

微陨石撞击下 ZrO_2 涂层的损伤效应 *

白羽 杨德庄 刘勇 秦伟

(哈尔滨工业大学)

摘 要 利用静电式粉尘加速器模拟空间微米级陨石粒子,研究了不同撞击速度下航天器外表面 ZrO_2 涂层的损伤形式.结果表明, ZrO_2 热控涂层在空间微陨石的撞击下,涂层表面形成砂蚀损伤,导致光学性能发生变化.热控涂层表面破坏程度及形式与碰撞速度有关, ZrO_2 涂层表面砂蚀损伤是导致涂层光学性能变化的原因. ZrO_2 涂层吸收发射比由碰撞前的 0.23 变为碰撞后的 0.75,涂层性质由太阳吸收体向绝对反射体转变.

关键词 材料失效与保护, ZrO_2 涂层, 微陨石, 吸收发射比, 静电加速器, 高速撞击

分类号 V416

文章编号 1005-3093(2005)06-0669-04

Damage effect of micrometeoroid on ZrO_2 coating

BAI Yu YANG Dezhuang** LIU Yong QIN Wei

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

* Supported by Space Debris Research Project Supported by National Defense Committee No.kjsp2001-2005. Manuscript received November 3, 2004; in revised form June 14, 2005.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(0451)86414445,
E-mail:yuyan5729@sina.com.cn

ABSTRACT Abrasion was formed on surface under impact of space micrometeoroid against ZrO_2 coatings used in outer surface of spacecraft, resulting in the change of optical property. The damage form of ZrO_2 coatings under the varied impact speeds was investigated using an electrostatic dust accelerator to simulate space micrometeoroid particles with size in micron level. The results showed that the damage extent and form of thermal control coatings depended on impact speed. It was found that the abrasion was the main reason for the change of optical property of ZrO_2 coatings. The ratio of absorption and emission was changed from 0.23 before impact to 0.75 after impact for ZrO_2 coatings. The optical property of coatings was transformed from solar absorber to absolute reflector under the impact of dust particles.

KEY WORDS materials failure and protection, ZrO_2 coating, micrometeoroid, ratio of absorptance and emittance, electrostatic accelerator, high speed impact

ZrO_2 热控涂层用于调整固体表面热辐射性质,是航天器热控系统的重要组成部分,其工作原理是调节物体表面的太阳吸收比 α_s 和发射率 ϵ 以控制物体的热量平衡.在设计长寿命卫星及空间站时,表面热控涂层的性能衰退是影响航天器寿命的重要因素.我国航天工作者非常重视空间环境对航天器外表热控涂层材料性能的影响研究,但是关于微米级太空陨石与热控涂层材料

* 国防科工委空间碎片行动 kjsp2001-2005 资助项目. 2004 年 11 月 3 日收到初稿; 2005 年 6 月 14 日收到修改稿.
本文联系人: 杨德庄, 教授, 哈尔滨市 150001, 哈尔滨工业大学 432 信箱

的交互研究工作尚未开展.

人类日益频繁的太空活动对低轨道空间造成严重的太空垃圾污染, 截面 1 m^2 的航天器与尺寸 $200 \mu\text{m}$ 的微陨石粒子碰撞概率为 $1 \text{ time}/350 \text{ d}$, 而与 $1 \mu\text{m}$ 的微陨石粒子碰撞概率高达 $10^5 \text{ times}/\text{d}$ ^[1]. 这种微米级陨石粒子虽然不能击穿航天器蒙皮, 但是其速度高、数量大, 长时间对航天器外表材料的累积作用, 对热控涂层材料等具有极大的危害作用, 已直接影响航天器正常运行和在轨服役寿命^[2]. 本文使用静电式粉尘加速器, 模拟研究微米级陨石粒子对航天器 ZrO_2 热控涂层的损伤形式以及光学性能的变化.

1 实验方法

将 ZrO_2 涂层涂敷到铝基片上, 制备出实验用试样. 选择尺寸 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的 Al 粉末作为粉尘粒子. 试验用设备为静电式粉尘加速器, 真空室的真空度为 $5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$. 利用法拉第环、信号放大器、脉冲发生器和记录装置测量粉尘的速度和数量^[3]. 碰撞对象 ZrO_2 涂层为属于太阳反射体 ($\alpha_s \approx 0, \varepsilon \approx 1$) 性质的涂层, 其太阳吸收比 α_s 为 0.2, 发射率 ε 小于 0.9. 采用传感器和激光动态跟踪仪测量粉尘粒子的飞行速度和粉尘粒子剂量. Al 粒子束撞击热控涂层的速度为 $0.1 \sim 5 \text{ km/s}$.

用 M И M-8A 型光学显微镜和 P 9 M-100y 型扫描电镜观察试验前后试样表面的损伤形貌; 采用积分球仪和热辐射计测量太阳吸收比和发射率.

2 结果与讨论

2.1 单个粒子碰撞对表面的损伤形式

热控涂层表面的损伤形式取决于 Al 粒子碰撞速度, 低于 1 km/s 时 Al 粒子飘浮并吸附在 ZrO_2 涂层表面, 造成表面吸附污染; 高速碰撞下涂层表面出现陷坑及裂纹. 粉尘粒子束撞击后, 可以在热控涂层的表面形成小岛状薄膜组织. 低速和高速粒子可以钻入涂层里. 图 1 中光亮处为镶嵌的 Al 粒子.

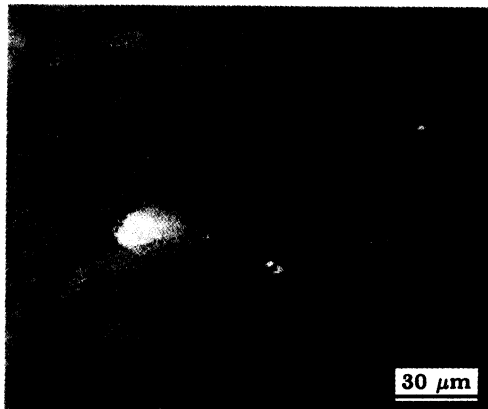


图 1 ZrO_2 涂层经 $<1 \text{ km/s}$ 的 Al 粒子碰撞表面损伤形貌

Fig.1 Micrograph showing damage morphology on ZrO_2 coatings due to collision by Al dust particles with $<1 \text{ km/s}$

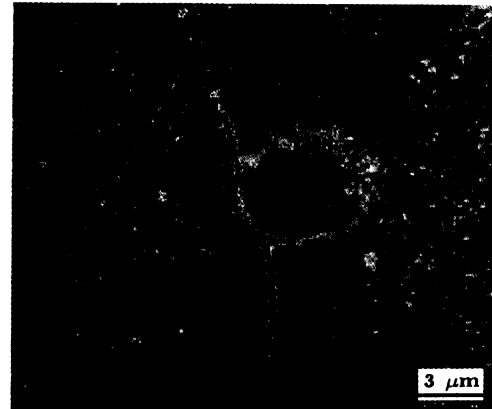


图 2 ZrO_2 涂层经 $1 \sim 2 \text{ km/s}$ 的 Al 粒子碰撞形成表面损伤形貌

Fig.2 Micrograph showing damage morphology on ZrO_2 coatings due to collision by Al dust particles with $1 \sim 2 \text{ km/s}$

经速度为 $1\sim 2$ km/s 的 Al 粒子碰撞后, 涂层表面基本损伤形式为陷坑及裂纹. 材料表面有较大的裂纹, 陷坑内部塌陷, 坑较深, 坑壁较陡. 陷坑底部及周围有大量碎屑. 整个损伤区域形状近似于三角形, 陷坑中心部位被 Al 粒子按流体力学机制洞穿. ZrO_2 热控涂层经单个 Al 粒子高速碰撞后的表面损伤形貌如图 2 所示.

受到速度为 5 km/s 以上 Al 粒子的撞击后, ZrO_2 热控涂层的表层出现脱落 (图 3). 由图 3 可见, 涂层表层以碰撞点为圆心在层界处呈较规则圆形脱落, 整个损伤缺陷尺寸是 Al 粒子直径的几十至几百倍. 对次表层坑底的观测发现, 坑底上散落着大量的微米级小颗粒.

可见, 低速碰撞时 Al 粒子吸附或镶嵌到材料表面上; 高速碰撞时 Al 粒子对材料表面产生陷坑和裂纹等缺陷; 超高速碰撞时 Al 粒子可在 ZrO_2 热控涂层上产生超大尺寸陷坑. 大多数类型的热控涂层具有多层结构. 高速微粒子对这

种材料的作用与对单层薄板或半无限物体的作用是不同的. 撞击产生的缺陷的特点在很大程度上取决于粒子尺寸、涂层厚度、层的数量、连接性及各层的力学特征. 通常用两种典型的作用机理 (流体力学和爆炸学) 研究撞击过程^[4]. 按流体力学机制损伤, Al 粒子以 $1\sim 2$ km/s 撞击 ZrO_2 涂层, 相当于高速粒子撞击无限大平板的情况. 爆炸机制损伤现象常出现在带有脆性表面层的热控涂层上, 除 ZrO_2 涂层外, 铝基油漆膜型热控涂层被微米级 Al 粒子高速撞击后, 也出现表层油漆膜大块脱落现象.

2.2 涂层表面损伤面积和光学性能变化

在光学显微镜下可以观察到高速和低速粒子在 ZrO_2 涂层形成的陷坑, 并估算出由 Al 粒子和陷坑组成的损伤面积. 放大 320 倍后, 从总面积为 $(7\sim 9)\times 10^{-3}cm^2$ 的热控涂层上选取 6~10 个点, 并把高速粒子和低速粒子撞击形成的陷坑相区分. 用电子显微镜可以评估飘浮或镶嵌在涂层表面 Al 粒子所占的面积, 为此需要放大 500~550 倍, 即可确定 Al 粒子占总面积的比例. 选取几个试样采用静电加速法做重复性试验, 结果表明, Al 粒子对涂层损伤状况大致相同, 均由碰撞陷坑及镶嵌的粉尘粒子组成. 但是, 每个试样的陷坑及 Al 粒子所占损伤缺陷面积比例不同, 使其吸收发射比有一定差异. 所有试样试验前后吸收发射比 α_s/ε 均发生较大变化. 涂层碰撞损伤情况及光学性能演化测量结果列于表 1. 由表 1 可知, 粉尘撞击热控涂层导致其表面发生损伤, 是涂层光学性能发生改变的根本原因, 将严重影响航天器的热平衡规范.

如果已知微米级陨石粒子在宇宙空间的分布状态, 则可通过地面模拟试验结果对空间微陨石环境因素作用下长时间在轨服役的各种热控涂层状态进行预报, 并为优选航天器热控材料提供依据.

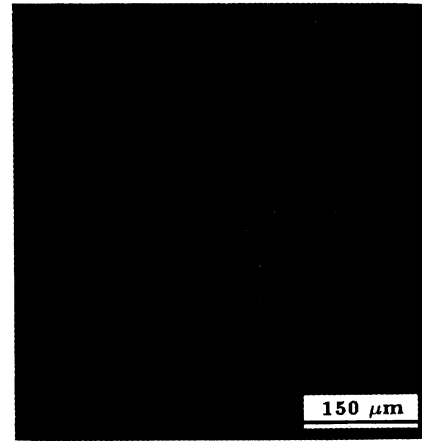


图 3 ZrO_2 涂层经 5 km/s 以上的 Al 粒子碰撞后产生超大尺寸陷坑形貌

Fig.3 Morphology of crater with huge size on ZrO_2 coatings caused by Al particles with >5 km/s

表 1 ZrO₂ 热控涂层损伤面积与光学性能关系Table 1 Relationship of optical property of ZrO₂ thermal control coating with its damaged area

Sample	ZrO ₂ thermal control coating			
$\alpha_{s0}/\varepsilon_0$	0.23	0.226	0.223	0.223
$\alpha_{s1}/\varepsilon_1$	0.75	0.733	0.704	0.764
$S_k\%$	0.09	0.2	0.1	0.17
$S_f\%$	7.3	9.2	7.12	7.2

Note: ε_0 —original emissivity; ε_1 —emissivity after impact; ε_{s0} —original sun absorptance; ε_{s1} —sun absorptance after impact; $S_k(\%)$ —area proportion of pits; $S_f(\%)$ —area proportion of Al particles

2.3 涂层表面损伤与光学性能变化关系

通过计算缺陷所占面积可以确定热控涂层光学性能的改变程度. 在 Al 粒子作用下热控涂层光学性能的演化规律为^[5] $K_p=1-(1-K^\infty \exp[-(1-K^\infty)K_s])$, 其中 K_p 为光学参数的变化程度, 等于实验值 $P(\alpha_s$ 或 $\varepsilon)$ 与原始值 P^0 的比值 $K_p=P/P^0$; K^∞ 为 K_p 的极限值 $K_s=\sum S_1/S_0$, 受损表面 S_1 与样品表面 S_0 的比值. 实验结果表明, 由于 Al 粒子的撞击, ZrO₂ 热控涂层的 $\Delta\alpha_s \gg \Delta\varepsilon$. 可见, 涂层的性质由太阳反射体 ($\alpha_s \approx 0, \varepsilon \approx 1$) 向绝对吸收体 ($\alpha_s \approx 1, \varepsilon \approx 1$) 改变, 这种类型涂层太阳吸收比的极限值为 0.65~0.80.

为了定量评价 Al 粒子对热控涂层的损伤作用, 引入比动能 $E_b = \frac{\rho_t \nu_p^2}{2}$, 其中 ν_p 为 Al 粒子的平均撞击速度; ρ_t 为 Al 粒子束的积分通量. 于是, 太阳反射体型热控涂层太阳吸收比变化与 Al 粒子动力学能量的关系为 $\alpha_s = \alpha_s^0 + (\alpha_s^\infty - \alpha_s^0)[1 - \exp(-KE_b)]$, 其中系数 K 由实验确定 ($K=(5\sim 6) \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{J}$).

太阳反射体型热控涂层发射率变化取决于涂层表层的破坏程度. 表层破坏程度较轻时, $\varepsilon^\infty = \varepsilon^0$; 表层破坏较严重时, 发射率变化的表达式为 $\varepsilon_s = \varepsilon_s^0 + (\varepsilon_s^\infty - \varepsilon_s^0)[1 - \exp(-KE_b)]$, 其中系数 K 为 $3 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{J}$. 实验结果表明, 太阳反射体型的热控涂层对 Al 粒子的碰撞破坏作用比较敏感, 涂层表面光学性能变化为非线性. 航天器外表面被微米级 Al 粒子碰撞的概率为 $(2\sim 4) \times 10^5 \text{times}/\text{m}^2\text{s}^{[6]}$, 涂层的太阳吸收比增加 40% 至 50%.

3 结 论

Al 粒子撞击热控涂层, 碰撞速度不同, 对涂层表面损伤形式不同. 在每秒几米至几百米的低速阶段, Al 粒子粘附在涂层的表面, 造成吸附污染; 在 1~2 km/s 的高速阶段, 涂层表面的损伤形式为陷坑和裂纹; 碰撞速度达到 5 km/s 以上, 涂层表面发生超大损伤, ZrO₂ 涂层的表层出现脱落. Al 粒子撞击导致 ZrO₂ 热控涂层太阳吸收比 α_s 较大幅度增加, 而发射率 ε 基本不变, 涂层的性质由太阳吸收体向绝对反射体转变.

参 考 文 献

- 1 V.L.Barsukov, T.N.Nazarova, Chronometer Communication, **22**(1), 61(1988)
- 2 V.L.Barsukov, T.N.Nazarova, Publ. Co., 243, (1983)
- 3 N.D.Semkin, Y.Bai, The Physics and Technology Applications of Wave Processes, **333~335**, (2003)
- 4 N.D.Semkin, Y.Bai, Transaction SSAU, **6**, 42(2001)
- 5 N.D.Semkin, Y.Bai, Physics and Chemistry Machining Material., **6**, 42(2002)
- 6 Y.A.Abazi, Z.A.Bacukova, B.L.Kacev, Space Investigate., **T19**, 790(1981)