



微波诱导马来酸酐固相接枝聚丙烯的 制备及性能研究

祝 萌, 彭文俊, 张先明

(1. 浙江理工大学纺织纤维材料与加工技术国家地方联合工程实验室, 杭州 310018;

2. 浙江省现代纺织技术创新中心, 浙江绍兴 312030)

摘 要: 聚丙烯(PP)作为通用塑料存在常规产品过剩与功能化产品严重短缺的问题,对 PP 进行接枝改性是实现其高性能化的重要方法。利用微波诱导固相接枝的方法,将极性单体马来酸酐(MAH)接枝在 PP 表面,通过添加第二单体苯乙烯(St)来提高接枝率,并对制备的马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH)进行特性表征。结果表明:红外谱图显示 PP 成功接枝了 MAH 和 St,添加 St 后最大接枝率可高达 1.4%;改性后的接枝产物熔点几乎不变,而结晶温度有所提高,达到 110.8 °C;熔体流动速率均低于 30 g/10min,较 PP(38.7105 g/10min)下降明显,复数黏度更是从 53.828 Pa·s 提升至 419.46 Pa·s;PP 与水接触角从 125.4°最多降至 100°,PP-g-MAH 的极性提高,亲水性能改善。该研究利用微波诱导 PP 固相接枝 MAH,方法简单高效,在获得高接枝率的同时避免了分子量下降,改善了材料的性能,具有较为广阔的应用前景。

关键词: 微波诱导;聚丙烯;马来酸酐;接枝率;黏度

中图分类号: TQ325.14

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2024)11-0787-08

引文格式: 祝萌, 彭文俊, 张先明. 微波诱导马来酸酐固相接枝聚丙烯的制备及性能研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(6): 787-794.

Reference Format: ZHU Meng, PENG Wenjun, ZHANG Xianming. A study on the preparation and properties of microwave-induced solid-phase grafting of maleic anhydride onto polypropylene[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2024, 51(6): 787-794.

A study on the preparation and properties of microwave-induced solid-phase grafting of maleic anhydride onto polypropylene

ZHU Meng, PENG Wenjun, ZHANG Xianming

(1. National Engineering Lab for Textile Fiber Materials and Processing Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Provincial Innovation Center of Advanced Textile Technology, Shaoxing 312030, China)

Abstract: Polypropylene (PP) as a general-purpose plastic faces a surplus of conventional products and a serious shortage of functionalized products, and grafting modification of PP is an important method to achieve its high performance. In this paper, the polar monomer maleic anhydride (MAH) was grafted on the surface of PP by using microwave-induced solid-phase grafting, and the grafting rate was improved by adding the second monomer styrene (St), and the prepared maleic anhydride-grafted polypropylene (PP-g-MAH) was characterized. As indicated by the results the infrared spectra showed that PP was successfully grafted with MAH and St, and the maximum grafting rate could be as high as 1.4% after the addition of St. The melting points of the modified grafted products were almost unchanged, while the crystallization temperatures were increased to 110.8 °C; the melt flow rates were all lower than 30 g/10min, which was a significant decrease compared with that of PP (38.7105 g/10min), and the complex viscosities were even improved from 53.828 Pa·s to 419.46 Pa·s; the contact angle between PP and water decreased from

收稿日期: 2024-03-05 网络出版日期: 2024-05-08

基金项目: 浙江省“尖兵”研发攻关计划项目(2023C01095)

作者简介: 祝 萌(1999—),男,安徽六安人,硕士研究生,主要从事聚合物改性方面的研究。

通信作者: 张先明, E-mail: zhangxm@zstu.edu.cn

125.4° to 100° at most, and the polarity of PP-g-MAH was increased with improved hydrophilicity. This study utilized microwave-induced solid-phase grafting of MAH on PP in a simple and efficient way, avoiding the molecular weight decrease while obtaining a high grafting rate and improving the properties of the material, so it has a broader application prospect.

Key words: microwave induction; polypropylene; maleic anhydride; grafting rate; viscosity

0 引言

聚丙烯(PP)是最常见的塑料之一,具有耐热性好、可加工性强、价格相对低廉等优点。PP与极性材料或者无机增强填充材料的相容性较差^[1],为了扩宽PP的应用领域,需在PP分子链上接枝极性单体进行化学改性,其中MAH是常用的接枝单体。接枝改性方法包括熔融接枝、溶液接枝和固相接枝等^[2-3]。熔融接枝制备的产物接枝率较低,降解严重、分子量下降明显;溶液接枝需要大量的有机溶剂,后处理困难,对环境污染严重^[4]。固相接枝反应温度一般低于聚合物熔点^[5],不产生熔融现象,且不涉及大范围有机溶剂的使用,后续处理更为简单,对环境的污染几乎可以忽略。固相接枝的方法相较于熔融接枝和溶液接枝,有效地避免了上述问题。

与传统的加热方法相比,微波诱导在固相接枝反应中可以提供更高的加热速率,从而缩短反应时间,同时无需加入引发剂,大大减少了副反应的发生^[6-8]。因为材料自身的极性不同,吸收微波转化为热能的能力也具有很大差异。MAH的极性很强,PP与MAH反应后能有效受热产生自由基,诱发接枝反应。Wang等^[5]利用微波诱导成功地制备了不含引发剂和MAH残留物的PP-g-MAH,该材料的刚性、韧性和耐热性较纯PP均有所提高,但接枝率有待提高。通过引入St在聚合物接枝改性中可以提高接枝率,Tian等^[9]用熔融接枝的方法在PP接枝MAH的过程中,添加的St作为共聚单体,提高了接枝率,增加了PP的相容性、拉伸性能和热稳定性。St具有苯环结构,对于稳定PP大分子自由基有着促进作用,PP会优先接枝St,再接枝MAH,从而获得较高接枝率^[10]。

本文利用微波诱导,在不添加引发剂的情况下,将MAH以固相接枝的方式接枝到PP表面,并添加第二单体St。分析了微波功率、反应时间和MAH含量等因素对PP-g-MAH的接枝率、结晶性能、熔体流动速率、复数黏度、力学性能和亲水性能的影响,以期为高性能聚合物接枝改性提供理论支持和技术指导。

1 实验部分

1.1 原料与试剂

PP(熔体质量流动速率38.7105 g/10min)来源于中国石化镇海炼化公司,MAH、St、酚酞和异丙醇购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司,丙酮购自国药集团化学试剂有限公司,二甲苯溶液购自无锡市展望化工试剂有限公司,KOH购自麦克林生化科技股份有限公司。以上生化试剂均为分析纯。HCl-异丙醇、KOH-异丙醇标准溶液实验室自制。

1.2 PP-g-MAH, PP-g-(St-co-MAH)的制备及纯化

取15.0 g块状MAH,研磨成粉末,完全溶解在丙酮溶液中,将溶液倒入充满PP粉料的三口烧瓶中,利用旋转蒸发器将溶液蒸干,样品在60℃真空烘箱中干燥12 h。干燥后的样品转移到充满氮气的耐高温高压反应瓶中,在微波炉中反应3 min后,取出样品,浸泡在丙酮溶液中超声洗涤3次,洗去未反应的MAH,将样品干燥。为提高MAH在PP上的接枝率,添加第二单体St($m(\text{St}):m(\text{MAH})=1:1$),制备了PP-g-(St-co-MAH)。取上述接枝改性后的样品2.0 g溶于50 mL二甲苯溶液中,在磁力搅拌器上将溶液加热到140℃,样品完全溶解后,继续向溶液里加入100 mL丙酮,倒入过程中不停搅拌。PP-g-MAH样品由于不溶于丙酮溶液而析出大量白色絮状沉淀,对絮状物继续用丙酮洗涤抽滤,干燥得到最终PP-g-MAH备用。

1.3 酸碱滴定法测算接枝率

取0.5 g样品溶于50 mL二甲苯溶液中,在磁力搅拌器上加热至样品完全溶解,用碱式滴定管滴加过量的KOH-异丙醇溶液,确保碱过量,消耗完样品中的酸性基团,滴加过程中轻微摇晃待测样品溶液,滴加1~2滴酚酞试剂,溶液呈现为紫红色,再缓慢滴加HCl-异丙醇溶液,观察溶液颜色突变为无色,且保持30 s不变色。记录消耗的酸碱溶液体积,计算接枝率,具体方法见参考文献[11]。式(1)是接枝率的计算公式:

$$G_{\text{MAH}}/\% = \frac{98.06 \times (V_1 C_1 - V_2 C_2) \times 100}{2000m} \quad (1)$$

其中: G_{MAH} 为接枝率,%;98.06为MAH的分子

量; V_1 是滴定过程中消耗 KOH-异丙醇溶液的体积, mL; C_1 是滴定过程中 KOH-异丙醇溶液的浓度, mol/L; V_2 是滴定过程中消耗的 HCL-异丙醇溶液的体积, mL; C_2 是滴定过程中 HCL-异丙醇溶液的浓度, mol/L; m 为待滴定样品质量, g。

1.4 测试与表征

1.4.1 红外光谱分析

分别称取 PP、PP-g-MAH 和 PP-g-(St-co-MAH)样品 0.2 g, 在 180 °C、2 MPa 条件下热压 1 min 成膜, 使用傅里叶红外光谱仪对样品进行表征, 扫描范围 4000~500 cm^{-1} 。

1.4.2 差示扫描量热测试

采用 Mettler Toledo DSC 分析仪对接枝前后的样品进行量热分析。称取 5~6 mg 样品, 在 N_2 流量 50 mL/min 条件下, 以 10 °C/min 的升温速度将样品从 50 °C 升温至 200 °C, 恒温 5 min 以消除热历史, 再以相同的降温速度从 200 °C 降至 50 °C, 记录降温过程中结晶温度的变化, 以 10 °C/min 的速度从 50 °C 升温至 200 °C, 记录样品非等温结晶后的熔融行为。

1.4.3 X 射线衍射分析

采用 X 射线衍射仪, 使用 Cu 靶作为光管靶材, X 射线波长 0.1541 nm, 工作电压和电流分别是 40 kV 和 40 mA, 扫描范围 5°~28°。

1.4.4 熔体流动指数测试

将制备的样品在 230 °C、2.16 kg 载荷下测试, 使用 T400C 熔融指数仪对样品的熔体流动速率进行测试。

1.4.5 流变性能测试

使用旋转流变仪进行测试, 采用振荡模式, 平行板直径 25 mm, 板间距 0.5 mm, 频率扫描范围在 0.1~100 rad/s, 测试温度 180 °C, 应变 1%。

1.4.6 接触角测试

使用光学接触角测量仪, 将制备的样品用热压机 180 °C 热压成薄膜, 选取样品表面光洁的部分, 用载玻片压紧, 测量范围 1°~180°, 采用座滴法, 接触液为去离子水。通过视频捕获装置和分析软件计算静态接触角, 对每个样品测量 3~5 次, 取平均值。

1.4.7 力学性能测试

使用微型注塑机将样品制成标准样条, 参考 GB/T 1040.1—2006《塑料 拉伸性能的测定 第 1 部分: 总则》, 并使用万能试验机进行拉伸测试。伸速度为 10 mm/min, 试验温度为常温, 每组拉伸 5 根 PP-g-MAH 和 PP 样条。

2 结果与讨论

2.1 PP-g-MAH 及 PP-g-(St-co-MAH) 的红外谱图分析

图 1 为 PP、PP+MAH 共混物、PP-g-MAH 和 PP-g-(St-co-MAH) 红外光谱图以及微波反应前后的样品对照图。图 1(a) 显示: PP+MAH 共混物在 1590 cm^{-1} 处有双键的吸收峰, 接枝改性后的 PP-g-MAH 和 PP-g-(St-co-MAH) 在 1750~1780 cm^{-1} 处出现了 MAH 的羰基振动吸收峰, 同时 MAH 中双键特征吸收峰消失, 表明 MAH 成功接枝在 PP 链段上。丙酮的多次超声洗涤可充分除去未参加接枝反应的 MAH 单体, PP-g-(St-co-MAH) 在 705 cm^{-1} 处出现了苯环对应的特征吸收峰, 表明 St 也成功地接枝在 PP 上面, 获得了产物 PP-g-(St-co-MAH), PP-g-(St-co-MAH) 在 1780 cm^{-1} 的峰强度更大, 说明 St 作为共单体提高了 PP-g-MAH 的接枝率。图 1(b) 中 PP 和 MAH 混合粉料的颜色在反应前为纯白色粉末, 经过微波诱导接枝反应后, 颜色仅有轻微发黄, 并且不发生 PP 的熔融, 微波诱导固相接枝得到的 PP-g-MAH 在保证增加 PP 极性的同时, 外观改变并不明显, 与工业级产品颜色相同, 有较为广泛的应用前景。

2.2 微波功率、反应时间以及单体比例对产物接枝率的影响

图 2 是不同微波功率下反应的红外温度图。3 种单体分别在 700 W 微波功率下加热 3 min, 相较于 PP 和 St, MAH 的吸热效果最好, 能在较短时间内升至较高温度, 这表明 MAH 作为极性单体对微波的敏感程度最高(见 2(a))。PP 和 MAH 混合物对应不同微波功率下反应 3 min 时测得的红外温度图的结果显示: 微波功率越高, 中心温度越高, MAH 作为极性分子吸收的热量越多, 但在最高微波功率下, 反应的温度也低于 PP 熔点(见 2(b)), 不会造成 PP 粉料的熔融^[12]。

利用酸碱滴定法和红外内标峰面积比值法测算不同反应条件下的接枝率, 把不同含量的 MAH 和一定量的 PP 在 Brabender 转矩流变仪中共混, 产物用平板硫化仪在 180 °C 热压成膜, 进行红外光谱定量分析, 结果如图 3 所示。图 3(a) 选取了 PP-g-MAH 羰基特征峰(1780 cm^{-1}) 和 PP 特征峰(2722 cm^{-1}) 的峰面积进行积分并取比值, 获得共混物中接枝率与峰面积比值的对应关系, 由标准曲

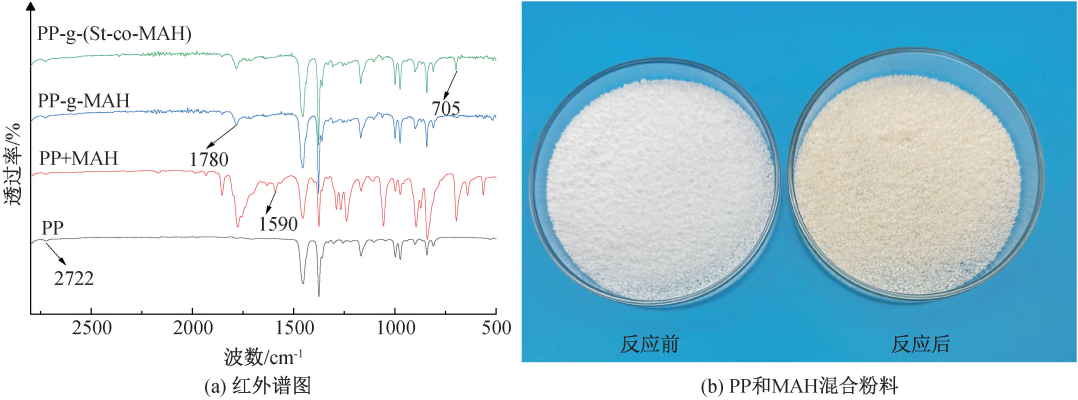


图 1 样品红外谱图以及反应前后照片

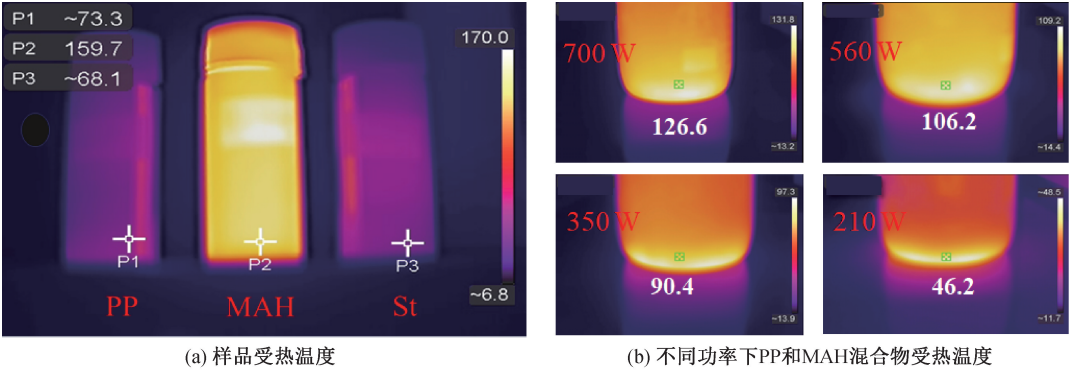


图 2 不同条件下样品红外温度图

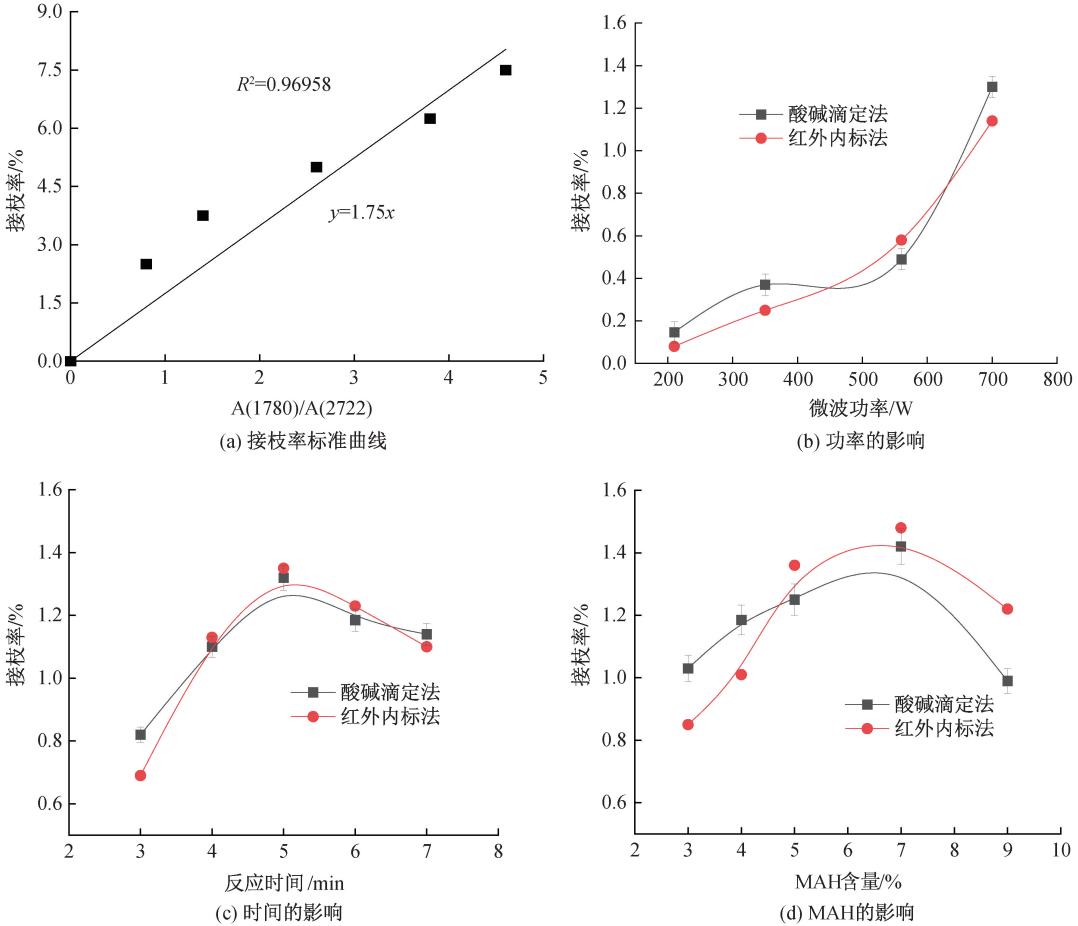


图 3 PP-g-MAH 中 MAH 含量的标准曲线和不同反应条件下的接枝率曲线

线得到不同反应条件下的 PP-g-MAH 接枝率。由图 3(b)—(d)可知:微波功率对接枝率的影响显著,接枝率随着功率的增大而提高,功率越高,反应温度越高,在 PP 主链上能产生更多的自由基,增加与 MAH 反应的有效接触部分,从而提高接枝率;随着反应时间的延长以及 MAH 含量的提高,PP-g-MAH 的接枝率呈上升趋势,当反应时间超过 5 min、MAH 含量超过 7%后,接枝率不升反降,这是因为随着时间的延长,MAH 在高温环境下发生部分气化,参与接枝部分的比例减少。因此,在微波的最高功率 700 W 下,添加 7%的 MAH 单体反应 5 min 后获得了最高接枝率,约 1.4%,相较于 Wang 等^[5]报道的最大接枝率 1%提高了 40%。

2.3 PP-g-MAH 的热性能和结晶性能分析

图 4 是 PP、PP-g-MAH 以及 PP-g-(St-co-MAH)的热性能变化谱图。图 4 显示:在消除材料

热历史后,以 10 ℃/min 的降温 and 升温速率进行 DSC 测试,PP 的结晶温度和熔点分别为 107.11 ℃和 165.37 ℃;样品在进行接枝改性之后,结晶温度有所提高,熔点变化不明显。通过微波诱导将 MAH 和 St 接枝到 PP 上面的方法,相较于传统的熔融接枝和溶液接枝,PP 不会发生降解,因此分子量也不会下降^[13]。接枝 MAH 之后,PP 的极性增强,分子间作用力也有所增加,PP 与 MAH 发生分子链之间的缠结,降低了 PP 的规整性,使结晶变得更加困难^[14-16]。St 作为共单体参与接枝反应时,St 具有的苯环结构,稳定了 PP 大分子自由基,并抑制 PP 分子链断裂,因此 PP-g-(St-co-MAH)具有最高的结晶温度。从表 1 接枝前后样品的结晶参数可知,PP-g-MAH 的结晶度较 PP 有所下降,当 St 引入之后,St 上的苯环结构增加了链段规整性,改善了结晶情况。

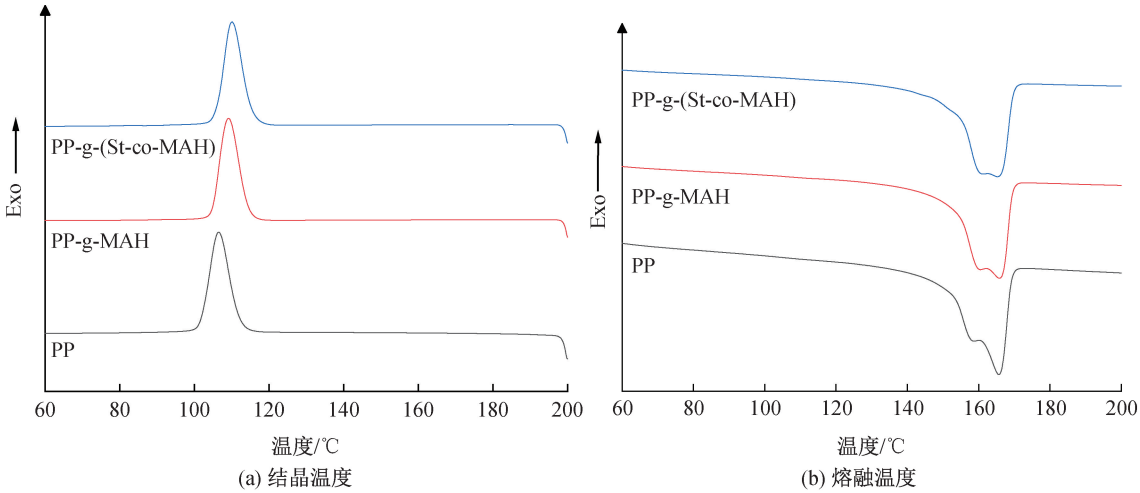


图 4 PP、PP-g-MAH、PP-g-(St-co-MAH)的 DSC 图谱

表 1 接枝前后聚丙烯结晶参数

样品	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$X_c/^\circ\text{C}$
PP	165.37	107.11	31.97
PP-g-MAH	165.42	109.79	29.96
PP-g-(St-co-MAH)	165.11	110.80	31.94

图 5 为不同反应时间和 MAH 含量的 PP-g-MAH 产物的 XRD 谱图。图 5 显示:PP 在 2θ 为 14.1° 、 17° 、 18.52° 和 22° 处有 4 个衍射峰,分别对应 α 晶面的 (110) 晶面、(040) 晶面、(130) 晶面、(111) 晶面;而 PP-g-MAH 均在 $2\theta=16^\circ$ 出现了衍射峰,对应 PP 中 β 晶型的 (300) 晶面^[14,17]。 β 晶型 PP 被认为具有较高的热稳定性,结合前面的 DSC 谱图, β 晶型提高了结晶温度, β 晶型 PP 结晶形态更为紧密,耐热性能更好、结晶速度更快、具有更快的成型速度,提升了效率,拓宽了 PP-g-MAH 的应用

场景^[14]。

2.4 PP-g-MAH 的流变性能分析

图 6 是 PP-g-MAH 样品熔体流动速率变化图。图 6 表明:PP-g-MAH 的熔体流动速率随着反应时间和 MAH 含量的增加逐渐下降,PP 原料的熔体流动速率是 38.7105 g/10 min,其原因可能是 PP 在接枝的过程中发生了分子链的缠结,生成了含有长支链的 PP^[15],并且 MAH 含量越大,熔体流动速率下降幅度越大。PP 的熔体流动速率与其分子量相关,熔体流动速率越小,相对分子量越大,说明添加 MAH 之后,PP-g-MAH 的分子量有着不同程度的提高;采用熔融挤出得到的 PP-g-MAH 发生降解,分子量会下降,通过微波诱导固相接枝的方法不仅避免了 PP 的降解,在一定程度上增加了其分子量^[18]。

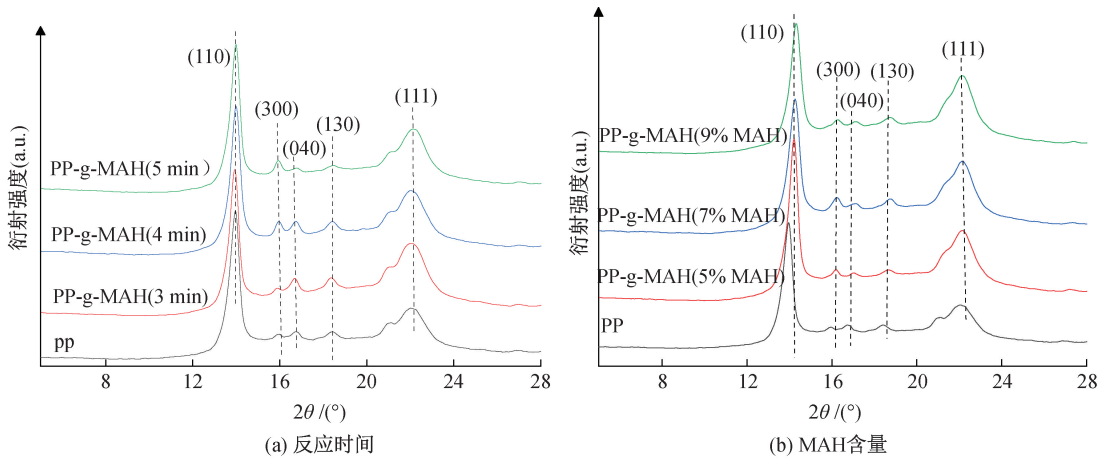


图 5 不同反应条件下 XRD 图谱

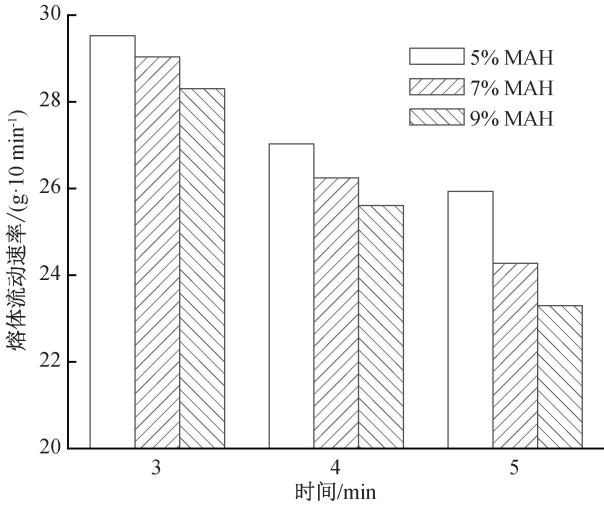


图 6 不同反应条件下的 PP-g-MAH 熔体流动速率图

图 7 为反应时间和 MAH 含量对 PP-g-MAH 的复数黏度的影响。图 7 显示,在高频区或者低频区,PP 的复数黏度都低于改性后的 PP,黏度从侧面反映 PP 的分子量变化,PP 的复数黏度变化趋势证明 PP-g-MAH 的确获得了分子量的增长,其原因可能是 MAH 在接枝的过程中促进 PP 产生自由基,并使其发生了支化,生成了含有长支链的 PP。图 7(a)中黏度随着反应时间的延长逐渐增加,反应时间超过 5 min 后,黏度又会有所下降,随着微波反应时间的增加,部分 PP 会发生分子链断裂,有熔融降解的趋势。图 7(b)中 PP-g-MAH 的黏度也是随着 MAH 比例的增加呈现先增长后下降的趋势,当微波功率 700 W,反应时间 5 min,MAH 含量 7% 时,PP-g-MAH 分子量最大,与最大接枝率对应的反应条件吻合。

2.5 PP-g-MAH 的力学性能和亲水性能分析

图 8 是不同反应时间和 MAH 含量下的 PP 和 PP-g-MAH 的应力-应变曲线。由图 8 可知:改性后的 PP-g-MAH 的力学性能较 PP 获得了不同程度的提高,当 MAH 含量为 7% 时,PP-g-MAH 强度较

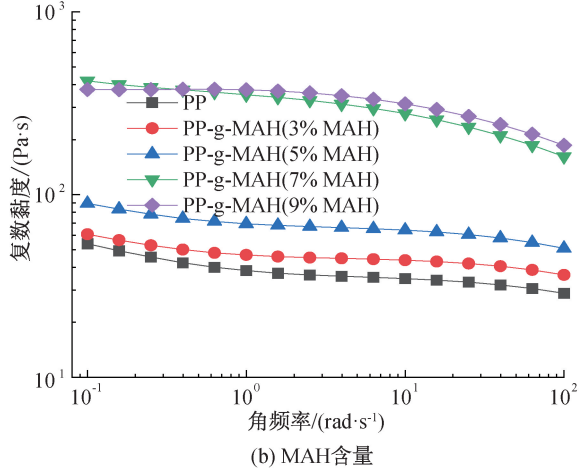
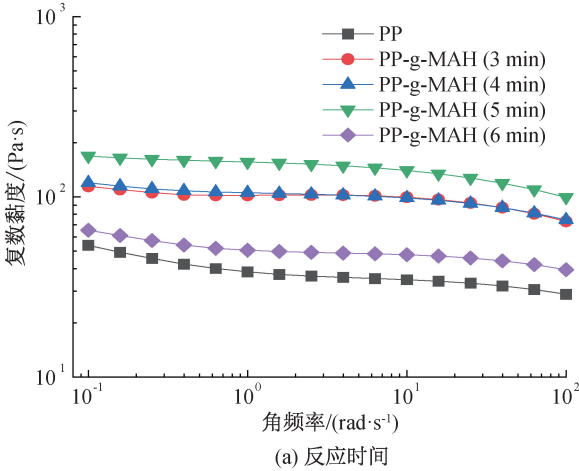


图 7 不同反应条件下的复数黏度曲线

PP 提高了约 20 MPa,断裂伸长率提升了 3 倍,延长反应时间和增加 MAH 含量均可提高 PP 的断裂伸长率,添加 MAH 含量对拉伸强度和断裂伸长率的影响比反应时间更为明显,其原因是 MAH 的含量越多,与 PP 分子链的缠结部分更多,缠结得更为紧密,产生了支化结构,交联部分增多,支化和交联会引起分子量的增加^[19-20],这也是 PP-g-MAH 力学性能得到提升的主要原因。

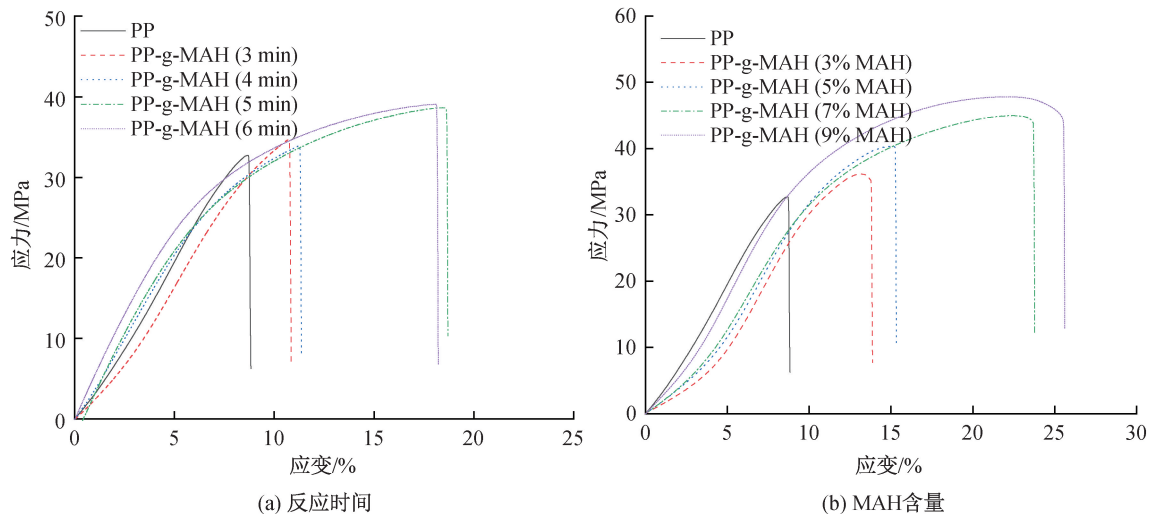


图 8 不同反应条件下 PP 和 PP-g-MAH 的应力-应变曲线

图 9 是 PP 薄膜在微波诱导接枝前后的表面水接触角测试结果。图 9 显示:PP 薄膜的极性较差,结构单一,在主链上没有其他的功能性官能团,与水的亲和性较差,疏水性较强,表面水接触角均值为 125.4° ;将 MAH 接枝到 PP 表面之后,所有 PP-g-MAH 的表面水接触角较 PP 薄膜均有不同程度的下降,并随着 MAH 含量的增加,下降的程度越来越明显;MAH 含量为 9% 时,亲水性最好,表明 PP-g-MAH 极性的增强是由于在 PP 表面接枝了 MAH。极性基团被引入到 PP 分子链上,薄膜表面的亲水性明显提升,提高了 PP 薄膜表面润湿性,增强了膜的附着力^[21-22]。

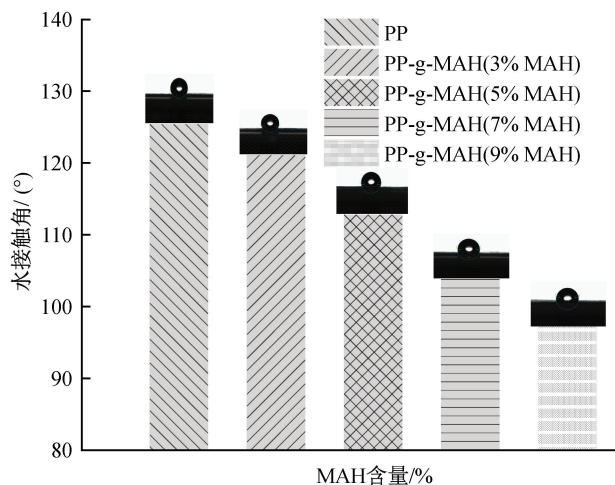


图 9 不同 MAH 含量的 PP 薄膜和 PP-g-MAH 薄膜的表面水接触角图像

3 结 论

本文通过微波诱导,在 PP 表面固相接枝了 MAH,分析了微波功率、反应时间以及 MAH 含量对

PP-g-MAH 接枝率的影响,并对 PP-g-MAH 在不同条件下的各项性能变化进行测定,主要结论如下:

a) St 作为共单体引入到 PP-g-MAH 体系中,一方面提高了接枝率,最高接枝率达到 1.4%,相比于已报道微波固相接枝文献提升了 40%;另一方面还提高了 PP-g-MAH 的结晶温度和热稳定性。

b) 微波诱导固相接枝的方法使得改性后的 PP 分子量不降反升,赋予了改性材料优异的强度和韧性,同时极性的增加改善了亲水性能。

本文以简单高效的方法获得了高性能改性聚合物,适用于极性单体和非极性材料间的固相接枝,有望改善 PP 与极性材料间的相容性和黏接性,具有广阔的应用前景,为高性能聚合物接枝改性提供理论支持和技术指导。

参考文献:

- [1] 陈龙, 李增俊, 潘丹. 聚丙烯纤维产业现状及发展思考 [J]. 产业用纺织品, 2019, 37(7): 12-17.
- [2] Kučera F, Petruš J, Bálková R, et al. Solid-state grafting of maleic anhydride onto polypropylene: The influence of morphology of polypropylene on heterogeneous reaction [J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60(5): 1076-1082.
- [3] 张雅峰, 陈安华, 王恒鑫, 等. 聚丙烯的绿色环保固相接枝法研究进展 [J]. 塑料工业, 2022, 50(1): 6-9.
- [4] Tariq A, Ahmad N M, Abbas M A, et al. Reactive extrusion of maleic-anhydride-grafted polypropylene by torque rheometer and its application as compatibilizer [J]. Polymers, 2021, 13(4): 495-512.
- [5] Wang S, Zhang X, Jiang C, et al. Polymer solid-phase grafting at temperature higher than the polymer melting point through selective heating [J]. Macromolecules,

- 2019, 52(9): 3222-3230.
- [6] Qiu Z, Li X, Wu H, et al. A new method for preparing anhydride grafted polypropylene with high grafting ratio by combining microwave reaction and reactive extrusion [J]. Journal of Polymer Research, 2023, 30(8): 319-329.
- [7] Hu Y, Feng D, Xie Y, et al. Microwave-assisted confining flame-retardant polypropylene in carbon nanotube conductive networks for improved electromagnetic interference shielding and flame retardation [J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(8): 2100024-2100039.
- [8] 蒋海斌, 张晓红, 刘文璐, 等. 微波辅助聚合物循环利用研究进展 [J]. 高分子学报, 2022, 53(9): 1032-1040.
- [9] Tian Z, Pan L, Pan Q. Polypropylene grafted with maleic anhydride and styrene as a compatibilizer for biodegradable poly(propylene carbonate)/polypropylene [J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2019, 14(10): 1-9.
- [10] Coustet M E, Cortizo M S. Functionalization of styrenic polymer through acylation and grafting under microwave energy [J]. Polymer Journal, 2011, 43(3): 265-271.
- [11] 王盼盼, 韩龙, 王莉, 等. 高接枝率聚丙烯接枝马来酸酐的制备 [J]. 塑料工业, 2018, 46(9): 35-38.
- [12] 王崧合. 选择性加热固相接枝法及其在聚丙烯功能化方面的应用 [D]. 北京: 北京化工大学, 2020: 124-235.
- [13] Liu J, Liu J. Characterization of maleic anhydride/styrene melt-grafted random copolypropylene and its impact on crystallization and mechanical properties of isotactic polypropylene [J]. Polymer Bulletin, 2018, 76(9): 4369-4387.
- [14] Hu C, Li C, Feng L, et al. Modification of the crystallization behavior of isotactic polypropylene by grafting styrene segments [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61(17): 5876-5884.
- [15] Navratilova J, Gajzlerova L, Kovar L, et al. Long-chain branched polypropylene: Crystallization under high pressure and polymorphic composition [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 143(5): 3377-3383.
- [16] Wu M H, Wang C C, Chen C Y. Chemical modification of atactic polypropylene and its applications as a crystallinity additive and compatibility agent [J]. Polymer, 2020, 194: 122386-122395.
- [17] Sowinski P, Piorkowska E, Boyer S A E, et al. On the structure and nucleation mechanism in nucleated isotactic polypropylene crystallized under high pressure [J]. Polymer, 2018, 151: 179-186.
- [18] Seo J, Kearney L T, Datta S, et al. Tailoring compatibilization potential of maleic anhydride-grafted polypropylene by sequential rheochemical processing of polypropylene and polyamide 66 blends [J]. Polymer Engineering & Science, 2022, 62(8): 2419-2434.
- [19] Uematsu H, Suzuki Y, Iemoto Y, et al. Effect of maleic anhydride-grafted polypropylene on the flow orientation of short glass fiber in molten polypropylene and on tensile properties of composites [J]. Advances in Polymer Technology, 2017, 37(6): 1755-1763.
- [20] Hasanpour M, Razavi Aghjeh M K, Mehrabi Mazidi M, et al. Effect of morphology alteration on mechanical properties and fracture toughness of polypropylene/polyamide 6/ethylene polypropylene diene monomer graft maleic anhydride (PP/PA6/EPDM-g-MA) reactive ternary blends [J]. Polymer Bulletin, 2019, 77(7): 3767-3794.
- [21] Alaburdait? R, Krylova V. Polypropylene film surface modification for improving its hydrophilicity for innovative applications [J]. Polymer Degradation and Stability, 2023, 211: 110334.
- [22] Jiang W X, Feng L F, Gu X P, et al. Microwave-induced grafting of maleic anhydride onto the surface of a polypropylene film for high adhesion to polyamide 6 [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(48): 17556-17563.

(责任编辑: 廖乾生)