



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.07

船用B10铜镍焊接弯管腐蚀失效机理研究

孙大翔¹, 杨红燕^{2*}, 江泽新³, 陈龙彬², 陈东初⁴, 闫德俊⁴, 胡红祥⁵, 石常亮¹

1. 广东省科学院工业分析检测中心, 广东 广州 510650
2. 中船黄埔文冲船舶有限公司 广东省舰船先进焊接技术企业重点实验室, 广东 广州 510725
3. 广船国际有限公司, 广东, 广州 511462
4. 佛山大学 广东省舰船先进焊接技术企业重点实验室, 广东 佛山 528051
5. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016

摘要: 本研究针对船用B10铜镍焊接弯管的腐蚀现象进行失效分析。通过低倍观察, 金相分析和电子探针分析发现, B10铜镍焊接弯管腐蚀失效的主要原因是海水冲刷腐蚀。在海水冲刷作用下, 铜镍管的保护膜(Cu_2O)遭到破坏, 材料发生晶界腐蚀。当腐蚀扩展到一定程度时, 晶粒在海水冲刷下开始脱落。由于焊缝底部的凸起(焊高)及弯管处流速较大的紊流场, 弯管距离焊缝较近的区域是易发生冲刷腐蚀的危险区域。而且B10合金的焊接热影响区的自腐蚀电流大于焊缝区域和基材, 腐蚀速率最大, 更易发生腐蚀失效。

关键词: 铜镍弯管; 冲刷腐蚀; 焊缝组织; 自腐蚀电流

中图分类号: U671.84 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)04-0049-07

Study on Corrosion Failure Mechanism of Welded B10 Cu-Ni Alloy Elbows for Marine Applications

SUN Daxiang¹, YANG Hongyan^{2*}, JIANG Zexin³, CHEN Longbin², CHEN Dongchu⁴, YAN Dejun⁴,
HU Hongxiang⁵, SHI Changliang¹

1. Center for Industrial Analysis and Testing, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology for Ships, CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Company Limited, Guangzhou 510715, China
3. Guangzhou Shipyard International Company Limited, Guangzhou 511462, China
4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology for Ships, Foshan University, Foshan 528051, China
5. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: This paper conducts a failure analysis on the corrosion phenomenon of welded B10 Cu-Ni alloy elbows used in marine applications. Through low-magnification observation, metallographic analysis, and electron probe microanalysis, it is found that the primary cause of corrosion failure in the B10 Cu-Ni welded elbows is seawater erosion corrosion. Under the action of seawater erosion, the protective oxide film (Cu_2O) on the copper-nickel alloy is damaged, leading to intergranular corrosion of the material. As the corrosion progresses to a certain extent, the grains begin to detach under the erosive force of the seawater. Due to the protrusions (weld reinforcement) at the bottom of the weld and the turbulent flow field with higher velocities at the elbow, the areas close to the weld seam in the elbow are identified as critical zones prone to erosion corro-

收稿日期: 2024-11-25 修回日期: 2025-03-01

基金项目: 广东省舰船先进焊接技术企业重点实验室基金(2023B1212070026); 广州市对外科技合作计划项目(201907010004)

作者简介: 孙大翔(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事金属材料腐蚀、疲劳损伤与失效分析。

通讯作者: 杨红燕(1974—), 女, 学士, 高级工程师, 主要从事材料分析与评价。E-mail: hpsyhy@163.com。

sion. Furthermore, the self-corrosion current in the heat-affected zone (HAZ) of the B10 alloy is greater than that in the weld region and the base material, indicating a higher corrosion rate and a greater tendency for corrosion failure to occur in the HAZ.

Keywords: Copper-Nickel elbow; erosion corrosion; weld microstructure; self-corrosion current

引用格式:孙大翔,杨红燕,江泽新,等. 船用B10铜镍焊接弯管腐蚀失效机理研究[J]. 电焊机, 2025, 55(4): 49–55.

Citation: SUN Daxiang, YANG Hongyan, JIANG Zexin, et al. Study on Corrosion Failure Mechanism of Welded B10 Cu–Ni Alloy Elbows for Marine Applications[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 49–55.

0 引言

海水冷却系统作为船舶的重要工作单元,承担着消防、换热、冷却等重要功能。海水冷却系统一般由泵、阀门、管线和热交换器等金属部件组成,由于长期传输海水作为冷却介质,必然会面临海水腐蚀的问题。随着金属材料的不断发展,海水冷却系统管道从早期的黄铜管和不锈钢管,发展到目前广泛使用的铜镍管^[1-2]。铜镍管的材质为铜镍合金(俗称白铜),因其良好的耐海水腐蚀性能、抗生物污损性能和优良的冷、热加工性能而广泛应用于船舶的海水冷却管路、消防水管路、油污水系统等^[2-4]。

B10铜镍管的耐蚀性优良,服役寿命可达20年,能满足大部分服役要求。但据国内外多家船厂的使用数据显示,船舶海水冷凝系统使用的B10铜镍管耐蚀性不稳定,出现了未达到使用年限就腐蚀失效的问题,有的甚至在新船交付使用后3~10个月就出现腐蚀穿孔事故。这类问题主要分布在船舶各处的海水管路包括消防管路、机电设备海水冷却管路、船底疏排水管路,尤其是管路的弯曲处出现的频率更高。这些部分一旦腐蚀破坏,就会影响设备正常运行,导致船舶在航率降低和运营成本上升,甚至威胁整船的安全,因此,船舶海水冷却系统镍铜管的腐蚀问题亟待解决。

对铜镍合金在海水中的腐蚀机理国内外学者已经进行了一系列的研究,由于海水温度、溶氧量、海水流速及海洋生物等诸多因素的变化对海水腐蚀都会产生交互影响,其腐蚀机理也较单一的腐蚀介质(如盐水等)引起的腐蚀复杂得多。一般认为铜镍合金表面膜是由双层膜组成,内层膜为结构致密、有保护性的 Cu_2O 膜,外层膜为疏松多孔、无保护性的 $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ 膜^[5-9]。目前多数研究都是利用既定的“双层膜”模型来解释腐蚀和电化学试验现象。

早期的研究工作由于检测方法的限制,对铜镍合金腐蚀现象的表征是粗放的、间接的^[10]。而且针对弯管发生腐蚀频率高的现象,管路的材料、焊接工艺以及环境等因素对管路腐蚀的影响规律也缺乏系统的研究。本文针对B10铜镍焊接弯管的腐蚀现象,通过失效分析研究管材的腐蚀失效机理,并深入研究材料的组织、焊接工艺等对管材腐蚀失效的影响规律。

1 试验材料和方法

试验材料为B10铜镍管,化学成分见表1,焊丝为B30。采用手工TIG焊对B10弯管进行单道焊接,焊接电流70~80 A,电压10~11 V,过程用氩气保护。

表1 B10铜镍管化学成分(质量分数,%)

Tab. 1 Chemical composition analysis of B10 tube (wt. %)

样品	Zn	Pb	P	S	Mn	Fe	Ni	C	Cu
1#	0.014	<0.001	<0.002	0.0034	0.78	1.70	10.80	0.0038	余量



图1 焊接弯管腐蚀穿孔宏观照片

Fig. 1 Macroscopic photographs of corrosion and perforation in welded elbow pipes

焊接弯管服役一段时间后发现,距离焊接位置5 mm处出现了腐蚀穿孔,宏观照片如图1所示。用Nikon SMZ800N型体式显微镜对铜镍管样品的腐蚀区域进行低倍组织观察。用LEICA DM 4000M型金相显微镜对焊缝组织进行金相组织分析,日本JEOL JXA-8100型电子探针进行组织形貌观察和能谱成分分析。利用GJZXA00281型电化学工作站在模拟海水的情况下测量管材样品的开路电位-时

间曲线以及动电位极化曲线、阻抗拟合曲线。

2 铜镍管腐蚀样品分析结果

将腐蚀样品剖开并检查管道内壁腐蚀情况,如图2所示。图2a中箭头表示管道内水流方向,根据水流方向将试样分为前端直管、中部弯管和后端直管三个部分。

从图2的剖面照片中可以看出三个部分的管道内部状态差异较为明显。前端直管内壁较为光滑,

无明显腐蚀痕迹,但能明显看到有泥沙残留;中部弯管内壁有明显的较深的腐蚀坑及腐蚀穿孔出现,弯管内的腐蚀孔或腐蚀坑内的腐蚀产物为黑色加少量铜绿色,紧邻焊缝的腐蚀坑较浅,且其内产物为砖红色;后端直管内壁也可明显看到有冲刷腐蚀的痕迹,在靠近焊缝的15 mm范围内有少量较浅的腐蚀坑产生,紧邻焊缝(5 mm范围内)的腐蚀产物颜色为砖红色,稍远一点的腐蚀坑较深,且腐蚀产物为黑色加少量铜绿色。内壁焊缝凸起高度最高处约3 mm。

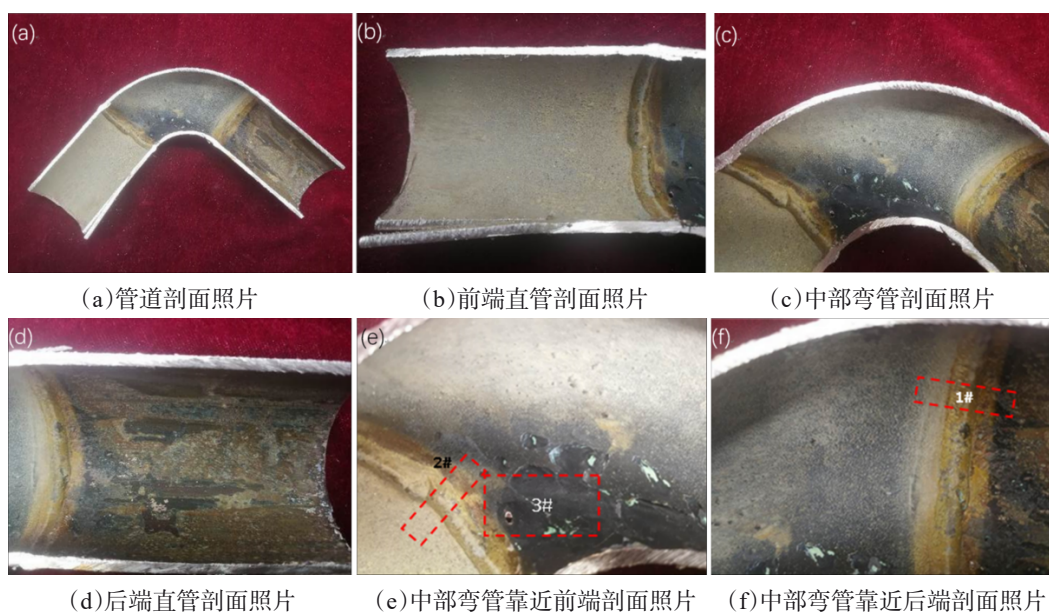


图2 腐蚀样品剖开内壁宏观照片

Fig. 2 Macroscopic photograph of the inner wall of the corrosion sample splitted

2.1 低倍宏观形貌

对图2e中弯管内3#腐蚀坑进行低倍宏观形貌观察,结果如图3所示。可以看出,弯管内壁腐蚀坑及腐蚀穿孔较深,其腐蚀产物为黑色加少量铜绿色,表明严重氧化和腐蚀;而紧邻焊缝的腐蚀坑较

浅,产物为砖红色加少量铜绿色。腐蚀产物的成分将通过下一步的电子探针进行测定。

2.2 焊缝组织金相分析

对图2f、2e中的1#、2#位置的腐蚀坑及其焊接接头组织进行金相显微组织观察,结果如图4、图5

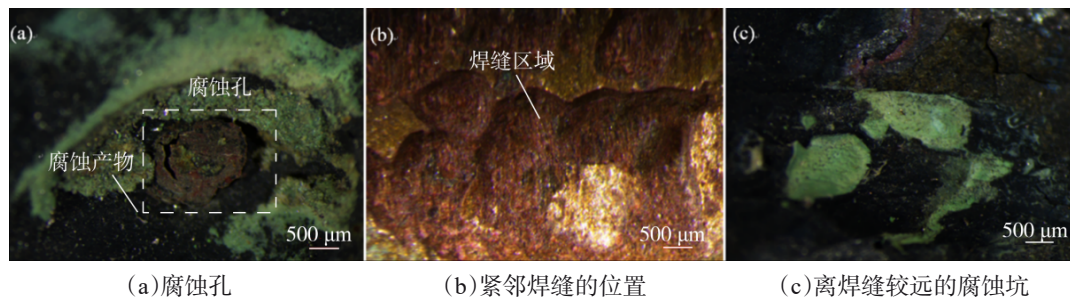


图3 3#区域腐蚀坑及腐蚀孔形貌

Fig. 3 Morphology of corrosion pits and holes in Area 3#

所示。可以看出该腐蚀样品的内部母材组织为 α 单相再结晶组织,且其金相组织内存在大量加工变形条纹组织;焊缝的热影响区晶粒十分粗大,这是由于焊接的热输入促使热影响区晶粒异常长大(见图4b、4e,图5b、5e)。焊缝组织特征为典型的树枝晶,内部存在少量气孔(见图4c、4d,图5c、5d)。

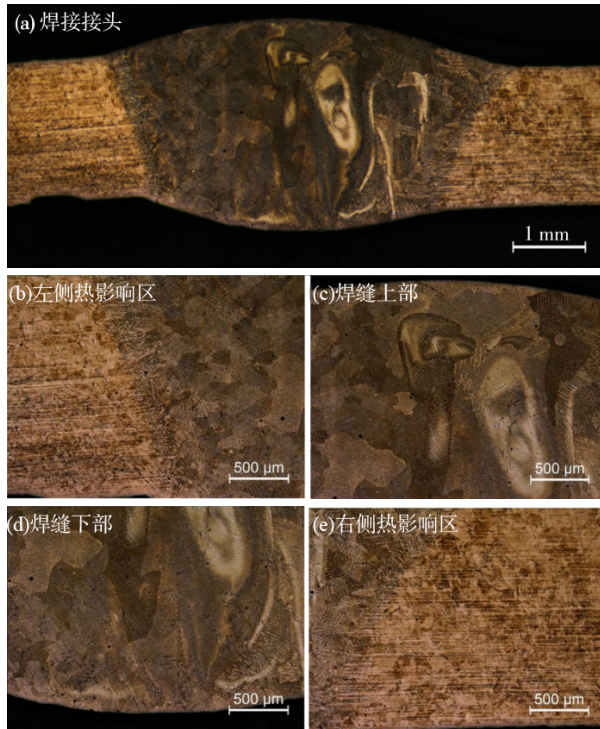


图4 1#焊接接头金相组织

Fig. 4 Metallographic structure of welded joint 1#

1#和2#试样在热影响区附近存在有腐蚀坑,其内壁腐蚀形貌非常符合冲刷腐蚀机理中的“挤出-锻打”理论。该理论认为样品表层由于“挤出-锻打”所形成的形变金属“小盘”,由于冷淬硬化的原因更容易受到机械损伤,在随后的颗粒冲击中更容易脱落,形成腐蚀表面的小凹坑,导致材料的磨损,形成薄弱区域。

2.3 电子探针分析

对弯管焊接的组织进行了面扫描,结果如图6、表2所示。可以看出,弯管表面存在大量的O元素和C元素,这是由于焊接热输入量过大,将弯管表面烧黑,导致表面生成了大量的黑色CuO。

对图3a位置进行电子显微观察及成分分析,结果如图7、表3所示。可以看出腐蚀坑的腐蚀产物主要由Cu和O组成,从宏观照片看到产物的颜色是黑

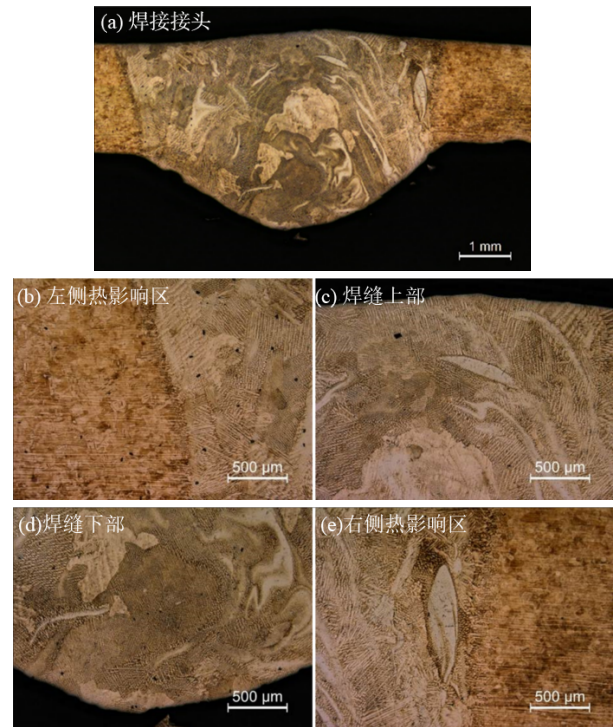


图5 2#焊接接头金相组织

Fig. 5 Metallographic structure of welded joint 1#

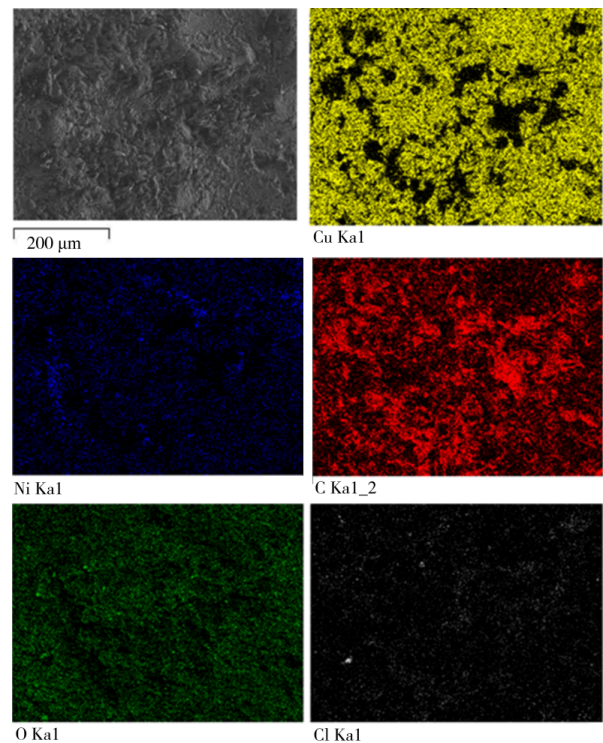


图6 焊接弯管样品表面成分面扫描

Fig. 6 Surface composition mapping of welded elbow pipe

色的,所以可以判断该腐蚀产物为CuO。并且发现该氧化物有部分脱落,漏出底层金属,对其进行成

表 2 焊接弯管表面化学成分(质量分数, %)

Table 2 Surface chemical composition of welded elbow pipe (wt. %)								
Ni	Fe	Mn	K	Si	C	O	Cl	Cu
1.92	0.45	0.26	0.20	0.24	19.18	22.67	0.27	54.80

分扫描发现其Ni的含量明显降低,说明在这个腐蚀过程中发生了脱(Ni)成分腐蚀。脱成分腐蚀属于微区电化学腐蚀的一种,并且弯管内腐蚀产物是CuO,不具有抗腐蚀性,因此,弯管内的腐蚀坑都比较深,且最终形成了腐蚀穿孔。

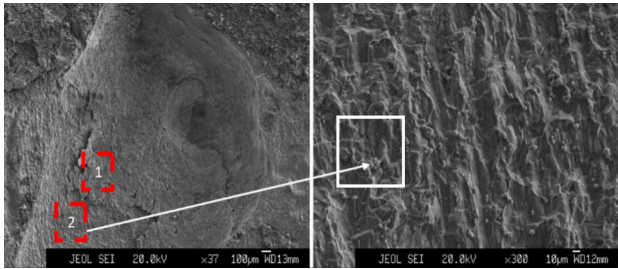


图 7 深腐蚀坑(弯管)显微形貌

Fig. 7 Microscopic morphology of corrosion pits on welded elbow pipe

表 3 深腐蚀坑化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical composition of the deep corrosion pits (wt. %)										
元素	C	O	Si	P	S	Cl	Mn	Fe	Ni	Cu
1	23.51	50.00	/	0.19	0.47	0.55	/	5.21	5.51	14.57
2	5.81	9.49	0.05	0.10	0.10	0.23	0.83	8.62	8.98	65.79

采用电子探针对图 3b 所示位置的电子形貌和化学成分进行分析,结果如图 8、表 4 所示。可以看出,腐蚀坑中的腐蚀产物主要由 Cu、O 及少量 Cl 元素组成,宏观照片中观察到的产物颜色是砖红色及少量的绿色,由此判断该腐蚀产物为 Cu₂O 及少量的 Cu₂(OH)₃Cl。此外,观察到该氧化物部分脱落后漏出底层金属晶粒,经成分扫描,其成分符合标准要求,未发现明显的脱成分腐蚀现象。研究表明, Cu₂O 的出现具有明显的抗腐蚀特性,这是导致相应腐蚀坑较浅的原因。

3 腐蚀机理分析及讨论

海水管系常见的腐蚀形式包括接触腐蚀、冲刷腐蚀、应力腐蚀和空泡腐蚀。(1)接触腐蚀发现在两种不同金属在导电介质(如海水电解质中)直接接触时,形成宏观电池腐蚀,或由于金属本身的不均匀性,产生无数个微电池,在微电池中的阳极区产

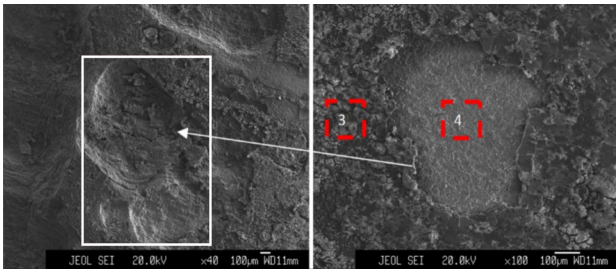


图 8 浅腐蚀坑(弯管)显微形貌

Fig. 8 Microscopic morphology of shallow corrosion pits on a welded elbow pipe

表 4 浅腐蚀坑化学成分(质量分数, %)

Table 4 Chemical composition of shallow corrosion pits (wt. %)							
元素	C	O	Mg	Al	Si	P	S
3	13.06	44.14	0.41	0.62	1.25	0.94	0.48
4	2.87	8.20	—	—	—	—	—
元素	Cl	Ca	Mn	Fe	Ni	Cu	
3	4.38	0.38	0.23	7.55	4.98	21.58	
4	0.36	—	0.69	1.90	10.39	75.59	

生电化学腐蚀。(2)冲刷腐蚀指金属表面同时受到电化学腐蚀和流体冲刷作用而遭到破坏的腐蚀现象。(3)应力腐蚀是金属在拉应力和腐蚀介质共同作用下的破坏,是一种危险的腐蚀形态,裂缝形态有沿晶界发展和穿晶破裂或其混合型。(4)空泡腐蚀则是由于流体高速流动产生紊流,在物体负压区形成的气泡受到压缩,并在高内压下破裂,对周围金属产生连续激烈的锤击,与其他腐蚀共同作用导致管路损坏,即以空泡的机械破坏为主,其他腐蚀为辅的综合腐蚀类型^[11]。

从微观组织分析结果来看,该管道焊接接头的显微组织基本属于正常的铜镍合金焊接接头组织,热影响区晶粒较粗大,也属于焊接热输入造成的晶粒长大,会对管道的耐腐蚀性有一定影响,当焊接热输入量较大时,造成了弯管的内表面形成大量的氧化物(CuO)和碳化物,该氧化物(CuO)的存在不具有抗腐蚀性。在海水冲刷腐蚀并存的条件下,弯管距离焊缝较近的区域内,由于焊缝底部的凸起(该试样最大凸起高度 3 mm)及弯管处的流速变化较大会形成较强的紊流场,是较危险的区域。如果流体中含有固体颗粒,在管道内壁焊缝的凸起处下游将会发生流体加速及冲刷两种腐蚀,管道的腐蚀速率将大幅增加。在海水中沙粒的冲刷作用下,管道内壁表面的氧化膜(Cu₂O)很快会被破坏,在紊流

场的作用下,很难再形成稳态的 Cu_2O 氧化膜,只能形成 CuO 和 $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$,降低了弯管处的抗腐蚀性。并且发生了脱(Ni)成分腐蚀,进一步降低了弯管处的抗腐蚀性,在该位置处会形成微区电化学腐蚀,进一步加深腐蚀,腐蚀坑较深,直至穿孔发生。而在紧邻焊缝根部的位置,即使形成了腐蚀坑,腐蚀坑也较浅,这是由于焊缝余高也可以阻挡一部分沙粒的冲击,保护了腐蚀产物 Cu_2O 氧化膜,形成了一层保护膜,阻止了腐蚀的进一步加剧,所以紧邻焊缝根部位置的抗腐蚀性比焊缝下游区域近管壁处位置的抗腐蚀性要强。

针对管材焊接的基材,热影响区和焊缝组织的耐腐蚀性能差异,利用多通路电极的方法研究不同位置的电化学腐蚀行为。用线切割制备包括这五个区域的试样,确保区域之间的缝隙保持在1 mm,用细铜导线将各区域缠绕,并使用电烙铁和焊锡进行焊接。为了防止缝隙腐蚀,采用环氧树脂对试样进行封装。试验中,时间继电器作为工作电极,与参比电极和对电极共同构成三电极回路,如图9所示。试样工作电极与电化学工作站相连接,实现了多电极开路电压的测试,同时进行电化学阻抗和极化曲线的测试结果。

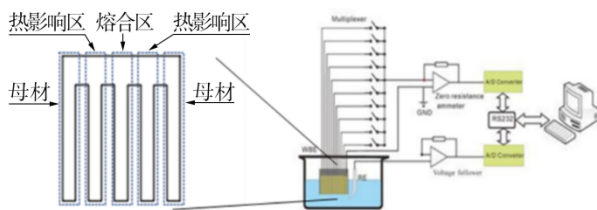
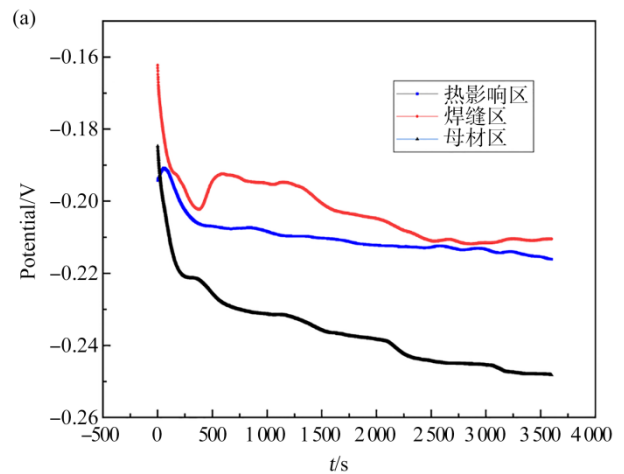


图9 多通道电极体系示意

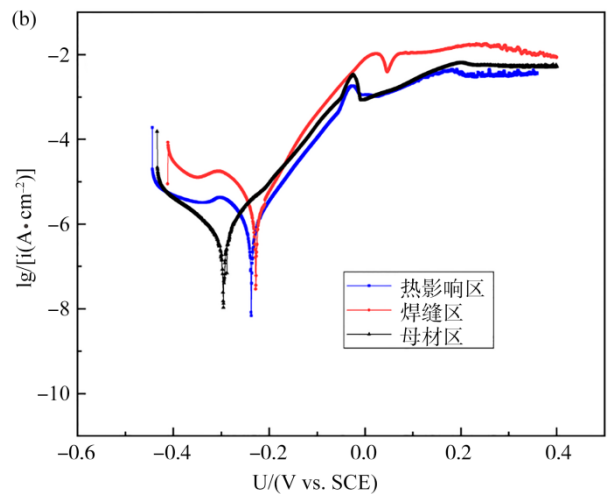
Fig. 9 Multi-channel electrode system diagram

利用电化学测试材料的开路电位、极化曲线和电化学阻抗。结果如图10所示。

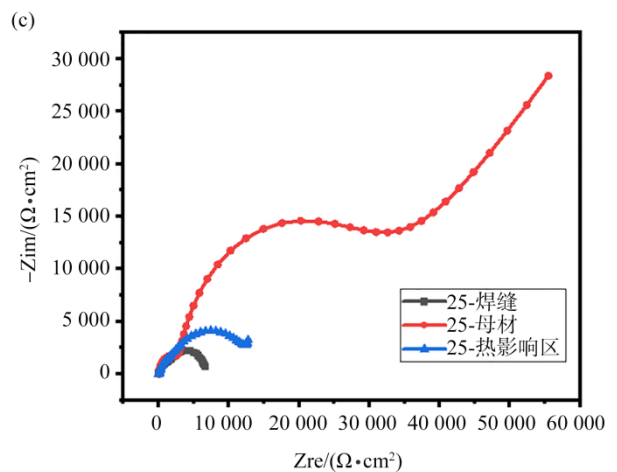
图10a为在25℃条件下B10焊接接头的不同区域在模拟海水中的开路电位-时间曲线。由图可知,焊缝区的开路电位迅速达到稳定状态,热影响区和母材的开路电位在2500 s后逐渐趋于稳定,表明焊缝区的热力学稳定性更好。母材区、热影响区、焊缝区的开路电位分别为-0.248 V、-0.216 V、-0.210 V,显示焊缝区的开路电位明显高于其他两个区域,从而降低了腐蚀倾向。图10b为25℃条件下B10焊接接头的不同区域在模拟海水中的动电位



(a)开路电位



(b)动电位极化曲线



(c)电化学阻抗谱

图10 25℃下B10焊接接头在模拟海水中的电化学测试

Fig. 10 Electrochemical testing of B10 welded joint in simulated seawater at 25℃

极化曲线,焊缝区的阴极区电流密度最小,阳极区三者的腐蚀电流密度都呈现出先上升然后趋于稳定的趋势。母材区、热影响区和焊缝区的自腐蚀电流密度分别为 $1.059\text{E}^{-06}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $1.831\text{E}^{-06}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $7.454\text{E}^{-07}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$,腐蚀速率分别为 $0.012\text{ }39\text{ mm/a}$ 、 $0.021\text{ }4\text{ mm/a}$ 和 $0.008\text{ }72\text{ mm/a}$ 。热影响区自腐蚀电流依旧在三者中最大,腐蚀速率也最高,不同区域的腐蚀规律跟前述情况类似,即焊缝区具有最佳的耐腐蚀性能,而热影响区的耐蚀性却很差。图10c为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下B10焊接接头的不同区域在模拟海水中的电化学阻抗谱,在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的溶液中母材区、热影响区、焊缝区的电荷转移电阻分别为 $3\text{ }825\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $878.3\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $26\text{ }610\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。阻抗谱得出的不同区域的腐蚀规律跟极化曲线类似,热影响区的耐腐蚀性能最差,可以明显看出热影响区域耐蚀性较差。从整体来看,在同一温度条件下,热影响区的腐蚀速率最大,说明其耐腐蚀性能较差,其次是母材区域,焊缝区由于使用的是性能更优的B30焊材,因此其腐蚀速率较小,耐腐蚀性能优异。

综上所述,该铜镍合金管的腐蚀穿孔失效主要是由于海水冲刷腐蚀所致。在海水的冲刷作用下,铜镍管表面的保护膜(Cu_2O)被破坏,海水中的腐蚀介质从材料的晶界开始,慢慢腐蚀材料,直至晶粒发生松动并在海水冲刷下发生脱落。当这种脱落达到一定程度时,管材便会出现穿孔。对于由弯管和支管焊接而成的船舶管路,由于焊缝底部的凸起(焊高)及弯管处海水流速较大的紊流场,使得弯管距离焊缝较近的区域成为易发生冲刷腐蚀的危险区域,这是弯管发生腐蚀穿孔的外在因素。此外,电化学测试结果显示,铜镍合金的焊接热影响区的自腐蚀电流最大,明显大于焊缝组织和基材,所以热影响区的腐蚀速率最高,耐蚀性较差,更易发生腐蚀穿孔^[12-14]。

4 结论与展望

(1)铜镍焊接弯管腐蚀失效主要原因是海水冲刷腐蚀,海水冲刷破坏铜镍管的表面 Cu_2O 层,导致晶界腐蚀和晶粒脱落,最终引发腐蚀穿孔。

(2)焊缝附近区域为腐蚀高风险区。焊缝底部

的凸起(焊高)及弯管处流速较大的紊流场加剧了海水冲刷腐蚀,使弯管距离焊缝较近的区域成为腐蚀失效的高风险区域。

(3)电化学测试表明,在同一温度条件下铜镍合金的焊接热影响区的自腐蚀电流和腐蚀速率最大,此区域的耐腐蚀性能最差;其次是母材区域;焊缝区的腐蚀速率较小,耐腐蚀性能最佳。

下一步可深入研究铜镍管的焊接工艺,尝试通过降低焊接热输入等方法,有效控制焊缝的凸起,减少热影响区的晶粒粗化,从而提高铜镍焊接弯管的耐蚀性能。

参考文献:

- [1] 刘天娇,陈惠鹏,张卫方,等. B10铜镍合金海水加速腐蚀行为[J]. 材料工程, 2017, 45(5): 31-37.
LIU T J, CHEN H P, ZHANG W F, et al. Accelerated Corrosion Behavior of B10 Copper-Nickel Alloy in Seawater[J]. Materials Engineering, 2017, 45(5): 31-37.
- [2] 张永强. 国产B10合金耐海水冲刷腐蚀对比研究[J]. 材料开发与应用, 2007, 22(6): 36-39.
ZHANG Y Q. Comparative Study on the Resistance to Seawater Erosion Corrosion of Domestic B10 Alloy[J]. Materials Development and Application, 2007, 22(6): 36-39.
- [3] Zinv B, Dabala M. Characterization of Cu-Ni alloy electrodeposition and synthesis of nanoparticles by pulsed sonoelectrochemistry [J]. Materials Chemistry and Physics, 2014, 144(3): 272-279.
- [4] 林乐耘,徐杰,赵月红. 国产B10铜镍合金腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, 20(6): 361-367.
LIN L Y, XU J, ZHAO Y H. Corrosion Behavior of Domestic B10 Copper-Nickel Alloy [J]. Journal of Chinese Corrosion and Protection, 2000, 20(6): 361-367.
- [5] Lalvani S B, Kang J C, Mandich N V. The corrosion of Cu-Ni alloy in a chloride solution subjected to periodic voltage modulation: Part I [J]. Corrosion Science, 1998, 40(1): 69-89.
- [6] Kear G, Barker B D, Stokes K, et al. Electrochemical corrosion behavior of 90-10 Cu-Ni alloy in chloride-based electrolytes [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2004, 34(7): 659-669.
- [7] 束国刚,薛飞,达文新,等. 核电厂管道的流体加速腐蚀及其老化管理[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(2): 21-25.
SU G G, XUE F, DA W X, et al. Fluid-Accelerated Corrosion and Aging Management of Nuclear Power