

# N80 钢在 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 及其混合介质环境中的 腐蚀行为研究

赵国仙<sup>1</sup>, 张思琦<sup>1</sup>, 王映超<sup>1</sup>, 宋洋<sup>2</sup>, 郭梦龙<sup>2</sup>

(1. 西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065;

2. 西安摩尔石油工程实验室股份有限公司, 西安 710065)

**摘要:** 针对 N80 钢油套管在 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 共存环境中的腐蚀问题, 利用失重法与电化学测试方法作对比分析, 并利用扫描电子显微镜以及 X 射线衍射仪对浸泡腐蚀试验后的 N80 钢试样进行研究。结果显示, 浸泡腐蚀试验结果与电化学测试结果一致, 在单独 CO<sub>2</sub> 环境中, N80 钢的自腐蚀电流与平均腐蚀速率最大, 腐蚀最严重; 在单独 H<sub>2</sub>S 环境中, N80 钢试样腐蚀速率最小, 自腐蚀电流最小; 在  $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{H}_2\text{S}}=1:0.3$  时, 主要以 H<sub>2</sub>S 腐蚀为主, 但在表面发生局部产物膜剥落, 此时的腐蚀速率高于纯 H<sub>2</sub>S 条件下的腐蚀速率。研究表明, 在单独 CO<sub>2</sub> 环境中, 腐蚀以阴极反应过程控制为主; 在单独 H<sub>2</sub>S 环境中, 腐蚀以阳极反应过程控制为主; 在  $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{H}_2\text{S}}=1:0.3$  时, 腐蚀以阴极反应过程控制为主。

**关键词:** 油套管; CO<sub>2</sub> 腐蚀; H<sub>2</sub>S 腐蚀; N80 钢; 腐蚀速率; 孔蚀

中图分类号: TG174.3

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.03.002

## Study on Corrosion Behavior of N80 Steel in CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S and Mixed Medium Environment

ZHAO Guoxian<sup>1</sup>, ZHANG Siqi<sup>1</sup>, WANG Yingchao<sup>1</sup>, SONG Yang<sup>2</sup>, GUO Menglong<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Xi'an Maurer Petroleum Engineering Laboratory Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Aiming at the corrosion problem of N80 steel oil casing in CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S coexistence environment, the weight loss method and electrochemical test method are compared and analyzed, and the N80 steel samples after immersion corrosion test are studied by scanning electron microscope and X-ray diffraction. The results show that the immersion corrosion test results are consistent with the electrochemical test results. In the CO<sub>2</sub> environment, the self corrosion current and average corrosion rate of N80 steel is the largest and the corrosion is the most serious. In H<sub>2</sub>S environment, N80 steel sample has the lowest corrosion rate and the lowest self corrosion current. When  $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{H}_2\text{S}}=1:0.3$ , it is mainly H<sub>2</sub>S corrosion, but local product film peeling occurs on the surface. At this time, the corrosion rate is lower than that under H<sub>2</sub>S. This shows that in the CO<sub>2</sub> environment, the corrosion is mainly controlled by the cathode reaction process; In H<sub>2</sub>S environment, the corrosion is mainly controlled by cathode reaction process; When  $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{H}_2\text{S}}=1:0.3$ , the corrosion is mainly controlled by cathode reaction process.

**Key words:** oil casing; CO<sub>2</sub> corrosion; H<sub>2</sub>S corrosion; N80 steel; corrosion rate; pitting

## 0 前 言

随着油田开发的深入,管道服役工况越来越复杂,地层中的 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 对油套管造成的腐蚀也日趋严重,由此导致的失效会造成油田经济损失甚至安全事故。其失效形式主要为腐蚀导致壁厚减薄,或由点蚀造成管道穿孔、刺穿等<sup>[1]</sup>。油套管是维持油气井运行的生命线,其安全服役对油田的生产具有重大意义<sup>[2]</sup>。当前,油井套管破损已经成为制约油田稳产的主要因素之一,因此,油套管腐蚀防护仍是油田开发的一项重大技术难关,是急需解决的生产技术问题。

CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 溶于水后,对钢铁具有较强的腐蚀性,因此,CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 腐蚀是石油行业中最常见的腐蚀类型,也是目前腐蚀与防护领域

重点关注的内容<sup>[3-4]</sup>。油套管在不同 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 分压下的腐蚀程度不同,这主要与其表面生成的腐蚀产物有关,表面成膜的状况直接影响到腐蚀速率与腐蚀类型<sup>[5-6]</sup>。某油田采用的油套管材质为 N80,其服役过程中在不同 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 分压环境中产生了不同程度的腐蚀。为了探究管道的腐蚀原因,本研究利用浸泡腐蚀试验对该材质在模拟现场环境条件下进行试验研究。同时,对 N80 钢的电化学性能进行测试,以期为油田现场防腐提供技术参考。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料

试验材料选用现场的 N80 套管钢,其化学成分见表 1。

表 1 N80 钢的化学成分

<i>w</i> (C)	<i>w</i> (Si)	<i>w</i> (Mn)	<i>w</i> (P)	<i>w</i> (S)	<i>w</i> (Ni)	<i>w</i> (Cr)	<i>w</i> (Mo)	<i>w</i> (Cu)
0.26	0.27	1.30	0.015	0.005	0.04	0.09	0.006	0.094

### 1.2 试验条件及方法

模拟试验温度为 60 ℃,试验时间为 168 h。浸泡腐蚀试验前,将试样尺寸为 50 mm×10 mm×3 mm 的挂片用 320#、600# 及 1 200# 砂纸逐级打磨到表面粗糙度 ≤1.6 μm。然后用丙酮清洗除油,冷风吹干,测量其尺寸并精确至 0.01 mm,称重并精确至 0.1 mg;之后将试样相互绝缘安装在特制的工装上,放入高温高压釜内的腐蚀介质中。通入高纯氮气(99.99%)为腐蚀介质除氧,

除氧时间为 2 h,并设定工作温度。除氧后通入试验要求气体,试验条件见表 2,溶液组成见表 3。试验结束后,用蒸馏水清洗去除试样表面的腐蚀介质,再采用无水乙醇脱水,之后烘干待用。

表 2 N80 钢模拟腐蚀试验条件

试验条件	<i>P</i> <sub>CO<sub>2</sub></sub> /MPa	<i>P</i> <sub>H<sub>2</sub>S</sub> /MPa
条件 1	1.0	-
条件 2	-	0.30
条件 3	1.0	0.30

表 3 模拟腐蚀溶液组成及其浓度

<i>φ</i> (KCl)	<i>φ</i> (NaCl)	<i>φ</i> (CaCl <sub>2</sub> )	<i>φ</i> (MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O)	<i>φ</i> (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	<i>φ</i> (NaHCO <sub>3</sub> )
708.71	10 062.52	13 209	9 156.25	1 249.3	368.54

试验采用了 4 个平行试样,其中 3 个用于计算平均腐蚀速率,1 个试样用于观察表面腐蚀特征。试验结束后,将试样表面冲洗干净后放入无水乙醇中脱水,用冷风机吹干,将 3 个平行试样泡入配制的酸洗液中,超声波清洗 5 min 后用蒸馏水冲洗表面残酸,利用无水乙醇脱水,干燥后称重(精确到 0.1 mg),计算其失重及腐蚀速率,腐蚀速率按公式(1)计算。

$$r_c = \frac{W \times 365 \times 1\,000}{ST\rho} \quad (1)$$

式中: *W*——金属挂片的失重, *W*=*m*<sub>0</sub>-*m*<sub>1</sub>, g;

*S*——金属挂片的表面积, mm<sup>2</sup>;

*T*——试验时间, h;

*ρ*——试样材料密度, g/mm<sup>3</sup>。

电化学测试装置由电化学工作站和 1 L 容积的五口玻璃电解池组成三电极体系,辅助电极为

石墨电极, 参比电极选用饱和甘汞电极 (SCE)。电化学试样尺寸为  $\Phi 12 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ , 与专用铜导线连接, 采用环氧树脂封存。试验前将试样浸入电解质中, 升温后用高纯 N<sub>2</sub> 除氧, 除氧时间为 1 h, 然后通入试验所需气体, 通气时间为 1 h。先进行开路电位测量, 待自腐蚀电位稳定后, 进行动电位极化扫描。动电位极化曲线测试电位范围为  $-500 \sim +500 \text{ mV}$ , 扫描速率为  $0.333 \text{ 3 mV/s}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 浸泡腐蚀试验

试验结束后, 计算 N80 在表 2 所示的三种试验条件下的均匀腐蚀速率, 结果见表 4。由表 4 可见,  $P_{\text{CO}_2}$  为 1 MPa 时, N80 钢的腐蚀速率为  $0.212 \text{ 3 mm/a}$ ;  $P_{\text{H}_2\text{S}}$  为 0.3 MPa 时, N80 钢的腐蚀速率为  $0.086 \text{ 4 mm/a}$ ; 在 CO<sub>2</sub> 与 H<sub>2</sub>S 共存条件下, N80 钢的腐蚀速率为  $0.092 \text{ 7 mm/a}$ 。由此可见, CO<sub>2</sub> 对 N80 的腐蚀速率最大, H<sub>2</sub>S 对 N80

钢的腐蚀速率最小, N80 钢的均匀腐蚀速率在 H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub> 共存的环境比在单独 CO<sub>2</sub> 环境下小, 说明 H<sub>2</sub>S 的加入使得 N80 的腐蚀规律发生了改变。通过对 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 共存系统的腐蚀机理进行研究<sup>[7]</sup>, 结果发现, H<sub>2</sub>S 的溶解度是 CO<sub>2</sub> 的 3 倍, 硫化物的稳定性高于 FeCO<sub>3</sub>, 在 CO<sub>2</sub> 腐蚀系统中加入少量的 H<sub>2</sub>S 可大幅度降低 N80 钢的腐蚀速率, 并且腐蚀产物膜的物理性质也发生明显变化。

表 4 N80 钢的均匀腐蚀速率

材质	气体分压	腐蚀速率/(mm·a <sup>-1</sup> )
N80	$P_{\text{CO}_2}=1 \text{ MPa}$	0.212 3
	$P_{\text{H}_2\text{S}}=0.3 \text{ MPa}$	0.086 4
	$P_{\text{CO}_2}/P_{\text{H}_2\text{S}}=1:0.3$	0.092 7

对试样表面及截面的腐蚀产物形貌进行观察, N80 钢在三种试验条件下的表面 SEM 形貌如图 1 所示, N80 试样的截面形貌如图 2 所示。由图 1 及图 2 可以看出, 不同条件下, 试样表面的腐蚀产物不同。

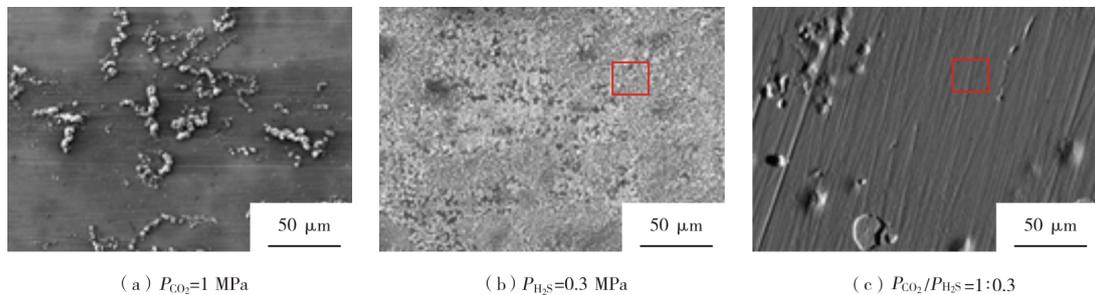


图 1 三种条件下 N80 钢表面 SEM 图

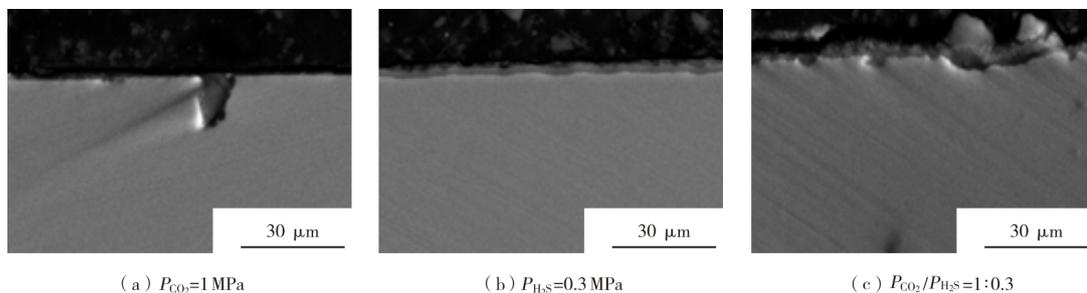


图 2 三种条件下 N80 钢截面的 SEM 形貌

由图 1 (a) 和图 2 (a) 可看出, N80 在 CO<sub>2</sub> 腐蚀中, 表面基本未形成连续的腐蚀产物膜, 这就使得基体金属暴露在腐蚀介质中, 源源不断地发生腐蚀, 这与表 4 中 N80 钢在 CO<sub>2</sub> 环

境中的腐蚀速率较大相对应。此外, 在该环境中, 试样表面存在点蚀坑, 这同样与 CO<sub>2</sub> 的强腐蚀性有关。

由图 1 (b) 可看出, 在 H<sub>2</sub>S 环境中, N80

钢表面生成的产物膜较连续,由图2(b)可看出该膜为双层,与基体接触的内膜均匀且致密。膜的保护性与膜的厚度并无直接关系,只有连续致密且附着力强的膜才能够起到缓蚀和保护作用。该层腐蚀产物可对基体金属产生较好的保护作用,这与表4中N80钢在 $H_2S$ 环境中的腐蚀速率较小相呼应。

由图1(c)可看出,在 $CO_2/H_2S$ 共存环境中,N80钢表面的腐蚀产物膜均匀致密,但是部分膜层发生剥落,试样表面有较多鼓泡产生。由图2(c)可以看出,试样表面的膜较均匀,但是部分脱落,腐蚀产物膜与金属基体的结合程度比试样在纯 $H_2S$ 环境中的结合程度差。随着腐蚀反应的进行,表面的鼓泡逐渐剥落,从而形成局部腐蚀。

对N80钢试样表面进行EDS分析,选取图1(c)中红色方框区域,EDS分析结果见表5。同时,利用XRD对腐蚀产物进行物相分析,结果如图3所示。

表5 N80钢在三种条件下表面腐蚀产物EDS分析结果

气体环境	质量百分比/%			
	C	O	S	Fe
$P_{CO_2}=1$ MPa	18.40	41.00	-	40.60
$P_{H_2S}=0.3$ MPa	-	9.24	40.58	50.18
$P_{CO_2}/P_{H_2S}=1:0.3$	17.55	6.66	30.87	44.92

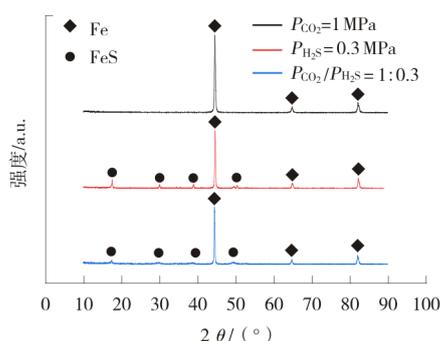


图3 三种条件下N80钢表面腐蚀产物XRD分析结果

由图3可知,在 $CO_2$ 腐蚀条件中,N80钢表面未检测到 $FeCO_3$ ,而由表5结果可知,其表面存在C、O元素,因此,在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,试样表面仅沉积了少量的 $FeCO_3$ ,且厚度较薄,利用X射线衍射仪对试样表面进行物相分析时,X射

线会穿透腐蚀产物层而照射至基体上,获取到的晶格参数即为 $\alpha\text{-Fe}$ 的晶格参数,衍射峰如图3所示。对比N80钢在不同气体环境中的腐蚀产物衍射峰发现, $H_2S$ 环境下与 $CO_2$ 和 $H_2S$ 共存环境下的衍射峰极为相似,腐蚀产物均为 $FeS$ 。根据表5,在 $CO_2$ 与 $H_2S$ 共存环境中,腐蚀产物中含有C、O元素,且Fe、S元素含量接近,说明其表面产物膜的主要成分为 $FeS$ ,并且其阻碍了 $FeCO_3$ 的生成,表明在 $CO_2$ 腐蚀环境中加入一定量的 $H_2S$ ,腐蚀产物膜的成分就会发生变化。

一般来说,干燥的 $CO_2$ 对钢没有腐蚀性,但溶于水后,在浓度相同的条件下,其酸性相较强酸更强,对钢铁的腐蚀性更严重<sup>[8]</sup>。在 $CO_2$ 腐蚀过程中,当溶液中离子浓度超过盐的溶解度时,会发生 $FeCO_3$ 沉淀, $FeCO_3$ 腐蚀产物膜的生长及其保护性主要取决于沉淀速率。本试验温度为 $60\text{ }^\circ\text{C}$ ,属于 $CO_2$ 腐蚀的低温区,在该温度下,沉淀过程非常缓慢,即使在过饱和度下,通常也只能得到无保护性的产物膜<sup>[9]</sup>。N80钢在 $P_{CO_2}=1$  MPa的条件下表面生成少量的腐蚀产物 $FeCO_3$ ,腐蚀介质与基体不断接触,发生较严重的全面腐蚀。

在N80钢试样表面附着 $FeCO_3$ 的区域与基体存在电位差,基体作为阳极发生电化学反应,产生点蚀。除此之外,点蚀的产生与腐蚀介质中的活性阴离子( $Cl^-$ )也有很大关系, $Cl^-$ 被称为孔蚀的“激发剂”,且具有极强的穿透性,介质中的 $Cl^-$ 可以穿过 $FeCO_3$ 腐蚀产物到达界面处,使基体表面产生点蚀<sup>[10-14]</sup>。

在金属表面形成点蚀坑后,随着腐蚀反应的进行,点蚀坑内金属阳离子不断增加,金属阳离子发生水解反应,增大了坑内溶液的pH值。为了使点蚀坑内溶液保持电中性,点蚀坑外部的阴离子将向点蚀坑内迁移,尤其是腐蚀介质中的 $Cl^-$ 将优先扩散到点蚀坑内部,从而使坑内溶液的化学和电化学状态与坑外溶液不同,由于坑内pH值较低, $Cl^-$ 浓度较高,从而使与之接触的金属电极电位低于外部溶液中金属的电极电位,加剧了点蚀坑内的腐蚀反应<sup>[15-17]</sup>。

在 $P_{H_2S}=0.3$  MPa条件下,N80钢表面生成连续且较为致密的 $FeS$ 腐蚀产物膜,对基体提供了

良好的保护作用,一定程度上抑制了腐蚀的进行,金属离子扩散速度的降低是反应速度下降的根本原因。有研究表明<sup>[1-3]</sup>,H<sub>2</sub>S 对金属腐蚀能起到缓蚀效果,但随着 H<sub>2</sub>S 体积分数的变化,缓蚀效果会发生变化,这与腐蚀产物膜的生成及状态转化有关,该研究与本试验结果吻合。

Abas 等<sup>[8]</sup>认为,在 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S 共存体系中,H<sub>2</sub>S 的作用为三种形式:①在  $P_{H_2S} < 70 \text{ Pa}$  时,CO<sub>2</sub> 为主要的腐蚀介质,温度高于 60 °C 时,腐蚀速率取决于 FeCO<sub>3</sub> 保护膜的性能,基本与 H<sub>2</sub>S 无关;②当  $P_{CO_2}/P_{H_2S} > 200$  时,材料表面形成一层致密的 FeCO<sub>3</sub> 膜,降低了腐蚀速率;③当  $P_{CO_2}/P_{H_2S} < 200$  时,H<sub>2</sub>S 为主要成分,这种情况下,通常会使得钢表面优先生成一层 FeS 膜,它会阻碍 FeCO<sub>3</sub> 膜的生成,而最终的腐蚀性取决于 FeS 和 FeCO<sub>3</sub> 膜的稳定性。在  $P_{CO_2}/P_{H_2S} = 1:0.3$  的条件中,N80 的腐蚀以 H<sub>2</sub>S 腐蚀为主导,根据表5 和图 3 可知,其表面腐蚀产物膜的主要成分为 FeS,仅有少量 FeCO<sub>3</sub> 存在。部分产物膜在形成过程中由于

自身缺陷、内应力会出现鼓泡现象,随着反应的进行,鼓泡破裂造成膜层脱落,发生局部腐蚀。虽然其表面腐蚀产物膜较致密,但由于局部腐蚀区域较多,其腐蚀速率高于 N80 在纯 H<sub>2</sub>S 条件下的腐蚀速率。

2.2 电化学试验

N80 钢在三种条件下的动电位扫描极化曲线如图 4 所示,N80 钢在三种条件下的腐蚀电位、腐蚀电流以及阴、阳极极化曲线斜率结果见表 6。

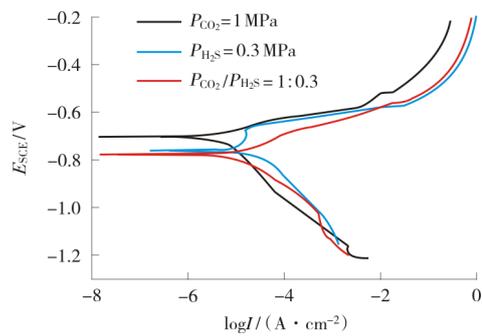


图 4 N80 钢在三种不同条件下的动电位扫描极化结果

表 6 N80 在三种不同  $P_{CO_2}/P_{H_2S}$  条件下的腐蚀电位与腐蚀电流

分压条件	$E_{cor}/\text{mV}$	$I_{cor}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	$b_c/\text{mV}$	$b_a/\text{mV}$
$P_{CO_2} = 1 \text{ MPa}$	-702.6	$4.4378 \times 10^{-3}$	189.830	54.348
$P_{H_2S} = 0.3 \text{ MPa}$	-750.7	$2.1835 \times 10^{-4}$	28.509	40.983
$P_{CO_2}/P_{H_2S} = 1:0.3$	-777.4	$2.9792 \times 10^{-3}$	70.608	55.110

通过图 4 可看出,N80 钢在单纯 CO<sub>2</sub> 环境中的自腐蚀电位最正,从热力学角度说明,N80 钢在该条件中发生腐蚀的趋势小,但由表 6 可以看出,其自腐蚀电流反而最大,腐蚀速率最大。

在  $P_{CO_2} = 1 \text{ MPa}$  与  $P_{CO_2}/P_{H_2S} = 1:0.3$  条件下, $b_c > b_a$ ,即在这两个条件下,N80 钢的腐蚀过程是以阴极反应过程控制为主,阴极反应由析氢过程控制<sup>[9]</sup>。在 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S 共存的环境下,阴极极化曲线斜率大于单独 CO<sub>2</sub> 环境中的斜率,说明在 CO<sub>2</sub> 环境中加入 H<sub>2</sub>S 后,会显著影响阴极的反应速率,使得腐蚀速率下降。

N80 钢在 H<sub>2</sub>S 环境中的自腐蚀电流最小,腐蚀速率最小。在该条件中, $b_a > b_c$ ,其腐蚀过程是以阳极反应过程控制为主。利用 CorShow 软件

拟合得出,在  $I_{cor} = 1.5658 \times 10^{-2} \text{ mA/cm}^2$  时,N80 钢的腐蚀电位正移,N80 钢在 H<sub>2</sub>S 条件下的阴、阳极极化曲线交点图如图 5 所示,由图 5 可以看出,其交点 A 处于活化溶解区,说明 N80 钢在  $P_{H_2S} = 0.3 \text{ MPa}$  的条件下并未发生钝化。

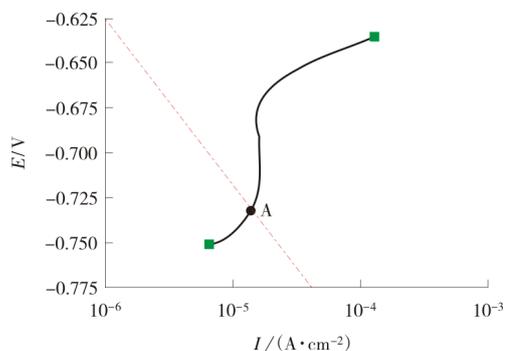


图 5 N80 在 H<sub>2</sub>S 条件下的阴、阳极极化曲线交点图

### 2.3 分析对比

浸泡腐蚀试验与高温高压电化学试验表明, N80钢在  $P_{\text{CO}_2}=1$  MPa 的条件下腐蚀速率最大, 加入 0.3 MPa 的  $\text{H}_2\text{S}$  后, 腐蚀速率下降。由电化学试验可知, 在  $P_{\text{CO}_2}=1$  MPa 与  $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{H}_2\text{S}}=1:0.3$  的条件下, N80钢均由阴极反应过程控制, 且后者的阴极极化曲线的极化率显著减小。由浸泡腐蚀试验可知, 在  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  共存条件中,  $\text{FeS}$  的产生抑制了  $\text{FeCO}_3$  的生成, 两种试验结果均说明, 在  $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{H}_2\text{S}}=1:0.3$  条件下,  $\text{H}_2\text{S}$  腐蚀占主导作用, 且  $\text{H}_2\text{S}$  是通过控制阴极反应来降低腐蚀速率。

在  $P_{\text{H}_2\text{S}}=0.3$  MPa 条件下, N80钢的试样表面未发生钝化, 因此, 其腐蚀速率降低是由于 N80钢表面生成的  $\text{FeS}$  产物膜在一定程度上阻隔了腐蚀介质与基体接触, 从而抑制了腐蚀的进行。

## 3 结 论

(1) 腐蚀产物膜的转变是降低腐蚀速率的重要原因, N80钢在  $P_{\text{CO}_2}=1$  MPa 条件下, 表面未产生腐蚀产物膜, 腐蚀最严重; 在  $P_{\text{H}_2\text{S}}=0.3$  MPa 与  $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{H}_2\text{S}}=1:0.3$  条件下, 表面均生成  $\text{FeS}$  腐蚀产物膜, 阻碍了腐蚀介质与基体接触。在纯  $\text{H}_2\text{S}$  条件中, N80钢的腐蚀程度最小; 在  $\text{CO}_2$  与  $\text{H}_2\text{S}$  混合的条件中,  $\text{H}_2\text{S}$  腐蚀占主导, 腐蚀速率介于纯  $\text{CO}_2$  与纯  $\text{H}_2\text{S}$  条件之间。

(2) 在纯  $\text{CO}_2$  与  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  混合条件中, N80钢的腐蚀均以阴极过程为主,  $\text{H}_2\text{S}$  通过控制阴极反应而降低腐蚀速率; 在纯  $\text{H}_2\text{S}$  条件中, N80钢的腐蚀是以阳极过程为主。

### 参考文献:

- [1] 陈长风, 路民旭, 赵国仙, 等. N80 油管钢  $\text{CO}_2$  腐蚀点蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003(1):22-26.
- [2] 刘然克, 张德平, 郝文魁, 等.  $\text{H}_2\text{S}$  分压对 N80 油套管钢  $\text{CO}_2$  环境下应力腐蚀开裂的影响[J]. 四川大学学报

(工程科学版), 2013, 45(6):196-202.

- [3] 孟玲. 油气管材  $\text{CO}_2$  腐蚀机理及其防护措施[J]. 热喷涂技术, 2017, 9(2):63-68.
- [4] 谢涛, 张晓诚, 林海, 等.  $\text{CO}_2$  和微量  $\text{H}_2\text{S}$  共存环境中套管防腐优选研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(1):57-63.
- [5] 陈卓元, 张学元, 王凤平, 等. 二氧化碳腐蚀机理及影响因素[J]. 材料开发与应用, 1998(5):36-42.
- [6] 康永印, 袁曦, 黄金营, 等. X52 钢在  $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$  饱和 5% NaCl 溶液中的腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2008(5):7-10, 91.
- [7] 何庆龙, 孟惠民, 俞宏英, 等. N80 油套管钢  $\text{CO}_2$  腐蚀的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007(3):186-192.
- [8] 白海涛, 杨敏, 董小卫, 等.  $\text{CO}_2$  腐蚀产物膜的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(4):295-301.
- [9] 李佳航, 王丹, 谢飞, 等. 油管道的  $\text{CO}_2$  腐蚀及防护研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(4):172-183.
- [10] 陈长风, 路民旭, 赵国仙, 等. N80 油套管钢  $\text{CO}_2$  腐蚀产物膜特征[J]. 金属学报, 2002(4):411-416.
- [11] 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(4):27-29.
- [12] 任呈强. N80 油管钢在含  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$  高温高压两相介质中的电化学腐蚀行为及缓蚀机理研究[D]. 西安:西北工业大学, 2003.
- [13] 韩燕, 巨亚锋, 罗有刚, 等. 某 N80 新油管早期腐蚀穿孔失效分析[J]. 材料保护, 2020, 53(11):160-165.
- [14] 吴保玉, 宋振云, 陈平. N80/J55 油管钢在超临界  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  体系中腐蚀行为研究[J]. 钻采工艺, 2021, 44(2):66-70.
- [15] 吕祥鸿, 赵国仙. 油套管材质与腐蚀防护[M]. 北京:石油工业出版社, 2015:36-37.
- [16] 魏亮, 庞晓露, 高克玮. X65 钢在含超临界  $\text{CO}_2$  的 NaCl 溶液中腐蚀机制的讨论[J]. 金属学报, 2015, 51(6):701-712.
- [17] 赵国仙, 吕祥鸿, 韩勇. 某井油管腐蚀原因分析[J]. 材料工程, 2010(3):51-55.
- [18] ABAS A Z, MOHAMMED N A, SUHOR M F, et al. The Effect of Elevated  $\text{H}_2\text{S}$  on Corrosion Behaviour of API 5L X65 Carbon Steel in High Partial Pressure  $\text{CO}_2$  Environments[C]//One Petro. SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Bahrain; Manama, 2019.
- [19] 梁平, 王莹. 覆有短期腐蚀产物膜的 X80 钢的电化学行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(5):371-376.

作者简介: 赵国仙 (1968—), 教授, 主要从事油管道的腐蚀与防护研究。

收稿日期: 2021-09-26

编辑: 董超