

# 核电厂冷冻水系统更换缓蚀剂的可行性评估

谢建丽<sup>1</sup>, 卢叶艇<sup>2</sup>, 吴立新<sup>2</sup>

(1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004; 2. 中核核电运行管理有限公司, 浙江 海盐 314303)

**摘要:** 目的 评估缓蚀剂更换过程对核电厂冷冻水系统管材防腐的影响。方法 采用线性极化、交流阻抗、强极化等电化学方法以及扫描电镜、X射线衍射等表面分析技术, 研究在从原缓蚀剂( $\text{NaNO}_2$ - $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  介质)向新缓蚀剂( $\text{LiOH}$ -联氨介质)置换过程中, A106B 碳钢及 B10 铜镍合金等两种主体管材的耐蚀性能变化。结果 电化学测量表明, 缓蚀剂置换过程中, 两种管材的极化电阻  $R_p$  和传递电阻  $R_t$  总体上逐渐增大, 腐蚀电流  $J_{\text{corr}}$  逐渐减小。表面分析表明, 金属在原缓蚀剂中表面较光滑, 换水过程中逐渐生成锈层, 在新缓蚀剂中锈层未见明显发展。结论 原  $\text{NaNO}_2$ - $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  介质可抑制金属阳极腐蚀过程, 对金属材质有良好的保护效果。换水阶段, A106B 碳钢发生均匀腐蚀, 表面积聚有锈层; B10 铜镍合金腐蚀程度较轻微, 两种材质的耐蚀性能均未见明显降低。新  $\text{LiOH}$ -联氨介质可继续对带锈层金属起保护作用, 可增强锈层致密性, 使金属材质的耐蚀性进一步提高。以  $\text{LiOH}$ -联氨介质置换  $\text{NaNO}_2$ - $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  介质, 作为核电厂冷冻水的缓蚀剂具有可行性及可操作性。

**关键词:** 核电厂; 冷冻水系统; 缓蚀剂;  $\text{LiOH}$ -联氨处理; 防腐

中图分类号: TG174.42

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)07-0114-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.07.021

## Feasibility of Replacing Inhibitor for Chilled Water System of Nuclear Power Plant

XIE Jian-li<sup>1</sup>, LU Ye-ting<sup>2</sup>, WU Li-xin<sup>2</sup>

(1. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou 215004, China;

2. China National Nuclear Corporation, Haiyan 314303, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To assess the influence of replacing inhibitors on the anti-corrosion treatment of chilled water system. **Methods** This paper studied the changes of corrosion resistance of A106B and B10 in the replacement process from the original inhibitor ( $\text{NaNO}_2$ - $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ ) to a new inhibitor ( $\text{LiOH}$ - $\text{N}_2\text{H}_4$ ) by the means of electrochemical tests and surface analysis methods, such as linear polarization and AC impedance tests, SEM and XRD. **Results** The electrochemical results showed that the  $R_p$  value and  $R_t$  value of two pipe materials increased gradually while the  $I_{\text{corr}}$  value decreased in the replacement process of inhibitors. The surface analysis results showed that there was little rust on metal surfaces in original inhibitor solution, the rust layers were formed during the replacement process of inhibitors, and the rust layers were not thickened in the new inhibitor solution. **Conclusion** The original  $\text{NaNO}_2$ - $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  medium had a good protective effect on the metal above by inhibiting anodic corrosion process. A106B carbon steel suffered a uniform corrosion and a rust layer formed on its surface, while B10 copper-nickel alloy had a lesser degree of corrosion when the inhibitor was replacing, indicating the anti-corrosion property of the two materials was not decreased. The novel

收稿日期: 2015-02-13; 修订日期: 2015-05-07

Received: 2015-02-13; Revised: 2015-05-07

作者简介: 谢建丽(1988—), 女, 四川人, 硕士, 工程师, 主要从事核电厂水处理及金属防腐研究。

**Biography:** XIE Jian-li(1988—), Female, from Sichuan, Master, Engineer, Research focus: water treatment and metal corrosion control.

LiOH-N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> medium, which can enhance the compactness of rust, was able to reduce the corrosion rate of rusted metal and increase the corrosion resistance of metals. It is feasible and operable to replace NaNO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> with LiOH-N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> medium for the anti-corrosion treatment of chilled water system of nuclear power plant.

**KEY WORDS:** nuclear power plant; chilled water system; inhibitor; LiOH-N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> treatment; anti-corrosion

某核电厂装机容量为2×728 MW,其闭式循环冷却水系统(RCW系统)以除盐水为补充水源,以LiOH-联氨处理法调节水质、降低金属腐蚀。当夏季设备冷却水源切换后,工作人员监测到RCW系统中Fe<sup>2+</sup>含量明显增高,同时检测出低含量的NO<sub>2</sub><sup>-</sup>;研究认为NO<sub>2</sub><sup>-</sup>加剧了RCW系统材质的腐蚀<sup>[1-2]</sup>。经查明,该污染离子来自于以NaNO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>为缓蚀剂的冷冻水系统泄漏。核电厂冷冻水系统为通风系统冷却盘管提供的7℃冷冻水,据调查,该系统并非仅能采用以NaNO<sub>2</sub>为主的缓蚀技术,国外有同型号机组的冷冻水系统采用吗啉-联氨处理,运行效果良好。鉴于此,为避免冷却水源切换时,因不同性质的缓蚀剂漏入RCW系统而产生腐蚀,拟更换冷冻水系统现用缓蚀剂。因RCW系统与冷冻水系统的主要材质类似<sup>[1]</sup>,推测冷冻水系统也可用RCW系统的LiOH-联氨处理法进行防腐。目前,已测试了LiOH-联氨对冷冻水系统的良好缓蚀效果<sup>[3]</sup>,论证了该防腐方法的初步可行性。

现场冷冻水系统采用NaNO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>处理多年,管材内壁已形成明显的氧化性锈层<sup>[4]</sup>;而据报道,碳钢等金属在LiOH介质中将形成还原性锈层<sup>[5]</sup>。当冷冻水系统更换缓蚀剂(从NaNO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>介质逐渐置换为LiOH-联氨介质)时,系统运行工况将从氧化性转变为还原性,此时金属原锈层可能因晶变应力或体积变化而剥落,其耐蚀性也可能变化<sup>[6]</sup>。因此,有必要模拟现场面临的该缓蚀剂置换过程,评价其对金属耐蚀性的影响<sup>[7]</sup>。

本文以A106B碳钢、B10铜镍合金等两种冷冻水系统主要材质为研究对象,采用线性极化、交流阻抗等电化学方法以及扫描电镜、X射线衍射等表面分析技术,研究上述金属在NaNO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>介质向LiOH-联氨介质置换过程的耐蚀性及锈层特性变化,进而全面地评估核电厂冷冻水系统更换缓蚀剂的可行性。

## 1 实验

实验材质为A106B碳钢及B10铜镍合金,试片尺寸为40 mm×13 mm×2 mm;电化学电极由上述试片

切割而成,经环氧树脂封装,工作面积为1 cm<sup>2</sup>。所有试片及电极均依次经0#—6#金相砂纸逐级打磨,用无水乙醇及丙酮擦洗后放入干燥器中备用。

实验包括3个阶段:第一阶段(预膜阶段),将试片及电极浸入装有NaNO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>介质(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>质量浓度为1 g/L)的烧杯中,密封静置,预膜20 d;第二阶段(换水阶段),以不除氧的除盐水为补充水,每天更换50%溶液量,连续换水15 d,直至NO<sub>2</sub><sup>-</sup>质量浓度小于100 μg/L;第三阶段(后成膜阶段),在试验水样中加入3 μg/L联氨及适量LiOH,调节溶液pH为10,鼓氮除氧,密封浸泡20 d。期间进行电化学测试及氧化膜评估。试验周期共55 d,水浴温度为30℃。

电化学实验使用PGSTAT128N型Autolab电化学工作站,采用三电极体系测量,工作电极为上述金属电极,参比电极为带luggin毛细管的饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极。

电化学测试条件:开路电位测试时间为1 h;线性极化扫描范围为-0.02~0.02 V(vs. 开路电位),扫描速度为0.1 mV/s;交流阻抗在自腐蚀电位下进行,测试频率为100 kHz~0.01 Hz;强极化曲线扫描范围为-0.2~0.4 V(vs. 开路电位),扫描速度为0.33 mV/s。测试介质为工作电极浸泡液,水温(30±1)℃。

对不同水质条件下浸泡成膜的金属试片,进行形貌及成分分析。扫描电镜、X射线衍射分析委托苏州大学分析测试中心进行,仪器型号分别为荷兰FEI公司QUANTA 200及日本岛津公司XRD-6000。其中,截面形貌分析时,将试样以环氧树脂封装,垂直切割后进行SEM拍照;XRD扫描范围为5°~90°,扫描步长为0.05°。

## 2 结果与讨论

### 2.1 电化学测试

#### 2.1.1 线性极化分析

对经NaNO<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>预膜、换水、LiOH-联氨后成膜的A106B碳钢、B10铜镍合金进行线性极化测量,结果如图1所示。

总体上,A106B的极化电阻 $R_p$ 低于B10,表明后

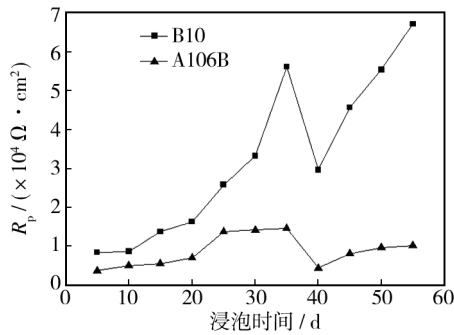


图1 A106B及B10电极 $R_p$ 值随浸泡时间变化曲线

Fig.1 Changing curves of  $R_p$  value of A106B and B10 over immersion time

者耐蚀性优于前者;两者的 $R_p$ 变化趋势类似,说明具有相似的成膜过程。在预膜阶段(前20 d), $R_p$ 均逐渐增大,表明两种材质在 $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$ 溶液中缓慢成膜,耐蚀性均逐渐增强<sup>[8]</sup>。在换水阶段(21~35 d), $R_p$ 显著增大,鉴于该过程中缓蚀剂质量浓度迅速降低, $R_p$ 增大的原因主要是介质被稀释,溶液电阻大幅增大。在新缓蚀剂成膜过程(36~55 d), $R_p$ 先略有下降,这是因新药剂加入后,溶液电阻减小,使实测 $R_p$ 降低;随着成膜时间的延长, $R_p$ 逐渐增大,表明新加入的LiOH-联氨介质能够继续增强材质的耐蚀性能。

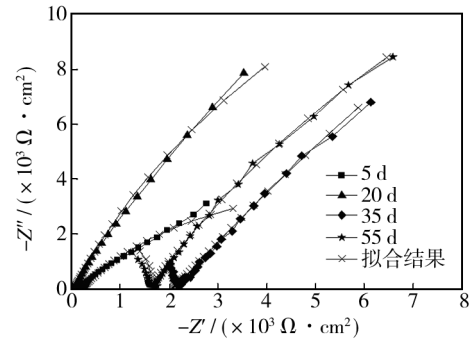
换水后(第40 d)的 $R_p$ 值接近甚至高于换水前(第20 d),这说明换水过程中低质量浓度的 $\text{NO}_2^-$ 不会对A106B及B10材质造成明显损害。同时,新缓蚀剂成膜后的 $R_p$ 较原缓蚀剂预膜时的明显增大,说明LiOH-联氨处理法较 $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$ 处理法对A106B碳钢及B10铜镍合金具有更好的保护效果。

### 2.1.2 交流阻抗分析

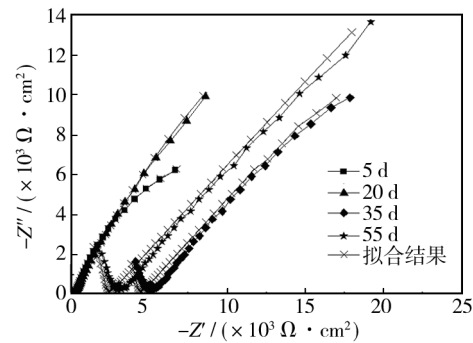
对经 $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$ 预膜、换水、LiOH-联氨后成膜的A106B碳钢、B10铜镍合金进行交流阻抗测量,结果如图2所示。

在整个缓蚀剂更换过程中,A106B及B10两种材质的阻抗谱变化情况较为相似。在 $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$ 预膜阶段,两种材质的阻抗谱均为单容抗弧;经换水及LiOH-联氨后成膜,其阻抗谱在高频段出现了代表锈层的容抗弧,呈双容抗弧特征,表明材质表面积聚有锈层<sup>[9]</sup>。将上图中Nyquist曲线以图3所示等效电路解析<sup>[10]</sup>,结果见表1。

$\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$ 预膜阶段(前20 d),两种材质的传递电阻( $R_t$ )值均增大,表明该缓蚀剂对上述金属具有明显的成膜效果;此时未出现锈层电阻。经换水



a A106B



b B10

图2 不同浸泡周期后电极的交流阻抗

Fig.2 EIS curves of (a) A106B and (b) B10 with different immersion time

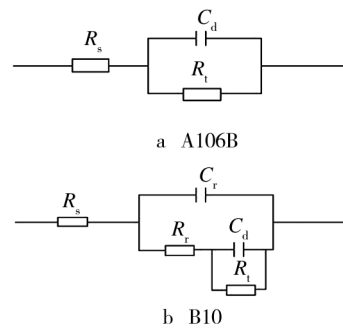


图3 电极等效电路

Fig.3 Equivalent circuits of electrodes

表1 Nyquist曲线解析结果

Tab.1 Analytical results of Nyquist curves

材质	周期 /d	$R_s /$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$R_t /$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$R_i /$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
A106B	5	216		11 313
	20	125		47 664
	35	2576	1859	58 116
	55	1650	4085	62 491
B10	5	259		21 645
	20	269		74 323
	35	4929	4866	89 217
	55	2710	7181	124 990

过程(20~35 d),阻抗谱中出现了锈层电阻,说明换水阶段金属存在腐蚀行为,腐蚀产物积聚于表面形成了锈层;同时,传递电阻  $R_t$  未见变小,说明该腐蚀成膜过程并未对金属的耐蚀性造成明显损害。在 LiOH-联氨后成膜阶段(35~55 d),两种材质的传递电阻均继续增大,表明新缓蚀剂能够对带锈金属起保护作用,使其耐蚀性能得到进一步增强<sup>[11]</sup>。上述阻抗测量结果与线性极化结果相符。

2.1.3 强极化分析

对经  $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$  预膜、换水、LiOH-联氨后成膜的 A106B 碳钢、B10 铜镍合金进行强极化测量,结果见图 4 及表 2。

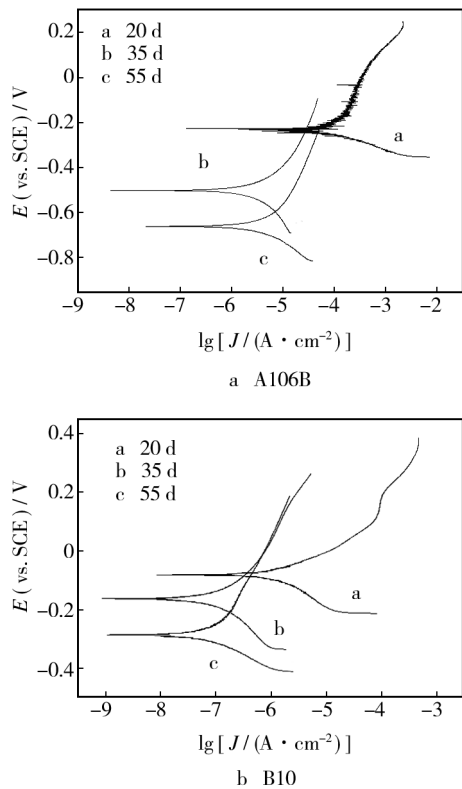


图 4 不同浸泡周期后电极的极化曲线

Fig. 4 Polarization curves of (a) A106B and (b) B10 with different immersion time

表 2 极化曲线解析结果  
Tab.2 Analytical results of polarization curves

材质	周期 /d	$E_{\text{corr}}$ /V	$J_{\text{corr}}$ / $(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	Tafel 斜率/ $(\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1})$	
				阳极	阴极
A106B	20	-0.225	12.5	90.8	50.9
	35	-0.500	8.65	415	633
	55	-0.650	9.55	595	261
B10	20	-0.081	0.808	80.6	98.2
	35	-0.163	0.192	244	255
	55	-0.285	0.127	368	124

由图 4 及表 2 可知,整个缓蚀剂更换过程中,A106B 及 B10 材质的极化曲线变化趋势相似。20 d  $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$  预膜后的极化曲线呈明显的阳极控制,这是因为  $\text{NaNO}_2$  及  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  均为阳极型缓蚀剂,主要抑制腐蚀反应的阳极过程。经 15 d 的换水过程后,电极腐蚀电位降低,腐蚀电流密度减小,阴阳极表观 Tafel 斜率均明显增大,表明腐蚀过程的阴阳极均受到了抑制;这可能是换水过程中溶液电阻增大,导致阴阳极腐蚀反应难度加大,同时也说明换水过程并未对金属材质造成明显损害。经 20 d LiOH-联氨处理后成膜,电极腐蚀电位继续下降,腐蚀电流密度仍保持在较低水平,阳极 Tafel 斜率进一步增大,而阴极 Tafel 斜率变化不大。这说明经 LiOH-联氨处理后成膜,金属有被钝化的趋势,故阳极反应难度进一步加大。对比图 4 中 20 d 和 55 d 后的极化曲线可知,电极的腐蚀电流密度  $J_{\text{corr}}$  值明显减小。这表明 LiOH-联氨处理法能够对带锈层的 A106B 及 B10 材质继续发挥保护作用,且防腐效果更佳。

2.2 表面锈层分析

2.2.1 SEM 分析

对经  $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$  预膜、换水、LiOH-联氨处理后成膜的 A106B 碳钢、B10 铜镍合金进行 SEM 拍照,结果见图 5—6。

由图 5 可见,A106B 在  $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$  介质中

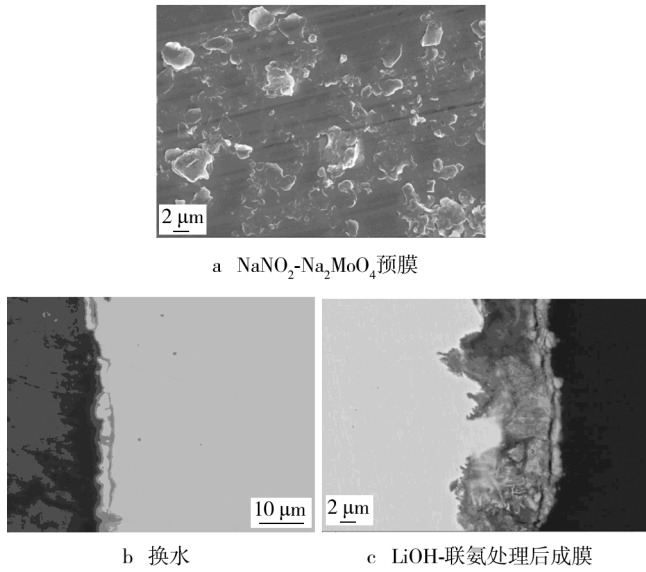


图 5 A106 B 经不同阶段浸泡后的锈层形貌

Fig.5 Morphology of rust layer of A106 B at each stage of immersion;a) Pre-film with  $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$ ; b) Inhibitor replacement; c) Film with  $\text{LiOH-N}_2\text{H}_4$



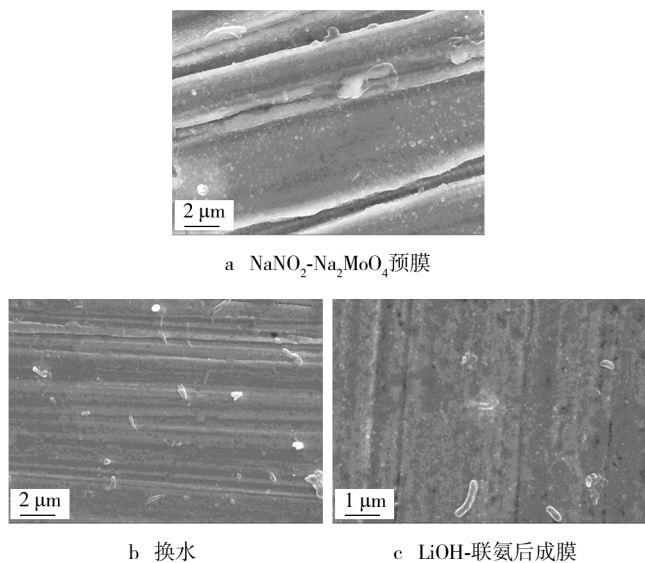


图6 B10 经不同阶段浸泡后的表面形貌

Fig. 6 Surface morphology of B10 at each stage of immersion: a) Pre-film with  $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$ ; b) Inhibitor replacement; c) Film with  $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$

预膜 20 d 后,其表面腐蚀产物较少,试片打磨痕迹仍然明显,说明该介质对 A106B 有较好的保护效果。经 15 d 的换水过程后,A106B 表面积聚了较明显的腐蚀产物层,其分布均匀,未见有点蚀等局部腐蚀;这说明 A106B 材质在换水时发生均匀腐蚀,形成了锈层,这与交流阻抗测量结果相符。经 20 d 的 LiOH-联氨处理后成膜,A106B 材质表面被致密的锈层覆盖,其形貌完整;另外溶液澄清,未观察到锈层脱落现象;结合电化学测量结果可知,该致密锈层能够对 A106B 材质起保护作用。

由图 6 可见,B10 经  $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$  介质预膜 20 d 后,表面几乎无腐蚀产物。经 15 d 的换水过程后,B10 表面腐蚀产物未见明显增多,但磨痕有所变浅,说明该材质表面形成了一层较薄的腐蚀产物层,这与交流阻抗测试结果一致。B10 材质在换水过程腐蚀并不明显,其耐蚀性能要优于 A106B 材质。之后,继续经 20 d 的 LiOH-联氨处理后成膜,B10 材质表面附着较明显的致密灰色膜层,未见明显腐蚀产物,表明 LiOH-联氨介质能够在 B10 材质表面成膜,对其具有显著的防腐效果。

### 2.2.2 XRD 分析

对经  $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$  预膜、换水、LiOH-联氨处理后成膜的 A106B 碳钢、B10 铜镍合金进行表面成分的 XRD 检测,结果见图 7—8。

由图 7 可见,在  $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$  介质中预膜 20

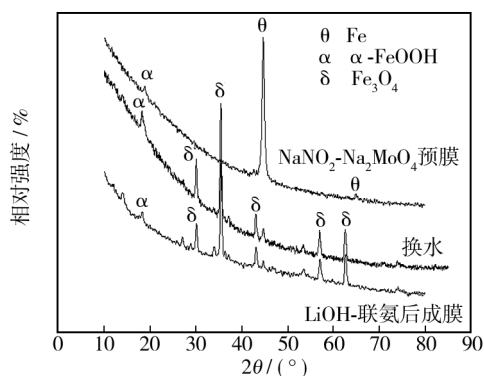


图7 A106B 在不同阶段的锈层 XRD 结果

Fig. 7 XRD results of A106B at each stage of immersion

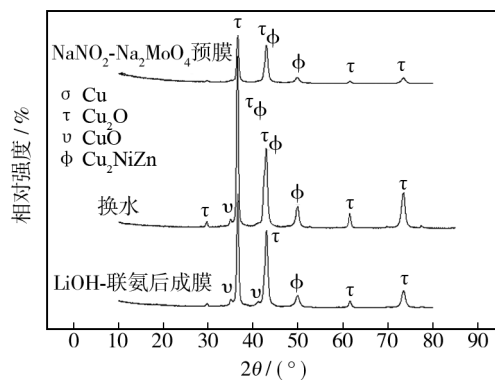


图8 B10 不同阶段的锈层 XRD 结果

Fig. 8 XRD results of B10 at each stage of immersion

d 后,A106B 表面膜层主要成分为 Fe,另外有少量的 FeOOH;这说明该介质中材质腐蚀程度很小,形成的氧化物较少,故 XRD 检测出明显的基体成分。在换水过程中,A106B 材质表面出现了新特征峰,定性为  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ <sup>[12-14]</sup>,表明换水过程中金属发生腐蚀,产生了新锈层,这与 SEM 结果一致。在 LiOH-联氨介质中成膜 20 d 后,A106B 材质的 XRD 图谱无明显变化,未出现新的强特征峰,说明锈层组分变化不大,腐蚀发展(腐蚀产物转化)过程不明显;电化学及 SEM 分析表明,LiOH-联氨介质可通过对带锈 A106B 材质起保护作用,而抑制其进一步腐蚀。

由图 8 可见,B10 材质在  $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$  介质中预膜 20 d 后,其表面膜层检测到  $\text{Cu}_2\text{O}$  及基体成分,说明  $\text{NaNO}_2\text{-Na}_2\text{MoO}_4$  介质对 B10 材质防腐效果较好,表面腐蚀产物层很薄。而在换水过程中,膜层图谱中出现了较小的  $\text{CuO}$ <sup>[15]</sup> 特征峰,说明 B10 在换水过程中也有很低的腐蚀成膜过程,这与交流阻抗及 SEM 结果相符。加入 LiOH-联氨成膜 20 d 后,膜层 XRD 图谱未发生明显变化,说明锈层组分变化不大,

腐蚀发展(腐蚀产物转化)过程不明显,即新缓蚀剂介质可以对覆盖锈层的 B10 材质起保护作用,阻碍腐蚀过程的继续进行。

### 3 结论

A106B 及 B10 材质在整个缓蚀剂置换过程中,其耐蚀性总体上得到加强。 $\text{NaNO}_2$ - $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  介质能抑制阳极腐蚀过程,对金属保护效果较好。在换水过程中,A106B 材质发生了较明显的均匀腐蚀,形成了锈层,而 B10 材质腐蚀程度较小;两种材质均无点蚀等局部腐蚀,且其耐蚀性能并未见明显减弱。 $\text{LiOH}$ -联氨介质可对带锈层金属继续起保护作用,使 A106B 锈层更为致密,B10 表面形成了偏灰色的保护性膜层,从而进一步增强了耐蚀性。

$\text{LiOH}$ -联氨介质可以对带锈层金属起保护作用,且防腐效果甚至优于原  $\text{NaNO}_2$ - $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  介质。研究表明核电厂冷冻水系统采用  $\text{LiOH}$ -联氨代替  $\text{NaNO}_2$ - $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  作为新缓蚀剂可行。

### 参考文献

- [1] 刘斌,金凯峰,谢建丽,等.低浓度亚硝酸盐对 A106B 碳钢材料腐蚀的影响[J].腐蚀与防护,2013,34(3):228—231.
- [2] LIU Bin, JIN Kai-feng, XIE Jian-li, et al. Effect of Low Concentration Nitrite on Corrosion of A106B Carbon Steel[J]. Corrosion and Protection, 2013, 34(3): 228—231.
- [3] KHOMAMI M N, DANAEI I, ATTAR A A, et al. Effects of  $\text{NO}_2^-$  and  $\text{NO}_3^-$  Ions on Corrosion of AISI 4130 Steel in Ethylene Glycol Plus Water[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2012, 65(3): 303—311.
- [4] 谢建丽,刘涛,袁曹龙.  $\text{LiOH}$ /联氨处理法用于冷冻水系统防腐的可行性[J].广州化工,2013,41(22):90—94.
- [5] XIE Jian-li, LIU Tao, YUAN Cao-long. The Feasibility of Corrosion Control of Chilled Water System using  $\text{LiOH}$  and Hydrazine [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013, 41(22): 90—94.
- [6] 祁鲁梁,李永存,张莉.水处理药剂及材料实用手册[M].北京:中国石化出版社,2006.
- [7] QI Lu-liang, LI Yong-cun, ZHANG Li. Practical Handbook of Water Treatment Chemicals and Materials[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2006.
- [8] CHAUHAN P K, SHARMA S K, GADIYAR H S. XPS Study of Oxides on Carbon Steel in  $\text{LiOH}$  at 250 °C [J]. Corrosion Science, 1981, 21(7): 505—515.
- [9] 杨志成,田志强.电化学方法评定转锈涂层的耐蚀性能[J].表面技术,2014,43(2):66—71.
- [10] YANG Zhi-cheng, TIAN Zhi-qiang. Assessment of Corrosion Resistance of Rust-transforming Coatings using Electrochemical Method [J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 66—71.
- [11] 谢建丽,金凯峰,蒋晓斌,等.带锈碳钢在稀  $\text{NaCl}$  溶液中的腐蚀行为[J].表面技术,2014,43(2):55—59.
- [12] XIE Jian-li, JIN Kai-feng, JIANG Xiao-bin, et al. Corrosion Behavior of Rusted Carbon Steel in Diluted  $\text{NaCl}$  Solution [J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 55—59.
- [13] 周年光,查方林,冯兵,等.电化学频率调制技术在 Q235 钢/ $\text{NaCl}$  腐蚀体系中的应用[J].中国腐蚀与防护学报,2014,34(5):445—450.
- [14] ZHOU Nian-guang, ZHA Fang-lin, FENG Bing, et al. Application of Electrochemical Frequency Modulation for Study of Q235 Steel Corrosion in  $\text{NaCl}$  Solution [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2014, 34(5): 445—450.
- [15] BAI Z Q, CHEN C F, LU M X, et al. Analysis of EIS Characteristics of  $\text{CO}_2$  Corrosion of Well Tube Steels with Corrosion Scales [J]. Applied Surface Science, 2006, 252: 7578—7584.
- [16] 邹妍,王佳,郑莹莹.锈层下碳钢的腐蚀电化学行为特征[J].物理化学学报,2010,26(9):2361—2368.
- [17] ZOU Yan, WANG Jia, ZHENG Ying-ying. Electrochemical Corrosion Behaviors of Rusted Carbon Steel [J]. Acta Physico-chimica Sinica, 2010, 26(9): 2361—2368.
- [18] 田永常,方小红,潘秉锁,等.  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  对铁电沉积过程的影响[J].表面技术,2014,43(3):54—58.
- [19] TIAN Yong-chang, FANG Xiao-hong, PAN Bing-suo, et al. Effect of  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  on the Cathodic Process of Iron Electrodeposition [J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 54—58.
- [20] CASTANO J G, BOTERO C A, RESTREPO A H, et al. Atmospheric Corrosion of Carbon Steel in Colombia [J]. Corrosion Science, 2010, 52: 216—223.
- [21] HU J Y, CAO S A, YIN L, et al. Study on the Corrosion Behavior of Q235A Carbon Steel in Product Water of Seawater [J]. Anti-corrosion Methods and Materials, 2012, 59: 305—310.
- [22] 邹妍,郑莹莹,王燕华,等.低碳钢在海水中的阴极电化学行为[J].金属学报,2010,46(1):123—128.
- [23] ZOU Yan, ZHENG Ying-ying, WANG Yan-hua, et al. Cathodic Electrochemical Behaviors of Mild steel in Seawater [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(1): 123—128.
- [24] XIAO W Z, HONG S K, TANG Z J, et al. Effects of Blending on Surface Characteristics of Copper Corrosion Products in Drinking Water Distribution Systems [J]. Corrosion Science, 2007, 49: 449—468.