

Ti₂AlNb基合金电子束焊接头的显微组织

柯于斌¹ 段辉平¹ 梁晓波² 张建伟²

(1 北京航空航天大学材料科学与工程学院,北京 100191)

(2 中国钢研科技集团公司,北京 100081)

文 摘 利用透射电子显微镜和能谱,研究电子束焊接过程中 Ti₂AlNb基合金显微组织演变过程以及焊缝区组成、焊后热处理对接头显微组织的影响。结果表明:焊接过程中焊缝区 Al元素损失较为严重,这有利于 B₂相的形成而不利于 O相的形成,使得接头焊缝区主要由 B₂和 α₂两相组成;在随后的热处理过程中,焊缝区的 B₂相转变为 α₂相和板条状的 O相,使焊缝区由 α₂、O和 β相组成。

关键词 Ti₂AlNb基合金,电子束焊接,显微组织

Microstructure of Ti₂AlNb Joint Produced by Electron Beam Welding

Ke Yubin Duan Huiping Liang Xiaobo Zhang Jianwei

(1 Material and Engineering Department of Beihang University, Beijing 100191)

(2 China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081)

Abstract The microstructure and composition of Ti₂AlNb joints fabricated by electron beam welding technique were investigated by transmission electron microscopy (TEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The effect of the composition of the welded zone and heat treatment after welding on the microstructure of the joint was also studied. Results showed that there was a great weight loss of Al element in the joint during welding, which was beneficial to the formation of B₂ phase but O phase. The as-welded joint was composed of B₂ and α₂ phases, while the joint after heat treatment was of α₂, O and β phases, which indicated that the following phase transformation of B₂ to α₂ and O occurred.

Key words Ti₂AlNb based alloy, Electron beam welding, Microstructure

1 前言

Ti₂AlNb基合金是在研究 Ti₃Al合金的增强增韧过程中新发展起来的金属间化合物材料,其密度较低,从室温到 750 °C 内都具有较高的比强度,因而在航空航天领域有着重要的应用前景。

Ti₂AlNb基合金一般由 α₂、β/B₂和 O相中的两相或三相构成,其成分通常为 Ti - (18% ~ 30%)Al - (12.5% ~ 30%)Nb(原子分数)。由于合金的相组成取决于合金的成分和所经历的热过程,因此合金经历的热过程不同,特别是经历诸如熔焊等高温重熔后,焊缝区成分与母材相比可能出现差异,而作为性

能对组织和成分具有高敏感性的一类材料^[1],焊接后 Ti₂AlNb基合金焊缝区的组织和性能会发生很大变化。

电子束焊接技术以其高能量密度、高熔透性以及焊接变形区小等优点已成为连接 Ti₂AlNb基合金的一种重要方法。焊接过程中,焊缝区的 Ti₂AlNb基合金要经历重熔和再结晶过程,随着焊缝区某些组元的烧损或冷却过程不同,其组织结构和性能也将发生变化^[2],这直接影响接头的服役性能和可靠性。因此,研究焊接以及焊后热处理过程中接头组织结构的变化具有重要意义。

收稿日期:2009-04-09;修回日期:2009-05-06

基金项目:航空科学基金项目(20075451020)

作者简介:柯于斌,1984年出生,硕士,主要从事材料的电子显微分析及 Ti₂AlNb高温合金的电子束焊接工作。E-mail: keyubin2004@163.com

本文利用 JEM - 2100F透射电子显微镜研究 $Ti_{60}Al_{20}Nb_{20}$ 基合金电子束焊接过程中焊缝区的组织以及焊后热处理对接头焊缝区组织的影响,从焊缝区成分变化入手,阐明了接头组织的形成过程以及对接头性能的影响。

2 实验材料及方法

采用厚度为 3 mm 的 $Ti - 22Al - 25Nb$ (原子分数 %) 基合金板材作为焊接母材,利用电子束焊接设备进行焊接,焊接工艺参数为:加速电压为 150 kV,电子束流为 7.0 mA,焊接速度为 0.4 m/min。采用真空炉对接头进行焊后热处理,热处理温度为

850 ,保温时间为 2 h。垂直于焊接方向切取分析试样,经抛光、挖坑、离子减薄等工艺制备透射电镜样品。采用带能谱的 JEM - 2100F分析型透射电镜对试样的显微结构进行分析。

3 实验结果

3.1 母材显微组织

图 1(a)为 $Ti_{60}Al_{20}Nb_{20}$ 基合金母材的显微组织照片,从中可见明显的块状组织。图 1(b)、(c)、(d)分别为母材中各相电子衍射花样。通过标定可知,主要为具有 bcc 结构的 β 相、 B_2 相以及密排六方结构的 α_2 相。

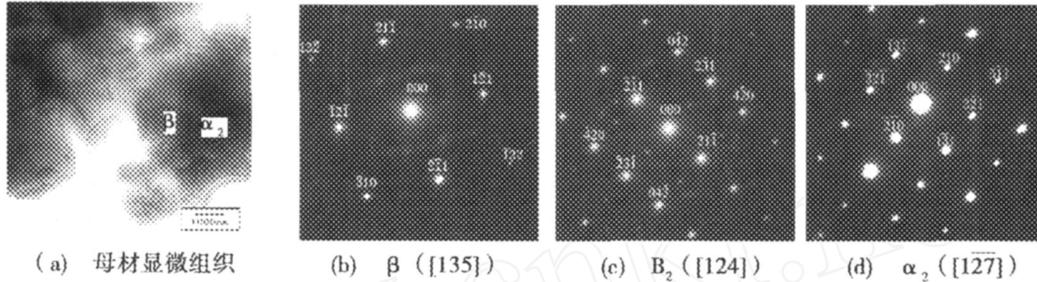


图 1 母材显微组织及各相衍射花样

Fig 1 Microstructure and SAD patterns of parent metal
nm,宽 100~400 nm。

3.2 焊缝区显微组织

电子束焊接时,焊缝区经历了重熔与快速凝固过程,其组织与母材有了较大区别,如图 2 所示。通过电子衍射分析可知,焊缝区主要由具有 bcc 有序结构的 B_2 相和密排六方结构的 α_2 相组成。

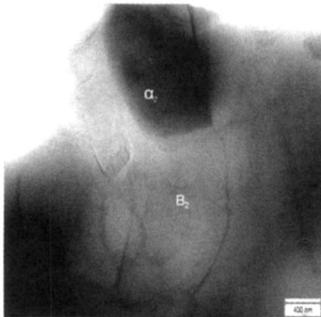


图 2 焊缝的显微组织

Fig 2 Microstructure of weld zone

3.3 热处理对焊缝区组织的影响

经 850 保温 2 h 热处理后,焊缝区显微组织如图 3 所示,可见在白色基体上析出了大量长约为 400~1 000 nm、宽约为 40~100 nm 的细板条,这些黑白相间的板条组成典型的网篮状组织。

通过选区电子衍射花样标定对白色基体和黑色板条状析出的结构分析可知,白色基体为具有 bcc 有序结构的 B_2 相,黑色板条主要为具有正交结构的 O 相。

热处理过程中母材 B_2 相基体上也会有少量粗大的板条状 O 相析出 (图 4),其尺寸为长 1 000~1 400

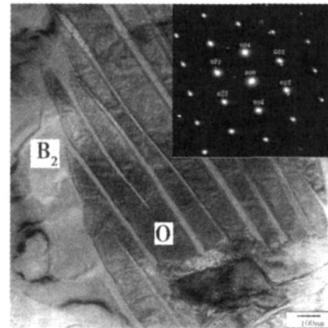


图 3 热处理后焊缝区显微组织及 O 相电子衍射花样 ([100])

Fig 3 Microstructure of joint after heat treatment and SAD pattern of O-phase

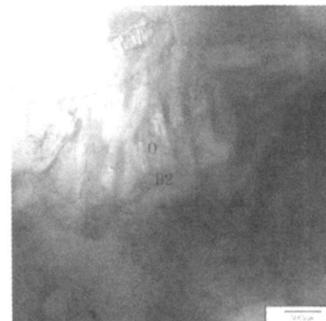


图 4 热处理后母材显微组织

Fig 4 Microstructure of base metal after heat treatment

4 讨论

表 1 为母材与焊缝的化学成分。可看出焊接后焊缝区 Al 元素损失较为严重,这主要是由于焊接熔池中 Al 元素的饱和蒸气压比 Ti 和 Nb 元素的饱和蒸气压至少高一个数量级,因而在真空电子束焊接过程中向真空中挥发损失严重^[3]。焊接过程中 Al 含量的减少导致焊接后 Ti-Nb 元素的相对含量升高。

表 1 母材及焊缝成分

Tab 1 Composition of base metal and weld-joint
%(原子分数)

区域	Al	Ti	Nb
母材	18.4	55.5	26.1
焊缝	9.70	57.1	33.2
热处理焊缝	11.4	57.2	31.4

根据 Kumpfert 和 Leyens 的研究结果可知^[4],在 Ti-22Al-25Nb 合金的相变过程中,由 β_2 、 β_1 、 β_2 相构成的母材在 1090 发生 β_2 的有序化转变,在 900 以下发生 $\beta_2 \rightarrow \beta_2 + O$ 、 $O + \beta_2$ 转变, $O + \beta_2$ 相是不稳定的,在 875~700 将通过分解反应 $\beta_2 \rightarrow O + \beta_2$,又转变成为无序的 β_2 相。由此可知合金的组织应由 β_2 、 β_1 和 O 三相组成。

由于电子束焊接的冷却速度极快, $\beta_2 \rightarrow \beta_2 + O$ 、 $O + \beta_2$ 相变过程被抑制,这种快速凝固过程使得大量初生 β_2 相被保留到室温,从而在室温组织中 β_2 相含量较高。目前大部分研究都以此作为依据来说明焊缝区的相组成,而忽视了焊缝区成分的变化对其相组成的影响。

根据 Ti-Al-Nb 三元相图^[5]可知:在 O 相稳定存在的范围内,Nb 原子分数可达 10%~32%,但 Al 含量范围较窄,为 20%~35%。当 Al 原子分数高于 26% 时,O 相最稳定;而 β_2 相在低 Al 含量的区域稳定存在^[6]。对比表 1 数据可看出,由于焊接过程中存在严重的 Al 烧损,焊缝区的 Al 含量远远低于母材中 Al 的含量,因此在焊接过程中焊缝区易于形成 β_2 相而不易产生 O 相。由此可知焊缝区组织主要为 β_2 相和少量 β_1 相。

对电子束焊接后的 Ti₃AlNb 基合金在 850 下保温 2 h 后,焊接过程中产生的大量高能量状态的亚稳

相 β_2 相分解为较低能量状态的 O + 稳定相,从而使最终得到的焊缝区组织为:O、 β_2 和 β_1 三相组织。

与钢中板条状马氏体类似^[7],O 相板条状析出的尺寸主要取决于初生 β_2 相尺寸的大小。合金焊缝区的 β_2 相是由母材组织中的 β_2 相在焊接过程中产生的,尺寸相对于母材中原有的 β_2 相尺寸要小,因而其在热处理过程所析出的 O 相板条的尺寸也相应的比母材直接进行热处理的原有 β_2 相分解的 O 相板条的尺寸更为细小,这对于焊缝区综合力学性能的改善十分有利^[8]。

5 结论

(1) 电子束焊接过程中,母材中的 β_2 相转变为 β_2 相,热处理后在 β_2 相基体上析出大量 O 相板条组织;

(2) 电子束焊接过程中,接头区 Al 元素挥发损失较为严重,有利于 β_2 相的形成而不利于 O 相的形成;

(3) 母材直接热处理仅得到少量 O 相板条组织,且尺寸粗大。

参考文献

- 1 吴会强,冯吉才等.电子束焊接 TiAl 基合金接头组织结构及其裂纹产生的敏感性.材料工程,2005;(4):7~10
- 2 司玉锋,孟丽华,陈玉勇等. Ti₃AlNb 基合金的研究进展.宇航材料工艺,2006;36(3):7~12
- 3 司玉锋,陈子勇,孔凡涛等. Ti-22Al-25Nb 合金 ISM 熔炼过程中的成分控制.铸造技术,2004;25(11):834~836
- 4 Andrew Facciano High temperature organic composite applications for supersonic missile airframes SAMPE Journal 2000;36(1):56~60
- 5 Banerjee D. The InterMetallic Ti₃AlNb Progress in Materials Science, 1997;42:135~158
- 6 Mozer B, Bendersky L A, Boettinger W J et al Scripta Metall, 1990;24:2363
- 7 李松瑞,周善初等.金属热处理.长沙:中南大学出版社,2003:298~299
- 8 李世琼,毛勇,张建伟等. Effect of microstructure on tensile properties and fracture behavior of intermetallic Ti₃AlNb alloys Trans Nonferrous Met Soc China, 2002;12(4):585~586

(编辑 任涛)