

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.04.007

PP/PS 合金的性能

尹朝清^{1,2,3}, 杨泽^{1,2,3}, 刘乐文^{1,2,3}

(1. 上海金发科技发展有限公司, 上海 201714; 2. 上海工程塑料功能化工程技术研究中心, 上海 201714;

3. 江苏金发科技新材料有限公司, 江苏昆山 215300)

摘要: 聚丙烯/聚苯乙烯 (PP/PS) 为两相不相容体系, 采用嵌段共聚物, 包括苯乙烯-丁二烯-苯乙烯 (SBS)、苯乙烯-乙烯/丁烯-苯乙烯 (SEBS)、苯乙烯-乙烯/丙烯二嵌段共聚物 (SEP) 与苯乙烯-乙烯/丙烯-苯乙烯 (SEPS), 以及接枝聚合物, 包括聚丙烯接枝马来酸酐 (PP-g-MAH) 与聚丙烯接枝聚苯乙烯 (PP-g-PS) 等不同类型增容剂改善 PP/PS 合金的相容性。通过力学性能测试、收缩率测试与扫描电子显微镜 (SEM) 表征等手段研究了 PS 的含量、增容剂种类及含量对 PP/PS 合金相形态及力学性能的影响。结果表明, 增容剂的引入可有效降低分散相的尺寸, 改善界面相容性, 提高合金的冲击韧性。SEP 具有最佳的增容作用。

关键词: 聚丙烯; 聚苯乙烯; 苯乙烯-乙烯/丙烯二嵌段共聚物

中图分类号: TQ325.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)04-0035-05

Properties of PP/PS Alloys

Yin Chaoqing^{1,2,3}, Yang Ze^{1,2,3}, Liu Lewen^{1,2,3}

(1. Shanghai Kingfa Science & Technology Co. Ltd., Shanghai 201714, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Functionalizing Engineering Plastics, Shanghai 201714, China; 3. Jiangsu Kingfa Science & Technology Advanced Materials Co. Ltd., Kunshan 215300, China)

Abstract: Polypropylene (PP) and polystyrene (PS) were immiscible, the dependence of phase morphology of PP/PS composite on various compatilizers were studied, including block copolymers, such as styrene-butadiene-styrene copolymer (SBS), styrene-ethylene/butylene-styrene copolymer (SEBS), styrene-ethylene/propylene diblock copolymer (SEP) and styrene-ethylene/propylene-styrene copolymer (SEPS), and grafted copolymers, such as maleic anhydride grafted polypropylene (PP-g-MAH) and polypropylene-graft-polystyrene (PP-g-PS). The effects of PS content, compatilizers and their concentrations on the phase morphology and physical properties were investigated by means of mechanical test, mold shrinkage test and scanning electron microscope (SEM), it shows that the introduction of compatilizers can decrease the average sizes of dispersed phase dramatically, strengthen the interfacial adhesion between phases, and improve the toughness of alloys. The compatibilizing effect of SEP is most noticeable.

Keywords: polypropylene; polystyrene; styrene-ethylene/propylene diblock copolymer

聚丙烯 (PP) 具有质量轻, 价格低廉, 耐化学药品性能优异, 耐热稳定性良好等优点, 广泛应用于家用电器、交通运输、电动工具等领域, 但 PP 有许多缺点, 例如成型收缩率大, 硬度偏低, 印刷性能较差等, 限制了其更广泛的应用。与 PP 相比, 聚苯乙烯 (PS) 的耐环境应力开裂性、韧性和耐化学药品性较差, 但是 PS 具有更高的模量、较高的表面硬度、低收缩率及优良的印刷性能, 广泛应用于家电、办公设

备、家居产品等各行各业。由于 PS 与 PP 的加工温度接近, 诸多学者就增容剂和制备工艺条件等因素对 PP/PS 合金的影响进行了广泛研究^[1-3], 以制备集 PP、PS 两者优良性能于一体的聚烯烃工程塑料。

PP 为半晶型聚合物, PS 为无定形聚合物, 两者为典型不相容体系, 无法形成稳定的相结构, 界面粘结强度较差, A. Halimatudahliana 等^[4]通过扫描电子显微镜 (SEM) 表征手段发现, 当 PS 的质量

通讯作者: 尹朝清, 博士, 主要从事高性能聚合物及其改性 E-mail: yunzocheng01@126.com

收稿日期: 2019-01-16

引用格式: 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.

Yin Chaoqing, Yang Ze, Liu Lewen. Properties of PP/PS alloys[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(4): 35-39, 58.

分数小于 50% 时, PS 为分散相; 而 PS 质量分数大于 50% 时, 合金倾向于形成双连续相^[5]。近年来, 国内外对影响 PP/PS 合金相形态的因素进行大量的研究, 主要研究了以下不同类型的增容剂对 PP/PS 共混体系的影响: 接枝共聚物^[6-9]、嵌段共聚物^[10-12]、原位反应增容^[13-16]。L. D'orazio 等^[17]研究了不饱和接枝共聚物 PP-g-PS 的加入对 PP/PS 合金体系热行为、结晶行为及微观形貌的影响, PP/PS 合金的相形态属于典型不相容体系, 随着体系中 PP-g-PS 含量的增加, 连续相-分散相的相界面变模糊, 球形分散相的尺寸和数量逐渐降低, 表明 PP/PS 的分散程度改善, 界面粘结性有所提高。P. H. P. Macaubas 等^[18]在 PP/PS (90/10) 体系中, 引入苯乙烯-丁二烯-苯乙烯 (SBS) 或苯乙烯-乙烯/丁烯-苯乙烯 (SEBS) 两种嵌段共聚物作为增容剂, 结果表明, 分散相尺寸显著减小, 由 PP/PS 合金的微观形貌, 界面张力及黏度可知, 与 SBS 相比, SEBS 具有更好的增容效果。

笔者研究了 PP/PS 合金中 PS 的含量对合金性能的影响, 评估了 SBS, SEBS, 苯乙烯-乙烯/丙烯二嵌段共聚物 (SEP) 与苯乙烯-乙烯/丙烯-苯乙烯 (SEPS) 及接枝共聚物 PP-g-MAH, PP-g-PS, 对 PP/PS 合金微观相形态的影响, 并对合金的综合性能进行了详细的表征。

1 实验部分

1.1 原材料

PP: 牌号 PP SP179, 粒料, 中国石油天然气股份有限公司;

PS: 牌号 HIPS 622P, 粒料, 上海赛科石油化工有限公司;

SEP-1, SEP-2, SEPS, SEBS: 粒料, 科腾聚合物贸易 (上海) 有限公司;

SBS: 粒料, 中国石油化工股份有限公司巴陵分公司;

接枝型增容剂: PP-g-PS, 粒料, PP-g-MAH (牌号 PC-1), 粒料, 佛山市南海柏晨高分子新材料有限公司;

抗氧化剂、润滑剂: 粉体, 巴斯夫股份有限公司。

1.2 设备及仪器

双螺杆挤出机: SHJ-30 型, 南京瑞亚高聚物装备有限公司;

注塑机: HTB80 型, 宁波海天机械有限公司;

万能试验机: CMT40204 型, 深圳新三思材料

检测有限公司;

摆锤冲击试验机: B5113 型, 德国 Zwick/Roell 公司;

SEM: S-3400N 型, 日本日立集团;

密度测试仪: XP204 型, 瑞士梅特勒-托利多公司;

熔体流动速率 (MFR) 测试仪: 4100 型, 德国 Zwick/Roell 公司。

1.3 试样制备

将 PP, PS 以及增容剂等原材料按比例与抗氧化剂、润滑剂混合均匀, 具体配方见表 1。采用双螺杆挤出造粒后, 注塑样条测试。挤出温度为 210℃, 喂料速率为 40 kg/h, 转速为 400 r/min, 注塑温度为 210℃。

表 1 试样的配方

试样 编号	PP	PS	SEBS	SEP-2	PP-g-PS	抗氧化剂	润滑剂
1 [#]	100					0.2	0.2
2 [#]	95	5	1.25			0.2	0.2
3 [#]	90	10	2.50			0.2	0.2
4 [#]	85	15	3.75			0.2	0.2
5 [#]	80	20	5.00			0.2	0.2
6 [#]	60	40	5.00			0.2	0.2
7 [#]	40	60	5.00			0.2	0.2
8 [#]	20	80	5.00			0.2	0.2
9 [#]		100				0.2	0.2
10 [#]	80	20				0.2	0.2
11 [#]	80	20		1.00		0.2	0.2
12 [#]	80	20		2.00		0.2	0.2
13 [#]	80	20		3.00		0.2	0.2
14 [#]	80	20		5.00		0.2	0.2
15 [#]	80	20		8.00		0.2	0.2
16 [#]	80	20			3.00	0.2	0.2
17 [#]	80	20			5.00	0.2	0.2

1.4 性能测试与表征

拉伸强度按照 GB/T 1040.1-2006 测试, 拉伸速率为 50 mm/min;

弯曲强度按照 GB/T 9341-2000 测试, 弯曲速率为 2 mm/min, 挠度 10 mm;

缺口冲击强度按照 GB/T 1843-2008 测试;

密度按照 GB/T 1033-2008 测试;

MFR 按 GB/T 3682-2018 测试, 载荷 2.16 kg, 温度 230℃;

收缩率测试: 收缩率板尺寸为 200 mm × 50 mm × 3.0 mm, 室温调节 24 h 后, 测试样片沿注塑方向尺寸, 根据模具尺寸计算材料的收缩率;

SEM 测试: 取冲击试样, 在液氮中冷冻脆断, 喷金处理, 观察断面, 测试电压 15 V, 电流 40 μA。

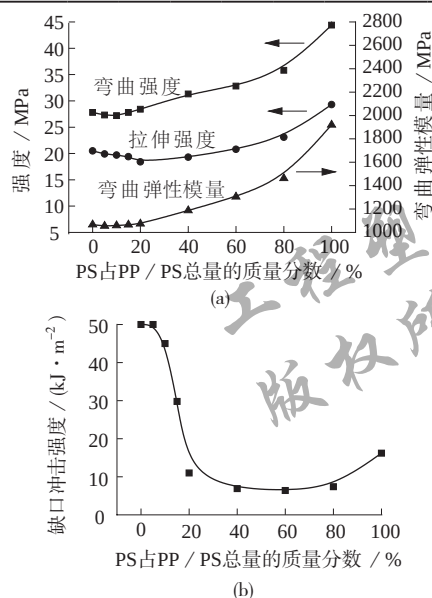
2 结果与讨论

2.1 PS含量对PP/PS合金性能的影响

为了保证合金的冲击韧性,选择了高抗冲聚苯乙烯(PS-HI)和高抗冲聚丙烯制备PP/PS合金,根据P. H. P. Macaubas等^[18]的研究成果,当分散相PS的含量 $\leq 20\%$ 时,增容剂嵌段共聚物SEBS添加量为PS组分的25%,当PS含量 $\geq 40\%$ 时,合金发生相反转。表2为不同PS含量的PP/PS合金的物理性能,图1为不同PS含量的PP/PS合金的力学性能。

表2 不同PS含量的PP/PS合金物理性能

性能	试样编号								
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]
密度/(g·cm ⁻³)	0.891	0.892	0.900	0.906	0.915	0.937	0.965	0.988	1.018
收缩率/%	1.65	1.55	1.41	1.30	1.15	0.86	0.75	0.60	0.48



a—拉伸、弯曲强度,弯曲弹性模量; b—缺口冲击强度

图1 不同PS含量的PP/PS合金的力学性能

由图1a可知,随着合金中PS含量的增加,PP/PS合金的拉伸强度、弯曲强度及弯曲弹性模量均呈现逐步上升的趋势,弯曲弹性模量由1066 MPa提高到1920 MPa,这主要得益于PS自身优异的力学性能。从图1b可以看出,当PS含量小于PP/PS树脂总量的20%时,随着合金中PS含量的增加,合金的缺口冲击强度大幅度降低,由49 kJ/m²降低到11 kJ/m²,发生突变,进一步增加PS的含量,合金的缺口冲击强度基本保持不变,当PS含量为PP/PS树脂总量的40%或60%时,合金的缺口冲击强度很低,且低于纯PS和PP,这可能是由于合金中PP与PS含量接近时,合金的混乱度最高,此时PP

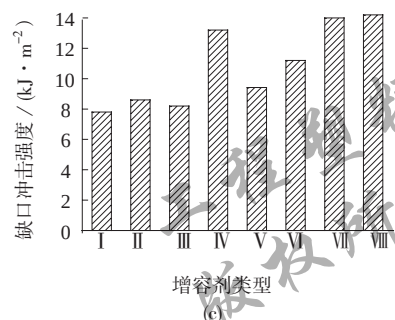
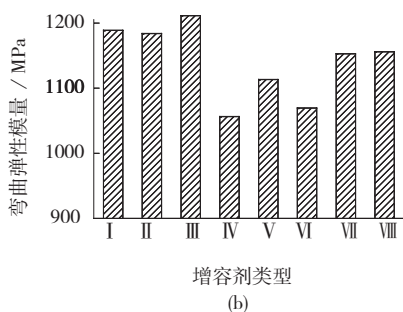
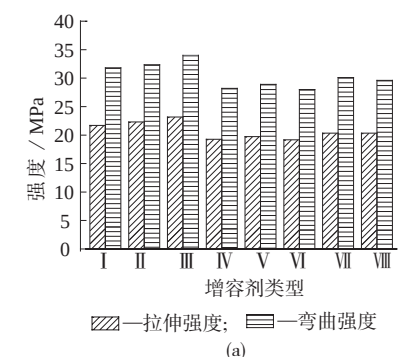
/PS合金的相形态对冲击性能起决定作用,两者为不相容体系,分散相与连续相间的界面作用弱,界面强度低,受外力易被破坏,缺口冲击强度低。另外,随着PS含量的增加,合金的收缩率下降,当PS含量为PP/PS树脂总量的20%时,收缩率由1.65%降低到1.15%,具备替代低结晶或无定形聚合物产品的潜力,有利于解决部分制件注塑成型的翘曲变形问题。

2.2 增容剂类型对PP/PS合金性能的影响

众所周知,要使高分子合金混合后充分发挥各自的优点,实现材料综合性能的提高,需尽量使共混组分形成分子级均匀的混合物,PP为结晶材料,PS为无定形材料,属于典型的不相容体系,熔融混合后形成海岛结构,增容剂可通过与聚合物的亲和作用或反应键合,改善两者的相容性。从化学结构方面考虑,选择的增容剂一般需要同时具有PP和PS链段,以保证发挥桥接作用,研究了6种不同类型的增容剂,包括嵌段共聚物SBS, SEBS, SEP, SEPS和接枝共聚物PP-g-MAH, PP-g-PS,对PP/PS合金性能及相形态影响,增容剂添加量为分散相含量的0%~25%,为充分对比各增容剂的差异,PP/PS/增容剂的质量比统一为80/20/5。图2为不同增容剂对PP/PS合金力学性能的影响,由图2a和图2b可知,接枝共聚物对拉伸强度、弯曲强度影响较小,嵌段共聚物尤其是SBS, SEBS, SEPS,由于本身分子链上存在双键或较长的脂肪链,使PP/PS合金的弯曲弹性模量有所降低。由图2c可知,增容剂PP-g-PS和PP-g-MAH加入后,合金的缺口冲击强度变化微小,而引入嵌段共聚物后,合金的缺口冲击强度明显提高,这可能是因为嵌段共聚物分子链中柔性链或双键的作用,有利于改善合金的韧性。

2.3 增容剂含量对PP/PS合金性能的影响

随着PP/PS体系中PS含量的增加,合金的冲击性能显著降低,这是限制PP/PS合金应用的主要约束条件之一,嵌段共聚物在改善PP/PS相容性的同时,有利于改善合金的冲击性能,因此评估了增容剂SEP-2的含量对PP/PS(80/20)合金韧性的影响,SEP-2含量为分散相PS含量的0%~40%,结果如图3所示。由图3可知,随着合金中增容剂含量的增加,冲击韧性提高,因为增容剂降低了PP/PS两相间的界面张力,当材料受到外力作用时,可有效传导和分散应力,避免应力集中,从而提高复合材料的冲击性能。SEP-2相对于PS的含量从15%提高



I—无; II—PP-g-PS; III—PC-1; IV—SBS; —SEBS;
VI—SEPS; VII—SEP-1; VIII—SEP-2

a—拉伸、弯曲强度; b—弯曲弹性模量; c—缺口冲击强度
图2 不同增容剂增容的PP/PS(80/20)合金的力学性能

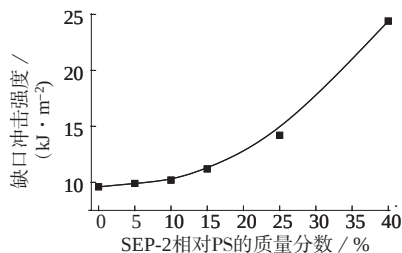


图3 不同SEP-2含量的PP/PS(80/20)合金的缺口冲击强度

到25%时,合金的缺口冲击强度从11.2 kJ/m²缓慢提高到14.2 kJ/m²,当SEP-2含量从25%提高到40%时,此时发生相转变,合金的缺口冲击强度快速提高到24.4 kJ/m²。表3为不同SEP-2含量的PP/PS合金的除缺口强度以外的力学性能。由表3可见,当SEP-2含量从25%提高到40%时,PP/PS合金断裂伸长率也有所提高,但是伴随着拉

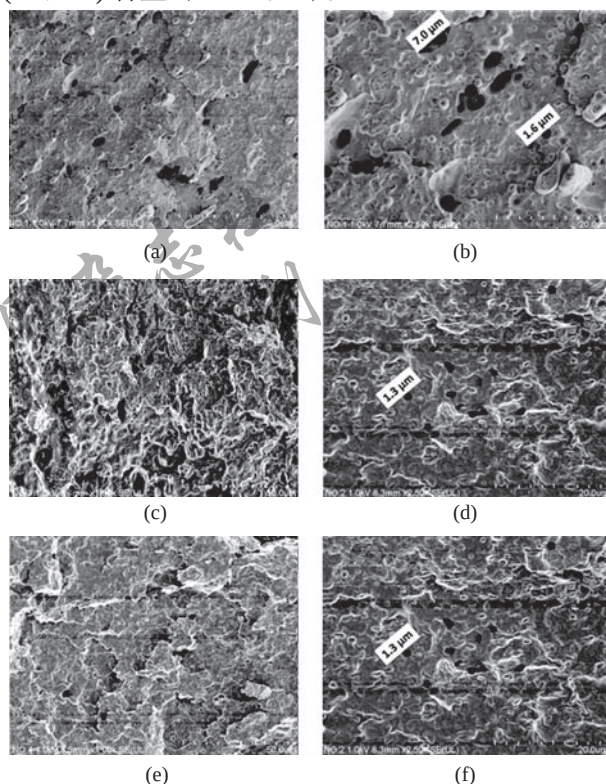
伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量的降低,因此需要根据实际应用情况选择相应含量的增容剂。

表3 SEP-2含量对PP/PS合金力学性能的影响

性能	试样编号					
	10 [#]	11 [#]	12 [#]	13 [#]	14 [#]	15 [#]
拉伸强度/MPa	22.3	22.2	22.1	21.7	20.7	19.5
断裂伸长率/%	24	26	22	31	32	39
弯曲强度/MPa	32.6	31.6	31.6	31.2	29.2	32.2
弯曲弹性模量/MPa	1230	1240	1245	1225	1115	1070

2.4 增容剂对PP/PS合金微观相形貌的影响

图4为不同嵌段共聚物SEP-2含量的PP/PS(80/20)合金的SEM照片。



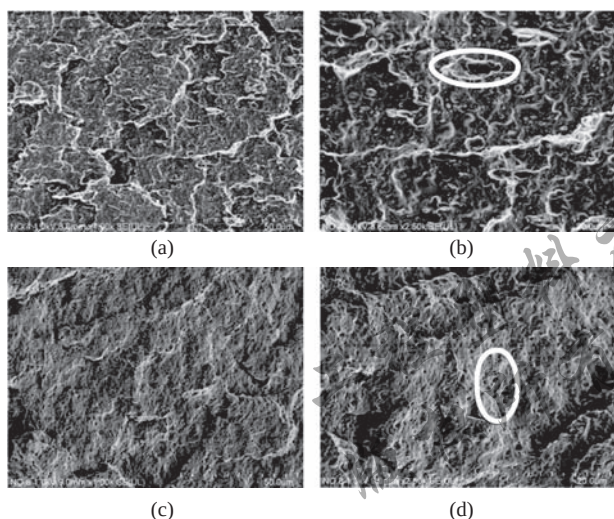
a—10[#]试样(放大1000倍); b—10[#]试样(放大2500倍);
c—13[#]试样(放大1000倍); d—13[#]试样(放大2500倍);
e—14[#]试样(放大1000倍); f—14[#]试样(放大2500倍)

图4 不同SEP-2添加量的PP/PS-HI(80/20)合金的SEM照片

由图4可知,未添加增容剂的合金呈现典型的两相结构,可观察到PS如水滴状分散在PP基体中,分散相尺寸分布宽,平均尺寸较大,为1.6~7.0 μm不等,加入增容剂SEP-2后,分散相颗粒尺寸降低,尺寸均匀性提高,典型尺寸集中在1.5 μm左右。当SEBS的添加量为分散相PS组分的25%时,如图4c所示,断面变粗糙,分散相尺寸进一步减小,两相界面趋于模糊,断面可观察到轻微的SEP-2团聚,形成一种新的分散相形貌。总之,在本实验研究范围之内,提高SEP-2的含量有利于促进PS颗粒

的分散,降低分散相尺寸,但无法完全消除相分离行为,PP/PS 仍然为典型的两相结构。

图 5 为添加不同含量接枝共聚物 PP-g-PS 的 PP/PS 合金的 SEM 照片。引入 PP-g-PS 后,分散相和连续相之间的相界面变模糊,如图 5b,图 5d 中椭圆圈所标示,当 PP-g-PS 的添加量为相对于分散相 PS 含量的 25% 时,断面很难观察到 PS 微孔,说明 PP/PS 的相容性大幅度改善。SEM 结果表明,从相形态来看,与 SEP-2 相比,PP-g-PS 对降低分散相尺寸更有效,但是从性能角度出发,PP-g-PS 对韧性的改善作用有限,未来,开发新的增容剂,在改善两相相容性的基础上,提高合金材料的韧性,仍是一项重要挑战。



a—16# 试样(放大 1000 倍); b—16# 试样(放大 2500 倍);
c—17# 试样(放大 1000 倍); d—17# 试样(放大 2500 倍)

图 5 不同 PP-g-PS 添加量的 PP/PS(80/20)合金的 SEM 照片

3 结论

与接枝共聚物 (PP-g-PS 和 PP-g-MAH) 相比,嵌段共聚物在改善 PP/PS 合金相容性的同时,可有效提高合金的缺口冲击强度,在本研究范围之内,诸多嵌段共聚物 (SBS, SEBS, SEPS, SEP) 中,SEP 具有最佳的增容作用,随着增容剂含量的增加,PP/PS 两相界面变模糊,分散相颗粒尺寸降低,尺寸均匀性提高,当 SEP 含量增加到分散相 PS 组分的 40% 时,合金发生相反转,缺口冲击强度大幅度提高,力学性能均衡。

参考文献

[1] De mello Felipe Bier, Nachtigall Sonia Marli Boehr, Salles Cleia de Andrade, et al. Compatibilization and mechanical properties of compression-molded polypropylene / high-impact polystyrene blends[J]. Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology,

2018, 34(3): 117-127.

- [2] Kong Yufei, Li Yingchun, Hu Guosheng, et al. Effects of polystyrene-b-poly(ethylene / propylene)-b-polystyrene compatibilizer on the recycled polypropylene and recycled high-impact polystyrene blends[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2018, 29(8):2 344-2 351.
- [3] Friedrich K. Polymer composites for tribological applications[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2018, 1(1):33-39.
- [4] Halimatudahliana A, Ismail H, Nasir M. Morphological studies of uncompatibilized and compatibilized polystyrene/polypropylene blend[J]. Polymer Testing, 2002, 21(3):263-267.
- [5] 游长江,席宋,莫海林,等. SEP 和蒙脱土复合增强 PP/PS 合金的研究 [J]. 中国塑料, 2003, 17(5):28-31.
- You Changjiang, Xi Song, Mo Hailin, et al. Study of SEP / MMT reinforced PP / PS alloys[J]. China Plastics, 2003, 17(5):28-31.
- [6] 李乔钧,李春成,芮峥嵘,等. 制备新型相容剂——聚丙烯固相接枝苯乙烯的研究 [J]. 高分子材料科学与工程, 1996, 12(3): 40-44.
- Li Qiaojun, Li Chun Cheng, Rui Zhengrong, et al. Study on compatibilizer of solid phase grafting styrene onto polypropylene[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 1996, 12(3):40-44.
- [7] Hammer Claes O, Maurer Frans H J. Barium sulfate-filled blends of polypropylene and polystyrene: Microstructure control and dynamic mechanical properties[J]. Polymer Composites, 1998, 19(2):116-125.
- [8] Martuscelli E, Pracella M, Volpe G D, et al. Morphology, crystallization, and thermal behaviour of isotactic polypropylene/ low density polyethylene blends[J]. Die Makromolekulare Chemie: Macromolecular Chemistry and Physics, 1984, 185(5):1 041-1 061.
- [9] Parameswaranpillai J, Joseph G, Chellappan R V, et al. The effect of polypropylene-graft-maleic anhydride on the morphology and dynamic mechanical properties of polypropylene / polystyrene blends[J]. Journal of Polymer Research, 2015, 22(2):2-6.
- [10] Radonjic G, Musil V, Šmit I. Compatibilization of polypropylene / polystyrene blends with poly(styrene-butadiene-styrene) block copolymer[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1998, 69(13): 2 625-2 639.
- [11] 游长江,席宋,莫海林,等. SEP 对 PP/PS 合金形态和力学性能的影响 [J]. 塑料工业, 2003, 31(8):16-18.
- You Changjiang, Xi Song, Mo Hailin, et al. Effect of SEP on morphology and mechanical properties of PP / PS Alloy[J]. China Plastics Industry, 2003, 31(8):16-18.
- [12] Jasinska-walc L, Bouyahyi M, Lorenc P, et al. Synthesis of isotactic polypropylene-block-polystyrene block copolymers as compatibilizers for isotactic polypropylene/polyphenylene oxide blends[J]. Polymer, 2018, 147(4):121-132.

(下转第 58 页)

(2) 在一定的熔体泵转速内,初生丝的挤出胀大比随熔体泵转速的增加而增大,由 1.258 (1 r/min) 增大到 1.318 (5 r/min)。

参考文献

- [1] 陈利民. 超高分子量聚乙烯纤维在防弹材料上的应用[J]. 工程塑料应用, 1995, 23(6):31-34.
Chen Limin. Application of ultra high molecular weight polyethylene fiber in ballistic materials[J]. Engineering Plastics Application, 1995, 23(6):31-34.
- [2] 甄万清, 王庆昭, 吴进喜, 等. 熔融纺丝法制备 UHMWPE / MMT 复合纤维的研究[J]. 合成纤维, 2011, 40(3):5-9.
Zhen Wanqing, Wang Qingzhao, Wu Jinxi, et al. Preparation of UHMWPE / MMT composite fiber by melt spinning method[J]. Journal of Synthetic Fibers, 2011, 40(3):5-9.
- [3] Liang J Z. Effects of extrusion conditions on die-swell behavior of polypropylene / diatomite composite melts[J]. Polymer Testing, 2008, 27(8):936-940.
- [4] 黄伟, 王晓春, 杨中开, 等. UHMWPE / 聚烯烃共混物的性能及其熔融纺丝研究[J]. 合成纤维工业, 2015, 38(6):43-48.
Huang Wei, Wang Xiaochun, Yang Zhongkai, et al. Study on properties and melt spinning of UHMWPE / polyolefin blends[J]. Journal of Synthetic Fibers, 2015, 38(6):43-48.
- [5] 郑艳超, 杨中开, 王晓春, 等. 熔纺 PE-UHMW / 聚烯烃共混体系及其纤维结构性能研究[J]. 北京服装学院学报: 自然科学版, 2017(1):8-17.
Zheng Yanchao, Yang Zhongkai, Wang Xiaochun, et al. Study on melt-spun UHMWPE / polyolefin blend system and its fiber structure properties[J]. Journal of Beijing Institute of Clothing Technology: Natural Science Edition, 2017(1):8-17.
- [6] 王非. 高密度聚乙烯改性超高分子量聚乙烯熔融纺丝的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
Wang Fei. Study on melt spinning of high density polyethylene modified ultra high molecular weight polyethylene[D]. Beijing :Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [7] Doufas A K, Mchugh A J, Miller C. Simulation of melt spinning including flow-induced crystallization: Part I. Model development and predictions[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000, 92(1):27-66.
- [8] 邓小珍, 柳和生, 黄益宾, 等. 非等温气辅共挤出胀大的三维粘弹数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(3):169-172.
Deng Xiaozhen, Liu Hesheng, Huang Yibin, et al. Numerical simulation of three-dimensional viscoelasticity of non-isothermal gas-assisted co-extrusion expansion[J]. Polymer Science and Engineering, 2013, 29(3):169-172.
- [9] 李萍. 聚合物气体辅助挤出成型工艺及数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010.
Li Ping. Polymer gas assisted extrusion molding process and numerical simulation[D]. Harbin :Harbin University of Science and Technology, 2010.
- [10] 徐妍清. 聚合物圆管气辅挤出数值模拟与口模设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
Xu Yanqing. Numerical simulation and die design of gas-assisted extrusion of polymer tubes[D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.
- [11] 何建涛. 塑料异型材气辅共挤数值模拟与实验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
He Jiantao. Numerical simulation and experimental study of gas-assisted co-extrusion of plastic profiles[D]. Nanchang :Nanchang University, 2014.
- [12] 曹义. 熔融纺丝组件熔体流动数值分析及其结构设计优化研究[D]. 上海: 东华大学, 2006.
Cao Yi. Numerical analysis of melt flow in melt spinning assembly and its structural design optimization[D]. Shanghai: Donghua University, 2006.
- [13] Wang Fei, Liu Lichao, Xu Ping, et al. Crystal structure evolution of UHMWPE / HDPE blend fibers prepared by melt spinning[J]. Polymers, 2017, 9(12):doi.org/10.3390/polym9030096.
2016, 118: 203-209.
- [16] Lei Yu, Huang Xi, Guo Xuemei, et al. Application of raman spectroscopy for in-line measurement of dispersion uniformity of polypropylene-polystyrene blends during melt extrusion[J]. Applied Spectroscopy, 2018, 72(10):1503-1510.
- [17] D'orazio L, Guarino R, Mancarella C, et al. Isotactic polypropylene / polystyrene blends: Effects of the addition of a graft copolymer of propylene with styrene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1997, 65(8):1539-1553.
- [18] Macaubas P H P, Demarquette N R. Morphologies and interfacial tensions of immiscible polypropylene/polystyrene blends modified with triblock copolymers[J]. Polymer, 2001, 42(6):2543-2554.

(上接第 39 页)

- [13] Xie Xuming, Zheng Xiao. Effect of addition of multifunctional monomers on one-step reactive extrusion of PP / PS blends[J]. Materials & Design, 2001, 22(1):11-14.
- [14] Sun Yijun, Willemse R J G, Liu T M, et al. In situ compatibilization of polyolefin and polystyrene using friedel-crafts alkylation through reactive extrusion[J]. Polymer, 1998, 39(11): 2201-2208.
- [15] Wang Kun, Pang Yongyan, Liu Wei, et al. A new approach designed for improving in situ compatibilization of polypropylene / polystyrene blends via reactive extrusion with supercritical CO₂ as the processing medium[J]. The Journal of Supercritical Fluids,