

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.11.018

高速气流对环氧树脂车顶绝缘子电痕深度影响的研究

包健康^{1,2}, 张血琴¹, 高 波¹, 吴广宁¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 针对高速列车环氧树脂车顶绝缘子沿面放电产生电痕, 导致绝缘性能下降, 以受电弓车顶绝缘子为研究对象, 基于Ansys建立了绝缘子流体计算模型和沿面放电的三维非线性电热耦合模型。分析了绝缘子周围气流气压分布, 以此分析了气流气压对电痕深度在绝缘子圆周方向和沿爬电距离变化的影响, 并研究了列车运行速度对电痕深度的影响。研究表明: 列车运行使绝缘子周围气流气压发生畸变, 形成不均匀分布; 侧风区电痕深度较小, 迎风和背风区电痕深度较大, 其中侧风区50°电痕深度最小, 背风区180°电痕深度最大, 护套电痕深度较大, 伞裙边沿电痕深度较小; 电痕深度随着运行速度加快先缓慢下降、后迅速下降、最后变缓, 侧风区电痕深度下降最快, 迎风区快于背风区。

关键词: 车顶绝缘子; 环氧树脂; 电痕深度; 高速气流; 爬电距离

Effects of Speedy Airflow on Trace Depth of Roof Epoxy Insulator

BAO Jiankang^{1,2}, ZHANG Xueqing¹, GAO Bo¹, WU Guangning¹

(1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 401123, China)

Abstract: Regarding the insulation performance degradation of the epoxy insulators on roof of high-speed trains due to surface discharge, a fluid model and a three-dimensional nonlinear transient electric-thermal coupling model of roof insulator for pantograph are established with the software Ansys to analyze the airflow and pressure distributions around the insulator, the variation of trace depth with airflow velocity and pressure in circumferential direction and along the creeping distance, and the effect of train speed on trace depth. The results show that: 1) the movement of the train make airflow pressure distort, forming an uneven distribution; 2) the trace depth is small in crosswind area but large in windward and leeward areas, where the minimum depth is in 50° direction of the crosswind area and the maximum depth is in 180° of the leeward area, and the trace depth is small on skirt edge but large on jacket; and 3) With train speed increasing, the trace depth slowly declines at first then decreases rapidly and returns to slow decline in the end, where the fastest decline rate of the trace depth appears in crosswind area, and the decline rate is higher in windward area than in the leeward area.

Key words: roof insulator; epoxy; trace depth; speedy airflow; creeping distance

0 引言

绝缘子是电气化铁路中重要的高压部件, 在牵引供电系统中起着支撑和绝缘作用^[1-5]。环氧树脂车顶受电弓绝缘子是分隔车壁与受电弓的重要部件, 其绝缘性能直接影响列车的安全运行^[6]。环氧树脂材料电气性能良好, 机械强度高, 成为目前最适合

户外服役的绝缘子类型, 但与无机绝缘材料相比, 其耐电痕能力较差, 常在维护检修中发现绝缘子表面有电痕破坏现象^[7-8]。

电痕破坏原因为环氧树脂车顶受电弓绝缘子常年经受风沙、雨、雾等恶劣气候的侵袭, 一旦表面沉积污秽受湿, 产生导电通道, 泄漏电流导通上下两极。较大的泄漏电流会将绝缘子表面局部区域水分蒸发, 形成干区, 干区场强达到空气临界电场强度会引发电弧放电现象。瞬间囤积的热量可导致环

收稿日期: 2017-05-09; 修回日期: 2017-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1234202, 51507146)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(U1234202, 51507146).

氧树脂材料化学性能活跃,物理性能下降,材料表面局部碳化和电蚀^[9]。

目前国内外学者主要在室内低风速环境中分析绝缘子的耐电痕的性能。文[10]分别用斜板试验、低电流电弧电阻试验、1 000 h 盐雾法和转轮法试验,并进行对比测试。文[11]提出灰尘、雾测试与斜面测试相结合进行的新方案,通过采集泄漏电流和高速摄像机观察放电现象,并建立了闪络预测模型来评估环氧树脂基绝缘性能。文[12]基于 IEC 60587—2007 标准,利用放电红外温升图研究了绝缘子在高压直流下的耐电痕特性。文[13]采用斜面法试验以研究复合材料的耐直流电蚀及耐电痕性能,并提出相应改进建议。以上文献均是在低风速环境中进行的耐电痕实验,由于高速气流对电弧及车顶绝缘子的冷却作用不容忽视,且高速气流对绝缘子周围气流气压有决定性影响,其实验结论并不能适用于高速运行的环氧树脂车顶绝缘子,因此需要分析高速气流对绝缘子产生电痕的影响。

文中为分析高速气流对环氧树脂车顶绝缘子耐电痕的影响,首先利用 Ansys/Fluent 模块仿真分析不同风速中车顶绝缘子周围气流速度分布和气压分布,再建立绝缘子沿面放电产生电痕的三维电热耦合非线性有限元模型,分析了高速气流对绝缘子产生电痕深度的影响,并研究了列车速度对绝缘子放电产生电痕深度的影响。

1 理论分析

1.1 产生电痕条件确定

环氧树脂绝缘子产生电痕前,泄漏电流的焦耳热使干区部分水分全部烘干至泄漏电流终止,周围环境湿度也可再次润湿污秽,重复上述干区形成与电弧放电过程。泄漏电流大小、放电火花形成均取决于与干区相串联的湿污层电阻值。见图 1,为绝缘子任意位置产生一根局部电弧等效物理模型示意图,电弧长度为 x 。一般情况下,作为污闪条件的电弧为几厘米以上,电弧电压主要是弧柱压降,忽略了弧根压降,因此绝缘子两极电压由剩余电阻和局部电弧组成^[14]。

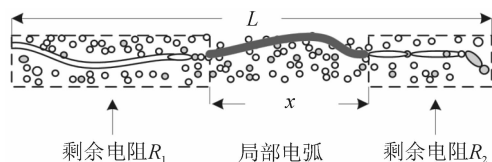


图 1 绝缘子产生电弧示意图

Fig. 1 Insulator arc diagram

$$U = AxI^n + R(x)I. \quad (1)$$

式(1)中: U 为绝缘子两端电压; I 为表面污层电流; $R(x)$ 为电弧长为 x 的剩余污层电阻; A 、 n 为交流情况下的电弧常数, $A=140$, $n=0.76$ ^[15]。

考虑污层均匀分布时剩余电阻计算式^[16]为:

$$R(x) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L-x)}{a} + \ln \frac{a}{2\pi r} \right]; \quad (2)$$

$$\gamma_e = 4.5 \times 10^{-4} \rho_{SDO}. \quad (3)$$

式(2)、(3)中: γ_e 为污层表面电导率; ρ_{SDO} 为附盐密度; a 为污层宽度; r 为弧根半径; L 为爬电距离。

弧根半径 r 与电流幅值有关^[17],表达式为

$$r = \sqrt{\frac{I}{1.45\pi}}. \quad (4)$$

对于交流情况,电弧熄灭后再次恢复放电才有可能发展至闪络。有明显熄灭重燃现象的交流电弧,电弧恢复条件^[18]为

$$U = 1\,050x/I. \quad (5)$$

受电弓车顶绝缘子型号参数确定后,联立式(1)~(5)可得 γ_e 、 I 和 x 三者的关系

$$1\,050x = AxI^{n+1} + \frac{1}{\pi\gamma_e} \ln \left(\frac{L-x}{\sqrt{I/1.45\pi}} \right). \quad (6)$$

当电弧电流有效值足够大时,受电弓车顶绝缘子环氧树脂材质可产生电痕现象。因此,根据式(2)、(6),带入一定的电弧电流,设置一定的附盐密度,可得弧根半径和弧长。由弧根半径代替弧道半径,忽略放电持续过程中弧道半径的变化。

热导率、密度、比热容、电导率是表征电弧等离子体的 4 个重要物性参数,4 个参数均与温度有非线性关系,当电弧内部温度改变时,物性参数也将随之发生改变,其物性参数能够从文[19]中查找得到。

1.2 模型建立

CRH380 动车组使用环氧树脂绝缘子比例达 80%以上,环氧树脂受电弓车顶绝缘子具有高度低、电气间隙小的特点,以此作为研究对象,环氧树脂受电弓车顶绝缘子结构参数见表 1。

表 1 环氧树脂车顶受电弓绝缘子结构参数

Table 1 Parameters of epoxy roof pantograph insulator

结构	伞径			芯棒直径 (上/下)	爬电距离
	大	中	小		
高度	400	300	280	230	72/128
					1 243

文中考虑列车不同运行速度下,高速气流对绝缘子周围气流和气压的影响,绝缘表面与电弧的对热换流系数随列车运行速度而变化,利用式(7)计算对热换流系数^[20]

$$h = cv^n v_m^{-n} d_m^{n-1} \lambda_m P_m^{1/3}. \quad (7)$$

式(7)中: $c=0.683$, $n_1=0.466$; v 为气流速度; d 为等效半径; P_m 为相对大气压数; v_m 、 λ_m 为空气参数,与温度有关。

绝缘子放电类型可分为沿介质表面放电和长空气间隙击穿两种形式,受气流风速和气压的影响,其放电位置随机出现在绝缘子各处。电弧热量对表面破坏起主要作用,而高能离子的撞击起次要作用。绝缘子表面产生电痕的过程为绝缘子表面受电弧作用温度上升,发生热分解碳化的过程。文中为分析列车运行车速对绝缘子沿面放电产生电痕的影响,首先利用 Ansys/Fluent 流体仿真软件分析列车运行过程中绝缘子周围气流速度和周围气压分布,并利用式(7)计算对热换流系数;再利用电热耦合的仿真方法对绝缘子发生沿面放电进行研究,建立发生局部放电时,电弧温升和绝缘子受热的三维非线性有限元模型,列车运行车速对绝缘子放电温升的影响过程见图 2。

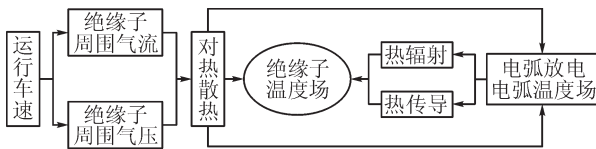


图 2 列车运行车速对绝缘子放电温升的影响过程

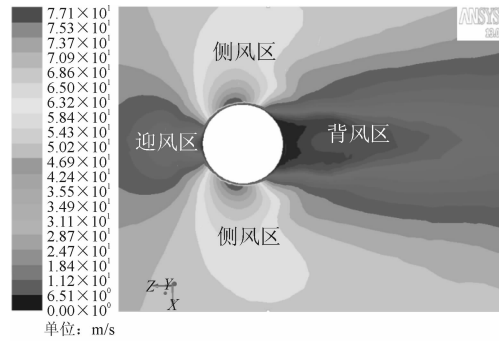
Fig. 2 Influence the process of speed train running on the insulator discharge temperature rise

2 仿真结果与分析

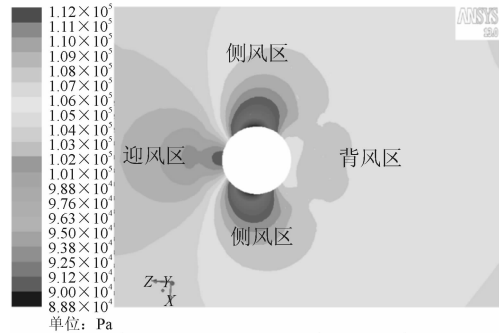
2.1 绝缘子周围气流气压对换流系数的影响

CRH380 列车高速运行时,绝缘子遭受强气流作用,气流场边界层效应使得绝缘子表面存在薄层区域,气流速度很小。文中计算所得弧道半径大于 4 mm 在边界层外,气流气压对电弧及绝缘子的冷却作用不容忽视。绝缘子周围气流气压分布随列车运行速度发生改变,利用 Ansys/Fluent 软件对绝缘子周围气流气压进行仿真,绝缘子在相对风速 50 m/s (即运行速度 180 km/h)条件下的气流速度分布和气压分布见图 3。

图 3(a)表明,侧风区气流速度有所升高,绝缘子迎风和背风区气流速度有所下降,且背风区气流速度下降最多,当相对风速 50 m/s 时,侧风区气流速度最高超过 70 m/s,背风区气流速度低于 10 m/s,同时迎风区气流速度部分低于 50 m/s。图 3(b)表明,迎风区气压较高,背风区和侧风区气压较低,其中侧风区气压最低,当仿真相对风速为 50 m/s 时,迎风区气压相对大气压数为 1.12,而侧风区气压相对大气压数为 0.888。



(a)相对风速 50 m/s 时气流速度云图



(b)相对风速 50 m/s 时气压分布云图

图 3 相对风速 50 m/s 时气流气压分布云图

Fig. 3 Airflow and pressure contours with relative wind speed 50 m/s

列车运行,绝缘子迎风区气流速度下降,气压升高,侧风区气流速度上升,气压下降,背风区气流速度下降剧烈,但气压与大气压相近。由式(7)知,换流系数是关于气流速度和相对大气压数的函数,当其他条件已知时,由气流速度和相对大气压数可计算得绝缘子周围的对热换流系数,从而得到绝缘子周围的散热强度。

2.2 气流气压分布对绝缘子电痕深度的影响

电痕深度表示产生电痕的最大深度,电痕深度可利用环氧树脂的热分解温度进行表征,具体定义为从表面到内部某点为环氧树脂热分解温度的最大距离。

绝缘子发生沿面放电,电弧通道随机出现在绝缘子表面,产生电痕会受到畸变气压和不均匀气流的影响,其影响同时满足对称性,所以仅考虑 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的分布情况,见图 4(a),绝缘子迎风区角度 $0^\circ \sim 45^\circ$,侧风区角度 $45^\circ \sim 135^\circ$,背风区角度 $135^\circ \sim 180^\circ$ 。为分析气流气压分布对绝缘子产生电痕的影响,设定相对风速为 50 m/s,选择绝缘子护套、绝缘子上表面和绝缘子下表面,角度从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的典型位置,利用电热耦合进行仿真分析,见图 4(b)。为分析气流气压分布对绝缘子放电产生电痕沿爬电距离的影响,选择圆周角为 0° 、 90° 、 180° 的绝缘子爬电路径。

受气流气压不均匀分布的影响,电弧和绝缘子

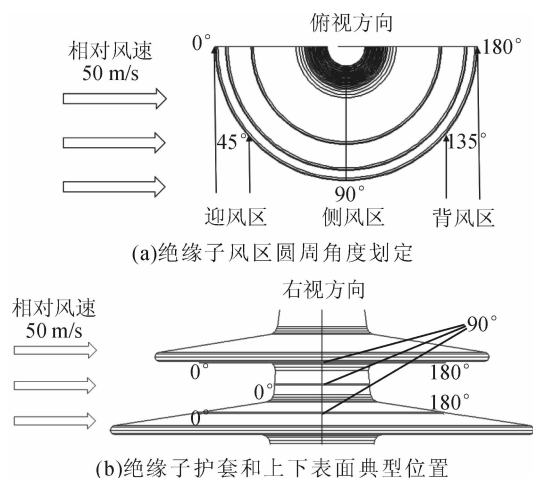
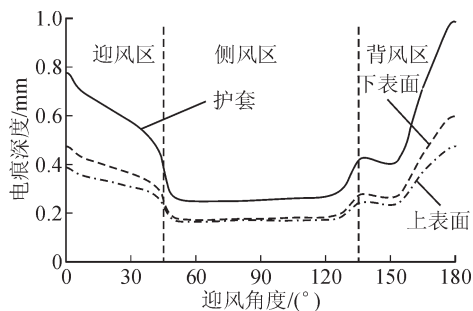


图 4 绝缘子仿真路径

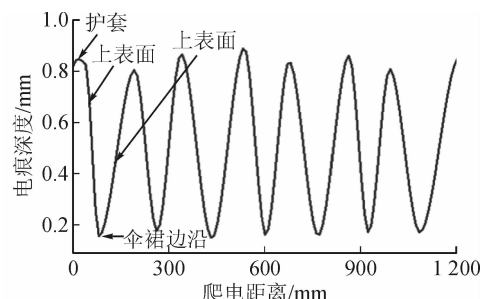
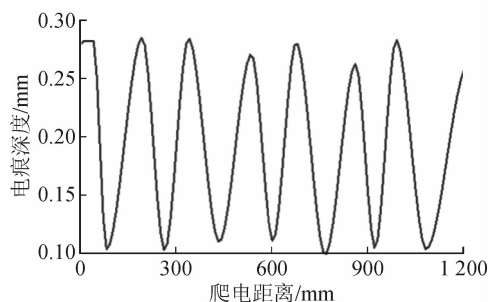
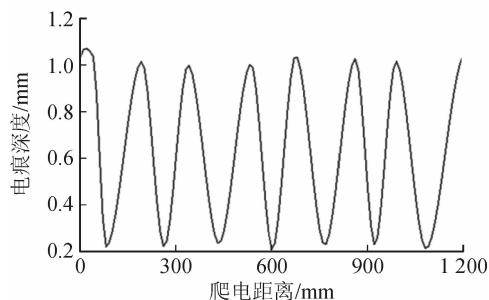
Fig. 4 Simulation path of insulator

的散热冷却在圆周方向上变化较大。电痕深度在绝缘子圆周角变化情况见图 5, 由图 5 可知, 护套电痕深度较大, 护套和伞裙上下表面产生电痕的深度随着圆周角变化具有相同的变化趋势。侧风区电痕深度小于迎风区和背风区, 电痕深度最大值出现在绝缘子背风区 180° 处, 护套最大值为 0.99 mm , 伞裙下表面最大值为 0.61 mm , 伞裙上表面最大值为 0.46 mm , 最小电痕深度均在侧风区圆周角为 50° 附近, 护套最小值为 0.29 mm , 伞裙下表面最小值为 0.18 mm , 伞裙上表面最小值为 0.17 mm 。侧风区虽然气压较低, 但气流速度较大, 约为相对风速的 1.5 倍, 对流换热相对较高, 所以电痕深度较低。背风区风速下降剧烈, 相对大气压数约为 1 , 但由于涡流的存在, 影响了部分区域的气流速度分布, 气流对电弧及绝缘子的冷却作用得到加强, 使得电痕深度从圆周角 $135^\circ \sim 155^\circ$ 呈下降趋势, 在圆周角 $150^\circ \sim 180^\circ$ 的区域, 电痕深度又逐渐增大, 并且电痕深度在 155° 附近存在次小值。

图 5 相对风速 50 m/s 时电痕深度随圆周角的变化Fig. 5 Tracking depth changes with circumferential angle with relative wind speed 50 m/s

迎风区 0° 、侧风区 90° 和背风区 180° 的电痕深度随绝缘子爬电距离的变化情况分别见图 6(a)、(b)、

(c)。护套和伞裙根部电痕深度较大, 伞裙边沿电痕深度较小, 伞裙表面电痕深度从根部到边沿逐渐减小, 表明气流气压对电弧和绝缘子的冷却作用在护套和伞裙根部较弱, 在伞裙边沿较强, 从伞裙根部到边沿逐渐减弱。

(a) 迎风区 0° 电痕深度随爬电距离的变化(b) 侧风区 90° 电痕深度随爬电距离的变化(c) 背风区 180° 电痕深度随爬电距离的变化图 6 相对风速 50 m/s 电痕深度随爬电距离的变化Fig. 6 Track depth changes with creeping distance with relative wind speed 50 m/s

同时由于气流压力的作用, 同一爬电距离上护套 1-8 和伞裙边沿 1-7 的电痕深度不同。在迎风区 0° 护套 1-8 中, 第 4 护套的电痕深度较大为 0.89 mm , 第 2 和第 7 护套电痕深度较低, 为 0.81 mm ; 在伞裙边沿 1-7 中, 第 2 伞裙边沿电痕深度较大为 0.18 mm , 第 3 伞裙边沿的电痕深度较小为 0.15 mm , 如图 6(a) 所示。在侧风区 90° 护套 1-8 中, 第 2、3 和 7 护套电痕深度较大为 0.28 mm , 第 2 和第 7 护套电痕深度较低为 0.26 mm ; 在伞裙边沿 1-7 中, 第 4 伞裙边沿电痕深度较大为 0.11 mm , 第 5 伞裙边沿的电痕深度较小为 0.09 mm , 如图 6(b) 所示。在背风区 180° 护套 1-8 中, 第 1 和 8 护套电痕深度较大为 1.07 mm , 第 3 护套电痕深度较低为 0.99 mm ; 在伞裙

边沿 1-7 中,第 3 伞裙边沿电痕深度较大为 0.24 mm,第 4 伞裙边沿的电痕深度较小为 0.21 mm,如图 6(c) 所示。

由此可知,气流气压分布对绝缘子放电产生电痕的抑制作用,影响绝缘子表面绝缘性能程度从高到低为:护套表面、伞裙根部、伞裙上表面、伞裙下表面、伞裙边沿。

2.3 列车运行速度对电痕深度的影响

列车启动加速、制动减速过程中,运行速度改变导致绝缘子周围气流气压发生变化,列车低速运行对绝缘子周围气流气压影响较小,但速度较高将会使气流气压产生畸变,产生不均匀分布。受列车运行影响,绝缘子迎风区气流速度下降、气压上升,侧风区气流速度加强、气压降低,背风区气流速度下降、气压变化较小。选择绝缘子伞裙上表面同一圆周上角度为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 的典型位置 A-E 进行仿真,见图 7。

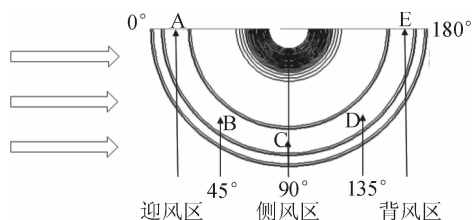


图 7 仿真位置选择

Fig. 7 Simulation position selection

电痕深度与列车运行速度的关系见图 8, 由图 8 可知,列车静止时,绝缘子放电产生电痕的深度均为 0.6 mm,运行速度较低时,电痕深度下降缓慢,随着速度增加,电痕深度下降程度加快,随着速度进一步增加,超过 60 m/s (即 216 km/h) 后,绝缘子周围气流气压逐渐达到极限,电痕深度下降程度变缓,当达到 100 m/s (360 km/h),A 至 E 的电痕深度分别为:0.3、0.13、0.11、0.17、0.4 mm。由此可知,随着列车运行速度逐渐加快,绝缘子周围气流气压发生变化、产生畸变和达到极限的过程,气流气压对电弧及绝缘表面的冷却作用加强,使得表面电痕深度下降程度不一,电痕下降程度大小依次为:侧风区、迎风区和背风区。

3 结论

1) 列车运行使绝缘子周围气流气压发生畸变,迎风区和背风区气流速度下降,侧风区气流速度升高,迎风区气压上升,侧风区气压下降,背风区气压变化较小。

2) 侧风区电痕深度较小,迎风区和背风区产生

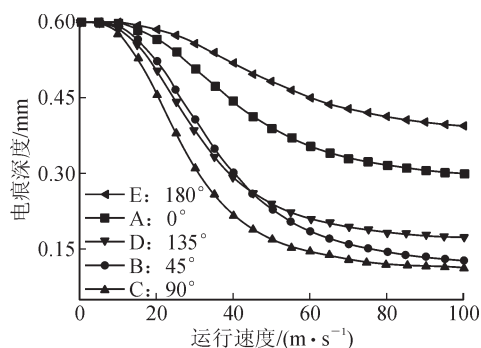


图 8 电痕深度与列车运行速度的关系

Fig. 8 Relationship between train speed and tracking depth

电痕深度较大,侧风区 50° 电痕深度最小,背风区 180° 电痕深度最大;护套和伞裙根部电痕深度较大,伞裙边沿电痕深度较小,伞裙表面电痕深度从根部到边沿逐渐减小。

3) 随着列车速度加快,绝缘子周围气流气压产生畸变达到极限,电痕深度下降趋势为先缓慢、后迅速、最后变缓,其中侧风区电痕深度下降最快,迎风区快于背风区,运行速度为 100 m/s 时迎风区 0° 、侧风区 90° 和背风区 180° 电痕深度分别为 0.3、0.11、0.4 mm。

参考文献:

- [1] 孙继星,徐跃,胡学永,等.高速气流环境中电气化铁路绝缘子表面积污分布特性[J]. 高电压技术,2014,40(1): 95-102.
SUN Jixing, XU Yue, HU Xueyong, et al. Characteristics of pollution distribution on insulators nearby electrified railroad in high-speed aerosol[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 95-102.
- [2] 胡学永,孙继星,罗蜀彩,等.高速气流环境绝缘子污闪研究[J]. 高压电器,2014,50(12): 7-13.
HU Xueyong, SUN Jixing, LUO Shucui, et al. Study on insulator flashover under pollution status in intermittent high speed train wind[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 7-13.
- [3] 罗蜀彩,孙继星,吴广宁,等.电气化铁路绝缘子表面污秽失水过程的阻抗特性分析[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 8-14.
LUO Shucui, SUN Jixing, WU Guangning, et al. Impedance characteristics analysis of water losing processes on polluted electrified railway insulator surface[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 8-14.
- [4] 矫立新,郭洁,何天宇,等.动车受电弓用绝缘子紫外线老化特性研究[J]. 电瓷避雷器,2015(1): 33-36.
JIAO Lixin, GUO Jie, HE Tianyu, et al. Study on the

- ultraviolet aging characteristic of train-set pantograph insulator[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2015(1):33-36.
- [5] 邱大庆. 覆冰、污秽条件下复合绝缘子电场分布研究[J]. *电瓷避雷器*, 2015(1):26-30.
- QIU Daqing. Study of the field distribution of composite insulator in icing and contamination conditions[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2015(1):26-30.
- [6] 巢亚锋,王成,黄福勇,等.中国输电线路复合绝缘子运行状况分析[J]. *高压电器*, 2015,51(8):119-124.
- CAO Yafeng, WANG Cheng, HUANG Fuyong, et al. Assessment on operation state of composite insulators used on chinese transmission lines[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015,51(8):119-124.
- [7] BILLINGS M J, HUMPHREYS K W. An outdoor tracking and erosion test of some epoxide resins[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1968(3):62-70.
- [8] 田霖. 直流电压下环氧树脂纳米复合电介质的电痕破坏现象研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- TIAN Lin. Effects of nano particles on tracking failure phenomenon of epoxy nanocomposite under DC voltage[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [9] 杜伯学. 有机绝缘耐电痕性的评定与发展[J]. *高电压技术*, 2005,31(5):10-13.
- DU Boxue. Research and development of test method on tracking resistance of polymer insulating materials[J]. *High Voltage Engineering*, 2005,31(5):10-13.
- [10] SEIFERT J M, WINTER H J. Tracking and erosion performance of liquid silicone rubber HV composite in housings [C]//Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP. [S.l.]: IEEE, 2007: 329-337.
- [11] GORUR R S, MONTESINOS J, VARADADESIKAN L, et al. A laboratory test for tracking and erosion resistance of HV outdoor insulation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1997,4(6):767-774.
- [12] 杜伯学,徐航,李云鹏,等.特高压直流用高导热纳米复合绝缘子耐电痕特性研究[J]. *高电压技术*, 2013,39(12):2910-2915.
- DU Boxue, XU Hang, LI Yunpeng, et al. Study on characteristics of tracking resistance of silicon rubber insulators with high thermal conductivity for UHVDC transmission lines[J]. *High Voltage Engineering*, 2013,39(12):2910-2915.
- [13] 王梓杨,朱正一,贾志东,等.直流污秽放电对硅橡胶表面特性破坏过程[J]. *高电压技术*, 2012,38(10):2611-2616.
- WANG Ziyang, ZHU Zhengyi, JIA Zhidong, et al. Degradation progress of silicon rubber surface properties under DC contamination flashover[J]. *High Voltage Engineering*, 2012,38(10):2611-2616.
- [14] IYER G, GORUR R S, KRIVDA A, et al. Prediction of electrical performance of medium voltage epoxy insulated equipment[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010,17(2):334-342.
- [15] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社, 2006:191-195.
- GUAN Zhicheng. *Insulators and power transmission equipment external insulation*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006:191-195.
- [16] GUAN Z, ZHANG R. Calculation of DC and AC flashover voltage of polluted insulators[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1990,25(4):723-729.
- [17] 李亚伟,杨昊,张乔根,等.基于上下表面电弧特性的交流绝缘子污秽闪络电压计算[J]. *中国电机工程学报*, 2014,34(30):5442-5450.
- LI Yawei, YANG Hao, ZHANG Qiaogen, et al. Modeling of AC arc discharge on insulators in consideration of arc characteristic differences between partial arcs on top and bottom wet-polluted dielectric surfaces[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014,34(30):5442-5450.
- [18] 刘学忠,高超,邓显波,等.高速气流对绝缘子表面放电特征的影响[J]. *电工技术学报*, 2010,25(12):16-21.
- LIU Xuezhong, GAO Chao, DENG Xianbo, et al. Influence of high-speed airflow on surface discharge characteristics of insulator[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010,25(12):16-21.
- [19] GLEIZES A, GONZALEZ J J, FRETON P. Thermal plasma modelling[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2005,38(9):153.
- [20] 戴锅. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:143-144.
- DAI Guo. *Heat transfer*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:143-144.
- 包健康(1990—),男,硕士研究生,从事高电压与绝缘技术的研究。
- 吴广宁(1969—),男,教授,博导,从事高压电气设备绝缘评估及状态检修、高压绝缘的电磁模拟与数值仿真研究。