

# Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层制备及耐蚀性的研究

赵丹, 徐旭仲, 刘亭亭

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063009)

**摘要:** **目的** 提高金属材料在海洋环境下的耐蚀性。 **方法** 采用化学镀方法在 Q235 碳钢表面施镀 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层, 采用扫描电镜 (SEM) 和能谱分析仪 (EDS) 对镀层表面形貌和断面成分进行了分析。 **结果** Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层相对于 Ni-Zn-P 合金镀层胞状组织更加均匀平滑, 胞与胞的边界结合更加连续致密。Ni-Zn-P 合金镀层断面厚度为 6.5  $\mu\text{m}$  左右, 锌和磷的质量分数分别约为 4% 和 14%。Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层断面总厚度约 7.5  $\mu\text{m}$ , 内层镀层的厚度约 2.3  $\mu\text{m}$ , 磷的质量分数约为 9%; 外层镀层厚度约 5.2  $\mu\text{m}$ , 锌和磷的质量分数分别约为 5% 和 11%。在 5%NaCl 溶液中腐蚀 144 h 后, Ni-Zn-P 合金镀层遭到了严重的破坏, 有许多裂纹, 而 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层仍然连续完整, 没有严重的破损, 只是局部腐蚀, 这说明双层镀层更耐蚀。 **结论** Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层腐蚀速率明显低于 Ni-Zn-P 合金镀层, 相对于 Ni-Zn-P 合金镀层耐蚀性更好。

**关键词:** Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层; Ni-Zn-P 合金镀层; 化学镀; 耐蚀性

**中图分类号:** TQ153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)04-0240-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.04.039

## Preparation and Corrosion Resistance of Bilayered Ni-P/Ni-Zn-P Composite Coating

ZHAO Dan, XU Xu-zhong, LIU Ting-ting

(School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve corrosion resistance of metal materials in marine environment. Ni-Zn-P alloy coating and Ni-P/Ni-Zn-P bilayered composite coating were prepared on Q235 steel by virtue of chemical plating. Surface morphology and fracture surface of the coatings were analyzed with SEM and EDS. The Ni-P/Ni-Zn-P bilayered composite coating was more uniform and smooth than Ni-Zn-P alloy coating, and the cell boundary was more continuous and dense as well. Cross section thickness of Ni-Zn-P alloy coating was about 6.5  $\mu\text{m}$ , and Zn and P mass fraction nearly 4% and 14% respectively. Overall thickness of Ni-P/Ni-Zn-P bilayered composite coating was about 7.5  $\mu\text{m}$ , thickness of inner coating about 2.3  $\mu\text{m}$ , P mass fraction about 9%; the outer coating about 5.2  $\mu\text{m}$ , Zn and P mass fraction of about 5% and 11% respectively. After being corroded for 144h in 5% solution, the Ni-Zn-P alloy coating was severely damaged and many cracks were present. The Ni-P/Ni-Zn-P bilayered composite coating remained intact and was subject to localized corrosion instead of serious damage, indicating that the

收稿日期: 2016-10-12; 修订日期: 2016-11-28

Received: 2016-10-12; Revised: 2016-11-28

基金项目: 河北省科技厅科技计划项目 (15211037); 华北理工大学研究生创新项目 (2016S24)

**Fund:** Hebei Science and Technology Department of Science and Technology Program(15211037), The Graduate Student Innovation Fund of North China University of Science and Technology(2016S24)

**作者简介:** 赵丹 (1977—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 金属材料腐蚀与防护技术, 轧制新技术与新工艺, 金属材料微结构与性能。

**Biography:** ZHAO Dan(1977—), Female, Doctor, Associate Professor, Reserch fouds: Metal Material Corrosion and Protection Technology, New Technology and New Process Rolling, Matal Materil Microsture and Performance.

bilayered coating was more resistant to corrosion. Corrosion rate of Ni-P Ni-Zn-P bilayered coating was significantly lower than that of Ni-Zn-P alloy coating, corrosion resistance of the former was better as well.

**KEY WORDS:** Ni-P/Ni-Zn-P bilayered coating; Ni-Zn-P alloy coating; chemical plating; corrosion resistance

随着工业的迅速发展,对材料的要求越来越严格,除了要求材料具备特定的力学性能和物理性能外,许多应用环境要求材料具有高耐蚀性,提高材料耐蚀性已经成为一个研究方向<sup>[1-3]</sup>。化学镀 Ni-P 具有镀层厚度均匀、耐蚀性能好和通过不同磷含量控制镀层磁性等优点<sup>[3-9]</sup>。但是,化学镀 Ni-P 保护层属于阴极性保护层,只有在镀层完好、没有孔隙的前提下才能起到较好的保护作用。一旦出现孔隙,Ni-P 镀层就会与基底钢铁构成腐蚀原电池加速基体的腐蚀,因此,Ni-P 镀层的存在不但保护不了基体反而会加速基体腐蚀<sup>[10]</sup>,这明显限制了化学镀 Ni-P 在海洋环境上的应用。本实验为了弥补化学镀 Ni-P 合金的这些缺点,在化学镀 Ni-P 合金镀层的基础上再在外面镀一层 Ni-Zn-P 合金镀层,利用两种镀层在电化学性质和硬度方面的差异,通过优化组合得到具有优异耐蚀的镀层<sup>[11-13]</sup>。Ni-Zn-P 镀层属于阳极型镀层,即使在孔隙存在的情况下,也不会对基体整体的防腐性能产生明显影响<sup>[14]</sup>。本文采化学镀方法在低碳钢 Q235 表面施镀 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层,研究了 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层表面形貌和断面成分,对比 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层的耐蚀性。

1 试验方法

1.1 基材处理

采用尺寸为 20 mm×25 mm×0.9 mm 的 Q235 低碳钢试样进行化学镀,其化学成分见表 1。试样一端打孔,按国标 GB/T 5776—2005 的规定进行表面处理。首先,对试样依次用 600#, 800#, 1000#, 1200#, 1500# 砂纸进行打磨,用去离子水清洗;然后,试样在 60 ~ 80 °C 的除油液中处理,用去离子水清洗;再在 10% 的盐酸溶液中浸泡 30~60 s 除去表面的氧化物;最后,试样在 5% 的盐酸中活化处理,直到试样的表面充满均匀的气泡为止。

表 1 Q235 低碳钢化学成分  
Tab.1 The chemical composition of Q235 steel wt%

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
含量	0.16	0.19	0.62	0.03	0.014	0.031	0.012

1.2 化学镀 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层和 Ni-Zn-P 合金镀层

化学镀 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层的镀液成分及工艺参数见表 2。

单层 Ni-Zn-P 合金镀层的工艺:预处理后的试样→镀 60 min 的 Ni-Zn-P→水洗→干燥。

Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层的工艺:预处理后的试样→先镀 20 min 的 Ni-P→再镀 60 min 的 Ni-Zn-P→水洗→干燥。

表 2 化学镀 Ni-P 和 Ni-Zn-P 镀液成分与工艺参数  
Tab.2 Electroless Ni-P and Ni-Zn-P bath composition and process parameters

镀液成分与工艺参数	Ni-P	Ni-Zn-P
硫酸镍/(g·L <sup>-1</sup> )	20	24
次亚磷酸钠/(g·L <sup>-1</sup> )	20~25	16~25
硫酸锌/(g·L <sup>-1</sup> )		0.6
硫酸铵/(g·L <sup>-1</sup> )		40
柠檬酸钠/(g·L <sup>-1</sup> )		50
苹果酸/(g·L <sup>-1</sup> )	16	
丁二酸钠/(g·L <sup>-1</sup> )	18	
pH	4.6~5.1	9~10.5
温度/°C	85	85

1.3 耐蚀性实验

采用静态挂片方法在 HH-S 2S 数显恒温水浴锅中进行耐蚀性实验。实验温度控制在(25±1)°C,腐蚀介质是 5%NaCl 水溶液,溶液用量应保证每 1 cm<sup>2</sup> 试样表面积不少于 20 mL 的量。

将以上制备得到的 Ni-Zn-P 合金镀层试样和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层试样竖直放入腐蚀介质中,保持试样距离液面 20 mm,实验周期 6、12、24、48、72、96、120、144、168h 记录每个试样腐蚀前后的质量。根据国标 GB/T 5667—2005 方法除锈、清洗、干燥,在干燥器中干燥 24 h 后称重。

1.4 结构表征与成分分析

采用蔡司显微镜和 Quanta 650 FEG 场发射扫描电子显微镜(SEM)观察腐蚀后锈层表面组织形貌,采用能谱分析仪(EDS)对镀层断面进行了分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表面形貌和成分分析

图 1 为 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层的表面形貌图。Ni-Zn-P 合金镀层 (图 a) 表面胞状之间有明显的空隙, 胞状组织不致密; Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层 (图 b) 表面胞状组织均匀致密, 更加平整。从镀层表面形貌可以看出 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层比 Ni-Zn-P 合金镀层更加致密, 孔隙率更低, 所以 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层耐蚀性更好。

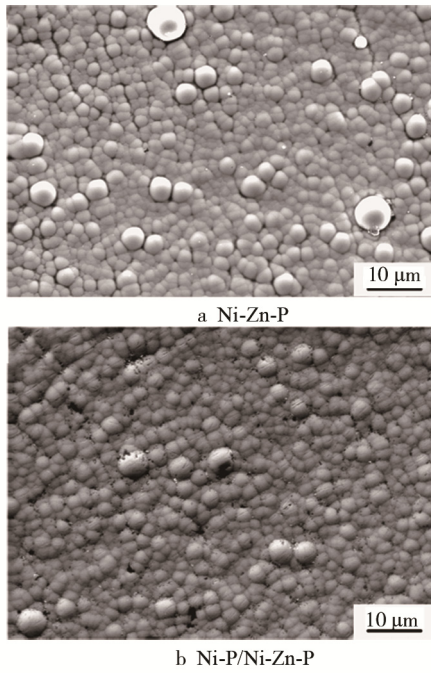


图 1 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层的 SEM 图  
Fig.1 The SEM image of Ni-Zn-P alloy plating layer and Ni-P / Ni-Zn-P double-layer composite coating

采用 EDS 技术, 分析镀层的表面成分, 结果见图 2 和表 3。从图 2 和表 3 中可以看出两种镀层的表面成分相差不大, 其中两种镀层的 P 含量 (全文含量均以质量分数计) 分别为 13.80% 和 12.39%, 两种镀层属于高磷镀层, 具有很好的耐蚀性。

表 3 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层表面成分

Tab.3 The coating surface composition of Ni-Zn-P alloy plating layer and Ni-P / Ni-Zn-P double-layer

	wt%		
镀层	Ni	P	Zn
Ni-Zn-P合金镀层	81.33	13.80	4.87
Ni-P/Ni-Zn-P双层复合镀层	82.43	12.39	5.18

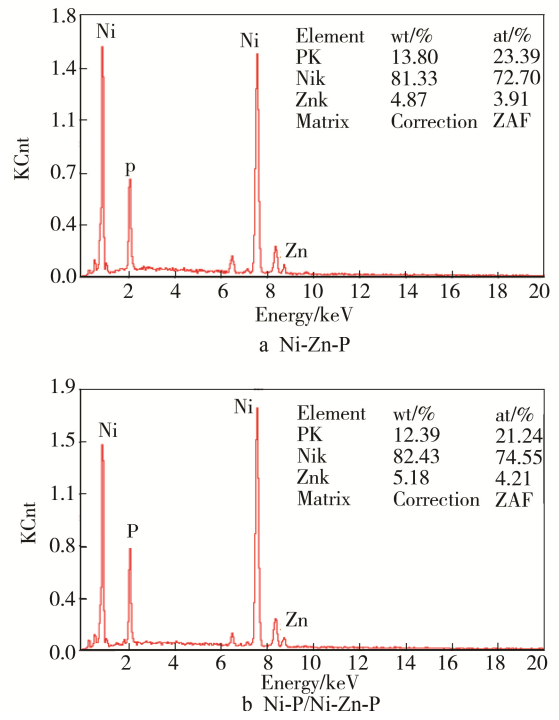
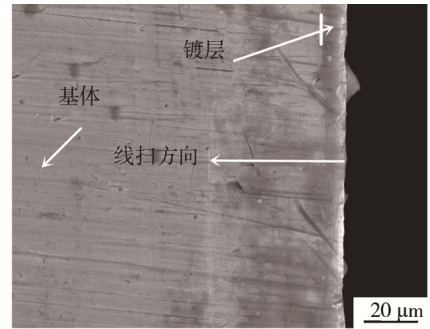


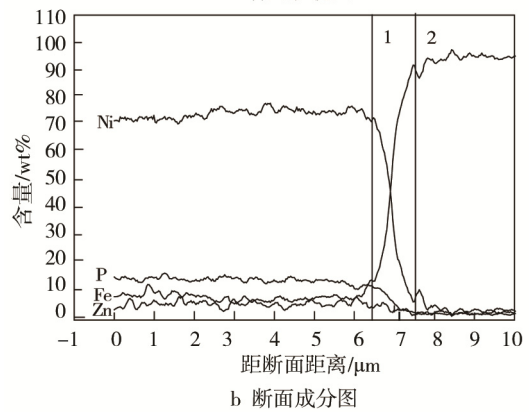
图 2 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层 EDS 图  
Fig.2 The EDS figure of Ni-Zn-P alloy plating layer and Ni-P / Ni-Zn-P double-layer composite coating

### 2.2 断面分析

图 3a 为 Ni-Zn-P 合金镀层断面 SEM 图, 基体与镀层之间过渡均匀, 连接良好, 说明镀层与基体结合



a 断面形貌图



b 断面成分图

图 3 Ni-Zn-P 合金镀层的断面形貌图和成分图  
Fig.3 The Ni-Zn-P alloy coating of section topography and composition diagram

良好。图 3b 是由基体到镀层表面各成分的变化曲线图, 由图可知, 1 的位置 Fe 的含量快速增大, Ni 含量突然下降, P、Zn 含量出现下降现象。在 2 位置处, 镀层中 Ni、P、Zn 含量已经下降到约 0%, Fe 的含量上升至约 100%, 位置 1 和位置 2 之间是镀层与基体的过渡区域。Ni-Zn-P 合金镀层的厚度为 6.5  $\mu\text{m}$  左右。

图 4 是内层 Ni-P 镀层施镀 20 min 外层 Ni-Zn-P 合金镀层施镀 60 min, 所得 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层的断面形貌图和成分图。图 4a 中镀层与基体没有明显的界限, 说明镀层与基体结合良好。图 4b 中 1 的位置之前 P 的含量在 11% 左右, Zn 含量在 5% 左右, Ni 含量在 80% 左右, 而且 1 的位置处 P、Zn 的含量都出现了下降趋势, 说明 1 位置之前为 Ni-Zn-P (外层) 镀层, 其厚度为 5.2  $\mu\text{m}$ 。在 1 位置之后 P 的含量变为 9% 左右, Zn 的含量变为 0%, 说明 1 位置与 2 位置之间是 Ni-P (内层) 镀层, 其厚度为 2.3  $\mu\text{m}$ 。在 2 位置之后镀层中的 Fe 含量开始迅速增加, Ni 含量则迅速地降低, 到 3 位置处, 镀层中 Fe 含量几乎已经达到了 100%, Ni、P 含量则均降至约 0%, 位置 2 和位置 3 之间是基体与内层镀层的过渡区。内层 Ni-P 镀层施镀 20 min, 外层 Ni-Zn-P 合金镀层施镀 60 min 所得 Ni-P/Ni-Zn-P 镀层的总厚度为 7.5  $\mu\text{m}$ 。

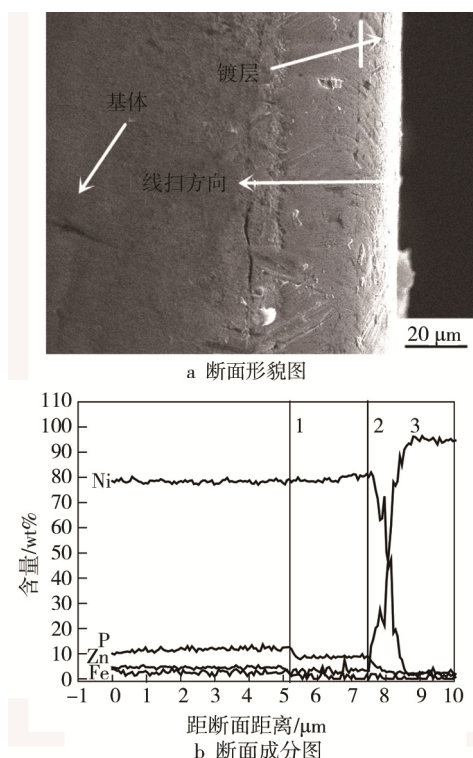


图 4 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层的断面形貌图和成分图  
Fig.4 The Ni-P/Ni-Zn-P double-layer of composite coating section topography and composition diagram

综合图 3、4 可以看出, Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层相对于 Ni-Zn-P 合金镀层厚度有了增加, 从而耐蚀性更好。根据文献<sup>[10]</sup>Ni-Zn-P 合金镀层属于阳极保护, Ni-P 合金镀层属于阴极保护, 在腐蚀时由于两种

镀层之间形成电位差, 在形成腐蚀电池时, 腐蚀作用优先在表面镀层横向进行, 从而延迟了腐蚀作用向整个镀层的穿透, 提高基体的耐蚀性。

## 2.3 镀层孔隙率的分析

根据 GB 5935—86 采用贴纸法测试 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层的孔隙率, 将充分浸泡腐蚀液的滤纸紧紧贴在试样外表面, 60 min 取下滤纸, 记下滤纸上蓝点的数量。结果是 Ni-Zn-P 合金镀层孔隙率为 3 个/ $\text{cm}^2$ , Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层的孔隙率为 1.7 个/ $\text{cm}^2$ , 结果表明 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层能够明显的降低镀层的孔隙率提高镀层的耐蚀性。根据文献<sup>[10]</sup>双层化学镀降低孔隙率的原因可能是中途改变镀液体系造成镀层表面针孔错位, 从而大大降低镀层孔隙率。

## 2.4 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/ Ni-Zn-P 双层复合镀层在 5%NaCl 溶液中腐蚀行为

### 2.4.1 腐蚀速率

根据国标 GB/T 5667—2005, 腐蚀速率计算公式如下:

$$V = \frac{K \times \Delta m}{St\rho}$$

上式中:  $V$  是腐蚀速率, 单位  $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ ;  $K$  是常数  $8.76 \times 10^4$ ;  $\Delta m$  是腐蚀前后的质量差, 单位  $\text{g}$ ;  $S$  是试样总表面积, 单位  $\text{cm}^2$ ;  $t$  是浸泡时间, 单位  $\text{h}$ ;  $\rho$  是材料密度 7.85, 单位  $\text{g}/\text{m}^3$ 。

从图 5 中可以看出两种镀层的腐蚀速率的总体变化趋势相同, 腐蚀初期, 腐蚀速率为 0; 腐蚀 6 h 后, Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层的腐蚀速率都开始迅速增加, Ni-Zn-P 合金镀层的腐蚀速率比 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层的腐蚀速率增加更快。Ni-Zn-P 合金镀层的腐蚀速率在 72 h 时达到最大值, 而后腐蚀速率在  $0.03 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$  上下波动。Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层的腐蚀速率在 144 h 时达到最大值, 而后基本在  $0.028 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$  上下波动。两种镀层呈现这种趋势原因是: 腐蚀初期, Ni-Zn-P 和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层保护基体材料, 镀层基本不会发生腐蚀; 腐蚀 6 h 后, 腐蚀速率迅速增加是由于 O 元素的作用, 镀层被破坏发生腐蚀, 之后腐蚀速率缓慢增加是由于镀层腐蚀生成氧化物覆盖在点蚀坑上, O 原子无法穿过氧化物层; 腐蚀后期,  $\text{Cl}^-$  半径小, 穿透氧化物层导致镀层发生了均匀腐蚀。对比发现, 在整个腐蚀期内, Ni-Zn-P 合金镀层腐蚀速率低于 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层, 这是由于 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层在腐蚀时由于两种镀层之间形成电位差, 在形成腐蚀电池时, 腐蚀作用优先在



表面镀层横向进行,从而延迟了腐蚀作用向整个镀层的穿透,提高基体的耐蚀性。

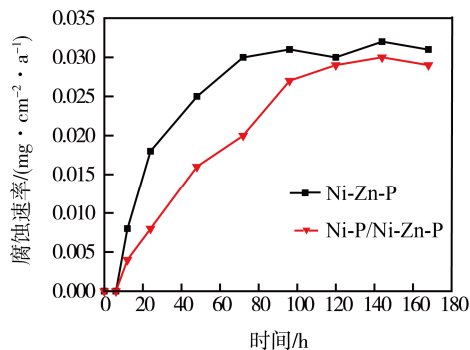
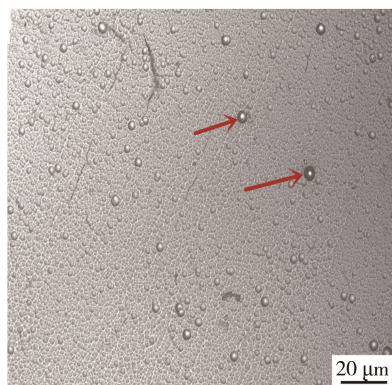
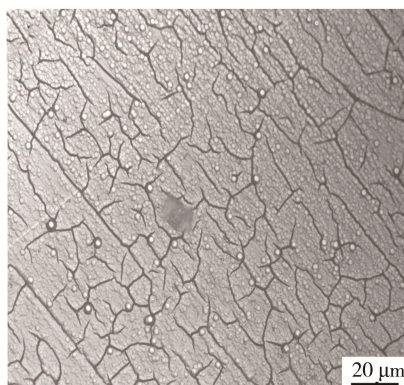


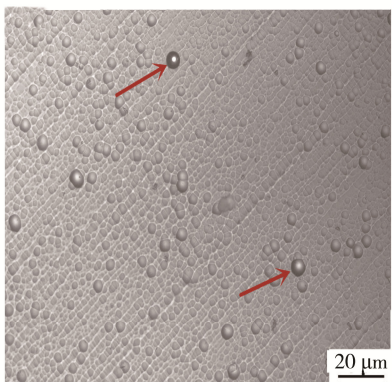
图5 Ni-Zn-P 和 Ni-P/Ni-Zn-P 镀层腐蚀速率与时间的关系  
Fig.5 Relationship Ni-Zn-P and Ni-P/Ni-Zn-P coatings corrosion rate and time



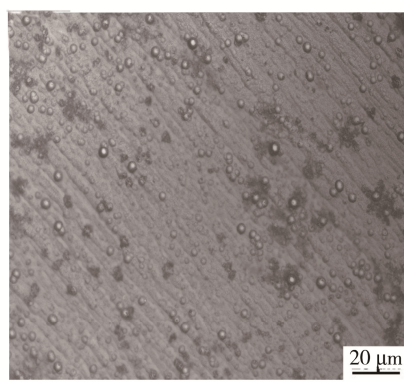
a Ni-Zn-P合金镀层腐蚀6 h



b Ni-Zn-P合金镀层腐蚀144 h



c Ni-P/Ni-Zn-P双层复合镀层腐蚀6 h



d Ni-P/Ni-Zn-P双层复合镀层腐蚀144 h

图6 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层腐蚀除锈后的金相图  
Fig.6 The photomicrographs of Ni-Zn-P alloy coating and Ni-P/Ni-Zn-P double-coating rust after corrosion

### 3 结论

1) Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层比 Ni-Zn-P 合金镀层胞状组织更加均匀平滑,胞与胞的边界结合更加连续致密。

2) Ni-Zn-P 合金镀层的厚度为 6.5 μm 左右, 锌含量约为 4%, 磷含量约为 14%, 镍含量约在 75%。Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层总厚度约 7.5 μm, 内层镀层的厚度约 2.3 μm, 磷含量约为 9%, 镍含量约在

#### 2.4.2 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层腐蚀形貌

图6为 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层腐蚀除锈后的金相图。a、c 图分别为 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层腐蚀 6 h 的金相图,可以看出,镀层连续完整,没有破损,但是镀层有个别胞状组织的边界发生腐蚀(图 a、c 中箭头所示);从 b 图可以看出 Ni-Zn-P 合金镀层在腐蚀 144 h 时镀层有许多裂纹,开始脱落,说明镀层遭到了严重的破坏;从 d 图可以看出 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层在腐蚀 144 h 时仍然连续完整,没有严重的破损,只是局部腐蚀,对比发现 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层耐蚀性更好。

79%; 外层镀层厚度约 5.2 μm, 锌含量约为 5%, 磷含量约为 11%, 镍含量约在 79%。

3) Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层能够明显降低镀层孔隙率,从而提高镀层的耐蚀性。

4) Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层腐蚀速率明显低于 Ni-Zn-P 镀层。

5) 在 5%NaCl 溶液中腐蚀 6 h 后, Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层和 Ni-Zn-P 合金镀层晶界周围开始发生腐蚀;在 144 h 后 Ni-Zn-P 合金镀层遭到了严重的破

坏,有许多裂纹,而 Ni-P/Ni-Zn-P 双层复合镀层仍然连续完整,没有严重的破损,只是局部腐蚀,这说明双层镀层更耐蚀。

#### 参考文献:

- [1] 姜晓霞,沈伟. 化学镀理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 232—234.  
JIANG Xiao-xia, SHEN Wei. Plating Theory and Practice[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 232—234.
- [2] 武慧慧,郝利锋,韩生. 化学镀镍的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2014, 36(3): 18.  
WU Hui-hui, HAO Li-feng, HAN Sheng. Research Advances of Electroless Plating of Nickel-Phosphorus Alloy[J]. Planting and Finishing, 2014, 36(3): 18—21.
- [3] 唐娟,程凯,张韧,等. 化学镀镍-磷的研究与应用[J]. 电镀与涂饰, 2011, 30(8): 24.  
TANG Juan, CHENG Kai, ZHANG Ren, et al. Review on the Study and Application of Electroless Nickel-Phosphorus Plating[J]. Electropolishing & Finishing, 2011, 30(8): 24.
- [4] ZHAO Guan-lin, YONG Zou, ZHANG Hui, et al. Correlation between Corrosion Resistance and the Local Atomic Structure of Electroless, Annealed Ni-P Amorphous Alloys [J]. Materials Letters, 2014, 132: 221—223.
- [5] 徐文芳,石志新,梁平,等. 镀液中 $\text{Fe}^{2+}$ 含量对Ni-P化学镀层耐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(8): 122—124.  
XU Wen-fang, SHI Zhi-xin, LIANG Ping, et al. Effect of  $\text{Fe}^{2+}$  Content in Bath on Corrosion Resistance of Ni-P Electroless Coating[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(8): 122—124.
- [6] CHENG Yan-hai, CHEN Heng-yang, ZHU Zhen-cai, et al. Tribological Behavior of Ni-P Deposits on Dry Condition[J]. Science Direct, 2014, 43(1): 0011—0016.
- [7] 陈步明,郭忠诚. 化学镀研究现状及发展趋势[J]. 电镀与精饰, 2011, 33(11): 11—15.  
CHEN Bu-ming, GUO Zhong-cheng. Current Research Status and Development Trends of Electroless Plating[J]. Planting and Finishing, 2011, 33(11): 11—15.
- [8] 黄晖,富阳,刘艳华,等. Ni-P 化学镀层对工业锅炉腐蚀防护的可行性研究[J]. 电镀与环保, 2014, 34(6): 40.  
HUANG Hui, FU Yang, LIU Yan-hua, et al. Feasibility Study of Ni-P Electroless Coating on Corrosion Protection of Industrial Boiler[J]. Electroplating & Pollution Control, 2014, 34(6): 40.
- [9] 金永中,杨奎,曾宪光,等. 温度对化学镀 Ni-P 合金层形貌、硬度及耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 23—26.  
JIN Yong-zhong, YANG Kui, ZENG Xian-guang, et al. Influence of Plating Temperature on the Morphology, Hardness and Corrosion Resistance of Electroless Ni-P Alloy Plating[J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 23—26.
- [10] 高荣杰,杜敏,孙晓霞,等. 双层 Ni-P 化学镀工艺及镀层在 NaCl 溶液中耐蚀性能的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(6): 435—438.  
GAO Rong-jie, DU Min, SUN Xiao-xia, et al. Electroless Deposition of Double Layered Ni-P Coating and Its Corrosion Performance in Sodium Chloride Solutions[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2007, 19(6): 435—438.
- [11] 刘景辉. W 含量对 Ni-P/Ni-W-P 双层镀层性能的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(16): 156—157.  
LIU Jing-hui. Influence of W Contents on Property of Ni-P/Ni-W-P Coating[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(16): 156—157.
- [12] 范希梅,张会广,郝军,等. 双层 Ni-P 合金镀层制备及耐蚀性[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(3): 389—392.  
FAN Xi-mei, ZHANG Hui-guang, HAO Jun, et al. Fabrication and Corrosion Resistance of N-P Duplex Layer Coating[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(3): 389—392.
- [13] 张翼,方永奎,张科. 酸性 Ni-Mo-P/Ni-P 双层化学镀工艺研究[J]. 中国表面工程, 2003, 16(1): 34—37.  
ZHANG Yi, FANG Yong-kui, ZHANG Ke. Study on the Double Layered Electro Less Plating of Ni-Mo-P/Ni-P Alloy in Acidic Solution[J]. China Surface Engineering, 2003, 16(1): 34—37.
- [14] 柳飞,朱绍峰,林晓东,等. 热处理对化学沉积 Ni-Zn-P 合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2010, 35(10): 21—24.  
LIU Fei, ZHU Shao-feng, LIN Xiao-dong, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Ni-Zn-P Alloy Plating Prepared by Electroless deposition[J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35(10): 21—24.