

TC4/TC17 电子束焊接接头组织及高温拉伸性能

王世清, 焦迎香

(西安石油大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对 TC4/TC17 异种钛合金开展电子束焊接研究, 并进行了高温 (400 °C) 拉伸试验。结果表明, 在焊接热循环作用下, 热影响区和焊缝组织与母材相比发生了显著变化, TC4 侧热影响区组织为马氏体, TC17 侧热影响区则是亚稳态 β 相, 焊缝处观察到粗大的柱状晶。由于是异种钛合金焊接, 因此两侧热影响区的硬度呈现出不同的趋势, 焊缝中心硬度最高。在 400 °C 下, 焊接接头的抗拉强度和屈服强度与 TC4 母材的相当, 但是延伸率与 TC17 母材基本一致。TC4/TC17 电子束焊接接头的断口表面存在尺寸较大, 少而浅的韧窝, 韧窝形状呈椭圆形。

关键词: 电子束焊接; TC4/TC17; 显微组织; 高温拉伸

中图分类号: TG442

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)07-2716-05

钛及钛合金在各种复杂工业中的广泛应用可归因于其具有高强度质量比、耐腐蚀性和高温强度的特性^[1-3]。钛合金 TC4 和 TC17 由于在高温下也具有良好的机械性能, 在航空航天整体叶盘的应用非常广泛。TC4 长时间工作温度可达 400 °C, 被用作航空发动机风扇和压气机盘、叶片等制造。TC17 能够满足损伤容限设计和高结构效益及低制造成本等要求, 主要用于航空发动机风扇、压气机盘件和大截面锻件^[4]。随着航空发动机推比(推力/密度)增大, 压气机出口温度不断提高, 盘心和盘缘温度差越来越大, 对不同位置的材料性能需求越来越趋于异化。TC4/TC17 异种钛合金组合结构件不仅可以解决不同位置材料异化需求, 而且还能减轻叶盘和叶片的质量, 从而有利于提高发动机工作效率, 可靠性得以进一步提升。但各国人员的研究多集中在同种材料的 TC4, TC17 钛合金^[5-8], 因此研究 TC4/TC17 异种钛合金的焊接还具有非常大的潜力。

异种钛合金的连接成为实现高结构完整性和使用性能的重要制造工艺^[9,10]。但由于异种钛合金材料特性如导热系数、热膨胀和弹性模量的不同, 在焊接过程可能会产生焊接接头界面处的不相容问题, 导致整个焊接接头的性能发生变化^[11]。因此, 本研究采用电子束焊接的方法, 研究叶盘常用 TC4/TC17 异种钛合金的组织及高温拉伸性能, 重点对接头的高温拉伸性能进行分析, 为 TC4/TC17 异种钛合金叶盘在航空航天方面的应用提供参考。

1 实验

实验所用材料为 TC4 和 TC17 钛合金板材, 供应状态是锻造处理, 试样尺寸为 100 mm×50 mm×10 mm。焊接试验设备采用国产 HDZ-15 型中压真空电子束焊机, 进行沿长度方向上的异种钛合金对接试验, 电子束焊接参数为加速电压 60 kV, 电子束流 30 mA, 聚焦电流 380 mA, 焊接速度 3 mm/s。焊后取接头金相试样分别通过研磨、抛光后, 使用 Keller 试剂 (12 mL HF, 36 mL HNO₃ 和 42 mL H₂O) 进行腐蚀。利用光学显微镜 (OM) 和扫描电镜 (SEM) 对焊接接头的不同区域组织和拉伸断口进行观察。使用显微硬度仪测量 TC4/TC17 异种钛合金电子束焊接接头不同位置的显微硬度, 压头载荷设置为 300 N, 保压时间设置为 10 s。

按照 GB/T228.2-2015《金属材料 拉伸试验 第 2 部分: 高温试验方法》制备标准高温试样, 焊缝位于高温拉伸试样的中心, 每组制备 3 个试样, 拉伸试样的形状和尺寸如图 1 所示; 利用 INSTRON 3382 电子万能材料试验机进行高温拉伸测试。其中, 高温拉伸试验的试验温度为 400 °C, 应变速率为 10⁻² s⁻¹。

2 结果及分析

2.1 显微组织分析

TC4 钛合金属于典型的 ($\alpha+\beta$) 双相钛合金^[12],

收稿日期: 2021-12-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51975469); 郑州机械研究所新型钎焊材料与技术国家重点实验室开放课题 (SKLABFMT-2019-04); 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室开放课题 (AWJ-22M09); 西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目 (YGS20213188); 西安石油大学青年科研创新团队 (2019QNKYCXTD11)

作者简介: 王世清, 女, 1980 年生, 博士, 副教授, 西安石油大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065, 电话: 029-88382607, E-mail: sqwang@xsyu.edu.cn

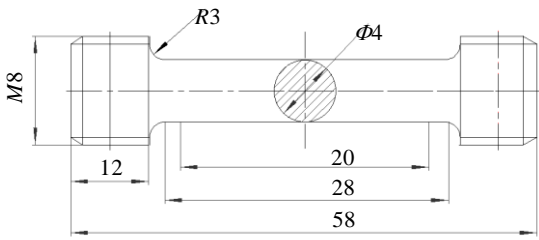


图 1 拉伸试样的形状和尺寸

Fig.1 Configuration and size of tensile specimens (mm)

TC4 母材 (BM) 显微组织如图 2a 所示, 从图中可以看出, TC4 母材的显微组织由片层状 $\alpha+\beta$ 相和等轴 α 相组成。TC17 钛合金为近 β 型钛合金, 不但具有 $\alpha+\beta$ 型钛合金的特点, 也具有 β 型钛合金的特点。图 2b 为 TC17 钛合金母材显微组织, 从图中可以看出, 层片状的 α 相均匀嵌入在 β 晶粒内部, 为典型的网篮组织^[13]。

由图 2c 可知, TC4 侧热影响区 (HAZ) 组织以马氏体为主, 这是因为在热影响区, 在焊接热循环的作用下, α 相和 β 相达到了相变温度, 转变成了高温的 β 相, 在随后的快速冷却过程中, 转变为马氏体。TC17 一侧热影响区如图 2d 所示, 可以观察到粗大的 β 相。在焊接时, TC17 一侧的 α 相和 β 相也转变成了高温的 β 相, 但此侧高温的 β 相并没有转变成马氏体, 这可能是由于 β 稳定元素使 β 相的转变温度降低, 因此在热源离开后, 在快速的冷却速度作用下, 高温的 β 相保留到了室温, 导致在 TC17 侧热影响区形成了粗大的 β 相。

TC4/TC17 电子束焊接接头焊缝区 (WZ) 组织如

图 2e 所示, 从图中可以看到焊缝处分布着粗大的柱状晶, 柱状晶内部组织是细小的马氏体, 如图 2f。从图中可以看出, 晶粒生长方向都是由两侧向焊缝中心生长, 这是因为熔池中存在一种现成表面, 即熔合区附近加热到半熔化的母材金属晶粒表面, 非自发晶核可以依附在这个表面上, 并以柱状晶的形态向焊缝中心生长, 形成联生结晶, 如图 2e 中框选部分所示。同时从图中还可以看出, 个别柱状晶甚至可以一直长至熔池的中心, 这是由于当晶体最易长大方向与散热最快速方向相一致时, 便可以择优长大, 一直长至熔池的中心, 形成粗大的柱状晶。

2.2 TC4/TC17 电子束焊接接头显微硬度分布

对 TC4/TC17 电子束焊接接头沿垂直于焊缝方向进行显微硬度测试, 2 个测量点的间距为 0.5 mm。TC4/TC17 钛合金电子束焊接接头显微硬度分布曲线如图 3 所示。由图 3 可知, TC17 母材硬度明显高于 TC4 母材硬度, 这可能是由于 TC17 中的合金元素比 TC4 中的略多一些, 因此 TC17 硬度高于 TC4。另外, TC17 的组织以网篮状的细小的 α 相和 β 相 (图 2b) 为主, 其晶界所占体积明显大于 TC4, 同时 TC17 中这些细小的组织及晶界会阻碍位错运动, 从而使 TC17 母材呈现高的硬度值。贺建超等人^[14]也从组织形态角度证实材料硬度的排序为: 网篮组织 > 等轴组织, 与硬度试验结果一致。

从图 3 可以看出, TC4 侧热影响区硬度随着距焊缝中心距离的增加逐渐降低, 并且 TC4 热影响区一侧的硬度平均值相比 TC4 母材的硬度平均值提高了约 21%, TC4 侧热影响区马氏体组织的存在是显微硬度

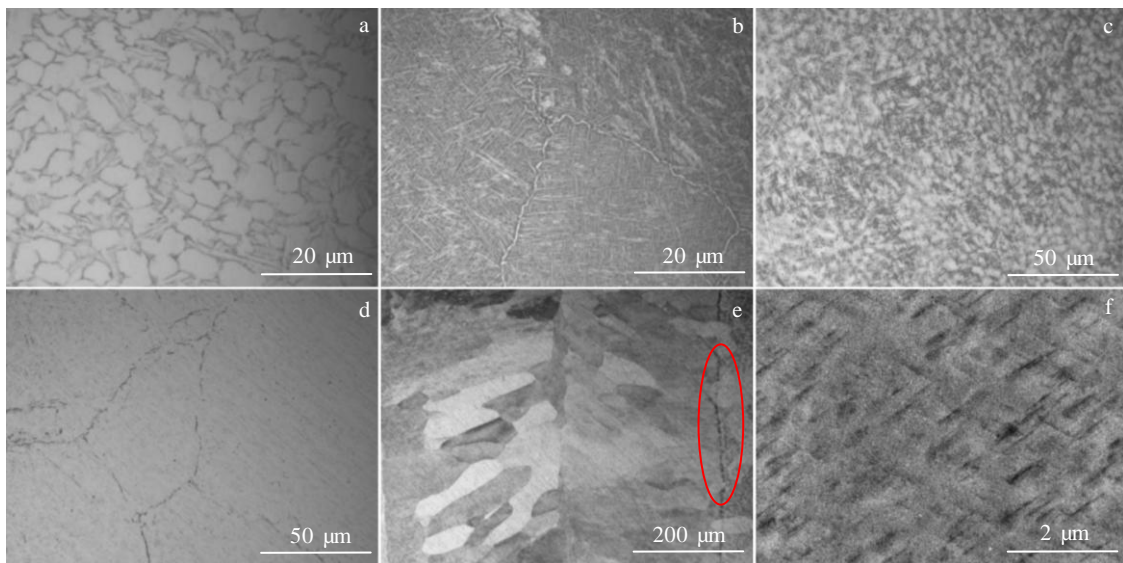


图 2 焊接接头组织形貌

Fig.2 Microstructures of welded joint: (a) TC4 parent metal; (b) TC17 parent metal; (c) TC4 heat affected zone; (d) TC17 heat affected zone; (e, f) weld zone

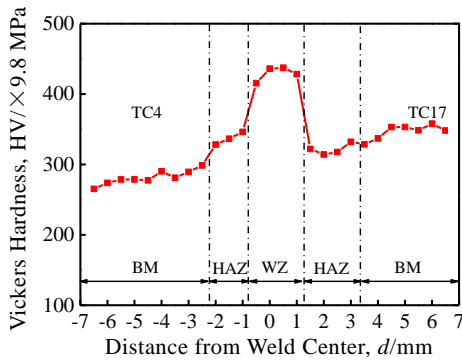


图 3 TC4/TC17 钛合金焊接接头显微硬度分布

Fig.3 Microhardness distribution of TC4/TC17 titanium alloy welded joint

提高的关键,如图 2c 所示。由于是异种材料的焊接,所以 TC17 侧热影响区的硬度变化趋势与 TC4 侧热影响区硬度变化趋势呈现出明显不同。TC17 侧热影响区硬度随着距焊缝中心距离的增加,先降低再升高。TC17 热影响区一侧的硬度平均值明显比 TC17 母材的硬度低,所以在此处产生了一个软化区,这主要归因于在 TC17 侧热影响区形成了粗大的 β 相,如图 2d 所示, β 相的硬度较低,因此在 TC17 侧出现了软化区。

由图 3 还可以看出,焊缝中心硬度最高,这是因为当焊接温度超过相变点时,焊缝区域在冷却时产生了细小的马氏体组织,如图 2f 所示,导致焊缝硬度增加。Xu 等人^[15]对 TC4/TA15 异质钛合金激光焊焊缝的力学性能进行研究时,也证实大量马氏体的存在会使焊缝的硬度值提高。此外,焊缝中心硬度分布均匀,说明异种钛合金焊接质量良好,焊缝完全熔透,使得焊缝区显微组织分布较均匀,硬度分布也均匀。

通过对焊接接头 3 个区域硬度值的分析,表明 TC4 母材的硬度最低,可以推测后续对焊接接头进行高温拉伸试验时,断裂位置可能在 TC4 母材一侧。

2.3 焊接接头高温拉伸性能分析

对 TC4、TC17 母材以及 TC4/TC17 电子束焊接接头进行了 400 °C 的拉伸性能测试。高温拉伸试验断裂位置如图 4 所示,焊缝区未遭到破坏,3 个焊接接头高温拉伸试件的断裂位置都是距离焊缝 8~12 mm 处 TC4 母材的一侧,这也与上节中对硬度的分析中推测出的断裂位置在 TC4 母材处相一致。这也表明 TC4/TC17 电子束焊接接头的高温强度高于 TC4 母材。

TC4 母材、TC17 母材和 TC4/TC17 接头的拉伸应力-位移曲线如图 5 所示。从图 5 可知,TC4 母材和 TC4/TC17 接头拉伸试验应力-位移曲线在弹性变形范围内的变化基本相同;TC4 母材、TC17 母材和其接头均呈现出光滑连续的拉伸应力-位移曲线,均具有良好



图 4 焊接接头高温拉伸试验断裂位置

Fig.4 Fracture position of welded joint in high temperature tensile test

的塑性阶段。和低碳钢典型的应力-应变曲线相比较,不具有上下屈服平台的特征,这是可能因为钛合金在屈服变形前其内部可动位错数量多,当应变速率一定,位错要开动时所需的切应力较均匀,所以没有观察到上下屈服平台。

TC4, TC17 母材以及 TC4/TC17 电子束焊接接头的高温拉伸性能如表 1 所示。结合图 5 及表 1,TC4 母材的抗拉强度和屈服强度平均值分别约为 572 和 461 MPa,TC17 母材的抗拉强度和屈服强度平均值分别约为 930 和 756 MPa,TC17 母材具有高强度主要归因于网篮的 α 相和 β 相的存在。一般硬度高的材料,其强度也高。对于 TC17 母材,细小的 α 相弥散分布在晶粒内部(图 2b),对位错滑移起到钉扎作用,因此大大提高了 TC17 母材的显微硬度和强度。TC4/TC17 异种材料焊接接头的抗拉强度和屈服强度平均值分别约为 578、482 MPa,与 TC4 母材相当。

金属材料的强度与塑性之间通常呈现出此消彼长的关系。TC4 母材的高温抗拉强度远低于 TC17 母材,但 TC4 母材的塑性却优于 TC17 母材;如表 1 所示,TC4 母材的延伸率和断面收缩率平均值分别约为 20.26% 和 40.53%,而 TC17 母材的延伸率和断面收缩

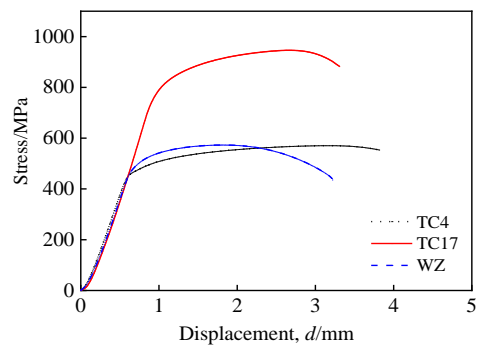


图 5 高温拉伸应力-位移曲线

Fig.5 Tensile stress-displacement curves at high temperature

表 1 接头及母材的高温拉伸性能

Table 1 Tensile properties of joints and base metal at high temperature

Material	Tensile strength, R_m /MPa	Yield strength, R_{eL} /MPa	Elongation, A /%	Reduction of section, Z /%
TC4	570.30	458.61	21.49	39.16
	575.74	463.67	21.08	45.24
	570.46	461.42	18.22	37.19
TC17	945.06	774.11	12.46	21.23
	928.22	747.72	13.74	29.44
	915.24	745.35	12.50	19.44
Joint	572.82	481.48	13.62	38.37
	584.66	481.76	15.52	35.59
	577.38	482.16	13.57	34.39

率平均值分别约为 12.9% 和 23.37%。TC4/TC17 接头的延伸率和断面收缩率平均值分别约为 14.24% 和 36.12%，延伸率与 TC17 母材的延伸率相当。高温拉伸试验结果与季亚娟等人^[16]的研究报道相类似。

从图 4 中可知，焊接接头高温拉伸试验的断裂位置在 TC4 母材的一侧，对拉伸断口进行金相观察。图 6 为高温拉伸断口横截面，从图 6a 中观察到靠近拉伸断口处的组织沿着轴向拉伸载荷方向被拉长，尤其是 α 相变得更加细长，表明 TC4 母材中的等轴 α 相发生明显的塑性变形，图 6b 中远离断口的 TC4 母材组织形状基本不变。

TC4 母材高温拉伸试验断口形貌如图 7a、7b 所示，观察到整个断口呈暗灰色，表面粗糙不平；在高倍下观察，发现断口表面分布着数量较多尺寸较大的

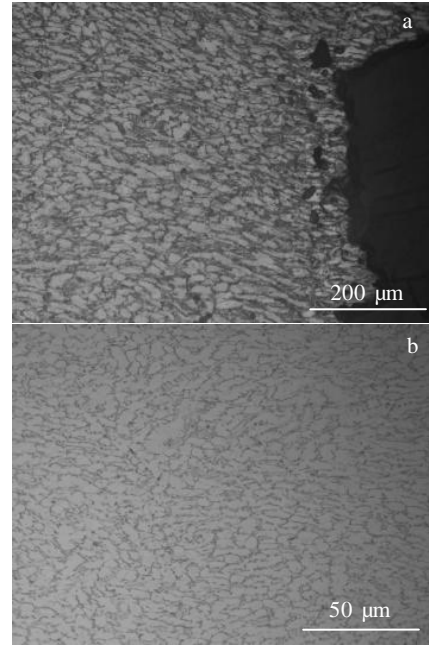


图 6 高温拉伸断口横截面

Fig.6 Tensile fracture cross section at high temperature: (a) close to the fracture and (b) keep away from the fracture

韧窝，表明此处塑性韧性良好。TC17 母材高温拉伸试验断口形貌如图 7c、7d 所示，可以看到整个断口相对平滑，如图 7d，进一步观察发现断口表面分布着大量不均匀、尺寸较小的韧窝，这是典型韧窝形态断裂面，属于韧性断裂的特征。图 7e、7f 为 TC4/TC17 电子束焊接接头高温拉伸断口形貌，从图 7e 中可以发现断裂面较为平整，图 7f 中的断口表面存在尺寸较大的韧窝，但数量较少深度较浅，韧窝形状呈椭圆形。

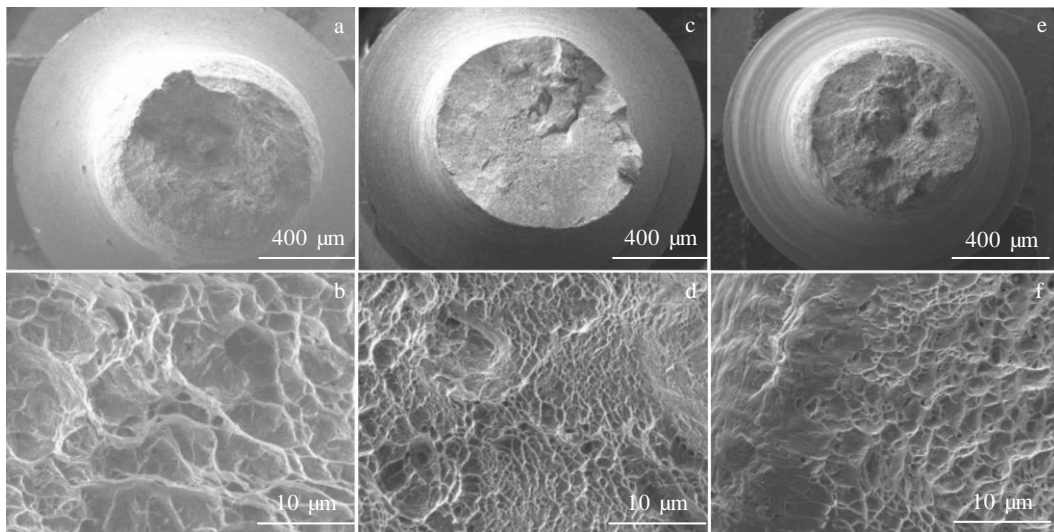


图 7 高温拉伸断口 SEM 形貌

Fig.7 SEM morphologies of tensile fracture at high temperature: (a, b) TC4 base metal, (c, d) TC17 base metal, and (e, f) joint

3 结 论

1) TC4/TC17 钛合金电子束焊接接头, TC4 侧热影响区存在大量的板条状马氏体, TC17 钛合金一侧热影响区则是亚稳态 β 相, 焊缝处观察到粗大的柱状晶。

2) 焊缝中心硬度最高。TC4 热影响区一侧的硬度 HV 值相比 TC4 母材的硬度值提高了约 21%。TC17 热影响区一侧的硬度 HV 值较 TC17 母材区域显微硬度有了明显下降, 表明 TC17 热影响区出现了软化区。

3) 在 400 °C 下, TC4/TC17 钛合金电子束焊接接头的抗拉强度 (578 MPa) 与 TC4 母材的抗拉强度 (572 MPa) 相比没有显著的变化。TC4/TC17 接头的延伸率与 TC17 母材的延伸率相当。

参考文献 References

- [1] Zhong Mingjun(钟明君), Wang Kelu(王克鲁), Lu Shiqing(鲁世强) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(6): 2149
- [2] Zhang Chuanchen(张传臣), Zhang Tiancang(张田仓), Liu Ying(刘颖). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2018, 39(5): 105
- [3] Huai Junfeng(淮军峰), Guo Wanlin(郭万林). *Welding & Joining*(焊接)[J], 2016(5): 57
- [4] Liu Ying(刘颖), Zhang Tiancang(张田仓), Li Jing(李晶) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2011, 31(1): 112
- [5] Liu H Q, Wang H M, Zhang Z *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 810: 151 937
- [6] Bu Wende(卜文德), Liu Rongguang(刘容光), Song Fengtao(宋锋涛) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2017, 38(9): 102
- [7] Liang S, Li J H, Zhang Q *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2021, 30(4): 2967
- [8] Wang Ke(王可), Zhao Yongqing(赵永庆), Jia Weiju(贾蔚菊). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(2): 552
- [9] Zhao P K, Fu L. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2020, 29(4): 2061
- [10] Yeganeh V E, Li P. *Materials & Design*[J], 2017, 124(6): 78
- [11] Weiss L, Zollinger J, Sallamand P *et al. Welding in the World*[J], 2019, 63: 53
- [12] Chowdhury S, Yadaiah N, Muralidhar M *et al. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*[J], 2021, 43(3): 173
- [13] Chang Chuanchuan(常川川), Li Ju(李菊), Li Xiaohong(李晓红). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(10): 3771
- [14] He Jianchao(贺建超), Zhang Tiancang(张田仓), Ji Yajuan(季亚娟) *et al. Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2016, 37(1): 185
- [15] Xu Weifeng, Zhang Zhenlin. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(12): 3135
- [16] Ji Yajuan(季亚娟), Liu Yanbing(刘燕冰), Zhang Tiancang(张田仓) *et al. Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2012, 33(10): 1

Microstructure and High Temperature Tensile Properties of TC4/TC17 Electron Beam Welded Joints

Wang Shiqing, Jiao Yingxiang

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Electron beam welding was carried out on TC4/TC17 dissimilar titanium alloy, and tensile tests were carried out at 400 °C. The results show that the microstructure of the heat affected zone (HAZ) and the weld are significantly different from that of the base metal. The microstructure of the HAZ on TC4 side is martensite, and the microstructure of the HAZ on TC17 side is metastable β phase, and coarse columnar crystals are observed at the weld. Due to the dissimilar titanium alloy welding, the hardness of the heat affected zone on both sides presents different trends, and the hardness is the highest in the center of the weld. At 400 °C, the tensile strength and yield strength of welded joints are similar to those of TC4 base metal, but the elongation of welded joints is basically the same as that of TC17 base metal. There are few and shallow dimples with large size on the fracture surface of TC4/TC17 electron beam welding joint, which are oval in shape.

Key words: electron beam welding; TC4/TC17; microstructure; high temperature tensile

Corresponding author: Wang Shiqing, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, P. R. China, Tel: 0086-29-88382607, E-mail: sqwang@xsyu.edu.cn