

• 研究论文 •

刚韧平衡聚丙烯/热塑性聚氨酯共混物制备及性能

赵琳琳¹ 徐世亮¹ 孙屿璠¹ 代飞宇¹ 刘 恒¹ 许丽丽^{2*} 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

先进橡胶材料教育部重点实验室 青岛 266042)

(² 日照市岚山区科学技术局 日照 276800)

摘要: 采用熔融共混法制备了聚丙烯(PP)/热塑性聚氨酯(TPU)共混物。通过力学性能测试、扫描电镜(SEM)观察及动态力学分析等表征手段,考察了3种不同MAH含量的PP-g-MAH作为增容剂(MAH接枝率分别为4.5 wt% (C1)、10.5 wt% (C2)与1.2 wt% (C3)商品化PP-g-MAH)对PP/TPU共混物力学性能的影响。结果表明,PP/TPU质量比为88/12时综合性能最佳,添加2 wt%的高接枝率PP-g-MAH(C2)增容效果最优,可使共混物冲击强度较纯PP提升51.5%,同时弯曲模量提高5.3%,实现了刚韧协同增强。

关键词: 聚丙烯; 热塑性聚氨酯; 聚丙烯接枝马来酸酐; 增容剂; 刚韧平衡

Preparation and Properties of Polypropylene/Thermoplastic Polyurethane Blends with Stiffness-toughness Balance

ZHAO Lin-lin¹, XU Shi-liang¹, SUN Yu-fan¹, DAI Fei-yu¹, LIU Heng¹,

XU Li-li^{2*}, ZHANG Chun-yu^{1*}, ZHANG Xue-quan¹

(¹ School of Polymer Science and Engineering, Key Laboratory of Rubber-Plastics, Ministry of Education,

Key Laboratory of Advanced Rubber Material, Ministry of Education;

Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042)

(² Lanshan District Science and Technology Bureau, Rizhao 276800)

Abstract: A series of polypropylene (PP)/thermoplastic polyurethane (TPU) blends were prepared by melt blending. The effects of three PP-g-MAH compatibilizers with different MAH grafting ratios (4.5 wt% for C1, 10.5 wt% for C2, and 1.2 wt% for commercial PP-g-MAH for C3) on the mechanical properties of the PP/TPU blends were systematically investigated using mechanical property tests, scanning electron microscopy (SEM), and dynamic mechanical analysis (DMA). The results showed that the PP/TPU blend with a mass ratio of 88/12 exhibited optimal comprehensive performance. Among the samples, the addition of 2 wt% of the high-grafting-rate PP-g-MAH (C2) yielded the most significant compatibilization effect, which increased the impact strength of the blend by 51.5% compared to that of pure PP, whereas the flexural modulus was enhanced by 5.3%. This achievement resulted in a synergistic enhancement of the stiffness and toughness.

Keywords: Polypropylene; Thermoplastic polyurethane; Polypropylene-g-maleic anhydride; Compatibilizer; Stiffness-toughness balance

青岛科技大学高分子研究专辑; 2026-02-28 收稿, 2026-04-10 录用, 2026-06-26 网络出版

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(基金号 ZR2022ME154), 山东省重点研发计划项目(项目号 2025TSGCCZZ B0790)

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

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.099

引用: 赵琳琳, 徐世亮, 孙屿璠, 代飞宇, 刘恒, 许丽丽, 张春雨, 张学全. 刚韧平衡聚丙烯/热塑性聚氨酯共混物制备及性能. 高分子通报, 2026, 39(8), 1434–1443.

Citation: Zhao, L. L.; Xu, S. L.; Sun, Y. F.; Dai, F. Y.; Liu, H.; Xu, L. L.; Zhang, C. Y.; Zhang, X. Q. Preparation and properties of polypropylene/thermoplastic polyurethane blends with stiffness-toughness balance. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2026, 39(8), 1434–1443.

聚丙烯(PP)作为一种重要的热塑性塑料, 凭借其优异的机械性能和热性能以及耐化学品性能和生产成本低等优势, 在塑料工业中占据着举足轻重的地位^[1–3]。然而, PP虽然加工性能优良, 且具有良好的机械性能和热性能, 但仍存在韧性较差、低温抗冲击不足等问题, 同时PP为非极性聚合物, 表面能低, 难粘接、涂覆性能差, 这些缺陷限制了其在高端制品领域的应用^[4,5]。目前, 研究人员已经对多种弹性体与PP共混来改善PP的韧性的方法展开了研究^[6,7], 应用到的弹性体包括乙烯–辛烯共聚物(POE)^[8,9]、苯乙烯–丁二烯三嵌段共聚物(SBS)^[10]、三元乙丙橡胶(EPDM)^[11]、氢化苯乙烯–丁二烯嵌段共聚物(SEBS)^[12], 这些弹性体虽能有效提升PP的韧性, 但因各组分均为非极性材料^[13], 使得纯PP及这些改性PP, 难以适用于对材料极性与亲水性有特定要求的领域, 如表面印刷、涂覆加工, 以及亲水性生物医用材料的制备等场景。热塑性聚氨酯(TPU)作为一种热塑弹性体, 兼具橡胶的高弹性和塑料的热塑加工性^[14], 同时具备耐低温和耐磨性, 广泛应用于汽车内饰、鞋类、柔性软管和管材等领域^[15,16]。TPU具有高弹性、高韧性、优异的耐冲击性, 同时分子链中含有大量极性基团(氨基甲酸酯键)。若将PP和TPU共混, 可以改善PP的弱极性、韧性差的问题, 同时还可以提高PP的耐油性、耐磨性, 降低其成型加工温度^[17]。但PP/TPU本为热力学不相容体系, 直接共混易导致共混物力学性能不佳, 而聚合物相间的相容性可通过在常规熔融共混过程中添加相容剂来改善^[18]。因此改善PP和TPU的相容性以制备高性能共混材料, 一直是研究的焦点^[19]。PP-g-MAH作为一种有效的增容剂, 常被应用于PP与TPU共混体系中, 以改善两者的界面相容性^[15]。本研究以3种不同MAH接枝率的PP-g-MAH作为增容剂, 通过熔融共混法制备了一系列PP/TPU共混物, 系统考察了TPU含量及PP-g-MAH对增容效果与力学性能的影响规律。通过对比不同增容剂的增容效率, 阐明了接枝率及结晶度对界

面调控的作用机制, 高接枝率、高结晶度的PP-g-MAH凭借聚丙烯链段结晶部分与PP基体形成共晶, 以及马来酸酐基团与TPU中的氨基发生化学作用的协同效应^[20], 有效增强了PP与TPU之间的相容性, 改善了两相界面的结合力, 进而提升了PP/TPU共混物的力学性能和热稳定性^[13]。这为PP与TPU的高效复合以及废旧塑料的混合再利用提供了有力支持^[21]。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

聚丙烯(PP, T30S), 熔融指数为3.4 g/10min (230 °C, 2.16 kg), 购于中国石油化工股份有限公司; 热塑性聚氨酯(TPU, 1185A), 熔融指数为5.5 g/10min (190 °C, 8.7 kg), 购于德国巴斯夫有限公司; 马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH, C1接枝率4.5 wt%, C2接枝率10.5 wt%并含有苯乙烯单体), 熔融指数为40~50 g/10min (230 °C, 2.16 kg), 为实验室自制; 商品化马来酸酐接枝聚丙烯(C3, 820), 接枝率1.2 wt%, 熔融指数为32 g/10min (230 °C, 2.16 kg), 购于东莞市康锦新材料科技有限公司。

Netzsch 3500 Sirius型示差扫描量热仪, 德国Netzsch公司; Mix-60C型密炼机, 哈尔滨哈普电气技术有限责任公司; JJ-20型记忆体冲击试验机, 长春市智能仪器设备有限公司; Instron 5566型万能材料试验机, 美国Instron公司; S-4300扫描电镜(SEM), 日本Hitachi High-Tech公司; ARES G2型旋转流变仪、DMA Q800动态机械分析仪, 美国TA公司。

1.2 实验过程

1.2.1 增容剂C1和C2的制备

以低氯化度氯化聚丙烯(LC-CPP)为原料, 经傅克反应(甲苯为芳基化试剂)和自由基接枝两步法制备2种马来酸酐接枝聚丙烯: PP-g-MAH(C1, 接枝率4.5 wt%)和PP-g-MAH(St)(C2, 接枝率10.5 wt%, 含苯乙烯协同单体)。

1.2.2 PP/TPU的共混

PP/TPU共混物采用熔融共混法制备, 密炼

机温度设为190 °C、转速60 r/min, 先加TPU密炼3 min 熔融, 再按设计比例加入PP及相应增容剂继续混炼10 min得均匀共混物。PP/TPU共混配方见表1。

表1 PP/TPU共混配方

Table 1 PP/TPU blending formulas

Run	Blend mass ratio	$m(\text{PP})$ (g)	$m(\text{TPU})$ (g)
PP/TPU	100/0	50.0	0
	95/5	47.5	2.5
	92/8	46.0	4.0
	88/12	44.0	6.0
	85/15	42.5	7.5
	80/20	40.0	10.0

2 结果与讨论

2.1 增容剂的结构与结晶性能

采用示差扫描量热法(DSC)对原料CPP、CPP-g-MB、C1、C2、C3的熔融温度、熔融焓及结晶度进行表征, 结果如图1和表2所示, 原料CPP呈现出较宽的熔融峰范围(约147~151 °C), 在接枝甲苯后, CPP-g-MB的 T_m 相较于CPP升高了

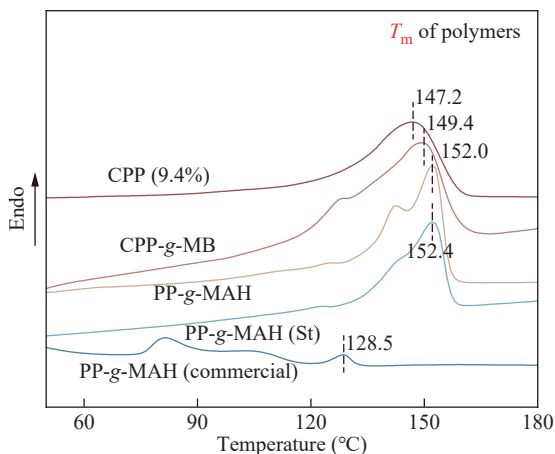


图1 CPP、CPP-g-MB及PP-g-MAH的DSC曲线

Figure 1 DSC curves of CPP, CPP-g-MB and PP-g-MAH samples

2.3 °C。这表明引入的甲苯基侧链通过苯环间的 π - π 相互作用, 提高了分子间作用力, 促进了分子链更为有序的排列, 使得熔融温度升高。当MAH接枝到CPP-g-MB上以后, C1因MAH仅接枝于苄基位点, 对PP主链规整性破坏有限, 维持了聚丙烯的高熔点特性, 其熔融温度达152.0 °C, 结晶度为18.31%, 而C2在苯乙烯协同作用下, 不仅实现了MAH接枝率的提升, 同时也兼具了高熔点和高结晶度, 其结晶度为30.67%。与之相比, 商品化的C3熔融温度仅约128.5 °C, 由于熔融接枝过程中MAH无规接枝及热机械降解共同破坏了PP分子链的规整性, 导致结晶度只有0.5%。

如表2所示, 3种增容剂的分子量及分子量分布亦呈现显著差异。实验室自制的C1和C2数均分子量较低, 而商品化C3的数均分子量高达 1.65×10^5 g/mol, 两者相差约1个数量级, 这种分子量的显著差别与制备路线密切相关, 这些结构参数的差异化组合, 为后续系统考察增容剂结构对PP/TPU共混体系性能的影响规律提供了研究基础。

2.2 PP/TPU共混体系的性能研究

2.2.1 力学性能

首先考察了不同PP/TPU共混比例的影响, 图2(a)~2(c)分别为PP、TPU以5种比例共混制得的复合材料的冲击强度、拉伸强度和弯曲模量对比图。可以看出, TPU对PP存在增韧作用, 当TPU质量分数从5%增长至12%时, 复合材料的冲击强度由4.61 kJ/m²提高到5.30 kJ/m²。但拉伸强度和弯曲模量却随TPU质量分数增加而明显下降, 一方面是因为TPU本身的拉伸强度和弯曲模量低, 另一方面由于二者极性相差较大, 相容性较差, TPU质量分数越高, 则形成了越多的相界面, 造成了拉伸强度和弯曲模量的减小。随着TPU份数的进一步增加, 冲击强度虽有所回落至5.01 kJ/m², 但仍高于纯PP, 而拉伸强度和弯曲模量则随TPU含量增加持续下降, 且均低于纯PP。因此, 固定PP/

表2 不同PP-g-MAH的接枝率、熔融焓和结晶度

Table 2 Grafting ratio, melting enthalpy and crystallinity of different PP-g-MAH

Sample	Grafting ratio ^a (wt%)	M_n (10^4 g/mol)	PDI	ΔH_m^b (J/g)	X_c^c (%)
PP-g-MAH (C1)	4.5	1.54	2.53	37.92	18.31
PP-g-MAH (St) (C2)	10.5	1.83	2.49	52.15	30.67
PP-g-MAH (commercial) (C3)	1.2	16.5	1.70	1.34	0.50

^a Determined by acid-base titration; ^b ΔH_m is the melting enthalpy of the sample (J/g); ^c X_c is the crystallinity, calculated according to the formula

$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100\%$, where ΔH_m^0 is the standard melting enthalpy of 100% crystalline polypropylene, taken as 209 J/g.

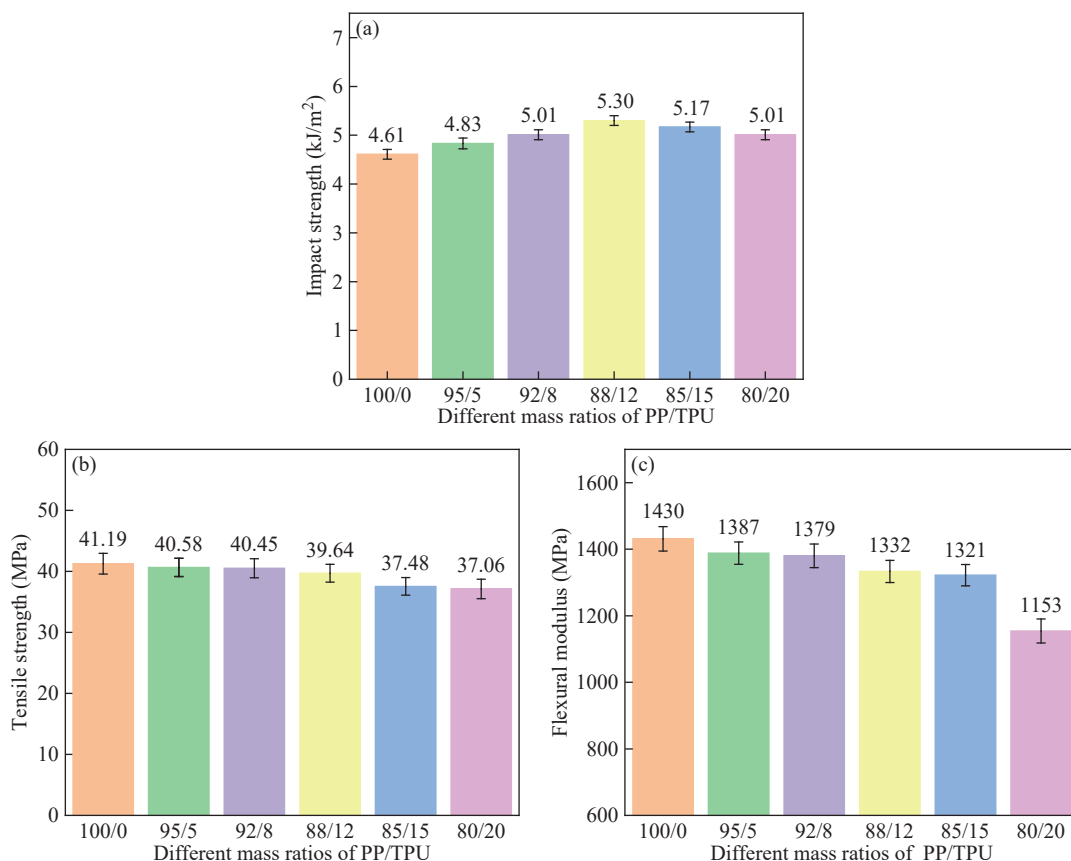


图2 不同质量比PP/TPU共混物的力学性能:(a)冲击强度;(b)拉伸强度;(c)弯曲模量

Figure 2 Mechanical properties of PP/TPU blends with different mass ratios: (a) Impact strength; (b) Tensile strength; (c) Flexural modulus

TPU质量比为88/12,进一步考察了增容剂对共混体系性能的影响,PP/TPU/C共混配方如表3所示。

系统探究了PP/TPU(88/12)共混体系中,增容剂C1添加量对其力学性能的影响规律结果如图3所示。结果显示,当C1为2 wt%时,体系冲击强度提升幅度最大,拉伸强度与弯曲模量较未添加增容剂体系略有提升,而当C1超过2 wt%后,上述2项力学性能均呈现持续下降趋势。

图4(a)~4(c)在2 wt%的固定添加量下,进一步对比了C1、C2、C3 3种不同类型PP-g-MAH的

增容效果。其中,C2体系的冲击强度提升最为显著,且拉伸强度保持率达99.1%,其弯曲模量不仅高于未添加增容剂的体系,同时也优于C1、C3体系。表明其增容效果最优,并且添加C2的体系的弯曲模量超过了纯PP,而添加了商品化的PP-g-MAH(C3)的体系则明显低于另外2个体系。

如表4所示,断裂伸长率由纯PP的363%降至170%~176%,反映了断裂机制从均匀塑性变形向银纹-剪切带转变的特征。尽管断裂伸长率有所降低,但PP/TPU/C2体系在拉伸强度基本保持的同时,兼具弯曲模量与冲击强度较纯PP的同步提升,实现了聚丙烯增韧体系的刚韧平衡。

2.2.2 形貌分析

图5展示了不同PP/TPU比例的二元共混体系的SEM图。为了更清晰地分析相区的分布情况,采用四氢呋喃蚀刻样品表面的TPU。纯PP的冲击断面(图5a)相对平滑,呈现出较为均匀的均相结构特征。当引入不同份数的TPU,如图5(b)~5(f)所示,TPU以接近球形的颗粒存在于聚丙烯基体中。分散相尺寸较大并且分布不均匀,

表3 PP/TPU/C共混配方

Table 3 PP/TPU/C blending formulas

C mass fraction (%)	<i>m</i> (PP) (g)	<i>m</i> (TPU) (g)	<i>m</i> (C) (g)
0	44.0	6.0	0
1	43.6	5.9	0.5
2	43.1	5.9	1.0
3	42.7	5.8	1.5
4	42.2	5.8	2.0
5	41.8	5.7	2.5
6	41.4	5.6	3.0

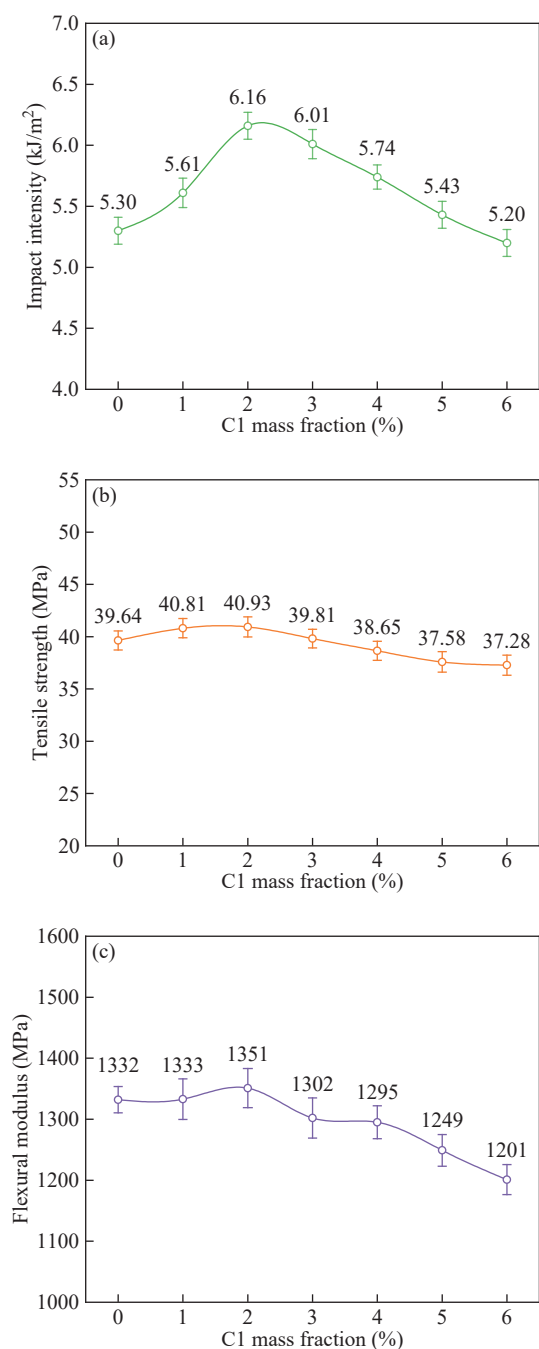


图3 C1加入量对PP/TPU/C1共混物的力学性能影响:
(a)冲击强度;(b)拉伸强度;(c)弯曲模量

Figure 3 Effect of C1 content on the mechanical properties of PP/TPU/C1 blends: (a) Impact strength; (b) Tensile strength; (c) Flexural modulus

随着加入比例增大,分散相孔径呈现出先减小后增大的趋势。当PP/TPU质量比为88/12时,分散相尺寸最小,呈现出更为均匀的分布状态(图5d)。

图6为未添加增容剂及添加2 wt% C1、C2、C33种增容剂的PP/TPU(88/12)共混体系SEM图,未增容体系中(图6a),TPU分散相以孤立大

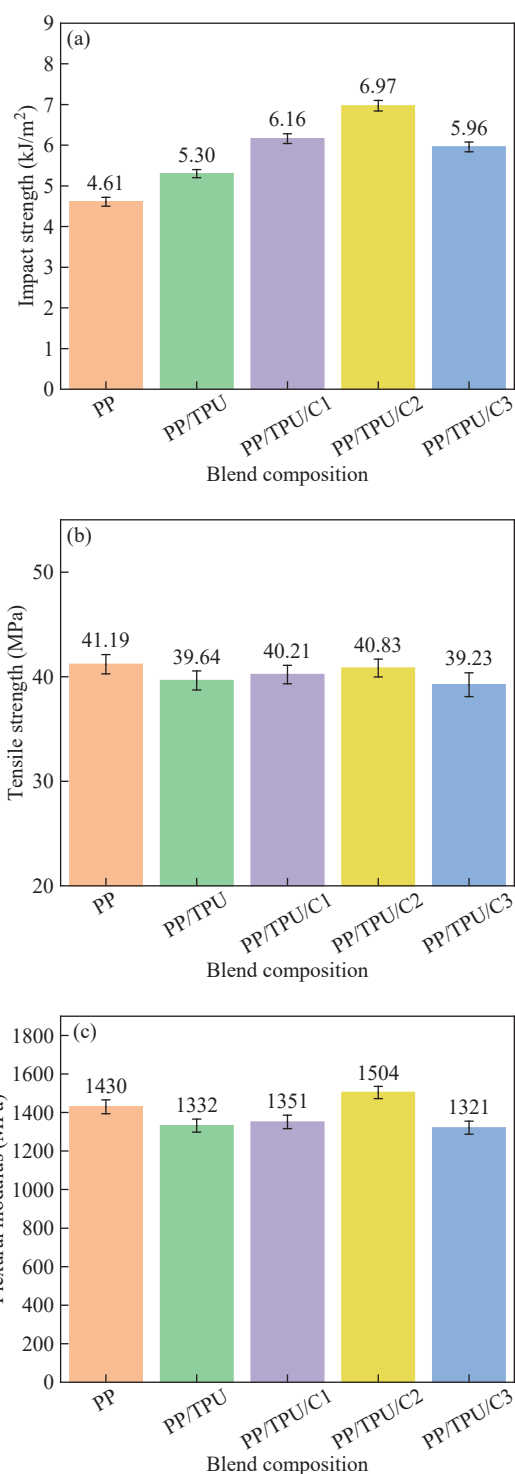


图4 PP/TPU/C共混物的力学性能(C1、C2、C3: 2 wt%):
(a)冲击强度;(b)拉伸强度;(c)弯曲模量

Figure 4 Mechanical properties of PP/TPU/C blends (C1, C2, C3: 2 wt%): (a) Impact strength; (b) Tensile strength; (c) Flexural modulus

颗粒形式存在,孔隙边界清晰,经THF刻蚀后,大的TPU颗粒易被溶解剥离并形成明显大孔径,表明PP与TPU界面结合力弱,添加增容剂后

表4 PP/TPU 共混体系的力学性能

Table 4 Mechanical properties of PP/TPU blends

System	Blend mass ratio	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)
PP	—	4.61±0.20	41.19±2.21	363±27	1430±37
TPU	—	—	21.00±2.12	530±20	29±3
PP/TPU	88/12	5.30±0.32	39.64±2.11	179±9	1332±27
PP/TPU/C1	88/12/2	6.16±0.15	40.21±1.82	176±9	1351±26
PP/TPU/C2	88/12/2	6.97±0.21	40.83±1.53	170±9	1504±29
PP/TPU/C3	88/12/2	5.76±0.31	39.23±2.42	175±10	1321±26

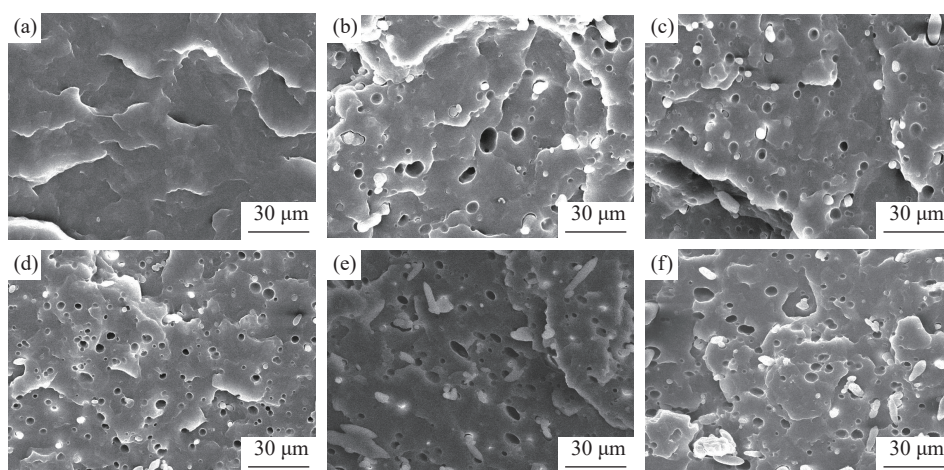


图5 不同配比PP/TPU共混物的冲击断面SEM图：(a)纯PP；(b) PP95TPU5；(c) PP90TPU10；(d) PP88TPU12；(e) PP85TPU15；(f) PP80TPU20

Figure 5 SEM images of impact sections of PP/TPU blends with different proportion (a) Pure PP; (b) PP95PU5; (c) PP90TPU10; (d) PP88TPU12; (e) PP85TPU15 (f) PP80TPU20

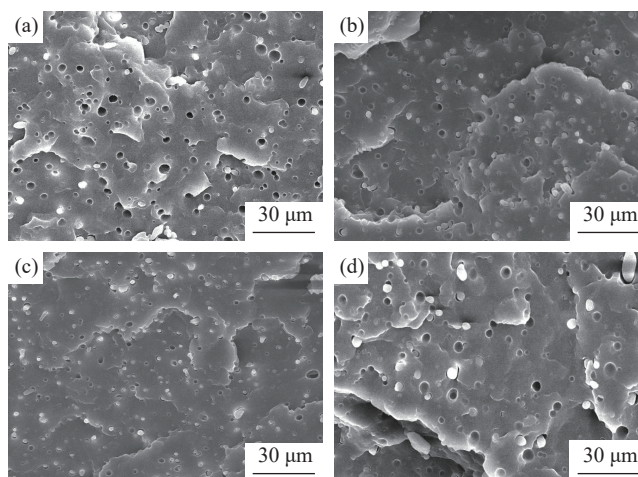


图6 PP/TPU共混物的冲击断面SEM图：(a) PP/TPU (88/12)；(b) PP/TPU/C1；(c) PP/TPU/C2；(d) PP/TPU/C3 (C1、C2、C3均为2 wt%)

Figure 6 SEM images of impact section of PP/TPU blends: (a) PP/TPU (88/12); (b) PP/TPU/C1; (c) PP/TPU/C2; (d) PP/TPU/C3 (C1, C2, C3: 2 wt%)

(图6b~6d)，不仅TPU分散相尺寸均有不同程度减小，THF蚀刻行为也发生明显改变，原因在于增容剂的PP主链可与PP基体通过共晶紧密结合，

接枝的MAH基团又能与TPU分子链中氨基甲酸酯(—NH—COO—)在熔融加工过程中发生界面化学反应^[22]。其机制如示意图1所示，TPU被

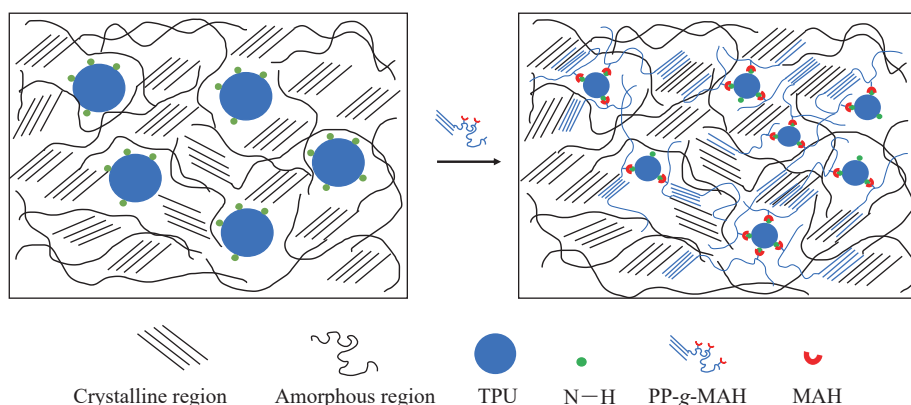


示意图1 PP-g-MAH对PP/TPU共混体系的增容机理

Scheme 1 Compatibilizing mechanism of PP-g-MAH on PP/TPU blends

固定在体系中,即便THF仍能溶解TPU分子链,也无法将其剥离,宏观表现为大量TPU相未被蚀刻,仍有大量分散相粒子被观察到(图6c)。由图6(b)~6(d)可以看出C2体系的TPU孔径更小且分布均匀,孔隙数量减少,边界也最模糊,C1体系的TPU孔径与分散均匀性次之,商品化的C3体系则表现为TPU孔径大、界面清晰。而3种增容剂的效果差异源于其接枝率及增容剂中聚丙烯结晶度的作用,C2因引入St协同单体,同时实现了高MAH接枝率和高结晶度,因此表现出最优的增容效果,值得注意的是,C3尽管分子量显著高于C1/C2,理论上更有利于界面缠结,但其实际增容效果反而较弱。这归因于其较低的接枝率和结晶度,无法通过化学键合和共晶锚定有效稳定界面,导致增容效果有限。

2.2.3 分散相粒径统计

为进一步定量表征TPU分散相在PP基体中的分布情况,采用ImageJ软件对各体系SEM图像中TPU分散相粒径进行统计分析。每个样品统计分散相颗粒数量在150~200个,结果如图7所示,未增容PP/TPU(88/12)体系的平均粒径为2.06 μm ,分散相尺寸较大。添加增容剂后,分散相尺寸显著减小:PP/TPU/C1降至1.29 μm ,PP/TPU/C2进一步降至0.91 μm ,PP/TPU/C3为1.62 μm 。该定量结果与SEM定性观察完全一致(图6),即高接枝率、高结晶度的C2的分散效果最优。

2.2.4 表面润湿性分析

为进一步验证增容剂对PP/TPU界面极性的改善,测定了共混物表面的水接触角,结果如图8所示。纯PP表面水接触角为 $(108.6 \pm 2.0)^\circ$,表现出疏水性;添加TPU后接触角降至 $(105.3 \pm 2.0)^\circ$,表明

TPU的引入确实一定程度上改善了PP的表面极性;而加入PP-g-MAH增容剂后,接触角显著降低,其中PP/TPU/C2体系的接触角降至 $(85.7 \pm 2.0)^\circ$,这表明高接枝率增容剂的引入,增容作用使TPU分散相尺寸减小,协同提高了材料极性。

2.2.5 热学分析

通过DSC对PP/TPU共混体系的熔融与结晶行为进行分析(图9)。纯PP特征熔融峰位于166.3 $^\circ\text{C}$,加入TPU后略有下降;添加增溶剂后,各体系熔点及结晶温度均无明显变化,表明增容剂的引入未破坏PP分子链有序排列和成核过程。然而,熔融焓和结晶度的数据揭示了更为显著的差异(表5)。纯PP的结晶度为54.6%,加入TPU后降至48.1%。值得注意的是,增容剂对结晶度产生了不同的影响:添加C1和C3后,结晶度分别骤降至34.8%和34.1%,较未增容体系下降约28%;而C2体系的结晶度仍维持在50.6%,仅比未增容体系低4.2%,显著优于C1/C3。

这种差异与增容剂本身的结晶特性(表3)密切相关。C1和C3规整性差,难以与PP形成共晶,

表5 PP/TPU共混体系的熔融焓与结晶度

Table 5 Melting enthalpy and crystallinity of PP/TPU blends

Sample	ΔH_m^a (J/g)	X_c^a (%)
PP	100.6	54.6
PP/TPU	88.5	48.1
PP/TPU/C1	62.8	34.8
PP/TPU/C2	93.2	50.6
PP/TPU/C3	60.0	34.1

^a ΔH_m is the melting enthalpy of the sample; X_c is the crystallinity of PP, calculated according to the formula $X_c = \Delta H_m / (209 \times w_{pp}) \times 100\%$, where w_{pp} is the mass fraction of PP, and 209 J/g is the standard melting enthalpy of 100% crystalline PP.

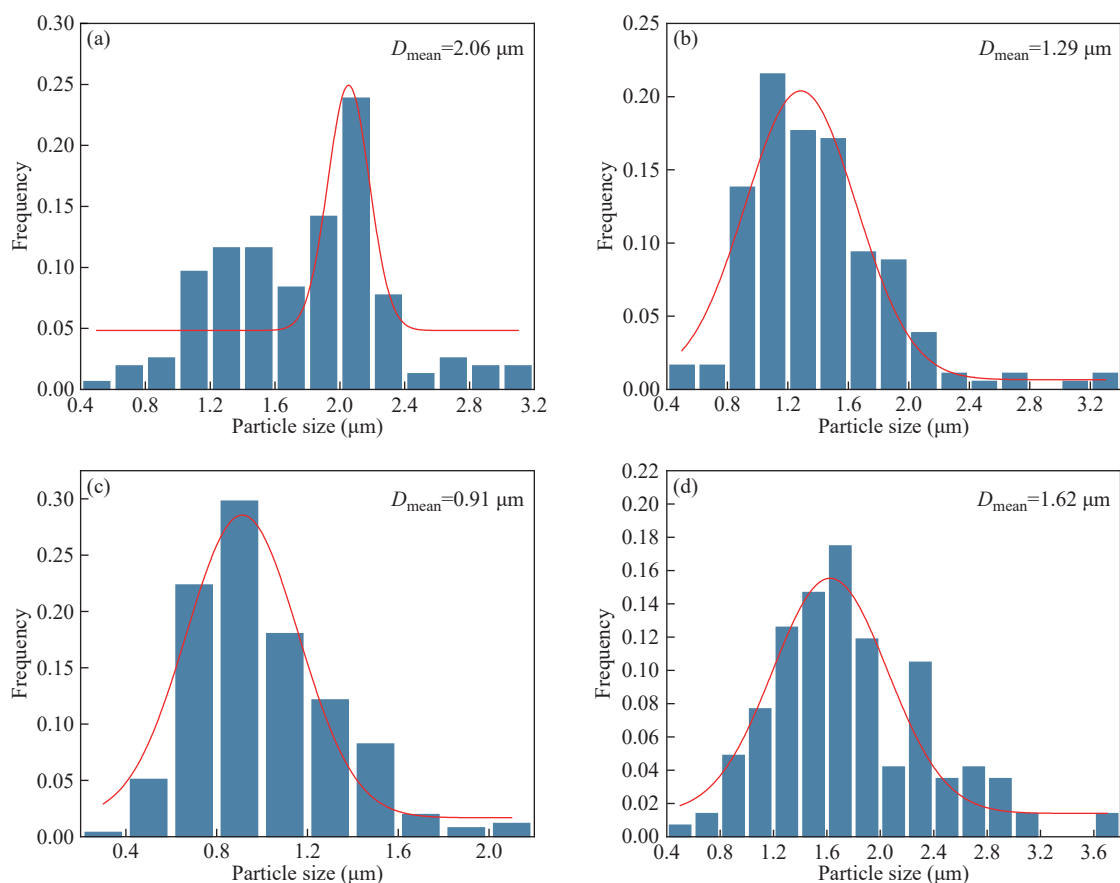


图7 PP/TPU共混物中TPU分散相的粒径分布图:(a) PP/TPU;(b) PP/TPU/C1;(c) PP/TPU/C2;(d) PP/TPU/C3 (C1、C2、C3均为2 wt%)

Figure 7 Particle size distribution of TPU dispersed phase in PP/TPU blends: (a) PP/TPU; (b) PP/TPU/C1; (c) PP/TPU/C2; (d) PP/TPU/C3 (C1, C2, C3: 2 wt%)

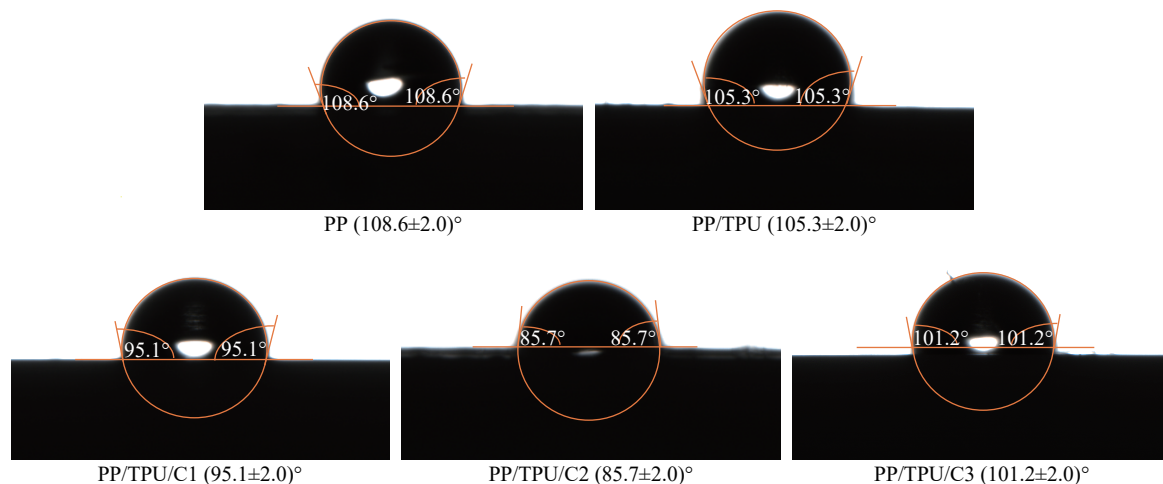


图8 PP及PP/TPU共混物表面的水接触角(C1、C2、C3: 2 wt%)

Figure 8 WCA of PP and PP/TPU blends (C1, C2, C3: 2 wt%)

反而作为异相杂质破坏了PP链的规整排列;相反,C2的高结晶度(30.67%)使其PP主链可通过外延结晶与基体形成共晶结构,不仅未破坏基体结晶,还可能起到异相成核作用。这也解释了C2

的弯曲模量高于纯PP,而C1/C3模量显著低于纯PP的现象。

2.2.6 流变学分析

图10为PP、TPU、PP/TPU二元共混物以及加

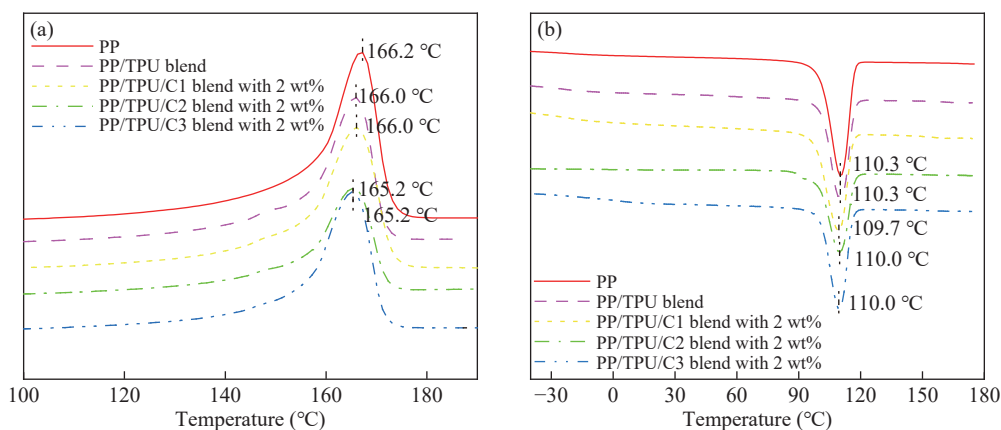


图9 PP、TPU、PP/TPU (88/12)以及分别添加2 wt% C1、C2和C3的PP/TPU (88/12)的DSC曲线:(a)熔融曲线;(b)结晶曲线
Figure 9 DSC curves of PP, TPU, PP/TPU (88/12), and PP/TPU (88/12) with the addition of 2 wt% C1, C2, and C3: (a) Melting curves; (b) Crystallization curves blend system

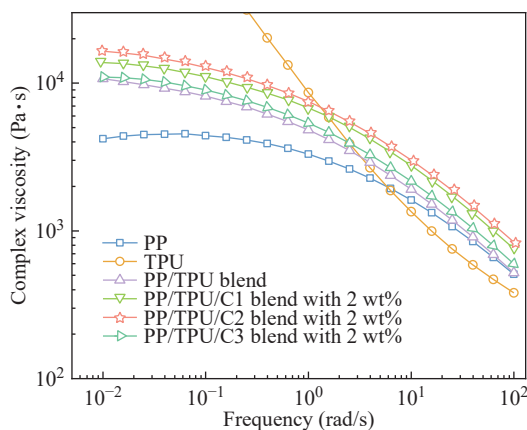


图10 PP、TPU、PP/TPU (88/12)及添加2 wt% C1、C2、C3的PP/TPU (88/12)的复数黏度曲线

Figure 10 Complex viscosity curves of PP, TPU, PP/TPU (88/12), and PP/TPU (88/12) with the addition of 2 wt% C1, C2, and C3

入2 wt%的增容剂(C1、C2、C3)的三元共混物的动态复数黏度(η^*)与频率(ω)的对数关系曲线。PP、TPU和PP/TPU共混物的 η^* 都随着 ω 增大而减少,具有明显的剪切变稀特性。其中纯TPU的 η^* 显著高于纯PP及PP/TPU共混物,且随 ω 变化幅度最大,PP/TPU二元共混物由于高黏度的TPU的引入表现出高于纯PP低频区黏度,而加入增容剂后体系黏度都有所增加,而其中引入C2后体系 η^* 在全频率区间均为最高,PP/TPU/C1体系略高于二元共混物与PP/TPU/C3体系,引入商品化的C3后体系黏度与二元共混物接近。推测主要是由TPU与PP的相容性提高,使得分子链缠结密度增加,从而提高了共混体系的黏度,也预示着该方法可以为高熔体强度的聚丙烯制备提供一条新路径。

2.2.7 动态力学分析

采用动态力学分析方法对PP/TPU共混体系的玻璃化转变温度(T_g)进行表征,结果如图11所示,纯PP的 T_g 为14.3 °C,在加入C2作为增容剂后,其温度降至12.3 °C。而当C1和C3加入共混体系后,共混物的 T_g 变化很小。通常情况下,加入增容剂后,共混物的两个玻璃化转变温度呈现相互趋近的趋势,则可判定该增容剂对PP/TPU体系起到了较好的增容作用^[23]。这也佐证了C2的增容效率高于C1和C3。

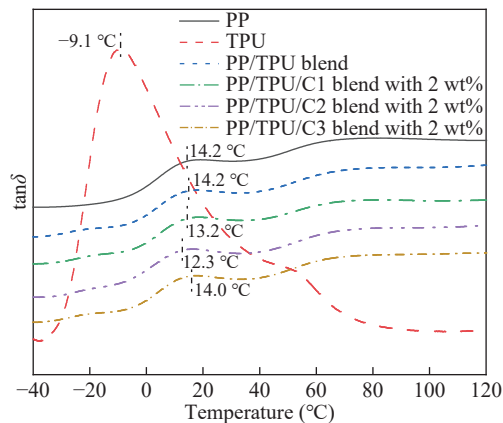


图11 PP、TPU、PP/TPU (88/12)及分别添加2 wt% C1、C2和C3的PP/TPU (88/12)的动态力学分析曲线

Figure 11 DMA plots of PP, TPU, PP/TPU (88/12), and PP/TPU (88/12) with the addition of 2 wt % C1, C2, and C3

3 结论

通过熔融共混法制备了PP/TPU共混体系,系统研究了TPU含量及PP-g-MAH接枝率及结晶度对共混体系界面相容性和力学性能的影响规律。

结果表明,高接枝率(10.5 wt%)且高结晶度的PP-g-MAH (C2)表现出最优的增容效果,在仅2 wt%添加量下,所制备的PP/TPU/C2共混体系冲击强度较纯PP提升51.5%,同时弯曲模量提高5.3%,有效解决了PP增韧过程中冲击强度提升伴随刚性下降的问题,实现了刚韧协同增强。该研究为制备刚韧平衡的PP/TPU共混材料提供了有效途径。

参考文献

- 1 Maddah, H. A. Polypropylene as a promising plastic: a review. *Am. J. Polym. Sci.*, **2016**, 6(1), 1–11.
- 2 Huang, N. H.; Chen, Z. J.; Wang, J. Q.; Wei, P. Synergistic effects of sepiolite on intumescent flame retardant polypropylene. *Express Polym. Lett.*, **2010**, 4(12), 743–752.
- 3 张琳, 李丽萍. 马来酸酐化1,2-聚丁二烯熔融接枝聚丙烯/木塑复合材料相容剂的研究. *高分子通报*, **2014**, (6), 67–72.
- 4 赵文朋, 李嘉程. 弹性体物理增韧聚丙烯的研究进展. *广东化工*, **2025**, 52(22), 70–72.
- 5 Ghasemi, F. A.; Ghasemi, I.; Menbari, S.; Ayaz, M.; Ashori, A. Optimization of mechanical properties of polypropylene/talc/graphene composites using response surface methodology. *Polym. Test.*, **2016**, 53, 283–292.
- 6 张永霞, 谢昕, 王庆涛, 孟竹, 龚光碧. 聚丙烯共混增韧改性研究进展. *合成材料老化与应用*, **2018**, 47(1), 85–90.
- 7 Kim, D. K.; Lee, S. H.; Hong, S. K.; Han, S. W.; Lee, D. H.; Yu, S. Low-temperature-toughened polypropylene blends with highly packed elastomeric domains. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2022**, 4(10), 7834–7840.
- 8 王昊, 金静. 膨胀阻燃聚丙烯及其协同力学改性的研究进展. *高分子通报*, **2015**, (7), 17–24.
- 9 Soroudi, A.; Skrifvars, M. Electroconductive polyblend fibers of polyamide-6/polypropylene/polyaniline: Electrical, morphological, and mechanical characteristics. *Polym. Eng. Sci.*, **2012**, 52(7), 1606–1612.
- 10 袁海兵. POE增韧改性聚丙烯/滑石粉复合材料的研究. *中国塑料*, **2018**, 32(3), 33–36.
- 11 陈瑞骐, 江学良, 游峰. 反应挤出制备聚丙烯基三元共混物. *武汉工程大学学报*, **2016**, 38(1), 46–51.
- 12 付明宇, 姜凤阳, 俞慧, 冀迪, 惠海峰, 陈明情, 弓合兴, 王俊勃. EPDM增韧PP/HDPE共混物的组织及增韧机制. *塑料科技*, **2024**, 52(5), 23–27.
- 13 刘玉坤, 谭晓莉, 陈金周, 牛明军, 刘雪莹, 管兰芳, 李新法. TPU增韧PP共混材料的力学性能. *包装工程*, **2007**, 28(9), 39–41.
- 14 程时远, 李建宗, 陈清元. 热塑性聚氨酯弹性体的形态学. *高分子通报*, **1994**, (1), 37–41.
- 15 Wang, X.; Hu, S.; Guo, Y.; Li, G. Q.; Xu, R. W. Toughened high-flow polypropylene with polyolefin-based elastomers. *Polymers*, **2019**, 11(12), 1976.
- 16 Lin, T. A.; Lin, M. C.; Lin, J. Y.; Lin, J. H.; Chuang, Y. C.; Lou, C. W. Modified polypropylene/thermoplastic polyurethane blends with maleic-anhydride grafted polypropylene: blending morphology and mechanical behaviors. *J. Polym. Res.*, **2020**, 27(2), 1–10.
- 17 Lu, Q. W.; Macosko, C. W.; Horrión, J. Compatibilized blends of thermoplastic polyurethane (TPU) and polypropylene. *Macromol. Symp.*, **2003**, 198(1), 221–232.
- 18 Jaruttrakool, R.; Tanpichai, S.; Pentrakoon, D.; Potiyaraj, P. Reactive blending of thermoplastic polyurethane and polypropylene. *Int. Polym. Process.*, **2010**, 25(5), 327–333.
- 19 Lin, T. A.; Bao, L. M.; Lin, M. C.; Lin, J. Y.; Lou, C. W.; Lin, J. H. Impact-resistant polypropylene/thermoplastic polyurethane blends: compatible effects of maleic anhydride on thermal degradation properties and crystallization behaviors. *J. Mater. Res. Technol.*, **2019**, 8(4), 3389–3398.
- 20 Lin, T. A.; Lin, J. H.; Bao, L. M. Polypropylene/thermoplastic polyurethane blends: mechanical characterizations, recyclability and sustainable development of thermoplastic materials. *J. Mater. Res. Technol.*, **2020**, 9(3), 5304–5312.
- 21 Dehaghi, F. M.; Aberoumand, M.; Sundararaj, U. A promising recycling strategy via processing polypropylene/recycled poly(ethylene terephthalate): reactive extrusion using dual compatibilizers. *Polymers*, **2024**, 16(17), 2439.
- 22 Hang, Z. S.; Lv, Z. C.; Feng, L.; Liu, B. Study of compatibility and flame retardancy of TPU/PLA composites. *Materials*, **2022**, 15(6), 2339.
- 23 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. *Polymers*, **2019**, 11(1), 157.