

8~14 μm 波段水性红外隐身涂料研究

叶圣天¹, 成声月², 刘朝辉¹, 王飞¹, 贾艺凡¹

- (1. 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: 从基体树脂、填料和涂层综合性能三方面对 8~14 μm 波段水性红外隐身涂料进行了研究。用红外发射率测量仪测量了涂层在 8~14 μm 波段的红外发射率, 用红外光谱仪测量了树脂红外吸收图谱, 用扫描电镜观察了涂层表面形貌。结果表明, 丙烯酸树脂在 8~14 μm 波段有较高的红外透明性, 适合做涂料基体树脂; 铝银浆能在涂层中形成致密的反射层, 适合做红外隐身涂料的填料; 填料的粒径、含量和形态都对涂层的发射率有较大的影响; 选用钢板为基材, 以丙烯酸树脂为基体树脂, 粒径 2 000 目、浮铝百分比为 50% 的铝银浆为填料, 当涂层中填料含量为 15% 时, 测得其发射率为 0.34。

关键词: 水性涂料; 红外隐身; 丙烯酸树脂; 铝银浆

中图分类号: TQ637 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0204004

Water-based infrared stealth coating in 8–14 μm wavebands

Ye Shengtian¹, Cheng Shengyue², Liu Zhaohui¹, Wang Fei¹, Jia Yifan¹

- (1. Department of Chemistry & Material, PLA Logistic Engineering University, Chongqing 401311, China;
2. Unit 92493 of PLA, Huludao 125001, China)

Abstract: Water-based infrared stealth coating in 8–14 μm wavebands was studied from three aspects, matrix resin, filler and the properties of coating. Infrared emissivity in 8–14 μm wavebands was measured by infrared emissometer, infrared absorption was measured by infrared spectrometer (IR), and the surface morphology of the coating was observed by scanning electron microscope (SEM). The results show that acrylic resin are infrared transparent in 8–14 μm wavebands and suitable for matrix resin; the aluminum paste with low infrared emissivity is easily disperse in water-based coating and suitable for filler. The size, content and form of filler are great influence on the emissivity of coating. Steel plate was chosen as a substrate, the acrylic resin as matrix resin. When the size of the aluminum paste is 2 000 mesh, the aluminum paste with 50% leafing aluminum is chosen as the filler, and the content of filler is 15%, the coating infrared emissivity is 0.34.

Key words: water-based coating; infrared stealth; acrylic resin; aluminum paste

收稿日期: 2015-06-17; 修订日期: 2015-07-03

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTC2012gg-sfgc00002)

作者简介: 叶圣天(1992-), 男, 硕士生, 主要从事红外隐身材料方面的研究。Email: 1129049096@qq.com

导师简介: 刘朝辉(1969-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事红外隐身技术方面的研究。Email: z_h_liu@163.com

0 引言

随着红外精确制导技术的发展, 战斗人员和装备受到红外侦视和打击的概率越来越高。为了提高人员生存能力和装备战斗力, 各国都加强了红外隐身材料的研究^[1-5]。红外隐身材料按使用方法可以分为涂覆型、结构型和遮障型, 其中涂覆型和遮障型材料具有伪装和撤收便捷, 人员装备可以通用等优点成为红外隐身材料中的主要组成之一^[6-7]。

目前研究的红外隐身涂料大多为溶剂型^[8-11], 但溶剂型涂料的操作不便、污染严重, 水性涂料必然是未来的发展趋势。国内鲜有对水性红外隐身涂层材料的报道, 文中从基体树脂、填料的筛选和涂料综合性能三个方面进行研究, 对水性红外隐身涂料的研究具有一定理论和实验基础指导。

1 实验

1.1 实验原料

丙烯酸树脂、聚氨酯、环氧树脂(珠海吉力化工企业有限公司); 铝银浆(深圳耀德圣科有限公司); 铝粉(天津市致远化学试剂有限公司); 铜粉(深圳耀德圣科有限公司); 铁粉(上海精细化工科技有限公司); 钢板等均市售。

1.2 涂层的制备

制备水性涂层前首先对基材(钢板)进行预处理: 砂纸均匀打磨→水清洗→化学除油→水清洗→烘干备用。然后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(SKL-FS400)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喷涂的要求。采用喷涂法(GB/T1727-1992《漆膜一般制备法》)在基体上喷涂制备涂层, 并保持涂层厚度为 30 μm 左右。在室温下干燥 5 h 制得涂层。

1.3 测试与表征

采用昆明物理研究所研制的 HWF-II 型红外辐射率测量仪测量涂层的红外发射率, 测量波段 8~14 μm; 采用 Waters 公司生产的傅里叶红外-拉曼光谱仪测量基体树脂的红外吸收光谱; 采用日立公司的 S-3700N 场发射扫描电子显微镜表征涂层形貌; 采用磁性测厚仪测量涂层厚度(GB/T1761-79)。

2 结果与讨论

2.1 基体树脂研究

研究表明, 涂料中基体树脂对红外线的吸收率占 60%~70%^[12], 所以低发射率涂层必须选用高红外透明性的基体树脂。现今使用最多的水性树脂主要有环氧树脂、聚氨酯和丙烯酸树脂。实验中将这三种树脂喷涂在钢板基材上, 测量树脂在 8~14 μm 波段红外发射率, 同时取部分树脂涂层测量其红外吸收光谱。

从表 1 基体树脂红外发射率可以看出, 相比环氧树脂和聚氨酯, 丙烯酸树脂红外透明性较高, 适合做红外隐身涂料基体树脂。原因可以从图 1~3 三种树脂红外图谱分析得出。强吸收峰对基体树脂红外发射率有重要的影响, 强吸收峰越多则树脂发射率越高。在

表 1 不同树脂的红外发射率

Tab.1 Infrared emissivity of different matrix resins

Adhesives	Epoxy	Polyurethane	Acrylic
Infrared emissivity	0.95	0.91	0.90

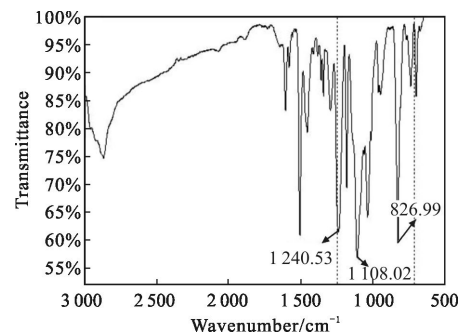


图 1 环氧树脂红外图谱

Fig.1 IR spectrum of epoxy resin

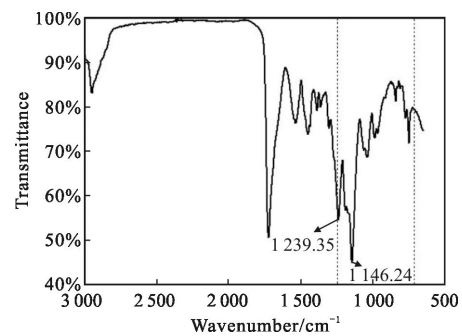


图 2 聚氨酯红外图谱

Fig.2 IR spectrum of polyurethane resin

8~14 μm(715~1 250 cm⁻¹)波段,环氧树脂强吸收峰较多,如在 826 cm⁻¹有苯环强吸收,在 1 108.02 cm⁻¹有 C-O 伸缩振动峰,在 1 240.53 cm⁻¹醚基吸收峰;聚氨酯强吸收峰数量次之,如在 1 146.24 cm⁻¹有醚基强吸收峰,在 1 239.35 cm⁻¹酯键吸收峰;丙烯酸树脂强吸收峰较少,只有在 1 159.02 cm⁻¹存在酯键强吸收峰。

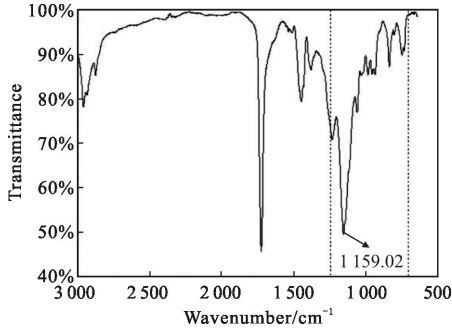


图 3 丙烯酸树脂红外图谱

Fig.3 IR spectrum of acrylic resin

2.2 填料研究

2.2.1 金属填料种类对涂层红外发射率的影响

根据基尔霍夫定律,对于不透明物体,透射率为零,物体反射率与吸收率之和为 1,而在热平衡条件下,物体的发射率等于其吸收率,即好的反射体必是弱的发射体^[13]。金属材料大都在红外波段具有较高的红外反射率,以金属材料为填料可以制备低发射率红外隐身涂料。将质量分数为 15%,粒径为 200 目的不同金属粉末与基体树脂制备涂层,测得其红外发射率如表 2 所示。

表 2 不同金属填料涂层的发射率

Tab.2 Infrared emissivity of coating of different metal filler

Filler metal	Aluminum powder	Iron powder	Copper powder	Aluminum paste
Infrared emissivity	0.879	0.906	0.886	0.77

从表2可以看出,以铁粉、铜粉为填料制备的涂层发射率比以铝粉为填料都高,而且片状铝银浆比球状铝粉具有更低的红外发射率。原因是片状结构的铝银浆更易在涂层中形成致密的反射层而使涂层的红外发射率更低。

2.2.2 金属填料粒径对涂层红外发射率的影响

红外线在涂层内部主要发生反射、透射、散射和

吸收四种现象。对于不透明的金属填料而言,影响其红外性能主要是反射和散射,这两种现象与填料的粒径都有直接的关系。实验测试了 200 目、400 目、800 目、1 000 目、1 200 目、2 000 目和 10 000 目这 7 种粒径在不同质量分数下涂层的红外发射率,结果如图 4 所示。

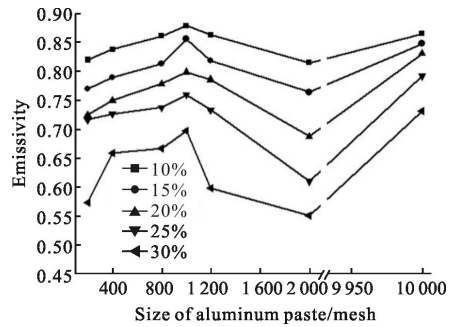


图 4 铝银浆粒径对涂层红外发射率的影响

Fig.4 Influence of aluminum paste's size on the infrared emissivity of coating

孙汉东等^[14]通过考虑涂层的吸收系数、散射系数和折射率等得出涂层发射率表达式为:

$$\epsilon(\lambda) = 1 - \rho_e \frac{1 - \rho_e^2}{1 - \rho_e + \frac{2n^2}{\sqrt{(A+2S)/A} - 1}} \quad (1)$$

式中:ρ_e表示涂层表面的反射率;A为吸收系数;S为散射系数;n为涂层折射率。通过该式可知,对于红外隐身涂层,应具有较高的反射系数和散射系数。在 200~1 000 目时,此粒径段填料粒径较大,涂层红外发射率主要受涂层中填料反射的影响,随着填料粒径的减小,填料越接近球形,反射率减小而致使涂层红外发射率增加;1 200~2 000 目时,填料粒径与红外波波长(8~14 μm)相当,此粒径范围散射机制主要为 Mie 散射^[15-16],涂层红外发射率主要受填料散射率增加而导致涂层红外发射率较低;当粒径在 10 000 目时,填料比表面积较大,填料反射率最小而导致涂层红外发射率最高。

2.2.3 金属填料含量对涂层红外发射率的影响

图 5 为不同目数的铝银浆含量分别为 10%、15%、20%、25%和 30%时涂层红外发射率变化图,从图中可以看出,随着铝银浆含量的增加,涂层的发射率都明显降低。原因主要有两个方面,一是随着填料含量的增加,填料间的间隙减少,在涂层中形成致密

的金属反射层,涂层反射率增加而使发射率下降;二是材料的红外发射率跟材料的导电率成负相关关系,随着金属填料的增加,涂层的导电率增加而使发射率降低。但是为了保持涂层的机械性能,兼容可见光和雷达波隐身,填料含量一般为 20%左右较好,不宜超过 30%^[17]。

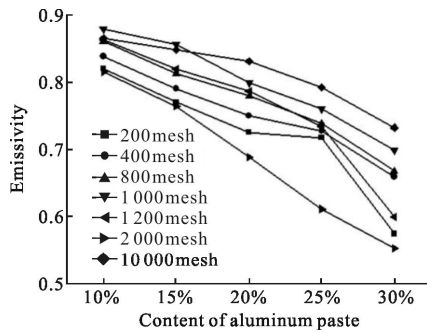


图 5 铝银浆含量对涂层红外发射率影响

Fig.5 Influence of aluminum paste's content on the infrared emissivity of coating

2.2.4 金属填料形态对涂层红外发射率的影响

金属填料可以分为漂浮型和非浮型两种,用不同百分比的铝银浆为填料制备的涂层红外发射率如图 6 所示。在图 6 中,图(a)分别为 1 200 目非浮、2 000 目非浮、1 200 目浮、2 000 目浮 4 种不同型号的铝银浆在不同含量时涂层的红外发射率;图(b)为 1 200 目、2 000 目铝银浆含量均为 15%,在不同浮型铝银浆百分比时涂层的红外发射率。

从图 6 可以看出,铝银浆的形态对涂层发射率有很大的影响。非浮铝银浆在涂层固化过程中,填料会逐渐下降而沉于涂层低部,涂层表面树脂较厚而致使整个涂层发射率较高。如图 7 所示,2000 目非浮铝,铝银浆含量为 15%的涂层 SEM 照片,从照片中可以看出,涂层表面填料较少。对于浮型填料,在

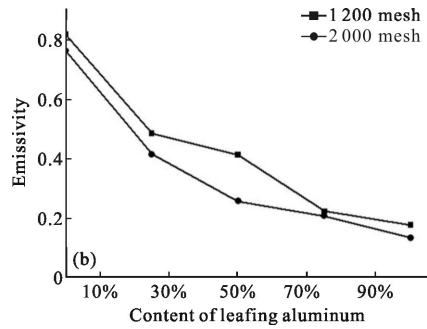
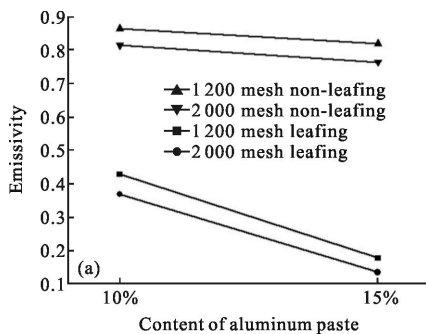


图 6 铝银浆形态对涂层红外发射率影响

Fig.6 Influence of aluminum paste's form on the infrared emissivity of coating

涂膜固化过程中会逐渐上浮,涂层表面基体树脂较薄而使发射率较低。但浮铝填料浮于涂膜表面,涂层可见光和雷达隐身性能受到影响,为此文中使用的浮铝填料含量为 50%。

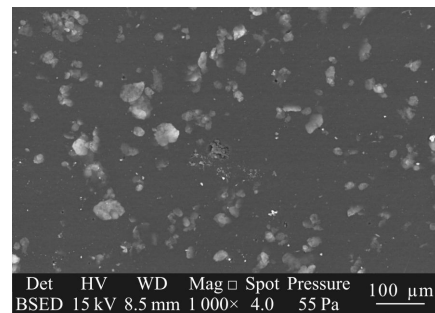


图 7 涂层 SEM 照片

Fig.7 SEM picture of the coating

2.3 涂层的综合性能研究

根据上述研究结论,按照表 3 的配方:粒径为 2 000 目,浮铝百分比为 50%,铝银浆总含量为 15%,在钢板上喷涂制备了红外隐身涂层材料,测得其发

表 3 红外隐身涂料基本成分和含量

Tab.3 Basic composition and content of infrared stealth coating

Components	Content
Fillers	15%–20%
Adhesives	77%–82%
Additives	3%

射率为 0.34。图 8 为该涂层的 SEM 照片,从照片中可以看出,铝粉在涂层中分布均匀,树脂包覆效果良好,符合涂层材料性能要求。同时与图 7 相比,两者

铝银浆含量相同,但表面有更多的填料,这也正是浮铝涂层比非浮铝涂层发射率低的原因。

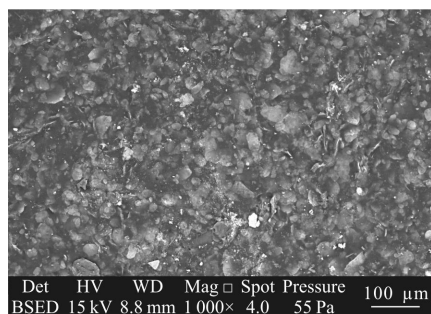


图 8 涂层 SEM 照片

Fig.8 SEM picture of the coating

3 结 论

(1) 通过对树脂红外发射率测试和红外吸收图谱分析,相比环氧树脂和聚氨酯,丙烯酸树脂有较好的红外透明性,适合做红外隐身涂料基体树脂。

(2) 金属填料中,铝的反射率较高,红外发射率较低;尤其是铝银浆,在涂层中容易形成致密反射层,适合做红外隐身涂料的填料。

(3) 铝银浆的形貌、含量和形态对涂层的红外发射率都有较大的影响;2 000 目的浮铝,当含量为 15%时,发射率低至 0.14,能够满足红外隐身要求。

(4) 以丙烯酸树脂为基体树脂,粒径 2 000 目,浮铝百分比为 50%的铝银浆为填料,在钢板上制备涂层,当铝银浆含量为 15%时,发射率低至 0.34。

参 考 文 献:

[1] Li Bo. Application and development trend of infrared stealth technology[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 818-822. (in Chinese)
李波. 红外隐身技术的应用及发展趋势 [J]. 中国光学, 2013, 6(6): 818-822.

[2] Li Junshan, Chen Xia, Li Jianhua. Infrared radiation characteristics contrast between target and background on different grounds[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 424-428. (in Chinese)
李俊山, 陈霞, 李建华. 不同地面背景下目标与背景红外辐射量对比特性[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 424-428.

[3] Chen Shiguo, Jiang Yong, Fang Haobai, et al. IR radiation imaging test, process and evaluation of jet aeroengine [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 727-731. (in

Chinese)
陈世国, 江勇, 方浩百, 等. 喷气发动机红外辐射成像测试、处理与评估[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 727-731.

[4] Wang Rui. Compound guided system with active laser imaging and passive infrared imaging [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 536-543. (in Chinese)
王锐. 激光红外主被动复合导引系统[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 536-543.

[5] Yang Ciyin, Cao Lihua, Zhang Jianping. Measurement of infrared radiation for target airplane based on real-time atmospheric correction [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1751-1759. (in Chinese)
杨词银, 曹立华, 张建萍. 基于大气实时修正的飞机辐射特性测量[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1751-1759.

[6] Wang Ning. Research on multi-spectral stealth tarpaulin materials[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006: 4-5. (in Chinese)
汪宁. 多频谱隐身篷布材料的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006: 4-5.

[7] Chen Xuan, Zhang Jian, Wang Yanwu, et al. Infrared stealth technology based on performance parameters of camouflage coating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 280-285. (in Chinese)
陈翮, 张健, 王艳武, 等. 基于涂料性能参数的红外隐身技术[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 280-285.

[8] Xu Feifeng, Xu Guoyue, Tan Shujuan, et al. Preparation methods of low infrared emissivity and low glossiness coatings for 8-14 μm wave band [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2011, 34(4): 5-9. (in Chinese)
徐飞凤, 徐国跃, 谭淑娟, 等. 8-14 μm 波段低红外发射率与低光泽度兼容涂层的制备方法初探 [J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(4): 5-9.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Zhang Weigang, Xu Guoyue, Qiao Jialiang, et al. Low emissivity at 8 to 14 μm and low near-infrared reflective properties of Al-Sm₂O₃/polyurethane composite coatings [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 34(2): 436-440. (in Chinese)

- 张伟钢, 徐国跃, 乔加亮, 等. Al-Sm₂O₃/聚氨酯复合涂层的近红外低反射与 8~14 μm 低发射率性能 [J]. 复合材料学报, 2014, 34(2): 436-440.
- [12] Li Jingyu, Shi Dongmei. Study on the property of several adhesives for infrared stealth coatings [J]. *Modern Paint & Finishing*, 2010, 13(7): 18-20. (in Chinese)
李靖宇, 施冬梅. 几种红外隐身涂料黏合剂的性能研究 [J]. 现代涂料与涂装, 2010, 13(7): 18-20.
- [13] Zhang Jianqi. Infrared Physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2013: 60-62. (in Chinese)
张建奇. 红外物理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013: 60-62.
- [14] Sun Handong, Fan Zhen, Chang Dading, et al. The road to enhance emissivity of high temperature infrared emissivity coating[J]. *Infrared Technology*, 1990, 12(3): 31-34. (in Chinese)
孙汉东, 樊震, 常大定, 等. 提高高温红外辐射涂层发射率的途径[J]. 红外技术, 1990, 12(3): 31-34.
- [15] Liu Lingyun, Gong Rongzhou, Nie Yan, et al. Computation model of the thermal infrared emittance of a coating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(12): 1903-1907. (in Chinese)
刘凌云, 龚荣洲, 聂彦, 等. 涂层的热红外发射率计算模型 [J]. 光子学报, 2006, 35(12): 1903-1907.
- [16] Liu Xiaodong, Dai Jingmin. Measurement of the complex refractive index of particles based on Mie theory index and transmission method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 820-824. (in Chinese)
刘晓东, 戴景民. Mie 散射理论测量粒子系复折射率的透射方法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 820-824.
- [17] Ren Yue, Hua Ping, Gong Rongzhou. Materials with low infrared emissivity based on epoxy resin [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2011, 34(2): 45-48. (in Chinese)
任玥, 华萍, 龚荣洲. 基于环氧树脂的低红外发射率材料研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(2): 45-48.