

# 两相体放电中的粒径效应

邓鹤鸣, 何正浩, 马军, 许宇航, 张召亮, 李劲

(华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

## Effects of the Size of Macroparticles on Two-phase Mixture Discharges

DENG He-ming, HE Zheng-hao, MA Jun, XU Yu-hang, ZHANG Zhao-liang, LI Jin

(School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** The two-phase mixture (TPM) discharge is what occurs under the condition that large amounts of liquid or solid macroparticles float in air, or bubbles of high concentration exist in liquid. On the basis of size measurement of 21 kinds of non-air macroparticles composing TPMs and directly comparative analysis of the percentages of the discharge path in air or TPMs, it revealed whether TPMs are beneficial to the discharge development or not in terms of discharge voltage and path selection mainly depends on the macroparticles' size other than material, i.e. regardless of organic or inorganic, solid or liquid state, which is called macroparticle-size effect. These macroparticles in TPMs distorted the electrostatic field, interacted with ions, electrons or photons, and produced corresponding enhancement or decrease in ionization and excitation as the avalanche front encountered them, but the details about degree of alterations on avalanches highly correlated with the macroparticles' size.

**KEY WORDS:** effect of macroparticles' size; two-phase mixture; discharge; path selection; volume fraction; impulse voltage

**摘要:** 两相体放电是指大量液体或固体颗粒物悬浮于气体中, 或大量气泡悬浮于液体中的放电现象。为了解两相体放电的影响因素, 采用 21 种不同介质颗粒来产生两相体, 在分析测定了两相体中非气相物质的颗粒粒径的基础上, 通过实验研究了两相体放电特性, 发现了两相体体系的击穿电压及两相体对放电路径的影响存在颗粒粒径的影响远大于颗粒物材料影响的“粒径效应”。分析表明, 两相体放电中的粒径效应是两相体颗粒对电场的畸变和两相体颗粒与粒子(电子、光子和离子)间的作用联合影响的结果。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(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).

**关键词:** 粒径效应; 两相体; 放电; 路径选择; 体积分数; 冲击电压

## 0 引言

两相体放电是指大量液体或固体颗粒物悬浮于气体中, 或大量气泡悬浮于液体中放电的现象, 它涉及多个领域, 如静电除尘、汽车点火、电流体放电、云中闪电的起源与发展、雨雾或沙尘天气下的电力系统外绝缘问题等。

在沙尘对输电线路外绝缘影响的方面, 主要涉及空气间隙和绝缘子在沙尘环境中放电现象等的研究, 大量研究表明沙尘对空气间隙击穿电压、绝缘子闪络电压有很大的影响, 且研究发现沙尘所引起间隙放电特性的变化主要是由于阴极表面沉积沙尘引起的<sup>[1-5]</sup>。有关气液两相体放电的研究, 许多都涉及液滴表面<sup>[6-7]</sup>或液滴云中<sup>[8]</sup>的放电现象。在绝缘气体-微米级液滴法研究方面, R. T. Harrold<sup>[9]</sup>在 SF<sub>6</sub> 气体中加入氟碳化合物、氯化物等雾化液滴, 大幅度提高了 SF<sub>6</sub> 气体的绝缘效果; M. Yashima 等<sup>[10-11]</sup>发现闪络电压随着四氯乙烯浓雾在 SF<sub>6</sub> 气体中的混入而提高, 但提高的幅度随着气压的增大而减小; H. Goshima 等<sup>[12]</sup>发现低温气体中喷入液氮雾滴可提高直流击穿电压; Y. Nagaki 等<sup>[13]</sup>在研究空气-水雾法的绝缘效果时, 注意到了水分子簇变化的影响。在汽车点火研究方面, P. Tardiveau 等<sup>[14]</sup>在研究放电与燃料液滴之间的影响机制时发现液滴的存在提高了放电速度, 并引导着流注发展的方向。在绝缘闪络方面, 研究者对硅橡胶表面存在分离水珠时的局部放电进行了测量<sup>[15]</sup>或电场分析<sup>[16]</sup>。有关云中闪电的起源与发展的研究, 研究者注意到 2 个及 2 个以上荷电雨滴相互碰撞合并引起雨滴的

粒径增长, 并且发现雨滴对闪电的起源与发展均有影响<sup>[8,17]</sup>。也有学者研究了雨滴的成分<sup>[18]</sup>、电导率<sup>[19]</sup>对微放电过程的影响。这些研究注意到了两相体对放电的影响, 但其中液滴或固体颗粒的粒径对放电的影响并未引起足够的重视, 而相关的解释仅作了定性的说明。

本文将混合两相体放电与气体放电特性的比较作为主线, 集中到与电气绝缘密切相关的大气压、非均匀电场下两相体放电与击穿特性的实验研究, 系统地分析了液滴或固体颗粒的粒径对放电的影响。考虑到两相体中颗粒荷电能力的不同, 为减少这方面的干扰, 采用雷电冲击电压来进行实验研究; 选择了石英砂、工业盐等 18 种物质作为固相材料, 以及 3 种粒径的水雾作为液相材料来产生两相体; 在分析测定了两相体中液滴或固体颗粒粒径和体积分数的基础上, 开展了两相体冲击放电路径和 50% 放电电压  $U_{50}$  的实验研究。发现了两相体的击穿电压和路径选择存在非气相物质颗粒粒径的影响远大于颗粒物材料影响的“粒径效应”。

### 1 实验装置和实验方法

两相体冲击放电路径选择的实验装置如图 1 所示, 该装置由电源系统、两相体产生系统和放电室组成。电源为 SGS 400 kV/8 kJ 型冲击电压发生器, 采用的正、负雷电冲击电压波形在 IEC 60060.1<sup>[20]</sup> 标准规定的误差范围内。整个放电室(1.5 m × 1.4 m ×

2 m)由非极性绝缘材料制作, 放电室顶部的风机在实验过程中抽离在空中飘荡的固/液相微粒, 减少对实验的干扰。放电室内置棒-板电极, 不锈钢网的板电极上对称放置 2 个铜定位电极, 电极高约 4 cm, 直径为 10 mm, 顶部为半球形, 2 个定位电极间距 16 cm。棒电极的直径为 10 mm, 尖电极的端部半径为 0.5 mm, 尖端长 10 mm。体积分数的定义为两相体中固相或液相所占的体积比例, 如无特殊说明, 实验中采用的体积分数的约为 3%, 见表 1。实验中雷电冲击 50% 击穿电压( $U_{50}$ )采用升降法获得, 实验次数选为 40 次, 通过置信水平为 0.95 的  $\chi^2$  拟合检验, 击穿电压样本值服从正态分布, 实验分散性即相对标准偏差  $\sigma$  小于 3% (理论上雷电冲击电压的最大分散值)。本文采用与文献[21]类似的方法进行实验。实验过程中从图 1 侧视图的角度同时喷入两相体

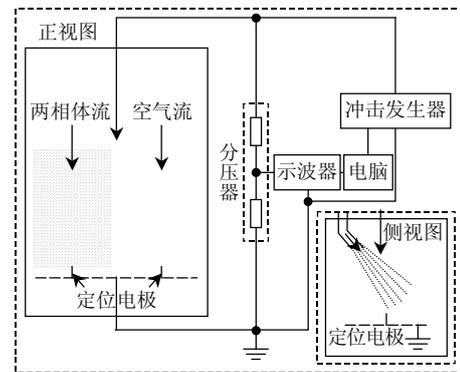


图 1 实验接线图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

表 1 实验材料的物理性质

Tab. 1 Properties of experimental materials

实验材料	平均粒径/ $\mu\text{m}$	粒径范围/ $\mu\text{m}$	测量粒径的方法	密度/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\epsilon_r$	体积分数/%
聚丙烯颗粒	3 830.0	3 600.0~4 100.0	游标卡尺法	0.90	1.50	3.68
聚乙烯颗粒	3 380.0	3 000.0~3 700.0	游标卡尺法	0.92	2.26	4.22
聚氯乙烯颗粒	3 260.0	2 800.0~3 600.0	游标卡尺法	1.10	4.20	3.91
聚苯乙烯颗粒	3 230.0	3 000.0~3 400.0	游标卡尺法	1.07	2.50	3.12
石英砂	2 150.0	1 600.0~2 800.0	游标卡尺法	2.60	4.20	3.43
菜籽	1 810.0	1 600.0~2 200.0	游标卡尺法	1.02	11.50	4.53
聚丙烯粉末	810.0	500.0~1 100.0	显微镜法	0.90	1.25	3.42
石英砂	780.0	400.0~1 200.0	显微镜法	2.60	4.20	2.98
石英砂	420.0	200.0~600.0	显微镜法	2.60	4.20	3.02
工业盐	340.0	300.0~500.0	显微镜法	2.16	5.90	3.46
聚氯乙烯粉末	130.0	80.0~160.0	显微镜法	1.06	3.40	3.57
石英砂	120.0	60.0~180.0	显微镜法	2.60	4.20	3.25
四氧化三铁	72.0	30.0~120.0	显微镜法	5.24	15.00	2.04
氧化铁	45.0	10.0~90.0	显微镜法	5.18	14.20	1.96
喷射水雾	40.0	10.0~80.0	激光散射法	1.00	83.00	2.79
蒸汽水雾	20.0	8.0~40.0	激光散射法	1.00	83.00	1.80
粉煤灰	8.5	1.0~16.0	激光粒度分析法	0.92	22.00	2.85
超声水雾	6.6	—	公式计算法	1.00	83.00	2.44
烟气 A	3.6	0.2~5.0	激光粒度分析法	—	—	—
烟气 B	2.9	0.2~5.0	激光粒度分析法	—	—	—
烟气 C	2.6	0.2~5.0	激光粒度分析法	—	—	—

和空气, 尽量避免因两相体颗粒粘在电极上带来的干扰; 控制两相体和空气的流速基本相同, 主要的实验步骤<sup>[22]</sup>如下:

1) 按图 1 所示调整棒电极和定位电极的位置, 并用估计的 1.1 倍  $U_{50}$  进行雷电冲击实验 50 次以上, 使棒对左、右定位电极的放电概率基本接近(即  $50\% \pm 5\%$ );

2) 吹入空气, 使其弥散在电极和定位电极空间内, 用升降法实验得出间隙的  $U_{50}$ ;

3) 吹入两相体, 使其弥散在电极和定位电极空间内, 用升降法实验得出间隙的  $U_{50}$ , 并比较空气和两相体  $U_{50}$  电压的大小, 较大的记为  $U'_{50}$ ;

4) 左边吹入空气, 右边吹入两相体, 并用 1.1 倍  $U'_{50}$  进行雷电冲击实验, 得出棒对左、右定位电极的放电次数;

5) 右边吹入空气, 左边吹入两相体, 并用 1.1 倍  $U'_{50}$  进行雷电冲击实验, 得出棒对左、右定位电极的放电次数;

6) 为减少左、右定位电极的影响, 每 10 次交换两相体和空气的喷入方位, 重复步骤 4)、5), 总次数 200 次以上;

7) 比较棒对左、右定位电极的放电概率, 便可以看出两相体对放电路径的影响程度。

## 2 两相体中液滴和固体颗粒粒径的获得

### 2.1 实验材料

实验所用材料的性质和相应的两相体参数见表 1, 其中喷射水雾是采用扇形空气雾化喷嘴产生的, 烟气 A、B、C 分别由烟草、锯木屑、稻谷壳不完全燃烧产生的。

### 2.2 公式计算法

超声水雾的雾滴粒径可用式(1)<sup>[23-25]</sup>来计算获得:

$$D = 0.34 \left( \frac{8\pi\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

式中:  $D$  为液滴直径;  $\sigma$  为雾化先体的表面张力;  $\rho$  为先体密度;  $f$  为超声频率。本文中水的表面张力为  $72.9 \text{ mN/m}$ , 水的密度为  $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 实验所用超声雾化器的振动频率为  $0.5 \text{ MHz}$ , 计算得到雾化液滴的粒径为  $6.6 \mu\text{m}$ 。

### 2.3 激光粒度分析法

烟气和粉煤灰的粒径采用 JL-9200 便携式高分辨激光粒度分析仪进行在线测量, 所得粒径分布信息和平均粒径如表 1 所示。图 2 为该法测量粉煤灰

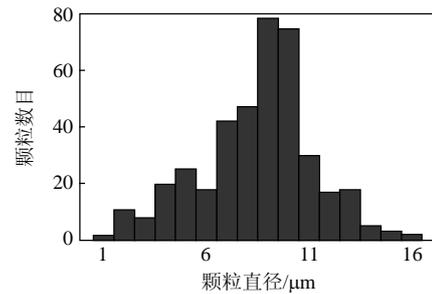


图 2 粉煤灰的粒径分布

Fig. 2 Diameter distributions of fly ash

的粒径分布图, 可以看出, 粉煤灰的粒径范围为  $1 \sim 16 \mu\text{m}$ , 平均粒径为  $8.5 \mu\text{m}$ 。

### 2.4 激光散射测量法

喷射水雾和水蒸气的液滴粒径采用激光散射测量法。测量仪器采用美国 TSI 公司整合 PIV (particle image velocimetry) 系统, 测量方法与文献[26-27]相同, 以喷射水雾为例。图 3 为喷射水雾的散射光聚焦图, 根据单位像素点所代表的实际长度, 换算雾滴的实际面积  $S$ , 然后保持面积不变, 将雾滴折算成等效的球形雾滴, 得到相应的等效直径  $D = \sqrt{4S/\pi}$ , 在一定范围内取 400 个雾滴的直径, 可得到相应雾滴的粒径分布, 进而得到喷射水雾的平均粒径, 如图 4 所示。可以看出, 喷射水雾的雾滴粒径范围为  $10 \sim 80 \mu\text{m}$ , 平均粒径  $40 \mu\text{m}$ 。



图 3 喷射水雾的散射光聚焦图像

Fig. 3 Focused image of spray

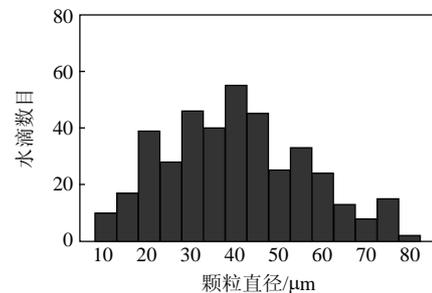


图 4 喷射水雾的粒径分布

Fig. 4 Diameter distributions of spray

### 2.5 显微镜法

粒径在  $40 \sim 1000 \mu\text{m}$  之间的固体颗粒采用显微镜法进行测量, 以石英砂( $120 \mu\text{m}$ )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 5 为石英砂(120 μm)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 6 所示。可以看出, 石英砂的粒径范围为 60~180 μm, 平均粒径 120 μm。

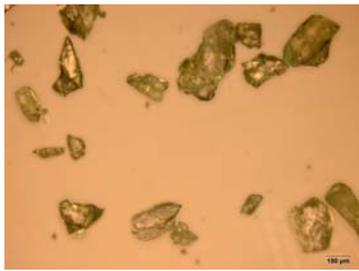


图 5 石英砂的显微镜照片  
Fig. 5 Photomicrograph of quartz sand

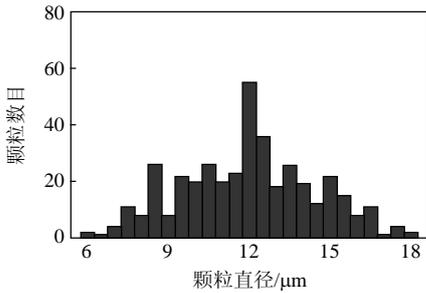


图 6 石英砂的粒径分布  
Fig. 6 Diameter distributions of quartz sand

2.6 游标卡尺法

粒径在 1 mm 以上的固体颗粒采用游标卡尺进行测量, 以聚丙烯颗粒为例(图 7)。利用游标卡尺测量聚丙烯颗粒的最长径和最短径, 取其平均数作为等效直径。随机取 400 个聚丙烯颗粒, 并得出等效直径, 从而可得到相应颗粒的粒径分布, 进而得到聚丙烯颗粒的平均粒径(图 8)。可以看出, 聚丙烯颗粒的粒径范围为 3.6~4.1 mm, 平均粒径为 3.83 mm。



图 7 聚丙烯颗粒的照片  
Fig. 7 Photograph of polypropylene granules

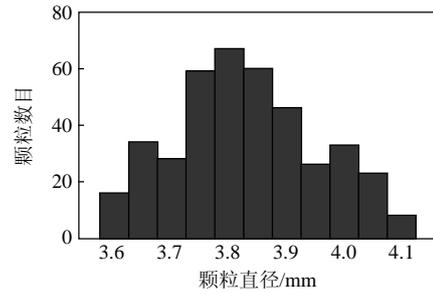


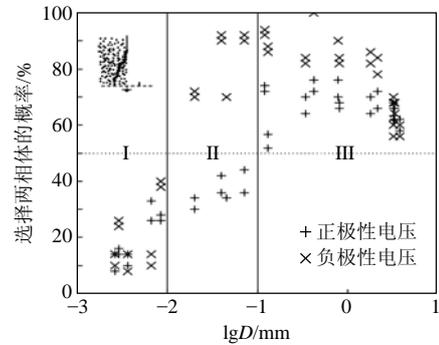
图 8 聚丙烯颗粒的粒径分布

Fig. 8 Diameter distributions of polypropylene granules

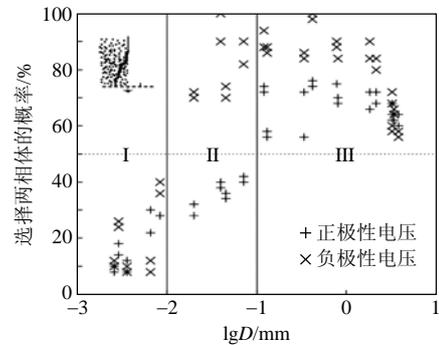
3 实验结果与分析

3.1 两相体中固/液相颗粒粒径对放电路径的影响

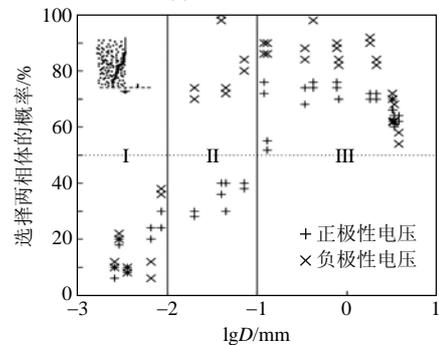
两相体中固/液相的颗粒粒径对放电路径的影响如图 9 所示, 分别在棒-板间隙 21(图 9(a)), 27



(a) 棒-板间隙 21 cm



(b) 棒-板间隙 27 cm



(c) 棒-板间隙 33 cm

图 9 放电路径选择两相体的概率与颗粒粒径的关系  
Fig. 9 Relationship between the average macroparticle diameters and the percentages of selection of two-phase mixtures

(图 9(b))和 33 cm(图 9(c))下完成的。可以看出，在棒-板间隙 21~33 cm 范围内，颗粒粒径对放电路径选择两相体概率的影响基本相似。

正极性雷电冲击电压下，粒径小于 100 μm 时，放电路径选择概率小于 50%，有的甚至低于 20%，如超声水雾(66 μm)，如图 9 的区域 I 所示。粒径大于 100 μm 时，放电路径选择概率迅速上升，在 200~400 μm 时，选择概率超过 80%，然后缓缓下降到 60% 附近，参见图 9 的区域 III。负极性雷电冲击电压下，粒径小于 10 μm 时，放电路径选择概率小于 50%，有的甚至低于 10%，如超声水雾(参见图 9 的区域 I)；粒径超过 10 μm 时，放电路径选择概率迅速上升达到 90% 以上，有的甚至到 100%，如喷射

水雾(40 μm，参见图 9 的区域 II)、石英砂(120~78 μm)、聚丙烯粉(810 μm)和菜籽(1 810 μm)等；当粒径超过 2.0 mm 时，选择概率开始下降，缓缓下降到 60% 附近，如聚丙烯颗粒(3.83 mm)、聚乙烯颗粒(3.38 mm)等，参见图 9 的区域 III。文献[28]从两相体中非气相物质的体积分数、颗粒粒径、介电常数这 3 个参数来研究对放电路径的影响时，在 30 cm 的棒-板间隙下得出颗粒粒径是放电路径发展的主要影响因素之一，与该处结论一致。

### 3.2 两相体中固/液相颗粒粒径对 $U_{50}$ 的影响

两相体中固/液相颗粒粒径对  $U_{50}$  的影响如图 10 所示。粒径的范围为  $D > 100 \mu\text{m}$  的两相体以石英砂(120 μm)、工业盐(340 μm)为例。在图 10(a)中，正

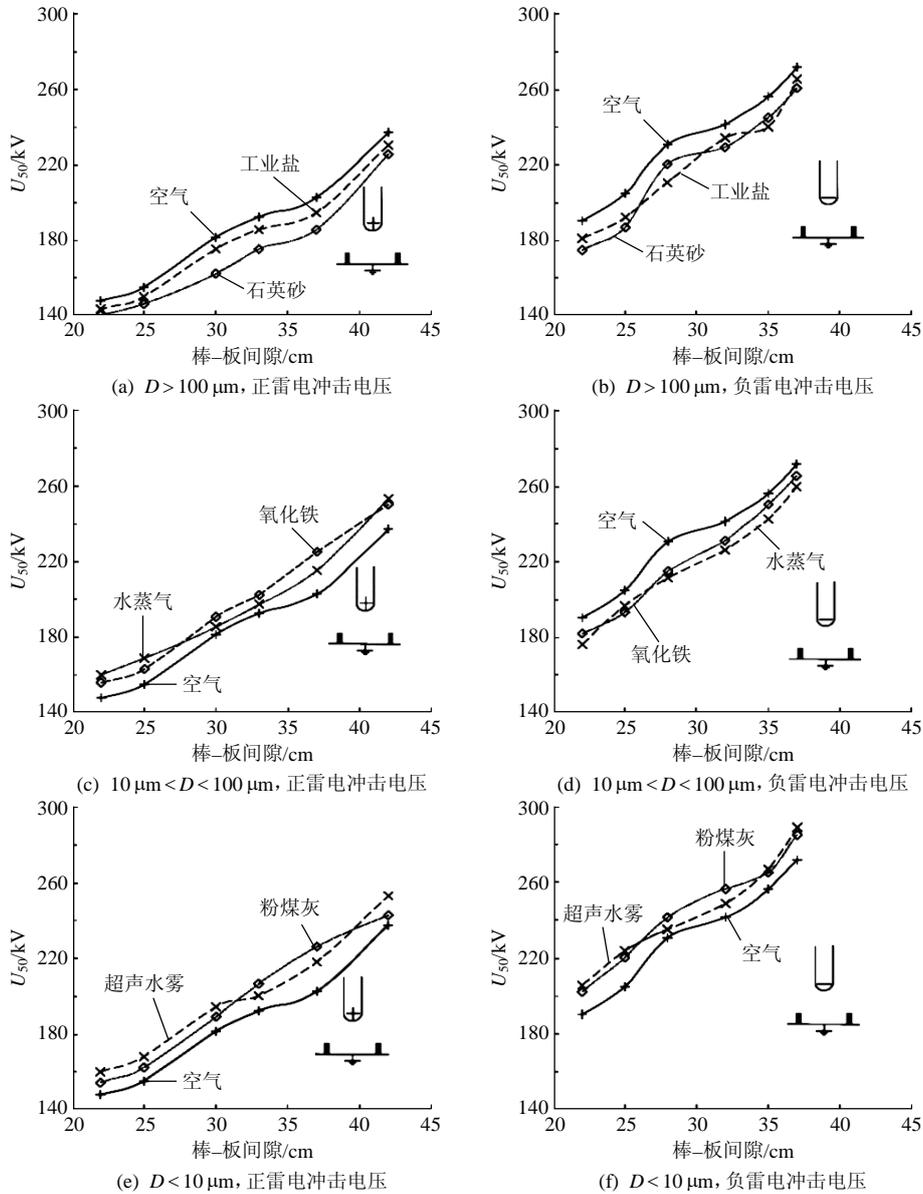


图 10 不同颗粒粒径下  $U_{50}$  随间隙的变化趋势

Fig. 10 Relationship between the rod-plane gap and  $U_{50}$  under the different macroparticle diameters

极性电压下,两相体间隙的击穿电压较空气下的低,其中石英砂低5%~11%,而工业盐仅为2%~4%;在图10(b)中,负极性电压下,两相体间隙的击穿电压仍较空气下的低,低2%~9%,其变化与作用电压的极性无关,该结果与文献[29]的结果相似。

粒径的范围为 $10\mu\text{m} < D < 100\mu\text{m}$ 的两相体以氧化铁( $45\mu\text{m}$ )和水蒸气( $20\mu\text{m}$ )为例。图10(c)中,正极性电压下,两相体间隙的击穿电压较空气中的高,高2%~11%;图10(d)中,负极性电压下,两相体间隙的击穿电压较空气中的低,低3%~8%,其变化与作用电压的极性有关。

粒径范围为 $D < 10\mu\text{m}$ 的两相体以粉煤灰( $8.5\mu\text{m}$ )和超声水雾( $6.6\mu\text{m}$ )为例。在图10(e)中,正极性电压下,两相体间隙的击穿电压较空气下的高,高2%~11%;在图10(f)中,负极性电压下,两相体间隙的击穿电压较空气下的高,高3%~9%,但其变化与作用电压的极性无关。

以上结果与两相体中绝缘颗粒的介电常数及形态(固态或液态)相关性不大,并且在22~37cm的间隙范围内保持相同的效果。

#### 4 讨论

流注是大气压条件下放电的主要过程,在此过程中必须考虑电荷对电场的畸变、碰撞电离和光电离等过程<sup>[30-32]</sup>;而了解大气压条件下两相体体系中的放电发展,除大气压条件下的流注过程以外,还必须从两相体中固/液颗粒与流注前端电子崩相互作用开始,即颗粒对流注发展的影响入手<sup>[22]</sup>。至少有2个因素<sup>[22,33]</sup>必须考虑:1)流注在两相体发展过程中粒子的行为(图11)。①两相体颗粒对电子的俘获;②两相体颗粒对离子的俘获;③颗粒表面的碰撞电离和颗粒表面的光电效应;④高能光子在

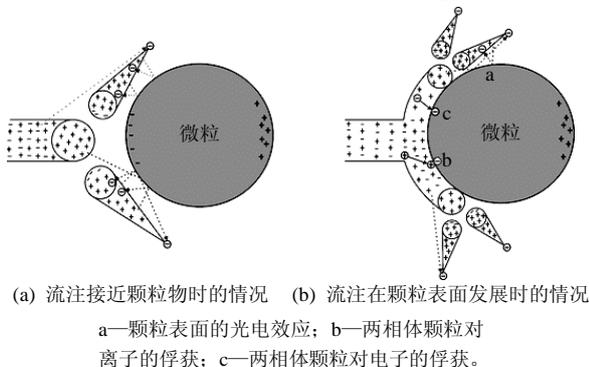


图11 流注在两相体中发展过程中粒子行为的示意图  
Fig. 11 Diagram of fundamental process contributing to ionization and attachment in a streamer propagation near a particle

电离区域内被颗粒吸收。2)两相体中电场的畸变。①颗粒对其周边电场的畸变;②两相体颗粒的相互作用产生的电场畸变;③荷电的两相体颗粒对其周边电场的畸变。本文采用冲击电压来进行实验研究,目的是减少两相体中固/液相颗粒的荷电时间,从而减少荷电的颗粒对其周边电场的畸变影响;采用低体积分数(约0.3%),颗粒间隙较大,这样减少两相体颗粒的相互作用产生电场的畸变影响。

粒径范围在 $D < 10\mu\text{m}$ 时(见图9的区域I及图10(e)和(f)),两相体间隙的击穿电压始终较空气间隙下的高,放电路径选择两相体的概率低于50%。这种情况下,每 $\text{m}^3$ 的颗粒数估计高达 $10^{14}$ 个,即两相体的颗粒数密度非常高;两相体中颗粒间距离估计小于 $50\mu\text{m}$ 。击穿电压的升高可能源于2方面的原因:1)流注前端的自由电子被颗粒俘获,引起两相体中自由电子的数量减少及存在时间下降;2)激发后辐射的光子在电离区域内被两相体颗粒吸收的数目增多,即产生的光电子数减少。这些方式不利于电子崩的形成,因此,放电路径不利于在这类两相体中发展。文献[9-13]描述了绝缘气体中加入这类微米级的雾滴提高了间隙的击穿电压或闪络电压,与此处有相同的结论。

粒径的范围在 $10\mu\text{m} < D < 100\mu\text{m}$ 时(见图9的区域II及图10(c)和(d)),正雷电冲击电压下,选择概率低于50%,两相体间隙的击穿电压较空气间隙下的高;而负雷电冲击电压下,选择概率高于50%,两相体间隙的击穿电压较空气间隙下的低。这种情况下,每 $\text{m}^3$ 的颗粒数约为 $10^8 \sim 10^{13}$ 个;两相体中放电发展是电场的变化和两相体颗粒与粒子(电子、光子和离子)间的联合作用影响的结果。在正雷电冲击电压下,形成电子崩的电子来源于电子崩前面的空间,但这些电子易于被两相体颗粒俘获,而不利于电子崩的形成,这样放电很难在两相体间隙中发展;负雷电冲击电压下,棒电极提供有利于电子崩形成的大量电子,而两相体颗粒周边的电场加快电子崩的形成,从而有利于放电在两相体中的发展。

粒径的范围为 $D > 100\mu\text{m}$ 时(见图9的区域III及图10(a)和(b)),两相体间隙的击穿电压始终较空气间隙下的低,选择概率总高于50%。这类情况下,每 $\text{m}^3$ 的颗粒数估计低于 $10^8$ 个。以颗粒粒径2mm为例,2个紧邻颗粒的平均距离超过10mm。击穿电压的降低可能源于2方面的原因。

1)从这类介电颗粒获得电子所需的逸出功远

小于空气的电离能。根据 C. F. Gallo 等<sup>[14,34]</sup>的理论, 有下面的公式:

$$E_e = \frac{e^2(\epsilon_r + 7)}{16\pi\epsilon_0 x_0(\epsilon_r + 1)} \quad (2)$$

式中:  $E_e$  为从介电颗粒获得电子的电离能;  $\epsilon_r$  为介电颗粒的相对介电常数;  $e$  为基本电荷;  $x_0$  为电子从绝缘材料表面的正电荷中心逸出的最小距离;  $\epsilon_0$  为真空介电常数。以聚乙烯为例,  $x_0 = 1.7 \times 10^{-10} \text{ m}$ ,  $\epsilon_r = 2$ , 故  $E_e = 6.35 \text{ eV}$ , 即远低于从氧气获得电子所需的电离能  $12.5 \text{ eV}$ 。因此, 从这类颗粒上获得电子比空气中较为容易。

2) 这些大粒径的颗粒引起电场的畸变范围较大, 趋向吸引附近的离子, 将加快靠近这些颗粒附近的流注及流注前端电子崩的速度。因此, 这有利于放电在这类两相体中发展。Q. Ye 等<sup>[35]</sup>在研究填充床反应器时, 采用小米(1.4~1.9 mm)和沙子(0.2~0.4 mm)作为填充物, 发现了低体积分数、大颗粒粒径时, 颗粒填充物对提高放电处理污染物效率有正面作用, 与本文结论有类似之处, 这为 A. B. Murphy 等<sup>[36]</sup>, B. S. Rajanikanth 等<sup>[37]</sup>得到的实验结果提供了解释, 该结果对等离子体填充床反应器的研制具有指导意义, 即采用低体积分数、大颗粒粒径的形式可能是一个更好的选择。

## 5 结论

本文采用 21 种不同介质材料来产生两相体, 在分析测定了两相体中固体/液滴颗粒粒径的基础上, 实验研究了两相体放电特性, 发现了气固、气液两相体的击穿电压和路径选择存在粒径的影响远大于颗粒物材料影响的“粒径效应”。现将研究结论总结如下:

1) 粒径小于  $10 \mu\text{m}$ , 放电路径都基本选择空气; 粒径大于  $100 \mu\text{m}$ , 放电路径都基本选择两相体; 粒径介于  $10$  和  $100 \mu\text{m}$  之间时, 放电路径表现出明显的极性差异, 负极性时, 放电路径基本上都选择两相体, 正极性时, 放电路径选择空气的概率高于选择两相体的概率。

2) 粒径小于  $10 \mu\text{m}$ , 击穿电压  $U_{50}$  高于空气的击穿电压; 当颗粒粒径大于  $100 \mu\text{m}$ , 击穿电压  $U_{50}$  低于空气的击穿电压; 当颗粒粒径介于  $10 \mu\text{m}$  和  $100 \mu\text{m}$  之间时, 负极性时击穿电压  $U_{50}$  低于空气的击穿电压, 正极性时击穿电压高于空气的击穿电压。

3) 两相体放电中的粒径效应是两相体颗粒对

电场的畸变和两相体颗粒与粒子(电子、光子和离子)间的作用联合影响的结果。

## 参考文献

- [1] Hamza A H A, Abdelgawad 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.
- [2] 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 Trans. on Power Delivery, 1991, 6(2): 706-714.
- [3] 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 Trans. on Power Delivery, 1991, 6(1): 421-428.
- [4] 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 Trans. on Electrical Insulation, 1992, 27(2): 193-206.
- [5] 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 Trans. on Power Delivery, 1993, 8(3): 1045-1051.
- [6] Korotkov K, Krizhanovsky E, Borisova M, et al. Time dynamics of the gas discharge around drops of liquids[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(7): 3334-3338.
- [7] Korotkov K G, Korotkin D A. Concentration dependence of gas discharge around drops of inorganic electrolytes[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(9): 4732-4736.
- [8] Grigor'ev A I, Shiryaeva S O. The possible physical mechanism of initiation and growth of lightning[J]. Physica Scripta, 1996, 54(6): 660-666.
- [9] Harrold R T. Physical aspects of vapor-mist dielectrics[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1986, 22(1): 63-69.
- [10] Yashima M, Fujinami H, Takuma T. Breakdown characteristics of gases mixed with tetrachlorethylene mist under nearly uniform fields[J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1990, 25(2): 371-379.
- [11] Yashima M, Fujinami H, Takuma T. Flashover characteristics of vapor-mist dielectrics under lightning impulse and means to increase the flashover voltage[J]. Electrical Engineering in Japan, 1993, 113(7): 11-22.
- [12] Goshima H, Suzuki T, Hayakawa N, et al. Dielectric breakdown characteristics of cryogenic nitrogen gas above liquid nitrogen[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(3): 538-544.
- [13] Nagaki Y, Itabashi S, Mitsui H, et al. Water mist formation in vapor-mist dielectrics and its effect[J]. Electrical Engineering in Japan, 1994, 114(3): 23-32.
- [14] Tardiveau P, Marode E. Point-to-plane discharge dynamics in the presence of dielectric droplets[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(10): 1204-1211.
- [15] 司马文霞, 刘贞瑶, 蒋兴良, 等. 硅橡胶表面分离水珠的局部放电对表面特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 113-118. Sima Wenxia, Liu Zhenyao, Jiang Xingliang, et al. Effects on surface performance of partial discharges due to discrete water droplets on the silicone rubber[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 113-118(in Chinese).
- [16] Zhu Y, Otsubo M, Honda C, et al. Corona discharge from water

- droplet on electrically stressed polymer surface[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(1A): 234-238.
- [17] Georgis J F, Coquillat S, Chauzy S. Modelling of interaction processes between two raindrops in an electrical environment[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1995(524): 745-761.
- [18] Skarja M, Berden M, and Jerman I. Influence of ionic composition of water on the corona discharge around water drops[J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(5): 2436-2442.
- [19] Bousaton M P, Coquillat S, Chauzy S, et al. Influence of water conductivity on micro-discharges from raindrops in strong electric fields[J]. Atmospheric Research, 2005, 76(1-4): 330-345.
- [20] IEC. IEC 60060-1 High voltage testing techniques: part1, general definitions and test requirements[S]. Geneva: IEC, 1989.
- [21] He Z, Li J. Effect of background ions on the selection of the discharge path[J]. Chinese Physics Letters, 2001, 18(2): 248-250.
- [22] 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 Heming, He Zhenghao, Xu Yuhang, et al. Effects of haze environment on discharge path under lightning impulses[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2669-2673(in Chinese).
- [23] Lang R J. Ultrasonic atomization of liquids[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1962, 34(1): 6-8.
- [24] Rajan R, Pandit A B. Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomization[J]. Ultrasonics, 2001, 39(4): 235-255.
- [25] Avvaru B, Patil M N, Gogate P R, et al. Ultrasonic atomization: effect of liquid phase properties[J]. Ultrasonics, 2006, 44(2): 146-158.
- [26] Adrian R J. Particle-imaging techniques for experiments fluid mechanics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23(1): 261-304.
- [27] 卢平, 章名耀, 陆勇. 利用 PIV 测量水煤膏雾化粒径的试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(4): 446-449.  
Lu Ping, Zhang Mingyao, Lu Yong. Experimental study on particle size measurement of atomizing coal-water paste with PIV technology[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2003, 33(4): 446-449(in Chinese).
- [28] 邓鹤鸣, 何正浩, 王蕾, 等. 混合两相体对放电路径选择的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(12): 2681-2686.  
Deng Heming, He Zhenghao, Wang Lei, et al. Effect of two phase mixtures on the selection of the discharge path[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(12): 2681-2686(in Chinese).
- [29] 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): 695-697.
- [30] 张贇, 曾嵘, 黎小林, 等. 大气中短空气隙流注放电过程数值仿真[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 6-12.  
Zhang Yun, Zeng Rong, Li Xiaolin, et al. Numerical simulation on streamer discharge of short air gap of atmospheric air[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 6-12(in Chinese).
- [31] 胡建林, 洪川, 杜林, 等. 基于有限元弱解式的棒-板长空气隙先导放电空间电场仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 148-154.  
Hu Jianlin, Hong Chuan, Du Lin, et al. Simulation study on electric field of a long rod-plane air gap during leader discharge based on weak form of finite element method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 148-154(in Chinese).
- [32] 张贇, 曾嵘, 杨学昌, 等. 大气压下流注放电光电离过程的数值仿真[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 110-116.  
Zhang Yun, Zeng Rong, Yang Xuechang, et al. Study on photoionization produced by discharge in atmospheric air by numerical method[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(5): 110-116(in Chinese).
- [33] Ye Q, Li J, Xie Z. Analytical model of the breakdown mechanism in a two-phase mixture[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(24): 3373-3382.
- [34] Gallo C F, Lama W L. Classical electrostatic description of the work function and ionization energy of insulators[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1976, 12(1): 7-11.
- [35] Ye Q, Zhang T, Lu F, et al. Dielectric barrier discharge in a two-phase mixture[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2008, 41(1): 1-5.
- [36] Murphy A B, Morrow R. Glass sphere discharges for ozone production[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2002, 30(1): 180-181.
- [37] Rajanikanth B S, Ravi V. Pulsed electrical discharges assisted by dielectric pellets/catalysts for diesel engine exhaust treatment[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(4): 616-626.



邓鹤鸣

收稿日期: 2010-02-26。

作者简介:

邓鹤鸣(1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为高电压与绝缘、高电压新技术及其应用, denghem@gmail.com;

何正浩(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电压与绝缘、高电压新技术及其应用, hzh@hust.edu.cn。

(责任编辑 马晓华)