

科研与开发

阴离子交换膜(AEM)水电解极板镍镀层耐蚀性能研究

董云泽¹, 王挺², 刘浩然³, 廖承亮¹, 商雷⁴, 张学元^{5*}, 毛庆^{1*}

(1.大连理工大学化工学院, 辽宁大连 116081; 2.中国核工业中原建设有限公司, 北京 100070;
3.大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁大连 116081; 4.辽宁华亿控制设备制造有限公司,
辽宁鞍山 114020; 5.广东腐蚀科学与技术创新研究院, 广东广州 510535)

摘要:阴离子交换膜(AEM)水电解制氢技术是绿氢生产的关键技术,而AEM电解槽双极板镀层的耐腐蚀性直接影响AEM电解槽的稳定性与安全性。以氨基磺酸镍为主盐,对比不锈钢表面经化学镀、连续恒流电镀、分次恒流电镀制备的镍基复合镀层的结构与耐蚀性。研究结果表明:冲击镍涂层耦合连续电镀镍形成的复合镀层厚度最大(15.38 μm),且表面最平整,腐蚀电流低至 $1.175 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$,在模拟碱性富氧工况下,该镀层展现出优异的钝化能力与耐蚀性,是最适合作为AEM电解槽双极板的镀层工艺。

关键词:阴离子交换膜(AEM);水电解;双极板;镍镀层;耐蚀性

中图分类号:TG174.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)07-0095-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.018

Research on corrosion resistance of nickel plating of water electrolytic plate of anion exchange membrane (AEM)

DONG Yun-ze¹, WANG Ting², LIU Hao-ran³, LIAO Cheng-liang¹, SHANG Lei⁴,
ZHANG Xue-yuan^{5*}, MAO Qing^{1*}

(1.School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, China;

2.China Nuclear Industry Zhongyuan Construction Co., Ltd., Beijing 100070, China;

3.School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, China;

4.Liaoning Huayi Control Equipment Manufacturing Co., Ltd., Anshan 114020, China;

5.Guangdong Institute of Corrosion Science and Technology Innovation, Guangzhou 510535, China)

Abstract:Anion exchange membrane (AEM) water electrolysis is a key technology for green hydrogen production, and the corrosion resistance of the bipolar plate coating in AEM electrolyzer directly affects the stability and safety of AEM electrolyzer. In this study, nickel sulfamate was used as the main salt to compare the structure and corrosion resistance of nickel-based composite coatings prepared by electroless plating, continuous constant-current electroplating and fractional constant-current electroplating. The results show that the composite coating formed by the impact nickel coating coupled with continuous electroplating exhibits the highest thickness (15.38 μm), the smoothest surface, and the lowest corrosion current with a value of $1.175 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$. Under simulated alkaline oxygen-rich conditions, this coating demonstrated excellent passivation capability and corrosion resistance, making it the most suitable plating process for bipolar plates in AEM electrolyzers.

Key words:anion exchange membrane (AEM); water electrolysis; bipolar plate; nickel plating; bipolar plate corrosion resistance

氢能是一种零碳能源载体,是实现“双碳”目标的核心战略支撑,电解水制氢作为生产绿氢的关键技术,在国家新兴能源体系中极具发展潜力^[1]。当前,电解水制氢主要有碱性水电解(ALK)、质子交换膜(PEM)水电解、阴离子交换膜(AEM)水电解以及固体氧化物水电解(SOEC)4种^[2-5],其中

AEM水电解技术^[6]耦合了ALK电解技术的低成本与PEM电解的高性能,得到了研究人员越来越多的关注^[7]。

AEM电解池核心结构主要包括双极板(带有流场结构)、气体扩散电极、与AEM,其具体工作原理如图1所示,在运行过程中,电解池阳极腔通入

收稿日期:2025-09-29;修回日期:2026-05-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(22179016)

作者简介:董云泽(2001-),男,硕士生,研究方向为AEM水电解失效诊断, dutdyz@mail.dlut.edu.cn;张学元(1969-),男,博士,研究方向为电池、燃料电池、太阳能电池腐蚀、涂层等相关电化学领域,通讯联系人, jzhang@gamry.com;毛庆(1979-),男,博士,副教授,研究方向为PEMFC膜电极与系统建模及在线谱学诊断、PEM/AEM水电解制氢、CO₂电化学转化制备燃料与高附加值化学品,通讯联系人, maoqing@dlut.edu.cn。

KOH 水溶液,在阳极表面, OH^- 发生电化学析氧反应(OER),通过 AEM 渗透过去至阴极的水分子得电子发生析氢,产生反应生成的 OH^- 通过 AEM 电渗的方式到达迁移至阳极^[8]。值得注意的是,尽管 AEM 电解制氢系统阳极处于碱性环境,但在高电场作用下,铁基双极板易被氧化成高铁酸盐而流失^[9],这一现象会对 AEM 电解槽的长期稳定运行构成严重安全隐患。事实上,当前技术成熟度较高的 ALK 电解槽已多次出现了不锈钢双极板腐蚀而引发的各类故障^[10]。针对这一问题,Antunes 等^[11]提出:基于耐久性和成本考虑,在不锈钢双极板表面制备兼具导电性和耐蚀性的镀层,是当前最具经济性的解决方案。

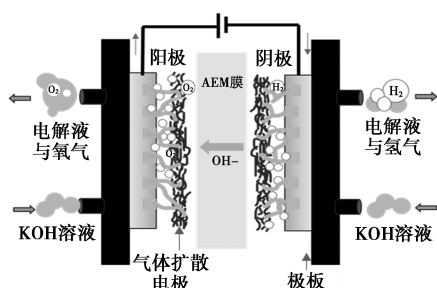


图 1 AEM 水电解过程示意图

在碱性介质中,镍^[12]具备优异的耐腐蚀性^[13],因此镍基涂层可有效缓解铁基双极板在碱性、高电位工况下的腐蚀问题,Serebrennikova 等^[14]研究了镍在碱性电池中的耐蚀性,发现镍表面在碱性溶液、不同电位下,会形成 NiO 、 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 、 NiOOH 等多种不可溶氧化镍产物,相比于不锈钢表面易生成可溶性的高铁酸盐流失,镍的耐蚀性更具应用优势。Ramdane 等^[15]以硫酸镍为主盐,对比分析了分别采用计时电流方法与扫描伏安法制备的 304 不锈钢表面镍涂层耐蚀性差异。研究结果表明:通过计时电流法制备的镍涂层,因具有更小的 Ni 晶粒尺寸和更低的表面粗糙度,在 0.1 mol/L NaOH 和质量分数 10% 的 NaCl 的混合溶液中表现出更优的耐蚀性。

表 1 3 种镍复合镀层工艺设计

	冲击镍+化学镀镍(X1)	冲击镍+连续电镀镍(X2)	冲击镍+分次电镀镍(X3)
基底	304 不锈钢		
前处理	除油 10 min, 酸洗 1 min		
镀冲击镍-镀液配方	主盐:盐酸 200 mL·L ⁻¹ , 氯化镍 250 g·L ⁻¹		
镀冲击镍-电流密度/(A·dm ⁻²)	5		
镀冲击镍-时间/min	3		
后续镀镍-镀液配方	氨基磺酸镍 350 g·L ⁻¹ 、氯化镍 15 g·L ⁻¹ 、次磷酸钠 441 g·L ⁻¹	氨基磺酸镍 350 g·L ⁻¹ 、氯化镍 15 g·L ⁻¹ 、硼酸 40 g·L ⁻¹	氨基磺酸镍 350 g·L ⁻¹ 、氯化镍 15 g·L ⁻¹ 、硼酸 40 g·L ⁻¹

杨富国等^[16]对基于硫酸镍主盐的不锈钢化学镀镍工艺进行了参数优化,确定最优工艺参数为:硫酸镍 25 g/L、表面活性剂 0.1 g/L、温度 85℃、pH 为 4.6,镀层沉积速率为 16.3 μm/h,并且弯曲、热浸等实验验证合格,为开发化学镀镍工艺提供了参考。张伟华^[17]以氨基磺酸镍为主盐,系统考察了电流密度、镀液温度、镀液 pH 和搅拌速率对镍镀层耐蚀性的影响,得出最优工艺参数为:电流密度为 8 A/dm²,镀液温度 45℃,镀液 pH 5.0,搅拌速率 0.5 m/s,此时镀层表面粗糙度为 0.63 μm。Cheng 等^[18]进一步对比研究了以硫酸镍、和氨基磺酸镍电沉积制备的镀层的耐蚀性,结果显示:氨基磺酸镍体系制备的镀层耐蚀性优于硫酸镍体系。机理分析表明:氨基磺酸镍体系中铵离子的存在,会使镍离子在电沉积过程中形成镍铵配合物,该配合物相比于游离的镍离子更易吸附于基底表面,最终导致两种体系下镀层耐蚀性的差异。

综上可知,不锈钢基底镍镀层(作为双极板材料)的耐蚀性能,不仅与镍基主盐的类型密切相关,还受制备工艺影响显著。然而,当前针对 AEM 电解槽实际运行工况,依托氨基磺酸镍主盐开发适配的镀层制备工艺,相关研究尚未开展。为此,本研究将围绕氨基磺酸镍的电镀工艺的设计展开,重点对比冲击镍镀层分别于化学镀、连续计时电位电镀和分次计时电位电镀耦合形成的复合镍镀层的耐蚀性能,在模拟 AEM 电解槽实际工况的环境中评价各复合镀层的耐蚀性能,分析导致不同镀层腐蚀性能差异的内在机制,优选出更适配于水电解(AEM)双极板的镀层制备工艺。

1 材料和方法

1.1 样品制备

双极板基体选用 304 不锈钢试片(10 mm × 50 mm),表 1 给出了 3 种不同的复合镀层工艺的制备细节。

续表			
	冲击镍+化学镀镍(X1)	冲击镍+连续电镀镍(X2)	冲击镍+分次电镀镍(X3)
后续镀镍-温度/℃	85~90	55	55
后续镀镍-电流密度/(A·dm ⁻²)	化学沉积,无需外电流	2	2
后续镀镍-时间及方式	连续 50 min(无停顿)	连续 50 min(无停顿)	先 20 min→停止 3 min→再 15 min →停止后再 15 min

将 3 种复合镀层样品用无水乙醇,再用去离子水冲洗,烘干备用。使用环氧树脂对样品封样,保留 1.0 cm×1.0 cm 的测试面积。

1.2 表面形貌及截面形貌测试

将不锈钢镍镀层样品切割成 0.3 cm×0.3 cm,通过 JSM-7900F 型扫描电镜观察样品表面的微观形貌,对表面做能谱(EDS)分析获取关键元素的分布特征;进一步将样品截面固定于 LM 2000 型金相显微镜工作台上,通过显微观察明确镀层截面结构,并测量记录各样品的镀层厚度数据。

1.3 电化学测试

应用电化学工作站(Zennium,Zahner-Elektrik GmbH&Co.KG)开展复合镀层的耐蚀性测试。测试采用可控温单室三电极体系电解槽,其中铂片(1 cm²)作为对电极,汞/氧化汞电极作为参比电极(内置 1 mol/L KOH,标准电位 0.098 V),待测样品为工作电极,1 mol/L KOH 水溶液为电解液。使用低温循环水泵控制测试温度恒定在 25℃。

测试体系搭建完毕后,向电解槽中通入 O₂,流速为 50 SCCM,保持测试体系氧饱和状态,监测不同样品的开路电位直至开路电位稳定;采用动电位扫描方法获取不锈钢镍基复合涂层的极化曲线,电位测试范围为-0.25 V vs.OCP~2.0 V vs.RHE,扫速为 1 mV/s。应用电化学阻抗谱(EIS)获取开路环境下腐蚀介质中不锈钢镍基复合涂层样品的频响特征。其中,EIS 测试频域区间为 100 kHz~10 mHz,振幅为 10 mV。采用计时电位方法(1.5 V vs.RHE)获取模拟工况环境下样品的腐蚀电流。此时,在测试体系中通入 O₂,O₂ 流速为 50 SCCM,与 OCP 测试条件相同,测试时长为 24 h。

1.4 ICP-MS

在进行恒电位测试开始之前取电解液作为参照,在 3 种样品恒电位测试之后,分别对电解液进行取样 3 mL,进行电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)的测试,仪器型号为美国 PerkinElmer 制造的 AVIO 500。

2 结果与分析

2.1 镍复合镀层的表面结构与形貌

图 2(a)~(c)示出了复合镍镀层 X1(冲击镍+化学镀镍)、X2(冲击镍+连续电镀镍)及 X3(冲击镍+分次电镀镍)的截面的金相显微形貌,可以看出,3 种镀层的平均厚度分别为 5.38、15.38 μm 和 6.92 μm;镀层表面的微观形貌如图 2(d)~(f)所示。可见,3 种复合镀层的表面平整性差异显著。样品 X1 表面存在很多宽且不均匀的沟壑,并且存在微孔;样品 X3 表面平整度与孔缺陷均低于样品 X1,但与样品 X2 相比,仍存在数量更多的小孔。图 3 分别给出样品 X1、X2 和 X3 表面 EDS 解析结果。可见,样品 X1 镀层中有磷的存在;而后二者 X2 和 X3 基本为纯镍。另外,可以分辨出,X1 表面中的坑内位置,镍含

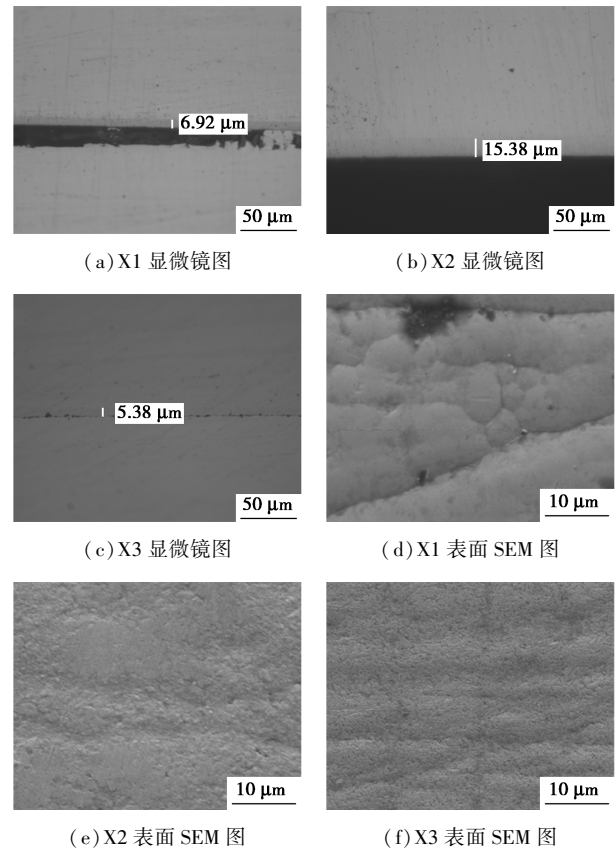


图 2 镀层金相显微镜图及表面 SEM 图

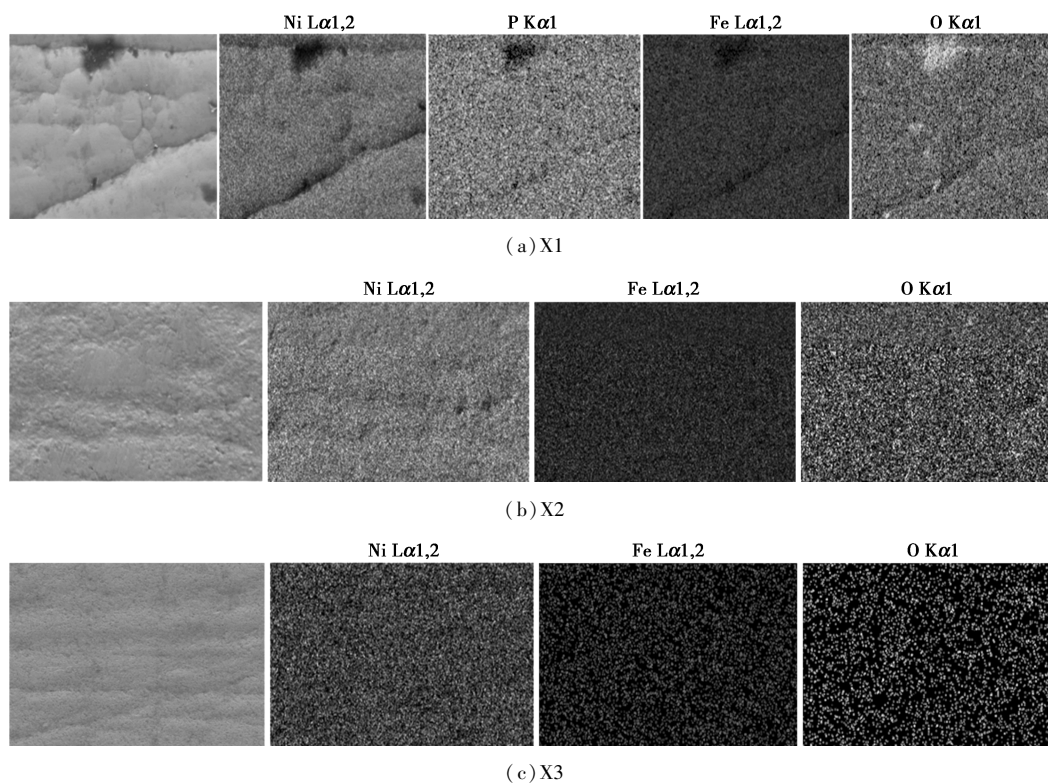


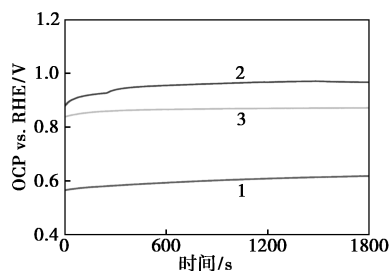
图 3 镀层表面 EDS 谱

量较低氧含量较高,表明该微区表面,并没有形成镀层;同时,可见 X2 与 X3 的面扫结果差异不大。

2.2 镍复合镀层的耐蚀性

2.2.1 开路电位测试

按 1.3 所述,在开始其他电化学测试之前先进行开路电位(OCP)测试,测试结果如图 4 所示。开始测试时,所有样品电位变正,10 min 后平稳,表明样品的表面反应在该条件下已达到动态平衡;可以看到连续电镀镍样品 X2 在该条件下的开路电位(0.966 V vs.RHE)较高于分次电镀镍工艺样品 X3(0.871 V vs.RHE),明显高于化学电镀镍工艺样品 X1(0.618 V vs.RHE),表明其热力学腐蚀倾向在所有样品中最低,更倾向于处在钝化状态,结合表面 EDS



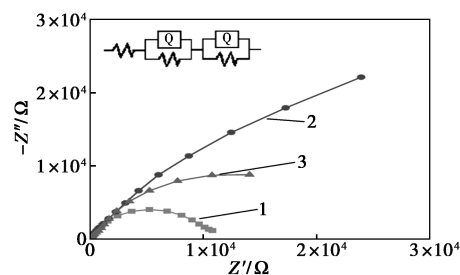
1—冲击镍+化学镀镍;2—冲击镍+连续电镀镍;
3—冲击镍+分次电镀镍

图 4 复合镍镀层样品的开路电位变化图

结果,可以推测出镍的含量决定了样品 OCP 的差异。

2.2.2 电化学交流阻抗谱测试

按照 1.3 中描述实验测试条件,对样品分别进行电化学阻抗测试,结果如图 5、表 2 所示。



1—冲击镍+化学镀镍;2—冲击镍+连续电镀镍;
3—冲击镍+分次电镀镍

图 5 所有复合镍镀层样品的 Nyquist 图

表 2 等效电路拟合结果

	$R_1/$ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$C_1/$ ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^2$)	$R_2/$ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$C_2/$ ($\mu\text{F} \cdot \text{cm}^2$)	$R_3/$ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
X1	1.841	112.7	307.4	960.9	1.031×10^4
X2	1.763	122.5	1635.0	316.8	4.827×10^4
X3	1.791	269.2	397.0	558.6	2.578×10^4

选用 $R(QR)(QR)$ 等效电路对 3 个样品的测试

结果进行拟合,得到溶液电阻 R_1 、涂层电阻 R_2 以及电荷转移电阻 R_3 ,并根据公式(1)计算得到等效电容。

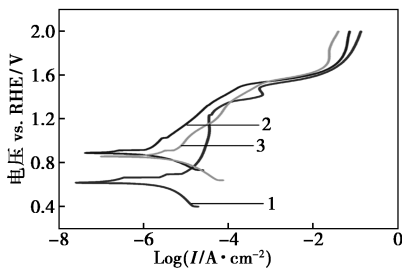
$$C_{eff} = Q^{1/n} \cdot R^{(1-n)/n} \quad (1)$$

其中, Q 为常相位角元件(CPE)的导纳常数, $\Omega^{-1} \cdot s^n$; n 为 CPE 指数,无量纲。

如图 5 所示,在阻抗图中,3 种工艺下的样品 Nyquist 图差异显著。由高频阻抗的变化可知,确定的电解质电阻(R_1)差异不大;中低频阻抗变化可以看到,样品 X2 的低频阻抗相比 X3 和 X1 明显更大,与拟合结果的 R_2 ($1\,637\,\Omega > 397\,\Omega > 307.4\,\Omega$)和 R_3 ($4.827 \times 10^4\,\Omega > 2.578 \times 10^4\,\Omega > 1.031 \times 10^4\,\Omega$)大小关系一致。根据电容计算结果, C_1 电容即涂层电容反映出样品 X1 和 X2 的致密性更好,孔隙率较低; C_2 电容即双电层电容,可以看到 X1 样品($960.9\,\mu F$)和 X3 样品($558.6\,\mu F$)较大,表明其表面粗糙程度较大,相对来说 X2 样品的表面平整度更好,这在 3 个样品的表面扫描电镜图中体现明显。

2.3 动电位极化测试

动电位极化曲线测试结果如图 6 所示。据此计算获得的自腐蚀电流和自腐蚀电位见表 3。可以看到,X2($0.904\,\text{V vs. RHE}$)和 X3($0.858\,\text{V vs. RHE}$)样品的自腐蚀电位高于 X1($0.612\,\text{V vs. RHE}$)样品,X1 样品自腐蚀电流($2.952 \times 10^{-6}\,\text{A/cm}^2$)也是所有样品中最大的。结合上述 SEM、金相显微测试结果,可以推测镀层的厚度、镀层表面均匀性影响了不同样品镀层的自腐蚀性能,最厚的 X2 样品自腐蚀



1—冲击镍+化学镀镍;2—冲击镍+连续电镀镍;
3—冲击镍+分次电镀镍

图 6 复合镍镀层样品动电位极化曲线测试结果图

表 3 复合镍镀层样品自腐蚀电位、电流结果表
(电位均为 RHE)

	$I_{corr}(25^\circ\text{C})/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$E_{corr}(25^\circ\text{C})/\text{V}$
X1	2.952×10^{-6}	0.612
X2	1.175×10^{-6}	0.904
X3	2.751×10^{-6}	0.858

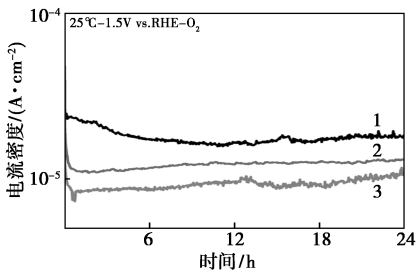
电流最小($1.175 \times 10^{-6}\,\text{A/cm}^2$),而厚度与 X1 相近的 X3 样品自腐蚀电流也与 X1 样品接近($2.751 \times 10^{-6}\,\text{A/cm}^2$)。

在制备 X2、X3 样品时发现,恒电流起始需要一段时间来建立电沉积的稳态条件,这体现在了恒电流时的电位突变上,而分次电镀理论上会使镀层变得更加均匀,但由于每次重新施加电流后需重新建立稳态,导致实际电沉积的时间不够长(小于连续电沉积 50 min),这一点从镀层厚度上有所体现,也说明这是 X3 样品耐蚀性能差于 X2 样品的原因。

2.4 AEM 电解工况环境镍复合镀层耐蚀性的电化学性能解析

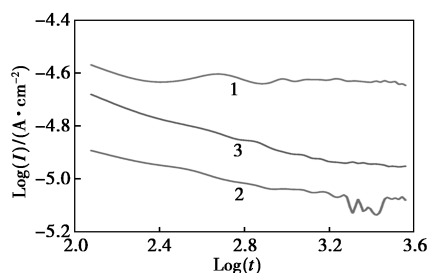
按照 1.3 所述,进行 3 种工艺下的样品在模拟实际工况下的 24 h 恒电位测试,测试结果代表了每种研究材料样品在该条件下的电化学行为,在恒电位分析期间获得的电流密度越高,样品耐蚀性越差^[19]。

从图 7 可以发现,3 种工艺下的样品在测试起始电流均较高,然后以较快速度减小,1 h 之后开始逐渐平稳,平稳之后电流大小关系与动电位极化和交流阻抗测试的结果对应,X2 样品的电流密度约为 $1 \times 10^{-5}\,\text{A/cm}^2$,小于 X3 样品的 $1.3 \times 10^{-5}\,\text{A/cm}^2$ 和 X1 样品的 $1.8 \times 10^{-5}\,\text{A/cm}^2$,表明在模拟工况条件下,X2 样品的耐蚀性能最优;开始测试后 1 h 内电流降低,是因为在碱性氧饱和条件下,镀层表面氧化物膜的形成起到了钝化作用。这层钝化膜能够有效隔绝金属与外部环境的接触,降低金属的腐蚀速率,而测试体系的高 pH 也有助于钝化膜的稳定。1 h 之后 3 种样品电流开始稳定,说明此时腐蚀反应与氧化物薄膜生成达到了平衡状态。文献^[20]中对于镍金属氧化膜生长进行了研究,发现镍金属在发生钝化时(即氧化膜生成) $\log(I) - \log(t)$ 之间有一定的线性关系,在此基础上对前 1 h 的数据进行 $\log(I) - \log(t)$ 作图,如图 8 所示,可以看到在前 1 h



1—冲击镍+化学镀镍;2—冲击镍+连续电镀镍;
3—冲击镍+分次电镀镍

图 7 复合镍镀层样品计时电位曲线



1—冲击镍+化学镀镍;2—冲击镍+连续电镀镍;
3—冲击镍+分次电镀镍

图8 复合镍镀层样品 $\log(I) - \log(t)$ 关系图

样品的 $I-t$ 之间也存在一定的线性关系,验证了上述推测。同时对 24 h 恒电位之后的电解液进行的 ICP-MS 测试结果表明,测试电解液中并未发现镍离子的存在,更加验证了镍金属复合镀层在高电位、高 pH、富氧的条件下生成了镍金属氧化物膜,有效抑制了腐蚀。

3 结论

本文选择了 3 种适合用于 AEM 水电解双极板的镍复合镀层工艺,冲击镍+化学镀镍、冲击镍+连续电镀镍以及冲击镍+分次电镀镍,并对这 3 种工艺下制备的镀层样品在 AEM 水电解工作的外部环境(高 pH、富氧)进行了自腐蚀性能测试、模拟实际运行的恒电位测试以及表面和截面的表征。经过测试分析,连续电镀镍复合镀层因表面平整度均匀性更好、缺陷更少、镀层厚度更厚,在自腐蚀性能测试和恒电位测试时有着更好的耐腐蚀性能,是这 3 种工艺中最适合应用在双极板上的工艺。同时,模拟 AEM 双极板实际运行条件下的 24 h 恒电位测试结合 ICP 测试结果表明,在短期测试内,镍镀层在高 pH 富氧、高电位条件下形成镍金属氧化物膜,无镍离子流失造成离子污染,有效抑制腐蚀。

参考文献

- [1] Vincent I, Bessarabov D. Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 1690–1704.
- [2] Millet P, Mbemba N, Grigoriev S A, et al. Electrochemical performances of PEM water electrolysis cells and perspectives [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(6): 4134–4142.
- [3] Kuleshov V N, Kuleshov N V, Grigoriev S A, et al. Development and characterization of new nickel coatings for application in alkaline water electrolysis [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(1): 36–45.
- [4] Gaikwad P S, Mondal K, Shin Y K, et al. Enhancing the Faradaic efficiency of solid oxide electrolysis cells: Progress and perspective [J]. *npj Computational Materials*, 2023, 9(1): 114–149.
- [5] 李勇勇, 马征, 冷志忠, 等. 固体氧化物燃料电池氧电极的研究进展 [J]. *陶瓷学报*, 2021, 42(4): 523–536.
- [6] Grigoriev S A, Fateev V N, Bessarabov D G, et al. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(49): 26036–26058.
- [7] 冯江涵, 宋钊. 阴离子交换膜电解池的研究进展 [J]. *化工进展*, 2023, 42(11): 1664–1687.
- [8] 钱圣涛, 何勇, 翁武斌, 等. 阴离子交换膜电解水制氢技术的研究进展 [J]. *新能源进展*, 2024, 12(1): 1–14.
- [9] 杨四齐, 夏先禹, 张利华, 等. 不同温度 Fe-H₂O 体系的溶解组分优势区域图和 Pourbaix 图 [J]. *矿冶*, 2023, 32(5): 64–73.
- [10] 周钧, 吴文宏. 压滤式电解水制氢电解槽极板腐蚀机理的研究 [J]. *舰船科学技术*, 2006, (2): 34–37.
- [11] Antunes R A, Oliveira M C L, Ett G, et al. Corrosion of metal bipolar plates for PEM fuel cells: A review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(8): 3632–3647.
- [12] 梁轩, 魏凯. 金属防护用镍基化学镀的研究进展 [J]. *电镀与涂饰*, 2020, 39(17): 1166–1170.
- [13] Huang L F, Hutchison M J, Santucci R J, et al. Improved electrochemical phase diagrams from theory and experiment: The Ni-water system and its complex compounds [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, 121(18): 9782–9789.
- [14] Serebrennikova I, Paramasivam I, Roy P, et al. Steel corrosion in alkaline batteries [J]. *Electrochimica Acta*, 2009, 54(22): 5216–5222.
- [15] Ramdane H, Benaïoun N, Guezoul M, et al. Investigation of the corrosion-preventing properties of nickel-coated austenitic stainless steel (AISI 304) in NaOH and NaOH+10% NaCl solutions [J]. *Inorganic Chemistry Communications*, 2023, 152: 110671.
- [16] 杨富国, 廖丽萍, 邓应财, 等. 不锈钢化学镀镍工艺研究 [J]. *表面技术*, 2010, 39(6): 84–86.
- [17] 张伟华. 氨基磺酸盐镀镍工艺优化 [J]. *电镀与环保*, 2015, 35(3): 9–11.
- [18] Cheng A, Pu N, Liu Y, et al. Evaluation of Ni-B alloy electroplated with different anionic groups [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 8360–8371.
- [19] Prado L H, Virtanen S, Weineck N, et al. How to perform corrosion experiments for proton exchange membrane water electrolysis bipolar plates [J]. *Journal of Power Sources*, 2024, 613: 234815.
- [20] MacDougall B. Interpretation of $\log I - \log t$ relationships for nickel passivation [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1983, 130(1): 114–117. ■