

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.05.005

微/纳米复合涂层对环氧树脂直流电场下闪络电压的影响

艾 昕^{1,2}, 周福文^{1,2}, 金 花³, 秦司晨^{1,2}, 成 毅^{1,2},
屠幼萍^{1,2}, 王 璁^{1,2}, 白福军⁴, 林 俊⁴

(1. 华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206; 2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 3. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206; 4. 华北电力大学可再生能源学院, 北京 102206)

摘要: 环氧树脂材料因其在电、力、热等方面的优良性能被广泛应用于高压输电设备中。然而在直流高压条件下, 环氧树脂绝缘材料表面易积聚电荷, 使附近电场畸变造成沿面闪络。文中采用涂覆技术, 分别将微米 SiO₂/EP、纳米 SiO₂/EP 和纳米 TiO₂/EP 涂层涂覆在环氧树脂基体表面, 分别在 0.1 MPa 下的空气和 SF₆ 中进行了直流闪络试验, 并在 0.1 MPa 下 SF₆ 中进行了预置电压后试样表面有电荷积聚时的直流闪络试验。试验结果表明, 在空气中各环氧树脂试样的短时闪络电压相差不大, 而在 SF₆ 气体中各试样闪络电压差异明显, 其中含微米 SiO₂ 涂层的试样中, 微粒质量分数为 3 wt% 的试样的短时闪络电压最高, 含有纳米 SiO₂ 和纳米 TiO₂ 涂层的试样中, 均为微粒质量分数为 1 wt% 的试样的短时闪络电压最高。预置电压后, 基体的闪络电压下降了 16.7%, 对于含有涂层的试样, 其预压后闪络电压比预压前高且均大于未涂覆的基体。含有微米 SiO₂/EP、纳米 SiO₂/EP 和纳米 TiO₂/EP 涂层的试样均在微粒质量分数为 3 wt% 时预压后闪络电压达到最大值, 其中涂层中含微米 SiO₂ 粒子的试样的闪络电压最高。

关键词: 环氧树脂; 微/纳米复合涂层; 闪络电压; 预压

Influence of Micro/Nano Composite Coating on Flashover Characteristics of Epoxy Resin

AI Xin^{1,2}, ZHOU Fuwen^{1,2}, JIN Hua³, QIN Sichen^{1,2}, CHENG Yi^{1,2}, TU Youping^{1,2},
WANG Cong^{1,2}, BAI Fujun⁴, LIN Jun⁴

(1. Beijing Key Laboratory of High Voltage & Electromagnetic Compatibility, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Beijing Key Laboratory of High Voltage & Electromagnetic Compatibility, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Epoxy resin materials are widely used in HV equipments because of their excellent properties in electronic, mechanics, heat and other fields. However, under HVDC, the surface of epoxy resin is easy to accumulate charge, which will distort the electric field nearby and cause flashover. In this paper, micro SiO₂/EP, nano SiO₂/EP and nano TiO₂/EP coating were respectively coated on the surface of epoxy matrix. The DC flashover voltage of coated samples was measured at 0.1 MPa in air and SF₆ respectively, and flashover voltage of samples after preset voltage was also measured at 0.1 MPa SF₆. The results show that, flashover voltage in the air of coated epoxy resin samples was not quite different from the samples without coating. However, there was great difference among them in SF₆. Among samples containing micron SiO₂, the short-time flashover voltage of 3 wt% was the highest. Both the short-term flashover voltage of nano SiO₂ and nano TiO₂ coating samples reached their maximum when the content of particles was 1 wt%. After preset voltage, the flashover voltage of the matrix decreased by 16.7%. For samples

收稿日期: 2018-01-04; 修回日期: 2018-03-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) (2006CB200303, 2006CB2003056); 国家自然科学基金 (51577062)。

Project Supported by the National Basic Research Program (973 Program) (2006CB200303, 2006CB2003056), National Science Foundation of China Under Project (51577062).

containing coating, the flashover voltage was higher than their short-term voltage and greater than the uncoated epoxy matrix. All the samples with micron SiO_2/EP , nano SiO_2/EP and nano TiO_2/EP coating reached their maximum when the particle content is 3 wt%, and the sample with micron SiO_2 particles was highest among them.

Key words: epoxy resin; micro/nano composite coating; flashover voltage; preset voltage

0 引言

环氧树脂材料是一种高聚合物材料,因其易固化,绝缘强度大,力学性能优良等优点在电力系统直流高压输电中得到广泛应用^[1-3],如气体绝缘输电线(GIL)和气体绝缘开关装置(GIS)的套管和绝缘支撑常采用环氧树脂复合材料^[4-6]。相比于交流高压条件,直流高压条件下的电场由于具有单向稳定性,环氧树脂材料更加易于积聚表面电荷,使附近电场严重畸变,造成材料的沿面闪络,引发严重事故^[7-8]。因此,寻找提高直流电场下环氧树脂绝缘材料闪络电压的措施成为了当前的研究热点。

近年来,涂覆技术可应用于环氧树脂材料表面来抑止表面电荷积聚提高闪络电压被广大研究人员所证明^[9-12]。慕尼黑工业大学的F.Messerer在环氧树脂表面涂覆了含有氧化钛和氧化锡的杜邦导电粉,并对涂覆前后的环氧树脂材料进行了闪络电压测试,结果表明,涂覆后绝缘材料的闪络电压得到提高^[13]。平高集团的田浩等人分别将两种不同表面电阻率的材料通过浸泡的方法使之涂覆在圆柱状绝缘子上,对涂覆前后的试样进行了表面电荷的测量,发现涂覆后材料的表面电荷的衰减速率加快,得出了适当减少表面电阻率可以抑制表面电荷的积聚的结论,说明了在绝缘子材料表面涂覆有助于防止闪络的发生^[14]。李逢等人采用变压器油涂覆于真空绝缘体表面,进行脉冲电压下绝缘体的沿面耐压试验,结果表明,真空中油膜涂覆绝缘体的首次闪络电压和耐受电压均大幅提高^[15]。但是现有研究中涂层材料较少涉及含微纳米颗粒的复合材料,而含微纳米粒子的复合材料在物理性能、力学性能等方面表现优良^[16-18]。因此研究掺杂微纳米颗粒涂覆的环氧树脂材料的绝缘性能具有重要的实际意义。

文中对微米 SiO_2 、纳米 SiO_2 和纳米 TiO_2 质量分数分别为 1 wt%、3 wt%、5 wt% 的 9 种试样进行直流条件下的闪络特性试验,研究涂覆前后环氧树脂试样的短时闪络电压和预置电压后试样表面有电荷积聚时的闪络电压变化情况,并优选出闪络特性良好的涂层参数。

1 试验设置及试验方法

微米 SiO_2 、纳米 SiO_2 和纳米 TiO_2 颗粒涂覆所使用的基体是呈半透明的环氧树脂薄片,尺寸为 35 mm×35 mm,厚度为 0.3 mm,涂覆的具体流程见图 1。

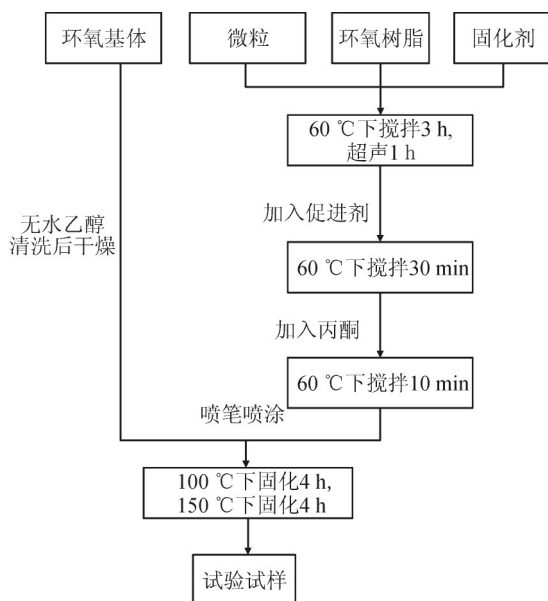


图1 涂覆试样制备过程

Fig. 1 Preparation process of coating samples

按照上述流程文中制造了涂层为纯环氧树脂(无微纳米颗粒)的试样、微/纳米 SiO_2 和纳米 TiO_2 质量分数分别为 1 wt%、3 wt%、5 wt% 的试样。其中微/纳米 SiO_2 和纳米 TiO_2 的粒径分别为 0.7 μm 、60 nm 和 10 nm,所有试样的表面粗糙度均小于 1 μm 。

文中的试验仪器主要包括气体放电腔体、电极、负极性的直流电压源等。

闪络特性测试平台由 126 kV 的 GIS 改造而来,见图 2^[19-20]。试样的闪络特性试验在其中一节气室中进行,该气室体积为 125 L,可耐气压 1 MPa,腔体一侧存在单向气阀,可以通过此单向气阀抽真空和充入 SF_6 气体。腔体上方设有二维操纵机构,可通过转动该机构控制电极的上下移动。

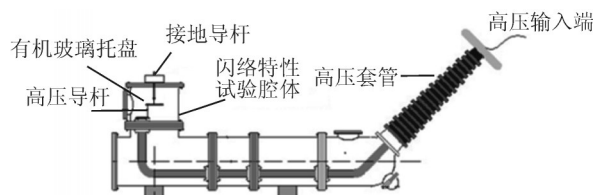


图2 闪络试验腔体

Fig. 2 Discharge test chamber

为使试样表面在预置电压过程中积聚更多的电荷,电极系统的法向分量需要较强。但是当电极系统的法向分量较强同时切向电场分量较弱时,试样表面难以发生沿面闪络。因此通过不断的调整电极之间法向分量与切向分量的比值,文中设计了一套闪络电极系统,并采用仿真软件计算了高压端施加-50 kV电压时,其电场线分布与电场分量,分别见图3、4。从图4可得,该电极系统在高压端附近法向电场分量较强,但在试样中部区域切向电场分量较强,该切向电场分量使得沿面闪络可以顺利发生,其中高压电极下端至地电极的距离 $X_a-X_i=28$ mm。

单位:kV

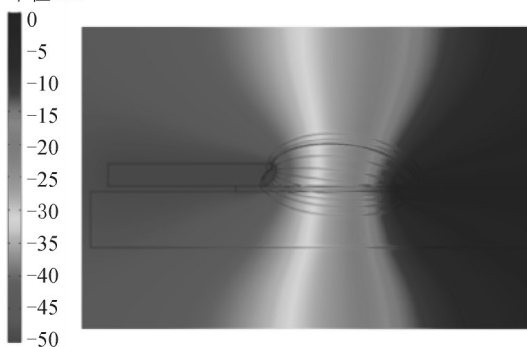


图3 试验电极电场线分布

Fig. 3 Electric field of test electrodes

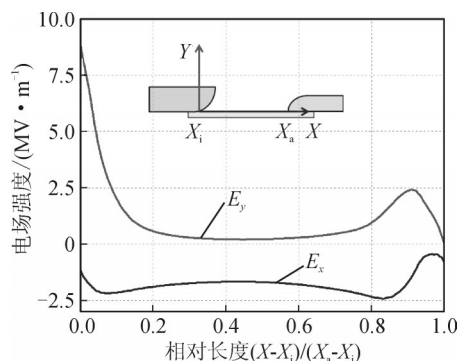


图4 试验电极产生的电场分量

Fig. 4 Electric field component of test electrodes

试验前使用无水乙醇擦拭电极和试样,确保其表面处于清洁状态。文中采用匀速升压的方法对涂覆后环氧树脂试样的闪络电压进行测试,升压速度为2 kV/s。每种试样以三片一组,每片进行5次闪络试验,最后取闪络电压的平均值作为测试结果。

2 试验结果及分析

2.1 微纳米复合涂层的环氧树脂短时闪络电压

空气中试样的短时闪络电压测试结果见图5,图5中虚线代表基体试样在空气中的短时闪络电压。从图5可得,未涂覆的基体试样的闪络电压相

对较小,涂覆后环氧树脂试样在空气中的闪络电压均在30 kV左右,数值相差不大且标准偏差较小。采用SF₆气体可以提升材料的闪络电压,使其差异化更加显著,因此在0.1 MPa下的SF₆气体中对试样进行短时闪络电压测试,测试结果见图6,图6中虚线代表基体试样在SF₆中的短时闪络电压。

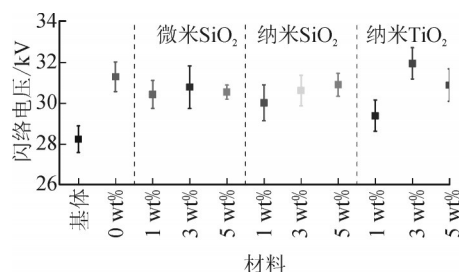


图5 空气中短时闪络电压的测试结果

Fig. 5 The results of short-term flashover voltage in the air

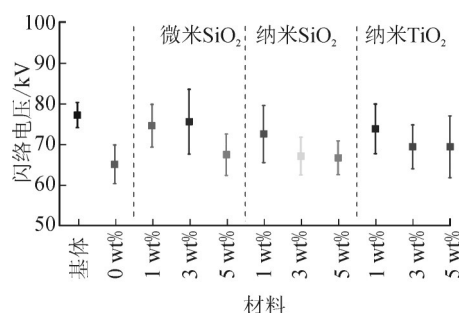


图6 SF₆中短时闪络电压的测试结果

Fig. 6 The results of short-term flashover voltage in the SF₆

从图6可得,0.1 MPa时SF₆气体中试样的短时闪络电压与空气中相比变化较大,不同试样的闪络电压值差别明显。其中未涂覆的基体试样的短时闪络电压最高,涂层为纯环氧树脂试样的短时闪络电压最低。在涂层中加入微纳米微粒后,9种试样的短时闪络电压均得到了提升,微米SiO₂的环氧树脂涂层中,微粒质量分数为3 wt%时试样的短时闪络电压提升效果最明显;含有纳米SiO₂和纳米TiO₂的环氧树脂涂层中,均为微粒质量分数为1 wt%的试样的短时闪络电压提升效果最明显。但是当涂层中微纳米颗粒质量分数增加至5 wt%时,微米SiO₂、纳米SiO₂和纳米TiO₂3种试样的短时闪络电压均发生下降。

2.2 微纳米复合涂层的环氧树脂预压后的闪络电压

除短时闪络电压外,还应考虑在预置一定时长电压后材料表面有电荷积聚时的闪络电压。文中首先对基体进行了不同预压时间(15、30 min)、预置电压为50 kV的闪络电压测试,试验结果见图7。预压15 min后,基体的闪络电压变化并不明显,而预压30 min后,基体的闪络电压下降了16.7%且重复

性很好(标准偏差几乎为零)。在继续增加预压时间的过程中,基体会在预压 40 min 至 50 min 的时间段内发生闪络,因此文中选用预压时间为 30 min 来对微纳米复合涂层的环氧树脂试样进行预压后的闪络电压测试。

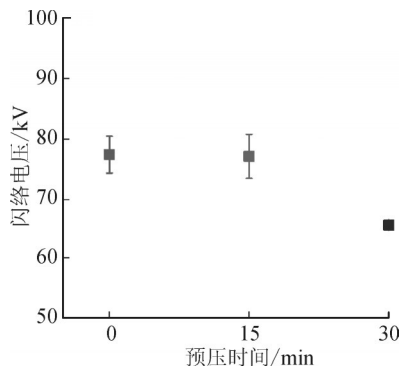


图7 预置电压后基体的闪络电压

Fig. 7 Flashover voltage of epoxy resin substrate after preset voltage

预置电压后闪络电压的测试结果见图8,图8中虚线代表基体试样在SF₆中的预压后的闪络电压,与图6相比,基体预压后的闪络电压出现了很大幅度的下降,涂层中微米SiO₂、纳米SiO₂和纳米TiO₂质量分数分别为1 wt%、3 wt%的6种环氧树脂试样预压后的闪络电压升高了,而微米SiO₂、纳米SiO₂和纳米TiO₂质量分数为5 wt%的3种环氧树脂试样预压后的闪络电压变化不大。涂覆后的环氧树脂试样均在微粒质量分数为3 wt%时,预压后闪络电压达到最大值,其中涂层中含微米SiO₂粒子试样的电压最高。

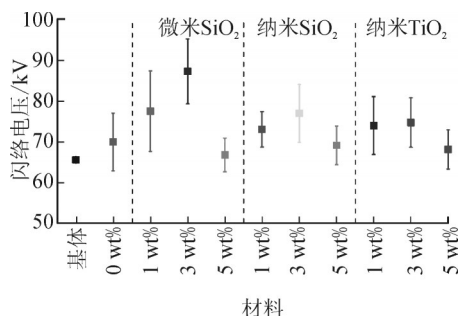


图8 SF₆中预压后闪络电压的测试结果

Fig. 8 The results of flashover voltage after preset voltage in the SF₆.

3 结论

文中采用涂覆的方法制备了涂层中分别含有微米SiO₂、纳米SiO₂和纳米TiO₂3种粒子,以及质量分数分别为1 wt%、3 wt%和5 wt%的环氧树脂试样,并在空气中测量其直流短时闪络电压,以及在0.1 MPa的SF₆中测量了各试样的短时闪络电压和预置电压

后的闪络电压。

1)含有微纳米复合涂层的环氧树脂试样在空气中的短时闪络电压相差不大,但在0.1 MPa下SF₆中,各试样的短时闪络电压差异显著,其中含3 wt%微米SiO₂涂层的试样的短时闪络电压最高,含有纳米SiO₂和纳米TiO₂涂层的试样中,均为微粒质量分数为1 wt%的试样的短时闪络电压最高。

2)含有微纳米复合涂层的环氧树脂试样在50 kV负极性直流电压下预压30 min后,其测试结果显示,未涂覆的基体闪络电压最低,涂层中微粒质量分数为1 wt%和3 wt%的试样预压后的闪络电压比预压前高,且微粒质量分数为3 wt%的试样预压后的闪络电压达到最大值,其中涂层中含微米SiO₂粒子的试样的闪络电压最高。

3)涂层中掺杂微米SiO₂粒子能够有效提升环氧树脂试样在SF₆中预压后的闪络电压,但对短时闪络电压的影响较小。纳米SiO₂涂层和纳米TiO₂涂层对试样闪络电压影响规律相近。

参考文献:

- [1] BOLON D A. Epoxy chemistry for electrical insulation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1995, 11(4): 10-18.
- [2] 俞翔霄, 俞赞琪, 陆惠英. 环氧树脂电绝缘材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
YU Xiangxiao, YU Zhanqi, LU Huiying. Electric insulating material for epoxy resin[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [3] 海彬, 章程, 王瑞雪, 等. 等离子体沉积类SiO₂薄膜抑制环氧树脂表面电荷积聚[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 375-384.
HAI Bin, ZHANG Cheng, WANG Ruixue, et al. Plasma depositing SiO₂-like film to suppress surface charge accumulation on epoxy resin[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 375-384.
- [4] BENATO R, DI MARIO C, KOCH H. High-capability applications of long gas-insulated lines in structures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 619-626.
- [5] KOCH H, HOPKINS M. Overview of Gas insulated lines[C]// Power Engineering Society General Meeting June. [S.l.]: [s.n.], 2005: 940-944.
- [6] 齐波, 张贵新, 李成榕, 等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1466-1473.
QI Bo, ZHANG Guixin, LI Chengrong, et al. Research status and prospect of gas-insulated metal enclosed transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1466-1473.
- [7] 张博雅, 王强, 张贵新, 等. SF₆中绝缘子表面电荷积聚

- 及其对直流 GIL 闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1481-1487.
- ZHANG Boya, WANG Qiang, ZHANG Guixin, et al. Surface charge accumulation on insulators in SF₆ and its effects on the flashover characteristics of HVDC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1481-1487.
- [8] 高 宇, 门业堃, 杜伯学, 等. 表面电荷对典型聚合物绝缘材料直流闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1474-1480.
- GAO Yu, MEN Yekun, DU Boxue, et al. Effect of surface charge on DC flashover voltage of typical polymer insulating materials[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1474-1480.
- [9] 汪 枫, 方 志, 邱毓昌. 高压直流 GIS 中绝缘子的表面电荷积聚的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 105-109.
- WANG Feng, FANG Zhi, QIU Yuchang. Study of charge accumulation on insulator surface in HVDC gas-insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 105-109.
- [10] NAKANISHI K, YOSHIOKA A, ARAHATA Y, et al. Surface charging on epoxy spacer at DC stress in compressed SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102(12): 3919-3927.
- [11] LI Chuanyang, HU Jun, LIN Chuanjie, et al. The control mechanism of surface traps on surface charge behavior in alumina-filled epoxy composites[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(44): 445304.
- [12] 汤 浩. 直流 GIL 绝缘特性及其绝缘优化的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- TANG Hao. Study on insulation characteristics of GIL and its insulation optimization[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [13] MESSERER F, BOECK W. High resistance surface coating of solid insulating components for HVDC metal enclosed equipment[C]//1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. [S.l.]: IET, 1999: 63-66.
- [14] 田 浩, 李继承, 郝留成, 等. 直流电压下环氧绝缘材料电气性能对电荷积聚的影响[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1463-1468.
- TIAN Hao, LI Jicheng, HAO Liucheng, et al. Influence of electrical properties of epoxy insulating materials on surface charge accumulation under DC voltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1463-1468.
- [15] 李 逢, 蒋吉昊, 王 勳, 等. 脉冲电压下油膜涂覆绝缘体真空沿面闪络特征[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 1995-2000.
- LI Feng, JIANG Jihao, WANG Meng, et al. Flashover characteristics of insulator surface vacuum with oil coating under pulsed voltage[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 1995-2000.
- [16] CHATTERJEE A, ISLAM M S. Fabrication and characterization of TiO₂-epoxy nanocomposite[J]. Materials Science and Engineering A - structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2008, 487(1/2): 574-585.
- [17] BAGHERZADEH M R, MAHDAVI F. Preparation of epoxy-clay nanocomposite and investigation on its anti-corrosive behavior in epoxy coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2007, 60(2): 117-120.
- [18] 郑顺丽. 纳米复合导电性环氧树脂涂层的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZHENG Shunli. Research on nanocomposite conductive epoxy resin coatings[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [19] 成 毅, 王 聰, 周福文, 等. 0.1 ~ 0.25 MPa 气压下 SF₆、CF₃I 及其二元三元混合气体的击穿特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 795-800.
- CHENG Yi, WANG Cong, ZHOU Fuwen, et al. Breakdown characteristics of SF₆ and CF₃I as well as their binary and ternary gas mixtures from 0.1 MPa to 0.25 MPa gas pressures[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 795-800.
- [20] 王 聰, 屠幼萍, 罗 颜, 等. 应用于直流 GIL 中环境友好型气体的绝缘性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6711-6717.
- WANG Cong, TU Youping, LUO Yan, et al. Insulation performance of environmentally friendly gas applied to HVDC-GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6711-6717.
- 艾 昕(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备外绝缘与气体放电。
- 屠幼萍(1966—), 女, 教授, 博导, 研究方向为电介质介电特性和电力系统过电压(通讯作者)。