

冷颜料在红外隐身涂料中的应用

叶圣天¹, 成声月², 刘朝辉¹, 王飞¹, 贾艺凡¹

(1. 中国人民解放军后勤工程学院 化学与材料工程系, 重庆 401311;

2. 中国人民解放军 92493 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: **目的** 通过冷颜料降低目标的表面温度,起到红外隐身的作用。**方法** 采用 XRD 衍射仪和紫外/可见光/近红外分光光度计等,分析颜料的相结构及近红外光谱特性。采用红外辐射率测量仪、紫外/可见光/近红外分光光度计和红外灯模拟太阳光照射,分析涂层的红外发射率及反射隔热性能。**结果** 与炭黑颜料相比,铁铬黑颜料的近红外平均反射率为 57%,且反射光谱与叶绿素基本一致;当填料质量分数为 10% 时,铁铬黑涂层的近红外反射率最大,平均反射率为 39.2%,红外发射率为 0.91;20% (质量分数) 炭黑涂层和 10% (质量分数) 铁铬黑涂层相比,铁铬黑涂层的反射隔热效果明显,其平衡温度较普通炭黑涂层低 8.8 ℃。**结论** 红外隐身材料应考虑颜料对涂层红外发射率的影响,在满足涂层颜色的条件下尽量控制颜料的添加量,实际应用中以颜料添加 10% (质量分数) 为宜,在满足涂层反射隔热要求的同时,保证了涂层的红外发射率。

关键词: 红外隐身; 冷颜料; 铁铬黑; 红外发射率; 近红外反射率; CIE 色度值

中图分类号: TQ637 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)02-0139-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.02.022

Application of Cold Pigments in Infrared Stealth Coatings

YE Sheng-tian¹, CHENG Sheng-yue², LIU Zhao-hui¹, WANG Fei¹, JIA Yi-fan¹

(1. Department of Chemistry & Materials, PLA Logistic Engineering University, Chongqing 401311, China;

2. 92493 Unit of PLA, Huludao 125001, China)

ABSTRACT: **Objective** To explore the application of cold pigments in the infrared stealth coatings and reduce the surface temperature so as to achieve infrared stealth. **Methods** XRD diffraction and ultraviolet/visible/near infrared spectrophotometer were used to analyze the phase structure and the near infrared spectral characteristics of pigments. The infrared emissivity measurement instrument, the ultraviolet/visible/near infrared spectrophotometer and the infrared lamp simulating sunlight experiment were applied to analyze the infrared emissivity of coatings and the properties of reflectance in heat insulation. **Results** Compared with the C black pigments, FeCr black pigments had excellent NIR reflectance, its average NIR reflectance was 57% and its reflectance spectral was

收稿日期: 2015-10-26; 修订日期: 2015-12-09

Received: 2015-10-26; Revised: 2015-12-09

基金项目: 全军后勤科研计划项目(BY115C007)

Fund: Supported by Logistical Scientific Research Projects of Army(BY115C007)

作者简介: 叶圣天(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为红外隐身材料。

Biography: YE Sheng-tian(1992—),Male,Master graduate student,Research focus:infrared stealth materials.

通讯作者: 刘朝辉(1965—),男,教授,博士,主要从事红外隐身技术研究。

Corresponding author: LIU Zhao-hui(1965—),Male,Professor,Ph. D.,Research focus:infrared stealth technology.

in accordance with chlorophyll. When the filler content was 10%, FeCr coatings had the best NIR reflectance, which was 39.2%, and the infrared emissivity was 0.91. Compared with 20% C coatings and 10% FeCr coatings, the reflection effect of FeCr coatings was obvious and the equilibrium temperature was 8.8 °C lower than C coatings. **Conclusion** Considering the infrared emissivity of pigments and the need of the color, the content of pigments should be controlled. It was advisable to add 10% mass fraction of pigments to meet the requirements of reflective insulation property and the infrared emissivity. Therefore, cold pigment has a certain practical application value and significance.

KEY WORDS: infrared stealth; cold pigments; FeCr black; infrared emissivity; NIR reflectance; CIE colorimetric data

红外探测手段的多样化和探测精度的提高使军事目标的生存受到严重威胁,为了提高军事目标的战场生存能力,各军事强国都投入大量科研力量进行红外隐身研究。为了达到红外隐身的目的,在目标表面应用红外隐身材料是最为常见的一种方法,红外隐身材料能够利用自身材料的特性降低目标的红外辐射量,减弱目标被探测和识别的概率,从而减少目标被打击的可能性^[1-2]。目标的红外辐射量由 Stefan-Boltzmann 定律决定^[3]:

$$W = \sigma \varepsilon T^4 \quad (1)$$

式中: W 为目标的红外辐射量, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, ε 为目标的红外发射率, T 为表面温度。

目前,红外隐身材料的研究主要围绕降低涂层的红外发射率,文献[4]、[5]认为低发射率涂层中基体树脂应使用高红外透过性、低吸收率的基体树脂,以丙烯酸树脂和聚氨酯为宜。文献[6]、[7]对金属填料的粒径、形貌、形态、导电性等因素对红外发射率的影响进行了报道。文献[8]、[9]制备了不同红外发射率梯度的低发射率涂层,测试了涂层的红外隐身性能,并对制备工艺进行了优化。关于如何降低目标表面温度,尤其是利用冷颜料增加涂层太阳光反射率达到降低表面温度的研究较少。冷颜料是一种无机金属混合氧化物,在制备过程中通过高温煅烧等方法增加其在可见光及近红外光区的反射率,达到降温的效果^[10-13];冷颜料最初应用在建筑节能方面,能够降低空调等的能耗^[14],但是在红外隐身方面的应用研究未见文献报道。本文系统对比铁铬黑冷颜料和普通炭黑颜料的反射隔热性能,分别从粒径分布、相结构、红外发射率、近红外反射率等方面进行详细表征、测试和分析,最后以黑色颜料为填料、水性丙烯酸树脂为成膜物制备涂层,并利用红外灯模拟太阳光测试涂层的反射隔热性能。

1 实验

实验原材料为水性丙烯酸树脂(珠海吉力化工有

限公司)、铁铬黑冷颜料(湖南巨发科技有限公司)、普通炭黑颜料(广州市宏特化工科技有限公司)、200目铝粉(东莞市长安德联工艺品辅料行)、分散剂(南京道宁化工有限公司)、消泡剂(广州易通高分子材料有限公司)、钢板(市售)等。

为了提高颜料在涂料中的分散性,将黑色颜料和去离子水按照质量比 1 : 1 混合,加入适量的消泡剂和分散剂,控制砂磨机的转速为 800 r/min,砂磨 15 min 后得到黑色色浆。对基材进行砂纸打磨、水洗、化学除油、烘干预处理,混合颜料色浆和水性丙烯酸树脂,分散机的转速为 400 r/min,分散 5 min,加入适量的消泡剂,在相同的转速下继续分散 5 min,制得涂料。控制适当的喷涂压力和速度,喷枪与基材保持垂直且相距 30 cm,在钢材上均匀喷涂涂料,涂层厚度为 40 μm ,自然条件下养护干燥。

采用日本岛津的 XRD-6100 型 X 射线衍射仪分析颜料的相结构。采用日立公司的 U-4100 紫外/可见光/近红外分光光度计测试粉体及涂层的近红外反射曲线。采用德国尼克斯的 QNIX4500 涂层测厚仪测量涂层厚度。采用上海汉谱光电科技有限公司的 HP-200 精密色差仪分析涂层的颜色。采用北方驰宏光电有限公司的 HWF-2 型红外辐射率测量仪测试涂层在 8 ~ 14 μm 波段的红外发射率。参照《HC/T 4341—2012 金属表面用热反射隔热涂料》测试涂层的反射隔热效果^[15]。

2 结果与讨论

2.1 颜料基本性能分析

2.1.1 XRD 分析

图 1 为铁铬黑颜料的 XRD 图谱,从图中可以看出,该颜料为 Cr、Fe 混相掺杂氧化物,在 24.4°、33.4°、35.9°、41.2°、49.9°、54.6°、62.8°、64.5°处有强烈的衍射峰,说明经高温煅烧制备的颜料结晶度较

好。通过对比粉末衍射卡片,得出该颜料的主晶相为 $\text{Cr}_{1.3}\text{Fe}_{0.7}\text{O}_3$, 晶体类型为尖晶石型结构。

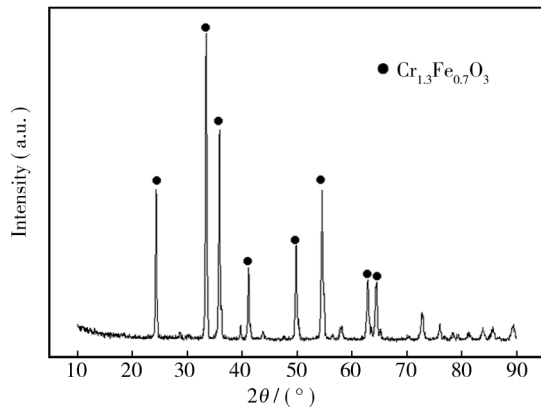


图 1 铁铬黑颜料的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of FeCr pigments

2.1.2 近红外光谱特性分析

对炭黑和铁铬黑颜料的近红外反射特性进行分析,图 2 为两种样品以及自然绿叶(叶绿素)在近红外波段(700~2500 nm)的反射图谱。从图中可知,铁铬黑颜料具有更优异的光谱反射特性,样品的光谱反射率随着波长的增加而增加,在 1455 nm 和 1925 nm 处出现光谱反射峰,说明在此处有较强的反射特性;而炭黑颜料在整个近红外波段的反射率波动较小,始终维持在 3% 左右。考虑到颜料的近红外伪装特性,对比炭黑颜料、铁铬黑颜料与自然绿叶(叶绿素)的近红外反射光谱,炭黑的近红外反射光谱与叶绿素相差很大,不利于实现近红外隐身;而铁铬黑颜料的光谱近红外反射率略高于叶绿素,变化趋势与叶绿素一致,利于提高其近红外伪装特性。表 1 为炭黑和铁铬黑颜料在近红外波段光谱反射率的最值及平均值。

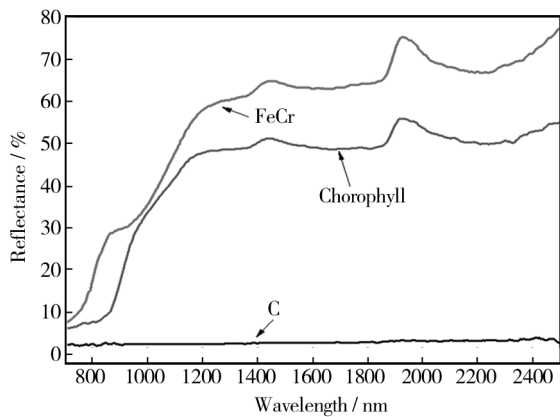


图 2 炭黑、铁铬黑颜料和叶绿素的近红外反射图谱
Fig. 2 NIR reflectance spectra of C and FeCr pigments and chlorophyll

表 1 颜料的光谱反射率

Tab. 1 The reflectance of C and FeCr pigments and chlorophyll

	Average reflectance/%	Max reflectance /%	Min reflectance/%
C	57.0	77.0	7.5
FeCr	2.8	3.8	1.9
Chlorophyll	43.6	55.8	6.1

2.2 涂层性能分析

2.2.1 色差分析

分别以炭黑和铁铬黑为填料,水性丙烯酸树脂为成膜物,制备了不同含量(填料质量分数分别为 5%, 10%, 15%, 20%)的涂层,并利用精密色差仪测试涂层的 CIE1976($L^*a^*b^*$)色度值,见表 2。可以看出,随着填料添加量的增加,炭黑涂层的明度(L^*)逐渐降低,色彩参数(a^*b^*)变化较小,而填料的添加量对铁铬黑涂层的色度影响不大。GJB 798—1990《伪装涂料漆膜颜色》^[16]中规定黑色涂层的 CIE1976($L^*a^*b^*$)为 29.1、0.2、0.4,要求色差不大于 $3L^*a^*b^*$ 单位,铁铬黑涂层的颜色满足国军标要求。

表 2 颜料添加量对涂层色度值的影响

Tab. 2 The influence of pigment content on CIE colorimetric data of coatings

Content	C Coatings			FeCr Coatings		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
5	27.76	-0.44	-1.41	28.18	1.27	-0.71
10	26.35	-0.38	-1.60	27.77	1.61	-0.68
15	25.79	-0.67	-1.35	27.94	2.34	-0.13
20	25.74	-0.50	-1.65	28.14	2.42	-0.12

2.2.2 红外发射率分析

本文分析了涂层的红外发射率,并与金属填料(铝粉)涂层的红外发射率作对比。图 3 表示了涂层发射率随填料含量的变化。从图中可知,随着填料含量的增加,三种涂层的红外发射率均逐渐减小,其中铝粉涂层的红外发射率最低达 0.59,但炭黑涂层和铁铬黑涂层始终保持在较高的水平且不低于 0.85。这是因为成膜树脂、炭黑和铁铬氧化物的红外发射率均较高,对于降低涂层的红外发射率没有帮助。对比炭黑和铁铬黑两种涂层,铁铬黑涂层的红外发射率略高于炭黑涂层,在 8~14 μm 波段的高红外发射率有助于将热量以热辐射的方式散射掉,但同时也会增加

被红外探测的可能性,不利于红外隐身。因此,颜料在红外隐身涂料中的应用应综合考虑近红外反射率和红外发射率,应以金属填料为主,降低涂层的红外发射率,再选取合适的着色颜料添加量,满足涂层伪装颜色要求。

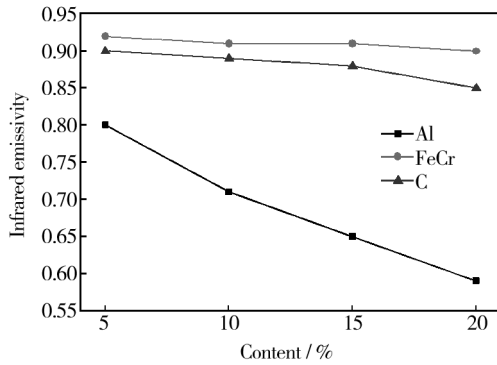


图3 颜料添加量对涂层红外发射率的影响

Fig. 3 The influence of pigment content on infrared emissivity of coatings

2.2.3 近红外反射特性分析

图4和图5分别为炭黑涂层和铁铬黑涂层的近红外反射光谱,从图中可知,涂层的近红外反射率曲线变化与粉体反射图谱变化大致一样,铁铬黑涂层的近红外反射率远高于炭黑涂层,不同颜料含量的炭黑涂层和铁铬黑涂层的近红外平均反射率见表3。与图2中叶绿素近红外反射曲线对比,铁铬黑涂层在1700、2150、2250~2500 nm处有较强的吸收峰,这是由于成膜树脂在近红外波段的吸收所致,对比4种不同的填料添加量,当铁铬黑的质量分数为10%时,涂层具有最高的反射率,其近红外波段的平均反射率为39.2%;炭黑涂层的近红外反射率变化不大,当炭黑的质量分数为20%时,涂层的近红外平均反射率最大,其值为4.4%。

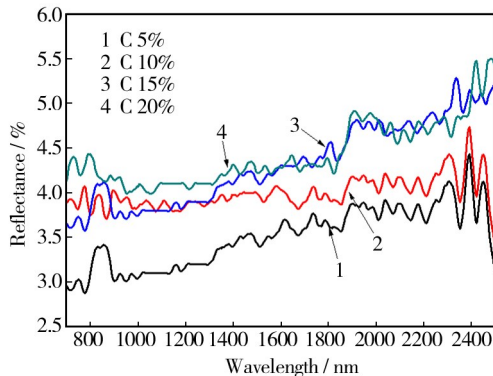


图4 炭黑涂层近红外反射光谱

Fig. 4 NIR reflectance spectra of C coatings

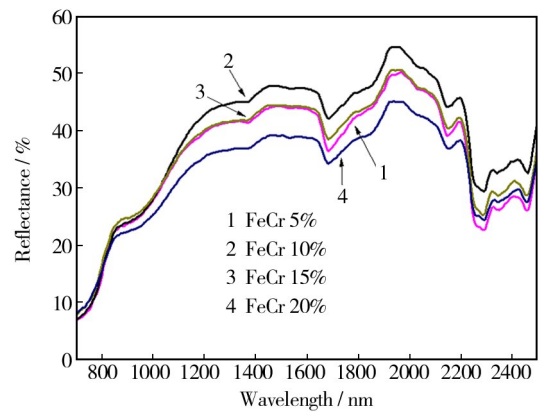


图5 铁铬黑涂层近红外反射光谱

Fig. 5 NIR reflectance spectra of FeCr coatings

表3 不同填料添加量的涂层的平均反射率

Tab.3 The average reflectance of coatings with different pigment contents

Content / %	Average Reflectance / %	
	C Coatings	FeCr Coatings
5	3.5	35.7
10	4.0	39.2
15	4.3	36.7
20	4.4	33.0

2.2.4 涂层反射隔热性能分析

分别选择近红外平均反射率较高的20%炭黑涂层和10%铁铬黑涂层,通过红外灯模拟太阳光,测试两种涂层的反射隔热性能,得到不同涂层样板底面的温度变化曲线如图6所示。从图中可以看出,炭黑涂层的平衡温度为71.9℃,而铁铬黑涂层的平衡温度为63.1℃,比普通炭黑涂层的平衡温度低8.8℃,反射隔热效果明显,说明铁铬黑颜料具有一定的实际应用价值,用于红外隐身涂料中利于降低目标的表面温

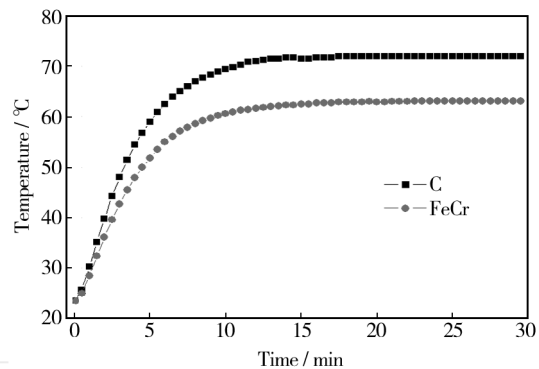


图6 涂层样板底面温度变化曲线

Fig. 6 The change curve of temperature in the model

度,降低目标的红外辐射量。

3 结论

1) 与炭黑颜料相比,铁铬黑颜料的近红外波段反射率有很大优势,其近红外平均反射率为57%,而炭黑的近红外平均反射率为2.8%;对比铁铬黑颜料和叶绿素的近红外反射曲线,两者的变化趋势基本一致,满足颜料的近红外伪装要求。

2) 铁铬黑涂层的红外发射率较金属填料涂层高,考虑到涂层红外隐身要求,应控制铁铬黑颜料的添加量,实际应用中以10%为宜。当填料添加量为10%时,铁铬黑涂层的近红外反射率最大,其平均反射率为39.2%,红外发射率为0.91,涂层颜色也满足伪装颜色要求。

3) 对比20%炭黑涂层和10%铁铬黑涂层,通过红外灯模拟太阳光测试两种涂层的反射隔热性能,铁铬黑涂层的反射隔热效果明显,其平衡温度较普通炭黑涂层低8.8℃,对提高目标的红外隐身能力有实际应用意义。

4) 铁铬黑涂层作为红外隐身材料,能够满足涂层在可见光和红外波段的隐身要求,但在近红外波段,由于基体树脂的影响,涂层的反射曲线较叶绿素存在一些差异,需要进一步改进。

参考文献

- [1] 成声月,刘朝辉,邓智平,等. 军用目标红外辐射特征研究进展[J]. 红外技术,2014,36(7):577—581.
CHENG Sheng-yue, LIU Zhao-hui, DENG Zhi-ping, et al. Research Progress on Infrared Characteristic of Military Target[J]. Infrared Technology, 2014, 36(7):577—581.
- [2] 陈秦,翁小龙. 外军装备目标特征信号测试设备及其特性研究[J]. 表面技术,2013,42(6):92—96.
CHEN Qin, WENG Xiao-long. Test Device Study of Foreign Military Equipment Target Characteristic Signatures[J]. Surface Technology, 2013, 42(6):92—96.
- [3] 付伟. 红外隐身原理及其应用技术[J]. 红外与激光工程,2002,31(1):88—93.
FU Wei. Principle and Application Technology of IR Stealth[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(1):88—93.
- [4] 李靖宇,杜仕国,施冬梅,等. 红外隐身涂料粘合剂的研究进展[J]. 表面技术,2009,38(4):72—74.
LI Jing-yu, DU Shi-guo, SHI Dong-mei, et al. Development of the Adhesive of Infrared Stealth Coating[J]. Surface Technology, 2009, 38(4):72—74.
- [5] SHAO C, XU G, SHEN X, et al. Infrared Emissivity and Corrosion-resistant Property of Maleic Anhydride Grafted Ethylene-propylene diene Terpolymer (EPDM-g-MAH)/Cu Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(24):4075—4080.
- [6] YU H, XU G, SHEN X, et al. Effects of Size, Shape and Floatage of Cu Particles on the Low Infrared Emissivity Coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 66(2):161—166.
- [7] YAN X, XU G. Effect of Surface Modification of Cu with Ag by Ball-milling on the Corrosion Resistance of Low Infrared Emissivity Coating[J]. Materials Science and Engineering: B, 2010, 166(2):152—157.
- [8] 成声月,刘朝辉,叶圣天,等. 水性红外迷彩涂料的制备及其表征[J]. 红外与激光工程,2015,44(8):2298—2304.
CHENG Sheng-yue, LIU Zhao-hui, YE Sheng-tian, et al. Preparation and Characterization of Water-based Infrared Camouflage Coatings[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(8):2298—2304.
- [9] 成声月,刘朝辉,叶圣天,等. 水性红外隐身涂料制备工艺优化[J]. 表面技术,2015,44(8):71—75.
CHENG Sheng-yue, LIU Zhao-hui, YE Sheng-tian, et al. Investigation for Preparation Process Optimizing of Water-based Infrared Stealth Coatings[J]. Surface Technology, 2015, 44(8):71—75.
- [10] 张捷,魏子栋,王春辉,等. 掺杂氧化铬颜料的红外反射特性研究[J]. 无机材料学报,2010(12):1303—1306.
ZHANG Jie, WEI Zi-dong, WANG Chun-hui, et al. Near Infrared Reflectance of the Doped Cr₂O₃ Pigment[J]. Journal of Inorganic Materials, 2010, 25(12):1303—1306.
- [11] 张潇予,张玉军,龚红宇,等. 纳米高近红外反射颜料制备工艺研究[J]. 人工晶体学报,2013,42(3):482—486.
ZHANG Xiao-yu, ZHANG Yu-jun, GONG Hong-yu, et al. Preparation of High Near-infrared Reflective Nano Pigments[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(3):482—486.
- [12] 朱洪立,于名讯,张玉军,等. 高近红外反射颜料 Y_{6-x}Si_xMoO_{12+x}的制备及其性能研究[J]. 稀有金属,2014,38(4):660—665.
ZHU Hong-li, YU Ming-xun, ZHANG Yu-jun, et al. Preparation and Characterization of Y_{6-x}Si_xMoO_{12+x} Composite Pigments with High Near-infrared Reflectance[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(4):660—665.
- [13] THONGKANLUANG T, CHIRAKANPHAISARN N, LIMSUWAN P. Preparation of NIR Reflective Brown Pigment[J]. Procedia Engineering, 2012, 32:895—901.

(下转第180页)

- LI Bing-zhong, WANG Chang-hui, DONG Zhi-hong, et al. Corrosion Resistance of Arc-sprayed Pseudo Zn-Al Alloy Coating[J]. Materials Protection, 2008, 41(4): 31—32.
- [4] 边飞龙, 黄燕滨, 时小军, 等. 海洋环境下螺纹紧固件复合防腐技术[J]. 电镀与涂饰, 2010, 29(10): 64—66.
- BIAN Fei-long, HUANG Yan-bin, SHI Xiao-jun, et al. Composite Corrosion Protection Technique for Threaded Fasteners in Marine Environment[J]. Electroplating & Finishing, 2010, 29(10): 64—66.
- [5] 舒畅, 刘彬, 周漪. 锌铝/富铝复合涂层在海洋环境中的耐蚀性研究[J]. 表面技术, 2012, 41(5): 56—59.
- SHU Chang, LIU Bin, ZHOU Yi. Research on Corrosion Resistance of Zn-Al/Rich-Al Composite Coatings in Marine Environment[J]. Surface Technology, 2012, 41(5): 56—59.
- [6] 陈伟, 唐凌燕, 周英. 锌镍合金镀工艺优化及镀层耐腐蚀性的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 110—114.
- CHEN Wei, TANG Ling-yan, ZHOU Ying, et al. Research on Process Optimization of Zn-Ni Alloy Plating and Coating Corrosion Resistance [J]. Surface Technology, 2015, 44(2): 110—114.
- [7] 王艳艳, 舒畅, 李超. 自然环境谱转化为加速试验环境谱的方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 34—38.
- WANG Yan-yan, SHU Chang, LI Chao. Method for Conversion of Natural Environmental Spectra to Accelerated Test Environmental Spectra[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 34—38.
- [8] 王凤平, 张学元, 杜元龙. 大气腐蚀研究动态与进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(2): 104—108.
- WANG Feng-ping, ZHANG Xue-yuan, DU Yuan-long. The Review of Atmospheric Corrosion Research [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2000, 12(2): 104—108.
- [9] 林翠, 王凤平, 李晓刚. 大气腐蚀研究方法进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2004, 24(4): 249—256.
- LIN Cui, WANG Feng-ping, LI Xiao-gang. The Progress of Research Methods on Atmospheric Corrosion[J]. Journal of Chinese Society on Corrosion and Protection, 2004, 24(4): 249—256.
- [10] 陈川, 黄海军, 王俊, 等. 我国湿热海上风电大气区金属重防腐涂层的性能研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 89—94.
- CHEN Chuan, HUANG Hai-jun, WANG Jun, et al. Performance of Metal Heavy-duty Coating in Atmospheric Zone of Humid-hot Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 89—94.
- [11] 钱建才, 许斌, 邹洪庆, 等. 2A12 铝合金硬质阳极氧化及膜层性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(5): 37—41.
- QIAN Jian-cai, XU Bin, ZOU Hong-qing, et al. Preparation and Properties of Hard Anodic Oxide Coating on 2A12 Aluminium Alloy [J]. Surface Technology, 2014, 43(5): 37—41.
- [12] 张琳, 王振尧, 赵春英, 等. 碳钢和耐候钢在盐雾环境下的腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 1—6.
- ZHANG Lin, WANG Zhen-yao, ZHAO Chun-ying, et al. Study on Corrosion Behavior of Carbon Steel and Weathering Steel in Salt Spray Test [J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 1—6.
- [13] 陈月华, 江德凤, 刘永永. 金属镀金外壳抗盐雾腐蚀工艺的改进[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 93—97, 132.
- CHEN Yue-hua, JIANG De-feng, LIU Yong-yong. Improvement of Anti-spray-salt Corrosion Mechanism of Metal Shells [J]. Surface Technology, 2015, 44(6): 93—97, 132.
- [14] 刘峰, 宋弘清, 黄政然, 等. 沿海地区输电铁塔防护涂层耐腐蚀性能研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 76—81, 88.
- LIU Feng, SONG Hong-qing, HUANG Zheng-ran, et al. Anti-corrosion Properties of Protective Coatings for Transmission Line Iron Tower in Coastal Area [J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 76—81, 88.
- [15] GJB 150. 11A—2009, 军用装备环境试验方法 第 11 部分 盐雾试验[S].
- GJB 150. 11A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel —Part 11 Salt Fog Test[S].
- [16] 王秀静, 陈克勤, 张炬. 金属大气暴露与模拟加速腐蚀结果相关性探讨[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 94—98.
- WANG Xiu-jing, CHEN Ke-qin, ZHANG Ju. Investigation on Correlation of Atmospheric Exposure Test and Accelerated Corrosion Test of Metals [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 94—98.
- [17] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
- WANG Xue-hua. Natural Environmental Test Technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.

(上接第 143 页)

- [14] 毕爱红, 朱金华, 文庆珍. 颜填料对涂料降温性能的影响[J]. 红外技术, 2007, 29(4): 215—217.
- BI Ai-hong, ZHU Jin-hua, WEN Qing-zhen. Effects of Pigments and Extenders on the Temperature-fall Performance [J]. Infrared Technology, 2007, 29(4): 215—217.
- [15] HG/T 4341—2012, 金属表面用热反射涂料[S].
- HG/T 4341—2012, Heat Reflecting Insulation Coating for Metal Surfaces[S].
- [16] GJB 798—1990, 伪装涂料漆膜颜色[S].
- GJB 798—1990, Colour for Films of Camouflage Paint[S].