

# TA15 钛合金电子束焊接接头组织分析

姚 罡 , 李晋炜 , 陆业航 , 李众城

(北京航空制造工程研究所 , 北京 100024)

**摘要 :** 对 20 mm 厚 TA15 钛合金板在不同工艺条件下的电子束焊接接头组织进行研究。比较分析了钉形、钟罩形、楔形和漏斗形焊缝不同区域的组织特点。结果表明 : TA15 薄板电子束焊接的接头形貌和组织主要由焊接速度和束流强度决定 , 当两个工艺参数配合得当 , 接头可以获得较好的组织。

**关键词 :** 电子束焊 ; 钛合金 ; 接头组织

中图分类号 : TG335.5; TG146.23 文献标志码 : A

## Analysis of microstructures of electron beam welding joints for TA15 titanium alloy

YAO Gang, LI Jin-wei, LU Ye-hang, LI Zhong-cheng

(Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**Abstract:** The electron beam welding (EBW) joints microstructures obtain by different technologies of TA15Ti alloy with thickness of 20 mm were investigated. Microstructures of different areas such kinds of welds as nail, hood, cuniform and infundibular were compared. The results show that sheet welding joints appearances are determined by the parameters of welding rate and current intensity. When the both parameters are satisfactory, the good properties can be get.

**Key words:** electron beam welding; titanium alloy; welding joints structure

钛合金由于具有优异的物理力学性能 , 如密度小、强度高、抗腐蚀性能好和超塑性突出等 , 在航空航天领域得到了广泛的应用。其中 TA15 钛合金属于近  $\alpha$ 型钛合金 , 具有中等的室温和高温强度、良好的热稳定性和焊接性能 , 工艺塑性稍低于 TC4。TA15 长时间(3 000 h)工作温度可达 500 , 瞬时(不超过 5 min) 可达到 800 , 450 以下时的工作寿命可达 6 000 h<sup>[1]</sup>。TA15 的诸多优点使其在航空技术中的应用前景非常广阔 , 未来 TA15 钛合金必将成为减轻飞机的质量 , 制造超音速飞机及发动机零件的重要结构材料<sup>[2]</sup>。

TA15 钛合金的名义成分为 Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V , 其主要的强化机制是通过  $\alpha$  稳定元素 Al 的固溶强化 , 加入中性元素 Zr 和  $\beta$  稳定元素 Mo 和 V , 可以改善其工艺性 , 所以 TA15 钛合金具有  $\alpha$ 型钛合金良好的热强性和可焊性。但由于钛的化学性质非常活泼 , 在

400 以上就开始和空气中的氧、氮、氢、碳发生化学反应 , 高于 600 时 , 进行剧烈反应 , 所以 , TA15 钛合金非常适合于采用真空电子束焊接技术进行连接加工<sup>[3]</sup>。

## 1 试验条件和方法

试验采用板厚为 20 mm 的 TA15 钛合金 (Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V) , 供货状态为轧制、退火态 , 其化学成分如表 1 所列。焊接用电子束设备为 ZD150-15A 高压电子束焊机 , 该焊机最大加速电压 150 kV , 最大焊接电流 200 mA , 钛合金单道焊缝最大熔深 100 mm。对钛合金试板进行板面堆焊 , 堆焊前去除表面污物 , 焊后截取横截面进行磨、抛、腐蚀观察焊缝截面的形貌变化。

表 1 TA15 钛合金化学成分

Table 1 Chemical composition of TA15 titanium alloy (mass fraction, %)

Al	V	Mo	Zr	C	Fe	Si	Ti
6.72	2.32	1.77	2.19	0.0053	0.08	0.14	Bal.

试验中，工作距离及加速电压固定不变，电子束聚焦点为工件表面略偏下。焊接过程中调节焊接速度和电子束流，可在同一条焊缝上获得不同焊缝截面形貌。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 焊缝界面形貌特征

在电子束焊接中，通过调整焊接参数可以获得不同的焊缝形貌，根据形貌特征将其命名为钉形、钟罩形、楔形和漏斗形，其典型形貌如图 1 所示。

TA15 电子束焊接工艺参数如表 2 所列。

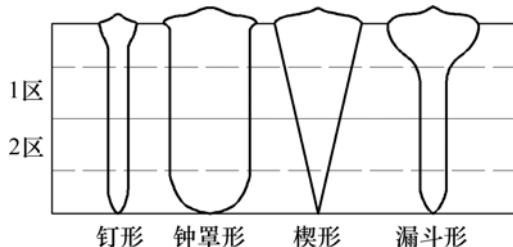


图 1 电子束焊接接头组织典型形貌

Fig.1 Typical joint form of EBW

表 2 TA15 电子束焊接工艺参数

Table 2 Parameters of EBW for TA15

焊缝形貌	焊接速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	电子束流/mA
钉形	600	53
钟罩形	600	62
楔形	400	39
漏斗形	400	42

根据电子束焊接“小孔效应”作用机理和大量实验，可以分析得出：在聚焦电流确定的情况下，通过改变焊接速度和束流强度，可以形成不同形貌的焊缝。当焊接速度较快，电子束流较大时可以获得融合线接近平行的焊缝。

分析焊缝形貌可以看出，钉形焊缝和钟罩形焊缝的一部分融合线接近平行，可以认为这两种形貌的焊缝纵向组织分布均匀有利于提高焊接接头的力学性能。当适当降低焊接速度或提高电子束束流强度，那么钉

形焊缝可以变宽，向钟罩形焊缝转变。

### 2.2 焊接接头组织比较

为比较钉形、钟罩形及其他形貌焊缝的微观组织，现将接头焊缝划分为 1、2 两个区域。区域 1 位于焊缝中线上部，水平生长的晶粒区域；区域 2 位于中线下部，根部钉尖处以上，如图 2 所示。4 种形貌的焊缝组织均为铸态组织，焊缝中心部位均是等轴  $\alpha$  和水平生长的枝晶。比较焊缝不同部位组织可以得出：

钉形 1、2 区域的微观组织相近，从焊缝中心到融合线依次为粗大的柱状晶、细晶区、再结晶区，如图 3 所示。钉形 1、2 组织基本不存在粗晶区，细晶和再

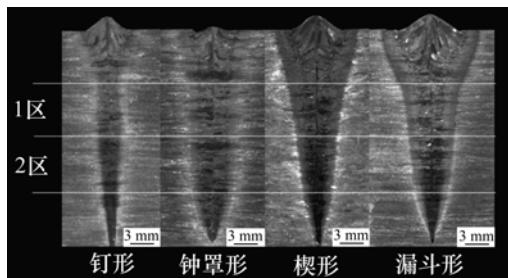


图 2 区域划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of joint partition

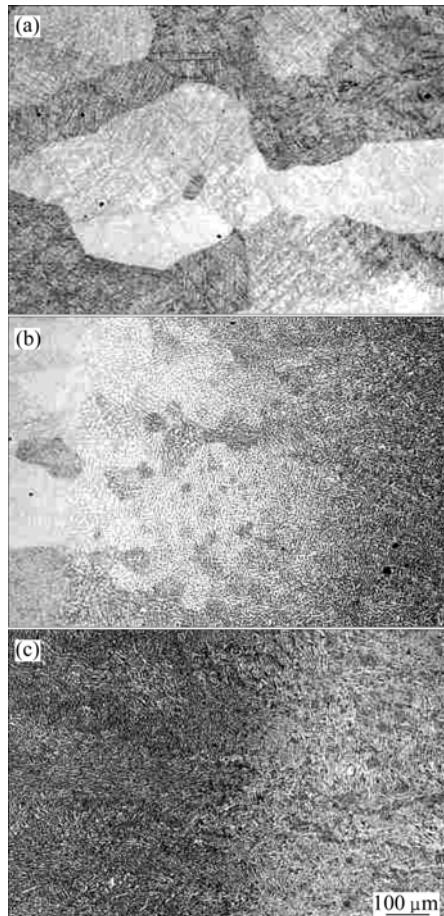


图 3 钉形焊缝 1、2 区域微观组织

Fig.3 Microstructures of areas 1 and 2 of nail joint: (a) Grain

coarsening zone; (b) Grain refining zone; (c) Grain refining, recrystallization zone

结晶区非常窄。

钟罩形1、2区域的微观组织非常相近,从焊缝中心到融合线依次为粗大枝晶、等轴的粗晶区、细晶区和再结晶区,如图4所示。钟罩形熔宽较宽,1、2区组织过渡明显。

楔形的1区与钟罩形1、2区相似,2区的粗晶区逐渐变窄末端与钉形1、2区组织相似。

漏斗形1区上半部与钟罩相似,由上到下粗晶区和细晶区逐渐变窄;2区下部与钉形组织相似。

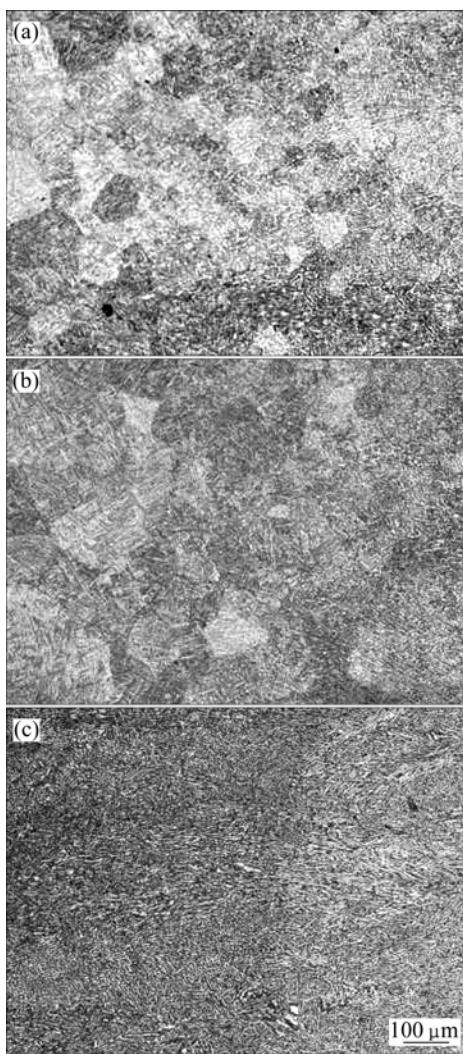


图4 钟罩形焊缝1、2区域微观组织

**Fig.4** Microstructures of areas 1 and 2 of phosphorizer joint:  
(a) Grain coarsening zone; (b) Grain refining zone; (c) Grain refining, recrystallization zone

漏斗形和楔形焊缝上宽下细,1区域比2区域的

熔宽要大。比较4种形貌焊缝可以看到熔宽相同的地方各形貌焊缝组织基本相同;熔宽较窄的区域粗晶、细晶区压缩在一起,组织过渡变化大。造成这种现象的原因是由于TA15合金热导性差,焊缝熔池热量向母材传导慢,过渡区存在很大的温度梯度。

由于电子束焊接的能量传递不是通过热传导,而是将加速电子的动能先转移到晶格电子上去,然后晶格电子再传送振动能量到全部晶格,晶格振荡的振幅增加,使得材料达到非常高的温度;再者,钛合金的热导性很差。所以通过分析可以得出:楔形和漏斗形的焊接速度较慢,1区金属单位时间内接受的能量多,向母材传导的热量也要多,温度梯度要小一点。但是因为电子束流强度的减小,电子束的穿透能力下降,使得2区单位时间内获得电子束能量相对减少,因此这两种形貌焊缝的微观组织1和2区域差别较大。所以可以判断四种形貌的组织与电子束焊接时的束流强度和焊接速度有关。

### 3 结论

- 1) 电子束焊接接头微观组织与焊缝的熔宽,即与温度梯度有关。
- 2) 电子束焊接接头过渡区的温度梯度主要由焊接速度和束流强度控制。
- 3) 同时增大焊接速度和焊接束流可以获得融合线近似平行、组织过渡较均匀的钟罩形焊缝组织。

### REFERENCES

- [1] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册(第4卷)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 74-83  
China Aeronautical Materials Handbook Editorial Committee. China aeronautical materials handbook (Vol 4)[M]. Beijing: China Standards Press, 2002: 74-83.
- [2] 美国金属协会. 金属手册(第2卷)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 141-145.  
American Society of Metals. Metals handbook (Vol 2)[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 141-145.
- [3] 李兴无, 沙爱学, 张旺峰. TA15合金及其在飞机结构中的应用前景[J]. 钛工业进展, 2003, 20: 4-5.  
LI Xing-wu, SHA Ai-xue, ZHANG Wang-feng. TA15 titanium alloy and its applying prospects on airframe[J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20: 4-5.

(编辑 杨幼平)