

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.11.009

# 玻纤形态对 PP/GF 复合材料的性能影响与优化

许升, 章建忠, 樊家澍, 黄建, 赵星宇, 费振宇, 陆建明, 王堃

(巨石集团有限公司产品研发中心, 浙江桐乡 314500)

**摘要:** 为研究玻璃纤维(GF)形态对 GF 增强热塑性树脂复合材料的性能影响,以指导开发出力学性能与表面性能均优异的复合材料制品,对比研究了不同 GF 含量下常规圆 GF 以及扁平 GF 增强聚丙烯(PP)的性能差异,并探究了以上两种 GF 复配使用时复合材料的综合性能,重点研究了不同 PP/GF 复合材料在力学性能、界面性能、翘曲性能、表面性能方面的差异性。研究表明,在 GF 质量分数为 30% 时,PP/GF 的力学性能随扁平 GF 用量的增加而降低,在 GF 质量分数为 50% 时,PP/GF 的力学性能随扁平 GF 用量增加而提高。同时,在高 GF 含量(质量分数 50%)下,与常规圆 GF 相比,扁平 GF 在 PP 树脂中分散更均匀,并在熔体流动方向具有更加明显的取向性。此外,当 GF 质量分数为 50% 时,使用圆 GF 制得的薄板翘曲高度为 13.8 mm,表面浮纤占比为 7.93%,而使用扁平 GF 制得的薄板翘曲高度降低至 3.1 mm,表面浮纤占比仅为 2.03%,表明在高 GF 含量下使用扁平 GF 能有效改善 PP/GF 复合薄板的翘曲问题,并能有效减少复合板材的表面浮纤。

**关键词:** 玻璃纤维;扁平玻璃纤维;聚丙烯;复合材料;翘曲;浮纤

**中图分类号:** TQ327.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)11-0051-05

## Influence and Optimization of Glass Fiber Morphology on Properties of PP/GF Composites

Xu Sheng, Zhang Jianzhong, Fan Jiashu, Huang Jian, Zhao Xingyu, Fei Zhenyu, Lu Jianming, Wang Kun

(Research & Development Center, Jushi Group Co., Ltd., Tongxiang 314500, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of glass fiber (GF) morphology on the properties of GF reinforced thermoplastic resin composites, and to provide lessons for the development of composite products with excellent mechanical properties and surface properties, the properties of conventional round GF and flat GF reinforced polypropylene (PP) under different GF content were compared. The comprehensive properties of composites based on the combination of above two kinds of glass fiber were investigated, and the differences in mechanical, interface, warpage and surface properties of different PP/GF composites were emphatically studied. The results show that when the GF content is 30 wt%, the mechanical properties of PP/GF decrease with the increase of flat GF content, when the GF content is 50 wt%, the mechanical properties of PP/GF increase with the increase of flat GF content. At the same time, at a high GF content (50 wt%), compared with the conventional round GF, the flat GF is more evenly dispersed in the PP resin, and has a more obvious orientation in the melt flow direction. In addition, at 50 wt% GF content, the composite sheet with round GF has a warpage height of 13.8 mm, and the proportion of surface floating fiber is 7.93%, while the sheet with flat GF has a warpage height of 3.1 mm, and the proportion of surface floating fiber is only 2.03%. The above data indicate that flat GF can effectively improve the warping of PP/GF composite sheet under high GF content, and can effectively reduce the surface floating fiber of composite sheet.

**Keywords :** glass fiber ; flat glass fiber ; polypropylene ; composite material ; warpage ; floating fiber

聚丙烯(PP)是一种常用的热塑性树脂,其分子链段规整结晶度较高,具有质量较轻、成本较低、电

绝缘性好、力学性能和加工性能优异的特点,因此被广泛应用于汽车制品、电子电器等领域<sup>[1-2]</sup>。但 PP

**基金项目:** 中国博士后科学基金面上项目(2021M691363)

**通信作者:** 许升, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为纤维表面功能性涂层与纤维增强树脂复合材料

**收稿日期:** 2023-09-25

**引用格式:** 许升, 章建忠, 樊家澍, 等. 玻纤形态对 PP/GF 复合材料的性能影响与优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11): 51-55.

Xu Sheng, Zhang Jianzhong, Fan Jiashu, et al. Influence and optimization of glass fiber morphology on properties of PP/GF composites[J].

Engineering Plastics Application, 2023, 51(11): 51-55.

存在低温冲击性能差、成型收缩率大、尺寸稳定性低的问题,限制了纯PP树脂在实际领域中的应用<sup>[3-4]</sup>。为了解决以上问题,通常使用玻璃纤维(GF)增强PP制备PP/GF复合材料,GF的引入一方面起到材料的增强作用,另一方面能有效降低复合材料成型后的尺寸收缩率<sup>[5-6]</sup>。因此,基于PP/GF的制品具有高刚性、高耐热、耐化学腐蚀性及尺寸稳定性等性能,能够应用于要求更加苛刻的领域<sup>[7]</sup>。

目前增强PP复合材料的常用短切GF主要是柱状的圆GF<sup>[8]</sup>,在复合材料注塑过程中,GF会沿着树脂熔体流动方向发生取向,使得垂直于流动方向的收缩率显著高于平行于熔体流动方向,因此制件会发生翘曲缺陷,导致制件产品变形与装配困难等问题<sup>[9]</sup>。尤其是对于薄壁化产品,由于GF在树脂中的各向异性导致的翘曲缺陷现象更为明显<sup>[10]</sup>。解决制件翘曲的常见方法包括改进模具结构、工艺条件优化以及添加形状对称填料如玻璃微珠等<sup>[11]</sup>。近年来,随着制件薄壁化发展需求,使用扁平GF替代圆GF也证实是解决薄壁化制件翘曲的一种有效手段<sup>[12]</sup>。扁平GF是一种横截面为扁平状的GF<sup>[13]</sup>,其扁平程度通常用截面长直径与短直径之比即扁平比表示,目前市场上常见扁平GF的扁平比为3:1与4:1。研究扁平GF增强PP复合材料的综合性能对于制备高性能、高质量的复合材料和解决制件变形问题具有重要意义。

基于此,笔者对比研究了扁平GF与圆GF在增强PP复合材料中的性能,探究了两种PP/GF复合材料在力学性能、制件表面、翘曲程度等方面的差异性,并研究了圆GF和扁平GF复配使用的性能。本研究旨在为解决薄壁化制件尺寸变形问题提供思路,帮助理解不同形态的玻纤增强材料的性能表现和优化制备工艺,并最终为制备高性能、高强度、尺寸稳定的薄壁化复合材料提供借鉴。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料

圆GF:ECS10-03-508A(简称GF10),纤维直径10  $\mu\text{m}$ ,短切长度3 mm,巨石集团有限公司;

扁平GF:ECS4F-03-508A(简称GF4F),扁平比为4:1,横截面长边为28  $\mu\text{m}$ ,短边为7  $\mu\text{m}$ ,短切长度3 mm,巨石集团有限公司;

PP树脂:T-03S,中石油化工股份有限公司;

增容剂:GPM200A,宁波能之光新材料科技股

份有限公司。

### 1.2 主要设备与仪器

双螺杆挤出机:直径为35 mm,长径比为40,德国贝尔斯托夫橡塑机械公司;

注塑机:S-2000i100A型,日本FANUC公司;

万能材料试验机:Z050型,德国Zwick公司;

摆锤冲击试验机:6956.000型,意大利CEAST公司;

扫描电子显微镜(SEM):S-3400N型,日本株式会社日立制作所;

正置金相显微镜:Leica DM4M型,德国徕卡公司;

熔体流动速率(MFR)仪:RL-Z18型,上海思尔达科学仪器有限公司。

### 1.3 PP/GF复合材料的制备

将PP树脂与质量分数为4%的增容剂预混均匀,与质量分数30%的短切GF经过双螺杆挤出机混合挤出,短切GF分别选用4种短切玻纤组合,即纯圆GF(GF10),GF10/GF4F(质量比为2:1)、GF10/GF4F(质量比为1:1)、纯扁平GF(GF4F)。挤出温度控制在210~230  $^{\circ}\text{C}$ ;经冷却后切割造粒,干燥后得到PP/GF复合料粒。随后将PP/GF料粒熔融注塑,注塑温度控制在225~245  $^{\circ}\text{C}$ ,注塑压力为750 MPa,注射速率为75 mm/s,模具温度为65  $^{\circ}\text{C}$ ;最终制成4组符合ISO标准的拉伸样条、弯曲样条、冲击样条以及注塑薄板,注塑薄板尺寸为95.0 mm $\times$ 65.0 mm $\times$ 1.0 mm,以上4组基于不同GF组成的PP/GF样品分别标记为1#样品、2#样品、3#样品和4#样品。

### 1.4 性能测试

复合材料的拉伸强度按ISO 527-2012测试,拉伸强度测试速率为10 mm/min,拉伸弹性模量测试速率为2 mm/min;

弯曲强度按ISO 178-2019测试,弯曲强度测试速率为10 mm/min,弯曲弹性模量测试速率为2 mm/min;

简支梁冲击强度按ISO 179-2010测试,缺口冲击强度的缺口类型是V型;

形貌表征:将不同复合材料样条冲击断面进行喷金处理,通过SEM观察样条的冲击断面形貌并拍照;

浮纤表征:将注塑样板置于正置金相显微镜下拍摄成像,提取样板表面区域中GF相的面积占比,

记为表面浮纤所占比例;

翘曲性能测试:将注塑薄板在温度( $23\pm 2$ ) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度( $50\pm 10$ )%环境中调理24 h,随后用夹具固定薄壁制品一端,使用高度游标卡尺测量制件另一端最高点到水平台的垂直距离,记为翘曲高度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PP/GF复合材料的力学性能

图1是GF质量分数为30%时的不同PP/GF的力学性能。由图1可见,GF10增强PP的拉伸强度为101.8 MPa,随着GF4F的使用比例增加,拉伸性能逐渐降低,使用GF10/GF4F (2:1)和GF10/GF4F (1:1)的拉伸性能较为接近,使用纯扁平GF增强PP的拉伸性能为94.6 MPa(图1a)。类似地,随着扁平GF含量的增加,PP/GF的弯曲性能和冲击性能也逐渐降低(图1b~图1c)。主要是相比于圆GF,扁平GF的尺寸较大,因此比表面积较低,与树脂结合反应位点减少,因此当GF质量分数为30%时使用扁平

GF增强PP的力学性能相对较低。

进一步研究了高GF含量(扁平GF)时PP/GF的力学性能,测试了当GF质量分数为50%时PP/GF的力学性能,结果如图2所示。当GF质量分数为50%时,GF10增强PP的拉伸强度为124.9 MPa,随着扁平GF含量的增加,PP/GF复合材料的力学性能变化不大,使用GF4F增强PP的拉伸强度为125.3 MPa。弯曲性能方面,PP/GF的弯曲强度随扁平GF含量的增加而逐渐提高;冲击性能也表现出相同的变化趋势。这种力学性能变化与GF质量分数为30%时PP/GF的趋势不一致,主要是由于在高GF含量下,GF在PP树脂中的分散性成为影响力学性能的主导因素。扁平GF相比于圆GF能更好地分散在PP树脂中,从而更有效承载外力的作用,因此,在高GF含量下使用扁平GF可使PP/GF表现出更优异的力学性能。

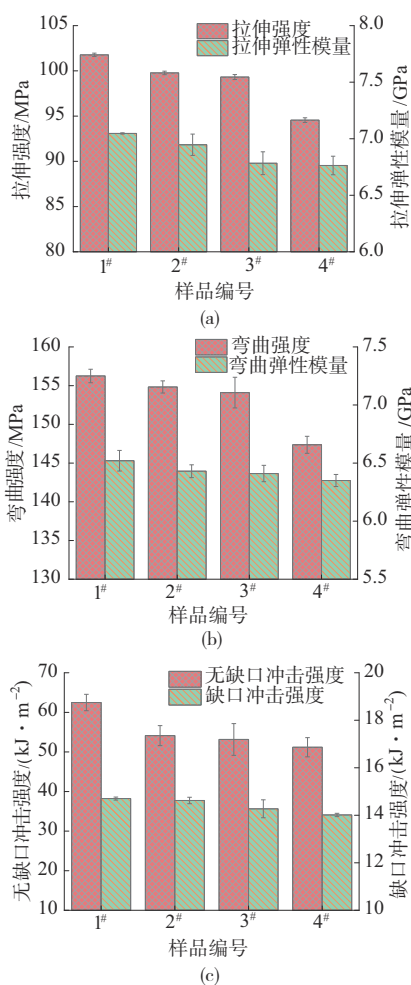


图1 不同PP/GF复合材料的力学性能(GF质量分数为30%)

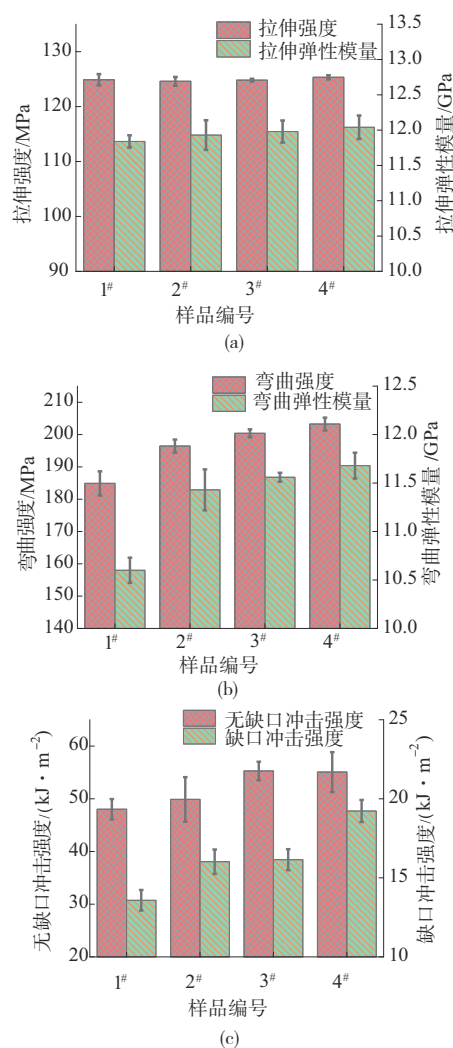


图2 不同PP/GF复合材料的力学性能(GF质量分数为50%)

## 2.2 PP/GF复合材料的界面性能

通过SEM表征GF质量分数为50%时PP/GF复合材料的冲击断面形貌,其SEM照片如图3所示。圆GF和扁平GF都与PP树脂具有较好的界面结合,这得益于GF表面浸润剂组分与PP树脂的良好界面相容性<sup>[14-15]</sup>。其中,图3a显示纯圆GF(GF10)在PP树脂中会发生多根聚并(白色圆圈部分),这是由于GF含量过高时GF难以完全分散。对于圆GF和扁平GF复配使用体系(图3b~图3c),可以看出扁平GF(GF4F)较为均匀地分散在圆GF中;尤其是对于纯GF4F体系(图3d),扁平GF在PP树脂中分散十分均匀。通过SEM图的形貌结果能很好地解释高GF含量下不同GF对力学性能的影响,虽然扁平GF尺寸较大,但其在树脂中分散性较好,因此在拉伸时具有与圆GF相当的拉伸性能。此外,由图3可见,扁平GF具有相对更一致的取向性,而圆GF则呈现出方向交错分散,说明在熔体流动过程中,扁平GF更容易沿着熔体流动方向发生取向。这种取向使得样条在受到弯曲应力和外界冲击时,应力相对垂直集中于扁平GF宽边,扁平GF较大的侧面会吸收更多能量,使复合材料抵抗外界变形或冲击的能力增强。因此,与圆GF相比,在高GF含量下扁平GF的引入比圆GF具有更加优异的弯曲性能和冲击性能。

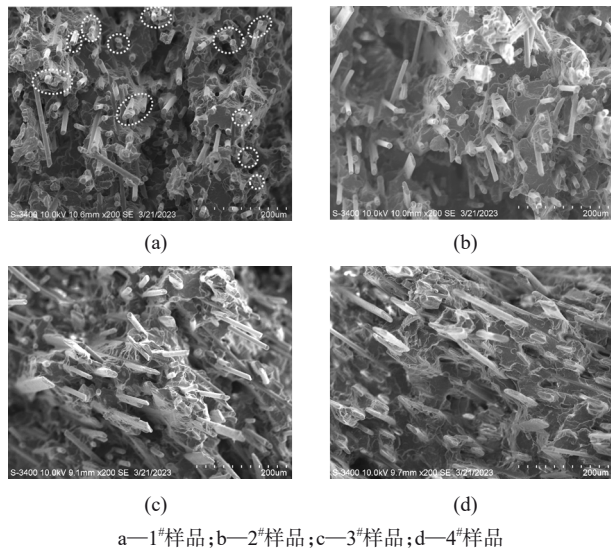


图3 不同PP/GF复合材料的冲击断面SEM照片  
(GF质量分数为50%)

## 2.3 PP/GF复合材料的翘曲性能

翘曲现象是GF增强热塑性树脂复合板材中的常见问题,主要是由于GF在树脂中取向使得板材

的横纵向收缩率差异引起的<sup>[16-17]</sup>。图4对比研究了不同PP/GF复合材料薄板的翘曲程度,结果表明使用纯圆GF制得PP/GF薄板的翘曲高度为13.8 mm,随着扁平GF的加入,薄板的翘曲高度显著降低到3.1 mm。这是因为板材中的扁平GF在水平方向有一定长径比,垂直方向有一定长宽比,因此扁平GF能有效降低板材横纵向的尺寸收缩率,从而改善薄壁化板材的翘曲问题。

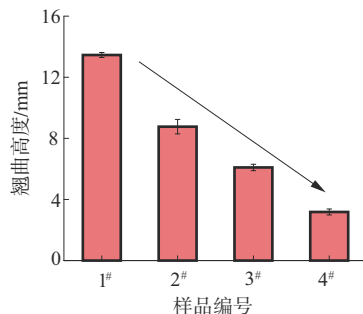


图4 不同PP/GF复合薄板的翘曲高度(GF质量分数为50%)

## 2.4 PP/GF复合材料的表面性能

通过光学显微镜研究了不同PP/GF复合材料板的外观状态,并将复合板材表面浮纤占比统计在表1中,可以看出随着扁平GF含量的增加,PP/GF复合材料板的表面浮纤量逐渐减少,这是由于扁平GF与PP树脂相容性较好,并且在PP树脂中分散较为均匀。因此,与纯圆GF相比,扁平GF的使用能减少高GF含量下PP/GF复合材料中的表面浮纤。

表1 不同PP/GF复合材料板的表面浮纤占比(GF质量分数为50%)

| 项目       | 样品编号 |      |      |      |
|----------|------|------|------|------|
|          | 1#   | 2#   | 3#   | 4#   |
| 表面浮纤占比/% | 7.93 | 2.98 | 2.34 | 2.03 |

## 3 结论

(1)低GF含量(质量分数30%)时,PP/GF的力学性能随扁平GF用量的增加而降低,此时GF的比表面积占主导地位;高GF含量(质量分数50%)时,PP/GF的力学性能随扁平GF用量的增加而提高,尤其是冲击性能和弯曲性能提高较为明显,此时GF的分散性占主导地位。

(2)高GF含量下,扁平GF比圆GF在PP树脂中分散更为均匀,并且更易在熔体流动方向发生取向;基于扁平GF增强的PP复合材料薄板具有更低的翘曲程度以及更光洁的表面。

(3)圆GF和扁平GF复配使用,能获得更加平衡的力学、翘曲、外观等综合性能,尤以质量比为1:1的配比使用能获得较高的性价比。

## 参考文献

- [1] 程军生. 玻璃纤维增强聚丙烯复合材料的制备及其性能[J]. 合成树脂及塑料, 2022, 39(4):29–34.  
Cheng Junsheng. Preparation and properties of glass fiber reinforced polypropylene composites[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2022, 39(4):29–34.
- [2] 唐潇, 孙秀玉, 王振卫. 玻璃纤维增强聚丙烯复合材料: 轻量化材料评述[J]. 上海塑料, 2021, 49(4):17–22.  
Tang Xiao, Sun Xiuyu, Wang Zhenwei. Glass fiber reinforced polypropylene composite: A review of lightweight material[J]. Shanghai Plastics, 2021, 49(4):17–22.
- [3] Watanabe R, Sugahara A, Hagihara H, et al. Insight into interfacial compatibilization of glass-fiber-reinforced polypropylene (PP) using maleic-anhydride modified PP employing infrared spectroscopic imaging[J]. Composites Science and Technology, 2020, 199. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108379.
- [4] 陈荣源, 赵凌峰, 刘欣, 等. 玻璃纤维增强增韧回收聚丙烯复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2022, 50(9):20–24.  
Chen Rongyuan, Zhao Lingfeng, Liu Xin, et al. Preparation and properties of glass fiber reinforced and toughened recycled polypropylene composites[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(9):20–24.
- [5] Sam-Daliri O, Ghabezi P, Steinbach J, et al. Experimental study on mechanical properties of material extrusion additive manufactured parts from recycled glass fibre-reinforced polypropylene composite[J]. Composites Science and Technology, 2023, 241. DOI:10.1016/j.compscitech.2023.110125.
- [6] de Lima L R M, Dias A C, Trindade T, et al. A comparative life cycle assessment of graphene nanoplatelets-and glass fibre-reinforced poly (propylene) composites for automotive applications[J]. Science of the Total Environment, 2023, 871. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.162140.
- [7] 曾彪, 刘玉飞, 王宁, 等. 玻璃纤维增强聚丙烯复合材料力学性能的研究进展[J]. 上海塑料, 2015(2):11–16.  
Zeng Biao, Liu Yufei, Wang Ning, et al. Effect of polyethylene addition on the preparation and properties of maleic anhydride grafted polypropylene[J]. Shanghai Plastics, 2015(2):11–16.
- [8] 张义乐. 玻璃纤维增强聚丙烯复合材料性能及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.  
Zhang Yile. The studies on properties and application of glass fiber reinforced polypropylene composite[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [9] Cadena-Perez A M, Yañez-Flores I, Sanchez-Valdes S, et al. Shrinkage reduction and morphological characterization of PP reinforced with glass fiber and nanoclay using functionalized PP as compatibilizer[J]. International Journal of Material Forming, 2017, 10: 233–240.
- [10] 于佳丽, 张继祥, 李又兵, 等. 车门内饰塑料翘曲变形分析及成型工艺优化[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(11):78–83, 88.  
Yu Jiali, Zhang Jixiang, Li Youbing, et al. Warpage deformation analysis and molding process optimization of door interior plastic parts[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11):78–83, 88.
- [11] 黄锋, 董鑫, 聂丹, 等. 高强度低翘曲PA6板材专用料研制[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(11):25–29.  
Huang Feng, Dong Xin, Nie Dan, et al. Preparation of high strength and low warpage PA6plate materials[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):25–29.
- [12] 许鸿基, 冯德才, 郑一泉, 等. 圆玻纤和扁平玻纤复配增强PA6及其性能研究[J]. 广东化工, 2019, 46(5):71–73.  
Xu Hongji, Feng Decai, Zheng Yiquan, et al. Combination of round glass fiber and flat glass fiber in reinforced pa6and its performance[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(5): 71–73.
- [13] 樊振华, 陈刚平, 梁珊, 等. 异形玻璃纤维的生产控制要点及其在复合材料中的应用[J]. 玻璃纤维, 2020, 24(5):1–5.  
Fan Zhenhua, Chen Gangping, Liang Shan, et al. Key points of production control of non-circular glass fiber and its application in composites[J]. Fiber Glass, 2020, 24(5):1–5.
- [14] Liu W, Zhu Y, Qian C, et al. Interfacial modification between glass fiber and polypropylene using a novel waterborne amphiphilic sizing agent[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 241. DOI:10.1016/j.compositesb.2022.110029.
- [15] 章建忠, 许升, 樊家澍, 等. 玻璃纤维浸润剂的分析与表征技术进展[J]. 化工进展, 2023, 42(2):821–838.  
Zhang Jianzhong, Xu Sheng, Fan Jiashu, et al. Progress in characterization and analysis of glass fiber sizing[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(2):821–838.
- [16] 陈列. 扁平玻纤增强PA9T复合材料的制备与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.  
Chen Lie. Preparation and properties of PA9T compositereinforced by flat GF[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [17] 肖利群, 刘罡, 陈健, 等. 工艺和玻璃纤维对增强聚丙烯材料翘曲和力学性能的影响[J]. 塑料工业, 2015, 43(8):65–69.  
Xiao Liqun, Liu Gang, Chen Jian, et al. Influence of processes and glass fiber on the warpage and mechanical properties of reinforced PP[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(8):65–69.