

# 激光选区熔化成形钛合金内部缺陷及其演化规律研究

赵春玲<sup>1</sup>, 李维<sup>1</sup>, 王强<sup>1</sup>, 王玉健<sup>2</sup>, 赵宇<sup>1</sup>, 邸士雄<sup>1</sup>, 任德春<sup>2</sup>, 吉海宾<sup>2</sup>

(1. 中国航发 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

(2. 中国科学院 金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:** 激光选区熔化(selective laser melting, SLM)成形技术可实现形状复杂、尺寸精度高、力学性能优异零部件的直接成形, 但成形工艺参数选择不当, 则会在产品中引入缺陷, 针对 SLM 成形钛合金内部缺陷的问题, 研究了激光功率和扫描速度 2 个主要成形工艺参数对钛合金内部缺陷类型、尺寸及数量的影响, 探索了缺陷的演化规律。结果表明, SLM 成形钛合金内部主要有不规则形状、规则球形 2 种形态的缺陷。低激光功率( $\leq 130$  W)、高扫描速度( $\geq 900$  mm/s)区域主要为不规则形状缺陷, 能量不足是导致形成该类型缺陷的主要原因; 高激光功率( $\geq 190$  W)、低扫描速度( $\leq 600$  mm/s)区域主要为规则球形缺陷, 能量过高导致合金元素气化是产生这类缺陷的主要原因。随着能量密度的增加, 根据缺陷的演化规律绘制了 SLM 成形钛合金加工图, 其中缺陷的演化呈现 3 个阶段, 即不规则形状缺陷尺度逐渐降低区, 微尺度不规则缺陷向微尺度规则球形缺陷过渡区和规则球形缺陷逐渐长大区。

**关键词:** 激光选区熔化; 缺陷; 激光功率; 扫描速度; 激光能量密度

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)08-2841-09

激光选区熔化(selective laser melting, SLM)成形技术基于“离散+堆积”的成形理念, 应用激光熔化金属粉末, 结合三维实体数字模型自下而上逐层制备, 最终实现高性能、复杂结构金属零件的成形<sup>[1-3]</sup>, 在航空航天、武器装备、汽车、模具、生物医学等领域具有广泛的应用前景<sup>[4-8]</sup>。然而由于 SLM 成形过程复杂, 涉及到材料的冶金、物理、化学和热力耦合等学科, 其逐点、逐线、逐面的成形特点导致合金内部不可避免的存在缺陷, 部分缺陷将显著降低成形件的力学和服役性能, 甚至造成零件的报废, 如何避免缺陷的形成是该技术面临的关键科学问题, 也成为国内外研究的热点<sup>[9-21]</sup>。

目前, 研究人员已经对 SLM 制备样品内部缺陷的形成和对性能的影响展开了部分相关研究。Vandenbroucke<sup>[14]</sup>等人通过改变工艺参数中的扫描速度和扫描间距, 对采用不同能量密度成形的 TC4 样品内部缺陷进行了统计和分析, 研究结果表明在一定的条件下随着能量密度的升高, 成形件内部缺陷减少。Kasperovich<sup>[15]</sup>等人通过选择 TC4 的激光工艺参数优化, 可以显著降样品中的低孔隙率, 最低孔隙率为 0.05%, 在能量密度过大时候, 出现由匙孔效应引起的

圆形孔洞; 当能量密度不足时出现由金属粉末未完全熔化导致的细长且垂直于成型方向的缺陷。Benedetti<sup>[16]</sup>等人研究了一定工艺参数下, SLM 成形的 TC4 样品的高周疲劳强度仅为机加工钛合金抗拉强度的 20%, 并得知样品的疲劳强度与样品中最大缺陷尺寸有关。贺瑞军<sup>[17]</sup>等人研究了激光沉积 Ti-6Al-2Zr-Mo-V 合金的高周疲劳性能, 发现高周疲劳裂纹优先在气孔处形核萌生, 气孔的存在降低了疲劳寿命和强度, 并且疲劳源区裂纹通过解理平面和撕裂形貌扩展。DebRoy<sup>[18]</sup>等人对工程合金增材制备过程中合金元素的挥发, 孔洞、未融合和裂纹等缺陷的形成过程进行了评述。Wei<sup>[19]</sup>等人根据增材制备过程中模型预测对实际打印过程的指导作用, 对迁移模型在缺陷形成、残余应力等方面的应用进行了重点评述。Zhao<sup>[20]</sup>等人利用高速 X 射线成像, 观察到在高功率、低扫描速度的激光熔化条件下小孔缺陷形成过程的细节, 得到小孔是由小孔尖端的严重不稳定性引起的, 且发现小孔孔隙率在功率、速度空间的边界是尖锐而光滑的, 在光板和粉床之间变化不大。Lu<sup>[21]</sup>等人研究了采用 LSP 和 SLM 相结合的方式制备 TC4 钛合金, 并对平行和垂直于成形方向样品的相组成、残

收稿日期: 2020-12-31

基金项目: 中国航发集团产学研合作项目(HFZL2019CX019); 科技部重点研发计划项目(2016YFC1100502)

作者简介: 赵春玲, 女, 1982 年生, 硕士, 高级工程师, 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002, 电话: 0731-28593201, E-mail: capi@608.163.net

余应力分布、力学性能和显微组织进行了研究,发现混合增材制备技术可以实现实际应用合金的高效、高质量集成制备。

SLM 成形钛合金内部缺陷及其对性能影响规律研究尚处于起步阶段,未建立缺陷类别与成形工艺之间的关系,缺乏缺陷形态的演化规律。因此将系统研究激光功率、扫描速度 2 个主要工艺参数对成形钛合金内部缺陷的作用规律,为缺陷的预测、控制及成形工艺优化提供技术支撑。

## 1 实验

实验用钛合金粉末为进口 TC4 粉末,粉末粒度范围 15~45 μm,粉末为球形粉末,球形度高达 90%以上,如图 1 所示,粉末成分见表 1。

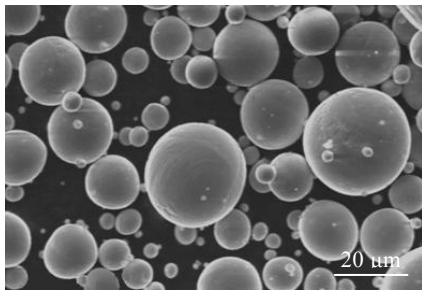


图 1 SLM 成形用 TC4 钛合金粉末形貌

Fig.1 SEM morphology of TC4 titanium powders used for SLM

本实验用的 SLM 成形设备为德国 Concept Laser 公司的 M2,采用该设备制备不同工艺参数的 TC4 钛合金试样。实验选取激光功率、扫描速度这 2 个主要工艺参数设计了 30 种成形工艺方案,激光功率设置范围在 100~250 W 之间,扫描速度范围在 300~1500 mm/s 之间(激光功率和扫描速度的组合包含了所研究的规则球形缺陷、不规则形状缺陷以及可以制备致密度良好、性能优异 TC4 钛合金的参数范围),具体工艺参数见表 2。

采用电火花线切割的方式将成形样品从成形基板上取下后,对不同打印参数样品的中心区域再次进行线切割得到样品横截面(垂直于打印方向)和纵截面(平行于打印方向)试样,试样经机械磨抛后,采用 Korll 试剂进行腐蚀。采用型号为 Axiover 200MAT 的光学显微镜(OM)、型号为 S-3400N 和 Mira3 Tescan 的扫描电子显微镜(SEM)观察粉末形貌和样品缺陷形貌特征。为方便对样品的缺陷尺寸、数量进行统计,调整 OM 显微组织照片的对比度,将呈现黑色的缺陷区域部分留下,无缺陷区域都调整为白色,照片处理前后的对比图实例如图 2 所示,从图中可以看出,调整前后缺陷数量及尺寸均一致,处理后的图片可以用来进行相关缺陷的统计。利用 Image-Pro Plus 软件对处理后的图片进行缺陷的数量和面积统计,获得缺陷尺寸、数量和工艺参数之间的关系。

表 1 TC4 钛合金粉末化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium powders (ω/%)

Ti	Fe	C	N	H	O	Al	V
Bal.	≤0.30	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.10	5.5~6.8	3.5~4.5

表 2 SLM 成形 TC4 钛合金具体工艺参数设计

Table 2 SLM parameters for fabrication of TC4 titanium alloy

Sample	Laser power/W	Scanning speed/mm·s <sup>-1</sup>	Sample	Laser power/W	Scanning speed/mm·s <sup>-1</sup>
1	100	300	16	190	300
2	100	600	17	190	600
3	100	900	18	190	900
4	100	1200	19	190	1200
5	100	1500	20	190	1500
6	130	200	21	220	300
7	130	600	22	220	600
8	130	900	23	220	900
9	130	1200	24	220	1200
10	130	1500	25	220	1500
11	160	300	26	250	300
12	160	600	27	250	600
13	160	900	28	250	900
14	160	1200	29	250	1200
15	160	1500	30	250	1500

## 2 实验结果

### 2.1 SLM 成形钛合金样品

按照表 2 所示参数使用 SLM 制备的 TC4 钛合金试样如图 3 所示。可以看出, 采用设计的 30 种不同工艺参数均可实现合金整体成形(图 3a), 成形合金表面无明显裂纹等缺陷的存在。同时, 由于各工艺参数之间所使用的激光功率和扫描速度不同, 导致成形合金表面状态如粗糙度等有所差别(图 3b)。

### 2.2 SLM 成形钛合金内部缺陷分布

采用图 2 的处理方式对 SLM 所制备 TC4 钛合金横(垂直于打印方向)纵(沿打印方向)截面 OM 组织图片进行处理后, 将 30 个不同样品截面的缺陷图按照扫描速度、激光功率由低到高的顺序进行排布, 得到缺陷与成形工艺参数的分布规律图。图 4 为 SLM 成形 TC4 钛合金横截面的缺陷分布图, 图 5 为 SLM 成形 TC4 钛合金纵截面的缺陷分布图。从图 4 和图 5 中可以看出, 在 SLM 成形 TC4 钛合金缺陷分布图的左下方与右上方处均存在较多的缺陷, 在分布图的左下方为低功率、高扫描速度区域, 该区域缺陷主要集中在激光功率为 100 W, 扫描速度为 900、1200、1500 mm/s 的范围。在分布图的右上方为高功率、低扫描速度区

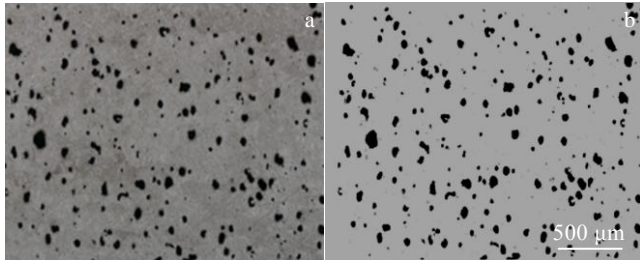


图 2 缺陷统计分析处理前后对比图

Fig.2 Contrast pictures used for defects analysis before (a) and after processing (b)

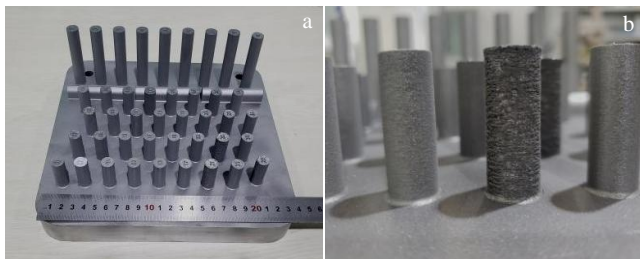


图 3 SLM 不同工艺参数成形 TC4 钛合金试样

Fig.3 TC4 titanium alloy samples fabricated by SLM under different parameters (a) and local magnification (b)

域, 该区域缺陷主要集中在扫描速度为 300 mm/s, 激光功率为 190、220、250 W 的范围。SLM 成形 TC4 钛合金横截面与纵截面缺陷分布与工艺参数的映射关系是一致的, 因此从图 4 和图 5 中可见成形合金内部缺陷的尺寸、数量分布与成形工艺参数密切相关。

### 2.3 SLM 成形钛合金内部缺陷特征

通过对 SLM 成形 TC4 钛合金横纵截面缺陷的分布规律可以看出, 成形钛合金内部的缺陷主要呈现 2 种不同的形态, 第 1 种为不规则形状的孔洞缺陷, 该类型缺陷主要分布在图 4 和图 5 中的左下角低功率、高扫描速度区域。图 6a 和图 6b 是 SLM 成形 TC4 钛合金工艺参数激光功率 100 W、扫描速度 900 mm/s 的 3 号样品不同位置 OM 缺陷分布图, 从图中可以看出该类型缺陷呈现连续或者半连续条状特征, 同时在缺陷内部存在半熔融或者未熔融的合金粉末, 结合图 4 和图 5 所示可得随着激光功率的提高或者扫描速度的降低, 该类型缺陷的尺寸和数量逐渐减小。

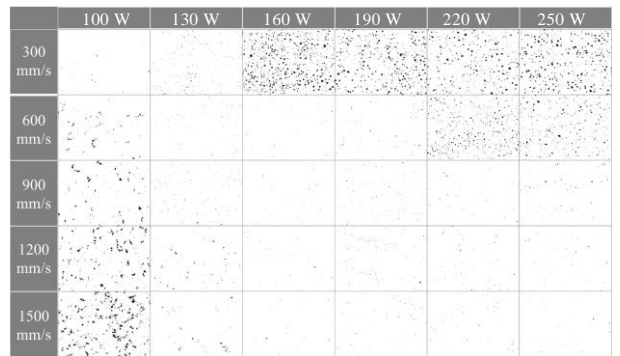


图 4 SLM 成形 TC4 钛合金试样横截面缺陷分布规律图

Fig.4 Defects distribution pattern of cross section for TC4 titanium alloy fabricated by SLM under different parameters

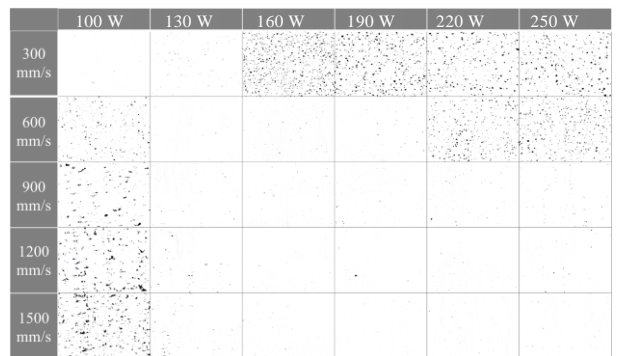


图 5 SLM 成形 TC4 钛合金试样纵截面缺陷分布规律图

Fig.5 Defects distribution pattern of longitudinal section for TC4 titanium alloy fabricated by SLM under different parameters

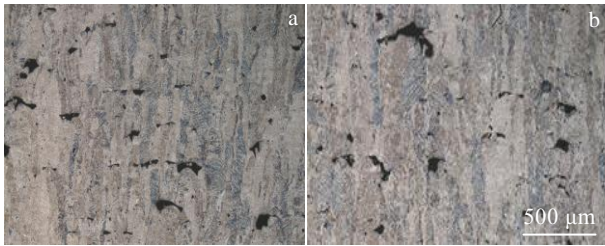


图 6 SLM 成形 3 号样品不同位置不规则形状孔洞缺陷  
Fig.6 Irregular shape defects distribution of different positions for sample 3 fabricated by SLM under laser power of 100 W and scanning speed of 900 mm/s

另一种为规则球形的孔洞缺陷，该类型缺陷主要分布在图 4 和图 5 中的右上角区域，该区域激光功率较高、扫描速度较低。图 7a 和图 7b 是 SLM 成形 TC4 钛合金工艺参数激光功率 190 W、扫描速度 300 mm/s 的 16 号样品不同位置 OM 缺陷分布图，该类型缺陷均呈现规则的球状，结合图 4 和图 5 可得随着激光功率的降低或者扫描速度的增加，缺陷尺寸和数量也呈现逐渐减小的趋势。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 SLM 成形钛合金内部缺陷类型及形成机理

##### 3.1.1 不规则形状孔洞缺陷

由图 4 和图 5 的分析结果可知，不规则形状缺陷主要出现在低激光功率、高扫描速度区域，而不规则缺陷内部存在一定数量未熔化的钛合金粉末(图 6)，判定该种缺陷是由于激光光束功率不足引起的。

在较低的激光功率和较高的扫描速度下，单位体积内能量密度较低导致扫描路径内的粉末不能完全熔化，同时在激光作用下熔化的粉末会迅速聚集，并吸附周围的粉末形成一个新的球形状态，称为球化现象<sup>[13, 22]</sup>，

该现象是造成此类缺陷的重要因素。如图 8a 和图 8b 所示，当能量不足的激光束第 1 次扫描粉末层后，部分熔化的粉末吸附周围粉末发生球化现象，彼此相邻的球化区之间形成粉末无填充的真空带，继续铺粉过程中粉末无填充的真空带会被粉末填平导致该区域粉末厚度增加(图 8c)，激光扫描时激光能量不足以熔化该区域的粉末(图 8d)，因此导致该区域形成不规则形状未熔合缺陷，未熔化粉末被包裹在该缺陷内部。

##### 3.1.2 规则球形孔洞缺陷

与不规则形状类的缺陷相对，从缺陷的分布图观察来看(图 4 和图 5)，规则球形的孔洞缺陷主要出现在高激光功率、低扫描速度区域，该区域缺陷内部未发现未熔合的粉末(图 7)，可以推断该种类型的缺陷是由于激光能量过高导致的。

较高功率激光束照射金属表面时会出现金属气化现象，即在金属表面产生大量的金属蒸气，与之相似的是在 SLM 成形过程中也存在激光对金属熔体的照射现象。如图 9a 所示，SLM 成形过程中，在激光作用下粉末会发生熔化形成熔池，当激光能量较高时，熔池内部会产生金属气化现象，导致熔池内部产生大量的金属蒸气，在熔池凝固之前，金属蒸汽在浮力作用下会向熔池顶部移动，然而由于 SLM 成形过程中熔

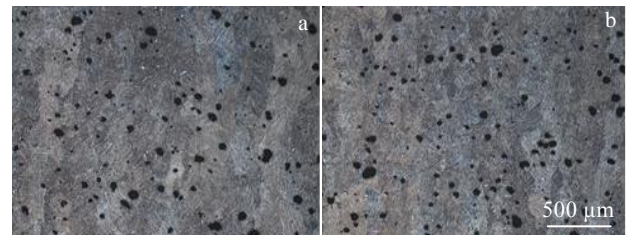


图 7 SLM 成形 16 号样品不同位置规则球形孔洞缺陷  
Fig.7 Spherical shape defects distribution of different positions for sample 16 fabricated by SLM with laser power of 190 W and scanning speed of 300 mm/s

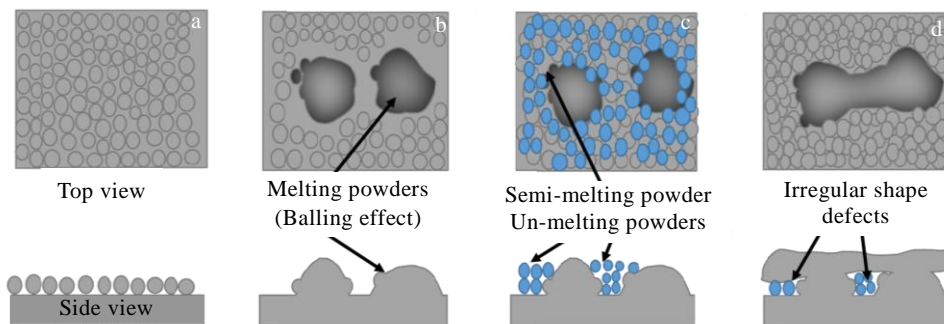


图 8 SLM 成形 TC4 钛合金不规则形状缺陷形成示意图

Fig.8 Schematic diagram for irregular shape defects formation in TC4 titanium alloy fabricated by SLM of original station for first layer of powders (a), melted for first layer of powders (b), second layer of powders (c) and melted for second layer of powders (d)

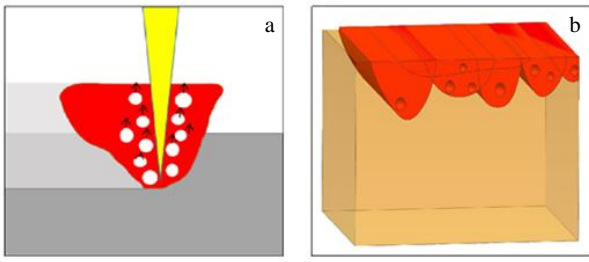


图 9 SLM 成形 TC4 钛合金规则球形孔洞形成过程示意图  
Fig.9 Schematic diagram for spherical shape defects formation in TC4 titanium alloy fabricated by SLM of laser scanning and melting (a) and solidification of molten pool (b)

池是快速非平衡凝固，冷却速率可达  $10^7$  K/s，如图 9b 所示金属蒸气在熔池凝固前无法全部逃逸，而这些蒸气会以球形气泡的形式存在于熔池中<sup>[14, 15, 23]</sup>，导致在成形合金内部形成球形的孔洞缺陷。

### 3.2 扫描速度对成形合金内部缺陷的影响

扫描速度是指 SLM 成形过程中激光光斑单位时间内扫描的距离，扫描速度高，激光光斑对单个熔池的曝光时间短，因此扫描速度会影响合金的成形质量。激光功率在 100、130、160、190、220 和 250 W 时，扫描速度对缺陷数量和占比的影响规律如图 10 所示。

当激光功率为 100 W 时(图 10a)，随着扫描速度的升高，合金内部缺陷数量与缺陷比例呈现上升趋势，从图 4 和图 5 可以看出低功率区合金内部的缺陷均为不规则形状缺陷，扫描速度增加导致单个熔池激光作用时间减少，因而激光作用在熔池上能量越小，粉末熔化不充分度越高，导致形成缺陷尺寸和数量越多<sup>[15, 23]</sup>。激光功率为 130 W 时(图 10b)，当扫描速度在 300~1500 mm/s 内变化时，合金中的缺陷数量与缺陷比例变化趋势平缓。

激光功率达到 160~250 W 范围时(图 10c~10f)，随扫描速度增加，缺陷截面占比与数量呈现降低趋势，这与低功率时(100 W)截然相反，扫描速度在 300~900 mm/s 范围内，这种降低趋势较显著。扫描速度超过 900 mm/s 时，缺陷的变化逐渐平缓。由于当激光功率超过 160 W 时，在低扫描速度(300~600 mm/s)区域，合金内部的缺陷主要为规则球形，这是由于能量较高时熔池内部合金元素的气化沸腾现象导致的，而随着扫描速度继续增大，激光作用在单个熔池的能量降低，气化现象逐渐弱化，因此合金内部缺陷数量及尺度逐渐减小<sup>[15, 22, 23]</sup>。

### 3.3 激光功率对成形合金内部缺陷的影响

激光功率代表光束能量大小，决定了激光光束熔化粉末能力，当激光功率比较低的时候，激光光束照射不能完全熔化粉末，而当激光能量较大的时候，

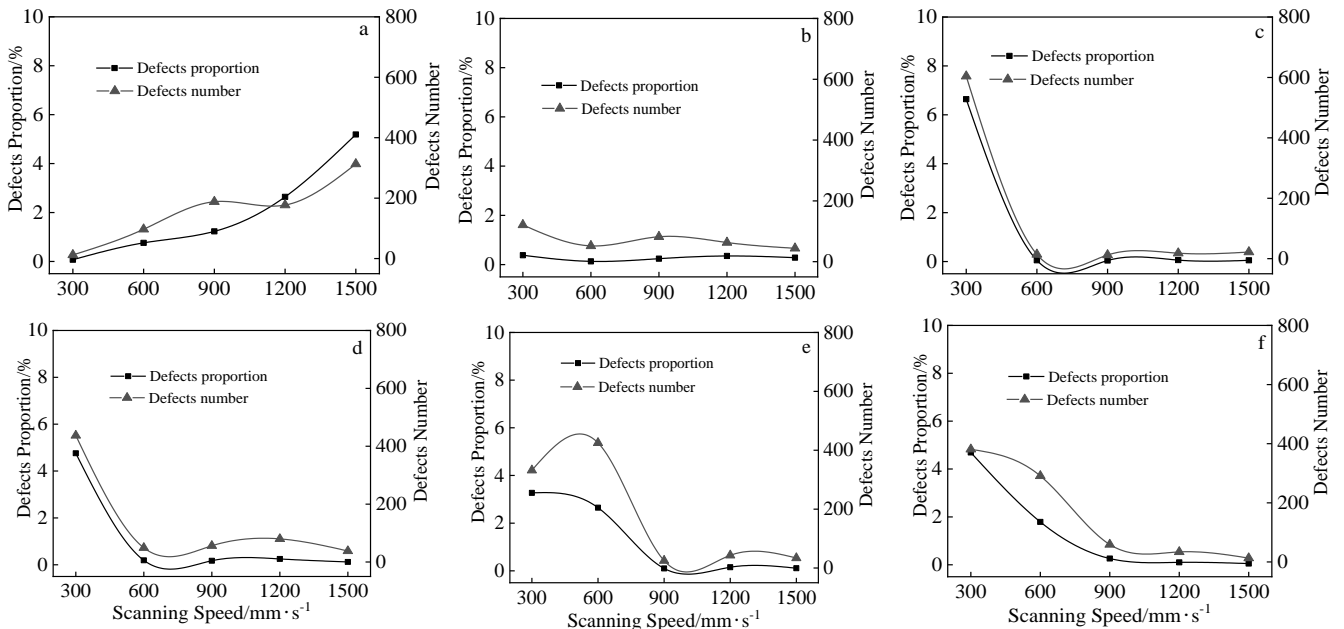


图 10 扫描速度对缺陷数量及占比的影响

Fig.10 Influence of scanning speed on the number and proportion of defects at laser power of 100 W (a), 130 W (b), 160 W (c), 190 W (d), 220 W (e), and 250 W (f)

激光不仅能穿透粉末，还能深入到已凝固区域，对已成形成区域产生重熔效果，因此激光功率也是影响成形合金质量的关键参数。当扫描速度分别为 300、600、900、1200、1500 mm/s 时，激光功率对成形合金内部缺陷数量与缺陷占比影响规律如图 11 所示。从图 4 和图 5 缺陷与成形工艺参数关系可以看出，当扫描速度一定时，随激光功率增加，缺陷由不规则形状向规则球形逐渐转变，缺陷演化过程将在下节论述。当扫描速度为 300 mm/s (图 11a)、600 mm/s (图 11b) 时，成形合金内部缺陷数量和缺陷占比随着激光功率增大呈现“降-升-降”变化趋势，当功率在 100~130 W 范围内时，合金内部的缺陷主要为不规则形状的缺陷，功率的增加会提高粉末的熔化率，降低熔池球形化现象的发生，因此未熔合缺陷的尺寸与数量也逐渐减小。随着激光功率增加进入规则球形缺陷区后，在激光作用下球形缺陷数量会逐渐增多、体积逐渐增大导致缺陷数量和占比逐渐升高，而随激光功率持续增加，球形缺陷会发生长大趋势，继续增加会进入不规则缺陷向规则球形缺陷的转化区，该区域缺陷尺度和数量会显著减小<sup>[18, 19, 22-24]</sup>。当扫描速度 900 mm/s (图 11c)、1200 mm/s (图 11d)、1500 mm/s (图 11e) 时，随着激光功率的增加，缺陷的数量和占比均呈现降低趋势，当激光功率超过 160 W 后，缺陷变化基本平缓。由图 4 和图 5 可以看出，当扫描速度在

900~1500 mm/s 范围内，随激光功率增加，缺陷逐渐由未熔合不规则缺陷逐渐向小尺度球形缺陷转变，因此缺陷尺度和数量均减小。

### 3.4 SLM 成形合金内部缺陷演化规律及加工图

#### 3.4.1 合金内部缺陷演化规律

能量密度代表单位体积内吸收的能量，通过能量密度可以将激光功率、扫描速度结合成一个变量进行分析，按照公式(1)<sup>[22]</sup>分别计算不同工艺的能量密度(表 3)，通过能量密度揭示 SLM 成形钛合金内部缺陷的演化规律。

$$\rho_E = \frac{P}{vh\delta} \tag{1}$$

式中： $\rho_E$ —样品的能量密度， $J/mm^3$ ； $P$ —激光功率， $W$ ； $v$ —扫描速度， $mm/s$ ； $h$ —铺粉厚度， $mm$ ； $\delta$ —扫描间距， $mm$ 。本实验中的  $h=0.025\text{ mm}$ ， $\delta=0.1\text{ mm}$  为固定值。

从表 3 中不同工艺参数的能量密度可以看出，低激光功率、高扫描速度区的能量密度也相对较低，高激光功率、低扫描速度区的能量密度也相对较高，表 3 中能量密度的数值与图 4 和图 5 中缺陷的图片是对应的。图 12 是能量密度与缺陷形态变化的对应关系图，从图 12 中可以看出，随着能量密度的增加，合金内部的缺陷从不规则形状向规则球形逐渐演化，其演化分为以下

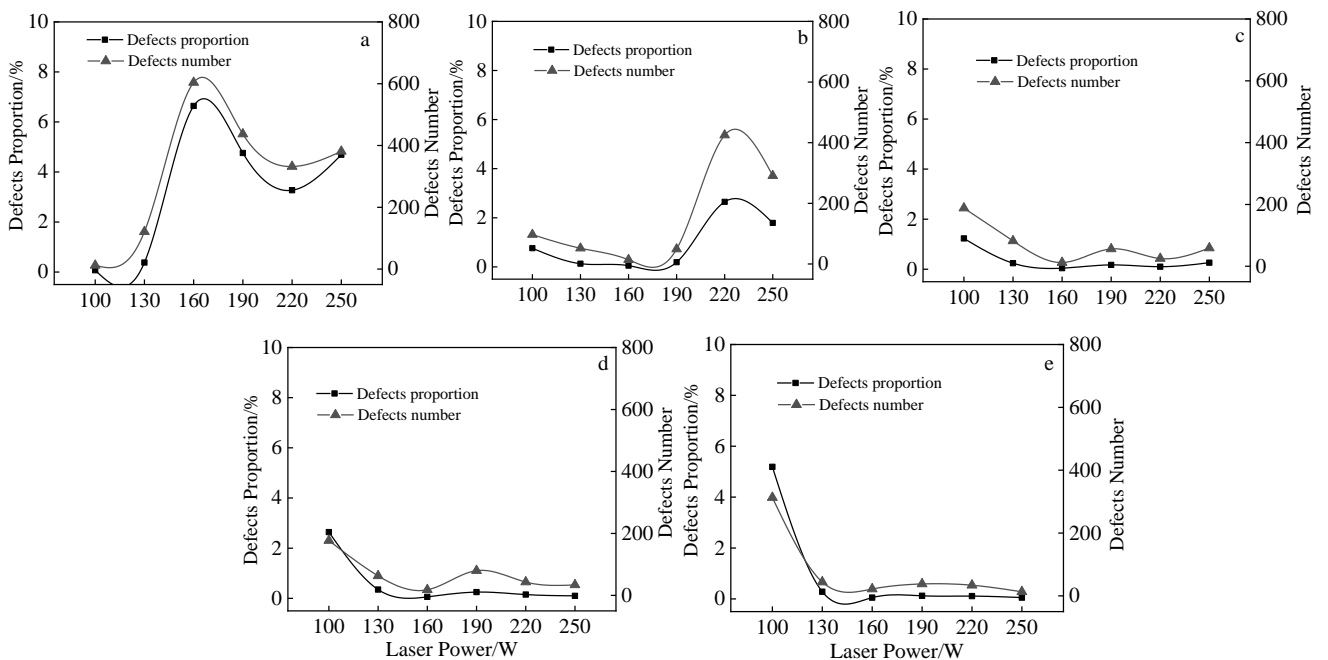


图 11 激光功率对缺陷数量及占比的影响

Fig.11 Influence of laser power on the number and proportion of defects at scanning speed of 300 mm/s (a), 600 mm/s (b), 900 mm/s (c), 1200 mm/s (d) and 1500 mm/s (e)

表 3 SLM 成形 TC4 钛合金不同工艺参数对应激光能量密度

Table 3 Laser energy density for TC4 titanium alloy fabricated under different parameters (J/mm<sup>3</sup>)

Scanning speed/mm s <sup>-1</sup>	Laser power/W					
	100	130	160	190	220	250
300	133	173	213	253	293	333
600	67	87	107	127	147	167
900	44	58	71	84	98	111
1200	33	43	53	63	73	83
1500	27	35	42	51	59	67

几个阶段：(1) 在低能量密度区域(图 12a、12b 和 12c)，在该区域合金内部的缺陷为不规则形状的缺陷，能量密度的增加会提高粉末的熔化率，降低熔池凝固后球化现象的发生，因此随着能量密度的提高未熔合缺陷的尺寸逐渐减小(缺陷长度由 600 μm 减小到 100~200 μm)，同样缺陷数量和缺陷占比会呈现降低的趋势(图 10 和图 11)；(2) 中等能量密度区域(图 12d 和 12e)，该区域为不规则形状缺陷向规则圆形缺陷过渡区，不规则形状缺陷数、规则球形缺陷的尺寸均显著减小，不规则形状缺陷尺寸可减小到 50 μm 以下，转化成的球形缺陷尺度小于 20 μm，该区域的能量密度在 58~98 J/mm<sup>3</sup> 范围内，与缺陷尺度和数量会呈现一个平台区(图 10 和图 11)；(3) 高能量密度区域(图 12f、12g 和 12h)，该区域缺陷完全转化成规则球形，随能量密度的增大，球形缺陷的数量减少，但是单个缺陷的尺寸显著增大，当能量密度从 213 J/mm<sup>3</sup> 提高到 333 J/mm<sup>3</sup>，对应的缺陷尺寸从 30 μm 左右增大到 200 μm 左右。

由此可见随着能量密度的增加，缺陷的演化规律为：首先由大尺寸不规则形状缺陷转化为微尺度不规则形状缺陷，再转化为微尺度规则球形缺陷，最后逐渐转变成大尺寸规则球形缺陷。

3.4.2 SLM 成形加工图

SLM 成形钛合金内部缺陷的控制是关系到构件性能稳定的前提，而选择合理的成形工艺是实现缺陷主动控制的有效手段，在本实验对成形合金内部缺陷形态及产生机理、工艺参数对缺陷影响规律、缺陷演化规律的研究基础上，首次绘制了 SLM 成形钛合金工艺加工图(图 13 所示)，不规则形状缺陷区位于加工图的左上部(激光功率 ≤ 130 W、扫描速度 ≥ 900 mm/s)，规则球形缺陷位于加工图的右下部(激光功率 ≥ 190 W、扫描速度 ≤ 600 mm/s)，中间区域为缺陷过渡区，可以根据零部件的性能要求、应用环境、成形效率等要求在该区域选区合适的工艺参数进行零部件制造。

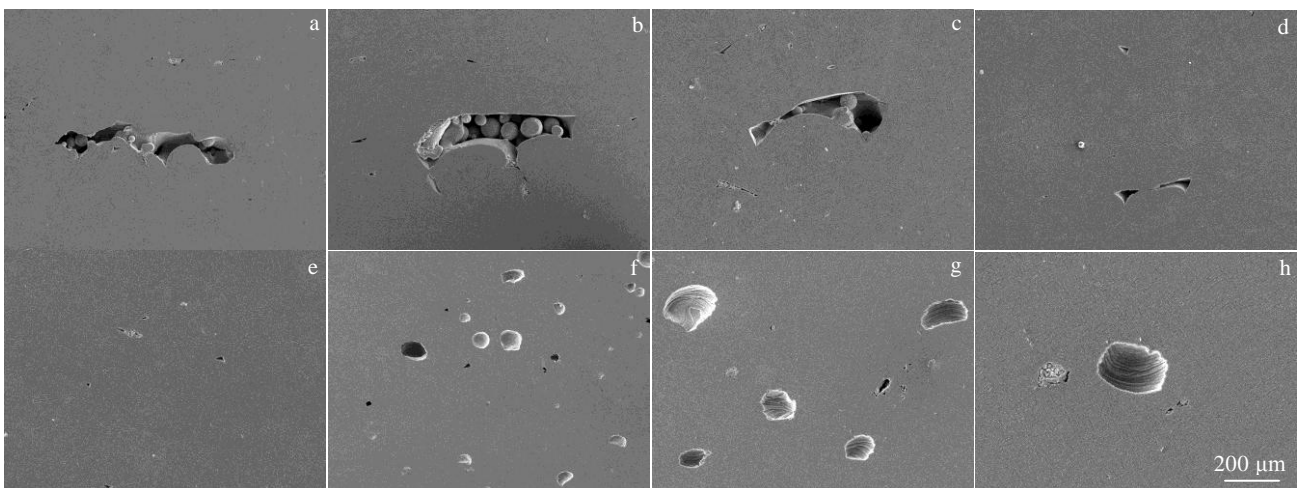


图 12 不同能量密度的缺陷演变规律图

Fig.12 Diagram for defects evolution with laser energy density of 27 J/mm<sup>3</sup> (a), 33 J/mm<sup>3</sup> (b), 44 J/mm<sup>3</sup> (c), 58 J/mm<sup>3</sup> (d), 98 J/mm<sup>3</sup> (e), 213 J/mm<sup>3</sup> (f), 253 J/mm<sup>3</sup> (g), and 333 J/mm<sup>3</sup> (h)

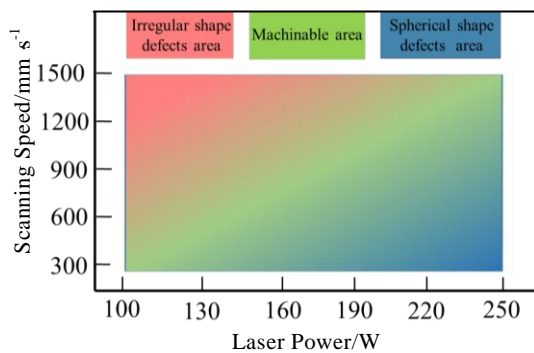


图 13 SLM 成形钛合金加工图

Fig.13 Process drawing for titanium alloy fabricated by SLM

## 4 结 论

1) 采用不同工艺参数成形的钛合金样品中主要存在 2 种类型的缺陷：一种是因为激光能量不足产生的不规则形状缺陷；另一种是由于激光能量过高产生的规则球形状缺陷。

2) SLM 成形钛合金随着能量密度的增加，缺陷的演化呈现 3 个阶段，即不规则形状缺陷尺度逐渐降低区、微尺度不规则缺陷向微尺度规则球形缺陷过渡区和规则球形缺陷逐渐长大阶段。

3) 首次绘制了 SLM 成形钛合金工艺加工图，可以根据实际要求参照该加工图选取合理的工艺进行零件生产。

### 参考文献 References

- [1] Lu Yichen(卢毅晨), Sun Zhonggang(孙中刚), Guo Yanhua(郭艳华) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(6): 2067
- [2] Xu Yangli(徐仰立), Zhang Dongyun(张冬云), Hu Songtao(胡松涛). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(5): 1736
- [3] Xiong Zhiwei, Li Zhonghan, Sun Zhen *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2019, 35: 2238
- [4] Ren Dechun, Li Shujun, Wang Hao *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2019, 35(2): 285
- [5] Zhang Fengying, Hu Tengting, Tan Hua *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(2): 357
- [6] Xue Lei(徐蕾), Chen Jing(陈静), Lin Xin(林鑫) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(6): 989
- [7] Zhang Sheng(张升), Gui Ruizhi(桂睿智), Wei Qingsong(魏青松) *et al. Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2013, 49(23): 21
- [8] Yang Guang(杨光), Wang Wendong(王文东), Qin Lanyun(钦兰云) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(12): 3295
- [9] Gong Haijun, Rafik Halid, Gu Hengfeng *et al. Materials and Design*[J], 2015, 86: 545
- [10] Liu Lujing, Li Shujun, Wang Haoliang *et al. Acta Materialia* [J], 2016, 113: 56
- [11] Ren Dechun(任德春), Zhang Huibo(张慧博), Zhao Xiaodong(赵晓东) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2020, 56(8): 1103
- [12] Vrancken Bey, Thijs Lore, Kruth Jean-Pierre *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2012, 541: 177
- [13] Bertoli Umberto Scipioni, Guss Gabe, Wu Sheldon *et al. Materials & Design*[J], 2017: 264: 127
- [14] Vandenbroucke Ben, Kruth Jean-Pierre. *Rapid Prototyping Journal*[J], 2013, 13(4): 196
- [15] Kasperovich Galina, Haubrich Jan, Gussone Joachim *et al. Materials & Design*[J], 2016, 105: 160
- [16] Benedetti M, Fontanari V, Bandini M *et al. International Journal of Fatigue*[J], 2018, 107: 96
- [17] He Ruijun(贺瑞军), Wang Huaming(王华明). *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报)[J], 2010, 31(7): 1488
- [18] DebRoy T, Wei H L, Zuback J S *et al. Progress in Materials Science*[J], 2018, 92: 112
- [19] Wei H L, Mukherjee T, Zhang W *et al. Progress in Materials Science*[J], 2021, 116: 100 703
- [20] Zhao Cang, Parab Niranjana D, Li Xuxiao *et al. Science*[J], 2020, 370(6520): 1080
- [21] Lu Jinzhong, Lu Haifei, Xu Xiang *et al. International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2020, 148: 103 475
- [22] Attar H, Calin M, Zhang L C *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2014, 593: 170
- [23] Qiu Chunlei, Panwisawas Chinnapat, Ward Mark *et al. Acta Materialia*[J], 2015, 96: 72
- [24] Song Changhui, Yang Yongqiang, Wang Yunda *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [J], 2014, 75(1-4): 445



## Investigation on Relationship between Defects and Parameters for Titanium Alloy Fabricated by Selective Laser Melting

Zhao Chunling<sup>1</sup>, Li Wei<sup>1</sup>, Wang Qiang<sup>1</sup>, Wang Yujian<sup>2</sup>, Zhao Yu<sup>1</sup>, Di Shixiong<sup>1</sup>, Ren Dechun<sup>2</sup>, Ji Haibin<sup>2</sup>

(1. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

(2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** Selective laser melting (SLM) technology can realize the direct fabrication of products with complex shape, high dimensional accuracy, and excellent mechanical properties. However, improper selection of fabrication parameters of SLM will introduce defects in the products. For the problem of defects, this investigation studied the influence of the two main fabrication parameters, laser power and scanning speed, on the type, size and quantity of internal defects in fabricated titanium alloy, and explored the evolution of defects with fabrication parameters. The results show that there are mainly irregular shape and regular spherical shape defects in the titanium alloy fabricated by SLM. The area with low laser power ( $\leq 130$  W) and high scanning speed ( $\geq 900$  mm/s) is mainly irregular shape defects. Insufficient energy is the main reason for the formation of this type defect. The area with high laser power ( $\geq 190$  W), low scanning speed ( $\leq 600$  mm/s) is mainly regular spherical shape defects. The gasification of alloying elements caused by excessive energy is the main reason for the formation of this type defect. With the increasing of laser energy density, the SLM fabricated titanium alloy processing map was drawn according to the evolution law of defects. The evolution of defects presents three stages for the area of irregular shape defects gradually decreasing, micro-scale irregular defects to micro-scale regular spherical defects, and regular spherical defects gradually growing up.

**Key words:** selective laser melting; defect; laser power; scanning speed; laser energy density

---

Corresponding author: Zhao Chunling, Master, Senior Engineer, AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, P. R. China, Tel: 0086-731-28593201, E-mail: capi@608.163.net