

# SLM成形工艺对TC4钛合金致密度和拉伸性能的影响

方 昊<sup>1</sup> 傅高升<sup>1,2</sup> 陈鸿玲<sup>1</sup> 张 晨<sup>2</sup>

(1. 福州大学机械工程及自动化学院,福州 350116;2. 闽江学院,福州 350116)

**摘 要** 采用选区激光熔化(SLM)技术制备骨科用Ti-6Al-4V(TC4)钛合金试样,探讨了SLM成形工艺(激光功率、扫描速度和扫描间距)对该合金致密度和力学性能的影响。结果表明,激光功率是影响致密度和抗拉强度的最主要因素,其次是扫描间距和扫描速度。激光功率的增大可以显著提高合金的致密度和抗拉强度,扫描速度或扫描间距的增大则导致合金致密度和抗拉强度降低。此外,当激光功率增大或扫描速度和扫描间距减小时, $\beta$ 柱状晶的宽度和针状初生 $\alpha'$ 马氏体的长度增加,不利于提高合金的力学性能,但致密度提高,因此该合金最终力学性能仍得到改善,故致密度对该合金整体力学性能的影响大于微观组织的影响。SLM成形TC4合金的最优工艺组合:激光功率为260 W、扫描速度为1 400 mm/s、扫描间距为120  $\mu$ m,该工艺条件下成形的TC4合金致密度、抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为99.56%、1 173.6 MPa、913.4 MPa和7.1%。

**关键词** TC4钛合金;骨科植入物;SLM成形工艺;致密度;力学性能

中图分类号 TG146.23;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240148

## Effects of SLM Forming Process on Relative Density and Tensile Properties of TC4 Titanium Alloy

FANG Hao<sup>1</sup>, FU Gaosheng<sup>1,2</sup>, CHEN Hongling<sup>1</sup>, ZHANG Chen<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116; 2. Minjiang University, Fuzhou 350116)

**Abstract:** Selected laser melting (SLM) was utilized to prepare Ti-6Al-4V (TC4) titanium alloy specimens for orthopedic applications, and influence law of SLM forming process (laser power, scanning speed, scanning distance) on the relative density and tensile properties of alloy was investigated. The results reveal that the laser power is the key factor affecting the density and tensile strength, which is followed by scanning distance and scanning speed. The relative density and tensile strength are increased significantly with increasing in laser power, while the increase of scanning speed and scanning distance leads to reduction of density and tensile strength. In addition, the width of  $\beta$  columnar crystal and length of primary acicular  $\alpha'$  martensite are increased with the rise of laser power or decline of scanning speed and scanning distance, which is adverse to mechanical properties, while the relative density is enhanced, thus improving the final mechanical properties, indicating the superior effect of relative density on the overall mechanical properties to that of microstructure. The optimal process combination for SLM forming TC4 alloy is determined as laser power of 260 W, scanning speed of 1 400 mm/s, scanning distance of 120  $\mu$ m, where the relative density, tensile strength, yield strength and elongation of TC4 alloy reach 99.56%, 1 173.6 MPa, 913.4 MPa and 7.1%, respectively.

**Key Words:** TC4 Titanium Alloy, Orthopedic Implants, SLM Forming Process, Relative Density, Mechanical Properties

随着全球人口老龄化严重,骨科材料需求显著增加,需要通过各种措施,选择不同材料来代替人骨<sup>[1-2]</sup>。目前的临床中,主要为不锈钢、Co-Cr合金、钛合金等材料。与不锈钢和Co-Cr合金相比,钛合金拥有更低的

弹性模量和更好的生物相容性而得到广泛的应用和发展<sup>[3-4]</sup>,而通过增材制造来制造植入物的技术应运而生<sup>[5]</sup>。目前,制备钛合金植入物的增材制造技术主要有激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)、选择性

收稿日期:2024-04-06;修订日期:2024-07-10

基金项目:福建省科技计划资助项目(产学研联合创新)(2020Y4018)

第一作者简介:方昊,男,1997年出生,硕士研究生,E-mail:1546541809@qq.com

通信作者:傅高升,男,1965年出生,教授,E-mail:fugaosheng@mju.edu.cn

引用格式:方昊,傅高升,陈鸿玲,等.SLM成形工艺对TC4钛合金致密度和拉伸性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2025,45(7):1 093-1 098.

FANG H, FU G S, CHEN H L, et al. Effects of SLM forming process on relative density and tensile properties of TC4 titanium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(7): 1 093-1 098.

激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)、电子束熔化(Electron Beam Melting, EBM)和激光金属沉积(Laser Metal Deposition, LMD)等,其中 SLM 技术因其成形的植入物具有高精度、出色的表面品质,且适用于制造具有复杂结构的合金,广泛应用于医用骨科植入物的制造<sup>[6-7]</sup>。SLM 成形工艺参数会对 TC4 成形件的组织 and 性能产生重要影响<sup>[8-11]</sup>。在前期研究基础上<sup>[12]</sup>,采用正交试验方法,进一步探讨成形工艺对 TC4 钛合金致密度和拉伸性能的影响,以期优化 SLM 成形工艺,为高质量的 TC4 钛合金骨科植入物制备提供依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试样制备

选用激光超声等离子球化(LUPS)技术制备 TC4 粉末<sup>[12]</sup>,采用 SLM125<sup>HL</sup>型 3D 打印机制备尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的试样,按照 GB/T 228.1-2021 加工拉伸试样,标距为 25 mm,厚度为 2 mm。

### 1.2 试验方法

取 TC4 钛合金试样的侧面(垂直于基板)进行研磨和抛光,采用 HF、HNO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>O 体积比为 2:1:17 的溶液进行腐蚀,分别采用 MV500 型光学显微镜(OM)和 SU3800 型扫描电镜(SEM)进行显微组织观察,并采用 Image-ProPlus 定量金相分析 OM 图像上的  $\beta$  柱状晶的宽度、初生针状  $\alpha'$  马氏体的长度、孔洞的尺寸,每

个试样测量 30 次取平均值。采用 Image-ProPlus 软件测量不同视场中无缺陷区域的面积占比,表征 TC4 钛合金的致密度,每个试样取 15 个视场求平均值。拉伸试验采用 S2015JX0239 型万能材料试验机,拉伸速率为 0.5 mm/min。根据前期研究<sup>[12]</sup>,选择  $L_9(3^4)$  正交试验优化 SLM 成形工艺参数,其因素和水平选择见表 1。

表 1 正交试验因素水平表

Tab.1 Factor levels for orthogonal experiment

| 水平 | 激光功率(A)/W | 扫描速度(B)/(mm·s <sup>-1</sup> ) | 扫描间距(C)/μm |
|----|-----------|-------------------------------|------------|
| 1  | 180       | 1 000                         | 100        |
| 2  | 220       | 1 200                         | 120        |
| 3  | 260       | 1 400                         | 140        |

## 2 试验结果与分析

### 2.1 正交试验结果

正交试验结果见表 2。可以看出,当激光功率、扫描速度和扫描间距分别为 180 W、1 400 mm/s 和 140 μm 时,试样的致密度和抗拉强度较低;当激光功率、扫描速度、扫描间距分别为 260 W、1 400 mm/s 和 120 μm 时,试样的致密度和抗拉强度较高,伸长率为 4%~8%,可满足生物体用 TC4 伸长率的要求<sup>[13]</sup>。由于人体骨骼的变形通常是在小范围内发生,更应关注植入物的内在质量和强度,因此选择致密度( $Y_I$ )和抗拉强度( $Y_{II}$ )作为考察指标作进一步分析。

表 2 SLM 成形 TC4 钛合金正交试验结果及极差分析

Tab.2 Orthogonal experimental results and range analysis of SLMed TC4 titanium alloy

| 试验号   | 激光功率(A)/W | 扫描速度(B)/(mm·s <sup>-1</sup> ) | 扫描间距(C)/μm | 致密度 $Y_I$ /% | 抗拉强度 $Y_{II}$ /MPa | 伸长率/%    |
|-------|-----------|-------------------------------|------------|--------------|--------------------|----------|
| $S_1$ | 180       | 1 000                         | 100        | 98.77        | 1 145.2            | 6.6      |
| $S_2$ | 180       | 1 200                         | 120        | 98.17        | 1 095.2            | 7.9      |
| $S_3$ | 180       | 1 400                         | 140        | 97.96        | 1 065.3            | 4.7      |
| $S_4$ | 220       | 1 000                         | 120        | 99.13        | 1 144.5            | 7.0      |
| $S_5$ | 220       | 1 200                         | 140        | 99.22        | 1 114.9            | 7.4      |
| $S_6$ | 220       | 1 400                         | 100        | 99.34        | 1 148.3            | 8.0      |
| $S_7$ | 260       | 1 000                         | 140        | 99.38        | 1 157.3            | 6.8      |
| $S_8$ | 260       | 1 200                         | 100        | 98.93        | 1 159.4            | 5.2      |
| $S_9$ | 260       | 1 400                         | 120        | 99.51        | 1 170.1            | 7.2      |
| 指标    | $Y_I$     | $Y_{II}$                      | $Y_I$      | $Y_{II}$     | $Y_I$              | $Y_{II}$ |
| $K_1$ | 2.939 1   | 3 305.7                       | 2.972 8    | 3 465.6      | 2.970 5            | 3 452.9  |
| $K_2$ | 2.977 0   | 3 461.5                       | 2.963 3    | 3 408.4      | 2.968 1            | 3 424.8  |
| $K_3$ | 2.978 3   | 3 490.6                       | 2.958 2    | 3 383.9      | 2.955 7            | 3 380.2  |
| $R$   | 0.039 2   | 184.9                         | 0.014 7    | 81.7         | 0.014 9            | 72.7     |
|       |           |                               |            |              |                    | 0.024 8  |
|       |           |                               |            |              |                    | 60.9     |

由表 2 可见,激光功率是影响试样致密度和抗拉强度的最主要因素,扫描速度和扫描间距次之。根据表 2 可以绘制出激光功率、扫描速度、扫描间距关于致密度和抗拉强度的主效应图,见图 1。可以看出,致密度和抗拉强度随激光功率、扫描速度、扫描间距的变化趋势

相同。试样的致密度和抗拉强度随着激光功率的增大而增大,随着扫描速度或扫描间距的增大而减小。因此,最优工艺组合是激光功率、扫描速度、扫描间距分别为 260 W、1 000 mm/s 和 100 μm。

对表 2 的结果进行方差分析,见表 3 和表 4。由表 3

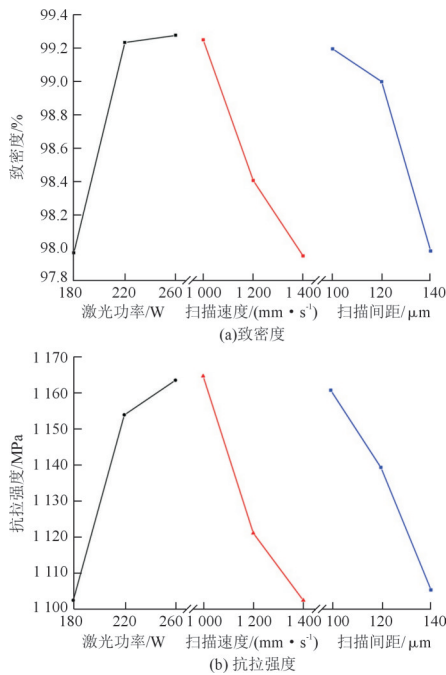


图1 SLM成形工艺对TC4致密度和抗拉强度影响的主效应图  
Fig.1 Main effect diagram of SLM forming process on relative densities and tensile strength of TC4 alloy

可知,在 $\alpha=0.05$ 的置信区间内,激光功率对致密度影响是显著的,而扫描速度和扫描间距对致密度的影响不显著。由表4可知,在 $\alpha=0.05$ 的置信区间内,激光功率、扫描速度和扫描间距对抗拉强度均有显著性影响,其中激光功率是影响试样抗拉强度的最主要因素,扫描间距和扫描速度次之。极差和方差分析结果一致。

根据极差分析和方差分析结果,综合考虑致密度和抗拉强度两个考察指标,SLM成形TC4合金优化工艺参数组合:激光功率为260 W,扫描速度为1 000 mm/s,扫描间距为100  $\mu\text{m}$ 。

为进一步验证正交试验结果的可靠性,分别对致密度和抗拉强度的结果进行回归分析,计算出致密度的预测值为99.98%,抗拉强度的预测值为1 154.1 MPa。选择优化的工艺组合进行验证试验。结果表明,试样的

表3 致密度正交试验的方差分析结果

Tab.3 Variance analysis results of orthogonal experiment for relative density

| 方差来源 | 偏差平方和       | 自由度 | 均方          | F比    | P值      | 备注                                  |
|------|-------------|-----|-------------|-------|---------|-------------------------------------|
| A    | 0.000 330 4 | 2   | 0.000 165 2 | 5.223 | 0.048 6 | 因素B和因素C的偏差平方和均小于误差的偏差平方和,合并为新的误差平方和 |
| 误差   | 0.000 189 8 | 6   | 0.000 031 6 | —     | —       |                                     |
| 总和   | 0.000 520 1 | 8   | —           | —     | —       |                                     |

表4 抗拉强度正交试验的方差分析结果

Tab.4 Variance analysis results of orthogonal experiment for tensile strength

| 方差来源 | 偏差平方和      | 自由度 | 均方         | F比     | P值       |
|------|------------|-----|------------|--------|----------|
| A    | 65 620.93  | 2   | 137 542.55 | 222.19 | 0.004 48 |
| B    | 60 207.04  | 2   | 132 128.67 | 213.45 | 0.004 66 |
| C    | 59 929.96  | 2   | 131 851.58 | 213.01 | 0.004 67 |
| 误差   | 1 477.75   | 2   | 619.01     | —      | —        |
| 总和   | 187 235.68 | 8   | —          | —      | —        |

致密度为99.56%,与预测值仅差0.42%左右;抗拉强度为1 173.6 MPa,与预测值接近,表明正交试验优化出的工艺可靠。此外,屈服强度为913.4 MPa,伸长率为7.1%。

## 2.2 分析与讨论

在SLM成形过程中,激光功率和扫描速度主要是通过影响成形过程中的能量输入来影响试样的微观组织和力学性能,扫描间距是通过影响熔池间的搭接率来影响试样的微观组织和力学性能<sup>[14]</sup>。当激光功率增大时,单位时间内输入的激光能量增加,TC4粉末充分熔化、结合紧密,有利于减少孔隙的产生,提高试样的致密度。图2为不同激光功率下试样的缺陷形貌。可以看出,当激光功率由180 W增大逐渐至260 W时,试样缺陷的数量下降、尺寸减小,平均面积分别为95.1、27.4和17.5  $\mu\text{m}^2$ ,平均致密度分别为97.97%、99.23%和99.27%。

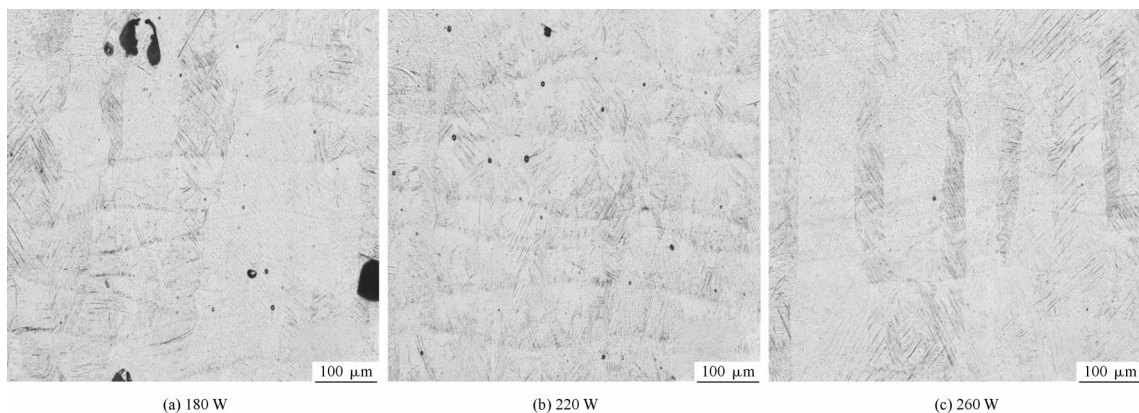


图2 不同激光功率下SLM成形TC4钛合金的缺陷形貌

Fig.2 Defect morphologies of SLMed TC4 titanium alloy under different laser powers

图3为不同激光功率下试样的微观形貌。可见,当激光功率由180 W逐渐增大至260 W时,激光能量输入增加,逐层打印过程中对前一层热影响增大,熔池冷

却速度减慢,导致TC4的组织粗化, $\beta$ 柱状晶的宽度分别为34.9、47.4和51.4  $\mu\text{m}$ ,初生针状 $\alpha'$ 马氏体的长度分别为36.8、59.3和61.9  $\mu\text{m}$ 。

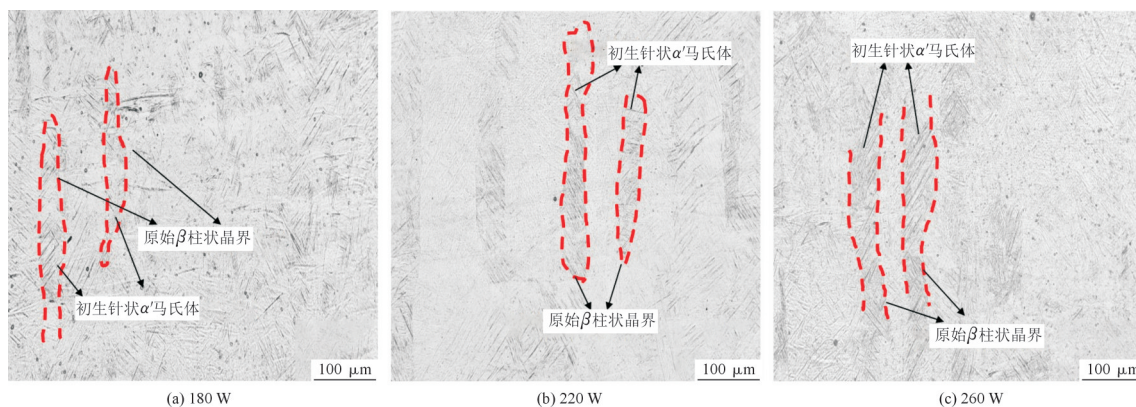


图3 不同激光功率下SLM成形TC4钛合金的微观形貌

Fig.3 Micro morphologies of SLMed TC4 titanium alloy under different laser powers

当扫描速度减小时,激光束在粉末表面的照射时间增大,激光能量的输入增加,TC4粉末的熔化程度增大,有利于减少孔隙的产生,提高试样的致密度。图4为不同扫描速度下试样的缺陷形貌。可见,当扫描速

度由1 400 mm/s逐渐减小至1 000 mm/s时,试样缺陷的数量呈下降趋势,尺寸呈减小趋势,平均面积分别为77.2、18.7和12.5  $\mu\text{m}^2$ ,平均致密度分别为98.61%、97.77%和99.09%。

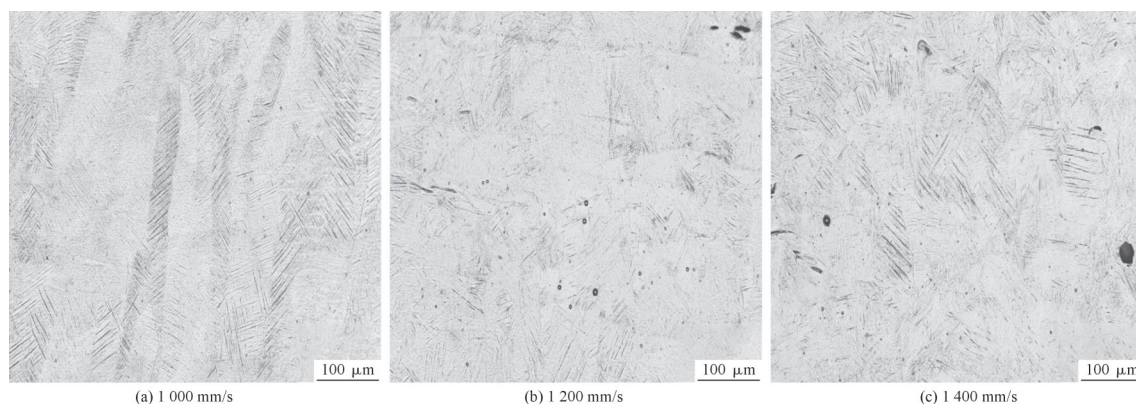


图4 不同扫描速度下SLM成形TC4钛合金的缺陷形貌

Fig.4 Defect morphologies of SLMed TC4 titanium alloy under different scanning speeds

图5为不同扫描速度下试样的微观组织。可见,当扫描速度由1 400 mm/s逐渐减小至1 000 mm/s时,激光束在粉末表面的照射时间增大,激光能量输入增加,对前一层的热影响增大,熔池冷却速度减慢,导致TC4合金的组织粗化, $\beta$ 柱状晶的宽度分别为38.5、47.4和49.6  $\mu\text{m}$ ,初生针状 $\alpha'$ 马氏体的长度分别为42.6、51.5和60.3  $\mu\text{m}$ 。

当扫描间距减小时,熔池与熔池之间的搭接率增大,有利于相邻熔池间粉末的熔化,减少孔洞的产生,提高试样的致密度。图6为不同扫描间距下试样的缺陷形貌。可见,当扫描间距由140  $\mu\text{m}$ 逐渐减小至100  $\mu\text{m}$ 时,试样缺陷的数量呈下降趋势,尺寸呈减小趋势,平均面积分别为60.8、35.2和30.8  $\mu\text{m}^2$ ,平均致密度分别为98.52%、98.93%和99.02%。

图7为不同扫描间距下试样的微观组织。可见,当扫描间距逐渐减小至100  $\mu\text{m}$ 时,熔池的搭接率增大,相邻熔池之间的热影响增大,导致TC4合金的组织粗化, $\beta$ 柱状晶的宽度分别为37.3、43.7和57.9  $\mu\text{m}$ ,初生针状 $\alpha'$ 马氏体长度分别为39.4、47.1和59.0  $\mu\text{m}$ 。

综上,激光功率的增大或扫描速度和扫描间距的减小虽不利于TC4合金的组织细化,但其致密度得到提高,平均抗拉强度增加,表明致密度对合金力学性能的影响比微观组织的大。故增大激光功率或减小扫描速度和扫描间距有利于改善TC4合金的力学性能。因此,在优化SLM成形工艺时,应首要关注SLM成形试样的致密度,以提高TC4合金整体的力学性能。

图8为优化工艺组合成形TC4的微观组织和断口形貌。由图8a可见,由于成形过程中熔池间的热影响

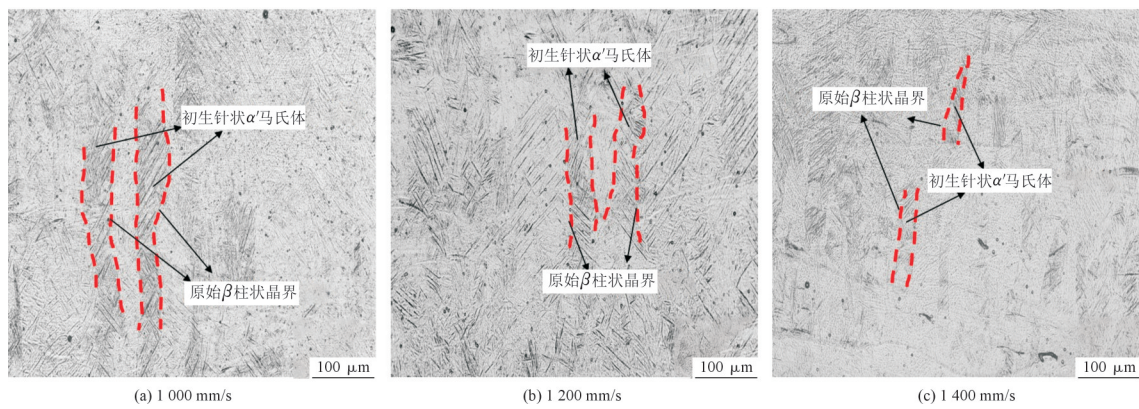


图5 不同扫描速度下SLM成形TC4钛合金的微观组织形貌

Fig.5 Micro morphologies of SLMed TC4 titanium alloy under different scanning speeds

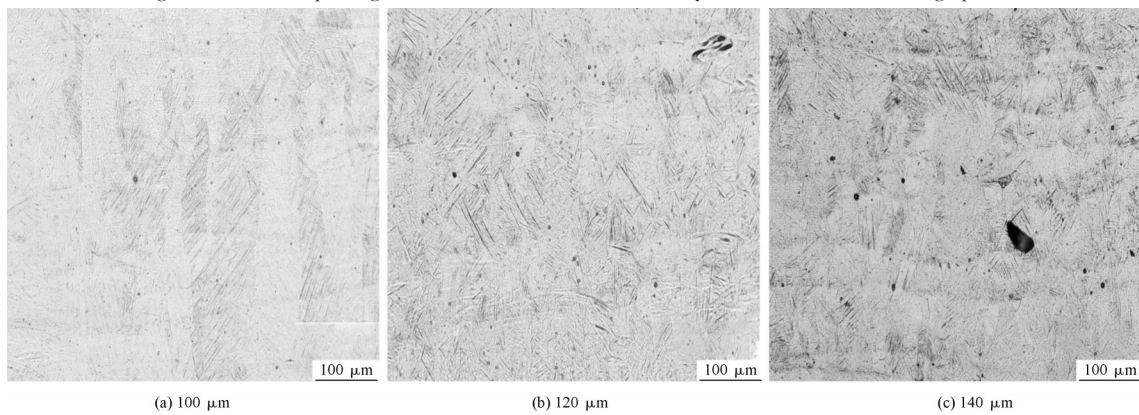


图6 不同扫描间距下SLM成形TC4钛合金的缺陷形貌

Fig.6 Defect morphologies of SLMed TC4 titanium alloy under different scanning distances

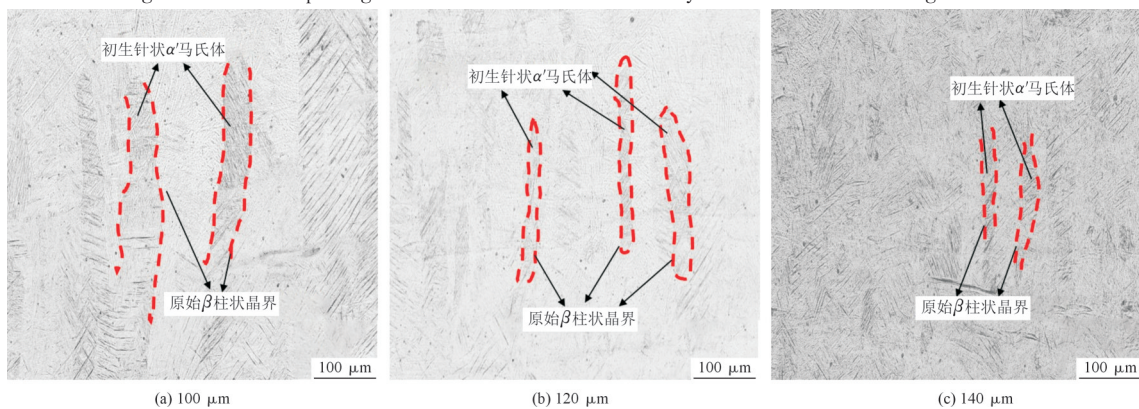


图7 不同扫描间距下SLM成形TC4钛合金的微观组织形貌

Fig.7 Micro morphologies of SLMed TC4 titanium alloy under different scanning distances

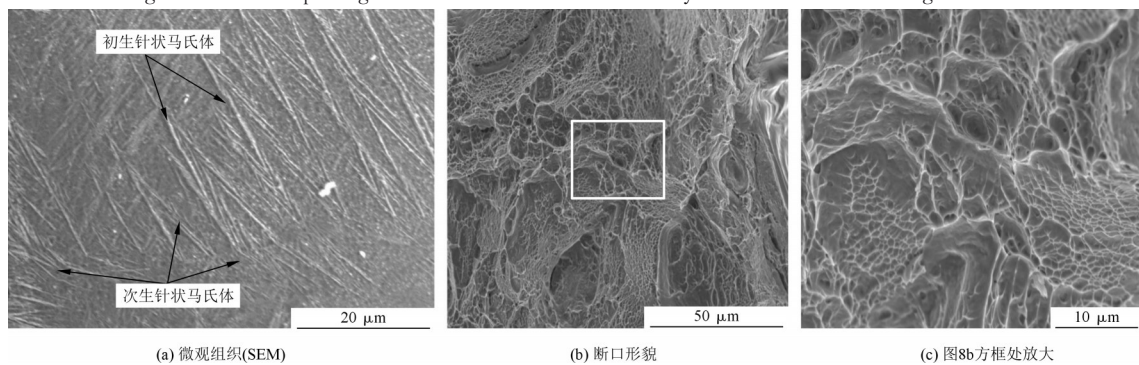


图8 SLM成形TC4钛合金的微观组织和断口形貌

Fig. 8 Microstructure and fracture morphologies of SLMed TC4 titanium alloy

较大,冷却速度较小,组织中含有较为粗大的初生针状马氏体,不利于TC4合金的力学性能。同时在组织中还发现较多细小的针状马氏体<sup>[15]</sup>,其是在多次热影响下生成的次生马氏体。由图8b和图8c可见,拉伸断口存在着较多的解理台阶和河流状花样,在断口处还发现了部分韧窝存在,说明试样在断裂过程中有一定的塑性变形。在断口处未发现明显的气孔等缺陷,说明试样的缺陷较少、致密度较高,减少了应力集中的可能,有助于提高试样整体的力学性能。

### 3 结 论

(1)激光功率是影响SLM成形TC4致密度和抗拉强度的最主要因素,其次是扫描间距和扫描速度。激光功率对致密度和抗拉强度有显著性影响;扫描间距和扫描速度对抗拉强度有显著性影响,对致密度的影响不显著。增大激光功率能促进TC4粉末熔化,提高试样的致密度和抗拉强度;增大扫描速度会导致TC4粉末熔化不够充分,使试样的致密度和抗拉强度下降;增大扫描间距会降低熔池间搭接率,在连接处易产生缺陷使结合不紧密,降低试样的致密度和抗拉强度。

(2)随着激光功率的增大或扫描速度、扫描间距的减小, $\beta$ 柱状晶的宽度和初生针状 $\alpha'$ 马氏体的长度增大,对合金的力学性能不利,但由于致密度提高,合金最终力学性能仍得到改善,故SLM成形TC4合金的整体力学性能受到其致密度的影响程度要大于微观组织的影响。因此,在优化SLM成形工艺时更应关注其对TC4合金致密度的影响。

(3)获得了优化工艺参数组合:激光功率为260 W,扫描速度为1 000 mm/s、扫描间距为100  $\mu$ m,该工艺条件下成形的TC4合金致密度为99.56%,抗拉强度为1 173.6 MPa,屈服强度为913.4 MPa,伸长率为7.1%。

### 参 考 文 献

- [1] IQBAL M M, KUMAR A, SHABADI R, et al. Fabrication and surface modification of biomaterials for orthopedic implant: A review [J]. Surface Review and Letters, 2023, 30(1): 2 141 008.
- [2] JACK Y. 中国骨科材料市场现状及创新趋势浅析[J]. 科技与金融, 2020(7): 53-57.
- [3] AMIRTHARAJ M K K, CHANDRASEKAR A R, DASAN A, et al. Recent advancements in materials and coatings for biomedical implants[J]. Gels, 2022, 8(5): 323.
- [4] ABD-ELAZIEM W, DARWISH M A, HAMADA A, et al. Titanium-Based alloys and composites for orthopedic implants applications: A comprehensive review [J]. Materials & Design, 2024, 241: 112 850.
- [5] 周梦, 成艳, 周晓晨, 等. 基于增材制造技术的钛合金医用植入物[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(11): 1 097-1 115.
- [6] BANDYOPADHYAY A, CILIVERI S, BOSE S. Metal additive manufacturing for load-bearing implants [J]. J. Indian Inst. Sci., 2022, 102(1): 561-584.
- [7] AWAD A, FINA F, GOYANES A, et al. Advances in powder bed fusion 3D printing in drug delivery and healthcare [J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2021, 174: 406-424.
- [8] HANZL P, ZETEK M, BAKŠA T, et al. The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts [J]. Procedia Engineering, 2015, 100: 1 405-1 413.
- [9] 方嘉铨, 刘洋, 李治国, 等. 工艺参数对SLM成形NiTi合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(12): 1 553-1 559.
- [10] WEI K W, WANG Z M, ZENG X Y. Preliminary investigation on selective laser melting of Ti-5Al-2.5Sn  $\alpha$ -Ti alloy: From single tracks to bulk 3D components [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244: 73-85.
- [11] ELSAYED M, GHAZY M, YOUSSEF Y, et al. Optimization of SLM process parameters for Ti-6Al-4V medical implants [J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(3): 433-447.
- [12] 陈健, 傅高升, 陈鸿玲, 等. 选区激光熔化成形工艺对多孔TC4钛合金显微组织的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47(11): 96-103, 110.
- [13] 黄利军. 新型医用高强度低弹钛合金研究[D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2006.
- [14] 竺俊杰, 王优强, 倪陈兵, 等. 激光增材制造钛合金微观组织和力学性能研究进展[J]. 表面技术, 2024, 53(1): 15-32.
- [15] HAN J, JIA S L, LIU Y D, et al. Study on the laser melting procedure for the specified zone of the TC4 titanium alloy [J]. Crystals, 2023, 13(7): 1 041.

(编辑: 彭瑾)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵, 文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造  
(关注铸造及有色合金  
领域重要研究成果)



压铸界  
(压铸领域最新动态  
及研究)



青稞讲堂  
(金属领域青年科学家  
最新研究成果)



特种铸造及有色  
合金杂志  
(文章动态时刻关注)