

Ti60/TC17 钛合金异材电子束焊接头的 显微组织及显微硬度分布特征

于冰冰¹, 陈志勇¹, 王清江¹, 刘建荣¹, 李晋炜²

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

摘 要: 研究 TC17 和 Ti60 异材钛合金电子束焊接头的显微组织和显微硬度分布特征。结果表明: 异材焊接接头的显微组织呈不均匀分布, 焊接接头熔合区中由大量针状 α' 相, 少量 α 相和 β 相组成, Ti60 的热影响区在焊接过程中发生了马氏体转变, 由针状的 α' 相+等轴 α 相和少量 β 相组成; TC17 的热影响区由针状 α' 相、等轴 α 相和亚稳 β 相组成。组织的不均匀分布导致焊接接头显微硬度分布不均匀, 熔合区中的硬度最高, TC17 的中热影响区中硬度最低。

关键词: Ti60 钛合金; TC17 钛合金; 异材电子束焊接; 显微组织; 显微硬度

中图分类号: TG146.2⁺3

文献标志码: A

Characteristics of microstructure and microhardness of Ti60/TC17 dissimilar joint welded by electron beam welding

YU Bing-bing¹, CHEN Zhi-yong¹, WANG Qing-jiang¹, LIU Jian-rong¹, LI Jin-wei²

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

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

Abstract: The microstructure and microhardness of dissimilar joint of a near α titanium alloy Ti60 and a β -rich, $\alpha+\beta$ titanium alloy TC17 were studied using electron beam welding technique. The results show that the microstructure is not uniform in different regions of the joint. The fusion zone is constituted of great amount of acicular α' phase, small amount of α phase and retained β phase. Martensitic transformation occurs in the heat-affected zone (HAZ) of Ti60 alloy, so the HAZ of Ti60 alloy is constituted of acicular α' phase, equiaxial α phase and small amount of β phase. The HAZ of TC17 titanium alloy is constituted of acicular α' phase, equiaxial α phase and metastable β phase. The microhardness of the joint distributes unevenly due to gradual microstructure of the joint. The microhardness of fusion zone (FZ) is the highest and the microhardness of the middle HAZ of TC17 is the lowest.

Key words: Ti60 titanium alloy; TC17 titanium alloy; dissimilar electron beam welding; microstructure; micro-hardness

钛合金具有优异的物理力学性能, 如密度低、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。钛合金在航空发动机上主要应用于轮盘、鼓筒及叶片等零件, 以减轻发动机的质量, 提高发动机的推重比, 达到改善发动机性能的目的。Ti60 钛合金是一种近 α 型高温钛合金, 长时服役温度可达到 600 °C。该合金具有优良的综合力学性能, 尤其是具有优异的蠕变和疲劳性能^[1]。TC17 钛合金是一

种富 β 稳定元素的亚稳 β 型(过渡型)两相钛合金, 该合金强度高、断裂韧性好、淬透性好和锻造温度范围宽, 能满足损伤容限设计的需要和高结构效益、高可靠性及低制造成本的要求, 最高工作温度为 427 °C^[2]。

根据 TC17 和 Ti60 钛合金的性能和服役温度特点, 两种钛合金主要用于我国高性能航空发动机不同温度区域的轮盘部件, 轮盘之间的连接拟采用电子束焊接的方式加以连接, 达到减轻质量的目的。目前国

内外文献中关于此两种钛合金之间的异材焊接工艺、焊接接头组织特征及其力学性能的研究还未见报道。因此, 较系统地研究异材焊接接头的组织特征及其演化情况, 同时研究异材焊接接头力学性能的影响因素, 可为以上两种材料的工程化应用提供必要的理论和实验指导。

1 实验

实验材料为 Ti60 和 TC17 钛合金锻件, 两种钛合金的化学成分见表 1。图 1 所示为两种合金焊前的显微组织。由图 1 可以看出, Ti60 和 TC17 钛合金的母材均为等轴 α 相和 β 相组成的双态组织, TC17 钛合金的组织比 Ti60 钛合金的组织细小得多。

表 1 Ti60 和 TC17 钛合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of Ti60 and TC17 titanium alloys

Alloy	Mass fraction/%								
	Al	Sn	Zr	Mo	Si	Cr	Nb	Ta	Ti
Ti60	5.6	4.0	3.2	0.4	0.4	—	0.4	0.4	Bal.
TC17	5	2	2	4	—	4	—	—	Bal.

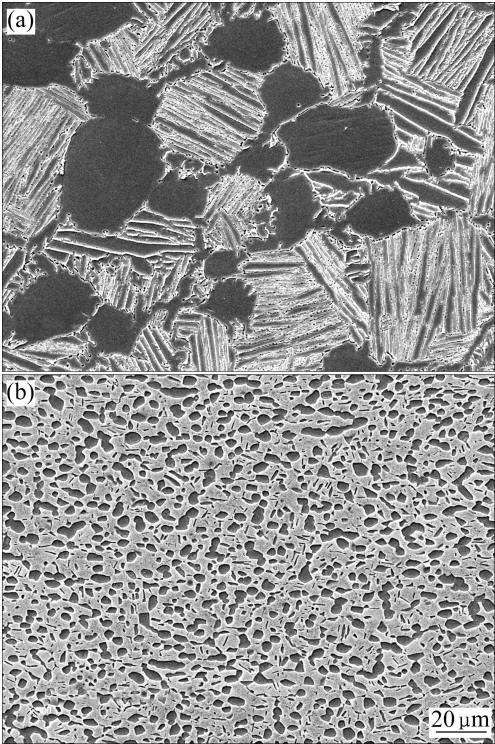


图 1 母材的显微组织
Fig. 1 Macrostructures of base metal: (a) Ti60 titanium alloy; (b) TC17 titanium alloy

在锻件上切取厚度为 10 mm 的试板进行电子束焊接实验, 电子束焊接采用国产高压真空电子束焊机, 型号为 ZD150-15C, 其最大加速电压为 150 kV、最大焊接电流为 200 mA、真空室容积为 81 m³。焊接前去除表面污物, 焊后取截面进行磨、抛、腐蚀, 观察焊缝的形貌。

2 结果与讨论

2.1 焊接接头的元素分布

对焊态条件的焊接接头进行电子探针扫描分析, 结果如图 2 所示。由图 2 可以看出, 焊接接头熔合区中主要合金元素成分介于两侧母材的成分范围之间, 且整个熔合区内成分呈均匀分布。

2.2 焊接接头的低倍组织

焊态条件下的 Ti60/TC17 钛合金异材电子束焊接接头低倍组织如图 3 所示。由图 3 可见, 焊接接头由熔合区(FZ)、热影响区(HAZ)和母材区(BM)组成。焊

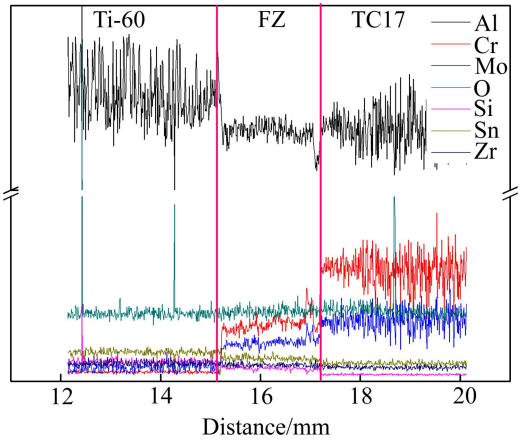


图 2 焊态焊接接头的成分分布
Fig. 2 Corresponding composition distribution across welding joint

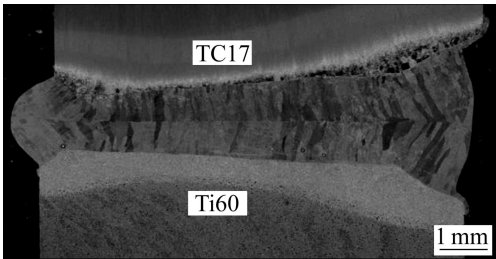


图 3 焊接接头的宏观组织
Fig. 3 Macrostructure in cross section of welding joint

接头熔合区的宏观形态呈“螺钉”形。焊缝熔合区组织由柱状晶(Columnar zone)和少量的等轴晶组成。熔合区的柱状晶以靠近焊缝熔池边缘呈半熔化状态的 β 晶粒作为晶核形核,并以“外延结晶”方式逆向散热最快的方向“竞争”生长^[3],柱状晶的生长一般终止于熔合区的中心线处。

2.3 焊接接头的显微组织特征

异材焊接接头的热影响区与同材焊接接头最大的不同在于两侧的母材化学成分和显微组织存在较大差异,两种合金的热影响区显微组织见图4。由图4可以看出,Ti60合金焊缝热影响区为由针状的 α' 马氏体相+等轴 α 相+ β 相组成的混合组织,这是由于在焊接热循环过程中,距离熔合区较远的热影响区边部和中

部热循环峰值温度相对较低,焊接过程中等轴 α 相不能完全溶解,在焊接快冷过程中,会发生由 β 相到 α' 马氏体相的转变^[4];熔合区附近的热影响区由于焊接热循环过程中在 β 相区停留时间较长,母材中的等轴 α 相可以充分溶解为 β 相,在随后的冷却过程中全部转变为针状的 α' 马氏体相(见图4(c));TC17合金一侧的热影响区在距离母材较远的远热影响区中未观察到明显的次生 α 相,为等轴 α 相+亚稳 β 相组织;随着离熔合区距离的减小,还可以观察到等轴 α 相边缘开始逐步溶解,此区域组织为等轴 α 相+少量针状 α' 相+亚稳 β 相组织;在靠近熔合区的近热影响区中,等轴 α 相基本完全溶解,此区域组织为大量针状 α' 相+亚稳 β 相组织。

焊接接头熔合区的柱状晶内部组织极细,在金相

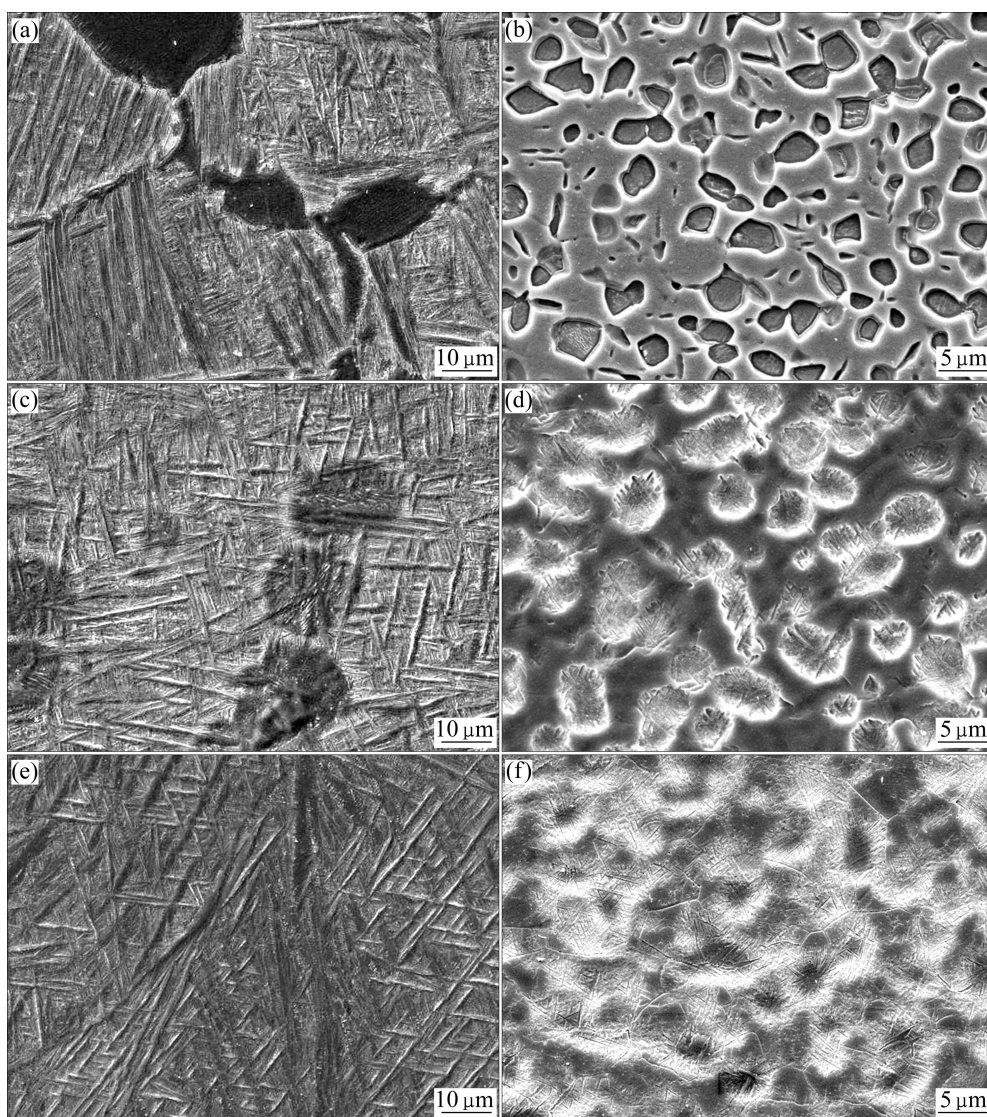


图4 不同合金热影响区的显微组织

Fig. 4 Microstructures of HAZ of different alloys: (a) Far-HAZ of Ti60 alloy; (b) Far-HAZ of TC17 alloy; (c) Middle-HAZ of Ti60 alloy; (d) Middle-HAZ of TC17 alloy; (e) Near-HAZ of Ti60 alloy; (f) Near-HAZ of TC17 alloy

显微镜下无法观察到组织细节。对熔合区进行 XRD (见图 5) 分析发现, 熔合区中主要由 α 相和 β 相组成, α 相和 α' 相的峰几乎是重合的, 无法区别 α 相和 α' 相。通过进一步的透射电镜观察可以看出, 柱状晶内部组织为细小的针状组织, 相邻的针状组织之间呈杂乱排列, 对针状组织区域进行选区电子衍射(见图 6)可知, 针状组织为 α 相或 α' 相, 针状板条之间为 β 相, 透射

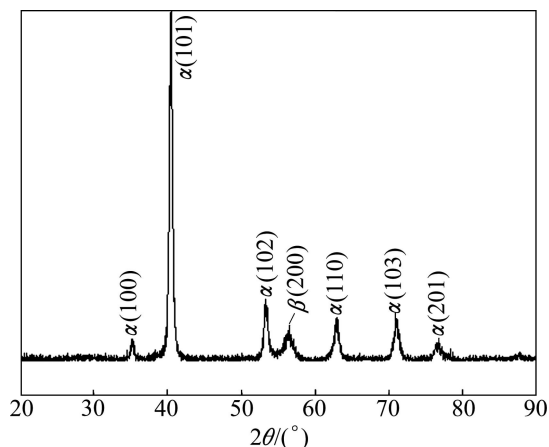


图 5 焊缝熔合区的 XRD 谱

Fig. 5 XRD pattern of FZ of welding seam

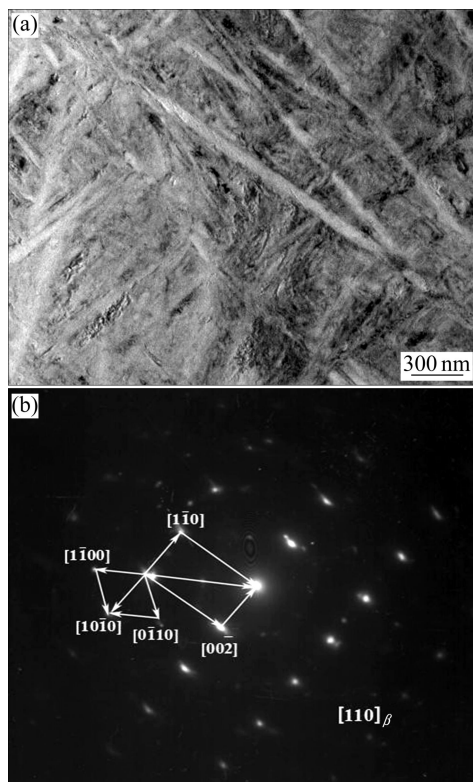


图 6 焊态条件下焊缝熔合区透射照片和选区电子衍射斑点

Fig. 6 TEM images of fusion zone (a) and selected area electron diffraction (b)

电镜下观察到的针状组织形貌和文献[6-7]中报道的 α' 相的形貌相似, 因此可以推断, 熔合区中以针状 α' 相为主, 另含有少量的 α 相和 β 相的混合组织。

2.4 焊接接头的硬度分布

图 7 所示为焊接接头从一侧母材到另一侧母材的显微硬度分布。由图 7 可知, 在焊态条件下, 焊接接头的显微硬度呈“马鞍”状分布, 熔合区硬度最高, 硬度在 400~420HV 之间; 从 Ti60 合金一侧的母材区开始, 随着离熔合区距离的减小, 硬度逐渐升高, 这是因为熔合区中分布着大量的马氏体 α' 相, 该组织的特点是硬度和强度高, 但塑性差^[6, 8-9]。TC17 合金一侧的热影响区的显微硬度呈“V”字形分布, 热影响区中部的显微硬度最低, 约为 310HV, 这是因为焊前该区域母材中弥散分布的次生 α 相在焊接热循环过程中全部溶解转变为 β 相, 然后在冷却过程中亚稳 β 相可以保存到室温而不发生分解(见图 4(d)), 最终该区域组织中由等轴 α 相和较软的 β 相^[10]组成。

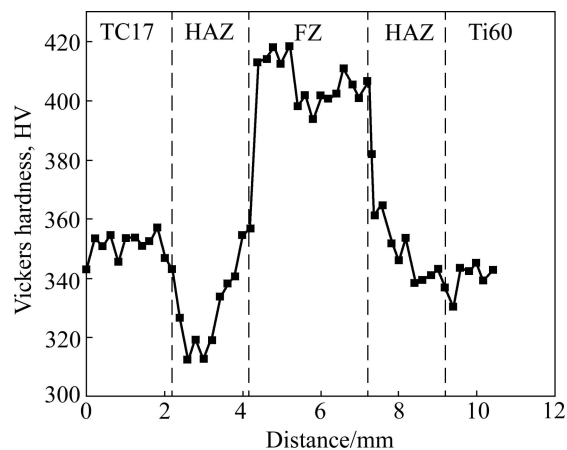


图 7 焊接接头横截面的显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distribution of cross section of welding joint

3 结论

1) TC17 与 Ti60 钛合金可以通过电子束的方法进行连接, 焊接接头成分分布均匀, 焊缝质量良好。

2) 焊缝熔合区由马氏体 α' 相、 α 相和 β 相组成, Ti60 合金一侧的热影响区由针状马氏体 α' 相、等轴 α 相和 β 相组成; TC17 一侧靠近母材区的组织为未溶解的等轴 α 相和亚稳 β 相构成, 靠近熔合区的热影响区中主要由针状 α' 相+亚稳 β 相组成。

3) 异材焊接接头的显微硬度呈不均匀分布, 熔合

区的显微硬度最高, Ti60 合金一侧的热影响区到母材区硬度值逐渐下降, TC17 合金一侧的热影响区, 由于次生 α 相的溶解, 热影响区中部出现硬度的最低值。

REFERENCES

- [1] 刘建荣. 时效对高温钛合金 Ti60 疲劳性能的影响[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2004.
- LIU Jian-rong. Effect of aging on fatigue properties of a high-temperature titanium alloy Ti60 [D]. Shenyang: Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册, 钛合金铜合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 15-59.
- Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China Aeronautical Materials Handbook. Titanium alloy and copper alloy [M]. Beijing: China Standards Press, 2002: 15-59.
- [3] KOU S. Welding metallurgy [M]. New York: John Wiley, 1987.
- [4] 陈智勇. Ti60 钛合金电子束焊接接头高温下失效与变形行为[J]. 金属学报, 2008, 44(3): 263-271.
- CHEN Zhi-yong. Failure and deformation behaviors of electron beam weldment of titanium alloy Ti60 at elevated temperature [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(3): 263-271.
- [5] BAOLISUOWA E A. 钛合金金相学[M]. 陈石卿, 译. 北京: 国防工业出版社, 1986: 1-467.
- BAOLISUOWA E A. Metallography of titanium alloys [M]. CHEN Shi-qing, transl. Beijing: Defence Industry Press, 1986: 1-467.
- [6] 周彦邦. 航空用钛合金[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 115.
- ZHOU Bang-yan. Aeronautical titanium alloys [M]. Shanghai: Shanghai Sciences and Technology Press, 1985: 115.
- [7] LEYENS C, PETERS M. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 100-101.
- LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys [M]. CHEN Zhen-hua, transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 100-101.
- [8] 邓安华. 钛合金的马氏体相变[J]. 上海有色金属, 1999, 20(4): 193-199.
- DENG An-hua. Martensitic transformation of titanium alloys [J]. Shanghai Nonferrous Metals, 1999, 20(4): 193-199.
- [9] 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- XU Zu-yao. Martensitic transformation and martensitic [M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [10] LI Wen-ya. Microstructure evolution and mechanical properties of linear friction welded Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr titanium alloy joints [J]. Advanced Engineering Materials, 2010, 12(1): 35-43.

(编辑 陈卫萍)