

微波辐照固化不饱和聚酯/苯乙烯树脂及其性能

董春雷^{1,2,3} 汪晓奇² 韦俊宇² 汪超¹ 黄凯¹

许苗苗² 陈建兵² 王远峰¹ 吴国忠³

¹ (安徽普洛兰管道修复技术股份公司 池州 247000)

² (池州学院 池州 247000)

³ (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 为提高热固性树脂固化效率,本研究探讨了不饱和聚酯/苯乙烯(UP/St)树脂体系的微波辐照固化行为及性能变化规律。通过差示扫描量热法确定适宜的热引发剂,并对微波固化与传统热固化对树脂体系的升温特性、热稳定性及力学性能的影响。结果表明,微波辐照固化能够显著提高UP/St树脂体系的固化效率。在1 000 W微波功率下,树脂升温速率为0.33 °C/s,是120 °C热固化的8.46倍;固化360 s后,树脂体系基本达到充分固化状态。相比传统热固化,微波固化样品具有更高的起始降解温度,同时保持了相近的拉伸强度和冲击强度。上述结果表明,微波辐照固化是一种UP/St树脂体系快速固化的有效方法,为非开挖现场原位固化管道修复提供了新的技术方案。

关键词 微波辐照, 不饱和聚酯树脂, 苯乙烯, 快速固化

中图分类号 TQ326.3

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0066

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2026-0066.

引用该文:

董春雷,汪晓奇,韦俊宇,等.微波辐照固化不饱和聚酯/苯乙烯树脂及其性能[J].辐射研究与辐射工艺学报,XXXX,XX(X):XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0066.

DONG Chunlei, WANG Xiaoqi, WEI Junyu, *et al.* Microwave irradiation curing of unsaturated polyester/styrene resin: curing behavior and properties[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0066.



基金资助: 安徽省教育厅自然科学基金项目(2025AHGXZK30012), 安徽省质量工程项目 (2024sysx031), 安徽省大学生创新创业项目 (S202511306083, S202511306165), 池州学院人才项目 (CZ2025YJRC196), 和池州学院质量工程项目 (2025XSXZX01)

第一作者: 董春雷,男,1991年2月出生,2024年于中国科学院大学获得博士学位,从事辐射化学工作

通信作者: 王远峰,高级工程师, E-mail: wangyuanfeng@puluolan.com; 吴国忠,研究员, E-mail: wuguozhong@sinap.ac.cn

收稿日期: 初稿 2026-06-04; 修回 2026-07-24

Supported by Anhui Provincial Department of Education Natural Science Project (2025AHGXZK30012), Anhui Provincial Quality Engineering Project (2024sysx031), Anhui Provincial College Student Innovation and Entrepreneurship Project (S202511306083, S202511306165), Chizhou University Talent Program (CZ2025YJRC196), and Chizhou University Quality Engineering Project (2025XSXZX01)

First author: DONG Chunlei (male) was born in February 1991, and obtained a doctoral degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2024 and engages in radiation chemistry research

Corresponding author: WANG Yuanfeng, Senior Engineer, E-mail: wangyuanfeng@puluolan.com; WU Guozhong, professor, E-mail: wuguozhong@sinap.ac.cn

Received 04 June 2026; accepted 24 July 2026

Microwave irradiation curing of unsaturated polyester/styrene resin: curing behavior and properties

DONG Chunlei^{1,2,3} WANG Xiaoqi² WEI Junyu² WANG Chao¹ HUANG Kai¹

XU Miaomiao² CHEN Jianbing² WANG Yuanfeng¹ WU Guozhong³

¹(Anhui Pro-liner Pipeline Repair Technology Co., Ltd., Chizhou 247000, China)

²(Chizhou University, Chizhou 247000, China)

³(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

ABSTRACT To improve the curing efficiency of thermosetting resins, this study investigated the microwave irradiation curing behavior and property evolution of an unsaturated polyester/styrene (UP/St) resin. Differential scanning calorimetry (DSC) was used to determine a suitable thermal initiator, and the effects of microwave curing and thermal curing on the heating characteristics, thermal stability, and mechanical properties of the resin system were comparatively analyzed. The results showed that microwave irradiation curing significantly enhanced the curing efficiency of the UP/St resin. At a microwave power of 1 000 W, the heating rate of the resin reached 0.33 °C/s, which was 8.46 times higher than that under thermal curing at 120 °C. After curing for 360 s, the UP/St resin was nearly fully cured. Compared with conventional thermal curing, the microwave-cured samples exhibited higher thermal stability while maintaining comparable tensile strength and impact strength. These results indicate that microwave irradiation curing is an effective approach for achieving rapid curing of the UP/St resin system and provides a new processing reference for trenchless cured-in-place pipe repair.

KEYWORDS Microwave irradiation, Unsaturated polyester resin, Styrene, Rapid curing

CLC TQ326.3

随着城市地下管网服役年限的延长,排水、给水及工业输送管道在长期服役过程中易出现腐蚀、渗漏、开裂和承载能力下降等问题。传统开挖修复方式存在施工周期长、交通扰动大、环境影响明显和综合成本较高等不足,难以满足城市更新中快速修复、低扰动施工和绿色建造的需求。非开挖管道修复技术可在少开挖或不开挖条件下恢复管道结构和输送功能,其中现场原位固化管道法(CIPP)因施工效率高、内衬连续性好、适用范围广等特点,已成为老旧管道修复的重要技术路线^[1]。CIPP通常是将浸渍热固性树脂的软管置入待修复管道内部,经水压或气压作用使其膨胀与原管内壁贴合,再通过热水、蒸汽、紫外光或其他能量输入方式引发树脂固化,最终在原管内形成连续致密的复合内衬层,从而实现结构补强、防渗和耐腐蚀保护^[2]。

树脂基体是决定CIPP内衬材料成型质量和服役性能的关键组成部分。不饱和聚酯树脂具有黏度适中、对纤维增强材料浸润性好、固化速度可调、耐介质性能较好及成本相对较低等特点,在管道内衬、玻璃钢制品和热固性复合材料中应用

广泛^[3-4]。苯乙烯是不饱和聚酯树脂中常用的活性稀释剂,一方面可降低树脂体系黏度,改善其对聚酯毡、玻璃纤维等增强材料的浸渍能力;另一方面可与不饱和聚酯分子中的C=C双键发生自由基共聚反应,形成三维交联网络结构^[5]。不饱和聚酯/苯乙烯(UP/St)树脂体系的固化程度、交联均匀性和残余双键含量直接影响CIPP内衬材料的力学强度、尺寸稳定性、热稳定性和长期服役可靠性。目前CIPP工程中常用的固化方式主要包括热水固化、蒸汽固化和紫外光固化等^[6]。其中,热固化过程通常依赖外部热量向树脂体系内部传导,受树脂导热系数低、内衬厚度、环境温度和现场施工条件等因素影响,容易出现升温速率慢、内外温度分布不均、固化时间较长及能耗较高等问题。对于热固性树脂基复合材料而言,固化过程不仅决定树脂从液态向固态网络结构的转变,也影响材料内部缺陷、残余应力和界面结合状态。若大量单体未反应,会导致固化不足,进而影响材料的力学性能和耐热性能;若局部升温过快或温度过高,则可能导致树脂收缩、孔洞、开裂或热降解等缺陷。因此,发展高效、均匀、可控的

固化方法，对提升CIPP不饱和聚酯基复合材料的成型效率和服役性能具有重要意义。

微波辐照是一种非电离电磁辐射能量输入方式，其热量来源为材料内部极性基团取向极化、界面极化和介电损耗等^[7-8]。与传统热固化和UV固化相比，微波固化在能量输入方式和适用对象上具有明显差异。传统热固化主要依赖热量逐层传导。UV固化主要依赖紫外光激发光引发剂产生自由基，具有启动快、低温固化和表面快速成型等优点，但固化深度易受光穿透能力、树脂透明性、填料和增强纤维遮光等因素限制，不利于厚壁或不透明复合体系的深层固化。相比之下，微波固化不依赖热量逐层传导或紫外光穿透，而是通过树脂体系吸收微波能量实现体积加热，可快速升温并促进热引发剂分解，进而引发不饱和聚酯中的C=C双键发生自由基共聚反应^[9]。因此，微波辅助固化更适合具有一定厚度和复合增强结构的CIPP UP/St树脂体系，有望实现快速、均匀和可控固化。Mo等^[10]研究发现微波辐照可促进不饱和聚酯树脂与碳酸钙复合材料快速固化，在适当功率和辐照时间下可获得与常规热固化相近的固化程度和化学结构。但目前针对CIPP UP/St树脂体系的微波固化工艺和固化行为研究较少。

本文以CIPP UP/St树脂体系为研究对象，采用微波辐照固化方法研究其固化行为及性能变化

规律。通过比较不同热引发剂的引发特征，筛选适宜引发体系；探究不同微波功率下树脂的升温行为，并分析微波固化对固化度、化学结构、热稳定性及力学性能的影响。研究结果可为CIPP内衬材料快速固化工艺优化及微波辐照技术在热固性树脂复合材料成型中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料

主要材料为安徽普洛兰管道修复技术股份公司提供的不饱和聚酯和苯乙烯混合树脂（，质量比为6：4，其中不饱和聚酯为间苯型不饱和聚酯树脂。偶氮二异丁腈（AIBN）、过氧化苯甲酰（BPO）和过氧化二异丙苯（DCP）均来自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 样品制备

称取100 g UP/St树脂，按设定比例加入引发剂并充分混合均匀。随后，将混合后的树脂样品置于自制微波固化装置中进行微波辐照固化。该微波发生器的工作频率为2.45 GHz，最大额定功率为1 000 W，实验流程如图1所示。作为对照，将加入相同引发剂的UP/St树脂样品置于120 °C烘箱中进行传统热固化。

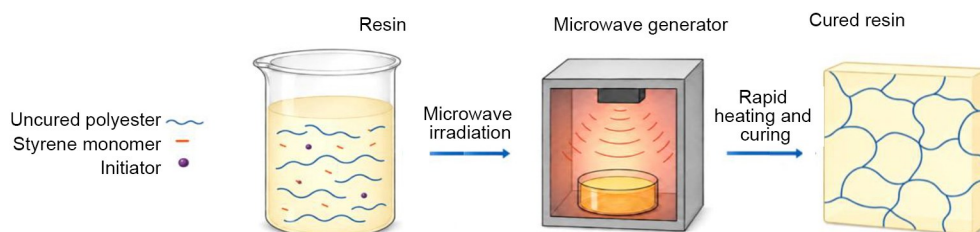


图1 UP/St树脂微波辐照固化示意图
Fig. 1 Schematic diagram of UP/St curing under microwave irradiation

1.3 样品性能测试与表征

1.3.1 差示扫描量热测试

采用德国耐驰仪器有限公司的差示扫描量热仪（DSC 214）测试不同固化程度的UP/St树脂的残余反应热，以评价不同微波辐照时间下UP/St样品的固化程度^[10, 11]。测试条件为：氮气气氛，升温速率为10 °C/min，温度范围为30~200 °C。样品固化度根据残余反应热进行计算，计算方法见公式（1）。

$$\alpha = \left(1 - \frac{\Delta H_{\text{res}}}{\Delta H_{\text{total}}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中： α 为固化度； ΔH_{res} 为不同固化时间样品测得的残余反应热，J/g； ΔH_{total} 为未固化树脂体系完全反应时的总反应热，J/g。

1.3.2 微波场中的温度测试

采用厦门海思迈光电技术有限公司的荧光光纤测温仪进行温度测试，测量精度为0.1 °C。

1.3.3 傅里叶变换红外光谱测试

采用赛默飞世尔科技公司的傅里叶变换红外

光谱仪（Nicolet iS10）测试样品的傅里叶变换红外光谱（FTIR），样品经溴化钾压片后进行测试。

1.3.4 拉曼光谱测试

采用日本 HORIBA 公司的拉曼光谱仪（LabRAM HR Evolution）对样品进行拉曼光谱测试。

1.3.5 热重分析

样品的热重分析（TG）和微分热重分析（DTG）采用北京恒久实验设备有限公司的热重分析仪（HTG-4）进行测试。测试条件为：空气气氛，升温速率 10 °C/min，测试温度范围 30~700 °C。

1.3.6 力学性能测试

样品的拉伸性能采用济南普业机电技术有限公司的电子万能试验机进行测试，测试方法参照 GB/T 1040.1—2025。悬臂梁冲击强度采用承德建德检测仪器有限公司的悬臂梁冲击试验机（XC-22D）进行测试，测试方法参照 GB/T 1843—2008。

1.3.7 扫描电子显微镜测试

样品拉伸断面经喷金处理后，采用复纳科学仪器（上海）有限公司的扫描电子显微镜（Phenom Pro）进行形貌表征。

2 结果与表征

2.1 引发剂的选择

为筛选出适宜的引发剂，分别将质量分数 1% 的 AIBN、BPO 和 DCP 添加到 UP/St 树脂中，差示扫描量热（DSC）测试结果如图 2 和表 1 所示。由

DSC 结果可知，AIBN 的起始反应温度最低，其较易在较低温度下分解产生自由基并引发树脂体系中 C=C 双键的发生反应。然而，较低的引发温度也可能对树脂体系在储存和运输过程中的稳定性产生不利影响，尤其在夏季高温环境下存在提前固化的风险。DCP 的起始反应温度最高，有利于提高树脂体系的储存稳定性，但需要更高温度才能有效引发固化反应，会延长树脂体系达到反应温度所需的时间，不利于实现快速固化。相比之下，BPO 的起始反应温度为 87.7 °C，峰值反应温度为 115.1 °C，处于 AIBN 和 DCP 之间，既可避免过低温度下提前引发，又能在微波加热过程中较快达到有效分解温度。综合考虑树脂体系的储存稳定性、运输安全性、微波加热条件下的快速引发需求和固化效率，本文选择 BPO 作为 UP/St 树脂体系微波辐照固化的热引发剂。

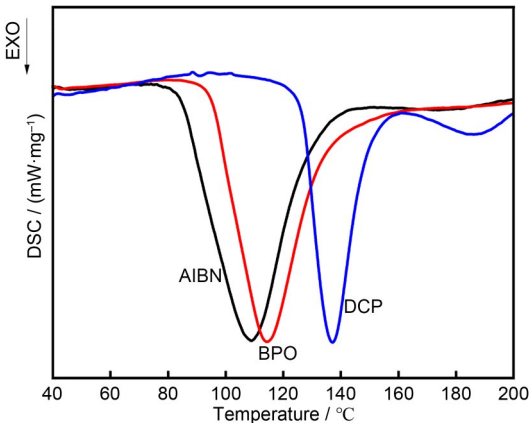


图2 不同引发剂引发UP/St树脂固化的DSC曲线图
Fig. 2 DSC curves of UP/St resin initiated by different initiators

表1 不同引发剂在UP/St树脂中的起始反应温度、峰值反应温度和终止反应温度表
Table 1 Initial reaction temperature, peak reaction temperature and final reaction temperature of different initiators in UP/St resin

引发剂	起始反应温度 T_i / °C	峰值反应温度 T_p / °C	终止反应温度 T_f / °C
Initiator	The initial reaction temperature	The peak reaction temperature	The final reaction temperature
AIBN	75.8	108.8	127.7
BPO	87.7	115.1	163.6
DCP	126.6	137.2	162.5

2.2 微波加热过程中温度变化

分别采用 400 W、600 W、800 W、1 000 W 的微波输出功率对含 BPO 引发剂的 UP/St 树脂体系进行微波辐照固化，并以 120 °C 烘箱热固化作为对照，温度变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知，不同微波功率下 UP/St 树脂体系均表现出较快的升温响

应，且升温速率随微波功率增加而明显提高。以树脂温度由 30 °C 升至 BPO 起始反应温度 87.7 °C 为计算区间，400 W、600 W、800 W 和 1 000 W 微波功率下树脂体系的升温速率分别为 0.12 °C/s、0.19 °C/s、0.26 °C/s 和 0.33 °C/s，而 120 °C 热固化条件下升温速率仅为 0.039 °C/s。其中，1 000 W 微

波固化的升温速率约为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热固化的 8.46 倍, 说明微波辐照能够显著提高 UP/St 体系的升温效率。两种固化方式升温行为的差异主要与加热机理有关。传统热固化依赖外部热源向树脂内部传导热量, 升温过程受树脂热导率和热扩散速率限制, 尤其对于树脂基复合材料而言, 其热导率较低, 容易形成明显的内外温差和热滞后现象。相比之下, 微波加热属于体积加热, 电磁波可直接作用于树脂体系内部, 并通过极性基团取向极化、界面极化和介电损耗等过程将电磁能转化为热能, 从而实现树脂体系的快速升温^[7]。随着微波功率提高, 单位时间内输入体系的电磁能增加, 树脂升温速率随之加快, 有利于缩短树脂体系达到引发剂分解温度所需时间, 并为后续 C=C 双键自由基聚合反应提供快速热触发条件。与传统热固化相比, 微波辐照能减少对单一热传导路径的依赖, 显著提高 UP/St 树脂体系的升温速率和固化效率。

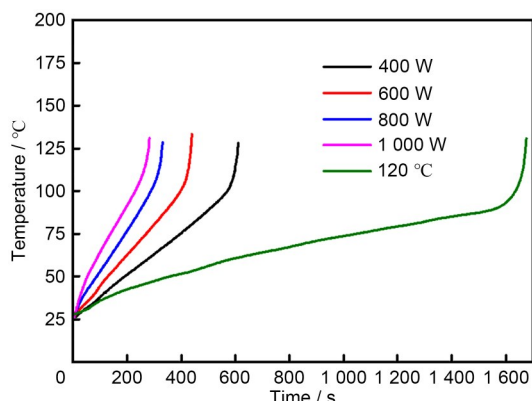


图3 UP/St树脂在不同功率下微波固化和热固化过程中的温度变化(彩色见网络版)

Fig.3 Temperature changes during microwave curing and thermal curing of UP/St resin (color online)

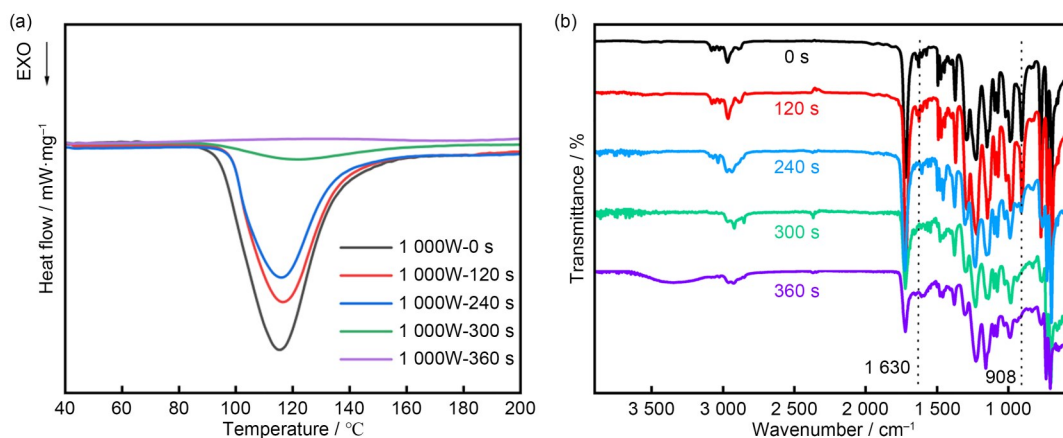


图4 UP/St树脂在1000 W微波功率下不同固化时间的DSC曲线(a)和FTIR光谱(b)(彩色见网络版)

Fig. 4 DSC curves (a) and FTIR spectra (b) of UP/St resin at different curing times under 1000 W microwave power (color online)

2.3 固化度测试

为评估不同微波辐照时间下 UP/St 体系的固化程度, 采用 DSC 测定 1000 W 微波功率下不同固化时间样品的残余反应热, 结果如图 4 (a) 所示。随着微波固化时间的延长, 样品的残余放热峰强度逐渐降低, 表明体系中未反应活性双键逐渐消耗, 交联固化反应逐步推进。由图 4 (b) 的 FTIR 结果可知, 位于 1630 cm^{-1} 附近的 C=C 伸缩振动特征峰以及 908 cm^{-1} 附近的=C-H 面外弯曲振动峰^[12]强度均随固化时间延长而逐渐降低, 说明不饱和聚酯和苯乙烯中的 C=C 双键持续反应。当固化时间为 120 s 和 240 s 时, DSC 曲线仍表现出明显的残余放热峰, 残余反应热分别为 -464.6 J/g 和 -377.2 J/g , 固化度分别为 26.0% 和 40.0%, C=C 和=C-H 的特征 FTIR 峰仍较明显, 表明此阶段体系仍存在较多未反应活性基团。当固化时间延长至 300 s 时, 残余反应热迅速降低至 -77.26 J/g , 固化度提高至 87.7%, 说明 240~300 s 是 UP/St 树脂体系固化程度快速提高的阶段。当固化时间进一步延长至 360 s 时, DSC 曲线中已观察不到明显的残余放热峰, C=C 和=C-H 的特征 FTIR 峰强度也十分微弱, 说明体系中大部分可反应双键已被消耗, 树脂接近完全固化状态。DSC 和 FTIR 结果相互印证, 表明固化时间是影响 UP/St 树脂体系固化程度的重要因素。微波辐照产生的快速体积加热效应能够促进体系快速升温, 加速 BPO 分解产生自由基, 从而引发 C=C 双键自由基聚合反应。在本实验条件下, 固化 360 s 可使 UP/St 体系达到较充分的固化状态。

2.4 傅里叶变换红外光谱和拉曼光谱分析

图5展示了未固化树脂、120 °C热固化样品和1 000 W微波固化360 s样品的FTIR和拉曼光谱图。由图5 (a)可知,与未固化的树脂相比,微波固化和热固化的样品在1 630 cm^{-1} 附近的C=C特征峰和908 cm^{-1} 附近的=C-H面外弯曲振动峰均明显减弱甚至基本消失。由图5 (b)可知,未固化树脂在1 632 cm^{-1} 附近具有强烈的C=C拉曼特征峰^[13],而经热固化和微波固化后,该峰强度明显降低。这表明UP/St树脂体系主要通过不饱和聚酯和苯乙

烯中C=C双键的自由基共聚反应实现固化^[13]。与此同时,热固化和微波固化样品在1 750 cm^{-1} 附近的酯基C=O伸缩振动峰以及3 000~2 800 cm^{-1} 区域的C-H伸缩峰仍清晰可见,说明固化过程中树脂主链中的酯基结构和烃链骨架未发生明显破坏^[14]。对比热固化和微波固化样品可以发现,两者FTIR主要特征峰位置基本一致,未出现明显新的吸收峰,表明微波辐照并未明显改变树脂体系的主体化学结构。由此说明,微波固化与传统热固化具有相似的固化反应路径。

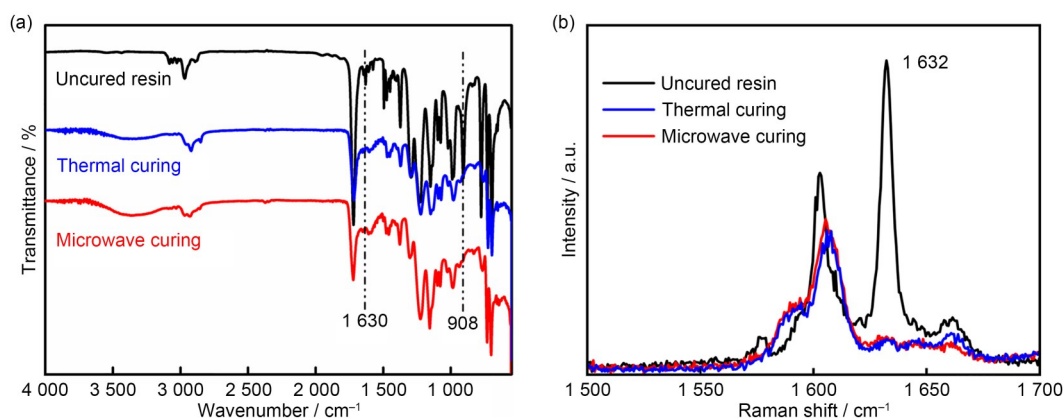


图5 未固化树脂、热固化和微波固化样品的光谱分析:(a)FTIR图谱;(b)拉曼光谱图(彩色见网络版)
Fig. 5 FTIR (a) and Raman (b) spectra of uncured resin, thermally cured, and microwave-cured samples (color online)

2.5 热稳定性能

为比较不同固化方式对UP/St树脂体系热稳定

性的影响,对热固化样品和1 000 W微波固化360 s样品进行TG和DTG测试,结果如图6所示。

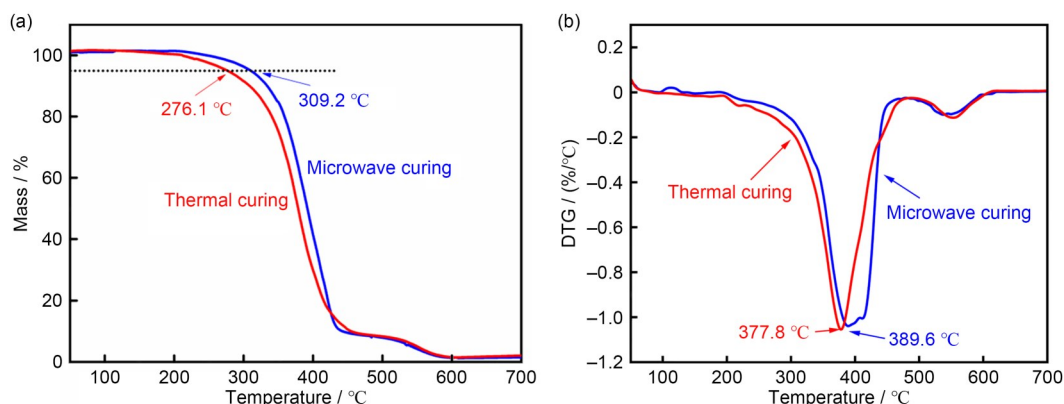


图6 微波固化与热固化样品的热重分析:(a)TG曲线;(b)DTG曲线
Fig. 6 Thermogravimetric analysis of microwave-cured and thermally cured samples: (a) TG; (b) DTG

由图6 (a)可见,热失重过程主要可分为低温稳定阶段、主降解阶段和高温残炭阶段。在30~250 °C范围内,两种样品质量变化较小,说明固化后的树脂网络在低温区域具有较好的热稳定性。该阶段的少量失重可能来源于吸附水、残余单体或低分子组分的挥发。随着温度继续升高,样品

进入主降解阶段,质量迅速下降。这一阶段主要对应聚酯主链中酯键的断裂以及UP/St交联结构的热裂解^[12, 15]。由图6 (a)和(b)可知,与热固化样品相比,微波固化样品的热降解起始温度和最大降解速率温度明显提高。微波固化样品的5%失重温度($T_{5\%}$)为309.2 °C,高于热固化样品的

276.1 °C, 提高约 33.1 °C。微波固化样品的最大降解速率温度为 389.6 °C, 比热固化样品的 377.8 °C 提高 11.8 °C。当温度升高至 500 °C 以上时, 两种样品的失重速率明显减缓, 并逐渐进入高温残炭阶段, 最终两者残余质量差异较小。综合来看, 相比于热固化, 微波固化不仅加快了 UP/St 树脂体系的固化过程, 还提高了热降解温度。

2.6 力学性能

为评价不同固化方式对 UP/St 树脂力学性能的影响, 对热固化样品和 1 000 W 微波固化 360 s 样品进行了拉伸强度和冲击强度测试, 结果如图 7 所示。由图 7 (a) 可见, 两种固化方式所得样品的拉伸强度和冲击强度较为接近, 说明在适宜固化条件下, 微波固化能够获得与传统热固化相当的力学性能。其中, 微波固化样品的拉伸强度和冲击强度分别为 55.4 MPa 和 24.5 kJ/m², 略高于热固化样品的 54.8 MPa 和 24.2 kJ/m², 表明微波固化并未削弱树脂体系的拉伸强度和冲击强度, 反而在一定程度上有利于强度保持。由图 7 (b) 可见,

两种样品的拉伸强度-应变曲线均呈现先快速上升后断裂的特征, 说明固化后的 UP/St 树脂体系为脆性断裂。相比热固化样品, 微波固化样品的曲线斜率略大, 并在较低应变下达到最大拉伸强度, 材料刚性略高; 而热固化样品的断裂应变相对较大, 说明其变形能力略优。

图 8 为微波固化与热固化样品的拉伸断面 SEM 图。由图 8 (a) 可见, 微波固化样品断面整体较为平整、均一, 仅可观察到少量细小纹理和微小缺陷, 未观察到明显孔洞、裂纹或大面积剥离现象, 说明微波固化样品断裂面缺陷较少, 间接表明其固化结构较为均一^[8, 10]。相比之下, 图 8 (b) 中热固化样品断面较粗糙, 可观察到明显的沟壑状和河流状断裂纹理, 并伴随局部片层剥离和不规则断裂区域, 表明传统热固化过程中可能存在一定的温度梯度和局部应力集中, 导致断裂过程中裂纹扩展路径更加复杂。总体来看, 微波固化不仅能够显著缩短固化时间, 还可保持材料良好的拉伸强度和冲击强度, 表明其在 CIPP 管道修复用热固性树脂快速固化中具有良好的应用前景。

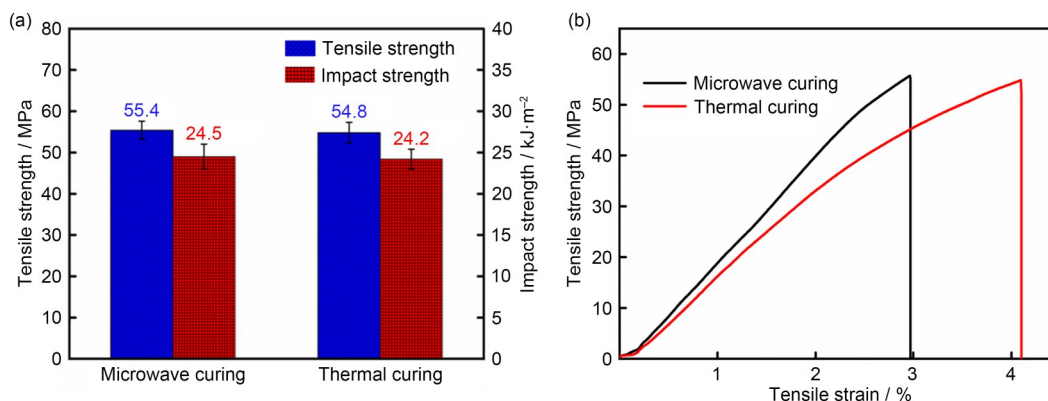


图 7 微波固化与热固化样品的力学性能: (a) 拉伸强度和冲击强度; (b) 拉伸强度-应变曲线 (彩色见网络版)
Fig. 7 Mechanical properties of microwave-cured and thermally cured samples: (a) tensile strength and impact strength; (b) tensile strength-strain curves (color online)

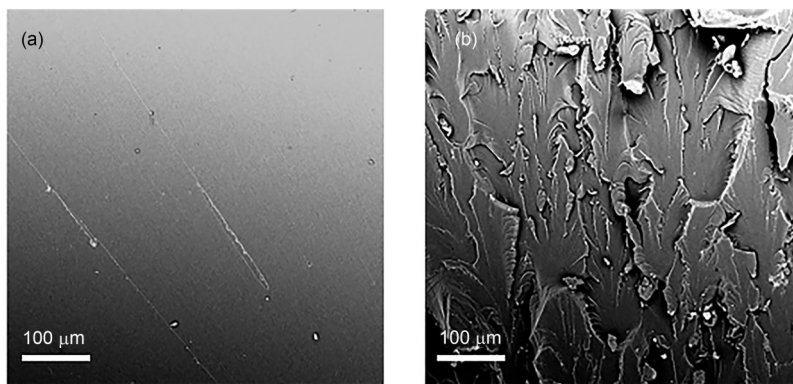


图 8 拉伸断面 SEM 图: (a) 微波固化; (b) 热固化
Fig. 8 SEM images of tensile cross sections: (a) microwave curing; (b) thermal curing

3 结论

本文系统研究了微波辅助固化UP/St树脂体系的固化行为及性能变化规律。结果表明,与传统热固化相比,微波体积加热能够显著提高升温速率和固化速率。在1 000 W微波功率下,树脂体系的升温速率达到0.33 °C/s,较120 °C热固化提高了7.46倍,并在固化360 s后基本达到完全固化状态。FTIR和拉曼光谱结果表明,微波固化过程中UP/St体系主要通过C=C双键的聚合反应实现固化。相较于热固化样品,微波固化样品在保持拉伸强度和冲击强度的同时,具有更高的热降解温度。表明微波辐照固化技术在热固性树脂快速固化及CIPP管道原位修复领域具有良好的应用前景。然而,针对纤维增强复合材料和厚壁结构体系,微波固化过程中的温度分布、固化均匀性及工程适用性仍需进一步研究。

作者贡献声明 董春雷、汪晓奇和韦俊宇负责材料的制备及表征,黄凯、汪超和许苗苗负责数据处理与分析;董春雷负责论文的撰写;黄凯、汪超和陈建兵参与材料表征的技术指导;王远峰参与材料制备的技术指导;吴国忠负责研究思路设计、实验方案制定及论文整体修改。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

- Hicks J, Kaushal V, Jamali K. A comparative review of trenchless cured-in-place pipe (CIPP) with spray applied pipe lining (SAPL) renewal methods for pipelines[J]. *Frontiers in Water*, 2022, **4**: 904821. DOI: 10.3389/frwa.2022.904821.
- Ji H W, Koo D D, Kang J H. Short- and long-term structural characterization of cured-in-place pipe liner with reinforced glass fiber material[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(6): 2073. DOI: 10.3390/ijerph17062073.
- Dowbysz A, Samsonowicz M, Kukfisz B, *et al.* Recent developments of nano flame retardants for unsaturated polyester resin[J]. *Materials*, 2024, **17**(4): 852. DOI: 10.3390/ma17040852.
- An W L, Wang X L, Liu X H, *et al.* Chemical recovery of thermosetting unsaturated polyester resins[J]. *Green Chemistry*, 2022, **24**(2): 701-712. DOI: 10.1039/d1gc03724b.
- Chu F K, Qiu S L, Zhang S H, *et al.* Exploration on structural rules of highly efficient flame retardant unsaturated polyester resins[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, **608**: 142-157. DOI: 10.1016/j.jcis.2021.09.124.
- Howell J M, Matthews E, Matthews J, *et al.* Styrene emissions in steam-cured CIPP: a review and comparison of multiple studies[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2022, **13**: 04021071. DOI: 10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000620.
- Naik T P, Singh I, Sharma A K. Processing of polymer matrix composites using microwave energy: a review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, **156**: 106870. DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.106870.
- 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.
- Mgbemena C O, Li D N, Lin M F, *et al.* Accelerated microwave curing of fibre-reinforced thermoset polymer composites for structural applications: a review of scientific challenges[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, **115**: 88-103. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.09.012.
- Mo Q F, Huang Y F, Ma L Y, *et al.* Study on microwave curing of unsaturated polyester resin and its composites containing calcium carbonate[J]. *Polymers*, 2022, **14**(13): 2598. DOI: 10.3390/polym14132598.
- Rahmat A R, Heatley F, Day R J. Comparison of microwave and thermal cure of unsaturated polyester resin[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2003, **32**(6): 257-264. DOI: 10.1179/146580103225002740.
- Salemane M G, Baruwa A D, Makhatha M E. Investigating the chemical stability and thermal functionality of DMPT promoted TiO₂ nanoparticles on unsaturated polyester resin[J]. *Results in Engineering*, 2024, **22**: 102116. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102116.
- Hu D B, Maitlo I, Nie J, *et al.* Understanding double bond conversion using laser con-focus RAMAN spectroscopy[J]. *Journal of Photochemistry and*

- Photobiology A: Chemistry, 2016, **325**: 83-87. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2016.03.033.
- 14 Hussein M A, Tay G S, Rozman H D. Real-time cure monitoring of unsaturated polyester resin from ultra-violet curing[J]. Journal of Research Updates in Polymer Science, 2012, **1**(1): 32-42. DOI: 10.6000/1929-5995.2012.01.01.5.
- 15 Hou Y B, Hu W Z, Gui Z, *et al.* Effect of cuprous oxide with different sizes on thermal and combustion behaviors of unsaturated polyester resin[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **334**: 39-48. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.03.051.