

沙尘天气下大沙粒对放电发展的影响

邓鹤鸣¹, 何正浩^{1,2}, 马军², 许宇航², 朱路², 郭润凯²

(1. 华中科技大学环境科学与技术学院, 武汉 430074;

2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074)

摘要: 沙尘暴过境产生电荷分离, 形成风沙电场, 干扰着无线电通讯, 并在导线上产生高电位, 可能直接导致电力系统外绝缘失效, 影响着沙尘环境地区输电的发展。为研究沙尘中大粒径对放电过程的影响, 利用石英砂来模拟沙尘暴天气, 在测定模拟沙尘的粒径和体积分数的基础上, 对比分析了空气与沙尘中的击穿电压、放电路径对沙尘与空气的选择概率, 并分析了大沙粒对伏秒特性和放电通道的影响。实验结果表明: 1) 粒径较大(直径>100 μm)的沙粒对放电的发展有促进作用, 但当粒径>2 mm时, 这种作用不是很明显; 2) 粗沙比细沙击穿的平均时间要长, 且击穿时间较为分散; 3) 粗沙中的放电通道相对较宽。经分析认为沙尘表面光电离、沙尘中电场畸变等作用是大沙粒有利于放电发展的主要原因。

关键词: 沙尘暴; 粒径; 体积分数; 路径; 流注; 放电

中图分类号: TM85 文献标志码: A 文章编号: 1003-6520(2010)05-1246-07

Effect of Large Sanddust Particles on Discharge Development in Sand Dust Weather

DENG He-ming¹, HE Zheng-hao^{1,2}, MA Jun², XU Yu-hang², ZHU Lu², GUO Run-kai²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to understand the effect of sanddust sizes on discharge development, quartz sand is applied to imitate dust environment. By measuring sanddust particle sizes, volume fraction of sanddust in simulative sandstorm, we comparably analyzed the breakdown voltage in air and sandstorm, the percentages of the discharge path in mist or air, and effect of large sanddust particles on $U-t$ Characteristics and discharge channel in a non-uniform field, at atmospheric pressure. The results show that: (1) Sanddust particles with diameter > 100 μm are propitious to discharge development; but when the diameter > 2 mm, the positive effect of sanddust on discharge development is not obvious; (2) The average time of breakdown under sanddust with the diameter of 2.15 mm is greater than that under sanddust with the diameter of 0.12 mm, and the time of breakdown under sanddust with the diameter of 2.15 mm is more scattered; (3) Discharge channel under sanddust with the diameter of 0.78 mm is relatively wider. The mechanism such as photoemission from the surface of sanddust, electric field distortion around sanddusts offers explanations for the positive impact of large sanddusts on discharge development.

Key words: sandstorm; particle size; volume fraction; discharge path; streamer; discharge

0 引言

沙尘暴过境产生电荷分离, 形成风沙电场^[1-7], 干扰着无线电通讯, 并在导线上产生高电位^[8], 可能直接导致电力系统外绝缘失效, 制约着沙尘环境地区输电的发展, 沙尘中电场的形成及沙尘环境地区输电问题一直是研究的热点。有关沙尘暴起电研

究, 早期的报道见英国的 P E Shaw(1929)^[1]、E W B Gill(1964)^[2] 和 J Latram(1964)^[3]。E W B Gill^[2]发现沙尘暴时有强电场形成, 在局部发生电火花现象, 并干扰了电波的传播。J Latham^[3]提出沙尘暴中运动沙粒的起电现象: 即不同粒径沙粒之间不对称摩擦运动, 导致不同极性电荷转移输送, 大沙粒带正电荷, 小沙粒带负电荷。美国的 D S Schmidt 等^[4]在 12 m/s 风速的沙面上(离地 1.7 cm)测出最大电场为 166 kV/m, 并认为风沙流电场由地表静止沙粒形成的, 他们还研究了沙尘暴中的电场力对沙地盐碱化的影响^[5]。国内已开始注意了沙尘暴起电问题, 并进行了相关的研究。兰州大学

基金资助项目: 国家自然科学基金(50237010), 科技部中加科技合作基金项目(2009DFA92810)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50237010), Sino-Canada Cooperation Project of MOST (2009DFA92810)。

的黄宁等利用风洞对风沙流中沙粒带电现象进行了测试^[6],并得出了沙粒所带正电或负电的临界粒径为250 μm,该结果证实了J Latham关于沙粒带电起因假设的合理性^[3],即风沙流电场主要是由带电运动沙粒形成的,这与D S Schmidt等认为风沙流电场由地表静止沙粒形成的观点相左^[4]。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的屈建军等在大型风洞下进行了沙尘暴起电^[7]和沙尘暴对导线电位影响的模拟实验^[8]。其中沙尘暴起电的结果与黄宁等^[6]的结论相似;沙尘暴中风速、输沙量、沙粒大小等对导线电位有不同的影响^[8]。

沙尘天气下输电外绝缘问题一直影响着沙尘环境地区输电的发展。美国J R Laghari等总结了沙尘污染对绝缘系统的影响时,他们的研究认为沙尘的成分和粒径均对击穿有不同的影响,而导体颗粒极大地降低了击穿电压^[9]。德国的J Halbritter研究污染物存在的绝缘表面放电时,发现多种污染物有助于电子崩的形成^[10]。沙特阿拉伯的M I Qureshi等实验研究了冲击电压下沙尘存在棒-棒间隙的击穿特性和击穿时延^[11, 12],采用的间隙为5~125 cm。A A Al-Arainy等研究了沙尘污染对冲击电压下多种电极结构中不均匀间隙击穿的影响特性^[13-15],他们试图从沙尘的成分及极性效应寻找原因。埃及的A H A Hamza等研究了沙尘天气下绝缘子闪络特性^[16],带电的尘粒使绝缘子闪络电压明显降低,并且在直流电压下闪络电压下降的幅度较大。美国的N Yu Babaeva等利用nonPDPSIM模型模拟了微尘颗粒对流注的影响^[17],分别探讨了微尘的大小(25~80 μm)、形状和材料特性对流注的影响。国内有关沙尘对输电线路外绝缘电气特性影响的研究很少。重庆大学的司马文霞等为了解沙尘对电力系统运行造成的影响,分析了沙尘对空气间隙和绝缘子放电特性的影响,在沙尘模拟实验室进行了风沙对间隙击穿电压影响的实验研究^[18]。

以上的工作主要研究沙尘暴起电问题和沙尘或沙尘的成分对输电外绝缘的影响,有研究者注意到了沙粒大小对导线电位有不同的作用^[8],但很少关注沙尘中大沙粒对输电外绝缘失效时放电的影响。根据参考文献[11-15]可知,沙尘的主要成分为石英砂,为了准确研究沙尘暴主要成分的影响,本文利用石英砂来模拟沙尘暴天气,在测定模拟沙尘的粒径和体积分数的基础上,对比研究了空气与沙尘中的击穿电压、放电路径对沙尘与空气的选择概率,并分析了大粒径的石英砂对伏秒特性和放电通道的影响情况。

表 1 实验材料的性质

Tab. 1 Properties of experimental materials

粒径 /mm	粒径范围 /mm	粒径测量 方法	密度 /(g·cm ⁻³)	ϵ_r	体积分数 /10 ⁻³
2.15	1.6~2.8	游标卡尺法	2.60	4.20	3.43
0.78	0.4~1.2	显微镜法	2.60	4.20	2.98
0.42	0.2~0.6	显微镜法	2.60	4.20	3.02
0.12	0.06~0.18	显微镜法	2.60	4.20	3.25

1 实验设置与方法

1.1 沙尘颗粒粒径的测量

实验所用材料的物理性质见表1,采用偏光显微镜进行对粒径较小的沙尘颗粒进行测量,这里以石英砂(0.12 mm)为例。测量所用显微镜的型号为OLYMPUS BX51,取像系统为OLYMPUS DP25,拍照软件为DP2-BSW。图1为石英砂(0.12 mm)的显微镜照片,根据比例尺所代表的实际长度,计算石英砂颗粒的实际面积S,然后保持面积不变,将不规则的颗粒折算成等效的球形颗粒,得到相应的等效直径 $D = \sqrt{4S/\pi}$,在一定范围内取400个颗粒的直径,可得到相应颗粒的粒径分布,进而得到石英砂的平均粒径,如图2所示。从图中可得出石英砂(0.12 mm)的粒径范围为0.06~0.18 mm,平均粒径0.12 mm。

对粒径>1 mm的沙粒采用游标卡尺法进行测量。利用游标卡尺测量沙粒的最长径和最短径,取其平均数作为等效直径。随机取400个沙粒,得出每个颗粒的等效直径,从而得到相应颗粒的粒径分布,进而得到沙粒的平均粒径(见表1),即粒径范围为1.6~2.8 mm,平均粒径2.15 mm。

1.2 模拟沙尘暴中沙尘体积分数的测量

沙尘暴中的沙尘体积分数 φ_0 由下式定义

$$\varphi_0 = \frac{V_{dust}}{V_{total}}. \quad (1)$$

式中, V_{dust} 和 V_{total} 分别为沙尘颗粒和沙尘暴的体积。设一定的时间间隔内流过截面积 S_c 的沙粒流量为 Q ,有(2)和(3)式成立:

$$\Delta V_{dust} = Q\Delta t = \frac{m}{\rho}\Delta t; \quad (2)$$

$$\Delta V_{total} = S_c \bar{v}\Delta t. \quad (3)$$

式中, ΔV_{dust} 和 ΔV_{total} 分别是时间间隔 Δt 流过 S_c 测量杯口内沙尘颗粒和沙尘暴的体积;此处利用一圆筒状测量杯测流量 Q ,测量杯所在位置如图3所示,杯口在棒板的中间位置上。在一定时间间隔 Δt 内

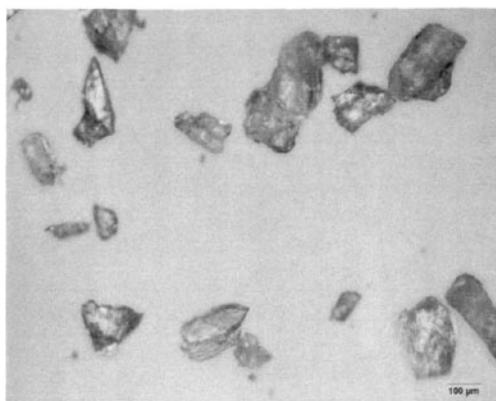


图 1 石英砂(0.12 mm)的显微镜照片

Fig. 1 Photomicrograph of quartz sand (0.12 mm)

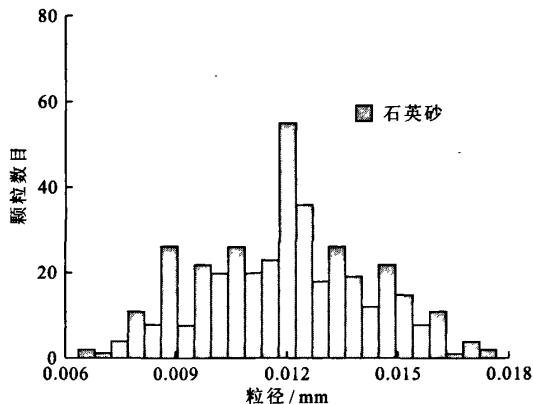


图 2 石英砂(0.12 mm)的粒径分布图

Fig. 2 Diameter distributions of quartz sand (0.12 mm)

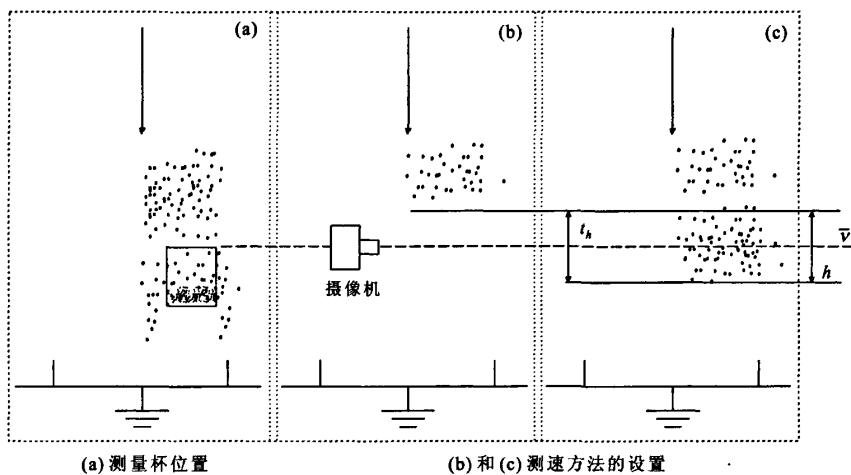


图 3 体积分数的测量

Fig. 3 Measuring equipment and method of the volume fraction of sand dust in sandstorm

获得沙粒的质量 m , ρ 为颗粒的密度(见表 1), S_c 是测量杯的内径。 \bar{v} 是杯口处的平均速度,由一摄像机(HDR-XR500E, SONY, Japan, 100 帧/s)测出,如图 3(b)和(c)所示,利用摄像机拍下沙粒下落的全过程,并利用专业软件将单秒的视频分成 100 帧图片,取出距杯口最近的两张图片,如图 3 所示测量 h , h 是两张图片中两相体头部位置的距离, \bar{v} 是在两相体下落经过该距离的平均速度,根据 $\bar{v} = h/t_k$ 得出平均速度。将公式(2)和(3)代入公式(1)就可得出固相体积分数 φ_0 (见表 1)

$$\varphi_0 = \frac{V_{\text{dust}}}{V_{\text{total}}} = \frac{\Delta V_{\text{dust}}}{\Delta V_{\text{total}}} = \frac{m}{\rho S_c \bar{v}} \quad (4)$$

1.3 实验设置

实验装置如图 4 所示,该实验装置由电源系统、沙尘暴产生系统、放电室组成。电源为 SGS 400

kV/8 kJ 型冲击电压发生器系统,采用的正、负雷电冲击电压波形在 IEC 60060.1 标准规定的误差范围内,放电室及放电电极的详细布局见文献[19]。实验中采用的棒板间隙为 27 cm。

如图 4 侧视图所示的角度同时喷入沙尘和空气,使沙尘充满棒电极和某一定位电极的半边区域,实验过程中尽量避免因沙尘粘在电极上带来的干扰。实验步骤见文献[19],根据文献所提供的步骤可得出空气与沙尘中的击穿电压、放电路径对沙尘与空气的选择概率以及不同粒径沙尘中放电的伏秒特性。

2 实验结果

2.1 不同粒径的沙尘对放电路径的影响

不同粒径的沙尘对放电路径的影响如图 5 所

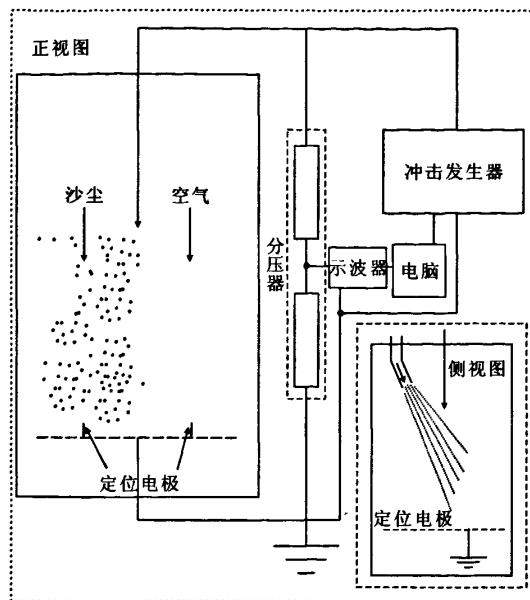


图 4 实验设置

Fig. 4 Experimental setup

示。正雷电冲击电压下,放电路径选择石英砂(0.12 mm)、石英砂(0.42 mm)、石英砂(0.78 mm)、石英砂(2.15 mm)的概率分别为73%、75%、75%、62%;负雷电冲击电压下,放电路径选择石英砂(0.12 mm)、石英砂(0.42 mm)、石英砂(0.78 mm)、石英砂(2.15 mm)的概率分别为94%、100%、90%、71%。4种粒径的沙尘对放电路径的影响基本相同,都>50%,除有相同的成分(密度、介电常数相同)外,粒径均>0.1 mm,但粒径>2 mm的沙尘的选择性明显降低。

2.2 不同粒径的沙尘对 U_{50} 的影响

不同粒径的沙尘对 U_{50} 的影响如图 6 所示。图 6(a)为正雷电冲击电压下的情况,粒径为 0.12 mm 的石英砂中 U_{50} 相对空气下降 5.0%~10.4%,而粒径为 2.15 mm 的石英砂中 U_{50} 仅仅下降 1.8%~3.8%;图 6(b)为负雷电冲击电压下的情况,粒径为 0.12 mm 的石英砂中 U_{50} 相对空气下降 4.1%~8.7%,而粒径为 2.15 mm 的石英砂中 U_{50} 仅仅下降 1.6%~3.1%,这与图 5 的结果相一致,即粒径>0.1 mm 均对放电有正面的作用,但当粒径>2 mm 时,这种作用不是很明显。

2.3 不同粒径对伏秒特性的影响

保持标准波形不变,逐级升高电压。一般情况下,电压较低时,击穿发生在波尾;电压较高时,放电时间减小,击穿发生在波头。波尾击穿时,以雷电冲击电压作为纵坐标,放电时间为横坐标;波头击穿

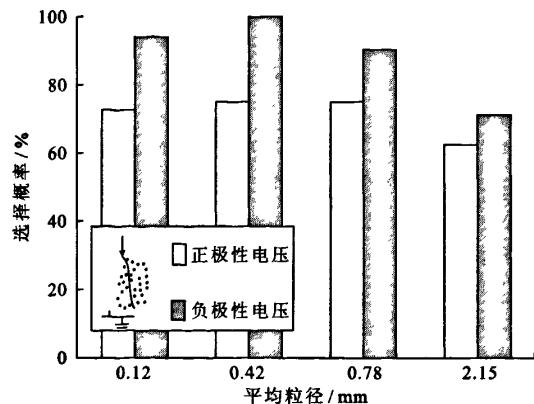
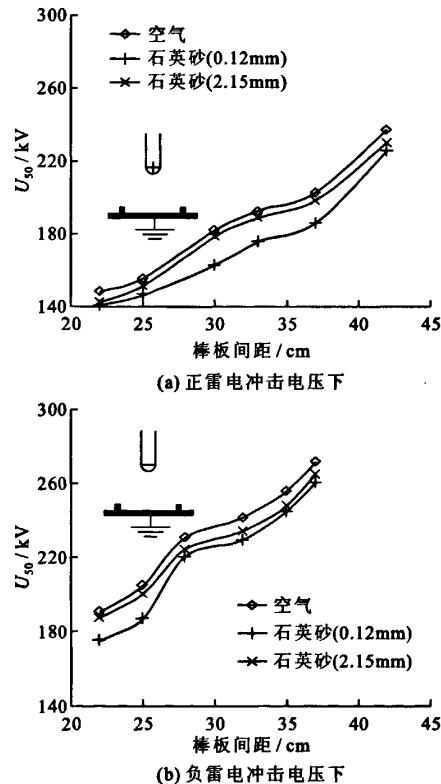


图 5 模拟沙尘暴的选择概率的柱状图

Fig. 5 Histogram for the percentages of the selection on simulative sandstorm

图 6 不同颗粒粒径下 U_{50} 随棒板间隙的变化趋势Fig. 6 Relationship between the rod-plane gap and U_{50} under the different sanddust particle diameters

时,以击穿电压为纵坐标,放电时间为横坐标。粗沙(2.15 mm)和细沙(0.12 mm)在 25 cm 棒板间隙下的伏秒特性曲线如图 7 所示。

结合图 7(a)和(b),间隙距离相同时,不同粒径下的伏秒特性曲线有:①电压越高,则击穿时间越

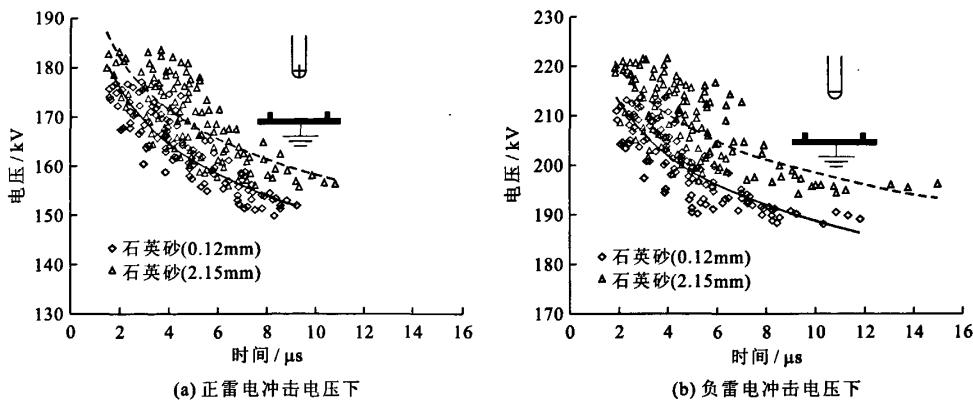


图 7 不同颗粒粒径下伏秒特性曲线

Fig. 7 U-t Characteristics under the different sanddust particle diameters

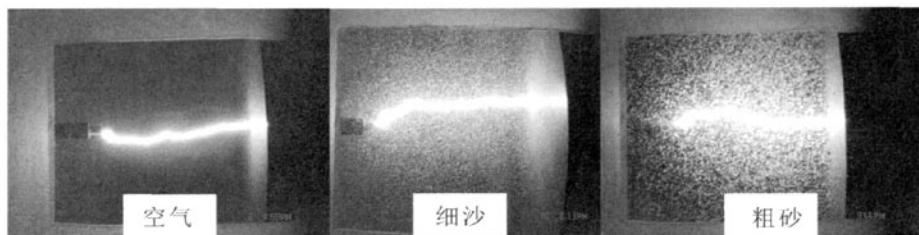


图 8 不同粒径的沙尘对正极性放电通道的影响

Fig. 8 Effect of sanddust with the different particle diameters on positive discharge channel

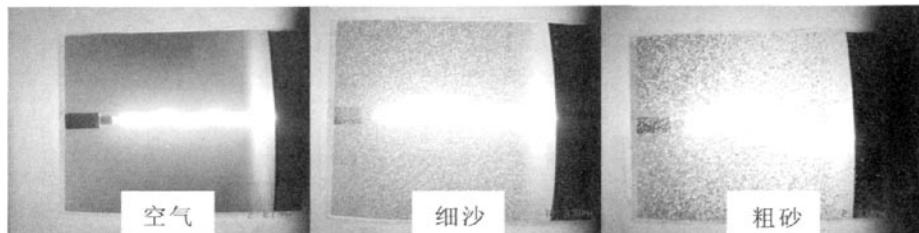


图 9 不同粒径沙尘对负极性放电通道的影响

Fig. 9 Effect of sanddust with the different particle diameters on negative discharge channel

短;②负雷电冲击电压比正电压下击穿的平均时间要长,击穿时间较为分散;③负雷电冲击电压的伏秒特性曲线比正冲击的伏秒特性曲线要平缓一些;④粗沙的伏秒特征曲线在细沙之上,并且较为平缓;⑤粗沙比细沙击穿的平均时间要长,且击穿时间较为分散。

2.4 不同粒径的沙尘对放电通道的影响

利用数码相机研究了不同粒径的石英砂对冲击电压下 15 cm 棒板间隙击穿时的放电通道的影响情况。使用的曝光时间为 3 s, 焦距调整为 1 m, 正雷电冲击下所加电压均为 120 kV; 负雷电冲击下所加电压均为 240 kV, 如图 8 和图 9 所示。从图中可以

看见很明显的放电通道,正雷电冲击电压下击穿电压较低,放电通道较细;负雷电冲击电压下击穿电压较高,放电通道亮度比正极性下亮,宽度也比正极性下大;同极性电压下,放电通道从小到大依次为空气、细沙(0.12 mm)、粗砂(0.78 mm)。

3 结果讨论

要认清沙尘间隙中的放电发展,必须分析颗粒对流注发展的影响,即从沙尘颗粒与流注前端电子崩相互作用开始。

1) 沙粒对光致电离的影响。N Y Babaeva & M J Kushner 在分析类似沙尘体系中的流注发展过程

时,发现沙尘颗粒引导光电离过程,有沙尘间隙的光子浓度和电子浓度远大于没有沙尘颗粒的区域,即沙尘颗粒促进光电离过程^[17, 20]。一般情况下,颗粒表面或气体中,达到光电离条件,必须满足 $h\nu \geq W$, 固体体系中,光电效应使电子从固体表面逸出,只需考虑固体的逸出功,石英砂的逸出功为 3.25 eV^[21, 22],这个值远小于空气中主要成分氮气和氧气的值(气体中则需考虑气体的电离能,电离能分别为 15.6 和 12.5 eV)。故光子更容易从沙粒表面电离出光电子,为引发电子崩或二次电子崩提供大量的种子电子,即单考虑光电离过程,流注更易在沙尘间隙中发展,故石英砂颗粒对放电有正面的作用。

2) 沙尘颗粒对离子或电子的俘获。采用低体积分数(约 0.3%),颗粒间隙较大,对电子或离子的吸附或俘获作用有限,不影响流注传播的整体行为。

3) 沙尘中电场的畸变,包括:颗粒对其周边电场的畸变;颗粒的相互作用产生的电场畸变;颗粒的荷电对其周边电场的畸变。本文采用冲击电压来进行实验研究,目的是减少沙尘颗粒的荷电时间,从而减少颗粒的荷电所产生对其周边电场的畸变;采用低体积分数(约 0.3%),颗粒间隙较大,这样减少沙尘颗粒的相互作用产生电场的畸变影响。当颗粒粒径在 0.1~1 mm 时,沙尘颗粒间平均距离的范围 1~10 mm,其畸变的电场可以影响流注的发展,而颗粒粒径>2 mm 时,沙尘颗粒的间隙>20 mm,畸变的电场对流注不造成任何影响。故粒径>0.1 mm 时均对放电有正面的作用,但当粒径>2 mm 时,这种作用不是很明显,即出现了大粒径下的击穿电压接近空气中的值,并且大于小粒径沙粒中的击穿电压。

4) 沙尘颗粒和流注间的相对位置。N Y Babaeva 等认为 80 μm 的尘粒处于流注的正前方可能阻挡放电的发展^[17],只有多个尘粒较近时,尘粒的共同作用才会促进放电的发展。本文采用较大的体积分数,颗粒间隙较大,得到的结果与此稍有不同,即放电路径选择沙尘的概率>50%,且沙尘下 U_{50} 值均小于气体下的值,即各种间隙的沙粒促进放电发展。文献[22]得出多种体积分数的两相体(包括沙尘) U_{50} 值均小于气体下的值,得到的结果与本文相似,可认为尘粒之间的间隙大小对放电有一定的影响,但不会阻挡放电的发展。本文认为多沙尘颗粒击穿的机理与多间隙击穿机理^[23]类似,即以沙尘颗粒为多个过渡点,第一间隙有引燃作用,沙尘表面的光电离也给该过程提供了相应的动力,故可在较低电压下击穿,接着第二间隙变成第一间隙,以此类推,各间隙相继击穿,整个由沙粒形成的串联多间隙

放电,故有很低的击穿电压。但在较大的粒径颗粒(>2 mm)时,必须考虑沙尘颗粒和流注间的相对位置,当颗粒处于流注的正前方,则直接阻碍流注的发展;当颗粒与流注较远时,对流注的影响不大,靠近流注时,沙粒附近的畸变电场加快流注发展,沙粒表面的光电离过程提供流注前端二次电子崩的种子电子;由于存在随机性,故粗沙比细沙击穿的平均时间要长,且击穿时间较为分散。

5) 沙尘颗粒大小对放电树枝状发展的影响。N Y Babaeva & M J Kushner 认为 40 μm 的颗粒可引发放电树枝状发展^[20]。本文的结果显示粒径超过 0.1 mm 仍可引发放电树枝状发展,这个结果表现为放电通道相对空气增大,并且放电通道随着颗粒粒径的增大而增大(见图 8、9)。

4 结论

a) 测定了实验所涉及的沙尘粒径和体积分数,并在此基础上测定了空气与沙尘中的击穿电压和伏秒特性曲线、放电路径对沙尘与空气的选择概率。

b) 对比分析了空气与沙尘中的击穿电压、放电路径对沙尘与空气的选择概率,结果表明:粒径较大(直径>0.1 mm)的沙尘对放电的发展有促进作用,但粒径>2 mm 的沙尘对放电的影响不是很明显。

c) 从沙粒对光电离、沙尘中电场畸变、沙尘颗粒和流注间的相对位置、沙尘颗粒大小对放电树枝状发展的影响等方面分析了流注和沙尘颗粒间的相互作用,这些作用在一定范围有利于放电的发展。

参 考 文 献

- [1] Shaw P E. Triboelectricity and friction. IV: electricity due to air-blow particles[J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A, 1929, 122(789): 49-58.
- [2] Gill E W B. Frictional electrification of sand[J]. Nature, 1948, 162(4119): 568-569.
- [3] Latram J. The electrification of snowstorm and sandstorms[J]. The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1964, 90(383): 91-95.
- [4] Schmidt D S, Dent J D. A theoretical prediction of the effects of electrostatic forces on salting snow particles[J]. Annals of Glaciology, 1993, 18(1): 234-238.
- [5] Schmidt D S, Schmidt R A, Dent J D. Electrostatic force on salting sand[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103 (8): 8997-9001.
- [6] 黄宁, 郑晓静. 风沙流中沙粒带电现象的实验测试[J]. 科学通报, 2000, 45(20): 2232-2236.
HUANG Ning, ZHENG Xiao-jing. Experimental and measuring research on sand electrification in sand-driving wind[J]. Science Bulletin, 2000, 45(20): 2232-2236.
- [7] 屈建军, 言穆弘, 薛光荣, 等. 沙尘暴起电的风洞模拟实验研究[J]. 中国科学 D 辑, 2003, 33(6): 593-601.

QU Jian-jun, YAN Mu-hong, DONG Guang-rong, et al. Wind tunnel simulated experiment study of sandstorm electrification [J]. *Science in China: Series D*, 2003, 33(6), 593-601.

[8] 屈建军, 岳瑞平, 袁穆弘, 等. 扬沙和沙尘暴对导线电位影响的风洞模拟实验[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 534-538.

QU Jian-jun, ZU Rui-ping, YAN Mu-hong, et al. Wind tunnel simulation of effect of sandstorm on electrical wire voltage[J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(5): 534-538.

[9] Laghari J R, Qureshi A H. A review of particle-contaminated gas breakdown[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1981, 16(5): 388-398.

[10] Halbritter J. On contamination on electrode surfaces and electric field limitations[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1985, 20(4): 671-679.

[11] Qureshi M I, Al-Arainy A A, Malik N H. Performance of rod-rod gaps in the presence of dust particles under lightning impulses[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1991, 6(2): 706-714.

[12] Qureshi M I, Al-Arainy A A, Malik N H. Performance of rod-rod gaps in the presence of dust particles under standard switching impulses [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1993, 8(3): 1045-1051.

[13] Al-Arainy A A, Malik N H, Qureshi M I. Influence of desert pollution on the lightning impulse breakdown voltages of rod to plane air gaps [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1991, 6(1): 421-428.

[14] Al-Arainy A A, Malik N H, Qureshi M I. Influence of sand/dust contamination on the breakdown of asymmetrical air gaps under lightning impulses[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1992, 27(2): 193-206.

[15] Al-Arainy A A, Malik N H, Qureshi M I. Influence of sand/dust contamination on the breakdown of asymmetrical air gaps under switch impulses[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1994, 1(2): 305-314.

[16] Hamza A H A, Abdalgawad N M K, Arafa B A. Effect of desert environmental conditions on the flashover voltage of insulators[J]. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43(17): 2437-2442.

[17] Babaeva N Yu, Bhoj A N, Kushner M J. Streamer dynamics in gases containing dust particles[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2006, 15(4): 591-602.

[18] 司马文霞, 吴亮, 杨庆. 沙尘对电力系统外绝缘电气特性影响分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 16-20, 52.

SIMA Wen-xia, WU Liang, YANG Qing. Effect of sand dust environment on external insulation of electrical power system [J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(1): 16-20, 52.

[19] 邓鹤鸣, 何正浩, 许宇航, 等. 雾霾对冲击放电路径影响特性的分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2669-2673.

DENG He-ming, HE Zheng-hao, XU Yu-hang, et al. Effects of haze environment on discharge path under lightning impulses [J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(11): 2669-2673.

[20] Babaeva N Y, Kushner M J. Streamer branching: the role of inhomogeneities and bubbles[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2008, 36(5): 892-893.

[21] Lenzlinger M, Snow E H. Fowler-nordheim tunneling into thermally grown SiO₂[J]. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40(1): 278-283.

[22] He Z, Xu H, Bai J, et al. A test study of 50% lightning impulse breakdown voltage on rod-plane gap with two-phase mixture of gas and solid particles[J]. *Plasma Science and Technology*, 2007, 9(6): 695-698.

[23] 马乃祥. 长间隙放电[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.



邓鹤鸣

1979—, 男, 博士生

现就读于华中科技大学环境科学与工程学院, 研究方向为高电压新技术及应用研究, 参与国家自然科学基金重点项目(50237010)“多相体放电规律及应用研究”、中加科技合作基金项目(2009DFA92810)“脉冲电弧液电放电船舶压载水处理技术与开发利用研究”等多个科技项目
电话:(027)87558970

E-mail: denghem@gmail.com



何正浩

1957—, 男, 博士, 教授, 博导
毕业于华中科技大学电气与电子工程学院, 主要从事高电压新技术及应用研究, 主持并参与国家自然科学基金项目、国际合作项目和863军口项目等多个科技项目
电话:(027)87558970
E-mail: hzh@hust.edu.cn

HE Zheng-hao
Ph. D., Professor

收稿日期 2010-01-07 修回日期 2010-04-07 编辑 任明