

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.06.011

3D 打印速度对 PLA 制件表面质量和力学性能的影响

于小健¹, 钱善华^{1,2}, 董淑宏^{1,2}, 程峰^{1,2}, 卞达^{1,2}, 姚瑾¹

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要: 为了提高熔融沉积型 3D 打印制件的力学性能, 基于单因素控制变量法, 利用白光干涉形貌仪、扫描电子显微镜和电子万能试验机等设备, 研究了 3D 打印速度对聚乳酸 (PLA) 表面质量和力学性能的影响规律。结果表明: 较低的外壳速度可改善 3D 打印制件表面质量, 而较高填充速度可提高打印制件力学性能。当外壳速度为 40 mm/s 时, PLA 制件表面平整光滑, 丝材排列紧密且分布均匀, 粗糙度为 10.2 μm ; 同时打印过程稳定, 出丝顺畅, 制件尺寸偏差较小, 尺寸精度达到了 0.16 mm。制件压缩强度差异化与制件截面孔隙率及铺层间粘结面积有关, 而拉伸强度和断裂伸长率提升得益于制件残余内应力的降低和丝材及铺层间界面强度的改善, 且当填充速度为 110 mm/s 时, 制件压缩强度和拉伸强度分别达到了 75.7 MPa 和 44 MPa, 断裂伸长率为 2.66%。

关键词: 3D 打印速度; 聚乳酸; 表面质量; 力学性能

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)06-0061-06

Effect of 3D Printing Speed on the Surface Quality and Mechanical Properties of PLA Parts

Yu Xiaojian¹, Qian Shanhua^{1,2}, Dong Shuhong^{1,2}, Cheng Feng^{1,2}, Bian Da^{1,2}, Yao Jin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to improve the mechanical properties of fused deposition modeling 3D printing parts, based on single factor control variable method, the effect of 3D printing speed on the surface quality and mechanical properties of polylactic acid (PLA) parts was studied by using white light interference topography instrument, scanning electron microscope and electronic universal testing machine and other equipment. The results show that lower shell speed can improve the surface quality of 3D printing parts, and higher filling speed can improve the mechanical properties. When the shell speed is 40 mm/s, the surface of PLA parts is flat and smooth and the wires are closely arranged and evenly distributed, and the roughness is 10.2 μm . At the same time, not only the printing process is stable and the output of filament is smooth, but also the dimensional deviation of parts is small, and the dimensional accuracy reaches 0.16 mm. The difference of compressive strength is related to the porosity of PLA parts and the bonding area between layers. The improvement of tensile strength and elongation at break is due to the reduction of residual internal stress and the improvement of interface strength between filaments and layups. When the filling speed is 110 mm/s, the compressive strength and tensile strength of 3D parts reach 75.7 MPa and 44 MPa respectively, and its elongation at break is 2.66%.

Keywords: 3D printing speed; polylactic acid; surface quality; mechanical property

3D 打印技术是基于平面离散和堆积成型原理, 借助于计算机辅助设计 (CAD) 的一种“自下而上”的增材制造方法, 它以离散可粘合材料 (如粉末状金属或塑料等) 为耗材, 通过逐层打印和堆积叠加方式来构造三维实体^[1]。其中熔融沉积成型 (FDM)

是目前较为成熟的 3D 打印增材制造技术之一, 其具有设备简单、成本低廉、操作便捷和效率高等优势, 广泛应用于机械、医疗、汽车和建筑等领域^[2-3]。工业上可用于 FDM 3D 打印成型的热塑性塑料有聚乳酸 (PLA)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS)

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (11972171), 2022 年江南大学大学生创新训练计划重点项目 (2022105Z) 和一般项目 (2022367Y)

通信作者: 钱善华, 教授, 主要研究方向为摩擦学及表面工程

收稿日期: 2022-04-07

引用格式: 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.

和尼龙等,其中 PLA 因具可降解性、环保无毒性,是 FDM 成型最常用的 3D 打印材料^[4]。但与传统注塑件相比,3D 打印成型的 PLA 制件因表面粗糙、尺寸精度和力学性能差致其工程应用还存在一定的局限性。

为了满足个性化需求并拓展 3D 打印技术应用,如何完善并提高 FDM 3D 打印 PLA 制件的力学性能成为学术界的研究热点。实践发现,除原材料本身属性外,成型工艺参数对 3D 打印制品质量和性能也存在较大影响。工艺参数设置的不同,打印出的模型质量与力学性能也不尽不同^[5]。国内外学术界在提高 FDM 3D 打印制件力学性能方面做了广泛的研究,并取得了诸多成果。如 Chacon 等^[6]研究了不同打印堆叠方式对 3D 打印制件力学性能的影响,发现沿水平方向堆叠其力学性能最好,侧边方向和垂直方向性能依次降低。Tian 等^[7]研究了不同打印温度下 3D 打印连续碳纤维增强 PLA 复合材料的力学性能,发现打印温度偏低时复合材料界面性能较差、弯曲强度偏低,但随着打印温度的提升,材料界面性能改善明显,在 240℃ 时弯曲强度可提高至 155 MPa。Hu 等^[8]研究不同 3D 打印工艺参数影响时发现层高对复合材料弯曲性能的影响最为显著,且随着打印层高的减小,复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量最高可达到 610 MPa 和 40 GPa。

3D 打印速度为打印机喷嘴相对于打印基板的移动速度,包括外壳速度、填充速度和空走速度。外壳速度对打印件表面质量有着决定性作用,填充速度影响着丝材及铺层间粘结程度的好坏,而空走速度对打印时间长短有重要影响。一般情况下,空走速度相对最快,填充速度次之,外壳速度最慢。但多数研究常将三者混为一谈或区分不明显^[9-10]。基于此,笔者以 FDM 3D 打印工艺中“打印速度”为研究变量,探究外壳速度对打印制件表面质量的影响及填充速度对制件力学性能的影响规律,并对其影响机制进行分析和探讨,旨在获得最适宜的外壳速度和填充速度,为 3D 打印设备调试和工艺参数优化提供理论依据和技术支持。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA 丝材:卷丝,直径为 1.75 mm,密度为 1210 kg/m³,深圳市极光尔沃科技股份有限公司。

1.2 主要设备及仪器

FDM 桌面打印机:MakerBot Replicator Z18 型,美国 MakerBot 有限公司;

电子万能试验机:WDW-100KN 型,深圳三思纵横科技股份有限公司;

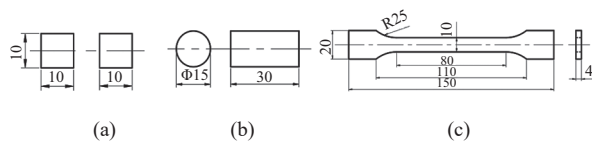
白光干涉形貌仪:MFP-D 型,美国 RTEC 公司;

扫描电子显微镜(SEM):EVO18 型,德国卡尔蔡司公司;

电子数显卡尺:0~200 mm,成都成量工具集团有限公司。

1.3 试样制备

利用 Solid Works 三维建模软件绘制 3D 打印试样,拉伸和压缩试样分别参照 GB/T 1040.2-2006 和 GB/G 1041-2008 标准,试样尺寸细节如图 1 所示。将试样模型以 STL 格式导出,使用 MakerBot Print 软件先对模型进行切片处理和打印参数的设置,再生成 Gcode 文件传送至打印机进行试样打印。表面质量试样外壳速度设置为 20,30,40,50,60 mm/s,填充速度为 110 mm/s;力学性能试样填充速度设置为 70,90,110,130,150 mm/s,外壳速度为 40 mm/s。打印机其他参数均设置一致,如打印温度为 210℃,填充率为 100%,打印层高为 0.2 mm,打印空走速度为 150 mm/s,填充方式为直线型且其角度为 0°/90°。



a—粗糙度和尺寸精度试样;b—压缩试样;c—拉伸试样

图 1 试样尺寸

1.4 性能测试

利用白光干涉形貌仪观测 PLA 试样表面三维形貌,并测量表面粗糙度,精度为 0.1 nm;

利用电子数显卡尺测量样品同方向(X或Y)尺寸 5 次,计算均值作为实际测量结果,精度为 0.01 mm,并取实际测量尺寸与理论设计尺寸偏差绝对值作为尺寸精度评价标准;

采用位移加载模式,利用电子万能试验机测试样品拉伸和压缩性能,测试 3 次后结果取均值,且拉伸和压缩速率分别设置为 5 mm/min 和 2 mm/min;

截取试样并喷金后,利用 SEM 观察其截面形貌。

2 结果与讨论

2.1 外壳速度对 PLA 制件表面质量影响

图 2 为不同外壳速度下的 PLA 制件表面三维微观形貌轮廓图。从图 2 可以看出, PLA 制件表面轮廓整体形貌起伏不定,主要由规则且均匀分布的波峰和波谷组成。外壳速度较慢时(图 2a),制件表面三维形貌以平台为主,其上分布着细小的粗糙峰,波峰高度为 0.3 mm,而波谷数量少且轮廓不明显,其深度为 0.14 mm,峰顶与谷底之间距离仅为 0.16 mm,表明制件表面较为光滑,粗糙度小。随着速度的增加且适中时(图 2b),PLA 制件表面波峰和波谷整体分布均匀、阶梯效应明显,且峰顶平坦又宽阔,其高度逐渐降低,仅为 0.2 mm;同时波谷光滑狭窄,其边缘具有极高的直线度,深度亦下降明显,峰顶与谷底之间距离为 0.18 mm。速度较快时(图 2c),PLA 制件表面呈瘦高型波峰和粗糙矮宽型波谷形貌,峰高和谷深变幅较大,其峰顶高度升为 0.27 mm,谷底深度降为 -0.12 mm,峰顶与谷底之间距离增至 0.39 mm。

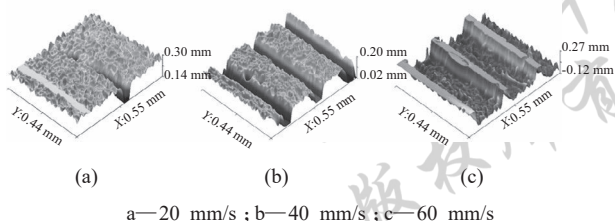


图 2 不同外壳速度下的 PLA 制件表面三维微观形貌

图 3 为不同外壳速度下 PLA 制件的二维表面形貌。图 3 中白色条纹为 PLA 丝材,对应图 2 中的波峰,黑色为丝材间隙,对应图 2 中的波谷。外壳速度较慢时(图 3a),丝材模糊且间隙界线不明显,说明制件表面相邻丝材有挤压粘结、堆积和搭接现象。速度适中时(图 3b),竖直方向上丝材阶梯效应明显,制件表面纹理和结构明晰可见,表面均匀度和平整度上升,表明打印时出丝顺畅;且丝材与间隙分布均匀、排列紧密,表观质量好。而速度较快时(图 3c),丝材逐渐变细,有轻微断丝现象,且相邻两

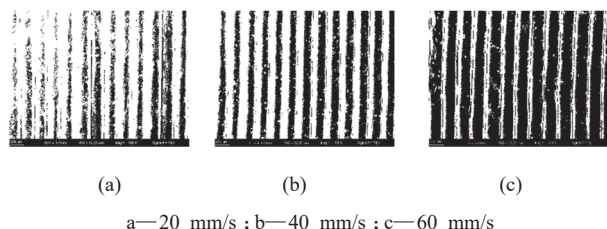


图 3 不同外壳速度下的 PLA 二维表面形貌

波峰或波谷之间的距离逐渐增大,加剧了制件表面凹凸不平,导致 PLA 表面平整度和表观质量均下降,其粗糙度增大。

图 4 为不同外壳速度对 PLA 制件粗糙度和尺寸精度的影响示意图。从图 4 可以看出,制件粗糙度随外壳速度的增加呈现逐渐上升趋势,而尺寸精度却随外壳速度的增加呈现先下降后升高的趋势。当外壳速度为 20 mm/s 时,PLA 表面三维形貌波峰以平台为主且较为光滑,故粗糙度小,仅为 5.4 μm ,但亦因速度过慢,丝材表面有明显溢料囤积或残余隆起现象,而尺寸精度由峰顶高度决定,故其尺寸精度较差,达到了 0.25 mm。随着外壳速度增加至 40 mm/s 时,制件平整光滑、表观质量好,粗糙度为 10.2 μm ;且因速度适中,喷嘴运动稳定,出丝均匀一致,故制件尺寸偏差小,尺寸精度达到 0.16 mm。当外壳速度增加至 60 mm/s 时,速度过快,挤出的丝材量无法满足过快的堆积叠加量,制件表面丝材断丝现象渐增,故其粗糙度较大,达到 25.9 μm ,且线材因挤出受拉而变细,制件实际尺寸与理论尺寸偏差加剧,故其尺寸精度变差且增幅较大。

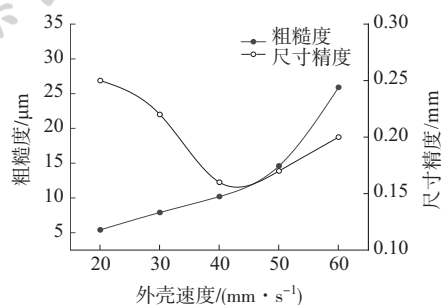


图 4 不同外壳速度下的 PLA 制件表面粗糙度和尺寸精度

外壳速度影响着打印过程的稳定性和持续性。速度较慢时,喷嘴挤出的丝材量远大于填充量,引起喷嘴堵塞或出现丝材挤压堆积、粘结和溢料现象,致使成型件表面多余的丝材局部隆起和突出,偏离理论设计尺寸,故其制件尺寸精度降低;同时因速度过慢,灼热的喷头会再次融化已堆积层,严重时丝材可焦糊或降解变质。但又因速度慢,喷嘴运动也较为稳定,故其表面粗糙度较低,表观质量好。而速度较快时,挤出的丝材量无法满足过快填充量,出现供丝不足或者丝材被牵拉成细线,造成制件表面局部空洞缺陷;同时因速度过快,喷头和机架剧烈振动,致使打印定位精度降低,且惯性作用又使得制件实际尺寸偏移^[11],最终导致成型件的尺寸精度降低。

故综合制件表面粗糙度和尺寸精度,3D 打印外

壳速度应设定为 40 mm/s。

2.2 填充速度对 PLA 制件压缩强度影响

图 5 为不同填充速度下 PLA 制件的压缩应力-应变曲线。从图 5 可以看出,不同填充速度下制件的应力-应变曲线较为相似。在弹性区内,即低应变区域,其压缩应力随应变增加呈现缓慢线性上升的趋势;达到屈服点之后,压缩变形进入塑性屈服阶段,且过屈服点峰值之后,塑性变形均出现应变软化现象,即随应变的增加,应力呈现下降的趋势。

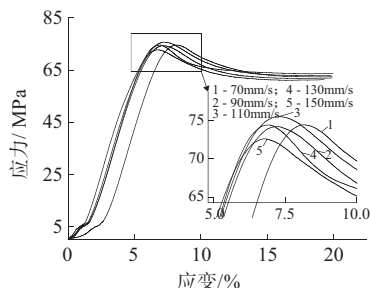


图 5 不同填充速度下 PLA 制件的压缩应力-应变曲线

图 6 为不同填充速度下 PLA 制件的压缩强度曲线。从图 6 可以看出,随填充速度的增加,制件压缩强度呈现先降低后升高再降低的趋势。当填充速度为 70 mm/s 时,制件内部结构致密,相同高度内丝材堆积的实际质量最多,故受压时压缩强度较高;当速度为 90 mm/s 时,速度仍相对较慢,材料存在局部降解和橡胶化现象,其丝材铺层间又渐现孔隙,故压缩强度开始下降。随速度增加至 110 mm/s 时,制件结构相对饱满,且打印时相邻铺层间温差较小,丝材及铺层接触面上易发生熔化再浸润现象,层间结合力和界面强度提高,制件受压缩时不易被破坏,故压缩强度达到峰值 75.7 MPa。但当填充速度增加至 150 mm/s 时,速度过快,制件内部丝材易出现“欠填充”现象,如丝材拉丝、粗细不均或断料等,这种出料不足导致单位面积上堆叠的丝材质量最少,整体填充蓬松且无力,同时上、下铺层间孔隙多、压实作用最小,故试样抗压压缩载荷逐渐减小,压

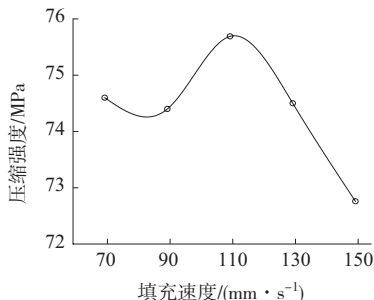


图 6 不同填充速度下 PLA 制件的压缩强度

缩强度降低。

图 7 为不同填充速度下 PLA 制件截面 SEM 照片。从图 7 中可以看出,制件截面平齐光滑且丝材无缩颈变形,均符合脆性断裂形貌特征。当填充速度为 70 mm/s 时 (图 7a), PLA 制件截面粗糙,丝材轮廓和形状不明显,但丝材及铺层间重叠堆积现象却清晰可见,似乎有成整体或连续结构的趋势,且其截面孔洞小且少。填充速度增至 90 mm/s 时 (图 7b),丝材轮廓和形状渐现且局部端面凹凸不平,丝材仍有堆积现象且空隙增多。当填充速度为 110 mm/s 时 (图 7c),截面丝材分布均匀且排列紧密,单丝直径最为粗大,相邻单丝“并肩”搭接现象明显,且线材及上下铺层间接触面积最大,粘结性能最好,利于制件力学性能的增加。但继续增加填充速度至 130 mm/s (图 7d) 和 150 mm/s (图 7e) 时,丝材间隙出现大量曲边梯形状和三角形状孔隙,且丝材分布不均,直径和形状差异较大,同时打印铺层路径较为曲折,层间相对疏松,说明此填充速度下打印机出丝不顺。

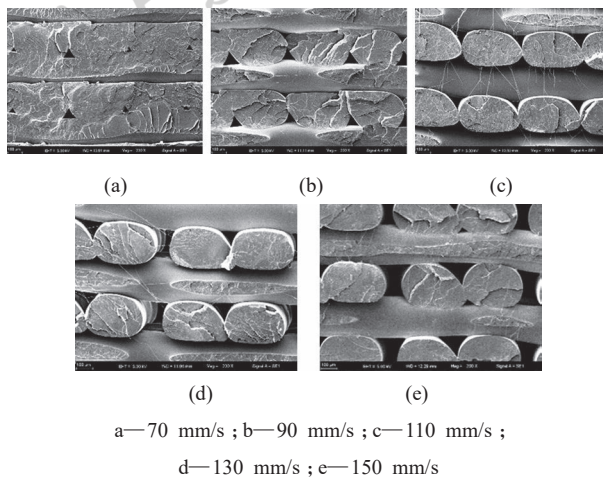


图 7 不同填充速度下 PLA 制件截面照片

分析认为不同打印速度下 PLA 制件压缩强度差异化可能与制件截面孔隙率和铺层间粘结面积有关^[12]。填充速度较低时,PLA 丝材停留在熔腔内时间长,材料熔融充分、熔体流动性好,其制件截面致密、孔洞率低,相同高度内丝材堆积密度最大、质量最重,原则上制件受压时抵抗变形能力最强,但因速度慢,新堆积层与已固化层间温差较大,上、下铺层间仅机械式堆积和叠加,相互无粘结面积和作用力,故压缩强度变低。而速度适宜时,因打印出丝均匀且顺畅,丝材及铺层间间距减小,孔隙缺陷又较少且制品填充密度较高,故受压时应力传递快分散效果

好,且打印时已堆积层还未完全固化,新铺层又能及时补上,引起两层间尚有一定运动能力的分子链可相互粘连和浸润,层间接触面积大、粘结牢固,因此受压时制件压缩强度高。但速度过快时易出现供丝不足的现象,即挤进热腔内的丝材量远远无法满足过快的挤出填充量,导致制件内部断丝和孔洞缺陷增多,同时丝材粗细不均导致铺层间粘结面积减少,故当制件受压时孔隙处发生应力集中,应力发展到极限时裂纹沿着界面直接扩展至丝材本体,导致层间发生界面脱落和丝材剥离现象^[13],故压缩强度大幅下降。

2.3 填充速度对 PLA 制件拉伸强度的影响

不同填充速度下的 PLA 制件拉伸应力-应变曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出,不同填充速度下的 PLA 制件均发生脆性断裂,屈服点之前为弹性阶段,应力随应变增加均呈线性增加,屈服点之后即试样达到最大屈服应力后,发生脆性断裂,且无明显屈服阶段,断裂应变在 2.2%~2.75% 之间。

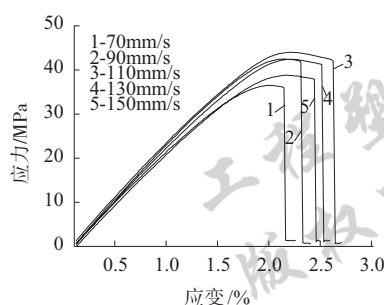


图 8 不同填充速度下的 PLA 制件的拉伸应力-应变曲线

不同填充速度下 PLA 制件的拉伸强度和断裂伸长率变化如图 9 所示。从图 9 可看出,制件拉伸强度和断裂伸长率均是随着填充速度的增加呈现先上升后降低的趋势。当填充速度为 70 mm/s 时,PLA 丝材停留在打印机熔腔内时间较长,高分子丝材易出现降解和烧焦的现象^[14],导致材料本体结构破坏,故制件拉伸强度和断裂伸长率均较低。随填充速度增至 110 mm/s 时,速度适宜,丝材能介于固态与液态之间保持熔融状态且出丝均匀,制件截面致密光滑,且丝材紧密相连,上、下铺层间粘结程度高,故其制件拉伸强度和断裂伸长率俱佳,分别达到 44 MPa 和 2.66%。但继续提高填充速度至 130 mm/s 和 150 mm/s 时,打印速度过快,导致丝材熔融不充分,其制件截面丝径稀疏分散、孔洞渐多渐大,且上、下铺层间接触面积少、粘结性差,故制件拉伸强度和断裂伸长率都呈下降的趋势。

制件拉伸强度和断裂伸长率的这种差异性变

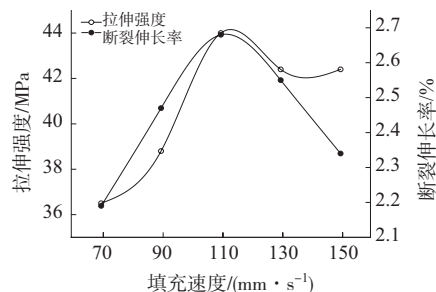


图 9 不同填充速度下的 PLA 制件拉伸性能

化可能与打印填充速度影响 PLA 制件残余内应力及打印层间的界面粘结强度有关^[15-16]。残余内应力直接削弱了制件的拉伸应力,而界面粘结强度间接改善了制件的拉伸强度和断裂伸长率。打印速度过慢时,丝材熔融充分且趋于“液态”,其流动性好,分子链能得以解缠而变松弛,故制件残余内应力小,原则上有助于提高其拉伸强度;但却因速度过慢,丝材铺覆前已堆积层早已固化,由于两层间的温差较大,层间只堆积无粘结,造成层间结合力和界面粘结强度低、塑性差,故受拉时制件易断裂,其拉伸强度和断裂伸长率偏低。速度适宜时,高分子丝材熔融保温充分,其晶粒结构完善、熔融再结晶部分比例增大,且此速度下达到黏流态的丝材其内应力更得以充分排除和释放^[14],故制件塑性好、断裂伸长率高;同时丝材及铺层间“网线”式的相互搭接和粘结,增加了材料整体的连续性,使得制件受力时应力传递速度快、分散效果好,进而其拉伸强度和断裂伸长率得以提升^[17]。但速度过快时,丝材在熔腔内停留时间较短,熔融保温不充分,熔体处于“半固态”状态,流动性差,内应力不易排除,导致制件中残余内应力大;同时因速度大,挤出丝材因牵扯拖拽而逐渐变细,甚至出现拉丝或断丝的欠填充情况,导致制件内部丝径间及上、下铺层间粘结强度减弱,故制件拉伸强度和塑性均降低。

综合制件的力学性能变化趋势,3D 打印填充速度建议设定为 110 mm/s,此速度下不仅一定程度上可缩短打印时间和提高打印进程,同时打印制件能兼具较高的压缩强度和拉伸强度。

3 结论

(1) 外壳速度影响 3D 打印过程的稳定性和持续性,对制件表面质量有决定性作用;而填充速度不仅影响着制件截面孔隙率和层间粘结面积,亦对制件残余应力及界面粘结强度有重要作用。综合打印制件表面质量及力学性能,最优 3D 打印外壳速度为 40 mm/s,填充速度为 110 mm/s。

(2) 当外壳速度为 40 mm/s 时, PLA 表面平整光滑,丝材排列紧密且分布均匀,同时打印过程稳定,出丝顺畅,制件尺寸偏差较小,粗糙度和尺寸精度分别达到了 10.2 μm 和 0.16 mm。

(3) 3D 打印制件压缩强度差异化与制件截面孔隙率和铺层间粘结面积有关,而拉伸强度和断裂伸长率提升得益于制件残余内应力的降低和丝材及铺层间界面强度的改善。当填充速度为 110 mm/s 时,制件压缩强度和拉伸强度分别达到 75.7 MPa 和 44 MPa,断裂伸长率为 2.66%。

参考文献

- [1] 纪宏超,张雪静,裴未迟,等. 陶瓷 3D 打印技术及材料研究进展[J]. 材料工程,2018,46(7):19-28.
Ji Hongchao, Zhang Xuejing, Pei Weichi, et al. Research process in ceramic 3D printing technology and material development[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(7):19-28.
- [2] 雷经发,魏展,刘涛,等. 熔融沉积 PLA 材料动态力学行为及本构模型研究[J]. 中国塑料,2020,34(11):59-65.
Lei Jingfa, Wei Zhan, Liu Tao, et al. Dynamic mechanical behavior and dynamic constitutive model of fused deposition PLA material[J]. China Plastics, 2020, 34(11):59-65.
- [3] 杨露,孟家光,薛涛. 3D 打印工艺参数对 PLA 试件拉伸强度的影响[J]. 塑料工业,2021,49(5):73-77,142.
Yang Lu, Meng Jiaguang, Xue Tao. Effects of 3D printing parameters on tensile properties of PLA[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(5):73-77, 142.
- [4] 王晨蕾,乔雯钰,胡浩,等. 3D 打印聚乳酸材料力学性能的研究[J]. 塑料工业,2020,48(S1):115-119.
Wang Chenlei, Qiao Wenyu, Hu Hao, et al. Study on mechanical properties of 3D printing PLA materials[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(S1):115-119.
- [5] 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.
- [6] Chacon J M, Caminero M A, Garcia-Plaza E, et al. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection[J]. Materials and Design, 2017, 124:143-157.
- [7] Tian Xiaoyong, Liu Tengfei, Yang Chuncheng, et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Technology, 2016, 88:198-205.
- [8] Hu Qingxi, Duan Yongchao, Zhang Haiguang, et al. Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament[J]. Journal of Material Science, 2018, 53:1 887-1 898.
- [9] Ansari A A, Kamil M. Effect of print speed and extrusion temperature on properties of 3D printed PLA using fused deposition modeling process[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45:5 462-5 468.
- [10] Nabavi-Kivi A, Ayatollahi M R, Rezaeian Parham, et al. Investigating the effect of printing speed and mode mixity on the fracture behavior of FDM-ABS specimens[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2021. DOI:10.1016/j.tafmec.2021.103223.
- [11] 闫丽静,李真真,冯婧,等. 聚乳酸 (PLA) 3D 打印工艺研究[J]. 塑料工业,2017,45(2):71-74.
Yan Lijing, Li Zhenzhen, Feng Jing, et al. Research of three-dimensional printing process for PLA[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(2):71-74.
- [12] 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.
- [13] 牟宇松,姜沅政,李红宾,等. 基于 FDM 技术的连续纤维增强复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用,2021,49(12):153-156,161.
Mu Yusong, Jiang Yuanzheng, Li Hongbin, et al. Research progress of continuous fiber reinforced composites based on FDM technology[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12):153-156, 161.
- [14] 崔荣荣,吴海花. 基于计算机辅助的聚乳酸 3D 打印工艺研究[J]. 工程塑料应用,2021,49(4):75-79.
Cui Rongrong, Wu Haihua. Study on 3D printing of PLA based on computer aided[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(4):75-79.
- [15] 高霞,戚顺新,苏允兰,等. 熔融沉积成型加工的结晶性聚合物结构与性能[J]. 高分子学报,2020,51(11):1 214-1 226.
Gao Xia, Qi Shunxin, Su Yulan, et al. Hierarchical structures and mechanical performances of semicrystalline polymer parts fabricated by means of fused deposition modeling[J]. Acta Polymerica Sinica, 2020, 51(11):1 214-1 226.
- [16] 陈向明,姚辽军,果立成,等. 3D 打印连续纤维增强复合材料研究现状综述[J]. 航空学报,2021,42(10):174-198.
Chen Xiangming, Yao Liaojun, Guo Licheng, et al. 3D printed continuous fiber-reinforced composites: state of the art and perspectives[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10):174-198.
- [17] 毕永豹,杨兆哲,许民. 打印方式对熔融沉积成型制品性能的影响[J]. 塑料科技,2017,45(4):59-64.
Bi Yongbao, Yang Zhaozhe, Xu Min. Influence of printing conditions on properties of FDM products[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(4):59-64.