

# 抗菌防霉防腐阻燃一体化纳米涂层应用研究

刘志雄, 田澍, 蒲吉斌, 乌学东, 王立平

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

**摘要:** **目的** 通过特种功能纳米粒子的协同作用以及不同功能涂层的合理配套使用, 获得集抗菌防霉、防腐、阻燃和耐磨等多种功能于一体, 适用于涉海和航天装备综合防护的多功能纳米涂层材料。**方法** 以环氧树脂为底漆和中间漆的基体树脂, 加入多聚磷酸盐和石墨烯复合助剂制备防腐底漆, 加入石墨烯和膨胀型阻燃剂为复合阻燃助剂制备阻燃中间漆; 以丙烯酸改性聚氨酯为面漆基体树脂, 加入吡啶硫酮锌和纳米银抗菌复合助剂以及纳米陶瓷颗粒耐磨助剂, 制备抗菌防霉耐磨聚氨酯面漆。将防腐底漆、阻燃中间漆和抗菌防霉耐磨面漆合理搭配, 制备多功能一体化综合防护涂层材料。通过铅笔硬度测试、划格法附着力测试、耐冲击强度测试和耐人工老化测试评价纳米涂层的常规性能, 通过盐雾测试研究防腐性能, 通过燃烧实验研究阻燃性能, 通过抗菌防霉实验研究抗菌防霉性能, 通过摩擦实验评价其耐磨性能。**结果** 经测试, 纳米涂层的硬度为 H, 附着力为 0 级, 耐冲击强度为 50 kg·cm。800 h 人工老化试验后, 漆膜无明显变化。800 h 中性盐雾测试后, 基体无腐蚀点。12 s 垂直燃烧实验研究发现其平均烧焦长度仅为 1 mm, 滴落物的续燃时间为 0 s。烟密度研究发现纳米涂层 240 s 的 Dm 平均值仅为 13, 抗菌、防霉实验表明该纳米涂层对大部分细菌的抑菌率高达 99%, 其防霉等级为 0 级, 耐磨性能测试发现涂层的质量损失为 32 mg。**结论** 所研制的一体化纳米涂层具有优异的防腐、阻燃、耐磨和抗菌防霉性能, 可以在航天航空以及海工设施等特种设备上使用, 能够起到综合防护作用。

**关键词:** 抗菌防霉; 阻燃; 防腐; 石墨烯; 纳米材料; 一体化涂层

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)11-0077-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.11.011

## Application of Antibacterial, Antimildew, Anti-corrosive and Flame-retardant Integrative Nanocoatings

LIU Zhi-xiong, TIAN Shu, PU Ji-bin, WU Xue-dong, WANG Li-ping

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

**ABSTRACT:** This work aims to obtain a multifunctional nano-coating material with antibacterial, antimildew, anti-corrosive and flame-retardant functions for comprehensive protection of marine and aerospace equipment depending on synergistic effect

收稿日期: 2017-06-07; 修订日期: 2017-09-12

Received: 2017-06-07; Revised: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51603217); 中国博士后基金面上项目 (2016M592023); 宁波市自然科学基金 (2016A610258)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51603217), the China Postdoctoral Science Foundation funded project (2016M592023), the Ningbo Natural Science Foundation (2016A610258)

作者简介: 刘志雄 (1985—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为特种功能涂料。

Biography: LIU Zhi-xiong (1985—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: special functional coatings.

通讯作者: 王立平 (1980—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新型强润一体化以及耐磨蚀薄膜材料和功能涂料。

Corresponding author: WANG Li-ping (1980—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection of materials.

of special functional nano-particles and reasonable ancillary use of different functional coatings. Anticorrosive primer was prepared by adding zinc polyphosphate and graphene as compound agents into substrate resin taking epoxy resin as primer and intermediate paint. Antibacterial, antimildew and anti-corrosive polyurethane finish paint was prepared by adding zinc pyrithione, nano-silver antimildew compound agents and nano ceramic particle wear-resistant additive into the substrate resin taking acrylic acid-modified polyurethane as finish paint. The multi-functional integrative protective coating material was prepared by matching anti-corrosive primer, flame-retardant intermediate paint as well as antibacterial, antimildew and anti-corrosive finish paint in a reasonable manner. Conventional properties of the nano-coating were evaluated by performing pencil hardness test, cross cut adhesion test, impact strength test and artificial aging resistance test. Corrosion resistance was studied by performing salt spray test. Flame retardancy was studied by performing combustion experiment. Antibacterial and antimildew properties were investigated by performing antifungal and antibacterial experiments. Hardness of the nano-coating was up to H, adhesive force reached grade 0 and impact resistance was 50 kg·cm. After artificial aging for 800 h, the paint film changed slightly. After the neutral salt spray test, the substrate had no corrosion spot. 12 s vertical ignition test showed that the burning length was merely 1 mm and drip afterflame time was 0 s and the burn length only 1 mm. Smoke density study showed the average  $D_m$  was only 13 for 240 s. Bacteriostasis rate of the nano-coating was up to 99% and antimildew grade was grade 0. Wear resistance test showed that mass loss of the coating was 32 mg. The integrative nano-coating prepared as-developed exhibits excellent antibacterial, antimildew, anti-corrosive and flame-retardant properties, hence it plays an important role in protecting special equipment such as space aircraft and marine facilities.

**KEY WORDS:** antibacterial and antimildew; flame-retardant; anti-corrosive; graphene; nano-material; integrative coating

随着我国海洋战略的持续推进,海工装备以及海洋设施表面的综合防护也越来越引起大家的重视。高温、高热、高盐和高辐射的“四高”恶劣环境极易导致材料表面产生严重锈蚀<sup>[1-2]</sup>,同时,高温、高湿的特殊环境极易导致设备表面滋生细菌和霉菌,而密闭空间中的机械设备更是滋生细菌和霉菌繁殖的温床。一方面,细菌和霉菌的快速繁殖不仅会加速材料腐蚀失效,而且会严重影响工作人员的生命健康<sup>[3-4]</sup>;另一方面,细菌和霉菌繁殖引起的材料腐蚀失效又极易导致设备老化短路或者燃料泄露,引发火灾,造成难以估计的巨大人身和财产损失。

现在社会上存在诸多的功能性涂料,用以解决上述问题。但是,这些涂料功能单一,在使用时为了达到综合防护的目的,需要在装备外面进行多次重复涂覆,且大多数涂料在混合使用时,自身的防护效果会降低,无法为装备提供长期有效的防护。此外,这些种类繁多的功能性涂料效果也一般。因此,急需开发一种多功能一体化的有机涂层来解决材料表面综合防护性能问题。

纳米材料由 1~100 nm 的粒子组成,具有小尺寸效应、表面效应、宏观量子隧道效应等<sup>[5]</sup>。利用纳米材料自身的优异特性,将其结合到涂料中,可显著改善和增强涂料的性能,尤其是研发出各种各样的功能性涂料<sup>[6]</sup>。纳米银是一种高效、广谱、耐药性好的抗菌材料,纳米银在与水接触时,可缓慢释放出银离子,低浓度的银离子会破坏细菌的细胞壁和细胞膜,抑制 DNA 复制,降低酶呼吸及其他活性,导致细菌死亡且无法分裂增殖<sup>[7-10]</sup>。杨等人报道了一种水性纳米银/

氟碳抗菌涂料,当纳米银粉质量分数为 0.03%时,该涂料灭菌率高达 94%<sup>[11]</sup>。纳米银抗菌剂尽管具有抗菌有效期长,对皮肤刺激性小,抗菌谱广等优点,但其抗菌作用起效较晚,对真菌的最小抑菌浓度值较大,抗真菌的效率较低等缺点限制了其应用。

石墨烯是一种二维片层状纳米材料,具有小尺寸效应,可以填充到涂料的孔洞和缺陷中,在一定程度上阻止和延缓了小分子腐蚀介质浸入金属基体,可以大幅提高涂层的抗腐蚀性能<sup>[12-15]</sup>。同时,其在涂料中层层叠加,形成的致密物理隔绝层与膨胀型阻燃剂形成的蓬松碳层协同作用,隔断聚合物和氧气的接触,阻止火灾的进一步蔓延,并且抑烟效果显著<sup>[16-20]</sup>。本文针对海工装备、海洋设施表面以及航空航天特种设备表面综合防护的需求,通过特种功能纳米粒子的协同作用以及不同功能涂层的合理配套使用,研发一种集抗菌、防霉、防腐、阻燃和耐磨等多种功能于一体的多功能纳米涂层材料。

## 1 试验

### 1.1 原材料

试验用的主要原材料为环氧树脂、固化剂 A、多聚磷酸锌、石墨烯、膨胀型阻燃剂、丙烯酸树脂、固化剂 B、吡啶硫酮锌、纳米银 (~20 nm)、纳米氧化硅 (~30 nm)、纳米氧化锆 (~30 nm)、颜填料和溶剂。该一体化纳米涂层材料采用防腐底漆、阻燃中间漆和抗菌防霉耐磨面漆配套体系,其主要组成见表 1 和表 2。

表 1 底漆和中间漆涂层的组成  
Tab.1 Composition of primer and intermediate paint coatings

	环氧树脂	固化剂 A	多聚磷酸锌	石墨烯	膨胀型阻燃剂	颜填料	溶剂
底漆	40 ~ 60	10 ~ 20	5 ~ 10	0.1 ~ 1		20 ~ 30	10 ~ 30
中间漆	30 ~ 50	8 ~ 15		0.1 ~ 5	10 ~ 30	2 ~ 30	10 ~ 30

表 2 面漆涂层的组成  
Tab.2 Composition of finish paint coating

	丙烯酸树脂	固化剂 B	吡啶硫酮锌	纳米银	纳米氧化铝	纳米氧化锆	颜填料	溶剂
面漆	40 ~ 50	10 ~ 20	1 ~ 5	1 ~ 5	5 ~ 10	5 ~ 10	20 ~ 30	10 ~ 20

## 1.2 试样制备

将树脂、相应功能纳米填料、颜填料和溶剂高速混合均匀, 经研磨至细度为 30 ~ 50  $\mu\text{m}$ , 再加入相应固化剂并混合均匀, 依次涂敷于不同规格的经除锈、除油处理后的金属基材上, 室温干燥 24 ~ 48 h 后备用。

## 1.3 性能测试

采用上海高致精密仪器公司的 QFH 百格刀, 按照 GB/T 9286—1998《色漆和清漆 漆膜的划格试验》测量涂层的附着力。按 GB/T 6739—2006《色漆和清漆 铅笔法测定漆膜硬度》测定面漆层的铅笔硬度, 试验时, 固定好 H 型铅笔, 在 500 g 砝码的负载下以 45° 角压在漆膜表面上。按照 GB/T 1732—1993《漆膜耐冲击测定法》对喷漆面进行正冲试验。按照 GB/T 14522—1993《机械工业产品用塑料、涂料、橡胶材料 人工气候加速试验方法》测定涂层的耐人工老化性能。按照 GB/T 1771—2007《色漆和清漆 耐中性盐雾性能》测定涂层的耐盐雾性能。

按照 HB 5469—1991《民用飞机机舱内部非金属材料燃烧试验方法》测试涂层的阻燃性能, 在 320 mm×90 mm×2 mm 的铝板上依次喷涂底漆、中间漆和面漆, 其中, 每层漆的厚度为~30  $\mu\text{m}$ , 室温干燥 48 h。按 HB 6577—1992《金属材料 烟密度试验方法》和 HB 7066—1994《金属材料燃烧产生毒性气体的测定方法》进行涂层燃烧的烟密度和燃烧毒性气体测试, 在 75 mm×75 mm×2 mm 的铝板上依次喷涂底漆、中间漆和面漆, 其中, 每层漆的厚度为~30  $\mu\text{m}$ , 室温干燥 48 h。

按 QB/T 2591—2003《抗菌塑料 抗菌性能试验方法和抗菌效果》和 GJB 150.10A—2009《军用装备实验室环境试验方法 第 10 部分: 霉菌试验》测定涂层的抗菌、防霉性能, 在 50 mm×50 mm×2 mm 的铝板上依次喷涂底漆、中间漆和面漆, 其中, 每层漆的厚度为~30  $\mu\text{m}$ , 室温干燥 48 h。

在外直径 100 mm、内直径 9 mm 的环型铝制样

件上依次喷涂底漆、中间漆和面漆, 其中, 每层漆的厚度为~30  $\mu\text{m}$ , 室温干燥 48 h 后, 在载荷为 1 kg, 500 转的测试条件下, 测试涂层的损失质量, 以评价耐磨性。

## 2 结果及分析

### 2.1 一体化纳米涂层的力学及防腐性能研究

图 1 是在碳纤维复合材料和铝合金表面依次喷涂防腐底漆、阻燃中间漆和抗菌防霉面漆形成一体化涂层的效果图。表 3 是一体化纳米防护涂层的力学性能和防腐性能测试数据。从表中可以看出, 一体化纳米涂层的附着力为 0 级, 表明涂层材料与金属基体具有良好的粘结强度; 涂层的铅笔硬度达到 H, 表明漆膜具有较好的硬度; 耐冲击强度为 50 kg·cm, 说明该涂层具有很好的柔韧性和耐冲击性能; 耐人工老化 800 h 后, 漆膜无明显颜色变化, 表面无粉化、裂纹、起皮、膨胀现象; 耐中性盐雾 800 h 后, 漆膜表面无任何腐蚀点, 说明该涂层具有很好的耐腐蚀性能。

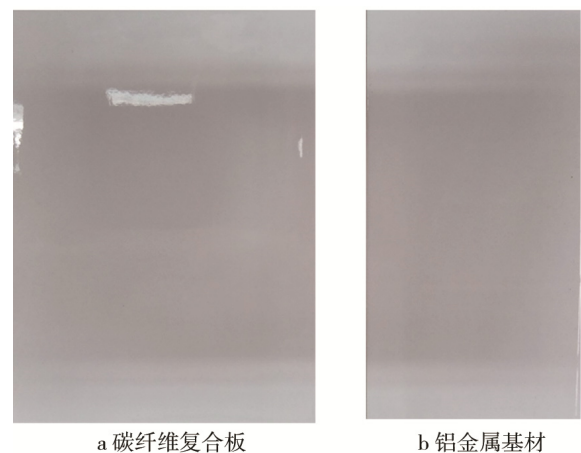


图 1 一体化纳米涂层在碳纤维复合板以及铝金属基材表面的喷涂效果

Fig.1 Design sketch of spraying integrative nano-coating on carbon-fibre composite (a) and aluminium plate (b)

表3 一体化纳米涂层的常规性能

Tab.3 Conventional properties of integrative nano-coating

项目	性能	测试标准
表面外观	白色, 表面均匀, 无裂纹、针孔等缺陷	目测
硬度	H	GB/T 6739—2006
人工老化	800 h 人工老化后, 漆膜无颜色变化, 表面无粉化、裂纹、起皮、膨胀现象	GB/T 14522—2008
冲击强度/(kg·cm)	50	GB/T 1732—1993
附着力/级	0	GB/T 9286—1998
耐中性盐雾	800 h 后, 基体金属无腐蚀点	GB/T 1771—2007

## 2.2 涂层的阻燃性能研究

在环氧树脂中加入石墨烯和膨胀型阻燃剂作为复合阻燃助剂, 遇火时, 在酸源磷酸+三聚氰胺磷酸盐和气源三聚氰胺+尿素的共同作用下, 成碳剂迅速脱水碳化, 在被保护的聚合物表面形成蓬松碳层。石墨烯二维纳米材料在涂料中层层叠加, 形成的致密物理隔绝层与膨胀型阻燃剂形成的蓬松碳层协同作用, 隔断聚合物和氧气的接触, 阻止火灾的进一步蔓延<sup>[16-20]</sup>。

通过垂直燃烧试验研究了一体化涂层材料的阻燃性能, 表4为中间漆涂层和一体化涂层的12 s垂直燃烧试验数据。可以看出, 一体化纳米涂层和阻燃中间漆涂层表现出了相似的阻燃性能, 其燃烧长度仅为1.0 mm, 停止燃烧后, 涂层立熄灭火, 且在燃烧过程中没有滴落物, 表明这种涂层具有很好的阻燃性能。

烟密度是指材料在规定的试验条件下发烟量的量度, 烟密度越大的材料, 对火灾时疏散人员和灭火越为不利。烟密度试验结果如表5所示, 由表可知, 中间漆涂层和一体化纳米涂层240 s的Dm值仅为13, 具有明显的抑烟效果。

事实上, 造成火灾中人员伤亡的主要原因是有毒烟气。统计结果表明, 火灾中85%以上的死亡是由烟

表4 一体化纳米涂层和中间漆涂层的

12 s 垂直燃烧测试数据

Tab.4 12 s vertical ignition test data of intermediate paint coating and integrative nano-coating

样品名称	样品编号	熄灭时间/s	燃烧长度/mm	滴落物熄灭时间/s
一体化纳米涂层	1	0	1	0
	2	0	0	0
	3	0	1	0
	平均值	0	1	0
中间漆涂层	1	0	1	0
	2	0	1	0
	3	0	1	0
	平均值	0	1	0

表5 一体化纳米涂层和中间漆涂层的烟密度

Tab.5 Smoke density of intermediate paint coating and integrative nano-coating

样品名称	样品编号	烟密度值	
		240 s Ds(max)及发生时间/s	最大校正(Dm)
一体化纳米涂层	1	14/240	13
	2	12/240	12
	3	15/240	15
	平均值	14	13
中间漆涂层	1	12/240	12
	2	14/240	14
	3	13/240	13
	平均值	13	13

气引发的, 其中, 大部分是由于吸入了烟尘和有毒气体导致的。因此, 涂层材料燃烧产生的毒性气体是评价涂层阻燃性能的一个重要指标。

表6给出了一体化纳米涂层和中间漆涂层燃烧产生的毒性气体浓度。可以看出, 一体化纳米涂层和中间漆涂层产生的毒性气体大致相同, 其中, 燃烧产生的CO含量仅为30ppm左右, 其他毒性气体的含量均低于2ppm, 说明该类涂层燃烧产生的毒性气体含量很低。

表6 一体化纳米涂层和中间漆涂层燃烧毒性气体含量(ppm)

Tab.6 Toxic gas mass concentration of intermediate paint coating and integrative nano-coating

样品名称	样品编号	CO	HCN	HF	HCl	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
一体化纳米涂层	1	30	0.5	<1.5	<1	<0.5	<2
	2	26	0.5	<1.5	<1	<0.5	<2
	3	33	0.5	<1.5	<1	<0.5	<2
	平均值	30	0.5	<1.5	<1	<0.5	<2
中间漆涂层	1	30	0.5	<1.5	<1	<0.5	<2
	2	35	0.5	<1.5	<1	<0.5	<2
	3	35	0.5	<1.5	<1	<0.5	<2
	平均值	33	0.5	<1.5	<1	<0.5	<2

### 2.3 涂层的抗菌防霉性能研究

适宜霉菌源繁殖生长的温度为 23 ~ 38 °C，相对湿度为 85% ~ 100%。因此，在湿热的密闭环境中，霉菌繁殖速度更快，其产生酶、酸和毒素的代谢产物，不仅会影响物品的外观与质量，污染环境，而且会严重危害动植物的生长和人类健康。纳米银无机抗菌剂和载银无机抗菌剂具有有效期长，对皮肤刺激性小、抗菌谱广的特点<sup>[7-11]</sup>，但载银无机抗菌剂的抗菌作用起效较晚，且对真菌的最小抑菌浓度值较大，抗真菌的效率较低。有机抗菌剂具有杀菌速度快、杀菌效率高、颜色稳定、廉价易得和广谱抗菌等优点。将纳米银抗菌剂与有机抗菌剂进行合理复配，可产生增效和兼治作用。吡啶硫酮锌可抑制革兰氏阳性、阴性细菌及霉菌的生长，将其和纳米银抗菌剂结合起来，制备高效复合抗菌防霉助剂，二者协同作用可以大幅提高涂层的防霉抗菌性能。

表 7 为一体化纳米涂层和对照涂层的防霉性能，从表中可以看出，添加纳米银和吡啶硫酮锌的一体化纳米涂层，其表面无霉菌生长，防霉等级为 0 级。

表 7 一体化纳米涂层和对照涂层防霉性能  
Tab.7 Antimildew properties of integrative nano-coating and control sample

样品名称	防霉等级	评级标准	试验菌种
一体化纳米涂层	0	0 级：无生长，材料无霉菌生长	黑曲霉，绳状青霉，土曲霉，宛氏拟青霉，绿色木霉，赭绿青霉和短柄帚霉
		1 级：微量生长，分散、稀少或非常局限的霉菌生长	
		2 级：轻度生长，材料表面霉菌断蔓延或菌落松散分布，或整个表面有菌丝连续延伸	
		3 级：中度生长，霉菌大量生长，材料可出现可使的结构改变	
		4 级：严重生长，厚重的霉菌生长	

表 8 为一体化纳米涂层的抗菌性能。由表可知，针对大肠杆菌，一体化纳米涂层培养 24 h 后的平均回收菌数为  $7.2 \times 10^2$  cfu/片，抑菌率达 99.96%。而针对金黄色葡萄球菌、白色念珠菌、表皮葡萄球菌、藤黄微球菌、变异库克菌等细菌，其抗菌率均高达 99%。

表 8 一体化纳米涂层抗菌性能  
Tab.8 Antibacterial properties of integrative nano-coating

样品名称	微生物种类	空白对照样品 抗菌塑料样品		抗(细)菌率/%
		24 h 后, 平均回收菌数 (cfu/片)	24 h 后, 平均回收菌数 (cfu/片)	
一体化纳米涂层	大肠杆菌	$1.8 \times 10^6$	$7.2 \times 10^2$	99.96
	金黄色葡萄球菌	$1.4 \times 10^6$	$1.9 \times 10^3$	99.86
	白色念珠菌	$9.6 \times 10^4$	<20	>99.99
	表皮葡萄球菌	$1.7 \times 10^6$	$1.5 \times 10^3$	99.91
	藤黄微球菌	$4.0 \times 10^5$	120	99.70
	变异库克菌	$2.8 \times 10^5$	$5.6 \times 10^2$	99.80

### 2.4 涂层的耐磨性能研究

陶瓷材料具有高硬度、高耐磨性、耐腐蚀性和高温抗氧化性等优点<sup>[21]</sup>，非常适合在海洋环境中使用。但是，陶瓷材料的制备、加工比较困难，生产成本高，脆性大，这些缺点限制了其实际应用。然而，其与加工性好、韧性和粘结力高的高分子树脂材料形成复合材料，既可以充分发挥各自材料的性能，又可以人为地进行材料组成和性能的设计和调控，以满足不同工况条件对零部件性能的要求。

通过在涂料中添加耐磨氧化铝和氧化锆纳米陶瓷颗粒，提高涂层的耐磨性能。在 1 kg 载荷、500 r 的测试条件下，研究了一体化涂层以及未添加纳米陶瓷颗粒对照样的耐磨性，发现对照样的质量损耗约为 50 mg，而一体化纳米涂层的质量损耗为 36 mg，说明纳米陶瓷颗粒的加入改善了涂层的耐磨性能。

## 3 结论

1) 通过在环氧底漆中添加石墨烯纳米材料得到一体化纳米涂层材料，该涂层材料具有良好的力学性能和抗腐蚀性能，其耐盐雾时间高达 800 h。

2) 在环氧树脂中添加石墨烯和膨胀型阻燃剂得到复合型阻燃助剂，其阻燃性能优越，满足航天航空设备对阻燃性能的需求。

3) 纳米银和吡啶硫酮锌复合抗菌防霉助剂的协同作用，大幅提高了涂层的抗菌和防霉性能。其对所测试的全部细菌的抑菌率高达 99% 以上，防霉等级为 0 级。

4) 添加纳米陶瓷颗粒可增强涂层的耐磨性能。

5) 将防腐底漆、阻燃中间漆和抗菌防霉耐磨面漆配套使用，开发了一种集抗菌防霉、防腐、阻燃和

耐磨等多功能于一体,适用于涉海和航天装备综合防护的多功能纳米涂层材料。

#### 参考文献:

- [1] 赵金榜. 发展前景灿烂的重防腐涂料[J]. 上海涂料, 2010, 48(5): 23-24.  
ZHAO Jin-bang. Developments of Heavy Duty Coatings[J]. Shanghai Paint, 2010, 48(5): 23-24.
- [2] 钱鸿昌, 李海扬, 张达威. 超疏水表面技术在腐蚀防护领域中的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 15-24.  
QIAN Hong-chang, LI Hai-yang, ZHANG Da-wei. Research Progress of Superhydrophobic Surface Technologies in the Field of Corrosion Protection[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 15-24.
- [3] 林宣益. 涂料用防腐剂和防霉防藻剂及发展[J]. 现代涂料与涂装, 2006, 9(1): 54-60.  
LIN Xuan-yi. Anti-corrosive Agents, Fungicides and Algaecides for Coatings and Their Developments[J]. Modern Paint & Finishing, 2006, 9(1): 54-60.
- [4] 胡梅, 陈逸君, 杨光雄. 涂料防腐防霉体系的构建及性能测试[J]. 上海涂料, 2007, 45(8): 37-40.  
HU Mei, CHEN Yi-jun, YANG Guang-xiong. Construction and Properties of Anticorrosive, Antimildew Coatings[J]. Shanghai Paint, 2007, 45(8): 37-40.
- [5] 薛群基, 徐康. 纳米化学[J]. 化学进展, 2000, 12(4): 433-440.  
XUE Qun-ji, XU Kang. Nanochemistry[J]. Progress in Chemistry, 2000, 12(4): 433-440.
- [6] 李林, 姚素薇. 纳米涂料的发展现状与未来[J]. 电镀与涂饰, 2004, 23(1): 40-44.  
LI Lin, YAO Su-wei. Current Developments and Future of Nano-coatings[J]. Electroplating & Finishing, 2004, 23(1): 40-44.
- [7] SUKDEB P, YU K T, JOON M S. Does the Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles Depend on the Shape of the Nanoparticle? A Study of the Gram-negative Bacterium Escherichia Coil[J]. Environ Microbiol, 2007, 73(6): 1712-1720.
- [8] TAYLOR P L, USSHER A L, BURREEL R E. Impact of Heat on Nanocrystalline Silver Dressings: Chemical and Biological Properties[J]. Biomaterials, 2005, 26: 7221-7229.
- [9] VIRENDER K S, RIA A Y, YEKATERINA L. Silver Nanoparticles: Green Synthesis and Their Antimicrobial Activities[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2009, 145: 83-96.
- [10] 吴宗山, 胡海洋, 任艺, 等. 纳米银的抗菌机理研究进展[J]. 化学进展, 2015, 34(5): 1349-1356.  
WU Zong-shan, HU Hai-yang, REN Yi, et al. Progress of Antibacterial Mechanisms of Silver Nanoparticles[J]. Progress in Chemistry, 2015, 34(5): 1349-1356.
- [11] 杨超, 王云普, 郭金山, 等. 环境友好型纳米银/氟碳抗菌涂料的研究[J]. 现代涂料与涂装, 2008, 11(2): 21-23.  
YANG Chao, WANG Yun-pu, GUO Jin-shan, et al. Study on Environmentally Friendly Nano-silver Modified Fluorocarbon Antibacterial Paint[J]. Modern Paint & Finishing, 2008, 11(2): 21-23.
- [12] JOSHI R K, CARBONE P, WANG F C, et al. Precise and Ultrafast Molecular Sieving through Graphene Oxide Membranes[J]. Science, 2014, 343: 752-754.
- [13] NAIR R R, WU H A, JAYARAM P N, et al. Unimpeded Permeation of Water through Helium-leak-tight Graphene-based Membranes[J]. Science, 2012, 335: 442-444.
- [14] PRASAI D, TUBERQUIA J C, HARL R R, et al. Graphene: Corrosion-inhibiting Coating[J]. ACS nano, 2012, 6: 1102-1108.
- [15] KIRKLAND N, SCHILLER T, MEDHEKAR N, et al. Exploring Graphene as a Corrosion Protection Barrier[J]. Corrosion Science, 2012, 56: 1-4.
- [16] KASHIWAGI T, DU F, DOUGLAS J F, et al. Nanoparticle Networks Reduce the Flammability of Polymer Nanocomposites[J]. Nature Materials, 2005, 4: 928-933.
- [17] 蒋静, 贾红兵, 王经逸, 等. 石墨烯/聚合物复合材料的进展[J]. 合成橡胶工业, 2011, 34(6): 482-488.  
JIANG Jing, JIA Hong-bing, WANG Jing-yi, et al. Progress in Research of Graphene/Polymer Nanocomposites[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2011, 34(6): 482-488.
- [18] 卜江, 梁红波, 刘彦余, 等. 磷氮阻燃剂/纯丙树脂光固化复合膨胀阻燃涂层制备及膨胀行为[J]. 表面技术, 2015, 44(8): 55-60.  
BU Jiang, LIANG Hong-bo, LIU Yan-yu, et al. Preparation and Expansion Process of Phosphorus-Nitrogen containing Flame Retardant/Polyacrylate UV Curable Intumescent Hybrid Coating[J]. Surface Technology, 2015, 44(8): 55-60.
- [19] 李洪飞, 王华进, 扈中武, 等. 氧化石墨烯在膨胀型水性防火涂料中阻燃和抑烟作用研究[J]. 涂料工业, 2015, 45(1): 1-8.  
LI Hong-fei, WANG Hua-jin, HU Zhong-wu, et al. Effects of Graphene Oxide on Flame Retardancy and Smoke Suppression of Waterborne Intumescent Fire Resistant Coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2015, 45(1): 1-8.
- [20] 周小平, 徐义胜. 感应加热三元硼化物金属陶瓷涂层的组织及耐磨性[J]. 表面技术, 2010, 39(1): 12-14.  
ZHOU Xiao-ping, XU Yi-sheng. Microstructure and Wear Resistance of Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub> Cermets Coating by Induction Heating[J]. Surface Technology, 2010, 39(1): 12-14.