

不同送粉速度对 TC4 钛合金表面激光熔覆的影响

寇元哲, 郭晋昌

(陇东学院 机械工程学院, 甘肃 庆阳 745000)

摘要: 采用光纤激光对 TC4 钛合金表面进行熔覆改性, 研究送粉速度对熔覆工艺过程和熔覆层性能的影响。采用高速摄像机拍摄了加热粉末在空间的分布形貌, 采用光学显微镜观察了熔覆层横截面形貌, 采用 EDS 分析了熔覆层的氮含量分布, 并测量了熔覆层横截面的显微硬度。实验表明, 送粉速度较小时, 粉末吸收少量激光能量, 熔池较大, 熔覆层宽而浅; 送粉速度较大时, 粉末吸收大量激光能量, 熔池较小, 熔覆层窄而深。当送粉速度较大时, 熔覆层的氮元素含量和显微硬度均分布基本均匀, 无明显梯度; 随送粉速度增加, 熔覆层显微硬度会增加, 并稳定在约 9.3 GPa。

关键词: TC4 钛合金; 激光熔覆; 熔覆层形貌; 显微硬度

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2021)02-025-05

Effect of Powder Feeding Rate on Laser Cladding of TC4 Titanium Alloy

Kou Yuanzhe, Guo Jinchang

(School of Mechanical Engineering, Longdong University, Qingyang 745000, China)

Abstract: The surface of TC4 titanium alloy was cladding modified by fiber laser, and the effect of powder feeding rate on cladding process and cladding layer performance was studied. The distribution morphology of the heating powder in space was photographed using high speed camera system, the cross section morphology of the cladding layer was observed using optical microscope, the nitrogen content of the cladding layer was detected using EDS and the cross section microhardness of the cladding layer was measured. The experimental results show that the powder absorbs a little laser energy when the powder feeding rate is low, the molten pool is large, and the cladding layer is wide and shallow. The powder absorbs a lot of laser energy when the powder feeding rate is high, the molten pool is small, and the cladding layer is narrow and deep. When the powder feeding rate is high, the nitrogen content and microhardness of the cladding layer are uniformly distributed without obvious gradient. With the increase of powder feeding rate, the microhardness of the cladding layer increases, and stabilizes at about 9.3 GPa.

Key words: TC4 titanium alloy; laser cladding; morphology of cladding layer; microhardness

钛合金具有强度高、密度小、耐腐蚀性能优良和生物相容性好等优点, 被广泛应用于汽车、化工、航空航天和生物医疗等行业^[1,2]。但是钛合金表面硬度和耐磨性较差, 限制了其更广泛地应用^[3]。为此, 研究人员进行了大量的钛合金表面改性研究。

如康新婷^[4]对钛合金表面进行电镀改性, 由于钛合金表面存在一层致密的氧化膜, 电镀前必须清理氧化膜, 工艺复杂。Biswas 等^[5]通过热氧化技术对钛合金进行表面改性, 改性后得到的热氧化层层深较浅, 无法应用于要求较高的工况。王钧石等^[6]采用等离子注入技术改善钛合金表面性能, 显著提高了合金硬度和耐磨性, 但是效率较低。

在众多钛合金表面改性方法中, 激光表面熔覆是一种比较理想的方法^[7,8]。激光熔覆工艺简单, 熔覆层层深大, 熔覆效率高, 基体变形小且熔覆层

收稿日期: 2020-09-26

基金项目: 庆阳市西峰区科技计划项目(XF201905); 甘肃省创新基地和人才计划项目(20JR10RA138); 甘肃省高等学校创新基金项目(2020A-118); 陇东学院博士基金项目(XYBY1907)

通信作者: 寇元哲(1972—), 男, 副教授。

与基体发生冶金结合,因而钛合金表面激光熔覆改性成为目前研究的热点^[9-11]。Zhang 等人^[12]采用激光熔覆技术在 TC4 钛合金表面制备了 TiC 改性层,熔覆层力学性能相比 TC4 基体显著提高。Kumar 等人^[13]以 AlN、Ni 和 TC4 混合粉末为原料在 TC4 钛合金表面制备熔覆改性层,熔覆层显微硬度是基材的 3 倍,耐磨性也显著提高,但是熔覆层因塑性差而产生了裂纹。刘建弟等人^[14]在 TA15 钛合金表面激光熔覆 WC 颗粒增强相,熔覆层 WC 颗粒分布均匀,滑动磨损条件下耐磨性显著提升,但是熔覆层中有少量裂纹和气孔存在。Li 等人^[15]采用 SiC 和 Ti 混合粉末对 TC4 钛合金表面进行熔覆改性,改性后的 TC4 钛合金硬度和耐磨性明显改善,但是熔覆层存在气孔缺陷。以上研究均可有效改善钛合金表面机械性能,但是由于熔覆层塑性和韧性较差,熔覆层往往存在缺陷。其本质是熔覆层硬度和塑性之间的矛盾。解决以上问题的有效方法是尝试不同的熔覆粉末和配比,以及优化工艺参数。

本研究采用 TiN 和 Ti 混合粉末对 TC4 表面进行熔覆改性,研究送粉速度对激光熔覆改性工艺和改性层性能的影响,期望得到性能优良的钛合金表面熔覆层。

1 实验

实验材料为 60 mm × 60 mm × 8 mm 的 TC4 钛合金板材,其化学成分见表 1。用砂轮打磨去除表面氧化物和杂质,用乙醇和丙酮清洗试样表面。

表 1 TC4 钛合金化学成分 (w%)

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy

Al	V	Fe	C	N	Ti
6.2	4.0	0.2	0.08	0.05	Bal.

采用 IPG 高功率光纤激光器在 TC4 板材表面制备熔覆层,如图 1 所示。激光器型号为 LYS-4000,最大输出功率 4.0 kW,激光波长 1.064 μm,激光器输出连续波激光,激光光斑为圆形,激光能量为高斯分布。采用 i-speed3 高速摄像系统采集被加热粉末的空间分布形貌,拍摄频率为 1000 Hz。采用氩气(纯度 99.99%)保护熔覆区域,以免高温熔池发生氧化。氩气与激光束同轴输入。

熔覆粉末为 TiN 和 Ti 混合物,TiN 粉末与 Ti 粉末的质量比为 1:2,粉末颗粒直径小于 20 μm。采用

同轴送粉方式,粉末与激光一起从喷嘴喷出。分别采用 25、75 和 125 g/min 的送粉速度进行熔覆实验,其他工艺参数不变,如表 2 所示。

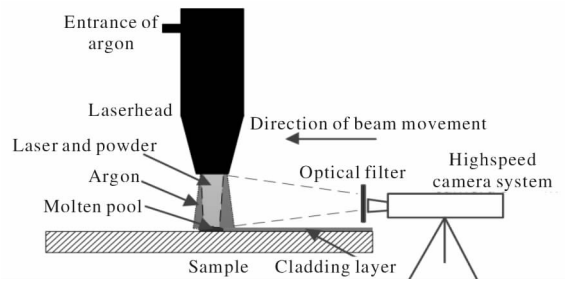


图 1 激光熔覆示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser cladding

表 2 实验工艺参数

Table 2 Experiment process parameters

Power /kW	Scanning speed /mm · min ⁻¹	Defocus distance /mm	Argon flow /L · min ⁻¹
3.0	600	18	10

用线切割将激光熔覆试样切开,用砂纸打磨并用乙醇清洗横截面。采用 Axio Scope A1 型光学显微镜拍摄熔覆层横截面形貌,采用 ESCALAB 250Xi 型 X 射线光电子能谱仪(EDS)检测熔覆层横截面氮含量。采用 Hv-1000 型显微硬度计测量熔覆层横截面显微硬度,测量位置为沿着熔覆层深度方向间隔 0.2 mm,每个深度测量 3 个点,计算 3 个点的平均硬度作为对应深度的硬度值。

2 结果与分析

2.1 加热粉末空间分布及熔覆层横截面形貌

图 2 为 TC4 钛合金表面激光熔覆层照片。熔覆实验自左往右进行,由于初始阶段同轴送粉不稳定,故熔覆层左面部分厚度较浅。从图 2 中可以看出,熔覆层表面粗糙度较高,并且随着送粉速度增加,

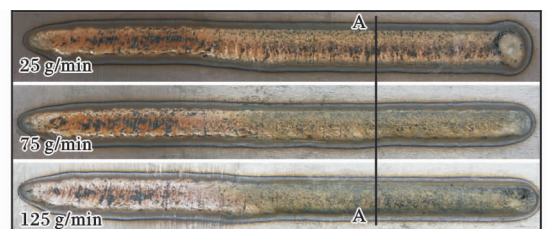


图 2 不同送粉速度下 TC4 钛合金表面熔覆层照片

Fig. 2 Photographs of cladding layer on the surface of TC4 alloy at different powder feeding rates

熔覆层余高明显增加, 而熔覆层宽度有降低的趋势。为避免送粉不稳影响研究结果, 本研究主要分析熔覆层右面部分。

图3中展示了送粉速度分别为25和125 g/min时, 加热粉末空间分布形貌, 分别为连续4帧照片。当送粉速度为25 g/min时, 空间粉末数量较少, 空间粉末吸收了少量激光能量, 并在空间发生了熔化, 最终在重力作用下过渡到熔池中, 同时实现传质和传热。图3a中熔覆粉末数量较少, 大量激光能量直接作用在TC4基体表面, 形成了轮廓清晰的熔池, 且熔池尺寸较大。熔覆过程中, 激光头自右往左运动, 已凝固的熔覆层表面高于基体, 故熔池普遍表现出左侧偏低右侧偏高的特点。送粉速度为125 g/min时, 较大送粉速度导致空间粉末数量较多, 大量粉末吸收激光能量并在空间发生熔化, 故空间加热粉末的亮度更亮一些。图3b中有部分粉末发生了气化, 形成金属蒸气。大量激光能量被粉末颗粒吸收, 只有少量激光能量传递到基体金属表面, 故熔池尺寸较小。

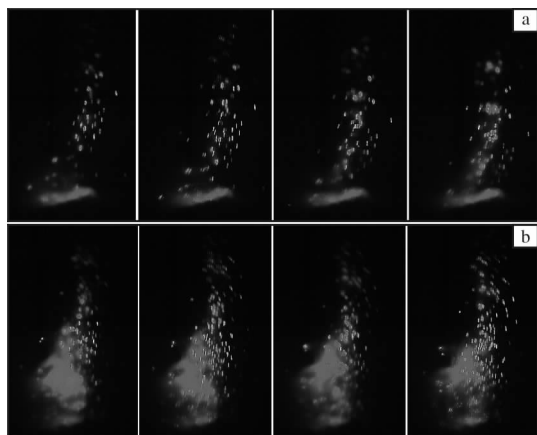


图3 不同送粉速度下加热粉末空间分布形貌

Fig. 3 Spatial distribution morphologies of heating powders at different powder feeding rates: (a) 25 g/min; (b) 125 g/min

沿图2 A-A线将熔覆层切开, 并对熔覆层横截面进行了打磨、剖光和腐蚀, 采用光学显微镜拍摄了熔覆层横截面形貌, 如图4所示。从图4中可以看出, 随着送粉速度的增加, 熔深和余高明显增加, 熔宽明显减小。首先分析熔深增加的机理。采用较小送粉速度进行实验时, 空间粉末只吸收了少部分激光能量, 多数激光能量直接作用在TC4基体上, TC4基体表面形成了熔池, 熔池将大量激光能量反

射, 故此时熔深相对较浅。当采用较大送粉速度时, 大量粉末在空间吸收了少量激光能量, 随着粉末过渡到熔池中, 将大量激光能量也带入到熔池中, 所以采用较大送粉速度时, 熔覆层熔深明显增大。其次分析熔宽减小的原因, 本研究采用的激光能量为高斯分布, 光束周边能量密度远远低于光束中心能量密度, 当采用较大送粉速度时, 大量粉末到达基体前发生了气化, 吸收了少量光束能量, 尤其是光束周边, 只有极少量能量到达TC4基体, 其能量密度不足以让熔覆层两侧发生熔化, 故随着送粉速度增加, 熔覆层熔宽减小。送粉速度增加还导致熔覆层余高增加。

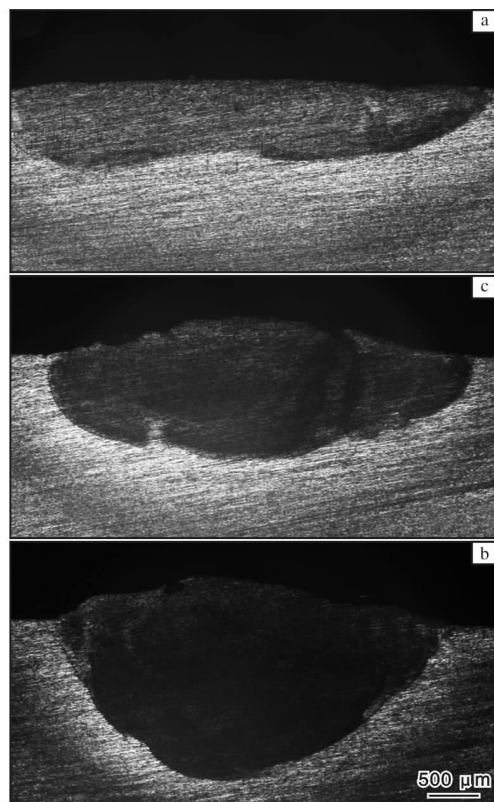


图4 不同送粉速度下熔覆层横截面形貌

Fig. 4 Cross-section morphologies of cladding layer at different powder feeding rates: (a) 25 g/min; (b) 75 g/min; (c) 125 g/min

测量了熔覆层的熔宽和熔深, 如图5所示。从图5中可以看出, 当送粉速度在一定范围内变化时, 熔覆层熔深和熔宽都随送粉速度呈线性变化关系。采用软件拟合了熔覆层熔深和熔宽与送粉速度的函数关系式, 结果如式(1)和式(2)所示。式(1)和式(2)可用来预测不同送粉速度对应的熔深和熔宽, 为激光熔覆生产提供指导。

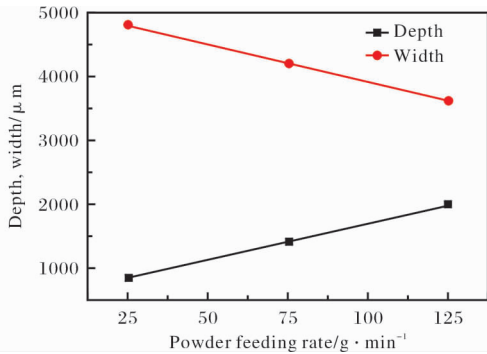


图5 熔覆层熔深和熔宽随送粉速度变化

Fig. 5 Variations of depth and width of cladding layer with powder feeding rate

$$y_1 = 11.4x + 570.5 \quad (1)$$

$$y_2 = -11.6x + 5073.5 \quad (2)$$

式中： y_1 为熔深， μm ； x 为送粉速度，取值范围为25~125 g/min； y_2 为熔宽， μm 。

2.2 熔覆层氮含量与显微硬度

采用EDS线扫描分析熔覆层横截面的氮含量，结果如图6所示。图6中白色线左边部分为熔覆层，右边部分为基体，颜色较深，基体与熔覆层之间有明显过渡区域。由于图6中不同送粉速度的熔覆层横截面状态不同，故不同送粉速度熔覆层氮含量的cps绝对数值有所差异。基体氮含量接近于零，熔覆层氮含量明显高于基体，在熔覆层与基体过渡区域氮含量发生了跳变。熔覆层的氮含量基本均匀，无氮含量梯度，这是由于熔覆粉末中本身氮含量是均匀的，而且激光熔池在表面张力作用下发生强烈的马兰戈尼对流，将熔化的少量基体与熔覆粉末混合均匀，形成氮含量均匀的熔覆层。熔覆层的氮含量过高将强烈影响其机械性能。

图7为熔覆层横截面的显微硬度测量结果。图7中可以看出，TC4基体显微硬度约3.4 GPa，熔覆层的显微硬度明显提高。由于边缘效应，第1个测量点的显微硬度低于熔覆层平均显微硬度，且不同送粉速度的熔覆层均表现出相同的趋势。送粉速度为25 g/min时，熔覆层显微硬度大约为5.9 GPa，这是由于氮元素起到第二相强化的作用。送粉速度为25 g/min的熔覆层硬度明显低于送粉速度为75和125 g/min的熔覆层，这是由于送粉速度较小时，熔覆层被基体强烈稀释，氮含量较小，故熔覆层硬度较小。送粉速度为75和125 g/min的熔覆层显微硬度大约都是9.3 GPa，此时送粉速度较大，粉末吸收

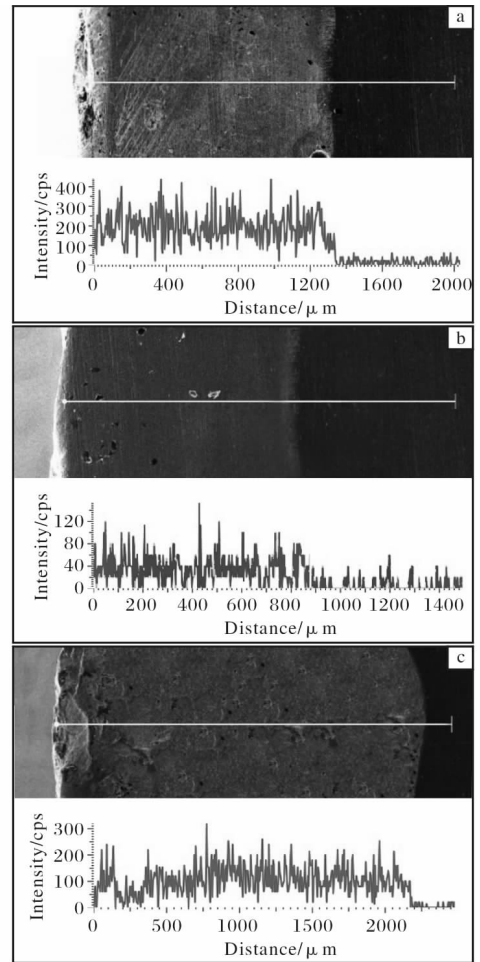


图6 不同送粉速度下熔覆层的氮元素EDS线扫描

Fig. 6 EDS line scanning of nitrogen element of cladding layer at different powder feeding rates: (a) 25 g/min; (b) 75 g/min; (c) 125 g/min

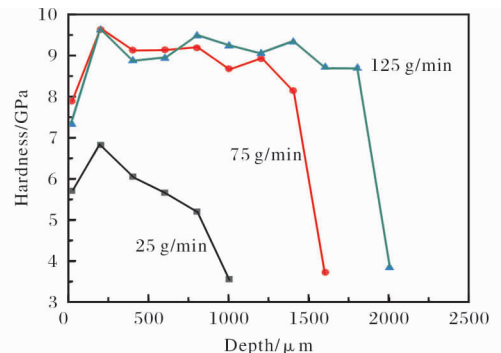


图7 不同送粉速度下熔覆层横截面显微硬度分布

Fig. 7 Cross section microhardness distribution of cladding layer at different powder feeding rates

了大量激光能量，基体只吸收了少量激光能量，并且只有少量基体被熔化，所以熔覆层稀释率较低，熔覆层氮含量更高，显微硬度更高。实验证明送粉

速度从 75 g/min 提高到 125 g/min 时, 只是增加了熔覆层的熔深, 熔覆层显微硬度并没有明显提高。当送粉速度为 75 和 125 g/min 时, 熔覆层显微硬度均基本均匀, 无明显梯度, 这是由于熔覆层氮含量较均匀。熔覆层显微硬度在熔覆层与基体过渡区域发生了突变, 这也与氮元素的分布规律一致。

3 结论

(1) 采用光纤激光对 TC4 钛合金表面进行熔覆改性, 送粉速度较小时, 粉末吸收了少量激光能量, 熔池较大, 熔覆层表现出宽而浅的特点; 送粉速度较大时, 粉末吸收大量激光能量, 熔池较小, 熔覆层表现出窄而深的特点。

(2) 当送粉速度较大时, 熔覆层的氮元素含量和显微硬度都表现出均匀分布的特点, 没有明显梯度。随送粉速度增加, 熔覆层显微硬度会增加, 最终稳定在约 9.3 GPa。

参考文献 References

- [1] 王浩军, 张颖云, 伍亚辉, 等. TC4 钛合金薄板双侧激光角焊搭接变形研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(9): 144-146.
- [2] 吴迪鹏, 武永, 陈明和, 等. TC31 钛合金板材高温流变行为及组织演变研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(12): 3901-3910.
- [3] Takesue S, Kikuchi S, Akebono H, et al. Effect of pre-treatment with fine particle peening on surface properties and wear resistance of gas blow induction heating nitrated titanium alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 359: 476-484.
- [4] 康新婷. 钛基体表面处理对无氰电刷镀银结合力的影响[J]. 钛工业进展, 2005, 22(3): 15-17.
- [5] Biswas A, Majumdar J D. Surface characterization and mechanical property evaluation of thermally oxidized Ti-6Al-4V[J]. Materials Characterization, 2009, 60(6): 513-518.
- [6] 王钧石, 晏永华, 陈桂容. 钛合金等离子体源离子注入表面改性[J]. 稀有金属, 2006, 30(5): 582-585.
- [7] 吴刚刚, 汪选国, 曾鲜, 等. TC4 表面激光熔覆 AlCoCr-FeNiTi_{0.5}高熵合金层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2019, 44(12): 1-5.
- [8] Fei Q X, Gong S L, Suo H B, et al. Laser cladding on TC2 titanium component[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(S2): 59-62.
- [9] Li J, Chen C, Lin Z, et al. Phase constituents and microstructure of laser cladding Al₂O₃/Ti₃Al reinforced ceramic layer on titanium alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(14): 4882-4886.
- [10] Yang Y L, Zhang D, Yan W, et al. Microstructure and wear properties of TiCN/Ti coatings on titanium alloy by laser cladding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(1): 119-124.
- [11] 邱莹, 张凤英, 胡腾腾, 等. 激光功率对 TC4 表面熔覆 Ti40 阻燃钛合金组织及硬度的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 167-175.
- [12] Zhang K M, Zou J X, Li J, et al. Surface modification of TC4 Ti alloy by laser cladding with TiC + Ti powders[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(11): 2192-2197.
- [13] Kumar S, Mandal A, Das A K, et al. Parametric study and characterization of AlN-Ni-Ti6Al4V composite cladding on titanium alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 37-49.
- [14] 刘建弟, 张述泉, 王华明. 激光熔覆 WC 颗粒增强复合涂层的组织及耐磨性[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2600-2607.
- [15] Li N, Xiong Y, Xiong H P, et al. Microstructure, formation mechanism and property characterization of Ti + SiC laser cladded coatings on Ti6Al4V alloy[J]. Materials Characterization, 2019, 148: 43-51.

2020 年 4—6 月日本海绵钛产销数据统计

日期	海绵钛产量/t	国内海绵钛出货量/t	国外海绵钛出货量/t	海绵钛出货量合计/t
2020 年 4 月	5130	2029	2295	4324
2020 年 5 月	4878	1478	2468	3946
2020 年 6 月	4673	726	1442	2168
合计	14 681	4233	6205	10 438