

钢在流动人造海水中的冲刷腐蚀行为与防护研究

夏江敏, 李竹影, 王晓强, 陈页骅, 林育锋

(海军工程大学 舰船与海洋学院, 武汉 430033)

摘要: **目的** 研究钢在流动人造海水中的冲刷腐蚀行为及防护方法。**方法** 采用自制的冲刷试验平台, 利用扫描电镜、电化学阻抗、电化学噪声、最大熵值变换等方法, 分析钢在流动人造海水中各阶段的冲刷腐蚀行为特征, 验证材料表面涂覆新型环氧涂层的方法对提高钢耐流动人造海水冲刷腐蚀的有效性。**结果** 钢在 2 m/s 流动人造海水中 30 d 的冲刷腐蚀行为特征可以分为三个阶段, 第一阶段, 金属开始发生点蚀, 生成网状腐蚀产物, 反应电阻上升后持续减小至 400 Ω , 电化学噪声电位发生负移, S_E 值较大, 电化学腐蚀速率增强; 第二阶段, 点蚀速率减弱, 开始出现颗粒状腐蚀产物, 反应电阻相对稳定在 300 Ω 左右, 电化学噪声电位发生正移, S_E 值数值较小, 电化学腐蚀速率保持相对稳定; 第三阶段, 外层腐蚀产物剥离, 反应电阻和 S_E 值发生较大的波动, 冲刷作用导致了腐蚀产物的快速形成和脱离。涂覆绝缘涂层的钢试样总电阻稳定在 $6.0 \times 10^5 \Omega$ 左右, 高出无涂层裸露试样总电阻 ($1.0 \times 10^3 \Omega$) 2 个数量级。**结论** 钢在 2 m/s 流动人造海水中 30 d 的冲刷腐蚀行为特征可以分为加速腐蚀-动态平衡-平衡破坏三个阶段, 新型环氧涂层具有较好的耐冲刷腐蚀性能。

关键词: 钢; 腐蚀机理; 冲刷腐蚀; 点蚀; 电化学噪声

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)11-0306-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.11.032

Study on Erosion and Corrosion Behavior and Protection of Steel in Flowing Artificial Seawater

XIA Jiang-min, LI Zhu-ying, WANG Xiao-qiang, CHEN Ye-xing, LIN Yu-feng

(College of Naval Architecture & Ocean Engineering, Naval Univ. of Engineering, Wuhan 430033, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the erosion and corrosion behavior of steel in flowing artificial seawater and its protection methods. Self-made scour test platform was adopted, methods of scanning electron microscopy, electrochemical impedance, electrochemical noise, maximum entropy transformation were used to analyze the erosion and corrosion behavior characteristics of steel in flowing artificial seawater at various stages, and it was verified that the surface of the material coated with a new oxygen coating method could improve the effectiveness of steel against erosion and corrosion by flowing artificial seawater. The erosion corrosion behavior of steel in 2 m/s flowing artificial seawater for 30 days can be divided into three stages: In the first stage, the metal began to undergo pitting corrosion and formed networked corrosion products, and the reaction resistance continued to decrease to 400 Ω . The electrochemical noise potential had a negative shift, the value of S_E was larger,

收稿日期: 2021-01-27; 修订日期: 2021-04-07

Received: 2021-01-27; Revised: 2021-04-07

作者简介: 夏江敏 (1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向船用材料与应用工程。

Biography: XIA Jiang-min (1990—), Male, Doctor student, Research focus: marine materials and application engineering.

引文格式: 夏江敏, 李竹影, 王晓强, 等. 钢在流动人造海水中的冲刷腐蚀行为与防护研究[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 306-312.

XIA Jiang-min, LI Zhu-ying, WANG Xiao-qiang, et al. Study on erosion and corrosion behavior and protection of steel in flowing artificial seawater[J]. Surface technology, 2021, 50(11): 306-312.

the electrochemical corrosion rate was enhanced; In the second stage, the pitting corrosion rate was weakened, and granular corrosion products began to appear, the reaction resistance was relatively stable at about 300 Ω , and the electrochemical noise potential had a positive shift. The value of S_E was small, and the rate of electrochemical corrosion remained relatively stable; In the third stage, the corrosion products of the outer layer peeled off, and the reaction resistance and the value of S_E fluctuated greatly, and the erosion effect led to the rapid formation and separation of corrosion products. The total resistance of the steel sample coated with an insulating coating was stable at about $6.0 \times 10^5 \Omega$, which was two orders of magnitude higher than the total resistance $1.0 \times 10^3 \Omega$ of the uncoated bare sample. The erosion corrosion behavior of steel in 2 m/s artificial seawater for 30 days can be divided into three stages: accelerated corrosion-dynamic equilibrium-equilibrium destruction. The new epoxy coating has good erosion corrosion resistance.

KEY WORDS: steel; corrosion mechanism; erosion corrosion; pitting corrosion; electrochemical noise

钢因具有优异的力学性能和相对较好的耐蚀性能而被广泛应用在船舶和海洋平台装置上,在海水冲刷下容易发生冲刷腐蚀,使腐蚀加剧。冲刷腐蚀在舰船壳体及海水管道中十分常见,在金属磨损中占比大于 5%。冲刷腐蚀是金属表面与腐蚀性流体之间由于高速相对运动而产生的金属损坏现象,是机械磨损和电化学腐蚀相互作用的结果^[1],冲刷腐蚀所造成的金属材料损失远大于机械磨损和电化学腐蚀单独作用之和^[2-3]。机械磨损在金属的冲刷腐蚀中占主要作用^[4-5]而电化学腐蚀在整个冲刷腐蚀中发挥着重要作用^[6]。冲刷腐蚀是一个十分复杂的过程,影响腐蚀速率的因素主要有:液体流速^[7]、流体含沙量^[8]、流体所含杂颗粒大小^[9]、流体冲刷角度^[10]、流体温度^[11]、流体 pH 值、材料的组成及材料的微观结构^[12]和热处理方式^[13]等。

目前,国内外学者对冲刷腐蚀的研究主要采用实验室模拟试验和海水挂片试验,运用失重法、电化学阻抗谱及微观表征等手段研究不同流体力学条件、环境因素、材料性质等对金属材料冲刷腐蚀的影响^[14]。随着金属材料的研究开发,金属表面涂覆涂层以增强其抗冲刷腐蚀性能成为冲刷腐蚀研究的热点^[15-16]。为了减少试验时间和成本,提高效率,近几年亦有研究者开始使用计算机软件建模的方法模拟冲刷腐蚀实验^[17],以期揭示流体力学因素对冲刷腐蚀的影响规律,从而找到减少流体中金属冲刷腐蚀的方法。

海水挂片试验对冲刷流速无法精确控制,所作分析着重于试验前与试验结束后的对比,对整个试验过程各个时间段的变化规律关注甚少,亦没有提出有效的冲刷腐蚀防护方法^[18-19]。计算机仿真研究边界条件设置复杂,需要进行一定简化,与实际情况有一定差距,所得结果能够揭示一些普遍规律,但是对于整个冲刷腐蚀过程中的微观变化,较难深入^[20]。针对上述两个问题,通过对钢材料进行电化学腐蚀性能测试分析以及表面结构及其相组成的微观测试分析,研究材料在 2 m/s 流速下各阶段的冲刷腐蚀变化规律,并研制出一种新型环氧涂层来提高材料表面耐冲刷腐蚀性能。

1 试验

试验材料为船用钢,化学成分见表 1。流体介质采用海盐配制模拟海水,盐度为 3.5%。流动人造海水冲刷腐蚀试验采用自行研制的旋转式冲刷腐蚀装置进行研究。将试板边缘的线速度作为冲刷速度,通过变频电机转速控制相对速度。电化学阻抗谱测试采用三电极体系,铂丝为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极。在开路电位下进行测试,交流激励信号幅值为 5 mV,测试频率范围为 100 kHz~10 mHz,扫频方向为从高频到低频。将线速度设定为 2 m/s,研究盐水冲刷下钢在海水中冲刷 30 d 各阶段的腐蚀情况。选取不同冲刷时间进行电化学阻抗、电位噪声测试和显微分析。电化学阻抗谱采用 Z-view 软件并选取合适的等效电路进行拟合,得出腐蚀反应电阻随时间的变化规律。电化学电位噪声采用最大熵值法进行分析,获得钢在长期腐蚀过程中的腐蚀类型及腐蚀变化规律,并用扫描电镜 (SEM) 对整个腐蚀过程中的电极表面形貌进行表征。

表 1 钢组成
Tab.1 Compositions of steel

										wt. %
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Ti	Fe	
0.12	0.79	1.01	0.016	0.007	0.67	0.64	0.42	0.005	Bal.	

2 结果及分析

2.1 扫描电镜测试分析

钢在 2 m/s 海水中腐蚀不同时间的表面形貌如图 1 所示。从图 1 可以看出,腐蚀 0.5 h 时,金属表面比较平整,局部出现细微小孔,腐蚀产物较少,表明此阶段机械磨损起主要作用,电化学腐蚀影响相对较小,开始发生点蚀反应。在试验时间达到 10 h 以后,开始出现疏松腐蚀产物,腐蚀产物薄膜具有基本网状结构,且网状结构致密度随着腐蚀时间的增长而增

加,外层疏松腐蚀层产物增多,表明在此过程中电化学腐蚀作用增强。腐蚀 24 h 时,表面出现腐蚀坑和致密的腐蚀产物,表明电化学腐蚀影响严重,电化学腐蚀作用加强。腐蚀第 4 d 时,表面出现密集的腐蚀产物,表明此时电化学腐蚀影响最大。冲刷腐蚀进行到第 10、16 d 时,表面疏松产物较少,网状结构之间出现颗粒,表明在流水冲刷下,内层腐蚀加速,导

致表层腐蚀产物逐渐脱落,机械磨损与电化学腐蚀相互影响。腐蚀 20 d 时,颗粒消失,出现疏松物质。腐蚀 26 d,网状上某些部位出现海绵状物,说明在海水冲刷剪切力作用下,外层腐蚀产物基本剥离,露出内层腐蚀产物膜。第 30 d 时,出现新的疏松腐蚀产物,说明开始了新一轮腐蚀产物膜的形成。

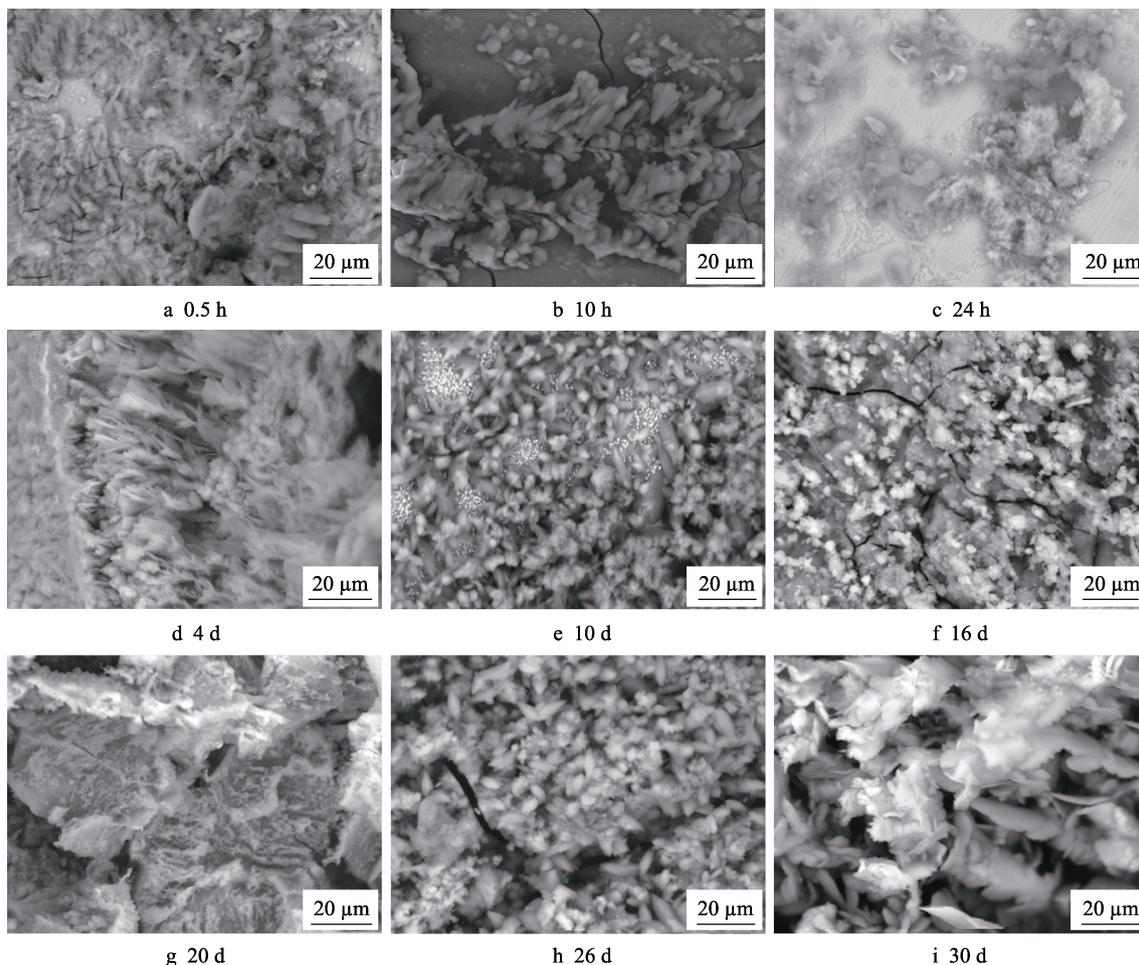


图1 钢在 2 m/s 海水冲刷下腐蚀不同时间的 SEM 形貌
Fig.1 SEM morphology of steel eroded in 2 m/s sea water

2.2 电化学测试分析

钢在 2 m/s 流动人造海水中不同时间段下冲刷腐蚀的电化学阻抗谱如图 2 所示。根据 Bode 图及 Nyquist 图特征可知,腐蚀前 2 h 和 96~720 h 为一个时间常数,机械冲刷起到主要作用,金属表面生成一层较薄的腐蚀产物膜,溶解氧可以透过腐蚀产物薄层与金属基底直接接触,发生电化学反应,腐蚀速率较大,可采用如图 3a 所示的等效电路进行拟合,其中 CPE1 为膜电容, R_{ct} 反应电阻, R_s 为溶液电阻。6~24 h 为两个时间常数,腐蚀产物表面更加致密,腐蚀产物表面孔径变小,溶解氧透过膜层受阻,腐蚀速率下降。故可采用如图 3b 所示的等效电路进行拟合,其中

CPE2 为反应界面电容, R_m 为膜电阻。

钢在 2 m/s 流动人造海水腐蚀过程中,对电化学阻抗谱采用 Z-view 软件并选取上述等效电路进行拟合,得出腐蚀反应电阻 R_{ct} 随时间的变化趋势,如图 4 所示。一般情况下,可用 R_{ct} 表示在自腐蚀电位下电荷穿过电极和溶液两相界面过程的难易程度, R_{ct} 越大,电荷转移过程越难以进行,腐蚀速率越慢。在海水中溶解氧对钢腐蚀主要两个作用:参与阴极反应,使腐蚀加速;在金属表面形成氧化膜,抑制腐蚀。在冲刷腐蚀过程中,机械磨损起主要作用,电化学腐蚀发挥重要作用。在流动海水中,含有丰富的溶解氧,溶解氧加速金属的电化学腐蚀,使金属表面不断形成腐蚀产物膜。同时,机械磨损使表层的腐蚀产物被

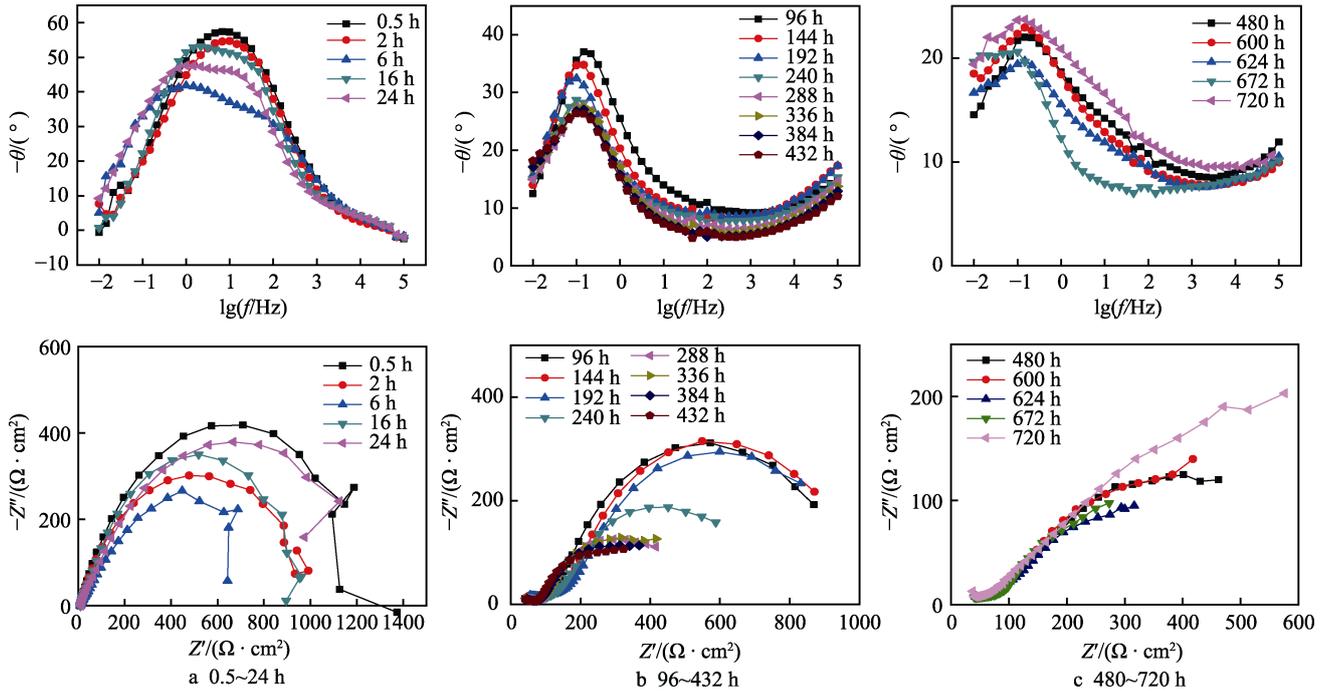


图 2 不同时间段下的 Bode 图和 Nyquist 图
Fig.2 Bode and Nyquist diagrams in different time

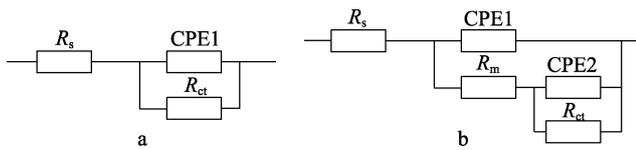


图 3 等效电路
Fig.3 Equivalent circuit

氧量更易穿过腐蚀产物与基底接触，加速电化学腐蚀；第四阶段（460~490 h）， R_{ct} 逐渐迅速上升，表明金属内层生成较为致密的腐蚀产物膜，对基体起到一定的减缓腐蚀作用；第五阶段（>490 h）， R_{ct} 持续减小，但相对第三阶段总体数值较大，表明外层的疏松腐蚀产物膜开始溶解脱落，加速了溶液中溶解氧的传输速度，使腐蚀速率加快。

2.3 电化学噪声测试分析

相对于诸多传统的腐蚀检测技术，电化学噪声技术具有无损、无须预先建立被测体系的电极过程模型、无须满足阻纳的 3 个基本条件、电化学噪声检测设备简单等优良特性，是一种对局部腐蚀情况给出很好评价的一种方法。钢在 2 m/s 海水中冲刷腐蚀 30 d 各时间段电位噪声随时间的变化曲线如图 5 所示。可以大体分为 3 个阶段：第一阶段（0~192 h），随着冲刷腐蚀的进行，电位发生负移，从 -0.545 V 负移至 -0.606 V，表明金属最初受表层氧化膜的保护而处于钝化状态，但与海水接触后，在氯离子作用下，氧化膜慢慢侵蚀，表面迅速发生电化学点蚀反应，形成腐蚀产物薄层，金属发生电化学腐蚀的趋势增强，整个过程处于钝化期。第二阶段（192~288 h），电位发生正移，从 -0.606 V 正移至 -0.565 V，表明金属钝化膜表面局部处于一个点蚀形成又再钝化的可逆状态，腐蚀速率较最初开始减缓，金属外层形成较为致密薄膜，阻碍了溶解氧的传递，对内层金属腐蚀起到一定减缓作用。第三阶段（>288 h），电位在 -0.56 V 附近保持轻微波动，表明内层腐蚀产物膜已经快速形成，外层腐蚀产物膜不断形成与溶解，基本形成一个腐蚀

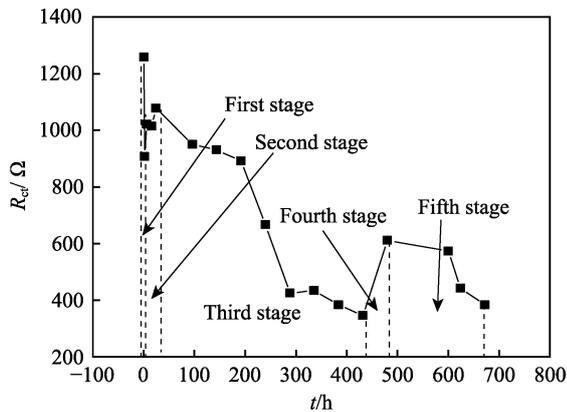


图 4 电荷转移电阻随时间的变化规律
Fig.4 Changes of Charge transfer resistance with time

不断冲刷消耗，所以金属表面是一个腐蚀产物膜层不断生成与溶解的过程。从图 4 可以看出， R_{ct} 的变化可以分为 5 个阶段：第一阶段（<12 h）， R_{ct} 急剧下降，说明金属与海水接触，一开始发生急剧的电化学反应；第二阶段（12~48 h）， R_{ct} 迅速上升，说明金属表面开始形成腐蚀产物薄层，阻碍溶液中溶解氧与基底的接触，使腐蚀速率减缓；第三阶段（48~460 h）， R_{ct} 逐渐下降，表明由于旋转圆盘高速旋转，机械磨损作用增强，部位腐蚀产物膜溶解脱落，使海水中溶

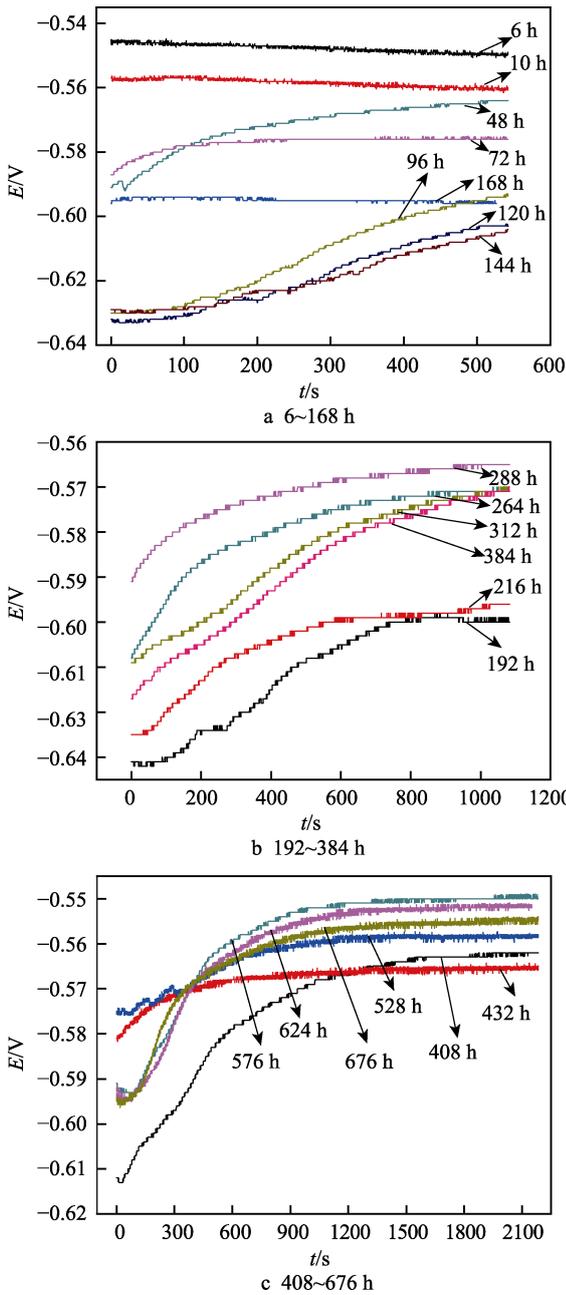


图5 2 m/s 海水冲刷下腐蚀的电化学电位噪声
Fig.5 Electrochemical potential noise of steel eroded in 2 m/s sea water

产物膜外层溶解内层稳定的动态平衡过程, 电化学腐蚀速率相对稳定, 变化相对腐蚀之初更加稳定。

钢在 2 m/s 海水流速下腐蚀 30 d 内不同腐蚀时间点的电化学噪声数据 (EN) 经最大熵值变换 (MEM) 后得到的功率谱密度 (PSD) 图谱见图 6^[20]。研究 PSD 有 3 个重要参数: 低频白噪声水平 (w)、高频斜率 (k) 以及高频倾斜部分和低频水平部分相交的转折频率 (f_c)。单一使用某一个参数不能完全判断腐蚀反应过程。施彦彦研究提出, 可以用 $S_E = f_c^2 \cdot \sqrt{k}$ 来表征电化学反应点蚀速率, 并经过试验验证^[21]。通过拟合功率谱密度图谱, 并作 S_E 曲线, 如图 7 所示。在试验

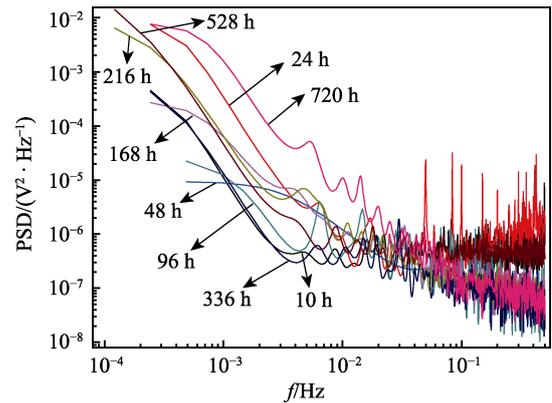


图6 在 2 m/s 海水冲刷下腐蚀的 PSD 谱图
Fig.6 PSD spectrum of steel eroded in 2 m/s sea water

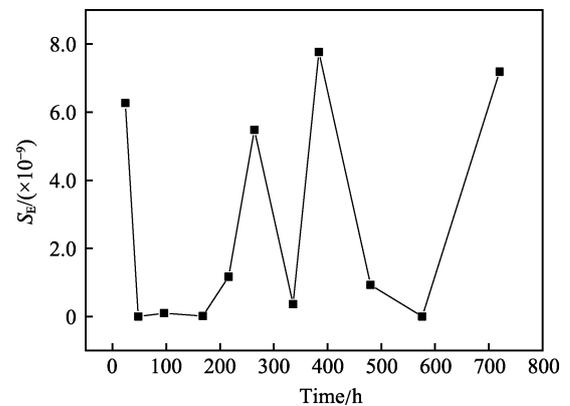


图7 S_E 参数值随时间的变化规律
Fig.7 Changes of S_E parameter values with time

初期 (0~48 h), 白噪声水平最高, S_E 值较大, 表明金属与溶液直接接触, 还未形成腐蚀产物膜, 此时发生剧烈的点蚀反应; 在试验中后期 (48~240 h), S_E 值保持相对稳定, 且数值较小, 表明金属在流动人造海水中, 逐渐形成较为稳定致密的腐蚀产物膜层, 点蚀反应减弱; 试验中后期 (>240 h), S_E 值发生较大的波动, 表明冲刷作用导致了腐蚀产物的快速形成和脱离。

2.4 涂覆新型环氧涂层后材料的耐冲刷腐蚀特性

为了有效提高材料的耐冲刷腐蚀性能, 研制出一种新型环氧防腐涂层。对钢试样表面涂覆新型环氧防腐涂层, 并与裸露的钢样在流动人造海水中的耐蚀性进行比较。为比较涂覆涂层和未涂覆涂层的钢的耐冲刷腐蚀能力, 验证新型涂层的耐冲刷腐蚀性能, 采用 EIS 技术测定了涂覆涂层的试样在 2 m/s 流动人造海水中的腐蚀行为 (如图 8 所示), 并与上述裸露试样进行对比分析。

通过图 8 可以看出, 涂覆防腐涂层的钢的腐蚀前期, Nyquist 图存在明显的扩散现象, 其主要原因是新型防腐涂层中掺杂 SiO_2 , SiO_2 为固体颗粒, 使涂层

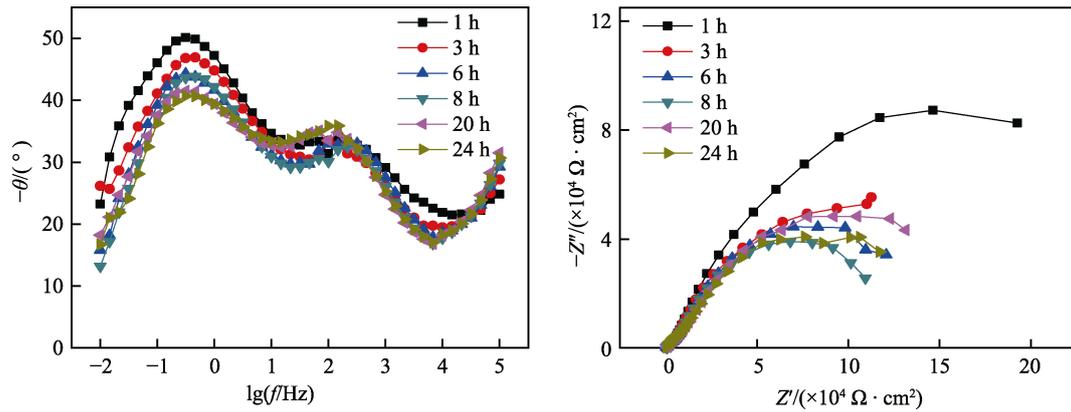


图 8 涂覆涂层试样在海水冲刷腐蚀的 EIS 谱图
Fig.8 EIS spectrum of coated samples eroded in sea water

具有多孔结构。海水中的侵蚀性粒子在诱发钢基体腐蚀前，必须通过多孔防腐涂层。根据 EIS 谱图的特性，采用如图 3b 所示的等效电路和 Z-view 软件对图 8 的 EIS 谱图进行拟合分析。充分考虑 R_{ct} 、 R_s 、 R_m 对腐蚀的影响，用三者之和的总电阻来表征整体腐蚀速率的大小，得到用总电阻表示的反应速率随时间的变化关系，如图 9 所示。

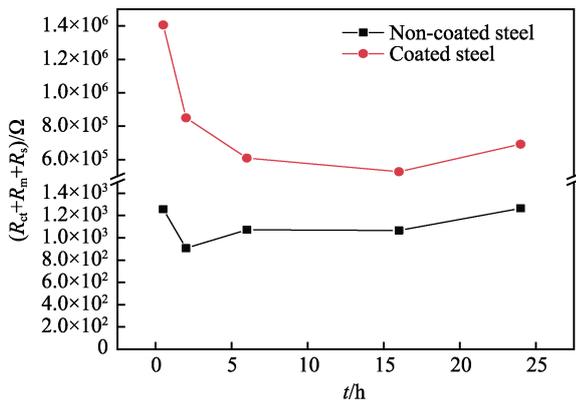


图 9 2 种试样在 2 m/s 海水中冲刷腐蚀总电阻随时间的变化
Fig.9 Changes of total resistance of 2 samples eroded in 2 m/s sea water with time

由图 9 的结果可以看出，在冲刷前 2 h，总电阻发生急剧下降。主要原因在于，海水与覆盖绝缘涂层的钢试样接触后，由于涂层的吸水性，使涂层电阻显著下降；海水与无涂层裸露试样接触后，发生急剧的电化学反应，使总电阻下降。2 h 后，总电阻值趋于平稳，表明此时覆盖绝缘涂层钢试样的涂层达到相对稳定状态，起到稳定保护作用；无涂层裸露试样表面形成腐蚀产物层，腐蚀速率较最初减小。稳定后，绝缘涂层的钢试样总电阻达到 $6.0 \times 10^5 \Omega$ ，相对无涂层裸露试样总电阻 $1.0 \times 10^3 \Omega$ ，高 2 个数量级。表明覆盖绝缘涂层的钢试样在 2 m/s 海水中的冲刷腐蚀速率远小于裸露钢的腐蚀速率，这说明通过覆盖绝缘涂层对材料表面进行改性，得到的新材料的耐电化学腐蚀性能大幅提高。

3 结论

1) 钢在 2 m/s 流动人造海水中 30 d 的冲刷腐蚀微观表征可以分为 3 个阶段：第一阶段，金属开始发生点蚀，腐蚀产物逐渐生成网状结构；第二阶段，腐蚀产物表面网状结构开始出现颗粒，逐渐生成海绵状物，内层腐蚀产物逐渐形成，电化学腐蚀速率保持相对稳定；第三阶段，外层腐蚀产物剥离，冲刷作用导致了腐蚀产物的快速形成和脱离。

2) 钢在 2 m/s 流动人造海水 30 d 冲刷腐蚀行为电化学特征可以分为 3 个阶段：第一阶段，反应电阻上升后持续减小，电化学噪声电位发生负移， S_E 值较大；第二阶段，反应电阻相对稳定在较小值，电化学噪声电位发生正移， S_E 值保持相对稳定，且数值较小；第三阶段反应电阻和 S_E 值发生较大的波动，冲刷作用导致了腐蚀产物的快速形成和脱离。

3) 在 2 m/s 的人造海水冲刷腐蚀过程中，在材料表面涂覆新型环氧涂层，可以提高材料本身的耐机械磨损能力和耐电化学腐蚀能力，新型绝缘涂层具有较好的耐冲刷腐蚀性能。

参考文献：

- [1] IRFAN O M, OMAR H M. Influence of grain refinement by ECAP on mechanical and erosion corrosion properties of AISI 4130 steel: Experimental and prediction approach [J]. Metallurgical and materials transactions A, 2019, 50(9): 4232-4244.
- [2] SELVAM K, AYYAGARI A, GREWAL H S, et al. Enhancing the erosion-corrosion resistance of steel through friction stir processing[J]. Wear, 2017, 386-387: 129-138.
- [3] BURSTEIN G T, SASAKI K. Effect of impact angle on the slurry erosion-corrosion of 304L stainless steel[J]. Wear, 2000, 240(1-2): 80-94.

- [4] ZHANG G A, XU L Y, CHENG Y F. Investigation of erosion-corrosion of 3003 aluminum alloy in ethylene glycol-water solution by impingement jet system[J]. *Corrosion science*, 2009, 51(2): 283-290.
- [5] TANG X, XU L Y, CHENG Y F. Electrochemical corrosion behavior of X-65 steel in the simulated oil-sand slurry. II: Synergism of erosion and corrosion[J]. *Corrosion science*, 2008, 50(5): 1469-1474.
- [6] NEVILLE A, REYES M, HODGKIESS T, et al. Mechanisms of wear on a Co-base alloy in liquid-solid slurries[J]. *Wear*, 2000, 238(2): 138-150.
- [7] NIU L, CHENG Y F. Synergistic effects of fluid flow and sand particles on erosion-corrosion of aluminum in ethylene glycol-water solutions[J]. *Wear*, 2008, 265(3-4): 367-374.
- [8] NEVILLE A, REZA F, CHIOVELLI S, et al. Erosion-corrosion behaviour of WC-based MMCs in liquid-solid slurries[J]. *Wear*, 2005, 259(1-6): 181-195.
- [9] TIAN B R, CHENG Y F. Electrochemical corrosion behavior of X-65 steel in the simulated oil sand slurry. I: Effects of hydrodynamic condition[J]. *Corrosion science*, 2008, 50(3): 773-779.
- [10] JANA B D, STACK M M. Modelling impact angle effects on erosion-corrosion of pure metals: Construction of materials performance maps[J]. *Wear*, 2005, 259(1-6): 243-255.
- [11] NIU Lin, CHENG Y F. Electrochemical characterization of metastable pitting of 3003 aluminum alloy in ethylene glycol-water solution[J]. *Journal of materials science*, 2007, 42(20): 8613-8617.
- [12] FLORES J F, NEVILLE A, KAPUR N, et al. An experimental study of the erosion-corrosion behavior of plasma transferred arc MMCs[J]. *Wear*, 2009, 267(1-4): 213-222.
- [13] ZHANG Da-wei, ZHANG Xin-ping. Laser cladding of stainless steel with Ni-Cr₃C₂ and Ni-WC for improving erosive-corrosive wear performance[J]. *Surface and coatings technology*, 2005, 190(2-3): 212-217.
- [14] 戴明城, 万新斌, 鞠剑峰, 等. 多场耦合条件下的 B10 铜镍合金在海水中的腐蚀行为[J]. *腐蚀与防护*, 2019, 40(7): 479-484.
- DAI Ming-cheng, WAN Xin-bin, JU Jian-feng, et al. Corrosion behavior of B10 Cu-Ni alloy in seawater under multi-field coupling condition[J]. *Corrosion & protection*, 2019, 40(7): 479-484.
- [15] YANG Q, ZHAO L R, PATNAIK P. Erosion performance, corrosion characteristics and hydrophobicity of nanolayered and multilayered metal nitride coatings[J]. *Surface and coatings technology*, 2019, 375: 763-772.
- [16] LUDWIG G A, MALFATTI C F, SCHROEDER R M, et al. WC10Co4Cr coatings deposited by HVOF on martensitic stainless steel for use in hydraulic turbines: Resistance to corrosion and slurry erosion[J]. *Surface and coatings technology*, 2019, 377: 124918.
- [17] STACK M M, ABDELRAHMAN S M. A CFD model of particle concentration effects on erosion-corrosion of Fe in aqueous conditions[J]. *Wear*, 2011, 273(1): 38-42.
- [18] 彭文山, 刘雪键, 刘少通, 等. 含砂流动海水中 Q235 钢冲刷腐蚀行为研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(9): 230-237.
- PENG Wen-shan, LIU Xue-jian, LIU Shao-tong, et al. Erosion-corrosion behavior of Q235 steel in flowing seawater containing sand particles[J]. *Surface technology*, 2019, 48(9): 230-237.
- [19] 陈艳, 康伟杰, 姚铭, 等. 基于 FLUENT 和神经网络预测海水弯管冲刷腐蚀的模型[J]. *腐蚀与防护*, 2019, 40(6): 436-440.
- CHEN Yan, KANG Wei-jie, YAO Ming, et al. Prediction model for erosion-corrosion of seawater bend based on fluent and neural network[J]. *Corrosion & protection*, 2019, 40(6): 436-440.
- [20] 张鉴清, 张昭, 王建明, 等. 电化学噪声的分析与应用——I. 电化学噪声的分析原理[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2001, 21(5): 310-320.
- ZHANG Jian-qing, ZHANG Zhao, WANG Jian-ming, et al. Analysis and application of electrochemical noise I. Theory of electrochemical noise analysis[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2001, 21(5): 310-320.
- [21] 施彦彦. 典型金属材料大气腐蚀的模拟电化学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- SHI Yan-yan. The electrochemical studies of atmospheric corrosion of typical metals[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.