

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.01.009

PP-g-MAH 对尼龙 6 / 炭黑复合材料性能和形貌的影响

李胤,周松,鲁超飞,罗玉梅,白小东

(西南石油大学新能源与材料学院,成都 610500)

摘要:以炭黑(CB)为导电填料,马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH)为增韧剂,通过双螺杆挤出机和注射成型机制备了尼龙(PA)6/PP-g-MAH/CB复合材料,研究了PP-g-MAH含量对7.5%CB填充PA6力学性能、抗静电性能、热稳定性和形貌的影响。结果表明,添加质量分数20%的PP-g-MAH可提高PA6/CB复合材料的拉伸强度、韧性、抗静电性能和热稳定性。PA6/PP-g-MAH/CB复合材料力学强度和热稳定性的提高源于PP-g-MAH产生的能量耗散以及CB,PP-g-MAH与PA6之间较好的界面粘附和PP-g-MAH均匀细化分散在PA6/CB中。PP-g-MAH改变了CB在共混物中的选择性分布,使PA6/CB的表面电阻率和体积电阻率分别下降5个和3个数量级。

关键词:尼龙6;马来酸酐接枝聚丙烯;炭黑;力学性能;抗静电性能

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)01-0044-05

Effect of PP-g-MAH on Properties and Morphologies of Nylon 6 / Carbon Black Composites

Li Yin, Zhou Song, Lu Chaofei, Luo Yumei, Bai Xiaodong

(School of New Energy and Materials, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Nylon 6 (PA6) / maleic anhydride grafted polypropylene (PP-g-MAH) / carbon black (CB) composites were prepared by twin-screw extruder and injection molding machine with CB as conductive filler and PP-g-MAH as toughening agent, and the effects of PP-g-MAH content on the mechanical properties, thermal stability, antistatic properties and morphology of the CB filled PA6 composites were studied. The results indicate that the addition of 20% of PP-g-MAH mass fraction results in the improvement of tensile strength, toughness, antistatic properties and thermal stability of PA6 / CB composites with 7.5% of CB mass fraction. The increase in mechanical strength and thermal stability of PA6 / PP-g-MAH / CB composites can be explained on the basis of energy-absorption process caused by PP-g-MAH phase, better adhesion and stress transfer between CB, PP-g-MAH and PA6, and finer dispersion of PP-g-MAH in PA6 / CB matrix. The presence of PP-g-MAH reduces the surface resistance and volume resistivity of PA6 / CB composites by 5 and 3 orders of magnitude respectively, due to the selective localization of CB in PA6 / PP-g-MAH matrix.

Keywords: nylon 6 ; maleic anhydride grafted polypropylene ; carbon black ; mechanical property ; antistatic property

尼龙(PA)6具有高拉伸强度和刚性、良好的蠕变性能和耐化学药品性,是应用广泛的工程塑料,但PA6对缺口应力较为敏感,尤其添加高含量无机填料后,使其冲击韧性明显降低。PA6还有较高的电绝缘性,会因摩擦产生静电放电,带来安全隐患,使其在煤矿井、纺织器材、家用电器等应用领域受到限制^[1-2]。在PA6中添加石墨^[3]、导电炭黑(CB)^[2-4]、碳纳米管^[5-6]等无机导电填料,通过在PA6内部形成导电网络,可降低PA6的电绝缘性。导电CB来

源丰富、成本低、导电性好,成为性价比较高的导电填料^[4]。通常添加导电CB使PA6刚性增加,拉伸强度和韧性均降低,如何制备拉伸强度和韧性均较高、低电阻的PA6/CB复合材料是众多研发者面临的挑战。通常添加聚烯烃和热塑性弹性体的接枝极性共聚物,可提高PA6及其复合材料的韧性,提高其综合性能^[7-8]。另外,在PA6/导电填料共混体系中添加第三组元聚合物,同时提高PA6抗静电材料的韧性和导电性的研究引起了人们的关注,添加乙

通信作者:周松,副研究员,主要研究方向为高分子材料成型加工技术 E-mail: song_zhou889@163.com

收稿日期:2020-10-27

引用格式:李胤,周松,鲁超飞,等. PP-g-MAH对尼龙6/炭黑复合材料性能和形貌的影响[J]. 工程塑料应用,2021,49(1):44-48.

Li Yin, Zhou Song, Lu Chaofei, et al. Effect of PP-g-MAH on properties and morphologies of nylon 6 / carbon black composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1):44-48.

烯-乙酸乙烯酯共聚物^[2]、马来酸酐接枝乙烯-辛烯共聚物 (POE-g-MAH)^[9]、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS) 树脂^[10] 等不仅能改善导电填料在 PA6 基体中的分散性和分布状态,提高材料的抗静电性能,也使材料的韧性增加。

马来酸酐接枝聚丙烯 (PP-g-MAH) 具有聚丙烯的耐疲劳性能、综合力学强度高、加工性良好,其马来酸酐极性基团与 PA6 有较好的相容性。与热塑性弹性体增韧 PA6 相比,强度和模量较高的 PP-g-MAH 增韧 PA6 及其复合材料不会导致材料强度和模量的明显降低^[11],合理控制 PP-g-MAH 含量,可同时提高 PA6 及其复合材料的拉伸强度和韧性^[12]。

笔者将 PP-g-MAH 加入到 PA6/CB 体系 (CB 质量分数固定为 7.5%) 中,研究 PP-g-MAH 含量对 PA6/CB 复合材料抗静电性能、力学性能、热稳定性和形貌的影响,希望获得抗静电性和综合力学性能均较好的抗静电复合材料,以利于实际应用。

1 实验部分

1.1 主要原料

PA6: 1013NW8, 熔体流动速率为 42.6 g/10 min, 日本宇部兴产株式会社;

PP-g-MAH: 中国蓝星晨光化工有限公司;

CB: 科琴黑 EC-600JD, 日本 Lion 公司。

1.2 主要设备与仪器

双螺杆挤出机: TSSJ-25/36 型, 成都科强高分子工程公司;

注射成型机: FT-90 型, 浙江申达机器制造有限公司;

万能材料试验机: WSK-20KN 型, 长春智能仪器设备有限公司;

数字高阻计: PC68 型, 上海第六电表厂;

冲击试验机: JJ-20 型, 长春智能仪器设备有限公司;

扫描电子显微镜: EVOMA15 型, 德国 Zeiss 公司;

红外光谱仪: Nicolet 6700 型, 美国 Thermol 公司;

热重 (TG) 分析仪: TGA/SDTA85/e 型, 瑞士梅特勒公司。

1.3 试样制备

先将 CB 和 PA6 在 90℃ 真空干燥 12 h, 然后按表 1 质量比混合均匀, 通过双螺杆挤出机分别将 PA6/CB 和 PA6/PP-g-MAH/CB 物料熔融共混、

挤出造粒, 温度为 165~245℃, 螺杆转速为 100 r/min。粒料在 90℃ 真空干燥 4 h 后, 通过注射成型机注射成标准测试试样, 注射温度为 170~245℃, 注塑压力为 65~90 MPa。

表 1 PA6/CB 和 PA6/PP-g-MAH/CB 质量配方 %

试样编号	PA6	PP-g-MAH	CB
1 [#]	100	0	0
2 [#]	92.5	0	7.5
3 [#]	87.5	5	7.5
4 [#]	82.5	10	7.5
5 [#]	77.5	15	7.5
6 [#]	72.5	20	7.5
7 [#]	62.5	30	7.5

1.4 性能测试和结构表征

拉伸性能按 GB/T 1040-2006 测试, 拉伸速率为 25 mm/min;

简支梁缺口冲击强度按 GB/T 1043-2008 测试, V 型缺口深度为 1 mm;

表面电阻率和体积电阻率按 GB/T 1410-2006 测试, 测试电压为 250 V;

TG 分析: 测试前样品在 90℃ 下真空干燥 8 h, 氮气气氛下从 25℃ 开始以 15℃/min 升温至 650℃ 结束;

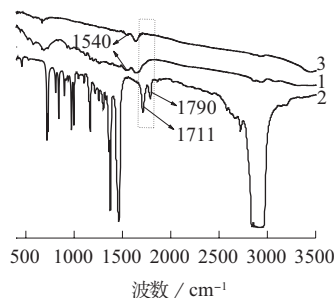
红外光谱分析: 通过试样获得样品粉末, 测试前粉末在 90℃ 下真空干燥 8 h。取少量样品粉末和一定量的 KBr 粉末混合干燥, 研磨均匀后, 采用压片法制样, 分析材料的组成和官能团信息, 扫描范围为 4000~400 cm⁻¹;

SEM 分析: 试样拉伸断面喷金后, 观察其断面形貌。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱分析

纯 PA6、纯 PP-g-MAH 和 PA6/PP-g-MAH/CB (7[#]) 的红外光谱如图 1 所示。图 1 中, 纯 PA6 在 1540 cm⁻¹ 处的峰属于酰胺 II 谱带的 N-H 面



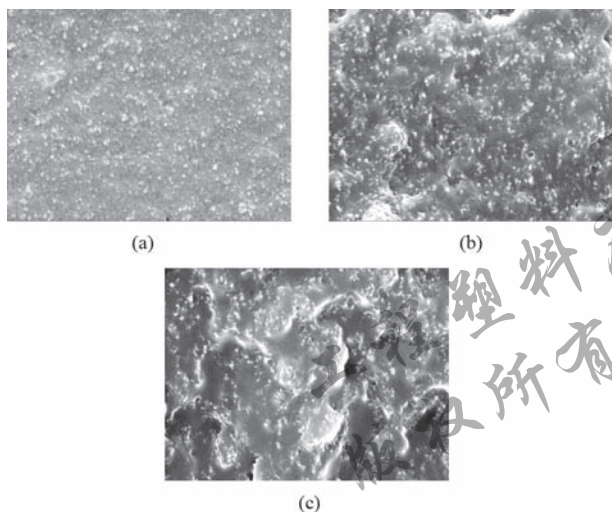
1—纯 PA6; 2—纯 PP-g-MAH; 3—PA6/PP-g-MAH/CB

图 1 纯 PA6、纯 PP-g-MAH 和 PA6/PP-g-MAH/CB 的红外光谱图

内弯曲振动和 C—N 键伸缩振动的组合^[13]。纯 PP-g-MAH, 在 1711 cm^{-1} 处的峰对应其羧酸二聚体的 C=O 伸缩振动, 1790 cm^{-1} 处的峰对应其马来酸酐的羰基 (C=O) 对称伸缩振动^[14]。对于 PA6/PP-g-MAH/CB 共混物, PP-g-MAH 在 1711 cm^{-1} 和 1790 cm^{-1} 处的振动吸收峰消失, PA6 在 1540 cm^{-1} 处的振动吸收峰强度减弱, 表明 PP-g-MAH, PA6 和 CB 间存在化学反应, 尤其 PP-g-MAH 的酸酐基团与 PA6 的酰胺基团之间可能形成接枝共聚, 这有利于改善 CB 在基体中分散, 也会影响共混物的形貌。

2.2 复合材料的拉伸断面形貌

PA6/CB 和 PA6/PP-g-MAH/CB 复合材料的拉伸断面形貌如图 2 所示。



a—2[#]; b—4[#]; c—7[#] (均放大 15 000 倍)

图 2 PA6/CB 和 PA6/PP-g-MAH/CB 复合材料的拉伸断面形貌

由图 2a 可见, PA6/CB 复合材料断面较为平坦, 有脆性断裂特征。断面有一些突出 CB 颗粒团聚体, 未被 PA6 基体充分分散浸润和包裹。聚集的 CB 颗粒可能作为应力集中点引发裂纹, 导致 PA6/CB 力学性能降低。CB 粒子间距较小, 部分 CB 粒子相互接触, 可形成导电网络结构。

由图 2b 和图 2c 可知, 随着 PP-g-MAH 含量增加, 凸显的 CB 颗粒团聚体数量减少, 表明 PA6/PP-g-MAH 树脂基体浸润和包覆 CB 粒子的能力增强, 这可能是添加黏度高的 PP-g-MAH 及其与 PA6 熔融共混反应形成的接枝共聚物使熔体黏度增加, 增强了对填料的剪切作用, 有利于无机炭系填料的分散^[5]; 另一种可能是基于 PA6 和聚烯烃的线膨胀系数差异^[15]。注射成型过程中, 物料被注入模具

并冷却定型, 由于 PP-g-MAH 的收缩率比 PA6 大, 凝固温度比 PA6 低, 使相容性 PA6/PP-g-MAH 共混物有更充足的时间浸润 CB 颗粒, 对 CB 颗粒的包裹收紧作用增强。在图 2b 和图 2c 中, 随着 PP-g-MAH 含量增加, CB 颗粒的偏聚程度增加, 这与 CB 颗粒的选择性分布有关。类似现象在 PA6/马来酸酐接枝聚乙烯 (PE-g-MAH)/碳纳米管 (CNT) 研究中也报道^[5], CNT 与 PA6 的界面能低于 CNT 与 PE-g-MAH 的界面能, 添加 PE-g-MAH 会驱使 CNT 更多地选择性分散于 PA6 相和 PA6/PE-g-MAH 相界面。

2.3 复合材料的力学性能

PP-g-MAH 对 PA6/CB 力学性能的影响如表 2 所示。

表 2 纯 PA6 及其二元和三元复合材料的力学性能

试样编号	拉伸强度 / MPa	拉伸弹性模量 / MPa	断裂伸长率 / %	冲击强度 / (kJ·m ⁻²)
1 [#]	63.27	631.17	54.36	13.07
2 [#]	47.26	769.50	7.25	7.15
3 [#]	56.59	596.27	10.07	9.19
4 [#]	54.32	563.67	11.75	9.34
5 [#]	52.63	504.67	12.04	10.47
6 [#]	50.13	450.42	12.29	12.36
7 [#]	46.86	399.80	12.74	13.10

由表 2 可知, PA6/CB (2[#]) 的拉伸强度明显低于纯 PA6, 这与高含量 CB 在 PA6/CB 共混物中产生的聚集有关。添加质量分数为 5%~20% 的 PP-g-MAH 能明显提高 PA6/CB 复合材料的拉伸强度, PP-g-MAH 质量分数为 5% 时, 使 PA6/CB 的拉伸强度提高了 19.7%。随 PP-g-MAH 含量进一步增加, PA6/PP-g-MAH/CB 的拉伸强度有所降低, 但最低值仍接近 PA6/CB 的拉伸强度, 拉伸强度有所降低与过多 PP-g-MAH 产生的增塑作用及其分布状况有关^[12-16]。PP-g-MAH 促进了 CB 在树脂基体中的浸润和包裹, 且与 PA6 基体的相容性较好, 熔体加工中 CB 表面的羟基、羰基和羧基可与 PA6 的酰胺基形成氢键^[5], 多种因素综合作用的结果, 导致 PA6/PP-g-MAH/CB 三元复合材料能更好传递应力, 使其具有较高的拉伸强度。

由表 2 还可知, 与纯 PA6 相比, PA6/CB 的韧性明显降低, 缺口冲击强度和断裂伸长率分别由 13.07 kJ/m^2 和 54.36% 下降到 7.15 kJ/m^2 和 7.25%。随 PP-g-MAH 质量分数从 0% 增至 30%, PA6/PP-g-MAH/CB 的韧性逐渐增大, 添加质量分数 30% 的 PP-g-MAH, 使 PA6/CB 的冲击强度

和拉伸断裂伸长率分别提高 83.22% 和 75.7%, PA6 / PP-g-MAH / CB (7[#]) 的冲击强度 (13.10 kJ/m²) 与纯 PA6 (13.07 kJ/m²) 相近。这是因为熔融状态下 PP-g-MAH 的酸酐基团与 PA6 的酰胺基团发生反应,可形成 PA6-g-PP 接枝共聚物,改善两相的相容性,增加相界面的结合力,当受到冲击时,应力可有效传递到韧性更高的 PP 软相,使共混物冲击强度大幅提高^[12]。

PA6 / PP-g-MAH / CB 具有较高力学强度和韧性,主要源于 PP-g-MAH, PA6 和 CB 之间较强的界面粘附以及 PP-g-MAH 分散相尺寸的细化有利于应力的有效传递。PP-g-MAH 在提高 PA6 / CB 韧性的同时,也使 PA6 / CB 保持较高的拉伸性能。与 PA6 / CB 相比,PA6 / PP-g-MAH / CB (6[#]) 的拉伸强度 (50.13 MPa)、断裂伸长率 (12.29%) 和冲击强度 (12.36 kJ/m²) 分别提高了 6.1%, 72.87% 和 55.7%。

2.4 复合材料的抗静电性能

PP-g-MAH 含量对 PA6 / CB 表面电阻率和体积电阻率的影响如图 3 所示。

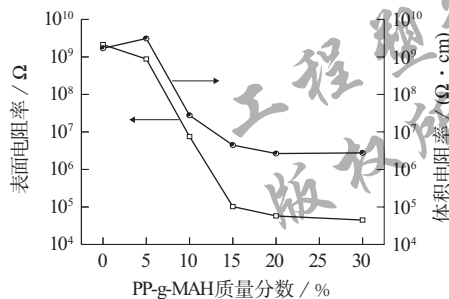
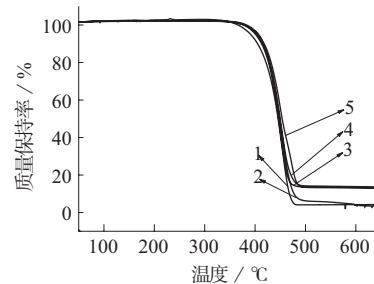


图 3 不同 PP-g-MAH 含量 PA6 / CB 的表面电阻率和体积电阻率

PA6 / CB 的表面电阻率和体积电阻率分别为 $3.43 \times 10^9 \Omega$ 和 $1.71 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, PA6 / PP-g-MAH / CB (6[#]) 复合材料表面电阻率和体积电阻率分别下降到 $5.76 \times 10^4 \Omega$ 和 $2.66 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, 下降了 5 个和 3 个数量级。类似现象在 PA6 / PC / 石墨^[3]、PA6 / POE-g-MAH / CB^[9] 和 PA6 / ABS / CB / CNT^[10] 抗静电复合材料中也有报道。三元体系熔融共混中 CB 更趋于选择分散在黏度较低和极性较强的 PA6 相,而不是分散于黏度高和极性弱的第三组元聚烯烃树脂中^[17],由于接枝聚烯烃的极性和界面自由能均低于 PA6,添加 PP-g-MAH 可改变 CB 在基体中的分布状态,使 CB 发生偏聚,更多地分布在 PA6 / PP-g-MAH 两相界面处或 PA6 基体相中,有利于 CB 在 PA6 中形成导电网络结构,提高复合材料的抗静电性能。

2.5 复合材料的热稳定性

纯 PP-g-MAH、纯 PA6 及其二元和三元复合材料的 TG 曲线见图 4,热降解参数见表 3,其中 T_5 , T_{10} , T_{50} 分别为失重 5%, 10% 和 50% 的分解温度。



1—PP-g-MAH ; 2—PA6 ; 3—PA6 / CB (2[#]) ;

4—PA6 / PP-g-MAH / CB (4[#]) ; 5—PA6 / PP-g-MAH / CB (7[#])

图 4 PP-g-MAH, PA6 及其二元和三元复合材料的 TG 曲线

表 3 PP-g-MAH, PA6 及其二元和三元复合材料的热降解参数 / °C

材料	T_5	T_{10}	T_{50}
PA6	406.3	416.0	449.0
PP-g-MAH	391.5	405.3	445.8
PA6 / CB (2 [#])	401.5	412.8	446.8
PA6 / PP-g-MAH / CB (4 [#])	403.2	415.2	450.2
PA6 / PP-g-MAH / CB (7 [#])	406.2	418.3	453.8

由图 4 和表 3 可知,纯 PP-g-MAH、纯 PA6 及其二元和三元复合材料的热分解均为一步降解。纯 PA6 的 T_5 , T_{10} 和 T_{50} 分别为 406.3, 416.0, 449.0 °C; 而纯 PP-g-MAH 的 T_5 , T_{10} 和 T_{50} 相对较低,分别为 391.5, 405.3, 445.8 °C,表明纯 PA6 的热稳定性略高于 PP-g-MAH。PA6 / CB 的 T_5 , T_{10} 和 T_{50} 分别为 401.5, 412.8, 446.8 °C,表明 PA6 / CB 的热稳定性低于纯 PA6,这与 PA6 中加入过量 CB 及其导致的 CB 颗粒聚集有关, CB 聚集体的形成减弱了 PA6 基体对 CB 浸润和包覆,材料内部形成更多缺陷,导致复合材料热稳定性降低^[18]。随 PP-g-MAH 含量增加, PA6 / PP-g-MAH / CB 的 T_5 , T_{10} 和 T_{50} 均增大, PA6 / PP-g-MAH / CB (7[#]) 的热分解温度接近甚至高于纯 PA6 的分解温度,表明 PP-g-MAH 提高了 PA6 / CB 的热分解温度,这是由于添加 PP-g-MAH 改善了树脂基体对 CB 粒子的浸润和包覆, CB, PP-g-MAH 和 PA6 间有较强的界面作用,以及 PA6 / PP-g-MAH / CB (7[#]) 中 PP-g-MAH 分散相的尺寸减小,可降低树脂的分解和热分解产物的扩散,增大对挥发分逸出的阻隔。

3 结论

(1) 添加质量分数为 7.5% 的 CB 使 PA6 的拉伸

弹性模量和抗静电性能增加,但使塑性变形能力、冲击强度和热稳定性明显降低。

(2) 随着 PP-g-MAH 含量增加, PA6 / CB 复合材料的断裂伸长率和冲击强度逐渐增大,同时复合材料仍保持较高的拉伸强度。与 PA6 / CB 相比, PA6 / PP-g-MAH / CB (72.5 / 20 / 7.5) 的拉伸强度、断裂伸长率和冲击强度分别提高 6.1%, 72.87% 和 55.7%。

(3) PA6 / PP-g-MAH / CB 三元复合材料中各组分之间的相容性较好, CB, PP-g-MAH 和 PA6 之间存在较强的界面粘附, PP-g-MAH 均匀细化地分散在 PA6 / CB 中,能提高树脂基体浸润和包覆 CB 粒子的能力,并影响 CB 的选择性分布,有利于提高复合材料的热稳定性和抗静电性能。添加质量分数为 20% 的 PP-g-MAH 使复合材料的表面电阻率和体积电阻率分别下降 5 个和 3 个数量级。

参考文献

- [1] 刘罡. 抗静电 PA6 复合材料的性能研究 [J]. 塑料工业, 2011, 39(9):52-56.
Liu Gang. Study on the performance of antistatic PA6 composites[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(9):52-56.
- [2] Wang Xu, Xu Liang, Xu Xiangbin, et al. Effect of mixing process and morphologies on the electrical conductivity of PA6 / EVA / CB composites[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2011, 50(5):533-538.
- [3] Zhou Shengtai, Chen Yang, Zou Huawei, et al. Thermally conductive composites obtained by flake graphite filling immiscible polyamide 6 / polycarbonate blends[J]. Thermochemica Acta, 2013, 566:84-91.
- [4] Zhang Qian, Wang Boyuan, Guo Weijia, et al. Highly efficient electrically conductive networks in carbon-black-filled ternary blends through the formation of thermodynamically induced self-assembled hierarchical structures[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(8).doi:10.1002 / app.45877.
- [5] Périé T, Brosse A C, Tencé-Girault S, et al. Co-continuous nanostructured nanocomposites by reactive blending of carbon nanotube masterbatches[J]. Polymer, 2012, 53(4):984-992.
- [6] Takuya M, Yoshihide K, Takuro M, et al. Design and fabrication of morphologically controlled carbon nanotube / polyamide-6-based composites as electrically insulating materials having enhanced thermal conductivity and elastic modulus[J]. Composites Science and Technology, 2017, 142:41-49.
- [7] Chow W S, Bakar A A, Mohd Ishak Z A, et al. Effect of maleic anhydride-grafted ethylene-propylene rubber on the mechanical, rheological and morphological properties of organoclay reinforced polyamide 6 / polypropylene nanocomposites[J]. European Polymer Journal, 2005, 41(4):687-696.
- [8] Chow W S, Mohdshak Z A, Karger-Kocsis J, et al. Compatibilizing effect of maleated polypropylene on the mechanical properties and morphology of injection molded polyamide 6 / polypropylene / organoclay nanocomposites[J]. Polymer, 2003, 44(24):7 427-7 440.
- [9] Hu Juan, Zhang Haobin, Hong Song, et al. Simultaneous improvement in both electrical conductivity and toughness of polyamide 6 nanocomposites filled with elastomer and carbon black particles[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2014, 53(6):2 270-2 276.
- [10] Chen Jie, Du Xuechong, Zhang Wenbin, et al. Synergistic effect of carbon nanotubes and carbon black on electrical conductivity of PA6 / ABS blend[J]. Composites Science and Technology, 2013, 81(14):1-8.
- [11] Liu Xiaohui, Wu Qiuju, Berglund L A, et al. Polyamide 6-clay nanocomposites / polypropylene-grafted-maleic anhydride alloys[J]. Polymer, 2001, 42(19):8 235-8 239.
- [12] Dayma N, Satapathy B K. Morphological interpretations and micromechanical properties of polyamide-6 / polypropylene-grafted-maleic anhydride / nanoclay ternary nanocomposites[J]. Materials and Design, 2010, 31(10): 4 693-4 703.
- [13] Chen Guangming, Shen Deyan, Meng Feng, et al. An attenuated total reflection FT-IR spectroscopic study of polyamide 6 / clay nanocomposite fibers[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2010, 25(11):1 121-1 124.
- [14] Wang Qifei, Qi Rongrong, Shen Yanhan, et al. Effect of high-density polyethylene-g-maleic anhydride on the morphology and properties of (high-density polyethylene) / (ethylene-vinyl alcohol) copolymer alloys[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 106(5):3 220-3 226.
- [15] Harmia T, Friedrich K. Fracture toughness and failure mechanisms in unreinforced and long-glass-fibre-reinforced PA66 / PP blends[J]. Composites Science and Technology, 1995, 53(4):423-430.
- [16] Sathe S N, Devi S, Srinivasa Rao G S. Relationship between morphology and mechanical properties of binary and compatibilized ternary blends of polypropylene and nylon 6[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 61(1):97-107.
- [17] Zhang Xuewei, Wu Wei, Liu Jiang, et al. Effect of carbon black self-networking on surface-morphological and electrical properties of immiscible polypropylene / polyamide 6 blends[J]. Materials Research Express, 2019, 6(3):1-8.
- [18] Khun N W, Cheng H K F, Li Lin, et al. Thermal mechanical and tribological properties of polyamide 6 matrix composites containing different carbon nanofillers[J]. Journal of Polymer Engineering, 2015, 35(4):367-376.