

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.12.009

PA6/PPE 的增韧改性

范煜炜¹, 刘玉倩¹, 吕通建¹, 陈利猛²

(1. 辽宁大学化学学院, 沈阳 110036; 2. 沈阳科通技术塑胶有限公司, 沈阳 101142)

摘要: 在加入增容剂马来酸酐接枝聚苯醚 (PPE-g-MAH) 的基础上, 添加不同用量的增韧剂马来酸酐接枝乙烯-辛烯共聚物 (POE-g-MAH)、马来酸酐接枝氢化苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物 (SEBS-g-MAH), 采用双螺杆熔融挤出法制备尼龙 6/聚苯醚 (PA6/PPE) 合金。通过常规力学性能测试探究 POE-g-MAH, SEBS-g-MAH 对 PA6/PPE 合金力学性能的影响, 并通过扫描电子显微镜、差示扫描量热 (DSC) 仪分析 PA6/PPE 合金的增韧机理及结构形貌。结果表明, 添加 5 份 POE-g-MAH 时, PA6/PPE 合金的综合力学性能最佳, 悬臂梁缺口冲击强度为 26.9 kJ/m², 拉伸强度为 65 MPa, 弯曲强度为 83 MPa。添加 3 份 SEBS-g-MAH 时, 合金的综合力学性能最佳, 悬臂梁缺口冲击强度为 30.7 kJ/m², 拉伸强度为 65 MPa, 弯曲强度为 80 MPa。DSC 测试表明, 添加增韧剂 POE-g-MAH, SEBS-g-MAH 会使 PA6/PPE 合金的过冷度增大, 结晶度下降。SEM 分析表明, 增韧剂 POE-g-MAH, SEBS-g-MAH 可进一步增加两相界面的粘结力, 有效吸收分散所受冲击应力, 大大提高合金的韧性。

关键词: 聚苯醚; 尼龙 6; 增韧; 力学性能; 马来酸酐接枝乙烯-辛烯共聚物; 马来酸酐接枝氢化苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物

中图分类号: TQ323.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2021)12-0050-05

Toughening Modification of PA6/PPE

Fan Yuwei¹, Liu Yuqian¹, Lyu Tongjian¹, Chen Limeng²

(1. School of Chemistry, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 2. Shenyang Ketong Technology Plastic Co., Ltd., Shenyang 101142, China)

Abstract: On the basis of adding the compatibilizer maleic anhydride grafted polyphenylene ether (PPE-G-MAH), the different amount of toughening agent maleic anhydride graft ethylene-octene copolymer (POE-G-MAH) or maleic anhydride graft hydrogenated styrene-butadiene-styrene block copolymer (SEBS-g-MAH) was added, the nylon 6/polyphenylene ether (PA6/PPE) alloy was prepared by twin-screw melt extrusion method. The influences of POE-g-MAH and SEBS-g-MAH on the mechanical properties of PA6/PPE alloy was investigated by conventional mechanical properties test, and the toughening mechanism and structural morphology of PA6/PPE alloy were analyzed by scanning electron microscope and differential scanning calorimetry (DSC). The results show that the comprehensive mechanical properties of PA6/PPE alloy are the best when 5 phr POE-g-MAH is added. The Izod notch impact strength, tensile strength and bending strength of the alloy are 26.9 kJ/m², 65 MPa and 83 MPa respectively. When 3 phr SEBS-g-MAH is added, the comprehensive mechanical properties of the alloy is the best. The Izod notch impact strength of the alloy is 30.7 kJ/m², the tensile strength is 65 MPa, and the bending strength is 80 MPa. DSC test shows that adding toughening agents POE-g-MAH or SEBS-G-MAH increases the undercooling degree of PA6/PPE alloy and decreases the crystallinity. SEM analysis shows that the toughening agents POE-g-MAH and SEBS-G-MAH can further increase the bonding force of the interface between the two phases, effectively absorb and disperse the impact stress, and greatly improve the toughness of the alloy.

Keywords: polyphenylene ether; nylon 6; toughening; mechanical property; maleic anhydride grafted ethylene-octene copolymer; maleic anhydride grafted hydrogenated styrene-butadiene-styrene block copolymer

尼龙 (PA) 是指分子主链上含有重复酰胺基团的一类热塑性树脂, 是历史上最早出现的合成纤维。

其种类繁多, 具有很强的耐磨性, 易加工, 广泛用于电子电器、汽车零件、化工设备等领域。PA 中最具

通信作者: 吕通建, 教授, 主要研究方向为高分子材料改性

收稿日期: 2021-09-16

引用格式: 范煜炜, 刘玉倩, 吕通建, 等. PA6/PPE 的增韧改性 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(12): 50-54.

Fan Yuwei, Liu Yuqian, Lyu Tongjian, et al. Toughening modification of PA6/PPE [J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12): 50-54.

代表性的是尼龙 6 (PA6) 和尼龙 66 (PA66), 两者化学物理特性相似, 但相比于 PA66, PA6 具有更优异的耐溶解性、耐冲击性, 且加工工艺温度范围更宽。但 PA6 仍存在高吸水率导致的制品尺寸不稳定、耐冲击强度低等不可忽视的问题^[1]。聚苯醚 (PPE) 是一种透明、无毒的工程塑料, 具有优良的耐热性、耐水性、力学性能和尺寸稳定性。但 PPE 存在着成型加工性差, 熔体黏度高等致命缺点^[2]。PA6 和 PPE 自身的缺点使其在很多领域的应用受限。

PA6/PPE 合金综合了 PPE 的高耐热、高强度及 PA6 易成型、耐溶剂性好的特点^[3], 实现了两者优势互补, 得到广泛应用。由于 PA6 为极性的结晶共聚物, PPE 为非结晶共聚物, 两者为典型的热力学不相容体系, 简单机械混合合金的两相界面结合力弱, 力学性能差, 因此改善 PA6/PPE 合金的相容性、提高力学性能十分重要。以往人们将研究重点放在如何提高 PA6/PPE 合金的相容性。通过优化加工工艺和添加增容剂可大大改善 PA6/PPE 的相容性^[4-6]。武德珍等^[7]在 PPE 和 PA6 中加入马来酸酐接枝三元乙丙橡胶 (EPDM-g-MAH) 制备三元共混体系, 研究表明, EPDM-g-MAH 与 PPE 和 PA6 都有较好的相容性, 随着 EPDM-g-MAH 用量增加, 合金的相容性提高。王欣^[8]选用柠檬酸原位增容 PA6/PPE, 结果表明, 加入柠檬酸可使合金的分散相相等更小, 改善了合金的力学性能。

笔者采用熔融共混法制备 PA6/PPE 合金, 在加入增容剂马来酸酐接枝聚苯醚 (PPE-g-MAH) 的基础上, 添加增韧剂马来酸酐接枝乙烯-辛烯共聚物 (POE-g-MAH)、马来酸酐接枝氢化苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物 (SEBS-g-MAH) 对 PA6/PPE 合金进行增容增韧改性, 研究了增韧剂用量对 PA6/PPE 合金结构及力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

PPE: LXR-040, 山西蓝星化工新材料股份有限公司;

PA6: YH3400, 湖南岳化化工股份有限公司;

抗氧剂: 1010, 168: 瑞士汽巴公司;

马来酸酐接枝聚苯醚 (PPE-g-MAH): KT-24, 沈阳科通技术塑胶有限公司;

POE-g-MAH: KT-916K, 沈阳科通技术塑胶有限公司;

SEBS-g-MAH: KT-25, 沈阳科通技术塑胶有

限公司;

过氧化二异丙苯 (DCP): 分析纯, 市售。

1.2 主要仪器与设备

双螺杆挤出机: GS-65 型, 南京国塑挤出装备有限公司;

卧式注塑机: BP-8180-A 型, 东莞市宝品精密仪器有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱: TST-E804-25 型, 东莞市特斯特检测仪器有限公司;

电子万能试验机: WDW-100H 型, 扬州市东铭检测仪器科技有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): SU8010 型, 日本日立公司;

悬臂梁冲击试验机: JBS-300Z 型, 济南联工检测设备有限公司。

1.3 试样制备

表 1 为 PA6/PPE 合金的主要配方, 按照表 1 主要配方称量主要原材料以及抗氧剂和 DCP, 用高速混合机均匀混合。

样品编号	PPE	PA6	PPE-g-MAH	POE-g-MAH	SEBS-g-MAH	份
L ₀	25	62	5	0	0	
L ₁	25	62	5	3	0	
L ₂	25	62	5	5	0	
L ₃	25	62	5	8	0	
L ₄	25	62	5	10	0	
L ₅	25	62	5	0	3	
L ₆	25	62	5	0	5	
L ₇	25	62	5	0	8	
L ₈	25	62	5	0	10	

注: 配方中添加抗氧剂 1010 和 168 的用量均为 0.2 份, DCP 为 0.3 份。

打开双螺杆挤出机, 待主机工作稳定, 设置主机转速 200 r/min, 喂料转速 120 r/min, 将均匀混合后的材料投入挤出机中挤出、冷却、造粒, 放入电热恒温鼓风干燥箱于 120℃ 干燥 4 h。L₀ 样品的挤出温度为 250~280℃, L₁~L₄ 样品的挤出温度为 230~260℃, L₅~L₈ 样品的挤出温度为 240~270℃。

将干燥后的粒料放入卧式注塑机中, 一段至五段注塑压力分别为 37, 38, 38, 36, 34 MPa, 机筒一区至三区注塑温度分别为 270, 260, 250℃。

1.4 性能测试与表征

(1) 力学性能测试。

拉伸强度按 GB/T 1040-2006 测试, 拉伸速度为 10 mm/min, 每组测试 5 个试样, 取平均值。

弯曲强度按 GB/T 9341-2008 测试,每组测试 5 个试样,取平均值。

悬臂梁缺口冲击强度按 GB/T 1843-2008 测试, A 型缺口, 每组测试 5 个试样, 取平均值。

(2) DSC 测试。

从 PA6/PPE 合金样品中部取样 5 mg 进行测试, 氮气气氛, 从 20℃ 升温至 280℃, 升温速率为 10℃/min, 到达 280℃ 后保温 10 min, 再从 280℃ 降温至 20℃, 降温速率为 10℃/min。结晶度 (X_c) 按式 (1) 计算:

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0 W_f} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔH_m ——样品的熔融热焓;

ΔH_m^0 ——100% 结晶时 PA6 的熔融热焓, 取值为 240 J/g^[9];

W_f ——样品中 PA6 的质量分数。

(3) SEM 测试。

将样品断面切下, 用导电胶粘于铝台上进行喷金处理, 放入 SEM 中观察, 加速电压为 5.0 kV。

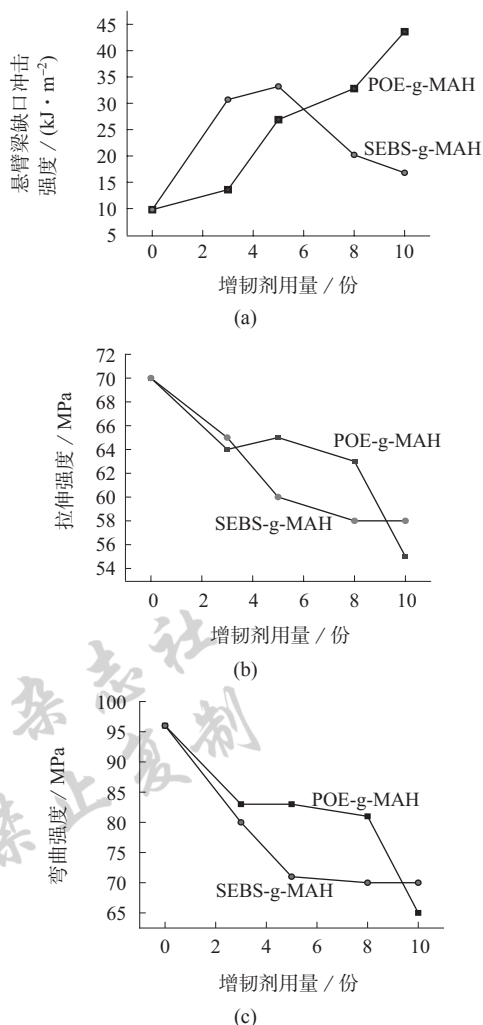
2 结果与讨论

2.1 力学性能分析

添加不同用量增韧剂 POE-g-MAH 或 SEBS-g-MAH 时, PA6/PPE 合金的力学性能如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 添加两种增韧剂均可提高 PA6/PPE 合金的悬臂梁缺口冲击强度。当 SEBS-g-MAH 用量为 5 份时, 悬臂梁缺口冲击强度达到最大值, 为 33.2 kJ/m²。在合金中添加的弹性体越多, 产生的银纹剪切屈服也就越多, 进而使基体可以吸收更多能量, 表现为缺口冲击强度提高。POE-g-MAH, SEBS-g-MAH 和 PPE-g-MAH 中的 MAH 官能团可与 PA6 中的酰胺基团发生反应性增容, 极大地改善 PPE 与 PA6 之间的相容性, 提高弹性体与 PPE 和 PA6 的粘结性。随着 SEBS-g-MAH 用量的增加, 过量的 SEBS 进入 PA6/PPE 两相界面会减弱两相界面的粘结力, 导致合金的缺口冲击强度骤降。相比于 SEBS-g-MAH, POE-g-MAH 更容易自发聚集形成弹性体相, 使合金中的应力集中点增加, 分散合金所受应力, 减弱银纹增长, 使得合金的韧性不断提高。

从图 1b、图 1c 可以看出, 添加两种增韧剂均会降低 PA6/PPE 合金的拉伸强度和弯曲强度。这是由于增韧剂 POE-g-MAH, SEBS-g-MAH 的强度都远低于 PA6/PPE 合金的强度, 即使少量添加 POE-



a—悬臂梁缺口冲击强度; b—拉伸强度; c—弯曲强度

图 1 添加不同用量 POE-g-MAH 或 SEBS-g-MAH 的 PA6/PPE 合金的力学性能

g-MAH, SEBS-g-MAH 也会使合金的拉伸强度和弯曲强度产生较大幅度的下降。PA6/PPE 合金的强度主要由 PPE 提供, 但由于 SEBS-g-MAH 中含有大量苯环与 PPE 有良好的相容性, 相较于 POE-g-MAH, SEBS-g-MAH 对合金强度的影响更大。

综合来看, 当增韧剂 POE-g-MAH 用量为 5 份或 SEBS-g-MAH 用量为 3 份时, PA6/PPE 合金的综合力学性能最佳, 增韧效果和强度均较好。当增韧剂 POE-g-MAH 用量为 5 份时, PA6/PPE 合金的悬臂梁缺口冲击强度为 26.9 kJ/m², 拉伸强度为 65 MPa, 弯曲强度为 83 MPa; 当 SEBS-g-MAH 用量为 3 份时, PA6/PPE 合金的悬臂梁缺口冲击强度为 30.7 MPa, 拉伸强度为 65 MPa, 弯曲强度为 80 MPa。因此后续以 POE-g-MAH, SEBS-g-MAH 用量分别为 5, 3 份配比对合金进行 DSC, SEM 分析。

2.2 DSC 分析

添加不同增韧剂的 PA6 / PPE 合金的 DSC 曲线如图 2 所示,相应的 DSC 数据见表 2。

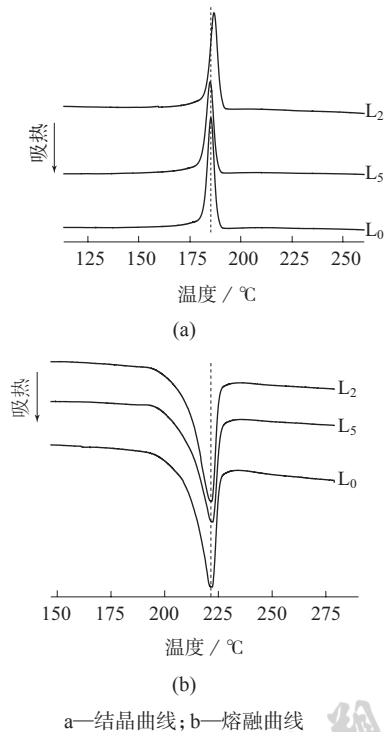


图 2 添加不同增韧剂的 PA6 / PPE 合金的 DSC 曲线

表 2 添加不同增韧剂的 PA6 / PPE 合金的 DSC 数据

样品 编号	$T_m /$ $^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_m /$ $(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$T_0 /$ $^{\circ}\text{C}$	$T_c /$ $^{\circ}\text{C}$	$\Delta T /$ $^{\circ}\text{C}$	$X_c /$ %
L ₀	221.63	28.99	188.30	185.17	3.13	19.48
L ₂	221.66	27.08	190.12	186.78	3.34	18.20
L ₅	222.07	26.68	188.13	184.83	3.30	17.93

注: T_m 为熔融温度, ΔH_m 为熔融热焓, T_0 为终止结晶温度, T_c 为结晶温度, $\Delta T = T_0 - T_c$ 为过冷度, X_c 为结晶度。

从图 2 和表 2 可以看出,添加增韧剂 POE-g-MAH 或 SEBS-g-MAH 时, PA6 / PPE 合金的 T_m 和 T_c 变化不大,即对合金的加工性能影响不大。添加增韧剂后, PA6 / PPE 合金的 ΔH_m 和 X_c 都有所下降,这是由于 POE-g-MAH, SEBS-g-MAH 的添加进一步增加了 PA6 与 PPE 的相容性,分散相粒径大大减小,两相界面分子缠绕程度增加,导致 PA6 分子链段的活动受到阻碍,影响了合金的结晶^[10]。另外, ΔT 增加,使得 PA6 / PPE 合金的结晶速率减小, X_c 降低,将导致强度下降,韧性提高,这与力学性能测试结果一致。

2.3 SEM 分析

添加不同增韧剂的 PA6 / PPE 合金断面的 SEM 照片如图 3 所示。

在 PA6 / PPE 合金中, PPE 为分散相, PA6 为连

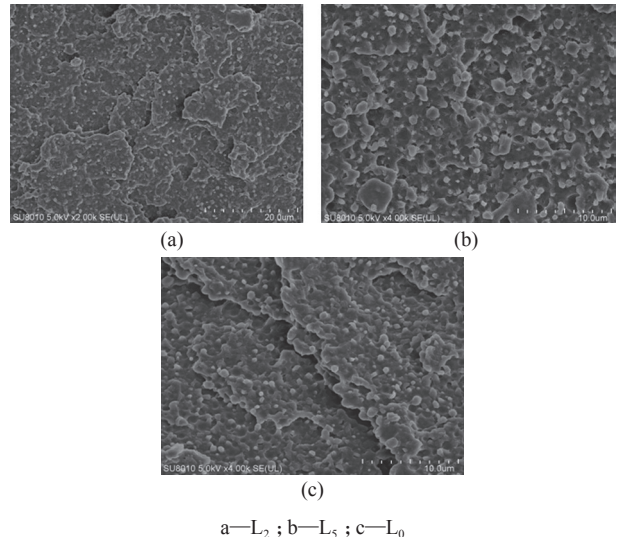


图 3 添加不同增韧剂的 PA6 / PPE 合金断面的 SEM 照片

续相。弹性体对合金韧性的影响往往与其在基体中的粒径大小以及界面粘结程度有关。从图 3c 可以看出,只添加 5 份增容剂 PPE-g-MAH 时,合金 L₀ 的两相界限相对模糊,增容剂在一定程度上改善了合金两相之间的相容性。但冲击断面结构表现出明显的断层现象。从图 3a 可以看出,添加 5 份 POE-g-MAH 后,合金 L₂ 断面出现了规整连续的片层状凸起,这是弹性体在合金受到冲击时吸收大量能量后的聚集体结构。同时由于 POE-g-MAH 与 PPE 和 PA6 的相容性一般,自身易形成较小的岛相,可以看到分散相粒径很小且分布均匀。在合金增韧体系中分散相粒径越小,越利于吸收合金所受到的冲击能,进而大大提高合金的韧性,这与力学性能测试结果相符^[11-12]。从图 3b 可以看出,添加 3 份 SEBS-g-MAH 后,几乎看不到明显的 PPE 与 PA6 两相界限,这是由于 SEBS-g-MAH 具有一定的增容性, SEBS-g-MAH 中的 PS 相与 PPE 为热力学相容体系^[13-14],使合金的相容性得到进一步提高。同时可清晰看到有大小两种粒径,小粒径弹性体 SEBS-g-MAH 在合金中均匀分布,且弹性体粒子界面清晰,可引发银纹剪切屈服,使合金受到应力时吸收大量能量;大粒径是以 PPE 为核, SEBS-g-MAH 为壳形成的核壳结构^[15],核壳结构会大大提高 SEBS-g-MAH 与基体材料的相互作用,使合金的增韧得到改善。

3 结论

在加入 5 份增容剂 PPE-g-MAH 基础上,添加不同增韧剂对 PA6 / PPE 合金进行增韧改性,对 PA6 / PPE 合金的结构和性能有着不同影响。

(1) 随着增韧剂 POE-g-MAH 用量的增加,合金

的悬臂梁缺口冲击强度增大,而拉伸强度及弯曲强度下降。当 POE-g-MAH 用量为 5 份时,合金的综合性能最佳,此时缺口冲击强度为 26.9 kJ/m^2 ,拉伸强度为 65 MPa,弯曲强度为 83 MPa。随着增韧剂 SEBS-g-MAH 用量的增加,合金的悬臂梁缺口冲击强度呈现先增加后减小的趋势,而拉伸强度及弯曲强度下降。当 SEBS-g-MAH 用量为 3 份时,合金的综合力学性能最佳,此时缺口冲击强度为 30.7 kJ/m^2 ,拉伸强度为 65 MPa,弯曲强度为 80 MPa。

(2) 增韧剂 POE-g-MAH, SEBS-g-MAH 对合金的 T_m 和 T_c 变化影响较小,但合金的过冷度增大,结晶速率降低, ΔH_m 和 X_c 下降。

(3) 添加 POE-g-MAH 会形成大量且均匀分布的小粒径结构,可吸收大量冲击能,提高合金韧性; SEBS-g-MAH 作为增韧剂时可提高 PPE 与 PA6 的相容性,具有一定的增容效果,同时形成核壳结构可提高合金吸收外界冲击的能力。两种增韧剂都可使 PA6/PPE 合金内分散相粒径大大减小,两相边界进一步模糊,极大地提高了合金的相容性和韧性。

参考文献

- [1] 沈玉海. 聚苯醚/尼龙合金性能影响因素概述[J]. 化工新型材料, 2021, 49(4):247-250, 256.
Shen Yuhai. Overview of factors affecting the properties of polyphenylene ether/nylon alloy [J]. New Chemical Materials, 2021, 49(4):247-250, 256.
- [2] 赵天宝, 杨如意, 袁诗琳, 等. PPO/PA 合金材料的研究进展[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2021, 40(1):109-114.
Zhao Tianbao, Yang Ruyi, Yuan Shilin, et al. Research progress of PPO/PA alloy materials[J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2021, 40(1):109-114.
- [3] 吕通建, 王江淮, 惠翠, 等. PA6/PPO 合金的研究[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(11):19-21.
Lyu Tongjian, Wang Jianghuai, Hui Cui, et al. Study on PA6/PPO alloy[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(11):19-21.
- [4] Qin, Shuhao, Li Qinfeng, He Min, et al. Study on thermal stability and flame retardancy of polymer/layered silicate nanocomposites based on POE and POE-g-MAH[J]. Polymer Engineering and Science, 2014, 54(12).doi:10.1002/pen.23848.
- [5] 马玫, 雷祖碧. 聚苯醚与尼龙 6 共混物的增容改性[J]. 合成材料老化与应用, 2014(5):19-21, 77.
Ma Mei, Lei Zubi. The compatible modification of the polyphenyl ether/polyamide 6 blends[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2014(5):19-21, 77.
- [6] 沈玉海. PPO/PA 合金研究进展[J]. 上海塑料, 2019(1):10-16.
Shen Yuhai. Research progress of PPO/PA alloy [J]. Shanghai plastics, 2019(1):10-16.
- [7] 武德珍, 战佳宇, 许桂连, 等. EPDM-g-MAH 对 PPO/PA6 共混体系结构与性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2006(4):126-129.
Wu Dezhen, Zhan Jiayu, Xu Guilian, et al. The effect of EPDM-g-MAH on the structure and properties of PPO/PA6 blends[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2006(4):126-129.
- [8] 王欣. 柠檬酸原位增容 PPO/PA6 合金化工艺的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
Wang Xin. Study on in-situ compatibilization of PPO/PA66 with citric acid[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [9] 张丽, 何敏, 鲁圣军, 等. PA6/NMA/EP 共混物的热性能及其力学性能研究[J]. 上海塑料, 2014(4):26-30.
Zhang Li, He min, Lu Shengjun, et al. Study on thermal properties and mechanical properties of PA6/NMA/EP blends[J]. Shanghai Plastics, 2014(4): 26-30.
- [10] 史鹏伟, 纪永鹏, 汤俊杰. PPO-g-MAH 对 PPO/PA66 合金和 PPO/PA66/GF 体系性能的影响[J]. 塑料工业, 2021, 49(4):60-64, 178.
Shi Pengwei, Ji Yongpeng, Tang Junjie. Influence of PPO-g-MAH on the properties of PPO/PA66 and PPO/PA66/GF system[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(4):60-64, 178.
- [11] 付鹏, 王基班, 陈相见, 等. POE-g-MAH 增韧 PA12T 复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(11):42-46.
Fu Peng, Wang Jiban, Chen Xiangjian, et al. Preparation and properties of PA12T composite toughened by POE-g-MAH[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):42-46.
- [12] 王萍丽, 孔壮志, 季君晖. POE-g-MAH 对尼龙 6 的增韧改性[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(4):73-75, 80.
Wang Pingli, Kong Zhuangzhi, Ji Junhui. Structure and mechanical properties of nylon6 toughened by POE-g-MAH[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2012, 28 (04):73-75, 80.
- [13] Debbah I, Krache R, Belkouissem K, et al. Effect of a thermoplastic elastomer compatibilizer (SEBS-g-MAH) on the properties of PP/PET blends[J]. Revue Roumaine de Chimie, 2018, 63(1):11-20.
- [14] 张师军, 顾觉生. SEBS-g-MAH 对 PPO/PA66 相容性影响的研究[J]. 塑料工业, 2001(3):23-24, 31.
Zhang Shijun, Gu Juesheng. Study of effect of SEBS-g-MAH on compatibility of PPO/PA66[J]. China Plastics Industry, 2001(3):23-24, 31.
- [15] 吴亦建, 戴连奇, 申屠宝卿. “核壳结构”粒子对 PA6/SEBS-g-MA/PPO 共混物的增韧作用[J]. 高校化学工程学报, 2017, 31(6):1 327-1 332.
Wu Yijian, Dai Lianqi, Shentu Baoqing. Toughening effects of “core-shell” particles in PA6/SEBS-g-MA/PPO blends[J]. Journal of Chemical Engineering of Colleges and Universities, 2017, 31(6):1 327-1 332.