

# 新型高强不锈钢在海水中的腐蚀行为研究

梁莹<sup>1,2</sup>, 张慧霞<sup>1</sup>, 郝福耀<sup>1</sup>, 李相波<sup>1</sup>, 胡鹏飞<sup>1</sup>

(1.中国船舶重工集团公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 2662371;  
2.中国石油大学(华东), 山东 青岛 2665802)

**摘要:** **目的** 确定新型高强不锈钢在海水环境中的耐蚀性能和腐蚀机理。**方法** 通过海水浸泡试验、动电位极化曲线和电化学交流阻抗测试考察新型高强不锈钢在海水环境中的腐蚀性能,并结合金相显微镜观察、X射线衍射分析(XRD)和X射线光电子能谱(XPS),分析该不锈钢的组织结构和钝化膜组成。**结果** 新型高强不锈钢在海水中的自腐蚀电位稳定在0.012~0.020 V,点蚀电位为1.10 V,保护电位为0.89 V。海水中浸泡45 d后,电化学阻抗值仍然保持在 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 数量级。这说明钝化膜表面并未出现点蚀的形核,钝化膜仍具有较好的保护性。该不锈钢具有典型的孪晶奥氏体结构,形成的钝化膜表层主要成分为FeOOH、Cr(OH)<sub>3</sub>等氢氧化物,内层成分主要为Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CrO<sub>3</sub>、单质Ni,具有较强的钝化膜修复能力。**结论** 该不锈钢在海水具有良好的耐蚀性。

**关键词:** 高强不锈钢; 奥氏体不锈钢; 海水环境; 腐蚀行为; 耐蚀性; 钝化膜

**中图分类号:** TG172.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2022)07-0093-07

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2022.07.012

## Corrosion Behavior of New High Strength Stainless Steel in Seawater

LIANG Ying<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui-xia<sup>1</sup>, HAO Fu-yao<sup>1</sup>, LI Xiang-bo<sup>1</sup>, HU Peng-fei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Corrosion and Protection, 725th Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Shandong Qingdao 266237, China; 2. China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, China)

**ABSTRACT:** This paper is intended to study the corrosion resistance and determine the corrosion mechanism of new high strength stainless steel in seawater environment. In this paper, the corrosion resistance of the new high strength stainless steel in seawater environment were investigated by potentiometric polarization curve, electrochemical impedance test and seawater immersion test. The microstructure and passivation film composition of the stainless steel were analyzed by metallographic microscope observation, X-ray diffraction (XRD) analysis and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The results show that the self-corrosion potential, pitting potential and protection potential of the new high strength stainless steel in seawater are stable in the range of 0.012~0.02 V, 1.10 V and 0.89 V, respectively. The electrochemical impedance value remained  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$  after 45 days of immersion in seawater, which indicated that there was no nucleation of pitting corrosion on the surface of the passivation film, and the passivation film still had good protection. This is because the stainless steel has a typical twinning austenite

收稿日期: 2021-06-16; 修订日期: 2021-08-16

Received: 2021-06-16; Revised: 2021-08-16

作者简介: 梁莹(1997—),女,硕士,主要研究方向海洋腐蚀与防护。

**Biography:** LIANG Ying (1997-), Female, Master, Research focus: marine corrosion and protection.

通讯作者: 张慧霞(1981—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向海洋腐蚀与防护。

**Corresponding author:** ZHANG Hui-xia (1981-), Female, Master, Senior engineer, Research focus: marine corrosion and protection.

引文格式: 梁莹,张慧霞,郝福耀,等. 新型高强不锈钢在海水中的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 093-099.

LIANG Ying, ZHANG Hui-xia, HAO Fu-yao, et al. Corrosion Behavior of New High Strength Stainless Steel in Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 093-099.

structure, and the main components of the passivation film surface are FeOOH, Cr(OH)<sub>3</sub> and other hydroxides, and the inner composition is mainly Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CrO<sub>3</sub> and elemental Ni, which has a strong passivation film repair ability, and thus has a good corrosion resistance in seawater.

**KEY WORDS:** high strength stainless steel; austenitic stainless steel; seawater environment; corrosion behavior; corrosion resistance; passivation film

在海洋资源的开发和利用过程中, 钢材扮演着不可或缺的角色。在海水环境中, 不锈钢比碳钢和低合金钢表现得更加优异<sup>[1]</sup>。不锈钢的综合性能开始向耐腐蚀性优异、超高强度、耐高压等方向发展, 加上其自身兼具良好的力学性能、加工成形性能、抗氧化能力, 以及高的延展性和韧性, 逐渐成为了海水环境中的理想工程材料<sup>[2-4]</sup>。

目前关于海洋工程不锈钢的报道大多关于 304、316L 钢。如高丽飞等<sup>[5]</sup>研究了 304 不锈钢在淡化海水中的点蚀行为, 结果表明, 304 不锈钢的点蚀敏感性随 Cl<sup>-</sup> 浓度的升高而增加。胡建朋等<sup>[6]</sup>研究了 304 不锈钢在模拟海水中的腐蚀行为, 研究结果表明, 304 不锈钢在模拟海水溶液中出现应力腐蚀敏感性。邱萍等<sup>[7]</sup>研究了 304 不锈钢在模拟海水中的腐蚀行为, 发现 304 不锈钢在海水环境中的腐蚀速率大约是淡水环境中的 2 倍。曾群飞等<sup>[8]</sup>研究了 304 不锈钢在模拟海水中的腐蚀磨损行为, 结果表明, 在载荷作用下, 304 不锈钢的耐蚀性变差。车俊铁等<sup>[9]</sup>研究了 316L 不锈钢焊接接头在海水中的腐蚀行为, 研究结果表明, 在海水环境中, 材料表面性质的不均匀会导致点蚀的发生。吴恒等<sup>[10]</sup>评价了 316L 不锈钢在淡化海水中的耐蚀性能, 结果表明, 随着温度的升高, 不锈钢的耐点蚀性能下降。李慧心等<sup>[11]</sup>研究了 316L 钢在南海环境中的腐蚀行为, 发现 316L 不锈钢在南海环境

中具有较高的缝隙腐蚀敏感性。

本文研究的新型高强不锈钢, 其力学性能较好, 可以满足海洋工程应用, 但其耐蚀性未知。通常使用耐点蚀当量 (PREN) 评估不锈钢在海水中的耐蚀性<sup>[12]</sup>, PREN 是以金属中化学成分的质量分数为基础的一种高效评测方法。ASTM A240、A789、A790 等国际标准中, PREN 值的计算公式为  $r_{PREN}=w_{Cr}+3.3\%w_{Mo}+30\%w_{N}$ 。文中新型高强不锈钢的抗拉强度为 800 MPa, 屈服强度 >450 MPa, PREN 值为 36.76%。

不锈钢的 PREN 值越高, 其耐点蚀能力就越强。有研究表明, PREN 值大于 35% 的不锈钢在海水具有良好的耐蚀性<sup>[12]</sup>。该新型高强不锈钢 PREN 为 36.76%, 说明其在海水中的耐蚀性良好。由于耐点蚀当量只能粗略地评价材料的耐点蚀性能, 此种新型高强钢在海水环境中的耐蚀性能具体如何, 目前也没有相关的研究报道。本文通过对此种不锈钢在海水中的腐蚀电化学行为进行分析, 获得其耐海水腐蚀性能数据, 以期在海洋工程应用方面提供参考。

## 1 试验

### 1.1 材料

试验材料为一种新型高强不锈钢, 其化学成分见表 1。

表 1 不锈钢的化学组成 (质量分数, %)  
Tab.1 Chemical composition of stainless steel (mass fraction, %)

C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	Nb	Cu	P	N	Fe
0.46	21.08	13.88	4.70	2.48	0.32	0.17	0.13	0.02	0.25	余量

### 1.2 方法

首先采用线切割将不锈钢材料切割成 10 mm×10 mm×10 mm 制备晶相样品, 然后进行打磨、抛光, 最后除油和清洗。使用 4% (硝酸的体积分数) 的硝酸乙醇溶液腐蚀样品 30~50 s 后, 清洗吹干。采用金相显微镜 (Leica DIM 5000M, 德国徕卡公司) 观察试样的微观组织, 如图 1 所示。

海水浸泡试验标准参照 GB 10124—88《金属材料均匀腐蚀全浸实验方法》, 将试样用砂纸打磨至 2000#, 抛光清洗后浸泡。腐蚀介质为青岛海域天然海水, 海水盐度 3.34%~3.5%, 溶解氧质量浓度为

5.5~7 mg/L, pH 值为 8.0~8.2, 浸泡时间为 45 d。浸泡结束后, 使用去离子水冲洗试样表面, 待表面干燥后观察腐蚀形貌。采用 D8ADVANCE-A25 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对试样腐蚀表面直接进行物相分析, X 射线采用 Cu 靶, 扫描范围为 20°~80°。采用以单色 Al 靶作为 X 射线源的 X 射线光电子能谱仪 (XPS) 分析试样浸泡后形成的钝化膜的成分, 溅射速度为 0.29 nm/s, 溅射时间为 0、10 s。

采用线切割方式先将不锈钢材料切割成 10 mm×10 mm×10 mm 制备电化学试样后, 依次用丙酮和无水乙醇超声震荡清洗干燥。样品其中一面连接铜导线后, 采用环氧树脂将除工作面外的其他面密

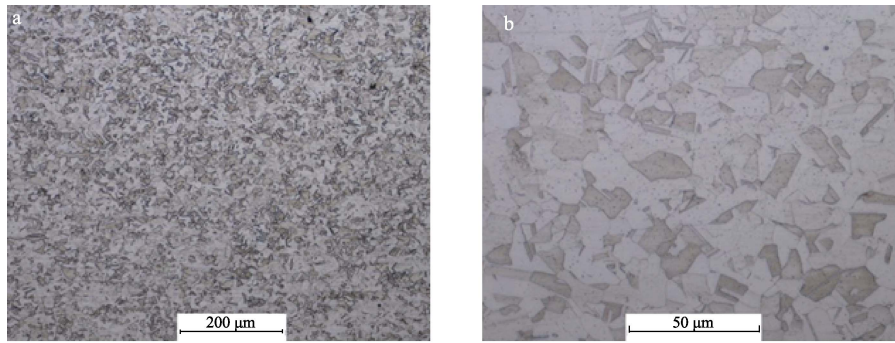


图 1 显微金相组织

Fig.1 Microscopic metallographic pattern magnified

封, 仅暴露一个 10 mm×10 mm 的工作面。工作面经打磨抛光及超声清洗后, 采用多区电化学综合测试系统 (Biologic vmp3) 进行试样在海水中的开路电位、极化曲线和电化学阻抗谱的测试。测试采用三电极测试体系, 其中参比电极为饱和 KCl 甘汞电极 (Saturated Calomel Electrode, SCE), 辅助电极为铂铈丝。阳极极化曲线从阴极向阳极开始扫描, 起始电位为 -0.05 V (vs.  $E_{corr}$ ), 扫描速率为 20 mV/min。当阳极电流密度达到 5 mA/cm<sup>2</sup> 时, 开始回扫, 直到正扫曲线与反扫曲线相交。交流阻抗谱测试频率范围为 100 kHz~10 mHz, 交流激励信号为幅值 10 mV。

## 2 结果与讨论

### 2.1 腐蚀行为

新型不锈钢在天然海水中的自然腐蚀电位随时间的变化曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 不锈钢的自腐蚀电位在前 5 d 内迅速正移, 第 6 d 左右变化趋于平缓, 并逐渐负移, 最终稳定在 0.012~0.020 V 内。海水中不锈钢表面会形成一层具有保护作用的钝化膜, 将其与氧气、侵蚀性的离子隔离开, 从而抑制腐蚀。自腐蚀电位的变化过程表征了该不锈钢表面钝

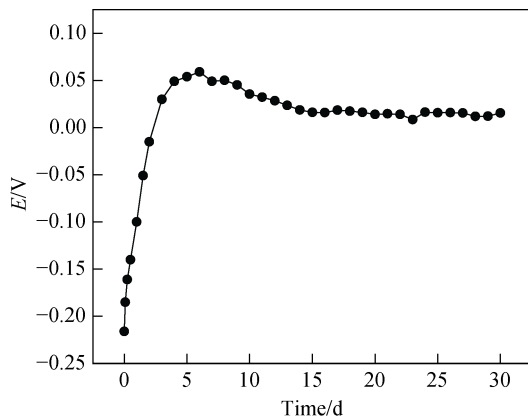


图 2 在天然海水中的自腐蚀电位 (vs. SCE) 随时间的变化曲线

Fig.2 Curve of self-corrosion potential in natural seawater (vs. SCE) over time

化膜在海水中的变化过程。在浸泡的前 5 d, 自腐蚀电位持续正移, 表明了在此腐蚀初期, 其表面钝化膜的成膜速度大于膜的溶解速度, 钝化膜表现为以生长为主导的过程, 因此其自腐蚀电位随钝化膜的增厚不断正移。从第 6 d 左右, 自腐蚀电位趋于稳定, 表明了后期钝化膜的成膜速度与溶解速度趋于平衡, 表现为钝化膜稳定状态, 因此自腐蚀电位不再变化。

该不锈钢在海水中的动电位极化曲线如图 3 所示。以阳极极化曲线上电流密度迅速增至 100 μA/cm<sup>2</sup> 时对应的电位值为点蚀电位 ( $E_b$ )<sup>[13]</sup>, 为 1.11 V。保护电位 ( $E_p$ ) 是极化曲线中回扫曲线与正扫曲线的交点对应的电位值。从图 3 中可以看到, 该不锈钢在天然海水中的保护电位 ( $E_p$ ) 为 0.89 V。当金属电位处于保护电位与点蚀电位  $E_b$  之间时, 金属表面不会形成新的点蚀坑, 而已存在的点蚀坑会继续生长。因此, 点蚀电位反映了材料表面钝化膜抗击穿的能力, 而保护电位反映了材料表面钝化膜的修复能力。  $E_p$  越接近  $E_b$ , 表明不锈钢的点蚀修复能力越强。同时, 回扫所形成面积较小, 说明此种不锈钢在海水环境中的抗点蚀能力较强, 钝化膜具有较强的修复能力。

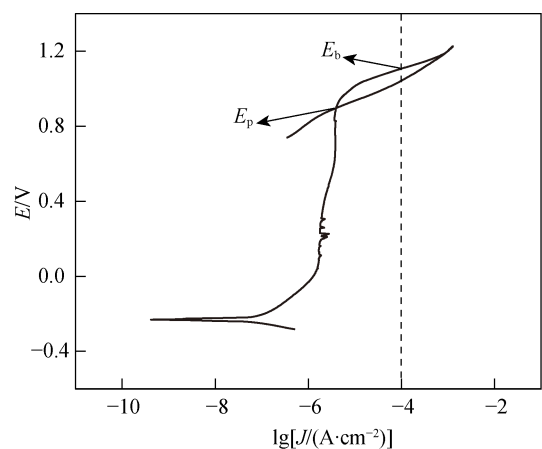


图 3 在天然海水中的阳极极化曲线

Fig.3 Anodic polarization curves in natural seawater

不锈钢在海水中的浸泡不同时间的电化学阻抗谱见图 4。观察 Niquist 图发现, 该不锈钢的阻抗谱

图不具备标准半圆轨迹,是因为电极表面的保护性膜层引起了弥散效应。该不锈钢的阻抗谱表现为单一容抗弧,说明整个电极的控制过程主要是电化学反应控制的电荷转移<sup>[14]</sup>。容抗弧半径的大小反映了腐蚀过程

中的电荷转移电阻,半径越大,说明电荷转移电阻越大。浸泡前 48 h,随浸泡时间的延长,容抗弧的半径逐渐增大,说明此时不锈钢表面钝化膜的成膜速度大于膜的溶解速度,使得其耐蚀性能逐渐增强。

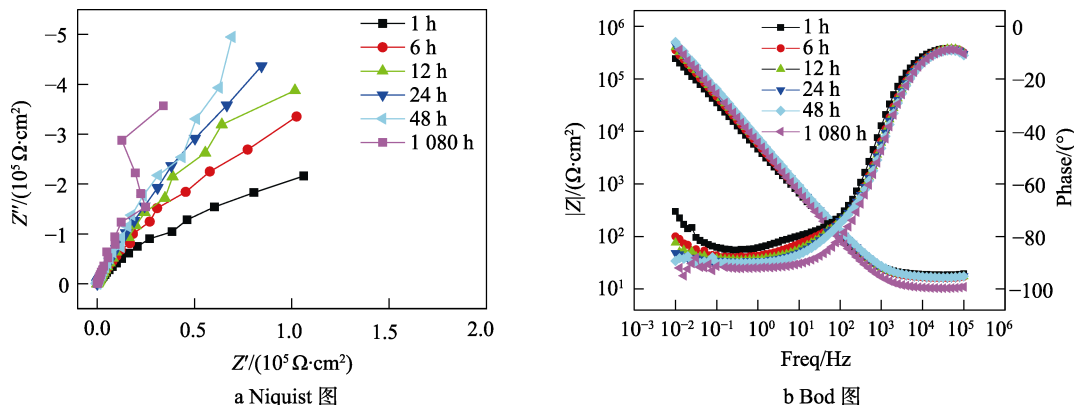


图 4 在海水中浸泡不同时间的电化学阻抗图谱

Fig.4 (a) Nyquist diagram, and (b) Bode diagram of electrochemical impedance patterns with different immersion hours in seawater

在 Bode 图中,曲线中只有 1 个很宽的波峰,可以认为是 2 个波峰的重叠。按照如图 5 所示的等效电路进行拟合,其中  $R_s$  是溶液电阻,  $R_{ct}$  是电荷转移电阻,  $R_f$  为钝化膜电阻 ( $R_f$  拟合的数据值见表 2)。观察发现,浸泡前 48 h,随着时间的延长,钝化膜电阻值逐渐增大,说明腐蚀过程阻力增大,耐蚀性增强。浸泡 48 h 后,钝化膜电阻值虽然有减小趋势,但其数值仍然较大。浸泡 1 080 h (45 d) 后,钝化膜电阻值仍然保持在  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$  数量级。若膜层阻抗值不低于  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$  数量级,其膜层仍具有保护性<sup>[15]</sup>。这表明在浸泡后期,钝化膜溶解与修复仍处于动态平衡过程,钝化膜表面并未出现点蚀的形核,钝化膜仍具有较好的保护性。

## 2.2 腐蚀机理

由金相结果可知,该不锈钢金相组织为孪晶奥氏体,通常普通晶界处的晶体结构混乱,具有较高的晶界能,容易聚集金属的杂质,因此在普通晶界处容易产生点蚀<sup>[16]</sup>。孪晶的形成可以降低晶粒长大过程中的晶界能,使孪晶界具有较低的晶界能,从而减少金属杂质的吸附<sup>[17-18]</sup>。因此,与一般的奥氏体不锈钢相比,具有孪晶奥氏体的高强不锈钢具有优异的耐蚀性能。

该高强不锈钢在海水中浸泡 45 d 后,试样表面的 XRD 图谱见图 6。从测得的 XRD 结果上看,基体  $\gamma\text{-Fe}$  的衍射峰和 Cr 元素的衍射峰较强, Cr 元素以置换固溶体的形式存在,这与上述材料的组织形态分析相吻合。同时也说明,在海水浸泡腐蚀过程中,试样表面基本不生成腐蚀产物,该不锈钢在海水中具有良好的耐蚀性能。造成这种现象的原因在于,不锈钢中

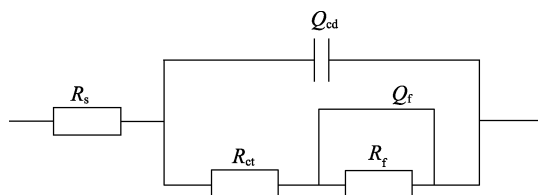


图 5 EIS 曲线拟合等效电路

Fig.5 EIS curve fitting equivalent circuit

表 2 阻抗谱拟合电路数据

Tab.2 Impedance spectrum fitting circuit data

Time/h	$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
1	$9.85 \times 10^5$
6	$2.74 \times 10^6$
12	$6.39 \times 10^6$
24	$1.84 \times 10^7$
48	$3.16 \times 10^7$
1 080	$2.32 \times 10^6$

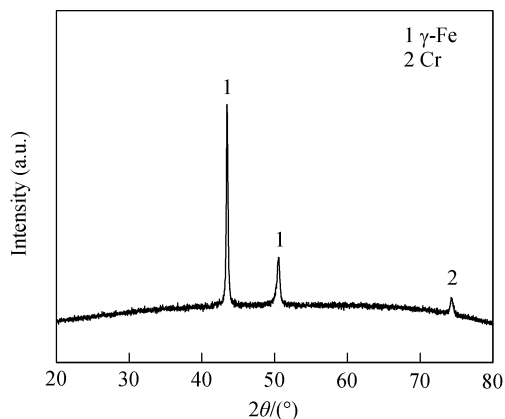


图 6 在海水中浸泡 45 d 的试样表面 XRD 图谱

Fig.6 XRD patterns of the sample surface soaked in seawater for 45 days

Cr 的含量较高, Cr 会发生反应, 在钢表面形成一层致密耐蚀的钝化膜, 保护基体。同时, Cr 可以在不锈钢表面形成富 Cr 区, 使腐蚀性离子不易进入不锈钢基体中, 从而提高不锈钢的耐蚀性能<sup>[19]</sup>。不锈钢中的 Ni 元素是形成奥氏体和稳定奥氏体的最佳元素, 与 Cr 元素配合时, Cr 元素起到钝化作用, Ni 元素可以强化钝化效果, 从而提高钢的耐蚀性。Mo 元素是耐点蚀元素, 钝化系数高, 能扩大钝化范围<sup>[20]</sup>。另外,

Mo 元素能使钝化膜更致密牢固, 从而有效提高不锈钢的耐蚀性能。因此, 基于钝化元素 Cr、Mo、Ni 的协同作用, 可以使不锈钢表面形成耐蚀性较好的钝化膜, 使其具有良好的耐蚀性。

该不锈钢浸泡 45 d 后, 溅射时间为 0、10 s 的 XPS 全谱见图 7。从全谱图中可以看出, 溅射前和溅射 10 s 后, 全谱图峰的强度变化较大, 说明钝化膜表层和内层的成分有所不同。

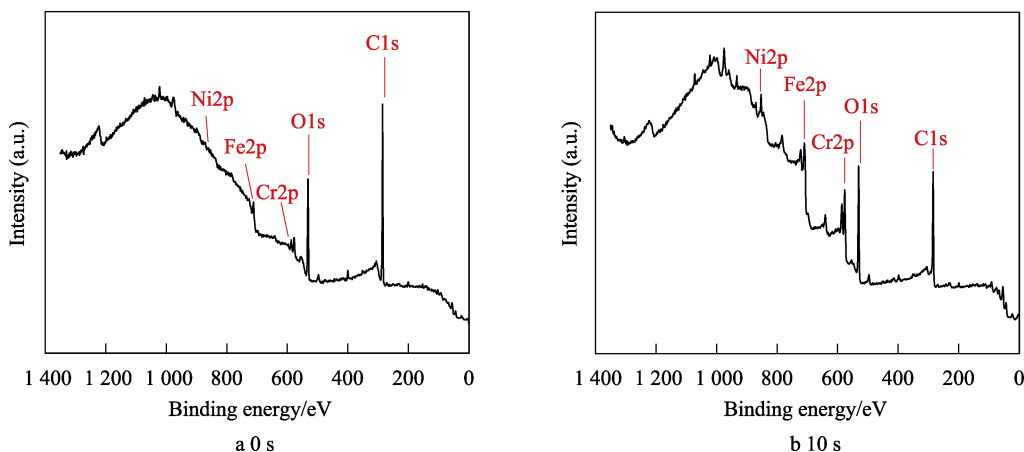


图 7 在海水中浸泡 45 d 形成的钝化膜不同溅射时间的 XPS 全谱

Fig.7 XPS full spectra passivation film with sputtering times of (a) 0 s, and (b) 10 s after immersion in seawater for 45 days

为了进一步探究钝化膜表层与内层的不同成分, 根据 NIST 的原子谱数据库, 对各个元素的精细谱图进行分峰拟合。不同溅射时间 O1s 的精细谱图见图 8。从图 8 中可知, 溅射 0、10 s 的 O1s 峰均可分为 531.5、530.1 eV 等 2 个峰。第 1 个峰是 M(OH)或 M(OH)<sub>2</sub> 化

合物峰, 对应于 OH<sup>-</sup>; 第 2 个峰是 MO 化合物峰, 对应 O<sup>2-</sup>。表层 OH<sup>-</sup>对应峰的面积较大, 说明表层的成分大多是 M(OH)或 M(OH)<sub>2</sub> 的氢氧化物; 内层 O<sup>2-</sup>对应峰的面积较大, 说明内层成分大多是 MO 的氧化物。

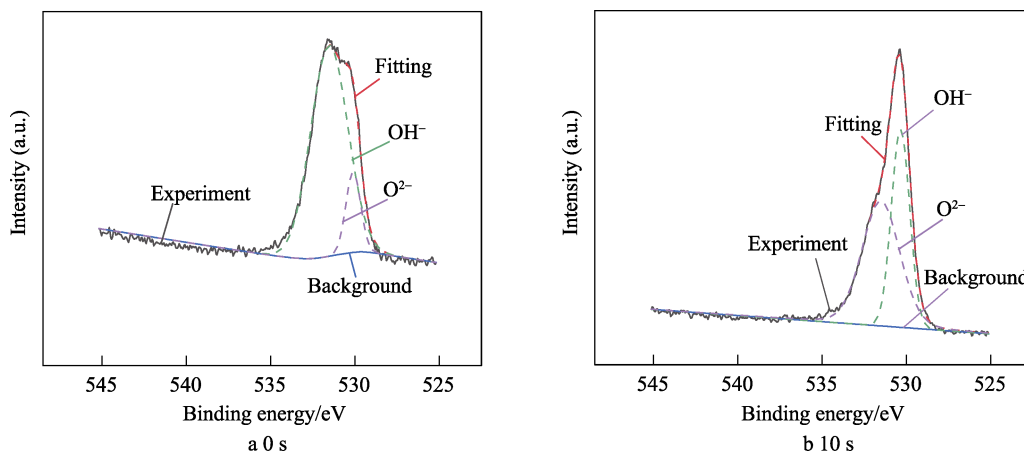


图 8 在海水中浸泡 45 d 形成的钝化膜不同溅射时间的 O1s 谱图

Fig.8 O1s spectra of passivation film formed by immersion in seawater for 45 days with sputtering times of (a) 0 s, and (b) 10 s

不同溅射时间下 Fe2p<sub>3/2</sub> 的精细谱图见图 9。由图 9a 可知, 钝化膜表层中的 Fe 以 FeO 和 FeOOH 等 2 种化合物的形式存在, 并且 FeOOH 所占比例较大。由图 9b 可知, 钝化膜内层中的 Fe 主要以 Fe、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的形式存在。

不同溅射时间下 Cr2p<sub>3/2</sub> 的精细谱图见图 10。由

图 10a 可知, 钝化膜表层中的 Cr 以 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr(OH)<sub>3</sub> 的形式存在, Cr(OH)<sub>3</sub> 对应峰的面积较大。由图 10b 可知, 钝化膜内层中的 Cr 以 Cr、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CrO<sub>3</sub> 的形式存在, 并且 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对应峰的面积最大。这说明 Cr 的氢氧化物只存在于表层中, 且比例相对氧化物较大, 内层中主要存在 Cr 的氧化物。

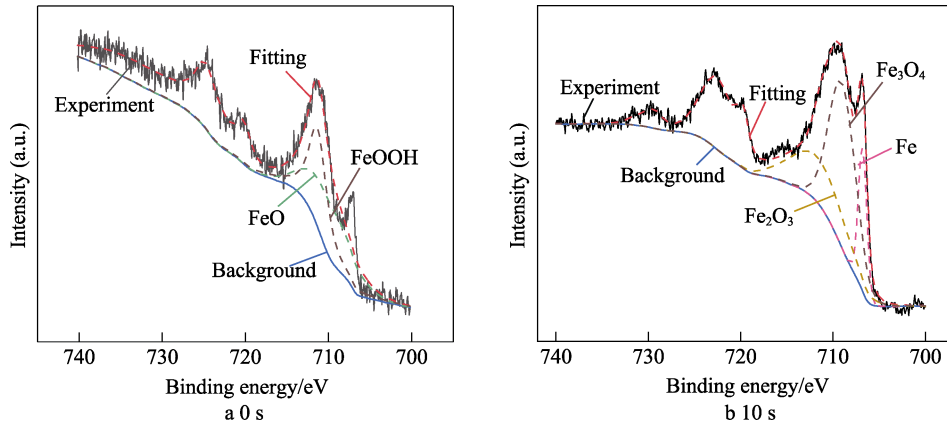


图9 在海水中浸泡 45 d 形成的钝化膜不同溅射时间的 Fe2p3/2 谱图  
 Fig.9 Fe2p3/2 spectra of passivation film with sputtering times of (a) 0 s, and (b) 10 s after being immersed in seawater for 45 days

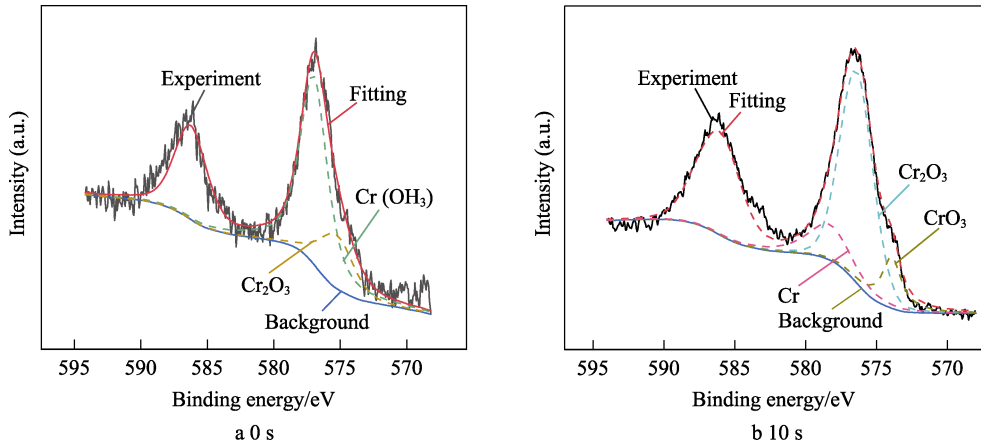


图 10 在海水中浸泡 45 d 形成的钝化膜不同溅射时间的 Cr2p3/2 谱图  
 Fig.10 Cr2p3/2 spectra of passivation film formed by immersion in seawater for 45 days with sputtering times of (a) 0 s, and (b) 10 s

溅射时间为 10 s 时, Ni2p3/2 的精细谱图见图 11。由溅射时间为 0 s 的全谱图可知, 钝化膜表层基本没有出现 Ni 的信号。溅射时间为 10 s 时, Ni2p3/2 的

XPS 图谱可以分为 2 个峰, 分别是对应 Ni、NiO。其中, 单质 Ni 对应峰的面积最大, 说明钝化膜中 Ni 主要以单质形式存在。金属单质 Ni 的存在, 说明钝化膜起到了阻挡腐蚀的作用, 并且在海水具有良好的稳定性。

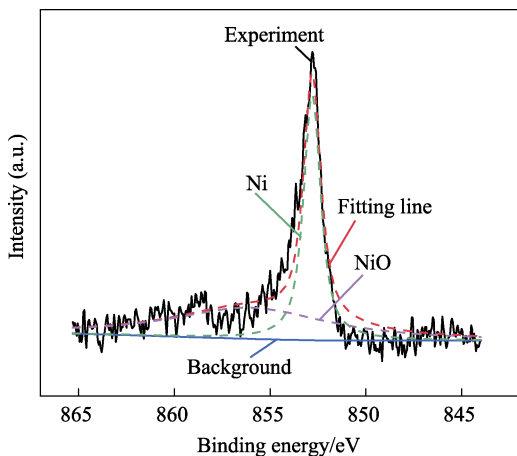


图 11 在海水中浸泡 45 d 形成钝化膜溅射时间 10 s 的 Ni2p3/2 谱图  
 Fig.11 Ni2p3/2 spectrum of passivation film with sputtering time of 10 s after immersion in seawater for 45 days

### 3 结论

1) 新型高强不锈钢在海水中的自腐蚀电位稳定在 0.012~0.020 V, 点蚀电位为 1.10 V, 保护电位为 0.89 V, 循环极化回扫面积较小, 说明钝化膜具有较好的修复能力。在海水中浸泡 45 d 后, 电化学阻抗值仍然保持在  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$  数量级, 其钝化膜仍具有较好的保护性, 说明其具有良好的耐蚀性能。

2) 新型高强不锈钢的组织为孪晶奥氏体, 在海水中具有较好的耐点腐蚀能力, 其钝化膜的表层主要成分为 FeOOH、Cr(OH)<sub>3</sub> 氢氧化物, 内层成分主要为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CrO<sub>3</sub> 及单质 Ni, 具有较强的钝化膜修复能力。

## 参考文献:

- [1] AL-FOZAN S A, MALIK A U. Effect of Seawater Level on Corrosion Behavior of Different Alloys[J]. Desalination, 2008, 228(1/2/3): 61-67.
- [2] BASTOS A C, SIMÕES A M, GONZÁLEZ S, et al. Application of the Scanning Electrochemical Microscope to the Examination of Organic Coatings on Metallic Substrates[J]. Progress in Organic Coatings, 2005, 53(3): 177-182.
- [3] PARKINS R N. The Theory of Stress Corrosion Cracking in Alloys[J]. British Corrosion Journal, 1972, 7(4): 151.
- [4] LIU Yu-rong, YE Dong, YONG Qi-long, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Property of Cr13 Super Martensitic Stainless Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(11): 60-66.
- [5] 高丽飞, 杜敏. 304 不锈钢在淡化海水中的点蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(1): 8-14.  
GAO Li-fei, DU Min. Pitting Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel in Desalination Seawater[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29(1): 8-14.
- [6] 胡建朋, 刘智勇, 胡山山, 等. 304 不锈钢在模拟深海和浅海环境中的应力腐蚀行为[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 9-14.  
HU Jian-peng, LIU Zhi-yong, HU Shan-shan, et al. Stress Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel in Simulated Deep and Shallow Seawater Environments[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 9-14.
- [7] 邱萍, 许守武, 修林冉, 等. 304 不锈钢螺栓在模拟水下环境中的腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2021, 54(5): 42-50.  
QIU Ping, XU Shou-wu, XIU Lin-ran, et al. Corrosion Behavior of 304 Stainless Steel Bolt in Simulated Underwater Environment[J]. Materials Protection, 2021, 54(5): 42-50.
- [8] 曾群锋, 许雅婷, 林乃明. 304 不锈钢在人工海水环境中的腐蚀磨损行为研究[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 194-202.  
ZENG Qun-feng, XU Ya-ting, LIN Nai-ming. Tribocorrosion Behaviors of 304 Stainless Steel in Artificial Seawater[J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 194-202.
- [9] 车俊铁, 张兵. 316J1L 不锈钢焊接接头海水点蚀研究[J]. 焊接, 2010(2): 51-53.  
CHE Jun-tie, ZHANG Bing. Pitting Corrosion of 316J1L Stainless Steel Welded Joint in Seawater[J]. Welding & Joining, 2010(2): 51-53.
- [10] 吴恒, 侯晓薇, 李超, 等. 316L 不锈钢在淡化海水中的耐腐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 14-18.  
WU Heng, HOU Xiao-wei, LI Chao, et al. Corrosion Behavior of 316 Stainless Steel in Desalinate Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(6): 14-18.
- [11] 李慧心, 李大朋, 王毛毛, 等. 316L 不锈钢在南海环境中的缝隙腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(1): 98-103.  
LI Hui-xin, LI Da-peng, WANG Mao-mao, et al. Crevice Corrosion of 316L Stainless Steel in Coastal Waters of South China Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(1): 98-103.
- [12] 黄桂桥, 尤建涛. 耐海水腐蚀不锈钢暴露 22 年的局部腐蚀[C]//中国腐蚀与防护学会耐蚀金属材料第十届学术年会论文集. 西安: 中国腐蚀与防护学会, 2006.  
HUANG Gui-qiao, YOU Jian-tao. Local Corrosion of Seawater Corrosion Resistant Stainless Steel Exposed to 22 Years[C]// Proceedings of the 10th the Chinese Society for Corrosion and Protection of Corrosion Resistant Metal Materials Annual Conference. Xi'an: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2006.
- [13] RUI Jia-qun, LI Jun, SUN Hu-dai, et al. Influence of pH on the Electrochemical Behavior of 00Cr<sub>15</sub>Ni<sub>7</sub>Mo<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub> Supermartensitic Stainless Steel in 3.5% NaCl Solutions[J]. Advanced Materials Research, 2012, 581/582: 1058-1061.
- [14] Cao Chu-nan, Zhang Jian-qing. An Introduction of Electrochemical Impedance Spectroscopy Science[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [15] 吴剑锋, 王结良, 吕涛, 等. 电化学阻抗谱研究三种涂层体系的耐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(10): 760-762.  
WU Jian-feng, WANG Jie-liang, LÜ Tao, et al. Corrosion Resistance of Three Coating Systems Studied by Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. Corrosion & Protection, 2010, 31(10): 760-762.
- [16] MARTIN F A, BATAILLON C, COUSTY J. In Situ AFM Detection of Pit Onset Location on a 304L Stainless Steel[J]. Corrosion Science, 2008, 50(1): 84-92.
- [17] WATANABE T. The Impact of Grain Boundary Character Distribution on Fracture in Polycrystals[J]. Materials Science and Engineering: A, 1994, 176(1-2): 39-49.
- [18] NIE J F, ZHU Y M, LIU J Z, et al. Periodic Segregation of Solute Atoms in Fully Coherent Twin Boundaries[J]. Science, 2013, 340(6135): 957-960.
- [19] 吴玮巍, 蒋益明, 廖家兴, 等. 0Cr<sub>25</sub>Ni<sub>7</sub>Mo<sub>4</sub>、316 与 304 不锈钢临界点蚀温度研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(4): 285-288.  
WU Wei-wei, JIANG Yi-ming, LIAO Jia-xing, et al. Electrochemical Measurement of Critical Pitting Temperature of 0Cr<sub>25</sub>Ni<sub>7</sub>Mo<sub>4</sub>, 316 and 304 Stainless Steels in 3.5% NaCl Solution[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2006, 18(4): 285-288.
- [20] 朱长春, 陈志强, 钟志兴. 耐海水无磁不锈钢的研究[J]. 上海金属, 2003, 25(1): 4-7.  
ZHU Chang-chun, CHEN Zhi-qiang, ZHONG Zhi-xing. Study of a non-Magnetic Stainless Steel for Ocean[J]. Shanghai Metals, 2003, 25(1): 4-7.

责任编辑: 刘世忠