

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.02.003

乙丙嵌段共聚物改性 PP/EPR 共混物

张博文¹,刘喜军¹,王宇威¹,杨奇²,张学全²

(1. 齐齐哈尔大学材料科学与工程学院,黑龙江齐齐哈尔 161006 ;

2. 中国科学院长春应用化学研究所高性能合成橡胶及其复合材料重点实验室,长春 130022)

摘要:以乙丙嵌段共聚物(EP)作为增容剂,采用熔融共混的方法制备了聚丙烯(PP)/二元乙丙橡胶(EPR)共混物,通过冲击试验机、电子万能试验机、动态力学分析仪、扫描电子显微镜、偏光显微镜、差示扫描量热仪、平板流变仪、熔体流动速率仪等,研究了 EP 添加量对 PP/EPR 共混物力学性能、分散相聚集态结构及加工性能的影响。结果表明,EP 对 PP/EPR 共混物具有良好的增容作用,降低了 PP 相的熔点和结晶规整性,提高了 PP 相的结晶温度和结晶度,当 EP 质量分数为 8% 时,分散相 EPR 粒子直径最小、PP 和 EPR 相容性最好,此时共混物的缺口冲击强度和断裂伸长率达到最大值,加工性能最好。

关键词:乙丙嵌段共聚物;聚丙烯;二元乙丙橡胶;冲击强度;断裂伸长率;聚集态结构

中图分类号:TQ325.1+4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2020)02-0013-06

Ethylene-Propylene Block Copolymer Modified PP/EPR Blends

Zhang Bowen¹, Liu Xijun¹, Wang Yuwei¹, Yang Qi², Zhang Xuequan²

(1. College of Materials Science and Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China ; 2. CAS Key Laboratory of High-Performance Synthetic Rubber and Its Composite Materials, Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract : Polypropylene (PP) / ethylene-propylene rubber (EPR) blends was prepared using melt blending with ethylene-propylene block copolymer (EP) as compatibilizer. The effects of the amount of EP added on mechanical properties, dispersed phase aggregation structure and processability of PP / EPR blends were studied by impact tester, electronic universal tester, dynamic mechanical analyzer, scanning electron microscope, polarizing microscope, differential scanning calorimeter, parallel plate rheometer and melt flow rate meter. The results show that the addition of EP has a good compatibilizing effect on PP / EPR blends, reduces the melting point and crystallization regularity of PP phase, and improves the crystallization temperature and crystallinity of PP phase. When the EP mass fraction is 8%, the particle diameter of dispersed phase EPR is the smallest and the compatibility of PP and EPR is the best. Meanwhile, the notched impact strength and elongation at break of the blends simply supported beam reach the maximum, the processability is the best.

Keywords : ethylene-propylene block copolymer ; polypropylene ; ethylene-propylene rubber ; impact strength ; elongation at break ; aggregated structure

聚丙烯(PP)是最轻的通用塑料,因其综合性能优异、生产成本低,在国内外的发展十分迅速,广泛应用于建筑、包装和汽车等领域^[1-5]。在全球五大合成树脂中,PP产量占1/4左右,我国PP年产量高达1000万吨以上。然而,由于冲击韧性差,特别是

低温脆性这一致命弱点,使其无法作为工程塑料应用^[6-7]。因此,为提高PP的冲击强度、拓展其应用领域,科研人员开展了PP增韧改性研究,并在原位共聚和机械共混两方面都取得了突破性的进展^[7-8]。

二元乙丙橡胶(EPR)是PP共混改性最常用的

基金项目:国际合作项目(LAW-2017-0545),黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12511588),黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(135309347)

通讯作者:刘喜军,博士,教授,主要从事聚合物功能化和高性能化研究 E-mail: liuxijun2002@163.com

收稿日期:2019-12-01

引用格式:张博文,刘喜军,王宇威,等.乙丙嵌段共聚物改性PP/EPR共混物[J].工程塑料应用,2020,48(2):13-18.

Zhang Bowen, Liu Xijun, Wang Yuwei, et al. Ethylene-propylene block copolymer modified PP / EPR blends[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(2) : 13-18.

橡胶之一,由于PP/EPR体系为典型的结晶/非晶体系,PP/EPR共混物的力学性能、聚集态结构和加工性能必然要受到熔体相分离行为的影响^[9-10]。聚合物共混成型时,影响分散相在基体中稳定性和聚集态结构的因素主要包括各组分的含量、两相之间的黏度比、相界面之间的相互作用及加工条件等,增容剂能很好地改善相界面之间的相互作用,因此,为了提高共混物中分散相的稳定性,调控分散相的聚集态结构,越来越多的科研工作者对增容剂进行研究^[11-16]。

笔者选用高熔体流动速率(MFR)的PP和EPR,固定PP/EPR=80/20,以乙丙嵌段共聚物(EP)作为增容剂,研究了EP添加量对PP/EPR共混物力学性能、聚集态结构和加工性能的影响。

1 实验部分

1.1 原材料

PP: PP3155E5,重均分子量(M_w)= 15.8×10^4 ,聚合物分散性指数(PDI)=4.18,埃克森美孚亚太研发有限公司;

EPR: Vistalon722, $M_w=16.5 \times 10^4$, PDI=3.61,埃克森美孚亚太研发有限公司;

EP: $M_w=19.0 \times 10^4$, PDI=19.07,中国科学院长春应用化学研究所高性能合成橡胶及其复合材料重点实验室。

1.2 仪器及设备

哈克转矩流变仪: Polylab OS型,美国赛默飞世尔公司;

塑料粉碎机: PC180型,苏州利欣特机电有限公司;

注塑机: SSF38-K5型,宁波圣特龙机械制造有限公司;

缺口制样机: ZYK-Ⅲ型,长春市智能仪器设备有限公司;

冲击试验机: GT-7045-HMH型,高铁检测仪器(东莞)有限公司;

电子万能试验机: 5869型,美国Instron公司;

动态力学分析(DMA)仪: Q800型,美国TA仪器公司;

场发射扫描电子显微镜(SEM): ESEM XL-30型,美国FEI公司;

偏光显微镜(POM): Axio Imager A1 m型,德国Zeiss公司;

差示扫描量热(DSC)仪: Q20型,美国TA仪器

公司;

旋转变仪: AERS-G2型,美国TA仪器公司;

MFR仪: RYC-400A型,长春市元创仪器设备有限公司。

1.3 试样制备

将PP/EPR/EP共混物按照80/20/0, 76.8/19.2/4, 75.2/18.8/6, 73.6/18.4/8, 72/18/10, 70.4/17.6/12的质量比在哈克转矩流变仪中制备完成,混炼温度为190℃,混炼速率为60 r/min,混炼时间为5 min,混炼好的共混物经冷却、破碎后注射成标准测试样条,注塑机螺杆各区温度分别为190, 185, 180℃。

1.4 性能测试与表征

简支梁缺口冲击强度按GB/T 1043.1-2008测试,试样尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,在冲击缺口制样机上制得V型缺口试样,缺口底部半径为 (0.25 ± 0.05) mm,冲击摆锤能量4 J,每组试样重复测试多次取平均值;

拉伸强度和断裂伸长率按GB/T 1040.1-2018测试,环境温度为25℃,拉伸速率为50 mm/min,每组试样重复测试多次取平均值;

流变性能: 测量仪器的夹具为直径25 mm的平板,温度190℃,在应变8%的条件下,对试样进行动态频率扫描测试,频率范围: 0.01~628 rad/s;

DMA分析: 测试方式为单悬臂梁,升温速度为3℃/min,测试温度为-100~100℃,频率为1 Hz,振幅为15 μm;

SEM分析: 观察共混物的低温脆断面形貌,断面放入60℃的二甲苯中刻蚀2 h后取出,断面观察前经喷金处理,加速电压为15 kV;

POM分析: 在热台上将样品加热到180℃压成20 μm左右的薄膜,并保温10 min后以10℃/min的降温速度,缓慢冷却到130℃,在130℃下保温10 min,然后观察共混物结晶形态;

DSC分析: 称取5~10 mg试样放入铝坩埚中,在N₂气氛下,以10℃/min升温至200℃,恒温5 min消除试样热历史,然后以10℃/min降温至40℃,最后以10℃/min升温至200℃,记录试样的DSC曲线;

MFR按GB/T 3682.1-2018测试,测试温度为230℃,负荷为2.16 kg,切取样条时间间隔为10 s,称量多段样条取平均值。

2 结果与讨论

2.1 PP/EPR/EP 共混物的力学性能

(1) 缺口冲击强度。

图 1 是 PP/EPR/EP 共混物的缺口冲击强度。随着 EP 的加入,共混物的缺口冲击强度不断增加,当 EP 质量分数达到 8% 时,缺口冲击强度达到最大值,与纯 PP/EPR 共混物相比提高了 2.26 倍,证明在较低用量时,EP 对 PP/EPR 共混物有良好的增容作用,有效地改善了共混物的性能。但当进一步增加 EP 用量时,共混物的缺口冲击强度开始下降。是因为当 EP 用量较低时,EP 主要分散在 PP 基体和 EPR 分散相之间的界面层,这提高了 PP 和 EPR 之间的界面黏性,起到减小分散相尺寸、稳定分散相结构的作用,进而提高了共混物的缺口冲击强度^[17];随着 EP 用量的进一步增加,超过了橡胶相粒子表面的容纳能力,EP 发生团聚并单独成相,存在于 EPR 相之中或游离于 EPR 相之外。这样 EP 的作用由增容转变为增韧,但因其韧性远不如 EPR,故共混物的缺口冲击强度开始不断降低。

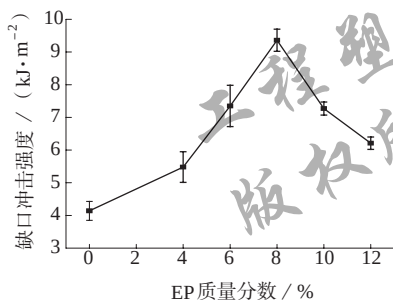


图 1 PP/EPR/EP 共混物的缺口冲击强度

(2) 拉伸性能。

图 2 是 PP/EPR/EP 共混物的拉伸性能。

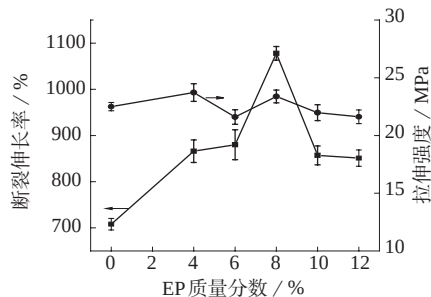


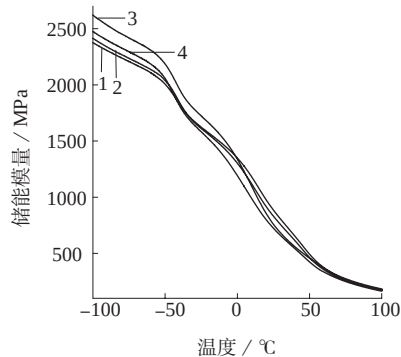
图 2 PP/EPR/EP 共混物的断裂伸长率和拉伸强度

随着 EP 添加量的增加,共混物的拉伸强度基本保持不变,断裂伸长率表现出与缺口冲击强度相似的变化规律,随着 EP 添加量的增加出现先上升后下降的变化趋势,当 EP 质量分数达到 8% 时,共混物的断裂伸长率达到最大值 1078%,与 PP/EPR 相比提高了 52.26%,随着 EP 添加量的进一步增加,

断裂伸长率开始急剧降低。主要原因是 PP 为晶态聚合物, EPR 为非晶态聚合物, EP 的加入提高了 PP 和 EPR 的界面相容性,使得共混物的断裂伸长率增加,当 EP 质量分数超过 8% 后,部分 EP 在界面处出现团聚而不是分布在 PP 和 EPR 的界面处,拉伸时团聚的 EP 会成为应力集中点,从而导致共混物的断裂伸长率急剧降低^[18-19],同时 EPR 和 EP 中乙烯含量较高,起到异相成核的作用,破坏了 PP 结晶,使 PP 结晶细化,所以共混物的拉伸强度基本不变。从上述结果可以看出,增容剂 EP 质量分数为 8% 时, PP/EPR/EP 共混物的缺口冲击强度和断裂伸长率均达到最高值,说明 EP 添加量存在一个临界添加量。

(3) 储能模量。

图 3 是 PP/EPR/EP 共混物的储能模量。由图 3 可见,随着温度的升高, PP/EPR 共混物和 PP/EPR/EP 共混物的储能模量不断下降,并且储能模量在整个下降过程中出现两次明显骤降。当温度在 -55 ~ -25℃ 范围时, EPR 分子链段运动开始,共混物的储能模量出现第一次明显骤降;当温度在 -10 ~ 25℃ 范围时, PP 分子链段运动变得更加容易,共混物的储能模量出现第二次明显骤降,共混物的储能模量两次明显骤降分别对应着 EPR 和 PP 的玻璃化转变温度 (T_g)。另外,当温度低于 EPR 的 T_g 时, PP/EPR/EP 共混物的储能模量随着 EP 添加量的增加明显高于 PP/EPR 共混物, EP 质量分数在 8% 时, PP/EPR/EP 共混物的储能模量最高,这是因为此时 EPR 在基体中的分散性最好。



EP 质量分数: 1—0%; 2—4%; 3—8%; 4—12%

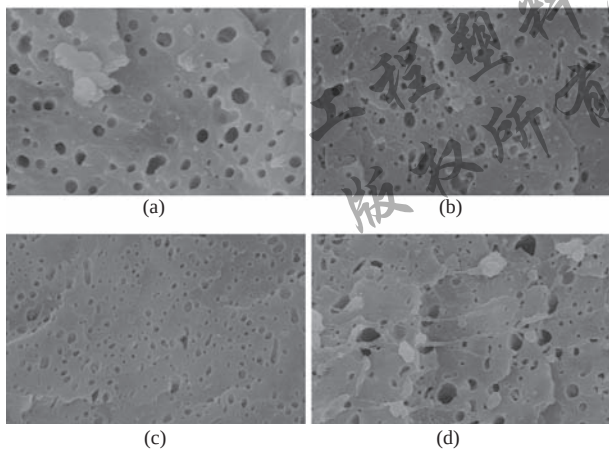
图 3 PP/EPR/EP 共混物的储能模量

2.2 PP/EPR/EP 共混物的聚集态结构

(1) PP/EPR/EP 共混物的相形态结构。

图 4 是 PP/EPR/EP 共混物脆断面的 SEM 照片。从图 4a 可以看出, PP/EPR 共混物呈现明显的相分离状态,分散相 EPR 相区尺寸较大,在 PP 基

体中分布不均匀。随着 EP 添加量的增加,分散相 EPR (刻蚀后孔洞) 尺寸逐渐减小,当 EP 质量分数为 8% 时,分散相 EPR 尺寸降至最小、形态更规则,说明 EP 的加入降低了分散相与基体之间的界面张力、增加了体系的相容性,分散相粒径明显小于 PP/EPR 共混物,当 EP 质量分数超过 8% 后,PP/EPR 共混物分散相粒径反而变大,孔洞形状逐渐变得不规则;另外,在分散相内部和外部均出现不能被甲苯刻蚀掉的部分,推测是由过饱和 EP 形成的单独的分散相,因为 EP 中乙烯链段具有一定的结晶能力因而未被甲苯刻蚀掉。EP 增容 PP/EPR 共混物和大多数共混物一样,增容剂添加量存在一个临界添加量,当 EP 添加量较低时,EP 主要分散在 PP 与 EPR 两相界面,起到减小相尺寸、稳定相结构的作用,当 EP 添加量超过临界添加量时自身聚集形成新的相区,而不是在 PP 与 EPR 的界面区域扩散,这进一步验证了在较高 EP 添加量下 PP/EPR 共混物的缺口冲击强度、断裂伸长率和储能模量不升反降的原因^[20-21]。

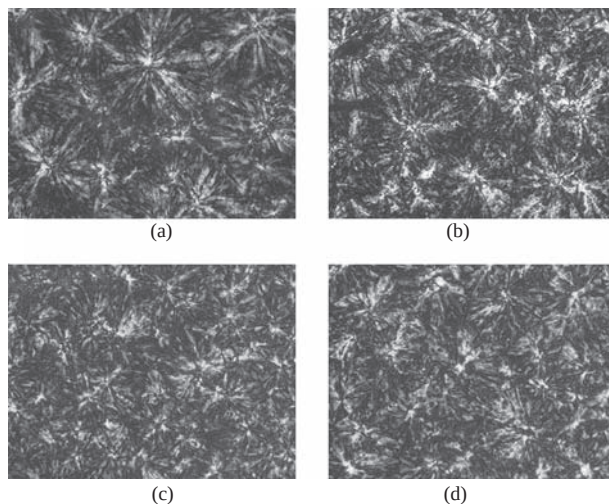


EP 质量分数: a—0%; b—4%; c—8%; d—12%

图 4 PP/EPR/EP 共混物刻蚀断面 SEM 照片(放大 3200 倍)

(2) PP/EPR/EP 共混物的结晶形态结构。

图 5 是 PP/EPR/EP 共混物的 POM 照片。从图 5 可以看到,PP 球晶的黑十字消光现象并不明显,因为 EPR 的存在一定程度上影响了 PP 结晶。PP/EPR 共混物的球晶尺寸较大,球晶之间界限相对较为清晰,随着 EP 添加量的增加,由于 EP 中乙烯链段起到了成核剂作用,PP/EPR/EP 共混物的球晶尺寸逐渐变小,球晶之间的界限逐渐模糊,晶体不完善程度提高,致使共混物的韧性提高。当 EP 质量分数超过 8% 后,球晶尺寸略有增大,并且球晶之间的界限变得逐渐清晰^[22-23]。该现象进一步验证了



EP 质量分数: a—0%; b—4%; c—8%; d—12%

图 5 PP/EPR/EP 共混物的 POM 照片(放大 500 倍)

力学性能的结果。

PP 与 EPR 是热力学不相容体系,EP 的引入必然会对 PP 的结晶过程产生影响,进而影响共混物的性能。表 1 为 PP/EPR/EP 共混物的 T_m , T_c 和 X_c 。从表 1 可以看出,EP 的加入提高了共混物中 PP 相的结晶温度和结晶度,并且随着 EP 添加量的增加逐渐升高。国内外学者研究表明,PP/橡胶共混物中橡胶相能对 PP 起到一定异相成核作用^[25-26],促进 PP 相结晶温度和结晶度的提高;另一方面,橡胶相也可能阻碍 PP 结晶进而降低其结晶度和结晶温度^[17]。表 1 数据也说明 EP 的异相成核作用占主导地位。另外,随着 EP 添加量的增加,共混物中 PP 相的熔点稍有下降,橡胶相的引入破坏了 PP 相结晶的规整性,导致 PP 相熔点降低。

表 1 PP/EPR/EP 共混物的 T_m , T_c 和 X_c

PP/EPR/EP	$T_m^{1)}/^{\circ}\text{C}$	$T_c^{2)}/^{\circ}\text{C}$	$X_c^{3)}/\%$
80 / 20 / 0	163.19	116.19	42.27
76.8 / 19.2 / 4	162.98	116.21	44.58
73.6 / 18.4 / 8	162.23	118.49	49.09
70.4 / 17.6 / 12	162.03	118.61	51.49

注: 1) T_m 为熔点; 2) T_c 为结晶温度; 3) X_c 为结晶度, PP100% 结晶度的熔融焓取 207.1 J/g^[24]。

2.3 PP/EPR/EP 共混物的加工性能

图 6 为 PP/EPR/EP 共混物的流变性能。从图 6 可以看出,PP/EPR/EP 共混物的复数黏度随频率增大先缓慢下降,达到一定频率后开始急速下降,呈现出明显的剪切变稀行为,属于典型的假塑性流体。PP/EPR/EP 共混物的复数黏度均高于 PP/EPR 共混物,并且在低剪切频率下更加明显。EP 作为增容剂引入共混体系增加了分子链间的缠结程度,提高了低剪切频率下共混物的复数黏度;随着

剪切频率的增加,分子链运动逐渐滞后于频率变化,熔体表现出线性分子链特征,黏度急剧下降,并且原来缠结程度越大的下降越快^[27-30],因此适当提高剪切速率更有利于增加熔体的流动性。

熔融状态下 PP 的黏度很小,因为 PP 呈线性分子链结构;熔融状态下 EPR 黏度很大,因为 EPR 为无规共聚物,分子链间运动相对困难,具有较高的熔体强度。从图 6 可以看出,当 EP 的质量分数为 8% 时,PP/EPR/EP 共混物的复数黏度最高,所有 EP 均匀分散在 EPR 周围,由于 EP 与 PP, EPR 均具有良好的相容性,致使 PP 和 EPR 分子间相互作用增加,进而导致共混物的复数黏度提高、熔体强度增加^[31]。

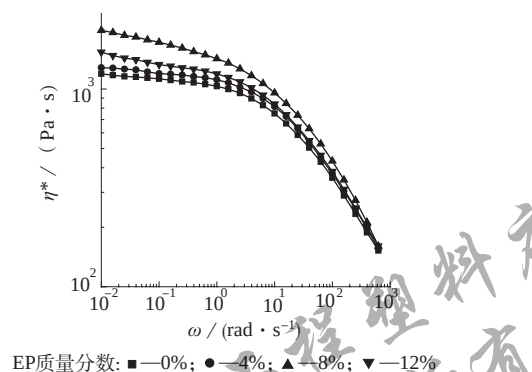


图 6 PP/EPR/EP 共混物的流变性能

PP 为结晶聚合物, MFR 为 35.3 g/10 min 较高; EPR 为非晶聚合物, MFR 为 4.1 g/10 min 较低; PP/EPR(80/20) 共混物的 MFR 为 15.8 g/10 min。EP 引入 PP/EPR 共混物后, MFR 变化情况见表 2。随着 EP 添加量的增加, PP/EPR/EP 共混物的 MFR 呈现先上升后下降的趋势, 当 EP 质量分数为 8% 时, MFR 达到最大值 21.4 g/10 min。EP 分子量较大且分布很宽, 具有增容和增黏双重作用, 当 EP 含量较低时, EP 具有良好的增容作用, 致使共混物的黏度明显下降, MFR 大幅度提高; 当 EP 含量较高时, 部分 EP 发生团聚并独立成相, 由于 EP 自身的 MFR 较小, 独立成相的 EP 对熔体流动起到阻碍作用, 增黏作用占主导, MFR 随之下降, 但仍高于 PP/EPR 共混物^[32-33]。

表 2 PP/EPR/EP 共混物的 MFR g/10 min

PP/EPR/EP	MFR
80/20/0	15.8
76.8/19.2/4	19.1
75.2/18.8/6	19.7
73.6/18.4/8	21.4
72/18/10	20.3
70.4/17.6/12	20.2

3 结论

(1) EP 的加入能有效降低 EPR 相区尺寸和 PP 结晶规整性, 在 EP 添加量较低时能明显提高共混物的缺口冲击强度、断裂伸长率和储能模量, 且拉伸强度几乎不降低;

(2) 当 EP 质量分数达到 8% 时, 分散相尺寸最小、增容效果最好、相分离程度最低, 缺口冲击强度和断裂伸长率最高, 加工性能最好;

(3) 随着 EP 加入量的增加, PP/EPR 共混物中 PP 相的结晶温度和结晶度不断升高, 熔点稍有降低。

参考文献

- [1] Chen Feng, Shangguan Yonggang, Jiang Yishu, et al. Toughening with little rigidity loss and mechanism for modified polypropylene by polymer particles with core-shell structure[J]. Polymer, 2015, 65:81-92.
- [2] Gharzouli N, Doufroume R, Riahi F, et al. Effects of nanosilica filler surface modification and compatibilization on the mechanical, thermal and microstructure of PP/EPR blends[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2019, 33(5):445-467.
- [3] 尹朝清, 杨泽, 刘乐文. PP/PS 合金的性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(4):35-39, 58.
- [4] Qiu Biwei, Chen Feng, Shangguan Yonggang, et al. Simultaneously enhancing strength and toughness for impact polypropylene copolymers by regulating the dispersed phase with high density polyethylene[J]. RSC Advances, 2014, 4(103):58999-59008.
- [5] 陈荣源, 张忠厚, 韩琳, 等. 近熔点混炼制备 PP/MMT 复合材料的性能[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(12):31-35, 41.
- [6] 张春晖, 上官勇刚, 谭业强, 等. 抗冲共聚聚丙烯及其级分的流变学研究[J]. 高等学校化学学报, 2012, 33(2):430-436.
- [7] Zhang Chunyu, Dong Bo, Zhang Hexin, et al. Morphology and properties of PP in-reactor alloys prepared with a $MgCl_2/TiCl_4$ /diisobutyl phthalate/phosphate tris-methylphenyl ester catalyst system[J]. Chemical Research in Chinese Universities, 2018, 34(1):145-150.
- [8] 路海冰. EPDM/PP 热塑性弹性体的制备及研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [9] 张洪斌, 周持兴. 流场中高分子共混物分散相的形态变化[J]. 高

- 分子材料科学与工程,1999,15(4):4-7.
- Zhang Hongbin, Zhou Chixing. Variation of the dispersed phase morphology of polymer blends in flow field[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 1999, 15(4):4-7.
- [10] Baranov A O, Medintseva T I, Zhorina L A, et al. Dispersivity of rubbers in thermoplastic polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 73(8):1563-1567.
- [11] Feng Zhiliu, Dong Lisong, Zhang Bolan, et al. Investigation of PP-EPR diblock copolymer as compatibilizer for PP / EPT Blend[J]. Polymer Communications, 1985, 3:216-225.
- [12] 莫志深,王立筱,张宏放,等. 乙丙嵌段共聚物的 X-射线衍射研究[J]. 高分子学报,1988(6):441-446.
- Mo Zhishen, Wang Lixiao, Zhang Hongfang, et al. An X-ray investigation of block copolymers of ethylene and propylene[J]. Acta Polymerica Sinica, 1988(6):441-446.
- [13] Kim B K, Do I H. Effect of viscosity ratio, rubber composition, and peroxide/coagent treatment in PP/EPR blends[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 61(3):439-447.
- [14] Kim B K, Do I H. Particles versus fibrillar morphology in polyolefin ternary blends[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 60(12):2207-2218.
- [15] 王益龙,冯之榴,黄葆同. PP-EPR-PP 增容 PP/EPT 的研究[J]. 高分子材料科学与工程,1998(2):119-121.
- Wang Yilong, Feng Zhiliu, Huang Baotong. PP-EPR-PP block copolymer compatibilizing PP/EPT[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 1998(2):119-121.
- [16] Nitta K, Kawada T, Yamahiro M, et al. Polypropylene-block-poly(ethylene-co-propylene) addition to polypropylene / poly(ethylene-co-propylene) blends: Morphology and mechanical properties[J]. Polymer, 2000, 41(18):6765-6771.
- [17] Jia Erwen, Shangguan Yonggang, Xiong Junwen, et al. Fabrication of polypropylene blends with excellent low-temperature toughness and balanced toughness-rigidity by a combination of EPR and SEEPS[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(3). DOI:10.1002/app.45714.
- [18] 吕播瑞,畅贝哲,白静静. 功能化纳米 SiO₂ / 热塑性弹性体复合材料的制备及性能[J]. 塑料工业, 2017(12):49-53.
- Lyu Borui, Chang Beizhe, Bai Jingjing. Preparation and characterization of functional nano-silica/thermoplastic elastomer composites[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(12):49-53.
- [19] Shangguan Yonggang, Chen Feng, Yang Jie, et al. A new approach to fabricate polypropylene alloy with excellent low-temperature toughness and balanced toughness-rigidity through unmatched thermal expansion coefficients between components[J]. Polymer, 2017, 112:318-324.
- [20] Zhang Chunhui, Shangguan Yonggang, Chen Ruifen, et al. Morphology, microstructure and compatibility of impact polypropylene copolymer[J]. Polymer, 2010, 51(21):4969-4977.
- [21] Mazidi M M, Aghjeh M K R. Effects of blend composition and compatibilization on the melt rheology and phase morphology of binary and ternary PP/PA6/EPDM blends[J]. Polymer Bulletin, 2015, 72(8):1975-2000.
- [22] 张春雨,董博,张贺新,等. 本体共聚合制备丙烯/1-丁烯共混物及表征[J]. 高等学校化学学报, 2014, 35(9):2014-2018.
- Zhang Chunyu, Dong Bo, Zhang Hexin, et al. Preparation and characterization of propylene/1-butene alloy with bulk copolymerization[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2016, 35(9):2014-2018.
- [23] 邓康清,姜兆华, Winnik M A. iPP/EBR 共混物的结晶和相形态[J]. 高分子材料科学与工程, 2009, 25(11):57-60.
- Deng Kangqing, Jiang Zhaohua, Winnik M A. Crystallization and Phase Morphology of iPP/EBR Binary Blend[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2009, 25(11):57-60.
- [24] Parameswaranpillai J, Dubey V K, Sisanth K S, et al. Tailoring of interface of polypropylene/polystyrene/carbon nanofibre composites by polystyrene-block-poly(ethylene-ran-butylene)-block-polystyrene[J]. Polymer Testing, 2016, 51:131-141.
- [25] Abreu F, Forte M M C, Liberman S A. SBS and SEBS block copolymers as impact modifiers for polypropylene compounds[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 95(2):254-263.
- [26] Denac M, Smit I, Musil V. Polypropylene/talc/SEBS(SEBS-g-MA) composites. Part 1. Structure[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(8):1094-1101.
- [27] 王雅珍,敖琳,岳成娥,等. PP/TiO₂ 复合材料老化前后动态流变性能研究[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(8):15-20.
- Wang Yazhen, Ao Lin, Yue Cheng'e, et al. Study on dynamic rheology properties of PP/TiO₂ blends before and after aging[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(8):15-20.
- [28] 马立群,董少波,石佳,等. 利用废旧聚丙烯腈纤维织物制备聚丙烯用抗老化剂[J]. 中国塑料, 2017, 31(3):82-89.
- Ma Liqun, Dong Shaobo, Shi Jia, et al. Preparation of an anti-aging agent for polypropylene by waste polyacrylonitrile fabrics[J]. China Plastics, 2017, 31(3):82-89.
- [29] Chen Guangshun, Guo Shaoyun, Li Huilin. Ultrasonic improvement of the compatibility and rheological behavior of high-density polyethylene/polystyrene blends[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 86(1):23-32.
- [30] Jaziri M, Kallel T K, Mbarek S, et al. Morphology development in polyethylene/polystyrene blends: the influence of processing conditions and interfacial modification[J]. Polymer International, 2005, 54(10):1384-1391.
- [31] Diaz M F, Barbosa S E. Polyethylene-polystyrene grafting reaction: Effects of polyethylene molecular weight[J]. Polymer, 2002, 43: 4851-4858.
- [32] 李俊杰,张琦,张师军. 增容剂对短切 GF 增强 PP 复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(3):7-13.
- Li Junjie, Zhang Qi, Zhang Shijun. Effects of compatibilizers on properties of short GF reinforced PP[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(3):7-13.
- [33] 薛斌. PA1010 含量对 PLA/PA1010 共混物性能的影响[J]. 塑料工业, 2018, 46(10):134-138.
- Xue Bin. Effect of PA1010 content on properties of PLA/PA1010 blends[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(10):134-138.