

Ti-Fe-Al 系合金 GTAW 和 PAW 接头的组织和性能

晏阳阳, 郭小辉, 刘志颖, 王乃友, 鄂楠

(洛阳船舶材料研究所, 洛阳 471039)

摘要: 采用 GTAW 和 PAW 2 种焊接工艺, 对厚度为 9 mm 的 Ti-Fe-Al 系合金板材进行对接焊接试验, 考察其焊接性能以适应船舶行业对低成本钛合金的使用要求。通过工艺参数的优化, 获得了良好的焊缝外观成形, 并结合性能测试结果分析了接头的组织和性能。研究表明: 采用这 2 种焊接方法得到的 Ti-Fe-Al 系合金接头质量达到了 X 射线检测 I 级水平, 熔敷金属合金成分和杂质含量控制适当, 接头硬度分布均匀, 拉伸、弯曲和冲击性能良好, 冲击断口呈韧性断裂, 微观金相观察无析出相。

关键词: Ti-Fe-Al 合金; 工艺参数; 显微组织; 力学性能; 析出相

中图分类号: TG 146.2

Structure and properties of Ti-Fe-Al alloy on GTAW and PAW welding joint

YAN Yang-yang, GUO Xiao-hui, LIU Zhi-ying, WANG Nai-you, E Nan

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract: The GTAW and PAW experiments were operated on Ti-Fe-Al alloy plates with thickness of 9 mm in order to qualify welding performance for operating requirement about low-cost titanium alloy on ship trade. Good appearance of welding joint was got by optimizing technics parameters and the microstructure and properties of welding joints were analysed according to aptitude test results. The results show that the quality of obtained joints through both of welding methods can reach the I grade of RT; alloy elements and impurity contents in welding line can be controlled befittingly; rigidity values distribute equably and tensility, bending and impacting test results are proved excellent. Especially, no precipitated phase is found in microstructure.

Key words: Ti-Fe-Al alloy; technics parameters; micro-structure; mechanical property; precipitate phase

钛材具有适用于海洋环境的特性, 如耐蚀性、无磁性、较高的综合力学性能和机械加工特性等, 是一种天然的海军装备结构材料。从 20 世纪 50 年代末开始, 钛材在船舶和海洋工程中应用。不仅领域逐步拓宽, 而且用量也随之增大^[1-5]。又因为钛合金材料在海洋工程的应用推广, 不仅需要优良的性能和质量, 更需要合适的价格, 低成本是当前船用钛合金材料及制造工艺研究的重要目标^[6-8]。Ti-Fe-Al 系合金作为一种低成本钛合金, 是在纯钛中加入一些廉价的 Fe 和 Al 元素, 构成的一种近 α 相的低成本船用结构钛合金, 具有冷热成型性优异的特点。和纯钛相比, 它具有更低的成形温度, 较小的成形抗力以及较低的开裂倾向,

所以冷热成形性能更好^[9]。

本文作者结合船用钛合金常用的焊接方法, 对 Ti-Fe-Al 系合金进行 GTAW 和 PAW 这 2 种焊接工艺的研究, 综合分析了在不同焊接条件下 Ti-Fe-Al 系合金焊接接头组织和性能变化。

1 实验

1.1 试验材料

PAW 和 GTAW 焊接工艺研究用板材为 9 mm 厚 Ti-Fe-Al 系合金板材对接试板 2 组, 规格均为 300 mm ×

150 mm; 配套使用的焊丝选用规格为 $d\ 2.0/3.2\ \text{mm}$ 。

1.2 试验条件

PAW 和 GTAW 焊接工艺用试板均开 30° “V” 型单边坡口, 根部间隙留 3 mm。试板加工时, 采用较慢的加工速度, 以机械方法加工坡口, 防止试板局部升温过高带来的影响。并清理试板表面的残留油渍和水渍等附着物, 再用机械方法去除对接面及其周围 25 mm 范围内的氧化皮, 蘸取丙酮溶液将其清洗干净。由于钛材在焊接过程中的保护和冷却速度的控制是保证焊接接头综合质量的关键因素, 为避免在焊接过程焊缝和周围区域高温氧化, 使用纯氩气作为保护气体, 其纯度符合相关标准的规定; 并且在焊接过程中层道间的温度控制在 $100\ ^\circ\text{C}$ 以下, 改善焊接过程中的保护效果。

1.3 焊接工艺试验

根据 PAW 和 GTAW 焊接工艺的特点, 针对 9 mm 板厚 Ti-Fe-Al 系合金, 通过多次焊接工艺试验, 摸索出焊接电流、焊接电压、焊接速度以及气体保护流量等工艺参数之间的匹配关系, 对比研究, 最终实现了 9 mm 厚 Ti-Fe-Al 系合金中厚板的焊接成型。

2 结果及讨论

2.1 外观质量及无损检测

焊后试板表面质量要求进行 100% 目视检查, 焊缝表面光滑并圆滑过渡到母材, 经测量, PAW 试板焊缝正面宽度为 10~12 mm, 背面宽度为 4~6 mm, 余高 1.2 mm; GTAW 试板焊缝正面宽度为 13~14 mm, 背面宽度为 6~7 mm, 余高 1.2 mm。按照 JB/T 4730.2—2005《承压设备无损检测第 2 部分: 射线检测》规定的方法进行 100% X 射线无损检测, 内部质量满足 I 级焊缝要求。

2.2 接头冷弯和拉伸性能

试板按照 GB 2649—2008 的规定进行取样, 并分别按照 GB 2651—2008 和 GB 2653—2008 的要求进行接头的拉伸与冷弯试验。冷弯试样取全厚度($t=9\ \text{mm}$), 弯曲半径为 $10t$, 弯曲角 180° , 拉伸面上沿着任意方向均没有单条长度大于 3 mm 的裂纹型开口缺陷, 表明焊接接头的成型性能良好。接头的拉伸试验结果见表 1。

表 1 接头拉伸试验结果

Table 1 Mechanical properties of welding jointing

Method	Dimension/mm	R_m/MPa	Breakpoint
PAW	9×37	614; 624	Basemetal
GTAW	9×37	596; 589	Welding line

由表 1 可以看出: 焊接接头的抗拉强度达到了 589~624 MPa。PAW 焊接接头的拉伸断裂位置在母材, 说明焊缝的抗拉强度高于母材的抗拉强度, 而 GTAW 焊接接头的拉伸断裂位置在焊缝。但是 2 种焊接方法得到的焊接接头均满足接头系数大于 0.95 的要求。

2.3 硬度测试

在 CV-430DAT 试验机上对 2 种方法焊接的接头横截面距离表面 1 mm(测试点间距 0.5 mm)位置按照 GB/T 4340.1—2009 标准进行维氏硬度试验, 硬度分布曲线见图 1。

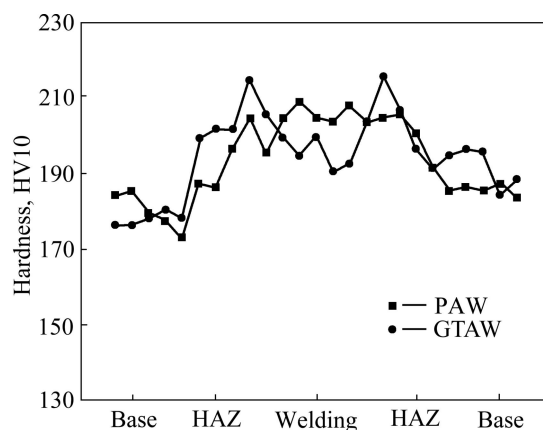


图 1 接头硬度(HV10)分布

Fig. 1 Distribution of hardness of welding joint

由图 1 看出: PAW 和 GTAW 2 种焊接方法得到的焊接接头, HAZ 的硬度值稍微高于母材的, 但是焊缝、HAZ 和母材三者的硬度差值并没有形成明显的硬度梯度, 说明在焊接过程中接工艺参数选择合适, 接头性能较为均匀。

2.4 化学成分分析

为了分析焊缝中的合金成分和杂质含量, 由焊缝中心取样在 Genesis Apex2 X 射线能谱仪上对焊缝主要合金成分进行分析, 结果见图 2; 在 ELTRA ONH2000 型氮氢氧气体分析仪上进行焊缝中 N、H 和 O 含量的分析, 结果见表 2。

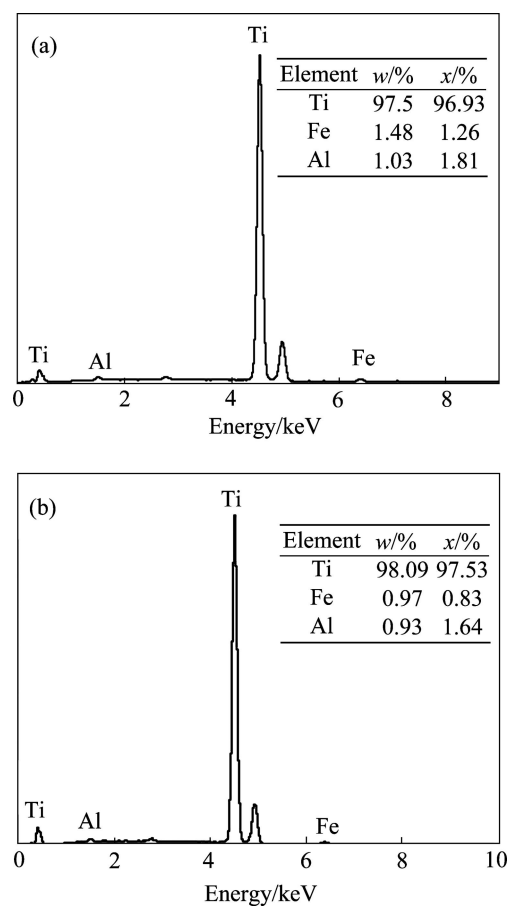


图 2 焊缝的 X 射线能谱分析

Fig. 2 Microanalysis of X-ray of welding seam: (a) Welding seam with PAW; (b) Welding seam with GTAW

如图 2 所示: 主要合金元素 Al 和 Fe 的含量基本控制在有效范围之内; 由表 2 分析结果来看, 采用 GTAW 工艺得到的焊缝, 其 N、H 和 O 含量都低于母材和焊丝的标称值; 采用 PAW 工艺得到的焊缝, 其 N 和 H 含量低于母材和焊丝的标称值, O 含量低于母材标称值但是略高于焊丝标称值。这说明在 PAW 焊接工艺中, 虽然有轻微的吸氧趋势, 但是 O 含量能够控制在有效范围之内。综合图 2 和表 2 的结果可知, 采用这 2 种焊接工艺都能较好地控制焊缝中的合金成分和杂质元素的含量。

表 2 焊缝中 N、H 和 O 的含量(质量分数)

Welding method	Chemical composition/%		
	N	H	O
GTAW	<0.005	0.001 9	0.066
PAW	<0.005	0.001 7	0.082

2.5 金相分析

在 Leica DMI5000M 金相显微镜下观察到的接头显微组织见图 3。

采用 PAW 焊接工艺得到的接头焊缝和热影响区组织是由马氏体 α' +微量 β 组成, 而采用 GTAW 焊接工艺得到的接头焊缝和热影响区组织都是由锯齿状 α +马氏体 α' +微量 β 组成, 基体金属的微观组织由等

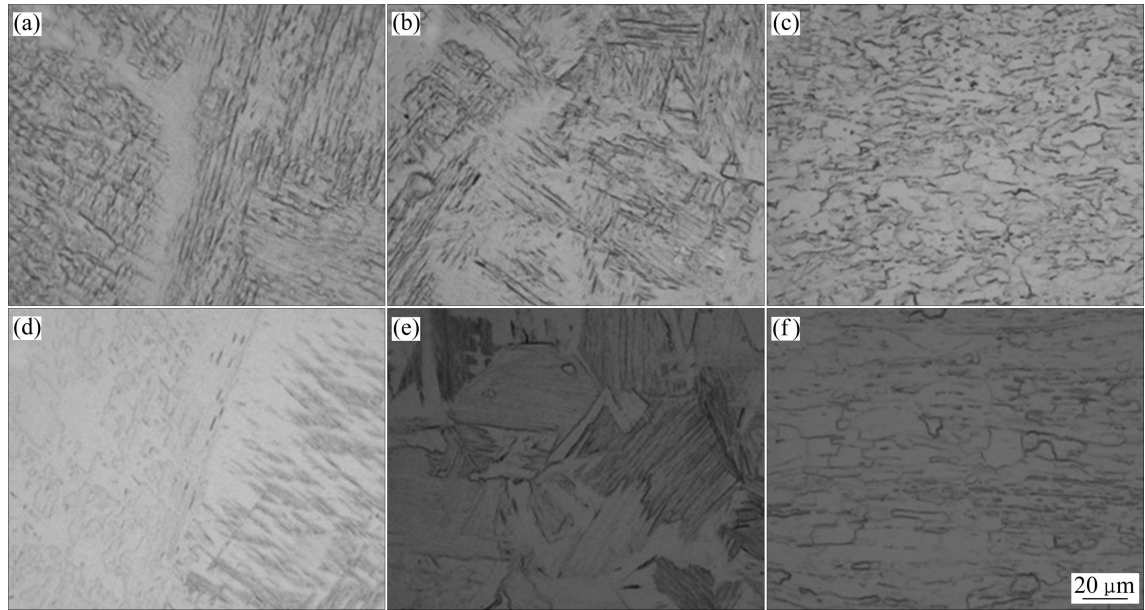


图 3 接头的显微组织

Fig. 3 Microstructures of welding joint: (a) PAW, welding seam; (b) PAW, HAZ; (c) PAW, base metal; (d) GTAW, welding seam; (e) GTAW, HAZ; (f) GTAW, base metal

轴 α +形变的 α +微量 β 组成, 其中未见明显的成分析出相。这与钛合金焊接过程中焊接接头组织由基体等轴晶组织和焊缝马氏体 α' 相针状组织组成^[10]一致。马氏体组织具有相对较高的硬度, 可能在焊接的过程中由于凝固过程形核速度的差别, 导致相对不同的凝固速度, 先凝固区域由于冷却速度快, 原始 β 晶粒进行晶格转变较小, 从而在温度下降到相变点以下时, 晶格畸变比较严重, 从而导致微观内应力的增加, 该内应力对该显微区域构成了强化效果, 从而提高了其硬度。

3 结论

1) Ti-Fe-Al 系合金采用 PAW 和 GTAW 焊接工艺, 得到的接头抗拉强度均高于 500 MPa, 满足接头系数大于 0.95 的要求。

2) 与 GTAW 相比, 采用 PAW 工艺获得的焊接接头, 其 O 含量稍微高于 GTAW 工艺获得的焊接接头的; 但是两者的气体元素含量均能控制在有效范围。

3) PAW 和 GTAW 2 种工艺方法焊接 Ti-Fe-Al 系合金, 焊接接头组织均匀, 均以 α +微量 β 为主; 凝固过程中产生的马氏体 α' 是导致接头显微区域强化的重要原因。

REFERENCES

- [1] 王东坡, 霍立兴, 张玉凤. 超声冲击法对钛合金焊接接头疲劳性能的改善[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(6): 1456-1460.
WANG Dong-po, HUO Li-xing, ZHANG Yu-feng. Improvement of fatigue properties of welded joints for titanium alloy by ultrasonic peening method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(6): 1456-1460.
- [2] LINDGREN L E. Finite element modeling and simulation of welding. Part 2: Improved material modeling[J]. Journal of Thermal Stresses, 2001, 24(4): 195-231.
- [3] ROSENTHAL D, NORTON J T. A method of measuring triaxial residual stress in plates[J]. Weld J, 1945, 24(5): s295-s370.
- [4] LEYENS C, PETERS M. 钛与钛合金[M]. 陈振华. 北京: 化学工业出版社, 2005: 292-429.
LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloy[M]. CHEN Zhen-hua. Beijing: Chemical industry Press, 2005: 292-429.
- [5] 常辉, 陈军, 邓炬. 新型近 β 钛合金 TB19 的时效特性[J]. 金属学报, 1999, 35(增刊 1): 5163-5166.
CHANG Hui, CHEN Jun, DENG Ju. The investigation of the sessioning characteristic of new near β titanium alloy[J]. Transactions of the China Metal Institution, 1999, 35(S1): 5163-5166.
- [6] 孙建科, 孟祥军, 陈春和. 船用钛合金材料技术体系[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(S3): 720-724.
SUN Jian-ke, MENG Xiang-jun, CHEN Chun-he. Technical system of ship building titanium alloy[J]. Rare Metal Materials And Engineering, 2005, 34(S3): 720-724.
- [7] 张建欣, 孟祥军, 余巍. MIG 焊在钛合金中的应用研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(S3): 176-179.
ZHANG Jian-xin, MENG Xiang-jun, YU Wei, et al. Study of application of MIG welding in titanium alloys welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(S3): 176-179.
- [8] 邵世单. 我国船用可焊结构钛合金的建造工艺适应性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(S3): 184-187.
SHAO Shi-dan. Study of formability weldability structure titanium alloys used for ship[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(S3): 184-187.
- [9] 蒋鹏, 李梁, 哈军, 宋德军. 低成本钛合金的成分设计计算与制备[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(9): 955-958.
JIANG Peng, LI Liang, HA Jun, SONG De-jun. Component design calculation and preparation of low-cost titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(9): 955-958.
- [10] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
ZHANG Xi-yan, ZHAO Yong-qing, BAI Chen-guang. Titanium alloy and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

(编辑 何运斌)