

水性红外隐身涂料制备工艺优化

成声月^{1,2}, 刘朝辉¹, 叶圣天¹, 闫实¹, 阮峥¹, 班国东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** 优化水性红外隐身涂层材料制备工艺, 提高低发射率红外隐身涂料隐身性能。**方法** 采用红外辐射率测量仪、红外光谱吸收仪等, 研究涂层固化温度、涂层表面粗糙度和涂层厚度对低发射率红外隐身涂料隐身性能的影响。**结果** 固化温度对涂层红外发射率和基体树脂红外吸收光谱影响不大, 但随着固化温度升高, 涂层固化时间明显缩短; 随着涂层表面粗糙度的增加, 涂层红外发射率增加; 表面粗糙材料红外发射率受测试角度影响小于表面光滑材料; 在基材上制备不同厚度的涂层, 当涂层厚度小于 30 μm 时, 涂层红外发射率受基材表面红外发射率影响较大, 当大于 30 μm 时, 影响较小。**结论** 可以根据实际时间需求选择合适的涂层固化温度, 宜选择刮涂方式使涂层表面保持一定的粗糙度, 涂层厚度宜为 30 ~ 40 μm 。

关键词: 水性涂料; 红外隐身; 固化温度; 表面粗糙度; 涂层厚度

中图分类号: TQ637 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)08-0071-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.08.013

Investigation for Preparation Process Optimizing of Water-based Infrared Stealth Coatings

CHENG Sheng-yue^{1,2}, LIU Zhao-hui¹, YE Sheng-tian¹, YAN Shi¹, RUAN Zheng¹, BAN Guo-dong¹

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

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

ABSTRACT: **Objective** In order to promote the stealth performance of the low-emissivity infrared stealth coatings, the preparation process of water-based infrared stealth coatings was optimized. **Methods** Infrared emissivity measurement instrument, infrared spectrum analyzer and so on were used in this paper to study the effects of the curing temperature, surface roughness and coating thickness on the stealth performance of the low-emissivity infrared stealth coatings. **Results** Curing temperature had little effect on the emissivity of coatings and IR absorption spectrum of matrix resin, but the coating curing time obviously shortened with increasing curing temperature. The infrared emissivity increased with the increase of surface roughness. The test angle had larger influence on the infrared emissivity of materials with smooth surface than that of materials with rough surface. Coatings with different coating

收稿日期: 2015-05-02; 修订日期: 2015-06-12

Received: 2015-05-02; Revised: 2015-06-12

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTC2012gg-sfgc00002); 总后勤部预研项目

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of Chongqing(CSTC2012gg-sfgc00002) and the Pre-research Project of General Logistic Department

作者简介: 成声月(1989—), 男, 湖南人, 硕士研究生, 主要研究红外隐身涂料。

Biography: CHENG Sheng-yue(1989—), Male, Master graduate student, from Hunan, Research focus: infrared stealth coatings.

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

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

thickness were perpetrated on substrate, the infrared emissivity was obviously affected by the infrared emissivity of the substrate surface when the coating thickness was below 30 μm , but the influence was relatively small when the coating thickness was above 30 μm . **Conclusion** Proper curing temperature could be chosen according to the actual need of time. The process of blade coating should be chosen to keep a certain surface roughness. The coating thickness should be between 30 μm and 40 μm .

KEY WORDS: water-based coating; infrared stealth; curing temperature; surface roughness; coating thickness

红外制导武器和红外探测器等发现、识别目标主要依靠目标与背景之间的辐射能量差^[1],该能量差可以用辐射对比度 C 表示,即目标和背景辐射出射度差值与背景辐射出射度之比^[2]:

$$C = \frac{M_T - M_B}{M_B} \quad (1)$$

式中: M_T 为目标辐射出射度, M_B 为背景辐射出射度。

从式(1)可以看出,军用目标若要避免红外探测,需要降低目标与背景之间的红外辐射对比度。而军用目标红外辐射出射度大多高于背景环境,作业时更是如此,要实现目标红外隐身,必须降低其红外辐射能量,使之与背景相似^[3]。

根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律,物体在所有可能的方向和范围内辐射能量为^[2]:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

式中: E 为物体的总体辐射能量; ε 为物体表面的发射率; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; T 为目标的绝对温度。

由式(2)可知,降低目标自身辐射能量可以从降低表面温度和降低表面发射率着手。就军用装备而言,因自身功能需求限制,降低表面温度比较困难,主要隐身措施是降低其表面发射率,这可以通过在其表面涂覆低发射率涂层材料实现^[4-5]。

涂层材料红外发射率受原材料和制备工艺的影响。在先前的研究中,主要集中于讨论原材料筛选^[6-7]、颜填料改性^[8-9]和颜基比^[10-11]等因素对涂层材料发射率的影响,很少涉及制备工艺。为此,本文着重对水性涂层材料制备工艺进行优化,主要从固化温度、表面粗糙度和涂层厚度 3 个方面展开,为水性涂层材料在装备上的实际应用打下基础。

1 实验

实验所需的主要原料为:水性丙烯酸树脂(珠海吉力化工企业有限公司)、不同种类水性铝银浆(深圳耀德圣科有限公司)、消泡剂(广州市易通高分子材料有限公司)、分散剂(南京道宁化工有限公司)、羧甲

基纤维素醋酸丁酸酯(CMCAB)增稠剂(美国伊斯曼化学公司)和钢板(重庆昌越装饰工程有限公司)。

对钢板基材进行预处理,依次进行砂纸均匀打磨、水清洗、化学除油、水清洗,烘干备用。将称量好的填料和树脂放入分散罐中,并加入适量的分散剂和消泡剂,使用高速分散研磨机以 500 r/min 的转速分散 15 min,加入适量的增稠剂调节黏度使其达到制备方法的要求。按照 GB/T 1727—1992《漆膜一般制备方法》,分别采用喷涂、刮涂和刷涂在基材上制备涂层。制备时保持涂层为设定的厚度,并将制备好的涂层在设定的温度下固化。

采用 HWF-II 型红外辐射率测量仪(昆明物理研究所)测量涂层的红外发射率,测量时先设定黑体温度为 227 $^{\circ}\text{C}$ 。待黑体温度稳定后,插上 8~14 μm 滤波片,使用 3 块标准样板校准仪器,再测量样品红外发射率,每块样品测量 8 次,计算平均值。

采用傅里叶红外-拉曼光谱仪(美国 Waters 公司)测量基体树脂的红外吸收光谱。

参照 GB/T 1761—1979,采用磁性测厚仪(德国菲尼克斯 Surfix)测量涂层厚度。

2 结果和分析

2.1 固化温度对涂层红外发射率的影响

水性涂层材料一般采用低温固化,本文设定为 25, 50, 75, 100 $^{\circ}\text{C}$ 。以 200 目非浮铝为填料制备涂层,将涂层在不同的温度下固化。通过测量涂层红外发射率、红外吸收图谱和固化时间,选择最佳固化温度。表 1 为不同固化温度下涂层发射率与固化时间的关系。

从表 1 可以看出,随着固化温度的增加,涂层红外发射率基本没有改变,但固化时间明显缩短。由文献^[12]可知,在低温固化过程中,氧化反应对铝银浆填料影响较小,即随着固化温度改变,填料对涂层红外发射率基本没有影响,主要影响因素是涂层的基体树脂。本文将基体树脂在不同的温度下固化,进行红外分析,结果如图 1 所示。

表1 固化温度对涂层固化时间和发射率的影响
Tab.1 The influence of curing temperature on the infra-red emissivity and curing time of the coating

固化温度/℃	时间/h	红外发射率
25	3	0.770
50	2	0.768
75	1	0.770
100	0.5	0.769

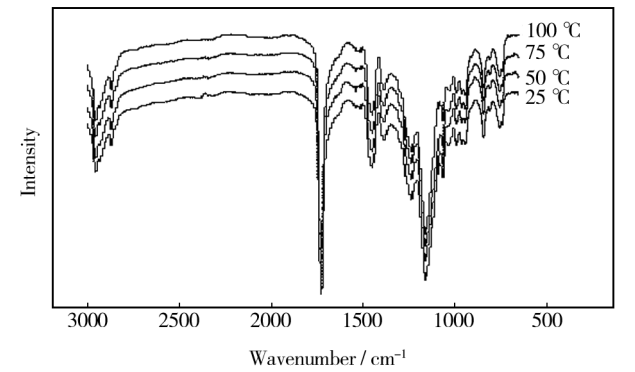


图1 不同固化温度下基体树脂红外吸收图谱
Fig.1 IR absorption spectra of matrix resin at different curing temperature

从图1可知,不同固化温度下,树脂红外吸收图谱基本相同,说明固化温度对基体树脂红外吸收影响很小,继而可以推断出固化温度对涂层红外发射率影响很小。虽然固化温度对柔性涂层材料的发射率没有较大的影响,但对固化时间影响较大。随着固化温度的升高,涂层的固化时间明显缩短,这对要在短时间内生产红外隐身材料,或战场中快速修补战损武器装备有着重要的指导作用。

2.2 表面粗糙度对涂层红外发射率的影响

在制备涂层的过程中,由于制备方法的差异而有不同的表面粗糙度,一般而言,喷涂、刮涂、刷涂对粗糙度的影响依次增大。本文分别以喷涂、刮涂和刷涂制备涂层,测得的红外发射率见表2。涂层中铝银浆质量分数为15%。

由表2可知,涂层红外发射率随着粗糙度的增大而增大。这是因为对于光滑表面,入射红外线只发生一次反射,涂层吸收的红外线较少;对凹凸不平的表面,入射红外线发生多次反射,涂层多次吸收红外线,这增加了涂层对红外线的吸收率,如图2所示。由基

表2 表面粗糙度对涂层红外发射率的影响
Tab.2 The influence of surface roughness on the infra-red emissivity of the coating

非浮铝银浆	涂层红外发射率		
	喷涂	刮涂	刷涂
200目	0.77	0.801	0.826
800目	0.813	0.843	0.865

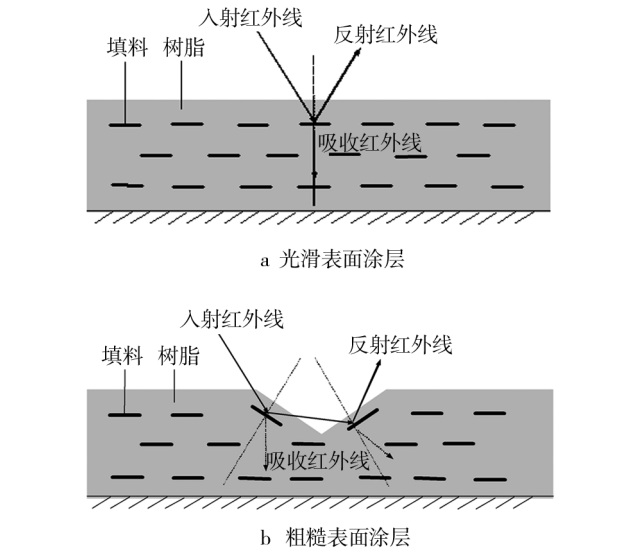


图2 表面粗糙度对涂层红外发射率影响示意图
Fig.2 The sketch map of the influence of surface roughness on the infrared emissivity of the coating

尔霍夫定律和能量守恒原理可知,在热平衡条件下,吸收率较高的物体必然有较低的反射率和较高的发射率^[2],即涂层吸收率增加导致涂层红外发射率增加。

另一种原因是,物体表面红外发射率与其表面粗糙度存在式(3)的关系,当表面粗糙度 Ra 增加时,涂层表面的反射率就会下降,从而导致表面红外发射率升高^[13]。

$$\varepsilon(\lambda)=1-\rho_r=1-\rho_p\exp\left[-\left(\frac{4\pi Ra}{\lambda}\right)^2\right]$$

(3)

式中: ρ_r 为粗糙表面反射率, ρ_p 为光滑表面反射率, Ra 为表面粗糙度, λ 为波长。

本文测试了不同粗糙度的材料在不同的方向下的红外发射率。试验方案参考文献^[14],将样品置于仪器托盘上,调节样品测试角,分别测试样品在 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° 下的红外发射率。其变化情况如图3所示,其中E1为帆布,E2为刀刮布,E3为不锈钢板。

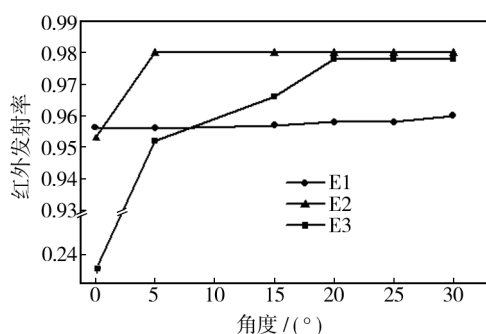


图3 材料红外发射率随角度变化

Fig. 3 The variation of materials' infrared emissivity with angle

由图3可以看出:1)不同测试角度对材料红外发射率有较大影响,随着测试角度加大,发射率均有增大的趋势;2)相比刀刮布和钢板,帆布表面红外发射率受测试角度的影响较小,原因是刀刮布和钢板表面很光滑,对外界红外反射主要表现为镜面反射,受测试角度影响较大;帆布表面粗糙,主要表现为漫反射,受测试角度影响较小。

分析以上结果可知,从降低涂层表面发射率的角度出发,其表面越光滑,发射率也越低。光滑表面对光线的反射是镜面反射,使得军用目标在某一特殊方向辐射强度增加,增加了目标被探测的可能性,为了保证军用目标对背景环境反射能量均衡,涂层表面应该保持一定的粗糙度,即在实际应用时宜选择刮涂方式。

2.3 涂层厚度对涂层红外发射率的影响

在制备涂层时,由于制备工艺的不同,会得到不同厚度的涂层。为确定最佳涂层厚度,本文以能测出表面涂层厚度的钢板为基材,以能在涂层表面形成金属反射膜而使得涂层红外发射率较低的浮型铝银浆为填料,采用喷涂法在基材上制备不同厚度的涂层,测得涂层红外发射率如图4所示。

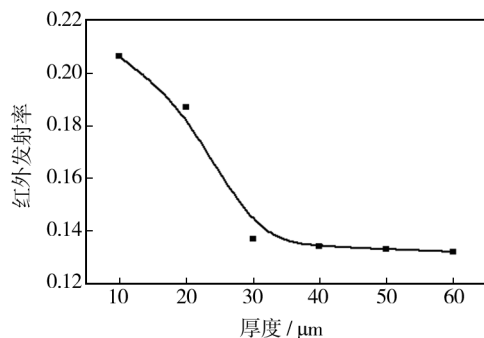


图4 涂层厚度对涂层红外发射率影响

Fig. 4 The influence of coating thickness on the infrared emissivity of the coating

从图4可以看出,当涂层厚度小于30 μm时,随着涂层厚度的增加,涂层红外发射率急剧下降;当涂层厚度大于30 μm后,涂层红外发射率基本不再有很大的变化。

由文献^[15]可知,涂层的红外发射率见式(4):

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{(1-\rho_e)(1-\rho_s e^{-2Ad})}{1-\rho_e \rho_s e^{-2Ad}} \quad (4)$$

式中: ρ_e 为涂层反射率, ρ_s 为基材反射率, d 为涂层厚度, A 为吸收系数。

在式(4)中,当 d 趋于无穷大时, e^{-2Ad} 趋于0,涂层的红外发射率为 $1-\rho_e$,即涂层红外发射率只受涂层本身影响,与基材无关。即当涂层小于30 μm时,涂层表面发射率受到基材发射率的影响;当涂层厚度大于30 μm后,涂层红外发射率由涂层本身决定。在实际应用时涂层厚度宜为30~40 μm。

3 结语

1) 固化温度对涂层红外发射率影响不大,但随着固化温度的提升,涂层固化时间明显缩短。

2) 随着涂层表面粗糙度增加,涂层红外发射率增加,为减少镜面反射引发的易探测性,可以采用刮涂来保持一定的粗糙度。

3) 当涂层厚度小于30 μm时,涂层发射率受基材影响较大;当大于30 μm后基本没有影响。实际应用时涂层厚度宜为30~40 μm。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张建奇. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2013.
ZHANG Jian-qi. Infrared Physics [M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science & Technology University Press, 2013.
- [3] 杨照金. 军用目标伪装隐身技术概论[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
YANG Zhao-jin. An Introduction to Military Target Stealth Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [4] 孙敏,于名讯. 隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社,

- 2013.
- SUN Min, YU Ming-xun. Stealth Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [5] 任登凤, 韩玉阁, 宣益民. 使用低发射率膜层的目标红外特性分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2916—2920.
- REN Deng-feng, HAN Yu-ge, XUAN Yi-min. Analysis on Infrared Signature of the Target with Low Emissivity [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 2916—2920.
- [6] 游毓聪, 杜仕国, 施冬梅, 等. 红外隐身涂料黏合剂的应用与研究[J]. 现代涂料与涂装, 2006, 9(7): 50—51.
- YOU Yu-cong, DU Shi-guo, SHI Dong-mei, et al. Application and Research of the Infrared Camouflage Coatings [J]. Modern Paint & Finishing 2006, 9(7): 50—51.
- [7] YU H, XU G, SHEN X, et al. Low Infrared Emissivity of Polyurethane/Cu Composite Coatings [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(12): 6077—6081.
- [8] 陈娇, 黄啸谷, 韩朋德, 等. Al/Cr₂O₃ 复合粒子的制备及其多波段兼容隐身性能的研究[J]. 无机材料学报, 2010, 25(12): 1298—1302.
- CHEN Jiao, HUANG Xiao-gu, HAN Peng-de, et al. Preparation and Multiple-band Stealth Properties of Al/Cr₂O₃ Composite Particles [J]. Journal of Inorganic Materials, 2010, 25(12): 1298—1302.
- [9] 黄啸谷, 陈娇, 李少炳, 等. 热处理温度对 Bi₂O₃/ATO 复合功能填料红外-可见光兼容隐身性能的影响[J]. 功能材料, 2012, 43(15): 2087—2090.
- HUANG Xiao-gu, CHEN Jiao, LI Shao-bing, et al. Effects of Heat Treatment Temperature on Infrared and Visible Light Stealth Properties of Bit Bi₂O₃/ATO Mixed Burning Filler [J]. Functional Materials, 2012, 43(15): 2087—2090.
- [10] HU C, XU G, SHEN X. Preparation and Characteristics of Thermal Resistance Polysiloxane/Al Composite Coatings with Low Infrared Emissivity [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486(1): 371—375.
- [11] YU H, XU G, SHEN X, et al. Corrosion Resistance and Infrared Emissivity Properties of EPDM (EPDM-g-MAH) Film on Low Infrared Emissivity PU/Cu Coating [J]. Electrochimica Acta, 2010, 55(5): 1843—1847.
- [12] 余慧娟. 低红外发射率涂层的制备及其耐腐蚀性能的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- YU Hui-juan. Study on Preparation and Corrosion Resistance of Low Emissivity Infrared Coatings [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [13] HE X, LI Y, WANG L, et al. High Emissivity Coatings for High Temperature Application: Progress and Prospect [J]. Thin Solid Films, 2009, 517(17): 5120—5129.
- [14] 胡晨. 3~5 μm 波段低发射率耐热型涂料研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- HU Chen. Research on Thermal Resistance Coatings with Low Infrared Emissivity in 3~5 μm [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [15] 徐文兰, 罗宁胜, 张珉, 等. 非均匀涂层的热辐射[J]. 红外与毫米波学报, 1990, 9(5): 384—388.
- XU Wen-lan, LUO Ning-sheng, ZHANG Min, et al. The Radiation of Inhomogeneous Coatings [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1990, 9(5): 384—388.

(上接第48页)

- ZHANG Xiao-feng, WANG Ai-hua, ZHANG Xiang-lin. Microstructure and Tribological Properties of Laser Cladding Ni₄₅-CaF₂-WS₂ Self-lubrication Coating [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(2): 215—220.
- [12] LIU W G, LIU X B, ZHANG Z G, et al. Development and Characterization of Composite Ni-Cr-C-CaF₂ Laser Cladding on γ-TiAl Intermetallic Alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 470: 25—28.
- [13] ZHANG S T, ZHOU J S, GUO B G, et al. Friction and Wear Behavior of Laser Cladding NiAl/hBN Self-lubricating Composite Coating [J]. Advance Tribology, 2010, 3: 442.
- [14] 李敏. Ti-3Al-2V 表面激光熔覆 Ti-BN 涂层的微观组织及反应行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- LI Min. Research on the Microstructure and Reactive Behavior of Ti-BN System by Laser Cladding on Ti-3Al-2V [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [15] 韩文静, 宋进朝. Ti-6Al-4V 合金表面激光熔覆 NiCrBSi-5% BN 涂层组织和性能[J]. 新产品新材料, 2011, 26(4): 51—54.
- HAN Wen-jing, SONG Jin-chao. Microstructure and Properties of Laser Cladding NiCrBSi+5% BN Coating on Ti-6Al-4V Alloy Surface [J]. New Products and New Material, 2011, 26(4): 51—54.