

温度与应力耦合作用下高强度海水 腐蚀行为研究

孙佳钰^{1,2}, 彭文山^{2*}

(1. 中国石油乌鲁木齐石化公司研究院, 乌鲁木齐 830019;

2. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护全国重点实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: **目的** 保证船舶设备安全, 明确船用 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢在不同海水温度中的服役状态变化。**方法** 在实验室模拟环境中, 通过四点弯曲装置向 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢施加不同应力, 并结合电化学测试、腐蚀形貌和产物分析, 研究温度与应力耦合对 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢在不同温度海水环境中腐蚀行为的影响及规律。**结果** 温度升高会加快 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢腐蚀产物的生成, 但是在较高温度海水中, 会使高强度钢由点蚀转变为均匀腐蚀, 因此较高温度海水中对高强度钢施加外加应力未发现点蚀坑加深。较高温度海水相对于低温海水条件下, 高强度钢腐蚀产物层中的 Cr、Ni 含量增加, 低温海水中施加应力致使腐蚀产物层中的 Cr、Ni 含量降低, 而较高温度海水中施加应力对腐蚀产物成分的影响不大。温度对 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢的腐蚀作用明显强于外加应力对其的腐蚀作用。**结论** 在不同温度海水中, 较高的温度使得 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢的耐腐蚀性能降低, 但是相对于低温海水中, 较高温度海水条件下施加应力对 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢腐蚀的影响较小, 因此对于高强度钢在海水中的腐蚀, 温度对高强度钢的影响明显大于应力的影响。

关键词: 模拟海洋环境; 温度; 高强度钢; 应力; 腐蚀形貌; 点蚀深度

中图分类号: TG172.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)04-0116-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.04.014

Seawater Corrosion Behavior of High-strength Steel under the Coupling Effect of Temperature and Stress

SUN Jiayu^{1,2}, PENG Wenshan^{2*}

(1. Research Institute, CNPC Urumqi Petrochemical Company, Urumqi 830019, China; 2. National Key Laboratory of Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Shandong Qingdao 266237, China)

ABSTRACT: The work aims to clarify the service state of marine Ni-Cr-Mo-V high-strength steel at different seawater temperature, in order to ensure the safety of ship equipment. In the laboratory simulation environment, different stresses were applied to Ni-Cr-Mo-V high-strength steel by four-point bending device. Combined with electrochemical test, corrosion morphology and product analysis, the effect of temperature and stress coupling on the corrosion behavior of Ni-Cr-Mo-V high-strength steel in seawater environment at different temperature was studied. The increase of temperature accelerated the formation of

收稿日期: 2024-01-05; 修订日期: 2024-03-05

Received: 2024-01-05; Revised: 2024-03-05

引文格式: 孙佳钰, 彭文山. 温度与应力耦合作用下高强度海水腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(4): 116-125.

SUN Jiayu, PENG Wenshan. Seawater Corrosion Behavior of High-strength Steel under the Coupling Effect of Temperature and Stress[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(4): 116-125.

*通信作者 (Corresponding author)

corrosion products of Ni-Cr-Mo-V high-strength steel, but in high temperature seawater, the pitting corrosion of high-strength steel was reduced to uniform corrosion, so no increasingly serious pitting corrosion was found when external stress was applied to high-strength steel in seawater at high temperature. The content of Cr and Ni in the corrosion product layer of high-strength steel increased in high temperature seawater compared with low temperature seawater. The stress applied in low temperature seawater caused the content of Cr and Ni in the corrosion product layer to decrease, while the stress applied in high temperature seawater had little effect on the composition of corrosion products. The corrosion effect of temperature on Ni-Cr-Mo-V high-strength steel was obviously stronger than that of applied stress. In seawater at different temperature, high temperature reduces the corrosion resistance of Ni-Cr-Mo-V high-strength steel. However, compared with low temperature seawater, the stress applied in higher temperature seawater has little effect on the corrosion of Ni-Cr-Mo-V high-strength steel. Therefore, for the corrosion of high-strength steel in seawater, the effect of temperature on high-strength steel is obviously greater than that of stress.

KEY WORDS: simulated marine environment; temperature; high-strength steel; stress; corrosion morphology; pit depth

21 世纪是步入海洋经济的新时代, 海洋中拥有丰富的燃料、矿产、锰结核以及天然气水合物等资源^[1]。为开发利用海洋资源, 保证海洋设备的安全, 离不开高强钢的发展与应用^[2-3]。随着钢强度的提高, 其组织也越加复杂, 塑性储备降低, 增大了该材料的局部腐蚀敏感性。

船舶航行过程会跨越不同海域, 其海洋环境有所不同, 海水温度、海洋微生物以及外界环境气温等因素对高强钢的腐蚀有较大影响^[4], 尤其随着季节和地域的不同, 海水温度也呈现出巨大差异。如南海海水夏季最高温度可达 33 °C 左右, 东海沿岸水温冬季最低会降至 5 °C 附近^[5]。随着温度的升高, 一般都会提高反应的活性, 以加快氧扩散反应的速度, 且海水电导率与温度呈正相关, 也会加速金属腐蚀。然而, 钙质水垢也会随着海水温度的升高在金属表面形成保护膜, 延缓金属的腐蚀。国内相关学者研究发现^[6-9], 对于碳钢和低合金钢等钢材, 在海水中随着海水温度的升高, 腐蚀加剧。也有学者指出, 当温度超过临界温度后, 腐蚀反应受到抑制, 腐蚀速率会由上升变为下降^[10]。另外, 有关学者研究发现, 海水温度变化还会影响金属局部腐蚀的形成^[11]、自腐蚀电位的变化^[12]以及腐蚀产物组成^[13]。目前, 关于温度对钢材腐蚀机理的影响需进一步深入研究, 并且关于 Ni-Cr-Mo-V 高强钢在不同海水温度下的腐蚀情况研究较少, 温度对其腐蚀行为的影响尚不明确。

除了温度的影响外, 在船舶和油气装备工作环境中, 高强钢通常还会承受结构载荷、海流作用、加工或焊接残余应力等普遍存在的局部拉伸应力, 与海洋腐蚀环境综合作用可能会导致严重的应力腐蚀^[14-16]。海水环境中, 应力改变了腐蚀反应进程, 对腐蚀的影响较明显^[17-19]。因此, 研究高强钢在模拟海洋环境下的拉伸预应力与温度因素协同作用下的腐蚀过程, 揭示其腐蚀机理, 对于船舶和探测设备的设计与安全运行具有重要参考意义。

1 试验

1.1 材料

试验材料选用船用 Ni-Cr-Mo-V 高强钢。运用 Bruker 荧光光谱仪测试试样的化学成分, 测得本次试验研究所采用的高强钢的化学成分(质量分数)为: Fe 92.878%, Ni 4.738%, Cr 0.674%, Mo 0.496%, V 0.106%, Si 0.172%, Mn 0.470%。将试样切成 120 mm×15 mm×3 mm, 备用, 并利用硅橡胶涂覆, 露出 15 mm×15 mm 试样表面, 试验介质为青岛海域天然海水。应力-腐蚀试验采用四点弯曲试验, 设置夹具大小为 160 mm×65 mm×20 mm。将试样放入青岛天然海水中浸泡 5 d, 试验条件: 压力为 0.1 MPa, 改变海水温度为 5.0、25.0、35.0 °C, 改变施加应力为 50% 屈服强度 ($R_{p0.2}$) 和 100% $R_{p0.2}$ 。

1.2 方法

通过尼康数码相机观测记录宏观形貌。利用蔡司 ULTRA55 扫描电子显微镜进行微观腐蚀形貌分析。利用 HIROX KH-8700 数字视频显微镜观察不同试验条件下腐蚀产物层下金属基体的腐蚀形貌。

电化学测试采用 PARATAT 2273 电化学工作站, 试验选用三电极体系, 参比电极为 218 型 Ag/AgCl 电极, 辅助电极为铂铌丝电极, 工作电极为四点弯曲电极试样。电化学阻抗谱测试(EIS)中, 交流激励信号幅值为 10 mV, 扫描范围为 100 kHz~10 mHz, 测试所得的数据利用 Zsimpwin 软件进行拟合。动电位极化扫描速率为 0.333 mV/s, 扫描范围为-300~300 mV (vs.OCP)。

2 结果与讨论

2.1 宏观腐蚀形貌分析

带应力 Ni-Cr-Mo-V 高强钢在不同温度下浸泡

5 d 的腐蚀形貌变化如图 1~3 所示。可以看出, 当温度在 5.0 °C 时, 温度较低, 试样表面腐蚀产物层较薄。当温度升高至 25.0、35.0 °C 时, 试样表面的腐蚀产物逐渐变黑, 腐蚀产物层增厚。在不同温度下, 对同一试样增加应力时, 较低温度下, 试样表面的腐蚀产物层较薄, 颜色呈现黄褐色, 且向中心扩展; 较高温度下, 随着应力的增加, 试样中心的腐蚀变得严重。在 25.0 °C 时, 试样表面呈现红褐色, 腐蚀产物较为疏松。在 35.0 °C 时, 试样表面呈现黑褐色, 腐蚀产物层较为致密。当施加 100% $R_{p0.2}$ 应力后, 中心处明显聚集较多腐蚀产物。因此, 较高温度下, Ni-Cr-Mo-V 高强钢的腐蚀明显比低温下的腐蚀速率快, 且生成的腐

蚀产物较多。因为温度高可以加快溶液的扩散系数, 使得 Cl^- 的运动速率加快, 造成腐蚀性离子更容易到达金属表面, 加剧金属的腐蚀^[20-21]。另外, 在较高温度下, 应力集中部位的腐蚀更为严重, 腐蚀产物层更厚。

2.2 微观腐蚀形貌分析

Ni-Cr-Mo-V 高强钢在不同温度的天然海水中浸泡 5 d 后, 其腐蚀产物的扫描电镜形貌如图 4~6 所示。在低温下, 形成的腐蚀产物膜层较为致密; 而较高温度下形成的腐蚀产物膜层明显增厚, 且较为疏松, 在高倍下可以观察到, 大直径腐蚀产物颗粒下方还有一层较为致密的小直径腐蚀产物。在较低温度下, 对

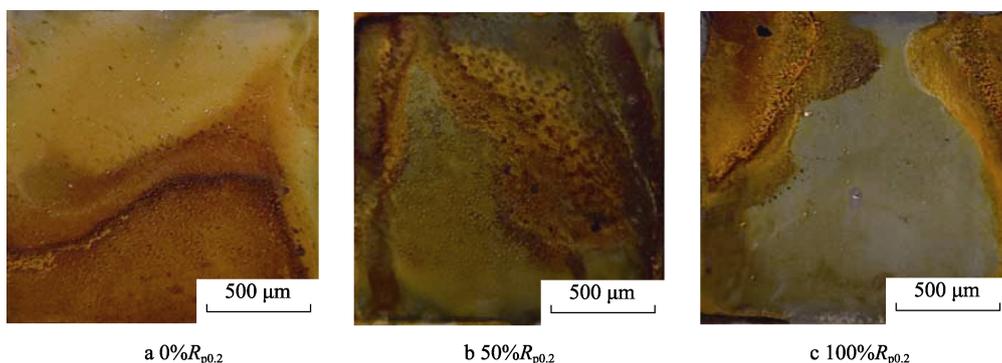


图 1 Ni-Cr-Mo-V 高强钢在 5.0 °C 条件下浸泡 5 d 后的腐蚀宏观形貌

Fig.1 Macro morphology of corrosion of Ni-Cr-Mo-V high-strength steel immersed in 5.0 °C seawater for 5 days

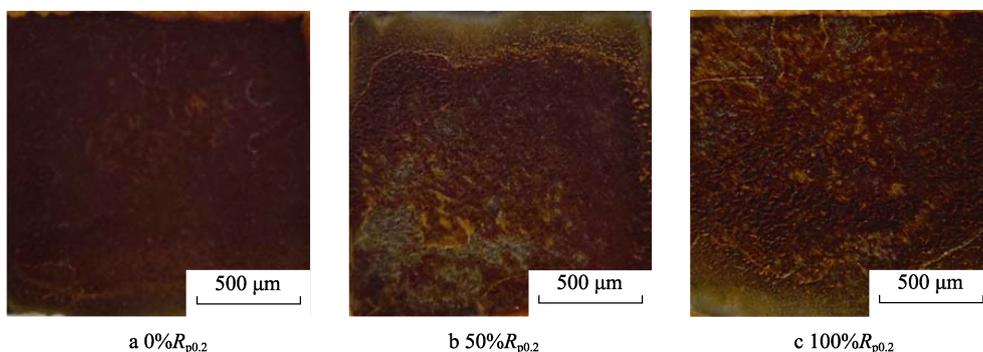


图 2 Ni-Cr-Mo-V 高强钢在 25.0 °C 条件下浸泡 5 d 后的腐蚀宏观形貌

Fig.2 Macro morphology of corrosion of Ni-Cr-Mo-V high-strength steel immersed in 25.0 °C seawater for 5 days

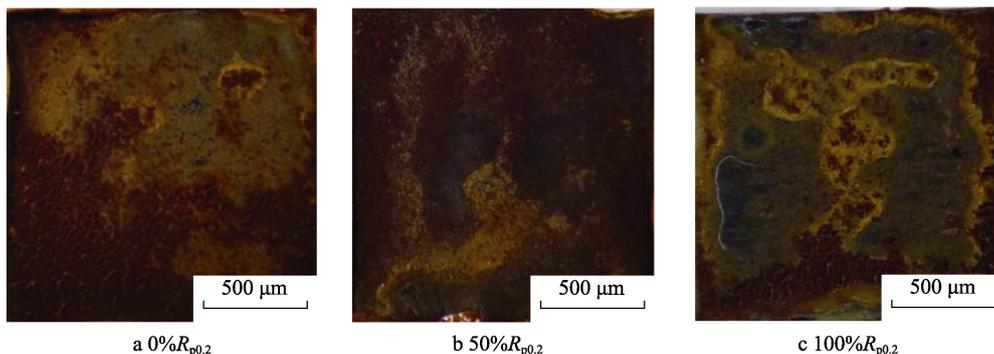


图 3 Ni-Cr-Mo-V 高强钢在 35.0 °C 条件下浸泡 5 d 后的腐蚀宏观形貌

Fig.3 Macro morphology of corrosion of Ni-Cr-Mo-V high-strength steel immersed in 35.0 °C seawater for 5 days

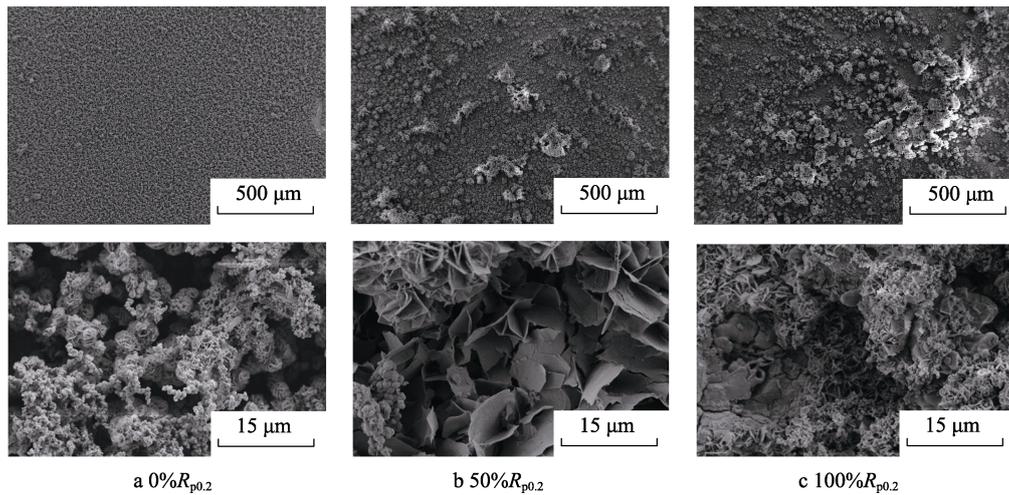


图 4 不同应力高强度钢在 5.0 °C 海水中浸泡 5 d 的微观形貌

Fig.4 Micro morphology of high-strength steel immersed in 5.0 °C seawater for 5 days under different stresses

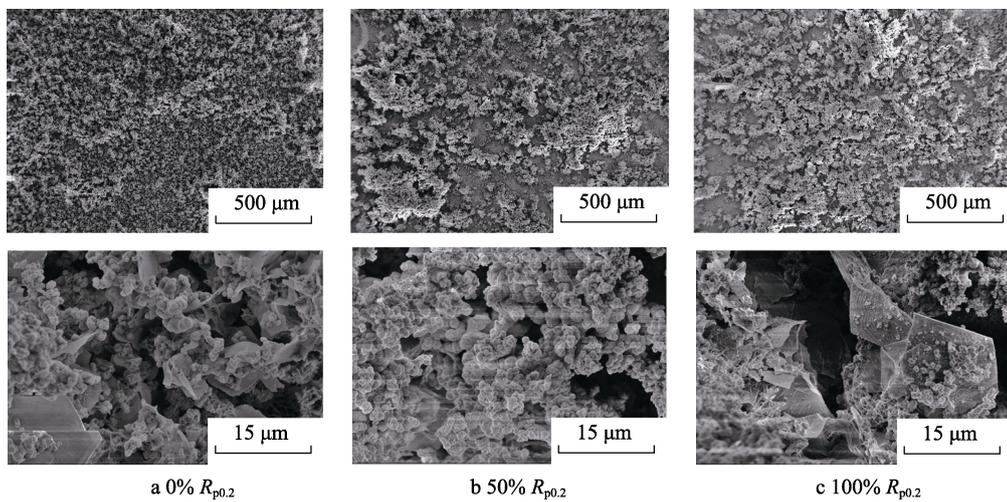


图 5 不同应力高强度钢在 25.0 °C 海水中浸泡 5 d 的微观形貌

Fig.5 Micro morphology of high-strength steel immersed in 25.0 °C seawater for 5 days under different stresses

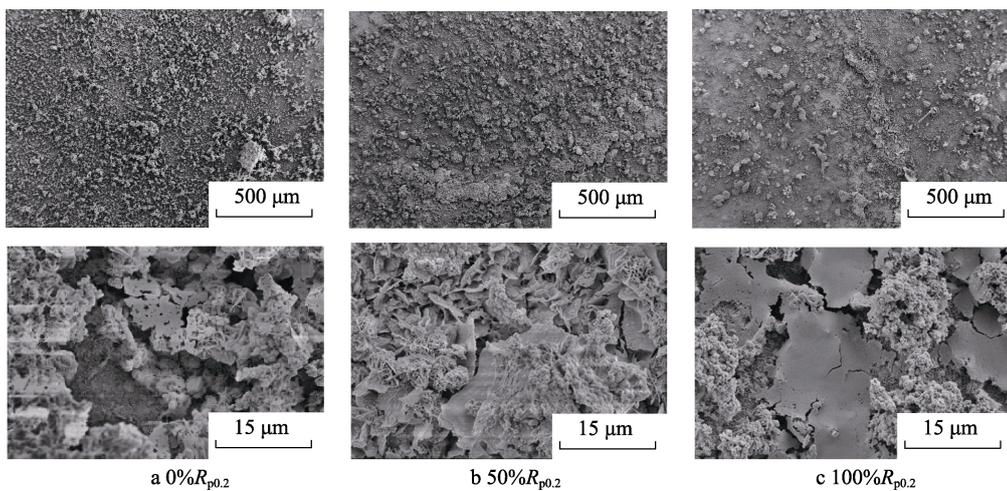


图 6 不同应力高强度钢在 35.0 °C 海水中浸泡 5 d 的微观形貌

Fig.6 Micro morphology of high-strength steel immersed in 35.0 °C seawater for 5 days under different stresses

Ni-Cr-Mo-V 高强度钢施加应力的增大, 其花瓣状腐蚀产物直径明显增大, 腐蚀产物锈层变得疏松; 在较高

温度下, 随着施加应力的增大, 花瓣状腐蚀产物直径也增大, 但是其腐蚀产物上的绒球状产物增多。在

35.0 °C、100% $R_{p0.2}$ 应力时，其腐蚀产物多数呈绒球状，表面还覆盖了一层带有裂纹的薄膜状物质。由此推断，在较高温下，由于离子反应速率的加快，使得 Ni-Cr-Mo-V 高强钢的腐蚀速率加快，腐蚀产物层明显增厚，并且形成直径较大的腐蚀产物颗粒，致使外层腐蚀产物层较为疏松多孔。在较高温下，对 Ni-Cr-Mo-V 高强钢施加应力，外层腐蚀产物较为松散地沉积在电极表面上，因此在施加过大应力时，外层疏松腐蚀产物更容易破裂脱落。

2.3 金属表面腐蚀形貌分析

对 Ni-Cr-Mo-V 高强钢施加 0% $R_{p0.2}$ 、100% $R_{p0.2}$ 应力后，在不同温度的自然海水中浸泡 5 d 的腐蚀微观形貌和三维形貌如图 7~9 所示。温度较低时，试样表面制备时残留的划痕清晰可见，金属仅发生点蚀；在较高温度条件下，Ni-Cr-Mo-V 高强钢表面基本都发生腐蚀，成为均匀腐蚀，其中掺杂着少量蚀坑，且在 35.0 °C 比 25.0 °C 时的腐蚀坑深度大。证明温度越

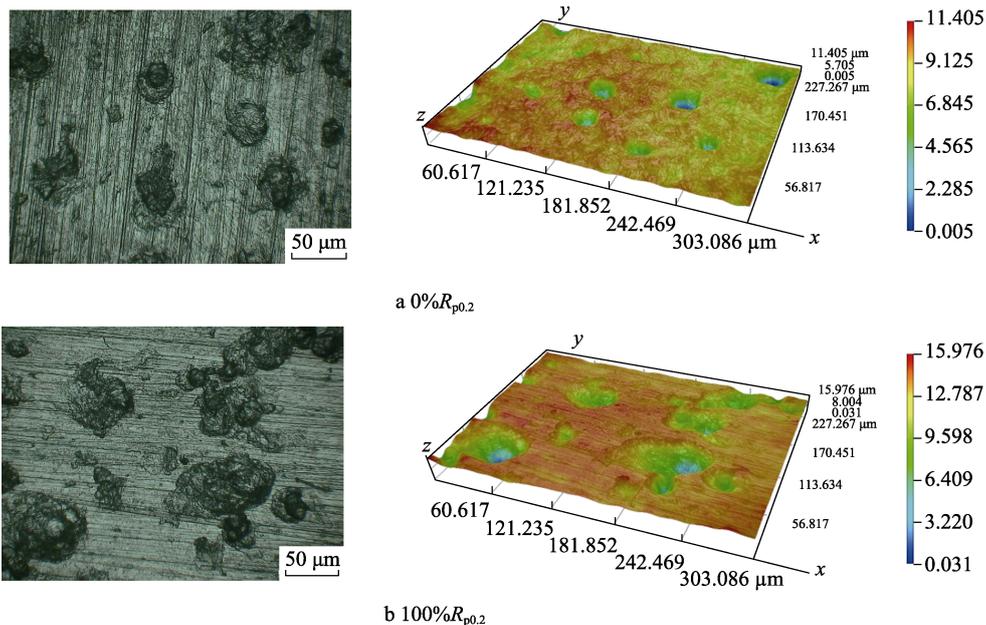


图 7 在 5.0 °C 自然海水中浸泡 5 d 后的点蚀形貌

Fig.7 Pitting morphology of high-strength steel after immersion in 5.0 °C natural seawater for 5 days

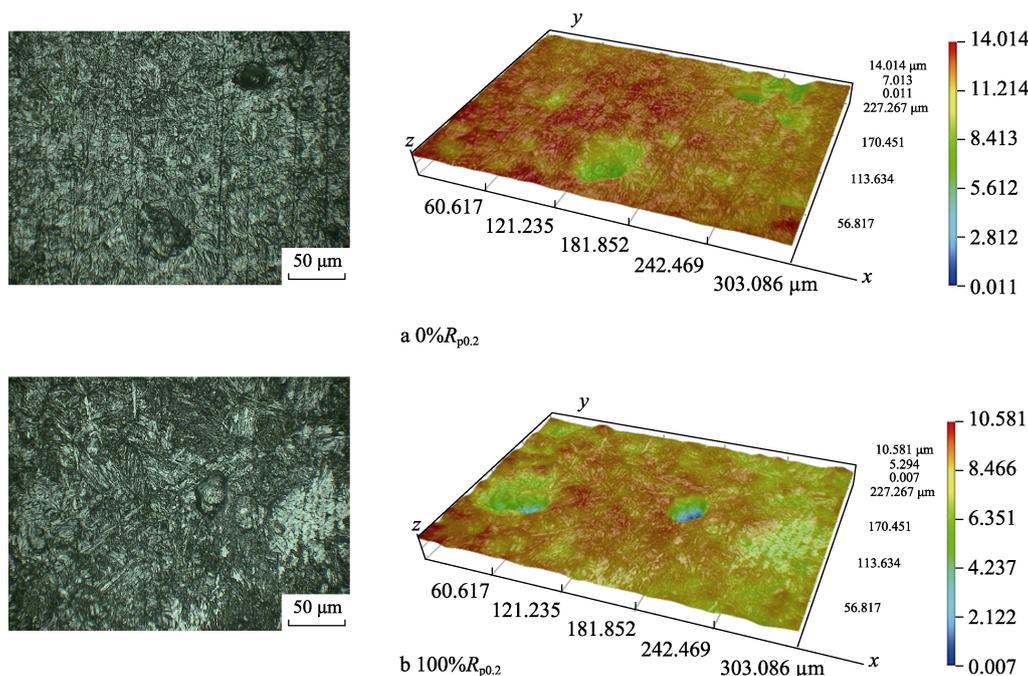


图 8 在 25.0 °C 自然海水中浸泡 5 d 后的点蚀形貌

Fig.8 Pitting morphology of high-strength steel after immersion in 25.0 °C natural seawater for 5 days

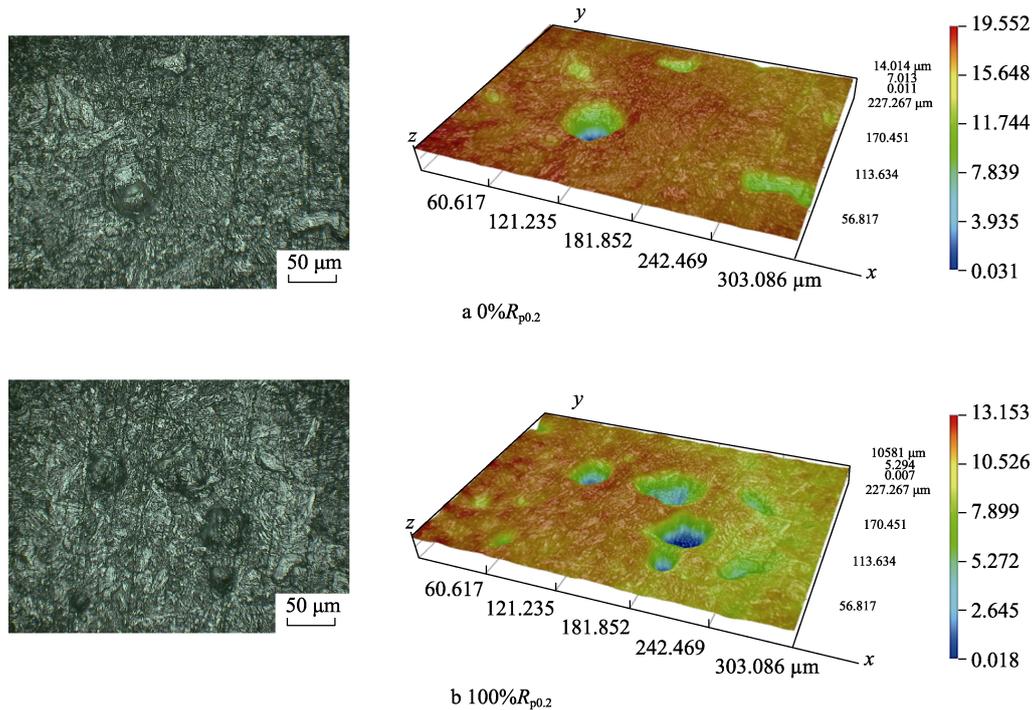


图 9 在 35.0 °C 自然海水中浸泡 5 d 后的点蚀形貌
Fig.9 Pitting morphology of high-strength steel after immersion in 35.0 °C natural seawater for 5 days

高, 金属的反应速率越快。在较低温度下, 施加应力试样的蚀坑明显发生横向扩展; 而在较高温度下, 施加应力试样的金属表面与未施加应力的金属表面差异不大。这可能是由于在较低温度下, 腐蚀还处于初始局部腐蚀阶段, 施加应力会造成应力在缺陷处集中, 因此造成缺陷处的腐蚀加剧, 点蚀发生扩展; 而在较高温度下, 由于腐蚀速度较快, 点蚀坑处 Cl⁻ 的传输速度增加, 降低了点蚀坑处闭塞区的形成概率, 造成金属表面由局部点蚀向均匀腐蚀转变^[22], 因此施加应力后的金属表面反而与未施加应力时相差不大。

2.4 腐蚀产物成分分析

对 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢施加 0% $R_{p0.2}$ 、100% $R_{p0.2}$ 应力, 在不同温度中天然海水中浸泡 5 d 后, 腐蚀产物的成分分析见表 1。表 1 中, 各条件下的主要元素都为 Fe 和 O, 证明该钢材腐蚀产物中的主要成分为

Fe 的氧化物组成。通过表 1 可以看出, 在较高温度条件下, Ni-Cr-Mo-V 高强度钢成分中 Cr 和 Ni 的含量明显比低温条件下的高, 证明该材料在较高温度条件下, 腐蚀产物中 Cr 和 Ni 的生成较多, 有可能是 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢在较高温度下腐蚀速度过快, 从而导致腐蚀产物膜增厚, 其中 Cr 和 Ni 的氧化物增多^[23]。施加应力后, Cr 和 Ni 的含量在较高温度海水中变化不大, 因此在较高温度海水中, 试样施加应力对腐蚀产物成分的影响较小。

2.5 电化学研究与分析

2.5.1 电化学阻抗谱

在 5.0 °C 工况下, 采用 $R(QR)$ 电路图对 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢在 5 °C 海水中浸泡 5 d 的 EIS 进行拟合, 如图 10a 所示。其中, R_s 为该反应体系的溶液电阻; Q_{dl} 为双电层电容常相位角原件; R_{ct} 为金属表面电荷转移电阻。在 25.0、35.0 °C 工况下, 由于试样表面有

表 1 不同应力 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢在不同温度的海水中腐蚀产物的化学成分 (质量分数, %)
Tab.1 Chemical composition of corrosion products of Ni-Cr-Mo-V high-strength steel in natural seawater at different temperature under different stresses (mass fraction, %)

Temperature/°C	Stress	O	S	Cl	Cr	Fe	Ni
5.0	0% $R_{p0.2}$	36.19	0.99	3.04	0.49	55.48	2.72
	100% $R_{p0.22}$	33.46	2.03	0.48	0.69	60.51	1.56
25.0	0% $R_{p0.2}$	32.19	0.88	1.24	0.87	61.54	2.54
	100% $R_{p0.2}$	30.54	1.12	0.28	0.75	63.32	2.47
35.0	0% $R_{p0.2}$	33.12	0.84	1.68	0.69	57.64	5.27
	100% $R_{p0.2}$	33.67	1.48	9.37	0.86	45.78	5.66

明显锈层,因此采用 $R\{Q[R(QR)]\}$ 等效电路,如图 10b 所示。其中, Q_f 为腐蚀产物膜电容; R_f 为腐蚀产物膜电阻。由于金属基体的电化学反应面积还是很大,因此与腐蚀产物物理阻抗相关的时间常数和与界面电化学反应相关的时间常数相近,相互叠加,难以区分,拟合结果较为理想^[24]。

从图 11 可以看出,随着温度的增加,材料的容抗弧半径明显减小,证明温度的增加造成了材料的耐蚀性能变差。在较低温度下,随着施加应力的增加,阻抗弧的容抗弧半径随之减小,高强钢的耐蚀性能变差。但是在较高温度下,随着温度的升高,

反而施加应力的试样较之未施加应力的试样,其阻抗弧的容抗弧变径较大,在应力条件下,该材料的耐蚀性能变好。

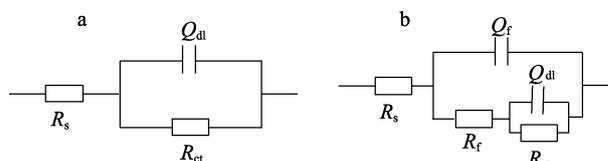


图 10 高强钢在天然海水中腐蚀的等效电路
Fig.10 Corrosion equivalent circuit of high-strength steel in natural seawater

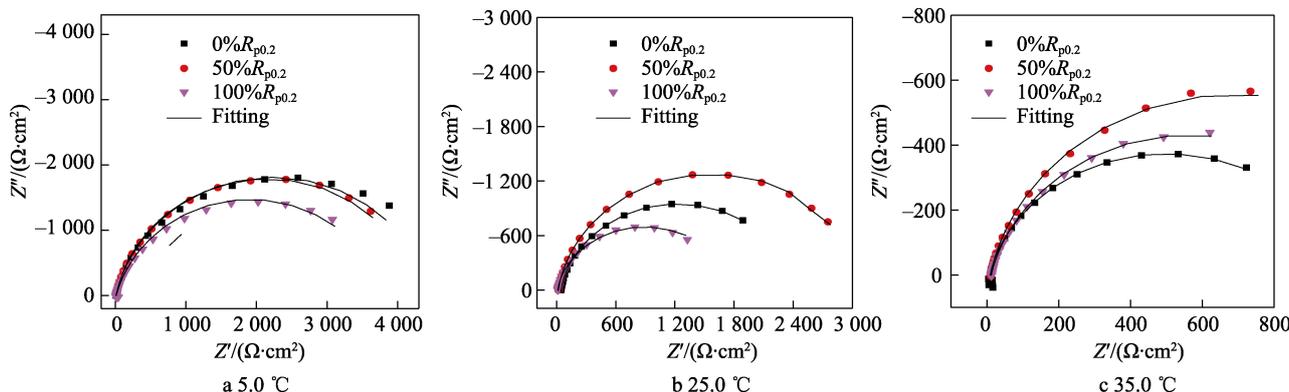


图 11 Ni-Cr-Mo-V 高强钢在不同温度条件中浸泡 5 d 测得的 EIS 图
Fig.11 EIS chart of Ni-Cr-Mo-V high-strength steel immersed in seawater at different temperature for 5 days

从表 2 中的数据可以看出,随着温度的升高, R_{ct} 和 R_f 迅速下降,但是在 25.0、35.0 °C 时,增加适当的应力会使得 R_{ct} 增加,即金属基体上的电荷转移难度增加,这与腐蚀产物形貌和成分分析结果相一致。由于温度较高,使得试样表面局部缺陷减少,发生均

匀腐蚀,因此增加应力也会造成更多的腐蚀产物生成,腐蚀产物中有更多的 Cr、Ni 氧化物,对基体产生了一定的保护作用,增加了应力反而使得 R_{ct} 略微增加。但是由于在有应力的情况下,该腐蚀产物膜疏松易脱落,因此造成腐蚀产物膜 R_f 极低。

表 2 Ni-Cr-Mo-V 高强钢在 5.0 °C 条件下浸泡 5 d 拟合的 EIS 参数
Tab.2 Fitted EIS parameters of Ni-Cr-Mo-V high-strength steel immersed in 5.0 °C seawater for 5 days

Temperature/°C	Stress	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
5.0	0% $R_{p0.2}$	9.48	—	4 460
	50% $R_{p0.2}$	15.91	—	4 270
	100% $R_{p0.2}$	13.60	—	3 680
25.0	0% $R_{p0.2}$	15.60	17.2	2 657
	50% $R_{p0.2}$	18.11	5.64	3 080
	100% $R_{p0.2}$	12.34	2.15	1 700
35.0	0% $R_{p0.2}$	9.38	7.75	1 010
	50% $R_{p0.2}$	9.81	3.31	1 380
	100% $R_{p0.2}$	12.01	2.17	1 120

2.5.2 动电位极化曲线结果与分析

在不同温度下,施加不同应力时,对 Ni-Cr-Mo-V 高强钢测试所得的极化曲线数据如图 12 所示。在 5.0 °C 时,施加应力后,极化曲线向右移动,腐蚀速度增加。在温度较高情况下,施加应力后,Ni-Cr-Mo-V

高强钢的出现类似钝化的台阶越明显,施加一定程度的应力反而使极化曲线向左移动,腐蚀速度减缓,该结果与阻抗结果相一致。证明在较高温度海水中,相对于低温海水中,应力对 Ni-Cr-Mo-V 高强钢腐蚀的影响较小。

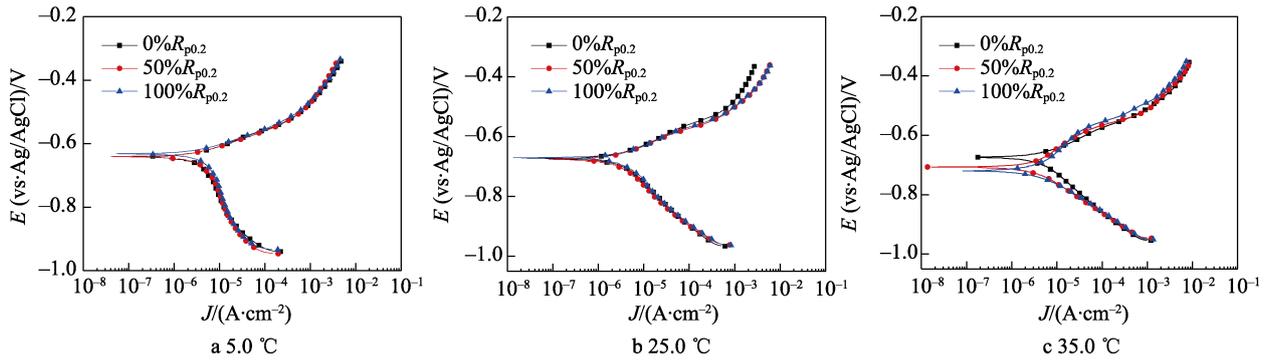


图 12 施加不同应力的 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢在相同温度条件下浸泡 5 d 后的极化曲线

Fig.12 Polarization curves of Ni-Cr-Mo-V high-strength steel immersed in seawater of the same temperature for 5 days under different stresses

不同恒应力下, 在不同温度低氧天然海水中浸泡 5 d 测试所得的极化曲线的对比如图 13 所示。结合表 3 综合分析可知, 随着温度的增加, Ni-Cr-Mo-V 高强度钢的阳极区域产生类钝化台阶。这可能是因为在较高温度下, 金属前期反应较快, 生成的腐蚀产物膜较厚。随着温度的增加, 自腐蚀电位下降, 证明虽然温度升高生成了较厚的腐蚀产物膜层, 但是由于氧含量较低, 导致较高温度下变为由混合控制为主。另外, 在较高温度下, 由于生成的腐蚀产物膜较为疏松, 且温度升高会加快溶液离子的扩散速度, 因此该腐蚀产物的耐蚀性能较差, 自腐蚀电位发生下降^[25]。

表 3 施加不同应力的 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢在不同温度条件下浸泡 5 d 后的自腐蚀电位

Tab.3 Self-corrosion potential of Ni-Cr-Mo-V high-strength steel immersed in seawater of different temperature for 5 days under different stresses

Temperature/°C	Stress	E_{corr}/V
5.0	0% $R_{p0.2}$	-0.64
	50% $R_{p0.2}$	-0.64
	100% $R_{p0.2}$	-0.63
25.0	0% $R_{p0.2}$	-0.67
	50% $R_{p0.2}$	-0.67
	100% $R_{p0.2}$	-0.66
35.0	0% $R_{p0.2}$	-0.67
	50% $R_{p0.2}$	-0.70
	100% $R_{p0.2}$	-0.71

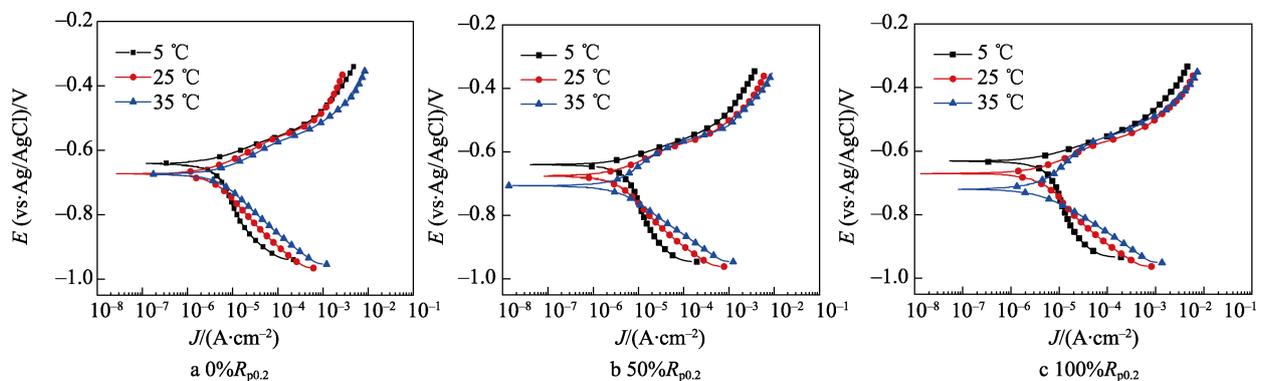


图 13 相同应力在不同温度条件下浸泡 5 d 后测得的极化曲线

Fig.13 Polarization curve measured after immersion in seawater of different temperature for 5 days under the same stress

3 结论

1) 温度升高导致 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢腐蚀产物增多, 但是生成的腐蚀产物膜更为疏松多孔, 在施加一定应力时, 造成腐蚀产物膜破裂脱落。在较高温度海水中, Ni-Cr-Mo-V 高强度钢的点蚀减少, 趋向于发生均匀腐蚀。

2) 在较高温度海水中, Ni-Cr-Mo-V 高强度钢腐蚀产物中 Cr、Ni 氧化物的含量更高, 证明相同浸泡天数时, 较高的温度能快速使 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢的腐蚀产物层增厚。

3) 在海水环境中, 温度和应力协同作用于 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢时, 由于较高温度环境下 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢能更快形成腐蚀产物层, 所以应力对该材料的腐蚀破坏作用更小。但是由于较高温度环境中 Ni-Cr-Mo-V 高强度钢的腐蚀倾向更大, 因此温度对船舶装备的危害强于应力。

参考文献:

[1] 冯士筭. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 48-53.

- FENG S Z. An Introduction to Marine Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 48-53.
- [2] 刘赐贵. 关于建设海洋强国的若干思考[J]. 海洋开发与管理, 2012, 29(12): 8-10.
- LIU C G. Some Thoughts on Building a Maritime Power[J]. Ocean Development and Management, 2012, 29(12): 8-10.
- [3] 林超群. 我国政府海洋意识变迁研究——基于1954-2013年政府工作报告的文本分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- LIN C Q. A Research on China's Government Marine Consciousness Change[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [4] 杨子旋. X70钢在模拟深海环境中腐蚀及应力腐蚀行为研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- YANG Z X. Study of Corrosion and Stress Corrosion Cracking of X70 Pipeline Steel in Simulated Deep-Sea Environment[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [5] 郭伟其, 沙伟, 沈红梅, 等. 东海沿岸海水表层温度的变化特征及变化趋势[J]. 海洋学报, 2005, 27(5): 1-8.
- GUO W Q, SHA W, SHEN H M, et al. Characteristics and Trend of SST Variation in the Coastal Region of the East China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(5): 1-8.
- [6] 王战辉, 张智芳, 高勇. 碳素钢在模拟海水中的腐蚀行为研究[J]. 甘肃科学学报, 2020, 32(4): 39-42.
- WANG Z H, ZHANG Z F, GAO Y. Study on the Corrosion Behavior of Carbon Steel in Simulated Sea Water[J]. Journal of Gansu Sciences, 2020, 32(4): 39-42.
- [7] 王佳, 孟洁, 唐晓, 等. 深海环境钢材腐蚀行为评价技术[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(1): 1-7.
- WANG J, MENG J, TANG X, et al. Assessment of Corrosion Behavior of Steel in Deep Ocean[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(1): 1-7.
- [8] 杨海洋, 黄桂桥. 环境因素对碳钢实海暴露初期腐蚀速率的影响[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(6): 576-578.
- YANG H Y, HUANG G Q. Influence of Environment Factors on Corrosion Rate of Carbon Steel at the Early Stage in Seawater[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(6): 576-578.
- [9] 李灏, 柴锋, 何宜柱, 等. 环境温度对船用耐蚀钢腐蚀行为的影响[J]. 钢铁, 2013, 48(8): 65-69.
- LI H, CHAI F, HE Y Z, et al. Effect of Environment Temperature on Corrosion Behavior of Corrosion Resistant Ship Hull[J]. Iron & Steel, 2013, 48(8): 65-69.
- [10] 廖柯熹, 黄琳钧, 王丹丹, 等. X65 管线钢在模拟海水环境中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(11): 856-861.
- LIAO K X, HUANG L J, WANG D D, et al. Corrosion Behavior of X65 Pipeline Steel in Simulated Seawater Environment[J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(11): 856-861.
- [11] PAN C, CUI Y, LIU L, et al. Effect of Temperature on Corrosion Behavior of Low-Alloy Steel Exposed to a Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(2): 1400-1409.
- [12] HU Q F, LIU Y C, ZHANG T, et al. Modeling the Corrosion Behavior of Ni-Cr-Mo-V High Strength Steel in the Simulated Deep Sea Environments Using Design of Experiment and Artificial Neural Network[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(1): 168-175.
- [13] WANG L Q, GAO Z M, LIU Y J, et al. Effect of Temperature on Corrosion Behavior of X65 Steel in Simulated Deep Sea Environment[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2019, 14(1): 161-172.
- [14] WAN H X, DU C W, LIU Z Y, et al. The Effect of Hydrogen on Stress Corrosion Behavior of X65 Steel Welded Joint in Simulated Deep Sea Environment[J]. Ocean Engineering, 2016, 114: 216-223.
- [15] LU Q K, WANG L W, XIN J C, et al. Corrosion Evolution and Stress Corrosion Cracking of E690 Steel for Marine Construction in Artificial Seawater under Potentiostatic Anodic Polarization[J]. Construction and Building Materials, 2020, 238: 117-123.
- [16] WU X, MU F W, GORDON S, et al. Development of a Numerical Model for Simulating Stress Corrosion Cracking in Spent Nuclear Fuel Canisters[J]. NPJ Materials Degradation, 2021, 5: 28.
- [17] 杨宏启, 张崎, 李一民, 等. 弹性应力对碳钢在海水环境中腐蚀速率的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 16-21.
- YANG H Q, ZHANG Q, LI Y M, et al. Effects of Elastic Stress on Corrosion Rate of Carbon Steel in Seawater[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(10): 16-21.
- [18] 严新永, 亢淑梅, 严玲, 等. 高锰钢和 9Ni 钢在模拟海水中的应力腐蚀行为对比研究[J]. 材料保护, 2023, 56(2): 34-43.
- YAN X Y, KANG S M, YAN L, et al. Comparative Study on Stress Corrosion Behavior of High Manganese Steel and 9Ni Steel in Simulated Seawater[J]. Materials Protection, 2023, 56(2): 34-43.
- [19] 郭昭, 李晗, 崔中雨, 等. A100 钢在动态薄液膜和人工海水环境中的应力腐蚀行为对比研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(6): 1303-1311.
- GUO Z, LI H, CUI Z Y, et al. Comparative Study on Stress Corrosion Behavior of A100 Ultrahigh-Strength Steel beneath Dynamic Thin Electrolyte Layer and in Artificial Seawater Environments[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(6): 1303-1311.
- [20] WEI X, DONG J H, TONG J, et al. Influence of Temperature on Pitting Corrosion Resistance of Cr₂₆Mo1 Ultra Pure High Chromium Ferrite Stainless Steel in 3.5%NaCl Solution[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 48(4): 502-507.

- [21] 冉斗, 孟惠民, 李全德, 等. 温度对 $^{14}\text{Cr}_{12}\text{Ni}_3\text{WMoV}$ 不锈钢在 0.02 mol/L NaCl 溶液中腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(3): 362-368.
RAN D, MENG H M, LI Q D, et al. Effect of Temperature on Corrosion Behavior of $^{14}\text{Cr}_{12}\text{Ni}_3\text{WMoV}$ Stainless Steel in 0.02 Mol/L NaCl Solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(3): 362-368.
- [22] 王标, 杜楠, 张浩, 等. 304 不锈钢点蚀产物对亚稳态点蚀萌生和稳态蚀孔生长的加速作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(4): 338-344.
WANG B, DU N, ZHANG H, et al. Accelerating Effect of Pitting Corrosion Products on Metastable Pitting Initiation and the Stable Pitting Growth of 304 Stainless Steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(4): 338-344.
- [23] 李慧艳. 超高强度马氏体不锈钢钝化与点蚀行为研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
LI H Y. Passivity and Pitting Behavior of Ultra High Strength Martensitic Stainless Steel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [24] 刘杰, 李相波, 王佳. 模拟深海压力对 2 种低合金钢腐蚀行为的影响[J]. 金属学报, 2011, 47(6): 695-703.
LIU J, LI X B, WANG J. Effect of Hydrostatic Pressure on the Corrosion Behaviors of Two Low Alloy Steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(6): 695-703.
- [25] CARDOSO M V, AMARAL S T, MARTINI E M A. Temperature Effect in the Corrosion Resistance of Ni-Fe-Cr Alloy in Chloride Medium[J]. Corrosion Science, 2008, 50(9): 2429-2436.