

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.07.033

强电场对低速气固两相流体运动影响的模拟试验研究

薛朝晖¹, 王 燕², 刘 靖¹, 贺 博³

(1. 海军指挥自动化工作站, 北京 100841; 2. 西安航天动力测控技术研究所, 西安 710025;

3. 西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710061)

摘要: 研究小粒径固-气混合流体在强电场区域的运动规律对于解释沙尘气候环境下线路绝缘子表面污秽沉积、间隙击穿、不明闪络等绝缘事故具有促进作用。文中基于人工模拟试验, 利用PIV技术系统研究了低速混合流体的流电耦合运动规律, 综合对比了电场不均匀度、电压等级、风速等因素对于流场分布的影响。结论发现: 在不均匀电场下, 电场对于流场的作用要明显强于均匀电场, 且随着外施电场强度的增加而增加, 随风速的增加而有所减弱; 均匀电场下粒子有向负极板运动的趋势, 而不均匀电场下粒子因为电晕作用而荷电明显, 易于向正极板运动。相关结论对于深化沙尘环境下输电线路外绝缘特性研究, 特别是小粒径颗粒荷电机理具有积极意义。

关键词: 风沙; 气固两相流体; 流电耦合; 人工模拟试验; PIV

Simulation Experiment of the Impact on the Motion of the Particle in Dual-phase Distribution of Gas & Solid Under Strong Electric Field

XUE Zhaohui¹, WANG Yan², LIU Jing¹, HE Bo³

(1. Navy Command Automation Workstation, Beijing 100841, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Test Institute, Xi'an 710025, China;

3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The research on the law of motion of small particles in the dual-phase distribution of gas & solid under strong electric field could better explain why the contamination depositing on the surface of the insulators, the gap breakdown, the unknown flashover or some other insulation accident happened. Based on the simulation experiments, the law of motion of small particles were discussed under low velocity and the coupled fluid and electric field with the using of PIV. With comprehensive comparison of the Electric field distribution, the applied voltage, the wind velocity, the obtained results show that the effect of electric field on the fluid field under the nonuniform electric field is significantly stronger than under uniform electric field. What's more, with the applied voltage increased, the effect obviously increased, while the wind velocity increased, the effect significantly decreased. The particles have a trend motion to the negative electrode under uniform electric field. While under nonuniform electric field, the particles have a trend motion to the positive electrode, because the effect of the cathode corona the particles are more easily to be charged.

Key words: sandstorm, dual-phase distribution of gas & solid; flow-electric field coupling; simulation experiment; particle image velocimetry(PIV)

0 引言

在输电线路外绝缘领域, 强风和沙尘天气作为极端恶劣的气候条件, 容易导致污秽闪络、间隙放

电和不明闪络等各类绝缘安全事故^[1-2]。对于输电线路路上具有高场强的间隙环境而言, 正常气象条件下, 间隙介质环境可以认为是洁净的空气, 而在强风及沙尘环境下, 介质环境则由洁净空气变成了具有一定流速和粒子浓度的气固两相混合流体。该混

合流体的流动规律对于间隙击穿、表面污秽沉降、电场畸变均具有直接的影响作用^[3]。

以沙尘暴气候对于高压输电线路外绝缘特性影响为对象,国内外学者从模拟试验的角度出发,采用较大粒径固体颗粒(10 μm 数量级以上粒径)制作试样进行了击穿电压测定、污秽沉降规律等方面的研究工作^[4-6]。但是从风沙的起动和输运规律来说^[7-10],粒径大的颗粒物主要分布在风沙流的底部,而粒径越小的颗粒物其主要分布区间在风沙流的顶部。而且由于小粒径的颗粒物(<10 μm)在运动过程中受到更大的粘滞阻力,因而处于一个相对较低的移动速度。因此对于要穿越沙尘天气多发区域的具有一定高度的架空输电回路而言,有必要研究以小粒径颗粒物主要构成的低速气固两相混合流体在流、电耦合作用下的运动问题。

对于粒子在流、电耦合场中运动规律的研究目前主要限于数值模拟。以数值模拟配合验证性试验,国内外学者讨论了固体颗粒物的荷电模型,颗粒物介入后电场的求取模型等^[11-14],但讨论对象受限于较大的粒径尺度和数量稀少的颗粒数。对于高场强作用下小粒径颗粒物群体低速运动规律并没有开展实测。

近年来,粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术的发展建立,使得高精度的小粒径固体颗粒物运动场测量变为可能^[15-16]。PIV 技术可以利用实验跟踪、显示粒子流的运动轨迹和速度矢量等方法,针对粒子在流电耦合场中的运动问题从微观层面直观的获得粒子在耦合场中的运动规律,是一种有效地解决颗粒气固两相流体在电场作用下的运动问题的方法,弥补了关于此类问题在试验测量上的不足。

文中基于人工模拟试验,利用 PIV 技术系统

研究了小粒径粒子群体在流、电耦合场中的运动规律,综合对比了电场不均匀度、电压等级、风速等因素对实测结果的影响,并对影响规律做了解释。相关结论对于从微观层面揭示沙尘环境下的污秽沉积以及分布机理、间隙击穿放电及不明闪络本质具有促进作用,对于增进目前对于小粒径颗粒物的荷电机理认识、改进荷电模型也具有积极意义。

1 试验介绍

1.1 试验平台

模拟试验平台主要由 3 个部分组成:流场装置、电场装置以及测量装置。图 1 为试验平台的示意图。图 1 中:流场装置主要包括风洞、吸入式风机等;电场装置主要包括电极系统、稳压直流电压源;测量装置为 PIV 测量系统(激光器、专用相机、分析工作站等)。通过调节阀可以控制吸入式风机的转速,最大可产生 5 m/s 的风速。电极系统见图 2,主要包括两种电极形式:板—板电极和针—板电极。板电极是不锈钢材质,表面抛光,220 mm×220 mm 方形,厚度为 10 mm,放置于绝缘材料制成的电极支架上,可通过电极支架滑动实现电极间距的调节;针电极是铜材质,圆柱形,长度 50 mm,直径 2 mm,针尖的曲率半径在 8 μm 左右。为了最大限度地克服边缘湍流对于流场的影响,将针端位置调整到下侧板电极的中间,见图 3。试验电压为稳压直流源,可提供最大 200 kV 的负极性电压,测量粒子(示踪粒子)由右侧进风口进入待测强场区域。PIV 测量中,脉冲激光器可以产生厚度为 1 mm 的激光片光,由风洞进口投射到电极的中心位置,专用相机同步采集电极区域流场图像,然后通过专业分析软件,获取观测区域的流场分布情况。

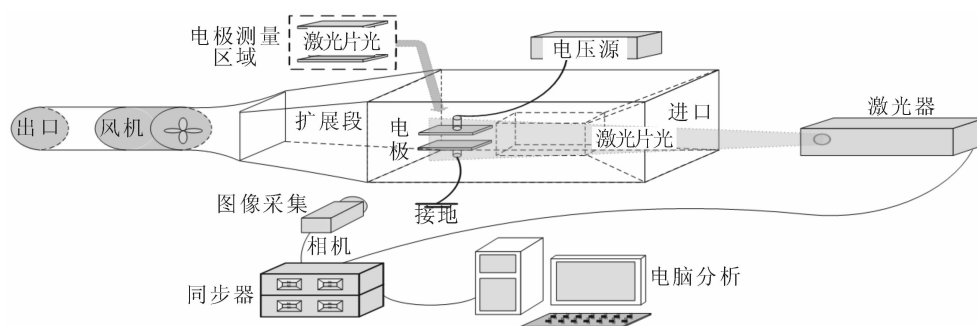


图 1 模拟试验平台示意图

Fig. 1 Schematic of the simulation experiment platform

1.2 试验安排与方法

文中以低速气固混合流体介质在流、电耦合场中

的运动为研究对象,结合前期试验的调研工作,确定试验风速为 0.6 m/s 和 1.2 m/s,符合低速流场条件。参

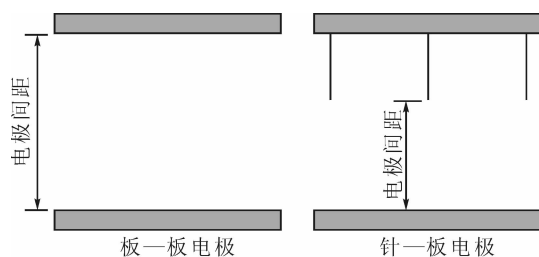


图2 试验用电极中心截面示意图

Fig. 2 Cross section of the electrodes in experiment

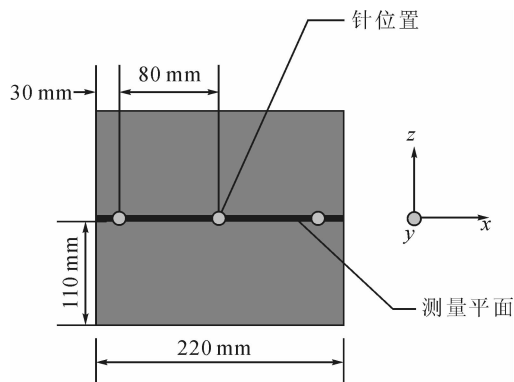


图3 试验用电极俯视图

Fig. 3 Top view of the electrodes in experiment

考沙尘天气中的飘尘粒子的粒径分析,确定试验所用的测量粒子的粒径为 $10\ \mu\text{m}$ 以下,属小粒径易悬浮颗粒。施加电压量值小于对应间距条件下击穿电压。

每次实现前,用蒸馏水和酒精清洗电极表面,保证表面清洁。试验中,下板电极接地,上侧电极(板或针)接负压直流或者工频交流电压。首先采用渐变的方式缓慢升高电压输出至期望值,等输出稳定后开启流场引入混合流体并等待 $5\ \text{s}$,流场持续稳定后再启动 PIV。

2 试验结果与分析

2.1 粒子运动与电场不均匀度的关系

为了研究粒子运动与电场不均匀度的关系,在保证电极间距和风速不变的情况下,改变电极类型进行试验,见图 4、5。

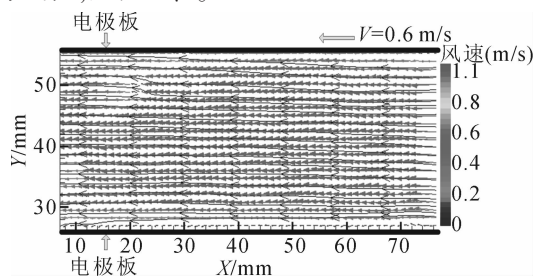


图4 平行板—板电极,电极间距 30 mm(电压 25.7 kV, 风速 0.6 m/s)

Fig. 4 Plane-plane electrodes with distance of 30 mm (Voltage is 25.7 kV, and wind speed is 0.6 m/s)

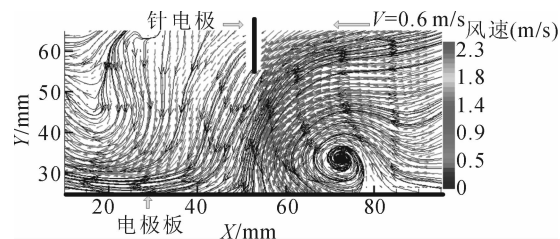


图5 针—板电极,针尖距离下极板 30 mm(电压 45 kV, 风速 0.6 m/s)

Fig. 5 Needle-plane electrodes with distance of 30 mm (Voltage is 45 kV, and wind speed is 0.6 m/s)

由图 4 可以看出,板—板电极、均匀电场分布下,颗粒运动基本呈现平流特性,仅在靠近负极表面处出现轻微上扬,有向阴极聚集的趋势,中间区域固粒群运动速度和风速相近($0.6\ \text{m/s}$),在靠近上下极板的位置附近,由于受到壁面粘滞阻力的影响,其速度较低,大约在 $0.2\ \text{m/s}$ 左右。由图 5 可以看出,在针—板电极、极不均匀电场分布下,颗粒明显向着阳极运动,尤其是在针尖的下方位置,颗粒几乎是沿着直线垂直向着阳极运动,在颗粒流靠近针尖和离开针尖的位置处,颗粒均呈现加速趋势,速度大小达 $1.4\ \text{m/s}$ 左右,在下方,受流场和电场的双重作用,形成了明显的涡流。

2.2 粒子运动与电压等级的关系

为了研究粒子运动与电压等级的关系,在保持相同电极型式、风速和间距的条件下,仅改变施加电压量值进行了试验见图 6。

由图 6 板—板电极的测量结果可以看出,在均匀场作用下,固粒群体运动仍保持了平流的特性,没有湍流出现,但随着电压等级的提高,粒子运动向着阴极聚集的趋势越来越大。在极不均匀电场作用下,粒子明显向阳极板运动,并且随着电压的增高,电场作用越来越强,尤其在针尖下方区域内,见图 7。在图 7(b)中,针尖下方颗粒尚具有水平分量,而在图 7(c)中,水平速度分量几乎消失,颗粒群体速度方向几乎和极板垂直。此外,在靠近针尖部位,粒子的加速作用非常明显,其速率明显大于其它部位粒子。

2.3 粒子运动与风速变化的关系

风速作为影响流场的一个重要因素,其大小变化会影响粒子在流、电耦合场中的运动。为了研究粒子运动与风速大小的关系,在保持电极型式、电极间距和电压等级不变的情况下,改变风机风速进行试验。试验结果见图 8、9。

由图 8 可以看出,对于平行板—板电极来说,在间距 $50\ \text{mm}$ 、电压 $42.8\ \text{kV}$ 下,随着风速的增大,

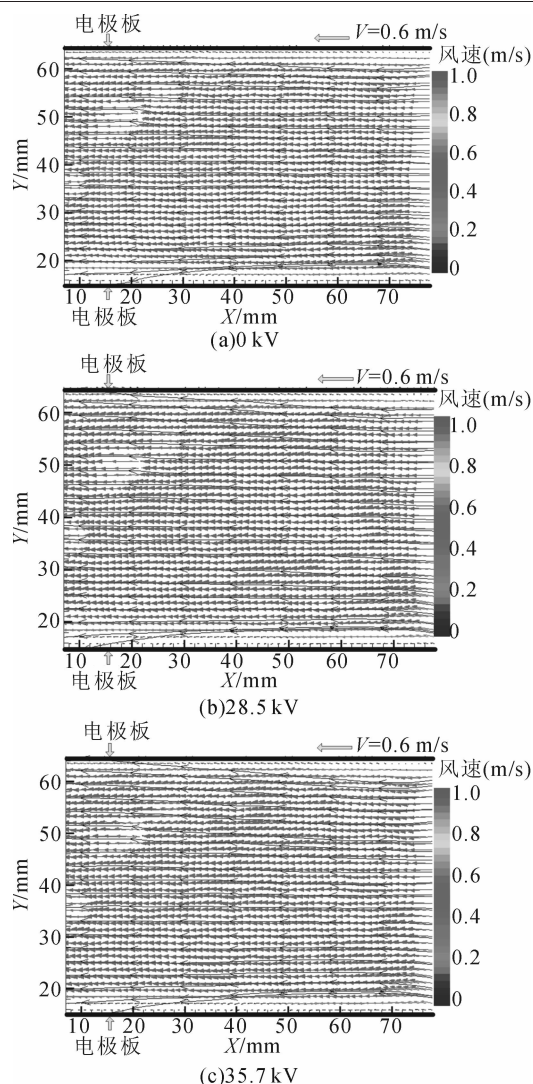


图6 板—板电极,电压与粒子运动关系(间距 50 mm, 风速 0.6 m/s)

Fig. 6 Relationship between the voltage and particles motion for plane-plane electrodes (Electrodes distance is 50 mm, and wind speed is 0.6 m/s)

粒子上扬(向着阴极偏转)的趋势减弱,尤其是在图8(b)中,在 1.2 m/s 相对较大风速下,粒子几乎是沿着直线向前运动的。由于电场的作用主要体现在垂直方向,而流场作用主要体现在水平方向,因此可以认为当风速增加时,电场对于粒子运动的影响在逐渐减弱。由图9可以看出,对于针—板电极而言,随着风速的增大,粒子速度矢量中沿垂直方向的速度分量比例在减小,导致流线矢量更趋于水平方向,这表明,流电场耦合下颗粒的运动和流体速度与平均电场强度的比有关,这和文[17]中的研究结论相吻合。

3 讨论

粒子在流、电场中的运动,其强耦合性表现在:

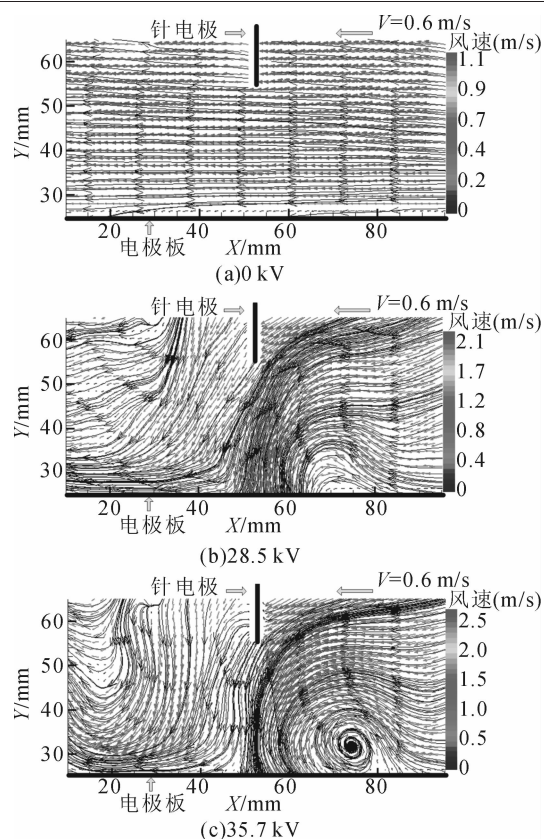


图7 针—板电极,电压与粒子运动关系(间距 30 mm, 风速 0.6 m/s)

Fig. 7 Relationship between the voltage and particles motion for needle-plane electrodes (Electrodes distance is 30 mm, and wind speed is 0.6 m/s)

从电场角度来看,颗粒物进入到高电场区域时,会发生荷电现象,颗粒与空气介电常数等参数的差异,以及颗粒荷电后的带电性导致其周围的局部电场发生畸变,从而使颗粒受到了额外的电场力的作用,改变了颗粒的受力情况,其运动必然发生变化进而影响到空间内的流场;从流场角度看,颗粒的运动发生变化,必然导致颗粒的空间分布发生变化,而荷电颗粒的空间分布又进一步影响到空间的电场分布。

根据文[18],研究这种低速气固混合流体介质在流、电耦合场中的运动问题,粒子在流经电场区域时的荷电方式以及荷电后电荷量的大小将直接关系到粒子所受到电场力的大小,而且由粒子在流电场中的 Navier-Stokes 方程、质量与动量守恒方程等可以得到,粒子在混合场中的某时刻运动状态决定于其所受外界作用力。因此,粒子在流、电耦合场中的运动是由其所受流场力和电场力所共同支配的。

由电场力的计算公式 $F_e = E \times Q$ 可以看出,颗粒自身电荷量和电场力成正比。在均匀场中不能出现电晕现象,而在极不均匀场中可以出现强烈的电晕

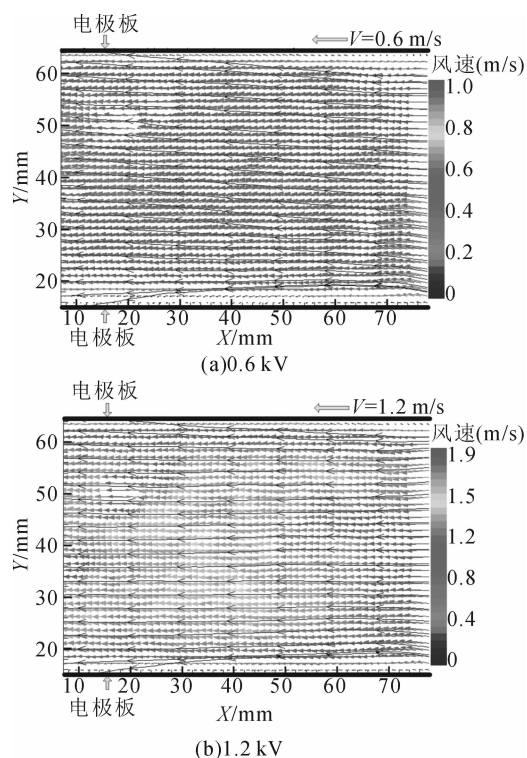


图 8 板—板电极, 风速与粒子运动关系(电压 42.8 kV, 间距 50 mm)

Fig. 8 Relationship between the wind speed and particles motion for plane-plane electrodes (Voltage is 42.8 kV, and electrodes distance is 50 mm)

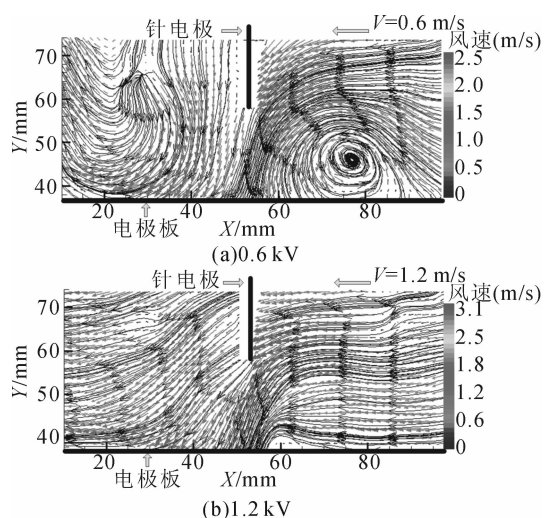


图 9 针—板电极, 风速与粒子运动关系(电压 42 kV, 间距 20 mm)

Fig. 9 Relationship between the wind speed and particles motion for needle-plane electrodes (Voltage is 42 kV, and electrodes distance is 20 mm)

现象, 在文中的针电极端部, 由于曲率非常大, 加上负极性的电压施加, 电晕的出现会在电极间注入大量电子。按照已有的研究结论, 小粒径固体颗粒的荷电以吸附荷电为主, 即颗粒与离子发生吸附而导

致颗粒自身带电。当颗粒经过高浓度离子分布的电晕区时, 其与离子相互碰撞的几率和数量都将远远大于没有电晕区的板—板电极。因此在针—板电极电晕区内, 粒子会获得较大的荷电量, 其电场运动也随之更加明显。

在电极间距不变的情况下, 提高电压等级, 在一定程度上增大了电场强度值, 电场力的作用表现的更加明显, 导致了粒子的电场运动趋势随之得到加强。

而当测量区域内的风速提高时, 粒子所受到的流场力增大, 在电场中停留的时间被缩短。由于荷电过程包含稳态和暂态两个过程, 颗粒需要一定的时间才能到达荷电饱和稳态。风速的提高, 一方面减小了颗粒运动速度矢量中因荷电导致的垂直分量比例, 此外, 在电场区域停留时间的减小, 也不利于获得较大的荷电量, 因此综合导致了颗粒物电场作用下运动的减弱。

颗粒发生荷电后, 其携带电荷量并不是保持最大荷电量一成不变, 而是随着颗粒物移动出现变化, 由以上关于针—板电极的测量结果可以看出, 离开针端后, 很大一部分颗粒的水平速度分量逐渐占主导, 表明自身携带电荷量在减少, 而且速度越大, 电荷量减少越明显。其原因主要在于颗粒和离子的结合程度, 对于导电性差的颗粒物而言, 由于颗粒物表面的电荷以松弛的方式和表面吸附, 在运动过程中, 由于和周围空气分子的碰撞, 会出现电荷量的丢失。

超细粒径颗粒物在移动中, 会出现表面松弛结合负电荷层的碰撞丢失, 从而导致了均匀场颗粒物的轻微上扬。

4 结论

1) 对于流电耦合场中小粒径颗粒的运动而言, 不均匀场下电场的影响作用更明显;

2) 在电极间距和风速不变的情况下, 随着电压等级的提升, 在板—板电极下, 粒子向着负极板运动的趋势被加强, 在针—板电极下, 粒子向着正极板运动的趋势加强;

3) 在电场环境不变的情况下, 随着风速的增大, 电场的影响作用变弱;

参考文献:

- [1] SCHMIDT D S, SCHMIDT R A. Electrostatic force on saltating sand[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103 (8): 8997-9001.
- [2] HAMZA A S H A, ABDELGAHAWAD N M K. Effect of desert environmental conditions on the flashover voltage of insula-

- tors[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(17): 2437-2442.
- [3] HE B, ZHANG G, CHEN B F, et al. A study on the influence of sand-dust environment on air-gap breakdown discharge characteristics of plate-to-plate electrode[J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy, 2010, 53(3): 458-464.
- [4] 邓鹤鸣, 何正浩, 马 军, 等. 沙尘天气下大沙粒对放电发展的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1246-1252.
- DENG Heming, HE Zhenghao, MA Jun, et al. Effect of large sand dust particles on discharge development in sand dust weather[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1246-1252.
- [5] 贺 博, 万 军, 陈邦发, 等. 人工模拟沙尘暴环境下绝缘子积污特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1510-1516.
- HE Bo, WAN Jun, CHEN Bangfa, et al. Contamination depositing characteristics of suspension insulators under sandstorm circumstance simulated artificially[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(12): 1510-1516.
- [6] 司马文霞, 程浩, 杨 庆, 等. 沙尘环境下绝缘子交流闪络特性及机理[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 834-840.
- SIMA Wenxia, CHENG Hao, YANG Qing, et al. AC flashover performance and mechanism of insulator in wind sand environment[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 834-840.
- [7] SAND M J P. Erosion and granular electrification[J]. Aeolian Research, 2011(4): 1-16.
- [8] XIAO Fengjun, GUO Liejin, LI Debiao, et al. Discrete particle simulation of mixed sand transport[J]. Particology, 2012, 10(2): 221-228.
- [9] 李荫堂, 余圆元, 孟海燕. 沙尘起动初期近地面浓度分布数值模拟研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 492-497.
- LI Yintang, SHE Yuanyuan, MENG Haiyan. Numerical simulation of the near surface particle concentration at the early stage of blown sand emission[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(3): 492-497.
- [10] 董治宝. 风沙起动形式与起动假说[J]. 干旱现象, 2005, 23(2): 64-69.
- DONG Zhibao. The Entrainment modes of blown sand particles and the corresponding theoretical hypotheses[J]. Arid Meteorology, 2005, 23(2): 64-69.
- [11] DUAN Shaozhen, CHENG Ning, XIE Li. A new statistical model for threshold friction velocity of sand particle motion[J]. Catena, 2013(104): 32-38.
- [12] 杨长河. 气水混合两相体放电现象及机制的理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- YANG Changhe. Theoretical & experimental study on the phenomena/mechanism of discharge in air-water two-phase mixture[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [13] SAIYASITPANICH P, KEENER T C. Removal of diesel particulate matter (DPM) in a tubular wet electrostatic precipitator[J]. Journal of Electrostatic, 2007, 65(10): 618-624.
- [14] PODLINSKI J, NIEWULIS A, SHAPOVAL V, et al. Electrohydrodynamic secondary flow and particle collection efficiency in a one-sided spike-plate type electrostatic precipitator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1401-1407.
- [15] 杨 斌, 王 元, 王大伟. 风沙两相流测量技术研究进展[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 580-590.
- YANG Bin, WANG Yuan, WANG Dawei. Development of wind-sand flow measurement techniques[J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(4): 580-590.
- [16] JONG J F, ODU S O, BUIJTENEN M S, et al. Development and validation of a novel digital image analysis method for fluidized bed particle image velocimetry[J]. Powder Technology, 2012(230): 193-202.
- [17] SKODRAS G, KAIKAS S P, SOFIALIDIS D, et al. Particulate removal via electrostatic precipitators-CFD simulation[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87(7): 623-631.
- [18] LONG Zhengwei, YAO Qiang. Evaluation of various particle charging models for simulating particle dynamics in electrostatic precipitators[J]. Journal of Aerosol Science, 2010(41): 70-72.
- 薛朝晖(1975—), 男, 工程硕士, 研究方向为通信电源。
- 王 燕(1971—), 女, 高级工程师, 硕士研究生, 研究方向为测试计量技术及仪器。
- 刘 靖(1975—), 男, 硕士, 研究方向为计算机应用。
- 贺 博(1976—), 男, 博士, 主要研究方向为污秽闪络在线检测和闪络风险预警方法, 大气中沿面闪络机理。

(上接第 170 页)

- er's electrical life[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(12): 38-41.
- [21] 刘 连. 12 kV 智能开关柜的一体化设计及实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- LIU Lian. Integrated design and implement of 12 kV smart switchgear[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- 喻冬梅(1976—), 女, 硕士、高级工程师, 主要从事智能开关设备的研发。