

## 专题——镁铝钛及其合金表面处理技术

## 缓蚀剂对镁合金化学镀镍的影响

邵忠财<sup>1</sup>, 崔永辉<sup>1</sup>, 李广宇<sup>1</sup>, 邵颖<sup>1</sup>, 戴诗行<sup>1</sup>, 魏尧<sup>2</sup>

(1. 沈阳理工大学 环境与化学工程学院, 沈阳 110159;

2. 上海爱谱华顿电子工业有限公司, 上海 200000)

**摘要:** 目的 寻找有效抑制镁合金腐蚀的缓蚀剂, 提高镀层质量。方法 研究缓蚀剂的种类和用量对缓解镁合金腐蚀的影响, 研究不同缓蚀剂对化学镀镍层的影响。采用全浸失重实验对缓蚀剂的性能进行评价, 并通过扫描电子显微镜 (SEM)、能谱仪 (EDS)、X 射线衍射仪 (XRD) 和电化学测试对不同缓蚀剂下所得镀镍层的性能进行表征。结果 经过初步筛选, 六次甲基四胺 (Hexamethylenetetramine)、氟化铵 ( $\text{NH}_4\text{F}$ )、氟化氢铵 ( $\text{NH}_4\text{HF}_2$ ) 缓蚀剂的效果较明显。AZ91D 镁合金在腐蚀溶液中, 随着添加六次甲基四胺浓度的增加, 腐蚀速率先减小后增加。随着添加氟化铵、氟化氢铵浓度的增加, 腐蚀速率逐渐减小。添加缓蚀剂的体系中较不加缓蚀剂的体系中测得的电化学曲线好。六次甲基四胺、氟化铵、氟化氢铵效果最好时, 质量分数分别为 1%、1.5%、2%。不同种类缓蚀剂均可以有效抑制镁合金的腐蚀, 减小腐蚀电流。加入缓蚀剂的化学镀镍配方沉积和镀覆效果明显, 镀层电化学性能也有很大的提升。结论 六次甲基四胺 (Hexamethylenetetramine)、氟化铵 ( $\text{NH}_4\text{F}$ )、氟化氢铵 ( $\text{NH}_4\text{HF}_2$ ) 缓蚀剂的使用可以有效抑制镁合金的腐蚀, 提高化学镀镍层的质量。

**关键词:** 镁合金; 缓蚀剂; 镀镍层; 耐蚀性; 镀层性能; 电化学

**中图分类号:** TG174.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)04-0120-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.04.018

Effect of Corrosion Inhibitor on Electroless Nickel Plating on  
Magnesium AlloySHAO Zhong-cai<sup>1</sup>, CUI Yong-hui<sup>1</sup>, LI Guang-yu<sup>1</sup>, SHAO Ying<sup>1</sup>, DAI Shi-hang<sup>1</sup>, WEI Yao<sup>2</sup>

(1. Shenyang Ligong University, School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang 110159, China;

2. Shanghai AIPU WATON Electronics Industry Co., Ltd, Shanghai 200000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to look for corrosion inhibitors that effectively inhibit magnesium alloy corrosion and improve the quality of coating. Effects of corrosion inhibitors in different types and amounts on inhibiting corrosion of magnesium alloy and effects of different corrosion inhibitors on electroless nickel plating were studied. The performance of the corrosion inhibitor was evaluated by total immersion and weight loss test and the properties of nickel coatings with different corrosion inhibitors were characterized by scanning electron microscopy (SEM), energy disperse spectroscopy (EDS), X-ray diffractometer (XRD) and electrochemical tests. After a preliminary screening, the effects of hexamethylenetetramine,  $\text{NH}_4\text{F}$  and  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  are more

收稿日期: 2017-12-14; 修订日期: 2018-02-08

Received: 2017-12-14; Revised: 2018-02-08

基金项目: 辽宁省高等学校创新人才支持计划资助; 辽宁省自然科学基金 (201602648)

Fund: Supported by the Program for Liaoning Innovation Talents in University, Liaoning Provincial Natural Science Foundation of China (201602648)

作者简介: 邵忠财 (1967—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Biography: SHAO Zhong-cai (1967—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection.

obvious. The corrosion rate of AZ91D magnesium alloy firstly decreased and then increased with the addition of hexamethylenetetramine concentration in the corrosion solution. With the addition of  $\text{NH}_4\text{F}$  and  $\text{NH}_4\text{HF}_2$ , the corrosion rate decreased gradually. The electrochemical curve measured in the system after addition of corrosion inhibitor was lower than that of the system without corrosion inhibitor. The effects of hexamethylenetetramine,  $\text{NH}_4\text{F}$  and  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  reached the best at mass fraction at 1%, 1.5%, 2% respectively. All inhibitors regardless of type could effectively inhibit the corrosion of magnesium alloys and reduce the corrosion current. The deposition and plating effect of electroless nickel plating added with corrosion inhibitors was obvious and the electrochemical performance also improved greatly. Hexamethylenetetramine,  $\text{NH}_4\text{F}$ ,  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  corrosion inhibitor can effectively inhibit the corrosion of magnesium alloys and improve the quality of electroless nickel plating.

**KEY WORDS:** magnesium alloy; corrosion inhibitor; nickel plating; corrosion resistance; coating performance; electrochemist

镁的密度较低(其密度为  $1.74 \text{ g/cm}^3$ , 仅为铝的  $2/3$  和铁的  $1/4$ ), 其合金比强度及比刚度高, 具有良好的减震性、电磁屏蔽性、导热性和导电性, 被称为“21 世纪的绿色工程材料”, 在汽车、航空航天、电子产品、生物医学等领域具有潜在的应用前景<sup>[1-3]</sup>。但由于镁自身较活泼, 易被腐蚀, 这限制了其更广泛的应用<sup>[4-6]</sup>。对镁合金进行电镀和化学镀处理, 可以得到具有良好耐蚀性能的镀层, 对基体起到保护的作用。镀层主要由金属或者合金组成, 最常见的有 Ni 和 Ni-P 镀层<sup>[7-9]</sup>。但镁合金不能直接置于镀液中施镀, 须经特殊处理后方可施镀, 如浸锌、表面化学转化等<sup>[10-12]</sup>。在镀液中加入缓蚀剂, 可以有效减少镀液对镁合金基体的腐蚀<sup>[13-15]</sup>。本实验对几种常见缓蚀剂进行实验, 确定缓蚀剂的种类及浓度对缓蚀效率的影响, 并将缓蚀剂加入化学镀镍溶液中进行镁合金化学镀镍, 对所得的化学镀镍层进行了性能检测。

## 1 实验

### 1.1 实验材料及工艺流程

实验选用尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的 AZ91D 镁合金及面积为  $1 \text{ cm}^2$  的电化学试样。缓蚀剂种类有咪唑、HEDP、六次甲基四胺、氟化铵、氟化氢铵。

工艺流程: 自动磨片机打磨→大量蒸馏水冲洗→化学法除油→大量蒸馏水冲洗→化学转化→大量蒸馏水冲洗→吹干→检测。

### 1.2 实验步骤

镁合金腐蚀溶液配方及条件:  $\text{NiSO}_4$  25 g/L, 乳酸 5 g/L, 溶液温度  $80^\circ\text{C}$ , pH=6.0, 反应时间 10 min。化学镀镍的基础配方及条件:  $\text{NiSO}_4$  25 g/L, 乳酸 25 g/L,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  30 g/L, 溶液温度  $80^\circ\text{C}$ , pH=6.0, 反应时间 30 min。清洗液: 200 g/L  $\text{CrO}_3$ +10 g/L  $\text{AgNO}_3$ 。

镁合金经过机械预磨、化学除油等前处理后称量, 浸泡在镁合金腐蚀溶液中, 10 min 后取样, 先用

清洗液清洗表面残留物, 后用去离子水冲洗, 冷风烘干后称量。使用失重法测算试样的腐蚀速率, 计算出平均腐蚀速率。再将缓蚀剂(有机试剂咪唑、HEDP、六次甲基四胺、无机试剂氟化铵、氟化氢铵)分别按照质量分数 0.1% 加入腐蚀液中, 计算此时的平均腐蚀速率, 挑选缓蚀效果较好的缓蚀剂。

将缓蚀剂分别按质量分数 0.1%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5% 加入腐蚀液中, 10 min 后取样, 清除腐蚀产物后称量, 计算试样的腐蚀速率, 筛选出缓蚀剂缓蚀效果较好时的浓度。

对化学镀镍液进行改良, 在镀镍体系中加入最优浓度的缓蚀剂进行化学镀镍, 对镀层进行性能评价。

### 1.3 检测

全浸失重实验腐蚀速率计算公式为:

$$V = \frac{m_0 - m_1}{S_0 t} \quad (1)$$

式中:  $V$  为腐蚀速度 ( $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ );  $m_0$ 、 $m_1$  为样品腐蚀前后质量 ( $\text{mg}$ );  $t$  为腐蚀时间 ( $\text{min}$ );  $S_0$  为试样的表面积 ( $\text{cm}^2$ )。

从镀速、孔隙率、结合力等级判断镀层性能, 镀速按下面的公式计算得出:

$$K = \frac{104(m_1 - m_0)}{\rho S t} \quad (2)$$

式中:  $K$  为沉积速率 ( $\mu\text{m/h}$ );  $m_0$ 、 $m_1$  为化学镀前后质量 ( $\text{g}$ );  $\rho$  为镀层密度 ( $\text{g/cm}^3$ );  $S$  为试样表面积 ( $\text{mm}^2$ );  $t$  为镀镍时间 ( $\text{h}$ )。

本实验的镀层结合力检测方法采用划格子法, 具体方法遵从 GB/T 5270—85。本实验设定了 5 个评定标准, 见表 1。

通过贴滤纸法测定镁合金镀层的孔隙率, 以此评估镀层耐蚀性。配制 0.5 g/L 的铬黑 T 试液, 工艺流程为化学镀镍、试液浸泡、滤纸包吸、计算孔隙率(各步间水洗)。镀层的孔隙率为  $n/s$ , 其中  $n$  为孔隙斑点数目,  $s$  为被测镀层面积 ( $\text{cm}^2$ )。在计算孔隙数目时, 腐蚀点直径在 1 mm 以下, 每点以 1 个孔隙计; 腐蚀点直径在 1 mm 以上、3 mm 以下时, 每点以 3 个孔

表 1 结合力等级评定标准  
Tab.1 Adhesion assessment standards

等级	表面状态
5	划线无脱落, 粘拉无脱落
4	划线无脱落, 粘拉少量脱落
3	划线无脱落, 粘拉大量脱落
2	划线少量脱落
1	划线大量脱落

隙计; 腐蚀点直径在 3 mm 以上、5 mm 以下时, 每点以 10 个孔隙计<sup>[16]</sup>。

在 CHI660E 电化学工作站上, 采用三电极体系对镁合金在不同腐蚀溶液体系中的电化学行为进行测量, 同时对比镀镍镁合金与镁合金基体的电化学行为进行测量实验。采用 VEGA3 XMU 扫描电镜对镀层进行微观分析, 采用能谱仪对镀层不同区域进行 EDS 分析, 使用 XRD-6100 型 X 射线衍射仪对性能最好的镀层进行 XRD 分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 缓蚀剂的种类对缓蚀效果的影响

表 2 为不同缓蚀剂体系下镁合金的腐蚀速率。由表 2 可知, 不加入任何缓蚀剂的情况下, 镁合金的腐蚀速率最大, 而缓蚀剂咪唑、HEDP、六次甲基四胺、氟化铵、氟化氢铵均对腐蚀反应起抑制作用。其中六次甲基四胺、氟化铵、氟化氢铵三种缓蚀剂的缓蚀效果更好, 其中氟化铵的缓蚀效率达到了 26.63%, 六次甲基四胺和氟化氢铵缓蚀效率相近, 均达到了 18.5%左右, 故选取这三种缓蚀剂进行下一步实验。

表 2 不同缓蚀剂体系下镁合金腐蚀速率

Tab.2 Corrosion rate of magnesium alloy under different corrosion inhibitor systems

类别	腐蚀速率/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ )	类别	腐蚀速率/ ( $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ )
无缓蚀剂	0.5126	六次甲基四胺	0.4186
咪唑	0.5110	氟化铵	0.3761
HEDP	0.4917	氟化氢铵	0.4170

### 2.2 缓蚀剂的浓度对缓蚀效果的影响

#### 2.2.1 六次甲基四胺的浓度对缓蚀效果的影响

由镁合金在六次甲基四胺浓度不同的腐蚀体系中的失重曲线 (图 1) 可以看出, 起初镁合金的腐蚀速率随着六次甲基四胺浓度的增加而迅速减小, 六次甲基四胺质量分数为 1% 时, 镁合金的腐蚀速率最小, 继续增加六次甲基四胺的浓度, 镁合金的腐蚀速率变化不明显。这是因为六次甲基四胺胺基上的氮原子可

以与镁原子形成配位键, 产生化学吸附并成膜, 阻碍了基体与腐蚀溶液接触, 从而降低了腐蚀速率。六次甲基四胺质量分数为 1% 时, 已经形成了覆盖效果较好的吸附膜, 继续增大浓度, 无益于吸附膜的形成, 所以当六次甲基四胺质量分数大于 1% 时, 镁合金腐蚀速率基本不变。从镁合金基体腐蚀后的表现 (图 2) 可以很明显地看出, 镁合金在未添加缓蚀剂的腐蚀溶液发生严重腐蚀, 产生大量的蚀坑, 且蚀坑较深; 而镁合金在添加 1% 六次甲基四胺的腐蚀溶液中产生的蚀坑少且深度小。由极化曲线图 (图 3) 可知, 添

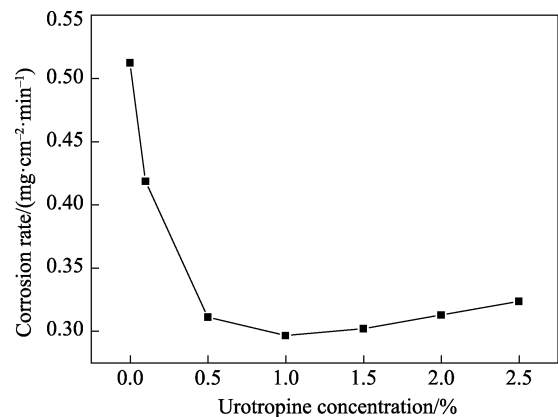


图 1 镁合金在六次甲基四胺浓度不同的腐蚀溶液中的失重曲线

Fig.1 Weight loss curve of magnesium alloy in corrosion solution with hexamethylenetetramine in different concentration



图 2 腐蚀溶液添加六次甲基四胺前后镁合金的表现  
Fig.2 Appearance of magnesium alloy before and after adding hexamethylenetetramine to corrosion solution

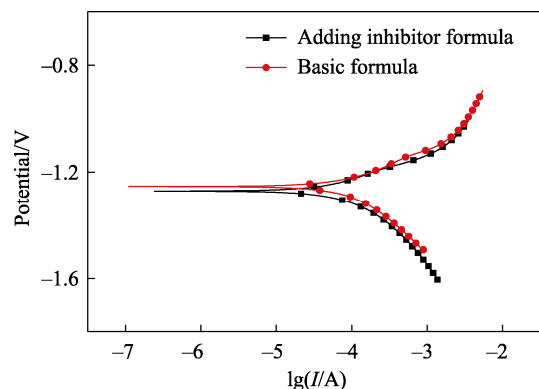


图 3 镁合金在基础腐蚀液和添加六次甲基四胺腐蚀液中的极化曲线

Fig.3 Polarization curves of magnesium alloy in basic formula and formula added with corrosion inhibitor

加六次甲基四胺可以降低腐蚀电流,起到了保护镁合金的作用。

### 2.2.2 氟化铵的浓度对缓蚀效果的影响

由镁合金在氟化铵浓度不同的腐蚀体系中的失重曲线(图 4)可以看出,镁合金的腐蚀速率随着添加氟化铵浓度的增加而逐渐减小。当氟化铵质量分数小于 1.5%时,镁合金的腐蚀速率下降很明显,当质量分数超过 1.5%时,镁合金的腐蚀速率变化不大。这是因为镁合金溶解产生的镁离子与添加剂中的氟离子在镁合金试样的表面形成稳定的氟化镁薄膜,阻滞了镁合金的溶解,对镁合金起到保护作用。当质量分数到达 1.5%以后,腐蚀溶液中氟离子已经过量,继续增加氟化铵的浓度无益于氟化镁薄膜的生成,所以此后镁合金的腐蚀速率下降不明显。本着添加剂应尽量少的原则,认为氟化铵质量分数为 1.5%时最优。从镁合金基体腐蚀后的表观(图 5)可以很明显地看出,镁合金在未添加缓蚀剂的腐蚀溶液中发生严重腐蚀,产生大量的蚀坑,而在添加了 1.5%氟化铵的腐蚀溶液中,镁合金表面溶解很少,表面产生了不光滑的膜层。由极化曲线图(图 6)可知,添加氟化铵可以降低腐蚀电流,提高腐蚀电位。

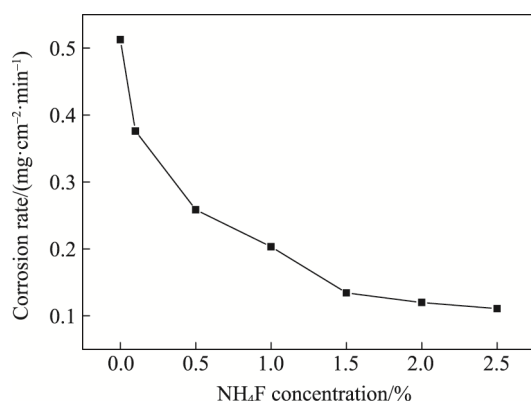


图 4 镁合金在氟化铵浓度不同的腐蚀溶液中的失重曲线  
Fig.4 Weight loss curve of magnesium alloy in corrosion solution with  $\text{NH}_4\text{F}$  in different concentration



图 5 腐蚀溶液添加氟化铵前后镁合金的表观  
Fig.5 Appearance of magnesium alloy before and after adding  $\text{NH}_4\text{F}$  to corrosion solution

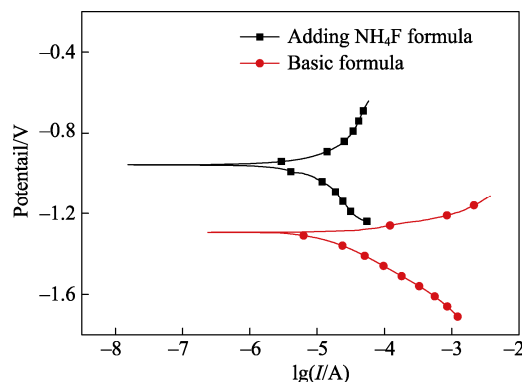


图 6 镁合金在基础腐蚀液和添加氟化铵腐蚀液中的极化曲线

Fig.6 Polarization curves of magnesium alloy in basic formula and formula added with corrosion inhibitor

### 2.2.3 氟化氢铵的浓度对缓蚀效果的影响

由镁合金在氟化氢铵浓度不同的腐蚀体系中的失重曲线(图 7)可以看出,镁合金的腐蚀速率随着添加氟化氢铵浓度的增加而逐渐减小。当氟化氢铵质量分数小于 2%时,镁合金的腐蚀速率下降很明显;当质量分数超过 2%时,镁合金的腐蚀速率变化不大。氟化氢铵缓蚀机理与氟化铵体系相似。本着添加剂应尽量少的原则,认为氟化氢铵质量分数为 2%时最优。从镁合金基体腐蚀后的表观(图 8)可以很明显地看出,镁合金在未添加缓蚀剂的腐蚀溶液中发生了严重腐蚀,产生大量的蚀坑,而在添加了 2%氟化氢铵的腐蚀溶液中,镁合金表面溶解很少。由极化曲线图(图 9)可知,添加氟化氢铵可以降低腐蚀电流,提高腐蚀电位。

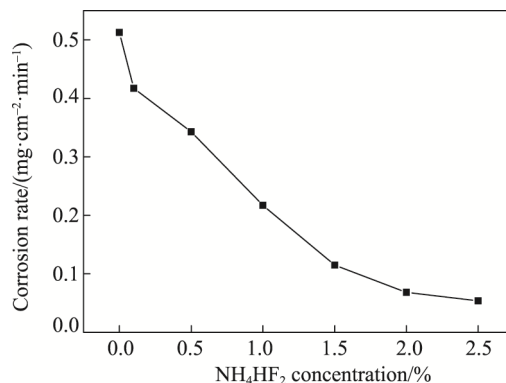


图 7 镁合金在氟化氢铵浓度不同的腐蚀溶液中失重曲线图  
Fig.7 Weight loss curve of magnesium alloy in corrosion solution with  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  in different concentration

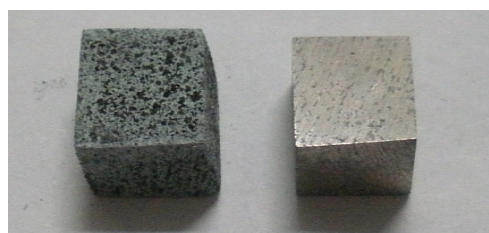


图 8 腐蚀溶液添加氟化氢铵前后镁合金的表观  
Fig.8 Appearance of magnesium alloy before and after adding  $\text{NH}_4\text{HF}_2$  into corrosion solution



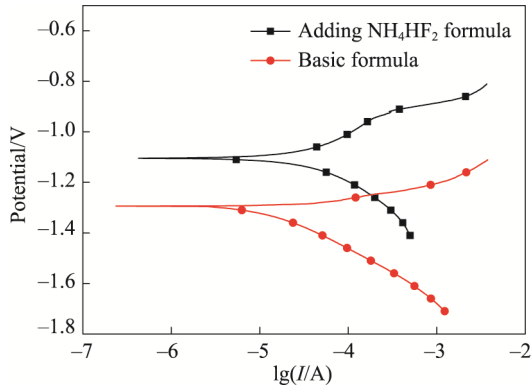


图 9 镁合金在基础腐蚀液和添加氟化氢铵腐蚀液中的极化曲线

Fig.9 Polarization curves of magnesium alloy in basic formula and formula added with corrosion inhibitor

## 2.3 缓蚀剂对化学镀镍层的影响

### 2.3.1 六次甲基四胺对化学镀镍层的影响

图 10 为添加六次甲基四胺缓蚀剂后进行化学镀镍得到的镁合金的表面形貌。由图 10 可以看出，添加 1%六次甲基四胺化学镀镍后，镁合金表面有大量镍沉积，但仍存在缝隙和沉积不完全区域，表面有腐蚀情况，镀层效果不理想。由图 11 可知，镁合金表面的胞状组织为镀上的镍，胞状镍的间隙为效果不理想区域，露出了镁合金基体。

### 2.3.2 氟化铵对化学镀镍层的影响

由表 3 可知，氟化铵作为缓蚀剂对化学镀镍的影响较明显。添加了 1.5%氟化铵后，镀速明显上升，而孔隙率稍微增大，可能是因为缓蚀剂浓度较大，夹杂在镀层中的几率增大，产生的孔隙增多，所得镀层的结合力等级也有明显上升。

图 12 为添加氟化铵化学缓蚀剂后进行化学镀镍得到的镁合金的表面形貌。如图 12 所示，镁合金表面镍的沉积量较多，并完整地覆盖在镁合金表面，在镀镍层上面还分布着较小的大小不一的镍胞状物，镀覆效果较好。图 13 为镁合金及镁合金化学镀镍层的极化曲线，可以看出添加氟化铵缓蚀剂所得的镀层腐蚀电流明显减小，腐蚀电位有很大提高，表明镁的耐腐蚀性能得到很大提高。

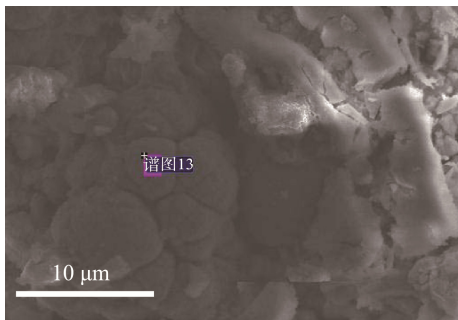


图 10 添加六次甲基四胺化学镀镍后镁合金 SEM 图  
Fig.10 SEM images of magnesium alloy after electroless nickel plating with hexamethylenetetramine

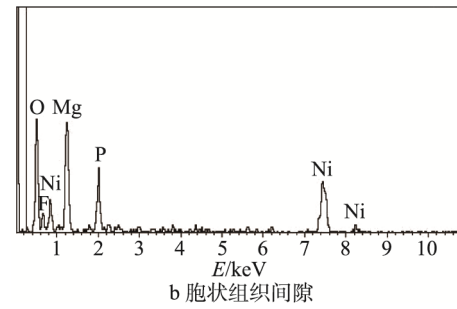
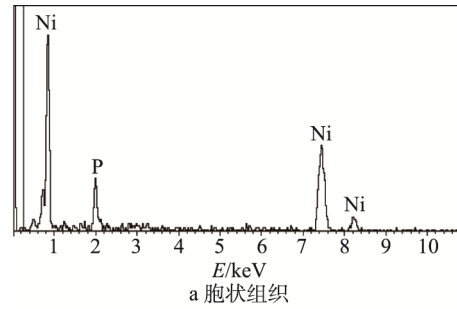


图 11 添加六次甲基四胺化学镀后镁合金表面能谱图  
Fig.11 EDS images of magnesium alloy after electroless plating with hexamethylenetetramine: (a) cellular tissue, (b) cell interstitial space

表 3 镀速及镀层性能测试结果

Tab.3 Plating speed and coating performance test results

氟化铵质量 分数/%	镀速/ ( $\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ )	孔隙率/ (个/ $\text{cm}^2$ )	结合力等级
0	1.3	1.7	1
1.5	12.5	2.3	3

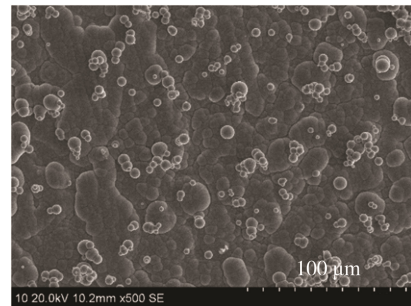


图 12 添加氟化铵化学镀后镁合金 SEM 图  
Fig.12 SEM images of magnesium alloy after electroless plating with  $\text{NH}_4\text{F}$

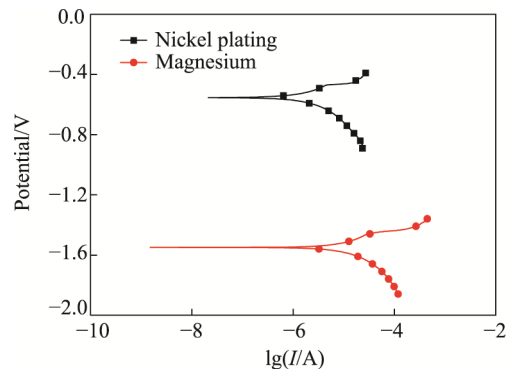


图 13 镁合金和添加氟化铵的镀镍镁合金的极化曲线  
Fig.13 Polarization curves of magnesium alloy and nickel-magnesium alloy

2.3.3 氟化氢铵对化学镀镍层的影响

由表 4 可知，氟化氢铵作为缓蚀剂对化学镀镍的影响十分明显。添加了 2%氟化铵后，镀速明显上升，孔隙率基本不变，所得镀层的结合力等级明显上升。

表 4 镀速及镀层性能测试结果

Tab.4 Plating speed and coating performance test results

氟化氢铵质量分数/%	镀速/( $\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ )	孔隙率/(个/ $\text{cm}^2$ )	结合力等级
0	1.3	1.7	1
2	15.6	1.6	4

图 14 为添加氟化氢铵化学缓蚀剂后进行化学镀镍得到的镁合金的表面形貌。添加 2%氟化铵后，镀层表面比较均匀、致密，镀覆效果十分理想。图 15 为镁合金及镁合金化学镀镍层的极化曲线，可以看出添加氟化氢铵缓蚀剂所得的镀层腐蚀电流明显减小，腐蚀电位有很大提高，表明镁的耐蚀性能得到很大提高。

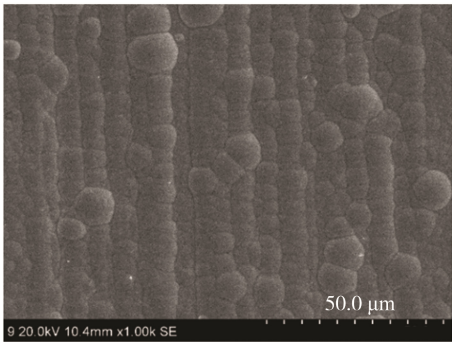


图 14 添加氟化氢铵化学镀后镁合金 SEM 图  
Fig.14 SEM images of magnesium alloy after electroless plating with  $\text{NH}_4\text{HF}_2$

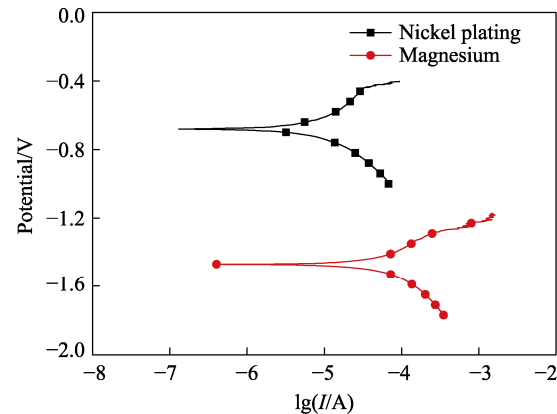


图 15 镁合金和添加氟化氢铵的镀镍镁合金的极化曲线  
Fig.15 Polarization curves of magnesium alloy and nickel-magnesium alloy

2.4 氟化氢铵缓蚀体系化学镀镍层 XRD 分析

对添加氟化氢铵缓蚀剂化学镀镍镀层进行 XRD 检测见图 16，衍射图在  $2\theta$  约为  $45^\circ$  处出现漫散射的宽化峰，表明镀层为非晶结构的镍层，镀层效果良好。

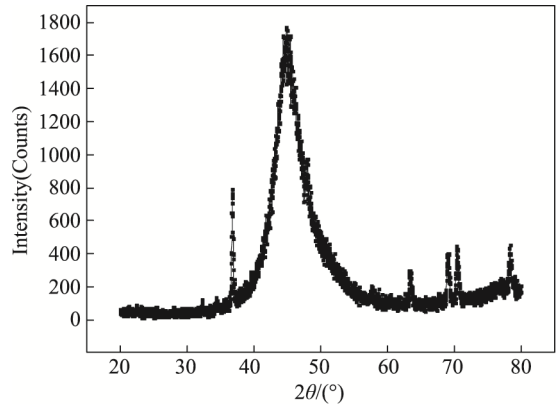


图 16 镁合金镀镍层 XRD 图  
Fig.16 XRD patterns of nickel plating coating on magnesium alloy

3 结论

- 1) 实验确定不同浓度的六次甲基四胺、氟化氢铵、氟化铵缓蚀剂均能起到良好的缓蚀作用。六次甲基四胺、氟化铵、氟化氢铵的缓蚀效果最优时的质量分数分别为 1%、1.5%、2%。缓蚀剂可以有效抑制镁合金的腐蚀，减小腐蚀电流，提高腐蚀电位。
- 2) 添加缓蚀剂的化学镀镍层与不添加的相比，其镀速与结合力都有极大的上升。添加氟化氢铵缓蚀剂化学镀镍后，镀层表面比较均匀、致密。添加氟化铵缓蚀剂化学镀镍后，镍胞状物大小不一，镀层质量较好，且电化学性能有较高的提升。添加六次甲基四胺缓蚀剂化学镀镍的镀层镀覆效果不理想。

参考文献：

[1] 沈骏. 镁合金表面防腐研究的前沿进展[J]. 功能材料, 2014, 45(17): 17023-17033.  
SHEN J. Advances in the Study of Surface Preservation of Magnesium Alloys[J]. Functional Materials, 2014, 45(17): 17023-17033.

[2] HORNBERGER H, VIRTANEN S, BOCCACCINI A R. Biomedical Coatings on Magnesium Alloys — A Review[J]. Acta Biomaterialia, 2012, 8(7): 2442-2455.

[3] ZHONG C, LIU F, WU Y T, et al. Protective Diffusion Coatings on Magnesium Alloys: A Review of Recent Developments[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 520(15): 11-21.

[4] ORLOV D. Enhanced Corrosion Resistance of Mg Alloy ZK60 after Processing by Integrated Extrusion and Equal Channel Angular Pressing[J]. Acta Materialia, 2011, 59(15): 6176-6186.

[5] 熊俊波, 张秀芝. 镁合金 AZ91 表面化学镀镍层的制备及性能研究[J]. 表面技术, 2009, 38(11): 34-36.  
XIONG J B, ZHANG X Z. Study on the Preparation and Property of Coatings on AZ91 Magnesium Alloy by Elec-

- troless Nickel Plating[J]. Surface Technology, 2009, 38(11): 34-36.
- [6] 张清, 李全安, 文九巴, 等. 稀土在镁合金腐蚀防护中的应用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 119(2): 119-121.  
ZHANG Q, LI Q A, WEN J B, et al. Application of Rare Earth in Corrosion Prevention of Magnesium Alloy[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 119(2): 119-121.
- [7] 胡荣, 邵忠财. 镁合金化学镀镍-磷合金溶液的优化与镀层性能[J]. 材料保护, 2015, 48(11): 4-7.  
HU R, SHAO Z C. Optimization and Performance of Electroless Nickel-Phosphor Alloy Solutions on Magnesium Alloys[J]. Materials Protection, 2015, 48(11): 4-7.
- [8] 张飞飞. 镁合金化学镀镍工艺的研究[J]. 电镀与环保, 2016, 36(4): 24-26.  
ZHANG F F. Investigation on Electroless Nickel Plating on Magnesium Alloy[J]. Electroplating & Pollution Control, 2016, 36(4): 24-26.
- [9] 刘海萍, 夏文超, 毕四富, 等. 镁合金直接化学镀镍工艺及镀层性能[J]. 电镀与涂饰, 2011, 30(2): 15-18.  
LIU H P, XIA W C, BI S F, et al. Direct Electroless Nickel Plating on Magnesium Alloys and Deposit Properties[J]. Electroplating & Finishing, 2011, 30(2): 15-18.
- [10] 胡荣, 陈英敏. 含缓蚀剂的镁合金化学镀镍溶液及其所得镀层性能的研究[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(11): 572-576.  
HU R, CHEN Y M. Study on Electroless Nickel Plating Solutions of Mg Alloy Containing Corrosion Inhibitor and Their properties[J]. Electropating & Finishing, 2017, 36(11): 572-576.
- [11] 邱敬东, 贾素秋, 关景鑫, 等. 以磷酸盐-高锰酸钾体系化学转化作为前处理的 AZ91D 镁合金化学镀镍工艺[J]. 电镀与涂饰, 2015, 34(15): 644-647.  
QIU J D, JIA S Q, GUAN J X, et al. Chemical Treatment of AZ91D Magnesium Alloy by Phosphate-Potassium Permanganate System as Pretreatment[J]. Electropating & Finishing, 2015, 34(15): 644-647.
- [12] 郭锋, 刘向艳, 李鹏飞. 镁合金微弧氧化层上低温化学镀镍研究[J]. 表面技术, 2011, 40(5): 73-76.  
GUO F, LIU X Y, LI P F. Study on Low Temperature Electroless Nickel Plating on the MAO Ceramic Coating of Magnesium Alloy[J]. Surface Technology, 2011, 40(5): 73-76.
- [13] 邹云, 王洋洋, 刘影, 等. 镁合金缓蚀剂的研究进展[J]. 电镀与环保, 2014, 34(4): 1-4.  
ZOU Y, WANG Y Y, LIU Y, et al. Research Progress of Magnesium Alloy Corrosion Inhibitors[J]. Electroplating & Pollution Control, 2014, 34(4): 1-4.
- [14] 周必芳, 周勇, 方坤, 等. AZ91D 镁合金用复合缓蚀剂缓蚀行为的研究[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(12): 1-5.  
ZHOU B F, ZHOU Y, FANG K, et al. Corrosion Behavior of Inhibitors Used for AZ91D Magnesium Alloy[J]. Plating and Finishing, 2012, 34(12): 1-5.
- [15] 胡晋莲, 李广宇, 邵忠财. 复合缓蚀剂在镁合金化学镀镍中的应用及镀层性能[J]. 电镀与涂饰, 2016, 35(21): 1112-1115.  
HU J L, LI G Y, SHAO Z C. Application of Composite Corrosion Inhibitor to Electroless Nickel Plating on Magnesium Alloy and Performance of Coating[J]. Electropating & Finishing, 2016, 35(21): 1112-1115.
- [16] 邵忠财, 田彦文. 镁合金化学镀镍层孔隙率的影响因素[J]. 材料研究学报, 2006, 20(4): 403-406.  
SHAO Z C, TIAN Y W. The Deposition Process of Electroless Nickel Plating on Magnesium Alloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2006, 20(4): 403-406.