

海工机械 Ni-Co/SiC 纳米复合镀层微观结构及耐蚀性能

李保松, 张 文, 环宇星, 张薇薇

(河海大学, 江苏 南京 211100)

摘 要: 采用扫描电子显微镜 (SEM)、能谱分析 (EDS) 和 X 射线衍射 (XRD) 研究了纳米 SiC 颗粒对 Ni-Co 镀层结构和形貌的影响, 通过 EIS, Tafel 电化学方法探究了 Ni-Co/SiC 电沉积过程及镀层的电化学腐蚀性能。结果表明, Co 的加入使 Ni 镀层晶粒细化, 孔隙率降低, 并使部分结构非晶化, 耐蚀性提高。纳米 SiC 颗粒具有促进 Ni-Co 合金形核长大和提高其硬度的双重作用, 使 Ni-Co/SiC 耐磨性增强, 与 Ni-Co 合金相比其 E_{corr} 更正, i_{corr} 更小, R_c 更大, 具有优异的耐蚀性和耐磨性。Ni-Co/SiC 具有更好的服役稳定性, 而 Ni-Co 合金服役中耐蚀性降低较快。在服役过程中, 镀层腐蚀过程经历了 3 个阶段: 即浸润阶段; 电解液在涂层中传输的扩散控制阶段; 电解液到达基材表面后扩散速率已大于电化学反应速率的电化学控制阶段。Ni-Co/SiC 合金具有良好的耐磨耐蚀性能, 在海水多重因素交互作用下能够对海工机械提供长效防护, 在海工防护领域具有良好的应用前景。

关键词: 电沉积; SiC; Ni-Co/SiC; 耐蚀性; 纳米复合镀层

中图法分类号: O646.5; TQ153.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)05-1509-08

海工机械在海水中受腐蚀、冲蚀及微生物污损等多因素的交互作用, 导致其服役性能加速恶化。Ni-Co 合金具有良好的耐蚀性、耐磨性、力学及可加工性能, 广泛用于金属材料的表面防护^[1-3]。近年来, 通过复合电沉积技术把功能性纳米颗粒镶嵌在不同基材中, 可制备高硬度, 高耐磨及抗腐蚀的纳米复合镀层, 已获得越来越广泛的研究^[4-10]。K. Raeissi^[11]研究了 Co, W 元素对 Ni 纳米晶合金电沉积性能的影响, J. Xu, Y. H. You^[12, 13]在 ITO 上制备了 Ni-Co 合金并研究了 Co 离子浓度对其耐蚀性及磁性能的影响。虽然 Ni-Co 合金研究已取得许多有价值的成果, 但针对海水多因素复合作用下的腐蚀数据研究还很缺乏, 孔隙、裂纹及耐磨性差等限制了其在海工领域的应用^[14-16]。SiC 具有高硬度, 耐高温, 良好的化学稳定性, 近年研究表明^[17-19], 利用共沉积方法将纳米 SiC 均匀分散于 Ni-Co 镀层中, 可显著改善镀层耐腐蚀及耐冲刷性能, 可获得性能更优异的海洋环境长效防护复合镀层, 从而提高海工机械的服役寿命, 已成为相关领域的研究热点^[20, 21]。本实验采用复合电沉积技术将纳米 SiC 颗粒分散到 Ni-Co 合金中制备 Ni-Co/SiC 纳米复合镀层, 研究 SiC 纳米颗粒对涂层耐蚀性、耐磨性的影响, 阐明镀层组织结构、微观形貌及电化学行为, 为海水多因素复合

作用下的先进防护涂层研究提供基础数据支撑。

1 实 验

电解液组成为: $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 200 g/L, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 20 g/L, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 20 g/L, H_3BO_3 30 g/L, NaCl 10 g/L, 十二烷基硫酸钠 0~0.5 g/L。向上述电解液中加入 0.5~5 g/L SiC 纳米颗粒, $\phi 80 \sim 150$ nm, 即得 Ni-Co/SiC 电解液, 为保持 SiC 在镀液中均匀悬浮, 应不断搅拌镀液。所用试剂均为化学纯试剂, 溶液均用去离子水配制, 采用 H_2SO_4 或 NaOH 溶液调节电解液 pH 值。采用 CHI660E 电化学工作站和 DKKII 试验电源为电沉积直流电源, 以镍板为阳极, 经前处理的黄铜试板为阴极, 两极距离为 35 mm, 电沉积时试样仅工作面一面接触电解液, 非工作部位用绝缘胶密封绝缘。在自制 250 mL 电解槽中, 在机械搅拌下进行电沉积, 电流密度 0.5~4 A/dm², pH 值 4~4.5, 通过水浴控制温度 35 °C, 沉积时间 1~30 min, 所制备涂层为 Ni-Co, Ni-Co/SiC 镀层。

采用 HITACHI-S3400N 型扫描电子显微镜观察镀层表面形貌, 加速电压为 15.0 kV, 并通过 Oxford INCA EDS 电子能谱仪分析镀层组成。采用日本理学株式会社 Rigaku D/max-R3 型 X 射线衍射仪分析样品物相结

收稿日期: 2017-05-23

基金项目: 国家自然科学基金 (51679076, 51301061, 51605137); 中央高校基本科研业务费 (2013B32614)

作者简介: 李保松, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100, 电话: 025-83786751, E-mail: bsli@hhu.edu.cn

构, 辐射源 Cu K α ($\lambda=0.154\ 05\ \text{nm}$), 工作电压 40 kV, 镍滤波, 电流 300 mA, 扫描速率 $5^\circ/\text{min}$, 扫描范围 (2θ) $20^\circ\sim 100^\circ$ 。采用划痕试验判断镀层与基体之间的结合力。电化学实验采用三电极体系, 用镀层样品做工作电极, 铂片做辅助电极, 饱和甘汞电极(SCE)做参比电极, 样品非工作面用环氧树脂密封, 实验前电极用金相砂纸抛光, 用乙醇、丙酮溶液清洗, 再用 3.0%(质量分数)稀盐酸浸泡 1 min, 蒸馏水洗涤, 实验前对电解液通氮气 15 min 以除去溶液中的氧, 利用动电位极化和 EIS 法测试样品在 3.5% NaCl 水溶液中的电流-电位极化曲线, $E_{\text{ocp}}-t$ 曲线及 EIS 图谱, 以判断合金的耐蚀性能。测试均在 CHI660E 电化学工作站上进行, 其中 EIS 测试频率为 0.01 Hz~100 kHz, 扰动电位为 10 mV。TAFEL 扫描速率为 5 mV/s, 测试均在室温下进行。

2 结果与讨论

2.1 复合镀层表面形貌

图 1 为仅改变 CoSO_4 含量, 在 $1.32\ \text{A}/\text{dm}^2$ 电流密度下沉积 3 min 所得 Ni-Co 合金的表面形貌。从图 1 可看出, 随镀液 CoSO_4 含量增加, 镀层晶粒尺寸变小, 平整度增加。 CoSO_4 20 g/L 时, 晶粒尺寸为 $0.6\sim 1.5\ \mu\text{m}$, 表面有凹陷, 平整度欠缺, 当 CoSO_4 40 g/L 时, 晶粒尺寸明显减小, 为 $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$, 随 CoSO_4 含量进一步

增加, 晶粒尺寸减小的速度明显降低, 在 80 g/L 时晶粒尺寸为 $0.1\sim 0.2\ \mu\text{m}$ 。可见, Co^{2+} 对镀层的结构和形貌有明显影响, Co^{2+} 可细化结晶, 提高镀层平整度, 从而进一步提高镀层的耐蚀性能。由于电沉积时间较短, 晶粒尺寸偏小, 层叠及晶粒长大过程还不够充分, 但足以说明 Co^{2+} 离子加入对 Ni 镀层晶粒的细化作用。

图 2 为 CoSO_4 含量 30 g/L, 电流密度 $1.32\ \text{A}/\text{dm}^2$ 沉积 3 min 所得 Ni-Co 合金的表面形貌, 由图可知, 沉积涂层微观结构局部不平整, 存在部分微裂纹, 这些结构将影响涂层的平整度和耐蚀性。

图 3 为加入 1.5 g/L 纳米 SiC 后所得的镀层形貌。SiC 颗粒尺寸为 120 nm, 沉积前对含有 SiC 的电解液机械搅拌 2 h, 超声波分散 30 min。由图 3 可知, 镀层致密平整, 无裂纹。由图 3a 所示, 镀层表面晶胞颗粒的分布大致分为 3 个区域, A 区域表面晶粒较少, 表面平整致密, 无裂纹, 孔隙率低, B 区域表面呈晶胞层叠状, 结合 EDS 分析可知, 晶胞中夹杂有 SiC 纳米颗粒, SiC 分布比 A 区域多, 表面平整致密, C 区域为晶胞聚集区, 呈现大量晶胞层叠, 是优先受到外界磨损的区域, 对耐蚀性提高具有重要作用。

图 3b、3c 和 3d 是图 3a 表面 A、B、C 3 个局部区域的放大图。电沉积过程中随着 Ni-Co 合金的生长, 纳米 SiC 夹杂并镶嵌在 Ni-Co 合金中, 生成 Ni-Co/SiC 纳米复合层。由于 SiC 颗粒可作晶核增加基体表面形

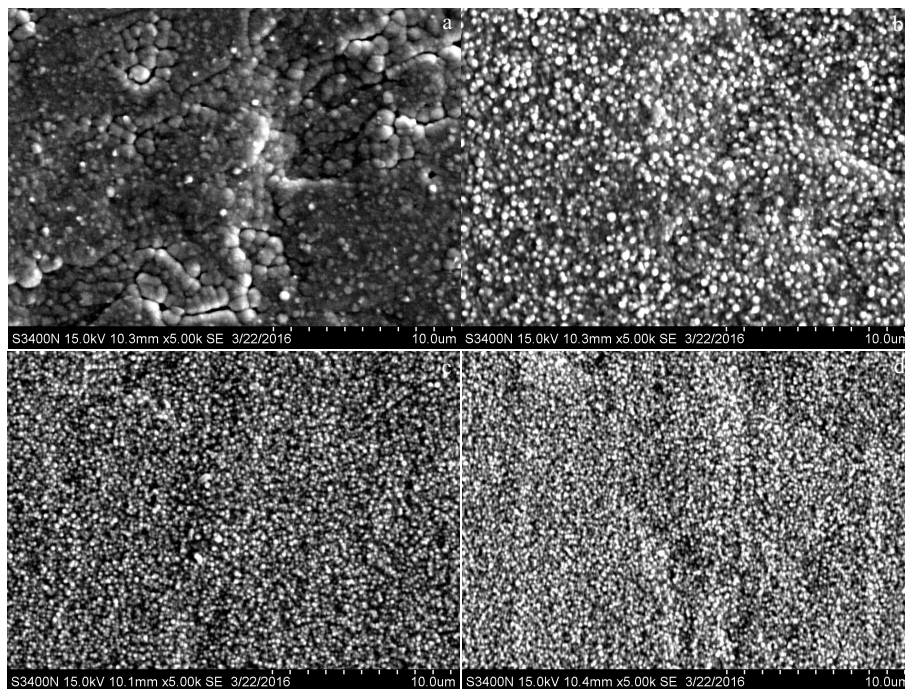


图 1 不同 Co 含量的 Ni-Co 合金形貌

Fig.1 SEM images of the Ni-Co alloys with different CoSO_4 contents: (a) 20 g/L, (b) 40 g/L, (c) 60 g/L, and (d) 80 g/L

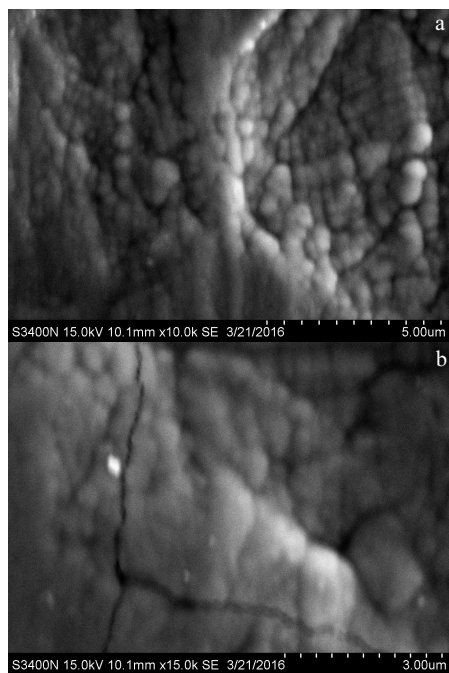


图 2 Ni-Co 合金形貌

Fig.2 SEM images of the Ni-Co alloys: (a) sag and (b) microcrack

核点数目,但由于其是悬浮体,分布并不十分均匀,导致不同区域晶胞生长速度不同,形成了局部颗粒聚集状结构。分析表明,晶胞颗粒中 SiC 含量最高,但图中表面晶胞颗粒并非 SiC,而是 Ni-Co/SiC 复合物,是 SiC 作为晶核和掺杂粒子,引发和促进了 Ni-Co 合金晶粒的形成和长大而生成的 Ni-Co/SiC 晶粒, SiC 加入显著改变了涂层表面的组织结构,镀层表面 SiC 并非均匀分布,其分布特征影响镀层的耐蚀性、结合力及耐磨性能。

2.2 复合镀层组成与结构

图 4 为镀层 EDS 能谱。图 4a, 4b 分别为 Co^{2+} 含量为 20, 40 g/L 的 Ni-Co 电解液沉积得到的合金涂层的能谱。由图 4a, 4b 可知,涂层含有 Ni, Co 元素,为 Ni-Co 合金。少量的 C 可能是在电沉积过程中含碳络合物在镀层中的沉积夹杂形成的, Cu 是由于铜基材导致的。电解液 Co^{2+} 含量增加,可提高镀层 Co 的含量。当电解液 CoSO_4 为 40 g/L 时,镀层 Co 元素原子分数为 33.33%,比 20 g/L 时的 32.25%提高了 1.08%,但 Co/Ni 的原子比由 32.25/68.58 的 47.03%,上升为 33.33/47.43 的 70.27%,可见涂层中 Co 含量明显增加,Co 具有良好的耐磨性,耐蚀性及磁性,对镍合金结构和物性具有

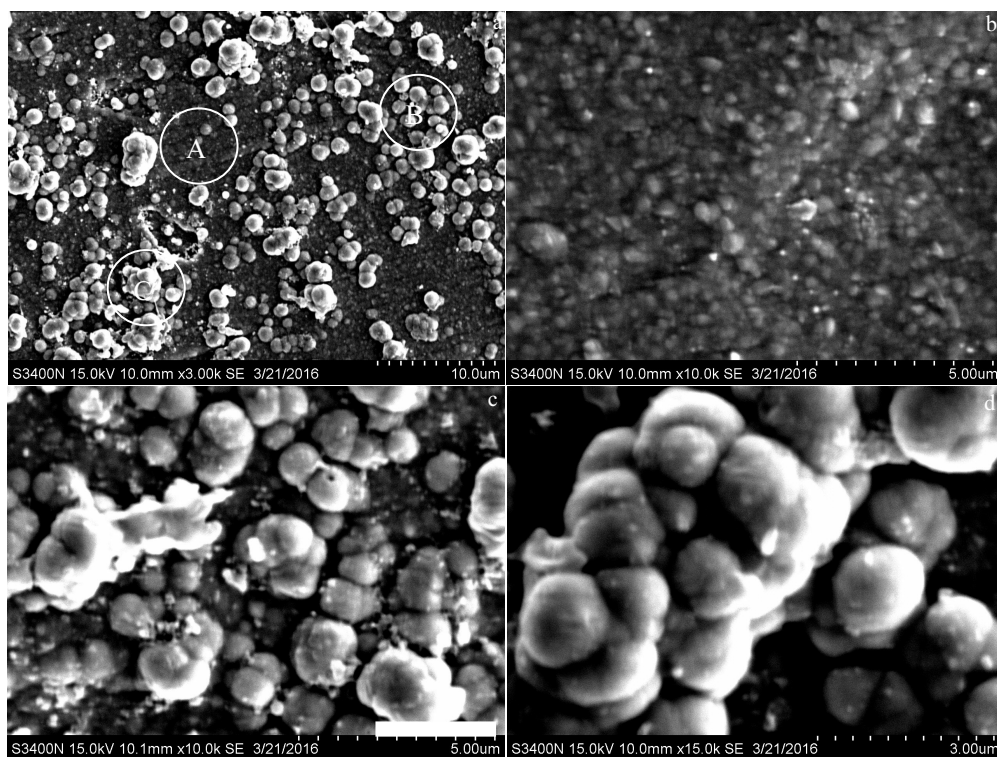


图 3 Ni-Co/SiC 合金表面形貌

Fig.3 SEM images of the Ni-Co/SiC alloys: (a) low magnification, (b~d) high magnification corresponding to A, B and C marked regions in Fig.3a, respectively

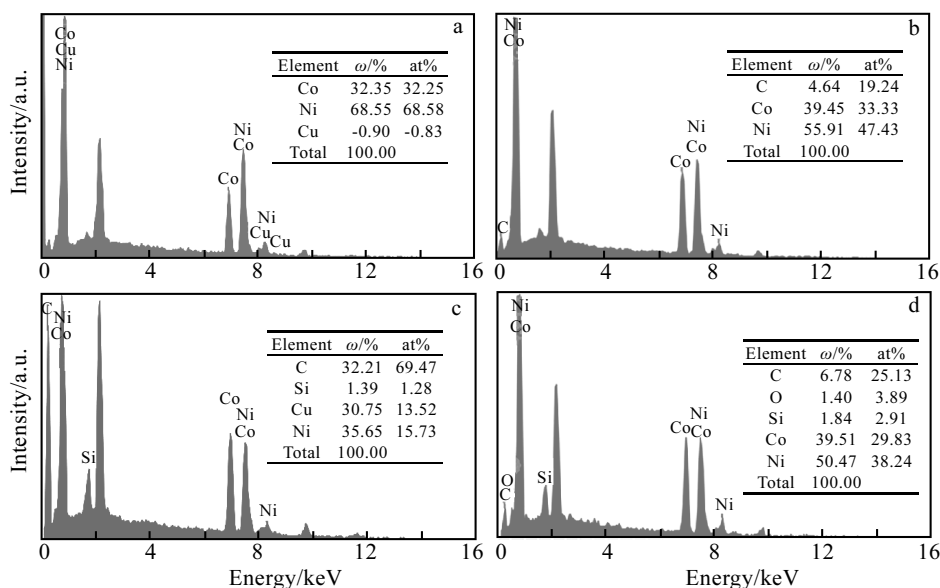


图 4 Ni-Co 和 Ni-Co/SiC EDS 能谱

Fig.4 EDS spectra of the Ni-Co alloys with Co²⁺ content of 20 g/L (a) and 40 g/L (b); region C (c) and region B (d) of Ni-Co/SiC alloy in Fig.3a

良好的改进作用,有利于镀层耐磨性和耐蚀性的提高。图 4c, 4d 为在 Ni-Co 电解液中复合 SiC 纳米陶瓷颗粒,获得的 Ni-Co/SiC 纳米复合镀层能谱,对应图 3a 所示的 C 区、B 区测试点所获得数据。由图 4d 可知,涂层含有 Ni, Co, C, Si, O 元素,表明涂层为 Ni-Co/SiC 复合涂层,能谱中没有 Cu 元素出现,表明该复合涂层致密度良好,没有明显的孔隙和露底现象。

结合 SEM 数据分析可知, SiC 纳米颗粒在涂层内部和表面的分布并不是十分均匀,存在均匀分布区和聚集区。在晶粒聚集区(见图 3a, C 区),由于 SiC 颗粒的异质形核作用,可加速 Ni-Co 合金的沉积生长,形成较大的层叠聚集状 Ni-Co/SiC 合金晶胞,该晶胞最凸出表面,在摩擦磨损过程中,该晶胞最先受到摩擦作用,由于 SiC 较高的硬度及 Co 元素对合金的强化作用,其耐磨性能得到显著提升,从而提高涂层使用寿命。晶胞的均匀分布区(见图 3a, B 区)更接近基材表面,在聚集区 C 区磨损后,该区域将作为磨损直接接触面承受主要的载荷,将提供更持久的耐磨性能,提升涂层耐磨性,从而延长涂层使用寿命。

图 5 为不同 CoSO₄ 含量电沉积得到的 Ni-Co 合金镀层的 XRD 图谱,图 6 为 Ni-Co/SiC 与 Ni-Co XRD 图谱。Ni-Co 合金和 Ni-Co/SiC 复合镀层的主要结构均以镍的面心立方(fcc)为主^[22]。Ni-Co 合金的形成是钴置换了部分镍原子,进入镍的原子晶格形成合金固溶体。由图 5 中 f 谱线可知, Ni 的特征峰 2、3 随着 Co 的加入峰高变得越来越小,最后变为馒头状的非晶峰,

甚至消失。Ni 的特征峰 1 的峰高也随着 Co²⁺ 的增加而降低,可见 Co²⁺ 加入使合金部分结构非晶化,而非晶结构有利于耐蚀性的提高。由于图 5 中 f 加入了部分 P 元素,峰 1 变宽,峰 2、3、4 几乎消失,可见 P 对涂层的非晶化具有积极作用。

由图 6 可知, Ni-Co/SiC 复合镀层主要由 Ni-Co 合金固溶体和 SiC 组成。随着 SiC 的加入,较钝的峰 4 变为了锐利的峰 3,峰宽变窄,峰强增大,具有明显的晶化作用,这说明 SiC 纳米颗粒具有促进晶体长大的作用。伴随电沉积的进行, SiC 作为异质晶核,可增加形核数目,促进结晶发生生长。图 6 中峰 1、2 为 SiC 纳米颗粒夹杂在晶体中形成的特征峰,部分结构的晶化和纳米 SiC 颗粒提高了涂层的硬度,使其具有更好的抗磨损性能。

2.3 复合镀层的耐蚀性

界面结合力对镀层耐蚀耐磨性具有重要影响,结合力差伴随内应力大,存在裂纹或孔隙,对纳米 SiC 作用的发挥也起到重要作用。镀层与基体结合力强,镀层和镶嵌的 SiC 就不易因为脱落而导致防护性能失效,因此结合力是镀层防护性能的关键因素之一,对镀层下界面的电化学腐蚀具有明显的影响。ASTM D3359-09 结合力测试结果见表 1。可见 Ni-Co/SiC 复合镀层的脱落率一般在 5% 以下,明显小于 Ni-Co 合金镀层, SiC 纳米颗粒不仅没有影响 Ni-Co 合金的结合力,而且对镍基合金镀层与金属基底的结合力有明显的改进作用。这可能是由于 SiC 硬度高,起到了联

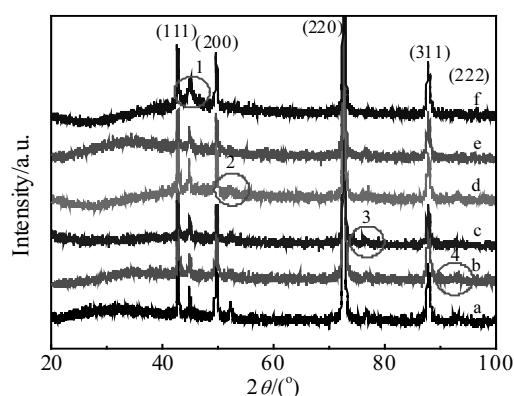


图5 不同 Ni-Co 镀层 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of the Ni-Co alloy coatings with different CoSO_4 contents (a-0, b-5 g/L, c-10 g/L, d-15 g/L, e-20 g/L, f-containing P, 15 g/L)

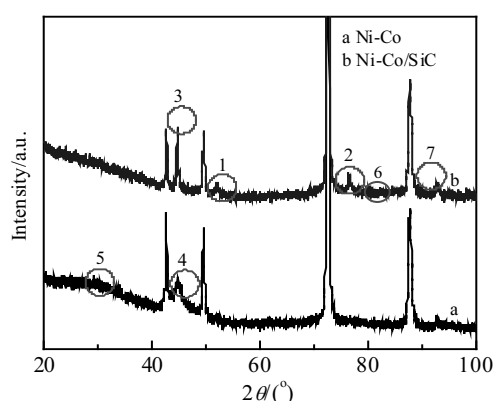


图6 合金镀层 XRD 图谱

Fig.6 XRD patterns of alloy coatings (a: Ni-Co and b: Ni-Co/SiC)

表1 镀层结合力

Table 1 Adhesion test results of coatings

Coating	Expulsion rate/%	ASTM grade
Ni-Co	5~15	3B
Ni-Co/SiC	≤5	4B

接骨架的作用, 由于 SiC 为纳米尺寸, 合金的晶胞尺寸为微米级, 远大于 SiC 颗粒, 因此纳米 SiC 粒子还可以填充 Ni-Co 晶粒间的孔隙, 使镀层更致密, 降低孔隙率, 提高密实性。

图 7 为镀层在 3.5%NaCl 溶液中浸泡不同时间的电化学阻抗谱。由图 7a 可知, 随着浸泡时间的延长, Ni-Co 合金的阻抗 R_c 在前 3 d 升高, 随后降低, 15 d

后 R_c 值降低下降速度加快, 在 20 d 左右, 阻抗下降趋势变缓并逐步趋于稳定。由图 7b Ni-Co/SiC 合金阻抗数据变化发现, 在浸泡初期, Ni-Co 合金的阻抗值优于 Ni-Co/SiC (图 7c), 随着浸泡时间的延长, 在 10 d 以后, Ni-Co 合金的阻抗值快速下降并逐渐低于 Ni-Co/SiC 的阻抗值, 对比图 7d 中 20 d 的阻抗值可知, Ni-Co/SiC 阻抗值已明显优于 Ni-Co。由此可见, 在服役前期, Ni-Co 的耐蚀性甚至优于 Ni-Co/SiC 合金, 但是随着时间的进行, 耐蚀性下降较快, 这可能是由于镀层组织结构不致密, 存在裂纹或者针孔引起的, 镀层的抗渗性能不足导致其不能长久保持高的耐蚀性。镀层加入 SiC 后形成的 Ni-Co/SiC 复合镀层, 虽然没有使镀层的最佳耐蚀数据得到大幅提升, 但其阻抗随时间的降低趋势有所减缓, 表明涂层的耐久性、服役稳定性得到提升。可以认为, Ni-Co/SiC 复合镀层的微观结构致密度得到提升, 孔隙率降低。根据文献[23,24]可知, 该镀层含有非晶纳米晶复合结构, 其耐蚀性明显增强, 具有更长的服役寿命。文献报道[25,26], Bode 图在低频(0.01 Hz)时的阻抗数值($|Z|$)可以很好表征镀层的防腐性能。Ni-Co 合金在低频时 $|Z|_{0.01\text{Hz}}$ 的数值为 $8.405 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, Ni-Co/SiC 复合镀层为 $2.043 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 加入 SiC 复合镀层阻抗增大, SiC 纳米颗粒的加入提高了镀层的耐腐蚀性能, 这也与电化学阻抗 Nyquist 曲线的分析结果一致。

图 8 为镀层 3.5% NaCl 溶液中浸泡不同时间的 TAFEL 极化曲线, 图右下侧镶嵌的是对应的开路电位 $E_{\text{ocp}}-t$ 曲线。由图 8 可知, 在浸泡过程中, 镀层的腐蚀电位是不稳定的, 这是由镀层的不均一结构决定的。在浸泡初期, Ni-Co 合金的腐蚀电位从初始电位 -0.1701 V 快速降低, 在 10 d 左右达到最低 -0.2414 V, 然后在 15 d 时升高到 -0.1983 V, 随后缓慢下降, 在 30 d 时腐蚀电位为 -0.2296 V。Ni-Co/SiC 合金极化曲线的初始腐蚀电位 -0.2074 V, 3 d 时增加为 -0.1771 V 随后逐步降低, 在 10 d 左右达到最低 -0.2439 V, 然后在 15 d 时升高到 -0.1924 V, 随后缓慢下降, 在 30 d 时腐蚀电位为 -0.2377 V。

E_{ocp} 在 10 d 时的增加可能是由于电解质溶液在涂层内部的传输使涂层与电极界面状态发生了明显变化, 腐蚀由扩散步骤控制阶段进入了电化学反应控制阶段。因此涂层的腐蚀可分为 3 个阶段, 第 1 阶段是电极的润湿阶段, 包括镀层表面微结构的润湿, 如 Ni-Co/SiC $E_{\text{ocp}}-t$ 曲线的前 3 d。随后进入第 2 阶段, 电解液逐步渗透镀层, 在镀层中传输, 此时为扩散步骤控制阶段; 第 3 阶段为电解液到达基材表面, 此时基材表面集聚大量电解质离子, 电解质离子的扩散传输

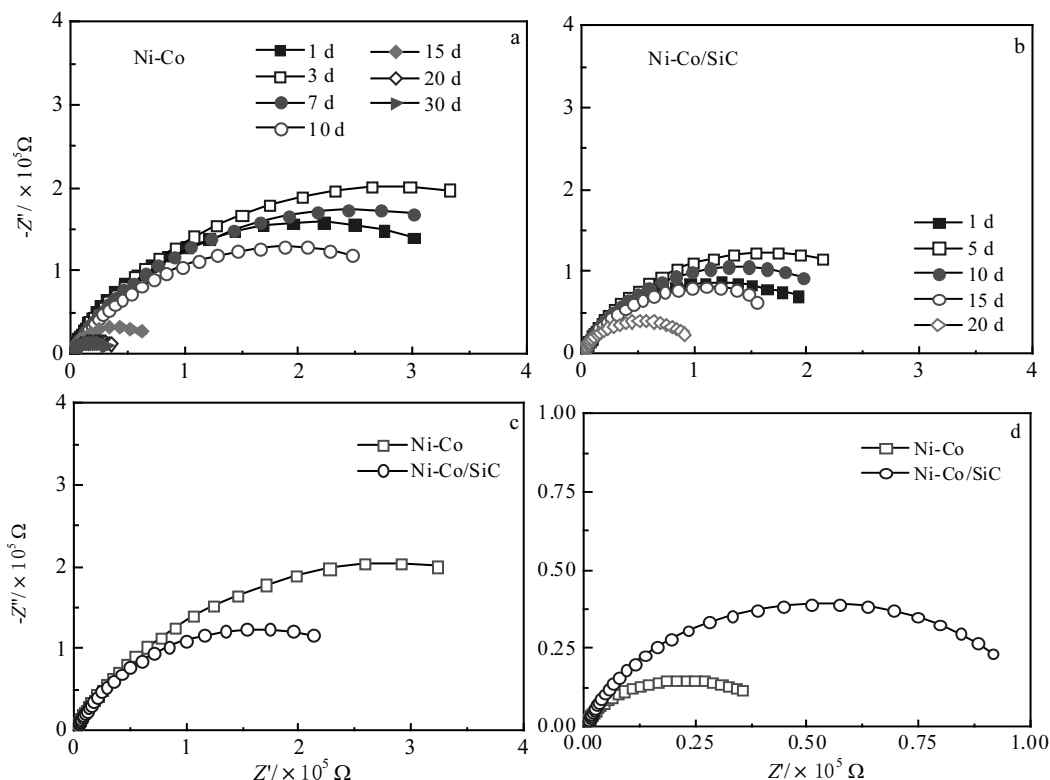


图 7 镀层在 3.5% NaCl 溶液浸泡不同时间的 EIS 图谱

Fig.7 EIS plots of different coatings after immersion in 3.5%NaCl solution: (a) Ni-Co, (b) Ni-Co/SiC, (c) Ni-Co and Ni-Co/SiC, 5d, (d) Ni-Co and Ni-Co/SiC, 20 d

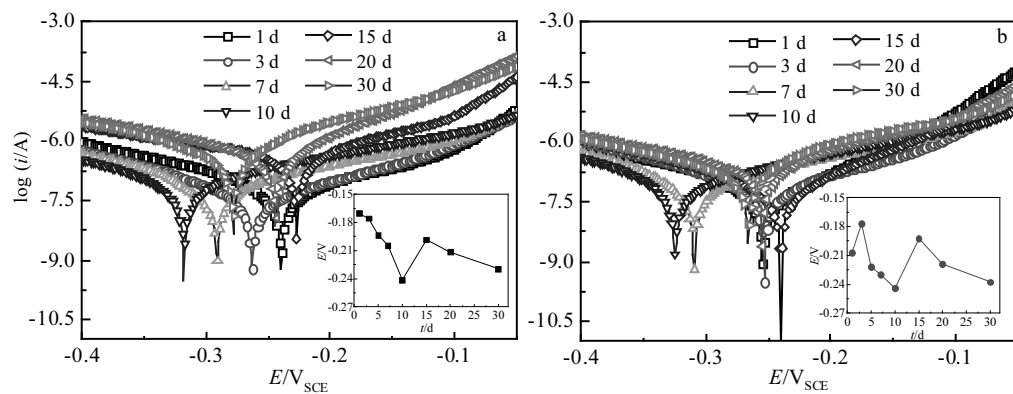
图 8 镀层 Tafel 及开路电位(E_{otp})-时间(t)曲线

Fig.8 Tafel polarization and E_{otp} - t curves: (a) Ni-Co and (b) Ni-Co/SiC

速率已大于电化学反应速率, 此时电化学过程为腐蚀的控制步骤。对上述极化曲线拟和可得腐蚀电位 E_{corr} , 腐蚀电流密度 I_{corr} 和极化电阻 R_p 。表 2 为 3.5% NaCl 溶液中浸泡 24 h 的极化曲线数据。从表 2 中可以看出, Ni-Co/SiC 复合镀层的腐蚀电位为 -0.2328 V, 腐蚀电流

密度为 $4.944 \times 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 极化电阻为 $412.0 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 耐腐蚀性能大大提升。随着 SiC 纳米颗粒的加入, Ni-Co 合金腐蚀电位更正, 腐蚀电流更小, 极化电阻更大, 耐腐蚀性能变好。

表 2 镀层在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 24 h 的腐蚀数据

Table 2 Corrosion data of the deposited coatings after immersed in 3.5%NaCl solution for 24 h

Coating	E_{corr}/V	$I_{\text{corr}}/\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	$R_p/\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$
Ni-Co	-0.2988	6.943×10^{-7}	52.8
Ni-Co/SiC	-0.2328	4.944×10^{-8}	412.0

3 结 论

1) Co 的加入使 Ni 镀层表面晶粒变细, 孔隙率降低, 并使部分结构非晶化, 耐蚀性明显提高。

2) SiC 纳米颗粒加入使 Ni-Co 合金含有非晶纳米晶复合结构, 改善了 Ni-Co 合金与基材的结合力和致密度, 提高了抗层下腐蚀的性能; SiC 具有促进 Ni-Co 合金形核长大和提高其硬度的双重作用, 使 Ni-Co/SiC 耐磨性增强, 孔隙率降低, 与 Ni-Co 合金相比其 E_{corr} 更正, i_{corr} 更小, R_c 更大, 具有优异的耐蚀性和耐磨性。

3) EIS 研究表明, 随着服役时间的进行, Ni-Co/SiC 表现出更优异的长期服役稳定性, 而 Ni-Co 耐蚀性降低较快。在服役过程中, 镀层的腐蚀过程经历 3 个阶段, 即浸润阶段, 电解液在涂层中传输的扩散控制阶段, 电解液到达基材表面后扩散速率已大于电化学反应速率的电化学控制阶段。Ni-Co/SiC 合金具有良好的耐磨耐蚀性能, 在海水多重因素交互作用的复杂环境下能够对海工机械提供长效防护, 在海工防护领域具有良好的应用前景。

参考文献 References

- [1] Miguel F L, Müller R, Rosenkranz A *et al.* *Wear*[J], 2016, 346-347: 87
- [2] Zhong Yuanhui(钟远辉), Dai Pinqiang(戴品强), Xu Changwei(许伟长) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(6): 1053
- [3] Frank A C, Sumodjo P T A. *Electrochimica Acta*[J], 2014, 132: 75
- [4] Karslioglu R, Akbulut H. *Applied Surface Science*[J], 2015, 353: 615
- [5] He Xinkuai(何新快), Hou Bolong(侯柏龙), Wu Luyue(吴璐烨) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(7): 1742
- [6] Cai C, Zhu X B, Zheng G Q *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2011, 205(11): 3448

- [7] Bahadormanesh B, Dolati A, Ahmadi M R. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2011, 509(39): 9406
- [8] Yao Y, Yao S, Zhang L *et al.* *Materials Letters*[J], 2007, 61(1): 67
- [9] Garcia I, Fransaeer J, Celis J P. *Surface & Coatings Technology*[J], 2001, 148(2-3): 171
- [10] Guo Yueping(郭跃萍), Li Jiangong(李建功), Sun Xiaojun(孙晓军). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(7): 1292
- [11] Farzaneh M A, Zamanzad-Ghavidel M R, Raeissi K *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2011, 257(13): 5919
- [12] You Y H, Gu C D, Wang X L *et al.* *Surface & Coatings Technology*[J], 2012, 206(17): 3632
- [13] Tian L, Xu J, Qiang C. *Applied Surface Science*[J], 2011, 257(10): 4689
- [14] Rudnik E, Burzynska L, Dolasinski L *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2010, 256(24): 7414
- [15] Ogihara H, Wang H, Saji T. *Applied Surface Science*[J], 2014, 296: 108
- [16] Niu Z, Cao F, Wang W *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2007, 17(1): 9
- [17] Sekar R, Jagadesh K K, Babu G N K R. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2015, 25(6): 1961
- [18] Fini M H, Amadeh A. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(10): 2914
- [19] Xia Fafeng(夏法锋), Jia Zhenyuan(贾振元), Wu Menghua(吴蒙华) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(8): 1479
- [20] Yang Y, Cheng Y F. *Electrochimica Acta*[J], 2013, 109: 638
- [21] Zhou Y, Ding Y. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2007, 17(5): 925
- [22] Qin Liyuan(秦丽元), Lian Jianshe(连建设), Jiang Enchen(蒋恩臣) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2013, 23(10): 2846
- [23] Ataee-Esfahani H, Vaezi M R, Nikzad L *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2009, 484(1-2): 540
- [24] Yang Y, Cheng Y F. *Surface and Coatings Technology*[J], 2011, 205(10): 3198
- [25] Bakhit B, Akbari A. *Surface and Coatings Technology*[J], 2012, 206(23): 4964
- [26] Xu Y, Zhu Y, Xiao G *et al.* *Ceramics International*[J], 2014, 40(4): 5425

Microstructure and Corrosion Resistance of Ni-Co/SiC Nanocomposite Coating for Marine Machinery

Li Baosong, Zhang Wen, Huan Yuxing, Zhang Weiwei

(Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The effects of SiC nanoparticles on the structure and morphology of Ni-Co coating were investigated by scanning electron microscopy (SEM), energy spectrum analysis (EDS) and X-ray diffraction (XRD). The influences of SiC nanoparticles on Ni-Co composite electrodeposition process and the electrochemical corrosion properties of Ni-Co/SiC composite coatings were studied by EIS and Tafel methods. The results show that the addition of Co^{2+} ions refines the grains of the Ni coating, reduces the porosity, transforms some structure to amorphous and improves the corrosion resistance. SiC nanoparticles can promote the nucleation and growth of Ni-Co alloy and improve the hardness of the alloys. Compared with Ni-Co alloys, Ni-Co/SiC coatings have excellent corrosion and wear resistance, which have more positive E_{corr} , lower i_{corr} and larger R_c . The Ni-Co/SiC composite coatings have the better stability of service performance, while the corrosion resistance of Ni-Co alloy decreases fast in 3.5 wt% NaCl solution. The process of corrosion experiences three stages, namely a wetting stage, a diffusion control stage in which electrolyte transports in the coating and an electrochemical control stage in which diffusion rate is larger than the electrochemical rate after electrolytes reach the substrate surface. Ni-Co/SiC alloys can provide long-term protection of marine engineering machinery under the influence of multifactors interaction in seawater environment.

Key words: electrodeposition; SiC; Ni-Co/SiC alloys; corrosion resistance; nano composite coatings

Corresponding author: Li Baosong, Ph. D., Associate Professor, College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, P. R. China, Tel: 0086-25-83786751, E-mail: bsli@hhu.edu.cn