# **Structure and Properties of Laser 3D Printing High Strength and High Toughness TC4 Alloy**

Shuangquan Guo<sup>1,2</sup> Shuguang Li<sup>1,2</sup> Wei Zhang<sup>1,2</sup> Xuanxuan Huang<sup>1,2</sup> Yi Wang<sup>1,2</sup>

1. Chengdu Hangli (Group) Industrial Co., Ltd., Meishan, Sichuan, 610041, China

2. Chengdu Tianxiang Power Technology Research Institute Co., Ltd., Meishan, Sichuan, 610041, China

#### Abstract

The TC4 titanium alloy was formed by SLM technology. The density of the 3D printing specimen optimized based on the Double Doelhert design matrix optimization reached 99.9%. The parameters for optimal printing are: layer thickness 30µm, laser power is 310W, scanning speed is 1200mm/s, scanning spacing is 0.1mm, and wind field value is 24. Due to the high laser energy density and high scanning speed during the laser selective melting process, the laser selective melting structure is a fine martensite structure that solidifies nearly rapidly. The relationship between heat treatment systems and mechanical properties was studied. It indicated that the HIP and long-term annealing process can obtain a high-strength and high-toughness 3D printed titanium alloy, which can fully meet the technical indicators of forgings and can be widely used in the printing of aircraft engine parts.

#### Keywords

3D pringting; laser additive manufacturing; titanium alloy; heat treatment

# 激光 3D 打印高强高韧 TC4 钛合金的组织与性能

郭双全<sup>1,2</sup> 李曙光<sup>1,2</sup> 张伟<sup>1,2</sup> 黄璇璇<sup>1,2</sup> 王轶<sup>1,2</sup>

1. 成都航利(集团)实业有限公司,中国・四川 眉山 610041 2. 成都天翔动力技术研究院有限公司,中国・四川 眉山 610041

### 摘要

采用SLM技术成形了TC4钛合金,基于Double Doelhert设计矩阵优化的3D打印试样的致密度达到99.9%,最佳打印的参数 为:层厚30μm,激光功率310W,扫描速度1200mm/s,扫描间距0.1mm,风场数值24。由于激光选区熔化过程中的高激光 能量密度和高扫描速度带来极快的冷却速度(10<sup>4</sup>~10<sup>7</sup>℃/s),激光选区熔化组织为近快速凝固的细小马氏体组织。研究了 热处理制度与力学性能关系,表明低温热等静压+长时真空退火可以获得高强高韧性的3D打印钛合金,全面达到锻件的技 术指标,可广泛应用于航空发动机零件的打印。

### 关键词

3D打印; 激光增材制造; 钛合金; 热处理

# 1 引言

TC4 钛合金具有优良的综合力学性能,通常是航空发动机冷端部件如机匣、整体叶盘等重要零件的制造选用材料。由于其 3D 打印的广泛应用,3D 打印钛合金航空发动机零部件也成了研究的热点<sup>[1]</sup>。发动机运行工况条件恶劣,3D 打印的钛合金需要全面达到锻件技术水平才能被广泛推广应用。很多研究人员并没有给出全面的性能测试数据<sup>[2]</sup>,导致在航空发动机工程应用推广缓慢。论文通过新工艺参数优化+热处理优化,深入研究组织与性能的关系,给出全面的性能数据库,为激光 3D 打印 TC4 制件的热处理工艺制定和工程应用提供试验依据和参考。

【作者简介】郭双全(1981–),男,中国四川眉山人,博 士,高级工程师,从事粉末研制与3D打印研究。

# 2 试验设备及方法

# 2.1 制备方法

本试验采用德国 SLM Solutions 公司生产的 SLM280HL 型激光选区熔化设备。该设备由一个最大输出功率为 400W 的 YLR-400 光纤激光器、带有 PSV 自动上送粉装置、工作 平台,回收过滤装置以及计算机控制系统等部分组成。

试验材料采用 Tekna 公司生产的商业 TC4 气雾化球形 粉末。采用美国麦奇克仪器公司的 S3500 型号激光粒度仪测 试粉末粒度,粉末的粒度主要分布范围为 15~45μm,其中 D (10)为 22μm, D(50)为 33μm, D(90)为 48μm。图 1 给出了试验粉末的 SEM 形貌,粉末的球形度达到 98.3%。



图 1 粉末 SEM 形貌

3D 打印的试样包括室温拉伸、高温拉伸、高温持久、 冲击韧性、硬度、高周疲劳和低周疲劳,试棒成形方向包括 横向 XY 方向和纵向 Z 方向。

对打印制备好的样品进行低温热等静压(HIP)+真 空长时退火处理,其中HIP具体参数为140MPa压力下 880℃×2h,而真空长时热处理温度880℃×6h。

#### 2.2 表征

样品在 20 V 和 0℃下使用 10% 磷酸水溶液蚀刻 5s。使用卡尔蔡司倒置光学显微镜(OM)和蔡司 GEMINI 300 扫描电子显微镜(SEM)分析打印态、后处理的形态和微观结构。

#### 2.3 力学性能测试

力学性能测试按照 HB 5143—1996《金属室温拉伸试 验方法》、HB 5148—1996《金属室温冲击试验方法》、 HB 5150—1996《金属高温拉伸持久试验方法》、ASTM E466—15《高周疲劳测试方法》、ASTM E606/E606M-12《低 周疲劳测试方法》和 HB 5168—1996《金属布氏硬度试验方 法》执行。

#### 3 结果与讨论

# 3.1 致密度优化与微观组织

采用 Double Doehlert 矩阵优化<sup>[3]</sup>方法,将激光功率、 扫描速度和扫描间距设定为 X1、X2 和 X3,18 组参数如表 所示,获得了工艺参数与致密度的关系。测试结果表明18 号参数的致密度最高且能量密度适中,最佳打印的参数为: 层厚 30µm,激光功率 310W,扫描速度 1200mm/s,扫描间 距 0.1mm,风场数值 24,其致密度达到 99.95%(表1)。 18 号参数样品金相组织如图 2 所示,由于激光选区熔化过 程中的高激光能量密度和高扫描速度带来极快的冷却速度 ( $10^4 \sim 10^7 \, \mathbb{C}$ /s),激光选区熔化组织为近快速凝固的细小 马氏体组织<sup>[34]</sup>。

#### 3.2 热处理后组织与力学性能

经过热等静压 + 热处理后的组织如表所示,组织非常 致密,并且为  $\alpha$  +  $\beta$  组织,其中  $\alpha$  的数量占了绝大部分, 并且  $\alpha$  相呈现多种形态,如短棒状、长条状、树枝状,多 尺度下协同为 3D 打印的 TC4 材料的综合力学性能提升提供 了保障。测试了横向和纵向的试样力学性能,测试结果表明 经过后处理的 3D 打印试样,其室温拉伸、高温拉伸、高温 持久、冲击韧性、硬度、高周疲劳和低周疲劳性能全面达到 航空锻件技术标准,并且经过处理以后其断面收率和锻件相 比非常高。可以实现航空锻件的直接打印(见图 3、图 4)。

# 4 结论

①采用 Double Doehlert 设计矩阵优化的 3D 打印工艺 参数可以实现打印试样达到≥ 99.9% 的致密度。

②经过低温热等静压+真空长时退火处理后得到稳定的  $\alpha+\beta$  组织。组织非常致密,其中  $\alpha$  的数量占了绝大部分,且  $\alpha$  相呈现多种形态,如短棒状、长条状、树枝状,多尺度下协同为 3D 打印的 TC4 材料的综合力学性能提升提供了保障。

③经过低温热等静压+真空长时退火处理后的试样其 室温拉伸、高温拉伸、高温持久、冲击韧性、硬度、高周疲 劳和低周疲劳性能全面达到航空锻件技术标准。可以实现航 空锻件的直接打印。

表126组工艺参数

序号	激光功率(W)	扫描速度(mm/s)	扫描间距 (mm)
1	350	1400	0.12
2	380	1400	0.12
3	365	1750	0.12
4	335	1750	0.12
5	320	1400	0.12
6	335	1050	0.12
7	365	1050	0.12
8	365	1516.801386	0.14
9	335	1516.801386	0.14
10	350	1166.801386	0.14
11	365	1283.198614	0.1
12	335	1283.198614	0.1
13	350	1633.198614	0.1
14	330	1200	0.1
15	350	1200	0.1
16	340	1450	0.1
17	320	1450	0.1
18	310	1200	0.1
19	320	950	0.1
20	340	950	0.1
21	340	1283.429561	0.12
22	320	1283.429561	0.12
23	330	1033.429561	0.12
24	340	1116.570439	0.08
25	320	1116.570439	0.08
26	330	1366.570439	0.08



(a) 未腐蚀

(b)腐蚀后

图 2 3D 打印态组织 OM 图



(a) 低倍

(b)高倍

图 3 HIP+ 热处理后的 XY 向组织 OM 图





### 参考文献

- Chaolin Tan, Fei Weng, Shang Sui, et al. Progress and perspectives in laser additive manufacturing of key aeroengine materials
  [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021,170(103804):1-58.
- [2] Sheng Cao, Ruikun Chu, Xigen Zhou, et al. Role of martensite decomposition in tensile properties of selective laser melted Ti-

6Al-4V [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018(74):357-363.

- [3] 王文博,马瑞鑫,井志成,等.固溶时效处理对激光3D打印TC4合金 组织与性能的影响[J].2019,46(10):1-9.
- [4] Camille Pauzona, Pierre Forêt, Eduard Hryha, et al. Argonhelium mixtures as Laser-Powder Bed Fusion atmospheres: Towards increased build rate of Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Processing Tech,2020,279(116555):1-9.