

# 粘度对红外低发射率灰色涂层性能的影响

李 卫<sup>1,2</sup>, 徐国跃<sup>1,2</sup>, 刘 宁<sup>1,2</sup>, 孟 雪<sup>1,2</sup>, 曾祥雄<sup>1,2</sup>, 尤玲丽<sup>1,2</sup>

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016;

2. 江苏省先进无机功能复合材料协同创新中心, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 选择不同粘度的料浆制得涂层, 探究粘度对于涂层各性能的影响。对制得的涂层进行表面观察, 采用发射率仪、色差仪及光泽度仪分别对其发射率、明度及光泽度进行测试, 并采用 SEM 对涂层表面形貌进行分析, 最后测试涂层的力学及耐盐雾性能。结果表明: 当料浆粘度在 15~20 s 时, 涂层表面状况较好, 铝粉可以被炭黑粒子均匀地覆盖, 涂层明度约为 53, 光泽度低至 6.5, 改变颜色的同时仍满足低发射率的要求, 约为 0.14, 且涂层具有优异的力学性能及耐盐雾性能。

**关键词:** 粘度; 发射率; 明度; 光泽度; 炭黑粒子

**中图分类号:** TQ639.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2017)01-0040-04

## Effect of Viscosity on Properties of Grey Coating with Infrared Low Emissivity

LI Wei<sup>1,2</sup>, XU Guoyue<sup>1,2</sup>, LIU Ning<sup>1,2</sup>, MENG Xue<sup>1,2</sup>, ZENG Xiangxiong<sup>1,2</sup>, YOU Lingli<sup>1,2</sup>

(1. College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Advanced Inorganic Function Composites, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Coatings were prepared by the slurry with different viscosity and the properties were studied. The coating surface was observed, and the emissivity, chroma and glossiness were measured by the infrared emissivity meter, colorimeter and glossiness instrument, respectively. Then the surface morphology of the coatings was characterized by SEM. The result shows that when the viscosity is between 15s and 20s, the coating surface is in good condition, and the aluminum powder can be uniformly covered with carbon black particles. The lightness of coating is about 53 and the glossiness is low to 6.5. The coatings still maintain low infrared emissivity after the color changed, and the emissivity was about 0.14, and both mechanical properties and salt spray resistance of the coating are excellent.

**Key words:** viscosity, emissivity, lightness, glossiness, carbon black particle

## 0 引言

红外低发射率涂层对红外光线具有高反射、低吸收的特点, 可有效隔绝热量传输路径, 在室内控温、红外隐身等民用和国防领域有较大的应用前景<sup>[1-2]</sup>。涂层主要由有机粘合剂和功能颜料构成, 粘合剂主要影响涂层的力学性能及耐环境性能<sup>[3]</sup>, 聚氨酯树脂由于其优异的力学及耐环境性能较适合作为红外隐身涂层的粘合剂<sup>[4]</sup>; 功能颜料通常为片状金属粉体, 多选用性能优异、廉价易得的铝粉<sup>[5]</sup>, 铝粉赋予涂层低发射率但同时高光泽、色度单一的特点, 不利于实际应用, 而加入炭黑颜料可有效降低铝粉涂层的光泽度和

明度。根据已报道的研究, 刘凯等<sup>[6]</sup>采用添加纳米着色颜料的方法, 在低发射率银色涂层的基础上制备出色度可调的低光泽、低明度及低红外低发射率涂层, 对于红外及可见光兼容隐身涂层的设计具有重要的意义。

涂层的发射率、颜色及光泽度主要依赖于功能颜料的浓度和涂层的表面形貌<sup>[7-8]</sup>, 而粘度对于涂层的性能及表面形貌有重要的影响, Buss<sup>[9]</sup>研究了不同的料浆粘度及溶剂挥发速率, 会导致表干过程中颜料不同的分布情况, 袁乐<sup>[10]</sup>研究了粘合剂的粘度也是决定涂层红外发射率的因素之一, 因此若想使涂层同时具备低发射率、低光泽及稳定的颜色, 须控制料浆粘度在

收稿日期: 2016-08-17; 修订日期: 2016-12-27.

作者简介: 李卫 (1992-), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要研究功能涂层材料。E-mail: liweinuaa1992@126.com.

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51403102); 江苏省自然科学基金青年基金项目 (BK20140811)。

合理的范围，而料浆粘度对色度与低发射率兼容涂层性能的影响研究鲜有报道。

本文选用炭黑颜料/铝粉/聚氨酯体系，重点探究了粘度对于灰色系低发射率涂层性能的影响，用扫描电子显微镜对这一机理作了探究，并得到了料浆粘度合理的控制范围。

1 实验过程

1.1 实验原料

片状铝粉，自制；纳米级炭黑颜料，PU-8 树脂，苏州世名科技股份有限公司；中海油常州涂料化工研究院；N-3375，德国拜耳乙酸丁酯；分析纯，南京化学试剂有限公司。

1.2 涂层制备

依次将铝粉、PU-8 树脂混合并搅拌均匀，超声粉碎 2 min，加入 N-3375 固化剂，用乙酸丁酯调节料浆粘度（10 s；15 s；20 s；25 s；涂-4 杯粘度计测得），喷涂于铝板上（基板经过砂纸打磨，水洗，烘干处理）。因涂层的厚度对于力学性能影响比较大，实验中控制涂层厚度在 40~60 μm 之间，表干之后置于 80℃ 鼓风干燥箱中 10 h 固化。

1.3 分析表征

- 1) 8~14 μm 波段的红外发射率：IR-2 双波段发射率测量仪，中国科学院上海技术物理研究所。
- 2) 光泽度：JKGZ-206085 三角度光泽度仪，测量角度为 60°。
- 3) 色度：X-rite RM200QC，D65 光源，氧化镁作为白板校准。
- 4) 微观形貌：场发射扫描电子显微镜，Hitachi S4800。

2 结果与讨论

2.1 粘度对涂层表面状况的影响

4 种不同粘度的料浆喷涂后制得的涂层如图 1 所示，涂层在 15 s 和 20 s 的粘度下制得的涂层表面状况良好，无浮色发花等现象。而在粘度 10 s 的条件下，出现了发花流挂的现象，在粘度 25 s 的条件下，涂层表面变得粗糙，符合喷涂施工的规律。

2.2 粘度对涂层发射率的影响

由表 1 可知，当料浆粘度在 15 s 及 20 s 时，涂层的红外发射率均低于 0.15，基本满足工程上应用，而当粘度在 10 s 及 25 s 时，涂层的发射率骤然增大，分别为 0.20 和 0.28 左右，这是因为当粘度较低时，料浆相对含有较多的有机溶剂，在表干固化后大部分溶剂挥发，会导致涂层的厚度较小，而涂层厚度与发射

率呈反比例关系<sup>[11]</sup>；当粘度较大时，由图 1 及分析可知，涂层的表面较为粗糙，造成红外光线的镜面反射减少，使得发射率增大。

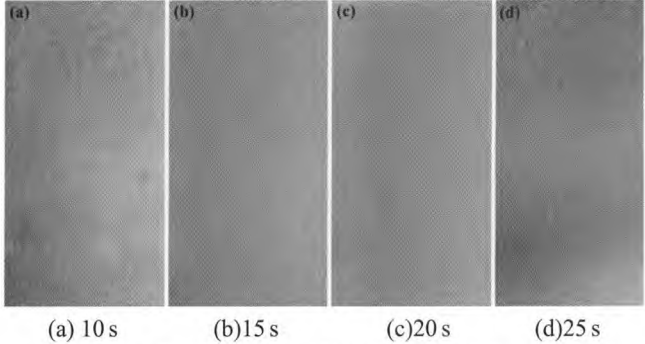


图 1 不同粘度下涂层的表面状况

Fig.1 Surface condition of coating with different viscosities

表 1 不同粘度下涂层 8~14 μm 的红外发射率

Table 1 Infrared emissivities of coating in 8-14 μm with different viscosities				
粘度	10 s	15 s	20 s	25 s
发射率	0.204	0.139	0.146	0.284

2.3 粘度对涂层明度及光泽度的影响

涂层的明度  $L^*$  ( $L^*$ 表示色彩的亮度， $a^*$ 和  $b^*$ 分别表示红绿色相、黄蓝色相<sup>[12]</sup>。炭黑色浆仅调节涂层明度  $L^*$ ， $a^*$ 与  $b^*$ 变化不明显，在此不予讨论)和光泽度由表 2 所示。对于可见光红外兼容隐身涂层除应具有较低的发射率，还应具有较低的明度及光泽度。在 15 s 和 20 s 的粘度下，涂层明度  $L^*$ 在 53 左右，光泽度在 6.5 左右，此时炭黑粒子均匀地覆盖在铝粉表面，在低红外发射率的同时对可见光具有较大的吸收，使得涂层明度和光泽度较低。当粘度为 10 s 及 25 s 时，光泽度分别增大至 9.31 和 7.63，明度均升高至 60 左右，这是因为当粘度较大时，喷涂出的颜料易成颗粒状，铝粉和炭黑颜料无法在溶剂的作用下定向排列，使得铝粉而裸露出来；当粘度较小时，根据费克(Fick)定律<sup>[13]</sup>，A 组分的分子扩散速率与浓度梯度成正比，溶剂的浓度大扩散快，铝粉在溶剂产生浮力的作用下大部分排列在涂层表面<sup>[8]</sup>也无法均一地被炭黑粒子覆盖，使涂层明度和光泽度均较大，这不利于达到可见光红外兼容隐身的效果。

表 2 不同粘度下涂层的色度及光泽度

Table 2 Chroma and glossiness of coating with different viscosities				
粘度	10 s	15 s	20 s	25 s
$L^*$	59.45	52.35	53.21	60.75
光泽度	9.31	6.48	6.89	7.63

2.4 涂层微观结构分析

如图 2 所示，可以看出，低粘度和高粘度的情况

下,与前文分析一致,铝粉裸露在涂层表面,表面也较为粗糙,炭黑颜料未能均匀地覆盖,粘度在20s时涂层的SEM如图3所示,此时,铝粉被炭黑颜料均

匀地覆盖,使得涂层的发射率、明度及光泽度均呈现较好的性能。

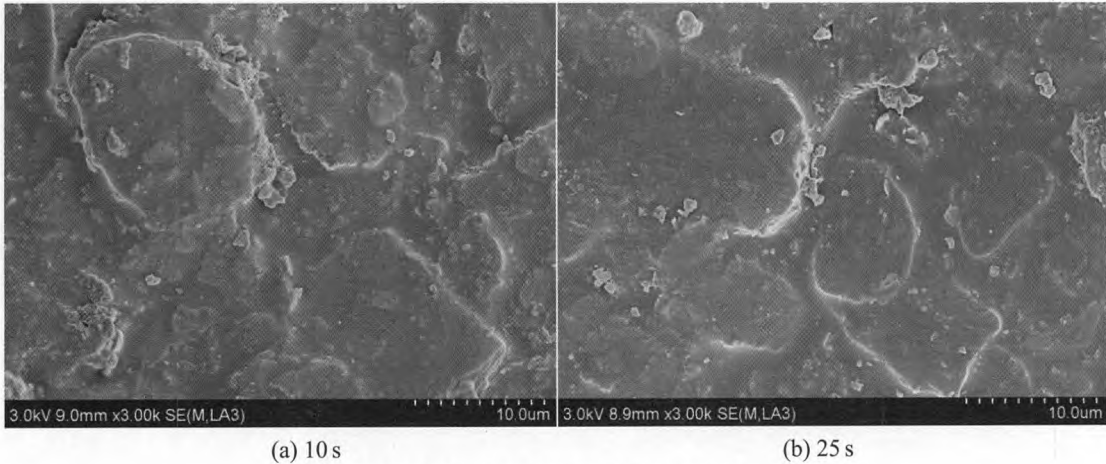


图2 低粘度与高粘度下涂层表面SEM图

Fig.2 SEM of the coating surface

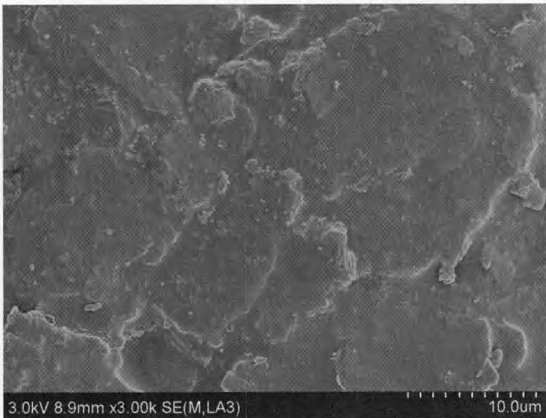


图3 涂层表面SEM图(20s)

Fig.3 SEM of the coating surface (20s)

2.5 涂层力学性能及耐盐雾性能测试

对粘度为15s及20s制得的涂层进行力学性能测试,如表3所示。两种粘度下的涂层有同样优异的附着力和柔韧性,而粘度15s制得的涂层硬度和耐冲击性能略好于20s制得的涂层,这可能是因为铝粉在粘度较低时有着较好的定向排列,表面较平整致密的原因。总体来看涂层的力学性能可维持较好的水平,满足工程应用。

表3 涂层力学性能测试

Table 3 Mechanics properties of coatings				
粘度	硬度	附着力	柔韧性	耐冲击性
15 s	3H	1 级	0.5 mm	50 cm
20 s	2H	1 级	0.5 mm	45 cm

盐雾中由于Cl<sup>-</sup>有较小的半径及水和能,因此穿透力强<sup>[14-15]</sup>,当Cl<sup>-</sup>到达铝粉颗粒表面时,铝粉表面在电解质的作用下发生电化学腐蚀,破坏涂层结构并导致发射率升高。根据GB/T1771-2007对涂层进行耐

中性盐雾腐蚀测试240h,结果如表4所示。由于纳米颜料覆盖在铝粉表面可降低Cl<sup>-</sup>腐蚀速率,且粘度15s及20s制得的涂层具有较平整的表面。所以涂层的发射率相比测试前只有略微升高,且明度、光泽度及附着力基本保持不变。总体而言15s及20s制得的涂层有优异的耐盐雾腐蚀性能。

表4 涂层耐盐雾性能测试

Table 4 Coating salt spray resistance test				
粘度	发射率	明度	光泽度	附着力
15 s	0.145	52.20	6.40	1 级
20 s	0.171	53.21	6.75	1 级

3 结论

当料浆粘度控制在15~20s之间时,涂层表面光滑且表面状况较好,铝粉可以被炭黑粒子均匀地覆盖,涂层的发射率、明度及光泽度较低。且具有优异的力学及耐盐雾性能当粘度低于此范围时,涂层易出现浮色发花的现象,而在粘度高于此范围时,涂层表面粗糙,且在这两种情况下,铝粉均无法均一地被炭黑粒子覆盖,导致发射率、明度及光泽度均较高,不利于红外可见光兼容隐身涂层的设计及应用。

参考文献:

[1] 张伟钢,徐国跃,薛连海.低红外发射率材料研究进展[J].红外技术,2015,37(5):361-367.  
ZHANG Weigang, XU Guoyue, XUE Lianhai. Research Progress of Low Infrared Emissivity Materials[J]. Infrared Technology, 2015, 37(5): 361-367.  
[2] 斯仁,吉洪湖,黄伟.低发射率对二元引射喷管无人机红外特征及探

- 测距离的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(5): 665-670.
- SI Ren, JI Honghu, HUANG Wei. Effect of low emissivity on infrared signature and detection range of UVA with 2-D ejector nozzle[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2013, 45(5): 665-670.
- [3] YAN X X, XU G Y. Corrosion and mechanical properties of polyurethane/Al composite coatings with low infrared emissivity[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 491(1-2): 649-653.
- [4] 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.
- LI JingYu, SHI DongMei. Study on the performance of several kinds of infrared camouflage coatings[J]. *Modern Paint & Finishing*, 2010, 13(7): 18-20.
- [5] 乔加亮. 粘合剂结构与低红外发射率涂层光泽度性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- JIAO Jialiang. Study on the properties of adhesive structure and low emissivity coating[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014.
- [6] 刘凯, 谭淑娟, 徐国跃, 等. 酞菁蓝对红外低发射率涂层色泽的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(1): 53-57.
- LIU Kai, TAN Shujuan, XU Guoyue, et al. Influence of phthalocyanine blue on chromaticity of low infrared emissivity coatings[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2016, 48(1): 53-57.
- [7] YU H J, XU G Y, SHEN X M, et al. Effects of size, shape and floatage of Cu particles on the low infrared emissivity coatings[J]. *Progress in Organic Coating*, 2009, 66(2): 161-166.
- [8] CHOU K S, LU Y C. The application of nanosized silver colloids in far infrared low-emissive coating[J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(18): 7217-7221.
- [9] Buss F, Roberts C C, Crawford K S, et al. Effect of soluble polymer binder on particle distribution in a drying particulate coating[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2011, 359(359): 112-120.
- [10] YUAN L, WENG X, DENG L J. Influence of binder viscosity on the control of infrared emissivity in low emissivity coating[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 56(56): 25-29.
- [11] YU H J, XU G Y, SHEN X M, et al. Low infrared emissivity of polyurethane/Cu composite coatings[J]. *Applied Surface Science, Infrared Physics and Technology*, 2009, 255(12): 6077-6081.
- [12] 周强. 涂料调色[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- ZHOU Qiang. *Coating Color*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [13] 王志魁. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- WANG Zhikui. *Principles of Chemical Engineering*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [14] 夏兰廷, 伟华. 金属有机涂层的耐海水腐蚀性分析[J]. 太原重型机械学院学报. 2001, 22(3): 189-192.
- XIA LanTing, WEI Hua. Analysis of seawater corrosion resistance of metal organic coating[J]. *Journal of Taiyuan Heavy Machinery College*, 2001, 22(3): 189-192.
- [15] 董言治, 尉志苹, 沈同圣, 等. 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 Lanping, YU Zhiping, SHEN Tongsheng, et al. Research Progress on corrosion protection of ship equipment under high salt fog[J]. *Modern Paint & Finishing*, 2003(3): 35-38.