



·脉冲功率技术·

## SF<sub>6</sub> 中氧化铝环氧复合材料的纳秒脉冲闪络特性

孙楚昱<sup>1</sup>, 王海洋<sup>1</sup>, 谢霖焱<sup>1</sup>, 迟晓红<sup>2</sup>

(1. 西北核技术研究所强脉冲辐射模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024; 2. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

**摘 要:** 氧化铝掺杂环氧树脂复合材料在电力绝缘设备中应用广泛, 然而人们对其在纳秒脉冲下的绝缘性能研究较少, 这限制了它在指导脉冲功率装置中的应用。为探究其在纳秒脉冲下的沿面绝缘性能, 对氧化铝掺杂环氧树脂复合材料在前沿数十 ns 快脉冲电压下的闪络特性进行了研究, 结果显示, 其闪络电场较纯环氧有较大提高, 闪络电压符合韦伯分布。实验表明, 闪络电压随电压上升率的增加而显著增加, 从 5.8 kV/ns 时的 108 kV 上升到 20.5 kV/ns 时的 226 kV, 增幅超过 1 倍。闪络时延随电压上升率的上升呈现“先快速下降、后趋于平缓”的趋势。在试样闪络通道表面观测到明显的碳化现象, 说明实验中的闪络放电对复合材料有破坏性影响。

**关键词:** 脉冲功率; 环氧树脂; 快脉冲; 沿面绝缘; 沿面闪络

中图分类号: TM85

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200289

## Flashover characteristics of epoxy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite under nanosecond rising pulses in SF<sub>6</sub> gas

Sun Chuyu<sup>1</sup>, Wang Haiyang<sup>1</sup>, Xie Linshen<sup>1</sup>, Chi Xiaohong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Epoxy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite is widely used as insulating material in power equipment. However, its performance in SF<sub>6</sub> gas under fast-rising pulse is little studied, which limits its application in guiding insulation design of pulse power devices. To investigate the insulation characteristics of epoxy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite under nanosecond pulses, the flashover characteristics of this material are studied under pulse voltage with rise time of about 52 ns. The results show that its electric field of flashover is much higher than pure epoxy's, and the flashover voltage is in accordance with Weibull distribution. The experiment shows that the flashover voltage increases significantly with the increase of the pulse steepness, from 108 kV at 5.8 kV/ns to 226 kV at 20.5 kV/ns. As pulse steepness increases, the flashover delay time decreases rapidly first, then tends to be flat. The surface morphology of the flashover area of the samples shows that the flashover channel is obviously carbonized and flashover discharge has a destructive effect on the composite material.

**Key words:** pulse power; epoxy resin; fast pulse; surface insulation; surface flashover

氧化铝掺杂环氧树脂复合材料通过掺杂技术, 实现了无机物与聚合物特性的兼容, 使环氧树脂复合材料呈现出独特的力学、热学和介电性能。有研究表明, 氧化铝和基体有较好的结合力, 能够同时对环氧树脂增强和增韧<sup>[1]</sup>, 且复合材料的抗弯强度随氧化铝质量分数的增加先提高后下降, 但仍高于纯环氧树脂<sup>[2-3]</sup>。Kochetov R<sup>[4]</sup> 和 Kozako M<sup>[5]</sup> 等人对氧化铝环氧复合材料热性能进行了研究, 认为无机粒子的加入可显著提高复合材料热导率, 有利于局部过热的传导。氧化铝填料的加入还会改变复合材料介电常数、介质损耗因数等特性, 研究表明, 随着氧化铝含量的增加, 复合材料相对介电常数呈上升趋势, 而介质损耗因数呈下降趋势<sup>[3, 6-7]</sup>。研究表明, 氧化铝环氧树脂在直流和交流下的绝缘能力较纯环氧也有一定提高。张治民<sup>[8]</sup> 等测试了纳米氧化铝/环氧树脂的电击穿特性, 认为其负直流和交流击穿场强随纳米氧化铝含量增加而增大, 在纳米氧化铝质量分数 5% 时分别提高了 7.3% 和 13.9%。

\* 收稿日期: 2020-10-19; 修订日期: 2021-03-17

基金项目: 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金项目 (SKLIPR1901Z)

作者简介: 孙楚昱 (1992—), 女, 硕士, 助理研究员, 从事脉冲功率及高电压绝缘研究。

李武峰<sup>[9]</sup>等探讨了氧化铝掺杂环氧树脂在 SF<sub>6</sub> 气体中的直流沿面闪络特性, 测量了 0.4 MPa SF<sub>6</sub> 气体中不同氧化铝含量环氧树脂试样的耐受电压, 在氧化铝和环氧树脂的质量比为 3.5 时, 复合材料耐受电压最低。阮浩鸥<sup>[6]</sup>对大气环境中氧化铝/环氧树脂复合材料针针电极下的直流闪络电压进行了实验, 探究复合材料直流闪络电压随氧化铝含量及粒径变化的关系, 发现复合材料闪络电压随氧化铝含量及粒径的增加呈现先增大后减小的趋势。李鹏<sup>[10]</sup>等对 SF<sub>6</sub> 气体中负直流电压下氧化铝/环氧绝缘子在准均匀场和极不均匀场下的沿面绝缘特性和烧蚀特性进行了研究, 认为填料含量 250 phr 的绝缘子均具有最好的沿面绝缘强度。Khan<sup>[11]</sup>等人发现纳米氧化铝质量分数为 1% 的环氧树脂材料的直流沿面闪络电压要比纯环氧高出 17.5%。M. Serkan 等人<sup>[12-13]</sup>对氧化铝-环氧复合材料在直流、交流和重频脉冲电压下的闪络特性与纯环氧材料进行了对比, 两种材料在重频脉冲下的闪络电压都要高于交流电压, 而复合材料闪络电压较纯环氧材料提高 10% 左右。

由于具有机械强度高、加工性能好、绝缘能力强等特点, 氧化铝环氧树脂复合材料目前已广泛应用于特高压电力设备中。在电磁脉冲模拟装置中, 高压部件与接地腔体间往往需要使用绝缘材料进行支撑和隔离, 随着装置向着轻型化、紧凑化、移动式的发展方向, 既要满足高压绝缘要求, 又要尽可能减小尺寸, 对支撑绝缘件的要求也越来越高。采用上述复合材料将有可能大幅提高装置耐压水平。然而, 绝缘材料在不同气压和电压条件下的电气性能差别很大。电磁脉冲模拟装置中电压脉冲前沿通常在几十到百 ns 量级, 而针对该复合材料的研究主要集中在直流和微秒脉冲下, 已有的文献数据不能直接指导电磁脉冲模拟装置的绝缘设计。本文研究了氧化铝-环氧树脂复合材料在 SF<sub>6</sub> 气体中的纳秒脉冲闪络特性, 获得了其在几十 ns 前沿脉冲电压下、SF<sub>6</sub> 气体 (0.2 MPa) 中闪络电压变化规律及概率分布, 同时研究了电压上升率对闪络电压与闪络时延的影响。

## 1 实验设置

实验系统整体示意图如图 1 所示, 主要由高压脉冲源、试样电极与腔体及测量装置组成。

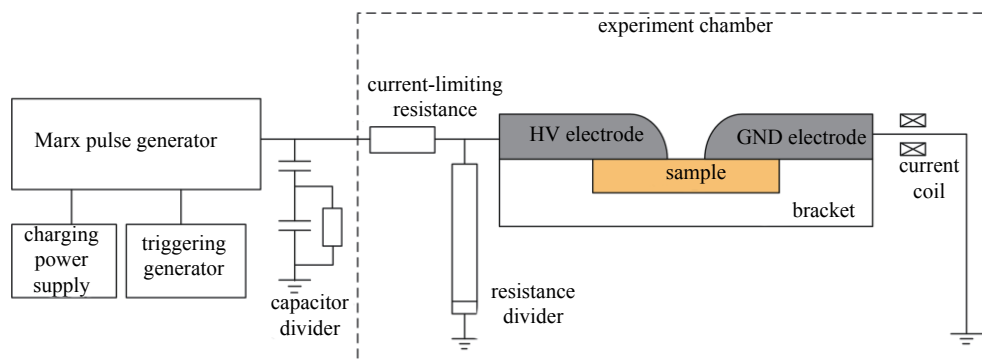


Fig. 1 Schematic of experiment setup

图 1 实验系统整体示意图

试样电极所施加的电压由 Marx 发生器直接产生。图 2 展示了未闪络波形和两组典型闪络波形。由于闪络均发生在上升前沿, 因此波形未达到理论峰值就已开始下降。由于回路电感基本保持不变, 因此 Marx 发生器输出脉冲电压的上升时间 (此处定义为从电压绝对值开始增加时刻到理论峰值时刻的时间) 保持 52 ns 不变。因此, 当改变 Marx 充电电压时, Marx 输出电压峰值增大而上升时间不变, 电压上升率就会随之增加。

针对本文实验有两种加压方式和实验步骤。在研究材料的闪络电压韦伯分布时, 保持每次 Marx 充电电压不变, 使放电全部在电压上升沿发生闪络。对每一块试样进行十次加压试验, 每次放电间隔 3 min, 共对 8 块试样进行了耐压试验, 其中 2 块试样在 10 次放电前即出现闪络电压的大幅下降, 因此只记录其闪络电压未出现明显下降时的数据, 共获得有效数据 75 发次。在研究电压上升率影响时, 对每一块试样进行实验时, 逐步升高 Marx 充电电压, 使电压

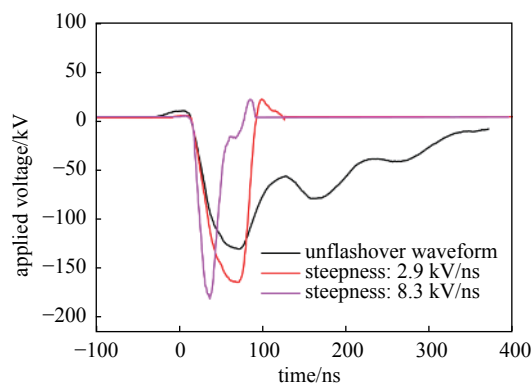


Fig. 2 Typical unflashover voltage waveform and flashover waveforms with different pulse steepness

图 2 典型未闪络波形及不同电压上升率的闪络波形

上升速率在 5.8~20.5 kV/ns 范围内逐渐提高,记录其在不同电压上升率下的闪络电压和闪络时延,共对 5 块试样进行了耐压试验。分别在 Marx 发生器后端输出法兰处和电极高压端采用电容分压器和电阻分压器监测闪络电压。在电极接地线上串联 Pearson 电流线圈监测闪络电流。

实验电极采用指型不锈钢电极,电极头部半径 5 mm,电极间距 5 mm,表面抛光至镜面。试样采用纳米氧化铝填充环氧树脂复合材料,加工为 3 cm×3 cm×1 mm 的方形薄片结构。所有试样均由厦门麦克奥迪电气有限公司提供。实验前用四氯化碳将电极及试样擦拭干净,固定好后放入实验腔体并密封。为避免空气中水分等对 SF<sub>6</sub> 气体的影响,先对腔体进行抽真空,之后充入 SF<sub>6</sub> 直至 0.2 MPa。

## 2 实验

### 2.1 理论模型

韦伯(Weibull)分布是一个通过最薄弱环节模型或串联模型得到的寿命分布模型,可反映材料缺陷的影响,是 IEEE 推荐的电气绝缘数据的统计分析方法<sup>[14]</sup>,在绝缘失效领域应用广泛<sup>[15-18]</sup>。由于沿面闪络也属于气体放电的一种,因此采用韦伯分布处理闪络电压数据是合适的。

对于两参数韦伯分布来说,累积概率函数可表示为

$$F(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

式中:  $V$  是发生闪络时的施加电压;  $F(V)$  是累积概率函数,即施加电压不大于  $V$  时的闪络概率;  $\alpha$  是尺度参数,表示特征击穿电压,即当  $V=\alpha$  时,  $F(V)=0.632$ ;  $\beta$  是形状参数,表示绝缘系统对电压增加的敏感性。

对式(1)进行对数变换可得

$$Y = \beta X - \beta \ln \alpha \quad (2)$$

式中:  $Y = \ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(V)}\right)\right]$ ,  $X = \ln V$ 。

根据实验数据列出了累积概率函数表(见表 1)以及韦伯分布的拟合曲线图(见图 3)。可以看出,数据能较好地符合韦伯分布,其中尺度参数  $\alpha = 112.47$ ,形状参数  $\beta = 14.71$ 。也就是说,发生闪络概率为 63.2% 时的电压为 112.47 kV。

表 1 累积概率函数

Table 1 Accumulative frequency

flashover voltage/kV	flashover amount	accumulated amount	$F(V)$
81-85	1	1	0.013 3
86-90	1	2	0.026 7
91-95	2	4	0.053 3
96-100	11	15	0.200 0
101-105	24	39	0.520 0
106-110	14	53	0.706 7
111-115	10	63	0.840 0
116-120	8	71	0.946 7
121-125	2	73	0.973 3
126-130	1	74	0.986 7
131-135	1	75	1

根据数据处理结果,氧化铝环氧复合材料的特征闪络场强为 224 kV/cm。表 2 列出了纯环氧材料在相同气压、相同电极型式下的闪络场强数据,可以看出,氧化铝半导体的加入有效提高了环氧树脂材料的闪络场强。

### 2.2 电压上升率的影响

图 4 显示了电压上升率与闪络电压和闪络时延的关系。需要说明的是在数据处理时所有数据点的电压上升率都根据实际波形进行计算,即用最高电压绝对值与到达最高电压所需的时间之比表示电压上升率。可以看出,闪络电压随电压上升率的上升而近似线性上升,且上升幅度很大,从 5.8 kV/ns 时的 108 kV 上升到 20.5 kV/ns 时的

226 kV, 增幅超过 1 倍。而闪络时延随电压上升率的上升呈现先快速下降、后趋于平缓的趋势。

事实上, 闪络电压的值等于电压上升率与闪络时延的乘积。因此, 闪络时延随电压上升率的变化主导了闪络电压的变化。闪络时延由统计时延和形成时延组成。统计时延为产生有效初始电子的必要时间, 形成时延为初始电子发展到临界电子密度所需要的时间。对于高压 SF<sub>6</sub> 沿面闪络来说, 初始电子主要来源于三结合点处的场致发射或空间负离子脱附<sup>[22-23]</sup>。根据 Fowler-Nordheim 理论, 场致发射电流密度可表示为

$$J_{FE} = c_{01} \frac{(\beta E_{AV})^2}{\phi} \exp[-c_{02} \phi^{3/2} / \beta E_{AV}] \quad (3)$$

式中:  $J_{FE}$  为场致发射电流密度;  $c_{01}$  和  $c_{02}$  为常数, 分别为  $1.56 \times 10^{-10} \text{ A} \cdot \text{eV} \cdot \text{V}^{-2}$  和  $6.83 \times 10^3 (\text{V} \cdot \text{eV}^{-3/2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$ ,  $E_{AV}$  为间隙平均电场强度;  $\beta$  为场增强因子;  $\phi$  为功函数。

负离子脱附概率可由半经验公式得到<sup>[24]</sup>

$$p = \exp \left\{ -tA \left[ B \cdot \exp \left( -\frac{C}{E_T(t)} \right) + U \right] \right\} \quad (4)$$

式中:  $p$  为电子产生概率;  $A, B, C$  和  $U$  为经验参数;  $E_T$  为外加电场。从式(3)和式(4)中可以看出, 上述两种初始电子产生方式都与电场直接相关。因此, 当电压上升率较小时, 需要一定时间到达相应电场阈值才能产生初始电子。随着电压上升率上升, 到达阈值的时间缩短, 统计时延也在减小。当电压上升率较大时, 到达阈值所需的时间相差不多, 此时统计时延的减小速度也逐渐减小。

表 2 部分纯环氧材料闪络场强对比

Table 2 Comparison with flashover electric field of pure epoxy

source	material	electrode	flashover electric field/(kV·cm <sup>-1</sup> )	pulse rise time/(ns)	SF <sub>6</sub> pressure/(MPa)
this paper	epoxy/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> composite	finger	224	52	0.2
ref.[19]	epoxy resin	finger	113	100	0.2
ref.[20]	epoxy resin	finger	55	20	0.2
ref.[21]	epoxy resin	finger	43	not mentioned	0.2

在初始电子产生后, 电子倍增过程主要包括空间中的气体电离以及绝缘材料表面电子发射。一方面, 空间中电离指数也是电场与气压的函数。气压相同时电场越高电离指数越高。当电压上升率较小时, 一定时间内达到的电场也较低, 电子获得能量小, 发展到临界密度的时间较长。随着电压上升率的提高, 一定时间内到达的电场随之提高, 电子获得能量高, 形成时延减小。另一方面, 当电场较高时, 电子获得能量较高, 更容易引起绝缘材料表面电子发射, 同时流注中的发光也会引起材料表面的光电发射。但是当电压上升率很大时, 往往很快达到阈值电场, 在空间电荷和光电离的作用下, 流注快速形成, 此时形成时延逐渐趋于稳定。

### 2.3 氧化铝复合材料闪络前后表面形貌观察

图 5(a)(b) 展示了未闪络试样照片与经历 10 次闪络后试样表面照片, 10 次闪络电流平均值为 121 A。可以看出, 在指型电极阴极和阳极之间的区域试样表面有明显的发黑和烧蚀痕迹, 且闪络通道较为集中, 在闪络通道中部有较为明显的黑色斑点。利用电子显微镜 (SEM) 对该碳化严重区域进行了微观形貌观察, 结果如图 5(c) 表示, 可

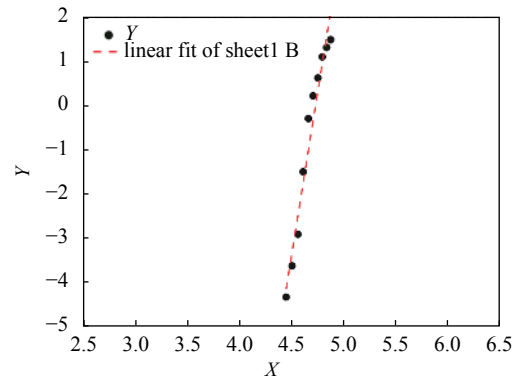


Fig. 3 Weibull probability plot

图 3 韦伯分布图

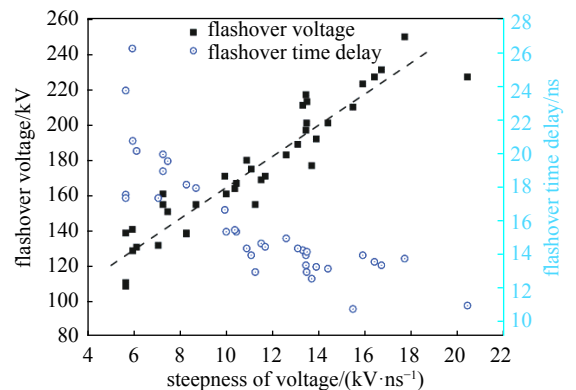


Fig. 4 Relationship of flashover voltage, time delay and pulse steepness

图 4 闪络电压和闪络时延与电压上升率的关系

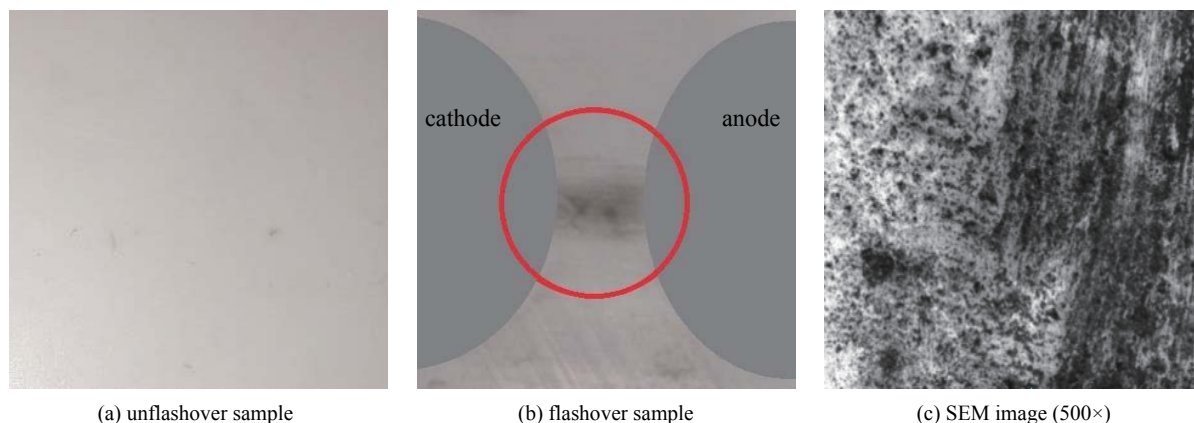


Fig. 5 Pictures of samples and SEM image of surface after flashover

图 5 试样照片及闪络区域 SEM 图像

可以看出: 试样表面粗糙度显著上升, 有明显孔洞、凸起、碳化等特征, 表明氧化铝复合材料在多次闪络中产生了不可恢复的伤害。分析认为试样表面在闪络前即存在微凸起等不规则结构, 引起局部场强畸变, 而在电场作用下加剧了材料表面的电子发射, 同时电流的快速上升, 使闪络通道内部温度升高, 复合材料中耐热性较差的环氧树脂材料受热熔化解, 表面结构被破坏。

### 3 结 论

氧化铝环氧复合材料兼具无机物与聚合物特性, 在电力设备中应用广泛。为探究该材料在脉冲功率装置中的应用可行性, 本文对该复合材料闪络特性进行了研究。主要结论如下: (1) 该材料在 0.2 MPa SF<sub>6</sub> 中、50 ns 脉冲前沿下的闪络电压符合韦伯分布, 且特征闪络场强较纯环氧高, 拥有较好的纳秒级脉冲下的沿面绝缘能力; (2) 在 5.8~20.5 kV/ns 范围内, 闪络电压随电压上升率的增长而近似线性增长, 而闪络时延随电压上升率的增长呈现先快速下降后趋于稳定的趋势; (3) 对复合材料闪络后表面形貌进行观察可知, 闪络电弧易对复合材料产生破坏性影响, 数次闪络即可使材料绝缘能力大幅下降。因此在绝缘设计时需要设计较大裕量, 且在出现闪络后及时更换。

#### 参考文献:

- [1] 王科. 氧化铝纳米颗粒改性TDE-85型环氧树脂复合材料的制备和性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2007: 37-46. (Wang Ke. Study on preparation and properties of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle reinforced epoxy resin composites. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2007: 37-46)
- [2] 吴聪, 都怡佩, 沈意斌, 等. 氧化铝/环氧树脂复合材料的制备及散热性能研究[J]. 化工新型材料, 2018, 46(8): 63-66. (Wu Cong, Du Yipei, Shen Yibin, et al. Preparation and thermal property of alumina/epoxy composite[J]. New Chemical Materials, 2018, 46(8): 63-66)
- [3] 胡永. 氧化铝陶瓷及氧化铝/环氧树脂复合材料的制备与性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016: 41-49. (Hu Yong. Preparation and properties of alumina ceramics and alumina/epoxy composites[D]. NanChang: Nanchang University, 2016: 41-49)
- [4] Kochetov R, Andritsch T, Morshuis P H F. Thermal and electrical behavior of epoxy-based microcomposites filled with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> particles[C]//Proc of ISEI. 2010.
- [5] Kozako M, Okazaki Y, Hikita M. Preparation and evaluation of epoxy composite insulating materials toward high thermal conductivity[C]//Proc of ICSD. 2010.
- [6] 阮浩鸥, 余永松, 张兴建, 等. 纳米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对环氧树脂复合材料沿面闪络电压的影响[J]. 绝缘材料, 2019, 52(2): 29-34. (Ruan Haoou, Yu Yongsong, Zhang Jianxing, et al. Effect of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on surface flashover voltage of epoxy resin composites[J]. Insulating Materials, 2019, 52(2): 29-34)
- [7] 孔令龙, 褚鹏飞, 张晖, 等. 微米氧化铝表面修饰对电工级环氧树脂绝缘性能的影响[J]. 绝缘材料, 2018, 51(6): 35-41. (Kong Linglong, Chu Pengfei, Zhang Hui, et al. Effect of surface modification for micro-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on insulating properties of epoxy resin of electrical grade[J]. Insulating Materials, 2018, 51(6): 35-41)
- [8] 张治民. 环氧树脂纳米复合材料电学特性和力学特性[D]. 太原: 太原理工大学, 2017: 30-45. (Zhang Zhimin. Study on the electrochemical characteristics and mechanical properties of epoxy resin nanocomposites. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017: 30-45)
- [9] 李武峰, 李鹏, 李金忠, 等. SF<sub>6</sub>气体中氧化铝掺杂环氧树脂直流沿面闪络中的虫孔效应[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 2754-2759. (Li Wufeng, Li Peng, Li Jinzhong, et al. Wormholes effect in DC flashover process of alumina filled epoxy resin surfaces in SF<sub>6</sub>[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2754-2759)
- [10] 李鹏, 李金忠, 张乔根, 等. 氧化铝填充环氧绝缘子SF<sub>6</sub>气体中直流负极性闪络特性[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6523-6529. (Li Peng, Li Jinzhong, Zhang Qiaogen, et al. Negative DC flashover characteristics of alumina filled epoxy resin insulators in SF<sub>6</sub>[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6523-6529)
- [11] Khan M Z, Waleed A, Khan A, et al. Significantly improved surface flashover characteristics of epoxy resin/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites in air, vacuum and SF<sub>6</sub> by

- gas-phase fluorination[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2020, 49(5): 3400-3408.
- [12] Serkan M, Kirkici H, Koppisetty K. Surface flashover characteristics of nano-composite dielectric materials under DC and pulsed signals in partial vacuum[C]//Proc of PMS. 2006: 90-92.
- [13] Kirkici H, Serkan M, Koppisetty K. Nano/micro dielectric surface flashover in partial vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007, 14(4): 790-795.
- [14] IEEE 930-2004. Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data[S].
- [15] Wilson, MP, Given M J, Timoshkin I V, et al. Impulse-driven surface breakdown data: A weibull statistical analysis[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(10): 2449-2455.
- [16] Xie Qing, Hu Zhiliang, Wang Tao, et al. Experimental study on surface flashover of PMMA and SR driven by negative DC voltage at atmospheric pressure[C]//Proc of ICHVE. 2016.
- [17] Li Guangjie, Wang Jue, Yan Ping, et al. Experimental study on statistical characteristics of surface flashover under nanosecond pulse in transformer oil[C]//Proc of the 27th International Power Modulator Symposium and 2006 High Voltage Workshop. 2006: 97-99.
- [18] 孙旭, 张喜波, 刘胜, 等. 绝缘材料高压气体沿面闪络特性研究[J]. *现代应用物理*, 2018, 9: 010404. (Sun Xu, Zhang Xibo, Liu Sheng, et al. Surface flashover properties of insulators in high pressure gas[J]. *Modern Applied Physics*, 2018, 9: 010404)
- [19] 谢庆, 刘熊, 吴高林, 等. SF<sub>6</sub>中环氧树脂纳秒脉冲沿面闪络实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(24): 6727-6735. (Xie Qing, Liu Xiong, Wu Gaolin, et al. Experiment study of surface flashover on epoxy resin discharged by nanosecond pulses in SF<sub>6</sub>[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(24): 6727-6735)
- [20] 陈玉, 成永红, 阴玮, 等. 环氧及其复合材料气固界面快脉冲闪络特性[J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(6): 703-707. (Chen Yu, Cheng Yonghong, Yin Wei, et al. Flashover property of pure epoxy and composites along the gas-solid interface under fast pulse[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(6): 703-707)
- [21] Huang Yin, Min Daomin, Li Shengtao, et al. Surface flashover performance of epoxy resin microcomposites improved by electron beam irradiation[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 406: 39-45.
- [22] 孙楚昱, 张国伟, 王海洋, 等. 纳秒脉冲下SF<sub>6</sub>中的沿面闪络特性[J]. *绝缘材料*, 2017, 50(4): 51-55. (Sun Chuyu, Zhang Guowei, Wang Haiyang, et al. Surface flashover characteristics in SF<sub>6</sub> gas under nanosecond pulse voltage[J]. *Insulating Materials*, 2017, 50(4): 51-55)
- [23] Sun Chuyu, Zhou Hui, Chen Weiqing, et al. Characteristics of nanosecond pulse dielectric surface flashover in high pressure SF<sub>6</sub>[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 24(4): 1387-1392.
- [24] Stephens J, Beeson S, Dickens J, et al. Charged electret deposition for the manipulation of high power microwave flashover delay times[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19: 112111.