

# 高辐射涂层对刚性隔热瓦性能的影响

孙陈诚<sup>1,2</sup> 何雅玲<sup>1,2</sup> 王晓婷<sup>1</sup> 周洁洁<sup>1</sup> 胡子君<sup>1</sup>

(1 航天材料及工艺研究所,先进功能复合材料科技重点实验室,北京 100076)

(2 西安交通大学,热流科学与工程教育部重点实验室,西安 710049)

**文 摘** 由二硅化钼和玻璃料等组成制备了一种刚性隔热瓦表面使用的高辐射涂层,研究了高辐射涂层对刚性隔热瓦结构、力学性能、防水特性、辐射特性、辐射加热试验、风洞试验和深空碎片高速撞击试验的影响规律。结果表明:刚性隔热瓦表面高辐射涂层为致密梯度结构,表面平整,辐射系数大于 0.85,防水效果好;高辐射涂层提高了材料的弯曲强度和肖氏硬度;厚度方向的拉伸强度因为涂层和基体的不匹配降低了近 50%;石英灯辐射加热试验中,致密的高辐射涂层提高了表面黑度,吸收更多热量使表面温度升高,背面温度上升快。风洞试验中,高辐射涂层将气动加热辐射掉一部分,降低了表面温度从而使材料具有更低的背面温度;含高辐射涂层的刚性隔热瓦能经受典型空间碎片冲击,未产生致命性的破坏。

**关键词** 刚性隔热材料,高辐射涂层,辐射加热,风洞试验

中图分类号:TB3

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.03.009

## Effects of Coating on Performance Rigid Tile

SUN Chencheng<sup>1,2</sup> HE Yaling<sup>1,2</sup> WANG Xiaoting<sup>1</sup> ZHOU Jiejie<sup>1</sup> HU Zijun<sup>1</sup>

(1 Science and Technology of Advanced Functional Composite Laboratory, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract** A coating constituted of MoSi<sub>2</sub> and melted glass with the high emittance was prepared. The effects of the coating on the microstructure and performances of the rigid tiles were investigated. The results indicated that the waterproof coating was dense with an emittance of about 0.85. After coating process, the flexural strength and shore hardness of the rigid tiles increased. The tensile strength in transverse orientation was about 50% of that without coating. The back side temperature of rigid tiles with coating was higher than that without coating, when rigid tile was exposed to the radiation heat. However, the back side temperature of rigid tiles with coating was lower than that without coating, when rigid tile was exposed to the simulative heat of re-entry. The rigid tiles with coating created a little hole after the chip attack.

**Key words** Rigid tiles, Coating with the high emittance, Radiation heat, Simulative heat of re-entry

## 0 引言

刚性隔热瓦是长时间在大气层内高速飞行的武器装备大面积重要防护材料,具有密度低、隔热效果好等优点。美国从 20 世纪 80 年代开始从事刚性隔热材料的研究,至今发展了 LI、FRCI、HTP、AETB、

BRI 等系列<sup>[1-3]</sup>,相应的发展了 RCG 和 TUF1 两种涂层<sup>[4-5]</sup>,为美国航天飞机和高超声速飞行器的发展发挥了重要作用。随着新型飞行器的发展,我国也发展了刚性隔热瓦材料,性能达到了美国第三代陶瓷瓦的水平。高辐射涂层是刚性隔热瓦的关键技术之一,

决定了材料表面强度和辐射特性。外表面涂层发射率越高,则再入时气动加热从外表面辐射到深空空间的热量越多,表面平衡温度越低,从而传到防热系统内部冷结构的热量就越少。可见刚性隔热瓦辐射涂层直接决定热防护系统的先进性和飞行器安全,具有重要意义。本文研究了高辐射涂层对刚性隔热瓦结构、力学性能、防水特性、辐射加热试验、风洞试验和深空碎片冲击试验的影响规律。

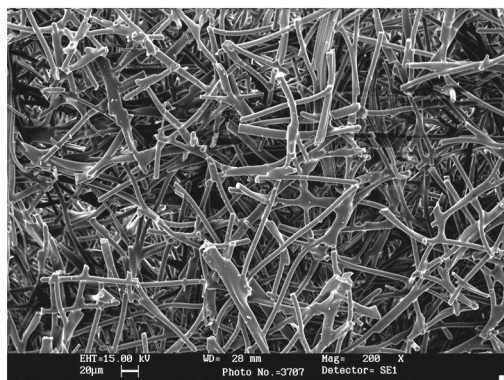
## 1 实验

### 1.1 涂层制备

将刚性隔热瓦表面清理干净,将涂层浆料喷涂到刚性隔热瓦表面,进入烘箱 100 °C 干燥,在高温烧结炉进行 1 100~1 200 °C 烧结,出炉冷却制备出含高辐射涂层的刚性隔热瓦材料。

### 1.2 性能测试

采用 LEICA-S440 扫描电镜对涂层和基体微观结构进行表征。采用型号为 NANOVEA ST400 三维非接触式表面轮廓仪,按 GB1031-83 进行涂层表面粗糙度测试。按照 GB/T7287-2008 测量涂层的辐射系数。参考 Q/Dq360.4-2000 测试材料的弯曲强度。



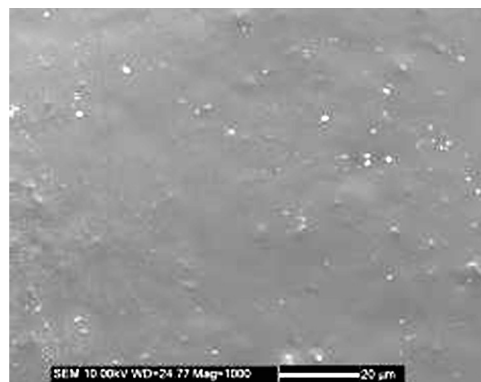
(a) 无涂层

参考 GB/T 1452-2005 测试材料的拉伸强度。对厚度为 20 mm 有无涂层的两种刚性隔热瓦进行石英灯辐射加热试验,试验热流为 250 kW/m<sup>2</sup>,试验时间为 1 800 s。对不含涂层和含涂层两种刚性隔热瓦进行电弧风洞试验,试验时间为 246 s。对含涂层刚性隔热瓦进行空间碎片试验,撞击速度 5 km/s,撞击角度 0°,碎片材质为铝,直径 1 mm,厚度 7.91 µm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高辐射涂层对表面结构的影响

图 1 为刚性隔热瓦制备涂层前后的表面微观结构,可见涂层覆盖了刚性隔热瓦表面约为 40 µm 大小孔隙,在材料表面形成了致密的涂层结构。涂层增重仅为 0.045 g/cm<sup>2</sup>,且渗进刚性隔热瓦内部形成梯度结构,如图 2 所示;宏观尺寸测量表明没有增加材料的厚度。而这种特殊的梯度结构增加了涂层与基材的结合强度,测试表明涂层与刚性隔热瓦本体的结合强度大于本体的拉伸强度。含涂层的刚性隔热瓦表面线粗糙度  $R_a$  为 9.779 µm,面粗糙度  $S_a$  为 11.702 µm,图 3 为表面粗糙度云图,可见含高辐射涂层刚性隔热瓦表面较为平整。



(b) 有涂层

图 1 有无涂层刚性隔热瓦微观结构

Fig.1 SEM micrographs of the rigid tiles without and with coating

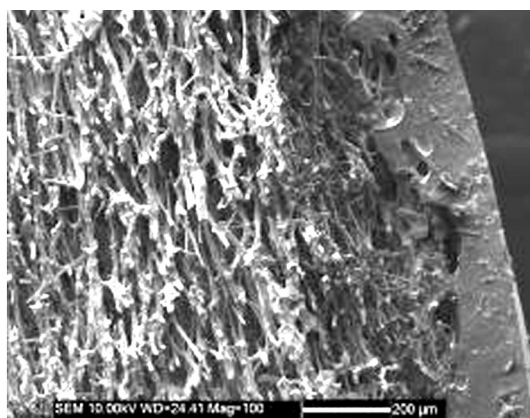


图 2 含涂层刚性隔热瓦截面微观结构

Fig.2 Cross section SEM micrographs of the rigid tiles with coating

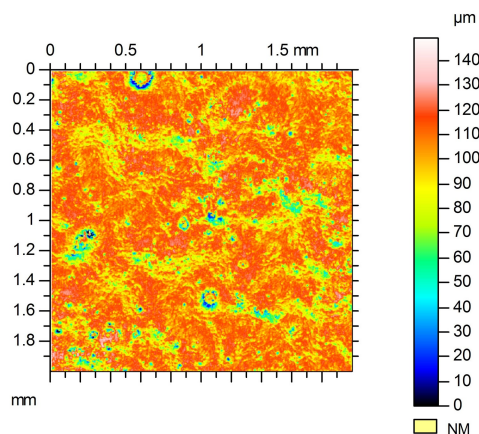


图 3 刚性隔热瓦表面粗糙度云图

Fig.3 Surface roughness of the rigid tiles with coating

## 2.2 高辐射涂层对表面辐射特性的影响

刚性隔热瓦为石英和氧化铝纤维烧结而成的白色多孔材料,制备的高辐射涂层呈黑色。在测试波段 3~14  $\mu\text{m}$  内,无涂层刚性隔热瓦辐射系数为 0.8 左右,有涂层刚性隔热瓦的辐射系数为 0.85~0.87,辐射系数明显增加,实际服役过程中直接决定了材料表面温度和向材料内部传递的热量,影响整个材料的隔热效果。涂层由  $\text{MoSi}_2$  (图 4) 和玻璃料等组成, $\text{MoSi}_2$  热辐射系数为 0.96,弥散在涂层中,使得涂层具有较高的辐射系数。

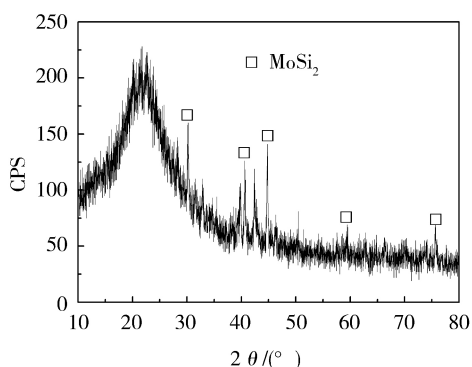
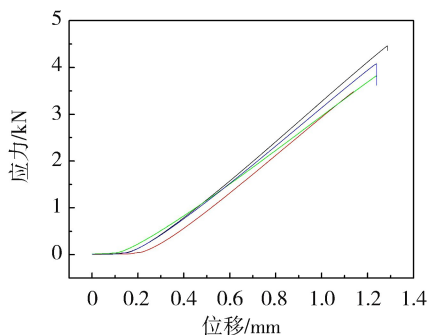


图 4 涂层的 XRD 图谱

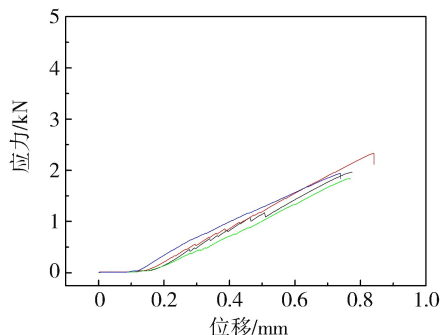
Fig.4 XRD pattern of the coating

## 2.3 高辐射涂层对力学性能的影响

有无涂层刚性隔热瓦的弯曲强度和肖氏硬度测



(a) 侧面无涂层



(b) 侧面有涂层

图 5 有无涂层刚性隔热瓦拉伸应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of the rigid tiles without and with coating

结合侧面有涂层刚性隔热瓦应力-应变曲线进一步分析,拉伸试验 I 阶段(图 6),涂层和基体结合强度高,两者一起变形,为弹性变形阶段。当应力继续增加时(II 阶段),由于涂层断裂延伸率仅为 0.1% 量级,无法抵御变形必然先破坏。应力继续增加,虽然基体断裂延伸率高达 2% 不易破坏,但由于两者较好的结合强度,裂缝会扩展到基体内部导致拉伸强度大幅度降低(III 阶段)。

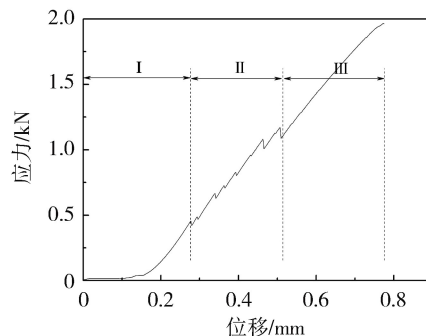


图 6 侧面含涂层刚性隔热应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve of rigid tiles with side face coating

试结果见表 1。涂层是一定厚度的梯度致密结构,具有较高的强度;而基体 85% 孔隙率,力学性能相对而言较低。而且测试弯曲强度时应力先作用于高强度涂层,试验件弯曲变形小,待涂层破坏后基体再受应力直至整个试验件破坏,从而表现出更高的弯曲强度,所以材料表面制备涂层后弯曲强度从 6.46 提高到 10.7 MPa。

硬度测试时撞销落到材料表面回跳,撞销撞击无涂层刚性隔热瓦时形成一定尺寸凹坑消耗掉部分能量,回跳高度低,硬度小。撞销撞击有涂层刚性隔热瓦时由于涂层强度高形成的凹坑小,回跳高度高,硬度大,所以材料表面制备涂层后肖氏硬度从 3.0 提高到 8.7。

表 1 有无涂层刚性隔热瓦弯曲强度和肖氏硬度对比

Tab.1 Comparison of flexural strength and shore hardness of rigid tiles without and with coating

刚性隔热瓦	弯曲强度/MPa	肖氏硬度
无涂层	6.46	3.0
有涂层	10.7	8.7

刚性隔热瓦使用时侧面需要制备高辐射涂层,图 5 是侧面有无涂层时的拉伸应力和位移曲线,可见侧面制备涂层后材料厚度方向的拉伸强度下降约 50%。



## 2.4 高辐射涂层对表面防水性能的影响

为了应对雨天等恶劣发射环境,刚性隔热瓦表面需要具有一定防水能力。如前所述(图1),刚性隔热瓦基体为孔径  $40\ \mu\text{m}$  左右的多孔材料,水滴在表面会快速渗入刚性隔热瓦基体内部。当制备高辐射涂层后,基体的孔被涂层填充,形成了较为光滑致密的表面,如图7水滴在表面能较长时间停留。



图7 含涂层刚性隔热瓦防水效果

Fig.7 Waterproof performance of the rigid tiles with coating

## 2.5 高辐射涂层对辐射加热隔热效果的影响

辐射加热试验结果如图8所示,辐射加热功率一定,有涂层表面吸收系数大导致表面温度高,刚性隔热瓦有无涂层试验平衡时的表面温度分别是  $972.7\ ^\circ\text{C}$  和  $941.3\ ^\circ\text{C}$ ,两者相差  $31.4\ ^\circ\text{C}$ 。有无涂层刚性隔热瓦  $1\ 800\ \text{s}$  试验结束时背面温度分别为  $681.4\ ^\circ\text{C}$  和  $558.8\ ^\circ\text{C}$ ,两者相差  $122.6\ ^\circ\text{C}$ 。对于同质材料而言,高温区温差( $31.4\ ^\circ\text{C}$ )小于低温区温差( $122.6\ ^\circ\text{C}$ ),违背传热学基本原理。

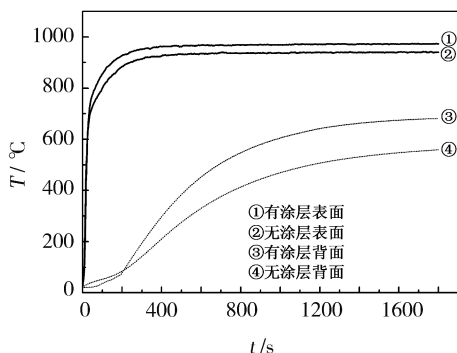


图8 有无涂层刚性隔热瓦辐射加热试验结果

Fig.8 Radiation heating test result of the rigid tiles without and with coating

图9为利用材料物性参数采用 ANSYS 软件模拟  $20\ \text{mm}$  厚不含涂层刚性隔热瓦正面  $972.7\ ^\circ\text{C}$  和  $941.3\ ^\circ\text{C}$  背面温升结果,对于无涂层刚性隔热瓦背面温升曲线与试验获得的基本一致,说明计算方法基本正确。计算获得的两者温差仅为  $31\ ^\circ\text{C}$ ,远小于试验测试温差  $122.6\ ^\circ\text{C}$ ,可见高辐射涂层导致了材料的背面温度

变化“异常”。

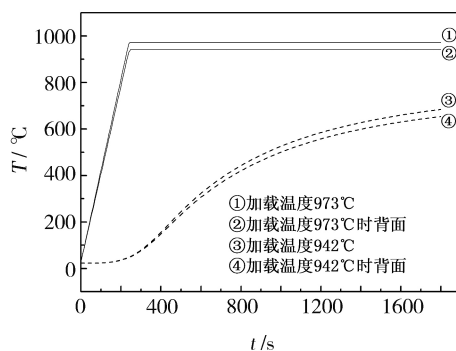


图9 有无涂层刚性隔热瓦辐射加热 ANSYS 模拟计算结果

Fig.9 Radiation heating result with ANSYS calculation of rigid tiles without and with coating

结合图10和刚性隔热瓦微观结构特点,假定不含涂层刚性隔热瓦表面层固体占  $20\%$ ,即表面层有效热源区域为样品面积的  $20\%$ ;而含涂层的表面有效热源为  $100\%$ ,导致了试验过程中表面加热层有效面积发生了本质变化,加之正面温度不同,所以导致试验获得的背温差  $122.6\ ^\circ\text{C}$ 。

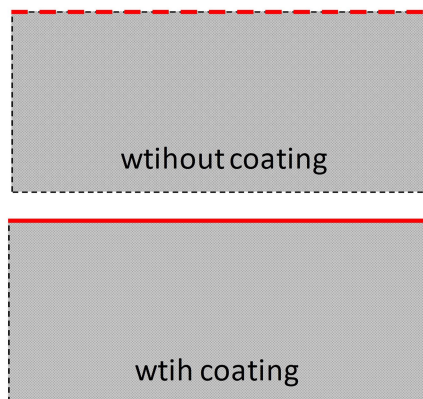


图10 有无涂层刚性隔热瓦结构示意图

Fig.10 Schematic diagram of the rigid tiles without and with coating

## 2.6 高辐射涂层对风洞考核隔热效果的影响

有无涂层刚性隔热瓦的辐射系数分别为  $0.85$  和  $0.8$ ,在相同热流条件下,辐射系数高,风洞考核过程中向外辐射的热量越大,表面温度越低,向内部传递传热就少,背面温度上升的速率就慢,背面温度就低。如图11所示,因为热电偶初始温度有差异,起始阶段两条背温曲线不重合。对于无涂层刚性隔热瓦,从  $80\ \text{s}$  左右背面温度开始上升,而有涂层刚性隔热瓦从  $120\ \text{s}$  左右背面温度开始上升,前者上升速度比后者快,两者背面温度差距越来越大,试验  $250\ \text{s}$  结束时背面温度分别为  $72.45\ ^\circ\text{C}$  和  $42.79\ ^\circ\text{C}$ 。

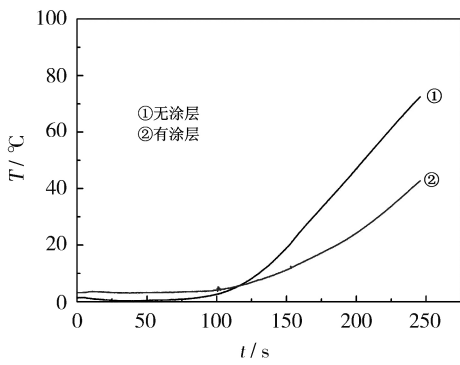


图 11 有无涂层刚性隔热瓦风洞试验结果  
Fig.11 Wind tunnel test results of the rigid tiles without and with coating

## 2.7 空间碎片冲击

如图 12 所示,由于涂层强度较高,高速碎片没有对材料表面产生大的缺陷,仅为直径约 5 mm 微小浅凹坑,由于基体内部丰富的孔隙抑制了裂缝的扩展,材料其余部分完整。

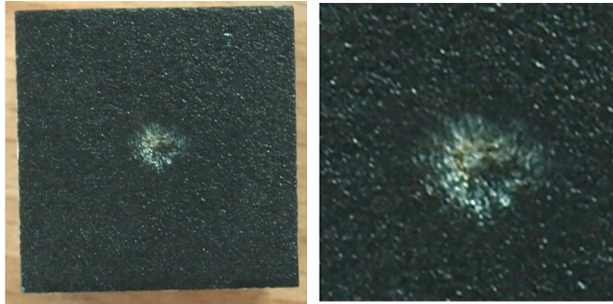


图 12 撞击试验后含涂层刚性隔热瓦  
Fig.12 Rigid tiles with coating after impact test

## 3 结论

(1)刚性隔热瓦表面高辐射涂层为致密梯度结构,表面平整,辐射系数大于 0.85,防水效果好。

(2)表面有高辐射涂层刚性隔热瓦的弯曲强度和肖氏硬度都有较大幅度的提高。侧面有高辐射涂层刚性隔热瓦的拉伸强度因为涂层和基体的不匹配降低了近 50%。

(3)高辐射涂层提高了表面黑度,吸收更多热量使表面温度升高,辐射加热样件背面温度上升快。高辐射涂层将气动加热辐射掉一部分,降低表面温度使风洞考核样件具有更低的背面温度。

(4)含高辐射涂层刚性隔热瓦能经受典型空间碎片冲击,未产生致命性的破坏。

### 参考文献

- [1] 曾昭焕.航天飞机用刚性陶瓷瓦隔热材料发展概况[J].宇航材料工艺,1989(2):12-20.
- [2] CLELAND J, et al..Thermal Protection System of the Space Shuttle[D]. NASA Contractor Report 4227, 1989.
- [3] HENG,et al..Rigid Insulation and Method of Producing Same[P].US Patent 6716782.
- [4] FLETCHER JAMES C.GHEL. Reaction cured glass and glass[P].US Patent 4093771.
- [5] STEWART D A. LEISER D B. Toughened uni-piece fibrous reinforous oxidization resistant composite [P]. US Patent 7314648.