

# 空间辐照模拟环境对消杂光热控涂层性能的影响

平托<sup>1</sup>, 周颖<sup>2</sup>, 余成武<sup>3</sup>, 李春江<sup>3</sup>, 白晶莹<sup>1</sup>, 郑琰<sup>1</sup>, 孟腾<sup>1</sup>, 张家强<sup>1</sup>

(1.北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094; 2.国家知识产权局专利局专利审查协作北京中心, 北京 100160; 3.北京控制工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** **目的** 研究空间辐照环境对 SCB-1 消杂光热控涂层性能的影响。**方法** 采用剂量为 5000 ESH 的真空-紫外辐照、总注量为  $2.5 \times 10^{15}$  p/cm<sup>2</sup> 的真空-质子辐照、总注量为  $2.5 \times 10^{16}$  e/cm<sup>2</sup> 的真空-电子辐照以及  $2.0 \times 10^{21}$  atoms/cm<sup>2</sup> 的原子氧辐照, 分别对 SCB-1 型消杂光热控涂层进行模拟空间环境试验, 分析空间辐照试验前后涂层太阳吸收比  $\alpha_s$  与半球发射率  $\varepsilon_H$  的变化, 并通过 X-射线光电子能谱 (XPS) 检测涂层表面元素状态变化, 从而判断 SCB-1 涂层耐空间各项辐照因素的稳定性。**结果** 经真空-紫外辐照后, SCB-1 涂层全波段  $\alpha_s$  下降了 0.007~0.009, 400~1100 nm  $\alpha_s$  下降了 0.008~0.010; 经原子氧作用后, SCB-1 涂层全波段与 400~1100 nm  $\alpha_s$  均下降了 0.006~0.009; 经真空-质子辐照后, 全波段  $\alpha_s$  下降了 0.004~0.005, 400~1100 nm  $\alpha_s$  下降了 0.005; 经真空-电子辐照后, 吸收比无明显变化。以上辐照过程中, SCB-1 涂层的半球辐射率均无明显变化。**结论** 经历空间模拟辐照试验, SCB-1 消杂光热控涂层展现出了极佳的抗空间辐照稳定性, 可以满足后续 GEO、LEO 等航天器的长寿命设计使用需求。

**关键词:** 空间环境; SCB-1 消杂光热控涂层; 太阳吸收比; 半球发射率; 低反射率

**中图分类号:** TQ63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)12-0030-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.12.005

## Effect of Simulated Space Radiation Environments on Properties of Stray Light Coatings

PING Tuo<sup>1</sup>, ZHOU Ying<sup>2</sup>, YU Cheng-wu<sup>3</sup>, LI Chun-jiang<sup>3</sup>, BAI Jing-ying<sup>1</sup>,  
ZHENG Yan<sup>1</sup>, MENG Teng<sup>1</sup>, ZHANG Jia-qiang<sup>1</sup>

(1.Beijing Spacecrafts, Beijing 100094, China; 2.Patent Examination Cooperation (Beijing) Center of the Patent Office, China, Beijing 100160, China; 3.Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effects of space irradiation environment on the properties of SCB-1 stray light coatings. Simulated space environment test of SCB-1 stray light coatings was conducted with vacuum-ultraviolet dose of 5000 ESH, vacuum-proton radiation flux of  $2.5 \times 10^{15}$  p/cm<sup>2</sup>, vacuum-electron radiation flux of  $2.5 \times 10^{16}$  e/cm<sup>2</sup> and atomic oxygen

收稿日期: 2020-07-18; 修订日期: 2020-09-15

Received: 2020-07-18; Revised: 2020-09-15

基金项目: 基础加强计划技术领域基金项目 (2019-JCJQ-JJ-455); 装发领域基金项目 (61409230605)

Fund: Supported by the Field Fund Projects for Foundation Enhancement Programme (2019-JCJQ-JJ-455) and the Department of Equipment Development (61409230605)

作者简介: 平托 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为表面工程。

Biography: PING Tuo (1990—), Male, Master, Engineer, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 张家强 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为表面工程。邮箱: jazhangl@163.com

Corresponding author: ZHANG Jia-qiang (1985—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: surface engineering. E-mail: jazhangl@163.com

引文格式: 平托, 周颖, 余成武, 等. 空间辐照模拟环境对消杂光热控涂层性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 30-37.

PING Tuo, ZHOU Ying, YU Cheng-wu, et al. Effect of simulated space radiation environments on properties of stray light coatings[J]. Surface technology, 2020, 49(12): 30-37.

dose of  $2.0 \times 10^{21}$  atoms/cm<sup>2</sup>. The changes in the solar absorption  $\alpha_s$  and hemispheric emissivity  $\varepsilon_H$  of the coatings before and after the space irradiation test were analyzed. The state changes of surface elements of the coatings were detected by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) to judge the stability of SCB-1 coatings under different radiation factors. After vacuum-ultraviolet irradiation, the solar absorption of the SCB-1 coatings in the full-wave band decreased by 0.007~0.009, and the solar absorption in 400~1100 nm decreased by 0.008~0.01. After atomic oxygen radiation, the solar absorption in both the full-wave band and 400~1100 nm decreased by 0.006~0.009. After vacuum-proton radiation, the solar absorption in the full-wave band and 400~1100 nm decreased by 0.004~0.005 and 0.005 respectively. After vacuum-electron radiation, no significant change was found in the absorption. There was no significant change in the hemispheric emissivity of SCB-1 coatings during the above irradiation processes. The simulated space irradiation experiment demonstrates that the SCB-1 stray light coatings have excellent stability against space irradiation. They can meet the needs on design of long service life spacecraft such as LEO and GEO.

**KEY WORDS:** space environments; SCB-1 stray light coatings; solar absorption ratio; hemispheric emissivity; low reflectance

空间在轨条件下, 由于没有热传导与热对流, 因此航天器热量传递的方式主要通过热辐射形式进行。热控涂层是目前热控设计应用中最广泛的热辐射性能材料, 通过改变航天器表面的太阳吸收比 ( $\alpha_s$ ) 和半球发射率 ( $\varepsilon_H$ ) 来实现航天器表面的温度控制<sup>[1-3]</sup>。消杂光热控涂层是一种主要应用于空间相机与星敏感器等光学载荷的吸光型热控涂层, 凭借其超高的太阳吸收比, 从而抑制光学系统外部及内部杂散光, 对提高光学载荷成像信噪比、对比度与识别精度起到决定性的作用<sup>[4-6]</sup>。

由于空间消杂光热控涂层对航天器光学载荷的重要作用, 促使世界上许多航天强国对这种热控涂层都开展了大量研究, 也开发出了多种不同牌号的性能优越的产品。美国实现应用的有 Marting Black 黑色涂层、Aeroglaze®Z306 涂层和 J-black 涂层。英国国家物理研究室 (NPL) 开发出了太阳吸收比大于 0.99 的超级涂层 (Super Black), Surrey nanosystmes 公司生产出了 Vanta Black 黑色涂层。俄罗斯实现了 AK-512 与 AK-243 黑色等涂层的应用。我国目前航天应用的多为进口消杂光热控涂层产品, 太阳吸收比只能达到 0.97, 这对我国航天器实现高精度探测与定位造成一定的技术限制<sup>[7-9]</sup>。

航天器在轨条件下, 消杂光热控涂层作为星体外表面热控涂层, 处于最恶劣的空间极端环境中。高真空下的紫外辐照、电子辐照以及质子辐照, 会使得涂层性能退化, 影响消杂光与热控性能<sup>[10-12]</sup>。近地轨道环境中存在的大量原子氧也会侵蚀涂层, 导致涂层出现局部脱落与露底现象, 严重的甚至会污染光学载荷镜头表面<sup>[13-15]</sup>。

根据空间高精度成像需求, 研究团队研制了 SCB-1 型高吸收率消杂光热控涂层 (SCB-1 涂层), 其全波段太阳吸收比  $\alpha_s \geq 0.98$ , 半球发射率  $\varepsilon_H = 0.91 \pm 0.02$ , 在空间光学探测载荷看重的 400~1100 nm 波段, 太阳吸收比  $\alpha_s \geq 0.98$ 。本文针对 SCB-1 涂层开展了空间模拟辐照环境测试, 研究各项空间辐照环境对该涂

层性能的影响, 从而判断 SCB-1 涂层的空间抗辐照稳定性。

## 1 试验

### 1.1 SCB-1 空间消杂光热控涂层样件制备

1) 涂层材料。SCB-1 高吸收率消杂光热控涂层为北京卫星制造厂有限公司自研产品, 主要成分为有机硅树脂、氧化硅粉体及炭黑等, 固化剂为正硅酸乙酯, 催化剂为二月桂酸二丁基锡, 溶剂为乙酸丁酯。

2) 试验样品制备。采用 40 mm×40 mm×2 mm 的 2A12 铝合金试片, 表面进行磷酸阳极氧化前处理 (磷酸 95 g/L, 电压为 11 V, 持续时间为 20 min, 阴极板为钛板)。采用 0.2 MPa 空气喷涂的方法进行 SCB-1 消光涂层的制备, 喷涂 6~8 遍, 涂层厚度为 30~80 μm, 经室温干燥 12 h 后, 再 85 °C 烘烤固化 16 h, 得到 SCB-1 空间消杂光热控涂层试样。

### 1.2 试验条件

真空-紫外辐照试验按照 GJB 2502.5—2015 的测试方法进行, 采用汞氙灯为辐照源, 光谱范围包括近紫外及远紫外波段, 真空度  $< 1.3 \times 10^{-3}$  Pa, 辐照剂量为 5000ESH, 加速因子为 5。分段测试试件热辐射性能, 真空-紫外辐照试验设备与试片测试状态如图 1 所示。

原子氧试验按照 GJB 2502.9—2006 的测试方法进行, 试验设备由真空容器、真空抽气系统、三维移动机构、束流发射装置、微波发生系统和总体控制及数据采集系统等组成, 真空度  $< 1.3 \times 10^{-3}$  Pa, 辐照总剂量为  $2.0 \times 10^{21}$  atoms/cm<sup>2</sup>, 通量为  $5.0 \times 10^{15}$  atoms/(cm<sup>2</sup>·s)。分段测试试件热辐射性能, 原子氧设备与试片测试状态如图 2 所示。

真空-质子辐照试验按照 GJB 2502.6—2006 的测试方法进行, 真空度  $< 1.3 \times 10^{-3}$  Pa, 质子能量为 50 keV, 质子注量为  $2.5 \times 10^{15}$  p/cm<sup>2</sup>, 通量为  $1.0 \times 10^{10}$  p/(cm<sup>2</sup>·s)。真空-电子辐照试验按照 GJB 2502.7—2006 的实验方

法, 真空度  $< 1.3 \times 10^{-3}$  Pa, 能量为 40 keV, 电子注量为  $2.5 \times 10^{16}$  e/cm<sup>2</sup>, 通量为  $1.0 \times 10^{10}$  e/(cm<sup>2</sup>·s)。分段测

试涂层的热辐射性能, 真空-质子及真空-电子辐照设备与试片测试状态如图 3 所示。

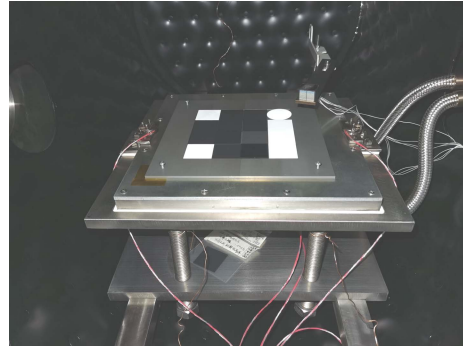
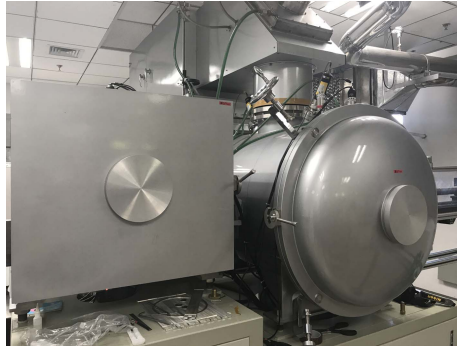


图 1 真空-紫外辐照设备与试片摆放状态

Fig.1 Vacuum-UV irradiation equipment and placement of test plates

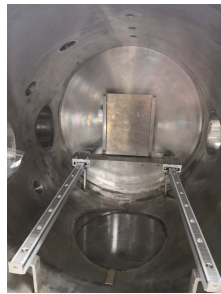
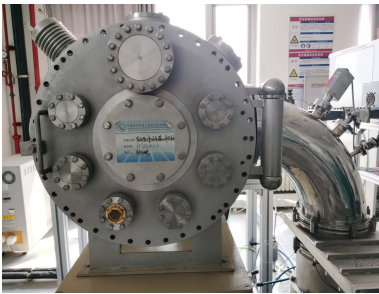


图 2 原子氧设备与试片摆放状态

Fig.2 Atomic oxygen irradiation equipment and placement of test plates

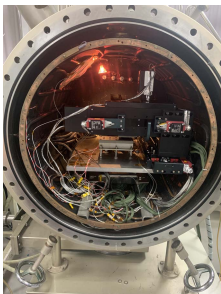


图 3 真空-质子电子辐照设备与试片摆放状态

Fig.3 Vacuum-proton & electron irradiation equipment and placement of test plates

涂层太阳吸收比  $\alpha_s$  依据 GJB 2502.02—2015 检测; 涂层半球发射率  $\varepsilon_H$  依据 GJB 2502.03—2015 检测。

XPS 能谱采用 ULVAC-PHI 公司 PHI Quantera SXM 设备进行检测, 检测方法依据 GB/T 19500—2004 《X 射线光电子能谱分析方法通则》, 设备采用 Al K $\alpha$  射线为激发源, 光子能量为 1253.6 eV, 线宽为 0.85 eV, 溅射条件为扫描型 Ar<sup>+</sup>枪, 标样为热氧化 SiO<sub>2</sub>/Si。

## 2 结果及分析

### 2.1 真空-紫外辐照对 SCB-1 消杂光热控涂层性能的影响

SCB-1 涂层经 5000ESH 的真空-紫外辐照后, 涂层的热辐射性能变化数据见表 1 (取 6 个平行试样)。涂层全波段太阳吸收比下降了 0.007~0.009, 400~1100 nm 太阳吸收比下降了 0.008~0.010, 半球发射率变化相对较小, 在测量误差范围内。由 SCB-1 涂层吸收比测试数据 (如图 4a 所示) 可知, 涂层在 1500~3500ESH 时, 太阳吸收比下降明显。经 3500ESH 紫外辐照后, 涂层太阳吸收比逐渐平稳, 无明显变化。观察试验前后 SCB-1 涂层的太阳波段吸收光谱曲线变化, 如图 4b 所示。曲线呈整体下降趋势, 400~850 nm 波段下降较为明显, 符合表 1 中  $\Delta\alpha_{S400\sim1100nm}$  大于  $\Delta\alpha_s$  的特征。SCB-1 涂层经 5000ESH 真空-紫外辐照前后的外观状态如图 5 所示, 涂层在试件表面均未发现脱

表 1 经 5000ESH 真空-紫外辐照前后 SCB-1 消光热控涂层热辐射性能

Tab.1 Thermal radiation performance of SCB-1 coating before and after vacuum-UV irradiation at 5000ESH

Samples	$\alpha_s$		$\Delta\alpha_s$	$\alpha_{S\ 400\sim1100\ nm}$		$\Delta\alpha_{S\ 400\sim1100\ nm}$	$\varepsilon_H$		$\Delta\varepsilon_H$
	Before UV irradiation	After UV irradiation		Before UV irradiation	After UV irradiation		Before UV irradiation	After UV irradiation	
SCB-1 1#	0.984	0.975	0.009	0.984	0.974	0.010	0.932	0.927	0.005
SCB-1 2#	0.984	0.977	0.007	0.984	0.975	0.009	0.933	0.931	0.002
SCB-1 3#	0.984	0.977	0.007	0.984	0.975	0.009	0.933	0.936	0.003
SCB-1 4#	0.984	0.976	0.008	0.984	0.974	0.010	0.930	0.925	0.005
SCB-1 5#	0.985	0.976	0.009	0.985	0.975	0.010	0.933	0.930	0.003
SCB-1 6#	0.984	0.977	0.007	0.984	0.975	0.009	0.933	0.932	0.001

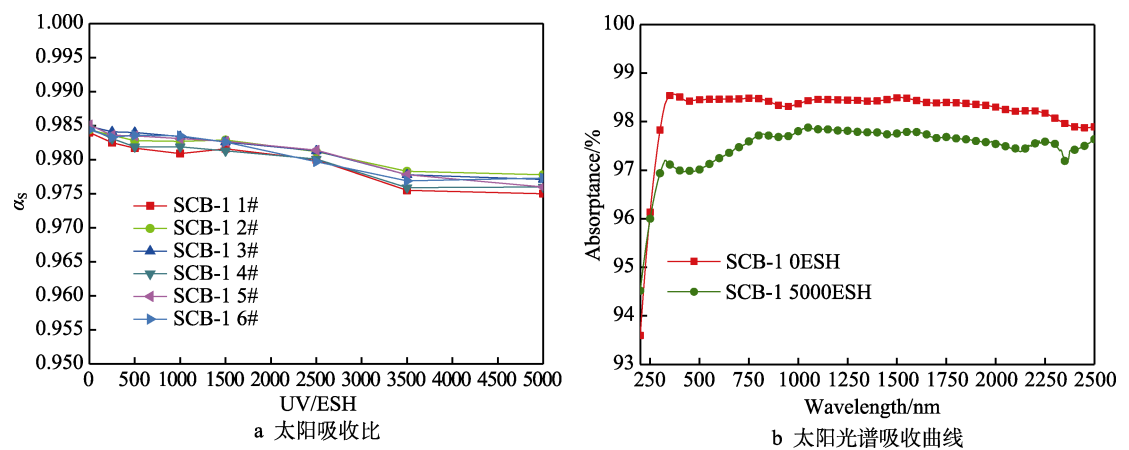


图 4 真空-紫外辐照过程中太阳吸收比变化值与测试前后太阳光谱吸收曲线  
Fig.4 Variation value of  $\Delta\alpha_s$  during vacuum-UV irradiation (a) and solar spectral curve before and after the test (b)

落与露底现象，但涂层外观颜色均明显变浅，由深黑色转为黑灰色。

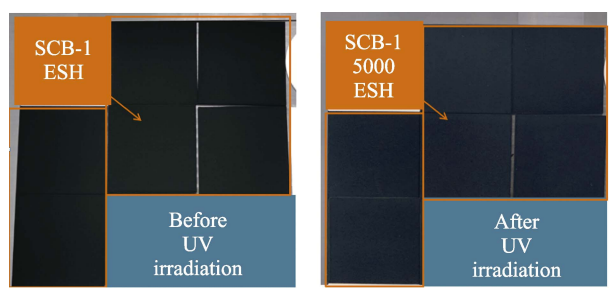


图 5 真空-紫外辐照前后 SCB-1 涂层外观状态  
Fig.5 Appearance state of SCB-1 coating before and after vacuum-UV irradiation

## 2.2 原子氧作用对 SCB-1 消杂光热控涂层性能的影响

SCB-1 涂层经  $2.0\times10^{21}$  atoms/cm<sup>2</sup> 的原子氧作用后，涂层的热辐射性能变化数据见表 2（取 3 个平行试样）。涂层全波段太阳吸收比与 400~1100 nm 太阳吸收比均下降了 0.006~0.009，半球发射率变化均相对较小。如图 6a 所示，经过  $1.0\times10^{21}$  atoms/cm<sup>2</sup> 的原子氧作用后，SCB-1 涂层的太阳吸收比逐渐平稳。观察图 6b 可以看出，原子氧作用前后，SCB-1 涂层太阳吸收光谱呈现整体下降趋势。经原子氧作用后，涂层外观状态无明显变化，试验前后色彩一致，无露底与脱落现象，如图 7 所示。

表 2 经  $2.0\times10^{21}$  atoms/cm<sup>2</sup> 真空-原子氧作用前后 SCB-1 消杂光热控涂层热辐射性能  
Tab.2 Thermal radiation performance of SCB-1 coating before and after atomic oxygen irradiation at  $2.0\times10^{21}$  atoms/cm<sup>2</sup>

Samples	$\alpha_s$			$\alpha_{S\ 400\sim1100\ nm}$			$\varepsilon_H$		
	Before UV irradiation	After UV irradiation	$\Delta\alpha_s$	Before UV irradiation	After UV irradiation	$\Delta\alpha_{S\ 400\sim1100\ nm}$	Before UV irradiation	After UV irradiation	$\Delta\varepsilon_H$
SCB-1 1#	0.984	0.978	0.006	0.984	0.978	0.006	0.926	0.929	0.003
SCB-1 2#	0.984	0.977	0.007	0.984	0.976	0.008	0.922	0.919	0.003
SCB-1 3#	0.982	0.973	0.009	0.982	0.973	0.009	0.919	0.915	0.004

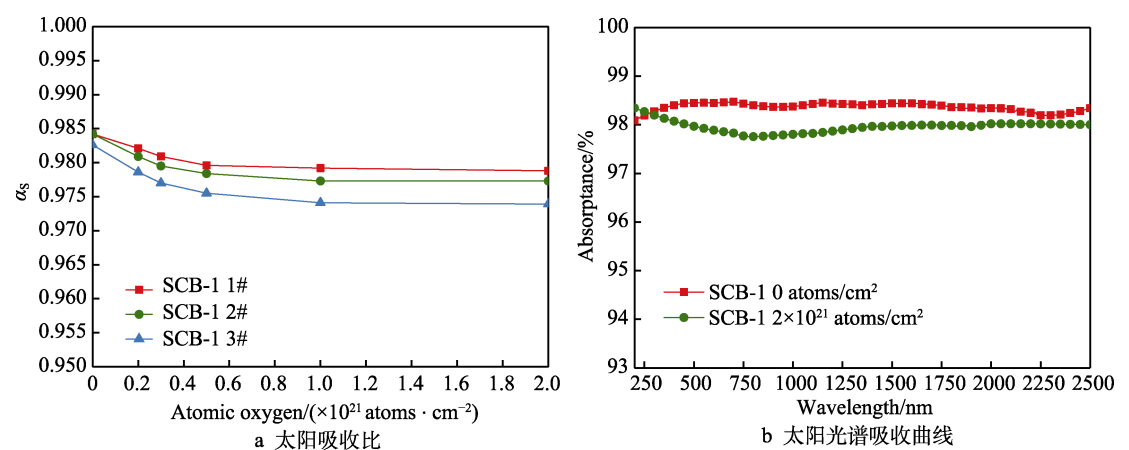


图 6 原子氧作用过程太阳吸收比变化值与测试前后太阳光谱吸收曲线  
Fig.6 Variation value of  $\Delta\alpha_s$  during atomic oxygen irradiation (a) and solar spectral absorption curve before and after the test (b)

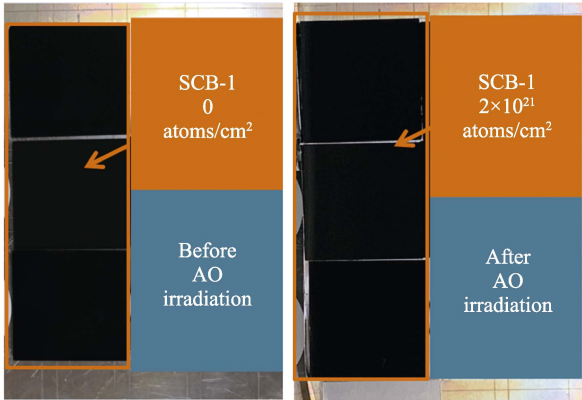


图 7 原子氧作用前后 SCB-1 涂层外观状态

Fig.7 Appearance state of SCB-1 coating before and after atomic oxygen irradiation

### 2.3 真空-质子及电子对 SCB-1 消杂光热控涂层性能的影响

SCB-1 涂层经  $2.5 \times 10^{15} \text{ p/cm}^2$  的真空-质子辐照

### 2.4 SCB-1 消杂光热控涂层空间辐照元素变化分析

通过 XPS 检测并结合以上测试数据, 对比不同

表 3 经  $2.5 \times 10^{15} \text{ p/cm}^2$  真空-质子辐照前后消杂光热控涂层热辐射性能

Tab.3 Thermal radiation performance of the SCB-1 coating before and after vacuum-electron irradiation at  $2.5 \times 10^{15} \text{ p/cm}^2$

Samples	$\alpha_s$			$\alpha_{S \text{ 400~1100 nm}}$			$\epsilon_H$		
	Before UV irradiation	After UV irradiation	$\Delta\alpha_s$	Before UV irradiation	After UV irradiation	$\Delta\alpha_{S \text{ 400~1100 nm}}$	Before UV irradiation	After UV irradiation	$\Delta\epsilon_H$
SCB-1 1#	0.985	0.980	0.005	0.985	0.980	0.005	0.925	0.923	0.002
SCB-1 2#	0.984	0.980	0.004	0.984	0.979	0.005	0.926	0.926	0
SCB-1 3#	0.984	0.979	0.005	0.984	0.979	0.005	0.923	0.924	0.001

表 4 经  $2.5 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$  真空-电子辐照前后消杂光热控涂层热辐射性能

Tab.4 Thermal radiation performance of the SCB-1 coating before and after vacuum- electron irradiation at  $2.5 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$

Samples	$\alpha_s$			$\alpha_{S \text{ 400~1100 nm}}$			$\epsilon_H$		
	Before UV irradiation	After UV irradiation	$\Delta\alpha_s$	Before UV irradiation	After UV irradiation	$\Delta\alpha_{S \text{ 400~1100 nm}}$	Before UV irradiation	After UV irradiation	$\Delta\epsilon_H$
SCB-1 1#	0.984	0.985	0.001	0.984	0.984	0	0.920	0.920	0
SCB-1 2#	0.984	0.985	0.001	0.984	0.985	0.001	0.930	0.930	0
SCB-1 3#	0.982	0.982	0	0.982	0.982	0	0.920	0.920	0

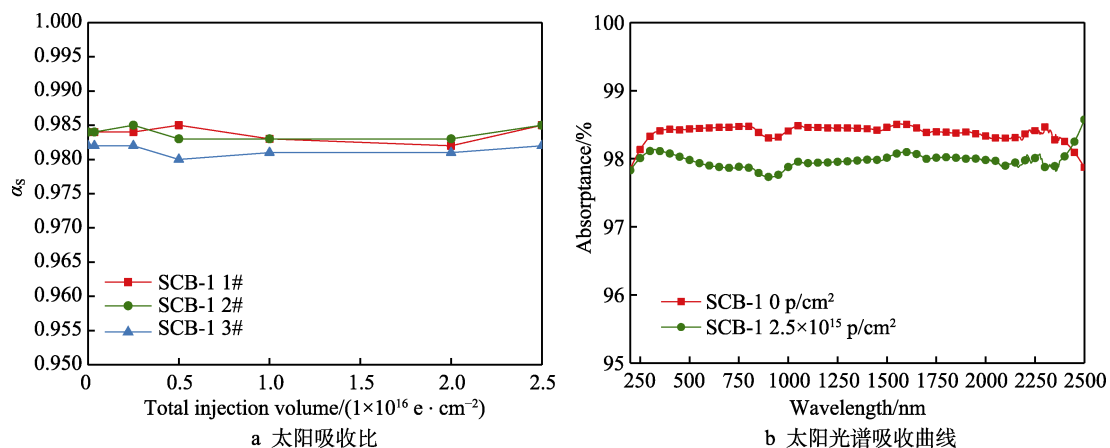


图 8 真空-电子作用过程太阳吸收比变化值与太阳光谱吸收曲线

Fig.8 Variation value of  $\Delta\alpha_s$  during vacuum-electron irradiation (a) and the solar spectral absorption curve (b)



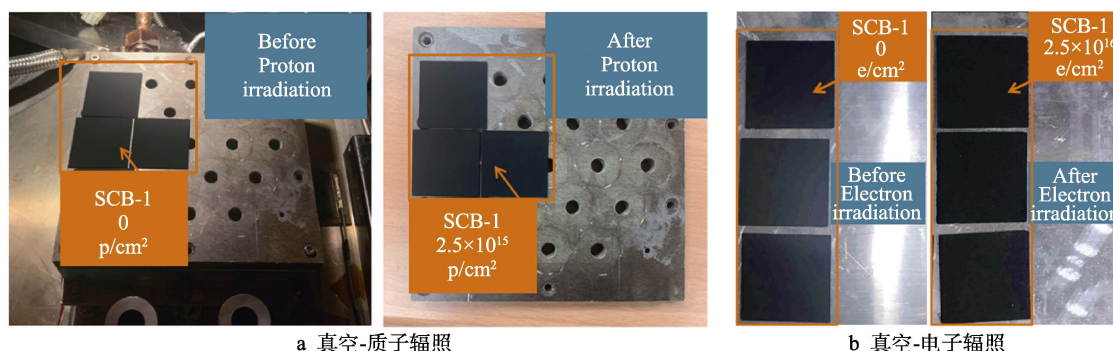


图 9 真空-质子及电子辐照前后 SCB-1 涂层外观状态

Fig.9 Appearance state of SCB-1 coating before and after vacuum-proton irradiation

辐照试验后 SCB-1 涂层与未经辐照 SCB-1 涂层宽谱图, 如图 10 所示。真空-紫外辐照后的 SCB-1 涂层图 10b 与未经辐照的 SCB-1 涂层图 10a 对比, 未出现新元素, 但 C、Si、O 元素变化明显。经紫外辐照后, C 元素原子数分数由辐照前的 22.88% 下降至 10.51%, 可能由于外表面有机树脂含碳链段降解, 影响了有机硅树脂透过率, 造成涂层黑度下降, 同时导致了太阳吸收比的下降。经原子氧作用的 SCB-1 涂层宽谱图如图 10c 所示, 可发现谱图中出现了 Sn、Ti 及 Fe 三种新元素, 其中 Sn 元素来自 SCB-1 涂层的二月硅酸二丁基锡催化剂, 而 Ti 与 Fe 元素分别来自放置涂层试样的钛板托盘与铁质支架。在原子氧高能轰击下, 以上两个部件的元素被激发, 并附着在涂层试样表面。此外, 经真空-电子与质子辐照后, SCB-1 涂层均含有 Sn 元素 (图 10d、e)。这说明原子氧、电子及质子相比于紫外辐照, 更能够穿透涂层表面, 激发涂层

内部不参与固化交联的 Sn 元素向外移动。去除 Ti、Fe 及 Sn 元素对三种非涂层固化组分的影响, 可发现真空-电子与质子辐照涂层中 C、Si、O 元素的原子数分数与未经辐照 SCB-1 涂层接近。原子氧轰击的 SCB-1 涂层的氧原子数分数达到 45.78%, 碳原子数分数下降至 14.53%, 硅原子数分数下降至 24.93%, 这说明长时间高能原子氧轰击造成涂层表面有机硅树脂或炭黑受到一定量的氧原子嵌入, 导致涂层太阳吸收比较小程度的降低。

对不同辐照试验后的 SCB-1 涂层进行 C、Si、O 的 XPS 窄谱分峰拟合, 进行 SCB-1 涂层空间辐照太阳吸收比变化的反应机理分析。由图 11a 所示, SCB-1 涂层的 Si2p 谱图含有的 Si—O (102.4 eV) 与 Si—C (104.8 eV) 键主要来自涂层中的有机硅树脂, SiO<sub>2</sub> (103.4 eV) 键能峰来自涂层中的氧化硅无机粉体。经历了紫外辐照后, UV-SCB-1 涂层曲线中的 Si—C

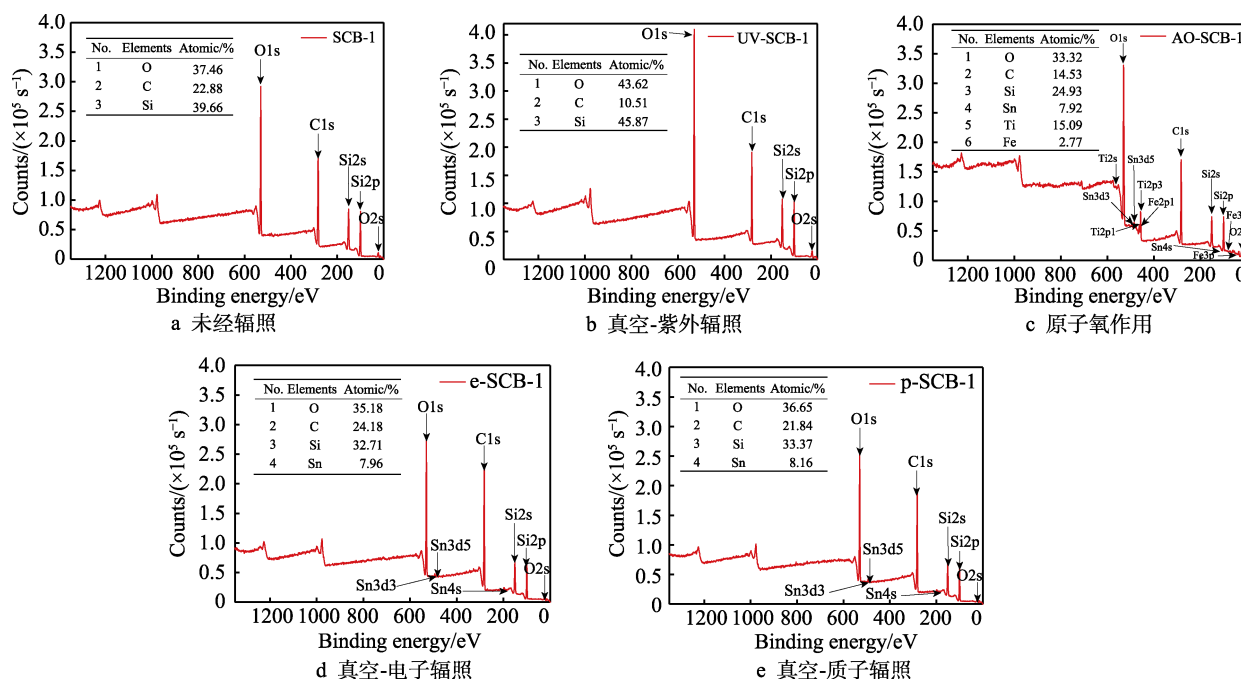


图 10 不同辐照试验后 SCB-1 涂层与未经辐照 SCB-1 涂层宽谱

Fig.10 XPS spectrum of SCB-1 before and after different irradiation experiments: (a) SCB-1 coating before irradiation; (b) SCB-1 coating after vacuum-UV irradiation; (c) SCB-1 coating after atomic oxygen irradiation; (d) SCB-1 coating after vacuum-electron irradiation; (e) SCB-1 coating after vacuum-proton irradiation

键结合能消失, Si—O 键结合能发生了向高结合能的偏移。对比图 11b 中 SCB-1 涂层 O1s 窄谱, UV-SCB-1 曲线中的 O—Si 键结合能 (532.6 eV) 同样向高结合能处偏移。图 11c 中 C1s 窄谱 UV-SCB-1 曲线的 C—Si—C 键结合能 (287.9 eV) 消失, 这说明 5000ESH 的高能紫外击断了表面有机硅树脂主链的绝大部分侧甲基, 失去甲基的主链局部吸收能量, 形成自由基, 自由基之间发生交联, 形成新的 Si—O—Si 键, 或者形成 SiO<sub>2</sub> 及 SiO<sub>x</sub> 等无机产物<sup>[16]</sup>。表面发生的一些反应, 造成树脂老化显色以及无机产物增多, 导致 SCB-1 涂层颜色一定程度地变灰变浅。原子氧作用下, O1s 谱图中 AO-SCB-1 曲线出现了 TiO<sub>2</sub> 的结合能峰, 来自于样品靶台溅射造成, 而在 C1s 谱图中经历

原子氧后, C—C 键能 (285.1 eV) 峰面积由 SCB-1 涂层曲线的 35 116 下降至 AO-SCB-1 涂层曲线的 25 010, 而 C—H 键结合能 (286.6 eV) 与 C—O 键结合能 (289.9 eV) 峰面积有少量的增加。这说明 SCB-1 涂层含有的炭黑经过长期原子氧作用后, 其表面含氧官能团的数量增加, 产生羧基、羟基等, 造成了 C—H 与 C—O 键的增加, 一定程度上影响了 SCB-1 涂层的太阳吸收比。真空-电子与质子辐照后, e-SCB-1 与 p-SCB-1 涂层曲线除了 Si2p 窄谱中 Si—C 键与 C1s 窄谱中 C—Si—C 键的结合能明显削弱以外, 曲线峰型与 SCB-1 原始曲线无明显区别, 这说明高能粒子也会对有机硅树脂的 Si—C 键产生影响, 但影响低于紫外辐照, 因此涂层太阳吸收比变化较小。

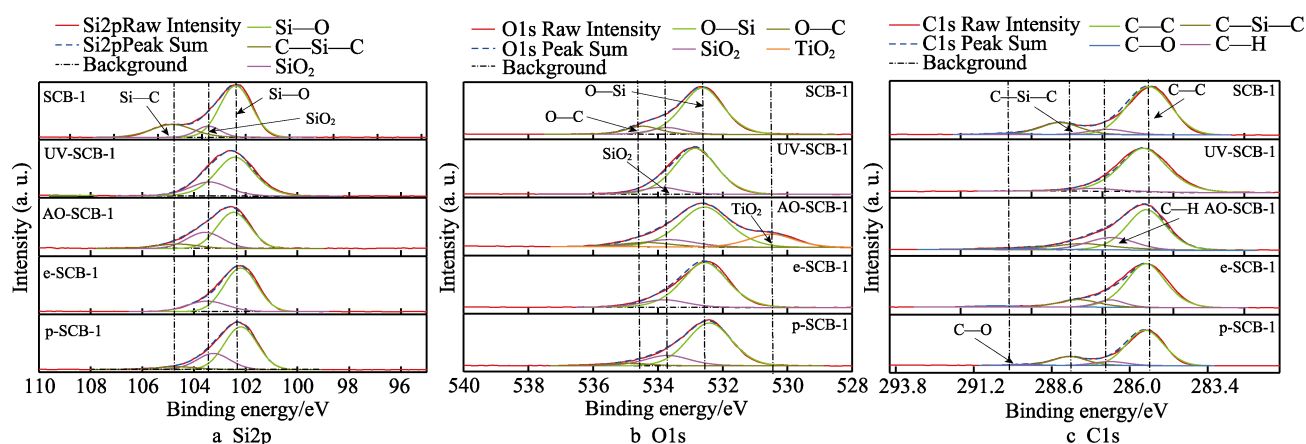


图 11 经历不同空间环境辐照试验 SCB-1 涂层的 Si2p、O1s、C1s 窄谱谱图

Fig.11 XPS spectrum of Si2p (a), O1s (b) and C1s (c) of SCB-1 coating after irradiation in different space environments

### 3 结论

1) 综合四项空间模拟辐照试验, SCB-1 消杂光热控涂层太阳吸收比变化最大值的总和为 0.023, 半球发射率变化最大值的总和为 0.011, 且四项试验后, 涂层外观均未发生明显变化, 证明了 SCB-1 消杂光热控涂层具有一定的空间稳定性。

2) SCB-1 消杂光热控涂层优异的空间稳定性, 证明了炭黑、氧化硅与有机硅树脂三种主要涂层制备原材料均为空间稳定型材料。

3) 真空-紫外辐照造成 SCB-1 涂层太阳吸收比降低, 主要是由于有机硅树脂主链侧甲基断裂, 以及氧化硅类物质的增加造成的。原子氧作用造成 SCB-1 涂层太阳吸收比降低, 源于炭黑受较小程度的氧化影响。真空-电子与质子对 SCB-1 涂层太阳吸收比产生的影响较为微弱。

#### 参考文献:

- [1] HENNINGER J H. Solar absorptance and thermal emittance of some common spacecraft thermal-control coatings[C]// NASA Reference Publication, 1984.
- [2] HALL D F, FOTE A A. Thermal control coatings performance at near geosynchronous altitude[J]. Journal of thermophysics and heattransfer, 1992, 6(4): 665-671.
- [3] 郝云彩, 余成武, 梁士通, 等. 新一代星敏感器遮光罩碳纳米管遮光罩技术研究[J]. 空间控制技术与应用, 2016, 42(2): 1-7.
- [4] HAO Yun-cai, YU Cheng-wu, LIANG Shi-tong, et al. New generation of star tracker baffle—CNT baffle[J]. Aerospace control and application, 2016, 42(2): 1-7.
- [5] 钟兴, 贾继强. 空间相机消杂光设计及仿真[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 621-625.
- [6] ZHONG Xing, JIA Ji-qiang. Stray light removing design and simulation of space borne camera[J]. Optics and precision engineering, 2009, 17(3): 621-625.
- [7] 王治乐, 龚仲强, 张伟, 等. 基于点源透过率的空间光学系统杂光测量[J]. 光学技术, 2011, 37(4): 401-405.
- [8] WANG Zhi-le, GONG Zhong-qiang, ZHANG Wei, et al. Measurement of stray light based on point-source transmittance in space optical system[J]. Optical technique, 2011, 37(4): 401-405.
- [9] IBN-ELHAJ M, SCHADT M. Optical polymer thin films with isotropic and anisotropic nano-corrugated surface topologies[J]. Nature, 2001, 410(6830): 796-799.
- [10] 王泽江. 多孔结构高吸收涂层的制备与性能研究[D].

- 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- WANG Ze-jiang. Preparation and properties of porous high absorbing coatings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [8] 李春东, 杨德庄, 何世禹, 等. 电子辐照能量对 Kapton/Al 热控涂层光学性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 741-744.
- LI Chun-dong, YANG De-zhuang, HE Shi-yu, et al. Effects of electron irradiation energy on optical properties of Kapton/Al thermal control coatings[J]. High power laser and particle beams, 2003, 15(8): 741-744.
- [9] 王丹艺. TMA 空间遥感相机消杂光技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- WANG Dan-yi. TMA remote sensing camera eliminate stray light research[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
- [10] 冯伟泉, 王荣, 丁义刚, 等. 低能质子对卫星热控涂层太阳吸收率的影响[J]. 中国空间科学技术, 2007, 12(6): 42-47.
- FENG Wei-quan, WANG Rong, DING Yi-gang, et al. Low energy proton effects on solar absorptance of thermal control coatings[J]. Chinese space science and technology, 2007, 12(6): 42-47.
- [11] 曾一兵, 熊春晓, 王慧, 等. 防静电白色热控涂层的空间环境性能试验[J]. 中国空间科学技术, 2002, 4(2): 63-66.
- ZENG Yi-bing, XIONG Chun-xiao, WANG Hui, et al. Development of anti-static thermal control coating and test of its related performance in simulated space environment[J]. Chinese space science and technology, 2002, 4(2): 63-66.
- [12] 马伟, 宣益民, 韩玉阁, 等. 长寿命卫星热控涂层性能退化及其对卫星热特征的影响[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 568-572.
- MA Wei, XUAN Yi-min, HAN Yu-ge, et al. Degradation performance of long-life satellite thermal coating and its influence on thermal character[J]. Journal of astronautics, 2010, 31(2): 568-572.
- [13] 李涛, 姜海富, 刘向鹏, 等. 空间原子氧环境对常用热控涂层的影响[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(3): 268-272.
- LI Tao, JIANG Hai-fu, LIU Xiang-peng, et al. The effects of atomic oxygen on the thermal control coatings in common use[J]. Spacecrafts environment engineering, 2012, 29(3): 268-272.
- [14] 张雷, 严川伟, 屈庆, 等. 原子氧对金属 Ag 及其表面 TiO<sub>2</sub>-有机硅热控涂层的侵蚀[J]. 金属学报, 2003, 39(9): 984-988.
- ZHANG Lei, YAN Chuan-wei, QU Qing, et al. Oxygen-atom erosion to Ag and TiO<sub>2</sub>-siloxane thermal control coatings on Ag surface[J]. Acta metallurgica sinica, 2003, 39(9): 984-988.
- [15] 张会. 消毒柜密封条用耐紫外/臭氧老化硅橡胶的制备与性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- ZHANG Hui. Preparation and properties of UV and ozone resistant silicone rubber for sealing strip of disinfection cabinet[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- (上接第 13 页)
- [22] 唐艳茹, 潘利华, 常宇, 等. 微弧氧化提高铝合金耐磨性能的研究[J]. 表面技术, 2015, 44(2): 48-54.
- TANG Yan-ru, PAN Li-hua, CHANG Yu, et al. Improving the wear resistance of aluminum alloy through the micro-arc oxidation technology[J]. Surface technology, 2015, 44(2): 48-54.
- [23] KIRSTEN B, ZHAO L, ÖTE M, et al. A highly porous thermal barrier coating based on Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> co-doped YSZ[J]. Surface & coatings technology, 2019, 366(7): 349-354.
- [24] 苗保记, 张猛, 夏熠. 钇稳定氧化锆(YSZ)纳米晶体的红外光谱分析[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(3): 29-33.
- MIAO Bao-ji, ZHANG Meng, XIA Yi. Infrared spectrum analysis of nanosized crystals of yttria stabilized zirconia (YSZ)[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2017, 38(3): 29-33.
- [25] 李响, 姚忠平, 李雪健, 等. 微弧氧化技术再热控涂层中的应用[J]. 表面技术, 2019, 48(7): 24-36.
- LI Xiang, YAO Zhong-ping, LI Xue-jian, et al. Application of micro-arc oxidation technology in thermal control coating[J]. Surface technology, 2019, 48(7): 24-36.
- [26] XING Shang-long, WANG Li-bing, JIANG Chuang, et al. Influence of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on microstructures and properties of electrodeposited Ni-W-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocrystalline coatings[J]. Vacuum, 2020, 181(9): 109665-109674.
- [27] GUPTA P, TENHUNDFELD G, DAIGLE E O, et al. Electrolytic plasma technology: Science and engineering—An overview [J]. Surface and coatings technology, 2007, 201(21): 8746-8760.
- [28] 慕伟意, 李争显, 杜继红, 等. 铝合金微弧氧化陶瓷涂层研究进展[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 94-99.
- MU Wei-yi, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, et al. Research progress of ceramic coatings formed on aluminum alloys by micro-arc oxidation[J]. Surface technology, 2013, 42(2): 94-99.
- [29] GERSTENLAUER D, KELLER M H, ARDUINI Schuster M, et al. Determination of the refractive index of TiO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic composites[J]. Journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer, 2014, 135: 44-49.
- [30] 扶友红, 陈明安. 纯铝及 6061 铝合金微弧氧化陶瓷层的微观结构和粗糙度[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(9): 472-477.
- FU You-hong, CHEN Ming-an. Microstructure and roughness of ceramic coatings formed by micro-arc oxidation on pure aluminum and 6061 aluminum alloy[J]. Electroplating finishing, 2017, 36(9): 472-477.
- [31] 周基伟, 王小群, 韩杰才. 红外高发射陶瓷涂层发射率于厚度关系[J]. 复合材料学报, 2007, 24(2): 86-91.
- ZHOU Ji-wei, WANG Xiao-qun, HAN Jie-cai. Relationship between emissivity and thickness of infrared composite ceramic coatings with high emissivity[J]. Acta material composite since, 2007, 24(2): 86-91.