

厚板钛合金窄间隙 TIG 焊接头组织与性能

吕世雄¹, 崔庆龙¹, 黄永宪¹, 郑传奇¹, 王 洋²

(1. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 钱江摩托股份有限公司, 温岭 317500)

摘 要: 采用氩弧焊的方法在窄间隙条件下, 采用 TIG 填丝多层焊的方式实现了 TC4 厚板钛合金的优质连接。结果表明, 通过优化焊接参数和合理的情性气体保护方案设计, 保证了接头的完整性与可靠性。通过宏观和微观金相分析, 发现窄间隙焊接条件下晶粒生长遵循联生结晶生长规律; 由于受到焊接热循环的作用, 致使接头显微结构随着冷却速度变化呈现不同的组织结构; 窄间隙 TIG 焊接头因啮合强化而使得接头强度得到提高, 焊缝的平均强度达到母材的 90% 以上。

关键词: 厚板钛合金; 窄间隙 TIG 焊; 组织; 力学性能

中图分类号: TG444.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2012)08-0081-04



吕世雄

0 序 言

钛合金具有密度小、比刚度高、比强度高, 耐腐蚀性好、耐热性好等一系列优点, 在航空航天、海洋工程、汽车和医疗等领域得到了越来越广泛的应用^[1]。近年来工业部门对钛合金应用又以厚板焊接结构居多, 因此一种高效便捷、经济性好、用于焊接厚板钛合金的方法对于推动厚板钛合金结构的应用有着重要意义。

在焊接高温下钛合金表面氧化膜变得疏松, 使钛与氢、氧、氮的反应速度加快, 降低了焊接接头的塑韧性。此外厚板材料焊接时常加工成 U 形或 V 形坡口, 以多层多道焊的方式进行焊接, 填充金属量过大是这种焊接方法一个很大的不足^[2], 不仅浪费了焊接材料, 而且因为热输入过大使得接头性能变差。电子束焊接可以一次穿透 18 mm 厚钛合金板^[3], 电子束焊接具有焊接速度快, 焊接变形小, 热效率高等一系列优点^[4], 但焊接生产成本高, 且试件尺寸受真空室限制^[5,6]; 相比之下, 采用氩弧焊的方法, 工艺简单、操作灵活, 可以有效解决大多数焊接结构问题。

鉴于此提出了一种利用氩弧焊窄间隙条件下焊接厚板钛合金的方法, 并配以良好的情性气体保护措施。TIG 焊对有色金属及其合金如钛合金的焊接

最具优势。窄间隙焊不仅可以减少坡口截面积、减少焊缝金属的填充量, 而且在相对少的焊接热输入下, 解决了开坡口困难、焊接速度缓慢、焊后板材变形大等问题^[7]。文中在实现了 56 mm 厚钛合金 (TC4) 板优质对接后, 对接头显微组织进行了观察研究, 测试了接头的硬度及拉伸性能。

1 钛合金窄间隙 TIG 焊工艺

试验选用窄间隙条件下 TIG 填丝焊的方法、多层焊的方式对厚板钛合金进行焊接。母材 TC4 (Ti-6Al-4V) 由陕西宝鸡钛业股份有限公司提供, 试件尺寸为 330 mm × 285 mm × 56 mm, 650 °C 保温 3 h, 随炉冷却。所用焊丝为近 α 钛合金 Ti-4Al-2V, 直径为 3 mm, 母材和焊丝的化学成分如表 1 所示。

表 1 母材及焊丝化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Compositions of base metal and filler metal

	Al	V	Fe	C	O	Ti
母材	6.06	3.92	0.30	0.013	0.15	余量
焊丝	4.50	1.80	0.20	0.010	0.08	余量

钛合金焊接试验系统原理如图 1 所示。除焊接电弧区域保护外, 焊接过程中对被焊试件实施正面、背面全面的保护, 采用手动控制钨极高度来控制电弧长度。

焊接试件所开窄间隙坡口如图 2 所示, 焊接前

收稿日期: 2011-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50974046, 50904020); 哈尔滨市青年科技创新人才资助项目 (2009RFQXG050)

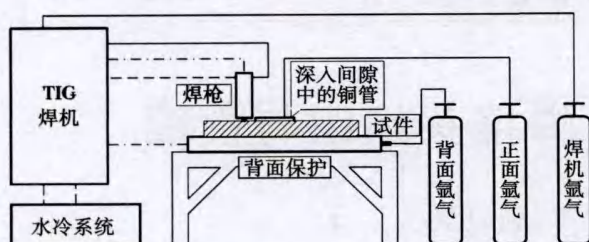


图 1 试验系统原理

Fig. 1 Schematic of experimental system

对钛合金进行化学清洗以除去试件表面的油污和氧化层.

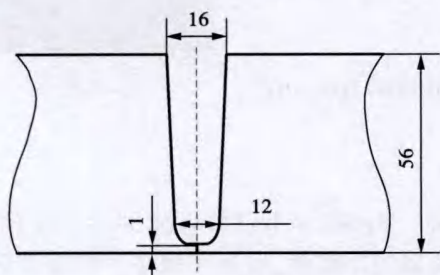


图 2 试件坡口尺寸 (mm)

Fig. 2 Dimensions of welding groove

焊接过程中采用特殊的陶瓷喷嘴,深入窄间隙坡口中焊接,并利用一只通有氩气的铜管深入坡口,保护焊接高温区. 如图 3 所示,试件正面铜管一直跟随焊枪,喷出的氩气的密度大于空气,长时间沉积在窄间隙坡口中,对焊接高温区长时间保护. 试件背面利用单面带胶的铝箔封闭成密闭空腔,同样通氩气保护. 焊接过程中利用反变形与刚性固定相结合的办法控制焊接角变形. 采用多层焊的方式,共焊接 19 层,各层焊接参数如表 2 所示,层间温度控制在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,焊接平均速度为 10 cm/min ,单层焊道填充金属厚度约为 3 mm .

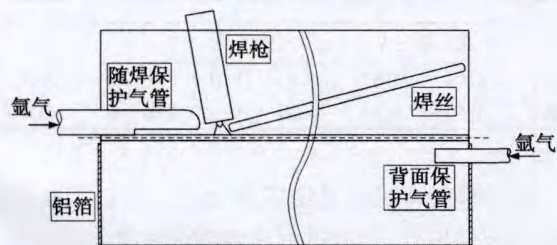


图 3 保护方案示意图

Fig. 3 Protecting system

表 2 窄间隙条件下的焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters for narrow-gap TIG welding

焊接层数	电流 I/A	焊枪气体流量 $q_h/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	铜管气体流量 $q_t/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	背面气体流量 $q_b/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
打底	180	8	10 ~ 20	10
中部	240	8	10 ~ 20	10
盖面	180	8	10 ~ 20	10

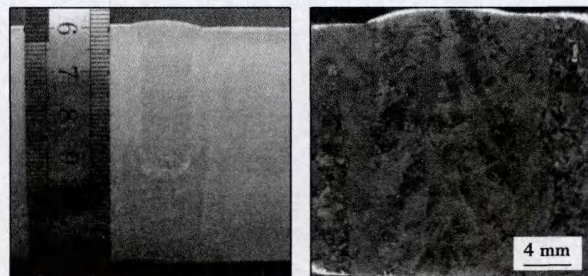
工艺试验结束后,对试件进行真空消应力退火,退火温度为 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 2 h 随炉冷却. 从退火后的焊接试件上分别取样,进行拉伸试验和显微组织分析.

2 试验结果与分析

2.1 接头的显微组织形貌

接头由焊缝、熔合区、热影响区 3 个部分组成. 熔池经历了熔化、化学冶金等一系列复杂过程后迅速凝固形成焊缝. 其中热影响区虽然没有熔化,但也因受到高温影响而发生了组织转变.

图 4 为焊接接头整体的宏观形貌,图 4a 为焊缝整体腐蚀后的形貌,图 4b 为在抛光腐蚀后光学显微镜下的接头形貌. 从图 4a 中可以清楚的看到母材到热影响区再到焊缝的过渡、焊接层数和热影响区的范围. 窄间隙条件下焊接,热影响区各区域的划分并不明显,图 4b 中可以看到接头中晶粒粗大的过热区,两侧各约为 3 mm ,而细晶区更为狭小,几乎无法辨别,在外侧区域的晶粒与母材无异.



(a) 焊缝截面

(b) 接头组织形貌

图 4 焊接接头组织形貌

Fig. 4 Macrostructure of Ti alloy weld

厚板钛合金在 TIG 焊热循环的作用下,焊缝金属开始凝固时,首先在熔合区边缘半熔化的晶粒处开始向焊缝中生长. 因为熔池壁和焊缝金属具有相似的化学成分,相同的晶格类型,因而特别适宜作为金属结晶的表面,对结晶最为有利. 图 4b 中间部分窄条区域为焊缝,两侧为热影响区,热影响区部分晶

粒局部熔化,晶粒直接从熔池壁上结晶,并沿着母材晶粒同一轴向生长,即联生结晶,外延生长。相似的情形出现在了多层焊的层间,可以看到许多晶粒贯穿多个焊接层,也是联生结晶的结果。熔池开始凝固时,晶粒在焊缝边缘形成联生结晶后,垂直于熔合线呈柱状晶生长并向焊缝中心区域推进。但随着熔池的散热,温度梯度的方向发生了改变,晶粒生长方向也发生了改变,最终呈现出如图4b所示弯曲晶粒状。

母材 TC4 钛合金高温时是完全 β 相组织,体心立方晶格结构,当温度降至约996℃时,开始由 β 相向 α 相转变, α 相呈密排六方结构,因为材料中含有 β 相稳定元素,不可能发生完全的 α 相转变,冷却至室温时呈现 $\alpha + \beta$ 双相组织,而且通过不同的冷却速度,可以得到不同金相形态的 α 相^[8]。

图5为母材的显微组织形貌,对于TC4双相钛合金,当冷却速度较慢时, α 相由 β 相中析出,得到片层状魏氏组织以及沿 β 晶界析出的 α 相。从图5可以看出母材是由 α 相和 β 相组成的混合组织,沿 β 晶界有 α 相镶边,在一束范围内,各 α 相是平行的,有共同的晶体学取向,各 α 相由 β 中间层分开。



图5 母材显微组织形貌
Fig. 5 Microstructure of base metal

焊缝填充金属使用的是近 α 钛合金Ti-4Al-2V,焊接过程中混入少量的母材成分,虽然冷却速度很快,但是 β 相稳定元素V含量较少,组织主要是 α 相、少量 β 相,如图6所示。

当高温 β 相以较快的速度冷却下来时,含 β 相稳定元素的合金易得到一种网篮状组织,冷却速度进一步加快时, β 相分解以非形核方式长大,发生无扩散马氏体相变,生成针状六方 α' 相及正交马氏体相。图7为钛合金焊接试件接头热影响区的显微组织形貌,窄间隙条件下焊接热影响区范围窄、冷却速度快,因此在热影响区形成了如图7a所示网篮状组织,图7b所示为冷却速度更快时形成的针状马氏体组织。两种形态的组织没有本质的区别,只是冷却速度不同造成 α 相形态不同。

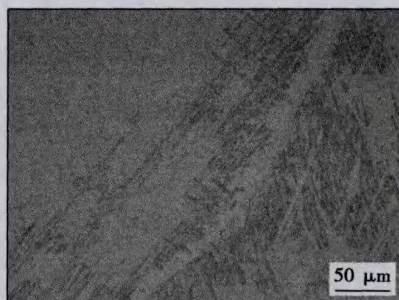


图6 焊缝显微组织形貌
Fig. 6 Microstructure of welding seam

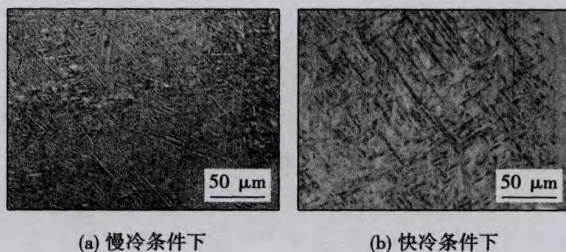


图7 焊接热影响区显微组织形貌
Fig. 7 Microstructure of HAZ

2.2 接头拉伸性能和显微硬度

拉伸性能试件均根据GB2651—2008焊接接头拉伸试验方法加工而成,试验设备采用INSTRON 5569电子万能材料试验机。拉伸试样尺寸见图8,钛合金窄间隙焊接试件焊缝拉伸试验结果见表3。

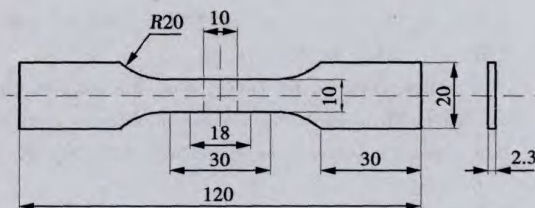


图8 拉伸试件尺寸(mm)
Fig. 8 Dimensions of tensile samples

表3 拉伸试验结果
Table 3 Mechanical properties of weld

	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)	屈服强度 R_{el} /MPa	断裂位置
1号	805	4.5	775	焊缝
2号	790	4.5	770	焊缝
3号	790	4.5	765	焊缝
母材	860	—	780	—
焊丝	705	—	545	—

试验结果表明,焊接接头的抗拉强度约为800

MPa, 高于焊丝的强度, 达到母材的 90% 以上, 焊接接头的拉伸试件发生断裂的位置均在焊缝处。

根据窄间隙焊接的啮合理论, 焊接过程中焊缝中混入了母材的部分成分, 同时焊接热影响区产生的针状 α' 相随着被焊金属厚度的增加和热输入的减少而细化^[9]。厚板钛合金进行窄间隙 TIG 焊时, 接头冷却速度快, 会形成细针状 α' 相。在外加载荷作用下, 接头组织相互交错, 发生啮合, 焊缝力学性能得到提高。因此所得到焊接接头的拉伸强度要高于焊丝的强度。

3 结 论

(1) 对 56 mm 厚钛合金板材进行了窄间隙 TIG 焊, 获得了成形良好、表面保护质量高的优质焊接接头, 焊接后无损检验未发现缺陷。

(2) 窄间隙条件下焊接接头区域十分狭窄, 热影响区仅约 3 mm, 熔合线边缘晶粒以联生结晶的方式向焊缝区域生长, 最后焊缝呈现粗大晶粒的铸态结构。焊接热影响区因为冷却速度过快而生成了钛马氏体组织。

(3) 由于焊缝在焊接过程中混入母材成分, 且接头热影响区生成的针状马氏体组织, 使得接头强度因啮合强化而高于焊缝金属强度。

参考文献:

- [1] 周水亮, 陶 军, 杜欲晓, 等. 细晶粒钛合金薄板 TIG 焊温度场分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(12): 33-36.
Zhou Shuiliang, Tao Jun, Du Yuxiao, *et al.* Analysis of temperature field for TIG welding fine grain titanium alloy thin sheet[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(12): 33-36.
- [2] Akhonin S V, Belous V Y, Romanyuk V S. Narrow-gap welding of up to 110 mm thick high-strength titanium alloys[J]. Welding

Journal, 2010, 89(5): 34-37.

- [3] 宫 平, 罗 宇, 王亚军, 等. TC4 钛合金电子束焊接工艺参数对焊缝形状的影响[J]. 航空制造技术, 2008(6): 72-75.
Gong Ping, Luo Yu, Wang Yajun, *et al.* Effect of TC4 titanium alloy electron beam welding parameters on weld shape[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(6): 72-75.
- [4] 吴 冰, 张建勋, 巩水利, 等. 厚板钛合金电子束焊接残余应力分布特征[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 10-12.
Wu Bing, Zhang Jianxun, Gong Shuili, *et al.* Residual stress distribution of large thickness titanium alloy joints by electron beam welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 10-12.
- [5] 王利发, 刘建中, 胡本润. TA15 钛合金电子束焊焊接接头力学性能[J]. 焊接学报, 2007, 28(1): 97-100.
Wang Lifa, Liu Jianzhong, Hu Benrun. Mechanical properties of TA15 titanium alloy electron beam welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(1): 97-100.
- [6] 张秉刚, 王 廷, 陈国庆, 等. 大厚度 TC21 钛合金电子束焊接试验[J]. 焊接学报, 2009, 30(11): 5-8.
Zhang Binggang, Wang Ting, Chen Guoqing, *et al.* Electron beam welding of TC21 titanium alloy with large thickness[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(11): 5-8.
- [7] 侯继军, 董俊慧. TC4 钛合金 TIG 焊接性研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2010, 29(2): 180-183.
Hou Jijun, Dong Junhui. A study on TIG weldability of TC4 titanium alloy[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2010, 29(2): 180-183.
- [8] 吴承建, 陈建国, 强文江. 金属材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [9] 郑喜刚, 赵 勇, 蒋成禹. 钛合金窄间隙 TIG 焊技术研究[J]. 钛工业进展, 2006, 23(5): 40-43.
Zheng Xigang, Zhao Yong, Jiang Chengyu. Research on narrow-gap TIG welding technology of titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2006, 23(5): 40-43.

作者简介: 吕世雄, 男, 1957 年出生, 博士, 教授级高级工程师。主要从事有色金属焊接与特种焊接方面的科研工作。发表论文 20 余篇。Email: lvshixiong_hit@163.com

通讯作者: 黄永宪, 男, 讲师。Email: yxhuang@hit.edu.cn