

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.09.010

# 电力金具表面电沉积 Zn-Mn 合金镀层及其耐蚀性能研究

李文峰, 田江波\*, 李 佳, 赵振华

(国网河北省电力有限公司保定供电分公司, 河北 保定 071000)

**摘要:** Zn 镀层是一种常见的防腐涂层, 可作为牺牲阳极为电力金具提供良好的阴极保护。电沉积制备的 Zn 合金镀层可进一步提高镀层的耐蚀性, 为电力金具提供更为有效的防护。采用 X 射线衍射、扫描电子显微镜、动电位极化曲线和电化学阻抗谱分别对 Zn-Mn 合金镀层的物相、微观形貌和耐蚀性能进行了表征, 研究了镀液中  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  的含量对 Zn-Mn 合金镀层的影响。结果表明, Zn-Mn 合金镀层在 3.5 wt.% NaCl 溶液中具有明显的钝化特征, 其腐蚀电流密度低于纯 Zn 镀层, 电化学阻抗值大于纯 Zn 镀层。当镀液中的  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  的含量为 33.8 g/L 时, 所制备的 Zn-Mn 合金镀层 (Zn-Mn II) 具有平整致密的表面形貌和较高的 Mn 含量, 其耐蚀性能最好。

**关键词:** Zn-Mn 合金镀层; 电沉积; 耐蚀性; 钝化; 电化学阻抗。

中图分类号: TG176

文献标识码: A

## Electrodeposition of Zn-Mn alloy coating on the surface of power fittings and evaluation of its corrosion resistance

Li Wenfeng, Tian Jiangbo\*, Li Jia, Zhao Zhenhua

(Baoding Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Baoding 071000, China)

**Abstract:** Zn coating is one of the most commonly used anti-corrosion coating, which can act as a sacrificial anode to provide good cathodic protection for power fittings. The electrodeposited Zn alloy coatings can further improve the corrosion resistance, and provide more effective protection for electric fittings. To investigate the effects of  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  content in the plating bath on the Zn-Mn alloy coating, the X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), potentiodynamic polarization curve and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) were employed to analyse the phase composition, micromorphology and corrosion resistance, respectively. The results show that the Zn-Mn alloy coating has obvious passivation characteristics in 3.5 wt.% NaCl solution. The corrosion current density of Zn-Mn alloy coating is lower than that of pure Zn coating, and the electrochemical impedance value of Zn-Mn alloy coating is bigger than that of pure Zn coating. When the  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  is 33.8 g/L, the optimized Zn-Mn alloy coating (Zn-Mn II) exhibits a flat and dense surface topography and owns a high Mn content in the coating, resulting in the best corrosion resistance.

**Keywords:** Zn-Mn alloy coating; electrodeposition; corrosion resistance; passivation; electrochemical impedance spectroscopy.

收稿日期: 2024-04-17

修回日期: 2024-05-21

作者简介: 李文峰 (1983—), 男, 高级工程师, 研究方向: 输电线路防护及高电压与绝缘技术, email: liwf369@126.com;

通信作者: 田江波 (1983—) 男, 高级工程师, 主要研究方向金具链接结构。email: jbtian@126.com

基金项目: 国网河北省电力有限公司科技项目(kj2023-060)

我国幅员辽阔且各地区发展水平差距较大,导致了电力需求与供给之间存在着局部不平衡的矛盾,这就要求电力系统通过跨区域输电网络的建设对电力能源进行调配<sup>[1]</sup>。输电线路的安全运行则是实现能源高效运输的重要保障。输电线路中的电力金具起着机械连接、固定及保护的作用,提升其在服役过程中的稳定性对于输变电工程中有着重要的意义<sup>[2]</sup>。

金具设备由于长期露置在自然环境中,易受各种特殊气象条件(如大风、覆冰、气温变化、雷击等)的侵袭而发生故障<sup>[3]</sup>。Q235钢是输电线路中最为常用的一种金具材料,其本身具有极高的电化学活性<sup>[4]</sup>。因此,通常需要采用涂镀层对Q235钢表面进行表面腐蚀防护处理<sup>[5-7]</sup>。目前,锌及锌合金镀层作为防护涂层,已广泛地应用于输电线路的杆塔、构支架、连接金具表面<sup>[8]</sup>。镀锌层通常是作为牺牲涂层来保护Q235基体免受腐蚀,同时锌的腐蚀产物作为屏蔽层也能对基体起到一定的保护作用<sup>[9]</sup>。目前,许多研究表明均表明提高镀锌层的质量,降低镀锌层的损耗速度对于提高其对基体的保护性具有重要的作用<sup>[8-9]</sup>。

目前,锌-铁族金属(Fe、Ni、Co)合金镀层已被证明能有效提高镀锌层的耐蚀性、耐磨性、硬度、均匀性和可焊接性能等<sup>[10]</sup>。N. Lotfi等研究发现Zn-Ni合金镀层中的Ni含量为12~15 wt.%时,镀层具有优异的耐蚀性。这种Zn-Ni合金镀层既具有牺牲阳极的特性为基体提供腐蚀防护,也通过Ni元素的作用极大地降低了镀层的损耗速率,可为基体提供更为长效的保护<sup>[11]</sup>。M.H. Gharahcheshmeh等也采用电沉积的方法制备了表面平整致密的Zn-Co合金镀层。镀层中Co的含量小于1 wt.%时,Zn-Co合金镀层具

有最优的耐蚀性能<sup>[12]</sup>。但是,Ni、Co等元素价格昂贵,且大规模使用含Ni、Co离子的镀液也会造成环境污染和带来潜在的人体健康安全隐患<sup>[13]</sup>。因此,开发其他的锌合金镀层成为当前研究的重要方向之一。本文提出采用电沉积的方法在金具表面制备了Zn-Mn合金镀层,并对其表面形貌、相组成和耐蚀性能等进行了系统的研究。本工作可为开发新耐蚀的锌合金涂镀层,以及为输电线路电力金具的腐蚀与防护提供支持。

## 1. 实验方法

### 1.1 镀层的制备

选用输电线路中最为常见的金具材料之一Q235钢作为基材,将其用线切割加工成大小为10 mm×10 mm×5 mm的电极片。随后,电极片用400#~2000#的金相砂纸逐级打磨,并用丙酮和去离子水依次对其清洗。最后,电极片背面焊接铜导线后用环氧树脂涂封,得到暴露面积为10 mm×10 mm的工作电极。

采用直流电沉积的方法在所制备的Q235钢工作电极表面进行Zn镀层和Zn-Mn合金镀层的沉积。沉积前工作电极的暴露面再次用2000#的金相砂纸打磨,并用去离子水清洗后浸入10 wt.% HCl溶液中活化60 s。电沉积使用的镀液成分列于表1,根据镀液中MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O含量不同而将所得到的镀层分别标记为Zn、Zn-Mn I、Zn-Mn II、Zn-Mn III。用氨水和稀硫酸将镀液的pH值调节至6.0,电沉积过程中阴极电流密度为0.04 A/cm<sup>2</sup>,温度为45℃,时间为1800 s。沉积完成后迅速将电极取出,将其用去离子水冲洗后冷风吹干。

表1 电沉积 Zn 和 Zn-Mn 合金镀层的镀液成分

Tab. 1 Composition of bath for electrodeposition of Zn and Zn-Mn alloy coatings

Samples	MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O/(g/L)	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O/(g/L)	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> /(g/L)	Saccharin sodium/(g/L)
Zn	0.0	115	25	0.3
Zn-Mn I	16.9	115	25	0.3
Zn-Mn II	33.8	115	25	0.3
Zn-Mn III	50.7	115	25	0.3

### 1.2 镀层的物相表征和性能测试

采用高分辨扫描电子显微镜(SEM, JEOL-JEM-1200-EX II)对所制备镀层样品的表面微观形貌进行观察;采用X射线能谱仪(EDS, Oxford X-MaxN)

对其成分进行分析;采用X射线衍射仪(XRD, Bruker D8 advance)对其相结构进行测试,Cu作为靶材( $\lambda=1.5406\text{ nm}$ ),工作条件为40 kV和200 mA。

用CS2350双单元电化学工作站对镀层进行腐

蚀电化学测试以评估镀层的耐蚀性。电化学测试采用传统的三电极体系,其中:工作电极为所制备的镀层样品;参比电极为饱和甘汞电极;对电极为面积为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的铂片电极。测试溶液为 $3.5\text{ wt.}\%$  NaCl溶液,测试温度为 $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 。工作电极浸入测试溶液后进行开路电位测试,测试时间为 $60\text{ min}$ 。待开路电位稳定后进行电化学阻抗和极化曲线测试。电化学阻抗测试频率为 $100\text{ kHz}\sim 10\text{ mHz}$ ,测量信号的幅值为 $5\text{ mV}$ 。动电位极化曲线测试测试速度为 $1\text{ mV/s}$ ,测试范围 $E_{\text{OCP}}$ 为 $0.15\text{ V}\sim 0.35\text{ V}$ 。

## 2. 结果与讨论

图1为所制备镀层的成分及Zn和Zn-Mn III镀层的能谱图。从图中可以看出,所沉积的Zn-Mn合金镀层主要由Zn、Mn两种元素组成。同时,图1a中显示了镀层中Mn的含量呈现随着镀液中 $\text{MnSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ 添加量增大而增大的趋势。此外,Zn-Mn合金镀层中的Mn含量都远低于Zn含量。这是因为Mn的析出电位 $(-1.18\text{ V}_{\text{RHE}})$ 低于Zn的析出电位 $(-0.76\text{ V}_{\text{RHE}})$ ,导致Mn比Zn更难沉积<sup>[14]</sup>。

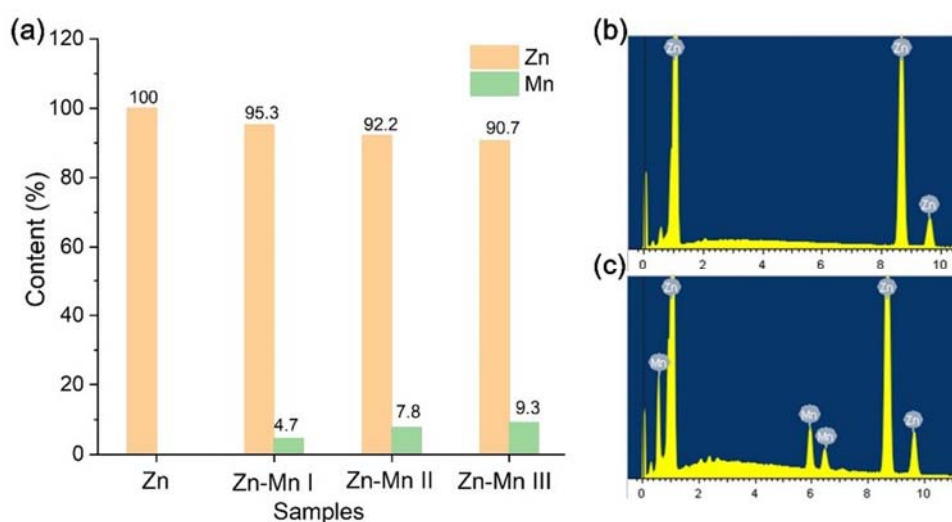


图 1 (a) Zn 和 Zn-Mn 镀层的成分以及(b) Zn 和(c) Zn-Mn III 镀层的能谱图

Fig. 1 (a) Composition of electrodeposited Zn and Zn-Mn coatings and the EDS spectrum of (b) Zn and (c) Zn-Mn III coating

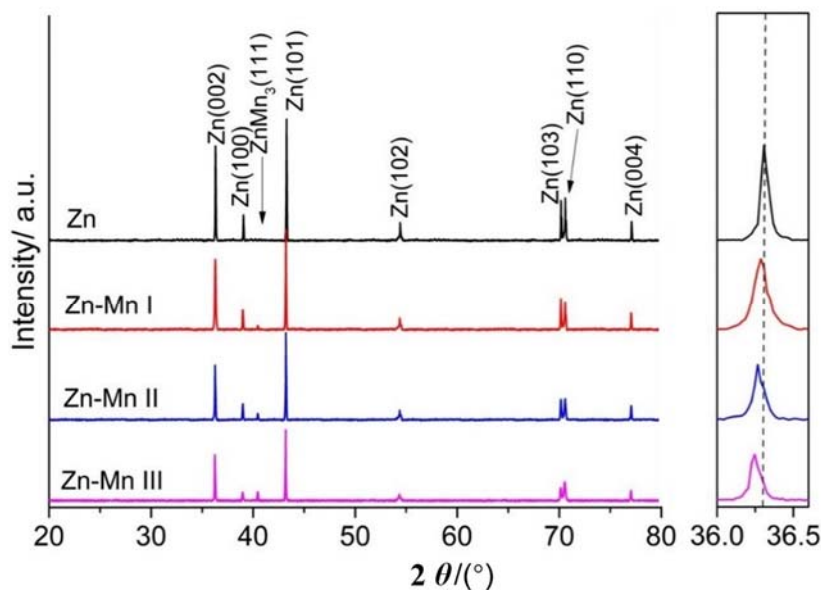


图 2 Zn 镀层和 Zn-Mn 合金镀层的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of electrodeposited Zn coating and Zn-Mn alloy coatings

图2为所制备的Zn镀层和Zn-Mn合金镀层的XRD图谱。纯Zn镀层在 $36.3^\circ$ 、 $39.0^\circ$ 、 $43.2^\circ$ 、 $54.3^\circ$ 、 $70.1^\circ$ 、 $70.6^\circ$ 和 $77.0^\circ$ 的位置存在着7个明显的衍射峰,分别对应于 $\eta$ -Zn中(002)、(100)、(101)、(102)、(103)、(110)和(004)晶面的衍射峰(JCPDS 01-087-0713)<sup>[15]</sup>。而Zn-Mn合金镀层中除了Zn的特征衍射峰外,还在 $54.3^\circ$ 的位置存在着 $\text{ZnMn}_3$ (111)的衍射峰(JCPDS 97-010-5020)<sup>[16]</sup>。 $\text{ZnMn}_3$ (111)的衍射峰强度呈现Zn-Mn III>Zn-Mn II>Zn-Mn I的规律,说明镀层中 $\text{ZnMn}_3$ 相随着镀层中Mn含量增大而增多。此外,Zn-Mn合金镀层中的Zn(002)的衍射峰有向左偏移的趋势,这主要是因为Mn的原子半径大于Zn的原子半径,Mn固溶于Zn晶体中导致

了晶格常数变大。

图3显示了所制备的Zn镀层和Zn-Mn合金镀层的表面形貌。从图中可以看出,纯Zn镀层由层片状的特征晶粒构成,其晶粒大小为 $6\sim 15\ \mu\text{m}$ (图3a)。Zn-Mn I合金镀层则由细小的颗粒状晶粒构成,其晶粒大小为 $1\sim 4\ \mu\text{m}$ 。Zn-Mn II合金镀层的晶粒进一步的减小( $<1\ \mu\text{m}$ ),部分极其细小的晶粒形成团簇状紧密覆盖于基体表面。Zn-Mn III合金镀层也是由极其细小的晶粒构成,但是其均匀程度却有所下降。镀液中 $\text{MnSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ 含量增大,Mn沉积量的增大使得镀层的析出电位负移,沉积过程中伴随的析氢反应变得更为强烈,导致镀层内应力过大,这将导致镀层的不均匀以及镀层中少量微裂纹的产生<sup>[17]</sup>。

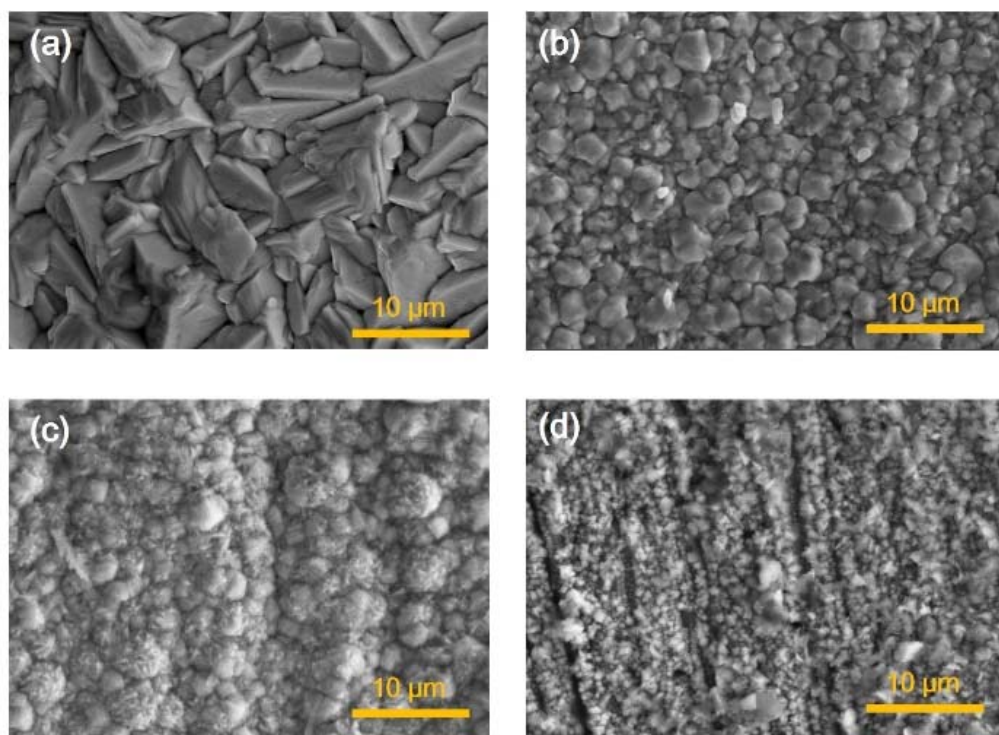


图3 Zn和Zn-Mn镀层表面SEM图片(a:Zn; b:Zn-Mn-I; c:Zn-Mn-II; d: Zn-Mn-III)

Fig. 3 SEM micrographs of electrodeposited Zn and Zn-Mn coatings (a: Zn; b: Zn-Mn-I; c: Zn-Mn-II; d: Zn-Mn-III)

Zn镀层和Zn-Mn合金镀层3.5 wt.% NaCl溶液中的开路电位-时间( $E_{\text{OCP}}-t$ )曲线如图4所示。随着镀层中Mn元素含量增大,其镀层的开路电位随之减小( $E_{\text{OCP}}$ : Zn-Mn III<Zn-Mn II<Zn-Mn I<Zn)。同时,在浸入溶液的初期,Zn-Mn合金镀层的开路电位均呈现迅速增大的趋势,这是由于Zn-Mn合金镀层表面电化学活性较高,在3.5 wt.% NaCl溶液中能快速氧化形成钝化膜层。表面的钝化膜能作为腐蚀屏蔽层隔绝溶液与基体,导致其开路电位快速增

大<sup>[18]</sup>。随着浸泡时间增加,Zn-Mn合金镀层的开路电位逐渐趋于稳定,表面的氧化/钝化膜层的形成和溶解达到一个动态平衡的状态。

图5为Zn和Zn-Mn合金镀层在3.5 wt.% NaCl溶液所测的动电位极化曲线,从曲线中提取的腐蚀电化学参数列于表2中。可以看出,Zn-Mn合金镀层的腐蚀电位 $E_{\text{corr}}$ 比Zn合金更负。同时,Zn-Mn合金镀层中Mn含量增大,其腐蚀电位也变得更负,这与开路电位所展现的规律一致。同时,Mn元素改变了镀

层的腐蚀行为特征, Zn-Mn合金镀层呈现出明显的钝化特征。在极化曲线的阳极反应区域, Zn-Mn合金镀层的表面并未出现活化-钝化的转变即直接进入钝化区, 表明钝化膜层能在Zn-Mn合金镀层表面直接自发地形成, 进而极大地抑制腐蚀时的阳极反应。镀层的腐蚀行为不同, 因此不能简单地根据镀层的 $E_{\text{corr}}$ 值来比较其耐蚀性<sup>[19]</sup>。通常, 腐蚀电流密度 $I_{\text{corr}}$ 可代表样品表面的腐蚀反应速率<sup>[20]</sup>。Zn-Mn合金镀层的 $I_{\text{corr}}$ 均小于Zn合金镀层的腐蚀电流密度(如表2所示)。其中, Zn-Mn II合金镀层的 $I_{\text{corr}}$ 值最小, 说明其耐蚀性最好。

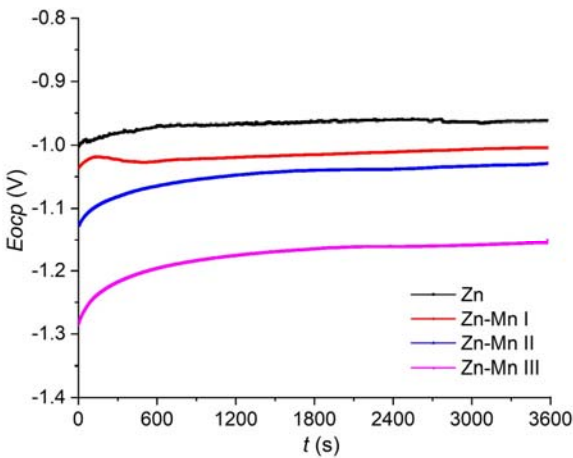


图 4 Zn 和 Zn-Mn 合金镀层在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的开路电位-时间曲线

Fig. 4  $E_{\text{ocp}}-t$  curves of electrodeposited Zn and Zn-Mn alloy coatings in 3.5 wt.% NaCl solution

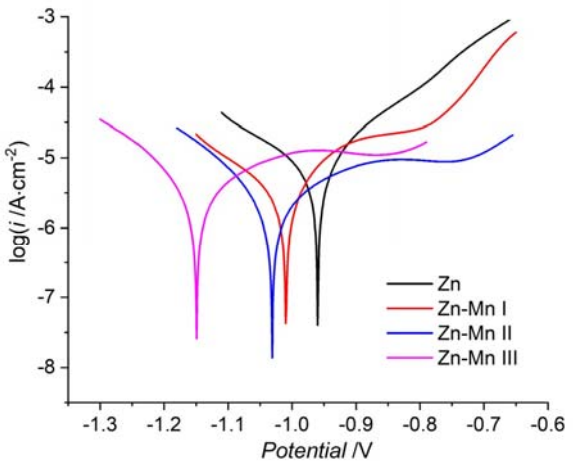


图 5 Zn 和 Zn-Mn 合金镀层在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的动电位极化曲线

Fig. 5 Potentiodynamic polarization curves of electrodeposited Zn and Zn-Mn alloy coatings in 3.5 wt.% NaCl solution

表 2 图 5 中极化曲线中提取的腐蚀电位和腐蚀电流密度  
Table 2.  $E_{\text{corr}}$  and  $I_{\text{corr}}$  extracted from potentiodynamic polarization curves in Fig. 5

Coatings	$E_{\text{corr}}/(\text{V})$	$I_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
Zn	-0.96	26.9
Zn-Mn I	-1.01	13.1
Zn-Mn II	-1.03	8.2
Zn-Mn III	-1.15	18.7

图6为Zn和Zn-Mn合金镀层在3.5 wt.% NaCl溶液中所测的电化学阻抗谱。从图中可以看出, Zn镀层的Nyquist曲线呈现一个简单的未完成的半圆弧的特征, 这反映了Zn合金镀层在3.5 wt.% NaCl溶液中作为牺牲阳极优先发生腐蚀反应, 基体受到保护不发生腐蚀的特点。与Zn镀层相比, Zn-Mn合金镀层Nyquist曲线的虚部( $-Z''$ )的显著增大, 这主要是其表面生成的钝化膜所具有的半导体结构特征所致。Zn-Mn合金镀层表面的钝化膜层起到屏蔽作用( $-Z''$ 增大), 从而导致其阻抗模值 $|Z|$ 远大于Zn镀层的 $|Z|$ 值。其中, Zn-Mn II合金镀层的 $|Z|$ 最大, 说明Zn-Mn II合金镀层具有最优异的耐蚀性能。

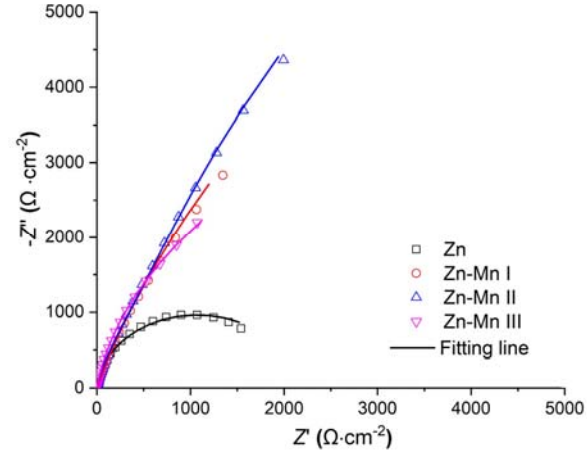


图 6 Zn 和 Zn-Mn 合金镀层在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的电化学阻抗谱

Fig. 6 EIS plots of electrodeposited Zn and Zn-Mn alloy coatings in 3.5 wt.% NaCl solution

根据Zn和Zn-Mn合金镀层电化学阻抗谱呈现的不同特征, 利用图6所示的等效电路a和b分别对其进行拟合, 拟合得到的电化学参数列于表3中。其中,  $R_s$ 为溶液电阻,  $R_{\text{ct}}$ 和 $R_p$ 分别为电化学反应中电荷转移过程中产生的电阻和钝化膜层电阻,  $\text{CPE}_{\text{ct}}$ 和 $\text{CPE}_p$ 分别为表征电化学反应时界面和钝化膜层表



面的偏离理想双电层电容状态的常相位角元件。图6中拟合曲线与所测试的电化学阻抗曲线十分接近,表明所用的等效电路能很好地解析Zn和Zn-Mn合金镀层在3.5 wt.% NaCl溶液中的界面和电化学反应过程。从表3看出,Zn-Mn合金镀层的电荷转移电阻 $R_{ct}$ 比Zn的 $R_{ct}$ 更大,说明Zn-Mn合金发生电化学反应速度更慢,作为阳极保护性镀层,其牺牲/损耗速度更低,能为基底提供更为长效的保护作用。其中,Zn-Mn II合金镀层的钝化膜电阻 $R_p$ 值最大,同时其 $R_{ct}$ 最

大,说明Zn-Mn II合金镀层具有最为良好的耐蚀性,这与极化曲线所反映的结果一致。Zn-Mn II合金镀层中Mn元素能为镀层提供良好的钝化性能,同时由均匀细小的晶粒构成的Zn-Mn II合金镀层具有平整致密的微观形态特征都是Zn-Mn II合金镀层具有优异耐蚀性的重要原因。尽管Zn-Mn III合金镀层中Mn含量更高,但是不均匀且含有微裂纹的镀层表面特征使其耐蚀性反而有所下降。

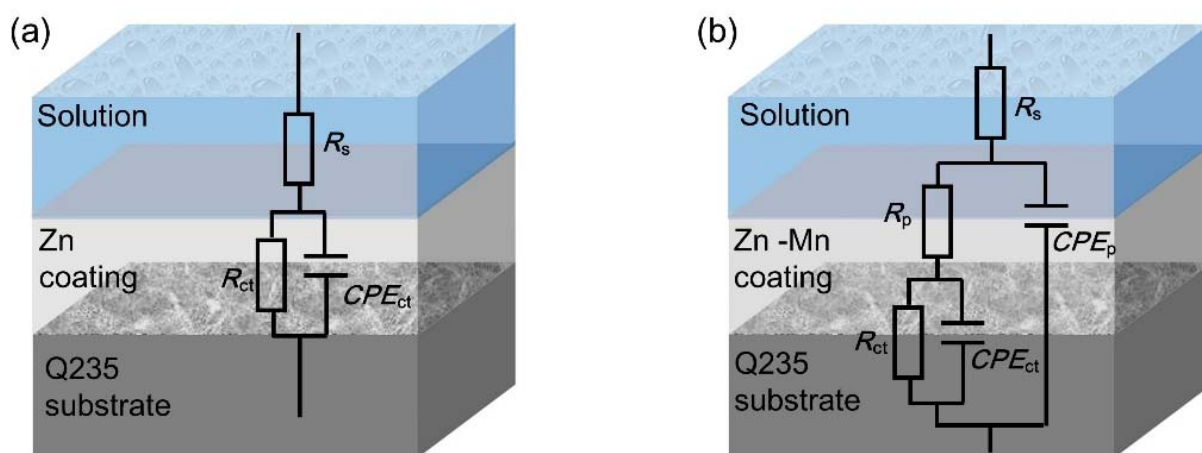


图7 Zn和Zn-Mn合金镀层在3.5 wt.% NaCl溶液中的等效电路图

Fig. 7 Potentiodynamic polarization curves of electrodeposited Zn and Zn-Mn alloy coatings in 3.5 wt.% NaCl solution

表3 电化学阻抗谱拟合得到的等效电路参数

Table 3. The fitted equivalent circuit parameters for EIS plots of the coatings.

Coatings	$R_s / (\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	$\text{CPE}_p - Y_0 / (\text{mF} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\text{CPE}_p - n$	$R_p / (\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	$\text{CPE}_{ct} - Y_0 / (\text{mF} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\text{CPE}_{ct} - n$	$R_{ct} / (\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$
Zn	1.20	—	—	—	0.49	0.88	21.4
Zn-Mn I	0.90	1.06	0.95	12.02	0.22	0.87	51.2
Zn-Mn II	0.80	0.88	0.96	14.39	0.18	0.87	59.4
Zn-Mn III	0.90	1.20	0.88	8.72	0.40	0.86	42.5

### 3. 结论

本文为提高Q235金具材料的耐蚀性,在其表面展开电沉积Zn-Mn合金镀层的研究。通过SEM、XRD以及电化学方法研究了镀液中 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的含量对Zn-Mn合金镀层表面形貌、晶体结构以及其耐蚀性的影响,主要的结论如下:

(1) 随着镀液中 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的含量增大,Zn-Mn合金镀层中的Mn含量逐渐增大;

(2) Zn-Mn合金镀层主要由 $\eta$ -Zn和 $\text{ZnMn}_3$ 两种晶体构成。随着镀液中 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的含量增大,镀

层中 $\text{ZnMn}_3$ 相的含量增大, $\eta$ -Zn的晶格常数也变大;

(3) 镀液中 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的含量为33.8 g/L时,所制备的Zn-Mn合金镀层(Zn-Mn II)表面均匀致密。镀液中 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的浓度过高(50.7 g/L)时,Zn-Mn合金镀层(Zn-Mn III)的均匀性下降。

(4) Zn-Mn合金镀层在3.5 wt.% NaCl溶液中具有明显的钝化特征,其腐蚀电流密度低于纯Zn镀层,电化学阻抗值大于纯Zn镀层。

(5) Zn-Mn II因其具有平整致密的表面形貌和较高的Mn含量,展现出最为优良的耐蚀性能。

## 参考文献:

- [1] 夏晓健, 金焱, 乔汉文, 等. 输变电设备腐蚀状况调查与分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(2): 121-127.
- [2] 吴天博, 王宗江. 架空输电线路金具腐蚀失效分析研究[J]. 电气开关, 2020, 58(1): 69-72.
- [3] 张培军, 李新梅, 杨现臣, 等. 镀锌层在室内模拟大气环境中腐蚀行为及寿命评估[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(2): 94-100.
- [4] Guo Q, Zhao Y, Xing Y, et al. Experimental and numerical analysis of mechanical behaviors of long-term atmospheric corroded Q235 steel[J]. Structures, 2022, 39: 115-131.
- [5] 赵书彦, 陈军君, 刘福春, 等. 新型硅土对电力金具涂层防护作用的影响[J]. 材料研究学报, 2016, 30(2): 107-114.
- [6] Wang Z, Wang M, Jiang J, et al. Atmospheric corrosion analysis and rust evolution research of Q235 carbon steel at different exposure stages in Chengdu atmospheric environment of China[J]. Scanning, 2020, 1-8.
- [7] 鲁莽, 史天如. 架空输电线路金具柔性耐磨重防腐涂层性能[J]. 材料保护, 2015, 48.10: 48-50.
- [8] 党乐, 郭金刚, 崔亚茹, 等. 架空输电线路金具材料研究现状及发展[J]. 电气技术, 2022, 23.4: 1-6.
- [9] Padhan S, Rout T K, Nair U G, N-doped and Cu, N-doped carbon dots as corrosion inhibitor for mild steel corrosion in acid medium[J]. Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 653: 129905.
- [10] Eliaz N, Venkatakrishna K, Hegde A C. Electroplating and characterization of Zn-Ni, Zn-Co and Zn-Ni-Co alloys[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205:1969-1978.
- [11] Lotfi N, Aliofkhazraei M, Rahmani H; et al. Zinc-Nickel Alloy Electrodeposition: Characterization, Properties, Multilayers and Composites[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2018, 54: 1102-1140.
- [12] Gharahcheshmeh M H, Sohi M H. Electrochemical studies of zinc-cobalt alloy coatings deposited from alkaline baths containing glycine as complexing agent[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2010, 40: 1563-1570.
- [13] Sahayata B, Mahanta S K, Upadhyay P, et al. An approach to improve corrosion resistance in electro-galvanized Zn-Al composite coating by induced passivity[J]. Materials Letters, 2023, 351: 135013.
- [14] Loukil N, Feki M. Zn-Mn electrodeposition: a literature review. Journal of The Electrochemical Society[J]. 2020, 167(2): 022503.
- [15] Loukil N, Feki M. Zn-Mn alloy coatings from acidic chloride bath: Effect of deposition conditions on the Zn-Mn electrodeposition-morphological and structural characterization. Applied Surface Science[J]. 2017, 410: 574-584.
- [16] Allam L, Lazar F, Benfedda B, et al. Zn-Mn alloy coating elaboration by magnetoelectrodeposition. Journal of Solid State Electrochemistry[J]. 2021, 25(7): 2041-2053.
- [17] Alimadadi H, Ahmadi M, Aliofkhazraei M, et al. Corrosion properties of electrodeposited nanocrystalline and amorphous patterned Ni-W alloy[J]. Materials & design, 2009, 30(4): 1356-1361.
- [18] ORTIZ Z I, Díaz-Arista P, Meas Y, et al. Characterization of the corrosion products of electrodeposited Zn, Zn-Co and Zn-Mn alloys coatings [J]. Corrosion Science, 2009, 51:703-2715.
- [19] Abedini B, AHMADI N P, Yazdani S et al. Electrodeposition and corrosion behavior of Zn-Ni-Mn alloy coatings deposited from alkaline solution[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(2): 548-558.
- [20] 盛敏奇, 许继芳, 万康, 等. 低碳钢表面Fe-Ni合金层的制备及耐腐蚀性能[J]. 材料研究学报, 2013, 27(2): 183-188.