

HFW 焊管沟槽腐蚀研究现状 *

王 涛^{1,2}, 任永峰^{1,2}, 雒设计³

(1. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008;
2. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008; 3. 西安石油大学, 西安 710065)

摘 要: 为充分了解 HFW 焊管焊缝沟槽腐蚀机理, 及其对高频电阻焊管力学性能的影响, 从而探索出有效降低 HFW 焊管沟槽腐蚀敏感性的方法, 从沟槽腐蚀影响规律、测试方法等方面对国内外现阶段沟槽腐蚀研究成果进行分析汇总, 着重分析了几种主要的沟槽腐蚀敏感性测试方法, 对其优劣性进行了对比。同时, 根据沟槽腐蚀研究现状以及相关知识产权的情况, 发现目前国内外尚无统一标准的焊缝沟槽腐蚀深度的测量设备或装置, 对沟槽腐蚀敏感系数临界值也缺乏工程依据, 其失效判定的有效性有待进一步探讨。

关键词: HFW 焊管; 沟槽腐蚀; 敏感系数; 影响因素; 测试方法

中图分类号: TG174

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.08.001

Research Status of Groove Corrosion of HFW Welded Pipe

WANG Tao^{1,2}, REN Yongfeng^{1,2}, LUO Sheji³

(1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods, Baoji 721008, Shaanxi, China; 2. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China;
3. Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to fully understand the mechanism of HFW welded pipe weld groove corrosion and its influence on the mechanical properties of resistance welded pipe, and explore the methods to effectively reduce the groove corrosion sensitivity of welded pipe, the research results of groove corrosion at home and abroad at this stage are analyzed and summarized from the aspects of groove corrosion impact law, testing methods and so on. Several main groove corrosion sensitivity test methods are emphatically analyzed, and their advantages and disadvantages are compared. At the same time, according to the research status of groove corrosion and relevant intellectual property rights, it is found that there is no unified standard equipment or device for measuring the groove corrosion depth of weld at home and abroad, and there is also a lack of engineering cases for the critical value of groove corrosion sensitivity coefficient, and the effectiveness of its failure determination needs to be further discussed.

Key words: HFW welded pipe; groove corrosion; sensitivity coefficient; influence factor; test method

* 基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“超临界二氧化碳长距离管道关键技术研究”(项目编号 2021ZZ01)。

0 前 言

沟槽腐蚀是高频直缝电阻焊 (HFW) 焊管在焊缝附近形成沟槽状的选择性腐蚀, 导致 HFW 焊管在实际的腐蚀性环境中抗腐蚀性能不匹配, 焊接区的沟槽腐蚀使得焊管过早穿孔。因此, 对现阶段管材沟槽腐蚀失效原因如微观组织及化学成分、残余应力、热处理、腐蚀介质的种类及离子含量、流速、外加电势等影响因素分析研究, 具有较高的工程实用价值。

HFW 焊管由于其在经济性、尺寸精度及表面状态等方面比无缝钢管的优越性, 在许多领域得到广泛的应用。目前, 我国许多油田的井下套管和油气集输管也多采用 HFW 焊管。但是, 由于其焊接区和母材电化学性能的差异, 造成 HFW 焊管在腐蚀介质中使用时会产生沟槽腐蚀, 从而引起管材失效问题, 对集输管线造成的破坏会给石油开发和原油集输系统带来巨大的经济损失。

目前对于 HFW 焊管焊缝沟槽腐蚀倾向的评价国内外尚无统一标准和试验方法。国内通常采用沟槽腐蚀敏感性系数 $\alpha=h_2/h_1$ (h_1 为基体材料的腐蚀深度, h_2 为沟槽的腐蚀深度) 来衡量。一般认为, 若 $\alpha \geq 1.3$, 则材料耐沟槽腐蚀性能较差。国内外已对焊管沟槽腐蚀行为的影响因素和试验方法开展了较为深入的研究, 认为主要影响因素包括焊管材料的微观组织、残余应力、热处理工艺、腐蚀介质和流速等; 试验方法主要有长期浸泡试验、极化曲线测量、电偶腐蚀试验和外加电位加速腐蚀等。因此, 迫切需要对现有的影响因素、试验方法、评价标准等进行改进, 或者探索准确、快速的试验方法来满足科研和生产检测的需要。

1 沟槽腐蚀速率的影响因素

1.1 微观组织及化学成分

王荣^[1]采用恒电位极化测定了不同显微组织的 J55 钢直缝电阻焊管焊接区的沟槽腐蚀性能, 结果表明, 明显流线组织的钢板易产生沟槽腐蚀, 具有高的沟槽腐蚀敏感性, 而不连续流线组

织的钢板具有较低的沟槽腐蚀敏感性。毕宗岳^[2]通过对不同热处理状态下 CT80 钢沟槽腐蚀敏感性测试发现, 母材组织以铁素体和珠光体为主组织, 而未经热处理的焊区主要以魏氏体和回火马氏体为主, 不同组织会产生明显的电位差, 而发生沟槽腐蚀。对于抗沟槽腐蚀能力流线型组织低于非流线型组织形态。

Wang 等^[3]采用恒电位极化加速腐蚀的方法对比研究了化学成分对 HFW 焊管沟槽腐蚀性能的影响, 并以 Cu、Ni 和 Si 元素的化学当量值 (ChE) 判断基体金属和焊缝区的腐蚀性能差异, 其中 $\text{ChE} = -(3.2\Delta\text{Cu} + 1.5\Delta\text{Ni} - 4.0\Delta\text{Si} + 1.5)$, ΔCu 、 ΔNi 、 ΔSi 分别为基体和焊缝区的化学成分差。如果 $\text{ChE} < 0$, 焊缝区作为阳极发生局部腐蚀; 如果 $\text{ChE} > 0$, 焊缝区为阴极。

王荣等^[4-5]测定了三种规格的 J55 钢 HFW 套管焊缝区的沟槽腐蚀敏感性, 结果表明套管焊缝区沟槽腐蚀敏感性强烈依赖于套管用钢的含 C 量, 随着含 C 量升高沟槽腐蚀敏感性增大。焊接过程中高热量造成焊缝区的合金成分不同于母材, 从而形成腐蚀电池。

S 元素的稳定性影响腐蚀微电池的形成, 研究发现 $w(\text{S})$ 在 0.01% 以上的钢中容易形成 MnS 夹杂物, 容易发生沟槽腐蚀^[6]。降低钢中 S 含量或者在钢中添加合金元素, 可减少硫化物数量, 从而有限降低沟槽腐蚀敏感性^[7]。添加 Ca 可使焊缝区的不稳定硫化物转变成稳定的 CaS , 而 Cu 离子也能捕捉不稳定硫化物中的 S 离子, 因此添加 Cu 元素也有利于减小沟槽腐蚀敏感性^[8]。

Takuya 等^[9]从合金元素的引入对抑制沟槽腐蚀行为影响进行研究, 通过对 Cu-Ti 掺杂的高频电阻焊钢管沟槽腐蚀行为机制的研究中发现, Cu-Ti 的加入可将 MnS 转换成多样化的硫化物 $\text{Cu}_x\text{S} + \text{MnS}$ 和 Ti_2S , 使材料的结构和微观组成发生改变, 降低了周围环境对 MnS 的溶解, 从而达到抑制沟槽腐蚀行为的结果。

Mohamed^[10]在对石油管道沟槽腐蚀现象的研究中指出, HFW 工艺质量的好坏是导致腐蚀发生的关键, 包括管道内表面未焊透, 以及未熔合, 沟槽腐蚀会加速这种缺陷的腐蚀, 并且 Cr、Ni、Cu、Ca 等合金元素的添加能有效缓解沟槽腐蚀速率。

1.2 残余应力

Lyu 等^[11]研究了残余应力对 HFW 焊管沟槽腐蚀的影响,残余应力是影响沟槽腐蚀的一个主要因素,减少焊缝的残余应力能大幅度增加 HFW 焊管的使用寿命。贺飞等^[12]采用恒电位极化法测定了电阻焊油套管经过模拟热张力减径处理试验后的沟槽腐蚀性能。结果表明,电阻焊管母材和焊缝区的应力是引起电阻焊管沟槽腐蚀的主要原因,热张力减径可以显著提高电阻焊油套管的抗沟槽腐蚀性能,从而扩大其在石油钻采领域的应用。吕春雷等^[13]对处于 0 MPa、100 MPa、200 MPa 和 300 MPa 恒定拉应力下的直缝高频电阻焊管进行阳极极化,并测定了焊缝沟槽腐蚀敏感性。结果表明,随着应力增大沟槽腐蚀敏感性系数增大,腐蚀电流增大。

1.3 热处理

吕春雷等^[13]在研究中考察了热处理对 HFW 焊管腐蚀情况的影响,研究结果表明 500 °C 去应力退火后焊缝区、热影响区和母材腐蚀速率接近一致,不易发生沟槽腐蚀。王荣^[14]研究了热处理对 J55 钢直缝电阻焊管沟槽腐蚀性能的影响,焊后热处理可以降低 HFW 焊管沟槽腐蚀敏感性系数,足够时间的无相变退火处理效果更显著。毕宗岳等^[14]对 HFW 焊管焊缝沟槽腐蚀敏感性行为的研究中发现:焊后单纯回火处理不能降低 HFW 焊管焊缝区沟槽腐蚀敏感性,而焊后调质处理和单纯淬火处理均可显著降低 HFW 焊管焊接区的沟槽腐蚀敏感性。Mueller^[15]研究了 HFW 碳钢焊管的点蚀行为,表明焊后热处理能有效降低焊管点蚀的倾向性。毕宗岳等^[12]采用电化学极化方法测定了不同热处理工艺下 CT80 钢连续油管 HFW 焊缝沟槽腐蚀的敏感性。结果显示,该 HFW 焊缝在焊态、调质及回火三种状态下,焊缝沟槽腐蚀的敏感性均很小,其中调质处理后焊缝沟槽腐蚀敏感性系数与母材基本相同。三种状态下焊缝沟槽腐蚀敏感性强弱依次为:焊态>回火>调质。

1.4 腐蚀介质的种类及离子含量

海上某油田井口输送管线发生局部泄露,泄露部位集中在焊缝附近,陈圣乾等^[16]选取典型管段样品进行分析,结果表明,湿环境下 CO₂ 腐

蚀破坏是该井口管线泄露的原因,且在该环境下焊缝处具有较高的沟槽腐蚀敏感性。罗逸^[17]对气井油管腐蚀沟槽的形成原因和特点进行了分析,试验结果证实 CO₂ 腐蚀是造成沟槽产生和扩展的主要原因之一。

Kato 等^[18-19]研究了 HFW 焊管在实验室模拟油气环境中的沟槽腐蚀行为,主要包括 H₂S、CO₂、Cl⁻、O₂、温度及 PH 值等对沟槽腐蚀行为的影响。电化学测试结果表明:O₂ 含量对沟槽腐蚀的发生起决定性作用,H₂S 的存在显著降低了钢管的沟槽腐蚀敏感性。

1.5 流速

罗逸^[17]对比研究了 N80 油管和 A3 钢油管腐蚀沟槽的形成原因,指出高压酸性碳酸气体的作用是腐蚀沟槽产生和扩展的根本原因,高压天然气流对管壁的破坏作用服从流体动力学的冲蚀规律,这种携带地层岩土微粒的高压气流对管壁的破击作用是促使点蚀沿流体方向逐渐扩展并形成狭长沟槽的原动力。

1.6 外加电势

Wang 等^[20]研究中指出,外加电势是影响沟槽腐蚀敏感性测试结果的一个重要因素。研究中分别采用-500 mV、-490 mV 及-440 mV 的外加电势进行加速腐蚀试验,并计算沟槽腐蚀敏感性系数。随着加载电势由-500 mV 增大至-440 mV,沟槽腐蚀敏感性系数随着改变,分别为 1.31、1.03 和 1.04,即外加电势的大小会对试验测量结果产生显著影响,甚至会产生错误的判断和评价。一般的外加电势至少高于焊管材料自腐蚀电势 E_{corr} 值 50 mV,但不能过高以免钢进入钝化区^[7]。

2 沟槽腐蚀敏感性的测试方法

用于沟槽腐蚀敏感性测试的方法主要包括长期浸泡试验、极化曲线测量、电偶腐蚀试验和外加电位加速腐蚀试验等。

2.1 长期浸泡试验

早期的沟槽腐蚀敏感性测试主要采用长期浸泡腐蚀试验。Kato 等^[16]将焊管试样浸泡在 40 °C 人造海水中 1 年,通过对比焊缝区和焊管母体材料的腐蚀形貌,并结合 EPMA 分析评价沟槽

腐蚀性能,在试验开始 1 个月后,焊缝区开始发生轻微沟槽腐蚀,一年后发展为选择性深沟槽腐蚀。Wang 等^[3]研究了 HFW 焊管在质量分数 3.5% 的 NaCl 溶液中浸泡 234 天的腐蚀情况,通过测量样品表面不同区域的腐蚀深度,依据公式 $\alpha=h_2/h_1$ 计算焊管的沟槽腐蚀敏感性系数。Lewis 等^[23]在采用旋转浸泡腐蚀的方法对沟槽腐蚀敏感性进行评价时却发现,在 94 天结束试验时焊缝附近并未发现沟槽腐蚀现象。

长期浸泡试验由于接近钢材实际的服役条件,结果的可信度较高。但长期浸泡试验法耗时长,不适合用于材料发展、技术研究以及后续的产品性能测试。

2.2 微区电势扫描法

Voruganti 等^[23]采用扫描微区电势的方法研究了焊管焊缝区域的腐蚀倾向性,结果显示焊缝区域不同的电势分布反映了不同的沟槽腐蚀倾向性,分析结果与长期浸泡试验和外加电位加速腐蚀试验结果一致。在这种测试方法中可以获得焊管焊缝区域的电势值及其分布曲线,由此可以得到局部腐蚀中阳极与阴极的位置。毕宗岳等^[24]采用扫描振动电极技术,利用扫描振动探针(SVP)检测样品不同部位的腐蚀电流密度,沟槽腐蚀敏感性系数与腐蚀电流密度成正比,即沟槽腐蚀敏感性可表征为 $\alpha=J_2/J_1$, J_1 为焊缝区电流密度, J_2 为母材及热影响区电流密度。

该方法获取数据时间短,适用于材料和腐蚀介质的检测,尤其是焊接工艺的优化。但由于测量探头尺寸太大(接近 80 μm),测量准确性较低(焊缝宽度大约 20~200 μm)。此外,该方法是定性表征,并不能得到诸如沟槽腐蚀敏感性参数的定量结果^[21]。

2.3 极化曲线测量

印仁和等^[25]采用电化学极化曲线和交流阻抗相结合的方法,测量得到不同测量区域腐蚀电位 E_{corr} 和阻抗膜值,对 K55 钢和 J55 钢的沟槽腐蚀敏感性进行了评价。魏华等^[26]应用极化曲线和电化学阻抗测量技术对比研究了 SML 和 HFW 管线钢在海泥中的腐蚀行为,通过测量极化电阻和腐蚀电流密度表征材料的腐蚀性能。邬中华^[27]通过微区极化曲线测量的方法研究了 HFW 直缝焊接

X52 管线钢的沟槽腐蚀敏感性,试验中分别对基体、热影响区和熔合线进行极化曲线测试,从测试曲线上腐蚀电流密度,以此计算金属的腐蚀速率 $\nu=NJ/F$,其中 N 为摩尔质量, J 为腐蚀电流密度, F 为法拉第常数。研究指出:当 $\nu_{\text{熔合线}}/\nu_{\text{基体}}>5$ 时, X52 直缝焊管有较高的沟槽腐蚀敏感性。

该方法缩短了沟槽腐蚀敏感性测试周期,但试验结果的可靠性有待进一步研究。

2.4 电偶腐蚀试验

Katoh 等^[28]基于电偶腐蚀机理测定了沟槽腐蚀速率,并且根据沟槽腐蚀过程的电偶腐蚀模型分别计算了阳极和阴极的腐蚀速率。

阳极腐蚀速率

$$I_{\text{ag}}(a)=\left(\frac{K \cdot S(a)}{R_{\text{pa}}}+I_{\text{g}}(c \rightarrow a)\right) / S(a) \quad (1)$$

阴极腐蚀速率

$$I_{\text{ag}}(c)=\left(\frac{K \cdot S(c)}{R_{\text{pc}}}+I_{\text{g}}(c \rightarrow a)\right) / S(c) \quad (2)$$

式中: $I_{\text{ag}}(a)$, $I_{\text{ag}}(c)$ ——阳极和阴极的腐蚀电流密度;

K ——线性极化电阻;

$S(a)$, $S(c)$ ——阳极和阴极的表面积;

R_{pa} , R_{pc} ——阳极和阴极的线性极化电阻;

$I_{\text{g}}(c \rightarrow a)$ ——电偶电流。

在该方法中通过比较阴阳极的腐蚀速率评价沟槽腐蚀性能,沟槽腐蚀敏感性系数可用 $I_{\text{ag}}(a)/I_{\text{ag}}(c)$ 的值表征。

2.5 外加电位加速腐蚀试验

该方法起源于 Masamura 等^[29]的研究,焊钢焊缝样品浸泡于 3.5% NaCl 溶液中并施加 0.3V_{SHE} 的恒定电势加速腐蚀 144 h,腐蚀结束后通过测量腐蚀深度计算沟槽腐蚀敏感性系数。吕春雷等^[13]采用恒电位阳极极化的方法研究了应力对 HFW 腐蚀情况的影响。贺飞等^[12]采用恒电位极化法,对样品施加 -500 mV 电位进行 48 h 的极化,通过测定沟槽腐蚀几何参数,计算沟槽腐蚀系数来表征电阻焊油井套沟槽腐蚀性能。

该方法是目前国内采用较多的测试方式,通过测试沟槽腐蚀敏感性系数,并将其与 1.3 进行对比从而作为评价沟槽腐蚀敏感性的一个有效方

法。但是大量研究指出外加电位的选择对试验测定结果有显著的影响，不合适的外加电位可能会得到与实际完全相反的结果。外加电位的目的是要使热影响区及基材的腐蚀加速，凸显两者之间的腐蚀速度差异，但由于焊管材料本身电化学性质存在差异，其腐蚀电位相差很大，外加统一的 -550 mV/SCE ，对不同母材和焊缝实际起到的加速程度相差很大，导致所测不同品种焊管的沟槽腐蚀性能不具可比性。此外，该方法测试时间较长，仅电解腐蚀试验就需要 144 h，整个测试周期超过 150 h，成为影响产品交货周期的重要因素之一。

2.6 交流阻抗法

印仁和等^[25]通过对 K55 和 J55 钢测试母材及焊缝区的交流阻抗发现，经过不同极化腐蚀时间后，J55 钢交流阻抗值变化不大，而 K55 钢的交流阻抗值产生了明显差别，这与沟槽腐蚀敏感系数（K55 较大）测试结果相吻合，为沟槽腐蚀敏感性评价提供了一种新方法，但这种方法并未给

出具体的沟槽腐蚀敏感性评价标准，实际生产中应用较少。

3 沟槽腐蚀性能研究现状

国内外研究者采用上述评价方法对不同材料进行沟槽腐蚀性能研究，并对其腐蚀敏感性系数进行测量。Duran 等^[30]以 $\alpha=2$ 的评价标准对沟槽腐蚀性能进行表征。近几年随着用户对 HFW 焊管产品质量的不断提高，研究者又以 $\alpha=1.3$ 作为沟槽腐蚀敏感性的判断依据，认为 $\alpha<1.3$ 的焊管对沟槽腐蚀不敏感， $\alpha>1.3$ 的钢管具有高的沟槽腐蚀敏感性。

现有研究中主要是针对 N80、J55、CT80 等钢级焊管进行的沟槽腐蚀性能测试，并对其敏感性系数进行了表征。表 1 总结了现有研究中 N80、J55、CT80 等焊管在不同状态下的沟槽腐蚀敏感性系数。某井口管线各管段化学成分见表 2^[16]。

表 1 不同钢材的沟槽腐蚀敏感性系数

材料	焊接方式	测试方法	状态	沟槽腐蚀敏感性系数 α	参考文献
N80	HFW	恒电位电化学极化	焊态	1.132	[31]
J55	HFW	恒电位电化学极化	焊态	1.783	[1]
CT80	HFW	微区电势扫描法	焊态	1.220	[24]
		浸泡法		1.180	
CT80	HFW	恒电位电化学极化	焊态	1.210	[2]
			回火	1.160	
			调质	1.030	
20 钢	HFW	恒电位电化学极化	焊态	1.940	[14]
			调质	1.270	
			回火	2.150	
			淬火	0.850	
J55	HFW	恒电位电化学极化	焊态	1.220	[32]
J55	HFW	恒电位电化学极化	焊态	1.530	[4]
某井口管线		恒电位电化学极化	直管	2.170	[16]
			弯管	1.650	
日本 J55	HFW	恒电位电化学极化	焊态	1.634	[33]
国产 J55				1.311	
日本 NC-55E				1.401	
日本 J55	HFW	腐蚀浸泡	焊态	1.501	[33]
国产 J55				1.297	
日本 NC-55E				1.396	

表 2 某井口管线各管段化学成分

管段	化学成分/%							
	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Mo)	w(V)
直管	0.13	0.26	1.04	0.011	0.001 0	0.045	0.023	0.000 8
弯管	0.20	0.21	0.56	0.011	0.005 1	0.021	0.010	0.000 6

图 1 所示为不同焊态材料的沟槽腐蚀敏感性系数,从图 1 可以看出,焊态材料的腐蚀敏感性系数普遍较大,大部分大于 1.3。

笔者对部分油套管产品进行了相关研究,并

结合现有研究成果^[31-33],结果表明,经过不同的热处理,材料的沟槽腐蚀敏感性系数普遍减小,如图 2 所示,可见焊管经过热处理之后沟槽腐蚀抗力提高,腐蚀敏感性系数绝大部分小于 1.3。

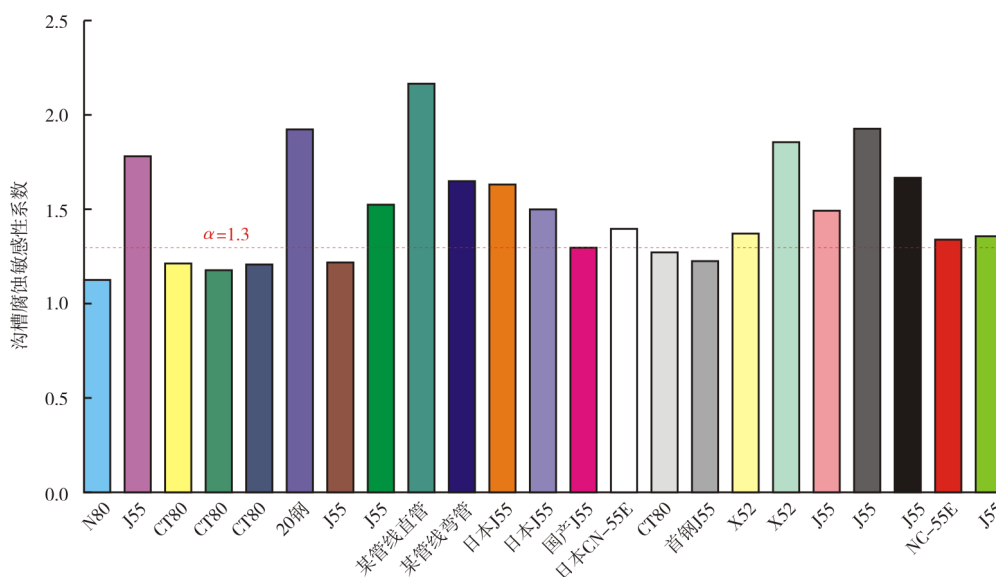


图 1 不同焊态材料的沟槽腐蚀敏感性系数

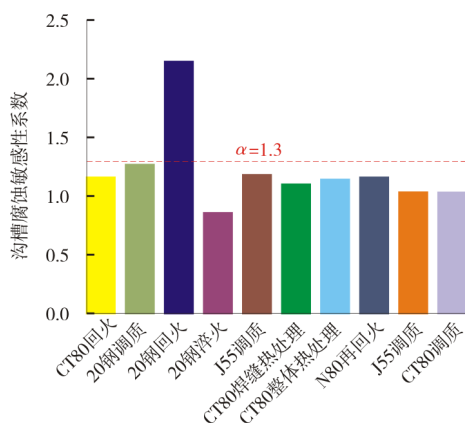


图 2 不同热处理后焊管材料的沟槽腐蚀敏感性系数

此外,不同应力状态下焊管的沟槽腐蚀性能也会产生差异,吕春雷等^[13]研究了表 3 中化学成分的焊接钢管在不同应力状态下热处理对直缝高频电阻焊管沟槽腐蚀性能的影响,结果如图 3 所示。可见,随着应力增大沟槽腐蚀敏感性系数增

大,但焊管经热处理后,焊缝沟槽腐蚀敏感性明显减小且随着应力变化不大,且热处理后钢管的沟槽腐蚀敏感性系数始终小于 1.3。

表 3 HFW 焊接钢管的化学成分 %

w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Nb+V+Ti)	w(Al)
0.2~0.3	0.1~0.3	0.6~1.2	0.02	0.003	0.1	0.026

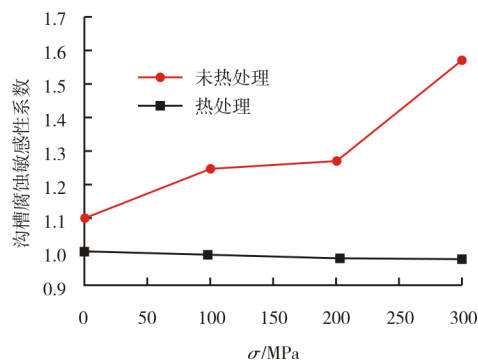


图 3 不同应力状态下热处理对焊缝沟槽腐蚀敏感性系数的影响

结合国内外沟槽腐蚀敏感性的研究现状和评价方法，可以确定采用加速腐蚀试验能够实现沟槽腐蚀性能的快速评价。但是，目前研究中试验条件没有统一标准，各文献所采用的加速腐蚀条件也有所差别。如介质采用 3.5% 或 3.0% NaCl，极化电位采用 -550 mV、-500 mV 或 -300 mV，试验周期为 24 h、48 h、72 h 或 144 h，沟槽腐蚀敏感性评价标准 ($\alpha=1.3$ 或 $\alpha=2$) 也不一致。这些试验条件和评价标准能否反映焊管在实际工况下的腐蚀情况，还需进一步考察。

表 4 一种抗沟槽腐蚀高强度 HFW 焊接套管用钢的化学成分

%

$w(C)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(P)$	$w(S)$	$w(Ti)$	$w(Nb)$	$w(V)$	$w(Cr)$	$w(Cu)$	$w(B)$	$w(Al)$	$w(Ca)$
0.15~0.25	0.05~0.4	0.7~1.5	0.1	0.005	0.005~0.03	0.005~0.04	0.005~0.04	0.1~0.7	0.1~0.3	0.003	0.002~0.04	0.001~0.01

4.2 沟槽腐蚀评价方法

针对现有沟槽腐蚀评价方法中存在的问题，王伟等^[35]提供了一种采用外加恒电流快速评价焊管沟槽腐蚀敏感性的方法，通过测量焊缝样品的电化学阻抗 EIS 曲线，得到其极化电阻 R_p ，根据不同焊管产品沟槽腐蚀测试结果的统计推断出 ΔE 值，由公式 $i=\Delta E/R_p$ 计算出测试时所施加的外加电流。将测试方法由恒电位加速改为恒电流加速，按照不同比例提高外加电流，在测试试样腐蚀程度相同的前提下，测试时间可以与提高电流等比例缩减。加速试验结束后，清理清洗样品，对样品进行称重，由样品腐蚀失重换算出其平均腐蚀深度 h_1 ，然后测量腐蚀沟槽深度 h_2 ，由公式 $\alpha=1+h_2/h_1$ 可以得到沟槽腐蚀敏感性系数。齐慧滨等^[36]提出一种用微区腐蚀电流密度测量焊管沟槽腐蚀敏感性的方法，该方法主要过程包括：对焊管的焊缝组织进行观察，划分熔合线与基体的微区；采用恒电位/恒电流仪测量各微区的极化曲线；计算自腐蚀电流密度，得到熔合线和基体各自的自腐蚀电流密度；由熔合线和基材的自腐蚀电流密度得到二者的比值 ($i_{熔}/i_{基}$)。该方法避免了采用金相测试试样平均腐蚀深度和沟槽深度所带来的物理测量误差，测量结果更准确可靠。王伟等^[37]提出一种用恒电位电解法测量焊管沟槽腐蚀的方法，主要包括极化曲线测试、加速电位优选、沟槽腐蚀系数测试。该方法基于“焊管焊缝材

4 沟槽腐蚀研究的相关专利

4.1 抗沟槽腐蚀材料

针对目前部分焊接钢管材料强度与抗沟槽腐蚀性能不兼容，田青超等^[34]的发明专利中提供了一种抗沟槽腐蚀高强度 HFW 焊接套管用钢，其化学成分见表 4，并且在发明专利中还提供了制备套管的生产方法，包括冶炼、浇铸、轧制、卷曲成板、焊接成型、热处理、剪切和管加工。

料的腐蚀电位在温度、溶液成分、浸泡时间均确定的情况下是稳定唯一的”这一特征，通过测量焊缝试样的极化曲线，得到其实际腐蚀电位，进而优化加速电位，从而使沟槽腐蚀系数测量的准确性和可靠性极大提高。

4.3 沟槽腐蚀深度测量装置

目前国内外无专门用于实际测量焊管焊缝区沟槽腐蚀深度的设备或装置，一般采用金相显微镜或者扫描电镜放大观察并金相评估，测量误差大，测量点有限。因此，龚育才等^[38]公开了一种焊管焊缝区沟槽腐蚀深度测量装置，该装置主要包括千分尺、测微螺杆、探头、升降加紧部件、试样台及通路判定表。该测量装置通过千分尺直接读数，测量数据准确可靠，并且可以根据需要进行多点测量，取平均值作为数据更加精准。王伟等^[39]提出一种新型焊管沟槽腐蚀敏感性测试装置，该设备主要包括盖板、电解槽、辅助电极和参比电极。该新型装置在进行平行测量时，消除了参比电极的电位差，使得测量结果更加准确，另外还可通过置于电解槽中的控温装置实现恒温测试。

5 结束语

影响 HFW 焊管焊缝沟槽腐蚀敏感性的主要因素有微观组织及化学成分、残余应力、热处理、腐蚀介质的种类及离子含量、流速、外加

电势影响等。沟槽腐蚀敏感性测试方法主要可以归纳为长期浸泡试验、极化曲线测量、电偶腐蚀试验和外加电位加速腐蚀试验等方法。通过比较各种评价方法的优劣,为找到一种或几种快捷、高效、可靠的评价方法提供帮助和参考。同时,本研究对沟槽腐蚀性能研究现状的知识产权情况进行综合分析阐述,笔者认为目前国内外无专门用于实际测量焊管焊缝区沟槽腐蚀深度的设备或装置,同时对评价沟槽腐蚀敏感系数临界值 1.3 没有形成共识,其失效的判定有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 王荣. 显微组织和热处理对直缝电阻焊管沟槽腐蚀的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(12): 6-10.
- [2] 毕宗岳, 井晓天, 鲜林云, 等. 热处理对连续油管焊缝沟槽腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(8): 4-7.
- [3] WANG R, BIZ Y, JING X T. Grooving corrosion of oil coiled tubes manufactured by electrical resistance welding[J]. Corrosion Science, 2012(5): 67-73.
- [4] 王荣. J55 钢直缝焊油井套管沟槽腐蚀性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2004, 24(6): 4-10.
- [5] WANG R. Grooving corrosion properties of electric resistance welded oil well casing of J55 steel[J]. Journal of the Chinese Society of Corrosion and Protection, 2004, 24(6): 360-363.
- [6] KATO C, OTOGURO Y, KADO S, et al. Grooving corrosion in electric resistance welded steel pipe in sea water[J]. Corrosion Science, 1978, 18(1): 61-74.
- [7] KURIS K T, HARADA S. Effect of various factors mechanisms and preventive method of grooving corrosion of HFW and CBW carbon steel pipes[J]. Kawasaki Steel Technical Report, 1979, 11(3): 321-336.
- [8] MASAMURA K, MATSUSHIMA I. Case studies of grooving corrosion of electric resistance welded pipe[J]. Corrosion Engineering, 1982, 17(1): 27-33.
- [9] HARA T, UEMORI R, TAMEHIRO H, et al. Mechanism of grooving corrosion resistance in Cu-Ti added high frequency electric resistance welded steel pipes[J]. Zairyo-to-Kankyo, 2000, 49(3): 150-158.
- [10] EL-SAYED M H. Grooving corrosion of seam welded oil pipelines[J]. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2014, 14(5): 36-42.
- [11] LYU C L, CAO W M, CHEN H, et al. Effects of residual tensile stress on grooving corrosion of ERW pipes[J]. Corrosion and Protection, 2010, 31(7): 512-514.
- [12] 贺飞, 尚成嘉, 张峰, 等. 热张力减径对电阻焊油井套管沟槽腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(10): 4-9.
- [13] 吕春雷, 曹为民, 陈浩, 等. 应力对直缝高频电阻焊管沟槽腐蚀的影响[J]. 腐蚀与防护, 2010(7): 3-6.
- [14] 毕宗岳, 刘道新, 李轩, 等. 热处理对 ERW 焊缝沟槽腐蚀敏感行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(2): 7-11.
- [15] MUELLER R A. Pitting and crevice corrosion in ERW carbon steel heat exchanger tubes[J]. Journal of Materials for Energy Systems, 1980, 2(2): 17-22.
- [16] 陈圣乾, 赵大伟, 张炜强, 等. 某油田井口输油管线焊缝腐蚀失效分析[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(10): 4-7.
- [17] 罗逸. 天然气井油管腐蚀沟槽的形成原因[J]. 天然气工业, 2002, 22(1): 3-8.
- [18] KATO C, OTOGURO Y, KADO S. Effect of alloying elements on grooving corrosion resistance of ERW steel pipe[J]. Zairyo-to-Kankyo, 2009, 23(9): 425-432.
- [19] CELAL, DURAN E, TREISS G, et al. The resistance of high frequency inductive welded pipe to grooving corrosion in salt water[J]. Materials Performance, 1986, 17(5): 43-51.
- [20] WANG W, LIU C S, ZHOU Q J, et al. Methods for assessing the grooving corrosion of high-frequency electric resistance welded pipes[J]. Baosteel Technical Research, 2010(4): 27-32.
- [21] WANG W, QI H B, LIU C, et al. Methods for assessing the grooving corrosion of high-frequency electric resistance welded pipes[J]. Baosteel Technical Research, 2010(3): 27-31.
- [22] LEWIS R E, HASSELL J C, CHOI H J, et al. Qualifying ERW tubular products for sweet petroleum production environments[C]//NACE International Annual Conference & Exposition. San Diego, US: NACE, 1998: 3-8.
- [23] VORUGANTI V S, LUFT H B, GEER D 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.
- [24] 毕宗岳, 任永峰, 井晓天. 微电极扫描法对 HFW 焊缝沟槽腐蚀敏感性研究[J]. 焊管, 2011, 34(10): 4-10.
- [25] 印仁和, 陈浩, 曹为民, 等. K55 钢高频电阻焊管沟槽腐蚀性能研究[C]//第十四次全国电化学会议论文集汇编. 扬州: 中国化学会, 2007: 632-633.
- [26] 魏华, 王秀通, 高荣杰, 等. SML、ERW 管线钢在海泥中的腐蚀行为[J]. 电化学, 2005, 11(3): 5-7.
- [27] 郭中华. X52 直缝焊管沟槽腐蚀评价方法的研究[J]. 太钢科技, 2009(3): 5-10.
- [28] KATO H K, KOSUGE N, ITOH S, et al. Evaluation of grooving corrosion-resistant high frequency electric resistance welded (HF-ERW) steel pipes by new electrochemical technique[J]. Nippon Steel Technical Report, 1989, 11(5): 5-7.

- [29] MASAMURA K, MATSUSHIMA I. Case studies of grooving corrosion of electric resistance welded pipe[J]. Corrosion Engineering, 1982, 31(5): 332-335.
- [30] DURAN C, TRIESS E, HERBSLEB G. The resistance of high frequency inductive welded pipe to grooving corrosion in salt water [J]. Mater. Performance (United States), 1986, 25(9): 28-34.
- [31] 赵西岐, 张骁勇, 苑清英, 等. 新型 N80 焊管耐蚀性能研究[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(12): 6-11.
- [32] 张志升, 杜素珍, 尹志福. J55 钢级电阻焊(ERW)套管的焊缝沟槽腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(5): 323-327.
- [33] 石荣满, 刘书国. ERW 钢管的沟槽腐蚀及结果分析[J]. 防腐保温技术, 2004, 12(4): 6-12.
- [34] 田青超, 董晓明, 丁维军. 抗沟槽腐蚀高强度 ERW 焊接套管用钢、套管及生产方法: 200710093967.9[P]. 2011-07-20.
- [35] 王炜, 齐慧滨, 钱余海, 等. 一种采用外加恒电流快速评价焊管沟槽腐蚀敏感性的方法: 200810201900.7 [P]. 2010-06-09.
- [36] 齐慧滨, 王炜, 钱余海, 等. 一种用微区腐蚀电流密度测量焊管沟槽腐蚀敏感性的方法: 200910197594.9 [P]. 2011-05-04.
- [37] 王炜, 齐慧滨, 钱余海, 等. 一种用恒电位电解法测量焊管沟槽腐蚀的方法: 200910197657.0[P]. 2011-05-04.
- [38] 龚育才, 陈戈, 王震. 一种焊管焊缝区沟槽腐蚀深度测量装置: 201020170602.9[P]. 2010-12-29.
- [39] 王炜, 陈红星, 钱余海, 等. 焊管沟槽腐蚀敏感性测试装置: 201120080395.2[P]. 2011-11-23.

作者简介: 王 涛 (1982—), 男, 高级工程师, 主要从事油气管材耐腐蚀性能研究工作。

收稿日期: 2022-01-18

修改返回日期: 2022-03-30

编辑: 罗 刚

甘肃首条中长距离输氢管道贯通

2022年7月4日, 甘肃省首条中长距离输氢管道主线路全线贯通。这条管道将源源不断地输出清洁新能源产品——纯氢, 为周边企业提供可消纳的可靠生产原料, 促进企地耦合发展。

有着83年历史的玉门炼化化工总厂, 所产氢气除去厂内自用外仍有富余。2021年, 玉门油田充分利用炼化化工总厂的富裕氢气资源, 建成投运了占地9 000 m², 集氢气压缩、装车系统和储氢设施于一体的氢气加注站, 氢气充装压力20 MPa, 充装能力3 000 m³/h, 纯度稳定在99.9%以上。目前, 油田已初步在甘肃、宁夏、新疆形成氢气供应链。

由于使用压缩气体罐车运输运量小、风险大、成本高, 迫切需要建设输送管道以提供持续不断的原料, 满足企业连续生产需要, 输氢管道应运而生。该条输氢管道连接玉门炼化化工厂氢气加注站, 是甘肃省第一条中长距离纯氢管道, 直径200 mm, 长度5.77 km, 压力2.5 MPa, 设计输氢能力为7 000 t/a (约10 000 m³/h)。输氢管道的正式建成投运, 打通了储运环节“最后一千米”, 不仅能解决玉门油田炼化化工厂产品销售问题, 促进区域循环经济加速建成, 还对玉门油田在新能源制氢、储氢、运输、加注、应用、氢能装备制造等业务领域延链补链。

近年来, 玉门油田加快推进上下游业务清洁低碳生产, 全面推进风电、光伏发电、光热等可再生能源建设, 同步布局储能、氢能, 形成“油气电氢”融合发展格局。2022年有望落地的玉门油田160 MW可再生能源制氢示范项目是中国石油首个应用新能源发电技术制取绿氢的示范项目, 也是甘肃省“十四五”规划部署的新能源产业发展重点项目。项目设计建设160 MW光伏电站和7 000 t电解水制氢生产线, 预计2023年全面建成投运。本次开工建设的输氢管道工程, 就是160 MW可再生能源制氢示范项目的重要配套工程。下一步, 玉门油田将进一步发挥全省“氢能源产业链链主”企业引领作用, 推动绿氢在富氢能源生产、氢冶金、公交、物流等领域的产业化应用, 力争“十四五”末建成50 000 t/a绿氢供应中心。

(摘自 中国化工报)