#### 试验研究 Experimental Research ● DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2020.05.001

1:10.16410/j.issn1000-8365.2020.05.001

# TA15 钛合金选区激光熔化成形工艺研究

### 张 丹,王 猛,李闯闯

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室金属高性能增材制造与创新设计工业和信息化部重点实验室,陕西西安 710072)

摘 要:采用选区激光熔化技术增材制造了 TA15 钛合金。结果表明,随着激光功率、激光扫描速率、扫描道间距的 增加,TA15 试样的致密度均呈显先增大后减小的趋势;作用于粉床的激光能量密度是一个较好的工艺参数判据,低能 量密度下,由于粉末不能完全熔化通常会出现不规则熔合不良型孔洞;高能量密度下因气体析出和裹陷而出现圆形气 孔;在 60~127 J/mm<sup>3</sup> 的中等能量密度下可得到致密度不低于 99.15%的 TA15 试样。

关键词:选区激光熔化;TA15 钛合金;成形参数;致密度

中图分类号: TG146.2

文章编号:1000-8365(2020)05-0407-06

# Effect of Processing Parameters on Selective Laser Melting of TA15 Titanium Alloy

文献标识码:A

### ZHANG Dan, WANG Meng, LI Chuangchuang

(State Key Laboratory of Solidification Processing, MIIT Key Laboratory of High Performance Metal Additive Manufacture and Innovative Design, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: TA15 titanium alloy were produced by additive manufacturing of selective leaser melting technique. The results show that with the increase of laser power, laser scanning rate and scanning channel spacing, the density of TA15 samples increases first and then decreases. The laser energy density acting on the powder bed is a good criterion for the process parameters. At low energy density, the powder can't completely melt, and irregular mal-fusion pores usually appear. At high energy density, circular pores appear due to gas precipitation and entrapment. At a medium energy density of 60~127 J/mm<sup>3</sup>, TA15 samples with a density not less than 99.15% can be obtained.

Key words: selective laser melting; TA15 titanium alloy; processing parameter; relative density

钛合金具有高比强度、比刚度和良好的耐腐蚀 性能,可满足高机动性、高可靠性和长寿命设计的 需要,其应用水平已成为衡量航空及航天器选材 先进程度的重要标志<sup>[1,2]</sup>。BT20 钛合金是俄罗斯航 空材料研究院于 1964 年研制成功的高 Al 当量的近 α型钛合金,其名义成分为 Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V, 我国依据该成分确定的合金牌号为 TA15<sup>[3]</sup>,具有良 好的高温强度、稳定性、耐热性、耐腐蚀性及焊接性 能等一系列优良的综合性能,是一种具有代表性的 近 α型钛合金。TA15 钛合金多用于制造飞机的风 扇,压气机盘及叶片等工作温度较高,受力较复杂 的重要结构件,是一种重要的飞机和发动机结构用

收稿日期: 2020-03-20

钛合金材料<sup>(4)</sup>。然而 TA15 的传统加工工艺中存在成 形温度范围窄、成形载荷较大、局部容易过热、材料 利用率低、成形成本高等问题<sup>[5]</sup>。

选区激光熔化技术 (SLM, Selective Laser Melting)是一种基于粉末床直接制造金属零件的增材制 造技术,在成形过程中,首先在基板上铺展一层金属 粉末,用计算机控制激光束扫描粉末床的表面,粉末 在激光束扫描下熔化后快速凝固形成试样截面,随 后粉末床下降一个粉末层的厚度,通过重复上述过 程,金属粉末逐层熔化并堆积成形试样,从而直接制 造出形状复杂、表面精度高、致密度高的零件[67]。目 前,已有很多文献报道<sup>189</sup>应用选区激光熔化技术成 形出  $\alpha$ +β 型钛合金(如 TC4)和近 β 型钛合金构件。 有关 α 型和近 α 型钛合金的选区激光熔化研究也 有一些报道,如高飘<sup>[10]</sup>等人研究了分层厚度对 SLM 成形 Ti-5Al-2.5Sn(TA7) 钛合金组织和性能的影响 规律,发现随着冷却速率的降低,α相由细长的针状 马氏体 α'逐渐向岛状 α<sub>m</sub>组织或平衡 α 转变;周旭<sup>[11]</sup> 等人研究了不同工艺参数对 SLM 成形

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1104001);国防基 础科研项目(JCKY2017204A021);宁夏"十三五"重大 科技项目(2018BCE01001)

作者简介:张 丹(1996-),女,陕西宝鸡人,硕士生.研究方向: 增材制造技术研究.电话:029-88494001, E-mail:zd6sunshine@163.com

Ti-Al-Sn-Zr-Mo (Nb)-Si 系近 α 型钛合金的影响规 律,探讨了近 α 型钛合金 SLM 成形过程中的裂纹 产生机理及抑制方法。

作为在航空及航天领域中广泛应用的合金, TA15 钛合金复杂精密结构的 SLM 成形技术具有 广阔的应用前景。为此,本文研究了 TA15 钛合金的 SLM 成形工艺,考察了不同工艺参数对试样致密度 以及缺陷分布的影响规律和作用机制,分析了缺陷 控制手段,获得了致密且组织良好的 TA15 钛合金 成形件。

# 1 实验方法

实验采用的 TA15 钛合金球形粉末材料是西安 欧中采用旋转电极法制备的,化学成分如表1所 示。粉末粒径范围 15~53 μm,平均粒径为 40.3 μm, 形貌如图1所示,粉末球形度较好,表面光滑,未见 明显孔洞等缺陷。

选区激光熔化实验在 Renishaw AM250 设备上 完成,设备配备 200 W 波长 1 070 nm 的光纤脉冲激



图 1 TA15 合金粉末形貌 Fig.1 The morphology of TA15 alloy powder

光器,成形腔体积为 245 mm×245 mm×300 mm(X× Y×Z)。实验前,将金属粉末置于真空烘箱中充分干燥,去除其吸附的水分及气体;实验过程中成形腔内 全程通入高纯 Ar,氧含量低于 200×10<sup>4%</sup>,所使用的 激光束光斑直径为 75 μm,并将 TA15 钛合金基板 预热到 170 ℃。采用表 2 所示的成形工艺参数及相 邻层之间扫描方向偏转 67°的扫描策略成形一系列 尺寸为 10 mm×10 mm 的 TA15 钛合金块体 试样。

将 SLM 成形的 TA15 钛合金试样表面经过清

表1 TA15钛合金粉末的化学成分 w(%) Tab.1 Chemical composition of the TA15 Titanium alloy powder

化学成分	Al	Zr	Мо	v	С	N	0	Н	Ti
成分范围	5.5~7.1	1.5~2.5	0.5~2.0	0.8~2.5	< 0.08	< 0.05	< 0.15	<0.015	Bal.
实测成分	6.50	1.72	1.37	2.17	0.008	0.003	0.14	0.004	Bal.

		表2 TA1	TA15钛合金SLM成形工艺参数					
Tab.	2	Parameters	for	selective	laser	melting	process	of

TAIS						
成形工艺参数	参数值	单位				
激光功率 /P	140, 160, 180, 200	W				
扫描速率 /v	400, 600, 800, 1 000, 1 200	mm/s				
扫描道间距/h	0.08, 0.10, 0.12	mm				
铺粉层厚/t	0.03	mm				

洗和轻微打磨处理后,使用赛多利斯 BS2245 电子 天平采用"阿基米德排水法"对试样的相对致密度进 行测定;试样经过精细打磨和抛光后,使用配比为 1 mL HF+6 mL HF+7 mL HNO3 的腐蚀液对试样进 行腐蚀制成金相试样,在 Keyence VHX-2000 型光 学显微镜下进行组织观察。

# 2 实验结果与分析

## 2.1 激光功率对致密度的影响

在激光扫描速率为 800 mm/s、扫描道间距为 0.1 mm 及铺粉层厚为 0.03 mm 的条件下,改变激光 功率 P(140、160、180、200 W)对 TA15 钛合金进行 成形实验,并对不同激光功率下获得试样的致密度 进行测定,结果如图 2,可见 SLM 成形 TA15 钛合



图 2 不同激光功率下试样的致密度曲线

Fig.2 Density curve for the samples with different laser powers

金试样的致密度随功率增加呈现先增加再减小的趋势:当激光功率从 140 W 增加到 180 W,试样致密度从 98.97%先增加至 160 W 时的 99.15%,再迅速增加至 99.57%;激光功率继续从 180 W 增加到 200 W,试样致密度略有下降,从 99.57%下降到了 99.40%。从数据可知当激光功率的值为 160~200 W 时,TA15 试样均能达到较高的致密度,在激光功率为 180 W 时到致密度的最大值。

图 3 给出了成形试样的光学显微照片,当激光 功率较小时,试样组织中存在着大量孔洞,这些孔洞 的形状不规则,尺寸较大可达 100 μm,从图 3(a)可





以看到用椭圆形框选出的孔洞内部还存在一些未熔 的金属粉末,导致试样致密度处于较低水平。随着激 光功率增加至160W,未熔粉末减少,不均匀孔洞的 尺寸也显著减少 (<100 µm), 形貌逐渐演变为图 3 (b)中的狭长缝隙型孔洞,这些狭长的缝隙型孔洞按 照一定规律分布在沉积的 TA15 试样的熔覆层之 间,其长边平行于扫描方向,窄边平行于沉积方向, 这些孔洞沿试样的沉积方向排列分布,并呈显为彼 此平行的状态,表明缝隙型孔洞属于试样沉积道和 沉积层之间的熔合不良。所形成的这种未熔粉夹杂 和不规则的孔洞缺陷均属于熔合不良缺陷,其形成 的原因为:在较低的激光功率下,粉末床上形成熔池 的熔宽和熔深都较小,在激光扫描粉末床时,难以实 现所铺设金属粉末的完全熔化,造成相邻沉积道和 沉积层之间无法形成有效的冶金结合;由于熔池温 度较低,一些未熔化或部分熔化的粉末颗粒粘附在 熔池边缘,并在沉积层及沉积道间未熔合的区域残 留,形成了所说的未熔粉末颗粒残留。

进一步增大激光功率到 180 W 和 200 W,成形 试样中未观察到明显的孔洞缺陷,如图 3 (c)~(d)所 示,分析认为,随着输入的激光能量变大,激光扫描 粉末床所形成的熔池尺寸相应变大,金属粉末可以 更有效地熔化,由于熔池可在高温状态下保持更长 的时间,充分填补了沉积层之间的孔洞,大大减少了 较低激光功率下存在的熔合不良型缺陷,有助于得 到成形质量良好的 TA15 钛合金试样。

#### 2.2 扫描速率对致密度的影响

激光扫描速率决定了高能激光束与金属粉末的

直接作用时间,是调节能量输入的一个重要参数。在 激光功率为180 W、扫描道间距为0.1 mm 及铺粉层 厚为0.03 mm 的条件下,改变激光扫描速率v(400、 600、800、1000、1200 mm/s)对 TA15 钛合金进行成 形实验,对不同激光扫描速率下获得试样的致密度 进行测定,结果如图4所示,可见SLM成形TA15 钛合金试样的致密度随激光扫描速率的增大呈现出 先增加再减小的趋势:当激光扫描速率处400 mm/s 增加到800 mm/s,试样致密度从98.90%先迅速增 加至99.40%,再缓慢增加至99.57%;当扫描速率从 800 mm/s增加到1200 mm/s,试样的致密度逐渐从 99.57%下降到98.50%。当激光扫描速率为 600 mm/s和800 mm/s时,试样的致密度水平较优, 均可达到99.4%以上,且在800 mm/s的扫描速率下 可获得最大的试样致密度。





为了说明不同扫描速率下试样内部的冶金缺陷 特征,图5给出了不同激光扫描速率下 SLM 成形







TA15 钛合金试样的光学显微照片。从图 5(a)中可以 看到,在较低的扫描速率下(400 mm/s),成形试样中 存在较多分布不均匀的圆形孔洞,这些圆形孔洞的 尺寸均小于 50 μm。随着激光扫描速率的逐渐增 大,该圆形孔隙数量逐渐减少,直至在 800 mm/s 的 扫描速率下形成完全致密的组织,致密度达到最高 值 99.57%。进一步增大扫描速率至 1 000 mm/s 和 1 200 mm/s,TA15 试样组织中逐渐出现少量狭长的 裂缝状孔洞(图 5(d))和大量形状不规则的孔洞,且 在部分孔洞中还有未完全熔化的粉末残留(图 5 (e)),因此所成形 TA15 试样的致密度呈现出先增大 后减小的趋势。

在过低和过高的扫描速率条件下,TA15 钛合 金试样的致密度都处于较低水平,这是因为成形试 样中出现了两种不同类型的孔洞缺陷。当扫描速率 较低时(400 mm/s),激光束和粉末床之间的相互作 用时间较长,输入熔池的能量较多,熔池的熔深显著 增大,部分裹陷进入熔池的气体因在凝固过程中来 不及逸出而残留在熔池中,形成了图 5(a)所示的圆 形气孔,这些圆形气孔的存在使得成形试样的致密 度降低。这些进入熔池的气体可能为原始粉末内部 或粉末之间存在的气体,或是金属粉末在铺展及熔 化过程中吸附或随紊流卷入的保护气体。此外,也有 文献[12]认为在高的激光能量输入条件下,熔池因 存在较高的温度梯度而产生明显的密度差异和表面 张力差值,进而引发激烈的自然对流和马兰格尼流 动,使熔体处于不稳定的流动状态,形成涡流俘获气 泡,阻止其逸出熔池表面。

随着扫描速率的增大,激光与粉末床之间的作 用时间缩短,输入粉末床的能量减少,熔池温度降 低、尺寸减小,熔体流动较为平稳,卷入的气体量变 少,因而成形件中的气孔缺陷逐渐减少,因此试样组 织成形质量较好且致密度较高。当进一步提升扫描 速率时,试样中会逐渐出现如图 5(d)所示的狭长型 裂缝状孔隙及图 5(e)所示的不规则孔隙等熔合不良 型缺陷,这是由于熔宽和熔深不足无法完全熔化金 属粉末而导致的。

### 2.3 扫描道间距对致密度的影响

扫描道间距 h 是指相邻两个熔道中心线之间的 距离。在激光功率为 180 W、激光扫描速率为 800 mm/s、铺粉层厚为 0.03 mm 的条件下,只改变 扫描道间距 h(0.08、0.10、0.12 mm)对 TA15 钛合金 进行成形实验,对不同扫描道间距下获得试样的致 密度进行测定,结果如图 6 所示,可见试样的致密度 随扫描道间距的增大呈现先增加再减小的趋势:当



#### 《铸造技术》05/2020

扫描道间距从 0.08 mm 增加到 0.10 mm,试样的致 密度从 99.16%增大到 99.57%;当扫描道间距进一 步增大到 0.12 mm 时,试样的致密度又略为减小到 99.38%。成形的 TA15 试样的致密度在道间距为 0.10 mm 时达到最大值,且相比于前文所述的激光 功率和激光扫描速率对致密度的影响来说,所选变 化范围的道间距对 TA15 试样致密度影响较小。观 察图 7 所示的不同扫描道间距下试样组织光学显微 照片,发现在给定的 3 组道间距下,所成形的 TA15 试样成形质量均较好,几乎观察不到明显孔洞等缺陷。

## 2.4 能量密度对试样组织和致密度的影响

在 SLM 成形过程中,试样的致密度受到多个成 形工艺参数的共同影响,从前文的分析可知,成形过 程中输入粉末床的激光能量大小会影响熔池温度和 尺寸,进而导致试样致密度的改变。有研究者根据成 形工艺参数的综合作用建立了能量输入模型,认为 可将激光体能量密度(LED, Laser energy density)作 为一个判据来考察工艺参数对试样致密度的影响, 其函数表达式如式(1)所示<sup>[13,14]</sup>。

$$E = \frac{P}{vth} \tag{1}$$

式中, E 为单位体积能量密度, 即激光输入单位体积 粉末材料内的能量, J/mm<sup>3</sup>; P 代表激光功率, W; v 代 表激光扫描速率, mm/s; h 代表扫描道间距, mm; t 为铺粉层厚, mm。从上式可看出, 激光体能量密度 E 与激光功率 P 成正比, 与激光扫描速率 v、扫描道间 距 h 和铺粉层厚 t 成反比。

图 8 给出了不同成形工艺参数对应体能量密度









下 60 组 TA15 试样的致密度散点分布图及其拟合曲线,可见随着体能量密度的增大,TA15 试样的致密度呈现出先增大后减小的趋势。

根据拟合曲线形态,可将该体能量密度范围分为3个区间,I区间、II区间和III区间,分别由如下定义划分:I区间:体能量密度数值 <60 J/mm<sup>3</sup>,其对应的致密度值在 95.68%~98.94%,试样的层与层之间、道与道之间形成不规则形状的熔合不良型缺陷,导致试样呈现出较低的致密度;II区间:体能量密度数据点值为 60~127 J/mm<sup>3</sup>,其对应的致密度值在 99.15%~99.57%,试样成形质量较好且致密度较高,

为致密度较优的体能量密度范围;III区间:体能量密 度数值 >127 J/mm<sup>3</sup>,其对应的致密度值在 96.40% ~98.87%,试样中出现明显的气孔缺陷,导致致密度 下降。

基于前文独立变量分析所得的较优工艺参数组 合为激光功率 180 W,扫描速率 800 mm/s,道间距 0.10 mm,铺粉层厚 30 µm,所成形试样的致密度达 到 99.57%,这一参数组合对应的激光能量密度为 75.00 J/mm<sup>3</sup>,该数值点为图 8 中的圆圈位置,属于能 量密度适中的 II 区间,表明能量密度是一个较为适 宜的选区激光熔化致密度控制参量。

## 3 结论

(1)SLM 成形 TA15 钛合金试样存在熔合不良 型孔洞及圆形气孔两种不同类型的冶金缺陷,当激 光功率过小或扫描速率过大导致体能量密度过低 时,形成不规则的熔合不良型孔洞缺陷;当激光功率 过高或扫描速率过小导致体能量密度过高时, 熔池较大且对流剧烈,气体析出和裹陷形成气孔 缺陷。

(2)随着激光功率、激光扫描速率、扫描道间距 及体能量密度的增加,TA15试样的致密度均呈显 出先增大后减小的趋势,当激光能量密度在 60~127 J/mm<sup>3</sup> 的工艺参数时,可得到致密度不低于 99.15%的 TA15 试样。

(3)激光功率 180 W,扫描速率 800 mm/s,道间 距 0.10 mm,铺粉层厚 0.03 m m 时,对应激光体能 量密度 75.00 J/mm<sup>3</sup>,可获得致密度达到 99.57%的 成形试样。

#### 参考文献:

- (1) 龚清洪,孙超,王伟. 航空钛合金结构件高速高效加工工艺研究 及应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(7): 26-32.
- [2] 王沛,黄正华,戚文军,等. 钛合金 3D 打印技术的应用及研究现状[J]. 材料科学, 2017, 7(3): 275-282.
- [3] 《中国航空材料手册》编辑委员会.中国航空材料手册[M].北京: 中国标准出版社,2002:74
- [4] Sun Z C, Yang H, Tang Z. Microstructural evolution model of TA15 titanium alloy based on BP neural network method and application in isothermal deformation [J]. Computational Materials Science, 2011, 50(2):308-318.
- [5] 龙丽,李晓丽,李森泉,等. TA15 合金等温挤压过程的热力耦合 模拟[J]. 中国机械工程,2006,17(2):212-215.
- [6] 林鑫,黄卫东.应用于航空领域的金属高性能增材制造技术[J]. 中国材料进展,2015,34(9):684-688.
- [7] Gu D D, Meiners W, Wissenbach K, et al. Laser additive manufac-

turing of metallic components: materials, processes and mechanisms, International Materials Reviews[J], 2012, 57(3):133-164.

- [8] Cardaropoli F, Alfieri V, Caiazzo F, et al. Manufacturing of porous biomaterials for dental implant applications through selective laser melting [J]. Advanced Materials Research, 2012, 535-537 (3): 1222-1229.
- [9] Schwab H, Palm F, Kü hn U, et al. Microstructure and mechanical properties of the near-beta titanium alloy Ti-5553 processed by selective laser melting[J]. Materials and Design, 2016, 105:75-80.
- [10] 高飘,魏恺文,喻寒琛,等.分层厚度对选区激光熔化成形 Ti-5Al-2.5Sn 合金组织与性能的影响规律 [J].金属学报,2018, 54(7): 999-1009.
- [11] 周旭. 激光选区熔化近 α 钛合金工艺基础探究 [D]. 武汉: 华中 科技大学, 2015.
- [12] Gu DD, Hagedorn Y C, Meiners W, et al. Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium [J]. ActaMaterialia, 2012, 60(9): 3849-3860.
- [13] Gong H, Rafi K, Gu H, et al. Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting[J]. Materials and Design, 2015, 86:545-554.
- [14] Song B, Dong S, Zhang B, et al. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V[J]. Materials and Design, 2012, 35:120-125.

