

电机用环氧绝缘材料相容性的研究

董晓英¹, 刘雁^{2*}, 刘代军¹, 吉彦兵¹, 匡润¹, 陈涛¹, 刘喆¹, 李万峰¹

(1. 中国长江电力股份有限公司, 湖北宜昌 443002; 2. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川德阳 618000)

摘要: 环氧类绝缘材料在制备和使用过程中往往需要与其他的环氧材料进行共混相容, 从而满足使用需求。其中, 相容性则是决定共混材料理化特性、力学性能的关键因素。研究选取两种(1#、2#)常用的双组分环氧树脂体系进行一定工艺的混合, 对其性能及微观形貌测试。结果表明: 相容混合固化样品的力学性能基本介于两个纯样品之间, 且先后固化工艺后无明显线性界面, 说明两者相容性良好, 制备的样品均满足相关技术要求。先后固化所需时间久, 但其性能优异。综合考虑, 最终选用先后固化方式下的样品, 研究结果为环氧树脂相容性研究提供参考。

关键词: 环氧树脂; 相容性; 热性能; 力学性能

中图分类号: TQ323.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0105-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.019

Study on Compatibility of Epoxy Insulation Materials for Motors

DONG Xiaoying¹, LIU Yan^{2*}, LIU Daijun¹, JI Yanbing¹, KUANG Run¹, CHEN Tao¹, LIU Zhe¹, LI Wanfeng¹

(1. China Yangtze River Power Co., Ltd., Yichang 443002, China; 2. Dongfang Electric Group Dongfang Motor Co., Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: Epoxy insulating materials often need to be blended and compatibilized with other epoxy materials during preparation and application to meet service requirements, where compatibility is a critical factor determining the physicochemical properties and mechanical performance of blended materials. In the study, two types (1# and 2#) of commonly used two-component epoxy resin systems were mixed using specific processes, and their properties and micro-morphologies were characterized. The results showed that the mechanical properties of compatibilized blended and cured samples fell basically between those of the two pure samples, and no obvious linear interface was observed after sequential curing, indicating good compatibility between the two components. All prepared samples met relevant technical requirements. Although sequential curing required longer time, it exhibited superior performance. Considering all factors, samples obtained by sequential curing were finally selected. The research results provide a reference for the study of epoxy resin compatibility.

Keywords: Epoxy resin; Compatibility; Thermal properties; Mechanical properties

随着人民生活水平的提高, 人均用电需求逐渐增大^[1], 针对大型发电机的研究要求也日益提高^[2]。当前, 环氧类绝缘材料作为电气设备的关键基础材料, 其技术路线的多元化和供应链的稳定性受到产业界关注。国内在这一领域的研究正持续推进, 探索具备自主知识产权的技术方案, 以丰富材料来源、提升产业安全保障能力, 更好地满足下游应用领域的发展需求。环氧树脂绝缘材料因其出色的电气绝缘性、机械强度、耐高温性和优良的

耐腐蚀性能, 在电子、电气、航空航天、轨道交通等多个领域得到广泛应用^[3-7]。相容性直接影响材料的主要使用特性和使用寿命。相容性的形成受多种因素制约, 包括材料的内部结构和组成、生产工艺以及外界环境条件等。共混复合材料的基材、填料的种类及混合比例是材料相容的基础, 直接影响材料的形成和各组分的协同共存^[8-12]; 通过调节生产工艺中的温度、时间和压力等参数, 可改善材料内部组分之间的相容性, 使其更好地协同作

收稿日期 Submitted date 2025-03-11; 修回日期 Revised date 2025-04-19; 录用日期 Accepted date 2025-05-23

基金项目: 中国长江电力股份有限公司科技项目(Z232302030)

*联系人, liuyan1021@126.com

引用本文: 董晓英, 刘雁, 刘代军, 等. 电机用环氧绝缘材料相容性的研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 105-109.

Citation: DONG X Y, LIU Y, LIU D J, et al. Study on compatibility of epoxy insulation materials for motors[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 105-109.

用,形成性能更优的产品^[13-14];外界环境条件的变化,如湿度和温度的波动,也会对材料的相容性产生直接或间接的影响。因此,在考虑材料本身因素对相容性的影响时,还需要针对外界环境条件的多变性采取相应的应对措施^[15-17]。环氧类绝缘材料的相容性对其制品的性能和使用寿命具有决定性作用^[18]。

基于国内外对不同类型环氧树脂体系相容性性能的研究现状与发展趋势,结合生产实际需求,本研究选取两种工业常用的双组分室温固化环氧树脂体系(1#和2#),按照一定比例和特定的相容工艺进行混合,并对其热性能、力学性能及微观形貌进行测试与分析。

1 实验部分

1.1 主要原料

环氧树脂 1#, ($m_{A组分}:m_{B组分}=21:4$),工业级,东方电气集团东方电机有限公司;环氧树脂 2#, ($m_{A组分}:m_{B组分}=100:30$),工业级,东方电气集团东方电机有限公司。

1.2 仪器与设备

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR), Bruker-Vector-22, 德国 Bruker 公司;热重分析仪(TG), STA449-F3, 德国耐驰仪器有限公司;万能试验机, GTM8010, 丰旺仪器仪表制造有限公司;悬臂梁冲击试验仪, GT-7045-MDL, 北京中航鼎力仪器设备有限公司;扫描电子显微镜(SEM), TH-F120, 美国 FEI 仪器公司;光学显微镜, GX53, 日本奥林巴斯公司;原子力显微镜(AFM), Bruker Dimension Icon, 德国 Bruker 公司。

1.3 样品制备

1.3.1 混合样品的制备

(1)同时混合固化:将样品按比例配制,然后将环氧树脂 1#、环氧树脂 2#样品均匀混合,然后倒入硅胶模具中,在室温下静置 48 h 后,再放入 90 °C 烘箱中加热 6 h,完成固化。所采用样品的混合质量比为 1:1。

(2)先后固化:将环氧树脂 1#样品按比例配制后,入模一半深度,固化条件为室温静置 48 h,然后于 90 °C 烘箱中加热 6 h;待其完全固化后,再将环氧树脂 2#样品入模,填满模具凹槽另一半,固化条件同上。

1.3.2 纯样品的制备

(1)环氧树脂 1#:样品按 $m_{A组分}:m_{B组分}=21:4$ 进行物理共混,机械搅拌均匀,固化条件为室温下静置 48 h,然后于 90 °C 烘箱中加热 6 h。

(2)环氧树脂 2#:样品按 $m_{A组分}:m_{B组分}=100:30$ 进行物理共混,其余工艺同环氧树脂 1#一致。

1.4 性能测试与表征

FTIR 测试:采用 KBr 作为背景,将测试样品与 KBr 研磨、压片。波数范围 4 000~500 cm^{-1} ,扫描 3 次。

固化度测试:采用索氏抽提法对两种不同混合方式的样品固化程度进行测试^[19]。交联度计算公式为:

$$C = \frac{m_0 - \Delta m}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: C 为交联度,%; m_0 为抽提前质量,g; Δm 为抽提前后质量差,g。

TG 测试:取先后固化工艺的胶料试样一小块,放入研钵中研磨至微细粉,将研磨好的细粉倒入坩埚中铺满坩埚底部,调试启动仪器对各试样进行热失重分析测试,记录相应原始数据及热重曲线。在 N_2 气氛下进行测试,测试范围 20~800 °C,升温速率 20 °C/min。混合固化工艺 TG 测试方法同上。

力学性能测试:弯曲强度按照 GB/T 9341—2008^[20]进行测试,同时混合与先后固化工艺样品根据 1.3 制备工艺将未固化的样品加入长 80 mm、宽 10 mm、深 4 mm 的长矩形模具中,采用电子万能试验机对试样进行弯曲测试,载荷加载速率 10 mm/min。拉伸强度按照 GB/T 528—2009^[21]进行测试,先后固化与同时固化工艺的测试试样为长 115 mm、狭窄处平行宽度为 6 mm 的长哑铃形样条,夹持试样必须保证中心线与夹头的上下表面垂直。测试时,拉伸速率为 10 mm/min,温度为 (24±2) °C,相对湿度为 (67±9)%。冲击强度测试按照 GB/T 1043.1—2008^[22]进行,采用悬臂梁冲击试验仪对试样进行冲击性能测试。测试试样为长 80 mm、宽 10 mm、厚 4 mm、提前铣洗缺口的长矩形样条。每种测试样条数量为 5 根,结果取平均值。

SEM 测试:截取各试样断面,喷金,利用扫描电镜观察记录试样断面形貌特征。

光学显微镜:将各样品断面处用砂纸打磨,先粗砂后细砂,然后抛光。抛光面置于镜像显微镜(配备数码拍照、摄像系统)透光孔上方,用反射光观察断面形貌,通过物镜的选择,观察不同放大倍率的状态。

AFM 测试:原子力显微镜主要通过检测样品表面与探针之间的微小的相互作用力来进行表面形貌观测。使用原子力显微镜可以观察不同老化状态的绝缘漆样品在纳米尺度上的表面形态、不同组分之间的界面状态等形貌信息。对固化后的断面样品,使用原子力显微镜进行表面形貌分析测试。

2 结果与讨论

2.1 FTIR 分析

图 1 为 1#、2#与 1#/2#混合样品的 FTIR 谱图。从图 1 可以看出,两种环氧胶料 1#与 2#出峰位置基本一致,形状有细微差异,主要是因为胶料中含有少量不同助剂。1 072 cm^{-1} 处的峰归因于环氧基团 C—O 键的不对称伸缩振动;3 332 cm^{-1} 附近是—OH 的振动峰;1 600 cm^{-1} 处为苯环特征吸收峰,1#/2#混合样品的出峰位置在 1#、2#样品中均有对应的峰,且没有新的特征吸收峰出现,说明 1#、2#胶料结构相似,物理共混后没有新的官能团出现,没有化学反应发生,表明 1#、2#样品两者相容性良好^[23]。

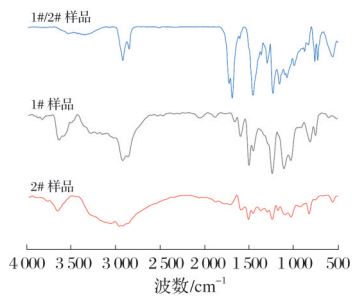


图1 1#、2#与1#/2#混合样品的FTIR谱图

Fig.1 FTIR spectra of 1#, 2# and 1#/2# mixed samples

2.2 交联度分析

表1为两种混合样品的抽提质量变化和交联度。从表1可以看出,两种混合方式的固化度均较高,说明两种环氧树脂具有良好的相容性,且先后固化的交联度明显高于同时混合固化,表明先后固化样品的反应程度高于同时混合固化样品的反应程度。

表1 两种混合样品的抽提质量变化和交联度

Tab.1 Extraction quality changes and crosslinking degree of two mixed samples

固化方式	m_0/g	m_1/g	$\Delta m/g$	$C/\%$
同时混合固化	1.05	1.00	0.05	95
先后固化	1.02	0.99	0.03	97

注:“ m_1 ”表示抽提后质量。

2.3 TG分析

图2为两种混合样品的TG曲线。表2为两种混合样品的热降解数据。从图2和表2可以看出,质量损失均分为3个阶段,同时混合固化样品的质量损失率大于先后固化样品的质量损失率。第一阶段质量损失主要是样品固化时内部的有机溶剂以及环氧树脂侧链或结合不稳定的位点发生分解,两混合方式的质量损失几乎一致。第二阶段随着温度的进一步升高,环氧树脂主链开始分解。其中,同时混合固化样品的损失速度明显大于先后固化样品的损失速率,可能是因为1#、2#样品环氧混合固化的比例下降所导致的^[24-25]。第三阶段经过高温分解后剩余残炭,800℃残炭率均在10%~15%左右。同时混合固化过程需要更多溶剂,热失重速率较先后固化样品更快,耐热性较差,与固化度测试结果一致。同时混合固化样品由于添加的B组分与先后固化样品添加的B组分与A组分的反应程度不同,交联度不一样。先后固化样品交联度更大,即固化度更高。

表2 两种混合样品的热降解数据

Tab.2 Thermal degradation data of two mixed samples

固化方式	$t_{5\%}/^{\circ}C$	$t_{10\%}/^{\circ}C$	$t_{50\%}/^{\circ}C$	残炭率(800℃)/%
同时混合固化	333	358	410	11.07
先后固化	343	363	423	14.54

注:“ $t_{5\%}$ ”表示起始分解温度;“ $t_{10\%}$ ”表示质量损失达到10%对应的温度;“ $t_{50\%}$ ”表示质量损失达到50%对应的温度。

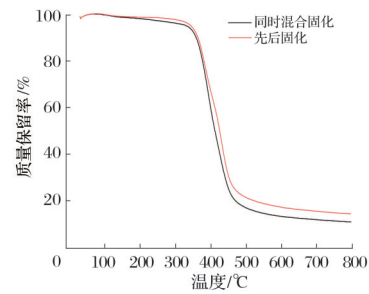


图2 两种混合样品的TG曲线

Fig.2 TG curves of two mixed samples

2.4 力学性能分析

2.4.1 弯曲强度

图3为4种样品的弯曲强度。从图3可以看出,先后固化与同时混合后固化样品的弯曲强度基本介于1#、2#纯品之间,且先后固化、同时混合固化样品比1#样品的弯曲强度分别高28.6%和18.8%。两种共混方式的样品弯曲性能没有明显下降,说明两者能够较好地固化,形成交联网状结构,具有良好的相容性。其中,先后固化样品的固化度高于同时混合固化的样品,说明在先后固化反应更彻底,其结果与TG测试结果相呼应。

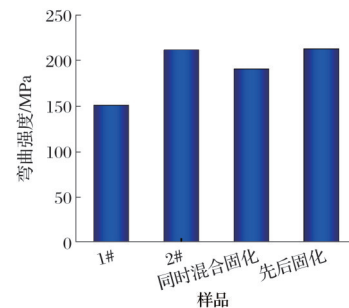


图3 4种样品的弯曲强度

Fig.3 Bending strength of four samples

2.4.2 拉伸强度

图4为4种样品的拉伸强度。从图4可以看出,2#样品、同时混合固化及先后固化样品的拉伸强度均可达到60 MPa以上。先后固化样品的拉伸强度达到最大值,比1#样品拉伸强度高20.6%,比2#样品拉伸强度高3.1%,比同时混合固化样品拉伸强度高6.3%。这可能是由于相容后样品的分子结构不同,分子基团不同,交联度不同,先后固化后样品化学性能最稳定,断裂伸长率最小,因此拉伸强度最好。

2.4.3 冲击强度

图5为4种样品的冲击强度。从图5可以看出,同等条件下,先后固化样品的冲击强度最大。一般情况下,抗冲击性能差的环氧树脂脆性较大,易发生脆性断裂。这表明相容后,先后固化样品端基上的活性基团已较好地嵌入环氧树脂交联网络中,在一定程度上起到网络结点的作用。此外,由于先后固化样品的反应程度更高,受到冲击

时能够有效分散和承受应力,提高材料的断裂能和韧性,从而使冲击强度得以提升。

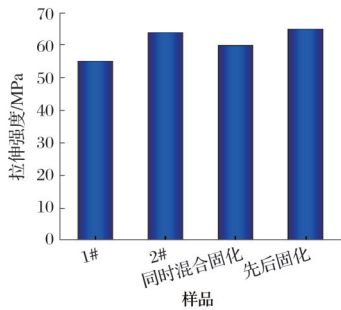


图4 4种样品的拉伸强度

Fig.4 Tensile strength of four samples

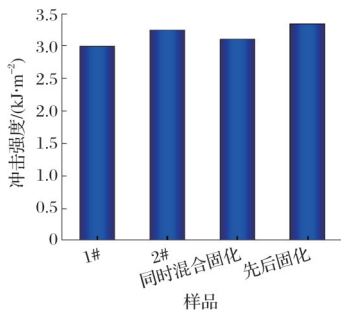
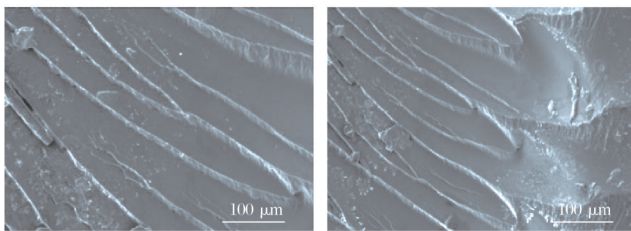


图5 4种样品的冲击强度

Fig.5 Impact strength of four samples

2.5 SEM分析

图6为两种混合样品断口处的SEM照片。从图6可以看出,样品相容后分布相对较为均匀,表面平整光滑,没有缺陷或孔洞,形状规则,呈现平板状,且同时混合固化和先后固化样品的SEM照片无明显的界面出现,在断口处出现河流状花样,为典型的脆性断裂,是样品被折断时所产生的,两者河流状花样宽度基本一致,表明同时混合固化和先后固化的弯曲性能差异不大。



(a) 1#/2# 同时混合固化样品 (b) 1#/2# 先后固化样品

图6 两种混合样品断口处的SEM照片(1 000×)

Fig.6 SEM images of fracture surface of two mixed samples (1 000×)

2.6 光学显微镜分析

图7和图8分别为先后固化样品1#和2#胶料的光学显微镜照片。从图7和图8可以看出,胶料表面有明显的颗粒结构,应该是胶料抛光过程中产生的局部不均匀微区,不是真正意义上的颗粒结构。同时,两者颗粒结构明显不同,表明胶料的硬度、耐磨性能等方面有所区别。但

在整个样品范围内,未观察到明显的界面结构,说明两种胶料的界面处产生了融合。原因在于1#与2#胶料同为环氧树脂,后固化的2#加入模具时为液态,对已经固化的1#胶料产生局部的溶解,所以界面成为一个区域,而不是明显的线性界面。

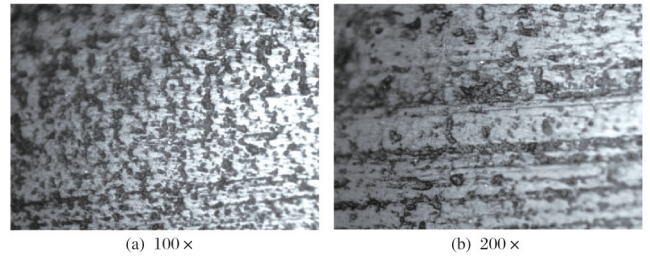


图7 先后固化样品1#胶料的光学显微镜照片

Fig.7 Optical microscope images of 1# adhesive material of sample obtained by sequential curing

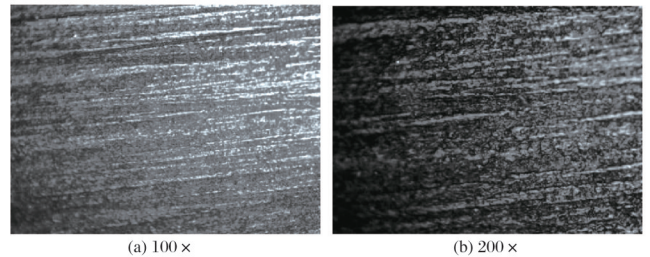
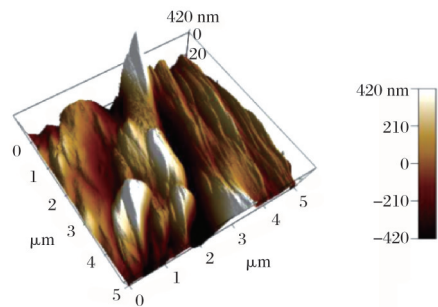


图8 先后固化样品2#胶料的光学显微镜照片

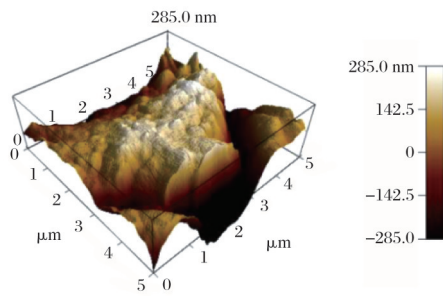
Fig.8 Optical microscope images of 2# adhesive material of sample obtained by sequential curing

2.7 AFM分析

图9为先后固化样品断口处和热态处理后断口处的AFM照片。从图9可以看出,同一样品热态处理后抛光,与常温下样品比较,各试样断口表面变得相对平滑,尖锐的凸起或凹陷显著减少,镜面度有所提高,镜面起伏程度分别降低一半左右。可能主要是因为经过热态处理后各胶料样品易于抛光、镜面度提升导致;样品在断口方向均只观察到不规则的条纹,没有明显的线性分隔,表明胶料之间没有产生几何分离,意味着两种组分之间产生了融合,具有一定的过渡区。此结论与光学显微镜、SEM观察结果一致,并互为印证,说明1#胶料与2#胶料两者相容性良好。



(a) 断口处



(b) 热态处理后断口处

图9 先后固化样品断口处和热态处理后断口处的AFM照片
Fig.9 AFM images of fracture surface of of sample
obtained by sequential curing and fracture surface
after thermal treatment

3 结论

根据FTIR谱图定性分析,胶料1#、2#出峰位置大致一致,形状略有不同,表明两者分子结构相似,有较好的相容性。根据固化度和TG曲线可得出,先后固化样品的耐热性能明显优于同时混合固化样品。对两种样品进行不同模式的共混,发现先后固化样品的力学性能较同时混合固化样品优异,但均能满足相关技术要求。经过SEM观察发现,两种混合模式下的样品分布相对均匀,表面平整光滑,形状规则,断口呈现河流断面,为典型的脆性断裂。在光学显微镜下未观察到明显的界面结构,说明两种胶料的界面处产生了融合,而且AFM图片表明胶料之间没有产生几何分离,与FTIR结果一致,说明两种胶料相容性好。相容后两种环氧树脂体系先后固化样品的性能优异,为工业挑选最优产品提供可靠的实验数据支撑。

参考文献

- [1] 周逸斐. 2月份全社会用电量同比增长8.6%[N]. 每日经济新闻, 2025-03-19(1).
- [2] 潘翠红, 孙占红. 风电叶片用国产碳纤维预浸料的制备及性能研究[J]. 中国新技术新产品, 2017(12): 147-148.
- [3] 王浩, 颜湘莲, 韩冬, 等. C_4F_7N/CO_2 及其分解气体与橡胶密封材料的相容性实验[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2625-2634.
- [4] YAN B Y, ZHANG Z, LI Y, et al. Research and application progress of resin-based composite materials in the electrical insulation field[J]. Materials, 2023, 16(19): 6394.
- [5] 郑哲宇, 李涵, 周文俊, 等. 环保绝缘气体 C_3F_7CN 与密封材料三元乙丙橡胶的相容性研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 335-341.
- [6] 张藕生, 唐建华, 罗子堃. 环氧树脂/DDS耐高温树脂体系的固化动力学研究及性能调控[J]. 热固性树脂, 2024, 39(4): 41-46.
- [7] 吴鹏, 叶凡超, 李祎, 等. $C_4F_7N/CO_2/O_2$ 与三元乙丙橡胶的相容性及相互作用机理研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3393-3403.
- [8] LI J L, LIU X, WU Z J, et al. The effect of 10-(2,5-di-hydroxyphenyl)-9, 10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenan-threne-10-oxide on liquid oxygen compatibility and cryo-genic mechanical properties of epoxyresin[J]. High Performance Polymers, 2016, 28(7): 820-830.
- [9] 吴旭东. 改性氮化硼/环氧树脂导热绝缘复合材料的制备与性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.
- [10] 赵明, 张雪, 孙明明, 等. 环氧树脂增韧体系对胶黏剂热性能的影响[J]. 中国胶粘剂, 2025, 34(1): 33-38.
- [11] 陈小文, 姜涛, 李文戈. 电子封装用环氧树脂基复合材料的研究进展[J]. 机械工程材料, 2024, 48(12): 1-8.
- [12] 刘贺晨, 葛琦, 吴璇, 等. 马来海松基环氧树脂的制备与性能研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(5): 34-41.
- [13] LIANG Y G, LEE S, YU H S, et al. Tuning the hysteresis of a metal-insulator transition via lattice compatibility[J]. Nature communications, 2020, 11(1): 3539.
- [14] JIN H K, HYEONGOOK K, BONGKUK S, et al. Synthesis of acid anhydride-modified flexible epoxy resins and enhancement of impact resistance in the epoxy composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 140(1): e53249.
- [15] 邓杰强. 增韧阻燃环氧树脂复合材料的制备及性能研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2025.
- [16] ANNA R. The impact of the acidic environment on the mechanical properties of epoxy compounds in different conditions[J]. Polymers, 2020, 12(12): 2957.
- [17] 张怀东, 庞秀江, 刘源, 等. 用于导热绝缘环氧树脂复合材料的氮化硼改性研究进展[J]. 山东化工, 2024, 53(3): 64-67.
- [18] WEN Y F, CHEN C, YE Y S, et al. Advances on thermally conductive epoxy-based composites as electronic packaging underfill materials: A review (Adv. Mater. 52/2022)[J]. Advanced Materials, 2022, 34(52): 2270358.
- [19] 贺晨, 梁洪涛, 卢鹤, 等. 索氏提取法: 一种直观定量表征硅橡胶功能涂层交联度的新方法[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 52-57.
- [20] 中国塑料标准化技术委员会. 塑料. 弯曲性能的测定: GB/T 9341—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [21] 中国塑料标准化技术委员会. 塑料 拉伸性能的测定 第2部分: 模塑和挤塑塑料的试验条件: GB/T 1040.2—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [22] 中国塑料标准化技术委员会. 塑料 简支梁冲击性能的测定 第1部分: 非仪器化冲击试验: GB/T 1043.1—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [23] ZHOU P P, ZOU L S, ZHA S W, et al. Compatibility and thermal decomposition behavior of acrylic block copolymer modified epoxy resin[J]. Journal of Polymer Research, 2020, 27: 4.
- [24] 陈岑. 耐高温环氧树脂及其复合材料的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- [25] CHI Q G, ZHANG X W, ZHANG C H, et al. Heat-resistant and electrical properties of bismaleimide modified epoxy resin[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2022, 33(22): 17868-17876.