

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.002

# TC4ELI 钛合金开孔构件的 SLM 成形工艺参数研究

朱浩楠<sup>a,b</sup>, 于培师<sup>a,b</sup>, 陶银<sup>a,b</sup>(江南大学 a. 机械工程学院 江南先进食品制造设备与技术重点实验室;  
b. 先进技术研究院 江苏省微纳增材制造工程研究中心, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** SLM 成形的 TC4ELI 钛合金凭借其优异的力学性能和抗腐蚀性能被广泛用于船舶、航空航天、医疗等领域。工程应用中的金属构件通常会开孔减质量, 影响构件的疲劳寿命。为改善 SLM 成形 TC4ELI 钛合金开孔构件的疲劳性能, 该文研究不同的 SLM 工艺参数和扫描策略对成形开孔的构件力学性能和显微组织的影响规律, 使用扫描电子显微镜、金相显微镜、疲劳试验机等测试手段对 SLM 成形的 TC4ELI 钛合金试件的断口形貌、显微组织及综合力学性能进行分析。结果表明: 在合适的工艺参数和扫描策略下, 成形试件可达到 1 102 MPa 的抗拉强度和 6.3% 的延伸率, 而且疲劳性能可以提高约 24.5%。

**关键词:** 选区激光熔化; 钛合金; TC4ELI; 疲劳性能

**中图分类号:** TB302.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1671-5276(2026)03-0008-04

## Research on SLM Forming Procedure Parameters of TC4ELI Titanium Alloy Components with Holes

ZHU Haonan<sup>a,b</sup>, YU Peishi<sup>a,b</sup>, TAO Yin<sup>a,b</sup>(a. Jiangnan Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, School of Mechanical Engineering;  
b. Jiangsu Province Engineering Research Center of Micro-Nano Additive and Subtractive Manufacturing, Institute of Advanced Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Although TC4ELI titanium alloy formed by SLM is widely used in shipbuilding, aerospace, medicine and other fields due to its excellent mechanical and corrosion-resistance properties, holes are usually opened on metal components in engineering applications to reduce weight, affecting the fatigue life of the components. To improve the fatigue properties of TC4ELI titanium alloy components with holes formed by SLM, this paper looks into the effects of different SLM procedure parameters and scanning strategies on the mechanical properties and microstructure of TC4ELI titanium alloy components with holes formed by SLM. Testing devices such as scanning electron microscope, metalloscope, fatigue testing machine are used to analyze the appearance of fracture, microstructure and overall mechanical properties of SLM-formed TC4ELI titanium alloy test specimen. The results show that under proper procedure parameters and scanning strategy, the tensile strength of 1 102 MPa and the elongation of 6.3% can be achieved, and the fatigue properties can be improved by about 24.5%.

**Keywords:** selective laser melting; titanium alloy; TC4ELI; fatigue properties

### 0 引言

TC4ELI 低间隙钛合金因具有较好的塑性、韧性、良好的焊接性能等, 而被广泛应用于医疗、舰船及飞行器等重要领域<sup>[1-3]</sup>。选区激光熔化 (selective laser melting, SLM) 作为最有前途的增材制造技术之一, 可以直接成形复杂结构且高性能的金属构件。由于 SLM 具有快速生产复杂形状零件的

能力, 被广泛应用于加工各种金属和合金材料<sup>[4-5]</sup>。

现有的针对 SLM 制造的镍基高温合金、钛合金、铝合金和钢的研究显示, 构造方向对微观结构和力学性能存在影响<sup>[6-7]</sup>。SLM 成形钛合金的内部缺陷, 影响了其成形钛合金构件的疲劳性能, 使其明显弱于锻造件<sup>[8]</sup>。要制备具有良好力学性能的钛合金构件, 需要对 SLM 成形 TC4ELI 钛合金构件的工艺参数进行研究, 并利用 SLM 成形的各

**基金项目:** 机械结构力学及控制国家重点实验室开放课题资助项目 (MCMS-E-0422G04); 纳智能材料器件教育部重点实验室开放课题基金资助项目 (NJ202003(INMD-2021M05))

**第一作者简介:** 朱浩楠 (1997—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为增材制造与结构设计, zn98557@outlook.com。

**通信作者简介:** 于培师 (1982—), 男, 山东济南人, 副教授, 博士, 主要研究方向为直书写 3D 打印传感器, ypsnuaa@163.com。

向异性特性来改善构件的疲劳性能。

本文主要研究 SLM 工艺参数对增材制造 TC4ELI 钛合金微观组织和力学性能的影响,采用 SLM 技术制备 TC4ELI 钛合金试件,通过力学试验选择合适的 SLM 工艺参数,进而制备带孔疲劳试件,并对带孔疲劳试件进行低周疲劳试验以验证扫描策略对 SLM 成形 TC4ELI 钛合金试件的疲劳性能的影响。

### 1 试验材料、设备与方法

#### 1.1 试验材料与设备

试验使用某公司提供的 TC4ELI 球形粉末,使用某公司生产的 iSLM160 激光打印机制造所需零件。iSLM160 打印机成形仓为密封结构,打印工作开始前先充入高纯度惰性气体氩气以置换仓内氧气,保证整个成型过程中仓内氧含量低于 50 ppm,用于保护成形过程中处于高温状态的构件不被氧化。

#### 1.2 SLM 成形 TC4ELI 标准拉伸试样

根据现有的研究结果显示,在 SLM 工艺成形过程中,激光功率和扫描速度是影响激光成形工件质量的主要因素。研究激光功率和扫描速度及与之对应的能量密度对 SLM 成形 TC4ELI 钛合金标准拉伸试样机械性能的影响。拉伸试验如图 1 所示,拉伸试验按照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第一部分:室温试验方法》设计标准拉伸试件,试件尺寸如图 2 所示。

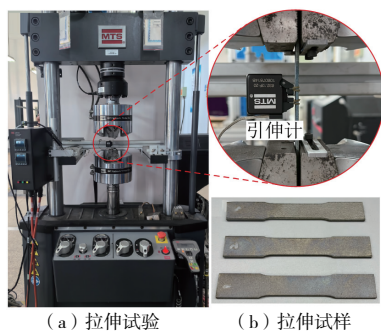


图 1 SLM 成形 TC4ELI 标准拉伸试样拉伸试验

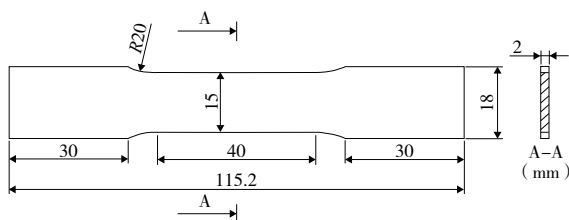


图 2 标准拉伸试件尺寸示意图

使用 MTS Landmark 370.10 试验机进行标准拉伸试件的拉伸试验(图 1(a))。单轴拉伸试验的加载速度为 2 mm/min,使用常温引伸计量取拉伸试验过程中标准试样的应变,得到不同打印参数下的激光打印 TC4ELI 钛合金的应力应变关系。

本文采用的工艺参数为铺粉层厚 40 μm,扫描间距 80 μm。激光打印完成后使用线切割将基板与试件分离,得到所需尺寸的标准拉伸试件,如图 1(b)所示。

#### 1.3 SLM 成形 TC4ELI 带孔疲劳试样

由于 SLM 工艺的原理是激光聚焦在粉末表面并沿既定路径扫描最终形成凝固的金属组织,相邻的扫描路径上面的金属组织会有先后凝固的区别,从而在相邻的扫描路径上成型的金属组织之间存在着积累的各向异性的残余应力,使得这一层金属表现出力学性能的各向异性。为了规避这种各向异性对成型构件的影响,通常采用激光扫描路径在每两层之间旋转一定角度的方法。

工程应用中使用的金属打印构件通常会通过设计减质量孔的方法来减小构件体积,从而降低构件的自质量和缩短打印时长。为了验证构件上的开孔对构件疲劳性能的影响,需先设计带有单一孔洞的长条形试件进行打印和疲劳试验。

构件受拉时孔洞垂直于受力方向的两侧边缘会有应力集中,经过有限元分析,在有限宽度的板状试件上,应力集中区域分布在孔洞两侧约 1.5 倍孔径范围内,而应力集中系数随着孔径变大而稍变小。因此设计正圆形的孔洞和长轴垂直于受力方向的椭圆孔来对比验证,圆孔的直径与椭圆孔的长轴尺寸相同,孔边的材料能够将应力集中区域完全包含在内,尺寸如图 3 所示。

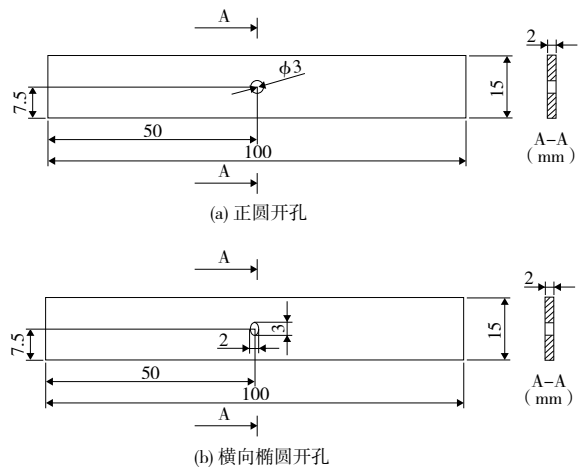


图 3 单孔疲劳试件尺寸图

为利用 SLM 过程中产生的残余应力,提高打印构件在一定受力方向上的疲劳性能,可以制定特定的扫描策略,以提高构件在一定方向上的疲劳性能。现制定 3 种不同的扫描策略如图 4 所示,图 4(a)为常用的层间旋转  $67^\circ$  扫描策略,图 4(b)为扫描路径垂直于受力方向的横向扫描策略,图 4(c)为扫描路径平行于受力方向的扫描策略。

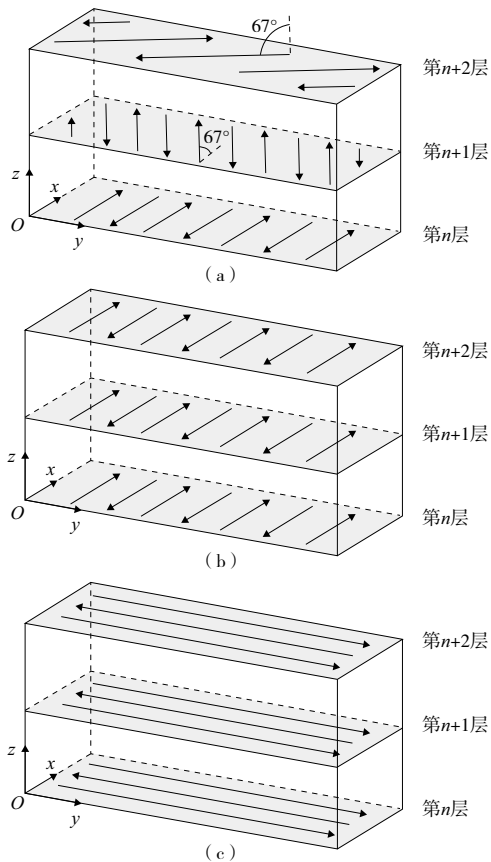


图 4 单孔疲劳试件的不同扫描策略

根据 SLM 制备的 TC4ELI 钛合金标准拉伸试件试验结果,选择性能较好的打印参数作为带孔疲劳试件的打印参数。打印得到的试件通过机加工处理得到光滑表面的试件。使用 MTS Landmark 370.10 试验机对带孔试件进行疲劳试验,试验机最大载荷为 100 kN,载荷精度为 0.01 kN,加载频率为 8 Hz,采用正弦波形加载,最大应力 400 MPa,应力比值 0.1。

## 2 试验结果及分析

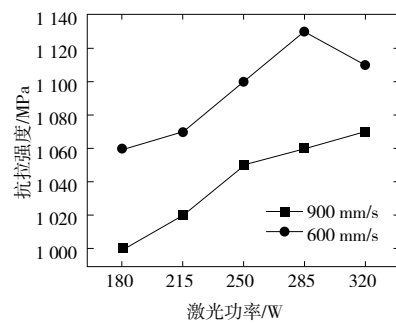
### 2.1 SLM 成形 TC4ELI 钛合金标准拉伸试样力学性能

本文采用的激光功率和扫描速度参数组合及其对应的力学性能参数如表 1 所示。得到的标准

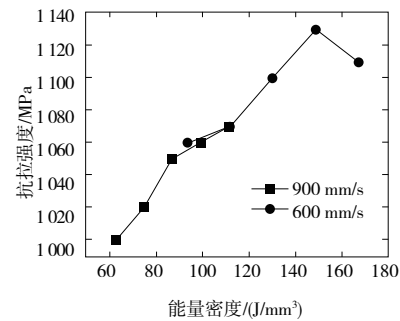
拉伸试件的性能有显著区别,如图 5 所示。

表 1 不同工艺参数下的标准拉伸试样的力学性能

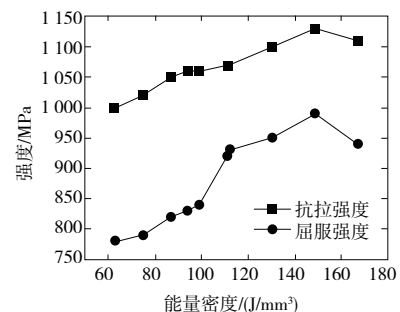
序号	激光功率 $P/W$	扫描速度 $v/(mm/s)$	能量密度 $w/(J/mm^3)$	抗拉强度 $\sigma_b/MPa$	延伸率 $\delta/\%$
①	180	900	62.5	997	3.1
②	215	900	74.7	1 017	3.4
③	250	900	86.8	1 053	3.8
④	285	900	98.9	1 058	4.1
⑤	320	900	111.1	1 069	4.2
⑥	180	600	93.8	1 012	4.5
⑦	215	600	112.0	1 053	5.6
⑧	250	600	130.2	1 102	6.3
⑨	285	600	148.7	1 126	5.7
⑩	320	600	167.2	1 113	4.8



(a) 不同扫描速度下抗拉强度随激光功率的变化



(b) 不同扫描速度下抗拉强度随激光能量密度的变化



(c) 抗拉强度与屈服强度随激光能量密度的变化

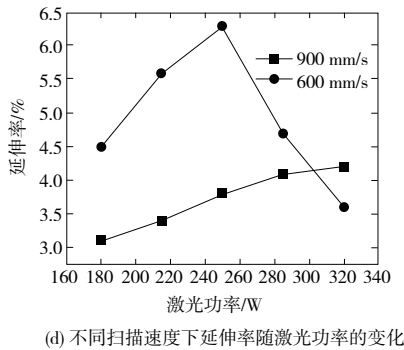


图 5 激光打印 TC4ELI 强度随参数的变化曲线

SLM 制造的 TC4ELI 钛合金标准拉伸试件的拉伸试验得到的数据显示,采用不同工艺参数组合成形的试件强度和延伸率有明显的差异。其中,由图 5 可知,当激光扫描速度为 900 mm/s 时,试样的抗拉强度和延伸率均随着激光功率的升高而升高;当激光扫描速度为 600 mm/s 时,随着激光功率的升高,抗拉强度和延伸率都有先升高后降低的趋势。这一结果表明:在一定范围内提高激光功率有利于 TC4ELI 粉末的充分融合,使构件的结构更致密,提高了构件的抗拉强度和延伸率;但继续提高激光功率导致激光能量密度过高,TC4ELI 粉末过度熔融产生气体孔隙,并引起钛合金元素过烧和晶粒粗大,使得抗拉强度和延伸率均产生下降。

## 2.2 显微组织

SLM 制备的钛合金结构件的力学性能与其显微组织有着直接的关系。利用金相磨抛机对不同打印参数制备的打印件进行磨抛、清洗、腐蚀处理后,使用金相显微镜观察它们的显微组织。

在打印的能量密度较高时,可以见到片状  $\alpha$  相和晶间  $\beta$  相结构增多,并且随着激光功率的提高,针状  $\alpha$  相组织的分布愈加均匀,使得试件的抗拉强度升高。但当激光输入的能量密度过高时,可见组织内部产生一些细小孔隙,并且随着激光功率的升高,孔隙数量增加。这是由于能量过高导致钛合金粉末融化时产生了剧烈的氧化反应并生成杂质气体无法及时排出,从而留在成形金属组织内部形成孔隙。激光功率越高,氧化反应就越剧烈,产生越来越多的气孔,最后导致打印试件的抗拉强度和延伸率下降。

使用扫描电子显微镜 (SEM) 观察试件断口,如图 6 所示。可以看出试件①断口比试件⑧断口平坦,断裂特征表现以脆性断裂为主,并且有激光功率较低导致 TC4ELI 粉末未完全熔化从而形成

的未熔合缺陷,进而造成试件抗拉强度和延伸率的明显下降。而试件⑧断口相对粗糙,其断口表面撕裂棱稍多,且具有少量韧窝分布,断口形貌表现为一定的韧性断裂特征。

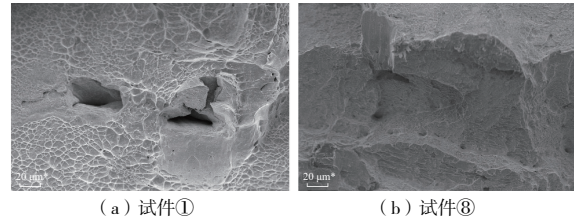


图 6 不同工艺参数下拉伸试样断口形貌

## 2.3 带孔结构的疲劳性能

根据 SLM 制备的 TC4ELI 钛合金标准拉伸试件试验结果,选择综合性能较好的第⑧组打印参数作为带孔疲劳试件的打印参数,即激光功率 250 W,扫描速度 600 mm/s,铺粉层厚 40  $\mu\text{m}$ ,扫描间距 80  $\mu\text{m}$ 。

SLM 制造的 TC4ELI 钛合金单孔疲劳试件的疲劳试验得到的数据如图 7 所示,可以得知以不同扫描策略制备的单孔试件中,横向椭圆孔试样的疲劳寿命均低于正圆孔试样,这符合应力集中系数的区别,与预期相符。对比正圆孔的疲劳试样,在 3 种扫描策略中,横向扫描策略的单孔疲劳试样的平均疲劳寿命最低,常规的层间旋转 67° 的扫描策略制备的单孔疲劳试样寿命比横向扫描策略的试样高出约 116%;而纵向扫描策略制备的单孔疲劳试样的寿命比横向策略的试样高出约 171%。与传统的层间旋转 67° 扫描策略相比,纵向扫描策略制备的单孔疲劳试样的寿命也可提高约 24.5%。由于激光扫描过程中存在的巨大冷却速率,相邻熔道间存在较大的温度梯度,沿熔道生成较大尺寸的柱状晶,这导致在垂直于熔道方向具有较差的力学性能。

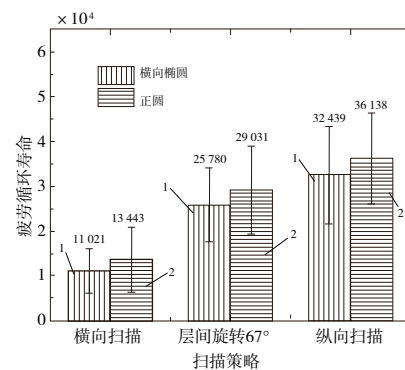


图 7 单孔疲劳试件的疲劳寿命

(下转第 25 页)

- 究[J]. 汽车工程学报,2011,1(1):69-75.
- [2] 金丽琼,邢志胜,朱宝庆,等. 基于双层隔振的船用空压机系统振动建模研究[J]. 中国设备工程,2019(13):216-218.
- [3] 张皓宇,韩保红,程兆刚,等. 一种适用于弹药公路运输的双层隔振器设计及性能分析[J]. 机械强度,2022,44(5):1039-1048.
- [4] 邱元燃,徐伟,胡泽超,等. 机械设备轻量化中间质量双层隔振技术研究[J]. 船舶力学,2022,26(9):1373-1384.
- [5] 牛昊轩,闫兵,吴潇. 动力机组双层隔振系统新型隔振器设计及研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(5):110-114,130.
- [6] WANG M T, CHAI K, LIU S Y, et al. Dynamic characteristics and experimental study of double layer vibration isolation system [J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2023,37(4):1699-1709.
- [7] 徐伟,邱元燃,胡泽超. 不同中间质量形式的双层隔振系统对比研究[J]. 海军工程大学学报,2021,33(3):62-66,105.
- [8] 江国和. 舰船机械设备隔振技术的发展[C]// 第十届船舶水下噪声学术讨论会,2007.
- [9] 肖望强,陈辉,许展豪,等. 基于颗粒阻尼的内燃动车组动力包构架多工况减振研究[J]. 机械工程学报,2022,58(4):250-257.
- [10] 鲁正,周超杰,严德裕,等. 附加增强型颗粒惯容装置的钢框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(增刊1):48-55.
- [11] 和东平,徐慧东,刘元铭,等. 基于颗粒阻尼吸振的波纹辊轧机非线性垂振控制[J]. 钢铁,2023,58(8):129-137.
- [12] EHLERS T, TATZKO S, WALLASCHEK J, et al. Design of particle dampers for additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing,2021,38:101752.
- [13] 段东平,高扬,张晓冬,等. 一种基于颗粒阻尼减振的硬岩掘进机及其阻尼减振设计方法:CN115419417B[P]. 2025-02-07.

收稿日期:2024-01-22

(上接第11页)

对比不同扫描策略制备的单孔疲劳试件的疲劳试验结果,可知 SLM 成形的 TC4ELI 钛合金带孔试样具有明显的疲劳性能各向异性。在实际打印制造零件时可根据零件的实际工况安排扫描策略,使受力方向基本平行于来回扫描的轨迹方向,可提升零件的疲劳性能。

### 3 结语

1) 在 SLM 成形过程中,激光功率和扫描速度是影响其成形质量的重要因素。在激光功率  $P=250\text{ W}$ ,扫描速度  $v=600\text{ mm/s}$  时,SLM 成形的 TC4ELI 构件的总体力学性能表现最好。

2) 在激光能量密度较低时,SLM 成形 TC4ELI 钛合金构件会出现不完全熔化产生的孔隙,降低了构件的强度和塑性。适当提高激光功率有利于钛合金粉末的充分熔合,改善了成形质量;但当激光能量密度过大时会引起钛合金元素过烧和晶粒粗大,导致钛合金成形构件的强度和塑性均有所降低。

3) SLM 成形的 TC4ELI 钛合金带孔试样具有明显的疲劳性能各向异性,与传统的层间旋转的扫描策略相比,固定扫描方向的扫描策略可以有效提升构件受平行于扫描轨迹方向载荷时的疲劳性能。

### 参考文献:

- [1] 姚梦,刘勇,朱景川. TC11 钛合金双重热处理工艺设计[J]. 热处理技术与装备,2016,37(5):65-70.
- [2] 史小云,郝芳,张晓园,等. 变量量对 TC25 钛合金饼坯组织和力学性能的影响[J]. 材料开发与应用,2017,32(5):28-32.
- [3] 张颖,赖长亮,和卫平,等. 潜水器耐压壳结构选材应用综述[J]. 舰船科学技术,2022,44(5):1-6.
- [4] BOURELL D, KRUTH J P, LEU M, et al. Materials for additive manufacturing[J]. CIRP Annals,2017,66(2):659-681.
- [5] 张凤明,程崇旗,范立成,等. 激光功率对选区激光熔化  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$  缺陷与力学性能分析[J]. 机械制造与自动化,2023,52(3):33-36.
- [6] SHEN L C, YANG X H, HO J R, et al. Effects of build direction on the mechanical properties of a martensitic stainless steel fabricated by selective laser melting[J]. Materials,2020,13(22):5142.
- [7] 姚晨光,安志斌,杨竹芳. Inconel718 合金增材制造残余应力分布与数值模拟分析[J]. 机械制造与自动化,2019,48(4):134-136,179.
- [8] 辛如意,兰亮,何博. 选区激光熔化增材制造钛合金的疲劳性能研究进展[J]. 材料科学与工程学报,2022,40(4):706-716.

收稿日期:2024-03-29