

# 风沙运动研究中的若干关键力学问题<sup>1)</sup>

郑晓静<sup>†</sup> 周又和

(兰州大学力学系, 兰州 730000)



郑晓静, 女, 兰州大学力学系教授, 固体力学博士生导师, 主管教学和科研的副校长; 国家杰出青年科学基金和教育部跨世纪人才基金获得者。1988 年经中国力学学会推荐获首届“中国青年科技奖”、1991 年被国务院学位委员会和国家教委联合授予“做出突出贡献的中国博士学位获得者”称号, 1997 年获宝钢教育基金会“高校优秀教师特等奖”等; 1997 年入选国家“百千万人才工程”第一、二层次人才、被甘肃省人民政府授予“甘肃省优秀专家”称号, 享受国务院“政府特殊津贴”; 现兼任中国科协第六届全委会委员和青年工作委员会委员, 教育部科技委委员, 中国力学学会理事, 甘肃省力学学会理事长, 《力学学报》、《固体力学学报》、《应用力学学报》编委和上海交通大学兼职教授等职; 2000 年 10 月开始主持国家重点基础研究发展规划项目(即 973 项目)的第二课题“风沙运动的力学机理与土壤风蚀的定量研究”。已发表学术论文 120 余篇, 出版学术专著二部。主要从事研究领域: 电磁固体力学, 风沙电现象与风沙运动力学机理, 非线性固体力学等。

**摘要** 针对沙漠化(严重时导致沙尘暴发生)这一国家关注的重大环境问题, 在简要介绍风沙运动力学机理研究的主要发展阶段和部分最新研究进展的基础上, 提出了风沙运动研究中值得关注的若干关键力学问题。

**关键词** 风沙运动, 力学机理研究, 关键科学问题

03 A

## 1 引 言

据有关资料统计<sup>[1]</sup>: 我国的沙漠、戈壁和沙漠化土地面积约为  $165.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占我国陆地面积的 17.3% 左右; 其中由于人类活动导致的现代沙漠化土地约为  $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 并在 20 世纪 90 年代以  $2460 \text{ km}^2/\text{year}$  的速度扩展。这种沙漠化过程的主要表现形式是沙粒在风场作用下的运动, 而由此带来的则是我国乃至全球关注的极其严重的环境问题。

风沙运动导致的土壤风蚀<sup>[2]</sup>, 使土地生产力下降, 土地资源丧失, 致使本来就与我国人口不成比例的耕地面积更为匮乏; 风沙运动造成的流沙蔓延, 使村镇掩埋、交通阻塞, 严重危及当地人民的生存和发展, 缩小中华民族的生存空间; 而风沙运动的突发事件——沙尘暴(一般气象上定义为一种水平能见度小于 1 km 的风沙现象, 而把瞬间最大风速超过  $25 \text{ m/s}$ , 能见度低于 50 m 的称为强沙尘暴或黑风暴), 导致了严重的人员伤亡和财产损失。如 1993 年 5 月 5 日发生在我国甘肃的黑风暴<sup>[3]</sup>(见图 1),



图 1 1993 年 5 月 5 日强沙尘暴照片(引自文 [3])

共死亡 81 人, 失踪 31 人, 受伤 386 人; 死亡丢失牲畜 45.1 万只(头); 农田和果林大面积受灾; 拉断拉坏电线 131 km。另外, 甘肃境内的金川有色金属公司 3500 V 供电线路中断, 造成 100 多个厂矿企业停电 24 小时。由于大风引起流沙掩埋铁路, 造成客、货车迟发、晚点和停运 42 列, 376 km 公路受到风沙埋压和吹蚀。乌吉铁路有 600 多米线路积沙达 1 米多厚, 致使吉兰泰盐场铁路中断运输 4 天。大风

2003-01-12 收到第 1 稿, 2003-02-12 收到修改稿。

1) 国家重点基础研究发展规划(即 973 项目)(G200004872)、教育部重点科技项目和教育部高校博士点专项基金等资助。

† E-mail: xjzheng@lzu.edu.cn

刮走芒硝和工业用盐  $2.8 \times 10^4$  t, 长途和农用电话线路阻断达 14 小时, 有 10 个广播、电视发射塔或发射天线被损坏。此外, 这次大风沙尘暴造成沙埋(有的新垦农田埋沙度达 5~20 cm)、吹刮(有的地方对地表肥沃土面吹蚀厚度达 10~20 cm) 等。而这种灾害随着环境的恶化具有逐年增加的态势<sup>[1]</sup>。据粗略估计, 每年由风沙灾害造成的直接经济损失高达 540 亿元, 严重制约着社会经济的持续发展, 成为我国的重大生态环境问题<sup>[4]</sup>。为了实现可持续发展, 加快我国进入小康和全面建设小康社会的步伐, 我国政府长期以来对风沙灾害和沙漠化问题给予了高度重视, 组织气象、地理、生态和环境等不同领域的研究人员, 针对风沙运动的起因、发生、发展规律与防治措施等开展了广泛的研究, 以期遏制沙漠化扩展势头, 减缓其对人类生存造成的危害。

风沙灾害的成因是由多种因素综合促成的。正常土壤的土质在物理、化学和生物等多种因素联合作用下退化为沙质的过程及气象条件是风沙灾害产生的必要条件。而风沙灾害的发生与否以及其危害程度则是风与沙相互作用的结果。所以, 风沙灾害在本质上主要是由大气风力作用下沙粒的运动所造成, 而且风沙运动对土质变化的各类过程产生加速影响。20 世纪上半叶, 随着地理科学家和土壤科学家对风沙地貌与风蚀过程的重视, 风沙运动的机理研究也随之展开, 并被称之为风沙物理学。目前, 人们对于风沙运动的基本过程按其离开地面的程度有了大致的分类: (1) 在地表滚动的沙粒蠕移运动; (2) 在近地风沙流层内沙粒离开地面的跃移运动; (3) 在高空中尘埃的悬移运动。由于沙粒同时在可变沙质地表与空中运动, 还存在沙粒与地表的复杂能量、动量交换的碰撞运动, 因此, 不难看出, 研究沙粒的这些基本运动过程以及大尺度的风沙运动与长时效应等微、宏观特征是典型的力学课题。通过对这些基本问题的研究, 弄清土壤风蚀过程以实现对土壤风蚀程度和分布的定量评价, 揭示风沙地貌形成及其发育成因以实现对其自然现象规律性的合理认识与把握, 定量揭示沙尘暴的形成机制以实现对沙尘暴发生与发展的有效监测和预报, 合理设计风沙工程结构以实现对风沙灾害的经济、有效、长时的防治以及对其进行有效性的定量评估。这些研究不仅有助于人类对风沙灾害自然现象与规律的了解, 有助于风沙防治的科学决策和具体实施, 而且对力学学科的拓展, 对科学前沿共性问题的解决都是极其重要的。

有关风沙运动和土壤风蚀研究, 已有许多工作和进展, 文 [2] 和文 [5] 给出了详细、全面的总结。本文将主要结合作者在主持国家重点基础研究发展规划项目(973 项目)第二课题“风沙运动的力学机理与土壤风蚀定量研究”两年来的研究, 着重介绍风沙运动力学机理研究的主要发展阶段和最新进展概况, 并针对风沙运动力学机理研究中的现状, 提出若干关键力学问题, 以期更多的力学工作者了解并能致力于这一领域的研究, 在将研究工作瞄准具有国家重大需求的风沙环境问题的同时, 来推动力学学科的自身发展。

## 2 主要发展阶段

由于早期力学归属于物理学的原因, 风沙运动力学机理的研究传统上一直被称为风沙物理学。这一领域研究大致分为 3 个主要发展阶段。

首先是上世纪 30~50 年代基于野外观测和实验测量的基本研究阶段。在这一阶段风沙运动研究的主体框架得到基本形成。此研究阶段的直接推动是当时美国大平原和加拿大西部所发生的沙尘暴。研究的重要代表学者是 Bagnold。针对土壤风蚀研究的一些基本物理量, 如未起沙地表和起沙地表上方的风速剖面、沙粒运动的临界风力、沙粒跃移运动特征轨迹和单宽输沙率等, Bagnold 开展了大量的野外观测和风洞实验研究, 并借鉴了空气动力学的分析手段。Bagnold 于 1941 年发表的关于风沙物理学的著名论著<sup>[6]</sup>《The Physics of Blown Sand and Desert Dunes》, 为这一领域的研究奠定了基础。受 Bagnold 研究工作的影响, Chepil 等人对土壤风蚀问题开展了较为全面的研究工作<sup>[2]</sup>, 成为当时在土壤风蚀领域发表研究文章最早且最多的活跃学者。

风沙物理学研究发展的第二阶段是在上世纪 60~80 年代的数学建模与定量模拟阶段。此研究阶段的主要推动是由于航天技术的发展和人类对太空探测的兴趣。当时, 对于太空探测, 除了在地球上近距离直接观察外, 还需要对诸如月球、火星和金星等被探测星球的地貌形成过程能有所认识与了解。由此开始重视风成地貌和风沙运动定量模拟的研究。这一阶段的开创性代表学者是 Owen<sup>[7]</sup>。他在 Bagnold 等人已有工作的基础上, 借鉴流体力学的描述手段, 通过假定沙粒运动服从于单一简单形状的轨道, 提出了描述单颗沙粒运动的数学模型, 由此揭示了近地表风沙流边界层中沙粒运动的若干基本特征, 如: 沙粒的跃移高度正比于摩阻风速的平方,

并以此来度量风沙边界的厚度等。在 Owen 单一轨道假设的基础上, Ungar 和 Haff<sup>[8]</sup> 考虑了风沙边界层中沙粒对风速的反作用, 建立了风场 - 沙粒相互耦合的沙粒单一形状轨道的数学模型, 并得到了与 Bagnold 实验结果定性相同的起沙后风速沿高度分布曲线中心——“Bagnold 结”。1980 年, 联合国教科文组织和国际理论物理中心在意大利召开了一次有 80 多位学者参加的沙漠化物理过程讨论会, 所讨论的 9 个专题中有 5 个专题与风沙运动机理研究有关, 即: 沙粒移动和沙漠形成的机制, 风洞和野外试验, 空间技术的应用及风沙输移现代化仪器的应用, 基本参数的控制, 沙暴与尘暴。由此可以看出, 这一阶段的风沙运动的实验研究和手段得到了很大发展。

风沙运动研究发展的第三阶段是关于风沙运动微、宏观研究的关联与过渡受到重视的现阶段。此阶段的直接推动主要来自于联合国召开的第一次世界沙漠化大会, 而在 1985 年于丹麦召开的风沙物理学讨论会被认为是风沙物理学这一阶段开始的重要里程碑<sup>[5]</sup>。此次会议在全面系统总结风沙运动研究已有成果基础上, 开始将理论研究的注意力转向如何利用单个沙粒的微观运动特征去解释并模拟风沙运动宏观现象和规律。在这一阶段, 随机过程和数理统计等数学方法被引入风沙运动的研究。对这一阶段研究有着重要推动的主要研究者之一是美国学者 Anderson。他将自己博士论文的部分工作以题为“Simulation of Eolian Saltation”于 1988 年在著名杂志《Science》上发表。文中从单个颗粒撞击沙床的数值模拟结果归纳出被溅起的颗粒数、击溅速度与角度, 通过给出的击溅函数, 计算模拟了从沙粒起动到风沙流系统达到自平衡状态的全过程<sup>[9]</sup>, 从而开始了由风沙运动微观研究与宏观研究相连接的研究。1991 年, 国际著名力学期刊《Acta Mechanica》出版了题为“风沙迁移”(I. 机理与风沙迁移、II. 风蚀环境) 的专辑, 详细介绍了风沙运动研究的进展与存在的问题。这一专辑的首篇是 Anderson 的综述性论文“风沙运动研究的进展”。该文对风沙运动的描述方法和存在的问题, 特别是一些科学术语的物理意义以及有关的数学模型等进行了详细的解释和讨论, 并建议在沙粒和沙床两个尺度上加强实验与理论的研究, 以期获得具实质性的推动和进展<sup>[10]</sup>。与此同时, 采用元胞自动机方法来模拟沙波纹<sup>[11]</sup> 以及沙粒与床面的碰撞实验和理论分析等基础性研究也在展开。

由上述风沙运动研究的三个发展阶段我们可以清楚地看到人类对风沙运动这一自然现象的认识在不断清晰, 进而对其研究的主要问题正逐步明朗; 对风沙运动的实验模拟在不断发展, 进而对不同因素的影响在逐步加深认识; 对风沙运动的理论建模在不断完善, 进而理论预测的能力在逐步接近实际。

### 3 若干最新进展

本文作者在科技部国家重点基础研究发展规划(即 973 项目)“中国北方沙漠化过程及其防治研究”中主持了“风沙运动的力学机理与土壤风蚀的定量评价”课题的研究。围绕本项目的国家需求与科学目标, 本课题对单位面积输沙率、风沙带电规律及其风沙电场的分布进行了风洞实验测量与理论分析, 并就沙粒电荷量对沙粒运动的影响以及治沙工程结构等问题开展了理论研究。本节简要介绍这一课题执行两年来取得的主要进展。

#### 3.1 单宽输沙率的理论与实验研究

单宽输沙率是评价土壤风蚀程度的重要物理量。目前, 针对不同沙质从不同角度出发提出的单宽输沙率公式多达 50 余种。虽然他们在形式上差别不大, 但对同一问题的预测有时相差可达 3 倍左右。为了判别各理论预测公式的使用范围和有效性, 提高其实验测量值的精度就显得尤为重要。本课题研究小组利用中科院沙坡头野外风洞, 以腾格里沙漠沙为沙样对输沙率进行了实验测量, 在此基础上给出了单宽输沙率实验值的处理程序和拟合公式, 有效地提高了实验值的精度(见图 2)。通过对著名的 Bagnold 公式和 Kawamura 公式的检验得到: Bagnold 公式和 Kawamura 公式分别在摩阻风速  $u^* > 0.47 \text{ m/s}$  和  $u^* < 0.35 \text{ m/s}$  时与实验测量值吻合较好, 而当  $u^*$  在  $0.35 \text{ m/s} \sim 0.47 \text{ m/s}$  之间时, 两理论公式与实验值均有较大差异。有关这一实验方法与实验结果的论文已在著名物理学期刊《Physical Review E》上发

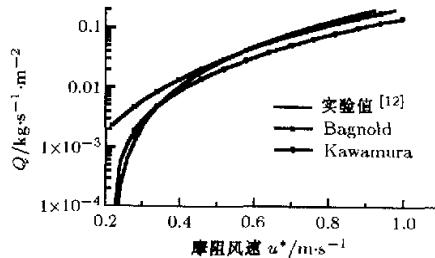


图 2 单宽输沙率实验结果<sup>[12]</sup>

表<sup>[12]</sup>。论文评阅人对此工作给予了充分肯定,认为“这是一项引人关注且完整的研究。作者们完成了一系列给人深刻印象的实验,并积累了大量好的数据。受本领域经典工作的启示,他们拟合得到了切实可行的公式。”

在理论模拟方面,(1)基于传统输沙率实验提出了沙粒起跳初速度函数分布的一种数值反演方法。在此基础上,通过模拟沙粒与气流相互作用的风沙流发展过程,得到的输沙率分布和风速廓线与实验测量十分吻合;(2)在考虑有关因素的随机分布基础上,建立了沙粒与沙床面二维随机碰撞的模型,由此得到的初速度分布函数与采用粒子速度测量仪(PDA)对风洞中沙粒运动的测量结果相吻合。

### 3.2 运动沙粒带电及其影响的研究

早在上世纪上半叶人们就证实了运动沙粒的带电现象。为了弄清运动沙粒的起电原因,已提出一些假说和推测。然而对沙粒带电一般规律及其对风沙运动影响的研究基本上没有深入展开。作者等人在中科院沙坡头野外风洞的风沙电实验测量发现:对于均匀沙(即:粒径分布在一相对小的范围内的沙),当沙粒直径小于250 μm时,运动沙粒带负电荷;当粒径大于500 μm时,运动沙粒带正电荷;对于混合沙,沙粒带电量与产生的风沙电场均强于均匀沙,这表明沙粒带电主要由不同粒径沙粒之间的碰撞摩擦所引起。其次,风沙流中沙粒的荷质比随沙粒粒径和风速的增大而减小,随高度的上升而增加;同时实验结果还表明:风沙流中的电场主要是由运动带电沙粒形成的,其电场强度方向垂直地面向上,与晴天电场的正方向相反,且其大小在一定高度内随风速和高度的增加而增大。通过采用风场与沙粒耦合作用数学模型进行的定量分析发现,沙粒带电对沙粒的跃移运动轨迹以及输沙率等都有明显影响,例如对起沙率的影响见图3所示。相关研究工作<sup>[13]</sup>已被地学国际权威期刊《Journal of Geophysical Research》接收发表,论文评阅人认为“这一研究处理了一极其重要的课题,并且是关于颗粒电荷连接临界风速与输沙率标准方程具有重要解释的少有研究之一。在这一论文中,展现了许多极其重要的贡献。”“这一论文的确包含原创性的内容,新的结果主要有在跃移粒子上电荷的测量与电荷对粒子运动的影响。”“这一论文在阅读上是相当有趣的,并且对于陆地与行星(如火星)表面大气层里的尘土跃移计算将是有用的。”

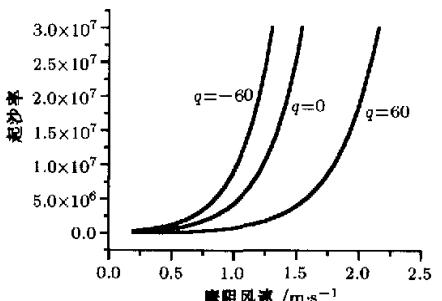


图3 沙粒带电对起沙率影响的模拟结果<sup>[13]</sup>

目前,对沙尘暴的监测主要是通过遥感方式进行的。在20世纪70~80年代,人们主要通过实验测量和理论分析来研究电磁波穿过沙尘暴的散射衰减程度。然而,实验测量的衰减值远远高出传统散射理论的预测值,有时竟高出30倍左右。导致这种差别的原因一直没有弄清。作者等人在考虑沙粒的局部带电后,不仅给出了与实验测量相一致的电磁波散射衰减的理论预测值,而且从理论上揭示了通过传统的电磁波衰减实验与荷质比实验来给出沙粒带电量的分布方式<sup>[14]</sup>。

### 3.3 风沙工程设计参数的力学研究

我国首次风沙工程设计是为了确保穿越腾格里沙漠的包兰铁路的畅通。随后,在沙漠腹地国防与石油开发等工程的推动下,穿越沙漠的公路与铁路也随之增长。1995年通车的塔里木石油公路,成为世界上最长的穿越沙漠的高等级公路。为了保证这些交通枢纽的通畅,我国的治沙研究人员摸索出许多成功的固沙、疏沙、阻沙、导沙经验,如用麦草铺成草方格在公路、铁路两旁形成固沙带,在固沙带前沿设立高立式栅栏作为阻沙措施以减少固沙带前沿积沙等。图4为栅栏的实物照片,用于保护铁路交通等基础设施减轻风沙灾害的影响。为了从机理上解释并揭示出这些治沙工程的有效性,许多学者



图4 防风沙栅栏的实物照片

从改善地表粗糙度的角度对机械治沙工程的工作原理进行了解释与阐述<sup>[15]</sup>,但对工程中关注的设计参数,目前仍然主要依赖经验摸索来获得。

作者等人从风沙运动的力学基本原理出发,对目前使用较为广泛的一类治沙工程如:草方格和栅栏,给予了初步的理论分析。对于草方格,我们根据实验测得的草带流谱图中每一草带后的流场均有旋涡存在这一事实,提出了一种单排理想涡列模型来模拟实际风沙流场,经过一定简化(如忽略麦草的弹性和摆动、气流为无黏不可压流体等)后,给出了麦草高度与草格宽度之间最佳关联的解析公式。该公式不仅简洁明了、易于工程应用,而且与实际经验结果吻合较好<sup>[16]</sup>。例如:实际经验认为当芦苇沙障的出露草头高度为18 cm~20 cm,草格宽度在100 cm时的固沙效果较好。而作者等人的这一理论公式给出的草格宽度最大值在97 cm~108 cm之间;又如:当麦草沙障的出露草头高度为13 cm时,实际经验得到草格宽度应在75 cm左右,而作者等人的理论公式给出的值是70 cm。

对于横格型栅栏,通过对风载荷以及立柱的受力分析,得到了栅栏立柱的最小埋深量与栅栏孔隙度、栅栏高度和立柱间距以及沙粒粒径之间的解析关系式;同时,对此类栅栏的流场进行了数值计算,给出了栅栏的开孔数和孔隙度对流场影响的一般规律<sup>[17]</sup>。这些研究为相关的治沙工程设计提供了理论依据。

#### 4 若干关键力学问题

尽管有关风沙运动的理论与实验研究已在许多方面确实取得了不少进展,但由于风沙系统的复杂性,目前仍然有一些基础性问题未获解决。风沙运动研究的现状正如Anderson所指出:“在1985年之前有关风沙运动的研究仅仅是论证了研究风沙运动的重要性和必要性”;“在风沙运动研究中已有的风沙运动的定量化理论模型还远未达到对输沙率进行可靠预测的程度”;“同时还缺乏能够用于规范数学模型的有关风场和输沙率特征的可靠的实时测量”<sup>[10]</sup>。不仅如此,随着人们对非线性复杂动力系统特征研究能力的不断提高,以及对诸如沙粒带电规律及其影响的揭示,目前已认识到将风沙运动系统作为非线性、多场耦合、跨尺度复杂动力系统研究的必要性。为了建立起满足认识风沙运动规律实际需要的力学理论框架,作者认为还存在以下一些关键力学科学问题亟待展开研究。

#### 4.1 可控条件的风沙运动基本物理量实验测量与相似性问题

沙粒的基本运动形式一般认为有碰撞、蠕移、跃移和悬移四种,而运动过程可分为空气吸卷过程、沙粒跃移过程、粒-床碰撞击溅过程和对风场的修正过程。在目前的研究中,大多是将粒-床的碰撞过程简化为均匀二维床面上的二维圆盘粒子的碰撞,并且没有考虑碰撞和击溅过程中沙床改变对沙粒碰撞的影响;在对沙粒蠕移、跃移和悬移运动形式的研究中,还缺少对蠕移量进行合理的定量理论研究与精确的实验测量;跃移运动的流场方程大多是采用充分发展的一维N-S方程;在对沙粒悬移运动的理论描述方面,由于近床空气湍流运动模拟的困难和沙粒不能一直跟随空气运动的事实,使得难以准确计算沙粒悬移的浓度。而为了对沙粒基本运动提供合理有效的力学模型,需要开展可控条件实验,改进和提高目前已有实验测量的精度,建立风洞实验与野外观测的相似性模型,以获得完善风沙运动基本理论框架足够多的基本物理量的实验和测量结果。

#### 4.2 风沙流运动的理论框架与风沙微、宏观运动的跨尺度转换问题

风沙运动是典型的散体颗粒在气流场中的运动。由于散体颗粒物具有与连续介质明显不同的特性,如剪胀特性、粒径分选特性等,因此建立能描述大量沙粒在风场作用下的基本有效分析模式是目前遇到的一个棘手的理论问题。由于近地层风沙散体与气流和变边界沙质地表的相互作用,已有的风沙二相流或多相流的流体力学模型很难实现对风沙流的一些基本特性的较好地定量模拟;而基于颗粒动力学方程对风沙运动的定量模拟,虽然在理论上认为能够描述每一沙粒的运动,但由于宏观尺度上沙粒数量之庞大,给定量分析带来一定困难。另外,从单一沙粒的跃移运动微观描述到获得风沙流的输沙率、浓度分布等宏观特性,目前主要认为需要借助于击溅函数和沙粒初速度分布函数来确定。但问题是,除了通过较高精度和准确度的实验观测以获得击溅函数和初速度分布函数外,是否还有其他途径和手段?除此之外,沙尘暴内部结构特征是什么?无数单颗沙粒的运动是如何形成这种结构的?这些问题的解决对解释沙尘暴发生的力学机制和条件以及对沙尘暴的预测和预报是非常必要的。

### 4.3 风沙地貌形成与演化的定量模拟研究

沙粒的粒径一般在  $10^{-4}$  m 左右的量级, 而大量沙粒在风场作用下可形成不同的地貌图案如沙波纹、沙丘和沙山等, 其几何尺度可达  $10^4$  m 左右。在时间尺度上, 沙漠的形成与扩展也可跨越数以万年的历程。如何从理论上揭示和描述风沙地貌在不同几何与时间尺度上的基本规律和特征以及这些在不同尺度上的特征是如何转换与过渡的问题, 不仅是风沙运动力学机制研究的基础性课题, 也是对风沙地貌的形成与扩展规律给予解释和揭示的基本课题。弄清这些基本问题将有助于揭示风沙复杂系统的运动机制, 揭示风沙地貌形成的历史过程与现代过程以及其它星球地貌演变过程, 同时还将有助于防沙治沙工程的有效设计和评价。目前对风成地貌的定量模拟研究主要是采用元胞自动机方法进行的。虽然这一方法能拟合出沙波纹的形成, 但需要解决的关键问题是模拟规则中的控制参数与风沙运动的实际几何和物理参数的对应问题。唯有如此, 元胞自动机的模拟方法才可能得到实际应用。

### 4.4 风沙工程结构优化设计的力学原理

为了尽可能减小风沙对铁路、公路和农田的侵害, 目前采用的主要措施是在被保护区域附近建立诸如草方格和栅栏等风沙工程。由于问题的复杂性, 在风沙工程设计中, 基本上还没有可供实际设计的理论方法和有效性评估体系, 一般主要依赖于实际工程经验的摸索和积累。实际风沙工程涉及的区域范围大(如: 三北防护林等), 气象条件多变。这样, 如何设计经济、有效与长久的风沙工程结构一直是风沙研究工作者关注的课题。为此, 需要建立适用于不同气象与地理条件的, 能模拟宏观尺度复杂情况下的风沙运动系统的途径和手段, 并实现对风沙工程长时效应的定量分析。除此之外, 对在风沙灾害影响较强地区的工程材料设计, 使之有效防止沙割等破坏的发生, 也是值得研究的。

## 5 结束语

综上所述, 风沙运动作为典型的力学课题, 在围绕与风沙活动的自然现象、物理过程和工程问题展开研究的同时, 也存在自然科学前沿基础研究中的许多共性问题, 如跨尺度问题、复杂动力系统、本构理论和非线性多场强耦合等。其研究不仅需要实验测试手段和方法的创新, 而且也需要理论框架的构

筑和计算模式的凝练; 既涉及力学与其它学科的交叉, 也涉及力学自身各分支学科的融合。因此, 无论是从力学工作者结合国家目标的需求开展任务性研究工作的角度, 还是从结合本学科发展的需求开展学术性研究的角度, 风沙运动力学机理的研究都将是很好的切入点与结合点, 是力学学科的用武之地, 也是有可能形成新的学术思想、发展新的研究手段、产出创新性强的研究成果的新研究领域。

## 参 考 文 献

- 1 王涛, 陈广庭, 钱正安, 杨根生, 屈建军, 李栋梁. 中国北方沙尘暴现状及对策. 中国沙漠, 2001, 21(4): 322~327
- 2 威隆溪, 王柏麟. 土壤侵蚀的流体力学机制(II)——风蚀. 力学进展, 1996, 26(1): 41~55
- 3 夏训成, 杨根生. 黑风暴. 北京: 科学出版社, 1995
- 4 米昂, 苍耳. 沙尘暴与经济交锋. 生态经济, 2002, 5: 9~16
- 5 董飞, 刘大有, 贺大良. 风沙运动的研究进展和发展趋势. 力学进展, 1995, 25(3): 368~391
- 6 Bagnold RA. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Methuen London, 1941
- 7 Owen PR. Saltation of uniform grains in air. *J of Fluid Mech*, 1964, 20: 225~242
- 8 Ungar J, Haff PK. Steady state saltation in air. *Sedimentology*, 1987, 34: 289~299
- 9 Anderson RS. Simulation of eolian saltation. *Science*, 1988, 241: 820~823
- 10 Anderson RS, Sorensen M, Willetts BB. A review of recent progress in our understanding of Aeolian sediment transport. *Acta Mech*, 1991 (Suppl 1): 1~19
- 11 Anderson RS, Bunas KL. Grain size segregation and stratigraphy in aeolian ripples modeled with a cellular automaton. *Nature*, 1993, 365: 740
- 12 Zhou YH, Guo X, Zheng XJ. Experimental measurement of wind-sand flux and sand transport for naturally mixed sand. *Physical Review E*, 2002, 66: 021305
- 13 Zheng XJ, Huang N, Zhou YH. Laboratory measurement of electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on sand saltation movement. *Journal of Geophysical Research*, 2003 (in press)
- 14 He QS, Zheng XJ, Zhou YH. Research on the theoretical prediction of the electric field generated by wind-blown sand. *Key Engineering Materials*, 2003, 244: 583~588
- 15 凌裕泉. 草方格沙障的防护效益. 见: 流沙治理研究. 银川: 宁夏人民出版社, 1980. 49~59
- 16 王振亭, 郑晓静. 草方格沙障尺寸分析的简单模型. 中国沙漠, 2002, 22(3): 229~232
- 17 Wang ZT, Zheng XJ. A numerical simulation of fluid flowing through a windbreak. *Key Engineering Materials*, 2003, 244: 607~612

(下转第 11 页)

- 题. 机械强度, 2001, 23(4): 393~401
- 11 Guido C. Monotonic and cyclic testing of thin film materials for MEMS applications. [Dissertation], Stanford University, 1999
- 12 Zhang X, Zhang TY, Zohar Y. Measurements of residual stress in thin films using micro-rotating-structures. *Thin Solid Films*, 1998, 335(1-2): 97~105
- 13 Van Spengen WM, De Wolf I, Knechtel R. Experimental one-and two-dimensional mechanical stress characterization of silicon microsystems using micro-Raman spectroscopy. In: Vladimirs Y, Coane PJ, Eds. Materials and Device Characterization in Micromachining III, Proceeding of SPIE, Santa Clara: SPIE, 2000: 132~139
- 14 Tsou CF, Fang WL. The effect of residual stresses on the deformation of semi-circular micromachined beams. *MEMS-voll, Microelectromechanical System*, ASME 1999: 347~353
- 15 Dunn ML, Zhang YH, Roy JM, et al. Nonlinear deformation of multilayer MEMS structures. *MEMS-voll, Microelectromechanical System*, ASME 1999: 75~79
- 16 傅卫平, 方宗德. 微系统动力学中的若干非线性问题. 力学进展, 2002, 32(1): 17~25
- 17 Tadigadapa S, Najafi N. Reliability of Microelectromechanical System (MEMS). In: Rainesham R Ed. Reliability, Testing and Characterization of MEMS/MOEMS, Proceedings of SPIE, Vol. 4558, SPIE, 2001: 197~205
- 18 温诗铸. 纳米摩擦学. 北京: 清华大学出版社, 1998
- 19 白春礼, 田芳, 罗克. 扫描力显微术. 北京: 科学出版社, 2000
- 20 赵亚溥, 王立森, 孙克豪. Tabor 数、粘着数与微尺度粘着弹性接触理论. 力学进展, 2000, 30(4): 529~537
- 21 王立森, 赵亚溥. 表面粗糙度对微结构粘附的影响分析. 摩擦学报, 2002, 22(4z): 339~343
- 22 Sniegowski JJ. Multi-level polysilicon surface-micromachining technology: application and issues. In: ASME 1996 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 1996. 17~22
- 23 余寿文. 复杂微力-电系统的细微尺度力学. 力学进展, 1995, 25(2): 249~259

## RESEARCH ON SEVERAL MECHANICAL PROBLEMS IN MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS

ZHANG Xiangjun MENG Yonggang WEN Shizhu

(State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** This paper reviews the state-of-the-art of researches on several solid mechanics problems in Microelectromechanical Systems (MEMS), including the basic mechanical properties of materials, mechanical analysis of microstructures, failure analysis of microsystems and actuating mechanisms of microsystems. Different kinds of acting forces, multi-factor interactions, multi-disciplinary nature and non-linearity due to the scaling effect and surface effect are emphasized, and the future work in this field is suggested.

**Key words** MEMS, solid mechanics, scaling effect, surface effect

(上接第 6 页)

## SOME KEY PROBLEMS IN THE RESEARCH OF WIND-BLOWN SANDS

ZHENG Xiaojing ZHOU Youhe

(Department of Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** This paper briefly reviews the latest advancements of investigation on mechanism of wind-blown sands with respect to sand desertification and/or sandstorm which becomes an extremely serious environmental problem and to which Chinese government and international communities have been paid a great attention. Some important topics are put forward for future researches on the mechanism of wind-blown sands.

**Key words** wind-blown sand movements, research of mechanism of sand motion, key scientific problems