

# Ti-Al-Fe 低成本钛合金 TIG 焊焊接组织和性能研究

田喜明<sup>1</sup>, 卫娜<sup>2</sup>, 周中波<sup>2</sup>, 张利军<sup>2</sup>, 张晨辉<sup>2</sup>

(1. 海军装备部, 陕西 西安 710021)

(2. 西安西工大超晶科技发展有限公司, 陕西 西安 710200)

**摘要:** 研究了 Ti-Al-Fe 低成本钛合金钨极氩弧焊焊接接头的内部质量、组织和力学性能, 并与 TC4 钛合金进行了比较。结果表明, Ti-Al-Fe 低成本钛合金焊缝表面质量良好, 焊缝内部融合良好, 无焊接缺陷, 可焊性好; 2 种合金的焊缝区宏观组织均由粗大的柱状晶和少量等轴晶组成, Ti-Al-Fe 合金柱状晶组织较细, 晶内由针状次生  $\alpha$  相和少量的长条状初生  $\alpha$  相组成; 2 种合金热影响区均为粗大的等轴晶, 晶内由大量初生  $\alpha$  相和少量针状次生  $\alpha$  相及残余  $\beta$  相组成; Ti-Al-Fe 低成本钛合金焊缝抗拉强度达到 1 204 MPa, 比 TC4 钛合金高 111 MPa。

**关键词:** 低成本钛合金; 钨极氩弧焊; 焊接组织; 焊接性能

中图分类号: TG457.19; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2020)05-023-04

## Study on Microstructure and Properties of Ti-Al-Fe Low Cost Titanium Alloy by TIG Welding

Tian Ximing<sup>1</sup>, Wei Na<sup>2</sup>, Zhou Zhongbo<sup>2</sup>, Zhang Lijun<sup>2</sup>, Zhang Chenhui<sup>2</sup>

(1. Naval Equipment Department, Xi'an 710021, China)

(2. Xi'an Super Crystal Sci-Tech Development Co., Ltd., Xi'an 710200, China)

**Abstract:** The internal quality, microstructure and mechanical properties of the welded joint by TIG welding of Ti-Al-Fe low cost titanium alloy are studied, and are compared with TC4 titanium alloy. The results show that the surface quality, the internal fusion and the weld-ability of the Ti-Al-Fe low cost titanium alloy weld is better, and there is no welding defect. The macrostructure of the weld zone is coarse columnar crystal and a small amount of equiaxed crystal, and the columnar crystal structure of Ti-Al-Fe low cost titanium alloy is finer. The microstructure is composed of acicular secondary  $\alpha$  phase and a small amount of elongated primary  $\alpha$  phase, and the acicular secondary  $\alpha$  phase of TC4 titanium alloy is finer. The heat affected zone (HAZ) is coarse equiaxed crystal, and the microstructure is consists of a large number of primary  $\alpha$  phase, a small amount of acicular secondary  $\alpha$  phase and residual  $\beta$  phase. The tensile strength of Ti-Al-Fe low cost titanium alloy weld reaches 1 204 MPa, which is 111 MPa higher than that of TC4 titanium alloy.

**Key words:** low cost titanium alloy; TIG welding; welding microstructure; welding performance

钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀性好、耐高温以及良好的焊接性, 在航空航天等领域得到了广泛应用<sup>[1,2]</sup>。但是与铝、镁等合金相比, 较高的原材料成本和加工成本对钛合金材料大范围的推广使用产生了不利的影响。因此, 发展低成本钛合金材料成为国内外钛工业领域研究的重要方向。低成本的实现一方面通过采用廉价元素降低原料成本,

另一方面通过改进生产工艺, 降低加工成本<sup>[3,4]</sup>。

低成本钛合金材料的研发有望进一步扩大钛及钛合金在化工、兵器、汽车、体育等领域的应用<sup>[5]</sup>。在低成本钛合金材料的设计开发过程中, 除了成本的控制和力学性能的提高, 其焊接性能也是在推广应用过程中需要考虑的重要问题。低成本钛合金材料与传统钛合金材料一样化学性质活泼, 极易与空气中的氧、氮、氢等元素发生反应, 形成内部气孔等焊接缺陷<sup>[6-9]</sup>, 焊缝表面也极易发生氧化<sup>[10,11]</sup>。

此外,低成本钛合金导热性相对较差,焊接过程中易产生裂纹,焊接试片易发生变形,导致焊接接头力学性能不能满足要求。

本文对 Ti-Al-Fe 低成本钛合金的焊缝内部质量、焊接组织和性能进行研究,并与 TC4 钛合金的焊接性能进行对比。以期初步掌握 Ti-Al-Fe 低成本钛合金的焊接性能,加快该合金的推广应用步伐。

## 1 实验

实验材料为采用铝豆、TiFe70、海绵钛等原材料通过 2 次真空自耗电弧熔炼制备而成的 Ti-Al-Fe 低成本钛合金。为便于评价该合金的焊接性能,选择常见的 TC4 钛合金进行对比。表 1 为 Ti-Al-Fe 低成本钛合金和 TC4 钛合金母材的化学成分。

表 1 Ti-Al-Fe 低成本钛合金和 TC4 钛合金母材化学成分 ( $w/\%$ )

Table 1 Chemical compositions of Ti-Al-Fe low cost alloy and TC4 titanium alloy base metal

| Alloy    | Al   | V    | Fe   | O    | Ti   |
|----------|------|------|------|------|------|
| Ti-Al-Fe | 6.15 | —    | 3.41 | 0.17 | Bal. |
| TC4      | 6.02 | 4.03 | —    | 0.25 | Bal. |

焊接试片厚度为 10 mm,开双 V 型坡口,钝边为 2 mm。焊丝与母材同牌号,规格为  $\phi 3.0$  mm。焊接前对焊接试片和焊丝进行表面清理,表面无氧化、夹杂、油污等,并对试片进行 150 °C/30 min 预热。焊接试验采用钨极氩弧焊(TIG 焊)。焊接时先将焊接试片两端进行点焊定位后,再用夹具固定焊接试片的 4 个角以防止焊接后变形。通入氩气后,依次进行打底焊、双面填充焊和盖面焊,焊接工艺参数如表 2 所示。

表 2 TIG 焊焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters of TIG welding

|                 | Argon flow rate<br>/L·min <sup>-1</sup> | Welding current<br>/A | Welding speed<br>/mm·min <sup>-1</sup> |
|-----------------|---|-----------------------|--|
| Backing welding | 8 ~ 10                                  | 80 ~ 100              | 100                                    |
| Filling welding | 8 ~ 10                                  | 120 ~ 150             | 100                                    |
| Cover welding   | 8 ~ 10                                  | 120 ~ 150             | 100                                    |

采用 XH2515 型 X 射线探伤机对焊缝进行缺陷检测,观察焊缝内部质量。垂直焊缝切取金相试样,经磨光、抛光、腐蚀(腐蚀剂采用体积比为 1:3:6

的 HF、HNO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O 的混合液)后,用肉眼及 OLYMPUS GX41 光学显微镜分别观察焊缝区域的宏观组织和显微组织。根据 GB/T 2649《焊接接头性能试验取样方法》垂直焊缝切取拉伸试样,然后按照 GB/T 2651《焊接接头拉伸试验方法》进行焊缝拉伸性能测试。

## 2 结果与分析

### 2.1 焊缝表面和内部质量

图 1 为 Ti-Al-Fe 低成本钛合金和 TC4 钛合金焊接后的焊缝形貌。从图 1 可以看出,焊缝表面颜色均为银白色,焊缝形状为分布整齐的鱼鳞纹状,宽度约为 15 mm。X 射线检测结果显示,焊缝内部融合完全,且无气孔、裂纹、夹杂等焊接缺陷,如图 2 所示。这表明 Ti-Al-Fe 低成本钛合金与 TC4 钛合金的可焊性相当,具有良好的可焊性能。

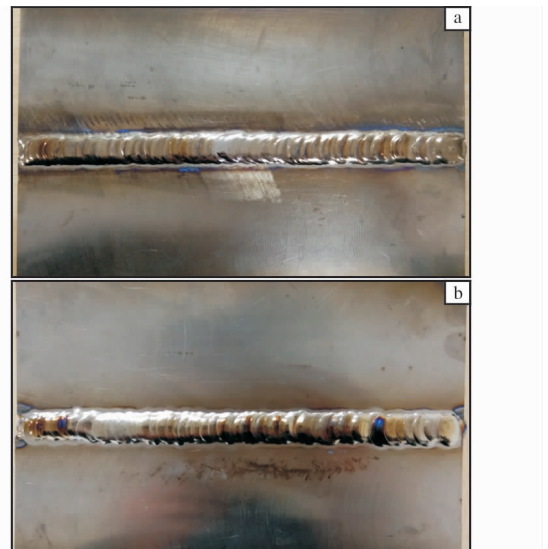


图 1 焊接试样的焊缝形貌

Fig. 1 Weld morphologies of welding specimens: (a)Ti-Al-Fe low cost titanium alloy; (b)TC4 titanium alloy

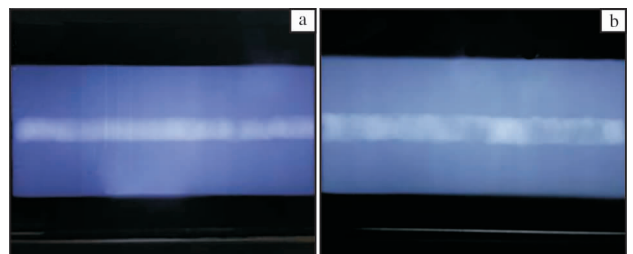


图 2 焊缝 X 射线检测结果

Fig. 2 X-ray test results of weld seam: (a)Ti-Al-Fe low cost titanium alloy; (b)TC4 titanium alloy

### 2.2 焊接组织

图3为Ti-Al-Fe低成本钛合金及TC4合金焊接接头的宏观组织。从图3可以看出,焊接接头分为焊缝区、热影响区(HAZ)和母材区。焊缝区域组织均由柱状晶组织(如图中方框所示)和少量的等轴晶(如图中椭圆所示)组成。柱状晶组织是由于焊缝金属在凝固过程中沿温度梯度方向垂直于熔合线向焊缝中心生长形成的。等轴晶是由于多层焊接时,后一层焊缝对前一层焊缝进行加热,发生相变再结晶,从而使内部柱状晶消失,形成细小等轴晶。从图3还可以看出,Ti-Al-Fe低成本钛合金柱状晶组织比TC4钛合金的组织细小。热影响区中等轴晶的形成是受焊接过程加热和冷却的循环作用,加热达到相变点以上时晶粒长大,冷却过程中由于向四周的散热条件一致,最终形成等轴晶。

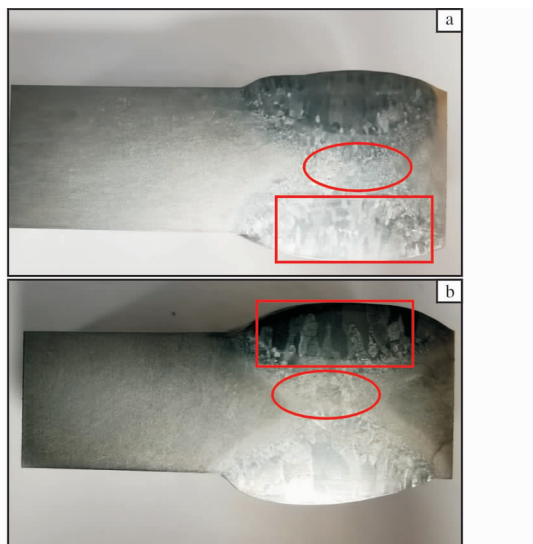


图3 焊接接头宏观形貌

Fig. 3 Macrostructures of welded joints: (a)Ti-Al-Fe low cost titanium alloy; (b)TC4 titanium alloy

图4为Ti-Al-Fe低成本钛合金和TC4钛合金焊缝区微观组织照片。从图4可以看出,焊缝区域晶粒尺寸粗大,可以观察到明显的晶界。Ti-Al-Fe低成本钛合金和TC4钛合金焊缝区域的组织均是由大量的针状次生 $\alpha$ 相和少量的初生长条状 $\alpha$ 相组成,TC4钛合金针状次生 $\alpha$ 相比Ti-Al-Fe低成本钛合金细且密。

图5为Ti-Al-Fe低成本钛合金和TC4钛合金热影响区及基体微观组织。从图5可以看出,二者基体组织均由初生 $\alpha$ 相、次生 $\alpha$ 相及残余 $\beta$ 相组成的。焊接热影响区组织由大量初生 $\alpha$ 相和少量针状次生

$\alpha$ 相及残余 $\beta$ 相组成,这是由于热影响区温度较低,相变未能完全进行,有大量的初生 $\alpha$ 相保留下来,在冷却过程中,从 $\beta$ 相中开始分解出少量的针状次生 $\alpha$ 相。

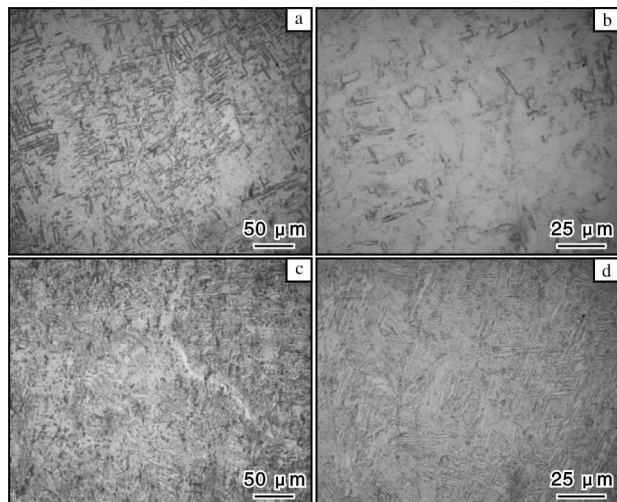


图4 焊缝区微观组织

Fig. 4 Microstructures of weld zone: (a, b)Ti-Al-Fe low cost titanium alloy; (c, d)TC4 titanium alloy

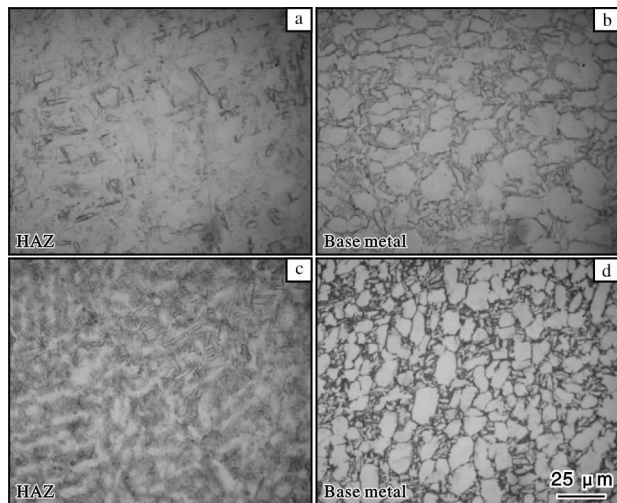


图5 热影响区和基体微观组织

Fig. 5 Microstructures of HAZ and base metal: (a, b)Ti-Al-Fe low cost titanium alloy; (c, d)TC4 titanium alloy

### 2.3 拉伸力学性能

表3为Ti-Al-Fe低成本钛合金和TC4钛合金焊接接头的室温拉伸性能测试结果。Ti-Al-Fe低成本钛合金焊接接头的抗拉强度平均值为1 204 MPa,TC4钛合金焊接接头抗拉强度平均值为1 093 MPa,说明采用相同的焊接方法和焊接工艺,Ti-Al-Fe低成本钛合金焊接接头的强度比TC4钛合金高111 MPa。

这是由于 Ti-Al-Fe 合金焊接区域的组织较细小, 晶界强化作用所致。图 6 是焊接接头拉伸试样断裂后的照片。可以看出, Ti-Al-Fe 低成本钛合金和 TC4 钛合金试样拉伸后均在母材区域断裂, 表明焊缝强度高于母材。

表 3 焊接接头拉伸性能

Table 3 Tensile mechanical properties of welded joints

| Alloy    | $R_m$ /MPa | $R_{p0.2}$ /MPa | $A$ /% | $Z$ /% | Fracture location |
|----------|------------|-----------------|--------|--------|-------------------|
| Ti-Al-Fe | 1 202      | 1 115           | 6.0    | 25     | Base metal        |
|          | 1 207      | 1 108           | 5.5    | 21     | Base metal        |
| TC4      | 1 092      | 1 020           | 9.5    | 43     | Base metal        |
|          | 1 094      | 1 028           | 8.0    | 42     | Base metal        |

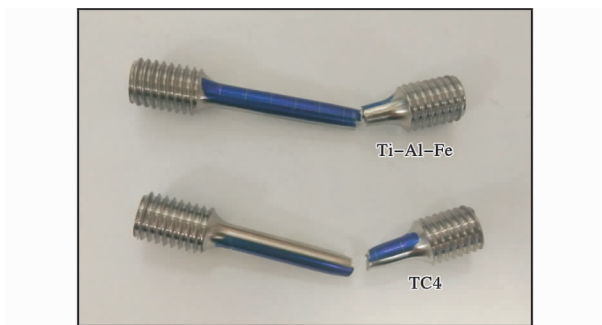


图 6 焊接接头拉伸试样断裂后的照片

Fig. 6 Photo of tensile specimens of welded joints after fracture

### 3 结论

(1) 采用 TIG 双面焊得到的 Ti-Al-Fe 低成本钛合金焊缝表面颜色为银白色, 焊缝形状为分布整齐的鱼鳞纹状, 焊缝内部融合完全, 且无气孔、裂纹、夹杂等焊接缺陷, 可焊性好。

(2) Ti-Al-Fe 低成本钛合金焊缝区域低倍组织是由柱状晶组织和少量的等轴晶组成, 其柱状晶组织

要比 TC4 钛合金的细小, 焊缝区域微观组织是由大量的针状次生  $\alpha$  相和少量的初生长条状  $\alpha$  相组成。

(3) Ti-Al-Fe 低成本钛合金拉伸断裂在母材位置, 焊缝强度高于母材。Ti-Al-Fe 低成本钛合金焊接接头抗拉强度平均值为 1 204 MPa, 与采用相同的焊接方法和焊接工艺的 TC4 钛合金相比, 抗拉强度高 111 MPa。

### 参考文献

- [1] 叶勇, 王金彦. 钛合金的应用现状及加工技术发展概况[J]. 材料导报, 2012, 26(2): 360-363.
- [2] 黄张洪, 曲恒磊, 邓超, 等. 航空用钛及钛合金的发展及应用[J]. 材料导报, 2011, 25(1): 102-108.
- [3] 高娃, 张存信. 低成本钛合金制备技术及其军事应用[J]. 钛工业进展, 2008, 25(3): 6-10.
- [4] 冯秋元, 佟学文, 王俭, 等. 低成本钛合金研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 128-134.
- [5] 朱知寿, 商国强, 王新南, 等. 低成本高性能钛合金研究进展[J]. 钛工业进展, 2012, 29(6): 1-5.
- [6] 戚云莲, 洪权, 刘向, 等. 钛及钛合金的焊接技术[J]. 钛工业进展, 2004, 21(6): 25-29.
- [7] 冯秋元, 张磊, 庞洪, 等. 低成本 TC4 钛合金板材的组织性能[J]. 金属热处理, 2016, 41(6): 85-88.
- [8] 高福洋, 廖志谦, 李文亚. 钛及钛合金焊接方法与研究现状[J]. 航空制造技术, 2012, 55(23/24): 86-90.
- [9] Hori K, Watanabe H, Myoga T, et al. Development of hot wire TIG welding methods using pulsed current to heat filler wire-research on pulse heated hot wire TIG welding processes[J]. Welding International, 2004, 18(6): 456-468.
- [10] 孙建刚, 高福洋, 高奇, 等. TC4 钛合金热丝钨极氩弧焊接头组织性能研究[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(2): 9-13.
- [11] 穆春艳. 不同焊接工艺下 TC4 钛合金焊接接头的晶粒尺寸和微观组织变化[J]. 铸造技术, 2015, 36(5): 1267-1269.