

## 钛合金表面缺陷的激光熔覆修复研究

## Research on Laser Cladding Repairing for Defect on Titanium Alloy Surface

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司工艺研究所 于新年 孙福权 刘新宇 李新东 刘冰

**[摘要]** 采用激光熔覆方法对钛合金试样表面缺陷进行修复,对修复结果进行反复测试,并与氩弧焊修复进行对比试验。试验结果表明,激光熔覆可实现对钛合金表面缺陷的有效修复,且各方面性能远高于氩弧焊修复。

**关键词:** 修复 激光熔覆 钛合金表面缺陷 氩弧焊

**[ABSTRACT]** Repairing for titanium alloy surface defect with laser cladding method is researched. A number of tests on the coat and the titanium alloy material are carried out. The comparative experiment on the laser cladding method and the argon arc welding is performed. The results prove that the laser cladding method can repair the titanium alloy surface defect well, and the laser cladding coat performances are better than the argon arc welding.

**Keywords:** Repairing Laser cladding Titanium alloy surface defect Argon arc welding

钛合金具有比强度大,比重量轻、耐高温以及焊接性能良好等优点,广泛的应用于航天、航空等领域<sup>[1-4]</sup>。实际生产过程中,刮碰、操作失误等原因造成钛合金零件产生凹痕、裂纹、尺寸超差等质量问题。因为表面缺陷导致零件的报废,将造成巨大的经济损失;制造新的零件,又会延长生产周期,甚至影响飞机的按期交付。采取适当的方法对零件的表面缺陷进行修复,不仅可以有效地解决这类问题,而且具有很好的经济效益和社会效益。

与传统修复方法相比,激光熔覆技术有以下优点<sup>[5]</sup>:激光束的能量密度高,作用区域集中,除作用区域外,材料其他部分不受热作用;激光加工的加热和冷却速度快,材料的组织和性能不受破坏,所形成修复层的表面组织和性能均优于其他传统方法形成的;激光加工的表面没有机械作用,使得加工速度快,效率高。因此,采用激光熔覆技术能够很好地修复钛合金的表面缺陷。

## 1 试验过程及方法

### 1.1 试验材料

试验选取了生产中常用的TA15钛合金材料,其名

义成分为Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V。它通过 $\alpha$ 稳定元素Al得到固溶强化,加入Zr、Mo和V补充强化并改善其工艺性能。TA15钛合金高铝当量接近 $\alpha$ 钛合金,相当于前苏联的BT20钛合金。

### 1.2 钛合金表面缺陷的激光修复工艺

激光熔覆热源采用CO<sub>2</sub>气体激光和Nd:YAG固体激光,波长分别为10.6 $\mu\text{m}$ 和1.06 $\mu\text{m}$ 。修复钛合金裂纹模拟试样前,需要先打磨清理裂纹区域,将线切割制作裂纹时产生的热影响区完全去除,然后采用Nd:YAG固体脉冲激光加工机的显微焊方式进行逐层填焊,直至将试样表面裂纹修复模拟区完全填满。

凹痕激光熔覆与通常的平面激光熔覆不同,凹痕处于三维空间,无论在修复层的结构约束方面还是在界面结合方面都不同于二维平面,前者受到较大的结构约束和空间多维界面结合的影响。

### 1.3 对比修复工艺的选择

在实际生产中,可选择的修复工艺除了激光熔覆,常用的还有氩弧焊和热喷涂等方法。氩弧焊会造成很大的热影响区,不能用于修复薄壁零件,也不能用来修复受热后产生变形翘曲、过热或裂纹的零件。热喷涂方法,由于形成的涂层有气孔、涂层与基体粘接不牢等缺陷,也不能用来修复接触载荷较大或冲击载荷较大的零件。综合比较,本研究选择氩弧焊与激光熔覆进行对比试验。

## 2 试验结果及性能分析

### 2.1 激光修复层的微观形貌及硬度分析

#### 2.1.1 模拟试样凹痕缺陷修复后的显微组织分析

凹痕缺陷修复后的微观形貌如图1(a)~(c)所示。图1(a)可以看出激光熔覆修复区无裂纹、无气孔,修复区与基体之间界面为冶金结合,热影响区很小,约在100 $\mu\text{m}$ 左右,修复区组织为明显的快速凝固胞枝晶结构,主要由 $\alpha'$ 针状马氏体相和少量的残余 $\beta$ 组织组成。

图1(d)是沿图1(a)修复区中心的显微硬度分布图。修复区的显微硬度与基材硬度相近,热影响区硬度有所升高,这是由于基体中的 $\beta$ 相或魏氏体发生部分马氏体转变。

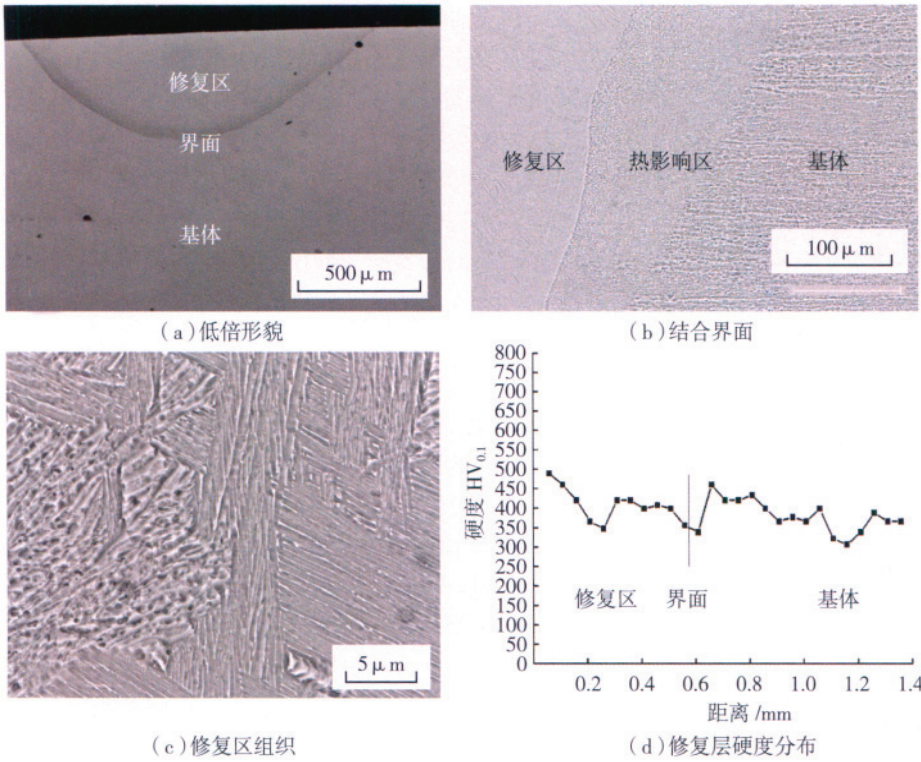


图1 模拟凹痕激光修复区SEM照片及修复层硬度分布  
Fig.1 SEM image of simulate dent laser cladding repairing area and distributing of micro-hardness

屈服强度和延伸率平均值分别为 1040.8MPa、1014.4MPa 和 12.9%；模拟凹痕试样修复后的抗拉强度、屈服强度和延伸率平均值分别为 1076.4MPa、1050.8MPa 和 10.1%；TA15 模拟裂纹试样修复后的抗拉强度、屈服强度和延伸率平均值分别为 1053.7MPa、1029.1MPa 和 7.6%。

对比可知,模拟试样激光修复后的抗拉强度和屈服强度均低于基体,其延伸率有所降低,这是由于焊缝组织晶粒细化,α' 针状马氏体相形成和存在较大残余应力等因素引起的塑性降低。

### 2.2.2 氩弧焊的拉伸试验

氩弧焊修复后的零件拉伸试验结果如表 2 所示。

与激光修复后的拉伸试验结果对比可知,由于氩弧焊修

### 2.1.2 模拟试样裂纹缺陷修复后的显微组织分析

裂纹缺陷修复后如图 2 (a)~(c) 所示。从图 2 (c) 可以看出,修复区组织为网篮状结构,脉冲激光修复区结合好,上下边充满,仅界面有少量的气孔存在。

图 2 (d) 表示的是沿图 2 (a) 修复区横向的显微硬度分布,修复区的显微硬度与基体硬度相近,热影响区硬度有所升高,这是由于基体中的 β 相或魏氏体发生部分马氏体转变。

### 2.1.3 氩弧焊的热影响区

氩弧焊对钛合金表面缺陷进行修复,其热影响区较大(见图 3),超过 1mm,而脉冲 Nd:YAG 激光修复的热影响区仅为 0.1mm 左右。因此经氩弧焊修复过的零件易产生变形、应力集中和零件的应力断裂等问题。

## 2.2 基体拉伸试验

### 2.2.1 拉伸试验结果及分析

由表 1 可以看出,基体抗拉强度、

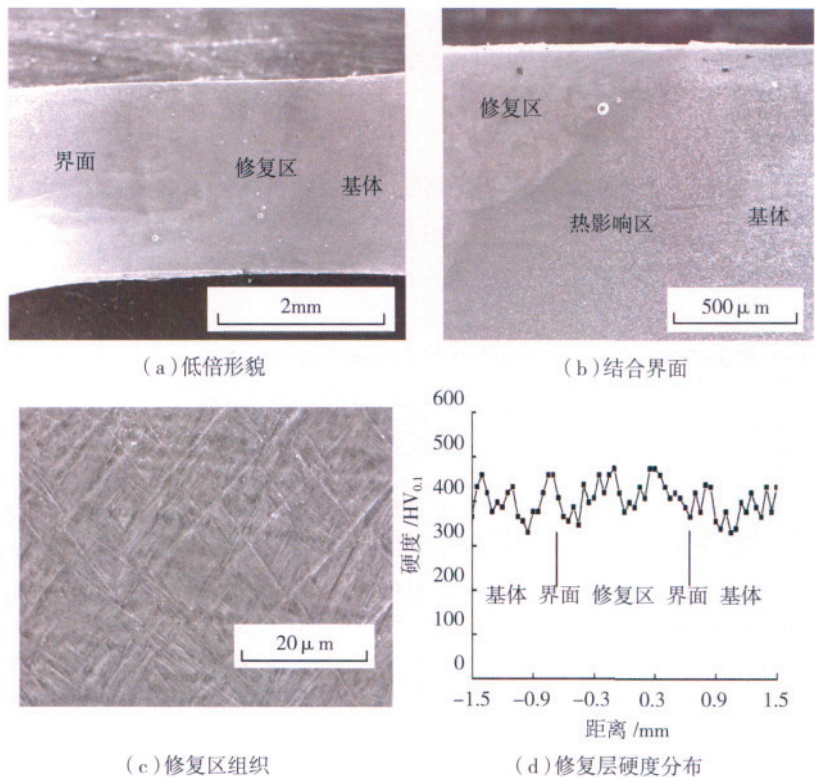


图2 模拟裂纹激光修复区SEM照片及横向硬度分布  
Fig.2 SEM image of simulate crack laser cladding repairing area and distributing of micro-hardness

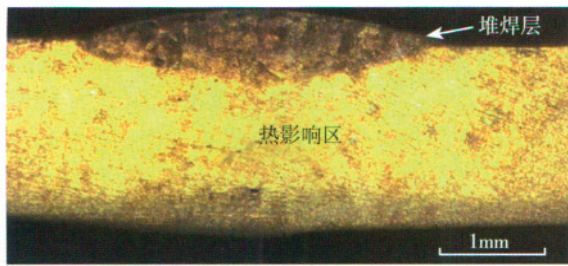


图3 氩弧焊层组织

Fig.3 Metal structure of argon arc welding layer

表1 试样拉伸试验结果

试样状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%
基体	1040.8	1014.4	12.9
模拟凹痕	1076.4	1050.8	10.1
模拟裂纹	1053.7	1029.1	7.6

表2 模拟裂纹氩弧焊修复拉伸试验结果

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%
820	—	—
995	937	2
940	—	—

复过程中过大的热输入对焊缝造成基体吸氢吸氧而变脆,使氩弧堆焊修复后抗拉强度、屈服强度和延伸率均低于激光修复。

### 2.3 疲劳试验

疲劳试验采用 MTS810 电液伺服疲劳试验机进行。试验条件为应力水平 650MPa,  $R=0.1$ ,  $f=25\text{Hz}$ 。试验结果如表 3 所示。

表3 试样疲劳试验

试样种类	疲劳周次平均值	
	激光熔覆修复	氩弧焊修复
模拟凹痕	20176	19701
模拟裂纹	15620	15582

从表 3 可以看出,由于基体组织的改变,材料硬度增加,导致激光修复后的试样疲劳寿命较基体有所降低,而与氩弧焊的疲劳寿命大致相当;模拟凹痕试样的疲劳寿命要高于模拟裂纹激光修复试样,这显然与修复面积的大小有关。

### 2.4 修复层与基体的结合力试验

弯曲试验主要考察涂层与基材的结合强度,观察在不同角度的弯曲条件下激光修复层是否有剥落、断裂

等现象。该弯曲试验采用三点弯曲法。结果表明,在  $0\sim 20^\circ$  范围内,全部试样塑性变形均不明显;从  $30^\circ$  到试样断裂角度范围内,试样都发生了明显的塑性变形,并伴有裂纹的产生和延长。在试样断裂前的任何弯曲角度下,激光修复涂层均未发生涂层翘起、剥落等现象,这表明该涂层与基材结合牢固。分析其原因,是由于涂层与基体之间是冶金结合,要比普通涂、镀层与基体间的物理或化学键结合要强许多。

## 3 结论

(1) 采用激光熔覆修复的钛合金试样,热影响区远小于氩弧焊修复的试样,且不变形。激光修复区无明显冶金缺陷,在修复层与基体有高强度冶金结合,采用弯曲法进行结合力测试,修复层不会剥落。

(2) 采用激光熔覆修复的钛合金试样的抗拉强度、屈服强度和疲劳强度与基体相比有所降低,但是与氩弧焊修复的试样相比抗拉强度、屈服强度有很大优势,且延伸率也远高于氩弧焊修复的试样,疲劳强度与氩弧焊大致相当。凹痕试样的疲劳强度要高于裂纹试样。

## 参考文献

- [1] 曹立英,邓炬,洪权,等. 化铣对 TA2TC4 薄板性能的影响. 中国有色金属学报,1998,8(8):289-291.
- [2] 金蕾,李获. 钛合金化学铣切及电化学加工. 稀有金属材料与工程,1989(2):66-71.
- [3] 郑百战. 大型化铣零件的铣切加工技术. 西飞科技,2002(2):27-28.
- [4] 付明,侯朋. 化学铣切工艺在 15-5PH 精密机械零加工中的研究与应用. 航空兵器,2006(2):56-59.
- [5] 李俊昌. 激光热处理优化控制研究. 北京:冶金工业出版社,2001. 78.

(责编 三丰)

(上接第 115 页)

熔合区内为“网篮状”马氏体组织。

(2) TC4-DT 电子束焊接接头疲劳裂纹扩展研究表明,当疲劳应变幅  $\Delta \epsilon_f/2$  小于 0.6% 时,母材与接头的疲劳寿命  $2N_f$  基本相同;当疲劳应变幅  $\Delta \epsilon_f/2$  大于 0.6% 时,随着塑性变形应变幅的增大,母材与焊接板材上、下层处的  $2N_f$  差异逐渐明显,其中母材处的  $2N_f$  最高,焊接板材上层处的  $2N_f$  最低。

## 参考文献

- [1] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展. 金属学报,2002,38(增刊):4-11.
- [2] Cheng Yali. Titanium application in aircraft. Beijing: Aviation Information Center in China, 1995.
- [3] 袁鸿,余槐,王金雪,等. TC4-DT 钛合金电子束焊接接头的损伤容限性能. 材料工程,2007(8):17-19.

(责编 良辰)