

# Ni-Zn-P 合金镀层在人工模拟海水中腐蚀行为的研究

赵丹, 徐旭仲, 徐博

(华北理工大学, 河北 唐山 063009)

**摘要:** 目的 提高金属材料在海洋环境中的耐腐蚀性和使用寿命。方法 采用碱式化学镀方法在 Q235 碳钢表面施镀 Ni-P 镀层和 Ni-Zn-P 合金镀层, 镀液配方  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  20 ~ 25 g/L,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\text{Na}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  50 ~ 70 g/L,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  25 ~ 30 g/L,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  15 ~ 25 g/L。制备 Ni-Zn-P 合金镀层时, 在以上配方中加入 0.4 ~ 0.8 g/L  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。采用金相显微镜和扫描电子显微镜 (SEM) 观察镀层在人工模拟海水中腐蚀前后的组织形貌, 用能谱分析仪 (EDS) 分析镀层腐蚀前后表面成分。结果 Ni-P 镀层和 Ni-Zn-P 合金镀层中的 P 质量分数分别为 11.26% 和 9.97%。从 P 含量和镀层组织形貌, 可以确定得到的两种镀层是连续致密的非晶镀层。Ni-Zn-P 合金镀层比 Ni-P 镀层的胞状组织更加均匀平滑, 胞与胞的边界结合更加连续致密。在人工模拟海水中腐蚀 144 h 后, Ni-P 镀层出现明显的点蚀坑, Ni-Zn-P 合金镀层仍然连续完整。Ni-Zn-P 合金镀层腐蚀后, Zn 含量明显下降, 并出现少量的 Fe 和 O, 表明合金镀层腐蚀过程是 Zn 优先被腐蚀, 然后镀层逐渐被腐蚀破坏, 最后基体发生腐蚀。Ni-Zn-P 合金镀层的腐蚀速率明显低于 Ni-P 镀层的。结论 Ni-Zn-P 合金镀层的胞状组织比 Ni-P 镀层的更加均匀平滑, 胞与胞的边界结合更加连续致密, Ni-Zn-P 合金镀层腐蚀速率明显低于 Ni-P 镀层。

**关键词:** 化学镀; Ni-Zn-P 镀层; Ni-P 镀层; 耐蚀性

**中图分类号:** TQ153.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2016)04-0169-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.028

## Corrosion Behavior of Ni-Zn-P Alloy Coating in Artificial Seawater

ZHAO Dan, XU Xu-zhong, XU Bo

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

**ABSTRACT:** **Objective** To improve the service life and corrosion resistance of metal materials in the marine environment.

**Methods** The Ni-P coating and Ni-Zn-P alloy coatings were prepared on Q235 steel by alkaline electroless plating technique. The bath formula was:  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  20 ~ 25 g/L,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\text{Na}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  50 ~ 70 g/L,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  25 ~ 30 g/L,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  15 ~ 25 g/L. Ni-Zn-P alloy coating was prepared by adding 0.4 ~ 0.8 g/L of  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  into the above formula. The surface morphology of coatings before and after corrosion in artificial simulated seawater was observed by optical microscope and SEM. The surface com-

收稿日期: 2015-12-31; 修订日期: 2016-02-06

Received: 2015-12-31; Revised: 2016-02-06

基金项目: 华北理工大学研究生创新项目 (2016S24)

Fund: Supported by 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, Ph. D., Associate professor, Research focus: corrosion and protection technology of metal materials, new technology and new process of rolling, microstructure and performance of metal materials.

position of coatings before and after corrosion was analyzed by EDS. **Results** The P contents of Ni-P plating and Ni-Zn-P alloy coating were 11.26 wt% and 9.97 wt%, respectively. From the P content and coating microstructure, it could be determined that the two coatings obtained were continuous dense amorphous coatings. The Ni-Zn-P alloy coating was more uniform and smooth than the Ni-P coating, and the cell boundary was more continuous and denser. After 144 h corrosion in artificial simulated seawater, Ni-P coating showed obvious pitting, while the Ni-Zn-P alloy coating was still intact without damage and localized corrosion. After corrosion, the content of Zn decreased obviously and a small amount of Fe and O appeared in the Ni-Zn-P alloy coating, indicating that Zn was first corroded in the corrosion process of the alloy coating, then the coating was gradually corroded, and finally, the substrate was corroded. The corrosion rate of Ni-Zn-P alloy coating was significantly lower than that of Ni-P coating. **Conclusion** The Ni-Zn-P alloy coating was more uniform and smooth than the Ni-P coating, and the cell boundary was more continuous and denser. The corrosion rate of Ni-Zn-P alloy coating was significantly lower than that of Ni-P coating.

**KEY WORDS:** electroless plating; Ni-Zn-P alloy coating; Ni-P coating; corrosion resistance

随着人类步入海洋开发的新时代,世界各国对海洋工业的发展越来越重视。碳钢材料在海洋领域得到了广泛的应用,例如船舶的螺旋桨、外壳、海港码头的各种设施、海中电缆、海上输油管道和采油平台等。海水具有很强的腐蚀性,大多数金属和合金在海水中会遭到不同程度的腐蚀<sup>[1-3]</sup>。此外,海水中存在大量的海洋微生物,它们会附着在浸泡于海水中的金属表面,对其表面产生严重的污损<sup>[4-5]</sup>。海水对金属材料的腐蚀会缩短材料的使用寿命,大大增加了产品设施的维护成本,存在安全隐患,甚至造成严重的工程事故。为了更好地利用海洋资源,开发先进的防腐耐污材料和技术,提高金属材料在海洋环境中的使用寿命已经成为材料科学领域研究方向之一。

化学镀方法是常用的材料保护技术,其中 Ni-P 镀层研究最多且应用最广<sup>[6-11]</sup>,该镀层具有硬度高、耐蚀性、耐磨性、可焊性和深镀能力强等诸多优异性能,但 Ni-P 镀层属于阴极型镀层,当镀层应用于容器内表面的防腐时,一般不允许出现孔隙,否则就会加速容器局部腐蚀,造成穿孔,而化学镀本身难以彻底消除孔隙的产生。Ni-Zn-P 镀层属于阳极型镀层,在孔隙存在的情况下,不会对镀层整体防腐性能产生明显的影响。Ni-Zn-P 镀层耐蚀性强、延展性好,而且低氢脆、内应力小,可以有效地解决容器的内表面防腐问题<sup>[12]</sup>。因此,Ni-Zn-P 合金镀层具有广阔的应用前景,国内外研究者<sup>[13-17]</sup>关于 Ni-Zn-P 镀层的工艺参数、组织结构、冲蚀特性和热处理条件进行了研究。本文采用碱式化学镀方法在低碳钢 Q235 表面施镀 Ni-P 镀层和 Ni-Zn-P 合金镀层,对比 Ni-P 镀层和 Ni-Zn-P 合金镀层的耐蚀性,研究 Ni-Zn-P 合金镀层在人工模拟海水中的腐蚀过程。

## 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(以质量分数计)为: C 0.16%, Si 0.19%, Mn 0.62%, P 0.03%, S 0.014%, Cr 0.031%, Ni 0.012%。试样一端打孔,按国标(GB/T 5776—2005)的规定进行表面处理。

1) 打磨。主要是去除表面的铁锈,使表面平整光滑,便于清晰地观察表面形貌。分别使用 800#、1000#、1200# 砂纸进行打磨,最后一道工序砂纸的选择要合适,打磨过程中注意均匀打磨,防止划痕的出现。

2) 碱洗。主要目的是为了除去钢铁表面在运输加工过程中的工业用油、抛光油等油脂或者污物。根据镀件表面存在的油污情况可用不同的方式进行除油,本实验采用碱洗。试样在 60~80℃ 的除油液中清洗 10 分钟,然后用 70℃ 的热水冲洗,最后用冷水冲洗。

3) 超声清洗。目的是为了除去试样表面晶粒间的油污。将碱洗后的试样放入装有去离子水的烧杯中,放入超声清洗器中清洗 10 分钟左右,分别使用冷水和热水冲洗。

4) 酸洗。主要使试样表面的物质与酸发生反应,除去试件表层没有被砂纸磨掉的氧化铁皮、氧化膜、锈蚀产物。本实验采用化学酸洗方式,在室温下将试样浸没于质量分数为 10% 的盐酸中 3 分钟左右。

5) 活化。主要目的是剥离工件表面在酸洗过程中产生的一些氧化膜,使试样表面产生无数活化点,活化点能量较高,利于催化反应的发生。这个工序对

镀层和基材金属的结合起着十分重要的作用,工件经过活化后,应立即清洗并进行下一步的化学镀。活化配方及工艺:在室温下,试样在 3% (质量分数) 的盐酸中活化,直到试样的表面充满均匀的气泡为止,时间为 20 ~ 30 秒。

1.2 化学镀 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P 镀层的制备

采用化学镀设备在 Q235 试样表面施镀 Ni-P 镀层和 Ni-Zn-P 合金镀层,镀液配方为:  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  20 ~ 25 g/L,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\text{Na}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  50 ~ 70 g/L,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  25 ~ 30 g/L,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  15 ~ 25 g/L。制备 Ni-Zn-P 合金镀层时,在以上配方中加入 0.4 ~ 0.8 g/L  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。用 NaOH 调节镀液 pH 为 10.5,施镀温度为 85 ℃,搅拌转速为 400 r/min,连续搅拌。将上述预处理好的基材试样放入镀液中施镀 90 分钟制备 Ni-Zn-P 合金镀层。施镀结束后取出试样,用清水清洗 1 ~ 2 min,然后使用无水酒精在超声清洗仪中清洗 1 ~ 3 分钟,取出吹干,将试样放入干燥器中备用。

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  $(25 \pm 1)$  ℃,腐蚀介质是人工模拟海水(质量分数为 3.5% 的 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。

将以上制备得到的 Ni-Zn-P 合金镀层试样和 Ni-P 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 1、6、12、24、48、72、96、120、144、168、192、216、240 h,每个周期需要取出三个平行样进行测试。根据国标 GB/T 16545—1996 方法除锈、清洗、干燥,在干燥器中干燥 24 h 后称量。

2 结果与讨论

2.1 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P 镀层组织形貌和成分分析

图 1 为 Ni-P 镀层和 Ni-Zn-P 合金镀层的 SEM 图,两种镀层都连续致密,胞状组织清晰可见。比较发现 Ni-Zn-P 合金镀层的胞状组织比 Ni-P 镀层的更加均匀平滑,胞与胞的边界结合更加致密,这是由于 Zn 的加入使镀液更加稳定,镀速降低,形核率增加,

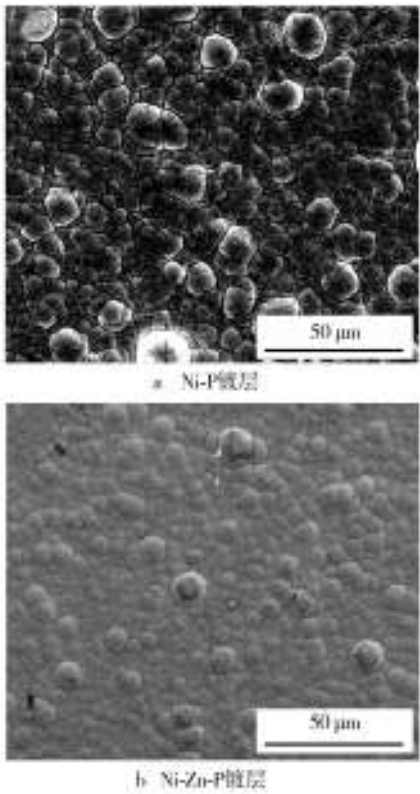


图 1 Ni-P 和 Ni-Zn-P 镀层 SEM 图  
Fig.1 SEM images of Ni-P and Ni-Zn-P alloy coatings: a) Ni-P plating coating, b) Ni-Zn-P alloy coating

镀层与基体材料的结合更加致密。  
采用 EDS 技术,分析镀层的表面成分。Ni-P 镀层和 Ni-Zn-P 合金镀层的成分见表 1,两种镀层 P 的质量分数分别为 11.26% 和 9.97%。从 P 含量和镀层组织形貌,可以确定得到的两种镀层是连续致密的非晶镀层。

表 1 Ni-P 镀层和 Ni-Zn-P 合金镀层成分  
Tab.1 Composition of Ni-P plating and Ni-Zn-P alloy coating %

Element	Ni-P Coating	Ni-Zn-P Coating
Ni	79.65	84.37
Zn	0	4.31
P	11.26	9.97

2.2 镀层在人工模拟海水中腐蚀行为

2.2.1 腐蚀速率

根据国标 GB/T 5776—1986,一般以腐蚀深度表示腐蚀速率,计算公式如下:

$$v = \frac{K \times \Delta m}{S \rho}$$

(1)

式中: $v$ 为腐蚀速率, $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ ;  $K$ 为常数, $K=8.76 \times 10^4$ ;  $\Delta m$ 为腐蚀前后的质量差, $\text{g}$ ;  $S$ 为试样总表面积, $\text{cm}^2$ ;  $t$ 为浸泡时间, $\text{h}$ ;  $\rho$ 为材料密度, $\rho=7.85 \text{ g}/\text{m}^3$ 。

图2为Ni-P镀层和Ni-Zn-P合金镀层腐蚀速率与时间的关系,可以看出两种镀层腐蚀速率的总体变化趋势相同,腐蚀初期,腐蚀速率低;腐蚀中期,腐蚀速率迅速增加到一定值,然后缓慢增加;腐蚀后期,腐蚀速率基本在某一定值附近波动,趋于平稳。两种镀层呈现这种趋势是由于腐蚀初期Ni-P镀层和Ni-Zn-P合金镀层保护基体,基体不发生腐蚀;腐蚀中期,腐蚀速率迅速增加是由于O元素的作用,镀层被腐蚀破坏,之

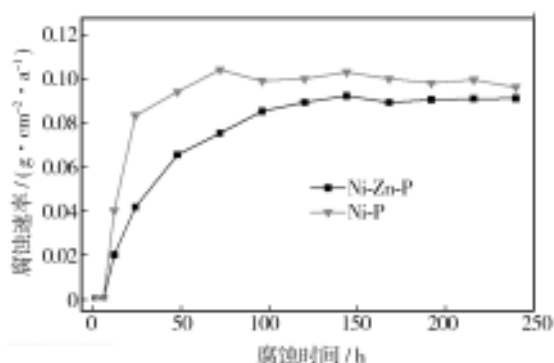


图2 Ni-P和Ni-Zn-P镀层腐蚀率与时间的关系

Fig. 2 Relationship between corrosion rate of Ni-P and Ni-Zn-P coatings and time

后腐蚀速率缓慢增加是由于镀层腐蚀生成腐蚀产物覆盖在点蚀坑上,O原子无法穿过腐蚀产物层;腐蚀后期,Cl离子半径小,能穿透腐蚀产物层而腐蚀基体,破坏镀层,发生均匀腐蚀。对比发现,168 h之前,Ni-Zn-P镀层的腐蚀速率明显低于Ni-P镀层的,这是由于Zn的加入使得镀层耐蚀性增加。最终两种镀层的腐蚀率趋于平稳,腐蚀速率基本相同,表明Ni-P镀层和Ni-Zn-P合金镀层腐蚀后期均发生基体的均匀腐蚀。

### 2.2.2 Ni-Zn-P合金镀层和Ni-P镀层腐蚀形貌

图3是Ni-P镀层和Ni-Zn-P合金镀层腐蚀后的金相组织形貌。图3a和图3c分别为Ni-P镀层和Ni-Zn-P合金镀层腐蚀24 h的微观形貌,可以看出,镀层连续完整,没有破损,但是Ni-P镀层部分胞状组织的边界发生腐蚀(图3a中箭头所示)。图3b和图3d分别为Ni-P镀层和Ni-Zn-P合金镀层腐蚀144 h的微观形貌,对比发现,Ni-P镀层出现明显的点蚀坑(图3b箭头所示),Ni-Zn-P合金镀层仍然连续完整,没有破损和局部腐蚀。Ni-P镀层腐蚀144 h出现点蚀坑可能是由于胞状组织边缘的P含量低于中心的,成为腐蚀微电池阳极优先腐蚀,且这些部位不容易形成钝化膜,所以优先腐蚀<sup>[2]</sup>;而Ni-Zn-P合金镀层存在Zn,Zn作为牺牲阳极优先腐蚀,保护了镀层和基体,增加了镀层的耐蚀性。

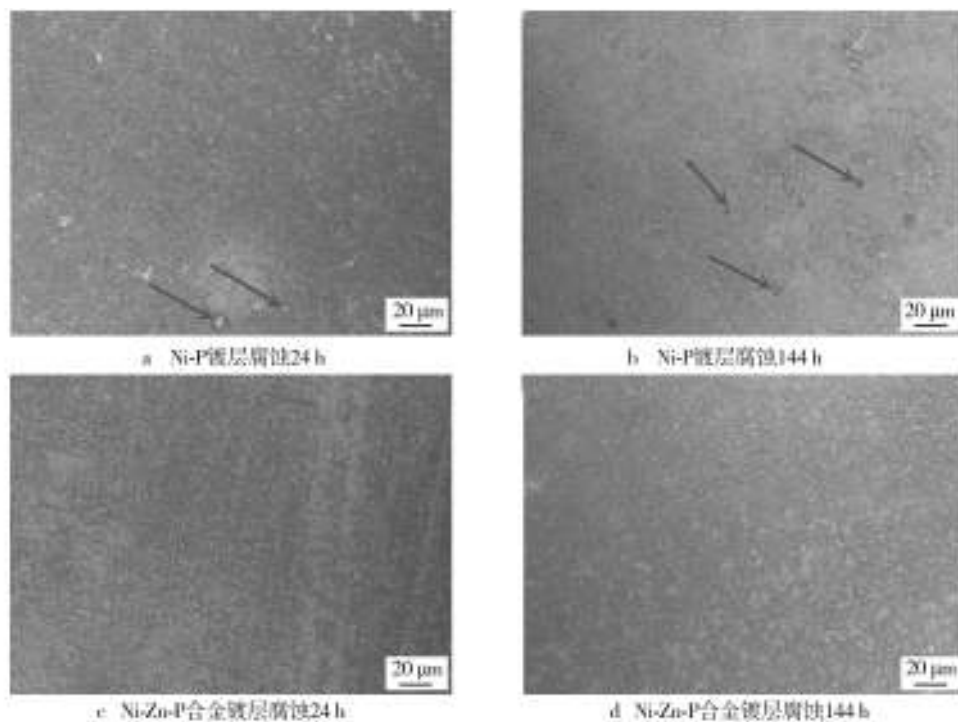


图3 Ni-Zn-P合金镀层和Ni-P镀层腐蚀形貌

Fig. 3 Corrosion morphology of Ni-Zn-P alloy coating and Ni-P plating: a) Ni-P plating, 24 h corrosion, b) Ni-P plating, 144 h corrosion, c) Ni-Zn-P alloy coating, 24 h corrosion, d) Ni-Zn-P alloy coating, 144 h corrosion



2.2.3 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P 镀层腐蚀后锈层成分分析

采用 EDS 分析 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P 镀层腐蚀前后的成分, 结果见表 2。从表 2 可知 Ni-Zn-P 合金镀层腐蚀前, Ni、Zn、P 三种元素的质量分数分别为 80.37%、4.31% 和 13.97%。Ni-Zn-P 合金镀层腐蚀 144 h 后含有 Ni、P、O、Fe 元素, 没有 Zn 元素, 出现 Fe

元素, 说明 Ni-Zn-P 镀层中 Zn 优先被腐蚀, 镀层逐渐被破坏, 最后基体发生腐蚀, 整个腐蚀过程由 O 主导。Ni-P 镀层腐蚀 144 h 后含有 Ni、P、O、Fe、Cl 元素, Ni-P 镀层被腐蚀, 并且出现 Cl 说明腐蚀是由 O 与 Cl 离子共同主导, 腐蚀前期, 镀层被腐蚀是由于 O 的作用, 当镀层表面被氧化物覆盖时, O 无法穿透锈层, Cl 离子半径较小, 可穿透镀层使基体发生腐蚀。

表 2 Ni-P、Ni-Zn-P 镀层腐蚀前后成分  
Tab.2 Composition of Ni-P and Ni-Zn-P coatings before and after corrosion%

Element	Ni	Zn	P	Fe	O	Cl
Ni-Zn-P coating composition before corrosion	80.37	04.31	13.97	0	0	0
Ni-Zn-P coating composition after corrosion	68	0	10.54	4.63	6.14	0
Ni-P coating composition before corrosion	79.65	0	12.26	0	0	0
Ni-P coating composition after corrosion	72.00	0	9.02	4.73	4.35	3.01

3 结论

- 1) 获得的 Ni-Zn-P 合金镀层和 Ni-P 镀层都是连续致密的非晶镀层。Ni-Zn-P 合金镀层的胞状组织比 Ni-P 镀层的更加均匀平滑, 胞与胞的边界结合更加连续致密。
- 2) Ni-Zn-P 合金镀层的腐蚀速率明显低于 Ni-P 镀层的。
- 3) 在人工模拟海水中腐蚀 144 h 后, Ni-P 镀层出现明显的点蚀坑, Ni-Zn-P 合金镀层仍然连续完整, 这是由于 Zn 作为牺牲阳极优先腐蚀, 保护了镀层和基体, 增加了镀层的耐蚀性。
- 4) Ni-Zn-P 合金镀层在人工模拟海水中腐蚀 144 h 后, Zn 含量明显下降, 出现了少量的 Fe 和 O, 表明镀层腐蚀过程是 Zn 优先被腐蚀, 然后镀层逐渐被腐蚀破坏, 最后基体发生腐蚀。

参考文献

[1] 穆鑫,魏洁,董俊华,等. 低碳钢在模拟海洋潮差区的腐蚀行为的电化学研究[J]. 金属学报,2012,48(4):420—426.  
MU Xin, WEI Jie, DONG Jun-hua, et al. Electrochemical Study on Corrosion Behaviors of Mild Steel in a Simulated Tidal Zone[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(4): 420—426.

[2] 冯立超,贺毅强,乔斌,等. 金属及合金在海洋环境中的腐蚀与防护[J]. 热加工工艺,2013,42(24):13—17.  
FENG Li-chao, HE Yi-qiang, QIAO Bin, et al. Corrosion and

Protection of Metal and Alloy in Marine Environment[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(24):13—17.

[3] JEOM K P, THAYAMBALLI A K, YOUNG I P, et al. A time-dependent Corrosion Wastage Model for Seawater Ballast Tank Structures of Ships[J]. Corrosion Science, 2004, 46: 471—486.

[4] 黄桂桥,郭鹏,邢辉斌. 微生物对碳钢海水腐蚀影响的电化学研究[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(5):331—334.  
HUANG Gui-qiao, GUO Peng, XING Hui-bin. Electrochemical Study on Microbiologically Influenced Corrosion of Carbon Steel in Seawater[J]. Corrosion & Protection, 2011, 32(5):331—334.

[5] 吴进怡,肖伟龙,柴柯,等. 热带海洋环境下海水中微生物对 45 钢腐蚀行为的单因素影响[J]. 金属学报,2010, 46(1):118—122.  
WU Jin-yi, XIAO Wei-long, CHAI Ke, et al. The Single Effect of Microbe on the Corrosion Behaviors of 45 Steel in Seawater of Tropical Ocean Environment[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(1):118—122.

[6] 刘宏,卞建胜,李莎,等. 化学镀镍磷基金属镀层耐磨性的研究进展[J]. 表面技术,2012,41(4):91—94.  
LIU Hong, BIAN Jian-sheng, LI Sha, et al. Current Statuses of the Wear Resistance of Electroless Ni-P Based Alloy Plating[J]. Surface Technology, 2012, 41(4):91—94.

[7] CHENG Yan-hai, CHEN Heng-yang, ZHU Zhen-cai, et al. Tribological Behavior of Ni-P Deposits on Dry Condition[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(1): 11—16.

[8] DUARI S, BARMAN T K, SAHOO P. Comparative Study of Tribological Properties of Ni-P Coatings under Dry and Lubricated Conditions[J]. Procedia Materials Science, 2014, 5:978—987.

- [9] 武慧慧,郝利峰,韩生. 化学镀镍的研究进展[J]. 电镀与精饰,2014,36(3):18—21.  
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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 柳飞,朱绍峰,林晓东. 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,2010,10(35):21—24.  
LIU Fei,ZHU Shao-feng,LIN Xiao-dong. Effect of Heat Treatment on Microstructure Andproperties of Ni-Zn-P Alloy Plating Prepared by Electroless-deposition[J]. Heat Treatment of Metals,2010,10(35):21—24.
- [13] WANG RUI,YE WEI CHUN,MA CHUAN LI,et al. Preparation and Characterization of Nanodiamond Cores Coated with a Thin Ni-Zn-P Alloy Film[J]. Materials Characterization,2008,59(2):108—111.
- [14] 王梓杰,王帅星,周海飞,等. 快速化学镀 Ni-Zn-P 合金工艺及镀层性能[J]. 表面技术,2015,44(8):25—30.  
WANG Zi-jie,WANG Shuai-xing,ZHOU Hai-fei,et al. Rapid Electroless Technique for Ni-Zn-P Alloy Coating and Its Properties[J]. Surface Technology,2015,44(8):25—30.
- [15] 万丽娟,蒋柏泉,魏林生. 氧化铈对碳钢表面化学镀 Ni-Zn-P 合金的影响[J]. 表面技术,2015,44(7):11—15.  
WAN Li-juan,JIANG Bai-quan,WEI Lin-sheng. Effect of Ytterbium Oxide on Electroless Plating Ni-Zn-P Alloy on Surface of Low Carbon Steel[J]. Surface Technology,2015,44(7):11—15.
- [16] POULADI S,SHARAT M H,BAHROLOLOOM M E. Electrodeposition and Characterization of Ni-Zn-P and Ni-Zn-P/Nano-SiC Coatings[J]. Surface & Coatings Technology,2012,12(213):33—40.
- [17] 朱绍峰,吴玉程,黄新民. 化学沉积 Ni-Zn-P 合金及其蚀特性[J]. 功能材料,2010,41(7):1181—1185.  
ZHU Shao-feng,WU Yu-cheng,HUANG Xin-min. Chemical Deposition Ni-Zn-P Alloy and Erosion Characteristics[J]. Functional Materials,2010,41(7):1181—1185.

## (上接第109页)

- [8] LIU P,ZHANG Y B,LUO H. Surface Modification of Pure Ti with  $TiB_2/Si_3N_4$  Reinforced Coating[J]. Surface Engineering,2012,28(7):532—535.
- [9] 冯淑容,张述泉,王华明. 钛合金激光熔覆硬质颗粒增强金属间化合物复合涂层耐磨性[J]. 中国激光,2012,39(2):1—5.  
FENG Shu-rong,ZHANG Shu-quan,WANG Hua-ming. Wear Resistance of Laser Clad Hard Particles Reinforced Intermetallic[J]. Chinese Journal of Laser,2012,39(2):1—5.
- [10] 李昂,王华明. 激光熔覆 NiTi/Ni<sub>3</sub>Ti 金属间化合物复合材料涂层组织及耐磨性[J]. 材料热处理学报,2006,27(5):87—90.  
LI Ang,WANG Hua-ming. The Microstructures and Properties of Laser Cladding NiTi/Ni<sub>3</sub>Ti Composite Coatings on TA15 Titanium Alloys[J]. Journal of Material Heat Treatment,2006,27(5):87—90.
- [11] FENG Shu-rong,TANG hai-bo,ZHANG Shu-quan,et al. Microstructure and Wear Resistance of Laser Clad TiB-TiC/Ti-Ni-Ti<sub>2</sub>Ni Intermetallic Coating on Titanium Alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc China,2012(22):1667—1673.
- [12] 崔爱永,胡芳友,回丽. 钛合金表面激光熔覆 (Ti+Al/Ni)/(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CeO<sub>2</sub>) 复合涂层组织与耐磨性能[J]. 中国激光,2007,34(3):438—441.  
CUI Ai-yong,HU Fang-you,HUI Li. Microstructure and Wear-resisting Property of (Ti+Al/Ni)/(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CeO<sub>2</sub>) Laser Cladding on Titanium Alloys[J]. Chinese Journal of Laser,2007,34(3):438—441.
- [13] LI Jia-ning,CHEN Chuan-zhong. Effect of ZrO<sub>2</sub>(YPSZ) on Microstructure Characteristic and Wear Resistance of the Ti3Al/TiC Laser-Cladded Ceramic Layer on Titanium Alloy[J]. Appl Ceram Technol,2012,9(5):947—952.
- [14] 张维平,路董华,余娟娟. 氧化锆增韧机制在激光熔覆技术中的应用[J]. 中国激光,2014,41(11):1—5.  
ZHANG Wei-ping,LU Dong-hua,YU Juan-juan. Application of Zirconia Toughening Mechanism on Laser Cladding[J]. Chinese Journal of Laser,2014,41(11):1—5.
- [15] 游润娟,欧阳八生. 外圆表面送粉激光熔覆 ZrO<sub>2</sub>/Ni60A 复合涂层组织及硬度[J]. 材料热处理技术,2012,41(2):113—118.  
YOU Run-juan,OUYANG Ba-sheng. Microstructure and Microhardness of ZrO<sub>2</sub>/Ni60A Composite Coating Formed by Feeding Powder Laser Cladding on Circular[J]. Surface Material and Heat Treatment,2012,41(2):113—118.