● 试验研究 Experimental Research ●
DOI: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^3 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 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)05-0407-06

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

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^3, 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[1,2]。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[3],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钛合金材料[4]。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[5]。

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[6,7]。目前,已有很多文献报道[8,9]应用选区激光熔化技术成形出 α+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[10]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_m 组织或平衡 α 转变;周旭[11]等人研究了不同工艺参数对 SLM 成形

收稿日期:2020-03-20
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^{-4}%，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×10 mm 的 TA15 钛合金块体试样。

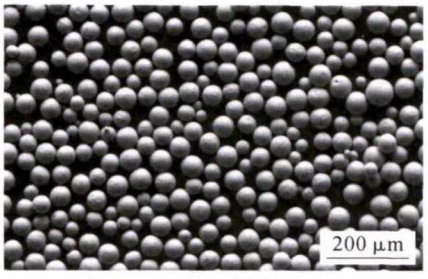


图 1 TA15 合金粉末形貌
Fig.1 The morphology of TA15 alloy powder

将 SLM 成形的 TA15 钛合金试样表面经过清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。

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	Mo	V	C	N	O	H	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 TA15钛合金SLM成形工艺参数
Tab. 2 Parameters for selective laser melting process of TA15

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

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。

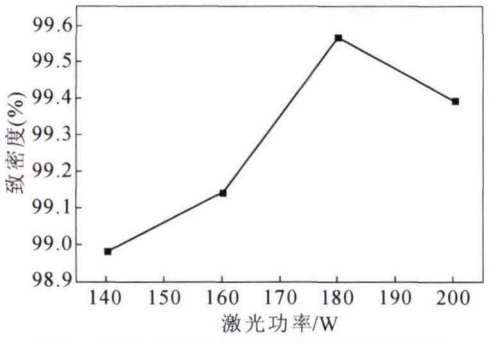
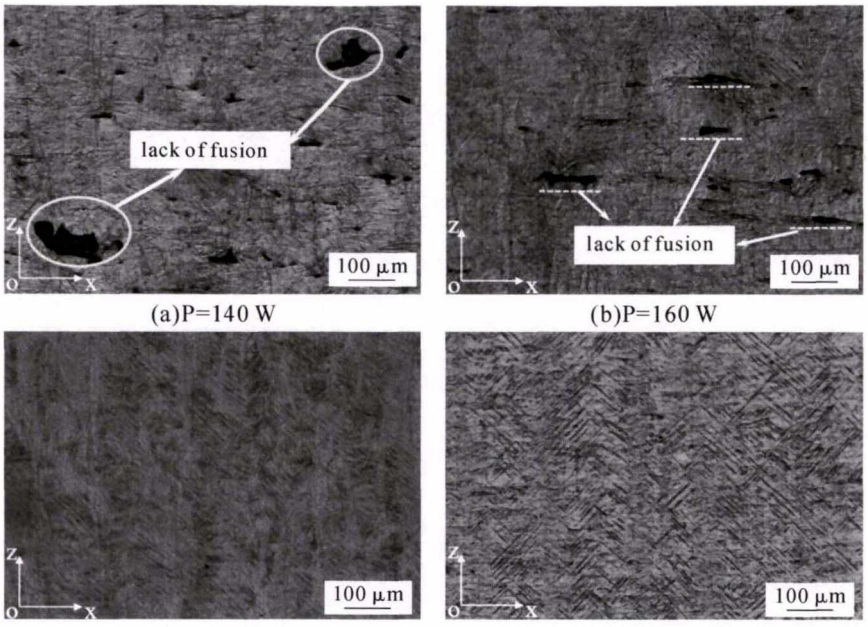


图 2 不同激光功率下试样的致密度曲线
Fig.2 Density curve for the samples with different laser powers

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



(a)P=140 W　(b)P=160 W　(c)P=180 W　(d)P=200 W

图 3 不同激光功率下 TA15 试样的光学显微形貌

Fig.3 Optical micrograph of TA15 samples with different laser powers

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 160 W，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、1 000、1 200 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：当激光扫描速率从 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 1 200 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。

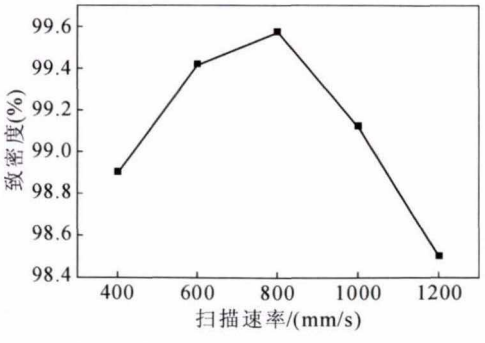
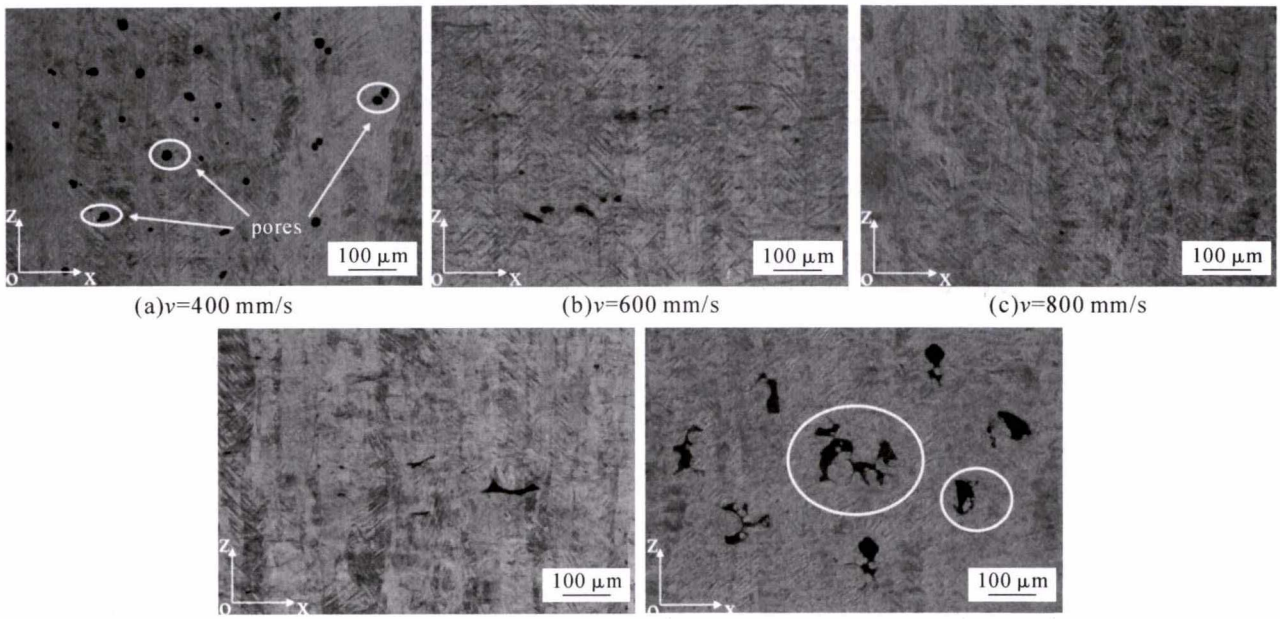


图 4 不同扫描速率下试样的致密度

Fig.4 Density curve for the samples with different laser scanning speeds

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



(a)v=400 mm/s (b)v=600 mm/s (c)v=800 mm/s

(d)v=1 000 mm/s (e)v=1 200 mm/s

图 5 不同激光扫描速率 v 下 TA15 试样的光学显微照片

Fig.5 Optical micrograph of TA15 samples with different laser scanning speeds

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

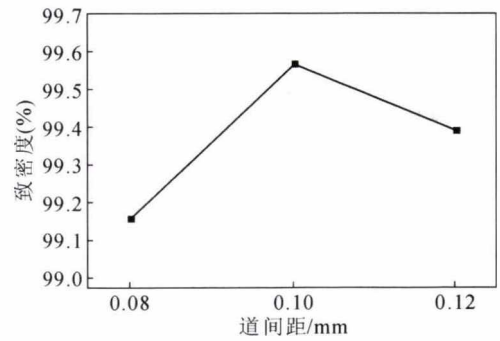


图 6 不同道间距下的致密度

Fig.6 Density curve for the samples with different hatching spaces

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。

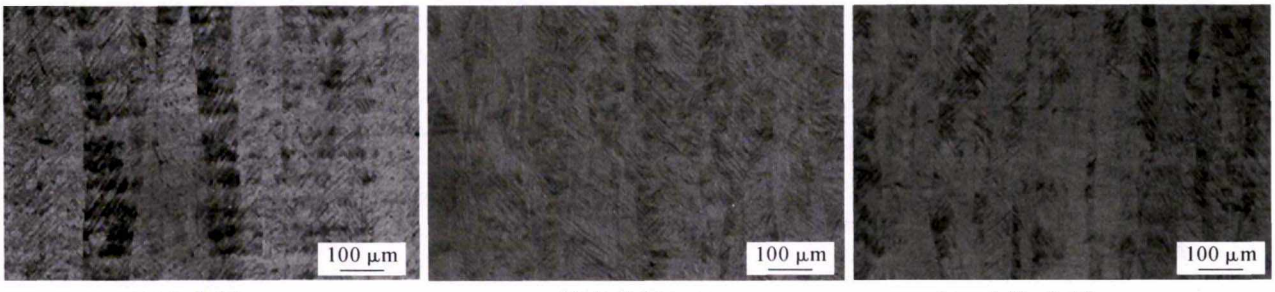
2.4　能量密度对试样组织和致密度的影响

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[13,14]。

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

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/mm³；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



(a)h=0.08 mm　　(b)h=0.10 mm　　(c)h=0.12 mm

图 7 不同道间距 h 下 TA15 试样的光学显微照片

Fig.7 Optical micrograph of TA15 samples with different hatching spaces

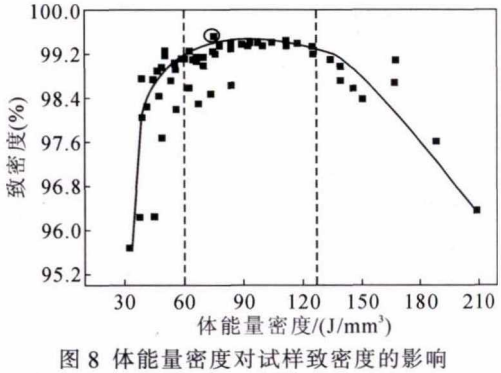


图 8 体能量密度对试样致密度的影响

Fig.8 Effect of bulk energy density on the density of TA15 samples

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/mm³，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/mm³，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/mm³，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/mm³，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/mm³ 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/mm³，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,李淼泉,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 manufacturing 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.

2020年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979年创刊，中国铸造协会会刊，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855，中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG。

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、应用技术、生产管理经验及信息和铸造设备，覆盖铸铁、铸钢和有色合金等铸造领域，包括砂型铸造以及熔模铸造、金属型铸造、消失模铸造和压铸等特种铸造技术。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、特种铸造、装备技术、实用成型技术、材料改性、材料开发、材料保护及表面工程、材料失效分析、应力控制与理化测试技术、今日铸造等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造原辅材料、铸造设备、熔炼设备、热处理设备、环保设备、检测仪器以及铸件生产、科研成果转让、企业形象宣传等相关广告。

订阅方式及价格：

请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年12期，每期定价25元，平寄全年300元（含邮费），挂号全年336元，快递全年420元。

海外：每期定价25美元，全年300美元。

银行汇款：

户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行

邮购地址：西安市金花南路5号西安理工大学608信箱（710048）

联系人：李巧凤　　电话/传真：029-83222071

网址：www.zhuzaojishu.net　　E-mail：zzjs@263.net.cn

微信扫一扫 信息快知道