

多次激光修复对 ZTC4 钛合金组织与硬度的影响

潘博, 黄怡晨, 李俐群*, 陶汪

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 采用了同轴送粉式激光熔覆技术对 ZTC4 钛合金板材上的圆孔形缺陷进行修复, 研究了多次激光修复对 ZTC4 钛合金组织、热影响区尺寸及修复件硬度分布的影响。结果表明: 修复件热影响区呈现为网篮组织→集束组织→针状马氏体的过渡, 修复区组织主要由粗大的 β 柱状晶和内部的魏氏组织组成, 且修复区顶部魏氏组织的长度更长; 随着修复次数增多, 热影响区尺寸明显增大, 但硬度的增大并不明显。

关键词 激光技术; 激光修复; 铸造钛合金; 微观组织; 硬度

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1002011

Effects of Multiple Laser Repairs on Microstructure and Hardness of ZTC4 Titanium Alloy

Pan Bo, Huang Yichen, Li Liqun*, Tao Wang

State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract A hole defect in the ZTC4 titanium alloy plate is repaired by the coaxial powder-feeding laser-cladding technology. The effects of multiple laser repairs on the microstructure, heat-affected zone size, and hardness distribution of repaired parts are investigated. The result shows that the heat-affected zone of the repaired specimen exhibits a microstructural transition from a basketweave structure to a colonies structure, and then transition to a needle-shaped martensite. The repaired area primarily comprises a coarse β -columnar crystal and widmanstatten structure, which is longer at the top of the repaired area. During multiple repairs, the size of the heat-affected zone considerably increases. However, the hardness of the heat-affected zone only increases slightly.

Key words laser technique; laser repair; cast titanium alloy; microstructure; hardness

OCIS codes 140.3590; 140.6810; 140.3390

1 引 言

钛合金构件在铸造和长期的高温服役过程中很容易产生孔洞、裂纹等缺陷。由于这些构件的生产批量较小, 而且原材料的成本较高, 相比于重新制造, 对这些构件进行修复能在很大程度上降低成本和资源消耗, 尽可能延长部件的使用寿命^[1-3]。但由于已经修复后的构件在使用过程中仍有可能会出现气孔和裂纹等缺陷, 因此需要将已修复区域去除后进行二次甚至多次修复, 以保证构件的最佳使用寿命。钛合金经多次修复后的组织和性能的变化规律尚不明确, 制约着多次修复后钛合金构件的应用前景, 因此亟需研究多次修复对钛合金组织与性能的影响规律, 进而根

据相关标准评定其是否能够满足使用要求。

目前, 我国的补焊修复多采用手工 TIG (Tungsten Inert Gas Welding) 填丝方法。随着激光技术的发展, 近年来以同步送粉激光熔覆为基础的激光修复技术逐渐得到了国内外学者的关注。相比于手工电弧填丝修复, 激光修复可以采用自动化设备, 精度更高。同时, 由于激光修复具有较低的热输入, 修复区的变形和残余应力更小, 能更好地避免修复导致的二次损伤。近年来, 国内外学者针对不锈钢^[4]、铝合金^[5]、钛合金^[6]、镍合金^[7]以及其他高温合金^[8]等进行了激光修复研究, 但他们更多关注的是单次修复后修复区与基体热影响区组织和性能的变化。国内外在钛合金激光修复工艺方面已有一

收稿日期: 2019-05-06; 修回日期: 2019-06-01; 录用日期: 2019-06-13

* E-mail: liliquan@hit.edu.cn

定研究经验,如:西北工业大学凝固技术国家重点实验室对 TC4 钛合金叶片的磨损区进行了激光修复,发现热影响区(HAZ)内部的次生 α 相是其硬度较高的主要原因^[9];沈阳工业大学对 TA15 钛合金的孔、面和槽三种缺陷进行了激光修复,发现热影响区组织由等轴初生 α 相、片层状 α 组成,此外还夹杂着一些针状马氏体 α 相^[10];东北大学采用脉冲激光修复了 BT20 的钛合金杯子,重点关注了修复区的组织结构,发现修复区组织主要由 α' 马氏体组成,在修复的边缘区域,马氏体呈柱状分布,柱状结构的分布与液相向 β 相转变时的冷却速度有关^[11];比利时烈日大学的 Paydas 等^[12]完成了 TC4 凹槽的修复,并认为修复区的组织类型主要由修复过程中的热输入决定,当热输入较低时,修复区主要形成马氏体,当热输入较高时,将形成魏氏组织与马氏体的混合组织;欧洲宇航防务集团的 Brandl 等^[13]建立了 Ti-6Al-4V 激光熔化沉积过程的热模型,将微观组织分为母材区(BM)、HAZ_{($\alpha+\beta$)2}、HAZ_{($\alpha+\beta$)1}、HAZ _{β} ,部分熔化区(PMZ)、熔化区(CG)、融合区(FZ)和熔覆区(AM)等多个区域进行研究,建立了不同位置组织与热输入、冷却速度的相关性。

表 1 ZTC4 钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of ZTC4 titanium alloy

Element	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
Mass fraction /%	6.1	4.05	0.30	0.01	0.02	0.03	0.005	Bal.



图 1 待修复区域
Fig. 1 Area to be repaired

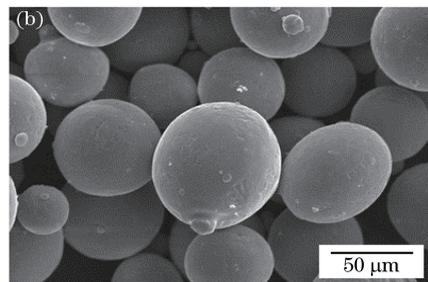
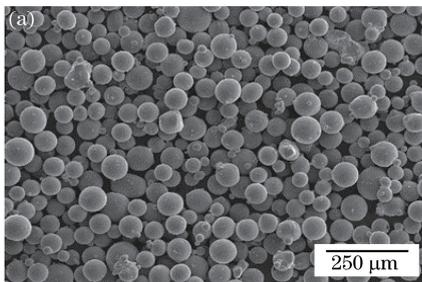


图 2 TC4 粉末的形貌。(a)粉末的微观形貌;(b)颗粒的表面形貌

Fig. 2 Morphologies of TC4 powder. (a) Microscopic morphology of powder; (b) surface morphology of powder

在铸造钛合金构件的性能评定中,组织状态、内部质量、硬度及力学性能是评定其修复质量的几个关键参考指标,由于以往研究主要是针对构件单次修复后的组织和性能展开的,缺少多次修复对母材热影响区影响规律的相关试验数据。在此背景下,本文以航空发动机机匣材料 ZTC4 钛合金为对象,系统研究了激光修复对修复区、热影响区组织结构的影响,重点分析多次激光修复对热影响区尺寸、组织及硬度的影响,为激光修复工艺规范的制定提供技术支撑与理论依据。

2 基本原理

2.1 试验材料

本次试验所用待修复材料为 ZTC4 钛合金,其名义成分为 Ti-6Al-4V,具体成分如表 1 所示。ZTC4 是标准牌号航空钛合金,被广泛应用于喷气发动机涡轮叶片的制造。试验用 ZTC4 板材的尺寸为 100 mm×100 mm×5 mm,屈服强度为 850.0 MPa,抗拉强度为 905.9 MPa,断后伸长率为 8.6%。待修复区域位于 ZTC4 板材中心,孔深为 3 mm,底部直径为 10 mm,侧壁开 45°坡口,如图 1 所示。

在选取激光修复所用粉末时,应保证粉末成分与母材成分尽可能相近,以便使修复区与母材区形成较好的熔合,并保证待修复件具有较好的力学性能。在本研究中,激光修复所用粉末为采用气雾化方法制备的 TC4 粉末,粒度为 45~105 μm ,球状度适中,粉末形貌如图 2 所示。

2.2 试验设备及方法

试验中使用的设备主要有:IPG-4000 光纤激光器、GTV PF2/2 双桶送粉器、KUKA 六轴机器人、

自制充氩舱和 Fraunhofer ILT 同轴送粉头。在试验前,首先将板材清洗干净,然后将其置于 120 °C 烘干箱中保温 1 h,以避免板材上的油污和氧化膜对试验产生不必要的影响。之后采用丙酮擦拭烘干后的板材表面,并将板材放入充氩仓中。试验中使用的 TC4 钛合金粉末同样需要在烘干箱中烘干 1 h,再放入送粉器中。

修复过程如图 3 所示。因为钛合金在空气中修复时会发生严重的氧化现象,在修复前应先向充氩舱中充入氩气,并控制充氩舱中水氧含量(体积分数)为 $0.1 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ 。在修复过程中,先将同轴保护气和载粉气开启,以保证粉末的均匀送出和激光熔覆过程的顺利进行。利用前期研究得到的单层熔覆工艺参数规划了圆孔的修复路径,如图 4

所示。在设定好的位置运行程序,直至修复过程结束时程序停止。修复过程具体参数如表 2 所示。

在完成第一次修复后,用铣刀铣去待修复区域,进行随后的再次修复。

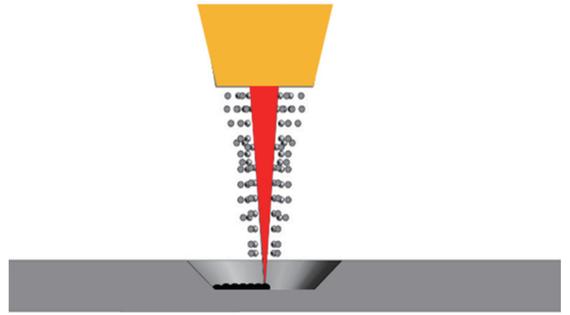


图 3 修复过程示意图

Fig. 3 Diagram of repair progress

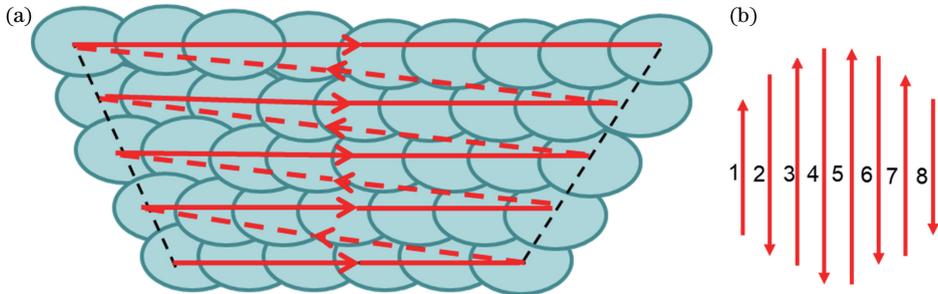


图 4 路径规划图。(a)正视图;(b)俯视图

Fig. 4 Path planning diagrams. (a) Front view; (b) top view

表 2 试验参数

Table 2 Experimental parameters

Parameter	Laser power /W	Scanning speed /($m \cdot \min^{-1}$)	Powder feeding speed /($g \cdot \min^{-1}$)	Layer height /mm	Carrier gas flow /($L \cdot \min^{-1}$)	Protective gas flow /($L \cdot \min^{-1}$)
Value	1100	0.6	5	0.6	8	13

3 实验结果与分析

3.1 ZTC4 激光修复的微观组织特征

ZTC4 板材在修复过程中会生成不同的微观组

织区域,这与该区域在修复过程中的热输入有关。图 5 为激光熔化沉积 ZTC4 试样的宏观组织,依据不同的组织状态,将修复后的试样划分为母材区、 $HAZ_{(\alpha+\beta)}$ 、 HAZ_{β} 和熔覆区 4 部分。



图 5 修复后试样的宏观形貌

Fig. 5 Macroscopic morphology of the sample after repair

母材区组织在修复过程中没有受到热输入的影响,所以其呈现的是原有的 ZTC4 钛合金的组织。

ZTC4 钛合金作为一种 $\alpha+\beta$ 钛合金,在铸造状态下组织由片状 α 相和晶间 β 相组成^[14],如图 6 所示。

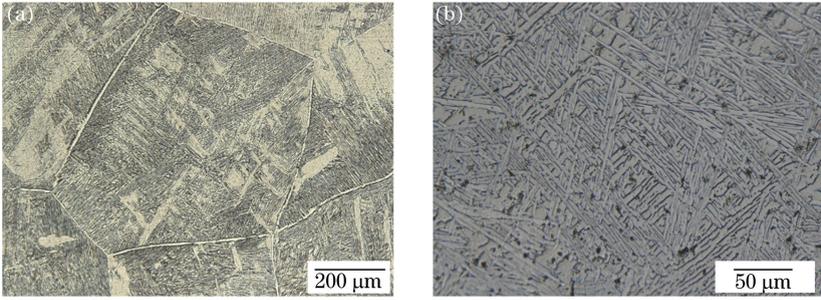


图 6 母材的 $\alpha+\beta$ 组织。(a)金相图片, $\times 300$; (b)金相图片, $\times 1000$

Fig. 6 Microstructure of $\alpha+\beta$ in base metal. (a) Metallographic image, $\times 300$; (b) metallographic image, $\times 1000$

在 $HAZ_{(\alpha+\beta)}$ 中, 因为该区域受热影响后的峰值温度小于 T_β (钛合金中 β 相转变温度), 所以相比于母材区, 它的组织变化有限。此时, 原始的 β 晶界出现了很大程度的破碎, 冷却后得到的 α 相具有很小的长宽比, 并交错分布在热影响区中, 形成网篮组织, 如图 7 所示。

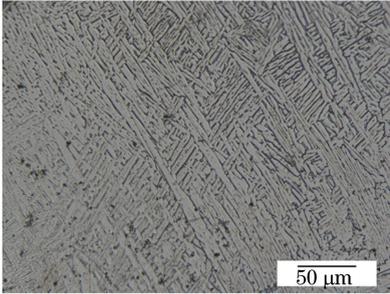


图 7 热影响区的网篮组织

Fig. 7 Basketweave structure in HAZ

在 $HAZ_{(\alpha+\beta)}$ 靠近 HAZ_β 的位置, 其峰值温度已经接近于甚至略高于 T_β 。对该区域的显微组织进行分析后可以发现, 在原有的片状 α 相附近有大量的集束组织形成, 如图 8 所示。这是因为原始的 β 晶粒中的 α 相有足够的形核时间和过冷度, 可以在网篮组织内部形核, 并最终完成网篮组织向集束组织的转变。

相比于 $HAZ_{(\alpha+\beta)}$, HAZ_β 离熔覆区较近, 峰值温

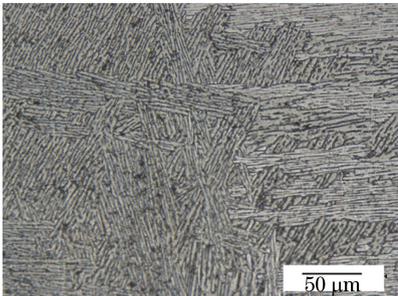


图 8 热影响区的集束组织

Fig. 8 Colonies structure in HAZ

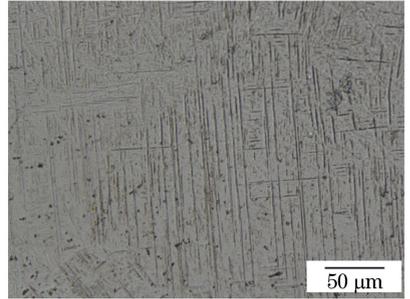


图 9 热影响区的 α' 马氏体

Fig. 9 Martensite with α phase in HAZ

度大于 T_β 。因此, 在熔覆过程中 HAZ_β 会发生从 α 相到 β 相的转变。相比于熔覆区, HAZ_β 有着较大的冷却速度, 在冷却结晶时, β 相从马氏体点 (M_s 点) 以上快速冷却, 形成针状 α' 马氏体, 如图 9 所示。相比于母材组织和熔覆区组织, α' 马氏体具有较大的硬度, 但其韧性和塑性较差。

在激光熔覆区中, 温度已经超过 T_β , β 相中的元素扩散系数较大, 使得 β 相粗化, 从而形成了粗大的 β 柱状晶, 并逆着 Z 方向的温度梯度外延生长, 且贯穿多个沉积层, 最终形成了贯穿整个熔覆区的晶粒, 如图 10 所示。

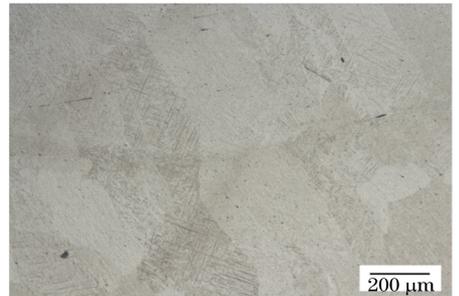


图 10 熔覆区的 β 柱状晶

Fig. 10 β columnar crystal in AM

当 β 相温度从 T_β 以上缓慢冷却后, 将形成魏氏组织, 如图 11 所示。当温度下降到 T_β 以下时, α 相会在 β 相晶粒内部形核, 形成相对短而粗的 α 相。

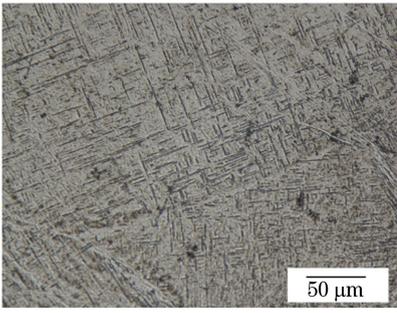


图 11 熔覆区的魏氏组织

Fig. 11 Widmanstatten structure in AM

当使用激光作为修复热源时,由于激光能量具有高度集中的特点,修复时的热影响区较小,冷却过程中的元素扩散现象并不明显,所以形成了以针状 α 相为主的网篮状魏氏组织。魏氏组织的形成与材料的冷却速度有关,研究认为:当冷却速度大于 $410\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,组织为完整的 α' 马氏体;当冷却速度在 $410\sim$

$20\text{ }^\circ\text{C/s}$ 之间时,会形成 α' 马氏体和少量次生 α 相;当冷却速度小于 $20\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,将形成魏氏组织^[15-16]。学者 Cottam 等^[17]认为魏氏组织的致密度与激光的扫描速度有关,随着激光扫描速度的降低,魏氏组织越来越致密。

分别提取熔覆层不同区域的显微组织(如图 12 所示)进行分析。相比于底部短而粗的 α 相,顶部魏氏组织的长度更长,呈细长的针状。这是因为在修复层的底部,由于后续修复过程中的重熔作用,魏氏组织中的部分马氏体 α 相在重熔过程中重新转变成的 β 相与 α 相中长大的残存的 β 相将蚕食 α 相,导致 α 相变短,并在冷却过程中继续长大,最终形成短而粗的 α 组织。

因此,在本研究中,从母材到修复区,组织的变化过程为片状 α 相和晶间 β 相 \rightarrow 网篮组织 \rightarrow 马氏体 \rightarrow 魏氏组织,如图 13 所示。

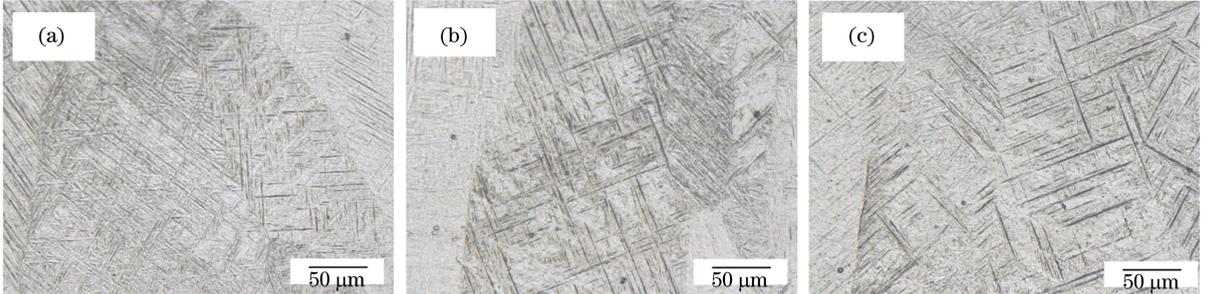


图 12 熔覆区不同位置的魏氏组织。(a)底部;(b)中部;(c)顶部

Fig. 12 Widmanstatten structures at different positions in AM. (a) Bottom; (b) middle; (c) top

3.2 多次修复对热影响区尺寸的影响

在激光修复过程中,部分修复材料将被加热至高温熔化,然后再逐渐冷却。在多次修复过程中,每一次修复都相当于对修复材料进行了一次热处理,这种热处理过程对热影响区的尺寸和力学性能有很大影响。根据修复试样组织的形貌特征,对修复试样不同区域进行划分,第一次修复、第二次修复及第三次修复组织的分区图如图 13 所示。

分别提取三次修复中 5 个不同位置热影响区的尺寸,取其平均值,并列于表 3 中。通过表 3 可以发现,在多次修复过程中,随着修复次数逐渐增多, $\text{HAZ}_{(\alpha+\beta)}$ 和 HAZ_β 的尺寸均逐渐增大,第二次修复比第一次修复增大了 48.5%,第三次修复比第一次修复增加了 127.3%。而且在第三次修复时,热影响区尺寸相比于第二次修复有了较大幅度的上升。这是由于随着修复次数增多,修复后的试样相当于受到了多次退火处理,原热影响区附近的母材区重新受热形成了网篮组织,表现为热影响区尺寸明显增大。

表 3 多次修复热影响区的尺寸

Table 3 HAZ widths after multiple repairs

Repair time	HAZ width /mm
First repair	0.66
Second repair	0.98
Third repair	1.50

3.3 多次修复对硬度的影响

三次修复对试样硬度的影响如图 14 所示,多次修复试样的硬度分布如表 4 所示。可以发现,三次修复后,熔覆区的硬度平均比母材高 10.7%,热影响区的硬度平均比母材高 17.6%。这是因为热影响区中生成了大量的 α' 针状马氏体,这种组织具有很高的硬度和强度;而熔覆区的组织为粗大的 β 柱状晶和典型的魏氏组织,还有少量 α' 针状马氏体,魏氏组织的强度与硬度均较高,从而导致了熔覆区的硬度上升。

通过对表 4 的分析可知,第二次修复热影响区的硬度比第一次增加了 1.4%,第三次修复比第一次增加了 4.0%,而熔覆区与母材区硬度变化不明显。

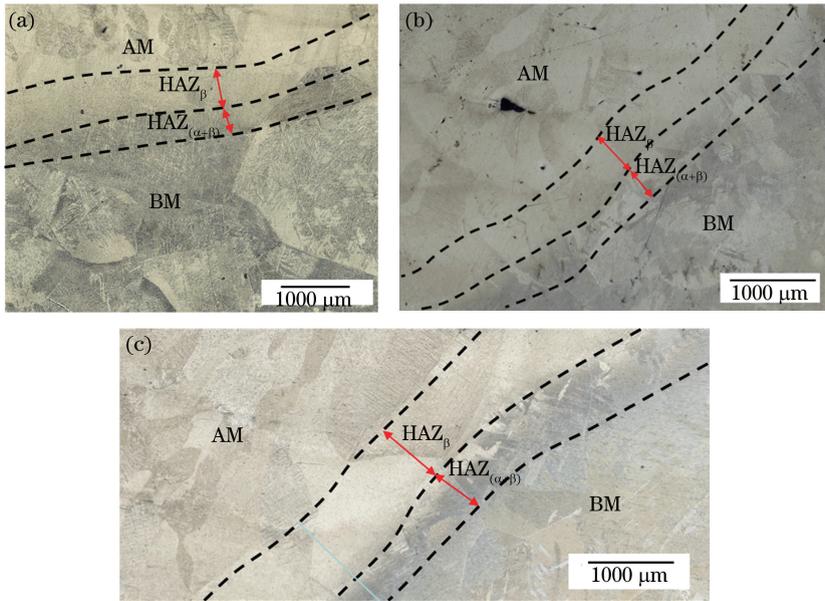


图 13 多次修复组织的分区图。(a)第一次修复;(b)第二次修复;(c)第三次修复

Fig. 13 Distribution diagrams after multiple repairs. (a) First repair;
(b) second repair; (c) third repair

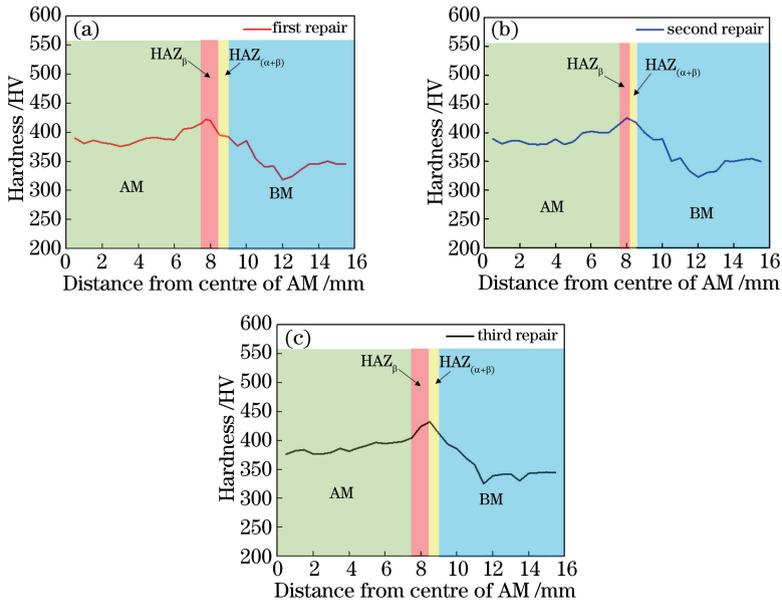


图 14 多次修复试样的硬度分布曲线。(a)第一次修复;(b)第二次修复;(c)第三次修复

Fig. 14 Hardness distributions after multiple repairs. (a) First repair;
(b) second repair; (c) third repair

这是因为随着修复次数增多,热影响区尺寸明显增大,热影响区中高硬度的 α' 针状马氏体明显增多,而母材区与熔覆区组织并未受到多次热输入的影响,故随着修复次数增多组织变化不明显。因此,多次修复将使热影响区硬度略有增加,且高硬度区的范围明显增大,但对熔覆区与母材区硬度的影响不明显。

表 4 多次修复试样的硬度分布

Table 4 Hardness distributions after multiple repairs

Repair time	Hardness /HV		
	AM	HAZ	BM
First repair	386.26	409.02	349.99
Second repair	389.87	414.58	359.88
Third repair	388.34	425.33	350.76

4 结 论

对多次激光修复后的 ZTC4 钛合金的显微组织进行观察,分析了多次修复对热影响区尺寸和修复件硬度分布的影响。结果表明:ZTC4 钛合金修复试样由母材到修复区的组织变化过程为片状 α 相和晶间 β 相 \rightarrow 网篮组织 \rightarrow 马氏体 \rightarrow 魏氏组织;对性能进行研究发现,第二次修复的热影响区尺寸比第一次修复增加了 48.5%,第三次修复比第一增加了 127.3%,而第二次修复热影响区硬度仅比第一次修复增加了 1.4%,第三次修复比第一次增加了 4.0%。根据试验结果可以发现:多次修复对组织的构成类型并未产生影响,但会使热影响区的硬度略有增加,且高硬度区尺寸明显增大;多次修复对熔覆区与母材区硬度的影响不明显。本研究为铸造钛合金构件修复次数的控制提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Wu X, Sharman R, Mei J, *et al.* Microstructure and properties of a laser fabricated burn-resistant Ti alloy [J]. *Materials & Design*, 2004, 25(2): 103-109.
- [2] Sexton L, Lavin S, Byrne G, *et al.* Laser cladding of aerospace materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 122(1): 63-68.
- [3] Frazier W E. Metal additive manufacturing: a review [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(6): 1917-1928.
- [4] Graf B, Gumenyuk A, Rethmeier M. Laser metal deposition as repair technology for stainless steel and titanium alloys[J]. *Physics Procedia*, 2012, 39: 376-381.
- [5] Liu Q C, Brandt M, Janardhana M, *et al.* Potential application and certification of laser cladding technology for repair of ageing aircraft components [C]. *AIP Conference Proceedings*, 2011, 257 (2011): 257-266.
- [6] Bian H Y, Zhai Q X, Li Y, *et al.* Microstructure and tensile properties of laser deposition repair GH738 superalloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1002003.
卞宏友, 翟泉星, 李英, 等. 激光沉积修复 GH738 高温合金的组织与拉伸性能 [J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1002003.
- [7] Yang G, Ma Y, Wang C, *et al.* Effects of additive repair on microstructure and mechanical properties of laser additive manufactured TC4 titanium [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1202002.
杨光, 马玥, 王超, 等. 增材修复对激光沉积制造 TC4 组织与力学性能的影响 [J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1202002.
- [8] Acharya R, Bansal R, Gambone J J, *et al.* A coupled thermal, fluid flow, and solidification model for the processing of single-crystal alloy CMSX-4 through scanning laser epitaxy for turbine engine hot-section component repair (part I) [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2014, 45(6): 2247-2261.
- [9] Ren Y M, Lin X, Fu X, *et al.* Microstructure and deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy by high-power laser solid forming[J]. *Acta Materialia*, 2017, 132: 82-95.
- [10] Qin L Y. Research on ley technique of laser deposition repair titanium alloy [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014: 98-102.
钦兰云. 钛合金激光沉积修复关键技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014: 98-102.
- [11] Wang W F, Wang M C, Jie Z, *et al.* Research on the microstructure and wear resistance of titanium alloy structural members repaired by laser cladding [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(11): 810-816.
- [12] Paydas H, Mertens A, Carrus R, *et al.* Laser cladding as repair technology for Ti-6Al-4V alloy: influence of building strategy on microstructure and hardness[J]. *Materials & Design*, 2015, 85: 497-510.
- [13] Brandl E, Michailov V, Viehweger B, *et al.* Deposition of Ti-6Al-4V using laser and wire, part I: microstructural properties of single beads[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 206(6): 1120-1129.
- [14] Welsch G, Boyer R, Collings E W, *et al.* Materials properties handbook: titanium alloys [M]. Ohio, USA: ASM International, 1994: 10-30.
- [15] Kelly S M. Thermal and microstructure modeling of metal deposition processes with application to Ti-6Al-4V[D]. Blacksburg: Virginia Tech, 2004: 32-50.
- [16] 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.
- [17] Cottam R, Brandt M. Laser cladding of Ti-6Al-4V powder on Ti-6Al-4V substrate: effect of laser cladding parameters on microstructure [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 323-329.