

# 表面粗糙度对高辐射涂层发射率的影响

李俊峰 卢 鸱 罗正平 赵立波

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 以氧化铁、碳化硅和氧化钴为高辐射填料,通过控制涂层浆料固含量和喷涂次数制备出了不同表面粗糙度的高辐射涂层。用 AE 辐射计测试了不同表面粗糙度高辐射涂层的室温发射率,根据 GB/T 7287—2008 测试了涂层的 800℃ 高温发射率,用扫描电子显微镜和光学显微镜观察了涂层表面形貌,用扫描探针显微镜测试了涂层的表面粗糙度。结果表明,在辐射换热条件下高辐射涂层表面粗糙度在 2.75 ~ 225.70  $\mu\text{m}$  变化时,其室温发射率发生了 0.02 ~ 0.05 的变化。而在导热换热条件下高辐射涂层表面粗糙度在 2.75 ~ 36.99  $\mu\text{m}$  变化时,其高温发射率没有变化。

**关键词** 表面粗糙度,涂层,室温发射率,高温发射率

## Influence of Surface Roughness on The Emissivity of High Emissivity Coatings

Li Junfeng Lu Wu Luo Zhengping Zhao Libo

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** The high emissivity coatings with different surface roughness using iron oxide, silicon carbide and cobalt oxide as high emissivity fillers were fabricated by controlling the spray times and the solid loading of coating slurry. The room-temperature emissivity of the high emissivity coatings with different surface roughness was measured by AE radiometer, and the high-temperature emissivity at 800℃ was determined according to GB/T 7287—2008. The images of the high emissivity coatings were characterized by scanning electronic microscopy and optical microscopy, and the surface roughness of the high emissivity coatings was measured by scanning probe microscopy. It is found that the room-temperature emissivity of the high emissivity coatings had a change of 0.02 to 0.05 in the condition of radiative heat transfer during the surface roughness of the high emissivity coatings changing from 2.75  $\mu\text{m}$  to 225.70  $\mu\text{m}$ , while the high-temperature emissivity of the high emissivity coatings had no change in the condition of heat conduction during the surface roughness of the high emissivity coatings changing from 2.75  $\mu\text{m}$  to 36.99  $\mu\text{m}$ .

**Key words** Surface roughness, Coating, Room-temperature emissivity, High-temperature emissivity

### 0 引言

高温高辐射涂层是一种高温下以红外辐射换热为主要途径的高温热防护材料,具有厚度薄、质量轻、高温条件下结构质量效益比高等优点<sup>[1-4]</sup>。在军用领域,高温高辐射涂层已经成为降低高超声速飞行器金属蒙皮表面温度的有效途径<sup>[5-7]</sup>。在民用领域,高温高辐射涂层在红外辐射加热和窑炉保温节能等方面大量应用<sup>[8-10]</sup>。

高辐射涂层辐射性能的影响因素主要有涂层组分、厚度、表面粗糙度等。在喷涂法制备涂层过程中,涂层的组分和厚度可以较容易地通过控制原料配比和喷涂次数而得到控制。但涂层表面粗糙度较难控制,因为影响涂层表面粗糙度的因素很多,如填料粒径、浆料固含量、浆料分散性、喷枪中气体流速、喷出

浆料的雾化程度等。这导致制备出的高辐射涂层的表面粗糙度往往有一定波动,可能会造成涂层发射率的不稳定。在辐射换热条件下,不同表面粗糙度的涂层对红外光捕获或共振吸收的程度不一样,从而影响了涂层的吸收率<sup>[11-12]</sup>。根据基尔霍夫定律,热平衡态下涂层的吸收率等于其发射率,所以辐射换热条件下涂层表面粗糙度变化会影响其发射率。但是在高温环境下当高辐射涂层的热量来自非辐射换热时,涂层表面粗糙度对其发射率的影响规律还少有研究。

本文采用喷涂工艺制备了以  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiC}$  和  $\text{Co}_3\text{O}_4$  为高辐射填料的不同表面粗糙度的高辐射涂层,研究了辐射加热条件下表面粗糙度变化对涂层室温发射率的影响以及导热加热条件下表面粗糙度对涂层高温发射率的影响。

收稿日期: 2013-03-29

作者简介:李俊峰,1981 年出生,博士,工程师,主要从事热控材料及特种功能涂层研究。E-mail:jfli1227@126.com

## 1 实验

将溶剂汽油和有机黏结剂聚硅氮烷分别与填料  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiC}$ 、氧化钴等按比例混合并研磨均匀,制备出黏度合适的涂层浆料。然后在不锈钢基板上用喷涂工艺制备高辐射涂层。将含有汽油的湿涂层静置 12 h,待湿涂层中的汽油完全挥发后,在烘箱中  $170^\circ\text{C}$  固化 2 h。通过控制涂层浆料的固含量和喷涂工艺参数可以制备不同表面粗糙度的高辐射涂层。

高辐射涂层的表面形貌用 SEM(SS-550,日本)和光学显微镜(DM2500P,Leica,德国)进行观察。其涂层表面粗糙度用扫描探针显微镜(Dektak 150, Veeco, 美国)以二维扫描模式进行测试。其室温发射率用 AE 辐射计(Keithley 8009, 美国)进行表征, $800^\circ\text{C}$  高温发射率按照 GB/T 7287—2008 测试,其中室温发射率测试采用的是辐射加热,高温发射率测试采用的是导热加热。

## 2 结果与讨论

图 1 给出了以  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为填料制备的表面粗糙度不同的高辐射涂层的光学照片和微观结构。

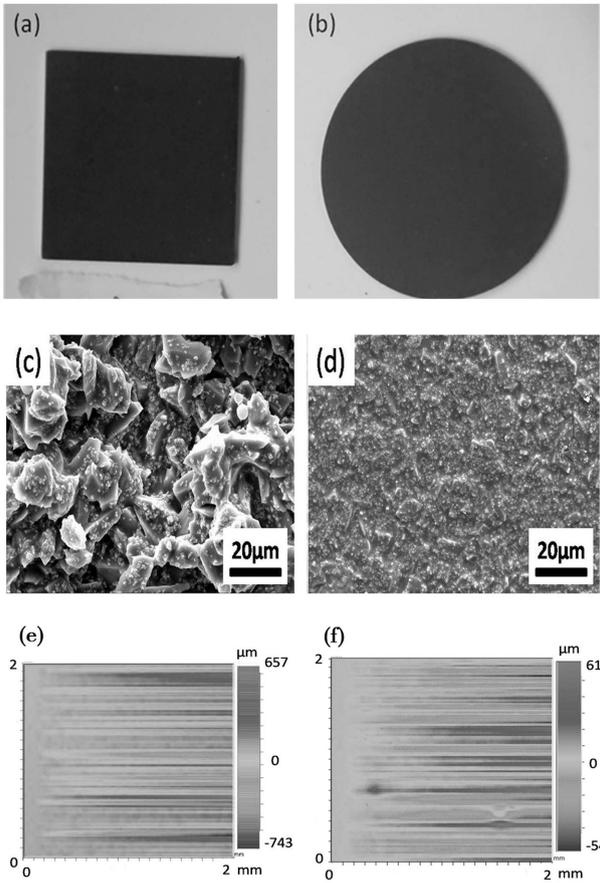


图 1 以  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为填料的不同粗糙度  
高辐射涂层的形貌和表面粗糙度

Fig.1 Images of the high emissivity coatings using  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  as filler

- (a) 粗糙度大涂层照片;(b) 粗糙度小涂层照片;  
(c) 粗糙度大涂层 SEM 形貌;(d) 粗糙度小涂层 SEM 形貌;  
(e) 粗糙度  $65.61\ \mu\text{m}$ ;(f) 粗糙度  $7.08\ \mu\text{m}$ 。

可以看出,图 1(a)中涂层颜色更黑,显示涂层表面非常粗糙,如图 1(c)所示。图 1(b)涂层颜色比图 1(a)要浅,其微观形貌更加平整光滑,如图 1(d)所示。上述结果说明图 1(c)中凹陷型的粗糙表面结构增强了涂层对可见光的捕获能力,从而使表面粗糙涂层的吸收率更大。

图 1(e)(f)给出的是两个高辐射涂层相应的表面粗糙度测试结果。从色条坐标范围可以看出,图 1(a)中涂层的表面粗糙度明显更大,平均达到  $65.61\ \mu\text{m}$ ,而图 1(b)中涂层的表面粗糙度平均只有  $7.08\ \mu\text{m}$ 。

图 2 给出了以  $\text{SiC}$  为填料制备的表面粗糙度不同的高辐射涂层的光学照片和微观结构。可以看出,图 2(a)中涂层的光学照片比图 2(b)中涂层的更黑,其相应的微观结构显示其涂层表面粗糙度更大。这一现象与以  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  为填料的高辐射涂层的结果是一致的,说明对同一种填料而言,增大其涂层表面粗糙度确实可以增大室温条件下涂层对可见光的吸收。

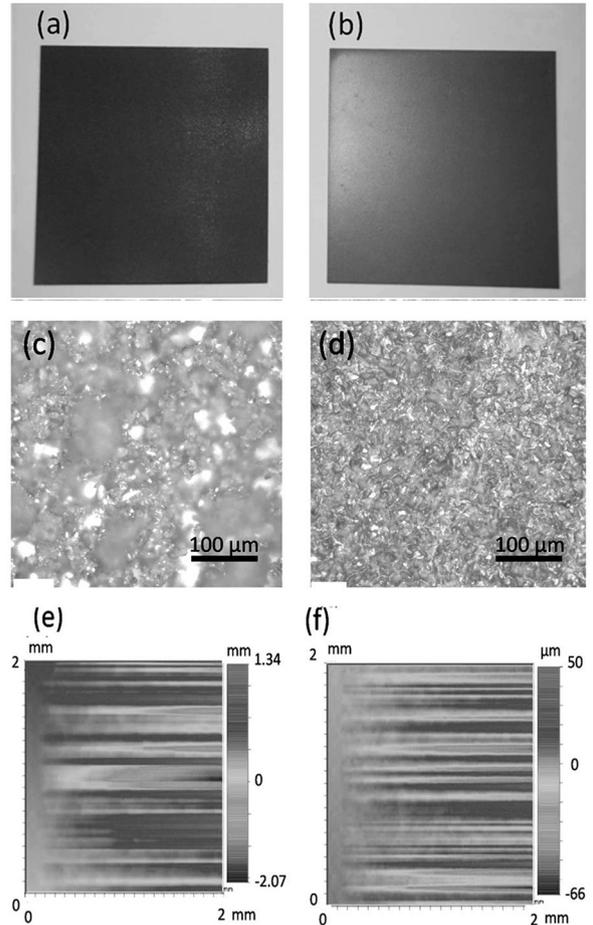


图 2 以  $\text{SiC}$  为填料的高辐射涂层的形貌表面粗糙度

Fig.2 Images of the high emissivity coatings using  $\text{SiC}$  as filler

- (a) 粗糙度大涂层光学照片;(b) 粗糙度小涂层光学照片;  
(c) 粗糙度大涂层光学显微镜形貌;  
(d) 粗糙度小涂层光学显微镜形貌;  
(e) 粗糙度  $225.70\ \mu\text{m}$ ;(f) 粗糙度  $6.05\ \mu\text{m}$ 。

图2(e)(f)给出的是两个高辐射涂层的表面粗糙度测试结果。从色条坐标范围可以看出,图2(a)中涂层的表面粗糙度很大,达到225.70  $\mu\text{m}$ ,而图2(b)中涂层的表面粗糙度较小,只有6.05  $\mu\text{m}$ 。

图3是以氧化钴为填料制备的表面粗糙度不同的高辐射涂层的光学照片和微观结构。可以看出,图3(a)中涂层的光学照片比图3(b)中涂层表面更粗糙,图3(c)(d)的光学显微结构照片也证实了这一点。

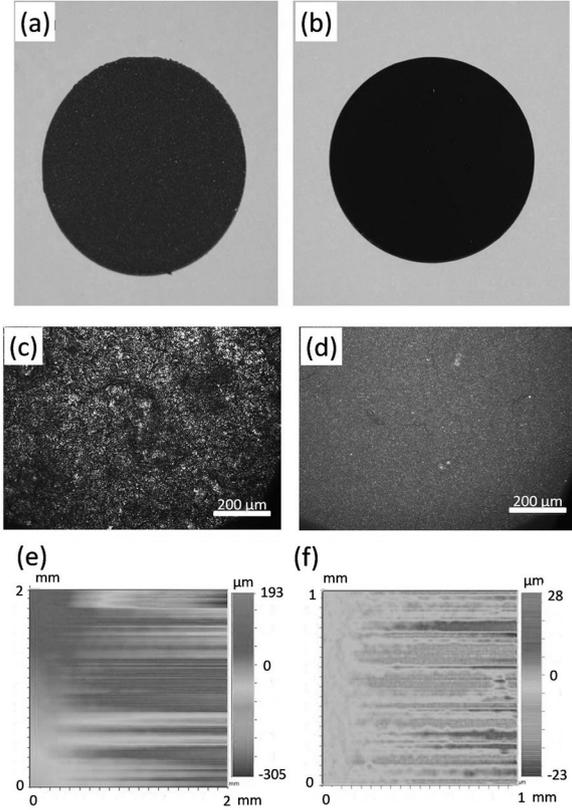


图3 以氧化钴为填料的高辐射涂层的形貌和表面粗糙度

Fig. 3 Images and surface roughness of

the high emissivity coatings using cobalt oxide as filler

- (a) 粗糙度大涂层光学照片;(b) 粗糙度小涂层光学照片
- (c) 粗糙度大涂层光学显微镜形貌
- (d) 粗糙度小涂层光学显微镜形貌
- (e) 粗糙度为36.99  $\mu\text{m}$ ;(f) 粗糙度为2.75  $\mu\text{m}$ 。

图3(e)(f)给出的是两个高辐射涂层的表面粗糙度测试结果。从色条坐标范围可以看出,图3(a)中涂层的表面粗糙度非常大,达到36.99  $\mu\text{m}$ ,而图3(b)中涂层的表面粗糙度只有2.75  $\mu\text{m}$ ,涂层很光滑。

表1给出了分别以 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiC}$ 和 $\text{Co}_3\text{O}_4$ 为填料的高辐射涂层的室温发射率。结果显示,以 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 为填料的高辐射涂层在表面粗糙度为65.61和7.08  $\mu\text{m}$ 时,其室温发射率分别达到0.92和0.87,表面粗糙度不同而使二者室温发射率相差达到0.05。以 $\text{SiC}$ 为填料的高辐射涂层在表面粗糙度为225.70和6.05  $\mu\text{m}$

时,其室温发射率分别达到0.91和0.88,表面粗糙度不同而使二者室温发射率相差达到0.03。以 $\text{Co}_3\text{O}_4$ 为填料的高辐射涂层在表面粗糙度为36.99和2.75  $\mu\text{m}$ 时,其室温发射率分别达到0.92和0.90,表面粗糙度不同而使二者室温发射率相差达到0.02。

表1 以 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiC}$ 和 $\text{Co}_3\text{O}_4$ 为填料的不同粗糙度高辐射涂层的室温发射率

Tab. 1 Room-temperature emissivity of the high emissivity coatings with different surface roughness filling with

填料种类	高辐射涂层粗糙度 / $\mu\text{m}$	涂层室温发射率
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	65.61	0.92
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	7.08	0.87
$\text{SiC}$	225.70	0.91
$\text{SiC}$	6.05	0.88
$\text{Co}_3\text{O}_4$	36.99	0.92
$\text{Co}_3\text{O}_4$	2.75	0.90

由于AE辐射计测试涂层室温发射率的原理是基于基尔霍夫定律,即分别位于一个密闭腔两端的热源与被测涂层达到辐射换热平衡,在热平衡条件下涂层发射率等于其吸收率。这说明,涂层室温发射率随表面粗糙度的增加而增大是由于涂层的粗糙表面结构增强了涂层表面对红外辐射的多次散射和捕获吸收,提高了涂层对红外辐射的吸收率,从而就提高了涂层的室温发射率。

表2给出了分别以 $\text{TiC}$ 和 $\text{Co}_3\text{O}_4$ 为填料的高辐射涂层在800℃的高温发射率。结果显示,以 $\text{TiC}$ 为填料的高辐射涂层在表面粗糙度为15.19和20.38  $\mu\text{m}$ 时,其高温发射率均为0.82。以 $\text{Co}_3\text{O}_4$ 为填料的高辐射涂层在表面粗糙度为36.99和2.75  $\mu\text{m}$ 时,其高温发射率均为0.87。

表2 以 $\text{TiC}$ 和 $\text{Co}_3\text{O}_4$ 为填料的不同粗糙度高辐射涂层的高温发射率

Tab. 2 High-temperature emissivity of the high emissivity coatings with different surface roughness filling with  $\text{TiC}$  or  $\text{Co}_3\text{O}_4$

填料	高辐射涂层粗糙度 / $\mu\text{m}$	涂层高温发射率
$\text{TiC}$	15.19	0.82
$\text{TiC}$	20.58	0.82
$\text{Co}_3\text{O}_4$	36.99	0.87
$\text{Co}_3\text{O}_4$	2.75	0.87

涂层高温发射率测试采用的是以导热传热方式

从涂层背面对涂层加热,然后测试涂层表面发射出的法向红外辐射强度,从而与同温度下黑体的红外辐射强度做比较,得出涂层的发射率。在这种发射率测试方法下,涂层达到热平衡时其表面粗糙度对涂层发射率影响很小。涂层发射率主要由涂层组分比例及各组分结构性能(如黏结剂含量、填料中化学键类型和缺陷数量等)来决定。这就是上述涂层高温发射率没有变化的原因。

### 3 结论

高辐射涂层表面粗糙度在  $2.75 \sim 225.70 \mu\text{m}$  变化时,可以使其室温发射率发生  $0.02 \sim 0.05$  的变化。高辐射涂层表面粗糙度在  $2.75 \sim 36.99 \mu\text{m}$  变化时,对其高温发射率没有影响。这表明所制备的高辐射涂层在辐射换热条件下其室温发射率受涂层表面粗糙度影响较大,而在导热换热条件下具有良好的高温发射率稳定性,不受喷涂工艺造成的表面粗糙度变化的影响。

### 参考文献

[1] Tang H, Sun Q, Yi C G, et al. High emissivity coatings on titanium alloy prepared by micro-arc oxidation for high temperature application[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(5): 2162-2168

[2] Meetham G W. High-temperature materials -a general review[J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(4): 853-860

[3] Cheng X D, Duan W, Chen W, et al. Infrared radiation coatings fabricated by plasma spray[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009, 18(3): 448-450

[4] Dan Z G, Cang D Q, Zhou H M, et al. Microstructure and properties of high emissivity coatings[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 15(5): 627-632

[5] Bird R K, Wallace T A, Sankaran S N. Development of protective coatings for high-temperature metallic materials [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, 41(2): 213-220

[6] Jiang X, Soltani M, Mishkinis D. Development of  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  thermochromic coating for smart spacecraft thermal radiator application [C]//10<sup>th</sup> ISMSE & THE 8<sup>th</sup> ICPMSE Colloquium, France, 2006, 616: 6

[7] Pidan S, Auweter Kurtz M, Herdrich G, et al. Recombination coefficients and spectral emissivity of silicon carbide-based thermal protection materials [J]. Journal of thermal physics and heat transfer, 2005, 19(4): 566-571

[8] 冯胜山,鲁晓勇,许顺红. 高温红外辐射节能涂料的研究现状与发展趋势[J]. 工业加热, 2007, 36(1): 10-15

[9] 于宁,朱丽娟. 高反射红外辐射涂料的制备与性能 [J]. 沈阳理工大学学报, 2010, 29(6): 63-66

[10] 马刘宝,朱靖. 红外辐射涂料的研究与发展趋势 [J]. 表面技术, 2007, 36(1): 68-70

[11] Faouzi G, Aoufik G T, Influence of microroughness on emissivity [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(5): 2656-2664

[12] He X D, Li Y B, Wang L D, et al. High emissivity coatings for high temperature application: progress and prospect [J]. Thin Solid Films, 2009, 517(17): 5120-5129

(编辑 任涛)