

## 钛合金表面激光熔覆修复技术\*

崔爱永<sup>1</sup>, 胡芳友<sup>1</sup>, 张忠文<sup>2</sup>, 卢长亮<sup>1</sup>, 易德先<sup>1</sup>, 邹刚<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院青岛分院 航空机械系, 青岛 266041; 2. 海军驻沈阳导弹专业军事代表室, 沈阳 110034)

**摘 要:** 为探讨压气机叶片损伤修复新工艺, 采用 CO<sub>2</sub> 激光熔覆技术, 在钛合金表面进行了激光熔覆 Ti/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层试验。通过分析各工艺参数对熔覆层质量的影响规律, 优化参数组合。结果表明, 激光功率为 1.8 kW、扫描速度 6 mm/s 时, 稀释率达到最小, 为 3.95%, 得到连续、均匀、无裂纹和气孔的高质量熔覆层, 实现了良好的冶金结合。显微硬度明显提高, 最高可达 1050 HV, 平均约为基材的 3 倍。

**关键词:** 钛合金; 激光熔覆; 工艺优化; 显微硬度

**中图分类号:** TG174.44; TG146.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2011)02-0061-04

### Titanium Alloy Laser Cladding Repair Technique

CUI Ai-yong<sup>1</sup>, HU FANG-you<sup>1</sup>, ZHANG Zhong-wen<sup>2</sup>, LU Chang-liang<sup>1</sup>, YI De-xian<sup>1</sup>, ZOU Gang<sup>1</sup>

(1. Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering College, Aeronautical Mechanical Institute, Qingdao 266041; 2. Naval Deputation in Shenyang, Shenyang 110034)

**Abstract:** To research and development new technologies of compressor blade damage remanufacturing, an experiment of laser cladding Ti/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on titanium alloy surface by CO<sub>2</sub> had been carried out. The effects of processing parameters on the cladding layer height, dilution rate and penetration into the substrate had been examined. It is found that the dilution rate reaches the lowest value (3.95%) at the laser power of 1.8 kW and the scanning speed of 6 mm/s. A white narrow metallurgical bonding zone is formatted at interface between the cladding and the substrate, about 10~20 μm. The cladding layer is continuous, homogeneous, poreless and crackless by optimizing the technical parameters. The hardness of the cladding layer increased obviously, the maximum is 1150 HV, the average is about 3 times of the substrate.

**Key words:** titanium alloy; laser cladding; processing parameter optimization; microhardness

## 0 引 言

钛合金具有比强度高、高低温性能好、耐腐蚀等优点, 被广泛应用于航空航天领域<sup>[1]</sup>, 是压气机叶片等结构件的首选材料。但其耐磨性能较差, 航空压气机叶片常因震动摩擦、沙粒冲击等原因而产生较严重的损伤<sup>[2,3]</sup>。传统修复工艺无法很好地满足损伤件的后续修复工作, 给飞行安全和部队整体战斗力带来较大影响, 并造成了经济上的极大损失。

随着大功率激光器的问世, 激光以其高亮度、高方向性、高单色性和高相干性<sup>[4]</sup>等独特的优越性, 使激光技术成为一种有效修复损伤的前沿热门

新工艺。文中以 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金粉末为原料, 采用激光熔覆技术, 在钛合金基体表面获得了良好冶金结合的熔覆层, 实现了压气机叶片损伤件的激光修复。

## 1 试验材料及方法

基体材料采用 Ti6Al4V 合金, 试样尺寸为 30 mm × 20 mm × 5 mm。钛基合金材料机械充分混合, 其中 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末质量分数为 10%, 颗粒直径为 20~40 μm; CeO<sub>2</sub> 粉末质量分数为 0.8%, 纯度 ≥ 99.99% (其余为 Ti+20% 镍包铝), 保温 150 °C, 烘烤 24 h。

使用 SSX-550 型扫描电镜和 BX51M 型光学金相显微镜观察熔覆截面形貌, 用图像分析软件测量熔覆层高度、宽度和熔深。用 HXS-1000A 型电子

收稿日期: 2010-08-13; 修回日期: 2011-03-07

基金项目: \*国家博士后科学基金项目 (20060391000)

作者简介: 崔爱永 (1981—), 男(汉), 江苏丰县人, 博士生。

显微硬度仪测量熔覆层显微硬度。

激光熔覆工艺参数: 激光功率 1.5~2.5 kW, 扫描速度 5~15 mm/s, 光斑直径 3 mm, 高纯氩气保护。无预热保温装置, 多道激光熔覆的搭接率为 30%。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 熔覆层宏观质量

图 1 给出了单道熔覆层表面形貌以及多道熔覆层表面形貌。可以看出, 不同功率下的单道熔覆层宏观质量没有明显的差异, 熔覆层完整、表面光洁、均匀, 只在边缘有极少的粉末积瘤, 无肉眼可见的夹杂或裂纹。多道搭接熔覆层表面较平整、光滑, 成型质量较高。

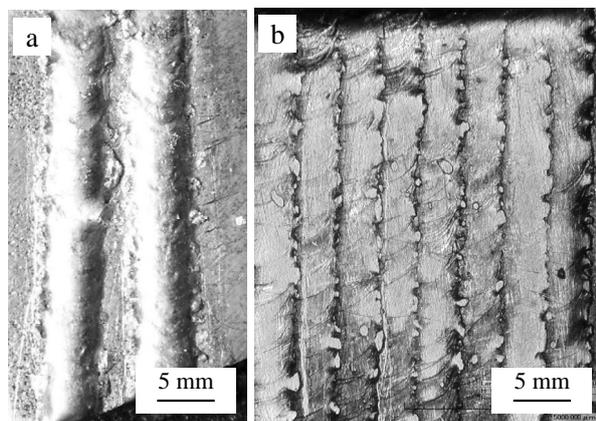
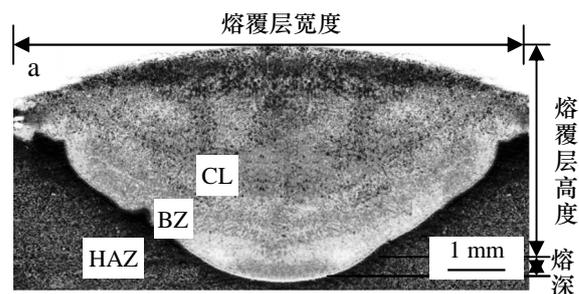


图 1 激光熔覆层表面形貌(a)单道熔覆层(b)多道熔覆层  
Fig.1 Surface topographies of laser cladding layer (a) single track (b) multipass lap joint

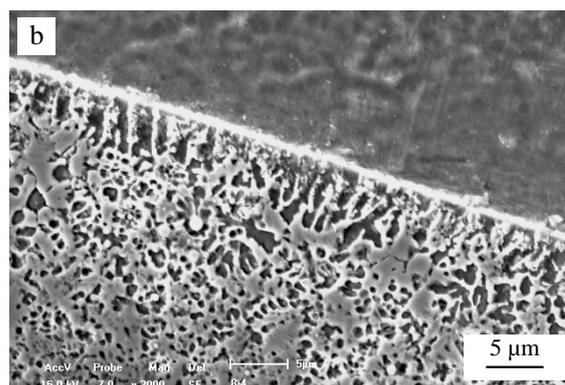
图 2 为单道激光熔覆试样横截面典型低倍电镜形貌。可见, 激光熔覆层在微观上分为三个区域: 熔覆区(CL:cladding layer)、熔合区(BZ:bonding zone)和基体热影响区(HAZ:heat-affected zone)。熔覆层和基材实现了良好的冶金结合, 白亮熔合区宽度 10~20  $\mu\text{m}$ 。通过优化工艺参数, 获得连续、均匀、无裂纹和气孔的高质量熔覆层。

### 2.2 工艺参数对熔覆层的影响

钛合金叶片激光修复技术中主要工艺参数包括激光功率、光斑直径和扫描速度等。这些参数直接影响着熔覆层的质量, 而彼此之间又存在着相互耦合影响, 因此找到最佳工艺参数组合是获得最优成形修复的重要保证。



(a) 界面形貌



(b) 界面组织

图 2 激光熔覆横截面 SEM 形貌

Fig.2 SEM morphologies of cross-section of the laser cladding layer

#### 2.2.1 激光功率对熔覆层影响

沿扫描垂直方向将单道熔覆层取样, 如图 2 所示, 分别测量熔覆层的高度、宽度及基体熔深等, 并计算了稀释率, 结果如表 1 所示。由于熔覆层的宽度与基体的熔深存在对应关系, 因此, 激光熔覆稀释率  $\beta$  的分析模型<sup>[5]</sup>可简化为:

$$\beta = \frac{d}{d + S_f} \quad (1)$$

其中,  $d$  为基体熔化深度,  $S_f$  为熔覆层高度。激光功率对熔覆层高度、宽度、熔深和稀释率的影响规律曲线如图 3 所示。可以看出, 当保持扫描速度不变时, 随着激光功率的升高, 熔覆层高度呈现先增加后成降低的趋势, 在 1.8 kW 附近出现极大值; 熔覆层宽度、熔深和稀释率均随激光功率的提高而增大, 其中熔宽变化缓慢, 大小基本保持不变。

#### 2.2.2 扫描速度对熔覆层的影响

扫描速度对熔覆层高度、宽度、熔深和稀释率的影响规律曲线如图 4 所示, 详细数据如表 2 所示。可以看出, 当保持激光功率不变时, 随着扫描速度升高, 熔覆层高度先增加后成降低趋势, 在 8 mm/s

表 1 相关参数的检测及计算结果

Table 1 experimental determination and calculation results

激光功率/kW	熔高/mm	熔深/mm	熔宽/mm	稀释率/%	裂纹
1.5	2.11	0.12	6.82	5.48	无
1.8	2.36	0.14	6.92	5.79	无
2.0	2.31	0.15	6.92	6.32	无
2.4	2.28	0.16	6.92	6.91	无

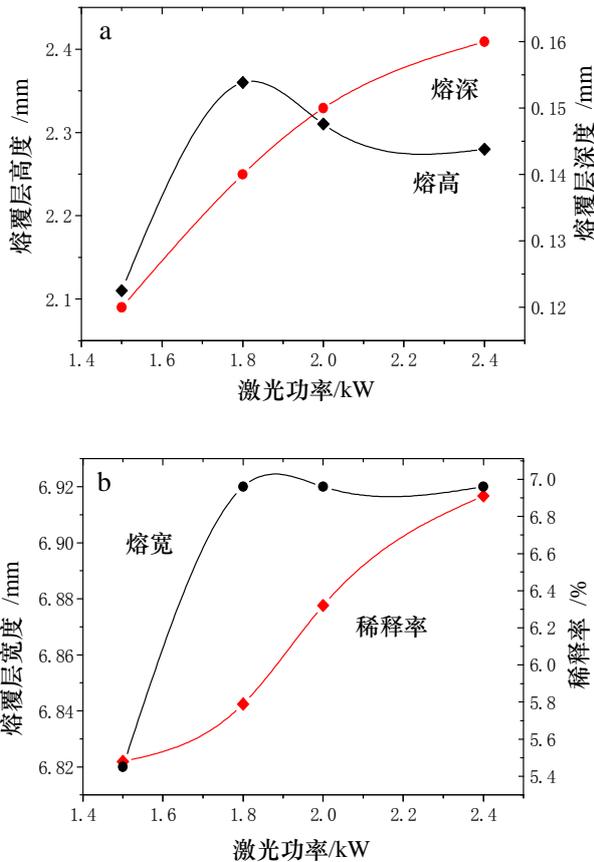


图 3 熔覆层熔高和熔深(a)、熔宽和稀释率(b)与功率的关系  
Fig.3 Influence of clad height, depth of penetration (a), width of clad and dilution (b) by laser power

表 2 相关参数的检测及计算结果

Table 2 Experimental determination and calculation results

扫描速度/mm·s <sup>-1</sup>	熔高/mm	熔深/mm	熔宽/mm	稀释率/%	裂纹
4	2.21	0.17	6.79	7.53	无
6	2.31	0.15	6.85	6.12	无
8	2.40	0.14	6.93	5.66	无
10	2.14	0.11	6.94	5	无

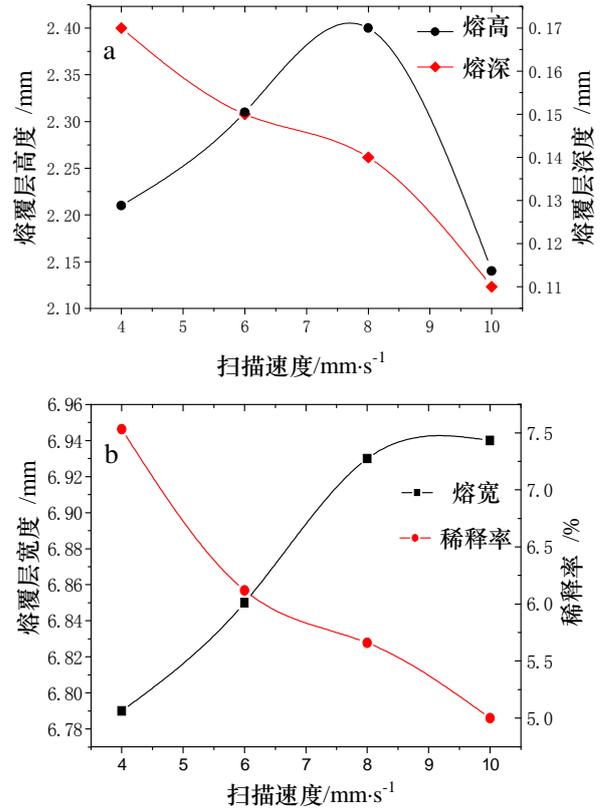


图 4 熔覆层熔高和熔深 (a)、熔宽和稀释率 (b) 与扫描速度关系曲线  
Fig.4 Influence of clad height, depth of penetration (a), width of clad and dilution (b) by scanning speed

附近出现极大值；熔深和稀释率均随扫描速度的提高而减小，熔宽变化缓慢，大小基本保持不变。

### 2.2.3 参数组合对熔覆层的综合耦合影响

以上采用单因素试验分别分析了单道熔覆层高度、宽度、熔深和稀释率随着扫描速度、激光功率的改变而变化的趋势，但熔覆层的几何形状是各种参数综合作用的结果，因此以上试验分析只能大约估计参数较合理的选取范围，得到最优参数组合还需要进一步分析。

使用正交试验优化参数组合，经过 9 组试验，得到了内部无明显可见缺陷、冶金结合良好、外观形貌光洁的熔覆试样。沿扫描垂直方向将单道熔覆层取样，分别测量熔覆层的高度、宽度及基体熔深等，并计算稀释率，结果如表 3 所示。

可见，稀释率、熔覆层高度、熔深均随激光功率等参数的变化而变化，但熔覆层宽度基本保持不变。总体上，熔覆层高度和熔深随激光功率的增加而增大，但这些参数对稀释率的影响复杂，相互间

表3 相关参数的检测及计算结果

Table 3 Experimental determination and calculation results

激光功率/kW	扫描速度/ $\text{m}\cdot\text{ms}^{-1}$	熔高/mm	熔深/mm	熔宽/mm	稀释率/%	裂纹
1.5	6	1.90	0.10	6.86	5.03	无
1.5	8	2.04	0.11	6.76	5.4	无
1.5	10	2.38	0.15	6.84	6.02	无
1.8	6	2.29	0.9	6.78	3.95	无
1.8	8	2.55	0.12	6.98	4.69	无
1.8	10	2.23	0.21	7.01	8.73	无
2.4	6	2.43	0.15	6.74	6.02	无
2.4	8	2.60	0.19	7.05	6.89	无
2.4	10	1.81	0.15	6.96	7.83	无

存在耦合作用。激光功率为 1.8 kW、扫描速度 6 mm/s 时，稀释率达到最小，为 3.95%。当激光功率保持不变，随扫描速度的增加，熔覆层高度、熔深和稀释率均增大。

裂纹是激光熔覆中最重要的质量问题。由于高能激光束的快速加热和基体的激冷，使熔覆层中产生极大的热应力，当局部残余热应力超过涂层材料强度极限时，就会产生裂纹<sup>[6]</sup>。试验表明该钛基合金对裂纹不敏感，氩气保护和未预热的情况下可实现无裂纹及其他缺陷。

### 2.3 显微硬度分布

取典型激光熔覆试样沿层深方向测量显微硬度，测量点间隔 0.05 mm，测量载荷为 500 N，作用时间为 20 s，得到显微硬度分布规律如图 5 所示。

可见，激光熔覆试样显微硬度曲线存在 3 个

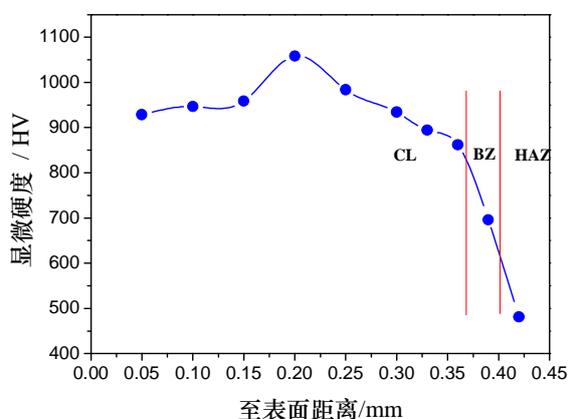


图5 激光熔覆试样沿层深方向的显微硬度分布

Fig.5 Microhardness distribution of the laser cladding by the distance from surface

区，分别对应熔覆区、熔合区和基体热影响区，显微硬度由表及里呈缓慢降低趋势。其中，熔覆区显微硬度最高，在 900~1050 HV 之间，平均是基体的 3 倍左右，这是因为存在  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、TiAl 等陶瓷增强相。熔合区较窄，为一条白亮熔合线，显微硬度急剧降低为 680 HV 左右。基体热影响区由于发生晶粒细化，硬度(380~420 HV)比基体材料硬度(310~320 HV)略有提高。

### 3 结论

(1) 激光功率 1.8 kW、扫描速度 6 mm/s 时稀释率达到最小，为 3.95%。通过优化参数组合，获得表面光洁、内部无裂纹的熔覆层，与基材冶金结合良好，可实现损伤件的修复。

(2) 熔覆区显微硬度(900~1150 HV) 较高，平均约为基体的 3 倍。

### 参考文献:

- [1] 崔爱永, 胡芳友, 等. 钛合金表面激光熔覆 (Ti+Al/Ni)/( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ + $\text{CeO}_2$ )复合涂层组织与耐磨性能 [J]. 中国激光, 2007, 3(34): 438-441.
- [2] Fangyou Hu. Experimental research on functional graded cladding layer of titanium alloy [J]. PICALEO, 2008.
- [3] Hu Fangyou, Li Hu. Microstructure of laser surface alloying layer of cast Al alloy with Ni-Cr-Si-Nb-B [C]. International Symposium on Material Science and Engineering, 2005, 58-61.
- [4] Huang R F, Luo J M, Wang C Q. Application and progress of laser cladding [C]. Proceedings of International Symposium on Materials Science and Engineering, 2005(1): 414-417.
- [5] 郑启光. 激光先进制造技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [6] 张庆茂. 送粉式激光熔覆稀释率的分析模型及其影响因素 [J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(1): 11-15.
- [7] 钟敏林. 45 kW 高功率  $\text{CO}_2$  激光熔覆过程中裂纹行为的实验研究 [J]. 应用激光, 1999, 19(5): 193-197.

作者地址: 山东青岛四流中路 2 号研究生队 266041  
海军航空工程学院青岛分院 航空机械系  
Tel: 152 6621 7175 E-mail: cuiyonghaijun@163.com