

激光与光电子学进展

激光重熔对 TC4 选区激光熔化成形质量及力学性能的影响

李佳宜, 刘玉德*, 周裕圣, 石文天, 张萌

北京工商大学人工智能学院, 北京 100048

摘要 研究了激光重熔在选区激光熔化(SLM)制备 TC4 钛合金时对样件的成形质量以及力学性能等方面的影响。实验结果表明,随着激光重熔次数的增加,TC4 样件的上表面质量和致密度逐渐改善,上表面粗糙度值和致密度分别由未重熔时的 13.2 μm 和 98.43% 改善为重熔两次的 8.7 μm 和 99.23%,但是侧表面质量未有明显变化。随着激光重熔次数的增加,伸长率有所增加,由未重熔时的 1.15% 改善为重熔两次的 1.33%,但是抗拉强度基本相同。通过对 TC4 样件的显微组织进行观察,发现激光重熔前后 TC4 样件的显微组织上均由针状马氏体 α' 相占据。

关键词 激光光学; 激光技术; 选区激光熔化; TC4 钛合金; 激光重熔; 力学性能; 表面质量

中图分类号 TN249; TG146.23

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0514006

Effect of Laser Remelting on Quality and Mechanical Properties of Selective Laser Melting of TC4

Li Jiayi, Liu Yude*, Zhou Yusheng, Shi Wentian, Zhang Meng

School of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

Abstract The effect of laser remelting on the forming quality and mechanical properties of sample components during the preparation of TC4 titanium alloy using selective laser melting (SLM) is examined. According to the experimental results, the upper surface quality and densities of TC4 samples improve with increasing laser remelting iterations, and the upper surface roughness and densities improve from 13.2 μm and 98.43% without remelting to 8.7 μm and 99.23% with remelting twice, respectively. The side surface quality, however, does not alter considerably. The elongation increases and improves with laser remelting iterations, from 1.15% to 1.33%, but the tensile strength remains constant. Observing the microstructure of the TC4 sample, the acicular martensite α' phase occupies the microstructure of the TC4 sample before and after laser remelting.

Key words laser optics; laser technique; selective laser melting; TC4 titanium alloy; laser remelting; mechanical property; surface quality

1 引言

与传统的等材、减材制造技术相比,3D 打印(增材制造)技术^[1-2]因其层层叠加的特点,在加工方式

上具有巨大的优势。而选区激光熔化(SLM)技术^[3-6]在众多学者的研究下,已经成功应用于钛合金、不锈钢等多种金属材料,又因其具有自由度与精确度高、近净成形等特点,适用于具有复杂、精密

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-08-29; 录用日期: 2021-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(51975006)

通信作者: *liu_yude@163.com

结构的金属部件,是近些年来获得广泛关注的金属 3D 打印技术之一。TC4 钛合金^[7-8]具有耐腐蚀好、比强度高、热稳定性好、抗疲劳和生物相容性等特点,广泛应用于航空航天、汽车、医疗等领域。

然而,SLM 技术在成形钛合金材料时会产生孔隙、裂纹等缺陷,这些缺陷会降低成型件的力学性能,而在 SLM 过程中的金属滴液飞溅、粉末黏附等现象也会显著降低成型件的表面质量^[9-13]。针对这些问题,研究学者们在 SLM 过程的工艺参数优化与后处理等方面进行了许多研究。

金鑫源等^[14]基于 SLM 技术的原理与特点,从粉体、扫描轨迹、打印参数、倾斜角度等方面概述了 SLM 成形件表面粗糙度的主要控制因素,并且对机械抛光、激光抛光等改善表面粗糙度的主要后处理工艺进行了总结。黄建国等^[15]从能量密度的角度研究了各类工艺参数对 SLM 成形 TC4 合金成形质量的影响;实验结果表明,当能量密度增高时,SLM 成形 TC4 合金在硬度、力学性能等方面会在达到一个最优值后逐步下降。Liang 等^[16]对 SLM 成形 TC4 合金的微观结构、相变和拉伸性能等进行了分析,并且还研究了 TC4 样件经过不同方式的热处理之后性能受到的影响;实验结果表明,由于显微组织的演变,在 800 °C 和 850 °C 下进行 4 小时的热处理后在空气中进行冷却得到的 TC4 样件有良好的综合性能表现。张成等^[17]通过使用线扫描功率、曝

光时间等不同打印参数制备了 SLM 成形 TC4 样件,研究了不同打印参数和退火处理对样件微观组织和性能的影响;实验结果表明,随着线扫描功率的升高,试样的缺陷逐渐减少,退火处理可以有效提高 SLM 成形 TC4 合金的力学性能。李浩浩等^[18]研究了再扫描激光功率对 SLM 成形 TC4 样件的致密度、缺陷尺寸、硬度的影响;实验结果表明,一方面,再扫描处理会使样件 β 相晶粒粗化并且使 TC4 样件的孔隙率降低、硬度提高,另一方面,晶粒宽度会随着扫描功率的提高而降低。

综上所述,对打印参数的合理优化以及后处理技术的适当使用可以提高 SLM 成形件的打印质量,但是成形件依然有孔隙、表面球化等缺陷。因此,本文研究不同次数的激光重熔对 SLM 成形的 TC4 钛合金样件的成形质量的影响,系统地解释了影响规律并且与未处理的样品进行了比较。

2 实验方法与设备

2.1 实验材料及设备

实验以 TC4 粉末作为实验原料。图 1(a)为扫描电镜(SEM)下观察到的 TC4 粉末微观形貌,图 1(b)为粉末粒径分布图。从图中可以看出,粒径尺寸主要集中在 11~93 μm ,颗粒的平均直径约为 38.9 μm 。为保证熔覆层与基板的结合度,实验时所用基板材料为铸造 TC4 板料,其化学成分如表 1 所示。

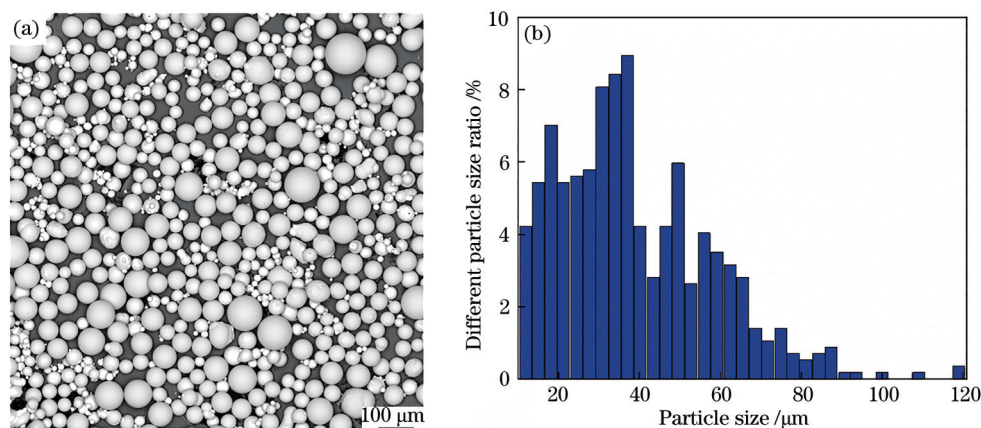


图 1 TC4 粉末的微观形貌和粒径分布。(a)粉末形貌图;(b)粉末粒径百分比

Fig. 1 Microstructure and particle size distribution of TC4 powder. (a) Powder morphology; (b) percentage of powder particle size

表 1 TC4 粉末各成分的质量分数

Table 1 Mass fraction of each component of TC4

titanium alloy powder							unit: %
Al	V	Fe	C	N	O	H	Ti
6.22	3.96	0.25	0.04	0.03	0.14	0.01	Balance

实验使用 Renishaw AM400 选区激光熔化成形设备,该设备的最大激光功率为 400 W,激光束直径为 70 μm ,采用刮刀铺粉方式将金属粉末材料均匀铺在基板上。加工室内允许加工最大为 250 mm \times 250 mm \times 300 mm 规格的成形试件。在

进行打印工作前,AM400 打印机首先会将工作腔内的空气抽走建立真空状态,随后会回填高纯度的氩气以保证氧气的质量分数低于 0.02%。因此在打印过程中,工作腔内气体压力与外界气压相同,约为一个标准大气压。

2.2 实验方案

SLM 样件成形示意图如图 2 所示,其中 δ 为线

间距, d 为点间距; φ 为激光光斑直径, N 为层数, h 为层厚。打印过程中,使用图 2 中由 N 到 $N+1$ 再到 $N+2$ 的成形方向与旋转角度为 67° 的层叠扫描策略,此种打印方式可以有效提高成形质量^[19]。成形工艺参数如下:激光功率为 300 W,层厚为 $50\ \mu\text{m}$,扫描线间距为 $60\ \mu\text{m}$,曝光时间为 $60\ \mu\text{s}$,扫描速度为 $550\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。多层块体搭接率^[20]约为 50%。

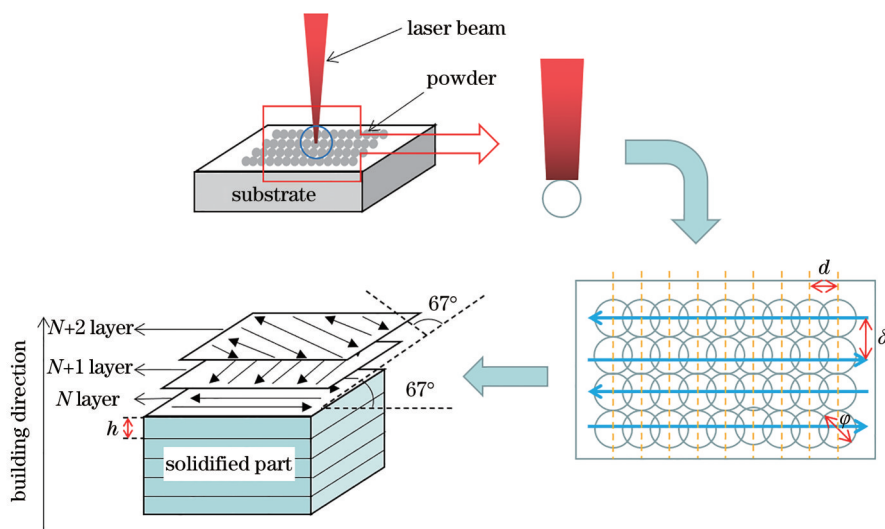


图 2 SLM 样件成形过程

Fig. 2 Forming process of SLM sample

在每层打印成形之后,打印机会使用相同的参数根据设定的重熔次数在相同的位置上进行重熔处理,因此该重熔属于原位重熔。由于重熔处理是在每层初次打印完成之后才进行的,因此打印成形与重熔的时间间隔与打印样件的大小以及设定的扫描速度有关。本次实验中,分别制备激光重熔次数为 0~2 次的 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 2\ \text{mm}$ 矩形块体样件与如图 3 所示的力学拉伸样件。制备矩形块体时,首先使用 ASI SZ-2000 自动立体变焦显微镜测量上表面与侧表面粗糙度,使用 VHX-600ESO 超景

深显微镜和 Phenom XL 扫描电镜分别观察样件的表面形貌,并且使用阿基米德排水法测量致密度。然后使用 XQ-1 型金相试样镶嵌机对样件进行镶嵌,使用 ZMP-2000 金相磨抛机对已镶嵌好的样件进行打磨抛光,最后再使用成分比为 $\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}=2.5:1.5:1:95$ 的 Kroll 腐蚀液对抛光好的样件进行腐蚀。使用 Phenom XL 扫描电镜观察腐蚀完成后样件的显微组织形貌,并且使用 ASI SZ-2000 自动立体变焦显微镜进行测量,得到截面缺陷图像。制备拉伸样件时,使用 instron5966 型力学拉伸机进行拉伸实验,记录数据并对得到的数据进行进一步的分析处理。

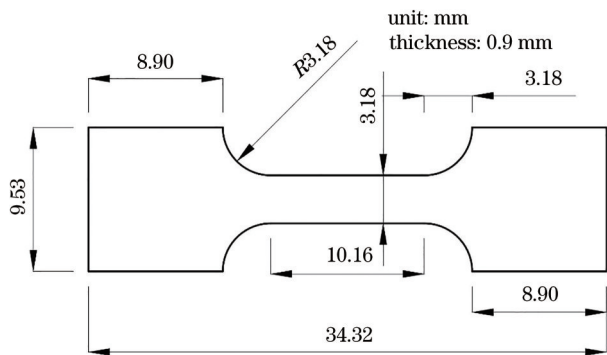


图 3 拉伸样件几何尺寸

Fig. 3 Geometric dimension of tensile sample

3 分析与讨论

3.1 表面形貌分析

图 4 为 SLM 成形的矩形块体样件的上表面、侧表面形貌与粗糙度 R_a ,从图 4 中可以看出,激光重熔对于 SLM 制备 TC4 钛合金表面质量的影响。

图 4(a)为未进行激光重熔的 TC4 样件上表面形貌,从图中可以看出,SLM 成形 TC4 样件上表面有大量不规则颗粒和球状凸起,表面质量较差,粗

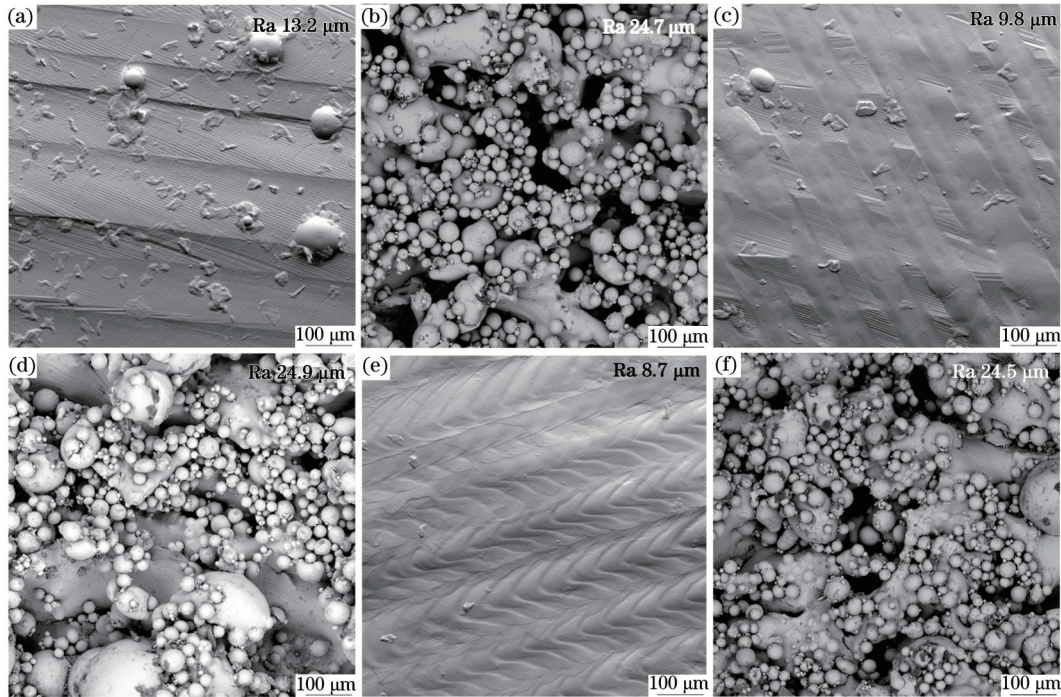


图4 不同激光重熔次数的TC4样件典型表面形貌与测量粗糙度值。(a)上表面未重熔;(b)侧表面未重熔;(c)上表面重熔1次;(d)侧表面重熔1次;(e)上表面重熔2次;(f)侧表面重熔2次;

Fig. 4 Typical surface morphologies and measured roughness values of TC4 samples with different laser remelting times.

(a) Upper surface not remelted; (b) side surface not remelted; (c) upper surface remelting once; (d) side surface remelting once; (e) upper surface remelting twice; (f) side surface remelting twice

糙度为 $13.2 \mu\text{m}$ 。经过1次激光重熔后,如图4(c)所示,样件表面的不规则颗粒和球状凸起明显减少,粗糙度为 $9.8 \mu\text{m}$ 。从图4(e)可以看出,经过2次激光重熔之后,样件上表面的不规则颗粒和球状凸起进一步减少,粗糙度为 $8.7 \mu\text{m}$ 。上表面质量随着激光重熔次数的增加逐渐改善,一方面在于激光重熔会进一步熔化上表面粘附的粉末,且随着重熔次数的增多,粘附的粉末会熔化得越来越彻底;另一方面,由于在SLM成型过程中,熔融产生的液态金属在界面张力的作用下,液态金属表面的形状会产生向球形表面转变的趋势,从而产生球化现象,而激光重熔过程会更好地将粉层穿透熔化,有助于进一步消除球化效应^[21-22]。

图4(b)、(d)、(f)分别为激光重熔次数从0到2的样件的侧表面形貌与粗糙度。从图中可以看出,每个样件的侧表面均粘附有大量未熔化粉末,SLM成形TC4钛合金的侧表面质量没有得到有效的改善,从重熔0次到重熔2次TC4样件的侧表面粗糙度分别为 $24.7, 24.9, 24.5 \mu\text{m}$,各样件粗糙度无较大的差异。因为尽管激光重熔过程会熔化粘附在样件侧表面的粉末,但是侧表面依然同上表面一样

会产生孔隙等缺陷,更主要的是由于样件侧表面直接与粉床接触,在首次SLM成形以及后续的激光重熔过程中均会产生从低表面张力区域到高表面张力区域的马兰戈尼对流(Marangoni convection)^[23]。马兰戈尼对流可能会带动相邻粉床中的粉末进入熔池当中、粘附在侧表面上,从而严重地降低了侧表面质量。因此无论进行多少次的激光重熔过程,都不能改善SLM成形TC4合金的侧表面质量,这也是激光重熔工艺在改善TC4样件表面质量上的局限之处。

3.2 致密度分析

采用阿基米德排水法来测量样件致密度,表达式为

$$\theta = \left\{ \frac{M \left[\frac{(M_1 - M_0)}{\rho_0} \right]}{\rho_1} \right\} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: θ 为致密度; M 为TC4样件质量,单位为g; M_1 为浸入水中的TC4样件和水的总质量,单位为g; M_0 为水的质量,单位为g; ρ_0 为水的密度,单位为 g/cm^3 ; ρ_1 为TC4钛合金的标准密度,单位为 g/cm^3 。

图5为取样观察示意图,对TC4块体试样取

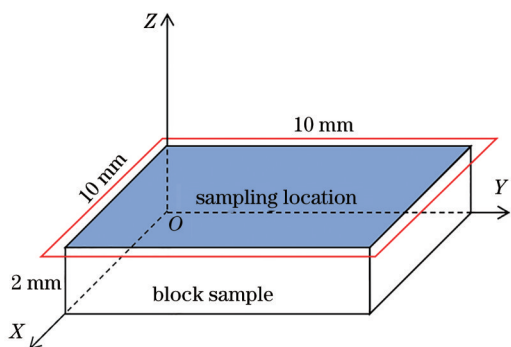


图 5 取样观察示意图

Fig. 5 Schematic diagram of sampling observation

XOY面进行观察。

不同重熔次数样件的截面缺陷图像与部分缺陷电镜形貌图像如图 6 所示,其中图 6(a1)、(b1)、(c1)为不同重熔次数样件的截面缺陷图像,图 6(a2)、(b2)、(c2)分别为图 6(a1)、(b1)、(c1)中部分缺陷电镜形貌图像。从图 6(a1)、(a2)可以看

出,由于在 SLM 过程中可能会出现孔隙、球化、液滴飞溅以及未熔化粉末等问题,未重熔 TC4 样件在截面上存在数量较多、尺寸较大的缺陷,所以其致密度^[12]较差,仅为 98.43%。而从图 6(b1)和图 6(b2)、图 6(c1)和图 6(c2)可以看出,相比于图 6(a1)、(a2),进行过激光重熔之后的 TC4 样件截面缺陷相比未重熔的 TC4 样件明显减少。这是因为激光重熔可以将初次 SLM 成型后的部分熔化后再次形成熔池,重熔过程在促进熔池内部不断流动的同时也会填补之前产生的气孔缺陷,更加充分地熔化之前未完全熔化的粉末^[24]。因此激光重熔次数越多,材料总的熔化时间越长,熔池内部流动也会越充分,更有助于样件气孔缺陷内气体的排出和打印层与层之间的更好结合。所以随着激光重熔次数的增加,样件截面上的缺陷尺寸与数量逐渐降低,致密度相较于未重熔样件变好,分别为 98.93% 和 99.23%。

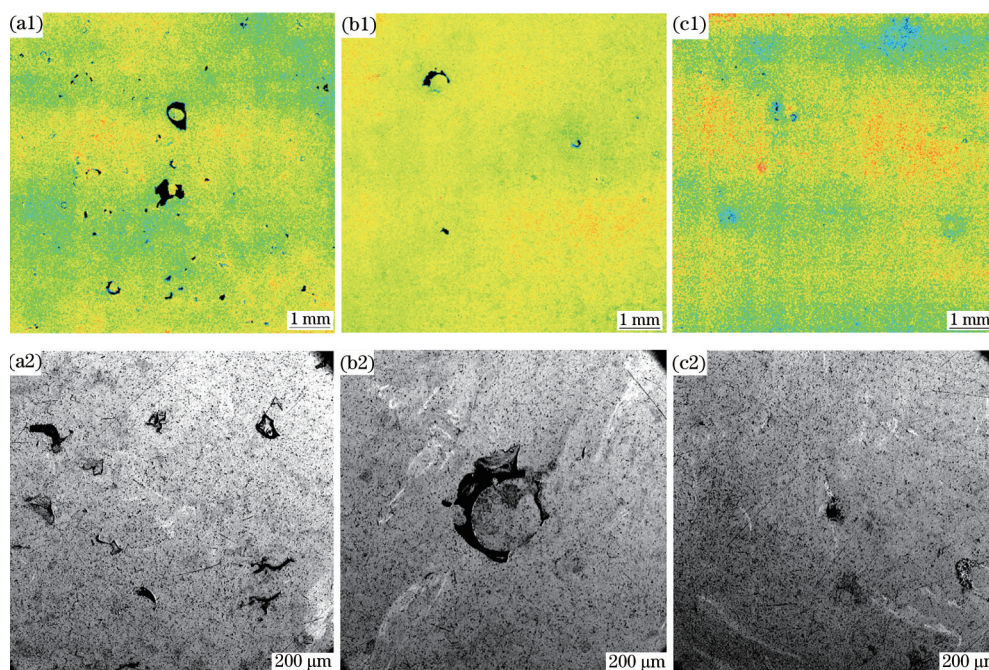


图 6 不同重熔次数 TC4 样件的截面缺陷。(a1)(a2)未重熔;(b1)(b2)重熔 1 次;(c1)(c2)重熔 2 次

Fig. 6 Section defects of TC4 samples with different remelting times. (a1)(a2) Not remelted;

(b1)(b2) remelting once; (c1)(c2) remelting twice

3.3 力学性能分析

图 7 为不同激光重熔次数下 SLM 成形 TC4 样件的伸长率与抗拉强度。从图 7(a)中可以看出,样件的伸长率随着重熔次数的增加而提高,未重熔的 SLM 样件伸长率为 1.15%,重熔次数为 1 次、2 次的 SLM 样件伸长率分别为 1.27% 和 1.33%。同样从图 7(b)可以看出,重熔次数对样件的抗拉强度并没

有明显的影响。

观察图 6 与图 7(a)的实验结果可知,在 TC4 样件致密度提高的同时其拉伸性能也得到了改善,所以激光重熔对于 TC4 样件拉伸性能的影响可能与样件的致密度有着密切的关系。不同重熔次数的拉伸件断口形貌电镜图如图 8 所示,其中图 8(a1)、(b1)、(c1)为不同重熔次数的拉伸件断口形貌电镜

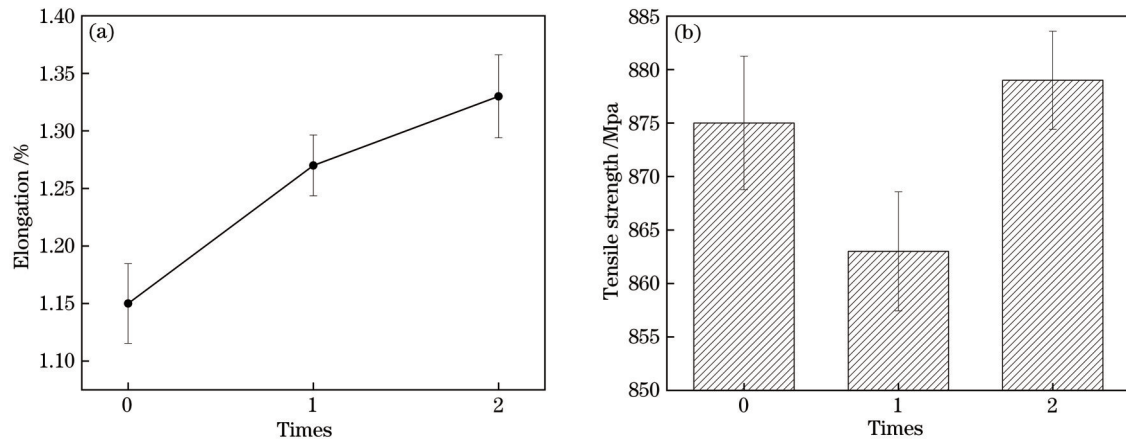


图 7 不同重熔次数 TC4 样件的抗拉强度和伸长率。(a)重熔次数与伸长率关系;(b)重熔次数与抗拉强度关系

Fig. 7 Tensile strength and elongation of TC4 samples with different remelting times. (a) Relationship between remelting times and elongation; (b) relationship between remelting times and tensile strength

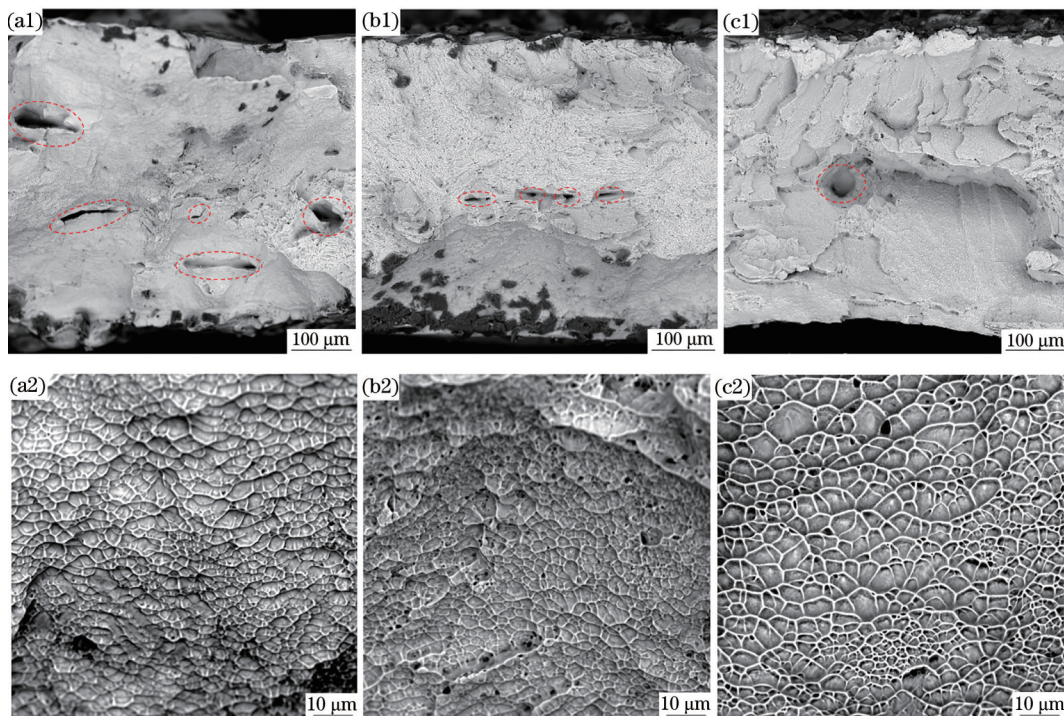


图 8 不同重熔次数拉伸样件断口形貌。(a1)(a2)未重熔;(b1)(b2)重熔 1 次;(c1)(c2)重熔 2 次

Fig. 8 Fracture morphology of tensile samples with different remelting times. (a1)(a2) Not remelted; (b1)(b2) remelting once; (c1)(c2) remelting twice

图, 图 8(a2)、(b2)、(c2)分别为对图 8(a1)、(b1)、(c1)断口形貌进一步放大观察的韧窝特征电镜图像。由图 8(a2)、(b2)、(c2)可知, 拉伸断口都表现出了韧窝特征, 这表明拉伸件在断裂前都发生了不同程度的变形。从图 8(a1)可以看出, 断口处存在数量较多、面积较大的气孔缺陷。而随着重熔次数的增加, 断口表面气孔缺陷的数量与面积均呈现下降趋势, 如图 8(b1)、(c1)所示。因此, 激光重熔之后样件内部气孔缺陷减少, 减少了拉伸过程中应力

集中可能出现的位置, 所以在致密度提高的同时也有利于拉伸性能的提高^[25]。

3.4 显微组织分析

TC4 钛合金属于典型的 $\alpha + \beta$ 双相钛合金, 显微组织形态是决定 TC4 钛合金性能的重要因素之一, 而 SLM 成形过程中的工艺参数与扫描策略以及合金的化学成分、温度分布、冷却速率等都会对显微组织形态产生影响, TC4 钛合金^[26-27]的相态分布受冷却速率影响较大。

在扫描激光束的作用下,TC4合金粉末在较短的时间内从粉末熔化形成熔池之后再迅速冷却凝固。而高达 $10^8 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ 的冷却速率远远超过了 $410 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的临界冷却速率,导致 β 相发生马氏体转变从而获得针状 α' 马氏体^[28-30]。激光重熔过程中的

冷却速率也与初次扫描时相同,远超临界冷却速率。因此重熔过程中的针状马氏体 α' 相会再次分解,并且在冷却过程中会再次生成马氏体 α' 相^[24]。无论没有重熔还是两次重熔的 TC4 样件均得到了针状马氏体 α' 相,如图 9 所示。

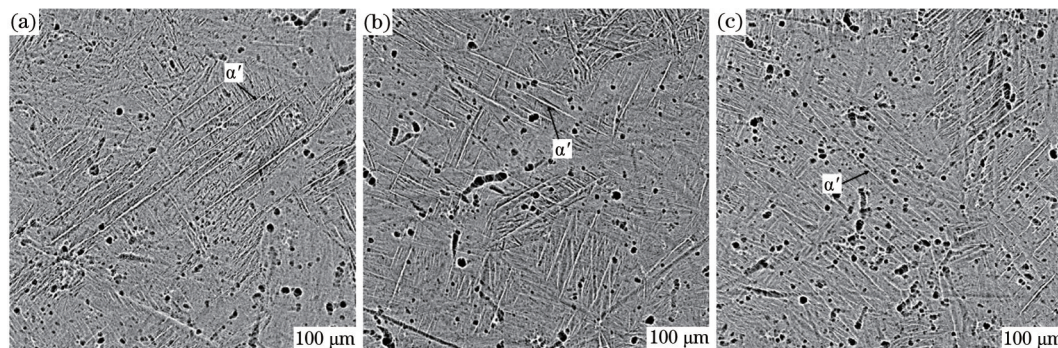


图 9 不同激光重熔次数时 SLM 成形 TC4 的微观形貌。(a) 未重熔;(b) 重熔 1 次;(c) 重熔 2 次

Fig. 9 Microstructure of TC4 formed by SLM with different laser remelting times. (a) Not remelted; (b) remelting once; (c) remelting twice

4 结 论

采用高功率脉冲激光器对 TC4 钛合金粉末进行了不同次数的激光重熔处理,分析了不同激光重熔次数对 SLM 成形 TC4 样件表面形貌、力学性能、显微组织等方面的影响,并研究了产生这些影响的原因。实验结果表明,激光重熔能明显改善 TC4 样件的上表面质量、拉伸性能和致密度水平,且改善效果随着重熔次数的增加而变好。激光重熔处理工艺是针对改善 SLM 成形质量方面,除打印参数、后处理工艺外的补充,因此激光重熔处理能在采用适当的打印参数、后处理工艺的基础上进一步提高 SLM 成形质量。实验结果也表明,重熔处理在侧表面质量、抗拉强度等方面仍有局限性,这也是今后研究的重点。

参 考 文 献

- [1] Hao J X, Liu Y D, Shi W T, et al. Mechanical properties and microstructure of TC4 samples formed by selective laser melting after annealing treatment [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2021, 41(5): 607-610.
郝锦曦, 刘玉德, 石文天, 等. 选区激光熔化成形 TC4 合金退火态力学性能及组织的研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41(5): 607-610.
- [2] Qin Y L, Sun B H, Zhang H, et al. Development of selective laser melted aluminum alloys and aluminum

matrix composites in aerospace field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402002.

秦艳利, 孙博慧, 张昊, 等. 选区激光熔化铝合金及其复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 1402002.

- [3] Yap C Y, Chua C K, Dong Z L, et al. Review of selective laser melting: materials and applications[J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(4): 041101.
- [4] Zhang L C, Klemm D, Eckert J, et al. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of a biomedical Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65(1): 21-24.
- [5] Murr L E, Gaytan S M, Medina F, et al. Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays[J]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2010, 368(1917): 1999-2032.
- [6] Yang Y Q, Chen J, Song C H, et al. Current status and progress on technology of selective laser melting of metal parts[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 011401.
杨永强, 陈杰, 宋长辉, 等. 金属零件激光选区熔化技术的现状及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 011401.
- [7] Zhang J L, Li F L, Zhang H J. Research progress on preparation of metallic materials by selective laser melting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(10): 100003.

- 张家莲, 李发亮, 张海军. 选区激光熔化技术制备金属材料研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(10): 100003.
- [8] Zhang S, Gui R Z, Wei Q S, et al. Cracking behavior and formation mechanism of TC4 alloy formed by selective laser melting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(23): 21-27.
张升, 桂睿智, 魏青松, 等. 选择性激光熔化成形 TC4 钛合金开裂行为及其机理研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 21-27.
- [9] Yang J, Liu Y D, Shi W T, et al. Process optimization and performance investigation in selective laser melting of large layer-thickness 316L powder[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(1): 011401.
杨锦, 刘玉德, 石文天, 等. 大层厚 316L 选区激光熔化工艺优化及性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 011401.
- [10] 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.
- [11] Stef J, Poulon-Quintin A, Redjaimia A, et al. Mechanism of porosity formation and influence on mechanical properties in selective laser melting of Ti-6Al-4V parts[J]. Materials & Design, 2018, 156: 480-493.
- [12] Tian J, Huang Z H, Qi W J, et al. Research progress on selective laser melting of metal[J]. Materials Review, 2017, 31(S1): 90-94, 101.
田杰, 黄正华, 戚文军, 等. 金属选区激光熔化的研究现状[J]. 材料导报, 2017, 31(S1): 90-94, 101.
- [13] Liu R C, Yang Y Q, Wang D. Research of upper surface roughness of metal parts fabricated by selective laser melting[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.
- [14] Jin X Y, Lan L, He B, et al. A review on surface roughness of metals parts fabricated by selective laser melting[J]. Materials Reports, 2021, 35(3): 3168-3175.
金鑫源, 兰亮, 何博, 等. 选区激光熔化成形金属零件表面粗糙度研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(3): 3168-3175.
- [15] Huang J G, Yu H, Xu Z F, et al. Effects of processing parameters on performance of TC4 alloy samples by selective laser melting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(4): 375-379.
黄建国, 余欢, 徐志锋, 等. 基于 SLM 的工艺参数对 TC4 合金成形件性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(4): 375-379.
- [16] Liang Z L, Sun Z G, Zhang W S, et al. The effect of heat treatment on microstructure evolution and tensile properties of selective laser melted Ti₆Al₄V alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 782: 1041-1048.
- [17] Zhang C, Liu Y D, Zhang M, et al. Mechanical properties and microstructure analysis of selective laser melting TC4 sample[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(3): 302-306.
张成, 刘玉德, 张萌, 等. 选区激光熔化 TC4 试样的力学性能及微观组织分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(3): 302-306.
- [18] Li H H, Wu M P, Ma Y Q, et al. Effect of rescanning on microstructure and properties of TC4 titanium alloy prepared by selective laser melting[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(8): 91-96.
李浩浩, 武美萍, 马毅青, 等. 再扫描对选区激光熔化成形 TC4 钛合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(8): 91-96.
- [19] Ziętala M, Durejko T, Polański M, et al. The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 677: 1-10.
- [20] Qi B, Liu Y D, Shi W T, et al. Study on overlap ratio of pulse laser selective melting forming[J]. Laser Technology, 2018, 42(3): 311-317.
祁斌, 刘玉德, 石文天, 等. 脉冲式激光选区熔化成形搭接率的研究[J]. 激光技术, 2018, 42(3): 311-317.
- [21] Wu W H, Yang Y Q, Wang D. Balling phenomenon in selective laser melting process[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(5): 110-115.
吴伟辉, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成型过程的球化现象[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 110-115.
- [22] Mumtaz K, Hopkinson N. Selective laser melting of Inconel 625 using pulse shaping[J]. Rapid Prototyping Journal, 2010, 16(4): 248-257.
- [23] Rombouts M, Kruth J P, Froyen L, et al. Fundamentals of selective laser melting of alloyed

- steel powders[J]. CIRP Annals, 2006, 55(1): 187-192.
- [24] Ye X, Wu M P, Miu X J, et al. Influence of laser remelting on forming quality of Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting[J]. Surface Technology, 2021, 50(8): 301-310.
叶秀, 武美萍, 缪小进, 等. 激光重熔对 Ti-6Al-4V 选区激光熔化成形质量的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 301-310.
- [25] Wei K W, Lv M, Zeng X Y, et al. Effect of laser remelting on deposition quality, residual stress, microstructure, and mechanical property of selective laser melting processed Ti-5Al-2.5Sn alloy[J]. Materials Characterization, 2019, 150: 67-77.
- [26] Zaeh M F, Branner G. Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting [J]. Production Engineering, 2010, 4(1): 35-45.
- [27] Xiao Z N, Liu T T, Liao W H, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy formed by selective laser melting after heat treatment [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0902001.
肖振楠, 刘婷婷, 廖文和, 等. 激光选区熔化成形 TC4 钛合金热处理后微观组织和力学性能[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0902001.
- [28] Xiao M L, Ke L D, Lai C F, et al. High-temperature tensile properties and fracture morphology analysis of TC4 titanium alloy formed by selective laser melting [J]. Applied Laser, 2021, 41(2): 350-356.
肖美立, 柯林达, 赖彩芳, 等. SLM 成形 TC4 钛合金高温拉伸力学性能及断裂机制分析[J]. 应用激光, 2021, 41(2): 350-356.
- [29] Ahmed T, Rack H J. Phase transformations during cooling in $\alpha + \beta$ titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 243(1/2): 206-211.
- [30] Dou E H, Xiao M L, Ke L D, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of selective-laser-melted TC11 titanium alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602117.
窦恩惠, 肖美立, 柯林达, 等. 热处理对激光选区熔化成形 TC11 钛合金组织性能的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602117.