

核电热交换器用耐蚀钛焊管制备工艺研究

张望成, 鲁蓉蓉, 曾宪山

(湖南湘投金天新材料有限公司, 湖南 益阳 413000)

摘要: 采用“W + 双半径”反弯成型方法将钛带弯曲成型, 用非熔化极钨极氩弧焊进行焊接, 试制出规格为 $\phi 25.4 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的核电热交换器用耐蚀钛焊管。采用金相显微镜、电子万能试验机和氧氮氢联测仪等对试制的钛焊管的金相组织、焊缝宏观形貌、力学性能、工艺性能、化学成分等进行了检测和分析。结果表明: 当焊接电流为 120 A、焊接电压为 11 V 时, 制得的钛焊管焊缝接头质量最好, 化学成分、显微组织和力学性能各项指标均满足核电热交换器用耐蚀换热管的技术要求。

关键词: 核电; 耐蚀换热管; 焊接; 钛焊管

中图分类号: TG457.19; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2021)04-034-04

Study on Preparation Process of Corrosion Resistant Titanium Weld Tubes for Nuclear Heat Exchange

Zhang Wangcheng, Lu Rongrong, Zeng Xianshan

(Hunan Xiangtougoldsky New Materials Co., Ltd., Yiyang 413000, China)

Abstract: The titanium strip was bent by “W + double radius” reverse bending method and welded by non melting tungsten argon arc welding, then the corrosion resistant titanium weld tube with specification of $\phi 25.4 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ for nuclear heat exchange was produced. The metallographic structure, weld macro morphology, mechanical and technological properties, chemical composition and some other properties of titanium weld tube were tested and analyzed by metallographic microscope, electronic universal testing machine and oxygen, nitrogen, hydrogen joint tester. The results show that when the welding current is 120 A and the welding voltage is 11 V, the quality of the welded joint of titanium weld tube is the best, and chemical composition, microstructure and mechanical properties of the tube are all meet the technical requirements of the corrosion resistant heat exchange tube for nuclear heat exchange.

Key words: nuclear power; corrosion resistant heat exchange tube; welding; titanium weld tube

钛及钛合金密度小、热导率适中, 在海水和海洋大气环境中具有良好的耐蚀性。钛焊管作为一种优异的高性能耐蚀换热管, 被广泛应用于核电热交换器中, 以应对冷却介质——海水的侵蚀, 保证核电设备的安全、稳定运行^[1-3]。

高性能耐蚀换热管是核电热交换器的核心材料, 但其关键制备技术长期以来被美国、日本等国家垄断^[2], 直接影响我国核电产业发展。目前, 国产钛焊管存在的主要问题是焊缝质量难以达到核电用标

准。为保障我国核电产业长远、安全发展, 高性能耐蚀钛焊管国产化的需求日益迫切。核电热交换器用高性能耐蚀钛焊管的完全自主生产, 将打破长期依赖进口的局面, 为我国核电全面国产化和快速发展提供重要保障, 并为我国核电走出国门奠定基础。

本研究采用“W + 双半径”反弯成型和非熔化极钨极氩弧焊(TIG焊)工艺试制高品质耐蚀钛焊管, 以期核电热交换器用耐蚀钛焊管的工业化生产提供参考。

1 实验

1.1 材料与工艺

实验所用纯钛带由湖南湘投金天科技集团生产,

收稿日期: 2021-01-18

基金项目: 国家科技重大专项项目(2020ZX06004003)

通信作者: 张望成(1990—), 男, 工程师。

其化学成分如表1所示。

表1 纯钛带化学成分(w%)

Table 1 Chemical composition of pure titanium strip

| C | O | N | H | Fe | Ti | Other elements | |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|----------------|-------|
| | | | | | | Each | Total |
| 0.010 | 0.120 | 0.010 | 0.010 | 0.040 | Bal. | ≤0.10 | ≤0.40 |

采用结构优化的JT50自动化连续钛焊管生产线进行生产，成品规格为 $\phi 25.4\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ ，工艺流程为：带材→卷曲成型→焊接→定径→在线退火→涡流探伤→激光测径→主线定尺切断(性能检验)→超声波探伤→水下气密试验。

针对钛弹性模量低，卷曲成型后回弹大的特点，采用“W+双半径”反弯成型法匹配“窄间隙排辊”技术卷曲成型。通过理论模拟分析和实际生产试制，开发了用于制备核电热交换器用耐蚀钛焊管的“高速成型变形回弹补偿”技术。图1为自行设计的“W+双半径”反弯成型法专用轧辊简图。

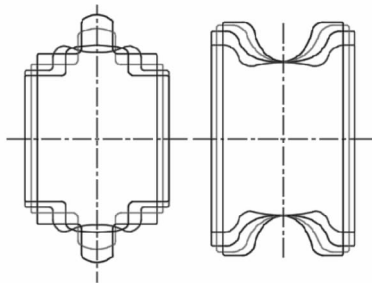


图1 轧辊设计简图

Fig. 1 Schematic diagram of roller

采用TIG焊直流正接法进行焊接^[4,5]。为避免焊接过程中焊缝发生氧化，焊合室、焊枪和换热管均采用氩气(纯度≥99.99%)保护。焊接用钨极直径为3.2 mm，在5 m/min的管材试制速度下，进行了3组焊管试制，其中：1#样管焊接电流150 A，焊接电压14 V；2#样管焊接电流140 A，焊接电压12 V；3#样管焊接电流120 A，焊接电压11 V。

1.2 样品检测

从1#、2#、3#样管中分别取1支，然后在每支样管上截取10个试样分别用于化学成分、力学性能、焊缝宏观形貌、金相组织以及工艺性能的检测和分析，其中拉伸试样3个，压扁试样2个。钛焊管取样部位及尺寸如图2所示。

化学成分分析采用LECO氧氮氢联测仪和红外碳

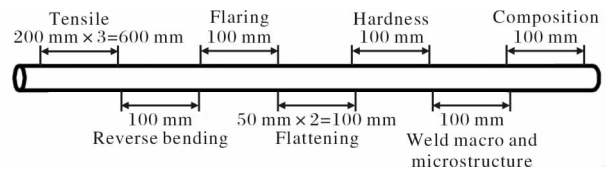


图2 焊管取样部位及尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling position and size of welded tubes

硫测定仪；工艺性能检测采用CDT1305型电子压力试验机；焊缝宏观形貌和金相组织观察采用XJZ-6A型金相显微镜；拉伸性能检测采用CMT5105型电子万能试验机(100 kN)；硬度检测采用Wolpert 402MVA型自动转塔显微维氏硬度计。

对所有钛焊管均进行涡流探伤和超声波探伤检测。超声波探伤采用Echomac FD-4E超声波探伤仪。人工缺陷宽度0.25 mm，长度12.7 mm，深度0.10 mm，缺口位于焊缝。钛焊管若存在1个或多个的信号振幅等于或大于样管缺陷最低参照信号的50%，则判定为不合格管。涡流探伤采用EDDYCHECK-5型涡流探伤仪，标准通孔直径≤0.80 mm，纵向间距300 mm，周向间隔120°，3个孔均位于基材。钛焊管若存在1个或多个的信号振幅等于或大于样管缺陷最低参照信号的50%，则判定为不合格管。

2 结果与分析

2.1 化学成分

钛焊管的化学成分对其各项性能有重要影响。钛作为一种活泼金属，在高温下与氧、氮、氢的反应速度极快，在300℃以上快速吸氢，600℃以上快速吸氧，700℃以上快速吸氮^[6-9]。焊接过程中如果保护不当，极易发生吸气，影响焊缝性能，造成焊缝强度过高和产生吸氢腐蚀。表2为试制的钛焊管杂质元素含量检测结果。由表2可知，钛焊管中Fe、O等杂质元素含量低于DB MS4550T标准上限要求。

表2 钛焊管杂质元素含量(w%)

Table 2 Impurity elements content of titanium welded tubes

| No. | N | C | H | Fe | O | Other elements | | |
|------------|------|-------|-------|--------|-------|----------------|-------|-------|
| | | | | | | Each | Total | |
| 1# | 0.01 | 0.01 | 0.001 | 0.03 | 0.11 | <0.08 | <0.20 | |
| 2# | 0.01 | 0.01 | 0.002 | 0.01 | 0.11 | <0.08 | <0.20 | |
| 3# | 0.01 | 0.01 | 0.001 | 0.03 | 0.10 | <0.08 | <0.20 | |
| DB MS4550T | | ≤0.02 | ≤0.05 | ≤0.010 | ≤0.10 | ≤0.15 | ≤0.10 | ≤0.40 |

2.2 力学性能

对试制的钛焊管进行拉伸试验,其结果如表3所示。从表3可以看出,试制的钛焊管各项技术指标均在DB MS4550T标准要求范围内,且延伸率远大于标准要求的下限值。钛焊管延伸率较高可能与本次试制所用钛带中的Fe、O元素含量低于标准要求有关。

表3 钛焊管的室温力学性能

Table 3 Room temperature mechanical properties of titanium welded tubes

| No. | R_m /MPa | $R_{p0.2}$ /MPa | $A_{50}/\%$ |
|----------------|------------|-----------------|-------------|
| 1 [#] | 455 | 341 | 36.4 |
| 2 [#] | 465 | 332 | 38.0 |
| 3 [#] | 470 | 343 | 42.2 |
| DB MS4550T | ≥ 345 | 275 ~ 450 | ≥ 25 |

表4为钛焊管横截面不同位置的硬度检测结果。由表4可知,生产的钛焊管焊缝位置整体硬度高于母材,同时焊缝与母材之间的硬度差均小于294 MPa,满足核电热交换器用钛焊管焊缝硬度要求。焊缝位置为铸造组织,内部存在较多的晶体缺陷,而母材为再结晶的等轴晶,内部缺陷相对较少,因而焊缝硬度高于母材^[11]。当焊缝与母材的硬度差异较小时,有利于钛焊管与管板的胀接。

表4 钛焊管显微硬度检测结果(MPa)

Table 4 Micro-hardness of titanium welded tubes

| No. | Welded joint | Base metal | Difference |
|----------------|--------------|-------------|------------|
| 1 [#] | 1736 | 1540 | 196 |
| 2 [#] | 1716 | 1540 | 177 |
| 3 [#] | 1726 | 1520 | 206 |
| DB MS4550T | ≤ 1765 | ≤ 1569 | ≤ 294 |

2.3 宏观形貌及金相组织

图3为3个换热管试样焊缝的宏观形貌。从图3可以看出,焊缝与母材过渡平滑,熔合线减薄和内焊缝余高均较小,焊缝位置无咬边、裂纹等缺陷。

焊缝熔合线位置是钛焊管的薄弱点,该位置壁厚最薄,是钛焊管在服役或胀接过程中最容易发生失效的位置,因此,焊缝熔合线减薄量也是核电热交换器用钛焊管的关键指标。

核电热交换器用换热管的使用工况与海水淡化等领域用换热管有所不同。在核电领域,海水介质

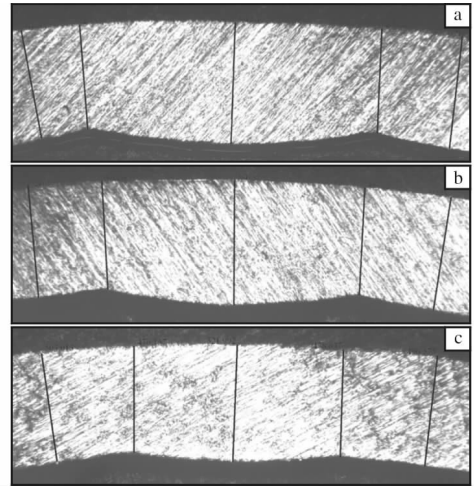


图3 不同钛焊管焊缝的宏观形貌

Fig. 3 Welded joints macroscopic of different titanium welded tubes: (a) 1[#]; (b) 2[#]; (c) 3[#]

在换热管管内流动;而在海水淡化领域,海水介质在管外流动。为防止换热管管内结垢和被海水冲刷,需要控制内焊缝余高,以降低换热管失效的可能性。

表5为试制的钛焊管焊缝熔合线壁厚和焊缝余高实测值。从表5可以看出,试制的钛焊管焊缝熔合线壁厚和焊缝余高都分别满足不小于管材公称壁厚的90%和不大于0.1 mm的要求。其中,3[#]样管的各项指标均优于1[#]和2[#]样管,焊接质量最好。这是由于1[#]和2[#]样管的焊接电流较大,焊缝熔池较宽,熔池金属下坠,出现焊缝熔合线减薄和焊缝余高较高的现象。

表5 不同钛焊管熔合线壁厚和焊缝余高(mm)

Table 5 Wall thickness of fusion line and weld reinforcement of different titanium welded tubes

| No. | Wall thickness | Weld reinforcement |
|----------------|----------------|--------------------|
| 1 [#] | 0.478 | 0.073 |
| 2 [#] | 0.481 | 0.080 |
| 3 [#] | 0.482 | 0.071 |
| DB MS4550T | ≥ 0.450 | ≤ 0.1 |

图4为3[#]样管轴向截面的金相组织。图4a为钛焊管母材区域组织,为等轴 α 组织,组织均匀;图4b、4c分别是母材向焊缝熔合区域左、右过渡的热影响区,该区域晶粒由母材向焊缝逐渐增大。图4d为焊缝熔合区金相组织,从晶粒上看,焊缝熔合区

晶粒呈锯齿状,晶粒明显大于母材。钛焊管在焊接时存在急速加热和冷却的过程,存在温度差异,因此焊缝处形成锯齿状的晶粒,同时在焊接热输入的影响下,焊缝熔化金属凝固再结晶并逐渐长大,导致焊缝晶粒明显大于母材^[11]。

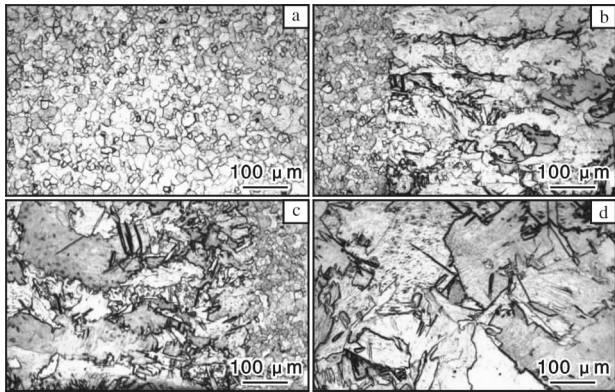


图4 3#样管轴向截面的金相组织

Fig. 4 Microstructures of 3# titanium welded tube of axial section: (a) base metal; (b) heat affected zone on the left; (c) heat affected zone on the right; (d) welded joint

2.4 工艺性能

对3#样管进行压扁、反向弯曲、扩口工艺性能检测,典型试样检测结果如图5所示。从图5可以看出,不论是压扁、反向弯曲还是扩口(扩口率为25%),钛焊管都未出现任何裂纹和断裂现象,满足标准要求。

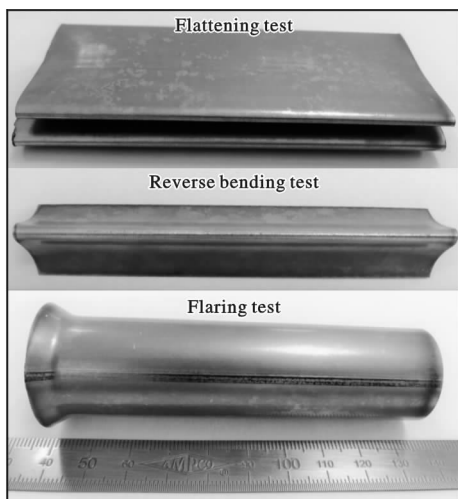


图5 经工艺性能检测后3#样管的照片

Fig. 5 Photos of 3# titanium welded tube after process performance test

2.5 无损检测

按核电热交换器对换热管的要求,对试制的3#样管进行涡流探伤和超声波探伤检测,均未发现可疑和不合格管材,完全满足核电热交换器的使用要求。

3 结论

采用“W + 双半径”反弯成型,当焊接电流为120 A、焊接电压为11 V时,制得的钛焊管焊缝与母材过渡平滑,熔合线减薄和内焊缝余高均较小,焊缝接头质量最好,同时化学成分、组织和性能等各项指标均满足核电热交换器用钛焊管标准要求。

参考文献 References

- [1] 郭佳林,董燕妮,徐永锋,等.核电站凝汽器用钛焊管蒸汽腐蚀疲劳性能研究[J].稀有金属材料与工程,2019,40(1):43-48.
- [2] 刘轶群,张延生.核电冷凝器Gr2钛焊接管专用带材研究[J].科技创新与应用,2014(9):24-25.
- [3] 冉正高,单世超,李庆华.核电凝汽器钛焊管采购及验收要点分析[J].电站辅机,2015,36(4):5-7.
- [4] Short A B. Gas tungsten arc welding of $\alpha + \beta$ titanium alloys: a review[J]. Materials Science and Technology, 2009, 25(3): 309-324.
- [5] Bendikiene R, Baskutis S, Baskutiene J, et al. Comparative study of TIG welded commercially pure titanium[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 155-163.
- [6] 杨国辉.钛管焊接时接头的保护[J].管道技术与设备,2003(6):24-25.
- [7] Patil H S, Patel D C, Patil C S. Characterizations of TIG welded joints of unalloyed commercially pure titanium Gr.2 for weld process parameters[J]. Frattura ed Integrità Strutturale, 2019, 23(48): 377-384.
- [8] 贾海涛,张睿伟.钛及钛合金的焊接性分析与应用[J].焊接技术,2020,49(1):61-66.
- [9] Shao L, Wu S J, Peng W Y, et al. Microstructure and mechanical behavior of an annealed automatic gas tungsten arc weld joint of TA16 and TC4 titanium alloys[J]. Materials Research Express, 2019, 6(5): 056523.
- [10] 黄九龄,孔谅,王敏,等.纯钛TA2薄板双钨极氩弧焊焊接工艺[J].焊接学报,2019,40(9):14-18.
- [11] Karparaj A, Shanmugam N S, Sankaranarayananamy K. Some studies on mechanical properties and microstructural characterization of automated TIG welding of thin commercially pure titanium sheets[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 640: 180-189.