

文章编号: 1008-9357(2026)03-0246-07

DOI: 10.14133/j.cnki.1008-9357.20260308002

基于氯化聚丙烯的傅-克反应制备高熔点、 高结晶度的改性 PP-g-MAH

赵琳琳¹, 徐世亮¹, 孙屿璠¹, 刘 恒¹, 侯建双², 许丽丽³, 张春雨¹, 张学全¹

(1. 青岛科技大学高分子科学与工程学院, 橡塑材料与工程教育部重点实验室/山东省橡塑材料与工程重点实验室, 先进橡胶材料教育部重点实验室, 山东青岛 266042; 2. 日照庆强塑料制品有限公司, 山东日照 276512; 3. 日照市岚山区科学技术局, 山东日照 276800)

摘 要: 本研究提出了一种高结晶度、高接枝率的马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH)制备新策略。首先以高结晶度、低氯化度的氯化聚丙烯(CPP)为原料,利用碳氯键的反应活性,通过经典的傅-克(Friedel-Crafts)反应将甲苯接枝到聚丙烯主链上制备芳基化聚丙烯。然后,利用苄基自由基易于形成的特点,在较温和条件下引发马来酸酐(MAH)与苯乙烯(St)共聚,成功制备出MAH接枝率高达10.5%的高熔点、高结晶度的改性PP-g-MAH(熔点为152.4℃、结晶度为30.67%),解决了熔融法制备PP-g-MAH所带来的接枝率低和聚丙烯分子链规整性易被破坏的问题,为聚丙烯的高性能化应用提供了可能性。

关键词: 聚丙烯; 氯化聚丙烯; 傅-克反应; 接枝改性; 马来酸酐

中图分类号: TQ325.14

文献标志码: A

Preparation of Modified PP-g-MAH with High Melting Point and High Crystallinity Based on Friedel-Crafts Reaction of Chlorinated Polypropylene

ZHAO Linlin¹, XU Shiliang¹, SUN Yufan¹, LIU Heng¹, HOU Jianshuang², XU Lili³, ZHANG Chunyu¹, ZHANG Xuequan¹
(1. Key Lab of Rubber-Plastics, Ministry of Education/Shandong Provincial Key Lab of Rubber and Plastics, Key Laboratory of Advanced Rubber Material, Ministry of Education, School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, Shandong, China; 2. Rizhao Qingqiang Plastics Production Co. Ltd., Rizhao 276512, Shandong, China; 3. Science and Technology Bureau, Lanshan District, Rizhao 276800, Shandong, China)

Abstract: A novel strategy for preparing maleic anhydride-grafted polypropylene (PP-g-MAH) with high crystallinity and

收稿日期: 2026-03-08

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME154); 山东省重点研发计划项目(科技型中小企业创新能力提升工程项目)(2025TSGCCZZB0790)

作者简介: 赵琳琳(2001—), 女, 山东人, 硕士, 主要研究方向为聚丙烯改性。E-mail: 1265371115@qq.com

通信联系人: 许丽丽, E-mail: m13963066818@163.com; 张春雨, E-mail: cyzhang@qust.edu.cn

引用格式: 赵琳琳, 徐世亮, 孙屿璠, 刘 恒, 侯建双, 许丽丽, 张春雨, 张学全. 基于氯化聚丙烯的傅-克反应制备高熔点、高结晶度的改性 PP-g-MAH[J]. 功能高分子学报, 2026, 39(3): 246-252.

Citation: ZHAO Linlin, XU Shiliang, SUN Yufan, LIU Heng, HOU Jianshuang, XU Lili, ZHANG Chunyu, ZHANG Xuequan. Preparation of Modified PP-g-MAH with High Melting Point and High Crystallinity Based on Friedel-Crafts Reaction of Chlorinated Polypropylene [J]. Journal of Functional Polymers, 2026, 39(3): 246-252.

high grafting ratio was proposed. Using chlorinated polypropylene (CPP) with high crystallinity and low chlorination degree as the starting material, the reactive carbon-chlorine bonds were exploited to graft toluene onto the polypropylene backbone via the classic Friedel-Crafts reaction, yielding arylated polypropylene. Leveraging the facile formation of benzylic radicals, the copolymerization of maleic anhydride (MAH) and styrene (St) was subsequently initiated under mild conditions, successfully affording modified PP-g-MAH with a maximum MAH grafting ratio of up to 10.5%, a high melting point (152.4 °C) and a high crystallinity (30.67%). This approach effectively addresses the issues of low grafting efficiency and compromised chain regularity associated with conventional melt-grafting methods, thereby paving the way for high-performance applications of polypropylene.

Key words: polypropylene; chlorinated polypropylene; Friedel-Crafts reaction; graft modification; maleic anhydride

聚丙烯(PP)作为一种重要的热塑性塑料,因其优异的力学性能、耐化学品性能以及低廉的生产成本,在塑料工业中占据重要地位^[1,2]。然而,PP为非极性聚合物,表面能低、亲水性差、与极性聚合物相容性差,这些限制了其在某些应用领域的拓展^[3]。为了解决这一难题,化学修饰成为一种有效的方法^[4]。马来酸酐(MAH)接枝改性是聚丙烯改性的重要方法之一,MAH可与醇类或胺类化合物反应进一步酯化或酰胺化,从而改善PP与其他极性聚合物(如尼龙、聚酯)的相容性^[5,6]。当前市售的马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH)产品中,MAH接枝率(<1.5%)普遍较低^[7]。低接枝率限制了PP-g-MAH的增容效果,熔融接枝工艺还破坏了PP分子链的规整性,导致产物结晶度显著降低、熔点下降,进而影响了材料的力学性能和耐热性能^[8]。与传统的四氯化碳溶剂氯化工艺不同,目前基于环保要求的水相氯化工艺在氯化过程中受结晶性聚丙烯溶解度的限制,氯化反应优先发生在聚丙烯的非晶部分或分子链的无规链节处^[9]。在低氯化度的氯化聚丙烯(CPP)制备过程中,氯化反应主要发生在非晶区,对结晶部分的破坏有限,因此可以在保持PP规整性和结晶性的前提下引入活性官能团。CPP中氯原子不仅提高了聚丙烯的极性,而且不稳定的C-Cl键具有较强的反应活性,可为聚丙烯进一步官能化提供活性位点。许多研究者以CPP作为起始物实现了聚丙烯的官能化、长链支化,如马向东等^[10]和赵兴顺等^[11]利用溶液接枝法制备了马来酸酐接枝氯化聚丙烯。Li等^[12]与Haloi等^[13]以氯化聚丙烯分子链上的氯原子作为原子转移自由基聚合(ATRP)反应的引发端制备聚丙烯接枝极性聚合物的共聚物。Acik等^[14,15]利用叠氮-炔烃环加成点击反应(CuAAC)制备氯化聚丙烯接枝极性聚合物共聚物。Choi等^[16]以NaHS为硫醇化试剂与CPP反应制备PP-SH,经双氧水氧化获得磺化聚丙烯。

现有的利用C-Cl键进行改性的方法(如ATRP反应^[12]、CuAAC反应^[14])通常面临反应条件苛刻、催化剂残留等问题,且CPP中C-Cl键不稳定,高温易分解产生HCl,造成设备腐蚀。傅-克(Friedel-Crafts)反应作为最有效的氯代烃烷基化反应,被应用于CPP的改性中^[17-19],可在温和条件下将CPP与甲苯进行芳基化,将不稳定的C-Cl键转变为稳定的C-C键^[17],且生成的苄基位点可在自由基作用下实现MAH高效定向接枝^[20]。

本研究提出了一种新的制备PP-g-MAH的策略,以低氯含量的CPP为原料,通过Friedel-Crafts反应在CPP分子链上引入苯甲基,再利用苄基自由基易于形成的特点在温和条件下实现MAH与苯乙烯(St)接枝共聚,制备出兼具高结晶度、高熔点以及高接枝率的改性PP-g-MAH,为高性能聚丙烯基相容剂的绿色高效制备提供了新思路。

1 实验部分

1.1 原料和试剂

CPP:氯的质量分数为9.4%,江苏中煦聚烯烃研究院有限公司;甲苯(纯度98%)、正己烷(纯度99%):天津富宇精细化工有限公司;氯化铝(AlCl_3):分析纯,北京化工厂;MAH:分析纯,上海化学试剂有限公司;偶氮二异庚腈(ABVN):分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;氯苯:分析纯,上海阿拉丁生化科技有限公司;商品化PP-g-MAH:牌号820,接枝率为1.2%,在190 °C、2.16 kg载荷下的熔融指数为32 g/10 min,东莞市康锦新材料科技有限公司。

1.2 测试与表征

傅里叶变换红外光谱(FT-IR):采用美国Thermo公司Nicolet iS10型红外光谱仪,将样品用二甲苯溶解,

配制成质量浓度为 5 mg/mL 的溶液, 均匀滴在溴化钾压片上, 用红外灯照射使溶剂挥发, 放置在红外光谱仪上扫描。

核磁共振波氢谱 ($^1\text{H-NMR}$): 采用美国 Bruker 公司 Avance Neo 400 MHz 型核磁共振波谱仪, 氘代四氯乙烷作溶剂, 120 $^{\circ}\text{C}$ 下测定样品的核磁共振波谱。

高温凝胶渗透色谱 (HTGPC): 采用美国 Agilent 公司 1260 Infinity II 型高温凝胶渗透色谱仪, 以 1,2,4-三氯苯 (TCB) 为流动相, 流速 1.0 mL/min, 色谱柱、进样器及检测器温度均为 150 $^{\circ}\text{C}$ 。将样品于 120 $^{\circ}\text{C}$ 下在 TCB 中恒温溶解 2.5 h 并间歇振荡, 溶液经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后, 进样量 200 μL , 根据聚苯乙烯标样校准曲线进行分析。

差示扫描量热 (DSC): 采用德国 Netzsch 公司 Netzsch 3500 Sirius 型差示扫描量热仪, 氮气氛围, 称取 6 mg 左右样品, 将其加热到 200 $^{\circ}\text{C}$, 保持 5 min, 消除热历史, 然后记录数据, 样品冷却到 -60 $^{\circ}\text{C}$, 再加热到 200 $^{\circ}\text{C}$, 扫描速率为 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

接触角 (WCA): 采用东莞豪恩检测仪器公司 HE-CA200 型接触角测量仪, 在室温常压条件下, 采用座滴法将 5 μL 去离子水作为探针液缓慢滴加至膜片的平整表面, 待液滴形态稳定 (滴加后 3~5 s), 通过仪器图像采集系统获取液滴侧面轮廓, 利用配套分析软件拟合轮廓并计算接触角。

1.3 实验步骤

1.3.1 甲苯接枝的聚丙烯 (CPP-g-MB) 的制备 将 1.0 g CPP 溶解于 80 $^{\circ}\text{C}$ 的混合溶剂 (甲苯 30 mL+正己烷 25 mL) 中, 体系降温至 60 $^{\circ}\text{C}$ 后加入 0.03 g 无水 AlCl_3 , 恒温反应 3 h, 反应结束后用大量乙醇沉淀, 再采用甲苯溶解-乙醇沉淀的方式纯化产物 3 次, 真空干燥至恒重, 得到 CPP-g-MB。

1.3.2 PP-g-MAH 的制备 取 1.0 g CPP-g-MB 溶解于 30 mL 氯苯中, 加入 0.5 g MAH 和 5 mg AVBN, 氮气氛围下升温至 100 $^{\circ}\text{C}$, 反应结束后降至室温, 将反应混合物倒入大量含 1% (体积分数) 盐酸的乙醇中, 静置分层, 抽滤收集沉淀物, 沉淀物经甲苯溶解-乙醇沉淀的方式纯化 3 次, 然后减压干燥至恒重, 得到 PP-g-MAH。制备改性 PP-g-MAH 时, 额外加入 1.12 mL 苯乙烯 (约 1.0 g) 作为协同单体, 反应条件及步骤同上, 得到的产物命名为 PP-g-MAH(St)。具体合成路线见图 1。

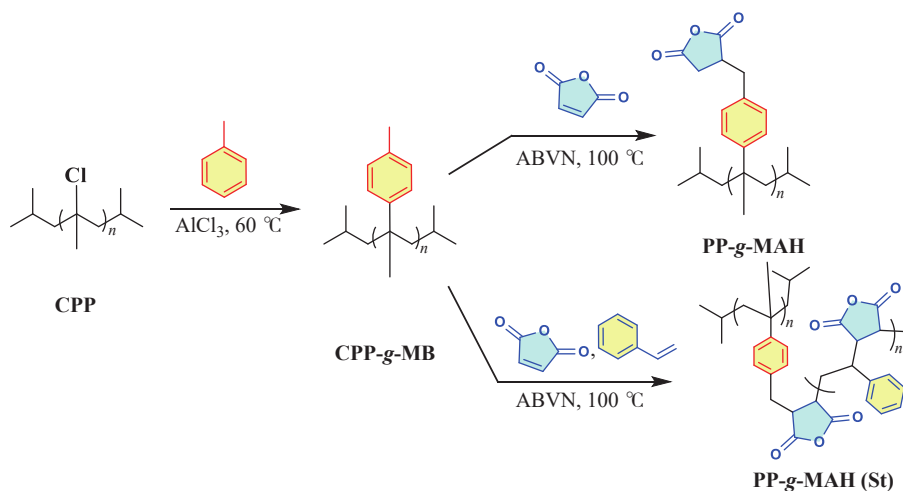


图 1 以氯化聚丙烯为原料合成 PP-g-MAH 的合成路线

Fig. 1 Route for synthesizing PP-g-MAH using chlorinated polypropylene as the raw material

2 结果与讨论

2.1 结构表征

2.1.1 FT-IR 分析 样品的 FT-IR 谱图如图 2 所示。所有样品在 2800~3000 cm^{-1} 以及 1375 cm^{-1} 与 1462 cm^{-1} 处均显示出与 PP 链相关的特征性烷基 (CH 和 CH_2) 谱带。与 CPP 的光谱相比, CPP-g-MB 的光谱位于 730 cm^{-1} 处的 C-Cl 峰消失^[14], 同时 1264 cm^{-1} 处出现了苯环的 C-H 面内弯曲振动峰, 815 cm^{-1} 处出现了苯

环的 C—H 面外弯曲振动峰^[21], 这表明甲苯通过 C—Cl 键成功接枝到了 PP 上。此外, 对于 PP-g-MAH 和 PP-g-MAH(St), 在 1780 cm^{-1} 处均出现了 MAH 中 C=O 的特征伸缩振动峰, 表明 MAH 已成功接枝。

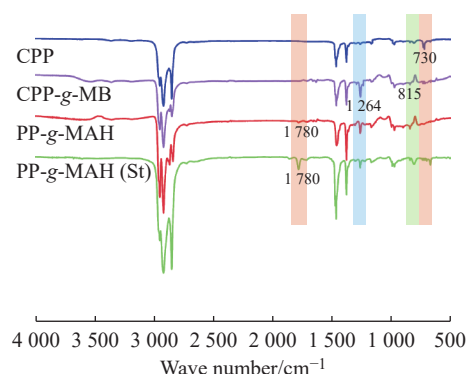


图2 CPP、CPP-g-MB、PP-g-MAH 与 PP-g-MAH(St) 的 FT-IR 光谱

Fig. 2 FT-IR spectra of CPP, CPP-g-MB, PP-g-MAH and PP-g-MAH(St)

2.1.2 $^1\text{H-NMR}$ 分析 样品的 $^1\text{H-NMR}$ 谱图如图 3 所示。本文参照文献 [17] 中对芳基化聚丙烯的核磁归属方法对核磁特征峰进行了归属, 图 3(b) 中化学位移 (δ) 在 2.20 和 7.00 处的信号峰分别归属于 CPP-g-MB 的苯甲基与苯环上的氢, 通过苯环氢与 PP 主链氢 ($\delta=0.9$) 的积分比计算得到甲苯的接枝量 (文中接枝量表示每 100 个聚丙烯主链碳原子上引入的结构单元) 为 0.98 个, 证实甲苯已成功接枝。与氯相邻的碳上氢原子信号峰 (δ 为 $3.8\sim 4.0$) 消失, 表明氯原子已经完全反应。对于 PP-g-MAH, 化学位移 3.45 和 3.75 处的特征峰分别归属于 PP-g-MAH 中的 MAH 的亚甲基和次甲基上的氢 (图 3(c))。在目标产物 PP-g-MAH(St) 的谱图 (图 3(d)) 中, 也同时出现了上述苯环结构与 MAH 接枝单元的特征信号, 而且化学位移 3.75 处的特征峰更明显, 这进一步证实了 MAH 已成功接枝到聚合物主链上, 且接枝效率得到有效提升。

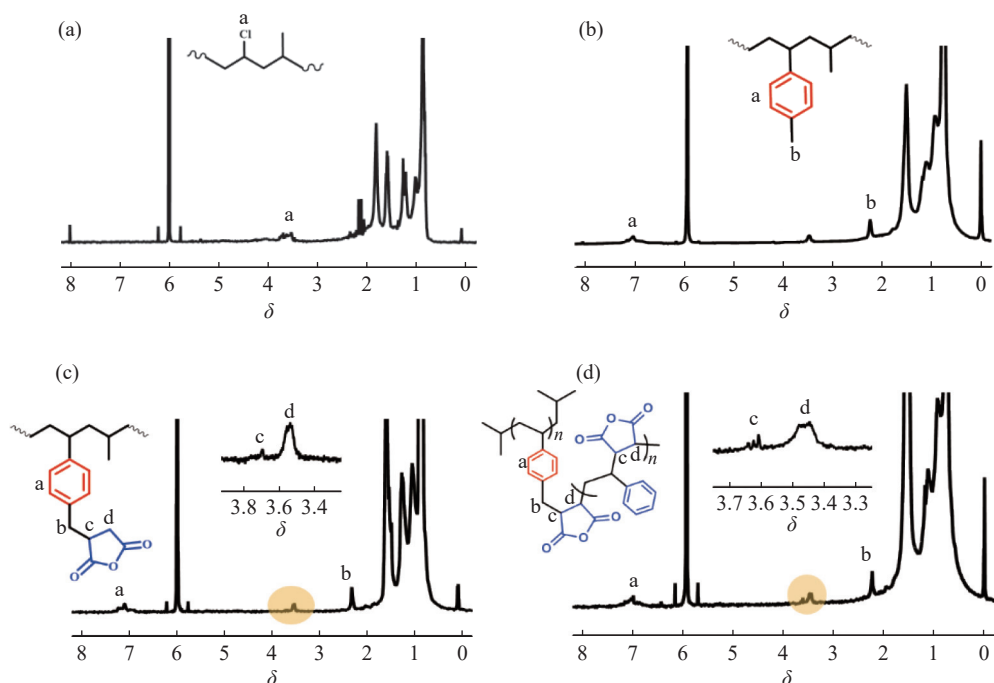


图3 (a) CPP、(b) CPP-g-MB、(c) PP-g-MAH 与 (d) PP-g-MAH(St) 的 $^1\text{H-NMR}$ 谱图

Fig. 3 $^1\text{H-NMR}$ spectra of (a) CPP, (b) CPP-g-MB, (c) PP-g-MAH and (d) PP-g-MAH(St)

2.1.3 接枝率 通过酸碱滴定法^[22]测得 PP-g-MAH 和 PP-g-MAH(St) 的 MAH 接枝率分别为 4.5% 和 10.5%, 相当于每 100 个聚丙烯主链碳原子上 MAH 结构单元的接枝量分别为 0.60 个和 0.89 个, 均低于 CPP-g-MB 中甲苯的接枝量。这一结果证实 MAH 仅通过苄基位点进行接枝, 未对 PP 主链结构造成破坏, 有效避免了 PP

主链规整度的进一步破坏,从而保证了最终接枝产物的结晶性能和力学性能。

2.2 数均分子量及其分布

由表 1 可知, CPP-g-MB 的数均分子量(M_n)低于 CPP, 表明在芳基化反应过程中, 路易斯酸在催化甲苯接枝的同时, 促进了 CPP 主链的断裂, 并伴随部分氯原子与 β -H 协同脱除 (形成 HCl); PP-g-MAH、PP-g-MAH(St) 与 CPP-g-MB 的数均分子量变化不大, 多分散性指数(PDI)亦较为接近, 主要是因为 MAH 的接枝率相对较低, 对聚合物整体分子量及其分布影响有限。

2.3 亲水性

由图 4 可知, CPP 的水接触角为 124.0° , 表现出较强的疏水性。CPP-g-MB 的水接触角增至 127.3° , 疏水性进一步增强, 这是因为接枝甲苯后, 极性的 C-Cl 键被 C-C 键取代, 分子链的非极性增强。PP-g-MAH 的水接触角降至 107.2° , 亲水性显著提升; PP-g-MAH(St) 的水接触角进一步下降为 96.5° 。这是由于 MAH 分子中含有极性较强的羧基基团, 接枝后分子链极性增强, 这也进一步证明 MAH 已经被成功接枝到聚丙烯上。

表 1 样品的分子量及其分布
Table 1 Molecular weight and polydispersity of samples

Sample	M_n	PDI
CPP	8.31×10^4	3.15
CPP-g-MB	1.21×10^4	3.12
PP-g-MAH	1.54×10^4	2.53
PP-g-MAH(St)	1.83×10^4	2.49

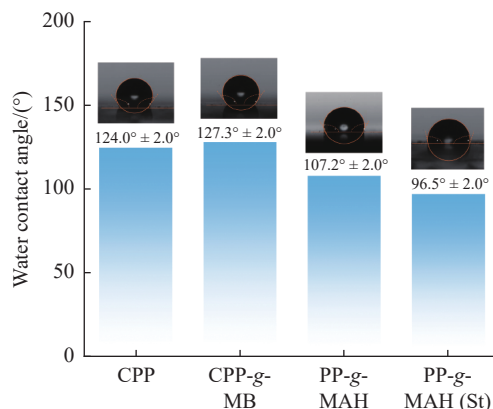


图 4 CPP、CPP-g-MB、PP-g-MAH 和 PP-g-MAH(St) 的水接触角

Fig. 4 Water contact angles of CPP, CPP-g-MB, PP-g-MAH and PP-g-MAH(St)

2.4 热学分析

样品的 DSC 曲线如图 5 所示, 相应的熔融温度(T_m)和结晶度(X_c)见表 2。CPP 呈现出较宽的熔融峰范围, CPP-g-MB 的 T_m 相较于 CPP 升高了 2.2°C , 但结晶度从 31.22% 下降到 11.22%, 这表明虽然苯环间的 π - π 相互作用提高了分子间作用力、促进了局部有序排列从而使熔点升高, 但主链断裂及甲苯侧基的引入破坏了分子链的规整折叠能力, 导致整体结晶度下降。PP-g-MAH 结晶度回升至 18.31%, PP-g-MAH(St) 的结晶度进一步

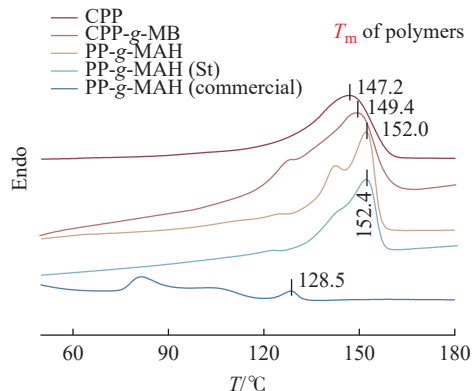


图 5 CPP、CPP-g-MB、PP-g-MAH 和 PP-g-MAH(St) 的 DSC 曲线

Fig. 5 DSC curves of CPP, CPP-g-MB, PP-g-MAH and PP-g-MAH(St)

表 2 样品的接枝率、熔融焓和结晶度

Table 2 Grafting ratio, melting enthalpy and crystallinity of samples

Sample	Grafting ratio	$T_m/^\circ\text{C}$	$\Delta H_m/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$X_c^{(1)}$
CPP	-	147.2	63.07	31.22%
CPP-g-MB	-	149.4	23.22	11.22%
PP-g-MAH	4.5%	152.0	37.92	18.31%
PP-g-MAH(St)	10.5%	152.4	58.31	30.67%
PP-g-MAH(commercial)	1.2%	128.5	1.34	0.50%

1) X_c was calculated from the melting enthalpy(ΔH_m) according to the equation: $X_c = (\Delta H_m / \Delta H_m^0) \times 100\%$, where ΔH_m^0 is the melting enthalpy of 100% crystalline polypropylene (207 J/g)

提高至 30.67%,已接近原料 CPP 的水平。这一趋势证实了 MAH 仅接枝在甲苯侧基的苄基碳上,未对 PP 主链造成额外破坏。随着接枝率的提高,苯乙烯协同单体通过 π - π 堆积促进了分子链的有序排列,弥补了主链断裂带来的结晶缺陷。熔点变化与结晶度呈正相关,PP-g-MAH 和 PP-g-MAH(St) 的熔点分别达到 152.0 °C 和 152.4 °C。与之相比,商品化的 PP-g-MAH 熔点仅 128.5 °C,并且熔融峰很小,主要是因为熔融接枝过程中 MAH 无规接枝到聚丙烯分子链上,破坏了分子链的规整性,虽然接枝率很低,但规整度的下降减弱了 PP 主链的结晶能力,导致商品化 PP-g-MAH 的结晶度只有 0.5%,同时熔点大幅降低。

3 结 论

(1) 以低氯含量的氯化聚丙烯为原料,经傅-克反应制备 CPP-g-MB,再利用苄基自由基的活性,引发 MAH 单独接枝及 MAH 与 St 协同接枝,分别制备得到两种改性聚丙烯产物 PP-g-MAH 与 PP-g-MAH(St)。

(2) PP-g-MAH(St) 的 MAH 接枝率高达 10.5%,且接枝反应未破坏 PP 主链规整性,产物保持高熔点、高结晶度(结晶度 30.67%、熔点达 152.4 °C)。

参考文献:

- [1] MADDAH H A. Polypropylene as a promising plastic: A review [J]. American Journal of Polymer Science, 2016, 6(1): 1-11.
- [2] 康文倩, 马宗立, 高玉林, 王雄, 杨宝, 闫功臣. 耐热聚丙烯专用料的结构与性能 [J]. 中国塑料, 2020, 34(7): 2-8.
KANG W Q, MA Z L, GAO Y L, WANG X, YANG B, YAN G C. Structure and properties of heat-resistant polypropylene specialty material [J]. China Plastics, 2020, 34(7): 2-8.
- [3] PENG Z G, LI C H, FENG Q, ZHENG Y. Research on surface modification of polypropylene fiber and its application evaluation in oil well cement [J]. Construction and Building Materials, 2024, 421: 135728.
- [4] 傅和青, 黄洪, 陈焕钦. 聚丙烯化学改性进展 [J]. 现代化工, 2003, 23(S1): 78-81.
FU H Q, HUANG H, CHEN H Q. Research progress in chemical modification of polypropylene [J]. Modern Chemical Industry, 2003, 23(S1): 78-81.
- [5] 张俊涛, 谢明, 段克尧, 蔡正国, 陈龙, 孙俊芬. 聚丙烯/羟基化聚丙烯共混膜的增容 [J]. 功能高分子学报, 2023, 36(6): 554-560.
ZHANG J T, XIE M, DUAN K Y, CAI Z G, CHEN L, SUN J F. Compatibilization of polypropylene/hydroxylated polypropylene blend membranes [J]. Journal of Functional Polymers, 2023, 36(6): 554-560.
- [6] LIAN Z Y, XU Y Y, ZUO J, QIAN H, LUO Z W, WEI W J. Preparation of PP-g-(AA-MAH) fibers using suspension grafting and melt-blown spinning and its adsorption for aniline [J]. Polymers, 2020, 12(9): 1-18.
- [7] 李朝, 贾元山. 增容剂马来酸酐接枝聚丙烯接枝率的酸碱反滴定法测定误差分析 [J]. 中国塑料, 2023, 37(10): 77-84.
LI C, JIA Y S. Error analysis of acid-base back titration method for determining grafting rate of maleic anhydride grafted polypropylene compatibilizer [J]. China Plastics, 2023, 37(10): 77-84.
- [8] 于晓强, 王静媛, 李峰, 秦东奇, 徐冰, 汤心颐. 马来酸酐接枝聚丙烯的等温结晶动力学研究 [J]. 高分子学报, 1998(1): 26-31.
YU X Q, WANG J Y, LI F, QIN D Q, XU B, TANG X Y. Study on isothermal crystallization kinetics of maleic anhydride grafted polypropylene [J]. Acta Polymerica Sinica, 1998(1): 26-31.
- [9] MITANI K, OGATA T, IWASAKI M. Chlorine distribution and structure-property relationship of chlorinated polypropylene [J]. Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition, 1974, 12(8): 1653-1669.
- [10] 马向东, 刘大壮, 孙培勤. 氯化聚丙烯接枝马来酸酐的合成研究 [J]. 涂料工业, 2007, 37(7): 29-31.
MA X D, LIU D Z, SUN P Q. Study on synthesis of chlorinated polypropylene grafted with maleic anhydride [J]. Paint & Coatings Industry, 2007, 37(7): 29-31.
- [11] 赵兴顺, 张军华, 郑朝晖, 潘毅, 朱珠, 丁晓斌, 彭宇行. 溶液法马来酸酐接枝氯化聚丙烯的研究 [J]. 功能高分子学报, 2003, 16(1): 77-80.
ZHAO X S, ZHANG J H, ZHENG Z H, PAN Y, ZHU Z, DING X B, PENG Y X. Study on maleic anhydride grafted chlorinated polypropylene by solution method [J]. Journal of Functional Polymers, 2003, 16(1): 77-80.
- [12] LI T T, CUI Z Y, ZHANG Q F, QIN S H, HE B Q, LI J X. Synthesis of chlorinated polypropylene grafted poly(methyl methacrylate)

- using chlorinated polypropylene as macro-initiator via atom transfer radical polymerization and its application in lithium ion battery [J]. *Materials Letters*, 2016, 176(1): 64-67.
- [13] HALOI D J, NASKAR K, SINGHA N K. Modification of chlorinated poly(propylene) via atom transfer radical graft copolymerization of 2-ethylhexyl acrylate: A brush-like graft copolymer [J]. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2011, 212(5): 478-484.
- [14] ACIK G, ALTINKOK C, OLMEZ H, TASDELEN M A. Antibacterial film from chlorinated polypropylene via CuAAC click chemistry [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2018, 125(1): 73-78.
- [15] ACIK G, ALTINKOK C, TASDELEN M A. Synthesis and characterization of polypropylene-graft-poly(L-lactide) copolymers by CuAAC click chemistry [J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2018, 56(22): 2595-2601.
- [16] CHOI Y B, PARK O O. Preparation of sulfonated polypropylene and its dyeability: Thiol as a functionalization template of polypropylene [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 109(2): 736-748.
- [17] FU X M, LIU X J, ZHANG C Y, LIU H, HU Y M, ZHANG X Q. Synthesis of propylene-co-styrenic monomer copolymers via arylation of chlorinated PP and their compatibilization for PP/PS blend [J]. *Polymers*, 2019, 11(1): 157-169.
- [18] ZHANG H X, YAN X, HAN W, LIU C, CHEN Y J, XIA Y Y, CAI Z G, YOON K B, YANG J M. Fabrication of high-performance PP/graphene nanocomposites via Friedel-Crafts [J]. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2023, 33(2): 1156-1163.
- [19] OLAH G A, REDDY V P, PRAKASH G K S. Friedel-Crafts reactions [J]. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 2004, 11: 1042-1081.
- [20] ZHANG M, COLBY R H, MILNER S T, CHUNG T C M, HUANG T, DEGROOT W. Synthesis and characterization of maleic anhydride grafted polypropylene with a well-defined molecular structure [J]. *Macromolecules*, 2013, 46(11): 4313-4323.
- [21] 刘敏, 刘大壮, 韦建国, 孙绍辉, 孙培勤. 氯化聚丙烯与甲苯烷基化反应的研究 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2006, 27(1): 121-124.
- LIU M, LIU D Z, WEI J G, SUN S H, SUN P Q. Study on alkylation reaction of chlorinated polypropylene with toluene [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science Edition)*, 2006, 27(1): 121-124.
- [22] 柯俊沐. 酸碱滴定法测定马来酸酐接枝聚丙烯接枝率精度的影响因素研究 [J]. *中国塑料*, 2023, 37(6): 16-20.
- KE J M. Study on factors affecting the accuracy of grafting rate determination of maleic anhydride grafted polypropylene by acid-base titration [J]. *China Plastics*, 2023, 37(6): 16-20.

(责任编辑: 刘亚萍)