

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.01.008

PE-HD-g-MAH 共混改性 PA612 性能研究

肖浩¹, 周良霄¹, 李杰¹, 周文²

(1. 上海普利特伴泰材料科技有限公司, 上海 201707; 2. 上海普利特复合材料股份有限公司, 上海 201707)

摘要: 通过马来酸酐接枝高密度聚乙烯 (PE-HD-g-MAH) 熔融共混改性尼龙 612 (PA612), 研究了玻纤增强改性后的 PA612 复合材料。结果发现, 随着 PE-HD-g-MAH 含量增加, PA612 的结晶温度逐渐下降。通过肉眼和光泽仪研究 PE-HD-g-MAH 对玻纤增强 PA612 外观的影响, 结果发现随着接枝物的引入, 相同条件下复合材料注塑后的样件浮纤更少, 光泽度更高。尤其在低模温的条件下, 这种差异更加明显。加入 PE-HD-g-MAH 共混改性后的玻纤增强 PA612 的复合材料对模温的要求更低, 外观更好, 改善了其成型性。同时, PE-HD-g-MAH 的引入使拉伸强度有小幅度的下降 (6%), 同时可以提高其缺口冲击强度 (18%), 对 PA612 有一定的增韧效果。最后, 研究了共混改性后对复合材料的吸水性及尺寸稳定性的影响。PE-HD-g-MAH 可以有效降低 PA612 的吸水性, 提高 PA612 复合材料制件的尺寸稳定性。

关键词: PA612; PE-HD-g-MAH; 结晶性能; 力学强度; 饱和吸水率; 尺寸稳定性

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)01-0041-05

Performance Study of PA612 / PE-HD-g-MAH Compounds

Xiao Hao¹, Zhou Liangxiao¹, Li Jie¹, Zhou Wen²

(1. Shanghai PRET Bantai material technology Co., Ltd., Shanghai 201707, China;

2. Shanghai PRET Composites Co., Ltd., Shanghai 201707, China)

Abstract : Nylon 612 (PA612) reinforced by glass fiber was modified by melt blending of maleic anhydride grafted high density polyethylene (PE-HD-g-MAH). Then, modified PA612 was studied. It was found that the crystallization temperature of PA612 decreased as the content of PE-HD-g-MAH increased. The effect of PE-HD-g-MAH on the appearance of glass fiber reinforced PA612 by naked eye and glossmeter. The results show that added graft copolymer, the parts of composite material has a better appearance, fewer glass fibers emergence and higher glossiness. Especially at the condition of low mold temperature, the difference is more obvious. The composite material of glass reinforced PA612 after PE-HD-g-MAH blending modification has lower requirements on mold temperature, better appearance and its molding property is improved. At the same time, PE-HD-g-MAH makes the tensile strength of PA612 have a slight decrease (6%), while it can improve its notched impact strength (18%) for toughening PA612. Finally, the effects of mixed modification on the water absorption and dimensional stability of composite materials were studied. PE-HD-g-MAH can effectively reduce the water absorption and improve the dimensional stability of PA612.

Keywords : PA612; PE-HD-g-MAH; crystallization performance; mechanical strength; saturation water absorption; dimensional stability

尼龙 (PA) 作为五大工程塑料之一, 因其高强度、高韧性, 在汽车行业、电子电器等行业中有广泛应用^[1]。根据重复单元中碳原子的数量可分为 PA46, PA6, PA66, PA610, PA612, PA12, PA1012 等,

其中 PA6 和 PA66 在市场上占比最大^[2]。但是由于 P6 和 PA66 脂肪链段较短, 酰胺键相对含量较高, 导致 PA6 和 PA66 吸水率较高, 在产品成型后易产生尺寸变化和性能不稳等缺陷, 在高温高湿等环境要

通讯作者: 肖浩, 博士, 工程师, 主要从事塑料改性研究 E-mail: 972123094@qq.com

收稿日期: 2019-11-02

引用格式: 肖浩, 周良霄, 李杰, 等. PE-HD-g-MAH 共混改性 PA612 性能研究 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(1):41-45.

Xiao Hao, Zhou Liangxiao, Li Jie, et al. Performance study of PA612 / PE-HD-g-MAH compounds[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):41-45.

求尺寸稳定性高的产品中运用受到很大的限制^[3-4]。

PA612 分子结构式为: $\left[\text{NH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{C}(=\text{O}) - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{NH} \right]_n$, 其中含有较长的碳链, 平衡吸水率 1.1%, 较 PA6 和 PA66 吸水率低很多, 尺寸更稳定, 对水解、醇解具有更高的稳定性。同时, PA612 为生物基材料^[5], 受化石原料影响较小, 价格稳定, 且更环保。但是, 相对于 PA66, PA612 的分子结构不够规整, 结晶度较低^[6], 力学性能相对 PA6 和 PA66 偏低, 如果通过调整 PA612 的凝聚态, 可以改善 PA612 的成型性和其他物理性能。刘建伟^[7] 通过研究 PA612 / PA6 合金的性能, 发现随着 PA6 含量的增多, 弯曲强度、热变形温度和吸水率逐渐升高, 而缺口冲击强度和断裂伸长率逐渐下降。陈宏伟^[8] 研究了不同熔融条件中 PA612 / PUR-T 合金的结晶行为, 研究发现随着冷却速率的增加, 结晶峰向低温方向移动, 并且随着热塑性聚氨酯 (PUR-T) 含量的增大, 移动的趋势越明显。作者解释这种现象是 PA612 和 PUR-T 两种大分子相互扩散导致。产文涛^[9] 研究了 PA612 及其共聚物的流变性能, 发现二者均为切力变稀的假塑性非牛顿流体, 可以通过调节温度和注塑速度控制熔体的流动速率, 从而获得合适的加工工艺。

笔者通过马来酸酐接枝高密度聚乙烯 (PE-HD-g-MAH) 共混改性 PA612, 调整 PA612 的结晶性能, 通过红外, 差示扫描量热 (DSC) 表征改性后的 PA612 的结晶区的变化, 同时通过 DSC 研究 PE-HD-g-MAH 的引入, PA612 的结晶温度和结晶速率的变化。通过光泽度和目测法表征注塑件的表现, 研究 PE-HD-g-MAH 对其表现和注塑工艺优化的作用。最后通过万用试验机水煮实验, 表征改性后 PA612 力学性能和吸水性的变化。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA612: 美国杜邦公司;

PE-HD-g-MAH: 马来酸酐接枝率为 5%, 美国陶氏公司;

抗氧剂 1098: 唐山科澳化学助剂;

玻璃纤维: 重庆国际复合材料有限公司。

1.2 主要设备及仪器

双螺杆挤出机: ZE30A*440-UTXi 型, 德国贝尔斯托夫公司;

注塑机: 1600SA 型, 中国海天集团;

万用试验机: Z010 型, 德国 Zwick/Roell 公司;

摆锤冲击试验机: HIT5.5P 型, 德国兹韦克公司;

傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: ALPHA II 型, 德国布鲁克公司;

DSC 测试仪: DSC 8000 型, 美国 Perkin Elmer 公司;

光泽度测试仪: BYK 4563 型, 德国 BYK 公司;

恒温水浴槽: HH-420 型, 深圳市友联仪器设备有限公司。

1.3 试样制备

设计了 5 个配方, PE-HD-g-MAH 在树脂中的比例分别为 0, 5%, 10%, 15%, 20%, 按配方将主料和助剂混合均匀, 控制挤出机温度在 230 ~ 250℃, 主料和助剂混合后通过主喂料口加入, 玻纤通过 7 区的侧喂料加入, 为总质量的 33%, 挤出切粒成型。经过 120℃, 5 h 干燥后, 改性粒子通过注塑机形成不同规格的测试样条和样板。按照 PE-HD-g-MAH 相对于 PA612 的比例, 将样品依次命名为 PE-0, PE-5, PE-10, PE-15, PE-20, 对应比例分别为 0, 5%, 10%, 15%, 20%。

1.4 性能测试

采用 FTIR 仪测试不同含量的 HDPE-g-MAH 对 PA612 结构的影响。测试标准: ISO 10640-2011; 测试样品: 样板 (100 mm × 150 mm × 3.2 mm); 测试条件为: 反射法, 扫描范围为: 500 ~ 4000 cm⁻¹。

采用 DSC 仪测试降温曲线中的冷却结晶峰。测试标准: ISO 11357-2016; 测试条件: 140 ~ 220℃, 10℃ / min。

采用光泽度仪测试 PE-HD-g-MAH 对 PA612 成型后的表现的影响。测试样品: 样板 (100 mm × 150 mm × 3.2 mm); 测试标准: ISO 2813-2014; 测试条件为: 23℃, 用会聚光束的 20° 光泽度的 TAPPI 法。

拉伸强度和拉伸断裂伸长率测试: 采用万用试验机, 样条尺寸 172 mm × 10 mm × 4 mm, 测试标准: ISO 527-2-2012, 测试条件: 50 mm / min, 23℃。

弯曲强度和弯曲弹性模量测试: 采用万用试验机, 样条尺寸 80 mm × 10 mm × 4 mm, 测试标准: ISO 179-1-2016, 测试条件: 2 mm / min, 23℃。

冲击强度和缺口冲击强度测试: 采用摆锤冲击试验机, 样条尺寸 80 mm × 10 mm × 4 mm, 测试标准: ISO 179-1-2016, 测试条件: 23℃。

2 结果与讨论

2.1 FTIR 分析

比较不同含量的 PE-HD-g-MAH 的红外吸收谱图, 可以很明显地看到, 随着 PE-HD-g-MAH 含

量的增加, 2850 cm^{-1} 和 2930 cm^{-1} 处的 CH_2 收缩振动吸收峰逐渐增大。另外, 在指纹区 $1000 \sim 1100\text{ cm}^{-1}$ 处, 吸收峰有个逐渐增大的过程, 在 15% 的样品中, 峰值达到最大。D. Garcia 等^[10] 认为该区域的吸收峰与酰胺键的结晶程度有关。因此, 可以大胆地推测, PE-HD-g-MAH 对 PA612 的结晶性能有影响。当然该结论还需进一步的验证。

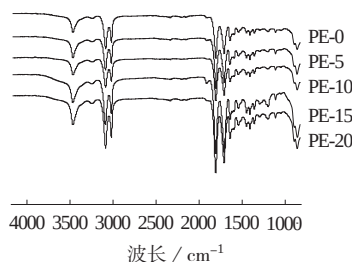


图1 不同含量 PE-HD-g-MAH 改性 PA612 的 FTIR 谱图

2.2 DSC 分析

不同的结晶度和结晶速率在结晶过程表现不同^[11], 因此通过研究 PA612 在降温过程中的吸放热曲线可以探究 PE-HD-g-MAH 对 PA612 结晶性能的影响, 如图 2 所示。在图 2 中可以看出, 随着 PE-HD-g-MAH 的含量的增多, 吸热峰曲线逐渐变得更加陡峭, 10%~15% 时, 吸热峰最大。同时, 吸热峰起始和峰位值都相对纯 PA612 有一个很明显的向低温移动的过程。这可能跟 PE-HD-g-MAH 熔点较低, 在 PA612 中同时起到了润滑剂的作用, 使分子链链段更易滑移, 要更低的温度才能形成稳定的结晶核。但同时又由于链段更易滑移, 所以结晶速率明显比纯 PA612 更快^[12]。在图 3 中, 比较了吸热曲线的最大斜率和吸热峰起始位置, 可以看到 PE-HD-g-MAH 含量 10% 的样品吸热曲线斜率达到最大, 而吸热峰起始位置随着 PE-HD-g-MAH 的含量增多而逐渐降低, 但降低幅度逐渐缩小。

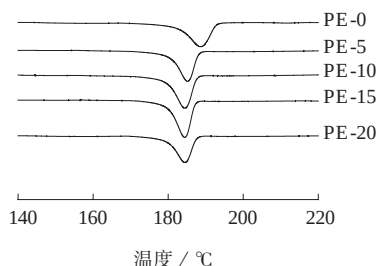


图2 不同含量 PE-HD-g-MAH 改性 PA612 的吸热曲线

为进一步验证 PE-HD-g-MAH 对 PA612 结晶性能的影响, 研究了 PE-0 和 PE-15 在不同降温速率下的结晶过程, 如图 3 和图 4 所示。由图可知, 随着降温速率逐渐增大, PA612 的起始结晶温度逐渐往

低温移动。这是由于随着降温速率的增加, 分子链链段对温度降低的响应速度越来越低^[13-14]。可很明显看到, 样品 PE-15 的吸收峰的曲线更陡峭, 但变化幅度比 PE-0 更小。对应在 PA612 作为工程塑料在实际注塑过程中, 不同的降温速率可以模拟为不同的模温的加工工艺。PE-HD-g-MAH 改性后的 PA612 所需模温更低, 并且对模温的反应更不敏感, 成型过程更稳定。

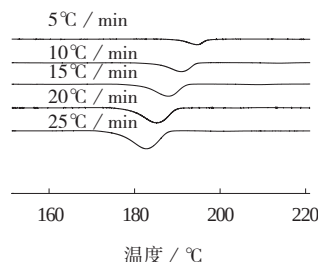


图3 不同降温速率下 PE-0 的吸热曲线

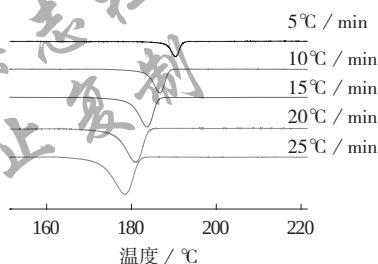


图4 不同降温速率下 PE-15 的吸热曲线

2.3 注塑件外观表征

为验证 PE-HD-g-MAH 对 PA612 成型性的影响, 对 5 种样品分别在 60, 80, 100, 120, 140 °C 模温下进行注塑, 模具为 100 mm × 150 mm × 4 mm 的样板模具, 通过肉眼和光泽度进行表征, 见表 1。肉眼评判标准为 5 个等级: 1、浮纤严重; 2、能看到浮纤; 3、镜面反光, 中心有点哑; 4、镜面反光, 边缘有点哑; 5、完全镜面反光, 并且根据实际情况取中间值。光泽度是根据树脂层的反射程度表征注塑件表面树脂包覆玻纤的情况, 可以一定程度上反映样件的表现。

表1 肉眼测试不同模温下五种试样的表现

模温 / °C	PE-0	PE-5	PE-10	PE-15	PE-20
60	2.5	3.2	3.5	3.6	3.5
80	3.5	4.1	4.4	4.2	4.3
100	3.5	4.4	4.6	4.7	4.6
120	4.2	4.6	4.7	4.7	4.8
140	4.7	4.8	4.8	4.8	4.8

从表 1 可以看出, 每个试样都随着模温的升高表现逐渐改善。这是由于塑料粒子在注塑过程中融化后的熔体接触到模具, 随着模具温度的升高, 树脂的冷却速度更慢, 玻纤更易收缩藏入树脂中。因

此,反映在注塑件上,模温越高,表观越好。同时可以看到,随着试样中 PE-HD-g-MAH 的含量增多,样品在低模温 (60~80℃) 下的表观逐渐改善。这是由于 PE-HD-g-MAH 的玻璃化转变温度 (-78℃) 比 PA612 (46℃) 低很多,分子链链段更柔软,在注塑过程中,树脂更易包裹住玻纤,使注塑件表观更好,对模温的要求更低。另外,在 100℃ 和 120℃ 的模温下的注塑件,靠近流道的部位表观更好(样板中心反光),在模具尾端有浮纤,表观稍差(样板边缘有些哑)。这是由于在注塑过程中靠近流道的部位熔体温度较高,流动性较好,树脂更易流动到模具表面将玻纤覆盖。

从光泽度的角度看,注塑件的光泽度随着模温的升高而升高。需要指出的是,因为注塑件的表面光泽度不均一,因此测取每块样板的中心与四个角落的光泽度,然后取平均值作为每个样件的最终光泽度。在测试过程中,树脂会将光泽度仪的测试光线反射回受光元件,但是裸漏的玻纤会将光线散射到不同方向。因此,光泽度可以一定程度上反映注塑件的表观情况。可以从图 5 中看到,在加入 PE-HD-g-MAH 成分的样板在低模温下的光泽度明显比未加 PE-HD-g-MAH 的样板更高。这一结果与肉眼测试的结果相对应。因此,可以得出确切结论,PE-HD-g-MAH 的加入可以改善 PA612 的低模温下表观,优化了 PA612 的成型性。

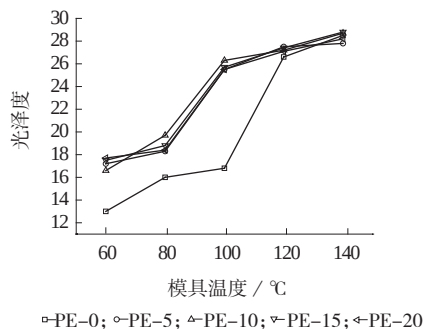


图5 不同模温下五种试样的光泽度

2.4 物理性能测试

PE-HD-g-MAH 对 PA612 的共混改性对其结构的影响可以一定程度反映在物理性能上。通过分析五种试样的物理性能可以看出, PE-HD-g-MAH 的加入使 PA612 力学强度会有一定程度的下降,其中 PE-5 和 PE-10 相较于 PE-0, 拉伸强度下降 6%, 弯曲强度下降 10%, 影响较小。但是, 需要指出的是, 缺口冲击和断裂伸长率, 相较于 PE-0, 其他四个引入 PE-HD-g-MAH 共混改性的试样都有一定程度的

上升。因此, PE-HD-g-MAH 的引入可以一定程度上提高 PA612 的韧性。从物理性能的测试结果上看, PE-HD-g-MAH/PA612 的共混体系中, 二者的分散性和相容性较好。

表2 五种试样的物理性能

性能	PE-0	PE-5	PE-10	PE-15	PE-20
密度 / (g · cm ⁻³)	1.355	1.32	1.289	1.27	1.22
拉伸强度 / MPa	167	157	155	152	140
断裂伸长率 / %	2.64	3.58	3.24	3.70	4.05
弯曲强度 / MPa	217	196	195	190	177
弯曲弹性模量 / GPa	7386	6305	6326	6295	6015
缺口冲击强度 / (kJ · m ⁻²)	14.6	15.6	16.5	16.8	16

2.5 吸水性能测试

虽然相对于 PA6 和 PA66, PA612 本身吸水性较低, 但是由于分子链中含有酰胺键, 跟烯烃类聚合物相比, 还是要高一些。在一些对材料的吸水性要求极高的产品, 比如高频和湿态下的绝缘材料, PA612 的应用还是受到了限制。同时, 吸水后产品尺寸会产生一定程度变化, 导致不同组件衔接不良等问题。PE-HD 为烯烃类聚合物, 吸水率极低^[15], 共混改性 P612 有望改善其吸水率较高的问题。

表 3 为五种试样的吸水率和尺寸变化率。在表 3 中, 饱和吸水率是将样件放置于 100℃ 的沸水中煮 12 h 后, 测试样件水煮前后重量变化率。通过测试 100 mm × 150 mm × 4 mm 的样板在水煮前后流动方向和垂直流动方向的尺寸变化, 分别得到纵向和横向尺寸变化率。通过研究不同含量的 PE-HD-g-MAH 共混改性 PA612, 可以看出随着 PE-HD-g-MAH 含量的增加, 试样的饱和吸水率逐渐下降, 横向和纵向尺寸变化率也逐渐变小。因此, PE-HD-g-MAH 共混改性 PA612 可以有效降低其吸水率。

表3 五种试样的吸水率和尺寸变化率 %

性能	PE-0	PE-5	PE-10	PE-15	PE-20
饱和吸水率	1.68	1.57	1.46	1.27	1.12
横向尺寸变化率	1.27	0.86	0.74	0.63	0.42
纵向尺寸变化率	0.16	0.14	0.13	0.12	0.12

3 结论

研究了 PE-HD-g-MAH 共混改性对 PA612 的结构和性能的影响。结果发现, 随着 PE-HD-g-MAH 的引入, PA612 的结晶温度下降了 8℃ 左右, 而且, 共混改性样品的结晶速率受降温速率的影响较小。通过肉眼和光泽度仪测试注塑件的表观, 发现共混改性的产品在低模温下的浮纤比未共混改性的产品少很多。因此, PE-HD-g-MAH 可以改善

玻纤增强 PA612 复合材料的表现,降低了其对模温的依赖,改善产品的成型性。其次,通过研究不同含量 PE-HD-g-MAH 共混改性 PA612,我们发现共混改性后的产品拉伸强度有小幅度的下降(6%),但是缺口冲击有上升。结果表明,PE-HD-g-MAH 在 PA612 树脂中分散较好,对其有一定程度的增韧效果。最后,通过比较不同含量 PE-HD-g-MAH 的样品的饱和吸水率和尺寸变化率,结果发现 PE-HD-g-MAH 共混改性 PA612 可以有效降低其吸水率,提高 PA612 的尺寸稳定性,拓宽了其在电子电器等方面的应用。

参考文献

- [1] 罗河胜. 塑料材料手册[M]. 广州: 广东科技出版社, 2019.
Luo Hesheng. Plastics material handbook[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2019.
- [2] 邓如生, 魏远方, 陈步宁. 聚酰胺树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
Deng Rusheng, Wei Yuanfang, Chen Buning. Polyamid resin and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [3] 李晖, 魏莉萍, 王湘明, 等. 吸水率对尼龙 66 力学性能的影响研究[J]. 工程塑料应用, 2008(8):64-67.
Li Hui, Wei Liping, Wang Xiangming, et al. Investigation on the influence of water absorption to the mechanical properties of nylon66 materials[J]. Engineering Plastics Application, 2008(8):64-67.
- [4] 周雷. PA66 产品尺寸稳定性的影响因素[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(1):126-131.
Zhou Lei. Influencing factors on dimensional stability of PA66 products[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1):126-131.
- [5] 伦瑞欣. 生物基长碳链尼龙纤维的制备及结构性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
Lun Ruixin. Preparation and structural properties of bio-based long carbon chain nylon fibers[D]. Shanghai: Dongnhua University, 2016.
- [6] 王玉东, 付鹏, 李晓光, 等. 尼龙 612 等温结晶的球晶形态与生成条件[J]. 高分子材料科学与工程, 2009, 25(9):72-75.
Wang Yudong, Fu Peng, Li Xiaoguang, et al. The spherulitic morphology of nylon 612 and its formation conditions in isothermal crystallization[J]. Polymer Material Science and Engineering, 2009, 25(9):72-75.
- [7] 刘建伟, 王召青, 田国锋, 等. 增韧尼龙 612 / 尼龙 6 合金的性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(1):15-19.
Liu Jianwei, Wang Zhaoqing, Tian Guofeng, et al. Performance of toughened PA612 / PA6 alloys[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(1):15-19.
- [8] 陈宏伟, 全丹丹, 林志勇. 熔融条件对尼龙 612TPU 共混物中尼龙结晶行为的影响[J]. 化学工程与装备, 2010(8):34-36.
Chen Hongwei, Tong Dandan, Lin Zhiyong. Effect of melting conditions on crystallization behavior of nylon in nylon 612TPU blends[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2010(8):34-36.
- [9] 产文涛, 曲希明, 俞昊, 等. 尼龙 612 及其共聚物流变性能的研究[J]. 合成纤维工业, 2019, 42(4):52-55.
Chan Wentao, Qu Ximing, Yu Hao, et al. Rheological behavior of nylon 612 and its copolymer[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2019, 42(4):52-55.
- [10] Garcia D, Starkweather H W. Hydrogen bonding in nylon 66 and model compounds[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2010, 23(3):213-230.
- [11] 张艳萍, 王军平, 刘凤山, 等. PA66 的结晶度及影响因素研究[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(6):54-57.
Zhang Yanping, Wang Junping, Liu Fengshan, et al. Study on influential elements of the measurement to the crystallinity of PA66[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(6):54-57.
- [12] Li Hongbo, Wu Jiawei, Huang Yaqiong, et al. Properties of polyamide 612 poly(vinyl alcohol) blends and their impact on free volume and oxygen barrier properties[J]. Journal of Polymer Research, 2018, 25(9):195.
- [13] 刘冰肖, 胡国胜, 张静婷, 等. 半芳香族共聚酰胺 10T 和 10T / 106 的非等温结晶动力学分析[J]. 塑料工业, 2019(4):110-114.
Liu Bingxiao, Hu Guosheng, Zhang Jingting, et al. Non-isothermal crystallization kinetics analysis of semi-aromatic copolyamides 10T and 10T / 106[J]. China Plastics Industry, 2019(4):110-114.
- [14] 曾鹏, 朱晓岗, 杨杰, 等. Jeziorny 法分析尼龙 MXD6 非等温结晶行为[J]. 科技视界, 2017, 29:43-44.
Zeng Peng, Zhu Xiaogang, Yang Jie, et al. Jeziorny method to analyze the non-isothermal crystallization behavior of nylon MXD6[J]. Science & Technology Vision, 2017, 29:43-44.
- [15] Zane Zelca1, Silvija Kukle, Janis Kajaks. Water absorption and tensile properties of hemp waste and polyethylene composites[J]. Materials Science and Engineering, 2019, 500:012 003.
- [16] 周慧, 陈 Xiaosong, Tang Huidong. Research on preparation and properties of PMMA / GR thermal conductivity composites[J]. Plastics Science And Technology, 2017, 45(7):53-57.
- [17] 吴佳玮, 吉鑫雨, 杨金帝, 等. 高热导率聚丙烯 / 石墨复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(8):36-40.
Wu Jiawei, Ji Xinyu, Yang Jindi, et al. Preparation and properties of polypropylene / graphite composites with high thermal conductivity[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(8):36-40.
- [18] 燕莎. 聚合物基导热复合材料的制备和性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
Yan Sha. Preparation and properties of polypropylene-based thermal conductive composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.