

# 电沉积方式对镍-锡-锰合金镀层耐蚀性的影响

孟庆波, 齐海东, 卢 帅, 郭 昭, 杨海丽\*

(华北理工大学现代冶金技术教育部重点实验室, 河北 唐山 063210)

**摘要:**采用直流(DC)、脉冲(PC)和超声脉冲(UPC)电沉积方式在 Q235 钢表面制备 Ni-Sn-Mn 合金镀层,利用扫描电子显微镜(SEM)、辉光放电光谱仪(GDS)、X 射线衍射仪(XRD)、Tafel 曲线和电化学阻抗谱(EIS)研究了不同电沉积方式对镀层表面形貌、元素含量、沉积速率、相结构和耐蚀性的影响。结果表明,分别采用直流、脉冲、超声脉冲电沉积方式制备的镀层,Ni 和 Sn 质量分数依次减小,Mn 质量分数依次增大,沉积速率依次提高;直流电沉积镀层晶粒粗大,存在裂纹和孔隙,耐蚀性较差;脉冲电沉积镀层晶粒细化,无明显缺陷,耐蚀性较高;超声脉冲电沉积镀层均匀致密,呈非晶结构,在 3.5% NaCl 溶液中具有最正的自腐蚀电位(-0.346 V)、最低的自腐蚀电流密度( $3.162 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>)和最大的电荷转移电阻( $9\ 143 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ),镀层耐蚀性最好。

**关键词:**电沉积方式;Ni-Sn-Mn 合金;表面形貌;元素含量;相结构;耐蚀性

中图分类号:TQ153.2

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)03-0101-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.03.022

## Effect of electrodeposition methods on corrosion resistance of Ni-Sn-Mn alloy coating

MENG Qing-bo, QI Hai-dong, LU Shuai, GUO Zhao, YANG Hai-li\*

(Key Laboratory for Modern Metallurgy Technology of Ministry of Education, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

**Abstract:** Ni-Sn-Mn alloy coatings are prepared on the surface of Q235 steel by direct current (DC), pulse current (PC) and ultrasonic-pulse current (UPC) electrodeposition methods respectively. The effects of electrodeposition methods on surface morphology, element content, deposition rate, phase structure and corrosion resistance are investigated by means of scanning electron microscopy (SEM), glow discharge spectroscopy (GDS), X ray diffractometer (XRD), Tafel polarization curve and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The results show that the mass fractions of Ni and Sn in coatings prepared by DC, PC and UPC electrodeposition methods respectively decrease in turn, but that of Mn increases in turn. Deposition rate of coatings prepared by DC, PC and UPC electrodeposition methods respectively increases in turn. The coating electrodeposited by DC has coarse grains, cracks and voids, and exhibits poor corrosion resistance. The coating electrodeposited by PC has fine grains and no obvious defect, and shows higher corrosion resistance. The coating prepared by UPC electrodeposition is most uniform and dense, possesses amorphous structure, and exhibits the most positive self-corrosion potential (-0.346 V), the smallest corrosion current density ( $3.162 \times 10^{-8}$  A·cm<sup>-2</sup>) and the biggest charge transfer resistance ( $9\ 143 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ) in 3.5% NaCl solution, representing the best corrosion resistance among three coating samples.

**Key words:** electrodeposition method; Ni-Sn-Mn alloy; surface morphology; element content; phase structure; corrosion resistance

近年来,随着海洋资源开发深度和广度的增加,钢铁材料在海洋环境中的用量不断加大,因此,钢铁材料在海洋环境中的腐蚀防护尤为重要。Ni-Sn 合金具有优异的抗腐蚀性、耐磨性、可焊性及良好的外观光泽度,可代替铬,在工业上广泛用于钢铁材料及电子产品的抗腐蚀和装饰性镀层<sup>[1-2]</sup>。然而,在腐蚀性较强的海洋环境中,Ni-Sn 合金耐蚀性有待进一步提高<sup>[3]</sup>。在合金中引入少量 Mn 元素,能细化

合金晶粒和提高耐蚀性<sup>[4-7]</sup>。目前有关 Ni-Sn-Mn 合金镀层耐蚀性研究还鲜有报道。电沉积法作为最常用的合金镀层制备方法之一,具有操作过程简单、沉积效率高、镀层附着性好等优点。合金镀层质量及性能的好坏不仅受工艺参数的影响,还与电沉积方式密切相关。王琳等<sup>[8]</sup>研究了直流和脉冲电沉积方式对 Ni-SiC 纳米复合镀层的影响,表明脉冲电沉积所得镀层沉积速率、硬度和耐蚀性均比直流电

收稿日期:2017-08-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474088)

作者简介:孟庆波(1989-),男,硕士研究生,主要从事金属材料表面处理方面的研究,15040683558@163.com;杨海丽(1968-),女,博士,教授,研究方向为新型材料的制备及其表面改性,通讯联系人,sjmsxmhl@126.com。

沉积要高。常立民等<sup>[9]</sup>采用超声电沉积方式制备了 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层,研究表明,与普通电沉积相比,超声电沉积镀层晶粒细化,孔隙率降低,平整致密性提高,耐蚀性更好。笔者采用直流电沉积、脉冲电沉积和超声脉冲电沉积方式在 Q235 钢表面制备了 Ni-Sn-Mn 合金镀层,研究了不同电沉积方式对 Ni-Sn-Mn 合金镀层表面形貌、元素含量、沉积速率、相结构及耐蚀性的影响。

## 1 实验

### 1.1 基材预处理

基体→打磨(依次经过 320<sup>#</sup>、500<sup>#</sup>、800<sup>#</sup>、1 000<sup>#</sup>和 1 500<sup>#</sup>砂纸打磨)→去离子水超声清洗→碱洗除油(15% NaOH 溶液)→去离子水超声清洗→酸洗活化(10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液)→去离子水、酒精超声清洗→干燥备用。

### 1.2 镀层制备

采用 SMD-30P 型智能多组换向脉冲电镀电源, YTP-500TM 型超声波发生器进行施镀。阴极为处理过的 Q235 钢片(20 mm×18 mm×1 mm), 阳极为纯镍板。镀液组分: SnCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 10 g/L, NiSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O 55 g/L, MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 50 g/L, Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>·2H<sub>2</sub>O 160 g/L, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 30 g/L, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 30 g/L, EDTA-2Na 20 g/L, C<sub>12</sub>H<sub>25</sub>SO<sub>4</sub>Na(SDS) 0.1 g/L, 甘氨酸 8 g/L, 抗坏血酸 3 g/L。镀液温度为 30℃, pH 为 4.0, 沉积时间为 30 min。采用不同电沉积方式的工艺参数为:

(1) 直流电沉积(DC): 电流密度为 10 A/dm<sup>2</sup>。

(2) 脉冲电沉积(PC): 脉冲周期为 1 000 μs, 脉冲占空比为 0.3, 平均电流密度为 10 A/dm<sup>2</sup>。

(3) 超声脉冲电沉积(UPC): 超声波功率为 150 W, 超声波频率为 28 kHz, 脉冲周期为 1 000 μs, 脉冲占空比为 0.3, 平均电流密度为 10 A/dm<sup>2</sup>。

### 1.3 测试方法

利用 SPECTRO GDA750 型辉光放电光谱仪检测镀层成分及厚度, 沉积速率用单位时间内电沉积镀层厚度表示(μm/h); S-4800 型场发射扫描电子显微镜观察镀层表面形貌; AXIOVERT 200 MA 型金相显微镜观察镀层横截面; IM6eX 型电化学工作站进行电化学测试, 采用三电极体系, 工作电极为待测试样(工作面积 1 cm<sup>2</sup>), 辅助电极和参比电极分别为铂片和饱和甘汞电极, 电解液为 3.5% NaCl 溶液, Tafel 曲线测试速率为 2 mV/s, 电化学阻抗谱测

试频率范围 10 mHz~50 kHz。

## 2 结果及讨论

### 2.1 镀层表面形貌

不同电沉积方式对 Ni-Sn-Mn 合金镀层表面形貌的影响如图 1 所示。由图 1 可以看出, 直流电沉积镀层表面晶粒粗大, 排列疏松, 存在孔隙和裂纹; 脉冲电沉积镀层晶粒明显细化, 致密性提高, 但存在个别较大晶粒; 超声脉冲电沉积镀层晶粒最为均匀细密。由于直流电沉积时浓差极化较大, 析氢反应剧烈, 导致镀层晶粒粗大, 形成裂纹和气孔; 脉冲电沉积时电流间歇时间可以使阴极附近还原沉积所消耗的金属离子通过扩散、对流等形式得到及时补充, 减小了浓差极化, 析氢反应减弱, 促进新晶核的形成, 同时脉冲电沉积的峰值电流密度较大, 阴极极化作用较强, 形核速率提高<sup>[10]</sup>, 晶粒得到细化; 引入超声波辅助脉冲电沉积, 超声波的强力搅拌作用和空化效应使镀液分散能力和离子运输能力增强<sup>[9]</sup>, 进一步降低浓差极化, 另外, 超声波能抑制离子团聚, 减少氢氧化物沉积形成, 使镀层更加致密均匀。

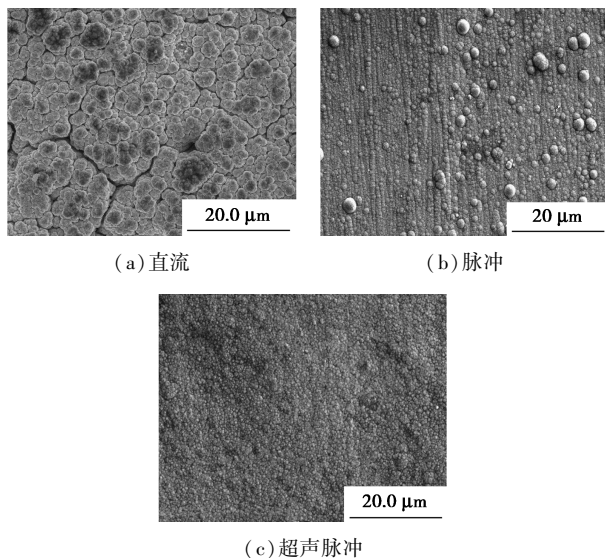


图 1 不同电沉积方式制备的 Ni-Sn-Mn 合金镀层表面形貌

### 2.2 镀层截面形貌

不同电沉积方式对 Ni-Sn-Mn 合金镀层截面形貌的影响如图 2 所示。由图 2 可以看出, 直流电沉积镀层较薄, 存在较多表面凹坑和裂纹, 且镀层和基体之间有明显缝隙, 镀层质量较差; 脉冲电沉积镀层厚度增加, 与基体结合较为紧密, 镀层内部未出现明显的裂纹, 镀层质量提高, 但表面凹凸不平; 超声脉冲电沉积镀层最为均匀致密, 表面平整, 镀层质量

最好。

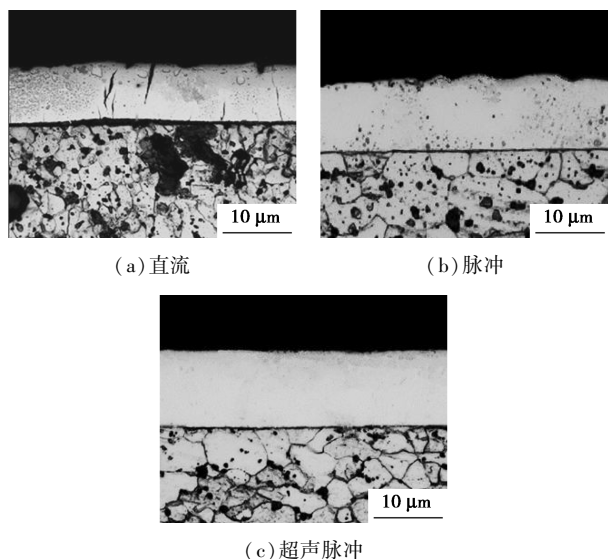


图2 不同电沉积方式制备的 Ni-Sn-Mn 合金镀层截面形貌

### 2.3 镀层元素质量分数和沉积速率

不同电沉积方式制备的 Ni-Sn-Mn 合金镀层的元素质量分数和沉积速率如表 1 所示。由表 1 可以看出,与直流相比,脉冲电沉积镀层的 Ni 和 Sn 质量分数减小, Mn 质量分数增加。这是由于脉冲电沉积过程中的实际工作电流为峰值电流密度,其值远大于直流电沉积的电流密度,阴极极化增大<sup>[11]</sup>,有利于电极电位较负的  $Mn^{2+}$  还原沉积,而电极电位较正的  $Ni^{2+}$  和  $Sn^{2+}$  还原沉积受抑制。引入超声波辅助脉冲电沉积时,极大地提高镀液的分散能力和扩散传质效率,增大了金属离子在阴极表面放电几率,对于摩尔浓度较高的  $Mn^{2+}$  还原沉积更为有利,镀层 Mn 质量分数进一步提高。不同电沉积方式所得镀层的沉积速率大小顺序为直流<脉冲<超声脉冲。

表 1 不同电沉积方式制备 Ni-Sn-Mn 合金镀层的元素质量分数和沉积速率

电沉积方式	镀层各元素的质量分数/%			沉积速率/ ( $\mu m \cdot h^{-1}$ )
	Ni	Sn	Mn	
直流	68.21	28.42	3.37	16.43
脉冲	66.95	27.23	5.82	20.52
超声脉冲	65.89	26.85	7.26	22.18

### 2.4 镀层相结构

不同电沉积方式制备的 Ni-Sn-Mn 合金镀层的 XRD 图谱如图 3 所示。由图 3 可以看出,直流和脉冲电沉积镀层在  $2\theta$  为  $40 \sim 50^\circ$  之间均出现 Ni 的特征峰,在  $31^\circ$ 、 $43^\circ$  及  $73^\circ$  附近出现  $Ni_3Sn_4$  相的特征峰,

在  $60^\circ$  和  $73^\circ$  附近出现  $Ni_4Sn$  相的特征峰,由于 Mn 的质量分数较低,未出现含 Mn 相的特征峰。直流电沉积镀层衍射峰较尖锐,而脉冲电沉积镀层衍射峰强度明显减弱,峰半高宽增大;超声脉冲电沉积镀层只在  $2\theta$  为  $40 \sim 50^\circ$  附近出现 Ni 的漫散“馒头状”衍射峰,峰半高宽化程度较大,表明镀层为典型的非晶态结构。这是因为沉积过程中 Mn 的加入会引起晶格畸变,当 Mn 质量分数达到一定值后,由于晶格畸变过大导致晶体结构的长程有序规则排列遭到破坏,形成了长程无序、短程有序的非晶态结构<sup>[12-13]</sup>。

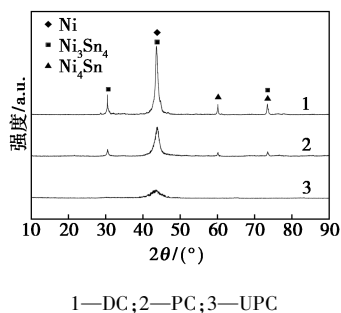


图 3 不同电沉积方式制备的 Ni-Sn-Mn 合金镀层 XRD 图谱

### 2.5 镀层耐蚀性

不同电沉积方式制备的 Ni-Sn-Mn 合金镀层在 3.5% NaCl 腐蚀液中的 Tafel 曲线如图 4 所示,由 Tafel 曲线得到的镀层自腐蚀电位 ( $E_{corr}$ ) 和自腐蚀电流密度 ( $J_{corr}$ ) 如表 2 所示。由表 2 可以看出,分别采用直流、脉冲、超声脉冲 3 种电沉积方式所得镀层的  $E_{corr}$  呈正移趋势,  $J_{corr}$  依次减小,耐蚀性提高。超声脉冲电沉积镀层  $E_{corr}$  值 ( $-0.346$  V) 最正,  $J_{corr}$  值 ( $3.162 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup>) 最小,耐蚀性最高。

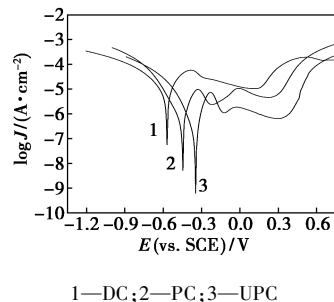
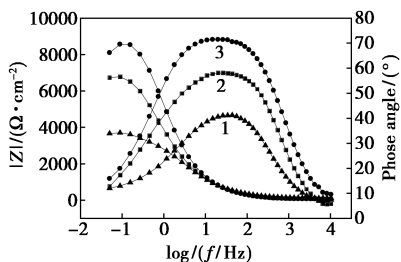


图 4 不同电沉积方式制备 Ni-Sn-Mn 合金镀层的 Tafel 曲线

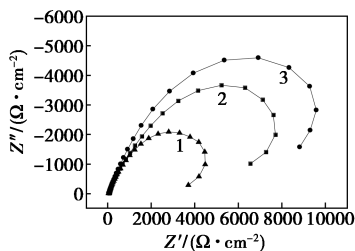
表 2 Ni-Sn-Mn 合金镀层的电化学腐蚀参数

电沉积方式	$E_{corr}/V$	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$
直流	-0.582	$4.634 \times 10^{-6}$
脉冲	-0.447	$8.913 \times 10^{-8}$
超声脉冲	-0.346	$3.162 \times 10^{-8}$

不同电沉积方式制备的 Ni-Sn-Mn 合金镀层在 3.5% NaCl 腐蚀液中的 EIS 图谱如图 5 所示。由图 5(a)可以看出,在 Bode 图低频区,超声脉冲电沉积镀层的阻抗模值最高,且频率-相位角曲线峰值相位角最大,镀层最为完整致密,腐蚀液难以向镀层渗透,腐蚀速率最低<sup>[14]</sup>。由图 5(b)可以看出,不同电沉积方式所得镀层的 Nyquist 图均为 1 条半圆形容抗弧。



(a) Bode plot



(b) Nyquist plot

1—DC;2—PC;3—UPC

图 5 不同电沉积方式制备 Ni-Sn-Mn 合金镀层的 EIS 图谱

根据 EIS 图谱特征建立等效电路,如图 6 所示。其中, $R_s$ 、 $R_{ct}$  分别表示溶液电阻和电荷转移电阻, $Q_{dl}$  为与双电层电容相关的常相位角元件, $n_{dl}$  为  $Q_{dl}$  的弥散指数。利用 Zsimpwin 软件对 EIS 谱数据拟合,得到等效电路各元件拟合参数值,如表 3 所示。由表 3

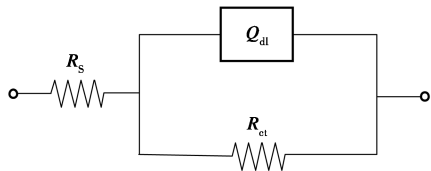


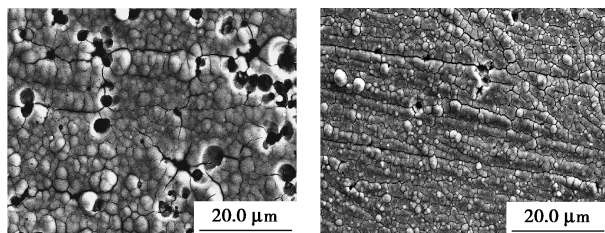
图 6 等效电路

表 3 等效电路元件拟合参数

电沉积方式	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl}/(\text{F} \cdot \text{cm}^2)$	$n_{dl}$	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
直流	63.73	$3.257 \times 10^{-6}$	0.7453	4614
脉冲	76.56	$9.496 \times 10^{-6}$	0.7726	7485
超声脉冲	73.05	$6.834 \times 10^{-6}$	0.8164	9143

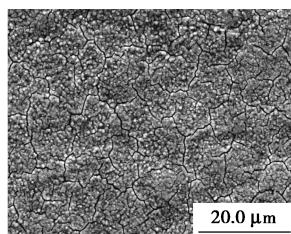
可以看出,直流、脉冲、超声脉冲电沉积所得镀层的电荷转移电阻  $R_{ct}$  值依次递增,超声脉冲电沉积镀层  $R_{ct}$  值( $9\,143 \Omega \cdot \text{cm}^2$ )最大,镀层耐蚀性最好。

不同电沉积方式制备镀层在 3.5% NaCl 溶液中浸泡腐蚀 480 h 后的表面形貌如图 7 所示。由图 7 可以看出,直流电沉积镀层浸泡腐蚀后表面形成大量腐蚀坑,失去对基体的保护作用,这是由于  $\text{Cl}^-$  具有极强的穿透能力,在镀层表面凹坑等缺陷处聚集,加速局部腐蚀,使镀层溶解,形成点蚀坑<sup>[15]</sup>;脉冲电沉积镀层表面腐蚀坑密度明显降低,且腐蚀坑尺寸减小,但微裂纹较密集;超声脉冲电沉积镀层腐蚀后仍较为完整,只存在微裂纹,未出现明显点蚀现象,镀层耐蚀性较好。



(a) 直流

(b) 脉冲



(c) 超声脉冲

图 7 不同电沉积方式制备镀层经过浸泡腐蚀后的表面形貌

### 3 结论

(1) 直流电沉积 Ni-Sn-Mn 合金镀层晶粒粗大,存在裂纹和孔隙等缺陷,镀层质量较差;脉冲电沉积所得镀层晶粒细化,无明显缺陷,镀层质量较好;超声脉冲电沉积镀层平整致密,晶粒均匀细小,镀层质量最好。

(2) 采用直流、脉冲和超声脉冲电沉积方式制备的 Ni-Sn-Mn 合金镀层,Ni 和 Sn 质量分数依次减小,Mn 质量分数依次增大;镀层沉积速率依次提高。

(3) 与直流和脉冲电沉积相比,超声脉冲电沉积 Ni-Sn-Mn 合金镀层具有非晶结构,在 3.5% NaCl 溶液中自腐蚀电位( $-0.346 \text{ V}$ )最正,自腐蚀

其中,第 3 步 2-氯-1,1,1,2-四氟丙烷(HCFC-244bb)气相脱 HCl 合成 HFO-1234yf 是该路线的核心步骤<sup>[5]</sup>。除脱 HCl 反应外,HCFC-244bb 还可发生脱 HF 反应过程。结果表明,2 种反应过程的活化能非常接近(分别为 61.3 kJ/mol 与 58.5 kJ/mol),热力学上难以实现高选择脱 HCl 合成 HFO-1234yf<sup>[6]</sup>。另外,气相脱卤化氢反应为吸热反应,需要较高的反应温度才能实现原料的转化,因此发展合适的催化剂使 HCFC-244bb 高效向脱 HCl 产物 HFO-1234yf 转化是该合成路线中亟待解决的重点问题。

本课题组前期研究了 MgO 负载型催化剂在上述反应中的催化行为发现,载体 MgO 在反应中不稳定,会部分转变为 MgF<sub>2</sub><sup>[6]</sup>,使得催化剂结构、织构发生改变,导致反应活性下降。基于此,笔者选择可在上述反应中稳定存在的 MgF<sub>2</sub> 为载体,研究不同酸、碱性金属离子(Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Zr<sup>4+</sup>、K<sup>+</sup>、Cs<sup>+</sup>)改性对 MgF<sub>2</sub> 催化剂在该反应中催化性能的影响规律。通过制备高比表面积氟化物的新方法—多元醇氟化法,成功制备出高温下结构稳定、比表面积达 100 m<sup>2</sup>/g 的氟化镁<sup>[3]</sup>,被用作本反应的催化载体。同时,利用 XRD、SEM-EDS、BET、NH<sub>3</sub>-TPD 等手段对所制催化剂进行表征,并对其催化 HCFC-244bb 气相脱卤化氢反应行为进行了关联。

(上接第 104 页)

电流密度(3.162×10<sup>-8</sup> A/cm<sup>2</sup>)最低,电荷转移电阻(9 143 Ω·cm<sup>2</sup>)最大,耐腐蚀性最好。

## 参考文献

- [1] 宋振兴,马树元,姚素薇,等.电镀镍-锡合金耐腐蚀性能研究[J].电镀与精饰,2013,35(10):1-4.
- [2] Refaey S A M, Taha F A, Hasanin T H. Passivation and pitting corrosion of nanostructured Sn-Ni alloy in NaCl solutions[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51: 2942-2948.
- [3] Anicaia L, Peticab A, Costovicic S, et al. Electrodeposition of Sn and NiSn alloys coatings using cholinechloride based ionic liquids—Evaluation of corrosion behavior[J]. Electrochimica Acta, 2013, 114: 868-877.
- [4] Liu Jun, Yang Shuai, Xia Weisheng, et al. Microstructure and wear resistance performance of Cu-Ni-Mn alloy based hardfacing coatings reinforced by WC particles[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 654: 63-70.
- [5] 章志铨,郭嘉成,徐文彬,等.室温离子液体中电沉积高耐蚀性 Ni-Mn 薄膜[J].表面技术,2017,46(3):66-71.
- [6] 张杰,王清,王英敏,等.含 Fe 和 Mn 的 Ni<sub>30</sub>Cu<sub>70</sub> 固溶体团簇模

## 1 实验部分

### 1.1 催化剂的制备

#### 1.1.1 氟化镁载体的制备

采用多元醇氟化法制备氟化镁载体<sup>[3]</sup>:将 12.82 g Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O(0.05 mol)和 5.5 g 聚乙二醇 2000 溶解于 50 mL 乙二醇中形成无色透明溶液,然后在水浴温度 60℃ 及磁力搅拌下,将 10 g 氢氟酸水溶液(0.2 mol,质量分数为 40%)滴加至上述溶液中,继续搅拌 6 h 后于空气中老化过夜。样品于 90℃ 真空烘箱中干燥得到湿凝胶,再于 150℃ 继续干燥 12 h 获得白色或淡黄色氟化镁粉体。

#### 1.1.2 负载型氟化镁基催化剂的制备

采用等体积浸渍法制备负载型氟化镁基催化剂,具体步骤为:分别称量 0.28 g KF·2H<sub>2</sub>O、0.46 g CsF、0.97 g ZrOCl<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O、1.12 g Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O,室温下用适量纯净水溶解,将 0.1 mol 氟化镁粉末倒入上述溶液中,搅拌均匀后于室温下浸渍过夜,再于 90℃ 干燥 8 h,最后经 400℃ 焙烧 5 h 获得催化剂。催化剂标记为:MgF<sub>2</sub>(未浸渍其他组分)、3% Al/MgF<sub>2</sub>、3% Fe/MgF<sub>2</sub>、3% Zr/MgF<sub>2</sub>、3% K/MgF<sub>2</sub>、3% Ba/MgF<sub>2</sub>、3% Cs/MgF<sub>2</sub>。以上催化剂均经过压片、破碎、筛分后得到 40~60 目的试样,以备使用。

型与耐蚀性研究[J].金属学报,2009,45(11):1390-1395.

- [7] 张利衡,添加 Mn 和 Cr 对 Cu-9Ni-6Sn 合金组织与性能的影响[J].上海有色金属,2003,24(3):112-119.
- [8] 王琳,路金林,刘坤,等.电沉积方式对 Ni-SiC 纳米复合镀层性能的影响[J].表面技术,2017,46(6):180-184.
- [9] 常立民,刘伟,段小月.超声波对 Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合镀层耐蚀性的影响[J].腐蚀科学与防护技术,2010,22(6):526-529.
- [10] 丁志敏,冯秋元,宋建敏,等.电流密度对熔盐电镀铝晶粒形貌的影响[J].材料热处理学报,2012,33(9):129-133.
- [11] 赵广宏,何业东.脉冲参数对等离子电沉积镍镀层结构和性能的影响[J].材料热处理学报,2012,33(8):115-120.
- [12] 侯婷,周海红,郭志猛,等.电流密度对电镀铁-钨非晶合金镀层的影响[J].表面技术,2010,39(5):15-18.
- [13] Ambat R, Zhou W. Electroless Nickel-plating on AZ91D magnesium alloy: Effect of substrate microstructure and plating parameters[J]. Surface Coating Technology, 2004, 179: 124-128.
- [14] Qin Luo, Zhong Wu, Zhenbo Qin, et al. Surface modification of nickel-aluminum bronze alloy with gradient Ni-Cu solid solution coating via thermal diffusion[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 309: 106-113.
- [15] 林绿波,戴品强,林兰芳,等.纳米晶 Co-Ni-Fe 合金镀层在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀特性[J].稀有金属材料工程,2012,41(5):851-856. ■