

316L+Q345R 双金属复合板压力容器的点蚀

陈庆国¹, 谭川江¹, 童 根¹, 宋成立², 王 瑶¹

(1. 中国石油塔里木油田分公司, 库尔勒 841000;

2. 中国石油集团工程材料研究院有限公司石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室, 西安 710077)

摘 要: 通过在 316L 不锈钢+Q345R 碳钢双金属复合板上预制不同深度的点蚀坑, 探讨在典型 CO₂ 腐蚀条件下点蚀坑的发展。结果表明: 预制的点蚀坑处于不锈钢层时, 腐蚀较轻微, 未萌生新的点蚀; 当点蚀坑底部触及碳钢层时, 碳钢优先发生腐蚀, 形成孔洞, 点蚀速率达到 3.911 mm/a, 点蚀坑底部附着了一层不均匀且较薄的腐蚀产物, 其成分主要为 FeCO₃; 当点蚀坑完全穿透至碳钢层时, 碳钢层优先发生腐蚀并向周围不断扩大, 形成凹凸不平的金属损失形貌, 点蚀速率达到 4.954 mm/a, 点蚀坑底部附着了一层较厚且相对紧密的腐蚀产物, 其成分主要是 FeCO₃。由此表明, 该双金属复合板表面一旦形成穿透至不锈钢层的点蚀, 将会引发显著的电偶腐蚀, 碳钢层优先腐蚀并向周围快速扩展, 从而危及复合板的承压性能。

关键词: 316L 不锈钢; 双金属复合板; 点蚀; 电偶腐蚀

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2025)03-0043-05

我国西部天然气田常存在高压、高含 CO₂、高矿化度、高含 Cl⁻ 等苛刻工况, 为了提升油气处理工艺系统的安全性和经济性, 压力容器主要采用内涂层压力容器和内覆耐蚀合金复合板压力容器^[1-2]。内涂层常常发生鼓包、脱落等失效, 这增加了开罐检修的次数, 也严重影响了装置安全生产^[3-4], 因此对内涂层的选型、涂敷工艺等应提出更高的要求。双金属复合板因具有良好的力学性能和优异的耐蚀性^[5-6], 且在使用过程中维护工作量也较低, 所以在天然气处理工艺中得到了越来越广泛的应用。

然而, 两种金属的合金成分、导热系数和热处理温度存在差异, 双金属复合板制造过程会导致不锈钢层的耐蚀性下降^[7], 且在酸性腐蚀环境作用下, 复合板压力容器内衬层易发生点蚀^[8-9]。点蚀发生的位置具有随机性, 同时在外加载荷条件下腐蚀孔容易穿透或诱发应力腐蚀开裂等危害性缺陷, 这对压力容器的安全服役产生极大威胁^[10]。

笔者考虑 316L+Q345R 复合板压力容器的典型运行工况, 在复合板试片上预制了不同深度的点蚀坑, 通过实验室腐蚀试验, 探讨不同点蚀坑的发展进程及其穿透至碳钢基材后给复合板带来

的腐蚀风险, 为复合板的点蚀维修、安全运行评估等提供重要的科学依据。

1 试 验

1.1 试样制备

试验样品来自某公司生产的复合板容器封头开孔余料, 该复合板采用爆炸复合制成, 再经过卷筒、焊接等工序拼接成容器本体^[11], 制造标准依据 NB/T 47002.1—2019《压力容器用爆炸焊接复合板》。复合板材料为 316L 不锈钢(厚度 3 mm)+Q345R 钢(厚度 16 mm)。其中 Q345R 钢属于低合金高强度钢, 综合力学性能和工艺性较好; 而 316L 不锈钢属于铬镍钼高合金钢, 具有抗腐蚀和耐高温等性能, 其屈服强度比 Q345R 钢低^[12]。两种金属材料的化学成分如表 1 所示。

将复合板样品加工成小试片, 尺寸为 60 mm×20 mm×7 mm, 开 $\phi 6$ mm 孔用于悬挂安装, 如图 1 所示。为了分析不同点蚀坑深度对复合板压力容器服役安全的影响, 利用数控钻床在内衬层表面中部预制直径相同、深度不同的点蚀坑。其中 1 号试片点蚀坑处于不锈钢层, 2 号试片点蚀坑底部刚触及碳钢层, 3 号试片点蚀坑完全穿透至碳钢层。每个试片点蚀坑的直径和深度精确测量结果如表 2 所示。为了提高试验精度, 采用树脂和 704 硅胶对试片暴露的碳钢层进行固化密封。

收稿日期: 2023-03-06

通信作者: 陈庆国(1989—), 工程师, 主要从事油田地面系统腐蚀防护工作, 18699697656, cqg728@126.com

表 1 复合板材料的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of composite plate materials

材料	质量分数/%							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
内衬层(316L 不锈钢)	0.024	0.50	1.19	0.036	0.001 2	17.7	2.01	10
基层(Q345R 钢)	0.018	0.45	1.40	0.010	0.005	0.014	0.000 2	0.010

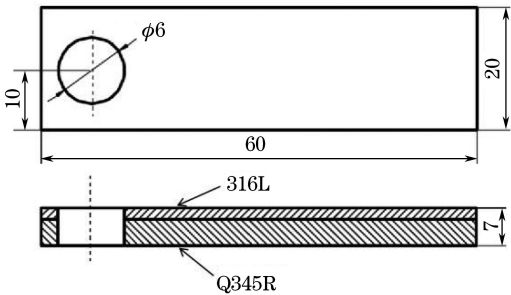


图 1 试片加工尺寸

Fig. 1 Processing size of specimen

表 2 试片点蚀坑尺寸

Tab. 2 Size of pits in specimens

试片编号	直径/mm	深度/mm
1	2.44	1.40
2	2.44	2.36
3	2.44	3.90

1.2 浸泡腐蚀试验

采用高温高压反应釜,模拟塔里木油田典型介

表 3 浸泡腐蚀试验参数

Tab. 3 Immersion corrosion test parameters

温度/℃	压力/MPa	介质组分							
		$w(\text{CO}_2)/\%$	$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Ca}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Mg}^{2+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{K}^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Na}^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
60	12	2	15×10^4	1 120	1 880	308	1 140	89 825	389

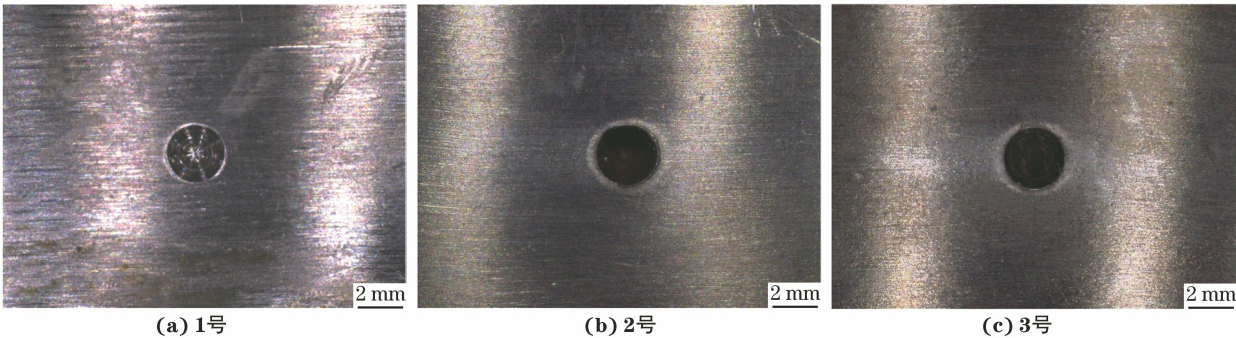


图 2 浸泡腐蚀试验后 3 个试片的点蚀宏观形貌

Fig. 2 Pitting macroscopic morphology of three specimens after immersion corrosion test

由图 3 可知:1 号试片预制的点蚀坑处可见明显的金属加工痕迹,3D 成像中呈现圆锥形,点蚀坑深度未发生变化,表明点蚀未发生明显扩展;2 号和 3 号试片点蚀坑内部附着了一层腐蚀产物,3D 成像

质组分和工况环境(见表 3),对上述制备的 1~3 号试片进行浸泡腐蚀试验,试验时间为 336 h。试验结束后,利用超景深显微镜对试片及预制的点蚀坑进行形貌观察和尺寸测量,并采用扫描电镜(SEM)及能谱仪(EDS)分析点蚀坑的腐蚀形貌及成分。同时根据试验前后点蚀坑的深度,利用式(1)计算点蚀速率。

$$v = \frac{8\ 760r}{t} \tag{1}$$

式中: v 为点蚀速率,mm/a; r 为点蚀坑深度的增加值,mm; t 为试验时间,h。

2 结果与讨论

2.1 点蚀形貌

由图 2 可知:所有预制的点蚀坑上部边缘一周均呈现较为规则的圆形,未见明显腐蚀扩展迹象,也未萌生新的点蚀;1 号试片预制的点蚀坑内可见金属光泽,2 号和 3 号试片点蚀坑内可见明显的腐蚀产物附着。

与 1 号试片呈现的圆锥形相差较大,点蚀坑深度因腐蚀产物的附着而减小。

由图 4 可知,2 号试片预制的点蚀坑底部刚好触及 Q345R 钢层,Q345R 钢优先发生了腐蚀,形成

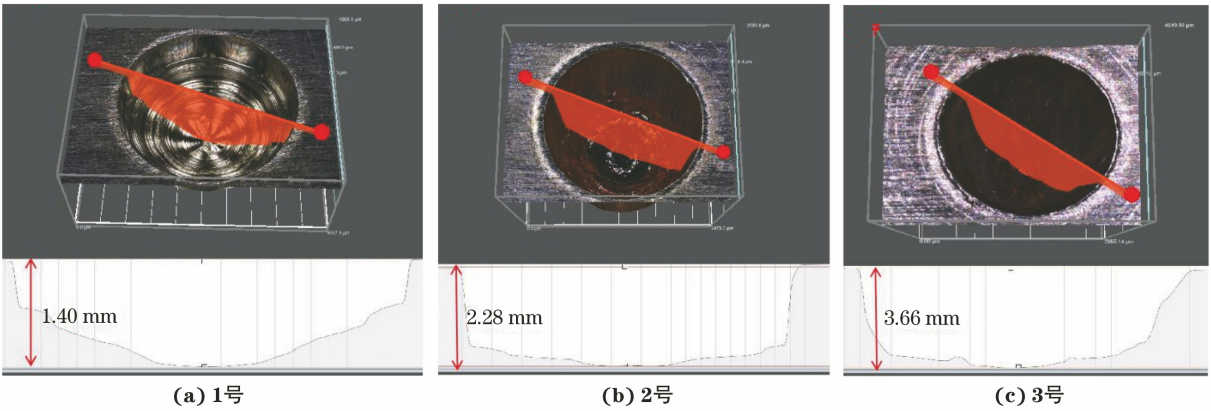


图 3 浸泡腐蚀试验后 3 个试片的点蚀坑 3D 图像

Fig. 3 3D images of pits in three specimens after immersion corrosion test

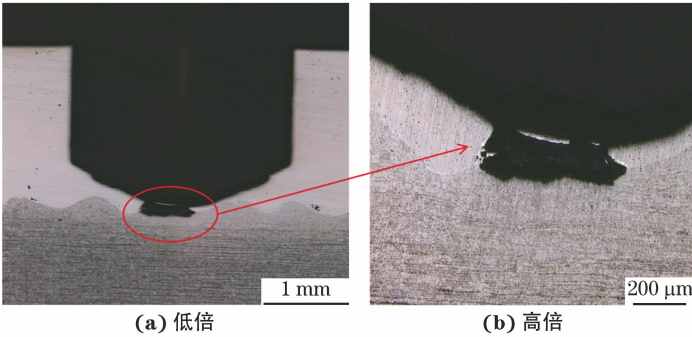


图 4 浸泡腐蚀试验后 2 号试片的点蚀坑截面形貌

Fig. 4 Cross-sectional morphology of the pit of No.2 specimen after immersion corrosion test: (a) low magnification; (b) high magnification

一个孔洞,孔洞的深度约 0.15 mm,点蚀速率为 3.911 mm/a。

由图 5 可知,3 号试片预制的点蚀坑已完全穿

透 316L 不锈钢层,Q345R 钢层优先发生了腐蚀,并不断向周围扩展,测得点蚀坑底部金属减薄了约 0.19 mm,点蚀速率为 4.954 mm/a。

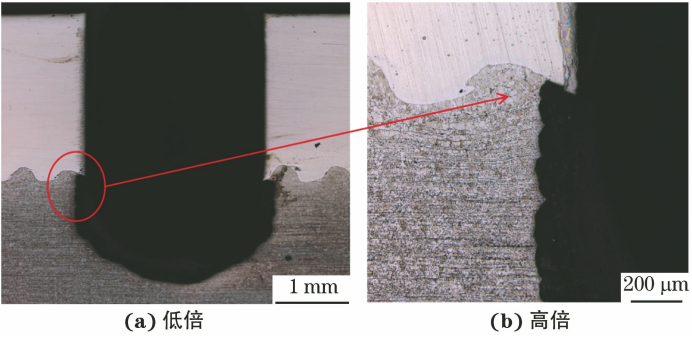


图 5 浸泡腐蚀试验后 3 号试片的点蚀坑截面形貌

Fig. 5 Cross-sectional morphology of the pit of No.3 specimen after immersion corrosion test: (a) low magnification; (b) high magnification

2.2 腐蚀产物成分

由图 6 可知:2 号试片开孔处的腐蚀产物主要集中于点蚀坑底部,腐蚀产物较薄且不致密;腐蚀产物主要成分为 C、O、K、Cr、Mn、Fe 和 Ni 元素,推断存在 CO₂ 的腐蚀产物 FeCO₃,Cr、Fe 和 Ni 都属于金属基体元素。

由图 7 可知:3 号试片预制的点蚀坑底部腐蚀相对严重,出现了凹凸不平的金属损失形貌,但上部

不锈钢层较为完好;坑底附着了一层较厚且相对紧密的腐蚀产物,其成分为 C、O、Mn 和 Fe 元素,推断主要是 CO₂ 的腐蚀产物 FeCO₃。

3 结 论

(1) 通过在 316L+Q345R 双金属复合板预制不同深度的点蚀坑,开展模拟典型 CO₂ 腐蚀条件下的浸泡腐蚀试验,发现当点蚀坑处于不锈钢层时腐

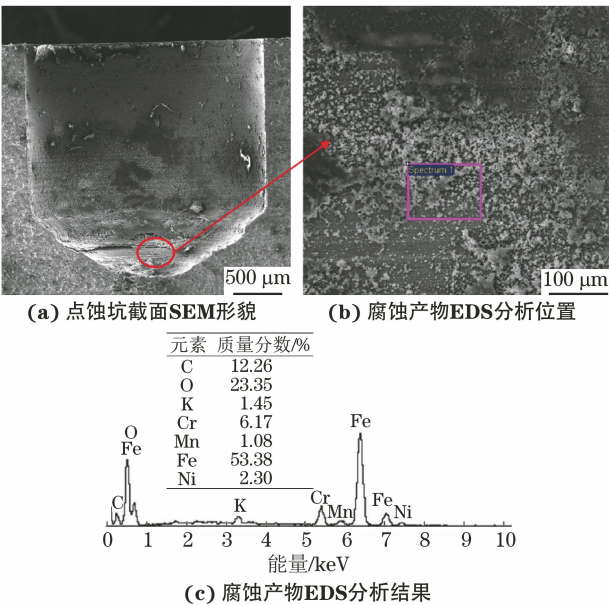


图6 浸泡腐蚀试验后2号试片点蚀坑沿直径剖开后的截面SEM形貌和腐蚀产物EDS分析位置及结果

Fig.6 SEM morphology of cross-section of pit along the diameter (a) and EDS analysis position (b) and results (c) of corrosion products of No.2 specimen after immersion corrosion test

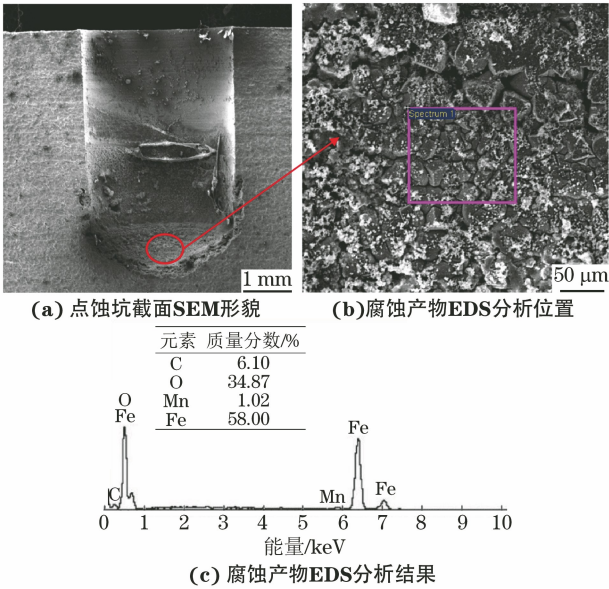


图7 浸泡腐蚀试验后3号试片点蚀坑沿直径剖开后的截面SEM形貌和腐蚀产物EDS分析位置及结果

Fig.7 SEM morphology of cross-section of pit along the diameter (a) and EDS analysis position (b) and results (c) of corrosion products of No.3 specimen after immersion corrosion test

蚀轻微,且未萌生新的点蚀;但当点蚀坑底部触及Q345R 碳钢层时电偶腐蚀加重,碳钢层损失形成局部孔洞;而当点蚀坑完全穿透至 Q345R 碳钢层时,碳钢层优先腐蚀并向周围不断扩展,电偶腐蚀程度加重。

(2) 建议双金属复合板压力容器在服役中应定期开展无损探伤,及时排查新萌生的点蚀,并对点蚀深度进行精确测量,当点蚀深度超过不锈钢层厚度时需要立即补焊修复,确保复合板压力容器的安全风险可控。

参考文献:

[1] 潘旭,李志铭,周永亮,等. 内衬 316L 复合板压力容器内衬焊缝点蚀问题与对策[J]. 油气田地面工程,2017, 36(9):80-82,85.

PAN X, LI Z M, ZHOU Y L, et al. Problems and countermeasures of pitting of the lining weld joints of the lining 316L composite broad pressure container [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2017, 36(9): 80-82,85.

[2] 鲍明显,任呈强,郑云萍,等. 基于点蚀的 316L 不锈钢在酸性气田环境中的适应性评价[J]. 材料导报,2016, 30(17):10-15,35.

BAO M Y, REN C Q, ZHENG Y P, et al. Adaptability evaluation of 316L stainless steel based on pitting corrosion in acid gas field[J]. Materials Review, 2016, 30(17):10-15,35.

[3] 夏雨. 油田压力容器和储罐内涂层的应用技术研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(7):245-246.

[4] 宋成立,林冠发,袁军涛,等. 油田压力容器和储罐内涂层的应用技术研究[J]. 新技术新工艺, 2016(2):88-92.

SONG C L, LIN G F, YUAN J T, et al. Application of the internal coating for pressure vessels and tanks in oil fields[J]. New Technology & New Process, 2016(2): 88-92.

[5] 郭智,李伟彦,葛树涛. 奥氏体不锈钢复合板设备制造过程的点腐蚀[J]. 压力容器, 2010, 27(5):32-35.

GUO Z, LI W Y, GE S T. Pitting corrosion of austenitic stainless clad plate in process of equipment manufacturing[J]. Pressure Vessel Technology, 2010, 27(5):32-35.

[6] 陈坤,傅延波,刘波,等. 浅析 Q345R+S31603 不锈钢复合板压力容器焊接技术[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(24):33-34,37.

[7] 白允强,邓家爱,王章忠,等. 热处理对 2205-Q345 爆炸复合板界面组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(11):60-62.

BAI Y Q, DENG J A, WANG Z Z, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of explosive clad plates of 2205 duplex stainless steel-

- Q345 carbon steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2011,36(11):60-62.
- [8] 梁斌,巩建鸣. 复合板压力容器点蚀缺陷运行适应性评价[J]. 中国安全科学学报,2012,22(7):36-41.
- LIANG B,GONG J M. Fitness-for-service assessment of the composite plate pressure vessel containing pitting defects[J]. China Safety Science Journal,2012,22(7):36-41.
- [9] 邵将,李丽丽. 超厚爆炸复合板结合面隐性缺陷分析及检测[J]. 压力容器,2016,33(11):64-68.
- SHAO J,LI L L. Recessive defect analysis and testing of bonding surface for ultra-thick explosion clad plate [J]. Pressure Vessel Technology,2016,33(11):64-68.
- [10] 杨海波. 热处理制度对不锈钢复合板耐蚀性影响分析[J]. 热加工工艺,2016,45(4):240-242,245.
- YANG H B. Analysis on corrosion resistance of stainless steel clad plate with different heat treatment [J]. Hot Working Technology,2016,45(4):240-242,245.
- [11] 潘旭,代平,刘廷,等. 油气处理厂内衬 316L 复合板压力容器应用分析[J]. 石油工程建设,2018,44(1):66-68.
- PAN X,DAI P,LIU T,et al. Analysis on application of pressure vessel with lined 316L composite plate in oil and gas treatment plant[J]. Petroleum Engineering Construction,2018,44(1):66-68.
- [12] 任爱梅,杨通胜,历金雁. Q345R+S31603 不锈钢复合板真空闪蒸罐的焊接工艺[J]. 热加工工艺,2018,47(11):211-213,219.
- REN A M,YANG T S,LI J Y. Welding process of Q345R + S31603 stainless steel composite plate vacuum flash tank [J]. Hot Working Technology,2018,47(11):211-213,219.

Pitting of 316L+Q345R Bimetallic Composite Plate Pressure Vessel

CHEN Qingguo¹, TAN Chuanjiang¹, TONG Gen¹, SONG Chengli², WANG Yao¹

(1. PetroChina Tarim Oilfield Company, Koral 841000, China;

2. State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials,CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China)

Abstract: By prefabricating pitting pits of different depths on 316L stainless steel+Q345R carbon steel bimetallic composite plates, the development of pitting pits under typical CO₂ corrosion conditions was discussed. The results show that when the prefabricated pit was in the stainless steel layer, the corrosion was slight and no new pit was generated. When the bottom of the pit just touched the carbon steel layer, the carbon steel preferentially corroded, forming a hole, and the pitting rate reached 3.911 mm/a, and a layer of uneven and thin corrosion products was attached to the bottom of the pit, and its composition was mainly FeCO₃. When the pit was completely penetrated to carbon steel layer, carbon steel layer preferentially corroded and then expanded to the periphery, forming an uneven metal loss morphology, with a pitting rate of 4.954 mm/a, and a thick and relatively tight corrosion product was also attached to the bottom of the pit, which was mainly composed of FeCO₃. It is shown that once the surface of the bimetallic composite plate was pitted and penetrated into the stainless steel layer, it will cause significant galvanic corrosion, and the carbon steel layer will preferentially corroded and propagate to the surrounding areas, which will directly endanger the pressure-bearing performance of the composite panel.

Key words: 316L stainless steel; bimetallic composite plate; pitting corrosion; galvanic corrosion