

文章编号: 1001-3806(2021)06-0697-06

TC4 表面激光熔覆 TiAl 合金涂层的工艺和组织性能

赵欣鑫, 肖华强*, 游川川, 冯进宇, 肖易
(贵州大学 机械工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 为了实现 TC4 钛合金表面 TiAl 合金涂层的大面积制备及实际应用, 采用激光熔覆的方法在 TC4 钛基体上制备单道和搭接的 TiAl 合金涂层。通过表面形貌和界面特征分析了涂层的熔覆质量, 对涂层的物相组成与显微组织进行研究, 测试了熔覆层界面及搭接层之间的硬度分布。结果表明, 涂层与基体之间属于冶金结合, 涂层内部没有裂纹和孔隙等缺陷, 涂层中 Ti/Al 主要以 TiAl(γ)、Ti₃Al(α_2) 以及微量元素的化合物形式存在, 涂层主要由双态组织和片层组织组成, 测试得到单道熔覆涂层和搭接涂层平均硬度是基体的 1.44 倍以上, 多道搭接涂层的组织分布相比单道涂层更加均匀; 涂层可进行大范围的多道搭接熔覆, 证明了 TiAl 涂层对 TC4 基体表面改性方法可行性。该研究对于实现涂层的实际应用具有重要意义。

关键词: 激光技术; TiAl 涂层; 激光熔覆; 组织分析; 搭接熔覆

中图分类号: TG156.99 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.06.004

Process and microstructure properties of laser cladding TiAl alloy coating on TC4 surface

ZHAO Xinxin, XIAO Huaqiang, YOU Chuanchuan, FENG Jinyu, XIAO Yi
(School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To realize the large area preparation and practical application of TiAl alloy coating on the surface of TC4 titanium alloy, a single and overlapped TiAl alloy coating was prepared on the titanium substrate by laser cladding. The cladding quality of the coating was analyzed by surface morphology and interface characteristics, the phase composition and microstructure of the coating were studied, and the hardness distribution between the interface of the cladding layer and the lap layer was measured. The results show that the coating is metallurgical, and there is no cracks and pores in the coating. The Ti/Al mainly exists in the form of TiAl(γ), Ti₃Al(α_2), and trace elements, and the coating is mainly composed of double-state structure and lamellar structure. The average hardness of single cladding coating and lap coating is more than 1.44 times that of substrate. The coating can carry out a wide range of multi-channel lap cladding, which proves the feasibility of the TiAl coating on the surface modification of the TC4 substrate. This study is of great significance for the practical application of the coating.

Key words: laser technique; TiAl coating; laser cladding; microstructure analysis; lap cladding

引言

TC4(Ti6Al4V)钛合金比重小、强度大,有很好的耐磨和耐蚀性,是目前最常用的钛合金,主要运用在航天航空发动机压缩机叶片、叶轮;海洋工程的耐压壳体;火箭导弹的外壳、船舱等等,被誉为“海洋金属”和

“航天金属”^[1-4]。高温氧化磨损和腐蚀磨损是 TC4 钛合金最主要的失效形式,所以对于它的表面性能如抗腐蚀性能、抗高温氧化性、耐磨性等要求越来越高,提升 TC4 合金的表面性能有很强的现实意义。常用的表面处理技术有等离子喷涂、电子束熔覆、微弧氧化、气相沉积、激光熔覆等等^[5-7]。其中激光熔覆是一种将粉末通过高温激光熔化凝固在基体上的先进、高效的表面改性技术。激光熔覆的精度高、热效应低、涂层厚且可控,有优异的冶金结合性,还可以进行选择区域熔覆用于零件增材再制造,广泛应用于 TC4 合金的表面改性^[8-11]。TC4 合金常用表面改性涂层有金属及金属合金涂层、陶瓷涂层、金属-陶瓷复合涂层几种。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52065009; 51605106)

作者简介:赵欣鑫(1996-),男,硕士研究生,现主要从事激光加工方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xhq-314@163.com

收稿日期:2020-12-24;收到修改稿日期:2021-01-07

HUANG 等人^[12]在 TC4 钛合金上熔覆了纯铁粉,涂层上形成多种化合物,有效提高表面硬度。XU 等人^[13]在 TC4 钛合金上激光熔覆了 NiCoCrAlY 涂层,研究激光扫描速率对涂层质量的影响,发现涂层裂纹随扫描速率的增加而增加。KOOI 等人^[14]在 TC4 合金上激光熔覆了 Ti 与 TiB₂ 混合粉末,制备了 Ti-TiB 复合涂层,研究其组织的生长演变过程。ZHANG 等人^[15]通过激光熔覆的方法在 TC4 钛合金基体上熔覆了 TiC 增强钛基涂层,有效改善了 TC4 合金耐磨性。

TiAl 合金比普通钛合金具有更好的耐磨耐蚀性能、抗高温氧化性和抗蠕变抗疲劳性能,且其与钛合金基体界面相容性好,是钛合金表面理想的防护涂层。利用激光熔覆技术制备 TiAl 合金涂层成为表面改性及增材修复的前沿研究热点^[16]。LIU 等人^[17]通过在铝合金表面熔覆无裂纹气孔的 TiAl 合金涂层,增强基体的抗高温氧化性。MALIUTINA 等人^[18]通过激光熔覆方法制备了 γ -TiAl 涂层,研究了涂层不同温度下的抗氧化性能。CÁRCEL 等人^[19]通过同步送粉熔覆的方式制备了 TiAl 合金涂层,研究了工艺参量与涂层性能之间影响。上述研究多采用原位合成的方法来制备 TiAl 合金涂层,虽然可以节约成本,但会出现中间产物或未完全反应的原材料,导致涂层性能差异大,稳定性差且难以控制^[20]。

本文中直接采用商用 Ti4822 粉末,采用激光熔覆工艺制备出与 TC4 钛合金界面相容性好并满足强韧耐磨、高稳定的 TiAl 金属间化合物涂层,克服了常用原位合成工艺条件下反应不完全导致的涂层组织性能不均匀、稳定性差的问题;系统研究了熔覆工艺、熔覆层组织特征及物相组成及多道搭接工艺下界面及涂层内部的组织性能演变,为激光熔覆制备高强韧、耐磨损 TiAl 合金涂层及其工业应用提供参考。

1 实验过程

基材为 Ti-6Al-4V (TC4) 板,熔覆粉末为 Ti48Al2Cr2Nb 粉末(15 μ m ~ 53 μ m)。利用线切割得到 40mm × 20mm × 10mm 的单道熔覆基板和 80mm × 40mm × 10mm 的多道搭接基板,将熔覆面用砂轮机打磨,去掉表面的氧化层,用超声波清洗机在酒精中清洗去掉油污。

熔覆设备为 YLS-6000 型光纤激光器,激光光斑尺寸 10mm × 2mm,熔覆过程在自制氩气仓中进行,氩气流量为 10L/min。采用预制方式在基板上铺设 1.5mm 厚的合金粉末,为研究激光参量对熔覆效果的影响,控

制不同的激光功率和扫描速率,得到不同功率、不同扫描速率下的熔覆涂层;多道搭接选择的搭接率为 30%,40% 和 50%。

图 1 为激光熔覆示意图和涂层截面几何量。熔覆后利用线切割得到 8mm × 10mm × 10mm 的试样,用 100 目 ~ 2000 目的砂纸打磨截面,抛光得到涂层的金相表面,在 $V(\text{H}_2\text{O}):V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3) = 10:1:4$ 的腐蚀液中腐蚀 5s ~ 10s,在光学显微镜下观察组织形貌;用 QuantaFEG 250 场发射扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 和能量色散谱 (energy dispersive spectrometer, EDS) 对其进行显微结构表征;采用 D8-Advance, Bruker X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 对涂层物相组成进行分析。利用 Buehler 维氏硬度仪测试基体和涂层的硬度,加载载荷为 1kg,保压时间为 10s。图中, H 是熔覆高度, W 是熔覆宽度。

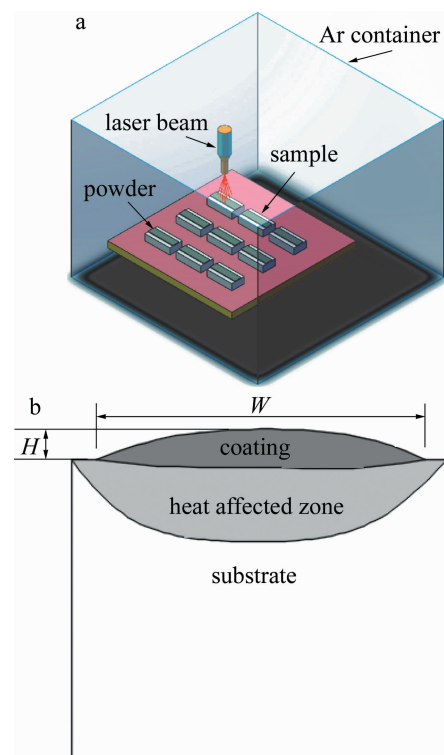


Fig. 1 Schematic illustration of laser cladding and geometry of coating section

2 实验结果与分析

2.1 单道熔覆 TiAl 涂层的组织性能

2.1.1 工艺参量对涂层质量的影响 表 1 是 6 种不同工艺参量下的涂层宽度、厚度。图 2 为涂层表面形貌。A₂ ~ A₅ 涂层表面光滑没有明显裂纹和气孔等缺陷,没有出现过烧或粉末不充分熔化现象,说明功率和扫描速率在此范围较为合理,而 A₁ 和 A₆ 的功率过高

Table 1 Cladding parameters

No.	width/ mm	height/ mm	laser power/ W	scanning velocity/ (mm · s ⁻¹)
A ₁	11.751	1.382	2700	2.5
A ₂	11.396	1.608	2500	2.5
A ₃	10.890	1.985	2300	2.5
A ₄	11.106	1.550	2300	4.0
A ₅	10.958	1.886	2100	4.0
A ₆	10.773	1.855	1800	2.5

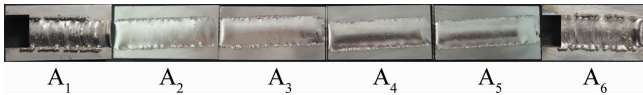


Fig. 2 Surface morphology of coating

和过低,导致熔池冷却凝固过慢和过快,造成堆叠现象,涂层表面粗糙。分别对比 A₁, A₂, A₃, A₆, A₄ 和 A₅ 涂层的宽度和厚度可以看出,在相同的光斑直径及熔覆速率下,功率越大涂层宽度越大、厚度越薄,这是由于功率大,熔池温度高,存在时间长,向两侧的流动越多,涂层宽度越宽厚度越薄。涂层的宽度都接近 11mm,与激光直径相差不大;涂层厚度都在 1.5mm ~ 2.0mm 之间,与铺粉厚度接近。这说明尽管涂层的宽度和厚度主要取决于光斑直径和铺粉厚度,但其亦受到激光功率和扫描速率的影响,对实际生产中制定合理的工艺参量具有指导意义。

2.1.2 物相及微观组织分析 选择涂层质量较好的 A₄ 号试样进行物相及微观组织分析。图 3 为涂层截面金相图。由图 3a 可以看出,涂层分布均匀,没有裂纹。交界处有一条明显过渡层(见图 3e),也就是涂层稀释区,宽度不到 50μm,说明稀释率低且均匀,属于冶金结合,结合性强。

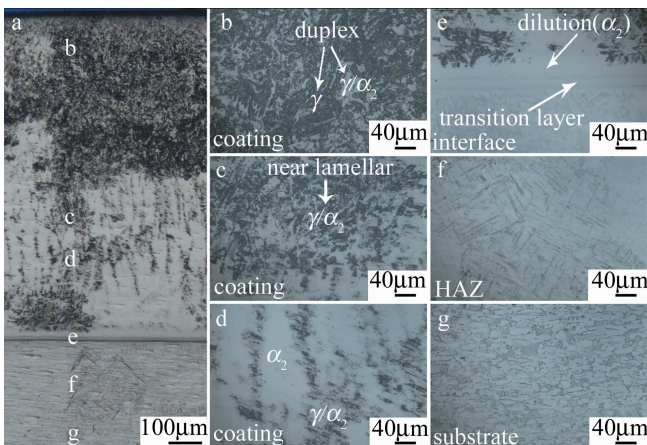
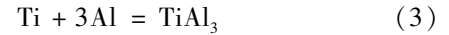


Fig. 3 Optical microscopy images

a—overall image of coating b~d—coating e—interface f—HAZ g—substrate

钛铝可以形成 Ti₃Al, TiAl 和 TiAl₃ 3 种金属间化

合物,化学反应式为:



熔覆粉末中铝元素的摩尔分数不大于 0.48,由 Al-Ti 二元合金相图(见图 4)^[17]并结合相关文献中物相形貌分析^[21-22]可知这时生成的是 TiAl(γ 相)和 Ti₃Al(α₂ 相)。TiAl(γ 相)中 Al 的摩尔分数比 Ti₃Al(α₂ 相)高,在金相腐蚀中先析出的是 TiAl(γ 相)颜色较深。由图 3b ~ 图 3d 可以看出,涂层组织主要为双态组织(见图 3b,等轴 γ 相 + 片层 γ/α₂ 相),近片层组织(见图 3c,片层 γ/α₂ 相和细小的等轴 γ 相)和单相的 α₂ 相(见图 3d)^[22]。在熔覆过程中 Al 元素由内向外挥发,涂层由边缘到交界,Al 元素不断减少,使得 TiAl(γ 相)呈现不断减少的趋势;同时,图 3e 为涂层和基体交界属于稀释区, Ti 元素增加最多,涂层组织基本为 Ti₃Al(α₂ 相)。微量元素 Nb 和 Cr 有固溶强化的作用,可有效提高 TiAl 合金的蠕变抗性、改善合金室温延性等合金性能^[22],形成新的化合物分布在涂层中。基体热影响区(heat affected zone, HAZ)(见图 3f)属于沉积态 TC4 合金,微观组织主要为 β 相冷却时成核长大或马氏体分解形成的针状 α 相;基体组织(见图 3g)是在 α-β 相区加热保留下来的 α 相。

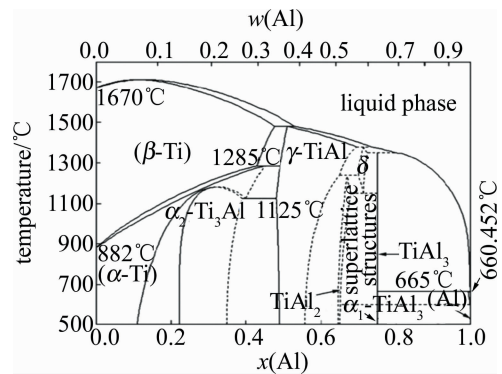


Fig. 4 Al-Ti binary alloy phase diagram^[17]

图 5 为涂层表面的 XRD 谱图。其主要物相为 Ti₃Al, TiAl 金属间化合物,微量元素化合物为 Ti₄Cr 和 Ti₂AlNb,其中 TiAl 含量相对较少,这一方面是因粉末中 Al 含量较少和基体稀释造成,另一方面熔覆过程中 Al 元素挥发进一步使其偏离了原始粉末的成分,这与组织分布结果基本一致。图 6 是图 3c 的 SEM 形貌。图 7a 和图 7b 分别对应图 6 中 1 和 2 处的 EDS 谱及其元素化学组成。由以上分析可知,图 6 为近片层组织,1 处为等轴 γ/α₂ 相,2 处为 α₂ 相和少量细小 γ 相,2 处 Ti 的相对含量(原子摩尔比)比 1 处高,EDS 的钛铝

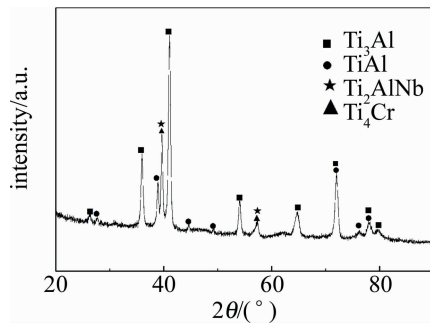


Fig. 5 XRD patterns of laser cladding coating

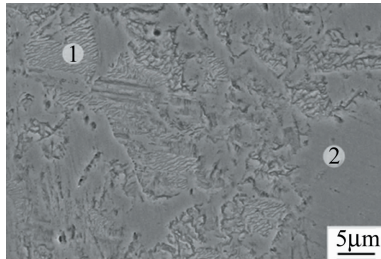


Fig. 6 SEM image of laser cladding coating

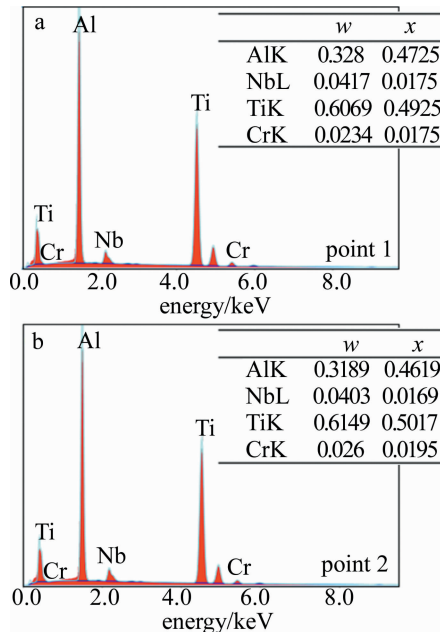


Fig. 7 EDS spectra and element chemical composition corresponding to positions of point 1 and point 2

元素组成结果与组织分布和 XRD 结果相符合。

2.1.3 硬度分析 通过间隔 0.25mm 直线测量从基体到涂层的硬度,得到硬度变化曲线如图 8 所示。基体平均硬度为 328.05HV,热影响区的平均硬度为 338.93HV,涂层平均硬度为 474.74HV,涂层硬度比基体高出 144.67HV,是基体的 1.44 倍。LIU 等人^[23]通过激光增材制造技术,即同步送粉沉积方式制备 TiAl 合金涂层,涂层硬度随沉积层数增加而减小,最高可达 520HV,但平均硬度不到 450HV,相比之下,激光熔覆

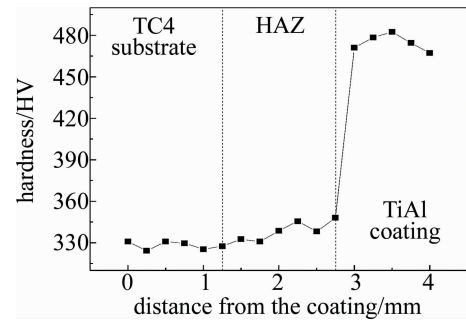
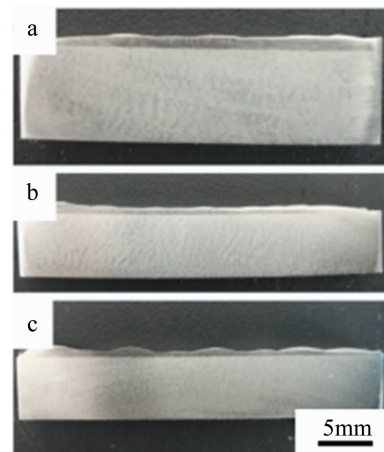


Fig. 8 Microhardness testing

涂层的平均硬度更高且更均匀。

2.2 多道搭接涂层的组织性能

2.2.1 多道搭接涂层的宏观形貌 搭接涂层是熔覆在实际生产中的关键步骤之一^[24]。为了研究 TiAl 搭接涂层的质量,制备了 TiAl 的搭接式样。图 9 为 3 种不同搭接率下的搭接样品。熔覆功率为 2300W、扫描速率为 4mm/s、搭接率分别为 50% (见图 9a)、40% (见图 9b)、30% (见图 9c)。可以看出,搭接率为 30% 时,涂层厚度不均匀,熔覆凸起搭接成波浪状,导致涂层表面凹凸不平;而搭接率为 40% 和 50% 时,涂层搭接痕迹不明显,截面基本看不出单道熔覆的轨迹。搭接率为 50% 时,涂层较厚,搭接铺粉厚度均为 1.5mm,此时粉末的利用率最高,涂层质量也相对较好。

Fig. 9 Macro-profile of overlapped specimen
a—50% b—40% c—30%

2.2.2 多道搭接涂层的显微组织 图 10 为搭接率 50% 的涂层截面金相。图 11 为图 10c 的 SEM 图。由图 10a 可知,涂层无裂纹、孔隙,涂层组织主要为全片层组织(见图 10b),双态组织(见图 10c)和近片层组织(见图 10d)。相比单道涂层,搭接涂层的单相 α_2 相减少,这是由于多道熔覆过程中涂层受热影响作用, TiAl 合金在 $\alpha + \gamma$ 两相区退火, γ 相细化扩散到其它相区,使得 γ 和 α_2 相转变为 γ/α_2 相^[25],生成片层组织,

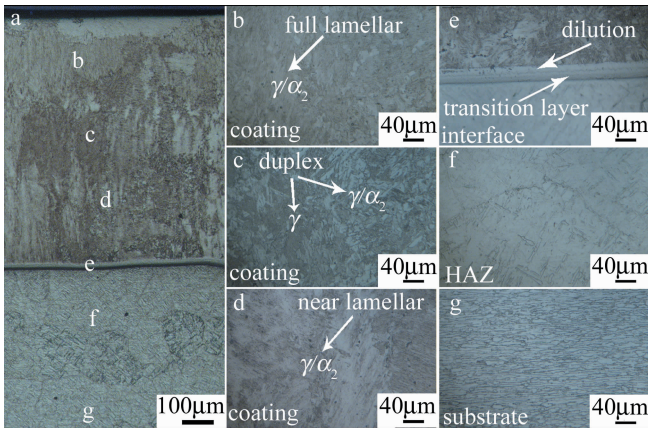


Fig. 10 Microstructure of lap coating

a—overall image of coating b~d—coating e—interface f—HAZ g—substrate

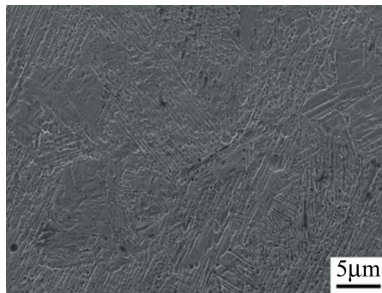


Fig. 11 SEM image of lap coating

导致涂层交界处(见图 10e)的稀释区不明显, TiAl 和 Ti₃Al 的分布更均匀;而搭接涂层的热影响区(见图 10f)和基体组织(见图 10g)与单道熔覆组织相同。对比图 11 和图 6, 两处均为近片层组织, 但明显单道涂层的 γ 相较为粗大, 搭接涂层片层状组织分布更加均匀, 这是 γ 和 α_2 相转变为 γ/α_2 相的结果^[26]。

2.2.3 多道搭接涂层的硬度分布 图 12 为搭接涂层截面宏观形貌示意图(见图 12a)及其硬度分布曲线(见图 12b、图 12c)。以间隔为 0.25mm 的距离测试搭接试样的硬度, 涂层平均硬度为 484HV。图 12b 为涂层截面从一条脊线到下一条脊线的横向硬度曲线, 可以看出, 在接近脊线位置涂层硬度较高, 平均硬度可达到 494HV, 而两道脊线中间位置的硬度只有 472HV, 与单道涂层硬度相差不大。原因可能是两次熔覆接痕位置(如图 12 中 B 点处)的粉末很少甚至没有, 搭接熔覆只是对接痕位置做了一次激光熔凝从而提高了涂层硬度, 而其它位置的硬度与单道涂层的硬度相同。图 12c 为脊线下方 AB 和两脊线中部 CD 从基体到涂层的竖向硬度曲线, 可以看出, CD 处的涂层硬度与单道涂层的相差不大, 涂层的平均硬度为 470HV, AB 处的涂层平均硬度为 492HV, 两处结果与涂层横向

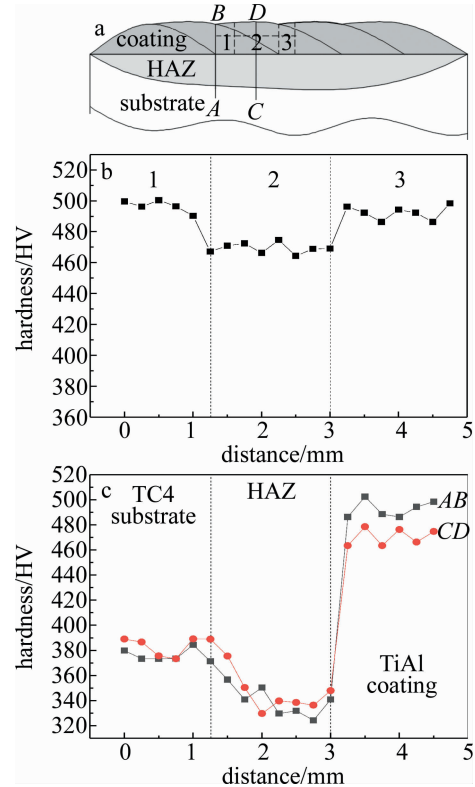


Fig. 12 Microhardness testing

a—schematic diagram of cross-section of overlap coating b—lateral hardness c—vertical hardness

硬度分布结果一致。搭接涂层的热影响区平均硬度为 339.87HV, 与单道熔覆热影响区相比几乎无变化。但搭接涂层 AB 和 CD 处的基体平均硬度分别为 382.64HV 和 375.98HV, 与单道熔覆基体相比提升了超过 50HV, 提升原因是多次熔覆高温, 使得基体在氩气环境下进行了一次短暂热处理。

3 结论

(1) 在激光功率为 2.1kW ~ 2.5kW、扫描速率为 2.5mm/s ~ 4mm/s 之间都可获得较好的熔覆表面质量, 搭接率为 50% 时, 可获得最佳的搭接表面质量, 涂层内没有裂纹和孔隙, 且涂层与基体有结合过渡带, 属于结合性强的冶金结合, 证明了 Ti4822 粉末与 TC4 有很好的冶金性能。

(2) 单道涂层的微观组织主要为双态组织、近片层组织和单相 α_2 相, 搭接涂层的微观组织主要为全片层组织、近片层组织和双态组织; 搭接涂层组织比单道涂层组织分布均匀, 片层组织分布更广, 这增加了组织的抗蠕变性。单道涂层平均硬度可达到 470HV 以上, 是基体的 1.44 倍。多道搭接涂层硬度呈交替分布, 高硬度区在脊线附近可达到 490HV 以上, 低硬度区在两

脊线之间平均为470HV左右。

(3)无论是从表面质量、涂层组织或是涂层硬度,搭接涂层的质量都比单道熔覆的有所提升。证明了采用激光熔覆制备TiAl金属间化合物涂层,可以保证大范围熔覆时的涂层质量,是一种实际可行的基体表面改性方法。

参 考 文 献

- [1] CHEN Z Y, LIU Y Y, JIN Y F, *et al.* Research on 650°C high temperature titanium alloy technology for aero-engine [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(6):22-30(in Chinese).
- [2] KOIZUMI H, TAKEUCHI Y, IMAI H, *et al.* Application of titanium and titanium alloys to fixed dental prostheses[J]. *Journal of Prosthodontic Research*, 2019, 63(3):266-270.
- [3] LENIVTSEVA G O, MUL D O, BATAEV A I, *et al.* Structure and tribological properties of steel after non-vacuum electron beam cladding of Ti, Mo and graphite powders[J]. *Materials Characterization*, 2016, 112:60-67.
- [4] YOU Ch Ch, XIAO H Q, REN L R, *et al.* Microstructure and properties of laser cladding Ti-Al-N composite coating on TC4 surface [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(5):585-589(in Chinese).
- [5] TANG Y X, PENG J H, SU D Y, *et al.* Wear behavior of hard coatings against TC4 Ti-alloy: An experimental study [J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2020, 40(3):5-10(in Chinese).
- [6] ZHANG T G, ZHANG Q, ZHUANG H F, *et al.* Microstructure and properties of Ti₂SC-Ti₂Ni composite structural phase self-lubricating laser cladding layer on TC4 surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11):1114001(in Chinese).
- [7] LIAO Y J L, GU L, LIU S Y, *et al.* Research status of machining γ -TiAl intermetallic compounds both in china and overseas [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(4):22-33(in Chinese).
- [8] CHEN Sh G, ZHANG X M, ZHENG Q Ch, *et al.* Effect of CeO₂ on microstructure and properties of Ni60 alloy coating by laser cladding [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(6):904-908(in Chinese).
- [9] HE Y Y, LIU Y J, CHEN M, *et al.* Study on effect of laser scanning speed on microstructure and properties of cladding layer[J]. *Laser Technology*, 2019, 43(2):201-204(in Chinese).
- [10] WU X Q, XIE F Q, HU Z Ch, *et al.* Effect of diffusion treatment on high temperature friction and wear resistance of aluminium-plated TiAl alloy [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2010, 119(5):113-117(in Chinese).
- [11] ZHENG Ch K, ZHANG W W, ZHANG D T, *et al.* Low cycle fatigue behavior of T4-treated Al-Zn-Mg-Cu alloys prepared by squeeze casting and gravity die casting[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(11):3505-3514.
- [12] HUANG G, SU Y, DUAN Zh Y, *et al.* Microstructure of Fe powder on laser-cladded Ti6Al4V alloy [J]. *Shanghai Metals*, 2013, 35(2):22-26(in Chinese).
- [13] XU R H, LI X F, ZUO D W, *et al.* Microstructure and hardness of NiCoCrAlY coatings on titanium alloy by laser cladding with different scanning speeds [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2014, 38(5):807-812(in Chinese).
- [14] KOOI B J, PEI Y T, HOSSON J T M D. The evolution of microstructure in a laser clad TiB-Ti composite coating[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(3):831-845.
- [15] ZHANG H W, ZHANG D L, ZHANG T G, *et al.* Microstructure and tribological properties of in-situ TiC reinforced Ti-based composite coating by laser cladding on TC4 surface [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2021, 58(1):0114001(in Chinese).
- [16] LIU D, ZHANG L J, MI L, *et al.* Preparation and application status of TiAl alloy [J]. *Progress in Titanium Industry*, 2014, 31(4):11-15(in Chinese).
- [17] LIU H X, LI Q L, ZHANG X W, *et al.* Microstructures and property of Ti-Al intermetallic compound composite coating prepared by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(6):1140-1147(in Chinese).
- [18] MALIUTINA I N, SI-MOHAND H, SIJOBERT J, *et al.* Structure and oxidation behavior of γ -TiAl coating produced by laser cladding on titanium alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 319:136-144.
- [19] CÁRCCEL B, SERRANO A, ZAMBRANO J, *et al.* Laser cladding of TiAl intermetallic alloy on Ti6Al4V -process optimization and properties[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56:284-293.
- [20] KOU H Ch, CHENG L, TANG B, *et al.* Progress on hot-forming techniques of high temperature TiAl alloys [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(21):24-27(in Chinese).
- [21] ZHOU J. Effect of nano-Y₂O₃ on high properties and heat treatment microstructure transformation of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018:6-9(in Chinese).
- [22] LI H. Research on microstructure and properties of β - γ type TiAl alloy [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019:4-9(in Chinese).
- [23] LIU Zh Q, XU G J, MA R X. Properties of TiAl alloy prepared by additive manufacturing with laser coaxial powder feeding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3):0302016(in Chinese).
- [24] ZHANG J Q, ZHANG D Q, GUO Zh J, *et al.* Effects of hot and cold lashing on the microstructure and properties of laser cladding coating [J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2016, 309(11):212-214(in Chinese).
- [25] WANG Y J, LI F, GU Y P, *et al.* The microstructure of Ti-45Al-7Nb-0.2B-0.1Hf-0.1Y alloy [J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2015, 32(1):56-59(in Chinese).
- [26] MICHAEL S K, SONALIKA G, FERESHTEH E, *et al.* Effect of microstructural parameters on the mechanical behavior of TiAlNb(Cr, Mo) alloys with $\gamma + \delta$ microstructure at ambient temperature[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695:2672-2674.