

蔽日黄沙迥不同 神奇静电匿其中

——漫话沙尘中的静电现象

李兴财^{1,2} 刘丹丹¹

(1 宁夏大学物理电气信息学院 750021, 2 宁夏沙漠信息智能感知重点实验室 750021)

沙尘对人类的危害主要体现在沙尘天气。沙尘天气,是指大量沙或尘被风吹起并随气流进入空中造成大气浑浊的现象。按照能见度(人眼能见的最远距离)大小可分为浮尘(能见度小于10 km)、扬沙(能见度在1~10 km)、沙尘暴(能见度小于1 km)和强沙尘暴(能见度小于500 m)四类。图1展示了国内两城市遭强沙尘暴袭击场景。沙尘天气的危害极其严重,如降低空气质量,毁坏公共设施和农田,影响交通及人类生命安全,导致呼吸系统疾病暴发;影响太阳辐射,导致区域气候异常;影响无线通讯信号的传输,甚至可能导致地外星球探测机器人暂时“失踪”。为此,诸多科学工作者从自己的专业角度出发,针对沙尘暴的危害与防治开展了大量科学研究。例如:部分学者基于力学、物理学、大气科学等学科理论分析沙尘天气的发生机理及其防治方法,另有部分学者也致力于就沙尘天气对区域气候变化的影响机理、沙尘暴的病理学研究,而力学、地理学和环境科学等学科的科研人员致力于沙尘暴治理的工程技术研究,等等。

随着研究的深入,一个古老而又神秘的现象走进人们的科研视野:接触起电。

接触起电,是指两个物体(可为同种材料,也可为相异材料)经静态或动态式接触并且分离后分别携带等量异号电荷的现象。我们熟知的摩擦起电即为动态接触起电的例子。英国菲利普斯爵士于1910年就注意到沙粒与其他物质相接触后会带有电荷^①,而拉奇(Rudge)的实验研究发现^②:沙粒间的相互接触也会导致沙粒带电,并影响大气电场分布,如沙尘暴期间测量到的大气电场远大于晴天大气电场,且电场方向发生反转等。后续研究不断发现:沙尘跃移层(较强风将地表沙尘颗粒吹起而形成的携沙层)内电场强度亦远大于晴天大气电场强度;沙尘暴期间甚至会发生电火花现象;直升机在沙漠地表降落中也可能因为沙粒带电而发生电火花现象等(图2)。自此,沙尘颗粒在运动过程中携带静电荷的现象走进人们的视野,并将其定义为“风沙电现象”。下文我们将从风沙带电现象的实验研究、物理机理、沙粒带电现象的



(a) 青海格尔木

(b) 甘肃民勤县城

图1 特强沙尘暴来临(图片来源: http://image.fengniao.com/slide/326/3262573_4.html)



图2 与沙尘相关的静电放电现象。(a)尘卷中的静电放电(b)沙漠地表降落中的直升机(图片来源: Xiao-Jing Zheng (2013). “Electrification of wind-blown sand: Recent advances and key issues”. The European Physical Journal E, 36:138)

危害及其静电能的利用等方面分别介绍。

1. 沙粒带电现象的实验验证与认识

实验是人类认识未知世界的基本手段。关于运动沙粒携带电荷现象的认识也起源于一些简单的实验测量。如用主要成分与沙粒相近的玻璃棒和滤纸进行摩擦,并通过验电器及法拉第筒等设备对玻璃棒的带电情况进行测量,或者通过空气喷溅方式将沙粒卷起,进而测量大沙粒和小沙粒的带电情况等。相关实验使得人们对沙粒带电现象有了基本认识,如大沙粒总是趋向于带正电,而相对较小沙粒更易带负电;同时科学工作者发现:大气压强、环境温度、湿度、颗粒表面质地、洁净度等均会对颗粒电荷量产生影响。不过由于实验条件的限制,相关研究更趋向于定性的认知。随着科学实验手段的进步和发展,部分学者发现沙粒带电电荷的极性与自身粒径有关,即:大沙粒带正电,小沙粒带负电。如格瑞莱等人^③通过分析风洞实验数据认为:决定沙粒携带电荷极性的临界粒径为 $60\ \mu\text{m}$ 。后来的研究也表明:对不同地区的沙样,其临界粒径是有所不同的。如:兰州大学的黄宁、郑晓静教授等人^④在中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠实验站通过风洞试验发现,沙粒粒径小于 $250\ \mu\text{m}$ 时带负电荷,而当粒径大于 $500\ \mu\text{m}$ 时带正电荷。另外,带电符号与颗粒表面性质(如是否含有杂质等因素)有关。中国科学院兰州沙漠研究所屈建军研究员^⑤在风洞中模拟了不同含水率沙尘形成的沙尘暴的运动,发现:随着沙粒含水率增加,

电场先急剧增加后迅速减小。需要特别指出的是,上述有关沙粒带电量的测量都是获得平均值。由于实验技术、仪器等客观因素的限制,对于单个沙粒的带电量以及其与粒径、风速、温度、湿度等因素的量化关系,至今还无法从实验测量上得到。即便如此,已有实验结果对于风沙电现象的认识有着积极的推动作用,并进而导致了一些有关其物理机制的猜想。

2. 沙粒带电现象的物理机制

在人们对沙粒带电现象有一定认识之后,关于沙粒带电机理的问题开始成为人们关注的重要课题。然而,由于实验测量水平以及实验仪器的限制,人们无法对沙粒带电过程进行直观的、定量的测量,所以在最初几年里,对沙粒带电机理的研究仅仅停留在实验测量结果基础上的各种推测和假设中。卡耐等人^⑥将众多的物理解释归纳为以下7种:(1)大气电场对沙粒的极化作用(极化感应起电);(2)沙尘暴中沙粉尘的不规则运动产生的摩擦接触(摩擦起电);(3)两种不同材料的物质相接触,在离开时会使两者都带电(接触起电);(4)晶体裂解为多块时,各部分都会带上电荷(晶格裂解);(5)光子撞击或宇宙射线中的带电粒子入射到沙粒的表面(带电离子吸附);(6)晶体加热后会在晶轴的两端产生异号电荷(热电效应);(7)晶体受到应力后会在两端积累电荷(压电效应)。下边我们将分别对它们进行阐述。

(1) 大气电场的极化感应作用

晴天大气中始终存在方向向下的垂直电场,这就

是大气电场。在晴天无云的条件下，近地层大气电场强度通常大约为 $100 \sim 200 \text{ V/m}$ （高空电离层的静电场约 500 V/m ），其强度会随地形变化而有所改变。由于大气电场的极化作用，被风吹起的沙尘粒子发生电极化，在粒子上半部分带有负电荷，下半部分带有正电荷。当两个粒子在空中发生碰撞时导致上面小球的正电荷与下方小球的负电荷发生中和，当再次分离后由于粒子自身正负电荷量不再相等，从而导致两粒子带电。其物理过程类似图 3。这种假设可以很好的解释“空中沙粒带负电”的实验事实，但是无法解释风速、温度、湿度对沙粒带电量的影响，因此它应该属于次要因素。然而，这种解释在雷暴起电研究中有着重要应用。

(2) 固体间的摩擦起电

相对运动的两种物质在摩擦接触后会带电的现象早被人们发现，如用丝绸摩擦过的玻璃棒带有正电荷，用毛皮摩擦过的橡胶棒会带有负电荷。关于不同材料经相互摩擦后是带正电还是带负电的问题，可以通过材料摩擦起电序列来确定（见表 1）。对于其物理机制可使用“功函数差”理论进行解释。“功函数”是指把一个电子从固体内部恰好移到此物体表面所需的

最少的能量。不同种材料自身对其内部电子的束缚力不同，因此导致材料的功函数一般不相同。在两种材料接触过程中电子从功函数小的一侧向功函数较大的一侧移动，从而导致它们带电。在某些时候发生交换转移的不是电子，而是其他类型的一些离子，如 H^+ 、 OH^- 离子等。然而对于同种材料间的摩擦起电，其物理机制还不是很清楚。目前主要是将介质表面污染考虑进去从而来解释此现象。由于介质在未摩擦之前会在周围的环境中受到一定程度的污染，介质和污染物之间因接触而产生了偶电层。当两介质发生摩擦时，会使得摩擦区域内一部分污染物脱离介质表面，从而该区域内的偶电层使得介质带电。图 4 中我们给出了一种常见的摩擦起电现象。

(3) 静态接触起电机理

静态接触起电理论认为：由于不同种材料的功函数一般不同，因此在接触时电子或离子发生非对称的交换转移，从而在材料分离后表现出带电的现象。其物理过程如图 5。这种理论一般被用于解释金属与金属、金属与半导体、金属与绝缘体之间的接触起电现象。然而，对于同种材料组成的颗粒，如沙粒，其功函数是相同的，因此基于传统意义的静态接触起电理

表 1 常见材料的摩擦起电序列

人体	玻璃	云母	毛织品	毛皮	丝绸	铝	纸	棉花	钢铁	木头	硬橡胶	聚酯薄膜	聚乙烯	聚氯乙烯	聚四氟乙烯
----	----	----	-----	----	----	---	---	----	----	----	-----	------	-----	------	-------

（上表中越靠左侧的物品，越易产生正电荷；反之，越靠右侧，越易产生负电荷）

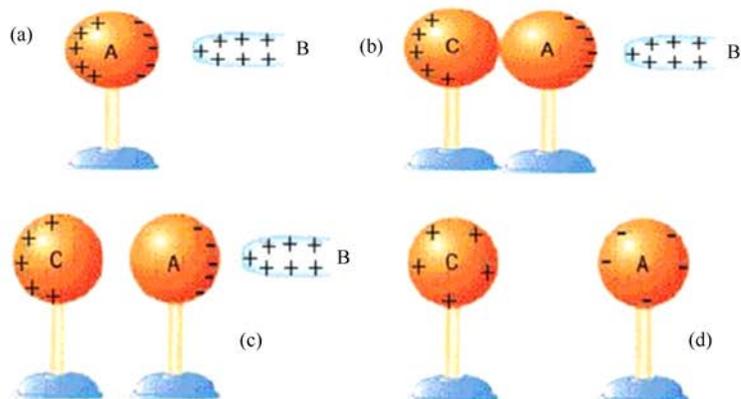


图 3 带电球体的感应起电过程（A、C 为初态不带电的球体，B 为用于产生环境电场的带电体）（图片来源：<http://home.phy.ntnu.edu.tw/~eureka/contents/elementary/chap%206/6-1-1.htm>）

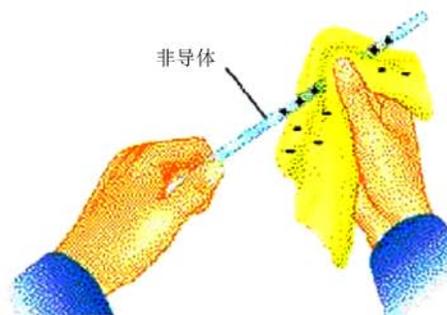


图 4 摩擦起电过程（图片来源：<http://home.phy.ntnu.edu.tw/~eureka/contents/elementary/chap%206/6-1-1.htm>）

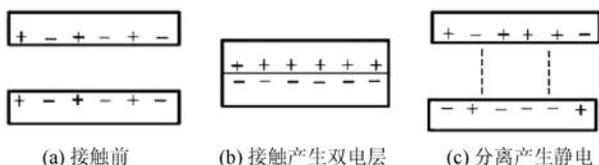


图5 固体的接触起电过程 (图片来源: <http://zy.swust.net.cn/12/1/jdaqjs/jidian/c2c6/868.html>)

论来解释沙粒间的接触起电现象, 只能得到“沙粒虽经接触仍不会发生带电”的结论, 这显然与事实不符。

(4) 晶格裂解

这种理论认为: 由于颗粒表面缺陷等原因使得其表面电荷非均匀分布, 在相互碰撞接触时由于粒子易碎、易产生裂缝等原因, 使得颗粒带电。如液体的喷溅、地震时因岩石层断裂而产生的电场等。其物理过程见图6。

(5) 带电离子的吸附

大气由于被宇宙射线的照射等因素作用会发生电离从而产生一定浓度的带电离子, 这些离子在空气中可自由运动。另外, 在大气电场的感应作用下, 地面一般带负电。对于干沙(湿度很小, 而非绝对干燥)构成的床面, 当风将地表沙粒吹起, 沙粒开始选择性捕获周围带正电的离子, 而排斥那些带负电的离子, 当沙粒自身携带的负极性电荷被捕获的正电荷全部中和后, 空中带负电的离子开始被沙粒吸附, 因而导致在沙尘暴实验中探测到沙粒带负电。关于带电离子吸附的物理过程见图7。然而近地层空气带电离子浓度较小, 且这一机制无法解释沙粒带电量随风速增加而增加、随沙粒湿度增加先增加后减小的现象。因此, 通常认为其是次要因素。

(6) 热电效应

所谓的热电效应, 是当受热物体中的电子(空穴),

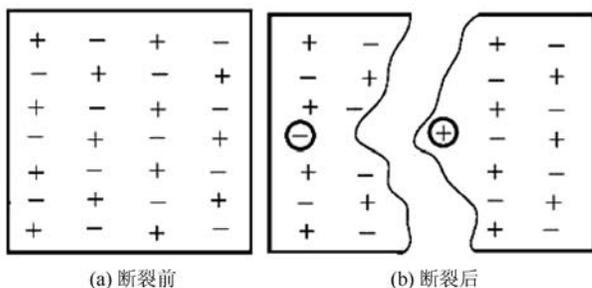


图6 固体的断裂起电过程 (图片来源: <http://zy.swust.net.cn/12/1/jdaqjs/jidian/c2c6/868.html>)

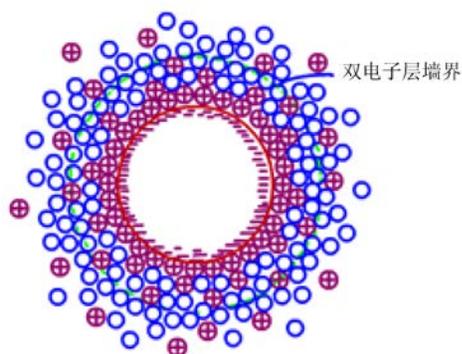


图7 带电离子吸附 (图片来源: <http://jpkc.hnadi.cn/2010jpkc/csu/wjclcx/jianggao/ch05-3.htm>)

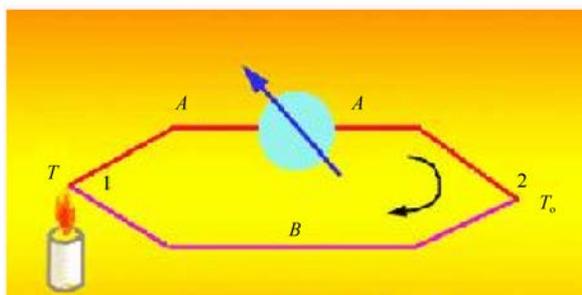


图8 热电效应 ($T > T_0$) (图片来源: <http://www.baike.com/wiki/%E7%83%AD%E7%94%B5%E6%95%88%E5%BA%94>)

因随着温度梯度由高温区向低温区移动时所产生的电流或电荷堆积的一种现象。其物理过程见图8。明矾石、石英等都具有这种效应。实验发现, 当加热石英晶体至 100°C 时会在晶轴两端产生等量异号电荷。在典型的沙漠气候条件下, 沙漠表层沙粒的温度几乎可以达到这一值。但是热电效应依赖于沙粒温度, 与沙粒运动导致电荷量剧增的事实无法联系, 而且也无法解释湿度、粒径等因素对沙粒带电量的影响。所以, 对于沙粒带电现象的解释, 它也是次要的因素。

(7) 压电效应

压电效应可分为两类: 正压电效应和逆压电效应。某些介质在沿一定方向上受到外力作用而变形时, 其内部会发生极化现象, 同时在它的两个相对表面上出现正负相反的电荷。当外力去掉后, 它又会恢复到不带电的状态, 这种效应称为正压电效应。当作用力的方向改变时, 电荷极性也随之改变。相反, 当在电介质极化方向上施加电场, 这些电介质也会发生变形, 电场去掉后, 电介质的变形随之消失, 这种现象称为逆压电效应, 或称为电致伸缩现象。其物理过程见图9。

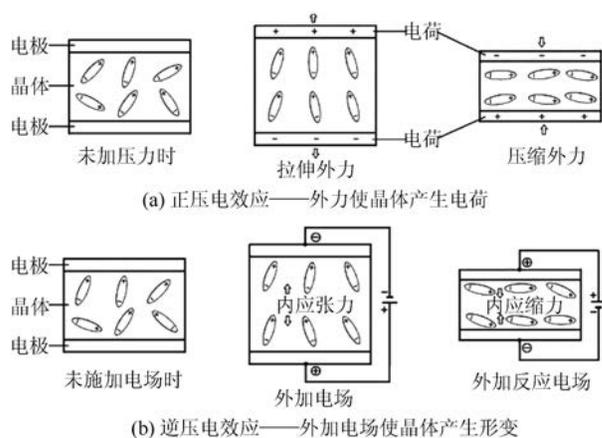


图9 压电效应 (图片来源: <http://image.baidu.com>)

石英作为一种半导体,其自身也具有压电效应。已有实验表明,压电效应对沙粒带电量的贡献小于20%,而且表面水膜的存在明显减小它的带电量,这与“随沙粒含水率增加,电荷量先急剧增加然后急剧减小”的实验结果不符。由此可见,压电效应在沙粒带电现象中也是次要的。

综上所述,摩擦起电机制是最可能接近事实的猜测,且已获得部分学者的认同。不过最终确定还需要通过实验来验证。究其本质需要回答以下问题,如沙粒摩擦碰撞过程中什么离子发生交换转移,为什么会发生非平衡交换,环境因素如何影响这种微观过程等。

3. 沙粒带电现象的危害

在一定条件下,带电颗粒物会因为“打火花”等现象对一些工业生产或运输活动产生异常严重的影响。如石油液滴带电可能导致运输管道爆炸,粉料加工车间及煤矿可能因为粉尘浓度过大而发生爆炸等。那么,沙粒带电会对人类社会的生产和生活产生负面影响吗?答案是肯定的。已有研究表明:由于运动沙粒携带大量静电荷,当沙尘浓度较大时会产生强度高达200 kV/m的静电场,在某些条件下甚至出现打火现象。带电沙尘粒子更容易吸附在高压线路甚至一些电气设备的绝缘子上,使得这些电气设备容易发生表面击穿,导致相关设备的损坏。同时,带电沙粒会显著增强对电磁波的散射、吸收或去极化(见图10-11,其中 ϵ 是颗粒表面电荷密度, Q_m 是沙粒携带电荷量与其质量的比值。Mie理论和Rayleigh理论是计算球体颗粒电磁散射性质的常用方法),从而影响无线通信设备的正常运行^⑦。

随着科学技术的进步,人类对地外星球的探测活动日益兴起。相关研究发现:月球、火星等地外星球表面同样存在沙尘活动现象。在地外星球探测中,如登月、火星探测等科研活动中,必然同样会面临风沙灾害的威胁。如带电沙尘颗粒沉降或吸附在仪器太阳能板表面,从而降低太阳能板的发电效率,影响系统的正常运行;微小沙尘可能进入相关机械的“关节”处,进而导致相关系统无法正常运行,甚至彻底瘫痪等。

除此以外,沙尘颗粒带电对于沙粒运动过程同样具有重要的影响。如由于静电场对带电颗粒具有一定的作用力,因此沙粒表面电荷会使得沙粒更容易被风吹起而进入空中进行远程运输,会增加或减小沙粒跳跃的距离(与表面电荷的正负极性有关),会改变单位体积内的沙尘输运量等,从而影响沙漠化扩展的速度等。

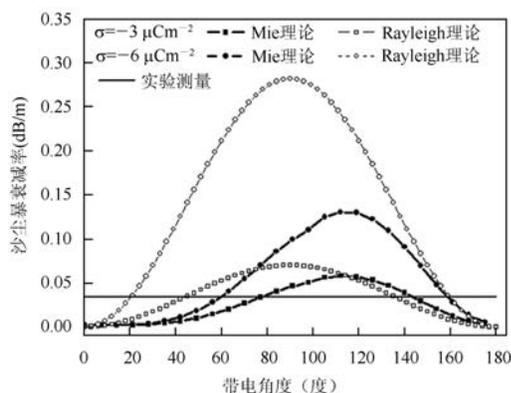


图10 沙粒带电对电磁波衰减率的影响 (图片来源: 李兴财, 2011, 沙粒局部带电对其电磁散射特性的影响及其应用, 兰州大学博士学位论文, 甘肃兰州, 中国)

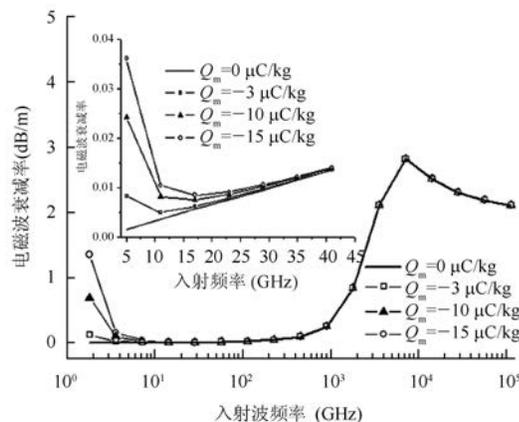


图11 沙尘暴中不同频率电磁波的衰减率 (图片来源: 李兴财, 2011, 沙粒局部带电对其电磁散射特性的影响及其应用, 兰州大学博士学位论文, 甘肃兰州, 中国)

4. 风沙静电能的利用

现代社会能源危机日益严重，尤其是电、煤炭、石油等化石能源短缺，严重制约了社会发展。那么风沙电现象中的静电能是否可以用来服务于人类社会？实际上，早在 20 世纪就有许多有关静电发电机的发明出现。静电发电机的基本工作原理是：基于环境静电场使得导体内产生持续的电子流，或者在两极板上储存大量正负电荷，一旦接通形成回路即可产生持续电子流，从而作为电源用于某些特殊工业元件或工业制造中。但是限于当时的科技手段，相关设备储存的能量很难满足实际应用的需要。随着科技的进步，高

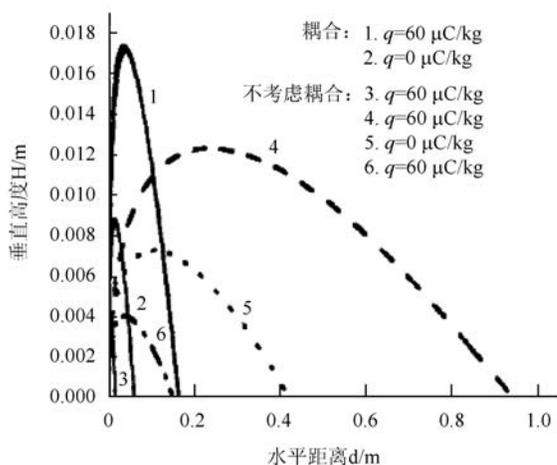


图 12 沙粒带电对其运动轨迹的影响（图片来源：黄宁，2002，沙粒带电及风沙电场对风沙跃移运动影响的研究，兰州大学博士学位论文，甘肃兰州，中国）

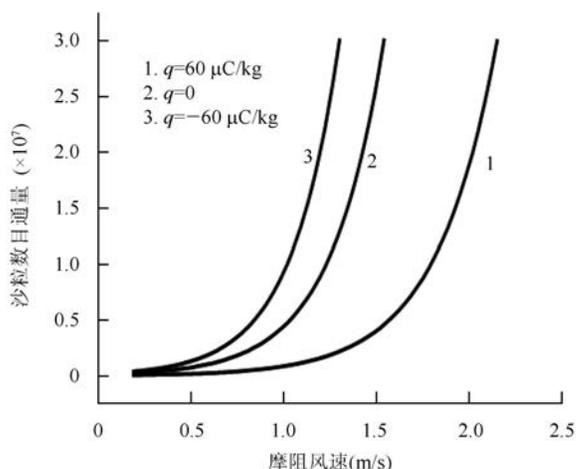


图 13 沙粒带电对输沙通量的影响（图片来源：黄宁，2002，沙粒带电及风沙电场对风沙跃移运动影响的研究，兰州大学博士学位论文，甘肃兰州，中国）

介电常数及纳米级新型材料不断出现，尤其是超级电容器的发明，静电发电机技术也得到一定的发展。风沙运动过程中产生的静电场强度最高可达 300kV/m。通过相关设备将如此高强度静电场能量储存起来并加以利用，或许不再是一个遥远的梦想。

由于沙尘粒子会对电磁波传输过程产生散射，吸收或去极化等影响，因此对于工作在沙尘环境下的无线通讯系统的设计及其正常使用，雷达、PIV（粒子图像测速法）、军事或民用卫星等高科技仪器设备的结果反演及校正等^⑧，均建立在对沙尘环境下电磁波传播特性具有较为准确的认识基础之上。风沙电现象早在 1913 年就被人们所发现，但是对于其发生机理及其与电磁波相互作用的机理、沙尘粒子对光学仪器及无线通讯系统正常运行的影响等至今仍是未解之谜。随着沙漠资源开发以及地外星球资源和文明探测等科技活动的开展，沙尘粒子在运动过程中携带大量静电荷的现象必将引起越来越多科技工作者的关注。在未来的发展中，随着一些高科技实验仪器及先进实验方法的引入，这些方面必将产生重大突破。与此相应，相关理论成果的突破也必将推动静电分选、静电复印、粉料加工与输运、静电除尘、静电去污等工业生产活动的发展。

主要作者简介：李兴财：男，讲师。目前工作于宁夏大学物理电气信息学院，宁夏沙漠信息智能感知重点实验室研究骨干。主要从事风沙电现象及其与电磁波相互作用机理方面的研究，相关研究获得宁夏自然科学基金重点项目、宁夏科技支撑计划项目及国家自然科学基金青年基金项目的资助。

① Phillips, C. E Phillips, C. E. S. (1910). Nature 84: 255-261

② Rudge, W. A. D. (1913). Nature 91: 31-32

③ Greeley, R. and R. Leach (1978). In: Rep Planet Geol. Program, 1977-1978, NASA TM 79729: 236-237

④ 郑晓静, 黄宁 (2004). 力学进展 34(1): 77-86

⑤ 屈建军, 言穆弘等. (2005). 中国科学 D 辑 33(6): 593-601

⑥ Kanagy S.P., C.J.Mann(1994). Earth Science Review. 36, 181

⑦ Xie Li, Li Xingcai, Zheng Xiaojing (2010). Applied optics, 49(35): 6756-6761

⑧ Xiao-Jing Zheng (2013). The European Physical Journal E, 36:138