

快速化学镀 Ni-Zn-P 合金工艺及镀层性能

王梓杰¹, 王帅星¹, 周海飞², 钱洲亥², 赵晴¹, 王敏¹, 葛文娜¹, 熊艳¹, 黄勇¹

(1. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 南昌 330063;

2. 浙江省电力公司电力科学研究院, 杭州 310014)

摘要: 目的 确定快速化学镀 Ni-Zn-P 合金的工艺。方法 通过一系列实验, 研究主盐含量、pH 值、温度、时间等对镀层沉积速度及镀层锌镍比的影响, 确定最优工艺条件。借助 SEM, EDS, XRD 及电化学方法分析镀层微观形貌、成分及耐蚀性。结果 在 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 8 g/L, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 35 g/L, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 20 g/L, NH_4Cl 50 g/L, $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 70 g/L, 稳定剂 1.5 mg/L, pH=9.0, 温度 90~95 °C 的条件下, 化学镀 Ni-Zn-P 合金沉积速度为 5~6 $\mu\text{m}/\text{h}$, 镀层中 Zn 质量分数为 8%~10%, P 质量分数为 6% 左右, Ni 质量分数为 80%~85%。Zn 的存在使 Ni 呈现出晶态结构, 在 XRD 谱图上 $2\theta=45^\circ$ 及 $2\theta=52^\circ$ 位置分别出现了 Ni(111), Ni(200) 衍射峰。施镀时间不会影响镀层成分, 但会影响镀层耐蚀性。施镀 1.5 h 时, 镀层厚度约为 9~10 μm , 其耐蚀性略好于相同厚度的 Ni-P 镀层。结论 Ni-Zn-P 化学镀沉积速度较快, 8%~10% 的 Zn 使镀层中 Ni 呈晶态结构, 且改善了镀层耐蚀性。

关键词: Ni-Zn-P 镀层; 化学镀; 镀速; 成分; 耐蚀性

中图分类号: TQ153.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2015)08-0025-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.08.005

Rapid Electroless Technique for Ni-Zn-P Alloy Coating and Its Properties

WANG Zi-jie¹, WANG Shuai-xing¹, ZHOU Hai-fei², QIAN Zhou-hai², ZHAO Qing¹,
WANG min¹, GE Wen-na¹, XIONG Yan¹, HUANG Yong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Zhejiang Electric Power Corporation Research Institute, Hangzhou 310014, China)

ABSTRACT: **Objective** To determine a rapid electroless technique for Ni-Zn-P alloy coating. **Methods** The effects of the concentration of main salts, pH, temperature and electroless time on the deposition rate and Zn : Ni (wt. %) of coating were studied by a series of experiments. An optimized electroless technique for Ni-Zn-P alloy was achieved. The morphology, composition, phase structure and corrosion resistance of the coating were analyzed by SEM, EDS, XRD and EIS, respectively. **Results** Ni-Zn-P alloy coating was prepared on carbon steel by the electroless technique when $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, NH_4Cl , $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, stabilizing agent, pH and temperature were 8 g/L, 35 g/L, 20 g/L, 50 g/L, 70 g/L, 1.5 mg/L, 9.0 and

收稿日期: 2015-05-06; 修订日期: 2015-06-12

Received: 2015-05-06; Revised: 2015-06-12

基金项目: 国网浙江省电力公司科技项目(5211011306V2)

Fund: Supported by Scientific and Technological Research Program of Zhejiang Electric Power Corporation of State Grid (5211011306V2)

通讯作者: 王帅星(1985—), 男, 讲师, 主要研究方向为有色金属表面改性及电化学加工。

Corresponding author: WANG Shuai-xing(1985—), Male, Lecturer, Research focus: surface modification of non-ferrous metal and electrochemical machining.

90~95℃, respectively. The deposition rate of the coating was 5~6 μm/h. The contents of Zn, Ni and P in the coating were 8wt.%~10wt.%, 80wt.%~85wt.% and about 6wt.%, respectively. Besides, the Ni in the coating showed crystalline structure in the presence of Zn. The diffraction peaks of Ni (111) and Ni (200) appeared at $2\theta=45^\circ$ and $2\theta=52^\circ$. In addition, electroless time had slight influence on the coating composition, but could affect the corrosion resistance of the coating. The thickness of Ni-Zn-P alloy coating was about 9~10 μm when the electroless time was 1.5 h. The Ni-Zn-P coating with a thickness of 9~10 μm had better corrosion resistance than the Ni-P coating with the same thickness. **Conclusion** The electroless deposition rate for Ni-Zn-P coating was higher. The presence of 8wt.%~10wt.% Zn led to the formation of crystalline Ni in the coating, and improved the corrosion resistance of the coating.

KEY WORDS: Ni-Zn-P coating; electroless; deposition rate; chemical composition; corrosion resistance

化学镀 Ni-P 可以在各种材料及复杂形状的零件上均匀沉积,且镀层具有较高的硬度及良好的耐蚀、耐磨性,因此广泛应用于电子及航空工业中。Ni-P 镀层属于阴极性镀层,孔隙在极大程度上影响着镀层的耐蚀性。若在 Ni-P 合金镀层中引入 Zn 元素,则在孔隙存在的情况下,不会对镀层整体耐蚀性产生影响。多数研究表明,Zn-Ni-P 三元合金镀层的耐蚀性更好,且无应力^[1-3],因此 Zn-Ni-P 三元合金镀层具有广阔的应用前景。Swathirajan 等^[4]将 P 加入 Zn-Ni 合金镀液中,成功制备出非异常沉积的 Zn-Ni-P 三元合金镀层,并发现电镀过程中产生了化学沉积现象。在此基础上,M. Schlesinger 等人^[5]以碱性氯盐为体系,用化学镀方法成功制备出 Zn-Ni-P 三元合金镀层,研究表明,Zn-Ni-P 镀层的晶化程度降低,腐蚀速率下降,比 Zn-Ni 合金具有更好的耐蚀性,且随着 Zn 含量的增加,Zn-Ni-P 镀层电势负移,趋向于形成阳极镀层。

近年来,许多研究者^[6-13]以柠檬酸钠和乳酸为配位剂,在碱性和酸性介质中进行化学镀 Zn-Ni-P 三元合金,系统地研究了硫酸锌、pH 值等工艺参数对镀速、镀层成分及镀层腐蚀电位的影响,分析了热处理后镀层硬度及微观结构的变化,取得了一定的成果。但是目前,化学镀 Zn-Ni-P 三元合金的工艺尚不成熟,对于稳定、高效的化学镀 Zn-Ni-P 三元合金镀液体系及镀速问题尚未很好地解决,对参数的讨论也并不全面。

文中通过一系列实验,确定了快速化学镀 Ni-Zn-P 合金工艺,分析了镀层的微观形貌、成分及耐蚀性,可为化学镀 Ni-Zn-P 合金工艺的应用提供参考。

1 试验

1.1 化学镀 Ni-Zn-P

基材为 45# 钢,电化学测试试样的尺寸为 10 mm×

10 mm×1 mm,其他试样的尺寸为 25 mm×60 mm×1 mm。

化学镀 Ni-Zn-P 合金的工艺流程为:打磨(用 150#—1200# 水砂纸依次打磨)→水洗→化学除油→热水洗→冷水洗→活化→水洗→化学镀 Ni-Zn-P →水洗→吹干。

化学除油配方及条件为:NaOH 70 g/L,NaCO₃ 30 g/L,Na₃PO₄ 30 g/L,Na₂SiO₃ 15 g/L;温度 80~95℃,时间 2~3 min。活化条件为:HCl 50 mL/L,室温下活化 60 s。

化学镀 Ni-Zn-P 溶液的成分包括 ZnSO₄·7H₂O, NiSO₄·6H₂O,NaH₂PO₂,NH₄Cl 及 C₆H₅Na₃O₇,其中,NaH₂PO₂·H₂O 20 g/L,C₆H₅Na₃O₇·2H₂O 70 g/L,NH₄Cl 50 g/L。ZnSO₄ 浓度、NiSO₄ 浓度、pH 值及温度是影响镀速及镀层成分的主要因素,文中以镀速及镀层锌镍比(质量比)作为评价指标,分析各因素对镀速及镀层成分的影响,最终确定化学镀 Ni-Zn-P 工艺。

1.2 Ni-Zn-P 化学镀层性能表征

采用 CMI 900 型 X 荧光测厚仪测定镀层厚度及镀层中的 Zn, Ni, P 的含量(以质量分数计),据此计算镀层沉积速度及锌镍比。利用 QUANTA-200 扫描电子显微镜(SEM)观察镀层表面形貌及截面形貌,借助 INCA 型能谱仪(EDS)分析镀层成分,通过 Bruker D8-Advance 型 X 射线衍射仪(XRD)分析膜层相结构。

采用 CHI604D 电化学工作站测试 Ni-Zn-P 镀层在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中的极化曲线及交流阻抗谱。其中,参比电极采用饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极,工作电极是用环氧树脂固封的 Zn-Ni-P 合金镀层试样(暴露面积为 1 cm²)。极化曲线测试条件为:扫描范围-1.5~1.2 V,扫描速率 5 mV/s。交流阻抗谱测试条件为:在开路电位下施加 10 mV 的正

弦波电位扰动,扫描频率 0.01 ~ 100 kHz,温度 25 ℃。

2 结果与讨论

2.1 Ni-Zn-P 化学镀工艺的确定

图 1 给出了 ZnSO_4 浓度、 NiSO_4 浓度、pH 值及温度对化学镀 Ni-Zn-P 合金镀速及镀层中锌镍比的影响。由图 1a 可知,随着镀液中 ZnSO_4 浓度的增大,镀层中的 Zn 含量上升,导致锌镍比增加,但沉积速度迅速降低,说明 Zn 对沉积反应起抑制作用。由图 1b 可知,随着 NiSO_4 浓度的增加,镀层沉积速度逐渐加快,但锌镍比先升至一最大值后下降, NiSO_4 质量浓度为 35 g/L 时,锌镍比最大。一般来说,以次亚磷酸钠为还原剂的化学镀液,Ni 有催化作用,Zn 没有催化作用,当镀液中 ZnSO_4 浓度增加时, Zn^{2+} 在镀层表面的覆盖度增大,而对次亚磷酸钠起催化作用的 Ni 的覆

盖度下降,从而造成镀层的沉积速度下降^[11]。为获得较高 Zn 含量的镀层,同时保证镀速, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度取 8 g/L 为宜, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 质量浓度可取 35 g/L。

由图 1c 可知,随着 pH 值增大,镀层沉积速度逐渐增加,而锌镍比有所波动,pH = 9.0 时,锌镍比最大。有研究认为,pH 值增大时, Zn^{2+} 的表面覆盖度降低,而电催化活性大的 Ni 的表面覆盖度增大^[7,14],也就是说,适当提高 pH 值有助于提高镀层沉积速度及镀层的锌镍比。但 pH 大于 9.5 时,镀液容易出现混浊物,稳定性较差,镀层外观性能下降。综合考虑,pH 值取 9.0 为宜。

由图 1d 可知,施镀温度直接影响镀层沉积速度:起初,随着温度提高,镀速呈线性增加;超过 90 ℃ 后,镀速增幅降低。温度对镀层锌镍比的影响略小,锌镍比随温度变化仅有小幅波动。综合考虑沉积速度及镀层的锌镍比,适宜的温度为 90 ℃。

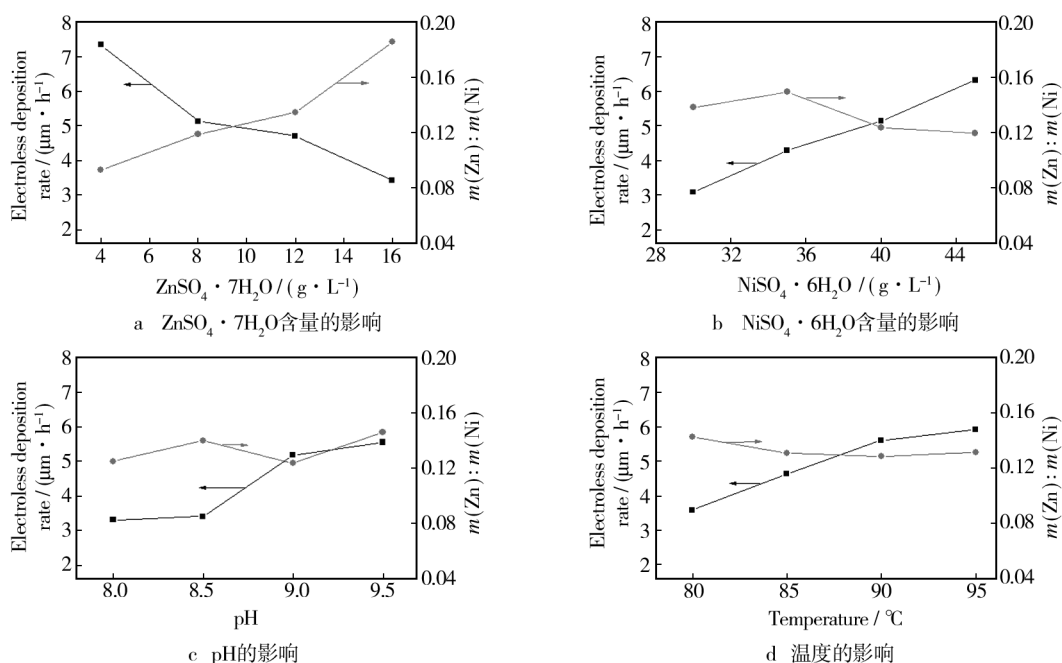


图 1 各因素对化学镀 Ni-Zn-P 合金镀速及镀层中锌镍比的影响

Fig. 1 Effects of various factors on the electroless deposition rate and Zn:Ni (wt%) of the Ni-Zn-P coating

综上所述,在 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 8 g/L, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 35 g/L, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 20 g/L, $\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 70 g/L, NH_4Cl 50 g/L, 稳定剂 1.5 mg/L, pH 值 9.0, 温度 90 ~ 95 ℃ 的条件下, Ni-Zn-P 合金化学镀沉积速度为 5 ~ 6 $\mu\text{m}/\text{h}$, 镀层中的 Zn 质量分数为 8% ~ 10%, P 质量分数为 6% 左右, Ni 质量分数为 80% ~ 85%。

2.2 不同厚度 Ni-Zn-P 镀层的成分及耐蚀性

通过调整施镀时间,获得了不同厚度的 Ni-Zn-P 镀层,镀层的表面成分见表 1。由表 1 可知,镀层厚度对镀层成分的影响不大,镀层中 Zn 质量分数稳定在 8% ~ 10%, Ni 质量分数约为 80% ~ 82%, P 质量分数稳定在 6% 左右。

表1 不同厚度 Ni-Zn-P 镀层的表面成分

Tab.1 Surface chemical composition of Ni-Zn-P coatings with various thicknesses

施镀时间/h	镀层厚度/ μm	各元素的质量分数/%		
		Zn	Ni	P
0.5	2~3	9.6	82.6	5.8
1	5~6	9.9	80.2	6.3
1.5	9~10	8.8	83.2	6.0
2	12	9.1	81.9	6.5

图2为不同厚度 Ni-Zn-P 合金镀层的交流阻抗 Nyquist 图。由图2可知,所有镀层均表现为一个容抗弧,但镀层厚度不同,容抗弧的半径有明显区别。一般来说,容抗弧半径反映镀层的腐蚀阻力,容抗弧半径越大,电荷转移电阻越大,镀层耐蚀性越好。由此可知,在1.5 h内,随着沉积时间的延长,镀层厚度增加,耐蚀性提高;继续延长沉积时间,虽然镀层厚度略有增加,但反应电阻减小,镀层耐蚀性反而下降。分析认为,随着施镀时间的延长,镀层厚度增加,侵蚀性 Cl^- 穿透镀层所需的阻力增大,因此耐蚀性提高;但施镀时间过长时,镀层表面的致密度下降,有一定的孔隙率,此时镀层较厚,但孔隙率会导致镀层的耐蚀性下降。化学镀 Zn-Ni-P 合金施镀时间为1~1.5 h时,镀层成分稳定,镀速适中,镀层耐蚀性良好。

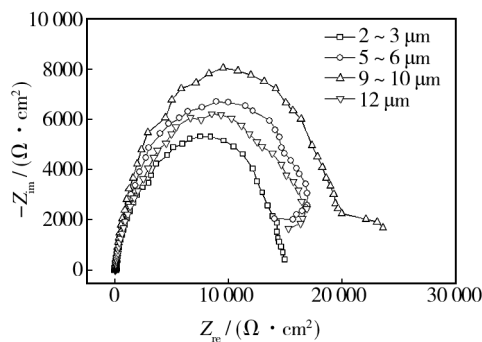


图2 不同厚度 Ni-Zn-P 合金镀层在 3.5% NaCl 溶液中的 EIS 谱
Fig.2 Nyquist Plots for Ni-Zn-P coatings with various thicknesses in 3.5% NaCl solution

2.3 Ni-Zn-P 镀层的微观形貌及成分

化学镀 Ni-Zn-P 合金层的表面 SEM 像及 EDS 谱见图3,截面线扫描 EDS 谱见图4。由图3a 可以看出, Ni-Zn-P 合金镀层呈紧密排列的胞状结构,结晶细致,但晶胞形状大小不一,且有部分胞状沉积物。由图3b 及图4 可知,镀层与基体结合力良好,无明显裂纹。镀层主要由 Zn, Ni, P, O 组成,其中 Ni 元素含量

沿向基材的方向逐渐增加; Zn 元素含量相对稳定,质量分数约为 9%; P 元素质量分数约为 6%。这说明镀层是以 Ni 为基相、Zn 为掺杂相的合金镀层。

图5为 Ni-Zn-P 化学镀层的 XRD 谱。由图5可

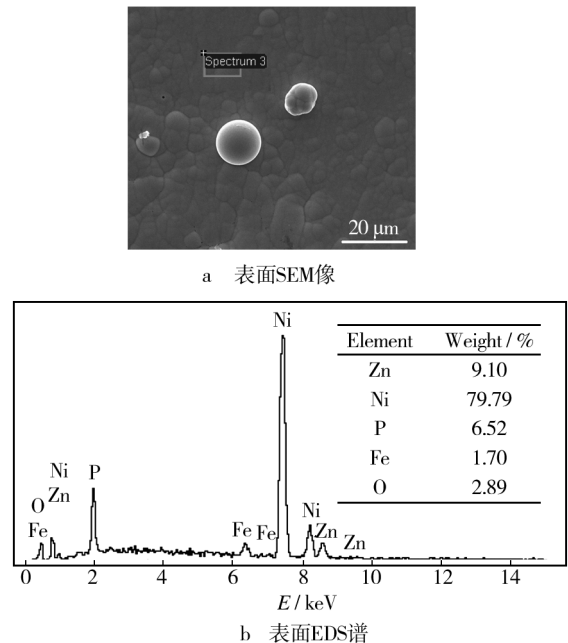


图3 化学镀 Ni-Zn-P 合金层的表面 SEM 像及 EDS 谱
Fig.3 Surface morphology and chemical composition of electroless Ni-Zn-P coating

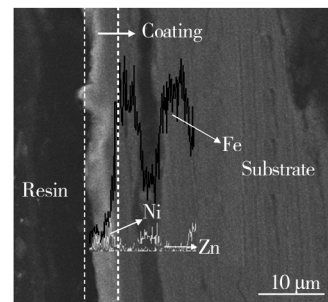


图4 化学镀 Ni-Zn-P 合金层的截面 EDS 谱
Fig.4 Cross-sectional chemical composition of electroless Ni-Zn-P coating

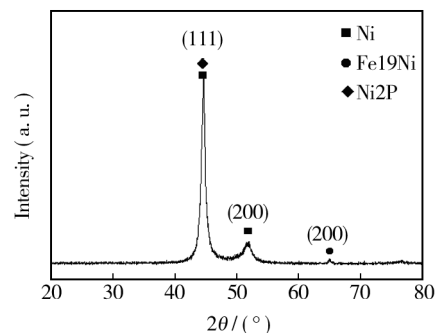


图5 化学镀 Ni-Zn-P 合金层的 XRD 谱
Fig.5 XRD pattern of electroless Ni-Zn-P coating

知,在 45°及 52°位置分别为 Ni(111),Ni(200)特征峰。多数研究表明^[7,15],Ni-P 镀层中的 Ni 多以非晶态形式存在,而 Ni-Zn-P 镀层中 Zn 的存在会使镀层中的非晶态 Ni 转变为晶态结构。本研究结果与之相符。此外,镀层中还存在微量 Fe19Ni 及 Ni2P,但未发现 Zn 特征峰。

2.4 Ni-Zn-P 化学镀层的耐蚀性

图 6 为相同厚度(9~10 μm)的化学镀 Ni-Zn-P 及 Ni-P 镀层在 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线。由图 6 可知,由于 Zn 的引入,Ni-Zn-P 镀层的 E_{corr} (-0.615 V)比 Ni-P 镀层的 E_{corr} (-0.537 V)略负;但其 J_{corr} (15.96 μA/cm²)比 Ni-P 镀层的 J_{corr} (27.54 μA/cm²)略小,说明 Zn 质量分数为 9% 的 Zn-Ni-P 镀层的耐蚀性略好于 Ni-P 镀层。

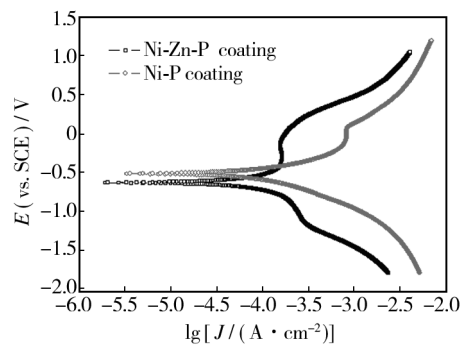


图 6 化学镀 Ni-Zn-P 及 Ni-P 合金层在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线

Fig. 6 Dynamic polarization curves of electroless Ni-Zn-P coating and Ni-P coating with a thickness of 9~10 μm in 3.5% NaCl solution

图 7 为相同厚度(9~10 μm)的化学镀 Ni-Zn-P 及 Ni-P 镀层在 3.5% NaCl 溶液中的交流阻抗 Bode 谱。由图 7 可知,Ni-Zn-P 镀层及 Ni-P 镀层均呈现出一个时间常数,但 Ni-Zn-P 镀层的阻抗明显高于 Ni-P 镀层。由此可知,Zn 的存在提高了 Ni-Zn-P 镀层的耐蚀性。为了进一步研究 Ni-Zn-P 镀层的电化学行为,采用图 8 的等效电路来拟合 EIS 数据。其中, R_s 代表溶液电阻, Q_{dl} 及 R_{ct} 分别代表镀层/溶液界面的双电层电容及电荷转移电阻。从图 7 可以看出,该等效电路可以很好地拟合试验数据,具体拟合结果见表 2。由表 2 可知,Ni-Zn-P 镀层的电荷转移电阻 R_{ct} 明显大于 Ni-P 镀层。一般来说,电荷转移电阻可以反映镀层的腐蚀阻力,电荷转移电阻越大,镀层耐蚀性越好。

综合比较自腐蚀电流密度 J_{corr} 及电荷转移电阻 R_{ct}

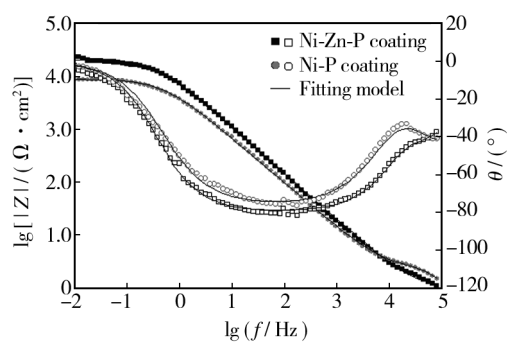


图 7 化学镀 Ni-Zn-P 及 Ni-P 合金层在 3.5% NaCl 溶液中的 EIS 谱

Fig. 7 EIS plots of electroless Ni-Zn-P coating and Ni-P coating with a thickness of 9~10 μm in 3.5% NaCl solution

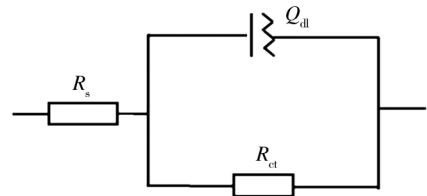


图 8 EIS 谱等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit used for simulating the impedance spectroscopy

表 2 Ni-Zn-P 及 Ni-P 镀层的 EIS 谱拟合数据

Tab. 2 Fitting results for EIS plots of electroless Ni-P coating and Ni-Zn-P coating

Coating	$R_{\text{ct}}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$C_{\text{dl}}/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	n_{dl}
Ni-P	2064	24.93	0.8701
Ni-Zn-P	8845	44.23	0.8437

可以确定,相同厚度的 Zn-Ni-P(9% Zn) 和 Ni-P 两种镀层相比,Zn-Ni-P 的耐蚀性略好。

3 结论

- 1) 化学镀 Ni-Zn-P 合金的最佳工艺参数为:ZnSO₄·7H₂O 8 g/L, NiSO₄·6H₂O 35 g/L, NaH₂PO₂·H₂O 20 g/L, NH₄Cl 50 g/L, C₆H₅Na₃O₇·2H₂O 70 g/L, 稳定剂 1.5 mg/L, pH=9.0, 温度 90~95℃。在该条件下,沉积速度为 5~6 μm/h,镀层中 Zn 质量分数为 8%~10%,P 质量分数为 6% 左右,Ni 质量分数为 80%~85%。
- 2) Ni-Zn-P 合金镀层是以 Ni 为基相、Zn 为掺杂相的合金镀层,镀层呈紧密排列的胞状结构,结晶细

致,与基体结合良好。Zn的存在使Ni呈现出晶态结构。

3) 施镀时间不会影响镀层成分,但会影响镀层耐蚀性。施镀1.5 h时,镀层厚度约为9~10 μm ,Zn质量分数为9.1%,Ni质量分数为79.79%,P质量分数为6.52%。与相同厚度的Ni-P镀层相比,该Ni-Zn-P镀层的耐蚀性略好。

参考文献

- [1] 谢勤. Zn-Ni, Zn-Ni-P合金电镀工艺及其基础理论研究[D]. 长沙:中南大学,2001.
XIE Qin. A Study on Process and Fundamentals of Zn-Ni and Zn-Ni-P Alloys Electroplating[D]. Changsha: Central South University, 2001.
- [2] OULLADJ M, SAIDI D. Preparation and Properties of Electroless Ni-Zn-P Alloy Films[J]. Mater Sci, 1999, 34: 2437—2439.
- [3] 付川, 祁俊生. 正交试验优化电镀 Zn-Ni-P合金工艺[J]. 表面技术, 2003, 32(6): 43—45.
FU Chuan, QI Jun-sheng. Optimization of Technology of Zn-Ni-P Alloy Electroplating by Orthogonal Test[J]. Surface Technology, 2003, 32(6): 43—45.
- [4] SWAHIRAJAN S, MIKHAIL Y M. Corrosion Resistant Nickel-Zinc-Phosphorus Coating and Method of Electroplating Said Coating; US, 4 758 479[P]. 1988-07-19.
- [5] SCHLESINGER M, MENG X, SNYDER D D. The Microstructure and Electrochemical Properties of Electroless Zinc-Nickel-Phosphorus Alloy[J]. J Electrochem Soc, 1991, 138(2): 406—410.
- [6] BOUNANI M, CHERKAoui F, FRATESI R, et al. Microstructural Characterization and Corrosion Resistance of Ni-Zn-P Alloys Electrolessly Deposited from a Sulphate Bath[J]. J Appl Electrochem, 1999, 29: 637—645.
- [7] VALOVA E, GEORGIEV I, ARMYANOV S, et al. Incorporation of Zinc in Electroless Deposited Nickel-Phosphorus Alloys I. A Comparative Study of Ni-P and Ni-Zn-P Coatings Deposition, Structure, and Composition[J]. J Electrochem Soc, 2001, 148(4): C266—C273.
- [8] VALOVA E, ARMYANOV S, FRANQUET A, et al. Incorporation of Zinc in Electroless Deposited Nickel-Phosphorus Alloys II. Compositional Variations through Alloy Coating Thickness[J]. J Electrochem Soc, 2001, 148(4): C274—C279.
- [9] 王殿龙, 宫玉梅. 酸性化学镀 Ni-Zn-P 工艺的研究[J]. 电镀与环保, 2009, 29(2): 39—42.
WANG Dian-long, GONG Yu-mei. Study of Electroless Ni-Zn-P Alloy Plating from Acidic Bath[J]. Electroplating & Pollution Control, 2009, 29(2): 39—42.
- [10] 王森林, 徐旭波, 吴辉煌. 化学沉积 Ni-Zn-P合金制备和腐蚀性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2004, 24(5): 297—300.
WANG Sen-lin, XU Xu-bo, WU Hui-huang. Preparation and Corrosion Properties of Electroless Ni-Zn-P Alloy Deposits[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2004, 24(5): 297—300.
- [11] VEERARAGHAVAN Baskar, HARAN Bala, KUMARAGURU Swaminatha P. Corrosion Protection of Steel Using Non-anomalous Ni-Zn-P Coatings[J]. J Electrochem Soc, 2003, 150(4): B131—B139.
- [12] 王森林, 陈志明. 热处理对化学沉积 Ni-Zn(Fe)-P合金结构和性质的影响[J]. 功能材料, 2005, 36(5): 798—802.
WANG S L, CHEN Z M. The Effect of Heat Treatment on the Structure and the Properties of the Ni-Zn(Fe)-P Alloy Prepared by Electroless Deposition[J]. Functional Materials, 2005, 36(5): 798—802.
- [13] 赵富霞. 化学镀 Ni-Zn-P合金工艺及镀层性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
ZHAO Fu-xia. Study on Electroless Zn-Ni-P Alloy Process and Coating Properties[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [14] VEERARAGHAVAN B, KIM H, POPOV B. Optimization of Electroless Ni-Zn-P Deposition Process: Experimental Study and Mathematical Modeling[J]. Electrochimica Acta, 2004, 49(19): 3143—3154.
- [15] RANGANATHA S, VENKATESHA T V, VATHSALA K. Development of Electroless Ni-Zn-P/Nano-TiO₂ Composite Coatings and Their Properties[J]. Applied Surface Science, 2010, 256: 7377—7383.