

DOI: 10.16078/j.tribology.2015.05.012

石墨烯环氧涂层的耐磨耐蚀性能研究

刘 栓, 姜 欣, 赵海超, 顾 林, 王永欣, 李金龙, 余海斌, 陈建敏*

(中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室 浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201)

摘 要: 将石墨烯分散液添加到双组份水性环氧树脂中制备石墨烯固体润滑涂层, 采用交流阻抗谱和动电位极化曲线研究了涂层在模拟海水(3.5% NaCl溶液)中的电化学腐蚀行为和失效过程; 采用UMT-3摩擦磨损试验机评价了三种石墨烯基环氧涂层在干摩擦和海水环境条件下的滑动摩擦磨损行为, 并分析了其磨痕形貌和磨损机理. 结果表明: 石墨烯可以明显提高水性环氧的涂层电阻和电荷转移电阻, 并降低环氧涂层在干燥条件与海水环境的摩擦系数和磨损率; 石墨烯环氧涂层的摩擦系数和磨损率在海水环境中均比干摩擦低.

关键词: 石墨烯; 水性环氧涂层; 腐蚀; 摩擦; 磨损

中图分类号: O647; TH117.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2015)05-0598-08

Corrosion Resistance and Wear Property of Graphene-Epoxy Coatings

LIU Shuan, JIANG Xin, ZHAO Hai-chao, GU Lin, WANG Yong-xin,

LI Jin-long, YU Hai-bin, CHEN Jian-min*

(Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technologies and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: The solid lubricant graphene coating was prepared by adding aqueous dispersion of graphene into two-component waterborne epoxy coatings. The electrochemical corrosion behavior and failure process were investigated by potentiodynamic polarization curve and electrochemical impedance spectroscopy in simulated seawater (3.5% NaCl solution). The sliding friction and wear behavior, wear scar morphology and wear mechanism of the three graphene-epoxy coatings were analyzed by UMT-3 tribology tester in dry condition and seawater environment, respectively. Results indicated that the graphene obviously improved the coating resistance and charge transfer resistance of the epoxy coating, also reduced the friction coefficient and wear rate of the epoxy coating. Friction coefficient and wear rate of graphene-epoxy coating in seawater were lower than that in dry condition.

Key words: graphene, waterborne epoxy coating, corrosion, friction, wear

轮船、海底管道、港口码头和石油平台等海工构筑物在服役过程中, 金属基体主要采用重防腐涂层和外加电流进行保护. 外涂覆涂层不仅会遭受海水腐

蚀和大气腐蚀, 同时在浪花飞溅区和全浸区, 海水摩擦和干摩擦也会大大影响涂层的防护性能, 这就要求涂层不仅有良好的耐蚀性能, 同时具备耐磨减摩性

Received 13 February 2015, revised 8 March 2015, accepted 25 March 2015, available online 28 September 2015.

* Corresponding author. E-mail: chenjm@nimte.ac.cn. Tel: +86-574-87603879.

This project was supported by the National Nature Science Foundation of China (51275509 and 41506098), the 973 Project of China (2013CB632300) and Chinses Academy of Science for financial support.

国家自然科学基金(51275509, 41506098)、国家973项目(2013CB632300)和中国科学院财政资助.

能^[1-3]. 重防腐涂料主要采用环氧涂层和聚氨酯涂层, 对涂料进行掺杂改性(引入缓蚀剂或者固体润滑相), 可以制备各种功能化涂层^[4-5].

石墨烯是一种由碳原子以 sp^2 杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的平面薄膜碳材料. 这种理论厚度只有0.34 nm的单层碳纳米材料, 内部碳原子之间连接柔韧, 当施加外力时, 碳原子面会弯曲变形, 使碳原子不必重新排列来适应外力, 从而保持结构稳定. 因此, 石墨烯具有独特的晶体结构和特殊的自润滑特性, 将其作为防护材料和固体润滑添加剂会表现出良好的耐磨耐蚀性能^[6-8]. Vesna^[9]和Dong^[10]课题组采用化学气相沉积法(CVD)在金属铜表面沉积生长石墨烯薄膜, 利用交流阻抗谱技术评价石墨烯薄膜对铜基底在3.5%NaCl溶液中的防护效果, 发现短期内石墨烯可以明显提高铜的耐蚀能力, 并且多层石墨烯的防护效果优于单层石墨烯, 但石墨烯薄膜的防护性能随着浸泡时间的延长而降低. Prasai等^[11]研究发现石墨烯可以明显提高铜的自腐蚀电位, 石墨烯薄膜的失效主要起源于其薄膜裂纹处, 这是由于薄膜制备方法缺陷所引起. Merisalu等^[12]采用聚吡咯来密封CVD法制备石墨烯薄膜中的缺陷, 并在盐水浸泡和老化试验中, 均发现这种复合涂层可以提高石墨烯薄膜的防护能力. 为了充分利用石墨烯在防腐领域的优异性能, 腐蚀防护学者尝试将石墨烯作为腐蚀抑制剂, 直接将层状石墨烯粉体均匀分散到有机树脂中来制备重防腐涂层, 以期提高涂层的防护效果. 例如: 华东理工大学周兴贵课题组^[13]以十六胺做分散剂对氧化石墨烯进行接枝改性, 采用化学法还原形成石墨烯, 然后将石墨烯分散到环氧涂层中制备抗静电涂层, 发现所制备石墨烯涂层的导电渗滤阈值为0.5%. 于欢^[14]将石墨烯作为分散剂分散光催化材料纳米 TiO_2 , 并将复合石墨烯/ TiO_2 材料添加到水性聚氨酯涂层制备海洋防污涂层, 发现石墨烯质量分数为5%石墨烯/ TiO_2 改性水性聚氨酯涂层的耐生物附着性能最好, 并且具有良好耐水性和优异的力学性能. 乔玉林等^[15]发现在水性分散溶液中, 石墨烯可以在磨损表面形成吸附减摩层和摩擦化学反应膜, 两者具有协同作用, 能够有效减缓摩擦磨损. 石墨烯的层数和表面形貌对其耐磨性能有一定影响, 其摩擦力及摩擦系数随着层数的增加而减小^[16-17].

到目前为止, 有关石墨烯掺杂改性水性环氧涂层耐磨耐蚀性能的研究鲜有报道. 为了得到分散良好的层状石墨烯, 本研究中采用聚丙烯酸钠为石墨烯分散剂, 辅助超声分散制备性能稳定的石墨烯分散液, 然

后掺杂到双组份水性环氧树脂制备石墨烯基环氧固体润滑涂层. 采用电化学工作站和盐雾试验评价石墨烯涂层在模拟海水中的电化学腐蚀行为; 采用摩擦磨损试验机评价不同含量的石墨烯基环氧涂层在干摩擦和海水环境条件下的滑动摩擦磨损性能, 并详细分析磨痕形貌和探讨磨损机理. 本研究对石墨烯基环氧涂层在海水环境中的耐磨耐蚀性能研究, 有一定的指导作用.

1 试验部分

1.1 石墨烯分散液的制备

选用质量分数4%的石墨烯浆料(石墨烯层数5~10层, 直径10~200 μm , 厚度5~15 nm, 纯度99.5%, 由宁波墨西科技有限公司提供), 采用高分子量聚丙烯酸钠(购买于阿拉丁试剂公司, 分析纯)为分散剂(浓度约为1 mg/mL), 硅藻土为防沉剂, 加入少量表面活性剂. 采用氨水溶液调节pH, 维持分散液的pH值为8~9, 采用AXTG16G高速离心机10 000 r/min分散2 h, 除去部分沉淀及杂质, 然后超声分散5~10 min(超声波清洗机型号SB-5200DTDN, 功率200 W, 超声频率50 Hz), 整个分散过程在室温, 约298 K下进行, 最后得到质量分数为2.5%石墨烯水性分散液.

1.2 石墨烯涂层的制备

本试验采用Q235碳钢和铸铁两种基底, 分别用来表征石墨烯涂层的电化学腐蚀和耐磨性能. 将Q235碳钢加工为1 cm $\times$ 1 cm $\times$ 1 cm的立方体小块, 除涂装面外剩余各面用环氧树脂封装. 采用150~1 200目SiC砂纸在抛磨机上对碳钢电极表面进行逐级打磨, 在丙酮中浸泡2 h脱脂, 放在干燥器中干燥24 h后涂装, 在涂装前, 再用丙酮擦拭电极表面, 除去表面可能存在的灰尘或杂质.

双组份水性环氧树脂由西北永新涂料有限公司提供, 先将石墨烯分散液加到树脂中, 超声分散30 min, 然后再加水性固化剂(环氧和固化剂的比例为1:1), 搅匀后用线棒涂布器在自制Q235碳钢电极和铸铁片上涂装成膜, 在空气中固化48 h后的涂膜厚度约 $30\pm 2 \mu m$. 用于摩擦试验的铸铁涂层厚度约200 μm . 控制石墨烯的用量, 使石墨烯在环氧涂层中所占质量比分别为0%、0.25%和0.5%.

1.3 电化学腐蚀试验

采用电化学工作站CHI-660E对石墨烯基环氧涂层的电化学腐蚀性能在模拟海水(3.5%NaCl溶液)中进行测试. 以自制石墨烯基环氧涂层为工作电极, 铂

片电极(面积为 2 cm^2)为对电极,饱和甘汞电极为参比电极.待电极在溶液中OCP稳定后,进行交流阻抗和动电位极化曲线测试.极化曲线的扫描速度为 0.5 mV/s ,扫描范围为 $-200\sim 200\text{ mV vs OCP}$;EIS测试的频率范围为 $100\text{ kHz}\sim 10\text{ MHz}$,正弦波振幅为 30 mV ,从高频向低频扫描,采用ZSimpWin3.21拟合软件解析各电化学腐蚀参数.

1.4 摩擦磨损试验

采用UMT-3摩擦磨损试验机表征石墨烯基环氧涂层的摩擦学性能,试验在常温下(约 $25\text{ }^\circ\text{C}$)进行.干摩擦载荷为 5 N ,海水环境的载荷为 10 N ,频率为 5 Hz ,时间为 12 min ,磨痕长度为 5 mm ,摩擦副材料为316L不锈钢钢球,直径为 3 mm .用Alpha-Step IQ表面轮廓仪扫描涂层磨痕的截面轮廓,用磨痕截面积来表征涂层的磨损大小.采用FEI Quanta 250场发射扫描

电镜热场(SEM)观察石墨烯基环氧涂层的磨痕形貌,探讨涂层的磨损机理和耐蚀特性.采用循环盐雾腐蚀试验箱(型号:Q-FOG CCT-1100)来加速评价石墨烯涂层的耐盐雾性能,盐水为质量分数5%NaCl溶液,盐雾箱内温度为 $35\text{ }^\circ\text{C}$.

2 结果与讨论

2.1 石墨烯基环氧涂层的耐蚀行为

图1是添加不同含量石墨烯的水性环氧涂层中在模拟海水中浸泡不同时间的EIS谱图.对比研究了纯环氧、0.25%G-环氧和0.5%G-环氧涂层在不同浸泡时间内的电化学腐蚀行为(当石墨烯的质量分数超过0.5%时,涂层的成膜性能不好,涂层容易起泡).在浸泡 $2\sim 48\text{ h}$ 范围内,所有涂层Nyquist图中均发现两个容抗弧,Bode图中出现两个时间常数,其中高频容抗弧

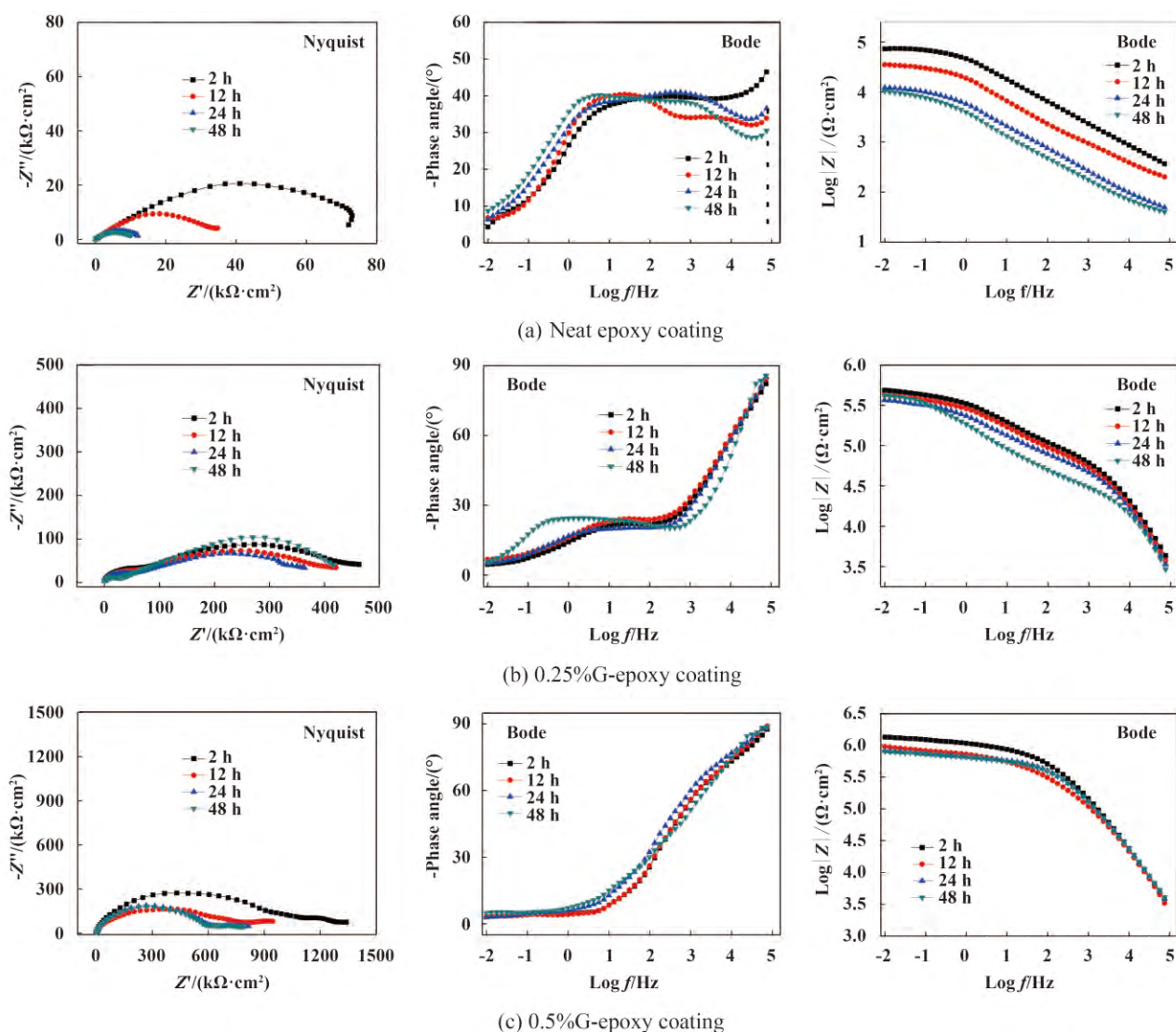


Fig. 1 The Nyquist and Bode plots of G-epoxy coating immersed in 3.5% NaCl solution after different times

图1 石墨烯基环氧涂层在3.5%NaCl溶液中浸泡不同时间的Nyquist和Bode图

对应于涂层电阻和电容, 中低频区容抗弧对应于金属基底与涂层间的电荷转移电阻和双电层电容^[18-19]. 随着浸泡时间的延长, 两个容抗弧半径和低频区模值都逐渐减小, 说明涂层对金属的防护性能逐渐降低; 其中纯环氧涂层容抗弧半径减小的趋势最明显[图1(a)], 表明纯水性环氧树脂对Q235钢在3.5%NaCl溶液中的防护效果较差. 涂层添加石墨烯后, 高频和中低频容抗弧的半径显著增大(浸泡初期), 随着浸泡时间的延长, 两个容抗弧逐渐收缩, 表面涂层对Q235钢的防护效果降低.

为了定量研究石墨烯基环氧涂层在模拟海水中的电化学腐蚀行为和失效过程, 采用等效电路(图2)对EIS谱图进行拟合, 得到的电化学腐蚀参数见表1. 在等效电路中, R_s 为溶液电阻, Q_c 为涂层电容, R_c 为涂层电阻, Q_{dl} 为双电层电容, R_{ct} 为电荷转移电阻. 由拟合结果可知, 随浸泡时间延长, 所有涂层体系 R_c 逐渐降低, Q_c 逐渐增大, 主要是由于强极性、介电常数高的水分子和腐蚀性氯离子逐渐向涂层内部渗透引起; 此外, Q_{dl} 和 R_{ct} 也呈降低趋势, 是因为水分子和氯离子渗

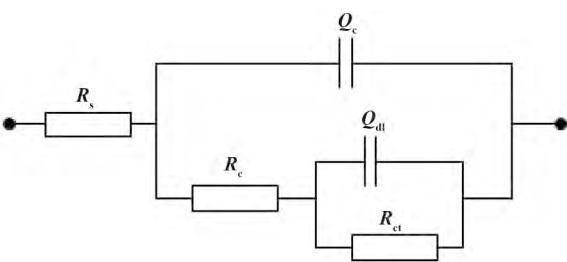


Fig. 2 The equivalent circuit used to fit the EIS data
图2 等效电路图

透通过涂层与基底碳钢接触, 加速了Q235钢的腐蚀. 在浸泡48 h后, 纯环氧、0.25%G-环氧和0.5%G-环氧涂层的涂层电容分别为132、0.007 8和0.008 7 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$, 说明石墨烯可以增强涂层致密性, 阻隔腐蚀性介质(水分子、氯离子等)向涂层内部扩散, 增强了涂层的致密性, 提高了涂层的防护效果. 需要注意的是, 对于0.25%G-环氧涂层在浸泡48 h后, 涂层变成纯电容性质($n=1$), 说明添加石墨烯后, 提高了水性环氧的物理阻隔作用, 表现出典型的屏蔽涂层的阻抗特征.

图3是不同含量石墨烯涂层 R_c 和 R_{ct} 随浸泡时间的

表1 三种石墨烯涂层通过等效电路拟合获得的电化学腐蚀参数

Table 1 The electrochemical corrosion parameters of three G-epoxy coatings fitted from the equivalent circuit.

	Time/h	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_c/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	n_1	$R_c/(\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$Q_{dl}/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	n_2	$R_{ct}/(\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2)$
0%G	2	0.01	8.9	0.44	62.2	7.78	0.84	23.1
	12	0.01	82.5	0.76	19.7	53.1	0.46	26.5
	24	0.01	110	0.76	3.448	77.7	0.45	10.9
	48	0.01	132	0.81	2.906	135	0.43	10.1
0.25%G	2	0.01	0.002 1	0.91	66.9	0.934	0.42	425
	12	0.01	0.002 2	0.92	34.1	1.38	0.41	391
	24	0.01	0.003 5	0.93	25.6	1.95	0.45	356
	48	0.01	0.007 8	1.00	19.8	2.56	0.41	349
0.5%G	2	0.01	0.005 6	0.82	579	0.846	0.65	645
	12	0.01	0.005 7	0.83	501	0.749	0.66	621
	24	0.01	0.0068	0.85	394	0.101	0.73	266
	48	0.01	0.0087	0.89	388	0.054	0.74	251

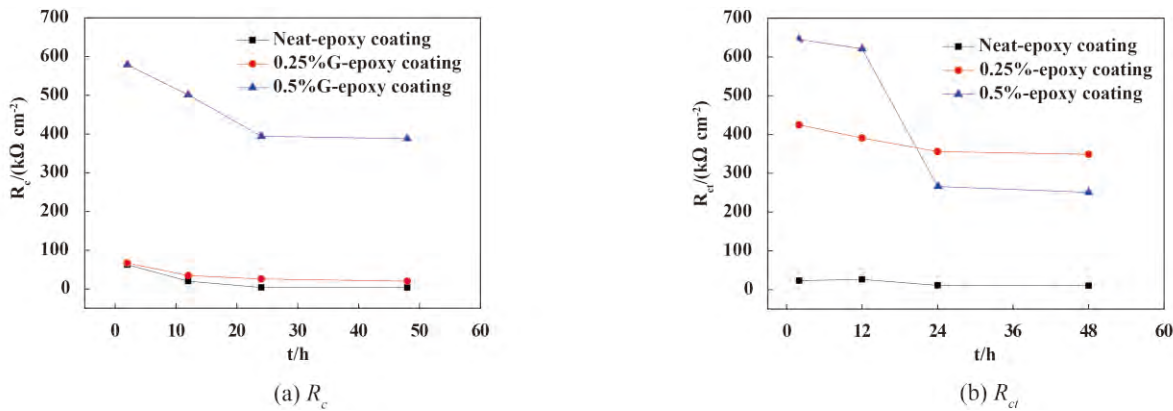


Fig. 3 Variations of R_c and R_{ct} curves of G-epoxy coating immersed in 3.5% NaCl solution after different times

图3 石墨烯涂层在3.5%NaCl溶液中浸泡不同时间的 R_c 和 R_{ct} 变化曲线

变化曲线. 纯环氧涂层的 R_c 和 R_{ct} 远低于石墨烯涂层, 随着石墨烯含量的增加, 石墨烯涂层的 R_c 和 R_{ct} 逐渐增大; 在浸泡48 h范围内, 0.25%G-环氧涂层的 R_c 从 $66.9\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 降至 $19.8\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$, 而0.5%G-环氧涂层的 R_c 从 $579\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 降至 $388\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$, 说明石墨烯的质量分数为0.5%时, 涂层电阻最大, 石墨烯可以明显提高环氧涂层的致密性, 进而提高涂层体系对金属基体的防护效果. 同时, 添加石墨烯后, 基底金属腐蚀反应的 R_{ct} 远高于纯环氧涂层, 可能是由于石墨烯的导电作用, 将腐蚀反应的阴极和阳极分开, 石墨烯增大了金属腐蚀反应阻力. 需要说明的是, 0.5%G-epoxy在浸泡后期 R_{ct} 降低幅度增大(24 h后的值为 $266\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$), 且比0.25%G-epoxy的 R_{ct} 值小($349\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$), 说明当腐蚀介质渗透通过涂层后, 石墨烯对金属基底的防护性能降低.

图4所示为水性石墨烯环氧涂层在模拟海水中浸泡48 h后的动电位极化曲线, 表2是在Tafel区拟合后得到的电化学腐蚀参数. 结合图表可知, 环氧涂层中随着石墨烯含量的增加, 石墨烯涂层体系的自腐蚀电位正移, 说明石墨烯降低了水性环氧涂层的腐蚀倾向; 阴极极化曲线斜率变化不大, 阳极极化曲线斜率增大, 可能是由于石墨烯抑制了阳极反应. 通过CHI660E自带软件Special Analysis在Tafel区进行拟合, 分别得到纯水性环氧涂层、0.25%G-环氧涂层和0.5%G-环氧涂层的自腐蚀电流密度(i_{corr})为分别为 0.13 、 0.083 和 $0.064\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 说明石墨烯的加入, 显著提高了水性环

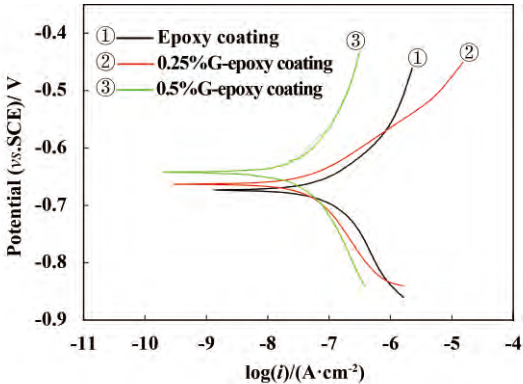


Fig. 4 The polarization curves of G-epoxy coating immersed in 3.5% NaCl solution after 48 h

图4 石墨烯环氧涂层在 3.5%NaCl溶液中浸泡48 h后的动电位极化曲线

氧涂层对金属基体的防护性能.

图5是三种石墨烯环氧涂层30 d盐雾试验后的腐蚀形貌照片. 发现纯环氧涂层表面有点蚀坑出现[图5(a)], 当环氧中加入石墨烯后, 涂层颜色变深变暗, 经盐雾试验30 d后, 涂层表面没有明显的腐蚀现象发生[图5(b~c)]. 说明在盐雾氛围中石墨烯提高了环氧涂层对金属基体的防护效果.

2.2 石墨烯基环氧涂层的耐磨耐蚀行为

采用UMT-3摩擦磨损试验机研究了不同石墨烯环氧涂层在干摩擦和模拟海水环境中的耐磨性能, 图6、图7和图8给出了三种涂层的摩擦系数(COF)、磨损率和截面磨痕形貌图. 在干摩擦和海水环境中试验15 min后, 涂层的COF基本稳定, 0%G-环氧、

表2 石墨烯环氧涂层在3.5%NaCl溶液中浸泡48 h后腐蚀参数

Table 2 Corrosion parameters of different epoxy coating composite immersed in 3.5% NaCl solution after 48 h				
Epoxy coating composite	$E_{\text{corr}}(\text{V}, \text{ vs SCE})$	$i_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$\beta_a/(\text{V}\cdot\text{dec}^{-1})$	$\beta_c/(\text{V}\cdot\text{dec}^{-1})$
Neat epoxy	-0.681	0.13	5.43	-4.15
0.25%G-epoxy	-0.648	0.083	5.21	-4.38
0.5%G-epoxy	-0.640	0.064	7.53	-5.27

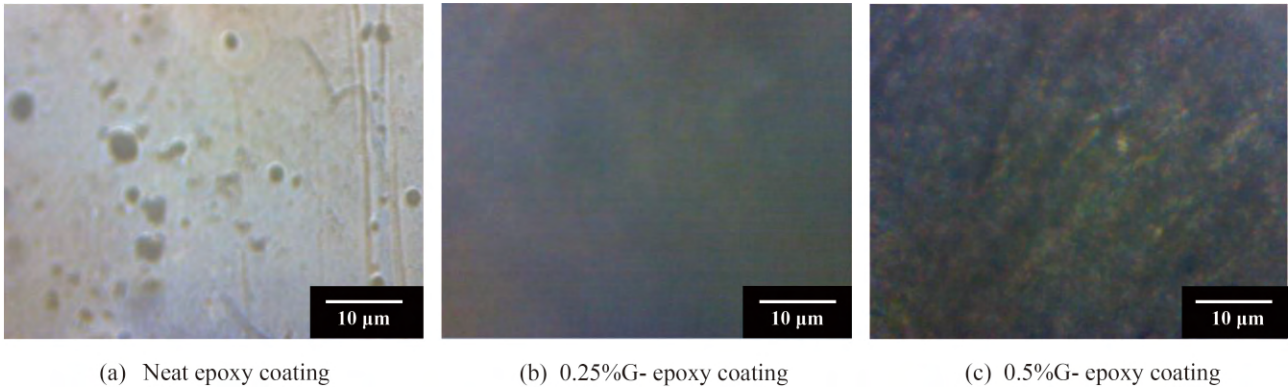


Fig. 5 Surface morphology of three G-epoxy coating after 30 d in salt spray box

图5 三种石墨烯环氧涂层30 d盐雾试验后的表面形貌

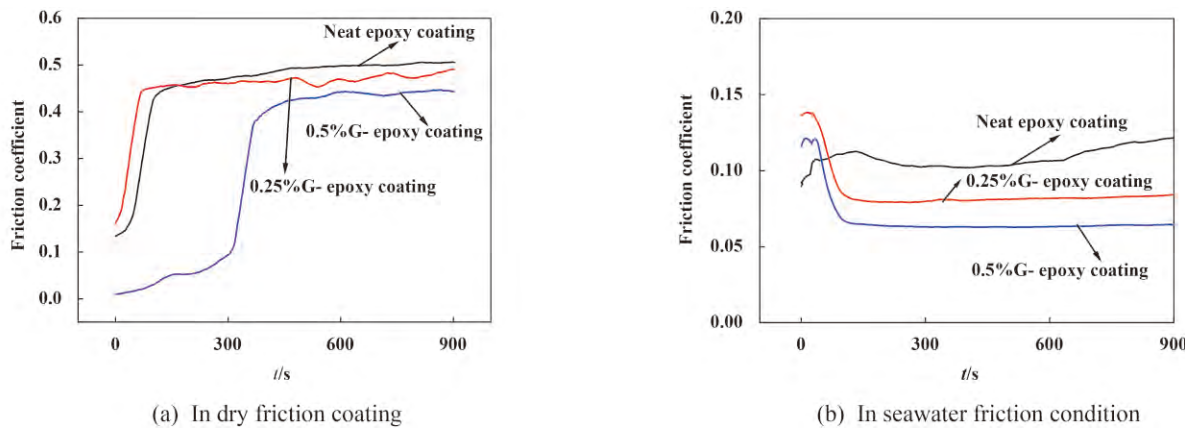


Fig. 6 COF of three G-epoxy coating in dry and seawater friction conditions

图6 三种石墨烯环氧涂层在干摩擦和海水环境的摩擦系数

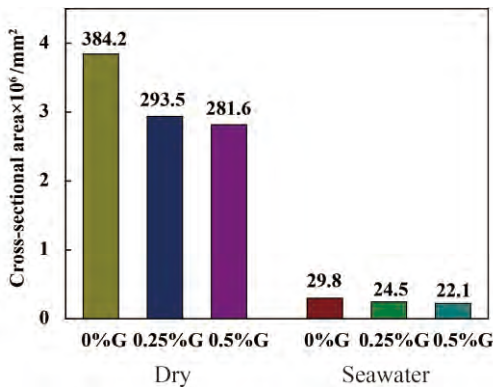


Fig. 7 Cross-sectional area of wear trace of three G-epoxy coating in dry and seawater friction conditions

图7 三种石墨烯环氧涂层在干摩擦和海水摩擦的磨痕截面积

0.25%G-环氧和0.5%G-环氧在干摩擦下的COF分别约为0.49、0.45和0.42,而在海水环境中的COF分别约为0.12、0.08和0.06,三种涂层在海水中的摩擦系数和磨损率均低于干摩擦时.这是因为一方面模拟海水中的NaCl物质本身就是润滑介质,可以降低摩擦系数,从而形成一个易于剪切摩擦层^[20];另一方面,海水作为腐蚀介质使不光滑的颗粒在有裂纹的情况下更易剥落,从而导致更快地形成光滑的摩擦界面,同时还能细化磨屑并减少磨屑数量,抑制磨粒磨损^[21].石墨烯涂层的摩擦系数和磨损率均随石墨烯含量的增加而减小,推测原因认为:石墨烯是1种力学强度极高的层状纳米填料,碳原子在层与层之间的结合力小于同层

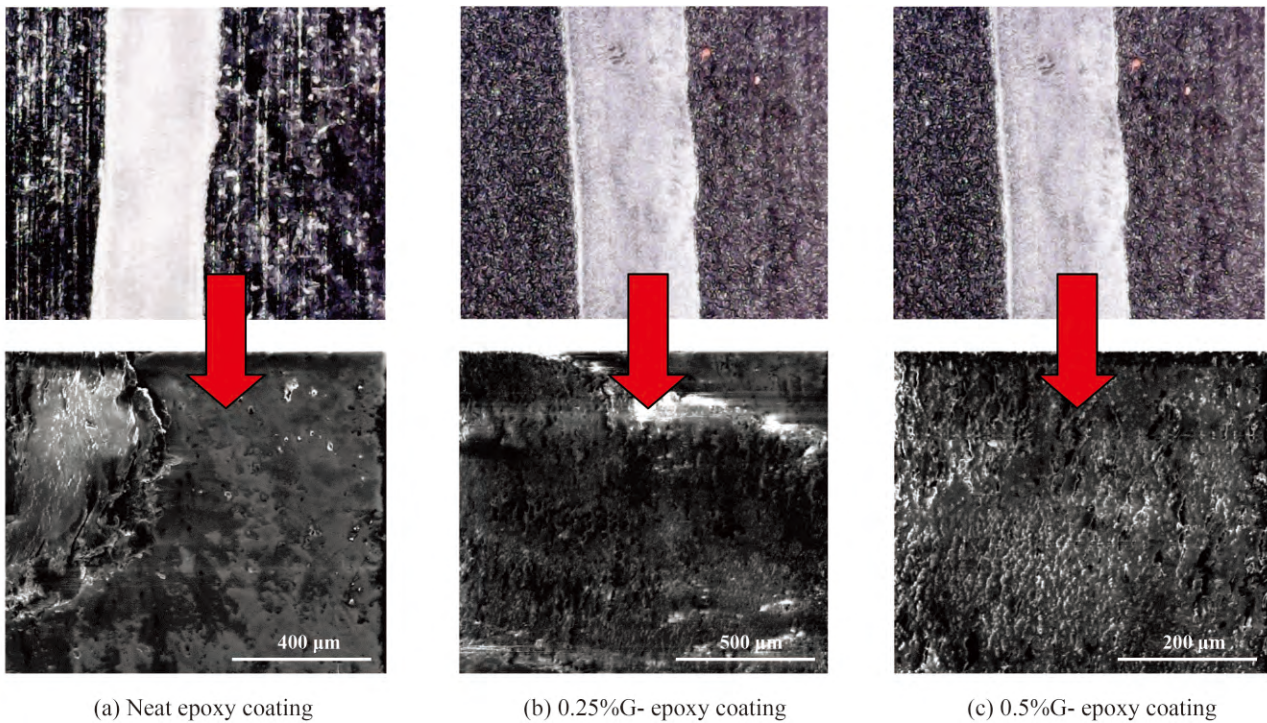


Fig. 8 Wear trace morphology of three G-epoxy coating in dry friction conditions

图8 三种石墨烯环氧涂层在干摩擦下的磨痕形貌

内相邻碳原子间的结合力,使石墨烯层间具有较低的剪切力和低摩擦系数,同时,在干摩擦和海水环境中摩擦,石墨烯容易转移到环氧涂层对偶表面形成转移膜,直接提高水性石墨烯环氧涂层的摩擦磨损性能^[22-23]。

图8为石墨烯水性环氧树脂涂层在干摩擦磨损后表面形貌照片,上图是试样磨痕处的整体照片,下图是磨痕处的放大SEM照片。三种涂层磨痕处均存在少量裂纹,没有明显的磨粒存在。纯环氧涂层的裂纹较深,尺寸较大,且表面有较多平行摩擦方向的裂纹和局部脱落,这与纯环氧涂层较低的抗磨性能相对应;在0.25%G-环氧和0.5%G-环氧涂层中,摩擦表面较平滑,裂纹尺寸小。说明石墨烯的加入,提高了水性环氧涂层的物理机械性能,石墨烯可以抑制裂纹的扩展,延缓疲劳磨损,进而提高涂层的抗磨减摩性能。

3 结论

a. 采用聚丙烯酸钠均匀分散石墨烯浆料并成功制备石墨烯环氧复合涂层。

b. 采用电化学测试和盐雾试验评价了石墨烯涂层的电化学腐蚀行为和失效过程。石墨烯可以提高环氧涂层的致密性,抑制水分子和腐蚀性介质在涂层内部的渗透和扩散;0.5%G-环氧涂层(i_{corr} 为 $0.064 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)的防护性能较纯净水性环氧涂层(i_{corr} 为 $0.13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)降低了1倍。

c. 石墨烯可以降低水性环氧涂层在干摩擦和海水摩擦下的摩擦系数和磨损率,形成转移膜,抑制裂纹的扩展,延缓疲劳磨损,进而提高涂层的抗磨减摩性能。

参考文献

- [1] Chen B B, Wang J Z, Yan F Y. Synergism of carbon fiber and polyimide in polytetrafluoroethylene-based composites: Friction and wear behavior under sea water lubrication [J]. Materials & Design, 2012, 36: 366–371.
- [2] Kong L Q, Cheng J, Jin K J, *et al.* Friction and wear properties of (WAl)C-Co ceramic composites under sea water environment[J]. Ceramics International, 2014, 40(9): 14 965–14 971.
- [3] Shan L, Wang Y X, Li J L, *et al.* Improving tribological performance of CrN coatings in seawater by structure design[J]. Tribology International, 2015, 82: 78–88.
- [4] Pu J B, Wang L P, Xue Q J. Progress of tribology of graphene and graphene-based composite lubricating materials[J]. Tribology, 2014, 34(1): 94–113 (in Chinese) [蒲吉斌, 王立平, 薛群基. 石墨烯摩擦学及石墨烯基复合润滑材料的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(1): 94–113].
- [5] Chen J M, Lu X W, Li H X, *et al.* Progress of solid self-lubricating coating over a wide range of temperature [J]. Tribology, 2014, 34(5): 592–600 (in Chinese) [陈建敏, 卢小伟, 李红轩, 等. 宽温域固体自润滑涂/覆层材料的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(5): 592–600].
- [6] Lin L Y, Kim D E, Kim W K, *et al.* Friction and wear characteristics of multi-layer graphene films investigated by atomic force microscopy[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205: 4 864–4 869.
- [7] Lee C G, Wei X D, Li Q Y, *et al.* Elastic and frictional properties of graphene[J]. Physica Status Solidi B, 2009, 246: 2 562–2 567.
- [8] Jiang Y, Li Y, Liang B, *et al.* Tribological behavior of a charged atomic force microscope tip on graphene oxide films[J]. Nanotechnology, 2012, 23: 495–703.
- [9] Vesna M S, Ivana J, Inhwa J, *et al.* Electrochemical study of corrosion behavior of graphene coatings on copper and aluminum in a chloride solution[J]. Carbon, 2014, 75: 335–344.
- [10] Dong Y H, Liu Q Q, Zhou Q. Corrosion behavior of Cu during graphene growth by CVD[J]. Corrosion Science, 2014, 89: 214–219.
- [11] Dhiraj P, Juan C T, Robert R. Graphene: corrosion-inhibiting coating[J]. ACS Nano, 2012, 6(2): 1102–1108.
- [12] Maïdo M, Tauno K, Jekaterina K. Graphene-polypyrrole thin hybrid corrosion resistant coatings for copper[J]. Synthetic metals, 2015, 200: 16–23.
- [13] Zhang Y. Synthesis and modification of graphene for antistatic coatings[M]. East China university of science and technology, 2013 (in Chinese) [章勇. 石墨烯的制备与改性及在抗静电涂层中的应用[M]. 华东理工大学, 2013].
- [14] Yu H. Study on preparation and performance of graphene/TiO₂ modified water borne polyurethane composite coatings[M]. Dalian maritime university, 2013(in Chinese) [于欢. 石墨烯/TiO₂复合材料改性水性聚氨酯防污涂层研究[M]. 大连海事大学, 2013].
- [15] Qiao Y L, Zhao H C, Zang Y, *et al.* Friction and wear properties of water-dispersing system of multilayer graphene [J]. Tribology, 2014, 34(5): 523–530(in Chinese) [乔玉林, 赵海潮, 臧艳, 等. 多层石墨烯水分散体系的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(5): 523–530].
- [16] Lin J S, Wang L W, Chen G H. Modification of graphene platelets and their tribological properties as a lubricant additive[J]. Tribology letters, 2011, 41: 209–215.
- [17] Ye Z J, Tang C, Dong Y L, *et al.* Role of wrinkle height in friction variation with number of graphene layers[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112: 116–102.
- [18] Zhao X, Liu S, Wang X T, *et al.* Surface modification of ZrO₂ nanoparticles with styrene coupling agent and its effect on the corrosion behaviour of epoxy coating[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 32(5): 1163–1171.
- [19] Liu S, Sun H Y, Sun L J, *et al.* Effects of pH and Cl⁻ concentration on corrosion behavior of the galvanized steel in simulated rust layer solution, Corrosion Science, 2012, 65: 520–527.

[20] Shan L, Wang Y X, Li J L, et al. Tribological property of TiN, TiCN and CrN coatings in seawater[J]. China surface engineering, 2013, 26(6): 86–92 (in Chinese) [单磊, 王永欣, 李金龙, 等. TiN、TiCN和CrN涂层在海水环境下的摩擦学性能[J]. 中国表面工程, 2013, 26(6): 86–92]

[21] Cui G J, Bi Q L, Zhu SY, et al. Tribological behavior of Cu-6Sn-6Zn-3Pb under sea water, distilled water and dry-sliding conditions[J]. Tribology International, 2012, 55: 126–134.

[22] Zhai W Z, Shi X L, Wang M, et al. Grain refinement: A mechanism for graphene nanoplatelets to reduce friction and wear of Ni3Al matrix self-lubricating composites[J]. Wear, 2014, 310(1–2): 33–40.

[23] Li H Q, Xie Y T, Li K, et al. Microstructure and wear behavior of graphene nanosheets-reinforced zirconia coating [J]. Ceramics International, 2014, 40(8): 12821–12829.

投 稿 指 南

《摩擦学学报》是《中国科学引文数据库》首批收录的期刊之一, 已列入中国科学院文献评价中心《中国科学引文数据库统计源期刊》、科技部中国科学技术信息研究所《中国科技论文统计源期刊》和《中文核心期刊要目总览》, 已被美国《工程索引(EI)》、《化学文摘(CA)》、《剑桥科学文摘(CSA)》以及日本《科学技术文献速报》等多种检索系统收录; 已入编《中国学术期刊(光盘版)》, 作者著作权费和稿酬一次性给付, 如投稿人不同意将文章编入光盘版中, 请在投稿时声明, 本刊将进行适当处理.

1 栏目与篇幅要求

- 研究论文: 报道具有学术价值的研究成果, 全文在7 000字左右;
 - 研究简报: 报道最新的研究成果与进展, 全文在5 000字左右;
 - 工程应用: 报道摩擦学研究领域的工程与应用进展, 全文在7 000字左右;
 - 专家论坛: 报道国内外摩擦学界专家对摩擦学研究领域的最新进展与研究方向的论坛, 全文在9 000字左右;
 - 评述与进展: 反映国内外摩擦学研究领域的最新进展与研究方向, 全文在9 000字左右;
- 以上 5 个栏目的文章所限字数均包括图、表及参考文献, 请注意文责由作者自负, 请勿一稿多投.

2 稿件质量要求

- (1)题名应简练, 一般不超过20个字, 题名中尽量不用缩略语、符号和分子式, 稿件中必须具有约200字的中文摘要和详细的英文摘要, 并请分别列出3~8个关键词和文章所属的中图分类号;
- (2)稿件全文按照1.5倍行距通栏排版;
- (3)稿件中的插图、表格和照片尽量精选(插图不得超出8幅), 曲线图线条应匀滑易辨, 图上字符数码必须工整到位, 表格一律采用3线表, 图题、图注、表题及表中内容均应附有中、英文2种文字说明;
- (4)稿件中的计量单位及符号的使用请参照我国法定计量单位及有关国家标准;
- (5)参考文献应选择作者亲自阅读过的和最主要的, 并按文中引用先后顺序编号(1篇文章最好不超过50条), 非正式出版物和尚未发表的论文不得引用, 著录格式请参照GBT7714-2015, 且每条中文参考文献均需提供相应英文翻译.

3 投稿方式

本刊现采取网上投稿的方式处理稿件, 投稿平台网址为: www.tribology.com.cn, 请在作者登陆一栏中点击新用户注册, 注册完成后即可在网上投递论文. 投稿时请仔细填写作者联系邮箱, 以便及时接受编辑部的邮件. 请国内的作者在网上投稿时附上中文标题和摘要.

4 稿件处理

- (1)投稿一经受理即发收稿回执, 否则将退请作者补充或退稿;
- (2)稿件的处理情况一般在收稿后3个月内告知作者, 需要修改的稿件将由编辑部整理改稿意见并通知作者, 作者返回修改稿时须附有对改稿意见的逐条处理说明; 作者可通过网站随时查询稿件的处理状态;
- (3)编辑有权对稿件作必要的文字修改, 作者在收到编辑加工的清样后务请仔细校核(仅可适当作个别改动), 并尽快返回编辑部. 请作者按版面支付发表费;
- (4)来稿一经发表, 即按规定寄付稿酬并赠送当期刊物.