

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.03.015

局部增强切片对 3D 打印 FDM 模型弯曲强度的影响

王琛, 蒋旻翰, 张晨赟, 夏凌然, 丁可青

(南京林业大学, 家居与工业设计学院, 南京 210037)

摘要: 为了提高熔融沉积(FDM)3D 打印模型的弯曲强度和比强度,通过 Cura 软件局部增强切片功能对聚乳酸(PLA)试样的中心区域进行了加强,使用 FDM 工艺制作了 8 组试样(包含 0[#]参考组和 1[#]~7[#]增强组),对各组试样进行三点弯曲实验,对比不同增强切片参数下 PLA 试样的弯曲强度和比强度。结果表明,随着局部增强填充密度的增大,PLA 试样的弯曲强度先增大后减小;随着局部增强填充走线乘数的增大,PLA 试样的弯曲强度逐渐增大;随着局部增强挤出倍率的增大,PLA 试样的弯曲强度逐渐增大;与 0[#]参考组相比,局部增强填充密度 60%、局部增强填充走线乘数 3、局部增强挤出倍率 120% 三种方式下 PLA 试样的比强度分别提高了 16%、13% 和 5%,通过局部增强填充密度方式产生的比强度提升效果最好。因此,对于常规切片参数为填充密度 20%、填充走线乘数 1、挤出倍率 100% 的 FDM 模型,将局部增强区域填充密度设置为 60% 可以有效提高其弯曲强度和比强度。

关键词: 局部增强切片; 熔融沉积模型; 弯曲强度

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)03-0091-06

Effect of local enhanced slicing on the bending strength of 3D printed FDM models

WANG Chen, JIANG Minhan, ZHANG Chenyun, XIA Lingran, DING Keqing

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

Abstract : In order to improve the bending strength and specific strength of fused deposition (FDM) 3D printed models, the central area of polylactic acid (PLA) specimens through the local enhancement slicing function of the Cura software was reinforced, and 8 groups of specimens (including 0[#] reference group and 1[#]-7[#] enhanced group) were fabricated using the FDM process, and three-point bending experiments were carried out on the groups of specimens to compare the bending strength and specific strength of the PLA specimens under different enhancement slicing parameters. The results show that when the bending strength of PLA specimens increases and then decreases with the increase of local enhanced filling density; the bending strength of PLA specimens increases gradually with the increase of local enhanced filling alignment multiplier; the bending strength of PLA specimens increases gradually with the increase of local enhanced extrusion rate; the specific strengths of PLA specimens in the three modes of local enhanced filling density of 60%, local enhanced filling alignment multiplier of 3, and local enhanced extrusion rate of 120% are increased by 16%, 13%, and 5%, respectively, compared to that in the reference group of 0[#], and the specific strengths increases in the modes of local enhanced filling density have been increased the most effectively. Therefore, for the FDM model with conventional slicing parameters of 20% filling density, 1 filling alignment multiplier, and 100% extrusion rate, setting the filling density of locally enhanced areas to 60% can effectively improve its bending strength and specific strength.

Keywords : local enhanced slicing ; fused deposition model ; bending strength

随着 3D 打印技术的发展,通过熔融沉积(FDM) 3D 打印制造的模型已经不局限于手板样件,越来越多地参与机构运动并承载的结构件通过 FDM 工艺

制造成型,这对 FDM 模型的力学性能提出了更高的要求^[1]。近年来,许多文献对 FDM 模型力学性能的提高方法进行了探究。姜世杰等^[2]将机械振动引入

基金项目: 教育部产学研协同育人项目(230804583152401)

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

收稿日期: 2024-01-19

引用格式: 王琛,蒋旻翰,张晨赟,等.局部增强切片对 3D 打印 FDM 模型弯曲强度的影响[J].工程塑料应用,2024,52(3):91-96.

WANG Chen, JIANG Minhan, ZHANG Chenyun, et al. Effect of local enhanced slicing on the bending strength of 3D printed FDM models [J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(3): 91-96.

FDM过程,完成了振动式FDM打印机的改装,结果表明,利用振动能够显著提高FDM薄板的正交各向异性,以及拉伸强度、稳定性等指标;唐鹿等^[3]阐述了FDM成型3D打印丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)材料的改性方法,对改性后的ABS材料力学性能进行了测试,测试结果验证了改性对ABS材料强度和韧性的增强作用;于彦东等^[4]分析了3D打印工艺参数中层高、填充路径和填充密度对FDM制件力学性能的影响,通过对数据的相关性处理与误差分析,得出了在不同需求下的各参数的匹配值。相关研究表明,对于FDM工艺,提高其3D打印模型力学性能的方法主要包括:改进打印设备、提升材料性能和优化工艺参数。

切片处理是通过软件把三维数模按特定参数转换为加工代码的过程,也是FDM成型3D打印工艺流程中的关键环节之一^[5-6]。局部增强切片是对模型局部区域通过改变参数设置的方式实现结构增强的效果,适用于模型加载条件已知,且局部载荷过量的情况。笔者以三点弯曲加载条件为例,通过Cura软件局部增强切片功能对PLA试样的中心区域进行了强化,使用FDM工艺制作了8组试样(包含0#参考组和1#~7#增强组),对比不同增强切片参数下PLA试样的弯曲强度和比强度。总结出既可提高弯曲强度,又可提高比强度的局部增强切片参数,为将局部增强切片功能应用于FDM模型的结构加强与轻量化设计提供参考。

1 局部增强切片原理与步骤

1.1 局部增强切片原理

常规切片处理是对FDM模型进行全局无差别切片,即同一切片模型中任意区域的填充密度、填充走线乘数和挤出倍率等参数均保持一致(如图1a所示)。随着切片软件功能的更新,局部增强切片可以对切片模型中的特定区域(例如中心区域)进行单独增强(如图1b所示),通过改变该区域的切片参数,可实现模型局部和整体结构的加强,从而避免了其因局部应力过大而破坏的情况^[7]。

以三点弯曲FDM模型为例,根据仿真应力云图如图2所示。由图2可知,FDM模型的顶面中线处承受载荷并使整体结构发生弯曲变形,其弯曲区域的内侧材料沿切线方向受到压缩,外侧材料沿切线方向受到拉伸,而压缩和拉伸的程度都是表层中心区域最大^[8]。进一步分析FDM模型应力云图的俯

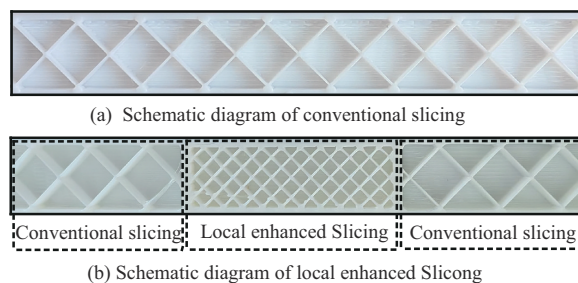


图1 常规切片与局部增强切片对比图

Fig. 1 Comparison between conventional slicing and local enhanced slicing

视图,发现其中心区域(约占模型体积的40%)的应力值明显高于其他区域。因此,FDM模型的中心区域为三点弯曲工况下的薄弱部分^[9]。选择对该区域进行局部增强切片处理,根据局部增强切片原理,通过改变区域中的部分切片参数(如填充密度、填充走线乘数和挤出倍率等),可实现FDM模型局部和整体结构的加强,从而有效提高FDM模型的弯曲强度^[10]。



图2 FDM模型三点弯曲应力云图

Fig. 2 Three point bending stress cloud diagram of FDM model

1.2 局部增强切片步骤

以三点弯曲FDM模型为例,总结局部增强切片步骤如下:(1)将由Solidworks软件设计的FDM模型导入Cura软件中,居中摆放;(2)在FDM模型的表面点击添加“切片拦截器”,其形状设置为长方体;(3)通过移动位置/缩放坐标轴或手动输入参数的方式调整“切片拦截器”的位置和大小,使“切片拦截器”的质心点、横截面轮廓线分别和FDM模型的质心点、横截面轮廓线重合,设置“切片拦截器”的空间尺寸为FDM模型空间尺寸的40%;(4)对“切片拦截器”中的切片参数进行设置;(5)对“切片拦截器”两侧常规区域的切片参数进行设置;(6)将切片完成的FDM模型保存为G-code加工代码,载入3D打印机中进行增材制造,局部增强切片的具体流程如图3所示。

2 实验部分

2.1 主要原材料

3D打印丝:PLA丝材(直径1.75 mm,白色),东

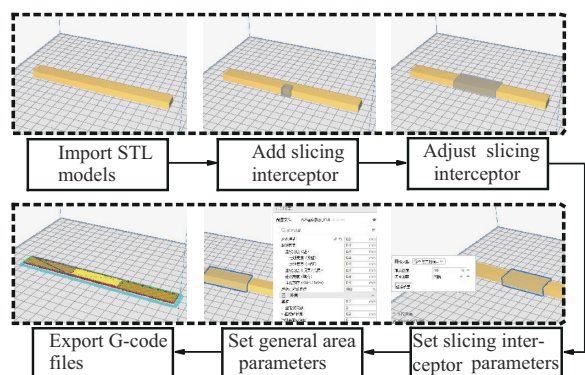


图3 局部增强切片流程图

Fig. 3 Flow chart of local enhanced slicing

莞以祥塑料科技有限公司。

2.2 仪器及设备

万能力学试验机:AG-X(20 kN),日本岛津株式会社;

3D打印机:哈辰P-200,南京双庚电子科技有限公司;

电子天平:BSA-224S,德国赛多利斯集团;

工业齐焦显微镜:CL-MA-48M,广州科乐默光学仪器有限公司。

2.3 试样制备

按照GB/T 9341-2008的试样尺寸(长160 mm、宽15 mm、高8 mm),选用PLA丝材,通过3D打印机制作8组PLA试样,其中0#参考组没有进行局部增强处理,其整体切片参数为:填充密度20%、填充走线乘数1、挤出倍率100%;1#~7#增强组均对PLA试样的中心区域(如图1b所示)进行了局部增强处理,局部增强切片参数见表1。相对于参考组,1#~3#增强组的局部增强变量为填充密度,4#~5#增强组的局部增强变量为填充走线乘数,6#~7#增强组的局部增强变量为挤出倍率。1#~7#增强组中除中心区域外的常规区域切片参数均为:填充密度20%、填充走线乘数1、挤出倍率100%。此外,由于多变量联合

表1 局部增强切片参数设置表

Tab. 1 Local enhanced slicing parameter setting table

Samples	$\rho/\%$	W	$R/\%$
1#	40	1	100
2#	60	1	100
3#	80	1	100
4#	20	2	100
5#	20	3	100
6#	20	1	110
7#	20	1	120

Note: ρ is filling density, W is filling alignment multiplier, R is extrusion rate.

增强会使熔融丝材挤出过量并重复堆叠,导致模型打废,故笔者仅对单变量增强情况下试样的弯曲强度和比强度进行分析。

2.4 性能测试

按照GB/T 9341-2008规定的实验方法,在室温(20℃)下使用万能力学试验机对8组PLA试样进行三点弯曲强度测试,实验跨距为140 mm,加载速度为2 mm/min。

3 结果与讨论

3.1 局部增强填充密度对弯曲强度的影响

填充密度即填充结构在模型内部空间中的占比。对0#参考组和1#~3#增强组的弯曲强度进行测试,测试得到的载荷-挠度曲线和弯曲强度对比如图4~图5所示。由图4~图5可见,当局部增强区域的填充密度为40%~60%时,随着填充密度的增大,PLA试样的弯曲强度增大,弯曲破坏处始于中性面以下的受拉区域,破坏形式为韧性断裂。由于PLA试样在弯曲时,其底面中线附近产生的弯曲正应力最大,弯曲正应力克服丝材纤维分子链间的结合键能,造成了丝材纤维的断裂,其裂纹从底面中心线处逐渐向上延伸,并随着损伤的累积最终导致试样的断裂^[1]。而当填充密度增大时,在弯曲正应力作

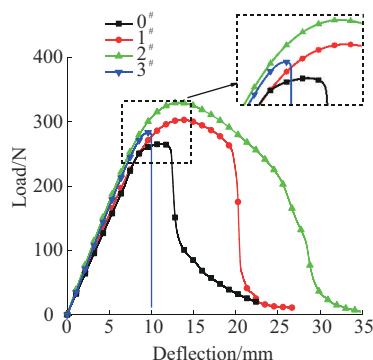


图4 载荷—挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curve

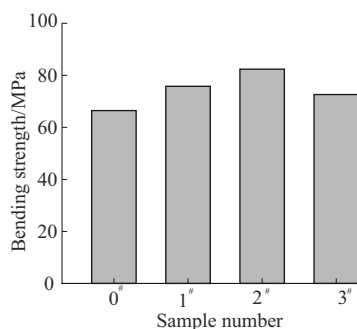


图5 弯曲强度对比图

Fig. 5 Comparison of bending strength

用方向上丝材纤维的数量和黏结面积有所增加,导致丝材纤维分子链断裂所需的破坏应力增大,也就是宏观上的弯曲破坏载荷增大,因此PLA试样的弯曲强度增大^[12]。

当局部增强区域的填充密度为80%时,PLA试样的弯曲强度反而减小。这是因为随着局部增强区域填充密度的增加,该区域抵抗弯曲破坏的能力增强,试样的破坏位置由底面中线转移到了常规切片区域与增强切片区域的结合边界,破坏形式为脆性断裂。图6为区域边界放大图。从图6可见,常规切片区域与增强切片区域的结合边界是由多片与试样横截面平行的薄壳体组成,而多片薄壳体的黏合界面存在一些孔隙和细缝。在弯曲剪力的作用下,孔隙和细缝处产生了应力集中,首先达到断裂破坏极限,从而引起PLA试样的宏观断裂,导致其弯曲强度下降^[13]。综上分析,随着局部增强填充密度的增大,PLA试样的弯曲强度先增大后减小。

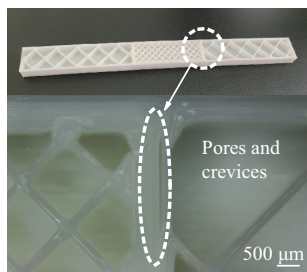


图6 区域边界放大图

Fig. 6 Enlarged view of regional boundary

3.2 局部增强填充走线乘数对弯曲强度的影响

填充走线乘数即打印同一填充图案时挤出头的重复走线次数。对0#参考组和4#~5#增强组的弯曲强度进行测试,测试得到的载荷-挠度曲线和弯曲强度对比如图7~图8所示。从图7~图8可见,随着局部增强区域填充走线乘数的增大,PLA试样的弯曲强度增大,弯曲破坏形式为韧性断裂。通常情况下,当挤出头打印同一填充图案时,其一次走线可形成单片薄壁状填充结构,而多次走线可形成多片并排连接的薄壁状填充结构,从而有效增加了整体填充结构的厚度^[14]。随着填充结构厚度的增加,局部增强区域单位面积上分布的弯曲正应力和切应力减小,PLA试样抵抗弯曲破坏的能力增强。综上分析,随着局部增强填充走线乘数的增大,PLA试样的弯曲强度逐渐增大。

3.3 局部增强挤出倍率对弯曲强度的影响

挤出倍率即打印过程中熔融丝材的实际挤出

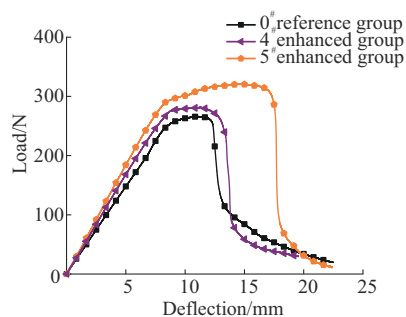


图7 载荷-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curve

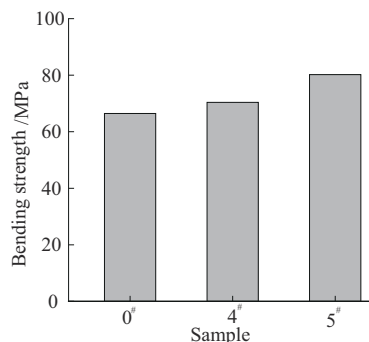


图8 弯曲强度对比图

Fig. 8 Comparison of bending strength

量。对参考组和增强组6#~7#的弯曲强度进行测试,测试得到的载荷-挠度曲线和弯曲强度对比如图9~图10所示。由图9~图10可见,随着局部增强区域挤出倍率的增大,PLA试样的弯曲强度增大,弯曲破坏形式为韧性断裂。由于熔融丝材的实际挤出量随着挤出倍率的增大而增大,当层高保持不变时,在打印头竖向(Z轴方向)挤压力的作用下,增量熔融状丝材在层间黏合界面处被充分挤压,既增加了相邻丝材间接触面的结合面积,又促进了聚合物分子间的浸润与扩散,从而有效提高了填充结构的层间黏合强度^[15]。而随着层间黏合强度的增加,PLA试样抵抗弯曲破坏的能力增强。综上分析,随着局部增强挤出倍率的增大,PLA试样的弯曲强度逐渐增大。

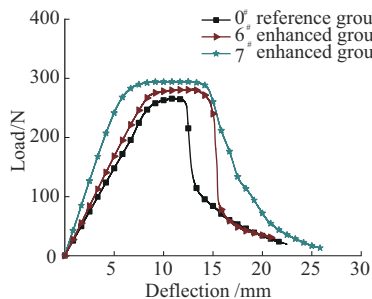


图9 载荷-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curve

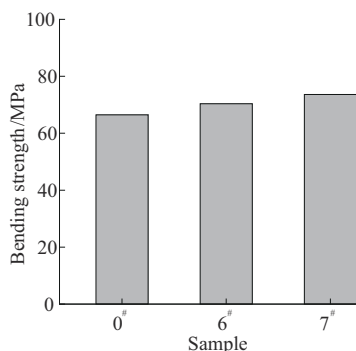


图10 弯曲强度对比

Fig. 10 Comparison of bending strength

3.4 局部增强切片对FDM模型比强度的影响

为了在提高FDM模型弯曲强度的同时,进一步减少材料的消耗,引入比强度指标。比强度是按单位质量计算的材料强度,其值等于材料的弯曲强度与其表观密度之比,比强度越高表明达到相应强度所用的材料质量越轻^[16]。使用电子天平对8组PLA试样进行称重并计算比强度,由于PLA试样在打印时不产生支撑结构,没有材料的浪费,其质量可以准确反映材料的消耗。图11是材料消耗及比强度对比图。从图11可见,0#参考组的材料消耗为12.73 g;而随着局部增强填充密度、填充走线乘数和挤出倍率的增大,PLA试样的材料消耗随之增大,其中3#增强组(局部增强填充密度80%)的材料消耗最大,其值为14.13 g;7#增强组(局部增强挤出倍率110%)的材料消耗最小,其值为13.07 g。

对比各组PLA试样的比强度结果可知,0#参考组的比强度值为 $0.100 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{kg}$;1#~3#增强组中,2#增强组(局部增强填充密度60%)的比强度最大,其值为 $0.116 (\text{N} \cdot \text{m}) / \text{kg}$,相对于0#参考组比强度提高了16%;4#~5#增强组中,5#增强组(局部增强填充走线乘数3)的比强度最大,其值为 $0.113 (\text{N} \cdot \text{m}) / \text{kg}$,相对于0#参考组比强度提高了13%;6#~7#增强组中,7#增强组(局部增强挤出倍率120%)的比强度最大,其值为 $0.105 (\text{N} \cdot \text{m}) / \text{kg}$,相对于0#参考组比强度提高了5%。综上分析,通过局部增强填充密度的方式产生的比强度提升效果最好。因此,对于常规切片区域填充密度20%、填充走线乘数1、挤出倍率100%的FDM模型,将局部增强区域切片参数设置为填充密度60%可以有效提高其弯曲强度和比强度。

4 结论

(1)为了提高FDM模型的弯曲强度和比强度,应用Cura软件局部增强切片功能对PLA试样的中

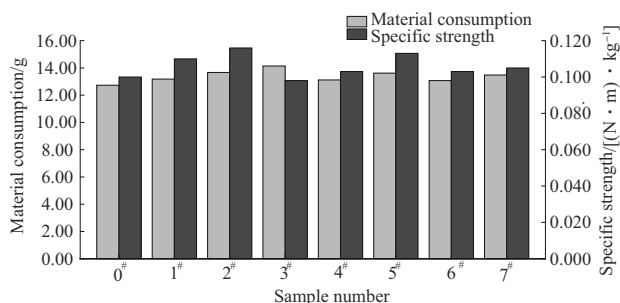


图11 材料消耗及比强度对比图

Fig. 11 Comparison of material consumption and specific strength

心区域进行了加强,通过三点弯曲实验对比不同增强切片参数下PLA试样的弯曲强度,结果表明,随着局部增强填充密度的增大,PLA试样的弯曲强度先增大后减小;随着局部增强填充走线乘数的增大,PLA试样的弯曲强度逐渐增大;随着局部增强挤出倍率的增大,PLA试样的弯曲强度逐渐增大。

(2)对比不同增强切片参数下PLA试样的比强度可知:与参考组相比,局部增强填充密度60%、局部增强填充走线乘数3、局部增强挤出倍率120%三种方式下PLA试样的比强度分别提高了16%、13%和5%,通过局部增强填充密度的方式产生的比强度提升效果最好。因此,对于常规切片参数为填充密度20%、填充走线乘数1、挤出倍率100%的FDM模型,将局部增强区域填充密度设置为60%可以有效提高其弯曲强度和比强度。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 姜世杰, YANNICK S, 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 S, 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 曹师增, 宋发成, 刘元义, 等. 基于FDM的3D打印翘曲变形优化研究[J]. 塑料工业, 2017, 45(10):51–54.
- CAO Shizeng, SONG Facheng, LIU Yuanyi, et al. Research on optimization of warpage deformation of 3D printing based on FDM [J]. China Plastics Industry, 2017, 45(10):51–54.
- [7] 徐良文, 吴章平, 陈守军, 等. FDM工艺参数对PLA试件力学性能的影响[J]. 塑料工业, 2020, 48 (10):92–96.
- XU Liangwen, WU Zhangping, CHEN Shoujun, et al. Effects of FDM 3D printing parameters on tensile properties of polylactic acid [J]. China Plastics Industry, 2020, 48(10):92–96.
- [8] 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.
- [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] 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.
- [13] 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.
- [14] 王铎, 沈振辉, 杨拴强. 外力压缩作用下FDM构件力学性能影响因素分析[J]. 武夷学院学报, 2021, 40(12):57–63.
- WANG Duo, SHEN Zhenhui, YANG Shuanqiang. Analysis of factors influencing mechanical properties of FDM members under external compression[J]. Journal of Wuyi University, 2021, 40 (12):57–63.
- [15] 李阳, 王海涛, 张云. PC/ABS在高应变率下的压缩大变形[J]. 精密成形工程, 2017, 9(3):25–29.
- LI Yang, WANG Haitao, ZHANG Yun. Compressive large deformation of PC/ABS at high strain rates[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(3):25–29.
- [16] 于小健, 钱善华, 董淑宏, 等. 3D打印速度对PLA制件表面质量和力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6):61–66.
- YU Xiaojian, QIAN Shanhua, DONG Shuhong, et al. Effect of 3D printing speed on the surface quality and mechanical properties of PLA parts[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50 (6):61–66.