

# 特高压 GIL 绝缘子用微米氧化铝-氧化硅共混 环氧复合材料的性能研究

刘 鹏<sup>1</sup>, 袁 航<sup>1</sup>, 朱思佳<sup>1</sup>, 赵惠军<sup>1</sup>, 闫 爽<sup>1</sup>, 吴泽华<sup>1</sup>, 彭宗仁<sup>1</sup>, 王浩然<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘 要:** 特高压气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)电压等级高、输送容量大,对绝缘子耐受电、热、力综合作用能力的要求更高。本研究通过分别掺杂微米级氧化铝、氧化硅和氧化铝-氧化硅共混填料的方式制备了环氧复合材料,对共混体系力学、热学和电气性能等进行测试分析。结果表明:随着氧化铝填料体积占比的提高,复合材料的综合力学性能提升,微米氧化铝/环氧复合材料综合力学性能最佳。掺杂两种填料有助于提升共混体系的导热和耐电弧性能,但会略微降低玻璃化转变温度和增大热膨胀系数,当氧化铝和氧化硅填料体积比为1:1时,复合材料的耐电弧时间可达186.63 s,导热系数可达1.198 W/(m·K)。随着氧化硅填料体积占比提高,环氧复合材料的介电常数减小,电气强度升高,体积电阻率增大,介质损耗减小。微米氧化硅/环氧复合材料工频电气强度最高,可达36.63 kV/mm。

**关键词:** 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL); 氧化铝; 氧化硅; 环氧树脂; 力学性能; 热学性能; 介电性能

中图分类号: TM216 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.02.004

## Study on properties of micro- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ /epoxy composites for UHV GIL insulators

LIU Peng<sup>1</sup>, YUAN Hang<sup>1</sup>, ZHU Sijia<sup>1</sup>, ZHAO Huijun<sup>1</sup>,  
YAN Shuang<sup>1</sup>, WU Zehua<sup>1</sup>, PENG Zongren<sup>1</sup>, WANG Haoran<sup>2</sup>

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** With a high voltage grade and large transmission capacity, ultra-high voltage (UHV) gas insulated metal enclosed transmission line (GIL) needs insulator with higher resistance to the comprehensive effect from electric, heat, and force. In this paper, epoxy composite materials were prepared by doping micro- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , micro- $\text{SiO}_2$ , and micro- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  blend fillers, respectively. The mechanical, thermal, and electrical properties of the blend system were tested and analyzed. The results show that with the increase of the volume proportion of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , the comprehensive mechanical properties of the composites are improved, and pure micro- $\text{Al}_2\text{O}_3$ /epoxy composite exhibits the best mechanical properties. Doping two fillers improves the thermal conductivity and arc resistance of the composites, but slightly reduces the glass transition temperature and increases the thermal expansion coefficient. When the volume ratio of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  in composites is 1:1, the arc resistance duration and the thermal conductivity of the composite reaches 1.198 W/(m·K) and 186.63 s, respectively. With the increase of the volume proportion of  $\text{SiO}_2$ , the dielectric constant of the composites decreases, while the breakdown strength increases. The power frequency breakdown strength of the pure micro- $\text{SiO}_2$ /epoxy composites is the highest, reaching 36.63 kV/mm.

**Key words:** gas insulated metal enclosed transmission line (GIL);  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{SiO}_2$ ; epoxy resin; mechanical properties; thermal properties; dielectric properties

## 0 引言

苏通1000 kV交流特高压气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated metal enclosed transmission line, GIL)综合管廊的安全运行,证明了特高压GIL技术的可行性和稳定性<sup>[1-2]</sup>。但在特高压GIL苏通

基金项目:国家电网公司科技项目(SGHBDK00SBJS2000363)。

管廊工程中,管廊建设垂直落差大,管廊埋深大,单相长度大,电压等级高,输送容量大,对特高压GIL的可靠性提出了更高的要求。一旦出现绝缘故障,可能导致区域性停电。在运行过程中,GIL绝缘子长期经受电、热、力场的作用,尤其在特高压工程中,随着电压的提升,导杆直径增大,质量增加,导杆载流发热现象更加严重,因此在对绝缘子绝缘性

能要求提高的同时,也对绝缘子热性能和力学性能提出了更高的要求,工程上明确提出要求绝缘子安全运行 40 年<sup>[3-7]</sup>。氧化铝/环氧复合材料机械强度大、导热性能优异,同时具有良好的绝缘性能,是制造 GIL 盆式绝缘子、三支柱绝缘子等绝缘件的主要材料<sup>[8-14]</sup>。而氧化硅具有较低的介电常数和高化学稳定性,且成本显著低于氧化铝,在国内外工程应用和学术研究中也经常选用为绝缘子用环氧复合材料的无机填料<sup>[15-20]</sup>。在气体绝缘封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中,电弧的存在会使 SF<sub>6</sub> 的分解产物与二氧化硅发生反应,造成绝缘件性能劣化,而长距离的 GIL 内部没有开关和电弧,因此 SF<sub>6</sub> 不会与二氧化硅发生反应。使用氧化硅/环氧复合材料的 GIL 绝缘子在存储、运输、安装时应特别保证其处于干燥环境<sup>[20-21]</sup>。美国 AZZ 公司的 GIL 技术路线中环氧绝缘子填充料均采用氧化硅,其产品在国际市场上具有最高的占有率,且已投入生产数十年<sup>[22]</sup>。

目前,大填充量的纳米级填料在共混体系中因极易发生团聚现象而难以在实际工业中推广应用,因此国内外工程中绝缘子用环氧复合材料选取的无机填料基本都为微米级<sup>[23-25]</sup>。近年来,国内外研究发现掺入微米氧化铝或氧化硅填料可以提升环氧复合材料不同方面的性能。在氧化铝掺杂方面,白德鹏等<sup>[26]</sup>在环氧树脂中掺杂不同体积分数的微米氧化铝,发现制备的环氧复合材料的拉伸和冲击性能均随氧化铝填料体积分数的增加先上升后下降。王旗等<sup>[27]</sup>研究发现掺入微米氧化铝填料可以提高环氧复合材料的热导率,但会降低其击穿强度。宁晓秋等<sup>[28]</sup>研究发现随着掺入微米氧化铝质量分数提高,复合材料的玻璃化转变温度下降,介电常数升高,电阻率下降。在氧化硅掺杂方面,秦毅<sup>[29]</sup>研究发现环氧复合材料的拉伸强度和击穿强度均随微米氧化硅质量分数的增加而先增大后减小。T IMAI 等<sup>[30]</sup>研究发现掺入约 60% 的微米氧化硅填料可以降低环氧复合材料的热膨胀系数,且可提高环氧复合材料的击穿强度。

掺入单一填料在提升复合材料性能的同时可能引入缺陷,影响其他方面的性能,其高填充量也会带来成本高、制造装配困难等问题。因此,有学者提出掺入不同种类的填料来进一步提升绝缘材料的性能。例如,已有诸多研究制备了氧化铝-氮化硼/环氧复合材料,该类材料的导热性能或绝缘性能优良<sup>[31-33]</sup>。马文杰等<sup>[34]</sup>通过复配氧化铝和氧化钛提升了环氧复合材料的绝缘性能,其表面电阻率可

达  $8.62 \times 10^{13} \Omega$ , 电气强度可达 29.01 kV/mm。M KURIMOTO 等<sup>[15]</sup>在保持总填料体积比不变的情况下,改变氧化钛氧化硅的填充比,探究了各配方下氧化钛-氧化硅/环氧复合材料的介电常数和热膨胀特性,并分析了具有低热膨胀系数的介电常数梯度环氧绝缘子的应用条件。

目前国内特高压 GIL 工程中环氧绝缘子均采用氧化铝/环氧复合材料,但在部分 252 kV 等其他低电压等级 GIL 的工程应用中,也有部分制造厂家采用氧化硅/环氧体系,且国外成熟的高压 GIL 技术路线中已有氧化硅/环氧体系投入使用,而采用氧化硅填料可以显著降低工程成本<sup>[20]</sup>。因此,探究掺入氧化硅填料和氧化铝-氧化硅共混填料对环氧复合材料性能影响的规律对国内特高压 GIL 工程和推行国产化环氧配方具有重要意义。本研究向环氧树脂分别掺入微米氧化铝、氧化硅和氧化铝-氧化硅共混填料,制备不同配方的环氧复合材料,并测试其电气(介电常数、体积电阻率、击穿强度和耐电弧性能)、力学(拉伸、弯曲和冲击)和热学性能(玻璃化转变温度、热膨胀系数和热导率),比较填料填充比例对其综合性能的影响,以探究满足特高压 GIL 绝缘子应用需求的环氧复合材料。

## 1 实验

### 1.1 主要原材料

双酚 A 型环氧树脂(牌号为 5531)、羧酸酐型固化剂(型号为 HT903C1),美国亨斯迈公司;氧化铝粉末,中值粒径为 8.16  $\mu\text{m}$ ,密度为 3.9 g/cm<sup>3</sup>,山东电气集团有限公司;氧化硅粉末,中值粒径为 9.52  $\mu\text{m}$ ,密度为 2.2 g/cm<sup>3</sup>,河南平高电气股份有限公司。

### 1.2 配方设计与试样制备

实验所用的氧化铝和氧化硅粉末粒径相近但密度相差较大,因此将填料体积分数设定为固定值。参照 GIL 工程中环氧绝缘子的填料体积分数,确定本研究填料的体积分数为 40%±0.2%,制备 5 种不同填料配方的环氧复合材料试样。氧化铝和氧化硅的体积比分别为 1:0、2:1、1:1、1:2、0:1 的环氧复合材料试样配方如表 1 所示。

首先,将环氧树脂加热至 110℃ 熔化,按比例加入事先烘干的填料粉末,然后将环氧树脂/填料混合物在 120℃ 油浴锅中搅拌 4 h,搅拌均匀后真空脱气 4 h,再加入固化剂搅拌 15 min,最后将混合料浇注到预热至 100℃ 的模具中。将浇注好的模具放置在烘箱中脱气,按照 100℃/1 h+120℃/2 h+130℃/2 h+

表1 试样配方

Tab.1 Composition of samples

试样 编号	环氧树脂质量 /g	固化剂 /g	氧化铝质量 /g	氧化硅质量 /g
EA	300	114	912	0
EA2S1	300	114	608	172
EA1S1	300	114	456	257
EA1S2	300	114	304	343
ES	300	114	0	515

140℃/18 h 的升温程序进行固化得到试样。

### 1.3 测试与表征

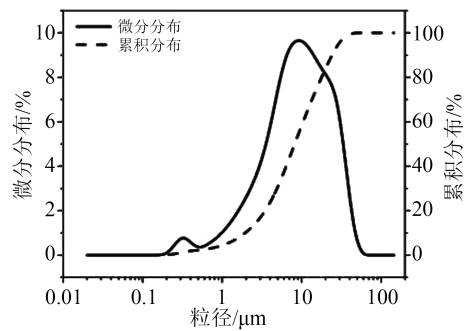
采用激光粒度分析仪(LS-909型, 欧美克公司)测量填料粒径分布。采用电子显微镜(VE-9800型, 日本基恩士公司)观测填料微观形貌。采用钨灯丝扫描电镜(EVO10型, 天美科学仪器公司)表征试样断裂面微观形貌, 并对微观表面进行半定量分析。采用阿基米德排水法密度仪(AL104型, 梅特勒托利多公司)测量试样密度。根据 GB/T 2567—2021, 采用电子万能试验机(ETM型, 万测公司)和引伸计(3542型, 美国 Epsilon 公司)进行变温拉伸实验, 温度选取 25、50、75、100、125℃; 采用电子万能试验机(CMT4503型, 上海捷沪仪器仪表有限公司)进行弯曲试验; 采用摆锤式冲击试验机(ZBC1000-A型, 美斯特公司)进行简支梁冲击试验。采用宽频介电阻抗谱测试仪(Concept80型, 德国 Novocontrol 公司)测量试样介电特性。采用差示扫描量热仪(DSC822e型, 瑞士梅特勒公司)测试试样的玻璃化转变温度, 升温速率为 10℃/min。采用激光导热分析仪(LFA447型, 德国耐驰公司)测量试样的热导率, 试样为直径为 12.7 mm、厚度为 1 mm 的小圆片。采用动态热机械分析仪(SDTA861e型, 瑞士梅特勒公司)测试试样的储能模量, 选择双悬臂梁弯曲模式, 试样为 2 mm×2 mm×80 mm 的条状试样, 测试温度范围为 40~150℃, 升温速率为 2℃/min。采用热膨胀仪(L75型, 德国林赛斯公司)测定试样的线性热膨胀系数, 测试温度范围为 25~150℃。采用圆球电极-平板试样-圆球电极结构及击穿电压测试仪测量试样的电气强度, 升压速率为 1 kV/s。根据 GB/T 1411—2002, 采用耐电弧试验仪(北京华测公司)进行耐电弧测试。

## 2 结果与讨论

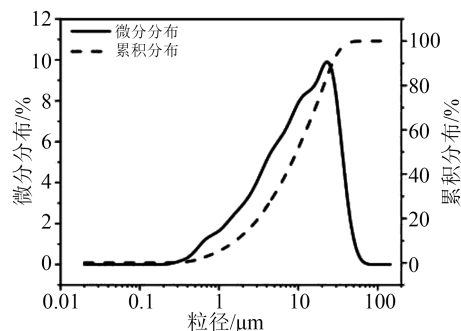
### 2.1 微观形貌与元素分析

图 1 为两种填料的粒径分布图和 SEM 图。从图 1 可以看到, 氧化铝填料的平均粒径略低于氧化硅填料, 但差距不大。两种填料形状皆呈不规则的

块状。



(a)氧化铝的粒径分布图



(b)氧化硅的粒径分布图



(c)氧化铝的 SEM 图

(d)氧化硅的 SEM 图

图1 两种填料的粒径分布图和 SEM 图

Fig.1 Particle size distribution and SEM images of two kinds of fillers

图 2 为不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的截面 SEM 图。从图 2 可以看出, 不同试样中的氧化铝颗粒或氧化硅颗粒在环氧基体中分散的均匀性基本一致。当环氧复合材料受到应力作用时, 氧化铝颗粒和氧化硅颗粒可以均匀地分散应力, 使材料的断裂面呈现高低不平、大小不均的不规则形状。

表 2 为 EDS 能谱检测结果中 Al 元素和 Si 元素各自的质量分数和原子数占比。对比表 2 与表 1 中数据, 可以看到所观察区域的 Al 元素和 Si 元素的分布比例与填料理论填充比例基本一致, 说明本研究制备的试样混合均匀, 验证了氧化铝和氧化硅填料共混填充环氧复合材料的可行性。

### 2.2 玻璃化转变温度与热膨胀系数

表 3 为不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合

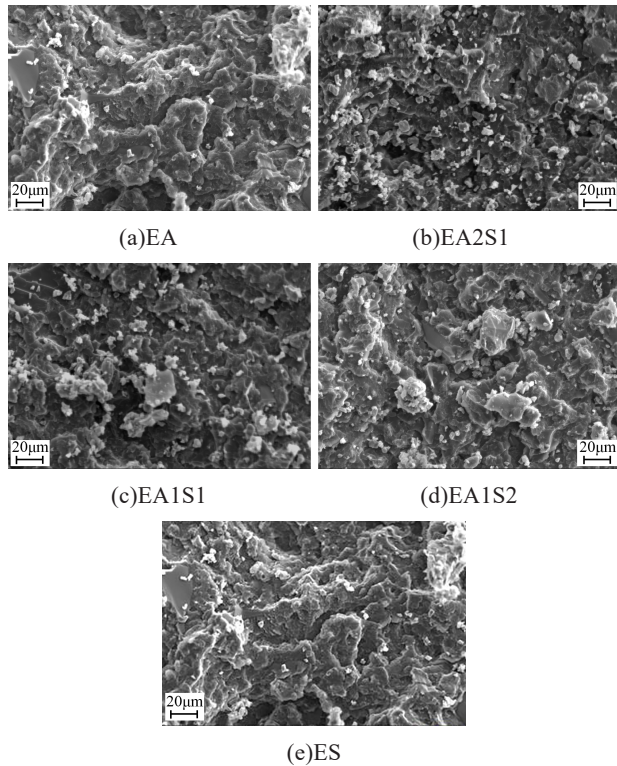


图2 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的断面SEM图

Fig.2 SEM images of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2/\text{EP}$  composites with different proportions

表2 EDS能谱检测结果

Tab.2 EDS test results

试样编号	Al的质量分数/%	Si的质量分数/%	Al的原子数比/%	Si的原子数比/%
EA	14.86	0.45	7.83	0.23
EA2S1	10.91	4.08	5.72	2.05
EA1S1	9.14	5.37	4.75	2.68
EA1S2	6.55	7.15	3.39	3.55
ES	0.22	9.06	0.11	4.41

表3 密度测量结果

Tab.3 Density test results

试样编号	密度测量值/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	密度理论值/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	标准差
EA	2.320	2.268	0.007
EA2S1	2.044	2.041	0.003
EA1S1	1.958	1.928	0.001
EA1S2	1.906	1.815	0.002
ES	1.644	1.588	0.006

材料的测量密度值及标准差和理论密度值。从表3可以看出,本研究制备的环氧复合材料的密度测量值与理论值相吻合,且误差小。结合2.1节的结果,表明本研究制备的试样并没有出现因两相填料密度差异造成的不均匀分布。

通过差示扫描量热分析(DSC)测试了氧化铝-

氧化硅共混环氧复合材料的玻璃化转变温度( $T_g$ ),结果如图3所示。从图3可以看出,环氧复合材料的 $T_g$ 随着氧化硅填料占比的增加,呈现先下降后上升的趋势。当氧化铝-氧化硅填料体积比为1:2时,环氧复合材料的 $T_g$ 出现最小值108.01℃。当复合材料中只有单一填料时,EA的 $T_g$ 为最大值(118.82℃),大于ES的 $T_g$ (115.92℃),说明氧化铝填料对环氧分子链链段运动的抑制作用大于氧化硅填料。但对于仅含有氧化硅填料的环氧复合材料,掺入氧化铝填料会使得玻璃化转变温度略微降低。

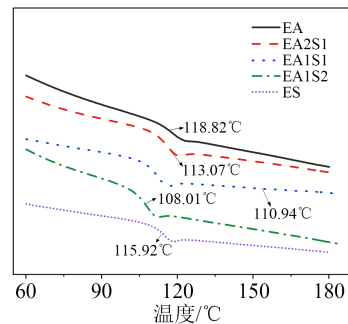


图3 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的DSC曲线

Fig.3 DSC curves of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2/\text{EP}$  composites with different proportion

图4为不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的热膨胀温度曲线。基于材料服役状况,玻璃态的热膨胀系数(CTE)是需要关注的重点<sup>[33]</sup>。从热膨胀系数曲线上选取不同编号试样在25℃和75℃下的热膨胀系数,总结在表4中。

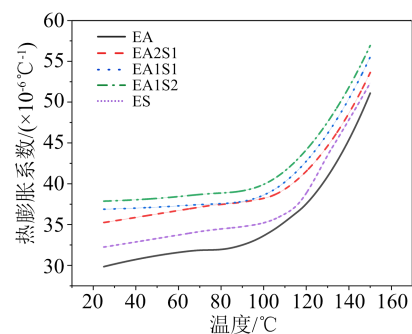


图4 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的热膨胀温度曲线

Fig.4 CTE curves of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2/\text{EP}$  composites with different proportions

从图4和表4可以看出,EA在各温度下的CTE值小于ES,这是因为氧化铝填料的CTE值小于氧化硅填料,更有利于降低复合材料总的CTE值。环氧复合材料的CTE随着氧化硅填料占比的增加呈现先上升后下降的趋势。该趋势与玻璃化转变温度

表4 不同温度下的热膨胀系数  
Tab.4 CTE at different temperature

温度	热膨胀系数/( $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )				
	EA	EA2S1	EA1S1	EA1S2	ES
25 $^\circ\text{C}$	29.8	35.2	36.9	37.9	32.2
75 $^\circ\text{C}$	31.9	37.3	37.5	38.8	34.3

的变化趋势相吻合。

一般来说,如果  $T_g$  升高,说明填料与环氧树脂基体间的界面结构致密,界面区域的分子链运动受到抑制。不同尺寸和种类的填料引入会增强对环氧分子链运动的抑制作用<sup>[35]</sup>。因此,一方面可以认为引入氧化铝-氧化硅共混填料后制成的环氧复合材料界面区结构较松散,另一方面也可能是氧化铝和氧化硅颗粒的引入影响了环氧树脂的交联反应过程,使得共混体系的自由体积增大,减少了对聚合链段运动的约束,从而降低了环氧复合材料的玻璃化转变温度,导致热膨胀系数增大。

### 2.3 导热系数

在环氧基体中引入适量的高导热粒子,可以在环氧基中构筑有效的导热通路,实现材料导热性能的增强。图5为不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料室温下的导热系数。从图5可以看出,EA的导热系数大于ES,这主要是因为氧化铝填料的导热系数(33 W/(m·K))大于氧化硅填料的导热系数(约为4 W/(m·K))<sup>[36-37]</sup>。一般来说,填料的导热系数越高,填充量越大,则复合材料的导热系数越大。

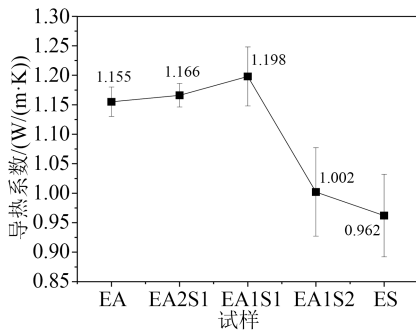


图5 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的导热系数

Fig.5 Thermal conductivity of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2/\text{EP}$  composites with different proportions

从图5还可以看出,EA1S1的导热系数明显高于其他试样,相比填充单一填料的EA和ES导热系数分别提升了4.68%和24.53%。结合图1和图2(c)进行分析,尺寸和形状有差异的两种填料在混合并均匀分布后可能提高了内部填充密度,形成更紧密的填充体系,增加了介质内部的导热通路种类和相

互搭接的概率(环氧-氧化铝、环氧-氧化硅和氧化铝-氧化硅通路),减少了因大量填充单一填料带来的缺陷,降低了共混体系的热阻。同时,氧化铝和氧化硅的组合可能还存在一定的协同作用,氧化硅具有良好的散热性能,氧化硅相可以有效地将热量向周围环境传递,而导热系数较高的氧化铝可以有效地将热量传递到填充物内部,两者相互协同,从而提高了导热性能。

### 2.4 力学性能

图6为不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料室温下的弯曲性能和冲击性能,图7为不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料拉伸性能随温度的变化特性。从图6可以看出,室温下,随着氧化硅填料占比的增加,共混环氧复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度均下降,说明氧化铝填料对共混体系整体的拉伸、弯曲和冲击性能的提升优于氧化硅填料。材料的冲击强度是表征材料韧性的重要参数,氧化铝填料在增韧上也优于氧化硅填料。

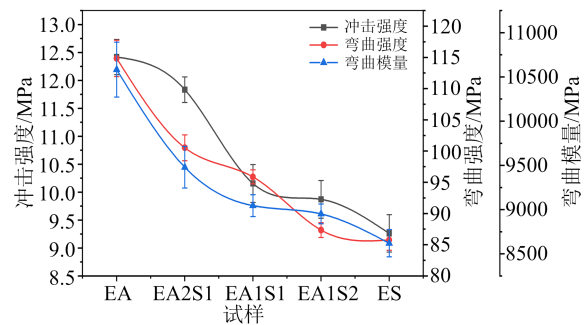


图6 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的弯曲和冲击性能

Fig.6 Bending and impacting properties of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2/\text{EP}$  composites with different proportions

弹性模量是复合材料在弹性形变中线性部分斜率的大小,代表着材料的刚性大小,即材料在弹性范围内抵抗变形的难易程度。从图7可以看出,随着温度升高,环氧复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量在25~100 $^\circ\text{C}$ 缓慢下降,且在同一温度点时,同样满足氧化铝填料占比越高,拉伸强度和弹性模量越高的趋势。在100~125 $^\circ\text{C}$ ,环氧复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量出现明显下降。这是因为温度超过了环氧复合材料的玻璃化转变温度,材料由玻璃态逐渐变化为高弹态,整体拉伸性能下降明显。

图8为不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的动态热机械分析(DMA)曲线。储能模量

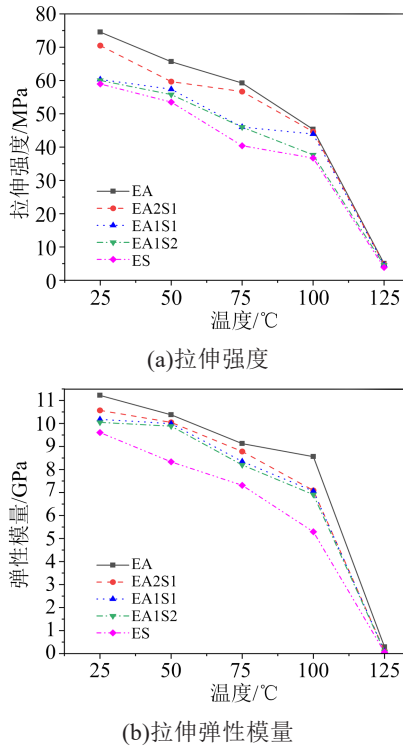


图7 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的拉伸性能和温度的关系

Fig.7 Relationship between tensile properties of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{/EP}$  composites with different proportions and temperature

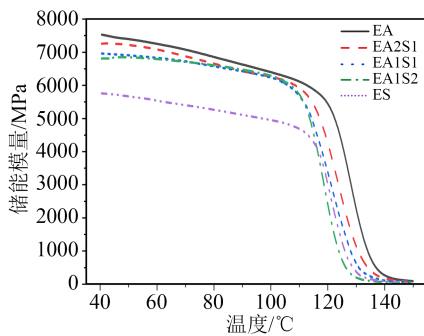


图8 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的动态热机械曲线

Fig.8 DMA curves of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{/EP}$  composites with different proportions

( $G'$ )与试样在每周期中贮存的最大弯曲弹性能量成正比,反映材料粘弹性中的弹性成分,和拉伸弹性模量都可衡量材料的刚度。

从图8可以看出,复合材料的储能模量均随温度增加先缓慢降低,在温度经过 $T_g$ 后大幅降低。在相同温度下,复合材料的储能模量也随着氧化铝填料占比的增加而提升,这是因为氧化铝为刚性粒子,自身具有比氧化硅更高的弹性模量,所以氧化铝填料的加入对复合材料的弹性模量提升较大,氧化铝填料占比越大,环氧复合材料的刚度越大。储

能模量曲线表征的 $T_g$ 范围,以及试样的 $T_g$ 随填料占比改变变化规律与DSC的测试结果吻合。

以上结果说明,在掺入填料体积确定的情况下,氧化铝填料对环氧复合材料力学性能的提升大于氧化硅填料,这为氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料在特高压GIL工程中力学性能与其他性能协同上提供了参考。

## 2.5 介电常数

图9为25°C下不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料在 $10^{-1}\sim 10^6$  Hz下的介电常数( $\epsilon'$ )。从图9可以看出,随着频率的增加,各试样的介电常数略有下降。

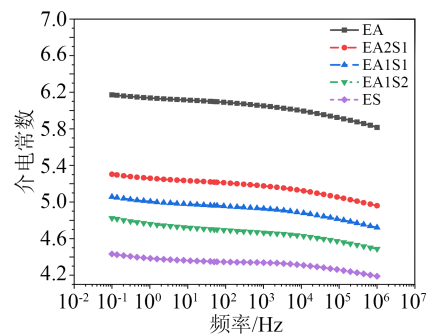


图9 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料在25°C、不同频率下的介电常数

Fig.9 Permittivity of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{/EP}$  composites with different proportions under different frequency at 25°C

图10为50 Hz下不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料在温度为25~150°C的介电常数。从图10可以看出,当温度在100°C以下时,随着温度的升高,各试样的 $\epsilon'$ 略微上升,变化基本不明显;当温度为100~125°C时,试样的 $\epsilon'$ 开始有明显的升高。在各个温度点,随着氧化硅填料占比的增加,复合材料整体的 $\epsilon'$ 都逐渐降低。这是因为在温度高于100°C时,温度接近环氧复合材料的玻璃化转变温度,环氧树脂由玻璃态逐渐转变为高弹态,内部的环氧链段运动更加剧烈,导致环氧材料的转向极化在此时迅速增加,使复合材料的介电常数迅速上升。从图10还可以看出,EA1S2介电常数的提升在100°C时较为明显,这也与 $T_g$ 的测量结果相对应,EA1S2的 $T_g$ 较低,它的偶极子转向极化在100°C左右已经开始增加。

在25°C时,ES的 $\epsilon'$ 为4.3466,相比EA的 $\epsilon'$ (6.0973)较低,这是因为氧化铝填料的 $\epsilon'$ 大于氧化硅填料的 $\epsilon'$ 。根据简单的有效介质理论<sup>[38]</sup>,氧化铝是极性强的离子晶体,氧化硅是原子晶体,当氧化铝填料加入到环氧体系中时,氧化铝填料的离子位

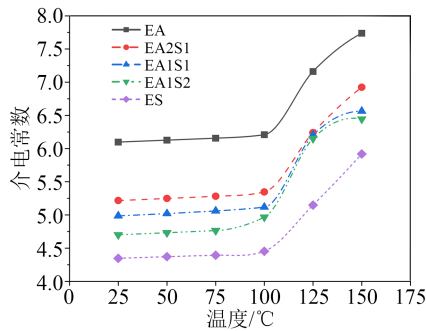


图 10 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料在 50 Hz、不同温度下的介电常数

Fig.10 Permittivity of the  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ /EP composites with different proportions under different temperatures at 50 Hz

移极化增强了体系整体的极化强度,同时填料的加入也产生了界面极化,使得氧化铝占比更多的共混体系整体的  $\epsilon'$  更大。

### 2.6 体积电阻率

图 11 为不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的体积电阻率( $\rho_v$ )与温度的关系。从图 11 可以看出,环氧复合材料的  $\rho_v$  随温度升高而逐渐下降,125 °C 时各试样的  $\rho_v$  相比 25 °C 时下降了一个数量级。在同一温度下,氧化铝填料的占比越大,环氧复合材料的  $\rho_v$  越大。25 °C 时,EA 的  $\rho_v$  ( $4.64 \times 10^{15} \Omega \cdot cm$ ) 相比 ES 的  $\rho_v$  ( $3.15 \times 10^{15} \Omega \cdot cm$ ) 高,这主要是因为氧化铝填料本身的电阻率大于氧化硅填料,共混体系的体积电阻率随氧化铝占比增加而提高。

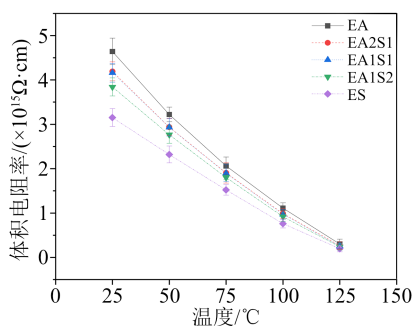


图 11 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料在不同温度下的体积电阻率

Fig.11 Volume resistivity of the  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ /EP composites with different proportions under different temperature

### 2.7 介质损耗因数

图 12 为 25 °C 下不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料在  $10^{-1} \sim 10^6$  Hz 的介质损耗因数 ( $\tan\delta$ )。从图 12 可以看出,复合材料的  $\tan\delta$  随频率的升高先下降后上升,在低频区,随着氧化硅填料占比的增加,复合材料的  $\tan\delta$  逐渐上升,而在高频区,各试样  $\tan\delta$  的差距较小。

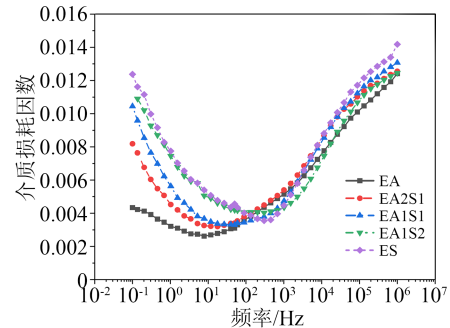


图 12 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料在 25 °C、不同频率下的介质损耗因数

Fig.12 Dielectric loss factor of the  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ /EP composites with different proportions under different frequency at 25 °C

图 13 为 50 Hz 下不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料在 25~150 °C 的  $\tan\delta$ 。从图 13 可以看出,与介电常数随温度变化的趋势相同,当温度低于 100 °C 时,随着温度的升高,各试样的  $\tan\delta$  略微上升,变化并不明显;当温度为 100~125 °C 时,试样的  $\tan\delta$  开始有明显的升高,与试样的  $\epsilon'$  在玻璃化转变温度附近明显升高的趋势相同。该频率下,在各温度点,随氧化铝填料占比的增加,共混体系的  $\tan\delta$  都有所降低。结合图 12 和图 13 进行分析,这主要是因为掺入氧化铝填料后的环氧材料电导小于掺入氧化硅填料后的环氧材料。

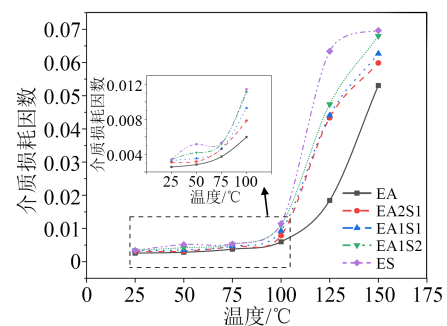


图 13 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料在 50 Hz、不同温度下的介质损耗因数

Fig.13 Dielectric loss factor of the  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ /EP composites with different proportions under different temperature at 50 Hz

### 2.8 电气强度

对不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料进行工频电气强度测试,得到电气强度的威布尔分布如图 14 所示,尺度参数( $\alpha$ )和形状参数( $\beta$ )如表 5 所示。 $\alpha$  表示击穿概率为 63.2% 时的电气强度,它类似于正态分布的平均值,表示试样的可信电气强度; $\beta$  是表征失效电压范围的值, $\beta$  值越大,则表明击穿电压或击穿次数的范围越小,它类似于正态分布的标准差的倒数。

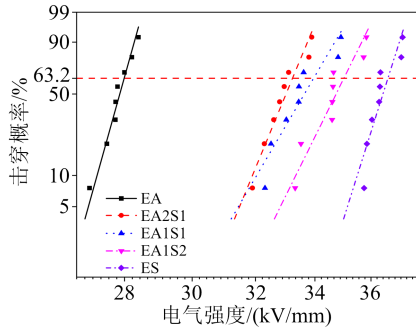


图 14 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料电气强度的威布尔分布图

Fig.14 Weibull distribution of power frequency breakdown strength of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{/EP}$  composites with different proportions

表 5 试样的尺度参数和形状参数

Tab.5 Scale and shape parameters of samples

试样编号	$\alpha$ /(kV/mm)	$\beta$
EA	27.99	81.35
EA2S1	33.23	54.99
EA1S1	33.96	38.71
EA1S2	35.02	45.90
ES	36.63	72.00

从图 14 可以看出,环氧复合材料的电气强度随氧化硅填料占比的增加而提高。EA 的电气强度为 27.99 kV/mm, ES 的电气强度为 36.63 kV/mm。固体电介质的击穿形式主要分为电击穿、热击穿、电-机械击穿和局部放电击穿<sup>[9]</sup>。在介电测试中发现,氧化铝占比越高的试样介电常数越高,其极化能力更强,即分子在外加电场作用下极化程度更高。这促进了电子和离子的形成和移动,产生更多正负电荷对,加强了介质中的空间电荷积累,加剧电场的畸变,导致电击穿的概率增大。

## 2.9 耐电弧性能

对不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料进行耐电弧试验,通过对试样表面上的两支钨电极施加交流电压,对试样的表面进行烧蚀,当试样无法耐受电弧的烧蚀时,表面会失效形成一条碳化的导电通道,记录试样从电弧开始到表面失效的总时间,用来表征试样的耐电弧强度。各试样的耐电弧性能如图 15 所示。从图 15 可以看出,环氧复合材料的耐电弧性能随氧化铝填料占比的增加先略微上升后下降,其中 EA1S1 的耐电弧时间最长,可达 186.63 s。但总的来说,各实验组耐电弧时间差距不大,且均大于 180 s,其耐电弧性能满足特高压 GIL 设备要求<sup>[20]</sup>。

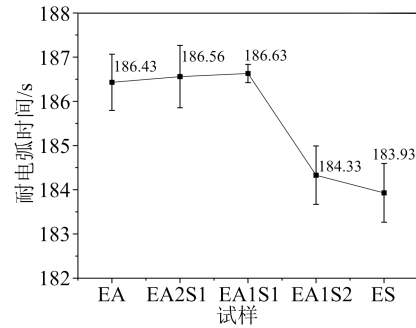


图 15 不同比例氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的耐电弧时间

Fig.15 Arc resistance time of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{/EP}$  composites with different proportions

## 3 结论

(1)随着氧化铝填料占比的增加,氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料的韧性和刚度增大,拉伸、弯曲和冲击性能提升。

(2)随着氧化硅填料占比的增加,氧化铝-氧化硅共混环氧复合材料不同温度下的介电常数减小,击穿性能增强,不同温度下的体积电阻率增大,介质损耗因数减小。纯微米氧化硅环氧复合材料的电气强度最高,可达 36.63 kV/mm。

(3)相比掺入单一填料,掺入氧化铝和氧化硅两种填料会略微降低环氧复合材料的玻璃化转变温度和增大热膨胀系数,但共混体系的导热性能和耐电弧性能有所提升,当氧化铝和氧化硅填料体积比为 1:1 时,复合材料的导热系数和耐电弧时长最高,耐电弧时长可达 186.63 s,导热系数可达 1.198 W/(m·K),比纯氧化铝环氧和纯氧化硅环氧材料分别提高了 4.68% 和 24.53%。

(4)研究制备的各实验组试样电学、热学和力学性能良好。探究得到氧化铝和氧化硅填料对环氧复合材料各性能影响的规律和协同效应,可以为不同工作环境下高性能特高压 GIL 绝缘子材料开发与结构设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] 韩先才,孙昕,陈海波,等.中国特高压交流输电工程技术发展综述[J].中国电机工程学报,2020,40(14):4371-86,719.
- [2] 吴泽华,龚傲,王浩然,等.GIL 绝缘子用环氧复合材料固化形变的试验研究与仿真模拟[J].高电压技术,2021,47(10):3590-3599.
- [3] 刘泽洪,王承玉,路书军,等.苏通综合管廊工程特高压 GIL 关键技术要求[J].电网技术,2020,44(6):2377-2385.
- [4] 班连庚,孙岗,项祖涛,等.特高压苏通综合管廊工程 GIL 系统工作条件[J].电网技术,2020,44(6):2386-2393.
- [5] 吴泽华,田汇冬,靳守锋,等.252kV 紧凑型 GIL 三相三支柱绝缘子绝缘结构与优化[J].高电压技术,2020,46(6):2030-2039.

- [6] GUO Z, WU Z, WANG H, et al. Experimental and numerical study on formation of interface separation and interfacial dielectric strength of GIL insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(6):1738-1746.
- [7] 陈允,崔博源,黄常元,等.特高压GIL用绝缘子材料寿命试验及预测[J].高电压技术,2020,46(12):4106-4112.
- [8] 吴泽华,田汇冬,靳守锋,等.252kV紧凑型气体绝缘金属封闭输电线路三相盆式绝缘子结构综合优化[J].西安交通大学学报,2020,54(12):138-146.
- [9] 郭子豪.特高压GIL用绝缘子关键技术研究及结构优化[D].西安:西安交通大学,2019.
- [10] LIU P, XIE Z, PANG X, et al. Space charge behavior in epoxy-based dielectrics: Progress and perspective [J]. Advanced Electronic Materials,2022,8(10):2200259.
- [11] 周浩然,袁镇,刘晨. AlN@Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/环氧树脂导热复合材料的制备与性能研究[J].绝缘材料,2020,53(8):32-37.
- [12] 何晋丰,杨威,乔健,等.高导热环氧/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>复合材料制备工艺研究[J].绝缘材料,2022,55(12):20-26.
- [13] 翟进乾,刘念祖,苏丹妮,等.环氧树脂/氧化铝微米复合电介质分子链松弛行为研究[J].绝缘材料,2022,55(12):27-32.
- [14] 李少龙,王忠军,刘绍光,等.微米氧化铝填料对环氧树脂高温介电松弛行为的影响[J].绝缘材料,2023,56(2):104-109.
- [15] KURIMOTO M, OZAKI H, SAWADA T, et al. Filling ratio control of TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> in epoxy composites for permittivity-graded insulator with low coefficient of thermal expansion[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(3):1112-1120.
- [16] KHAN H, AMIN M, ALI M, et al. Effect of micro/nano-SiO<sub>2</sub> on mechanical, thermal, and electrical properties of silicone rubber, epoxy, and EPDM composites for outdoor electrical insulations [J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences,2017,25(2):1426-1435.
- [17] UTAMI A M S, SYAKUR A, HERMAWAN H. Analysis of leakage current and insulator resistivity for quality assurance of medium voltage network polymer insulators alumina - SiO<sub>2</sub> in tropical climate simulator room[J]. Teknik,2021,42(1):10-19.
- [18] ULLAH I, AMIN M, HUSSAIN H, et al. Impact of accelerated ultraviolet weathering on polymeric composite insulators under high voltage DC stress[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2022,8(3):922-932.
- [19] 樊浩楠,刘育豪,王黎明,等.环氧树脂绝缘子合模缝对水扩散试验的影响[J].电网技术,2021,45(6):2420-2426.
- [20] 彭宗仁,张鹏飞,刘鹏,等.苏通综合管廊工程特高压GIL绝缘关键技术[J].高电压技术,2023,49(10):4046-4057.
- [21] STUCKLESS H A. Degradation of silica-filled epoxy spacers by arc contaminated gases in SF<sub>6</sub>-insulated equipment [J]. IEEE Power Engineering Review,1985,PER-5(12):55-56.
- [22] 高克利,颜湘莲,王浩,等.环保型气体绝缘输电线路(GIL)技术发展[J].高电压技术,2018,44(10):3105-3113.
- [23] 李卫国,张暖,杨亚奇.环氧树脂纳米复合电介质电气性能研究进展[J].科学技术与工程,2019,19(2):11-18.
- [24] ANDRITSCH T, FABIANI D, VAZQUEZ I R. Nanodielectrics-examples of preparation and microstructure[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2013,29(6):21-28.
- [25] 陈允,崔博源,王宁华,等.1100kV盆式绝缘子改善机械强度的研究[J].高压电器,2015,51(7):52-56,62.
- [26] 白德鹏,贺云逸,李亨,等.氧化铝填料含量和粒径对环氧树脂复合材料力学性能的影响[J].西安交通大学学报,2021,55(4):181-188.
- [27] 王旗,李喆,尹毅,等.微/纳米氧化铝/环氧树脂复合材料热导率和击穿强度的研究[J].绝缘材料,2013,46(2):49-52.
- [28] 宁晓秋,王立地,王宇,等.微米Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/环氧树脂复合材料介电性能和热性能研究[J].绝缘材料,2020,53(10):32-37.
- [29] 秦毅.环氧树脂基纳米复合绝缘材料的耐电压击穿性能研究[D].合肥:中国科学技术大学,2021.
- [30] IMAI T, SAWA F, OZAKI T, et al. Approach by nano- and micro-filler mixture toward epoxy-based nanocomposites as industrial insulating materials[J]. IEEE Transactions on Fundamentals & Materials,2007,126(11):1136-1143.
- [31] BIAN W, YAO T, CHEN M, et al. The synergistic effects of the micro-BN and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in micro-nano composites on enhancing the thermal conductivity for insulating epoxy resin[J]. Composites Science and Technology,2018,168:420-428.
- [32] 陈赟,张翀,杨威,等.氧化铝-氮化硼复合环氧绝缘材料导热性能与组合物粘度关系研究[J].高电压技术,2019,45(9):2715-2721.
- [33] 姜尚良.基于BN杂化与改性的环氧树脂复合材料结构与导热性能[D].武汉:华中科技大学,2018.
- [34] 马文杰,赵红红,崔丽茹,等. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 复配改性环氧树脂的绝缘特性[J].高分子材料科学与工程,2021,37(2):61-66.
- [35] LIZUNDIA E, SERNA I, AXPE E, et al. Free-volume effects on the thermomechanical performance of epoxy-SiO<sub>2</sub> nanocomposites[J]. Journal of Applied Polymer Science,2017,134(34):45216.
- [36] 尹泽.电弧热流载荷下环氧树脂的损伤机制及其耐电弧性能提升方法研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [37] 张天栋,石壮壮,吴加雪,等.填充型高导热环氧树脂复合材料的研究进展[J].绝缘材料,2022,55(3):10-22.
- [38] SINGHA S, THOMAS M. Dielectric properties of epoxy nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(1):12-23.
- [39] 王威望,李盛涛.工程固体电介质绝缘击穿研究现状及发展趋势[J].科学通报,2020,65(31):3461-74.

收稿日期:2023-01-17;修回日期:2023-03-06。

作者简介:刘鹏(1979-),男(汉族),陕西西安人,教授,主要从事特高压GIL/GIS关键绝缘技术的研究;通信作者:袁航(1999-),男(汉族),重庆人,硕士生,主要从事GIL绝缘子材料特性的研究。