

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.12.013

短切碳纤维增强聚醚醚酮真空 FDM 工艺参数优化

王熙泽¹, 周佐新¹, 刘腾飞²

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100094; 2. 西安交通大学机械工程学院机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710045)

摘要: 在轨 3D 打印是一种在极端空间环境条件下的新型太空制造技术, 具有非常广阔的应用前景。太空中真空环境下材料散热方式主要以辐射散热为主, 从成型模块挤出的高温熔体在冷却过程中会经历与地面打印不同的热历史, 最终影响打印件的力学性能。为此, 采用有限元分析的方法, 建立真空环境下短切碳纤维增强聚醚醚酮(PEEK)材料在成型模块中的热分析模型, 通过对材料在成型模块流道内的温度场分析, 探究真空环境下短切碳纤维增强 PEEK 熔融成型的热传导规律。结合仿真分析结果, 采用正交实验法开展短切碳纤维增强 PEEK 熔融沉积成型 3D 打印工艺参数优化的实验设计, 对实验结果开展极差分析和单因素试验分析, 建立最优的工艺策略, 以保证真空环境下打印的试件具有优异的力学性能。有限元分析结果表明, 在 380~410 °C 范围内加热块温度对材料在成型模块内熔融过程的影响不显著, 而送线速度越大材料的熔融过程越不充分, 打印短切碳纤维增强 PEEK 树脂材料应保持送线速度不超过 8 mm/s。实验结果表明, 对于拉伸强度, 最优的工艺参数组合为加热块温度 390 °C、扫描间距 0.6 mm、分层厚度 0.2 mm、打印速度 20 mm/s; 对于拉伸弹性模量, 最优的工艺参数组合为加热块温度 410 °C、扫描间距 0.6 mm、分层厚度 0.2 mm、打印速度 30 mm/s。

关键词: 太空制造; 在轨 3D 打印; 熔融沉积成型; 复合材料; 工艺参数; 力学性能

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)12-0089-08

Optimization of FDM process parameters for chopped carbon fiber reinforced polyether ether ketone under vacuum

WANG Xize¹, ZHOU Zuoxin¹, LIU Tengfei²

(1. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710045, China)

Abstract : In-orbit 3D printing is a new type of space manufacturing technology under extreme space environmental conditions and has a very broad application prospect. In the vacuum environment of space, the heat dissipation mode of the material is mainly radiative heat dissipation, and the high-temperature melt extruded from the print head experiences different thermal history during the cooling process compared with the ground printing, which ultimately affects the mechanical properties of the printed part. Therefore, the thermal analysis model of chopped carbon fiber reinforced polyether ether ketone (PEEK) composites in the molding module under vacuum environment was established by the finite element analysis method. The heat conduction law of chopped carbon fiber reinforced PEEK melting forming under vacuum environment was investigated by analyzing the temperature field of the composite in the flow channel of the molding module. Combined with the results of simulation analysis, the orthogonal test method was used to carry out the experimental design of the optimization for the 3D printing process parameters of chopped carbon fiber reinforced PEEK with fused deposition modeling, and the range analysis and single factor test analysis were carried out, and the optimal process strategy was established to ensure the excellent mechanical properties of the specimen printed under vacuum environment. The finite element analysis results show that the melting process of the composite in the molding module is not significantly affected by the heating block temperature in the range of 380–410 °C, and the higher the wire feed speed, the less sufficient the melting process of the composite. The wire feed speed of the chopped carbon fiber reinforced PEEK composite should be kept no more than 8 mm/s. The experimental results show that for the tensile strength, the optimal combination of process parameters are heating block temperature of 390 °C, scanning spacing of 0.6 mm, layer thickness of 0.2 mm, and printing speed of 20 mm/s. For the tensile modulus, the optimal combination of process parameters are heating block temperature of 410 °C, scanning spacing of 0.6 mm, layer thickness of 0.2 mm, printing speed of 30 mm/s.

Keywords : space manufacturing ; in-orbit 3D printing ; fused deposition modeling ; composite ; process parameters ; mechanical property

通信作者: 周佐新, 硕士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为航天器总体设计及热控技术

收稿日期: 2024-09-18

引用格式: 王熙泽, 周佐新, 刘腾飞. 短切碳纤维增强聚醚醚酮真空 FDM 工艺参数优化[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12): 89–96.

WANG Xize, ZHOU Zuoxin, LIU Tengfei. Optimization of FDM process parameters for chopped carbon fiber reinforced polyether ether ketone under vacuum[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(12): 89–96.

在轨3D打印技术,又称在轨增材制造技术,是发射原材料和增材制造装备到目标轨道上,进而在轨道上进行增材制造航天器及部组件的技术^[1-3]。该技术最早由美国NASA提出,目的是通过在轨制造使国际空间站拥有部分物资自给的能力。目前在轨3D打印技术不断发展,特别是随着在轨3D打印技术与空间机器人、在轨装配等技术结合,在轨3D打印技术被认为是将从根本上改变传统航天器“地面制造、收拢发射、在轨展开”设计模式的颠覆性技术,能够避免航天器发射段和运载火箭发射空间等约束,成为了各国研究的热点^[4-8]。

在轨3D打印首先需要考虑空间微重力环境下成型工艺的控制,因此国内外研究人员先后通过抛物飞行和轨道实验等方法验证了微重力环境下3D打印的成型工艺^[9-10]。随着研究的深入,高真空环境对成型工艺的影响也越来越受到学者们的重视。空间真空环境下传热条件与地面具有较大差别,高性能树脂在熔融成型过程中的温度环境决定了材料成型的质量和精度,此外真空环境下所匹配的成型工艺也与地面不同。Maidin等^[11]研究了40 000 Pa的真空条件对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)和聚乳酸(PLA)样件抗压强度与微观结构的影响。结果显示,真空下成型的ABS与PLA样件的抗压强度均优于常压下的打印件,微观结构分析表明,常压下打印的ABS与PLA样件均存在不均匀表面,而真空下两者均显示出更为光滑的表面。作为新型高性能工程塑料,聚醚醚酮(PEEK)及其复合材料由于具有优异的性能受到学界和工程界的广泛关注^[12-15]。Liu等^[16]发现100 Pa真空度下PEEK结晶度由14.9%提升至27.8%,不同打印方向的拉伸强度与拉伸弹性模量均有大幅提升。通过红外热成像对比PEEK在两种环境下的冷却过程,证明了真空中的缓慢散热速率可以使样件长时间保持高温状态,促进了PEEK材料的结晶与融合。

综合而言,国内外针对真空环境下3D打印开展了一些原理性研究,但针对工艺参数的研究还很少,而且基本都采用单一变量法研究真空环境下的工艺参数,没有将各工艺参数组合起来考虑其综合影响。笔者采取正交实验设计的方法研究真空环境下工艺参数组合对熔融沉积成型(FDM)所得样件质量的影响,分别得到真空下打印短切碳纤维增强PEEK复合材料拉伸强度和拉伸弹性模量最优的工

艺参数,通过定量研究,掌握在轨真空环境下3D打印成型工艺,为该工艺的深入应用提供依据。

1 模拟仿真

开展真空环境下短切碳纤维增强PEEK复合材料打印的有限元分析,采用有限元分析的方法,建立材料在真空环境下从进入成型模块到挤出固化过程中的热分析模型和熔融挤出过程成型模块内流体流动过程,揭示真空环境下材料FDM的热传导规律,并为真空环境下FDM打印工艺参数的选择提供参考。

1.1 模型的建立

在不同的送线速度下,成型模块中流道内材料的实际温度分布还不明确,而材料从成型模块入口端进入到从喷嘴出口处挤出所经历的时间比较短,因此有必要分析在此过程中PEEK复合材料温度的分布情况。材料熔体在成型模块中的传热分析属于流固耦合问题,采用ANSYS软件中的Fluent模块进行仿真分析。

首先,用SolidWorks创建一个用于打印PEEK及其复合材料成型模块的三维模型,如图1所示。将模型导出为Parasolid (*.x_t)格式,再将其导入ANSYS Workbench进行分析。

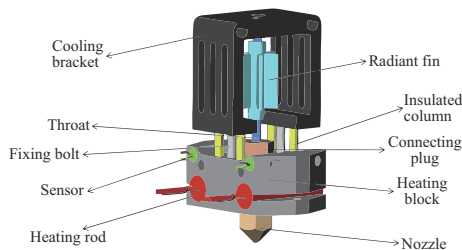


图1 成型模块仿真分析模型

Fig. 1 Molding module simulation analysis model

1.2 网格划分

在仿真软件的网格功能模块中可以实现设置单元形状、单元类型、网格划分技术和算法等功能。模型整体的单元尺寸设置为0.5 mm。对于重点关注的流道等处进行网格细化,设置局部单元尺寸为0.05 mm,以反映此处真实的温度场情况。生成网格并检查网格质量,确定生成的网格满足后续的仿真需求。最终网格的单元总数为3 873 468,节点总数为886 910。

1.3 材料属性

成型模块各组件使用的材料以及对应的材料性能见表1。

表1 成型模块各组件材料及性能

Tab. 1 Materials and properties of various components of molding module

Component	Material	Specific heat/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Density/(g·cm ⁻³)	Surface emissivity
Nozzle	H59 copper alloy	378	118	8.5	0.05
Heating block	H59 copper alloy	378	118	8.5	0.05
Heating rod	304 stainless steel	460	16.2	7.93	0.1
Sensor	304 stainless steel	460	16.2	7.93	0.1
Throat	304 stainless steel	460	16.2	7.93	0.1
Radiant fin	T3 red copper	394	386	8.93	0.88
Connecting plug	T3 red copper	394	386	8.93	0.88
Insulated column	304 stainless steel	460	16.2	7.93	0.1
Fixing bolt	304 stainless steel	460	16.2	7.93	0.1
Cooling bracket	7075 Aluminium alloy	502	10	2.81	0.5

定义短切碳纤维增强PEEK复合材料的性能参数见表2。

表2 纤维质量分数10%的短切碳纤维增强PEEK复合材料的性能

Tab. 2 Properties of 10 wt% chopped carbon fiber reinforced PEEK composite

Properties	Value
Density/(kg·m ⁻³)	1 340
Specific heat/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1 800
Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.95
Melt viscosity/(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	10 000
Melting temperature/°C	343

1.4 边界条件设置

真空环境和常规环境的传热模式区别在于,真空环境下不存在空气的对流换热,只有热传导和热辐射。为模拟真空环境,在材料中删除空气,并开启热辐射模块。开启凝固和融化模块,模拟短切碳纤维增强PEEK在成型模块内的相变过程。流道内熔融的树脂材料流动过程具有低流速、高黏度的特点,符合流体的层流特性,因此在黏度模块中选择“laminar flow”进行仿真。在单元区域条件中将加热块的温度设置为380℃。设置材料的入口速度以模拟实际打印过程中丝材的送线速度。

点击运行计算,对短切碳纤维增强PEEK复合材料在成型模块中的温度场展开仿真分析。

2 仿真结果与讨论

短切碳纤维增强PEEK复合材料在流道中经历一个熔融的相变过程,理想情况下材料在流道内部能够得到充分加热,保证材料在达到喷嘴处时处于熔融状态。当送线速度过快时,材料在流道内部停留时间过短,材料无法吸收充足的热量进行熔融。在不同的入口速度下对流道内部的温度场进行了仿真,为实际打印中送线速度这一参数的选择提供参考。仿真得到于真空环境在加热块温度为380℃

下打印短切碳纤维增强PEEK时,不同送线速度下成型模块流道内稳态温度场的仿真结果如图2所示。

仿真结果表明,不同送线速度下,材料在整个成型模块内流道段的温度分布呈现低温段、过渡段与高温段3个区域(图2a)。低温段材料温度都在60.5℃以下,此时PEEK复合丝材仍保持固体状态,具有良好的刚性,这对于材料挤出是有利的。对于高温段,当送线速度为较小的4 mm/s和6 mm/s时,高温段的材料温度能够达到340℃以上,说明此时短切碳纤维增强PEEK已经完全融化,即在该送线速度下,成型模块有足够的时间将材料完全融化进而从喷嘴中挤出。随着送线速度的增加,过渡段逐渐下移,低温段长度增加,高温段长度降低。当送线速度达到10 mm/s时,高温段基本消失,不能保证加热块与喷嘴段材料的温度高于材料的熔融温度,且中心区域温度更低,主要是由于当送线速度过高时,材料在成型模块内部停留时间过短,无法将材料完全融化,这对于打印来说是不利的。因此根据仿真结果得出结论,在相同的条件下打印短切碳纤维增强PEEK复合材料时,需保持送线速度小于8 mm/s。

根据流量相等原理,即单位时间内流入成型模块的树脂材料与流出成型模块的树脂材料相等,可按照公式(1)进行计算。

$$\frac{\pi D_p^2}{4} V_p = \frac{\pi D_s^2}{4} V_s \quad (1)$$

式中: D_p 为喷嘴直径; V_p 为喷嘴出口平均速度(数值上等于打印速度 V_0); D_s 为丝材直径, V_s 为送线速度。

式(1)中等号左边代表喷嘴出口截面材料的流量,等号右边代表进入成型模块材料的流量。通过

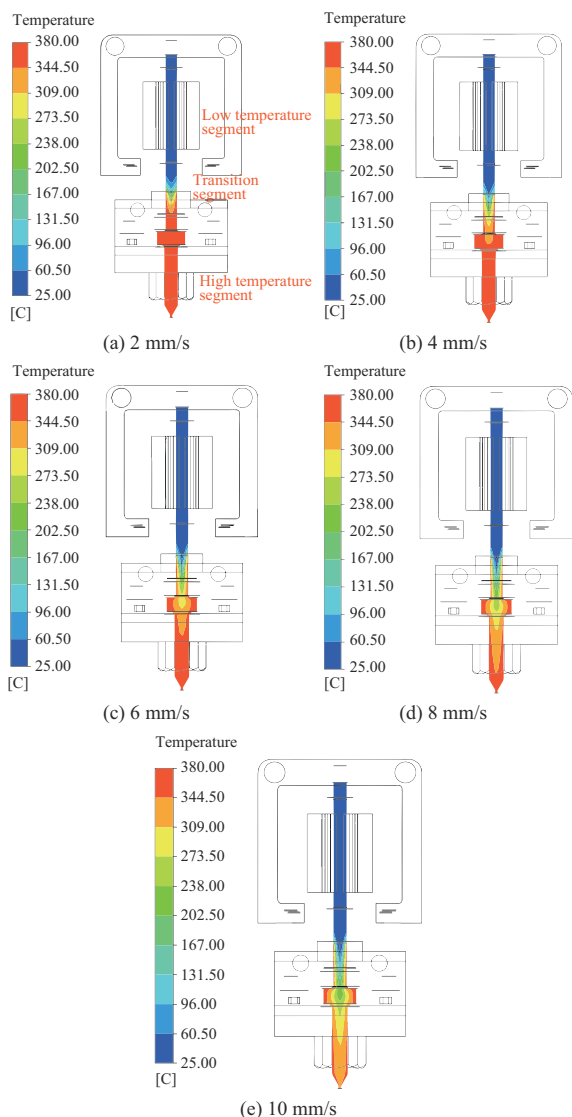


图2 不同送线速度下成型模块流道内稳态温度场仿真结果

Fig. 2 Simulation results of steady-state temperature field inside molding module channel at different wire feeding speeds

式(1)可以判断在丝材直径确定的条件下,喷嘴直径和打印速度两工艺参数的组合是否使对应的送线速度 V_s 小于 8.0 mm/s ,使材料在成型模块内充分熔融,从而判断工艺参数选择的合理性。在后续的实验方案设计中通过这种方法也验证了工艺参数组合的合理性。

为研究真空环境中加热块温度和送线速度对PEEK复合材料在成型模块流道内熔融过程的影响,开展不同温度下不同送线速度的仿真。根据实际的打印经验选择加热块温度和送线速度范围:加热块温度选择 $380, 390, 400, 410 \text{ }^\circ\text{C}$;送线速度选择 $2, 4, 6, 8, 10 \text{ mm/s}$ 。选择过渡段长度作为表征材料在加热模块内熔融情况的输出量,过渡段长度越短

表示材料在加热模块内熔融得越充分。开展仿真得到真空环境中不同加热块温度下送线速度-过渡段长度折线图如图3所示。

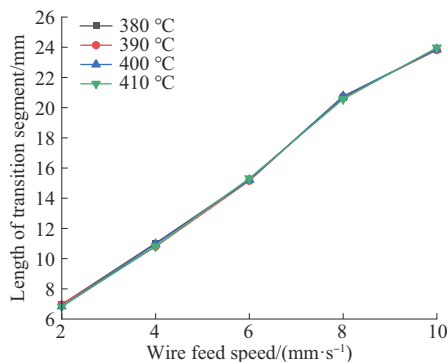


图3 不同加热块温度下送线速度-过渡段长度折线图

Fig. 3 Line chart of wire feed speed-length of transition segment under different heating block temperatures

结合图3对仿真结果进行分析,可以得出以下结论:加热块温度对PEEK复合材料在成型模块流道内熔融过程的影响不显著;过渡段长度随着送线速度的增大而增大,说明送线速度越大材料的熔融过程越不充分,这一结论可以结合后续的实验结果进一步分析。值得说明的是,当送线速度达到 10 mm/s 时,过渡段长度达到极限值 25 mm ,此时高温段几乎消失,如图2e所示。

3 真空环境下短切碳纤维增强PEEK成型工艺参数优化实验

结合以上仿真分析结果,采用正交实验法开展短切碳纤维增强PEEK打印工艺参数优化的实验设计,利用力学性能测试(包括拉伸强度、拉伸弹性模量)的结果进行分析,得到短切碳纤维增强PEEK在真空环境下优化的成型工艺参数。

3.1 主要原材料

短切碳纤维增强PEEK(纤维质量分数10%):丝状耗材,直径 1.75 mm ,上海远铸智能(INTAMSYS)技术有限公司。

3.2 主要仪器及设备

真空高低温环境箱:HK-DQY-216,西安环科试验设备有限公司;

多功能静力学试验机:CMT4304,美特斯工业系统(中国)有限公司。

3.3 实验方案设计

正交实验是研究多因素多水平的一种设计方法,能够在较少的实验次数下达到与全面实验等效的结果。正交设计要遵循“独立性”和“均衡性”原

则,即各个因素应该相互独立,每个因素的各个水平应该在实验方案中平衡地出现。FDM工艺参数主要包括加热块温度、环境温度、扫描间距、分层厚度、打印速度,除此以外喷嘴直径也会影响增材制造的成型质量。喷嘴直径会影响扫描间距的选择,而在同一喷嘴直径下选择不同的扫描间距进行打印时成型质量会产生差异。根据正交实验的“独立性”原则,喷嘴直径按照和扫描间距在数值上相等原则作为固定值,因为一般来讲,喷嘴直径相当于从成型模块流出熔丝的宽度,扫描间距是一个平面内两个相邻熔丝的间距,当两者数值上相等时,熔丝之间才能没有重叠也没有空隙,从而高效地填满平面。此外在真空环境下,施加环境温度的难度较高,因此环境温度同样设置为固定值。综上所述,对于工艺参数优化,最终选择的工艺参数包括加热块温度、扫描间距、分层厚度和打印速度4个因素,如图4所示。

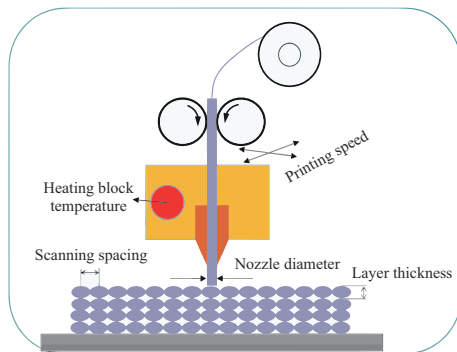


图4 选择的FDM工艺参数

Fig. 4 Selected FDM process parameters

根据前期的各工艺参数的单因素实验以及打印经验,选择4个因素的水平如下:加热块温度选择380,390,400,410℃四个水平;扫描间距选择0.4,0.5,0.6 mm三个水平;分层厚度选择0.2,0.3,0.4 mm三个水平;打印速度选择20,30,40,50 mm/s四个水平。生成正交表 $L_{16}(4^4)$ 后采用拟水平法处理,最终得到真空下工艺参数优化实验正交表见表3。

根据前文的仿真结果验证工艺参数选择的合理性:当第9组中扫描间距(即喷嘴直径)和打印速度(即出口平均速度)同时取最大值0.6 mm和50 mm/s,丝材直径取1.75 mm时,将以上数值代入式(1),计算得出此时的送线速度对应为5.88 mm/s,小于仿真得到的送线速度上限8 mm/s,可以判断材料在成型模块内部能够充分熔融,工艺参数的选择是合理的。

表3 真空下工艺参数优化实验正交表

Tab. 3 Orthogonal table for optimizing process parameters under vacuum

Serial number	Heating block temperature/℃	Scanning spacing/mm	Layer thickness/mm	Printing speed/(mm·s ⁻¹)
1	380	0.6	0.2	20
2	380	0.4	0.3	30
3	380	0.5	0.4	40
4	380	0.5	0.2	50
5	390	0.6	0.3	40
6	390	0.4	0.2	50
7	390	0.5	0.2	20
8	390	0.5	0.4	30
9	400	0.6	0.4	50
10	400	0.4	0.2	40
11	400	0.5	0.2	30
12	400	0.5	0.3	20
13	410	0.6	0.2	30
14	410	0.4	0.4	20
15	410	0.5	0.3	50
16	410	0.5	0.2	40

实验的真空度设置为100 Pa,环境温度设置为25℃。使用短切碳纤维增强PEEK材料按照表中16种参数组合(每组打印5个试件)打印共80个试件。为保证打印质量,打印前将喷嘴预热至目标温度,并清除喷嘴处的残料。打印结束后,将样件放置密封袋内,待其自然冷却到稳定状态后按照GB/T 1040.1-2006标准进行16组试样的拉伸性能测试。

3.4 试件制备

拉伸试件按照GB/T 1040.2-2006 1BA型试样制备。利用SolidWorks三维建模软件绘制3D打印试件,将试样模型以STL格式导出,在切片软件中设置打印参数并进行切片,导入到3D打印机打印试件。拉伸试件在水平方向打印,每层的打印路径方向与X方向平行,保证颈部沿纵向打印,拉伸性能测试按照GB/T 1040.2-2006进行,拉伸速率设置为1 mm/min。

4 结果与讨论

将16组工艺参数对应的试件进行力学性能测试,测得拉伸强度和拉伸弹性模量平均值的柱状图如图5所示。

根据柱状图可以直观地得出结论,在真空环境下,不同的工艺参数组合对短切碳纤维增强PEEK试件的力学性能有显著影响。

4.1 极差分析

极差分析被用来评估实验结果在不同处理条

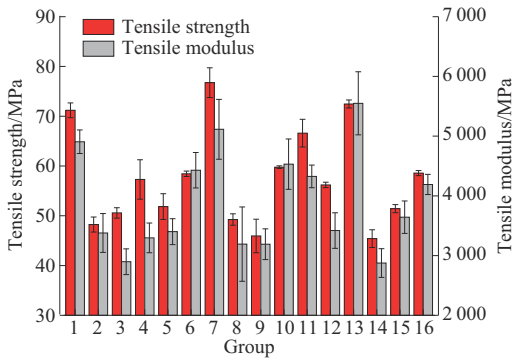


图5 各组工艺参数对应的拉伸强度和拉伸弹性模量柱状图
Fig. 5 Bar charts of tensile strength and tensile modulus corresponding to each process parameter group

件下的变异性,可以反映数据的离散程度,用于研究因素对实验结果的变化范围(极差)的影响。

在极差分析中, K 值为某因素某水平的实验数据求和, K_{avg} 值为对应的平均值;最佳水平指某因子最佳(本实验中为拉伸强度或拉伸弹性模量最大) K_{avg} 值对应的水平; R 指因素的极差值,该值取某因素时对应的 K_{avg} 最大值减去 K_{avg} 最小值,可对比各因素的优劣;水平数量指某因素的水平数;每水平重复数 r 指水平的平均实验重复次数。对于混合型正交表,需要对 R 值进行校正。本实验正交表经过拟水平法处理,属于混合型正交表,需要使用 R' 值,计算方法见式(2)。

$$R' = d \cdot R \cdot \sqrt{r} \quad (2)$$

式中: d 为折算系数,结合水平数量查表得到。

根据以上计算方法得出拉伸强度的极差分析结果见表4。

表4 拉伸强度的极差分析结果

Tab. 4 Tensile strength range analysis results

Item	Heating block temperature	Scanning spacing	Layer thickness	Printing speed
Optimum level	390	0.6	0.2	20
R	2.24	7.4	17.34	9.11
Level quantity	4	3	3	4
r	4	5	5	4
d	0.45	0.52	0.52	0.45
R'	2.02	8.6	20.16	8.2

通过表4的极差分析可知,从4个因素来看,结合 R' 值的大小对比可知,分层厚度是对试件拉伸强度影响最大的因素,其次是扫描间距,之后是打印速度,最后是加热块温度。因而4个因素对试件拉伸强度影响的排序为:分层厚度>扫描间距>打印速度>加热块温度。

通过各参数的最佳水平可知,对于拉伸强度,

最优的工艺参数组合为加热块温度 390 °C、扫描间距 0.6 mm、分层厚度 0.2 mm、打印速度 20 mm/s。在该最优工艺参数组合下制备的试件拉伸强度为 80.31 MPa,对比图 5,发现高于正交实验 16 组的数据,由此验证了该最优工艺参数组合的准确性。

同样地,对拉伸弹性模量开展极差分析。根据前面的计算方法得出拉伸弹性模量的极差分析结果见表5。

表5 拉伸弹性模量的极差分析结果

Tab. 5 Tensile modulus range analysis results

Item	Heating block temperature	Scanning spacing	Layer thickness	Printing speed
Optimum level	410	0.6	0.2	30
R	445	501.97	1 504.35	471.69
Level quantity	4	3	3	4
r	4	5	5	4
d	0.45	0.52	0.52	0.45
R'	400.5	583.67	1 749.19	424.52

通过表5的极差分析可知,从4个因素来看,结合 R' 值的大小对比可知,分层厚度是对试件拉伸弹性模量影响最大的因素,其次是扫描间距,之后是打印速度,最后是加热块温度。因而4个因素对拉伸弹性模量影响的排序为:分层厚度>扫描间距>打印速度>加热块温度。

通过各参数的最佳水平可知,对于拉伸弹性模量,最优的工艺参数组合为加热块温度 410 °C、扫描间距 0.6 mm、分层厚度 0.2 mm、打印速度 30 mm/s,对应于正交表中第 13 组,相应的拉伸弹性模量最高。

4.2 单因素试验分析

为了更直观地说明真空环境下各因素对打印短切碳纤维增强 PEEK 试件力学性能的影响,采用单因素法研究加热块温度、扫描间距、分层厚度和打印速度4因素对试件拉伸强度和拉伸弹性模量的影响。

不同因素水平下试件拉伸强度和拉伸弹性模量如图6所示。4个工艺参数中,扫描间距和分层厚度主要是通过影响材料从喷头挤出后冷却成型过程从而影响打印试件的力学性能。加热块温度和打印速度主要是通过影响材料在成型模块内的熔融过程从而影响打印试件的力学性能。

拉伸强度随着扫描间距的增大而增大,拉伸弹性模量总体上也有类似的趋势。可能的原因是在试件整体宽度确定的条件下,在一层中扫描间距越

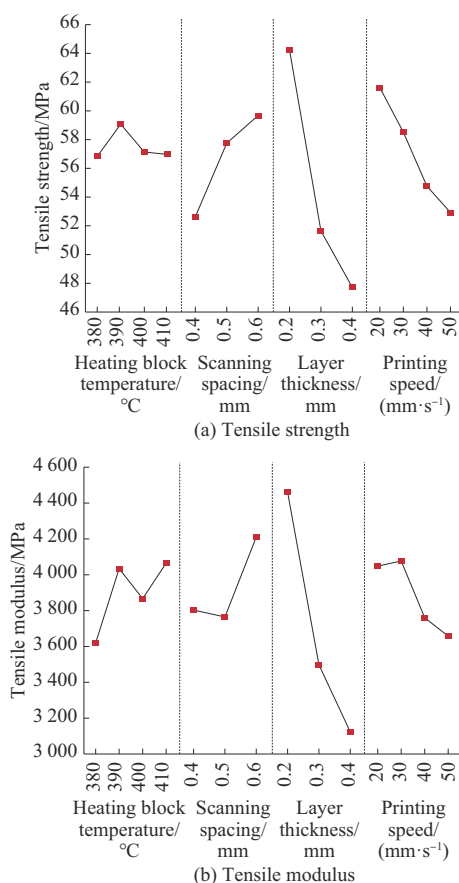


图6 不同因素下各水平对应的拉伸强度和拉伸弹性模量均值

Fig. 6 Mean values of tensile strength and tensile modulus corresponding to each level under different factors

大,这一层铺线的数量越少,相比于线窄而多的情况这种方法散热面积更小,冷却速率更慢,材料结晶更加充分,最终提升材料的力学性能。而扫描间距从0.4 mm到0.5 mm时试件的拉伸弹性模量减小,说明有其他可能的因素影响试件的拉伸弹性模量。

试件的拉伸强度和拉伸弹性模量均随着分层厚度的增大而减小,这是由于分层厚度越大,材料堆积得越疏松,而材料的冷却速率越快,最终影响材料的力学性能。

对于加热块温度,单因素试验分析表明其与拉伸强度和拉伸弹性模量之间无明显关系。结合仿真结果分析,加热块温度对PEEK复合材料在成型模块流道内熔融过程的影响不显著,进而对试件的力学性能影响不大,这与极差分析结果一致。

拉伸强度随着打印速度的增大而减小,总体来看拉伸弹性模量也有类似的趋势,这一结论与仿真分析中的结论“送线速度越大材料的熔融过程越不充分”相符合,因为在其他工艺参数确定的条件下

送线速度和打印速度之间呈线性关系。可能的原因是PEEK及其复合材料的结晶与热历史密切相关,材料在结晶温度以上足够的时间充分熔融是实现完全定向结晶的有利条件,因此打印速度越大,材料的高温历史越短,结晶越不充分,缺陷更多,对应的力学性能越差。而打印速度从20 mm/s到30 mm/s时试件的拉伸弹性模量有所增大,说明有其他可能的因素影响试件的拉伸弹性模量。

5 结论

通过有限元仿真计算与正交实验研究了短切碳纤维增强PEEK真空FDM工艺参数与性能,得到以下结论。

(1)对于真空环境下的FDM工艺,在相同的打印条件下,打印短切碳纤维增强PEEK复合材料应保持送线速度不超过8 mm/s,以避免材料熔融不充分,进而影响打印质量。

(2)加热块温度对PEEK复合材料在成型模块流道内熔融过程的影响不显著;过渡段长度随着送线速度的增大而增大,说明送线速度越大材料在成型模块内的熔融过程越不充分。

(3)根据实验结果,在真空环境下,不同的工艺参数组合对短切碳纤维增强PEEK试件的力学性能有显著影响。4项工艺参数对拉伸强度和拉伸弹性模量的影响排序为:分层厚度>扫描间距>打印速度>加热块温度。

(4)对于试件的拉伸强度,最优的工艺参数组合为加热块温度390 °C、扫描间距0.6 mm、分层厚度0.2 mm、打印速度20 mm/s;对于试件的拉伸弹性模量,最优的工艺参数组合为加热块温度410 °C、扫描间距0.6 mm、分层厚度0.2 mm、打印速度30 mm/s。

参考文献

- [1] 田小永,李涤尘,卢秉恒.空间3D打印技术现状与前景[J].载人航天,2016,22(4):471-476.
TIAN Xiaoyong, LI Dichen, LU Bingheng. Status and prospect of 3D printing technology in space[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(4):471-476.
- [2] 李涤尘,鲁中良,田小永,等.增材制造——面向航空航天制造的变革性技术[J].航空学报,2022,43(4). DOI: 10.7527/S1000-6893.2021.25387.
LI Dichen, LU Zhongliang, TIAN Xiaoyong, et al. Additive manufacturing—Revolutionary technology for leading aerospace manufacturing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4). DOI: 10.7527/S1000-6893.2021.25387.
- [3] 王功,赵伟,刘亦飞,等.太空制造技术发展现状与展望[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2020,50(4):95-105.

- WANG Gong, ZHAO Wei, LIU Yifei, et al. Review of space manufacturing technique and developments[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2020, 50(4):95–105.
- [4] 张琪, 刘明, 赵少凡, 等. 在轨制造现状及金属材料在轨制造方法研究[J]. *自然杂志*, 2023, 45(4):247–257.
- ZHANG Qi, LIU Ming, ZHAO Shaofan, et al. Development of on-orbit manufacturing and the research of on-orbit manufacturing for metallic materials[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2023, 45(4):247–257.
- [5] 张颖一, 张伟, 王功. 太空增材制造的技术需求和应用模式探索[J]. *中国材料进展*, 2017, 36(Z1):503–511.
- ZHANG Yingyi, ZHANG Wei, WANG Gong. Discussion on the technical demands and application modes of additive manufacturing in space[J]. *Materials China*, 2017, 36(Z1):503–511.
- [6] 万雪曼, 崔万照, 张晓萌. 3D打印在空间微波部件的应用展望[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2023, 21(4):555–562.
- WAN Xueman, CUI Wanzhao, ZHANG Xiaomeng. Research progress and prospect of space 3D printing microwave devices[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2023, 21(4):555–562.
- [7] 刘洁, 时云, 崔宇涛, 等. 空间在轨增材制造技术的研究进展与展望[J]. *中国空间科学技术*, 2022, 42(6):23–34.
- LIU Jie, SHI Yun, CUI Yutao, et al. Research progress and prospect of on-orbit additive manufacturing technology[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2022, 42(6):23–34.
- [8] PRATER T, WERKHEISER N, LEDBETTER F, et al. 3D printing in zero G technology demonstration mission: Complete experimental results and summary of related material modeling efforts[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101(1–4):391–417.
- [9] WERKHEISER N. In-space manufacturing(ISM): 3D printing in space technology demonstration: 256–544–8406[R/OL]. (2015-06-23) [2024-11-19]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150016451/downloads/20150016451.pdf>.
- [10] 杨杰, 黎静, 吴文杰, 等. 空间大型桁架在轨增材制造技术的研究现状与展望[J]. *材料导报*, 2021, 35(3):3 159–3 167.
- YANG Jie, LI Jing, WU Wenjie, et al. Research status and prospect of on-orbit additive manufacturing technology for large space truss[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(3):3 159–3 167.
- [11] MAIDIN S, HAYATI N M N, RAJENDRAN T K, et al. Comparative analysis of acrylonitrile butadiene styrene and polylactic acid samples' mechanical properties printed in vacuum[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 67. DOI:10.1016/j.addma.2023.103485.
- [12] 苏蕴华. 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的研究及应用[J]. *现代制造技术与装备*, 2024, 60(9):7–10, 17.
- SU Yunhua. Research and application of CF/PEEK composites[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2024, 60(9):7–10, 17.
- [13] 李久振, 战丽, 李莞, 等. 基于FDM的PEEK/CGF复合材料综合力学性能优化[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(2):75–81.
- LI Jiuzhen, ZHAN Li, LI Guan, et al. Optimization of integrated mechanical properties of PEEK/CGF composites based on FDM[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(2):75–81.
- [14] 林初明, 陈柏, 王尧尧. 3D打印工艺参数对聚醚醚酮(PEEK)介电性能的影响[J]. *机械制造与自动化*, 2024, 53(3):70–73.
- LIN Chuming, CHEN Bai, WANG Yaoyao. Effect of 3D printing process parameters on dielectric properties of PEEK[J]. *Machine Building & Automation*, 2024, 53(3):70–73.
- [15] 何叶泓, 范震. 碳纤维-聚醚醚酮改性促进材料成骨活性和抗菌性能的研究进展[J]. *同济大学学报(医学版)*, 2024, 45(3):429–433.
- HE Yehong, FAN Zhen. Research progress on carbon fiber-polyetheretherketone modification to promote osteogenic activity and antibacterial properties[J]. *Journal of Tongji University (Medical Science)*, 2024, 45(3):429–433.
- [16] LIU T, ZHANG M, KANG Y, et al. Material extrusion 3D printing of polyether ether ketone in vacuum environment: Heat dissipation mechanism and performance[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 62. DOI:10.1016/j.addma.2023.103390.