

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.08.021

# 不同长度玻纤增强聚丙烯热氧老化性能

林明华<sup>1</sup>,黄鑫<sup>1</sup>,郭建兵<sup>2</sup>,王华<sup>1</sup>

(1.康命源(贵州)科技发展有限公司,贵州安顺 561100; 2.贵州省材料产业技术研究院,贵阳 550014)

**摘要:**为研究不同长度纤维复配聚丙烯(PP)复合材料热氧老化性能的影响,采用熔融浸渍法制备了长玻璃纤维(LGF)增强PP复合材料(PP/LGF),在120℃的热氧环境下持续老化40d后,利用旋转流变仪、扫描电子显微镜(SEM)等对老化样品进行观察表征,对比不同长度复配的LGF在热氧老化下对PP复合材料力学、结晶及流变等性能的作用,探讨LGF长度复配对PP复合材料老化性能的影响机理。结果表明,经40d的老化后,PP复合材料拉伸强度平均下降仅为2.39%,弯曲强度上升了0.79%,而冲击强度保持率达到87.0%以上。老化前后,纤维复配PP样品均有较高的结晶度且老化后进一步提高到49.12%。老化后纤维复配的PP样品出现了明显的剪切应力下降。另外,通过SEM观察到,老化前后,复合材料界面微观形貌变化不明显,但GF质均长度较低的样品与PP基体结合较好。研究表明,热氧老化使得GF增强PP复合材料整体呈变硬变脆的趋势下,纤维长度复配对这一趋势有较好的抑制作用,并提高了材料冲击强度的稳定性;不同长度纤维共同作用有利于提高PP复合材料在老化过程中的结晶度并降低剪切应力。

**关键词:**玻璃纤维;复配;聚丙烯;热氧老化;力学性能

**中图分类号:** TQ322.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)08-0148-06

## Thermal oxygen aging properties of polypropylene enhanced by different lengths glass fiber

LIN Minghua<sup>1</sup>, HUANG Xin<sup>1</sup>, GUO Jianbing<sup>2</sup>, WANG Hua<sup>1</sup>

[1. Kangmingyuan (Guizhou) Technology Development Co., Ltd., Anshun 561100, China;

2. Guizhou Institute of Materials Industry Technology, Guiyang 550014, China]

**Abstract:** In order to study the effect of different lengths fiber on the thermo-oxygen aging properties of polypropylene (PP) composites, PP composites reinforced with long glass fiber (PP/LGF) were prepared by melt impregnation method. After continuous aging for 40 days at 120 °C, the aging samples were observed and characterized by rotating rheometer and scanning electron microscope. The effects of different length composite glass fibers on the mechanical, crystalline and rheological properties of PP composites under thermal oxygen aging were compared, and the mechanism of the effects of long and short fiber composite on the aging properties of PP were discussed. The results show that after 40 days of aging, the average tensile strength decrease by 2.39%, the bending strength increase by 0.79%, and the impact strength retention rate reach more than 87.0%. Before and after aging, the crystallinity of fiber composite samples is higher and increase to 49.12% after aging. After aging, the shear stress of PP composite samples decrease obviously. In addition, it was observed by SEM that the change of the interface morphology was not obvious before and after aging, but the samples with lower average length of glass fiber were better combined with PP matrix. The results show that under the trend of hardening and brittleness caused by thermal oxygen aging, the different length of fiber pairing has a better inhibition effect on this trend, and improves the stability of impact strength. The combination of different length of fibers can improve the crystallinity of PP composite and reduce the shear stress during aging.

**Keywords:** glass fiber ; composites ; polypropylene ; thermal oxygen aging ; mechanical property

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52263007),贵州省科技计划项目(黔科合平台人才-ZZSG[2024]015,黔科合中引地项目[2024]020)

**通信作者:** 王华,高级工程师,产业导师,主要研究方向为聚合物共混改性;郭建兵,博士,研究员,硕士生/博士生导师,研究方向为高性能复合材料研究及应用

**收稿日期:** 2024-06-02

**引用格式:** 林明华,黄鑫,郭建兵,等.不同长度玻纤增强聚丙烯热氧老化性能[J].工程塑料应用,2024,52(8):148-153.

LIN Minghua, HUANG Xin, GUO Jianbing, et al. Thermal oxygen aging properties of polypropylene enhanced by different lengths glass fiber[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(8): 148-153.

聚丙烯(PP)作为一种质地轻、无毒害、便于加工、材料力学性能好、耐化学腐蚀等优良特点的材料,被广泛应用于诸多领域。用于受力或结构件时,通常添加纤维材料<sup>[1]</sup>(植物纤维<sup>[2-3]</sup>、合成有机纤维<sup>[4-5]</sup>、无机纤维<sup>[6-7]</sup>等)作为增强骨架,大幅提高复合材料的力学性能。玻璃纤维(GF)因原料易得、增强效果显著等优势获得较多关注<sup>[8]</sup>。GF长度对复合材料力学性能、加工性能等存在重要的影响,已有研究发现一定范围内长GF性能优于短GF复合材料,但过长的纤维(>18 mm)更易在复合材料成型的过程发生过多缠结且分散浸渍效果不佳,从而产生空洞形成缺陷<sup>[9]</sup>。另外,由于GF增强复合材料服役环境因素影响会导致性能下降,延缓聚合物材料失效的研究也是关注的研究热点。热氧老化对聚合物的影响是通过热与氧的共同作用得以实现的,可以加速氧化反应对聚合物的作用,所以其不仅是聚合物材料老化的主要形式之一,也是评定复合材料耐老化性能的人工加速老化试验方法<sup>[10]</sup>。

目前,对于纤维增强PP的老化有较多成果,但研究的关注点主要为不同GF含量、不同GF长度或不同添加剂等对复合材料老化性能的影响,对于不同长度GF复配对PP材料老化性能的研究较少。笔者采用不同长度的长玻纤(LGF)增强PP基体,制备出复合材料,通过观察分析其在热氧老化条件下微观形貌、力学性能、结晶度及流变性能的变化,研究长度不同的GF在老化过程中对复合材料性能的影响规律。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PP:熔体流动速率为100 g/10 min,韩国SK集团;

PP/LGF复合材料母粒:其中GF长度分别为3, 12 mm,纤维直径为16  $\mu\text{m}$ ,GF质量分数为50%,贵州凯科特材料有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

注塑成型机:CJ80MZ2 NC II,广东震德塑料机械厂;

数字鼓风干燥箱:DHG-9070,上海一恒科学仪器有限公司;

恒温试验箱:DHG-9625A,上海一恒科学仪器有限公司;

微机控制电子万能试验机:CMT6104,美特斯

工业系统(中国)有限公司;

冲击试验机:ZBC8400-B,美特斯工业系统(中国)有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):KYKY-EM6000,北京中科科仪技术发展有限责任公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC25,美国Waters公司;

旋转流变仪:Mars60,德国哈克公司。

### 1.3 试样制备

首先将PP和PP/LGF母粒放入烘箱中于80  $^{\circ}\text{C}$ 干燥2 h,然后通过注塑机注塑成型,1~4区至喷嘴温度分别为190,210,230,230,230  $^{\circ}\text{C}$ 。共混配方见表1。

表1 PP复合材料配方

Tab. 1 PP composite formulation

Samples	phr		
	PP	PP/LGF master batch (3 mm)	PP/LGF master batch (12 mm)
GF3	80	20	0
GF12	80	0	20
GF3/12	80	10	10

试样的热氧老化在恒温试验箱中进行。样条堆放时互相错位放置,使得样条可与空气保持充分接触。箱内温度保持120  $^{\circ}\text{C}$ ,每10 d取出部分试样密封阴凉保存,直到老化试验完成40 d时一并进行后续性能检测。根据GF长度的不同,三种试样分别记录为GF3,GF12和GF3/12。

### 1.4 性能测试

拉伸强度按GB/T 1040.1-2018测试,拉伸速率为50 mm/min,设置115 mm的夹具间距,温度为(23 $\pm$ 2)  $^{\circ}\text{C}$ ,湿度为(50 $\pm$ 5)%。

悬臂梁缺口冲击强度按GB/T 1843-2008测试,缺口深度误差为(2.0 $\pm$ 0.2) mm,然后放置在湿度为50%、温度为25  $^{\circ}\text{C}$ 的恒湿恒温箱内24 h,以消除内应力。选择5.5 J的摆锤,温度为(23 $\pm$ 2)  $^{\circ}\text{C}$ ,湿度为(50 $\pm$ 5)%。

SEM测试:对进行缺口冲击试验后的试样断面进行喷金处理,用SEM对试样缺口微观形貌进行观察,加速电压25 kV。

DSC测试:称取6~8 mg试样,在高纯氮气围下,将试样从室温快速升温至230  $^{\circ}\text{C}$ ,恒温3 min以消除热历史;再以10  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率降温至40  $^{\circ}\text{C}$ ,再以相同的升温速率升温至230  $^{\circ}\text{C}$ 并记录DSC曲线。

流变测试:取适量样品放置在样品腔内的旋转

台上,升温到220℃后,恒温后,在0~100 Hz范围内进行样品流变性能的测量并记录数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 纤维复配对复合材料力学性能的影响

不同长度GF复配增强PP复合材料在经过不同时间的热氧老化后,其力学性能测试结果如图1所示。其中图1a为PP复合材料在老化前后的拉伸强度,由图可知,经过40 d热氧老化后,拉伸强度变化率最大的样品为仅含较短GF的GF3,其强度衰减仅为5.0%,而GF12的拉伸强度更是只降低了1.2%,说明长时间的热氧老化对于长短GF增强PP复合材料的拉伸性能影响程度较小。图1b则是复合材料老化前后的弯曲强度曲线,明显地,弯曲强度在经过

热氧老化后都有不同程度的提高。老化40 d后GF3,GF12和GF3/12的弯曲强度分别提高了7.74,5.48,0.84 MPa。再结合图1c中PP复合材料的冲击强度曲线,从图中可以看出,含有12 mm长纤维的GF12和GF3/12的冲击强度保持率在87.5%和86.8%,而GF长度为3 mm的GF3的冲击强度出现较大幅度下降,保持率为80.6%,其原因是长纤维在基体中的分布形成纤维骨架,受到外力冲击时能量沿着骨架传递,有效减轻受力部位破坏,从而提高了冲击强度。弯曲强度的增加和冲击强度的降低表明老化后复合材料整体呈变硬而脆的趋势。

此外,单长纤的GF12试样的拉伸强度均略低于另两组含短纤的试样,推测原因为随着纤维与基体间界面接触面积增大,在界面黏结处产生缺陷的几率也随之增加。而对于复合材料的冲击强度保持率的下降而言,因为热氧老化并不会对基体中GF长度产生直接影响,含有长GF的样品有较高的优势。图1展示了PP复合材料力学性能变化,其原因主要是经热氧老化后,大分子链的断裂、GF与PP基体之间的脱黏以及复合材料界面微裂纹的生成与扩展等因素的协同作用<sup>[11]</sup>,导致了复合材料整体上都呈现了变硬、变脆的趋势,但是不同的GF长度对于这一趋势有不同程度的影响,长纤维在基体中形成的纤维骨架对这种硬脆化的趋势有较好的抑制效果,从实际效果看来,适当减少长纤含量,增加短纤复配,对提高材料冲击强度的稳定性有较好的作用。

### 2.2 纤维复配对复合材料的结晶性能的影响

通过对老化前后的样条进行DSC测试,研究长期热氧条件下复合材料中PP基体的结晶性能的变化。图2a和图2b分别展示了老化前后不同GF长度的PP复合材料的DSC曲线。根据所得DSC曲线的熔融吸热峰面积与100%结晶的PP熔融热对比,可得到不同老化时间段内GF增强PP复合材料的结晶度( $\Delta H_0 \approx 207 \text{ J/g}$ ),同时对DSC曲线进一步分析,可得到PP材料的熔融热焓( $\Delta H_m$ )、熔融温度( $T_m$ )、结晶温度( $T_c$ )、结晶度( $X_c$ )等参数<sup>[12]</sup>,见表2。

由图2和表2可以看出,不同长度GF的复合材料在 $\Delta H_m$ 、 $T_m$ 指标上并无明显区别, $T_m$ 在老化前后的变化最大不超过1.3℃,而老化后各组样品在 $X_c$ 上都有明显提高。相较于结晶晶粒,GF尺寸较大,对复合材料的成核结晶过程影响较少。 $X_c$ 的升高是由于

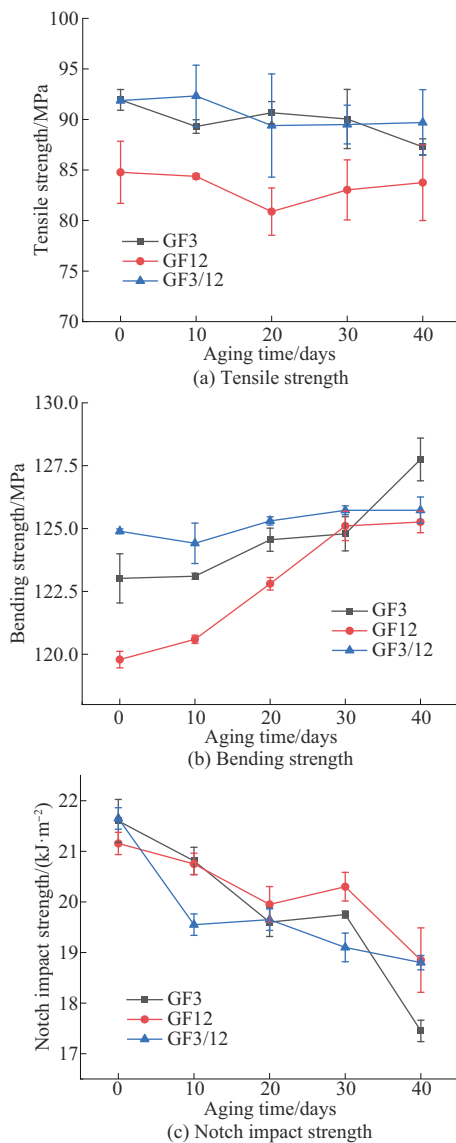


图1 老化时间对PP复合材料力学性能的影响

Fig. 1 Effect of aging time on mechanical properties of PP composites

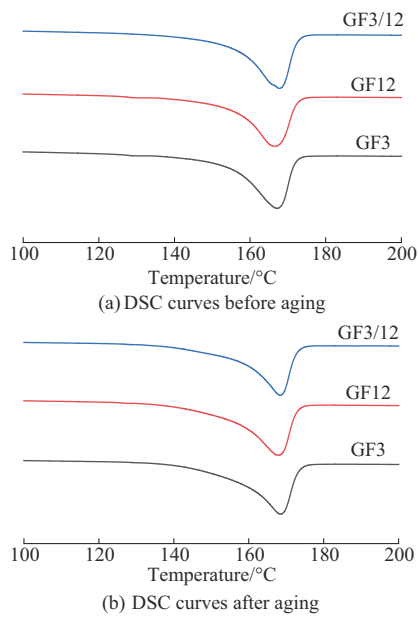


图2 老化前后PP复合材料的DSC曲线

Fig. 2 DSC curves of PP composites before and after aging

表2 老化前后PP复合材料的 $\Delta H_m$ ,  $T_m$ ,  $T_c$ 和 $X_c$ 的变化Tab. 2 Changes of  $\Delta H_m$ ,  $T_m$ ,  $T_c$ , and  $X_c$  of PP composites before and after aging

Samples	$\Delta H_m / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$T_m / ^\circ\text{C}$	$T_c / ^\circ\text{C}$	$X_c / \%$	
Before aging	GF3	69.23	167.23	129.26	41.81
	GF12	69.70	166.63	128.72	42.09
	GF3/12	72.87	167.72	129.53	44.00
After aging	GF3	79.06	168.53	129.71	47.74
	GF12	81.09	167.85	129.96	48.97
	GF3/12	81.34	167.85	129.57	49.12

在120℃的老化温度下,分子链获得足够的能量克服链与链之间的活动能垒,使得处于无定形区域内的分子重排形成结晶<sup>[13]</sup>。已有前期研究<sup>[14]</sup>表明,在140℃较高温度下对长GF增强PP复合材料进行热氧老化,长时间后(>50 d)出现PP基体结晶度下降的现象,说明在该条件下PP大分子链发生断裂,分子量降低,发生了显著的热氧化降解。然而对于本工作而言,PP复合材料老化的过程中分子链获得能量重排和发生断裂这两种情况同时存在,当老化温度(120℃)处于玻璃化转变温度( $T_g$ )和 $T_m$ 之间时,在老化初期相当于一个热处理过程,此时无定形区域内的分子可以继续运动形成结晶,较小的晶粒也得以继续长大;而在老化后期,较高的温度会引发GF与PP基体脱黏、分子链间作用力减弱,同时生成大量自由基、过氧化物加速分子链的分解、断裂,这不仅导致PP复合材料的表面缺陷增多、扩大,还使基体的 $X_c$ 减小。鉴于本工作中所考察的热氧老化温度

为120℃,接近于复合材料中PP的 $T_c$ ,从而在一定时间内对PP基体结晶有部分促进作用,这必然会短时间内提高PP复合材料的 $X_c$ 。

### 2.3 纤维复配对复合材料流变性能的影响

PP复合材料剪切强度随剪切速率变化如图3所示。从图中可以看出,老化前后含有较短纤维的GF3和GF3/12两组样品的剪切应力都发生了明显下降,老化到40 d后,各组样品都出现了不同程度的剪切应力下降的情况,其中长、短GF复配的GF3/12的样品下降较为明显。文献[15]表明,GF质均长度低于某阈值(5.1 mm附近)时,随着GF长度和含量的增加,GF增强PP复合材料的剪切黏度会有小幅度增加。样品GF3/12为两种长度GF等质量比的组合,经共混后其质均长度理论为7.5 mm,纤维经剪切作用后会使其实际平均长度小于理论质均长度,即实际平均长度更接近阈值;另外样品GF3质均长度因纤维较短,受到的剪切较低,纤维保留长度相比GF12更加接近阈值,根据该理论,可以推断出在未老化之前,GF3/12有最大剪切黏度,而GF3次之,这与实验结果一致。在40 d老化之后,各组样品均出现不同程度的剪切应力的下降,可归因为热氧环境下PP的分子链降解<sup>[16]</sup>以及界面脱黏的共同作用。

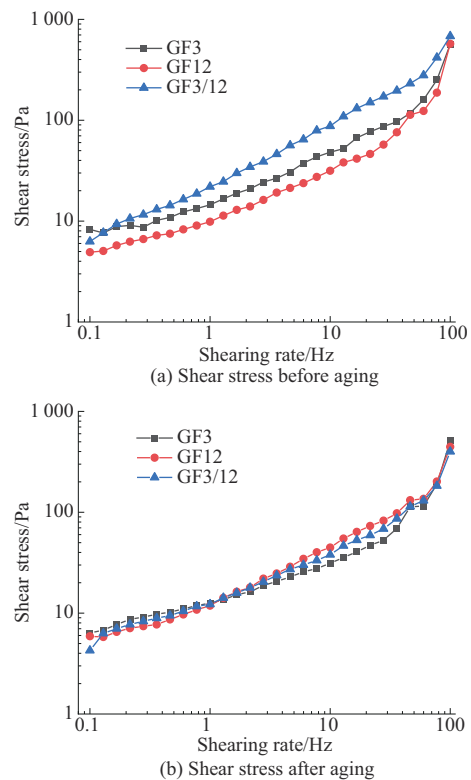


图3 老化前后PP复合材料的剪切应力变化

Fig. 3 Change of shear stress of PP composite before and after aging

## 2.4 纤维复配对复合材料断面形貌的影响

通过SEM对PP复合材料老化前后的冲击断面进行了观察研究,图4和图5为老化前和40 d老化后的形貌。图4中,复合材料GF3和GF3/12的GF表面粗糙,而GF12的GF表面光滑,粗糙表面说明纤维与基体结合紧密,受到冲击时,能更好地传递能量,减少局部受力,从而提高冲击强度;另外,GF长度越长,表面积越大,表面处理的界面面积也越大,界面粘结中产生缺陷的几率越高,表明GF质均长度较小的样品中GF与PP基体间界面反而更为牢固,宏观表现为这二者有较高的拉伸强度。此外,老化前后各纤维长度的PP样品的冲击断面上基体与纤维的结合界面变化较小,纤维表面粗糙程度基本保持一致,并未出现因热氧老化作用导致纤维与PP基体界面强度大幅下降,这与PP复合材料拉伸强度在老化前后变化较小的实验结果相一致。

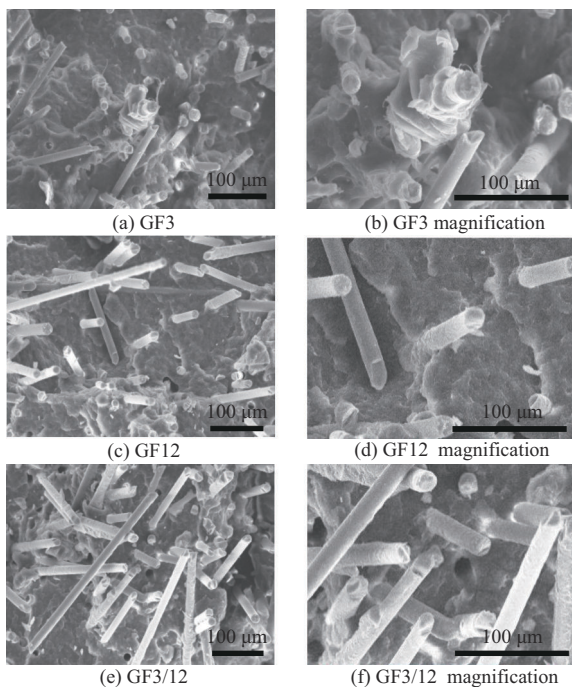


图4 老化前PP复合材料的冲击断面形貌

Fig. 4 Impact profile of PP composite before aging

## 3 结论

采用熔融浸渍法制备了不同粒子长度的PP/LGF材料,研究了不同长度复配的GF在热氧老化下对PP复合材料的力学、结晶及流变等性能的影响。

(1)40 d的热氧老化使得不同长度GF增强PP复合材料整体呈变硬变脆的趋势,长/短纤维复配对这一趋势有较好的抑制作用。

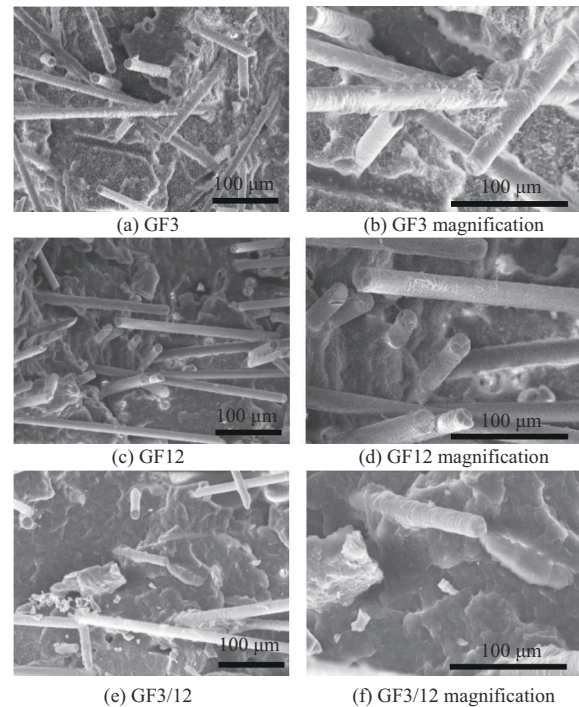


图5 老化后样品的冲击断面形貌

Fig. 5 Impact profile of the sample after aging

(2)不同长度GF复配对PP复合材料的 $T_m$ 、 $T_c$ 影响较小,且特定温度下的热氧老化会在一定时间内促进复合材料基体中的PP结晶。

(3)对PP复合材料的流变性能,不同长度GF复配会提高PP复合材料的剪切强度,而热氧老化过程中主要是PP基体的部分降解对复合材料的流变性能起主要作用。

(4)对复合材料冲击断口的微观形貌观察表明,GF质均长度较小的试样中纤维与基体间的界面较为牢固,而 $T_c$ 附近一段时间内的热氧老化对GF/PP基体间界面影响较小。

## 参考文献

- [1] 傅刚辉.连续纤维增强热塑性复合材料生产工艺及应用进展[J].合成树脂及塑料,2022,39(5):74-76,81.  
FU Ganghui. Preparation and application of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2022, 39(5): 74-76, 81.
- [2] 黄森林,方海,霍瑞丽,等.五种植物纤维/聚乙烯木塑复合材料紫外老化性能[J].复合材料科学与工程,2024:1-8.https://link.cnki.net/urlid/10.1683.TU.20240327.1211.008.  
HUANG Miaolin, FANG Hai, HUO Ruili, et al. UV ageing properties of five types of plant fibers/polyethylene wood plastic composites[J]. Composites Science and Engineering. 2024: 1-8. https://link.cnki.net/urlid/10.1683.TU.20240327.1211.008.
- [3] 麦成猛,蒋政,余斌斌,等.模压工艺对亚麻/丙纶纤维复合材料的性能及二氧化碳排放量的影响[J].塑料工业,2024,52(3):152-159.

- MAI Chengmeng, JIANG Zheng, YU Binbin, et al. Effect of molding process on properties of flax / polypropylene fiber composites and carbon dioxide emission[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(3):152-159.
- [4] TIAN H F, ZHANG S, GE X, et al. Crystallization behaviors and mechanical properties of carbon fiber-reinforced polypropylene composites[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 128(3):1 495-1 504.
- [5] FANG Jiangpeng, ZHANG Ling, LI Chunzhong. Largely enhanced transcrystalline formation and properties of polypropylene on the surface of glass fiber as induced by PEI-CNT and PEI-GO modification[J]. Polymer, 2020, 186. DOI: 10.1016/j. polymer. 2019. 122025.
- [6] 潘利明, 王晓群, 陆超超, 等. 玻纤增强聚丙烯抗菌防霉复合材料制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(5):57-62.  
PAN Liming, WANG Xiaoqun, LU Chaochao, et al. Preparation and properties of glass fiber reinforced polypropylene antibacterial and anti-mildew composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(5):57-62.
- [7] TANG C H, XU F X, LI G Y. Combustion performance and thermal stability of basalt fiber- reinforced polypropylene composites[J]. Polymers, 2019, 11(11):1 826-1 845.
- [8] 明星星, 徐定红, 张凯舟, 等. 长玻纤增强聚丙烯复合材料[J]. 塑料, 2012, 41(5):37-39.  
MING Xingxing, XU Dinghong, ZHANG Kaizhou, et al. Long glass fiber reinforced PP composite[J]. Plastics, 2012, 41(5):37-39.
- [9] 段召华, 付祥, 陈弦, 等. 长玻璃纤维增强聚丙烯[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(4):124-126.  
DUAN Zhaohua, FU Xiang, CHEN Xuan, et al. The long glass fiber reinforced polypropylene[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2010, 26(4):124-126.
- [10] 武立文, 乔亮, 范峻铭, 等. 聚乙烯管道寿命预测研究进展[J]. 中国塑料, 2023, 37(11):149-162.
- WU Liwen, QIAO Liang, FAN Junming, et al. Research progress in life prediction of polyethylene pipeline[J]. China Plastics, 2023, 37(11):149-162.
- [11] 谢海生, 周淑芬, 兰修才, 等. 热氧化对马来酸酐接枝聚丙烯的结构与性能的影响[J]. 塑料工业, 2024, 52(2):135-140.  
XIE Haisheng, ZHOU Shufen, LAN Xiucui, et al. Effect of thermal oxygen aging on the structure and properties of maleic anhydride grafted polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(2):135-140.
- [12] 何玮琳, 郭建兵, 陈晓浪. UV 老化对 ZnO 填充 PA6 / LGF 复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(12):98-103.  
HE Weidi, GUO Jianbing, CHEN Xiaolang, et al. Effects of UV aging on properties of PA6 / LGF composites filled with zinc oxide[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(12):98-103.
- [13] 李吉芳, 杨睿, 于建, 等. 聚丙烯纳米复合材料的热老化[J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(10):103-106.  
LI Jifang, YANG Rui, YU Jian, et al. Thermal aging of polypropylene nanocomposites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2008, 24(10):103-106.
- [14] 何敏, 慈书亭, 张景中, 等. 热氧化对 LGFPP 复合材料性能的影响[J]. 塑料, 2016, 45(1):29-31.  
HE Min, CI Shuting, ZHANG Jingzhong, et al. Effect of thermal-oxidative aging on the properties of LGFPP composite[J]. Plastics, 2016, 45(1):29-31.
- [15] THOMASSET J, CARREAU P, SANSCHAGRINA B, et al. Rheological properties of long glass fiber filled polypropylene[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2005, 125(1): 25-34.
- [16] 魏涛. 无卤阻燃长玻纤增强聚丙烯复合材料的老化性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.  
WEI Tao. The study of aging on the properties of halogen-free LGFPP flame retardant system[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016.

(上接第 139 页)

- [13] 黄荣学, 赵梅芳, 范豪, 等. 基于 Moldflow 的肥皂盒注塑模具设计[J]. 合成树脂及塑料, 2023, 40(5):57-63, 75.  
HUANG Rongxue, ZHAO Meifang, FAN Hao, et al. Design of injection mold for soap box based on Moldflow[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2023, 40(5):57-63, 75.
- [14] 赵利平, 秦瑞亮, 彭新华. 薄壁深腔小脱模斜度箱体塑件注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(9):102-107.  
ZHAO Liping, QIN Ruiliang, PENG Xinhua. Injection mold design of thin wall deep cavity small release angle box plastic parts[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(9):102-107.
- [15] 夏凯, 张云, 熊建武, 等. 汽车吸尘器封盖注射模设计[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(8):100-105.  
XIA Kai, ZHANG Yun, XIONG Jianwu, et al. Design of injection mould for automobile vacuum cleaner cover[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8):100-105.
- [16] 黄可, 蒋庆斌, 李兵兵. 进气歧管盖多向抽芯热流道注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(8):106-111.  
HUANG Ke, JIANG Qingbin, LI Bingbing. Injection mould design of inlet manifold cover multi-core hot runner[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8):106-111.