

局部碳酸钙沉积对 N80 碳钢腐蚀行为的影响

尹泽斌^a, 钟显康^{a,b}, 傅俊颖^{a,b}

(西南石油大学 a.石油与天然气工程学院 b.油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500)

摘要: 目的 研究局部碳酸钙沉积对 N80 碳钢腐蚀行为的影响, 为解决碳酸钙沉积引发的腐蚀问题提供新思路。**方法** 采用恒电位阴极极化法诱导碳酸钙沉积。采用电化学阻抗谱、丝束电极、扫描电镜和能谱仪对 N80 碳钢的均匀腐蚀、局部腐蚀、电偶腐蚀、微观形貌和化学组成进行表征, 揭示局部碳酸钙沉积对 N80 碳钢腐蚀行为的影响规律。**结果** 碳酸钙沉积会使电极的腐蚀电位正移约 100 mV。相同条件下, 碳酸钙覆盖电极的容抗弧直径远大于裸电极。随着浸泡时间的延长, 裸电极的容抗弧直径不断增大, 而碳酸钙覆盖电极的容抗弧先增大后减小。电偶测试中, 碳酸钙覆盖电极作为阴极, 裸电极作为阳极, 在 168 h 内, 二者没有发生极性反转, 电偶电流密度最终稳定在 $-0.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 左右。WBE 结果显示, 浸泡开始时, 碳酸钙覆盖区域的电位较高且均为阴极电流, 24 h 后, 该区域逐渐出现阳极点。浸泡 72 h 后, 电位最负的位置开始向碳酸钙覆盖区域转移。微观分析结果表明, 碳酸钙覆盖电极表面有一层完整且致密的腐蚀产物膜, 可能对基体起到了一定的保护作用。去除腐蚀产物后, 基体存在明显的点蚀坑。**结论** 局部沉积的碳酸钙虽然对基体有一定的保护作用, 但会导致电偶腐蚀的发生。随着浸泡时间的延长, 覆盖碳酸钙的区域会由于氧浓差电池和酸化自催化效应发生局部腐蚀。

关键词: 碳钢; 结垢; 碳酸钙; 局部沉积; 电化学腐蚀; 局部腐蚀

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)10-0337-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.10.035

Effect of Local Calcium Carbonate Deposition on Corrosion Behavior of N80 Carbon Steel

YIN Ze-bin^a, ZHONG Xian-kang^{a,b}, HU Jun-ying^{a,b}

(a.School of Petroleum and Natural Gas Engineering; b.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

ABSTRACT: This paper studied the effect of local calcium carbonate deposition on the corrosion behaviors of N80 carbon steel in order to provide new ideas for the petroleum industry to solve the corrosion problem caused by calcium carbonate deposition. The author adopted the constant potential cathodic polarization method to induce the calcium carbonate to deposit at the local position of the electrode. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and wire beam electrode technology (WBE) were used

收稿日期: 2021-05-25; 修订日期: 2021-09-02

Received: 2021-05-25; Revised: 2021-09-02

基金项目: 国家自然科学基金 (52171080)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (52171080)

作者简介: 尹泽斌 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为油气田腐蚀与防护。

Biography: YIN Ze-bin(1997—), Male, Master, Research focus: corrosion and protection in oil and gas field.

通讯作者: 钟显康 (1984—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为油气田腐蚀与防护。

Corresponding author: ZHONG Xian-kang(1984—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection in oil and gas field.

引文格式: 尹泽斌, 钟显康, 傅俊颖. 局部碳酸钙沉积对 N80 碳钢腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(10): 337-344.

YIN Ze-bin, ZHONG Xian-kang, HU Jun-ying. Effect of local calcium carbonate deposition on corrosion behavior of N80 carbon steel[J]. Surface technology, 2021, 50(10): 337-344.

to study the corrosion behavior of N80 carbon steel during local calcium carbonate deposition. The morphology and composition of corrosion (uniform, local, and galvanic corrosion) products were analyzed using scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The electrochemical test results showed that the deposition of calcium carbonate would positively shift the corrosion potential of electrode by about 100 mV. Under the same conditions, the capacitive arc diameter of the electrode covered by CaCO_3 deposit was much larger than that of the bare electrode. After the electrode was immersed for a longer time, the capacitive arc radius of the bare electrode became larger, while the capacitive arc of the electrode covered by CaCO_3 deposit first increased and then decreased over time. The results of the galvanic electrode showed that the electrode covered by CaCO_3 deposit acted as the cathode in the galvanic corrosion and the bare electrode was the anode. Polarity reverse did not occur during the 168 h immersion. The galvanic current density finally stabilized at $-0.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. The WBE results showed that the potential at the calcium carbonate deposition area at the beginning of the immersing was higher than other areas and all was cathode current. After 24 h immersion, the anode spots gradually appeared in the calcium carbonate deposition area. After 72 h immersion, the position with the most negative potential began to shift to the calcium carbonate deposition area. The morphology analysis showed that corrosion products on the surface of the electrode covered by CaCO_3 deposit were complete and dense, providing a better protective effect for the carbon steel. Local corrosion pits were observed on the substrate after the removal of corrosion products. In summary, the locally deposited calcium carbonate shows protective effect on the electrode in a certain extent, but it will induce galvanic corrosion. As the immersion time becomes longer, the locally deposited calcium carbonate will cause local corrosion due to the presence of the oxygen concentration difference battery and the autocatalytic effect.

KEY WORDS: carbon steel; scaling; calcium carbonate; local deposition; electrochemical corrosion; local corrosion

近年来,我国油气产量的快速增长使得生产和开采条件日益严峻^[1],由腐蚀和结垢导致的安全问题愈发严重。在油气生产过程中,腐蚀和结垢往往同时进行,相互影响^[2]。碳酸钙等无机垢在管柱壁面的附着不仅会堵塞油气回路,影响传输效率,还会引起垢下腐蚀^[3-4]。

随着油田开发的不断深入,采出液含水量不断上升^[5]。采油或采气时,介质温度、压力等热力学条件的变化会使碳酸钙析出结垢。此外,注水开发时,注入介质与地层水较差的配伍性也是引起碳酸钙结垢的重要原因。作为石油工业中最常见、危害最大的无机垢^[6],碳酸钙对碳钢腐蚀行为的影响已经得到了研究者们广泛的关注。Esmaeely 等人^[7-8]在 80 °C、0.1 MPa CO_2 环境下,研究了不同 Ca^{2+} 浓度下碳钢的电化学腐蚀行为,结果表明,当 Ca^{2+} 为 100 mg/L 时,碳钢的腐蚀速率较低且没有点蚀发生。当 Ca^{2+} 为 10 000 mg/L 时,碳钢发生了严重的点蚀。Rizzo^[9]等人在 80 °C 的 CO_2 环境中研究了碳酸钙饱和度 (S_{CaCO_3}) 对碳钢腐蚀行为的影响。Tavares 等人^[10]发现,固体碳酸钙存在时,碳钢的腐蚀速率下降明显。王莹、马丽^[11-12]分别研究了 X80 管线钢和 NC-55E 套管钢在不同 Ca^{2+} 浓度下的腐蚀行为,结果表明,垢层的保护作用随浸泡时间延长而不断增强。目前的研究均表明,碳酸钙会改变碳钢的腐蚀行为。但这些工作都将研究重心放在了 Ca^{2+} 浓度上,而在采油和采气过程中,由于管柱内不断有新鲜流体经过,对于管柱某一位置而言, Ca^{2+} 浓度不会发生显著变化。我们注意

到,实际生产时,由于管柱各位置的介质流速和温度不同,碳酸钙沉积呈现显著的局部分布特征^[2,13]。然而,目前局部碳酸钙沉积对碳钢腐蚀行为的影响研究尚未见报道。

传统的电化学测试技术只能获得电极表面的均匀腐蚀电化学信息,难以实现对碳钢局部腐蚀行为的原位测量^[14]。丝束电极 (Wire Beam Electrode, WBE) 由多根排列规则且彼此绝缘的细小电极组成。因为电极之间的距离很小,所以可以将其整体视为面积较大的电极试样。与传统电化学测试技术相比,WBE 技术可原位获得垢下局部电化学信息^[15-16]。有研究指出,碳酸钙的沉积会导致局部电位差异,形成阴-阳极区域,而碳钢腐蚀过程中的阴极反应能加速垢的形成^[17-19]。因此,本文采用恒电位阴极极化法模拟碳酸钙的局部沉积过程。结合 EIS 和 WBE,研究了局部碳酸钙沉积时 N80 碳钢的电化学腐蚀行为。用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 和 EDS 能谱仪 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 对电极的表面形貌和腐蚀产物的元素组成进行了检测。

1 实验

1.1 电极和溶液

实验材料为 N80 碳钢,其化学成分及含量见表 1。将用于电化学测试的样品加工成长方体,端面的面积为 1 cm^2 。将样品的一端与铜导线焊接起来,除工作面外,其余部分用环氧树脂封装。电偶电极的制作方

法是，将两个相同的 N80 试样固定在同一平面，间距设置为 1 mm，除了工作面外，其余部分用环氧树脂封装，并保证两个试样彼此绝缘。测试之前，依次用 400、600、800、1200 目砂纸打磨电极，之后用丙酮除油、去离子水冲洗、乙醇脱水，最后用氮气吹干。溶液参照 Chen 等^[20]的研究，化学成分如表 2，溶液 pH 值用盐酸调至 6.9 ± 0.2 ，温度为 (25 ± 1) °C。

表 1 N80 钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of N80 steel

wt%								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Fe
0.3	0.23	1.33	0.012	0.004	0.33	0.003	0.07	Bal.

表 2 溶液的化学组成
Tab.2 Chemical compositions of solution

Cl ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	mg/L
11710	7080	720	930	

1.2 电化学测试

电化学测试均在 CS310 电化学工作站上进行。采用传统三电极体系，饱和甘汞电极为参比电极（Reference Electrode, RE），铂电极为辅助电极（Counter Electrode, CE），N80 电极为工作电极（Working Electrode, WE）。其中一个工作电极直接浸泡在溶液中，称为裸电极，另一个工作电极利用恒电位阴极极化法使碳酸钙沉积在其表面，称为碳酸钙覆盖电极。恒电位极化时，为避免析氢反应影响碳酸钙的沉积行为，参考 Marín-Cruz 等^[21]的研究，恒电位阴极极化电位选择 -0.85 V。实验前，先对电极施加 -0.85 V 的恒电位，时间为 12 h，形成碳酸钙覆盖电

极，然后每 24 h 测量一次开路电位（Open Circuit Potential, OCP）和电化学阻抗（Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS）。为了控制变量，裸电极在溶液中浸泡 12 h 后，再开始测量 OCP 和 EIS。阻抗谱频率为 $0.01\sim10^5$ Hz，正弦扰动电位为 10 mV。

1.3 电偶测试

电偶测试装置由电偶电极和参比电极 SCE 组成。实验开始前，对电偶电极的一侧施加 12 h 恒电位（-0.85 V）极化，以诱导碳酸钙沉积在电偶电极的一侧（WE1），另一侧（WE2）不做处理。电偶电位和电偶电流由电化学工作站测得，若电偶电流读数为正，表示电偶电极（WE1）对应的是电偶系统中的阳极，另一侧的电偶电极（WE2）为电偶系统中的阴极，电流从 WE1 流向 WE2，负电流则与之相反。

1.4 丝束电极

丝束电极由 100 根边长为 2 mm 的电极组成。将电极组成 10×10 的矩形阵列，间距设置为 0.5 mm，保证电极彼此绝缘。电极编号如图 1a，其中 X 为 WBE 的列编号，Y 为 WBE 的行编号，电极的工作面用砂纸逐级打磨至 1200 目。WBE 测试前，用电化学工作站对 WBE 的(1,1)到(10,5)电极施加 -0.85 V 的恒电位 12 h，形成碳酸钙覆盖区域，直接浸泡在溶液中的区域称为裸露区域。采用丝束电极扫描仪（CST520，武汉科思特仪器有限公司）监测丝束电极表面的电位-电流分布。丝束电极扫描仪会通过 10×10 自动切换单元来控制各电极间的通断。电位测量时，被测电极独立，电流测量时，将待测电极通过零电阻电流表（ZRA）与其他 99 根电极进行偶接，从而得到整个 WBE 表面的电位-电流分布。

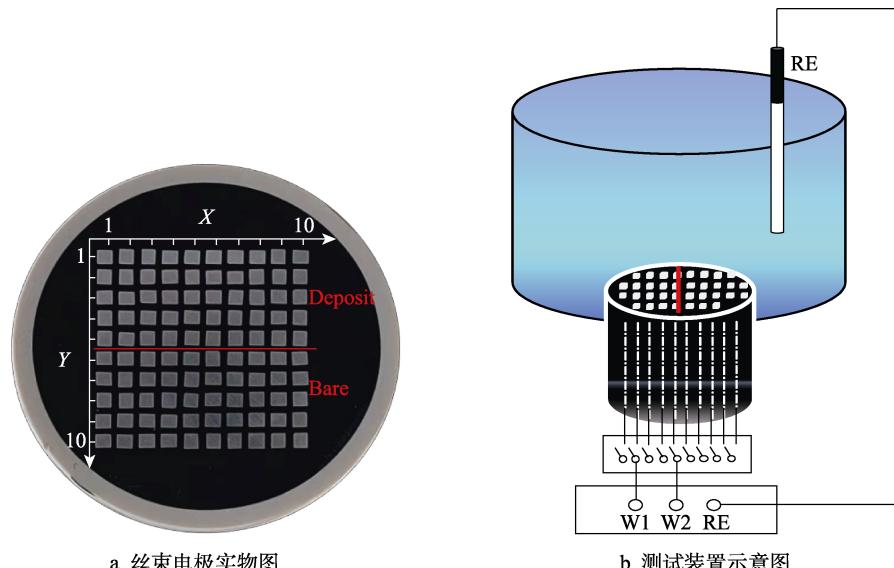


图 1 丝束电极原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of WBE

1.5 微观形貌表征

将浸泡 168 h 后的裸电极和碳酸钙覆盖电极从容器中取出，并用氮气干燥。采用 ZEISS EVO MA15 扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM) 观测样品的表面形貌，利用能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)对电极表面腐蚀产物的元素组成进行检测。

2 结果与讨论

2.1 电化学测试分析

2.1.1 开路电位

恒电位极化后的开路电位随时间的变化曲线如图 2 所示。与裸电极相比，碳酸钙覆盖电极的开路电位更正，说明碳酸钙覆盖电极的腐蚀倾向小，与裸电极相比，不易发生腐蚀^[22]。此外，测试结果还表明，碳酸钙覆盖电极和裸电极之间的电位差在 100 mV 左右，这表明二者耦合起来后，将发生电偶腐蚀^[14,23]。

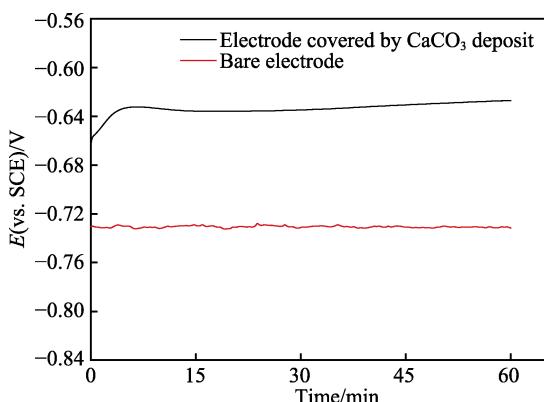


图 2 两种电极开路电位随时间的变化

Fig.2 Evolution of the OCP of two electrodes with immersion time

2.1.2 电化学阻抗谱

图 3 为不同浸泡时间下裸电极和碳酸钙覆盖电极的电化学阻抗谱。对于不同的浸泡时间，两种电极的阻抗谱形状均没有发生显著变化，这表明腐蚀动力学过程未随浸泡时间的变化而发生显著改变。相同浸泡时间下，裸电极的容抗弧直径远小于碳酸钙覆盖的电极，这表明裸电极的腐蚀程度比碳酸钙覆盖电极的腐蚀程度更严重^[24-25]。

由图 3a 可知，裸电极阻抗谱的容抗弧直径随时间不断增大，这与电极表面形成的保护性腐蚀产物膜有关，逐渐析出的碳酸钙层对电极起到了一定的保护作用^[11]。图 3b 为碳酸钙覆盖电极在不同时间的电化学阻抗谱。由图可知，阻抗谱的容抗弧直径随时间先增大后减小，这表明在腐蚀初期，沉积的碳酸钙阻碍了基体与溶液的接触，在一定程度上保护了金属基

体。随着浸泡时间的延长，垢层的存在使金属阳离子难以扩散，正电荷聚集过多，吸引 Cl⁻从外部溶液浸入到垢层下，加上金属离子水解导致的酸化自催化过程，可能引发局部腐蚀^[14,26]。

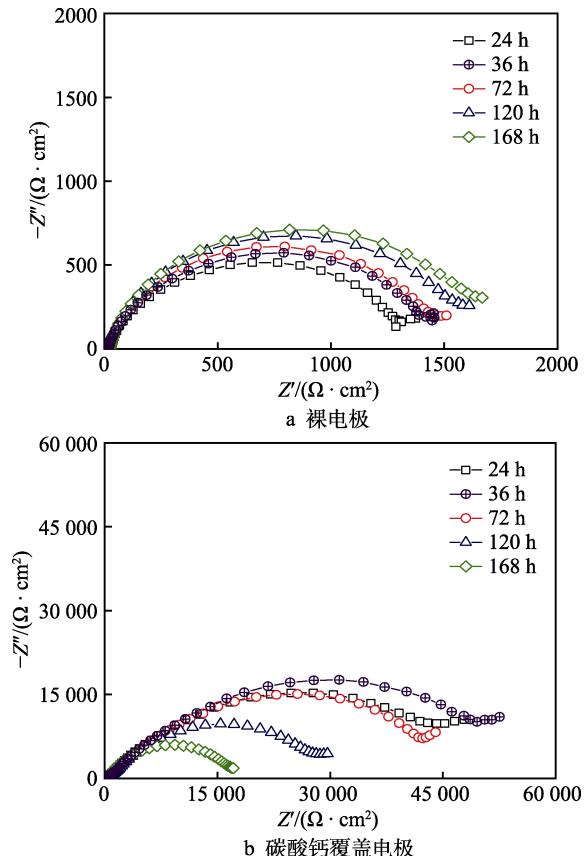


图 3 不同浸泡时间下两种电极的奈奎斯特图

Fig.3 Nyquist diagrams of two electrodes at different times: a) bare electrode; b) electrode covered by CaCO₃ deposit

2.2 电偶测试

图 4 为电偶电极的测试结果，插图是电偶电极浸泡 168 h 后的光学照片。在初始阶段，电偶电流密度迅速向正方向移动，而电偶电位相对稳定。浸泡过程

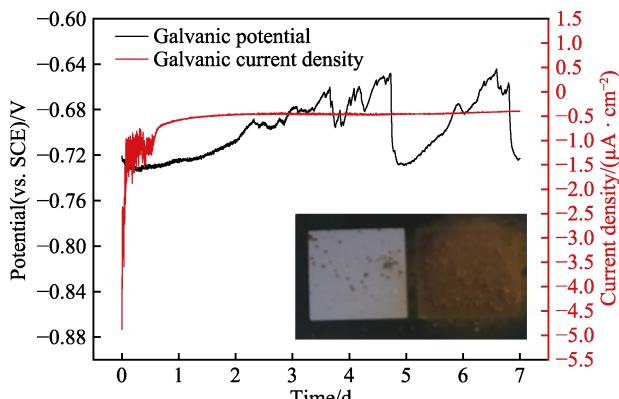


图 4 局部碳酸钙沉积时电偶电位/电流随时间的变化

Fig.4 Evolution of galvanic potential/current with time during local calcium carbonate deposition

中, 电偶电位明显波动, 表明可能发生了局部腐蚀^[27-28]。从光学照片上可看出, 碳酸钙覆盖一侧有明显的黄色斑点。电偶电流测试结果表明, 碳酸钙覆盖一侧作为电偶电极的阴极, 而裸电极作为阳极, 168 h 内未见极性反转。

2.3 丝束电极测试

图 5 为局部碳酸钙覆盖时, WBE 的电位-电流分布图, 其中 1—5 行电极为碳酸钙覆盖区域 (虚线上

半部分)。

由图可知, 在浸泡开始时, 碳酸钙覆盖区域的平均电位是 -697.88 mV, 裸露区域的平均电位是 -716.94 mV, 最负的电位值为 -725.73 mV, 这与开路电位的测试结果具有相同的趋势。碳酸钙覆盖会使电极电位正移。电流分布图显示, 碳酸钙覆盖区域虽然在(2,3)、(3,2)、(4,2)、(5,2)4 个电极表面出现了阳极电流, 但电流值很小, 平均只有 $0.11 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 反观裸露区域的阳极电流密度, 最高达到了 $9.06 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

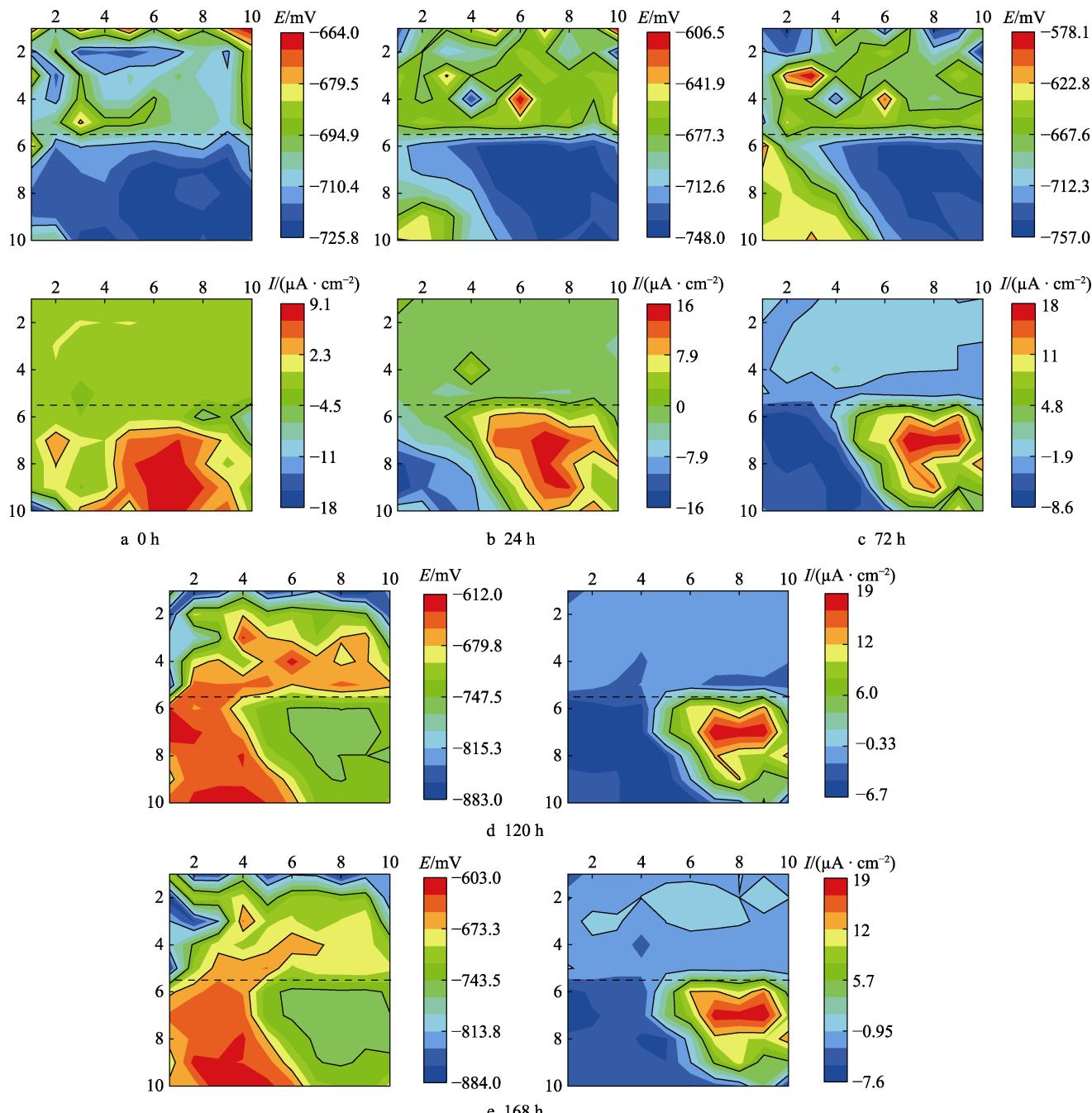


图 5 不同浸泡时间下的电位和电流分布图 (虚线上部电极被碳酸钙覆盖)

Fig. 5 Corrosion potential-current distribution maps at different times (the electrodes above the dotted line were covered with calcium carbonate)

浸泡时间为 24 h 时, 碳酸钙覆盖区域的平均电位是 -672.97 mV , 裸电极区域的平均电位是 -747.75 mV 。相比 0 h 时, 碳酸钙覆盖区域的平均电位升高了 24.91 mV , 而裸露区域的平均电位下降了 30.81 mV 。碳酸钙覆盖区域的平均电流密度为 $-1.43 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 裸露区域的平均电流密度为 $1.57 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 最高值为 $15.71 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。值得注意的是, 24 h 时, 碳酸钙覆盖区域出现了一个明显的阳极点, 其电流密度是 $4.76 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 对应电位为 -734.77 mV , 这表明随着浸泡时间的增加, 侵蚀性离子逐渐渗入碳酸钙层, 导致碳酸钙覆盖区域阳极点的出现, 这表明沉积物下已经发生了局部腐蚀。

浸泡时间为 72 h 时, 裸露区域的阳极电流最大值上升至 $18.09 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。浸泡时间为 120 h 时, 碳酸钙覆盖区域的电位下降明显, 几个最负的电位出现在了该区域。浸泡 168 h 时, 最负的电位出现在(8,1)位置, 电位的下降预示着局部腐蚀的持续发生^[29]。我们注意到, 随着腐蚀的进行, 裸露区域的阴极面积不断

增大, 阴极反应在裸露区域更为剧烈。这是因为碳酸钙层的存在阻碍了氧的扩散, 溶解氧更容易在裸电极区域发生还原反应。

2.4 腐蚀形貌

图 6 是裸电极和碳酸钙覆盖电极在溶液中浸泡 168 h 后的表面微观形貌。由图 6a 和 6b 可知, 相比于碳酸钙覆盖电极, 裸电极表面的腐蚀产物稀疏多孔, 呈团簇微球状, 而碳酸钙覆盖电极表面的腐蚀产物颗粒度较小, 分布相对均匀, 对电极的保护作用更好。

为了进一步了解电极表面的腐蚀情况, 用去膜液(盐酸+六次亚甲基胺)除去电极表面的腐蚀产物, 去膜后的 SEM 图像如图 6c 和 6d。裸电极基体形成了密集凹坑, 说明其遭受了较严重的均匀腐蚀。与裸电极不同, 碳酸钙覆盖电极的表面光滑, 电极打磨时留下的划痕也清晰可见, 但个别位置存在较大的孔洞, 说明碳酸钙覆盖电极的表面有局部腐蚀发生。这与前面的电化学测试结果一致。

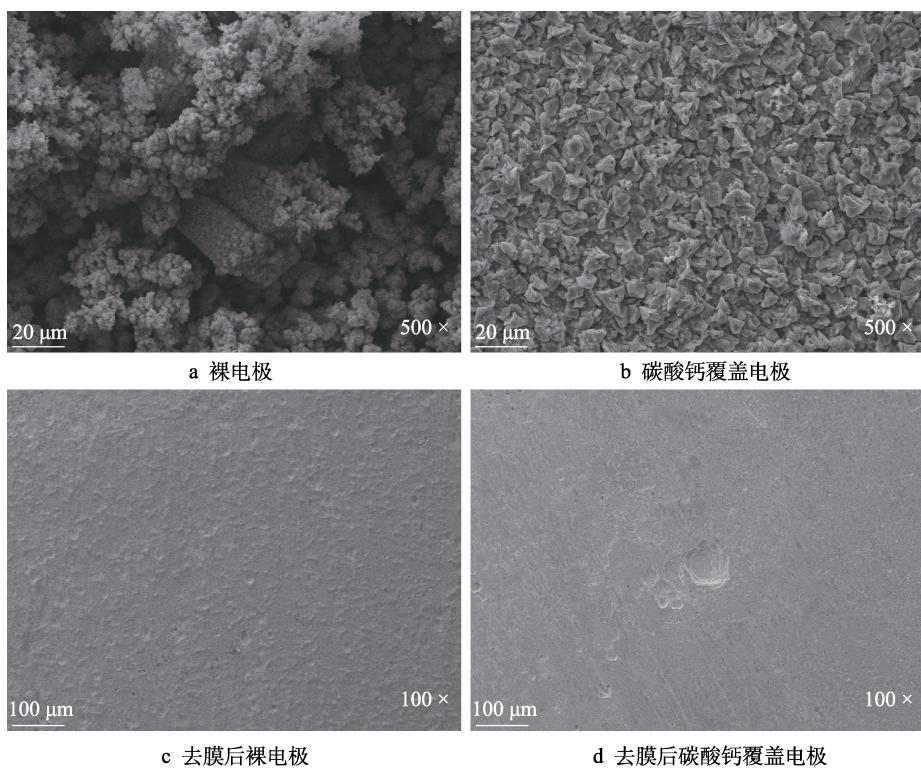


图 6 浸泡 168 h 后电极的 SEM 图

Fig.6 SEM images of two electrodes after immersed for 168 h: a) bare electrode; b) electrode covered by CaCO_3 deposit; c) bare electrodes after removing corrosion products; d) electrode covered by CaCO_3 deposit after removing corrosion products

图 7 是浸泡 168 h 后的腐蚀产物能谱图, 相应的元素含量也已在图中列出。由图可知, 裸电极的腐蚀产物中 Ca 的质量分数只有 0.27%, 而 Fe 元素的质量分数则达到了 63.5%; 碳酸钙覆盖电极腐蚀产物中 Ca 元素的质量分数为 44.56%, Fe 只有 4.41%。众所周知, Fe 元素来自腐蚀产物中铁的氧化物、氢氧化物或电极基体, 故 Fe 含量少, 说明腐蚀轻微^[30]。碳

酸钙覆盖电极表面存在较多的 Ca 元素则印证了之前的结论, 即碳酸钙的覆盖改变了电极的腐蚀行为。

2.5 腐蚀机理

局部碳酸钙沉积对 N80 碳钢腐蚀行为的影响机理如图 8 所示。浸泡初期, 碳酸钙的沉积有效阻碍了氧、水和侵蚀性离子到达钢基体表面, 对基体金属起

到了保护作用, 覆盖碳酸钙的位置电位更正, 可作为阴极。随着腐蚀反应的进行, 碳酸钙层起到了阻碍氧气进入的作用, 氧气难以到达基体表面, 而没有碳酸钙覆盖的电极区域氧含量高, 因此形成了氧浓差电池。此外, 垢层下的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 不断增加, 为了保持电中性, 溶液中带负电荷的离子(如 Cl^-)会不断向

垢层内部迁移, 同时, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 水解, 导致局部区域 pH 值降低, 促进了垢下局部腐蚀的发生和发展。另一方面, 随着浸泡时间的延长, 裸露区域由于氧含量较多, 阴极反应不断进行, pH 升高, 碳酸钙会继续在此区域沉积, 故裸露区域的全面腐蚀可得到一定程度的缓解。

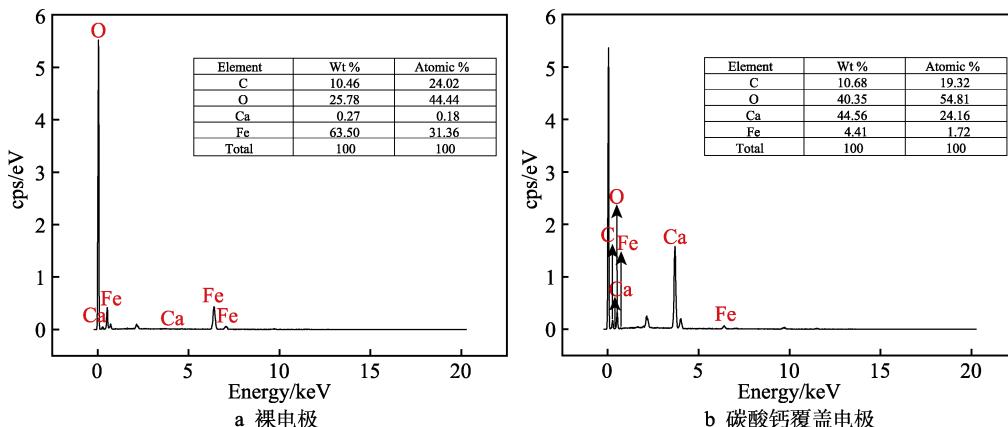


图 7 EDS 能谱图和腐蚀产物主要元素含量

Fig.7 EDS energy spectrum of two electrodes and main element content of corrosion products: a) bare electrode; b) electrode covered by CaCO_3 deposit

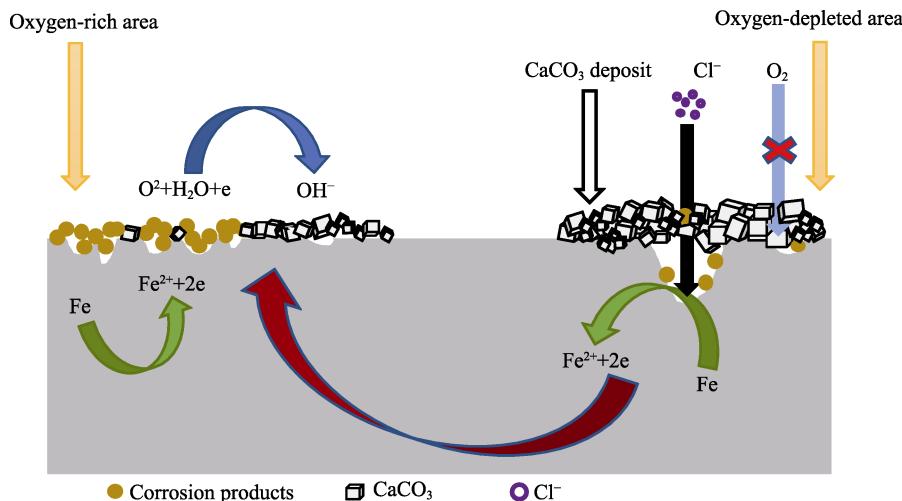


图 8 局部碳酸钙沉积的腐蚀机理
Fig.8 Corrosion mechanism diagram under local calcium carbonate deposition

3 结论

1) 利用恒电位阴极极化法模拟了碳酸钙的局部沉积, 碳酸钙的覆盖会使电极的开路电位正移, 与裸电极之间的电位差较大, 因此局部碳酸钙沉积可引发电偶腐蚀。

2) EIS 与 WBE 技术的结合能够用于表征局部碳酸钙沉积下 N80 碳钢的电化学腐蚀行为。在浸泡初期, 碳酸钙层对电极有着较好的保护作用, 但浸泡时间延长会导致局部腐蚀的萌生和发展。

3) 微观腐蚀形貌与电化学测试的结果相吻合。裸电极呈现明显的均匀腐蚀特征, 表面腐蚀产物的保

护性较差。碳酸钙覆盖电极表面的腐蚀产物完整且致密, 洗去腐蚀产物发现电极表面平整, 但存在明显的局部腐蚀坑。

参考文献:

- [1] FU A Q, FENG Y R, CAI R, et al. Downhole corrosion behavior of NiW coated carbon steel in spent acid & formation water and its application in full-scale tubing[J]. Engineering failure analysis, 2016, 66: 566-576.
- [2] 徐云泽, 黄一, 盈亮, 等. 管线钢在沉积物下的腐蚀行为及有机膦缓蚀剂的作用效果[J]. 金属学报, 2016,

- 52(3): 320-330.
- XU Yun-ze, HUANG Yi, YING Liang, et al. Corrosion behavior of pipeline steel under deposit corrosion and the inhibition performance of organic phosphine inhibitor[J]. Acta metallurgica sinica, 2016, 52(3): 320-330.
- [3] 余吉良, 王志坤, 霍然, 等. 弱碱环境中碳酸钙垢阻垢剂的阻垢性能与阻垢机理[J]. 油田化学, 2017, 34(4): 699-704.
- YU Ji-liang, WANG Zhi-kun, HUO Ran, et al. Inhibition performances and mechanisms of CaCO_3 scale inhibitors under alkalescent conditions[J]. Oilfield chemistry, 2017, 34(4): 699-704.
- [4] TAN Yong-jun, FWU Y, BHARDWAJ K. Electrochemical evaluation of under-deposit corrosion and its inhibition using the wire beam electrode method[J]. Corrosion science, 2011, 53(4): 1254-1261.
- [5] 潘爱芳, 马润勇, 杨彦柳. 油田注水开发防垢现状及新技术研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- PAN Ai-fang, MA Run-yong, YANG Yan-liu. Present situation and new technology of scale prevention in oil-field waterflooding development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [6] MACEDO R G M D A, MARQUES N D N, PAULUCCI L C S, et al. Water-soluble carboxymethylchitosan as green scale inhibitor in oil wells[J]. Carbohydrate polymers, 2019, 215: 137-142.
- [7] NAVABZADEH ESMAEELY S, CHOI Y S, YOUNG D, et al. Effect of calcium on the formation and protectiveness of iron carbonate layer in CO_2 corrosion[J]. Corrosion, 2013, 69(9): 912-920.
- [8] ESMAEELY S N, YOUNG D, BROWN B, et al. Effect of incorporation of calcium into iron carbonate protective layers in CO_2 corrosion of mild steel[J]. Corrosion, 2017, 73(3): 238-246.
- [9] RIZZO R, AMBAT R. Effect of initial CaCO_3 saturation levels on the CO_2 corrosion of 1Cr carbon steel[J]. Materials and corrosion, 2021, 72(6): 1076-1090.
- [10] TAVARES L M, COSTA E M D, ANDRADE J J D O, et al. Effect of calcium carbonate on low carbon steel corrosion behavior in saline CO_2 high pressure environments[J]. Applied surface science, 2015, 359: 143-152.
- [11] 王莹, 俞宏英, 程远, 等. 钙离子的浓度对X80钢腐蚀行为的影响[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(1): 66-71.
- WANG Ying, YU Hong-ying, CHENG Yuan, et al. Effects of the concentration of calcium ions on the corrosion behavior of X80 steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(1): 66-71.
- [12] 马丽, 郑玉贵. 钙离子对NC-55E钢 CO_2 腐蚀产物膜性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(2): 79-85.
- MA Li, ZHENG Yu-gui. Effect of calcium ions on performance of corrosion product scale on nc-55E steel during CO_2 corrosion[J]. Corrosion science and protection technology, 2008, 20(2): 79-85.
- [13] SMITH J P, GILBERT I, KIDDER R. Inhibition of CO_2 corrosion in multiphase flow and solids production: A case history[J]. Corrosion science, 2001, 41(5): 171-188.
- [14] XIONG Qi, HU Jun-ying, GU Chen-rong, et al. The study of under deposit corrosion of carbon steel in the flowback water during shale gas production[J]. Applied surface science, 2020, 523: 146534.
- [15] TAN Yong-jun. Wire beam electrode: A new tool for studying localized corrosion and other heterogeneous electrochemical processes[J]. Corrosion science, 1998, 41(2): 229-247.
- [16] HIEN P V, VU N S H, THU V T H, et al. Study of yttrium 4-nitrocinnamate to promote surface interactions with AS1020 steel[J]. Applied surface science, 2017, 412: 464-474.
- [17] ZHU Tian-zhen, WANG Li-da, SUN Wen, et al. The role of corrosion inhibition in the mitigation of CaCO_3 scaling on steel surface[J]. Corrosion science, 2018, 140: 182-195.
- [18] ZHU Tian-zhen, WANG Li-da, SUN Wen, et al. Local scaling of CaCO_3 on carbon steel surface with different corrosion types[J]. Powder technology, 2019, 356: 990-1000.
- [19] MORIZOT A P, NEVILLE A, TAYLOR J D. An assessment of the formation of electrodeposited scales using scanning electron and atomic force microscopy[J]. Journal of crystal growth, 2002, 237-239: 2160-2165.
- [20] CHEN Tao, NEVILLE A, YUAN Ming-dong. Calcium carbonate scale formation—Assessing the initial stages of precipitation and deposition[J]. Journal of petroleum science and engineering, 2005, 46(3): 185-194.
- [21] MARÍN-CRUZ J, GARCÍA-FIGUEROA E, MIRANDA-HERNÁNDEZ M, et al. Electrochemical treatments for selective growth of different calcium carbonate allotropic forms on carbon steel[J]. Water research, 2004, 38(1): 173-183.
- [22] DONG Ze-hua, SHI Wei, GUO Xing-peng. Initiation and repassivation of pitting corrosion of carbon steel in carbonated concrete pore solution[J]. Corrosion science, 2011, 53(4): 1322-1330.
- [23] 黄宸, 黄峰, 张宇, 等. 高强耐候钢焊接接头电偶腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(6): 527-535.
- HUANG Chen, HUANG Feng, ZHANG Yu, et al. Galvanic corrosion behavior for weld joint of high strength weathering steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(6): 527-535.
- [24] 张晨峰, 扈俊颖, 钟显康, 等. 双咪唑啉在 CO_2/O_2 环境中的缓蚀行为及其与巯基乙醇的复配性能[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 66-74.
- ZHANG Chen-feng, HU Jun-ying, ZHONG Xian-kang, et al. Bis-imidazoline compound as a corrosion inhibitor in CO_2/O_2 environment and its synergistic effect with 2-mercaptoethanol[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 66-74.

(下转第383页)