

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.10.013

基于正交试验优化 PLA 的 3D 打印工艺参数

郑玲¹, 邓鑫^{1,2}, 焦晓岚¹, 周依莎¹

(1. 中南林业科技大学材料科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 中南林业科技大学材料表面科学与技术湖南省重点实验室, 长沙 410004)

摘要: 结合打印头直径、实物尺寸、材料性能等客观因素, 研究了壁厚、封闭面厚度、填充率、打印速度和打印头温度对聚乳酸 (PLA) 制件力学性能的影响。采用 5 因素 3 水平设计正交试验来优化 3D 打印工艺参数, 并对实验结果进行了正交试验极差分析, 又通过综合评价方差分析方法对 PLA 制件的综合力学性能进行研究, 最后提出了壁厚 0.8 mm、封闭面厚度 0.6 mm、填充率 60%、打印头温度 200℃、打印速度 60 mm/s 最佳参数设定, 从而有效地提高了制件的力学性能。

关键词: 3D 打印; 熔融沉积; 力学性能; 工艺参数; 正交试验

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)10-0068-05

Optimization of 3D Printing Process Parameters for PLA based on Orthogonal Experiment

Zheng Ling¹, Deng Xin^{1,2}, Jiao Xiaolan¹, Zhou Yisha¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. Hunan Province Key Laboratory of Materials Surface & Interface Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract : Combining objective factors such as print head diameter, physical size, material properties, etc., the effects of wall thickness, sealing surface thickness, filling rate, printing speed and print head temperature on the mechanical properties of polylactic acid (PLA) parts were studied. The five-factor and three-level design of orthogonal experiments was used to optimize the 3D printing process parameters, and the experimental results were analyzed by the orthogonal experiment range, and the comprehensive mechanical properties of PLA parts were studied through the method of comprehensive evaluation of variance analysis. Finally, the optimal parameter settings for wall thickness 0.8 mm, closed surface thickness 0.6 mm, filling rate 60%, print head temperature 200℃, and printing speed 60 mm/s are proposed to effectively improve the mechanical properties of the parts.

Keywords : 3D printing ; fused deposition modeling process ; mechanical property ; process parameters ; orthogonal experiment

熔融沉积成型技术 (FDM) 在 3D 打印技术中应用广泛, 其原理是通过高温将材料加热熔化至熔融态, 参考分层数据, 根据这些数据来控制打印喷头挤出, 待产品冷却固化, 再层层堆叠, 由此形成打印产品^[1-2]。FDM 因其操作简单、材料种类广泛、制造成本低、无毒环保, 目前已被较多领域接受, 具有广泛的应用前景。

与注塑零件相比, FDM 印刷零件的功能性应用由于其较低的力学性能而受到影响^[3-4]。为了优

化工艺参数, S. H. Ahn 等^[5]比较了 FDM 印刷部件和注射成型部件的拉伸强度和压缩强度, 发现通过优化 FDM 工艺中气隙和光栅取向等参数, 可以有效提高成型零件的强度和质量。F. Rayegani 等^[6]使用数据处理分组方法 (GMDH) 来建模以对 FDM 工艺参数进行预测和优化。认为影响强度的最重要参数是气隙, 并表明负气隙可以显著地提高拉伸强度。M. Dawoud 等^[7]通过优化气隙和光栅取向参数提高 3D 打印零件的力学性能。通过利用负栅格

基金项目: 湖南省自然科学基金 - 省市联合基金项目 (2019 JJ60075), 材料表面科学与技术湖南省重点实验室开放课题

通信作者: 邓鑫, 博士, 副教授, 研究方向是高分子复合材料成型与加工

收稿日期: 2021-08-06

引用格式: 郑玲, 邓鑫, 焦晓岚, 等. 基于正交试验优化 PLA 的 3D 打印工艺参数 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(10) : 68-72, 80.

Zheng Ling, Deng Xin, Jiao Xiaolan, et al. Optimization of 3D printing process parameters for PLA based on orthogonal experiment[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10) : 68-72, 80.

间隙和 45° 光栅角,高密度零件的力学性能显著提高。相关的研究结果显示,采用 FDM 工艺方法印制的试件,其强度、硬度、模量、附着力和收缩率等都存在不同的各向特性,同时容易对试件产生蠕变效应^[8-9],因此对 FDM 工艺参数进行优化具有重要意义。

聚乳酸 (PLA) 材料生物降解性良好,在 FDM 工艺中应用广泛。笔者以 PLA 为 3D 打印原料,选择合适的工艺参数,包括壁厚(边缘宽度)、封闭面厚度、填充率、打印头温度和打印速度,设计正交试验,选取合适的工艺参数,对冲击和拉伸试验进行数据分析,获得最佳工艺参数,进而对 PLA 制件进行优化^[10-13]。

1 实验方法

1.1 原材料

PLA:丝状耗材,直径 1.75 mm,北京汇天威科技有限公司。

1.2 仪器及设备

微机控制电子万能试验机:WDW-10 型,济南新试金试验机有限公司;

冲击试验机:XJ-550 型,承德试验机有限责任公司;

3D 打印机:Z300 型,北京汇天威科技有限公司。

1.3 3D 打印工艺参数设置及样条制备

利用三维建模软件绘制样条,样条尺寸参照 GB/T 1040.1-2006 和 GB/T 1843-2008 制得。将样条模型以 .STL 格式文件导出,使用 Modlight 软件进行数字模型的切片和打印参数的设置,使用 3D 打印机进行制样^[14]。选择壁厚(边缘宽度)(A)、封闭面厚度(B)、填充率(C)、打印头温度(D)和打印速度(E)5 个工艺参数作为研究内容,设计 5 因素 3 水平的正交试验方法进行样条制备,因素水平表见表 1。

表 1 因素水平表

水平	因素				
	A/mm	B/mm	C/%	D/℃	E/(mm·s ⁻¹)
1	0.4	0.4	40	190	40
2	0.8	0.6	50	200	50
3	1.2	0.8	60	210	60

1.4 性能测试

试样的拉伸性能按照 GB/T 1040.1-2006 测试,拉伸速率为 50 mm/min;

试样的冲击性能按照 GB/T 1843-2008 测试。

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果

表 2 是正交试验力学性能检测结果。

表 2 正交试验结果

试验号	A	B	C	D	E	拉伸强度 / MPa	缺口冲击强度 / (kJ·m ⁻²)
1	1	1	1	1	1	5.219	2.961
2	1	2	2	2	2	4.867	3.534
3	1	3	3	3	3	9.880	3.417
4	2	1	1	2	2	6.188	3.101
5	2	2	2	3	3	7.675	3.836
6	2	3	3	1	1	10.000	3.624
7	3	1	2	1	3	8.170	3.533
8	3	2	3	2	1	9.260	4.349
9	3	3	1	3	2	9.866	3.257
10	1	1	3	3	2	7.457	3.552
11	1	2	1	1	3	6.524	3.094
12	1	3	2	2	1	7.904	2.744
13	2	1	2	3	1	6.468	3.298
14	2	2	3	1	2	8.747	4.349
15	2	3	1	2	3	9.181	3.846
16	3	1	3	2	3	9.415	3.481
17	3	2	1	3	1	7.292	3.249
18	3	3	2	1	2	11.068	2.834

2.2 极差分析

根据极差的大小可以判断因子的影响程度,极差分析见表 3。由表 2,表 3 可知,对于制件的拉伸强度,最佳试验条件为:A3B3C3D1E3,即壁厚(边缘宽度)为 1.2 mm、封闭面厚度为 0.8 mm、填充率为 60%、打印头温度为 190℃、打印速度为 60 mm/s;对于制件的缺口冲击强度,最佳试验条件为:A2B2C3D2E3,即壁厚(边缘宽度)为 0.8 mm、封闭面厚度为 0.6 mm、填充率为 60%、打印头温度为 200℃、打印速度为 60 mm/s。

表 3 极差分析结果

性能	项目	A	B	C	D	E
拉伸强度	k1	6.975	7.153	7.378	8.288	7.691
	k2	8.043	7.394	7.692	7.803	8.032
	k3	9.179	9.650	9.127	8.106	8.474
	R1	2.203	2.497	1.748	0.486	0.784
缺口冲击强度	k1	3.217	3.321	3.251	3.399	3.371
	k2	3.676	3.735	3.297	3.509	3.438
	k3	3.451	3.287	3.795	3.435	3.535
	R2	0.459	0.448	0.544	0.110	0.164

注:k1,k2,k3 分别表示 1,2,3 水平指标总和的均值,R 为极差。

对制件拉伸强度来说,影响因素 A,B,C,D 和 E 的极差分别为 2.203,2.497,1.748,0.486 和 0.784。所以 5 个因素中对拉伸强度影响由强到弱依次为封闭面厚度、壁厚、填充率、打印速度和打印头温度,即 B>A>C>E>D;对于缺口冲击强度来说,影响因素 A,B,C,D 和 E 的极差分别为 0.459,0.448,

0.544, 0.110 和 0.164。因此, 5 个因素中对缺口冲击强度的影响由强到弱依次为填充率、壁厚 (边缘宽度)、封闭面厚度、打印速度、打印头温度, 即 $C > A > B > E > D$ 。

2.3 单因素实验结果分析

(1) 壁厚对 PLA 制件力学性能的影响。

在封闭面厚度 0.6 mm、打印头温度 200℃、填充率 60%、打印速度 60 mm/s 情况下, 考察不同壁厚对 PLA 制件力学性能的影响, 图 1 为壁厚对制件力学性能的影响。由图 1 可以看到, 随着壁厚的增加, 当对制件进行拉伸测试时, 其实际有效受拉截面积增加, 从而导致拉伸强度进一步增加。当壁厚为 1.2 mm 时, 制件的拉伸强度达到最大值; 而缺口冲击强度在壁厚相对较小时, 随壁厚增加呈上升趋势, 当壁厚为 0.8 mm 时达到最大。当壁厚为 1.2 mm 时, 缺口冲击强度降低。造成这种情况的原因可能是当壁厚较厚时, 外壳致密结构限制了其变形。

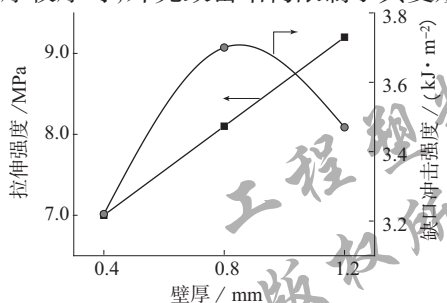


图1 壁厚对制件力学性能的影响

(2) 封闭面厚度对制件力学性能的影响。

在保持壁厚为 0.8 mm、打印头温度 200℃、填充率 60%、打印速度 60 mm/s 不变的条件下, 分别设定封闭面厚度为 0.4, 0.6, 0.8 mm 进行实验, 研究封闭面厚度对样品力学性能的影响。图 2 为封闭面厚度对制件力学性能的影响。

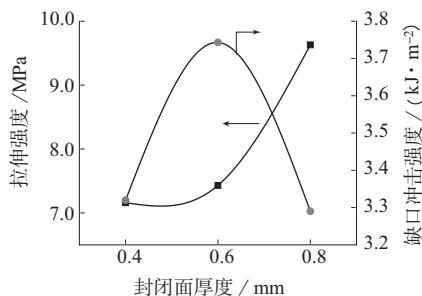


图2 封闭面厚度对制件力学性能的影响

由图 2 可知, 随着封闭面厚度的增加, 制件的拉伸强度和缺口冲击强度呈现不同的变化, 封闭面厚度越大, 拉伸强度越大, 并在封闭面厚度为 0.8 mm 时达到最大值; 而缺口冲击强度在封闭面厚度小

于 0.6 mm 时, 随着封闭面厚度的增加而增加, 在 0.6 mm 处出现极大值。在封闭面厚度为 0.8 mm 时, 缺口冲击强度降低到最小。这与壁厚对制件力学性能的影响趋势一致, 封闭面厚度越厚, 样品填充密度较好, 其变形受到限制。

(3) 填充率对试样力学性能的影响。

在封闭面厚度 0.6 mm、打印头温度 200℃、壁厚 0.8 mm、打印速度 60 mm/s 的情况下, 填充率对制件的力学性能影响如图 3 所示。当填充率为 60% 时, 拉伸强度和缺口冲击强度达到最佳状态, 且填充率越大, 试样的力学性能越好。这是由于拉伸强度和缺口冲击强度与结构有密切关系, 且填充率增加, 线丝间的结合力愈好, 填充结构愈趋于致密, 承载受力增加, 因此拉伸强度提高。

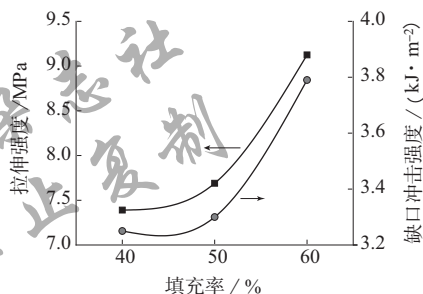


图3 填充率对制件力学性能的影响

(4) 打印头温度对打印制件力学性能的影响。

打印头温度是指打印过程中打印机喷嘴的温度, 打印头的温度决定着线料经过喷嘴时的熔融状态^[15]。在封闭面厚度 0.6 mm、填充率 60%、打印壁厚 0.8 mm、打印速度 60 mm/s 不变的条件下, 打印头温度对制件力学性能的影响如图 4 所示, 随着打印头温度的增加, 制件的拉伸强度和缺口冲击强度呈现不同方向的变化。当打印头温度为 200℃, 其拉伸强度达到最小值, 而缺口冲击强度达到最大值。出现此情况是因为温度与熔融状态有关, 当打印头温度较低时, 熔丝在堆积过程中, 其熔合强度较低。因此温度升高有利于线料之间的熔合度, 制件的制品缺口冲击强度增强。但受到 PLA 材料性质

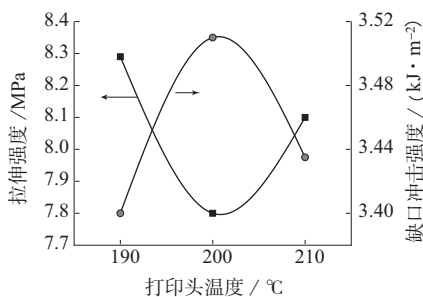


图4 打印头温度对制件力学性能的影响

的影响,会出现物料分解现象,使得材料性能下降。

(5) 打印速度对试样力学性能的影响。

打印速度是指填充网格的速度^[16]。在封闭面厚度 0.6 mm、打印温度 200℃、填充率 60%、打印壁厚 0.8 mm 的条件下,打印速度对制件力学性能的影响如图 5 所示。由图 5 可以看到,制件的拉伸强度和缺口冲击强度随着打印速度的提高而增强,在打印速度为 60 mm/s,制件的力学性能达到最大值。这说明了打印速度在 60 mm/s 时,挤出的丝材能有足够时间使得层与层之间相互融合,提高粘接质量,从而提高力学性能。当打印速度过快时,容易出现丝材熔融状态较差的情况,导致制件力学性能不够理想。

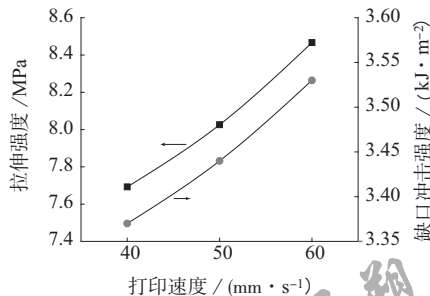


图5 打印速度对试样性能的影响

2.4 综合性能方差分析

试验采用综合评价的方法对拉伸强度和缺口冲击强度两个指标进行加权处理。考虑到选择最佳工艺条件后打印的制件为模型(摆件),模型对缺口冲击强度的要求较高,因此将拉伸强度的权数设为 0.4,缺口冲击强度的权数设为 0.6(可根据制件用途调整隶属度)。考虑到拉伸强度的数据区间与缺口冲击强度的数据区间不一致,且量纲不同,故不能将二者直接进行加权处理,需将两指标进行线性函数归一化处理后再进行加权处理,做综合评价。

制件综合性能评价正交试验方差分析数据处理及归一化加权处理结果见表 4 和表 5。其中空列 1 和空列 2 表示因子之间交互作用产生的影响(在对正交试验进行方差分析时,必须估计随机误差,而随机误差是通过正交表中空列得到的,由空列得到的误差包含了试验和交互作用的综合误差,是一种估算值)。两个空列对结果均未达到不可忽略的程度,应视为误差处理。由表 4 和表 5 可知,综合性能最佳的工艺条件为 $A2B2C3D2E3$,即壁厚(边缘宽度)为 0.8 mm、封闭面厚度为 0.6 mm、填充率为 60%、打印头温度为 200℃、打印速度为 60 mm/s。由方差分析表(表 6)可知, $F_{0.1}$ 表示因子对制件

性能影响较为显著。影响因素 A, B, C, D 和 E 的 $F_{比}$ 分别为 5.385 375, 2.510 922, 8.730 039, 0.008 079 和 0.920 010。因此,5 个因素中对综合性能的影响由强到弱依次为填充率(C)、壁厚(A)、封闭面厚度(B)、打印速度(E)、打印头温度(D),即 $C > A > B > E > D$ 。

表4 综合评价

试验号	A	B	C	D	E	空列 1	空列 2	拉伸强度 变换	缺口冲击 强度变换	综合评价
1	1	1	1	1	1	1	1	0.056 765	0.135 202	0.103 828
2	1	2	2	2	2	2	1	0	0.492 212	0.295 327
3	1	3	3	3	3	3	1	0.808 418	0.419 315	0.574 956
4	2	1	1	2	2	3	1	0.213 030	0.222 430	0.218 670
5	2	2	2	3	3	1	1	0.452 830	0.680 374	0.589 356
6	2	3	3	1	1	2	1	0.827 770	0.548 287	0.660 080
7	3	1	2	1	3	2	2	0.532 656	0.491 589	0.508 016
8	3	2	3	2	1	3	2	0.708 434	1	0.883 374
9	3	3	1	3	2	1	2	0.806 160	0.319 626	0.514 240
10	1	1	3	3	2	2	2	0.417 675	0.503 427	0.469 126
11	1	2	1	1	3	3	2	0.267 215	0.218 069	0.237 727
12	1	3	2	2	1	1	2	0.489 760	0	0.195 904
13	2	1	2	3	1	3	3	0.258 184	0.345 171	0.310 376
14	2	2	3	1	2	1	3	0.625 706	1	0.850 282
15	2	3	1	2	3	2	3	0.695 694	0.686 604	0.690 240
16	3	1	3	2	3	1	3	0.733 430	0.459 190	0.568 886
17	3	2	1	3	1	2	3	0.391 066	0.314 642	0.345 211
18	3	3	2	1	2	3	3	1	0.056 075	0.433 645

表5 归一化加权处理结果表

项目	A	B	C	D	E	空列 1	空列 2
K_1	1.876 867	2.178 902	2.109 916	2.793 577	2.498 773	2.822 496	2.442 217
K_2	3.319 005	3.201 278	2.332 624	2.852 401	2.781 290	2.968 000	2.808 386
K_3	3.253 371	3.069 065	4.006 704	2.803 266	3.169 181	2.658 748	3.198 641
K_1^2	3.522 636	4.747 612	4.451 746	7.804 074	6.243 865	7.966 483	5.964 423
K_2^2	11.015 796	10.248 180	5.441 136	8.136 192	7.735 574	8.809 026	7.887 032
K_3^2	10.584 426	9.419 158	16.053 674	7.858 300	10.043 711	7.068 941	10.231 306
SS_g	0.221 046	0.103 062	0.358 330	0.000 332	0.037 762	0.007 979	0.047 698

表中: SS_g 表示偏差平方和。 $K_1 \sim K_3$ 为每个因素各个水平下的指标总和; $K_1^2 \sim K_3^2$ 表示水平数之和的平方。

表6 方差分析表

偏差来源	SS	df	MS	$F_{比}$	$F_{0.1}$
A	0.221 046	2	0.110 523	5.385 375	5.46
B	0.103 062	2	0.051 531	2.510 922	5.46
C	0.358 330	2	0.179 165	8.730 039*	5.46
D	0.000 332	2	0.000 166	0.008 078	5.46
E	0.037 762	2	0.018 881	0.920 010	5.46
空列 1	0.007 979	2	0.003 989 5	0.194 393	5.46
空列 2	0.047 698	2	0.023 849	1.162 063	5.46
e(误差)	0.061 568	3	0.020 523		
总偏差	0.837 778	17			

注: SS 为离均差平方和; df 为自由度; MS 为均方; $F_{比}$ 是指组间均方和组内均方的比值; * 表示因子对实验结果达到较为显著的水平,不可忽略。

忽略空列误差而得到的方差分析表不能真实

反应试验因素对结果的影响大小。因此,需将实验误差进行合并,对方差分析表进行矫正。矫正后的方差分析表见表7。其中, F_{α} 为分布临界值,设置 $F_{0.05}$ 和 $F_{0.01}$ 主要是讨论因子对制件综合性能影响是否显著。当 $F_{比}$ 大于等于 $F_{0.05}$,代表方程显著, $F_{比}$ 大于等于 $F_{0.01}$,代表方程极显著,若 $F_{比}$ 小于 $F_{0.05}$,则代表方程不显著。由表7可以看出,5个因素中对综合性能的影响由强到弱依次为填充率、壁厚、封闭面厚度、打印速度、打印头温度,即 $C > A > B > E > D$,该结果与矫正前的方差分析表一致,其中填充率对制件综合性能的影响达到极显著,壁厚(边缘宽度)对制件综合性能的影响达到显著但未至极显著,其它因素对制件综合性能的影响均未达到显著水平。

表7 矫正方差分析表

偏差来源	SS	df	MS	$F_{比}$	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
A	0.221 046	2	0.110 523	6.598 672 ¹⁾	4.74	9.55
B	0.103 062	2	0.051 531	3.076 619	4.74	9.55
C	0.358 330	2	0.179 165	10.696 871 ²⁾	4.74	9.55
D	0.000 332	2	0.000 166	0.009 898	4.74	9.55
E	0.037 762	2	0.018 881	1.1272 84	4.74	9.55
合并误差	0.117 245	7	0.016 749			
总偏差	0.837 778	17				

注:1)表示因子对实验结果的影响达到显著水平;2)表示因子对实验结果的影响达到极显著水平。

3 结论

(1)由正交试验结果分析可知,拉伸强度最佳的工艺条件是壁厚(边缘宽度)为1.2 mm、封闭面厚度为0.8 mm、填充率为60%、打印头温度为190℃、打印速度为60 mm/s;缺口冲击强度最佳的工艺条件是壁厚(边缘宽度)为0.8 mm、封闭面厚度为0.6 mm、填充率为60%、打印头温度为200℃、打印速度为60 mm/s;

(2)通过对正交试验结果的极差分析得到5个因素中对拉伸强度影响由强到弱依次为封闭面厚度、壁厚(边缘宽度)、填充率、打印速度和打印头温度;5个因素中对缺口冲击强度影响由强到弱依次为填充率、壁厚(边缘宽度)、封闭面厚度、打印速度、打印头温度。

(3)填充率对制件综合性能的影响极显著,壁厚(边缘宽度)对制件综合性能的影响显著,其它因素对制件综合性能的影响均未达到显著水平。

(4)通过综合评价方差分析的方法对PLA制件的综合力学性能进行了研究,得到最佳工艺参数:壁厚0.8 mm、封闭面厚度0.6 mm、填充率60%、打

印头温度200℃、打印速度60 mm/s。5个因素中对综合性能的影响由强到弱依次为填充率、壁厚、封闭面厚度、打印速度、打印头温度。

参考文献

- [1] 贺超良,汤朝晖,田华雨. 3D打印技术制备生物医用高分子材料的研究进展[J]. 高分子学报,2013(6):722-733.
He Chaoliang, Tang Zhaohui, Tian Huayu. Research progress in the preparation of biomedical polymer materials by 3D printing technology[J]. Acta Polymerica Sinica, 2013(6):722-733.
- [2] Guo Shuangzhuang, Qiu Kaiyan, Meng Fanben, et al. 3D printed stretchable tactile sensors[J]. Advanced Materials, 2017, 29(27):1-8.
- [3] Domingo-Espin M, Puigoriol-Forc Ad A J M, Garcia-Gran Ad A A, et al. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling polycarbonate parts[J]. Materials & Design, 2015, 83:670-677.
- [4] Dave H K, Patel B H, Rajpurohit S R, et al. Effect of multi-infill patterns on tensile behavior of FDM printed parts[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2021, 43(1):DOI:10.1007/s40430-020-02742-3.
- [5] Ahn S H, Montero M, Odell D, et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS[J]. Rapid Prototyp J, 2002, 8:248-257.
- [6] Rayegani F, Onwubolu G. Fused deposition model-ling(FDM) process parameter prediction and optimiza-tion using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE.)(J]. Int J Adv Manufact Technol, 2014, 73:509-519.
- [7] Dawoud M, Taha I, Ebeid S J. Mechanical behaviour of ABS:An experimental study using FDM and injection moulding techniques[J]. J Manufact Proc, 2016, 21:39-45.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 林广义,刘峰,赵绩辉,等. FDM分层高度对制品力学性能和表面质量的影响[J]. 塑料, 2017, 46(3):83-88.
Lin Guangyi, Liu Feng, Zhao Jihui, et al. The effect of FDM delamination height on the mechanical properties and surface quality of products[J]. Plastics, 2017, 46(3):83-88.
- [12] 黄丹,张效迅,习武,等. 基于FDM工艺的打印件成型时间与力学性能的研究[J]. 塑料工业, 2016, 44(3):89-93.

- based micro-nano elastic filters via melt blowing process[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(10):20-28.
- [9] 崔景强,王富利,甄琪,等.多尺度PP/PET微纳米纤维材料的熔喷成型及其油液吸附性能[J].工程塑料应用,2019,47(9):56-61.
Cui Jingqiang, Wang Fuli, Zhen Qi, et al. Preparation and oil absorptive properties of multi scale PP / PET micro-nanofibrous materials via melt blowing process[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(9):56-61.
- [10] 彭鹏,张瑜,张伟,等.聚乳酸超细纤维医用抗菌敷料的制备[J].上海纺织科技,2014,42(12):18-20.
Peng Peng, Zhang Yu, Zhang Wei, et al. Preparation of polylactic acid superfine fiber anit-bacterial medical dressings[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2014, 42(12):18-20.
- [11] Kudzin M H, Mrozinska Z. Biofunctionalization of textile materials. 2. Antimicrobial modification of poly(lactide) (PLA) nonwoven fabrics by fosfomycin[J]. Polymers, 2020, 12(4). DOI : 10.3390/polym12040768.
- [12] 王伟,黄晨,靳向煜.单向导湿织物的研究现状及进展[J].纺织学报,2016,37(5):167-172.
Wang Wei, Huang Chen, Jin Xiangyu. Development of unidirectional water-transfer fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(5):167-172.
- [13] Pu Yi, Yang Jing, Russell S J, et al. Cotton nonwovens with unidirectional water-transport properties produced by atmospheric plasma deposition[J]. Cellulose, 2021, 28(7):4427-4438.
- [14] 张恒,吕宏斌,车福生,等.梯度结构的聚酯/粘胶热风非织造材料及液体非对称传输特性[J].丝绸,2019,56(7):46-51.
Zhang Heng, Lyu Hongbin, Che Fusheng, et al. Polyester / viscose hot-air nonwoven material with gradient structure and its liquid asymmetric transfer properties[J]. Journal of Silk, 2019, 56(7):46-51.
- [15] 周忠成,周衡书,张恒,等.单向导液非织造材料成型方法及其应用进展[J].工程塑料应用,2020,48(11):141-146.
Zhou Zhongcheng, Zhou Hengshu, Zhang Heng, et al. One-way liquid nonwoven material forming method and its application progress[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11):141-146.
- [16] 李振,鄢友娟,吴爽,等.单向导湿面料的研究现状与进展[J].山东纺织科技,2021,62(3):53-56.
Li Zhen, Yan Youjuan, Wu Shuang, et al. Research status and development of unidirectional water-transfer fabrics[J]. Shandong Textile Science & Technology, 2021, 62(3):53-56.
- [17] 展江湖,王迎宵,杨志浩,等.苧麻纤维增强聚乳酸复合材料性能研究[J].工程科学学报,2021,43(7):952-959.
Zhan Jianghu, Wang Yingxiao, Yang Zhihao, et al. Effect of fiber content on the properties of ramie fiber reinforced poly(lactic acid) composites[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7):952-959.
- [18] Dzierzkowska E, Scislowska-Czarnecka A, Kudzin M, et al. Effects of process parameters on structure and properties of melt-blown poly(lactic acid) nonwovens for skin regeneration[J]. Journal of Functional Biomaterials, 2021. DOI : 10.3390/jfb12010016.
- [19] Liu Hailu, Chen Ruilian, Sun Xiaoyan, et al. Preparation and properties of PBAT / PLA composites modified by PVA and cellulose nanocrystals[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021. DOI : 10.1002/app.51474.
- [20] 詹世平,万泽韬,王景昌,等.生物医用材料聚乳酸的合成及其改性研究进展[J].化工进展,2020,39(1):199-205.
Zhan Shiping, Wan Zetao, Wang Jingchang, et al. Synthesis and modification of biomedical material polylactic acid[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(1):199-205.

(上接第72页)

- Huang Dan, Zhang Xiaoxun, Xi Wu, et al. Research on molding time and mechanical properties of printed parts based on FDM process[J]. China Plastic Industry, 2016, 44(3):89-93.
- [13] 金泽枫,金杨福,周密,等.基于FDM聚乳酸3D打印材料的工艺性能研究[J].塑料工业,2016,44(2):67-70.
Jin Zefeng, Jin Yangfu, Zhou Mi, et al. Research on process performance of 3D printing materials based on FDM polylactic acid[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(2):67-70.
- [14] 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. The influence of FDM-3D printing process parameters on the mechanical properties of PLA parts[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):68-71.
- [15] 于国庆,毕超.3D打印参数对聚乳酸试样拉伸性能的影响[J].中国塑料,2017,31(11):125-129.
Yu Guoqing, Bi Chao. The effect of 3D printing parameters on the tensile properties of polylactic acid samples[J]. China Plastics, 2017, 31(11):125-129.
- [16] 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(05):73-77, 142.
Yang Lu, Meng Jiaguang, Xue Tao. The effect of 3D printing process parameters on the tensile strength of PLA specimens[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(5):73-77, 142.