

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.01.020

套管用玻璃纤维增强环氧树脂老化后强度与色差演化研究

曹阳¹, 安义岩², 刘会斌², 张欣伟², 王博²

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司, 呼和浩特 010010; 2. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 呼和浩特 010010)

摘要: 环氧树脂老化是高压套管常见事故, 掌握高压套管外部环氧树脂老化规律, 探索其老化监测手段对于高压套管服役具有重要意义。为此, 对玻璃纤维增强环氧树脂(EP/GF)进行不同温度(85~145 °C)180 h老化, 采用拉伸与弯曲试验测试老化后样件强度, 结合拉、弯实验断口形貌, 分析其强度下降原因。利用比色计监测老化后色度、光泽度变化, 建立色差变化与强度变化曲线, 尝试提出采用色差监测老化程度的技术路线。结果表明: 热老化降低EP/GF拉伸强度和弯曲强度, 且温度越高下降越明显; 同时EP/GF复合材料断裂形式从低温下塑性断裂转变为脆性断裂, 其原因在于EP树脂老化引起的粉化, 导致树脂与纤维出现分离。热老化同时带来明显的色差变化, 因此采用色差变化来反映老化程度这一技术路线可行。

关键词: 玻璃纤维增强环氧树脂; 热老化; 拉伸; 弯曲; 色差

中图分类号: TM40 **文献标识码:** **文章编号:** 1001-3539(2023)01-0109-06

The Evolution of Strength And Color of Glass Fiber-Reinforced Epoxy Resin After Thermal Aging

Cao Yang¹, An Yiyang², Liu Huibin², Zhang Xinwei², Wang Bo²

(1. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company, Huhhot 010010, China;

2. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Huhhot 010010, China)

Abstract : The aging of epoxy resin is a common accident of high-pressure sleeve pipes. It is of great significance for the service of high voltage bushing to explore the aging rule and its monitoring technology. In response to the aging laws and monitoring needs of glass fiber reinforced epoxy resin(EP/GF) in high-pressure sleeve pipes, thermal aging tests ranged from 85 °C to 145 °C have been conducted for 180 h. The tensile strength test and bending test were carried out to obtain mechanical behaviors combined with fracture observation. The color change was also detected by colorimeter to propose a technical route for aging monitoring. The results show that the tensile strength and bending strength are decreased after thermal aging and the decrements positively depended on the aging temperature. At the same time, the fracture mode of EP/GF composite transformed from ductile fracture at low aging temperature to a brittle fracture as the temperature higher than 100 °C, which is resulted from the separation between resin and fiber. The thermal aging brings obvious changes in color difference, which could be an indicator to reflect the aging degree.

Keywords : fiber-reinforced epoxy resin ; thermal aging ; tensile ; bending ; color change

环氧(EP)树脂是一类含有EP基团的高分子聚合物的总称, 具有优良的介电性能、力学性能、理化特性和良好的可加工性^[1], 其在固化过程中挥发物少, 体积收缩率小, 黏接性好, 因而, 在换流变压器阀侧套管、中间接头、气体绝缘开关终端套管等设备上作为绝缘材料被广泛用^[2-3], 特别适用于超高压、大容量、小型化和免维修的高压电器绝缘^[4]。大量的EP树脂在电力设备上作为绝缘材料应用表明,

此类EP树脂失效所带来的电网事故频频发生, 其原因在于EP树脂老化所引起的开裂导致绝缘介质绝缘性能下降, 甚至会造成击穿而形成不可逆的结果^[5-7]。因此为改善局部区域的电场分布, 迫切需提高EP树脂的强度, 研究树脂老化强度退化规律并实现其日常运行中的在役监测^[8]。

玻璃纤维(GF)增强EP树脂(EP/GF)是通过在EP树脂内部添加纤维成型的复合材料, 内部纤维作

通信作者: 曹阳, 高级工程师, 主要研究方向为电网设备失效分析

收稿日期: 2022-10-02

引用格式: 曹阳, 安义岩, 刘会斌, 等. 套管用玻璃纤维增强环氧树脂老化后强度与色差演化研究[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(1): 109-114.

Cao Yang, An Yiyang, Liu Huibin, et al. The evolution of strength and color of glass fiber-reinforced epoxy resin after thermal aging[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(1): 109-114.

为材料内部支架,很好提升EP树脂强度^[9],相对于普通EP树脂,被认为是更好的套管绝缘材料,有望进一步提升套管使用性能与寿命^[10-11]。现阶段,GF增强EP树脂在老化环境下的性能退化主要集中热老化下介电性能以及结构变化。热氧老化试验研究表明:局部放电量、介质损耗角正切值均呈现先减小后增加的趋势,体积电阻仅在临近老化终点显著下降^[12-13]。在老化过程引入电流之后,随着电热老化时间的增加,样品质量减少,击穿电压减小,介质损耗增加,这一变化比无电环境更严重^[14-16]。EP树脂老化包含湿热、热氧等多种条件老化,在湿热下EP树脂的力学性能和介电性能均有不同程度的下降;其原因在于树脂基体的塑化、水解和基体—纤维界面的破坏^[17]。许良等^[18]对GF增强EP树脂进行热氧、湿热、热水老化实验,发现树脂未出现官能团变化,其吸湿与失重各不相同,热氧老化对该复合材料表面形貌的破坏要严重于热水和湿热老化,热氧环境对复合材料基体的后固化作用大于吸湿对树脂基体的塑化作用。可见,EP树脂热氧老化下退化最快,其介电性能退化规律研究成熟,而其力学性能研究相对较少。而在EP树脂退化监测与表征方面主要基于前述加速热氧老化模型,根据弯曲模量数据、热解动力学等参数,构建寿命预测数学模型,计算EP树脂材料热氧老化寿命^[19],并无服役状态下监测技术^[12]。因此,关注GF增强的EP树脂在热氧化下的性能退化现象,掌握其退化规律,开发老化过程中性能退化监测特征参数与技术具有重要意义。

笔者采用GF增强EP树脂强度,在不同温度下进行热老化实验,采用拉伸与剪切实验获得其强度变化规律,结合断口形貌扫描电子显微镜(SEM)分析,获得其强度退化内在机理;同时,笔者针对不同温度老化样品进行色差分析,尝试获得EP树脂老化过程中色差变化,以此表征老化程度,实现EP树脂服役过程中的老化监测。

1 实验部分

1.1 主要原材料

GF增强EP树脂:含20%GF,重庆红河公司。

1.2 主要仪器及设备

烘箱:HZ-2004型,东莞市力显仪器科技有限公司;

万能试验机:MTS E45型,美国美特斯MTS有

限公司;

场发射SEM(FESEM):Tescan Mira III型,捷克TESCAN公司;

比色计:X-Rite Color-Eye 7000a型,美国Gretag Macbeth公司。

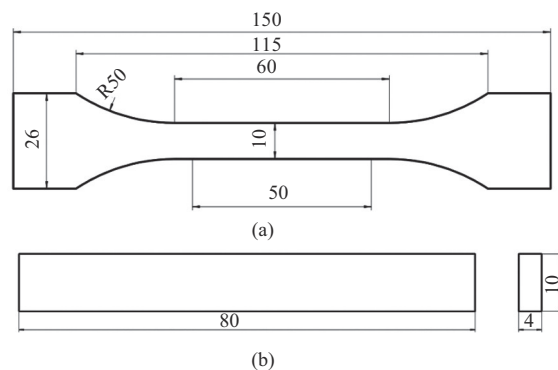
1.3 试样制备

(1) 老化试样制备。

清洗后GF增强EP树脂放入烘箱,在空气环境下进行热老化处理,依据已有文献报道^[1-3],将老化温度分别设定为85,100,115,130,145℃,老化时间为180 h。当温度升至设定温度并保持恒定时,将样品放入炉中,同时采用未老化的原始样品作为对比,样品命名为EP-X样品,其中X表示施加的老化温度。例如,EP-RT和EP-100表示原始样品和100℃老化样品。

(2) 拉伸、弯曲试样制备。

根据ASTM D3039-2000标准,采用机械切割,制备拉伸测试所需试样,具体尺寸如图1a所示,拉伸试样尺寸为2 mm×10 mm×150 mm。弯曲试样根据ASTM D7264-2007标准,通过机械切割制备,挠曲测试标本的尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,支撑跨度为64 mm,如图1b所示。



a—拉伸试样;b—弯曲试样

图1 力学测试试样尺寸

1.4 测试与表征

(1) 力学性能测试。

采用万能试验机在室温下进行拉伸与弯曲性能测试。其中弯曲试验中恒定的交叉头速度为50 mm/min,使用长度为50 mm的延伸计来测量仪表长度区域的分化。交叉头速度为1 mm/min。拉伸与弯曲实验对每个温度老化样品,重复五次测量。样品的拉伸强度,拉伸应变和弹性模量进行测量并报告为平均值。EP/GF复合材料的弯曲强度,弹性模

量和应变由弯曲曲线计算获得。

(2) 断口形貌分析。

使用FESEM对拉伸样品断口进行表面观测,加速电压为5 kV,在观测前,将样品断口进行喷碳处理,保证良好导电性。

(3) 色度测量。

采用比色计测试热老化样品的颜色变化,其中, L 值呈现亮度,范围从0到100,表明从黑暗到明亮。 a 值范围为-128至128范围从绿色到红色。 b 值范围为-128至128范围,从蓝色到黄色。通常颜色变化(ΔE)可以依据 L, a, b 数值进行计算。

2 实验结果与讨论

2.1 老化样品拉伸实验研究

图2为EP/GF复合材料样品的拉伸应力-应变曲线。由图2可知,所有样品在拉伸状态下均呈现弹性变形、塑性变形以及断裂三个阶段。但不同样品在三个区间表现不同,其中老化试样弹性变形较小,EP115弹性变形最小;进入塑性变形区间后,多个样品出现曲率变化,表明拉伸状态下EP/GF出现非均匀塑性变形,其原因有待进一步分析。

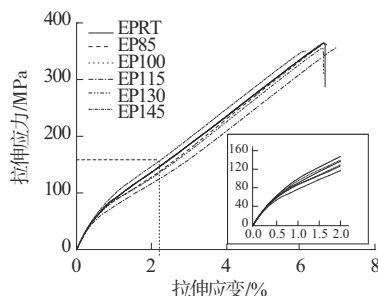
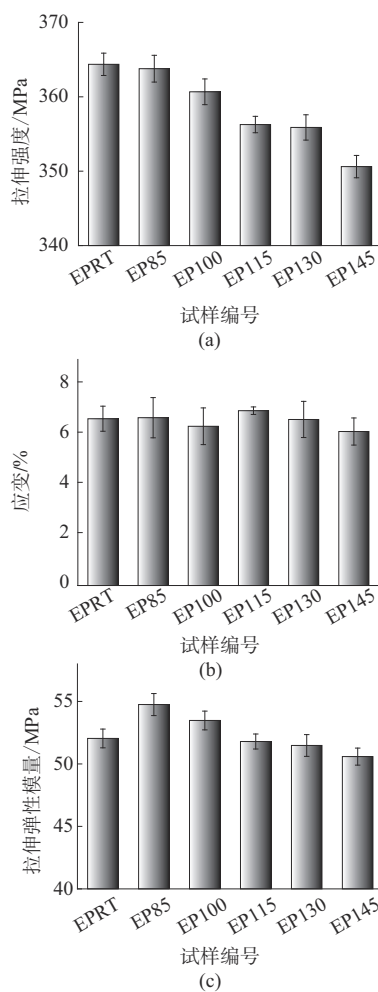


图2 EP/GF复合材料拉伸应力-应变曲线

图3为热老化前后EP/GF复合材料拉伸性能测试结果。图3a~图3c显示了样品的拉伸强度、拉伸应变和拉伸弹性模量。结果表明,如图3a所示,样品的拉伸强度随着衰老温度的升高而降低,由364 MPa下降到350 MPa。而图3b显示样品拉伸应变随老化温度升高呈现先降低后升高趋势。同时,如图3c所示,拉伸弹性模量随着衰老温度的升高逐渐下降。热老化导致EP/GF复合材料的强度下降,特别是弹性变形与塑性变形能力。这一变化出现的原因在于EP树脂为线性或分支分子结构,在热老化过程中EP树脂基体易于出现链条分裂或交联,从而使得材料变脆,继而影响其变形能力^[20]。这种分裂或交联行为随老化温度以及时间增加而变得更为



a—拉伸强度;b—拉伸应变;c—拉伸弹性模量

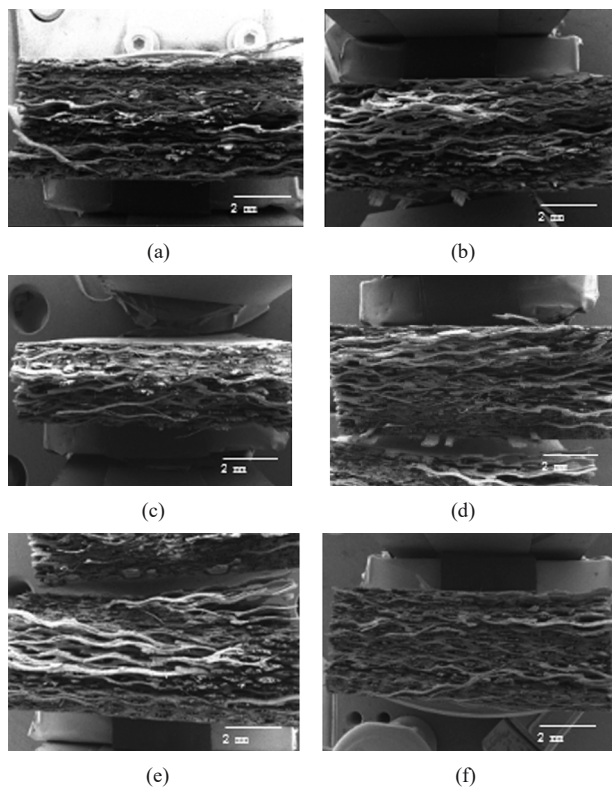
图3 不同温度老化后EP/GF复合材料拉伸性能

显著。因此在老化之后,EP/GF复合材料强度明显下降,特别是其弹性变形以及塑性变形能力随温度升高下降明显。

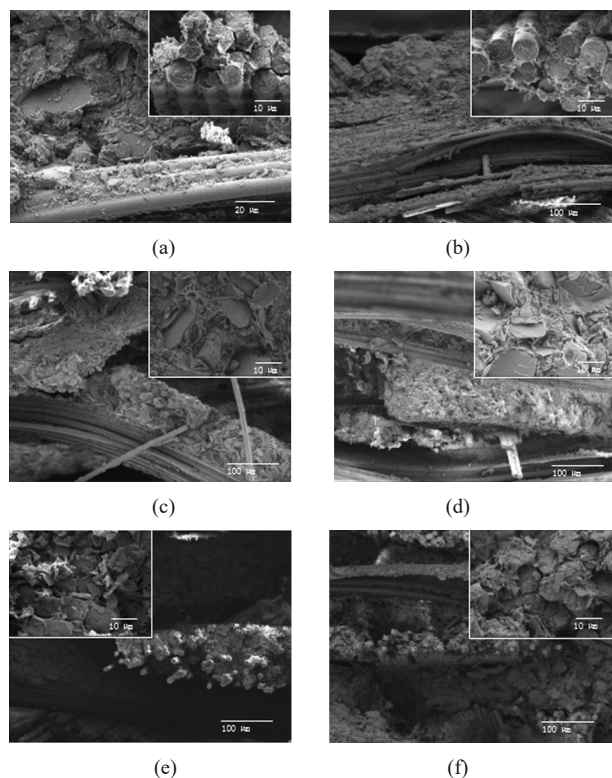
2.2 拉伸断口形貌分析

图4为样品拉伸断裂断口整体形貌,原始EP/GF复合材料为典型复合结构,大量GF镶嵌从横、纵两个方向镶嵌于EP树脂内部,形成良好的复合效果,老化后拉断断口与原始样品基本宏观上并没有明显差异。

图5为拉伸断裂后复合样品的高倍图像,其中针对GF断口进行典型特征放大,分析老化对于GF断裂的影响。从图5a中原始样品的拉伸断裂表面分析可以看到,断口中GF依旧镶嵌于EP树脂基体中,表明GF与EP树脂之间结合良好,达到强化效果。GF断口呈现河流花样,为塑性断裂特征。经过85℃老化的断裂样品,其断口形貌与原始样品基本



a—原始样品;b—85 °C老化;c—100 °C老化;
d—115 °C老化;e—130 °C老化;f—145 °C老化
图4 不同温度老化后样品拉伸断口宏观形貌

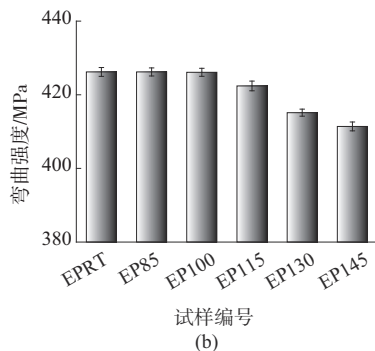
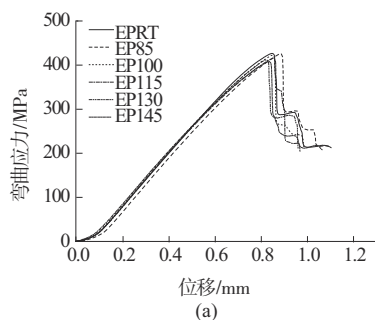


a—原始样品;b—85 °C老化;c—100 °C老化;
d—115 °C老化;e—130 °C老化;f—145 °C老化
图5 不同温度老化后样品拉伸断口高倍形貌观察

一致,因此其拉伸强度与变形量基本与原始样品一致,而其拉伸弹性模量小幅度升高。当老化温度升高至 100 °C 以上,断口形貌出现明显变化,EP100 与 EP115 样品 GF 断口十分光滑,为典型脆性断裂特征,这可能是由于老化后纤维的延展性损失,导致脆性环氧树脂基质缺乏支撑的缘故。但纤维周围 EP 树脂与 GF 之间依旧结合良好,未出现明显分离现象。当老化温度继续上升,GF 断口依旧脆性断裂特征,同时,断裂的 GF 与周围 EP 树脂出现明显的间隙,且在 GF 断口上覆盖有大量 EP 树脂碎屑。这一发现表明,在 130 °C 以上温度纤维和基质之间存在明显的分离,因此形成间隙,同时高温下 EP 树脂出现粉化现象,导致拉断之后出现大量碎屑。这一变化使得原有的 EP 树脂基体无法在拉力作用时为 GF 提供支撑,同时 GF 大幅度脆化,导致 EP/GF 材料强度显著下降。此外,复合结构在拉应力下的分离,导致拉伸曲线的斜率变化。

2.3 弯曲强度

图 6 为不同温度老化后样品弯曲性能。如图 6a 所示,在弯曲载荷下,EP/GF 复合材料样品弯曲曲线先快速上升,而后陡然下降,随后出现水平台阶之后再下降,呈现台阶状态。曲线台阶状变化原因在于复合结构带来的优势。首先在 EP 树脂与 GF 共同作用下,整体抗弯曲能力较好,曲线斜率较大,在



a—弯曲应力-应变曲线;b—弯曲强度
图6 不同温度老化后 EP/GF 样品弯曲性能

扰度升高到一定程度之后,EP树脂基体出现开裂现象,导致GF独立承担弯曲载荷,随后垂直于载荷方向的独立GF出现断裂,但部分交错分布GF依旧支撑整体,不至于快速断裂,最后当所有纤维断裂后,样品整体弯断。可见,GF大幅度增强EP树脂抗弯曲能力,特别是增强挠曲变形量。图5b显示了老化温度对EP/GF复合材料弯曲强度的影响。结果表明,当老化温度升高到145℃,弯曲强度从426 MPa降低到411 MPa。EP/GF-145样品在所有测试样品中表现出最低的强度和应变。这是由于在热衰老下聚合物基质的降解引起了复合材料的脆性,这些结果与拉伸性质一致。

2.4 色差

表1为不同老化样品色差变化。表2为不同温度老化后样品力学性能与色差变化。

表1 不同老化样品色差变化

样品名称	ΔL	Δa	Δb	ΔE
EPRT	-0.23	2.73	4.33	5.12
EP85	0.6	5	1.91	5.39
EP100	0.14	3.96	4.5	5.99
EP115	1.05	3.73	4.59	6.01
EP130	0.44	5.14	3.26	6.1
EP145	0.5	4.21	4.7	6.33

表2 不同温度老化后样品力学性能

样品名称	拉伸强度/MPa	弯曲强度/MPa
EPRT	364.37	426.2
EP85	363.78	426.2
EP100	360.67	426.1
EP115	356.27	422.4
EP130	355.88	415.14
EP145	350.62	411.4

从表1可以观察到EP/GF复合材料的颜色没有发生显著变化, ΔE 值从5.12变为6.33,随着老化的温度增加,样品色差逐渐增大,这可能是由于EP树脂内部结构变化,特别是粉化所带来的影响。表2结果表明,EP/GF样品力学性能随老化温度升高而降低,而 ΔE 值则随之升高。可见,力学性能与EP/GF复合材料的颜色差异之间具有一定相关性,通过使用颜色变化分析,可预测热老化后复合材料的强度,这一无损检测技术非常适合于套管表面EP树脂老化程度监测。其具体相关性与数学关系有待进一步研究,以实现老化程度的量化。

3 结论

针对含有20% GF的EP/GF复合材料进行不同温度老化,通过拉伸、弯曲试验,获得材料老化后强度变化,结合断口形貌分析其强度下降原因,结合

色度光泽度检测,提出采用色度光泽度监测老化程度的技术路线,得到如下结论:

(1) 随着老化温度的升高,EP/GF复合材料的拉伸强度和弯曲强度都显著降低,样品的延展性也呈现降低趋势。样品的弹性模量则随着老化温度升高先升高后降低,表明它受热老化影响与强度值不同。

(2) 低温下($<100^\circ\text{C}$) GF断口为塑性断裂特征,且EP树脂与GF紧密结合;当热老化温度达到 100°C 以上,复合材料的断裂显示为脆性断裂,其原因在EP树脂老化引起的粉化,导致树脂与纤维出现分离。这种分离带来断裂的不同步,因此在拉伸曲线中出现斜率变化。

(3) 老化使得EP/GF复合材料的 ΔE 值从5.12变为6.33,随着老化的温度增加,样品色差逐渐增大,而力学性能随老化温度升高而降低。可见,力学性能与EP/GF复合材料的颜色差异之间具有一定相关性。通过色差检测预测热老化程度具有一定的可行性。

参考文献

- [1] 王有元,王施又,黄炎光,等.干式变压器环氧树脂热老化特性研究[J].高电压技术,2018,44(1):187-194.
Wang Youyuan, Wang Shiyu, Huang Yanguang, et al. Study on thermal aging characteristics of epoxy resin of dry-type transformer [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1):187-194.
- [2] 田猛.直流复合场下环氧树脂内电树枝生长特性研究[D].天津:天津大学,2019.
Tian Meng. Electrical tree characteristics of epoxy resin under superimposed DC field[D]. Tianjin: Tianjin University. 2019.
- [3] 姜涵.玻璃纤维增强树脂材料树枝状老化研究[D].北京:华北电力大学(北京),2019.
Jiang Han. Study on treeing characteristics in glass fiber reinforced resin[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [4] 王成.玻璃纤维增强环氧树脂材料的电树枝生长特性及机制研究[D].北京:华北电力大学(北京),2020.
Wang Cheng. Study on the characteristics and mechanisms of electrical tree growth of glass fiber reinforced epoxy resin[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [5] 李姗姗,王力农,方雅琪,等.输电杆塔用复合材料的因素老化分析和寿命评估[J].绝缘材料,2016,49(11):80-84.
Li Shanshan, Wang Linong, Fang Yaqi, et al. Multi-factor ageing analysis and life evaluation on composite materials for transmission tower[J]. Insulating Materials, 2016, 49(11):80-84.
- [6] 王有元,刘玉,王施又,等.电老化对干式变压器中环氧树脂特性的影响[J].电工技术学报,2018,33(16):3 906-3 916.
Wang Youyuan, Liu Yu, Wang Shiyu, et al. The effect of electro-thermal aging on the properties of epoxy resin in dry-type trans-

- former[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3 906–3 916.
- [7] 龚瑾,李喆,刘新月. 氧化铝/环氧树脂复合材料空间电荷特性与高温高湿环境下交流电场老化[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 191–198.
- Gong Jin, Li Zhe, Liu Xinyue. Space charge and AC field aging in high hygrothermal environment of alumina/epoxy resin composites[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 191–198.
- [8] 崔爽. 无机填料/环氧树脂复合介质非线性电导特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- Cui Shuang. Research on nonlinear conductivity of inorganic filler/epoxy resin composite[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2020.
- [9] 蔡玄龙,冯少博,柯贤朝. 玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的弯曲性能及破坏特征[J]. 理化检验: 物理分册, 2021, 57(9). DOI: 10.11973/lhgy-wl202109004.
- Cai Xuanlong, Feng Shaobo, Ke Xianchao. Bending properties and failure characteristics of glass fiber reinforced epoxy resin composites[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2021, 57(9). DOI: 10.11973/lhgy-wl202109004.
- [10] 冯昌辉. 玻璃纤维增强环氧树脂绝缘材料老化特性及影响因素研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2021.
- Feng Changhui. Study on the aging characteristics and influencing factors of glass fiber reinforced epoxy resin insulation materials[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021.
- [11] 张杰,周宇通,罗宏建,等. 220 kV GIS终端环氧套管开裂原因分析[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 240–245.
- Zhang Jie, Zhou Yutong, Luo Hongjian, et al. Cause analysis of cracking of epoxy casing in 220 kV GIS terminal[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 240–245.
- [12] 谢伟,杨征,程显,等. 环氧树脂材料热氧老化特性研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(20): 4 397–4 404.
- Xie Wei, Yang Zheng, Cheng Xian, et al. Study on thermo-oxygen aging characteristics of epoxy resin material[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(20): 4 397–4 404.
- [13] Provencher H, Hudon C, David E. Thermal and thermo-mechanical aging of epoxy-mica insulated stator bars[C]//IEEE Electrical Insulation Conference, 2011: 483–487.
- [14] 王有元,刘玉,王施又,等. 电热老化对干式变压器中环氧树脂特性的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3 906–3 916.
- Wang Youyuan, Liu Yu, Wang Shiyu, et al. The effect of electro-thermal aging on the properties of epoxy resin in dry-type transformer[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3 906–3 916.
- [15] Sylvestre A, Rain P, Raphoz N, et al. Influence of electro-thermal aging on the space charges measurements in epoxy resins[C]//IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2001: 113–116.
- [16] Preetha P, Thomas M J, Ranjan R. Electrothermal ageing of epoxy nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2012, 19(6): 2 081–2 089.
- [17] 高坤,史汉桥,孙宝岗,等. 湿热老化对玻璃纤维/环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1 147–1 152.
- Gao Kun, Shi Hanqiao, Sun Baogang, et al. Effects of hydro-thermal aging on properties of glass fiber/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1 147–1 152.
- [18] 许良,贾耀雄,周松,等. 老化环境对T800碳纤维/环氧树脂基复合材料性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(6): 109–115.
- Xu Liang, Jia Yaoxiong, Zhou Song, et al. Effect of aging environment on the properties of T800 carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 2021, 37(6): 109–115.
- [19] 吴子剑,王晨,张明艳,等. 环氧树脂纳米复合材料界面及其对电性能影响分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3 897–3 905.
- Wu Zijian, Wang Chen, Zhang Mingyan, et al. Interface of epoxy resin composites and its influence on electrical performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3 897–3 905.
- [20] Lan Z, Deng J, Song Y, et al. Color changes and mechanical properties of glass fiber reinforced polycarbonate composites after thermal aging[J]. Polymers, 2022, 14(2). DOI: 10.3390/polym14020222.

(上接第108页)

- Ma Ji, Wang Haofang, Ma Beili, et al. Electromagnetic scattering analysis method based on subarray strategy and domain decomposition moment method[J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(4): 100–106.
- [12] 宋文良,杨峥峥. 基于小波矩量法的目标电磁散射快速算法研究[J]. 舰船电子对抗, 2022, 45(2): 77–80.
- Song Wenliang, Yang Zhengzheng. Research into fast algorithm of target electromagnetic scattering based on wavelet-MoM[J]. Ship-board Electronic Countermeasure, 2022, 45(2): 77–80.
- [13] 陈定. 一种新的多层物理光学法在反射面快速计算中的应用[C]//2019年全国天线年会论文集(中册). 西安: 西安电子科技大学, 2019: 481–484.
- Chen Ding. A new multilevel physical optics method for fast pattern calculation of reflector[C]// Proceedings of the 2019 National Antenna Annual Conference (Volume II). Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2019: 481–484.
- [14] 高楷,邹宇甲,张玉,等. 一种面向电大尺寸介质目标的物理光学法[C]//2021年全国天线年会论文集. 西安: 西安交通大学出版社, 2021: 1 684–1 686.
- Gao Kai, Zou Yujia, Zhang Yu, et al. Physical optics method for electrically large medium targets[C]//Proceedings of the 2021 National Antenna Annual Conference, Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2021: 1 684–1 686.
- [15] Xiao Li, Wang Xiaohua, Wang Bingzhong, et al. An efficient hybrid method of iterative MoM-PO and equivalent dipole-moment for scattering from electrically large objects[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1 723–1 726.