

钛合金 A-TIG 焊接工艺的应用研究

洪浩洋¹, 赵 晖¹, 王 军², 王 洋³

(1. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159;

2. 睿能(沈阳)热泵技术有限公司, 辽宁 沈阳 110141;

3. 沈阳捷众汽车零部件有限公司, 辽宁 沈阳 110122)

摘 要: 在只改变一个焊接工艺参数的情况下, 对 $\delta 2$ 的 TC4 钛板采用 TIG 焊和 A-TIG 焊, 对 $\delta 6$ 的 TC4 钛板采用 A-TIG 焊; 并研究其焊接质量, 接头力学性能及显微组织的变化。采用拉伸试验机、扫描电子显微镜、金相显微镜等方法对焊缝接头组织性能、显微组织的变化进行表征。结果表明, $\delta 2$ 厚的 TC4 钛板使用 TIG 焊时电流为 60 ~ 75 A, 而使用 A-TIG 焊时电流仅为 45 ~ 55 A, $\delta 6$ 厚的 TC4 钛板使用 A-TIG 焊时电流为 200 ~ 220 A, 焊接质量最好, 接头力学性能也较好。

关 键 词: TC4 钛合金; 表面活性剂; TIG 焊; A-TIG 焊; 接头组织性能
中图分类号: TB 31 **文献标志码:** A

Applied Research on A-TIG Welding Technology of Titanium Alloy

HONG Haoyang¹, ZHAO Hui¹, WANG Jun², WANG Yang³

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Farce can heat pump technology Co., Ltd., Shenyang 110141, China;

3. Shenyang Jie Zhong the auto parts Co., Ltd., Shenyang 110122, China)

Abstract: Under the condition of only one of welding process parameters having been changed, the $\delta 2$ TC4 titanium plate is welded using TIG welding and A - TIG welding, the $\delta 6$ TC4 titanium plate is welded using A - TIG welding. The welding quality, the joint mechanical properties and microstructure changes were studied. The organization performance and the change of microstructure of weld joint were characterized by tensile testing machine operation, scanning electron microscope, metallographic microscope and other methods. The results show that for the $\delta 2$ thick TC4 titanium plate TIG welding current size is 60 ~ 75 A, while the A-TIG welding is used and the size is 45 ~ 55 A, and for $\delta 6$ thick TC4 titanium the A-TIG welding is used and current size is 200 ~ 220 A, the welding quality is the best, and the mechanical properties of joints are also very good, respectively.

Key words: TC4 titanium alloy; surfactant; TIG welding; A-TIG welding; joint organization performance

收稿日期: 2014-10-10

基金项目: 科技部国际合作项目(2011DFR71150); 辽宁社科规划基金项目(L13BJY023)

作者简介: 洪浩洋(1988—), 男, 硕士研究生; 通讯作者: 赵晖(1968—), 男, 教授, 博士, 研究方向: 金属材料表面改性。

钛正常状态下呈密排六方结构,无冷脆现象;钛的塑性好,在室温下纯钛可冷轧,减薄率可达 85% 以上,钛产品易被氧化而形成稳定性很高的氧化薄膜,耐腐蚀性好^[1]。TC4 钛合金因为有比强度高、优秀的力学性能、很好的耐蚀性普遍应用于航天、船舶、武器以及化工等领域^[2-3]。钛合金在工程上利用起步较晚,因为钛的亲合力较大,焊接钛合金时,焊接接头易被气体等杂质玷污而发生脆化^[4];钛合金焊接过程中经常出现气孔。所以焊接钛合金时要采取严格的保护措施和适合的热输入,目前适于钛合金的焊接方法很多,如钨极氩弧焊、电子束焊、等离子弧焊、激光焊等焊接方法在钛及钛合金的焊接中利用普遍^[5-7]。目前,在钛及其合金的焊接过程中,国内最常用的钨极氩弧焊(钨极惰性气体保护电弧焊简称 TIG)包括手动、自动或半自动。国内生产的钛产品 95% 以上采用手工 TIG 焊完成^[8],为提升 TIG 焊的焊接效率,降低费用,国内外的焊接工作者进行了大量的研究。在 20 世纪 60 年代中期,乌克兰巴顿焊接研究所(PWI)举行钛合金焊接实验时发觉涂敷一层表面活性焊剂能够明显增加 TIG 焊的焊接熔深,发明了钛合金焊接使用的活性焊剂^[9-11]。本文的目标是采用对比试验来研究、分析 TC4 钛合金焊接试样,制定适合的焊接工艺。采用 X 射线探伤检测焊缝缺陷;用扫描电镜、金相显微镜观察和分析拉伸断口形貌及接头组织;用万能试验机测试接头性能。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料及设备

用 2mm、6mm 厚的 TC4 板母材试验,采用手工钨极氩弧焊和 A-TIG 焊进行对比试验。接头形式采用 I 型接头不开破口,不留缝隙,不添加焊丝,单道焊。钛合金的化学成分如表 1 所

示。

表 1 TC4 母材化学成份(元素质量分数) %

Ti	Al	N	H	O	V	Si	Fe	C
剩余	6	0.05	0.015	0.15	4	0.15	0.30	0.10

焊接设备采用林肯电气公司生产的 TIG375 型焊机。电极采用直径为 2.4mm 钨钨极,直流电源正接,喷嘴直径为 13mm,电压为 12V。焊接时正面、背面、拖罩采用纯度为 99.999% 的氩气保护焊缝熔池,及靠近焊缝的热影响区。

1.2 试验方法

分别对试件采用 TIG 和 A-TIG 两种焊接方法进行对接。焊前,对 2 种焊接方法的待焊试样,用细砂纸打磨,去除氧化膜后,对焊件进行酸洗并用净水冲洗再烘干,酸洗液使用 HF(5%) + 稀硝酸的水溶液。A-TIG 焊焊接前将粉状活性剂与丙酮混合成悬浊液,使用扁平刷子将活性剂均匀涂覆焊缝部位两侧,涂层厚度为 0.3 ~ 0.5mm 覆盖金属的光泽最合适。待丙酮完全挥发后,再进行焊接。焊接时,观测和对比焊接过程中工艺参数的变化情况。焊接完成后,观察焊件,了解两种焊接方式的焊缝成形状况。为找到合适的 A-TIG 焊焊接工艺,通过改变焊接电流、焊接速率、氩气流量等参数研究 A-TIG 焊焊缝成形和焊缝质量的变化。实验时,一次只能改变表 2 中一个焊接变量,其焊接工艺参数如表 2 所示。

1.3 焊接试样制作及检测

(1) X 射线探伤

通过对两种焊接方法的焊接试样进行 X 射线探伤,比较焊接接头缺陷和位置的变化情况。

(2) 焊接接头力学性能的检测

按照 GB2649-89《焊接接头机械性能试验取样方法》选取拉伸和弯曲的试样尺寸(图 1),在液压拉力试验机上进行拉伸和弯曲试验。

表 2 钛合金 TC4 的钨极氩弧焊焊接工艺参数

焊接方法	厚度 /mm	焊接速率 (mm·min ⁻¹)	焊接电流 /A	焊接电压 /V	氩气流量/(L·min ⁻¹)		
					焊枪	背面	尾罩
TIG 焊	2	11 ~ 25	60 ~ 85	8 ~ 10	10 ~ 14	18 ~ 20	18 ~ 20
A-TIG 焊	2	20 ~ 35	40 ~ 75	8 ~ 12	11 ~ 15	20 ~ 25	18 ~ 22
A-TIG 焊	6	30 ~ 50	200 ~ 220	18 ~ 22	18 ~ 22	25 ~ 30	25 ~ 28

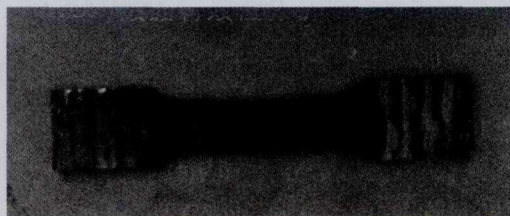
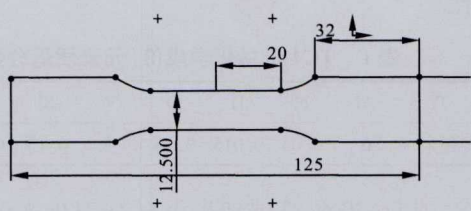


图1 焊接试样

(3) 显微组织分析

焊接接头经切割、打磨、抛光、腐蚀后制备成各种工艺参数的金相试样, 分别用 LEXT OSL4100 三维激光共聚焦光学显微镜和扫描电镜观察焊缝的显微组织形态。

(4) 显微硬度分析

在显微硬度机上打出焊缝, 热影响区, 组织的硬度并分析其变化规律。

2 实验结果与讨论

2.1 气孔的影响

气孔是焊接钛合金时最常见的缺陷之一, H_2 、 O_2 、 N_2 、水分和油污都会产成气孔。为了解 A-TIG

焊在降低焊缝气孔方面的作用, 作了对照性实验。在相同工艺下稍微降低焊前及焊接过程中的保护措施, 常规 TIG 焊焊缝经 X 射线探伤, 检验结果如表 3 所示, 发现有明显气孔, 而 A-TIG 焊焊缝没有发现气孔。依此, A-TIG 焊接可以有效降低孔隙的产生。

2.2 焊接电流的影响

在 40 ~ 75A 之间改变焊接电流大小, 获得 82 厚的 TC4 钛板两种焊接方法的焊接试样的拉伸性能随电流变化的曲线图如图 2、图 3 所示。

从图 2 和图 3 可以看到, 焊接电流对 TIG 焊和 A-TIG 焊接性能的影响, 以及相同的趋势, 随着电流的增加抗拉强度降低, 延伸率随焊接电流的增加而增加。

表3 X射线探伤结果

焊接方法	气孔数量/个	缺陷位置	气孔大小/mm	符合标准等级
TIG 焊	5 ~ 30	靠近焊缝融合线附近	0.5	HB5376-87 的 III 级焊缝
A-TIG 焊	1 ~ 3	焊缝起弧、收弧处	0.3	HB5376-87 的 I 级焊缝

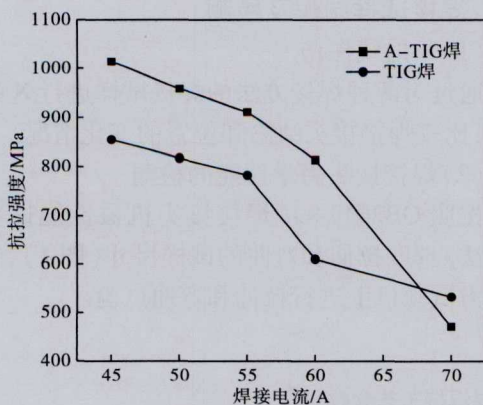


图2 抗拉强度随电流变化曲线

当焊接电流从 40A 增加至 75A 时, TIG 焊接的拉伸强度降低了约 3.8%, 延伸率增加了约 17.8%; 而 A-TIG 焊的抗拉强度降低约 5.5%, 延伸率增加约 20%。因而可知, A-TIG 焊接电流

对组织性能的影响大于 TIG 焊的影响。

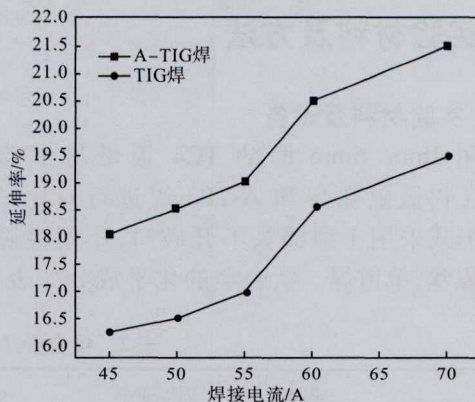


图3 延伸率随焊接电流变化曲线

从图 2 和图 3 可见, 焊接电流为 45 ~ 60A 时, A-TIG 焊接接头的力学性能较好, 拉伸强度达到 950 ~ 1050MPa, 达到母材强度的 93.2% ~

96.8%。当焊接电流超过 60A 时, A-TIG 焊和 TIG 焊抗拉强度显著降低, 但 A-TIG 焊更明显。因此, A-TIG 焊和 TIG 焊对比, A-TIG 焊小电流很容易焊接, 可以得到良好性能的接头。

2.3 焊接速度的影响

在 120 ~ 220mm/min 间改变焊接速度, 获得了 82 厚的 TC4 钛板 TIG 焊和 A-TIG 焊焊缝试样组织性能随焊接速率变化的曲线图如图 4、图 5 所示。

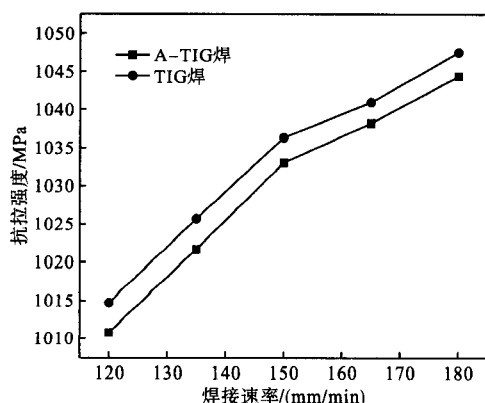


图 4 抗拉强度随焊接速率变化曲线

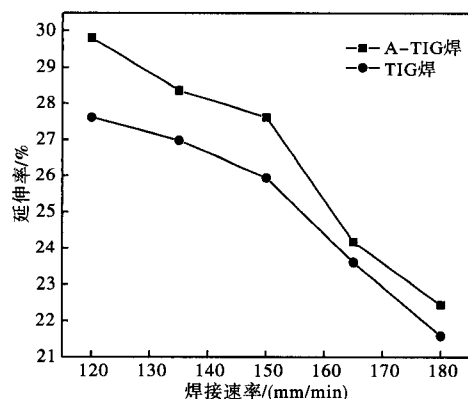


图 5 延伸率随焊接速率变化曲线

从图 4、图 5 中能够看出, 焊接速率对 TIG 焊、A-TIG 焊的影响接近, 都随着焊接速率的增加抗拉强度也随之变大。从图 4 中可以看到, 当焊接速率小于 150mm/min 时, A-TIG 焊和 TIG 焊抗拉强度显著降低, A-TIG 焊更明显。焊接速率在 135 ~ 200mm/min 时, A-TIG 焊焊缝的机械性能较好, 抗拉强度为 1020 ~ 1050MPa, 达到母材的 94.2% ~ 97.6%。因此, 与 TIG 焊对比, A-TIG 焊具有较高的焊接速率, 可以得到良好的性能。但是, 当焊接速率为 175 ~ 200mm/min 时, A-TIG 焊

的拉伸强度变化很小。这是由于, 当焊接速率太快, 活性剂涂层不能完全蒸发, 焊接电弧有向后漂移搜寻金属熔池的特性, 使焊接电弧不稳定, 对焊缝力学性能有影响。

2.4 保护气体流量对焊缝质量的影响

2.4.1 焊枪保护气体流量的影响

焊接正面保护气体是焊接积极保护的主要因素, 从焊枪端口流出, 保护熔池和热影响区。在焊接 82mm 厚的钛板时, 气体的流量正常情况应为 10 ~ 14L/min, 来保证熔池和焊缝不被氧化, 焊缝一般情况下呈银白色, 紧接着氩气流量从 14L/min 降低至 7L/min 时, 焊缝的色泽由开始的银白转为浅黄和深黄; 当继续降低氩气的流量, 焊缝颜色由黄色逐渐转变为蓝色, 最后外表面甚至呈现白色粉末状的氧化层。

实验结果表明, 该焊枪气体流量为 10 ~ 12L/min, 预通气 4s, 焊接效果最好。当焊接完成后氩气气流持续供气不少于 10s, 确保收弧处的焊缝金属一直受到保护, 持续通气到温度低于 400℃。

2.4.2 背面保护气体流量的影响

背面保护气体进入焊接夹具后, 整体保护在焊接区和非焊接区。因为卡槽以气室方式呈现, 所以要使保护气体先填充在凹槽内, 排出空气, 然后持续释放氩气, 来达到保护的效果。当焊接 6mm TC4 钛板情况下, 背面保护气体流量为 25 ~ 30L/min, 尾盖保护气体流量为 25 ~ 28L/min, 焊缝金属得到保护, 但是当气体流量不够, 热影响区颜色变蓝。背面保护气体流量为 26L/min 时最好, 先通气, 每 100mm 长度之间的焊缝通气不得少于 5s。

2.5 活性焊剂的影响

活性焊剂最早由乌克兰巴顿焊接研究所于上世纪 60 年代发明。当时以改进钛合金 TIG 焊时焊缝中的气孔现象为目的。而实验得悉, 通过增添卤化物即可以降低气孔产生, 还关系到焊缝的成形; 在其他条件不变的条件下, 熔宽减小, 焊缝的熔深增加, 焊缝的成形系数也相应减小。试验得出, 因为活性焊剂的效果, 电弧收缩, 能量密度增加, 焊接效率提升。A-TIG 焊与常规 TIG 焊焊接工艺相比较, 熔透能力明显提高, 热输入减小, 焊接应力及变形降低, 焊缝深宽比达到 1:1, 焊缝接头的强度韧性提高。

本实验选用由北京航空制造工程研究所制造的活性剂,通过对不同厚度钛合金材料使用的活性焊剂分别为 FT-01, FT-02。该活性剂在提高焊接接头质量,增加焊缝深宽比,降低焊接热输入,减少焊接应力变形,具有优越的性能。

2.6 接头组织及力学性能分析

2.6.1 接头组织

图6为焊接电流为40A时,2mm TC4的焊缝截面形貌图。图7为焊接电流为210A时,6mm TC4的焊缝截面形貌图。焊接接头显微组织,由图8所示,母材为双向组织 $\alpha + \beta$, α 呈现

白色, β 晶粒呈片状分布于 α 晶粒之间^[12]。接头分为母材区、热影响区、焊缝区,各区域分别如图8a~图8d所示。



图6 焊接电流为40A时2mm TC4的焊缝截面形貌



图7 焊接电流为210A时6mm TC4的焊缝截面形貌

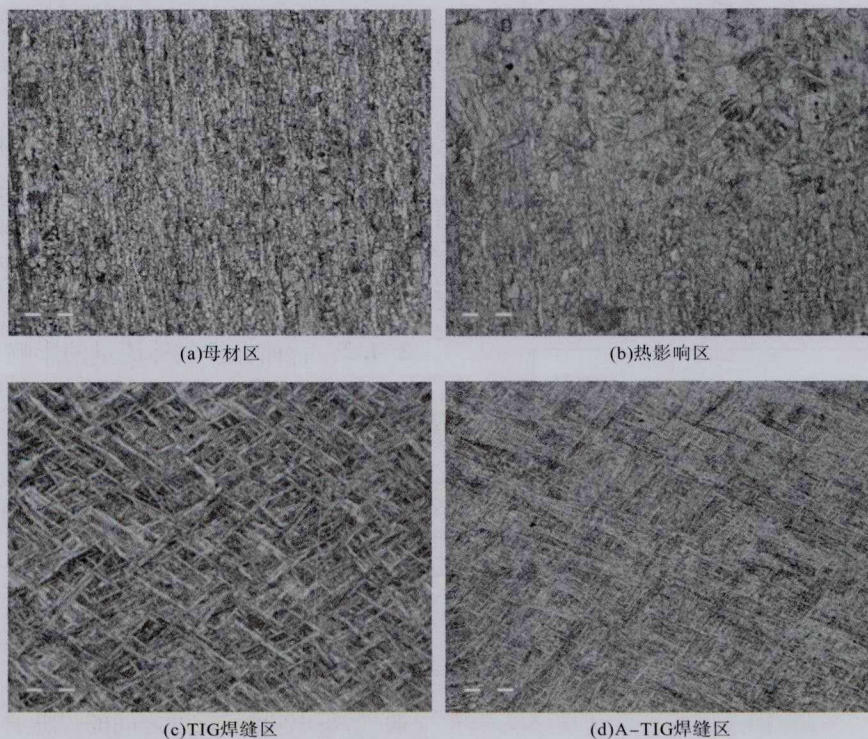


图8 焊缝接头显微组织

从TIG焊图8c和A-TIG焊图8d焊缝金相照片对比可看出,A-TIG焊的焊缝晶粒要细小。晶粒长大的倾向也不相同,TIG焊焊缝晶粒呈汇流式从焊缝里面向焊缝表面长大,而A-TIG焊焊缝晶粒则从母材双侧向焊缝中间生长。在A-TIG焊焊缝金相照片可以看出,在 $\delta 2$ 和 $\delta 6$ 不同厚度的钛板焊接过程中,焊缝凝固形态一致,这是由于焊接电弧对熔池温度场分布的作用相似。

2.6.2 断口形貌分析

图9为常规TIG焊和A-TIG焊 $\delta 2$ 和 $\delta 6$ 的

TC4钛板试样拉伸试验扫描电镜图,常规TIG焊接试样断在母材区,A-TIG焊焊接试样断在熔合线附近。

由图9可看出,常规TIG焊焊接试样主要是韧窝断裂,主要断裂在基体金属,基材的塑性较好;而A-TIG焊试样断裂发生在熔合线附近,属于韧窝和混合模式断裂,解理面的增多表明其塑性对比于母材下降。从拉伸试样上分析,试样断在母材区明显发生塑性变形,靠近熔合线断裂的试样变形不明显。

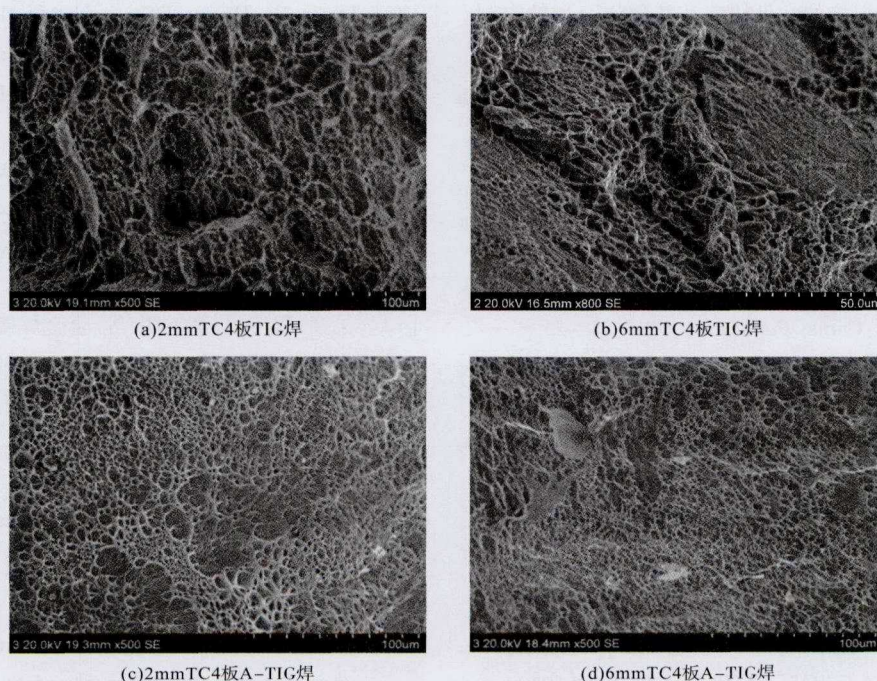


图9 拉伸试样扫描电镜图

2.6.3 显微硬度分析

焊接接头不同区域的硬度,很大程度上影响着接头的力学性能。通过试验,两种焊接方法焊缝硬度变化趋势基本相近,如图10所示。

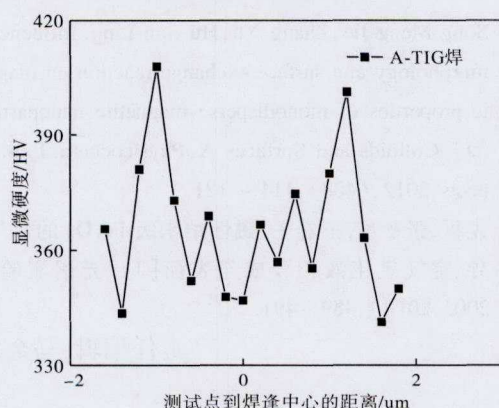


图10 显微硬度变化曲线

TIG 焊焊缝中心的硬度最小,到两边的硬度逐渐增加,到熔合线附近硬度达到最大,然后逐渐降低,并逐渐过渡到基体材料,基材硬度高于焊接中心。产生该现象的原因为,焊缝中心基本以 α 相为主,随着离焊缝中心距离的增加,在焊缝区 α 相减少,而 β 相含量逐渐增加,硬度也随之增加,直到热影响区出现最大值。

3 结论

焊接2mm厚的TC4钛合金板材,TIG焊最优焊接工艺为:电压10V,焊接电流75A,焊接速率14m/h,氩气流量正面12L/min,背面20L/min;A-TIG焊最优焊接工艺为:电压10V,焊接电流47A,焊接速率15m/h,氩气流量正面13L/min,背面22L/min。在此前提下,焊缝成形优良,外形漂亮,获得综合力学性能较好的接头。

当焊接6mm TC4钛板,其最佳焊接工艺为:电压12V,焊接电流210A,焊接速度3m/h,氩气流量28L/min,其接头的抗拉强度为904.36MPa,能够达到母材的98.54%;延伸率为9.7%,焊缝性能较好。

参考文献:

- [1] 周廉. 美国、日本和中国钛工业发展评述[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(8): 577-581.
- [2] 草道英武编. 金属钛及其应用[M]. 程敏等译. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
- [3] 陆树荪, 顾开道, 郑来苏. 有色铸造合金及熔炼[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.

- [4] 敬东. 钛合金焊接的常见缺陷及其预防[J]. 航空制造技术, 2000, (5): 56 - 60.
- [5] 李青云, 刘雅廷. 稀有金属加工手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 90 - 91.
- [6] Bys Chiang, Albright CE. The Limit of Join Penetration in High Energy Density Beam Welding [J]. Welding Journal, 1993, (3): 118 - 122.
- [7] A Rata Y. Plasma Electron and Laser Beam Technology[M]. USA: Carnes Publication, 1986: 24 - 25.
- [8] 黄晓艳, 刘波, 李雪. 钛合金在军事上的应用[J]. 轻金属, 2005, (9): 51 - 52.
- [9] Lucas W, Howes DS. Activating flux increasing the performance and productivity of the TIG and plasma processes [J]. Welding and Metal Fabrication, 1996, 64(1): 11 - 17.
- [10] Troy Paskell. GTAW flux increase welding joint penetration[J]. Welding Journal, 1997, (4): 57 - 62.
- [11] 巴顿焊接研究所. 飞机制造中的焊接技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [12] 吴巍, 程广福, 高洪明, 等. 合金焊接头组织转变与力学性能分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(7): 81 - 84.

(责任编辑: 马金发)

(上接第11页)

- [12] 苏鹏飞, 陈国, 赵珺. 表面羧基化 Fe_3O_4 磁性纳米粒子的快捷制备及表征[J]. 高等学校化学学报, 2011, 32(7): 1472 - 1477.
- [13] 王冰, 张锋, 邱建华, 等. Fe_3O_4 超顺磁纳米晶的超声共沉淀法制备及表征[J]. 化学学报, 2009, 69(11): 1211 - 1216.
- [14] 汪汉斌, 刘祖黎, 卢强华, 等. 柠檬酸根对纳米 Fe_3O_4 颗粒的生长及性能的影响[J]. 无机化学学报, 2004, 20(11): 1279 - 1283.
- [15] Sun Min-Min, Zhu Ai-Mei, Zhang Qiu-Gen, et al. A facile strategy to synthesize monodisperse superparamagnetic OA-modified Fe_3O_4 nanoparticles with PEG assistant[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, (369): 49 - 54.
- [16] Zhang G Q, Wu H P, Ge M Y, et al. Ultrasonic-assisted preparation of monodisperse iron oxide nanoparticles[J]. Materials Letters, 2007, 61(11 - 12): 2204 - 2207.
- [17] Tadmor R, Rosensweig R E, Frey J, et al. Resolving the Puzzle of Ferrofluid Dispersants[J]. Langmuir, 2000, (16): 9117 - 9120.
- [18] 杨宇翔, 张莉苹, 梁晓娟, 等. 纳米 Fe_3O_4 及钴离子掺杂 Fe_3O_4 : 有机碱共沉淀制备和磁性质[J]. 无机化学学报, 2010, 26(4): 668 - 676.
- [19] Huang Z, Tang F. Preparation, structure, and magnetic properties of polystyrene coated by Fe_3O_4 nanoparticles[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, (275): 142 - 147.
- [20] Wen Xian-Tao, Yang Jun-Xiao, He Bin. Preparation of monodisperse magnetite nanoparticles under mild conditions[J]. Current Applied Physics, 2008, 8(5): 535 - 541.
- [21] Song Meng-Jie, Zhang Yu, Hu Sun-Ling. Influence of morphology and surface exchange reaction on magnetic properties of monodisperse magnetite nanoparticles[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 2012, (408): 114 - 121.
- [22] 孟哲, 张冬亭, 王春平. 磁性纳米级 Fe_3O_4 的氧气诱导、空气氧化液相合成与表征[J]. 光谱实验室, 2003, 20(4): 489 - 491.

(责任编辑: 马金发)