

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.07.013

熔融沉积成型工艺参数对聚乳酸制件力学性能的影响

张林初,王宇,陈侠

(浙江大学机械工程学院,杭州 310058)

摘要:采用熔融沉积成型的方法对聚乳酸 (PLA) 进行 3D 打印,以拉伸强度和拉伸弹性模量为指标,首先通过单因素实验研究了打印温度、层高和打印填充路径对 PLA 打印制件力学性能的影响,在此基础上选择了这三个参数的三个水平,进行了三因素三水平的正交实验,并对正交实验的结果进行了极差分析和灰色关联度计算。结果表明,对 PLA 制件拉伸强度和拉伸弹性模量影响程度最大的为层高,其次为打印填充路径,打印温度的影响程度最小;当打印温度为 200℃,层高为 0.1 mm,并按照制件 XYZ 方向打印同时采用 45°/45° 线填充路径时,成型的 PLA 制件的拉伸性能最好,拉伸强度和拉伸弹性模量分别可达到 47.2 MPa 和 1 622 MPa。

关键词:聚乳酸;熔融沉积成型;3D 打印;力学性能;工艺参数;正交实验;灰色关联分析

中图分类号:TH145 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2019)07-0071-06

Influences of FDM Process Parameters on Mechanical Properties of PLA Parts

Zhang Linchu, Wang Yu, Chen Xia

(School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract : 3D printing of polylactic acid (PLA) was done by fused deposition modelling (FDM), taking tensile strength and tensile modulus as indexes, the influences of printing temperature, layer thickness and printing filling path on the mechanical properties of the PLA materials were studied through single factor experiments. Based on these, 3 levels of each factor were selected in the orthogonal experiments and range analysis and grey relational analysis were conducted based on the experimental results. In conclusion, layer thickness influences the mechanical properties the most significantly, followed by printing filling path and then printing temperature. When the printing temperature is 200℃, layer thickness is 0.1 mm and the PLA part is printed according to XYZ direction and by using 45°/45° line filling path, the highest tensile strength and modulus are achieved, which are 47.2 MPa and 1 622 MPa respectively.

Keywords : polylactic acid ; fused deposition modeling ; 3D printing ; mechanical property , processing parameter ; orthogonal experiment ; grey correlation analysis

熔融沉积成型 (FDM) 是一种将热塑性丝状材料加热熔融成型的 3D 打印技术^[1-3],用于 FDM 的热塑性塑料有聚乳酸 (PLA)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料、尼龙等,其中 PLA 具有生物可降解、加热熔融时无刺激性气味等优点^[4-5],由其制备的 FDM 打印制件热成型性优良、收缩率低、尺寸稳定、力学性能(如纵向拉伸弹性模量)高、在打印过程中发生翘曲的可能性小^[6],是一种常用的 FDM 打印材料。

许多文献研究了 FDM 工艺参数对 PLA 打印

制件性能的影响。如王宜为等^[7]研究了 FDM 工艺中填充模式对 PLA 打印制件力学性能、成型时间及材料消耗的影响,发现同心圆型的填充具有更高的强度、较少的成型时间及材料消耗。贾先等^[8]比较分析了打印时不同工艺参数变化对 PLA 模型在垂直层面方向的压缩力学性能的影响,结果表明,合理设置打印时的分层厚度、喷头温度、打印速度等工艺参数,可以有效提高 3D 打印模型的压缩力学性能。A. L. Duigou 等^[9]对不同线宽的复合材料 FDM 制件的力学性能进行了研究,发现线宽越小的制件,润

通讯作者: 王宇,助理工程师,主要研究方向为增材制造及减材制造 E-mail: wangyug107@163.com

收稿日期: 2019-04-09

引用格式: 张林初,王宇,陈侠. 熔融沉积成型工艺参数对聚乳酸制件力学性能的影响[J]. 工程塑料应用,2019,47(7): 71-76.

Zhang Linchu, Wang Yu, Chen Xia. Influences of FDM process parameters on mechanical properties of PLA parts[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7): 71-76.

湿后的力学性能下降程度越大。相关研究表明,经 FDM 工艺打印的制件,其强度、硬度、模量、应变和粘合力、收缩率等都存在各向异性,同时还容易产生蠕变效应^[10-11],因而针对 FDM 的工艺优化十分重要。另外, FDM 工艺参数较多,其对 PLA 制件力学性能的影响非常复杂。因此,笔者以 PLA 为研究对象,设置打印温度、层高以及打印填充路径为可变参数,其它打印参数以及环境参数保持稳定,打印出不同工艺参数条件下的 PLA 标准拉伸制件,通过单因素实验分析上述 3 种工艺参数对制件拉伸强度和拉伸弹性模量的影响,进而选出合适的参数水平范围进行正交实验,在此基础上分析这 3 个参数对 PLA 力学性能的影响程度,并且选择相应的数学统计方法对结果进行处理,得到双指标下的优化工艺参数组合,为 PLA FDM 工艺的系统研究提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA 丝材:浙江省兰博公司。

1.2 主要仪器及设备

3D 打印机: delta 型,实验室自制,打印软件采用 Repetier-host,切片软件采用 CuraEngine;

电子万能试验机: UTM2000 型,深圳三思纵横科技股份有限公司。

1.3 FDM 工艺参数设计

打印温度、层高以及打印填充路径对制件力学性能的影响程度较大,故选择这 3 个工艺参数为变量,探讨其对 PLA 制件力学性能的影响效果。

(1) 打印温度的设计与选择。

打印温度为丝材挤出时的温度,也称为喷头或挤出温度。在打印温度方面,根据 PLA 材料的熔融温度,将打印温度设为 180~220℃,每隔 10℃ 为一个梯度。打印温度过低,丝材挤出粘结不牢,无法有效打印;打印温度过高,丝材挤出时的高温容易让已经挤出的丝材和正在挤出的丝材发生过度粘结,同样无法实现有效地打印。

(2) 层高的设计与选择。

层高指每一层打印的丝材高度,其由打印速度以及喷头决定。在层高方面将其设置为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm。层高过低时严重加长打印时间,且层间力会大于粘结力导致打印无法成型;层高太大则会导致填充间隙过大,打印材料同样无法成型。

(3) 打印填充路径的设计与选择。

PLA 拉伸制件比较适宜的打印方向如图 1 所

示,将图 1 所示的 3 个打印方向规定为 XYZ, XZY 以及 ZYX;填充路径包括填充线宽、填充间隔、填充角度及轮廓宽度,如图 2 所示,为方便实验工艺参数的描述,将打印方向和填充路径统一归结为打印填充路径。

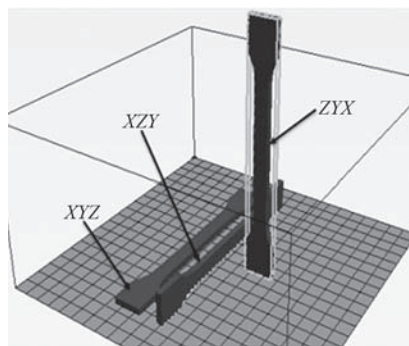


图 1 打印方向

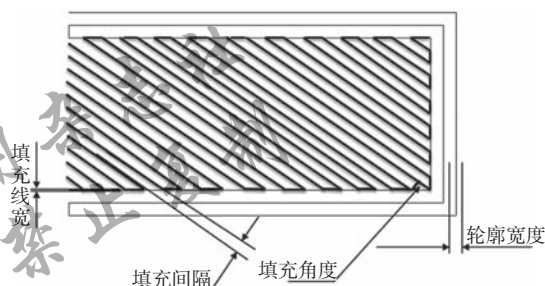


图 2 填充路径在 Z 方向上的视图

在打印方向方面,由于 XZY 打印方向的标准试样中部内凹,无法与热床紧密接触,打印过程中很容易发生丝材大范围偏移,如果添加支撑,又会造成工艺繁琐和成本上升的问题,因此选用 XYZ 和 ZYX 两个打印方向。

所使用的切片软件 CuraEngine 可以选择水平、竖直、线、格等填充路径。实验发现,水平 (0°)、竖直 (90°) 两种填充路径下的制件力学性能明显弱于其它两种,因此选用线和格两种填充路径。如图 2 所示,线填充路径是指打印机喷头按照每一条线逐条扫描填充,角度为 45°/45°,即不同层之间扫描线的角度相同;格填充路径是指将扫描区域分成一定大小的小格,喷头对每个小格进行扫描填充,角度为 45°/-45°,即不同层之间扫描线的角度交叉。

最终选择的打印填充路径分别为 XYZ-线、XYZ-格, ZYX-线和 ZYX-格。

(4) 其它工艺参数的选择。

打印过程中的其它工艺参数具体为:打印速度 (喷头运动过程中的运行速度) 60 mm/s,外边缘打印速度 60 mm/s,填充速度 100 mm/s,填充密度 100%;第一层层高统一为 0.3 mm,其它层高按

照设计值选取;顶层和底层均选择实体填充,外壳厚度选择 0.8 mm,热床温度控制在 50℃,打印的丝材直径为 1.75 mm,打印时风扇始终处于工作状态。

1.4 拉伸性能测试

参照 GB/T 1040.2-2006 测试打印的 PLA 制件的拉伸性能,制件尺寸样式为 1A,厚度为 4 mm。测试过程中,拉伸速度始终稳定在 2 mm/min,拉伸最大载荷为 2 kN。为保证拉伸试验中拉伸结果稳定,不出现大的偶然性误差,每一个参数组合下的试样打印 3 个。考虑到 PLA 打印制件的断裂伸长率均较低 (2%~8%),因此主要测试制件的拉伸强度与纵向拉伸弹性模量,单次测量中控制拉伸强度和纵向拉伸弹性模量的误差范围为 ± 1 MPa。

2 结果与讨论

2.1 单因素实验结果分析

(1) 打印温度对 PLA 制件力学性能的影响。

选择打印填充路径为 XYZ- 线打印,层高为 0.2 mm,考察不同打印温度对 PLA FDM 制件拉伸强度与拉伸弹性模量的影响,结果如图 3 所示。

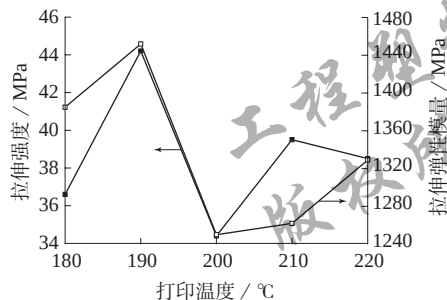


图3 XYZ-线模式下不同打印温度的 PLA 制件拉伸性能

分析图3数据,可知在XYZ-线打印、层高 0.2 mm 条件下,打印温度为 190℃时,拉伸强度和拉伸弹性模量均有最大值,随着打印温度继续升高,拉伸性能反而出现降低的情况,打印温度为 200℃时,拉伸强度和拉伸弹性模量均有最小值,而兰博公司生产的 PLA 丝材推荐的打印温度范围是 195~215℃,图3中拉伸性能最高时的打印温度不在兰博公司的推荐范围内。针对这一情况,在层高 0.2 mm 条件下,分别选择XYZ-格和ZYX-格模式,测试了不同打印温度打印的试样的拉伸性能,结果如图4所示。由图4可知,在XYZ-格和ZYX-格模式下,随着打印温度的上升,拉伸强度和拉伸弹性模量总体上得到提高,打印温度高于 200℃后,拉伸性能呈现出不同的变化,但拉伸强度总体上变化幅度不大。

对比图3和图4可以看出,选择XYZ-线打印

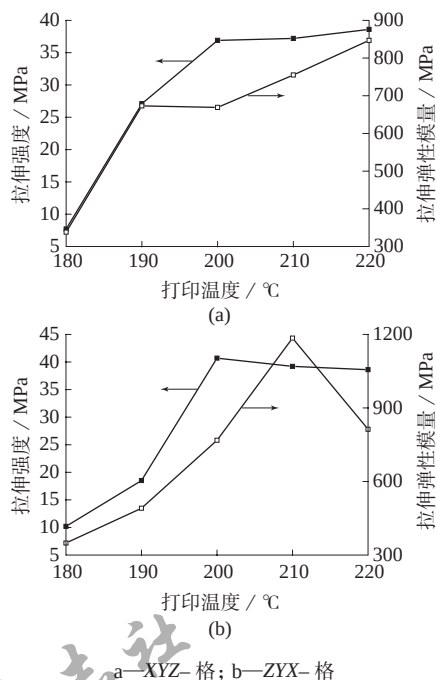


图4 XYZ-格和ZYX-格模式下不同打印温度的 PLA 制件拉伸性能模式,其拉伸强度和拉伸弹性模量随打印温度升高的变化趋势与其它两种打印模式截然不同,这说明了 PLA 制件拉伸性能随打印温度的变化趋势在很大程度上受到了打印填充路径的影响。

(2) 层高对 PLA 制件力学性能的影响。

选择打印填充路径为XYZ-线打印,打印温度为 210℃,考察不同层高对 PLA FDM 制件拉伸强度与拉伸弹性模量的影响,结果如图5所示。

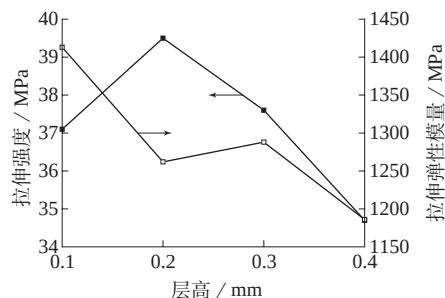


图5 不同层高中 PLA 制件的拉伸性能

由图5可知,随着层高的增加,制件拉伸强度和拉伸弹性模量呈现不同的变化,层高为 0.4 mm 时,制件的强度和模量均较低,与层高为 0.2 mm 时相比,其拉伸强度下降了 12.2%,与层高为 0.1 mm 时相比,其拉伸弹性模量下降了 19.9%。层高为 0.4 mm 时制件力学性能较低的原因可能是,选用的 3D 打印机的出丝直径为 0.4 mm,这导致在相同高度上粘结堆积的丝材较少,制件致密性较差,因而强度和模量较低。

(3) 打印填充路径对 PLA 制件力学性能的影响。

选择打印温度为 210℃, 层高为 0.2 mm, 考察不同打印填充路径对 PLA FDM 制件拉伸强度与拉伸弹性模量的影响, 结果如图 6 所示。

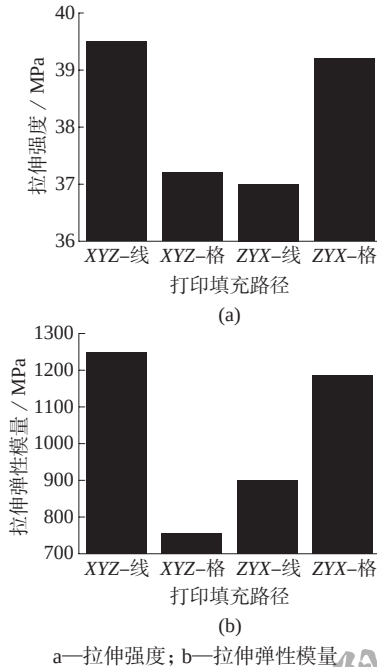


图 6 不同打印填充路径下 PLA 制件的拉伸性能

从图 6 可以看出, 当打印方向为 XYZ 时, 线打印下的制件拉伸强度和拉伸弹性模量明显高于格打印下的强度和模量; 当打印方向为 ZYX 时, 格打印下的制件拉伸强度和拉伸弹性模量明显高于线打印下的强度和模量。可以看出, 在打印温度 210℃ 以及层高 0.2 mm 时, XYZ-线打印的制件拉伸强度和拉伸弹性模量相对最高, ZYX-格次之, 但与 XYZ-线相差不大。分析原因可能是, XYZ 方向的打印面积最大, 线打印的粘结堆积效果较好, 故制件的力学性能相对最好; ZYX 方向的打印面积最小, 格打印的粘结堆积效果较好, 故制件也具有相对较好的力学性能。

2.2 正交实验设计及其结果分析

FDM 不同工艺参数对 PLA 制件力学性能的影响非常复杂, 仅凭单因素实验无法准确获得工艺参数的影响程度以及最优的参数组合。为此, 需采用正交实验来探讨打印温度、层高和打印填充路径对 PLA 制件力学性能的影响程度, 并对这些工艺参数进行优化以获得最终优化结果。

在正交实验中, 将打印温度 (A)、层高 (B) 和打印填充路径 (C) 设为 3 个因素, 根据单因素实验结果选取层高水平为 0.1, 0.2, 0.3 mm。针对打印温度,

根据不同打印填充路径下的单因素实验结果, 经综合考虑, 选为 190, 200, 210℃。对于打印填充路径, XYZ-线和 ZYX-格下的制件拉伸性能较高, 而对于 XYZ-格和 ZYX-线, 相应的制件拉伸性能总体上相差不大, 因此在打印温度 180~220℃, 层高 0.2 mm 的条件下, 测试了 XYZ-格和 ZYX-线模式下的打印制件的拉伸性能, 如图 7 所示。由图 7 可以看出, 在打印温度为 180~220℃ 时, XYZ-格下的制件拉伸性能总体上高于 ZYX-线, 故最终选择的打印填充路径水平为 XYZ-线、XYZ-格和 ZYX-格。

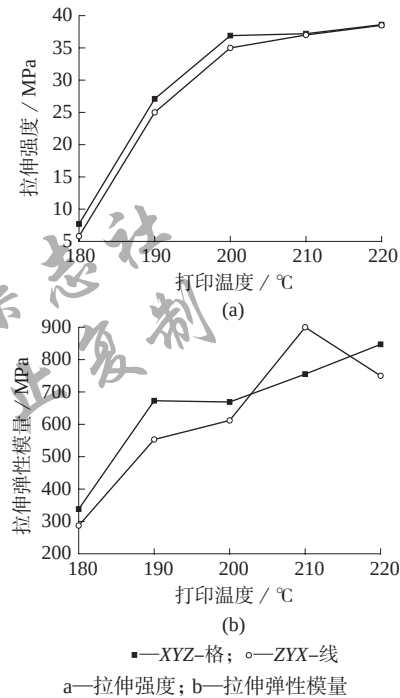


图 7 XYZ-格和 ZYX-线式下不同打印温度的 PLA 制件拉伸性能

根据以上分析结果, 这 3 种因素的水平设计如表 1 所示。

表 1 正交实验因素水平设计表

水 平	因 素		
	A / °C	B / mm	C
1	190	0.1	XYZ-线
2	200	0.2	XYZ-格
3	210	0.3	ZYX-格

根据以上因素水平的选择, 选择正交实验表为 $L_9(3^3)$, 以拉伸强度和拉伸弹性模量为指标, 则具体实验方案及结果如表 2 所示。

对拉伸强度结果进行极差分析, 结果如表 3 所示。从表 3 分析可以得到三种因素对制件拉伸强度的影响大小程度: 层高 > 打印温度 > 打印填充路径, 且最佳工艺参数组合为 A2B1C1, 即对于拉伸强度最佳的打印方案为打印温度 200℃, 层高 0.1 mm, 打印填充路径 XYZ-线。

表2 正交实验方案及结果

实验序号	A	B	C	拉伸强度 / MPa	拉伸弹性模量 / MPa
1 [#]	1	1	1	45.2	1480
2 [#]	1	2	2	27.1	673
3 [#]	1	3	3	23.5	648
4 [#]	2	1	2	46.0	780
5 [#]	2	2	3	38.2	860
6 [#]	2	3	1	40.1	1305
7 [#]	3	1	3	39.5	790
8 [#]	3	2	1	39.5	1262
9 [#]	3	3	2	37.0	1260

表3 拉伸强度的极差分析结果

项 目	A	B	C
K1	95.8	130.7	124.8
K2	124.3	104.8	110.1
K3	116.0	100.6	101.2
R	28.5	30.1	23.6

注: K1, K2, K3 分别表示某因素 3 个水平下的拉伸强度之和, R 表示极差, 下表同。

对拉伸弹性模量结果进行极差分析, 结果如表 4 所示。从表 4 结果来看, 对制件拉伸弹性模量的影响程度从大到小依次为: 打印填充路径>打印温度>层高, 且最佳工艺参数组合为 A3B3C1, 即对于拉伸弹性模量最佳的打印方案为打印温度 210℃, 层高 0.3 mm, 打印填充路径 XYZ- 线。

表4 拉伸弹性模量的极差分析结果

项 目	A	B	C
K1	2801	3050	4047
K2	2945	2795	2713
K3	3312	3213	2298
R	511	418	1749

由表 3 和表 4 的分析结果可以看出, 对于拉伸强度和拉伸弹性模量, 工艺参数的影响程度及最佳工艺参数组合不完全相同, 故采用灰色关联度来获得双指标 (拉伸强度和拉伸弹性模量) 下的工艺影响程度和最优工艺组合。

根据灰度关联公式^[12-13]以及实验数据, 逐步求出表 2 中每组实验对应的灰色关联度, 具体求解步骤如下:

- (1) 确定原始数据序列;
- (2) 数据无量纲化处理;
- (3) 求数据差序列;
- (4) 求灰色关联度系数, 如表 5 所示;
- (5) 求出灰色关联度并进行分析, 结果如表 6 所示。

从表 6 的灰色关联度的极差值可以看出, 层高等对制件拉伸性能的影响最大, 其次为打印填充路径, 再次为打印温度; 从表 6 灰色关联度的均值可

表5 各列数据无量纲化处理、求差序列及灰色关联度系数

拉伸强度 无量纲化	拉伸弹性 模量无量 纲化	拉伸强度 求差序列	拉伸弹性 模量求差 序列	拉伸强度 灰色关联 度系数	拉伸弹性模 量灰色关联 度系数
0.964 444	1.000 000	0.035 556	0.964 444	0.933 610	1.000 000
0.160 000	0.030 048	0.840 000	0.160 000	0.373 134	0.340 147
0.000 000	0.000 000	1.000 000	0.000 000	0.333 333	0.333 333
1.000 000	0.158 654	0.000 000	1.000 000	1.000 000	0.372 760
0.653 333	0.254 808	0.346 667	0.653 333	0.590 551	0.401 544
0.737 778	0.789 663	0.262 222	0.737 778	0.655 977	0.703 892
0.711 111	0.170 673	0.288 889	0.711 111	0.633 803	0.376 130
0.711 111	0.737 981	0.288 889	0.711 111	0.633 803	0.656 151
0.600 000	0.735 577	0.400 000	0.600 000	0.555 556	0.654 088

表6 灰色关联度的极差分析结果

实验 序号	A	B	C	灰色关联度
1 [#]	1	1	1	0.966 804 979
2 [#]	1	2	2	0.356 640 754
3 [#]	1	3	3	0.333 333 333
4 [#]	2	1	2	0.686 379 928
5 [#]	2	2	3	0.496 047 791
6 [#]	2	3	1	0.679 934 193
7 [#]	3	1	3	0.504 966 508
8 [#]	3	2	1	0.644 977 118
9 [#]	3	3	2	0.604 821 803
A1	0.552 259 689	0.719 383 805	0.689 224 858	
A2	0.620 787 304	0.499 221 888	0.513 847 151	
A3	0.584 921 810	0.539 363 110	0.554 896 793	
R	0.068 527 6150	0.220 161 917	0.175 377 706	

注: A1, A2, A3 分别表示某因素 3 个水平下的灰色关联度的均值。以看出, 最佳工艺组合为 A2B1C1, 即当打印温度为 200℃、层高为 0.1 mm、打印填充路径为 XYZ- 线时, 制件应具有较高的拉伸强度和拉伸弹性模量, 在该工艺参数组合下进行打印, 经拉伸测试得到 PLA 制件的拉伸强度为 47.2 MPa、拉伸弹性模量为 1622 MPa, 明显优于表 2 中其它工艺组合下的数据, 验证了正交实验及灰色关联度计算的合理性及优化结果。

3 结论

(1) 通过单因素实验研究了 PLA 打印制件的 3 个主要 FDM 工艺参数——打印温度、层高和打印填充路径对制件拉伸强度和拉伸弹性模量的影响, 在此基础上选择了用于三因素正交实验的三个水平, 并对实验结果进行了极差分析和灰色关联度计算。

(2) 灰色关联度计算结果表明, 对于 PLA 制件拉伸强度和拉伸弹性模量影响程度最大的是层高, 其次为打印填充路径, 再次为打印温度。最优的工艺参数是打印温度 200℃, 层高 0.1 mm, 打印填充路径 XYZ- 线, 在该工艺参数下打印的 PLA 制件拉伸强度达到 47.2 MPa、拉伸弹性模量达到 1622 MPa。

参考文献

- [1] 王鹤. 短碳纤维增强 3D 打印用光敏树脂及力学性能分析[J]. 中国胶粘剂, 2018, 27(8):24-27.
Wang He. Mechanical properties analysis and synthesis of short carbon fiber reinforced 3D printing photosensitive resin[J]. China Adhesives, 2018, 27(8):24-27.
- [2] 丁云雨. 3D 打印用光敏树脂的制备及膨胀单体改性光敏树脂[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
Ding Yunyu. Preparation of photosensitive resin for 3D printing and modified photosensitive resin with expansion monomer[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2016.
- [3] 韩钰, 贾国柱. 基于 3D 打印的离散型产品可制造性优化问题[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(5):1 229-1 234.
Han Yu, Jia Guozhu. Optimization of manufacturability in 3D printing based discrete products[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(5):1 229-1 234.
- [4] 陈景华, 郝发义, 马爽, 等. 聚乳酸 / 有机蒙脱土复合材料制备及性能研究[J]. 包装工程, 2017, 38(19):14-19.
Chen Jinghua, Hao Fayi, Ma Shuang, et al. Preparation of polylactic acid / OMMT composite and research on its properties[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(19):14-19.
- [5] 雷雁洲, 王少伟, 吕秦牛, 等. 碳纤维 / 聚乳酸复合材料的结晶性能和流变特性[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6):1 402-1 406.
Lei Yanzhou, Wang Shaowei, Lyu Qinniu, et al. Crystallization and rheological properties of carbon fiber / poly(lactic acid) composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6):1 402-1 406.
- [6] 林鸿裕, 夏新曙, 杨松伟, 等. 基于熔融沉积成型的聚乳酸 / 热塑性聚氨酯的制备与表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(5):105-110.
Lin Hongyu, Xia Xinshu, Yang Songwei, et al. Preparation and characterization of poly(lactic acid) / thermoplastic polyurethane based on fused deposition modeling[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(5):105-110.
- [7] 王宜为, 郭蕊, 宋永明. 填充模式对熔融沉积 PLA 力学性能、成型时间及材料消耗的影响[J]. 塑料工业, 2017, 45(3):79-82, 96.
Wang Yiwei, Guo Rui, Song Yongming. The effect of infilling mode on mechanical properties, forming time, material consumption of polylactic acid by FDM[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(3):79-82, 96.
- [8] 贾先, 谭栓斌, 雷鸿春, 等. 3D 打印工艺参数对 PLA 压缩性能的影响研究[J]. 制造技术与机床, 2018(4):29-32.
Jia xian, Tan Shuanbin, Lei Hongchun, et al. 3D printing process parameters on PLA compression performance[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2018(4):29-32.
- [9] Duigou A L, Castro M, Bevan R, et al. 3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality[J]. Mater Des, 2016, 96:106-114.
- [10] Dupret-Bories A, Vergez S, Meresse T, et al. Contribution of 3D printing to mandibular reconstruction after cancer[J]. Eur Ann Otorhinolaryngol Head Neck Dis, 2018, 135 (2):133-136.
- [11] Mouser V H M, Levato R, Bonassar L J, et al. Three-dimensional bioprinting and its potential in the field of articular cartilage regeneration[J]. Cartilage, 2017, 8 (4):327-340.
- [12] 赵丹丹, 焦锋. 基于灰色关联分析的 35CrMoV 钢活塞杆激光熔覆工艺参数优化[J]. 兵工学报, 2018, 39(10):2 073-2 080.
Zhao Dandan, Jiaofeng. Process parameters optimization of laser cladding of 35CrMoV steel piston rod based on grey relational analysis[J]. Journal of Military Engineering, 2018, 39(10):2 073-2 080.
- [13] 白飞先, 汪永超, 魏宇, 等. 基于灰色关联分析 - 层次分析法的机械加工工艺评价[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(8):174-176, 180.
Bai Feixian, Wang Yongchao, Wei Yu, et al. Evaluation of machining process based on grey correlation analysis-AHP[J]. Modular Machine Tool & Automated Machining Technology, 2018(8):174-176, 180.
- [13] 董莉, 熊征蓉, 刘向东, 等. 预辐照接枝法提高 PVDF 的紫外线吸收性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(1):23-28.
Dong Li, Xiong Zhengrong, Liu Xiangdong, et al. Study on pre-irradiation grafting method to improve ultraviolet absorption property of PVDF[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45 (1):23-28.
- [14] Calvo M E, Castro Smirnov J R, Míguez H. Novel approaches to flexible visible transparent hybrid films for ultraviolet protection[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2012, 50(14):945-956.
- [15] Zhou Yan, Wang Xiaojian, Liu Xiangdong, et al. Polyurethane-based solid-solid phase change materials with halloysite nanotubes-hybrid graphene aerogels for efficient light-and electro-thermal conversion and storage[J]. Carbon, 2019, 142:558-566.

(上接第 38 页)