

引用格式:郭纪龙,付娟,赵勇,等.TA18钛合金TIG焊接头组织及耐腐蚀性能研究[J].热加工工艺,2024,53(7):11-15.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20220482

http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

焊接技术及其自动化

TA18钛合金TIG焊接头组织及耐腐蚀性能研究

郭纪龙¹, 付娟¹, 赵勇¹, 刘新², 潘艳飞², 陈夫刚¹

(1. 江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 江苏 镇江 212003; 2. 江苏长江智能制造研究院, 江苏 常州 213164)

摘要:采用2B实芯焊丝对12 mm厚的TA18钛合金板进行了TIG焊试验,研究了TA18钛合金TIG焊接头的显微组织,不同腐蚀介质中的电化学和应力腐蚀行为。结果表明:TA18钛合金接头焊缝区域分布大量粗大的柱状晶和少量等轴晶,在盖面、打底及中间填充层存在部分网篮组织;热影响区主要由针状的 α' (α'')相、残余 α 相和 β 相组成。在3.5% NaCl溶液中进行电化学腐蚀试验,TA18钛合金接头各区域的耐腐蚀性能从高到低为:母材>焊缝>热影响区。比较TA18钛合金接头在大气环境和模拟海水环境中的慢应变速率拉伸应力-应变曲线,表明该接头的力学性能受海水影响不明显,且对海水的应力腐蚀敏感性较低。

关键词:TA18钛合金;TIG焊;电化学腐蚀;应力腐蚀

中图分类号:TG406;TG444+.74

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2024)07-0011-05

Study on Microstructure and Corrosion Resistance of TA18 Titanium Alloy TIG Welding Joint

GUO Jilong¹, FU Juan¹, ZHAO Yong¹, LIU Xin², PAN Yanfei², CHEN Fugang¹

(1. Provincial Key Lab of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. Jiangsu Changjiang Intelligent Manufacturing Research Institute, Changzhou 213164, China)

Abstract: TIG welding test of 12 mm thick TA18 titanium alloy plate was carried out by using 2B solid core welding wire. The microstructure, the electrochemical and stress corrosion behavior in different corrosive media of the TA18 titanium alloy TIG welding joint were studied. The results show that a large number of coarse columnar crystals and a small amount of equiaxed crystals are distributed in the TA18 titanium alloy joint's weld area, part of net basket organization exists in the cover, bottom and intermediate filler layers. The microstructure of the heat-affected zone is mainly composed of needle-like α' (α'') phase, residual α phase and β phase. When the electrochemical corrosion test is carried out in 3.5% NaCl solution, the corrosion resistance of each region of the TA18 titanium alloy joint from high to low is as follows: base metal, weld, heat-affected zone. Comparing the slow strain rate tensile stress-strain curves of the TA18 titanium alloy joint in air and simulated sea water, the mechanical properties of the joint are not significantly affected by seawater and it has low stress corrosion sensitivity to seawater.

Key words: TA18 titanium alloy; TIG welding; electrochemical corrosion; stress corrosion

钛及其合金具有其他金属不可替代的优势,如低密度、高强度、优良的耐蚀性等^[1],在航空航天、海洋运输、能源化工等工业领域中得到广泛应用^[2-3]。近几十年来,钛合金是继钢铁和铝合金之后应用于航空航天领域的一种新型轻质结构材料,其在商用

及军用飞机领域的用量呈稳步增长趋势^[4]。TA18钛合金是从TC4钛合金演变而来的近 α 型钛合金,虽不及TC4钛合金强度高,但由于具有优异的冷成形性能、良好的高温性能和耐腐蚀性能,已被广泛应用于航空航天领域^[5-6]。钛的化学性能极其活泼,易与空气中的O、N、H等元素反应,发生氧化、氮化、脆化的现象,在焊接时也经常出现接头脆化、焊接裂纹和气孔等焊接缺陷,严重影响钛的力学性能和耐腐蚀性能。因此,钛是一种较难焊接的金属^[7]。

钨极氩弧焊(TIG焊)因焊接电弧稳定、焊缝成型美观等优点,是钛及其合金主要的焊接方法。我国自主研发的7000米级“蛟龙号”载人潜水器采用钛

收稿日期:2022-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51901087);江苏省自然科学基金资助项目(BK20190975)

作者简介:郭纪龙(2000-),男,浙江绍兴人,研究方向为激光焊接;

E-mail:jilonguo@163.com

通信作者:付娟(1983-),女,辽宁阜新人,讲师,硕士,研究方向为激光焊、有色金属焊接等;E-mail:fujian@just.edu.cn

合金作为耐压壳体材料, 并采用钨极氩弧焊进行焊接^[8]。由此可见, 钨极氩弧焊在钛合金焊接中的优势明显。目前国内外对近 α 型钛合金的研究主要集中在电子束焊和激光焊^[9], 且多数研究着重于对工艺参数的优化和力学性能的改善, 对于近 α 型钛合金 TIG 焊及其腐蚀性能研究较少。

本文对 TA18 钛合金 TIG 焊接头的耐腐蚀性能进行了研究, 分别以大气环境和模拟海水环境作为腐蚀介质进行试验, 探究在模拟环境下焊接接头的腐蚀机制。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料及焊接工艺

试验母材为 TA18 钛合金, 尺寸为 350 mm×150 mm×12 mm, 选用 ϕ 3.0 mm 的 2B 实芯焊丝为焊接材料, 其化学成分见表 1。采用钨极氩弧焊, 保护气体选用纯度为 99.99% 的氩气。

表 1 TA18 钛合金和 2B 焊丝的化学成分(质量分数, %)
Tab.1 Chemical composition of TA18 titanium alloy and 2B welding wire(wt%)

材料	Al	C	N	H	O	V	Fe	Ti
TA18	4.04	≤0.1	-	≤0.015	≤0.1	1.92	≤0.3	余量
2B 焊丝	1.5~2.5	0.07	0.04	0.02	0.12	1.0~2.0	0.2	余量

焊前对 TA18 钛合金母材使用重油污清洗剂等去除表面油污, 再使用氧化铝型砂轮片对坡口及附近进行打磨, 最后使用丙酮擦洗坡口表面, 并保证母材的干燥。为防止钛合金在高温下被空气氧化, 保护气体通过背保护装置、拖罩及焊枪共同输送, 为焊缝提供保护。背保护与拖罩中气流量控制在 30~35 L/min, 焊枪中气流量控制在 9~12 L/min。接头坡口尺寸及焊道示意图如图 1 所示, 焊接工艺参数见表 2。

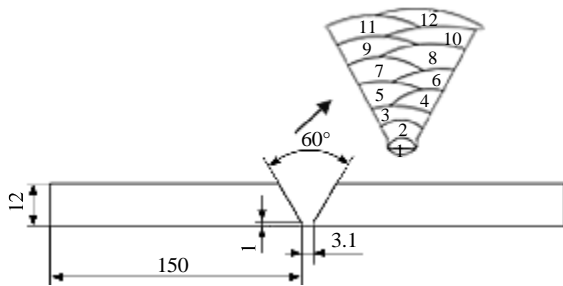


图 1 坡口尺寸及焊道示意图(mm)

Fig.1 Groove sizes and schematic of weld pass (mm)

1.2 试验方法

接头试样进行打磨、抛光后, 用无水乙醇清洗表

表 2 焊接工艺参数
Tab.2 Welding parameters

焊接道次	电流 /A	电压 /V	焊接速度 / (mm·s ⁻¹)	热输入 / (kJ·cm ⁻¹)
1	160	15.8	1.8	14.0
2	190	15.9	3.9	7.7
3~12	220	15.8~17.8	2.8~5.4	6.7~14.0

面, 并采用 Kroll 试剂(HF:HNO₃:H₂O=2:1:17)腐蚀, 腐蚀时间控制在 10~15 s。经腐蚀后的接头试样放在金相显微镜下进行微观组织的观察和分析。

为研究海水环境中 TA18 钛合金 TIG 焊接头的腐蚀特性, 电化学试验采用双恒电位电化学工作站(CS2350H), 以测试试样为工作电极, Pt 电极为辅助电极, 饱和甘汞电极为参比电极, 组成经典的三电极测试体系, 其中工作电极的试样面积为 1 cm²。试验介质为分析纯试剂和去离子水制备的 3.5% NaCl 溶液, 每组试验至少重复 3 次以保证试验结果的准确可靠。

电化学试验顺序依次为 OCP (开路电位)、EIS (电化学阻抗谱) 和 PP (动电位扫描极化)。首先在 3.5% NaCl 溶液介质中浸泡试样, 保证开路电位处于稳定状态, 并得到 OCP 曲线和工作电极的稳定电位(腐蚀电位)。EIS 测试的初始扫描频率为 10⁵ Hz, 终止频率为 10² Hz。PP 曲线测试的扫描频率为 0.333 mV/s, 并从开路电位 -0.5 V 处开始扫描, 终止电位设置为开路电位 1.5 V, 当电流至 20 mA 时停止扫描。使用 Origin 软件对所测数据进行处理, 并使用 CS-Studio5 电化学分析软件和 Z-Viewr 软件进行拟合计算, 模拟出等效电路。

为研究大气环境和海洋环境中 TA18 钛合金 TIG 焊接头的应力腐蚀敏感性, 应力腐蚀试验采用慢应变速率拉伸试验机(LETRY)装置, 拉伸环境分别为空气和 3.5% NaCl 溶液模拟海水, 控制试验温度为室温。根据 GB/T15970.7—2017 钛合金应变速率为 5×10⁻⁶ s⁻¹, 确定试样拉伸速率为 0.009 mm/min。拉伸完成后, 依次使用去离子水、酒精冲洗断口, 并进行干燥, 置于扫描电镜下观察其断口形貌。

2 试验结果与分析

2.1 接头显微组织

图 2 为 TA18 钛合金 TIG 接头的宏观形貌, 焊接接头冶金结合良好, 无明显的气孔、裂纹、夹杂等缺陷。焊缝区域分布大量粗大的柱状晶和少量等轴

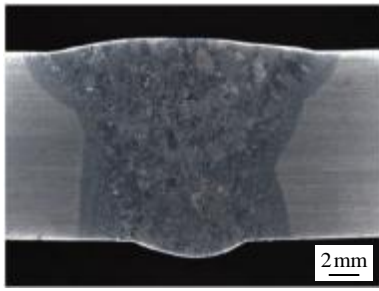


图2 TA18 钛合金接头的宏观形貌

Fig.2 Macroscopic morphology of TA18 titanium alloy joint

晶。接头在熔池凝固过程中,柱状晶与母材未熔化的晶粒联生结晶,并在温度梯度下向焊缝中心生长。焊接接头分为焊缝区和热影响区,热影响区中存在较多的等轴晶,越靠近母材晶粒尺寸越小。

图3为焊接接头各区域的显微组织。焊后组织均产生明显变化。从图3(a)~(f)可观察到,在盖面、打底及中间填充层存在部分网篮组织。这是由于TIG焊过程中焊缝温度迅速上升至相变点以上,而

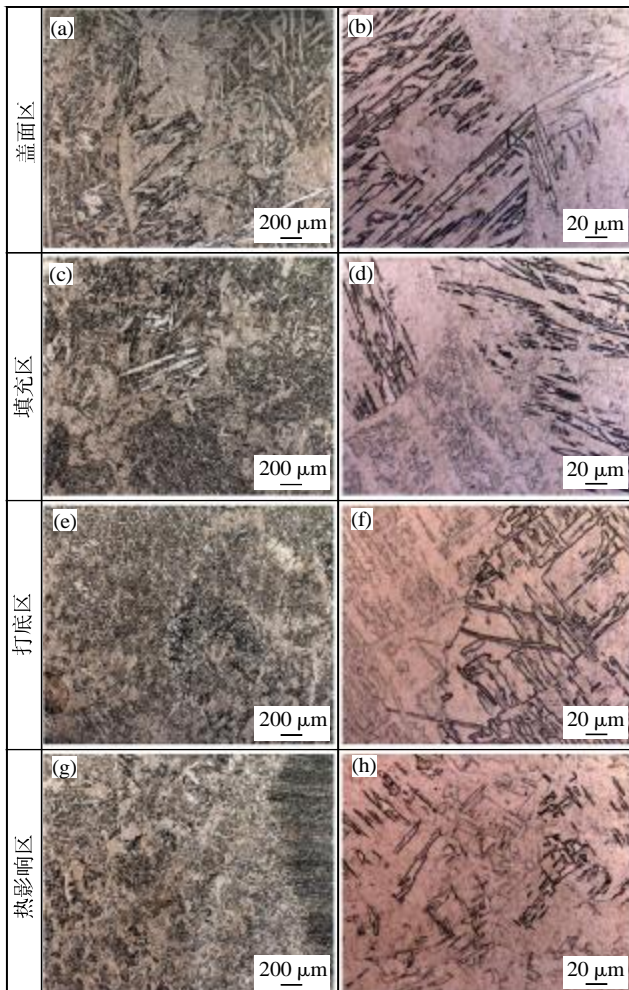


图3 接头各区域的显微组织

Fig.3 Microstructure of each region of the joint

焊后接头冷却过快,焊缝中的合金元素来不及扩散,导致无扩散转变,原先的 β 相组织转变为片状和长针状 α' 相组织。该组织是合金元素在 α 相中的过饱和固溶体,是六方马氏体。 α' 相组织通过形核长大,形成相邻平行的束域。分布在填充区和盖面区中不同区域的 α' 束域具有不同的取向,相互交织,形成部分网篮组织,且在 α' 晶界分布着 β 相, α' 相含量较高。

热影响区(HAZ)位于焊缝和母材之间,是焊缝两侧母材受焊缝温度影响而发生组织变化的区域。由图3(g)、(h)可知,其组织是由针状的 α' (α'')、残余 α 相和 β 相组成的混合物。这是由于靠近焊缝的热影响区温度低于相变温度,且高温停留时间短, β 晶粒长大不明显,各个方向散热条件相当,形成等轴晶粒。在焊后冷却中, β 相转变为针状的 α' (α'')、残余 β 等。但此处的冷却速度较慢,其过冷度较小, α' 相首先在晶界形成,并在之后与各取向不同的 α' 相交错, α 相晶界存在残余 β 相。

2.2 接头电化学腐蚀性能

图4为TA18钛合金接头在3.5%NaCl溶液中的电化学阻抗谱Nyquist图。由图可知,接头各区域材料的电化学体系均为电荷转移控制体系,无扩散控制现象。在EIS-Nyquist图的基础上,用Z-View软件拟合数据,如表3所示。其中极化阻抗 R_2+R_3 可用来表示工作电极的耐蚀性能,且极化电阻越高,工作

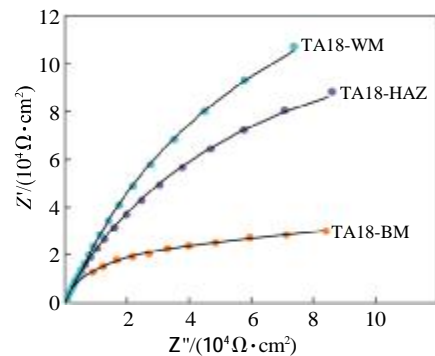


图4 TA18接头的电化学阻抗谱Nyquist图
Fig.4 EIS-Nyquist diagram of the TA18 joint

表3 TA18接头电化学阻抗谱拟合数据
Tab.3 EIS fitting data of the TA18 joint

接头区域	母材	焊缝	热影响区
溶液电阻 $R_s / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	14.75±0.14	5.96±0.02	10.27±0.17
极化电阻 $R_2 / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$(3.78 \pm 0.02) \times 10^5$	$(5.58 \pm 0.25) \times 10^5$	$(7.57 \pm 0.15) \times 10^5$
极化电阻 $R_3 / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	0	$(2.91 \pm 0.23) \times 10^5$	$(2.82 \pm 0.11) \times 10^5$

电极的耐蚀性能越优异。由表可知,接头区域的耐蚀性能由高到低分别为:母材 > 焊缝区 > 热影响区。

图 5 为 TA18 钛合金接头在 3.5%NaCl 溶液中的阻抗谱 Bode 图和等效电路图。在低频区,模值 $|Z|$ 接近或超过 10^5 , 说明在电极表面上存在着电阻层;同时,相位角的曲线斜率的绝对值不等于 1, 这说明了在电极表面出现弥散行为, 因此在拟合等效电路过程中, 用 CPE1 及 CPE2 代替纯电容 C。在 Bode 图的低频区, 相位角几乎保持不变, 这表明存在 R_p 阻抗结构元件(即图 5(d) R_2, R_3); 在 Bode 的中频区, 相位角增大, 表明存在 Cdl 结构元件(即图 5(d) CPE1、CPE2); 在 Bode 图的高频区, 相位角保持不变, 表明存在 R_s 阻抗结构元件。

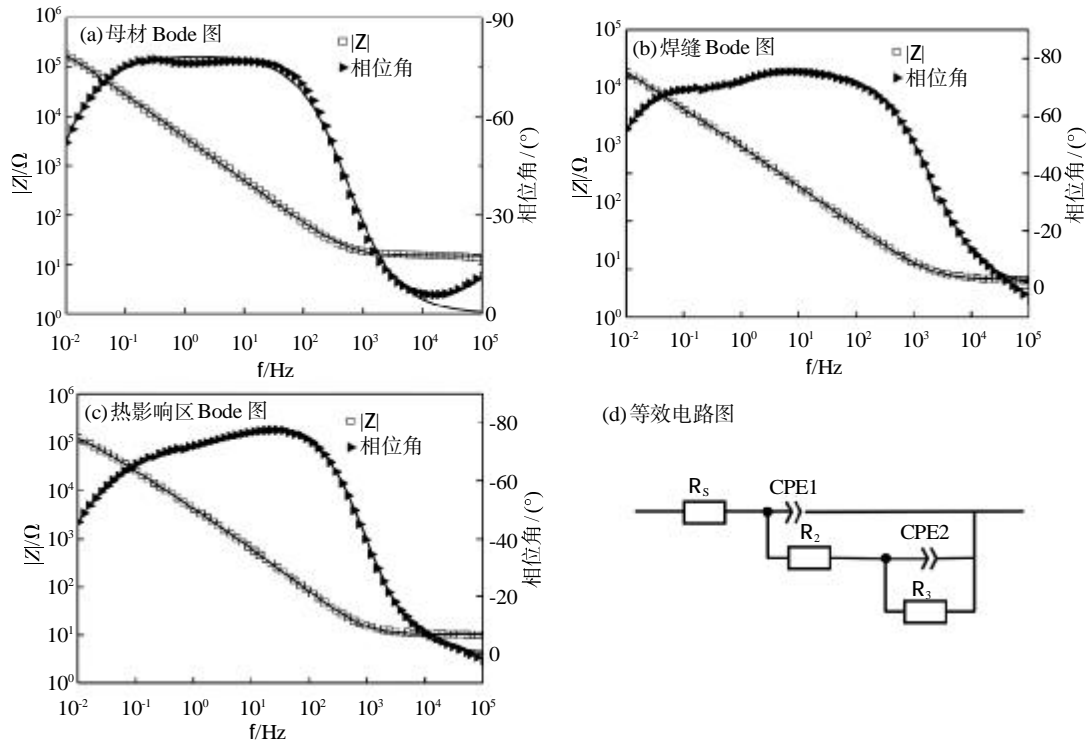


图 5 接头的 Bode 图和等效电路图

Fig.5 Bode diagram and equivalent circuit diagram of the joint

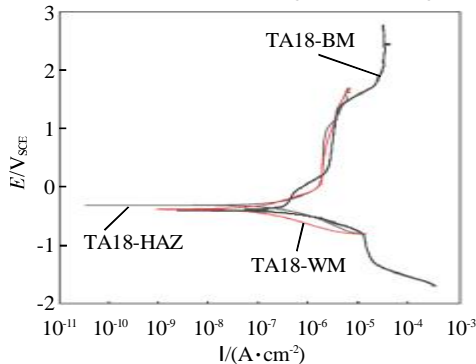
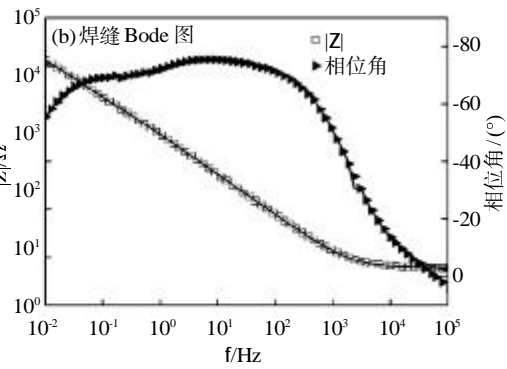


图 6 接头不同区域的极化曲线

Fig.6 Polarization curves of different region of the joint

图 6 为 TIG 焊接头不同区域的极化曲线。可看出,在 $-0.03V_{SCE} \sim 0.56V_{SCE}$ 范围内,随着电位的增加,TA18 钛合金 TIG 焊接头的焊缝区电流密度基本不变,说明焊缝区发生了钝化反应并在表面形成钝化膜;热影响区电流密度也基本不变。通过对极化曲线的 Tafel 拟合,得出拟合数据,如表 4 所示。腐蚀电流密度从大到小依次为热影响区 > 焊缝区 > 母材,腐蚀电位从大到小依次为热影响区 > 焊缝区 > 母材。在极化曲线中,一般认为拥有更高的腐蚀电位且同时拥有较小的腐蚀电流密度的工作电极,具有更好的耐腐蚀性能。因此,根据极化曲线及其 Tafel 拟合,再次证明接头区域的耐蚀性能由高到低分别为:母材 > 焊缝区 > 热影响区。



(d) 等效电路图

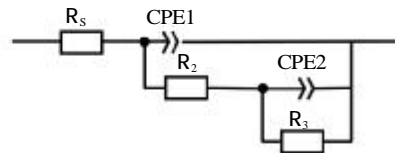


表 4 接头的 Tafel 拟合结果

Tab.4 Tafel fitting results of the joint

区域	母材	焊缝	热影响区
腐蚀电位 E_{cor}/V_{SCE}	-0.40 ± 0.01	-0.37 ± 0.01	-0.31 ± 0.01
腐蚀电流密度 $i_{cor}/(A \cdot cm^{-2})$	$(6.73 \pm 0.05) \times 10^{-7}$	8.88×10^{-7}	1.74×10^{-6}

2.3 接头应力腐蚀性能

图 7 为 TA18 钛合金 TIG 焊接头在空气和模拟海水中的应力-应变曲线。TA18 接头在空气中的抗拉强度达到 622 MPa,断后伸长率为 12.6%,在海水中的慢应变拉伸试样,其抗拉强度为 598 MPa,断后

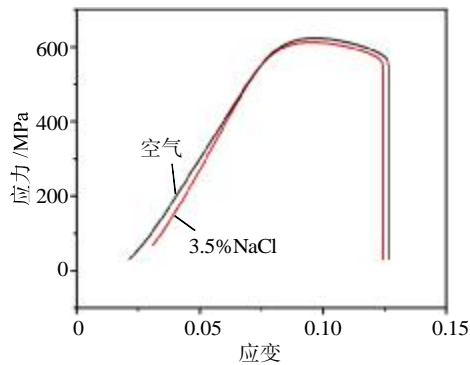


图7 接头在空气和海水中的应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of the joint in air and sea water

伸长率为 11.3%。在两种介质环境介质下接头的抗拉强度和伸长率都相差不大,说明 TA18 材料在海水环境中表现出比较强的抗应力腐蚀敏感性。

分别测量断后试样的长度和横截面积,计算接头伸长率 δ 、断面收缩率 Ψ 和相应的应力腐蚀敏感性指数 $F(\delta)$ 、 $F(\Psi)$,具体数据见表 5。由表 5 可以直观地看到,在相同的应变速率下,接头在模拟海水环境下的伸长率和断面收缩率较模拟大气环境下的有所降低,说明海水对 TA18 钛合金 TIG 接头在慢应变腐蚀中的力学性能产生变化,但是由于数值相差很小,其影响并不明显。同时,TA18 钛合金 TIG 接头在海水中的应力腐蚀敏感性指数 $F(\delta)$ 和 $F(\Psi)$ 均小于 15%,表明 TA18 接头在海水环境下并不具有应力腐蚀敏感性。

图 8 为 TA18 钛合金 TIG 焊接头的应力腐蚀断

表 5 接头慢应变腐蚀试验数据
Tab.5 Slow strain corrosion test data of the joint

环境	$\delta(\%)$	$\Psi(\%)$	$F(\delta)$	$F(\Psi)$
空气	12.6	33.6	10.4%	9.2%
海水	11.3	30.5		

注: $F(\delta)=(\delta_{\text{空气}}-\delta_{\text{海水}})/\delta_{\text{空气}}$; $F(\Psi)=(\Psi_{\text{空气}}-\Psi_{\text{海水}})/\Psi_{\text{空气}}$

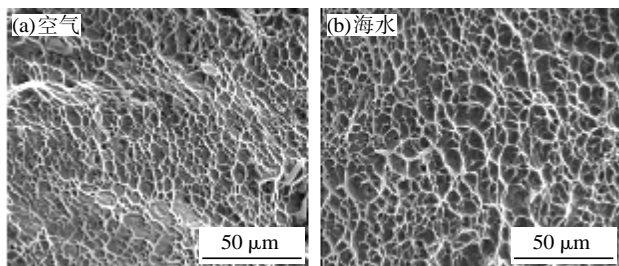


图 8 接头的应力腐蚀断口形貌

Fig.8 Morphologies of stress corrosion fracture of the joint

口形貌。对比图 8(a)、(b)接头在空气、模拟海水中的形貌,断口形貌差别较小,皆是浅韧窝及河流花样组成的复合型形貌,说明 TA18 钛合金 TIG 焊接头在海水环境中的应力腐蚀敏感性低。

3 结论

(1) TA18 钛合金 TIG 焊接头焊缝区域分布大量粗大的柱状晶和少量等轴晶,在盖面、打底及中间填充层存在部分网篮组织,热影响区组织主要由针状的 $\alpha'(\alpha'')$ 相、残余 α 相和 β 相组成的混合物。

(2) TA18 钛合金 TIG 焊接头在 3.5% NaCl 溶液中电化学腐蚀后,各区域的耐腐蚀性能从高到低依次为母材、焊缝、热影响区。

(3) 比较 TA18 钛合金 TIG 焊接头在大气环境和海水环境中的慢应变速率拉伸应力-应变曲线,表明 TA18 钛合金 TIG 焊接头的力学性能受海水影响不明显,且对海水的应力腐蚀敏感性较低。

参考文献:

- [1] 孙文君,王善林,陈玉华,等. 钛合金先进焊接技术研究现状[J]. 航空制造技术,2019,62(18):10.
- [2] Fang Jun, Liang Chuang, Lu Shi-qiang, et al. Effect of geometrical parameters on forming quality of high-strength TA18 titanium alloy tube in numerical control bending[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2018,28 (2): 309-318.
- [3] Fang J, Lu S, Liang C, et al. Mandrel role in numerical control rotary draw bending process of TA18 high strength titanium alloy tube [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 631: 022065.
- [4] 李亚江,刘坤. 钛合金在航空领域的应用及其先进连接技术[J]. 航空制造技术,2015(16):34-37.
- [5] 高兴强,佘好学,岳喜山,等. TC4/TA18 钛合金蜂窝夹层结构钎焊工艺研究[J]. 航空制造技术,2015(11):109-111.
- [6] 陈逸,李金山,孙峰,等. 冷轧 TA18 管材变形过程中微观组织及织构[J]. 塑性工程学报,2012,19(1):35-39.
- [7] 戚运莲,洪权,刘向,等. 钛及钛合金的焊接技术[J]. 钛工业进展,2004,21(6):25-29.
- [8] 李文跃,王帅,刘涛,等. 大深度载人潜水器耐压壳结构研究现状及最新进展[J]. 中国造船,2016,57(1):210-221.
- [9] 李兴宇,李芳,牟刚. 等. 钛及钛合金的焊接[J]. 电焊机,2017,47(4):67-70.