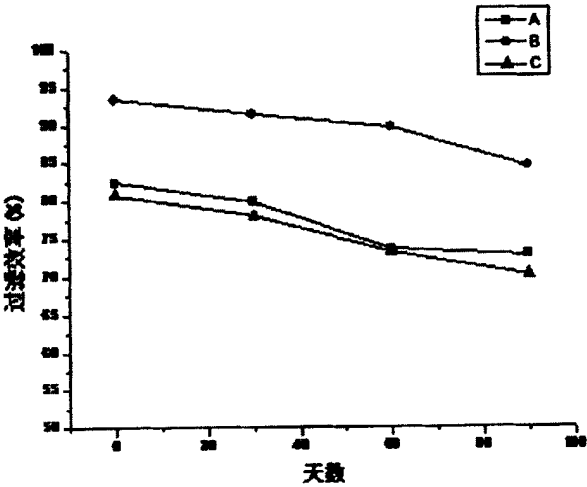
积, 过滤材料上所带的电荷逐渐被中和, 此外过滤材料表面的电荷逐渐发生衰减, 使得滤料的静电效应逐渐减弱, 因此前期过滤效率逐渐下降; 具体分析还可看出, 透过率先急剧上升后上升速度逐渐减慢, 达到一个最大值, 这是因为随着时间的增加静电效应和扩散效应、惯性效应等的此减彼增造成的。过滤后期, 随着时间的增加、过滤过程的进一步进行, 滤料上所带的电荷所剩无几, 此时滤料以扩散效应和惯性效应等机械阻挡效应为主, 随着微粒在纤维上的沉积使得滤料的孔隙减小, 过滤通道被堵塞, 造成过滤材料的填充率增大, 因此过滤效率呈现上升的趋势。

5.6 驻极滤料衰减性的研究

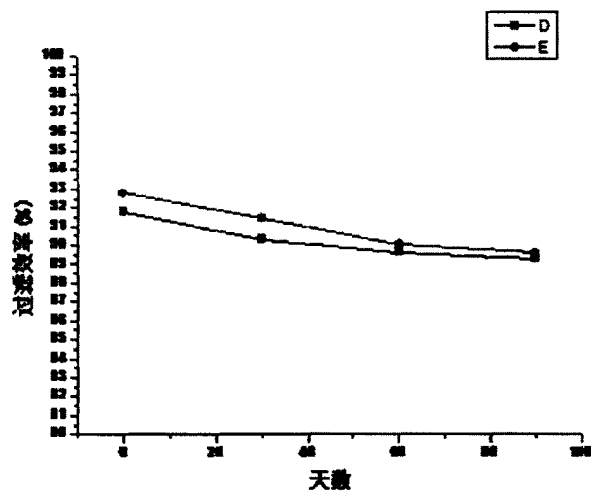
因为驻极滤料通常作为过滤层位于整个滤料的中间层, 所以本实验选用将驻极滤料密封进行衰减性测试。测试条件为滤速 4.5cm/s, 盐型 NaCl 气溶胶粒子, 气溶胶浓度 15.6mg/m³, 测得的结果如表 5-10 所示。

表 5-10 各驻极滤料过滤效率的衰减性 (%)

	A	B	C	D	E
2013-3-17	82.4	93.4	80.8	91.80	92.77
2013-4-17	79.9	91.46	78.0	90.29	91.41
2013-5-16	73.7	89.7	73.3	89.6	90.0
2013-6-24	72.9	84.5	70.2	89.2	89.53



a A、B、C 滤料



b D、E 滤料

图 5-14 各驻极滤料随时间的衰减性

从图 5-14 可以看出，驻极滤料的过滤效率随时间的延长会先下降后保持不变。这种变化趋势对 D、E 滤料尤为明显。为了解释这种现象，测试了 D、E 滤料的静电势，其结果如图 5-15 和 5-16 所示。

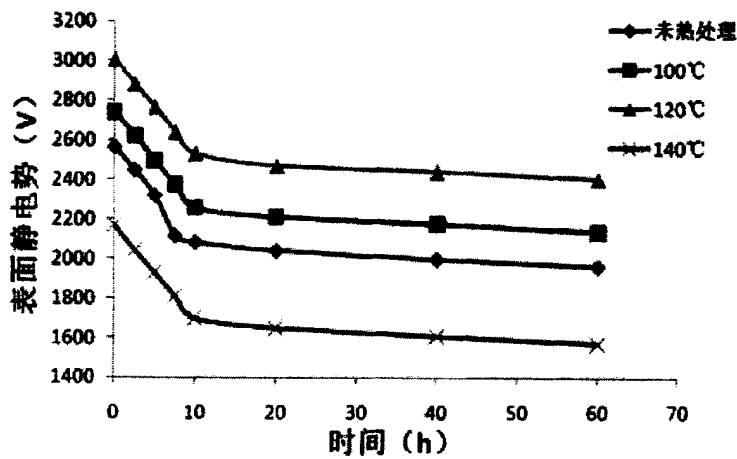


图 5-15 D 滤料表面静电势衰减图

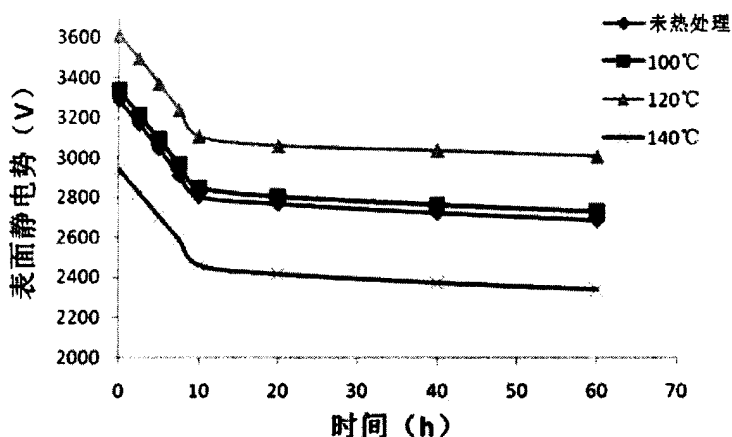


图 5-16 E 滤料表面静电势衰减图

一般认为充电后的样品中存在有处于不同能态的两类空间电荷：一类位于表面浅阱中，可称之为表面电荷；另一类被捕获在深陷阱中，称为陷阱电荷。表面电荷在常温储存、或较低温度下就发生衰减；陷阱电荷需在较高温度下激发脱阱，表现出高存储稳定性。表面电位的快速衰减过程正是由于表面电荷的衰减引起的，而恒定的表面电位值则表明了陷阱电荷的多少^[34]。

从图 5-15 和图 5-16 中可以看出，随着时间的推移，滤料表面的电荷有所衰减，但在一定时间后，滤料的表面电荷趋于稳定，原因可能在于非织造布的表面的电荷容易从空隙或者是与其他介质接触从而损失，而较深层的电荷则较难与外界接触和衰减，所以可以长时间的储存在非织造部内。这也就解释了滤料过滤效率随着时间的推迟会先下降后基本保持不变。

5.5 本章小结

(1) 通过对驻极工艺的探讨，得出最佳工艺参数为：驻极时间 2min，驻极间距 2.5cm，驻极电压 50kV，最佳热处理温度 120℃。在此工艺条件下，熔喷非织造布的表面静电势最大。

(2) 各滤料驻极后的过滤效率普遍比驻极前提高了 50~70%，而过滤阻力几乎没有发生变化，容尘量是驻极前的 2 倍多。

(3) 对于驻极过滤材料，1 层和 2 层为最佳厚度，再继续增加厚度，过滤效率变化不大，但过滤仍会继续上升。

(4) 驻极过滤材料过滤效率随着滤速的增大直线下降，和未驻极的过滤材料的先直线下降后保持不变的过程不一样。过滤阻力随滤速增大而增大，与未驻极滤料一样，但增大幅度大于未驻极滤料。

(5) 驻极过滤材料对盐型 NaCl 气溶胶颗粒的过滤性能明显优于石蜡油，过滤效率之间的差距由未驻极前的 2~10 个百分点增大至近 20 个百分点。由此可知，气溶胶颗粒物性质对熔喷聚丙烯过滤材料的过滤性能存在很大的影响。

(6) 气溶胶浓度对驻极滤料的过滤效率和过滤阻力均影响不显著。

(7) 过滤材料经过驻极后，随着时间的增加，过滤阻力前期上升缓慢，后期上升速度加快，与未驻极滤料的变化关系一样，但驻极后的过滤效率则随着时间的增加先下降后上升，与未驻极滤料不一样。

(8) 驻极滤料的过滤效率随时间的延长会先下降后保持不变。说明随着时间的推移，滤料表面的电荷衰减，容易从空隙或者是与其他介质接触从而损失，而较深层的电荷则较难与外界接触和衰减，可以长时间的储存在非织造部内。

第六章 结论与展望

6.1 结论

鉴于非织造过滤材料当前在空气过滤领域的广泛应用和巨大发展前景,本文着重对熔喷非织造布过滤材料的过滤性能进行了研究。首先通过对影响非织造布过滤材料的各因素进行理论分析,定性和定量地提出了各因素影响过滤材料过滤性能的方式和程度;然后通过对实验材料各结构因素进行统计和分析,并据此做进一步的理论计算,对比理论值和实验值的差异,确定理论与实际的联系和区别,为在一定范围内运用现有理论指导生产和实践提供依据,为合理使用过滤材料提供指导;最后通过对驻极工艺的研究,将上述实验材料进行驻极,测试驻极后材料的过滤性能,确定各因素对驻极材料的影响和驻极滤料的衰减性,为驻极滤料的开发和改善提供建议。

通过本课题的理论分析和实验研究,可以得出以下结论:

(1)对于微粒直径小于 $1\mu\text{m}$ 的粒子,未驻极的过滤材料过滤效率不甚理想,在 30%~40%,但经驻极后,过滤效率显著提高至 75%~95%,容尘量也为未驻极的 2 倍多,但是过滤阻力几乎不变。说明驻极是使过滤材料达到增效减阻的有效方法之一。

(2)对于不同气溶胶,非织造布过滤材料过滤效率不同。如未驻极的过滤材料对盐型 NaCl 气溶胶颗粒的过滤效率略优于油型 Paraffin Oil,差距为 2~10 个百分点;但是经过驻极后,对盐型 NaCl 气溶胶颗粒的过滤效率显著优于油型 Paraffin Oil,差距为 20 个百分点。

(3)不管是对于驻极还是为驻极的过滤材料,当气溶胶浓度较小,为 $10\sim 15\text{mg}/\text{m}^3$ 时,气溶胶浓度变化对过滤效率的影响不大。

(4)过滤效率和过滤阻力都随滤料纤维直径的增大而下降,但下降程度越来越小,直至趋于平缓。即减小纤维直径,能增加过滤效率,但同时也会增大过滤阻力,因此只能在阻力适中的情况下减少纤维直径。

(5)对于驻极滤料或未驻极滤料,随滤材厚度的增大,过滤效率逐步提高,增加到一定程度后,在继续增加厚度对过滤效率的提高作用不明显,但过滤阻力还是会继续呈几何倍数的增大。因此不能只追求效率而增大厚度,要寻求两者的平衡,找到一个滤材的最佳厚度。

(6) 对于未驻极滤料, 过滤效率随着滤速的增大先减小后增大, 存在一个临界过滤速度; 过滤阻力则随着滤速的增大则呈直线性的递增, 因此应尽量找到滤料的临界过滤速度, 在临界过滤速度 (即临界风速) 下使用过滤材料。对于驻极滤料, 过滤效率随滤速的增大而呈直线性下降; 两者的过滤阻力都是随着滤速的增大而增大。因此不论是驻极滤料还是未驻极滤料, 都应尽量在小过滤风速下使用。

(7) 通过对驻极工艺的探讨, 得出最佳工艺参数为: 驻极时间 2min, 驻极间距 2.5cm, 驻极电压 50kV, 最佳热处理温度 120℃。在密封条件下, 驻极过滤材料的表面静电势会随着时间的延长先急剧下降后保持不变, 使得过滤效率也会先下降后保持不变。

(8) 随着时间的增加, 未驻极的过滤材料过滤阻力和过滤效率都逐渐提高; 驻极过滤材料过滤阻力逐渐提高, 过滤效率则会先下降后上升。过滤阻力都是前期上升缓慢, 后期上升速度加快; 未驻极滤料过滤效率前期波动较大, 后期波动较小, 呈逐渐上升的趋势; 驻极滤料过滤效率在下降过程中前期波动较小, 中期波动较大, 过滤后期过滤效率呈上升趋势。

(9) 过滤效率和过滤阻力的计算值与实验值之间差异较大, 但也有明显的联系, 即变化趋势相同。因此过滤理论对实际有一定的指导作用, 需进一步完善。

6.2 展望

由于时间, 测试条件和本人能力等限制, 本课题只对熔喷非织造布过滤材料的结构和性能进行了初步研究, 对过滤理论进行了初步的计算。因此通过本课题的研究, 作者认为尚需或还可进一步研究的问题为:

(1) 过滤分为清洁过滤和含尘过滤两个阶段, 本课题的研究主要是建立在清洁过滤的假设条件下, 对于含尘过滤阶段的研究不是很深入, 而主要对滤料的运行费用和使用寿命起关键作用的是含尘过滤阶段, 以后再继续研究时应加强对含尘过滤的探讨。

(2) 在影响过滤材料的过滤性能时, 一般都是多个因素同时起作用, 本文对多因素分析不够, 可进一步研究。

(3) 利用计算机技术对非织造材料的过滤过程进行模拟, 模拟出纤维含量, 纤维直径, 滤材厚度, 填充率等变化以及不同的过滤参数如过滤风速、微粒大小、微粒浓度等对过滤性能的影响, 以期对过滤材料的研发和生产起到更明确和更具体的指导作用^[35]。

参考文献

- [1] 刘道清. 空气过滤技术研究综述[J]. 环境科学与管理, 2007,(05).
- [2] 陈喆. 空气过滤材料及其技术进展[J]. 非织造技术及产业用纺织品, 2011,(86-88).
- [3] 刘来红, 王世宏. 空气过滤器的发展与应用. 过滤与分离, 2000, 10(4):8-9
- [4] Peter P. Tsai, 柯勤飞. 过滤材料全球技术发展趋势. 产业用纺织品, 2003, 21(1): 8-11.
- [5] 王延熹. 国外非织造滤料发展现状与前景[J]. 产业用纺织品, 2000,(01).
- [6] 裘康, 焦晓, 洪贤良, 葛诗源, 陈胜发. 非织造布在空气过滤中的应用. 产业用纺织品[J], 2005(1):24-35.
- [7] 郭晓玲, 本德萍, 李益群等. 有限空间内空气净化材料研究的新进展[J]. 产业用纺织品, 2005(8): 42-45.
- [8] 程家宠. 纳米技术在医药领域的应用研究进展[A]. 见: 中科院纳米科技中心. 2001 年纳米研讨会论文集[C], 北京: 2001. 1~2.
- [9] 于建香, 师奇松, 张淑敏, 顾凯, 刘太奇. 纳米空气净化材料[J]. 北京石油化工学院学报, 2004,(01).
- [10] 胥绍华. 天然纳米纤维在空气过滤材料中的应用[J]. 中国造纸. 2011,(06).
- [11] 黄继红. 微孔薄膜复合滤料运行阻力的研究. 建筑热能通风空调, 2001, 1:1-4.
- [12] 俞珊, 瞿爱莎, 付新梅, 王春丽. 室内空气净化材料研究进展[J]. 科技导报, 2008,(05).
- [13] 刘呈坤, 马建伟. 非织造布过滤材料的性能测试及产品应用[J]. 非织造布, 2005, 13(1): 30-34.
- [14] 蔡杰. 空气过滤 ABC[M]. 中国建筑工业出版社, 2002.
- [15] 吴湘济. 过滤材料的应用及其测试指标[J]. 合成纤维, 2006, 4: 26-29.
- [16] 非织造布的性能与测试[M]. 中国纺织出版社, 1998.
- [17] 朱晖. 环境空气中微粒过滤材料性能的实验研究[J]. 上海: 东华大学, 2005.
- [18] 徐健. 空气过滤器的科学更换标准探讨[J]. 现代商贸工业, 2012, 24(14): 194-194.
- [19] 付海明, 沈恒根. 空气过滤理论研究与发展[J]. 过滤与分离, 2003, 13(3): 20-24.

- [20] 涂光备. 纤维型空气滤料过滤效率的理论曲线及其分析 [J][J]. 暖通空调, 1983, 13(4): 25-30.
- [21] 李永祥. 高效空气滤纸过滤性能测试方法的研究 [D]. 天津大学, 2004.
- [22] 王江标. 高效, 超高效空气滤纸最易穿透粒径法实验性能研究[D]. 天津大学, 2006.
- [23] Davies C N. The Separation of Airborne Dust and Particles[J]. Arhiv za Higijenu Rada, 1950, 1(4): 393-427.
- [24] Davies C N. Air filtration[J]. 1973.
- [25] 高峰. 纤维滤材过滤特性研究[D]. 天津大学, 2004.
- [26] 蔡杰. 空气过滤 ABC[M]. 中国建筑工业出版社, 2002.
- [27] 魏取福, 褚慧芬. 针刺土工布压缩性能及孔隙率的分析[J]. 非织造布, 1995 (3): 16-18.
- [28] 2006 GB. 呼吸防护用品——自吸过滤式防颗粒物呼吸器[D]. 2006.
- [29] 肖慧明, 谢文虎, 陈钢进. 熔喷聚丙烯驻极体空气过滤材料对不同气溶胶的过滤性能及过滤机理研究[J]. 功能材料, 2013(7): 761-764.
- [30] Hanley J T, Ensor D S, Smith D D, et al. Fractional Aerosol Filtration Efficiency of In - Duct Ventilation Air Cleaners[J]. Indoor Air, 1994, 4(3): 169-178.
- [31] Tsai P P, 吴英. 非织造布驻极滤料静电施加技术比较[J]. 产业用纺织品, 2000, 5(18): 39-41.
- [32] 陈钢进, 肖慧明, 王耀翔. 聚丙烯非织造布的驻极体电荷存储特性和稳定性. 纺织学报, 2007, 28(9): 126-128.
- [33] 康卫民. 复合驻极聚丙烯熔喷非织造布开发及其性能研究 [D][D], 2004.
- [34] 冀忠宝, 夏钟福, 沈莉莉, 等. 电晕充电的聚丙烯无纺布空气过滤膜的电荷储存及稳定性[J]. 物理学报, 2005, 54(8): 3799-3804.
- [35] 高晓艳. 静电纺纤维/非织造布复合过滤材料的结构性能与模拟[D]. 苏州大学, 2009.
- [40] 冯朝阳. 高效空气过滤器阻力与结构关系的实验研究[D]. 清华大学 2007
- [41] Guifang,Zhang. 非稳定性过滤的基础性理论研究[Z]. 中国暖通空调制冷资讯(技术篇). 2002.
- [42] 付海明, 沈恒根. 非稳定过滤捕集效率的理论计算研究[J]. 中国粉体技术, 2003, 9(6): 4-7.
- [43] 戴天翼. 中国“过滤材料性能测试方法标准”的现状与将来[A]. 第四届中国国际过滤研讨会论文集[C]. 2006.
- [44] 黄翔,王与娟,樊丽娟,狄育慧,吴志湘. 新型功能性空气过滤材料研究进展[J].

暖通空调. 2009(01).

- [45] 戴有刚,左保齐. 静电纺丝非织造过滤材料研究进展[J]. 产业用纺织品, 2008,(07) .
- [46] 周欢,李从举. 过滤粉尘用纺织材料的发展现状[J]. 产业用纺织品, 2011,(01) .

攻读学位期间发表的学术论文情况

1. 《基于不同测试条件下熔喷聚丙烯滤料的过滤性能》, 发表于《技术纺织品》, 2013 年 12 月。

致 谢

两年半研究生阶段的学习与生活，使人感觉既紧张而又充实。无论是在基础知识方面、实践技能方面，还是在为人处事方面都得到了恩师张志奋老师的认真教诲和辛勤培养。他严谨求实的治学态度和一丝不苟的科研作风将使我受益终生。正是在他的严格要求和悉心培养下，我的自身综合素质得以全面地提高，这为我今后的学习、工作和生活均打下了坚实的基础，在此向他表示最衷心的感谢！

这次毕业论文从课题的选定、研究到论文的撰写、定稿，都得到了张老师的精心细致的指导。他不仅为我提供了必要的课题研究条件，还积极鼓励我的想法助我克服各种困难，并在论文的撰写过程中进行了严格认真地审校工作。正是在他的精心指导和热情帮助下，此毕业论文才得以顺利圆满地完成，再一次向他表示由衷的谢意！

在本课题的研究过程中，得到了东华大学实验室老师的指导和许多同学的帮助，在此对他们致以深深的谢意！同时感谢多年来一直关心和鼓励我的家人，也感谢所有给予我帮助的师长和朋友们！