

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.01.005

## A3钢表面化学镀Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层

孔琳<sup>1</sup>, 刘品潇<sup>2\*</sup>, 孔斌<sup>3</sup>,

(1. 南阳技师学院, 河南 南阳 473000; 2. 南阳理工学院, 河南 南阳 473004; 3. 北京星和众工设备技术股份有限公司, 北京 100176)

**摘要:** 在A3钢表面制备了以Ni-P镀层为底层、Ni-Mo-P镀层为表层的双层镀层, 测试了单层Ni-P镀层、Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的结合力、腐蚀速率和阻抗谱图, 并表征分析了单层Ni-P镀层、Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的成分以及腐蚀前后的形貌。结果表明, 单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层都与基体结合良好, 且都呈较为平整的胞状形貌; 单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层都属于中磷镀层, Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层表面几乎没有孔洞, 胞状物大小相对均一, 孔隙率仅为0.6个/cm<sup>2</sup>, 明显低于单层Ni-P镀层; 在一定周期内, 单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层都能对A3钢起到较好的保护作用, 从而减轻A3钢腐蚀。与单层Ni-P镀层相比, Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的耐腐蚀性能更好, 能为A3钢提供更长效的防护。

**关键词:** Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层; 单层Ni-P镀层; 化学镀; 腐蚀速率; 腐蚀形貌

中图分类号: TQ153

文献标识码: A

## Electroless Plating of Ni-P/Ni-Mo-P Bilayered Coating on A3 Steel

KONG Lin<sup>1</sup>, LIU Pinxiao<sup>2\*</sup>, KONG Bin<sup>3</sup>

(1. Nanyang Technician College, Nanyang 473000, China; 2. Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China; 3. Beijing Star and Zhonggong Equipment Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

**Abstract:** Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating with Ni-P coating as the bottom layer and Ni-Mo-P coating as the surface layer was prepared on the surface of A3 steel. The binding force, corrosion rate and impedance spectra of single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating were tested, and the composition and morphology of single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating before and after corrosion were characterized and analyzed. The results show that both the single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating have a good combination with the matrix and they all present relatively flat cellular morphology. Both the single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating belong to the medium phosphorus coating, there are almost no holes on the surface of Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating, and the cellular substances are relatively uniform. The porosity of Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating is only 0.6 cm<sup>-2</sup>, which is significantly lower than that of single-layer Ni-P coating. In a certain

收稿日期: 2020-05-20

修回日期: 2020-06-14

通信作者: 刘品潇, email: lpinxiao@163.com

基金项目: 民生科技发展计划项目(182107000037)

period, both the single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating can play a protective role in reducing the corrosion of A3 steel. Compared with single-layer Ni-P coating, Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating exhibits better corrosion resistance and can provide longer protection for A3 steel.

**Keywords:** Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating; single-layer Ni-P coating; electroless plating; corrosion rate; corrosion morphology

Ni-P镀层是应用非常广泛的防护性化学镀层,但由于单层Ni-P镀层的耐腐蚀性能与其孔隙率密切相关,只有当镀层覆盖完整、孔隙率较低的情况下才能起到良好的防护作用。近年来,双层镀层受到越来越多的关注。张祖军等<sup>[1]</sup>在铝合金表面制备了以Ni-P镀层为底层、Ni-B镀层为表层的双层镀层,高荣杰等<sup>[2]</sup>在Q235B钢表面制备了两种高磷Ni-P镀层紧密堆叠的双层镀层,赵丹等<sup>[3]</sup>在Q235钢表面制备了以Ni-P镀层为底层、Ni-Zn-P镀层为表层的双层镀层,王良洪等<sup>[4]</sup>在7075铝合金表面制备了以Ni-P镀层为底层、Ni-W-P镀层为表层的双层镀层,张翼等<sup>[5]</sup>在45钢表面制备了以Ni-P镀层为底层、Ni-Mo-P镀层为表层的双层镀层。鉴于双层镀层具有比单层Ni-P镀层更好的耐腐蚀性能,再加上相对较低的制备成本,使其应用前景广阔。

A3钢具有良好的机械性能,在各行各业中得到了广泛应用。然而A3钢的某些性能还不太理想,比如耐腐蚀性能。通过在A3钢表面化学镀双层镀层,有望较大幅度地提高A3钢的耐腐蚀性能。以Ni-P镀层为底层、Ni-Mo-P镀层为表层的双层镀层已经被证实具有良好的耐腐蚀性能,但是目前针对Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的研究绝大多数是以中碳钢、合金钢或铝合金作为基体,而以A3钢作为基体化学镀Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层很少见报道。A3钢属于低碳钢,其性质有所不同。研究已证实,基体性质对膜层的性能有一定影响。为了较大幅度地提高A3钢的耐腐蚀性能,本文在A3钢表面化学镀Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层,希望能为Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层在A3钢表面处理中的应用提供实验数据。

## 1 实验

### 1.1 化学镀单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层

制备符合实验要求的A3钢试样作为基体,试

样在酒精中超声清洗后,进行碱性除油,溶液与油污发生皂化反应从而实现彻底除油。再经酸洗活化后,迅速浸入镀液中。表1为镀液配方和工艺条件,化学镀单层Ni-P镀层的过程是在Ni-P镀液中施镀60 min,完成后用蒸馏水冲洗试样,置于恒温干燥箱中烘干。化学镀Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的过程是先在Ni-P镀液中施镀30 min,再迅速浸入Ni-Mo-P镀液中施镀60 min,从而得到以Ni-P镀层为底层、Ni-Mo-P镀层为表层的双层镀层。

表1 镀液配方和工艺条件

Tab.1 Bath formula and process conditions

镀液配方和工艺条件	Ni-P	Ni-Mo-P
$c(\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	20~25	25~30
$c(\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	25~30	20~25
$c(\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	35~40	25~35
$c(\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	—	$2.5 \times 10^{-3}$
$c(\text{CH}_4\text{N}_2\text{S})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1~2	1~2
$c(\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	50~60	50~60
pH	8.8~9.0	8.8~9.0
温度/°C	$80 \pm 1$	$90 \pm 1$

### 1.2 单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层性能测试

依照GB/T 9286—1998对单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的结合力进行测试。利用MARCLIN Compact扫描电镜对单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的形貌进行表征,同时利用能谱仪对单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的成分进行分析。依照GB/T 5935—1986对单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的孔隙率进行测试。

依照GB/T 10124—1988进行全浸腐蚀实验,在3.5% NaCl溶液中浸泡168 h,每隔24 h测定单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的腐蚀速率,计算公式如下:

$$v = \frac{m_0 - m_1}{St} \quad (1)$$

式中:  $m_0$  为单层 Ni-P 镀层或 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层浸泡前的质量, mg;  $m_1$  为单层 Ni-P 镀层或 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层浸泡后的质量, mg;  $S$  为单层 Ni-P 镀层或 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的表面积,  $\text{cm}^2$ ;  $t$  为单层 Ni-P 镀层或 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的浸泡时间, h。

利用 MARCLIN Compact 扫描电镜观察单层 Ni-P 镀层和 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层腐蚀后的形貌。另外, 分别以单层 Ni-P 镀层或 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层作为工作电极, 铂电极作为辅助电极, 饱和甘汞电极作为参比电极, 采用 CHI660D 电化学分析仪进行阻抗谱测试, 振幅为 5 mV, 频率为  $10^5 \sim 10^2$  Hz。

## 2 结果与分析

### 2.1 单层 Ni-P 镀层和 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的结合力、形貌和成分

镀层与基体的结合力高低直接影响到镀层的性能, 也是评价镀层质量的重要指标<sup>[6]</sup>。利用硬质划刀分别在单层 Ni-P 镀层和 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层表面划出“#”形网格, 如图 1 所示。观察发现, 网格内的镀层未出现裂纹、边缘翘起和脱落现象, 说明单层 Ni-P 镀层和 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层都与基体结合良好。

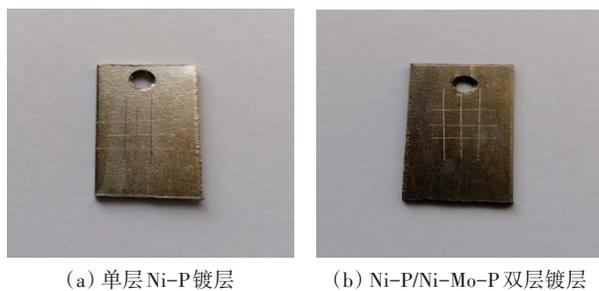
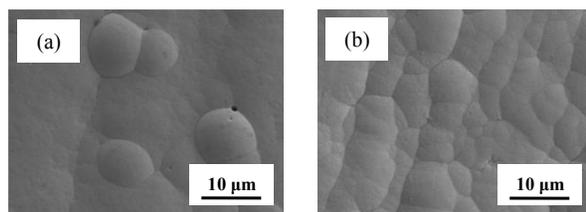


图 1 单层 Ni-P 镀层和 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的结合力测试结果

Fig.1 Adhesion test results of single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating

图 2(a) 为单层 Ni-P 镀层的形貌, 图 2(b) 为 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的形貌。观察发现, 单层 Ni-P 镀层和 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层都呈较为平整的胞状形貌, 但存在一些差异。单层 Ni-P 镀层表面的胞状物呈集中分布, 尺寸为  $10 \mu\text{m}$  左右, 在胞状物边界处有一些尺寸小于  $1 \mu\text{m}$  的孔洞。Ni-P/Ni-Mo-P

双层镀层表面的胞状物大小相对均一, 分布比较均匀, 几乎没有孔洞。单层 Ni-P 镀层的孔隙率接近于  $2.0 \text{ 个}/\text{cm}^2$ , 而 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的孔隙率明显较低, 约为  $0.6 \text{ 个}/\text{cm}^2$ 。较低的孔隙率有利于保证 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的耐腐蚀性能。



(a) 单层 Ni-P 镀层 (b) Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层

图 2 单层 Ni-P 镀层和 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的形貌  
Fig.2 Morphology of single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating

图 3(a) 为单层 Ni-P 镀层能谱图, 图 3(b) 为 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层能谱图, 表 2 为单层 Ni-P 镀层和 Ni-Mo-P 双层镀层的成分。由表 2 可知, 作为底层的单层 Ni-P 镀层为中磷镀层, 其中 P 元素质量分数为 7.88%。作为表层的 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层也属于中磷镀层, 其中 P 元素质量分数为 7.23%, Mo 元素质量分数为 4.38%。

### 2.2 单层 Ni-P 镀层和 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的耐腐蚀性能

#### 2.2.1 腐蚀速率

图 4 为单层 Ni-P 镀层和 Ni-P/Ni-W-P 双层镀层浸泡不同时间的腐蚀速率。观察发现, 随着浸泡时间延长, 单层 Ni-P 镀层和 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的腐蚀速率变化趋势大致相同。浸泡 24 h 后, Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的腐蚀速率为  $0.103 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ , 与单层 Ni-P 镀层的腐蚀速率  $0.106 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$  比较接近。浸泡 48 h 后, 单层 Ni-P 镀层和 Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的腐蚀速率逐渐显出差异, 在一定范围内随着浸泡时间延长, 腐蚀速率的差异也在扩大。例如, 同样是浸泡 96 h, Ni-P/Ni-Mo-P 双层镀层的腐蚀速率为  $0.126 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ , 较单层 Ni-P 镀层的腐蚀速率有较大幅度的下降。但超过 120 h 后, 随着浸泡时间继续延长, 单层 Ni-P 镀层的腐蚀速率显著增加, 这是由于单层 Ni-P 镀层遭到了较严重的破坏, 使基体发生了一定程度的腐蚀。相比之下, Ni-P/

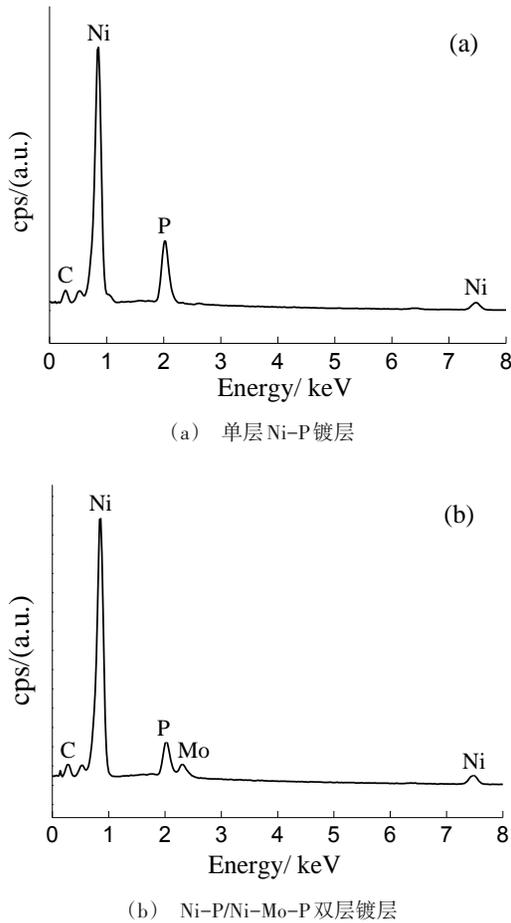


图3 单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层能谱图  
Fig.3 Energy spectrum diagram of single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating

Ni-Mo-P双层镀层的腐蚀速率增加幅度较小。

2.2.2 腐蚀形貌

表3示出了A3钢、单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层浸泡不同时间的腐蚀情况。通过比较得知,浸泡96 h以内,单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-

表3 浸泡不同时间的腐蚀情况

Tab.3 Corrosion status after immersion for different time

浸泡时间/h	A3钢	单层Ni-P镀层	Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层
48	表面有少量黄褐色的铁锈	无锈	无锈
96	表面有大量黄褐色的铁锈	表面有轻微锈迹	无锈
120	表面几乎布满了铁锈	锈迹明显,局部有黄褐色的铁锈	表面有轻微锈迹
168	布满了铁锈,局部呈深褐色	生锈面积扩大,局部颜色变暗	锈迹明显,局部有黄褐色的铁锈

图5为A3钢、单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层浸泡168 h后的形貌。观察发现,A3钢腐蚀非常严重,腐蚀后表面呈多层花瓣状结构,花瓣之

表2 单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的成分  
Tab.2 Composition of single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating

镀层	成分/(wt.%)			
	Ni	P	Mo	C
单层Ni-P镀层	74.54	7.88	—	17.58
Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层	73.05	7.23	4.38	15.34

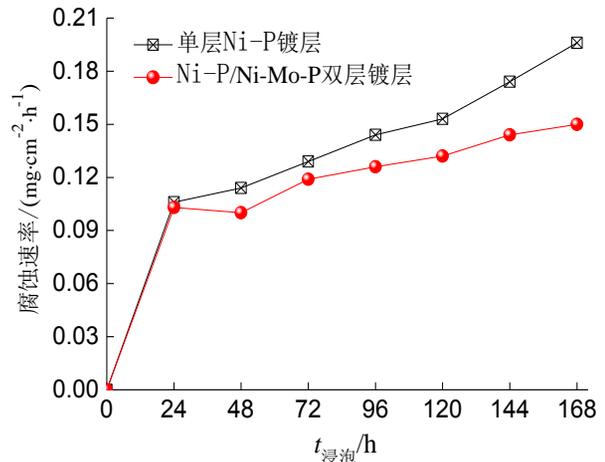


图4 单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层浸泡不同时间的腐蚀速率

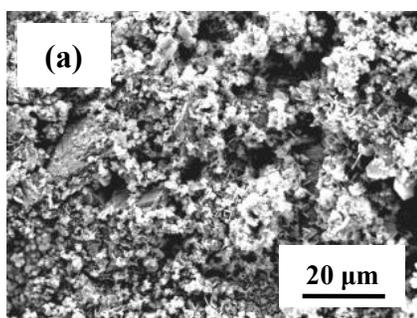
Fig.4 Corrosion rate of single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating immersion for different time

Mo-P双层镀层都能对A3钢起到较好的保护作用。无论是单层Ni-P镀层还是Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层,覆盖在A3钢表面都能形成完整的保护层,有效避免了A3钢与氯化钠溶液直接接触。浸泡96 h后,由于单层Ni-P镀层被腐蚀破坏,对A3钢的保护作用减弱。但Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层对A3钢的保护作用直到浸泡120 h后才明显减弱,这说明Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层能为A3钢提供更长效的防护。

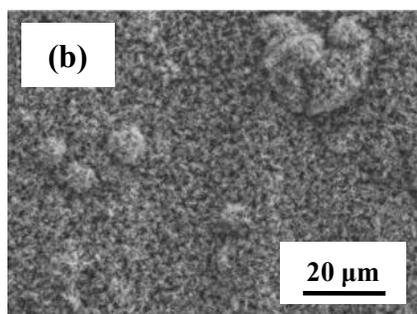
间的间隙较大,这是长时间渗透腐蚀所造成。分布在单层Ni-P镀层表面的胞状物被腐蚀破坏严重,形状残缺不全。胞状物以外的区域也因遭到腐蚀变

得不平整,出现了很多密集分布的细小凹坑。分布在Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层表面的胞状物未被明显腐蚀破坏,但在胞状物边界处有较多细小的孔洞。与单层Ni-P镀层相比,Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的腐蚀程度较轻。

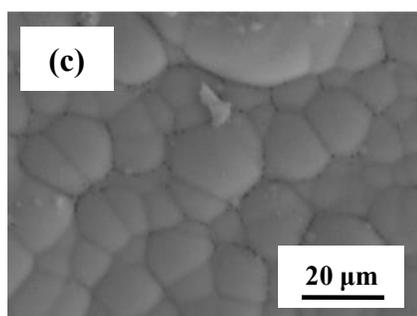
图6为A3钢、单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的Nyquist图,图7为拟合所采用的等效电路



(a) A3钢



(b) 单层Ni-P镀层



(c) Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层

图5 A3钢、单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层浸泡168 h后的形貌

Fig.5 Morphology of A3 steel, single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating immersion for 168 h

路,其中 $R_s$ 表示溶液电阻, $CPE_1$ 和 $CPE_2$ 分别表示膜层电容、双电层电容, $R_d$ 表示膜层电阻, $R_{ct}$ 表示电荷转移电阻。电荷转移电阻能反映腐蚀过程中电荷

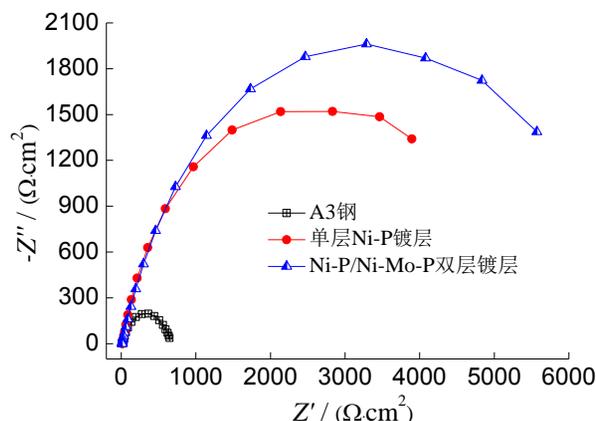


图6 A3钢、单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的Nyquist图

Fig.6 Nyquist plot of A3 steel, single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating

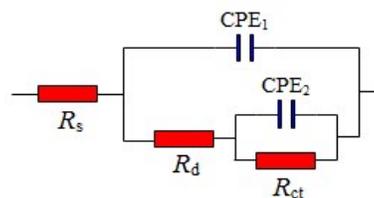


图7 拟合所采用的等效电路

Fig.7 Equivalent circuit diagram used for fitting

传递、转移的难易程度。从图6及拟合结果可知,单层Ni-P镀层的容抗弧半径大于A3钢的容抗弧半径,对应的电荷转移电阻分别为 $0.72 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、 $2.34 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的容抗弧半径则大于单层Ni-P镀层的容抗弧半径,其电荷转移电阻达到 $2.9 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。容抗弧半径和电荷转移电阻越大,表明材料腐蚀过程中电荷传递、转移的难度增加,抵抗均匀腐蚀的能力越强,不容易被腐蚀<sup>[7-8]</sup>。反之,容抗弧半径和电荷转移电阻越小,材料抵抗均匀腐蚀的能力越差,腐蚀过程中电荷传递、转移的难度降低,更容易被腐蚀。

图8对比了A3钢、单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的阻抗模值。从图8可看出,频率为 $10^2 \text{ Hz}$ 时,单层Ni-P镀层的阻抗模值为 $2.04 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ,较A3钢的阻抗模值显著提高。Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的阻抗模值最高,达 $3.1 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ,较A3钢和单层Ni-P镀层的阻抗模值分别提高了约 $1.4 \text{ k}\Omega \cdot$

cm<sup>2</sup>和2.45 kΩ·cm<sup>2</sup>。相关研究表明,低频阻抗模值反应了镀层耐受腐蚀介质侵蚀的能力,一般来说,阻抗模值越大,镀层耐腐蚀性能越好<sup>[9]</sup>。因此,单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的耐腐蚀性能都显著优于A3钢,与单层Ni-P镀层相比,Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的耐腐蚀性能更好。

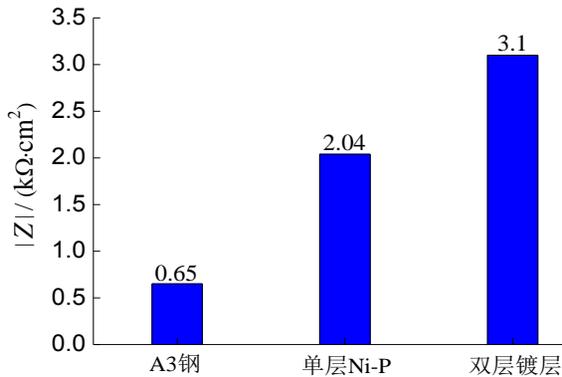


图8 A3钢、单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层的阻抗模值

Fig.8 Impedance modulus values of A3 steel, single-layer Ni-P coating and Ni-P/Ni-Mo-P bilayered coating

### 3 结论

(1)在A3钢表面制备出以Ni-P镀层为底层、Ni-Mo-P镀层为表层的双层镀层,双层镀层与基体结合良好,形貌质量与单层Ni-P镀层相比较好,孔隙率明显较低,浸泡相同时间情况下的腐蚀速率低于单层Ni-P镀层,其耐腐蚀性能较单层Ni-P镀层更好。

(2)在一定周期内,单层Ni-P镀层和Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层都能对A3钢起到较好的保护作用,从而减轻A3钢腐蚀。Ni-P/Ni-Mo-P双层镀层能为A3钢提供更长效的防护,更适合用于A3钢表面处理。

#### 参考文献

[1] 张祖军,王勇. 铝合金化学镀Ni-P/Ni-B双层复合镀层及其性能研究[J]. 材料导报, 2006, 20(z2): 342-344.  
Zhang Z J, Wang Y. The capability study of Ni-P/Ni-B double layer composite coating on aluminium alloy by

electroless plating [J]. Materials Review, 2006, 20(z2): 342-344 (in Chinese).

[2] 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 (in Chinese).  
Gao R J, Du M, Sun X X, 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 (in Chinese).

[3] 赵丹,徐旭仲,刘亭亭. Ni-P/Ni-Zn-P双层复合镀层制备及耐蚀性的研究[J]. 表面技术, 2017, 46(4): 240-245.  
Zhao D, Xu X Z, Liu T T. Preparation and corrosion resistance of bilayered Ni-P/Ni-Zn-P composite coating [J]. Surface Technology, 2017, 46(4): 240-245 (in Chinese).

[4] 王良洪,谢红希,肖刚锋. 7075铝合金化学镀Ni-P/Ni-W-P双层镀层研究[J]. 表面技术, 2012, 41(2): 43-46.  
Wang L H, Xie H X, Xiao G F. Research of the electroless Ni-P/Ni-W-P duplex coatings on 7075 aluminium alloy [J]. Surface Technology, 2012, 41(2): 43-46 (in Chinese).

[5] 张翼,王娅莉,刘长海,等. Ni-P/Ni-Mo-P镀层耐腐蚀性研究[J]. 材料保护, 2002, 35(11): 15-17.  
Zhang Y, Wang Y L, Liu C H, et al. Corrosion resistance of Ni-P/Ni-Mo-P alloy coatings [J]. Journal of Materials Protection, 2002, 35(11): 15-17 (in Chinese).

[6] Michal C, Petr D. Adhesion of zinc hot-dip coatings [J]. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2014, 62(1): 53-64.

[7] 冯宇飞,宋义全,安玥. Mg-Zn-Mn合金的铸态组织及耐腐蚀性[J]. 金属热处理, 2016, 41(10): 29-33.  
Feng Y F, Song Y Q, An Y. Microstructure and corrosion resistance of Mg-Zn-Mn alloy as-cast [J]. Heat Treatment of Materials, 2016, 41(10): 29-33 (in Chinese).

[8] Hsu C H, Chen Y D, Huang D H. Corrosion resistance of tool steel arc-deposited Cr-N-O double-layered coatings in 3.5% sodium chloride [J]. Corrosion, 2008, 64(8): 681-686.

[9] 祝珊珊. 脉冲电沉积制备铝及铝镁合金的研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2016.