

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2021.03.009

## 镀层和涂层的抗霉菌研究进展

祁怀伟\*, 吴心元, 王亮兵, 徐涛涛

(天津航空机电有限公司, 天津 300308)

**摘要:** 霉菌及其新陈代谢产物严重影响着各种材料的性能与使用寿命, 尤其是在大气环境中对镀层和涂层的腐蚀更为严重。本文介绍了影响霉菌生长的条件、因素及霉菌对金属材料的腐蚀过程, 综述了目前对镀层和涂层防霉处理方法及其研究进展, 并对防霉涂层的研究发展提出了建议。

**关键词:** 抗霉菌腐蚀; 镀层; 涂层; 霉菌

**中图分类号:** TQ153.2

**文献标识码:** A

## Research Progress on Anti-fungal Deposits and Coatings

QI Huaiwei\*, WU Xinyuan, WANG Liangbing, XU Taotao

(AVIC Tianjin Aviation Electro-Mechanical Co. Ltd., Tianjin 300308, China)

**Abstract:** Molds and their metabolites seriously affect the properties and service life of various materials, especially affect the corrosion of deposits and coatings in atmospheric environment. In this paper, the conditions and factors affecting the growth of mold were studied, the corrosion process of mold on metal materials was analyzed, and the methods and progress of anti-mildew on metal materials were summarized, we also proposed the suggestion for the development of anti-mildew coatings.

**Keywords:** anti-fungal corrosion; deposit; coating; mold

金属的腐蚀不仅会影响器件的功能和美观, 并引发严重环境污染, 造成大量的原材料浪费。恶劣的环境会加剧材料表面锈蚀, 比如潮湿、高温和高盐雾等<sup>[1, 2]</sup>。关于金属腐蚀, 在日常生活工作中随处可见, 而常见的有化学腐蚀和电化学腐蚀, 然而很少有人会想到微生物对金属材料的腐蚀。事实上, 微生物对金属材料的腐蚀直接影响其环境适应性、使用可靠性和寿命。目前人们针对细菌对金属腐蚀的影响研究较多, 而对同样大量存在于大气环境中的霉菌的影响研究还远远不够。有研究表明, 霉菌的代谢产物也会对金属本身及涂层、镀层造成严重的腐蚀<sup>[3]</sup>。例如在切削油、研磨油、压延油等金属的加工油中, 会繁殖假单胞杆菌、枯草杆菌、黄

曲霉、芽枝霉、柱孢霉等, 它们产生的各种代谢产物都会直接或间接的腐蚀金属材料。

在我国的亚热带和温带地区, 各种材料均会受到霉菌的影响, 而且表面都能生长菌丝, 它们的大量繁殖不仅污染环境, 还会影响人们的心情, 进而影响使用者的身体健康<sup>[4]</sup>。相对于金属材料, 非金属元器件、有机涂料和绝缘材料表面更是滋生霉菌的温床, 而霉菌的大量繁殖和旺盛的代谢产物则会破坏器件表面结构、损害零部件功能。近年来研究表明, 霉菌会对金属材料产生严重腐蚀<sup>[5, 6]</sup>, 导致材料表面形貌和物理、化学性质发生变化, 降低其使用寿命。因此, 对于新材料的开发, 要在综合考虑常规条件的基础上, 补充考虑其抗霉性能, 以满足

收稿日期: 2019-08-26

修回日期: 2020-03-23

通信作者: 祁怀伟, qihuaiwei105@126.com

不同环境中的抗霉要求。本文介绍了影响霉菌生长的条件和因素,分析了霉菌对金属材料的腐蚀过程,并且综述了目前对金属材料表面防霉处理方法及其研究进展。

## 1 镀层和涂层表面霉菌生长的成因

### 1.1 霉菌生长的环境因素

霉菌俗称丝状真菌,喜欢偏酸性生长环境,环境中只要有足够的氧气和营养物质、而且温度和湿度适宜,它们就可以快速繁殖,最终引起被附着材料的霉变<sup>[7]</sup>。霉菌之所以能长期并且广泛存在,主要原因是其对环境的要求并不苛刻,只要温度、湿度、营养供给条件都满足,霉菌孢子就可以萌芽,数月之间就可形成肉眼可见的菌株<sup>[8,9]</sup>。当环境温度处于30℃左右,相对湿度大于95%时,霉菌繁殖速度最快<sup>[10]</sup>,当温度低于零度或高于40℃时,霉菌就会停止生长。霉菌的营养来源非常广泛,例如被霉菌附着的材料自身的含碳和含氮化合物、动植物皮毛、代谢物、残骸以及灰尘等都可以为其提供营养。气流速度也是影响霉菌繁殖的一个重要因素,气流速度越小,霉菌生长繁殖越快。此外,不同材料相互接触,防霉性能也会互相影响<sup>[11]</sup>。比如电缆和电线用一般木料去包装,而不经防霉处理,则木料表面生长的霉菌会蔓延到电缆电线表面,从而影响其使用寿命。常用的铁木结构电缆盘因为木质材料不防潮,所以在梅雨季节木料表面就会生长霉菌,然后蔓延至与它接触的产品上,最后导致电缆被霉菌污染。

### 1.2 霉菌对镀层和涂层的腐蚀

霉菌腐蚀金属材料的过程涉及多个领域,包括材料学、生物学、化学及电化学等<sup>[12]</sup>,其中对电化学腐蚀过程影响最为显著,主要原因是霉菌的某些代谢产物能够加快腐蚀反应速率,进而损害材料的性能、降低使用寿命。例如,若金属表面存在碳源、氮源和其它营养物质,那么就会形成一层适合微生物寄居、繁殖、代谢和发展的薄膜,给霉菌生长的、创造了条件,孢子落在上面后,很快会繁殖生成大量的菌丝体,逐渐对金属进行腐蚀。除了碳、氮和水分外,霉菌的生长繁殖还需要微量的金属离子(如

铁、铜、钾、铝、锰等)。

霉菌对各种金属的腐蚀可以分为直接和间接腐蚀。直接利用材料来获取营养物质,从而腐蚀材料的属于直接腐蚀。间接腐蚀是霉菌生长过程排出的多种代谢产物(如有机酸、氨基酸、核酸、酶及毒素等),对金属材料及其制品造成的腐蚀。金属材料表面一旦附着有霉菌,通常情况下,经过一段时间就会形成一层生物膜,直接影响到被附着材料的物理和化学特性,也会造成不同程度的腐蚀。因此,按照影响腐蚀的机制不同,将微生物的种类划分为<sup>[13]</sup>:硫酸盐还原菌(SRB)、产酸菌、产氨菌等。一般认为,金属腐蚀程度与附着微生物的数量和时间有关,腐蚀速率随着霉菌附着量的增加而上升。朱武峰等<sup>[14]</sup>针对舰载机液压系统受海洋环境湿热、盐雾和霉菌影响的特点,进行了霉菌环境实验。分析结果发现,铸钢表面越粗糙,则越容易滋生霉菌,也就会产生较为严重的腐蚀。而且在双金属结合处表面更易于滋生霉菌,发生电化学腐蚀。但是某些抗霉菌腐蚀力强的材料,如铝合金氧化膜<sup>[6]</sup>,其腐蚀率并不随霉菌附着量的增减而变化。

## 2 镀层和涂层的防霉菌研究进展

通过研究霉菌对材料的腐蚀过程表明,一般情况下,多数材料都可以依靠材料最外层的防霉涂料或镀层来抵抗霉菌腐蚀,也就是通过将防霉剂添加到涂料中,并涂覆于材料表面,或者将基材浸泡在镀液中形成镀层,以达到防霉目的。其主要原理是:(1)影响霉菌代谢过程;(2)干扰和破坏霉菌正常繁殖;(3)与菌体代谢的脱氢过程竞争来破坏其三羧酸循环,从而破坏菌体的正常呼吸作用;(4)通过束缚菌体生长所必须的金属元素(如铁、铜、锌)等,来达到杀菌的目的。理想的防霉涂料或镀层应该满足以下要求<sup>[15]</sup>:耐高温、难溶于水、安全环保、使用方便、与基材相容性好等。比如在舰船保护方面,传统的海洋防微生物和霉菌腐蚀涂料,完全是依靠如三丁基氟化锡、汞和氧化亚铜等毒性很强的物质向海水中释放毒料来防止霉菌腐蚀的。虽然这种方式有一定的效果,但与此同时对整个海洋生态环境造成了不可逆的污染,甚至通过生物链最终

危害到人类自身健康。因此设计选用新型的环保防霉涂料迫在眉睫。

## 2.1 有机防霉涂层

夏越美<sup>[16]</sup>等探究了不同材料涂层的抗霉菌性能,结果表明,与其他材料,由聚氨酯漆和氨基漆组成的涂层表面更易滋生霉菌,从而对基体材料造成腐蚀。原因就是这两种涂层材料本身含有氮元素,而氮元素是霉菌生长繁殖所必需的营养元素。为了研究霉菌的生命活动和代谢产物对A04-60氨基漆表面微观形貌和防护性能等的影响,陈丹明等<sup>[17]</sup>做了一系列对比试验,结果表明,黑曲霉是导致A04-60氨基漆被侵蚀的主要菌种,并且黑曲霉的持续腐蚀会使涂层表面变得非常粗糙,表面缺陷不断扩大和深入,最终使得涂层的阻抗值和防护性能持续下降。

武器装备的贮存和养护关乎国防建设,所以要尽可能选用抗霉性能良好的材料对装备进行保护(包括防霉涂层和镀层)<sup>[18]</sup>。理论上讲,只要材料表面不含可供霉菌生长的营养成分,霉菌就不可能进行生长繁殖。因此,要严格控制武器装备的工艺制造过程,防止表面沾有各种可能成为霉菌营养物的物质,从而给霉菌提供生长环境。刘志雄<sup>[19]</sup>等讨论了吡啶硫铜锌和纳米银分别做防霉剂时的抗菌防霉效果,同时为了更好地利用二者的防霉特性,作者将两种材料相结合制备出更高效的复合抗菌防霉助剂,从而大幅提高涂层的抗菌和防霉性能。高云鹏<sup>[20]</sup>等为提高船用电机的耐腐蚀性,对一系列涂料进行了抗霉菌、耐盐雾和抗酸碱腐蚀实验。成功选出满足GB/T 7060-2008要求的最佳涂覆方案,即底漆用无机硅酸锌、中间漆用环氧云铁、表面漆用丙烯酸聚氨酯。

海洋环境非常复杂,具有高温高湿、高盐雾、高辐射和霉菌腐蚀等特点<sup>[21, 22]</sup>。因此,对舰船<sup>[13]</sup>和武器的寿命和性能具有很大影响。一般情况下,设备在沿海使用的故障率比内地会高很多<sup>[23]</sup>。周家胜<sup>[24]</sup>等详细分析了炮弹在海洋环境下的适应性并对防腐和维护提出了可行性对策。铝合金之所以能够广泛应用在轮船战舰、汽车配件和航天科技等领域,主要就是因为它密度小、强度高、导电导热性

能优异等。但是铝合金材料也有明显的缺点,比如难以抵抗海洋等复杂恶劣环境中霉菌的腐蚀。石娇等<sup>[25]</sup>为了提升铝合金的耐霉菌腐蚀性能,先在表面涂覆一层硅烷膜,之后再涂覆有机硅改性环氧树脂涂料。以硅烷膜作过渡层,可以在铝合金基体和有机涂层之间起到固定连接作用,从而形成牢固的防霉薄膜,增强涂层与基体的结合力,提升防霉性能。

陈丹明<sup>[26]</sup>等为了分析A04-60氨基烘干磁漆样件涂层老化、变质特征,通过是否添加防霉剂的方式进行霉菌试验。结果表明,黑曲霉对A04-60氨基烘干磁漆涂层的侵蚀损害最严重,如果不经防霉剂处理,黑曲霉会使样件涂层疏松脱落,且试验时间越长,表面孔洞就越粗大,而添加防霉剂后可以明显提高抗霉性能。

夏越美<sup>[27]</sup>探究了常用于电子产品表面的有机涂料的防霉特性,比如氨基漆、丙烯酸漆、环氧基漆、聚氨酯漆、酚醛漆和有机硅聚氨酯漆等涂料。结果均表明,添加防霉剂后可以增强有机涂料的防霉性能。

## 2.2 无机防霉涂层

张颖<sup>[28]</sup>等使用氮掺杂的高效二氧化钛光催化涂料来抑制霉菌的生长繁殖,结果表明:这种高效的光催化涂料能够很好的抑制霉菌生长繁殖。

王政芳<sup>[29]</sup>等研制的以无机矿物填料和无机硅酸盐为主要成分的涂料不但耐水、耐沾污、耐洗刷。而且具有良好的防霉防菌效果。这种涂料在未来会广泛的应用到各种领域。

## 2.3 抗菌防霉镀层

用涂层或镀层将材料保护起来是常见的防霉手段,主要方法有直接涂布法、喷涂法和电化学沉积法,其中电化学沉积法优势更为明显,因为这种方法可以不受部件形状限制,而且制备的涂层缺陷少、孔隙率也较低。氧化亚铜是一种传统的防污涂料,它主要靠本身的毒性来杀死微生物,从而达到防霉效果。原瑞霞<sup>[30]</sup>等采用电化学沉积法分别在304不锈钢、铜和铝基底上制备氧化亚铜薄膜来探究其防霉性能的。

美国PAVCO公司发明了Microban Metal Fin-



ishing 抗菌保护技术<sup>[7]</sup>,通过电镀,使有机的抗菌物质共沉积在整个镀层中,例如:在各种设备器件表面共沉积一层含有抗菌物质的镍铬合金镀层后,既不影响镀层外观和设备功能,还能显著增强其抗菌腐蚀性。抗菌保护处理过的表面,一小时后其细菌明显减少,而未经处理的表面细菌的增长超过10倍。经过24小时,表面经过抗菌保护处理过的,其细菌减少到几乎为零,而未经处理的表面细菌增加了10万倍。该抗菌剂均匀分布在整個镍和铬层。抗菌剂的预期寿命与金属镀层本身的使用年限是一样的。如果镀层没被损坏并且也没被腐蚀,那么其抗菌性能依然存在。

日本神户制铜公司<sup>[31]</sup>将具有抗菌防霉特性的保护层镀在铝、钛、不锈钢等各种金属表面,显著提高了材料的表面抗菌性能。这种技术已经广泛应用于多种设备的生产线上。

通过电镀或化学镀的方式在金属材料表面镀上一层致密均匀的防霉镀层,不但外观明亮,还能够防止霉菌腐蚀,从而延长使用寿命。赵立华与段渝平<sup>[32]</sup>按 GJB 150.10A-2009 对不同基材的多种防霉涂层和镀层的抗霉菌腐蚀性能进行了试验。结果表明:高强度铝合金阳极氧化层的抗霉性能良好,而涂漆层和炮油涂层的抗霉性能较差;高强度合金结构钢润滑油涂层抗霉性能良好,而镀锌层或锌镍合金层、涂漆层、炮油涂层的抗霉性能较差。此外,在电镀镍镀液中添加几种微量元素而得到的合金镀层的抗菌耐腐蚀性要比单体镍的效果要好很多。例如锌镍合金镀层的抗霉菌耐蚀性显著优于镀锌层<sup>[33]</sup>。

### 3 展望

在现实环境中,大部分的涂料、涂层或镀层都是不抗霉或半抗霉的,能够绝对抗霉菌腐蚀的很少。通常情况下,材料的材质、生产工艺和所处环境都会影响其抗霉性,所以要想防止材料被霉菌腐蚀,就必须改变材料组成、更新生产工艺、选用抗霉材料或者适当加入防霉抗菌剂等<sup>[34]</sup>。目前,对于材料抗霉菌性能的评定标准还不够完善,主要是缺乏对霉菌生命活动和代谢产物对腐蚀速度的动力学

规律分析和定量研究,因此,仍有许多深入的研究工作尚待完成。而且过度的抗菌加工可能会杀死人类生存所必要的共生菌,引起其它更严重的弊病。无论是有机抗菌涂层、无机抗菌涂层,还是抗菌防霉镀层,开发环境友好的高效防霉抗菌剂是未来的研究重点,其中无机抗菌涂层和镀层技术是今后的主流技术。因此,期待未来能更进一步开发出可巧妙地“和谐”人体的安全与抗菌能力的抗菌表面处理新技术。

### 参考文献

- [1] 钱鸿昌. 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):15-30.  
Qian H C. Research progress of super-hydrophobic surface technology in the field of corrosion protection [J]. Surface Technology, 2015, 44(3):15-30(in Chinese).
- [2] 赵金榜. 发展前景灿烂的重防腐涂料[J]. 上海涂料, 2010, 48(5):23-25.  
Zhao J B Heavy anticorrosive coatings with bright development prospects[J]. Shanghai Coatings, 2010, 48(5):23-25(in Chinese).
- [3] 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, 46(8):37-40.  
Hu M, Chen Y J, Yang G X. Construction and performance test of coating anticorrosive and mildew-resistant system [J]. Shanghai Coatings, 2007, 46(8):37-40(in Chinese).
- [4] 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, 1(创刊10周年特刊):54-60.  
Lin X Y Preservatives and mildew and algae inhibitors for coatings and their development [J]. Modern Coatings and Coatings, 2006, 1(10th Anniversary Special Issue):54-60(in Chinese).
- [5] 陈化南. 抗菌性金属表面处理技术之浅述[J]. 五金科技, 2008, 36(4):86-88.  
Chen H N Brief introduction of antibacterial metal surface treatment technology [J]. Hardware Science and Technology, 2008, 36(4):86-88(in Chinese).
- [6] 梁子原,林燕顺,叶德赞. 霉菌对金属材料腐蚀的研究[J]. 海洋学报(中文版), 1986, 8(2):251-254.  
Liang Z Y, Lin Y S Y e Dezan. Study on the corrosion of metal materials by mold [J]. Chinese Journal of Oceanog-

- raphy (Chinese version), 1986, 8(2):251-254(in Chinese).
- [7] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京:航空工业出版社, 2003.
- Wang X H. Natural environment test technology[M]. Beijing:Aviation Industry Press, 2003(in Chinese).
- [8] 林应锐. 防霉与工业杀菌剂[M]. 北京:科学出版社, 1987.
- Lin Y R Mildew and industrial fungicides[M]. Beijing: Science Press, 1987(in Chinese).
- [9] 马振瀛. 实用防霉技术[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1987.
- Ma Z H. Practical anti-mold technology[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987 (in Chinese).
- [10] 井上真由美. 微生物灾害及其防止技术[M]. 上海:上海科学出版社, 1983.
- Mayumi I. Microbial disaster and its prevention technology[M]. Shanghai:Shanghai Science Press, 1983(in Chinese).
- [11] 李梅,王庆瑞. 抗菌材料的发展及其应用[J]. 化工新型材料, 1998, 26(5): 8-11.
- Li M, Wang Q R. Development and application of antibacterial materials[J]. New Chemical Materials, 1998, 26 (5):8-11(in Chinese).
- [12] 刘倩倩,卢琳,高歌. 大气环境中金属及其保护层霉菌腐蚀研究的进展[J]. 工程科学学报, 2017, 39 (10): 1463-1469.
- Liu Q Q, Lu L, Gao G. Research progress on mold and metal corrosion in atmospheric environment[J]. Journal of Engineering Science, 2017, 39 (10): 1463-1469 (in Chinese).
- [13] 董言治,任建存,刘振杰. 霉菌和微生物对舰船的腐蚀及其涂料防护研究[J]. 现代涂料与涂装, 2006, 特刊(7): 30-32.
- Dong Y Z, Ren J C, Liu Z J. Corrosion of molds and microorganisms on ships and its coating protection[J]. Modern Paint and Coating, 2006, Special Issue(7): 30-32(in Chinese).
- [14] 朱武峰,吴文海,秦成. 舰载机液压系统霉菌综合环境试验研究[J]. 液压与气动, 2013, 11: 79-83.
- Zhu W F Wu W H, Qin C. Comprehensive environmental test research on mold of carrier-borne hydraulic system [J]. Hydraulic & Pneumatic, 2013, 11: 79-83 (in Chinese).
- [15] 周振宇. 抗菌防霉调湿涂料的研制及其性能研究[D]. 湖南:湖南工业大学, 2017.
- Zhou Z Y. Study on the development of antibacterial and mildew-resistant humidity-controlling coatings and their performance[D]. Hunan: Hunan University of Technology, 2017(in Chinese).
- [16] 夏越美,傅耘. 电子产品常用有机涂层防霉特性研究[J]. 装备环境工程, 2007, 4(2):32-35.
- Xia Y M, Fu Y. Research on Anti-mildew Properties of Common Organic Coatings for Electronic Products [J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4 (2): 32-35(in Chinese).
- [17] 陈丹明,李明,郑兴明. 霉菌对A04-60氨基烘干磁漆的侵蚀作用研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2014, 26(1): 19-24.
- Chen D M, Li M, Zheng X M. Study on the Erosion Effect of Mold on A04-60 Amino Drying Magnetic Lacquer[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2014, 26 (1):19-24(in Chinese).
- [18] 王丽. 霉菌试验及其标准介绍[J]. 航空标准化与质量, 2001, 3: 38-42.
- Wang L. Introduction of mold test and its standard [J]. Aviation Standardization and Quality, 2001, 3:38-42(in Chinese).
- [19] 刘志雄. 抗菌防霉防腐阻燃一体化纳米涂层应用研究[J]. 表面技术, 2017, 46(11):77-82.
- Liu Z X. Research on the application of antibacterial, mildewproof, anticorrosive and flame retardant integrated nano coatings[J]. Surface Technology, 2017, 46 (11): 77-82(in Chinese).
- [20] 高云鹏,柴全微,尹默. 船用防爆电机涂层结构研究[J]. 电气防爆, 2015, 2:21-24.
- Gao Y P, Chai Q W, Yin M. Study on coating structure of marine explosion-proof motor [J]. Electrical Explosion Protection, 2015, 2:21-24(in Chinese).
- [21] 董言治,周晓东,沈同圣. 舰船设备盐雾防护及实验技术研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16 (1):29-32.
- Dong Y Z, Zhou X D, Shen T S. Research progress on salt spray protection and experimental technology of ship equipment[J]. Corrosion Science and Protection Technol-

- ogy, 2004, 16(1):29-32(in Chinese).
- [22] 董言治,尉志苹,沈同圣. 高盐雾条件下舰船设备的腐蚀防护研究进展[J]. 现代涂料与涂装, 2003, 3: 35-38.  
Dong Y Z, Wei Z P, Shen T S. Research progress on corrosion protection of ship equipment under high salt fog conditions[J]. Modern Paint and Coating, 2003, 3: 35-38 (in Chinese).
- [23] 张友兰,李树华. 海洋环境条件对机载电子设备的影响[C]:1998电子产品防护技术研讨会,中国江西庐山,1998:85-91.  
Zhang Y L, Li S H. Impact of marine environmental conditions on airborne electronic equipment[C]//1998 Seminar on Electronic Product Protection Technology, Lushan, Jiangxi, China, 1998:85-91(in Chinese).
- [24] 周家胜,王慧,周涛. 炮弹在海洋环境下适应性分析及对策[J]. 兵工自动化, 2017, 36(3):81-83.  
Zhou J S, Wang H, Zhou T. Analysis on the Adaptability of Projectiles in the Marine Environment and the Countermeasures[J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36 (3):81-83(in Chinese).
- [25] 石娇,曲彦平. 耐海洋环境中霉菌腐蚀有机涂层的研究[J]. 表面技术, 2011, 40(1):56-58.  
Shi J, Qu Y P. Study on organic coatings resistant to mold corrosion in marine environment[J]. Surface Technology, 2011, 40(1):56-58(in Chinese).
- [26] 陈丹明,李明,李维保. A04-60氨基烘干磁漆抗霉性能研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2):25-29.  
Chen D M, Li M, Li W B. A04-60 Study on Anti-mildew Properties of Amino Drying Magnetic Varnish[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12 (2): 25-29 (in Chinese).
- [27] 夏越美,傅耘. 电子产品常用有机涂层防霉特性研究[J]. 装备环境工程, 2007, 4(2):32-35.  
Xia Y M, Fu Y. Study on Anti-mildew Properties of Common Organic Coatings for Electronic Products[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(2):32-35(in Chinese).
- [28] 张颖,黄永捷,王文明. N-TiO<sub>2</sub>涂料对甲醛降解与霉菌抑制的研究[J]. 中国环保产业, 2016, 2:25-27.  
Zhang H, Huang Y J, Wang W M. Study on the degradation of formaldehyde and mold inhibition by N-TiO<sub>2</sub> coatings[J]. China Environmental Protection Industry, 2016, 2:25-27(in Chinese).
- [29] 王政芳,罗广建,陈海生. 无机硅酸盐涂料的研制及应用[J]. 广州化学, 2014, 39(3):1-6.  
Wang Z F, Luo G J, Chen H S. Development and Application of Inorganic Silicate Coatings[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 39(3):1-6(in Chinese).
- [30] 原瑞霞. 电沉积法制备氧化亚铜及其防微生物附着研究[D]. 山东青岛:中国海洋大学, 2014.  
Yuan R X. Preparation of Cuprous Oxide by Electrodeposition and Its Antimicrobial Adhesion [D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China, 2014(in Chinese).
- [31] 盛国华. 日本开发金属镀膜抗菌技术[J]. 食品工业科技, 2002, 23(5):43.  
Sheng G H. Japan develops antibacterial technology for metal coatings[J]. Science and Technology of Food Industry, 2002, 23(5):43(in Chinese).
- [32] 赵立华,段渝平. 高强度合金结构钢与高强度铝合金防护层的耐霉性研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12 (4):82-88.  
Zhao L H, Duan Y P. Study on the mildew resistance of the protective layer of high-strength alloy structural steel and high-strength aluminum alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12 (4): 82-88 (in Chinese).
- [33] 夏玲玲. 新防护性镀层Zn-Ni(锌/镍)合金工艺研究[J]. 材料保护, 2013, 46(8):44-46.  
Xia L L. Research on New Protective Coating Process of Zn-Ni (Zn / Ni) Alloy[J]. Materials Protection, 2013, 46 (8):44-46(in Chinese).
- [34] 谭生,郭军红,崔锦峰. 抗菌涂料的研究现状及发展趋势[J]. 中国涂料, 2011, 26(2):16-20.  
Tan S, Guo J H, Cui J F. Research Status and Development Trend of Antibacterial Coatings[J]. China Coatings, 2011, 26(2):16-20(in Chinese).