

板厚对 Ti60 钛合金电子束焊接头显微组织及力学性能的影响

于冰冰¹, 陈志勇¹, 李晋炜², 朱绍祥¹, 刘建荣¹, 李玉兰¹, 王清江¹, 杨锐¹

(1. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

(2. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要: 研究了不同厚度 Ti60 钛合金板材电子束焊接头的显微组织与力学性能。结果表明, 不同厚度 Ti60 合金板材的焊接接头均由熔化区 (FZ)、热影响区 (HAZ) 和母材区 (BM) 组成。焊接接头 FZ 均由粗大的柱状晶组成, 柱状晶内的显微组织均由细小的片层 α 相和少量 β 相组成, 板材厚度对 FZ 中柱状晶内部的组织形态影响不明显。焊接接头显微硬度均呈“马鞍形”分布, 其中 FZ 显微硬度最高, BM 最低。焊接接头拉伸试样断裂均发生于 BM, 其抗拉伸强度等强于 BM。

关键词: Ti60 钛合金; 板材; 电子束焊接; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2+3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)S1-166-05

高温钛合金因其密度低, 比强度高, 高温性能好而被广泛应用于航空发动机的轮盘、鼓筒及压气机叶片等零部件以减轻发动机的重量, 提高发动机的推重比, 从而达到提高发动机性能的目的^[1,2]。传统上, 发动机的叶片和涡轮盘采用机械连接, 若采取焊接取代机械连接不仅可使发动机进一步减重, 而且可以减少机械结合界面, 从而减少疲劳裂纹源。

钛合金高温下具有很高的化学活性, 在熔化焊接过程中, 钛合金焊缝极易被周围环境中的氧、氮所污染, 导致整个焊接接头机械性能的下降。因此, 熔化焊接必须在惰性气体保护或在真空环境下进行。适用于钛合金的较普遍的熔焊方法主要有钨极惰性气体保护电弧焊 (GTAW/TIG)、激光束焊接 (LBW) 及电子束焊接 (EBW)。电子束焊接处于真空室中, 因而优越的保护条件, 可以保证焊接质量。

Ti60 合金是我国自主开发的近 α 型高温钛合金, 长期服役温度可以达到 600 °C, 该合金具有优良的力学性能, 尤其是具有令人满意的蠕变性能和疲劳性能。在实际应用过程中, 用该合金制作的发动机零部件之间存在连接问题。对于钛合金, 其焊接方法和工艺以及焊接接头力学性能方面的报道主要集中于 TC4、TA15 等两相钛合金^[3-7], 对于高温近 α 型钛合金在这方面的报道较少。陈志勇等^[8,9]对含 Ti60 合金锻件的电子束焊接接头的高温力学性能及变形机制进行了研

究。但对于 Ti60 钛合金板材的电子束焊接性, 尚未开展系统的研究工作。

针对 2、6 和 10 mm 厚 Ti60 钛合金板材电子束焊接组织与性能开展了对比研究。期望对 3 种不同厚度板材的焊接接头的显微组织特征和室温力学性能进行较系统的研究, 为该合金的工程化应用提供理论和实践依据。

1 实验

1.1 实验材料

实验用 Ti60 钛合金名义成分(质量分数, %)为: Al: 5.0~6.0, Sn: 3.0~4.5, Zr: 3.0~4.0, Mo: 0.4~1.2, Nb: 0.2~0.8, Ta: 0.3~1.1, Si: 0.1~0.5, Ti: 余量, 选用合金轧制板材, 板材厚度为 2、6 和 10 mm, 板幅尺寸 800 mm × 2400 mm。板材厚度不同, 在轧制过程中, 变形量不同, 导致显微组织产生差别, 板材的显微组织见图 1。2 和 6 mm 板材组织为典型的等轴组织 (图 1a, 1b), 由等轴 α 相和少量 β 相组成; 10 mm 板材板材组织为双态组织, 由变形的等轴 α 相、 β 转变组织组成和少量 β 相组成 (图 1c)。

1.2 焊接与焊后热处理

将板材分别切割成尺寸为 100 mm × 200 mm × (2, 6, 10) mm 的焊接试板, 对焊接试板的表面进行仔细的机械打磨及化学清洗, 消除表面污染物。对板材进行电

收稿日期: 2016-12-14

作者简介: 于冰冰, 男, 1986 年生, 博士生, 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016, 电话: 024-23971586, E-mail: zhiyongchen@imr.ac.cn

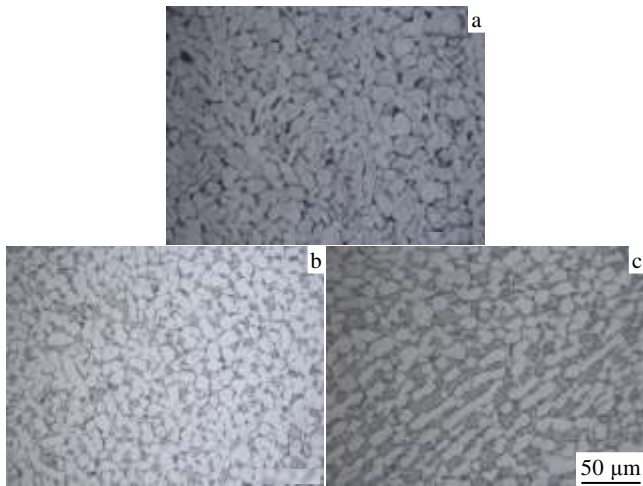


图 1 Ti60 钛合金板材的显微组织

Fig.1 Microstructure of Ti60 alloy plates: (a) 2 mm plate, (b) 6 mm plate, and (c) 10 mm plate

子束焊接。焊接完成后按照航空 I 级焊缝标准对焊缝进行 X 射线无损探伤, 保证用于实验分析的试样无可探焊接缺陷。

为了消除焊接残余应力, 并优化焊接接头力学性能, 对焊接接头进行了焊后热处理 (PWHT)。焊后热处理在三段管炉中进行, 热处理工艺如为: 700 °C/2 h/FC。

1.3 实验方法

在蔡司 Axiovert 200MAT 显微镜金相显微镜上观察焊接接头显微组织; 在 FM-700e 数显维氏硬度计上进行显微硬度测量, 从接头一侧的母材到另一侧的母材, 每间隔约 250 μm 沿焊接接头横截面水平中心线进行显微硬度测试。在岛津 AG-100kNG 型材料试验机上进行室温拉伸性能测试, 在 AG-X 250kN 型材料试验机上进行高温拉伸性能测试, 试样加工时保证焊接熔化区处于棒状拉伸试样的标距中心位置。

2 实验结果

2.1 焊接接头的组织特征

焊后探伤表明, 3 种厚度的板材通过电子束焊接均可以获得质量良好的焊接接头, 可达到航空 I 级焊缝探伤标准。焊接接头的宏观组织形貌如图 2 所示。焊接接头分为熔化区 (FZ)、热影响区 (HAZ) 和母材区 (BM) 3 个区域。由图 2 中可知, 熔化区中均可以清晰地观察到粗大的原始 β 柱状晶, 焊接接头中未发现裂纹、气孔等缺陷。2 mm 板材电子束焊接接头呈“V”字形, 6、10 mm 板材电子束焊接接头呈“螺钉”形。

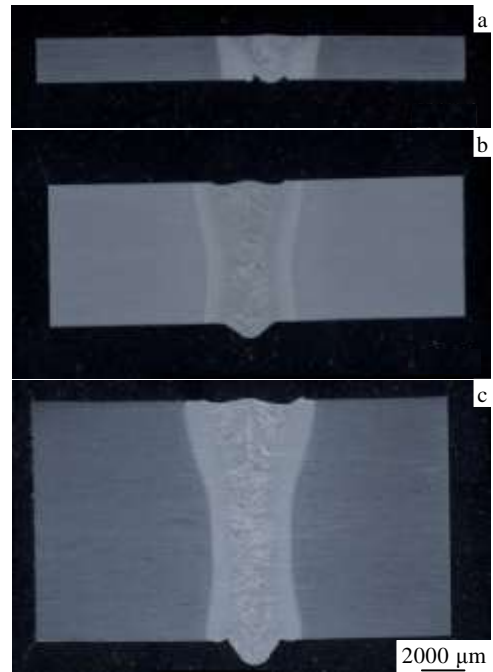


图 2 Ti60 板材焊接接头的宏观组织

Fig.2 Macrostructure of EB-weldments of Ti60 plates: (a) 2 mm plate, (b) 6 mm plate, and (c) 10 mm plate

2.1.1 熔化区

图 3 为焊态条件下, FZ 光学显微镜下组织形貌。由图 3a 和 3b 可知, 3 种厚度的 FZ 柱状晶内部显微组织相似, 晶内由大量细小的针状 α 相组成。图 4a 为 2 mm 板材电子束焊接接头焊态 FZ 的 SEM 组织形貌照片, 可以看出 FZ 片层 α 相的边缘存在少量的 β 相。

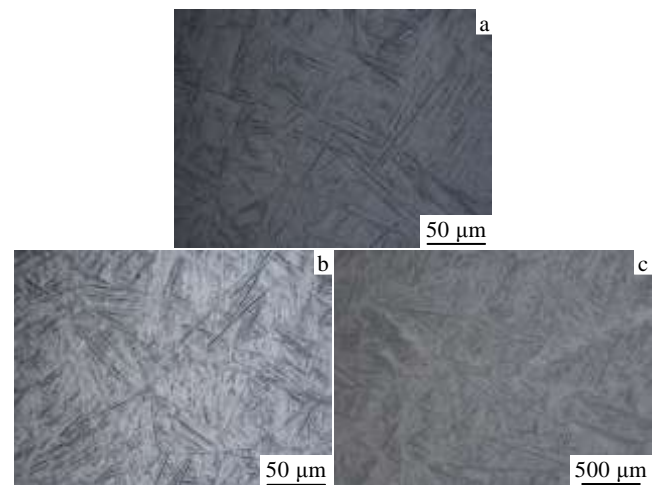


图 3 FZ 的显微组织形貌照片

Fig.3 Microstructure of FZ of Ti60 plates: (a) 2 mm plate and

(b) 6 mm plate, and (c) 10 mm plate

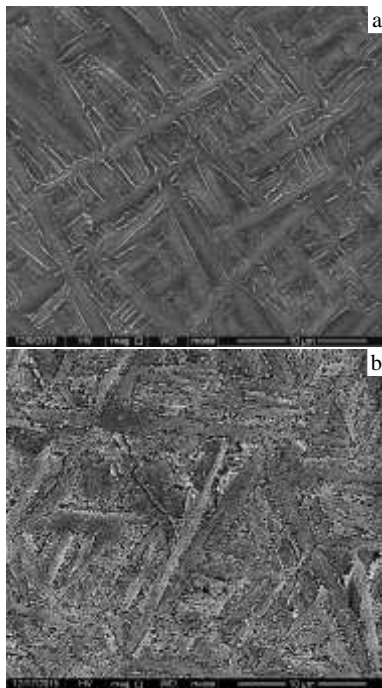


图 4 Ti60 板材 (2 mm) 焊接接头 FZ 的 SEM 形貌照片
 Fig.4 Microstructures of FZ of Ti60 plate (2 mm): (a) as welded and (b) after PWHT at 700 °C

因此可以确定 Ti60 板材的焊接接头 FZ 是由细小的片层 α 相和少量 β 相组成的。

700 °C 焊后热处理后, FZ 光学显微镜下组织如图 5 所示。可以看出该温度下热处理 FZ 内片层 α 相尺寸和形貌未发生明显变化。从图 4b 中 2 mm 板材在 700 °C 焊后热处理 FZ 的 SEM 组织形貌可以看出, 在该温度热处理后, FZ 的显微组织未发生明显变化。

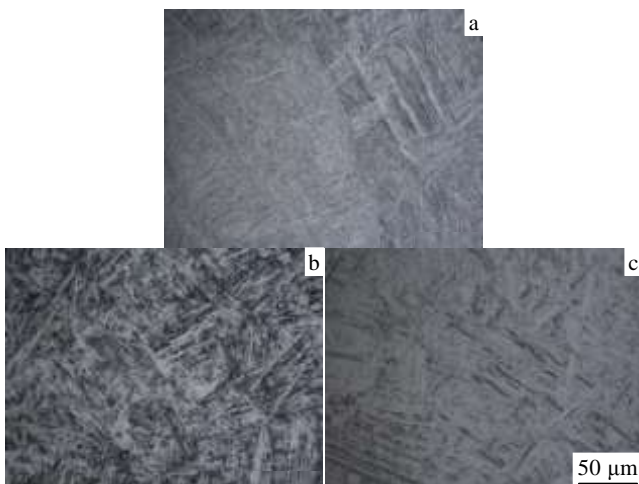


图 5 PWHT 条件下 FZ 的显微组织

Fig.5 Microstructures of FZ after PWHT: (a) 2 mm plate,

(b) 6 mm plate, and (c) 10 mm plate

2.1.2 热影响区

图 6 为焊接接头热影响区光学显微镜照片。通过对比可知, 3 种热影响区组织演变规律相同, 板材厚度对热影响区组织形态影响很小。

由图 6 可知, 热影响区是一种过渡组织, 焊接热循环对热影响区中 α 相的形貌产生较显著影响。母材区附近的远热影响 (Far-HAZ) 区域原始组织中 β 相中少量的片层 α 相最先溶解生成 β 相, 焊后冷却过程中, β 相发生分解, 生成更加细小的片层 α 相, 该区域由等轴 α 相、和细小的片层 α 相组成; 随着与 FZ 距离的减小, 到热影响区中部 (Middle-HAZ), 等轴 α 相开始溶解, 该区域由残留的 α 相和细小的片层组织组成; 到近热影响区 (Near-HAZ) 等轴 α 相完全消失, 显微组织为全片层组织, 该区域的显微组织和 FZ 的显微组织基本相同。

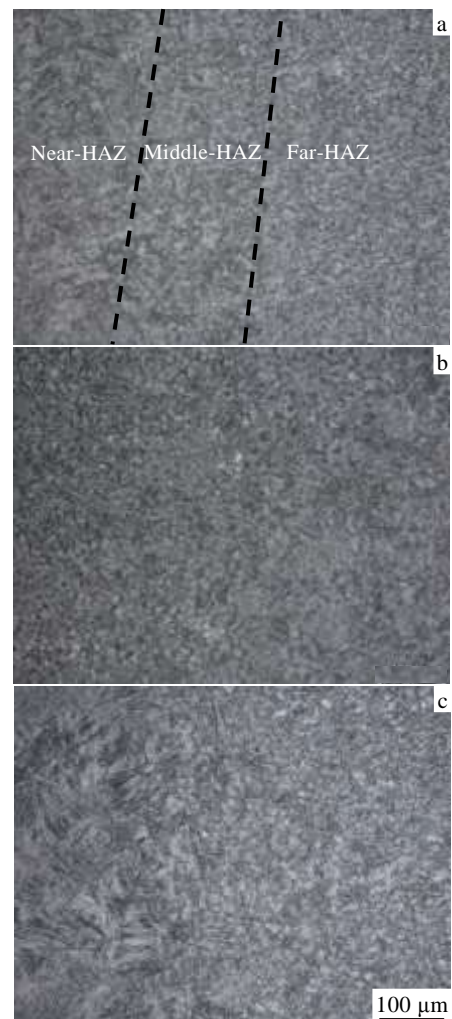


图 6 Ti60 板材焊接接头 HAZ 的显微组织

Fig.6 Microstructures of HAZ in the EB-weldment of Ti60

plates: (a) 2 mm plate, (b) 6 mm plate, and (c) 10 mm plate

2.2 显微硬度

PWHT 条件下, 焊接接头的显微硬度分布如图 7 所示。不同厚度板材, 焊接接头显微硬度均呈“马鞍形”分布, BM 硬度最低, FZ 硬度最高。由于 HAZ 是一种过渡组织, 因此随着距离 FZ 距离的减少, HAZ 中出现的细小的片层 α 相越来越多, 其显微硬度值逐步增加。

从图 7 中还可以观察到, PWHT 条件下, 不同厚度的板材, 其 FZ 中的显微硬度值略有波动。2 mm 板材的 FZ 显微硬度 HV 约为 3600 MPa; 6 mm 板材的 FZ 显微硬度约为 4100 MPa; 10 mm 板材的 FZ 显微硬度约为 3900 MPa, 产生硬度值波动的原因, 主要是由于板厚导致的焊接热输入、焊后冷却速度略有不同, 最终导致的 FZ 组织中组织形态的微小差异所致。

2.3 焊接接头的室温拉伸性能

表 1 为 PWHT 条件下, 不同厚度板材焊接接头的室温拉伸性能测试数据。从表中可知, 不同厚度板材电子束焊接头拥有良好的室温抗拉伸强度和塑性匹配。观察断裂位置发现, 所有的室温拉伸试样均断裂于 BM 区。

3 讨论

3.1 焊接 FZ 中的相变与组织

由于 Ti60 合金为近 α 型钛合金, 合金中 β 稳定元素含量较低, 合金自 β 相区冷却到室温, β 相会发生相变分解生成 α 相或 α' 相^[2], 相变类型由冷却速率决定。在电子束焊接过程, FZ 主要通过平行于板材平面且垂直于焊接方向的方向进行热传导, 因此板厚对焊接过程中 FZ 的冷却速率影响较有限, 不同板厚的 Ti60 合金焊接过程中, FZ 冷速相差较小, 接头柱状晶内部显微组织基本相同, 只在片层 α 相的尺寸上产生微小的差异。总体而言, 由于电子束焊接具有冷速高的特点, 因此 FZ 内, 冷却过程中形成的 α 片层较母材相比十分细小。

3.2 焊接接头的拉伸断裂行为

Ti60 合金是一种近 α 型钛合金, 该类型的钛合金主要的强化方式有固溶强化、晶界(相界)强化、织构强化以及析出强化^[2]。FZ 片层 α 相的尺寸远小于母材区 α 相尺寸, 如 Hall-Patch 关系所描述的, 更小的晶粒尺寸可以使材料强度增加, 因此 FZ 的硬度和强度明显高于母材区硬度, 由于热影响区是一种过渡组织, 随距 FZ 距离的减小, HAZ 中的组织形态越接近 FZ, 因而热影响区的硬度和强度逐步增加到 FZ 的水平。

室温拉伸条件下, 显微硬度和强度较低的 BM 区先于 FZ 和 HAZ 产生变形, 形成应力集中后, 拉伸断

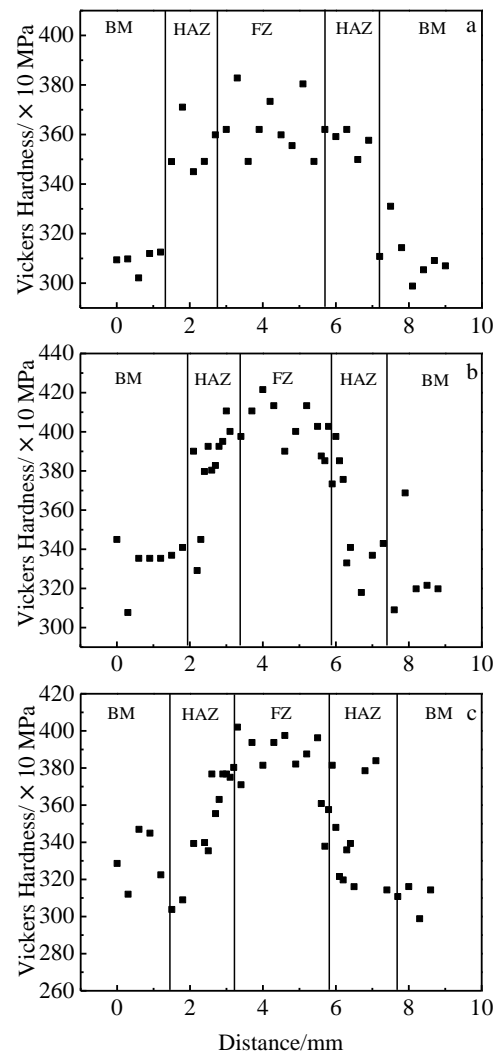


图 7 不同厚度 Ti60 板材焊接接头的显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness across the EB-weldments of Ti60 plates: (a) 2 mm plate, (b) 6 mm plate, and (c) 10 mm plate

表 1 Ti60 合金板材焊接接头室温拉伸性能

Table 1 Room temperature tensile properties of EB-weldments of Ti60 plate

Thickness/mm	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A/%	Failure location
2	930	1019	9	BM
6	974	1020	12	BM
10	951	1024	10	BM

裂也发生于此区域不同厚度板材接头室温拉伸试样均断裂于母材。

4 结论

1) 2、6 和 10 mm Ti60 板材均可以通过电子束焊

接可以得到焊接质量良好的焊缝。

2) 不同厚度 Ti60 板材的焊接接头 FZ 均由粗大的柱状晶组成, 柱状晶内显微组织差异不大, 均由细小的片层 α 相和少量 β 相组成。焊接 HAZ 为介于 BM 和 FZ 之间的过渡组织, HAZ 的大部分区域由等轴 α 相、细小的片层 α 相和 β 相组成, FZ 附近的 HAZ 中等轴 α 相完全溶解, 该区域组织为的 α 相片和 β 相组成的片层组织。

3) 焊接接头显微硬度均呈“马鞍形”分布, FZ 显微硬度最高, BM 最低, 焊接接头拉伸试样断裂均发生于母材区, 接头抗拉伸强度等强于母材区。

参考文献 References

- [1] Leyens C, Peters M eds. Translated by Chen Zhenhua(陈振华). *Titanium and Titanium Alloys*(钛及钛合金)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 297
- [2] Lütjering G, Williams J C eds. Translated by Lei Ting(雷霆), Yang Xiaoyuan(杨晓源), Fang Shuming(方树铭). *Titanium, 2nd ed*(钛, 第二版) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 8
- [3] Lu Wei, Li Xiaoyan, Lei Yongping *et al.* *Materials Science and Engineering*[J], 2012, 540: 135
- [4] Akman E, Demir A, Canel T *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2009, 209(8): 3705
- [5] Chen Shuhai, Huang Jihua, Cheng Donghai *et al.* *Materials Science and Engineering*[J], 2012, 541: 110
- [6] Elmer J W, Palmer T A, Babu S S *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 2004: 95(12): 8327
- [7] Mironov S, Zhang Y, Sato Y S *et al.* *Scripta Materialia*[J], 2008, 59(5): 511
- [8] Chen Zhiyong(陈志勇). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报) [J], 2008: 44(3): 263
- [9] Chen Zhiyong, Li Jinwei, Liu Jie *et al.* *Journal of Materials Science & Technology* [J], 2010: 26(6): 564

Influence of Plate Thickness on Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Welding Joint of Ti60 Titanium Alloy

Yu Bingbing¹, Chen Zhiyong¹, Li Jinwei², Zhu Shaoxiang¹, Liu Jianrong¹, Li Yulan¹, Wang Qingjiang¹, Yang Rui¹

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China)

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

Abstract: Microstructural evolution and mechanical properties of the electron beam weldments of different thickness Ti60 titanium alloy plates were investigated. Metallographic examination of as-welded Ti60 electron beam welds show that there are three zones in the EBW weldments, the fusion zone (FZ), heat affected zone (HAZ), and base metal (BM). The fusion zone is consisted of columnar grains. Effect of plate thickness on the microstructure of columnar grains is small. So the microstructure of columnar grains in plate with different thickness was similar and consisted of fine α plates and a small amount of β phase. The micro-hardness of welded joint was "saddle shaped" distribution, and the micro-hardness of FZ is the highest. The failure location of the room temperature tensile specimens of EBW weldment is found to be in the BM region, so the tensile strength of FZ is stronger than BM.

Key words: Ti60 titanium alloy; plate thickness; electron beam welding; microstructure; mechanical property

Corresponding author: Chen Zhiyong, Ph. D., Associate Professor, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, P. R. China Tel: 0086-24-23971586, E-mail: zhiyongchen@imr.ac.cn