

B10 铜镍合金流动海水冲刷腐蚀电化学行为

杜娟^{1,2}, 王洪仁^{2*}, 杜敏¹, 李海涛²

1. 中国海洋大学 化学化工学院, 青岛 266003;

2. 海洋腐蚀与防护国家级重点实验室, 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 青岛 266071

摘要:采用旋转圆桶冲刷腐蚀试验机, 利用多种电化学测试手段, 结合表面分析、失重测量研究了 B10 铜镍合金流动海水冲刷腐蚀、成膜过程和膜层的电化学信息, 探讨了流速及腐蚀时间对成膜过程的影响. 结果表明, B10 合金在 0、1、2、3、3.6、4 m/s 的试验流速海水中的腐蚀速度随着腐蚀时间的变化规律相似, 在静止和流动海水中都会生成内、外双层保护性的腐蚀产物膜, 随着流速增加, 产物膜因受流体力学作用增大而被冲刷削薄; 腐蚀反应阳极区随海水流速和时间变化较大, 腐蚀受阳极反应和传质过程控制.

关键词: B10 铜镍合金; 流动海水; 冲刷腐蚀; 电化学

中图分类号: TG172.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6495(2008)01-0012-07

ELECTROCHEMICAL CORROSION BEHAVIOR OF 90/10 Cu-Ni ALLOY IN FLOWING SEAWATER

DU Juan^{1,2}, WANG Hong-ren², DU Min¹, LI Hai-tao²

1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003;

2. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266071

Abstract: The electrochemical corrosion behavior of 90/10 copper-nickel alloy after being erosion-corrosion tested in flowing seawater has been studied. From an analysis of the electrochemical behavior of the alloy, it is clear that the variation of corrosion rate with time are similar both in quiescent and flowing seawater. There is a double oxide film formed on the surface of the material. The inner oxide film, which primarily consisted of cuprous oxide (Cu_2O), is important for the protection of the material. It can be concluded that the rate of charge and mass transfer of the anodic reaction is the determining step of the corrosion reaction.

Keywords: 90/10 copper-nickel alloy; flowing seawater; erosion corrosion; electrochemistry

B10 铜镍合金因其有良好的耐流动海水腐蚀性能而广泛应用于各类舰船的冷凝器管、滨海电厂的热交换器以及海水淡化处理设备管道系统等. 多数研究者认为其在流动海水中浸泡初期表面可形成一层氧化膜, 在溶液环境 pH 值、溶解氧含量、温度等条件相对稳定的情况下, 其耐蚀性取决于此表面膜层, 许多研究者对此进行了大量研究^[1-8], 一定程度上深化了人们对铜镍合金耐蚀本质的认识, 有利于进一步探讨此合金海水腐蚀机理. 但是对于 B10 铜镍合金在流动海水中不同流速、不同时间材料表面膜层的生成过程以及形成后的电化学反应机制的研究尚不多. 本文利用电化学阻抗谱

(EIS)、线性极化等电化学手段, 结合 SEM、EDX 分析研究了 B10 铜镍合金在洁净海水中不同流速、不同时间冲刷腐蚀后的材料表面状态与变化, 极化阻力、阴阳极极化行为、表面微观形貌以及成分的变化, 探讨了 B10 铜镍合金在流动海水中的腐蚀规律.

1 实验方法

实验材料为国产 B10 铜镍合金. 实验前试样经 220[#] ~ 1200[#] 水磨砂纸逐级打磨, 用蒸馏水、无水乙醇清洗吹干后保存于干燥器内. 实验介质为青岛天然海水, 温度为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$.

静态浸泡实验在全浸试验机上进行, 流动海水腐蚀试验在 CF-97 冲刷腐蚀试验机上进行, 试样形状及尺寸如图 1. 试样镶嵌在转轮的周边, 试样表面与转轮表面平齐, 厚度与转盘厚度相等, 转盘周边的线速度作为试样与海水的相对速度. 试验流速分别取 1、2、3、3.6、4 m/s; 试样在每个流速下冲刷 2、8、24、72、120、168、240 h 后立刻取平行样尽量保持其表

收稿日期: 2007-01-10 初稿; 2007-03-13 修改稿

基金项目: 基础科研环境腐蚀课题(H082006A003)

作者简介: 杜娟(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为材料的腐蚀与防护.

* Tel: 0532-85843158 E-mail: wanghr@sunrui.net

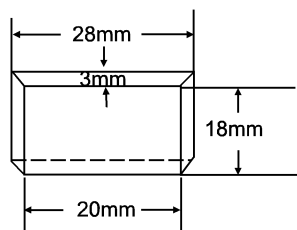


Fig. 1 Specification of testing sample

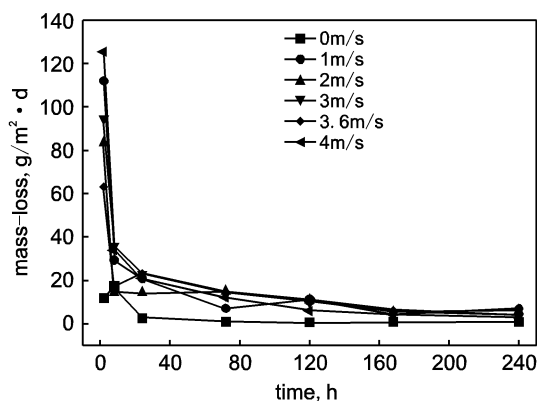


Fig. 2 Effect of time on mass loss of B10 after erosion-corrosion in seawater at different velocity

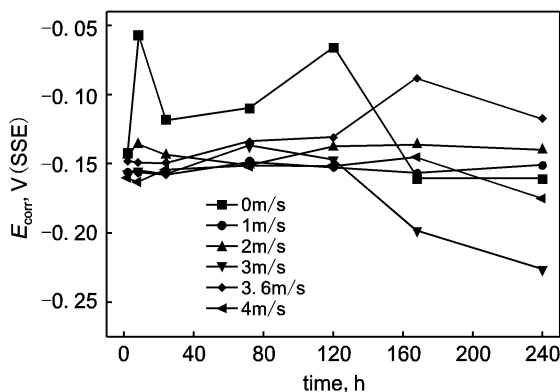


Fig. 3 Variation of E_{corr} of B10 with time after erosion-corrosion in seawater with different velocity

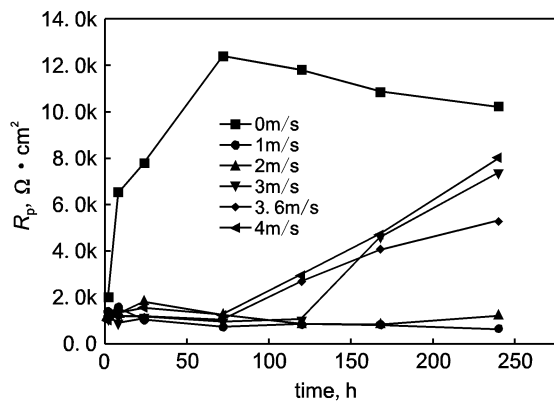


Fig. 4 Effect of time on polarization resistance (R_p) of B10 after erosion-corrosion in seawater with different velocity

面状态并进行电化学测试、失重测量(精确度 $\pm 0.0001\text{g}$)以及微观分析。

电化学测试采用三电极体系,参比电极为 Ag/AgCl 电极(SSE),辅助电极为铂片,采用普林斯顿 2273 电化学测试系统.交流阻抗谱测量的频率范围为 $100\text{ kHz} \sim 0.01\text{ Hz}$,交流激励信号幅值为 5 mV ;线性极化扫描速率为 $10\text{ mV}/\text{min}$,扫描范围为 $\pm 15\text{ mV vs. 开路电位(OCP)}$;动电位极化扫描速率为 $20\text{ mV}/\text{min}$,扫描范围为 $\pm 500\text{ mV vs. OCP}$.

微观腐蚀形貌分析采用荷兰 Philips XL30 型环境扫描电镜,并采用 Phoenix EDAX 能谱仪进行表面成分分析。

2 结果与分析

2.1 腐蚀失重

图 2 示出了 B10 铜镍合金不同流速条件下,随着腐蚀时间的增加腐蚀速度的变化.由图 2 知,在每个流速条件下,冲刷腐蚀初期腐蚀速度较大,随着冲刷时间的增加腐蚀速度逐渐减小,并趋于稳定,这是因为腐蚀初期材料表面很快形成氧化膜层,随腐蚀时间延长而逐渐致密完整并相对稳定,降低了材料表面阴、阳极反应的传质速度和电荷转移速度,从而降低了腐蚀速度,并逐渐达到了一个相对稳定值.冲刷腐蚀前期,不同流速下材料表面氧化膜层处于形成但不稳定状态,其冲刷腐蚀速率随流速增大但不很稳定;腐蚀试验后期,氧化膜层相对稳定,流速增加材料所受剪切应力增大,造成腐蚀速率随流速的增大相应增加。

2.2 电化学测试

2.2.1 冲刷腐蚀后自腐蚀电位(E_{corr})的变化 图 3 为 B10 铜镍合金在不同流速海水中经历不同腐蚀时间后,迅速取出试样保持其表面膜原始状态,并在静态海水中稳定 5 min 后测得的自腐蚀电位的变化.静态海水条件下前期腐蚀电位不稳定,这与在静态浸泡条件下表面耐蚀性氧化膜形成不均匀有关,腐蚀形貌观察发现表面有大量腐蚀点.而在流动海水条件下电位相对比较稳定,且都比静态浸泡条件下的电位负移.其原因是流动介质中 O_2 传输能力增强,使阴极还原电流增大,同时 Cl^- 、 OH^- 传输能力加强,促进材料表面腐蚀产物膜形成与溶解速度均加快,表面形成相对稳定致密的膜层,因此虽然阴、阳极反应活性增强使其腐蚀电位相比静态时负移,但 E_{corr} 相对比较稳定。

2.2.2 冲刷腐蚀后线性极化阻力(R_p)的变化 图 4 示出了在不同流速、时间冲刷腐蚀后, B10 铜镍合金的线性极化阻力(R_p)的变化规律.流动条件下不同冲刷时间的 R_p 值都要比静态浸泡时各个浸泡时间后的 R_p 值小.相对较低的试验流速下,随腐蚀时间增加 R_p 值很稳定,而在 3 m/s 以上的试验流速下, R_p 值前期相对稳定,冲刷 72 h 以后 R_p 值呈直线增加.这是因为流动海水冲刷掉了材料表面相对疏松的腐蚀产物,使相同的腐蚀时间后流动条件下的 R_p 值要小于静态条件下的值;而相对高的试验流速海水中氧含量充足,加速了物质传输速度,使材料表面很快形成比低流速下更稳定而致密的氧化膜层,从而造成了不同流速下随腐蚀时间增加

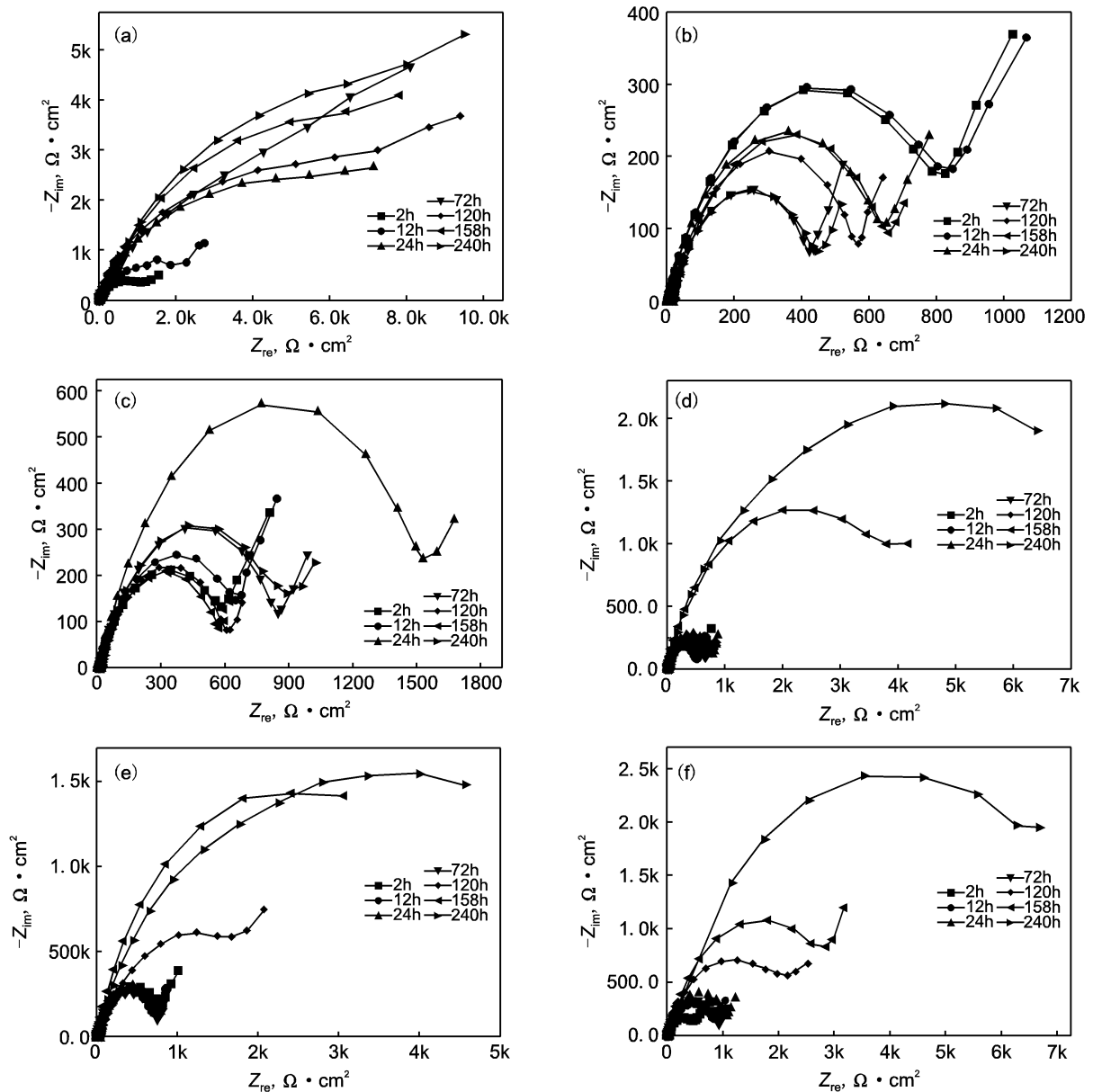


Fig. 5 Variation of Nyquist plots of B10 after erosion-corrosion for different time in seawater of different velocity (a) 0m/s, (b) 1m/s, (c) 2m/s, (d) 3m/s, (e) 3.6m/s, (f) 4m/s

R_p 值的变化规律不同。

根据 Stern-Geary 公式:

$$i_{\text{corr}} = \beta_A \beta_B / 2.3 R_p (\beta_A + \beta_B) = B / R_p$$
 (β_A 、 β_B 为塔菲尔常数, B 为比例常数) (1)

可知, R_p 值与自腐蚀电流密度 (i_{corr}) 成反比, 因此 R_p 值可以间接的反应出材料腐蚀速率的大小, R_p 值越大, i_{corr} 值越小, 腐蚀反应速率小, 反之则腐蚀反应速率大. 根据图 4, 静态浸泡下材料在不同时间的腐蚀速率都要小于各流速条件下的腐蚀速率, 在流动状态下不同冲刷腐蚀时间后的腐蚀速率变化与自腐蚀电位变化和失重结果变化规律基本一致.

在流动海水的冲刷腐蚀条件下, 材料的总的失重来自于两个方面: 一是以离子状态流失的电化学腐蚀分量, 即法拉第分量; 一是以原子状态流失的冲刷腐蚀分量, 即非法拉第分量^[10]. 用失重方法所得的腐蚀速率包含了这两个失重分

量, 而用 R_p 值间接判断材料腐蚀速率的方法时, 所反映的腐蚀速率相当于电化学腐蚀失重的法拉第分量; 而且失重法测量的是一定时间内累积的平均腐蚀速率, 而 R_p 值反映的是在某一时刻腐蚀速率的大小, 与该时刻材料的表面状态有很大的关系. 因此在流体力学对材料的冲刷造成的影响很小, 腐蚀时间较短时通过 R_p 值所反映的腐蚀速率变化与用失重方法测出的腐蚀速率变化规律基本一致, 但在流速增大, 流体力学因素对材料失重造成的影响较大或腐蚀时间较长时, 用 R_p 值所反映的腐蚀速率要与腐蚀失重测出的腐蚀速率有所偏差.

2.2.3 交流阻抗谱 (EIS) 的变化 图 5 中各图示出了 B10 铜镍合金在不同流速、不同腐蚀时间冲刷腐蚀后, 电化学阻抗的变化规律. 不同的阻抗谱可以用图 6 中的等效电路模型表示.

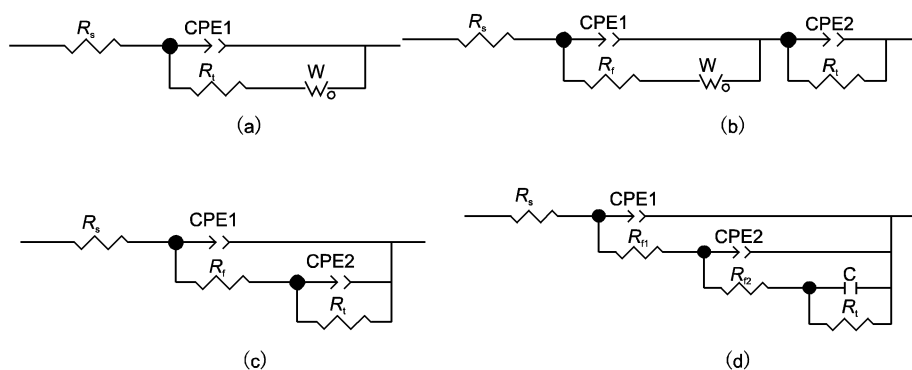


Fig. 6 Equivalent circuit of B10 after erosion-corrosion in seawater for different time with different velocity

Table 1 Equivalent circuit of B10 after being exposed to flowing seawater with different velocity

time	0 m/s	1 m/s	2 m/s	3 m/s	3.6 m/s	4 m/s
2h	a	c	c	c	c	c
8h	a	c	c	c	c	c
24h	b	c	c	c	c	c
72h	b	c	c	c	c	c
120h	b	c	c	c	c	c
168h	d	c	c	c	c	c
240h	d	c	c	c	c	c

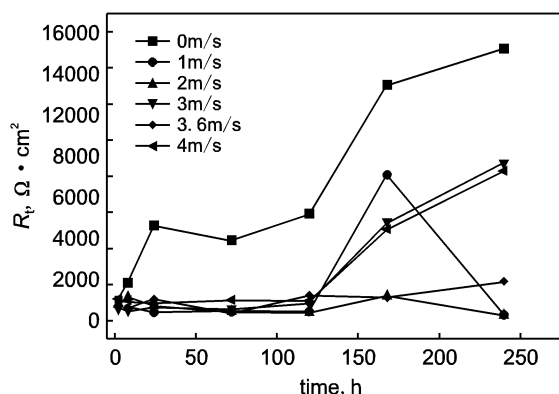


Fig. 7 Variations of R_f with time of B10 after erosion-corrosion in seawater with different velocity

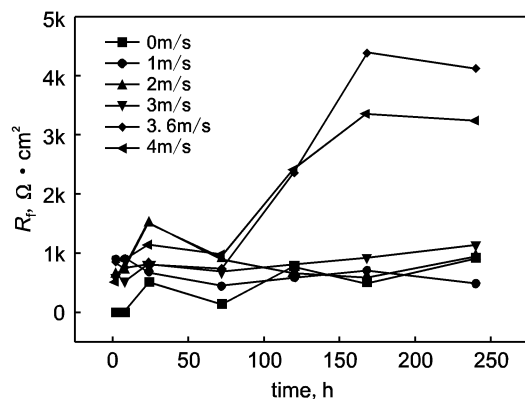


Fig. 8 Variations of R_f with time of B10 after erosion-corrosion in seawater with different velocity

每个流速下不同冲刷腐蚀时间后的交流阻抗谱对应的等效电路如表 1 所示:

根据以上等效电路对不同流速、腐蚀时间后的交流阻抗谱进行解析,获得电荷转移电阻(R_t),氧化膜层电阻(R_f)随冲刷腐蚀时间的变化规律如图 7、图 8 所示:

对于 B10 铜镍合金,文献^[3,13]中指出高频区容抗弧反映了材料基体的电荷转移反应,比如 $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^+ + \text{e}$ 或者可能是部分阴极反应 $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$;低频区的容抗弧反映了电荷或物质通过表面氧化膜层的传输过程.这与试验测量阻抗谱的模拟等效电路所反映的信息相吻合.

试验中,在静态浸泡条件下,B10 铜镍合金阻抗谱高频区容抗弧半径随腐蚀时间的增加而增大, R_f 随腐蚀时间增加而增加;在浸泡初期,海水中的氧促进了材料表面的 Cu_2O 膜的生成,但膜层生成缓慢,参与阴极反应的氧存在浓度扩散梯度,阻抗谱中低频区出现 Warburg 阻抗,腐蚀反应受扩散控制;浸泡中期,低频区出现半径很大的容抗弧,表明材料表面氧化膜形成逐渐完整致密,参与反应的氧需穿过氧化膜层到达基体才可参与阴极反应,因此相应的阻抗谱用等效电路 b 解释;浸泡后期,材料表面形成了内、外双层膜^[7,9,10],外层氧化产物膜疏松多孔,膜层之间相互穿插并出现裂纹,腐蚀反应在膜层、基体与膜层溶液间同时进行,反应受电荷转移过程和物质在氧化膜层中传输步骤共同控制,此时等效电路 d 所反映的信息与材料表面反应过程相吻合^[6].在流动海水冲刷腐蚀过程中,高频和低频容抗弧半径明显减小,这是由于流动海水加快了阴极反应还原剂 O_2 和阳极反应电荷转移、传质过程,增加了腐蚀反应速率,促进了表面氧化膜层的迅速生成,外层疏松的氧化产物生成后即被流动海水冲刷掉,因此每个流速下低频区容抗弧大多只表现出了单层膜的信息,腐蚀速率控制步骤取决于内层 Cu_2O 膜的电子导电性^[8],模拟出的等效电路 c 反映出了材料表面单层膜的信息.

由图 7、8 得知,腐蚀反应的电荷转移电阻(R_t)在每个流速条件下前期变化比较平稳,而后逐渐增加;流速在 3.6 m/s 以下时膜层电阻(R_f)随冲刷时间增加而缓慢增加,而 3.6、4 m/s 时,在冲刷后期 R_f 急剧增加,反映出一方面随流速增加,相对较高的流速阴极反应供氧量充足,氧化膜层形成更迅速,材料表面受流动海水的剪切应力也有所增加;另一方面,随着冲刷时间的增加,氧化膜层形成逐渐致密完整.随着流速的增大海水的剪切应力增加,表面氧化膜层的形成速度和

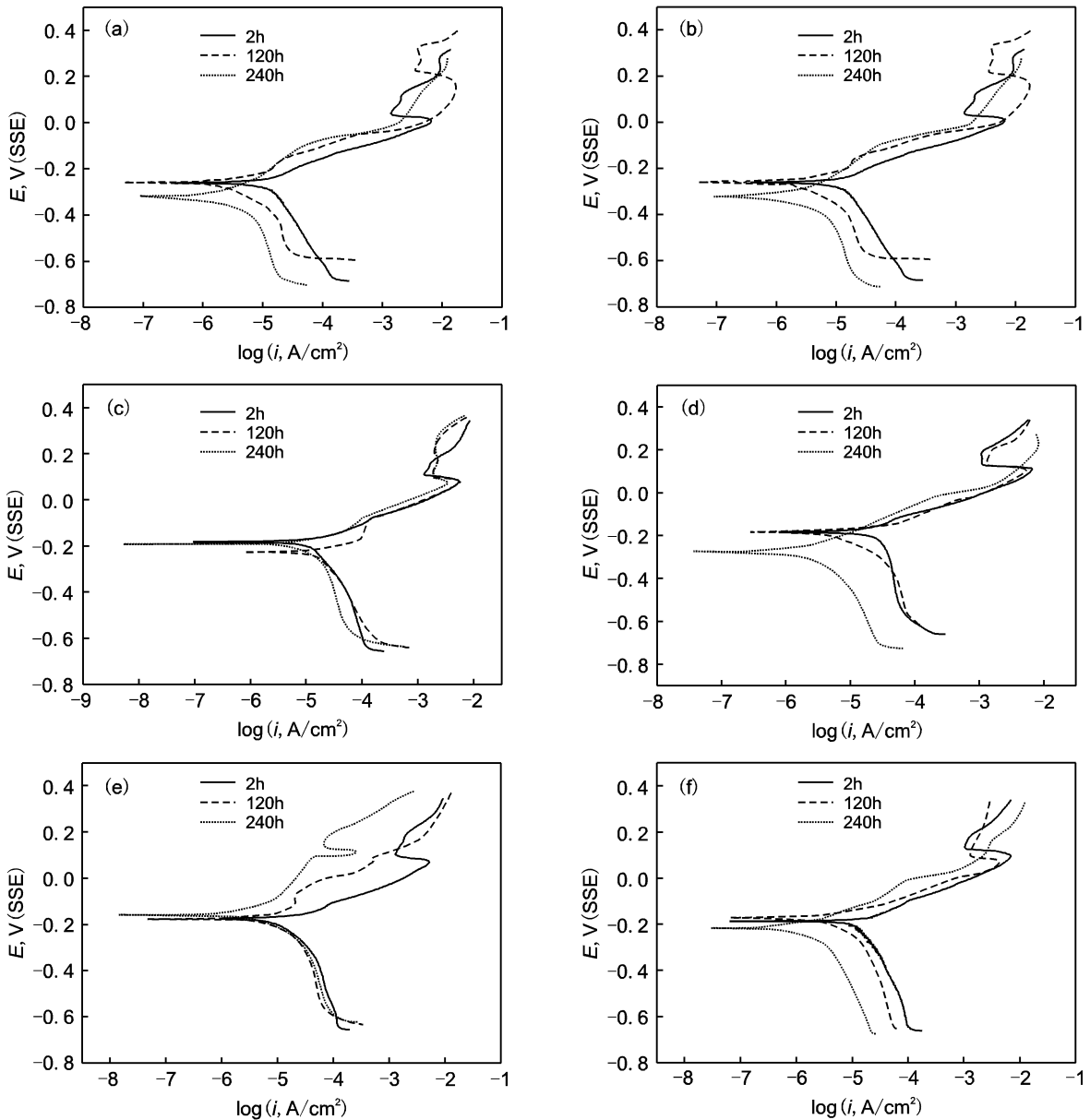


Fig. 9 Variation of potentiodynamic polarization curves of B10 after erosion-corrosion for different time in seawater with different velocity (a) 0 m/s, (b) 1 m/s, (c) 2 m/s, (d) 3 m/s, (e) 3.6 m/s, (f) 4 m/s

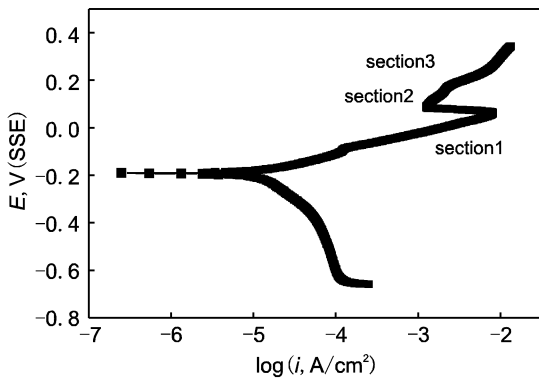


Fig. 10 A typical polarization curve of 90/10 Cu/Ni in flowing seawater

共同作用使低流速条件下的 R_f 随冲刷时间延长而增大的速度减慢。而在相对高的流速下，冲刷腐蚀后期 R_f 急剧增大，这是由于此时腐蚀反应的电荷转移速度和传质速度急剧增大，这一因素对材料表面氧化膜层生成的影响要远大于流动海水的剪切应力对它的切削作用，因此 R_f 值急剧增大^[3]。阻抗谱测量的冲刷腐蚀变化规律与前述线性极化、腐蚀失重结论基本一致。

2.2.4 动电位极化行为的变化 图9示出了B10在不同流速条件下不同腐蚀时间的动电位极化曲线。静态浸泡条件下，阴极区的氧极限扩散电流密度($i_{d,o}$)随着时间增加逐渐减小，因为随着腐蚀时间增加氧化膜层逐渐稳定致密，到达基体表面或氧化膜层中参与阴极反应的溶解氧浓度减小， $i_{d,o}$ 逐渐减小。而在流动海水条件下，随着腐蚀时间增加 $i_{d,o}$ 相对稳定，但在流动海水中不同腐蚀时间后 $i_{d,o}$ 都要比静态条件

致密度随着流速增大和腐蚀时间延长而增加，这两个因素的

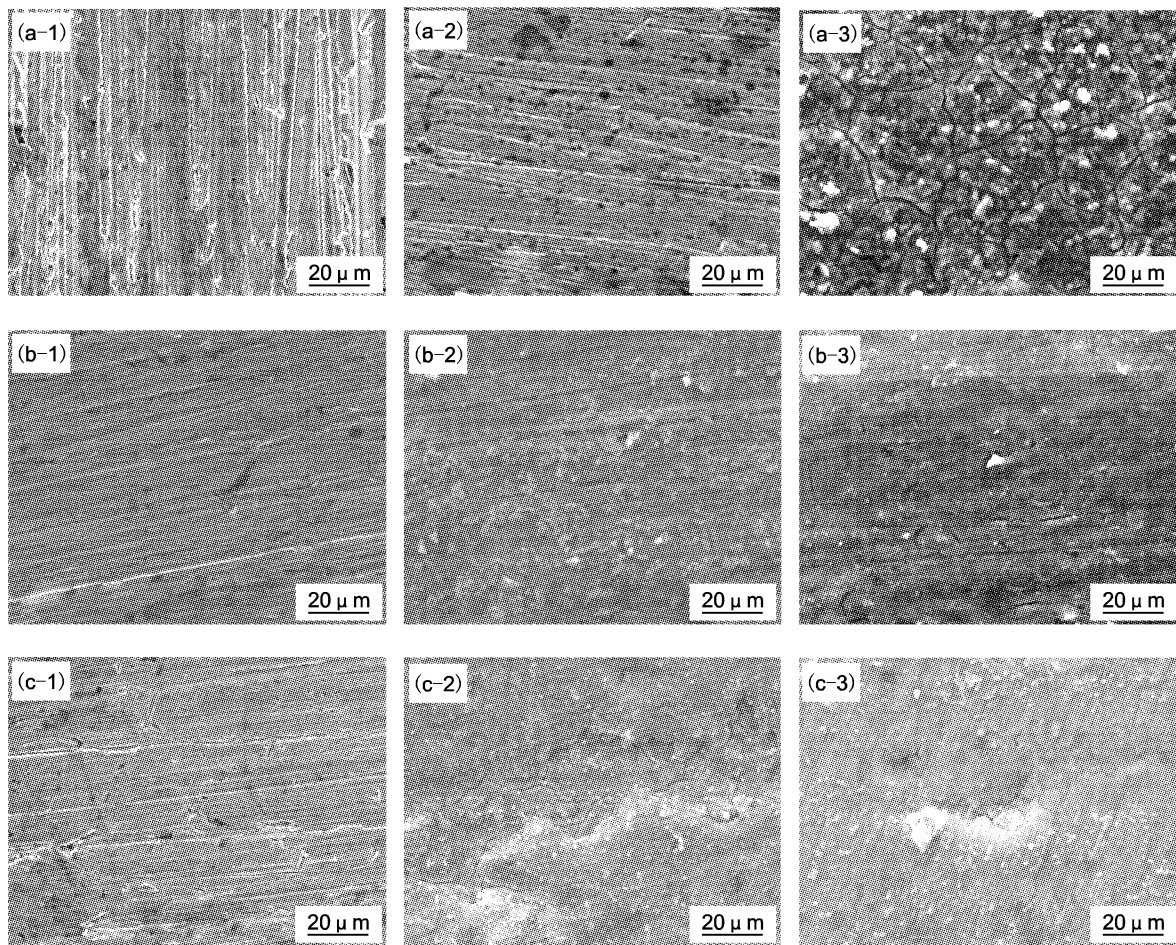


Fig. 11 Surface morphology of B10 after erosion-corrosion with different time (1 – 2 h, 2 – 120 h, 3 – 240 h) in flowing seawater of different velocity (a – 0 m/s, b – 3 m/s, c – 4 m/s)

下略有增大. 这是因为随着流速增加, 氧扩散层受流动海水剪切力作用而有所减薄, 增大了物质传输速度, 使参与阴极反应的溶解氧量浓度增大, 达到氧的最大溶解量, 阴极氧还原反应速度加快, $i_{d,o}$ 要比静态条件下大且相对稳定.

图 10 示出了 B10 铜镍合金在不同流速海水中腐蚀后测量的典型动电位极化曲线, 在阳极区可以分为三个反应区^[6,12,14]. Section1 为活性溶解区, 在此区域内极化电位比较低, 从热力学角度来说, B10 铜镍合金中的铜以 Cu^+ 形式溶解, 然后 Cu^+ 与海水中的 Cl^- 进行络合, 阳极反应^[6,14,16] 分别为:



Section2 为钝化区, CuCl 是不溶性的, 它沉积在合金表面, 又发生水解而形成热力学上更稳定的一价铜的氧化物 Cu_2O , 反应为:



Cu_2O 是在合金表面形成致密的氧化膜, 阻碍 Cl^- 向电极表面扩散和 CuCl_2^- 由本体向反应溶液中的扩散, 从而使腐蚀电流下降, 进入钝化区; Section3 为极限电流区, 随着极化电位的继续升高, Cu^+ 的产物会被氧化成二价铜的产物, 阳

极反应的电流随电位升高而逐渐增大^[6].

由图 9 可知, 随着流速的增加, B10 的阳极钝化区 (Section2) 范围逐渐减小, 而在同一流速下, 随着冲刷时间的增加, 阳极钝化区 (Section2) 的范围也逐渐减小. 这是因为随着流速增大及腐蚀时间延长, 由反应 (5) 在基体上生成的 Cu_2O 保护膜受海水流动的影响, 材料表面氧化产物膜中 Cl^- 、 CuCl_2^- 等物质的传输扩散速度增大, 使阳极反应 (2) 中生成的 Cu^+ 很快被氧化成 Cu^{2+} 的产物, 从而导致阳极钝化区的减小; 而且在相同流速下, 随腐蚀时间增加, 阳极钝化区减小的趋势更为明显.

2.3 SEM、EDX 测试

B10 铜镍合金在不同流速不同冲刷腐蚀时间后的形貌见图 11. 在静态条件下, B10 在浸泡过程中表面会出现大量腐蚀点, 随着腐蚀时间增加, 表层腐蚀产物膜逐渐增厚, 内层膜均匀, 外层腐蚀产物疏松; 在流动海水中, 材料表面很快形成稳定致密的腐蚀产物膜, 疏松的外层产物随着生成即被流动海水冲刷掉, 材料表面呈黄褐色或部分黑色, 相对低的流速下, 沿冲刷方向上呈波纹状, 相对高流速下冲刷形态紊乱. 试样经 EDX 分析可知, 在每个流速下随腐蚀时间延长, 材料表面氧元素含量逐渐增加, 并有少量 Mg、Cl 等元素出现, 可以反映出材料表面氧化产物的逐渐形成、增多. 无论是静态

或流动海水中,材料表面的腐蚀产物膜都有裂纹出现,这是因为当所形成的腐蚀产物膜下面的基体处在晶界或孪晶界及其它缺陷处时,由于成分与结构的变化,在这些位置的腐蚀产物膜生长速度较晶内位置成膜慢或者因为腐蚀产物膜内应力超过膜强度,从而腐蚀产物膜出现沟或裂纹. EDX 分析结果表明这些沟或裂纹处镍量比膜中镍含量低,因此其腐蚀电位比富镍膜高,富镍膜作为阳极逐渐消耗,沟或裂纹变为凸出条纹,这些凸出条纹逐渐富镍,且 Ni/Cu 比新裸露的区域高,从而条纹处作为阳极溶解使表面膜变得平整、光滑,如此反复^[9].

综合上述失重、自腐蚀电位、线性极化、交流阻抗、动电位极化以及腐蚀形貌观察结果, B10 铜镍合金在静态海水中随着腐蚀时间的增加,表面形成内、外双层的氧化膜对基体产生保护作用,但材料表面易出现点蚀;流动海水中材料表层疏松的腐蚀产物被冲刷掉,内层氧化膜层对材料耐蚀性起主要作用,随着流速和冲刷腐蚀间增加,物质传输速度增大,材料表面氧化膜层形成逐渐稳定致密,在试验流速条件下,氧化膜层对材料的保护作用受流动海水的剪切力影响而减弱程度较轻.

3 结论

1. B10 铜镍合金在流动海水中的腐蚀速率要明显高于静态海水中的腐蚀,在流动海水冲刷初期腐蚀速率较大,随着冲刷腐蚀时间的增加,腐蚀速率逐渐减小并趋于稳定;而相同的冲刷腐蚀时间条件下,随着流速的增加,材料的腐蚀速率呈增加趋势.

2. 在静态或是流动海水中, B10 铜镍合金材料表面会形成内、外双层的腐蚀产物膜,内层氧化膜致密与基体结合强,对材料的耐蚀性起主要作用;外层腐蚀产物膜疏松多孔,流动海水冲刷条件下被冲刷去,对基体的保护作用不强. 静态下,材料表面出现大量腐蚀点,流动海水中材料无此现象. 在试验流速条件下,氧化膜层对材料的保护作用受流动海水的剪切力影响而减弱程度较轻.

3. 在静态浸泡和流动海水中腐蚀后, B10 铜镍合金材料阳极极化区都会出现活性溶解区、钝化区、极限电流区,但随着流速和冲刷腐蚀时间的增加,阳极钝化区的范围逐渐减小,阴极反应区的变化不大,材料腐蚀反应速率主要受阳极反应速率和物质传输速率控制.

参考文献:

- [1] Hack H P. Role of the corrosion product film in the corrosion protection Cu-Ni Alloys in saltwater [D]. Dissertation of Pennsylvania State University, 1987.
- [2] K D Eford. The synergistic effect of Ni and Fe on the sea water corrosion of copper alloy [J]. Corrosion, 1977, 33: 347.
- [3] D D Macdonald, B C Syrett, S S Wing. Methods for measuring corrosion rates of copper-nickel alloys in flowing seawater [J]. Corrosion, 1978, 28: 25.
- [4] 张哲, 姚禄安, 甘复兴. 铜镍合金表面膜对其电化学行为的影响 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 1987, 7(2): 143.
- [5] Paul T, Wojcik, Mark E, Orazem. Experimental study of the erosion-corrosion of copper and copper nickel alloys using a submerged impinging jet [J]. Corrosion, 1997, 17: 435.
- [6] G Kear, B D Barker, K Stokes et al. Electrochemical corrosion behaviour of 90-10 Cu-Ni alloy in chloride-based electrolytes [J]. Applied Electrochemistry 2004, 34: 659.
- [7] 赵永韬, 李海洪, 陈光章. 铜合金在海水中电化学阻抗谱特征研究 [J]. 海洋科学, 2005, 29, (7): 21.
- [8] 朱小龙, 林乐耘, 徐杰, 等. Cu-Ni 合金海水腐蚀产物膜研究进展 [J]. 材料科学与工艺, 1997, 5(2): 22.
- [9] 朱小龙, 李中建, 徐杰. Cu-Ni 合金海水腐蚀产物膜的形成与破裂机制研究进展 [J]. 稀有金属, 1997, 21(6): 463.
- [10] 杨帆, 郑玉贵, 姚治铭, 等. 铜镍合金 BFe-30-1-1 在流动人工海水中的腐蚀行为 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999, 19(4): 207.
- [11] 王洪仁, 钱建华, 滕国生, 等. 铜合金海水管路材料在流动海水中的腐蚀与防护 [A]. 第三届海峡两岸材料腐蚀与防护研讨会论文集 [C]. 北京: 化学工业出版社, 2002. 777.
- [12] M E Folquer, S B Ribotta, S G Real et al. Study of copper dissolution and passivation processes by Electrochemical impedance spectroscopy [J]. Corrosion, 2002, 58(3): 240.
- [13] D D Macdonald, B C Syrett, S S Wing. The corrosion of Cu-Ni alloys 706 and 715 in flowing sea water. II - Effect of dissolved sulfide [J]. Corrosion, 1979, 35(8): 387.
- [14] 徐海波, 付洪田, 赵广宇, 等. 铜阳极活性区溶解机制的电化学研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999, 19(1): 27.
- [15] B C Syrett. Erosion-corrosion of copper-nickel alloys in sea water and other aqueous environments-a literature review [J]. Corrosion, 1976, 32(6): 242.
- [16] H P Dhar, R E White, G Burnell et al. Corrosion of Cu and Cu-Ni alloys in 0.5 mol/L NaCl and in synthetic seawater [J]. Corrosion, 1985, 41(6): 317.