

海管焊接接头腐蚀特性及监测方法研究进展

韩一峰¹, 朱烨森^{1,2}, 陈皖滨², 程堂华¹, 胡涛勇¹, 胡葆文¹, 黄一²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122;

2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 首先, 介绍了海底管道焊接区域的腐蚀理论, 其中成分差异理论和活性组织溶解理论是导致焊接区域发生局部腐蚀的主要内因。其次, 总结了影响焊接区域腐蚀性能的因素, 主要包括焊接区域元素成分、显微组织等材料自身因素以及温度、流速等环境因素。进而, 结合焊接区域的属性特点和环境条件, 归纳了电偶腐蚀、应力腐蚀、晶间腐蚀等主要的腐蚀类型。最后, 重点介绍了元素成分和显微组织结构复杂的焊接区域非均匀腐蚀监测方法, 明确了如电化学法、电阻法等的技术特点和适用条件, 从而从腐蚀特性及腐蚀监测层面为海管焊接区域的工艺设计和腐蚀管理提供技术指导。

关键词: 海底管道; 焊接接头; 腐蚀特性; 影响因素; 非均匀腐蚀; 腐蚀监测

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)07-0098-11

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.013

Research Progress on Corrosion Characteristics and Monitoring Methods of Submarine Pipeline Weldment

HAN Yi-feng¹, ZHU Ye-sen^{1,2}, CHEN Wan-bin², CHENG Tang-hua¹, HU Tao-yong¹, HU Bao-wen¹, HUANG Yi²

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. State Key Laboratory Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

ABSTRACT: Firstly, the corrosion theory of submarine pipeline weldment was introduced, among which the composition difference theory and the active tissue dissolution theory were the main internal causes of local corrosion in the weldment. Secondly, the factors affecting the corrosion performance of the weldment were summarized, including the elements, microstructures and other material factors, and environmental factors such as temperature and flow rate. Furthermore, based on the characteristics of weldment and environmental conditions, the main corrosion types such as galvanic corrosion, stress corrosion and intergranular corrosion were summarized. Finally, the review focused on the non-uniform corrosion monitoring methods in the weldment with complex element composition and microstructure structure, and defined the technical characteristics and applica-

收稿日期: 2022-11-02; 修订日期: 2023-06-26

Received: 2022-11-02; **Revised:** 2023-06-26

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目 (2022M722955); 工业装备结构分析国家重点实验室开放课题 (GZ22118)

Fund: China Postdoctoral Science Foundation (2022M722955); The open Foundation of State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment (GZ22118)

作者简介: 韩一峰 (1982—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为金属结构设计。

Biography: HAN Yi-feng (1982-), Male, Senior engineer, Research focus: metal structure design.

通讯作者: 朱烨森 (1992—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为海工/水工金属结构腐蚀监测及防腐。

Corresponding author: ZHU Ye-sen (1992-), Male, Doctor, Engineer, Research focus: corrosion monitoring and anti-corrosion of marine/hydraulic metal structures.

引文格式: 韩一峰, 朱烨森, 陈皖滨, 等. 海管焊接接头腐蚀特性及监测方法研究进展[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 098-108.

HAN Yi-feng, ZHU Ye-sen, CHEN Wan-bin, et al. Research Progress on Corrosion Characteristics and Monitoring Methods of Submarine Pipeline Weldment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 098-108.

ble conditions such as electrochemical method and resistance method, so as to provide technical guidance for the process design and corrosion management in the weldment of submarine pipeline from the aspects of corrosion characteristics and corrosion monitoring.

KEY WORDS: submarine pipeline; weldment; corrosion characteristics; affecting factor; non-uniform corrosion; corrosion monitoring

海洋油气主要通过高效、节能的海底管道方式集输^[1]。海底管道面临着失效带来的双重挑战:一方面严重干扰着经济社会活动,另一方面危及人类生命和财产安全^[2]。中海石油公司曾报道,1986—2016年,中国海底管道事故的最主要原因是腐蚀^[3]。另外,东海某油田管道壁也检测出了明显的腐蚀坑,部分管壁甚至已穿孔。某管线在2018年发现了大面积腐蚀坑,最严重的蚀坑深度达到了壁厚的37%。为了解决这些问题,需要采取必要的措施确保海底管道的可持续性和安全性。

为了长距离地输运深海油气,焊接成为深海管道

连接最普遍和经济的连接方式,如图1所示。海底管线中每12 m就需要进行一次焊接^[4],因此焊接接头成为海洋油气工程中不可避免的结构。在铺设长距离输送管道时,通常采用铺管船法将钢管逐一焊接接长,并在接口进行绝缘防腐、保温以及包覆混凝土防护层,最后将加工后的海管通过铺管船铺敷到海底。但焊接部位在焊接热循环的作用下,焊接接头各区域的材质分布和微观组织结构会发生一系列变化。例如倒置元素的迁移和分布的不均匀、显微组织的改变、焊接残余应力和焊接缺陷的出现,这些都会严重影响整个长输管线的完整性,严重时更会危及输运工程的安全运行。

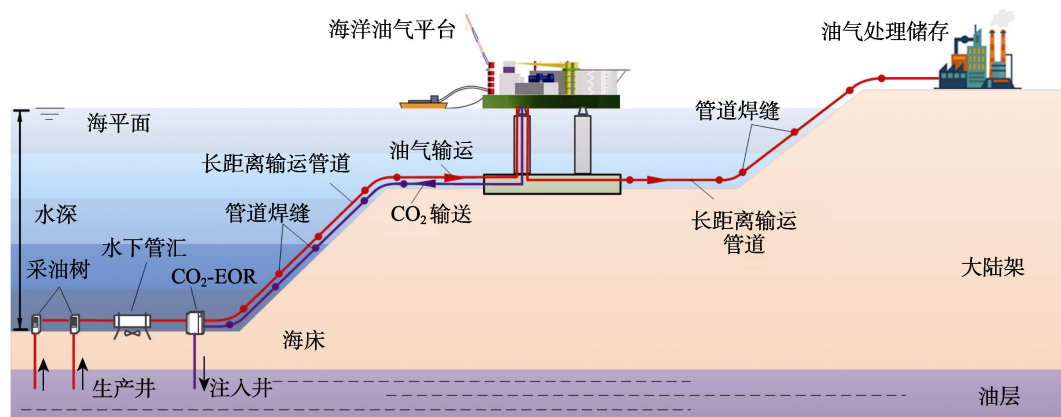


图1 海洋油气开采和输运过程

Fig.1 Schematic diagram of offshore oil and gas exploitation and transportation process

考虑到元素成分类型和分布,以及结构微观组织,管道焊接区域可分为焊缝区、热影响区和母材区。根据已有工程实例,海底管道焊接接头非均匀腐蚀的影响因素众多、腐蚀机理复杂。电化学方法^[5-7]和电阻探针法^[8]技术成熟、工程应用广泛,在获取焊接区域的腐蚀速率等基本信息具有反应及时的优势,但受限于2种方法的测试原理,针对存在材质差异的焊接接头,难以获得其空间上的腐蚀深度分布和变化规律。同时,即便电阻探针布置靠近管道焊接区域附近,可以通过尽可能还原腐蚀环境来反馈腐蚀深度,但由于未能充分考虑到焊接区域材料和显微组织的非均匀性,导致监测结果可能过于保守。管道实际运行过程中,针对管道焊接区域的腐蚀监测手段比较有限。针对焊缝接头定期采用超声波检测是最常见的腐蚀检测方法,但该方法在深海环境下操作难度较大。近年来,电指纹法在管线腐蚀监测领

域的应用逐渐普遍^[9-12],该方法可以在保证管道结构完整性的情况下获取内壁的非均匀腐蚀分布特点,但受限于电阻算法原理,该方法的监测精度并不高,且对于材质不均匀的焊接区域,测量误差会比较大。由此,针对海底管道焊接区域,设计一种可靠的非均匀腐蚀监测方法,并研究其腐蚀规律至关重要。

1 海底管道焊接区域腐蚀问题研究进展

复杂的焊接过程会形成非平衡的热循环作用,使得焊接各个区域的元素组成和显微组织发生了较大差异变化,进而增强了焊接缺陷和应力集中的敏感性^[13-14]。焊接接头作为管道内的异质结构,在复杂的多相输运腐蚀介质中,容易发生各种宏观和微观尺度的耦合腐蚀问题,进而引发安全事故,造成严重的

经济和人身损失^[15-16]。

1.1 焊接区域的腐蚀理论

成分差异理论和活性组织溶解理论是现阶段用来解释焊接接头腐蚀发生的主要理论^[1]。

1) 成分差异理论。成分差异理论的差异性体现在 2 方面: 母材和焊缝的固有组成元素成分存在差异; 母材和焊缝的固有元素组成之间的性能不相匹配。在管道焊接热循环过程中, 无论是过程加热或是冷却, 均会对热影响区、焊缝区和母材区的元素起到迁移变化的影响, 进而导致焊接接头的各区域产生电化学性质的差异, 在微观层面出现腐蚀电池效应。在宏观表现上, 腐蚀电池作用导致的电偶腐蚀成为管道焊接接头腐蚀发生的最常见和最严重的类型。电偶腐蚀具有明显的空间分布特点, 2 种金属的交界区域最为敏感, 且通常距离交界越远, 腐蚀程度相对越轻。作为焊接接头, 母材、热影响区和焊缝区不可避免地存在由于元素成分和显微组织差异导致的电位差, 使得电偶腐蚀问题异常明显^[17-19]。Kato 等^[20]研究表明, 硫元素会对金属的电偶腐蚀产生重要影响, 在焊接热循环作用下, 母材在温度梯度的作用下会聚集来自热影响区的硫元素, 进一步形成 MnS 夹杂物, 进而可能使得母材电位相对较低而成为阳极, 母材局部腐蚀加速, 在与热影响区的交界位置形成沟状腐蚀。García 等^[21]进一步研究发现, 低含硫钢比高含硫钢具有更好的耐蚀性, 并且添加适量的 Ca、Cu 等元素, 可以起到稳定硫元素的作用, 从而提高材料的耐腐蚀性。Castelli 等^[22]研究表明, 热影响区的选择性腐蚀程度与交界的母材区的 Mn 元素密切相关, 母材的 Mn 元素越高, 热影响区的局部腐蚀问题越突出, 这种现象可能与 Mn 和 Nb 元素在热影响区中溶解密切相关。

2) 活性组织溶解理论。活性组织溶解理论根据是不同显微组织对腐蚀溶解的敏感程度存在差异, 进而导致不同显微组织的溶解速度。Saarinen^[23]研究指出, 一旦大量马氏体和贝氏体出现在热影响区, 选择性腐蚀或者是局部腐蚀就会发生。Ezuber^[24]、Savva 等^[25]和 Wranglen^[26]研究发现, 碳含量较高的马氏体结构, 在未进行回火处理时, 极易出现优先腐蚀现象。Raty 等^[27]研究发现, 铁素体中淬火态的碳元素是热影响区发生局部腐蚀的首要原因。Voruganti^[28]研究发现, 马氏体的存在会使得热影响区的腐蚀问题突出。因此, 有学者提出了 RI 指数概念, 通过关联材料的显微组织特点来定量描述焊接接头的选择性腐蚀敏感程度。然而, 也有学者持相左观点, 认为微观结构的变化不足以让焊接区域出现显著的选择性腐蚀^[29-30]。

3) 其他理论。另有观点认为, 材料中第二相的沉积, 或是金属表面氧化膜的存在, 也会一定程度

为焊缝区或者热影响区提供局部腐蚀孕育和发展的环境^[31]。

1.2 海底管道焊接区域的腐蚀影响因素

海洋腐蚀是海洋环境的重要特征。海水中存在高盐浓度、富氧状态、大量海洋微生物、海浪冲击和阳光照射等因素, 使得海洋腐蚀环境极为苛刻。此外, CO₂、H₂S、Cl⁻等物质的共存也会对材料造成严重的腐蚀。海水温度受到纬度、季节和深度的影响, 而油气介质温度则受地质条件和开采阶段的影响。例如, 在北极地区, 极限低温接近-60℃, 而新采油气的温度却可达到 100℃以上。环境温度的变化不仅会改变材料的腐蚀速率, 还会影响材料的性能。材料自身(元素成分、显微组织)和环境因素(温度、pH 等)是决定焊接接头腐蚀性能主要因素。这些因素共同作用导致焊接区域的异质性差异, 进而影响其耐蚀性。

1) 金属化学成分。前文提到, 焊接过程中的非平衡热循环导致焊缝熔池和母材形成了温度梯度, 进一步引起了元素成分迁移, 就使得焊接接头出现元素成分差异, 从而改变了焊缝区和热影响区的力学、化学和物理性能, 导致了焊接接头的局部腐蚀问题。在管道焊接时, 为了匹配焊缝和母材的强度, 以及保证可焊接性, 通常会添加少量合金元素。通常在保证焊接接头强度外, 适量添加某些合金元素可以改善焊缝整体的耐蚀性。在实际应用中, 仍有部分合金元素由于自身电位较高, 会与母材形成电位差, 进而导致电偶腐蚀的发生。研究表明, 添加 Cr 可以提高管线钢的强度、韧性和可焊接性, 并且会显著提高钢材的耐蚀性能^[32]。此外, 有研究表明, 合金腐蚀产物膜的致密程度与 Mo 元素含量有关, 0.15%~0.25% (质量分数) 的 Mo 元素使得钢材表面腐蚀产物更加致密, 从而使得其耐蚀性增强^[33-34], 这种作用在提升 X80 钢的热影响区强度和耐蚀性方面更加明显^[35]。然而, 例如 Mn 和 Mg 等元素的含量超过一定阈值时, 反而会削弱焊缝接头的耐蚀性能^[36]。

2) 显微组织结构。焊接过程中的热循环作用会显著改变母材和焊缝的显微组织。其中, 决定焊缝区显微组织的主要原因是焊材类型和焊接工艺, 而靠近焊缝熔池的母材由于反复的受热和冷却过程也会成为微观结构发生变化的热影响区。通常情况下, 焊接形成的焊缝区和热影响区的显微组织类型相对复杂, 分布相对不均匀, 并且由于焊接过程不可避免地不均匀受热会使得显微组织的晶粒变得粗大, 从而大幅度降低了局部区域的耐腐蚀性, 极易诱发优先腐蚀。刘成虎等^[37]研究发现, X70 管线钢焊缝区的主要组成成分为树枝状铁素体, 热影响区则主要由粗大的铁素体、贝氏体和 MA 岛状等组成, 因而焊缝区的耐蚀性明显优于热影响区和母材区。梁成浩等^[38]的研究表明, 低合金钢和低碳钢基底的母材区常包含均匀分布

的回火索氏体,热影响区和焊缝区则通常包含粗大的铁素体和珠光体晶粒,导致热影响区和焊缝区的自腐蚀电位明显低于母材区,进而热影响区和焊缝区表现为阳极,从而加速了局部腐蚀。Alizadeh等^[39]、Bordbar等^[40]研究表明,经过热处理的X70管线钢焊缝区的耐蚀性会有显著改善。此外,Zhu等^[41-43]研究发现,不同类型的铁素体在溶解速率上存在差异,并最终通过腐蚀产物的扩散和沉淀过程来影响不同区域的腐蚀差异。这些研究为提升管道耐蚀性能提供了理论基础和指导思路。

3) 残余应力。在管道的焊接过程中,由于热膨胀和收缩现象,焊接接头的残余应力不可避免。这些应力会在熔池凝固后达到极高的值,甚至接近材料的屈服应力值。在此时若焊后热处理不得当,应力腐蚀问题将会成为焊接接头结构破坏的重要原因^[44-47]。此外,在海底管道的随船铺设和实际输运过程中,必然会受到来自波浪流、地质运动等外部载荷。这对于内壁几何形状不连续的管道焊接区域,会极易形成应力集中的敏感区,从而导致应力腐蚀和疲劳裂纹等问题的发生^[45,48-50]。

4) 几何因素。在进行焊接过程中,制造形状缺

陷是不可避免的,尤其在采用单面焊双面成形焊接的管道中,根部熔深很难精确控制。当管道内的输运介质处于高流速状态时,过大的根部熔深会极大扰动管内介质的流动状态,从而引起冲刷腐蚀现象^[15]。在低流速的油气输运系统中,当输运介质夹带大量高温水汽时,过大的根部熔深会阻碍水汽的自由流通,导致在突起的焊缝区域形成水汽冷凝聚积的现象,形成腐蚀环境,导致腐蚀加剧^[51-52]。

1.3 海底管道焊接区域的腐蚀类型

根据腐蚀失效发生的位置,焊缝区和热影响区的选择性腐蚀是最主要的局部损伤类型,如图2所示^[4]。之前已经介绍了导致管道焊接区域腐蚀的各种原因,包括焊接接头结构设计上的缺陷、材料自身的冶金缺陷、焊接工艺的选择欠佳以及焊接疲劳裂纹和残余应力的处理不当等。同时,环境因素也会对腐蚀造成影响,其中包括在管道服役时的应力状态,以及其所处的介质类型、温度、pH和压力等参数。考虑到腐蚀行为特点,海底管道焊接区域的局部腐蚀类型主要可以分为电偶腐蚀、应力腐蚀、冲刷腐蚀、晶间腐蚀和点蚀等。

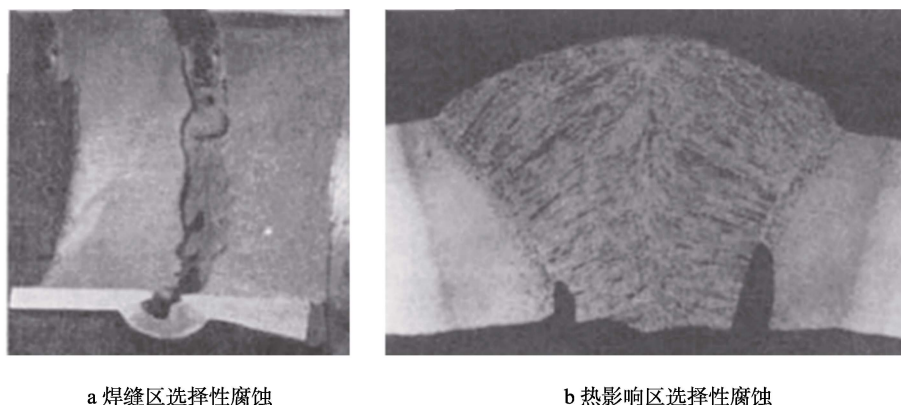


图2 基于腐蚀区域划分的焊接区域腐蚀类型^[4]

Fig.2 Corrosion types of weldment based on corrosion area^[4]: a) preferential WM corrosion; b) preferential HAZ corrosion

1) 电偶腐蚀。电偶腐蚀是海底管道焊接区域极为常见的腐蚀形式之一。Zhu等^[19]研究发现,在含3%铬元素的低合金钢焊接区域中,焊缝区在室温常压下的盐溶液中表现为阴极,但热影响区由于电位相对较低而表现为阳极,局部腐蚀明显。Montgomery等^[53]研究了2种焊材的管道焊接区域非均匀腐蚀行为,发现随着焊接过程的进行,焊缝区和热影响区中Ni元素的不断聚集,流经焊缝区和热影响区的阳极电流加剧。Okonkwo等^[54]研究指出,由于焊接热循环作用,部分回火贝氏体会转变成马氏体,从而形成的电位差会进一步导致影响区和焊缝区之间的电偶效应增强。同时,即便当海底管道焊接区域各个焊接区域的电位差不明显时,但若母材作为阳极,由于母材与焊缝区/热影响区的面积比较大,使得焊缝区/热

影响区仍旧具有较高的腐蚀速率。

2) 应力腐蚀。如图3所示,应力腐蚀是导致金属构件破坏的一种重要形式,焊接区域由于残余应力、冷却速度快等因素的影响,容易产生应力集中和强化,从而提高了应力腐蚀的发生概率。焊接区域的热影响区通常是裂纹扩展的敏感区,因为焊接过程中的高温区域会热影响到材料的微观组织,导致材料性能发生变化。如硬度增加、抗拉强度减小等^[55]。对于不同种类的钢材,在焊接和热影响区出现的性能变化和应力腐蚀敏感性也不完全相同。如C-Mn钢焊接区域中易发生应力腐蚀开裂,残余应力是主要促进因素^[4,56],而奥氏体不锈钢焊接区域则常常因为局部的晶间腐蚀而产生开裂。在工程实践中,为了降低焊接区域的应力腐蚀风险,可以采取合适的焊接工艺、

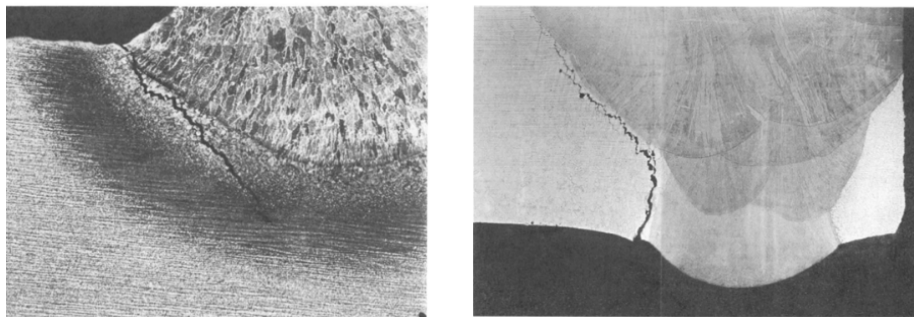


图3 焊接区域应力腐蚀裂纹^[4,56]
Fig.3 Stress corrosion cracking of weldment^[4,56]

选用合适的焊接材料、调整焊接工艺参数等措施。

3) 冲刷腐蚀。导致焊接区域冲刷腐蚀发生的最主要特点是焊缝接头内壁几何尺寸的不连续性。导致这种现象的原因有2方面:一方面,如果焊缝缝宽较大,会致使熔深过大,在焊道处管径就会缩小,使得输运介质的流通性受到阻碍,从而导致管道内壁遭受严重的冲刷损伤^[57],如图4所示;另一方面,焊缝处的过大熔深会进一步阻碍固体介质的通过,导致固体沉积物堆积在焊接接头内壁上游面附近,从而使得管道输运气相介质的流向改变,引发顶部区域的冲刷腐

蚀,导致管道壁厚减薄严重。

4) 晶间腐蚀。晶间腐蚀的发生是通过破坏晶粒间的结合强度来诱发的,这也是不锈钢焊接区域出现机械强度降低的主要原因^[4]。晶间腐蚀的产生与热影响区中碳化物沉淀引起的敏化作用密切相关。在焊接过程中,焊接区域温度升高和降低时,碳化铬会在晶界处沉积,沉淀过程消耗了靠近晶界的铬元素。在温度降至完全固化时,贫铬区域在晶界形成,这个区域对腐蚀非常敏感,晶界腐蚀速率远高于基体。

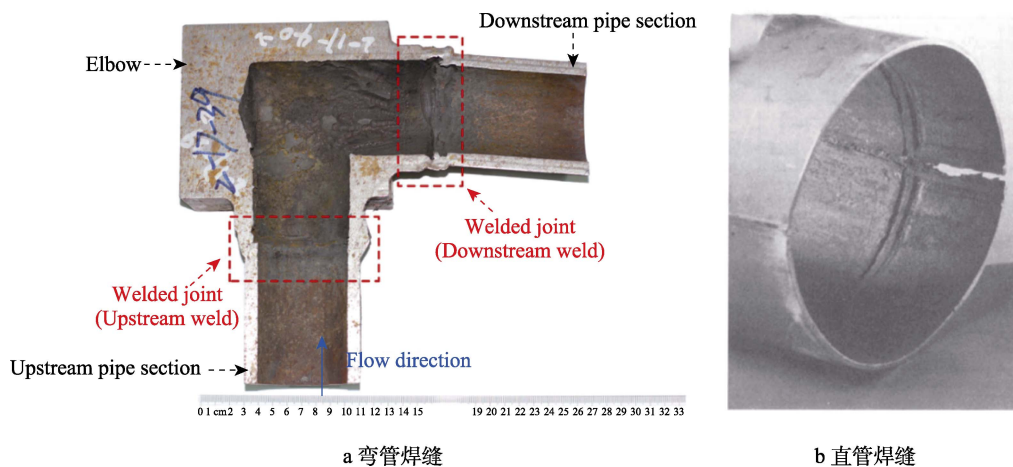


图4 冲刷腐蚀^[57]
Fig.4 Erosion corrosion^[57]: a) elbow weldment; b) straight pipe weldment

2 海底管道焊接区域腐蚀监测方法研究进展

由于海底管道焊接区域的化学成分复杂,并具有多样的显微组织结构,在腐蚀性环境中很可能受到严重的非均质腐蚀威胁。为了及时快速了解海底管道焊接区域的腐蚀特点,评估不同焊接区域的局部腐蚀程度,研发并应用有效合理的监测措施对于海底管道流动安全保障非常有必要。

2.1 腐蚀挂片法

腐蚀挂片技术是一种成熟、易于操作且使用成本

低的监测方法,通过定期测量在海底管道环境下的金属挂片质量变化来计算平均腐蚀速率。这些金属挂片的材质与海底管道焊缝相同,形状也可根据实际工况进行选择。通常在海底管道入口和出口处安装腐蚀挂片,在每月或数月的间隔中取出观察和称量,以推算平均腐蚀速率和分析局部腐蚀状况。然而,该技术无法及时反馈油田生产变化对腐蚀的影响,且测量周期长,因此所得到的平均腐蚀速率结果具有一定的局限性。

2.2 线性极化法

线性极化法是一种用于监测管道腐蚀的测量技

术,其基本原理在于管道腐蚀受活化极化控制时,通过测量电极电位与腐蚀电流,使其符合 Stern-Geary 方程式^[5-7]。目前,海上油田广泛使用的线性极化电阻腐蚀速率测定仪具备了溶液电阻补偿功能。这项技术可以显著降低溶液电阻过高对监测数据准确性的影响,其准确、快速的测量方法已经纳入美国 ASTM 标准,并在管道腐蚀监测中发挥着重要的作用。

线性极化法是一种响应迅速、灵敏度高、同时具备不过度干扰测试体系平衡性的管道腐蚀监测技术。然而,该技术的应用范围较为有限,仅适用于具有较好导电性的电解质环境。此外,由于线性极化法的测试和分析原理是参照腐蚀动力学原理,与其中的 Stern 常数值密切相关,但在实际应用中该值却又比较难以准确获得,因而采用估算 Stern 常数值的方式会使得监测误差较大^[58]。虽然可以使用实验获得特定的 Stern 值,但随着腐蚀过程的持续进行,管道的 B 值在不同时刻会发生变化,因此难以实现实时分析中 B 值的准确性。此外,由于管道焊接区域的材质不均匀,不同区域的真实 Stern 值可能会略有不同,因此线性极化法在该区域的准确度较低^[59-60]。

2.3 电化学阻抗谱法

电化学阻抗谱法是一种精确、可靠的管道腐蚀监测技术。它通过频率域测量,获得电化学阻抗信息,并分析腐蚀的动力学和结构信息。该技术施加的信号微弱,且不会影响管道体系。并分析阻抗谱特点,可得到不同焊接区域的极化电阻,研究腐蚀反应机理,判断不同区域的耐蚀性能。电化学阻抗谱法是提高海底管道腐蚀监测精度和灵敏度的关键技术之一,对于管道的安全运行具有至关重要的作用^[61-62]。

2.4 电化学噪声探针

电化学噪声技术是一种通过监测腐蚀时腐蚀电位或者电偶/电池电流的微小波动,并设定点蚀系数来间接计算点蚀程度或局部腐蚀趋势的技术。该技术采用的信号微弱,不会影响金属结构的性能,因而在金属腐蚀监测领域被广泛应用。电化学噪声技术的分析方法通常采用频域分析和时域分析。在时域分析中,通过计算电位、电流的噪声标准偏差和点蚀指数,来进一步判断腐蚀类型和速率,从而实现有效监测和管理腐蚀对金属结构的损害。Ma 等^[63]、Xia 等^[64-65]在研究中对电化学噪声技术在金属腐蚀监测中的机理、分析方法及应用进行了系统的分析和讨论,为电化学噪声技术的应用提供了重要的理论依据。

电化学噪声技术作为一种原位腐蚀监测方法,不需要施加外界扰动,尤其是该技术在对管道的局部腐蚀的监测分析过程中,具有尤为明显的优势。但是在管道焊缝的监测中,由于焊接接头处材质的不连续性,需要对电化学噪声结构形式做进一步优化,

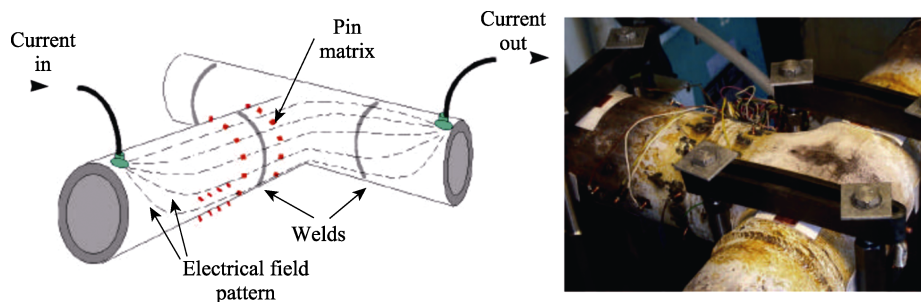
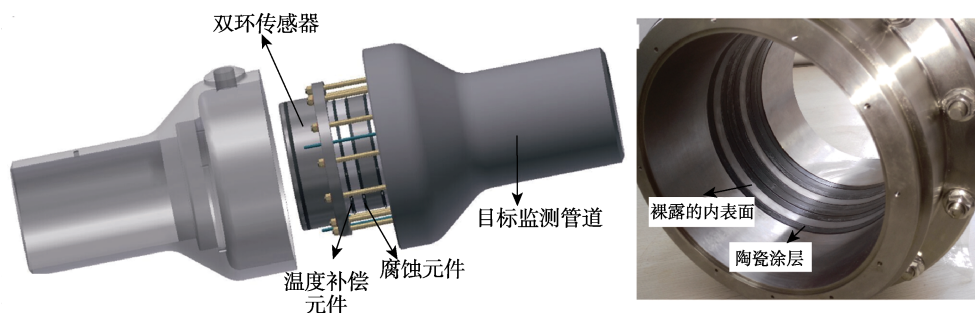
研究更适合非均匀腐蚀的分析模型,并进一步进行深入的数据分析及其理论应用研究。

2.5 电阻法

电阻法(Electrical Resistance, ER)是一种监测局部区域电阻变化来反映腐蚀程度的方法。该技术所采用的测量原理简单、系统可靠,已在油气工程中得到成熟并广泛的应用。与电化学方法相比,电阻法具有更广泛的场景适用范围。例如即使在电阻率较高的溶液体系中、或监测对象电极的表面有腐蚀产物覆盖、亦或是被导电性较弱物质阻隔的情况下,电阻法仍然能够快速响应,并具有一定的准确性。目前的电阻探针技术也有明显的局限性,即传统的电阻探针只能测得单一材质探头的电阻变化,进而反映管线钢的平均腐蚀情况,无法有效监测例如像管道焊缝接头这样具有典型材质非均匀性的结构的局部腐蚀。因此,需要进一步研究如何提高电阻法在检测焊缝处腐蚀方面的检测灵敏度,以及提高测量精度和准确性等技术改进。

针对管道焊接接头的非均匀结构特点和非均匀材质分布特性,电指纹法(Field Signature Method, FSM)作为近年来不断发展的一种高效可靠的局部腐蚀监测手段被加以应用^[9-12]。FSM 法通过在管道的外壁布置具有规律性排布的电极矩阵,将管道目标区域划分成小的矩形分区,通过设计特制测量电路来测量各个分区的电阻变化,从而反映管道的局部壁厚信息,如图 5 所示^[66]。当管道发生腐蚀时,FSM 法可以精确定位该腐蚀区域并反映该区域矩阵所测得的电阻变化,即腐蚀深度。相比传统的电阻探针,FSM 方法的测量灵敏度达壁厚的 1/1 000^[67]。FSM 法当前更多应用于单一材质管道,因而使用的温度补偿元件通常为同一个,这对于管线沿着路由方向存在温度变化的场景有所限制,导致其温度补偿效果较差,进一步影响测量分辨率和精度。但是,FSM 法在工程应用中最具优势的是其无需破坏管道的完整性,并可以通过在外壁布置感知阵列点来监测内壁的腐蚀程度,这为该方法在已建工程后续监测实施应用提供了条件。因此,在实际应用时,需要综合考虑 FSM 法的优缺点和要求,通过继续升级阵列布置形式、温度补偿方案以及电阻优化算法,以确保其准确性和可靠性。

近年来,一种采用环状分区电阻监测的新型管道内壁腐蚀监测技术被广泛关注^[68-70]。该技术采用一对环分别作为腐蚀元件和温度补偿元件,故而被称为双环电阻探针(Ring Pair Electrical Resistance Sensor, RPERS),如图 6 所示。其中使用的环组与被监测的实际管道材质一致,通过将环组中的环设计成完全一样的几何形状,从而消除了由于几何、温差以及压力所带来的测量误差。同时,该技术将环形探针外壁布置了等间隔分布的感知探头,可以进行 360°全周向多

图5 FSM技术在管道焊接区域腐蚀监测中的应用^[66]Fig.5 Application of FSM technology in corrosion monitoring of pipeline weldment^[66]图6 基于双环电阻探针的管道内壁腐蚀监测传感器^[68-70]Fig.6 Corrosion monitoring sensor on inner wall of pipe based on RPERS^[68-70]

象限分区,从而实现了管道全周向的非均匀腐蚀监测。参照以上技术特点,通过进一步将焊接接头的母材区、热影响区、焊缝区分别加工成阵列环形探针,并研发快速响应的高精度微电阻测量仪,可以实现对焊接接头的局部腐蚀深度监测。此外,双环电阻探针技术可以深度结合电化学测量方法,获取更为全面的局部腐蚀信息^[70-71]。通过这种腐蚀监测方法,可以实现对焊缝区的及时监测和预报,提高管道安全性和可靠性。该技术的监测精度和范围与环形传感器的壁厚大小及分辨率有关,因此需要在实际应用中根据不同情况进行优化和调整。

2.6 电感探针

电感探针则是一种通过监测金属损失带来的内部磁阻信号变化来反映腐蚀程度的测试技术。该技术在探针外表面置入一薄金属片,并通过测量探针内线圈磁阻信号的变化,来分析计算金属的腐蚀速率。美国 Cortest 公司的电感探针已在工程中广泛应用。与传统的电阻法相比,电感探针的测量精度更高、分辨率更优、场景适用性广、抗干扰性能好。此类探针可以高效地发现管道内壁的腐蚀情况,并可及时采取防腐措施,确保管道运行的安全可靠。电感探针虽然精度高,但其价格较高,而且相对较易受到探头材质和管道环境的影响,因此在具体应用前需要进行详细评估,并选择恰当的型号和参数。

2.7 光纤传感技术

光纤传感技术作为一项先进技术,已广泛应用于

管道腐蚀监测领域。该技术通过监测管道壁厚变化或腐蚀裂纹等指标,检测管道的腐蚀情况。光纤具有耐腐蚀、轻量化、高韧性以及宽传输频带等特点,使其在高温高压环境下表现优异。特别是在管道焊接区域的腐蚀和开裂监测方面,光纤传感技术具有很好的适用性。然而,它需在管道建设时期与管道一起铺设。另外,光纤传感器易受外部干扰,可能会产生大量虚假信号,需要通过大量数据分析来调整和优化算法以提高精确度。

3 结语

焊接接头作为海底管道流动安全风险最高的区域,对其开展腐蚀机理研究以及实施有效的腐蚀监测,对保障管线流动安全具有十分重要的意义。考虑到管道焊接接头材质以及结构的非均匀性,对焊接接头进行轴向异质区域和周向同质区域的空间分离以及联合分析,是精准掌握焊接接头非均匀腐蚀的关键。因而,一方面可加强焊接接头局部腐蚀的实验室研究和数值模拟计算,揭示局部腐蚀关键影响因素及影响规律;另一方面,加强实际工程中中海管焊接接头腐蚀失效案例的统计及分析,为海管焊接接头局部腐蚀评估建立参考依据。

针对真实海底管道焊接接头腐蚀监测,必须整体考虑监测可靠性、测量精度以及经济性,在监测方式选择上重点还原焊接接头的结构组成和电化学完整性。对于新型在线监测手段,一方面要不断增强监测方法在焊接接头应用的适应型,另一方面要不断增强

数据积累和数据挖掘,深化监测数据的融合,为海底管道焊接接头局部腐蚀机理研究和管道完整性管理提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 陈卓婷. WC13-1 平台至 FPSO 海底管道膨胀弯焊缝腐蚀实验研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
CHEN Zhuo-ting. Experimental Study of Weld Corrosion in the Submarine Pipeline Expansion Bend Installed from WC13-1 Platform to FPSO[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [2] LI X. Share Corrosion Data to Prevent Disasters[J]. Nature, 2015(527): 441-442.
- [3] 王红红, 刘国恒. 中国海海底管道事故统计及分析[J]. 中国海上油气, 2017, 29(5): 157-160.
WANG Hong-hong, LIU Guo-heng. Statistics and Analysis of Subsea Pipeline Accidents of CNOOC[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(5): 157-160.
- [4] DAVIS J R. Corrosion of Weldments[M]. Ohio: ASM International, 2006.
- [5] MANSFELD F, OLDHAM K B. A Modification of the Stern—Geary Linear Polarization Equation[J]. Corrosion Science, 1971, 11(10): 787-796.
- [6] REEVE J C, BECH-NIELSEN G. The Stern-Geary Method. Basic Difficulties and Limitations and a Simple Extension Providing Improved Reliability[J]. Corrosion Science, 1973, 13(5): 351-359.
- [7] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2008.
CAO Chu-nan. Principles of Electrochemistry of Corrosion[M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [8] 徐云泽. 海洋管道内壁局部腐蚀的监测关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
XU Yun-ze. A Study on Key Monitoring Techniques for the Internal Localized Corrosion of Marine Pipelines[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [9] CLARIDA D, BOOTHMAN R, SCANLAN R. Corrosion Monitoring Experience in the Refining Industry Using the FSM Technique[C]//Presented at the NACE Corrosion Conference and Expo 2003. San Diego: [s. n], 2003.
- [10] WOLD K, SIRNES G. FSM Technology-16 Years of Field History-Experience, Status and Further Developments[C]// Presented at the NACE Corrosion Conference and Expo 2007. Nashville: [s. n.], 2007.
- [11] 甘芳吉, 李宇庭, 万正军, 等. 一种基于场指纹法的金属管道小腐蚀坑的求解方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(1): 223-229.
GAN Fang-ji, LI Yu-ting, WAN Zheng-jun, et al. A Method for Monitoring Pitting Corrosion Based on Field Signature Method[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(1): 223-229.
- [12] 马建兵. 场图像技术 FSM 在气田输气管道上的应用[J]. 化工管理, 2016(12): 62.
- MA Jian-bing. Application of Field Image Technology FSM in Gas Field Gas Pipeline[J]. Chemical Enterprise Management, 2016(12): 62.
- [13] 李亚江. 焊接组织性能与质量控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
LI Ya-jiang. Welding Microstructure, Properties and Quality Control[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [14] 王文先, 王东坡, 齐芳娟. 焊接结构[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
WANG Wen-xian, WANG Dong-po, QI Fang-juan. Welded Structure[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [15] QIAO Qiao, CHENG Guang-xu, LI Yun, et al. Corrosion Failure Analyses of an Elbow and an Elbow-to-Pipe Weld in a Natural Gas Gathering Pipeline[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 82: 599-616.
- [16] QIAO Qiao, CHENG Guang-xu, WU Wei, et al. Failure Analysis of Corrosion at an Inhomogeneous Welded Joint in a Natural Gas Gathering Pipeline Considering the Combined Action of Multiple Factors[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 64: 126-143.
- [17] 伊红伟, 胡慧慧, 陈长风, 等. CO₂ 环境下油酸咪唑啉对 X65 钢异种金属焊缝电偶腐蚀的抑制作用研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(2): 96-104.
YI Hong-wei, HU Hui-hui, CHEN Chang-feng, et al. Corrosion Behavior and Corrosion Inhibition of Dissimilar Metal Welds for X65 Steel in CO₂-Containing Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2020, 40(2): 96-104.
- [18] HUANG Chen, HUANG Feng, LIU Hai-xia, et al. The Galvanic Effect of High-Strength Weathering Steel Welded Joints and Its Influence on Corrosion Resistance[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2019, 54(7): 556-566.
- [19] ZHU Jin-yang, XU Li-ning, FENG Zhi-cai, et al. Galvanic Corrosion of a Welded Joint in 3Cr Low Alloy Pipeline Steel[J]. Corrosion Science, 2016, 111: 391-403.
- [20] KATO H, EYRE T S, RALPH B. Sliding Wear Characteristics of Nitrided Steels[J]. Surface Engineering, 1994, 10(1): 65-74.
- [21] GARCÍA C, CERÉ S, DURÁN A. Bioactive Coatings Prepared by Sol-Gel on Stainless Steel 316L[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2004, 348: 218-224.
- [22] CASTELLI R A, PERSANS P D, STROHMAYER W, et al. Optical Reflection Spectroscopy of Thick Corrosion Layers on 304 Stainless Steel[J]. Corrosion Science, 2007, 49(12): 4396-4414.
- [23] SAARINEN A, ONNELA K. A Method for Testing the Corrodibility Ofheat-Affected Zones in Steel[J]. Corrosion Science, 1970, 10(11): 809-815.
- [24] EZUBER H M. Influence of Temperature and Thiosulfate

- on the Corrosion Behavior of Steel in Chloride Solutions Saturated in CO₂[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(9): 3420-3427.
- [25] SAVVA G C, WEATHERLY G C, AUST K T. Heat-Affected-Zone Corrosion Behavior of Carbon-Manganese Steels[J]. *Corrosion*, 1989, 45(3): 243-249.
- [26] WRANGLÉN G. Pitting and Sulphide Inclusions in Steel[J]. *Corrosion Science*, 1974, 14(5): 331-349.
- [27] RATY J Y, GYGI F, GALLI G. Growth of Carbon Nanotubes on Metal Nanoparticles: A Microscopic Mechanism from *Ab Initio* Molecular Dynamics Simulations[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(9): 096103.
- [28] VORUGANTI V S, LUFT H B, DEGEER D, et al. Scanning Reference Electrode Technique for the Investigation of Preferential Corrosion of Weldments in Offshore Applications[J]. *Corrosion*, 1991, 47(5): 343-351.
- [29] TOH T, TAKEUCHI E, HOJO M, et al. Electromagnetic Control of Initial Solidification in Continuous Casting of Steel by Low Frequency Alternating Magnetic Field[J]. *ISIJ International*, 1997, 37(11): 1112-1119.
- [30] TSURU Y, SAVVA G C, AUST K T. Construction and Use of a Scanning Micro-Electrode to Study the Localized Corrosion of a Low-C-Mn Steel Weldment in 10⁻³M Sulfuric Acid[J]. *Corrosion*, 1989, 45(5): 415-419.
- [31] 黄志潜. X80 级管线钢在高压大流量输气管道上的应用与发展前景[J]. *焊管*, 2005, 28(2): 1-10.
HUANG Zhi-qian. The Application and Development Prospect of Grade X80 Pipeline Steel in High Pressure Large Volume Gas Transmission Pipeline[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2005, 28(2): 1-10.
- [32] LIU Qing-you, SUN Xin-jun, JIA Shu-jun, et al. Austenitization Behaviors of X80 Pipeline Steel with High Nb and Trace Ti Treatment[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2009, 16(6): 58-62.
- [33] SADEGHI B, SHARIFI H, RAFIEI M, et al. Microstructural, Mechanical and Corrosion Properties of Dissimilar Joint between AISI A321 Stainless Steel and ASTM A537CL1 Structural Steel Produced by GTAW Process[J]. *Metallurgical Research & Technology*, 2019, 116(4): 418.
- [34] SK M H, ABDULLAH A M, QI J, et al. The Effects of Cr/Mo Micro-Alloying on the Corrosion Behavior of Carbon Steel in CO₂-Saturated (Sweet) Brine under Hydrodynamic Control[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2018, 165(5): C278-C288.
- [35] CHEN Xiao-wei, QIAO Gui-ying, HAN Xiu-lin, et al. Effects of Mo, Cr and Nb on Microstructure and Mechanical Properties of Heat Affected Zone for Nb-Bearing X80 Pipeline Steels[J]. *Materials & Design*, 2014, 53: 888-901.
- [36] 张娇娇. L360 管线钢及其焊接接头在 CO₂/H₂S 介质中的腐蚀行为研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
ZHANG Jiao-jiao. Study on Corrosion Behavior of L360 Pipeline Steel and Weld Joint in CO₂/H₂S Solutions[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.
- [37] 刘成虎, 柳伟, 赵耀斌, 等. X70 异种钢焊接接头的电偶腐蚀行为[J]. *北京科技大学学报*, 2008, 30(1): 25-29.
LIU Cheng-hu, LIU Wei, ZHAO Yao-bin, et al. Galvanic Corrosion of X70 Dissimilar Weld Joints[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 30(1): 25-29.
- [38] 梁成浩, 温殿江. 海水中碳钢及低合金钢的焊接接头腐蚀行为的研究[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 1994, 6(3): 260-264.
LIANG Cheng-hao, WEN Dian-jiang. Corrosion Behavior of Welded Joints of low-Alloy Steel and Carbon Steels[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 1994, 6(3): 260-264.
- [39] ALIZADEH M, BORDBAR S. The Influence of Microstructure on the Protective Properties of the Corrosion Product Layer Generated on the Welded API X70 Steel in Chloride Solution[J]. *Corrosion Science*, 2013, 70: 170-179.
- [40] BORDBAR S, ALIZADEH M, HASHEMI S H. Effects of Microstructure Alteration on Corrosion Behavior of Welded Joint in API X70 Pipeline Steel[J]. *Materials & Design*, 2013, 45: 597-604.
- [41] ZHU Ye-sen, XU Yun-ze, LI Ke-tian, et al. Experimental Study on Non-Uniform Corrosion of Elbow-to-Pipe Weldment Using Multiple Ring Form Electrical Resistance Sensor Array[J]. *Measurement*, 2019, 138: 8-24.
- [42] ZHU Ye-sen, XU Yun-ze, SONG Shi-de, et al. Probing the Nonuniform Corrosion of Pipeline Weldments under Stepwise Increasing Solution Temperature Using a Coupled Multielement Electrical Resistance Sensor[J]. *Materials and Corrosion*, 2020, 71(8): 1386-1399.
- [43] ZHU Ye-sen, XU Yun-ze, WANG Ming-yu, et al. Understanding the Influences of Temperature and Microstructure on Localized Corrosion of Subsea Pipeline Weldment Using an Integrated Multi-Electrode Array[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 189: 106351.
- [44] 刘宇. 焊接残余应力影响 316 不锈钢腐蚀的局部电化学研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
LIU Yu. Local Electrochemical Study of the Effect of Welding Residual Stress on the Corrosion of 316 Stainless Steel[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [45] 李海刚. 304 不锈钢补焊接头残余应力与应力腐蚀开裂研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2017.
LI Hai-gang. Residual Stress and Stress Corrosion Cracking in Repair Welding Joint of 304 Stainless Steel[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2017.
- [46] 王玉杰. 残余应力影响碳钢腐蚀敏感性的局部电化学研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.

- WANG Yu-jie. Local Electrochemical Study of the Effect of Residual Stress on the Corrosion Sensitivity of Carbon Steel[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [47] 白林越, 江克斌, 高磊, 等. 残余应力对焊接结构腐蚀行为的影响规律研究[J]. 电焊机, 2018, 48(4): 85-90.
- BAI Lin-yue, JIANG Ke-bin, GAO Lei, et al. Investigation on Influence Law of Residual Stress on the Corrosion Behavior of Welded Structure[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(4): 85-90.
- [48] 李能旺. 防止不锈钢管道焊缝晶间应力腐蚀破坏的方法[J]. 压力容器, 1987, 4(6): 60-64.
- LI Neng-wang. Methods to Prevent Intergranular Stress Corrosion Damage of Stainless Steel Pipeline Weld[J]. Pressure Vessel Technology, 1987, 4(6): 60-64.
- [49] 李能旺. 防止管道焊缝晶间应力腐蚀开裂的方法[J]. 化肥设计, 1984, 22(5): 67-72.
- LI Neng-wang. Methods to Prevent Intergranular Stress Corrosion Cracking of Pipeline Welds[J]. Chemical Fertilizer Design, 1984, 22(5): 67-72.
- [50] 杨宝, 许天旱, 王党会. X90 管线钢及焊缝在空气和近中性 NS4 溶液中的应力腐蚀开裂行为[J]. 机械工程材料, 2016, 40(3): 78-81.
- YANG Bao, XU Tian-han, WANG Dang-hui. Stress Corrosion Cracking Behavior of X90 Pipeline Steel and Weld in Air and Near-Neutral NS4 Solution[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40(3): 78-81.
- [51] 徐甄真, 卫超, 张建勋. 天然气管道环焊缝缺陷部位的腐蚀沉淀机理[J]. 焊接学报, 2017, 38(4): 47-50.
- XU Zhen-zhen, WEI Chao, ZHANG Jian-xun. Corrosion and Deposition Mechanism at Position of Defect in Circumferential Weld of Gas Pipeline[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(4): 47-50.
- [52] 文博. 换热器管子与管板焊缝的缝隙腐蚀的研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- WEN Bo. The Study of Crevice Corrosion for Weld Joint between Heat Exchanger Tubes and Tube Sheet[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.
- [53] MONTGOMERY M, DAHL K V, HALD J. Corrosion of Welds in Biomass Power Plants[J]. Materials and Corrosion, 2019, 70(4): 585-592.
- [54] OKONKWO B O, MING Hong-liang, ZHANG Zhi-ming, et al. Microscale Investigation of the Correlation between Microstructure and Galvanic Corrosion of Low Alloy Steel A508 and Its Welded 309/308L Stainless Steel Overlay[J]. Corrosion Science, 2019, 154: 49-60.
- [55] 陈居术, 孙新岭, 张涛, 等. 管道焊缝的应力腐蚀及其控制[J]. 油气储运, 2003, 22(11): 42-45.
- CHEN J (S /Z), SUN Xin-ling, ZHANG Tao, et al. Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steel Welded Joints and Controlling[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2003, 22(11): 42-45.
- [56] 蔡敏. 电化厂中氯气输送管道焊缝应力腐蚀机理探讨[J]. 企业技术开发, 2013, 32(S3): 71-72.
- CAI Min. Discussion on Stress Corrosion Mechanism of Weld Seam of Chlorine Gas Pipeline in Electrochemical Plant[J]. Technological Development of Enterprise, 2013, 32(S3): 71-72.
- [57] 孔令真. 不锈钢硝酸输送管道的腐蚀行为及特性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- KONG Ling-zhen. Corrosion Behavior and Characteristics of Stainless Steel Pipelines in Nitric Acid[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [58] AMIN M A, KHALED K F, FADL-ALLAH S A. Testing Validity of the Tafel Extrapolation Method for Monitoring Corrosion of Cold Rolled Steel in HCl Solutions - Experimental and Theoretical Studies[J]. Corrosion Science, 2010, 52(1): 140-151.
- [59] MCCAFFERTY E. Validation of Corrosion Rates Measured by the Tafel Extrapolation Method[J]. Corrosion Science, 2005, 47(12): 3202-3215.
- [60] ORLIKOWSKI J, DAROWICKI K, MIKOŁAJSKI S. Multi-Sensor Monitoring of the Corrosion Rate and the Assessment of the Efficiency of a Corrosion Inhibitor in Utility Water Installations[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 181: 22-28.
- [61] DURAN C, TREISS E, HERBSLEB G. The Resistance of High Frequency Inductive Welded Pipe to Grooving Corrosion in Salt Water[J]. Materials Performance, 1986, 25: 41-48.
- [62] 谢飞, 王丹, 吴明, 等. 库尔勒土壤中溶解氧含量对 X80 钢及其焊缝腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2014, 47(9): 56-58.
- XIE Fei, WANG Dan, WU Ming, et al. Influence of Dissolved Oxygen Content on Corrosion Behavior of X80 Steel and Its Welded Joint in Ku' Erle Soil Simulated Solution[J]. Materials Protection, 2014, 47(9): 56-58.
- [63] MA Chao, SONG Shi-zhe, GAO Zhi-ming, et al. Electrochemical Noise Monitoring of the Atmospheric Corrosion of Steels: Identifying Corrosion Form Using Wavelet Analysis[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2017, 52(6): 432-440.
- [64] XIA Da-hai, DENG Cheng-man, MACDONALD D, et al. Electrochemical Measurements Used for Assessment of Corrosion and Protection of Metallic Materials in the Field: A Critical Review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 112: 151-183.
- [65] XIA Da-hai, SONG Shi-zhe, BEHNAMIAN Y, et al. Review—Electrochemical Noise Applied in Corrosion Science: Theoretical and Mathematical Models towards Quantitative Analysis[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2020, 167(8): 081507.
- [66] MORTON D, RIDD B, et al. Weld Root Corrosion Monitoring with a New Electrical Field Signature Mapping Inspection Tool[C]// The NACE Corrosion Conference and

- Expo 2000. Orlando: [s. n.], 2000.
- [67] GAN Fang-ji, WAN Zheng-jun, LI Yu-ting, et al. Improved Formula for Localized Corrosion Using Field Signature Method[J]. Measurement, 2015, 63: 137-142.
- [68] XU Yun-ze, HUANG Yi, WANG Xiao-na, et al. Experimental Study on Pipeline Internal Corrosion Based on a New Kind of Electrical Resistance Sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 224: 37-47.
- [69] HUANG Y, XU Y, LI B, et al. Novel Electrical Resistance Method to Measure Underdeposit Corrosion and Its Inhibition in Pipeline Steels[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2016, 51(3): 211-222.
- [70] XU Y Z, YANG L J, HE L M, et al. The Monitoring of Galvanic Corrosion Behaviour Caused by Mineral Deposit in Pipeline Working Conditions Using Ring Form Electronic Resistance Sensor System[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2016, 51(8): 606-620.
- [71] SLIEM M H, FAYYAD E M, ABDULLAH A M, et al. Monitoring of under Deposit Corrosion for the Oil and Gas Industry: A Review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 204: 108752.

责任编辑：刘世忠