

引用格式:任颖惠,海茹鹰,杨智坤,等. Q235钢和N80钢在不同腐蚀环境中的腐蚀行为[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2026, 45(1): 30-37. [REN Y H, HAI R Y, YANG Z K, et al. The corrosion behavior of Q235 steel and N80 steel in different corrosive environments[J]. Journal of Yan'an University(Natural Science Edition), 2026, 45(1): 30-37.] DOI: 10.13876/J.cnki.ydnse.250067

Q235钢和N80钢在不同腐蚀环境中的腐蚀行为

任颖惠,海茹鹰,杨智坤,刘展,白甜甜,周宇昇

(延安大学石油工程与环境工程学院,陕西延安716000)

摘要:为研究Q235钢和N80钢在油田典型腐蚀环境(近酸性采出水、近中性NaCl溶液、弱碱性自来水)中的腐蚀行为差异,为材料选型与防护方案提供依据,通过腐蚀失重实验、电化学极化曲线和阻抗谱研究了两种钢材的腐蚀机理与性能差异。腐蚀失重结果表明,Q235钢和N80钢均在近酸性采出水中腐蚀速率较高,而N80钢因含Cr、Ni等合金元素表现出更优耐蚀性。电化学结果表明,N80钢的自腐蚀电位比Q235钢更正,电荷转移电阻更高。在酸性、高Cl⁻油田采出水环境中,N80钢更适合作为结构材料,但仍需采取防护措施,其中涂层保护和表面改性是两种有效的防腐措施。此外,环境控制和使用缓蚀剂也是重要的防腐策略。

关键词:Q235钢;N80钢;油田采出水;NaCl溶液;腐蚀行为

中图分类号:TE988.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-602X(2026)01-0030-08

随着石油工业的不断发展,大部分油田开采进入中后期,油田设备和管道的腐蚀问题日趋严重。钢材作为油田开采过程中应用最为广泛的材料之一,其腐蚀行为一直是腐蚀科学与工程领域的重要研究课题^[1]。Q235钢和N80钢是两种常用的钢材,Q235钢具有良好的塑性和韧性,被广泛应用于油田的地面设施和部分地下管道;N80钢作为一种高强度管线钢,因其优异的强度和韧性,被广泛应用于长输油气管道中^[2-4]。然而,这两种钢材在不同腐蚀环境中的腐蚀行为存在显著差异,深入研究其腐蚀机理对于优化油田设备选材、延长设备使用寿命以及降低油田生产成本具有重要意义^[5-7]。

在实际应用中,油田设备和管道面临极其复杂的腐蚀环境,其腐蚀行为受到多种关键因素的综合影响,包括复杂的化学成分(如高盐度、溶解气体CO₂/H₂S、有机物)、pH值(从酸性到碱性)、温度、流速以及微生物活动等^[8-12]。近年来,国内外学者对Q235钢和N80钢的腐蚀行为已开展了大量研究,为

理解其腐蚀机制奠定了基础^[13-17]。然而,现有研究大多集中在单一或简化的腐蚀介质环境中^[18-19],并不能充分反映实际油田环境中多种腐蚀因素(尤其是不同pH环境)的协同作用及其对材料腐蚀行为的系统性影响。这种研究现状的局限性使得针对特定复杂工况(如弱酸性采出水、近中性盐溶液、弱碱性环境)的材料腐蚀性能评估和选材优化缺乏足够依据。

针对上述局限,本研究通过腐蚀失重实验定量评价Q235钢和N80钢两种钢材的平均腐蚀速率;结合电化学极化曲线和阻抗谱分析技术,深入解析其在不同环境中的电化学腐蚀动力学特征与界面反应过程;并通过腐蚀形貌观察,表征局部腐蚀倾向及腐蚀产物膜特征。通过上述方法的综合运用,系统揭示Q235钢和N80钢在典型油田多因素耦合环境下的腐蚀机理与性能差异,从而为油田设备的科学选材和针对性腐蚀防护措施的制定提供可靠的理论与实验依据。

收稿日期:2025-07-08

基金项目:陕西省大学生创新训练计划项目(D2023128)

作者简介:任颖惠(1988—),女,讲师,博士,主要从事油气管道腐蚀行为研究。E-mail:627493108@qq.com

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验材料采用Q235钢和N80钢,其化学成分如表1所示。

表1 Q235钢和N80钢的化学成分

质量分数/%	元素								
	C	Si	P	S	Mn	Nb	Mo	Ni	Fe
Q235	0.18	0.3	0.04	0.04	0.32	/	/	/	剩余
N80	0.26	0.22	0.010 1	0.014 5	1.21	0.001 6	0.021	0.023	剩余

注:“剩余”是材料化学成分表的常规表示方法,指除表格中明确列出的所有元素外,剩余的成分主要为基体元素—铁(Fe)。

延安地区某采油厂油田采出水的具体成分如表2所示,总矿化度为35 642.17 mg/L,水型为氯化

1.2 腐蚀介质及实验条件

实验选用了3种腐蚀介质:延安地区某采油厂油田采出水、延安地区自来水和NaCl溶液。这3种介质在成分和性质上具有显著差异,能够从不同角度反映Q235钢和N80钢的腐蚀特性。

钙型,pH为6.52,属于弱酸性腐蚀介质。

表2 延安地区某采油厂油田采出水成分

成分	K ⁺ +Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	S ²⁻
含量/(mg/L)	7 384.52	4 040.06	1 385.67	73.26	22 243.10	457.65	51.55

自来水是一种常见的腐蚀介质,其成分相对简单。采用配位滴定法测得延安地区自来水的总硬度在13°左右,根据天然水硬度分类标准可知延安地区自来水属于高硬度水,并且通过pH计测得pH=7.82,因此延安地区自来水属于弱碱性腐蚀介质。

NaCl溶液是一种典型的电解质溶液,本次实验采用质量分数为10%的NaCl溶液,设定10% NaCl主要基于以下考虑:1)API RP 14E等标准建议^[20]使用3.5%~15% NaCl评估油管钢的腐蚀行为,10%浓度位于该范围内,具有工程可比性;2)实际测试的延安地区某油田采出水的成分中Cl⁻含量是22 243.10 mg/L,相当于Cl⁻浓度是2.22%,而设定10% NaCl可提供更高的腐蚀驱动力,模拟更苛刻的腐蚀环境,确保在实验周期内获得可测量的腐蚀速率数据。通过pH计测得pH=7.14,属于近中性腐蚀介质。

所有实验均在25±1 °C、常压、50±5%湿度下进行,温度通过恒温水浴控制,在实验室开放体系下进行,环境湿度由空调和除湿机调节,以排除额外变量干扰。

1.3 腐蚀失重实验

实验采用尺寸为76 mm×13 mm×1.5 mm的Q235钢片和尺寸为50 mm×10 mm×3 mm的N80钢片,在距试样边缘2 mm处有直径3 mm的悬挂孔。用非金属线悬挂后固定在密封容器内,浸泡实验时间为3、7和10 d,实验温度为室温。实验之前,试样需进行打磨、无水乙醇除水、丙酮除油、并放入干燥器中

干燥。实验结束后,采用机械法和化学除锈法清除所有的腐蚀产物,先用自来水后用去离子水清洗,再用丙酮擦洗、滤纸吸干表面、放在干燥器中干燥,使用精度为0.000 1 g的电子天平称重,计算腐蚀前后的质量差。

1.4 电化学腐蚀实验

本实验的电化学测试采用CHI660E电化学工作站(上海辰华仪器有限公司),测试体系采用三电极体系,铂片为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,工作电极采用自制的Q235钢和N80钢电极,尺寸为10 mm×10 mm×2 mm,试样经铜导线点焊,环氧树脂密封(图1),实验前将工作电极用金相砂纸由160#逐级打磨至2000#,经无水乙醇擦拭,去离子水冲洗后,冷风吹干备用。

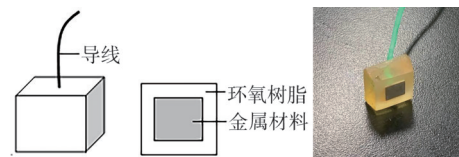


图1 工作电极示意图和实物图

电化学测试前进行开路电位测试,待开路电位稳定后,进行交流阻抗及动电位极化曲线测试。交流阻抗测试频率为10⁻¹~10⁵ Hz,交流信号激励幅值5 mV。动电位极化曲线自阴极向阳极扫描,电位范围为-1.5~1.25 V,扫描速率为0.005 mV/s。本文所有电位均相对于SCE。为了得到更可靠的实验结果,每组电化学实验至少进行3次平行实验。

2 结果与分析

2.1 腐蚀失重

由于在实际工业场景中,管线钢可能长期全部浸泡在液体介质中,比如管道、储罐等设备在海水、酸性溶液或工业废水中的腐蚀环境,也可能部分浸入介质中,气/液相交界长期保持在固定位置,比如海洋飞溅区和潮差区的腐蚀环境。所以为了更真实地模拟实际工况的腐蚀环境,本次腐蚀失重实验设计了全浸实验和半浸实验,从而全面地评估 Q235 钢和 N80 钢在不同环境下的耐腐蚀性能,为材料选择和防腐设计提供更准确的依据。

表 3 Q235 钢和 N80 钢在全浸实验腐蚀损失质量表

材料	腐蚀介质	腐蚀时间/h	腐蚀前质量/mg	腐蚀后质量/mg	腐蚀损失质量/mg	腐蚀速率/(mm/a)
Q235 钢	自来水	240	10 400.5	10 365.9	34.6	0.080 2
	10%NaCl 溶液	240	10 637.8	10 608.3	29.5	0.066 9
	油田采出水	240	10 590.7	10 543.1	47.6	0.108 4
N80 钢	自来水	240	10 585.0	10 558.3	26.7	0.101 4
	10%NaCl 溶液	240	10 523.1	10 514.2	8.9	0.034 0
	油田采出水	240	10 541.2	10 505.6	35.6	0.135 9

除此之外,通过对比 Q235 钢和 N80 钢在相同腐蚀介质中腐蚀前后的损失质量,可知 N80 钢较 Q235 钢的损失质量较少,所以得到 N80 钢的耐蚀性能优于 Q235 钢的耐蚀性能。主要是由于 N80 钢中加入了 Ni、Mo 等合金元素,这些元素在钢表面能形成致密的钝化膜,而 Q235 钢缺乏这些元素,形成的腐蚀产物结构疏松。

图 2 为 Q235 钢和 N80 钢分别浸泡 72、168、240 h 后的表面腐蚀形貌图。从图中可以看出,Q235 钢和 N80 钢在腐蚀前都表面光滑,在介质中浸泡一段时间之后发生了不同程度的腐蚀。Q235 钢在弱酸性的油田采出水腐蚀介质中,钢片在第 10 d 表面出现了明显的点蚀现象,由于油田采出水中含有的 Cl⁻ 是一种强腐蚀性离子,可以吸附在金属表面,破坏表面的钝化膜,形成局部腐蚀电池,这些局部腐蚀电池会加速点蚀坑的形成和发展。在弱碱性的自来水腐蚀介质中,第 10 d 钢片表面形成赤红色腐蚀产物(Fe₂O₃)膜,这种保护膜不均匀且存在缺陷,导致腐蚀性介质可以向腐蚀产物层下扩散,形成闭塞腐蚀电池效应,随着时间增长,部分膜脱落,露出黑色内层。在近中性的 NaCl 腐蚀介质中,从第 3 d 开始钢片表面出现黑色腐蚀产物(Fe₃O₄),整个腐蚀过程中表现为均匀腐蚀形态。N80 钢在弱酸性的油田采出水腐蚀介质中,钢片在第 10 d 表现出点蚀现象,

2.1.1 全浸实验

表 3 为 Q235 钢和 N80 钢分别在自来水、10% 氯化钠和油田采出水腐蚀介质中全浸状态的腐蚀损失质量结果。从表 3 可以看出,Q235 钢和 N80 钢均在油田采出水腐蚀介质中的腐蚀速率最大,因为从表 2 可知油田采出水中 K⁺+Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻ 含量较高,形成的氯化物加速了腐蚀速率。其次是自来水介质,10% NaCl 溶液介质中腐蚀速率最小。所以得到 Q235 钢和 N80 钢都在弱酸性腐蚀介质中的腐蚀速率大于弱碱性腐蚀介质中的腐蚀速率,弱碱性腐蚀介质中的腐蚀速率大于近中性腐蚀介质中的腐蚀速率。

主要是由于 Cl⁻ 破坏了 Q235 钢表面的钝化膜,形成局部腐蚀坑。这些腐蚀坑会进一步扩展,导致材料的局部减薄。在弱碱性的自来水腐蚀介质中,N80 钢表面出现点蚀,表面表现为麻坑状腐蚀形貌。在近中性的氯化钠腐蚀介质中,发生均匀腐蚀,腐蚀速率较低,发生氧化还原反应,生成黑色的腐蚀产物。

通过对比 Q235 钢和 N80 钢在相同腐蚀介质中的腐蚀形态,可知 Q235 钢的耐蚀性能劣于 N80 钢。Q235 钢的合金元素含量(如 Mn、C 等)较低,无法形成有效的耐腐蚀合金相或致密腐蚀产物膜;而 N80 钢(高强度管线钢)通过适当的合金化(如添加少量 Ni、Mo 等),提升了基体的电化学稳定性及腐蚀产物的保护性,从而降低了腐蚀速率。

2.1.2 半浸实验

表 4 为 Q235 钢和 N80 钢在自来水、10% NaCl 溶液和油田采出水腐蚀介质中半浸状态的腐蚀损失质量结果。对比不同材料管线钢在相同腐蚀介质中腐蚀前后损失质量,可知 N80 钢较 Q235 钢的损失质量较少,所以可知 N80 钢的耐蚀性能优于 Q235 钢的耐蚀性能。

图 3 为 Q235 钢和 N80 钢分别浸泡 72、168、240 h 后的表面腐蚀形貌图。综上可以看出,半浸状态,Q235 钢和 N80 钢都在油田采出水腐蚀介质中的腐蚀速率最大,挂片在腐蚀第 3 d 开始在水线以下就发

生了明显的腐蚀现象,随着时间增长,腐蚀区域向上扩散,水线附近腐蚀最严重。因为水线附近的氧气浓度差异导致了氧浓差电池的形成,水线以下的区域氧气浓度较低,而水线以上的区域氧气浓度较高,这种差异使得水线附近的金属表面形成局部腐蚀电池,加速了腐蚀过程。同时,半浸状态下,水线附近的湿度梯度较大,水线以下的区域湿度较高,而水线以上的区域湿度较低,湿度差异导致了水分蒸发和凝结现象,水线附近的湿度变化使得局部腐蚀反应的速率增加,进一步加剧了腐蚀。Q235钢和N80钢在10% NaCl腐蚀溶液中的腐蚀速率最小,从腐蚀形貌图可以看出主要发生的是均匀腐蚀和局部腐蚀形态,腐蚀产物层中的裂纹和孔隙为腐蚀性介质提供了通道,促进了局部腐蚀的发展。在弱碱性自来水介质中的腐蚀速率介于弱酸性油田采出水和中性氯化钠之间,主要发生的是均匀腐蚀形态。

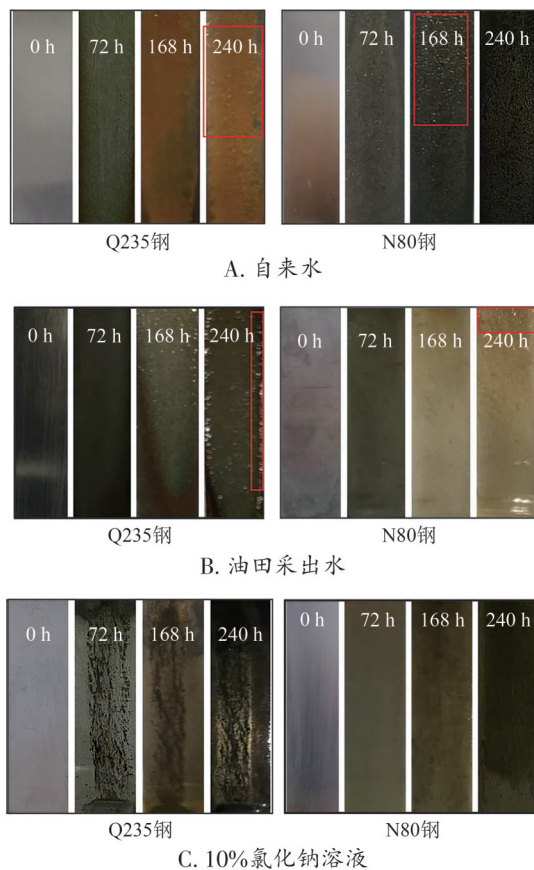


图2 全浸条件下的腐蚀形貌图

对比表3和表4可以得到相同材质的管线钢,在同一腐蚀介质中,半浸状态的腐蚀速率远远大于全浸状态的腐蚀速率,由于半浸状态下,管线钢表面与腐蚀介质之间的相互作用更为复杂,导致腐蚀过程更加剧烈。主要是因为:1)半浸状态下,水线

以下的区域氧气浓度较低,而水线以上的区域氧气浓度较高,这种氧气浓度差异导致了氧浓差电池的形成。水线以下的区域作为阳极,发生氧化反应;水线以上的区域作为阴极,发生还原反应。这种局部电池效应加速了水线附近的腐蚀,并形成明显的腐蚀带。2)半浸状态下,水线以下的区域湿度较高,而水线以上的区域湿度较低。湿度差异导致了水分蒸发和凝结现象。水线附近的湿度变化使得局部腐蚀反应的速率增加,进一步加剧了腐蚀。3)在半浸状态下,水线以下的区域电解质浓度较高,而水线以上的区域电解质浓度较低。电解质浓度的差异导致了电化学反应的不均匀性。水线附近的电解质浓度变化使得局部电化学反应更加剧烈,进一步促进了腐蚀。4)在半浸状态下,水线以下的区域和水线以上的区域形成了不同的电化学环境,水线附近的电化学反应差异导致了局部腐蚀电池的形成。水线以下的区域和水线以上的区域之间的电位差使得局部腐蚀反应更加剧烈,进一步加剧了腐蚀。因此,在实际应用中,应特别注意水线附近的腐蚀防护,采取有效的防腐措施。

表4 Q235钢和N80钢在半浸实验腐蚀损失质量表

材料	腐蚀介质	腐蚀时间/h	腐蚀前质量/mg	腐蚀后质量/mg	腐蚀损失质量/mg	腐蚀速率/(mm/a)
Q235钢	自来水	240	10 199.4	10 132.6	66.8	0.315 9
	10% NaCl 溶液	240	10 176.2	10 123.1	53.1	0.251 7
	油田采出水	240	10 497.4	10 425.1	72.3	0.332 2
N80钢	自来水	240	10 665.2	10 665.2	40.3	0.304 2
	10% NaCl 溶液	240	10 610.0	10 584.6	25.4	0.192 7
	油田采出水	240	10 653.7	10 502.1	51.6	0.390 6

2.2 极化曲线

图4为Q235钢和N80钢在不同腐蚀介质中的电化学极化曲线,图中*i*为自腐蚀电流密度,*E*为自腐蚀电位。由图可以看出两个极化曲线都没有明显钝化区域,阳极和阴极的极化曲线形状大体一致,趋势相同,在3种腐蚀介质中的极化行为相似。从图4A可以看出Q235钢在10%NaCl腐蚀介质中的自腐蚀电位最正,表明腐蚀速率最小,耐腐蚀性能最强,可能是由于Q235钢表面形成了一层相对稳

定的氧化膜,虽然 NaCl 溶液中的氯离子(Cl^-)会促进腐蚀,但这种氧化膜在近中性溶液中相对稳定,不会导致电位显著降低,从而有效减缓腐蚀速率。Q235 钢在油田采出水腐蚀介质中的自腐蚀电位最负,说明在弱酸性介质中的腐蚀速率最大,耐蚀性能最弱。自来水中的腐蚀速率介于两者之间。从图 4B 可以看出 N80 钢在 NaCl 腐蚀介质中的自腐蚀电位最正,表明腐蚀速率最小,耐蚀性能最强,因为 N80 管线钢含有一定量的 Ni 元素,这些元素可以促进材料表面形成致密的氧化膜,使得腐蚀速率降低。在油田采出水腐蚀介质中的自腐蚀电位最负,说明 N80 钢在弱酸性介质中的腐蚀速率最大,耐蚀性能最弱,因为油田采出水中 Cl^- 含量较多, Cl^- 在保护膜表面的薄弱处的吸附,形成的氯化物发生水解,产生酸性环境,从而腐蚀速率加快。在自来水介质中的自腐蚀电位介于油田采出水和 NaCl 介质之间。

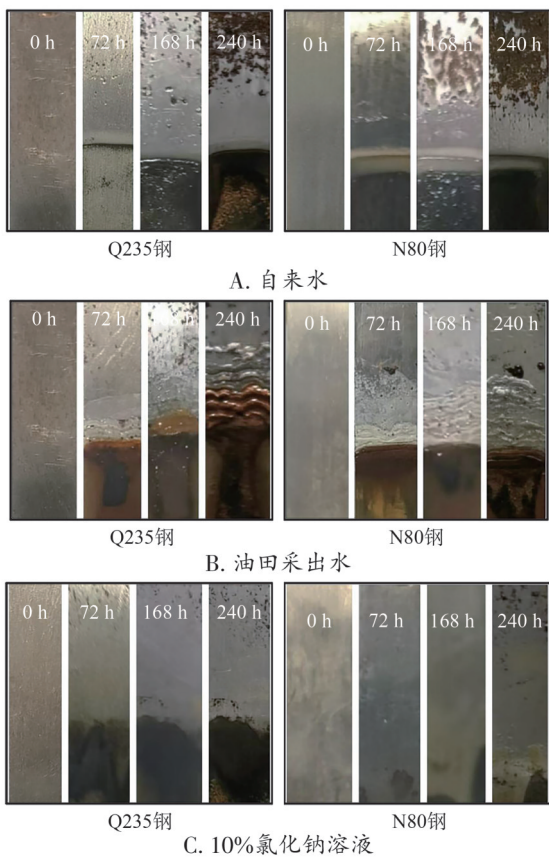


图 3 半浸条件下的腐蚀形貌图

对比图 4A 和 B 曲线,可以发现两种钢均在 10% NaCl 溶液中的自腐蚀电位最正,在油田采出水中的自腐蚀电位最负。Q235 钢在 10% NaCl 溶液中的自腐蚀电位为 -0.847 V ,在自来水中的自腐蚀电位为 -0.960 V ,在油田采出水中的自腐蚀电位为 -1.046 V ;

N80 钢在 10% NaCl 溶液中的自腐蚀电位为 -0.803 V ,在自来水中的自腐蚀电位为 -0.925 V ,在油田采出水中的自腐蚀电位为 -1.031 V 。从而可以得到在相同腐蚀介质中,N80 钢的自腐蚀电位都比 Q235 钢的自腐蚀电位更正。因此,N80 钢的耐蚀性能更优于 Q235 钢。

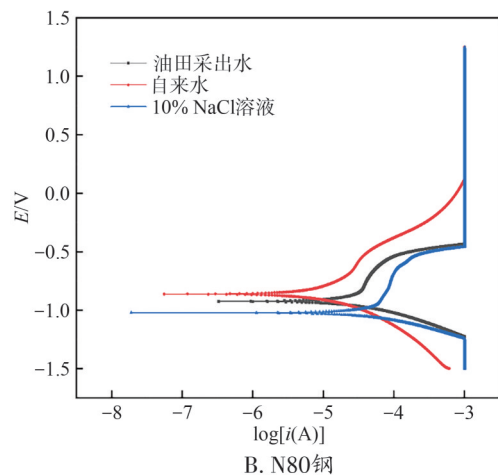
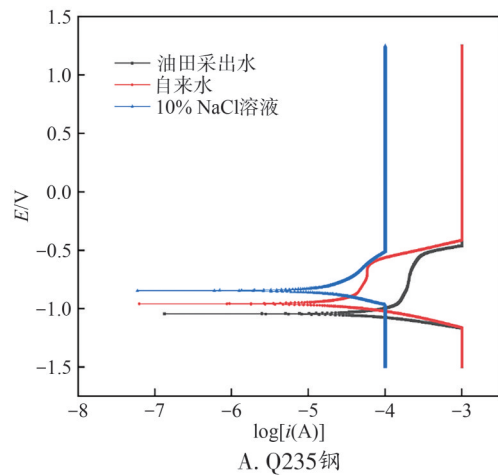


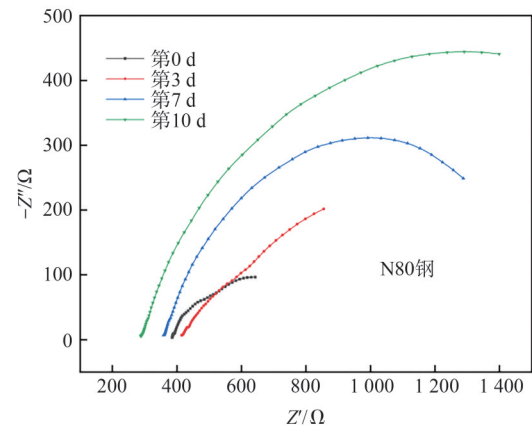
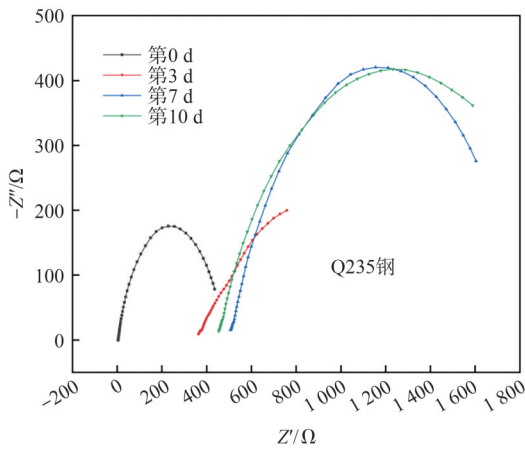
图 4 电化学极化曲线

2.3 阻抗谱

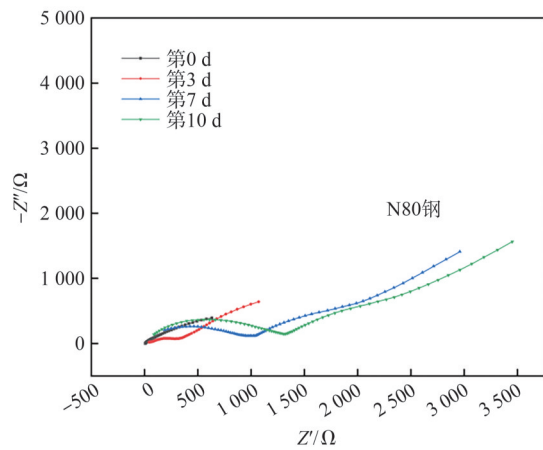
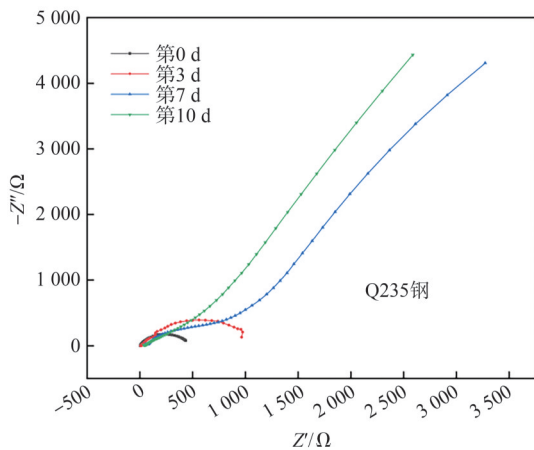
图 5 为 Q235 钢和 N80 钢在不同腐蚀介质中的电化学阻抗谱。由 Nyquist 图可知,两种钢在弱碱性自来水介质中随着时间的推移(0~10 d),容抗弧的直径都在逐渐增大,表明电荷转移电阻(R_{ct})逐渐增加,腐蚀速率逐渐减小。低频区的半圆逐渐增大,表明在低频范围内,电极过程的阻抗逐渐增加,随着时间的推移,氧化膜逐渐增厚,导致阻抗值增加,降低腐蚀速率。在弱酸性油田采出水介质中,两种钢的容抗弧直径都较小,表明电荷转移电阻(R_{ct})较小,腐蚀速率较快。低频区的直径逐渐增大,表明在低频范围内,电极过程的阻抗逐渐增加,可能是

由于腐蚀产物膜的形成和增厚,由于酸性介质的腐蚀性较强,整体阻抗值仍然较低。在近中性的 NaCl 溶液介质中,容抗弧的直径较大,表明电荷转移电阻(R_{ct})较大,腐蚀速率较小。低频区的半径逐渐增大,表明在低频范围内,电极过程的阻抗逐渐增加,可能是由于腐蚀产物膜的形成和增厚所致。在近

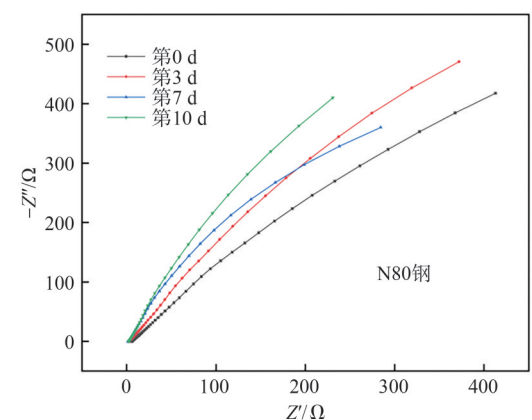
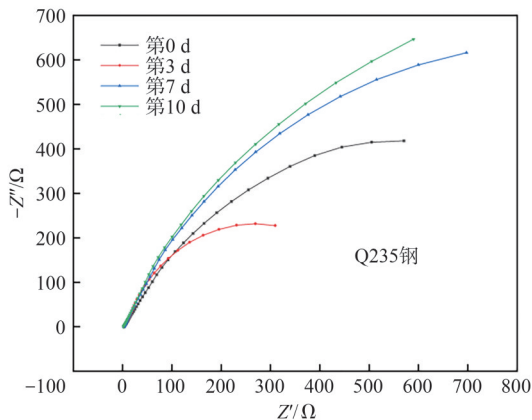
中性 NaCl 溶液中,两种钢可能会受到局部腐蚀(如点蚀)的影响,然而,随着时间的推移,可能会形成一层保护性氧化膜,从而增加阻抗值。由于 NaCl 溶液的 pH 值接近中性,腐蚀速率相对较低,因此整体阻抗值较高,表明在近中性 NaCl 溶液中,Q235 钢和 N80 钢都表现出稳定的耐蚀行为。



A. 自来水



B. 油田采出水



C. 10%氯化钠溶液

图 5 不同腐蚀介质中的 Nyquist 图

对比 N80 钢和 Q235 钢在 3 种腐蚀介质中的 Nyquist 图,可知 N80 钢在 3 种介质中的耐腐蚀性能均优于 Q235 钢。可能是由于 N80 钢具有更好的合金成分和微观结构,从而在腐蚀介质中形成更稳定的保护性氧化膜。在弱酸性油田采出水腐蚀介质中,两种钢材的腐蚀速率均较快,但 Q235 钢的腐蚀速率可能更快。在近中性氯化钠溶液中,两种钢材的腐蚀速率均较小,但 N80 钢的耐腐蚀性能更优。随着时间的推移,两种钢材在弱碱性自来水介质中的腐蚀速率均减小,这可能是由于保护型氧化膜的形成。然而,N80 钢的这种变化更为显著,表明其在这种介质中的耐腐蚀性能提升更快,与腐蚀失重实验结果相一致。

3 防腐策略

Q235 钢与 N80 钢在油田典型腐蚀环境(弱酸性的油田采出水、近中性的 NaCl 溶液、弱碱性的自来水)中的腐蚀性能差异的研究结果显示:N80 钢虽耐蚀性更优但仍需防护。为确保油田设施的结构完整性与长期服役安全,采取有效的防腐措施至关重要。综合研究结果及工程实践,提出以下关键防腐策略。

1)表面涂层保护法。这是最直接且应用广泛的防护手段。在钢材基体表面涂覆高性能涂层(如环氧树脂、聚氨酯、氟碳涂料或熔结环氧粉末 FBE 涂层),可构筑物理屏障,有效隔绝腐蚀介质(如采出水、 Cl^- 、 H^+)与金属基体的接触。

2)表面改性技术。通过物理或化学方法改变材料表层性质以提升耐蚀性。例如,对 N80 钢进行表面渗氮、渗铬处理;在 Q235 钢表面进行热浸镀锌、电弧喷涂锌/铝及其合金,可形成致密的防护层或牺牲阳极层。激光表面重熔、等离子体电解氧化等技术也能优化表层化学成分与组织结构,显著提高钢材的耐点蚀和均匀腐蚀能力。

3)缓蚀剂应用。当设备处于密闭或循环系统(如管线、处理设备)中,可以通过添加适量的缓蚀剂达到防护的目的。针对酸性和高 Cl^- 环境,应优选适用于酸性介质、抗 Cl^- 干扰的吸附型或成膜型缓蚀剂(如咪唑啉类、季铵盐类或其复配体系),并优化加注浓度和方式。

4)环境参数控制。在条件允许的情况下,可以通过工艺调整降低环境腐蚀性。例如,对油田采出水进行除氧处理(如真空脱气、化学除氧剂),严格

控制溶解氧含量;或者调节系统 pH 值至中性或弱碱性(需考虑结垢风险);或对含盐溶液进行适度稀释或脱盐处理,均可显著减缓腐蚀速率。

4 结论

1)pH 值与 Cl^- 浓度是影响两种钢材腐蚀行为的关键因素。其中,弱酸性油田采出水(含高浓度 Cl^-)对两种钢的腐蚀作用最显著,尤其是 Q235 钢在此环境下腐蚀速率最高(均匀腐蚀与局部腐蚀协同加剧),而 N80 钢因合金元素(如 Mn、Si 或少量合金化元素)形成的致密钝化膜,有效抑制了 H^+ 与 Cl^- 的渗透,表现出更好的耐蚀性。

2)N80 钢的耐蚀性能显著优于 Q235 钢,无论全浸还是半浸状态,N80 钢的腐蚀速率均明显低于 Q235 钢。电化学测试进一步印证了这一结论:N80 钢的自腐蚀电位更正(电化学稳定性更高)、电荷转移电阻(R_{ct})更大(腐蚀介质与基体的界面反应更难进行),其根源在于合金化提升了基体的抗腐蚀能力。

3)同一材质在半浸状态下的腐蚀速率远大于全浸状态,说明气-液-固三相界面的复杂作用显著加速了腐蚀进程,需重点关注此类工况的防护。

4)在酸性、高 Cl^- 油田采出水环境中,N80 钢更适合作为结构材料,但仍需进行防护,其中涂层保护和表面改性是两种有效的防腐措施。此外,环境控制和使用缓蚀剂也是重要的防腐策略。

参考文献:

- [1]邓绍云,邱清华.我国钢材生物腐蚀研究现状与展望[J].表面技术,2019,48(8):239-246.
- [2]孙啸.N80 油套管钢腐蚀规律的实验研究及分析[J].天然气与石油,2008,26(4):27-29.
- [3]杨轶轩,阳晋,张威,等.夹杂物对 Q235 钢耐蚀行为的影响[J].工程科学学报,2020,42(S):27-33.
- [4]朱旺,李艳辉,王琪博,等.高温高压复杂水相环境下缓蚀剂的作用特性及机理[J].工程科学学报,2026,48(1):72-86.
- [5]韩霞,杨军,王子明,等.Q235 钢在油田污水处理系统中的垢下腐蚀行为[J].腐蚀与防护,2020,41(2):14-18+64.
- [6]秦术杰,王欣,曹宝珠,等.钢材腐蚀行为的研究进展[J].海南大学学报自然科学版,2023,41(1):104-114.
- [7]苏强.油气管道腐蚀与防护技术研究[J].石化技术,2024,31(12):193-195.
- [8]郑鑫.油田集输管道腐蚀原因分析及防腐蚀技术研究[J].石油和化工设备,2024,27(11):204-206+203.
- [9]邸春雨,崔国森.浅析油气管道腐蚀原因及影响因素[J].石化技术,2024,31(7):69-71.

- [10]李洋,孙寿民,廖锐全. 环境因素对N80钢在模拟油田采出液中腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52(24): 72-76.
- [11]杨涛,许磊,王建春,等. 油套管CO₂腐蚀和防护研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(5): 1134-1144.
- [12]李玉星,刘兴豪,王财林,等. 含杂质气态CO₂输送管道腐蚀研究进展[J]. 金属学报, 2021, 57(3): 283-294.
- [13]谢春霞. 埋地Q235天然气管道外壁腐蚀穿孔特性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
- [14]周龙,鲁骏,丁文珊,等. 不同植酸盐对Q235钢腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(3): 669-678.
- [15]李晓亮. 油田集输管道腐蚀分析与防腐技术研究[J]. 中国设备工程, 2024(8): 202-204.
- [16]陈洁净,鞠虹,孙灿,等. 电化学测试技术在垢下腐蚀中的应用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(3): 207-215.
- [17]胥聪敏. 复配杀菌缓蚀剂对N80钢在SRB环境中微生物腐蚀行为的影响[J]. 材料研究学报, 2025, 39(2): 145-154.
- [18]储宵宵,王珍珍,王伟,等. 盐雾下Q235钢腐蚀特性及基于VIC-3D的拉伸性能研究[J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2025, 43(1): 33-40.
- [19]王鹏杰,宋昱灏,樊林,等. 新型高效咪唑希夫碱缓蚀剂对Q235钢在1 mol/L HCl溶液中的缓蚀作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(1): 59-70.
- [20]API RP 14E: 2018, Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems (5th Ed.)[S], 华盛顿: 美国石油学会, 2018.

[责任编辑 张 香]

The corrosion behavior of Q235 steel and N80 steel in different corrosive environments

REN Yinghui, HAI Ruying, YANG Zhikun, LIU Zhan, BAI Tiantian, ZHOU Yusheng

(School of Petroleum Engineering and Environmental Engineering, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: To study the differences in the corrosion behavior of Q235 steel and N80 steel in typical oilfield corrosive environments (near-acid produced water, near-neutral NaCl solution, and weakly alkaline tap water), so as to provide a basis for material selection and corrosion prevention measures, corrosion weight loss experiments were conducted. This study systematically investigates the corrosion mechanisms and performance disparities between the two steels through corrosion weight-loss experiments, combined with electrochemical polarization curve and impedance spectroscopy analyzes to characterize electrochemical corrosion behavior, supplemented by corrosion morphology observations. The results of the corrosion weight loss experiments showed that the corrosion rate of Q235 steel and N80 steel was relatively high in the near-acid produced water, and N80 steel, due to the presence of alloying elements such as Cr and Ni, exhibited better corrosion resistance. The electrochemical results indicated that the self-corrosion potential of N80 steel was more positive than that of Q235 steel, and the charge transfer resistance was higher. Therefore, in acidic and high Cl⁻ oilfield environments, N80 steel is more suitable as a structural material, but still requires protection. Coating protection and surface modification are two effective corrosion prevention measures. In addition, environmental control and the use of corrosion inhibitors are also important corrosion prevention strategies.

Key words: Q235 steel; N80 steel; oilfield produced water; NaCl solution; corrosion behavior