

电刷镀 Ni-石墨烯复合镀层的耐腐蚀性能

金 国¹, 丁小龙^{1,2}, 胡振峰², 吕 鏢², 汪笑鹤³

(1. 哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(2. 陆军装甲兵学院 机械产品再制造国家工程研究中心, 北京 100072)

(3. 中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200)

摘 要: 为了得到一种制备简便、耐腐蚀性能优良的用于舰船腐蚀防护的金属镀层, 利用电刷镀技术在 45#钢上制备出了 Ni-石墨烯复合镀层。采用扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS)、原子力显微镜 (AFM)、Raman 光谱仪对石墨烯片层和镀层微观形貌进行了表征, 采用电化学试验和浸泡实验对 Ni-石墨烯复合镀层的耐腐蚀性能进行了研究。结果表明: 石墨烯片层进入了 Ni-石墨烯复合镀层; 相比 Ni 镀层, Ni-石墨烯复合镀层质量更优; 在电化学试验和浸泡实验中, 发现 Ni-石墨烯复合镀层与 Ni 镀层相比, 前者的腐蚀电位较后者正移了 70 mV, 前者的自腐蚀电流密度仅为后者的 0.34 倍, 前者的电荷转移电阻为后者的 3.1 倍; 在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 168 h 后, Ni-石墨烯复合镀层的失重量仅为 Ni 镀层的 0.47 倍, 说明 Ni-石墨烯复合镀层的耐腐蚀性能明显增强。

关键词: 舰船腐蚀防护; 电刷镀; 石墨烯; Ni-石墨烯复合镀层; 耐腐蚀性

中图分类号: TG174.441; TQ153

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)06-2002-07

随着中国海军“走向深蓝”转型战略的提出, 舰船的出海频次及航行时间明显增加, 这使得舰船的腐蚀问题变得更加突出。舰船发生腐蚀后不仅要耗费大量的人力物力去维修^[1,2], 还会严重影响舰船上武器装备的服役寿命, 进而影响整个舰船的战斗能力^[3]。处于海洋环境中的舰船受到的腐蚀复杂, 按照发生腐蚀的区域不同可将其分为四类^[4]: 水线以下的腐蚀、水线区腐蚀、水线以上及上层建筑腐蚀、舰船内部腐蚀。目前常通过在舰船易腐蚀区域制备保护涂层来解决腐蚀问题。保护涂层分为金属性涂(镀)层和非金属油漆涂层^[5], 非金属油漆涂层有效期限短, 力学性能较差^[6], 而金属性涂(镀)层虽然具有较好的综合性能, 但是其制备复杂, 需要设计专门的装置, 因此其使用也受到了很大的制约^[7]。

电刷镀技术具有镀覆速度快、镀层质量高、设备轻便、工艺简单、可适用于现场抢修等一系列优点^[8,9]。过去几十年里在装备维修与再制造领域发挥了巨大的作用^[10]。该技术的利用可以很好地解决非金属涂(镀)层制备复杂的问题。石墨烯(graphene, GE)是理想的二维纳米碳材料, 它不仅具有优异的力学、热学、光学性能^[11-15], 同时其还具有超强的疏水性能^[16], 以

及较高的介电常数和高达 $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的电子迁移率^[17,18], 这使其具有极强的耐腐蚀性能^[19]。

本实验采用电刷镀技术, 将耐蚀性极强的 GE 加入应用广泛的快速 Ni 电刷镀液中, 制备出了 Ni-GE 复合镀层, 探讨了 Ni-GE 复合镀层的微观形貌及镀层内部的 GE 形貌, 同时对 Ni-GE 复合镀层的耐腐蚀性能进行了重点研究, 以期得到耐腐蚀性能优良的 Ni-GE 复合镀层, 从而为舰船提供一种制备简单、性能优良的金属基镀层。

1 实 验

基材选用 45#钢 (150 mm×150 mm×100 mm)。实验前, 表面均用 400#至 800#的砂纸打磨, 然后在无水乙醇中超声清洗, 烘干备用。

实验中使用的 GE (北京碳世纪科技有限公司提供) 为氧化还原法制备, 单片层结构占比 95%以上。图 1 为 GE 片层的 AFM 表征图。可以看出, 其片层大小为 3 μm 左右, 厚度 1 nm 左右。图 2 为 GE 片层的 SEM 形貌。可以观察到接近透明的 GE 片层, 以及因热不稳定性而形成的褶皱^[20]。

收稿日期: 2018-06-13

基金项目: 国家自然科学基金 (5177512, 51605491)

作者简介: 金 国, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院腐蚀科学与表面技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001, 电话: 0431-82589660, E-mail: jinguo@hrbeu.edu.cn

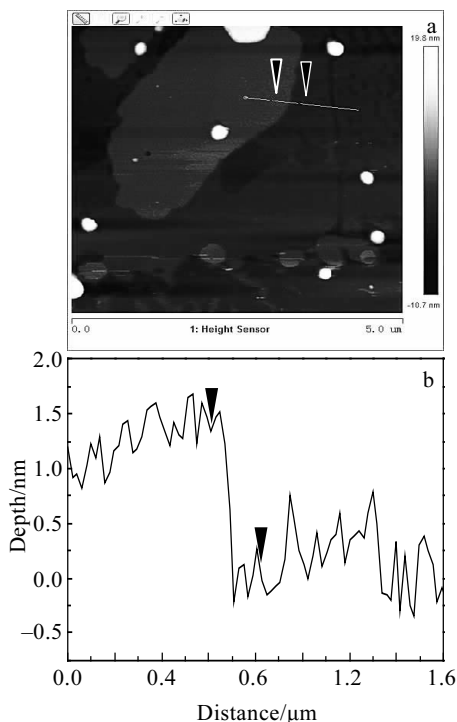


图 1 GE 的 AFM 表征图

Fig.1 AFM images of GE: (a) line scanning position of GE nanosheets and (b) depth profile of the line scanning of the GE nanosheets in Fig.1a

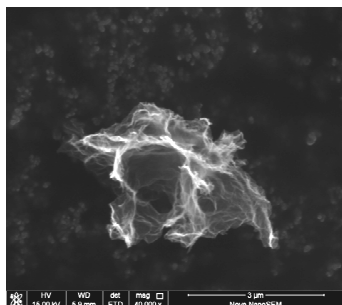


图 2 GE 片层的 SEM 形貌

Fig.2 SEM image of GE

电刷镀液主要成分如表 1 所示。其中，使用水浴超声振荡和使用添加剂解决 GE 在溶液中的易团聚、

不易分散的问题，通过 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 调节镀液 pH 值在 7.3~7.5 之间，将镀液水浴超声 90 min，以使 GE 能在溶液内均匀悬浮分散。

电刷镀电源采用陆军装甲兵学院生产的 DSD-75 型专用电源，阳极为高纯度石墨。电刷镀工艺流程及具体参数如表 2 所示。

采用 FEI-Nova NanoSEM50 型高分辨率扫描电子显微镜 (SEM) 对 GE 片层和镀层微观形貌进行表征。采用布鲁克 Dimension Icon 型原子力显微镜 (AFM) 对 GE 片层的厚度进行测量。采用 SEM 自带的能谱仪 (EDS) 对 Ni-GE 复合镀层内的 GE 片层进行确认，同时采用雷尼绍 Ruvia 型 Raman 光谱仪对复合镀层内的 GE 片层进行特征图谱表征，表征之前为了去除 Ni 基质对激光信号的干扰，采用 30% 的稀硝酸将镀层腐蚀 5 min，然后用去离子水和无水乙醇冲洗干净后烘干备用。

采用 ZAHNER Zennium PP201 电化学工作站对镀层的耐蚀性进行表征，测量指标包括开路电位、动电位极化曲线。试验参数如下：采用标准甘汞电极 (SCE) 作为参比电极，铂片 (20 mm×25 mm) 作为辅助电极，试样为工作电极，在室温条件下以质量分数 3.5% 的 NaCl 溶液作为腐蚀介质。为避免非检测面的影响，在试验之前用环氧树脂将非检测面密封。在进行每个试验之前，将试样浸泡在腐蚀介质中以稳定开路电位。腐蚀电位 (E_{corr}) 和自腐蚀电流密度 (i_{corr}) 通过对极化曲线采用塔菲尔曲线外延法获得。动电位极化曲线的测量参数如下：扫描范围为 -0.9~-0.4 V，扫描速度为 1 mV/s。电化学交流阻抗的交流信号幅值为 5 mV，

表 1 镀液主要成分

Table 1 Major components of electro-brush plating solution

Component	Amount
$\text{NiSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	20
$\text{CH}_3\text{COONH}_4/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	40
$(\text{NH}_4)_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	45
$\text{GE}/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0~0.6
$\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}/\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$	100~130 (adjust pH to 7.3~7.5)
Additives	Suitable

表 2 电刷镀工艺流程及参数

Table 2 Process flow and parameters of electro-brush plating

Process	Solution	Voltage/V	Plating time/min	Movement velocity of plating pen/ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$
Electrical cleaning	Electing cleaning solutions	+12	1	6~8
Intense activation	No.2 activation solutions	-12	0.5	8~10
Slight activation	No.3 activation solutions	-18	0.5	6~8
Preplating	Preplating nickel solutions	+12	1	8~10
Plating	Ni-GE composite plating solutions	+12	5	10~12

频率响应范围为 $10^{-2} \sim 10^5$ Hz。

选用与电化学试验时一样的腐蚀溶液在同样的温度下进行浸泡实验。为了保护非镀层面，浸泡前先将非镀层面用环氧树脂封装。共浸泡 7 d，期间每隔 24 h 取出一次，用软毛刷在流水中对镀层表面的腐蚀产物进行轻微机械清洗，然后再用无水乙醇清洗，至镀层表面无锈蚀后烘干，用分析天平称量腐蚀失重量。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌

2.1.1 镀层微观形貌

图 3 为 Ni 镀层和 Ni-GE 复合镀层的表面微观形貌。可以看到 Ni 镀层上有较多的缝隙，同时“菜花头”结构尺寸较大，而 Ni-GE 复合镀层的表面缝隙明显减少变短，“菜花头”结构尺寸显著变小。这是由于 GE 进入镀层后会细化晶粒，最终使得镀层“菜花头”结构变小，同时 GE 还会进入“菜花头”结构间的缝隙内充当异质形核的质点，这就使得大量的缝隙会被包裹着 GE 的 Ni 金属填补，因此最终将得到组织致密性明显提升、缝隙显著减少变小的 Ni-GE 复合镀层。

图 4 为 2 种镀层的截面形貌。可以看到 Ni 镀层截

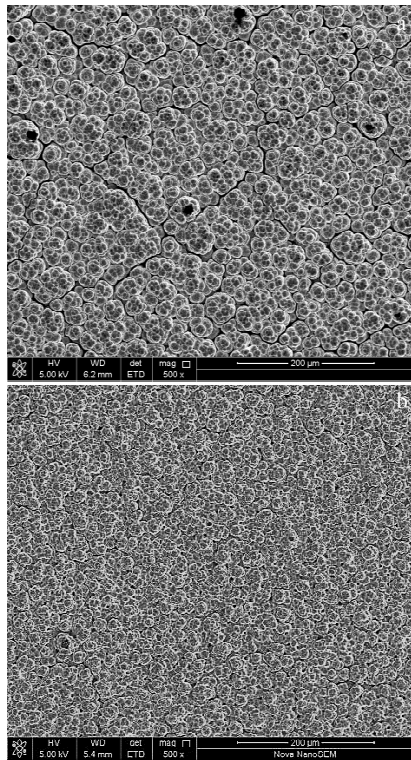


图 3 2 种镀层的表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of the two coatings: (a) Ni and (b) Ni-GE

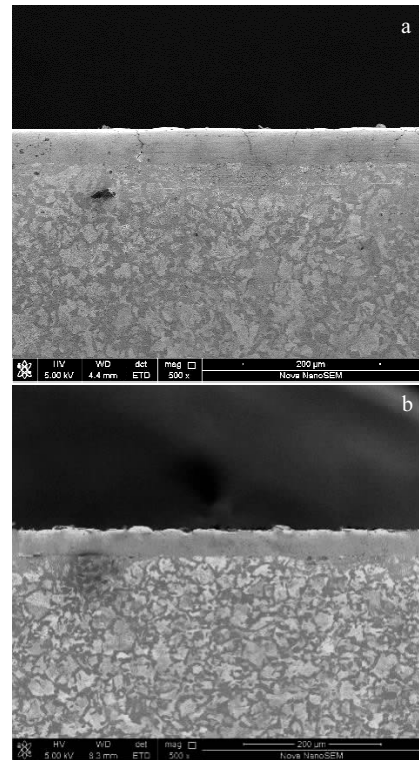


图 4 2 种镀层的截面形貌

Fig.4 Cross-section morphologies of the two coatings: (a) Ni and (b) Ni-GE

面有较多的贯穿型裂纹，而 Ni-GE 复合镀层的截面未出现任何裂纹，整体质量优于 Ni 镀层。Ni 基电刷镀层可以看作是一层层的“菜花头”结构沉积堆叠而成，如果“菜花头”结构尺寸较大，那么在堆叠过程中就会在“菜花头”结构间留出较多、较大的空隙，这些空隙在水平方向上连接会成为缝隙，在竖直方向上连接会形成贯穿镀层的裂纹。由于 Ni 镀层的“菜花头”结构尺寸较大，将使得其表面会出现大量缝隙，镀层内出现较多贯穿裂纹，而 Ni-GE 复合镀层的“菜花头”结构较小，堆叠过程中产生的空隙会较少、较小，再加上 GE 可以进入空隙中异质形核来填补这些缝隙，最终将会得到致密性较高同时裂纹极少的复合镀层。

2.1.2 Ni-GE 复合镀层内部 GE 形貌

图 5 为 Ni-GE 复合镀层内部的 GE 片层形貌及其对应位置的 EDS 能谱。可以看出部位 2 的 C 含量明显高于部位 1 的 C 含量。从 SEM 照片中可以看到 GE 片层的透明结构，该 GE 片层尺寸较小。同时从边缘可以看到明显的分层现象，说明在电刷镀过程中因镀笔的摩擦挤压和放热作用，GE 片层会发生一定程度的团聚。为了进一步确定其为石墨烯，对该部位进行

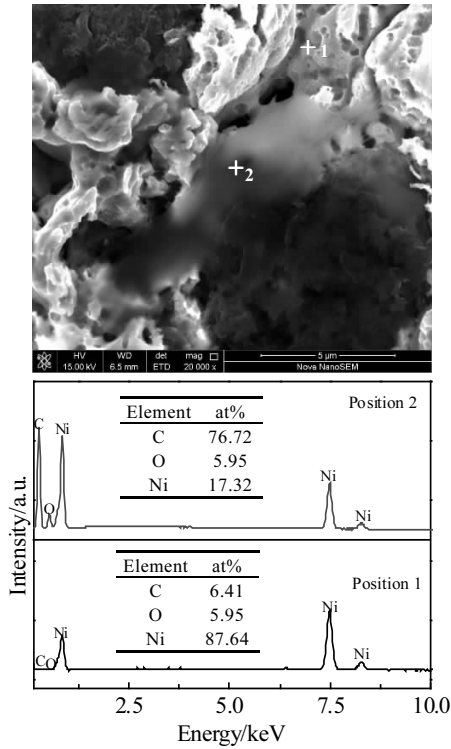


图 5 复合镀层内部的 GE 形貌及 EDS 能谱

Fig.5 Morphology and EDS spectra of GE in composite coatings

Raman 表征，得到如图 6 所示的 Raman 光谱图。可以看出在 1350 和 1590 cm^{-1} 处出现了石墨烯的特征 D 峰和特征 G 峰，这进一步证明了位置 2 所在区域为石墨烯。同时在 2500~3000 cm^{-1} 范围内出现了严重变形的 2D 峰，这主要是由于 GE 片层发生团聚以及镀笔施加的压力增加了石墨烯上的压应力使得 2D 峰发生分裂和蓝移（右移）所致。

2.2 耐腐蚀性能

2.2.1 电化学试验

(1) 动电位极化曲线

图 7 为 2 种镀层的动电位极化曲线。表 3 为两种镀层的自腐蚀电位与自腐蚀电流密度。从图 7 中可以看出，Ni 镀层在 -0.7~-0.6 V 之间发生明显钝化，但当腐蚀电位大于 -0.6 V 后，钝化膜破裂，腐蚀加剧；Ni-GE 复合镀层未出现钝化区。但是从表 3 可以看出，Ni-GE 复合镀层的自腐蚀电位为 -0.69 V，自腐蚀电流密度为

5.03 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，而 Ni 镀层的自腐蚀电位为 -0.76 V，自腐蚀电流密度为 14.89 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。Ni-GE 复合镀层的腐蚀电位较 Ni 镀层正移了 70 mV，自腐蚀电流密度仅为 Ni 镀层的 0.34 倍。这说明 Ni-GE 复合镀层较 Ni 镀层的耐腐蚀性能明显提升。

Ni-GE 复合镀层的耐蚀性之所以提高，是因为，尽管 Ni 镀层发生了钝化，但是由于其组织不致密，表面具有较多孔洞和缝隙，导致腐蚀点位显著增加，使腐蚀初期形成的钝化膜迅速破裂，腐蚀明显加剧；而 Ni-GE 复合镀层由于 GE 的加入，使镀层致密度提高，腐蚀点位数量下降，同时 GE 的高导电性可以阻碍腐蚀过程中电子转移，从而减缓镀层的腐蚀^[21]。这两方

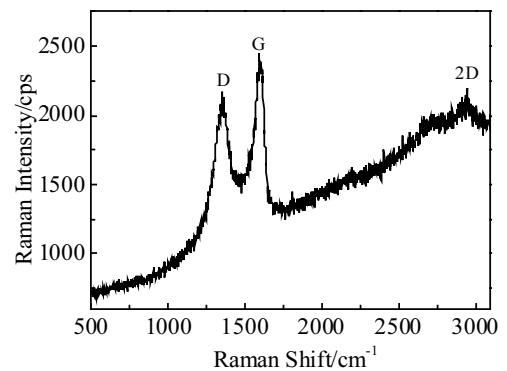


图 6 复合镀层内部 GE 的 Raman 光谱图

Fig.6 Raman spectrum of GE in composite coatings

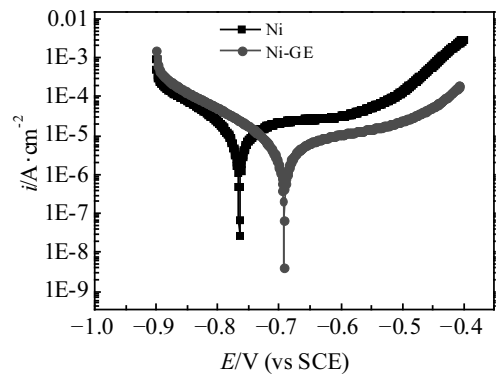


图 7 2 种镀层的动电位极化曲线

Fig.7 Potentiodynamic polarization curve of the two coatings

表 3 2 种镀层的自腐蚀电位 E_{corr} 与自腐蚀电流密度 i_{corr}

Table 3 Self-corrosion potential E_{corr} and self-corrosion current density i_{corr} of the two coatings

Coating	Self-corrosion potential, E_{corr}/V	Self-corrosion current density, $i_{\text{corr}}/\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$
Ni	-0.76	14.89
Ni-GE	-0.69	5.03

面的因素导致 Ni-GE 复合镀层的耐蚀性提升。

(2) 交流阻抗谱

图 8 为 2 种镀层的交流阻抗谱, 阻抗测试结果采用复平面 (Nyquist 图) 表示。由图可知, Ni-GE 复合镀层的容抗弧明显大于 Ni 镀层的容抗弧, 说明 Ni-GE 复合镀层的耐腐蚀性明显提高。

根据 Nyquist 图, 采用如图 9 所示的等效电路拟合 EIS 阻抗谱。 R_1 表示溶液电阻, CPE1 表示常相位角元件, CPE1-T 具有双电层的性质, 类似电容, R_2 表示电荷转移电阻。表 4 是对两种镀层的交流阻抗谱进行解析获得的 R_1 、 R_2 、CPE1-P 与 CPE1-T 的值。可以看出, Ni-GE 复合镀层的转移电阻为 $3715 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 其为 Ni 镀层转移电阻的 3.1 倍, 说明 Ni-GE 复合镀层的耐腐蚀性能明显增强。同时发现 Ni-GE 复合镀层的 CPE1-P、CPE1-T 均小于 Ni 镀层的, 这说明 Ni-GE 复合镀层的表面致密度明显提升, 腐蚀介质不容易进入复合镀层的活性区使镀层发生腐蚀。

2.2.2 浸泡实验

(1) 腐蚀失重

图 10 为两种镀层在质量分数 3.5% NaCl 溶液中的单位面积腐蚀失重变化图。可以看出, 腐蚀 168 h 后, Ni 镀层的失重为 21 mg/cm^2 , 而 Ni-GE 复合镀层的失重为 10 mg/cm^2 , 仅为 Ni 镀层的 0.47 倍; 还可以发现,

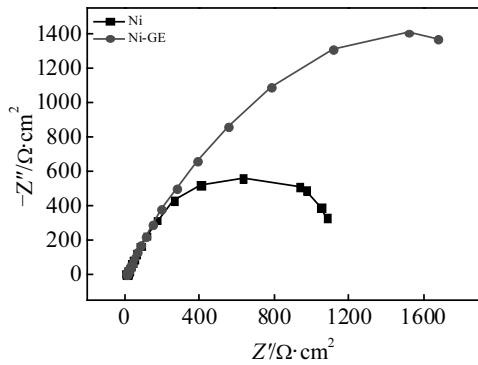


图 8 2 种镀层的交流阻抗谱

Fig.8 AC impedance spectra of the two coatings

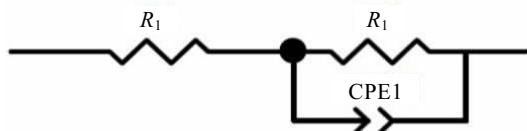


图 9 交流阻抗等效电路图

Fig.9 Equivalent circuit diagram of AC impedance

表 4 2 种镀层的交流阻抗谱拟合数据

Table 4 AC impedance spectrum fitting data for two coatings

Coating	$R_1/\Omega \cdot \text{cm}^2$	$R_2/\Omega \cdot \text{cm}^2$	CPE1-P	CPE1-T
Ni	5.25	1184	0.9013	0.0022398
Ni-GE	7.532	3715	0.8280	0.0013372

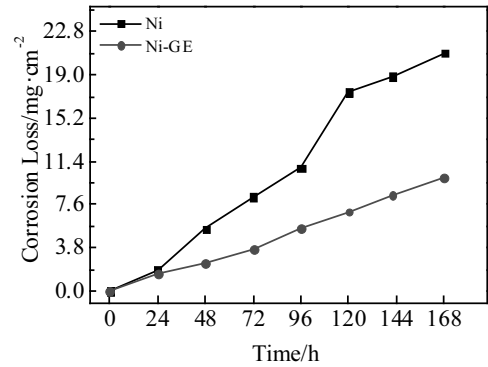


图 10 2 种镀层在 3.5%NaCl 溶液中的单位面积腐蚀失重

Fig.10 Corrosion mass loss per unit area of the two coatings in 3.5% NaCl solution

当浸泡 96 h 后, Ni 镀层的失重发生了突变, 120 h 后又变得相对平稳, 而 Ni-GE 复合镀层的失重一直都比较平稳, 只在 72 h 时发生了轻微波动, 这与其细化致密的镀层表面能够较好地隔绝腐蚀介质以及 GE 的耐腐蚀性密不可分。

(2) 腐蚀形貌

图 11 为 2 种镀层在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 168 h 之后的腐蚀形貌。可以明显看出, Ni 镀层的边缘出现大面积的腐蚀剥落, 同时剥落边缘镀层的最外层也出现了一定程度的脱落。推测在浸泡 96 h 后 Ni 镀层的失重发生突变, 是由于该时间段内有较多的 Ni 镀层从边缘剥落所致。而 Ni-GE 复合镀层的损伤较小, 其腐蚀基本都发生在“菜花头”结构的空隙间。Ni-GE 复合镀层的表面损伤之所以较小, 是因为 GE 使镀层组织细化, 镀层本身致密, 短时间内腐蚀介质很难进入镀层内部进行腐蚀。随着浸泡时间增加, 腐蚀介质会在“菜花头”结构的空隙间对 Ni 基质产生腐蚀损伤。当外层 Ni 基质损伤后, 内部的 GE 片层将会暴露在腐蚀介质中, 而 GE 具有极强的疏水性, 它将隔绝镀层与腐蚀介质, 同时其高导电性又会阻碍电子转移, 从而使镀层的腐蚀减慢, 最终使得 Ni-GE 复合镀层表现出较强的耐腐蚀性能。

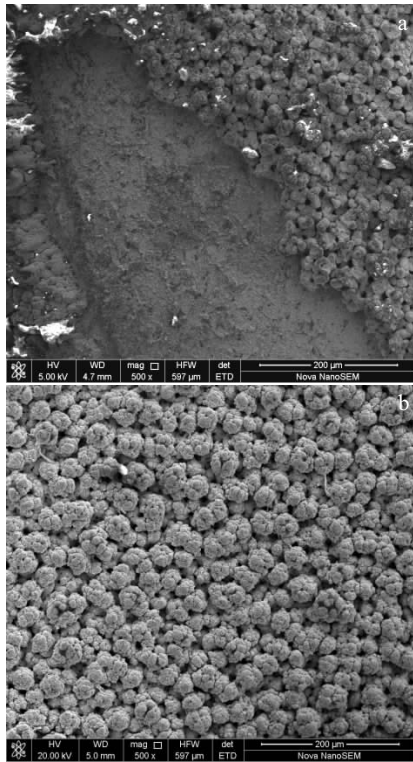


图 11 2 种镀层在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 168 h 之后的腐蚀形貌
Fig.11 Corrosion morphologies of the two coatings immersed in 3.5% NaCl solution for 168 h: (a) Ni and (b) Ni-GE

3 结 论

1) 通过电刷镀技术制备的 Ni-GE 复合镀层相较于相同工艺条件制备的 Ni 镀层, 镀层组织更致密, 内部无缝隙、裂纹等缺陷, 镀层质量更优。

2) Ni-GE 复合镀层内存在发生一定团聚的 GE 片层。

3) Ni-GE 复合镀层的腐蚀电位较 Ni 镀层正移了 70 mV, 自腐蚀电流密度仅为 Ni 镀层的 0.34 倍, Ni-GE 复合镀层的电荷转移电阻是 Ni 镀层的 3.1 倍, 这说明 Ni-GE 复合镀层的耐蚀性要明显强于 Ni 镀层。

4) 在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 168 h 后, Ni-GE 复合镀层的腐蚀失重仅为 Ni 镀层的 0.47 倍, 同时 Ni 镀层表面有严重的腐蚀剥落现象, 这也说明 Ni-GE 复合镀层的耐腐蚀性能要优于 Ni 镀层。

参考文献 References

[1] Zhu Weimin(朱伟民). *Ship Materials and Markets(船舶物资与市场)*[J], 2002(1): 33

- [2] Mu Zifang(牟子方), Wei Ruxiang(魏汝祥). *Chinese Journal of Ship Research(中国舰船研究)*[J], 2016, 11(3): 122
- [3] Fang Zhigang(方志刚), Liu Bin(刘斌), Wang Tao(王涛). *Ship Science and Technology(舰船科学技术)*[J], 2016(1): 137
- [4] Zou Zhengyu(邹正宇), Song Shengli(宋胜利), Zhao Ming(赵明). *Shanxi Chemical Industry(山西化工)*[J], 2017, 37(1): 23
- [5] Chen Guangzhang(陈光章), Wu Jianhua(吴建华), Xu Likun(许立坤) et al. *Ship Science and Technology(舰船科学技术)*[J], 2001(2): 38
- [6] Fu Dahai(付大海), Cao Jingyi(曹京宜). *China Coatings(中国涂料)*[J], 2003, 18(1): 49
- [7] Wang Cong(王聪), Zhang Guangzhi(张广智). *China Ship Repair(中国修船)*[J], 2016, 29(5): 16
- [8] Xu Binshi(徐滨士). *Brush Plating(刷镀技术)*[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1985
- [9] Vanek D. *Metal Finishing* [J], 2002, 100(7): 18
- [10] Xu Binshi(徐滨士), Hu Zhenfeng(胡振峰). *New Technology and New Process(新技术新工艺)*[J], 2008(11): 7
- [11] Frank I W, Tanenbaum D M, Van d Z A M et al. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics & Nanometer Structures*[J], 2007, 25(6): 2558
- [12] Lee C, Wei X, Kysar J W et al. *Science*[J], 2008, 321(5887): 385
- [13] Balandin A A, Ghosh S, Bao W et al. *Nano Letters*[J], 2008, 8(3): 902
- [14] Cai W, Moore A L, Zhu Y et al. *Nano Letters*[J], 2010, 10(5): 1645
- [15] Zhu Y, Murali S, Cai W et al. *Advanced Materials*[J], 2010, 22(45): 3906
- [16] Su Qing(苏庆), Zhang Xiaoqian(张晓倩), Yu Minglang(于明朗) et al. *China Surface Engineering(中国表面工程)*[J], 2012, 25(1): 83
- [17] Geim A K. *Science*[J], 2009, 324(5934): 1530
- [18] Zhang Y, Tan Y W, Stormer H L et al. *Nature*[J], 2005, 438(7065): 201
- [19] Tao Zhenzhen(陶祯臻). *Study on Anticorrosion Performance of Nanocomposite Waterborne Coating Based on Graphene(石墨烯纳米复合水性涂层的防腐性能研究)*[D]. Hefei: Anhui University of Technology, 2015
- [20] Fasolino A, Los J H, Katsnelson M I. *Nature Materials*[J], 2007, 6(11): 858
- [21] Huang Kun(黄坤), Zeng Xianguang(曾宪光), Pei Songfeng(裴嵩峰) et al. *Paint and Coatings Industry(涂料工业)*[J], 2015, 45(1): 17

Corrosion Resistance of Ni-graphene Composite Coatings by Electro-brush Plating

Jin Guo¹, Ding Xiaolong^{1,2}, Hu Zhenfeng², Lv Biao², Wang Xiaohe³

(1. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(2. National Engineering Research Center for Mechanical Product Remanufacturing,
Academy of Armored Army Force, Beijing 100072, China)

(3. Huayin Weapon Test Centre in China, Huayin 714200, China)

Abstract: In order to obtain a metal coating with excellent corrosion resistance by a simple preparation process applied to navy vessel corrosion protection, Ni-graphene composite coatings were grown on 45# steel substrates by electro-brush plating. Scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), atomic electron microscopy (AFM) and Raman spectroscopy were employed to characterize the morphology of graphene and the coatings. The corrosion resistance of Ni-graphene composite coatings was studied by electrochemical test and immersion experiments. Results show that the graphene layers enter the Ni-graphene composite coating; compared with Ni coating, Ni-graphene composite coating exhibits better quality. In electrochemical test and immersion experiments, we find that in the comparison between Ni-GE composite coating and Ni plating, the corrosion potential of the former moves positively by 70 mV, the corrosion current density of the former is only 0.34 times of that of the latter, and the charge transfer resistance of the former is 3.1 times of that of the latter. After immersion for 168 h in 3.5% NaCl solution, the mass loss of Ni-graphene composite coating is 0.47 times of Ni plating layer, indicating that the corrosion resistance of Ni-graphene composite coating is obviously enhanced.

Key words: navy vessel corrosion protection; electro-brush plating; graphene; Ni-GE composite coating; corrosion resistance

Corresponding author: Hu Zhenfeng, Ph. D., Associate Researcher, Academy of Military Science PLA China, National Innovation Institute of Defense Technology, Beijing 100071, P. R. China, E-mail: hu_zhenfeng@sina.com