

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.05.003

## 光学麦克风封装材料相容性试验

汤贝贝<sup>1,2</sup>, 张国强<sup>1,2</sup>, 李群<sup>3</sup>, 张子阳<sup>4</sup>, 邵剑<sup>3</sup>, 吴鹏<sup>3</sup>

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100149;

3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

4. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

**摘要:**为确保光学麦克风在电气设备内部应用的安全可靠性,文中选定聚氨酯、聚四氟乙烯、环氧树脂、聚醚醚酮和酚醛树脂作为封装材料,进行光学麦克风与电气设备相关的环境相容性试验,并采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)和傅里叶变换红外(Fourier transform infrared, FTIR)光谱仪对试验前后的材料性能进行检测。结果表明:聚氨酯表面易浸润变压器油且有明显颜色变化,不适用于油浸式变压器,但可用于水听器、空气和常温环境中;聚四氟乙烯与变压器油的相容性较好,可用于油浸式变压器、气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)和温度变化较大的场景;其余材料与电气设备的相容性不佳,适用性有待进一步研究。文中提出的封装材料与环境相容性试验的检测方法可为光学麦克风封装材料选型提供有益借鉴,具有一定的工程实用价值。

**关键词:**电气设备;气体绝缘开关设备(GIS);光学麦克风封装材料;相容性试验;傅里叶变换红外(FTIR)光谱;扫描电子显微镜(SEM)

中图分类号:TM211

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)05-0020-10

### 0 引言

电气设备在运行过程中,会不可避免地出现一些局部放电现象,且往往伴随着超声波辐射、光信号辐射、局部过热、电磁辐射以及新物质的产生等。局部放电进一步发展为绝缘故障,将给电力系统的安全稳定运行带来危害。局部放电的主要检测手段有超声波法<sup>[1-3]</sup>、光检测法<sup>[4-7]</sup>、化学检测法<sup>[8-9]</sup>、特高频法<sup>[10-12]</sup>、暂态对地电压法<sup>[13]</sup>和脉冲电流法<sup>[14]</sup>等。其中,基于光纤传感的局部放电超声检测<sup>[15-19]</sup>所用的光学麦克风具有良好的抗电磁干扰性能,还具有体积小、结构简单和安全可靠等优点,逐渐成为局部放电检测的研究热点之一。

对光学麦克风探头进行封装,不但可以保护探头,延长其使用寿命,还可以保证光学传感系统的稳定性。封装材料可分为金属类和非金属类,金属类封装材料一般为铝合金、合金钢等;非金属类封装材料一般为塑料、聚合物、环氧胶黏剂等<sup>[20]</sup>。国内,杨吉祥等人<sup>[21]</sup>使用新型的压力敏感聚合物复合材料对光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器进行封装,提高了传感器的灵敏度;陈起超等人<sup>[22]</sup>采用多套管耦合支撑结构对非本征型光纤法珀传感器(extrinsic fiber Fabry-Perot interferometer, EFPI)进行封装,其检测灵敏度为传统传感器的3.75倍。国外,英国 OX 公司研发团队成功研制了基于

光纤准直器的高温压力传感器,采用氧化铝管和不锈钢外壳组成封装,实现了光纤传感器封装的耐高温性<sup>[23]</sup>;美国佛罗里达大学 Sheplak Mark 课题组<sup>[24]</sup>改进了封装结构,将压敏膜片、蓝宝石多模光纤与氧化铝套集成,并加装 316 不锈钢外壳,使得传感器能在一定温度范围内完成动态校准。

目前对光学麦克风探头封装材料与电气设备内部特定环境的相容性<sup>[25-26]</sup>研究较少。为保证探头能稳定可靠地工作,须检测封装后的探头与绝缘介质(油或 SF<sub>6</sub> 气体)是否发生化学反应,封装后的探头是否具有较高绝缘性能,封装材料与电气设备的相容性是否良好等。因此光学麦克风探头封装材料和电气设备运行环境的相容性研究十分重要。

针对封装材料对不同环境适应性的差异,结合电气设备实际运行对材料的要求,文中主要研究非金属类封装材料,选用聚氨酯(polyurethane, PU)、聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)、环氧树脂(epoxy resin, EP)、聚醚醚酮(polyetheretherketone, PEEK)和酚醛树脂(phenol-formaldehyde resin, PF)进行相容性试验。对热加速试验后的材料性能进行检测,对比分析检测结果产生的原因,所得结果可为光学麦克风封装材料的选型提供参考和依据。

### 1 封装材料相容性试验与检测方法

#### 1.1 相容性试验方法

相容性试验所用的高低温试验箱的工作尺寸

收稿日期:2023-07-31;修回日期:2023-09-06

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFF0708400)

为 400 mm×500 mm×500 mm,外箱整体尺寸为 1 100 mm×750 mm×1 650 mm,温度范围为 -70~150 ℃。将 PU、PTFE、EP、PEEK 和 PF 5 种材料作为样品进行变压器油、SF<sub>6</sub>气体和 He 气体氛围下的相容性试验,将 He 气体氛围作为对照组。设置试验温度为 150 ℃,加速热老化时间为 7 d(168 h)。样品的直径为 28.5 mm,每种样品分别有 1.5 mm 和 10 mm 2 种厚度,每种厚度设置 3 个平行试样。

具体试验流程如下。

试验前,对原始材料进行清洗,消除表面杂质。清洗方法为:使用装有无水乙醇溶液的超声波清洗仪清洗 3~5 次,每次时间为 180 s。然后将材料放入高低温试验箱,50 ℃烘干 6 h,之后放入室温静置 12 h,以释放材料内部应力。用无水乙醇擦拭试验罐内壁,用超声清洗仪清洗样品架。

准备好样品后,将其放入样品架并装入试验罐中,用试验氛围对试验罐进行清洗。对于气体氛围气罐,其具体操作为:将试验罐抽真空 30 min,之后充入 SF<sub>6</sub>气体和 He 气体氛围静置 20 min,然后抽真空,反复清洗试验罐 3~4 次。变压器油氛围罐与 He 气体氛围气罐的清洗过程一致。通过上述操作消除水分和空气等杂质对试验的影响,最后充入试验所需变压器油或气体氛围。

将试验罐放入高低温试验箱进行初步相容性试验,并对材料持续加热 7 d(168 h)。样品的具体处理流程如图 1 所示。

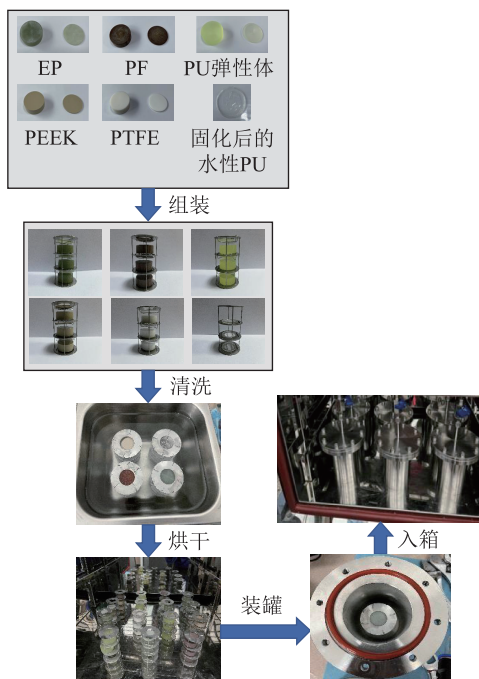


图 1 样品处理流程

Fig.1 Flow chart of sample processing

## 1.2 材料性能检测方法

### 1.2.1 表面形貌检测方法

表面形貌检测采用德国 Carl Zeiss 公司生产的 SIGMA 型场致发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM),利用该 SEM 对相容性试验前后的材料表面形貌进行检测。为提升 SEM 检测的图像质量,检测前利用真空溅射设备在相容性试验样品表面进行喷金处理。

### 1.2.2 表面官能团变化检测方法

试验采用美国 Nicolet iS50 傅里叶变换红外(Fourier transform infrared, FTIR)光谱仪对相容性试验前后的封装材料进行检测,光谱波数范围为 400~4 000 cm<sup>-1</sup>,分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>,扫描次数为 16。

采用 FTIR 光谱仪测定样品的红外光谱时,使用的红外光源是连续波长的光源。连续波长的光源照射红外样品后,样品中的分子会吸收某些波长的光,而没有被吸收的光到达检测器。通过检测器将检测到的光信号进行模数转换,再经过傅里叶变换,即可得到样品的单光束光谱。

## 2 相容性试验结果与分析

### 2.1 聚氨酯(PU)

PU 抗多种酸碱和有机溶剂腐蚀,因其卓越的性能被广泛应用于化工、电子、医疗和航天等众多领域<sup>[27-28]</sup>。

PU 在相容性试验前后的宏观变化如图 2 所示。试验前的 PU 呈透明浅绿色;试验后,SF<sub>6</sub>气体和 He 气体氛围中的 PU 呈黄色,变压器油氛围中的 PU 变为棕黄色。



图 2 相容性试验前后的 PU

Fig.2 PU before and after the compatibility test

其中,变压器油氛围中 1.5 mm 厚度的样品弹性降低,如图 3(a)所示;10 mm 厚度的样品出现开裂甚至熔化现象,如图 3(b)所示。

(1) 表面形貌检测。图 4 为 PU 样品试验前后的扫描电镜图片对比,放大倍数为 500。

图 4(b)、(c)所示气体氛围处理的样品相较于图 4(a)所示未处理的样品,表面颗粒减少;而图 4



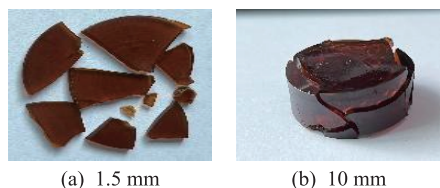


图3 相容性试验后变压器油氛围中的 PU

Fig.3 PU in transformer oil after the compatibility test

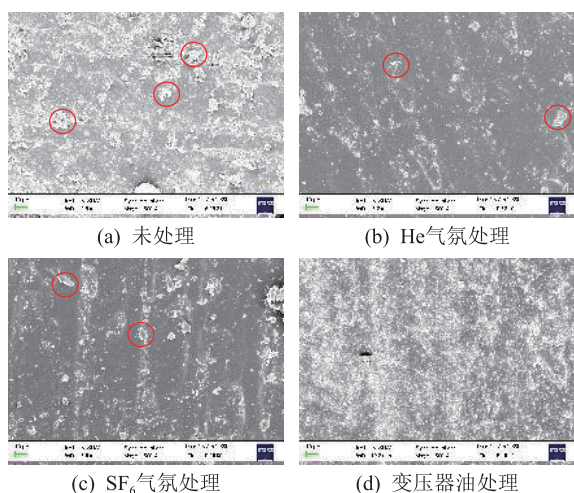


图4 PU 样品扫描电镜图

Fig.4 SEM images of PU samples

(d)所示变压器油处理的样品表面较大尺寸颗粒明显减少,推测样品表面长时间被变压器油浸润,与变压器油产生反应。这与从宏观形貌上观察到的开裂或熔化现象一致,表明 PU 材料与变压器油相容性较差。

(2) 表面官能团变化检测。对 PU 进行 FTIR 光谱检测,He 气氛处理后的结果如图 5 所示。

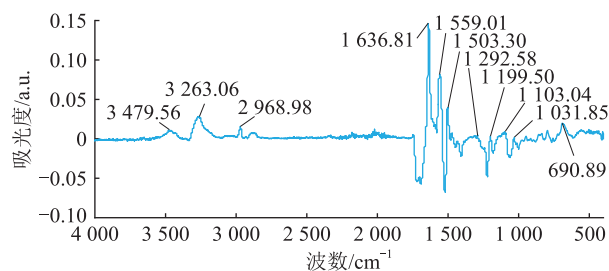


图5 He 气氛处理后 PU 样品 FTIR 光谱检测结果

Fig.5 FTIR detection results of PU samples after He atmosphere treatment

表 1 为 He 气氛处理后 PU 样品表面特征吸收波数和其所属振动模式以及官能团。根据检测结果,3 263.06  $\text{cm}^{-1}$  处峰所属分子结构中的 N—H 键伸缩振动;1 559.01  $\text{cm}^{-1}$  处为 C—NH 变形振动特征吸收峰;1 030~1 300  $\text{cm}^{-1}$  之间有 C—O 键宽吸收峰,为 PU 的特征吸收谱带。检测结果中出现负的吸光度,表明对应波数处有反常吸收<sup>[29]</sup>。红外光谱

测量时,如果背景样品(指未处理的样品)的吸收信号太强,谱图中会出现反常吸收现象,这表明背景样品中的特征峰较强。

表 1 He 气氛处理后 PU 样品红外特征吸收峰及官能团

Table 1 Infrared characteristic absorption peaks and functional groups of PU samples after He atmosphere treatment

特征吸收波数/ $\text{cm}^{-1}$	振动模式	所属官能团及对应化学结构
690.89	N—H 面外弯曲振动	N—H
1 031.85	C—OH 伸缩振动	C—OH
1 103.04	C—OH 伸缩振动	C—OH
1 199.50	C—O 键伸缩振动	C—O
1 292.58	C—OH 伸缩振动	C—OH
1 503.30	$\text{NH}_3^+$ 对称变角振动	受碳氢变角干扰难以辨认
1 559.01	C—NH 变形振动	C—NH
1 636.81	C—O 键伸缩振动	C—O
2 968.98	$\text{CH}_3$ 反对称伸缩振动	饱和烷基
3 263.06	N—H 键伸缩振动	N—H
3 479.56	O—H 键伸缩振动	O—H

$\text{SF}_6$  气氛处理后 PU 样品 FTIR 光谱检测结果如图 6 所示,和 He 气氛处理相比,特征吸收峰位置和峰强变化不明显。

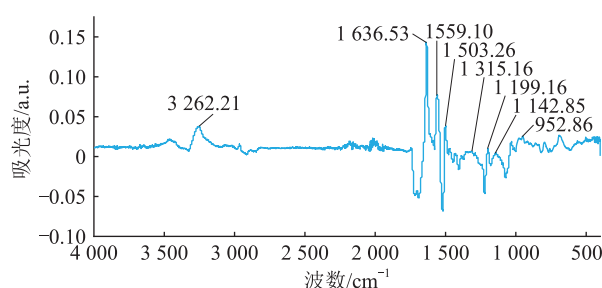


图6  $\text{SF}_6$  气氛处理后 PU 样品 FTIR 光谱检测结果

Fig.6 FTIR detection results of PU samples after  $\text{SF}_6$  atmosphere treatment

表 2 为  $\text{SF}_6$  气氛处理后 PU 样品表面特征吸收波数和其所属振动模式以及官能团。根据检测结果,3 262.21  $\text{cm}^{-1}$  处峰所属分子结构中的 N—H 键伸缩振动;1 559.10  $\text{cm}^{-1}$  处为 C—NH 变形振动特征吸收峰;同样在 1 030~1 300  $\text{cm}^{-1}$  之间有 C—O 键宽吸收峰,为 PU 的特征吸收谱带。

变压器油氛围处理后 PU 样品 FTIR 光谱检测结果如图 7 所示,和 He 气氛处理相比,特征吸收峰位置和峰强存在明显变化。

表 3 为变压器油氛围处理后 PU 样品表面特征吸收波数和其所属振动模式以及官能团。根据检测结果,波数大于 2 900  $\text{cm}^{-1}$  的峰为变压器油中饱

表 2 SF<sub>6</sub>气氛处理后 PU 样品红外特征吸收峰及官能团  
Table 2 Infrared characteristic absorption peaks and functional groups of PU samples after SF<sub>6</sub> atmosphere treatment

特征吸收波数/cm <sup>-1</sup>	振动模式	所属官能团及对应化学结构
952.86	C—OH 面外弯曲振动	C—OH
1 142.85	C—OH 伸缩振动	C—OH
1 199.16	C—O 键伸缩振动	C—O
1 315.16	C—OH 伸缩振动	C—OH
1 503.26	NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> 对称变角振动	受碳氢变角干扰难以辨认
1 559.10	C—NH 变形振动	C—NH
1 636.53	C—O 键伸缩振动	C—O
3 262.21	N—H 键伸缩振动	N—H

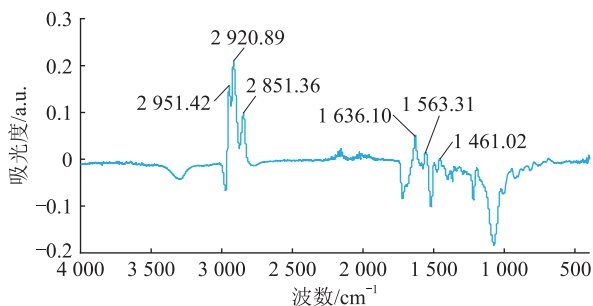


图 7 变压器油氛围处理后 PU 样品 FTIR 光谱检测结果  
Fig.7 FTIR detection results of PU samples after transformer oil atmosphere treatment

和烷基或长链烷基,其余频段属于 PU 材料本身振动频率,且峰强降低。

表 3 变压器油氛围处理后 PU 样品  
红外特征吸收峰及官能团

Table 3 Infrared characteristic absorption peaks and functional groups of PU samples after transformer oil atmosphere treatment

特征吸收波数/cm <sup>-1</sup>	振动模式	所属官能团及对应化学结构
1 461.02	CH <sub>3</sub> 不对称变角振动	CH <sub>3</sub>
1 563.31	C—NH 变形振动	C—NH
1 636.10	C—O 键伸缩振动	与烷基相连的 C—O
2 851.36	C—H 伸缩振动	C—H
2 920.89	CH <sub>2</sub> 反对称伸缩振动	长链烷基
2 951.42	CH <sub>3</sub> 反对称伸缩振动	饱和烷基

对于气体氛围处理的样品,其表面特征吸收峰主要为 PU 材料本身,有部分主键断裂;对于变压器油处理的样品,其表面吸附较多变压器油,PU 分子结构被破坏,PU 特征峰强明显降低。

## 2.2 聚四氟乙烯 (PTFE)

PTFE<sup>[30]</sup> 又称为塑料王,其耐热性好,除熔融金属钠和液氟外,和一切化学药品都不反应。

相容性试验前后的 PTFE 如图 8 所示,试验后的 PTFE 相较试验前无直观变化。

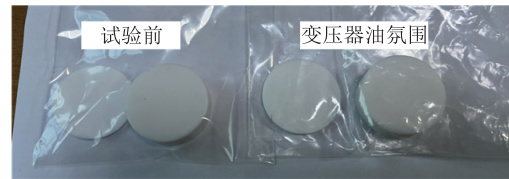


图 8 相容性试验前后的 PTFE

Fig.8 PTFE before and after the compatibility test

(1) 表面形貌检测。图 9 为 PTFE 样品试验前后的扫描电镜图片对比,放大倍数为 500。

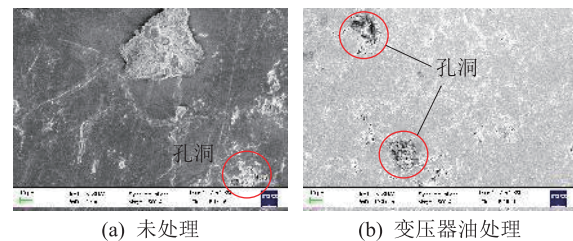


图 9 PTFE 样品扫描电镜图

Fig.9 SEM images of PTFE samples

经过变压器油氛围处理,材料表面有少量直径约为 20 μm 大小的孔洞,而未处理的样品,其表面也有少量类似孔洞,因此无法初步判断出是否为变压器油影响。

(2) 表面官能团变化检测。变压器油氛围处理后 PTFE 样品 FTIR 光谱检测结果如图 10 所示。

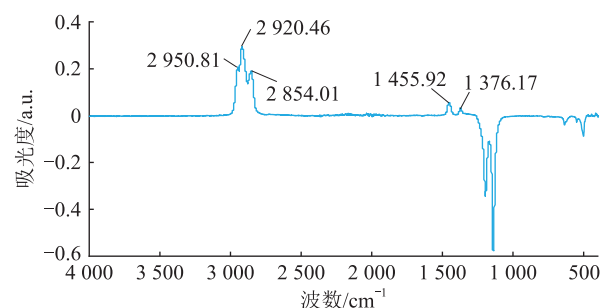


图 10 变压器油氛围处理后 PTFE 样品  
FTIR 光谱检测结果

Fig.10 FTIR detection results of PTFE samples after transformer oil atmosphere treatment

表 4 为变压器油氛围处理后 PTFE 样品表面特征吸收波数和其所属振动模式以及官能团。图谱库中 PTFE 特征吸收波数在 1 150 cm<sup>-1</sup> 处有 F—C—F 对称伸缩振动,在 1 220 cm<sup>-1</sup> 附近有 F—C—F 不对称伸缩振动。而对试验后的样品进行检测,得出这两处峰明显变小,波数大于 2 900 cm<sup>-1</sup> 的峰为变压器油中饱和烷基或长链烷基。同样,1 200 cm<sup>-1</sup> 附近的反常吸收为 PTFE 样品中较强的特征峰。



表 4 变压器油氛围处理后 PTFE 样品  
红外特征吸收峰及官能团

Table 4 Infrared characteristic absorption peaks and functional groups of PTFE samples after transformer oil atmosphere treatment

特征吸收波数/cm <sup>-1</sup>	振动模式	所属官能团及对应化学结构
1 376.17	CH <sub>3</sub> 变角振动	CH <sub>3</sub>
1 455.92	CH <sub>2</sub> 、CH <sub>3</sub> 变角振动	CH <sub>2</sub> 、CH <sub>3</sub>
2 854.01	C—H 伸缩振动	CH <sub>2</sub>
2 920.46	CH <sub>2</sub> 反对称伸缩振动	长链烷基
2 950.81	CH <sub>3</sub> 反对称伸缩振动	饱和烷基

从检测结果来看,其他吸收波数处没有出现新的特征峰,因此没有新的官能团产生,初步推测 PTFE 与变压器油的相容性较好。

### 2.3 环氧树脂(EP)

EP<sup>[31]</sup>又被称作人工树脂、人造树脂、树脂胶等,是一类非常重要的热固性塑料,属于高分子聚合物。相容性试验前后的 EP 见图 11,试验前的 EP 呈水绿色,表面似有白色粉尘;试验后,变压器油氛围中的 EP 颜色变黄,SF<sub>6</sub>气体和 He 气体氛围中的 EP 表面有明显白色粉尘,且表面出现深色斑点。



图 11 相容性试验前后的 EP

Fig.11 EP before and after the compatibility test

(1) 表面形貌检测。图 12 为 EP 样品试验前后的扫描电镜图片对比,放大倍数为 500。

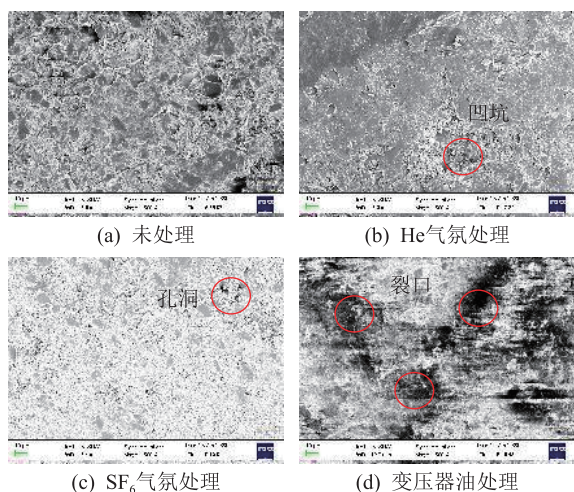


图 12 EP 样品扫描电镜图

Fig.12 SEM images of EP samples

图 12(b)、(c) 所示气体氛围处理的样品相较于图 12(a) 所示未处理的样品,其表面出现少量直径为 40 μm 左右的凹坑或孔洞,而经过变压器油处理的样品如图 12(d) 所示,其表面变化相对明显,有部分裂口较深,因此初步判断 EP 与变压器油相容性不佳。

(2) 表面官能团变化检测。He 气氛处理后 EP 样品的 FTIR 光谱检测结果如图 13 所示。

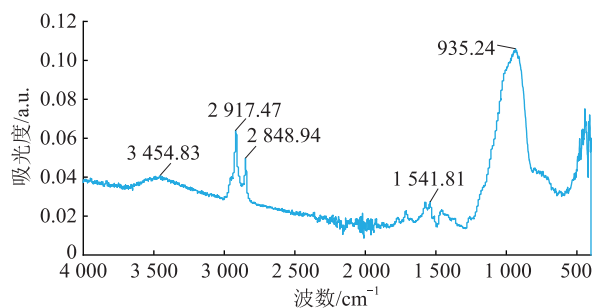


图 13 He 气氛处理后 EP 样品 FTIR 光谱检测结果

Fig.13 FTIR detection results of EP samples after He atmosphere treatment

表 5 为 He 气氛处理后 EP 样品表面特征吸收波数和其所属振动模式以及官能团。3 454.83 cm<sup>-1</sup> 附近为 O—H 伸缩振动,935.24 cm<sup>-1</sup> 处为环氧基团特征峰。

表 5 He 气氛处理后 EP 样品红外特征吸收峰及官能团  
Table 5 Infrared characteristic absorption peaks and functional groups of EP samples after He atmosphere treatment

特征吸收波数/cm <sup>-1</sup>	振动模式	所属官能团及对应化学结构
935.24	C—O—C 对称伸缩振动	环氧基团
1 541.81	芳环骨架振动	芳环骨架
2 848.94	C—H 伸缩振动	C—H
2 917.47	CH <sub>2</sub> 反对称伸缩振动	长链烷基
3 454.83	O—H 伸缩振动	O—H

SF<sub>6</sub>气氛处理后 EP 样品 FTIR 光谱检测结果如图 14 所示。943.06 cm<sup>-1</sup> 处环氧基团中 C—O—C 对称伸缩振动。和 He 气氛处理相比,SF<sub>6</sub>气氛处理后样品的 O—H 和 CH<sub>2</sub> 特征峰强都有所降低,推测可能是材料局部发生反应所致。

变压器油氛围处理后 EP 样品 FTIR 光谱检测结果如图 15 所示。

表 6 为变压器油氛围处理后 EP 样品表面特征吸收波数和其所属振动模式以及官能团。据检测结果,2 918.92 cm<sup>-1</sup> 处峰为变压器油中 长链烷基,峰强较大,附着较多变压器油,928.96 cm<sup>-1</sup> 处为环氧基团特征峰。

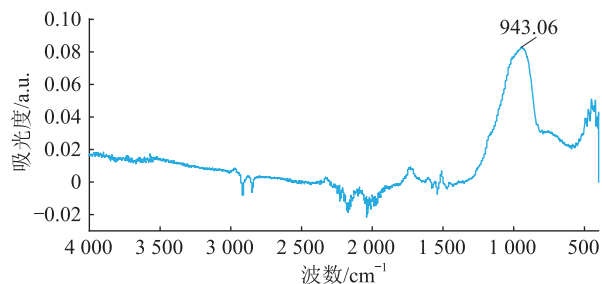
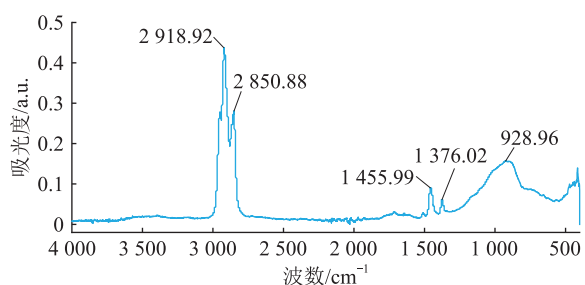
图 14 SF<sub>6</sub>气氛处理后 EP 样品 FTIR 光谱检测结果Fig.14 FTIR detection results of EP samples after SF<sub>6</sub> atmosphere treatment

图 15 变压器油氛围处理后 EP 样品 FTIR 光谱检测结果

Fig.15 FTIR detection results of EP samples after transformer oil atmosphere treatment

表 6 变压器油氛围处理后 EP 样品  
红外特征吸收峰及官能团Table 6 Infrared characteristic absorption peaks  
and functional groups of EP samples after  
transformer oil atmosphere treatment

特征吸收 波数/cm <sup>-1</sup>	振动模式	所属官能团及 对应化学结构
928.96	C—O—C 对称伸缩振动	环氧基团
1376.02	CH <sub>3</sub> 变角振动	CH <sub>3</sub>
1455.99	CH <sub>2</sub> 、CH <sub>3</sub> 变角振动	CH <sub>2</sub> 、CH <sub>3</sub>
2850.88	C—H 伸缩振动	C—H
2918.92	CH <sub>2</sub> 反对称伸缩振动	长链烷基

EP 样品经气体氛围处理后,其 FTIR 光谱在 3 000 cm<sup>-1</sup>附近以及环氧基团特征峰处峰强发生变化,而经变压器油氛围处理后,2 918.92cm<sup>-1</sup>处峰为变压器油中长链烷基对应的吸收峰,由此可判断出 EP 材料与变压器油相容性较差。

## 2.4 聚醚醚酮(PEEK)

PEEK 是在主链结构中含 1 个酮键和 2 个醚键的重复单元所构成的高聚物,属特种高分子材料,具有热固性塑料的耐热性、化学稳定性和热塑性塑料的成型加工性。相容性试验前后的 PEEK 见图 16,试验前后的 PEEK 宏观形貌无明显变化。

(1) 表面形貌检测。图 17 为 PEEK 材料试验前后的扫描电镜图片对比,放大倍数为 500。

变压器油氛围中 PEEK 样品除表面颗粒感降

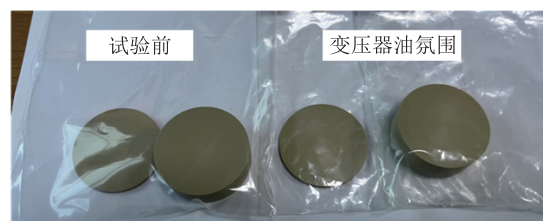


图 16 相容性试验前后的 PEEK

Fig.16 PEEK before and after the compatibility test

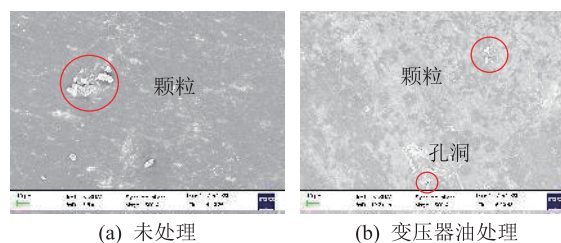


图 17 PEEK 样品扫描电镜图

Fig.17 SEM images of PEEK samples

低,出现较小直径(约 2 μm)的孔洞外,其微观表面形貌无明显变化。

(2) 表面官能团变化检测。对 PEEK 进行 FTIR 光谱检测,变压器油氛围处理后的结果如图 18 所示。

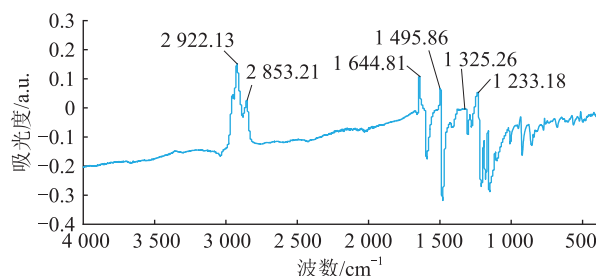
图 18 变压器油氛围处理后 PEEK 样品  
FTIR 光谱检测结果Fig.18 FTIR detection results of PEEK samples after  
transformer oil atmosphere treatment

表 7 为变压器油氛围处理后 PEEK 样品表面特征吸收波数及其所属振动模式以及官能团。1 644.81 cm<sup>-1</sup>处为 PEEK 分子中 C=O 的伸缩振动模式,2 922.13 cm<sup>-1</sup>处为变压器油中长链烷基,PEEK 材料与变压器油相容性一般。

## 2.5 酚醛树脂(PF)

PF 是一种合成塑料,为无色或黄褐色固体,因电气设备使用较多,也被称作电木<sup>[32-33]</sup>。相容性试验前后的 PF 如图 19 所示,试验前的 PF 干燥,纹路清晰;试验后的样品充分浸润变压器油,颜色加深。

(1) 表面形貌检测。图 20 为 PF 样品试验前后的扫描电镜图,放大倍数为 500。在变压器油中 PF 样品出现部分凹坑,材料不平整度较高。

表7 变压器油氛围处理后 PEEK 样品  
红外特征吸收峰及官能团

Table 7 Infrared characteristic absorption peaks and functional groups of PEEK samples after transformer oil atmosphere treatment

特征吸收波数/cm <sup>-1</sup>	振动模式	所属官能团及对应化学结构
1 233.18	Ar—O—Ar 不对称收缩振动	长链烷基
1 325.26	CH <sub>3</sub> 对称伸缩振动	饱和烷基
1 495.86	Ar—O—Ar 平面振动	分子中芳基
1 644.81	C=O 伸缩振动	C=O
2 853.21	C—H 伸缩振动	C—H
2 922.13	CH <sub>2</sub> 反对称伸缩振动	长链烷基



图 19 相容性试验前后的 PF

Fig.19 PF before and after the compatibility test

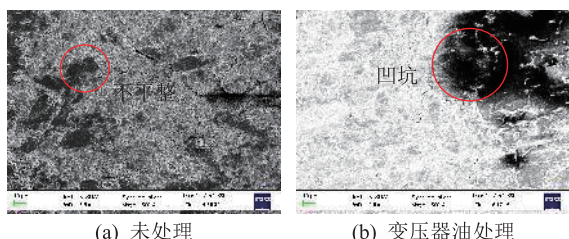


图 20 PF 样品扫描电镜图

Fig.20 SEM images of PF samples

(2) 表面官能团变化检测。对 PEEK 进行 FTIR 光谱检测,变压器油氛围处理后的结果如图 21 所示。

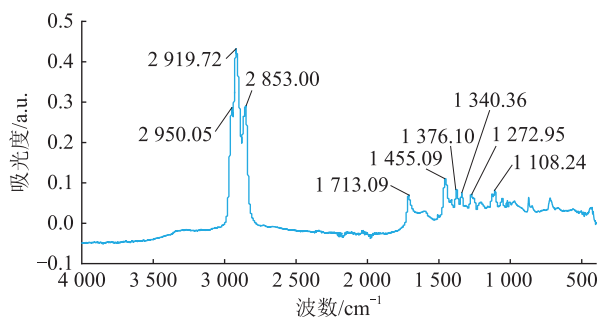


图 21 变压器油氛围处理后 PF 样品 FTIR 光谱检测结果

Fig.21 FTIR detection results of PF samples after transformer oil atmosphere treatment

表 8 为变压器油氛围处理后 PF 样品表面特征吸收波数和其所属振动模式以及官能团。1 713.09 cm<sup>-1</sup>处出现醛基 C=O 伸缩振动,波数大于 2 900 cm<sup>-1</sup>的峰为变压器油中饱和烷基或长链烷基峰,且

峰强很高,表明材料表面附着较厚的变压器油,与变压器油相容性较差。

表 8 变压器油氛围处理后 PF 样品  
红外特征吸收峰及其官能团

Table 8 Infrared characteristic absorption peaks and functional groups of PF samples after transformer oil atmosphere treatment

特征吸收波数/cm <sup>-1</sup>	振动模式	所属官能团及对应化学结构
1 108.24	C—O 伸缩振动	C—O
1 272.95	C—OH 伸缩振动	C—OH
1 340.36	C—H 变角振动	无特征性
1 376.10	CH <sub>3</sub> 变角振动	CH <sub>3</sub>
1 455.09	CH <sub>2</sub> 、CH <sub>3</sub> 变角振动	CH <sub>2</sub> 、CH <sub>3</sub>
1 713.09	芳香醛 C=O 伸缩振动	C=O
2 853.00	C—H 伸缩振动	C—H
2 919.72	CH <sub>2</sub> 反对称伸缩振动	长链烷基
2 950.05	CH <sub>3</sub> 反对称伸缩振动	饱和烷基

## 2.6 材料检测结果差异性对比分析

通过相容性热加速试验对材料表面形貌和表面官能团检测结果进行分析,所得结果如表 9 所示。

表 9 材料相容性试验结果

Table 9 Material compatibility test results

材料	相容性
PU	与变压器油相容性较差,与 SF <sub>6</sub> 相容性一般
PTFE	与变压器油相容性较好
EP	与变压器油相容性较差
PEEK	与变压器油相容性一般
PF	与变压器油相容性较差

从材料本身的性能分析,PU 弹性体是以二异氰酸酯和低聚物多元醇为基本原料聚合而成的高分子材料,由于聚合物多元醇中的氧原子易与硬段中氨基甲酸酯基中的氢形成氢键,其热稳定性不好。PU 的使用温度一般不超过 80 ℃,100 ℃以上材料会软化变形<sup>[34]</sup>,机械性能明显减弱;短期使用温度不超过 120 ℃。A 级绝缘变压器顶层油温一般不超过 105 ℃,该温度可能高于 PU 使用的一般温度,因此 PU 在变压器油中的使用受到限制。PTFE 中 C—C 键的键能为 372 kJ/mol,C—F 键的键能为 347 kJ/mol,是已知键能中较强的,因此分子内结合牢固,耐热性高。PTFE 的长期使用温度为 -250 ~ 260 ℃<sup>[30,35]</sup>,与变压器油相容性较好。PEEK 的热变形温度为 160 ℃<sup>[36]</sup>。文中 EP 吸附较多变压器油,油的分子链段长时间作用可能会降低材料的交联程度<sup>[37]</sup>,影响其性能,与变压器油的相容性较差。PF 耐热性较好<sup>[32-33]</sup>,但 PF 材料表面粗糙度较大,更易吸附变压器油,也不适用此环境。



### 3 结论

(1) 对于 PU 材料,其表面容易浸润变压器油且颜色变化明显,老化速度较快,可用于常温的水听器、空气中声学成像仪等光学麦克风探头的封装。

(2) 对于 PTFE 材料,其表面形貌在试验前后变化不明显,与变压器油的相容性较好,可用于油浸式变压器、气体绝缘开关设备、温度变化范围较大的场景等。

(3) EP、PEEK、PF 材料的综合性能一般,对于电气设备中涉及变压器油、SF<sub>6</sub>的环境相容性有待进一步研究。

(4) 检测结果表明,文中提出的对材料进行相容性试验的方法可为光学麦克风封装材料初步选型提供参考,具有一定的工程实用价值。

#### 参考文献:

- [1] 韩世杰,吕泽钦,隋浩冉,等. 基于 EFPI 传感器的 GIS 局部放电模式识别研究[J]. 电力工程技术,2022,41(1):149-155.  
HAN Shijie, LYU Zeqin, SUI Haoran, et al. Partial discharge pattern recognition in GIS based on EFPI sensor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1):149-155.
- [2] 钱学超,钱勇,赵泓霖,等. 基于超声信号的局部放电无线检测装置研制[J]. 电气自动化,2019,41(6):107-110.  
QIAN Xuechao, QIAN Yong, ZHAO Honglin, et al. Development of a wireless partial discharge detector based on ultrasonic signal [J]. Electrical Automation, 2019, 41(6):107-110.
- [3] 孔凡珺,马径坦,湛珉灏,等. SF<sub>6</sub>压力对 GIS 典型缺陷局部放电检测灵敏度的影响[J]. 电力工程技术,2023,42(3):233-241.  
KONG Fanjun, MA Jingtan, CHEN Minhao, et al. Effect of SF<sub>6</sub> pressure on the sensitivity of partial discharge detection of typical defects in GIS[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3):233-241.
- [4] 李信哲,任明,李琛,等. 基于单光子探测的局部放电多光谱诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(17):6511-6521.  
LI Xinzhe, REN Ming, LI Chen, et al. Multispectral partial discharge diagnosis based on single photon detection[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(17):6511-6521.
- [5] 张兴辉,常文治,杜非,等. GIS 局部放电多特征量传感研究进展[J]. 高压电器,2022,58(4):8-16.  
ZHANG Xinghui, CHANG Wenzhi, DU Fei, et al. Research progress of multi-physics sensing in partial discharge of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4):8-16.
- [6] 李彦飞,汤贝贝,韩冬,等. SF<sub>6</sub>放电的发射光谱特性分析与放电识别[J]. 电工技术学报,2022,37(7):1866-1874.  
LI Yanfei, TANG Beibei, HAN Dong, et al. Spectroscopy analysis of emission spectrum characteristics and discharge recognition of SF<sub>6</sub> gas discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7):1866-1874.

- tical Society, 2022, 37(7):1866-1874.
- [7] REN M, SONG B, ZHUANG T X, et al. Optical partial discharge diagnostic in SF<sub>6</sub> gas insulated system via multi-spectral detection[J]. ISA Transactions, 2018, 75:247-257.
- [8] 周朕蕊,韩冬,赵明月,等. SF<sub>6</sub>替代气体分解特性的研究综述[J]. 电工技术学报,2020,35(23):4998-5014.  
ZHOU Zhenrui, HAN Dong, ZHAO Mingyue, et al. Review on decomposition characteristics of SF<sub>6</sub> alternative gases[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(23):4998-5014.
- [9] 覃兆宇,郑宇,周文俊,等. 针-板电场中 SF<sub>6</sub>分解气体的含量比值特性及吸附剂的影响[J]. 高电压技术,2017,43(9):2919-2926.  
QIN Zhaoyu, ZHENG Yu, ZHOU Wenjun, et al. Characteristics of contents ratio of SF<sub>6</sub> decomposed gases in point-plate electric field and influence of adsorbents[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9):2919-2926.
- [10] 丁登伟,高文胜,刘卫东. GIS 中局部放电特高频信号与放电严重程度关联分析[J]. 高压电器,2014,50(9):6-11.  
DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Investigation of correlation between UHF signal and PD severity in GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9):6-11.
- [11] 胡长猛,程林,王辉,等. 含典型缺陷的变压器套管局部放电检测试验研究[J]. 电瓷避雷器,2021(2):107-115.  
HU Changmeng, CHENG Lin, WANG Hui, et al. Investigation of partial discharge detection of transformer bushing with typical defects[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2):107-115.
- [12] 辛文成,姚森敬,陈浩敏,等. 宽动态范围的有源集成传感系统的研究与设计[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(4):189-197.  
XIN Wencheng, YAO Senjing, CHEN Haomin, et al. Research and design of active integrated sensor system with wide dynamic range[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4):189-197.
- [13] 余英,李锐鹏,黄超,等. 基于时域有限差分法的开关柜表面 TEV 分布特性的研究[J]. 绝缘材料,2015,48(4):45-51.  
YU Ying, LI Ruipeng, HUANG Chao, et al. Study on TEV distribution characteristic of switchgear surface based on finite-difference time-domain method[J]. Insulating Materials, 2015, 48(4):45-51.
- [14] 赵晓辉,杨景刚,路秀丽,等. 油中局部放电检测脉冲电流法与超高频法比较[J]. 高电压技术,2008,34(7):1401-1404.  
ZHAO Xiaohui, YANG Jinggang, LU Xiuli, et al. Comparative research on current pulse method and UHF measurements of partial discharge in mineral oil[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7):1401-1404.
- [15] 周宏扬,马国明,张猛,等. 基于迈克尔逊光纤干涉的变压器局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报,2022,42(21):8016-8025.



- ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in power transformer based on the Michelson optical fiber interferometer[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 8016-8025.
- [16] 洪博, 张晨曦, 王旭. 基于迈克尔逊干涉和图像识别的高压电缆防外破监测预警系统[J]. 浙江电力, 2021, 40(3): 79-84.
- HONG Bo, ZHANG Chenxi, WANG Xu. Monitoring and warning system of power cable external-damage prevention based on Michelson interference and image recognition[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(3): 79-84.
- [17] 赵洪, 李敏, 张影, 等. 非本征法珀型超声传感器输出信号的特征[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 1018-1024.
- ZHAO Hong, LI Min, ZHANG Ying, et al. Characteristics of output signal of extrinsic fiber Fabry-Perot acoustic sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(6): 1018-1024.
- [18] 司文荣, 傅晨钊, 卜剑, 等. 基于多孔式敏感膜片的 MEMS 光纤法珀传感器及其局部放电检测[J]. 光学精密工程, 2021, 29(11): 2613-2621.
- SI Wenrong, FU Chenzhao, BU Jian, et al. MEMS fiber optic Fabry-Perot sensors based on porous sensing diaphragms and applications for partial discharge detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(11): 2613-2621.
- [19] 周朕蕊, 邱宗甲, 李康, 等. 光纤法布里-珀罗传感器的解调方法研究综述[J]. 光电工程, 2022, 49(6): 3-21.
- ZHOU Zhenrui, QIU Zongjia, LI Kang, et al. Review on demodulation methods for optic fiber Fabry-Perot sensors[J]. Opto-Electronic Engineering, 2022, 49(6): 3-21.
- [20] 周锋, 李永倩, 王劭龙. 光纤布喇格光栅传感器及其封装研究进展[J]. 光通信技术, 2017, 41(11): 8-11.
- ZHOU Feng, LI Yongqian, WANG Shaolong. Progress in fiber Bragg grating sensor and its packaging technology[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(11): 8-11.
- [21] 杨吉祥, 余尚江, 陈显. 光纤 Bragg 光栅应变传感器在霍普金森压杆上的冲击试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(1): 61-63, 85.
- YANG Jixiang, YU Shangjiang, CHEN Xian. Shock test for a fiber Bragg grating strain sensor on a SHPB[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(1): 61-63, 85.
- [22] 陈起超, 李琪, 李中原, 等. 高灵敏度高一一致性非本征光纤法-珀局部放电声发射传感器[J/OL]. 高电压技术: 1-10 [2023-07-14]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221905>.
- CHEN Qichao, LI Qi, LI Zhongyuan, et al. Highly sensitive and consistency extrinsic fiber Fabry-Perot partial discharge induced acoustic emission sensor [J/OL]. High Voltage Engineering: 1-10 [2023-07-14]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221905>.
- [23] SPOSITO A, PECHSTEDT R D. Optical sensors for aerospace applications: brake temperature sensors and fuel pump pressure sensors for aircraft [C]//2016 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace). Florence, Italy. IEEE, 2016: 97-101.
- [24] ZHOU H C, MILLS D A, VERA A, et al. A high-temperature optical sapphire pressure sensor for harsh environments [C]// Proceedings of the AIAA Scitech 2019 Forum. San Diego, California. Reston, Virginia: AIAA, 2019: AIAA2019-2044.
- [25] 赵辉, 张亚杰, 张江辉, 等. 海上风电绝缘材料芳纶纸与变压器油相容性试验[J]. 变压器, 2023, 60(7): 68-70.
- ZHAO Hui, ZHANG Yajie, ZHANG Jianghui, et al. Compatibility of aramid paper and transformer oil as insulating material for offshore wind power[J]. Transformer, 2023, 60(7): 68-70.
- [26] 颜湘莲, 高克利, 韩冬, 等. C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> 混合气体与环网柜中固体材料的相容性试验[J/OL]. 电网技术: 1-12 [2023-07-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.2023-0428.1507.005.html>.
- YAN Xianglian, GAO Keli, HAN Dong, et al. Experiments on compatibility of C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> gas mixture and the solid materials in ring main unit [J/OL]. Power System Technology: 1-12 [2023-07-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20230428.1507.005.html>.
- [27] 孙晓光, 田一, 李凯, 等. 聚氨酯和环氧树脂及其复合材料性能对比研究[J]. 化工新型材料, 2023, 51(1): 109-112.
- SUN Xiaoguang, TIAN Yi, LI Kai, et al. Comparative study on properties of polyurethane, epoxyresins and their composites [J]. New Chemical Materials, 2023, 51(1): 109-112.
- [28] 彭军, 董任峰, 赖培旭, 等. 水性聚氨酯的合成制备及改性技术研究[J]. 广东化工, 2023, 50(3): 24-26.
- PENG Jun, DONG Renfeng, LAI Peixu, et al. Study on synthesis and modification of waterborne polyurethane [J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(3): 24-26.
- [29] 杨燕花. 傅里叶变换红外光谱测量中几个基础问题的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- YANG Yanhua. Study of several basic problems in the measurement of Fourier transform infrared spectroscopy [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [30] 张震锋, 白晓萍, 惠伟. 聚四氟乙烯材料基础性能研究[J]. 电工材料, 2021(6): 25-28.
- ZHANG Zhenfeng, BAI Xiaoping, HUI Wei. Study on fundamental performance of material of polytetrafluoroethylene [J]. Electrical Engineering Materials, 2021(6): 25-28.
- [31] 谢伟, 李文博, 程显, 等. 固体绝缘开关柜环氧树脂电老化绝缘特性研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(6): 115-120.
- XIE Wei, LI Wenbo, CHENG Xian, et al. Study on electrical aging insulation properties of epoxy resin in solid insulated switchgear [J]. China Plastics Industry, 2020, 48(6): 115-120.
- [32] 张红颖, 夏绍灵, 刘聪, 等. 酚醛树脂增韧改性研究进展[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(6): 151-156.
- ZHANG Hongying, XIA Shaoling, LIU Cong, et al. Research progress on toughening modification of phenolic resin [J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(6): 151-156.
- [33] 杨阶桐, 徐雨, 王斌, 等. 热塑性酚醛树脂的改性研究进展[J]. 塑料工业, 2023, 51(1): 12-22.
- YANG Jietong, XU Yu, WANG Bin, et al. Research progress in

- the modification of thermoplastic phenolic resin [J]. China Plastics Industry, 2023, 51(1):12-22.
- [34] 吴国文,朱继光. 聚氨酯弹性体耐热性能影响因素综述[J]. 合成橡胶工业, 2021, 44(6):503-507.  
WU Guowen, ZHU Jiguang. A review of influence factors on heat resistance of polyurethane elastomer[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2021, 44(6):503-507.
- [35] 张林,李玉海. 聚四氟乙烯的性能与应用现状[J]. 科技創新导报, 2012, 9(4):111-112.  
ZHANG Lin, LI Yuhai. Performance and application status of PTFE[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2012, 9(4):111-112.
- [36] 化征. 聚醚醚酮增材制造中温度对其形状记忆性能影响的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2020.  
HUA Zheng. Effect of temperature on shape memory properties in poly (ether-ether-ketone) additive manufacturing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [37] 王旭军,肖淦,张爱平,等. 环氧树脂浸纸电容式套管多组

分材料相容性试验研究[J]. 变压器, 2019, 56(7):41-44.  
WANG Xujun, XIAO Gan, ZHANG Aiping, et al. Study on compatibility test of epoxy resin impregnated paper capacitance bushing with multi-component materials [J]. Transformer, 2019, 56(7):41-44.

作者简介:



汤贝贝

汤贝贝(1994),女,博士在读,研究方向为电力设备状态在线监测及光学传感技术(E-mail:tangbeibei@mail.iee.ac.cn);

张国强(1964),男,博士,研究员,研究方向为电力设备状态在线监测、故障诊断及光学传感技术;

李群(1967),男,博士,研究员级高级工程师,从事柔性输电、FACTS在电力系统中的应用、新能源并网、电力设备缺陷光纤检测、分布式光纤测温等相关研究工作。

### Compatibility test of optical microphone packaging materials

TANG Beibei<sup>1,2</sup>, ZHANG Guoqiang<sup>1,2</sup>, LI Qun<sup>3</sup>, ZHANG Ziyang<sup>4</sup>, SHAO Jian<sup>3</sup>, WU Peng<sup>3</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

**Abstract:** In order to ensure the safety and reliability of the optical microphone in the internal application of electrical equipment, polyurethane, polytetrafluoroethylene, epoxy resin, polyetheretherketone and phenol-formaldehyde resin are selected as packaging materials to carry out environmental compatibility tests related to electrical equipment and test material properties before and after the tests by scanning electron microscope (SEM) and Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer. The results show that the polyurethane surfaces are susceptible to infiltration of transformer oil and have a marked colour change. It can be used in the environment of hydrophone, air and ambient temperature, but not in the environment of oil-immersed transformer. The polytetrafluoroethylene is compatible with the transformer oil, and can be used in the environment of oil-immersed transformer, gas insulated switchgear (GIS) and environment with large temperature change. The compatibility of other materials in electrical equipment related environments is not good, and their applicability needs further research. A method for testing the environmental compatibility of packaging materials is presented in this paper. It can be used for reference in the selection of packaging materials for optical microphones and has certain engineering practical value.

**Keywords:** electrical equipment; gas insulated switchgear (GIS); optical microphone packaging materials; compatibility test; Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy; scanning electron microscope (SEM)

(编辑 陆海霞)