

# API X65、316L 不锈钢及 Inconel 625 间电偶 腐蚀风险研究

田永芹<sup>1</sup>, 常炜<sup>1</sup>, 胡丽华<sup>1</sup>, 贾旭<sup>1</sup>, 周晓红<sup>1</sup>, 邢云颖<sup>2</sup>, 余晓毅<sup>1</sup>, 于湑<sup>1</sup>

(1.中海油研究总院, 北京 100029; 2.安科工程技术研究院(北京)有限公司, 北京 100083)

**摘 要:** 目的 确定 API X65、316L 不锈钢及 inconel625 相互偶接后的电偶腐蚀风险。方法 采用电化学测试、标准电偶腐蚀评价实验和腐蚀模拟实验对电偶腐蚀进行分析研究。结果 在模拟地层水中, 经过电化学测试, X65 的自腐蚀电位在  $-0.75$  V 左右, 316L 和 625 的电位在  $-0.35$  V 左右。对于标准电偶腐蚀评价实验, 敞口溶液及  $\text{CO}_2$  分压分别为 100 kPa 和 500 kPa 的溶液中, X65 与 316L 之间的电偶电流最大, 其次是 X65 与 625, 316L 和 625 之间的电偶电流最小, 几乎为零。通过电偶腐蚀模拟试验可知, X65 与 316L 或 625 偶接, 都发生了明显的电偶腐蚀, 而且 X65 侧靠近焊接接头位置发生了严重的沟槽腐蚀, 未偶接异金属时 X65 的平均腐蚀速率为 1.24 mm/a, 异金属接触导致的电偶腐蚀使 X65 的腐蚀速率增加, X65 与 316L 偶接后的平均腐蚀速率为 1.49 mm/a, X65 与 625 偶接后的平均腐蚀速率为 1.75 mm/a。X65 与 316L 偶接后的局部腐蚀速率最大为 16.8 mm/a, X65 与 625 偶接后的局部腐蚀速率高达 26.4 mm/a, 由于电偶腐蚀导致的局部腐蚀速率要比 X65 的自腐蚀速率超出十几倍。X65 与 316L 偶接的电偶腐蚀的速率要比 X65 和 625 偶接的大, 316L 和 625 间几乎没有电偶腐蚀发生。结论 X65、316L 和 625 间偶接的电偶腐蚀风险大于 X65 与 316L 的, 316L 和 625 间偶接的电偶腐蚀风险较小。

**关键词:** 316L; API X65; inconel625; 电偶腐蚀; 电化学测试; 模拟试验

**中图分类号:** TG172.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)05-0128-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.05.020

## Risk of Galvanic Corrosion among API X65, 316L and Inconel 625

TIAN Yong-qin<sup>1</sup>, CHANG Wei<sup>1</sup>, HU Li-hua<sup>1</sup>, JIA Xu<sup>1</sup>,  
ZHOU Xiao-hong<sup>1</sup>, XING Yun-ying<sup>2</sup>, YU Xiao-yi<sup>1</sup>, YU Tian<sup>1</sup>

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100029, China; 2. Safetech Research Institute, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To determine the galvanic corrosion risk among API X65, 316L and inconel 625. **Methods** Electrochemical corrosion test, standard galvanic corrosion evaluation experiment and simulation experiment were carried out to analyze the corrosion risk. **Results** The corrosion potential of X65 was around  $-0.75$  V, while that of 316L and 625 potential was both around  $-0.35$  V. For standard galvanic corrosion evaluation experiment, in the open solution or 100 kPa and 500 kPa  $\text{CO}_2$  solution, the galvanic current of X65-316L was the largest, followed by X65-625 and then 316L-625. Galvanic corrosion occurred when X65 met either 316L or 625. For simulation experiment, obvious galvanic corrosion occurred among X65, 316L

收稿日期: 2016-01-16; 修订日期: 2016-04-26

Received: 2016-01-16; Revised: 2016-04-26

作者简介: 田永芹(1983—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事腐蚀与防护方面的工作和研究。

**Biography:** TIAN Yong-qin(1983—), Female, Master, Engineer, Research focus: corrosion and protection.

and 625. There was a serious groove corrosion near the weld joint position in X65. The corrosion rate of X65 without galvanic corrosion was 1.24 mm/a. The galvanic corrosion increased this value. The average galvanic corrosion rate of X65-316L was 1.49 mm/a and that of X65-625 was 1.75 mm/a. The local galvanic corrosion rate of X65-316L was 16.8 mm/a and that of X65-625 was 26.4 mm/a, which was over ten times as high as the corrosion rate of X65 without galvanic corrosion. The galvanic corrosion rate of X65 and 316L was larger than that of X65 and 625. There was almost no galvanic corrosion between 316L stainless steel and 625 nickel base alloy. **Conclusion** Galvanic corrosion risk between X65 and 316L was larger than that between X65 and 625. Galvanic corrosion risk between 316L and 625 was very small.

**KEY WORDS:** 316L; API X65; inconel625; galvanic corrosion; electrochemical corrosion test; simulation experiment

海上油气开发工程可选用的材料种类很多,包括碳钢、合金钢和高镍基合金等材料,如果从经济成本上考虑,不锈钢、高镍基合金等耐蚀材料不可能大量使用<sup>[1-2]</sup>,需要根据介质输送条件选择使用。由于操作条件及设备重要性不同,不同部位会采用不同的材质,因此,在项目中经常会遇到异金属连接的情况,异金属连接会存在电偶腐蚀<sup>[3-4]</sup>。电偶腐蚀已有大量文献报道,研究表明<sup>[5-7]</sup>,电偶腐蚀行为不仅与电偶对材料的电化学性质有关,而且与溶液介质中离子的作用、溶液 pH 值、溶液流速、阴阳极面积比、电偶对距离、温度等因素有关。还有文献分别研究了 API X70、N80 或钛合金等异金属材料的电偶腐蚀行为<sup>[8-16]</sup>。

本文开展试验研究,通过电化学测试及标准电偶腐蚀评价实验明确了 X65、316L 及 625 间的电偶腐蚀倾向性,并通过某项目的腐蚀环境模拟实验分析比较了 X65、316L 及 625 间两两偶接的电偶腐蚀风险。

1 试验

实验材料为 X65、316L 及 625。实验介质为地层水模拟溶液,用分析纯化学试剂和去离子水配制,其中,总矿化度为 15 885.62 mg/L, Cl<sup>-</sup> 质量浓度为 8542.03 mg/L, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 质量浓度为 671.22 mg/L。实验前预先向模拟地层水溶液中通入高纯 N<sub>2</sub> 除氧,然后通入 CO<sub>2</sub> 达到 100 kPa 分压,实验温度为 30 ℃。

电化学测试采用三电极体系:工作电极为研究材料,切割为 10 mm×10 mm×3 mm 的方形试样,用环氧树脂封装后,工作面用水砂纸逐级打磨到 2000<sup>#</sup>,清洗、除油、冷风吹干后备用;参比电极为饱和甘汞电极;辅助电极为铂电极。采用 gamery 电化学工作站测试试样的自腐蚀电位及极化曲线,动电位扫描速率为 0.5 mV/s,电位扫描范围为

-0.2~0.8 V (相对于开路电位)。

电偶腐蚀评价实验参照 ASTM G71<sup>[16]</sup>金属材料电偶腐蚀试验方法进行。将 X65、316L 和 625 切割成 50 mm×30 mm×2 mm 的试样,试样表面用 360<sup>#</sup>砂纸打磨、清洗、除油,备用。将 X65-316L、X65-625 和 316L-625 组成电偶对,试样与导线进行连接并在连接处用硅胶涂封,阴阳极暴露面积为 1:1。实验时,将配好的偶对放入电化学釜中,每一偶对的两个组元并排垂直放置,两者距离为 30 mm,添加实验溶液,使液面处在试样涂封区,偶联试样中间通过导线相连。试验第一天,分别在 1、4、8、24 h 测量偶联试样的电偶电流,从第二天开始,每日上、下午各测试一次,实验周期为 7 天。实验样品及条件如表 1 所示。测试装置如图 1 所示。

表 1 电偶腐蚀评价实验列表  
Tab.1 List of galvanic corrosion evaluation experiments

Test condition	Sample	Cathode and anode area ratio	Test time/d
Open air, 30 ℃, simulated formation water	X65-316L	1:1	7
	X65-625	1:1	
	316L-625	1:1	
100 kPa CO <sub>2</sub> , 30 ℃, simulated formation water	X65-316L	1:1	7
	X65-625	1:1	
	316L-625	1:1	
500 kPa CO <sub>2</sub> , 30 ℃, simulated formation water	X65-316L	1:1	1
	X65-625	1:1	
	316L-625	1:1	

将尺寸为 50 mm×20 mm×3 mm 的 X65 和 625、X65 和 316L、316L 和 625 试样两两对接焊接,另外准备尺寸为 100 mm×20 mm×3 mm 的 X65 对比试样。模拟环境试验在高温高压旋转釜中进行,试验温度为 30 ℃, CO<sub>2</sub> 分压为 500 kPa,液相流速为 0.77 m/s,试验周期为 7 天,样品间采取焊接方式,实验前进行除油清洗称重,试验结束后除锈称

重,并通过截面观察沟槽深度并计算腐蚀速率。实验前试样如图2所示。

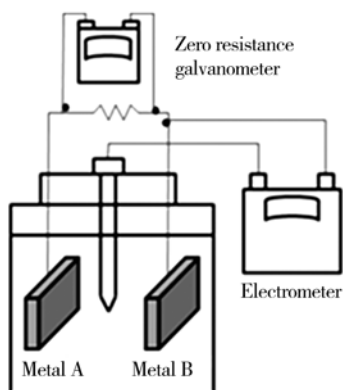


图1 电偶腐蚀测试装置  
Fig.1 Galvanic corrosion test device

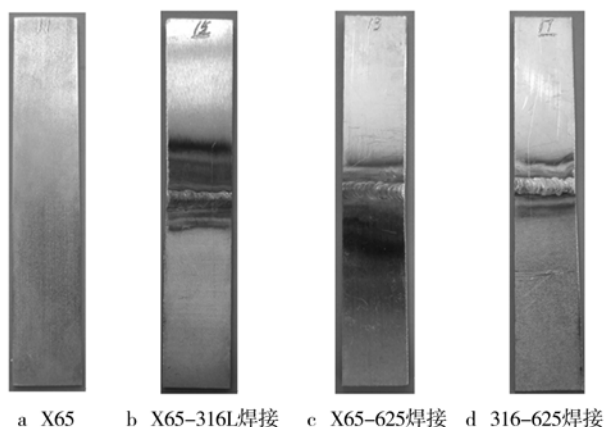


图2 焊接样品实验前照片

Fig.2 Welding sample photos before experiment: a) X65, b) X65-316L welding, c) X65-625 welding, d) 316-625 welding

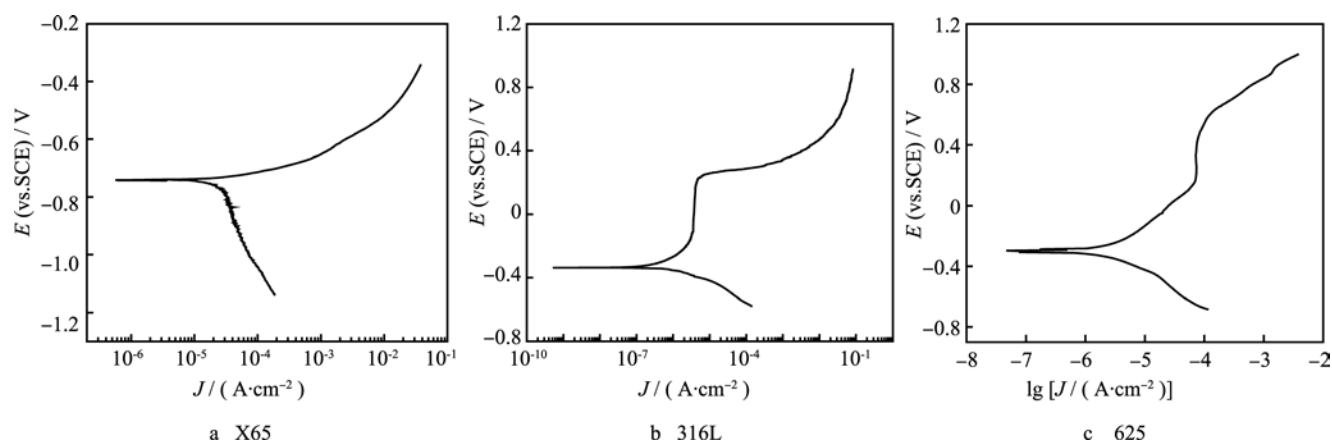


图4 模拟工况环境下的极化曲线

Fig.4 The polarization curves in the simulated environment

根据三种材料的电化学行为,可以预测两两偶接后的电偶腐蚀的倾向性。X65 和 316L、625 两种材料间的腐蚀电位差都很大,当 X65 与任何一种

## 2 结果与分析

### 2.1 电化学测试结果分析

图3为X65、316L和625三种材料在30℃、100 kPa CO<sub>2</sub>的模拟地层水溶液中的自腐蚀电位随时间的变化关系。可以看出,自腐蚀电位比较稳定,X65的自腐蚀电位在-0.75 V左右,316L和625的电位在-0.35 V左右,二者相差不大。

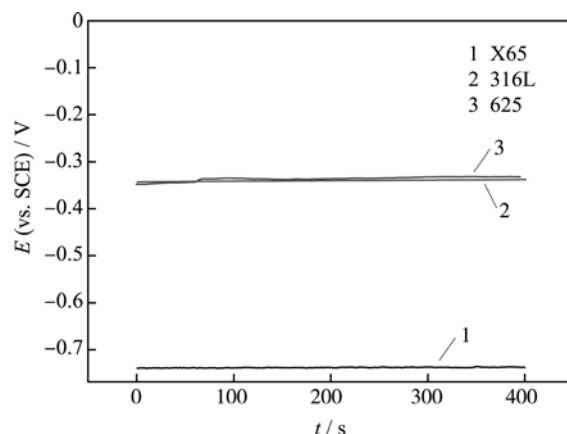


图3 X65、316L和625在模拟工况环境下的自腐蚀电位  
Fig.3 The self corrosion potential of X65, 316L and 625 in the simulated environment

图4为三种材料在30℃、100 kPa CO<sub>2</sub>的模拟地层水中的极化曲线,可以看出,X65的阳极极化曲线为活化状态,316L的阳极极化曲线出现了明显的钝化,说明316L能在100 kPa CO<sub>2</sub>中形成钝化膜。

材料偶接时,X65作为电偶对的阳极,腐蚀速率增加;而316L和625作为宏观阴极受X65提供的阴极保护电流,腐蚀速率降低。316L和625两种材

料间的电位相差不大,二者偶接时,电偶腐蚀效应较弱。

## 2.2 标准电偶腐蚀评价实验结果分析

图 5 为 X65、316L、625 三种金属材料在敞口溶液里暴露面积比为 1 : 1 时的电偶腐蚀试验结果,从电位测试结果可以看出,X65 的腐蚀电位( -0.75 V 左右)与另外两种材料间的腐蚀电位差相差较大,而 316L 和 625 之间的电位差相差很小,都在 -0 V 至 -0.2 V 之间。从图 5a 可以看出,电偶对刚放入溶液中时,两者之间产生了 0.7 mA 的偶联电流,然后开始极化,电流迅速减小,140 h 之后,极化结束,电流趋于稳定,维持在 0.15 mA 左右。X65-625 偶联电流随时间的变化(图 5c)同图 5a 的变化趋势基本相同,不同点在于起始偶联电流大,在 0.95 mA 左右,在 100 h 后,偶联电流在 0.4 mA 左右出现起伏,在试验时间内没有出现稳定极化结束现象。从图 5 可以看出,X65-316L 之间的电偶电流最大,其次是 X65-625,316L 和 625 之间的电偶电流最小,几乎为零(图 5e)。

图 6 为 X65、316L、625 三种金属材料在 100 kPa CO<sub>2</sub>、暴露面积比为 1 : 1 条件下的电偶腐蚀试

验结果,从电位测试结果可以看出,与敞口溶液里的相比规律一致,碳钢 X65 和另外两种材料间的腐蚀电位差相差较大,而 316L 和 625 之间的电位差相差较小,625 电位略负于 316L。与敞口溶液相比,电位都有所降低。316L 和 625 的电位相对于敞口溶液里的有所负移,因为在 CO<sub>2</sub> 条件下影响钝化膜的性能。从图 6 可以看出, X65-625 之间的电偶电流最大,其次是 316L 和 X65, 625 与 316L 之间的电偶电流最小,几乎为零,与敞口溶液里的规律一致。

图 7 为 X65、316L、625 三种金属材料在 500 kPa CO<sub>2</sub>、暴露面积比为 1 : 1 条件下的电偶腐蚀试验结果,可以看出, X65-625 之间的电偶电流最大,其次是 316L 和 X65, 625 与 316L 之间的电偶电流最小,几乎为零,与敞口溶液里和 100 kPa CO<sub>2</sub> 条件下的规律一致。

X65、316L 和 625 三种材料之间的电偶腐蚀试验结果表明, X65 与 316L 或 625 偶接,都会发生电偶腐蚀, 316L 和 X65 偶接,电偶腐蚀的速率比 625 和 X65 偶接的大; 316L 和 625 间电偶腐蚀趋势相对较小,二者偶接,几乎没有电偶腐蚀发生。

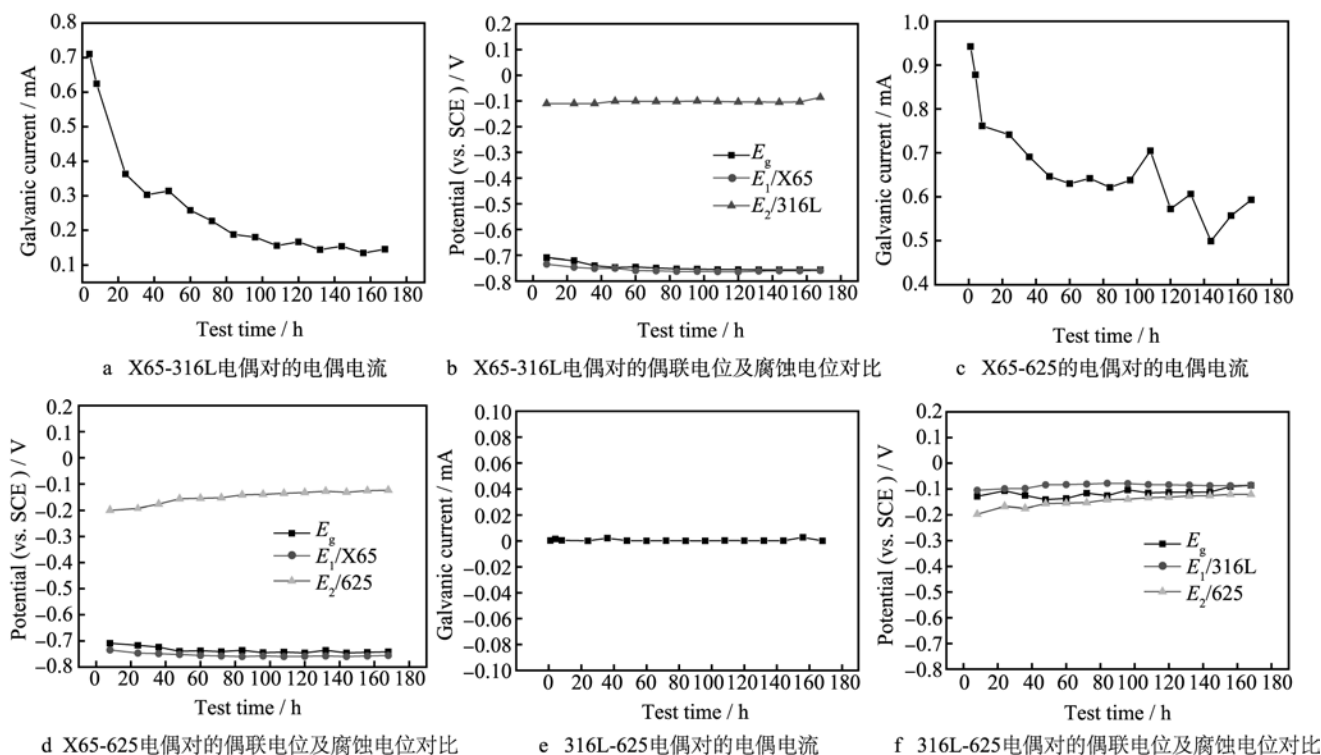
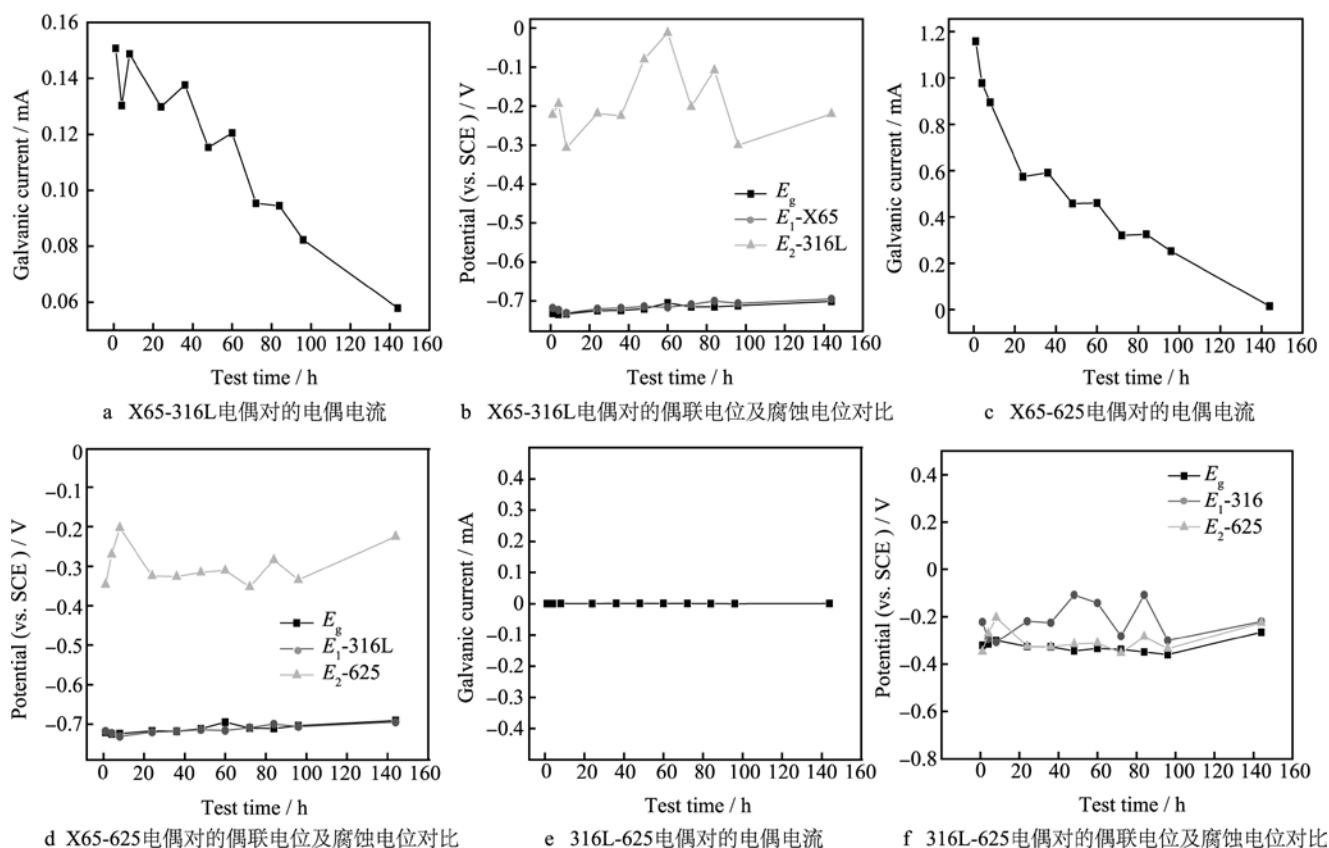
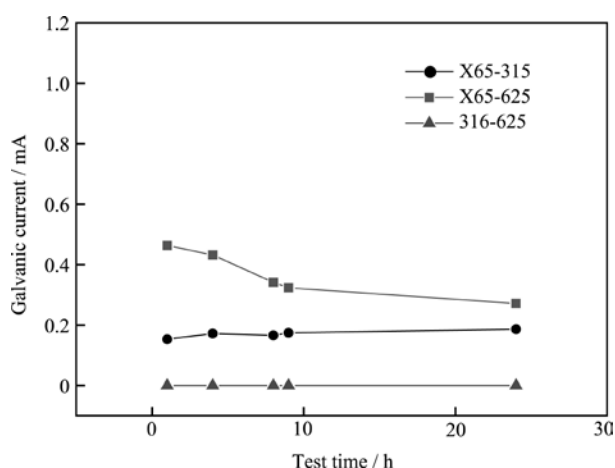


图 5 三种材料在敞口溶液里的电偶腐蚀结果

Fig.5 The galvanic corrosion test results of three kinds of materials in the open solution

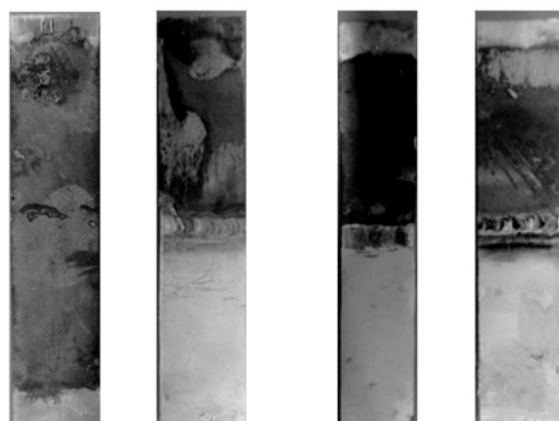
图6 三种材料在 100 kPa CO<sub>2</sub> 条件下电偶腐蚀试验结果Fig.6 The galvanic corrosion test results of three kinds of materials in 100 kPa CO<sub>2</sub> solution图7 三种材料在 500 kPa CO<sub>2</sub> 条件下的电偶电流对比Fig.7 The contrast of galvanic current of three kinds of materials in 500 kPa CO<sub>2</sub> solution

### 2.3 模拟环境试验结果分析

试验 7 天后取出样品, 酸洗、烘干后称重, 样品照片如图 8 所示。观察宏观形貌可以看出, 图 8b 和图 8c 上 X65 表面发生了明显的腐蚀, 图 8d 表面 316L 和 625 均未腐蚀。切取焊接接头位置进行截面观察, 发现图 8b 和图 8c 的 X65 一侧靠近焊接接

头位置发生了沟槽腐蚀, 截面照片如图 9 所示。

根据腐蚀失重计算试样的平均腐蚀速率, 结果如图 10 所示。可以看出, 未偶接异金属时 X65 的平均腐蚀速率为 1.24 mm/a, 异金属接触导致的电偶腐蚀使 X65 的腐蚀速率增加, X65 与 316L 偶接



a X65 b X65-316L焊接 c X65-625焊接 d 316-625焊接

图8 试样在 500 kPa CO<sub>2</sub>、30 °C、0.77 m/s

模拟地层水溶液中 7 天后宏观形貌

Fig.8 Macroscopic morphologies of samples after 7 days in solution of 500 kPa CO<sub>2</sub>, 30 °C, 0.77 m/s: a) X65, b) X65-316L welding, c) X65-625 welding, d) 316-625 welding

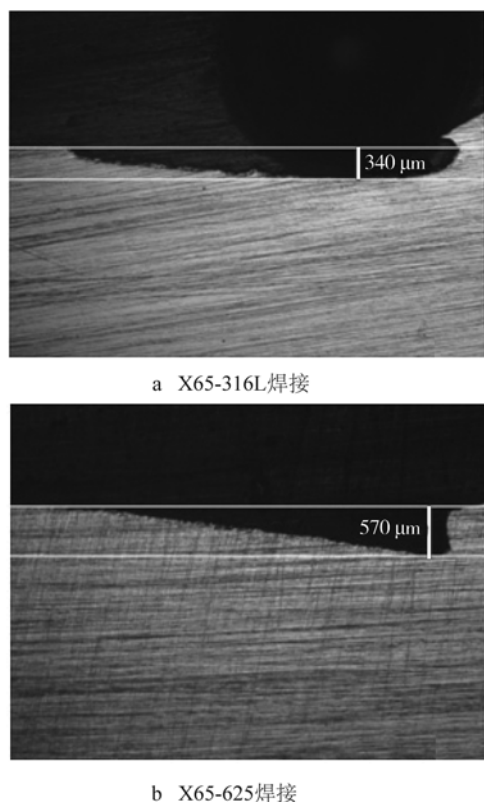


图 9 500 kPa、30 ℃、0.77 m/s 模拟地层水溶液中 7 天酸洗后截面图

Fig.9 Pickled sectional view after 7 days in solution of 500 kPa CO<sub>2</sub>, 30 ℃, 0.77 m/s: a) X65-316L welding, b) X65-625 welding

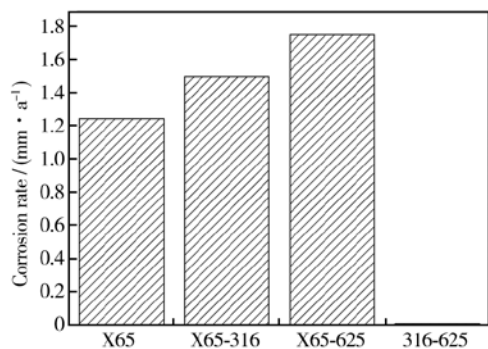


图 10 试样平均腐蚀速率对比

Fig.10 Contrast of the average corrosion rate of the samples

后的平均腐蚀速率为 1.49 mm/a, X65 与 625 偶接后的平均腐蚀速率为 1.75 mm/a, X65 与 625 偶接后腐蚀速率大于 X65 与 316L 偶接, 这与前面标准电偶腐蚀评价实验的结果一致。

根据沟槽腐蚀深度计算试样图 8b 和图 8c 中 X65 的局部腐蚀速率, 结果如图 11 所示, 可以看出, X65 与 316L 偶接后的局部腐蚀速率最大为 16.8 mm/a, X65 与 625 偶接后的局部腐蚀速率高达 26.4 mm/a, 因为电偶腐蚀导致的局部腐蚀速率比 X65

的自腐蚀速率超出十几倍。同时, 从局部腐蚀速率可以看出, X65 与 316L 偶接造成的损失要比 X65 和 625 偶接造成的损失小, 这与标准电偶腐蚀评价实验的结果一致。

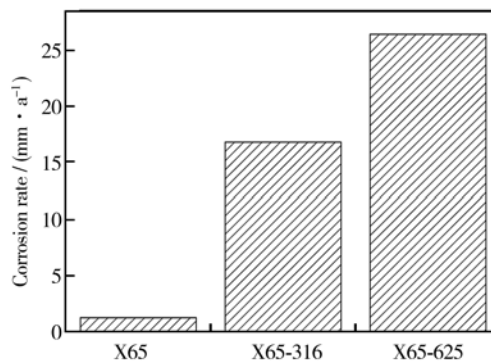


图 11 试样腐蚀速率对比

Fig.11 Contrast of the corrosion rate of the samples

### 3 结论

综合分析电化学实验、标准电偶腐蚀评价结实验和模拟工况下的焊接电偶腐蚀试验的测试结果, 得出如下结论。

在 30 ℃、100 kPa CO<sub>2</sub> 的模拟地层水溶液中, X65 的自腐蚀电位在 -0.75 V 左右, 316L 和 625 的电位在 -0.35 V 左右, X65 的电位要正于 316L 和 625。

根据 X65、316L、625 三种金属材料在敞口溶液、100 kPa CO<sub>2</sub>、500 kPa CO<sub>2</sub> 条件下偶接, 且暴露面积比为 1:1 时的标准电偶腐蚀试验, 可以得出, X65-625 之间的电偶电流最大, 其次是 X65-316L, 316L-625 之间的电偶电流最小, 几乎为零。

根据模拟电偶腐蚀试验, X65 与 316L 和 625 对焊, 会发生严重的沟槽腐蚀, X65 与 316L 偶接后的局部腐蚀速率最大为 16.8 mm/a, X65 与 625 偶接后的局部腐蚀速率高达 26.4 mm/a, 腐蚀速率与 X65 的自腐蚀速率相比高出十几倍, 其中 X65 与 316L 偶接的电偶腐蚀速率要低于 X65 与 625 偶接的。

### 参考文献

- [1] HUANG C A, WANG T H, HA W C, et al. A Study of the Galvanic Corrosion Behavior of Inconel 718 after Electron Beam Welding[J]. Materials Chemistry and Physics,

- 2007,104:293—300.
- [2] EDAHSHAN M E, SHAMS A M, HAGGAG H H. Galvanic Corrosion in the Systems Titanium/316L Stainless Steel/Albrass in a Rabian Gulf Water[J]. Desalination, 2002,142:61—169.
- [3] 赵麦群, 雷阿丽. 金属的腐蚀与防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 98.  
ZHAO Mai-qun, LEI A-li. Metal Corrosion and Protection[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 98.
- [4] VARELA F E, KURATA Y, SANADA N. The Influence of Temperature on the Galvanic Corrosion of a Cast Iron-stainless Steel Couple[J]. Corrosion Sci, 1997, 39(4): 775—788.
- [5] TAHARA A, KODAMA T. Potential Distribution Measurement in Galvanic Corrosion of Zn/Fe Couple by Means of Kelvin Probe[J]. Corrosion Sci, 2000, 42: 665—673.
- [6] ABREU C M, CRISTOOBAL M J, MONTEMOR M F. Galvanic Coupling between Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel in Alkaline Media[J]. Electrochimica Acta, 2002, 47(12): 2271—2279.
- [7] YIN Z F, YAN M L, BAI Z Q. Galvanic Corrosion Associated with SM80SS Steel and Ni-based Alloy G3 Couples in NaCl Solution[J]. Electrochimica Acta, 2008, 52(22): 6285—6292.
- [8] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 40.  
CAO Chu-nan. Corrosion Electrochemical Principle[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 40.
- [9] 舒福昌. 13Cr-L-80 钢的电偶腐蚀及缓蚀剂研究[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(2): 70—72.  
SHU fu-chang. Galvanic Corrosion and Inhibitor Selection Between 13Cr-L-80 and N80[J]. Corrosion and Protection, 2007, 28: 70—72.
- [10] 刘成虎, 柳伟, 赵耀斌, 等. X70 异种钢焊接接头的电偶腐蚀行为[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(1): 25—29.  
LIU Cheng-hu, LIU Wei, ZHAO Yao-bin, et al. Galvanic Corrosion of X70 Dissimilar Weld Joints[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30: 25—29.
- [11] 冯子峰, 邓明, 赵玉江. 奥氏体不锈钢紧固件电偶腐蚀原因分析与防护[J]. 装备环境工程, 2009(6): 10—15.  
FENG Zi-feng, DENG Ming, ZHAO Yu-jiang. Analysis and Protection of Galvanic Corrosion on Austenitic Stainless Steel Fasteners[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009(6): 10—15.
- [12] 刘东, 艾俊哲, 郭兴蓬. 二氧化碳环境中碳钢电偶腐蚀行为研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(10): 114—118.  
LIU Dong, AI Jun-zhe, GUO Xing-peng. Galvanic Corrosion Behaviors of Carbon Steel under Carbon Dioxide(CO<sub>2</sub>) Environment[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27: 114—118.
- [13] 黄桂桥, 郁春娟, 李兰生. 海水中钢的电偶腐蚀研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(1): 46—53.  
HUANG Gui-qiao, YU Chun-juan, LI Lan-sheng. Study on Galvanic Corrosion of Steel Couples in Seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2001, 21: 46—53.
- [14] 王海林, 雍兴跃, 侯纯扬, 等. 碳钢/钛合金复合材料在 3% NaCl 溶液中的电偶腐蚀研究[J]. 化工机械, 2009, 36(5): 471—475.  
WANG Hai-lin, YONG Xing-yue, HOU Chun-yang, et al. A Research on Galvanic Corrosion of Carbon Steel/ Titanium Alloy Composite Materials in 3% NaCl Solution[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2009, 36: 471—475.
- [15] 孙禹宏, 李竹影, 张旺洲, 等. 钛合金和 95<sup>#</sup> 钢的电偶腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(2): 7—10.  
SUN Yu-hong, LI Zhu-ying, ZHANG Wang-zhou, et al. Study on Galvanic Corrosion of Titanium Alloy and 95<sup>#</sup> Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(2): 7—10.
- [16] 黄桂桥, 韩冰, 杨海洋. 海洋用钢焊接接头的海水腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 11—15.  
HUANG Gui-qiao, HAN Bing, YANG Hai-yang. Seawater Corrosion Behavior of Welding Joints of Steels for Marine Applications[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 11—15.
- [17] ASTM G71-81(2014). Standard Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes[S].