

# Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合粉体的制备及红外反射特性研究

袁 乐, 翁小龙, 卢 虎, 邓龙江

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 微电子与固体电子学院, 成都 610054)

**摘 要:** 采用液相沉淀法, 制备了在片状铝粉表面包覆 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的复合粉体颜料, 利用 XRD、SEM、UV/VIS/NIR 分光光度计、FTIR 红外光谱仪等方法对颜料相结构、形貌、光谱及红外反射特性等进行了测试表征。结果表明, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 包覆层对光谱反射特性的影响随波长变化而异, 波长越短, 包覆前后反射率的变化越大。当 Cr<sup>3+</sup>:Al 摩尔比为 0.2:1.0 时, Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合颜料在可见光波段的反射率下降接近 50%, 颜色明度参数  $L^*$  降低 15, 而 8~14  $\mu\text{m}$  波段红外反射率下降不到 10%。分析表明, 包覆层对不同波长辐射的吸收系数以及表面粗糙度的差异导致了上述结果。该复合颜料对于低明度和光泽度的低红外发射率涂层设计有重要研究价值。

**关 键 词:** 片状铝粉; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 发射率; 明度; 包覆

中图分类号: TQ637 文献标识码: A

## Preparation and Infrared Reflection Performance of Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Particles

YUAN Le, WENG Xiao-Long, LU Hu, DENG Long-Jiang

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** The composite pigments were prepared by co-precipitation coated Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the surface of flake aluminum powders. Phase structure, surface morphology and reflectance spectra of the composite pigment were characterized by XRD, FE-SEM, UV/VIS/NIR spectroscopy and Fourier transform infrared spectrometer. The result shows that the influence of cover treatment with Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the reflectance spectra at various radiation wavelengths is different. The shorter the wavelength is, the stronger the influence is. When the molar ratio of Cr<sup>3+</sup> to Al is 0.2:1.0, compared with the uncoated flake aluminum powders, its average reflectance of visible spectrum and brightness ( $L^*$ ) drop to 50% and 15, respectively. However, the infrared emissivity of 8–14  $\mu\text{m}$  waveband increases less than 10%. It mainly ascribes to the difference of surface roughness and absorption coefficient for different radiation wavelengths. Thus, the composite particles play a vital role in designing the low infrared emissivity coating.

**Key words:** flake aluminum; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; emissivity; brightness; coating

低红外发射率涂层在太阳能集热、热控器件、节能技术、军事伪装/隐身等领域具有广泛应用, 是近年来功能涂层技术的主要研究热点之一。低红外发射率涂层对红外辐射的高反射、低吸收, 可以有

效隔绝热量传输路径, 减少对外部热量的吸收, 减弱红外辐射, 可起到节能<sup>[1]</sup>和伪装隐身<sup>[2]</sup>的作用。低发射率涂层主要由粘合剂、低发射率功能颜料、着色颜料等构成。粘合剂作为成膜物质, 主要赋予涂

收稿日期: 2012-06-25; 收到修改稿日期: 2012-09-04

基金项目: 西华大学特种材料及制备省级重点实验室开放研究基金(SZJJ2009-001); 装备预先研究项目(51310030103)

The Province Key Laboratory Program of Special Material and Preparation of Xihua University (SZJJ2009-001); The Weaponry Equipment Pre-research Foundation of China (51310030103)

作者简介: 袁 乐(1985-), 男, 博士研究生. E-mail: yuanle.cn@gmail.com

通讯作者: 翁小龙, 副研究员. E-mail: wengxl59@163.com

层机械性能;着色颜料则主要提供涂层的颜色性能;低发射功能颜料主要起反射红外电磁波的作用,是决定涂层发射率的关键因素。为获得低红外发射率,涂层中需添加大量的低发射率功能颜料<sup>[3]</sup>。

片状金属颜料是最常用的红外低发射率颜料,特别是片状铝粉因发射率低、价格低廉以及定向排列性能好等优点,应用最为广泛。但是由于片状铝粉在可见光、红外波段均具有较高的反射率,涂层中大量使用会增加涂层的明度( $L^*>85$ )和光泽度( $>20$ ),导致涂层异常明亮;另一方面,从应用角度无论是彩色/深色节能涂层的发展,还是可见光/红外兼容隐身设计的需要,均要求涂层具有低明度、低光泽、颜色可调等特性,以满足建筑美学、军事伪装需求,避免光学污染。传统工艺方法中,通常通过添加着色颜料来降低明度和光泽度,制备绿色、黄色等颜色的红外低发射率涂层;然而绝大多数着色颜料均为强红外辐射吸收体,加入着色颜料必然会恶化涂层的红外特性<sup>[2,4]</sup>,严重限制了低发射率涂层的应用。因此,如何抑制片状铝粉颜料的高可见光反射率,降低明度和光泽度,同时保持其优异的红外反射特性,对改善低发射率涂层的性能具有重要的现实意义。

三氧化二铬( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )颜料的着色力强,耐候性好,是一种重要的绿色颜料,通过掺杂改性可同时实现近红外波段高反射率和可见光波段高吸收率,达到与绿色植物类似的光谱特性<sup>[5]</sup>,但是  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  会强烈吸收热红外波段(8~14  $\mu\text{m}$ )辐射( $\varepsilon\approx 0.9$ )。若采用包覆改性的方法,在片状铝粉颜料表面包覆一层  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  材料,合理控制包覆层厚度,制备出核壳结构复合颜料可兼具两种材料的某些性能<sup>[5-7]</sup>,在降低铝粉颜料的可见光明度和光泽的同时,又能保持其红外波段的高红外反射率。

目前,虽然有不少对铝粉包覆改性制备有色铝粉的专利报道,但此类研究大多关注于改善铝粉的耐腐蚀性<sup>[8-10]</sup>,或制备高亮度、高光泽度的彩色铝粉颜料<sup>[11-12]</sup>满足汽车漆等要求,这些产品均无法满足

低发射率涂料低明度、低光泽、高红外反射率的需求,很少有专门针对低红外发射率涂层这一特殊应用背景的改性铝粉颜料产品和相关研究报道。陈娇等<sup>[13]</sup>采用共沉淀法制备了墨绿色,具有一定的红外-激光-可见光兼容隐身性能的  $\text{Al}/\text{Cr}_2\text{O}_3$  复合粒子,Couler等<sup>[14]</sup>采用CVD方法制备的三明治结构(介质层/金属层/介质层)的有色片状复合颜料,通过调整介质层成分,可具有多频谱兼容隐身能力,但是尚无系统评价复合颜料对可见光、红外波段光谱特性影响的文献报道。

本工作旨在通过控制  $\text{Cr}^{3+}$ -Al 摩尔比例来调控  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  包覆层厚度,研究制备工艺对复合粉体微观结构与形貌的影响,并重点讨论了包覆改性对粉体的明度以及可见光、近红外、热红外波段光谱特性的影响。

# 1 实验

## 1.1 样品制备

实验采用液相沉淀法,以片状铝粉(平均粒径 20  $\mu\text{m}$ )和  $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (分析纯)为原料,氨水为沉淀剂,十二烷基苯磺酸钠( $\text{C}_{18}\text{H}_{29}\text{NaO}_3\text{S}$ , SDBS)为分散剂,制备  $\text{Al}/\text{Cr}_2\text{O}_3$  复合粉体,通过改变配方中  $\text{Cr}^{3+}$ :Al 摩尔比制备不同包覆层厚度的样品,具体原料配方如表 1 所示。实验原料中,片状铝粉来自肇庆东洋铝业有限公司,其他化学试剂来自成都科龙化工有限公司。

样品制备过程如下:按照表 1 的配比将  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  加入一定量的无水乙醇中配成 0.6 mol/L 的沉淀剂溶液备用。将片状铝粉加入 400 mL 乙醇溶液中,超声震荡使铝粉颜料均匀分散,依次加入  $\text{Cr}(\text{ON}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  和 SDBS,待原料完全溶解后,在恒温水浴(60 $^\circ\text{C}$ )、磁力搅拌环境下慢速(2.5 mL/min)滴入沉淀剂。待反应完成后,溶液静置 2 h,经离心分离、洗涤、过滤、干燥后,前驱体粉体在 400 $^\circ\text{C}$  大气氛围中煅烧 2 h 即可得到所需产物。

表 1 原料配方  
Table 1 Compositions of the raw materials

Samples	$n(\text{Cr}^{3+}):n(\text{Al})$	Composition/g			Precipitant/g
		Flake Al	$\text{Cr}(\text{ON}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$	SDBS	$\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ (25wt%)
S1	1:0	0	16	1.12	16.32
S2	1:1	1.08	16	1.12	16.32
S3	0.4:1.0	2.70	16	1.12	16.32
S4	0.2:1.0	5.40	16	1.12	16.32
S5	0.1:1.0	10.8	16	1.12	16.32

## 1.2 分析表征

利用 X 射线衍射仪确定物相结构(日本岛津, XRD-7000 型), 粉体微观形貌由日本电子 JSM-7600FFE-SEM 观察得到。样品粉末的可见光/近红外反射光谱由美国 Perkin-Elmer 公司 Lambda750 UV/VIS/NIR 分光光度计测得(测量模式: 漫反射, 150 nm 聚四氟乙烯积分球附件和粉末样品支架, 硫酸钡白色参考背景), 并利用 Color CIE 色度分析软件计算粉体颜色参数(计算波长范围 380~760 nm, 光源: CIE D65, 10° 观察角, CIE1976  $L^*a^*b^*$  色度坐标系统)。样品 8~14  $\mu\text{m}$  红外反射光谱由德国 BRUKER 公司 Tensor27 傅立叶变换红外光谱仪(附积分球附件)测得。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物相结构

由铝粉和 Al/Cr(OH)<sub>3</sub> 前驱体粉体的热失重曲线(图 1)可知, 铝粉的氧化温度为 500℃ 左右, 热处理温度超过 500℃, 样品重量即会因为铝粉表面氧化而增加, 温度升至 800℃, 由于铝粉的大量氧化, 使得样品重量增加了 40%。对于 Al/Cr(OH)<sub>3</sub> 前驱体粉体, 310℃ 的热处理温度就可以使表面包覆的 Cr(OH)<sub>3</sub> 前驱体完全分解, 煅烧温度超过 500℃, 铝粉氧化也会导致样品重量增加, 但是与未包覆的铝粉颜料相比, 复合粉体的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 包覆层对铝粉的氧化起到明显的抑制作用。因此, 将复合粉体的热处理温度设定为 400℃, 既能达到 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的反应温度, 又不会导致铝粉颜料氧化。

图 2 给出了不同 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 包覆量的复合粉体 XRD 图谱。由图 2 可知, S2~S5 复合粉体样品仅有 Al 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 两种晶相, 其中 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为刚玉晶体结构, 复合粉体中无其他杂相的衍射峰出现, 表明该实验工

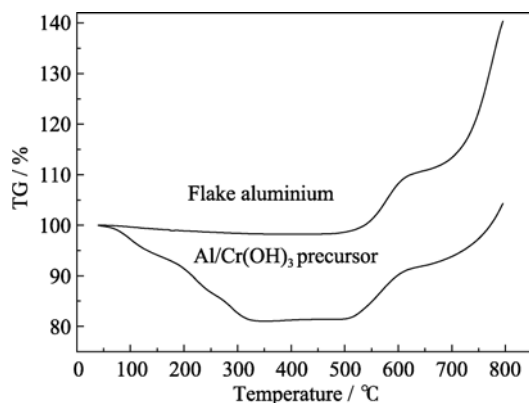


图 1 铝粉和 Al/Cr(OH)<sub>3</sub> 前驱体粉体的 TG 曲线

Fig. 1 TG curves of Al pigment and Al/Cr(OH)<sub>3</sub> precursor

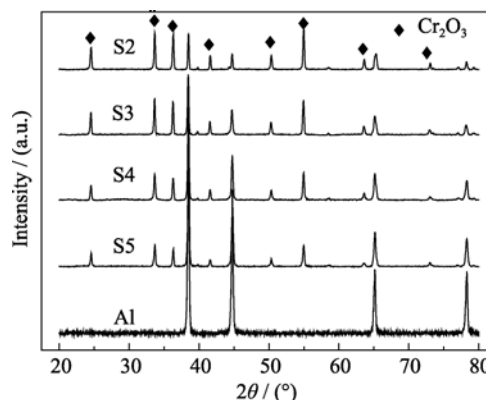


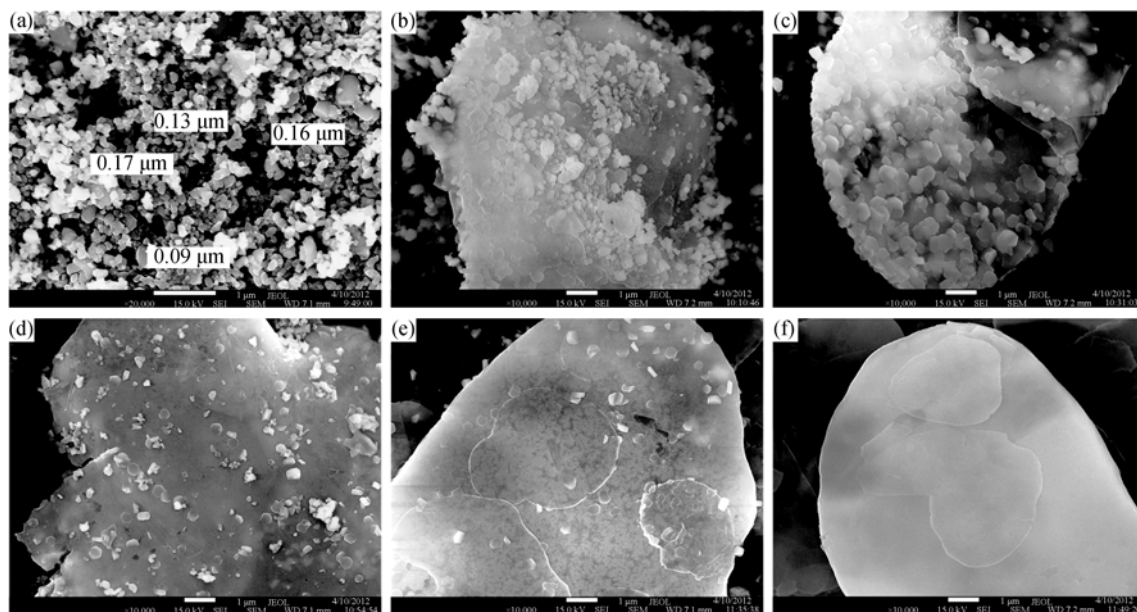
图 2 Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合粉体的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of the Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite powders

艺条件下制备的前驱体经过 400℃ 煅烧 2 h 后均可热分解而形成 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶相。此外, 随着  $n(\text{Cr}^{3+}):n(\text{Al})$  比值的增大, Al 晶相的衍射峰强度逐渐减弱, 而 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶相的衍射峰强度随之升高。这是由于低铝粉浓度(S2)环境下, 可供包覆的铝粉表面积有限, 导致复合粉体表面的包覆量较高, 从而减弱了 Al 的衍射强度, 这也表明片状铝粉表面的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 包覆量可以通过调整反应物配方来控制。

### 2.2 粉体表面形貌

图 3 为 Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合粉体的 SEM 照片。如图 3 所示, 该实验工艺条件制备未包覆的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颜料(S1)呈近球形, 颗粒粒径大约 100 nm。 $n(\text{Cr}^{3+}):n(\text{Al})=1:1$ (S2)制备的复合粉体, 除了在片状铝粉表面形成 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 包覆层, 还会生成大量的球形 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒吸附在片状颗粒表面或散落在复合粉体中。这是由于反应物中 Cr<sup>3+</sup> 的相对含量过高, 沉淀反应中过量的 Cr(OH)<sub>3</sub> 沉淀无法包覆于铝粉表面, 只能形成球形颗粒堆积在片状颗粒表面。大量的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒虽然能有效遮盖片状铝粉的金属光泽并降低明度, 但 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒对红外辐射的高吸收必然会导致复合粉体的红外吸收率急剧升高, 并会增强对红外辐射的散射作用, 不利于制备低红外发射率的复合粉体。将  $n(\text{Cr}^{3+})/n(\text{Al})$  降低至 0.4:1.0(S3), 表面附着的球形 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的数量显著降低, 铝粉表面的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 包覆层更倾向于结晶而形成大量片状 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒, 颗粒粒径约为 500 nm, 由于铝粉含量升高, 可供包覆面积增加, Cr(OH)<sub>3</sub> 倾向于沉淀在铝粉表面, 改善了对铝粉颗粒的表面包覆效果。进一步降低  $n(\text{Cr}^{3+})/n(\text{Al})$  至 0.1:1.0 (S5), 包覆层厚度更薄, 铝粉表面的颗粒密度更低, 若包覆层厚度薄至无法完全覆盖铝粉

图 3  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}/\text{Cr}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}$  粉体的 SEM 照片Fig. 3 SEM photographs of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}/\text{Cr}_2\text{O}_3$  and  $\text{Al}$  powders  
(a) S1; (b) S2; (c) S3; (d) S4; (e) S5; (f) Al

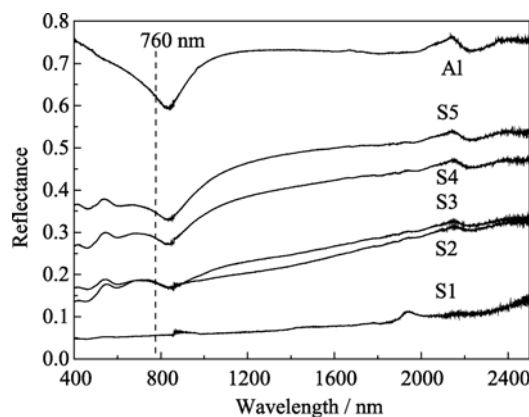
表面,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  包覆层会呈“岛状”分布, 粉体的亮度和粗糙度有所增加, 与未包覆的片状铝粉(S6)相比, 片状铝粉表面的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  包覆层增加了表面粗糙度, 并能有效降低铝粉亮度。

### 2.3 光谱反射特性

图 4 为  $\text{Al}/\text{Cr}_2\text{O}_3$  复合粉体的可见光-近红外漫反射光谱。如图 4 所示, 片状铝粉颜料在 840 nm 波长附近存在明显的特征吸收峰, 但在整个可见光-近红外波段仍具有很高的光谱反射率。未包覆的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  纳米粉体(S1), 在整个 Vis-NIR 波段的反射率均  $< 0.1$ , 其光谱反射曲线与  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  绿色颜料的特征光谱<sup>[4]</sup>有显著的差异, 这是由于: 一方面为了避免铝粉氧化, 复合粉体的煅烧温度不能过高,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的结晶程度较低, 粉体颗粒中大量的晶体缺陷降低了颜料的近红外反射率; 另一方面, 颗粒尺寸为纳米量级, 根据颗粒对光的散射理论<sup>[15]</sup>, 颗粒粒径越小, 相同体积内颗粒数目越多, 电磁波在颜料颗粒间的多重关联散射和吸收都会相应升高, 并增加了辐射在颜料体系中的吸收路径<sup>[4]</sup>, 因此纳米颗粒对可见光和红外光均具有强烈的消光效果, 导致整个波段的光谱反射率都很低。

$\text{Cr}_2\text{O}_3$  反射率低, 因此在片状铝粉表面少量包覆可以显著降低其光谱反射率, 各波段的反射率均随着表面  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  包覆量的增加而逐渐降低。图 5 为包覆改性反应前、后,  $\text{Al}/\text{Cr}_2\text{O}_3$  复合粉体分别在

380~760 nm、760~2500 nm、8~14  $\mu\text{m}$  三个波段下的平均反射率差值。如图 5 所示, 包覆量较低时, 包覆层对片状铝粉的反射率的影响效果更为明显, 当  $n(\text{Cr}^{3+}):n(\text{Al})=0.4:1.0$  时(S3), 380~760 nm、760~2500 nm 波段的平均反射率即分别降低了 0.52 和 0.45; 继续提高  $\text{Cr}^{3+}$  的相对含量, 包覆层达到一定厚度, 片状铝粉对反射率的影响日益减弱, 这时复合粉体的反射率主要取决于  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  包覆层的反射特性, 继续增加包覆层的厚度, 反射率仅能缓慢下降。结合复合粉体的表面形貌分析,  $\text{Cr}^{3+}$  的相对含量过高, 包覆层厚度很难继续增加, 反而导致了吸附在片状粉体表面的颗粒数量急剧升高, 这些粉体虽然

图 4  $\text{Al}$  颜料和  $\text{Al}/\text{Cr}_2\text{O}_3$  复合粉体的 Vis-NIR 漫反射光谱  
Fig. 4 Diffuse reflectance Vis-NIR spectra of  $\text{Al}$  and  $\text{Al}/\text{Cr}_2\text{O}_3$  powders

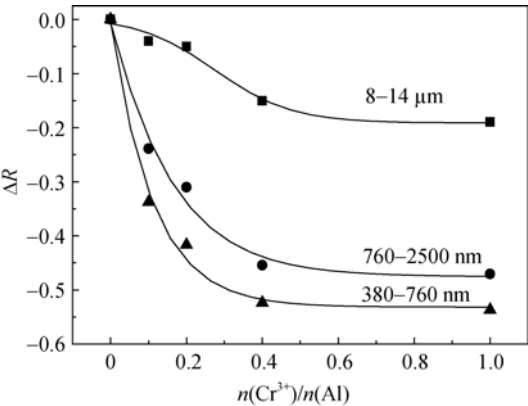


图 5 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 包覆量对复合粉体反射率的影响  
Fig. 5 The effects of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating on the reflectance of the Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders

能够达到一定的消光效果,但其易于团聚,致使复合粉体的分散性能恶化。若要获得良好的包覆效果以及良好的可见光-近红外光谱反射特性,需合理控制 Cr<sup>3+</sup> 的添加量。

图 6 为 Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合粉体在 8~14 μm 波长范围的漫反射红外光谱,与可见光、近红外光谱类似,复合粉体的红外光谱反射率也会随着包覆量的增加而降低,但 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对 8~14 μm 光谱反射率的影响明显弱于可见光和近红外波段。结合图 5 分析,表面包覆层对光谱反射率的影响会随着辐射波长的增加而降低,即对可见光的消光效果更加显著,而对红外波段发射率的影响相对较弱。当  $n(\text{Cr}^{3+}):n(\text{Al})=0.1:1.0$  时,380~760 nm 和 760~2500 nm 波段的平均反射率分别降低了 0.34 和 0.24,而 8~14 μm 波段的红外反射率仅降低 0.04。这一方面由于表面包覆的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒粒径均为 100~200 nm,复合粉体的表面粗糙度与可见光波长相仿,可见光入射至复合粉体表面,粗糙表面会引起强烈的多重关联散射和吸收。而对于 8~14 μm 波长范围的红外辐射,粉体表面则可近似为完全光滑,粗糙表面的散射效应可以忽略;另一方面,若将表面包覆层近似为一层均匀介质,根据朗伯定律<sup>[16]</sup>:

$$I = I_0 \exp^{-\alpha \cdot d} \tag{1}$$

其中  $\alpha = -4\pi k / \lambda$ , 为均匀介质的吸收系数,  $k$  为消光系数,入射辐射穿过厚度为  $d$  的介质时,其辐射强度  $I$  将呈指数衰减,但介质对不同辐射的吸收系数与辐射的波长密切相关,辐射的波长越短,介质层对其吸收系数越高。与可见光相比,波长较长的红外辐射具有更大的趋肤深度,通过合理控制包覆层厚度,红外辐射能以较小的损耗穿过包覆层到达铝粉表面,而较短波长的可见光穿透介质时被介质吸收损耗十分严重,从而保证复合粉体能够维持较高

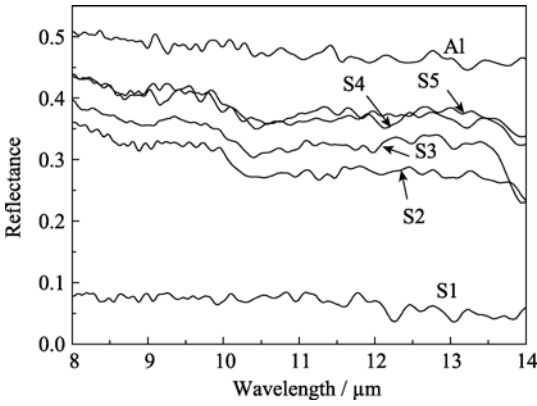


图 6 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al 粉体在 8~14 μm 波长范围的漫反射红外光谱  
Fig. 6 Diffuse reflectance IR spectra of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al powders in 8~14 μm waveband

的红外反射率,又可显著降低可见光波段的反射率和明度,最终实现复合材料在红外和可见光的兼容隐身。

根据图 6 的红外光谱反射率数据,由公式(2)可计算得到复合粉体样品在 8~14 μm 波段的平均红外发射率<sup>[16]</sup>,结果见表 2。

$$\varepsilon = \frac{\int (1-R(\lambda))M_{bb}(\lambda,T)d\lambda}{\int M_{bb}(\lambda,T)d\lambda} \tag{2}$$

其中,  $M_{bb}(\lambda,T)$  为在特定的波长  $\lambda$  和温度  $T$  下的黑体辐射强度。

由表 2 可知,若 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 包覆量过低(S5),表面包覆层对明度和红外发射率均无太大的影响,达不到改善可见光/红外兼容性能之目的,若 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 包覆过多,则会导致复合粉体的热红外发射率急剧恶化,因此为实现较好的可见光-红外兼容效果,应选择适当的 Cr<sup>3+</sup>/Al 摩尔比。当  $n(\text{Cr}^{3+}):n(\text{Al})=0.2:1.0$  时制备的复合粉体呈绿色(图 7),能够显著抑制片状铝粉的亮度和光泽。与片状铝粉相比,复合粉末的热红外发射率仅升高不到 10%,而可将明度值降低 15,在可见光与红外波段有较好的兼容隐身性能。

### 3 结论

1) 液相沉淀法合成了在片状铝粉表面包覆 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的复合粉体,改变 Cr<sup>3+</sup> 与 Al 摩尔比例可控制

表 2 Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合粉体的红外发射率和明度  
Table 2 Emissivity and brightness of Al/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders

Samples	S1	S2	S3	S4	S5	Al
$\varepsilon_{8-14\mu\text{m}}$	0.93	0.71	0.67	0.57	0.56	0.52
CIE $L^*$	21.0	47.7	54.0	62.3	72.1	77.1

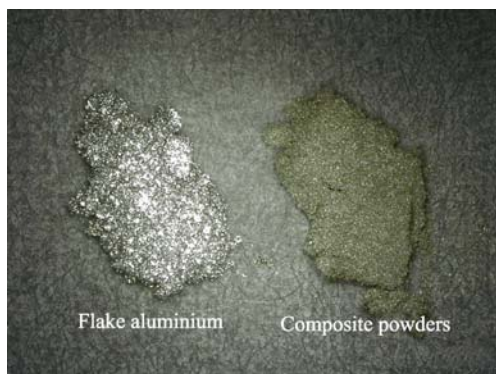


图 7 片状铝粉和  $\text{Al}/\text{Cr}_2\text{O}_3$  复合粉体的照片

Fig. 7 Photo of flake Al powder and  $\text{Al}/\text{Cr}_2\text{O}_3$  composite-powder ( $\times 20$ )

其表面的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  包覆量;

2) 复合粉体在可见光、近红外和热红外波段的光谱反射特性与表面包覆量和辐射的波长密切相关, 辐射的波长越短, 包覆层对反射率的影响越大, 这归因于包覆层相对于不同波长辐射的表面粗糙度以及吸收系数的差异。通过控制包覆层厚度, 可有效抑制铝粉的高亮度和光泽度, 而较小的影响红外波段的反射特性;

3) 当  $n(\text{Cr}^{3+}):n(\text{Al})=0.2:1.0$  时, 制备的复合粉体呈黄绿相, 在可见光波段的反射率下降接近 50%, 颜色明度参数  $L^*$  降低 15, 而  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  波段红外发射率升高不到 10%, 对低明度和光泽度的低红外发射率涂层设计有重要的研究价值。

## 参考文献:

- [1] Uemoto K L, Sato N M N, John V M. Estimating thermal performance of cool colored paints. *Energy and Buildings*, 2010, **42**(1): 17–22.
- [2] Tomas H, Tina N H, Eva H K, *et al.* Development of Low-emissive Camouflage Paint: Final Report. Swedish Defence Research Agency, 2005: 1–17.
- [3] Babrekar Harshada A, Kulkarni Naveen V, Jog Jyoti P, *et al.* Influence of filler size and morphology in controlling the thermal emissivity of aluminium/polymer composites for space applications. *Mater. Sci. Eng. B*, 2010, **168**(1/2/3): 40–44.
- [4] Manara J, Reidinger M, Rydzek M, *et al.* Polymer-based pigmented coatings on flexible substrates with spectrally selective characteristics to improve the thermal properties. *Progress in Organic Coatings*, 2011, **70**(4): 199–204.
- [5] ZHANG Jie, WEI Zi-Dong, WANG Chun-hui, *et al.* Near infra-red reflectance of the doped  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  pigment. *Journal of Inorganic Materials*, 2010, **25**(12): 1303–1306.
- [6] WU Xiao-Wei, FENG Yu-Jie, WEI Han, *et al.* Preparation of IR and microwave absorbing barium ferrite material by electroless Ni-P Plating. *Journal of Inorganic Materials*, 2009, **24**(1): 97–102.
- [7] ZHOU Jian-Hua, WANG Tao, WANG Dao-Jun, *et al.* Preparation and infrared emissivity of glucose-based carbon coated  $\text{ZnFeO}$ . *Journal of Inorganic Materials*, 2009, **24**(5): 1045–1048.
- [8] Zhang Yingchao, Ye Hongqi, Liu Hui, *et al.* Preparation and characterisation of aluminium pigments coated with silica for corrosion protection. *Corrosion Science*, 2011, **53**(5): 1694–1699.
- [9] Patrice Bujard. Flake-form Pigments Based on Aluminum. US Patnet, 0034787, 2006.
- [10] Kiehl A, Greiwe K. Encapsulated aluminium pigments. *Progress in Organic Coatings*, 1999, **37**(3/4): 179–183.
- [11] Wolfgang Reisser, Denise Mebarek. Colored Aluminum Pigments Process for Producing Them and Their Use. US Patent, 5931996, 1999.
- [12] Sadashiv K. Nadkarni. Coloring Aluminum Flakes. US Patent, 5261955, 1993.
- [13] CHEN Jiao, HUANG Xiao-Gu, HAN Peng-De, *et al.* Preparation and multiple-band stealth properties of  $\text{Al}/\text{Cr}_2\text{O}_3$  composite particles. *Journal of Inorganic Materials*, 2010, **25**(12): 1298–1302.
- [14] Coulter Kent E, Mayer Thomas, Phillips Roger W, *et al.* Bright Metal Flake Based Pigments. US Patent, 6383638 B1, 2002.
- [15] Bohren Craig F, Huffman Donald R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. New York: Wiley Professional Paperback Edition Published, 1998: 64–69.
- [16] 张建奇, 方小平. 红外物理. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 37–40.