

温度对 CO₂/盐水中碳钢腐蚀形貌的影响及其描述方法研究

白海涛¹, 王永清¹, 马云^{2,3}, 任鹏⁴, 张宁生^{2,3}

(1.西南石油大学 石油与天然气工程学院, 成都 610500; 2.西安石油大学 石油工程学院, 西安 710065; 3.陕西省油气田环境污染控制技术与储层保护重点实验室, 西安 710065; 4.西安泰金工业电化学技术有限公司, 西安 710016)

摘要: **目的** 研究 CO₂/盐水环境下, 温度对 J55 碳钢腐蚀的影响以及腐蚀形貌的描述方法。**方法** 利用高温高压反应釜模拟 9 MPa、不同温度下的 CO₂/盐水腐蚀环境, 分别测定 50、65、80 °C 下 J55 碳钢的平均腐蚀速率。利用全自动三维显微成像系统对腐蚀后的试片表面进行大面积图像扫描、提取和分析, 表征不同温度下的腐蚀形貌特征。同时, 在不同温度和压力的条件下, 在 CO₂/盐水环境中对 J55 碳钢进行腐蚀试验, 验证腐蚀形貌的分布规律。**结果** 随着温度的升高, CO₂/盐水对 J55 碳钢的平均腐蚀速率先减小后增大, 65 °C 时, 平均腐蚀速率为 2.1871 mm/a。在明场、放大倍数为 200 倍、重合度为 10% 的 9 视域拼接条件下采集试片表面腐蚀形貌, 采集图像面积占整个试片的 12.28%。试片表面腐蚀深度分布符合 Gauss 分布, 相关系数为 0.9790, 参数 x_c 与平均腐蚀速率随温度的变化趋势一致, 参数 w 能反映腐蚀形貌类型。不同温度和压力下, CO₂/盐水环境对 J55 碳钢腐蚀试验的结果相同。**结论** 随着温度的升高, CO₂/盐水环境对 J55 碳钢的腐蚀形态由点蚀逐渐转变为均匀腐蚀。试片表面腐蚀深度分布符合 Gauss 分布, 且参数能反映 CO₂/盐水环境对 J55 碳钢的腐蚀规律。该腐蚀形貌描述方法可有效避免腐蚀形貌描述中的主观性和随机性。

关键词: CO₂/盐水; 碳钢; 温度; 点蚀; 腐蚀形貌; 图像; 统计

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)08-0204-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.028

Influence of Temperature on the Corrosion Morphology of Carbon Steel in CO₂/Brine and Its Description Method

BAI Hai-tao¹, WANG Yong-qing¹, MA Yun^{2,3}, REN Peng⁴, ZHANG Ning-sheng^{2,3}

(1. Institute of Petroleum and Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Institute of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 3. Key Laboratory of Environment Pollution Control Technology of Oil Gas and Reservoir Protection in Shaanxi Province, Xi'an 710065, China; 4. Xi'an Taijin Industrial Electrochemical Technology Co., Ltd, Xi'an 710016, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of temperature on corrosion of J55 carbon steel in CO₂/brine environment and

收稿日期: 2018-01-15; 修订日期: 2018-06-01

Received: 2018-01-15; Revised: 2018-06-01

基金项目: 国家自然科学基金 (51504193); 陕西省教育厅科研计划项目 (15JS090)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of China (51504193), the Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department (15JS090)

作者简介: 白海涛 (1986—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Biography: BAI Hai-tao (1986—), Male, Doctor, Research focus: corrosion and protection.

the description method of corrosion morphology. CO₂/brine corrosion environment at 9 MPa and different temperature was simulated by autoclave and the average corrosion rate of J55 carbon steel was determined respectively at 50 °C, 65 °C and 80 °C. Corroded coupons surface was scanned, extracted and analyzed by the full-automatic 3-D microscopic imaging system and the characteristics of corrosion morphology were characterized at different temperature. At the same time, J55 carbon steel corrosion test in CO₂/brine environment was conducted at different temperature and pressure in order to verify the distribution of corrosion morphology. With the increase of temperature, the average corrosion rate of CO₂/brine to J55 carbon steel decreased first and then increased and the average corrosion rate was 2.1871 mm/a at 65 °C. The surface corrosion morphology of the coupon was collected in 9-threshold splicing with magnification times of 200 and contact ratio of 10% in the bright field. Extracted image area accounted for 12.28% of the whole coupon. The surface corrosion depth distribution of coupon accorded with the Gauss distribution. The correlation coefficient was 0.9790. The change trend of x_c and average corrosion rate was consistent with temperature. The parameter w could reflect the type of corrosion morphology. The same conclusion was obtained from the corrosion test of J55 carbon steel at different temperature and pressure in CO₂/brine environment. With the increase of temperature, the corrosion morphology of CO₂/brine environment on J55 steel gradually transforms to uniform corrosion from pitting corrosion. The surface corrosion depth distribution of coupon accords with Gauss distribution and the parameters can reflect the corrosion behavior of CO₂/brine water on J55 carbon steel. The corrosion morphology description method can effectively avoid subjectivity and the randomness in the description of morphology.

KEY WORDS: CO₂/brine; carbon steel; temperature; pitting corrosion; corrosion morphology; image; statistics

在油气田开发过程中, 二氧化碳引起的管线、设备腐蚀问题十分严重, 尤其是点蚀^[1]。点蚀是一种发生率很高、外观隐蔽且破坏性很大的局部腐蚀, 常发生于易钝化金属和合金之中^[2]。在目前众多研究点蚀的方法中, 应用最普遍的技术是电化学测量技术和表面形貌分析技术^[3-4]。在电化学研究点蚀的方法中, 测定极化曲线是点蚀电化学研究的最基本方法, 极化曲线中提供的大量数据对点蚀发生、发展和机理方面的研究都具有非常重要的作用^[5-6], 但无法直观描述腐蚀形貌。表面形貌分析的方法有扫描电镜、扫描隧道显微镜、原子力显微镜等。这些方法都比较直观, 但对很小的局部区域进行点蚀程度的测量或估算时, 点蚀的识别和定量测定会随所选区域的变化而变化; 或者是对点蚀形貌的二维数据进行统计, 进而定量分析, 因二维图像景深的限制, 当点蚀深度大于 0.45 mm 时, 会对结果有很大影响。因此采用这些方法对点蚀深度 (或穿透力) 的研究不够精确, 使得现有研究在进行点蚀结果描述和机理研究时带有一定的片面性、偶然性和不确定性^[7-8]。

本文利用高温高压反应釜模拟 9 MPa、不同温度下的 CO₂/盐水腐蚀环境, 分别测定 50、65、80 °C 下 J55 碳钢的平均腐蚀速率, 研究 CO₂/盐水环境下温度对 J55 碳钢腐蚀的影响。利用全自动三维显微成像系统对腐蚀后的试片表面进行大面积扫描, 并对图像信息进行提取和统计, 解析图像数据信息与腐蚀形貌特征之间的联系, 建立腐蚀形貌描述新方法, 消除扫描电镜、扫描隧道显微镜、原子力显微镜等传统腐蚀形貌描述过程存在主观性和随机性的弊端。

1 实验

1.1 失重法测定腐蚀速率

试验材料为 J55 碳钢腐蚀试片, 尺寸为 50 mm×10 mm×3 mm, 其化学成分 (以质量分数计) 为: C 0.34%~0.39%, Si 0.2%~0.35%, Mn 1.25%~1.5%, P≤0.020%, S≤0.015%, Cu≤0.020%, Fe 余量。

按照每升超纯水中加入 13.7338 g CaCl₂、0.5897 g MgCl₂、18.5028 g NaCl、0.2440 g Na₂SO₄ 和 0.0631 g NaHCO₃ 配得矿化度为 33 000 mg/L 的模拟采出水。将 J55 试片脱油、干燥处理后称量, 固定在高温高压釜中, 取 1.5 L 模拟采出液倒入 PARR-4578 高温高压反应釜 (美国, 1.8 L), 保证试片完全浸入采出液。用小气量氮气吹扫釜中模拟液中的溶解氧 30 min, 再在 1 MPa 压力下通入高纯 CO₂ 2 min, 置换其中的氮气, 继续用高纯 CO₂ 加压, 最后保持压力 9 MPa, 转速为 200 r/min。分别在温度为 50、65、80 °C 下, 试验 48 h。试验结束后, 取出试片, 用沸程为 60~90 °C 的石油醚清洗试片表面, 然后用酸洗液 (100 mL HCl, 3.5 g C₆H₁₂N₄, 稀释至 1000 mL) 清洗试片表面的腐蚀结垢产物, 再用超纯水洗去酸洗液, 干燥后用 Sartorius BSA224S 型分析天平 (德国) 称量。腐蚀速率按照式 (1) 计算。

$$r_{\text{corr}} = \frac{8.76 \times 10^4 \times (m - m_1)}{S \times t \times \rho} \quad (1)$$

式中: r_{corr} 为平均腐蚀速率 (mm/a); m 、 m_1 分

别为实验前后试片质量; S 为试片表面积 (cm^2); t 为试验时间 (h); ρ 为试片密度, 取 7.86 g/cm^3 。

1.2 腐蚀形貌的提取及分析

采用 OLYMPUS DSX500 光学数码显微镜 (日本), 在明场 (BF) 模式下, 对挂片上特定位置 (见图 1) 以多图拼接模式进行 9 视域拼接的 3D 图像采集, 然后通过“显示”→“色表”→“Rainbow 10tane”将腐蚀表面按照相同的深度范围划分为 10 种颜色, 即一种颜色代表一定的腐蚀坑深度范围。设置 3D 图像 Z 轴方向的上下限, 保证最深的腐蚀坑能够完全显示。将图像转换为 2D 图像保存, 再用显微镜自带的图像分析软件提取图像中不同颜色区域面积占总图像面积的百分比, 即可得到腐蚀表面上不同腐蚀深度所占的百分比。最后, 使用 Origin 9.0 对统计数据进行分析。

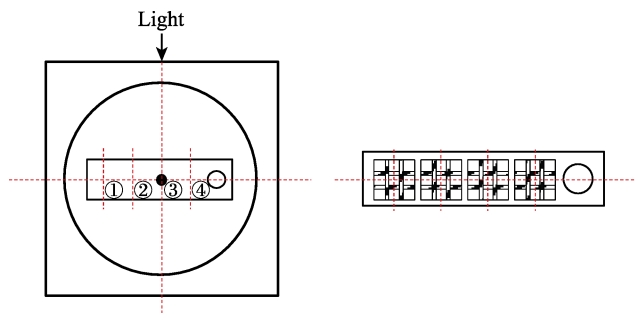


图 1 图像采集位置

Fig.1 Location diagram of image acquisition

2 结果与讨论

2.1 温度对 CO_2 平均腐蚀速率的影响

不同温度下的试片平均腐蚀速率测定结果见表 1, 试片腐蚀后的外观见图 2。由表 1 可得, 三组实验的标准差均小于 0.03, 说明该实验结果较为稳定, 试片之间的差异小。平均腐蚀速率随着温度的升高而先减小、后增大, 65°C 时, 平均腐蚀速率为 2.1871 mm/a ; 点蚀坑随着温度的升高而逐渐减少, 但直径逐渐增大, 温度为 80°C 时, 已经无法看到明显的点蚀坑, 腐蚀形态由点蚀逐渐变成均匀腐蚀。该体系矿化度较高, 存在大量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 对腐蚀产物膜的形成和试片表面粘附力的影响较复杂^[9-10]。在温度为 50°C 时, 腐蚀产物膜较疏松, 使得盐水容易穿透腐蚀产物膜与金属基体接触, 导致试片表面出现较多的小点蚀坑。当温度升高到 65°C 时, 形成了较致密的保护膜, 腐蚀速率降低, 但保护膜不完整, 在缺陷处出现较大的点蚀坑。在 80°C 时, 由于溶液对腐蚀产物膜的溶解性增强、腐蚀产物膜脱落等原因, 使得试片表面无法形成有效的保护膜, 故出现均匀腐蚀和腐蚀速率增大等现象。

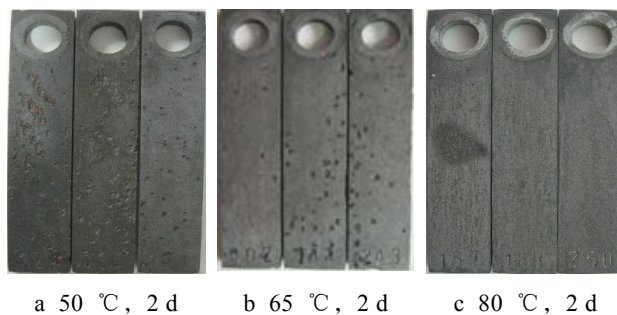


图 2 腐蚀后试片外观

Fig.2 Coupon's appearance after corrosion test

表 1 不同温度下试片平均腐蚀速率测定结果
Tab.1 Test results for average corrosion rate of coupons at different temperature

Temperature/ $^\circ\text{C}$	No.	Corrosion rate/ $(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	Average corrosion rate/ $(\text{mm}\cdot\text{a}^{-1})$	Standard deviation
50	125	2.2902	2.2702	0.0233
	126	2.2758		
	174	2.2446		
65	102	2.1609	2.1871	0.0229
	144	2.2036		
	243	2.1968		
80	157	2.8738	2.8808	0.0287
	188	2.8563		
	250	2.9124		

2.2 腐蚀形貌图像提取

2.2.1 提取参数的确定

试片悬挂孔 $\phi=6 \text{ mm}$, 正反的面积均为 471.74 mm^2 , 分别对试片的同一区域进行不同放大倍数的单视阈扫描和 9 视阈拼接扫描 (重叠比为 10%)。对比试样同一位置单视域不同放大倍率下的高度图与三维图 (见图 3), 放大倍率为 100、200 和 300 倍时, 均可以满足点蚀坑深度的测量。而放大倍率太大, 基准面会消失, 最大点蚀深度无法统一基准测量, 考虑表面形貌显示的清晰程度与视阈面积, 故选择放大倍率为 200。对试片一个面分别放大 100、200、300、400、600、800 倍进行 9 个视阈的拼接扫描, 则扫描面积分别约占表面积的 36.85%、9.21%、4.09%、2.30%、1.02%、0.58%, 远远超出其他方法的研究范围, 能够更加全面准确地反应试片表面的点蚀行为, 结果见表 2。

分别对试片的同一区域进行放大 200 倍下不同重合度的 9 视阈拼接扫描, 结果见表 3。重合度为 0 时, 拼接出的图像有明显的断层; 重合度 $\geq 10\%$ 时, 拼接出的图像无明显断层。随着重合度的增大, 扫描面积逐渐减小。结合图像的完整性与扫描面积, 选用拼接重合度为 10%。

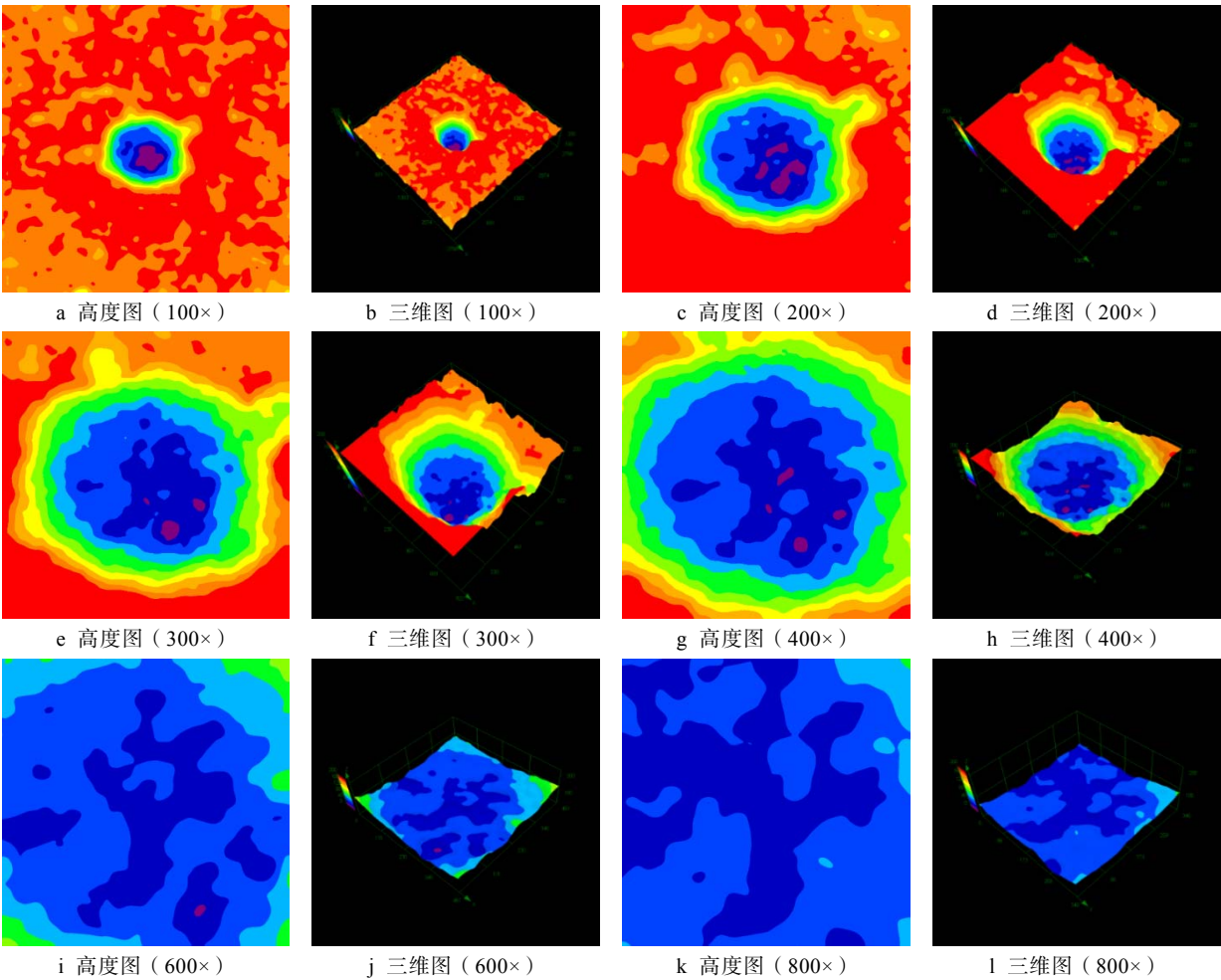


图 3 试样同一位置不同放大倍率下的高度图与三维图
Fig.3 Height diagram and 3-D diagram of coupon at the same position at different magnification rates

表 2 放大倍数的确定

Tab.2 Determination of magnification times

Magni- fication	9 thresholds splicing figure		Maximum pitting depth/ μm
	Area/ μm^2	Percentage/%	
100	7612×7612	49.13	188.24
200	3806×3806	12.28	191.32
300	2537×2537	5.46	189.36
400	1903×1903	3.07	Base level disappeared
600	1269×1269	1.37	Base level disappeared
800	952×952	0.77	Base level disappeared

表 3 拼接重合度的确定

Tab.3 Determination of splicing and contact ratio

Coincidence degree/%	9 thresholds area/ μm^2	Scanning area/ mm^2	Proportion/ %
0	4078×4078	133.04	14.10
10	3806×3806	115.89	12.28
20	3534×3534	99.91	10.59
30	3262×3262	85.13	9.02
40	2991×2991	71.57	7.59
50	2719×2719	59.14	6.27

2.2.2 最大点蚀深度的测定

油气生产过程中，管线穿孔时常发生，最大点蚀深度处的管壁厚度最薄，力学性质最差，同时管线应力也会向最大点蚀深度处集中，故发生穿孔的位置一般出现在最大点蚀深度处^[11]。因此，最大点蚀深度的研究对油气田管线安全具有重要意义。比较正反两面的最大点蚀深度，得出最大点蚀深度，结果见表 4。

表 4 最大点蚀深度测定结果

Tab.4 Determination result of maximum pitting depth

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Maximum pitting depth/ μm
50	281.568
65	301.358
80	180.648

由表 4 可得，最大点蚀深度随温度的升高而先增大后减小，与腐蚀形态由点蚀逐渐转变成均匀腐蚀一致。点蚀是小阳极、大阴极腐蚀电池引起的阳极区高度集中的局部腐蚀形式，与试片表面形成的腐蚀产物膜的性质有直接关系。

2.3 腐蚀形貌分析

使用 OLYMPUS DSX500 光学数码显微镜在明场、放大倍数为 200 倍、重合度为 10% 的 9 视域拼接条件下,对同一试片正反两面 8 个观察点进行试片表面腐蚀形貌采集。调整 3D 图像显示高度为最大点蚀高度,保证同一组图片中,不同颜色代表不同深度范围的腐蚀坑,同一种颜色代表相同的腐蚀深度,然后

将图像转变成腐蚀深度分布等高图。图 4 为试片单面 4 个观察位置 9 视域拼接高度图,由红色到紫色表示腐蚀深度逐渐等距增加。图 4a—c 分别表示 0~281.568、0~301.358、0~180.648 μm 的腐蚀深度分布等高线。分别对图中不同颜色的面积进行统计,对 8 副图的颜色面积百分比求平均值并绘制频率密度分布图,见图 5。

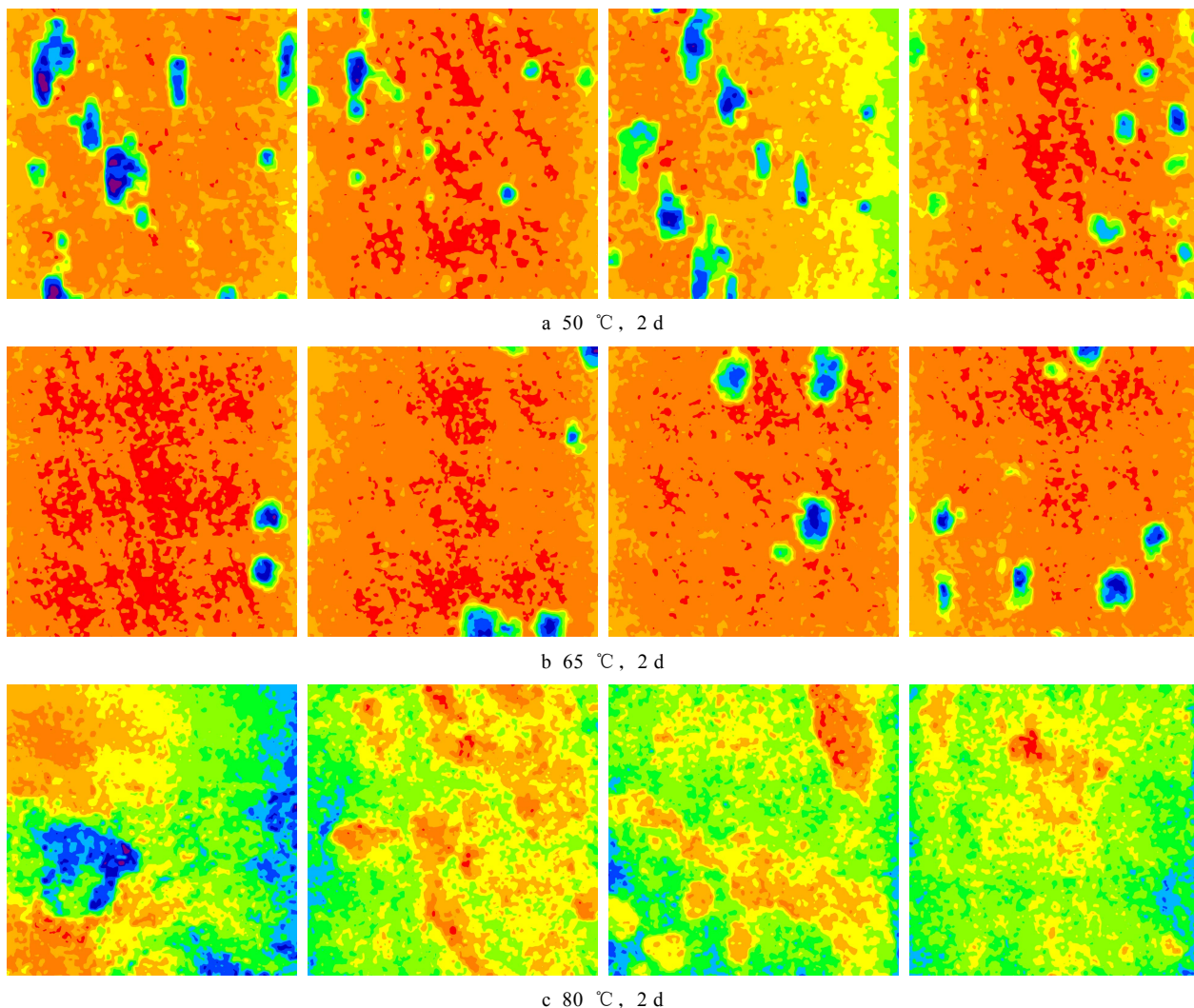


图 4 试样不同位置 9 视阈拼接高度图

Fig.4 Height diagram of coupon in 9-threshold splicing at different locations

由图 5 可得,试片腐蚀深度密度分布曲线呈现出中间大、两头小、左右对称的特征,故可判断腐蚀后试片表面腐蚀深度呈高斯分布^[12-13]。表 5 为利用 Origin9.0 软件中 Gauss 模型多曲线 Global 模式对图 5 中曲线参数的拟合结果,相关系数为 0.9790。由腐蚀深度分布的物理意义(公式(2))可得, $y_0=0$, $A=1$ 。

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(x-x_c)^2}{w^2}} \quad (2)$$

式中: y 为概率密度函数; x 为腐蚀深度 (μm); x_c 为期望值 (μm); w 为 2 倍的标准差。期望值 x_c 决

定了分布曲线的位置, w 决定了分布曲线的幅度。

对比表 1、表 4 和表 5 可得,参数 x_c 与平均腐蚀速率随温度的变化趋势一致,参数 w 与腐蚀类型相关。说明 Gauss 模型的参数 x_c 和 w 与腐蚀速率和腐蚀形态相关。参数 x_c 表示频率密度曲线的位置, x_c 越小,平均腐蚀速率也越小。参数 w 表示频率密度曲线的形状, w 越小,密度分布曲线跨度越小,说明腐蚀深度越集中,出现在密度分布曲线尾部的部分就是点蚀坑,腐蚀类型为点蚀; w 越大,密度分布曲线跨度越大,说明腐蚀深度越分散,密度分布曲线尾部也

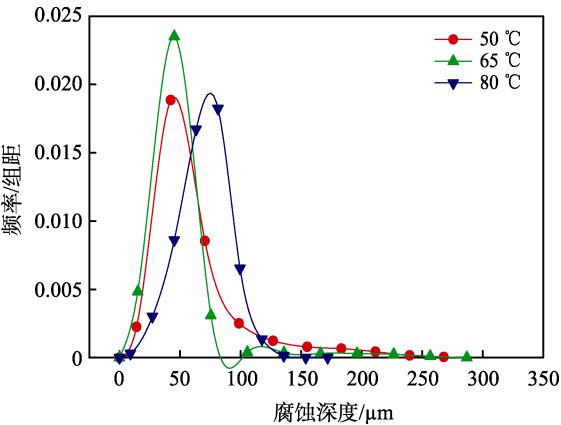


图 5 腐蚀深度频率密度分布图
Fig.5 Frequency and density distribution diagram of corrosion depth

表 5 腐蚀深度分布的 Gauss 模型拟合参数表
Tab.5 Fitting parameter table for Gauss model of depth distribution of corrosion

Temperature/°C	$x_c/\mu\text{m}$	ω
50	48.367 83	37.774 56
65	43.697 03	32.887 62
80	71.451 02	41.492 18

较短，腐蚀类型表现为均匀腐蚀。

2.4 腐蚀深度分布模型验证

为了验证 CO₂/盐水环境下 J55 碳钢腐蚀深度分

布是否符合 Gauss 分布，分别在不同温度和压力下，按照 1.2 方法进行 CO₂/盐水（矿化度为 33 000 mg/L）环境下 J55 碳钢的腐蚀试验，分别测定平均腐蚀速率、最大点蚀深度，在放大 200 倍下，采用重合度 10%的 8×9 视域拼图对酸洗后腐蚀试片表面的腐蚀形貌进行提取，并分析其腐蚀深度分布，结果见图 6。由图 6 可得，不同温度和压力下，试片表面腐蚀深度同样呈现中间大、两头小、左右对称的特征，采用 Origin9.0 软件中 Gauss 模型多曲线 Global 模式对图 6 中的曲线进行拟合，相关系数为 0.9726。不同温度和压力下的平均腐蚀速率、最大点蚀深度和 Gauss 分布拟合的参数见表 6。

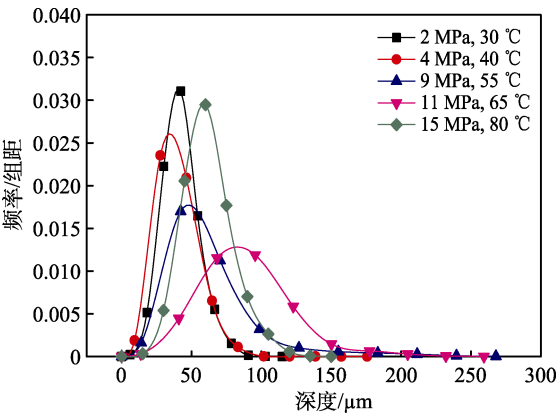


图 6 不同条件下 CO₂/盐水中腐蚀深度频率密度分布图
Fig.6 Frequency and density distribution diagram of CO₂/brine corrosion depth in different conditions

表 6 不同条件下 CO₂/盐水中腐蚀速率及腐蚀深度分布的 Gauss 模型拟合参数
Tab.6 Fitting parameter table for Gauss model of corrosion rate and depth distribution of CO₂/brine corrosion in different conditions

Pressure/MPa	Temperature/°C	Average corrosion rate/(mm·a ⁻¹)	Maximum pitting depth/μm	$x_c/\mu\text{m}$	ω
2	30	0.5463	120.461	40.897 21	25.458 18
4	40	0.3602	184.444	37.112 29	28.907 76
9	55	2.5820	281.568	52.255 47	41.157 07
11	65	11.7705	272.087	84.569 81	60.858 82
15	80	9.8361	148.468	59.204 96	29.423 04

由表 6 可得，参数 x_c 与平均腐蚀速率呈正相关，即 x_c 越大，平均腐蚀速率也越大。参数 w 也能反映腐蚀类型，其中 2 MPa/30 °C、4 MPa/40 °C 和 15 MPa/80 °C 下表现为点蚀，11 MPa/65 °C 下表现为均匀腐蚀。因此，通过对试片表面腐蚀形态图像的提取、统计和拟合，能够对腐蚀程度和腐蚀类型进行表征。该方法对试片表面的提取面积占试片表面积的 12.28%，远大于目前其他方法的研究面积，更能反映腐蚀表面形貌特征，避免了腐蚀形貌描述的随机性和主观性。同时，根据腐蚀深度分布拟合的 Gauss 分布还能预测不同最大点蚀深度出现的概率，为管线设备的安全运行提供参考。该方法可根据研究需要扩大或缩小提取

图像的面积，对腐蚀深度进行相应的统计和拟合，根据拟合规律对腐蚀形态、腐蚀深度和管线设备的安全性进行分析。

3 结论

- 1) 随着温度的升高，CO₂/盐水环境中 J55 碳钢的平均腐蚀速率先减小后增大，腐蚀形态由点蚀逐渐转变成了均匀腐蚀。
- 2) 在放大 200 倍下，光学电子显微镜采用重合度 10%的 9 视域拼图对腐蚀形貌进行提取，提取面积达 12.28%。

3) 试片表面腐蚀深度分布符合 Gauss 分布, Gauss 分布拟合参数与平均腐蚀速率和腐蚀类型相关。

4) 大面积表面形貌提取和图像分析能有效避免点蚀描述中的主观性和随机性。

参考文献:

- [1] 王丹, 袁世娇, 吴小卫, 等. 油气管道 CO₂/H₂S 腐蚀及防护技术研究进展[J]. 表面技术, 2012, 41(3): 31-37.
WANG Dan, YUAN Shi-jiao, WU Xiao-wei, et al. Research progress of CO₂/H₂S corrosion in oil and gas pipelines and the protection techniques[J]. Surface technology, 2012, 41(3): 31-37.
- [2] FRANKEL G S. Pitting corrosion of metals[J]. Journal of the electrochemical society, 1986, 145(6): 2186.
- [3] 石林, 郑志军, 高岩. 不锈钢的点蚀机理及研究方法[J]. 材料导报, 2015, 29(12): 79-85.
SHI Lin, ZHENG Zhi-jun, GAO Yan. Mechanism and research methods of pitting corrosion of stainless steel[J]. Materials review, 2015, 29(12): 79-85.
- [4] 叶超, 杜楠, 赵晴, 等. 不锈钢点蚀行为及研究方法的进展[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(3): 271-276.
YE Chao, DU Nan, ZHAO qing, et al. Progress in research of pitting corrosion behavior and research methods of stainless steel[J]. Corrosion & protection, 2014, 35(3): 271-276.
- [5] BHANDARI J, KHAN F, ABBASSI R, et al. Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures—A technical review[J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2015, 37: 39-62.
- [6] 陈长风, 路民旭, 赵国仙, 等. N80 油管钢 CO₂ 腐蚀点蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(1): 21-25.
CHEN Chang-feng, LU Min-xu, ZHAO Guo-xian, et al. Behavior of CO₂ pitting corrosion of N80 steel[J]. Journal of chinese society for corrosion and protection, 2003, 23(1): 21-25.
- [7] HAN J, CAREY J W, ZHANG J, et al. A Coupled electrochemical-geochemical model of corrosion for mild steel in high-pressure CO₂-saline environments[J]. International journal of greenhouse gas control, 2011, 5: 777-787.
- [8] FARELAS F, GALICIA M, BROWN B, et al. Evolution of dissolution processes at the interface of carbon steel corroding in a CO₂ environment studied by EIS[J]. Corrosion science, 2010, 52(2): 509-517.
- [9] CHOI Y S, YOUNG D, NESIC S, et al. Wellbore integrity and corrosion of carbon steel in CO₂ geologic storage environments: A literature review[J]. International journal of greenhouse gas control, 2013, 16s: s70-s77.
- [10] ZHANG G A, LIU D, LI Y Z, et al. Corrosion behavior of N80 carbon steel in formation water under dynamic supercritical CO₂ condition[J]. Corrosion science, 2017, 120: 107-120.
- [11] 叶继红, 申会谦, 薛素铎. 点蚀孔腐蚀钢构件力学性能劣化简化分析方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 70-75.
YE Ji-hong, SHEN Hui-qian, XUE Su-duo. Simplified analytical method of mechanical property degradation for steel members with pitting corrosion[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 70-75.
- [12] ZHAO Y, ZHANG X, DING H, et al. Non-uniform distribution of a corrosion layer at a steel/concrete interface described by a gaussian model[J]. Corrosion science, 2016, 112: 1-12.
- [13] CHRISTOU V, BOCCHINI P. An efficient methodology that simulates a multi-dimensional non-Gaussian field to evaluate the effect of the spatial distribution of corrosion in a steel beam[J]. Structures congress, 2014, 27: 1059-1069.