

FDM 技术中路径规划对成型件力学性能影响

穆存远¹,冯叶阳¹,刘运学²

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究 FDM 技术中路径规划对于成型件力学性能影响,找出力学性能最佳的路径规划方式,分析不同路径规划成型件之间力学性能差异的原因. 方法 以切片软件 Slic3r 中直线式、同心式、蜂窝式、希尔伯特曲线式、阿基米德曲线式路径规划方式为例,使用 PRUSA 型串联式 3D 快速成型机制备不同路径规划方式的实验试样,分别对各路径规划方式的试样进行了拉伸实验和弯曲实验;建立各路径规划试样理论模型,分析理论模型内部结构差异及计算各模型的内部材料覆盖面积;最终将力学实验结果和理论模型分析结果进行对比分析. 结果 得出同心式路径规划的试样力学性能最佳,其抗拉强度为 44.77 MPa、拉伸断后伸长率为 4.64%,弯曲强度为 69.87 MPa;同心式路径规划试样的理论模型内部材料覆盖面积为 18.10 mm²,大于其他 4 种路径规划试样. 结论 成型件的力学性能和路径规划有着密切的关联,而造成各路径规划成型件之间力学性能差异的原因就是其内部材料覆盖面积的不同.

关键词 FDM 技术;路径规划;力学实验;理论模型

中图分类号 TH16

文献标志码 A

Effect of Path Planning on Mechanical Properties of Molded Parts in FDM Technology

MU Cunyuan¹, FENG Yeyang¹, LIU Yunxue²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Material Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: To find out the best path planning for mechanical properties and analyze the reasons for the differences in mechanical properties among different path planning molded parts, the influence of path planning on the mechanical properties of FDM technology was studied. Linear, Concentric, Honeycomb, Hilbert curve and Archimedes curve path planning methods in the slicing software Slic3r were taken as examples. The experimental samples of different path planning methods were made by the PRUSA type tandem 3D rapid prototyping machine, and the tensile test and bending test on the samples of each path planning method were carried out. The theoretical model of each

收稿日期:2018-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51375137)

作者简介:穆存远(1961—),男,教授,主要从事非标专机设计方面研究.

path planning sample was established. The internal structure difference of the theoretical model was analyzed and the internal material coverage area of each model was calculated. Finally, the mechanical experimental results and theoretical model analysis results were compared and analyzed. The results show that the mechanical properties of the sample with concentric path planning are the best, and its tensile strength is 44.77 MPa, elongation after tensile break is 4.64%, and bending strength is 69.87 MPa. The theoretical model of concentric path planning samples has an internal material coverage of 18.10 mm, which is larger than the other four path planning samples. The conclusion is that the mechanical properties of the molded parts are closely related to the path planning, and the reason for the difference in mechanical properties among the molded parts in the path planning is the difference in the internal material coverage.

Key words: FDM technology; path planning; mechanical experiment; theoretical model

3D 打印技术不同于传统制造技术,其成型原理是将三维模型降维成二维,二维变作一维,再由一维变作零维,化繁为简^[1]. 然后,由点连成线,线按预定的路径形成面,面再堆积成体的一个过程. 3D 打印技术经过不断发展,延伸出了立体光固化成型法(SLA)、分层实体制造法(LOM)、激光烧结成型法(SLS)和熔融成型法(FDM)^[2]等. FDM 技术作为 3D 打印快速成型技术中的一种,因其运行成本低、成型材料广泛、能够快速制造出模具,有效缩短产品研发周期等优势^[3-4]. 其在机械制造、航空航天、医疗设备、汽车设计、建筑模型、家用电器及产品造型等领域得到更加广泛的运用. 然而,随着 FDM 技术在生活中运用的愈加广泛,其成型工艺的一些不足也逐渐暴露出来. 汪绍兴等^[5-6]从理论模型和力学实验角度分析了影响成型件力学性能工艺参数,最终得出成型件之间力学性能差异的本质原因. 林海英等^[7]研究了工程塑料不同方向和不同纤维直径力学性能差异,得出工程塑料 ABS 在纤维方向表现出了弹塑性,垂直方向上则表现为明显的弹脆性. 高士友等^[8]经由实验发现,随填充率的增加,成型件力学性能逐渐增加. I. E. Durgun 等^[9]采用 ABS 耗材分析了构建取向、光栅角度等加工参数对成型件拉伸、弯曲性能的影响. A. Amendola 等^[10]深入研究了成型件的结构特征对力学性能的影响.

胡邓平等^[11]分析了打印过程中形成表面品质误差的因素,并研究了打印速度和挤出速度对成型件表面粗糙度的影响. 杨立宁等^[12]研究了不同成型路径和堆积速度下热应力场的分布和变化规律,对于制件翘曲变形的影响. 曾善文等^[13]从理论算法入手研究扫描路径,发现扫描路径和重要参数对于成型精度及成型效率有很大的影响. 赵天婵等^[14]通过实际加工分析了 FDM 技术成型过程中出现底部翘曲、拉丝、出丝不畅和错位问题,并提出了应对措施. 范孝良等^[15]设计正交实验对 FDM 工艺中支撑添加技术进行研究,得到了使支撑易去除的最佳工艺.

目前关于 FDM 技术中关键技术之一的路径规划的研究较少^[16],即使有对路径规划的相关研究也仅限于理论,缺乏科学的实验和数据支撑. 因此,笔者以成型件的力学性能为研究对象,通过实验分析路径规划与成型件力学性能之间的关系. 基于切片软件 Slic3r 展开 FDM 技术中路径规划对成型件力学性能的影响. 选取软件中 5 种代表类型的路径规划方式为基础,展开力学实验. 同时,通过对 FDM 技术研究得出其成型技术原理的核心就是熔融丝状耗材按照某一预定路径规划方式完成单层的打印,再以同样的方式逐层堆积材料最终完成整个实体的制备. 因此,一种路径规划方式就对应着的一种内部结构^[17-18]. 正是这个原因造成了不同路径规

划成型件之间的力学性能的差异.笔者以成型件力学性能为研究对象,从力学实验及理论模型分析的角度分析路径规划对成型件力学性能的影响.通过实验结果与理论模型分析的对比,得出力学性能最佳的路径规划方式,并最终找出不同路径规划的成型件之间力学性能差异的原因.

1 实验过程

1.1 实验设备及技术参数简介

实验设备分为成型设备和力学试验设备,成型设备选用的是 PRUSA 型串联式 3D 打印机^[19],其加工长宽高为 220 mm × 335 mm × 600 mm,加工精度为 0.3 mm.力学实验设备选用的是台湾高铁检测仪器有限公司 TCS-2000 伺服控制拉力实验机,最大实验力为 20 kN,荷重分解度为 1/20 000,荷

重精度为 ± 0.5%,测试速度为 0.000 1 ~ 1 000 mm/min,速度精度为 ± 0.5%.适用于非金属材料的拉伸、弯曲、压缩等力学性能测试.

1.2 实验试样设计及打印参数选定

实验使用 PRUSA 型串联式 3D 打印机,采用新型环保材料聚乳酸-PLA 来制备拉伸和弯曲实验试样.各实验试样的路径规划方式参考图 1 中 5 种路径规划方式选择,5 种路径为切片软件 Slic3r 中常用的路径规划方式.填充角度为默认的 45°.根据力学测试国家标准要求,每个受试方向和每项性能的测试应该至少实验 5 个试样.因此,各试样不同路径分组分别打印 5 个进行实验,实验完成后选取 3 组可靠的数据取平均值来确定实验最终数值.实验试样在室温的条件下进行打印制备,最终选定的主要打印参数见表 1.

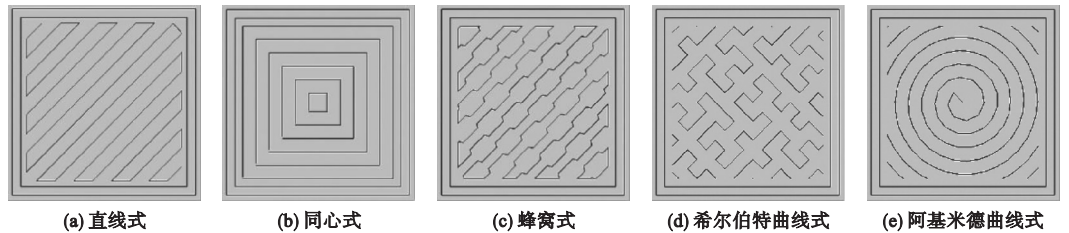


图 1 路径规划方式

Fig. 1 The way of path planning

表 1 选定的打印参数

Table 1 Print parameters selected

分层厚度/ mm	首层高度/ mm	打印速度/ (mm·s ⁻¹)	喷嘴温度/ ℃	喷嘴直径/ mm	外壳填充/ 层	填充密度/ %
0.2	0.2	60	200	0.4	2	70

在 3D 打印机组装完成后,由于手工设计工艺参数存在着较大的随意性和不稳定性.故在进行力学实验试样制备之前,进行了成型件表面质量优化实验,得出软件自身默认数值打印出来的成型件的成型质量和成型效率皆不是最佳状态.其中分层厚度,对于成型件表面质量影响较大,分层厚度设置不合理常常会导致模型表面出现“波浪纹”,“凸起”等问题,通过不同分层厚度的实验结

果,最终选定 0.2 mm.此外,首层高度的选择影响着成型件的翘曲度,当选取喷嘴直径数值的一半 0.2 mm 时翘曲度最小.另外,鉴于试样数量较多及耗材量大的问题,最后选择填充密度为 70%^[20].其余主要参数参考同类文献打印参数的选择而定.

1.3 拉伸实验

拉伸实验作为检测材料力学性能的最基本、最重要的实验项目^[21-22],故将拉伸实验

作为首要实验. 实验试样采用的 PLA 属于热塑性材料, 且 FDM 成型技术属于机械加工的一种. 因此, 试样参照国标《塑料拉伸性能的测定》(GB/T 1040.2—2006) 中 1BA 型试样而设计, 拉伸试样外观如图 2 所示. 图中 25 为实验标距.

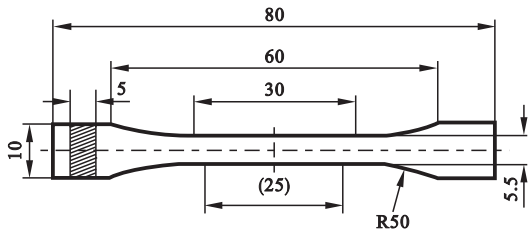


图 2 拉伸试样
Fig. 2 Tensile specimen

试样的制备首先是使用三维制图软件 Rhinoceros 参照图 2 建立数字模型, 另存储为 STL 文件格式, 然后将 STL 文件导入切片软件 Slic3r 中进行切片参数的设置及路径规划方式选择, 要切片参数选取表 1 中数值, 其余参数则为切片软件中默认值. 最后从切片软件中导出 G 代码, 将 G 代码输入 3D 打印机进行打印制作. 单次打印 5 个相同路径规划方式的试样, 打印结束后, 为了避免喷头温度、机器起始运行状态不一等因素, 在成型过程中对试样的成型精度产生影响, 等待打印机静置一段时间后, 让喷头温度恢复到常温 and 校准 FDM 设备的机器误差等, 再继续打印其他的路径规划方式的试样. 成型后的试样实物如图 3 所示.



图 3 拉伸试样实物
Fig. 3 The photo of stretch specimen

图中所展示的只是 5 组拉伸试样的其中 1 组, 各试样上编号为试样的路径规划方式. 其中, 01 为直线式路径规划; 02 为同心式路径规划; 03 为蜂窝式路径规划; 04 为希尔伯特曲线式路径规划; 05 为阿基米德曲线式路径规划.

将不同路径规划拉伸试样放在拉力实验机拉伸专用夹具上 (见图 4). 将试样放入夹具中, 过程中必须保证试样的长轴线与实验机轴线成一条直线, 然后分别调节上下夹具的夹头之间的距离, 保证其夹紧试样, 在 TCS-2000 伺服控制拉力实验机配套的测试软件中选择 5 mm/min 为加载速度, 从零载荷开始逐渐增加载荷进行实验, 直至试样被拉断结束实验.

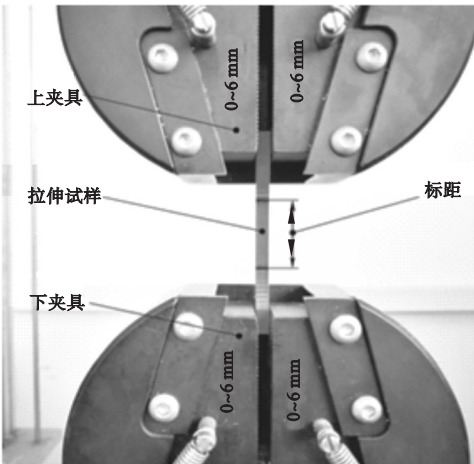


图 4 抗拉强度测试装置
Fig. 4 Stretching strength testing device

1.4 弯曲实验

因弯曲实验的结果不受试样在实验中摆放位置偏斜的影响, 以及相对简单的试样设计和实验操作, 故笔者还针对不同路径规划试样作了弯曲实验. 其实验试样外观及尺寸参考《塑料弯曲性能的测定》(GB/T 9341—2008) 而定的 (见图 5).

图中 64 为实验跨距, 试样的设计过程及切片参数与拉伸实验试样制备一致. 单次打印 5 个同路径规划的试样, 等待 3D 打印机恢复到初始状态之后, 依次完成剩下试样的

打印.成型之后的弯曲试样实物如图 6 所示.各试样实物上的编号为试样路径规划方式,其中 I 为直线式路径规划、II 为同心式路径规划、III 蜂窝式路径规划、IV 为希尔伯特曲线式路径规划、V 为阿基米德曲线式路径规划.

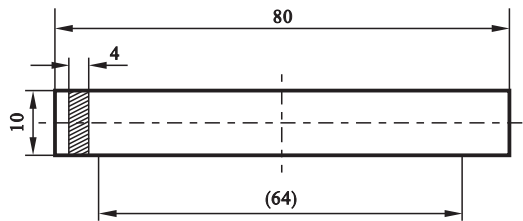


图 5 弯曲试样
Fig. 5 Bending specimen



图 6 弯曲试样实物

Fig. 6 The photo of bending specimen

实验前卸下拉力实验机的拉伸实验夹具,安装图 7 中的三点弯曲实验装置,将下部分的两个支座之间的距离调整为 64 mm,将试样对称的放在两支座上,加载速度设置为

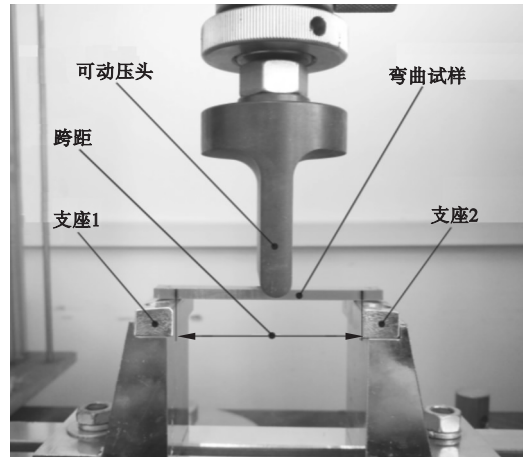


图 7 弯曲强度测试装置

Fig. 7 Bending strength test device

5 mm/min,于跨距中心施加载荷,从零载荷开始逐渐增加载荷进行实验,当载荷达到峰值后并减小到峰值的 95% 时,结束实验.

2 实验结果分析

2.1 路径规划对试样拉伸性能影响

不同路径拉伸试样实验后得出的力学曲线图如图 8 所示.图中 5 条曲线皆由同一参数下 5 个试样的实验数据中优选的 3 组数据的平均值绘制.

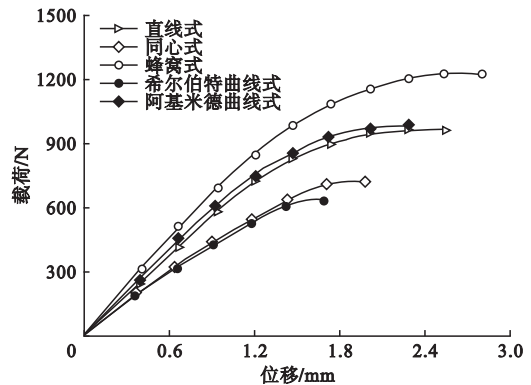


图 8 不同路径拉伸试样载荷 - 位移曲线

Fig. 8 Load displacement curve of tensile specimens with different paths

从图 8 中可以看出,同心式路径规划试样抗拉载荷和伸长量都高于其他路径规划试样,直线式和蜂窝式路径规划试样各项指标接近,希尔伯特曲线式和阿基米德曲线式路径规划试样则低于前 3 种路径规划试样.

各路径试样的抗拉强度和伸长率如表 2 所示.为保证实验数据可靠性,表 2 中数值均为同路径规划试样的 5 组实验数据中优选 3 组的平均值.由表 2 可知,同心式路径规划试样抗拉强度为 44.77 MPa,为 5 种路径规划试样中最佳,比直线式路径规划试样高了近 28.5%,其伸长率也远优于直线式路径规划试样.而阿基米德曲线式路径规划的试样的弯曲强度为 23.01 MPa,为 5 种路径规划试样中最低,比直线式路径规划试样低了近 33.4%,伸长率远不如直线式路径规划.

表 2 不同路径试样的抗拉强度和伸长率

Table 2 Tensile strength and elongation of specimens with different path

路径规划方式	抗拉强度/MPa	伸长率/%
直线式	34.84	4.22
同心式	44.77	4.64
蜂窝式	35.47	3.76
希尔伯特曲线式	26.03	3.27
阿基米德曲线式	23.01	2.84

2.2 路径规划对试样弯曲性能影响

不同路径规划的弯曲试样经过弯曲实验后得到的力学曲线如图 9 所示,其中的每条曲线皆为同一参数设置下相同路径规划的 5 个试样的实验数据中优选 3 组有价值的数值取完的平均值所绘.

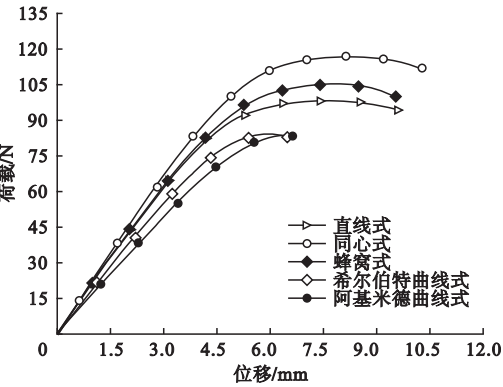


图 9 不同路径试样弯曲载荷 - 位移曲线

Fig. 9 Bending load displacement curve of specimens with different path

从图 9 可以看出同心式路径规划试样在抗弯载荷和断裂延伸性方面皆优于其他路径规划试样,希尔伯特曲线式和阿基米德曲线式路径规划试样远不如其他的路径规划试样,而切片软件中默认的直线式扫路径规划的试样虽不如同心式和蜂窝式路径规划试样,但也有较高的抗弯载荷和延伸率.

由实验得出的各路径试样的弯曲强度如表 3 所示. 其中数值和表 2 的取值一样,均为同一路径规划试样的 5 组实验数据的平均值. 由表 3 可知,同心式路径规划试样的弯曲强度为 69.87 MPa,是不同路径规划试样中

最高的,较直线式路径规划试样提高了近 18.7%. 蜂窝式路径规划试样次之,较直线式路径规划试样提高了近 7.2%. 而余下两种路径规划试样弯曲强度则远低于前 3 种.

表 3 不同路径试样弯曲强度

Table 3 Bending strength of specimens with different path

路径规划方式	弯曲强度/MPa
直线式	58.84
同心式	69.87
蜂窝式	63.05
希尔伯特曲线式	50.75
阿基米德曲线式	49.65

3 理论模型建立与分析

笔者将顶层去除后得到模型内部如图 10 所示. 其中模型黑色部分为外轮廓,灰色部分为内部结构.

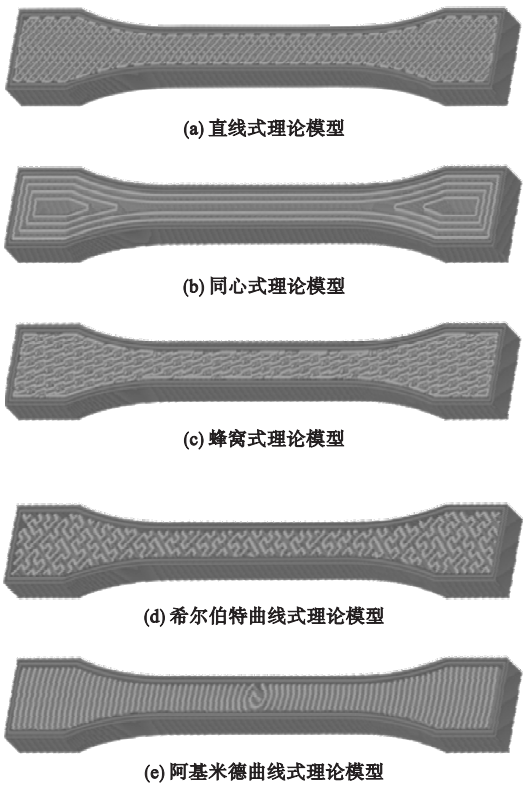


图 10 不同路径试样理论模型

Fig. 10 Theoretical model of samples with different path

通过力学实验的结果分析,可知不同路径规划试样之间力学性能存在差异,而造成这种差异的原因,却无法直接从力学实验得出.故笔者按照各路径规则方式建立试样的理论模型并对其内部结构进行分析,从理论模型角度研究路径规划对于成型件力学性能的影响,最终找出不同路径规划试样间力学性能差异的原因.以拉伸试样模型为例,依据图 1 中的 5 种路径规划方式在三维制图软件中逐层建立试样的理论模型,

通过图 10 可直观的看出各模型内部的

丝径排列方式的不同,而这种不同导致其内部结构不同.为了更为直观地观察内部结构的差异,笔者在三维制图软件中,与模型中心位置处将其对称分割,得到对应模型的端口横截面.为了方便观察和后期数据处理,笔者将各横截面图放大 23 倍,不同路径模型的横截面图如图 11 中所示.每个模型的横截面由上表面、下表面、轮廓部分和内部填充部分构成,其中上下表面和轮廓部分是致密的,而填充部分由于选定填充密度为 70%,故为中空.

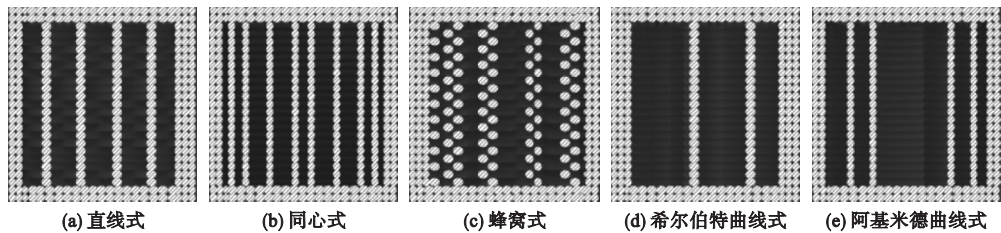


图 11 不同路径模型的横截面图

Fig. 11 Cross section diagram of model with different path

笔者通过图形处理软件 Photoshop 中直方图工具计算出图 11 中 5 个截面中白色区域的像素点所占整个截面像素点总和的比例,即为模型内部材料覆盖面积所占原始截面积的比例大小.通过数据结果和力学实验结果的对比,探究不同路径规划的试样之间力学性能差异的原因.实际处理过程如图 12 所示.其中图 12(a)为直线式路径规划模型

截面图经过放大 4 倍数后,在 Photoshop 中运用魔棒工具选取白色区域的示意,在进行 12 图(a)中操作的同时图 12(b)直方图工具便显示出选取白色区域的像素点数及总的像素点数.由此,便可计算出直线式路径规划模型内部材料覆盖面积比例.按同样的方法计算出的其他 4 种路径规划试样理论模型的内部材料覆盖面积比例.

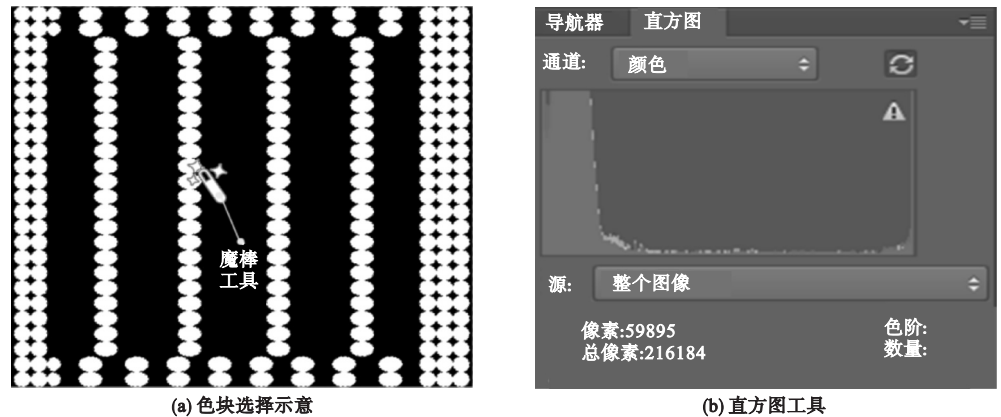


图 12 截面内像素点统计

Fig. 12 Statistics of pixels in sections

据图 2 中拉伸试样尺寸得出试样原始截面积为 27.5 mm^2 ,结合不同路径模型的材料覆盖面积比例便可计算出 5 种路径规划模型内部材料覆盖面积,其结果如表 4 所示.由表 4 中的数据可知,同心式路径规划模型的内部材料覆盖面积为各路径规划模型中最大的.由的力学实验结果可知,同心式路径规划试样的力学性能最佳.故可推测试样内部材料覆盖面积决定着试样的力学性能优劣.

表 4 各路径模型内部材料覆盖面积

Table 4 The internal material coverage area of each path model

路径规划方式	内部材料覆盖面积/mm ²
直线式	16.48
同心式	18.10
蜂窝式	17.18
希尔伯特曲线式	14.73
阿基米德曲线式	13.78

图 13 为抗拉强度和材料覆盖面积的关系.从图中可看出,随着材料覆盖面积的增加,抗拉强度逐渐变大,可知试样的抗拉强度和实际材料覆盖面积大小几乎呈正比关系.弯曲强度和弯曲试样模型内部材料覆盖面积之间,存在相同规律,故笔者不再选取弯曲试样及其理论模型进行相关分析.由于路径规划方式的不同,使得各试样内部丝径排列的不同,造成试样内部材料覆盖面积的差异,最终导致了试样力学性能的优劣.

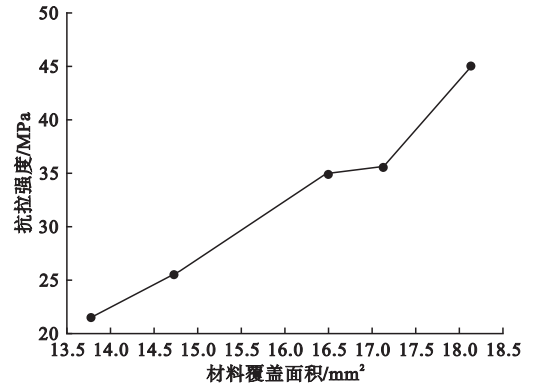


图 13 抗拉强度和材料覆盖面积的关系

Fig. 13 The relationship between tensile strength and material covering area

4 结 论

(1)通过力学实验结果分析可知,路径规划对于成型件的力学性能有显著影响.同心式路径规划试样的抗拉强度为 44.77 MPa ,拉伸的断后伸长率为 4.64% ,弯曲强度为 69.87 MPa ,其力学性能为 5 种路径规划试样中最佳.

(2)通过 Photoshop 中直方图工具计算出各路径规划试样模型内部材料覆盖面积比例大小,结合试样的原始截面积得出,同心式路径规划试样的理论模型内部材料覆盖面积为 18.10 mm^2 ,大于其他 4 种路径规划试样.

(3)由试样理论模型分析可知,各路径规划试样力学性能与试样内部材料覆盖面积的大小有关.并经过与试样抗拉强度对比分析,最终得出试样的力学性能与其内部材料覆盖面积之间呈正相关.因此,在 FDM 技术中进行路径规划或设计新的路径规划方式时,选择能增大成型件内部材料覆盖面积的路劲规划方式,将有助提高成型件力学性能.

参考文献

[1] 桑鹏飞. 熔融沉积扫描路径规划及实验研究 [D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
(SANG Pengfei. Research on the scanning path planning and experiment in fused deposition modeling [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2015.)

[2] DUDEK P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements [J]. Arch-metall mater,2013,58(4):1415-1418.

[3] KAVEH M, BADROSSAMAY M, FORO-OZMEHR E, et al. Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes [J]. Journal of materials processing technology, 2015, 226: 280-286.

[4] SUTRADHAR A, PARK J, CARRAU D, et al. Experimental validation of 3D printed patient-specific implants using digital image correlation and finite element analysis [J]. Computers in biology & medicine, 2014, 52(3):8-17.

[5] 汪绍兴. 基于 PLA 丝材的 FDM 试件机械性能分析及优化 [D]. 大连:大连理工大学, 2015.

- (WANG Shaoxing. Analysis and optimization of the mechanical properties for FDM specimens based on PLA filament [D]. Dalian University of Technology, 2015.)
- [6] HOSSAIN M S, ESPALIN D, RAMOS J. Improved mechanical properties of fused deposition modeling-manufactured parts through build parameter modifications[J]. Journal of manufacturing science and engineering, 2014, 136(12): 61001–61002.
 - [7] 林海英, 崔博然, 刘冰河. 3D 打印工程塑料力学特性分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(1): 149–153.
(LIN Haiying, CUI Boran, LIU Binghe. Analysis on mechanical property of 3D printing engineering plastic [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2017, 4(1): 149–153.)
 - [8] 高士友, 黎宇航, 周野飞, 等. 熔融沉积(FDM)3D 打印成形件的力学性能实验研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(1): 200–206.
(GAO Shiyu, LI Yuhang, ZHOU Yefei, et al. Experimental study on mechanical properties of molten deposition 3D printing formwork [J]. Journal of plasticity engineering, 2017, 24(1): 200–206.)
 - [9] DURRGUN I E. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost[J]. Rapid prototyping journal, 2014, 20(3): 28–235.
 - [10] AMENDOLA A, HERNANEZ-NAVA E, GOODALL R, et al. On the additive manufacturing, post-tensioning and testing of bi-material tensegrity structures [J]. Composite structures, 2015, 131: 66–71
 - [11] 胡邓平, 文泽军, 陈裕和, 等. 基于 3D 打印技术的 FDM 薄板塑件表面成型精度实验研究[J]. 中国塑料, 2017, 31(2): 82–87.
(HU Dengping, WEN Zejun, CHEN Yuhe. Surface-molding accuracy of FDM thin plastic parts molded by 3D printing [J]. China Plastics, 2017, 31(2): 82–87.)
 - [12] 杨立宁, 单忠德, 戎文娟, 等. 金属件熔融堆积 3D 打印过程热应力场数值模拟[J]. 铸造技术, 2016, 37(4): 753–758.
(YANG Lining, SHAN Zhongde, RONG Wenjuan, et al. Numerical simulation of thermal stress field in 3D printing technology based on metal fused and deposition [J]. Casting technology, 2016, 37(4): 753–758.)
 - [13] 曾善文. 基于 FDM 的扫描路径分析与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
(ZENG Shanwen. Analysis and research of the scan path based on FDM [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.)
 - [14] 赵天婵, 黄海. 基于 3D 打印的熔融沉积快速成型工艺若干问题研究[J]. 机械工程师, 2016(4): 22–23.
(ZHAO Tianchan, HUAN Hai. Research on some problems of rapid deposition process of Melt deposition based on 3D printing [J]. Mechanical Engineer, 2016(4): 22–23.)
 - [15] 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]. 中国工程机械报, 2016, 14(6): 520–524.
(FAN Xiaoliang, LI Chuanshuai, DAI Hongchuan, et al. Experiment research on supporting structure parameters for fused deposition modeling [J]. Chinese journal of construction machinery, 2016, 14(6): 520–524.)
 - [16] DING D, PAN Z, CUTURI D, et al. A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2014, 73(1–4): 173–183.
 - [17] 侯章浩, 乌日开西·艾依提. 3D 打印的路径规划研究综述[J]. 机床与液压, 2016, 44(5): 179–182.
(HOU Zhanghao, WURIKAIXI A. Review of studies on path planning of 3D printing [J]. Machine & hydraulics, 2016, 44(5): 179–182.)
 - [18] 李磊. 基于 FDM 成型技术的 3D 打印工件机械性能及质量研究分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
(LI Lei. Research and analysis on mechanical property and quality for 3D printing workpiece based on FDM molding technology [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.)
 - [19] GALANTUCCI L M, LAVECCHI F, PERCO G. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts [J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2009, 58: 189–192.
 - [20] 孟陈力. FDM 成型性能的影响因素分析及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
(MENG Chen Li. The analysis and experimental study on the influencing factors of FDM forming performance [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.)
 - [21] 国家质量监督检验检疫总局职业技能鉴定指导中心. 材料物理性能检验[M]. 北京: 中国计量出版社, 2005.
(National Quality Supervision, Inspection and Quarantine General Administration Vocational Skills Identification and Guidance Center. Material Physical Property Test [M]. Beijing: China Metrology press, 2005.)
 - [22] 侯文顺, 杨宗伟. 高分子物理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
(HOU Wenshun, YANG Zongwei. Polymer physics [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.)