

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.12.013

3D 打印技术在复杂曲面塑料产品设计与制造中的应用

王春香,尹金林,潘杍成,钱亮,王齐超

(内蒙古科技大学机械工程学院,内蒙古包头 014010)

摘要:针对具有复杂曲面的按摩器塑料产品,借助 3D 打印技术,实现了塑料产品快速设计与制造,总结了对于具有复杂曲面按摩器塑料产品 3D 打印过程中的技术要点。首先,利用激光扫描仪,结合 Geomagic Wrap 软件完成实体点云数据的采集,以及模型数据的预处理。其次,借助 Geomagic Design X 软件,通过三维曲面拟合的方法来实现按摩器模型的重构,将重构的实体模型与采集处理后的点云数据进行误差对比,验证了该模型重构方法的可行性。最后通过对目前常用的 3D 打印成型工艺进行分析,选用熔融沉积成型工艺的 3D 打印机,从 3 个不同成型方向进行产品试制。结果表明,模型曲面脊线与成型平台呈 45° 时,打印时间、耗材量、支撑结构较少,成型产品效果较好。

关键词: 3D 打印; 熔融沉积成型; 复杂曲面; 模型重构; 塑料产品

中图分类号: TP391, TQ325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)12-0072-05

Application of 3D Printing Technology in Design and Manufacture of Complex Curved Plastic Products

Wang Chunxiang, Yin Jinlin, Pan Yicheng, Qian Liang, Wang Qichao

(School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract : Aiming at massagers plastic products with complex curved surfaces, with the help of 3D printing technology, the rapid design and manufacturing of plastic products were realized, and the technical points of the 3D printing process for massagers plastic products with complex curved surfaces were summarized. First, a laser scanner and Geomagic Wrap software were used to complete the collection of physical point cloud data and the preprocessing of model data. Secondly, with the help of Geomagic Design X software, the reconstruction of the massager model was realized by the method of three-dimensional surface fitting, and the error of the reconstructed solid model was compared with the point cloud data collected and processed, and the feasibility of model reconstruction method was verified. Finally, through the analysis of the currently commonly used 3D printing process, the 3D printer of the fused deposition modeling process was selected, and the products were trial-produced from 3 different molding directions. The results show that when the ridge of model curved surface is 45° to the molding platform, the printing time, the amount of consumables and the supporting structure are less, and the effect of molding plastic product is better.

Keywords : 3D printing ; fused deposition modeling ; complex curved surface ; model reconstruction ; plastic product

近年来,3D 打印技术得到快速发展,在航天、机械、医疗、文物保护与修复等领域得到广泛应用^[1-2],在传统塑料产品生产中,往往需要通过注塑成型工艺来实现,但其成型工艺较为复杂且成本过高。尤其对型面比较复杂的产品,其设计过程需要优化各种参数以达到满意的设计效果。随着计算机技术的不断进步,逆向工程技术得到相应发展,其中,3D 打印技术借助计算机辅助系统,通过数字化模拟,可

以达到产品参数的优化,为一些几何曲面复杂的产品提供了新的生产工艺方式,同时降低了产品的工艺成本,尤其在塑料产品的设计与制造中得到广泛应用^[3]。

笔者以具有复杂曲面的按摩器为研究对象,其模型如图 1 所示,通过数据采集、数据处理、逆向重构到产品试制一系列流程,总结复杂曲面塑料产品在 3D 打印时各个阶段的技术要点,为 3D 打印技术

基金项目: 包头市科技计划项目(2019Z3004-6)

通信作者: 王春香,教授,硕士生导师,从事优化方法及 3D 打印技术等研究

收稿日期: 2021-09-24

引用格式: 王春香,尹金林,潘杍成,等. 3D 打印技术在复杂曲面塑料产品设计与制造中的应用[J]. 工程塑料应用,2021,49(12): 72-76,80.

Wang Chunxiang, Yin Jinlin, Pan Yicheng, et al. Application of 3D printing technology in design and manufacture of complex curved plastic products[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12): 72-76, 80.

在具有复杂曲面塑料产品的优化设计、工艺流程以及个性化定制等方面提供参考。

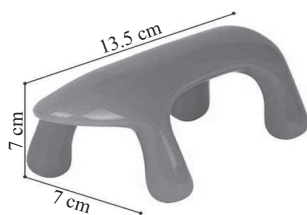


图1 按摩器实物模型

1 模型数据的采集与处理

1.1 点云数据采集

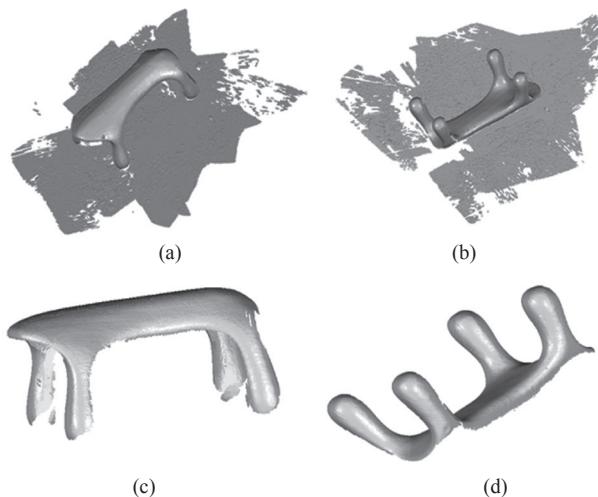
模型的数据采集是进行3D打印的首要环节,采集的数据通常是用海量的点集合来表示模型,其采集数据质量将直接影响模型重构的效率和精度^[4]。采用海克斯康8725-7型关节臂激光扫描仪结合Geomagic Wrap软件完成按摩器的点云模型数据采集。另外,采集到的点云数据中点与点之间是散乱的,需要通过联合点对象,给采集的点云数据中的点建立拓扑关系,以删除重复采集的数据,完成模型数据的采集。

1.2 数据去噪

在点云处理流程中去噪处理作为处理的第一步,对于接下来的重构模型,如果存在噪声数据点,会影响重构模型的精度,导致偏差过大,重构模型不符合产品设计要求,甚至无法重构模型^[5]。但在获取点云时,由于设备采集数据角度的限制、操作人员的人为因素和环境条件因素等带来的影响,采集的点云数据模型总会有一些噪声点。在数据采集完成后结合Geomagic Wrap软件,首先去除明显的噪声点,其次,通过删除非连接项、体外孤点的操作,删除模型表面的一些离散数据,接下来,根据模型的曲率变化,调整数据平滑度,完成去噪处理,如图2所示,第一次共采集到494 688个数据点,去噪后保留了131 942个数据点;第二次共采集到1 120 565个数据点,去噪后保留了136 064个数据点。

1.3 数据配准

在实际的数据采集过程中,由于采集设备是激光扫描仪,它是通过光线的反射来采集数据,在数据采集过程中扫描光线会受到物体遮挡而产生视觉死角,不可能通过单一角度扫描得到完整的点云模型数据^[6],因此需要采取多次测量、从不同位置和角度获得独立点云。而数据配准就是把多次采集的独立点云统一到一个坐标系下,同时删除不同方向测量

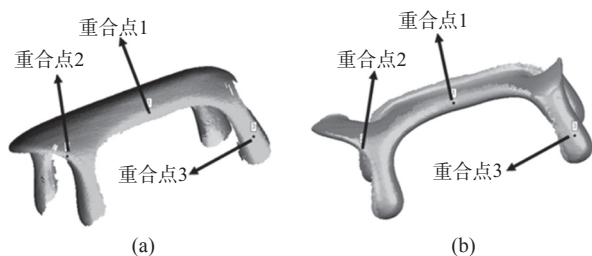


a—第一次采集数据;b—第二次采集数据;
c—第一次采集数据去噪完成;d—第二次采集数据去噪完成

图2 数据的采集与去噪

数据中相互重合的部分,使采集的点云数据成为一体,从而得到点云模型。

在配准过程中,选取第一次采集后去噪完成的数据为固定数据,第二次采集后去噪完成的数据为浮动数据,通过手动选取两次数据采集过程中重合部分的数据点,如图3所示,计算浮动数据相对于固定数据的位移旋转矩阵,实现数据的粗配准。由于该模型外表并没有明显的特征,手动选取难免存在不精确的配准,再利用Geomagic Wrap中全局注册命令,实现模型的高精度配准,通过11次迭代后,其点之间的平均距离为0.020 6 mm,配准结果如图4所示。



a—第一次采集数据重合点选取;b—第二次采集数据重合点选取

图3 采集数据重合点的选取



图4 配准结果

1.4 模型孔洞修补

孔洞修补是点云数据预处理的关键,也是难点。在数据采集过程中,受各种条件的限制,可能

会出现数据缺失等情况,导致采集的数据模型存在孔洞等,不利于模型的重构^[7]。由于采集角度以及模型表面的影响,产生的孔洞如图5所示。将模型封装为三角面片格式以减少接下来孔洞修补的数据量,通过填充孔功能实现孔洞的修补,结果如图6所示。



图5 模型中的孔洞



图6 修补后完整的模型

2 曲面模型重构过程

在按摩器模型重构过程中,由于该按摩器是一个曲面零件,并没有明确的参照基准,只能利用采集到的点云数据作为参考,拟合出模型的曲面轮廓,从而获得完整几何模型^[8]。借助提取轮廓线、3D样条曲线等工具提取出按摩器的轮廓特征曲线,根据模型轮廓曲线,使用面片拟合、构造曲面网格等工具来拟合出按摩器曲面。运用曲面边界延长、修剪、缝合等工具获得按摩器曲面体,通过对曲面体的合并得到完整的CAD几何模型。具体步骤如下:

(1) 模型轮廓提取。

将采集处理后的模型导入 Geomagic Design X 软件,根据模型的特征,将模型自动划分领域。分析该模型的几何特征,将敏感度设置为20。大致可以分为顶部的曲面主体、四条支腿的回转体以及底部的球体。根据模型表面的点利用3D样条曲线,提取出模型的轮廓,如图7所示。基于此,在接下来的模型重构中通过点云数据的曲率拟合出曲面,利用曲面拟合实体的方法可最大精度地实现模型重构。



图7 模型边界轮廓

(2) 曲面网格划分。

根据提取的模型轮廓3D样条曲线,执行“构造

曲面片网格”命令,其中采用“自动估算”方法,构造的面片网格如图8所示。尽可能把构造的网格编辑成规则四边形网格,以便其能准确表达模型曲面几何信息。但同时可能仍存在一些不完整的曲面片,使用分割命令中的“交叉点分割”以完成曲面网格的划分。



图8 四边形网格划分

(3) 模型实体拟合。

利用生成的三维曲面拓扑网格,采用非平均拟合方法分别拟合每个四边形网格,完成按摩器曲面创建,通过对曲面分割、缝合以及剪切等操作进行曲面实体拟合。通过封闭的曲面模型生成CAD实体几何模型,如图9所示。从实体等轴侧视图(图9a)和实体反面视图(图9b)观察,可知该重构模型是完整的。



a—实体等轴侧视图;b—实体反面视图

图9 CAD 实体模型

(4) 重构模型误差分析。

将按摩器实体几何模型和采集处理后的原始点云数据进行3D偏差分析,许可公差设置为 ± 0.15 mm。该逆向设计的按摩器误差分析结果如图10所示,可以看出,重构模型误差在 $-0.1 \sim 0.1$ mm之间,模型达到预期重构效果。



图10 重构模型误差分析

3 实物的成型

3D打印技术也叫快速成型技术,是一种以三维数字化模型为基础,通过材料的逐层叠加得到三维实体模型的制造方法。对于目前常见的不同的

3D 打印方法^[9-10],按照成型工艺的不同可以分为熔融沉积成型(FDM)、光固化成型(SLA)、选区激光烧结(SLS)、分层实体制造(LOM)及三维印刷成型(3DP),其优缺点见表1。

表1 常见3D打印成型工艺的优缺点

成型工艺	优点	缺点
FDM	操作简单,节约材料,成本低	不利于打印大型产品,成型过程需要支撑
SLA	成型精度高,无需支撑	成型材料单一,成型模型不易保存
SLS	成型材料选择广,材料利用率高	打印精度低,容易造成污染
LOM	成型时间短,可用于较大成型模型	阶梯效应明显,表面粗糙度低
3DP	成型速度快,成型材料广泛	粘结强度低

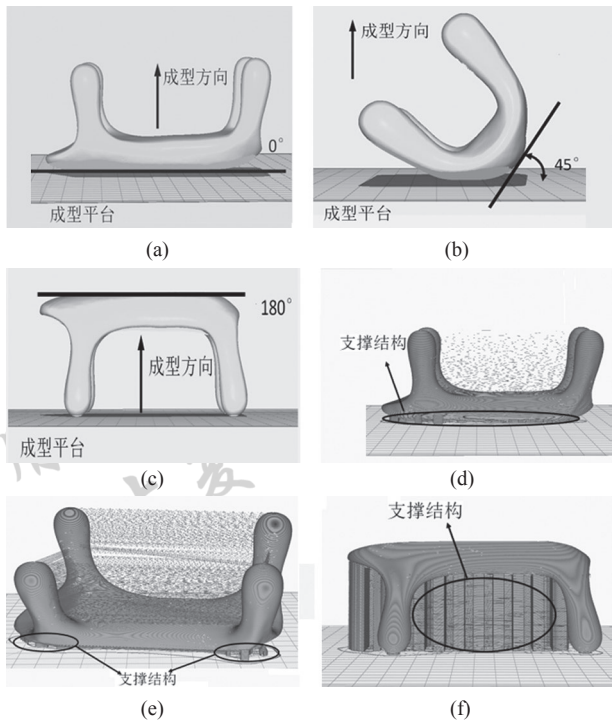
通过对3D打印不同成型工艺优缺点分析,实验中按摩器选用FDM式3D打印机打印成型,设备为厦门光服科技公司的E-one型3D打印机,材料为深圳光华伟业公司生产的聚乳酸(PLA),该材料具有较小的收缩率,在成型过程中不易产生变形,同时具有良好的生物可降解性和相容性^[11-12]。将上述重构的模型导入配套的切片软件中,设置填充层高、填充率、填充图案、支撑角度、支撑图案、打印温度、成型平台温度、打印速度等主要参数,其中对表面成型质量影响较大的参数是层高,会影响到模型的力学性能^[13],其主要参数见表2。

表2 3D打印主要参数设置

填充层高/mm	填充率/%	填充图案	支撑角度/(°)	支撑图案	打印温度/℃	成型平台温度/℃	打印速度/(mm·s ⁻¹)
0.1	15	立方体	70	锯齿形	200	60	60

将模型切片后的数据导入打印机控制系统中,加热块把丝材加热为熔融状态后,通过送丝机构以一定压力将材料从喷头挤出,喷头与成型平台在x-y平面相互配合移动,按照模型截面轮廓进行材料填充,完成一层后,喷嘴沿z轴提升一定高度(即填充层高)逐层叠加成型,从而完成按摩器的打印。但由于该模型几何面较为复杂,在成型过程中存在悬空部分,必须通过添加支撑结构的方法才能保证顺利成型。但支撑会影响模型表面质量并造成材料浪费^[14],另外,在打印完成后要去除支撑,也增加了模型后处理的难度,因此,为尽量减少支撑结构对成型表面质量的影响,在进行分层处理前,根据模型不同的摆放姿态,在实际打印过程中会有不同的截面轮廓,也就会有不同的成型方向^[15]。通过旋转、平移模型选择合适的成型方向,进而减少模型的支撑,以缩短成型时间以及提高成型效果。通过对模型不同

成型方向探究,根据模型的实际情况,把该按摩器模型的成型方向分为3种,以模型曲面脊线为基准,基准与成型平台分别呈0°,45°,180°为成型方向(分别简称为0°,45°,180°成型方向),如图11a~图11c所示。分别从不同成型方向打印,其成型效果如图11d~图11f所示,三种不同成型方向的成型时间及耗材量见表3。



a—0°成型方向;b—45°成型方向;c—180°成型方向;
d—0°成型方向效果图;e—45°成型方向效果图;
f—180°成型方向效果图

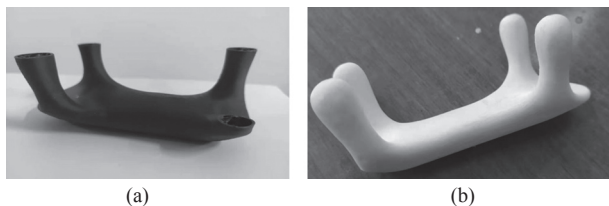
图11 三种不同成型方向及其成型效果图

表3 三种不同成型方向的成型时间及耗材量

项目	0°成型方向	45°成型方向	180°成型方向
成型时间/min	313	331	433
耗材量/g	66	68	95

选择180°成型方向时,耗时长、耗材多,同时在实际打印过程中,由于该成型方向的打印起始层与成型平台接触较少,再加上喷嘴在吐丝粘结时,有一定的摩擦力,会带动已经成型的模型移动,不能完成打印。选择0°成型方向时,成型时间和耗材最少,但由于该模型背面是弧形,该成型方向与成型平台接触面较小,在实际成型过程中,模型会出现偏移,可能导致打印失败。同时平行于该成型方向成型的截面在打印完成后受力较小^[16],且以该成型方向打印的支腿部分层与层之间粘结面积也较小,该按摩器在实际使用过程中,一旦出现0°方向的力,就容易发生断裂,如图12a所示。根据成型时间以及实

际成型效果,最终选择 45° 成型方向,可成功打印出该按摩器产品,经过后处理的产品如图 12b 所示。



a— 0° 成型方向; b— 45° 成型方向

图 12 不同成型方向打印的实物模型

4 结论

综合运用 3D 打印技术,通过模型数据的采集与处理、模型重构以及打印实体模型,实现了具有复杂曲面塑料产品的快速设计与制造。在模型数据采集与处理过程中,由于按摩器模型表面没有明显特征,需要在粗配准的情况下,通过全局注册实现模型的高精度配准。对于扫描中缺失的数据通过计算机处理得到完整的数据模型,保证了重构模型的完整性。在模型重构过程中,针对曲面模型,通过曲面拟合的方法创建曲面实体,减少了传统模型重构方法中的布尔运算,最大限度地重构其原本曲面几何特征。在模型成型过程中,通过 FDM 工艺,从不同的成型方向对模型进行实体打印。结果表明,以 45° 成型方向打印出的产品较好。该按摩器的成功打印可为具有较复杂曲面产品的打印提供参考。

参考文献

- [1] 阳范文,陈海莲,宋佳奇,等. PBAT 基 3D 打印材料制备及其在上肢固定器中应用[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(8):25-30.
Yang Fanwen, Chen Hailian, Song Jiaqi, et al. Preparation of 3D printing material based on PBAT and its application in upper limb fixator[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(8):25-30.
- [2] 史玉升. 3D 打印技术的工业应用及产业化发展[J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(2):11-16.
Shi Yusheng. The industrial application and industrialization development of 3D printing technology[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(2):11-16.
- [3] 朱小明,韩伟,刘楚生,等. 基于逆向工程和 3D 打印的鞋子个性化设计制作[J]. 塑料科技, 2019, 47(12):89-92.
Zhu Xiaoming, Han Wei, Liu Chusheng, et al. Personalized design and manufacture of shoes based on reverse engineering and 3D printing[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(12):89-92.
- [4] 吴阳,冯兰芳,郑金锋,等. 逆向工程中影响扫描点云精度的因素分析及解决方法[J]. 制造业自动化, 2017, 39(2):40-43.
Wu Yang, Feng Lanfang, Zheng Jinfeng, et al. The analysis and solution of influence factors for the precision of point cloud in reverse engineering[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(2):40-43.
- [5] 房海蓉,师世健,杨奕. 大型椭球类复杂曲面仿形加工点云数据去噪光顺算法[J]. 现代制造工程, 2020(9):76-80.
Fang Hairong, Shi Shijian, Yang Yi. Denoising and smoothing algorithm of point cloud data for profiling of large ellipsoid complex curved surface[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(9):76-80.
- [6] 姚明镜,唐璇,张春良,等. 基于逆向工程和 FDM 技术的塑料产品设计与应用[J]. 塑料科技, 2020, 48(12):45-48.
Yao Mingjing, Tang Xuan, Zhang Chunliang, et al. Design and application of plastic products based on reverse engineering and FDM technology[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(12):45-48.
- [7] 杨永强,李淑红. 最小二乘支持向量机的点云数据孔洞修补算法[J]. 吉林大学学报:理学版, 2018, 56(3):692-696.
Yang Yongqiang, Li Shuhong. Hole repairing algorithm for point cloud data based on least square support vector machine[J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2018, 56(3):692-696.
- [8] 黄攀,汪泉,周红军,等. 基于逆向工程的曲面建模与创新设计[J]. 塑料科技, 2020, 48(1):24-28.
Huang Pan, Wang Quan, Zhou Hongjun, et al. Surface modeling and innovative design based on reverse engineering[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(1):24-28.
- [9] 贾仕奎,李云云,张向阳,等. 3D 打印成型工艺及 PLA 材料在打印中的应用最新进展[J]. 应用化工, 2020, 49(12):3 185-3 190, 3 194.
Jia Shikui, Li Yunyun, Zhang Xiangyang, et al. Recent progress on 3D processing methods and applications of 3D printing PLA[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(12):3 185-3 190, 3 194.
- [10] Liu Xiaojun, Chi Baihong, Jiao Zhiwei, et al. A large-scale double-stage-screw 3D printer for fused deposition of plastic pellets[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(31).doi:10.1002/app.45147.
- [11] 李玉竹,姚利辉,叶世强,等. 生物降解材料在水环境中降解性能的研究进展[J]. 中国塑料, 2021, 35(7):103-114.
Li Yuzhu, Yao Lihui, Ye Shiqiang, et al. Research progress on degradation performance of biodegradable materials in water environment[J]. China Plastics, 2021, 35(7):103-114.
- [12] Liao Yuhua, Liu Chang, Coppola B, et al. Effect of porosity and crystallinity on 3D printed PLA properties[J]. Polymers, 2019, 11(9). doi:10.3390/polym11091487.
- [13] 白鹤,苏亚辉,王核心,等. FDM 3D 打印工艺参数对 PLA 制件力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(1):68-71.
Bai He, Su Yahui, Wang Hexin, et al. Influence of FDM 3D-printing process parameters on mechanical property of PLA sample[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):68-71.
- [14] 范孝良,李传帅,代红川,等. FDM 快速成型工艺支撑结构参数的实验研究[J]. 中国工程机械学报, 2016, 14(6):520-524.
Fan Xiaoliang, Li Chuanshuai, Dai Hongchuan, et al. Experiment

艺参数主次顺序为:成型室温度>喷嘴温度>成型速度,三个参数的响应度依次为:62.65%,20.97%,16.38%。随着成型室温度的增加,制件的翘曲变形量呈现逐渐减小的趋势;随着喷嘴温度的增加,制件的翘曲变形量呈现先增大后减小的趋势;随着成型速度的增加,制件的翘曲变形量呈现先减小后增大的趋势。

参考文献

- [1] Guo Nannan, Leu M C. Additive manufacturing: Technology, applications and research needs[J]. Front Mech Eng, 2013, 8(3):215-243.
- [2] Boschetto A, Giordano V, Veniali F. 3D roughness profile model in fused deposition modeling[J]. Rapid Prototyping Journal, 2013, 19(4):240-252.
- [3] Bulanda K, Oleksy M, Oliwa R, et al. Biodegradable polymer composites used in rapid prototyping technology by melt extrusion polymers[J]. Polimery, 2020, 65(6):430-436.
- [4] 杨裕金,林鸿裕,杨晨,等.基于正交实验的熔融沉积成型工艺参数的优化[J].中国塑料,2019,33(6):69-75.
Yang Yujin, Lin Hongyu, Yang Chen, et al. Optimization of process parameters of fused deposition modeling based on orthogonal experiment[J]. China Plastics, 2019, 33(6):69-75.
- [5] 徐运祺,潘永红,王万卷,等.3D打印参数对聚乳酸力学性能的影响[J].塑料工业,2017,45(12):67-69.
Xu Yunqi, Pan Yonghong, Wang Wanjuan, et al. Effect of 3D printing parameters on mechanical properties of polylactic acid[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(12):67-69.
- [6] 张捷,顾海,李彬,等.FDM工艺零件翘曲变形分析及实验研究[J].制造业自动化,2017,39(8):48-49,60.
Zhang Jie, Gu Hai, Li Bin, et al. The analysis and experimental research for warp deformation in FDM process[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(8):48-49, 60.
- [7] 张志.FDM中PLA长方体翘曲变形数值模拟及工艺参数优化[D].南昌:江西理工大学,2021.
Zhang Zhi. Numerical simulation of warping deformation of PLA cuboid in FDM and optimization of process parameters[D]. Nanchang: Jiangxi University of Science and Technology, 2021.
- [8] 张耿彬,魏宝强,欧文靖,等.FDM 3D打印PLA/木粉复合材料翘曲变形影响因素分析[J].装备制造技术,2020(1):74-77.
- [9] 白鹤,赵明侠,王核心,等.FDM 3D打印翘曲变形成因分析及解决对策[J].塑料工业,2019,47(1):60-63,68.
Bai He, Zhao Mingxia, Wang Hexin, et al. Analysis and countermeasures of warpage deformation in FDM 3D printing process[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(1):60-63, 68.
- [10] 郭文霞.熔融沉积成型技术中产生翘曲变形的工艺优化研究[J].内蒙古工业大学学报:自然科学版,2018,37(4):260-265.
Guo Wenxia. Research on process optimization of the buckling deformation in the process of fused deposition modeling[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology: Natural Science Edition, 2018, 37(4):260-265.
- [11] 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.
- [12] 谢卓.熔融沉积成型精度分析及工艺参数研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.
Xie Zhuo. Study on Process and precision of fused deposition modeling[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [13] 桑鹏飞,刘凯,王扬威.熔融沉积成型中的原型翘曲变形分析[J].机械设计与研究,2015,31(3):118-120,124.
Sang Pengfei, Liu Kai, Wang Yangwei. A model research for prototype warp deformation in the FDM process[J]. Machine Design & Research, 2015, 31(3):118-120, 124.
- [14] 陈葆娟,梁延德,何福本.熔融沉积成形试件翘曲成因的分析与优化[J].电加工与模具,2012(4):33-36.
Chen Baojuan, Liang Yande, He Fuben. Factor analysis and optimization of warpage deformation in FDM[J]. Electromachining & Mould, 2012(4):33-36.
- [15] Yan Cunfu, Li Shujuan, Yang Leipeng, et al. Investigation of FEF process liquid phase migration using orthogonal design of experiments[J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(3):388-396.
- [16] Wu Xuan, Leung D Y C. Optimization of biodiesel production from camelina oil using orthogonal experiment[J]. Applied Energy, 2011, 88(11):3 615-3 624.
- [17] Mo Quanhu, Zhang Xuegang. Research on the influence of layer thickness to the forming precision of 3D printing[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(4):25-29.
- [18] Celebi A. Investigation of fused deposition modeling processing parameters of 3D PLA specimens by an experimental design methodology[J]. Materials Testing, 2019, 61(5):405-410.

(上接第76页)

research on supporting structure parameters for fused deposition modeling[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2016, 14(6):520-524.

- [15] 莫泉湖,张学刚.3D打印成型方向和层厚对成型精度的影响研究[J].机械设计与制造工程,2017,46(4):25-29.