

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.012

# PLA/CF 与 PETG/CF 复合材料 3D 打印工艺参数优化

阿布都克热木江·阿不拉卡热<sup>1,2</sup>, 赵冬梅<sup>1,2</sup>, 乌日开西·艾依提<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学机械工程学院, 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆增材再制造技术重点实验室, 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 为解决传统石膏绷带在骨折固定中存在的笨重、透气性差及力学性能不足等问题, 推动短碳纤维增强聚乳酸(PLA/CF)与短碳纤维增强聚对苯二甲酸乙二酯-1,4-环己烷二甲酯(PETG/CF)复合材料在支具制造中的应用, 采用正交试验法, 对熔融沉积成型(FDM)工艺中的填充方向、打印层高、打印速度及打印温度等关键参数进行优化, 并系统分析其对材料力学性能的影响。通过三维全场应变测量分析系统获取拉伸试验中的应变场分布, 结合微米 X 射线检测技术表征内部缺陷, 明确工艺参数对性能的作用机制, 确定最优打印参数, 并通过细胞增殖试验验证材料的生物相容性。结果表明, 打印参数与材料类型对复合材料各项力学性能有显著影响。在最优工艺参数组合下, PLA/CF 的拉伸强度达到 59.82 MPa, 弯曲强度为 96.75 MPa, 缺口冲击强度为 10.29 kJ/m<sup>2</sup>。PETG/CF 的拉伸强度为 52.44 MPa, 弯曲强度为 80.12 MPa, 缺口冲击强度则达到 19.91 kJ/m<sup>2</sup>, 展现出优异的综合力学性能。两种材料的力学性能均显著优于传统石膏绷带, 且具备良好的细胞相容性。以上结果表明, 该材料在高性能康复支具制造中具有广阔的应用前景。

**关键词:** 3D 打印; 碳纤维增强复合材料; 正交试验; 熔融沉积成型; 力学性能

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0089-09

## Optimization of process parameters for 3D printing of PLA/CF and PETG/CF composites

ABULAKARE Abudoukeremujiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Dongmei<sup>1,2</sup>, AIYITI Wurikaixi<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

2. Key Laboratory of Additive Remanufacturing Technology of Xinjiang, Urumqi 830017, China)

**Abstract :** In order to solve the limitations of traditional plaster bandages in fracture fixation, such as heavy weight, poor air permeability and insufficient mechanical properties, and promote the application of short carbon fiber reinforced polylactic acid (PLA/CF) and short carbon fiber reinforced polyethylene terephthalate (PETG/CF) composites in brace manufacturing, the key parameters such as filling direction, printing layer height, printing speed and printing temperature in fused deposition modeling (FDM) process were optimized by orthogonal test method, and their effects on the mechanical properties of materials were systematically analyzed. The strain field distribution in the tensile test was obtained by the three-dimensional full-field strain measurement and analysis system, and the internal defects were characterized by micron X-ray detection technology, the mechanism of the effect of process parameters on performance was clarified, the optimal printing parameters were determined, and the biocompatibility of the material was verified through cell proliferation experiment. The results show that the printing parameters and material types have a significant effect on the mechanical properties of the composites. Under the optimal combination of process parameters, the tensile strength of PLA/CF reaches 59.82 MPa, the flexural strength is 96.75 MPa, and the notched impact strength is 10.29 kJ/m<sup>2</sup>, and the tensile strength, flexural strength and notched impact strength of PETG/CF are 52.44 MPa, 80.12 MPa and 19.91 kJ/m<sup>2</sup>, respectively, showing excellent comprehensive mechanical properties. The mechanical properties of the two materials are significantly better than those of traditional plaster bandages, and both have good cell compatibility. The above results show that the material has broad application prospects in the manufacture of high-performance rehabilitation braces.

**Keywords :** 3D printing; carbon fiber reinforced composite; orthogonal experiment; fused deposition modeling; mechanical property

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题项目(2025D04009)

**通信作者:** 乌日开西·艾依提, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事增材制造(3D 打印)技术、生物力学等研究

**收稿日期:** 2025-10-22

**引用格式:** 阿布都克热木江·阿不拉卡热, 赵冬梅, 乌日开西·艾依提. PLA/CF 与 PETG/CF 复合材料 3D 打印工艺参数优化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(12): 89-97.

ABULAKARE Abudoukeremujiang, ZHAO Dongmei, AIYITI Wurikaixi. Optimization of process parameters for 3D printing of PLA/CF and PETG/CF composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 89-97.

3D打印技术是以三维模型数据为基础,通过材料的逐层累加与物理堆积实现三维实体对象的构建。该技术因其在实现复杂结构一体化成型与高度个性化定制方面的核心优势,已于生物医疗、电子器件及航空航天制造等多个重要领域展现出广泛的应用价值<sup>[1]</sup>。

传统骨折外固定治疗常用石膏绷带<sup>[2]</sup>。该绷带虽具有操作简便、成本低廉的优点,但其透气性差、质量较重,长期固定易导致皮肤出现瘙痒、过敏甚至肌肉萎缩等多种并发症<sup>[3-4]</sup>,严重影响患者的康复体验与效果。针对这个问题,近年来,基于3D打印技术制备的个性化支具展现出巨大潜力<sup>[5-6]</sup>。该技术通过精准匹配患者的肢体形态,在实现有效固定的同时,又能显著提高支具的透气性、轻量化程度及力学性能,从而提升治疗过程的舒适性<sup>[7-8]</sup>。因此,开发与应用3D打印支具已成为骨折外固定领域的重要发展方向<sup>[9]</sup>。

骨折支具的设计需符合生物力学特性<sup>[10]</sup>,以确保其在治疗过程中能够为骨折部位提供有效的支撑与保护,并满足材料在不同条件下的强度要求<sup>[11-12]</sup>。若采用普通塑料等低性能材料,往往需通过增大体积和厚度来满足力学性能需求<sup>[13]</sup>,但这会导致支具笨重、透气性差,降低患者的佩戴舒适度。相比之下,碳纤维增强生物基塑料复合材料等高性能材料兼具优异的力学性能、良好的生物相容性与轻量化特性<sup>[14-15]</sup>,可在较小厚度下实现足够的力学支撑,有利于制造出更轻薄的支具。

因此,本文采用正交试验方法,对聚乳酸/碳纤维(PLA/CF)和聚对苯二甲酸乙二酯-1,4-环己烷二甲酯/碳纤维(PETG/CF)两种复合材料的力学性能、失效模式及生物相容性进行了研究。旨在为后续骨折支具的材料选择和3D打印工艺参数提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PLA/CF与PETG/CF复合材料打印丝材:采用商品化短纤维增强复合材料,碳纤维质量分数为10%,直径为(1.75±0.05)mm,深圳拓竹科技有限公司。

### 1.2 主要仪器及设备

FDM打印机:Bambu Lab X1C,深圳拓竹科技有限公司;

万能力学试验机:3005T,深圳市瑞格尔仪器有

限公司;

双立柱摆锤冲击试验机:PIT452D,深圳万测试验设备有限公司;

三维全场应变测量系统:XTDIC,深圳市新拓三维技术(深圳)有限公司;

微米级X射线检测设备:Xradia 515 Versa,德国卡尔·蔡司股份公司;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-7610Plus,日本电子株式会社。

### 1.3 试样制备

根据ISO 527-2:2012,拉伸性能测试试样选择1BA型试样,试样尺寸为100mm×10mm×4mm;根据ISO 178:2010,弯曲性能测试试样的尺寸为80mm×10mm×4mm;根据ISO 179:2000,冲击性能测试试样选择A型试样,试样尺寸为80mm×10mm×6mm;每组测试均打印3个试样。打印试样的固定工艺参数包括:打印路径为直线往复式,打印间距为0.4mm,喷嘴直径为0.4mm,打印试样填充度为100%。

### 1.4 试验设计

以拉伸强度、弯曲强度及冲击强度为优化目标,选取填充方向(A)、打印层高(B)、打印速度(C)和打印温度(D)四个工艺参数作为影响因素。由于PLA/CF与PETG/CF的材料属性不同,需为这两种材料分别采用相应打印参数。本研究进行四因素三水平的正交试验,以完成参数优化。详细参数设置见表1。

表1 试验因素与水平设计

Tab. 1 Experimental factors and levels

No.	A/(°)	B/mm	C/(mm·s <sup>-1</sup> )	D/°C
1	0	0.10	100/90	210/240
2	45	0.15	135/120	230/260
3	90	0.2	170/150	250/280

Note: Two sets of data listed in C and D, the former corresponds to PLA/CF material, and the latter corresponds to PETG/CF material.

### 1.5 测试与表征

#### 1.5.1 力学性能与动态应变测试

拉伸性能参照ISO 527-2:2012进行测试,试验速度为2mm/min,直至样件断裂。试验过程中,采用三维全场应变测量系统采集试样的动态应变。测试前,在试样表面喷涂斑点以辅助应变观测。

三点弯曲试验:按照ISO 178:2010进行试验,试验速度设置为2mm/min。

冲击试验:按照ISO 179:2000进行试验,冲击能量为150J。

1.5.2 内部缺陷分析

内部缺陷采用微米X射线检测设备进行检测。该设备用于分析试样内部缺陷的几何形状、体积及空间分布。扫描参数设置为:分辨率7 μm,峰值管电压80 kV,管电流35 μA。

1.5.3 断面微观形貌观察

采用SEM对试样的断面进行观察,并结合试验获得的应力-应变数据,分析碳纤维增强复合材料试样的失效模式。

1.5.4 细胞增殖试验

采用3D打印技术制备直径为6 mm、高度为1 mm的PLA/CF与PETG/CF圆柱片状样品,不同材料各制备6个平行试样,试验结果取平均值。将皮肤细胞接种于试样表面,待细胞完全贴壁后,分别培养1,3,5 d,并于各时间点检测吸光度,以此计算细胞相对增殖率。

2 结果与讨论

2.1 试验结果

2.1.1 力学试验与动态应变测量结果

PLA/CF复合材料正交试验方案及结果见表2。利用全场应变测量系统,获取了试样拉伸时的应变分布云图,图1为PLA/CF拉伸试样全场应变分析结果。由应变曲线和应变分布云图可知,随着拉伸过程的进行,方案1试样(填充方向为0°)在d点处的试样中部呈现出大范围的红色区域,表明试样发生了均匀的变形,未出现应力集中。方案5试样(填充方向为45°)从c点起,出现沿打印路径的应变集中区,在d点处试样中间有明显的、很窄的呈45°分布的红色区域,表明此处出现了应力集中。随着拉伸过程的进行,试样最终在此处断裂。方案9试样(填充方向为90°)在d点处的试样中间有明显的、很窄的呈

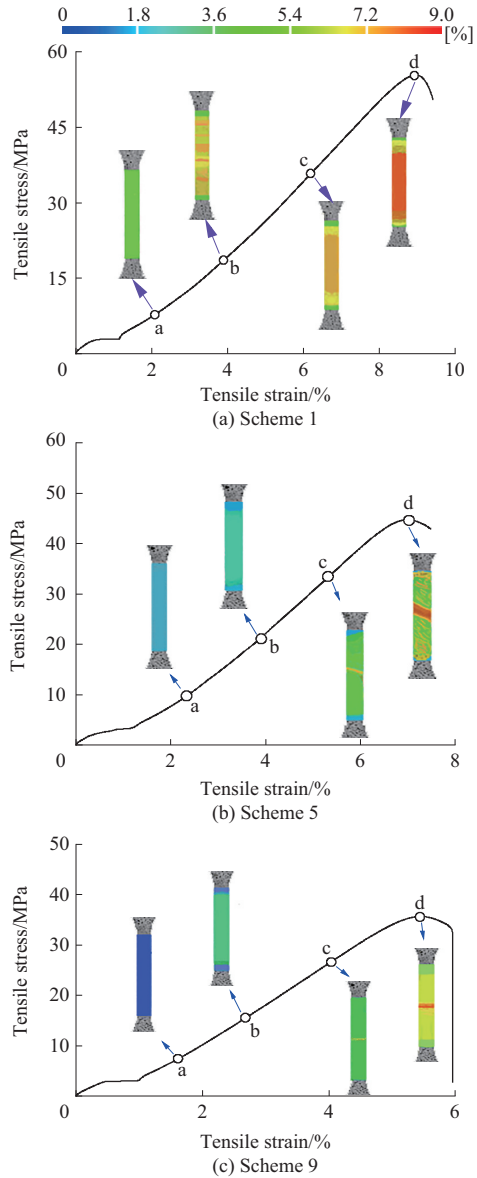


图1 PLA/CF拉伸试样全场应变分析

Fig. 1 Full-field strain analysis of PLA/CF tensile specimens

水平分布的红色区域,表明此处出现了应力集中。随着拉伸过程的进行,试样最终在此处断裂。

表2 PLA/CF正交实验方案及结果

Tab. 2 Orthogonal experiment design and results of PLA/CF

Scheme	A/(°)	B/mm	C/(mm·s <sup>-1</sup> )	D/°C	Tensile strength/MPa	Bending strength/MPa	Notched impact strength/(kJ·m <sup>-2</sup> )
1	0	0.1	100	210	55.26	88.25	9.88
2	0	0.15	135	230	54.97	87.83	9.23
3	0	0.2	170	250	48.33	75.16	6.43
4	45	0.1	135	250	50.03	78.55	7.63
5	45	0.15	170	210	44.75	66.51	5.14
6	45	0.2	100	230	43.59	64.65	5.01
7	90	0.1	170	230	44.22	67.51	7.32
8	90	0.15	100	250	41.10	60.58	4.17
9	90	0.2	135	210	35.72	51.64	4.88

方案1,5,9对应试样在拉伸过程中的应变分布云图如图2所示,由图2可知,随着拉伸过程的进行,方案1试样中部(填充方向为 $0^\circ$ )在d点处呈现出大范围的红色区域,表明试样发生了均匀的变形,未出现应力集中。方案5(填充方向为 $45^\circ$ )试样中间在d点处有明显的、很窄的呈 $45^\circ$ 分布的红色区域,表明此处出现了应力集中。随着拉伸过程的进行,试样最终在此处断裂。方案9试样(填充方向为 $90^\circ$ )在d点处试样中间有明显的、很窄的呈水平分布的红色区域,表明此处出现了应力集中。随着拉伸过程的进行,试样最终在此处断裂破坏。PETG/CF复合材料正交试验所得力学性能结果详见表3。

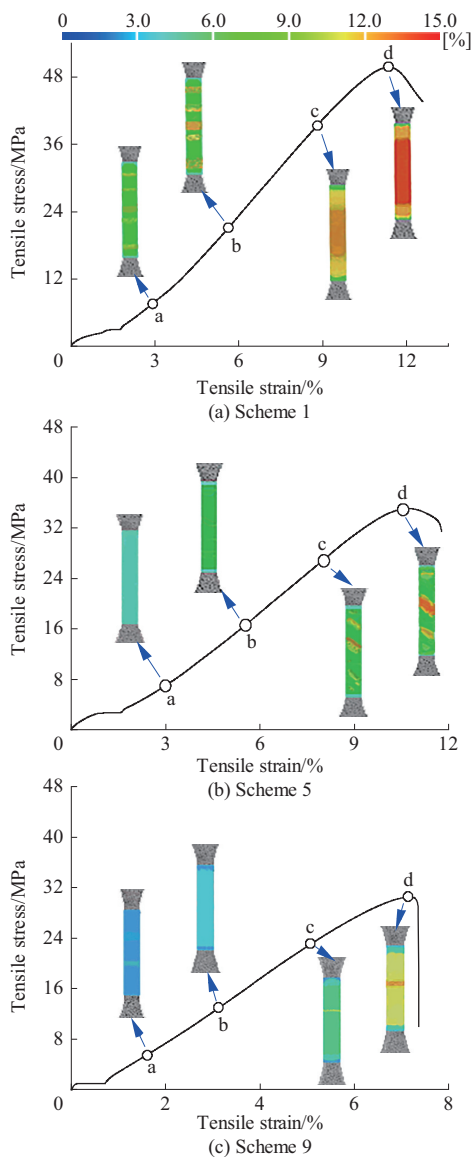


图2 PETG/CF拉伸试样全场应变分析

Fig. 2 Full-field strain analysis of PETG/CF tensile specimens

### 2.1.2 极差分析

表4为PLA/CF复合材料在不同工艺参数水平下对各力学性能指标的极差分析结果,极差为各打印参数均值 $k$ 值的最大值与最小值之差,反映该因素对试验结果影响的显著程度。对于拉伸强度与冲击强度的影响因素排序一致,均为:填充方向>打印层高>打印温度>打印速度。对弯曲强度的影响因素排序为:填充方向>打印层高>打印速度>打印温度。

表5列出了PETG/CF复合材料各因素在不同水平下对力学性能的极差分析结果。从分析结果可以看出,对于拉伸强度的影响因素排序为:填充方向>打印层高>打印速度>打印温度。对于弯曲强度与冲击强度的影响因素排序一致,均为:填充方向>打印层高>打印温度>打印速度。

### 2.1.3 优化参数组力学性能结果

基于正交试验极差分析确定的最优方案结果见表6,最优打印参数组合下复合材料试样的应力-应变曲线和力学性能结果如图3所示。根据PLA/CF极差分析结果,确定最优打印工艺参数组合为:填充方向 $0^\circ$ 、打印层高 $0.1\text{ mm}$ 、打印速度 $135\text{ mm/s}$ 、打印温度 $230\text{ }^\circ\text{C}$ 。该参数组合未包含在正交试验设计的9组参数中,因此针对最优参数补充一组试样进行验证,如图3a-图3c所示。结果表明,该组试样的拉伸强度为 $59.82\text{ MPa}$ ,弯曲强度为 $96.75\text{ MPa}$ ,缺口冲击强度为 $10.29\text{ kJ/m}^2$ ,各项性能均优于其余9组。本实验所得拉伸强度比前期研究<sup>[16]</sup>高 $22.73\%$ 。

根据PETG/CF极差分析结果,确定最优打印工艺参数组合为:填充方向 $0^\circ$ 、打印层高 $0.1\text{ mm}$ 、打印速度 $120\text{ mm/s}$ 、打印温度 $260\text{ }^\circ\text{C}$ 。该参数组合不在正交试验设计的9组参数中,因此针对最优参数制备一组试样进行验证,如图3d-图3f所示。结果表明,该组试样的拉伸强度为 $52.44\text{ MPa}$ ,弯曲强度为 $90.12\text{ MPa}$ ,缺口冲击强度为 $19.91\text{ kJ/m}^2$ ,各项性能均优于其余9组试样。相较于文献[17]的研究数据,本实验获得的拉伸强度提高了 $17.84\%$ 。

### 2.2 内部缺陷分析

3D打印过程中普遍存在内部微观缺陷,这类缺陷直接影响试样的力学性能。采用微米X射线检测技术观察样品内部缺陷,具体取样位置与缺陷分布形态如图4和图5所示。对PLA/CF(图4)和PETG/CF(图5)的内部缺陷分析表明,材料的孔隙

表3 PETG/CF正交实验方案及结果

**Tab. 3 Orthogonal experiment design and results of PETG/CF**

Scheme	A/(°)	B/mm	C/(mm·s <sup>-1</sup> )	D/°C	Tensile strength/MPa	Bending strength/MPa	Notched impact strength/(kJ·m <sup>-2</sup> )
1	0	0.1	90	240	49.83	74.90	18.98
2	0	0.15	120	260	48.35	73.35	16.71
3	0	0.2	150	280	44.97	68.92	13.66
4	45	0.1	120	280	39.08	59.82	13.02
5	45	0.15	150	240	35.10	56.83	11.72
6	45	0.2	90	260	35.33	57.21	12.17
7	90	0.1	150	260	32.65	52.43	11.47
8	90	0.15	90	280	31.13	50.51	9.13
9	90	0.2	120	240	30.69	45.85	11.31

表4 PLA/CF力学性能极差分析

**Tab. 4 Range analysis of mechanical properties of PLA/CF**

Factor	Tensile strength				Bending strength				Impact strength			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
k1	52.85	49.84	46.65	45.24	83.75	78.10	71.16	71.16	8.51	8.28	6.35	6.63
k2	46.12	46.94	46.91	47.59	69.90	71.64	72.67	73.33	5.93	6.18	7.25	7.19
k3	40.35	42.55	45.77	46.49	59.91	63.82	69.73	71.43	5.46	5.44	6.30	6.08
Range	12.50	7.29	1.14	2.35	23.84	14.28	2.94	2.17	3.05	2.84	0.95	1.11
Sorting	1	2	4	3	1	2	3	4	1	2	4	3

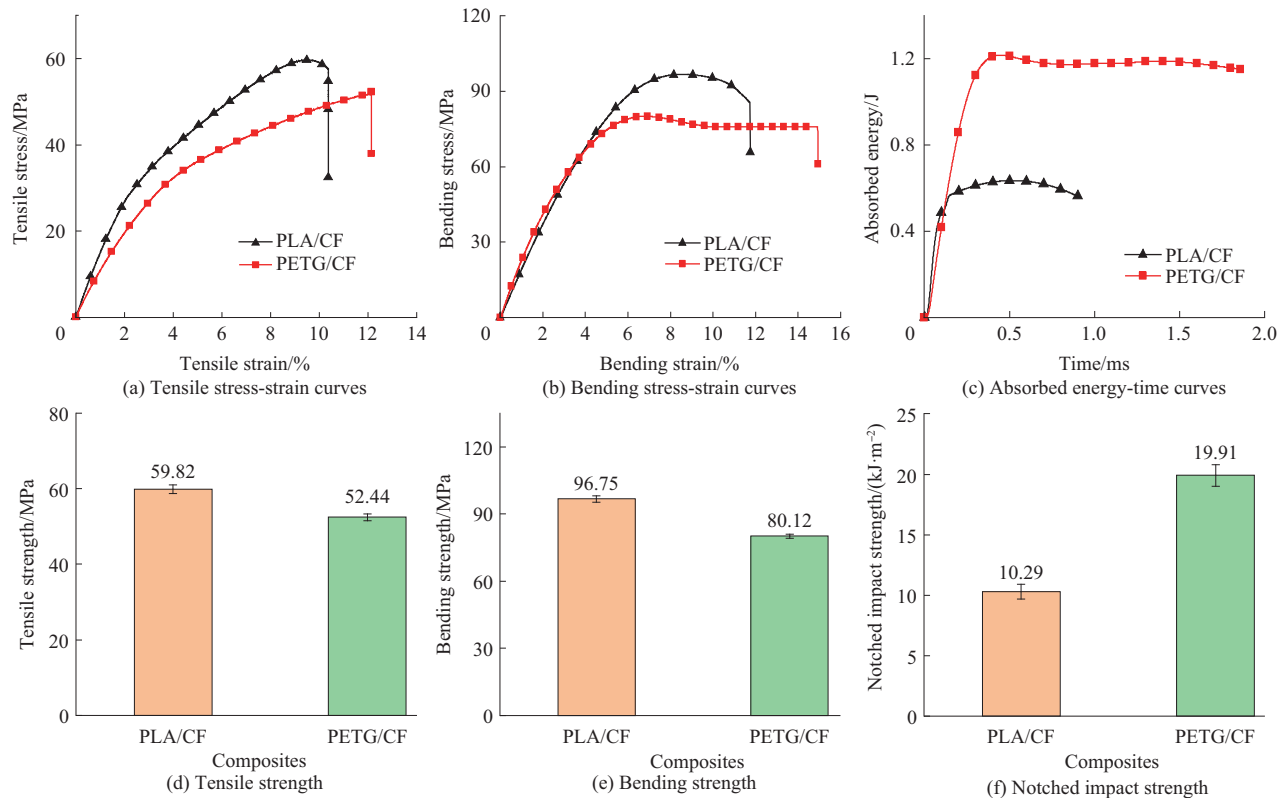


图3 最优打印参数组合下试样的应力-应变曲线和力学性能结果

Fig. 3 Stress-strain curves and mechanical property results of samples with optimal printing process parameters

率与宏观力学性能存在关联。两种材料中,最优打印工艺参数下试样(方案10试样)的性能最佳,均表现出最低的孔隙率(PLA/CF为2.35%;PETG/CF为3.54%),而性能最差的方案9试样(填充方向为90°)则对应最高的孔隙率(PLA/CF为5.72%;PETG/CF

为8.70%)。结果表明,层间的空隙缺陷会影响其复合材料破坏形式。

### 2.3 试验结果分析

#### 2.3.1 拉伸试验结果分析

各因素对于PLA/CF拉伸强度的影响程度大小

表5 PETG/CF力学性能极差分析

Tab. 5 Range analysis of mechanical properties of PETG/CF

Factor	Tensile strength				Bending strength				Impact strength			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
k1	47.72	40.52	38.76	38.54	72.39	62.38	60.87	59.19	16.45	14.49	13.43	14.00
k2	36.50	38.19	39.37	38.78	57.95	60.23	59.67	60.99	12.30	12.52	13.68	13.45
k3	31.49	37.00	37.57	38.39	49.26	57.32	59.39	59.75	10.64	12.38	12.28	11.94
Range	16.23	3.52	1.80	0.39	23.13	5.06	1.48	1.80	5.81	2.11	1.4	2.06
Sorting	1	2	3	4	1	2	4	3	1	2	4	3

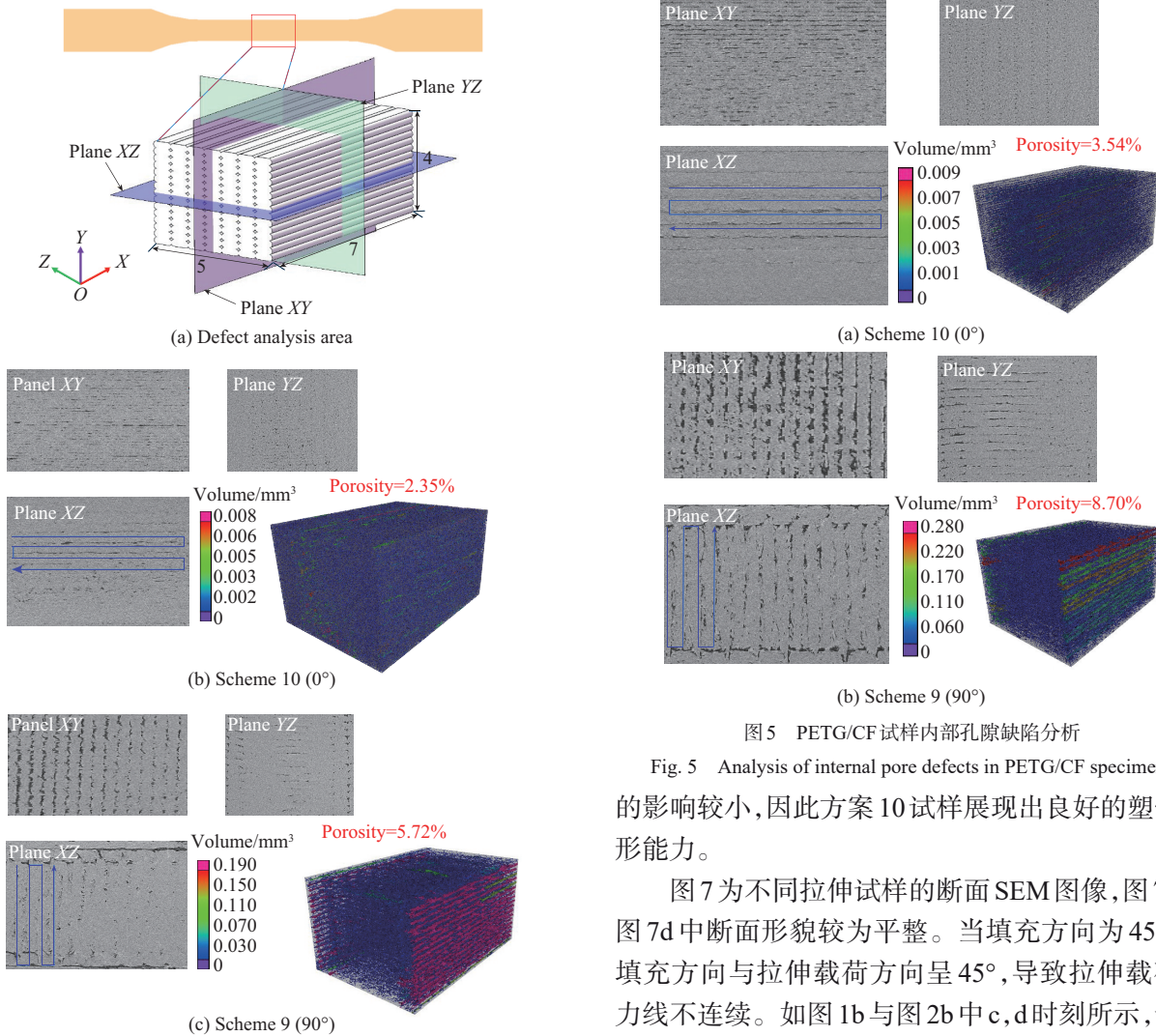


图4 PLA/CF试样内部孔隙缺陷分析及取样位置

Fig. 4 Analysis of internal pore defects in PLA/CF specimens and selected positions

顺序为填充方向>打印层高>打印温度>打印速度;对于PETG/CF拉伸强度的影响程度大小顺序为填充方向>打印层高>打印速度>打印温度;两种材料的填充方向对力学性能的影响都最大。试样的受力分析结果如图6所示。由图6a可见,填充方向为0°时,填充方向与拉伸载荷方向平行,载荷能够均匀地分布所有丝材上,该取向对拉伸载荷力线连续性

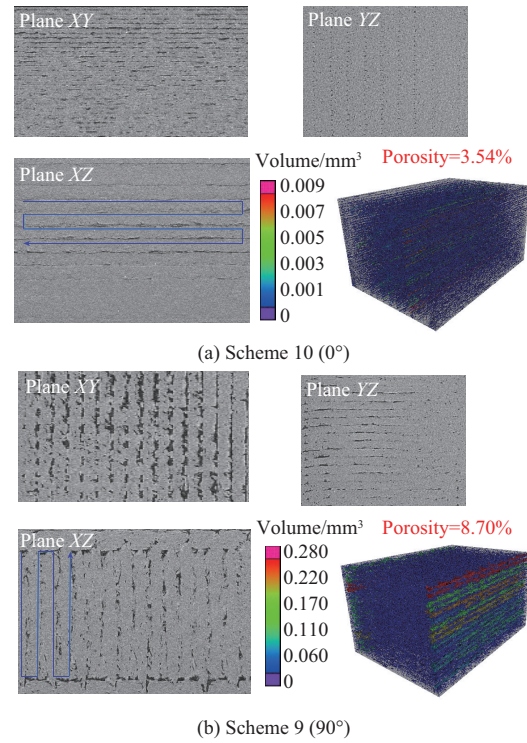


图5 PETG/CF试样内部孔隙缺陷分析

Fig. 5 Analysis of internal pore defects in PETG/CF specimens

的影响较小,因此方案10试样展现出良好的塑性变形能力。

图7为不同拉伸试样的断面SEM图像,图7a和图7d中断面形貌较为平整。当填充方向为45°时,填充方向与拉伸载荷方向呈45°,导致拉伸载荷的力线不连续。如图1b与图2b中c,d时刻所示,试样中部形成呈45°方向的红色应力集中区域,集中程度比0°大,反映出45°填充方向对力线产生了切断作用;与此相一致,图7b与图7e试样的断面呈现粗糙、不规则形貌。

当填充方向为90°时,其与拉伸载荷方向垂直。如图6b所示,垂直于载荷的长条状孔隙使力线不连续,外载仅能通过沉积线材间狭窄结合界面传递。图1c与图2c中d点显示,试样中部出现狭窄红色高应力区,应力集中程度较45°方向更大,更易导致断裂。图7c与7f中观察到的纤维拔出痕迹,进一步佐

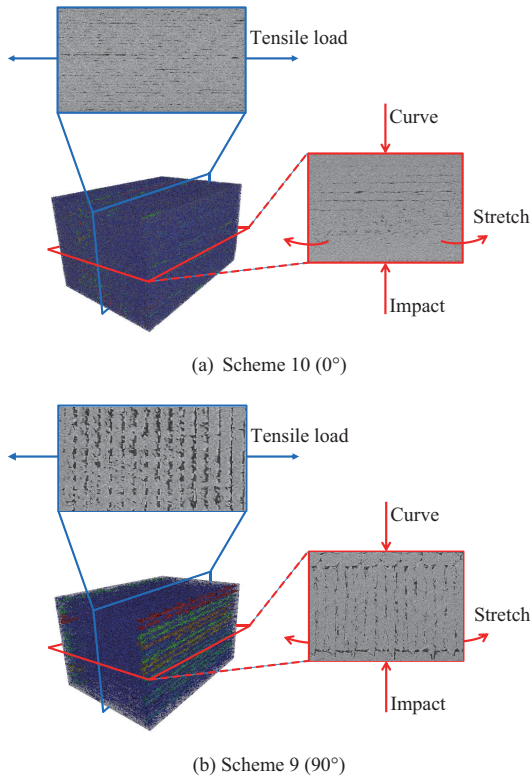


图6 试样10和试样9的受力分析  
Fig. 6 Force analysis of scheme10 and scheme 9

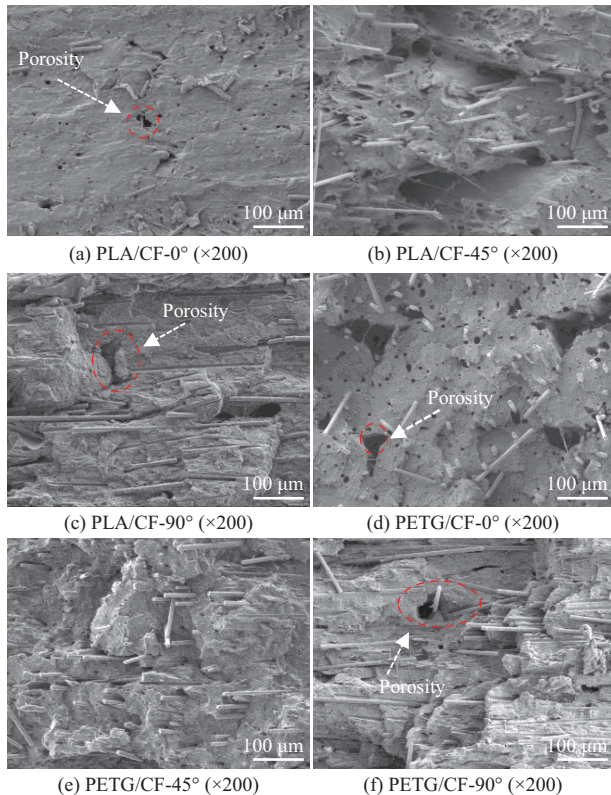


图7 PLA/CF和PETG/CF复合材料拉伸试样断面SEM照片  
Fig. 7 SEM photos of tensile specimens section of PLA/CF and PETG/CF composites

证了因线材沉积方向与载荷垂直所导致的界面失效。该结果与文献[18]结论一致。

### 2.3.2 冲击试验结果分析

在影响PLA/CF与PETG/CF复合材料缺口冲击强度的各打印工艺参数中,填充方向对缺口冲击强度的影响最大,其次分别为打印层高、打印温度、打印速度。图6a显示,0°填充时纤维方向与冲击方向垂直。该条件下,因纤维-基体界面脱黏需克服较大阻力,断面呈现纤维拔出及粗糙形貌(图8a),同时图8d中未见层间边界,表明PETG/CF层间结合致密。

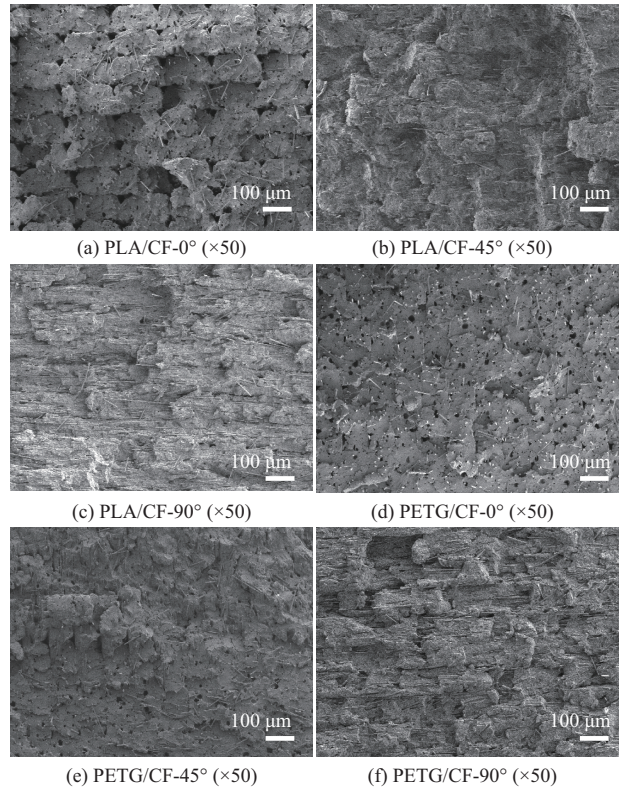


图8 PLA/CF和PETG/CF复合材料冲击试样断面SEM照片  
Fig. 8 SEM photos of impact fracture surface of PLA/CF and PETG/CF composites

当填充方向为45°时,其与冲击载荷方向呈45°夹角,易引发界面脱黏和纤维拔出等现象,断面粗糙度增加,最终造成试样冲击性能下降。

如图6b所示,90°填充条件下,材料沉积方向与冲击载荷方向一致,导致纤维-基体界面容易脱黏。图8c和图8f显示,试样断面形貌平整并呈现明显层间边界,表明该工艺参数下试样的力学性能较低。本研究中PLA-CF,PETG/CF复合材料冲击断面的SEM观察结果与现有文献[19]研究结论基本一致。

### 2.4 细胞增殖试验

细胞相对增殖率(RGR)=(实验组平均吸光度

值-空白对照组平均吸光度值)/(阳性对照组平均吸光度值-空白对照组平均吸光度值) $\times 100\%$ ,根据此式计算RGR结果如图9所示,由图9可知,随着细胞培养时间的延长,PLA/CF材料组与PETG/CF材料组的RGR均呈逐步升高趋势,表明两组材料表面的细胞持续增殖生长。细胞毒性评价标准见表6。

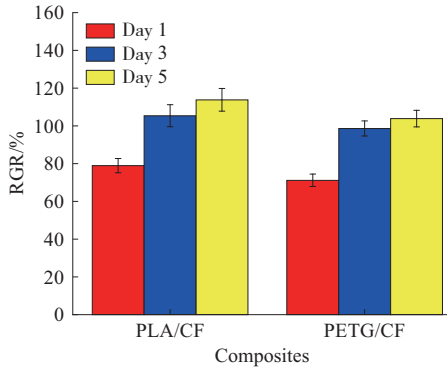


图9 PLA/CF和PETG/CF复合材料的RGR

Fig. 9 RGR of PLA/CF and PETG/CF composites

表6 细胞毒性评价标准表

Tab. 6 Cell toxicity evaluation standard table

Cytotoxicity grade	RGR/%	Cytotoxicity
0	$\geq 100$	None
1	75~99	Slight
2	50~74	Mild
3	25~49	Moderate
4	1~24	Severe

PLA/CF和PETG/CF复合材料细胞毒性分级参照表7。培养第1天时,PETG/CF材料显示为2级细胞毒性,表现为轻微毒性;至第5天时,PETG/CF材料组与PLA/CF材料组的细胞毒性均降至0级,表明已无细胞毒性。

表7 PLA/CF和PETG/CF复合材料的RGR及等级

Tab. 7 RGR and cytotoxicity grade of PLA/CF and PETG/CF composites

Materials	Day 1		Day 3		Day 5	
	RGR/%	Grade	RGR/%	Grade	RGR/%	Grade
PLA/CF	78.96	1	105.39	0	113.79	0
PETG/CF	71.17	2	98.61	1	103.88	0

## 2.5 PLA/CF和PETG/CF复合材料的综合性能对比分析

PLA/CF和PETG/CF复合材料的综合性能对比结果见表8。由表8可见,PLA/CF在拉伸强度、弯曲强度和细胞相容性方面表现更优,而PETG/CF则在冲击韧性方面具有明显优势。PLA/CF的拉伸强度比PETG/CF高14.07%,弯曲强度比PETG/CF高

20.76%;在承载能力方面,PLA/CF和PETG/CF所能承受的最大弯曲载荷分别为161.25 N和133.53 N,是石膏绷带<sup>[20]</sup>的6.3倍和7.7倍,体现出碳纤维增强复合材料在结构承载方面的显著优势;在冲击性能方面,两种材料呈现出显著差异,PETG/CF的缺口冲击强度比PLA/CF高93.49%,表明PETG/CF在冲击载荷下具有更好的能量吸收能力;PLA/CF表现出更低的孔隙率和更高的细胞存活率,说明其具有更致密的微观结构和更优的生物相容性。

表8 PLA/CF和PETG/CF复合材料综合性能对比

Tab. 8 Comprehensive properties comparison of PLA/CF and PETG/CF composites

Properties	PLA/CF	PETG/CF
Tensile strength/MPa	59.82	52.44
Bending strength/MPa	96.75	80.12
Notched impact strength/( $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )	10.29	19.91
Porosity/%	2.35	3.54
RGR/%	113.79	103.88

## 3 结论

通过优化PLA/CF和PETG/CF复合材料的3D打印参数,探究了四个关键打印工艺参数对其试样力学行为的作用机制,并得出以下结论。

(1)对于PLA/CF材料试样,在拉伸强度和缺口冲击强度方面,四个因素的影响程度由大到小依次为填充方向、打印层高、打印温度和打印速度。在正交实验优化参数条件下,该材料的拉伸强度最高可达59.82 MPa,冲击强度最高为10.29  $\text{kJ}/\text{m}^2$ 。在弯曲强度方面,影响程度由大到小依次为填充方向、打印层高、打印速度与打印温度。优化后试样弯曲强度最高达到96.75 MPa。

(2)对于PETG/CF材料试样,在拉伸强度方面,四个因素的影响程度从大到小依次为填充方向、打印层高、打印速度和打印温度。在优化参数条件下,其拉伸强度最高可达52.44 MPa。在弯曲强度和冲击强度方面,各因素的影响顺序为填充方向、打印层高、打印温度与打印速度。优化后试样弯曲强度最高达80.12 MPa,冲击强度最高为19.91  $\text{kJ}/\text{m}^2$ 。

(3)采用优化参数打印的PLA/CF与PETG/CF试样,在力学性能上显著优于传统石膏绷带,并具有更轻的质量优势。细胞增殖试验表明,两种碳纤维增强复合材料均具备了良好的细胞相容性,展现出作为人体皮肤接触类材料的应用潜力。

## 参考文献

[1] CHUA C Y X, LIU H C, DI TRANI N, et al. Carbon fiber rein-

- forced polymers for implantable medical devices[J]. *Biomaterials*, 2021, 271. DOI:10.3389/fsurg.2022.1055008.
- [2] NAZARI R, MOUSAVI S, FAKOOR M, et al. Comparative analysis of closed reduction with external fixation versus closed reduction with percutaneous pinning for distal radius fractures[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15. DOI:10.1038/s41598-025-04001-8.
- [3] LI B, XIE J Y, ZHANG Z M, et al. Braces versus casts for post-operational immobilization of ankle fractures: A meta-analysis[J]. *Frontiers in Surgery*, 2022, 9. DOI:10.3389/fsurg.2022.1055008.
- [4] SONG B, SHI J S, XU X H, et al. Calcaneal distraction vs. cast immobilization for the preoperative treatment of patients with Danis-Weber type C ankle fractures: A case-control study[J]. *Frontiers in Surgery*, 2024, 11. DOI:10.3389/fsurg.2024.1404746.
- [5] WANG Y L, ZHOU X, ZHONG J, et al. Personalized piezoresistive anti-scar orthosis with precise pressure monitoring function based on embedded 3D printing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(30). DOI:org/10.1002/adfm.202400208.
- [6] O'CONNOR H A, ADAMS L W, MACFADDEN L N, et al. 3D printed orthopaedic external fixation devices: A systematic review [J]. *3D Printing in Medicine*, 2023, 9(1). DOI: 10.1186/s41205-023-00180-0.
- [7] KARDASH K, KOUTRAS C, OTADUY M A. Design of personalized scoliosis braces based on differentiable biomechanics-Synthetic study[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022, 10. DOI:10.3389/fbioe.2022.1014365.
- [8] JIA G G, ZHOU M W, JI X, et al. Design and application of a three-dimensional skeletonized structure for distal radius fracture splinting based on 3D printing technology[J]. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 2025, 20(1). DOI: 10.1186/s13018-025-05885-y.
- [9] RICHARD R D, HEARE A, MAUFFREY C, et al. Use of 3D printing technology in fracture management: A review and case series[J]. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 2023, 37(11S): S40-S48.
- [10] GE W W, WANG Y, GE K, et al. Application of virtual reconstruction 3D-printed external fixation helmet in early functional treatment of facial fracture[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2021, 26(3):368-371.
- [11] 吴涛, 黄志强, 杨柳, 等. 基于3D打印踝足矫形器计算机辅助设计及有限元分析[J]. *材料科学与工程学报*, 2024, 42(4):602-607. WU Tao, HUANG Zhiqiang, YANG Liu, et al. Computer-aided design and finite element analysis of ankle foot orthosis based on 3D printing[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2024, 42(4):602-607.
- [12] DAL MASO A, COSMI F. 3D-printed ankle-foot orthosis: A design method[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 12: 252-261.
- [13] POPESCU D, IACOB M C, TARBĂ C, et al. Exploring a novel material and approach in 3D-printed wrist-hand orthoses[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, 8(1). DOI:10.3390/jmmp8010029.
- [14] WALKER K J, PRZESTRZELSKI B T, KALUF B, et al. Novel 3D-printed foot orthoses with variable hardness: A comfort comparison to traditional orthoses[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2023, 115. DOI:10.1016/j.medengphy.2023.103978.
- [15] SAITTA L, TOSTO C, PERGOLIZZI E, et al. Design and fabrication of a customized and fully-recyclable carbon fibers/epoxy composites prostheses via a functional additive manufacturing approach[J]. *Macromolecular Symposia*, 2023, 411(1). DOI: 10.1002/masy.202200189.
- [16] 支皓, 乌日开西·艾依提, 贾儒. 两种FDM打印扫描方式对比研究[J]. *机械设计与制造*, 2025(6):130-133, 139. ZHI Hao, AIYITI Wurikaixi, JIA Ru. Comparative study of two FDM printing scanning methods[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2025(6):130-133, 139.
- [17] S V L S, KARTHICK A, DINESH C. Evaluation of mechanical properties of 3D printed PETG and Polyamide (6) polymers[J]. *Chemical Physics Impact*, 2024, 8. DOI: 10.1016/j.chphi.2024.100491.
- [18] ALKABBANIE R, AKTAS B, DEMIRCAN G, et al. Short carbon fiber-reinforced PLA composites: Influence of 3D-printing parameters on the mechanical and structural properties[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2024, 33(8):1 065-1 074.
- [19] BOUHAMED A, DAMMAK M, HAGUI H, et al. Multiscale mechanical characterization of 3D-printed PLA composites with carbon fiber reinforcement: Effect of raster angle and layer thickness[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, 137(9):4 805-4 824.
- [20] 阿依古丽·喀斯木, 乌日开西·艾依提, 滕勇, 等. 基于3D打印的手指屈肌腱损伤定制化支具设计[J]. *机械设计与制造*, 2017(11): 215-219. AYIGULI Kasimu, AIYITI Wurikaixi, TENG Yong, et al. Design of customized brace for finger flexor tendon injury based on 3D printing[J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2017(11): 215-219.