

微波辐照绝缘环氧树脂的快速固化行为及其性能

吴承屹¹ 李 萧⁵ 吴佳丽¹ 韩进慧¹ 张建军¹ 马素德^{1,2,3,4}

¹ (西华大学材料科学与工程学院 成都 610039)

² (材料与表面技术教育部重点实验室 成都 610039)

³ (四川省能源装备智能焊接工程研究中心 成都 610039)

⁴ (含能材料实验室 成都 610039)

⁵ (东方电气集团东方电机有限公司 德阳 618000)

摘要 环氧树脂是性能优良、应用广泛的绝缘材料,但必须固化后才能发挥作用,传统固化方式效率低、能耗大。采用微波辐照方式对绝缘用环氧树脂体系进行固化研究,通过物料体系温度变化探讨了固化工艺,利用固化度、红外光谱、热重分析、微观形貌、力学性能、电学性能等手段对产物性能进行分析表征并与传统方式固化产物进行比较。结果表明,在不改变材料体系的情况下,微波固化可以缩短固化时间95%以上并提高固化度3%,微波固化与热固化产物化学结构相同且有更好的热稳定性,电气性能接近,拉伸强度、弯曲强度、冲击强度分别提高了4%、3.8%、6%,微波固化产物在微观结构看来更均匀且有致密性。微波固化技术为绝缘用环氧树脂涂料的高效制备提供了创新路径,后续研究应聚焦于多物理场耦合机理解析、智能化装备开发,以加速其工业化进程。

关键词 微波固化,环氧树脂,电工材料,固化度

中图分类号 TL13

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0045

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0045

引用该文:

吴承屹,李萧,吴佳丽,等.微波辐照绝缘环氧树脂的快速固化行为及其性能[J].辐射研究与辐射工艺学报,2025,43(6):060202. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0045.

WU Chengyi, LI Xiao, WU Jiali, *et al.* The rapid curing behavior and properties of epoxy resin under microwave irradiation[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, 43(6): 060202. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0045.



第一作者: 吴承屹,男,1999年出生,在读硕士研究生,主要研究方向为高分子涂料

通信作者: 马素德,工学博士,教授, E-mail: masude2007@163.com

收稿日期: 初稿 2025-05-29; 修回 2025-07-30

First author: WU Chengyi (male) was born in 1999, postgraduate student, main research direction is polymer coatings

Corresponding author: MA Sude, doctor of engineering, professor, E-mail: masude2007@163.com

Received 29 May 2025; accepted 30 July 2025

The rapid curing behavior and properties of epoxy resin under microwave irradiation

WU Chengyi¹ LI Xiao⁵ WU Jiali¹ HAN Jinhui¹ ZHANG Jianjun¹ MA Sude^{1,2,3,4}

¹(School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

²(Key Laboratory of Materials and Surface Technology (Ministry of Education), School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

³(Sichuan Energy Equipment Intelligent Welding Engineering Research Center, School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, SChina)

⁴(Laboratory of Advanced Energetic Materials and Devices, School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

⁵(Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China)

ABSTRACT Epoxy resin is an insulating material with excellent performance and wide application, but it must be cured to play a role, and the traditional curing method is inefficient and energy consuming. Using microwave irradiation for insulation with epoxy resin system curing research, through the material system temperature change to explore the curing process, the use of curing degree, infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis, micro-morphology, mechanical properties, electrical properties and other means of analytical characterization of the product properties and curing products with the traditional way of curing products were compared. The results show that, without changing the material system, microwave curing can shorten the curing time by more than 95% and improve the degree of curing by 3%, microwave curing and thermal curing products with the same chemical structure and better thermal stability, electrical properties close to the tensile strength, bending strength, impact strength increased by 4%, 3.8%, 6%, respectively, microwave curing products in the microstructure appears to be more homogeneous and densification. Microwave curing technology provides an innovative path for the efficient preparation of epoxy resin coatings for insulation. Subsequent research should focus on the analysis of multi physical field coupling mechanisms and the development of intelligent equipment to accelerate its industrialization process.

KEYWORDS Microwave curing, Epoxy resin, Electrical materials, Curing degree

CLC TL13

环氧树脂类绝缘材料是制造大型发电机的重要材料,其性能的好坏对发电机能否长时间保持稳定的工作状态有着直接影响,其定子线棒中表面漆料的主要成分是环氧树脂类产品,传统固化方式下工期长、效率低、能耗高、内部存在温度梯度差导致内应力分布不均等问题^[1-4],在不改变材料体系前提下,采用微波固化有望解决这一固化工艺问题。微波是波长在1 mm~10 cm电磁波,自美国工程师Percy Spencer在雷达研究中意外发现微波的热效应以来,微波的工业应用在世界范围内引起了广泛关注,相较于传统热传导、热辐射的加热方式,微波加热通过电磁波辐射促使材料内部分子极化,引发分子间的碰撞与摩擦而产生热量,其由内而外的体加热方式展现出独特的优势。这种加热原理不仅具有加热效率高、选择性

强、易于控制等特点,也使得微波加热在新型加热方式的选用中备受青睐^[5-8]。微波固化环氧树脂体系是树脂中的极性分子在交变电磁场作用发生偏转,通过分子间摩擦发热使得树脂体系吸收微波能量,从而促进树脂体系中交联反应的进行,最终完全固化^[9-11]。

Arora等^[11]利用微波固化了高密度聚乙烯碳纳米管和聚丙烯碳纳米管,从分子键合层面表明微波能有效提高复合材料的固化度;Rao等^[12]发现微波入射频率对微波辅助固化工艺有着至关重要的影响。南京航空航天大学研究团队在微波固化环氧树脂基复合材料的各方面进行了大量研究,其中张灵林^[13]、吴晓春^[14]从微波固化机理、固化动力学、微波固化变形预测等方面为微波固化环氧树脂基复合材料建立了固化模型;李迪^[15]则提出

了一种微波固化温度场的控制策略；李梦颖等^[16]在他们基础上展开环氧树脂复合材料的微波固化实验和性能研究。现有研究多集中于复合材料(环氧树脂与补强料的复合体系)层压成型体系，更关注材料的力学性能，未涉及电学性能；而针对绝缘材料用纯环氧(环氧树脂中不加入无机填料)树脂这类薄层结构在微波场中的固化研究尚属空白，本文对绝缘用环氧树脂的微波固化工艺与性质进行了研究，并对可能的应用提供基础支撑。

1 材料与方法

1.1 主要材料

主要材料由东方电机有限公司提供，包括DECJ环氧胶A组分，型号为双酚A型E-51，其环氧当量和环氧值分别是185~208 g/mol和0.48~0.54 g/mol，DECJ环氧胶B组分，型号为三乙烯四胺，其胺当量为24.4 g/mol。

1.2 仪器与设备

变频式微波炉(工作频率2.45 GHz，额定输出功率700 W)；鼓风干燥箱，上海远怀化工科技有限公司；傅里叶变换红外光谱仪，Bruker-Vector-22，德国Bruker公司；热重分析仪，STA449-F3，德国耐驰仪器有限公司；扫描电子显微镜，JSM-6510LV，日本电子美国公司；索氏提取器，JSHD，江苏汇达医疗器械有限公司；电压击穿试验仪，LJC-50E北京中航鼎力仪器设备有限公司；表面体积电阻率测试仪，ZST-121，北京中航鼎力仪器设备有限公司；万能试验机，E44 104型，美特斯中国产。

1.3 样品制备

将A和B组分按照一定比例取量倒入烧杯中搅拌均匀，混合均匀后倒入准备好的模具中，样品形状为直径100 mm、厚度1 mm的胶饼，采取一定的固化工艺进行微波固化。传统热固化的温度程序设定为常温48 h+80 °C/8 h。

1.4 性能测试与表征

1.4.1 固化度测试

完成固化后立即将样品研磨成粉，并按照图1装置进行索氏提取法测试固化度，固化度 α 的数值算法参照公式(1)。

$$\alpha = \frac{w_1}{w_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中： α 为固化度； w_1 为抽提后样品质量； w_2 为抽提前样品质量。

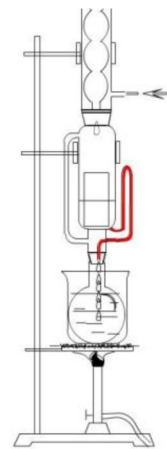


图1 固化度测试装置图
Fig.1 Diagram of curing degree testing device

1.4.2 红外光谱测试

使用傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪测试，测试样品由刀片刮下的涂层粉末与适量分析纯KBr粉末混合后压片制得。制备方法如下：用刀片将所要进行红外测试的涂层刮下约3 mg放入研钵中，加入适量分析纯KBr粉末(质量约为涂层的50~100倍)后研磨使两者充分混合均匀，将研磨好的试样加入到压片的模具中，在15 kPa的压力下压制5 min，取出后进行红外光谱测试。

1.4.3 热失重(TGA)测试

对微波固化、热固化完成的样品进行TGA分析。

1.4.4 力学性能测试

拉伸强度：参照GB/T 528—2009^[17]制备样品，测试拉伸强度。每个样品制备5个样条，分别测试后取平均值，样品形状及测试过程如图2所示。

弯曲强度：参照GB/T 33061.5—2023^[18]的标准制备样品，测试弯曲强度。样品为矩形，长宽厚度分别为80 mm×10 mm×4 mm。样品形状及测试过程如图3所示。

冲击强度：参照GB/T 1043.2—2018^[19]标准在上述矩形样条上铣一个缺口，然后采用简支梁法进行冲击强度测试，测试过程如图4所示。

1.4.5 电气性能测试

参照GB/T 31838.2—2019^[20]执行标准对固化完成的样品进行电气性能测试。

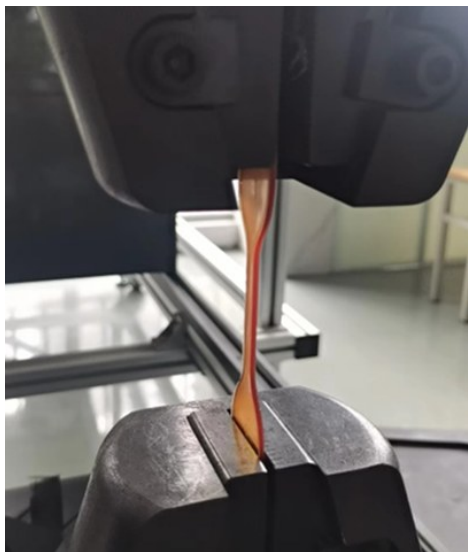
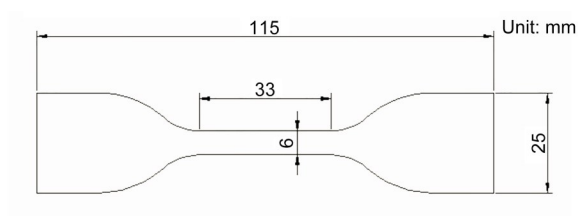


图2 哑铃型样品及拉伸强度测试过程
Fig.2 Dumbbell shaped sample and tensile strength testing process

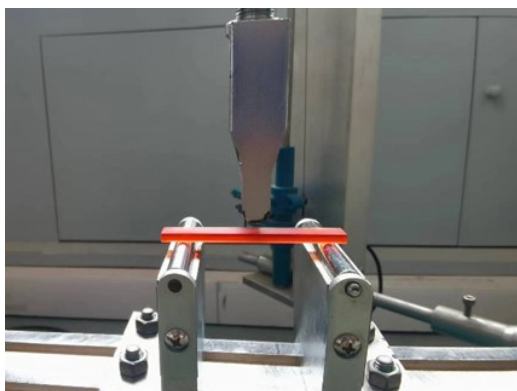
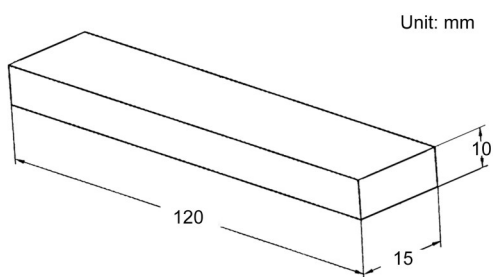


图3 矩形样品及弯曲强度测试过程
Fig.3 Rectangular sample and bending strength testing process



图4 简支梁法测试冲击强度
Fig.4 Impact strength test using simply supported beam method

表面电阻率：将搅拌均匀的环氧胶涂刷在绝缘板上，在不同固化方式下固化完全后冷却至室温，采用万用表进行表面电阻测量。每个试样测3点，取其平均值为表面电阻。测量电极结构如图5所示；表面电阻率按式(2)计算。

$$\rho_s = 4R_s \quad (2)$$

式中： ρ_s 为表面电阻率， Ω ； R_s 为表面电阻， Ω 。

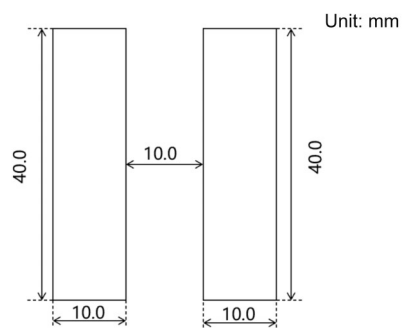


图5 测量电极结构图
Fig.5 Measurement electrode structure diagram

体积电阻率：按一定比例配制导电黏接剂，取直径为20 mm的圆形铝箔试样做为电极，在一个平稳的压力下使用导电黏接剂粘贴电极与待测样品，采用三电极系统绝缘兆欧表测试不同样品

的体积电阻率，计算见式(3)。

$$\rho_v = R_x \frac{A}{h} \quad (3)$$

式中： ρ_v 为体积电阻率， $\Omega \cdot m$ ； R_x 为测得的电阻值， Ω ； A 为被保护电极的有效面积， m^2 ； h 为试样的平均厚度， m 。

击穿场强：使用0.1 mm的铜板作为基底，双面涂刷环氧胶，固化完全后进行测试。每组样品做5个，取平均值，计算如式(4)所示。

$$E_b = \frac{U_b}{d} \quad (4)$$

式中： U_b 为击穿电压， kV ； d 为样片厚度， mm ； E_b 为击穿场强， kV/mm 。

1.4.6 扫描电镜(SEM)测试

通过SEM扫描电镜可以明显观察样品表面的微观形貌。样品须在喷金30 s之后，分别在1 000倍、2 000倍、5 000倍的观察倍数下观看。

2 结果与讨论

2.1 微波固化工艺的确定

选择70 W、210 W、350 W、490 W的输出功率对树脂进行微波固化，在不同功率下的固化过程中树脂的温度变化如图6所示。从图6可以看出，采取较高功率(350 W、490 W)进行微波辐照时，树脂升温迅速，加热10 min时就已经达到140 °C以上，而温度的迅速升高也导致固化交联反应过快而出现树脂局部热损现象(呈黑色，并伴有刺激性气味)，且功率越高，热损现象出现得越早。功率为70 W时，树脂温度上升较慢，最终温度低于70 °C，加热1 h时树脂凝胶，继续加热1 h

树脂能基本固化；功率为210 W时，树脂温度上升较快，连续加热10 min后树脂凝胶但是会产生大量气泡，说明树脂体系温度上升过快导致树脂内部小分子挥发快而产生气泡，同时也说明210 W的功率能加快反应速率不会导致树脂出现热损现象，可以作为树脂凝胶后继续固化的功率选择^[21]。

由图6可以看出，高功率不适合环氧树脂体系的固化条件，采取70 W+210 W的功率组合进行最佳固化工艺探究。在不同固化条件下环氧树脂体系的固化度与时间关系如表1所示，可以看出，在70 W微波功率下加热时，环氧树脂体系最终的固化度低于75%；210 W功率时，固化度能达到90%以上，接近热固化样品；210 W功率下固化1 h、1.5 h时的固化度基本相差不大，说明在固化反应后期，随着交联密度的增大，参与反应的官能团数目锐减，体系基本上完全固化。

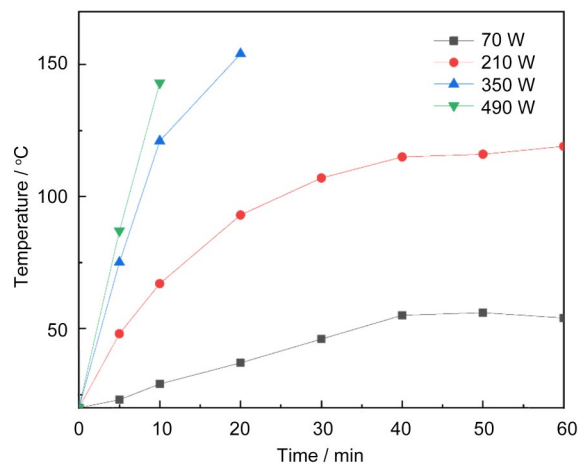


图6 不同功率下环氧树脂体系微波固化过程中的温度变化

Fig.6 Temperature changes during microwave curing of epoxy resin system at different powers

表1 不同固化条件下环氧树脂体系的固化度
Table 1 Curing degree of epoxy resin system under different curing conditions

固化时间 / min Curing time	70 W 微波功率 / % 70 W microwave power	210 W 微波功率 / % 210 W microwave power	热固化 / % Thermal curing
10	—	67.8	93.7
30	55.9	83.5	
60	67.6	97.1	
90	71.2	97.2	
120	72.8	—	

注：热固化的时间为常温下48 h+80 °C/8 h。

Note: The curing time is 48 h+ 80 °C/h at room temperature.

结合前期工艺探究实验，本次实验的样品制备采取以下的固化方式：在70 W功率下，10 min

为一个周期，间隔2 min，循环6次；在210 W功率下，开始为2 min辐照时间，后续每个周期采取

梯度增加 1 min 时间, 每次加热间隔 2 min, 直至树脂完全固化。

2.2 化学结构对比分析

不同固化方式下所得样品的红外光谱如图 7 所示。由图 7 可知, 两种方式下所得样品的红外光谱峰形基本一致, 各个特征峰结构相同, 二者在 915 cm^{-1} 处未见环氧基的明显吸收峰, 说明两个样品中的环氧树脂固化完全, 在 $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ 均有强吸收峰存在, 原因是环氧基开环形成的羟基伸缩振动, 并且微波样品在此处的峰形更尖锐明显; 热固化样品在 $2\ 400\text{ cm}^{-1}$ 附近出现吸收峰, 原因可能是多余固化剂中存在的胺基; 在 $1\ 450\sim 1\ 600\text{ cm}^{-1}$ 附近为苯环的骨架振动, 使用的环氧树脂是双酚 A 型。两种样品所得的红外光谱说明微波固化并不会改变反应产物结构。

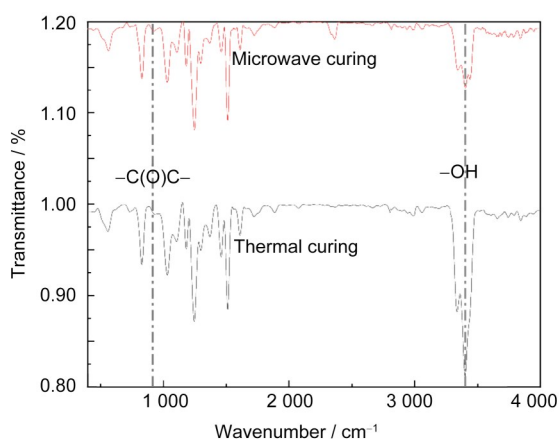


图 7 不同固化方式所得样品的红外光谱
Fig.7 Infrared spectra of samples obtained by different curing methods

2.3 耐热性能对比分析

由图 8 可知, 微波固化样品($364\text{ }^{\circ}\text{C}$)略高于热

固化样品($357\text{ }^{\circ}\text{C}$)的初始分解温度, 原因是微波固化过程中形成的三维网络结构更牢固, 使其有更好的热稳定性; 热固化样品的分解率更快, 说明微波促进树脂与固化剂的单体转化, 减少挥发物的残留; 残碳率差异显著, 微波固化样品(6.2%左右)比热固化样品(2%左右)高出 4 个百分点, 说明传统热固化可能生成更多线性结构, 导致更容易因高温受热分解为小分子气体(CO_2 、 H_2O), 微波化效果更好, 固化度更高^[22]。

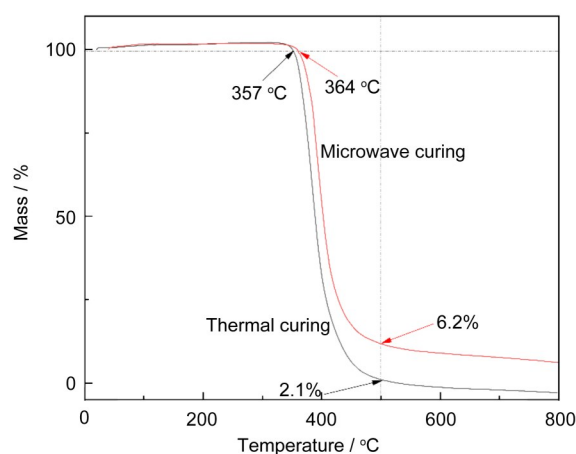


图 8 不同固化方式所得样品的热失重曲线
Fig.8 Thermogravimetric curves of samples obtained by different curing methods

2.4 机械性能对比探讨

不同固化方式所得样品的力学性能测试结果如表 2 所示。由表 2 可知, 微波固化样品的力学性能均优于热固化样品, 主要因为微波固化的均匀性使得固化过程中树脂内部不存在梯度固化, 交联网络更均匀, 分子链段取向更优, 加上固化时间的大幅度缩减使得挥发物残留减少, 大大降低了树脂内部缺陷的产生^[23]。

表 2 不同固化方式下的力学性能
Table 2 Mechanical properties under different curing methods

固化样品 Curing samples	拉伸强度 / MPa Tensile strength	弯曲强度 / MPa Bending strength	冲击强度 / ($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$) Impact strength
热固化 Thermal curing	63.76	210.861	3.260
微波固化 Microwave curing	66.32	218.665	3.478
相对差值 Relative difference	4%	3.8%	6%

2.5 绝缘性能对比分析

不同固化方式所得样品的电气性能测试结果如图 9 所示。通过图 9 的柱状图数据对比可以看

出, 两种样品的电气性能有一定的差异性, 其中热固化样品的表面电阻率是 $2.8\times 10^{12}\ \Omega$, 微波固化样品的是 $3.3\times 10^{12}\ \Omega$, 热固化样品的体积电阻率是 $1.38\times 10^{15}\ \Omega\cdot\text{m}$, 微波固化样品的是 $1.01\times 10^{15}\ \Omega\cdot\text{m}$,

这两组数据基本反应了两组样品优良的绝缘性能，虽然二者在数值上存在差异，但是因为表面电阻率、体积电阻率都在兆欧级别以上，二者相差没有超过一个数量级，且都满足相关标准要求^[24]，可

以视为电气性能指标一致。另外在击穿场强方面，热固化样品为 25.54 kV/mm，微波固化样品为 25.38 kV/mm，相对差值仅为 0.6% 左右，进一步说明两个样品的绝缘性能基本一致。

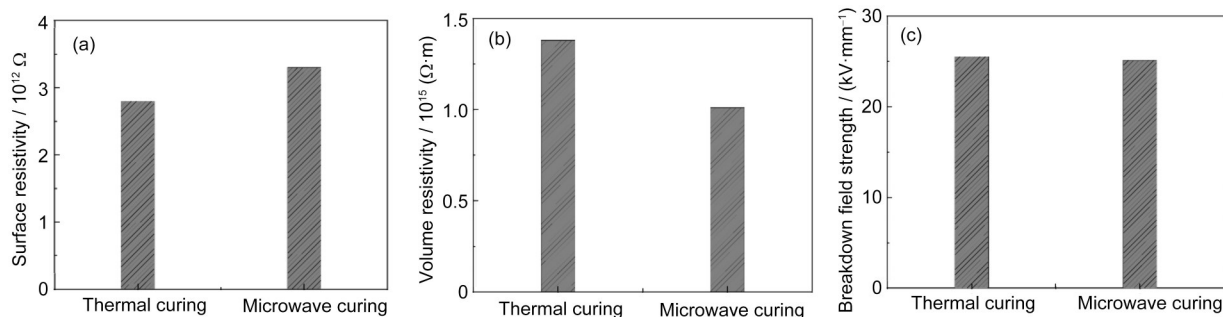


图9 不同固化方式所得样品的电气性能:(a)表面电阻率;(b)体积电阻率;(c)击穿场强

Fig.9 Electrical properties of samples obtained by different curing methods: (a) surface resistivity; (b) volume resistivity; (c) breakdown field strength

2.6 微观形貌差异分析

由图 10、11 可以看出，两种样品的断面 SEM 存在明显差异，热固化样品的断面表面粗糙多呈河流状纹路，是典型的韧性断裂，说明热固化过

程中存在热量传递梯度导致的局部应力集中；微波固化样品的断面则平整光滑，纹路清晰，是典型的脆性断裂，说明微波固化形成的交联网络更均匀且致密^[25]。通过微观形貌辅助证实了微波固化在力学性能方面更具优异性。

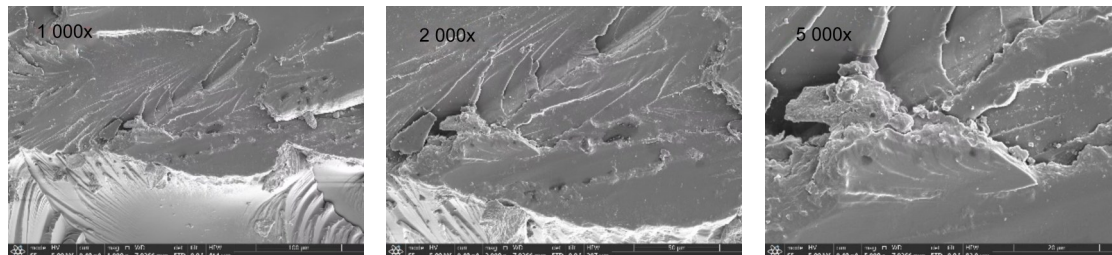


图 10 热固化样品的断面 SEM(从左至右为 1 000×、2 000×、5 000×)

Fig.10 SEM cross-section of the thermosetting sample (from left to right are 1 000×, 2 000×, and 5 000×)

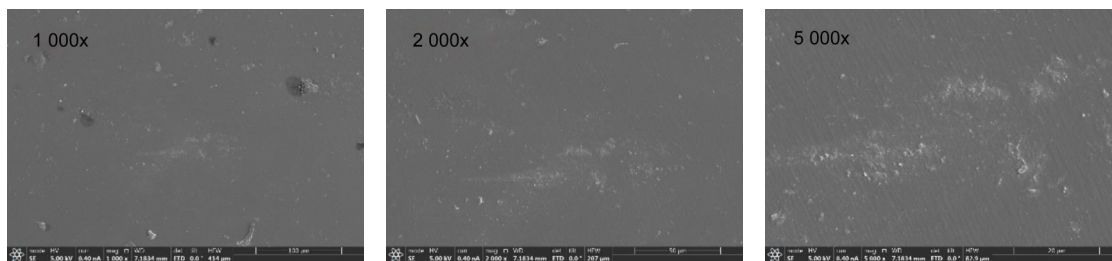


图 11 微波固化样品的断面 SEM(从左往右为 1 000×、2 000×、5 000×)

Fig.11 SEM cross-section of the microwave cured sample (from left to right are 1 000×, 2 000×, and 5 000×)

3 结论

针对双酚 A 型环氧树脂/胺类固化剂体系的微波固化工艺研究表明，在特定功率控制下，微波固化相较传统热固化展现出显著优势。(1)环氧树脂

脂体系的微波固化需要在一定的功率条件下进行，功率过高或过低均无法达到理想的固化效果；微波固化不会改变最终产物的化学结构，能显著提高固化速率并提高了一定的固化度。本研究采用的双酚 A 型环氧树脂、胺类固化剂体系的传统固

化时间在 56 h 左右,微波固化时间则在 2 h,缩短了 54 h,即固化时间缩短了 96.4%。(2)力学性能测试表明,微波固化产物的拉伸强度、弯曲强度、冲击强度均优于热固化产物,性能分别提高了 4%、3.8%、6%。扫描电镜发现二者微观形貌的差异性较大,微波固化树脂交联网络更均匀且致密。这进一步佐证了微波固化产物的力学性能和热稳定性更优异。

作者贡献声明 吴承屹、吴佳丽、韩进慧负责微波辐射固化实验和结构表征,实验数据处理和分析,以及论文的撰写;李萧负责提供实验材料与仪器设备;张建军协助指导实验的性能测试;马素德负责本文的研究思路、实验方案及论文整体修改。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 周俊. 环氧树脂材料在铁路电力设备中的绝缘应用[J]. 粘接, 2022, 49(2): 69-73.
ZHOU Jun. Application of epoxy resin materials in insulation of railway power equipment[J]. Adhesive, 2022, 49(2): 69-73.
- Fujiwara T, Takeuchi M, Che D Y, *et al.* Mechanical properties of epoxy- and dicyclopentadiene-based carbon-fiber-reinforced plastics at low and room temperatures[J]. Applied Composite Materials, 2025, 32(3): 895-907. DOI: 10.1007/s10443-024-10302-4.
- Hajebi S, Payamani M, Fattahi H, *et al.* Dual-curing epoxy thermosets: design, curing, properties and applications[J]. Polymer Reviews, 2025, 65(1): 250-280. DOI: 10.1080/15583724.2024.2405684.
- 吴雪贞. 环氧树脂固化工艺及其固化剂研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(7): 127-128. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2017.07.060.
WU Xuezheng. Study on curing process of epoxy resin and its curing agent[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37(7): 127-128. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2017.07.060.
- Bana P, Greiner I. Comparison of conventional and microwave heating for evaluation of microwave effects [J]. Australian Journal of Chemistry, 2016, 69(8): 865. DOI: 10.1071/ch16017.
- 甘颖, 戴长奇, 刘文武, 等. 壳聚糖基高吸水性树脂的微波辐射制备及其溶胀动力学[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, 40(2): 020202. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0202.
- GAN Ying, DAI Changqi, LIU Wenwu, *et al.* Microwave radiation preparation and swelling kinetics of chitosan-based superabsorbent resin[J]. Journal of Radiation Research and Radiotechnology, 2022, 40(2): 020202. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0202.
- Fulo H F, Vincent M A, Stiegman A E, *et al.* Cooperative application of conventional and microwave heating[J]. Asian Journal of Organic Chemistry, 2020, 9(6): 961-966. DOI: 10.1002/ajoc.202000157.
- Kabir E. Application of microwave heating in polymer synthesis: a review[J]. Results in Chemistry, 2023, 6: 101178. DOI: 10.1016/j.rechem.2023.101178.
- Johnston K, Pavuluri S K, Leonard M T, *et al.* Microwave and thermal curing of an epoxy resin for microelectronic applications[J]. Thermochimica Acta, 2015, 616: 100-109. DOI: 10.1016/j.tca.2015.08.010.
- 谷晓昱, 张军营. 微波固化环氧树脂中非热效应的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(3): 183-186. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2006.03.046.
GU Xiaoyu, ZHANG Junying. Non-thermal effect of microwave radiation on curing of epoxy resin[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2006, 22(3): 183-186. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2006.03.046.
- Arora G, Pathak H, Zafar S. Fabrication and characterization of microwave cured high-density polyethylene/carbon nanotube and polypropylene/carbon nanotube composites[J]. Journal of Composite Materials, 2019, 53(15): 2091-2104. DOI: 10.1177/0021998318822705.
- Rao S, Vijapur L, Prakash M R. Effect of incident microwave frequency on curing process of polymer matrix composites[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 55: 198-207. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.04.003.
- 张灵林. 碳纤维增强树脂基复合材料微波固化机理[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
ZHANG Linglin. Microwave curing mechanism of carbon fiber reinforced resin matrix composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- 吴晓春. 碳纤维增强树脂基复合材料微波固化变形预测[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
WU Xiaochun. Prediction of microwave curing deformation of carbon fiber reinforced resin matrix composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

- 15 李迪. 碳纤维增强树脂基复合材料微波固化温度场控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020. DOI: 10.27239/d.cnki.gnhhu.2020.001436.
LI Di. Temperature field control of microwave curing of carbon fiber reinforced resin matrix composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. DOI: 10.27239/d.cnki.gnhhu.2020.001436.
- 16 李梦颖, 肖军, 还大军, 等. 湿法分层缠绕 T700/环氧复合材料微波固化工艺及性能[J]. 复合材料科学与工程, 2021(12): 89-94. DOI: 10.19936/j.cnki.2096-8000.20211228.014.
LI Mengying, XIAO Jun, HUAN Dajun, *et al.* Microwave curing process and properties of T700/epoxy composites by wet filament lamination winding[J]. Composites Science and Engineering, 2021(12): 89-94. DOI: 10.19936/j.cnki.2096-8000.20211228.014.
- 17 全国橡胶委橡胶物理和化学试验方法分技术委员会(SAC/TC 35/SC 2). 硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定: GB/T 528—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
National Rubber Standards Committee Rubber Physical and Chemical Test Methods Technical Committee (SAC/TC 35/SC 2). Determination of tensile stress strain properties of vulcanized rubber or thermoplastic rubber: GB/T 528—2009[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- 18 全国塑料标准化技术委员会(SAC/TC 15). 塑料 动态力学性能的测定 第5部分: 非共振弯曲振动法: GB/T 33061.5—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
National Plastic Standardization Technical Committee (SAC/TC 15). Determination of dynamic mechanical properties of plastics. Part 5: Non resonant bending vibration method: GB/T 33061.5—2023[S]. Beijing: China Standard Press, 2023.
- 19 全国塑料标准化技术委员会通用方法和产品分技术委员会(SAC/TC 15/SC 4). 塑料 简支梁冲击性能的测定 第2部分: 仪器化冲击试验: GB/T 1043.2—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
General Methods and Products Technical Committee of National Plastic Standardization Technical Committee (SAC/TC 15/SC 4). Determination of impact performance of plastic simply supported beams. Part 2: Instrumented impact test: GB/T 1043.2—2018[S]. Beijing: China Standard Press, 2018.
- 20 全国电气绝缘材料与绝缘系统评定标准化技术委员会(SAC/TC 301). 固体绝缘材料 介电和电阻特性 第2部分: 电阻特性(DC方法) 体积电阻和体积电阻率: GB/T 31838.2—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
National Technical Committee on Electrical Insulating Materials and Insulation Systems Evaluation Standardization (SAC/TC 301). Solid insulating materials - Dielectric and resistive properties - Part 2: Resistive properties (DC Method) - Volume resistance and volume resistivity: GB/T 31838.2—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- 21 孙涛, 常新龙, 赖建伟, 等. 不同固化方式下环氧树脂体系固化行为及力学性能研究[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(5): 679-682.
SUN Tao, CHANG Xinlong, LAI Jianwei, *et al.* Comparison of curing behaviors and mechanical properties of epoxy resin system in different curing approaches[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(5): 679-682.
- 22 Groh F, Kappel E, Hühne C, *et al.* Investigation of fast curing epoxy resins regarding process induced distortions of fibre reinforced composites[J]. Composite Structures, 2019, 207: 923-934. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.09.003.
- 23 Singh M K, Zafar S. Development and mechanical characterization of microwave-cured thermoplastic based natural fibre reinforced composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2019, 32(10): 1427-1442. DOI: 10.1177/0892705718799832.
- 24 王亭, 崔东. 我国高压输变电设备绝缘配合标准的特点与分析: 简析GB311.1《绝缘配合第1部分定义、原则和规则》标准修订[J]. 电器工业, 2011(1): 62-65. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5578.2011.01.011.
WANG Ting, CUI Dong. Characteristics and analysis of insulation coordination standard for high-voltage power transmission and transformation equipment in China: brief analysis on the revision of GB311.1 "insulation coordination part 1 definition, principles and rules"[J]. China Electrical Equipment Industry, 2011(1): 62-65. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5578.2011.01.011.
- 25 关成龙. 树脂基复合材料构件振动预处理-微波固化复合成型工艺基础研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022. DOI: 10.27661/d.cnki.gzhnu.2022.006347.
GUAN Chenglong. Basic research on vibration pretreatment-microwave curing composite forming process of resin matrix composite components[D]. Changsha: Central South University, 2022. DOI: 10.27661/d.cnki.gzhnu.2022.006347.