

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.012

基于螺杆挤出PLA颗粒料3D打印工艺

刘彪强¹, 钱波^{1,2}, 梁雨心¹, 胡珍涛¹

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201600; 2. 机械工业航空大型复杂薄壁构件智能制造技术重点实验室, 上海 201600)

摘要: 针对现有的熔融沉积成型(FDM)打印技术出丝不稳、打印速度较低以及打印材料受限等问题,通过不断优化打印参数(料筒温度、螺杆转速、挤出倍率以及打印速度),比较不同填充方式下打印件的力学性能,最终确定了针对聚乳酸(PLA)颗粒料的成型参数。基于这些成型参数,利用自制的螺杆挤出颗粒料3D打印设备展开工艺研究。结果表明,料筒温度在170℃,喷嘴温度在205℃以及挤出倍率为0.65时PLA颗粒料能够在出丝稳定性的同时保证孔隙率最小;对不同喷嘴直径稳定出丝时的螺杆转速进行数值模拟得出二者的拟合公式,以便在选用不同喷嘴直径时能够快速确定螺杆转速;蜂窝填充表现出更加优异的弯曲性能,其值为22.49 MPa,相比于网格填充的19.37 MPa提升了16.10%;网格填充表现出更佳的拉伸性能,其值为24.75 MPa相比于蜂窝填充的22.36 MPa提升了10.69%;并且随着层厚的增大打印件的表面粗糙度渐升高,从层厚0.6 mm的160.51 μm提升到层厚1.0 mm的220.38 μm,表面粗糙度升高了37.30%。

关键词: 3D打印; 螺杆挤出; 表面粗糙度; 填充方式; 数值模拟

中图分类号: TB302 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)04-0075-08

3D printing technology of PLA granular material based on screw extrusion

LIU Biaoqiang¹, QIAN Bo^{1,2}, LIANG Yuxin¹, HU Zhentao¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China; 2. Key laboratory of Intelligent Manufacturing technology of large complex thin-wall components of machinery industry aviation, Shanghai 201600, China)

Abstract : Aiming at the problems of unstable filament, low printing speed and limited printing materials in the existing fused deposition modeling (FDM) printing technology, the printing parameters (barrel temperature, screw speed, extrusion ratio and printing speed) were continuously optimized. The mechanical properties of the printed parts under different filling methods were compared, and the forming parameters for polylactic acid (PLA) granular materials were finally determined. Based on these forming parameters, the process research was carried out by using the self-made 3D printing equipment for screw extrusion of granular materials. The results show that the stability of spinning and the minimum porosity can be ensured when the barrel temperature is 170℃, the nozzle temperature is 205℃ and the extrusion ratio is 0.65 for PLA granular materials. The screw speed with different nozzle diameters is numerically simulated to obtain the fitting formula of the two, so that the screw speed can be quickly determined when different nozzle diameters are selected. Honeycomb filling shows more excellent bending properties, the value of which is 22.49 MPa, which is 16.10% higher than that of grid filling, and the value of which is 24.75 MPa, which is 10.69% higher than that of honeycomb filling. And with the increase of layer thickness, the surface quality of printed parts gradually decrease, the surface roughness from 160.51 μm with $h=0.6$ mm to 220.38 μm with $h=1.0$ mm, which is 37.30%.

Keywords : 3D printing ; screw extrusion ; surface roughness ; filling method ; numerical simulation

3D打印技术也称为增材制造技术,是通过逐层叠加的方式把计算机辅助设计的三维模型分层处

理,打印机在获取分层所得截面数据后,在控制系统的作用下喷嘴根据所获得的轮廓数据由点到线

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1105300)

通信作者: 钱波,博士,副教授,主要研究方向为智能制造、增材制造技术、激光加工、3D打印

收稿日期: 2024-02-06

引用格式: 刘彪强,钱波,梁雨心,等. 基于螺杆挤出PLA颗粒料3D打印工艺[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 75-82.

LIU Biaoqiang, QIAN Bo, LIANG Yuxin, et al. 3D printing technology of PLA granular material based on screw extrusion[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 75-82.

再到面进行逐层打印,最终完成三维实体零件的构造^[1]。由于可迅速制造出自由曲面和形状较复杂的零件,并且打印材料利用率较高,近几年来3D打印技术得到了快速的发展,在航空航天、汽车、医疗、专业定制等领域得到了广泛应用^[2]。然而,针对熔融沉积成型(FDM)打印技术,尽管有着相对便宜的材料和设备并且3D打印的普及程度越来越高,但需要一个生产丝材的中间步骤,这就导致FDM打印材料的生产过程效率低下并且生产成本也相对较高^[3]。此外,颗粒料的存储比缠绕成线轴的细丝更容易,特别对于缠绕半径较小的纤维丝而言,由于其初始部分受到残余应力的作用会使其发生脆化进而影响其打印质量。通过去除丝材的制备过程,经过简单的造粒步骤可以更容易地将塑料废物回收利用符合绿色发展^[4]。

因此,一种更节约成本的打印方式(以颗粒料直接作为打印材料的新型打印方式)正在逐步发展。Minetola等^[5]研究了在Arburg Plastic无模具成型工艺中,螺杆将熔融的材料沿电喷嘴方向进行输送,其以液滴形式沉积,使用压电喷嘴进行测量。在以往的研究,研究人员针对塑料挤出成型提出过两种成型方式:一种是柱塞式,另一种是螺杆式。前者使用的是类似于注射器装置进行挤出,Volpato等^[6]使用气缸活塞系统从加热的储液器中将熔融的聚丙烯颗粒挤出成长丝。然而,随着科学研究不断的深入基于柱塞式挤出其弊端逐渐显露。如今,大多数研究人员采用的是螺杆式挤出方式。Reddy等^[7]研究了喷嘴温度、腔室温度和打印间隙对黏合强度和表面光洁度的影响。Valkenaers等^[8]开发出了一种试验性螺杆挤出系统,使用0.2 mm直径的喷嘴进行打印聚己内酯颗粒料。Tseng等^[9]和Woern等^[10]将回收颗粒用于四种不同的热塑性塑料进行螺杆挤出。Wang等^[11]利用多物理场建模软件建立了一个可与工业机器人集成的挤出系统。Athanasios等^[12]研究了颗粒形状很大程度上影响颗粒材料的体相性质,棱角状颗粒料的集合体比圆形颗粒具有更高的剪切强度。Liu等^[13]建立了一个大型的双级螺旋打印机来成型聚合物颗粒料,由于聚合物存在热敏性,聚合物的热分解温度在工艺窗口上重叠导致加工困难。因此,Alaimo等^[14]直接将颗粒料挤出3D打印的方法过程阶段组合在一起,降低了热暴露的风险。Kumar等^[15]证明了使用基于聚合颗粒的增材制

造系统成功制造了柔性聚合物零件。Khondoker等^[16]进一步开发了两段式螺杆挤出系统用于聚合物3D打印。Ferretti等^[17]发现孔隙的形成可能是所采用的打印方式不同所造成的。Woodfield等^[18]开发了一种由加热不锈钢注射器组成的挤出装置,用于加工聚对苯二甲酸乙二醇酯/聚对苯二甲酸丁二醇酯共聚物颗粒。Lu等^[19]开发了一种陶瓷-聚合物复合浆料挤出装置,研究了活塞速度和X-Y速度对纤维丝直径和挤压力的影响。李昭勋等^[20]对大流量螺杆挤出沉积成型打印过程中的跳转拉丝问题进行研究。然而,这些相关研究针对FDM打印技术所面临的问题还有一定的局限性。

针对现有的FDM打印技术所存在的打印材料受限、打印速度以及材料挤出稳定性方面的不足,笔者设计了一种基于螺杆挤出颗粒料3D打印成型设备,通过不断地优化打印参数确定最终的工艺参数。该设备的X轴和Y轴采用皮带传动Z轴通过丝杆传动在保证打印速度的同时提高了成型精度,打印速度高达80 mm/s。同时采用螺杆挤出方式可以实现多材料混合打印,有效地解决了打印耗材单一的局限性。笔者探究了不同的打印速度、打印温度、填充方式、螺杆转速和喷嘴直径等关键参数对打印样件的拉伸强度、弯曲强度、孔隙率和表面粗糙度的影响。

1 实验部分

1.1 基于螺杆挤出颗粒料成型过程

基于螺杆挤出颗粒料的成型过程如图1所示,首先通过丙交酯开环聚合法或直接缩聚法来制备聚乳酸(PLA)原料。然后将原料通过螺杆送入到料筒中经过加热后从喷嘴中挤出,喷嘴沿着成型件每层的轮廓进行移动逐层打印最后成型所需零件,在此过程中需要对成型件进行三维建模、离散化处理

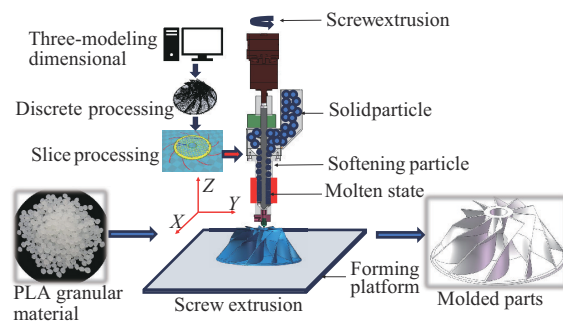


图1 螺杆挤出成型过程

Fig. 1 Screw extrusion molding process

1.2 颗粒料3D打印成型设备

针对大部分高分子塑料颗粒物的成型主要采用螺杆挤出成型,可以实现定量定压地挤出以提高成型的精度。基于螺杆挤出打印材料的可选范围比较广泛并且可以直接打印颗粒料,省去了制备打印丝材工序,同时也让无法制备丝材的脆性材料有了打印的可能,提升了打印机对打印材料的兼容性。但螺杆和料筒的参数与挤出粒料的特性有关,不同粒料对应不同的螺杆结构参数^[21]。笔者设计一种新型基于螺杆挤出颗粒料3D打印机,整体结构如图2a所示,所设计的挤出机构克服了传统丝材打印的缺陷,同时具备螺杆料筒便捷更换的功能。基于螺杆挤出3D打印设备的挤出装置配备了加热棒和温控仪,以保证在挤出过程中提供稳定的热量。此外,还使用了散热风扇给挤出电机和储料箱进行实时散热,防止挤出电机长时间在高温下工作而降低电机的使用寿命。图2b为螺杆挤出装置,该装置分为三个区域(喂料区、软化区和熔融区),各区域的螺纹长度和螺槽深度不同。

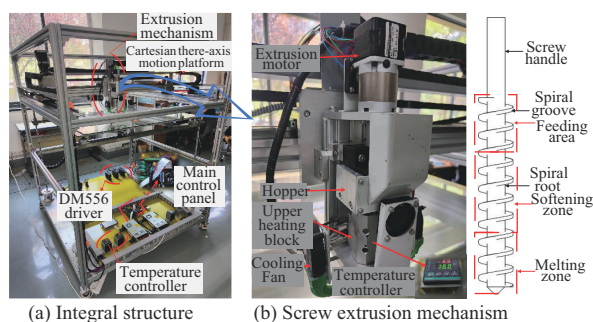


图2 成型设备实物图

Fig. 2 Physical drawing of molding equipment

1.3 螺杆结构参数

螺杆的结构参数见表1,针对螺杆的设计首先确定2个关键参数即螺杆的高宽比 L/D 和压缩比,通常情况下,螺杆的高宽比选择在16:1~24:1,压缩比选择在2:1~3:1^[22],这样可以保证有足够的时间融化颗粒料并消除储存在料筒中的空气以实现在喷嘴处稳定挤出,笔者选取的高宽比为16:1,进料区、软化区和熔融区分别为76,63 mm和45 mm。压缩比 ε 可以通过以下公式进行求解。通过将参数带入计算得 ε 值在2:1~3:1的范围内。

$$\varepsilon = \frac{h_F(S-e)(D-h_F)}{h_M(S-e)(D-h_M)}$$

式中: ε 为螺杆的压缩比; h_F 和 h_M 分别为螺杆进

料区和熔融区的深度; S 为螺杆的螺距; e 为螺杆的宽度; D 为螺杆的外径。

表1 螺杆的结构参数

Tab. 1 Structural parameters of screw

Parameter type	Parameter value/mm	Parameter type	Parameter value/mm
Thread width	10	Helix angle of lift	17.6
Screw Diameter	18.5	Depth of feed section	3
Inner diameter of barrel	20	h_F	1
Total length of screw	184	Depth of metering section	1.2
Length of feed section	76	Pitch of spiral	12
Compressed segment length	63	Slot width	9
Measured segment length	45	Screw and barrel clearance	0.75

2 打印成型

2.1 打印材料

笔者所使用的打印材料为PLA颗粒料,颗粒料的直径为 (2.3 ± 0.5) mm,型号为FY801,密度为1.24 g/m³,熔体流动速率为4 g/10min,拉伸强度为50 MPa,断裂伸长率为5%,呈现出不规则的球状颗粒。

2.2 参数优化

挤出流量主要受螺杆转速和料筒温度的影响,对不同料筒温度下的挤出线径进行了探究,如图3a所示。在恒定的螺杆转速、不同料筒温度下对PLA颗粒料进行挤出,观察挤出的线径与喷嘴直径 ϕ 偏差大小进而确定出最佳的料筒温度。当料筒温度低于170℃时,颗粒料的挤压膨胀效应逐渐减弱导致挤出的丝材直径略小于喷嘴直径;当料筒温度达到170℃时,此时颗粒料融化较为均匀,挤出线径几乎与喷嘴尺寸相等;当料筒温度高于170℃时,颗粒料的挤压膨胀效应过大造成出丝过量导致挤出丝材的直径较大,当料筒温度过高时会影响到出丝质量。因此,最适合的料筒温度为170℃,此外根据PLA颗粒料的熔融特性,打印PLA材料时的喷嘴最适温度为205℃。

为了进一步优化成型工艺参数,提高打印时对参数的选用效率,针对不同喷嘴直径和螺杆转速进行了探究,针对不同的喷嘴直径在不同转速下进行挤出比较各喷嘴的出丝直径,如图3b所示。从图3b可以看出,挤出丝材的直径随螺杆转速的增大而增

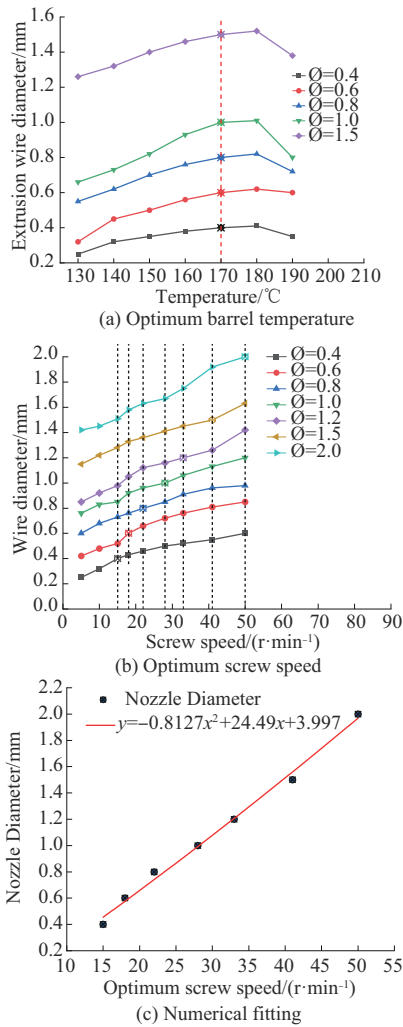


图3 成型工艺参数优化

Fig. 3 Optimization of molding process parameters

加,并且每一种喷嘴都对应一个最佳的螺杆转速,表2为喷嘴直径为0.4,0.6,0.8,1.0,1.2,1.5,2.0 mm下稳定挤出时所对应的螺杆转速。由表2可以看出,在稳定出丝的情况下,随着喷嘴直径的增大,螺杆转速也要相应地提高。为了使喷嘴直径与螺杆转速联系更加紧密,通过Matlab软件对表2中的数据点进行回归计算得到图3c中的拟合曲线,拟合函数为 $y = -0.8127x^2 + 24.49x + 3.997$ 。

表2 螺杆转速与喷嘴直径

Tab. 2 Screw speed and nozzle diameter

Screw speed/(r·min ⁻¹)	Nozzle diameter/mm
15	0.4
18	0.6
22	0.8
28	1.0
33	1.2
41	1.5
50	2.0

2.3 成型工艺窗口

表3为喷嘴直径为0.8 mm时打印过程中选定的工艺窗口。为了保证首层打印质量,在热床平台上贴有美纹纸以便首层能够更好地与平台黏合,并且在切片软件中将首层打印层厚设置为80%、首层挤出线宽90%以及首层打印降速比率为75%。

表3 喷嘴直径0.8 mm成型工艺参数

Tab. 3 Molding process parameters with nozzle diameter of 0.8 mm

Parameter	Value
Extrusion ratio	0.65
Extrusion line width/mm	0.6
Withdrawal distance/mm	2.0
Compensating distance/mm	6.0
Withdrawal speed/(mm·s ⁻¹)	100
Layer thickness/mm	0.60
Filling overlap rate/%	90
Barrel temperature/°C	170
Nozzle temperature/°C	205
Hot bed temperature/°C	65
Packing density/%	80
Print speed/(mm·s ⁻¹)	80

2.4 标准试件打印

采用自制的螺杆挤出颗粒料3D打印机探究了不同的填充方式对打印样件的拉伸强度、弯曲强度和表面质量的影响。首先使用切片软件simplify 3D对计算机辅助设计的三维模型进行切片,生成用于打印机所能识别的G代码。然后将G代码导入到自制的螺杆挤出3D打印机的控制主板中,最后打印头根据主控板所识别的G代码进行逐层打印,最终打印成型。样件填充方式如图4所示,按照GB/T 1040.1-2018和GB/T 9341-2000,填充方式采用直线填充、网格填充和蜂窝填充。通过采用不同的填充方式打印样件对其进行拉伸和弯曲试验以确定最佳的填充方式。

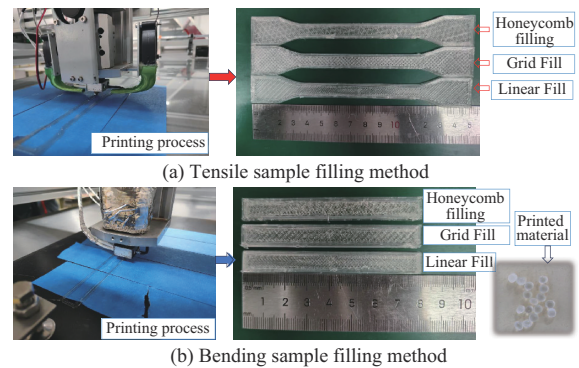


图4 样件填充方式

Fig. 4 Sample filling methods

2.5 空心方块和小方块打印

探究不同挤出流量(EM)下壁厚偏差值的大小以确定最佳的挤出流量,分别采用0.25,0.4,0.6,0.65,0.7和0.85挤出流量打印空心方块,方块的外部尺寸为30 mm×30 mm×5 mm,空心部分尺寸为18 mm×18 mm×5 mm,所有打印方形样件中填充率为100%。挤出流量主要是对沉积材料进行微调,以获得良好的表面质量和正确的壁厚。在打印过程中挤出流量不宜过大也不宜过小,过小易造成挤出不足使得打印件的空隙增大,过大易造成挤出偏多使得过多料向四周溢出影响打印件的表面粗糙度。EM的变化用于工艺参数的优化以确定最佳的打印参数,用于评定30 mm×30 mm×20 mm小方块的表面质量。

3 结果与讨论

3.1 力学性能表征

采用不同的填充方式打印标准拉伸样件和弯曲样件,来比较不同填充方式下的拉伸强度和弯曲强度以得出最佳的填充方式。采用了直线、网格和蜂窝3种不同的填充方式,具体的打印参数见表3。

3.1.1 拉伸强度表征

为保证拉伸试验的顺利进行,将标准拉伸样条进行了拉伸模拟试验。采用Ansys仿真软件中的LS-DYNA模块对标准拉伸样条进行模拟仿真,如图5所示。由图5可见,首先将标准拉伸样件的三维模型(step格式)导入到几何结构中,然后在模型中对拉伸样件进行分割处理将模型分割成三个区域(固定区、拉伸区、连接区),接着给模型添加PLA材料特性,接着对模型进行网格划分,采用四面体网格单元,单元尺寸为0.5 mm,网格单元数为7 525,

添加CFL时间步长,接着给模型添加边界条件包括固定支撑和位移约束,最终进行拉伸模拟仿真。

根据仿真结果所示,拉断的位置在靠近夹头的位置,这可能是因为夹头的夹持力对拉伸样条产生了一个破坏滑移导致断裂。最大的拉伸强度为40 MPa,最大的拉伸变形量为12.04 mm,结合仿真结果的最大拉伸强度和最大拉伸变形量可知,在对拉伸样条做拉伸试验时可以设置最大的位移为20 mm,最大的拉伸强度为50 MPa。对三种不同填充方式的打印样件进行拉伸试验,试验结果如图6所示。以拉伸强度来表征PLA颗粒料的主要力学特征,拉伸强度最大的为网格填充,其值为24.75 MPa;拉伸强度最小的为蜂窝填充,其值为22.36 MPa。由此可知,最佳的填充方式为网格填充。然而,基于此结果发现颗粒料3D打印PLA的拉伸强度略低于丝材3D打印的PLA材料,出现此现象的原因可能是由于两种工艺不同,使用的材料等级和打印参数不同造成的。

3.1.2 弯曲强度表征

为了保证弯曲试验的顺利进行,对标准弯曲样条进行弯曲模拟试验。采用Ansys仿真软件中的LS-DYNA模块对标准弯曲样条进行模拟仿真,结果如图7所示,可知最大的弯曲强度为26.35 MPa,最大的弯曲变形量为15.08 mm。

在实际弯曲试验时,可以依据该仿真结果设置适当的参数以确保弯曲试验顺利进行。对三种不同填充方式的打印样件进行弯曲试验,结果如图8所示。用弯曲强度来表征PLA颗粒料的主要力学特征,弯曲强度最大的为蜂窝填充,其值为22.49 MPa;弯曲强度最小的为网格填充,其值为19.37

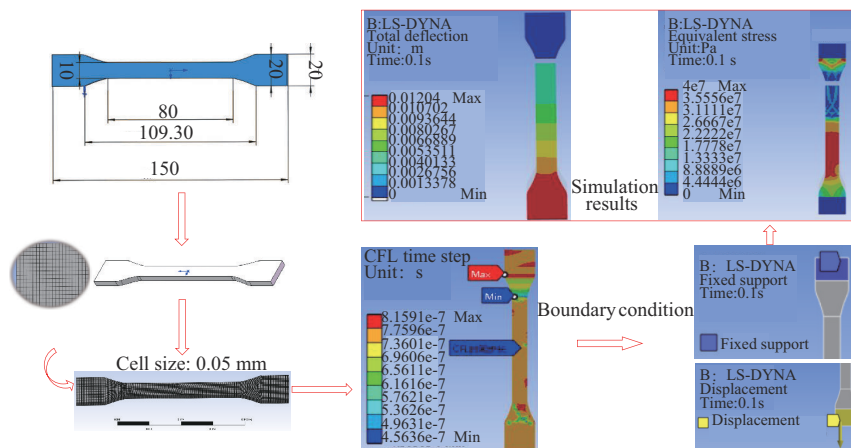


图5 样条拉伸试验仿真模拟

Fig. 5 Simulation of sample tensile test

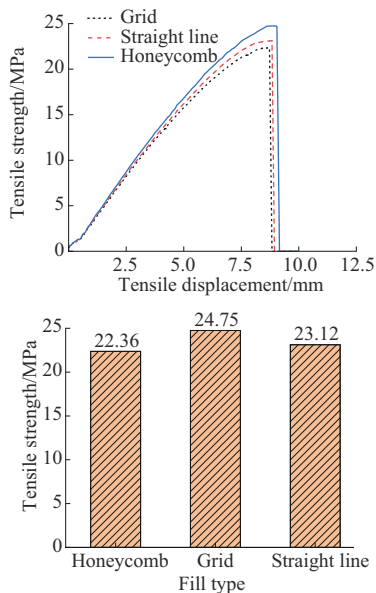


图6 样件拉伸试验

Fig. 6 Sample tensile test

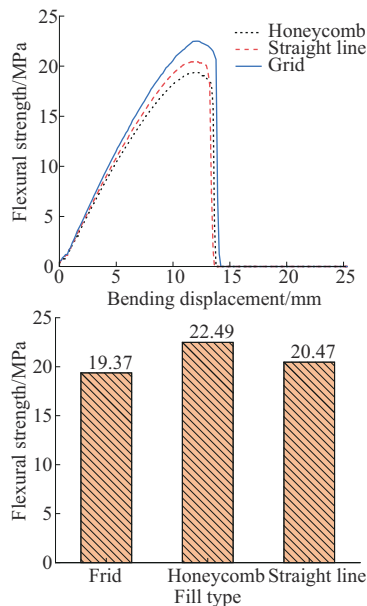


图8 样条弯曲试验

Fig. 8 Sample bending test

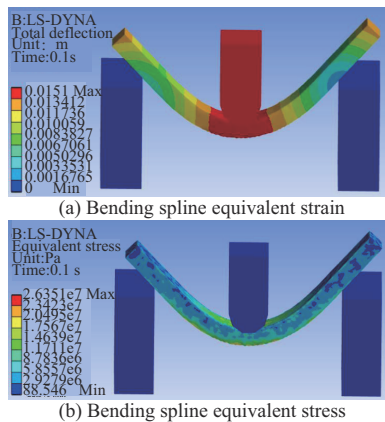


图7 样条弯曲试验仿真模拟

Fig. 7 Sample bending test simulation

MPa。由此可知,最佳的填充方式为蜂窝填充。综上所述,对打印零件拉伸强度有较高的要求可以选用网格填充方式进行零部件的成型,对打印零件的弯曲强度有较高的要求可以选用蜂窝填充的方式进行零部件的成型。

3.2 最佳的挤出倍率

空心立体方块在 simplify 3D 切片软件中选择合适的挤出倍率进行打印,采用 GOM inspect 软件精确测量空心立体样件的壁厚与理论 CAD 模型的标称壁厚进行比较。将每个空心立方体的 CT 扫描数据以 STL 格式导入 GOM inspect 中,并使用 constructor Outer Disr Caliper 的内置功能在多个位置测量每个立方体的侧壁厚度,该功能可以作为虚拟卡尺用来测量与被测元件接触的两个平行圆盘

之间的距离。软件会在接触盘首次接触元件的位置创建两个接触点,然后计算两个接触点之间的距离。壁厚是校准电磁的重要参考参数。表4为不同挤出倍率下的壁厚标准差,从表4可以看出,在不考虑EM值为0.25的空心测试立方体的情况下,EM值为0.65的空心测试立方体与壁厚标称值的偏差最小,为0.1 mm。挤出流量最小值(EM=0.25)是由于挤压不足的情况下没有沉积足够的材料,这一点可以从较低的试样质量和与立方体标称体积的最大偏差得到证明。综上,可以得出结论,较低的EM参数降低了流速,导致挤压不足。然而,挤出流量并不是越大越好,挤出流量过大会导致多余的材料向四周溢出从而大大降低打印件的表面粗糙度。

表4 不同挤出倍率下的壁厚标准差

Tab. 4 Standard deviation of wall thickness at different extrusion multiplicities

Extrusion multiplier	Average wall thickness	Wall thickness standard deviation
0.25	2.78	0.51
0.40	2.89	0.33
0.60	2.92	0.19
0.65	3.03	0.10
0.70	3.07	0.18
0.85	3.18	0.35

在增材制造过程中成型件的力学性能易受孔隙的影响,这是由于聚合物颗粒中存在水分,水分在打印过程中蒸发,导致微孔的形成^[8]。然而,针对颗粒料3D打印而言,孔隙的出现可能是由于颗粒

料不规则表面以及挤出倍率不佳导致材料挤出不连续造成的。为了进一步确认挤出倍率的最佳值,对空心立体样件进行了内部空心扫描,扫描结果列于表5。从表5可以看出,孔隙总体积和孔隙率都随着挤出倍率的增大呈现出先减小后增大的趋势。但是,孔隙率无论是增大还是减小所表现出来的趋势都要小于孔隙总体积。这是由于挤出倍率过小导致挤出不足进而线与线和层与层之间出现间隙;而挤出倍率过大一方面会导致单位时间内挤出的材料偏多,另一方面会导致过多的材料向四周溢进出进而使得打印件的孔隙率增大。无论是从孔隙率还是孔隙总体积来看,挤出流量($EM=0.65$)所呈现出来的结果都是最佳的。

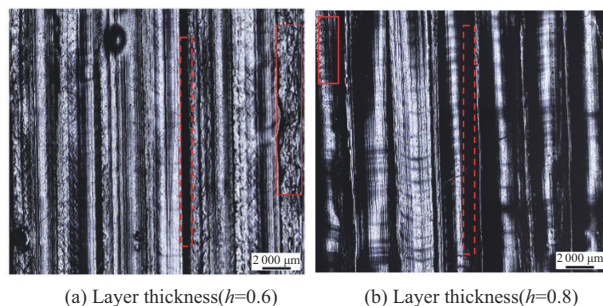
表5 孔隙率及孔隙总体积

Tab. 5 Porosity and total pore volume

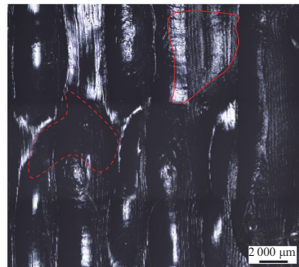
Extrusion multiplier	Total pore volume	Porosity/%
0.25	12.334	0.954
0.40	8.153	0.826
0.60	5.698	0.723
0.65	3.056	0.644
0.70	6.769	0.745
0.85	10.963	0.891

3.3 表面质量

层厚是影响样件表面成型质量的重要因素,层厚越大表面成型质量的效果就越差,层厚越小表面成型质量的效果就越好。为了定量地判断层厚对打印件表面质量的影响,选用三种层厚(0.6, 0.8 mm和1.0 mm)进行打印小方块,图9为不同速度下的二



(a) Layer thickness($h=0.6$) (b) Layer thickness($h=0.8$)



(c) Layer thickness($h=1.0$)

图9 样件表面二维形貌图

Fig. 9 2D topography of the sample surface

维表面形貌,从图9可以看出,二维表面形貌主要分为三个区域:模糊区、明亮区和黑色区,模糊区在图9中用实线框选出来,这是由于打印件表面凸起导致显微镜无法聚焦;黑色区在图9中用虚线框选出来,这是由于打印件表面凹陷导致显微镜光线无法到达指定的位置;明亮区表示表面平整。从图9可以看出,随着层厚的增大,打印件的表面形貌逐渐变得粗糙。

为了更加精准地分析打印样件的表面粗糙度,取打印件的同一位置测量线粗糙度并可视化。图10为不同层厚下的表面粗糙度分布曲线,从图10可以看出,当打印层厚(h)为0.6 mm时,粗糙度值的波动最小,当 $h=1.0$ mm时,粗糙度值的波动最大。由此可以得知打印件的粗糙度随着打印层厚的增加呈现出逐渐增大的趋势,当层厚为0.6 mm时,表面粗糙度为 $160.51 \mu\text{m}$;当层厚为1.0 mm时,表面粗糙度为 $220.38 \mu\text{m}$,提升了37.30%。

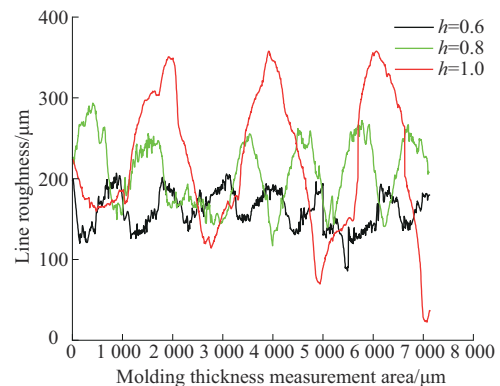


图10 不同层厚下表面粗糙度值

Fig. 10 Surface roughness values for different layer thicknesses

4 结论

针对现有的FDM打印技术所存在的出丝不稳、打印速度受限、最优打印参数选择以及填充方式对打印件的力学性能影响等问题进行了初步的探究,通过仿真与试验相结合的方式可以得出以下结论。

(1)通过探究不同EM下壁厚偏差值的大小以及打印件内部的孔隙率以确定最佳的挤出流量,分别采用0.25, 0.4, 0.6, 0.65, 0.7和0.85的挤出流量打印空心方块,得出当 $EM=0.65$ 时,空心方块的壁厚偏差值最小,偏差值的大小为0.1 mm,此时的方块内部的孔隙率也最小,其值为0.64%。

(2)采用不同填充方式对打印标准拉伸样件和弯曲样件进行拉伸试验和弯曲试验,结果表明,蜂窝填充表现出更加优异的弯曲性能,弯曲强度为

22.49 MPa,相比于网格填充的 19.37 MPa 提升了 16.10%,然而,网格填充表现为更加优异的拉伸性能,拉伸强度为 24.75 MPa,相比于蜂窝填充的 22.36 MPa 提升了 10.69%。

(3)随着打印层厚的增大,打印件的表面粗糙度逐渐降低,通过分析可知,当层厚为 0.6 mm 时,表面粗糙度为 160.51 μm ;当层厚为 1.0 mm 时,表面粗糙度为 220.38 μm ,提升了 37.30%。

参考文献

- [1] GU D D, MEINERS W, WISSENBAACH K, et al. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms[J]. *International Materials Reviews*, 2012, 57(3): 133–164.
- [2] CHOUDHURY S, ACHARYA U, ROY J, et al. Recent progress in solid-state additive manufacturing technique: Friction stir additive manufacturing[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2023, 237(2):467–491.
- [3] SHAIK Y P, SCHUSTER J, SHAIK A. A scientific review on various pellet extruders used in 3D printing FDM processes[J]. *Open Access Library Journal*, 2021, 8(8):1–19.
- [4] ALEXANDRE A, CRUZ SANCHEZ F A, BOUDAUD H, et al. Mechanical properties of direct waste printing of polylactic acid with universal pellets extruder: Comparison to fused filament fabrication on open-source desktop three-dimensional printers[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2020, 7(5):237–247.
- [5] MINETOLA P, CALIGNANO F, GALATI M. Comparing geometric tolerance capabilities of additive manufacturing systems for polymers[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101103.
- [6] VOLPATO N, KRETSCHKE D, FOGGIATTO J A, et al. Experimental analysis of an extrusion system for additive manufacturing based on polymer pellets[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81(9):1 519–1 531.
- [7] REDDY B V, REDDY N V, GHOSH A. Fused deposition modeling using direct extrusion[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2007, 2(1):51–60.
- [8] VALKENAERS H, VOGELER F, FERRARIS E, et al. A novel approach to additive manufacturing: Screw extrusion 3D-printing [C]//*Proceedings of the 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*. Research Publishing, Singapore, 2013:235–238.
- [9] TSENG J W, LIU C Y, YEN Y K, et al. Screw extrusion-based additive manufacturing of PEEK[J]. *Materials & Design*, 2018, 140: 209–221.
- [10] WOERN A L, BYARD D J, OAKLEY R B, et al. Fused particle fabrication 3D printing: Recycled materials' optimization and mechanical properties[J]. *Materials*, 2018, 11(8). DOI: 10.3390/ma11081413.
- [11] WANG Z, LIU R, SPARKS T, et al. Large-scale deposition system by an industrial robot (I): Design of fused pellet modeling system and extrusion process analysis[J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2016, 3(1):39–47.
- [12] ATHANASSIADIS A, MISKIN M, KAPLAN P, et al. Particle shape effects on the stress response of granular packings[J]. *Soft Matter*, 2014, 10(1):48–59.
- [13] LIU X, CHI B, JIAO Z, 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.
- [14] ALAIMO G, MARCONI S, COSTATO L, et al. Influence of meso-structure and chemical composition on FDM 3D-printed parts[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2017, 113:371–380.
- [15] KUMAR N, JAIN P K, TANDON P, et al. Extrusion-based additive manufacturing process for producing flexible parts[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2018, 40(3):1–12.
- [16] KHONDOKER M A H, SAMEOTO D. Direct coupling of fixed screw extruders using flexible heated hoses for FDM printing of extremely soft thermoplastic elastomers[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2019, 4(3):197–209.
- [17] FERRETTI P, LEON-CARDENAS C, SANTI G M, et al. Relationship between FDM 3D printing parameters study: parameter optimization for lower defects[J]. *Polymers*, 2021, 13(13). DOI: 10.3390/polym13132190.
- [18] WOODFIELD T B F, MALDA J, DE WIJN J, et al. Design of porous scaffolds for cartilage tissue engineering using a three-dimensional fiber-deposition technique[J]. *Biomaterials*, 2004, 25 (18):4 149–4 161.
- [19] LU X, LEE Y, YANG S, et al. Extrusion freeforming of millimeter-wave electromagnetic bandgap (ebg) photonic crystals [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2009, 14(S1):168–174.
- [20] 李昭勋, 王晓, 吴华英, 等. 大流量颗粒料 3D 打印跳转拉丝控制研究[J]. *机械工程与自动化*, 2022(1):5–7.
LI Zhaoxun, WANG Xiao, WU Huaying, et al. Research on jump wire drawing control of large flow granular materials in 3D printing[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2022(1):5–7.
- [21] 杨磊, 马睿, 黄部东, 等. FDM 3D 打印挤出螺杆设计及应用研究[J]. *铸造设备与工艺*, 2017(3):8–10, 15.
YANG Lei, MA Rui, HUANG Budong, et al. Study on application and design of extrusion screw for FDM 3D printing[J]. *Foundry Equipment And Technology*, 2017(3):8–10, 15.
- [22] ZHANG Jingzhi, NING Tingzhou, GOU Yanan. Application of parametric modeling technology in single screw extruder[J]. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, 2020 (8). DOI:10.17683/ijomam/issue8.31.