

## PWHT 温度对 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金 EBW 接头显微组织和显微硬度的影响

吴冲冲<sup>1</sup>, 王清江<sup>1</sup>, 陈志勇<sup>1</sup>, 李晋炜<sup>2</sup>, 刘建荣<sup>1</sup>

(1. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016; 2. 中航工业北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

**摘要:** 研究了不同焊后热处理(PWHT)温度对 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金电子束焊接(EBW)接头显微组织和显微硬度的影响。结果表明: 焊态条件下, 母材区是双态组织, 焊缝熔合区主要是柱状 B2 相组织, 焊接接头的显微硬度呈不均匀分布; 经焊后热处理, 焊缝熔合区变为网篮组织; 随着热处理温度升高, 熔合区中 O 相晶粒尺寸增大, 数量减少, 热影响区为双态组织, 与母材区的差别在于等轴 α<sub>2</sub> 相边缘针状化。焊接接头的显微硬度经 850、900 °C 热处理后分布均匀。

**关键词:** Ti<sub>2</sub>AlNb 合金; 电子束焊接; 焊后热处理; 显微组织; 显微硬度

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

## Effects of PWHT temperature on microstructure and microhardness of EBW Ti<sub>2</sub>AlNb alloy joints

WU Chong-chong<sup>1</sup>, WANG Qing-jiang<sup>1</sup>, CHEN Zhi-yong<sup>2</sup>, LIU Jian-rong<sup>1</sup>

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Research Institute of Beijing Aeronautical Manufacturing Technology, Beijing 100024, China)

**Abstract:** The effects of post weld heat treatment(PWHT) temperature on the microstructure and microhardness of electron beam welding(EBW) Ti<sub>2</sub>AlNb alloy joints were studied, while the welding joint was treated at different PWHT temperatures. The results show that the microstructure of base metal is duplex microstructure, while the fusion zone is mainly composed of columnar B2 phase in original state, and the microhardness of the original joint is not well-distributed. After PWHT, the column crystal of fusion zone is replaced by basketweave microstructure, and with the PWHT temperature increasing, the grain size of O phase in basketweave becomes larger while the quantity of O phase becomes smaller. At the same time, the heat-affected zone remains the microstructure of base metal besides the edge of α<sub>2</sub> phase tend needle-like. Also, after PWHT conducted at 850 °C and 900 °C, the microhardness of melting joint becomes much better distributed than the original one.

**Key words:** Ti<sub>2</sub>AlNb alloy; electron beam welding; post weld heat treatment; microstructure; microhardness

现代航空航天技术的发展对材料的要求越来越高, 高温钛合金因为具有高比强度、低密度以及较好的高温性能, 受到越来越多的关注。与传统的近 α 钛合金相比, 钛铝金属间化合物能够在更高的温度下工作, 经过各国学者的不断研究, 已经开始在航空发动机上得到使用。20 世纪 80 年代, BANERJEE 等<sup>[1]</sup>在 Ti<sub>3</sub>Al 基合金研究过程中发现了 Ti<sub>2</sub>AlNb 金属间化合物, 因其具有正交结构而被命名为 O 相。

O 相合金因其具有优良的高温综合性能受到重

视。发动机零部件制造过程中必然涉及异型件的焊接连接问题, 焊接接头在实际使用过程中往往是最容易出现问题的部位, 因此, 对 Ti<sub>2</sub>AlNb 金属间化合物焊接接头的表征必不可少。

真空电子束焊接是实现 Ti<sub>2</sub>AlNb 连接的高效连接方法, 此前已经有研究者对电子束焊接接头进行了研究<sup>[2-6]</sup>, 但这些研究的焊后热处理制度大多参考了 Ti<sub>2</sub>AlNb 非焊接件的研究结果, 因此, 有必要对焊后热处理方法进行系统研究。

本文作者研究  $Ti_2AlNb$  合金焊接接头的微观组织, 讨论不同焊后热处理制度对焊接接头组织和显微硬度的影响, 该合金成分为  $Ti-22Al-25Nb$ , 使用真空电子束法焊接。

## 1 实验

实验材料成分为  $Ti-22Al-25Nb$ , 是从锻件上切取的厚度为 4.2 mm 的试板。试板经电子束焊接后分别进行以下不同温度的热处理: (750 °C, 2 h, AC), (800 °C, 2 h, AC), (850 °C, 2 h, AC), (900 °C, 2 h, AC), (950 °C, 2 h, AC)。

金相试样用线切割机制取, 用热镶料镶制, 电镜观察前经过喷金处理。使用 keyence VHX-1000 测量显微镜观察低倍形貌, 使用蔡司 Axiovert 200MAT 金相显微镜、岛津 SSX-550 钨丝扫描电子显微镜观察微观形貌, 使用 Future-Tech FM-700e 显微硬度计进行显微硬度测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 焊态显微组织

图 1 所示为母材的微观组织。从图 1 可以看出,

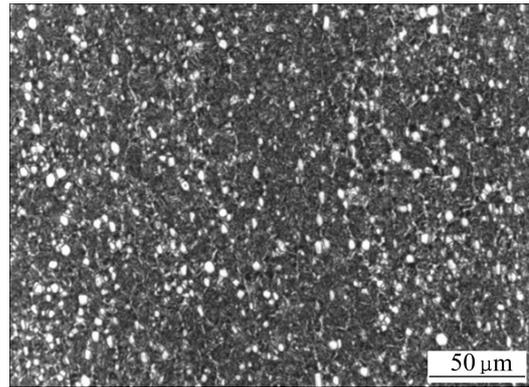


图 1 母材的显微组织

Fig. 1 Microstructure of base metal

母材为双态组织, 其中等轴状组织为  $\alpha_2$  相。

图 2 所示为焊态条件下的焊接接头组织。由图 2 可以发现, 熔合区主要由柱状晶和分布在上下边缘的少量枝状晶组成, 并且沿中心轴对称分布。柱状晶由热影响区向熔合区生长, 生长方向为逆向散热最快的方向。由于焊接热循环的周期性<sup>[7]</sup>, 焊态的宏观组织呈现明显的层状不均匀性。

图 3 所示为焊态焊接接头的显微硬度分布。由图 3 可以发现, 热影响区和熔合区的硬度明显高于母材的, 且热影响区的硬度略高于熔合区的硬度。这种硬度不均匀分布, 主要是焊接接头组织的不均匀分布所致。

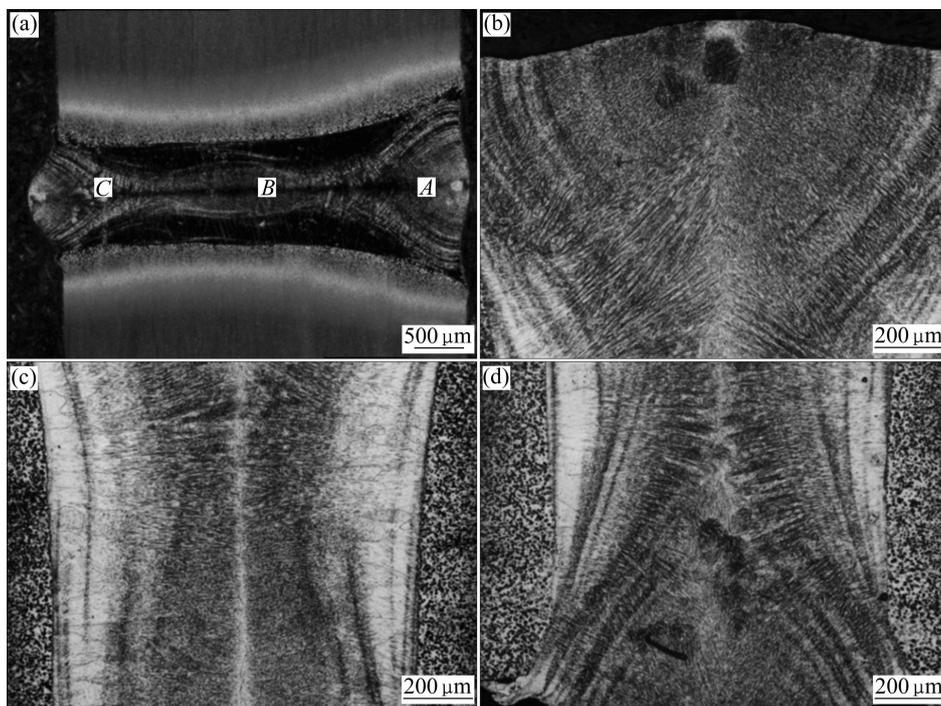


图 2 焊接接头焊态的组织形貌

Fig. 2 Microstructures of original welding joint: (a)SEM image; (b) Zone A; (c) Zone B; (d) Zone C

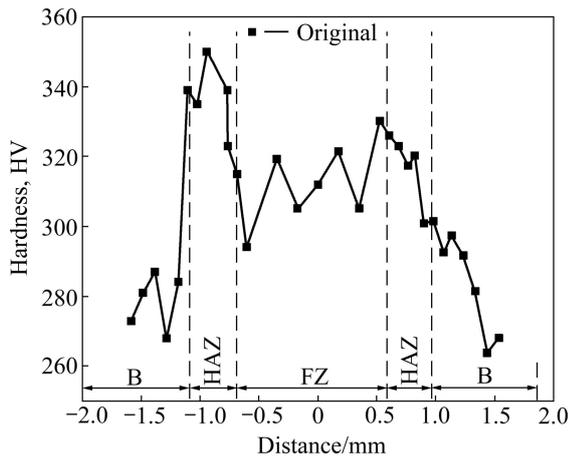


图 3 焊接接头焊态硬度分布

Fig. 3 Hardness distribution of original welding joint (FZ: fusion zone; HAZ: heat affected zone; B: base metal)

2.2 焊后热处理对焊接接头显微组织的影响

图 4 所示为经过不同温度焊后热处理后, 焊缝熔

合区的组织变化。由图 4 可以发现, 熔合区组织类似于钛合金中的网篮组织, 其中较暗的相是  $O$  相, 较亮的相是  $B2$  相。这是因为焊接熔池在电子束高能量影响下处于极高温, 在此温度下迅速冷却时,  $\alpha_2$  相来不及生成, 经焊后热处理也未观察到明显的  $\alpha_2$  相, 因此, 在本热处理条件下, 焊缝熔合区中主要由  $O$  相组成。

随焊后热处理温度的升高, 熔合区中的  $O$  相尺寸明显增大, 如图 4 所示。从图 4 还可以观察到, 750、800、850 和 900 °C 温度热处理时  $O$  相含量变化不明显, 但在 950 °C 热处理时,  $O$  相含量却明显减少。这是因为  $O$  相长大阶段在 950 °C 以下, 在此区间内, 热处理温度越高, 越有利于  $O$  相的长大; 当温度升高到 950 °C 时, 已接近  $O$  相合金的相转变点, 此温度下  $O$  相逐渐转变为  $B2$  相, 表现为  $O$  相数量减少,  $B2$  相数量增多。

图 5 所示为不同焊后热处理条件下的热影响区组织。从图 5 可知, 热影响区中的等轴  $\alpha_2$  相边缘呈针状, 这是因为虽然在 750、800、850 和 900 °C 时, 热处理

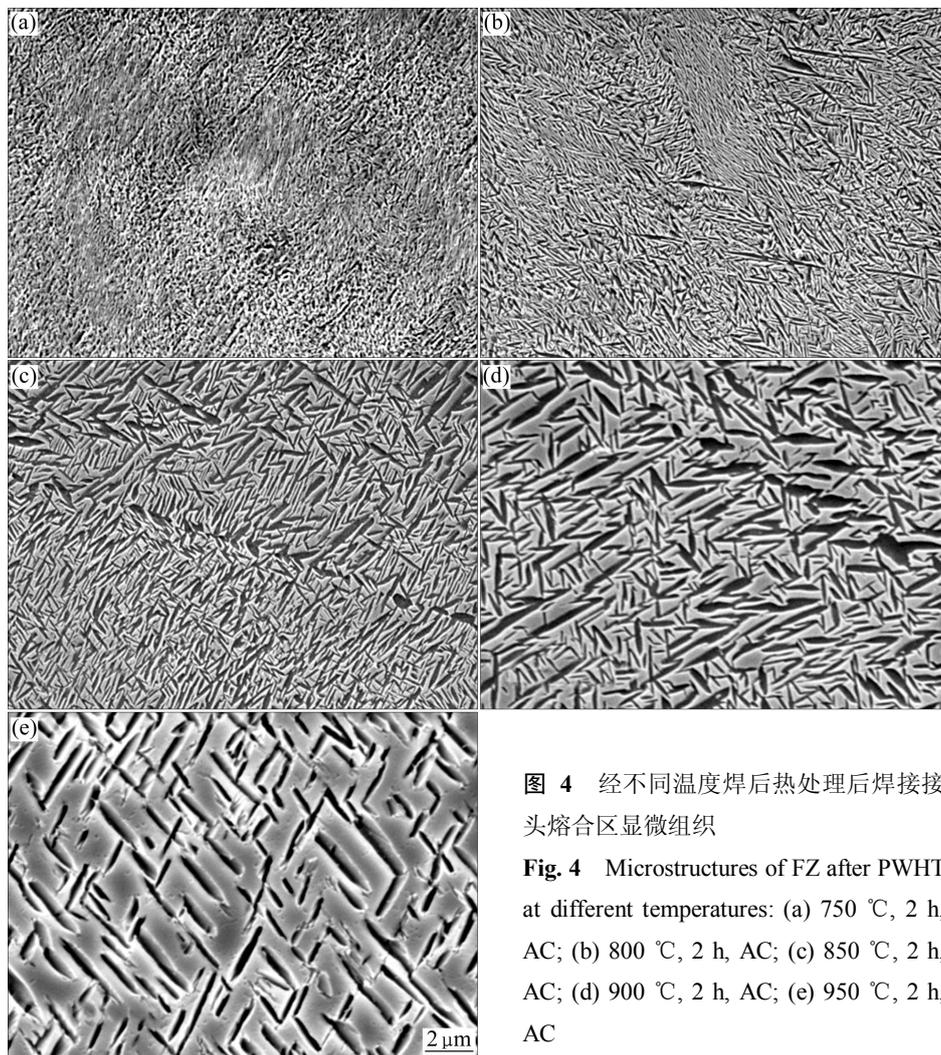


图 4 经不同温度焊后热处理后焊接接头熔合区显微组织

Fig. 4 Microstructures of FZ after PWHT at different temperatures: (a) 750 °C, 2 h, AC; (b) 800 °C, 2 h, AC; (c) 850 °C, 2 h, AC; (d) 900 °C, 2 h, AC; (e) 950 °C, 2 h, AC

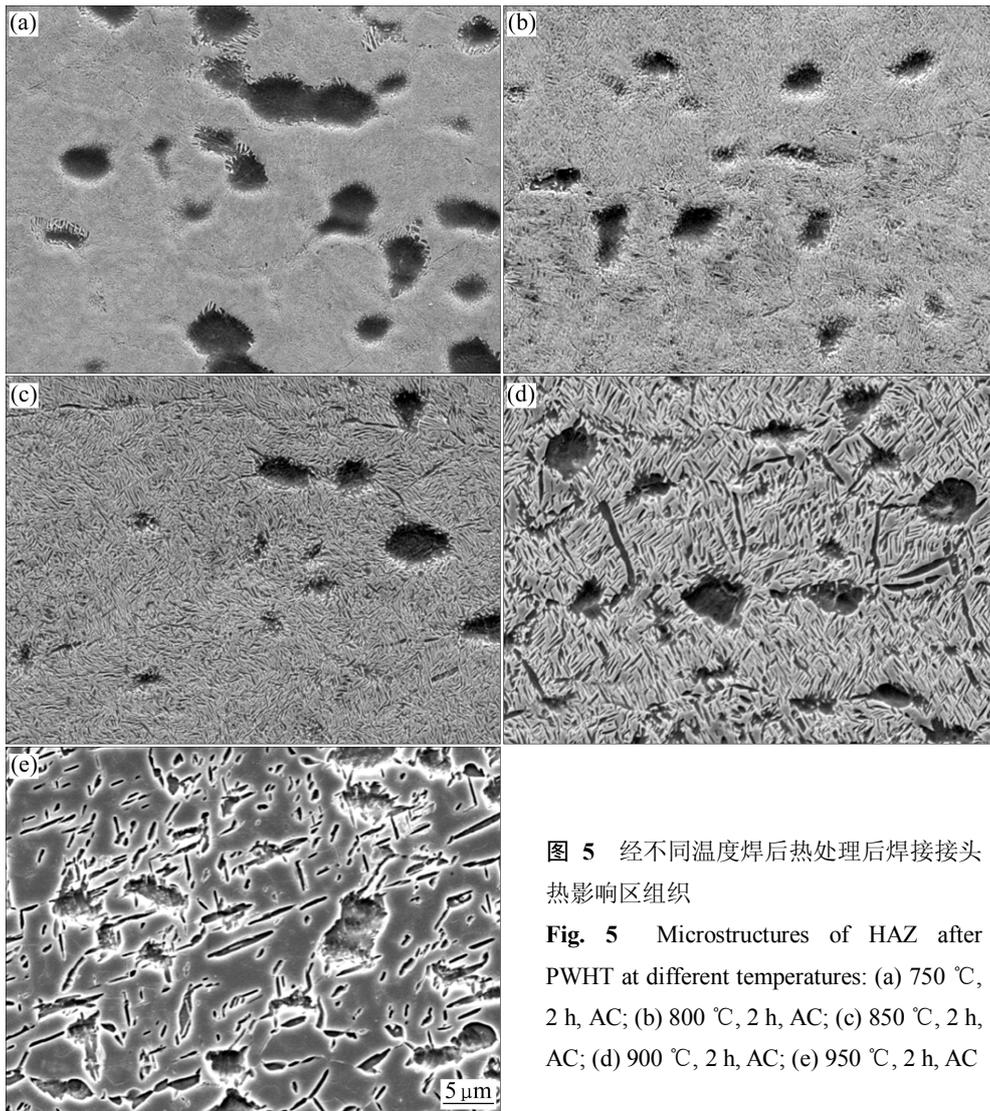


图5 经不同温度焊后热处理后焊接接头热影响区组织

Fig. 5 Microstructures of HAZ after PWHT at different temperatures: (a) 750 °C, 2 h, AC; (b) 800 °C, 2 h, AC; (c) 850 °C, 2 h, AC; (d) 900 °C, 2 h, AC; (e) 950 °C, 2 h, AC

可以同时促进  $O$  相和  $\alpha_2$  相的生长, 但是  $O$  相在原始组织中是针状相, 针状边缘相对于等轴状边缘更有利于相析出和长大, 而且  $\alpha_2$  相边缘是 3 种相接触的区域, 更易于新相析出, 因而就形成了针状边缘。 $O$  相长大趋势与熔合区中  $O$  相长大的趋势一致, 也是随热处理温度的升高, 尺寸逐渐增大。同时, 对比图 5(d)和(e)可以发现, 随热处理温度的升高,  $B2$  相含量的明显变多, 这与吴波等的预测结果<sup>[8-9]</sup>一致。

通过焊接接头显微组织观察, 可以推测仅仅经过 950 °C 或者更高温度的一重热处理无法获得满意组织, 也无法获得满意性能。此外, 在 750 °C 热处理后, 合金中的  $O$  相尺寸不大, 可能无法得到较好的塑性。但是在本实验温度范围内, 还存在  $O1$ 、 $O2$  转变, 且在  $B2$  相转变为  $O$  相的过程中还可能产生  $\beta$  相和  $O'$  过渡相。此外, 这个温度区间也存在  $\alpha_2$  相, 相变区间内也可能析出微小的  $\alpha_2$  相。这些相变, 特别是  $O1$ 、 $O2$

有序无序转变对接头性能有很大的影响<sup>[10]</sup>。因此, 还不能简单地从微观组织上判断 950 °C 以下的哪个温度能得到最好的性能。

### 2.3 焊后热处理对焊接接头显微硬度的影响

通常条件下, 显微硬度可以在一定程度上反映材料的力学性能, 下面结合不同热处理条件下的焊接接头显微硬度变化情况, 分析热处理对焊接接头力学性能的影响。

焊接接头硬度分布见图 6。由图 6 可以发现, 经 800 °C 热处理后, 焊接接头熔合区和热影响区的硬度显著增加, 焊接接头的硬度不均匀分布趋势增加, 经 850 和 900 °C 热处理后, 熔合区和热影响区的显微硬度出现一定程度的下降, 接头的硬度分布不均得到改善。从不同热处理条件下焊接接头的显微硬度分布结果来看, 焊后热处理的温度范围应该控制在 850~900

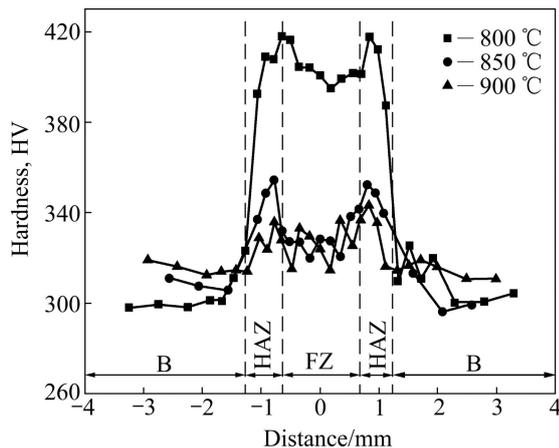


图6 经不同温度焊后热处理后焊接接头的硬度变化

Fig. 6 Hardness distribution of welding joints after PWHT at different temperatures (FZ: fusion zone; HAZ: heat affected zone; B: base metal)

°C 之间, 在此区域内, 焊接接头的显微硬度分布较均匀, 也能得到接头不同区域较好的性能匹配。

### 3 结论

1) 焊态条件下, Ti<sub>2</sub>AlNb 合金的电子束焊接接头组织和硬度呈现不均匀分布。焊接接头熔合区为粗大的柱状晶组织。焊后热处理后, 转变为由 *O* 相和 *B2* 相组成的网篮组织。随热处理温度升高, *O* 相尺寸变大; 在 950 °C 热处理后, *O* 相含量明显变少, *B2* 相明显增多。

2) 焊接接头热影响区与母材区的组织形态相似, 区别在于圆滑的  $\alpha_2$  相边缘变成不规则的针状形貌, 不同热处理条件下, 热影响区中 *O* 相尺寸和含量的变化与熔合区变化趋势一致。

3) 在 850 和 900 °C 进行焊后热处理可以改善焊接接头的硬度分布不均现象。

### REFERENCES

[1] BANERJEE D, GOGIA A K, NANDY T K, JOSHI V A. A new ordered orthorhombic phase in a Ti<sub>3</sub>Al-Nb alloy [J]. Acta Metallurgica, 1988, 36: 871-882.

[2] 朱瑞灿, 张益坤, 谢美蓉, 程云君, 赵刚. 焊后热处理温度对 Ti-22Al-25Nb 合金电子束焊接接头组织和性能影响研究 [C]//全国荷电粒子源、粒子束学术会议论文集. 2008: 290-294. ZHU Rui-can, ZHANG Yi-kun, XIE Mei-rong, CHENG Yun-jun, XIE Gang. Effect of PWHT temperature on microstructure and properties of EBW welding Ti-22Al-25Nb

alloy[C]//Proceedings of Charged Particle Source and Particle Beam Academic Conference of China, 2008: 290-294

- [3] 朱瑞灿, 吴国清, 黄正, 程云君, 张建伟, 毛智勇, 余伟. Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金板材电子束焊接焊缝组织研究[J]. 航空制造技术, 2007(z1): 412-415. ZHU Rui-can, WU Guo-qing, HUANG Zheng, CHENG Yun-jun, ZHANG Jian-wei, MAO Zhi-yong, YU Wei. Microstructure of EB-Welded Joints of Ti<sub>2</sub>AlNb Based Alloy Sheet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(z1): 412-415.
- [4] 尹建明, 卢斌, 李玉兰, 杨锐. Ti<sub>2</sub>AlNb 合金板材的电子束焊接[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(z1): s325-s330. YIN Jian-ming, LU Bin, LI Yu-lan, YANG Rui. Electron beam welding of Ti<sub>2</sub>AlNb based alloy sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(z1): s325-s330.
- [5] 冯艾寒, 李渤渤, 沈军. Ti<sub>2</sub>AlNb 基合金的研究进展[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(1):30-38. FENG Ai-han, LI Bo-bo, SHEN Jun. Recent advances on Ti<sub>2</sub>AlNb-based alloys[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2011, 10(1):30-38.
- [6] FENG J C, WU H Q, HE J S, ZHANG B G. Microstructure evolution of electron beam welded Ti<sub>3</sub>Al-Nb joint [J]. Materials Characterization, 2005, 54: 99-105.
- [7] 吴会强, 冯吉才, 何景山, 张秉刚. 焊接工艺对高铌 Ti<sub>3</sub>Al 合金电子束焊接接头显微组织和显微硬度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(8): 1313-1317. WU Hui-qiang, FENG Ji-cai, HE Jing-shan, ZHANG Bing-gang. Microstructure evolution of high Nb containing Ti<sub>3</sub>Al based alloy electron beam welding joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(8): 1313-1317.
- [8] 吴波, 沈剑韵, 商顺利, 孙军, 张翥, 彭德林, 柳松清. Ti-22Al-27Nb 合金平衡相结构预测[J]. 稀有金属, 2002, 26(1): 12-14. WU Bo, SHEN Jian-jun, SHANG Shun-li, SUN Jun, ZHANG Zhu, PENG De-lin, LIU Song-qing. Prediction of Phase Equilibrium in Ti-22Al-27Nb Alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2002, 26(1): 12-14.
- [9] 吴波, 沈剑韵, 张翥, 孙军, 彭德林, 柳松清. Ti<sub>2</sub>AlNb 合金的计算机模拟研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(4): 241-245. WU Bo, SHEN Jian-jun, ZHANG Zhu, SUN Jun, PENG De-lin, LIU Song-qing. The progress of computer simulation for Ti<sub>2</sub>AlNb-based alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31(4): 241-245.
- [10] GOGIA A K, NANDY T K, BANERJEE D. Microstructure and mechanical properties of orthorhombic alloys in the Ti-Al-Nb system [J]. Intermetallics, 1998, 6(6): 741-748.

(编辑 何学锋)