

石墨烯冷涂锌防腐涂料的制备及性能

房昺, 杨瑞*, 杨亮, 姜国杰

中国航发北京航空材料研究院, 中国航空发动机集团航空材料先进腐蚀与防护重点实验室, 北京 100095

摘要 采用硅烷偶联剂对氧化石墨烯进行改性后制备了表面功能化石墨烯, 并以此功能化石墨烯制备了稳定分散的石墨烯浆料。将此浆料与溶解好的树脂液、预分散好的锌粉浆料混合, 制备了石墨烯冷涂锌涂料。通过盐雾试验、接触角试验及电化学测试, 确定了石墨烯在涂料体系中的最佳添加量。对石墨烯冷涂锌涂料的性能进行了全面测试, 结果显示, 涂层耐盐雾时间达到 2500 h, 是相同厚度热浸锌涂层的 2 倍以上。

关键词 石墨烯; 功能化石墨烯; 石墨烯浆料; 冷涂锌涂料; 防腐

海洋环境中的钢结构材料, 服役条件恶劣, 长期处于海洋大气、海水飞溅及浸泡、潮湿、霉菌等环境下, 使腐蚀更易发生发展。目前一般采取镀锌工艺进行防护, 主要包括电镀锌及热镀锌。从工艺过程来看, 电镀锌特别是氰化镀锌, 存在着毒性大、高污染、易氢脆等缺点; 热镀锌存在着高污染、高能耗、高职业病风险等缺点。更重要的是, 由于二者工艺的限制, 整个防护过程必须在工厂进行, 无法实现对于钢结构腐蚀部位的快速维修处理^[1]。

冷涂锌防腐涂料, 是一种特殊的单组分富锌涂料, 在常温下通过刷涂、喷涂、滚涂等工艺实现现场

快速涂装, 克服了镀锌工艺的不足, 已被越来越多的海洋环境下的钢结构防腐场合所采用^[2-5]。然而在实际应用中, 冷涂锌也暴露出一些问题, 如耐腐蚀性不足、与其他涂层配套性不好等^[2, 4-5]。由于其耐腐蚀性能不足, 导致施工时需要多遍涂覆, 不但影响施工效率, 而且涂层厚度增加后易发生开裂、鼓泡等现象, 因此急需对其防腐性能进一步提升, 实现其在海洋环境中更好的应用。

石墨烯是具有单层片状结构的二维材料^[6], 其厚度仅相当于一个原子的直径(约 0.35 nm), 具有独特而优异的热、电学以及力学性能, 是新一代革

收稿日期: 2021-07-15; 修回日期: 2021-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1600700)

作者简介: 房昺, 工程师, 研究方向为表面工程, 电子信箱: 84922278@163.com; 杨瑞(通信作者), 高级工程师, 研究方向为表面腐蚀防护, 电子信箱: yrui918@126.com

引用格式: 房昺, 杨瑞, 杨亮, 等. 石墨烯冷涂锌防腐涂料的制备及性能[J]. 科技导报, 2022, 40(5): 44-51; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.05.005

命性材料。由于其特殊的片层状结构,石墨烯可使涂层具有优异的屏蔽性能,其机理与鳞片状云母粉、铝粉、玻璃薄片等作为填料应用于防腐涂料中类似,能延缓氧气、水分子、氯离子等腐蚀因子到达金属基体表面,使防腐涂层的渗透性降低,提高涂层的耐蚀性。

然而,由于石墨烯具有高的比表面积、强的范德华力和 $\pi-\pi$ 键作用,使其易发生团聚,不利于涂层整体层层堆叠结构的形成,所以制备高性能石墨烯/有机复合涂层必须解决石墨烯团聚的问题,提高其在聚合物中的分散程度^[7]。已有文献报道,采用氧化石墨烯表面功能化(f-GO)的方法,改善其与聚合物的相容性及分散性可以制备高耐蚀涂层^[8-24],国内也有将石墨烯应用于环氧富锌涂料的相关研究^[25-31],但将石墨烯应用于冷涂锌涂料的研究却鲜有报道。基于石墨烯在金属腐蚀防护领域巨大的应用潜力,本研究将探索制备添加石墨烯的冷涂锌防腐涂料并对其进行全面性能测试。

1 实验

1.1 制备工艺

1) 功能化石墨烯的制备。

制备工艺如图1所示。准备含5% 3-氨丙基三乙氧基硅烷(APTES,阿拉丁化学试剂有限公司)、80%乙醇(阿拉丁化学试剂有限公司)及15%去离子水(自制)的硅烷溶液。采用醋酸(阿拉丁化学试剂有限公司)调节硅烷溶液的pH值至4~5以加速硅烷的水解反应。室温下,在磁力搅拌器上混合3 h后,将5 mg氧化石墨烯GO(常州第六元素材料科技股份有限公司)纳米片加入硅烷溶液。将混合液用10%氢氧化钠(阿拉丁化学试剂有限公司)溶液逐滴加入调节pH值至10,然后在60℃下搅拌6 h,使水解硅烷与GO表面的-OH反应。最后,将混合物离心并清洗5次,去除物理吸附的硅烷。然后在冷冻箱中放置24 h冻干。制备过程如图2所示。

2) 石墨烯料浆的制备。

将制备的功能化石墨烯分散于高沸点芳香烃溶剂(S-100,江苏华伦化工有限公司)中,添加分

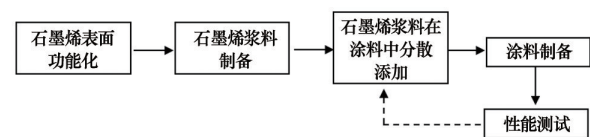


图1 制备工艺路线

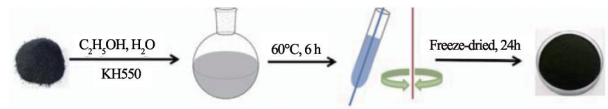


图2 功能化石墨烯制备过程

散剂(BYK-220S,德国BYK公司)并快速机械搅拌30 min,然后超声分散2 h,即制备出稳定分散的石墨烯浆料。制备过程如图3所示。



图3 石墨烯浆料制备过程

3) 涂料的制备。

首先,将聚丙烯酸树脂(A-04,辽宁三环树脂有限公司)溶解于部分S-100中。然后将制备的石墨烯浆料倒入溶解好的树脂液中,并搅拌约1 h分散均匀。另外用一部分溶剂分散锌粉(800目球状,优美科富虹(湖南)锌业有限公司),将分散好的锌粉浆料倒入石墨烯+树脂液中,然后加入其他功能助剂,再次搅拌约1 h,即得石墨烯冷涂锌涂料。

1.2 性能表征与测试

1.2.1 表征

使用傅里叶红外光谱仪(美国Nicolette, Maf-na-IR750)对石墨烯功能化前后的红外光谱进行对比。使用接触角测试仪(德国KRÜSS, DSA10-MK2)表征涂层表面疏水情况。使用电化学工作站(Ametek, M342)表征涂层电化学性能,极化曲线及交流阻抗测试时采用Ag/AgCl饱和和KCl作参比电极,碳棒为辅助电极,电解质为3.5%NaCl溶液。其中,极化曲线扫描速度为0.5 mV/s;电化学阻抗谱测试激励信号为幅值10 mV的正弦波,频率范围为10 mHz~100 kHz。

1.2.2 性能测试

涂料的主要技术指标需满足《HG/T 4845—2015 冷涂锌涂料》相关要求,如表1所示。

其中,耐中性盐雾腐蚀评价参照国家标准《GB/T 1771—2007 色漆和清漆-耐中性盐雾性能的测

定》。测试条件:试验溶液为质量分数5%NaCl溶液,试验室温度 $35\pm 2^{\circ}\text{C}$,压力桶温度 $47\pm 2^{\circ}\text{C}$,pH值6.5~7.2,喷雾量 $1\sim 2\text{ mL}/(80\text{ cm}^2\cdot\text{h}^{-1})$,连续喷雾,Q-FOG型盐雾试验箱。测试表面与垂直方向的夹角为 $20^{\circ}\pm 5^{\circ}$,采取划痕测试方法。

表1 冷涂锌涂料技术指标

项目	检测方法	技术指标
容器中状态	目视	搅拌后无硬块,呈均匀状态
不挥发物含量/%	GB/T 1725—2007	≥ 80
表干时间/h	GB/T 1728—1979(1989)	≤ 0.5
实干时间/h	GB/T 1728—1979(1989)	≤ 24
柔韧性/mm	GB/T 1731—1993	≤ 2
耐冲击性/cm	GB/T 1732—1993	50
划格试验/级	GB/T 9286—1998	≤ 1
附着力(拉开法)/MPa	GB/T 5210—2006	≥ 3
耐盐雾性(2000 h)	GB/T 1771—2007	划线处无红锈,单向扩蚀 $\leq 2.0\text{ mm}$;未划线区无开裂、剥落、生锈现象(不包括白锈)
配套性	GB/T 5210—2006	漆膜平整,不起皱、不咬起,且附着力 $\geq 3\text{ MPa}$

配套性实验采用Q235钢板(尺寸:25 mm×25 mm×3 mm),表面经喷砂处理后再喷涂石墨烯冷涂锌涂层,干燥24 h后,再喷涂一层环氧底漆,厚度约为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。按照《GB/T 5210—2006 色漆和清漆拉开法附着力试验》中9.4.1的双试柱法进行结合力测试。

2 结果与讨论

2.1 石墨烯功能化表征

功能化前后石墨烯的傅里叶红外光谱如图4所示。

从图4可以看出, 3420 cm^{-1} 为-OH吸收峰, 1720 cm^{-1} 左右为羧基上的C=O伸缩振动峰,表明功能化前的石墨烯中含有-COOH及-OH等官能团。与功能化前相比,功能化后的谱图中,新出现的吸收峰包括: 2924 cm^{-1} 和 2851 cm^{-1} 为-CH₂-的伸缩振动吸收峰, 1149 cm^{-1} 为-Si-O-C-的伸缩振动吸收峰, 1033 cm^{-1} 为-Si-O-Si-伸缩振动吸收峰。-CH₂-、-Si-O-C-及-Si-O-Si-吸收峰的出现表明硅烷偶联剂已成功接枝到了

石墨烯表面。

2.2 石墨烯浆料的制备

采用表面功能化后的石墨烯按照1.1部分2)中的方法制备了石墨烯浆料,并与功能化前的石墨烯浆料进行了对比,如图5所示。

从图5中可以看出,功能化后的石墨烯浆料静置30 d后仍未分层,功能化前的石墨烯浆料静置过程中逐渐分层,间接表明氧化石墨烯表面实现了功能化,并且功能化后的石墨烯浆料分散性及稳定性良好。

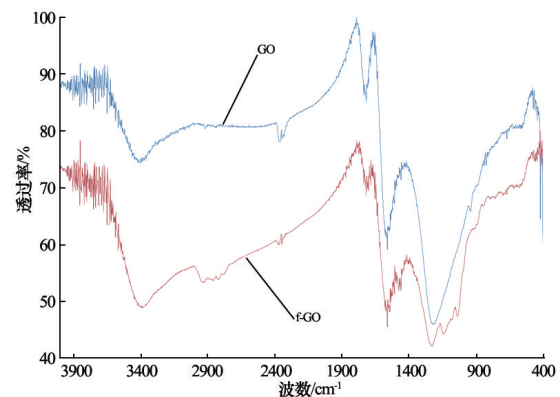
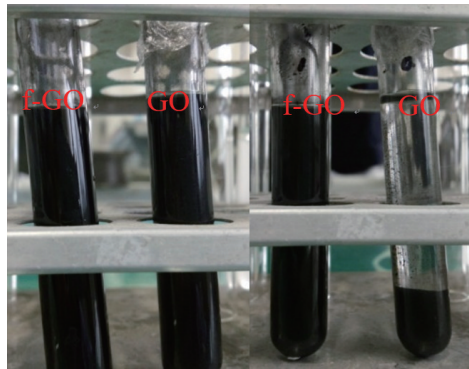
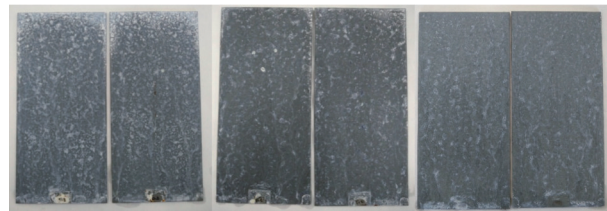


图4 石墨烯功能化前后的红外谱图

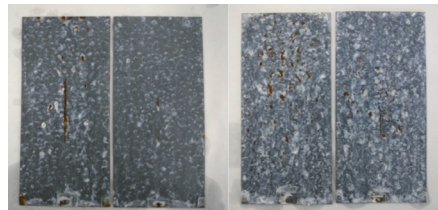


(a) f-GO与GO 浆料静置0 d
(b) f-GO与GO 浆料静置30 d

图5 石墨烯浆料静置照片



(a) 0% (b) 0.25% (c) 0.5%



(d) 0.75% (e) 1.0%

图6 不同石墨烯添加量的盐雾照片

2.3 石墨烯最佳添加量的确定

2.3.1 盐雾测试

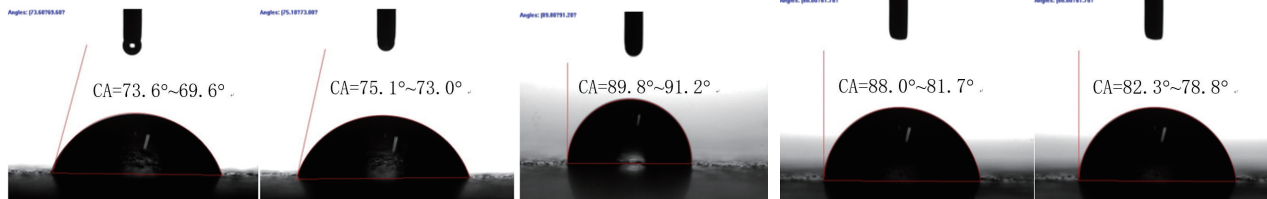
按照 1.1 部分 3) 中的方法配制了冷涂锌防腐涂料及石墨烯添加量分别为 0.25%、0.5%、0.75% 及 1.0% 的石墨烯冷涂锌防腐涂料。为便于快速筛选最佳添加量, 涂层厚度为 15~20 μm, 图 6 所示为盐雾 200 h 后的试片腐蚀状况。

可以看出, 石墨烯添加量为 0.5% 时, 涂层表面

状况良好, 腐蚀产物少, 基材未发生腐蚀, 抗腐蚀效果最佳。

2.3.2 接触角测试

采用测试水接触角(CA)的方法评价了涂层的疏水性能。图 7 所示为不同石墨烯含量的涂层水接触角测试结果。



(a) 0% (b) 0.25% (c) 0.5% (d) 0.75% (e) 1.0%

图7 不同石墨烯添加量的水接触角

石墨烯涂料涂层在成膜过程中, 部分石墨烯会随着溶剂挥发引起的表面张力的变化, 平铺在涂层外表面, 从而提高涂层的疏水性能, 该性能可以降低水与腐蚀性介质对涂层表面的吸附。可以看出, 石墨烯添加量为 0.5% 时, 涂层具有最大的水接触角(89.8°~91.2°), 疏水性能最好。

2.3.3 电化学测试

采用极化曲线和阻抗谱评价了不同石墨烯添加量的影响。不同石墨烯添加量的涂层极化曲线结果如图 8 所示。

表 2 为根据图 8 中极化曲线计算出的不同石墨烯添加量涂层的自腐蚀电流密度。可以看出, 随着

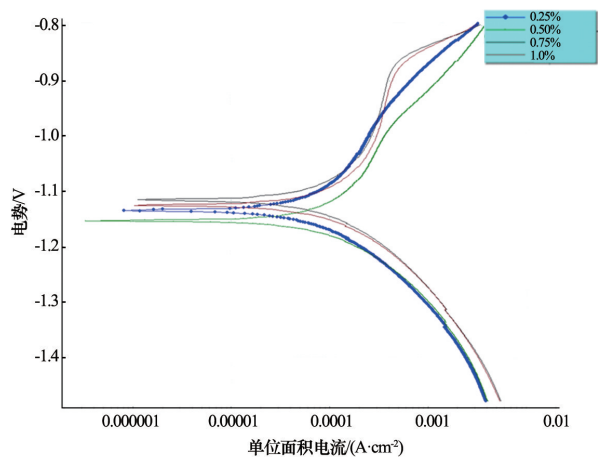


图8 不同石墨烯添加量涂层的极化曲线

表2 不同石墨烯添加量涂层的自腐蚀电流密度

石墨烯含量/%	单位电流密度/ $10^{-4}(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
0.25	1.23
0.50	1.18
0.75	2.51
1.00	3.10

涂层中石墨烯添加量的增加,涂层的自腐蚀电流密度先减小后增大,在0.5%的石墨烯添加量时,涂层具有最小的自腐蚀电流密度,说明此时的涂层具有最好的防护性能。

不同石墨烯添加量涂层的Bode曲线和Nyquist曲线如图9所示。由Bode曲线可以看出,随着涂层中石墨烯添加量的增加,涂层在低频0.01 Hz处的阻抗模值先增加后减小,在0.5%的石墨烯添加量时,涂层的低频阻抗模值达到最大,此时涂层防护性能最好。从Nyquist曲线可知,当交流电频率较高时,不同石墨烯添加量涂层的阻抗变化不明显,

在曲线初始阶段几乎重合,而且阻抗值很低。这是由于高频交流电更容易通过涂层表面与浸泡液之间形成双电层结构,同时忽略了一部分极化电阻的影响。当交流电的频率降低到中频段时,不同石墨烯添加量涂层的阻抗值开始显现出不同,表现在Nyquist曲线在中间段出现分离。到低频段后,曲线间的离散度更为明显。随着涂层中石墨烯添加量的增加,涂层对应曲线的阻抗先逐渐增加,在0.5%添加量时涂层容抗弧和阻抗值达到最大,随后又逐渐减小。这是因为不含石墨烯的冷涂锌涂层表面存在孔洞,当添加石墨烯后,通过石墨烯片层的封闭作用使涂层表面更为致密,因此涂层阻抗值增加;但当石墨烯添加量太高后,会引起石墨烯团聚,反而在涂层中产生毛细孔,腐蚀介质会通过毛细孔渗透到金属底材而使涂层的防腐蚀性能下降,反映在阻抗谱上就会出现阻抗值的降低。

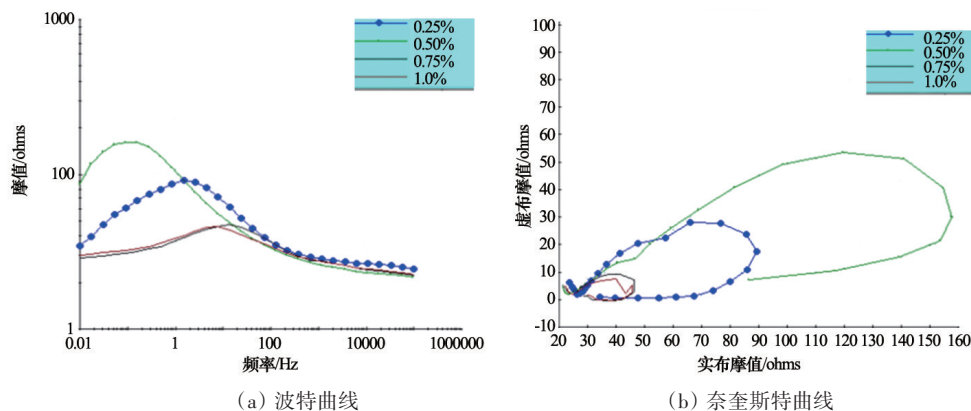


图9 不同石墨烯添加量涂层的阻抗谱图

综上所述可以看出,在石墨烯冷涂锌涂料体系中,石墨烯存在一个最佳添加量,为0.5%。根据该最佳添加量最终确定了石墨烯冷涂锌防腐涂料的配方,如表3所示。

表3 石墨烯冷涂锌防腐涂料的配方

组分	配比/%
锌粉	95~97
石墨烯	0.5
树脂	2~4
其他助剂	0.5~2
溶剂	20~30

3 性能测试

综合考虑上述因素对于石墨烯冷涂锌涂料性能的影响,经配方优化,制备了石墨烯冷涂锌防腐涂料,并对其性能进行了测试,结果如表4所示。

3.1 盐雾腐蚀评价

石墨烯冷涂锌涂料配方在Q235钢上制备试样,通过中性盐雾试验与热浸锌、冷涂锌进行了对比测试,如图10所示。

表4 冷涂锌防腐涂料性能测试结果

项目	检测结果	检测依据	技术指标
容器中状态	涂膜均匀,无流挂、针孔、开裂和剥落等现象	目视	搅拌后无硬块,呈均匀状态
不挥发物含量/%	82.5%	GB/T 1725—2007	≥80
表干时间/h	10 min	GB/T 1728—1979(1989)	≤0.5
实干时间/h	8 h	GB/T 1728—1979(1989)	≤24
柔韧性/mm	1 mm	GB/T 1731—1993	≤2
耐冲击性/cm	50 cm 高度落锤冲击后,漆膜无裂纹、皱纹及剥落等现象	GB/T 1732—1993	50
划格试验/级	1 级	GB/T 9286—1998	≤1
附着力(拉开法)/MPa	6.5 MPa	GB/T 5210—2006	≥3
耐盐雾性(2000 h)	2500 h,划线处无红锈(图10)	GB/T 1771—2007	划线处无红锈,单向扩蚀≤2.0 mm;未划线区无开裂、剥落、生锈现象(不包括白锈)
配套性	23 MPa	GB/T 5210—2006	漆膜平整,不起皱、不咬起,且附着力≥3 MPa

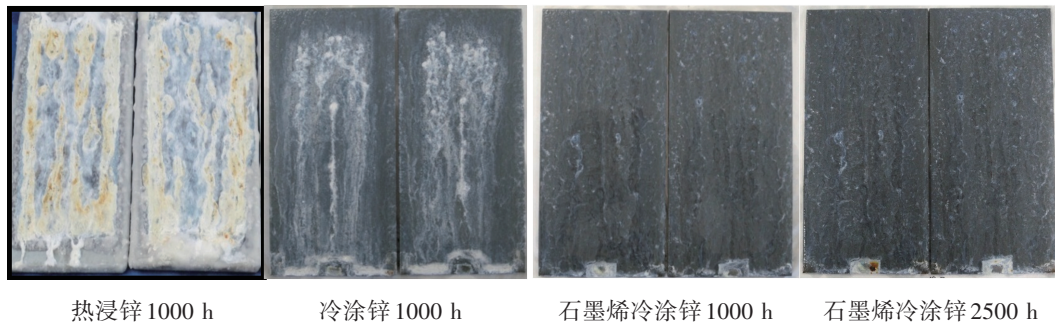


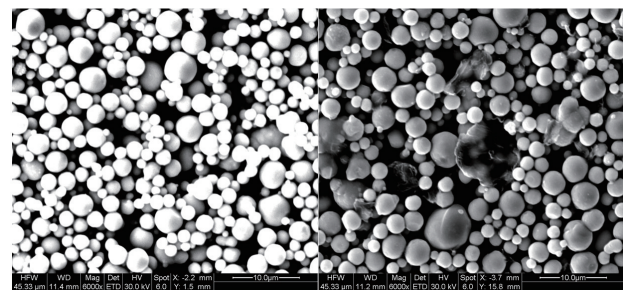
图10 涂层耐盐雾性能测试

可以看出,热浸锌涂层 1000 h 后表面已出现严重锈蚀,冷涂锌涂层表面也有明显白锈产生,相比于热浸锌和冷涂锌,添加石墨烯后,涂层经过 2500 h 中性盐雾后,表面仅有少量白色锈点,仍没有产生红锈,涂层耐盐雾性能提高 2 倍以上。

图 11 为冷涂锌和石墨烯冷涂锌涂层的表面 SEM 形貌图。可以看出,冷涂锌涂层表面存在明显的孔洞,添加石墨烯后,石墨烯片层平铺在涂层外表面,能够对涂层表面的孔隙起到封闭作用,从而使涂层的防护性能提高。

3.2 配套性测试

表 5 为双试柱法结合力测试结果,其对应的拉



(a) 冷涂锌 (b) 石墨烯冷涂锌

图 11 涂层表面 SEM 形貌图

开后照片如图 12。从测试结果看,石墨烯冷涂锌与底漆的平均结合力为 23 MPa,且多表现为石墨烯冷涂锌涂层间的内聚破坏,满足配套性指标要求。

表5 石墨烯冷涂锌+环氧底漆结合力测试

试样号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	平均值
结合力/MPa	27.8	18.4	32.7	18.9	14.4	26.7	23

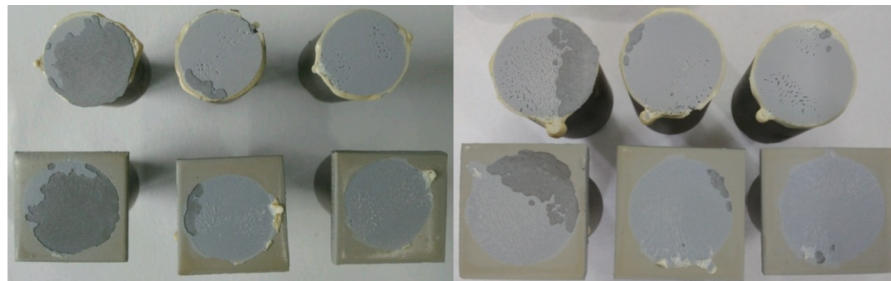


图12 石墨烯冷涂锌+环氧底漆结合力测试

4 结论

1) 石墨烯的功能化处理与浆料制备。制备了功能化石墨烯,并采用红外光谱对功能化前后的石墨烯进行了表征分析,结果显示石墨烯表面成功接枝硅烷偶联剂,功能化后的石墨烯能够稳定分散形成石墨烯浆料。

2) 含石墨烯富锌涂层制备及其性能。制备了石墨烯冷涂锌防腐涂料,通过盐雾试验、接触角试验及电化学测试确定了石墨烯的最佳添加量。石墨烯冷涂锌防腐涂料涂层各项性能满足指标要求,耐盐雾时间达2500 h,与环氧底漆配套性良好,综合性能优秀,是海洋环境中钢结构材料的理想防护涂层。

参考文献(References)

- [1] 杨瑞,原玲,刘虎,等.冷涂锌防腐涂料的制备与性能研究[J].涂料工业,2016,46(5):39-43.
- [2] 郭芳,常彦虎,李强.冷涂锌复合涂层体系在钢桥梁上的施工应用[J].涂料工业,2019,49(8):75-80.
- [3] 王庆军,李敏风.冷涂锌应用于八卦洲枢纽钢箱梁内表面涂装[J].电镀与涂饰,2020,39(4):220-223.
- [4] 李敏风.冷涂锌的性能和应用[J].电镀与涂饰,2014,33(18):788-790.
- [5] 高冬,万贵章.冷涂锌及其复合涂层配套体系在钢结构桥梁上的应用研究[J].试验研究与应用,2020(4):4-6.
- [6] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669.
- [7] 杨程,陈宇斌,田俊鹏,等.功能化石墨烯的制备及应用研究进展[J].航空材料学报,2016,36(3):40-56.
- [8] Ramezanzadeha B, Niroumandrad S, Ahmadi A, et al. Enhancement of barrier and corrosion protection performance of an epoxy coating through wet transfer of amino functionalized graphene oxide[J]. Corrosion Science, 2016, 103: 283-304.
- [9] Zhu Q S, Li E, Liu X H, et al. Epoxy coating with in-situ synthesis of polypyrrole functionalized graphene oxide for enhanced anticorrosive performance[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 140: 1-8.
- [10] Sari M G, Shamshiri M, Ramezanzadeh B. Fabricating an epoxy composite coating with enhanced corrosion resistance through impregnation of functionalized graphene oxide-co-montmorillonite nanoplatelet[J]. Corrosion Science, 2017, 129: 38-53.
- [11] Jing L C, Wang T, Cao W W, et al. Water-based polyurethane composite anticorrosive barrier coating via enhanced dispersion of functionalized graphene oxide in the presence of acidified multi-walled carbon nanotubes [J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 146: 1-11.
- [12] Li T L, Li L, Qi J, et al. Corrosion protection of Ti6Al4V by a composite coating with a plasma electrolytic oxidation layer and sol-gel layer filled with graphene oxide[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 144: 1-9.
- [13] Sari M G, Ramezanzadeh B. Epoxy composite coating corrosion protection properties reinforcement through the addition of hydroxyl-terminated hyperbranched polyamide non-covalently assembled graphene oxide platforms [J]. Construction and Building Materials, 2020, 234: 1-15.
- [14] Xiong L L, Yu M, Li Y Q, et al. Modified salicylaldehyde@ZIF-8 graphene oxide for enhancing epoxy coating corrosion protection property on AA2024-T3[J]. Progress in Organic Coatings, 2020, 142: 1-11.

- [15] Moradi L G, Sari M G, Ramezanzadeh B. Polyester-amine hyperbranched polymer as an interfacial modifier for graphene oxide nanosheets Mechanistic approach in an epoxy nanocomposite coating[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 142: 1-11.
- [16] Rajitha K, Mohana K N. Application of modified graphene oxide-Polycaprolactone nanocomposite coating for corrosion control of mild steel in saline medium[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 241: 1-10.
- [17] Ma Y J, Ye Y P, Wan H Q, et al. Chemical modification of graphene oxide to reinforce the corrosion protection performance of UV-curable polyurethane acrylate coating [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 141: 1-11.
- [18] Jin T, Xie Z L, Fullston D, et al. Corrosion resistance of copolymerization of acrylamide and acrylic acid grafted graphene oxide composite coating on magnesium alloy [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 136: 1-11.
- [19] Meng F D, Zhang T, Liu L, et al. Failure behaviour of an epoxy coating with polyaniline modified graphene oxide under marine alternating hydrostatic pressure[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2019, 361: 188-195.
- [20] Tran T V, Abedin F, Usta A, et al. Polyurethane nanocomposite coating with silanized graphene and hexagonal boron nitride as nanoadditives for improved resistance against ultraviolet degradation[J]. *Journal of Composite Materials*, 2018, 53: 1-13.
- [21] Zhang X H, Ying X H, Zhang M M, et al. Investigation of reinforced performance of modified graphene oxide high solid content polysiloxane nanocomposite coating films[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54: 3052-3068.
- [22] Zhan Y Q, Zhang J M, Wan X Y, et al. Epoxy composites coating with Fe₃O₄ decorated graphene oxide modified bio-inspired surface chemistry, synergistic effect and improved anti-corrosion performance[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 436: 756-767.
- [23] Tang J J, Yao W, Li W L, et al. Study on a novel composite coating based on PDMS doped with modified graphene oxide[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2018, 15(2): 375-383.
- [24] Zhang X R, Ma R N, Du A, et al. Corrosion resistance of organic coating based on polyhedral oligomeric silsesquioxane-functionalized graphene oxide[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 484: 814-824.
- [25] 王清海, 王秀娟, 方健君. 石墨烯在环氧富锌底漆中的应用[J]. *涂料工业*, 2016, 46(12): 42-47.
- [26] 孙春龙, 关迎东. 石墨烯在环氧锌粉涂料中的应用研究[J]. *中国涂料*, 2017, 32(2): 14-17.
- [27] 腾帅, 曹凤丽, 高扬, 等. 石墨烯与氧化石墨烯增强富锌环氧涂层防腐性能的研究[J]. *山东化工*, 2018, 47(8): 9-13.
- [28] 薛鹏, 李文凯, 胡秀东, 等. 石墨烯料浆在环氧锌粉复合防腐涂料中的应用[J]. *涂料工业*, 2017, 47(11): 59-62.
- [29] 陈中华, 李青, 何畅. 石墨烯的氧化程度和含量对水性锌粉涂料的防腐性能的影响[J]. *涂料工业*, 2019, 49(6): 35-41.
- [30] 陈中华, 李青, 何畅. 石墨烯料浆改性水性环氧富锌涂料的性能[J]. *电镀与涂饰*, 2018, 37(18): 823-827.
- [31] 朱相苗, 倪忠斌, 刘士荣, 等. 石墨烯富锌涂料的制备及其防腐性能[J]. *材料保护*, 2019, 52(1): 78-82.

Preparation and performance of cold-coating zinc anticorrosive paint containing graphene

FANG Bing, YANG Rui*, YANG Liang, JIANG Guojie

AECC Key Laboratory of Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China

Abstract Well dispersed graphene slurry is prepared with silane-functionalized graphene oxide (f-GO). This graphene slurry is then combined with solved resin and pre-dispersed zinc slurry to prepare the cold-coating zinc paint. The best addition dosage of graphene oxide in the coating is determined by salt spray fog, contact angle test and electrochemical measurements. Properties of the cold-coating zinc paint containing f-GO are tested, and the time of resisting salt spray in the test is above 2500 h, which is about twice the time of the hot-dip galvanizing counterpart with the same thickness.

Keywords graphene; functionalized graphene; graphene slurry; cold-coating zinc paint; anticorrosion ●



(责任编辑 王丽娜)