

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.01.002

桐油覆膜 Ni-Co-SiO₂ 纳米复合涂层的制备及防腐性能研究

李敏, 张胜健*, 曹秋菊

(太原工业学院 化学与化工系, 山西 太原 030008)

摘要: 采用恒电位法在瓦特型电镀液中于碳钢表面制备了 Ni-Co-SiO₂ 纳米复合涂层, 通过浸渍桐油处理制备桐油覆膜 Ni-Co-SiO₂ 涂层。利用场发射扫描电镜、能谱仪、X 射线衍射、红外光谱仪、三维视频显微镜等表征涂层的形貌、元素组成、结构和粗糙度。采用 Tafel 动态极化曲线和电化学阻抗测试比较覆膜涂层和未处理涂层的耐蚀性。通过浸泡试验, 对桐油覆膜涂层进行防腐蚀性评价。结果表明: 桐油处理后涂层明显被一层薄膜涂覆, 其表面粗糙度降低, 但涂层前后的微观结构不变。桐油覆膜 Ni-Co-SiO₂ 涂层具有较低的腐蚀电流密度, 较大的容抗弧和较高的阻抗模量。此外, 长期浸泡试验表明, 涂层低频阻抗模值在很长一段时间保持高于 10⁶ Ω/cm², 表明桐油覆膜 Ni-Co-SiO₂ 具有较高的耐腐蚀性。

关键词: 桐油; Ni-Co/SiO₂; 复合涂层; 耐腐蚀性

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A

Preparation and corrosion resistance of tung oil coated Ni-Co-SiO₂ nanocomposite coatings

Li Min, Zhang Shengjian*, Cao Qiuju

(Department of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China)

Abstract: Ni-Co-SiO₂ nanocomposite coatings were prepared on the surface of carbon steel in Watt electroplating solution by potentiostatic method, and the modified Ni-Co-SiO₂ coating was prepared by impregnation treatment in tung oil. The morphology, element, structure and roughness of the coatings were characterized by field emission scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, X-ray diffraction, infrared spectroscopy and three-dimensional video microscopy. The corrosion resistance of coated and untreated coatings was characterized by Tafel potentiodynamic polarization and electrochemical impedance tests. The corrosion resistance of tung oil coated coating was evaluated by immersion test. The results showed that after tung oil treatment, the coating was obviously coated with a layer of thin film, and its surface roughness was reduced, but the microstructure before and after coating remained unchanged. The modified Ni-Co-SiO₂ coating has lower corrosion current density, larger capacitive arc and capacitive arc impedance modulus. In addition, the long-term immersion test showed that the low-frequency impedance modulus of the coating remained higher than 10⁶ Ω/cm² for a long period of time, indicating that the modified Ni-Co-SiO₂ coating has high corrosion resistance

Keywords: tung oil; Ni-Co/SiO₂; composite coating; corrosion resistance

收稿日期: 2020-05-06

修回日期: 2020-06-06

作者简介: 李敏(1985—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为表面处理, email: limin999666@163.com

*通信作者: 张胜健, email: zsj151732@163.com

Ni-Co 合金涂层具有较高的硬度、耐磨性和耐腐蚀性,被广泛应用于腐蚀与防护领域^[1-3]。随着纳米技术的出现,在合金镀层中掺杂纳米颗粒制备复合涂层可更为有效的提高金属涂层的性能,例如:在电沉积液中加入纳米 SiO₂^[4]、纳米 Si₃N₄^[5]、纳米 SiC^[6]、纳米 TiO₂^[7]、纳米 Al₂O₃^[8]等都能极大的提高金属基合金涂层的性能。其中纳米二氧化硅具有高强度、高硬度、稳定性好、耐腐蚀等优点,因此是增强 Ni-Co 合金涂层性能的一种重要氧化物,掺杂纳米二氧化硅后的复合涂层具备更高的硬度、耐磨性和耐腐蚀性^[9-10]。Atuanya 等^[11]通过共沉积在碳钢表面制备了 Ni-Co-SiO₂ 复合涂层,发现纳米二氧化硅能够影响合金涂层的晶粒大小和硬度。王会菊等^[12]采用电沉积法在铜基体表面沉积 Ni-Co-SiO₂ 复合涂层,发现纳米二氧化硅粒子的加入可以提高合金涂层的耐腐蚀性能和摩擦学性能。

目前,对纳米复合涂层的研究报道较多,但对进一步提高 Ni-Co-SiO₂ 复合涂层防腐性能的研究相对较少。桐油是一种干性油,其具有干燥快、比重轻、防腐、防锈等优点,被大量应用在涂料领域^[13]。为了进一步提高涂层的耐蚀性能,本文采用桐油处理液对涂层进行浸泡处理,使得涂层表面能够形成一种有机膜层,制备桐油覆膜 Ni-Co-SiO₂ 涂层(TO-Ni-Co-SiO₂),以期通过桐油对涂层所起到的有效的封孔作用来改善材料的耐腐蚀性能。该方法操作简单,借助覆膜与底层 Ni-Co-SiO₂ 的协同作用,可有效提高基体金属的耐蚀性能。

1 实验

1.1 仪器与试剂

基体为 Q235B 碳钢,尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm,表 1 为碳钢的化学成分。纳米二氧化硅粒径约 60 nm(自制)。正硅酸乙酯、十六烷基三甲基溴化铵、三乙醇胺、无水乙醇、丙酮、氯化镍、氯化钴、硼酸、氯化镍、桐油、氢氧化钠、盐酸等药品购买自国药集团化学试剂有限公司。配制溶液所用的均为去离子水。

表 1 基体碳钢的元素组成

Tab.1 Chemical composition of the mild steel

元素	Fe	C	O	Al	Si	Mn
含量/(wt.%)	95.30	0.67	2.17	0.78	0.61	0.48

1.2 Ni-Co-SiO₂ 复合涂层和 TO-Ni-Co-SiO₂ 涂层的制备

用环氧树脂对碳钢封样,依次用 600#、1000#、1500#和 2000#水磨碳化硅砂纸打磨抛光,用丙酮超声清洗 10 min,再用乙醇清洗 10 min,最后用去离子水冲洗,吹干待用。采用恒电流的沉积模式,在加入了 1 g/L 纳米 SiO₂ 的瓦特型电镀液中电沉积制备出 Ni-Co-SiO₂ 纳米复合涂层。

按照摩尔比为 1.14:1 的比例配制桐油和丙酮混合溶液,将 Ni-Co-SiO₂ 试样浸泡在混合溶液中搅拌 1 h,使桐油充分填充 Ni-Co-SiO₂ 表面的间隙。之后,将试样取出至于恒温干燥箱中,80 °C 加热处理 12 h,制备出 TO-Ni-Co-SiO₂ 涂层。

1.3 电化学及分析表征

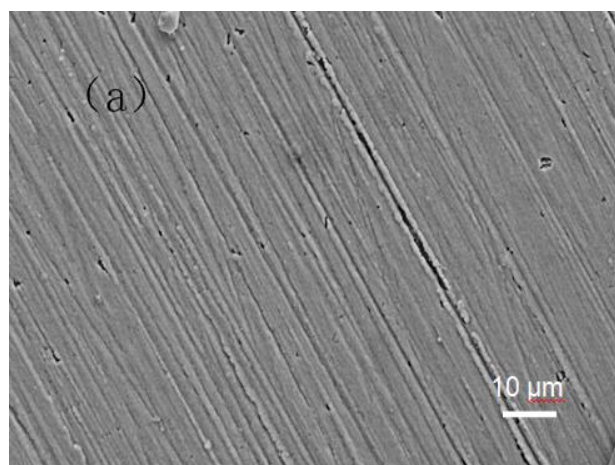
利用场发射扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)比较分析覆膜前后 Ni-Co-SiO₂ 的形貌和成分。利用 X 射线衍射仪(XRD)分析覆膜前后微结构的变化。利用红外光谱仪(FT-IR)分析表面膜层物质的变化,利用三维视频显微镜(DM)分析覆膜前后的粗糙度变化。采用 PART2273 电化学测试系统测试表征涂层的电化学特征,分析其耐蚀性。电化学测试在室温下进行,采用饱和甘汞电极为参比电极,铂铈丝电极为辅助电极,涂层试样为工作电极。在天然海水中进行试样的阻抗测试,测试频率为 10⁵~10² Hz, Tafel 极化曲线测试的扫描速率为 0.333 mV/s,电位扫描范围为相对开路电位±250 mV。

2 结果与讨论

2.1 SEM 和 EDS 分析

图 1 是碳钢、Ni-Co-SiO₂ 和桐油覆膜 Ni-Co-SiO₂ (TO-Ni-Co-SiO₂) 的表面形貌。由图 1(b)可以看出, Ni-Co-SiO₂ 复合涂层表面比较粗糙,有大量微小的颗粒存在,颗粒粒径在 1 μm 左右。经过桐油表面覆膜处理后的样品表面形貌如图 1(c)所示,可以看出样品表面颗粒均匀性有一定的提高。这是由于处理过程中,桐油吸附到涂层表面,经过氧化处理后,桐油中的不饱和键发生加聚反应,形成的膜层覆盖在表面,填补了表面的缺陷,从而使表面粗糙度下降。

表 2 是 Ni-Co-SiO₂ 涂层和 TO-Ni-Co-SiO₂ 涂层的 EDS 元素分析对比表。从表 2 可以看出桐油覆膜处理后的 Ni-Co-SiO₂ 涂层,元素的含量发生了明显变化。其中 Ni、Co 和 Si 元素的含量降低,C 和 O 元



(a) 碳钢

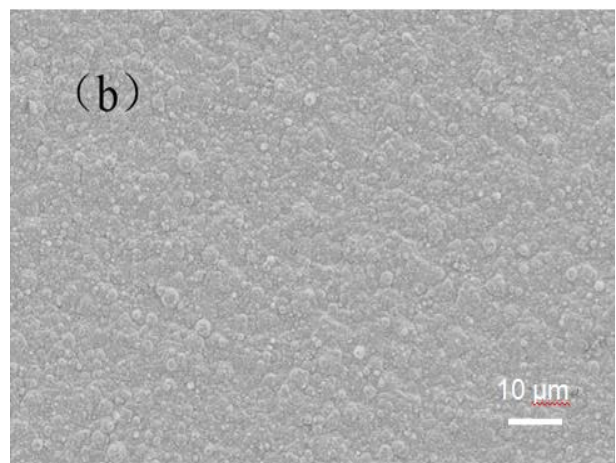
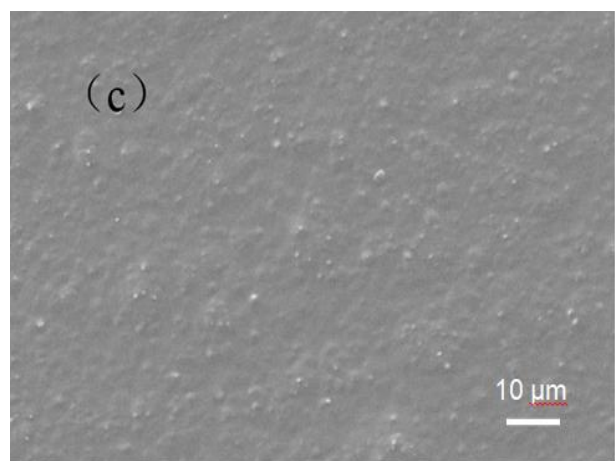
(b) Ni-Co-SiO₂(c) TO-Ni-Co-SiO₂

图1 不同试样的SEM图

Fig.1 SEM images of different samples

素的含量增加,这是由于表面桐油氧化生成了薄膜。

表2 Ni-Co-SiO₂涂层和 TO-Ni-Co-SiO₂涂层的元素组成 (wt.%)

Tab.2 Element composition of Ni-Co-SiO₂ and TO-Ni-Co-SiO₂ coatings (wt.%)

试样	Ni	Co	Si	O	C	Fe
Ni-Co-SiO ₂	52.42	44.55	0.62	1.68	0.73	0
TO-Ni-Co-SiO ₂	48.35	37.86	0.44	5.15	8.19	0

2.2 XRD分析

不同试样的XRD测试结果如图2所示。通过对比PDF卡片可知, 2θ 为 52.377° 和 77.235° 处的吸收峰分别是碳钢的(110)和(200)的衍射峰。Ni-Co-SiO₂涂层和 TO-Ni-Co-SiO₂涂层在 $2\theta=61.015^\circ$ 出现了衍射峰,而 $2\theta=77.235^\circ$ 处碳钢晶面(200)的衍射峰消失,结合表2的EDS结果可知,此时基体完全被金属涂层覆盖,且 Ni-Co-SiO₂涂层和 TO-Ni-Co-SiO₂涂层较为致密。根据文献可知, 2θ 为 52.178° 和 61.015° 处的吸收峰分别是镍钴合金(111)和(200)晶面的衍射峰,表明获得的镍钴合金是一种单相固溶体^[11,14-15]。同时 Ni-Co-SiO₂浸渍覆膜后的涂层不会改变 Ni-Co-SiO₂涂层的结构。

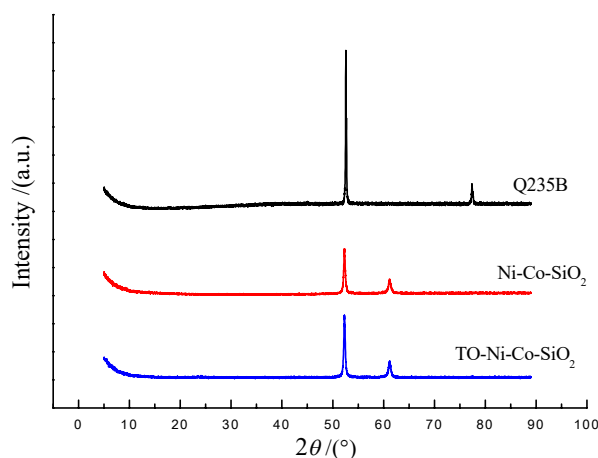


图2 不同试样的XRD谱图

Fig.2 X-ray diffraction patterns of different samples

2.3 FT-IR分析

不同膜层的红外光谱(FT-IR)如图3所示。从图3可以看出, Ni-Co-SiO₂涂层没有任何的红外吸收峰,这是因为其表面无任何有机物。经加热处理后, Ni-Co-SiO₂涂层表面出现了有机物的官能团。在 1747.22 cm^{-1} 处存在酯基 C=O 双键的吸收峰,同时发

现在 991.39 cm^{-1} 和 3013.94 cm^{-1} 处 $\text{C}=\text{H}$ 的吸收峰消失,证明在恒温处理过程中双键发生了聚合反应,生成较大的高分子化合物。这表明在 Ni-Co-SiO_2 涂层表面形成新的薄膜。

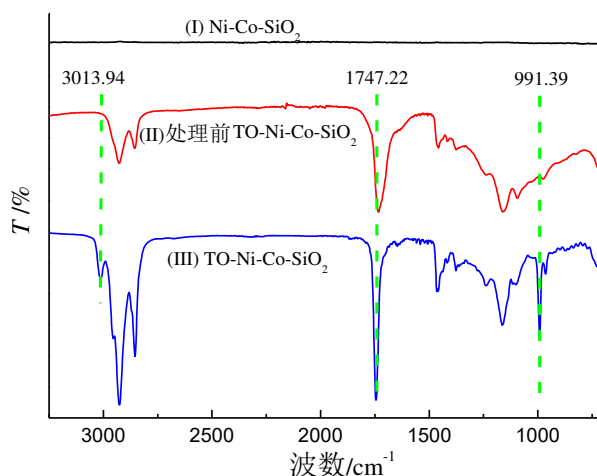


图 3 不同试样的红外谱图

Fig.3 FT-IR spectra of different samples

2.4 粗糙度分析

不同试样的三维形貌如图 4 所示。其中图 4(a) 是 Ni-Co-SiO_2 涂层,可以看出,峰顶和峰谷最大差值约 $2.8\text{ }\mu\text{m}$,其表面含有大量的凸起和凹陷,总体差值在 $1.2\text{ }\mu\text{m}$,表面较为粗糙。这是由于电沉积过程中, SiO_2 纳米粒子被还原的 Ni^{2+} 和 Co^{2+} 离子所嵌入,形成凸起的封顶,而没有纳米粒子嵌入的部位则出现峰谷,随着电沉积时间的延长,凸起部分作为新的晶核生长点,并嵌入大量纳米 SiO_2 粒子,不断扩大至整个表面,形成完整涂层,但表面总会出现大量凸起。图 4(b) 是 Ni-Co-SiO_2 桐油覆膜后的三维形貌,可以看出,凸起的峰顶与凹陷的峰谷最大差值约 $2.2\text{ }\mu\text{m}$,其表面含有少量凸起和凹陷,总体差值在 $0.5\text{ }\mu\text{m}$,表面较为平整。这是因为表面桐油覆膜处理后,桐油填补了电沉积后的凹陷,使表面更为平整。

2.5 极化曲线分析

图 5 为不同试样在 $3.5\%\text{NaCl}$ 溶液中的极化曲线对比图。从图中可以看出与碳钢相比, Ni-Co-SiO_2 和 TO-Ni-Co-SiO_2 涂层的腐蚀电位 E_{corr} 明显正移,腐蚀电流密度 I_{corr} 的大小顺序为: $\text{Q235B} > \text{Ni-Co-SiO}_2 > \text{TO-Ni-Co-SiO}_2$ 。对极化曲线的相关参数进行拟合,拟合结果如表 3 所示。

可以看出, Ni-Co-SiO_2 涂层和 TO-Ni-Co-SiO_2 涂

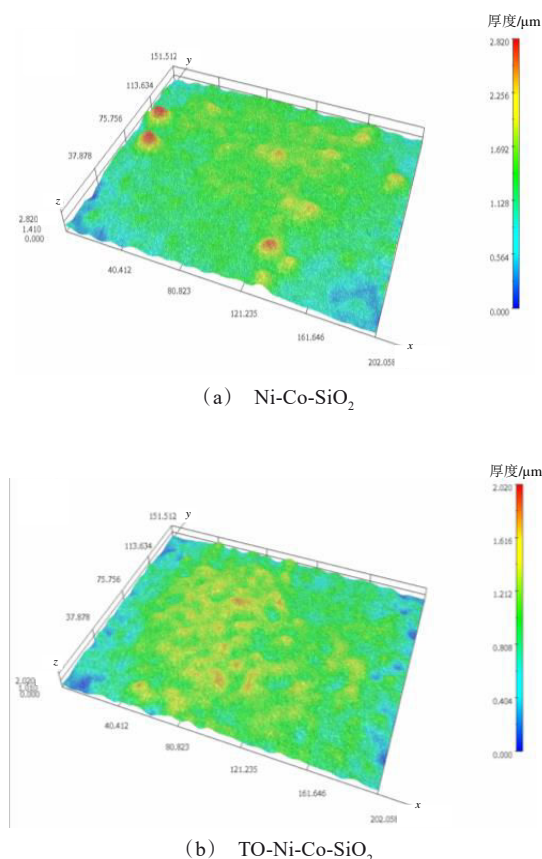


图 4 不同试样的三维表面形貌图

Fig.4 Surface three-dimensional morphology of different samples

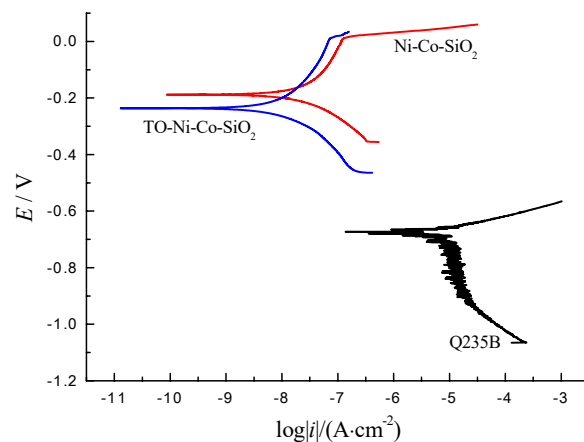


图 5 不同试样的 Tafel 极化曲线

Fig.5 Tafel polarization curves for different samples

层的自腐蚀电位相差不大,在 $-240\text{ mV} \sim -180\text{ mV}$ 之间,相比碳钢的自腐蚀电位 (-673.74 mV) 正移了约 470 mV ,腐蚀的倾向减小。 TO-Ni-Co-SiO_2 涂层

表3 不同试样的Tafel曲线拟合数据

Tab.3 Tafel curve fitting data of different samples

试样	β_a/mV	β_c/mV	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$I_{\text{corr}}/(\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
Q235B	43.062	254.32	-673.74	3.9855×10^{-3}	2.2847×10^3
Ni-Co-SiO ₂	182.00	107.20	-188.11	2.2605×10^{-5}	1.1941×10^5
TO-Ni-Co-SiO ₂	154.13	109.74	-236.33	6.7356×10^{-6}	3.2193×10^6

的自腐蚀电流密度为 $6.7356 \times 10^{-6} \text{ mA/cm}^2$, 在三者中最小, 其极化电阻 R_p 为 3.2193×10^6 , 在三者中最大。自腐蚀电流密度降低, 极化电阻增大, 表明 Ni-Co-SiO₂ 和 TO-Ni-Co-SiO₂ 两种涂层在 NaCl 溶液中有良好的耐蚀性。Ni-Co-SiO₂ 涂层的自腐蚀电流密度低, 这是因为镀层的完整性较好, 纳米 SiO₂ 粒子的存在, 可以细化 Ni-Co 镀层的晶粒, 从而达到细晶强化的作用。Ni-Co-SiO₂ 表面覆膜后的涂层的自腐蚀电

流密度较低, 这是在 Ni-Co-SiO₂ 涂层完整性和细晶强化的同时, 表面的颗粒与颗粒之间的缝隙被再次填充, 使粗糙度将低, 极大的减少了表面的缺陷, 从而进一步阻隔了腐蚀介质进入到基体表面。因此, TO-Ni-Co-SiO₂ 耐蚀性会有显著提高。

2.6 EIS分析

电化学阻抗谱(EIS)是能够评价涂层防腐蚀性能的有效工具。图6是不同试样浸泡在 NaCl 溶液中的 Nyquist 图。从图中可以看出, 碳钢的阻抗弧最小, Ni-Co-SiO₂ 的阻抗弧较小, TO-Ni-Co-SiO₂ 阻抗弧较大, 并在低频区出现 Warburg 扩散效应。低频阻抗模值 ($|Z|_{f=0.01 \text{ Hz}}$) 通常被用来综合评估涂层的阻抗模值^[16], 通过图6可以看出三种不同试样的阻抗模值有明显差别, 在低频区 TO-Ni-Co-SiO₂ 的阻抗模值最高, 是碳钢基体阻抗模值的 10^4 倍。

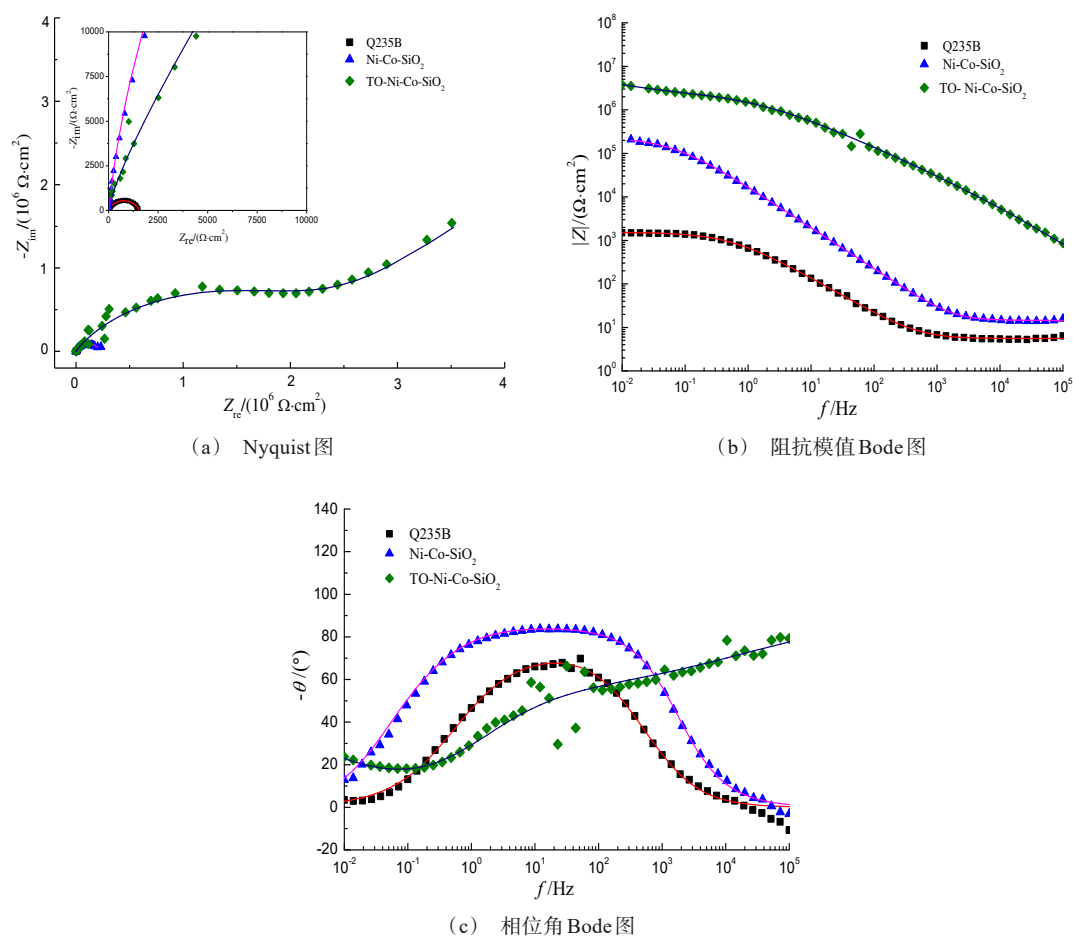


图6 不同试样在3.5%NaCl溶液中浸泡1.5 h后的电化学阻抗谱图

Fig.6 EIS spectra of different samples immersed in 3.5% NaCl solution for 1.5 h

图 7 是不同试样在 3.5%NaCl 溶液中的等效电路图,其拟合数据列于表 4 中,其中 R_s 表示溶液电阻,图 7(a)中 Q_c 为碳钢的双电层电容, R_c 为碳钢的电荷转移电阻;图 7(b)中 Q_c 为 Ni-Co-SiO₂ 涂层的电容, R_c 为 Ni-Co-SiO₂ 涂层的电阻, Q_{dl} 为双电层电容, R_{ct} 为电荷转移电阻;图 7(c)中 Q_c 为 Ni-Co-SiO₂ 覆膜涂层后的电容, R_c 为 Ni-Co-SiO₂ 覆膜涂层后的电阻, Q_{dl} 为双电层电容, R_{ct} 为电荷转移电阻, R_w 为 Warburg 扩散电阻。

从表 4 可以看出, Ni-Co-SiO₂ 涂层的电阻是 $1.036 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 电荷转移电阻为 $1.107 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。Ni-Co-SiO₂ 涂层的耐蚀性相比碳钢耐蚀性有了明显提高,原因是 Ni-Co-SiO₂ 涂层可以阻隔腐蚀性离子的渗入,同时 Ni-Co-SiO₂ 涂层的耐蚀性较好,从而可以较好的保护基体。TO-Ni-Co-SiO₂ 涂层的电荷转移电阻是 $1.678 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 较大的电荷转移电阻能够阻止涂层的 Ni-Co-SiO₂ 中的电子的向腐蚀介质迁移,从而延长 Ni-Co-SiO₂ 的寿命。TO-Ni-Co-SiO₂ 涂

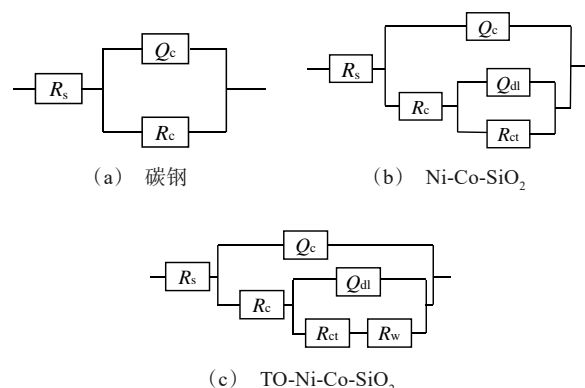


图 7 不同试样在 3.5% NaCl 溶液中等效电路图

Fig.7 Equivalent circuit diagrams of different samples immersed in 3.5% NaCl solution

层出现 Warburg 阻抗,这是因为在 Ni-Co-SiO₂ 和桐油氧化膜的协同作用下,腐蚀处于扩散控制过程, TO-Ni-Co-SiO₂ 涂层可以较好阻隔水和腐蚀性离子渗入,从而较好地保护基体。

表 4 不同试样的 EIS 拟合数据

Tab.4 EIS fitting data of different samples

样品名称	$Q_c/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^2)$	n_c	$R_c/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl}/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^2)$	n_{dl}	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_w/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
Q235B	2.476	0.8224	1.491×10^3	—	—	—	—
Ni-Co-SiO ₂	0.1023	0.9449	1.036×10^5	0.1075	0.7058	1.107×10^5	—
TO-Ni-Co-SiO ₂	6.662×10^{-5}	0.9056	5.241×10^3	1.465×10^{-3}	0.5773	1.678×10^6	2.456×10^{-6}

2.7 浸泡腐蚀分析

图 8 为 TO-Ni-Co-SiO₂ 涂层浸泡在 3.5% 溶液中的电化学阻抗谱随时间变化图。从图 8(a)中可以看出,随着浸泡时间的延长,涂层的容抗弧先增大后减小, Warburg 扩散阻抗弧逐渐减小。通过拟合数据可知,扩散电阻先增大后减小,这是由于膜层的吸水膨胀导致,但吸收水分后,膨胀后的涂层的隔水效果较好,能够阻止腐蚀性粒子的进入,可较好的保护 Ni-Co-SiO₂ 涂层,延长 Ni-Co-SiO₂ 涂层的寿命。从

图 8(b)可以看出,浸泡 350 h 后的涂层的低频阻抗模值仍然在 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上,表明 TO-Ni-Co-SiO₂ 涂层在 NaCl 溶液中具有较好的稳定性。使用图 7(c)的等效电路图进行拟合,拟合数据如表 5 所示。

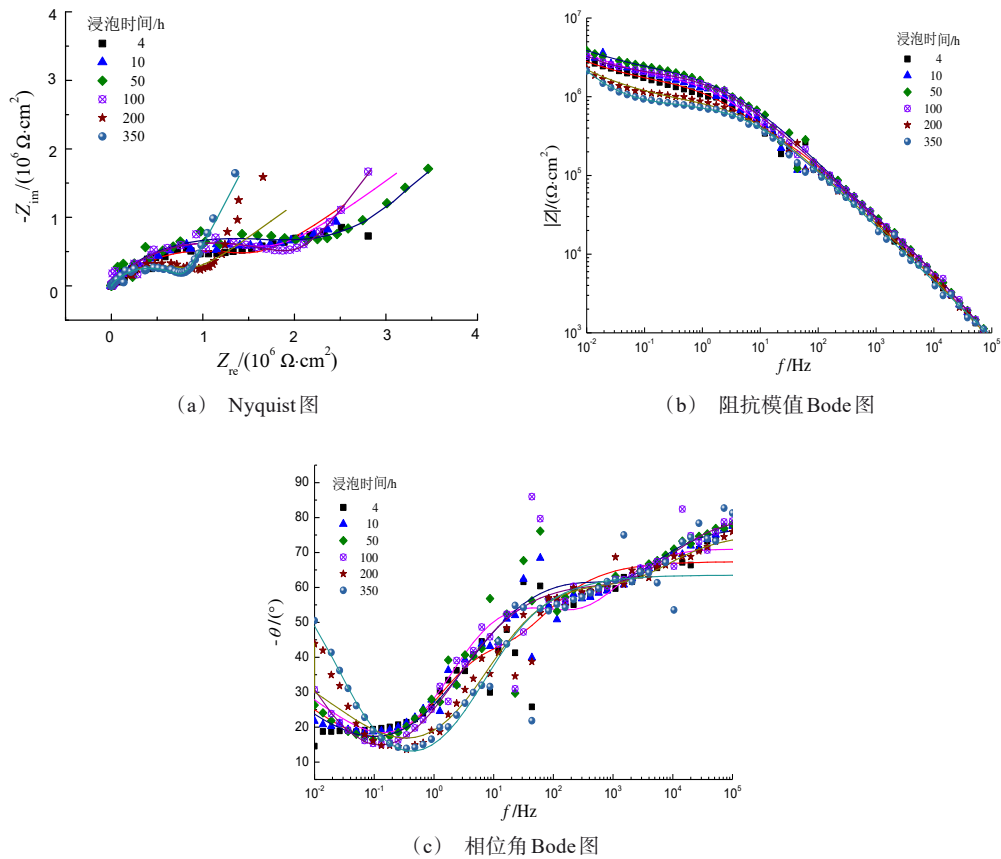
2.8 浸渍覆膜恒温处理的后涂层的耐蚀性增强的原理图

通过恒电流制备出的 Ni-Co-SiO₂ 涂层,由于 SiO₂ 纳米粒子的存在,导致晶体形核中心的增加,可以细化 Ni-Co 合金的晶粒,这样制备出的 Ni-Co-

表 5 TO-Ni-Co-SiO₂ 涂层的 EIS 拟合数据

Tab.5 EIS fitting data of TO-Ni-Co-SiO₂ coatings

时间/h	$Q_c/(10^{-5} \mu\text{F} \cdot \text{cm}^2)$	n_c	$R_c/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl}/(10^{-4} \mu\text{F} \cdot \text{cm}^2)$	n_{dl}	$R_{ct}/(10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_w/(10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2)$
4	6.66	0.9056	5.241×10^3	1.465	0.5773	1.678	2.456
10	147.90	0.6059	4.357×10^3	0.126	0.8349	2.109	2.332
50	12.09	0.8607	3.363×10^4	8.614	0.6276	2.248	1.869
100	11.30	0.8667	3.351×10^4	8.233	0.6425	1.880	2.188
200	84.74	0.7090	8.320×10^4	420.200	0.7128	13.680	2.473×10^{-1}
350	90.79	0.7059	9.370×10^4	474.700	0.7561	55.980	2.493×10^{-3}

图8 TO-Ni-Co-SiO₂涂层在3.5%NaCl溶液中的电化学阻抗谱图Fig.8 EIS spectra of TO-Ni-Co-SiO₂ coating in 3.5% NaCl solution

SiO₂涂层内部具有较高的致密性。在沉积结束时的表面,会形成大量的Ni-Co-SiO₂复合粒子,这样就会导致表面存在一定的粗糙度,如图9所示。在腐蚀介质中,这些复合粒子之间存在的间隙,会造成腐蚀介质的渗入,从而引发腐蚀的产生。为了避免腐蚀介质的渗入,通过桐油覆膜处理,使桐油分子均匀的吸附在Ni-Co-SiO₂复合粒子的间隙之间,浸渍覆膜处理后,表面吸附的分子经过加热处理后会发

聚反应,这与FT-IR分析结果一致,形成网络状大分子,完整覆盖在表面,填补了Ni-Co-SiO₂涂层表面的缺陷,从而降低了涂层的粗糙度,这与SEM和三维形貌相一致。因此腐蚀介质在表面不易渗入到基体,延缓了腐蚀的产生,延长了Ni-Co-SiO₂寿命,同时Ni-Co-SiO₂复合粒子充当网络状膜层的增强相也是耐蚀性提高的重要因素。

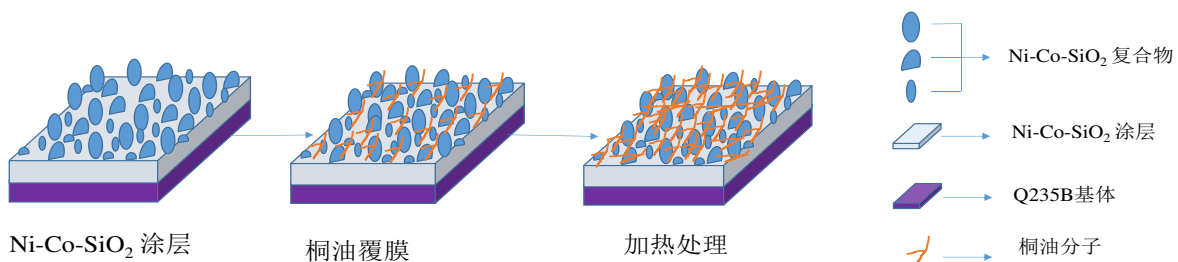


图9 加热处理桐油覆膜涂层原理示意图

Fig.9 The mechanism model of soak film treated at constant temperature

3 结语

在碳钢基体上成功制备出了较为致密的Ni-Co-SiO₂纳米复合涂层,通过桐油覆膜恒温处理后的Ni-Co-SiO₂涂层表面明显覆盖一层薄膜,覆膜后对涂层的厚度影响较小,膜层可填补Ni-Co-SiO₂涂层表面的间隙。桐油覆膜层不会改变Ni-Co-SiO₂涂层微观结构,通过红外光谱表明恒温处理后桐油膜层中碳碳双键消失,单分子之间发生了加聚反应,能够降低表面粗糙度。桐油覆膜Ni-Co-SiO₂涂层相比Ni-Co-SiO₂涂层具有较低的腐蚀电流密度,膜层可在较长的时间内维持膜层的稳定,低频阻抗表明桐油覆膜Ni-Co-SiO₂涂层具有较好的耐蚀性。桐油在加聚后形成网状结构和表面Ni-Co-SiO₂复合物对网状结构的支撑有协同作用。

参考文献

- [1] 宋皓, 谭俊, 郑晓辉, 等. Co-P合金镀层的研究现状[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 102-108.
- [2] 宋振兴, 姚素薇, 王宏智, 等. 电镀Ni-Co合金镀层耐腐蚀性能研究[J]. 电镀与精饰, 2014, 36(11): 1-3.
- [3] 朱龙章, 张庆元, 陈宇飞, 等. 镍钴合金镀层的电沉积及其耐蚀性的研究[J]. 材料保护, 1997(5): 4-6.
- [4] 吴勐, 沈喜训, 徐群杰, 等. 超声辅助电沉积制备Ni-SiO₂纳米复合镀层及耐蚀性能研究[J]. 电镀与精饰, 2017, 39(1): 11-14.
- [5] 胡佳, 方亮, 唐安琼, 等. 铝合金Ni-Co-P/Si₃N₄镀层的化学复合镀制备及其硬度[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(9): 128-133.
- [6] Shi L, Sun C, Gao P, et al. Mechanical properties and wear and corrosion resistance of electrodeposited Ni-Co/SiC nanocomposite coating[J]. Applied Surface Science, 2006, 252(10): 3591-3599.
- [7] 乔俊强, 孙晓军, 孙英杰, 等. 电沉积TiO₂/Ni纳米复合涂层的微结构与性能[J]. 电镀与涂饰, 2005, 24(11): 8-11.
- [8] 王一雍, 苏建铭, 韩楚菲, 等. 电沉积制备Ni-Co-Al₂O₃纳米复合镀层的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(2): 53-57.
- [9] 钟佩文. 铝合金表面Ni-Co-P/SiO₂化学复合镀层的制备和性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [10] Ghazanlou S I, Shokuhfar A, Navazani S, et al. Influence of pulse electrodeposition parameters on microhardness, grain size and surface morphology of Ni-Co/SiO₂ nanocomposite coating[J]. Bulletin of Materials Science, 2016, 39(5): 1-11.
- [11] Atuanya C U, Ekweghiariri D I, Obele C M. Experimental study on the microstructural and anti-corrosion behaviour of Co-deposition Ni-Co-SiO₂ composite coating on mild steel[J]. Defence Technology, 2018, 149(1): 64-69.
- [12] 王会菊, 陈森, 杨武, 等. NiCo/纳米SiO₂复合镀层的耐腐蚀及其摩擦学性能研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(6): 51-54.
- [13] 廖燕珍, 谭东. 桐油的加工利用[J]. 化工技术与开发, 1991(1): 7-11.
- [14] 钟远辉, 戴品强, 许伟长, 等. 脉冲电沉积纳米晶Ni-Co合金镀层腐蚀特性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(6): 1053-1057.
- [15] 潘晓铭, 张琳琳, 张大伟, 等. 激光熔覆Ni-Co基合金复合涂层的组织与耐磨性[J]. 热加工工艺, 2015(4): 155-157.
- [16] 曹楚南. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.