

TC2 钛合金焊接接头组织与疲劳断裂性能研究

回 丽^{1,2}, 谢里阳¹, 刘建中³, 何雪¹, 曹志韬¹

(1. 东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 沈阳航空工业学院 机械工程系, 辽宁 沈阳 110034; 3. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 通过金相、硬度、拉伸以及疲劳实验, 分析了 TC2 钛合金焊接接头显微组织结构、硬度分布规律及拉伸、疲劳性能, 并综合疲劳断口特征, 进一步分析了焊接接头光滑试样的疲劳性能与影响因素。结果表明, 焊缝区为 $\alpha + \alpha'$ 相的魏氏组织, 热影响区为 $\alpha + \alpha' +$ 少量 β 相的魏氏组织, 母材为 $\alpha + \beta$ 相的等轴组织。焊缝区的硬度高于母材 50HV, 塑性较差, 由于焊缝内几何不连续缺陷的存在使其疲劳性能较低; 热影响区的硬度较低, 塑性较好, 其拉伸强度是焊接接头部位的最薄弱区, 但却有较好的疲劳性能。

关键词: 钛合金; 焊接接头; 显微组织; 性能

中图分类号: TG454

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2004)03-0048-04

为减轻飞机的重量, 人们从结构材料和制造工艺两个方面进行了不断的探索。传统的铝合金占飞机总重量的比例不断减小, 而具有更高比强度和热加工性能的钛合金的比例不断提高, 如 F-16 飞机钛合金材料只占重量的 3%, 而 F-22 飞机的钛合金已达到重量的 30% 以上。由于钛合金具有良好的焊接性能, 其制造工艺也由原来的铆接为主, 发展为可明显降低结构重量的焊接工艺。作为承受交变载荷的结构材料, 其疲劳性能是人们极为关注的, 为此研究者们对各种类型钛合金的疲劳性能进行了大量研究^[1~5]。然而, 焊接是一个复杂的热物理化学冶金过程, 造成了焊接接头部位材料组织和性能的不均匀性, 而使焊接结构的抗疲劳性能不佳, 70% ~ 80% 的焊接结构失效源于焊接接头的疲劳断裂。因此, 研究焊接接头的性能及其影响因素, 对指导某些焊接构件的制备和防疲劳断裂, 具有十分重要的理论意义和工程价值。本文以 TC2 钛合金焊接接头为研究对象, 针对焊接接头的组织和性能进行了系统实验研究。思路为: 显微组织—拉伸性能、显微硬度—疲劳性能。

1 实验方法

试样制备: 实验用材料为 2.5mm 厚度的 TC2 钛合金冷轧板材, 退火状态。其化学成分

(wt%) 为: Al 4.09, Mn 1.66, Fe < 0.10, Si < 0.10, Zr < 0.05, C < 0.005。将 TC2 钛合金板材进行手工钨极氩弧对焊, 焊缝方向垂直于母材的轧制方向; 焊接按 HB/Z120-87 标准进行, 450V 形坡口单层焊接, 氩气导入量 8~12mL/min, 焊接电压 10V, 焊接电流 85A, 焊接速度 12~14mm/min。焊缝质量满足 HB5376-87 标准(I 级), 焊接后真空退火热处理。真空热处理温度 560℃, 保温时间 3h。铣平焊高, 按照 GB3075-82 制成焊接光滑疲劳试样, 实验前试样表面抛光, 并用 5HF% + 10% HNO₃ + 85% H₂O 溶液蚀刻, 以显示焊接接头的焊缝、热影响区等区域。同时制取焊接接头金相试样, 以观测焊接接头不同部位的组织。

主要检测设备: S360 扫描电镜; MTS810 材料性能试验机; 10t Schenck 疲劳试验机。

2 结果与分析

2.1 显微组织

试样表面经蚀刻后可以看出, 焊接接头分为焊缝区、熔合区(线)、热影响区和母材区, 如图 1 所示。焊缝中的晶粒粗大, 是因为所采用的焊接速度较低, 高温停留时间较长, 从而使晶粒充分长大; 又由于材料自身的传热性能较差, 使热影响区的尺寸较宽, 与焊缝距离不同的位置所受热循环的影响不同, 出现了热影响区的梯度组织结构。

图 2 为 SEM 下焊缝及热影响区的典型显微组织, 图 2(a) 显示了焊缝中的魏氏组织结构, 及其晶内 α 丛、片状马氏体 α' 组织; 图 2(c) 显示了

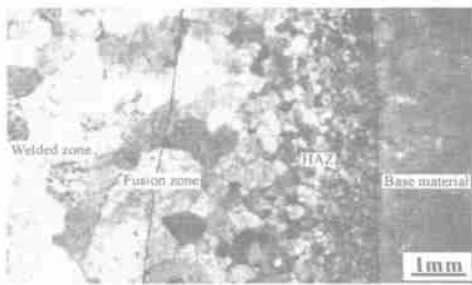


图 1 焊接接头宏观形貌

Fig. 1 Macro-appearence of welded joints

热影响区中的魏氏组织结构及晶内针状 $\alpha + \beta$ 组织。

综合焊缝、热影响区 SEM 显微组织形貌照片、X 射线衍射谱以及电子探针元素线扫描图像,并结合钛合金焊接金相图谱^[6]进行分析表明热影响区、熔合区、焊缝的化学成分分布较均匀;焊缝区晶粒粗大最大可达 $900\mu\text{m}$,晶内组织为 α 丛 + α' ;在热影响区,由焊缝边界至熔合线,晶粒尺寸由 $40\sim 400\mu\text{m}$ 均匀变化,为 $\alpha + \alpha' +$ 少量 β 的魏氏组织晶粒。

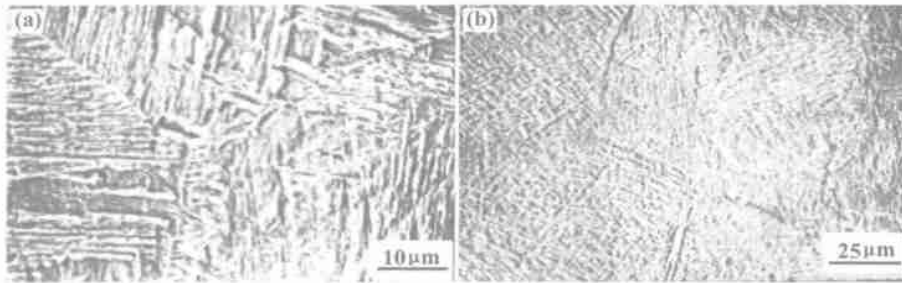


图 2 焊接接头显微组织(SEM) (a) 焊缝区典型显微组织;(b) 热影响区显微组织

Fig. 2 SEM micrographs of welded joints (a) Microstructure of the weld; (b) Microstructure of the HAZ

2.2 静态性能

沿垂直于焊缝方向测得典型焊接接头显微硬度分布曲线如图 3;曲线表明:最高硬度发生在焊缝粗大晶粒区,其值约比母材高 50HV。即焊缝处将有较高的强度和变形阻力。而热影响区硬度相对较低;热影响区中,在熔合区以及焊接边界附近,硬度值最低,且呈不稳定变化趋势,说明这个

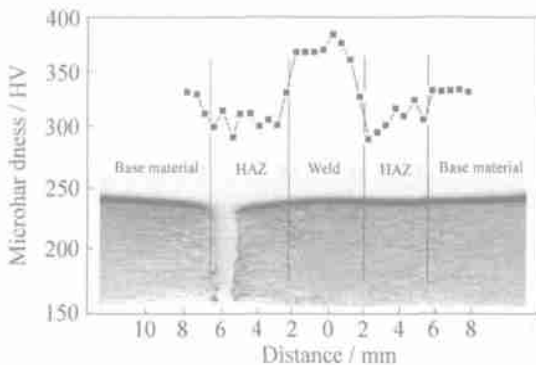


图 3 焊接接头显微硬度分布曲线与拉伸断裂试样对比

Fig. 3 Comparison of microhardness and tensile fracture appearance of welded joints

部位可能是焊接接头强度的最薄弱区;因此可以推断,焊缝的强度较高,热影响区的强度是焊接接头的最薄弱区。

为了确定焊接接头的强度极限、断裂区域以及焊接接头不同区域的性能差异,并为进一步的疲劳全寿命实验提供加载依据,进行了光滑疲劳试样的拉伸实验。试样拉伸后的变形与断裂情况如图 3。可以看出,焊接试样拉伸的主要变形区域在热影响区及其邻近的母材部位,断裂部位在焊接接头边界并偏向热影响区。拉伸结果如表 1,可以看出,焊接接头与母材相比,强度无明显变化,但焊接接头的延伸率下降了约 8%,这主要是由于焊缝中出现粗大晶粒组织结构,使焊接接头塑性降低。

2.3 疲劳全寿命试验

采用焊接光滑试样进行了疲劳全寿命试验(共 12 个试样),室温环境,单轴拉-拉正弦波加载,最大应力为 680MPa ,应力比为 0.1,加载频率为 10Hz 。

试验结果如表 2 所示,10 个有效试样中,8 个试样在焊缝处断裂,2 个试样在母材处断裂;图 4

表 1 拉伸试验数据

Table 1 Data of tensile test

Specimen	σ_0 / MPa	σ_t / MPa	$\delta / \%$
Welded joint	730	827	10.5
Base material	756	825	18.75

所示为二个典型焊接试样断裂的宏观断裂形貌, S7 试样在焊缝处断裂, BS2 试样在母材处断裂。可以推断热影响区部位的疲劳性能优于母材和焊缝。

为进一步分析焊接接头的疲劳性能, 了解疲劳断裂原因及其影响因素, 在 S360 扫描电镜下对全部疲劳断裂试样进行了断口分析, 图 5 为典型的断口 SEM 图像。

综合所有断口可以看出, 源区低倍断口特征均为以气孔为中心向四周辐射的放射花样, 说明焊缝的裂纹起源于焊缝内微小几何不连续缺陷,

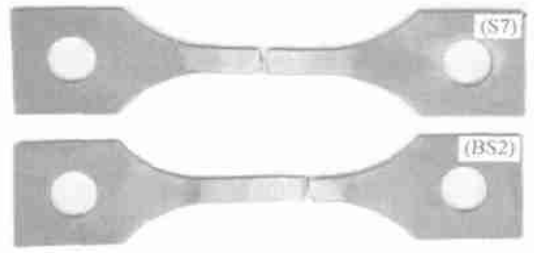


图 4 试样 S7, S2 宏观断裂形貌

Fig. 4 Fracture morphologies of welded samples No. S7(fracture at weld), BS2(fracture at base material)

表 2 焊缝试样疲劳试验结果

Table 2 The fatigue life of the weld and base material

Specimen	S5	S7	S4	S9	S3	S12	S2	S11	BS2	BS4
Fatigue life/ 10^4 cycle	1.535	3.130	4.291	4.315	4.826	4.902	4.993	4.998	11.074	11.625

Note: S× —fracture in the weld; B× —fracture in the base material.

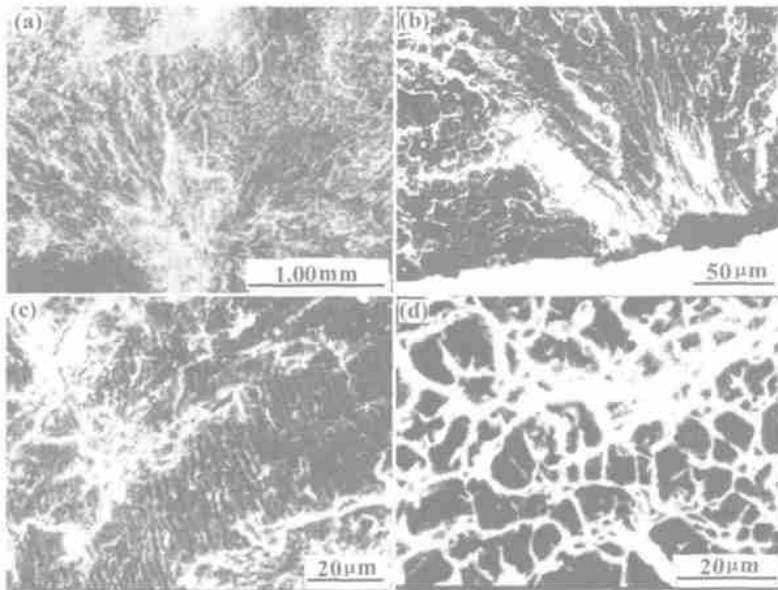


图 5 疲劳断口 SEM 图像 (a) 气孔疲劳源; (b) 表面疲劳源; (c) 疲劳扩展区辉纹; (d) 瞬断区

Fig. 5 SEM fractographs (a) (b) Fatigue origins; (c) Fatigue striations associated with crack growth (d) characteristic of fracture at the point of fatigue failure

这种缺陷用 X 光探伤检查不易发现, 图 5(a) 所示为 S12 试样疲劳源区低倍 SEM 图像。

母材区域断裂的试样, 疲劳源位于试样棱边和表面, 图 5(b) 为典型的表面疲劳源断口特征图像 (BS2 试样), 可以看出疲劳源是由疲劳过程中滑移的挤出和挤入所形成的, 而且寿命远高于有气孔缺陷的试样。全部断裂试样扩展区的微观断

口特征, 均显示在扩展区有疲劳辉纹, 并伴有大量的二次裂纹, 如图 5(c)。全部断裂试样瞬断区的微观断口均呈现等轴韧窝断裂特征, 如图 5(d)。

3 结 论

(1) TC2 钛合金氩弧焊焊接可以得到化学成分分布均匀的焊接接头; 焊缝区为 $\alpha + \alpha'$ 相的魏氏

组织,最大晶粒尺寸达 $900\mu\text{m}$;热影响区为 $\alpha + \alpha'$ + 少量 β 相的魏氏组织,晶粒尺寸由 $40\sim 400\mu\text{m}$ 均匀变化。

(2) 焊接接头在焊缝区的硬度约高于母材 50HV,塑性较差。热影响区硬度较低,塑性较好,其拉伸强度是焊接接头的最薄弱区,但却有优于焊缝和母材的疲劳性能。焊接接头的延伸率比母材低 8%,屈服强度值略低于母材,极限强度值与母材相当。

(3) TC2 钛合金焊接接头光滑试样的疲劳断裂多起源于焊缝内表面缺陷;外表面起源试样的寿命明显长于表层下起源断裂,断裂发生在母材区域。

参考文献:

[1] SOBOYEJO W O, MERCER C, LOU K, et al. Investigation of the fatigue and fracture behavior of Mn-containing gamma titanium aluminides[J]. Metall and Mater

ter Trans(A), 1995, 26: 2275- 2291.

- [2] SUGANO Mikio, TSUCHIDA Yasuo, SATAKE Tadaaki, et al. Microstructural study of fatigue fracture in titanium-molybdenum alloys[J]. Mater Sci Engng(A), 1998; 243: 163- 168.
- [3] WANG S H, MUELLER C. Study on the change of fatigue fracture mode in two titanium alloys[J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 1998, 21: 1077- 1087.
- [4] IMAM M A, CHU H P, RATH B B. Fatigue properties of titanium alloy Ti-6Al-4V-0.8Mo[J]. Mater Sci Engng(A), 2002, 323: 457- 461.
- [5] JINKEUN Oh, NACK J Kim, SUNGHAK Lee, EUI W Lee. Correlation of fatigue properties and microstructure in investment cast Ti-6Al-4V welds Mater. Sci Engng (A), 2003, 340: 232- 242.
- [6] 中国机械工程学会 焊接学会. 焊接金相图谱[M]. 机械工业出版社, 1987. 7: 404- 427.
- [7] 崔约贤, 王长利. 金属断口分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998. 4: 151- 212.

Study on microstructure and fatigue fracture properties of TC2 titanium alloy welded joints

HUI Li^{1,2}, XIE Liyang¹, LIU Jianzhong³, HE Xuehong¹, CAO Zhitao¹

(1. Mechanical Engineering and Automation College, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Shenyang Institute of Aeronautical Industry Shenyang 110034, China; 3. Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The microstructure, microhardness, tensile and fatigue properties of TC2 titanium alloy welded joints were investigated. The results show that the welded joints do not have not uniform microstructure and properties. The weld is composed of weave structure with lamellar colonies and existence of martensite α' phases. The HAZ is composed of weave structure with needle α, α' and β phases. The base material is composed of equiaxed structure with α and β phases. The microhardness of the weld is the highest, about 50HV more than that of the base material while the plasticity poorer, The defects in the weld can not be eliminated, which are the main factor affecting the fatigue life. The microhardness and tensile strength of the HAZ is the lowest whereas the plasticity and fatigue property is the best.

Key words: titanium alloy; welded joints; microstructure; property