

文章编号: 2095-7386(2024)01-0054-07

DOI: 10.3969/j.issn.2095-7386.2024.01.008

TA1 高频感应焊接头和基体在 NaCl 溶液中的电化学腐蚀行为

李伟杰¹, 李菊英¹, 谢志雄², 董仕节^{1,2}, 解剑英³, 叶枫²

(1. 武汉轻工大学 机械工程学院, 武汉 430023; 2. 湖北工业大学 绿色轻工材料湖北省重点实验室, 武汉 430068;

3. 武汉博金新材料科技有限公司, 武汉 430058)

摘要: 高频感应焊 TA1 薄壁管的焊接接头和基体在微观结构方面存在差异, 电化学腐蚀行为往往是不同的。采用动电位极化技术和电化学阻抗谱(EIS), 分析了 TA1 基体和焊接接头在不同浓度 NaCl 溶液中的电化学腐蚀行为。实验结果表明, 随着氯离子浓度的增加, TA1 基体和焊接接头的腐蚀电位呈负偏移, 极化电阻逐渐减小, 腐蚀速率增大。相比基体, 焊接接头的腐蚀电位更高、极化电阻更大、腐蚀速率更低, 表明耐腐蚀性能更好。实验可为高频感应焊 TA1 薄壁管在海水环境中的实际应用提供一定的理论依据。

关键词: TA1 薄壁管; 钛合金; 高频感应焊; 电化学腐蚀

中图分类号: TG 172.5

文献标识码: A

Electrochemical corrosion behavior of TA1 welded joints and substrate by frequency induction welding in NaCl solution

LI Weijie¹, LI Juying¹, XIE ZhiXiong², DONG Shijie^{1,2}, XIE Jianying³, Ye Feng²

(1. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Hubei Key Laboratory of Green Light Industrial Materials,
Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

3. Wuhan Bojin New Material Technology Co., LTD., Wuhan 430058, China)

Abstract: High-frequency induction welding of TA1 thin-walled pipes there are differences in terms of the microstructure of the welded joint and the substrate, the electrochemical corrosion behavior is often different. The electrochemical corrosion behavior of TA1 substrate and welded joints in different concentrations of NaCl solutions was analyzed by using the dynamic potential polarization technique and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The experimental results showed that with the increase of chloride ion concentration, the corrosion potential of TA1 substrate and welded joints were negatively shifted, the polarization resistance gradually decreased, and the corrosion rate increased. Compared with the substrate, the welded joint has higher corrosion potential, larger polarization resistance and lower corrosion rate, indicating better corrosion resistance. The experiment can provide a certain theoretical basis for the practical application of high-frequency induction welding TA1 thin-walled pipe in seawater environment.

Key words: TA1 thin-walled pipe; titanium alloy; high frequency induction welding; electrochemical corrosion

收稿日期: 2023-11-07.

作者简介: 李伟杰(1999—), 男, 硕士研究生, E-mail: 2641251731@qq.com.

通信作者: 李菊英(1975—), 女, 副教授, 博士, E-mail: jyli@whpu.edu.cn.

基金项目: 湖北省国际科技合作项目(编号: 2022EHB020).

0 引言

TA1 作为 α 钛合金的典型代表,是工业中最常用的纯钛之一,具有密度小、比强度高、耐腐蚀性和焊接性能好等特点,因此被广泛应用于航空航天、海洋工程、能源行业和生物医学等领域^[1]。TA1 合金管可分为无缝管和焊接管两大类,无缝管主要是通过挤压和拉伸工艺生产,存在生产工艺繁杂、成本较高等问题^[2],而焊管由于生产速度快,成本较低。高频感应焊接(HFIW)是生产辊压成型管最常用的方法之一,主要利用高频电流的集肤效应和邻近效应完成焊接^[3],焊接过程中,由于受到热循环的作用,导致焊接接头焊缝区和热影响区的显微组织、化学成分、力学性能与基体存在较大差异,进而影响电化学特性。随着海水淡化技术的进展,耐海水腐蚀性良好的纯钛换热器管需求不断扩大,因此,焊管的腐蚀性能受到了广泛关注^[4-6]。

目前,国内外对焊管在各种介质中的腐蚀性和钝化性进行了许多研究。Liu 等^[7]研究了 TA2 焊接接头各区在流动海水中的腐蚀行为以及各区域耦合后的整体腐蚀趋势,发现钛合金焊接接头的热影响区(HAZ)和基体(BM)在海水中具有更好的耐腐蚀性,焊缝(WM)是加速腐蚀的主要阳极,在高流速下,电极将变为阴极。Zhen 等^[8]制备了不同热输入的 TA1 焊接接头,研究了其在模拟唾液中的微观结构、力学性能和耐腐蚀性,发现不同热输入焊接接头的耐腐蚀性不同,为熔合区(FZ)>热影响区(HAZ)>基体(BM),热输入对熔合区的耐腐蚀性影响更大。Su 等^[9]通过搅拌摩擦焊成功焊接 α 钛合金的 T 型接头,与基体相比,焊接接头的耐腐蚀性也有所提高。Gao 等^[10]通过研究钛合金焊接接头不同区域的裂纹扩展和应力腐蚀临界应力强度因子,发现微观结构、组织和电化学性能是应力腐蚀的主要原因。有关 TA1 钛焊管的研究主要集中在钝化膜耐腐蚀性的影响上,而有关氯离子浓度变化对钛焊缝耐腐蚀性能影响的研究很少。由于微观组织受到焊接工艺的影响,焊接接头和基体的电化学性能存在差异,因此研究高频感应焊 TA1 薄壁管焊接接头和基体在不同氯离子浓度溶液中的腐蚀行为是很有必要的。

鉴于此,笔者通过光学显微分析和电化学测试,分析了 TA1 基体和焊接接头在 NaCl(浓度为 3.5%、5.0%和 7.5%)溶液中的电化学腐蚀行为,总结氯离子浓度对 TA1 基体和焊接接头腐蚀行为的影响,以期后续的高频焊管生产研究工作提供

理论依据和指导。

1 材料和实验

1.1 高频感应焊管和焊接参数

采用武汉市博钛新材料科技有限公司自主设计的高频感应焊接生产线,将板带通过多道冷滚压后,受力弯曲形成钛管。图 1 为高频感应焊接生产线中的焊接盒和 TA1 管。焊接过程在氩气保护下完成,氩气纯度大于 99.9%。为了避免焊接过程中高温对焊接接头质量的影响,焊接后采用(不直接接触)循环冷却水加氩气的方式进行冷却。表 1 列出了 TA1 原始带材的化学成分(重量百分比)。焊管厚度为 0.6 mm,直径为 19 mm,焊接工艺参数如表 2 所示。

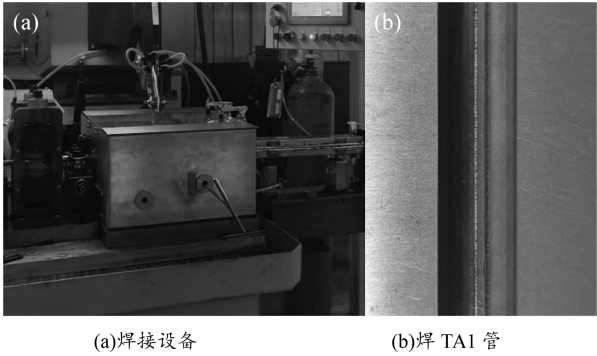


图 1 高频感应焊接生产线中的焊接设备和焊 TA1 管
Fig. 1 High frequency induction welding line welding equipment and welding TA1 pipe

表 1 TA1 板带的化学成分(重量百分比)
Table 1 The chemical composition of TA1 strip (wt %)

Fe	C	N	H	O	Ti
<0.20	<0.08	<0.03	<0.015	<0.18	Balance

表 2 高频感应焊接参数
Table 2 Welding parameters for high frequency induction welding

焊接速度 /(m/min)	焊接频率 /kHz	焊接功率 /kW	热输入 /(kJ/m)	挤压量 /mm
60	386 393	14.4	14.4	0.200

1.2 显微观察

为了观察高频感应焊管焊缝的微观组织,垂直于焊缝方向截取金相试样,镶嵌、研磨、抛光后用腐蚀试剂对样品进行腐蚀,腐蚀时间为 3 040 s,腐蚀试剂为 Kroll 浸蚀剂(HF 为 1 mL、HNO₃ 为 3 mL、H₂O 为 96 mL)。采用 OM(奥林巴斯光学金相显

显微镜GX-51型)观察焊接试样的微观组织。

1.3 电化学实验

采用 CS310X 多通道电化学工作站(武汉科思特仪器有限公司)测量了样品的电化学阻抗谱(EIS)和极化曲线。饱和甘汞(SCE)为参比电极,铂片为辅助电极,测试样品为工作电极,构建了一个传统的三电极系统。测试样品分别是高频感应焊 TA1 薄壁管的焊接接头(以焊缝为中心)和基体部位,测试用溶液为模拟海水成分的浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液和在此基础上更高浓度的 NaCl 溶液,由 NaCl 和去离子水配制而成,质量分数分别为 3.5%、5.0% 和 7.5%。电解池为科斯特平板腐蚀池,暴露面面积为 0.196 cm²。工作电极测试前需进行预处理,表面用 300-2000 砂纸逐步打磨,用丙酮去油和酒精去水,晾干后使用。

电化学阻抗谱 EIS 测试的频率范围为 0.01 Hz ~ 100 kHz,采用信号幅度为 5 mV 的正弦波。使用 CView 和 ZView 软件对极化曲线和 EIS 数据进行分析 and 拟合。动电位扫描偏振速率为 0.5 mV/s,扫

描范围为 -0.5 ~ +2 V_{vs}OCP。

2 结果和讨论

2.1 显微组织

TA1 钛焊管由基体、焊缝和热影响区三个部分组成^[11]。从图 2(a)中可以看出,基体的微观结构为细小均匀的等轴 α 组织和少量的孪晶。如图 2(b)所示,焊缝的晶粒尺寸粗大,存在许多锯齿状 α 、少量针状 α 和孪晶。晶粒形状变化是由于在焊接过程中焊缝中心区域的热输入较高,其温度超过了相变点(882 °C),发生了 $\alpha \rightarrow \beta$ 相变^[12]。在冷却过程中 β 相内析出了 α 相,但由于冷却速度极快,并非所有的 β 相都在冷却中转变为了 α 相,有一部分 β 相留存,这部分 β 相由于快速冷却而处于亚稳状态,形成了不规则的 α 晶粒结构^[13-16]。如图 2(c)所示,焊接热影响区也受到了焊接热循环的影响,形成了不均匀的粗大锯齿状 α 相和针状 α ,由于距离焊缝较远,受到焊接热循环的影响不如焊缝区严重,与焊缝相比晶粒略小。

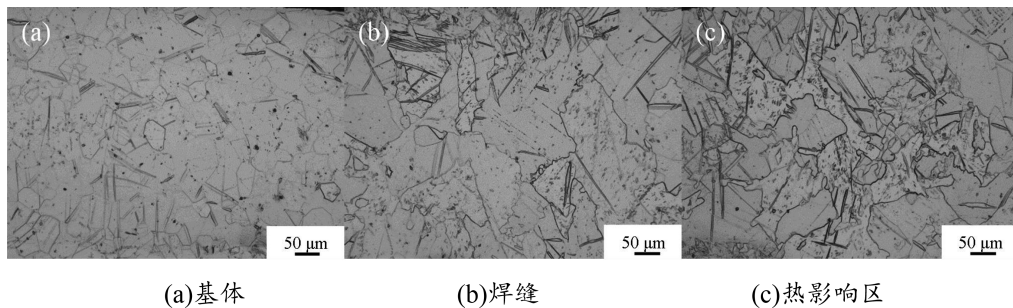


图 2 TA1 基体和焊接接头的显微结构

Fig. 2 Microstructure of TA1 substrate and welded joint

2.2 电化学结果分析

2.2.1 极化曲线

图 3 显示了 TA1 基体和焊接接头在不同氯离子溶液中的塔菲尔极化曲线。一般来说,腐蚀电位的正值越大,腐蚀电流密度越小,意味着相应材料的耐腐蚀性越好^[17,18]。可以明显观察到,在不同浓度的 NaCl 溶液中,TA1 基体和焊接接头呈现了不同的腐蚀电位和电流密度,随着 NaCl 溶液浓度的降低,材料的塔菲尔曲线向电位更正和电流密度更负的方向移动,即 TA1 基体和焊接接头在浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液中的耐腐蚀性能相对较好,在 5.5% 和 7.5% 中次之。极化曲线基本形状保持不变表明氯离子浓度仅改变了腐蚀反应的速率,而不是腐蚀机理^[19]。极化曲线中获得的电化学参数可用来定量描述阳极的溶解行为,并通过塔菲尔外推法确定阳极和阴极极化曲线的各项参数。表 3 列出

了 TA1 基体和焊接接头在不同浓度 NaCl 溶液中的塔菲尔分析结果。 b_a 和 b_c 分别代表阳极和阴极的塔菲尔斜率, E_{corr} 为腐蚀电位, J_{corr} 为腐蚀电流密度, V 为腐蚀速率。计算公式为:

$$V = \frac{K \times J_{\text{corr}} \times E}{dA} \quad (1)$$

其中, K 为常数, d 是材料的密度(g/cm³), A 为试样的暴露面积(cm²), E 是材料当量(克当量),公式为:

$$E = \frac{1}{\sum \left[\frac{n_i \times f_i}{w_i} \right]} \quad (2)$$

其中, f_i 是材料中第 i 种元素的质量占比, w_i 是材料中第 i 种元素的原子量, n_i 是材料中第 i 种元素的化合价。

图 4 显示了 TA1 基体和焊接接头的腐蚀速率,

随着腐蚀介质中氯离子浓度的升高,腐蚀速率增加。氯离子对钛合金具有腐蚀性,因为它们容易通过溶解沉积的腐蚀产物而导致钝化膜被破坏,从而增加了合金的阳极溶解。因此,在 NaCl 溶液中,随着氯

离子浓度的提高,材料钝化膜的保护性降低、腐蚀程度增强,而焊接接头具有更低的腐蚀电流和较高的腐蚀电位,耐腐蚀性能较好。

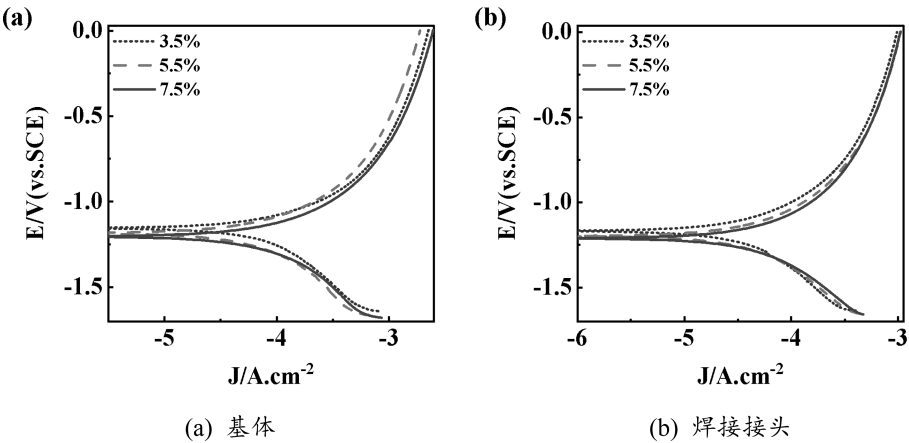


图 3 TA1 基体和焊接接头在不同浓度 NaCl 溶液中的极化曲线
Fig. 3 Polarization curves of TA1 substrate and welded joint in different concentrations of NaCl solutions

表 3 基体和焊接接头在不同浓度 NaCl 溶液中的极化曲线拟合结果
Table 3 The fitting results of polarization curves of substrate and weld joint in different concentrations of NaCl solution

样品	$C_{\text{NaCl}}/\%$	$b_a/\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1}$	$b_c/\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1}$	$J_{\text{corr}}/\text{A} \cdot \text{cm}^2$	$V/\text{mm} \cdot \text{y}^{-1}$
基体	3.5	251.36	-415.10	5.402 1E-05	0.595 64
	5.5	361.79	-431.62	5.684 4E-05	0.626 77
	7.5	297.16	-385.25	5.967 9E-05	0.658 03
焊接接头	3.5	310.30	-417.61	2.804 0E-05	0.309 18
	5.5	329.28	-381.40	3.059 3E-05	0.337 33
	7.5	365.58	-356.04	3.495 2E-05	0.385 38

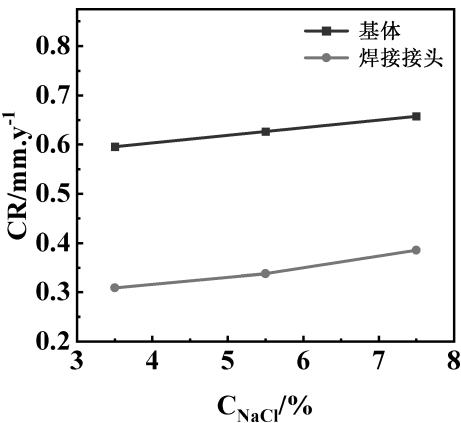
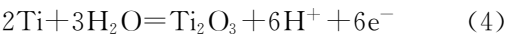
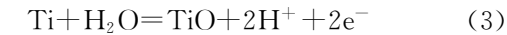


图 4 TA1 基体和焊接接头在不同浓度 NaCl 溶液中的腐蚀速率
Fig. 4 Corrosion rates of TA1 substrate and welded joints in different concentrations of NaCl solution
在相同浓度的 NaCl 溶液中,基体的腐蚀速率

大于焊接接头,即焊接接头的耐腐蚀性能更好,这是由于焊接过程中焊接热循环的影响导致金属的相组织和晶粒的大小发生了变化,从而影响金属表面钝化膜的稳定性,导致了耐腐蚀性能改变。钛和钛合金一般在大气或水溶液中会快速生成一层致密的氧化膜,这种现象对提高钛和钛合金的耐腐蚀性有很大帮助,因此钛合金的耐腐蚀性取决于其钝化膜的稳定性^[20,21]。图 5 为 TA1 纯钛表面钝化过程示意图,钝化过程主要为 Ti 的氧化反应。钛与氧会先后生成不同价位的氧化物,在初始阶段,钛合金溶解,在金属表面迅速形成 TiO,随后 TiO 被氧化成三价 Ti₂O₃,最终与水中的 OH⁻ 发生反应,生成稳定的 TiO₂。因此,钛合金上钝化膜的形成过程主要由以下反应完成^[22,23]:



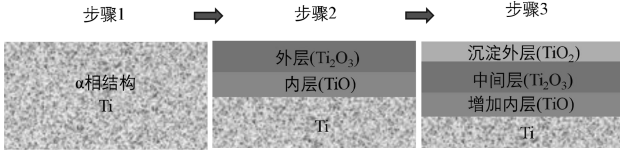
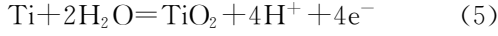


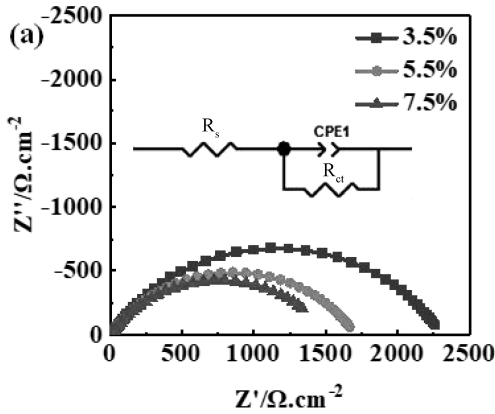
图 5 TA1 纯钛表面钝化过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of passivation process on TA1 pure titanium surface

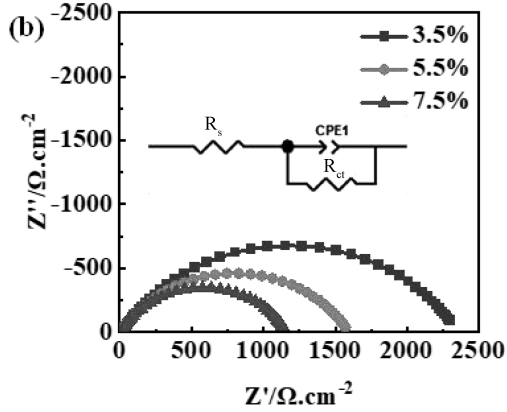
2.2.2 电化学阻抗(EIS)

图 6 显示了 TA1 基体和焊接接头的电化学阻抗(EIS)。如图6(a)和6(b)所示,奈奎斯特图均为变

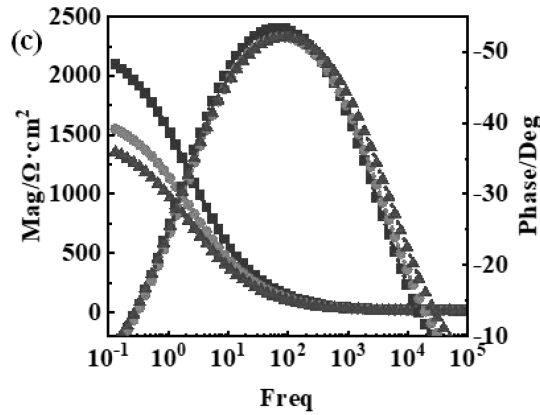
形的单容抗弧,容抗弧的半径反映了电荷转移电阻的大小,容抗弧半径越大,电荷转移的电阻就越大,材料的耐腐蚀性就越好^[24]。因此,在不同浓度的 NaCl 溶液中,基体和焊接接头的容抗弧半径随 NaCl 浓度的增加而减小,即试样钝化膜的稳定性随氯离子浓度的增加而越来越差。根据 Bode 图,焊接接头和基体在频率为 100 Hz 时相位角最大。在 EIS 中,一般通过比较电荷转移电阻 R_{ct} 和最大相位角来评估材料的耐腐蚀性。从图 6(c)和 6(d)中可以看出,三种不同浓度 NaCl 溶液中的最大相角变化不大,因此可以通过极化电阻 R_p 来比较试样耐腐蚀性的好坏。



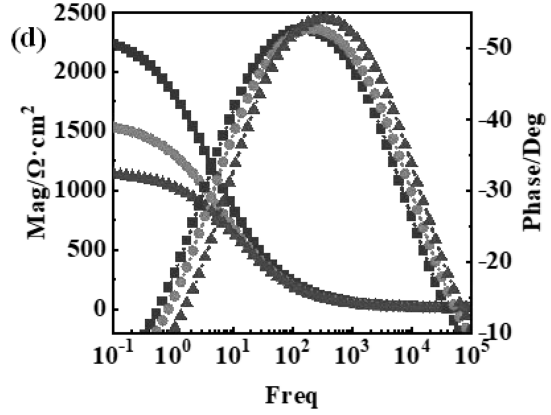
(a) 基体的奈奎斯特图



(b) 焊接接头的奈奎斯特图



(c) 基体的Bode图



(d) 焊接接头的Bode图

图 6 基体在不同浓度 NaCl 溶液中的电化学阻抗谱

Fig. 6 Electrochemical impedance spectra of substrate in NaCl solution with different concentrations

材料的奈奎斯特图中都只有一个容抗弧,Bode 图中的相位角也只增加到了峰值然后就减小,表明只存在一个时间常数,因此选择 $R_s(Q_{dl}-R_{ct})$ 等效电路来拟合测量结果。 R_s 是参比电极到工作电极的溶液电阻, R_{ct} 是电荷转移电阻, Q_{dl} 表示与层容量有关的恒定相位元素(CPE),CPE 为常相位角,

用于描述 n 变化时的非理想电容及其阻抗,其公式如下:

$$Z_{CPE}(\omega) = \frac{1}{(j\omega)^n} \quad (6)$$

其中, j 为虚数单位, ω 表示角频率, n 表示相移的偏差参数,从 1 到 0 不等。当 $n=1$ 时,CPE 可以

被视为实际电容,而 $n=0$ 表示实际电阻。

R_p 为极化电阻,根据法拉第定律,试样表面钝化膜结构的稳定性可以通过等效电路中的 R_p 来评估, R_p 值越大,材料的耐蚀性就越好,而 R_{ct} 可以用来近似表示极化电阻 R_p 。根据等效电路图,使用 Zview 软件对 EIS 数据进行了拟合,结果见表 4。图 7 显示 TA1 基体和焊接接头的极化电阻都随着 NaCl 溶液浓度的增加而减小,即耐腐蚀性降低。在相同浓度的 NaCl 溶液中,焊接接头的极化电阻大于基体的极化电阻,说明焊接接头的耐腐蚀性能比

基体好。从极化曲线和电化学阻抗的测量分析结果可知,在相同的电化学条件下,焊接接头的耐腐蚀性能比基体更好,这主要与电化学过程中焊接接头的焊缝和热影响区存在锯齿状 α 晶粒和针状的 α 相(也可以称为针状马氏体)有关。这些针状的 α 相在纯钛形成钝化膜的过程中,相比于等轴晶和大晶粒的锯齿状 α 晶粒,能更快地形成钝化膜,从而具有更好的耐腐蚀性能。实验结果与文献 25、26 中的组织对电化学性能的影响相似。

表 4 TA1 基体和焊接接头的 EIS 拟合参数

Table 4 EIS fitting parameters of TA1 substrate and welded joint

样品	$C_{NaCl}/\%$	$R_s/\Omega \cdot cm^2$	$CPE1-T/\Omega^{-1} - cm^{-2} s^n$	$CPE2-P/\Omega^{-1} - cm^{-2} s^n$	$R_{ct}/\Omega \cdot cm^2$	$R_p/\Omega \cdot cm^2$
基体	3.5	14.440	9.2205E-05	0.67784	2 290	2 290
	5.5	10.720	1.2264E-04	0.66276	1 696	1 696
	7.5	7.634	1.5196E-04	0.65304	1 506	1 506
焊接接头	3.5	10.850	6.3895E-04	0.60240	5 193	5 193
	5.5	7.519	6.6131E-04	0.64425	4 340	4 340
	7.5	5.844	6.3308E-04	0.67437	3 768	3 768

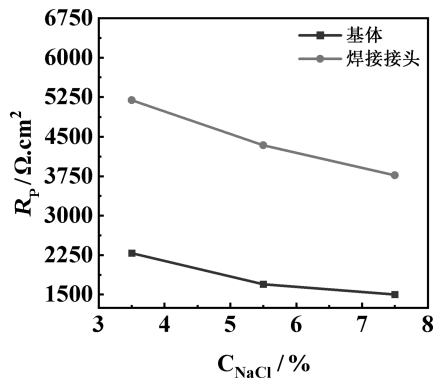


图 7 不同浓度的 NaCl 溶液中 TA1 基体和焊接接头的极化电阻

Fig. 7 Polarization resistance of TA1 substrate and welded joint at different concentrations of NaCl

3 总结

采用动电位极化技术(Tafel)和电化学阻抗谱(EIS),分析了高频感应焊薄壁 TA1 钛管基体和焊接接头在不同浓度 NaCl(3.5%、5.5%、7.5%)溶液中的电化学腐蚀行为,得出以下结论:

(1)随着氯离子浓度的增加,TA1 基体和焊接接头的自腐蚀电位和极化电阻降低,自腐蚀电流密度增大,TA1 基体和焊接接头的耐腐蚀性随着氯离子浓度的增加而变差。

(2)TA1 基体的微观组织为均匀的等轴 α 晶粒

组织和少量孪晶,焊缝和热影响组织为粗大的锯齿状 α 相、少量针状 α 相和孪晶。由于焊接接头和基体的微观组织不同,与焊接基体相比,焊接接头的自腐蚀电位和极化电阻较大,腐蚀速率较小,焊接接头的耐腐蚀性能比基体相对更好。

焊接接头由于没有孔洞、裂纹、晶界第二相的存在和具有独特的微观组织结构,使其在高浓度 NaCl 溶液中的耐腐蚀性能仍好于基体,这对于高频感应焊 TA1 薄壁管在海水环境中的实际应用提供了一定的理论依据。

参考文献:

[1] Cui C X, Hu B M, Zhao L C, et al. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development. Materials & Design[J], 2021, 32 (3): 1684-1691.

[2] Romancev B, Goncharuk A, Aleschchenko A, et al. Production of hollow thick-walled profiles and pipes made of titanium alloys by screw rolling[J]. Russian Journal of Nonferrous Metals, 2015, 56(5): 522-526.

[3] Ghaffarpour M, Akbari D, Naeeni H M, et al. Improvement of the joint quality in the high-frequency induction welding of pipes by edge modification [J]. Welding in the World, 2019, 63: 1561-1572.

- [4] 张颖骁,张梓杨,宋龙飞,等. Ti80 合金及其热模拟组织在含氟模拟海水中的力学电化行为研究[J]. 表面技术, 2022, 51(05): 49-60, 69.
- [5] Auwal S T, Ramesh S, Yuso F, et al. A review on laser beam welding of titanium alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97: 1071-1098.
- [6] Emre H E. The corrosion behaviour of as-welded and post-weld heat treated Ti6Al4V alloy in simulated body fluid[J]. Materials Letters, 2019, 254(1): 162-166.
- [7] Liu R, Liu Y, Zhang D L, et al. Multiscale Characterization of Erosion of TA2 Titanium Alloy Welded Joints[J]. Frontiers in Materials, 2022, 9: 910319.
- [8] Zhen L, Wei Z, Yu K D, et al. Effect of Heat Input on Microstructure and Corrosion Resistance of CP-Ti Laser Beam Welded Joints[J]. Research on Corrosion and Protection Technology of Metal Matrix Composite, 2022, 12(10): 1570.
- [9] Su X, Li W, Su Y, et al. Evolution of microstructure, texture and mechanical properties of special friction stir welded T-joints for an α titanium alloy[J]. Materials Characterization, 2021, 17: 111152.
- [10] Gao F Y, Sun Z J, Yang S L, et al. Stress corrosion characteristics of electron beam welded titanium alloys joints in NaCl solution[J]. Materials Characterization, 2022, 192: 112126.
- [11] Cui S, Shi Y, Zhang C, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy K-TIG welded joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(2): 416-425.
- [12] 郑成博,刘爱国,张璐瑶,等. TA2 钛合金熔丝钨极氩弧焊接头的组织性能[J]. 沈阳理工大学学报, 2019, 38(06): 54-58.
- [13] 王旭扬,李菊,陶军,等. 焊后热处理对 TC11 钛合金线性摩擦焊接头组织与性能影响[J]. 材料工程, 2023, 51(10): 118-125.
- [14] 崔丽,李晓延,贺定勇,等. 工业纯钛光纤激光-MIG 复合焊接工艺及性能[J]. 焊接学报, 2009, 11(30): 33-36.
- [15] Filip R, Kubiak K, Ziaja W, et al. The effect of microstructure on the mechanical properties of two-phase titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133(1-2): 84-89.
- [16] 石晓辉,曹祖涵,张敏,等. 钛合金六方马氏体 α' 的特殊金相腐蚀行为及机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(06): 1989-1994.
- [17] 官敬,宋康杰,代燕,等. TC6 钛合金真空感应渗氮层的电化学腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2020, 53(07): 49-54.
- [18] Li B, Wang X, Min Y, et al. Corrosion resistance and mechanical properties of titanium with hierarchical micro-nanostructure[J]. Mater Lett., 2016, 182: 43-46.
- [19] Wang N, Wang R, Peng C, et al. Corrosion behavior of Mg-Al-Pb and Mg-Al-Pb-Zn-Mn alloys in 3.5% NaCl solution[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(10): 1936-1943.
- [20] Casavola C, Pappalettere C, Tattoli F, et al. Experimental and numerical study of static and fatigue properties of titanium alloy welded joints[J]. Mechanics of Materials, 2009, 41(3): 231-243.
- [21] Amaya J S, Amaya M R, Botana F J, et al. Laser welding of light metal alloys: aluminum and titanium alloys[J]. Handbook of Laser Welding Technologies, 2013, 38(7): 215-254.
- [22] Luo S, Yan P, Liu M, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of TA2 Titanium Alloy Welded Joint in Cl-Containing Solutions[J]. Int. J. Electrochem. Sci., 2021, 16(9): 21096.
- [23] Wang L, Yu H Y, Wang K, et al. Local Fine Structural Insight into Mechanism of Electrochemical Passivation of Titanium[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(28): 18608-18619.

(下转第 76 页)

- [21] Chen K H, Namkoong M J, Goel V, et al. Efficient fast-charging of lithium-ion batteries enabled by laser-patterned three-dimensional graphite anode architectures[J]. Journal of Power Sources, 2020, 471: 228475.

(上接第 60 页)

- [24] 董盼. 苛刻腐蚀环境中 TC4 钛合金表面钝化膜特性研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2022.
- [25] Li Z, Zhao W, Xiao G, et al. Impact of microstructure evolution on the corrosion behaviour of the Ti-6Al-4V alloy welded joint using high-frequency pulse wave laser[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 4300-4314.
- [26] Li J Q, Lin X, Guo P F, et al. Electrochemical behaviour of laser solid formed Ti-6Al-4V alloy in a highly concentrated NaCl solution[J]. Corrosion Science, 2018, 142: 161-174.