

体能量密度对选区激光熔化钛合金表面质量及致密度的影响

易 涛, 成 靖, 赵仲哲, 荣 鹏

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610092)

摘 要: 分别对选区激光熔化的激光功率、扫描间距进行了研究, 引入了激光体能量密度, 综合分析了工艺参数对钛合金致密度及表面粗糙度的影响。试验结果表明: 随着体能量密度的增大, 所加工出的金属样的表面粗糙度呈减小趋势。而通过调节激光功率使体能量密度增大的方式更有利于加工出更高致密度的金属零件。

关键词: 钛合金; 选区激光熔化; 能量密度; 表面粗糙度; 致密度

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)04-0075-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.04.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of volumetric energy density on surface roughness and density of selective laser melted titanium alloy

Yi Tao, Cheng Jing, Zhao Zhongzhe, Rong Peng

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, Sichuan, China)

Abstract: In this paper, the laser power and scanning distance of selective laser melting were studied respectively, and the influence of process parameter on density and surface roughness of titanium alloy was comprehensively analyzed by introducing volumetric laser energy density. The experimental results show that the surface roughness of machined metal samples decreases with the increase of volumetric energy density via tuning laser power.

Key words: titanium alloy, selective laser melting, energy density, surface roughness, density

0 引言

选区激光熔化(Selective Laser Melting)是金属 3D 打印领域中应用较广、技术较为成熟的成型工艺之一, 其发展经历了低熔点非金属粉末烧结、低熔点包覆高熔点粉末烧结、高熔点粉末直接熔化成形等阶段^[1]。选区激光熔化技术是在预先规定的扫描路径下, 利用高能激光束, 将已平铺好的金属粉末完全熔化, 经冷却后凝固成形的一种技术。选区激光熔化成形技术可以直接制造几乎是任意形状的金属零件, 并且可以获得具有完全冶金结合的组

织, 已成功应用到汽车、航空航天、工艺品、医疗及珠宝等行业领域。

粗糙度和致密度是影响选区激光熔化成形金属零件性能的关键特征值, 已有学者进行了研究。韩国梁^[2]等人基于单熔道试验的基础参数研究了钛合金 3D 打印过程中成形工艺和表面成形质量, 研究发现采用高功率、低扫描线间距及适当降低曝光时间可有效提高表面成形质量。安超^[3]等人研究了工艺参数对钴铬合金致密度及粗糙度的影响, 试验表明, 铺粉厚度是影响 SLM 成型件致密度大小的最重要因素, 而激光功率是影响成型件上表面和侧面

粗糙度的最重要因素。潘露^[4]等人研究了线能量密度对选区激光熔化 316L 的缺陷影响分析,研究表明,当线能量密度较高时,裂纹缺陷及气泡减少。

上述研究都侧重于单个工艺参数对于金属零件粗糙度和致密度的影响^[5-6],或将主要工艺参数统一成能量密度来研究^[7],但并未综合考虑各工艺参数的影响。所以笔者分别对激光功率、扫描间距进行了分析,引入体能量密度来探究激光能量密度对于表面粗糙度及零件致密度的影响规律。

1 试验材料及方法

试验采用 Concept Laser Mlab cusing 金属快速成型机,其扫描层厚 15~50 μm ,激光器类型为 100 W 光纤激光器,功率可调节范围为 10~100 W,扫描速度可调范围为 10~7 000 mm/s,扫描间距可调范围为 0.001 4~13.6 mm,其光斑直径大小约为 20~80 μm ,使用的保护气体为高纯氩气。所使用

的打印材料是钛合金球形粉末(Ti-6Al-4V,加拿大 AP&C),该粉末是采用等离子雾化生产工艺生产的,球形度高,粉末粒径分布在 20~55 μm ,中位径为 33.6 μm 。

表面形貌采用 Phenom ProX 扫描/能谱一体机和日本 JSE-5900LV 扫描电子显微镜进行观察。内部截面使用金相显微镜(Olympus GX51)进行观察。使用基恩士非接触式 3D 轮廓测量仪 VR-5000 进行表面轮廓和粗糙度的测量。测试的放大倍数为 80 倍,测量位置为样品表面中部区域。基于阿基米德排水法采用分析天平测量样品在空气中和水中的质量,然后计算出样品体积,从而计算出样品的致密度 ρ 。

选区激光熔化成型技术主要关键参数为激光功率 P 、扫描速度 v 、扫描间距 h 和铺粉厚度(切片高度) d 。根据体能量密度公式 $\text{VED}=P/(vhd)$,主要调节激光功率和扫描间距两个参数,从而获得不同的体能量密度,其工艺参数设计方案如表 1 所示。

表 1 工艺参数设计方案
Table 1 Selected technical parameters

编号	激光功率/W	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	扫描间距/mm	铺粉厚度/mm	体能量密度VED/(J·mm ⁻³)
1	70	900	0.1	0.025	31.1
2	80	900	0.1	0.025	35.6
3	90	900	0.1	0.025	40.0
4	100	900	0.1	0.025	44.4
5	90	900	0.11	0.025	36.4
6	90	900	0.12	0.025	33.3
7	90	900	0.13	0.025	30.8

2 结果与分析

2.1 表面粗糙度分析

2.1.1 激光功率对表面粗糙的影响

激光功率对表面粗糙度的影响图 1、2。从图 1 可以看出,随着激光功率的增加,表面粗糙度逐渐降低,从 19.5 μm 降低到 11.6 μm 。其主要原因是激光功率决定能量输入大小,决定了粉末熔化情况。当激光功率增加时,溶体的粘度降低,熔池流动性和润湿性变好,不易造成球化现象,同时激光的热影响区变大,更多的粉末由于受到了更多的能量加载,熔化情况变好,熔道宽度增加,熔道间搭接得更多,融合得更好。其中激光功率从 70 W 增加到 80 W,表面粗糙度降低得最快,从 19.5 μm 降低到 15.2 μm 。

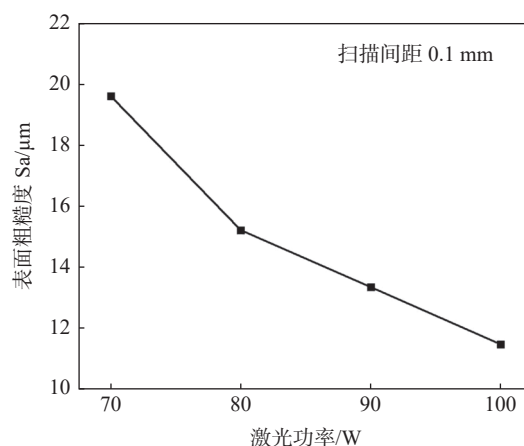


图 1 激光功率对表面粗糙的影响

Fig. 1 The effect of laser power on surface roughness

从图2可以看出,当激光功率为70 W时,表面凸起物较多,凸起物峰值较高。其主要原因可能是激光功率70 W对于钛合金粉末而言能量较低,熔

化不充分,出现熔池球化现象,再加上相邻熔道之间产生的球化物不断累积,最终形成较大的凸起物。

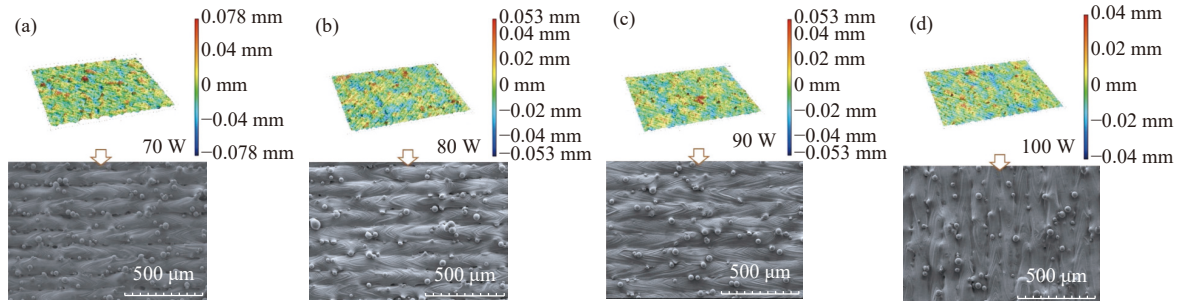


图2 不同激光功率制备的表面形貌
Fig. 2 The 3D surface morphologies prepared at different laser powers

2.1.2 扫描间距对表面粗糙度的影响

扫描间距对表面粗糙度的影响如图3、4所示。从图3中可以看出,随着扫描间距的增大,表面粗糙度呈逐渐增加的趋势,从11.4 μm逐渐增加到18.0 μm。经测量该工艺参数下的单熔道尺寸发现,单熔道的宽度约为0.104 mm,意味着当扫描间距大于0.10 mm时,熔道间的间距逐渐拉大,存在的间隙逐渐增加,搭接率为0。搭接率较低,会产生大小不一、分布随机的缺陷孔隙,经过不断的累积,最终所产生的缺陷会越来越多。从图4(a)-(d)可以看到,随着扫描间距的增加,单熔道的边界轮廓也越来越明显,再加上相邻层是垂直扫描策略,致使相邻层熔道垂直交叉部位累积了更多的熔化物,表面轮廓极值差变大,最终导致表面粗糙度增大。从图4(d)中可以观察到,当扫描间距为0.13 mm时,表面开始产

生孔隙,致使表面轮廓极值差变大,表面粗糙度值变大。

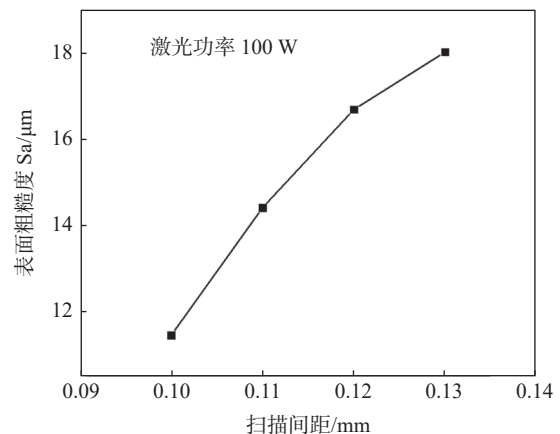


图3 扫描间距对表面粗糙的影响
Fig. 3 The effect of scanning distance on surface roughness

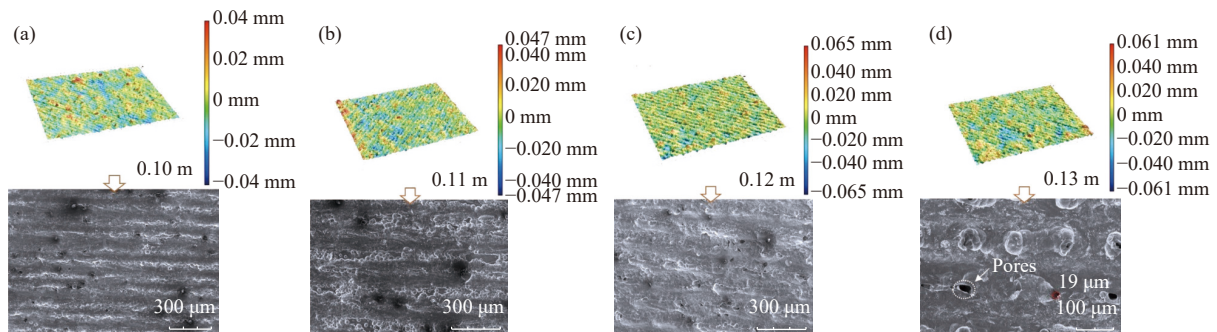


图4 不同扫描间距制备的表面形貌
Fig. 4 The 3D surface morphologies prepared at different scanning distance

2.1.3 体能量密度对表面粗糙度的影响

激光的体能量密度是综合考虑激光功率和扫描间距对表面粗糙度的影响值,它反映的是在单位体

积下激光所输入的能量值。将激光功率和扫描间距的试验数据换算为体能量密度,其体能量密度对表面粗糙度的影响规律如图5所示,随着体能量密度

的增加,表面粗糙度整体上呈现下降趋势,可以说明,只要满足体能量密度呈一定趋势,在任意变换激光功率和扫描间距时所得到的表面粗糙度值也存在一定趋势。而当体能量密度在 30.8 J/mm^3 和 31.1 J/mm^3 时,其能量密度值相差 0.3 J/mm^3 ,而表面粗糙度相差 $1.6 \mu\text{m}$,通过降低激光功率使体能量密度降低的方式,表面粗糙度更大。其主要原因可能是通过降低激光功率使体能量密度降低的方式会使粉末熔化、球化严重,使得表面粗糙度加大,经逐层累加后,表面质量更差;而通过增加扫描间距使体能量密度降低的方式,粉末熔化不受影响,熔道成形正常,仅存在一定的熔道间隙,经逐层打印后,部分间隙可能会被填补,表面粗糙度相对较小。

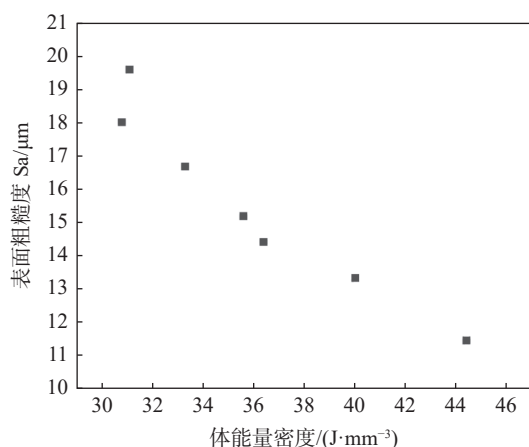
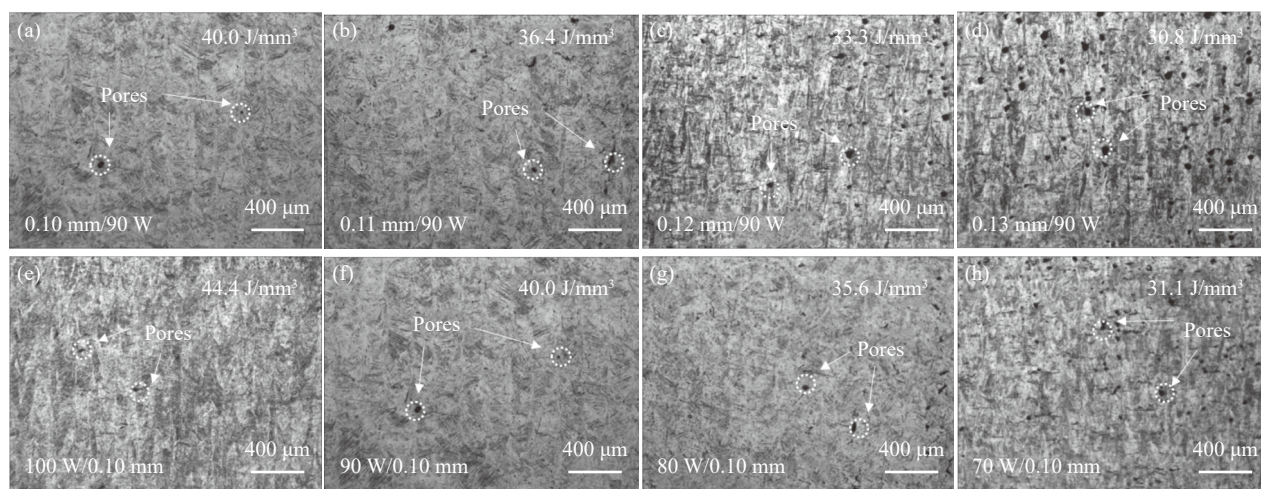


图5 体能量密度对表面粗糙的影响

Fig. 5 The effect of volumetric energy density on surface roughness

2.2 致密度分析

不同工艺参数下制备的样品内部情况如图6所示。由图6可知,随着激光功率的降低,内部孔隙逐渐增多;随着扫描间距的增加,内部孔隙也逐渐增加。同时从图7可以看到,随着体能量密度的增加,致密度呈现非线性增加,是不稳定的波动。通过分别观察激光功率和扫描速度调节的体能量密度对致密度的影响,可以看到,单因素调节的体能量密度对致密度的影响具有一定的规律,随着激光功率的增加或扫描间距的降低,体能量密度随之增加,致密度呈稳定增长趋势。同时,从图7中也可以看到,在激光体能量密度为 31 J/mm^3 和 36 J/mm^3 左右时,通过激光功率调节的比通过扫描间距调节的体能量密度所加工的样品的致密度高。其原因在于这两个因素对打印的主要影响不一样。激光功率主要决定的是粉末和熔道所吸收的能量大小,对粉末的熔化及熔池的状态有直接影响。当激光功率较小时,虽然熔道的状态不好,但在适当的扫描间距下,相邻熔道相互弥补缺陷,并且再经过下一层激光的再熔化,累积过程中产生的缺陷就会越少。而扫描间距主要影响的是熔道之间的搭接及熔道温度场的影响范围,是打印体致密度的直接影响因素。当扫描间距较大时,熔道间间隙增大,在较大的激光功率下所产生的热影响区可能不足以对相邻熔道的间隙进行填补与修饰,表面粗糙度增加,累积过程中产生的缺陷也越来越多,最终导致致密度越来越低。



(a)~(d) 为调节扫描间距调控能量密度的方式; (e)~(h) 为调节激光功率调控能量密度的方式

图6 不同工艺参数制备的样品内部截面示意

Fig. 6 The internal cross section of samples prepared with different process parameters

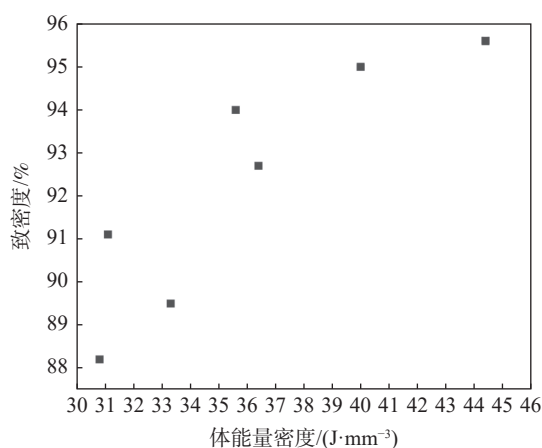


图7 体能量密度对致密度的影响

Fig. 7 The effect of volumetric energy density on sample density

3 结论

1)增大激光功率和降低扫描间距有助于表面粗糙度的降低。随着体能量密度的增大,所加工出的金属样件的表面粗糙度呈减小趋势。

2)体能量密度的增加,会使样品内部孔隙降低,致密度增加。通过调节激光功率使体能量密度增大的方式更有利于加工出更高致密度的样品。扫描间距对致密度的影响较大。

参考文献

- [1] Yang Yongqiang, Wang Di. Laser selective melting 3D printing technology [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2019.
(杨永强,王迪.激光选区熔化3D打印技术[M].武汉:华中科技大学出版社,2019.)
- [2] Han Guoliang, Shi Wentian, Han Yufan, *et al.* Research on surface forming quality of selective laser melting TC4 titanium alloy based on single channel test[J]. *Journal of Laser*, 2021, 42(3): 163–169.
(韩国梁,石文天,韩玉凡,等.基于单熔道试验的选区激光熔化成形TC4钛合金表面成形质量研究[J].*激光杂志*, 2021, 42(3): 163–169.)
- [3] An Chao, Zhang Yuanming, Zhang Jinsong. Influence of selected laser melting parameters on density and surface roughness of cobalt-chromium alloy materials[J]. *Applied Laser*, 2018, 38(3): 328–333.
(安超,张远明,张金松.选区激光熔化工艺参数对钴铬合金材料成型件致密度与表面粗糙度的影响规律研究[J].*应用激光*, 2018, 38(3): 328–333.)
- [4] Pan Lu, Liu Qihui, Wang Liang, *et al.* Effect of linear energy density on fabrication of 316L stainless steel by selective laser melting[J]. *Journal of Applied Laser*, 2019, 39(1): 21–27.
(潘露,刘麒慧,王亮,等.线能量密度对选区激光熔化制备316L不锈钢缺陷的影响[J].*应用激光*, 2019, 39(1): 21–27.)
- [5] Lan Fang, Liang Yanjuan, Huang Binbin. Research on quality of selective laser melting forming[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2018, 281(5): 162–164,172.
(兰芳,梁艳娟,黄斌斌.选区激光熔化成形质量研究[J].*装备制造技术*, 2018, 281(5): 162–164,172.)
- [6] Liu Ruicheng, Yang Yongqiang, Wang Di. Study on surface roughness of selective laser melting forming metal parts[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 425–430.
(刘睿诚,杨永强,王迪.选区激光熔化成型金属零件上表面粗糙度的研究[J].*激光技术*, 2013, 37(4): 425–430.)
- [7] Lv Jinjian, Jia Changzhi, Yang Jianchun. Effect of laser energy density on quality of selective laser melting[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(20): 156–159.
(吕金建,贾长治,杨建春.激光能量密度对选区激光熔化成型质量的影响[J].*热加工工艺*, 2018, 47(20): 156–159.)