

准分子激光辐照对激光选区熔化成形 Ti6Al4V 合金表面浸润性的影响

徐仰立^{1,2}, 李婷婷³, 曹玄扬⁴, 谭援强^{1,2}

(1. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021; 2. 脆性材料加工技术教育部工程研究中心, 福建 厦门 361021; 3. 厦门软件职业技术学院, 福建 厦门 361024; 4. 长沙新材料产业研究院有限公司, 长沙 410083)

摘要: **目的** 提高激光选区熔化成形 (Selective Laser Melting, SLM) Ti6Al4V 合金的表面亲水性。**方法** 通过调控 248 nm KrF 准分子激光功率密度和脉冲数, 对 SLM 成形 Ti6Al4V 合金进行表面改性。利用扫描电子显微镜和激光扫描共聚焦显微镜对激光辐照前后的表面形貌和粗糙度进行表征, 利用 EDS 能谱分析仪和 X 射线衍射仪对激光辐照后试样的表面成分进行分析, 利用接触角测量仪来表征试样表面的浸润性。**结果** 在 50 个激光脉冲数下, 通过控制准分子激光功率密度为 0~531 mJ/cm², 使 SLM 成形 Ti6Al4V 表面接触角由 (116±4)° 减小至 (7.5±0.4)°。通过表面形貌观察, 激光辐照后的 Ti6Al4V 表面变得更加平滑, 表面粗化现象得到改善。激光辐照后的 Ti6Al4V 表面粗糙度由 (40.3±3.7) μm 减小至 (8.3±1.7) μm, 试样表面与氧气发生反应, 导致氧元素质量分数增加至 33.54%, 且有 TiO 产生。通过 Cassie-Baxter 模型和试样三维表面形貌分析, 激光辐照后的 Ti6Al4V 表面更加光滑, 使固-液-气复合界面上固体所占的百分比增加, 导致试样变得更加亲水。通过时效性测试, 发现试样的表面接触角在 48 h 内具有稳定性。**结论** 通过改变准分子激光的功率密度, 可以快速高效地降低 SLM 成形 Ti6Al4V 合金的表面粗糙度, 改善并调控 Ti6Al4V 的表面亲水性。

关键词: 准分子激光辐照; Ti6Al4V; 浸润性; 粗糙度; Cassie-Baxter 模型

中图分类号: TG249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0191-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.021

Effect of Excimer Laser Irradiation on the Surface Wettability of Selective Laser Melted Ti6Al4V Alloy

XU Yang-li^{1,2}, LI Ting-ting³, CAO Xuan-yang⁴, TAN Yuan-qiang^{1,2}

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Engineering Research Center of Brittle Materials Machining, Xiamen 361024, China;

3. Xiamen Institute of Software Technology, Xiamen 361024, China;

4. Changsha Advanced Materials Industrial Research Institute, Changsha 410083, China)

收稿日期: 2019-11-13; 修订日期: 2020-02-25

Received: 2019-11-13; Revised: 2020-02-25

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划 (IRT_17R41)

Fund: Supported by Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT_17R41)

作者简介: 徐仰立 (1991—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为激光增材制造与表面改性。邮箱: ylxu@hqu.edu.cn

Biography: XU Yang-li (1991—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: laser additive manufacturing and surface modification. E-mail: ylxu@hqu.edu.cn

引文格式: 徐仰立, 李婷婷, 曹玄扬, 等. 准分子激光辐照对激光选区熔化成形 Ti6Al4V 合金表面浸润性的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 191-197.

XU Yang-li, LI Ting-ting, CAO Xuan-yang, et al. Effect of excimer laser irradiation on the surface wettability of selective laser melted Ti6Al4V alloy[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 191-197.

ABSTRACT: The work aims to improve the hydrophilia of selective laser melted (SLMed) Ti6Al4V alloy. The surface of SLMed Ti6Al4V alloy was modified by controlling laser energy density and pulse number of 248 nm KrF excimer laser. Scanning electron microscopy (SEM) and laser scanning confocal microscope (LSCM) were used to characterize the surface morphology and roughness before and after laser irradiation, energy dispersive X-ray spectrum (EDS) and X-ray diffraction (XRD) were employed to analyze the surface components of specimens after laser irradiation and contact angle measuring system was applied to characterize the wettability of specimen surface. When the excimer laser energy density was controlled from 0 to 531 mJ/cm² with the pulse numbers of 50, the contact angles of specimens decreased from (116±4)° to (7.5±0.4)°. Meanwhile, through surface observation, the surface of Ti6Al4V after excimer laser irradiation became smoother and the surface roughness was improved, decreasing from (40.3±3.7) μm to (8.3±1.7) μm. Moreover, an increase content of oxygen element from 0wt% to 33.54wt% was detected and TiO generated due to the reaction between Ti6Al4V specimens and oxygen. Based on Cassie-Baxter model and 3D surface morphology of the specimens, the surface of Ti6Al4V alloy after laser irradiation became smoother, which increased the percentage of solids in the solid-liquid-gas composite interface, leading to the specimens becoming more hydrophobic. Timeliness test showed that the surface contact angle of the specimens was stable within 48 hours. Therefore, the surface roughness of SLMed Ti6Al4V alloy can be decreased effectively and rapidly and the surface hydrophilia can be improved and controlled by changing energy density of excimer laser irradiation.

KEY WORDS: excimer laser irradiation; Ti6Al4V; wettability; roughness; Cassie-Baxter model

激光选区熔化技术 (Selective Laser Melting, SLM) 是一种在惰性气体的保护下, 利用聚焦的高功率激光束辐照金属粉末床, 使金属粉末快速熔化、凝固, 从而实现三维零件成形的 3D 打印技术^[1]。由于这种技术的激光热影响区较小, 因而成形精度高, 能够制造高性能、几何形状复杂的金属零件^[2-4]。利用 SLM 技术制造的 Ti6Al4V 合金, 具有高比强度、低弹性模量、抗蚀性优异等优点^[5], 正在被广泛应用于航空航天和汽车工业领域^[6-7], 但是仍然无法大量应用于医用领域。这是因为医用领域要求 Ti6Al4V 植入体表面具有良好的生物相容性, 不仅能使细胞更好地附着在植入体上, 同时还要使体液在植入体上具有一定的渗透率。然而, SLM 成形的 Ti6Al4V 合金表面粗糙^[8-10], 呈现疏水性, 无法满足医疗领域对 SLM 成形件表面性能的要求。因此, 为了使 SLM 成形的 Ti6Al4V 能够满足医疗领域的应用要求, 需要降低其表面粗糙度, 同时提高其亲水性^[11]。

目前, 钛合金的表面浸润性改性方法主要有: 表面化学涂层法、纳/飞秒激光表面织构化、激光辐照法等。Kao 等^[12]利用 DLC 材料对 SLM 成形的 Ti6Al4V 进行表面涂层处理, 处理后的试样具有更好的摩擦磨损性能和耐磨蚀性, 亲水性明显提高, 接触角减小至 56.4°, 同时提升了细胞的附着能力。Huerta-Murillo 等^[13]利用纳秒激光和飞秒激光分别在 Ti6Al4V 表面加工出周期性的纹理, 这种方法能够提高 Ti6Al4V 的表面能, 接触角增加至 160°, 制备出超疏水的表面。Rotella 等^[14]利用 Yb 脉冲激光加工 Ti6Al4V 合金表面, 通过改变不同激光加工参数来调控材料表面的粗糙度, 使材料表面的浸润性可在 17°~50°范围内调控。以上方法均可以有效地改变 Ti6Al4V 的表面浸润性, 但是表面化学涂层法形成的涂层不稳定, 极易发生脱

落失效; 纳/飞秒激光表面织构化对试样表面的平整度要求较高, 不适合 SLM 成形件的加工; 而激光辐照法相较于前两种方法, 具有加工面积可控、快速精确处理材料表面的优点, 具有很好的应用前景。曾勇等^[15]利用准分子激光辐照对 PA2200 尼龙 SLS 成形件表面进行改性, 发现这种方法可以使打印件表面变得光滑, 同时产生 C=O 双键亲水性基团, 接触角由 120°减小至 70°, 改善并调控了成形件的表面浸润性。目前, 利用准分子激光辐照改变 SLM 成形 Ti6Al4V 合金表面浸润性的研究较少。

本文利用 248 nm KrF 准分子激光对 SLM 成形 Ti6Al4V 合金进行表面改性, 研究了激光能量密度对成形件表面浸润性的影响, 通过扫描电子显微镜、扫描共聚焦显微镜、EDS 能谱分析仪、X 射线衍射仪和接触角测量仪等性能表征方法, 分析了激光辐照前后 Ti6Al4V 合金表面形貌、粗糙度、化学成分和接触角的变化, 利用 Cassie-Baxter 模型解释了准分子激光辐照改变 SLM 成形件表面浸润性的机理。

1 试验

1.1 实验方案

本实验所使用的 Ti6Al4V 为德国 EOS 公司生产的气雾化粉末材料, 平均粒径为 40 μm^[16]。使用德国 EOS 公司的激光选区熔化设备 EOS M280 制备 SLM 成形件, 尺寸为 5 mm×5 mm×3 mm, 成形工艺参数为: 激光功率 280 W, 扫描速度 1200 mm/s, 扫描间距 0.12 mm, 制造层厚 30 μm。SLM 成形 Ti6Al4V 的物理性能参数和化学成分参数如表 1 和表 2 所示^[17], 该结果符合 ASTM F136-12 标准 (外科植入 Ti6Al4V

(超低间隙)锻造合金标准)^[18],能够满足医疗应用要求^[19]。激光辐照实验光路图如图 1 所示,激光器选用德国 Lambda Physik 公司的 LPX305iF 型 KrF 准分子激光器,波长为 248 nm,脉冲宽度为 30 ns,频率

为 2 Hz。选定激光脉冲次数为 50 个,激光辐照的能量密度分别为 344、406、468、531 mJ/cm²,为了减少实验误差,每组激光辐照参数作用在三个试样上,实验结果取三个试样的平均值。

表 1 Ti6Al4V 合金的热物理性能和机械性能
Tab.1 Thermal physics and mechanical properties of Ti6Al4V alloy

Material property	Value	Material property	Value
Density $\rho_s/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	4.3~5.1	20 °C elastic modulus E_s/GPa	110~140
Melting point $t_m/^\circ\text{C}$	1670	Yield strength σ_{ys}/MPa	1000~1100
Coefficient of thermal expansion $\alpha_s/(\times 10^{-6}\text{K}^{-1})$	8~9	Breaking strength σ_{fs}/MPa	1120~1220
Coefficient of thermal conductivity $\lambda_s/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	15~27	Fracture toughness $K_{ICs}/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	55~115
Specific heat capacity $C_{ps}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	500~550		

表 2 SLM 成形 Ti6Al4V 的化学成分
Tab.2 Chemical composition of SLMed Ti6Al4V

wt%							
Al	V	O	N	C	H	Fe	Ti
5.5~6.5	3.5~4.5	<0.13	<0.03	<0.08	<0.012	<0.25	Bal.

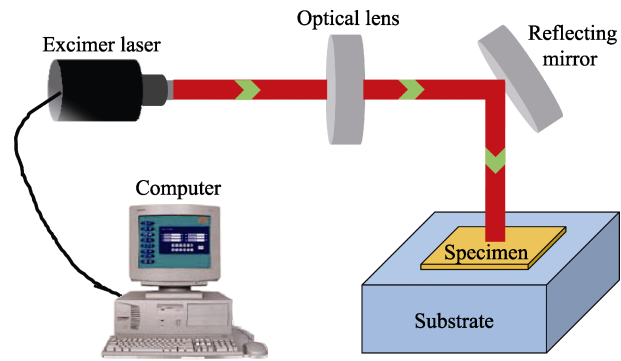


图 1 准分子激光辐照系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of excimer laser irradiation system

1.2 性能表征方法

使用内置能谱仪的扫描电子显微镜(FEI公司,QUANTA200),观察实验试样的表面形貌,并测定试样表面元素成分。使用X射线衍射仪(BRUKER公司,D8 ADVANCE)对试样表面进行成分分析。使用激光共聚焦显微镜(Carl Zeiss AG公司,LSM700)测量试样的表面形貌和粗糙度。使用接触角测量仪(上海中晨数字设备有限公司,JC2000D)测量试样表面的水接触角。

2 结果及分析

2.1 功率密度对 SLM 成形件表面浸润性的影响

图 2 是激光辐照后 SLM 成形 Ti6Al4V 的表面接触角随激光能量密度的变化关系。由图 2 可知,未经过激光辐照的初始成形件表面接触角大约为(116±4)°,

此时呈现疏水性。经过激光辐照后,成形件开始呈现亲水性,并且表面接触角随着激光能量密度的增大而逐渐减小。当激光能量密度增大至 531 mJ/cm²时,成形件的表面接触角减小至最小值(7.5±0.4)°,接近超亲水状态。另外,随着激光能量密度的增加,接触角测量的标准偏差也相应减小,在图中体现为误差棒逐渐变短,直至消失。因此,当激光脉冲数为 50 个时,通过改变激光能量密度,可以有效地调控 SLM 成形 Ti6Al4V 的表面浸润性,使其由疏水性转变为亲水性。

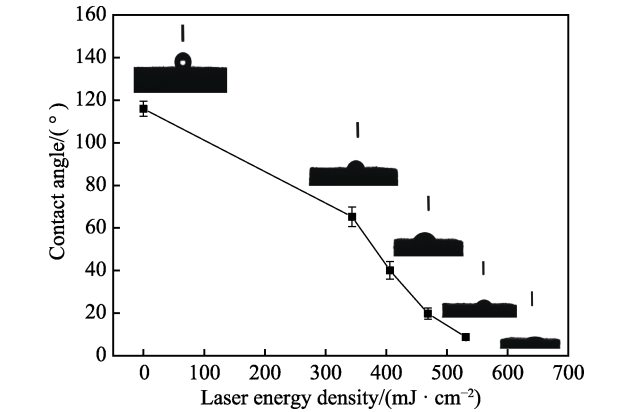


图 2 SLM 成形 Ti6Al4V 的表面接触角与激光辐照能量密度的关系
Fig.2 Change in relationship between contact angle and laser energy density of SLMed Ti6Al4V alloy

2.2 SLM 成形 Ti6Al4V 的 SEM 形貌分析

图 3 是激光辐照前 SLM 成形 Ti6Al4V 的 SEM 表面形貌图。从图 3 可以看到,由于激光热影响区的存在,原始的 SLM 成形件表面粘附了很多未熔化的粉末颗粒,粉末颗粒的形状不是规则的球形,这是因为

在激光热影响区外部的能量较低,无法充分熔化粉末,处于半熔化状态的粉末粘附在成形件表面,形成了不致密的表面形貌。图 4 是经过脉冲数为 50 个、能量密度为 531 mJ/cm^2 的激光辐照后 SLM 成形试样的 SEM 表面形貌图。从图 4 可以看出,在激光辐照过程中产生的热效应和微振动的影响下,一些粘附在

成形件表面上但结合度较差的粉末发生了脱落,另一些结合度较好的粉末被激光重熔,使表面变得更加密实和平滑。这说明激光辐照有可能使 SLM 成形试样的表面结构发生了改变;另外,由于该实验是暴露在空气中进行,在激光与试样相互作用过程中可能产生了新物质。

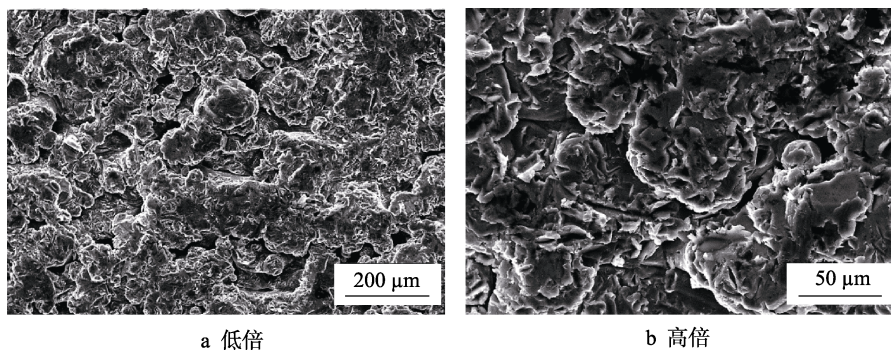


图 3 准分子激光辐照前 Ti6Al4V 成形件的 SEM 图像

Fig.3 SEM micrograph of SLMed Ti6Al4V alloy before excimer laser irradiation: (a) SEM micrograph in low magnification, (b) SEM micrograph in high magnification

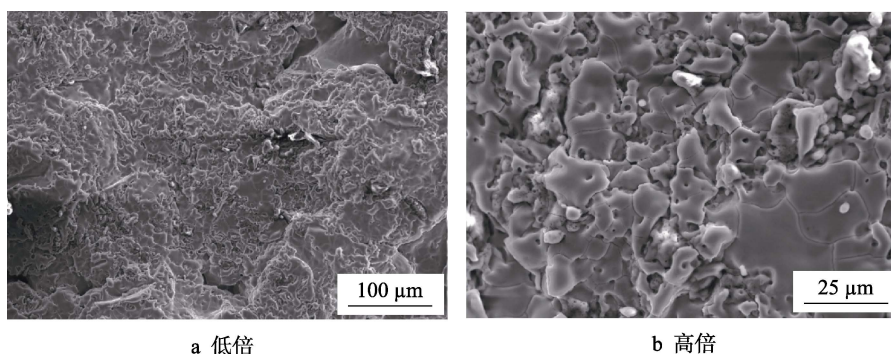


图 4 准分子激光辐照后 Ti6Al4V 成形件的 SEM 图像

Fig.4 SEM micrograph of SLMed Ti6Al4V alloy after excimer laser irradiation: (a) SEM micrograph in low magnification, (b) SEM micrograph in high magnification

2.3 SLM 成形 Ti6Al4V 的成分分析

图 5 是激光辐照前后 Ti6Al4V 成形件的 EDS 能谱分析结果。从图 5 中可得,经过激光辐照后,O 原

子的质量分数和原子数分别增加至 33.54%和 59.02%。O 原子成分的变化有可能是 SLM 成形试样在激光作用下与氧气发生氧化反应^[20],形成了新物质,这种新物质有可能是 TiO 或者 TiO₂。为了进一步验证这一

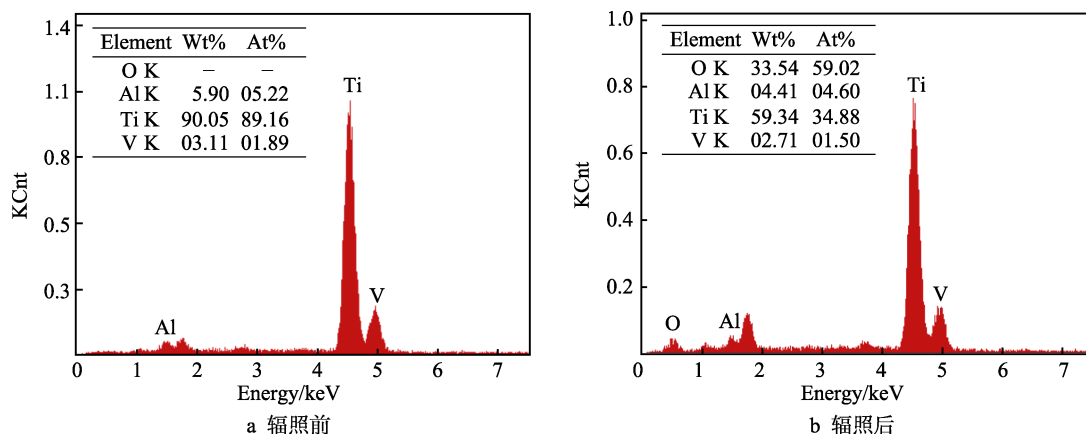


图 5 准分子激光辐照前后 Ti6Al4V 成形件的 EDS 能谱分析

Fig.5 EDS results of SLMed Ti6Al4V alloy before (a) and after (b) excimer laser irradiation

猜想, 需要进行相成分的测定。

图 6 为激光辐照前后 SLM 成形 Ti6Al4V 的 XRD 相成分检测结果。实验结果表明, 原始 Ti6Al4V 合金 SLM 成形件主要的衍射峰为密排六方结构的 α' 相。但是, 在经过激光辐照后, 在 43.5° 位置显示出了一个微弱的衍射峰, 经标定, 此为面心立方结构的 TiO 相。这与 EDS 能谱分析的结果相符。对于同一激光能量密度, 每组 Ti6Al4V 试样需要被辐照 50 次。当脉冲数量较少时, 由于激光辐照热效应产生的温度较低 ($>300^\circ\text{C}$), Ti 和 O_2 反应生成 TiO_2 ; 随着脉冲数增加到 50 时, 产生了大量的热累积, 此时温度达到 1600°C 以上, Ti 又与 TiO_2 反应生成 TiO^[21]。TiO 是一种脆性的陶瓷相, 会降低 Ti6Al4V 合金的力学性能, 但是没有相关研究表明它会影响 Ti6Al4V 的浸润性。因此, 影响准分子激光辐照 Ti6Al4V 合金的表面浸润性的主要原因是表面形貌的改变。

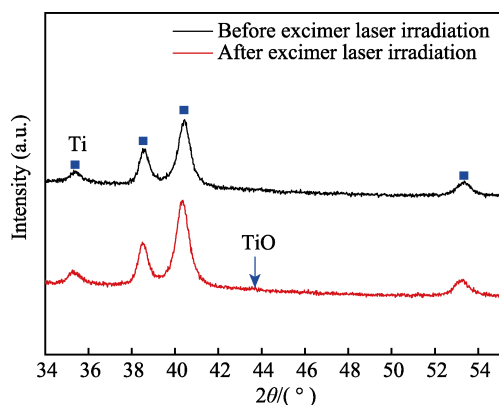


图 6 准分子激光辐照前后 SLM 成形 Ti6Al4V 的 XRD 结果
Fig.6 XRD results of SLMed Ti6Al4V alloy before and after excimer laser irradiation

2.4 准分子激光辐照 SLM 成形 Ti6Al4V 浸润性的影响机理

图 7 是准分子辐照前后的 SLM 成形试样表面粗

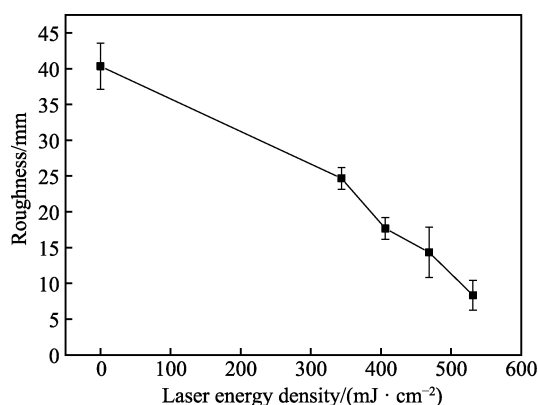


图 7 SLM 成形 Ti6Al4V 的表面粗糙度与激光辐照能量密度的关系

Fig.7 Relationship between roughness of SLMed Ti6Al4V alloy and laser irradiation energy density

糙度随激光能量密度的变化关系。原始成形件的表面粗糙度为 $(40.3 \pm 3.7) \mu\text{m}$, 但随着激光能量密度的增加, 表面粗糙度逐渐减小, 当激光能量密度为 $531 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 时, 表面粗糙度减小到最小值 $(8.3 \pm 1.7) \mu\text{m}$ 。这表明, 调控准分子激光辐照的能量密度, 确实改变 Ti6Al4V 合金 SLM 成形件的表面形貌, 使成形件表面更加平滑和致密。

综合以上实验结果, SLM 成形试样表面浸润性的变化主要与表面形貌有关。目前有两种模型可以用来解释粗糙表面浸润性的变化原因, 分别为 Wenzel 模型^[22]和 Cassie-Baxter 模型^[23]。Wenzel 提出粗糙度的概念对表面浸润性进行表征, 假定粗糙表面上的水滴与固体表面完全接触, 水能够进入微结构中所有的缝隙, Wenzel 模型在几何上扩大了水和表面的接触面积, 因而它的接触角 θ^* 可表述为:

$$\cos\theta^* = r \cos\theta_e \quad (1)$$

式中: r 为表面粗糙度因子, 数值上等于实际固-液接触面积与表观接触面积之间的比值, 通常 $r \geq 1$; θ_e 为材料理想表面上的本征接触角。Wenzel 模型揭示了均匀的粗糙表面的表观接触角与本征接触角的关系, 由于本实验中试样的表面不均匀, 在此不适用。

而 Cassie 和 Baxter 提出的模型是针对非均匀表面的浸润性模型。Cassie-Baxter 模型假定水滴不能填满粗糙表面的孔隙, 孔隙中存在空气。因此, 此模型的接触角 θ^* 可表述为:

$$\cos\theta^* = f_s(1 + \cos\theta_e) - 1 \quad (2)$$

式中: f_s 为固-液-气复合界面中固体的占比, 是影响材料表面浸润性的重要因素。通常, $f_s < 1$, 固体面积在整体表面积中所占的面积越小, f_s 越小, 材料的接触角就越大, 如同让水滴坐落在有序排列的针尖上一样^[24] (如图 8)。由此得出, 材料表面形貌对接触角的影响很大。为了研究激光辐照对 Ti6Al4V 成形件表面形貌的影响, 利用激光共聚焦显微镜对比了激光辐照前后试样表面形貌的变化 (图 9)。激光辐照前, 试样的表面结构是类针状的形貌, 激光辐照后, 试样表面变得更加平滑。通过对 Cassie-Baxter 模型的分析, 可以得出, 经过准分子激光辐照后, 水滴与试样表面接触的面积增大, f_s 值变大, 因而导致成形件的表面接触角变小, 提高了亲水性。

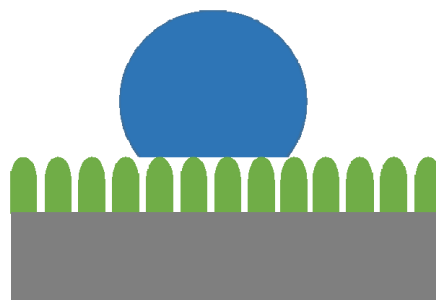


图 8 Cassie-Baxter 模型示意图
Fig.8 Schematic diagram of Cassie-Baxter model

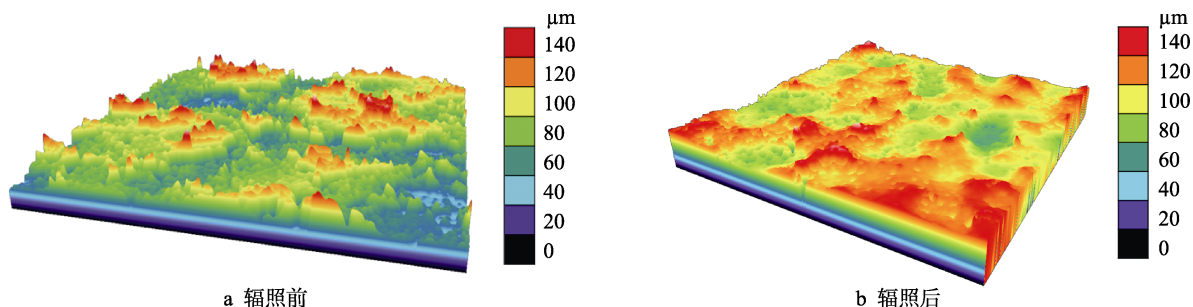


图9 激光辐照前后 Ti6Al4V 成形件的三维表面形貌

Fig.9 3D surface morphology of SLMed Ti6Al4V alloy before (a) and after (b) laser irradiation

图 10 为 48 h 内, 激光辐照前后的 SLM 成形 Ti6Al4V 的表面接触角随时间的变化关系。由图 10 可知, 激光辐照前, 试样的接触角略有下降, 稳定在 $(103 \pm 4)^\circ$, 这可能与试样在空气中被氧化有关; 经过激光辐照后的试样在 48 h 内, 表面接触角仅在 $(6.4 \pm 0.6)^\circ$ 至 $(9.6 \pm 0.3)^\circ$ 范围内浮动, 最终稳定在 $(8.7 \pm 0.4)^\circ$ 。另外, 这与激光辐照后试样初始接触角 $(7.5 \pm 0.4)^\circ$ 偏差不大。因此可认为, 经过激光辐照后达到亲水的试样具有一定的时效性。

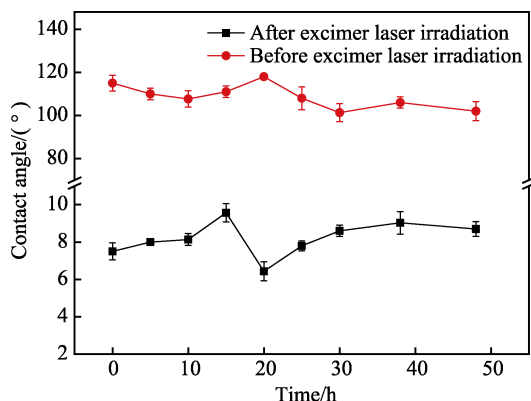


图 10 准分子激光辐照前后 Ti6Al4V 成形件接触角随时间的变化关系

Fig.10 Change of contact angle of SLMed Ti6Al4V alloy before and after excimer laser irradiation with time

3 结论

1) 在 50 个激光脉冲数下, 通过控制准分子激光功率密度在 $0 \sim 531 \text{ mJ/cm}^2$, 使 SLM 成形 Ti6Al4V 表面接触角由 $(116 \pm 4)^\circ$ 减小至 $(7.5 \pm 0.4)^\circ$, 试样在 48 h 内, 表面接触角在 $(6.4 \pm 0.6)^\circ \sim (9.6 \pm 0.3)^\circ$ 范围内浮动, 表明激光辐照后试样的浸润性具有一定的时效性。

2) Ti6Al4V 合金 SLM 成形件的表面形貌与激光能量密度有关, 随着激光能量密度的增加, 表面粗糙度逐渐减小, 当激光能量密度为 531 mJ/cm^2 时, 表面粗糙度减小到最小值 $(8.3 \pm 1.7) \mu\text{m}$ 。这表明, 改变准分子激光辐照的能量密度, 可以使试样表面更加平滑和致密。

3) 激光辐照后的 Ti6Al4V 与氧气反应, 导致氧

元素含量增加至 33.54%, 生成 TiO 。 TiO 产生的物理过程为: 当脉冲数量较少时, 由于激光辐照热效应产生的温度较低 ($>300^\circ\text{C}$), Ti 和 O_2 反应生成 TiO_2 ; 随着脉冲数增加到 50 时, 产生了大量的热累积, 此时温度达到 1600°C 以上, Ti 又与 TiO_2 反应生成 TiO 。

4) Ti6Al4V 合金 SLM 成形件表面浸润性的变化可以通过 Cassie-Baxter 模型和三维表面形貌变化来解释, 激光辐照后的 Ti6Al4V 表面更加光滑, 使固-液-气复合界面上固体所占的百分比增加, 因而变得更加亲水。

参考文献:

- [1] XU W, LUI E W, PATERAS A, et al. In-situ tailoring microstructure in additively manufactured Ti-6Al-4V for superior mechanical performance[J]. Acta materialia, 2017, 125: 390-400.
- [2] XU Y, ZHANG D, HU S, et al. Mechanical properties tailoring of topology optimized and selective laser melting fabricated Ti6Al4V lattice structure[J]. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2019, 99: 225-239.
- [3] ZHANG M, YANG Y, WANG D, et al. Microstructure and mechanical properties of CuSn/18Ni300 bimetallic porous structures manufactured by selective laser melting [J]. Materials & design, 2019, 165: 107583.
- [4] YU T, HYER H, SOHN Y, et al. Structure-property relationship in high strength and lightweight AlSi10Mg microlattices fabricated by selective laser melting[J]. Materials & design, 2019, 182: 108062.
- [5] 王琪超, 杜楠, 王帅星, 等. Ti6Al4V 微弧氧化 TiO_2/W 复合膜的制备及摩擦学性能[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 191-199.
WANG Qi-chao, DU Nan, WANG Shuai-xing, et al. Preparation and tribological property of TiO_2/W composite coating on Ti6Al4V by micro-arc oxidation[J]. Surface technology, 2019, 48(1): 191-199.
- [6] 周斌, 张婷, 林峰, 等. 电子束选区熔化成形 Ti6Al4V 和 316L 不锈钢叶轮体微观组织和力学性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(1): 175-180.
ZHOU Bin, ZHANG Ting, LIN Feng, et al. Study of

- microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V and 316L stainless steel impeller body by electron beam selective melting[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2018, 47(1): 175-180.
- [7] 徐仰立, 张冬云, 郭彦梧, 等. 选区激光熔化成形 Ti6Al4V 合金拉伸性能提高的研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(5): 108-115.
- XU Yang-li, ZHANG Dong-yun, GUO Yan-wu, et al. Improvement of tensile properties of Ti6Al4V alloy by selective laser melting[J]. *Surface technology*, 2019, 48(5): 108-115.
- [8] ZHANG H, GU D, MA C, et al. Surface wettability and superhydrophobic characteristics of Ni-based nanocomposites fabricated by selective laser melting[J]. *Applied surface science*, 2019, 476: 151-160.
- [9] CHEN Z, WU X, TOMUS D, et al. Surface roughness of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy components[J]. *Additive manufacturing*, 2018, 21: 91-103.
- [10] CHARLES A, ELKASEER A, THIJS L, et al. Effect of process parameters on the generated surface roughness of down-facing surfaces in selective laser melting[J]. *Applied sciences*, 2019, 9(6): 1256.
- [11] GITTENS R A, SCHEIDELER L, RUPP F, et al. A review on the wettability of dental implant surfaces II: Biological and clinical aspects[J]. *Acta biomaterialia*, 2014, 10(7): 2907-2918.
- [12] KAO W H, SU Y L, HORNG J H, et al. Tribological, electrochemical and biocompatibility properties of Ti6Al4V alloy produced by selective laser melting method and then processed using gas nitriding, CN or Ti-C: H coating treatments[J]. *Surface and coatings technology*, 2018, 350: 172-187.
- [13] HUERTA-MURILLO D, GARCÍA-GIRÓN A, ROMANO J M, et al. Wettability modification of laser-fabricated hierarchical surface structures in Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. *Applied surface science*, 2019, 463: 838-846.
- [14] ROTELLA G, ALFANO M, CANDAMANO S. Surface modification of Ti6Al4V alloy by pulsed Yb-laser irradiation for enhanced adhesive bonding[J]. *CIRP annals*, 2015, 64(1): 527-530.
- [15] 曾勇, 魏小波, 蒋毅坚. 激光辐照 PA2200 材料 3D 打印件的表面浸润性[J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1201006.
- ZENG Yong, WEI Xiao-bo, JIANG Yi-jian. Surface wettability of PA2200 3D printing parts by laser irradiation[J]. *Chinese journal of lasers*, 2018, 45(12): 1201006.
- [16] LANGER H J. EOS titanium Ti64 light metal for aerospace, motorsports and biomedical applications [EB/OL]. (2016-07-28) [2020-02-24]. https://www.eos.info/systems_solutions/metal.
- [17] XU Y, ZHANG D, GUO Y, et al. Microstructural tailoring of as-selective laser melted Ti6Al4V alloy for high mechanical properties[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2020, 816: 152536.
- [18] VRANCKEN B, THIJS L, KRUTH J P, et al. Heat treatment of Ti6Al4V produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2012, 541: 177-185.
- [19] 程序. 航天·医学领域钛合金材料基础研究及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- CHENG Xu. Basic research and application of titanium alloy materials in aerospace and medical fields[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [20] MILOVANOVIĆ D S, PETROVIĆ S M, SHULEPOV M A, et al. Titanium alloy surface modification by excimer laser irradiation[J]. *Optics & laser technology*, 2013, 54: 419-427.
- [21] MARESSA P, ANODIO L, BERNASCONI A, et al. Effect of surface texture on the adhesion performance of laser treated Ti6Al4V alloy[J]. *The journal of adhesion*, 2015, 91(7): 518-537.
- [22] WENZEL R N. Resistance of solid surfaces to wetting by water[J]. *Industrial and engineering chemistry*, 1936, 28(8): 988-994.
- [23] CASSIE A B D. Contact angles[J]. *Discussions of the Faraday Society*, 1948, 3: 11-16.
- [24] 崔炳. 激光辐照制备 PTFE、FEP、PFA 涂层技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016: 14-16.
- CUI Bing. Investigation on preparation of PTFE, FEP, PFA coating by laser irradiation[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016: 14-16.