专题——石油管材及装备材料腐蚀与防护技术

# 925 镍基合金和 110SS 钢在高温高酸性 环境中的电偶腐蚀行为

# 赵国仙,胡晓彤

(西安石油大学 材料科学与工程学院,西安 710065)

摘要:目的 探究镍基合金 925 和抗硫油管管材 110SS 在不同面积比下耦接后的电偶腐蚀行为和电偶腐蚀效 应,模拟国内某油气田高温高酸性腐蚀环境。方法 采用浸泡腐蚀试验和电化学测试技术,评价电偶腐蚀的 阴阳极过程对腐蚀进程的影响,并利用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线能谱仪(EDS)与 X 射线衍射仪(XRD) 对腐蚀试样的表面形貌及腐蚀产物成分进行分析。结果 110SS 的自腐蚀电位远远低于 925,阴阳极分别以 1:1、1:5、1:10、1:30 四种面积比耦接后,均发生电偶腐蚀。耦接后 110SS 的腐蚀速率分别为:0.7564、0.7032、 0.6457、0.6289 mm/a,均为极严重腐蚀。结论 电偶腐蚀速率和电偶腐蚀效应均随着阴阳极面积比的增大而 增加。镍基合金与碳钢油管耦接主要对材料在腐蚀环境下的腐蚀进程有影响,而对腐蚀产物和腐蚀机理的 影响不大。

关键词: 电偶腐蚀; 镍基合金 925; 抗硫油管 110SS; 阴阳极面积比; 极化曲线 **DOI**: 10.7643/ issn.1672-9242.2020.10.006 **中图分类号: TG174.4 文献标识码: A** 

文章编号: 1672-9242(2020)10-0032-08

# Galvanic Corrosion Behavior of Nickel-based Alloy 925 for Downhole Tools Coupled With 110SS Steel

ZHAO Guo-xian, HU Xiao-tong

(School of Material Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**ABSTRACT:** To investigate the galvanic corrosion behavior and galvanic effect between nickel-based alloy 925 for downhole tools and sulfur resistant pipeline 110SS steel in different area ratios, a High temperature and high sour environment was simulated in oil and gas field in China. Electrochemical tests and immersion corrosion tests were conducted in a high temperature and high pressure autoclave, and the corrosion products formed on the metal surface were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and energy disperse spectroscopy (EDS), The results indicate that the free corrosion potential of 110SS steel is much lower than that of nickel alloy 925, even after coupling, galvanic corrosion occurs. The galvanic corrosion rate is positively correlated with the ratio of anode and cathode. While the coupling of heterogeneous metals has no obvious effect on the corrosion products and corrosion mechanism.

KEY WORDS: galvanic corrosion; nickel alloy 925; sulfur resistant pipeline 110SS; area ratio of anode and cathode; polariza-

收稿日期: 2020-09-01; 修订日期: 2020-09-02

Received: 2020-09-01; Revised: 2020-09-02

作者简介:赵国仙(1968—),女,博士,教授,主要研究方向为石油管的腐蚀与防护。

Biography: ZHAO Guo-xian (1968-), Female, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection of oil pipeline.

通讯作者:胡晓彤(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向为石油管的腐蚀与防护。

Corresponding author: HU Xiao-tong (1995---), Female, Master, Research focus: corrosion and protection of oil pipeline.

tion curve

随着国内外油气田开采量的增多,油气开采不 得不向高含 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 以及高 CF浓度等苛刻环境发 展<sup>[1-4]</sup>,对石油管材的耐蚀性要求越来越高。不锈钢、 镍基合金、钛合金等均被应用<sup>[5]</sup>,但由于成本较高的 原因,仅用于某些极严重腐蚀的部位或者仅用于制造 部分构件,而碳钢仍作为主体使用,这就使得井下电 偶腐蚀的问题愈发突出。不锈钢作为井下工具的常用 材质,一旦与碳钢油管在井下环境电解质溶液中相接 触,电偶腐蚀的发生就不可避免。这会使碳钢油管产 生阳极极化,从而加剧腐蚀,导致失效。电偶腐蚀 往往还会诱发和加速应力腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、 氢脆等其他各种类型的局部腐蚀,从而加速设备的破 坏<sup>[6]</sup>,造成严重的安全事故和经济损失。

目前有大量针对电偶腐蚀机理以及电偶腐蚀的 影响因素的研究。张文毓<sup>[7]</sup>总结了钢、铝合金、镁合 金、钛合金、铜合金、复合材料的电偶腐蚀与防护的 研究进展。邓宏达等<sup>[8]</sup>研究了双金属复合管 X65/316L 在模拟产出水中的电偶腐蚀行为,认为外层因内层金 属输送介质渗漏将构建电偶对,X65 为阳极,316L 为阴极,偶接后外层金属加速腐蚀。任科等<sup>[9]</sup>研究了 Q245R 钢和不锈钢在 3.5%NaCl 溶液中的电偶腐蚀行 为,研究结果表明,Q245R 的腐蚀电位远低于不锈钢, 偶接后作为阳极,腐蚀加剧,偶接后电偶对的混合电 位与电偶电流呈负相关。油井管电偶腐蚀的相关文 献<sup>[7-12]</sup>主要集中在多金属联合使用的构件,腐蚀环境 单一。关于井下工具用镍基合金和油管在苛刻环境中 的电偶腐蚀行为的文章鲜有发表。

由此,亟需对井下工具和油管的电偶腐蚀行为进 行研究,探究耦接对金属腐蚀的影响,以明确井下工 具和油管在腐蚀环境下的电偶腐蚀效应,以及阴阳极 面积比对电偶腐蚀的影响,以期为油气田后续油管、 井下工具组合选材及设计提供依据。

## 1 试验方法

试材选用井下工具用 925 镍基合金以及常用抗 硫油管 110SS 作为电偶对,两种材料的化学成分见表 1。925 和 110SS 的组织分别为奥氏体和回火索氏体。

表 1 925 和 110SS 的化学成分

Iab.1         The chemical composition of the test material							%	
试材	С	Cr	Ni	Мо	Mn	Si	Cu	Al
925	0.016	21.84	45.35	3.24	0.56	0.30	1.72	0.42
110SS	0.20	0.504	0.021	0.737	0.50	0.22	0.026	—

用 320#、600#、800#、1200#水磨砂纸依次打磨 后用蒸馏水冲洗、脱水,冷风吹干,称量后备用。腐 蚀介质为 NaCl 水溶液, Cl<sup>-</sup>质量浓度为 90 000 mg/L。

浸泡试验需要在同种腐蚀环境中做试样单独腐 蚀和电偶腐蚀的对照实验。单独材质的腐蚀试验将 925 与 110SS 试样设计为 50 mm×10 mm×3 mm 的片 状试样。电偶腐蚀试验将 925 与 110SS 分别以 1:1、 1:5、1:10、1:30 的面积比耦合, 连接方式为螺纹连接, 110SS 为公扣, 925 为母扣。试验条件: H<sub>2</sub>S 分压为 1.5 MPa, CO<sub>2</sub>分压为 4.5 MPa, 总压为 10 MPa, 温 度为 150 ℃, 试验周期 25 天。采用 TFCZ5-35/250 型 磁力驱动反应釜模拟高温高酸性井下工况。通入高纯  $N_2$ 除氧 2 h 后, 通入 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub>, 升温升压至设定数 值。试验结束后,将试样表面腐蚀介质去除,将110SS 试样放入由 20g 三氧化二锑、50g 氯化亚锡和 1 L HCl 配制的清洗液中超声波清洗 5 min; 将 925 试样放入 15% HCl(ρ=1.19 g/mL)清洗液中超声波清洗 5 min。 温度均为 25 ℃。试样酸洗后再冲洗、脱水、吹干, 用 FR-300MKII 电子天平(精度 0.0001 g) 称量,并 利用失重法计算腐蚀速率。

在电偶腐蚀试验中,通常采用电偶腐蚀系数

P<sub>c</sub><sup>[9,13]</sup>表征耦合对材料电偶腐蚀行为的影响,计算方法为:

$$p_{\rm c} = \frac{v_1}{v_2} \times 100\%$$
(1)

式中: $v_0$ 、 $v_1$ 为阳极试样偶接前、后的腐蚀速率, mm/a。

试验结束后,观察试样表面腐蚀形貌(SM-5800 型扫描电镜),分析腐蚀产物元素含量(OXFORD ISIS 能谱仪),分析成分结构(X'pert Pro型X射线 衍射仪),观察点蚀形貌并测量深度(奥林巴斯GX51 金相显微镜)。电化学测试设备采用CS2350 双单 元电化学工作站,辅助电极选用铂电极,参比电 极为氯化银电极。电极极化曲线测量的电位范围为 -500 mV~+500 mV(相对于自腐蚀电位),扫描速度为 0.3333 mV/s。电化学阻抗测试频率范围为 5 mHz~ 100 kHz,阻抗测量信号幅值为 10 mV 的正弦波。

## 2 结果及分析

#### 2.1 浸泡腐蚀试验

镍基合金 925 和碳钢 110SS 偶接前后的腐蚀速率

如图 1 所示,电偶腐蚀系数 P。如图 2 所示。由图 1 可 见,925 单独腐蚀时腐蚀速率为 0.0197 mm/a,以 1:1、 1:5、1:10、1:30 面积比偶接后的腐蚀速率分别为 0.0054、 0.0137、0.0109、0.0059 mm/a。110SS 单独腐蚀时的腐 蚀速率为 0.4327 mm/a,以 1:1、1:5、1:10、1:30 面积 比耦接后的腐蚀速率分别为 0.7564、0.7032、0.6457、 0.6289 mm/a。根据 NACE SP 0775—2013,耦接前后 925 均为轻度腐蚀,110SS 均为极严重腐蚀,并且耦 接后 110SS 的腐蚀速率远高于耦接前。由此可知,以 不同面积比耦接后 110SS 的腐蚀速率均大于其单独 腐蚀时的速率,但腐蚀速率随着阴阳极面积比的减小 而有所减小;而耦接后 925 的腐蚀速率均比单独腐蚀 速率小。即两种材质在模拟井下环境中发生了电偶腐 蚀,导致作为阳极的 110SS 腐蚀速率增加,925 作为 阴极被保护,腐蚀速率减小。





由图 2 可知, 阴阳极面积比对阳极腐蚀速率影响 很大, 面积比越小, 阳极的腐蚀速率越小, 但都大于 110SS 单独腐蚀的腐蚀速率。对 925 来说, 阴阳极面 积比对阴极腐蚀速率的影响没有明显的线性关系, 这 是因为 925 中含有 Cr、Ni 元素, 在腐蚀介质中的产 物膜会产生铬和镍的富集,生成 Cr(OH)<sub>3</sub>,填补金属 表面空隙,从而十分致密。随阴阳极面积比的减小, 作为阴极的 925 的腐蚀速率先增加、后减小,在 1:5 时最大,但均小于单独腐蚀时的腐蚀速率。由图 2 的 电偶腐蚀系数可知,耦接后阳极金属的腐蚀速率和电 偶腐蚀系数均随着阴阳极面积比的减小呈下降趋势。



图 2 925 和 110SS 不同面积比偶接后的电偶腐蚀系数 Fig.2 Galvanic corrosion coefficients of 925 and 110SS in different Surface area ratio of cathode to anode

图 3 和图 4 分别为 925 和 110SS 耦接前后表面腐 蚀产物膜的 SEM 形貌。由图 3 可知, 925 材料耦接 前后的腐蚀产物均较少, 耦接后 925 作为阴极被保 护,仅出现少量的点蚀。耦接前后 925 表面的最大点 蚀深度见表 2。单独腐蚀时,最大点蚀深度为 7.0 µm, 以四种面积比耦接后,在面积比为 1:5 时,出现最大 点蚀深度为 6.5 µm; 而在面积比为 1:30 时,未见明 显点蚀。耦接前后的最大点蚀速率均小于 NACE SP 0775—2013 中的 0.13 mm/a,为轻度腐蚀。这说明 925 在高温高酸性条件下耐蚀性能极好,仅发生轻微的腐 蚀,从 SEM 形貌还能清晰可见打磨痕迹。故 925 镍 基合金在高温高酸性环境中的应用符合井下生产要 求。因此主要考虑 110SS 在此高温高酸性介质中的腐 蚀情况,以确定两者耦接在井下生产时是否可行。



图 3 以面积比 1:5 偶接后 925 清洗前后的表面微观形貌 Fig.3 Surface micromorphologies of 925 with a Surface area ratio of 1:5: a) before cleaning; b) after cleaning





e 1:30

图 4 以不同面积比偶接后 110SS 表面的微观形貌 Fig.4 Surface micromorphologies of 110SS in different Surface area ratio of cathode to anode

表 2	以不同面积比偶接前后 925 表面最大点
	蚀深度及局部腐蚀速率
Tab 2	Maximum nitting donth and Maximum nitting

Tab.2Maximum pitting depth and Maximum pittingrate on the surface of 925 before and after coupling

状态	偶接前	1:1	1:5	1:10	1:30
最大点蚀	7.0	2.0	6.5	3.3	_
深度/μm 最大点蚀	0.1000	0.0000	0.0040	0.0402	
速率/mm·a <sup>-1</sup>	0.1022	0.0292	0.0949	0.0482	-

由图 4 可见, 耦接后 110SS 材料表面腐蚀产物比 耦接前明显增多, 腐蚀速率较单独腐蚀时均有增加。 由图 4b—e 可知, 阴阳极面积比越小时, 阳极(110SS) 面积越大, 试样表面腐蚀产物堆积得越密集, 在高温 下腐蚀产物膜的致密性较好, 而这能够相对减缓腐蚀 速率, 所以阳极腐蚀速率随着阴阳极面积比的减小有 所减小。

从形貌来看,虽然耦接后 110SS 材料表面的腐蚀 产物明显增多,但腐蚀产物形貌与单独腐蚀时并无明 显差别。进一步对偶接前后试样表面的腐蚀产物进 行分析, EDS 结果见表 3, XRD 结果如图 5 和图 6 所示。

Tab.3 EDS analysis of surface corrosion products of 925 and 110SS %									
		С	0	S	Fe	Cr	Ni	Cl	Na
110SS	偶接前	8.21	5.17	28.96	56.33	_	—	0.54	0.79
	偶接后	11.05	7.30	21.71	56.29	—	—	0.73	2.92
925	偶接前	6.70	2.33	_	32.98	20.6	37.39	_	_
	偶接后	19.01	7.60	36.58	21.92	10.51	4.38	_	_

表 3 试样表面腐蚀产物 EDS 分析结果









耦接前后 110SS 表面的腐蚀产物主要成分均为 Fe 的氧化物(FeCO<sub>3</sub>)和硫化物(FeS),组分没有明显 变化。虽然 110SS 发生腐蚀时阳极表面会形成大量 腐蚀产物,但这些腐蚀产物是晶态物质<sup>[14]</sup>,尤其是 FeCO<sub>3</sub> 与基体表面留有空隙,且在酸性环境中会溶 解掉,不能起到较好的保护作用,会使得金属继续 腐蚀。

925 表面有一层极薄的致密腐蚀产物膜,其中未 检测到 FeCO<sub>3</sub>。原因是 FeCO<sub>3</sub> 在酸性介质中溶解,基 体中的 Cr、Ni 元素明显富集,以填补腐蚀产物的空 隙。Cr 和 Ni 的化合物在钝化膜中的占比很大,所以 925 的产物膜致密性高,有很好的保护作用。

#### 2.2 电化学测试

两种材料在高温高 CI 酸性腐蚀介质中的开路电 位 OCP 和极化曲线如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可见,925 试样在浸入试验溶液 300 min 后,开路电位 *E*<sub>oep</sub>稳定在-301.47 mV,110SS 在溶液 中稳定在-761.11 mV,两种材料的开路电位差为 459.64 mV。已有研究表明,耦接金属对的电位差大 于 250 mV 时就会产生较为严重的电偶腐蚀<sup>[15]</sup>。因此 根据腐蚀热力学可以初步判断 110SS 发生腐蚀的倾向远远大于 925,当 925 镍基合金与 110SS 碳钢偶接时,会发生以高电位的 925 为阴极、低电位的 110SS 为阳极的电偶腐蚀,这与浸泡腐蚀试验的结果一致。





Fig.8 Polarization curves of 925 and 110SS

由图 8 极化曲线可以看出,925 的阴极强极化区 存在明显的 Tafel 区,说明阴极是活化控制体系,氢 离子结合电子的速度控制了阴极极化的进程。阳极钝 化区的出现表明镍基合金 925 在高温高压高酸性腐 蚀条件下阴极极化曲线与阳极极化曲线交点位于稳 定钝化区,具有良好的钝化能力。当材料表面极化到 致钝电位时,会生成一层致密、覆盖性良好的固体腐 蚀产物膜,隔绝基体与腐蚀介质,阻止基体进一步被 腐蚀。110SS 的阳极强极化区和阴极强极化区均有明 显的 Tafel 区,说明在高温高压高酸性腐蚀条件下其 极化过程由活化极化控制,并且 Tafel 斜率 ba<bc。说 明阴极极化的程度大于阳极,故 110SS 的极化反应由 阴极活化极化控制。

利用 CorShow 软件拟合出的极化曲线参数见表 4,两种材料的  $E_{corr}$ 与其开路电位  $E_{ocp}$ 均发生了一定 的偏差,是因为受到极化作用的影响。925 镍基合金 的自腐蚀电位  $E_{corr}$ =-525.43 mV,与其开路电位相比,

发生了明显的负移。这是因为作为镍基合金,925在 腐蚀介质中表面生成了致密的钝化膜。在利用开路电 位法[16]测定开路电位时,金属钝化过程中,表面的金 属离子与溶液中靠近金属表面的负价离子结合生成 产物膜,使电位向正方向移动很多,这是金属转变为 钝化态时出现的一个普遍现象。当其阳极电位增加至 发生点蚀临界电位时,由于溶液中存在大量活性 Cl-, 能够穿过膜内极小的孔隙, 与钝化膜中金属离子相互 作用,生成可溶性化合物,导致钝化膜破裂发生点蚀, 使电流密度迅速增加,腐蚀速率增加。此时钝化膜得 以清除,腐蚀继续进行,自腐蚀电位继续向负方向移 动。阳极极化曲线后期又出现了一次微小的活化-钝 化转变现象,可能是由于发生了二次钝化,或钝化膜 自身溶解与修复的动态平衡被破坏,导致钝化膜不稳 定造成的,此时钝化膜对基体的保护作用减弱。110SS 的自腐蚀电位与其开路电位变化不大。这是因为当 110SS 发生极化时, 表面生成黏着性差的产物会随着 反应的进行很快消耗掉,不会产生钝化现象,产物膜 对基体的保护作用不大,其 Ecorr 为-746.72 mV,不仅 负于 925 钝化状态时的电位 ( E<sub>ocp</sub>=-301.47 mV ),也 负于 925 经过阴极活化后 (钝化膜得以清除)的 Ecorr (-525.43 mV),此时两种材料的自腐蚀电位差为 221.29 mV。一般认为材料的自腐蚀电位越正或自腐 蚀电流密度越小,材料的耐蚀性能越好<sup>[17-19]</sup>。因此, 在 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、Cl<sup>-</sup>共存的腐蚀环境中,925 更耐蚀。 当两种材质在井下接触时,就会形成以高电位的925 为阴极、低电位的 110SS 为阳极的腐蚀原电池, 925 作为阴极被保护,110SS 作为阳极被加速腐蚀,这 与浸泡腐蚀试验的结果一致。此时整个反应的阳极 过程即为 110SS 的阳极反应, 阴极过程即为 925 的 阴极反应。在高酸性腐蚀介质中, 阳极表面溶解的 金属离子发生次生反应,形成腐蚀产物碳酸亚铁和 硫化亚铁等附着在金属表面, 阴极氢离子会得到电 子析出氢气,氢离子得到电子的过程控制阴极反应 的进行。

#### 表 4 925 与 110SS 在腐蚀环境中的 极化曲线参数拟合结果 Tab.4 Electrochemical parameters of 925 and

110SS under corrosion condition

材质	$E_{\rm corr}/{\rm mV}$	$\frac{J_{\rm corr}}{(\times 10^{-5} \rm A \cdot cm^{-2})}$	$b_{a}/(mV \cdot dec^{-1})$	$b_{c}/(mV \cdot dec^{-1})$
925	-531.26	2.0833	_	174.24
110SS	-746.72	5.4087	62.872	449.8

925 与 110SS 耦接前后的 Evans 腐蚀极化图如图 9 所示。Evans 腐蚀极化图是将实际的极化曲线简化 为直线,从而反映材料电极电位与电流强度之间的极 化关系<sup>[20]</sup>。

单独腐蚀时, 110SS 处于自腐蚀状态 A 点。当



图 9 925 与 110SS 耦接前后的 Evans 腐蚀极化示意图 Fig.9 Evans corrosion polarzation schematic diagrams of alloy 925 before and after coupling with 110SS

110SS 与 925 耦接时,由于两者之间存在较大的电位 差,110SS作为阳极发生阳极极化,电极电位正移, 最终自腐蚀电位由 A 点正移到混合电位 C 点, 自腐 蚀电流密度由  $J_{corr}$  增加至  $J_{couple}$ ,导致腐蚀速率明显 增加。925 与 110SS 耦接后,在不同的面积比下,两 金属的腐蚀驱动力电位差不同,925的自腐蚀电位远 远高于110SS。在活化极化控制下,溶液中的氢离子 在发生氢去极化时,腐蚀电流密度为阴极电流控制, 阴极面积越大, 阴极电流密度越小, 阴极上氢超电压 就越小,氢去极化速度亦越大,结果阳极的溶解速度 增加,这就导致了不同面积比下腐蚀速率的差异。对 于阳极(110SS)而言,当 925 与 110SS 耦接后,耦合 电位会偏离 110SS 的自腐蚀电位向正移,并趋于稳 定。阴阳极面积比越大,耦合电位偏离的值越大。阴 阳极面积比越大, 偶接时阳极 110SS 的电偶电流密度 越大,110SS 被迅速阳极极化,整体耦合电位迅速正 向偏移,此时925受到阴极极化耦合电位又逐渐负移 趋于稳定。阴阳极面积比越小, 偶接瞬间阳极的电偶 电流密度越小,110SS 受到弱的阳极极化作用,耦合 电位正移很少,稳定在110SS的自腐蚀电位附近。因 此阴阳极面积比的增加,导致了电偶腐蚀速率以及电 偶腐蚀效应的增加。

## 3 结论

在模拟高温高酸性高 CF浓度的地层水中,将 925 与 110SS 分别以 1:1、1:5、1:10、1:30 四种不同的面积比耦接,结果表明:

1) 井下工具用 925 镍基合金在腐蚀介质中耐蚀 性能很好,但与 110SS 耦接会使 110SS 发生极严重腐 蚀,应避免两者在井下的接触,或者选用自腐蚀电位 差相近的材料使用。

2)发生电偶腐蚀的驱动力是 925 和 110SS 之间 的自腐蚀电位差,电位差的不同,导致了腐蚀速率的 差异。 3) 在文中所给的四种面积比下, 阴阳极面积比 越大, 即阳极面积越小, 电偶腐蚀速率和电偶腐蚀效 应越大。在井下应避免大阴极小阳极结构的腐蚀原电 池出现。

4) 镍基合金 925 与抗硫油管 110SS 偶接后的电 偶效应对材料在腐蚀环境中的腐蚀进程有显著影响, 对腐蚀产物和腐蚀机理没有明显影响。

#### 参考文献:

- 张瑞,李夯,李大朋,等. 高温高酸性环境下镍基合金 718 与异种金属偶接的电偶腐蚀行为[J]. 材料保护, 2017, 50(6): 27-30.
   ZHANG R, L H, LI D P, et al. Galvanic Corrosion Behavior of Nickel Base Alloy 718 Coupled with Dissimilar Metals in High Temperature and High Acid Environment[J]. Materials Protection, 2017, 50(6): 27-30.
- [2] 赵华莱,姜放,李珣,等.酸性油气井油套管及封隔器 材料电偶腐蚀行为[J].天然气工业,2008,28(11): 114-116.

ZHAO H L, JIANG F, L X, et al. Galvanic Corrosion Behavior of Casing and Packer Materials in Acid Oil and Gas Wells[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(11): 114-116.

- [3] OKONKWO O B, MING Hong-liang, ZHANG Zhiming, et al. Microscale Investigation of the Correlation between Microstructure and Galvanic Corrosion of Low Alloy Steel A508 and Its Welded 309/308L Stainless Steel Overlayer[J]. Corrosion Science, 2019, 154: 49-60.
- [4] WEI Jie, DONG Jun-hua, ZHOU Yang-tao, et al. Inflfluence of the Secondary Phase on Micro Galvanic Corrosion of Low Carbon Bainitic Steel in NaCl Solution[J]. Materials Characterization, 2018, 139: 401-410.
- [5] 田永芹, 常炜, 胡丽华, 等. APIX65、316L 不锈钢及 Inconel 625 间电偶腐蚀风险研究[J]. 表面技术, 2016, 45(5): 128-134.

TIAN Y Q, CHANG Y, HU L H, et al. Study on Galvanic Corrosion Risk between APIX65, 316L Steel and INCONEL 625[J]. Surface Technology, 2016, 45(5): 128-134.

- [6] 赵华莱.油套管及封隔器用钢在封隔液环境下的电偶腐蚀行为研究[D].成都:四川大学,2007.
   ZHAO H L. Galvanic Corrosion Research of Production Tubing, Production Casing and Packer Materials in packer Fluid[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.
- [7] 张文毓. 电偶腐蚀与防护的研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32(12): 51-56.
  ZHANG W Y. Research Progress of Galvanic Corrosion and Protection[J]. Total Corrosion Control, 2018, 32(12): 51-56.

- [8] 邓洪达,曾顺鹏.复合管 X65/316L 在模拟产出水中的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(8): 727-730.
   DENG H D, ZENG S P. Galvanic Corrosion Behavior of Composite pipe X65/316L in Simulated Produced Water[J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(8): 727-730.
- [9] 任科, 戴亚洲. Q245R 与不锈钢在 3.5%NaCl 溶液中的 电偶腐蚀行为研究[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(8): 70-74.
  REN K, DAI Y Z. Galvanic Corrosion Behavior of Q245R and Stainless Steel in 3.5% NaCl Solution[J]. Total Corrosion Control, 2017, 31(8): 70-74.
- [10] 宗广霞,张洋,方军锋,等. X65/316L 电偶对在模拟油 田产出水中的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(7): 589-592.
  ZONG G X, ZHANG Y, FANG J F et al. Galvanic Corrosion Behavior of X65/316L Couple in Simulated Oilfield Produced Water[J]. Corrosion and Protection, 2012, 33(7): 589-592.
- [11] CHOIA Kyoung Joon, YOOB Seung Chang, KIM Seunghyun. Microstructural Evolution and Corrosion Behavior of Thermally Aged Dissimilar Metal Welds of Low-alloy Steel and Nickel-based Alloy[J]. Corrosion Science, 2019, 153: 138-149.
- [12] LIYAKHATH A S, SUNIL K T. Studies on Galvanic Corrosion of Tri-metallic Joint of Steels in Sodium Chloride Solution[J]. Science Direct, 2019, 15: 57-62.
- [13] 林玉珍,杨德钧.腐蚀和腐蚀控制原理[M].北京:中国石化出版社,2007:133-135.
  LIN Y Z, YANG D J. Corrosion and Corrosion Control Principle[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007: 133-135.
- [14] 王准章. 超临界 CO<sub>2</sub>环境中 N80 碳钢与 13Cr 不锈钢 电偶腐蚀及缓蚀机理[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
  WANG Z C. Galvanic Corrosion and Inhibition Mechanism of N80 Carbon Steel-13Cr Stainless Steel under Supercritical CO2 Conditions[D]. Wuhan: Huazhong Uni-

versity of Science and Technology, 2019.
[15] 张天宇,何宇廷,张腾,等.异种结构材料电偶腐蚀及防护技术的研究现状及发展方向[J].装备环境工程,2020,17(5):40-46.
ZHANG T H, HE Y T, ZHANG T, et al. Research Status and Development Direction of Galvanic Corrosion and Protection Technology for Dissimilar Structural Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(5): 40-46.

 [16] 陈日辉,周林,张聪,等.异种金属管道耦接引起的电位分布研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2019,31(5): 483-488.

CHEN R H, ZHOU L, ZHANG C, et al. Potential Distributions for Coupling of Disimillar Metallic Pipes in 3.5%

NaCl Solution[J]. Corrosion science and protection technology, 2019, 31(5): 483-488.

[17] 赵国仙, 祝恒倩. 镍基合金 718 在 H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>环境中的腐 蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(3): 291-296.

ZHAO G X, ZHU H Q. Corrosion Behavior of Nickel-based Alloy 718 in Simulated H2S/CO2 Environments[J]. Corrosion science and protection technology, 2019, 31(3): 291-296.

[18] ZHANG Q, ZHANG C, ZHANG Z, et al. Galvanic Corrosion Behavior of Dissimilar Casing Steels in High Sulfur Containing Gas Well[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 108: 104320.

[19] 罗睿, 余世杰, 袁鹏斌, 等. 316L 与 X65 在模拟流动地 层水中电偶腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 162-167.
LUO R, YU S J, YUAN P B, et al. Galvanic Corrosion Behavior of 316L and X65 in Simulated Flowing Forma-

tion Water[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(4): 162-167.
[20] 曹楚南. 腐蚀电化学原理(第三版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

CAO C N. Principles of Electrochemistry of Corrosion[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.