

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.09.014

熨烫处理对3D打印成型件表面特性的影响

王琛, 李靖瑶, 张晨赞, 朱玉

(南京林业大学家居与工业设计学院, 南京 210037)

摘要: 为了有效提高3D打印成型件的表面质量和美观度,通过熔融沉积成型(FDM)3D打印机挤出头对成型件表面进行熨烫处理,采用表面粗糙度测试、光泽度测试、颜色属性测试评价了熨烫处理对FDM成型件表面特性的影响。粗糙度测试结果表明,熨烫处理后FDM成型件的轮廓算术平均偏差 R_a 和轮廓最大高度 R_z 平均值分别降低了46.18%和37.36%;光泽度测试结果表明,熨烫处理后FDM成型件在 20° , 60° , 85° 入射角下的光泽度平均值分别提高了45.65%, 31.63%, 20.34%;颜色属性测试结果表明,熨烫处理后FDM成型件的色相 H 平均值基本保持不变,明度 L^* 、彩度 C^* 平均值分别增大了7.25%和6.14%。对比工业显微镜拍摄的细节放大图可见,与熨烫处理前较粗的表面纹理相比,熨烫处理后FDM成型件的表面纹理更加细密,质感更显光滑,其表面的凸起物得到有效去除,“缺陷”基本消失,光泽度有所提升,颜色显得更加明亮、鲜艳。因此,熨烫处理可以有效改善FDM成型件的表面特性,具有较高的应用推广价值。

关键词: 熨烫处理; 3D打印; 熔融沉积成型; 成型件; 表面特性

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)09-0092-05

Effect of ironing treatment on surface properties of 3D printed molded parts

WANG Chen, LI Jingyao, ZHANG Chenyun, ZHU Yu

(College of Home and Industrial, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract : In order to effectively improve the surface quality and aesthetics of 3D printed molded parts, the surface of the molded parts was ironed by the extrusion head of a fused deposition modeling (FDM) 3D printer, and the effects of the ironing treatment on the surface properties of the FDM molded parts were evaluated by using surface roughness test, glossiness test, and color property test. After ironing treatment, the results of surface roughness test show that the average values of the arithmetic mean deviation of contour R_a and maximum height of contour R_z of the FDM molded parts are reduced by 46.18% and 37.36%, respectively; the results of glossiness test show that the average values of glossiness of the FDM molded parts are increased by 45.65%, 31.63%, and 20.34%, respectively, under the incidence angles of 20° , 60° , and 85° ; the results of color property test show that, after ironing treatment, the average value of hue H of the FDM molded parts remains basically unchanged, and the average values of brightness L^* and chroma C^* are increased by 7.25% and 6.14% respectively. As seen from the detailed enlarged view captured by industrial microscopes, compared with the coarse surface texture before ironing treatment, the surface texture of the FDM molded parts after ironing treatment is finer and smoother, the protuberance on the surface are effectively removed, the "defects" basically disappear, the gloss is improved, and the color looks brighter and more vivid. Therefore, ironing treatment can effectively improve the surface properties of the FDM molded parts, which has high application and promotion value.

Keywords : ironing treatment ; 3D print ; fused deposition modeling ; molded part ; surface property

近年来,3D打印技术已经在各类产品原型的制造中取得了广泛应用^[1]。其中,熔融沉积成型(FDM)3D打印因为具有操作简单、价格便宜、应用范围广等优势,展现出更强的发展潜力^[2]。FDM的

基金项目: 教育部产学研协同育人项目(230804583152401),江苏省大学生创新训练计划项目(202410298194Y)

通信作者: 王琛,实验师,主要从事3D打印技术应用、逆向工程、计算机辅助产品设计等研究

收稿日期: 2024-06-26

引用格式: 王琛,李靖瑶,张晨赞,等.熨烫处理对3D打印成型件表面特性的影响[J].工程塑料应用,2024,52(9):92-96.

WANG Chen, LI Jingyao, ZHANG Chenyun, et al. Effect of ironing treatment on surface properties of 3D printed molded parts[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(9): 92-96.

工艺基本流程如下:加热的挤出头在设定数据的驱动下,根据产品数模的截面轮廓作平面运动,热塑性丝材由供丝机构传送至挤出头,并在挤出头中熔化成黏流态,然后被挤压出来,有选择地沉积在热床上,快速冷却后形成一层薄片轮廓^[3];当一层截面成型完成后挤出头上移一定高度,再进行下一层的沉积,犹如一层层“画出”截面轮廓,如此循环,最终形成3D打印FDM成型件^[4]。

产品表面特性是指产品表面所呈现出的各种性质和特征,这些性质和特征对于产品的性能和应用有着非常重要的影响^[5]。近年来,许多文献对FDM成型件的表面特性改进方法进行了探究。李彬等^[6]为了提高FDM成型件的表面光洁度,提出了利用数控加工技术对FDM成型件进行后处理的方法,结果表明,数控加工可以有效提高FDM成型件的表面光洁度、减少成型尺寸误差;刘梦梦等^[7]通过打磨、补土等方法对3D打印花瓶进行后处理,以提高花瓶产品的表面质量和光泽度;李圆圆等^[8]对FDM制件的表面瑕疵进行了总结,分析了手工打磨、化学抛光和珠光处理等方式对FDM制件表面效果的影响。相关研究表明,现有的FDM成型件表面特性改进方法主要集中在后处理阶段,区别于传统的后处理方法,熨烫处理是一种FDM成型件表面处理的新方法。虽然在国外3D打印创客平台上已有博主发布了有关熨烫功能的介绍视频,但是通过表面特性测试(粗糙度、光泽度和颜色属性测试)来量化评价熨烫处理对FDM成型件作用效果的研究目前很少有文献报道。

由于FDM的工艺特点导致了其打印模型的表面存在一些“纹理”与“缺陷”,使得FDM成型件无法像注塑或者机械加工后的制件一样具有光滑的表面,FDM成型件在美观度和后期应用上受到了一些限制^[9]。为了淡化“纹理”,减少“缺陷”,进一步提高FDM成型件的表面质量和美观度。笔者通过3D打印挤出头对FDM成型件表面进行熨烫处理,采用粗糙度测试、光泽度测试、颜色属性测试评价了熨烫处理对FDM成型件表面特性的影响,以期合理利用熨烫处理改善FDM成型件的表面特性提供参考。

1 熨烫处理原理

由于FDM打印机通过挤出头层层“画出”成型件的截面轮廓,导致了成型件表面存在一些“纹理”与“缺陷”。其中,“纹理”体现为水平方向上相互平

行的痕迹纹路,这种痕迹纹路是挤出头中的熔融丝材按照预设打印路径冷却固化后形成的^[10];“缺陷”指的是FDM成型件表面多余的凸起物,由于熔融丝材在打印路径的末端未能及时回抽,导致了凸起结构的产生,从而影响了FDM成型件的表面质量^[11]。

熨烫处理是将3D打印机的挤出头作为“熨斗”,对FDM成型件表面进行修复和美化的过程,具体原理如下:首先3D打印机完成模型顶层轮廓的打印,然后挤出头高度保持不变,在原有顶层轮廓的基础上,采用较低的挤出率、较小的轮廓线间距和较慢的打印速度,以获得纤细的熔融丝材,并利用纤细的熔融丝材重新打印一遍顶层轮廓,从而形成一个质感光滑的表面^[12]。根据如图1所示的工作原理,总结熨烫处理对3D打印成型件表面的主要作用如下:①高温下的挤出头在水平方向上的移动,可以烫平FDM成型件表面多余的凸起物;②挤出头在FDM成型件表面平铺一层纤细的熔融丝材,以细线条纹路代替了原有的粗线条纹路,覆盖了原有顶层纹路中较粗的缝隙,减小了成型件表面的粗糙度。

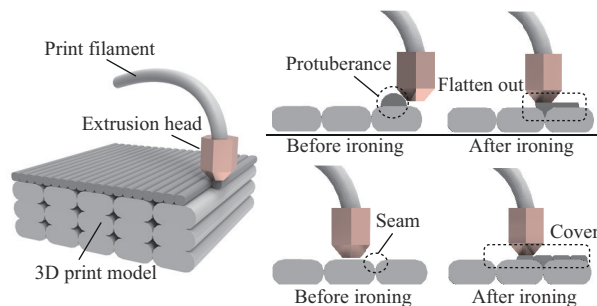


图1 熨烫处理原理

Fig. 1 Principle of ironing treatment

2 实验部分

2.1 主要原材料

聚乳酸(PLA) 3D打印丝:红色,直径1.75 mm,东莞以祥塑料有限公司。

2.2 主要仪器及设备

表面粗糙度测试仪:JB-4C,上海泰明科学仪器有限公司;

表面光泽度测试仪:HG-268,深圳三恩时科技有限公司;

测色仪:CI-60,美国X-Rite有限公司;

3D打印机:P-300,南京双庚电子有限公司;

工业显微镜:CL-MA-48M,广州科乐默仪器有限公司。

2.3 试样制备

通过 SolidWorks 软件设计长方体块,如图 2a 所示,使用 FDM 3D 打印机制作长方体成型件,为提高测试数据的准确性,每种类型的测试各打印了 3 组成型件。进行 3D 打印时,原材料选用 PLA 丝材,常规打印参数设置如下:挤出头温度为 220 °C,层高为 0.2 mm,打印速度为 50 mm/s,填充率为 10%,挤出率为 100%,填充图案为“网格型”。

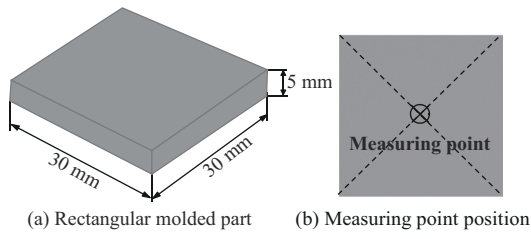


图 2 长方体成型件与测量点定位

根据前期的预实验(熨烫处理参数实验)结果得知,不同挤出率、轮廓线间距和打印速度等参数对 FDM 成型件表面特性的影响较小,因此在本文中不对熨烫处理参数进行探讨。在本文实验中,各组成型件均采用较低的挤出率(90%)、较小的轮廓线间距(0.1 mm)和较慢的打印速度(30 mm/s)等预实验优选参数进行表面熨烫处理。此外,熨烫处理时挤出头温度为 220 °C,这和常规打印阶段挤出头温度保持一致。

2.4 性能测试

使用表面粗糙度测试仪、表面光泽度测试仪、测色仪分别对长方体成型件表面的粗糙度、光泽度和颜色属性进行测试。参考实验方法要求及成型件尺寸,在其表面取 1 个测量点,测量点位于成型件顶面正方形的形心(如图 2b 所示)。

3 结果与讨论

3.1 熨烫处理对 FDM 成型件表面粗糙度的影响

表面粗糙度是指物体表面具有的较小间距和微小峰谷的不平度。对 FDM 成型件熨烫处理前后的表面粗糙度进行测试,测试得到的表面轮廓曲线如图 3 所示。由图 3 可见,FDM 成型件的表面轮廓呈现了两个明显特征:①熨烫处理前、后的表面轮廓均呈现了规律性的波峰、波谷特征,这是因为挤出的熔融丝材在横截面上为椭圆形,进一步冷却凝固后,其在竖直方向上的顶点形成了波峰,水平方向上的顶点与相邻丝材熔接,形成了波谷^[13];②熨烫处理后的表面轮廓曲线整体位于熨烫前的表面轮

廓曲线的上方,这是因为熨烫处理是在成型件的顶面再平铺一层 PLA 丝材,由于新铺的丝材具有一定厚度,因此熨烫处理后的轮廓曲线在竖直方向上产生了“增高”。

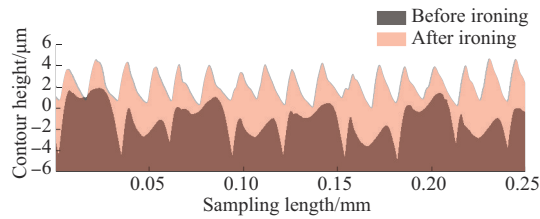


图 3 熨烫处理前后成型件的表面轮廓曲线

3 组 FDM 成型件熨烫处理前后的表面粗糙度数值见表 1。从表 1 可知,熨烫处理后 3 组 FDM 成型件的轮廓算术平均偏差 R_a 平均值为 1.707 μm ,轮廓最大高度 R_z 的平均值为 7.634 μm 。此 R_a 和 R_z 平均值均明显小于熨烫处理前的对应平均值(R_a 值为 3.172 μm , R_z 值为 12.187 μm)。熨烫处理后 R_a 和 R_z 的平均值分别降低了 46.18% 和 37.36%,说明了熨烫处理显著降低了 FDM 成型件表面的粗糙度数值,有效提高了 FDM 成型件的表面光洁度。

表 1 熨烫处理前后成型件的表面粗糙度数值

Ironing treatment	Molded part 1		Molded part 2		Molded part 3		Average value	
	$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$
Before	3.157	12.135	3.185	12.207	3.173	12.219	3.172	12.187
After	1.706	7.672	1.685	7.523	1.729	7.706	1.707	7.634

Notes: R_a represents arithmetic mean of absolute value of contour deviation over sampling length; R_z represents distance between peak and valley lines of contour.

3.2 熨烫处理对 FDM 成型件表面光泽度的影响

光泽度是物体表面的一种光学特性,指的是反射光线在人眼中形成影像的清晰程度。对 3 组 FDM 成型件熨烫处理前后的表面光泽度进行测试,选取 20°, 60°, 85° 入射角的测试数据作为评价参数,每组成型件均进行了 20°, 60°, 85° 入射角光泽度测试,测试结果取平均值,所得结果如图 4 所示。由图 4 可见,熨烫处理后 3 组 FDM 成型件在 20°, 60°, 85° 入射角下的光泽度平均值分别为 4.6, 9.8, 5.9 Gu, 均大于熨烫处理前的对应平均值(20° 对应值为 2.5 Gu, 60° 对应值为 6.7 Gu, 85° 对应值为 4.7 Gu)。熨烫处理后 FDM 成型件在 20°, 60°, 85° 入射角下的光

泽度平均值分别提高了45.65%,31.63%,20.34%。这是因为熨烫处理后FDM成型件的表面粗糙度减小,其对光线的散射能力减弱、反射能力增强,因此光泽度增大^[14]。综上分析,熨烫处理有效提高了FDM成型件的表面光泽度。

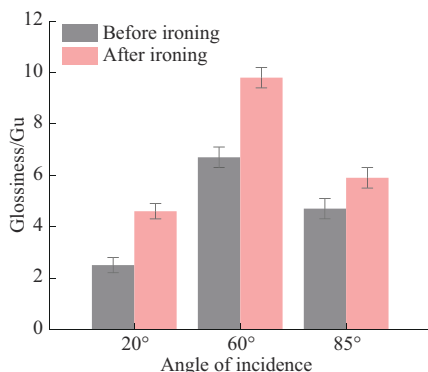


图4 熨烫处理前后成型件的表面光泽度参数

Fig. 4 Surface glossiness parameters of molded parts before and after ironing treatment

3.3 熨烫处理对FDM成型件颜色属性的影响

颜色属性是界定色彩感官识别的基础。对3组FDM成型件熨烫处理前后的表面颜色进行测试,选取明度 L^* 、彩度 C^* 、色相 H 作为评价参数,测试结果如图5所示。由图5可见,熨烫处理后3组FDM成型件的明度 L^* 、彩度 C^* 、色相 H 的平均值分别为46.9,68.4和21.5°,均大于熨烫处理前的对应平均值(L^* 值为43.5, C^* 值为64.2, H 值为21.4°)。熨烫处理后FDM成型件的色相 H 数值变化较小,等同于保持不变,而明度 L^* 、彩度 C^* 平均值分别增大了7.25%和6.14%,对各颜色属性的变化原因分析如下。

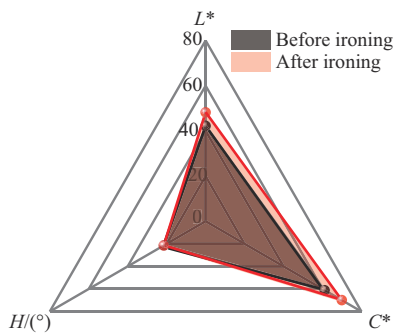


图5 熨烫处理前后成型件的表面颜色参数

Fig. 5 Surface color parameters of molded parts before and after ironing treatment

(1)明度 L^* 是表征颜色明暗的特征量,物体表面的光泽度越大,光反射系数越高,其颜色的明度 L^* 就越高。由于熨烫处理后FDM成型件表面的光泽度增大、光反射系数增大,因此成型件表面的明度

值 L^* 增大,颜色变亮^[15]。

(2)彩度 C^* 是表征颜色纯净度的特征量,当入射光线照射在成型件表面时,首先在成型件表面被反射(首层表面反射,主要构成为中性色白光),其余入射光经过材料的选择性吸收后,二次反射出材料的主色光,人眼观察到的颜色就是首层表面反射光和主色光的混合光。熨烫处理后的FDM成型件,由于其表面光泽度增大,首层反射光表现为高度定向性,不易进入人眼,主色光中混合的首层表面反射光较少,即主色光中混合的中性色白光减少,主色光的彩度 C^* 增大,FDM成型件的颜色显得鲜艳。

(3)色相 H 是颜色与颜色间区别的主要特征,其属性取决于辐射光谱对人眼刺激而产生的主观感觉^[16]。由于熨烫处理主要改变了FDM成型件的表面光泽度,并未改变颜色的本质属性,因此FDM成型件表面的反射光谱成分仍与入射光的光谱成分相同,成型件的色相 H 保持不变。

3.4 熨烫处理效果对比分析

为了更加直观地对比熨烫处理效果,使用工业显微镜对熨烫处理前后FDM成型件的表面细节进行观察。首先,在相同环境温度(25 °C)下,使用同台FDM打印机和同卷PLA丝材先后打印了两组长方体成型件,其中一组打印完成后未进行熨烫处理,另一组打印完成后进行了熨烫处理。然后,通过工业显微镜对两组成型件进行了拍摄,拍摄得到的不同区域的表面细节放大图如图6所示。

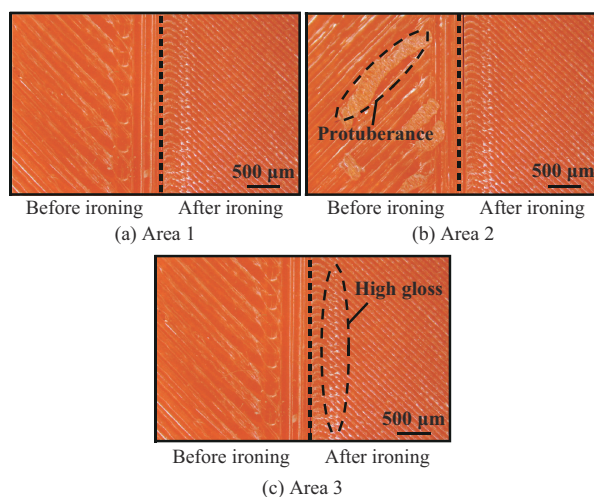


图6 熨烫处理前后FDM成型件表面细节放大图

Fig. 6 Enlarged view of surface detail of FDM molded parts before and after ironing treatment

通过分析图6 (图中Area1, Area2, Area3 分别拍摄的是两组成型件表面的不同区域),对比熨烫处理前后FDM成型件的表面效果。从Area1中可见,与

熨烫处理前较粗的表面纹理相比,熨烫处理后成型件的表面纹理更加细密,质感更显光滑;从Area2中可见,熨烫处理前成型件表面存在较多的凸起物,而熨烫处理后成型件表面的凸起物得到有效去除,“缺陷”基本消失;从Area3中可见,熨烫处理后成型件表面的高光反射区域增加,光泽度有效提升,成型件表面的颜色显得更加明亮、鲜艳。以上对比结论进一步检验了上述的测试结果,验证了熨烫处理可以有效改善FDM成型件的表面特性,因此该处理方法具有较高的应用推广价值。

4 结论

(1)通过FDM 3D打印机的挤出头对成型件表面进行熨烫处理,对熨烫处理前后的FDM成型件进行了表面特性测试,结果如下:①熨烫处理后FDM成型件的 R_a 和 R_z 平均值分别降低了46.18%和37.36%;②熨烫处理后FDM成型件在 20° 、 60° 、 85° 入射角下的光泽度平均值分别提高了45.65%、31.63%、20.34%;③熨烫处理后FDM成型件的色相 H 基本保持不变,明度 L^* 、彩度 C^* 平均值分别增加了7.25%和6.14%。

(2)对比工业显微镜拍摄的细节放大图可见,熨烫处理后FDM成型件的表面纹理更加细密,质感更显光滑,其表面的凸起物得到有效去除,“缺陷”基本消失,光泽度有所提升,颜色显得更加明亮、鲜艳。

参考文献

- [1] 于彦东,孟陈力.基于PLA丝材的FDM试件综合性能的研究[J].哈尔滨理工大学学报,2018,23(3):60-65.
YU Yandong, MENG Chenli. Research on the comprehensive properties of FDM specimens based on PLA filament[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018, 23(3):60-65.
- [2] 于小健,吴连生,赵凯,等.3D打印熔丝温度对PLA断面形貌和力学性能的影响[J].塑料工业,2021,49(12):67-71,159.
YU Xiaojian, WU Liansheng, ZHAO Kai, et al. Effect of 3D printing fusing temperature on fracture surface morphology and mechanical properties of PLA[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(12):67-71, 159.
- [3] 姜世杰, YANNICK Siyajeu, 史银芳, 等.振动利用对FDM薄板动力学性能的影响研究[J].振动与冲击, 2019, 38(16):1-6.
JIANG Shijie, YANNICK Siyajeu, SHI Yinfang, et al. Experimental investigation on the effect of utilizing vibration on the dynamic property of FDM plates[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(16):1-6.
- [4] 张春蕊, 鞠锦勇.不同填充率下FDM 3D打印预制件建模及力学性能分析[J].中国塑料, 2020, 34(6):66-72.
ZHANG Chunrui, JU Jinyong. Modeling and mechanical performance analysis of FDM 3D printed preforms with different filling rates[J]. China Plastics, 2020, 34(6):66-72.
- [5] 王战辉, 曹保卫.聚四氟乙烯涂层对304钢材表面特性的影响分析[J].塑料工业, 2019, 47(9):160-163.
WANG Zhanhui, CAO Baowei. Study on the influence of polytetrafluoroethylene coating on 304 steel surface characteristic[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(9):160-163.
- [6] 李彬, 陆恒, 顾海, 等.熔融沉积成型工艺参数及数控加工后处理对表面精度的影响[J].机床与液压, 2020, 48(9):79-82.
LI Bin, LU Heng, GU Hai, et al. Influence of process parameters of fused deposition modeling and NC machining post-processing on surface accuracy[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(9):79-82.
- [7] 刘梦梦, 朱晓冬, 陶毓博, 等.熔融沉积3D打印工艺在花瓶设计中的应用研究[J].家具与室内装饰, 2020(12):17-19.
LIU Mengmeng, ZHU Xiaodong, TAO Yubo, et al. Application research of fused deposition 3D printing process in vase design[J]. Furniture & Interior Design, 2020(12):17-19.
- [8] 李圆圆, 王远.基于熔融沉积技术的3D打印产品设计探讨[J].工业设计, 2020(3):157-158.
LI Yuanyuan, WANG Yuan. Discussion of 3D printing product design based on fused deposition technology[J]. Industrial Design, 2020(3):157-158.
- [9] 冯丹艳.基于FDM技术3D打印典型零件的力学性能和质量研究[J].装备制造技术, 2022(2):50-52, 56.
FENG Danyan. Research on mechanical properties and quality of typical parts based on FDM technology 3D printing[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022(2):50-52, 56.
- [10] 王林.填充路径对FDM制造ABS力学性能的影响[J].塑料, 2022, 51(5):108-113.
WANG Lin. Effect of raster angle on the mechanical properties of FDM fabricated ABS[J]. Plastics, 2022, 51(5):108-113.
- [11] 付建军.ABS塑料的3D打印工艺优化研究[J].合成材料老化与应用, 2021, 50(3):40-42.
FU Jianjun. Study on 3D printing process optimization of ABS plastics[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2021, 50(3):40-42.
- [12] 刘德喜, 李鹏, 陶毓博.3D打印木塑填充结构的平压性能比较[J].木材工业, 2019, 33(5):39-43.
LIU Dexi, LI Peng, TAO Yubo. Flatwise compression properties of 3D-printed infill patterns of wood plastic composites[J]. Wood Industry, 2019, 33(5):39-43.
- [13] 喻红, 杨孟茹, 吴悠, 等.3D打印参数对制品层间黏结性能的影响[J].中国塑料, 2018, 32(6):92-97.
YU Hong, YANG Mengru, WU You, et al. Effect of 3D printing parameters on interlayer adhesive properties of printed parts[J]. China Plastics, 2018, 32(6):92-97.
- [14] 叶旋, 涂华锦.3D打印用ABS研究进展[J].中国塑料, 2019, 33(12):101-108.
YE Xuan, TU Huajin. Research progress in ABS materials for 3D printing[J]. China Plastics, 2019, 33(12):101-108.
- [15] 王琛, 蒋旻翰.丙酮浸泡处理对3D打印ABS成型件表面质量及光泽度影响[J].工程塑料应用, 2022, 50(6):88-91, 98.
WANG Chen, JIANG Minhan. Influence of acetone soaking treatment on surface quality and gloss of 3D printed ABS molded parts[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6):88-91, 98.
- [16] 唐鹿, 薛飞, 李旺.熔融沉积成型3D打印ABS材料的改性与应用研究[J].化工新型材料, 2017, 45(12):13-15, 20.
TANG Lu, XUE Fei, LI Wang. Study on the modification and application of fused deposition molding 3D printing ABS material[J]. New Chemical Materials, 2017, 45(12):13-15, 20.