

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.04.014

FDM 工艺参数对聚乳酸 / 石墨烯复合材料 制件弯曲性能的影响

高尧¹,屠泽洋¹,刘双姓¹,王曙光¹,刘涛涛²,马加仑²

(1. 浙江工贸职业技术学院,浙江温州 325000; 2. 浙江凯威碳材料有限公司,浙江温州 325000)

摘要: 为了提高聚乳酸 (PLA) 复合材料 3D 打印制件的性能,采用三因素三水平正交试验设计,研究了用熔融沉积成型 (FDM) 工艺 3D 打印 PLA/ 石墨烯复合材料制件过程中,打印层高、填充密度以及构建取向对制件弯曲性能的影响。结果表明,石墨烯对 PLA/ 石墨烯复合材料制件有较好增强效果,各试验参数对 3D 打印 PLA/ 石墨烯复合材料制件弯曲强度的影响大小顺序为: 构建取向>填充密度>层高,且当构建取向为侧立方式,填充密度为 80%,层高为 0.2 mm 时,制件具有最佳的弯曲强度;对复合材料制件弯曲弹性模量的影响大小依次为: 填充密度>层高>构建取向,且当构建取向为侧立,填充密度为 80%,层高为 0.1 mm 时,制件具有最佳的弯曲弹性模量。

关键词: 熔融沉积成型; 聚乳酸; 石墨烯; 正交试验; 弯曲性能

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)04-0076-05

Influences of FDM Process Parameters on Bending Performance of PLA/Graphene Composite Products

Gao Yao¹, Tu Zeyang¹, Liu Shuangxing¹, Wang Shuguang¹, Liu Taotao², Ma Jialun²

(1. Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Wenzhou 325000, China; 2. Zhejiang Kaiwei Carbon Materials Co., Ltd., Wenzhou 325000, China)

Abstract : In order to improve the performance of poly(lactic acid) (PLA) composite 3D printed products, the effects of printing layer height, filling density and build orientation on the bending properties of 3D printed samples of the PLA/graphene composite products prepared by fused deposition modeling (FDM) were studied by three-level orthogonal experimental. The results show that graphene has significant enhancement effect on PLA parts and the order of the influences of FDM parameters on the bending strength of 3D printed PLA/graphene composite samples is : build orientation > filling density > layer height. When the build orientation is lateral, the filling density is 80%, and the layer height is 0.2 mm, the sample exhibits the best bending strength. The order of influences on the flexural modulus of elasticity of the composite part is : filling density > layer height > construction orientation. When the construction orientation is lateral, the filling density is 80%, and the layer height is 0.1 mm, the sample exhibits the best flexural modulus of elasticity.

Keywords : fused deposition modeling ; poly(lactic acid) ; graphene ; orthogonal test ; bending property

3D 打印技术是集材料学、机械工程学、电子信息工程学等多学科融合形成的一种快速成型技术,也可以称为增材制造技术,被誉为“第三次工业革命”^[1-4]。根据打印材料的不同,3D 打印可以分为熔融沉积成型 (FDM)、激光烧结成型和分层实体制造等技术,其中 FDM 技术因其具有系统操作简单、打印成本低、快速成型、换材方便、效率高、能够制造出

形状复杂的物体等优点,成为应用范围最广的一种 3D 打印技术^[5-6]。

FDM 技术常用的打印材料有聚乳酸 (PLA) 和丙烯腈 - 丁二烯 - 苯乙烯塑料 (ABS) 等热塑性材料,与 ABS 打印材料相比,PLA 具有更环保、气味低、生物相容性好、收缩率低等优点,因此应用更为广泛。但是单一 PLA 线材具有脆性大、力学强度低、

基金项目: 温州市重大科技创新攻关项目 (ZG2021015)

通信作者: 高尧,博士,副教授,主要研究方向为聚合物复合材料微观结构、工艺与性能

收稿日期: 2022-01-17

引用格式: 高尧,屠泽洋,刘双姓,等. FDM 工艺参数对聚乳酸 / 石墨烯复合材料制件弯曲性能的影响 [J]. 工程塑料应用,2022,50(4):76-80,86.

Gao Yao, Tu Zeyang, Liu Shuangxing, et al. Influences of FDM process parameters on bending performance of PLA/graphene composite products[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):76-80, 86.

亲水性差和不导电等缺点,难以实现功能化和器件化,限制了其应用范围,因此非常需要对其进行改性,以期达到较好的性能^[7-9]。

石墨烯具有高强度,高模量及优异的电、热、磁等性能,不仅可以赋予 PLA 材料优异电学性能和功能性,还可以弥补 PLA 力学性能上的缺点^[10-11]。张迪^[12]采用溶液混合法制备石墨烯复合微粒,再采用熔融挤出成型工艺制备了线径为 1.75 mm 的 PLA/石墨烯复合线材,大幅度提高了 PLA 线材的电学性能,当石墨烯质量分数为 6% 时,其电导率可达到 4.76 S/cm。田小永等^[13]采用球磨混合工艺和单螺杆挤出工艺成功制备了柔性 PLA/石墨烯复合丝材,采用 3D 打印制备的试样具有良好的电导率。Kim 等^[14]通过溶液混合和熔融挤出工艺成功制备了 PLA/石墨烯复合材料,当石墨烯质量分数为 2% 时,PLA 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率得到显著提高,此复合材料可以制备导电、柔韧 3D 打印制件。对 3D 技术而言,打印材料是其物质基础^[15],加工工艺参数则直接影响成型件的质量与性能^[16-18],但目前关于 PLA/石墨烯复合材料 FDM 制件工艺与性能的研究鲜有报道。

PLA 材料在生物医疗领域等应用时,经常会受到较大的弯曲载荷,因此,研究其弯曲性能非常有必要。笔者采用正交试验法,利用 FDM 工艺 3D 打印 PLA/石墨烯复合制件,以制件的打印层高、填充密度以及构建取向三个工艺参数作为试验因素,每个试验因素选取三个水平参数,并建立正交试验表,研究分析三个试验因素对 PLA/石墨烯制件弯曲性能的影响,获得最佳的 FDM 工艺参数,为 FDM 工艺 3D 打印 PLA 功能制件的性能提升和工艺的优化提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA/石墨烯复合线材:GPLA-5K,石墨烯质量分数 0.5%,黑色,直径 1.75 mm,鑫烯三维科技(上海)有限公司。

1.2 主要仪器与设备

3D 打印机:弘瑞 Z300 Plus 型,北京汇天威科技有限公司;

万能材料试验机:3369 型,美国 Instron 公司;

离子溅射仪:GVC-1000 型,上海禾早电子科技有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):Phenom XL 型,复纳

科学仪器(上海)有限公司。

1.3 正交试验设计

采用三因素三水平正交试验法,选取打印层高、填充密度以及构建取向三个因素对 PLA/石墨烯复合线材制件弯曲性能的影响进行研究,每个因素选取三个水平参数。其中,构建取向指试样与工作台的相对方向,分别选取平躺、侧立和竖立的形式,如图 1 所示。

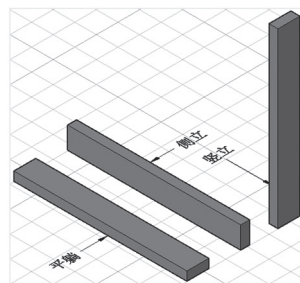


图 1 构建取向

最终选取的因素与水平具体参数设置见表 1。同时根据现有的材料与实验仪器,确定使用弘瑞自主开发的 3D 打印切片及打印机控制软件 Modellight,对成型试样数字模型的 STL 文件进行切片分层处理,并对 Modellight 软件内除试验因素外的其它工艺参数进行恒定,如打印头直径 0.4 mm,打印头工作温度 210℃,打印速度 30 mm/s,填充图案为线型,即打印喷头按照每一条线逐条扫描填充,填充方式为斜交($\pm 45^\circ$),即不同层间的扫描线相互交叉。

表 1 因素水平表

水平	因素		
	层高(A)/mm	填充密度(B)/%	构建取向(C)
1	0.1	40	竖立
2	0.15	60	侧立
3	0.2	80	平躺

1.4 试样制备

弯曲性能测试试样按照三因素三水平正交试验法和 GB/T 9341-2008 的要求共需制作 9 组试样,每组包含 3 个平行试样,总计 27 个试样,试样形状为长方体,尺寸为 80 mm×10 mm×4 mm。

试样的制备利用 Auto CAD 软件绘制完成试样的模型,并导出为 STL 文件,再将 STL 文件导入 Modellight 软件内,完成工艺参数的设定后,对数字模型进行分层切片,再导出为 Gcode 文件,利用 U 盘将导出完成的 Gcode 文件导入 3D 打印机进行加工,FDM 工艺参数的设定见表 1。

1.5 性能测试

弯曲性能按照 GB/T 9341-2008 测试,加载速

度为 2 mm/min,跨距为 60 mm。

弯曲断面形貌表征:对试样弯曲断面喷金 120 s,采用 SEM 对其断面微观形貌进行观察,加速电压为 15 kV。

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果

建立 $L_9(3^3)$ 正交试验表用以试验,共制作 9 组试样,每组包含 3 个平行试样,每组试验结果取测量 3 个平行试样的平均值,正交试验结果见表 2。

表 2 正交试验结果

试验号	A/ mm	B/ %	C	弯曲强 度 /MPa	弯曲弹性 模量 /MPa
1	0.1	40	竖立	63.79	2464
2	0.1	60	侧立	103.78	2603
3	0.1	80	平躺	124.75	3569
4	0.15	40	侧立	94.55	2333
5	0.15	60	平躺	96.70	2409
6	0.15	80	竖立	91.09	3197
7	0.2	40	平躺	89.20	1875
8	0.2	60	竖立	71.00	1991
9	0.2	80	侧立	141.28	3336

由表 2 可以看出,不同的 FDM 成型工艺参数下试样的弯曲性能差异较大,第 9 组试验的弯曲强度最高,为 141.28 MPa,第 1 组的弯曲强度最低,为 63.79 MPa;第 3 组的弯曲弹性模量最高,为 3569 MPa,第 7 组的弯曲弹性模量最低,为 1875 MPa。PLA/石墨烯复合材料 3D 打印试样的弯曲性能明显高于目前市售的纯 PLA 试样^[19-20],石墨烯对 PLA 3D 打印制件有显著的增强效果。

2.2 极差分析

(1) 弯曲强度的极差分析。

对表 2 的弯曲强度试验数据进行极差分析,其结果见表 3。

表 3 弯曲强度极差分析结果

项目	A	B	C
k_1	97.44	82.52	75.29
k_2	94.11	90.49	113.20
k_3	100.49	119.04	103.55
最佳水平	3	3	2
极差	6.38	36.52	37.91

注: k_i 表示某一因素在 $i(i=1,2,3)$ 水平时的弯曲强度均值;最佳水平表示某一因素在试验中得到的最佳工艺参数所在水平,即 k_i 最大值所对应的水平。

由表 3 可知,对于 FDM 成型 PLA/石墨烯复合材料制件的弯曲强度来说,影响因素 A, B, C 的极差分别为 6.38, 36.52, 37.91, 即弯曲强度的影响因素从强到弱依次是 $C > B > A$, 能够获得较高弯曲强度的 FDM 工艺 3D 打印方案为 $A_3B_3C_2$, 即层高为

0.2 mm, 填充密度为 80%, 构建取向为侧立打印方式。

不同因素水平时制件的弯曲强度如图 2 所示。

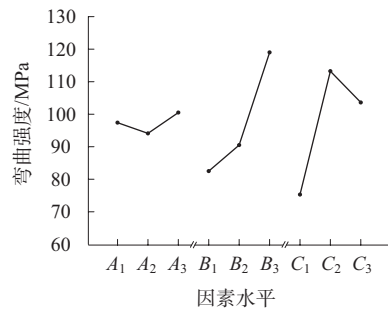


图 2 不同因素水平时制件的弯曲强度

由图 2 可以看出,随着打印层高的增加,制件的弯曲强度先降低后升高,这是由于层高增加时, FDM 制件的打印层数降低,导致相邻两层间的粘结力变弱,整个制件的弯曲强度随之降低,但同时各层间丝材的粘结作用降低也使得丝材自身的结构损毁减少,当打印层高由 0.15 升高至 0.2 mm 时,由于后者丝材自身的结构损毁减少使整个制件的弯曲强度相应增大的作用大于层数减少粘结力降低而使制件弯曲强度减少的作用,从而制件弯曲强度得到提升。制件的弯曲强度随填充密度的升高而增加,这是由于填充密度增加,使制件的内部越发紧密,填料之间的间隙越来越小,层与层之间粘结效果越来越好,粘结力增大,可以承载的弯曲载荷增加,最终使得制件的弯曲强度增大。对于不同的构建取向,侧立方式打印时制件弯曲强度最高,平躺方式打印制件弯曲强度略低于侧立方式,竖立方式打印成型制件弯曲强度最低。侧立方式制件弯曲时,弯曲载荷被分解为沿熔丝方向与垂直于熔丝方向的分力,载荷需超过熔丝最大弯曲强度,才能使材料失效,故侧立方式制件有良好的抗弯能力,弯曲强度较高;平躺方式制件弯曲时,受弯曲载荷影响,试样内部丝材发生弯曲变形直至断裂,载荷达到丝材最大弯曲强度,试样即失效,同时沉积熔丝少于侧立成型方式,因此其抵抗弯曲破坏的能力较侧立式制件有所下降;而竖立成型方式沉积熔丝平行于弯曲载荷方向,仅靠层与层之间的粘结力来抵抗弯曲应力,因此弯曲强度最低。

(2) 弯曲弹性模量的极差分析。

对表 2 的弯曲弹性模量试验数据进行极差分析,其结果见表 4。

由表 4 可以看出,对于 FDM 成型的 PLA/ 石墨

表4 弯曲弹性模量极差分析结果

项目	A	B	C
k_1	2 879	2 224	2 551
k_2	2 647	2 334	2 757
k_3	2 401	3 367	2 617
最佳水平	1	3	2
极差	478	1 143	206

烯复合材料制件的弯曲弹性模量来说,影响因素 A 、 B 、 C 的极差分别为 478, 1 143, 206, 即对弯曲弹性模量影响因素从强到弱依次是 $B > A > C$, 且能够获得较高弯曲弹性模量的 FDM 工艺 3D 打印方案为 $A_1B_3C_2$, 即层高为 0.1 mm, 填充密度为 80%, 构建取向为侧立打印方式。

不同因素水平时制件的弯曲弹性模量如图 3 所示。

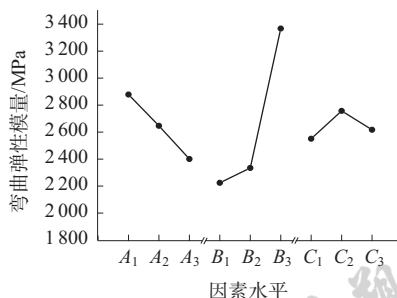


图3 不同因素水平时制件的弯曲弹性模量

由图 3 可以看出,随着打印层高的增加,弯曲弹性模量不断降低,这是由于在层高为 0.1 mm 时,由于层高较低,打印每层时喷头抬高距离较小,熔丝从喷头处至下层熔丝层距离较短,熔丝失温程度小,导致丝材层间粘结强度大,增加了丝材整体的弹性变形能力,使得制件的弯曲弹性模量最大;而当打印层高增加时,打印每层时喷头抬高距离较长,熔丝失温程度大,层间丝材的粘结作用小,丝材的弹性变形能力逐渐减小,制件的弯曲弹性模量变小。随填充密度的增加,制件的弯曲弹性模量增大,这是由于制件内部的填充密度不断增加,使得制件的抗弯能力不断增强,因此制件的弯曲弹性模量提高。对于构建取向,侧立方式制件的弯曲弹性模量最高,平躺方式成型制件次之,竖立方式成型件最低,其相关机理同弯曲强度分析所述。

2.3 方差分析

极差分析仅能反映试验因素对 PLA/ 石墨烯复合材料制件弯曲性能影响的主次关系,对于试验因素影响制件弯曲性能的显著性不能很好地体现和区分。而方差分析则是将试验数据的总差异分成由各试验因素引起的差异和由误差引起的差异,并通过

构造 F 检验值得到 P 值,最终可判断各试验因素的显著性。

(1) 弯曲强度的方差分析。

对表 2 的弯曲强度试验数据进行方差分析,其结果见表 5。

表5 弯曲强度方差分析结果

项目	自由度	离差平方和	方差	F 值	P 值	显著性水平
A	2	61.046	30.523	1.135	0.468	不显著
B	2	2 212.453	1 106.227	41.134	0.024	显著
C	2	2 328.941	1 164.471	43.300	0.023	显著
误差	2	53.786	26.893	-	-	-
合计	8	4 656.226	-	-	-	-

由表 5 可知,对于 FDM 成型的 3D 打印 PLA/ 石墨烯复合材料制件的弯曲强度来说,试验因素 B 、 C 的 P 值都小于 0.05,说明 B 和 C 的差异性显著,而试验因素 A 的差异性不显著。填充密度和构建取向是影响试样弯曲强度的主要因素,而层高则不是影响试样弯曲强度的主要因素。

(2) 弯曲弹性模量的方差分析。

弯曲弹性模量方差分析结果见表 6。

表6 弯曲弹性模量方差分析结果

项目	自由度	离差平方和	方差	F 值	P 值	显著性水平
A	2	342 918	171 459	7.125	0.123	不显著
B	2	2 385 166	1 192 583	49.557	0.020	显著
C	2	66 605	33 303	1.384	0.419	不显著
误差	2	48 130	24 065	-	-	-
合计	8	2 842 819	-	-	-	-

由表 6 可知,对于 FDM 成型的 3D 打印 PLA/ 石墨烯复合材料制件的弯曲弹性模量来说,试验因素 B 的 P 值小于 0.05,说明 B 的差异性显著,而试验因素 A 和 C 的差异性不显著。填充密度是影响试样弯曲弹性模量的主要因素,而层高和构建取向则不是影响试样弯曲弹性模量的主要因素。

2.4 弯曲试验失效试样断面分析

由极差分析可知,影响弯曲强度的主要因素是构建取向,为了探究不同取向打印试样的失效机理,分别选取试验组填充率都为 80% 的 3 个失效试样,对其断口微观结构进行观察与特征分析,其 SEM 断面微观结构如图 4 所示。

由图 4 可发现,平躺方式和侧立方式打印试样(图 4a、图 4b)的失效都是弯曲载荷引起 PLA/ 石墨烯复合材料内部分子破坏而导致的丝材断裂,这种失效方式利于石墨烯增强效果的发挥,因此其弯曲性能较好。对于竖立方式打印试样(图 4c),其断面较为平整光滑,为典型的脆性断裂,其弯曲载荷方向

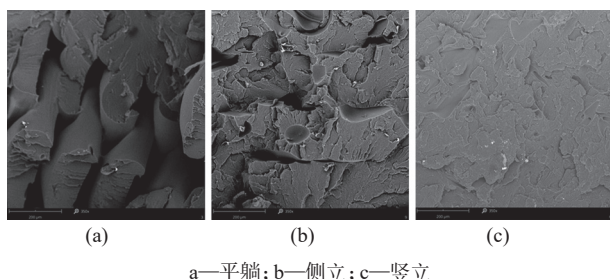


图 4 弯曲试验试样断面形貌

与丝材方向平面相互平行,其断面是弯曲时相邻两层丝材之间较弱的粘结作用被破坏而使相邻两层丝材剥离产生的,故该制件易发生脆性断裂,弯曲强度最小。该失效断面分析结果与正交试验结果相吻合。

3 结论

(1) 通过 FDM 工艺 3D 打印 PLA/ 石墨烯复合材料制件,根据正交试验结果的极差分析,得出各试验因素对制件弯曲强度的影响大小顺序为:构建取向>填充密度>层高;对制件弯曲弹性模量的影响大小顺序为:填充密度>层高>构建取向。

(2) 由正交试验方差分析结果可知,各试验因素对制件弯曲强度的显著性水平为:构建取向、填充密度的差异性显著,而层高的差异性不显著;对制件弯曲弹性模量的显著性水平为:填充密度的差异性显著,而层高、构建取向的差异性不显著。

(3) 通过 SEM 对弯曲失效试样断面进行观察,分析了 FDM 工艺 3D 打印工艺参数之构建取向对 PLA/ 石墨烯复合材料试样弯曲失效的影响及其失效机理,其失效形貌特征与正交试验结果一致。

(4) 对于 FDM 工艺 3D 打印 PLA/ 石墨烯复合材料制件工艺参数的选择,侧立方式打印试样的弯曲性能较好;填充密度越大,弯曲性能越好,但打印时间越长,消耗丝材也越多,可根据实际情况进行选择。

参考文献

[1] 刘嘉和,徐铭作,何懿琳,等. 3D 打印技术的研究现状及发展趋势[J]. 科技传播,2018,10(3):104-105,107.
Liu Jiahe, Xu Mingzuo, He Yilin, et al. Research status and development trend of 3D printing technology[J]. Public Communication of Science & Technology, 2018, 10(3):104-105, 107.

[2] 蔡云冰,刘志鹏,张子龙,等. 聚乳酸材料在 3D 打印中的研究与应用进展[J]. 应用化工,2019,48(6):1 463-1 468.
Cai Yunbing, Liu Zhipeng, Zhang Zilong, et al. Research and application of polylactic acid in 3D printing[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(6):1 463-1 468.

[3] 许昆鹏. 3D 打印制备 PLA/MWCNT 复合材料及其性能研究[J].

塑料工业,2019,47(8):160-163.

Xu Kunpeng. Preparation of PLA/MWCNT composites by 3D printing and study of its properties[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(8):160-163.

[4] 毕向军,田小永,张帅,等. 连续纤维增强热塑性复合材料 3D 打印的研究进展[J]. 工程塑料应用,2019,47(2):138-142.

Bi Xiangjun, Tian Xiaoyong, Zhang Shuai, et al. Research progress in 3D printing technology of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2): 138-142.

[5] 宋凤莲,黄亚,盛宗建. 基于 FDM 的 3D 打印工艺实验研究[J]. 机电产品开发与创新,2021,34(5):74-76.

Song Fenglian, Huang Ya, Sheng Zongjian. Experimental study on 3D printing process based on FDM[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2021, 34(5):74-76.

[6] 文周. 3D 打印工艺参数对 PLA 制品弯曲性能的影响[J]. 塑料工业,2020,48(11):79-82.

Wen Zhou. The influence of 3D printing process parameters on the bending performance of PLA products[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(11):79-82.

[7] 徐冬梅,张琳,刘洋. 3D 打印聚乳酸改性材料制备及性能[J]. 工程塑料应用,2021,49(11):68-71.

Xu Dongmei, Zhang Lin, Liu Yang. Preparation and properties of modified polylactic acid used for 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11):68-71.

[8] 钱正,马志勇,史耕田,等. 挤出 3D 打印 PLA/CF 复合材料的力学性能[J]. 工程塑料应用,2019,47(10):59-62,68.

Qian Zheng, Ma Zhiyong, Shi Gengtian, et al. Mechanical properties of carbon fiber reinforced polylactic acid composites based on 3D extrusion printing[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10):59-62, 68.

[9] 党海春,雷春兴,刘占洲,等. 星型聚氨酯增韧改性聚乳酸 3D 打印线材[J]. 工程塑料应用,2021,49(1):13-19.

Dang Haichun, Lei Chunxing, Liu Zhanzhou, et al. Toughening modification of polylactic acid wire for 3D printing by star polyurethane[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1):13-19.

[10] 杨文杰,何佳文,朱寒宾,等. 石墨烯增强聚乳酸力学性能及其发泡行为研究[J]. 中国塑料,2021,35(6):26-32.

Yang Wenjie, He Jiawen, Zhu Hanbin, et al. Mechanical properties and foaming behavior of graphene-reinforced poly(lactic acid) [J]. China Plastics, 2021, 35(6):26-32.

[11] 张鑫,陈立贵,苏巨桥,等. 聚乳酸/石墨烯复合材料的制备及温敏响应行为[J]. 塑料工业,2020,48(10):53-58.

Zhang Xin, Chen Ligui, Su Juqiao, et al. Preparation and resistivity-temperature performance of poly(lactic acid)/graphene composites[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(10):53-58.

(下转第 86 页)

- 49(11):109-112.
- [6] 王颖,黄卫庭,黄健,等. 汽车座椅内外侧盖板复杂抽芯注塑模具设计[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(9):87-91.
- Wang Ying, Huang Weiting, Huang Jian, et al. Design of injection mould with complex core pulling mechanism for inner and outer cover of automobile seat[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9):87-91.
- [7] 吴炳进. 声呐面罩壳八滑块六次抽芯复合机构注塑模具设计[J]. 中国塑料, 2019, 33(6):117-126.
- Wu Bingjin. Design of injection mold for six-time core-pulling composite mechanism of eight sliders of sonar surface shell[J]. China Plastics, 2019, 33(6):117-126.
- [8] 张燕琴,黄科勤. 迷你音响外壳注射模设计[J]. 模具工业, 2016, 42(4):48-51.
- Zhang Yanqin, Huang Keqin. Design of injection mold for mini audio shell[J]. Die & Mould Industry, 2016, 42(4):48-51.
- [9] 欧阳波仪. 汽车仪表罩倾斜式多种脱模机构及其注塑模具设计[J]. 塑料工业, 2016, 44(9):70-75.
- Ouyang Boyi. Inclined multiple ejection mechanisms for automobile instrument cover and injection mold design[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(9):70-75.
- [10] 贺柳操,卞平,肖国华. 双头螺纹花洒旋转式抽芯脱模机构及其注塑模具设计[J]. 塑料工业, 2016, 44(10):42-45, 49.
- He Liucan, Bian Ping, Xiao Guohua. Design of injection mold and core demoulding mechanism for double thread rotary sprinkler pump[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(10):42-45, 49.
- [11] 许傲,黄力. 医用接头头前模四面抽芯脱模注塑模具设计[J]. 塑料, 2017, 46(2):110-113.
- Xu Ao, Huang Li. Design of injection mould for the medical plug with four sides extracting[J]. Plastics, 2017, 46(2):110-113.
- [12] 杨华林. 球形件强制脱模注塑模具设计[J]. 制造技术与机床, 2017(10):139-141.
- Yang Hualin. Design of forced demoulding injection mould for the spherical part[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(10):139-141.
- [13] 贺柳操,肖国华,卞平. iPad 支架联动抽芯脱模机构及注塑模具设计[J]. 中国塑料, 2017, 31(12):117-123.
- He Liucan, Xiao Guohua, Bian Ping. Design of demoulding mechanism and injection molds for iPad brackets[J]. China Plastics, 2017, 31(12):117-123.
- [14] 胡智清,周全,熊建武. 仿真步枪枪托机械式自动脱模机构及注塑模具设计[J]. 塑料工业, 2018, 46(1):54-57.
- Hu Zhiqing, Zhou Quan, Xiong Jianwu. A rifle butt automatic demoulding mechanism and injection mold design[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(1):54-57.
- [15] 何成战,梁松. 艺术网格鸟巢模型特殊脱模机构模具设计[J]. 现代塑料加工应用, 2020, 32(2):42-45.
- He Chengzhan, Liang Song. Mould design of special demoulding mechanism for artistic grid bird nest model[J]. Modern Plastics Processing and Application, 2020, 32(2):42-45.
- 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. Influence of FDM 3D-printing process parameters on mechanical property of PLA sample[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):68-71.
- [17] 闫存富,乔雪涛,郭晓红,等. 基于熔融沉积快速成型 3D 打印翘曲变形的工艺参数优化[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(12):77-80.
- Yan Cunfu, Qiao Xuetao, Guo Xiaohong, et al. Optimization of process parameters for 3D printing warpage deformation based on FDM[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12):77-80.
- [18] 刘卫兵,钱素娟,刘志东. 3D 打印用高分子材料及打印成型工艺参数优化研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2020, 37(2):85-89.
- Liu Weibing, Qian Sujuan, Liu Zhidong. Research progress and optimization of process parameters of polymer materials for 3D printing[J]. China Synthetic Resins and Plastics, 2020, 37(2):85-89.
- [19] 胡家荣. 3D 打印连续碳纤维增强热塑性复合材料弯曲性能研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(11):40-43.
- Hu Jiarong. Study on the bending properties of 3D printing continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(11):40-43.
- [20] Li Liang, Tao Huang, Songxiang Yu, et al. Study on 3D printed graphene/carbon fiber multi-scale reinforced PLA composites[J]. Materials Letters, 2021, 300. DOI:10.1016/j.matlet.2021.130173.

~~~~~

(上接第 80 页)

- [12] 张迪. 基于 3D 打印的高导电石墨烯基柔性电路的构建与性能研究[D]. 北京:北京化工大学, 2016.
- Zhang Di. Fabrication and establishment of highly conductive graphene flexible circuits by 3D printing[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [13] 田小永,闫万权,黄兰,等. 石墨烯/柔性聚乳酸自传感复合材料结构 3D 打印与性能研究[J]. 机械工程学报, 2021, 7(57):215-233.
- Tian Xiaoyong, Yan Wanquan, Huang Lan, et al. Graphene/flexible polylactic acid self-sensing composite structures 3D printing and performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 7(57):215-233.
- [14] Kim M, Jeong J H, Lee J-Y, et al. Electrically conducting and mechanically strong graphene-polylactic acid composites for 3D printing[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11(12):11 841-11 848.
- [15] 张向阳,贾仕奎,赵中国,等. 3D 打印用聚合物材料的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(5):156-159, 165.
- Zhang Xiangyang, Jia Shikui, Zhao Zhongguo, et al. Research progress of polymer materials for 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(5):156-159, 165.
- [16] 白鹤,苏亚辉,王核心,等. FDM 3D 打印工艺参数对 PLA 制件