

4 结论

(1) 钎焊接头中钎料和母材实现良好的冶金结合,界面区发生 Cu, Sn 等元素的短距离扩散。

(2) 接头界面区和焊缝区组织由亮白色相和灰黑色相组成,焊缝中局部出现的灰白色与灰黑色相间分布的树枝状组织为偏析的 α 固溶体和枝晶间 ($\alpha + \delta$) 共析体。

(3) B - Cu90PSn 钎料接头的平均抗拉强度为 300 MPa,钎料中 Sn 元素在富 Cu 相中起到固溶强化的作用,提高焊接接头抗拉强度。B - Cu90PSn 钎料断口为准解理断裂,由解理小裂纹和韧窝带组成,且韧窝较均匀。

参考文献

- [1] 黄杰,薛松柏,王博. 合金元素对 Cu-P 系钎料性能影响的研究现状[J]. 焊接,2014(11):14-19.
- [2] 龙伟民,何鹏,顾敬华,等. 中国有色金属焊接材料的发展

现状及展望[J]. 焊接,2011(11):7-10.

- [3] 龙伟民,张青科,马佳,等. 浅谈硬钎料的应用现状与发展方向[J]. 焊接,2013(1):18-20.
- [4] Long W M, Zhang G X, Zhang Q K. In situ synthesis of high strength Ag brazing filler metals during induction brazing process[J]. Scripta Materialia, 2015, 110: 41-43.
- [5] 张启运,庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京:机械工业出版社,2008:101-110.
- [6] 黄俊兰,龙伟民,张冠星. Sn 元素对铜磷钎料性能和组织的影响[J]. 焊接,2012(3):2-6.
- [7] 张启运,庄鸿寿. 三元合金相图手册[M]. 北京:机械工业出版社 2011:430-438.
- [8] 孙茂才. 金属力学性能[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.

作者简介: 李书珍,1988 年出生,硕士研究生。主要研究方向为新型钎料及其先进制造技术的研究。

30 mm 厚钛合金 TC4 磁控电弧窄间隙 TIG 焊接接头组织及力学性能研究

李双^{1,2} 徐望辉² 李锋¹ 张宇鹏² 易耀勇²

(1. 沈阳工业大学,材料科学与工程学院,沈阳 110870;2. 广东省焊接技术研究所(广东省中乌研究院),广州 510650)

摘要 对 30 mm 厚钛合金 TC4 板材进行磁控电弧窄间隙 TIG 焊接试验,并对其接头组织与力学性能进行检测分析,包括金相组织、拉伸强度、冲击韧性及显微硬度。通过优化焊接工艺试验,得到了外观成形美观、保护效果良好,未见宏观缺陷的窄间隙焊接接头。焊缝显微组织主要由片状 α 相、 β 相及细针状马氏体 α' 相组成。磁控电弧窄间隙 TIG 焊接中电弧在窄间隙坡口中进行周期性摆动,能够降低焊接热输入的同时保证侧壁充分熔合,得到的热影响区与常规 TIG 焊接方法相比要窄,宽度大约为 1~2 mm。对接头进行拉伸试验,断裂位置均在焊缝处,断裂方式为韧性断裂,接头抗拉强度可达到母材的 96% 以上。接头热影响区硬度值最高,焊缝中心区显微硬度最低,整个接头的硬度峰值出现在热影响区的粗晶区,但未见明显的硬化及软化区域。

关键词: 钛合金 磁控电弧 窄间隙 TIG 焊 组织 力学性能

中图分类号: TG442

0 序言

钛合金因具有密度小、比强度高、耐腐蚀性好等诸多

优点被广泛应用于航空、船舶、海洋工程、压力容器等领域^[1]。随着海洋工程装备向适用于深、远海环境方向发展,钛合金厚板的应用也日趋广泛,对于钛合金厚板的高效率、高质量、低成本的焊接工艺需求十分迫切。

窄间隙焊接技术采用较小间隙的 I 形或小角度 V 形坡口,因而具有填充材料少、焊接效率高、焊接变形

收稿日期: 2017-04-13

基金项目: 广东省科技计划项目(2017A070701026; 2016B070701025); 广州市科技计划项目(201508030023; 201704030068); 广东省科技计划项目(2015B050502008)。

小等优点,已成为当代工业生产中厚板结构焊接的首选技术^[2]。窄间隙焊接方法按照焊接工艺可以分为窄间隙 SAW、窄间隙 MAG 焊^[3]和窄间隙 TIG 焊,其中窄间隙 TIG 焊^[4]具有电弧稳定、焊件质量效率高、保护效果好等优点,特别适用于钛合金厚板的焊接。但是目前窄间隙 TIG 焊还存在侧壁未熔合等难点问题,为了有效解决侧壁未熔合问题,相关研究人员提出了多种窄间隙 TIG 焊接方法,比如摆动电弧、大电流等方法。乌克兰-巴顿焊接研究所将磁场技术引用到窄间隙焊接中,通过交变磁场使电弧在窄间隙坡口内做周期性摆动,增加电弧加热面积,扩大热量作用区域,有效解决侧壁未熔合问题^[5]。国内的哈尔滨工业大学和长春工业大学针对 TC4 钛合金中厚板进行了窄间隙 TIG 焊接试验,结果表明磁控电弧摆动有利于优化焊缝形貌、细化焊缝组织^[6-7]。

文中采用磁控电弧窄间隙 TIG 焊对 30 mm 厚 TC4 板材进行焊接试验,研究分析其接头的组织与力学性能,为该工艺的实际应用奠定理论基础。

1 试验方法及设备

采用磁控电弧窄间隙 TIG 焊接系统进行焊接试验,其工作原理如图 1 所示。该系统由钨极、磁场发生器和电源等部件组成;磁场发生器包括铁芯、线圈和交变电源;铁芯安装在钨极前方,当线圈中通入交变电流后,磁场通过铁芯引导到钨极电弧周围,从而在电弧区域产生磁场;随着磁场电流方向的改变,电磁场方向也跟着发生变化,流经电弧区域的焊接电流在交变磁场的作用下产生电磁力,且电磁力方向随磁场方向的变化而变化,进而促使焊接电弧在坡口内部摆动,增加侧壁热输入,实现窄间隙坡口侧壁充分熔合。电弧的摆动频率、摆动幅度分别通过磁场频率和磁场强度进行调节。

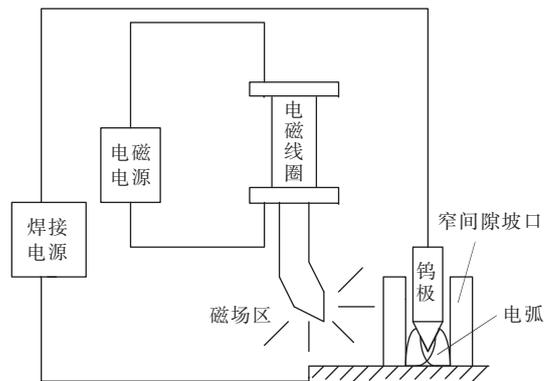


图 1 磁控电弧窄间隙 TIG 焊接示意图

试验所用母材为钛合金 TC4(Ti-6Al-4V),焊丝为同母材材料的 TC4,直径为 2 mm,母材化学成分见表 1。保护气为高纯氩气,气流量为 15 L/min。窄间隙坡口深度为 30 mm,宽度为 10 mm,背面使用垫板进行焊接装配,具体尺寸如图 2 所示。

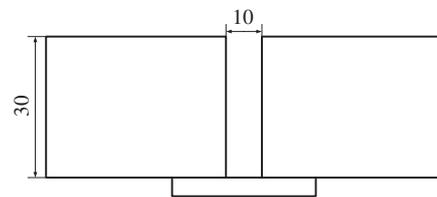


图 2 焊接试件装配尺寸

根据前期焊接工艺优化试验结果,采用的优化焊接工艺参数见表 2。焊接结束后,利用线切割截取试样,打磨、抛光至表面光亮后,用 Kroll 试剂按 HF:HNO₃:H₂O = 1:2:10 配比腐蚀液进行腐蚀,进行金相显微观察。利用数显显微硬度仪 HSV-1000 对接头焊缝、热影响区和母材进行显微硬度测量,测量过程中载荷为 1 kgf,加载时间为 10 s。根据相关标准在厚度方向分别加工拉伸及冲击试样,并根据 GB/T 228.1-2010《金属材料拉伸实验第 1 部分:室温试验方法》和 GB/T

表 1 钛合金 TC4(Ti-6Al-4V)化学成分(质量分数,%)

Ti	Al	V	Fe	Si	C	Zr	O	H
86.45~90.90	5.3~6.8	3.5~5.3	<0.6	<0.1	<0.1	<0.3	<0.2	<0.015

表 2 焊接工艺参数

层数	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 v/(m·h ⁻¹)	送丝速度 v _送 /(m·h ⁻¹)	磁场频率 f/Hz	磁场强度 B/mT
1	370	16	25	380	20	8
2~4	380	17	25	390	20	8
5	390	18	25	400	20	8

229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》标准对窄间隙焊接接头进行拉伸和冲击试验,以检验接头的力学性能。

2 试验结果及分析

2.1 焊接接头表面成形、显微组织

如图3a所示,焊缝表面光滑、成形美观、鱼鳞纹均匀紧致。在焊接过程中,尤其对于极易氧化发生脆化现象的钛合金而言,在焊前及焊后分别设置提前和滞后送高纯氩气,因此焊缝正面以及焊缝两侧周围母材部分均呈银白色,焊接保护效果良好。图3b为腐蚀后的焊缝截面图,焊接层数共为5层,每层焊接厚度为5~7 mm,侧壁熔合良好,熔深较为均匀,热影响区宽度较小,约为1~2 mm,这是由于在窄间隙焊接条件下,较小的热输入和合理的电弧热量分布使热影响区宽度很小,减小了热量对非焊接区不必要的影响^[8]。



(a) 焊缝表面



(b) 焊缝截面

图3 焊缝表面及截面

焊接接头由母材、热影响区和焊缝三部分组成,从图4可以看出,当熔合区附近的焊缝金属开始凝固时,

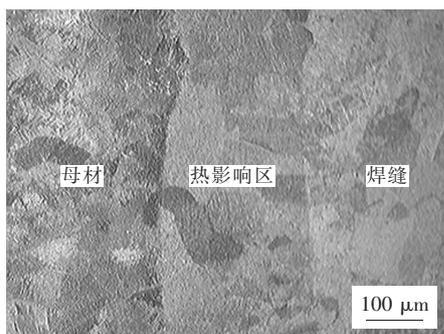


图4 焊接接头金相图片

液态焊缝金属在靠近熔合线的半熔化母材金属表面上以柱状晶的形态向焊缝中心生长,晶粒贯穿不同区域生长,纵横交织在一起,符合联生结晶的生长规律^[9]。

如图5所示为母材显微组织,主要为大量片状 α 相和 β 相晶界组成的混合组织(明亮处为 α 相,暗处为 β 相),分布在 α 相间的 β 相组织相对较少。在一集束中各 α 相形态较为均匀,基本呈现出相互平行紧密排列、具有相同的晶体学取向。

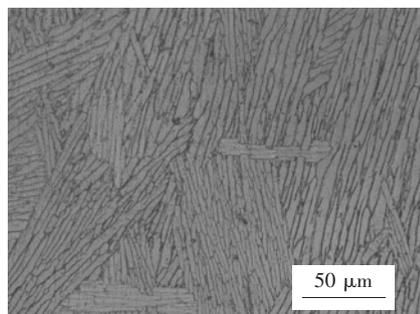


图5 母材显微组织

图6为焊缝区的显微组织,主要为长而平直的细针状马氏体 α' 组织、少量初生 α 相以及 β 相组织。在窄间隙焊接条件下,填充的焊丝量相对较少,焊缝金属冷却速度较快,原始 β 相来不及完全转变为平衡态的 α 相,并通过 β 相接近程迁移规律实现切变相变,从而形成了针状马氏体 α' 组织^[10]。在高温作用下,焊缝组织主要为 β 相,冷却时,当温度达到相变温度约980℃时,开始发生 $\beta \rightarrow \alpha$ 转变,由于材料中含有 β 相稳定元素,较快的冷却速度到室温时,焊缝组织存在残留 β 相,焊缝中由于采用填丝单道多层焊的焊接方式,后一道焊对前一道焊有回火热处理作用以及磁控电弧摆动,可使焊缝组织得到细化,形成致密分布的细针状马氏体 α' 组织,提高了接头的力学性能。图7为TC4焊缝层间熔合区图片,熔合区清晰可见,可看见不同焊层区域组织及晶粒形态的差异,这是受热影响不同形成的晶粒长大形态也不同。

热影响区包括粗晶区和细晶区,如图8所示,由于钛合金TC4导热性差,热容大,粗晶区出现在近熔合线处,靠近焊缝区温度高,高温停留时间相对较长,使部分晶粒粗大生长,使粗晶细晶之间形成一道鲜明界线,初生等轴 α 相镶嵌在粗大晶粒上,形态杂乱分布。而细晶区靠近母材一侧,由于靠近母材未受热影响区域较大,温度低,高温停留时间短,冷却速度快,形成细小晶粒,细晶区的显微组织为细针状的 α 相和少量残留的原始 β 相。

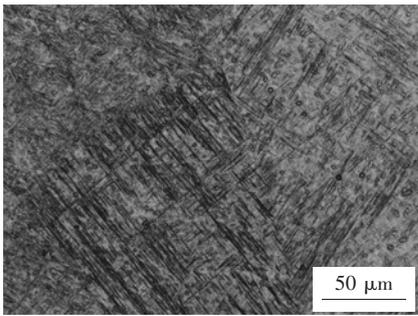


图6 焊缝显微组织

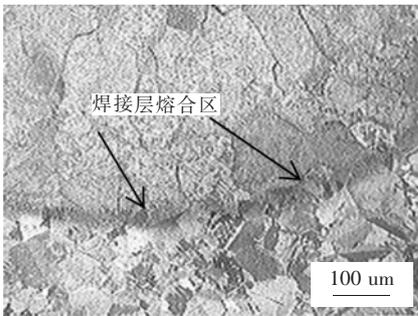


图7 焊缝熔合区金相图片

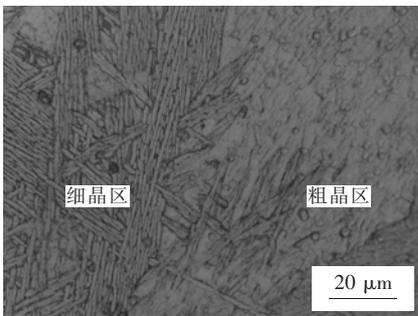


图8 粗晶区和细晶区显微形貌

2.2 接头力学性能

对焊接接头的拉伸性能进行了测试,结果见表3,接头抗拉强度约为1 073 MPa。拉伸试样断裂位置均在焊缝处,如图9所示,接头抗拉强度与母材相当(约为母材的96%,母材为1 080 MPa)。厚板钛合金在磁控窄间隙TIG焊接时,由于交变磁场作用及电弧搅拌

表3 室温拉伸试验结果

试样编号	抗拉强度 R_m /MPa	断后伸长率 A (%)	断裂位置
母材	1 080	10	母材
1-1	1 074	7.5	焊缝
1-2	1 067	6.0	焊缝
1-3	1 078	6.0	焊缝

作用,焊缝区晶粒细化,组织相互交错生长,在外加载荷作用下组织紧密相互交织,发生啮合强化^[11],大大提高焊缝强度,使焊缝拉伸性能与母材相当。这表明该方法获得的接头具有较好的抗拉性能。

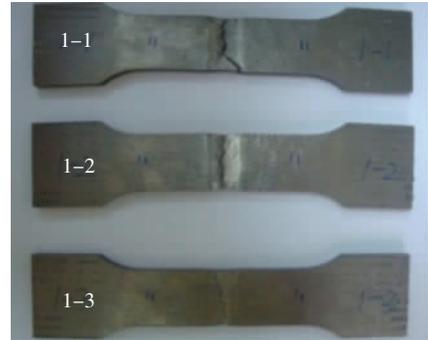


图9 拉伸试样断裂部位图

焊缝拉伸断口形貌图如图10所示,在外力作用下,随着塑性变形的产生形成显微空穴,随应力增大微孔逐渐长大,断口上形成很多密集排列大小深浅不一的韧窝,可看见居中位置有一个较大深窝,认为焊缝金属具有较大的延展性,并对裂纹的扩展具有很大的阻力,这是焊缝抗拉强度值很高的原因,并推断拉伸试样断裂方式属于韧性断裂。

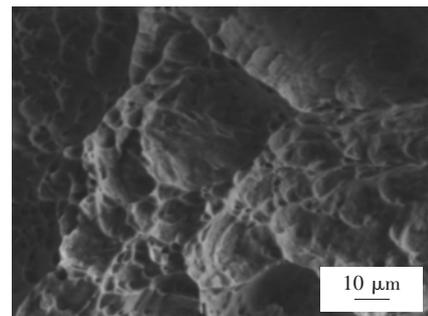


图10 拉伸断口显微形貌

焊缝冲击吸收能量结果见表4,焊缝冲击吸收能量平均值约在58 MPa,母材为78 MPa,可达到母材的74%左右,接头冲击韧性较好,满足相关标准。由于焊缝显微组织主要是片状 α 相和针状马氏体 α' 相组织, α 相晶粒为密排六方结构,在晶间弥散分布着针状马氏体,在冲击力的作用下,变形分散在晶界、晶粒内部,吸收能量,增加试样断裂强度,以及晶界在晶粒中的曲折度降低裂纹扩展速度,从而提高焊缝冲击吸收能量。

如图11所示,热影响区的平均硬度为320 HV,是整个接头硬度值最高区域,母材硬度为268.8 HV,接头的峰值硬度为325 HV,出现在粗晶区。热影响区焊接

时冷却速度快, β 相来不及扩散转变为平衡 α 相, 产生了大量密集分布的针状钛马氏体 α' 相组织, 使硬度得到提高。焊缝区域平均硬度为 280 HV, 焊缝中心线处的硬度值最低, 为 264 HV, 从焊缝中心到热影响区显微硬度值呈现上升趋势。焊缝中心显微组织多数为片状 α 相, 硬度低, 靠近热影响区焊缝部分组织属于联生结晶生长方式, 基于部分熔化的母材及填充金属产生的分散分布的钛马氏体组织, 晶粒分布密集, 以集束和畴的形式出现, 因而硬度值要高于焊缝中心, 在磁控窄间隙 TIG 焊接的整个接头未见明显的软化区。

表 4 焊缝冲击韧性结果

序号	缺口位置	冲击吸收能量 A_k/J
1-1	焊缝	58
1-2	焊缝	60
2-1	焊缝	56
2-2	焊缝	58
母材	母材	78

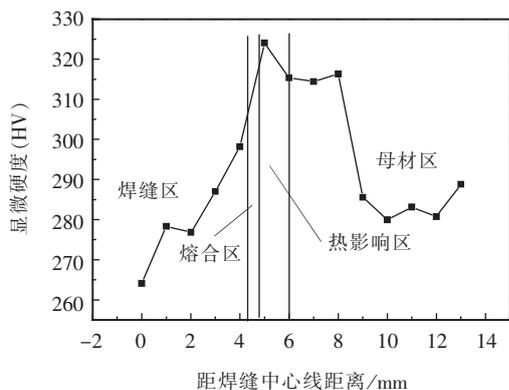


图 11 距离焊缝中心不同位置显微硬度分布图

3 结论

(1) 采用磁控电弧窄间隙 TIG 焊接方法成功焊接了 30 mm 厚板钛合金 TC4 板材, 焊缝表面成形良好, 通过合理的焊接工艺参数、焊接过程气体保护措施及磁控电弧装置, 解决了钛合金焊接侧壁熔合不良的问题, 得到了优质连接的焊接接头, 无宏观可见焊接缺陷产生。

(2) 焊缝组织主要由片状 α 相 + β 相和细针状马氏体 α' 相组成, 因不同位置冷却速度不同, 得到相同组织的形态有差异。热影响区宽度约为 1 ~ 2 mm, 包括

粗晶区和细晶区。

(3) 焊接接头硬度分布中, 焊缝硬度值最低, 峰值硬度出现热影响区, 主要为热影响区冷却速度快形成马氏体 α' 相。接头抗拉强度约为 1 073 MPa, 可达到母材 96% 以上, 说明磁控电弧窄间隙 TIG 焊可以获得具有优良力学性能的连接。

(4) 针对大厚件易氧化的钛合金焊接中, 必须采取一定的焊接保护措施对待焊件进行保护, 才能得到性能较好的焊接接头。

参考文献

- [1] Zhou Shui Liang, Tao Jun, Du Yu Xiao, et al. Analysis of temperature filed for TIG welding fine grain titanium alloy thin sheet [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2010, 31(12): 33-36.
- [2] 廖传清, 鲍宏伟, 宋伟. 厚壁不锈钢箱体构件窄间隙焊接工艺 [J]. 焊接, 2016(8): 42-45.
- [3] 赵博, 范成磊, 杨春利, 等. 高速旋转电弧窄间隙 MAG 焊焊缝成形的分析 [J]. 焊接学报, 2008, 29(9): 109-112.
- [4] 王朋, 张富巨. 窄间隙焊接技术及其新进展 [J]. 电力建设, 1999(8): 12-14.
- [5] Paton B E, Zamkov V N, Prilutsky V P. Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium [J]. Welding Journal, 1996, 75(5): 37-41.
- [6] 孙清洁, 李文杰, 胡海峰, 等. 厚板 Ti-6Al-4V 磁控窄间隙 TIG 焊接接头性能 [J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 9-12.
- [7] 李慧. 厚板钛合金窄间隙 TIG 焊接接头组织与力学性能研究 [D]. 长春: 长春工业大学硕士学位论文, 2014.
- [8] 姜永春. 厚板钛合金窄间隙 TIG 焊焊接接头组织与力学性能 [J]. Defense Manufacturing Technology, 2013, 6(3): 49-52.
- [9] 张文钺. 焊接冶金学(基本原理) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [10] Balasubramanian M, Jayabalan V, Balasubramanian V. Effect of microstructure on impact toughness of pulsed current GTA welded α - β titanium alloy [J]. Materials Letters, 2008, 62(6-7): 1102-1106.
- [11] 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.

作者简介: 李双, 1992 年出生, 硕士研究生。主要从事钛合金焊接工艺研究, 已发表论文 1 篇。