

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.11.010

树脂黏度对玻纤增强 PA6 力学性能和外观的影响

丁超,周华龙,张永,黄牧,张亚军,王丰

(金发科技股份有限公司,广州 510663)

摘要:为解决工程应用中如何同时兼顾玻纤(GF)增强尼龙(PA)外观和力学性能的问题,将不同黏度的PA6树脂与40% GF共混,制备不同类型的PA6/GF复合材料。系统研究了树脂黏度对PA6/GF复合材料力学性能、结晶性能和外观的影响。结果表明,树脂黏度对PA6/GF复合材料的力学性能具有重要的影响,树脂黏度越高,PA6/GF复合材料的冲击强度越高,而拉伸强度越低;PA6/GF复合材料的熔融结晶行为与其树脂黏度具有密切的关系,树脂黏度越高,材料的结晶温度和结晶度越低;当使用相对黏度2.0树脂与相对黏度4.0树脂复配时,复合材料的分子量分布变宽,呈现最好的外观。

关键词: 尼龙6;黏度;结晶;外观;浮纤

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)11-0056-06

Effect of Resin Viscosity on Mechanical Properties and Appearance of Glass Fiber Reinforced PA6

Ding Chao, Zhou Hualong, Zhang Yong, Huang Mu, Zhang Yajun, Wangfeng

(Kingfa Science & Technology Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: For glass fiber (GF) reinforced nylon (PA), how to balance its appearance and mechanical properties at the same time is a difficult problem in the field of engineering application. In order to solve this problem, PA6 resin with different viscosity was blended with 40% GF to prepare different types of PA6/GF composites. The effect of resin viscosity on mechanical properties, crystalline properties and appearance of PA6/GF was studied systematically. The results show that resin viscosity has the important effect on the mechanical properties of PA6/GF composites. The higher the resin viscosity, the higher the impact strength and the lower the tensile strength of PA6/GF. The melting and crystallization behaviors of PA6/GF composites are closely related to the resin viscosity. The higher the resin viscosity is, the crystallization temperature and crystallinity of the material will decrease obviously. When the resin with the relative viscosity of 2.0 is combined with the resin with the relative viscosity of 4.0, the PA6/GF composite has the best appearance due to the wide molecular distribution.

keywords: nylon 6; viscosity; crystallinity; appearance; floating fiber

玻纤(GF)增强尼龙(PA)复合材料具有优异的力学性能、尺寸稳定性、耐热性能、耐蠕变性能和耐疲劳性能等,被广泛应用于精密仪器、电动工具、交通运输和汽车零部件等领域^[1-3]。但GF的引入会极大地提高PA熔体的黏度,当GF含量较高(质量分数>30%)时,熔体流动性差,并且其结晶速度快,在注塑过程中树脂熔体无法很好地浸润表面玻纤,导致注塑制品表面容易有浮纤,严重限制了PA/GF的广泛应用^[4-7]。因此,改善PA/GF表面浮纤,提

高其市场竞争力,一直是PA工程化应用领域的研究热点之一。

目前,改善PA/GF表面浮纤主要有两种思路,一是通过引入低分子润滑剂改善熔体的流动性,二是通过引入特殊添加剂(如苯胺黑、氯化锂)来降低结晶速度^[8-11]。而常用的改善PA/GF浮纤的方法都存在一些缺点,如低分子润滑剂容易迁移到聚合物表面或受热降解,在注塑复杂制件时,引起聚合物表面发生焦烧现象或气痕,而氯化锂等添加剂在

通信作者:丁超,硕士,主要研究方向为工程塑料改性

收稿日期:2021-08-16

引用格式:丁超,周华龙,张永,等.树脂黏度对玻纤增强PA6力学性能和外观的影响[J].工程塑料应用,2021,49(11):56-61.

Ding Chao, Zhou Hualong, Zhang Yong, et al. Effect of resin viscosity on mechanical properties and appearance of glass fiber reinforced PA6[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11): 56-61.

一定程度上会降低 PA/GF 的力学性能。笔者将不同黏度的 PA6 树脂与 40% GF 共混,制备不同类型的 PA6/GF 复合材料,系统研究了树脂黏度对复合材料力学性能、结晶性能和外观的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA6:M2000(相对黏度 2.0),M2400(相对黏度 2.4),M2800(相对黏度 2.8),广东新会美达锦纶股份有限公司;

PA6:BL40H(相对黏度 4.0),中石化巴陵石油化工有限公司;

GF:ECS301HP-3-H,重庆国际复合材料股份有限公司;

抗氧剂 IRGANOX 1098、润滑剂 TR044W:珠海金发供应链管理有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:NE27E/40-1500 型,四川中装科技有限公司;

注塑机:BM-90E 型,广东正茂精机有限公司;

自动黏度测定仪:NCY 型,上海思尔达科学仪器有限公司;

万能材料试验机:Z010 型,德国 Zwick/Roell 集团;

摆锤冲击试验机:IT504 型,美国 Tinius Olsen 公司;

熔体流动速率(MFR)仪:Cflow 型,德国 Zwick/Roell 集团;

固体密度计:XS104 型,梅特勒-托利多集团;

差示扫描量热(DSC)仪:200F3 型,德国耐驰仪器制造有限公司;

二次元影像测量仪:YVM-3020CSPC 型,上海界限实业有限公司;

凝胶渗透色谱(GPC)仪:ACQUITY APC 型,美国 Waters 公司。

1.3 试样制备

将干燥好的 PA6 树脂和助剂按比例混合,然后通过主喂料口加入到挤出机中,GF 采用侧喂的方式加入,制备 PA6/GF 复合材料。挤出机各区温度为 180,240,250,240,240,230,220,230℃,机头温度 230℃,螺杆转速 400 r/min。挤出完成后,将粒料放入 120℃鼓风烘箱中烘 4 h,通过注塑机根据不同的测试标准制备相应样条。PA6/GF 复合材料质量配方见表 1。

表 1 PA6/GF 复合材料质量配方

材料	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
PA6 M2000	58.4				29.2	40.9
PA6 M2400		58.4				
PA6 M2800			58.4			
PA6 BL40H				58.4	29.2	17.5
GF	40	40	40	40	40	40
IRGANOX 1098	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
TR044W	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

1.4 测试与表征

黏度测试:准确称量 0.417 g 干燥后的样品于 25 mL 容量瓶中,加入 15 mL 左右 96% 硫酸,放在温度不超过 30℃恒温水浴振荡器中,待样品完全溶解后,冷却,定容至刻度,摇匀。将定容后的溶液通过砂芯漏斗过滤至乌氏黏度管(内径 1.03 mm)中,采用自动黏度仪在 (25±0.02)℃条件下测定纯溶剂和样品的流动时间,计算相对黏度和比浓黏度(黏数)。

DSC 测试:氮气气氛中,将 5 mg 左右的样品从 30℃升至 260℃,恒温 2 min 消除热历史后降至 30℃,再升温至 260℃,升降温速率均为 10℃/min,氮气流量为 20 mL/min。

力学性能测试:均在 23℃下测试,拉伸强度按照 ISO 527-2-2012 进行测试,拉伸速率 10 mm/min;悬臂梁冲击强度按照 ISO 180-2000 进行测试。

MFR 按照 ISO 1133-1-2011 进行测试,温度 260℃,负荷 2.16 kg。

密度按照 ISO 1183-1-2012 进行测试,温度 23℃。

二次元显微观察:将样品置于仪器玻璃台面上,选择合适的物镜倍数,调整物镜距离,保证图像清晰,观察样品表面形态。

分子量及分子量分布测试:采用 GPC 仪测量样品的分子量及分子量分布,流动相为六氟异丙醇(5 mmol/L 三氟乙酸钠),流速 0.5 mL/min,检测室温度 40℃,以窄分布的聚甲基丙烯酸甲酯标准曲线计算样品的相对分子量及分子量分布。

2 结果与讨论

2.1 黏度对力学性能的影响

不同配方材料的相对黏度与黏数见表 2。与预估相对黏度(用树脂的黏度与比例进行估算,且假

表 2 不同配方体系相对黏度与黏数数据

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
实测相对黏度	2.09	2.51	3.05	3.58	2.73	2.45
预估相对黏度	2.0	2.4	2.8	4.0	3.0	2.6
黏数/(mL·g ⁻¹)	109	151	205	258	173	145

设挤出前后树脂的黏度不变)相比,1[#],2[#],3[#]的实测相对黏度略有提升,而4[#]的实测相对黏度下降较多,说明高黏树脂流动性差,在挤出过程中受到较强的剪切作用,导致分子量降低,从而黏度下降^[12],同理,5[#],6[#]由于有高黏树脂 BL40H 的存在,加工过程中也会受到较强的剪切,所以最终的黏度低于预估相对黏度。

表3为PA6/GF复合材料的力学性能和密度。由表3可知,对于1[#]~4[#]配方,随着树脂黏度提高,PA6/GF复合材料的拉伸强度逐渐下降,而缺口冲击强度逐渐上升。对于1[#]~4[#]配方,树脂黏度由2.09提高到3.58,PA6/GF复合材料的缺口冲击强度由13.6 kJ/m²提高到20.6 kJ/m²,上升了51.5%。5[#]和6[#]是采用高低黏树脂(BL40H与M2000)复配的方案,其力学性能介于1[#]与4[#]之间。6[#]配方中M2000含量更高,所以其力学性能更接近1[#]配方。由表3还可看出,树脂黏度对密度基本没有影响。

表3 不同配方PA6/GF复合材料的力学性能和密度

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
拉伸强度/MPa	213	211	207	195	198	206
悬臂梁缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)	13.6	17.0	17.8	20.6	17.4	14.8
悬臂梁冲击强度/(kJ·m ⁻²)	56	85	92	81	83	86
密度/(g·cm ⁻³)	1.465	1.463	1.460	1.460	1.459	1.460

2.2 黏度对熔体流动性能的影响

图1为不同配方PA6/GF复合材料的MFR。由1[#]~4[#]配方可知,MFR与树脂黏度呈负相关性。树脂黏度越高,MFR越小;由5[#]和6[#]可知,当采用高低黏树脂复配时,MFR处于两者之间,低黏树脂含量越高,MFR越大。

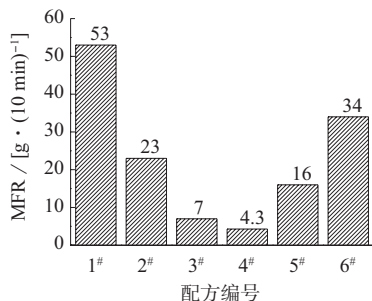
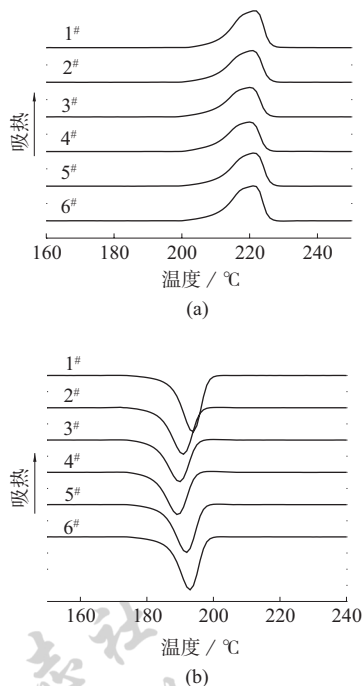


图1 不同配方PA6/GF复合材料的MFR

2.3 黏度对熔融和结晶行为的影响

图2为不同配方PA6/GF复合材料的DSC二次升温曲线与一次降温曲线。由升温曲线可知,树脂黏度对复合材料的熔融峰温度(T_m)影响较小,而对其结晶峰温度(T_c)影响较大,具体数值见表4。



a—二次升温曲线;b—一次降温曲线

图2 不同配方PA6/GF复合材料的DSC升降温曲线

表4 不同配方PA6/GF复合材料的DSC数据

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
$T_m/^\circ\text{C}$	221.3	220.7	219.9	219.6	221.2	221.1
$T_c/^\circ\text{C}$	193.8	190.9	189.8	189.2	191.8	193
$\Delta H_m/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	35.66	31.55	29.22	28.95	32.43	33.90
$X_c/\%$	32.1	28.4	26.3	26.1	29.2	30.6

复合材料的结晶度(X_c)根据式(1)进行计算。

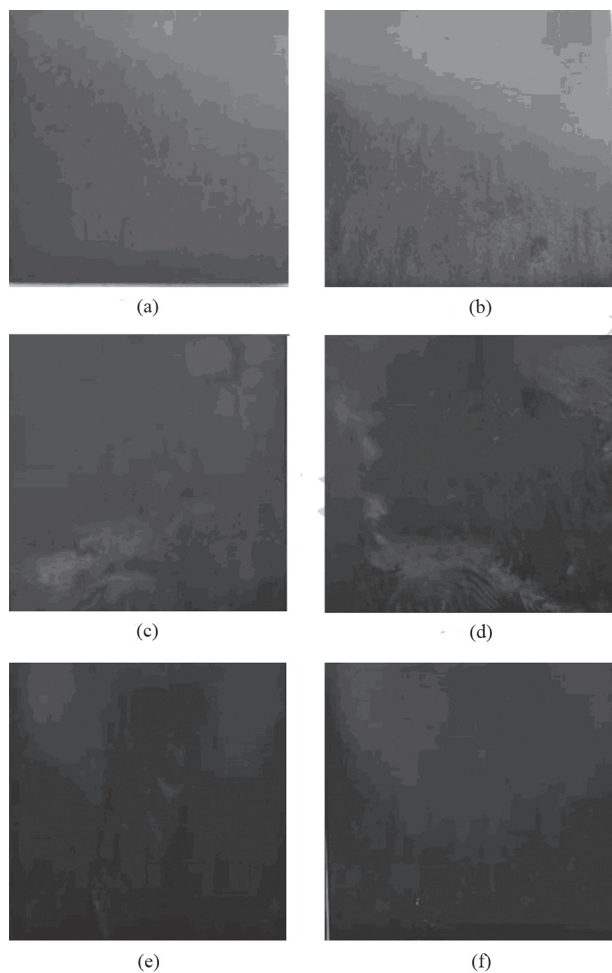
$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0 \times \omega_{\text{resin}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔH_m 为复合材料的熔融焓; ΔH_m^0 为聚合物结晶度达到100%时的熔融焓,依据参考文献[13]选取PA6的 $\Delta H_m^0=190 \text{ J/g}$; ω_{resin} 为纯树脂的质量分数,其数值为0.584。

由表4可知,随着树脂黏度的提高(1[#]~4[#]),复合材料的熔融温度 T_m 从221.3℃下降至219.6℃,仅下降了1.7℃;而其结晶温度 T_c 从193.8℃下降至189.2℃,下降了4.6℃,较为明显;结晶度 X_c 从32.1%下降至26.1%,这是因为分子量越大,PA6分子链运动活性越低,规整堆砌困难,从而导致其结晶速度和结晶度下降。由于5[#]和6[#]为两种不同黏度的树脂共混,其各项数据介于1[#]和4[#]之间,与5[#]相比,6[#]配方体系中PA6 M2000含量更高,因此结晶峰温度和结晶度也较高。同时,结晶度的提高,导致材料的刚性增强,韧性变差,力学性能体现为拉伸强度提升、缺口冲击强度下降。

2.4 黏度对外观的影响

图3为注塑方板的外观照片。从图3可以看出,表面浮纤状况各不相同,2[#],3[#]和4[#]表面有明显的GF团聚。根据对方板外观的评判标准,可分为4级,其中1级为外观光洁度高,无浮纤和团聚;2级为外观光洁度高,有少量浮纤但无团聚;3级为外观光洁度一般,有较多浮纤或少量团聚;4级为外观光洁度差,有大量浮纤或大量团聚。表5为对此六块方板的外观等级评价结果,6[#]的外观最好,为1级,而3[#]和4[#]的外观最差,为4级。



a—1[#]; b—2[#]; c—3[#]; d—4[#]; e—5[#]; f—6[#]

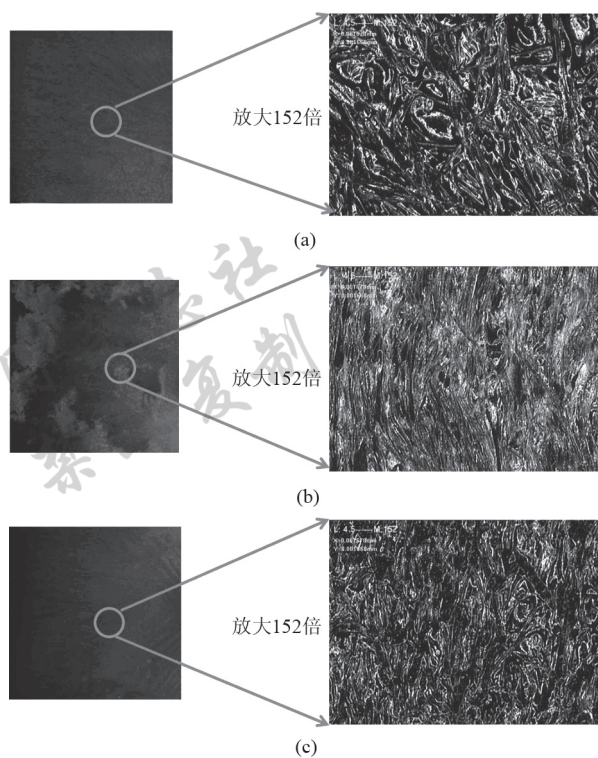
图3 不同配方注塑方板的外观

表5 方板的外观评级

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
外观等级	3级	3级	4级	4级	2级	1级

在二次元下进一步观察方板的表面,发现PA6树脂与GF的结合有多种形式,如图4所示。1[#]配方PA6树脂与GF的结合较差,能观察到明显的GF;4[#]方板的表面有很大一部分GF团聚,二次元

下可以观察到大量GF,这是由于材料的流动性太差,GF无法随着树脂的流动而充分分散,4[#]方板还有一部分表面光泽度较高,二次元下观察到树脂与GF的结合非常好,树脂完全包覆GF,基本看不到玻纤的存在,这是由于4[#]配方的结晶温度最低,PA6冷却速率慢,树脂有充足的时间包覆GF,呈现较好的外观;6[#]方板的表面最好,二次元下观察到树脂与GF的结合较好,但未完全包覆,状态处于1[#]与4[#]之间。



a—1[#]; b—4[#]; c—6[#]

图4 1[#],4[#]与6[#]方板的二次元图

图5为相对黏度与结晶温度的关系曲线。从图5可以发现,两者完全呈负相关关系,相对黏度高时,材料的结晶温度低。相对黏度越高,材料的流动性越差,GF无法充分分散,导致外观变差,但相对

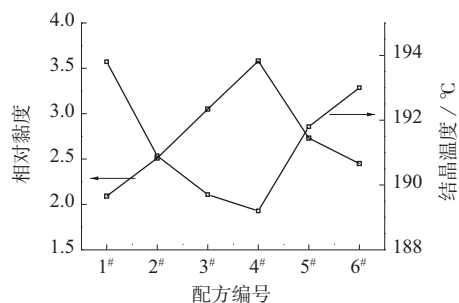


图5 不同配方时相对黏度与结晶温度曲线

黏度越高,结晶温度又会越低,PA6树脂的冷却速率变慢,使得树脂能较好地包覆GF,又会导致外观变好。因此,如果材料具有较低的相对黏度,且结晶温度也低时,则产品会呈现较好的外观。共聚尼龙、低熔点长碳链尼龙、离子型化合物等^[14-16]都可以降低PA6的结晶温度,但通常都会导致复合材料的熔点、刚性下降,且成本会有较明显的提升。

实验仅通过不同黏度的树脂共混来改善外观,对熔点、性能、成本的影响较小,取1[#]、4[#]、6[#]样品进行GPC分析,其分子量与分子量分布见表6。可以发现6[#]配方采用两种不同黏度的树脂共混后,其分子量分布变宽,高黏度树脂为材料提供低的结晶温度,使树脂充分包覆GF,而低黏度树脂为材料提供好的流动性,使GF能充分分散,最终呈现出最好的外观,基本观察不到浮纤。

表6 样品的分子量与分子量分布

项目	1 [#]	4 [#]	6 [#]
重均相对分子质量	46 819	108 022	73 440
数均相对分子质量	27 974	68 819	36 873
分子量分布	1.67	1.57	1.99

3 结论

(1) 树脂相对黏度越高,复合材料的拉伸强度越低,缺口冲击强度越高,流动性越差,但黏度对密度无影响。

(2) 随着相对黏度的提高,复合材料的熔融峰温度变化不明显,但结晶峰温度和结晶度逐渐下降,这是由于黏度高时分子量高,PA6的分子链堆砌变得困难。

(3) PA6黏度高时,材料的流动性差,GF难以充分分散,导致外观变差,但黏度高时,结晶温度低,使得树脂能充分包覆GF,外观又变好,流动性与结晶温度同时影响外观。

(4) 当使用高黏树脂(相对黏度4.0)与低黏树脂(相对黏度2.0)复配时,外观最好,复合材料的分子量分布变宽,高黏树脂提供低的结晶温度,低黏树脂提供高的流动性。

参考文献

- [1] Wu T, Huang Z X, Qu J P, et al. Effect of continuous elongational flow on structure and properties of short glass fiber reinforced polyamide 6 composites[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2019, 3(2):93-101.
- [2] 王忠强,易庆锋,王灿耀,等. 良外观高玻纤含量聚酰胺66复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(9):7-12.
- Wang Zhongqiang, Yi Qingfeng, Wang Canyao, et al. Preparation

- and properties of PA66 composites with high glass fiber content and good appearance[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(9):7-12.
- [3] Liu C C, Wang L L, Liu X B, et al. Fabrication strategies of polymer-based electromagnetic interference shielding materials[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2020, 4(3):149-159.
- [4] 江翼,谭麟,梁惠强,等. 玻纤增强尼龙66流动性及表面光泽度的研究[J]. 塑料工业, 2012, 40(10):80-83.
- Jiang Yi, Tan Lin, Liang Huiqiang, et al. The study on the mobility and surface gloss of glass fiber reinforced nylon 66[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(10):80-83.
- [5] 郑骏驰,吴超,孟征,等. PA6/GF复合材料力学性能改进研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(5):137-143.
- Zheng Junchi, Wu Chao, Meng Zheng, et al. Research progress on mechanical properties improvement of polyamide 6/glass fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):137-143.
- [6] 王正宏,张敏,黄宁选,等. 尼龙66改性研究进展[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(1):121-125.
- Wang Zhenghong, Zhang Min, Huang Ningxuan, et al. Research progress on modification of nylon 66[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(1):121-125.
- [7] 孙彩虹,毕静利,张艳君,等. 尼龙6物理改性技术研究进展[J]. 山东化工, 2018, 47(1):55-56.
- Sun Caihong, Bi Jingli, Zhang Yanjun, et al. Research progress on physical modification technology of nylon 6[J]. Shandong Chemical Industry, 2018, 47(1):55-56.
- [8] 刘旭,徐海,徐立新,等. 改性碳纤维增强尼龙6复合材料的制备及性能[J]. 材料工程, 2021, 49(4):128-134.
- Liu Xu, Xu Hai, Xu Lixin, et al. Preparation and properties of modified carbon fiber reinforced polyamide 6 composite[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(4):128-134.
- [9] 郝冬梅,林倬仕,陈涛,等. 无卤阻燃改性增强尼龙6性能的研究[J]. 塑料助剂, 2012(1):43-46.
- Hao Dongmei, Lin Zhuoshi, Chen Tao, et al. Study on properties of reinforced nylon 6 modified by non-halogen flame retardants[J]. Plastics Additives, 2012(1):43-46.
- [10] 田国峰,王朝进,王召青,等. 高含量玻璃纤维增强PA66/PA6I复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料工业, 2018, 46(12):140-143.
- Tian Guofeng, Wang Chaojin, Wang Zhaoqing, et al. Preparation

- and properties of high content glass fiber reinforced PA66 / PA6I composite material[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(12):140–143.
- [11] 李先红, 兰修才, 唐勇, 等. PA6 相对黏度对玻纤增强 PA6 复合材料性能的影响 [J]. 塑料工业, 2018, 46(11):30–32.
- Li Xianhong, Lan Xiucui, Tang Yong, et al. Effect of PA6 relative viscosity on the properties of glass fiber reinforced PA6 composites[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(12):140–143.
- [12] Lee K H, Lim S J, Kim W N. Rheological and thermal properties of polyamide 6 and polyamide 6 / glass fiber composite with repeated extrusion[J]. Macromolecular Research, 2014, 22(6):624–631.
- [13] Matsunaga T, Sato Y, Goda K. Major cause of strength improvement of a ramie / PA composite with low fiber contents[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2018, 1(1):93–98.
- [14] 罗玉航. 共聚酰胺 6 / 66 的制备及性能研究 [D]. 长沙: 湖南师范大学, 2017.
- Luo Yuhang. Preparation and properties study of copolyamide 6 / 66[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2017.
- [15] 解廷秀, 杨桂生. 尼龙 1212 / 尼龙 6 共混体系的非等温结晶行为 [J]. 高分子学报, 2005(2):227–230.
- Xie Tingxiu, Yang Guisheng. Nonisothermal crystallization behavior of nylon1212 / nylon6 blends[J]. Acta Polymerica Sinica, 2005(2):227–230.
- [16] 李杨, 姜金分, 周琴. PA6 / CaCl₂ / 玻璃纤维复合材料非等温结晶动力学研究 [J]. 塑料工业, 2007, 45(1):40–43.
- Li Yang, Lou Jinfen, Zhou Qin. Non-isothermal crystallization kinetics of PA6 / CaCl₂ / glass fiber composite[J]. China Plastics Industry, 2007, 45(1):40–43.
-
- (上接第 55 页)
- [9] Liu G, Li H. Extrusion of ultrahigh molecular weight polyethylene under ultrasonic vibration field[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 89(10):2 628–2 632.
- [10] Xie M, Liu X, Li H, et al. Influence of poly(ethylene glycol)-containing additives on extrusion of ultrahigh molecular weight polyethylene / polypropylene blend[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 100(2):1 282–1 288.
- [11] 张晓华, 周士静, 顾晓华, 等. 超高分子量聚乙烯 / 石墨烯纳米复合材料的制备及其热性能的研究 [J]. 材料科学与工艺, 2016, 24(5):85–90.
- Zhang Xiaohua, Zhou Shijing, Gu Xiaohua, et al. Preparation and thermal properties of UHMWPE / GNS composites[J]. Materials Science and Technology, 2016, 24(5):85–90.
- [12] 翟家驹, 瞿金平. 偏心转子挤出机制备 UHMWPE / PP / OMMT 纳米复合材料及表征 [J]. 塑料工业, 2020, 48(9):135–140.
- Zhai Jiaju, Qu Jinping. Preparation and characterization of UHMWPE / PP / OMMT nanocomposites by eccentric rotor extruder[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(9):135–140.
- [13] Chen J, Du X, Zhang W, 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.
- [14] Qiao X, Na M, Ping G, et al. Halloysite nanotubes reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene nanocomposite films with different filler concentration and modification[J]. Polymer Testing, 2017, 57:133–140.
- [15] Zhai W, Sun R, Sun H, et al. Segregated conductive CNTs / HDPE / UHMWPE composites fabricated by plunger type injection molding[J]. Materials Letters, 2018, 229:13–16.
- [16] 董鹏刚, 陈有双, 唐忠锋, 等. γ 射线辐照对超高分子量聚乙烯 / 改性纳米伊蒙土复合材料的拉伸性能及热稳定性的影响 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2017, 35(4):53–58.
- Dong Penggang, Chen Youshuang, Tang Zhongfeng, et al. Thermostability and tensile-property of ultra-high molecular weight polyethylene / modified illite-smectite interstratified clay minerals composites irradiated by γ -rays[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2017, 35(4):53–58.