

臭氧氧化处理提升电气绝缘用环氧树脂直流击穿强度研究

董 倩¹, 司英莲¹, 古玺玉¹, 苏宏伟², 何文钦²

(1. 国网武威供电公司, 甘肃 武威 733000; 2. 湖北安源安全环保科技有限公司, 湖北 武汉 430021)

摘 要:为满足新一代电工装备对高性能绝缘介质的迫切需求,本研究制备了环氧树脂,采用不同浓度臭氧气体对其进行氧化处理,并测试表征臭氧氧化处理前后环氧树脂的化学结构、陷阱特性及直流击穿强度。结果表明:臭氧氧化后,环氧树脂表面 C=O 和 C-OH 基团含量显著增加。经浓度为 120 mg/L 的臭氧气体在 80 °C 下氧化 2 h 后,环氧树脂的深陷阱能级由 0.97 eV 增至 1.04 eV,直流击穿强度由 311.94 kV/mm 提升至 395.96 kV/mm。

关键词:环氧树脂;直流击穿强度;臭氧氧化处理

Study on enhancing DC breakdown strength of epoxy resin for electrical insulation by ozone oxidation treatment

DONG Qian¹, SI Yinglian¹, GU Xiyu¹, SU Hongwei², HE Wenqin²

(1. State Grid Wuwei Electric Power Supply Company, Wuwei 733000, China;

2. Hubei Anyuan Safety and Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan 430021, China)

Abstract: To meet the urgent demand for high-performance insulating materials in next-generation electrical equipment, epoxy resin samples were prepared and oxidized with different concentrations of ozone gas. The chemical structure, trap characteristics, and DC breakdown strength of the samples before and after ozone oxidation treatment were then tested and characterized. The results show that after ozone oxidation, the content of C=O and C-OH groups on the surface of epoxy resins increases significantly. After being oxidized with ozone gas at a concentration of 120 mg/L at 80°C for 2 hours, the deep trap energy level of epoxy resin increases from 0.97 eV to 1.04 eV, and its DC breakdown strength improves from 311.94 kV/mm to 395.96 kV/mm.

Key words: epoxy resin; DC breakdown strength; ozone oxidation treatment

0 引言

环氧树脂(epoxy resin, EP)是以脂肪族、脂环族或芳香族等结构为基本骨架且含有两个及以上环氧基的高分子聚合物的统称^[1]。经与酸酐固化剂交联后,环氧树脂展现出优良的电气、热学和力学性能,因此被广泛应用于电气设备中,发挥着绝缘和支撑的关键作用^[2-5]。随着新型电力系统的发展,高压电气设备在实现高电压和小型化的同时,必须确保长期运行的可靠性,这对环氧树脂等绝缘介质的绝缘强度提出了更高的要求。具体而言,需要在更薄的绝缘间隙中承受更高的电压落差^[6-7]。因此,需要进一步提升环氧树脂的电气强度以满足新一代电力设备的绝缘需求。

向聚合物中掺入适量的纳米或微米填料是增

强聚合物电气强度的一种有效方法^[8-13]。然而,这种方法也存在一定的局限性,微/纳米复合材料的性能高度依赖于填料在聚合物基体中的分散性,填料分散不均会显著降低其电气和力学性能^[14]。此外,聚合物基体在复合电介质中可能形成绝缘薄弱环节,在极端条件下依然可能导致放电或击穿现象的发生^[6-7]。因此,开发高性能环氧聚合物,提升其绝缘性能迫在眉睫。

研究表明,适当增强聚合物的陷阱能级有助于提升放电和击穿的阈值,而调控聚合物的化学结构如引入特殊的极性基团或单元,是当前提升纯有机聚合物陷阱能级的有效策略^[6-7,15-17]。YUAN Chao 等^[15]在聚丙烯分子上接枝衣康酸酐基团,发现引入的极性基团显著提高了聚合物的陷阱能级,使其直流击穿强度提升了约 50%。YANG Kerong 等^[6]、LI Mingru 等^[7]和 SUN Wenjie 等^[17]在环氧树脂中引入了

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(52272810005)。

含氟极性基团(如CF和CF₃),不仅提高了改性环氧树脂的陷阱能级,还有效提升了电气强度。除此之外,研究人员还采用其他化学手段向聚合物中引入极性基团,如通过紫外辐照^[18-19]和电子束辐照^[20-21]等引入包含C-OH和C=O的基团。臭氧作为一种强氧化性气体,能与碳基聚合物发生反应,同时其氧化处理过程具有操作简单和环境友好的优点。因此,臭氧氧化在环氧树脂的改性处理中展现出良好的应用潜力。然而,目前尚缺乏关于臭氧氧化处理对环氧树脂耐击穿性能影响的系统性报道。

为了探讨臭氧氧化处理对环氧树脂直流击穿强度的影响,本文制备环氧树脂试样,并在80℃下分别使用浓度为60 mg/L、120 mg/L的臭氧进行氧化处理2 h。随后测试并表征试样的化学结构、陷阱特性及直流击穿强度,希望能为开发具有优异绝缘性能的环氧树脂提供理论基础。

1 实验

1.1 主要原材料

双酚A环氧树脂,环氧值为0.530 eq/100 g,陶氏化学;甲基四氢苯酚固化剂,常州市润祥化工有限公司;苯酚促进剂,麦克林化学试剂;佳丹909脱膜剂,东莞市佳丹润滑油有限公司。

1.2 试样制备

将脱模剂均匀涂抹在模具表面,然后将模具放入烘箱在80℃下加热30 min,烘干喷涂的脱模剂,同时让模具加热有助于浇筑。称取100 g环氧树脂、80 g固化剂与1 g促进剂,首先将促进剂与固化剂充分搅拌均匀,随后与环氧树脂一同倒入三口烧瓶中搅拌并脱气1 h。将烧瓶内的混合物倒入模具中,按照80℃/2 h+120℃/12 h程序进行固化,得到厚度为80 μm的薄片试样,将试样取出密封保存。

1.3 臭氧氧化处理

臭氧氧化处理装置图见图1(臭氧发生器购自北京同林科技公司,同林3S-T)。首先设定臭氧浓度分别为60 mg/L与120 mg/L,随后将气体输出至加热模块,待温度稳定在80℃后将气体充入至腔体内密封2 h,最后取出样品并密封保存。

1.4 测试方法

使用傅里叶红外光谱(Bruker Vertex 70型,德国布鲁克公司)表征试样的化学结构,测试波数范围为3 600~600 cm⁻¹。

使用宽带介电谱仪(Concept80型,德国Novo-

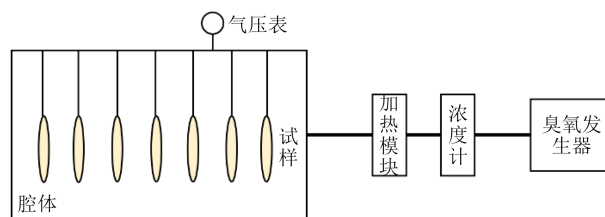


图1 臭氧氧化装置图

Fig. 1 Ozone oxidation device diagram

control公司)测量试样的介电谱,测试温度为20℃,频率为10⁻¹~10⁶ Hz。测试前需对试样两面喷镀导电电极,电极直径为12.64 mm。

使用同步热分析仪(STA449F3型,德国耐驰公司)测量试样的玻璃化转变温度,升温速率为10℃/min,温度区间为50~200℃,氮气气氛。

使用等温表面电位衰减法测量并提取试样的陷阱参数。测试时针电极的电压为-9 kV,板电极的电压为-6 kV,充电时间为2 min。充电后关闭电源,并记录30℃时试样电位的衰减情况。

直流击穿实验在绝缘油中进行,使用直径25 mm的球-球电极,对4个试样分别进行4次击穿实验,随后用Weibull函数统计并分析16次击穿结果。

使用6517b型静电计测量试样在不同电场强度下的泄漏电流,测试场强为2~30 kV/mm,步长为2 kV/mm,测试温度为60℃,时间为5 min,取最后1 min电流的平均值为测试结果。

2 结果及讨论

2.1 化学结构

图2为臭氧氧化处理前后环氧树脂的红外光谱图。从图2可以看出,不同环氧树脂试样间化学结构的主要差异在1 732 cm⁻¹和1 509 cm⁻¹处,其他波数的化学结构并未出现显著差异。其中,位于1 732 cm⁻¹处的吸收峰源自C=O基团的伸缩振动^[18,22],而位于1 509 cm⁻¹处的吸收峰源于C-OH基团的面内弯曲振动^[22]。这说明在实验中,具有强氧化性的臭氧与环氧树脂分子发生了化学反应,该现象与文献[23]的结果相符。

2.2 介电常数与介质损耗因数

图3为臭氧氧化处理前后环氧树脂的介电常数与介质损耗因数随频率的变化。从图3(a)可以看出,臭氧氧化处理后环氧树脂的介电常数略有增加,随着臭氧浓度提升介电常数增大。以频率为50 Hz时的介电常数为例,未氧化试样的介电常数为

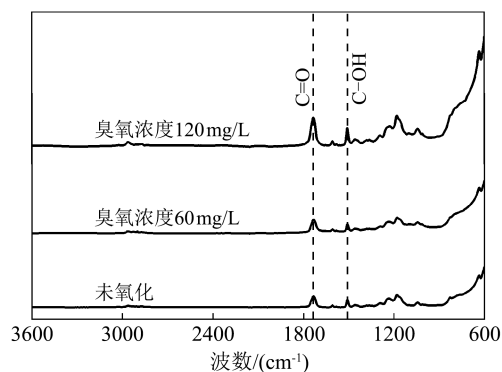
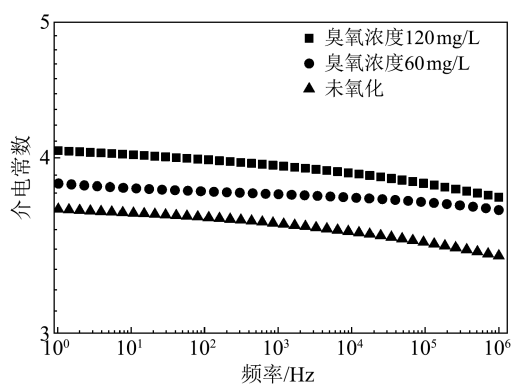
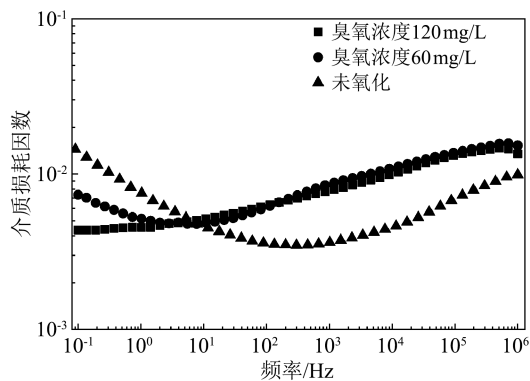


图2 臭氧氧化处理前后环氧树脂的红外光谱图

Fig. 2 Infrared spectrum of epoxy resin before and after ozone oxidation treatment



(a) 介电常数



(b) 介质损耗因数

图3 臭氧氧化处理前后环氧树脂的介电谱

Fig. 3 Dielectric spectra of epoxy resin before and after ozone oxidation treatment

3.64,而分别经浓度为60 mg/L、120 mg/L的臭氧气体氧化处理后,试样的介电常数分别增加至3.81、4.00。从图3(b)可以看出,当频率大于10 Hz时,臭氧氧化处理使得环氧树脂的介质损耗因数增加。工频下,臭氧氧化后的试样介质损耗因数最大为0.005 9,高于未氧化试样的0.004 7,但二者的介质损耗因数均维持在 5×10^{-3} 附近,属于正常范围,可认

为臭氧氧化处理并未显著增大环氧树脂的介质损耗因数。

臭氧氧化处理使得环氧树脂分子中增加了部分新的含氧基团,导致样品中氧元素的含量上升。与C、H原子相比,O原子具有更大的分子量和半径,以及更大的电子极化率,可增强电子极化^[24]。此外,含氧极性基团的增加也会增强偶极极化。电子极化与偶极极化的同时增强导致氧化后的环氧树脂介电常数与介质损耗因数变大。

2.3 玻璃化转变温度

图4为臭氧氧化处理前后环氧树脂的差示扫描量热曲线,将曲线前基线和后基线的延长线交点对应的温度记为玻璃化转变温度(T_g)。从图4可以看出,臭氧氧化处理降低了环氧树脂的耐热性能。未氧化的环氧树脂试样 T_g 为126.78℃,而60 mg/L和120 mg/L臭氧氧化后试样的 T_g 分别降低至122.34℃和115.45℃。在臭氧氧化处理过程中,环氧树脂会与臭氧分子发生氧化反应,释放热量,可能导致环氧树脂固化过程中内部残存的气体逸出,使得其内部结构变得松散,导致其玻璃化转变温度降低。

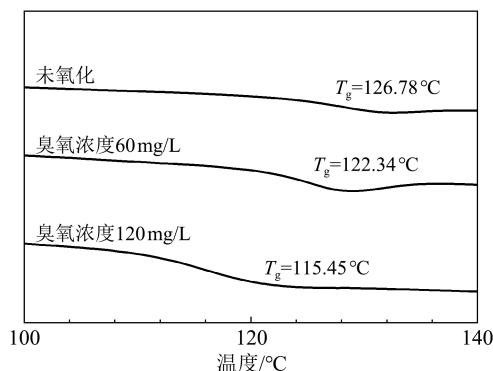


图4 臭氧氧化处理前后环氧树脂的DSC曲线

Fig. 4 DSC curves of epoxy resin before and after ozone oxidation treatment

虽然臭氧氧化处理降低了环氧树脂的玻璃化转变温度,但其降幅较小且 T_g 仍处于较高的水平,因此认为臭氧氧化处理后环氧树脂热性能的变化不影响环氧基电力设备的正常运行。

2.4 击穿强度

根据GB/T 29310—2012采用两参数Weibull分布模型对臭氧氧化处理前后环氧树脂的耐击穿性能进行分析,如式(1)所示^[7-8,25]。

$$P_f(E_b; \alpha, \beta) = 1 - e^{-(\frac{E_b}{\alpha})^\beta} \quad (1)$$

式(1)中: P_f 是击穿概率,%; E_b 是击穿强度,kV/mm;

α 是尺寸参数,表征击穿概率为 63.2% 时试样的击穿强度, kV/mm; β 是形状参数,表征试验数据的分散性。

臭氧氧化处理前后环氧树脂的直流击穿实验数据见图 5,实验结果的 Weibull 分布参数列于表 1。从图 5 和表 1 可以看出,臭氧氧化处理显著提升了环氧树脂的直流击穿强度。在氧化处理前,环氧树脂的击穿强度为 311.94 kV/mm;分别经浓度为 60 mg/L、120 mg/L 的臭氧氧化处理后,环氧树脂的击穿强度分别提升至 361.64 kV/mm、395.96 kV/mm,较纯环氧树脂大幅提升,最大增幅为 26.93%。此外,氧化后环氧树脂的耐击穿性能稳定性也有所改善,其 Weibull 分布参数 β 较纯环氧树脂有所提升。上述分析表明,臭氧氧化处理不仅提高了环氧树脂的击穿强度,还改善了其耐击穿性能的稳定性,是提升环氧树脂电气绝缘性能的有效方法。

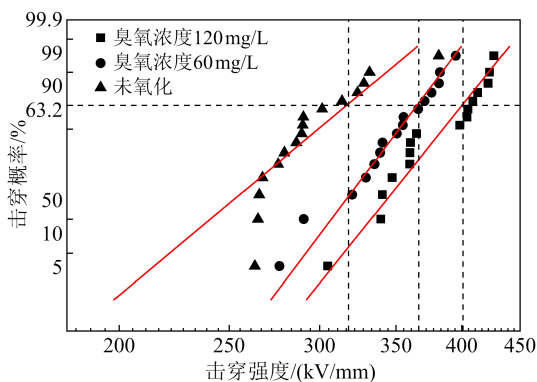


图5 击穿实验结果的Weibull分布

Fig.5 Weibull distribution of breakdown experimental results

表1 直流击穿实验的Weibull分布参数

Table 1 Weibull distribution parameters of DC breakdown test

试样	α /(kV/mm)	β
未氧化	311.94	8.67
臭氧浓度 60 mg/L	361.64	13.82
臭氧浓度 120 mg/L	395.96	12.97

2.5 介质陷阱

电介质的击穿强度通常受介质陷阱参数的影响,因此本研究通过实验提取了臭氧氧化处理前后环氧树脂的陷阱参数。文献[6]报道了利用表面电位衰减 (SPD) 技术研究环氧电介质陷阱参数对耐击穿性能影响的可行性,并以此阐释了陷阱特性对环氧树脂击穿强度的影响机制。本研究测量了臭氧氧化处理前后环氧树脂的 SPD 曲线,并提取了陷阱

参数,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,未氧化试样的表面电位迅速衰减,而氧化处理后环氧树脂的表面电位衰减速度减缓。通过 SPD 曲线,可以通过式(2)^[20]计算电介质的陷阱参数,得到的陷阱参数曲线如图 7 所示。

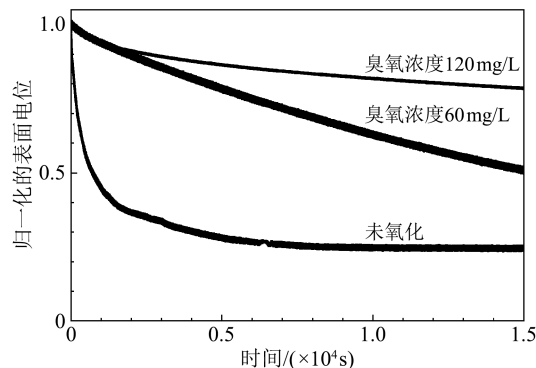


图6 环氧树脂经归一化处理的SPD曲线

Fig.6 The SPD curves of epoxy resin

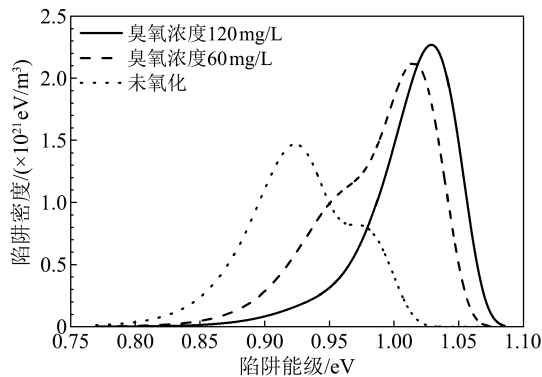


图7 环氧树脂的陷阱分布曲线

Fig.7 Trap distribution curves of epoxy resin

$$\varphi(t) = y_0 + A_1 e^{\left(\frac{-t}{x_1}\right)} + A_2 e^{\left(\frac{-t}{x_2}\right)}$$

$$N_t(E_t) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{e l d} t \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (2)$$

$$E_t = k_B T \ln(v_{ATE} t)$$

式(2)中: $\varphi(t)$ 是图 6 中 SPD 曲线的双指数函数拟合曲线; y_0 是常数; A_1 、 A_2 、 x_1 、 x_2 是双指数函数的系数; E_t 是陷阱能级, eV; ε_0 是真空介电常数,其值为 8.854×10^{-12} F/m; ε_r 是试样的介电常数,取图 3(a)中 50 Hz 的实验结果; e 是电子电量; l 是电子入射深度,本文取 $1 \mu\text{m}$; d 是试样的厚度,在本研究中为 $80 \mu\text{m}$; k_B 是玻尔兹曼常数; T 是实验温度, K; v_{ATE} 是逃逸系数, s^{-1} 。

从图 7 可以看出,经臭氧氧化处理后,环氧树脂的深陷阱能级与密度均得到了提升。纯环氧树脂的深陷阱能级为 0.97 eV,陷阱密度为 8.1×10^{20} eV/m³。而经 60 mg/L 和 120 mg/L 臭氧氧化后,环氧树脂的

陷阱能级分别提升至 1.01 eV 和 1.04 eV, 陷阱密度分别提升至 2.12×10^{21} eV/m³ 和 2.27×10^{21} eV/m³。由此可见, 臭氧氧化处理提升了环氧树脂的陷阱能级与密度。

2.6 泄漏电流

当在绝缘体两端施加电场时, 材料内部仍会有微弱的电流流过, 可通过高精度电流计进行检测。图 8 为施加不同强度的电场时, 流过环氧树脂的泄漏电流。从图 8 可以看出, 未氧化的环氧树脂泄漏电流最大, 随着臭氧浓度升高, 流通过氧化处理试样的泄漏电流逐渐下降, 这一现象说明臭氧氧化处理后环氧树脂体内的电荷迁移受到了抑制。

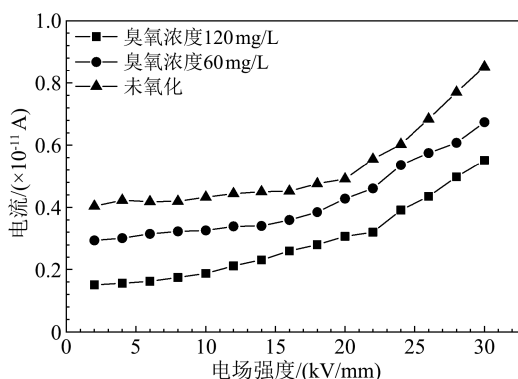


图 8 环氧树脂的泄漏电流

Fig.8 Leakage current of epoxy resin

2.7 讨论

聚合物的陷阱参数与化学结构有关^[6-7,17-18]。通过红外光谱可发现, 臭氧氧化处理提升了环氧树脂中含氧化学键的含量, 而这些含氧极性基团往往被认为与介质陷阱有关^[18,21]。因此可以认为, 臭氧氧化处理是通过改变分子化学结构, 调控陷阱参数与电荷输运能力, 进而提升了环氧树脂的击穿强度。

固体电介质的电击穿现象包含多个复杂的物理过程, 包括电极电荷注入、载流子迁移与加速、碰撞电离、电荷捕获与脱陷、电子倍增、雪崩效应以及放电等过程^[3,6-7]。在这些过程中, 陷阱发挥着重要作用。陷阱能够捕获自由迁移的载流子(如电子), 导致材料体内电荷数量减少; 同时, 迁移中的电子被陷阱捕获后, 其平均自由程降低。在这两个因素共同作用下, 固体电介质内部的电荷输运受到了抑制, 体内发生碰撞电离的概率下降, 从而阻碍电子倍增与电子崩的形成, 并表现为击穿强度的提升。陷阱能级决定了介质中陷阱捕获载流子的能力, 而陷阱密度决定了介质陷阱捕获载流子的概率^[6-7], 一

般而言, 陷阱能级越高, 密度越大, 陷阱对电荷的捕获作用越强, 对提升电介质的耐击穿性能越有利。

对于未氧化的环氧树脂, 其陷阱能级与密度较低, 分别约为 0.97 eV 和 8.1×10^{20} eV/m³, 因此内部陷阱对电荷捕获作用较弱, 载流子容易迁移, 导致在相同电场作用下的泄漏电流较大, 击穿强度相对较低。经过臭氧氧化处理后, 随着臭氧浓度的增加, 介质的陷阱能级和密度逐渐提高。在更高陷阱能级和更大密度的陷阱作用下, 改性环氧树脂内部载流子的迁移受到抑制, 泄漏电流减小, 击穿强度随之上升。当臭氧浓度达到 120 mg/L 时, 氧化后的环氧树脂陷阱能级提升至 1.04 eV, 陷阱密度提升至 2.27×10^{21} eV/m³, 此时的击穿强度为 395.96 kV/mm, 较未氧化环氧树脂提升了 26.93%。

3 结论

(1) 臭氧氧化处理过程导致环氧树脂中含氧化学基团(如 C-OH 和 C=O)的含量显著增加。

(2) 经过臭氧氧化处理后, 环氧树脂的介电常数和介质损耗因数均有所增加, 而玻璃化转变温度略微下降。在 80℃ 下, 采用浓度为 120 mg/L 的臭氧氧化处理 2 h 后, 环氧树脂的玻璃化转变温度从 126.78℃ 降至 115.45℃。

(3) 臭氧氧化处理显著提高了环氧树脂的陷阱能级, 有效抑制了载流子的迁移, 进而提升了击穿强度。经臭氧氧化处理后, 环氧树脂的击穿强度从 311.94 kV/mm 提升至 395.96 kV/mm, 增幅达 26.93%。

参考文献 References

- [1] 陈平, 王德中, 刘胜平. 环氧树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
CHEN Ping, WANG Dezhong, LIU Shengping. Epoxy resin and its applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [2] 廖文龙, 杨玥坪, 魏华超, 等. 饱和电抗器用环氧树脂性能提升研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(5): 42-48.
LIAO Wenlong, YANG Yueping, WEI Huachao, et al. Study on performance enhancement of epoxy resin for saturated reactor[J]. Insulating Materials, 2024, 57(5): 42-48.
- [3] 舒锐, 宁晓秋, 杨波. 基于介电响应的环氧树脂/微米氧化铝复合电介质热性能研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(6): 52-60.
SHU Rui, NING Xiaoqi, YANG Bo. Study on thermal properties of epoxy resin/micron-alumina composite dielectric based on dielectric response[J]. Insulating Materials, 2025, 58(6): 52-60.
- [4] 丁嘉乐, 贾倩倩, 李峰, 等. 高压绝缘用环氧树脂配方体系研究进展[J]. 绝缘材料, 2024, 57(12): 9-19.

- DING Jiale, JIA Qianqian, LI Feng, et al. Research progress on epoxy resin formulation system for high-voltage insulation[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(12): 9-19.
- [5] 宁晓秋, 王立地, 王宇, 等. 微米 Al_2O_3 /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.
- NING Xiaoqiu, WANG Lidi, WANG Yu, et al. Dielectric properties and thermal properties of Al_2O_3 /epoxy resin composites[J]. *Insulating Materials*, 2020, 53(10): 32-37.
- [6] YANG Kerong, CHEN Weijiang, ZHAO Yushun, et al. Enhancing dielectric strength of epoxy polymers by constructing interface charge traps[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(22): 25850-25857.
- [7] LI Mingru, SHANG Kai, ZHAO Jihui, et al. Constructing fluorine hybrid epoxy polymers with excellent breakdown strength by surface fluorination[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(12): 10226-10233.
- [8] 姜铁, 关弘路, 陈向荣, 等. 环氧树脂纳米复合材料电气性能研究综述[J]. *浙江电力*, 2019, 38(11): 65-71.
- JIANG Tie, GUAN Honglu, CHEN Xiangrong, et al. Review on electrical properties of epoxy resin based nanocomposites[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(11): 65-71.
- [9] 张楚岩, 杨松澎, 廖一帆, 等. 纳米改性聚丙烯复合绝缘材料性能研究 I—在交流电场下的击穿特性[J]. *南方电网技术*, 2021, 15(1): 41-47.
- ZHANG Chuyan, YANG Songpeng, LIAO Yifan, et al. Research on the properties of nano-modified polypropylene composite insulating materials I - breakdown characteristics under AC electric field[J]. *Southern Power System Technology*, 2021, 15(1): 41-47.
- [10] 朱荧科, 江平开, 黄兴溢. 提升纳米复合电介质击穿强度的理论与方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 183-199, 409.
- ZHU Yingke, JIANG Pingkai, HUANG Xingyi. Theory and method of improving the breakdown strength of nanocomposite dielectrics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 183-199, 409.
- [11] PARK J, LEE J. Effect of surface-modified nanosilicas on the electrical breakdown strength in epoxy nanocomposites[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2023, 30(1): 3-10.
- [12] 阴凯, 郭其阳, 张添胤, 等. 表面氟化聚苯乙烯纳米微球提升环氧树脂绝缘特性[J]. *物理学报*, 2024, 73(12): 345-354.
- YIN Kai, GUO Qiyang, ZHANG Tianyin, et al. Improving insulation properties of epoxy filled with surface fluorinated polystyrene nanospheres[J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, 74(12): 345-354.
- [13] 程子霞, 邢威威, 张云霄, 等. 纳米 MgO /环氧树脂复合材料的陷阱特性及对电树枝特性的影响研究[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(21): 5562-5569.
- CHENG Zixia, XING Weiwei, ZHANG Yunxiao, et al. Study on trap properties of nano- MgO /epoxy resin composites and its influence on electrical tree properties[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(21): 5562-5569.
- [14] POURRAHIMI A, HOANG T, LIU Dongming, et al. Highly efficient interfaces in nanocomposites based on polyethylene and ZnO nano/hierarchical particles: a novel approach toward ultralow electrical conductivity insulations[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28: 8651-8657.
- [15] YUAN Chao, ZHOU Yao, ZHU Yujie, et al. Improved high-temperature electrical properties of polymeric material by grafting modification[J]. *ACS Sustainable Chemistry Engineering*, 2022, 10(27): 8685-8693.
- [16] ZHU Yuanwei, QIAO Nan, DONG Shuqi, et al. Side-chain engineering of polystyrene dielectrics toward high-performance photon memories and artificial synapses[J]. *Chemistry of Materials*, 2022, 34: 6505-6517.
- [17] SUN Wenjie, XU Jiazhu, SONG Jianhong, et al. Self-healing of electrical damage in insulating robust epoxy containing dynamic fluorine-substituted carbamate bonds for green dielectrics[J]. *Materials Horizons*, 2023(7): 2542-2553.
- [18] BAO Zhiwei, DING Song, DAI Zhizhan, et al. Significantly enhanced high-temperature capacitive energy storage in cyclic olefin copolymer dielectric films via ultraviolet irradiation[J]. *Materials Horizons*, 2023, 10(6): 2120-2127.
- [19] JIA Jiangheng, DAI Zhizhan, DING Song, et al. Enhancing energy storage performance of polyethylene via passivation with oxygen atoms through C-H vacancy carbonylation[J]. *Materials Today Energy*, 2024, 42: 101553.
- [20] 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(1): 39-45.
- [21] LI Mingru, NIU Huan, SHANG Kai, et al. Effect of electron beam irradiation on surface molecule and flashover voltage of epoxy composites[J]. *High Voltage*, 2024, 9(3): 528-536.
- [22] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- WENG Shipu. Fourier transform infrared spectroscopy analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [23] LI Mingru, NIU Huan, SHANG Kai, et al. Surprising hydrophobic polymer surface with a high content of hydrophilic polar groups[J]. *Langmuir*, 2022, 38(49): 15353-15360.
- [24] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- CHEN Jidan, LIU Ziyu. Dielectric physics[M]. Beijing: China Machine Press, 1982.
- [25] 潘绍明, 张磊, 赵坚, 等. 快速暂态过电压老化对环氧树脂电气强度的影响[J]. *绝缘材料*, 2024, 57(1): 46-50.
- PAN Shaoming, ZHANG Lei, ZHAO Jian, et al. Effect of VF-TO ageing on electric strength of epoxy resin[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(1): 46-50.

收稿日期: 2025-06-03; 修回日期: 2025-06-30。

作者简介:

董倩(1976-), 男(汉族), 甘肃庄浪人, 高级工程师, 主要从事电网规划、电网投资方向的研究。