

脉冲激光对选区激光熔融 Ti_6Al_4V 钛合金表面质量及变形量的影响

郭庆丰^{1,2}, 张政¹, 黄李杰¹, 林文雄^{1*}

¹中国科学院福建物质结构研究所光电材料化学与物理重点实验室, 福建 福州 350002;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 分别采用脉冲激光和连续激光作为选区激光熔融工艺的热源, 研究了不同激光平均功率和脉冲占空比对 Ti_6Al_4V 钛合金试样致密度、表面粗糙度和显微组织等参数的影响。实验结果表明, 相比连续激光, 脉冲占空比为 60%~70% 的脉冲激光可以显著提高试样的表面质量, 表面粗糙度最低为 $3.6 \mu\text{m}$, 使试样晶粒宽度由 $(1.14 \pm 0.23) \mu\text{m}$ 减小到 $(0.85 \pm 0.18) \mu\text{m}$, 且能有效消除连续激光加工时因热应力累积导致的翘曲变形。

关键词 激光器与激光光学; 激光材料加工; 选区激光熔融工艺; 脉冲激光; 致密度; 表面粗糙度; 变形量

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.211404

Effects of Pulsed Laser on Surface Quality and Deformation of Selective Laser Melted Ti_6Al_4V Titanium Alloy

Guo Qingfeng^{1,2}, Zhang Zheng¹, Huang Lijie¹, Lin Wenxiong^{1*}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this paper, using pulsed laser and continuous laser as the heat source of the selective laser melting process, the effects of different laser average powers and pulse duty cycles on the density, surface roughness, and microstructure of Ti_6Al_4V titanium alloy samples are studied. Experimental results show that compared with continuous laser, the use of pulsed laser with a duty cycle of 60%–70% can significantly improve the surface quality of the part. The surface roughness is as low as $3.6 \mu\text{m}$, and the sample grain width is reduced from $(1.14 \pm 0.23) \mu\text{m}$ to $(0.85 \pm 0.18) \mu\text{m}$, and can effectively eliminate the warpage caused by the accumulation of thermal stress during continuous laser processing.

Key words lasers and laser optics; laser material processing; selective laser melting process; pulsed laser; relative density; surface roughness; deformation

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 240.5770

1 引言

Ti_6Al_4V (TC4)钛合金具有比强度高、生物相容性良好和耐腐蚀等特点,被广泛应用于航空航天和生物医疗等领域^[1],但通过传统加工手段制造 TC4 钛合金零件的难度较高,且材料利用率低^[2]。选区

激光熔融(SLM)工艺具有材料利用率高、可制备复杂零件的优点,能满足用户的个性化需求^[3-4],广泛应用于航空航天领域的超轻结构件^[5]和医疗领域的生物植入零件制造^[6-7]中。

SLM 工艺利用高功率激光熔化金属粉末,通过逐层铺粉、激光熔融成形的的方式制造出三维零件。制造过程存在的局部熔化和迅速凝固现象(冷却速

收稿日期: 2020-02-24; 修回日期: 2020-03-10; 录用日期: 2020-03-12

基金项目: 福建省科技计划(2017T3001)、中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-417)

* E-mail: wxlin@fjirsm.ac.cn

率为 $10^3 \sim 10^8 \text{ K/s}^{[8]}$)使试样内部存在热应力大、组织呈各向异性分布等问题。而过高的功率输出会导致成形零件热累积严重,容易产生裂纹^[9]或翘曲变形^[10]。此外,激光扫描过程出现的飞溅^[11]、球化^[12]等现象会进一步恶化试样的表面质量。

边培莹等^[13]研究了激光功率对 SLM 熔池形貌及残余应力的影响,发现熔池的几何尺寸和成形件中的残余应力均随激光功率的增大而增大。万乐等^[11]研究了扫描方式对 SLM 钛合金成形质量的影响,表明分区扫描可获得尺寸精度更高、表面质量良好的钛合金试样,同时可以显著改善悬垂面的成形效果。张国会等^[14]研究了激光能量密度对 SLM 成形 GH4169 合金致密度的影响,结果表明,扫描速度较低时,组织内会产生圆形气孔;扫描速度过高时,组织内会产生不规则形状的孔隙,并通过优化工艺参数得到致密度为 99.7% 的样品。

高功率激光经过脉冲调制后具有作用时间可控、周期性间歇曝光等特点,能有效缓解加工过程中的热累积,减少激光扫描时的热影响区,降低试样内的热应力^[15-16]。Demir 等^[17]研究了脉冲激光和连续激光对 SLM 成形件致密度和尺寸误差的影响,结果表明,增加脉冲占空比,可以增加零件致密度、增大尺寸误差。Zafari 等^[18]研究了激光曝光时间和点间隔对 TC4 钛合金 SLM 成形件微观组织的影响,得到了完全的针状马氏体 α' 相、大部分针状马氏体 α' 相加少量孤立的 β 相以及完全的片状 α/β 相三种微观结构,并通过调控相成分改善了成形件的延展性。

综上所述,脉冲激光在 SLM 领域有重要的研究价值,但其在 SLM 过程中对 TC4 钛合金试样表

表 1 TC4 钛合金粉末的成分

Table 1 Composition of TC4 titanium alloy powder

Element	Ti	Al	V	Fe	C	H	O	N
Mass fraction / %	Bal.	6.42	4.00	0.21	0.0076	0.0016	0.12	0.004

成形过程中充入高纯度的氩气保护,成形腔室中氧含量的质量分数小于 200×10^{-6} 。设置扫描间距为 $70 \mu\text{m}$,铺粉层的厚度为 $20 \mu\text{m}$,激光扫描速度为 1 m/s 。在激光功率分别为 90、110、130、150、170、190 W,激光脉冲占空比分别为 30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100% 情况下进行实验。激光脉冲占空比是指单个激光周期 ($20 \mu\text{s}$) 中激光脉冲宽度所占的比值,打印试样是尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的正方体。试样用丙酮进行超声波清洗后,进行打磨、抛光、腐蚀,腐蚀液由 HF、 HNO_3 、 H_2O 组成,腐蚀液的体积比 $V(\text{HF})$:

面质量、微观组织形貌及试样的变形量等参数的影响研究较少。因此,本文采用不同脉冲占空比的脉冲激光作为热源,系统地研究了脉冲激光对 TC4 钛合金成形试样致密度、微观组织、表面粗糙度和零件变形量等参数的影响,通过实验对脉冲加工参数进行了优化,为制备具有高致密度和良好表面质量的钛合金打印件提供了技术参考。

2 实验材料及方法

实验采用的钛合金粉末为自主研发的 TC4 球形粉末,TC4 的粉末粒度为 $20 \sim 53 \mu\text{m}$ 。TC4 粉末的扫描电子显微镜 (SEM) 图像如图 1 所示,具体成分如表 1 所示。采用自主研发的 M100 激光 3D 打印机进行实验,激光光源为光纤激光器,功率为 200 W,波长为 $1.07 \mu\text{m}$,光斑直径为 $50 \mu\text{m}$,激光输出模式为连续模式和重复频率为 50 kHz 的脉冲调制模式。

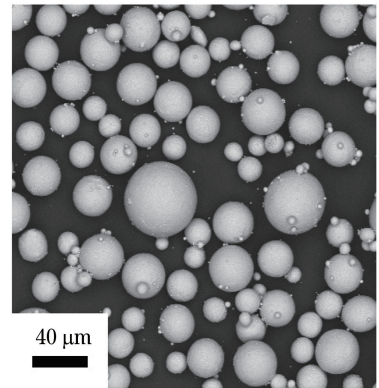


图 1 TC4 钛合金粉末的 SEM 图像

Fig. 1 SEM image of TC4 titanium alloy powder

$V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=10:5:85$ 。

根据阿基米德原理,先采用 GH-300C 密度仪,利用排水法测试试样的密度;再将试样的密度与 TC4 钛合金的理论密度进行对比,得到试样的致密度。用 SENSO FAR 光学剖面测量仪测量试样的表面粗糙度,采用 Phenom 公司的台式 SEM (Phenom XL) 观察试样的表面形貌、横截面内部缺陷和微观组织。

3 实验结果与分析

3.1 致密度分析

图 2 为不同激光功率和脉冲占空比对成形试样致

密度的影响,可以发现,成形 TC4 钛合金试样的致密度在激光功率为 90~150 W 时随脉冲占空比和激光功率的增加而增大;在激光功率为 170~190 W 时随脉冲占空比的增加先增大后减小。在激光功率为 190 W、脉冲占空比为 80% 和激光功率为 170 W、脉冲占空比为 90% 时,试样的致密度最大,为 99.88%。

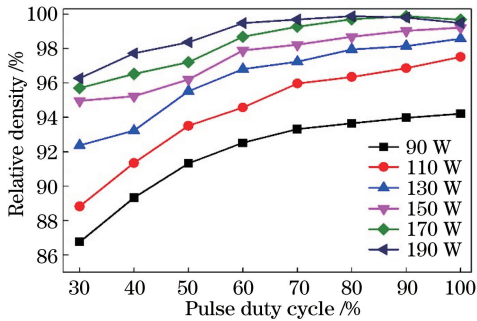


图2 不同激光参数下 TC4 钛合金试样的致密度

Fig. 2 Relative density of TC4 titanium samples under different laser parameters

试样的致密度受其内部缺陷影响,主要包括孔隙缺陷和裂纹。孔隙缺陷可分为两类,一类是不规则形状的匙孔缺陷,主要由球化效应、金属粉末熔化凝固成实体过程中体积收缩引起的部分底层金属粉末未充分熔化导致。另一类是近似圆形的气孔缺陷,主要由熔池凝固过快或内部保护气体和低沸点物质在高温下汽化形成的气体不能及时排出导致。裂纹主要由熔池温度梯度和SLM成形层与层间的

温度梯度引起的热应力过大以及超过材料本身的强度极限导致。实验中成形试样产生的内部缺陷主要为孔隙缺陷。

激光功率为 110 W、脉冲占空比为 30%, 50%, 60%, 100% 时,试样的横截面形貌如图 3(a)~图 3(d) 所示。可以发现,当脉冲占空比为 30% 时,试样存在大量尺寸为 50~100 μm 的不规则孔洞,部分孔洞存在未被完全熔化的球形 TC4 钛合金颗粒。原因是激光能量密度过低,球化效应^[12]影响了下一层的铺粉质量,从而形成匙孔缺陷^[19-21]。当脉冲占空比为 50% 时,试样内部的孔洞变小,尺寸主要集中在 20~50 μm ,个别孔洞的尺寸可达到 100 μm ,未熔化的 TC4 粉末基本消失,但内部缺陷仍以匙孔缺陷为主。当脉冲占空比为 60% 时,试样存在尺寸较小(几十 nm 到几 μm) 的近圆形微孔,匙孔缺陷基本消失,以气孔缺陷^[19-21] 为主。原因是激光作用时间、TC4 钛合金粉末熔化量均随着脉冲占空比的增加而增加,熔池变宽、变深,相邻熔道的结合和层间结合更紧密。此外,TC4 钛合金粉末的间隙充满氩气,氩气在 TC4 钛合金粉末吸热熔化时迅速向外排出。但由于熔池快速凝固,氩气气泡不能及时排出,最终形成圆形气孔。同时,TC4 钛合金中沸点较低的成分在高温下汽化,产生的气体在熔池凝固时不能及时排出,凝固收缩后也会形成气孔。当脉冲占空比为 100% 时,匙孔缺陷完全消失,原因

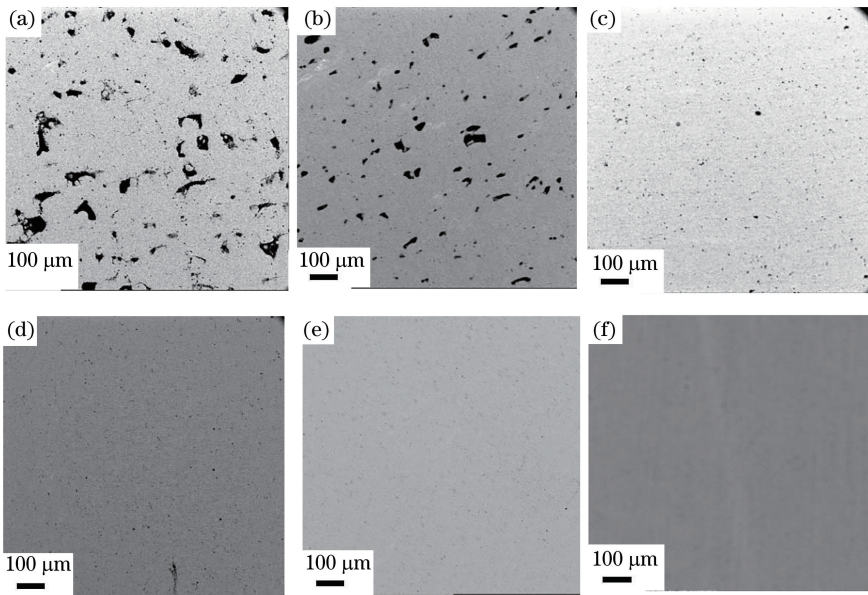


图3 不同脉冲占空比下 TC4 钛合金试样的 SEM 图像。(a)~(d) 激光功率 110 W 时,脉冲占空比为 30%、50%、60%、100%; (e)~(f) 激光功率 190 W 时,脉冲占空比为 30%、80%

Fig. 3 SEM images of TC4 titanium samples under different pulse duty cycles. (a)~(d) Pulse duty cycle is 30%, 50%, 60%, 100%, when the laser power is 110 W; (e)~(f) pulse duty cycle is 30%, 80%, when the laser power is 190 W

是氩气和金属蒸汽的排出速度随熔池凝固时间的增加而增加,有利于致密度的增加。

激光功率为 190 W、脉冲占空比为 30%、80% 时,试样的横截面形貌如图 3(e)~图 3(f)所示。对比图 3(a)可以发现,随着激光功率的增加,TC4 钛合金粉末完全熔化,匙孔缺陷逐渐消失,致密度也得到了提升,但仍存在少量气孔缺陷。从图 3(f)中没有观察到孔洞,对应的试样致密度达到 99.88%,几乎为全致密状态。这表明使用脉冲激光进行加工可以得到高致密度的试样,且增加脉冲占空比可以提高试样致密度。

3.2 表面质量分析

不同成形参数下试样的表面粗糙度如图 4 所示,可以发现,当激光功率为 90 W 和 110 W 时,试样的表面粗糙度均随脉冲占空比的增加而降低;当激光功率为 130~190 W 时,试样表面的粗糙度随脉冲占空比的增加呈先下降后增加的趋势;当激光功率为 190 W、脉冲占空比为 70% 时,试样表面的粗糙度最低,为 3.6 μm 。

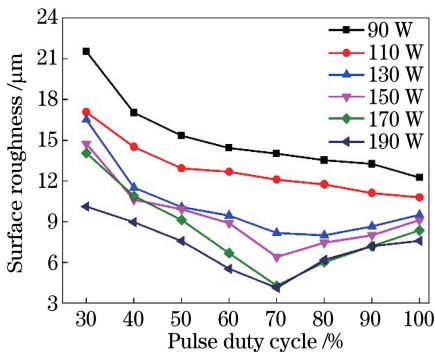


图 4 不同参数下 TC4 钛合金试样的表面粗糙度

Fig. 4 Surface roughness of TC4 titanium samples under different parameters

SLM 过程中产生的表面缺陷直接影响了零件的表面质量及成形性能,从而影响 SLM 技术在各个领域的应用。SLM 成形表面主要存在的缺陷包括球化、飞溅等。金属粉末在激光热源的作用下迅速熔化形成熔池,熔池凝固过程中为了降低表面能,在表面张力作用下趋向于形成球形颗粒,这种现象被称为球化现象。球化现象会导致表面不平整,降低表面质量。产生飞溅的原因是能量密度过大,熔池温度急剧上升直至汽化,会产生强大的反冲力,同时熔池周围的气体膨胀爆炸会导致金属粉末飞离烧结区,从而降低试样的表面质量。

激光功率为 110 W 时,不同脉冲占空比下 TC4 钛合金试样表面的 SEM 图像如图 5 所示。可以发

现,当脉冲占空比为 30% 时,试样表面有较大的孔洞,粗糙度最差。原因是激光的作用时间较短,形成的熔池宽度和深度较小,凝固速度快,凝固时由于球化效应在表面张力作用下固化成不连续的熔滴,导致熔道不连续。此外,低脉冲占空比对应的长曝光间隔使孔洞内存在两次曝光过程中未完全熔化的 TC4 钛合金粉末。当脉冲占空比为 50% 时,孔洞和未熔化的 TC4 钛合金粉末有所减少,粗糙度降低。原因是随脉冲激光作用时间的增加,TC4 钛合金粉末熔化量增加,熔池变大,且曝光间隔减小,熔池在两次曝光间隔内得到延续,相邻熔滴的连接更紧密。当脉冲占空比增加到 60% 和 70% 时,熔道的连续性得到了进一步增加,表面孔洞和未熔化的 TC4 钛合金粉末更少。当脉冲占空比为 80% 时,表面孔洞和未熔化的 TC4 钛合金粉末明显减少,相邻熔滴彼此连接,熔道连续,同时熔道上出现球形颗粒(粒径为 20~50 μm),原因是金属蒸汽^[22]从熔道周围卷起的 TC4 钛合金粉末散落到已经凝固的表面上。当脉冲占空比为 100% (连续激光) 时,虽然熔道不连续造成的孔洞消失,但试样表面的球形颗粒有所增加,原因是随着脉冲占空比的增大,熔池吸收的热量增加,金属蒸汽变强,卷起的 TC4 钛合金粉末量增加。

激光功率为 190 W 时,不同脉冲占空比下 TC4 钛合金试样表面的 SEM 图像如图 6 所示。可以发现,当脉冲占空比为 30% 时,熔道不连续,试样表面存在孔洞。与图 5(a)相比,增大激光功率可以增加 TC4 钛合金粉末的能量吸收,从而增加熔池的宽度和深度,使未熔化的 TC4 钛合金粉末减少,孔洞变少,粗糙度得到了明显改善。当脉冲占空比为 50% 和 60% 时,随着脉冲占空比的增加,曝光时间逐渐增加、曝光间隔逐渐减小,使 TC4 钛合金粉末的熔化量增加、孔洞减少、粗糙度降低。当脉冲占空比为 70% 时,孔洞完全消失,表面无缺陷,粗糙度最低,为 3.6 μm 。当脉冲占空比继续增加到 80% 和 100% 时,随着熔池宽度和深度的增加,熔池持续时间变长,在熔池内高温梯度和马兰戈尼效应^[22-23]的共同作用下,熔池内的对流增大,试样表面飞溅物增多,粗糙度增大。

当脉冲占空比为 100% 时,高功率连续激光持续冲击熔池,熔池在反冲压力和粉末床熔化收缩及表面张力的共同作用下呈向下的凹陷形状,产生一个空腔^[21,24-25]。激光移动加热腔体正面,产生垂直于表面(向上和向后)喷射的金属蒸汽^[22],移动的金

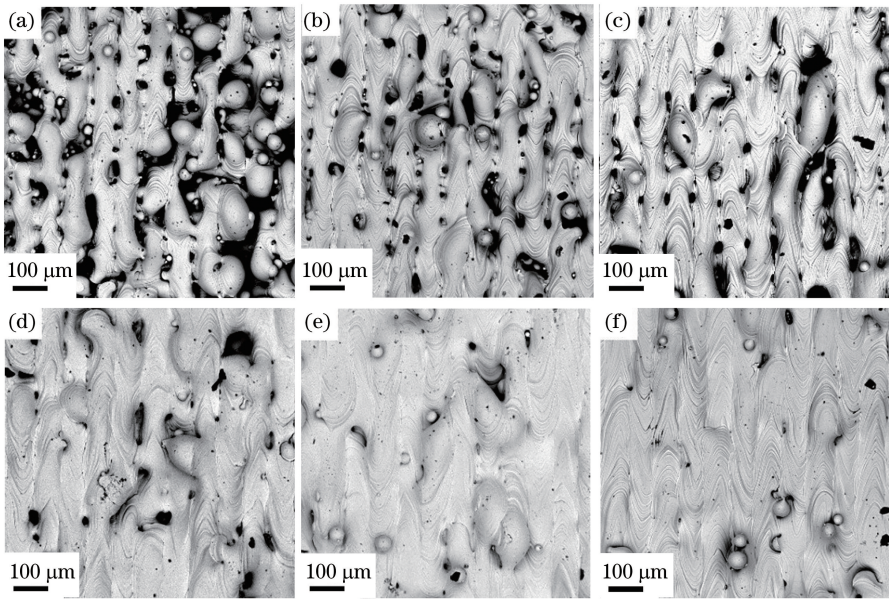


图 5 不同脉冲占空比下 TC4 钛合金试样表面的 SEM 图像(激光功率为 110 W)。(a) 30%;(b) 50%;(c) 60%;
(d) 70%;(e) 80%;(f) 100%

Fig. 5 SEM images of TC4 titanium sample surface under different pulse duty cycles (laser power is 110 W).
(a) 30%; (b) 50%; (c) 60%; (d) 70%; (e) 80%; (f) 100%

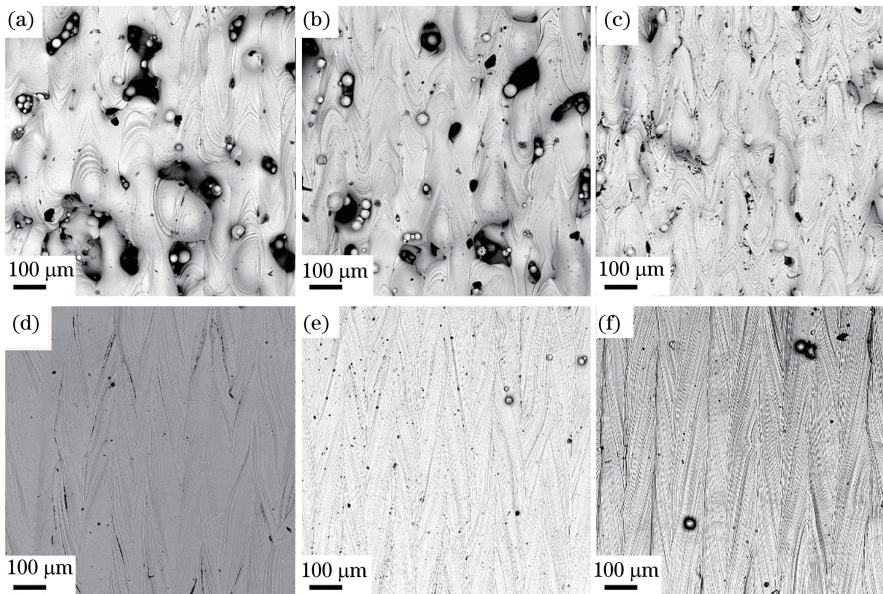


图 6 不同脉冲占空比下 TC4 钛合金试样表面的 SEM 图像(激光功率为 190 W)。(a) 30%;(b) 50%;(c) 60%;
(d) 70%;(e) 80%;(f) 100%

Fig. 6 SEM images of TC4 titanium sample surface under different pulse duty cycles (laser power is 190 W).
(a) 30%; (b) 50%; (c) 60%; (d) 70%; (e) 80%; (f) 100%

属蒸汽从熔道周围卷起 TC4 钛合金粉末,散落到样品表面,降低了样品的表面质量。激光能量通过热能被传导到熔池中,由于熔池内的高温度梯度和表面张力,熔池内出现马兰戈尼对流,导致部分金属液以飞溅物的形式喷出,降低了样品的表面质量。使用脉冲激光时,由于存在曝光间隔,热量没有持续累

积,金属蒸汽变弱,卷起的 TC4 钛合金粉末量减少。同时,熔池变小,熔池持续时间变短,凝固速度变快,而对流变小、飞溅物减少,能有效抑制飞溅现象,改善试样的表面质量。

3.3 微观组织分析

TC4 钛合金的微观组织形貌主要取决于成形

过程中的冷却速率,冷却速率越高,组织越细,材料的强度也会随之提高^[26]。原因是随着冷却速率的增加,晶核形成速度变快、晶粒增多,晶核形成速度的增加超过晶粒生长速度的增加,使晶粒得到细化。由于 SLM 工艺的冷却速率为 $10^3 \sim 10^8$ K/s^[8],成形试样的微观组织在激光功率为 190 W 时的致密度高,且表面粗糙度低,因此在该功率下分析试样的微观组织随脉冲占空比的变化情况。

图 7 为不同脉冲占空比下 TC4 钛合金的微观组织形貌,可以发现,TC4 钛合金表面主要由针状马氏体构成,且晶粒随脉冲占空比的减小逐渐变细小。当脉冲占空比为 30% 时,激光加热 $5 \mu\text{s}$ 后直接

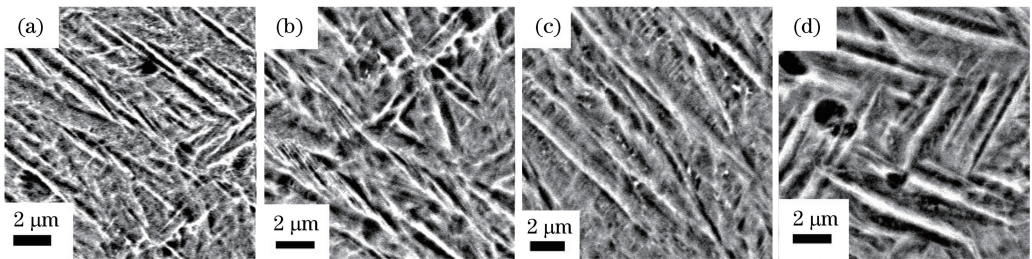


图 7 不同脉冲占空比下 TC4 钛合金试样的 SEM 图像。(a) 30%;(b) 50%;(c) 70%;(d) 100%

Fig. 7 SEM images of TC4 titanium samples under different pulse duty cycles. (a) 30%; (b) 50%; (c) 70%; (d) 100%

3.4 变形量分析

SLM 在成形过程中在容易产生翘曲,从而影响成形精度,造成较大的尺寸、形位公差,甚至导致零件报废。SLM 过程中金属粉末快速熔化凝固时会产生体积收缩,收缩的先后次序和收缩量不同会导致零件内部产生热应力,当收缩量较大且产生的应力未超过材料本身的强度极限时会导致翘曲变形。试样内部的热应力越大,收缩量越大,翘曲越大。

由上述分析可知,当激光功率为 190 W、脉冲占空比为 70% 时,试样的致密度较高且表面的粗糙度较低。因此,选择该参数进行 SLM 成形并与连续

开始冷却凝固,相邻激光加热时间的间隔为 $10 \mu\text{s}$,冷却过程基本不受下一周期激光加热的影响,晶粒宽度为 $(0.50 \pm 0.13) \mu\text{m}$ 。当脉冲占空比增大到 50% 和 70% 时,激光曝光时间变长,曝光间隔变短,熔池受下一周期激光曝光的影响变大,甚至未完全凝固便再次升温,使冷却速率下降、晶粒变粗,此时晶粒的粒度分别为 $(0.65 \pm 0.21) \mu\text{m}$ 和 $(0.85 \pm 0.18) \mu\text{m}$ 。当脉冲占空比为 100% 时,激光连续加热,在热量累积下,熔池持续时间变长,冷却速率进一步降低,此时的晶粒更粗大,晶粒的粒度为 $(1.14 \pm 0.23) \mu\text{m}$ 。这表明使用脉冲激光可以细化试样的晶粒,且脉冲占空比越低晶粒越细。

激光模式的变形量进行对比,结果如图 8 所示。从图 8(a) 可以发现,当脉冲占空比为 70% 时,成形零件没有观察到变形现象。而图 8(b) 中使用连续激光打印时,零件底部两端位置处约翘起 3 mm,变形明显,原因是打印过程中会产生热累积。这表明使用脉冲激光进行 SLM 成形可以降低零件内部热应力,减小零件的变形,提高零件的尺寸精度。降低零件内部的热应力可使模型的支撑更稀疏、更薄,方便去除。此外,脉冲激光还可以减少裂纹,提高成形件的致密度,在此基础上提高功率密度,扩大工艺窗口,可制造出尺寸更大的零件。

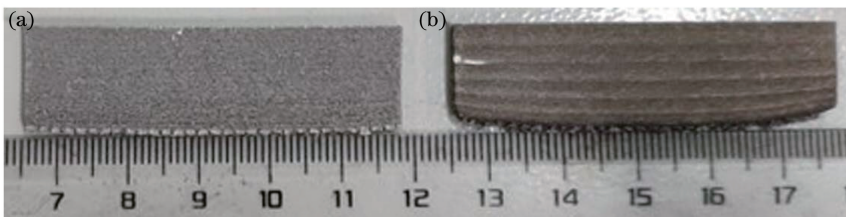


图 8 激光功率为 190 W 时打印零件的变形量。(a) 脉冲占空比为 70% 的激光;(b) 连续激光

Fig. 8 Deformation of the printed part when the laser power is 190 W. (a) Laser with pulse duty cycle is 70%; (b) continuous laser

4 结 论

基于 SLM 技术研究了脉冲激光的功率和脉冲

占空比对 TC4 钛合金试样致密度、表面粗糙度、微观组织和零件形变量等参数的影响。实验结果表明,使用脉冲激光可以得到高致密度的试样,致密度

最大可达到 99.88%；合理调节脉冲激光的脉冲占空比可以减少飞溅，在保证高致密度的同时改善试样的表面质量，使试样的表面粗糙度最低为 3.6 μm ；使用脉冲激光加工时熔池具有更高的冷却速率，从而细化成形试样的内部组织，且脉冲占空比越低，晶粒越细，实验中晶粒粒度由 $(1.14 \pm 0.23) \mu\text{m}$ 减小到 $(0.50 \pm 0.13) \mu\text{m}$ ；使用脉冲激光可以降低打印过程中的热应力，减小零件变形量，实验中可消除约 3 mm 的翘曲，为制造更大尺寸的 TC4 钛合金零件提供参考。

参 考 文 献

- [1] Zhao Y Q. Current situation and development trend of titanium alloys[J]. *Materials China*, 2010, 29(5): 1-8, 24.
赵永庆. 国内外钛合金研究的发展现状及趋势[J]. *中国材料进展*, 2010, 29(5): 1-8, 24.
- [2] Cheng J Q, Shi C. Study progress of microstructure, properties and processing technology of titanium alloys[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(2): 5-8, 13.
程巨强, 史超. 钛合金的组织、性能及加工技术研究进展[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(2): 5-8, 13.
- [3] Wang P, Huang Z H, Qi W J, et al. Application and research progress on titanium alloy printed by 3D technology[J]. *Material Sciences*, 2017, 7(3): 275-282.
王沛, 黄正华, 戚文君, 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.
- [4] Li J F, Wei Z Y, Lu B H. Research progress on technology of selective laser melting of titanium and titanium alloys [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011403.
李俊峰, 魏正英, 卢秉恒. 钛及钛合金激光选区熔化技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011403.
- [5] Lei L M, Hou H P, He Y L, et al. Application and challenges of metal additive manufacturing in civil aviation[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(21): 22-30.
雷力明, 侯慧鹏, 何艳丽, 等. 金属增材制造技术在民用航空领域的应用与挑战[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(21): 22-30.
- [6] Murr L E, Quinones S A, Gaytan S M, et al. Microstructure and mechanical behavior of $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2009, 2(1): 20-32.
- [7] Yadroitsev I, Krakhmalev P, Yadroitsava I. Selective laser melting of $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ alloy for biomedical applications: temperature monitoring and microstructural evolution[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 583: 404-409.
- [8] Yang J J, Han J, Yu H C, et al. Role of molten pool mode on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ alloy[J]. *Materials & Design*, 2016, 110: 558-570.
- [9] Pan L, Zhang C L, Wang L, et al. Crack formation law and mechanism in selective laser melting of 316L stainless steels [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(10): 101401.
潘露, 张成林, 王亮, 等. 基于选区激光熔化的 316L 不锈钢的裂纹形成规律及机理[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(10): 101401.
- [10] Ge Y N, Wu M P, Mao Y Y, et al. Effect of scanning strategy on forming precision of titanium alloy by selective laser melting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091403.
葛亚楠, 武美萍, 冒浴沂, 等. 激光选区熔化扫描策略对钛合金成形精度的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091403.
- [11] Wan L, Wang S Q, Zhang X W, et al. Forming quality of titanium alloys by selective laser melting based on partition scanning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091401.
万乐, 王思琦, 张晓伟, 等. 基于分区扫描的选区激光熔化钛合金的成形质量[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091401.
- [12] Li R D, Liu J H, Shi Y S, et al. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 59(9/10/11/12): 1025-1035.
- [13] Bian P Y, Yin E H. Effect of laser power for metal selective laser melting on morphology of 316L stainless steel molten pool and residual stress [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(1): 011403.
边培莹, 尹恩怀. 选区激光熔化激光功率对 316L 不锈钢熔池形貌及残余应力的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(1): 011403.
- [14] Zhang G H, Guo S Q, Huang S, et al. Relative density of GH4169 superalloy prepared by selective

- laser melting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 031404.
- 张国会, 郭绍庆, 黄帅, 等. 选区激光熔化技术制备 GH4169 合金的致密度研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 031404.
- [15] Hu Y, Zhang J, Tan X J, et al. Influence of peak power and pulse width on the formability of Nd : YAG pulsed laser welding TC4 titanium alloy [J]. *Applied Laser*, 2014, 34(5): 427-432.
- 胡玉, 张健, 谭小军, 等. Nd : YAG 脉冲激光焊接 TC4 时峰值功率、脉宽对焊缝成形的影响[J]. *应用激光*, 2014, 34(5): 427-432.
- [16] Lei Z L, Tian Z, Chen Y B. Laser cleaning technology in industrial fields [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030005.
- 雷正龙, 田泽, 陈彦宾. 工业领域的激光清洗技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030005.
- [17] Demir A G, Colombo P, Previtali B. From pulsed to continuous wave emission in SLM with contemporary fiber laser sources: effect of temporal and spatial pulse overlap in part quality [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(5/6/7/8): 2701-2714.
- [18] Zafari A, Barati M R, Xia K. Controlling martensitic decomposition during selective laser melting to achieve best ductility in high strength Ti_6Al_4V [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 744: 445-455.
- [19] An C, Zhang Y M, Zhang J S, et al. Experimental study on density and pore defects of cobalt-chromium alloy fabricated by selective laser melting [J]. *Applied Laser*, 2018, 38(5): 730-737.
- 安超, 张远明, 张金松, 等. 选区激光熔化成型钴铬合金致密度与孔隙缺陷实验研究 [J]. *应用激光*, 2018, 38(5): 730-737.
- [20] An C, Zhang Y M, Zhang J S, et al. Research on influences of process parameters on density formation and pore defect mechanism of cobalt-chromium alloy formed by selective laser melting [J]. *Laser Journal*, 2018, 39(7): 68-71.
- 安超, 张远明, 张金松, 等. 工艺参数对选区激光熔化成型件致密度影响规律和孔隙缺陷形成机理研究 [J]. *激光杂志*, 2018, 39(7): 68-71.
- [21] Dai D H, Gu D D. Tailoring surface quality through mass and momentum transfer modeling using a volume of fluid method in selective laser melting of TiC/AlSi₁₀Mg powder [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 88: 95-107.
- [22] Khairallah S A, Anderson A T, Rubenchik A, et al. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones [J]. *Acta Materialia*, 2016, 108: 36-45.
- [23] Yuan P P, Gu D D, Dai D H. Particulate migration behavior and its mechanism during selective laser melting of TiC reinforced Al matrix nanocomposites [J]. *Materials & Design*, 2015, 82: 46-55.
- [24] Khorasani A M, Gibson I, Ghaderi A R. Rheological characterization of process parameters influence on surface quality of Ti_6Al_4V parts manufactured by selective laser melting [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97 (9/10/11/12): 3761-3775.
- [25] Xiang Y, Zhang S Z, Li J F, et al. Numerical simulation and experimental verification for selective laser single track melting forming of Ti_6Al_4V [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(11): 2102-2109, 2117.
- 向羽, 张树哲, 李俊峰, 等. Ti_6Al_4V 的激光选区熔化单道成形数值模拟与实验验证 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2019, 53(11): 2102-2109, 2117.
- [26] Jiang X J, Chen G Y, Men X L, et al. Grain refinement and excellent mechanical properties of a Ti-based alloy via laser melting and subsequent low temperature annealing [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 737: 182-187.