辽河油田土壤中溶解氧对 X70 管线钢腐蚀的影响

谢飞[1]，王月[1]，王兴发[1]，王军[2]，郭大成[3]，姜锦涛[3]，赵鑫[3]

（1.辽宁石油化工大学 石油天然气工程学院，辽宁 抚顺 113001；2.辽河石油勘探局油气工程技术处，辽宁 盘锦 124010；3.中石油辽河油田油气集输公司，辽宁 盘锦 124010）

摘 要：目的 降低腐蚀对油气管线运行的危害。**方法** 通过控制溶液中不同通氮时间，获得不同溶解氧浓度的辽河油田土壤模拟溶液，利用交流阻抗技术和动电位极化技术研究不同的溶解氧浓度对 X70 管线钢在模拟溶液中电化学腐蚀行为的影响，并结合金相显微镜对管线钢表面的腐蚀形貌进行表征，以阐明该条件下不同浓度溶解氧对管线钢腐蚀行为的作用机制。**结果** 在该环境下，X70 钢的腐蚀机理为阳极溶解机制。随着溶解氧含量的不断降低，电极极化电阻变大，腐蚀电流密度明显减小，此时，电极表面点蚀坑数量也变少，点蚀坑的直径变小，金属腐蚀速率显著下降。当溶解氧质量浓度为 10.0 mg/L 时，试件的腐蚀速率最大，腐蚀现象最明显。当溶解氧质量浓度从 10.0 mg/L 降低至 0.3 mg/L 时，金属电极表面生成了一层以 $FeCO_3$ 为主的腐蚀产物膜，产物膜明显抑制了腐蚀反应的进行，对 X70 钢起到保护作用，此时试样腐蚀现象最不明显。**结论** 溶解氧浓度的不同导致了 X70 管线钢电极表面产物膜形态的不同，从而影响了该环境下金属的电化学腐蚀行为。

关键词：溶解氧；X70 管线钢；辽河油田土壤；电化学腐蚀；动电位极化技术

中图分类号：TG172 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2018)10-0186-07

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.10.025

Effect of Dissolved Oxygen on Corrosion of X70 Pipeline Steel in Liaohe Oilfield

XIE Fei[1], WANG Yue[1], WANG Xing-fa[1], WANG Jun[2], GUO Da-cheng[3], JIANG Jin-tao[3], ZHAO Xin[3]

(1.Schoolof Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;
2.Oil and Gas Engineering Technology Division, Liaohe Petroleum Exploration Bureau, Panjin 124010, China;
3.PetroChina Liaohe Oilfield Oil and Gas Gathering and Transportation Company, Panjin 124010, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the harm of corrosion on operationoil and gas pipelines. In the soil simulation solution of Liaohe Oilfield, soil simulation solution with different dissolved oxygen concentration was obtained by controlling different nitrogen pass-through time in the solution. The influence of different dissolved oxygen concentrations on electrochemical corrosion behavior of X70 pipeline steel in soil simulation solution of Liaohe Oilfield was studied by AC impedance technology and potentiodynamic polarization technology. In order to clarify the mechanism of the different concentrations of dissolved oxygen on the corrosion behavior of pipeline steel, the corrosion morphology of the pipeline steel surface was characterized with a met-

收稿日期：2018-07-29；修订日期：2018-09-12

Received：2018-07-29；**Revised**：2018-09-12

基金项目：国家自然科学基金（51604150）；辽宁省博士启动基金（201601324）；辽宁省基本科研项目（L2017LQN016）

Fund: Supported by the National Science Foundation of China (51604150) and Doctor Startup Foundation of Liaoning Province(201601324) and Science Research Foundation of Liaoning Province(Grant numbers L2017LQN016)

作者简介：谢飞（1983—），男，博士，副教授，主要研究方向为油气管道腐蚀与防护。邮箱：xiefei0413@163.com

Biography: XIE Fei (1983—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: corrosion and protection of oil and gas pipeline. E-mail: xiefei0413@163.com

allographic microscope. In such environment, the corrosion mechanism of X70 steel was anodic dissolution mechanism. With the continuous decrease of dissolved oxygen content, the polarization resistance of the electrode becamelarger and the corrosion current density decreased. At this time, the number of pits on the surface of the electrode also decreased, the pit diameter became smaller, and the metal corrosion rate droppedsignificantly. When the dissolved oxygen concentration was 10.0 mg/L, the corrosion rate of the specimen was the largest, and the corrosion phenomenon was most obvious. When the dissolved oxygen content reduced from 10.0 mg/L to 0.3 mg/L, a layer of corrosion product mainly containing $FeCO_3$ was formed on the surface of the metal electrode. The product film significantly inhibited the corrosion reaction and protected the X70 steel. At this time, the corrosion of the sample wasthe least obvious. The difference in dissolved oxygen concentration leads to different morphologiesof the product film on the surface of the X70 pipeline steel electrode and then affects the electrochemical corrosion behavior of the metal in the environment.

KEY WORDS: dissolved oxygen; X70 pipeline steel;Liaohe oil field soil;electrochemical corrosion; potentiodynamic polarization

当前，在油气输送管道的结构组成方面，X70 管线钢因其优异的性能在该领域得到了广泛的应用[1]。然而，随着我国油气管道建设的迅速发展，大量高强度管线被投入使用，管道腐蚀问题也日渐突出[2-3]。埋地管线途经多种不同的地质带，经过长时间运行以后，会受到一定程度的腐蚀，严重时还会导致油气输送发生泄漏，进而造成重大事故[4]。为了降低腐蚀对管线运行造成的危害，必须明确在不同土壤环境中 X70 管线钢腐蚀行为的变化规律，因此开展 X70 管线钢在不同土壤环境中电化学行为的研究十分必要。

土壤中的氧含量变化是影响埋地管道腐蚀行为的重要因素。目前，国内外对 X70 管线钢在不同含氧环境中的腐蚀行为进行了大量研究，但是观点尚未统一，不同腐蚀环境下的溶解氧作用规律并不相同。叶存冬等[5]认为氧元素对 X70 管线钢在含氧溶液中的应力腐蚀性能有一定的促进作用。Sun 等[6]研究了 X70 钢在含 O_2 和 SO_2 杂质的超临界 CO_2 体系中的腐蚀行为，结果表明，O_2 和 SO_2 的共存协同加速了 X70 钢的腐蚀。Liu 等[7]研究发现，在 NS4 模拟溶液中，X70 钢的 SCC 敏感性与溶解氧浓度成反比，不同氧化膜的形式导致腐蚀行为的差异性。然而针对辽河油田土壤环境下溶解氧对 X70 管线钢的腐蚀影响规律尚未见报道。

辽河油田作为主要的东北能源输出地，油气输送管道众多。该地区属于典型的盐碱土壤，腐蚀性较强，通过该土壤的埋地管道腐蚀危险性较高[8]。因此，文中选取 X70 管线钢为研究对象，探究辽河油田土壤环境中溶解氧含量变化对管道电化学腐蚀行为的影响规律，明确溶解氧对管道腐蚀的作用机制，为今后辽河油田油气管道铺设及防腐措施的制定提供科学参考依据。

1　实验方法

本次研究选用的 X70 管线钢板材材料由宝钢提供，其化学成分为：C≤0.16%，Si≤0.45%，Mn≤1.70%，P≤0.020%，S≤0.010%，V≤0.06%，Nb≤0.05%，Ti≤0.06%。在所选材料上挑选约 1cm^2 的面积作为受试对象。该受试对象的背面经铜导线穿引，之后借助环氧树脂完成试样的包封过程，将其包封在聚四氟乙烯中。再利用丙酮对试样进行清洗，用备好的 60$^{\#}$ ~ 1000$^{\#}$水砂纸打磨工作电极，完成后用无水乙醇和去离子水对其加以清洗，将其烘干后留待备用。本次实验溶液模拟的是辽河油田土壤溶液，其化学成分见表 1。

表 1　辽河油田土壤模拟溶液物质组成成分

Tab.1 Composition of simulated Liaohe oilfield soil solution

g/L

$NaHCO_3$	$CaCl_2$	$MgSO_4$	$MgCl_2$	NaCl
2.731	0.364	0.120	0.306	2.254

为了研究辽河油田土壤模拟溶液中的氧含量对材料的影响，首先将其通氮气的时间加以严格控制，借此可以完成对溶液中含氧量的调控。在溶液中通入高纯氮气，之后经由溶解氧测定仪（JPSJ-605）对溶液中含氧量情况进行测定，将模拟溶液中氧气的质量浓度依次控制在 0.3、1.3、6.3、10.0 mg/L。根据辽河地区的理化性质，利用 5%的 NaOH 溶液，调节模拟溶液的 pH 值为 9.0。本次实验所选用的是三电极体系，其中工作电极、辅助电极以及参比电极依次是 X70 管线钢试件、铂片和饱和甘汞电极（SCE）。另外选用 PARSTAT2273 仪器完成交流阻抗和动电位极化曲线的测量。在其自腐蚀电位下，测量频率范围为 100 kHz~10 mHz，交流正弦激励信号幅值为 10 mV。然后借助 ZSimpWin 软件根据实验所得结果拟合等效电路。在进行动电位极化的扫描时，速率为 0.5 mV/s，电位范围为相对开路电位（OCP）±0.3 V。将受试对象放置模拟溶液中浸泡 30 d，利用金相显微镜观察腐蚀形貌。另外，为了确保其可以进行重复性验证实验，对每个实验都另做三个平行试验。实验温度均为室温，电极电位均是相对于 SCE 而言。

2　实验结果

2.1　极化曲线

图 1 是在不同溶解氧含量的辽河油田土壤溶液中 X70 钢的极化曲线。可以看出，当溶液中溶解氧浓度在缓慢下降时，受试对象的极化曲线向左移动。此时其腐蚀电流密度也出现显著下降，受试对象的抗腐蚀性获得了有效的提升[9]。试件的极化曲线阳极区没有出现明显的活化-钝化转变区，这表明电极过程为阳极活化极化。

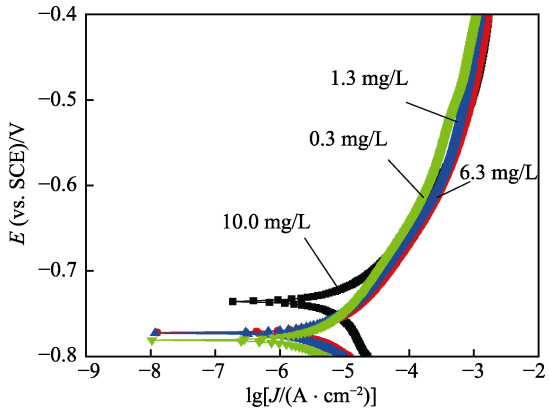


图 1　辽河油田土壤模拟溶液中 X70 钢极化曲线

Fig.1 Polarization curves of X70 pipeline steel in Liaohe oilfield simulated soil solution

图 2 为 X70 钢在不同溶解氧浓度辽河油田土壤模拟溶液中腐蚀电流密度的拟合结果。由图 2 可以看出，土壤溶液中的溶解氧从 0.3 mg/L 上升到 10.0 mg/L 时，试件的自腐蚀电流增大，X70 钢的腐蚀现象越来越明显。当溶解氧达到 10.0 mg/L 时，试件的腐蚀速率最大，腐蚀现象最明显。

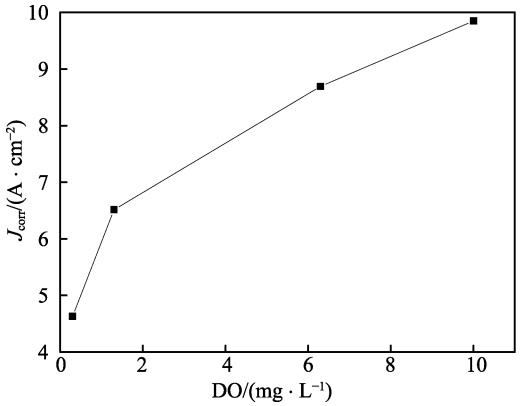


图 2　X70 钢在不同溶解氧浓度辽河油田土壤模拟溶液中腐蚀电流密度的拟合结果

Fig.2 Fitting results of corrosion current density of X70 steel in Liaohe oilfield simulated soil solution with different dissolved oxygen concentrations

2.2　交流阻抗

图 3 为 X70 管线钢在不同溶解氧含量下的 EIS 图谱。由图 3 可以看出，试件的交流阻抗谱（EIS）由单独的半圆形容抗弧构成，在低频段出现上升说明在电极表面的反应过程中生成了新的产物和发生了新的化学反应[10]。溶液中的溶解氧浓度越小，则弧的直径越大，相应地其容抗弧幅值也越来越大。该结果表明，当材料在发生腐蚀的过程中，其极化电阻出现增大时，会导致反应过程中受到的阻力增大，最终使受试对象表现出腐蚀速率的减弱[11-12]。

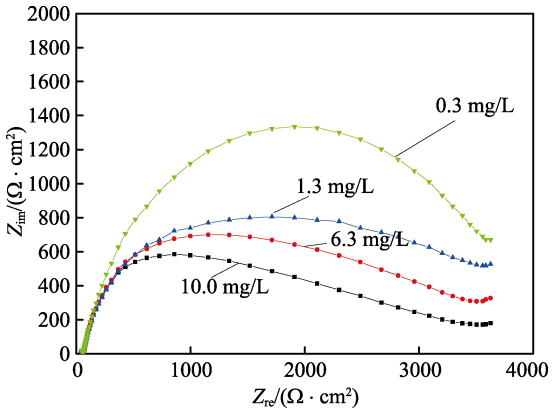


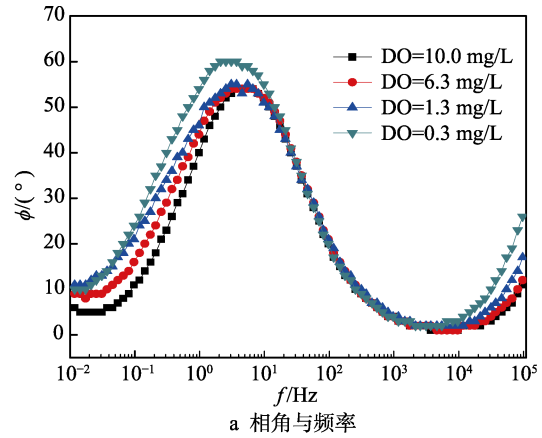
图 3　X70 钢在不同溶解氧浓度条件下的交流阻抗图谱

Fig.3 AC impedance spectra of X70 steel at different concentrations of dissolved oxygen

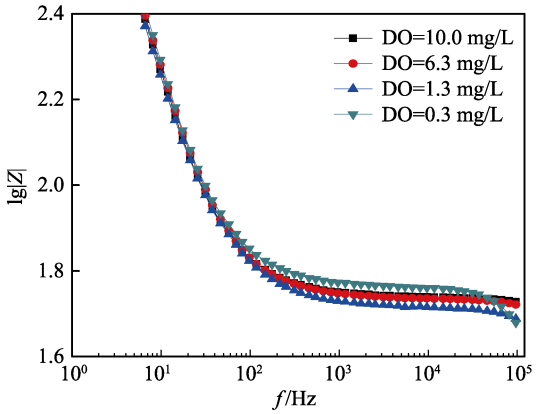
图 4 为不同溶解氧浓度辽河油田土壤模拟溶液中 X70 钢的阻抗图谱。由图 4a 可以看出，Bode 图体现为一个时间常数，说明试样表面发生单一腐蚀反应[13]。从图 4b 可以看出，随着溶解氧浓度的增大，阻抗幅值降低，极化电阻减小。由此可见，X70 钢随着溶解氧浓度的增大，腐蚀速率变大，这与图 3 的结果相同。

图 5 为 X70 钢在不同溶解氧浓度辽河油田土壤模拟溶液中交流阻抗的等效电路 $R(C(RW(QR)))$。其中，R_s 代表反应过程中的溶液电阻；C_{dl} 则代表着材料界面的双电层电容；W 和 Q 分别表示韦伯阻抗和电极表面腐蚀产物结合层之间的非理想电容；R_t、R_f 以及 R_p 依次代表整个反应过程中的电荷转移电阻、生成的腐蚀产物膜层电阻和整个反应过程中的极化电阻，定义 $R_p=R_t+R_f$。一般来说当极化电阻越来越大时，此时金属材料发生腐蚀的速率就越来越小[14]。当实验条件不同时，腐蚀产物也随之不断改变，因此等效电路中的纯电容 C 用元件 Q 来代替，$Q=(j\omega)^{-n}/Y_0$。式中，n 表示的是弥散指数，作为一种拟合常数，与电极表面状态有一定的关联[15]；Y_0 则表示的是导纳常数。另外通过对 n 和材料腐蚀产物膜的研究发现，两者呈正相关关系，也就是说，n 越大，其腐蚀产物膜就愈致密，这会使金属的抗腐蚀性能加强[16]。

表 2 为 X70 钢在不同溶解氧浓度的辽河油田土壤模拟溶液中的阻抗图谱拟合结果。从表 2 中可以发现，当土壤模拟溶液中氧的质量浓度从 10.0 mg/L 下



a 相角与频率



b 阻抗与频率

图 4　X70 钢在不同溶解氧浓度辽河油田土壤模拟溶液中的 Bode 图

Fig.4 Bode diagram of X70 steel in Liaohe oilfield simulated soil solution with different dissolved oxygen concentrations: a) phase angle and frequency; b)impedance and frequency

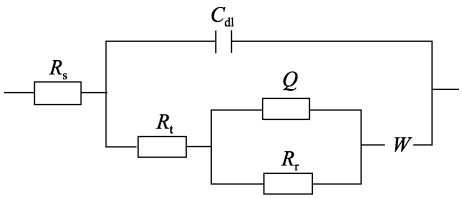


图 5　X70 钢在不同溶解氧浓度辽河油田土壤模拟溶液中的等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of X70 steel in Liaohe oilfieldsimulated soil solution with different dissolved oxygen concentrations

表 2　X70 钢在不同溶解氧浓度下的阻抗图谱拟合参数

Tab.2. Impedance spectra fitting parameters of X70 steel in Liaohe Oilfield simulated soil solution with different dissolved oxygen concentrations

Dissolved oxygen concentration /(mg·L^{-1})	R_s/(Ω·cm^2)	R_t/(Ω·cm^2)	R_f/(Ω·cm^2)	n	C_{dl} /(×10^{-8}F·cm^{-2})	R_p /(Ω·cm^2)
10.0	12.24	52.68	1568	0.682	4.26	1620.68
6.3	13.46	42.66	1828	0.714	2.96	1870.66
1.3	14.67	21.46	2316	0.744	1.74	2337.46
0.3	17.64	10.68	2866	0.816	2.04	2876.68

降到 0.3 mg/L 时，n 从 0.682 增大到 0.816，这表明反应过程中的产物膜变得越来越致密均匀[17]。试样的极化电阻 R_p 从 1620.68 Ω·cm^2 增大到 2876.68 Ω·cm^2，随着溶解氧浓度的减少反而逐渐增大。该结果表明，随着溶氧量的下降，溶液的极化电阻增大，因此金属材料的腐蚀阻力会跟着明显增大，最终表现出受试对象腐蚀速率的下降。这是因为当氧浓度过低时，实验过程中生成致密而均匀的腐蚀产物膜，对金属起到保护作用，该试验结果与极化曲线所反映出的规律相一致。

2.3　腐蚀形貌

图 6 为在金相显微镜下观察得到的 X70 钢腐蚀形貌。由图 6 可以看出，当溶解氧为 6.3 mg/L（图 6b）和 10.0 mg/L（图 6a）时，X70 钢表面点蚀坑数量较多，直径较大，且连成一片，腐蚀现象较为明显。当溶解氧为 1.3 mg/L（图 6c）时，X70 钢表面点蚀坑较图 6a 和图 6b 明显减少，且腐蚀坑面积较小，位置也较分散，尽管如此，该条件下钢材仍存在明显的点蚀坑。当溶解氧为 0.3 mg/L（图 6d）时，X70 钢表面存在少量的点蚀坑，与图 6c 相比，腐蚀现象明显减轻，这表明该反应过程中极化反应受到了明显的抑制。

3　分析与讨论

本文探究在不同溶解氧含量的辽河油田土壤溶液中 X70 钢的极化曲线、交流阻抗图谱和腐蚀形貌图，通过对结果的观察与分析不难发现，X70 钢的阴极反应是吸氧反应[18]，具体过程为：

$$O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^- \quad (1)$$

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e \quad (2)$$

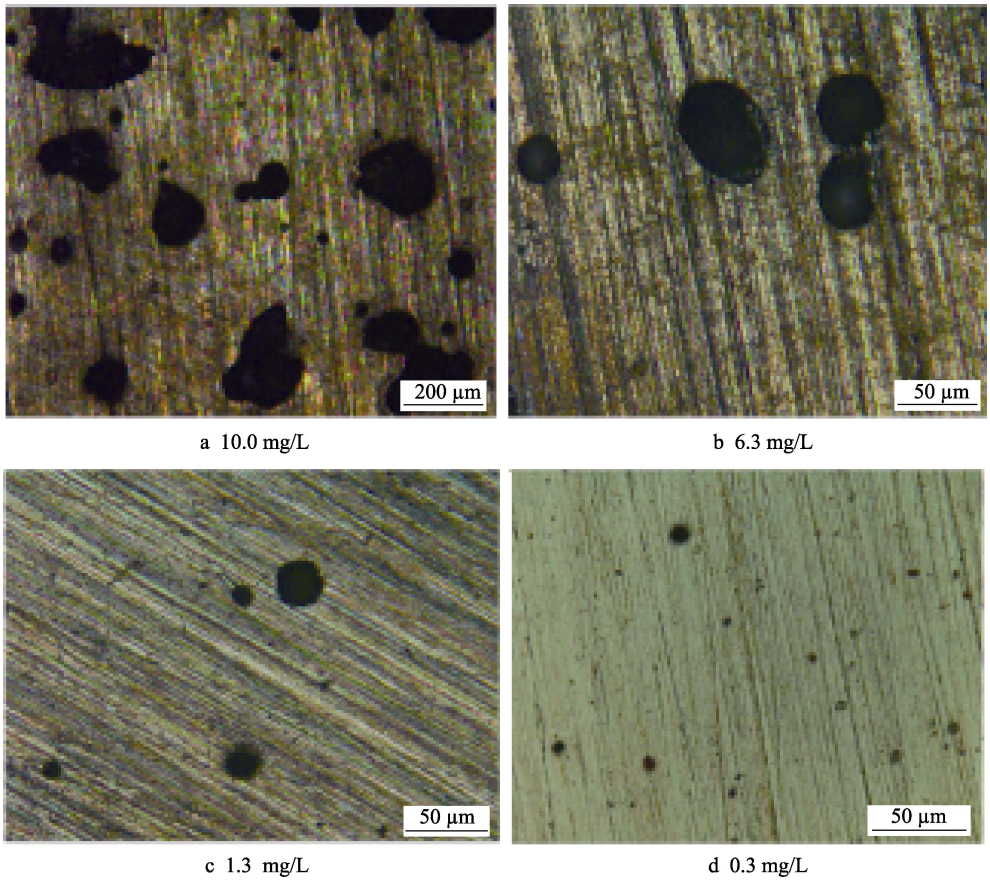
$$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 \quad (3)$$

$$Fe(OH)_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 \quad (4)$$

$$Fe(OH)_3 \rightarrow FeOOH + H_2O \quad (5)$$

$$8FeOOH + Fe^{2+} + 2e \rightarrow 3Fe_3O_4 + 4H_2O \quad (6)$$

当溶解氧为 10.0 mg/L 和 6.3 mg/L 时，由于氧含量充足，此时会有 Fe_3O_4 大量生成[19]。随着反应的不断发生，溶液中的氧含量越来越少，当溶解氧浓度减小到一定程度时，会导致反应(6)中断，此时就不会再生成 Fe_3O_4，因此腐蚀产物中会包含 Fe_3O_4 和 $Fe(OH)_2$。尽管模拟溶液中含有的腐蚀产物 Fe_3O_4 会对电极表面发挥一定的保护作用[20-21]，但是，当发生电极反应后，生成的产物很容易与试件相分离，这会使原本均匀致密的产物膜变得疏松多孔，此时腐蚀产物膜对金属电极表面的保护作用随之减弱[22]。除此之外，在其腐蚀产物中含有 $Fe(OH)_2$，属于一种多孔的沉积层[23]，而且其孔径也相对来说比较大，对金属的阳极溶解保护性很差[24]。辽河油田土壤模拟溶液中存在着的 Cl^- 和 HCO_3^- 等侵蚀性离子，会穿透疏松的腐蚀产物膜层，



a 10.0 mg/L　　b 6.3 mg/L

c 1.3 mg/L　　d 0.3 mg/L

图 6　X70 钢在不同溶解氧浓度下的的腐蚀形貌

Fig.6 Corrosion morphology of X70 steel at different dissolved oxygen concentrations

侵蚀电极表面，改变其表面的化学成分，并继续发生化学反应，最终使得金属的局部表面产生严重的腐蚀现象。因此，当辽河油田土壤溶液中溶解氧浓度较高时，X70 钢会有较大的腐蚀速率和电流密度，受腐蚀现象较为严重。

当溶解氧的质量浓度下降到 1.3 mg/L 时，氧气含量较低，应该无法使反应全部进行，不会出现大量 Fe^{2+}，会导致生成 Fe_3O_4 的反应(6)中断。因此在氧含量较低的情况下，腐蚀产物中不会存在 Fe_3O_4，但溶液中的 $Fe(OH)_2$ 会与部分 HCO_3^- 反应：

$$Fe(OH)_2 + HCO_3^- \rightarrow FeCO_3 + H_2O + OH^- \quad (7)$$

因此，会有 FeOOH 和少量 $FeCO_3$ 生成，具体如图 6c 所示。FeOOH 同样是一种多孔结构，但从孔密度上来看，要远远低于 $Fe(OH)_2$，对于模拟溶液中金属材料的保护效果要优于 $Fe(OH)_2$[25]。作为另一种产物，$FeCO_3$ 是一种不错的腐蚀产物膜，会组成致密均匀的保护膜，可以很好地弥补 FeOOH 的缺陷，因此其能够有效地促进腐蚀产物膜变得更致密和均匀，进而发挥保护金属材料的作用[26]。当辽河油田土壤模拟溶液中溶解氧浓度较低时，X70 钢的腐蚀电流密度和腐蚀速率会明显降低。

当溶解氧的质量浓度为 0.3 mg/L 时，溶液中的氧浓度不足以维持(3)以后反应的进行，会生成 $Fe(OH)_2$，剩余的 Fe^{2+} 会与 HCO_3^- 反应生成 $Fe(HCO_3)_2$ 和 $FeCO_3$（图 6d），具体反应为：

$$Fe^{2+} + HCO_3^- \rightarrow Fe(HCO_3)_2 \quad (8)$$

$$Fe(HCO_3)_2 \rightarrow FeCO_3 + CO_2 + H_2O \quad (9)$$

通过式(8)和式(9)不难发现，在其腐蚀产物中拥有 $Fe(HCO_3)_2$ 和 $FeCO_3$ 两种物质。将该结果与溶液中溶解氧浓度为 1.3 mg/L 时对比，发现反应所得到的腐蚀产物膜相较于后者要更加的致密均匀，而且其对于金属的保护作用也得到了显著的提升。因此，X70 钢在溶解氧浓度极低的辽河油田土壤模拟溶液中腐蚀速率较小。

4　结论

1）在辽河油田土壤模拟溶液中，溶解氧浓度（DO）对 X70 钢的腐蚀过程主要受阳极活化溶解控制。当溶液中含有的氧浓度越来越低时，其腐蚀电流密度同样跟着发生下降，腐蚀速率也逐渐减小。当溶解氧为 10.0 mg/L 时，试样的腐蚀电流密度最大，腐蚀程度最严重。

2）溶液中溶解氧浓度不同时，会产生不同的化学反应，这会导致腐蚀产物发生变化，从而使腐蚀速率改变。溶解氧浓度越低，试件表面生成的腐蚀产物

形成的产物膜越致密，从而降低腐蚀速率。

3）在实际工程中，当土壤为碱性时，与本文研究的其他含氧量的土壤环境相比，建议尽量使管线钢处于溶解氧趋近于 0.3 mg/L 的埋地环境中，以降低腐蚀对管线运行的危害。

参考文献：

[1] MOHTADI-BONAB M A, ESKANDARI M, KARIMDADASHI R, et al. Effect of different microstructural parameters on hydrogen induced cracking in an API X70 pipeline steel[J]. Metals & materials international, 2017, 23(4): 726-735.

[2] XU L Y, CHENG Y F. Reliability and failure pressure prediction of various grades of pipeline steel in the presence of corrosion defects and pre-strain[J]. International journal of pressure vessels &piping, 2012, 89(1): 75-84.

[3] LI S X, YU S R, ZENG H L, et al. Predicting corrosion remaining life of underground pipelines with a mechanically-based probabilistic model[J]. Journal of petroleum science &engineering, 2009, 65(3): 162-166.

[4] LI X G, ZHANG D W, LIU Z Y, et al. Share corrosion data[J]. Nature, 2015, 527: 441-442.

[5] 叶存冬, 孔德军, 张垒. 温度对 X70 管线钢在含氧溶液中应力腐蚀的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015(7): 2432-2438.
YE Cun-dong, KONG De-jun, ZHANG Lei. Effects of temperature on stress corrosion of X70 pipeline steel in solution with oxygen[J]. Journal of central south university (Science and technology), 2015(7): 2432-2438.

[6] SUN J, SUN C, WANG Y. Effects of O_2 and SO_2 on water chemistry characteristics and corrosion behavior of X70 pipeline steel in supercritical CO_2 transport system[J]. Industrial &engineering chemistry research, 2018, 57(6): 432-438.

[7] LIU Z Y, LI X G, DU C W, et al. Effect of dissolved oxygen on stress corrosion cracking of X70 pipeline steel in near-neutral pH solution[J]. Corrosion, 2010, 66(1): 99-106.

[8] JIA J, ZONG S, HU L, et al. The dynamic change of microbial communities in crude oil-contaminated soils from oil fields in China[J]. Journal of soil contamination, 2017, 26(2): 171-183.

[9] 谢飞, 王丹, 吴明, 等. 溶解氧对 X80 管线钢腐蚀行为的影响及其机制[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 60-64.
XIE Fei, WANG Dan, WU Ming, et al. Effect of dissolved oxygen on corrosion behavior of X80 pipeline steel and its mechanism[J]. Journal of iron and steel research, 2015, 27(3): 60-64.

[10] LUO H, DONG C F, CHENG X Q, et al. Electrochemical behavior of 2205 duplex stainless steel in NaCl solution with different chromate contents[J]. Journal of materials engineering & performance, 2012, 21(7): 1283-1291.

[11] LI Z, HAO H, DING Q. Electrochemical tests on the optimum cathodic protection potential of X70 steel in the presence of AC interference[C]// International conference on computer distributed control and intelligent environmental monitoring. [s. l.]: IEEE, 2011: 166-171.

[12] 张弟, 梁平, 史艳华, 等. 温度和溶解氧对 X80 管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中腐蚀行为的影响[J]. 热加工工艺, 2016(8): 70-73.
ZHANG Di, LIANG Ping, SHI Yan-hua, et al. Effects of temperature and dissolved oxygen on corrosion behavior of X80 pipeline steel in simulated Ku'eler soil solution[J]. Hot working technology, 2016(8): 70-73.

[13] 宋博强, 陈旭, 马贵阳, 等. SRB 对 X70 管线钢在近中性 pH 溶液中腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(3): 212-218.
SONG Bo-qiang, CHEN Xu, MA Gui-yang, et al. Effect of SRB on corrosion behavior of X70 pipeline steel in-near-neutral pH solution[J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 2016, 36(3): 212-218.

[14] 胥聪敏, 张璇, 罗立辉, 等. X100 管线钢在含 SRB 的近中性土壤溶液中的腐蚀行为[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(7): 562-569.
XU Cong-min, ZHANG Xuan, LUO Li-hui, et al. Corrosion behavior of X100 pipeline steel in near neutral pH soil solution with action of SRB[J]. Journal of iron and steel research, 2017, 29(7): 562-569.

[15] 谢飞, 吴明, 陈旭, 等. SO_4^{2-}对 X80 管线钢在库尔勒土壤模拟溶液的影响[J]. 中南大学学报：自然科学版, 2013, 44(1): 424.
XIE Fei, WU Ming, CHEN Xu, et al. Effects of SO_4^{2-} on corrosion behavior of X80 pipeline steel in simulated Ku'erle soil solution[J]. Journal of central south university: science and technology, 2013, 44(1): 424.

[16] 谢飞, 王丹, 吴明, 等. 溶解氧对 X80 管线钢腐蚀行为的影响及其机制[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 60-64.
XIE Fei, WANG Dan, WU Ming, et al. Effect of dissolved oxygen on corrosion behavior of X80 pipeline steel and its mechanism[J]. Journal of iron and steel research, 2015, 27(3): 60-64.

[17] ZHANG D, QIAN H, WANG L, et al. Comparison of barrier properties for a superhydrophobic epoxy coating under different simulated corrosion environments[J]. Corrosion science, 2016, 103: 230-241.

[18] 吴明, 宗月, 谢飞, 等. 模拟海水中 Cl^-浓度对 Q235 和 X70 管线钢腐蚀行为的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(2): 62-66.
WU Ming, ZONG Yue, XIE Fei, et al. Effect of chloridion concentration on corrosion behavior of Q235 and X70 pipeline steel in simulated seawater[J]. Heat treatment ofmetals, 2017, 42(2): 62-66.

[19] 焦宏涛, 李新东, 李胡勇. 西北土壤环境下 X100 管线钢的腐蚀行为分析[J]. 铸造技术, 2017(8): 1819-1821.
JIAO Hong-tao, LI Xin-dong, LI Hu-yong. Corrosion behavior of X100 pipeline steel in northwest soil environ-

ment[J]. Foundry technology, 2017(8): 1819-1821.

[20] MCINTIRE G, LIPPERT J, YUDELSON J. The effect of dissolved CO_2 and O_2 on the corrosion rate of iron[J]. Corrosion, 1990, 46(2): 91-95.

[21] PARK J J, PYUN S I, NA K H, et al. Effect of passivity of the oxide film on low-pH stress corrosion cracking of API 5L X-65 pipeline steel in bicarbonate solution[J]. Corrosion, 2002, 58(4): 329-336.

[22] LI Y, WU J, ZHANG D, et al. The electrochemical reduction reaction of dissolved oxygen on Q235 carbon steel in alkaline solution containing chloride ions[J]. Journal of solid state electrochemistry, 2010, 14(9): 1667-1673.

[23] 李伟善, 蔡松琦. Fe/硼酸盐缓冲溶液界面性质的交流阻抗研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2003(3): 80-89.
LI Wei-shan, CAI Song-qi. The interaction impedance study of the Fe/boric acid buffer interface[J]. Journal of South China Normal University(Natural science), 2003 (3): 80-89.

[24] SARIN P, SNOEYINK V L, BEBEE J, et al. Iron release from corroded iron pipes in drinking water distribution systems: Effect of dissolved oxygen[J]. Water research, 2004, 38(5): 1259-1269.

[25] PARK J J, PYUN S I, NA K H, et al. Effect of passivity of the oxide film on low-pH stress corrosion cracking of API 5L X-65 pipeline steel in bicarbonate solution[J]. Corrosion, 2002, 58(4): 329-336.

[26] LOUAFI Y, LADJOUZI M A, TAIBI K. Dissolved carbon dioxide effect on the behavior of carbon steel in a simulated solution at different temperatures and immersion times[J]. Journal of solid state electrochemistry, 2010, 14(8): 1499-1508.