

# 沙尘暴起电的风洞模拟实验研究\*

屈建军 言穆弘 董光荣 张鸿发 矫瑞平 拓万全  
赵爱国 肖正华 李芳 杨保

(中国科学院寒区环境与工程研究所, 风沙物理与工程实验室, 沙坡头开放站, 兰州 730000)

**摘要** 沙尘暴过境经常有放电现象并对人类造成危害。在回顾国内外沙尘暴起电研究现状的基础上, 利用大型风洞对沙尘暴中蠕移跃移扬沙、悬移扬沙和加水悬移扬沙的电场状况进行了模拟实验。根据测定结果, 对电场结构和形成机制作了分析讨论, 对电荷量和电场力分别进行了测量和计算。最后得出几点结论。

**关键词** 风沙结构 起电机制 风洞模拟

沙尘暴作为一种灾害性天气, 不仅以强大的风力和浓厚的沙尘给人类造成了巨大危害, 而且伴有很多放电现象。如, 高压电线火花放电、输电网跳闸、电子设备受干扰等。反映出沙尘暴过境产生电荷分离, 形成空间电荷结构, 并在导线上产生高电位, 国内野外观测到线路上的电位高达 2700V, 国外记录到几万伏。这种高压电位轻则影响通讯质量, 重则使信号中断和造成错误, 有时还击穿线路设备, 危害人身安全, 造成重大事故<sup>[1]</sup>。因而要重视沙尘暴起电现象的研究。

国外学者从 20 世纪初开始研究沙尘暴时就已注意沙尘暴起电研究<sup>[2]</sup>。Gill<sup>[3]</sup>发现沙尘暴天气过境, 地面有强电场, 发生电火花现象。Latham<sup>[4]</sup>在研究风暴雪片起电现象时, 提出沙粒也有类似起电现象: 即不同粒径沙粒之间不对称摩擦加热, 导致不同极性电荷转移输送, 大粒子带正电荷, 小粒子带负电荷, Grelley<sup>[5]</sup>又进一步实验给出 0.6 mm 临界值, 大于此半径的沙粒带正电荷, 反之带负电荷。Schmidt<sup>[6]</sup>在 12 m/s 风速的沙面上(离地 1.7 cm)测量到最大电场为 166 kV/m。一些学者还已注意到极性粒子的运动, 并作数值模拟研究<sup>[7,8]</sup>。我国自上世纪 70 年代才开始研究沙尘暴, 主要侧重于沙尘暴天气气候学特征以及防治措施等<sup>[9]</sup>, 对沙尘暴起电问题研究甚少。仅言穆弘等对与沙尘暴类似的雷电起电过程和电结构方面有过较多研究<sup>[10-12]</sup>, 黄宁等利用风洞作过一些风沙电实验和数值模拟研究<sup>[13]</sup>。但真正有关沙尘暴电结构的研究成果在国内外至今尚未见到正式报道。为了揭示沙尘暴的空间电结构和起电机理, 作者利用室内大型风洞开展了沙尘暴起电的模拟研究。

## 1 模拟实验的思路、装置和方法

沙尘暴过境出现的放电现象, 是由于气流运行中沙尘颗粒之间以及沙尘颗粒与地床面之间的电荷交换引起的。而沙漠地区这些不同粒径和浓度的沙尘物质又同时处于地表蠕移和不

2002-08-18 收稿

\* 中国科学院寒区环境和工程研究所创新项目(编号: 210027), 中国科学院知识创新项目(编号: KZCX2-304), 国家自然科学基金项目(批准号: 49971013), 国家重点基础研究发展规划项目(编号: 20000487)共同资助

同高度的跃移(扬沙)、悬移(浮尘)3 种运动状态。受室内条件限制, 要完整模拟沙尘暴这 3 种运动状态下的起电现象目前尚有困难。本实验分别模拟地表以上较低高度的沙物质蠕移、跃移和悬移的起电过程。为了更接近于野外沙漠地区沙尘暴物质的蠕移、跃移和悬移运动状态, 主要采用两种实验方案: 一是在风洞床面上铺一定厚度的沙层, 在一定风速下沙粒起动, 形成风沙流, 用以研究地表蠕移和跃移扬沙过程发生的电荷转移; 二是在风洞顶入沙口倒沙, 沙粒进入气流形成沙尘云, 以研究悬移扬沙过程产生的电荷转移。另外, 考虑到沙尘物质是水汽的凝结核。在沙尘暴自西北干旱区向东南半干旱、半湿润和湿润区运移过程中, 随着空气湿度的增加, 沙尘颗粒表面水分增多, 甚至导致降水, 伴生“雨土”、“雨沙”或“雪沙”天气。为了研究沙尘含水量变化对颗粒起电影响, 还作了加水悬移扬沙实验。

模拟实验是在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所风沙物理与工程实验室室内木结构的风沙环境风洞中进行的。风洞全长 37.78 m, 实验段长 16.23 m, 宽 1 m, 高 0.6 m, 风速连续可调, 最大风速可达 30m/s 以上。同时, 实验段床面可供铺沙形成风沙流, 洞顶供沙器可倒入沙尘物质, 形成沙尘云, 因而能满足模拟沙尘暴蠕移、跃移扬沙和悬移沙两种实验的基本条件。

实验布置如图 1 所示。在实验段下风向中心轴(距洞壁 50 cm 处)的垂直纵剖面上, 距扬沙口 8.3 m(1 号点)、11 m(2 号点)和扩散段出口 21 m(3 号点和 4 号点)处各布置 1 个电场感应仪。它们的感应面离床面高度分别为 45, 12.5, 107 和 17.5 cm。电场感应仪的这种布置, 主要是因为风洞实验段和扩散段流场情况不同(前者较稳定, 后者有湍流影响), 会有不同起电率, 故在这两个段各安置两个电场感应仪。同时, 由于运动沙尘起电, 在风洞实验段和扩散段内电场存在梯度, 所以在这两个段的电场感应仪安置在不同高度上, 以供分析比较。另外, 在 1 号点下方床面上放置一个积沙仪以测电荷量, 在 2 号点与 4 号点之间布设铜铝导线来测量电位差; 在离扬沙口 3.85 m 安置 1 个毕托管以测风速。

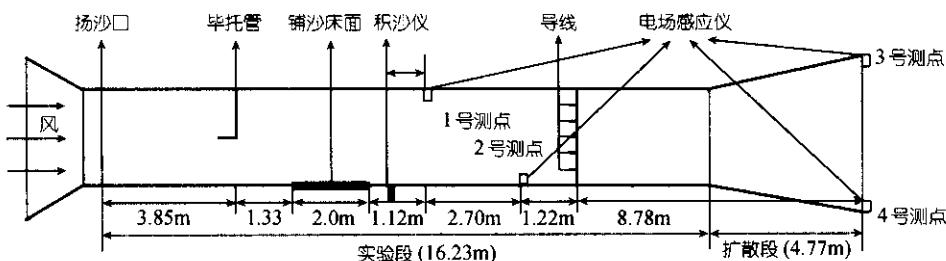


图 1 风洞实验段中心垂直剖面上实验仪器布置示意图(侧视)

其中, 洞底床面铺沙的蠕移、跃移扬沙实验, 采用 8, 12, 16, 18 和 22 m/s 5 种风速; 实验段铺沙前端距供沙器 5.18 m, 厚 2.5 cm, 长 2 m, 宽 0.9 m; 因为处于蠕移和跃移状态的主要沙、砾物质, 故试样采用的沙物质, 包括粒径分别为 0.1~0.2, 0.3~0.4, 0.4~0.5, 0.5~0.6 mm 的 4 种人工配制的均匀沙, 以及来自沙尘暴源区的两种混合沙: 民勤县沙丘沙( $d = 0.25\sim0.08$  mm)、沙坡头地区沙丘沙( $d = 0.315\sim0.1$  mm)。洞顶供沙的悬移扬沙实验, 采用 12 和 22 m/s 两

种风速。因为处于悬移状态的主要是一些细沙, 试样采用民勤沙丘沙( $d=0.25\sim0.08\text{ mm}$ )和新垦农田耕作沙土( $d=0.063\sim0.01\text{ mm}$ )两种原型沙土物质。加水悬移扬沙实验, 同样在洞顶供沙口倒入。试样仍然采用民勤沙丘沙和民勤耕作土; 含水量分别采用 0.5%、1% 和 2% 3 种; 风速采用 12 和 22 m/s 两种。为了保证数据精确可靠, 每种方案吹风 1~2 min, 重复实验 4~5 次; 在作蠕移、跃移扬沙实验时, 为了减少因风速变化引起沙面电场测量值的不稳定, 吹风前沙面上安置一个金属板覆盖物, 待风速稳定在某一测定值时, 再将金属板迅速移至沙面下方。

## 2 模拟实验结果分析与讨论

表 1 是风洞模拟沙尘暴 3 种实验方案电场测量值。表中值已扣去每次测量前的背景本底值。现对实验结果作如下分析讨论。

### 2.1 电场结构

由表 1 可见, 在所模拟的 3 种试验方案中, 除蠕移跃移扬沙实验中 1 号点 8~22 m/s 风速时 0.3~0.6 mm 粒径均匀沙和沙坡头沙丘沙少数电场为 0, 悬移扬沙实验中 12 和 22 m/s 风速时民勤沙丘沙和耕作土少数电场记录缺失外, 都测得性质与强度不同的电场, 并且绝大多数以负电场为主, 最高值达 -74 kV/m。晴天天气为正电场, 实验前风洞测得的背景电场也为正电场, 其值在 0.5~+4 kV/m 之间。显然, 风洞内这种负的强电场是由处于 3 种运动状态下的带电沙尘引起的。这一结果与黄宁等人<sup>[13]</sup>的实验结果比较一致, 也与野外沙尘暴天气地面经常测量到较强的负电场的事实基本吻合。例如, 作者曾在沙坡头站沙尘暴发生期间测到高达 250 kV/m 负电场(拟另文介绍)。因为沙漠地区的沙尘暴一般都同时由地表蠕移沙粒和跃移风沙流以及大气中悬移浮尘组成, 而这三部分运动物质都能形成负电场, 表明整个沙尘暴负电场是由这三部分运动物质形成的负电场共同迭加的结果。

但从表 1 也可以看到, 主要受下列因素影响, 其电场强度(绝对值)的变化也是很大的。

**2.1.1 沙物质运动状态** 蠕移跃移扬沙实验中, 在 8~22 m/s 5 种风速条件下, 6 种沙物质的电场极值为 0.0 和 -29.5 kV/m, 平均 +0.05~+18.13 kV/m。其中 12 和 22 m/s 风速条件下, 民勤沙丘沙电场极值为 +0.1 和 -29.5 kV/m。而悬移扬沙实验中, 同是 12, 22 m/s 风速的民勤沙丘沙, 电场极值为 0.0 和 -36.9 kV/m, 平均为 -0.2~+33.88 kV/m; 民勤耕作土电场极值为 0.0 和 -57.0 kV/m, 平均值为 +0.17~+45.3 kV/m。这表明, 在沙尘暴产生的过程中, 蠕移跃移扬沙的电场强度比悬移扬沙的小, 是否如此, 还有待更多实验和野外观测。

**2.1.2 风速** 蠕移跃移扬沙实验中, 同是 6 种沙样, 在风速由 8 m/s 逐步增至 22 m/s 的 5 种风速作用下, 1~4 号点测得的电场强度绝对值大多数都是相应增加的。其中以人工配制的 0.1~0.2 mm 粒径的细沙和颗粒较细的民勤沙丘沙(天然混合沙)表现最为明显(图 2)。而在悬移扬沙和加水扬沙实验中, 尽管都是民勤沙丘沙和耕作土, 加水量也相同, 但在 3 和 4 号点测得的电场值都是风速 22 m/s 比 12 m/s 的大。这表明, 沙尘暴形成和路经地区的风速越大, 沙尘暴的负电场也越强。

**2.1.3 沙物质粒度组成** 从人工配制的 4 种粒级沙样的蠕移跃移扬沙实验结果来看, 在 8~22 m/s 的 5 种风速下, 其电场强度总的以 0.1~0.2 mm 的细沙最高, 依次为 0.3~0.4 mm、0.4~0.5 mm 的中沙和 0.5~0.6 mm 的粗沙(图 3)。这表明, 沙尘暴形成和过境地区的地表沙物质越细, 所产生的电场强度就越大。

**2.1.4 含水量** 在 12 m/s 和 22 m/s 风速条件下, 民勤耕作土扬沙实验中(图 4), 3 号和 4 号点电场极值分别为 +13.6~+18.5 kV/m, +14.5~+18.5 kV/m 和 -9.9~+56.2 kV/m, -30.5~+57 kV/m, 当加水 0.5% 和 1% 之后, 其电场强度分别迅速增至 -30.5~+42.7 kV/m, -38.3~+40.7 kV/m 和

表 1 风洞模拟 3 种实验方案电场测量值/kV · m<sup>-1</sup>

风速	测点	沙样					
		0.1~0.2	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	民勤沙丘沙 (天然混合沙)	沙坡头沙丘沙 (天然混合沙)
床面铺沙蠕移跃移扬沙实验	1	+0.2	0.0	0.0	0.0	+0.1	0.0
	2	-1.4	-0.4	+4.7	+0.3	-0.5	+0.6
	3	-0.7	+0.1	+0.2	+0.3	+1.2	-0.1
	4	-1.1	+0.5	+1.3	-0.6	+0.7	+0.6
	1	+2.4	0.0	0.0	-0.1	+0.1	0.0
	2	-5.0	-3.3	-0.4	-0.9	-0.7	+1.6
	3	-5.4	-1.4	-0.5	-0.9	-1.2	-0.3
	4	-9.4	-5.3	-2.1	-1.7	-2.6	-2.1
	1	+2.0	+0.1	+0.1	0.0	-1.0	+0.1
	2	-15.5	-7.9	+8.0	-0.9	-0.8	-2.7
	3	-13.6	-3.3	-0.1	-0.1	-8.3	-10.0
	4	-26.3	-8.8	-4.5	-3.4	-10.0	-11.8
悬移扬沙实验	1	+2.4	0.0	0.0	0.0	-2.0	+0.1
	2	-17.6	-10.0	-1.0	+1.1	-2.0	-2.9
	3	-19.6	-4.0	-2.6	-2.2	-12.8	-9.7
	4	-29.0	-7.0	-7.8	-7.0	-23.0	-22.5
	1	+5.0	+0.1	+0.1	0.0	-1.0	+1.3
	2	-19.3	-12.1	-0.4	+0.4	-6.9	-1.7
	3	-24.4	-5.	-3.2	-5.0	-14.1	-10.0
	4	-29.5	-7.3	-8.0	-7.5	-29.5	-27.0
	沙样	风速/m·s <sup>-1</sup>	测点	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4
			1	—	—	0	-0.8
	民勤沙丘沙	12	2	—	—	-13.1	-12.4
			3	—	—	-5.3	-4.6
			4	—	—	-10.5	-8
			1	-6.6	-9	-2.7	-2
	民勤耕作土	22	2	-30.6	-5.2	-9.4	-23.5
			3	-14.9	-19.8	-21	-22.3
			4	--	-32	-35.2	-36.9
			1	0	—	—	0.2
加水扬沙实验	民勤耕作土	12	2	-5.9	—	—	-9
			3	18.5	—	—	13.6
			4	17.5	—	—	14.5
			1	0.2	—	—	0.1
	民勤耕作土	22	2	18	—	—	-13
			3	-9.9	—	—	-56.2
			4	-30.5	—	—	-49
				含水量			
	风速/ m s <sup>-1</sup>	测点	0.5%		1.0%		平均 值
			民勤耕 作土	民勤沙 丘沙	民勤耕 作土	民勤沙 丘沙	
	12	1	-1.5	-0.9	0.0	0.0	-0.4
		2	-6.5	-0.8	-11.2	1.4	-1.9
		3	-42.7	-1.72	-30.5	0.9	-15.0
		4	-38.3	-1.8	-40.7	-1.7	-24.5
	22	1	-2.9	-1.8	-5.70	0.0	-0.7
		2	-2.4	-10.1	-9.5	-1.6	-11.4
		3	-70.6	-19.5	-72.0	-3.2	-24.3
		4	-58	-21.3	-74.0	-3.6	-35.2

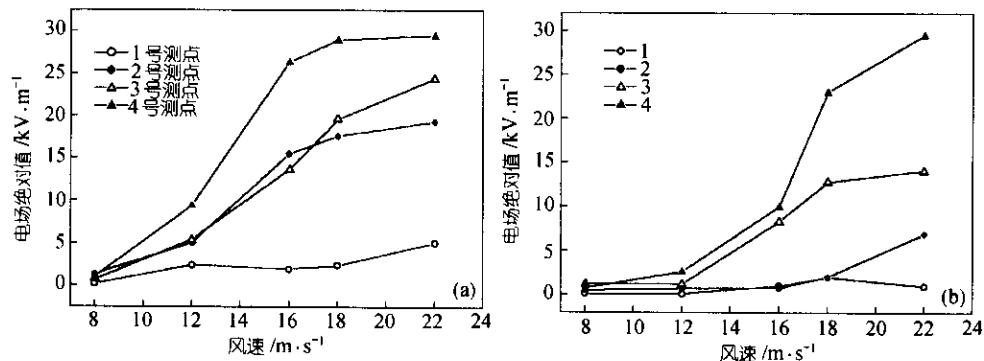


图2 蠕移跃移扬沙实验电场强度随风速变化

(a) 0.1~0.2 mm 均匀沙; (b) 民勤沙丘沙; 1, 2, 3, 4 示测点

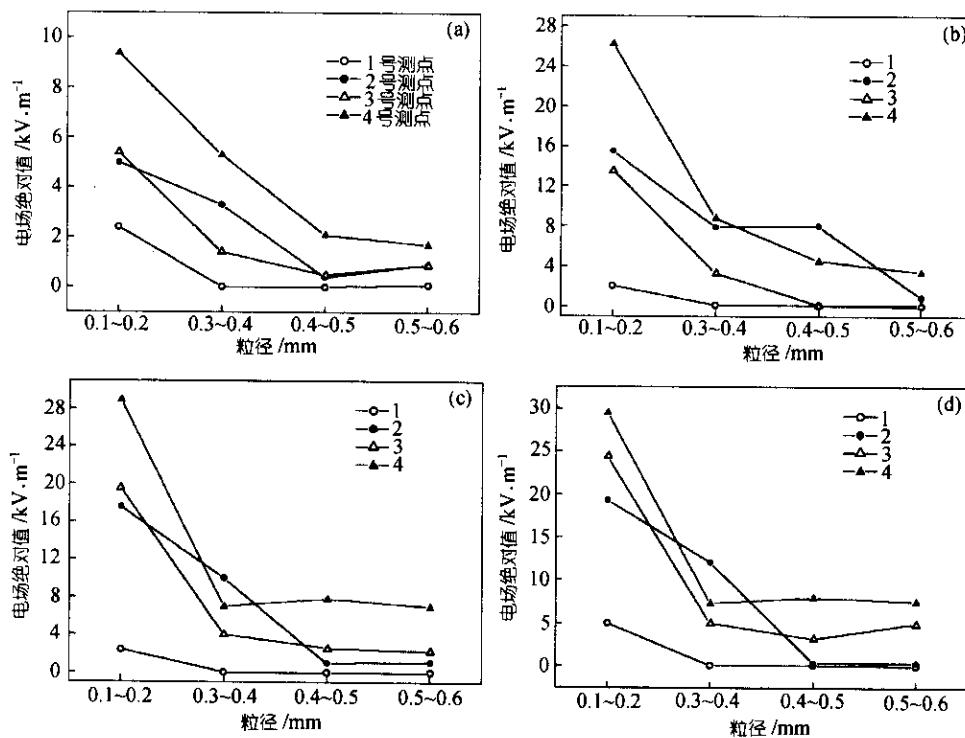


图3 电场强度随沙物质粒径的变化

(a)  $V=12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (b)  $V=16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (c)  $V=18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (d)  $V=22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 1, 2, 3, 4 示测点

$-76 \sim -72.0 \text{ kV/m}$ ,  $-58.0 \sim -74.0 \text{ kV/m}$ , 但在加水 2% 后反而急剧下降。这表明, 沙尘物质含水量增多使电场强度增加是有限度的。

**2.1.5 模拟区段和高度** 由表 1 中 5 种风速、6 种沙样蠕移跃移扬沙实验的电场测定结果可以看出(图 5), 风洞实验段(即层流段)1, 2 号点测得的电场强度极值分别在  $0.0 \sim +5.0$  和  $+0.3 \sim -19.3 \text{ kV/m}$  之间, 而风洞扩散段(即紊流段)3, 4 号点测得的电场强度极值分别在  $-0.1 \sim -24.4 \text{ kV/m}$  和  $+0.5 \sim -29.5 \text{ kV/m}$  之间, 前者明显小于后者。这表明, 沙尘暴运行过程中, 电场强度在层流条件下(如遇大的平坦地形)较小, 而在垂直扰动条件下(如遇突起地形和地面由宽变窄

等等)显著增大。同时,由图 5 可以看到,不论哪种风速和哪种样品,风洞实验段 1 号点和扩散段 3 号点(即位置较高处)的电场强度均比实验段 2 号点和扩散段 4 号点的小,也就是说,电场强度不是随高度增加而增加<sup>[13]</sup>,而是变小的。这是否与沙尘暴的情况一致,需要在野外加以监测验证。

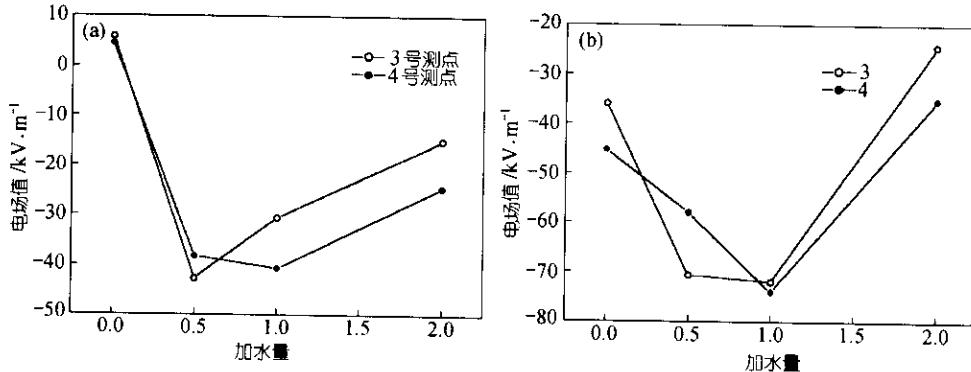


图 4 电场强度随耕作土加水量的变化

(a)  $V=12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; (b)  $V=22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 3、4 示测点(图中横坐标 0 点表示未加水悬移扬沙实验平均值, 其他点表示相应加水量)

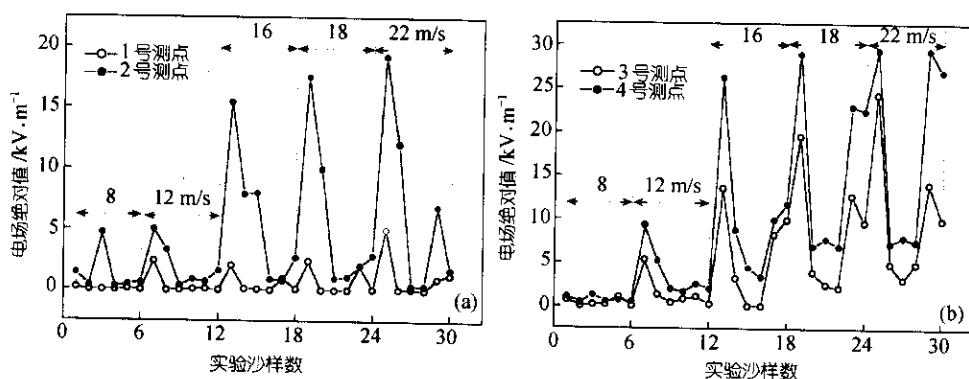


图 5 蠕移跃移扬沙电场强度随模拟区段和高度的变化

(a) 实验段; (b) 扩散段

## 2.2 电场形成机制

从上面模拟实验结果分析可知, 沙尘暴过境过程中往往伴有强烈的负极性电场, 而其强度又随沙物质运动状态、风速、物质粒径、含水量、气流稳定性及高度而变化。这种电场结构与沙尘物质在蠕移、跃移和悬移运动过程中电荷生成、转移与分离有关。

**2.2.1 电荷生成** 由于受降水、地下水和大气凝结水的影响, 沙粒表面和沙粒之间往往保持一定的水分。特别在沙尘暴由西北往东南方向运动过程中, 水汽含量更是会逐渐增加。一方面, 沙粒表面的水分在大气电场作用下自身会电离出大量  $\text{H}^+$  与  $\text{OH}^-$  离子; 另一方面, 当水溶解了沙中的盐分和腐殖质以后, 随着 pH 值增高, 变为弱碱性条件, 增加了作为沙尘物质主要成分的  $\text{SiO}_2$  的溶解度, 它与水微弱反应, 生成正硅酸( $\text{H}_2\text{SiO}_4$ ), 在水中往往电离成  $\text{H}^+$  和  $\text{SiO}_4^{4-}$  离子<sup>[1]</sup>。因此, 沙尘物质表面经常都有正、负电荷生成, 而且  $\text{H}^+$  与  $\text{OH}^-$  离子是主要的。在沙尘物质静止不动情况下, 由于正、负离子处于平衡状态, 沙物质一般呈现中性特征。

**2.2.2 电荷转移与分离** 当沙尘物质在气流作用下处于运动状态时, 不同颗粒之间以及颗粒和床面之间就会产生碰撞摩擦, 因摩擦生热使沙粒温度升高, 在比热相同的情况下, 小粒子

温度高, 大粒子温度低, 这就导致了小沙粒表面正、负离子特别是  $H^+$  离子与  $OH^-$  离子向大粒子转移。由于  $H^+$  扩散率远大于  $OH^-$ , 大量  $H^+$  向冷端扩散迁移, 使大粒子带上“正”电荷, 小粒子留下“负”电荷, 最终实现电荷分离, 并形成离子电流。接触面上产生的离子电流可表示为:  $J = a(E - \alpha\Delta T)$ 。这里  $a$  是附水沙粒电导率,  $E$  是电场环境,  $\Delta T$  是接触表面温度梯度,  $a$  是表征沙粒电特征的参数。电流  $J$  是被冷热端温差电位所驱动, 一旦  $\Delta T$  被确定, 电流  $J$  也就被确定。这就是所谓“不对称摩擦起电”机制。这种起电方式所产生的电场性质取决于沙物质粒径的相对大小。比如, 当粒度较小的组分占优势时, 形成负极性电场; 而大粒径组分占优势时, 也可能出现正极性电场。

**2.2.3 对电场结构的解释** 上述起电机制较为合理地解释了风洞实验结果。(i) 相对床面而言, 不管风洞还是野外, 沙粒均可以看作小“粒子”, 床面为大“粒子”。特别是在风洞内, 由于风洞顶面高度较低, 风作用时间短, 在风洞中测量到的电场值大部分是由于沙粒和床面之间的碰撞形成的。这样, 在运动过程中, 大多数沙粒都会带负电, 而床面带正电(每次实验完毕, 沙粒吹尽, 测得环境电场本底值都为正极性)。在风洞中由于床面接地(野外类似), 所以测量到的大部分都为负极性电场。而实验中少数正值的出现, 是由于不同粒径沙粒之间的碰撞所致。(ii) 床面铺沙实验所测电场小于相应的洞顶扬沙实验, 这是因为铺沙实验中绝大多数颗粒只以蠕移跃移形式运动, 而洞顶扬沙过程中不仅存在蠕移跃移, 也存在大量悬移物质, 所以颗粒之间的碰撞机会后者比前者多的多。(iii) 在同样条件下, 当风速增大时, 沙粒之间及其与床面之间碰撞次数增加, 从而导致风速越大, 电场越强。(iv) 在风速相同情况下, 粒径较大的粒子较难起动, 碰撞数机会较少, 产生的电场强度也较小。两种天然混合沙之间的电场强度的差异也在于各自含小粒径颗粒比例不同所致。(v) 电场随含水量变化, 则是因为在不对称摩擦起电过程中, 电荷的转移主要以沙粒表面的  $H^+$  与  $OH^-$  为主, 故当沙物质含水量达到 0.5~1.0% 时, 电场强度增加较快。然而, 当含水量达到 2% 时, 沙粒被黏连而不易起动, 碰撞接触面减少, 又使起电率降低。(vi) 模拟实验中在风洞扩散段的电场强度一般都大于实验段。这是因为, 在实验段风沙流多呈层流状态, 颗粒以水平方向碰撞为主, 而扩散段湍流混合作用强烈, 除了水平方向的碰撞以外, 还存在沙物质在垂直方向的大量交换转移。(vii) 不管在实验段, 还是在扩散段, 都表现出了电场强度随高度减少, 这种情况的产生主要是因为风洞高度低、风的作用时间短, 不管是沙粒之间还是沙粒与床面的碰撞都是发生在距离床面很低的范围内, 活动程度也随高度减少。但是, 在野外如果沙尘暴经过的地方地面沙源缺乏或者没有“就地起沙”, 而仅仅属于沙尘“过境”, 时, 也可能会出现电场强度随高度增加而增加的情况, 但这种高处电场强度主要仍是远处地面起电沙尘飘移带过来的。

### 2.3 电荷量测量

如前所述, 沙尘暴的起电现象主要是由于沙粒之间和沙粒与床面摩擦碰撞所引起的表面电荷转移分离, 电场强度的大小从根本上取决于沙粒表面电荷转移量的多少。所以, 电荷量的测量可以对电场性质与强度做进一步解释。

本次实验中主要利用冲击电流仪来测量风洞实验段积沙仪每次积沙的电荷量。测量时, 用长 2 cm, 直径 0.4 cm、表面积为  $2.03 \text{ cm}^2$  的金属棒插入积沙中, 金属棒与冲击电流仪连接, 每次插沙时间为 5 s。测量结果发现, 积沙的电荷极性正负是变化的, 其中负极性值占优势, 但也测到正极性电荷。在插沙时间内, 由于电场作用金属棒附近沙粒中  $H^+$  离子与  $OH^-$  离子会向测量棒移动。已有资料表明, 在 100 V/m 电场下,  $H^+$  与  $OH^-$  迁移速度分别为  $0.00032 \text{ cm/s}$  和  $0.00048 \text{ cm/s}$ 。根据本实验测量电场为 10 kV/m, 则在 5 秒钟内  $H^+$  移动距离为 1.6 cm,  $OH^-$  为 0.9 cm, 即有 1.6 cm 厚度  $H^+$  和 0.9 cm 厚度  $OH^-$  向测量棒移动, 这实际上增大了棒表面测量接触厚度。若假定一个离子电荷为一个沙粒所携带, 则此厚度为接触沙粒厚度, 计算得到接触沙粒质量(取沙粒密度为  $2.64 \text{ g/cm}^3$ )分别为 5.97 g(负电荷)和 3.65 g(正电荷)。通过对 5 次重复实验

计算得到负电荷最大荷质比为  $304 \mu\text{C/kg}$ , 正电荷最大荷质比为  $158 \mu\text{C/kg}$ , 此值比 Schmidt<sup>[5]</sup> 平均测量值( $66 \mu\text{C/kg}$ )要大。本实验测量值是理想极值, 实际上积沙中不可能只有一种极性电荷, 其分布也不均匀, 存多种形式输送路径。此外, 计算中也作了很多假定, 只是近似值。由此可见, 尽管大部分沙粒带负电荷, 但是在吹沙开始阶段, 距离床面较近处也能测量到正电荷。这说明, 在开始吹沙阶段, 除了沙粒和地面摩擦使沙粒带负电外, 沙粒之间的摩擦也较重, 非对称摩擦使大粒子带正电荷, 小粒子带负电荷。当小粒子被风吹走, 留下大粒子, 使接近铺沙床面处空间电场为正极性。但后续被吹起的大沙粒, 在其运动过程中又不断与床面作用, 起电增加, 携带更多负电荷, 使整个风洞内电场结构变为负极性, 且床面附近最强, 随高度增加而减小。

## 2.4 电场力计算

沙粒运动能够产生电场, 特别是在沙尘暴期间, 由于风速大、沙尘浓度高, 可以产生强电场, 既然存在电场, 就必然会产生电场静电力。在风沙物理学研究中, 气流作用于沙粒的力一般只考虑沙粒受到的迎面阻力(或拖曳力)、上升力、冲击力以及重力, 很少考虑其所受的静电引力<sup>[14, 15]</sup>。为了更全面地了解运动沙粒受力状况, 有必要对电场力进行估算。

对于电场为  $E$  的静电力  $F$  可表示为:

$$F = qE,$$

这里  $q$  为一个沙粒所携带电荷量,  $q = A(\text{荷质比}) \times M$  (单颗沙粒质量),  $M = \frac{4}{3} \delta r^3 \cdot e$ , 沙粒

半径  $R=0.01 \text{ cm}$ , 沙粒密度  $e=2.6 \text{ g/cm}^3$ , 计算得到  $M=1.09 \times 10^{-8} \text{ kg}$ , 将测量得到的荷质比  $A=304 \times 10^{-6} \text{ C/kg}$  代入  $q_i=3.31 \times 10^{-12} \text{ C}$ , 取电场  $E=70 \text{ kV/m}$ , 得到  $F=2.13 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{kg/s}^2$ 。若用 Schmidt 测量的荷质比计算得到  $F=0.45 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{kg/s}^2$ , 而半径为  $0.01 \text{ cm}$  的沙粒的重力为  $P=M_g=1.09 \times 10^{-8} \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2=1.07 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{kg/s}^2$ 。

这说明, 沙粒所受静电力与重力相当, 所以在研究沙粒运动时, 静电力不能随便忽略。当然, 这是在特定的时空环境下才能产生, 也就是必须有很强的电场和沙粒电荷。对于强度较小的风沙运动, 电场通常不是很大, 在一般风沙物理研究中常被忽略。

## 3 结论

通过对沙尘暴起电的风洞实验模拟, 初步得到以下结论。

(1) 沙物质运动, 特别是沙尘暴过程伴有强烈的电场。在蠕移跃移扬沙、悬移扬沙和加水悬移扬沙 3 种实验方案中, 电场大多表现为负极性, 最大值达  $-74 \text{ kV/m}$ 。

(2) 电场强度随沙物质运动状态、风速、物质粒径、含水量、气流稳定度及高度而变化。一般而言, 在沙物质 3 种运动方式中, 悬移运动产生的电场较蠕移跃移的大。相同条件下, 电场强度随风速增大而增大, 随沙物质粒径增大而减小。含水量对电场的影响有一定限度, 在加水悬移实验中, 当含水量在  $0.5\% \sim 1.0\%$  之间时, 电场强度显著增加; 但是含水量达到  $2\%$  时, 电场强度又开始迅速减小。每次实验中, 电场强度都是扩散段都大于实验段, 并随高度增加而减少。

(3) 沙尘暴电场的形成主要是由于沙粒之间及沙粒与床面之间的碰撞摩擦引起沙粒表面电荷的转移与分离形成的。在“不对称摩擦起电”过程中, 摩擦生热使沙粒表面的正负离子(主要是  $\text{H}^+$  与  $\text{OH}^-$ )向不同方向迁移。一般, 大小粒子的碰撞, 会使小粒子带负电荷, 大粒子带正电荷; 沙粒与床面的碰撞会使沙粒带负电荷, 而床面带正电荷。在本次实验中, 由于床面接地, 故观测到的电场多为负极性。这种电场形成机制也较为合理的解释了实验中观测到的电场强度随沙物质运动状态、风速、物质粒径、含水量、气流稳定度及高度的变化。

(4) 电荷量计算得到负电荷最大荷质比为  $304 \mu\text{C/kg}$ , 正电荷最大荷质比为  $158 \mu\text{C/kg}$ , 说

明尽管大部分沙粒带负电荷,但是在每次实验开始阶段,距离床面较近处也能测量到正电荷。这是因为,在开始吹沙阶段,除了沙粒和地面摩擦起电外,沙粒之间的摩擦也较重要,非对称摩擦使大粒子带正电荷,小粒子带负电荷。当小粒子被风吹走,留下大粒子,使接近铺沙床面处空间电场为正极性。

(5) 电场静电力计算结果表明,在电场很强的情况下,电场力可以与沙粒重力相当,以致在分析沙粒受力过程中不能忽略。但是,在大多数情况下,强度较小的风沙运动产生的电场力可以忽略。

### 参 考 文 献

- 1 董光荣, 高尚玉, 金 焰, 等. 青海共和盆地土地沙漠化与防治途径. 北京: 科学出版社, 1993. 56~58, 79~81
- 2 Shaw P E. Triboelectricity and friction, IV: Electricity due to air-blow particles. Proc R Soc A, 1929, 122: 49~58
- 3 Gill E W B. Frictional electrification of sand. Nature, 1948, 18(4): 568~569
- 4 Latram J. The electrification of snowstorm and sandstorms. Q J R Meteorol Soc, 1964, 90: 91~95
- 5 Greeley R, Leack R. A preliminary assessment of the effects of electrostatic on aeolian process. In: Rep Planet Geol Program, 1977~1978, NASA TM79729, 1978. 236~237
- 6 Schmidt D S, Schmidt R A. Electrostatic force on saltating sand. J Geophys Res, 1998, 103(4): 8997~9001
- 7 Schmidt D S, Dent J D. A theoretical prediction of the effects of electrostatic forces on saltating snow particles. Ann Glaciol, 1993, 18: 234~238
- 8 Werner B T. A steady-state model of wind-blown sand transport. J Geol, 1990, 98: 1~17
- 9 王式功, 董光荣, 陈惠忠. 沙尘暴研究进展. 中国沙漠, 2000, 20(4): 349~353
- 10 言穆弘, 郭昌明, 葛正模. 积云动力学和电过程二维模式研究. 地球物理学报, 1996, 39(20): 62~77
- 11 张义军, 言穆弘, 刘欣生. 雷暴中放电过程模式研究. 科学通报, 1999, 44(12): 1322~1325
- 12 屈建军, 孙宏义, 李金贵. 腾格里沙漠南缘沙尘暴的 MarkaV 模型分析. 中国沙漠, 2001, 21(Supp.): 206~208
- 13 黄 宁, 郑晓静. 风沙流中沙粒带电现象的实验测试. 科学通报, 2000, 45(20): 2232~2235
- 14 朱久江, 匡震邦, 邹学勇, 等. 风沙两相流中的跃移运动. 中国科学, A辑, 1998, 28(3): 266~274
- 15 杨 保. 气流颗粒阻力系数和升力系数的讨论. 中国沙漠, 1998, 18(1): 70~76