

# 热等静压对激光熔覆涂层组织与性能的影响



徐伟<sup>1</sup>, 杜虎<sup>2</sup>, 李勇<sup>1</sup>, 王秋林<sup>1</sup>

1. 成都航空职业技术学院, 四川 成都 610100

2. 成都泵类应用技术研究, 四川 成都 610207

**摘要:**为提高钛合金的表面性能,满足高效稳定的设计要求,本文利用热等静压技术改善钛合金表面激光熔覆涂层的组织与性能。涂层在热等静压的高温和压力作用下实现重熔,风冷快速冷却至室温。分析了涂层的形貌、微观结构以及微区元素分布,并测试了涂层截面的显微硬度。同时,探究了热等静压作用对涂层的组织与性能的影响。结果显示,在激光功率为1200W、扫描速度为20mm/s条件下制备的激光熔覆层中出现多处裂纹,裂纹纵横复杂,经热等静压处理后的激光熔覆涂层虽厚度相差无几,但波浪式的熔池尺寸变大,涂层与基体结合变得相对平直,裂纹数量得到有效控制,未发现塌陷或孔洞等缺陷,涂层最外层的铝合金层不复存在,形成了TiAl或是新相Ti<sub>5</sub>Al<sub>11</sub>,主要元素与未处理的熔覆涂层保持一致,但是高温和高压作用使得微区元素分布发生了一定的变化。涂层试样最大表面硬度为777.5HV<sub>0.2</sub>,相较无处理涂层的最大硬度至少提高6.8%,热等静压后处理改善了激光熔覆涂层组织和性能。

**关键词:**钛合金; 激光熔覆; 涂层; 热等静压; 显微组织

中图分类号: TG178

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.02.010

TA15钛合金在航空、航天等领域使用广泛,但抗高温氧化性和耐磨性较差,对其表面改性有着重要意义,而传统工艺很难满足高效稳定的设计要求<sup>[1]</sup>。激光熔覆技术利用激光束辐照加热,基体表层和熔覆粉末材料同时熔化又快速冷却,在基体合金表面制备出较薄的涂层,因其发生了冶金连接,故而涂层与基体结合紧密,涂层不易脱落,同时合金基体内部也不会受到激光束的影响。然而激光熔覆技术制备的Ti-Al梯度涂层,由于钛-铝物理性能相差较大,导致涂层内部裂纹和孔洞等缺陷的出现,严重影响了涂层的防护效果。如何修复这些缺陷成为目前有待解决的问题<sup>[2-4]</sup>。热等静压是一种集高温高压于一体的工艺技术,将激光熔覆涂层置于热等静压设备中处理,涂层在高温和高压下实现固溶修复,不仅可以修复内部裂纹和孔洞等缺陷,还可以进一步促进Al原子与Ti原子形成更加稳定Ti<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>金属间化合物<sup>[5-7]</sup>。

国内外学者对激光熔覆技术制备防护涂层和热等静压

后处理材料进行了一些相关研究。舒林森等<sup>[8]</sup>以同步送粉的形式在钛合金表面激光熔覆制备了复合涂层,涂层主要的金属间化合物为TiC、TiB和TiAl,涂层内部没有明显缺陷,金属间化合物提升了基体合金的表面性能。Schneider等<sup>[9]</sup>研究了电磁场对激光熔覆涂层组织的影响,发现磁场作用改善了焊接表面质量,电磁力的搅拌作用细化了涂层的中部组织,但是当磁场强度过大时,析出相又有长大趋势。高宇翔<sup>[10]</sup>对电子束熔化成形技术制备的Ti<sub>48</sub>Al<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>N<sub>6</sub>合金试棒进行后处理,发现合金经热等静压处理后,其致密度和显微硬度都有所增大。田晓莹等<sup>[11]</sup>利用热等静压技术对铸造镁合金进行了后处理,认为热等静压技术处理后的合金晶粒组织细小,抗拉强度与塑性得到了提高,同时还消除了缩松缩孔。热等静压技术经常被用于材料的制备以及后处理等,可以优化材料组织结构、改善力学性能。但是对涂层的后处理相关报道却很少。

本文利用热等静压技术(HIP)对Ti-Al梯度涂层进行

收稿日期: 2024-07-19; 退修日期: 2024-10-23; 录用日期: 2024-12-11

基金项目: 航空科学基金(2023Z053158001)

引用格式: Xu Wei, Du hu, Li Yong, et al. Effect of hot isostatic pressing on microstructure and properties of laser cladding coatings[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(02): 111-118. 徐伟, 杜虎, 李勇, 等. 热等静压对激光熔覆涂层组织与性能的影响[J]. 航空科学技术, 2025, 36(02): 111-118.

后期处理,观测涂层的形貌、微观结构的变化,测得涂层各区表面硬度,研究热等静压后处理对Ti-Al涂层组织与性能的影响,对提高钛合金的表面性能具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验基体合金为TA15钛合金,其化学成分见表1。熔覆材料为Al-Si粉末,平均尺寸为75 $\mu\text{m}$ ,Al-Si体积比为9:1。

表1 TA15钛合金主要的化学成分

Table 1 The main chemical composition of titanium alloy

主要成分/%			其他杂质/%		
Al	V	Ti	Mo	Zr	C
5.5~7.1	0.8~2.5	剩余	<0.5~2.0	<1.5~2.5	<0.08

### 1.2 试验方案

将TA15钛合金切割为20mm $\times$ 20mm $\times$ 5mm的块状试样打磨、抛光并超声清洗其表面。利用激光熔覆设备,采取同轴送粉及氩气保护的方式,在合金待加工表面制备较薄的涂层,在空气中冷却得到钛合金表面涂层中间试样,试验主要参数见表2。再将中间试样置于热等静压设备中,抽真空后通入氩气气氛保护,保温保压处理30min,熔覆层在高温和高压下完成重熔,炉内风冷快速冷却,得到熔覆涂层最终试样,热等静压试验主要参数见表3。沿着熔覆涂层纵向切开抛光后腐蚀制备成金相试样,利用扫描电子显微镜观察每组样品的涂层截面形貌和微观结构(SEM),通过点扫描获得涂层截面附近的元素分布(EDS),借助自动转塔显微硬度计测试涂层的显微硬度,从涂层基体到涂层外侧每隔50 $\mu\text{m}$ 测得一次数据,每次测量三个点,取平均值作为测量的数值,施加载荷为0.2kg,保荷时间10s。

表2 激光熔覆试验参数

Table 2 Laser cladding test parameters

激光功率/W	光斑直径/mm	搭接率/%	保护气压力/MPa	扫描速度/(mm/s)
1200	2	50	0.2	20

表3 热等静压试验主要参数

Table 3 Main parameters of hot isostatic pressure test

温度/ $^{\circ}\text{C}$	保压时间/h	压力/MPa	真空度/Pa
800	0.5	30	100

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 涂层微观结构

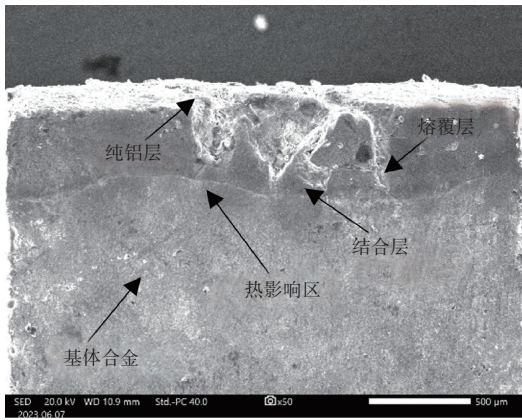
图1(a)为TA15合金表面激光熔覆Ti-Al涂层试样显

微组织,涂层厚度可达500 $\mu\text{m}$ 左右,涂层与基体呈现波浪式结合,由大小相对规则的熔池连接构成,由下至上分别为基体合金、热影响区、结合区、熔覆层以及最外层亮白色铝层。激光熔覆技术工艺中激光功率和扫描速度对涂层的影响较大,激光功率越大,激光比能就越大,辐射在基体表面的能量就越大,基体合金与涂层粉末可以获得足够的能量而发生各种热化学反应,最终形成稳定的激光熔覆层。但过大的激光功率容易使得熔覆层塌陷,基体热影响区组织发生较大变化,因此适当的激光功率直接影响了涂层的质量。扫描速度越大,能量辐射在基体表面的时间越短,热化学反应不充分,熔覆层组织很难控制,而扫描速度太低时又可能发生粉末堆积导致涂层过厚的现象。因此,想要真正获得质量较高的激光熔覆涂层,又能对基体合金起到良好保护的作用,是十分不易的<sup>[12-16]</sup>。如图1(b)所示,激光熔覆层中出现多处裂纹,裂纹纵横复杂,方向并无一定规律性,多处延伸至基体;如图1(c)所示,涂层中裂纹深度较大,涂层出现大面积塌陷现象,无法对基体起到应有的防护作用。该试样激光功率为1200W、扫描速度为20mm/s,激光功率较大且扫描速度较快,这就导致涂层出现缺陷,加之熔池冷却速率较大,涂层的残余应力超过了其极限应力也会导致裂纹的产生。

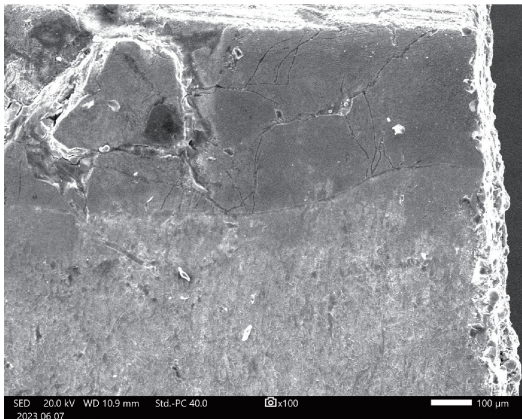
图2为热等静压处理后TA15合金表面激光熔覆Ti-Al涂层试样显微组织,涂层厚度依然为500 $\mu\text{m}$ 左右,但最外层的铝合金层消失不见,波浪式的熔池尺寸变大,涂层与基体结合变得相对平直,虽有极少数的裂纹,但裂纹数量得到有效控制,未发现塌陷或孔洞等缺陷,经热等静压处理后的激光熔覆层质量得到了大幅度的改善。在高温800 $^{\circ}\text{C}$ 和30MPa压力的环境下,涂层发生了重熔,压力促进了涂层与基体的相互结合,涂层中的铝元素向基体方向扩散移动,同时促使原子间的相互扩散补缩,修复了原涂层中存在的大多数裂纹。而高温环境中发生了各种热化学反应,铝原子与基体钛原子形成稳定的金属间化合物,最终形成了稳定的高质量激光熔覆层,可以有效起到对基体钛合金的防护作用。

在高温和各向同等静压作用下,热等静压激光熔覆Ti-Al涂层中的缺陷完成修复。整个过程可分为三个阶段:物质颗粒重排、宏观塑性变形以及扩散蠕变,其中温度和压力促使物质颗粒重排,可以提高涂层的致密度。随着温度的升高和压力的增大,孔洞和裂纹周围材料受应力梯度作用发生塑性变形,促进了孔洞的闭合和裂纹的修复,组织中孔洞面积分数明显下降。当温度和压力继续升高





(a) 涂层显微组织50倍



(b) 涂层显微组织100倍



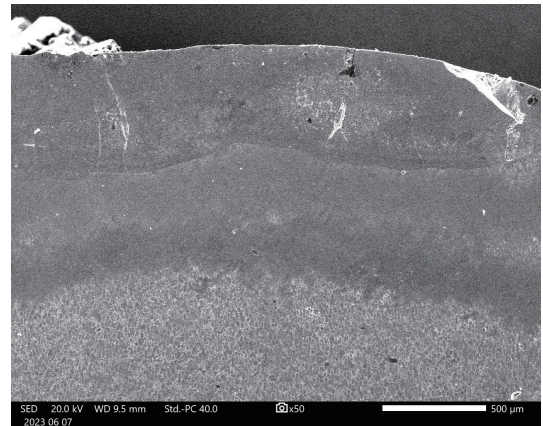
(c) 涂层显微组织500倍

图1 激光熔覆涂层显微组织

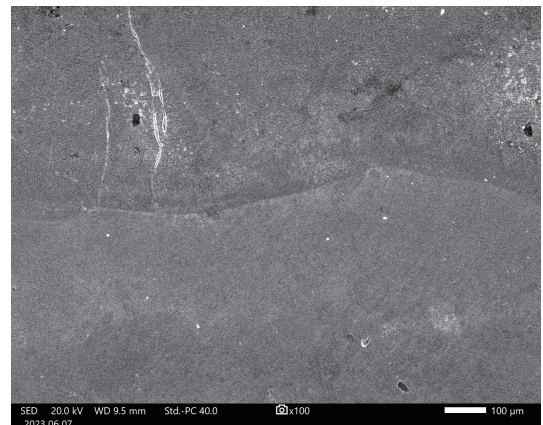
Fig.1 Microstructure of laser cladding coating

时,进入扩散蠕变阶段,该过程中会发生复杂的物理及热化学反应,原子间扩散更加剧烈,在不破坏基体和涂层的前提下改变了涂层组织和性能。热等静压工艺参数中对金属合金影响较大的是温度和压力,温度太低无法实现物质颗粒重排,仅靠压力的驱动力是远远不够的,而温度过高容易导致涂层组织长大,影响其力学性能,并且压力过

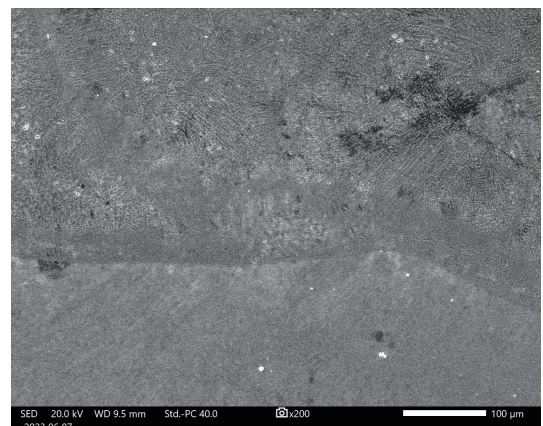
大有可能对涂层外表面结构造成破坏。当保温温度为800°C时,工艺过程进入扩散蠕变阶段,高温加剧了原子间的扩散程度,蠕变变形程度远大于塑性变形,Ti原子和Al原子在驱动力作用下首先向裂纹和孔洞的中心方向移动,修复了涂层的缺陷<sup>[17-19]</sup>。



(a) 涂层显微组织50倍



(b) 涂层显微组织100倍



(c) 涂层显微组织500倍

图2 HIP激光熔覆涂层显微组织

Fig.2 Microstructure of HIP laser cladding coating



## 2.2 物相分析

图3为激光熔覆涂层试样和热等静压处理后激光熔覆涂层试样X射线衍射对比分析,其中熔覆涂层试样金属间化合物主要有 $Ti_{0.8}Al_3V_{0.2}$ 、 $TiAl_3$ 、 $AlMg$ 、 $Al_2Mg$ 、 $Al_{0.5}Fe_3Si_{0.5}$ ,还有一部分的Al单质,实为未反应的送粉粉末在空气中冷却形成的,热等静压处理后熔覆涂层试样主要成分为 $Ti_{0.8}Al_3V_{0.2}$ 、 $TiAl_3$ 、 $Ti_5Al_{11}$ 、 $AlMg$ 、 $Al_3V$ 、 $Al_8V_{12}Fe_8$ 、 $Al_3FeSi$ ,涂层中没有发现单质Al的存在。激光熔覆涂层在温度 $800^{\circ}C$ 和 $30MPa$ 压力下发生了重熔,最外层单质Al与基体中Ti原子形成了 $TiAl_3$ 或是新相 $Ti_5Al_{11}$ ,因此涂层最外层的铝合金层不复存在,涂层中 $Al_2Mg$ 向 $AlMg$ 转变, $Al_{0.5}Fe_3Si_{0.5}$ 转变为 $Al_3FeSi$ ,同时高温和高压作用促进了新相 $AlV_3$ 的产生。

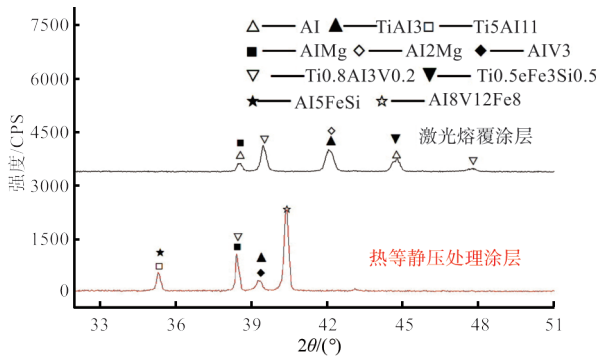
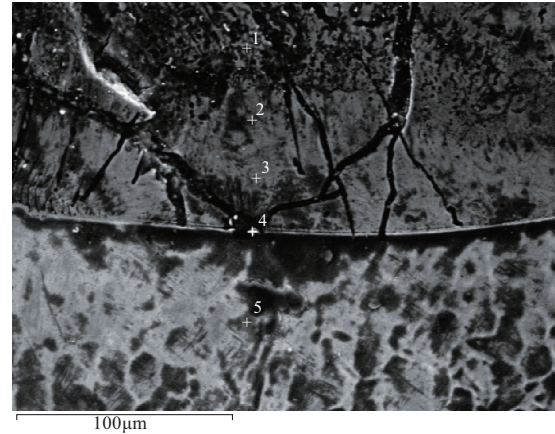


图3 激光熔覆涂层XRD图谱

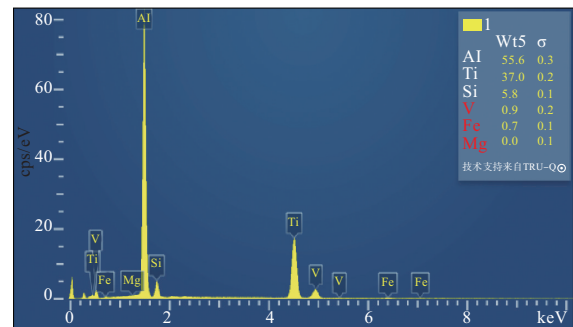
Fig.3 XRD pattern of laser cladding coating

图4为钛合金表面激光熔覆涂层不同区域扫描分析,结果显示该涂层主要元素为Ti、Al、Si、Fe及少量的V和Mg,与涂层的XRD分析结果保持一致。涂层外侧靠近铝层测试点1位置,Al元素含量较高,Al元素和Ti元素的原子比为1.5:1,测试点2位置热化学反应相对充分,Al元素和Ti元素的原子比为1.1:1。测试点3位置靠近涂层的结合处,Al元素和Ti元素的原子比为1:1.4,Ti元素的含量较Al元素多出许多,测试点4位于结合处之上,该处Al元素和Ti元素的原子比为1:2.6,说明结合处金属间化合物 $TiAl_3$ 存在的可能性较大。测试点5位于基体钛合金热影响区域内,Al元素超过了本身合金的含量,影响并不是太大。Si元素为送粉粉末中所含元素,由涂层外侧向基体方向含量逐渐降低,Fe、V和Mg为钛合金基体本身所含元素,与Ti和Al形成了一系列的金属间化合物,提高了涂层的综合性能。图5为热等静压激光熔覆涂层不同区域扫描分析,主要元素与未处理的熔覆涂层保持一致,但是高温和高压作用使得微区元素分布发生了一定的变化。测试点1靠近铝层

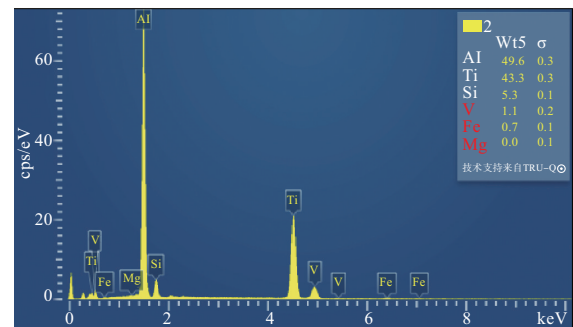
处,Ti元素含量已经高于Al元素,Al-Ti原子比约为1.1:1,压力作用促进了Al原子向基体方向扩散,导致外层Al元素含量降低,与此同时,Al与基体多原子形成了不同的化



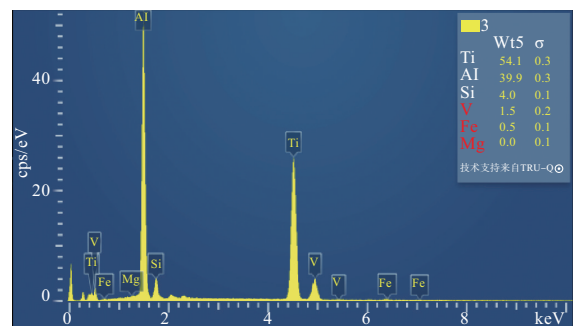
(a) 涂层元素分布的5个区域



(b) 点1区域元素分布

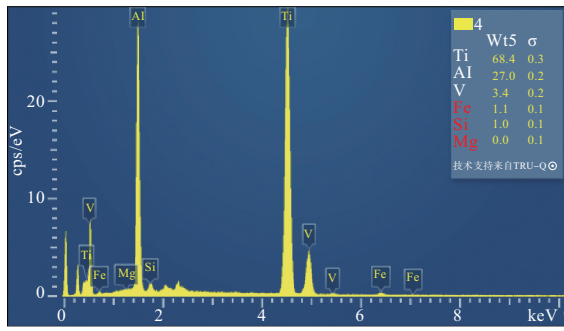


(c) 点2区域元素分布

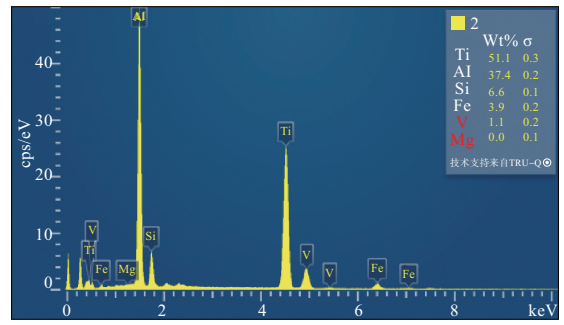


(d) 点3区域元素分布

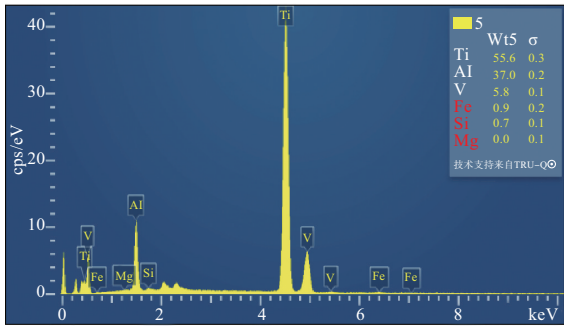




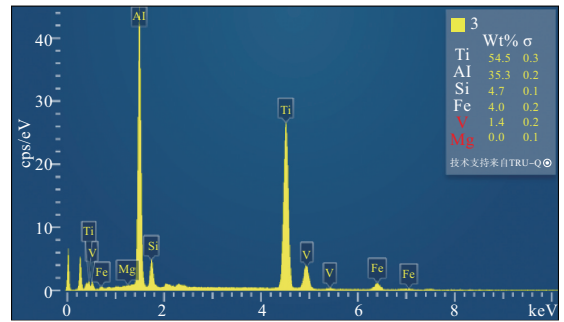
(e) 点4区域元素分布



(c) 点2区域元素分布



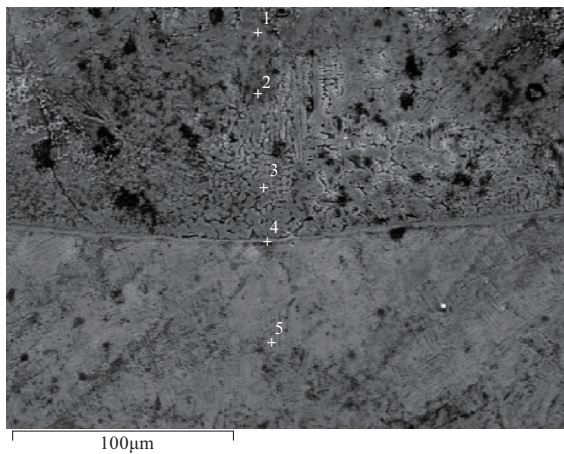
(f) 点5区域元素分布



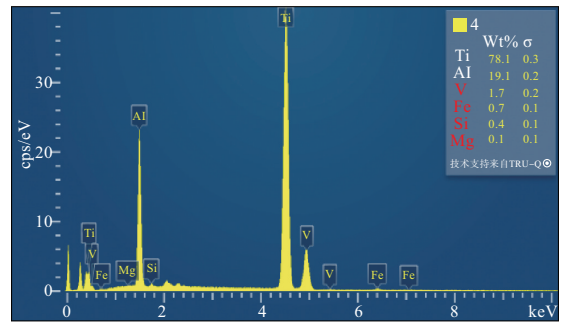
(d) 点3区域元素分布

图4 钛合金表面激光熔覆涂层EDS分析

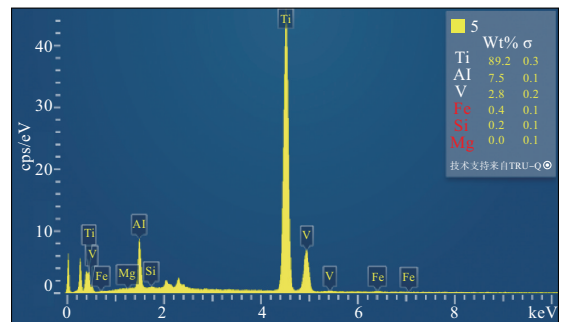
Fig.4 EDS analysis on laser cladding coating of titanium alloy surface



(a) 涂层元素分布的5个区域



(e) 点4区域元素分布



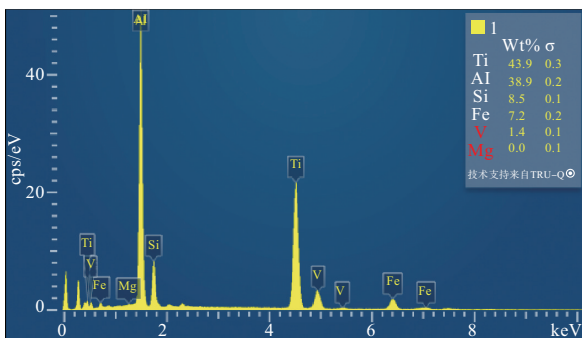
(f) 点5区域元素分布

图5 HIP激光熔覆涂层EDS分析

Fig.5 EDS analysis on HIP laser cladding coating 化合物<sup>[20-21]</sup>。

### 2.3 显微硬度

图6为钛合金表面激光熔覆涂层试样和热等静压处理后激光熔覆涂层试样表面硬度对比分析,钛合金表面激光熔覆涂层试样表面硬度由基体向外呈现递增趋势,达到峰



(b) 点1区域元素分布

值后逐渐降低,硬度最大处可达  $742.9\text{HV}_{0.2}$ ,外层最低为  $551.9\text{HV}_{0.2}$ 。涂层试样表面硬度处Ti原子和Al原子之间热化学反应充分,形成了多种Ti-Al金属间化合物,因此该处的硬度达到最大值,向涂层外侧方向,单质Al的含量逐渐增多,导致硬度出现了下降趋势。热等静压处理后熔覆涂层试样最大表面硬度为  $777.5\text{HV}_{0.2}$ ,外层最低为  $589.3\text{HV}_{0.2}$ 。激光熔覆涂层在高温和高压作用下,缺陷得以修复,形成了更多的金属间化合物,组织致密性得到改善,因此,试样最大硬度得到提高;最外层单质Al与基体中Ti原子结合为金属间化合物,外层单质Al含量较少,热等静压处理后激光熔覆涂层试样最外层相较无处理涂层的最外层硬度至少提高6.8%。

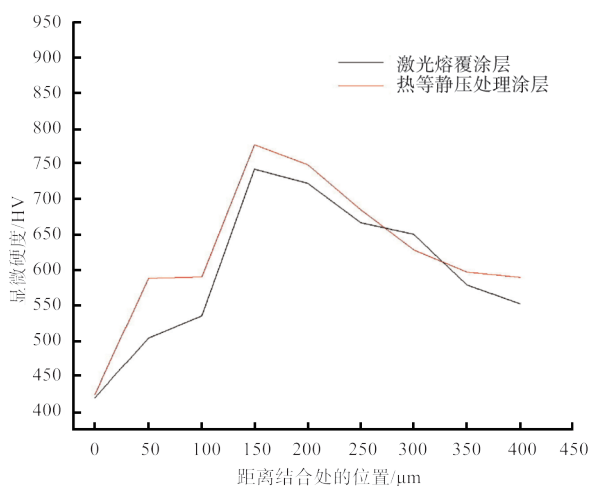


图6 激光熔覆涂层表面硬度分析

Fig.6 Surface hardness analysis on laser cladding coating

### 3 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1)在激光功率为1200W、扫描速度为20mm/s条件下制备的激光熔覆层中出现多处裂纹,裂纹纵横复杂,无法对基体起到应有的防护作用。经热等静压处理后的激光熔覆涂层厚度基本不变,波浪式的熔池尺寸变大,涂层与基体结合变得相对平直,裂纹数量得到有效控制,未发现塌陷或孔洞等缺陷,涂层质量得到了大幅度的改善。

(2)激光熔覆涂层在热等静压作用下发生了重熔,涂层最外层的铝合金层不复存在,形成了 $\text{TiAl}_3$ 或是新相 $\text{Ti}_3\text{Al}_{11}$ ,主要元素与未处理的熔覆涂层保持一致,但是高温和高压作用使得微区元素分布发生了一定的变化。压力作用促进了Al原子向基体方向扩散,导致外层Al元素含量降低。涂层试样最大表面硬度为  $777.5\text{HV}_{0.2}$ ,最外层相较无处

理涂层的最外层硬度至少提高了6.8%。

AST

### 参考文献

- [1] 秦奉,施麒,刘辛,等.热处理对选区激光熔化17-4PH不锈钢力学性能的影响[J].材料研究学报,2021,35(8):607-610.  
Qin Feng, Shi Qi, Liu Xin, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of selective laser melted 17-4PH stainless Steel[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2021, 35(8): 607-610. (in Chinese)
- [2] 王飞飞.钛合金表面激光熔覆 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基复合涂层的组织与性能研究[D].上海:上海工程技术大学,2021.  
Wang Feifei. Microstructure and properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Based composite coatings prepared by laser cladding on Titanium alloy surface[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2021. (in Chinese)
- [3] 王志刚,朱小军,刘栋.氩弧焊修复对激光增材制造TC18钛合金力学性能影响研究[J].航空科学技术,2022,33(9):51-57.  
Wang Zhigang, Zhu Xiaojun, Liu Dong. Effect of TIG welding restorations on the mechanical properties of Laser-Formed TC18 titanium alloy[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(9): 51-57. (in Chinese)
- [4] 李明兵,王新南,商国强,等.TC32钛合金不同热处理工艺下的组织性能及断裂机制[J].金属热处理,2021,46(4):112-114.  
Li Mingbing, Wang Xinnan, Shang Guoqiang, et al. Microstructure properties and fracture mechanism of TC32 titanium alloy under different heat treatment processes[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(4): 112-114. (in Chinese)
- [5] 张健辉,纪志军,冯新,等.ZTA15铸造钛合金高周疲劳性能研究[J].精密成形工程,2022,14(6):28-35.  
Zhang Jianhui, Ji Zhijun, Feng Xin, et al. High-cycle fatigue properties of ZTA15 cast Titanium alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(6): 28-35. (in Chinese)
- [6] 石磊,雷力明,王威,等.热等静压/热处理工艺对激光选区熔化成形GH4169合金微观组织与拉伸性能的影响[J].材料工程,2020,48(6):149-152.  
Shi Lei, Lei Liming, Wang Wei, et al. Effects of hot isostatic pressing and heat treatment process on microstructure and tensile properties of selective laser melting manufactured GH4169 alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(6): 149-152. (in Chinese)



- [7] Liu Siyuan, Li Yuxin, Yang Yixin, et al. Effects of laser power on microstructure and properties of laser cladding NiCoCrAlY coating[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(3): 50-57.
- [8] 舒林森, 张燊东, 于鹤龙, 等. 激光熔覆原位 Ti-C-B-Al 复合涂层的结构特征与力学性能[J]. 材料导报, 2024, 38(2): 177-181.
- Shu Linsen, Zhang Candong, Yu Helong, et al. Structural characteristics and mechanical properties of laser-fused in-situ Ti-C-B-Al composite coatings[J]. Materials Reports, 2024, 38(2): 177-181. (in Chinese)
- [9] Schneider A, Avilov V, Gumenyuk A, et al. Laser beam welding of Aluminum alloys under the influence of an electromagnetic field[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 4-11.
- [10] 高宇翔, 李忠文, 刘凯, 等. 后处理对电子束熔化成形 Ti48Al2Cr2Nb 合金组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(11): 101-106.
- Gao Yuxiang, Li Zhongwen, Liu Kai, et al. Effect of post-treatment on microstructure and properties of Ti48Al2Cr2Nb alloy prepared by electron beam melting [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(11): 101-106. (in Chinese)
- [11] 田晓莹, 魏健雄, 闫宏, 等. 热等静压对低压铸造 WE43 镁合金组织和室温及高温力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(10): 87-95.
- Tian Xiaoying, Wei Jianxiong, Yan Hong, et al. Effect of hot isostatic pressing on microstructure, room temperature and hightemperature mechanical properties of low-pressure casting WE43 Magnesium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(10): 87-95. (in Chinese)
- [12] Liu Huangxiang, Li Qinglin, Zhang Xiaowei, et al. Microstructure and properties of laser cladding Ti-Al intermetallic compound composite coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1141-1143.
- [13] 曾嘉怡, 练国富, 褚梦雅, 等. 激光熔覆原位合成 TiC 成形工艺参数优化方法 [J]. 精密成形工程, 2022, 14(6): 101-110.
- Zeng Jiayi, Lian Guofu, Chu Mengya, et al. Laser cladding in-situ synthesis of TiC forming control method[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(6): 101-110. (in Chinese)
- [14] Mah J C W, Muchtar A, Somalu M R, et al. Metallic interconnects for solid oxide fuel cell: a review on protective coating and deposition techniques[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(14): 9219-9229.
- [15] 刘育斌, 冯成慧, 朱小军, 等. 钛合金基体激光熔覆 WC/TC18 复合涂层滚动接触疲劳性能研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(3): 86-90.
- Liu Yubin, Feng Chenghui, Zhu Xiaojun, et al. Rolling contact fatigue property of WC/TC18 composite coating prepared by laser cladding on titanium alloy [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(3): 86-90. (in Chinese)
- [16] Liu Yang, Wang Dongpo, Deng Caiyan, et al. Novel method to fabricate Ti-Al intermetallic compound coatings on Ti-6Al-4V alloy by combined ultrasonic impact treatment and electrospark deposition [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 628: 208-212.
- [17] 王院生, 熊计, 王均. 工业纯钛热浸镀铝及其抗高温氧化性能的研究[J]. 表面技术, 2010, 39(6): 4-7.
- Wang Yuansheng, Xiong Ji, Wang Jun. Commercial-purity titanium hot-dip aluminium and its high temperature oxidation resistance [J]. Surface Technology, 2010, 39(6): 4-7. (in Chinese)
- [18] 刘育斌, 冯成慧, 朱小军, 等. 钛合金基体激光熔覆 WC/TC18 复合涂层滚动接触疲劳性能研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(3): 86-90.
- Liu Yubin, Feng Chenghui, Zhu Xiaojun, et al. Rolling contact fatigue property of WC/TC18 composite coating prepared by laser cladding on Titanium Alloys[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(3): 86-90. (in Chinese)
- [19] Zhang Jianhui, Ji Zhijun, Feng Xin, et al. High-cycle fatigue properties of ZTA15 cast Titanium alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(6): 28-35.
- [20] 田天, 崔丽, 贺定勇, 等. 激光选区熔化成形 TC4 钛合金激光焊接接头组织与力学性能[J]. 航空科学技术, 2022, 33(4): 102-107.
- Tian Tian, Cui Li, He Dingyong, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded joints of SLM TC4 alloys[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(4): 102-107. (in Chinese)
- [21] Mah J C W, Muchtar A, Somalu M R, et al. Metallic interconnects for solid oxide fuel cell: A review on protective coating and deposition techniques[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(14): 9219-9229.

## Effect of Hot Isostatic Pressing on Microstructure and Properties of Laser Cladding Coatings

Xu Wei<sup>1</sup>, Du hu<sup>2</sup>, Li Yong<sup>1</sup>, Wang Qiulin<sup>1</sup>

1. Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China

2. Chengdu Pump Application Technology Research Institute, Chengdu 610207, China

**Abstract:** In order to improve the surface properties of titanium alloy and meet the design requirements of high efficiency and stability, the microstructure and properties of laser cladding coating on titanium alloy surface were improved by hot isostatic pressing technique. The coating is remelted under the high temperature and pressure of hot isostatic pressing, and quickly cooled to room temperature by air cooling. The morphology, microstructure and element distribution of the coating were analyzed, and the microhardness of the coating section was measured. At the same time, the effect of hot isostatic pressing on the microstructure and properties of the coating was investigated. The results show that there are many cracks in the laser cladding layer prepared under the conditions of 1200W laser power and 20mm/s scanning speed, and the cracks are complex. Although the thickness of the laser cladding coating after hot isostatic pressing treatment is similar, the size of the wavy molten pool becomes larger, the combination of the coating and the matrix becomes relatively straight, and the number of cracks is effectively controlled. No defects such as collapse or holes were found, and the aluminum alloy layer in the outermost layer of the coating ceased to exist, forming TiAl or a new phase  $Ti_5Al_{11}$ . The main elements were consistent with the untreated cladding coating, but the distribution of elements in the micro-region changed to a certain extent due to high temperature and high pressure. The pressure promoted the diffusion of Al atoms towards the matrix, resulting in a decrease in the content of Al elements in the outer layer. The maximum surface hardness of the coated sample is  $777.5HV_{0.2}$ , which is at least 6.8% higher than that of the untreated coating. The microstructure and properties of the laser cladding coating are improved by hot isostatic pressing post-treatment, and the coating quality is greatly improved.

**Key Words:** titanium alloy; laser cladding; coating; hot isostatic pressing; microstructure

**Received:** 2024-07-19; **Revised:** 2024-10-23; **Accepted:** 2024-12-11

**Foundation item:** Aeronautical Science Foundation of China (2023Z053158001)