

# 热处理对 Ti650 钛合金电子束焊接组织和力学性能的影响

张菁丽, 辛社伟, 周伟, 张永强, 郭荻子, 李倩, 毛小南

(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 对 Ti650 合金电子束焊接样品进行了不同制度的热处理, 研究了焊后热处理工艺对合金焊接样品的组织和力学性能影响。结果表明, Ti650 合金真空电子束焊缝焊后主要以亚稳马氏体  $\alpha'$  相为主。经 700 °C/2 h AC 退火后, 焊缝中马氏体  $\alpha'$  相发生近平衡相变  $\alpha' \rightarrow \alpha$ , 同时焊缝中析出大量次生短针状  $\alpha$  相。经 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC 处理后,  $\alpha$  相发生了明显粗化和等轴化。次生析出的短针状  $\alpha$  与原始粗化的  $\alpha$  片层相结合有效地提高焊缝强度, 阻碍了裂纹的扩展, 使焊接接头在该条件下具有较好的强度和塑性。经固溶时效后再经 700 °C/2 h AC 处理, 晶界处逐渐析出等轴  $\alpha$ , 弱化了晶界强度, 引起其塑性的降低。综合分析焊缝区的组织和性能, Ti650 合金焊接样品采用 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC 进行焊后热处理, 焊缝和基体的性能能够获得较好匹配。

**关键词:** Ti650 合金; 电子束焊接; 热处理; 力学性能

**中图分类号:** TG146.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2021)01-0299-05

Ti650 合金是西北有色金属研究院自主研制的 650 °C 近  $\alpha$  高温钛合金<sup>[1]</sup>。该合金是 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-Si-Nb-Ta-C 系合金, 采用多元固溶强化手段, 具有良好的热强性和室温塑性, 可长时间在 650 °C 工作环境下使用, 是一种理想的航空发动机用轻质高温材料<sup>[2]</sup>。

真空电子束焊接是制造发动机整体化构件的一种常用方法, 该方法具有焊接冶金质量高、焊缝及热影响区狭窄、焊缝深宽比大、焊接变形小、焊缝及热影响区不被空气污染等优点, 被广泛应用于钛合金的焊接中<sup>[3-6]</sup>。作为西北有色金属研究院自主研制的新型高温钛合金, 课题组前期重点研究了 Ti650 合金的变形行为及力学性能。雷永平等<sup>[7]</sup>人曾采用 1000 °C/1 h AC+700 °C/4 h AC 对 Ti650 合金电子束焊接接头进行焊后热处理, 研究了接头的组织、硬度分布, 及母材和接头的拉伸性能和持久性能。但目前对于 Ti650 合金焊接及热处理的相关研究仍十分有限。

针对 Ti650 合金的应用特点, 进行了 Ti650 合金的电子束焊接, 并采用多种热处理制度对焊接微观组织和力学性能进行改善, 研究 Ti650 的组织演变规律, 揭示力学性能变化规律。该研究结果将为 Ti650 合金的焊后焊缝区和基体材料的热处理工艺选择和优化提供重要的参考, 并为近  $\alpha$  高温钛合金焊接及焊后热处理进行经验和数据的积累。

## 1 实验

实验材料为西北有色金属研究院生产的 18 mm 厚固溶时效态 Ti650 轧制板材, 其微观组织为  $\alpha$  集束及少量细小  $\alpha$  等轴相构成(图 1)。焊接前将焊接试板的焊接面磨平, 并用丙酮溶液整体清洗, 以清除试样表面的油污、水分、氧化物。采用优化的焊接工艺(见表 1)对试板进行焊接, 焊接完成后试样在真空室内缓冷 10 min 取出, 防止表面氧化。之后对焊缝进行 X 光无损探伤, 保证用于后续性能检测和组织观察的焊接样品无可见的焊接缺陷。

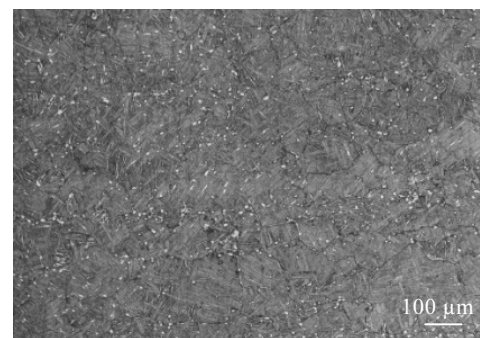


图 1 焊接样品原始组织

Fig.1 Original microstructure of welding sample

收稿日期: 2020-03-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51805442)

作者简介: 张菁丽, 女, 1987 年生, 博士, 西北有色金属研究院钛合金研究所, 陕西 西安 710016, E-mail: zhangjingli2018@163.com

表 1 Ti650 试板真空电子束焊接参数

Table 1 Electron beam welding parameters of Ti650 specimens

Electron beam welding parameter	Value
Accelerate voltage/kV	85
Focusing current/mA	375
Welding current/mA	50
Welding speed/mm·min <sup>-1</sup>	1200
Vacuum degree/×10 <sup>-3</sup> MPa	3.2

为了研究焊后热处理对焊缝及母材微观组织及力学性能的改善作用,采取了多种不同焊后热处理工艺,拟在消除焊接过程中产生的焊接残余应力的同时,优化焊缝组织和性能,具体工艺如表 2 所示。其中工艺 1 为焊后未经热处理的对比实验,之后又尝试了不同类型的热处理制度。工艺 2 是最常见的钛合金去应力退火工艺,采用 700 °C/2 h AC 退火处理。工艺 3 是对焊接件进行了固溶时效处理,尝试采用 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC 的热处理工艺使焊缝及母材发生强化。工艺 4 是在固溶时效的基础上,进行了退火处理。目的是通过时效析出强化相,通过后续退火使强化相长大,以改善其塑性。

这些工艺设计的目的是保障基体材料处于一种优化性能的前提条件下,让焊缝经历多种复杂退火工艺,对焊缝组织和性能进行多样化的调整<sup>[8]</sup>,深入研究不同类型热处理对近  $\alpha$  高温钛合金焊缝组织和性能的影响。

试验中所有室温拉伸均垂直于焊缝方向取样,并保证焊缝位于试样标距的中间。组织及物相观察分别在 OLMPUS PMG 光学显微镜、D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪、JSM-6460F 型扫描电镜和 JEM-200CX 型透射电镜上进行的。

## 2 结果及分析

### 2.1 力学性能

对 Ti650 焊接样品进行室温拉伸测试后发现,焊态 Ti650 表现出较好的强度和塑性,试样拉断在母材部位。但由于焊态试样焊缝及热影响区会存在较大焊接残余应力,在后续使用过程中,焊接接头更易出现

表 2 Ti650 焊板焊后热处理工艺

Table 2 Heat treatments of samples

Sample	Post-weld heat treatment
1	No treatment
2	700 °C/2 h AC
3	1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC
4	1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC+700 °C/2 h AC

裂纹,因此仍需对其进行热处理,去除残余应力对其影响<sup>[9-12]</sup>。表 3 列出了不同热处理试样的力学性能。经过 700 °C/2 h AC 退火后,试样塑性略有降低,强度基本未变。经 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC 处理后,试样在不降低塑性的情况下,强度得到了显著提升。与试样 1 和 2 相比,试样 3 的断裂强度提高了近 200 MPa。试样经 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC+700 °C/2 h AC 处理后,强度有所提高,但塑性显著降低,试样断裂在焊缝处。该条件下试样延伸率仅有 2.8%,为脆性断裂。

图 2 为不同热处理 Ti650 焊接接头试样的硬度分布曲线。4 个试样的焊缝区表现出相近的硬度 HV 值,均在 4000~4400 MPa。试样 1 和试样 2 的硬度曲线表现出相似的变化趋势,硬度值在焊缝区达到最高值,热影响区和母材区均明显低于焊缝区。试样 3 和试样 4 的硬度曲线均较平稳,焊缝区、热影响区和母材区硬度值差别较小。

### 2.2 显微组织

图 3 为试样 1~4 焊缝区的 XRD 图谱。从图中可以看到试样 1 和试样 2 的 XRD 谱较相似,主要为  $\alpha$  相。此时试样 1 中  $\alpha$  相应为马氏体  $\alpha'$  相。同时  $\beta$  衍射峰基本无法观察到,证明焊态焊缝中主要以亚稳马氏体  $\alpha'$  相为主, $\beta$  相在焊后快冷的状态下较难保留到室温。由试样 3 和试样 4 均可观察  $\beta$  相 (110) 的标准衍射谱,说明在 1010 °C 的固溶过程中发生了部分  $\alpha$  转变为  $\beta$  相,另外可发现强峰  $\alpha(101)$  峰值显著增强。

热处理前的 Ti650 试样显微组织如图 4 所示。由图可看出,Ti650 合金母材由  $\alpha$  片层及少量细小等轴  $\alpha$  相构成。经真空电子束焊接后,焊缝在较快的冷却过程中,亚稳马氏体  $\alpha'$  相晶内弥散形核,并通过切变方

表 3 不同热处理状态下合金的典型力学性能

Table 3 Mechanical properties for the alloy after different heat treatments

Sample	State after welding treatment	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	Failure
1	No heat treatment (NHT)	1065	947	8.5	At matrix
2	700 °C/2 h AC	1049	958	6.5	At matrix
3	1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC	1238	1093	8.8	At matrix
4	1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC+700 °C/2 h AC	1163	1060	2.8	At welded joint

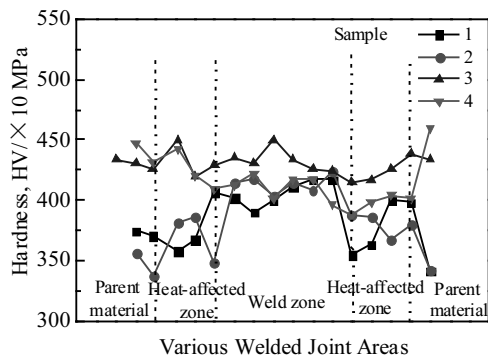


图 2 不同热处理状态下 Ti650 焊接接头硬度分布曲线

Fig.2 Hardness distribution curves for welded joint of Ti650 alloys after different heat treatments

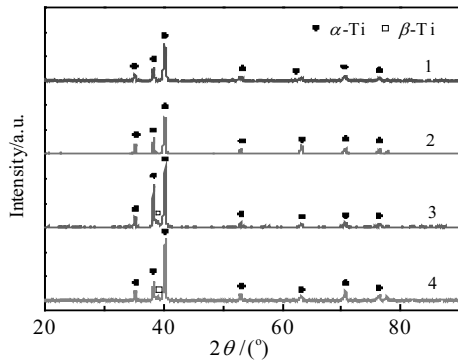


图 3 Ti650 合金焊缝在不同热处理后的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of fusion zone of Ti650 alloys after different heat treatments

式转变形成<sup>[7]</sup>。该相呈针状交错分布于  $\beta$  基体上，且具有较大的长宽比。试样 1 的室温拉伸断裂于母材处，

说明针状交错分布的马氏体  $\alpha'$ 相使焊缝强度显著提高，焊缝强度高于母材强度。焊态试样热影响区微观组织由交错的  $\alpha$  片层构成，有少量等轴  $\alpha$  分布。经 700 °C/2 h AC 退火后，Ti650 合金焊缝中马氏体  $\alpha'$ 相发生近平衡相变  $\alpha' \rightarrow \alpha$ ， $\alpha'$ 相全部转变为  $\alpha$  相。相形态也发生较明显的改变，由焊态长度 10~37  $\mu\text{m}$  的细长针状相变为 3~16  $\mu\text{m}$  短针状相（图 5）。

经 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC 处理后， $\alpha$  相发生了明显粗化，呈片层状分布在基体上。热影响区及母材原有的片层  $\alpha$  相也发生了显著粗化，部分粗化  $\alpha$  片层发生了球化现象，形成了部分短棒  $\alpha$  相（图 6）。在固溶时效处理后再经 700 °C/2 h AC 退火，试样热影响区短棒  $\alpha$  增多，母材区域  $\alpha$  片层的球化现象更加明显（图 7）。

通过 Ti650 合金焊缝高倍 TEM 照片（图 8），可以更清晰地观察到焊后与热处理后焊缝的相转变过程。图 8a 中微观组织仅存在马氏体  $\alpha'$ 相。观察 8b 图可发现，经 700 °C/2 h AC 处理后，焊缝中析出大量短针状  $\alpha$  相，同时转变后的片层  $\alpha$  相出现颈缩现象，大量  $\alpha$  相从中间断开，尺寸变短，这与 SEM 观察结果一致。经 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC 处理后，且互相交错片层  $\alpha$  相发生长大与粗化，这导致部分片层  $\alpha$  相被垂直方向生长的  $\alpha$  相截断，使原始片层  $\alpha$  相变为短棒状。同时片层  $\alpha$  相内部也会形成亚晶界，发生等轴化。在原始粗化片层夹缝处可观察到大量短针状  $\alpha$  相。试样 2 和试样 3 中的片层/棒状  $\alpha$  相与次生短针状  $\alpha$  相交错分布的结构显著提高了焊缝的强度，使其室拉样品均断于母材处。同时试样 3 的母材为粗化片层  $\alpha$  及等轴  $\alpha$  表现出更好的塑性，使试样具有更高的延伸率。经固溶时效后再经 700 °C/2 h AC 处理后，晶界明显可见有  $\alpha$  相析出。晶界  $\alpha$  相的析出造成了晶界强度的弱化，这使焊缝强度低于母材强度。因此试样 4 在室温拉伸过程中断裂于焊缝处。

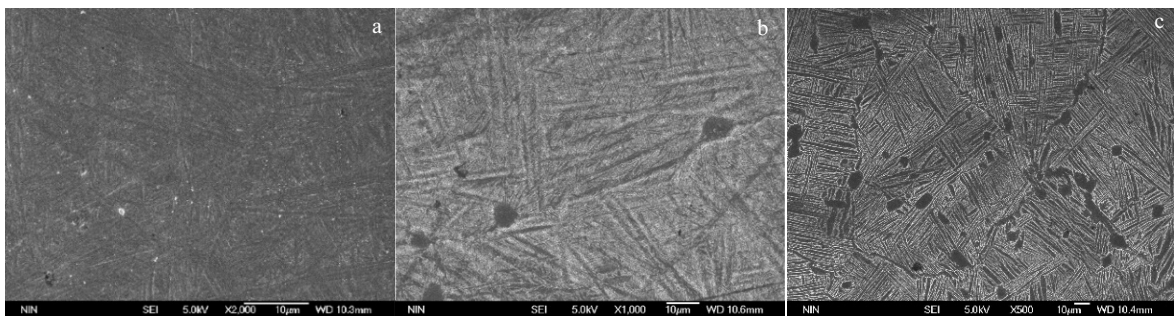


图 4 未热处理 Ti650 合金焊态焊缝、热影响区、母材 SEM 照片

Fig.4 SEM microstructures of fusion zone (a), heat affected zone (b) and base material (c) of Ti650 without heat treatment

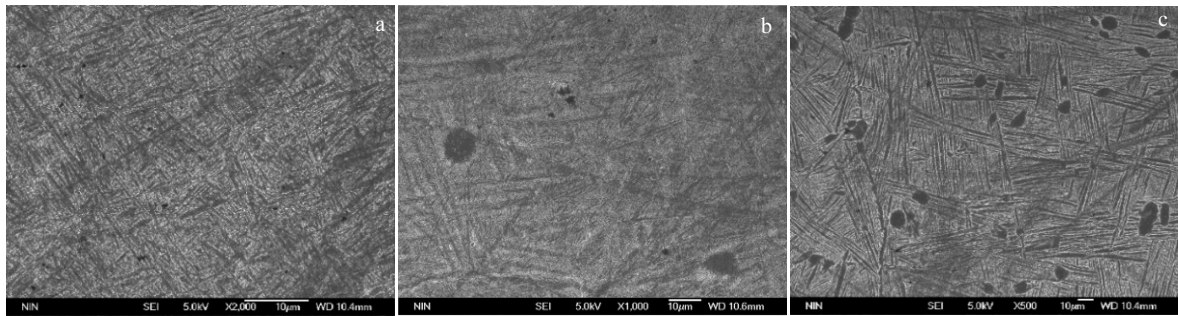


图 5 Ti650 合金 700 °C/2 h AC 热处理后焊缝、热影响区、母材 SEM 照片

Fig.5 SEM microstructures of fusion zone (a), heat affected zone (b) and base material (c) of Ti650 after 700 °C/2 h AC heat treatment

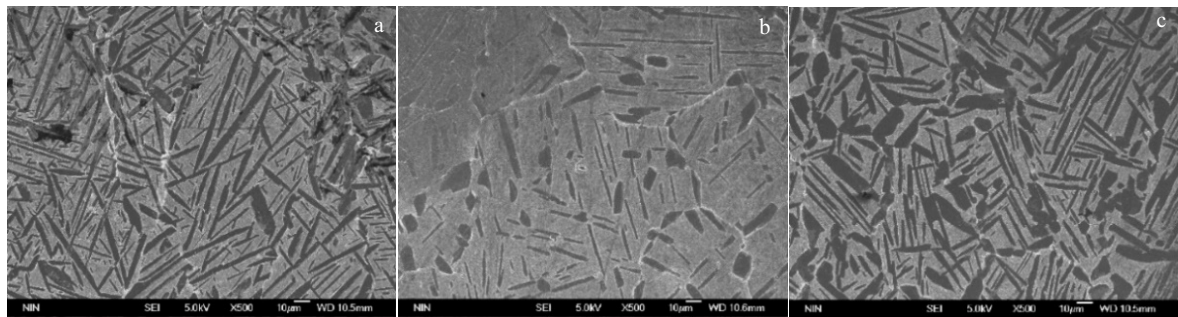


图 6 Ti650 合金 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC 热处理后焊缝、热影响区、母材 SEM 照片

Fig.6 SEM microstructures of fusion zone (a), heat affected zone (b) and base material (c) of Ti650 after 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC heat treatment

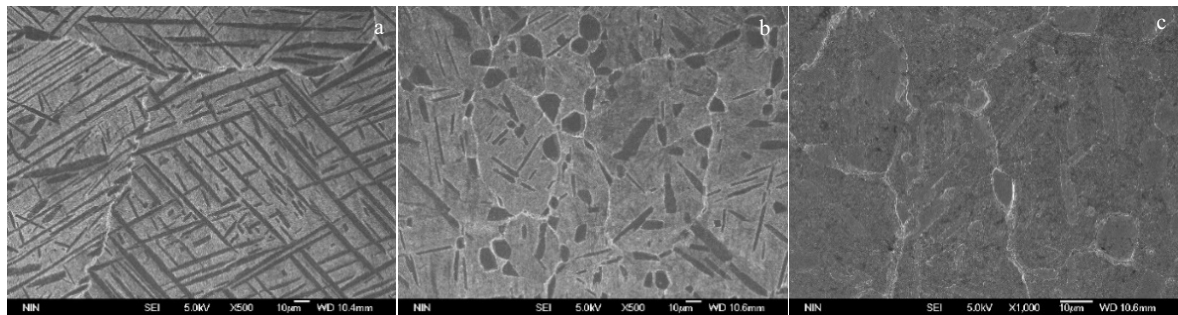


图 7 Ti650 合金 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC+700 °C/2 h AC 热处理后焊缝、热影响区、母材 SEM 照片

Fig.7 SEM microstructures of fusion zone (a), heat affected zone (b) and base material (c) of Ti650 after 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC+700 °C/2 h AC heat treatment

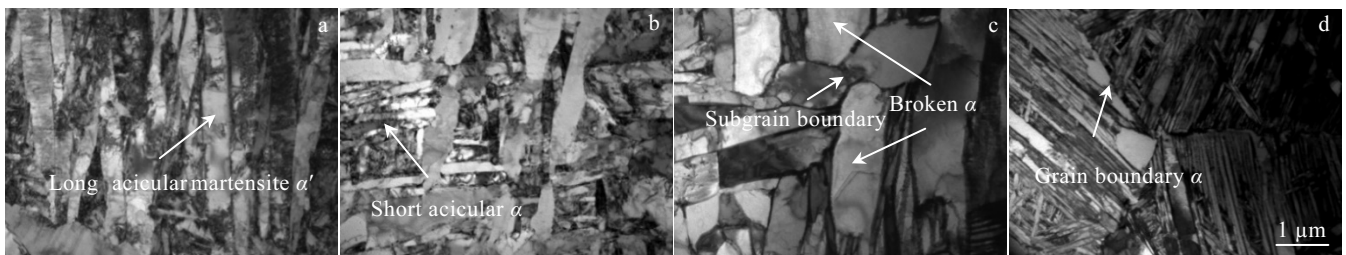


图 8 不同热处理后的 Ti650 合金焊缝 TEM 照片

Fig.8 TEM images of fusion zone of Ti650 alloy after different heat treatments: (a) sample 1, (b) sample 2, (c) sample 3, and (d) sample 4

### 3 结 论

1) Ti650 合金真空电子束焊缝主要由亚稳马氏体  $\alpha'$  相构成。经 700 °C/2 h AC 退火, 焊缝中马氏体  $\alpha'$  相发生近平衡相变  $\alpha' \rightarrow \alpha$ ,  $\alpha'$  相全部溶解, 同时焊缝中析出大量短针状  $\alpha$  相。经 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC 处理后,  $\alpha$  相发生了明显粗化和等轴化。经固溶时效后再经 700 °C/2 h AC 处理后, 晶界明显可见有  $\alpha$  相析出。

2) 焊态 Ti650 试样经 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC 处理后, 试样在不降低塑性的情况下, 强度得到了显著提升。原始粗片层与次生短针状  $\alpha$  相的结合能有效提高焊缝强度, 阻碍裂纹的扩展。

3) 综合分析焊缝区的组织和性能, Ti650 合金焊接试样采用 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC 进行焊后热处理, 焊缝和基体的性能能够获得较好匹配。

#### 参考文献 References

- [1] Lu Bin(卢 斌), Yang Rui(杨 锐). *Aerospace Materials and Technology*(宇航材料工艺)[J], 2007, 37(6): 77
- [2] Wang Yong(王 永). *The High Treatment and Phase Transformation of a High Temperature and High Strength Titanium Alloy*(高温高强钛合金的热处理工艺及相变行为研究)[D]. Shenyang: Shenyang University, 2008
- [3] Zhang Ziyang(张子阳), Wang Shanlin(王善林), Ke Liming(柯黎明) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属

- 材料与工程)[J], 2018, 47(7): 2245
- [4] Zhang Shilin, Ma Yingjie, Huang Sensen et al. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2019, 35(8): 1681
- [5] Jyotirmaya Kar, Debalay Chakrabarti, Sanat Kumar Roy et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2019, 266: 165
- [6] Xin Shewei(辛社伟), Zhao Yongqing(赵永庆), Zhou Wei(周伟) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(11): 3422
- [7] Li Changjian(李昌健), Liu Xin(刘 昕), Lei Yongping(雷永平). *Materials Science and Technology*(材料科学与工艺)[J], 2018, 26(6): 22
- [8] Ma Quan(马 权), Xin Shewei(辛社伟), Song Kai(宋 凯) et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(8): 2723
- [9] Xin Shewei(辛社伟), Zhao Yongqing(赵永庆). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2005(4): 4
- [10] Wang Qiang(王 强), Yan Zhongjie(闫忠杰), Liu Xuesong(刘雪松) et al. *Transactions of the China Welding Institution* (焊接学报)[J], 2019, 40(7): 139, 148
- [11] Ling Kun(凌 堃), Huang Xiaomei(黄笑梅). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2019, 40(1): 124
- [12] Hoh Hsin Jen, Pang John Hock Lye, Tsang Kin Shun. *International Journal of Fatigue*[J], 2016, 87: 279

## Effect of Heat Treatments on Microstructure and Mechanical Properties on Electron Beam Welded Joint of Ti650 Alloy

Zhang Jingli, Xin Shewei, Zhou Wei, Zhang Yongqiang, Guo Dizi, Li Qian, Mao Xiaonan  
(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The effects of post-weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti650 alloy electron beam welding (EBW) samples were studied. The results indicate that metastable martensite  $\alpha'$  is the main phase in the fusion zone of welding seam. During 700 °C/2 h AC heat treatment, a phase transition  $\alpha' \rightarrow \alpha$  occurs, and a large number of short aciculate secondary  $\alpha$  phases are precipitated in the fusion zone. After 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC heat treatment,  $\alpha$  is obviously coarsened and equiaxed. The microstructure contains the original coarse layer and the secondary short acicular alpha can effectively improve the strength and prevent the crack growth of welded joint. The welded joint has better strength and plasticity under the condition. After subsequent treatment at 700 °C/2 h AC, some equiaxed  $\alpha$  phases gradually precipitates at the grain boundary, resulting in a decrease in strength and plasticity of the grain boundary. In conclusion, 1010 °C/1.5 h WC+650 °C/2 h AC is the most suitable post-welding heat treatment for Ti650 EBW welded joint to make the properties of weld and matrix be well matched.

**Key words:** Ti650 alloy; electron beam welding; heat treatment; mechanical property

Corresponding author: Zhang Jingli, Ph. D., Titanium Alloy Research Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, E-mail: zhangjingli2018@163.com