

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.20

不同补焊次数对 X2CrNi12 铁素体不锈钢焊接接头耐点蚀性能的影响研究

宋 睿, 许鸿吉, 暴兴威

大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028

摘 要: 以 X2CrNi12 铁素体不锈钢为研究对象, 采用 MAG 焊进行不同次数的补焊, 探讨了补焊次数对焊接接头组织及耐点蚀性能的影响。研究表明, 一次补焊和二次补焊接头的焊缝区显微组织基本相似, 主要由白色的奥氏体基体以及黑色的板条状和网状 δ 铁素体组成。与母材相比, 焊接接头的晶粒尺寸明显增大。电化学测试结果显示, 焊缝区的耐蚀性最好, 其次是母材, 而 HAZ 的耐蚀性最差。SEM 观察发现, 焊缝区无点蚀产生, 而母材和 HAZ 出现了均匀分布的小点蚀坑。与一次补焊相比, 二次补焊后的焊缝区耐蚀性更好。因此, 二次补焊有利于提高 X2CrNi12 铁素体不锈钢焊接接头的耐点蚀性能。这一研究结果为根据焊接接头的电化学点蚀性能选择合适的补焊次数提供了理论依据。

关键词: X2CrNi12 不锈钢; 补焊次数; 点蚀; 耐蚀性能; 焊接接头

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0135-06

Impact of Various Addition Welding Times on the Corrosion Resistance of X2CrNi12 Ferritic Stainless Steel Welded Joints

SONG Rui, XU Hongji, BAO Xingwei

School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China

Abstract: This study investigates the effects of varying numbers of re-weldings on the microstructure and pitting resistance performance of X2CrNi12 ferritic stainless steel using MAG welding. The results reveal that the microstructure of the weld zone in both the first and second re-weld joints is largely similar, primarily consisting of a white austenite matrix interspersed with black plate-like and net-like δ ferrite. Notably, the grain size of the welded joint significantly increases compared to the parent material. Electrochemical tests indicate that the corrosion resistance of the weld zone is superior to that of the parent material, while the HAZ exhibits the lowest corrosion resistance. Scanning Electron Microscope (SEM) observations reveal no pitting in the weld zone, whereas small pits are uniformly distributed in both the parent material and HAZ. Furthermore, the corrosion resistance of the weld zone post the second re-weld surpasses that of the first re-weld. Consequently, a second re-weld enhances the pitting resistance performance of X2CrNi12 ferritic stainless steel welded joints. These findings provide a theoretical foundation for selecting appropriate re-welding times based on the electrochemical pitting performance of the welded joint.

Keywords: X2CrNi12 stainless steel; weld repair times; pitting; corrosion resistance; weld joint

引用格式: 宋睿, 许鸿吉, 暴兴威. 不同补焊次数对 X2CrNi12 铁素体不锈钢焊接接头耐点蚀性能的影响研究[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 135-140.

Citation: SONG Rui, XU Hongji, BAO Xingwei. Impact of Various Addition Welding Times on the Corrosion Resistance of X2CrNi12 Ferritic Stainless Steel Welded Joints[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 135-140.

收稿日期: 2023-07-27 修回日期: 2023-10-25

作者简介: 宋 睿(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事先进材料连接的研究。E-mail: 15509861160@163.com。

0 引言

点蚀是一种破坏性和隐患性较大的腐蚀形态,是化工、海洋、石油经常遇到的腐蚀问题^[1-3]。点蚀具有破坏高度集中、蚀孔的分布不均匀、蚀孔隐蔽、有或长或短的孕育期(或诱导期)等特征,通常被视为最具破坏性的局部腐蚀形式之一^[4-5]。不锈钢因含有较多的Cr,使其在很多介质中能形成稳定的钝化膜而表现出良好的耐腐蚀性能,但是在某些含侵蚀性阴离子(如Cl⁻、B⁻、SCN⁻等)的溶液中会经常发生微小区域内金属阳极溶解而出现蚀孔或麻点现象^[6]。

鉴于国际市场中镍含量较高的奥氏体不锈钢价格上涨,不含镍或仅含少量镍的铁素体不锈钢在满足使用条件的情况下被广泛使用^[7-9]。随着对铁素体不锈钢的深入研究和应用实践,其焊接性能和耐蚀性能的不足已经得到改善^[10-11]。例如,3Cr12钢在20世纪80年代初为取代涂层碳钢和其他耐蚀性能差的材料而被开发,现已广泛应用于铁路货车车体制造^[12]。德国1995年基于3Cr12钢开发了一种超低碳、低铬经济型铁素体不锈钢X2CrNi12^[13],该钢种具有中等的抗蚀性、适度强度、良好的耐磨性和低维修成本,已广泛应用于交通运输、化工、海洋、石油等各工业领域^[14-16]。

为了研究不同补焊次数下的X2CrNi12铁素体不锈钢受电化学点蚀的影响,本文采用MAG方法在不同补焊次数(一次和二次)下对X2CrNi12进行焊接,通过观察不同补焊次数下的显微组织,测定极化曲线,并利用SEM扫描电镜观察不同区域的点蚀形貌,旨在为根据焊接试件电化学点蚀性能选择合适的补焊次数提供理论依据。

1 试验材料及方法

试验母材为X2CrNi12不锈钢,厚度3 mm;焊接材料为直径1.0 mm的ER308焊丝;母材及焊材的化学成分及力学性能分别见表1、表2。采用MAG焊,对接接头,I型坡口,坡口间隙1~2 mm,焊接工艺参数及坡口尺寸见表3和图1。保护气体为95%Ar+

5%CO₂。根据焊接手册及生产实际要求,规定铁素体不锈钢补焊次数一般不超过2次,所以试验采用未补焊、一次补焊、二次补焊进行耐点蚀性能对比。补焊试件保留距熔合线1 mm的焊缝金属,补焊试件如图2所示。

表1 X2CrNi12不锈钢和焊材的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of X2CrNi12 stainless steel(wt. %)

材料牌号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
X2CrNi12	0.03	1.00	1.50	0.04	0.015	0.30~1.00	10.50~12.50
ER308	0.01	0.54	8.00	0.016	0.01	9.78	20.06

表2 试验材料的力学性能

Table 2 Test the mechanical properties of materials

材料牌号	R_{el}/MPa	R_{m}/MPa	$A/\%$
X2CrNi12	280~320	450~650	≥24
ER308	—	600	—

表3 焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters of process test

焊接工艺	板厚/mm	电流/A	电压/V
未补焊	3	130	18
一次补焊	3	122	19
二次补焊	3	122	19

焊接工艺	时间/s	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	热输入/ $(\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-2})$
未补焊	43	8.1	0.230
一次补焊	67	5.2	0.355
二次补焊	63	5.6	0.334

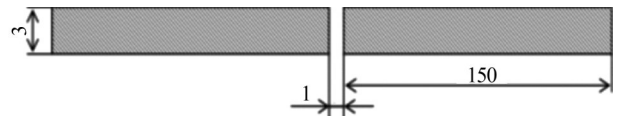


图1 对接接头焊接坡口尺寸

Fig. 1 Welding groove size of butt joint

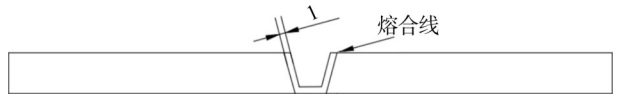


图2 补焊试件焊接接头保留金属尺寸

Fig. 2 Welded joints of the repair specimen retain the metal size

不同补焊次数的宏观形貌如图3所示。根据标尺可以看出补焊次数对焊缝、热影响区面积不会产生影响,焊缝宽度约为5 mm,一侧热影响区宽度约为3 mm。在GB/T17899—1999(不锈钢点蚀电位测量方法)下,分别从试件板的焊缝、HAZ和母材上通过线切割取尺寸如图4所示的试件(为保证变量一致,焊缝、HAZ与母材在试件板上切割相同尺寸的试件,焊缝、HAZ面积不足10 mm×10 mm保证其在

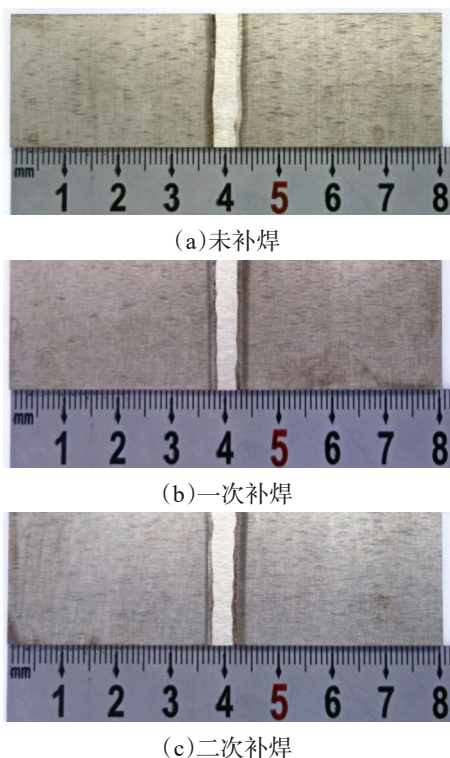


图3 焊接接头宏观形貌

Fig. 3 Macro diagram of welded joint

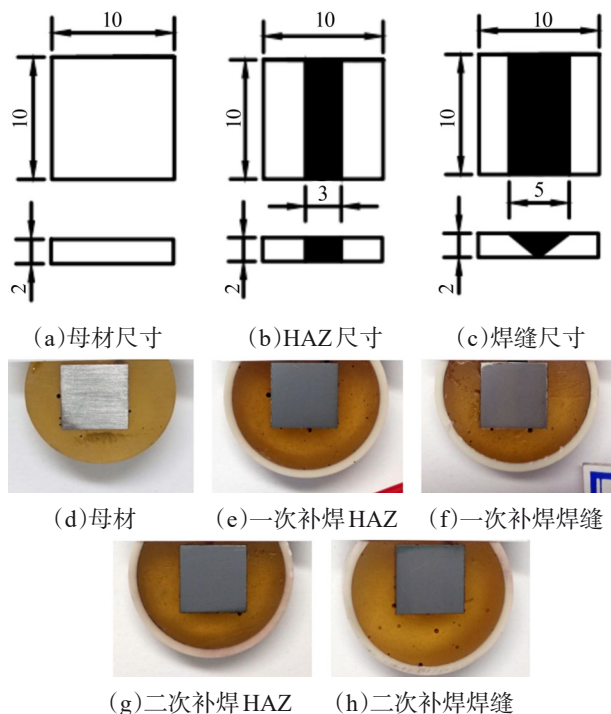


图4 电化学点蚀试验试件

Fig. 4 Electrochemical pitting test specimen

中心位置即可),同时根据结合图4尺寸及宏观形貌,HAZ占腐蚀有效面积的3/10,焊缝占腐蚀有效

面积的1/2。对显微组织试件进行打磨抛光,使用DMi8-Leica数码金相显微镜观察显微组织。对电化学点蚀试件使用粒度为1000的砂纸进行打磨。为了保证试验的准确性,采用锡焊将导线焊接在试样上,同时使用环氧树脂对非试验面和导线进行了可涂覆镶嵌处理。为了进一步提高试件表面的光洁度,使用粒度为1200的砂纸进行打磨,并使用去离子水进行冲洗清洁。

使用3.5%NaCl溶液作为腐蚀介质,以甘汞电极和铂电极分别作为参比电极和辅助电极。在30℃恒温条件下将试样浸没于溶液中,保持1cm的深度。过10min静置后,从自然电位起以4mV/s速度进行阳极极化,直至阳极电流达到500~1000 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 停止。试验结束后,检查试样表面是否有裂纹腐蚀,并对有腐蚀的试样进行扫描电镜和能谱分析,对腐蚀过程进行详细的表征和分析。

2 试验结果及分析

2.1 焊接接头的显微组织

不同补焊次数下焊接接头各区域显微组织如图5所示。母材组织为单一的多边形铁素体,晶粒度7~8级。焊缝显微组织基体为白色的奥氏体,黑色的板条状和网状 δ 铁素体分布在基体上。一次补焊与二次补焊的焊缝区域显微组织相似,且铁素体的生长没有明显方向性,大多是由原奥氏体晶界形核成长的。根据铬镍当量比计算,二者焊缝均为F-A凝固模式。靠近熔合线的过热粗晶区晶粒较大,晶粒度为2~3级,这是因为铁素体不锈钢HAZ在900℃左右的温度区间内加热时晶粒容易长大,且无法恢复,并且Cr含量最高,长大倾向越严重。随着距离熔合线越远,晶粒逐渐细化,可看到晶粒度为5~6级的正火细晶区,尽管此处晶粒较过热区的晶粒有所细化,但仍大于母材晶粒。从熔合线到母材,晶粒尺寸变化明显。

托普^[17]研究了固溶态304不锈钢和表面经STMT处理后的304不锈钢的点蚀能力,得出结论:晶粒细化可以改善不锈钢的抗点蚀能力。对比焊缝和HAZ:焊缝区由于经历了复杂的热处理过程,晶粒相对较小,因此展现出较好的抗点蚀能力。经

过二次补焊后,晶粒进一步细化,其抗点蚀性能进一步提升。然而,紧邻焊缝的过热区由于在焊接过程中吸收了较多的热量,导致晶粒尺寸增大,同时焊接过程的快速冷却使得该区域晶粒仍保持较大

尺寸,从而降低了该区域的抗点蚀性能。对于HAZ,由于二次补焊的HAZ晶粒较一次补焊并没有明显粗大,补焊次数对HAZ的耐蚀性没有明显的影响。

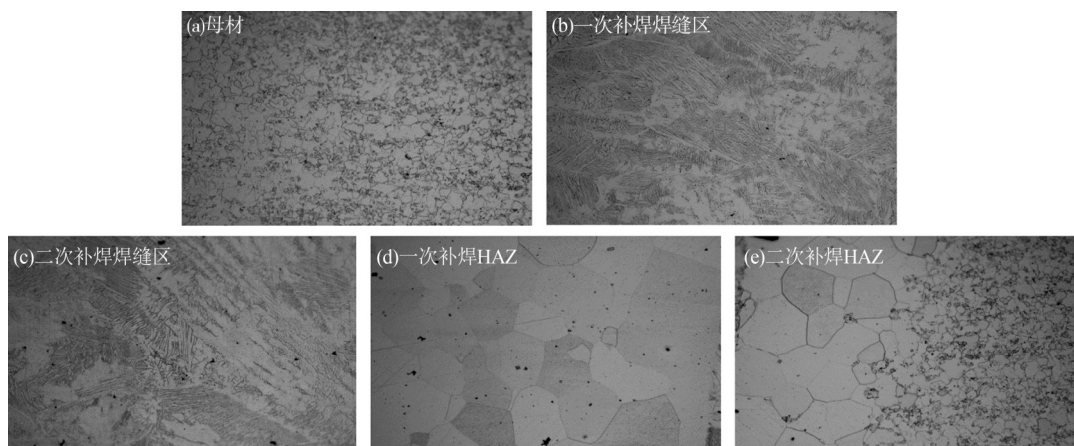


图5 不同补焊次数下焊接接头各区域显微组织形态

Fig. 5 Microstructure morphology of each region of welded joint under different repair welding times

2.2 极化曲线

点蚀过程可以认为是一种电化学反应,与电化学反应一样包括阳极溶解和阴极还原等过程。当金属的点蚀电位越正时,相应的阳极反应速率越低,即金属在腐蚀环境下的溶解速度较慢,从而缓

解了点蚀的产生^[18]。在极化曲线上由于点蚀而使电流开始急剧上升的电位称为点蚀击穿电位,当点蚀发生引起立即上升的电流不确定时,可以用极化曲线上对应电流密度 $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 即 $10^{-4} \text{ A}/\text{cm}^2$ 的电位中最正的电位值来表示点蚀(击穿)电位。

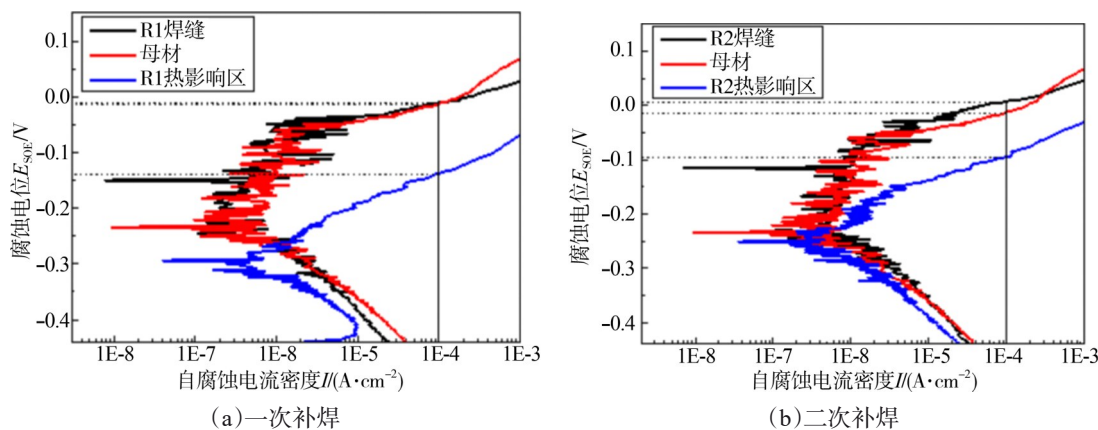


图6 不同补焊次数接头焊缝-母材-HAZ电化学点蚀极化曲线对比

Fig. 6 Comparison of electrochemical pitting corrosion polarization curves of joint weld-base metal-heat-affected zone with different repair welding times

图6为不同补焊次数接头焊缝-母材-HAZ电化学点蚀极化曲线对比,图7为不同补焊次数焊接接头接头电化学点蚀极化曲线对比。可以得到:两种不同补焊次数的接头都表现为焊缝区的极化曲线都位于最左上方,表明其具有最高的耐点蚀性能,其次是母材区,而HAZ的极化曲线则位于最右

下方,显示出最差的耐点蚀性能。同样,当腐蚀电流密度为 $10^{-4} \text{ A}/\text{cm}^2$ 时,焊缝区的点蚀电位最正,母材区次之,HAZ的点蚀电位最低。比较不同补焊次数接头的焊缝区极化曲线时,二次补焊接头焊缝极化曲线位于一次补焊接头焊缝极化曲线的左上方,表明其具有更好的耐点蚀性能。同样,在HAZ的比

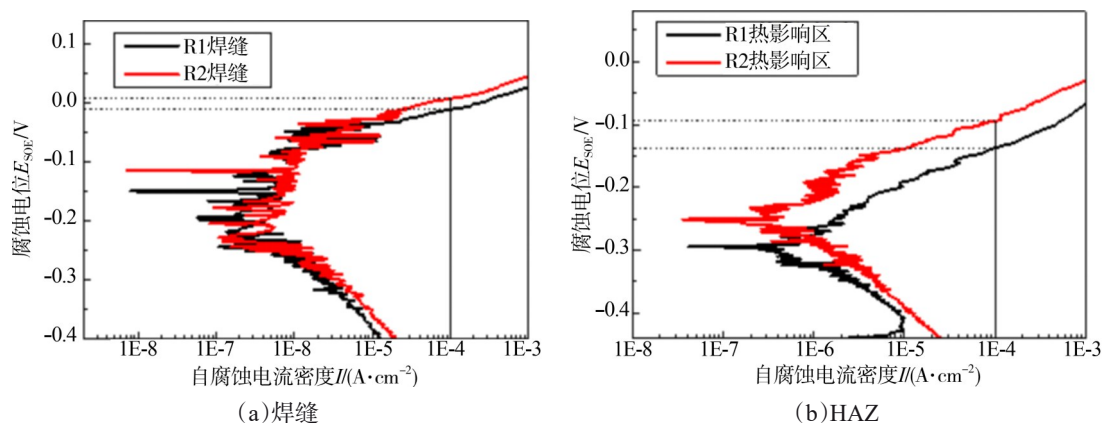


图7 不同补焊次数焊接接头接头电化学点蚀极化曲线对比

Fig. 7 Comparison of electrochemical pitting corrosion polarization curves of welded joints with different repair welding times

较中,二次补焊接头的极化曲线也表现出更优的性能。综上所述,一次和二次补焊接头均是焊缝区的耐电化学点蚀性能最好,其次为母材,HAZ耐电化学点蚀性能最差。相较于一次补焊,二次补焊接头在耐电化学点蚀性能上有所提升,根据点蚀电位相对差值,其耐点蚀性能会下降约2%~3%。

2.4 SEM扫描电镜下点蚀形貌

使用扫描电镜对经电化学点蚀后的不同补焊次数接头的母材、HAZ及焊缝区进行微观形貌分析,如图8所示。分析表明,在两种接头中,焊缝区均未出现点蚀坑,表现出优异的耐电化学点蚀性能;母材和HAZ(主要为敏化区)的点蚀形貌相似,均呈现为均匀分布的小的等轴点蚀坑,腐蚀坑的大小和深浅也相似,根据腐蚀坑大小深浅对比,其耐蚀性会较焊缝区下降约1%~3%。此外,紧邻焊缝区

分布有大量点蚀坑,这些点蚀坑密集且直径较大(相对于母材和HAZ敏化区来说),这部分区域属于HAZ的过热区,其耐电化学点蚀性能很差,与耐蚀性最佳的焊缝区相比,其耐蚀性能下降了约10%。

不同补焊次数接头的耐腐蚀性能差异可归因于其焊接过程和热循环历程的差异^[19]。在一次补焊接头中,焊接区域受到高温热源的作用,导致焊缝区和HAZ经历较高的温度。随后的冷却和固化过程改变了这些区域的组织结构,形成了相应的晶粒结构。对于二次补焊接头,修补过程需要重新加热原有焊缝区域,这改变了焊接过程中的热循环,先要对原有焊缝进行修补,这涉及重新加热焊缝区域。由于焊缝已经存在,使得焊接过程中产生的热循环历程与一次补焊接头不同。二次补焊接头的焊缝区域经历了较低的温度或较小的温度变化,这

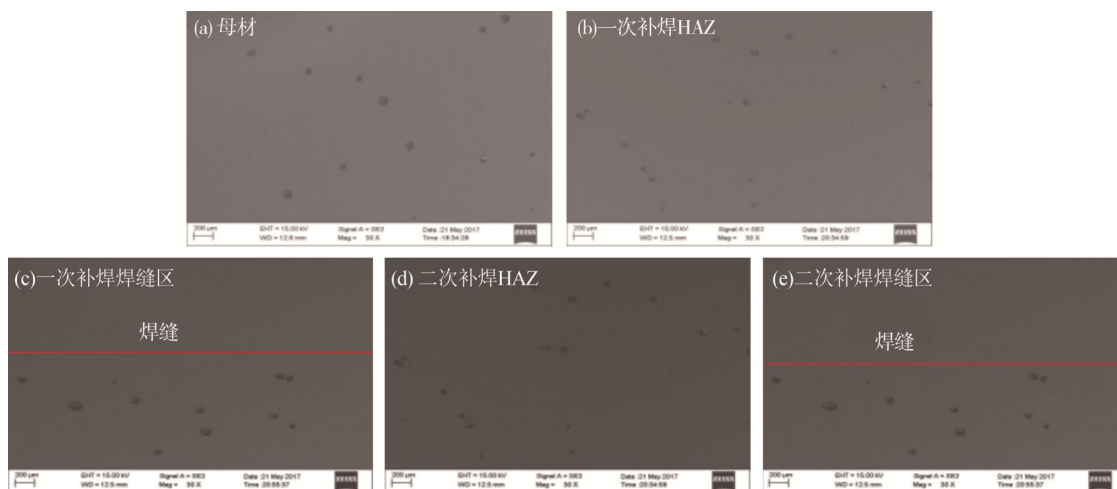


图8 不同补焊次数下的焊接接头各区域点蚀微观形貌

Fig. 8 Micromorphology of pitting corrosion in various regions of welded joints under different repair welding times

有助于提高其耐腐蚀性能。尽管 HAZ 在两种情况下都经历了高温热循环,但温度变化较大,导致晶粒异常生长和偏析。这些现象增加了 HAZ 的敏化程度,使其更容易受到电化学腐蚀的影响,降低了该区域的耐点蚀能力。

3 结论

(1)一次补焊和二次补焊接头的焊缝区在显微组织上呈现出高度的相似性,主要由白色奥氏体基体和黑色板条状及网状的 δ 铁素体构成。相对而言,HAZ 中的过热粗晶区域显示出较大的晶粒尺寸,与母材相比,焊接接头在晶粒尺寸上呈现出显著的变化。

(2)极化曲线分析表明,不论是经过一次还是二次补焊,焊缝区的极化曲线均位于最左上方,显示出最佳的耐腐蚀性;母材区次之;而 HAZ 的极化曲线位于最下方,表明其耐腐蚀性最弱。在腐蚀电流密度达到 10^{-4} A/cm^2 的条件下,二次补焊接头的焊缝区点蚀电位更正,意味着其相较于一次补焊接头具有更优的耐腐蚀性能。

(3)在一次补焊和二次补焊接头中,母材和 HAZ 都表现出均匀分布的小等轴点蚀坑,且腐蚀坑的大小和深浅相似。焊缝区具有优异的耐蚀性能。但过热区和 HAZ 表现出较差的耐蚀性能,存在密集且较大直径的点蚀坑。在一次和二次补焊接头中,母材和 HAZ 均展现出均匀分布的小型等轴点蚀坑,且腐蚀坑的大小和深度相近。焊缝区展现出的耐腐蚀性能。然而,过热区和 HAZ 的耐腐蚀性能较差,存在密集且直径较大的点蚀坑。

参考文献:

- [1] 高爱华. 6063 铝型材斑点腐蚀的机理与改善措施探讨[J]. 热加工工艺, 2011, 40(08): 72-74.
GAO A H. Analysis on Mechanism and Measures of Speckle Corrosion of 6063 Aluminum Extrusion [J]. Hot Working Technology, 2011, 40(08): 72-74.
- [2] 唐子龙. 孔蚀发展过程动力学分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1998(04): 3-12.
TANG Z L. Kinetic Analysis on Pitting Growth [J]. Journal of Chinese Society For Corrosion and Protection, 1998(04): 3-12.
- [3] 刘晓红, 潘丽飞, 严伟林. 超细晶变形铝合金点腐蚀行为[J]. 热加工工艺, 2014, 43(03): 50-51+54.
LIU X H, PAN L F, YAN W L. Pitting Corrosion Behavior of Ultrafine-grained Wrought Aluminum Alloys [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(03): 50-51+54.
- [4] Burstein G T, Pistorius P C, Mattin S P. The nucleation and growth of corrosion pits on stainless steel[J]. Corros. Sci., 1993, 35(1-4): 57.
- [5] King A, Johnson G, Engelberg D. Observations of intergranular stress corrosion cracking in a grain-mapped polycrystal[J]. Science, 2008, 321: 382-385.
- [6] Ding M, Liu S S, Hao H, et al. Strength and infrared assessment of spot-welded sheets on ferrite steel [J]. Mater. Des., 2013, 52: 353-358.
- [7] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983: 207-312.
- [8] 余存焯. 节镍不锈钢的开发与展望[J]. 化工设备与管道, 2008, 25(4): 4-8.
YU C Y. Development and Application Prospect of Nickel Saving Stainless Steel[J]. Process Equipment & Piping, 2008, 25(4): 4-8.
- [9] 许留关, 王槐伟. 关于暖通、给水设备的选材[J]. 化工设备与管道, 2001, 38(4): 59-61.
XU L G, WANG H W. Material Selection for Equipment of Ventilation and Water Supply [J]. Process Equipment & Piping, 2001, 38(4): 59-61.
- [10] Gordon W, van Bennekom A. Review of stabilisation of ferritic stainless steels [J]. Materials Science and Technology, 2013, 12(2): 126-131.
- [11] Zhang Z H. Study on microstructure and properties of heat affected zone of T4003 ferritic stainless steel D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015
- [12] 张孝福. 3Cr12——一种使用前景广阔的低铬铁素体不锈钢[J]. 不锈钢, 2004(2): 9-11.
ZHANG X F. 3cr12—A low chromium ferritic stainless steel with wide application prospect [J]. China Stainless, 2004(2): 9-11.
- [13] 赵雯雯, 许鸿吉, 金光. 1.4003 铁素体不锈钢与 Q235-C 钢焊接接头的组织和力学性能[J]. 理化检验(物理分册), 2009, 45(06): 335-338+344.
ZHAO W W, XU H J, JIN G. Microstructures and Mechanical Properties of Welded Joints for 1.4003 Ferritic Stainless Steel and Q235-C Steel [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2009, 45(06): 335-338+344.