

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.01.011

GF增强PA66复合材料注塑制品熔接痕强度改善研究

苏似鑫¹, 马航飞¹, 叶素娟¹, 陈大华¹, 吴丽旋¹, 张宇², 谢恒辉¹, 陈金伟¹

(1. 广东轻工职业技术学院轻化工技术学院, 广州 510300; 2. 四维尔丸井(广州)汽车零部件有限公司, 广州 510730)

摘要: 通过在聚酰胺 66 (PA66) 中加入不同含量玻璃纤维, 进行了玻纤增强 PA66 复合材料注塑制品熔接痕强度变化规律的研究。在获取最佳玻纤含量的情况下, 利用研制的熔接痕样条振动模具进行了不同振动参数条件下玻纤增强 PA66 复合材料制品熔接痕强度变化规律的研究。研究表明, 在本实验条件下, 不同含量玻纤增强 PA66 复合材料注塑制品的熔接痕强度存在最佳值, 即当玻纤质量分数为 40% 时, 熔接痕强度达到最大值; 在玻纤质量分数为 40% 时, 引入振动力场能进一步提高制品熔接痕强度, 且振动参数存在最佳值: 当振动频率为 40 Hz 时, 制品拉伸强度达到最大值, 当振动频率为 50 Hz 时, 制品弯曲强度、冲击强度均达到最大值。在振动力场的作用下, 随着频率加大, PA66 基体与玻纤均更易沿着熔体流动方向移动, 玻纤在制品熔接痕区域相互穿插形成交织结构, 从而提升熔接强度。

关键词: 聚酰胺 66; 玻璃纤维; 熔接痕强度; 振动力场

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)01-0059-05

Study on Improvement of Weld Mark Strength of Glass Fiber Reinforced Pa66 Composites Injection Molding Products

Su Sixin¹, Ma Hangfei¹, Ye Sujuan¹, Chen Dahua¹, Wu Lixuan¹, Zhang Yu², Xie Henghui¹, Chen Jinwei¹

(1. Guangdong Industry Polytechnic School of Light Chemical Technology, Guangzhou 510300, China;

2. Swell Marui (Guangzhou) Automobile Parts Co., Ltd, Guangzhou 510730, China)

Abstract : The change rule of weld line strength of injection molded products of glass fiber reinforced PA66 composite was studied by adding different content of glass fiber into PA 66. Under the condition of the best glass fiber content, the change rule of weld line strength of glass fiber reinforced PA66 composite products under different vibration parameters was studied by using self-developed weld line sample vibration mold. The results show that under the experimental conditions, there is an optimal value for the weld line strength of injection molded products of glass fiber reinforced PA66 composites with different content, that is, when the glass fiber content is 40%, the weld line strength reach the maximum value. When the glass fiber content is 40%, the introduction of the vibration force field could further improve the product weld line strength, and there is an optimal value for the vibration parameters: when the vibration frequency is 40 Hz, the tensile strength of the product reach the maximum value, and when the vibration frequency is 50 Hz, the bending strength and impact strength of the product reach the maximum value. Under the action of vibration field, both PA66 matrix and glass fiber are more likely to move along the melt flow direction with the increase of frequency. The fusion mark areas of the glass fiber work-in-process are interspersed with each other to form an interweaving structure, thus improving the fusion strength.

Keywords : polyamide 66 ; glass fiber ; weld line strength ; vibration force field

航空航天、汽车、建材、船舶等行业的很多部件大, 在注射成型时均需要采用多浇口进行浇注, 而属于大型复杂塑料制品, 由于这些产品整体尺寸较大, 多浇口浇注则形成多股熔体流最后汇合形成熔接

基金项目: 2021 年度广东省普通高校特色创新类项目(2021KTSCX202), 2019 年度广东省普通高校特色创新类项目(2019GKTSCX014), 2021 年度广州市基础研究计划基础与应用基础研究项目(202102080524)

通信作者: 陈金伟, 博士, 研究员, 主要从事高分子材料结构与性能方面的教科研工作

收稿日期: 2022-09-26

引用格式: 苏似鑫, 马航飞, 叶素娟, 等. 玻璃纤维增强 PA66 复合材料注塑制品熔接痕强度改善的研究[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(1):59-63.

Su Sixin, Ma Hangfei, Ye Sujuan, et al. Study on improvement of weld mark strength of glass fiber reinforced PA66 composites injection molding products[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(1):59-63.

痕^[1-2]。不仅影响塑料制品的外观质量而且对制品的力学性能影响也很大,严重缩短制品的使用寿命,其缺陷一直制约着孔类制件的品质提升,而消费者对制件品质的要求日益苛刻和极致,明显的熔接痕缺陷已难以被接受^[3-4]。短切玻纤(GF)增强聚酰胺66(PA66)由于其易加工、成本低及良好的力学性能而备受关注,并在电器、电子特别是汽车工业中得到越来越广泛的应用^[5]。PA66经过GF增强后,依靠纤维和树脂的牢固粘结,材料的力学强度明显提升,但熔接痕的存在对于纤维增强塑料制品的影响也较为显著^[6]。研究表明,在相同工艺条件下,熔接痕区域的强度只有原始材料的10%~92%,严重影响塑件的正常使用^[7,8]。

目前国内外专门针对熔接痕的改善研究主要基于拉伸试样,研究了模具结构、制件截面形状、工艺参数等对熔接痕外观形貌和强度的影响^[9-14],在车用注塑件上,也有通过控制浇口时序和工艺参数优化的方式来减少和优化熔接痕^[15]。而笔者通过改变GF含量并引入振动力场进行GF增强PA66复合材料制品熔接痕改善的研究,将PA66做为复合材料基体,采用GF做为增强材料,在改变GF含量的条件下研究GF增强PA66复合材料注塑制品熔接痕强度变化规律。在获取最佳GF含量的情况下,利用自主研制的熔接痕样条振动模具搭建了动态成型平台,进行了不同振动参数条件下GF增强PA66复合材料制品熔接痕强度变化规律的研究。

1 实验部分

1.1 主要原料

PA66: EP158, 相对黏度 2.67, 熔体流动速率 10.8 g/10min, 温州华峰集团有限公司;

短切 GF: ECS301HP-3-H, 横截面直径为 10 μm , 长度 3 mm, 重庆国际复合材料有限公司。

1.2 主要设备及仪器

35型双螺杆挤出机: 长径比 28:64, 科倍隆(南京)机械有限公司;

注塑成型机: SA1600型, 宁波海天塑机集团有限公司;

熔接痕样条振动模具: 广东轻工职业技术学院轻工技术学院;

电热鼓风干燥箱: SD101-3A型, 南通华泰实验仪器有限公司;

电子万能测试机: CMT4204型, 深圳市新三思

材料检测有限公司;

悬臂梁冲击试验机: HIT-2492型, 承德市金建检测仪器有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): JSM-6460LV型, 日本电子株式会社。

1.3 熔接痕样条制备

PA66/GF复合材料的制备: 共混前, 将PA66树脂置于80℃真空干燥箱中干燥8h, 以去除原料中的水分。配方见表1, 每种配方的原料总质量均取3kg。

表1 GF增强PA66样条配方

试样编号	PA66	短切GF	%
1	100	0	
2	80	20	
3	70	30	
4	60	40	
5	50	50	

采用同向双螺杆挤出机熔融共混, 通过侧喂料方式连续添加短切GF, 制备了PA66/GF复合材料。混合物通过料斗加入同向双螺杆挤出机, 短切GF从GF口即挤出机的侧进料口加入, 挤出加工温度控制在260~280℃之间, 螺杆转速设定在300~400 r/min范围内。侧喂料口投放量按照前面方案设定的比例, 以0%, 20%, 30%, 40%, 50%的比例投放加入, 通过调节进纤口二级进料的转速来控制GF的含量。工艺路线按照熔融共混、料条挤出、牵引、过水冷却、切粒, 之后放置于烘箱120℃下干燥2h。

熔接痕样条制备: 注塑温度在260~280℃, 注射速度为60 mm/s, 注射压力80 MPa, 保压和冷却时间设定在15 s, 熔胶储量通过设定螺杆后退60 mm实现, 背压调整为0 MPa, 将干燥好的、不同GF含量的复合粒料利用装有熔接痕样条振动模具注射机, 分别在振动频率为0, 10, 20, 30, 40, 50 Hz振动条件下进行熔接痕样条制备, 然后对熔接痕样条按照GB/T1040.1-2018, GB/T9341-2008, GB/T1843.1-2008等标准要求的尺寸进行力学性能测试样条二次制备, 并将测试样条放置铝塑复合袋中静置冷却24 h, 待内应力消除进行性能测试。

1.4 测试与表征

力学性能测试: 取PA66/GF复合材料的哑铃型熔接痕拉伸样条、弯曲测试样条和缺口冲击样条, 在室温下分别采用电子万能测试机和悬臂梁冲击试验机, 按照GB/T1040.1-2018、GB/T9341-2008、GB/T1843.1-2008等标准测试样条的拉伸性能、弯

曲性能和缺口冲击性能,拉伸速率 10 mm/min,弯曲速度 2 mm/min,每组样条至少测试 5 次,结果取其平均值。

SEM 表征:SEM 被广泛应用于检测各种复合材料断面微观结构形貌,通过观察塑料与纤维之间的结合情况,分析复合材料制品熔接痕强度提高的原因。本试验主要观察复合材料的纵向脆性断口和冲击断口。测试前用液氮浸泡 30 s,后立即对测试样条进行脆断,将试样截取 2~5 mm 的高度,粘附在载物台上,对待测样条断口表面做喷金处理,以增强导电性,便于采集复合材料断口图像。

2 结果与讨论

2.1 未加振 PA66/GF 材料熔接痕样条力学性能

用电子万能试验机测试不同 GF 含量下 PA66/GF 复合材料熔接痕样条的力学性能,结果见表 2。

表 2 PA66/GF 复合材料熔接痕样条力学性能试验结果

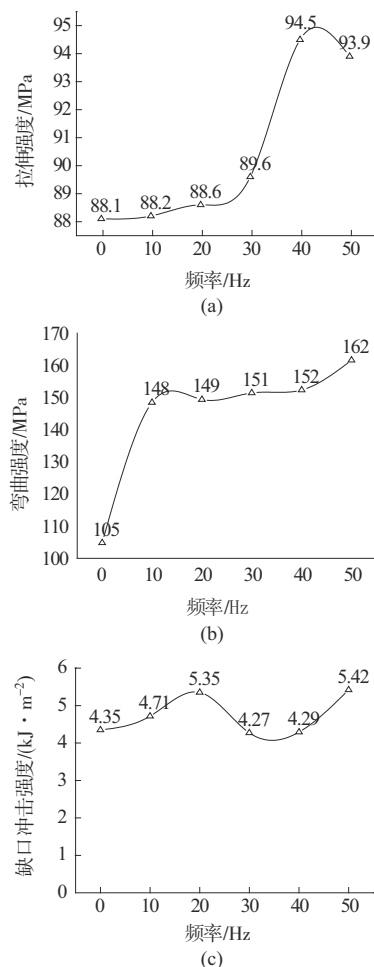
试样编号	拉伸强度/MPa	弯曲强度/MPa	缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)
1	66.43	86.32	3.763
2	84.62	90.29	3.837
3	85.95	98.56	4.034
4	88.10	103.97	4.346
5	77.52	115.23	4.154

由表 2 可知,相比纯 PA66 树脂,PA66/GF 复合材料的力学性能明显改善,尤其是添加 40%GF 时,与纯 PA66 试样相比,拉伸强度提高约 32.6%,弯曲强度提高约 20.5%,缺口冲击强度提高约 15.5%。从表 2 可以看出,PA66/GF 熔接痕样条的拉伸强度、缺口冲击强度随着 GF 含量的增加递增后再递减,当 GF 质量含量为 40% 的 PA66 力学性能强度达到峰值,即 GF 含量对 PA66 熔接痕强度的影响存在最佳值,即本实验条件下,40% 为最佳 GF 含量。

2.2 加振 PA66/GF 材料熔接痕样条的力学性能

以 GF 含量 40% 的 PA66/GF 复合材料作为主要研究对象,进行不同振动频率下 PA66/GF 复合材料熔接痕样条的拉伸、弯曲、冲击等力学性能测试,不同频率下的力学性能变化曲线如图 1 所示。

由图 1 可以看出,针对添加相同 GF 含量(质量分数 40%)的 PA66/GF 复合材料,通过对模具加装振动装置,振动频率对熔接痕样条的拉伸强度,弯曲强度和冲击强度均有较大影响。加振熔接痕 PA66/GF 样条与不加振相比,样条拉伸强度分别提高了 0.11%, 0.57%, 1.70%, 7.26%, 6.58%, 弯曲强度分别提高了 41.60%, 42.50%, 44.47%, 45.33%, 54.17%,



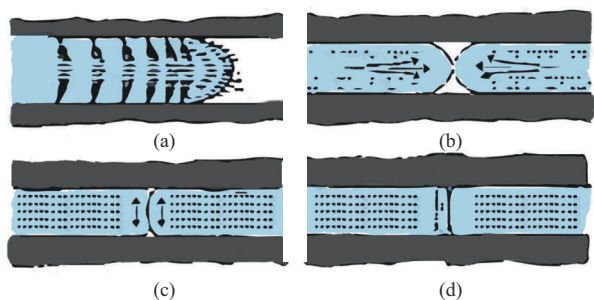
a—拉伸强度;b—弯曲强度;c—缺口冲击强度

图 1 PA66/GF 复合材料熔接痕样条在不同频率下力学性能变化曲线
缺口冲击强度分别在 10, 20, 50 Hz 处分别提高了 8.37%, 23.01%, 24.57%, 在 30, 40 Hz 处略有降低。可见随着振动频率的增加,熔接痕样条的拉伸强度,弯曲强度和冲击强度总体均有提高,熔接痕拉伸强度对应的频率最佳值 40 Hz,当振动频率为 50 Hz 时熔接痕弯曲强度和冲击强度达到最大值。

2.3 PA66/GF 熔接痕样条宏观结构

(1) 熔接痕形成机理。

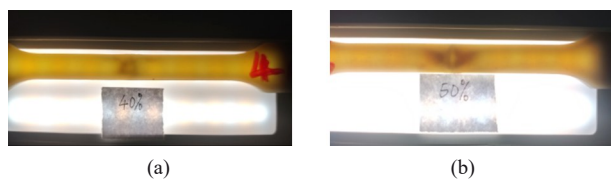
当两股熔体前沿尚未汇合以前,熔体前沿的压力为零,如图 2a 所示。一旦熔体汇合,如图 2b 所示,熔体前沿处的压力增加,流动停止,两个自由表面相互接触并发生非线性的黏弹性变形。由于扩散和分子运动,接触表面的分子链开始松弛、缠结和迁移,由于这种缠结和迁移的结果是为熔接痕提供键接强度,熔接痕熔体结合强度随着分子链的缠结程度的增加而增加。熔接痕取向由于受挤压作用而垂直于流动方向,如图 2c、图 2d 所示。



a—熔体流动情况;b—两股熔体开始交汇;c—熔接痕形成;d—完成熔合
图2 熔接痕的形成

(2) PA66/GF 熔接痕样条宏观结构。

由于GF在PA66/GF熔接痕样条的熔接痕处无法形成交织融合状态,因此该处是整个制品强度较弱的区域。随着GF含量的提高,GF不仅没能穿透熔接痕处,反而在熔体熔接痕结合线两侧形成更为明显的堆积,如图3所示,试样在日光灯照射下形成更为明显的黑影。刚开始随着GF含量的增加,GF的增强作用占主导作用,因此样条整体强度是提高的,但随着GF含量的增加,熔体熔接痕结合线两侧GF的堆积开始影响整个样条的强度,从而造成熔接痕样条的力学性能反而下降。



GF质量分数:a—40%;b—50%
图3 日光灯照射PA66/GF熔接痕样条宏观结构

2.4 熔接痕样条的微观结构分析

采用SEM对冲击断面及脆断的注塑流向断面形貌进行拍摄,从放大250倍电镜图中观察PA66/GF复合材料的整体形貌以及GF与树脂结合的界面情况。如图4所示^[16],沿流动方向从试样中间取一段5 mm长度样条。在液氮中浸泡5 min,取出后即刻沿流动方向从中间纵向掰断得到纵截面。需要对切后的断面作喷金处理,增强导电性,使得扫描电镜更容易采集到图像^[17]。

取GF质量分数为40%、不同振动频率下的熔接痕样条皮下0.2, 0.5, 1 mm作为皮层、中间层、芯

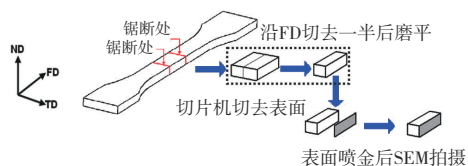
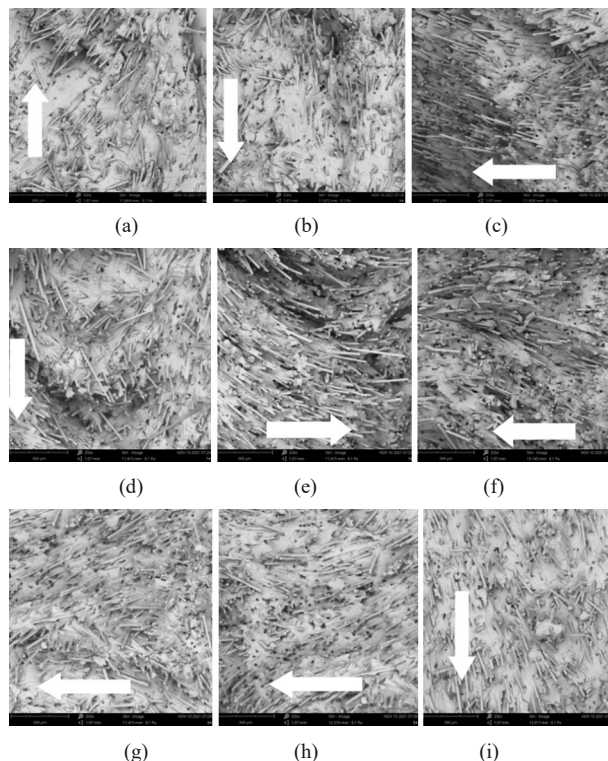


图4 脆断试样制备过程示意图

层的观察位置,分别对PA66/GF熔接痕样条进行SEM分层表征观察,结果如图5所示,图中箭头方向表示熔体流动方向。



a, b, c—0 Hz 芯层、中间层、皮层; d, e, f—20 Hz 芯层、中间层、皮层;
g, h, i—40 Hz 芯层、中间层、皮层

图5 振动条件下PA66/GF材料样条冲击断面SEM照片($\times 250$)

通过图5可以观察到不同振动条件下,GF在PA66基体中的分散状况及GF与PA66基体间的相容情况。如图5所示,所有熔接痕样条存在一个共同的趋势,即皮层的GF更趋向平行,基本沿着流动方向,越往芯层,GF越趋向紊乱,芯层垂直于熔体流动方向的GF较多,从皮层到芯层絮乱程度越来越强烈,这也为PA66/GF熔接痕样条制品外层的刚性较大提供了有力支撑。对于相同含量的GF,随着频率的加大,GF随着两股料流在熔接痕处形成了更好的穿插交互,即PA66/GF熔接痕样条对外力的抵抗除了树脂基体、树脂与GF的连接之外,还有GF在熔接痕区域相互穿插形成的交织结构,这是样条熔接痕强度改善的重要原因。由图5的芯层结构亦可以看出,不加振动的PA66/GF样条芯层也有内旋缠叠的交织态,但其交织程度不及振动条件下的熔接痕样条强烈,因此其强度低于加振的PA66/GF熔接痕样条。

3 结论

项目通过改变 GF 含量并引入振动力场,进行了 GF 增强 PA66 复合材料注塑制品熔接痕强度改善的研究,结果表明:

(1) PA66/GF 熔接痕样条的拉伸强度随着 GF 含量的增加递增后再递减,当 GF 质量分数为 40% 时 PA66 拉伸强度达到峰值。可见 GF 含量对 PA66 熔接痕强度的影响存在最佳值,即本实验条件下,40% 为最佳 GF 含量。这是因为随着 GF 含量的增加,熔体熔接痕结合线两侧 GF 的堆积开始影响整个样条的强度,从而造成熔接痕样条的力学性能在某一 GF 含量条件下存在拐点。

(2) 在 GF 含量不变的情况下,利用自制熔接痕样条振动模具引入振动力场,可有效改善 PA66/GF 熔接痕样条制品的熔接痕强度。随着振动频率的增加,熔接痕样条拉伸强度、弯曲强度和冲击强度总体均获得提高。当振动频率为 40 Hz 时,熔接痕样条拉伸强度达到最佳值,当振动频率为 50 Hz 时,熔接痕样条的弯曲强度和冲击强度均达到最大值。

(3) 在振动力场的作用下,随着振动频率的增加,PA66 基体与 GF 均更易沿着熔体流动方向移动,从而使 GF 在 PA66/GF 熔接痕样条制品的熔接痕区域相互穿插形成交织结构,该结构是熔接痕样条强度提高的主要原因。

参考文献

- [1] 王梦寒,涂顺利,余春丽.基于Kriging和NSGA-II的辅以困气改善的熔接痕优化策略[J].化工学报,2018,69(10):449-445.
Wang Menghan, Xu Shunli, Yu Chunli. Optimization strategy of weld line assisted by air traps improvement based on Kriging and NSGA-II[J]. CIESC Journal, 2018, 69(10): 449-445.
- [2] 徐佩弦.注射制品与模具设计[M].北京:中国轻工业出版社,2002.
Xu Peixuan. Injection products and mold design[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2002.
- [3] Chen S C, Chang Y, Chang Y P, et al. Effect of cavity surface coating on mold temperature variation and the quality of injection molded parts[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, 36(10): 1030-1035.
- [4] Chiang K T. The optimal process conditions of an injection-molded thermoplastic part with a thin shell feature using grey-fuzzy logic: a case study on machining the PC/ABS cell phone shell[J]. Materials & Design, 2007, 28(6): 1851-1860.
- [5] 熊玉竹,田瑶珠,涂铭旌.短切玻纤增强尼龙6的缺口拉伸性能[J].工程塑料应用,2009,37(5):60-63.
Xiong Yuzhu, Tian Yaoshu, Tu Mingjing. Notched tensile properties of short cut glass fiber reinforced nylon 6[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(5): 60-63.

- [6] 杨扬,董斌斌,刘春太.纤维增强PA66注塑熔接痕性能的工艺优化[J].工程塑料应用,2004(3):32-34.
Yang Yang, Dong Binbin, Liu Chuntai. Process optimization of weld performance of fiber reinforced PA66 injection molding[J]. Engineering Plastics Application, 2004(3): 32-34.
- [7] 缪遇春.塑件熔接痕缺陷的成因及解决方案[J].模具制造,2020,20(10):52-54.
Mu Yuchun. Causes and solutions of weld marks defects in plastic parts[J]. Die & Mould Manufacture, 2020, 20(10): 52-54.
- [8] 严志云,丁玉梅,谢鹏程,等.注塑成型熔接痕缺陷研究进展[J].塑料工业,2009,37(4):1-5,18.
Yan Zhiyun, Ding Yumei, Xie Pengcheng, et al. Study development on the weld line defect in injection molding[J]. China Plastics Industry, 2009, 37(4): 1-5, 18.
- [9] Xie L, Ziegmann G. Influence of processing parameters on micro injection molded weld line mechanical properties of polypropylene (PP)[J]. Microsystem Technologies, 2009, 15(9): 1427-1435.
- [10] Xie L, Ziegmann G, Hlavac M, et al. Effect of micro tensile sample's cross section shape on the strength of weld line in micro injection molding process[J]. Microsystem Technologies-Micro and Nano systems-Information Storage and Processing Systems, 2009, 15(7): 1031-1037.
- [11] Wu C H, Liang W J. Effects of geometry and injection-molding parameters on weld-line strength[J]. Polymer Engineering and Science, 2005, 45(7): 1021-1030.
- [12] Kuo H C, Jeng M C. Effects of part geometry and injection molding conditions on the tensile properties of ultra-high molecular weight polyethylene polymer[J]. Materials & Design, 2010, 31(2): 884-893.
- [13] Ozcelik B. Optimization of injection parameters for mechanical properties of specimens with weld line of polypropylene using Taguchi method[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011, 38(8): 1067-1072.
- [14] Tian M, Gong X, Yin L, et al. Multi-objective optimization of injection molding process parameters in two stages for multiple quality characteristics and energy efficiency using Taguchi method and NSGA-II[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1/2/3/4): 241-254.
- [15] 冯志新.基于DOE的汽车保险杠注塑工艺参数的优化方法研究[J].塑料工业,2017,45(7):73-76.
Feng Zhixin. Study on the optimization method of the automobile bumper injection molding process parameters based on DOE[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(7): 73-76.
- [16] 苏似鑫,马航飞,吴启升,等.不同形态玻璃纤维对尼龙66结构与性能影响[J].工程塑料应用,2021,49(11):119-125.
Su Sixin, Ma Hangfei, Wu Qisheng, et al. Structure and properties of polyamide 66 effected by different glass fibers[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11): 119-125.
- [17] 陈金伟.聚合物熔体振荡推拉成型试样的结构与性能研究[D].广州:华南理工大学,2014.
Chen Jinwei. Study on the structure and properties of sample molded by oscillating push-pull molding of polymer melt[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.