

# 热连轧高强钛合金厚壁管道的 TIG 工艺及组织和性能

冯靖<sup>1</sup>, 吕雪岩<sup>1</sup>, 周晓锋<sup>1</sup>, 武少杰<sup>1</sup>, 程方杰<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学, 天津 300072; 2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 针对采用新型的热连轧工艺生产的厚壁高强度无缝钛合金管, 通过 TIG 自动送丝与手工填丝 2 种焊接方法进行了环缝对接焊接工艺试验, 对比分析了 2 种工艺下接头的焊缝成形、微观组织及力学性能。结果表明, 2 种焊接方法下的焊道表面均呈亮银色, 无明显氧化现象, 自动送丝接头表面成形更加平滑美观, 而手工填丝接头表面成形有不规则的鱼鳞纹; 热影响区中  $\beta$  相均发生了一定程度的粗化, 并生成了一定量的细针状  $\alpha'$  马氏体相。焊缝区组织主要为沿  $\beta$  相界生成的板条状和块状  $\alpha$  相, 以及晶粒内形成的少量针状  $\alpha'$  马氏体组织; TIG 自动送丝和手工填丝焊接接头的硬度都是热影响区最高, 焊缝最软而母材居中; 拉伸试验断裂位置均位于焊缝, 平均抗拉强度分别为 603.8 MPa 和 571.7 MPa; 热影响区的冲击吸收能量分别达到了 41.7 J 和 78.5 J, 手工填丝下的热影响区表现出了比母材更好的冲击韧性。

**创新点:** (1) 研究了热连轧工艺下新型钛合金管道手工 TIG/自动 TIG 工艺下的组织及力学性能, 2 种工艺均采用多层多道焊技术。  
(2) 2 种工艺采用纯钛焊丝进行填充时, 接头抗拉强度均高于母材; 焊缝及热影响区冲击韧性均高于母材; 焊缝由于纯钛焊丝合金元素低, 冷却下来焊缝位置形成的马氏体含量低。  
(3) 手工 TIG/自动 TIG 多层多道工艺下复杂的热过程起到了合适的热处理作用, 热影响区形成了大量重叠交织的  $\alpha$  组织, 使得热影响区的冲击韧性大幅度提升, 解决了该系钛合金常规焊接工艺下热影响区冲击韧性差的问题。

**关键词:** 高强钛合金; 自动送丝; 手工填丝; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG457.19 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20210828002

## TIG process, microstructure and properties of hot-rolled high-strength titanium alloy thick-walled pipe

Feng Jing<sup>1</sup>, Lü Xueyan<sup>1</sup>, Zhou Xiaofeng<sup>1</sup>, Wu Shaojie<sup>1</sup>, Cheng Fangjie<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** For the thick-walled high-strength seamless titanium alloy pipe produced by the new hot continuous rolling process, the circular weld butt welding process test was carried out by the two welding methods of TIG automatic wire feeding and manual wire filling, and the joints under the two processes were compared and analyzed from aspects of formation of weld, microstructure and mechanical properties. The results showed that the surface of the weld pass under the two welding methods appeared bright silver without obvious oxidation. The surface of the joint under automatic wire feeding was smoother and beautiful, while the surface of the joint under manual wire filling had irregular fish scales. The  $\beta$  phase in the heat-affected zone got coarsened to a certain extent, and a certain amount of fine needle-like  $\alpha'$  martensite phase formed. The microstructure of the weld zone was mainly lath and block  $\alpha$  phases formed along the  $\beta$  phase boundary, as well as a small amount of acicular  $\alpha'$  martensite formed in the crystal grains. Hardness of the TIG joint under both automatic wire feeding and manual wire filling were the highest in the heat-affected zone, hardness of the weld was the lowest and hardness of the base material was in the middle. The tensile test fracture positions all located in the weld, and the average tensile strength was 603.8 MPa and 571.7 MPa respectively. The impact energy absorption of the heat-affected zone reached 41.7 J and 78.5 J respectively, and the heat-affected zone under manual wire filling showed better impact toughness than the base metal.

收稿日期: 2021-08-28 修改日期: 2021-10-13 录用日期: 2021-10-19

基金项目: 天津市科技计划项目(18ZXJMTG00140)

- Highlights:** (1) Microstructure and mechanical properties of new titanium alloy pipe under hot rolling process were studied under manual TIG/automatic TIG process, both processes adopted multi-layer and multi-pass welding technology.
- (2) When pure titanium wire was used for filling in the two processes, tensile strength of the two joints was both higher than that of the parent metal, and impact toughness of weld and heat affected zone was higher than that of the parent metal. Due to the low alloying element of pure titanium welding wire, the content of martensite formed at the weld position was low after cooling.
- (3) The complex thermal process of manual TIG/automatic TIG multi-layer and multi-pass process played an appropriate role in heat treatment, and a large number of overlapping  $\alpha$  microstructure formed in the heat affected zone, which greatly improved the impact toughness of the heat affected zone and solved the problem of low impact toughness of the heat affected zone under the conventional welding process of this titanium alloy.

**Key words:** high-strength titanium alloy, automatic wire feeding, manual wire filling, microstructure, mechanical properties

## 0 前言

钛及钛合金作为 20 世纪中叶发展起来的一种重要金属材料,在性能上具有低温性能好、比强度高、抗冲击性能与耐腐蚀性能强等优点,满足了许多海洋工程材料的特殊要求,因此钛合金享有“海洋金属”、“智能金属”等美誉<sup>[1-2]</sup>。另外,在某些特定腐蚀环境下,钛合金管也成为代替不锈钢管、铜合金管及镍基合金管的理想材料,在显著提高管道寿命的同时,还可达到减重的目的<sup>[3]</sup>。在国外,钛合金管道已经被成功用于了高温油井管、医疗设备介入导管、飞机舰船的燃料和冷却管道系统<sup>[4]</sup>;国内对于钛合金管道焊接性的研究尚未形成成熟的体系,特别是在批量化生产高强度高耐蚀性的厚壁无缝管及其配套焊接工艺方面明显落后工业发达国家,这极大限制了国内钛合金管道的推广应用。

钛合金由于熔点高、导热性差、在焊接等热加工过程中易吸收 H、O、N 等元素使得接头产生脆化等,严重地降低了焊接接头的综合力学性能<sup>[5-6]</sup>。理论上,常用的焊接工艺包括等离子弧焊、电子束焊、激光焊、MIG、电渣焊及 TIG 等都可以用于钛合金的焊接<sup>[7-13]</sup>。但经过调研发现,在诸多的钛合金焊接方法中,真正在工程上应用最成熟和最广泛的还是 TIG, TIG 工艺虽然效率较低,但是它具有操作灵活、适用范围广、成本低及接头综合性能高等优点<sup>[14]</sup>。

该研究选用了自动送丝和手动填丝 2 种典型的 TIG 进行工艺开发。文中的焊接对象是采用热连轧工艺制造的一种厚壁高强高耐蚀的钛合金无缝管,热连轧作为一种简便高效的钛合金管材生产技术,可实现厚壁钛合金无缝管的连续化生产,但热连轧工艺具有厚度公差大、生产管胚短的缺点,通常需要配合相应的焊接成形工序。文中采用 TIG 手工填丝和自动送丝 2

种焊接方式进行工艺试验,对比分析了 2 种 TIG 焊接方法下焊缝的成形、组织及力学性能差异,对于该系厚壁高强高耐蚀的钛合金无缝管的焊接生产具有一定的参考价值。

## 1 试验材料、设备及方法

TIG 自动送丝选用了福尼斯 TransTig 型焊机, TIG 手工填丝选用了米勒 350 型多功能焊机。试验材料选用了 198 mm × 89 mm × 7.8 mm 的 Ti-Al-Nb-Zr-Mo 系近  $\alpha$  型无缝高强钛管。自动送丝选用了直径 1.6 mm、钛含量大于 99.9%、标称抗拉强度为 295 ~ 470 MPa 的 HTA0-1M 纯钛型焊丝,手工填丝工艺使用同材质直径 3.0 mm 的焊料棒。管与管之间采用 V 形坡口对接,坡口角度为  $60^\circ \pm 5^\circ$ ,钝边尺寸为 1 mm,坡口间隙量为 1.5 mm,焊道排布及坡口形貌尺寸如图 1 所示。保护气采用纯度为 99.99% 的高纯氩气,保护气流量为 15 L/min,焊接过程中采用拖罩通氩气对高温焊缝进行保护,尾罩保护气流量为 20 L/min。TIG 自动送丝与手工填丝的焊接电参数和运动参数见表 1。

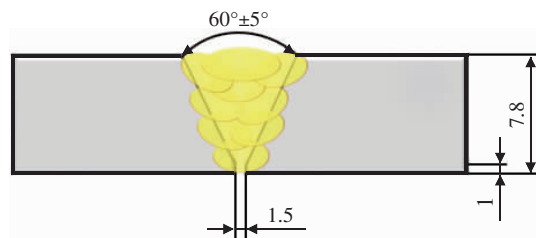


图 1 TIG 过程焊道排布及坡口尺寸形貌图

由于 TIG 自动送丝与手工填丝选用的试验材料、尺寸一致,因此采用相同的取样标准进行力学综合性能评判。采用线切割的方法分别在钛管上截取 2 个全厚度尺寸的拉伸标准试样和 9 个冲击标准试样,冲击

表 1 2 种 TIG 方式下焊接工艺参数

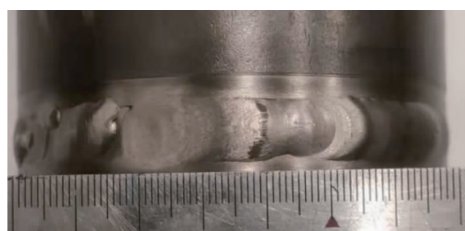
送丝方式	焊接电流 /A	电弧电压 U/V	送丝速度 $v_f/(m \cdot min^{-1})$	焊接速度 $v_w/(m \cdot min^{-1})$
自动	122	9.6	0.36	0.26
手工	80~110	9.6	—	—

试样的缺口分别开在母材、热影响区处和焊缝处,取样标准参照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》和 GB/T 229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》。

硬度测试选用了 HVA-10A 型小负荷的显微维氏硬度仪,测量载荷为 1 kg,负载时间 10 s,测量位置为焊缝上沿距离表面 4 mm 位置处。从焊缝中心线到母材方向,每隔 0.5 mm 进行一次硬度测试;拉伸试验在 MTS 的电子万能拉伸机上进行,试验前用水砂纸打磨线切割加工面,以保证试验的准确性;冲击试验采用摆锤式冲击试验机在 -10 ℃ 条件下保温 15 min 后,分别对母材、热影响区及焊缝区域进行试验,测试结果取平均值。

## 2 焊缝成形及组织分析

图 2 为 2 种焊接方法下接头的宏观形貌,可以看出,TIG 自动送丝的接头宏观成形要优于 TIG 手工填丝,这取决于小尺寸管道自动焊下具有更高的精准度与稳定性。TIG 手工填丝接头表面成形不均匀,形成了明显的余高,约为 1.5 mm。TIG 自动送丝的接头表面光滑平整,无明显余高,焊缝表面有亮银色鱼鳞纹产生。2 种 TIG 方法下的熔宽均在 10 mm 左右,且表面



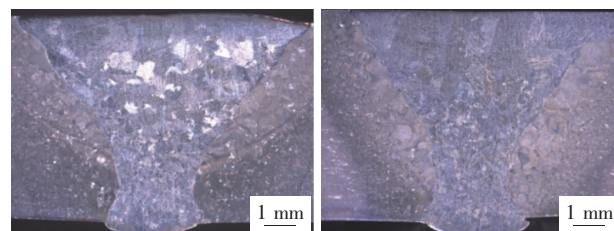
(a) 手工 TIG



(b) 自动 TIG

图 2 2 种 TIG 焊接方法下的钛管表面形貌

均无明显氧化、未熔合和气孔等缺陷产生;图 3 为 2 种焊接方法下接头的截面形貌,由图可知,焊缝背部均存在一定的余高。此外,TIG 手工填丝由于热输入更大、焊接过程中的热作用更加随机复杂,截面形貌表现更粗大的晶粒尺寸及更复杂的组织变化特征。



(a) 手工 TIG

(b) 自动 TIG

图 3 2 种 TIG 焊接方式下钛管截面形貌

由图 4 可知,母材主要由白亮色初生等轴  $\alpha$  相、魏氏组织及少量  $\beta$  相成。魏氏组织为原  $\beta$  晶粒上析出的平行片层状  $\alpha$  相。钛合金中魏氏组织的形成机理是当加热到  $\beta$  相区温度下缓慢冷却, $\alpha$  片层充分生长而形成,其组织特点表现为断裂韧性高,延伸率差,母材中魏氏组织的出现是热连轧过程中变形量不足与冷却速度慢导致的。

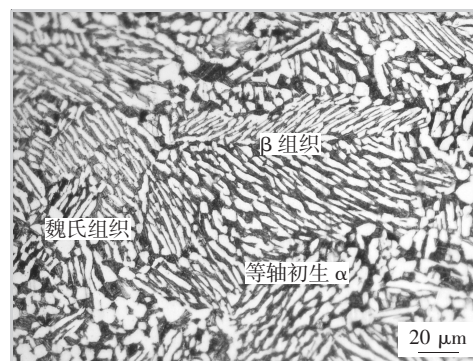


图 4 母材微观组织

2 种焊接方法下焊缝及热影响区组织形貌如图 5 所示,图 5a 和图 5e 截取了 2 种焊接方法下接头的典型区域。其中,TIG 手工填丝的热输入要远大于自动送丝,导致 2 种方法下的焊缝及热影响区处组织特征有一定的区别。图 5b 与图 5f 为过渡区组织,在高于  $\beta$  相变点的焊接热循环作用下,该区域中原始等轴初生  $\alpha$  相和  $\beta$  相发生了明显粗化,原始等轴  $\alpha$  晶粒上析出了大量的不均匀  $\beta$  相,导致过渡区中原始等轴  $\alpha$  组织的晶界特征变得模糊,并伴随有少量细针状  $\alpha'$  马氏体生成,2 种焊接方法下过渡区组织无明显差异;图 5c 与图 5g 为热影响区组织,该区域所经历的焊接热循环峰值

温度升高,晶粒尺寸变大。其中,TIG 手工填丝下  $\beta$  晶界轮廓明显,并沿  $\beta$  晶界首先析出连续的晶界  $\alpha$  相, $\beta$  晶界内部生成了大量的细针状  $\alpha'$  马氏体。TIG 自动送丝下原始  $\beta$  晶界难以发现,生成粗大的  $\alpha'$  马氏体组织。相比而言,手工填丝下接头的粗晶区形成的细针状  $\alpha'$  马氏体比例更高,尺寸更加均匀细长;图 5d 与图 5h 为焊缝区组织,TIG 手工填丝焊缝处的组织为沿  $\beta$  晶界形成的高长径比大板条状  $\alpha$ ,以及少量块状  $\alpha$  和细针状  $\alpha'$  马氏体组织, $\beta$  晶界不再清晰;TIG 自动送丝焊缝处组织主要为沿  $\beta$  晶界生长出大块状  $\alpha$  组织和少量细针状  $\alpha'$  马氏体组织。

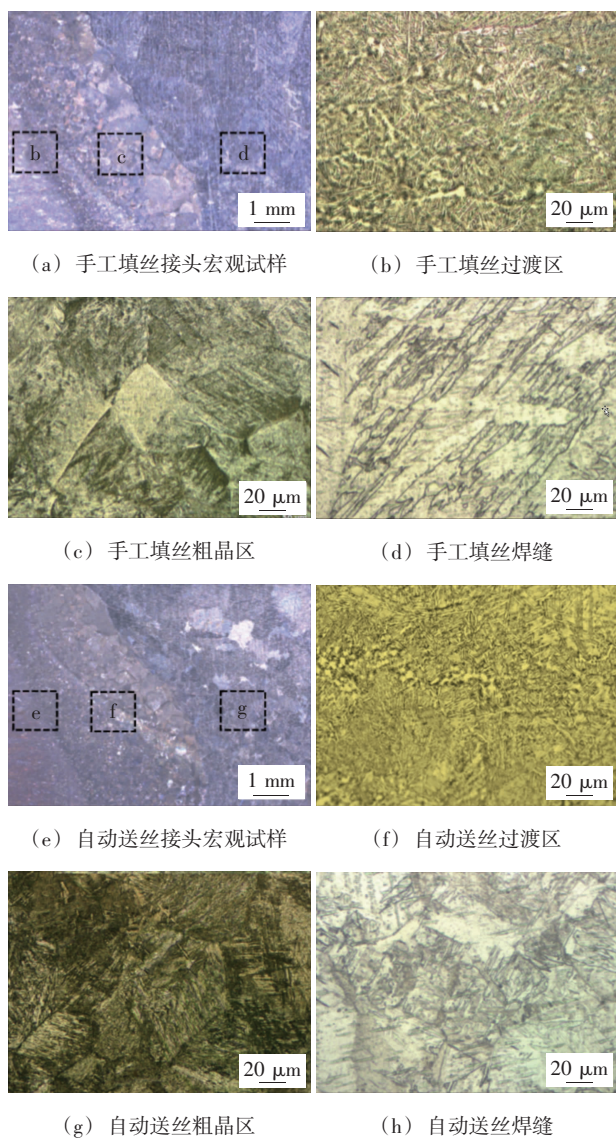


图 5 2 种 TIG 下的热影响区组织与焊缝微观组织

### 3 力学性能分析

#### 3.1 显微硬度

图 6 为 2 种焊接方法下的硬度变化规律,数据得

出,TIG 自动送丝和手工填丝下接头的硬度变化规律近似,总体硬度趋势均为热影响区 > 母材 > 焊缝。热影响区处由于冷却速度超过了临界冷却温度而形成了大量硬、脆的  $\alpha'$  马氏体,导致硬度值相比于母材显著提升。而焊缝由于填充材料为纯钛,合金元素含量低,凝固过程中仅形成的  $\alpha'$  马氏体比例大大减少,接头处硬度发生了明显的软化。此外,TIG 手工填丝在焊缝及热影响区处整体硬度值要高于自动送丝,这与手工填丝热输入高,导致  $\beta$  晶粒尺寸更大, $M_s$  点上升,生成马氏体含量更多导致的。

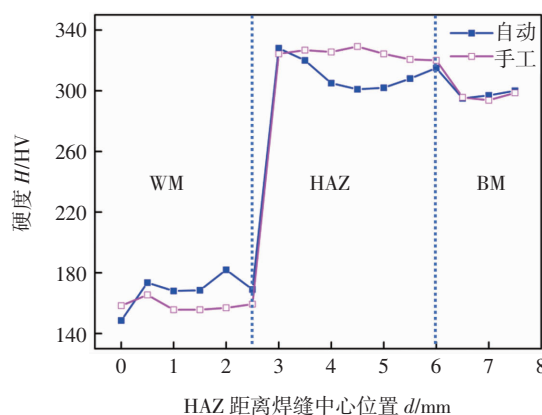


图 6 显微硬度分布图

#### 3.2 拉伸性能

由表 2 可知,TIG 自动送丝下接头的平均抗拉强度为 603.8 MPa,手工填丝下接头的平均抗拉强度为 571.7 MPa,自动送丝下接头的抗拉强度略高于手工填丝。由图 7 可知,2 种焊接方法下的拉伸试样均断裂在焊缝的位置处,焊缝处抗拉强度低于母材。

表 2 TIG 自动送丝与手工填丝拉伸性能

送丝方式	抗拉强度 $R_m$ /MPa	
	单值	平均值
自动	578.7,628.8	603.8
手工	530.3,613.1	571.7

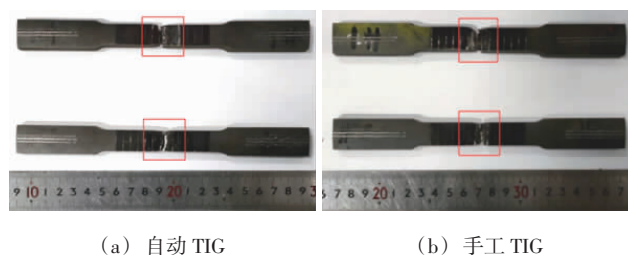
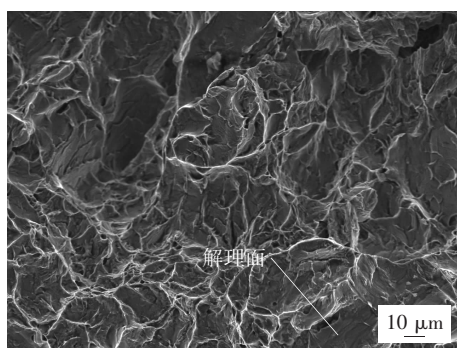
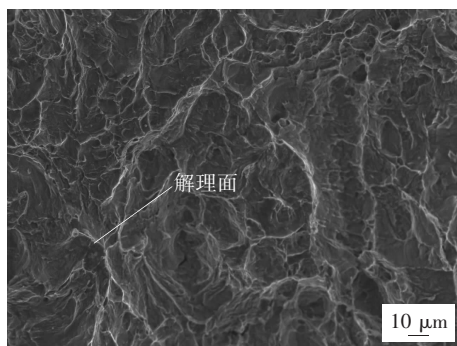


图 7 拉伸试样断裂位置

图8为2种焊接方法下的断口形貌,TIG自动送丝和手工填丝下拉伸接头断口形貌表现为大量网状等轴韧窝,同时混合了一定比例的光滑解理面。相比之下,TIG自动送丝断口处的韧窝更加致密,尺寸小而深,抗拉强度更高。2种焊接方法下的拉伸试样断裂形式均为韧性断裂+少量的解理断裂形式。



(a) 自动 TIG



(b) 手工 TIG

图8 试样断口形貌

### 3.3 冲击试验结果

图9给出了2种焊接方法下的冲击试验结果。TIG自动送丝的试样冲击韧性无明显差异,TIG手工填丝下热影响区的冲击韧性要优于母材。对于焊缝及热

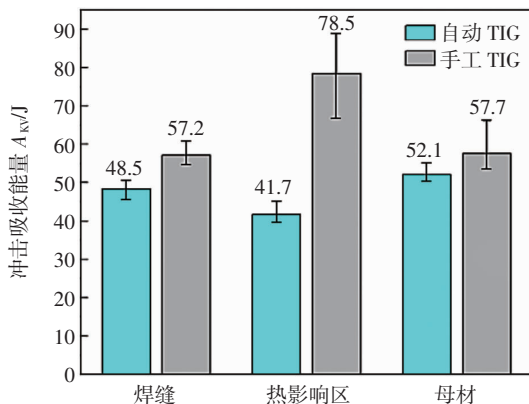


图9 TIG自动送丝与手工填丝冲击结果图

影响区,TIG手工填丝的冲击功高于TIG自动送丝。观察冲击试样发现,TIG自动送丝下,缺口开在不同位置处的试样全部断裂,而TIG手工填丝下,缺口开在热影响处的试样仍保证了部分连接。

## 4 讨论

该次试验选取了TA0级的纯钛焊材,该焊材的标称抗拉强度仅为295~470 MPa。拉伸试验结果得出,尽管焊缝抗拉强度仍低于母材,但是TIG手工填丝抗拉强度可达571.7 MPa,TIG自动送丝更是达到了603.8 MPa,抗拉强度远高于焊材标称抗拉强度。这是因为钛合金TIG焊过程中,焊缝及热影响区处冷却速度超过生成马氏体的临界速度,析出了一定量的马氏体组织,提高了焊缝的抗拉强度,这为钛合金焊材选取提供了参考。焊接过程中要充分考虑到焊缝冷却速度、焊材合金元素对焊缝组织转变过程的影响,可以通过低合金化的材料作为填充金属,利用快速冷却形成一定量的马氏体相提升接头强度和硬度,获得综合性能优异的焊接接头,不宜简单遵循钢材焊接时选择成分近似填充金属的原则。

文中试验结果发现TIG手工填丝下热影响区表现出了优异的冲击韧性(78.5 J),甚至明显高于母材(57.7 J)。可以推测,该热输入下的手工多层多道焊复杂的热过程可能也是一种不错的热处理过程,使热影响区处原交织分布的针状马氏体组织发生相变,沿晶界形成了白块状 $\alpha$ 组织,进而提升接头韧性。出现该现象的具体原因尚不清楚,还需要后续进一步的研究分析。

## 5 结论

(1)采用自动送丝或手动填丝的TIG焊工艺都可以成功的实现厚壁钛合金管的环缝焊接,焊道成形良好,颜色银白而且无气孔、未熔合和夹渣等缺陷。

(2)2种TIG焊接方法下热影响区组织差异不大,都是由沿粗大的 $\beta$ 晶粒边界析出的连续晶界 $\alpha$ 相和晶内大量交错分布的细针状 $\alpha'$ 组织构成;焊缝区组织主要是沿 $\beta$ 晶粒生成的板条状 $\alpha$ 、大块状 $\alpha$ 及少量 $\alpha'$ 马氏体组织构成。

(3)TIG自动送丝焊接接头的平均抗拉强度为603.8 MPa,TIG手工填丝下接头的平均抗拉强度略低,为571.7 MPa。断裂发生在焊缝金属上。

(4)TIG自动送丝和手工填丝接头处均表现了良好的冲击韧性,前者热影响区的冲击吸收能量甚至超过了母材。

## 参考文献

- [1] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.
- [2] 李毅, 赵永庆, 曾卫东. 航空钛合金的应用及发展趋势[J]. 材料导报, 2020, 34(Z1): 280-282.
- [3] 范丽颖, 刘俊玲, 安红. 钛在海洋工程上的应用现状及前景展望[J]. 中国金属通报, 2006(Z2): 25-28.
- [4] 江志强, 杨合, 詹梅, 等. 钛合金管材研制及其在航空领域应用的现状与前景[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 44-50.
- [5] 于得水, 张岩, 周建平, 等. 钛合金与铝合金异种金属焊接的研究现状[J]. 焊接, 2020(11): 37-45.
- [6] 侯继军, 董俊慧, 白雪宇, 等.  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  活性激光焊接 TC4 钛合金焊缝成形和组织[J]. 焊接学报, 2019, 40(10): 67-72.
- [7] 郭春富, 刘帛炎, 董春林, 等. TC4 厚壁管全位置 PAW 工艺及接头性能分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(7): 121-126.
- [8] 房卫萍, 肖铁, 张宇鹏, 等. 超厚板 TC4 钛合金电子束焊接接头应力腐蚀敏感性[J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 121-128.
- [9] Duan Aiqin, Wang Zhenshu, Peng Huan, et al. Effect of undercut defect on deformation behavior TC4 titanium alloy laser welded butt joint under static tensile loading [J]. China Welding, 2020, 29(2): 34-41.
- [10] 许爱平, 董俊慧, 甄甄杨, 等. 单一氟化物对钛合金激光光焊的影响[J]. 焊接, 2020(9): 24-26.
- [11] 李瑞武, 邱胜闻, 徐家磊, 等. 钛合金 T 形接头双面双弧 MIG 焊工艺[J]. 焊接, 2020(8): 39-44.
- [12] Akhtar Awais, Dong Honggang, Xia Yueqing, et al. Lap joining 5052 aluminum alloy to Ti6Al4V titanium alloy by GTAW process with AlSi12 filler wire [J]. China Welding, 2020, 29(3): 1-8.
- [13] Ryabtsev Anatoliy D, Troyanskyy Oleksandr A, Pashynskiy Volodymyr V, et al. Alloying of titanium by oxygen during chamber electroslag remelting [J]. Vojnotekhnichki Glasnik/Military Technical Courier, 2014, 62(4): 72-78.
- [14] 田喜明, 卫娜, 周中波, 等. Ti-Al-Fe 低成本钛合金 TIG 焊焊接组织和性能研究[J]. 钛工业进展, 2020, 37(5): 23-26.

第一作者: 冯靖, 硕士研究生; 主要从事先进连接技术方面的科研工作; 18851197936@163.com。

通信作者: 程方杰, 博士, 教授, 博士生导师; 主要研究方向为先导焊接工艺与电弧增材制造; chfj@tju.edu.cn。

(编辑: 王龙权)

## Active Bond<sup>®</sup> 系列通用活性钎料

## Cerasolzer<sup>®</sup> 系列高强度活性钎料

## S-Bond<sup>®</sup> 系列低熔点活性钎料



适用于真空钎焊和超声波钎焊方法  
适用于玻璃、陶瓷、半导体材料的钎焊

免费出样 支持定制  
欢迎来电来函索取资料  
电子邮箱: shanghai\_yuerong@163.com  
电话/微信: 17717291389

\*\*\* 本广告中的所有图文仅供参考, 产品以实际为准。本公司在法律允许的范围内保留最终解释权, 并可以在不事先通知的情况下对产品和资料进行更改。本广告中的“高”、“低”、“活性”等比较性表达和功能性表达仅表示与本公司产品相比较。本广告中的“适用于”仅表示在本公司的经验范围内所适用的对象, 不表示对所有本广告所提及的对象均适用。本广告不作为合同要约, 买卖双方的权利义务以合同为准。

 上海越融科技发展有限公司  
Shanghai Yue Rong STD Co. Ltd.

广告