长薄U形结构钛合金SLM制件的控形仿真与性能验证研究

吴海荣[1]，贾志宏[2]，郑建超[2]，闫思文[2]，谢洪志[2]，温钟淳[2]

1.海装沈阳局驻沈阳地区第一军事代表室　辽宁沈阳　110148

2.沈阳飞机工业（集团）有限公司　辽宁沈阳　110850

摘要：为优化大尺寸钛合金薄壁类激光选区熔化制件的加工方案、提高零件合格率，通过基于前处理工艺设计软件与模拟仿真软件平台，对具有长薄U形典型结构特征的钛合金试件进行了成形方案优化，并验证了仿真迭代结果的可行性。结果表明：试件在成形过程中的变形趋势主要集中在立筋与长臂结构边缘处，通过添加点阵支撑的方式达到了零件控形的目的，其三维扫描外形测量结果均在合格范围内。综合性能测试结果显示，试件*XY*向和*Z*向的强度极限分别可达1029.5MPa、1026.2MPa，断后伸长率平均分别为12.1%和11.2%，接近各向同性，而*XY*向和*Z*向的室温冲击测试结果平均分别为31.4J和48.6J，表现出明显的各向异性。

关键词：钛合金；激光选区熔化；仿真迭代；变形控制；性能测试

Simulation of deformation control scheme and combination properties verification of titanium SLM components with U-shaped long and thin structure

WU Hairong[1], JIA Zhihong[2], ZHENG Jianchao[2], YAN Siwen[2], XIE Hongzhi[2], WEN Zhongchun[2]

1.The First Military Representative Office of the Shenyang Bureau of Naval Equipment in Shenyang, Shenyang 110148, Liaoning, China

2.AVIC Shenyang Aircraft Company Limited, Shenyang 110850, Liaoning, China

Abstract: In order to optimize the working scheme of thin-wall titanium SLM parts and enhance the conformity rate, this study mainly focus on iterating the forming scheme of titanium SLM components with typical long and thin U-shaped structure, which was based on pre-treatment process design and simulation software platform. Meanwhile, the feasibility of the simulation iteration results were verified. It showed that stress deformation was mainly distributed in edge of the straight gussets and long-arm parts. Lattice supports were applied to accomplish the purpose of controlling distortion, which guaranteed the 3D-scan result was within the scope of qualification. The results of comprehensive performance testing showed that the ultimate strength were 1029.5MPa (*XY*) and 1026.2MPa (*Z*), and elongation were 12.1%(*XY*) and 11.2%(*Z*) in average, respectively, which was nearly isotropy, while the results of room temperature impact test were 31.4J(*XY*) and 48.6J(*Z*), which showed apparently anisotropy.

Keywords: titanium; SLM; simulation iteration; deformation control; performance testing

第一作者：吴海荣，硕士，主要从事航空装备管理和监造研究，E-mail：462425622@qq.com。

通信作者：贾志宏，博士，主要从事激光增材制造、电弧增材制造研究，E-mail：jzh0204050956@163.com。

1 序言

钛合金零件具有良好的耐高温、耐蚀性和综合力学性能等优点，在航空领域有着广泛的应用[1]。激光选区熔化成形（Selective Laser Melting，SLM）作为航空制造领域中应用最为广泛、成熟度最高的一类增材制造技术，具有设计自由度高、生产迭代周期短、成形零件批次稳定性良好等优点[2]。然而钛合金薄壁SLM制件在成形过程中，往往会出现由于热应力累积和成形策略不当而引起的零件变形、翘曲超差等工艺性缺陷。针对此类问题，需从工艺设计方案迭代与验证入手，结合具体零件产品的应用场景和技术要求，展开一系列相关验证研究。

PENG等[3]针对增材制造零件支撑结构设计的高强度、轻量化需求，基于Timoshenko悬臂梁理论提出一种主动拟合算法，针对大型薄壁零件构建了尺寸为538mm×400mm×384mm、质量为7.78kg的支撑结构，在满足轻量化需求的同时大幅提高了整体结构的控形强度。郭胜奎[4]针对SLM零件的表面成形质量、成形时间和支撑结构数量等方面进行了模型优化设计，并编写了遗传算法以简化支撑角度设计计算过程，使用Matlab对支撑设计算法和遗传算法进行了编程实现，通过工程实例验证了算法的有效性。葛啸等[5]提出了八棱柱状支撑结构设计方法，在四棱柱状支撑结构基础上进行了优化，通过试验验证达到了节约模型打印时间的目的。闫继伟等[6]基于拓扑优化技术与力学模拟仿真技术相结合，优化了SLM工艺支撑结构的设计形式，在满足使用性能的前提下，实现了验证件减重40%的理想效果。

国内方面，LIU等[7]采用X射线衍射法研究了沉积高度、支撑设计方案对SLM成形不锈钢试样的影响，指出层间后续热循环对试样沉积高度的热应力分布影响显著。张小川等[8]的研究结果也表明，在激光选区熔化增材制造中，支撑方式对零件的应力和变形有着重要影响。CHEN等[9]研究了SLM成形TC4薄壁零件变形与零件尺寸之间的定性联系，发现薄板变形量与零件高度和长度呈正相关。张小川等[10]针对激光选区熔化工艺中的悬垂结构支撑设计方案进行了计算研究，采用了正态分布的支撑方式，发现悬垂结构应力分布呈现中间高、两端低的非均匀趋势，并得出了正态分布的支撑算法，实现了单/双悬垂臂结构的非均匀支撑设计。刘义畅等[11]采用拓扑优化结合数值模拟仿真的方法，获得了具有优良承载性能并满足轻量化设计要求的高比刚度填充结构，通过考虑局部体积约束，总结出了多孔填充模型。张啸雨等[12]研究了基于蒙皮点阵一体化结构形式的移动可变形组件拓扑优化设计方法，经过工程化试验验证，实现了相机支撑结构减重50%、基频提高35%的成果，并成功应用于空间站3D打印零件制造。柯林达等[13]通过有限元模拟，研究了工艺参数和沉积高度对钛合金SLM制件应力演变的影响，结果表明，残余应力随层厚的增加而减小，但随着沉积高度的增加而增大，扫描速率的影响有所降低。

本文围绕钛合金SLM制件的应用需求，针对具有特定结构的钛合金SLM薄壁零件的工艺方案开展了一系列研究。通过软件工艺设计与模拟仿真技术相结合，对典型件的打印成形方案进行迭代优化，同时对其综合性能进行考察和验证，为该类钛合金SLM产品达到稳定的成形状态提供了解决方案。

2 试验材料与方法

首先基于Magics工艺设计软件平台，对长薄U形结构试件进行模型处理、摆放设计、支撑添加等前处理工作，采用Simufact Additive软件对试件成形过程进行模拟仿真，根据预测的变形情况，对试件成形工艺设计方案进行迭代优化。

确定打印方案后，采用规格15～53 μm的TC4钛合金粉末，开展长薄U形结构试件的SLM工艺的验证性研究。粉末在经过烘干、筛分后，运用分光光度法和原子光谱分析法对所用粉末化学成分进行了检测，结果见表1。粉末松装密度为2.40g/cm^3，振实密度为2.77g/cm^3，流动性测试结果为（37～55）s/50g，符合钛合金SLM原材料的相关指标。采用99.99%纯度的液态氩作为风场气源，TC4基板规格为419mm×419mm×50mm。经过前期基础性工艺验证，本文所采用的SLM主要工艺参数见表2。

表1 TC4钛合金粉末化学成分（质量分数）（%）

Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O	Si
余量	6.270	3.930	0.170	0.012	0.005	0.003	0.069	0.027

表2　主要成形工艺参数

填充激光功率/W	填充扫描速率/（m/s）	扫描间距/mm	铺粉层厚/μm
325	1.1	0.11	60

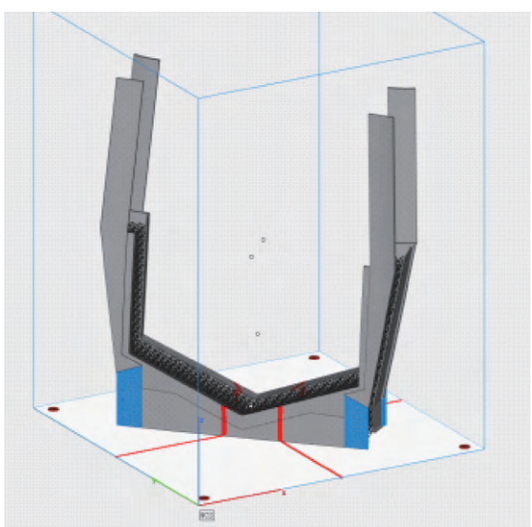
试件打印成形后，需进行去应力退火处理，热处理制度要求为：真空热处理炉去应力退火，退火温度为（800±10）℃，保温4h，真空度≤1Pa，随炉冷却至200℃以下空冷。热处理后，采用线切割方式将试件与基板分离，线切割余量为2mm，再进行去支撑、打磨处理。最后采用KSCAN-Magic三维扫描仪对试件进行几何外形数字化测量，同时开展试件化学成分、显微组织、室温拉伸及室温冲击等性能的检测验证工作。

3　试验结果及讨论

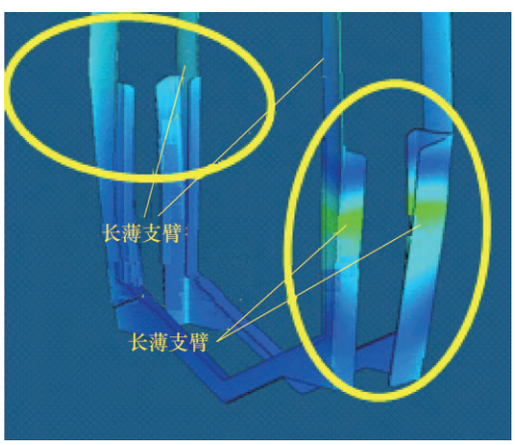
3.1　控形工艺设计方案迭代优化

鉴于U形试件“长”而“薄”的结构特点，拟采用点阵支撑连接的形式成对打印该试件。第一次前处理工艺设计方案及其成形模拟仿真结果如图1所示，从图1中可以看出，该组试件整体靠自支撑沿竖直方向摆放，此时试件立筋结构处有明显的变形趋势，变形量可达0.47～0.53mm。其次为长薄支臂的边缘部位，初步预测该组试件即使在退火及打磨处理后，仍会存在较为严重的局部外形超差问题，因此需对工艺设计方案进行二次迭代。

在第二次工艺设计方案中，试件整体前后两侧添加了筋板式的加强实体支撑，如图2a所示，以

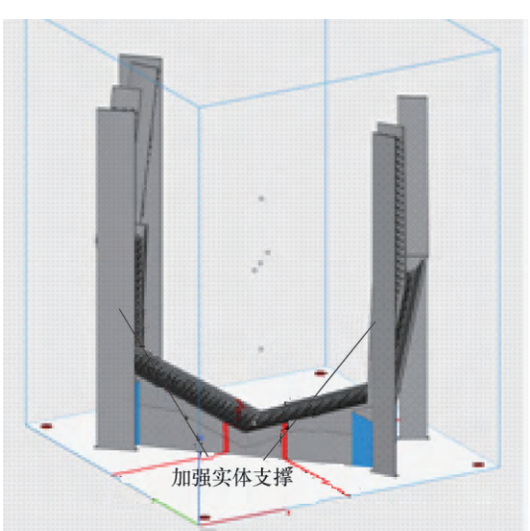


a）第一次方案设计

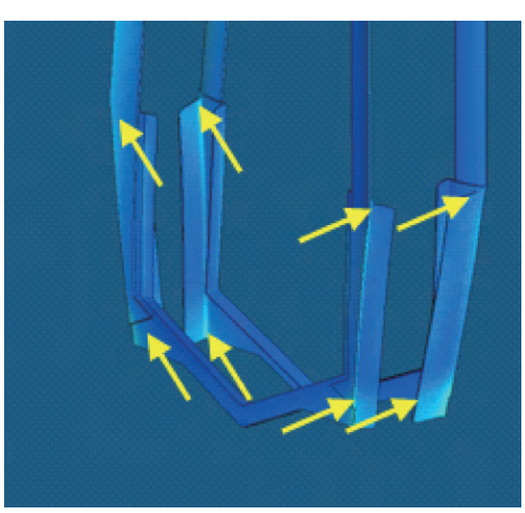


b）第一次仿真迭代

图1　第一次打印方案设计与仿真迭代



a）第二次方案设计

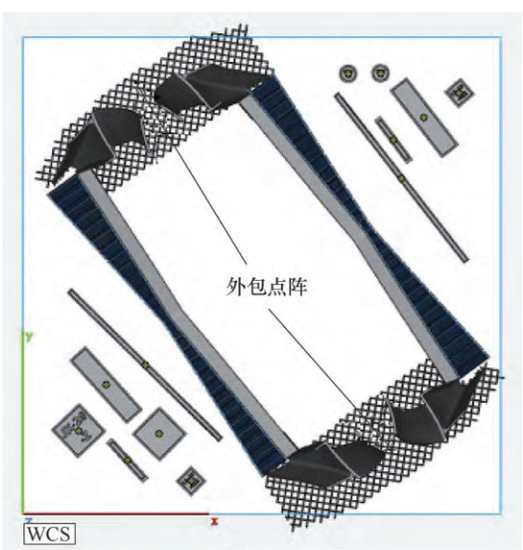


b）第二次仿真迭代

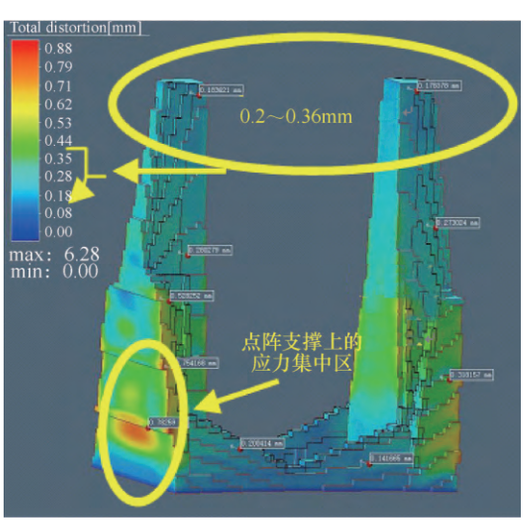
图2　第二次打印方案设计与仿真迭代

保证立筋结构在打印过程中的成形刚度。通过仿真结果可以看出，在立筋结构的边角部位仍有变形超差风险（见图2b箭头标识），经初步推测和判断，若此时继续添加实体筋板支撑“拉住”零件变形，并不会取得更理想的效果，因此需对支撑形式加以调整。

第三次工艺设计方案（见图3a）优化为在试件底部四周外包一圈点阵支撑，旨在将边缘部位的应力集中“散”至外围支撑之上，以保证试件本身成形精度。该方案模拟验证结果如图3b所示（为提高点阵特征的计算效率，降低了网格精度），可以看出此时应力集中主要分布于外围点阵结构（圈注部分），靠近零件打印末段的预测变形量基本在0.2～0.36mm，变形可控，故以此为最终打印方案。



a）第三次方案设计



b）第三次仿真迭代

图3　第三次打印方案设计与仿真迭代

3.2　数字化测量验证

经退火处理、线切割及去支撑/打磨后的试件实物如图4所示，打磨后的试件表面粗糙度可达到Ra=3.2μm，经目视检查，打磨后的表面无明显气孔、划痕等表面缺陷。考虑喷砂工序对该类薄壁零件几何外形的影响，选择了在试件喷砂后的最终状态下，对其进行三维扫描外形尺寸测量，结果如图5所示。

a）去支撑打磨后

b）贴点测量

图4　U形结构试件实物

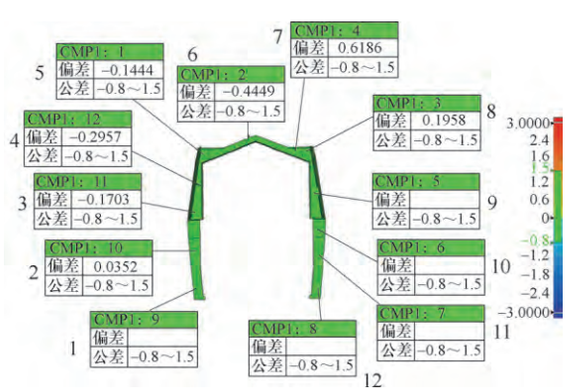


图5　U形结构试件三维扫描测量结果

图5中共标记出了12个测量点。根据该类结构件的一般公差要求与使用状态需求，定义该U形试件合格的外廓尺寸公差为－0.4～+0.7mm，测量结果统计情况见表3。从表3可看出，点1、12等靠近长薄支臂端头的位置在合格范围内，正差趋势明显，

说明试件在打印至末段时具有更大的上翘倾向，但在可控范围内。点7、8所显现出的正偏差幅度较为突出，分析可能是由于此处应力载荷相对更高，如图3b中圈注的红色区域所示，该结果可能与分区扫描填充策略带来的热输入差异有关。其余点位的尺寸测量结果基本为负偏差，与图3b所预测的趋势一致，说明成形方案的模拟仿真迭代验证结果可靠。

表3　U形结构试件三维扫描测量结果　（mm）

测试点序号	偏差测试结果	外廓尺寸公差范围	测量结论
1	+0.4761	−0.4～+0.7	合格
2	+0.0352	−0.4～+0.7	合格
3	−0.1703	−0.4～+0.7	合格
4	−0.2957	−0.4～+0.7	合格
5	−0.1444	−0.4～+0.7	合格
6	−0.4449	−0.4～+0.7	合格
7	+0.6186	−0.4～+0.7	合格
8	+0.1958	−0.4～+0.7	合格
9	−0.2793	−0.4～+0.7	合格
10	−0.3259	−0.4～+0.7	合格
11	−0.1235	−0.4～+0.7	合格
12	+0.2575	−0.4～+0.7	合格

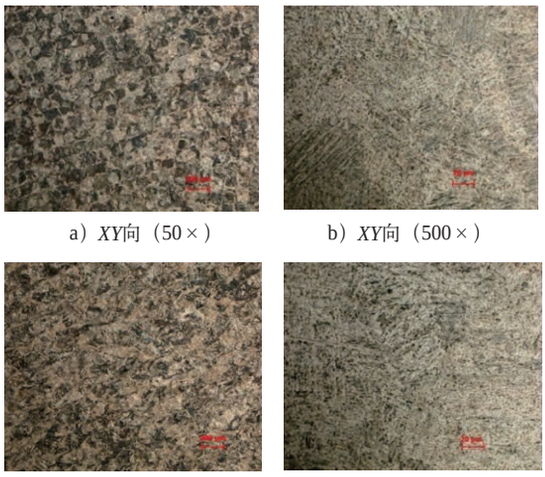
3.3　综合性能验证

对试件随炉试样的化学成分、显微组织、室温拉伸及室温冲击等性能进行了一系列测试。试件化学成分测试结果见表4，其中O、N、H元素含量分别为0.1%、0.024%、0.001%，均远小于指标的上限要求。结合试样显微组织进行观察，如图6a、c所示，可以看出*XY*向与*Z*向显微组织均未出现微裂纹、未熔合、偏析或金属/非金属夹杂及显著气孔等冶金缺陷，组织均匀性与致密度良好，高倍条件下可观察到清晰的网篮组织特征，如图6b、d所示，表明成形过程稳定。

表4　化学成分分析结果（质量分数）　（%）

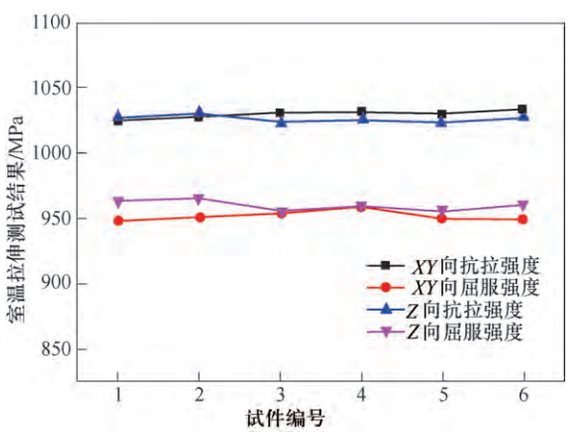
	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O	Si
合格范围	基体	5.50～6.75	3.5～4.5	≤0.30	≤0.08	≤0.05	≤0.015	≤0.20	≤0.10
测试结果	余量	6.14	3.87	0.20	0.012	0.024	0.0010	0.10	0.001

试件随炉试样的室温拉伸与室温冲击测试结果，分别如图7、图8所示。根据测试结果，*XY*向室温抗拉强度极限为1025～1034MPa，平均为1029.5MPa，屈服强度为948～958MPa，平均为951.7MPa，断后伸长率平均为12.1%，室温冲击吸收能量平均为31.4J；*Z*向室温抗拉强度极限为1022～1031MPa，平均为1026.2MPa，屈服强度为956～963MPa，平均为959.8MPa，断后伸长率平均为11.2%，室温冲击吸收能量平均为48.6J。室温力学性能均符合相关技术要求，整体数据波动稳定，其

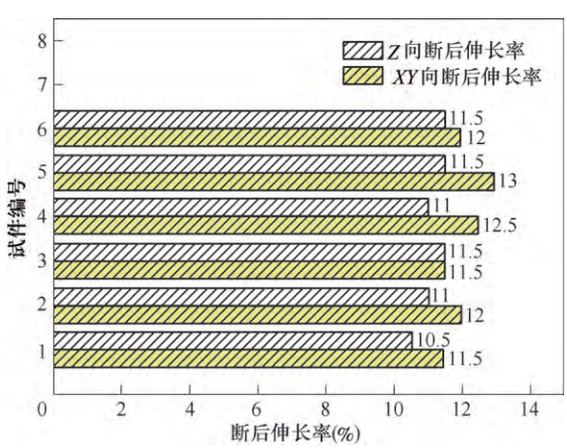


a）*XY*向（50×）　b）*XY*向（500×）　c）*Z*向（50×）　d）*Z*向（500×）

图6　高/低倍显微组织



a）强度极限/屈服强度



b）断后伸长率

图7　室温拉伸测试结果

中*XY*向的强度极限与Z向测试结果非常接近，接近各向同性。*XY*向断后伸长率略高于Z向，即*XY*向塑性相对较好，而Z向试样的室温冲击性能要明显高于*XY*向，室温冲击性能具有明显的各向异性，初步推测可能是由于片层α相在β基体上沿Z向的生长形态具有更大的长宽比，使得断裂过程中的位错滑移需要更高的能量才得以穿过晶粒界面。

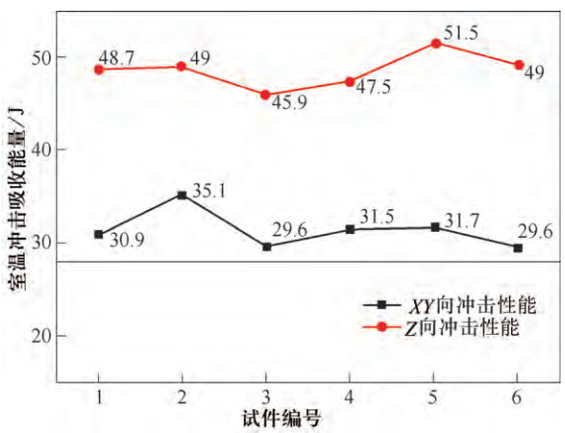


图 8　室温冲击测试结果

4　结束语

1）通过软件前处理工艺设计与模拟仿真迭代验证，确定了长薄U形结构试件的打印方案，通过点阵连接与外包的支撑设计形式达到变形控制的目的。通过三维扫描测量验证了控形方案的可行性，测量结果表明，试件外形尺寸偏差均在－0.4～+0.7mm的合格范围内。

2）对试件随炉试样的理化指标进行了测试，试件化学成分与显微组织均符合相关技术指标要求，*XY*向、Z向的平均抗拉强度极限分别为1029.5MPa、1026.2MPa，断后伸长率平均分别为12.1%、11.2%，接近各向同性；而*XY*向、Z向的室温冲击性能测试结果平均分别为31.4J和48.6J，表现出明显的各向异性。

参考文献：

[1] 武永，陈明和. 钛合金薄壁件热塑性成形工艺研究进展[J]. 航空制造技术，2021，64（20）：78-87.

[2] 贾志宏，刘艳梅，程旭，等. 航空铝合金异形曲面SLM制件工艺仿真与性能研究[J]. 金属加工（热加工），2023（6）：23-27.

[3] PENG J H, LIU SH J, WANG. Design and optimization of thin-walled main support structure for space camera based on additive manufacturing[J]. Micromachines，2024，15（2）：1-4.

[4] 郭胜奎. 基于尺寸优化的增材制造支撑结构设计方法研究[D]. 武汉：华中科技大学，2015.

[5] 葛啸，史廷春，岳秀艳，等. 基于STL格式的增材制造八棱柱状支撑结构的设计与优化[J]. 工业软件，2021（11）：16-20.

[6] 闫继伟，边友，刘宝昌，等. 基于增材技术的支撑柱结构轻量化设计、制造与验证[J]. 世界有色金属，2022（1）：107-109.

[7] LIU Y, PANG Z C, ZHANG J. Comparative study on the influence of subsequent thermal cycling on microstructure and mechanical properties of selective laser melted 316 stainless steel[J]. Applied Physics，2017，123A：688.

[8] 张小川，康进武，融亦鸣，等. 增材制造中的支撑设计[J]. 热加工工艺，2018，47（12）：1-7.

[9] CHEN C P, XIAO Z X, ZHU H H, et al. Deformation and control method of thin-walled part during laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V Alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2020，110（11-12）：3467-3478.

[10] 张小川，康进武，融亦鸣，等. SLM增材制造工件的正态分布支撑设计[J]. 热加工工艺，2019，48（15）：136-139.

[11] 刘义畅，周明东，魏创，等. 面向增材制造的自支撑填充结构拓扑优化设计：中国力学大会[C]. 北京：中国力学学会，2021.

[12] 张啸雨，刘畅，施丽铭，等. 蒙皮点阵一体化支撑结构的移动可变形组件优化设计及空间站应用[J]. 固体力学学报，2022，43（5）：551-560.

[13] 柯林达，殷杰，朱海红，等. 钛合金薄壁件选区激光熔化应力演变的数值模拟[J]. 金属学报，2020，56（3）：374-384.

MW 20240105