

## TA15 钛合金高压及中压电子束焊接接头组织性能研究

## Investigation on Microstructure and Mechanical Properties of High and Medium-Pressure Electron Beam Welded TA15 Titanium Alloy

中航工业沈阳飞机设计研究所 贺 飞

**[摘要]** 分析了高压及中压两种电子束焊接条件下大厚度 TA15 钛合金焊接接头的显微组织及力学性能。通过光学显微镜及扫描电镜分析了焊接接头不同部位的显微组织形貌,并测试了不同焊后热处理条件下焊接接头的拉伸性能、冲击性能及疲劳性能。研究结果显示,通过焊后 800℃退火处理,两种工艺下焊接接头的韧性获得了明显提高,焊接接头具有优异的强韧性匹配,并且焊接接头力学性能能够满足设计使用需求。

**关键词:** 电子束焊接 TA15 钛合金 显微组织 力学性能

**[ABSTRACT]** The microstructure and mechanical properties of high-thickness TA15 titanium alloy welded joints subjected to high-pressure and medium-pressure electron beam welding are investigated respectively. By the means of optical microscope and scanning electron microscope, the microstructure morphology of different parts of the welded joints is analyzed. Besides, tensile properties, impact properties and fatigue properties of welded joints under different post-weld heat treatment conditions are tested, respectively. It is found that the toughness of welded joints with different welding processes increases obviously after 800℃ post-weld annealing treatment, moreover, the welded joint obtains excellent matching for strength and toughness, and its mechanical properties can meet the design requirements.

**Keywords:** Electron beam welding TA15 titanium alloy Microstructure Mechanical properties

电子束焊接技术是将高能量密度的电子束作为一种热源,通过聚焦系统加速轰击加热金属表面实现零件的焊接加工制造,是一种应用较为广泛的特种加工的技术之一,因其能量密度高、热影响区小、变形小等优点,现在已广泛应用于航空、航天以及核工业等国防科技领域。目前国内已通过多种科研渠道,针对大厚度 TC4 合金、TA15 合金以及 TC4-DT 合金等主要结构钛合金进行了深入的电子束焊接工艺研究<sup>[1-6]</sup>。目前采用大功率

电子束焊接深熔穿透焊接成形技术,并运用扫描搅拌焊接方法进行性能调控,形成了稳定的焊接工艺,积累了丰富的工艺经验及数据,并成功应用于国内先进战机的研制中。

本文分析了加速电压为高压及中压时,TA15 合金电子束焊接接头的显微组织及力学性能。讨论了焊后热处理制度对两种焊接工艺下焊接接头组织及力学性能的影响,提出了优化的焊后热处理工艺。本文还分析了最优焊后热处理工艺下,两种焊接方法得到的 TA15 合金焊接接头的全面性能。本文的研究结果将为 TA15 合金电子束焊接工艺选择及相关构件设计提供重要的试验参考。

## 1 试验过程

将 TA15 棒料经改锻后在 810℃退火处理,而后经机加工序成一定尺寸的试板。通过扫描电镜观察到的 TA15 钛合金试板的显微组织如图 1 所示,可见试板为均匀一致的双态组织。试板的宽度方向与锻造方向一致,焊接方向垂直于锻造方向,确保与锻件焊接时的取向情况一致。焊前采用钢丝刷蘸丙酮打磨试板及垫板各面,再用丝绸布蘸丙酮擦拭干净。试板两端对接接缝用氩弧焊连续定位。试板与垫板之间进行 3 处 30mm

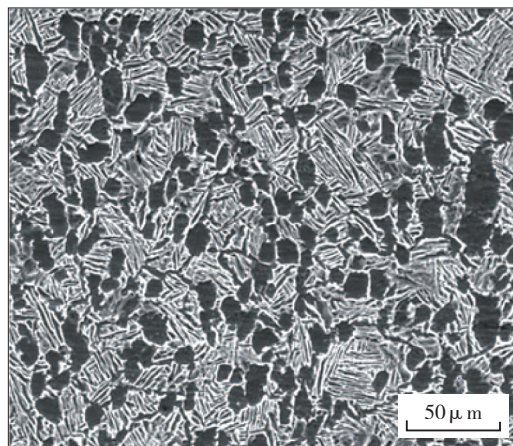


图1 试验采用的TA15合金SEM下的显微组织形貌  
Fig.1 SEM morphology of TA15 test panel

长焊缝定位。本试验采用了高压及中压两种加速电压对 TA15 试板进行电子束焊接,采取的焊接工艺参数及试板厚度如表 1 所示。

表1 试验采用的两种电子束焊接工艺参数

加速电压 / kV	试板厚度 / mm	聚焦电流 / A	焊接电流 / mA	焊速 / (mm·s <sup>-1</sup> )
150	70	2.15	195	8
55	62	2.01	350	5

在获得了焊后的接头最优退火热处理制度后,对退火后的焊接接头进行了全面力学性能研究分析。所测试的项目包括拉伸性能、冲击性能、断裂性能和高周疲劳性能。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 焊缝高低倍组织分析

采用高压及中压两种焊接工艺获得的 TA15 试板电子束焊缝低倍照片如图 2 所示,从图中可以看出,两种焊接工艺下电子束扫描搅拌焊接后形成的焊缝形状趋于平行,焊缝内柱状晶组织细小均匀。对图 2 (a) 焊接接头不同位置处的显微组织进行了观察,如图 3 所示。可以看出,母材 (BM) 为均匀的双态组织,初生  $\alpha$  相含量大于 10%,条状  $\alpha$  相长度未超过 0.25mm。焊缝熔合区 (FZ) 处为具有原始  $\beta$  柱状晶的针状马氏体组织,且沿熔深方向马氏体  $\alpha'$  组织变化不大。焊接接头在热影响区 (HAZ) 为针状马氏体  $\alpha'$  和等轴 ( $\alpha+\beta$ ) 的混合组织。

### 2.2 焊后热处理对焊缝显微组织及性能的影响

试验还考察了 3 种不同焊后热处理工艺对电子束焊接接头显微组织及力学性能的影响,3 种焊后热处理工艺分别为: 640℃ /1.5h A.C. (空气冷却), 750℃ /2.5h A.C., 800℃ /2.5h A.C.。对不同焊后热处理工艺下焊缝显微组织形貌分别在光学显微镜及扫描电镜下进行了观察,结果分别如图 4 及图 5 所示。

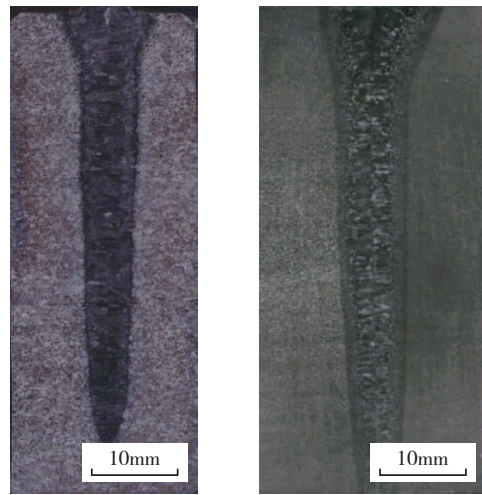
由图 4 及图 5 可以看出,与无焊后热处理相比,焊后 640℃ 去应力退火对焊缝的过饱和状态影响较小,焊缝中  $\alpha$  片状析出不明显。提高焊后热处理温度至 750℃ 时,  $\alpha$  片状析出增加,晶粒边界更加清晰。焊后采用 800℃ 空气炉退火,焊接造成的过饱和状态基本消除,焊缝片状  $\alpha$

充分析出,且其长径比减小。

### 2.3 两种焊接工艺焊缝全面性能分析

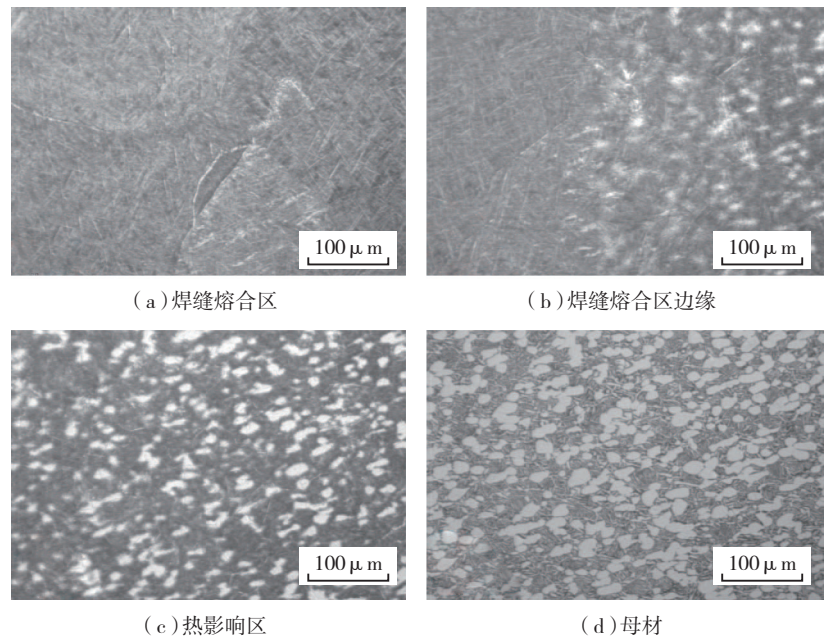
焊后采用 800℃ /2h A.C. 能够保证焊接接头具有良好的强韧性匹配,本试验测试分析了在该焊后退火制度下,高压及中压电子束焊接接头的拉伸性能、室温冲击性能、断裂韧性和疲劳性能。

表 2 为两种焊接工艺 TA15 合金电子束焊接试板的室温及 200℃ 高温拉伸性能,可以看出两种焊接工艺下



(a) 高压电子束焊接, 70mm 厚试板 (b) 中压电子束焊接, 62mm 厚试板

图2 TA15合金两种焊接工艺下焊缝低倍形貌  
Fig.2 Macroscopic morphology of TA15 welding joint with different welding processes



(a) 焊缝熔合区 (b) 焊缝熔合区边缘

(c) 热影响区 (d) 母材

图3 焊缝高倍金相组织形貌

Fig.3 Optical morphology of welding joint

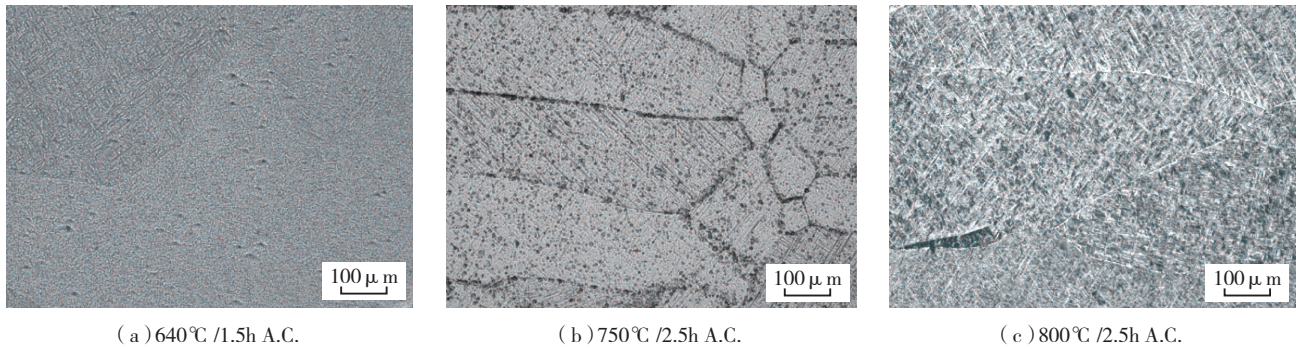


图4 TA15合金电子束焊接接头熔合区经不同焊后热处理后光学显微组织形貌  
Fig.4 Optical morphology of FZ of electron beam welded TA15 joint with different post-weld heat treatments

焊接接头的抗拉强度  $R_m$  均达到设计使用要求(室温下  $R_m$  930~1130MPa)。

测试了两种焊接工艺下 TA15 合金电子束焊接接头的冲击韧性及断裂韧性,其中断裂韧性测试采用紧凑拉伸试样,沿焊缝方向开槽,试验结果如表 3 所示。结果表明 TA15 合金经电子束焊接后,其接头冲击韧性均低于母材,但均达到了设计使用要求( $a_{KV} \geq 35J/cm^2$ )。

测试分析了两种焊接工艺下 TA15 合金电子束焊接接头的高周疲劳性能,其中应力集中系数  $K_t=1.3$ ,应力比  $R=0.06$ 。疲劳试验在

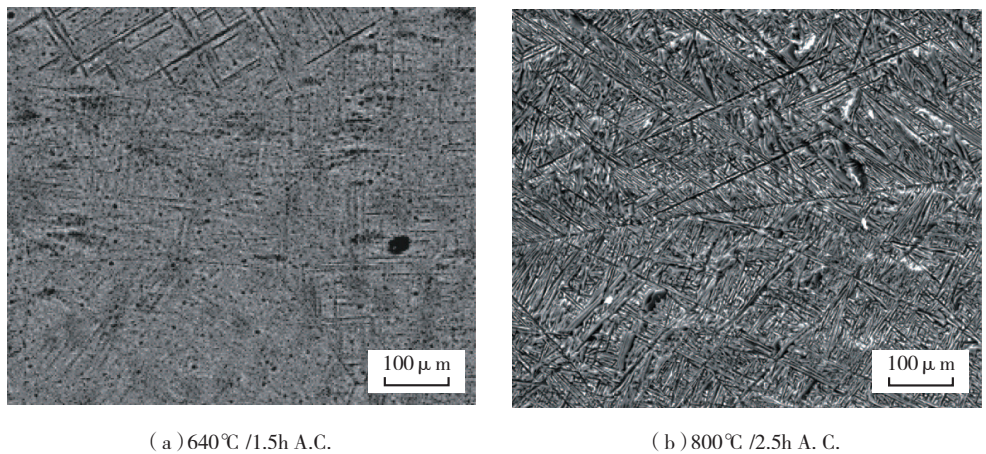


图5 TA15合金电子束焊接接头熔合区经不同焊后热处理后SEM显微形貌  
Fig.5 SEM morphology of FZ of electron beam welded TA15 joint with different post-weld heat treatments

表2 TA15合金电子束焊接接头室温、高温(200°C)拉伸性能

状态	焊接方式	$R_m/MPa$	$R_{p0.2}/MPa$	$Z/\%$
室温	高压接头	957	901	45.1
	低压接头	976	901	44.8
200°C	高压接头	761	657	52.6
	低压接头	771	650	55.6

表3 TA15合金电子束焊接接头室温冲击韧性和断裂韧性

取样位置及测试项目	冲击吸收功 $KU_2/J$	冲击韧性 $a_{KV} / (J \cdot cm^{-2})$	断裂韧性 $K_{IC} / (MPa \cdot m^{1/2})$
高压焊接接头	36.3	45.3	65.9
低压焊接接头	/	39.2	81
母材区	46.68	58.35	/

表4 TA15合金电子束焊接主导工艺接头高周疲劳性能

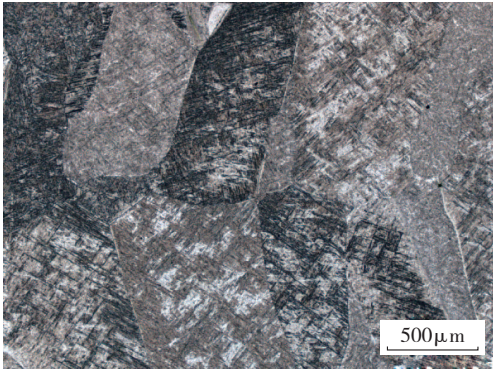
试验条件	$K_t$	$f/Hz$	$N/周$	$\sigma_b/MPa$
高压	1	130	107	500
	3	125	107	230
中压	1	130	107	512
	3	125	107	372

室温大气环境中进行,加载波形为正弦波,试验结果如表 4 所示。

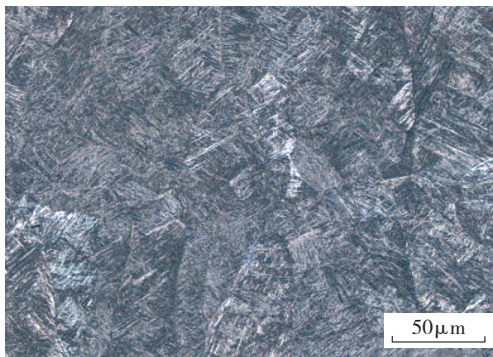
### 3 结论

本文研究分析了高压及中压两种工艺下 TA15 合金电子束焊接接头的显微组织及力学性能。通过 800°C / 2h A.C. 焊后热处理,能够明显提高焊接接头的韧性,使两种电子束焊接工艺下焊接接头具有最优的强韧性匹配。通过该焊后热处理,高压及中压两种电子束焊接接头的拉伸性能、冲击韧性等均能够满足设计使用需求。

(下转第 96 页)



(a) 一次退火状态下接头熔合区组织



(b) 双重退火状态下接头熔合区组织

图5 两种状态下接头熔合区组织

Fig.5 Microstructure of weld zone in EBW joint at 2 states

断裂都发生在基体上。经过双重退火后,焊接接头在相变点以上发生了组织转变,熔合区内  $\alpha'$  相全部分解,变成交错排列的、长宽比较大的  $\alpha$  相和相间其中的  $\beta$  相,这种组织状态基本接近母材基体,因此,双重退火后的焊接接头的冲击强度基本上与母材相当(降幅在 10% 以内)。而经过一次退火后的焊接接头组织不发生改变,焊接接头熔合区组织仍为马氏体组织。因此,可以解释一次退火后焊接接头的强度高于双重退火后的焊接接头,而塑性强度低于双重退火后焊接接头。

### 3 结论

(1) 70mm 厚 TC4-DT 钛合金电子束焊接接头沿焊缝从上至下,焊缝组织具有良好的一致性,同时,焊缝上、中、下 3 层的抗拉强度、屈服强度以及冲击强度基本相当。

(2) 经过 700~750℃ /2~4h, FC 热处理制度退火的焊接接头组织状态未发生转变,熔合区组织仍由针状马氏体相构成;而经过 980℃ /10min, AC +720℃ /2h, AC 热处理制度双重退火的焊接接头在相变点以上发生了组织转变,熔合区内  $\alpha'$  相全部分解,变成交错排列的、长宽比较大的  $\alpha$  相和相间其中的  $\beta$  相,这种组织状态基本接近母材基体,双重退火后的焊接接头的冲击强度

基本上与母材相当(降幅在 10% 以内)。

(3) TC4-DT 钛合金为一种损伤容限钛合金,在工程应用中,为了尽量维持 TC4-DT 钛合金电子束焊接构件具有较高的损伤容限性能,建议在实际应用中优先选用 980℃ /10min, AC +720℃ /2h, AC 的双重退火制度对 TC4-DT 钛合金焊接件进行退火。

### 参考文献

- [1] 王金友. 航空用钛合金. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [2] 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(Z): 4-6.
- [3] 李成功. 航空材料概论. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [4] 张晓峰. 钛合金的设计方法及其研究进展. 材料导报, 2005, 19(3): 1-3.

(责编 亦非)

(上接第 89 页)

### 参考文献

- [1] 李行志, 胡树兵, 肖建中, 等. TA15 钛合金电子束焊接接头不同区域的疲劳裂纹扩展行为研究. 航空材料学报, 2010, 30(1): 52-56.
- [2] 许鸿吉, 尹丽香, 李晋炜, 等. TC4 钛合金电子束焊接接头组织和性能. 焊接学报, 2006, 26(11): 43-46.
- [3] 李清华, 胡树兵, 李行志, 等. TC4 钛合金焊接接头组织不均匀性与疲劳性能. 材料工程, 2010, (1): 62-68.
- [4] 吴会强, 冯吉才, 何景山, 等. 电子束焊接 Ti-6Al-4V 接头断裂行为机制. 焊接学报, 2004, 25(4): 59-62.
- [5] 刘鹏涛, 赵秀娟, 刘昕, 等. 氢对 TC4 钛合金电子束焊接接头疲劳裂纹扩展速率的影响. 航空材料学报, 2011, 31(3): 52-55.
- [6] 吴会强, 冯吉才, 何景山, 等. Ti-6Al-4V 电子束焊接焊缝区域精细组织特征. 航空材料学报, 2005, 25(3): 21-24.

(责编 亿霖)

(上接第 92 页)

- [3] 左铁钊, 肖荣诗, 陈铠, 等. 高强铝合金的激光加工. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [4] 崔丽, 李晓延, 贺定勇, 等. 光纤激光-MIG 复合焊参数对钛合金焊缝成形的影响. 航空制造技术, 2009(9): 120-125.
- [5] 陈俐. 航空钛合金激光全熔透稳定性及焊接物理冶金研究. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [6] Wang S H, Wei M D, Tsay L W. Tensile properties of LBW welds in Ti-6Al-4V alloy at evaluated temperatures below 450 °C. Materials Letters, 2003, 57: 1815-1823.
- [7] Li Z, Gobbi S L, Norris I, et al. Laser welding techniques for titanium alloy sheet. Journal of materials processing technology, 1997, 65: 203-208.
- [8] 陈新松, 姚伟, 巩水利. 钛合金激光填丝焊接. 中国激光, 2007, 34(Z): 235-238.
- [9] 许飞, 杨璟, 巩水利, 等. 铝合金激光修饰焊缝成形特征. 应用激光, 2010, 30(5): 374-377.

(责编 亦非)