

碳化硅复合镍磷合金涂层的组织结构、 显微硬度及腐蚀性能研究

李丹¹, 陈德馨¹, 何叶青², 王启伟¹, 康志新², 朱胜³, 李卫¹

- (1. 暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院, 广州 510632;
2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640;
3. 陆军装甲兵工程学院再制造技术国家重点实验室, 北京 100072)

摘要: 镍基复合涂层是一项有望替代电镀铬涂层的先进绿色环保表面处理技术。本文在铝合金表面制备了纯 Ni、NiP 及其与 SiC 复合涂层, 利用 SEM、EDS 和 XRD 研究了 Ni、NiP 及其复合涂层的微观形貌、成分与组织结构, 利用显微硬度计与电化学工作站研究了其硬度与耐腐蚀性能。研究结果表明: SiC 复合电镀纯镍涂层的表面较为粗糙, SiC 复合电镀镍磷合金涂层中晶粒轮廓明显; 电沉积镍磷合金涂层的相结构包括晶体 Ni_2P 、 Ni_{12}P_5 和非晶 NiP。铝合金基体表面 Ni-P 合金涂层的显微硬度显著高于纯 Ni 涂层, 引入 SiC 纳米颗粒形成复合涂层可提高其显微硬度; SiC 颗粒有助于提高复合涂层在氯化钠溶液中的腐蚀电位, 降低腐蚀电流密度, 提高其耐蚀性能。

关键词: 复合涂层; 碳化硅; 显微硬度; 耐蚀性

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-7127(2020)12-0004-8

DOI 10.3969/j.issn.1674-7127.2020.04.004

Component, Structure, Micro-hardness and Anti-corrosion Properties of Silicon Carbide Composite Nickel-phosphorus Alloy Coating

Dan Li¹, Dexin Chen¹, Yeqing He², Qiwei Wang¹, Zhixin Kang², Sheng Zhu³, Wei Li¹

- (1. Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistant and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632;
2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640;
3. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: Electro deposition of nickel and composite coatings has been developed as an advanced environmentally-friendly surface treatment technology for replacing chromium electro-plating. In this research, pure nickel, nickel-phosphorus and their composite coatings have been electro-deposited on aluminium alloy surfaces. The surface morphology, component and structure are studied by SEM, EDS and XRD. Microhardness tester and electrochemical workstation are used to investigate the hardness and anti-corrosion properties. The results showed that the surfaces of SiC composite Ni coatings were roughness and the profile of NiP cells is distinct on NiP-SiC composite coatings. The structures of NiP-SiC composite coatings included crystalline Ni_2P , Ni_{12}P_5 and amorphous NiP. The microhardness of NiP coatings on Al substrates was higher than that of

第一作者: 李丹 (1993-), 男, 硕士研究生, E-mail: lidan10241226@163.com。

通讯作者: 王启伟 (1981-), 男, 副研究员, 博士, E-mail: wangqiwei@jnu.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB2002000), 广东省基础与应用基础研究基金 (2019A15150101011282)。

pure Ni coatings. Introducing SiC nanoparticles to form composite coatings would improve the microhardness. Furthermore, SiC nanoparticles would increase the corrosion electric potential of the composite coatings in NaCl solution and decrease the electric current density, resulting in better anti corrosion properties.

Key words: Electro deposition; Composite coating; Silicon carbide; Microhardness; Anti corrosion

0 引言

电镀铬涂层因光洁度好、硬度高、耐磨耐蚀性强等优势,国内许多重要工业领域仍大量应用。但电镀铬工艺引发的环境污染、危害健康等问题,已成为制约我国建设环境友好型社会的顽疾。替代电镀铬的绿色表面处理技术为解决上述难题提供了突破口,但目前国内在车辆交通、钢铁、矿山等重大行业诸多典型部件仍缺失该类绿色技术。电沉积镍及其复合涂层是一项有望替代传统电镀铬的先进绿色表面处理技术。其中电沉积镍及复合涂层因其简单工艺与优良涂层性能,如良好耐磨性、耐蚀性和高硬度等性能优点,已广泛应用于石油化工、仪器仪表、医疗器械、船舶等零部件中^[1-4]。

引入微纳颗粒增强复合涂层赋予了金属涂层更耐磨耐蚀的服役性能,如复合氧化铝等硬质颗粒可提高涂层的耐磨性^[5,6];含有硫化钼等减摩新材料的复合涂层具有更优的自润滑性能^[7,8];加入碳纳米管等碳材料可提高复合涂层的耐蚀性能^[9,10]。碳化硅颗粒是一种高性能复合涂层的增强颗粒,具有高强度、高温抗氧化、热稳定性与耐腐蚀等优异特性。国内外关于 SiC 复合涂层的研究已取得一定进展,但 SiC 复合涂层主要集中于纯 Ni、以及 Ni-B、Ni-Co、Ni-W 等合金涂层^[11-18]。如加入 SiC 颗粒制备 Ni-Co 复合涂层可保持其高硬度且耐磨性能的同时提高其耐腐蚀性能^[18];通过脉冲电镀制备 SiC 复合 Ni-B 复合涂层具有优异的力学与耐腐蚀性能^[13]。

镍磷合金涂层经过组织调控与性能优化,其硬度相比于其他镍基合金涂层更接近电镀硬铬涂层^[1]。如上述, SiC 能有效提高涂层的力学性能与耐腐蚀性能。本文利用电化学沉积技术制备了纯 Ni、Ni-SiC、NiP 和 NiP-SiC 复合涂层,研究了涂层表面形貌与结构,以及 SiC 对复合涂层的显微硬度、耐腐蚀性能的影响。

1 试验

1.1 实验材料与药品

本实验的基体材料为铸造铝合金(ZL102),采用线切割机将样品切割成 10×20×5mm 的块状备用。碳化硅粉末、六水合硫酸镍、六水合氯化镍、硼酸和水合硼酸氢钠购自阿拉丁生化科技股份有限公司,其中碳化硅粉末粒径为 40 纳米。

1.2 碳化硅复合电镀镍工艺

电镀前,采用 120#、320#、600#、800# 和 1000# 的 SiC 砂纸依次打磨试样表面,随后用去离子水充分冲洗试样表面,以便去除打磨残留的毛刺与磨屑。碳化硅复合电镀工艺要求如表 1 所示,将 ZL102 试样作为阴极通过简单自制试样夹置入复合电镀溶液,阳极为高纯镍板(99.99%)。纯镍涂层的溶液组成包括 NiSO₄·6H₂O、NiCl₂·6H₂O 和 H₃BO₄,镍磷合金涂层的溶液组成为在此基础上加入 NaH₂PO₂·H₂O, SiC 复合涂层则加入纳米 SiC 粉末。

表 1 碳化硅复合电镀镍工艺要求

Table 1 Process parameters of SiC-Ni composite coatings

Reagents	Concentration	Parameters
NiSO ₄ ·6H ₂ O	240 g/L	
NiCl ₂ ·6H ₂ O	30 g/L	T = 25 or
H ₃ BO ₄	40 g/L	60 ,
NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O	16 g/L	t = 60 min
SiC	1.2 g/L	

1.3 结构表征及力学与腐蚀性能测试

利用 D8 advance 型多晶 X 射线衍射仪(XRD, Cu Kα 靶, 加速电压 40 kV, 电流 40 mA)对涂层进行物相分析;利用 Phenom XL 型扫描电子显微镜(SEM)及附带 X 射线能谱仪(EDS)对薄膜的表面形貌和元素含量进行观察。利用 HVS-5

型数显小负荷维氏硬度计测定涂层的维氏硬度，采用 200 g 的压头，保压时间为 15s。复合涂层的耐腐蚀性能采用电化学工作站（双恒电位仪，CHI760E，上海辰华仪器有限公司）来评测材料的电化学腐蚀行为。动电位极化测试与阻抗测试均采用三电极体系（参比电极、辅助电极和工作电极），在室温下进行。其中，极化的测试范围为开路电位 ± 500 mV，扫描速率为 10 mV/s；电化学阻抗谱的测试频率范围为 10 mHz~100 kHz，

扰动电压为 5 mV。

2 试验结果与讨论

2.1 SiC-Ni 试样表面形貌与成分

如图 1 所示为不同镀镍工艺制备的试样照片，纯镍涂层表面有气孔，但加入 SiC 后其表面气孔消失。镍磷合金涂层试样表面均匀无缺陷，呈现灰色。加入 SiC 复合电镀的试样表面变暗，尤其是 SiC 复合电镀镍磷合金涂层。

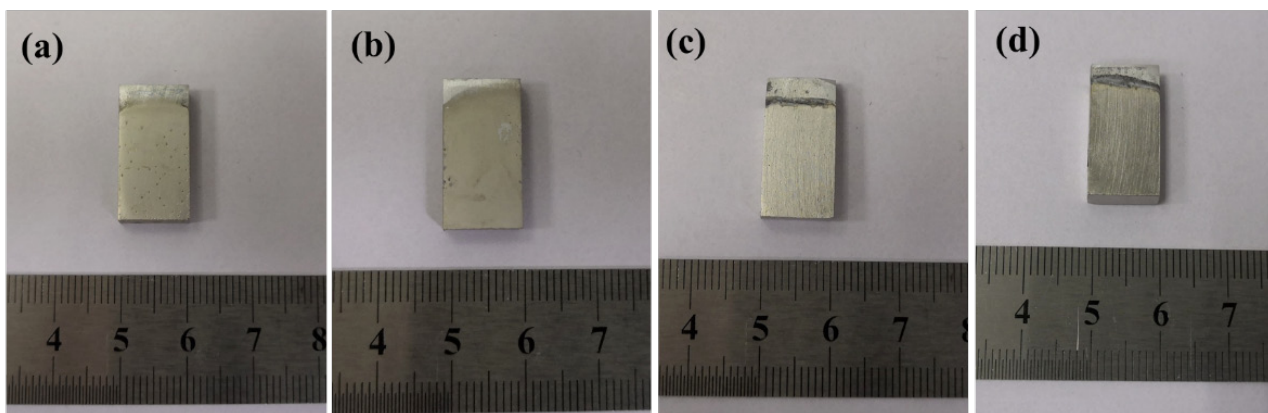


图 1 不同镀镍工艺制备的试样照片：(a) Ni; (b) Ni-SiC; (c) Ni-P; (d) Ni-P-SiC

Fig.1 Photographs of Ni-coated ZL102 samples prepared by various processes: (a) Ni; (b) Ni-SiC; (c) Ni-P; (d) Ni-P-SiC

图 2 为 SiC 颗粒在复合电镀中沉积的物理模型^[1]。电镀过程中，镀层中 SiC 颗粒的共沉积过程分为几个阶段发生，包括包覆 SiC 颗粒的离子云的形成，离子云形成后与阴极发生对流效应，通过浓度边界层的扩散以及最后吸附在阴极表面上；在阴极表面上，一部分 SiC 颗粒被截留在镀层中，另一部分则均匀分布在镀层表面上。

通过 SEM 和 EDS 观察 SiC 颗粒在复合电镀涂层中的分布与元素含量，如图 3 所示。其中 SiC 复合电镀纯镍涂层的表面较为粗糙，纯镍晶粒上镶嵌较多凸起（如图 3a）。其表面 EDS 结果如图 3 所示，微细凸起颗粒处（图 3a 中标记 1 处）含有 Ni、C 和 Si 元素（如图 4a），较大纯镍晶粒处（图 3a 中标记 2 处）元素仅包含 Ni（如图 4b），说明颗粒凸起为 SiC 颗粒，而大晶粒处为纯镍。同时，结合涂层表面 EDS 结果（如图 5）分析可知，当两种镀液中 SiC 的含量都为 1.2g/L 时，相应制备的涂层 Si 元素的含量分别为 13.91

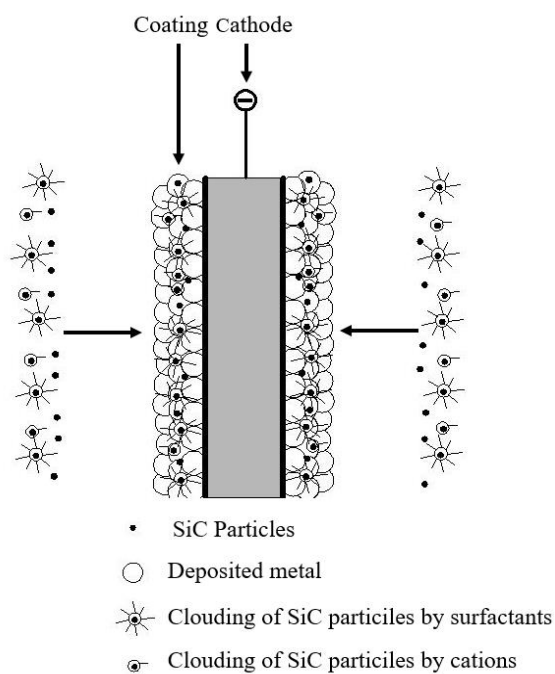


图 2 SiC 颗粒在复合电镀中沉积的物理模型^[1]
Fig.2 Physical model of SiC particles deposited in composite electroplating^[1]

和 1.17wt.%，SiC 微粒在纯镍中的复合量相对较多且均匀分散于涂层中。SiC 颗粒的共沉积是一个物理过程，在一定浓度范围内，镀液中分散的 SiC 量越多，SiC 颗粒越容易吸附在基体上，镀层中 SiC 颗粒含量增多。然而，当超过这一定浓度时，SiC 颗粒间的平均间距降低以致于彼此趋于稳定，导致毗邻电解质表面的颗粒的有效浓度的降低^[19]。

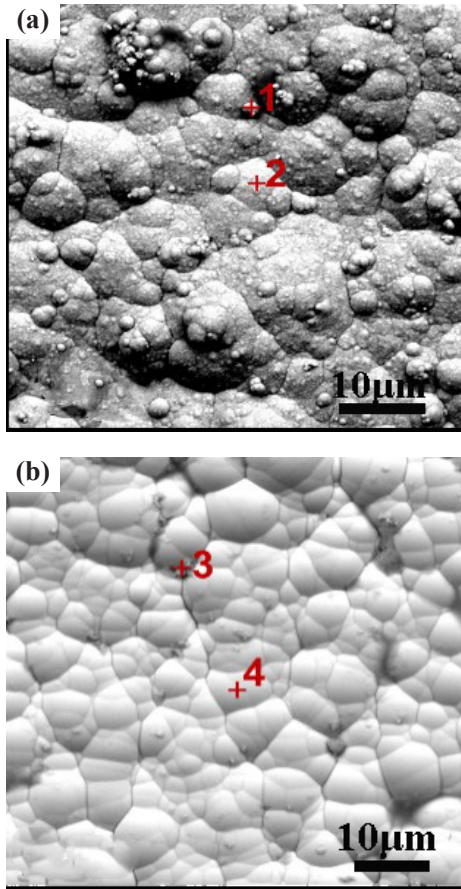


图 3 SiC 复合涂层的表面 SEM 形貌：
(a) Ni-SiC 复合涂层；(b) Ni-P-SiC 复合涂层
Fig.3 SEM images of SiC composite coatings:
(a) Ni-SiC coatings; (b) Ni-P-SiC coatings

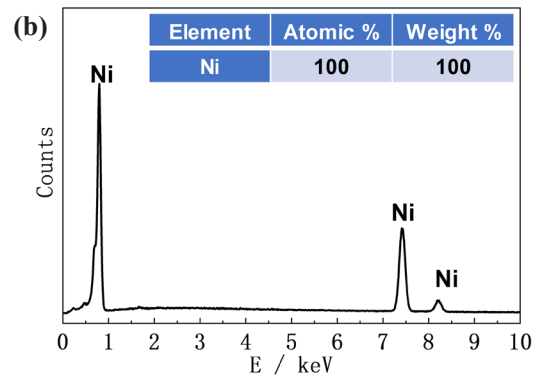
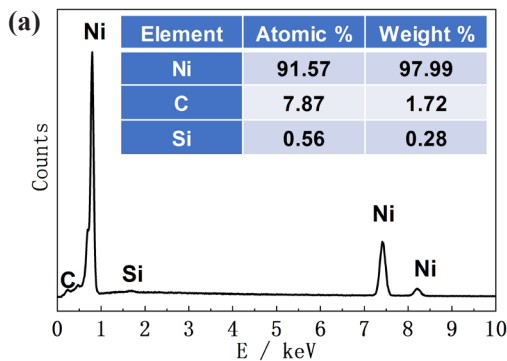


图 4 Ni-SiC 复合涂层 (图 3a) 的表面 EDS 图谱：
(a) Point 1; (b) Point 2

Fig.4 EDS results of point 1 and 2 in SEM of Ni-SiC coatings (Fig. 3a): (a) Point 1; (b) Point 2

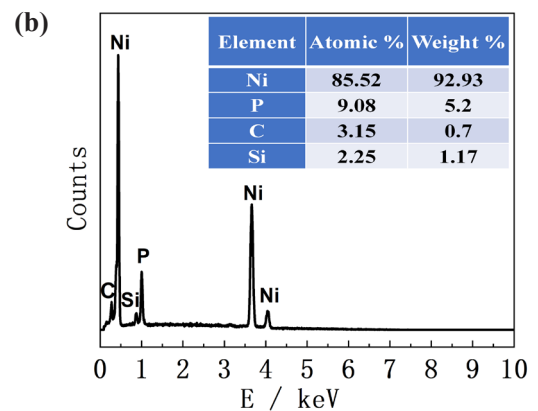
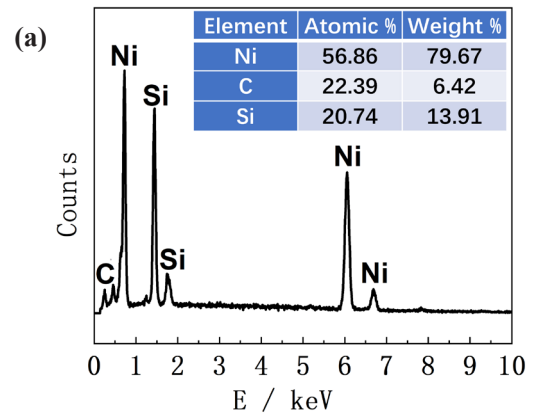


图 5 SiC 复合涂层表面 EDS 图谱：

(a) Ni-SiC 复合涂层；(b) Ni-P-SiC 复合涂层

Fig.5 EDS results of SiC composite coatings:

(a) Ni-SiC coatings; (b) Ni-P-SiC coatings

对于 SiC 复合电镀镍磷合金涂层，其表面较为整洁，在粗细不同的晶粒的界面处镶嵌少量颗粒，如图 3b 所示。明显镶嵌有颗粒处 (图 3b 中

标记 3 处) EDS 结果表明, 其含有 C 和 Si 元素, 说明此处含有 SiC 颗粒 (如图 6a)。而在大晶粒处的元素 (图 3b 中标记 4) 含有 Ni、O 和 P, 即该晶粒为镍磷涂层 (如图 6b)。对比与 Si 元素在纯镍与镍磷合金涂层中的含量, 分别为 0.56 和 0.72

at.%, 这是因为 SiC 颗粒在镍磷镀层中容易团聚, 使用 EDS 对两点处进行观察时, 容易出现镍磷合金涂层中 Si 元素更高。此外, P 元素在涂层中含量分别为 6.26 和 5.75 wt.%, 说明该电沉积 Ni-P 涂层为中磷涂层。

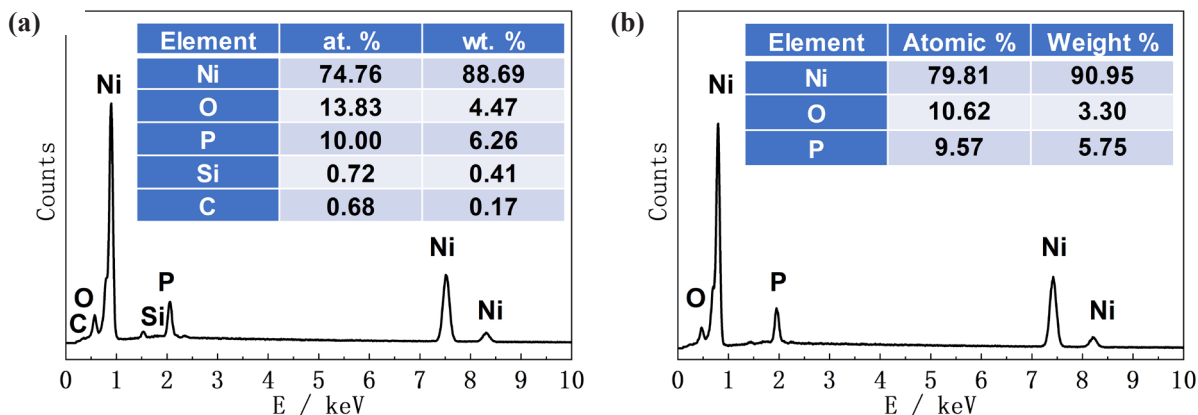


图 6 Ni-P-SiC 复合涂层 (图 3b) 的表面 EDS 图谱: (a) Point 3; (b) Point 4
Fig. 6 EDS results of point 3 and 4 in SEM of Ni-P-SiC coatings (Fig.3b): (a) Point 3; (b) Point 4

2.2 复合涂层的相结构

图 7 为电镀纯镍、镍磷及其 SiC 复合涂层的 XRD 图谱。对照标准卡片 (#65-0380) 可知, 纯镍涂层的 XRD 图谱中 (图 7a), 2θ 为 44.1° 、 51.5° 和 80.0° 处的峰位分别对应金属镍的 (111)、(200) 和 (220) 晶面, 表明该涂层的相结构为纯镍。

在 NiP 合金涂层中, 在 2θ 为 30° 左右处有明显的非晶峰位, 对应 NiP 的非晶相结构, 如图

7b。同时存在两种晶体结构, 分别是在 28.1° 、 47.0° 、 55.8° 和 78.0° 处的峰位分别对应 Ni_2P 的 (111)、(220)、(311) 和 (420) 晶面, 2θ 为 38.1° 、 44.3° 和 64.7° 处的峰位分别对应 Ni_{12}P_5 的 (112)、(330) 和 (303) 晶面。加入 SiC 形成复合涂层, 其相结构未发生变化, 同时未出现 SiC 的相关 XRD 峰位, 这是由于涂层中 SiC 含量较低, 如图 3 中 SEM 形貌所示。

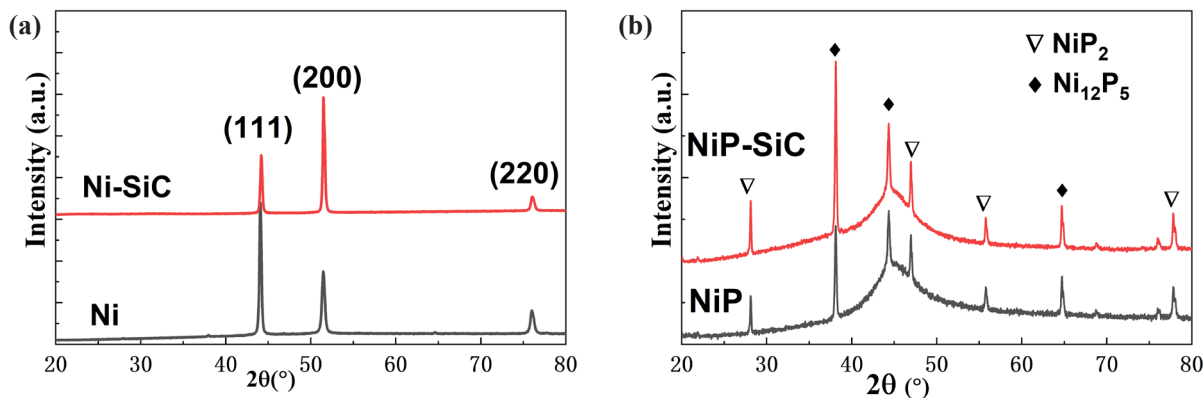
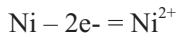
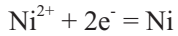


图 7 电镀涂层的 XRD 图 (a) Ni; (b) NiP
Fig.7 XRD spectra of electroplating coatings:(a) Ni; (b) NiP

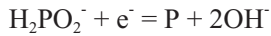
结合溶液体系分析其电沉积复合涂层的反应过程^[20]，在阳极端：



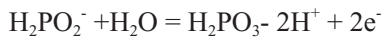
在阴极端：



同时溶液中次亚磷酸根发生了还原反应，从而共沉积生成 NiP 合金涂层：



此时在样品表面，NiP 合金形成的同时产生 OH⁻ 根，从而使得阴极附近 pH 值上升，次亚磷酸根与水反应生成磷酸根，同时产生 H⁺ 离子中和：



在电沉积溶液中，pH 值的变化促使 Ni₂P 和 Ni₁₂P₅ 等 NiP 的亚稳定相的生成。

2.3 复合涂层的硬度测试

如图 8 所示，所用 ZL102 铝合金基体的维氏硬度为 63.17 HV0.2。采用硫酸系镀液电镀制备的纯镍涂层，维氏硬度仅为 194.76HV0.2，在试样表面的压痕形貌如图 9a 所示，压头在平整涂层表面打出菱角清晰的四边形。加入 SiC 形成复合涂层，则硬度增加约 50 HV0.2，达到 241.27 HV0.2。即便使用 150 进行热处理，其涂层的显微硬度并未得到明显增加。

在铝合金表面电镀镍磷合金涂层，其表面维氏硬度可达到 592.35 HV0.2，加入 SiC 将涂层硬度提高到 611.54 HV0.2，如图 9b 为其表面压痕形貌。SiC 复合 Ni-P 合金涂层的硬度超过 600 HV0.2，说明该 NiP-SiC 复合涂层可作为替代电镀铬的涂层材料应用于工程机械与装备的表面防护

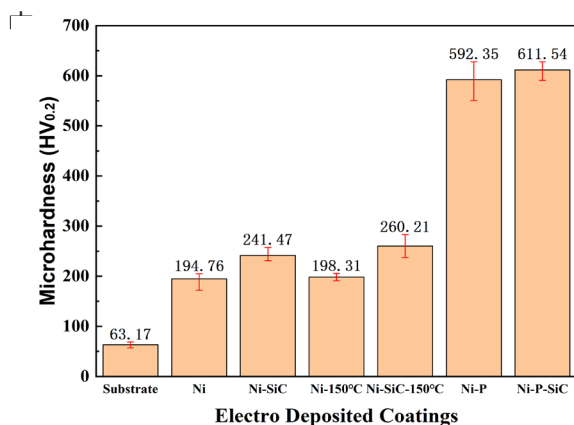


图 8 复合电镀镍涂层的维氏硬度

Fig.8 Microhardness of the prepared coatings

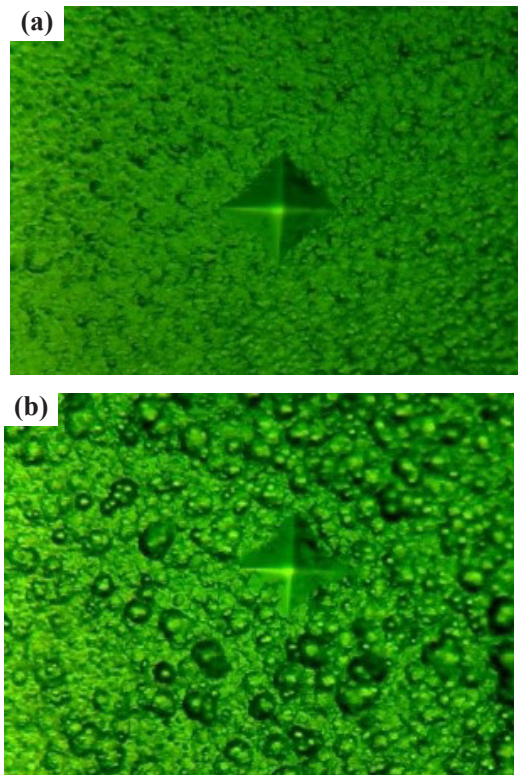


图 9 维氏硬度测试的压痕：(a) Ni; (b) Ni-P-SiC

Fig.9 Impression of microhardness test:

(a) Ni; (b) Ni-P-SiC

2.4 复合涂层的耐腐蚀性能

针对 Ni-P 合金涂层的耐腐蚀性能，采用 3.5 wt.% 氯化钠水溶液作为测试腐蚀液，通过电化学工作站进行动电位极化与阻抗测试。如图 10 所示，SiC 复合的 Ni-P 合金涂层比 Ni-P 涂层具有更高腐蚀电位 (E_{corr}) 和更低的腐蚀电流密度 (i_{corr})。

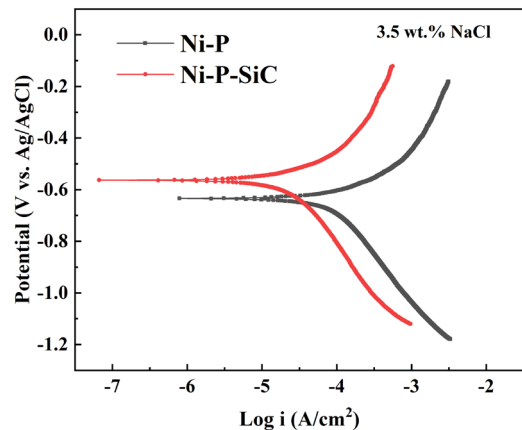


图 10 电镀镍磷合金涂层的动电位极化曲线

Fig.10 Potentiodynamic polarization curves of the prepared Ni-P alloy coatings

利用 Tafel 外推法对动电位极化曲线进行计算,相关参数如表 2 所示。Ni-P 和 Ni-P-SiC 涂层的腐蚀电位分别为 -0.634 和 -0.563 V, 呈现向正电位偏移的趋势, 说明涂层中的 SiC 颗粒有助于提高涂层在氯化钠腐蚀溶液中的腐蚀电位, 提高

合金涂层发生腐蚀的势能, 即更难发生腐蚀。其腐蚀电流密度分别为 6.10×10^{-5} 和 1.24×10^{-5} A/cm², Ni-P-SiC 合金涂层的腐蚀电流密度更低, 即腐蚀速度更慢, 说明 SiC 复合涂层的耐蚀性更优。

表 2 电镀镍磷合金涂层的极化电化学参数

Table 2 Electrochemical parameters of the prepared Ni-P alloy coatings

Coatings	Ni-P	Ni-P-SiC
E _{corr} (V vs. Ag/AgCl sat. KCl)	-0.634	-0.563
i _{corr} (A/cm ²)	6.10×10^{-5}	1.24×10^{-5}
R _s (Ω cm ²)	6.269	3.565
Q _c (F cm ²)	2.38×10^{-6}	1.16×10^{-4}
R _c (Ω cm ²)	24.25	31.00
Q _{dl} (F cm ²)	1.95×10^{-4}	1.87×10^{-4}
R _{ct} (Ω cm ²)	276.7	237.0

图 11 为两种涂层在 3.5 wt.% 氯化钠溶液中测试得到的交流阻抗谱, 空心点为测试数据, 实线为拟合曲线。其 Nyquist 曲线形状类似, 但 Ni-P-SiC 涂层的曲线半径更大, 说明两种涂层的腐蚀机理是相同的, 但腐蚀效率不同。

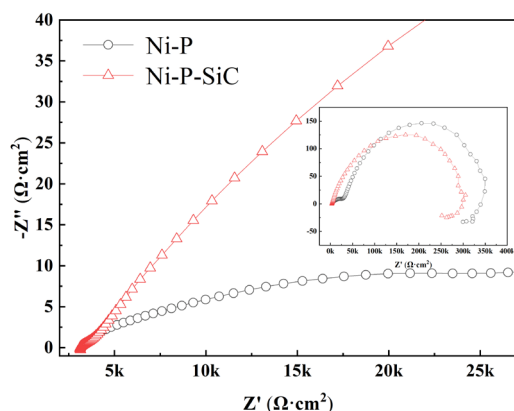


图 11 在 3.5wt.% NaCl 溶液中镍磷合金涂层的 Nyquist 图
Fig.11 Nyquist plots of Ni-P coatings at 3.5wt.% NaCl solution

在阻抗拟合等效电路中, 如图 12 所示, R_s 是参比电极与被测试样之间的溶液电阻; R_c 是 Ni-P 合金涂层电阻, 表示溶液进入涂层的难度^[16]; Q_c 表示 Ni-P 合金涂层的电容, 表示涂层与溶液的接触面^[17]; R_{ct} 是涂层与电解质间的荷质转移电阻,

Q_{dl} 表示双电层的电容。拟合数据如表 2 所示, Ni-P 和 Ni-P-SiC 涂层的 R_c 分别为 24.25 和 31.00 Ω cm², 数值越大说明溶液更难以进入涂层产生腐蚀, 即加入 SiC 使得复合涂层更难产生腐蚀。Ni-P 和 Ni-P-SiC 涂层的 Q_c 分别为 2.38×10^{-6} 和 1.16×10^{-4} F cm², Si-C 复合涂层的 Q_c 更大, 这是由于引入 SiC 颗粒, 加大复合涂层的表面粗糙度, 从而提高了涂层与溶液之间的接触面。

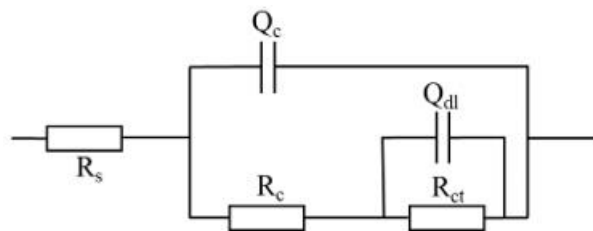


图 12 镍磷合金涂层的阻抗拟合等效电路示意图
Fig.12 Electrical equivalent circuits for Ni-P coatings

3 结 论

(1) 在 ZL104 铝合金表面电沉积 Ni、Ni-SiC、Ni-P 和 NiP-SiC 涂层, SiC 复合电镀纯镍涂层的表面较为粗糙, 纯镍晶粒上镶嵌较多凸起。SiC 复

合电镀镍磷合金涂层，其晶胞轮廓明显，在粗细不同的晶粒的界面处镶嵌少量 SiC 颗粒。

(2) 电沉积镍磷合金涂层的相结构包括非晶 NiP、Ni₂P 和 Ni₁₂P₅。由于 SiC 添加量较少，纯镍与镍磷复合涂层的相结构未发生改变。

(3) 铝合金基体表面 Ni-P 合金涂层的显微硬度显著高于纯 Ni 涂层，引入 SiC 纳米颗粒形成复合涂层可提高涂层的显微硬度。

(4) SiC 颗粒有助于提高涂层在氯化钠腐蚀溶液中的腐蚀电位，降低腐蚀电流密度，即 SiC 复合涂层的耐蚀性更优。

参考文献

- [1]Lelevic A, Walsh F C. Electrodeposition of NiP alloy coatings: A review[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 378: 124803.
- [2]Ban C, Wang F, Chen J, et al. Effect of mechanical attrition on structure and property of electroplated Ni-P coating on magnesium alloy[J]. Electrochemistry, 2019, 87(1): 89-93.
- [3]Shen Y F, Liu W N, Sun X, et al. Plastic deformation in an amorphous Ni-P coating[J]. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2012, 43(5): 1610-1620.
- [4]Ping Z, He Y, Gu C, et al. Mechanically assisted electroplating of Ni-P coatings on carbon steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(24): 6023-6028.
- [5]Karimzadeh A, Aliofkhaezrai M, Rouhaghdam A S. Study on wear and corrosion properties of functionally graded nickel-cobalt-Al₂O₃ coatings produced by pulse electrodeposition[J]. Bulletin of Materials Science, 2019, 42(2): 53.
- [6]Feng Q, Li T, Yue H, et al. Preparation and characterization of nickel nano-Al₂O₃ composite coatings by sediment co-deposition[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(8): 2262-2268.
- [7]李文生, 崔帅, 何玲, 等. 电化学沉积镍基 MoS₂ 复合涂层及其宽温域摩擦性能 [J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 97-103.
- [8]Cheng Q, Yao Z, Zhang F, et al. Microstructure and tribological property of Ni-MoS₂ composite coatings prepared by ultrasonic and mechanical stirring electrodeposition[J]. Materials Research Express, 2020, 6(12): 126434.
- [9]Prasannakumar R S, Chukwuike V I, Bhakyaraj K, et al. Electrochemical and hydrodynamic flow characterization of corrosion protection persistence of nickel/multiwalled carbon nanotubes composite coating[J]. Applied Surface Science, 2020, 507: 145073.
- [10]Liu C, Wei D, Huang X, et al. Electrodeposition of Co-Ni-P/graphene oxide composite coating with enhanced wear and corrosion resistance[J]. Journal of Materials Research, 2019, 34(10): 1726-1733.
- [11]Chou M, Ger M, Ke S, et al. The Ni-P-SiC composite produced by electro-codeposition[J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 92(1): 146-151.
- [12]Salari Mehr M, Akbari A, Damerchi E. Electrodeposited Ni-B/SiC micro- and nano-composite coatings: A comparative study[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 782: 477-487.
- [13]Ahmadiyeh S, Rasooli A, Hosseini M G. Ni-B/SiC nanocomposite coating obtained by pulse plating and evaluation of its electrochemistry and mechanical properties[J]. Surface Engineering, 2019, 35(10): 861-872.
- [14]Raghavendra C R, Basavarajappa S, Sogalad I. Electrodeposition of Ni-nano composite coatings: a review[J]. Inorganic and Nano-Metal Chemistry, 2018, 48(12): 583-598.
- [15]Zhou Y, Xie F Q, Wu X Q, et al. A novel plating apparatus for electrodeposition of Ni-SiC composite coatings using circulating-solution co-deposition technique[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 699: 366-377.
- [16]Özkan S, Hapçı G, Orhan G, et al. Electrodeposited Ni/SiC nanocomposite coatings and evaluation of wear and corrosion properties[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 232: 734-741.
- [17]Cai C, Zhu X B, Zheng G Q, et al. Electrodeposition and characterization of nano-structured Ni-SiC composite films[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(11): 3448-3454.
- [18]Hu X, Qu N. Enhanced corrosion resistance of nickel-cobalt/carborundum coatings formed by supergravity field-assisted electrodeposition[J]. Thin Solid Films, 2020, 700: 137923.
- [19]王慧龙, 奚勇, 傅强, 等. 镀液中 SiC 含量对化学镀 Ni-P-SiC 复合镀层结构和性能的影响 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(04): 307-311.
- [20]Ma C, Wang S C, Wang L P, et al. The electrodeposition and characterisation of low-friction and wear-resistant Co-Ni-P coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 235: 495-505.