

KS-B 高吸收高发射率无机热控涂层低轨环境效应

丁为, 白晶莹, 蔺鹏婷, 吴琼, 孟腾, 张家强

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100190)

摘要: **目的** 研究低轨环境对 KS-B 高吸收高发射无机热控涂层 (简称 KS-B 涂层) 性能的影响。**方法** 对 KS-B 涂层分别进行总剂量为 3.9×10^{22} atoms/cm² 的原子氧辐照、剂量为 5000 ESH 的真空-紫外辐照、总注量为 9.30×10^{11} p/cm² 的真空-质子及总注量为 1.108×10^{14} e/cm² 的真空-电子综合辐照试验, 分析空间模拟辐照环境中 KS-B 涂层太阳吸收比 (α_s)、半球发射率 (ε_H)、表面形貌、表面组分含量、质量损失率等性能的变化规律, 研究 KS-B 涂层的耐空间环境稳定性。**结果** 原子氧暴露后, KS-B 涂层太阳吸收比增加 0.003, 半球发射率增加 0.004; 原子氧辐照后, KS-B 涂层表面形貌出现了一定程度的糙化, 表面 Si、O 元素含量下降。初始暴露时, KS-B 涂层质量损失率逐渐提高, 最终质量损失率为 0.96%。真空-紫外辐照后, KS-B 涂层太阳吸收比增加 0.003, 半球发射率无变化。真空-质子及真空-电子辐照前后, KS-B 涂层太阳吸收比增加 0.001, 半球发射率无变化。**结论** 经历原子氧、真空-紫外、真空-质子及真空-电子模拟辐照后, KS-B 涂层的太阳吸收比及半球发射率变化较小, 具有较好的耐空间辐照性能, 可以满足空间站等低轨航天器的长寿命服役需求。

关键词: 低轨环境; 高吸收高发射; 无机热控涂层; 太阳吸收比; 半球发射率

中图分类号: TG174.4; V416 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)12-0038-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.12.006

Low Orbit Environment Effects on KS-B High Absorption and High Emissivity Inorganic Thermal Control Coating

DING Wei, BAI Jing-ying, LIN Peng-ting, WU Qiong, MENG Teng, ZHANG Jia-qiang

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100190, China)

ABSTRACT: The work aims to study effect of low earth orbit environment on the performance of high absorption and high emissivity inorganic thermal control coating (KS-B coating). The KS-B coatings were irradiated with atomic oxygen dose of 3.9×10^{22} atoms/cm², vacuum-ultraviolet dose of 5000ESH, vacuum-proton radiation flux of 9.3×10^{11} p/cm², vacuum-electron radiation flux of 1.108×10^{14} e/cm². By analyzing the changes of coating solar absorption ratio (α_s), hemispheric emissivity (ε_H), morphology, composition and mass loss rate before and after the space irradiation tests, the stability of KS-B coatings in simulated environments was studied. After AO exposure, the α_s of the KS-B coating increased by 0.003, and the ε_H increased by

收稿日期: 2020-08-02; 修订日期: 2020-09-14

Received: 2020-08-02; Revised: 2020-09-14

作者简介: 丁为 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为表面工程。

Biography: DING Wei (1992—), 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: jqzhangl@163.com

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

引文格式: 丁为, 白晶莹, 蔺鹏婷, 等. KS-B 高吸收高发射率无机热控涂层低轨环境效应[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 38-43.

DING Wei, BAI Jing-ying, LIN Peng-ting, et al. Low orbit environment effects on KS-B high absorption and high emissivity inorganic thermal control coating[J]. Surface technology, 2020, 49(12): 38-43.

0.004; the coating surface became roughing; silicon and oxygen content on the coating surface decreased slightly. At the initial exposure, the coatings' mass loss rate gradually increased. The final mass loss rate was 0.96%. After VUV irradiation, the α_s of the KS-B coatings increased by 0.003, and the ε_H did not change. After vacuum proton and electron irradiation, the α_s of the KS-B coatings increased by 0.001, and the ε_H did not change. After AO, VUV, proton and electron simulated irradiation tests, the small $\Delta\alpha_s$ and $\Delta\varepsilon_H$ change indicated that the coating has stable structural properties, which can meet long-life service requirements of low orbit spacecraft such as the space station.

KEY WORDS: low earth orbit environment; high absorption and high emissivity; inorganic thermal control coating; solar absorption ratio; hemispheric emissivity

热控涂层是航天器热控系统的重要组成部分,通过调节航天器表面的太阳吸收比与半球发射率,以控制航天器温度^[1]。随着国内外航天技术的高速发展,空间航天器的种类越来越多,对功能性热控涂层的需求越来越大。复杂严峻的空间环境对航天器的长寿命服役构成了很大的挑战,对热控涂层的空间稳定性提出了更高的要求。尤其在空间环境较为复杂的近地轨道(LEO,一般指 100~1000 km 高度范围的轨道)中,原子氧、真空-紫外、真空-质子及真空-电子等空间环境将会造成涂层剥蚀和性能退化^[2-6]。

高吸收高发射热控涂层是一类能够有效消除光学系统杂光或降低光线散射的涂层^[7],可用于遥感和高分辨探测卫星等航天器的消杂光系统。传统的有机消光涂层在空间环境中易发生热降解和光降解,释放出的有机小分子易污染光学器件,造成光学系统的性能退化,影响航天器光学数据的采集。同时,空间站舱外宇航员舱外活动路径、维修点标识等黑色标识材料需要满足在 LEO 轨道条件下的 15 年环境使用需求。

研究表明,硅氧化物对涂层有较强原子氧防护及紫外防护性能^[8],已广泛应用于空间站原子氧防护^[9-10]。项目团队采用硅酸钾作为成膜物质,耐氧化的铜铬黑作为黑色颜料^[11-13],制备了一种具备高吸收高发射特性的热控涂层(KS-B 涂层)。为考察 KS-B 涂层的低轨环境效应和涂层性能稳定性,开展了原子氧、真空-紫外、真空-质子及真空-电子等模拟辐照试验,分析了涂层在模拟空间辐照环境条件下的性能变化规律,以评价该涂层空间环境稳定性。

1 实验

1.1 KS-B 涂层试样制备

KS-B 高吸收高发射无机热控涂层是北京卫星制造厂有限公司自主研发产品,主要成分为硅酸钾与铜铬黑等。

采用 40 mm×40 mm×1 mm 的 2A12 铝合金试片,表面进行磷酸阳极氧化前处理。采用空气喷涂的方法进行 KS-B 涂层的制备,经室温干燥 24 h 后,再 80 ℃ 烘烤固化 12 h,获得涂层厚度为 40~80 μm 的 KS-B

高吸收高发射无机热控涂层样品,涂层结合力优于 2 级。

1.2 辐照试验

原子氧辐照试验按照 GJB 2502.9—2006 进行。试验条件:真空度优于 1.3×10^{-3} Pa;原子氧辐照积分通量为 3.9×10^{22} atoms/cm²,通量为 5.0×10^{15} atoms/(cm²·s),加速因子为 5。辐照前后测试 3 个 KS-B 涂层试样热辐射性能,并取平均值进行分析。

真空-紫外辐照试验按照 GJB 2502.5—2015 进行。试验条件:真空度优于 1.3×10^{-3} Pa,辐照剂量为 5000 ESH(当量太阳小时),加速因子为 5。辐照前后测试 3 个 KS-B 涂层试样热辐射性能,并取平均值进行分析。

真空电离辐照试验中,先进行真空-质子辐照,再进行真空-电子辐照。真空-质子辐照试验按照 GJB 2502.6—2006 进行。试验条件:真空度优于 1.3×10^{-3} Pa,辐照能量为 50 keV,总注量为 9.30×10^{11} p/cm²,注量率为 2×10^{11} p/(cm²·s)。真空-电子辐照试验按照 GJB 2502.7—2006 进行。试验条件:真空度优于 1.3×10^{-3} Pa,辐照能量为 40 keV,总注量为 1.108×10^{14} e/cm²,注量率为 3×10^{11} e/(cm²·s)。辐照前后测试 3 个 KS-B 涂层试样热辐射性能,并取平均值进行分析。

1.3 测试分析方法

采用型号 MiniTest 735 测量仪,按照 QJ 1072—1986 测量涂层厚度。采用型号 950 光谱吸收比测量仪,按照标准 GJB 2502.02—2006 测试涂层太阳吸收比。采用型号 AE1 辐射计,按照标准 GJB 2502.03—2006 测试涂层半球发射率。采取划格法测试涂层结合力,按照 GB/T 9286—1998 进行。

微观形貌采用扫描电镜(SEM)进行表征,仪器型号为 Zeiss supra55VP,加速电压为 20 kV。表面元素组成及含量采用能谱仪(EDS)进行表征,仪器型号为 IE350 Oxford。采用 PerkinElmer-Frontier 红外光谱仪进行红外光谱测试,仪器的分辨率为 4 cm⁻¹,扫描次数为 32,扫描范围为 4000~500 cm⁻¹。

在 XP205 高精度电子天平上进行称量,精度为 10⁻⁵ g。每个试样称量 3 次,取平均值。试样的质量

损失率根据式(1)计算。

$$m_{\text{loss}} = (m_0 - m_t) / m_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_{loss} 为试样的质量损失率; m_t 为作用后试样的质量, g; m_0 为原始试样的质量, g。

2 结果及分析

2.1 原子氧对 KS-B 涂层性能的影响

在 LEO 轨道中, 氧气在紫外作用下离解成原子氧, 原子氧具有极强的氧化能力, 在高度为 500 km 的轨道中, 原子氧含量能达到所有气体粒子的 80%。飞行器按照飞行速度 7.8 km/s 计算, 与 AO 的碰撞能量达到 5 eV 以上, 碰撞后 AO 能对材料进行剥蚀, 造成材料性质退化^[14]。AO 对有机材料有极强的剥蚀作用, 可以打断有机材料的化学键, 形成有机小分子, 使材料表面形貌和结构发生变化, 进而影响材料的光热性能, 影响航天器的正常运转。原子氧对无机材料也有一定的破坏性, 本研究中 KS-B 涂层是具有高吸收、高发射性能的无机热控涂层, 考虑到低轨航天器的长寿命服役要求, 有必要对其耐原子氧性能进行研究。

为模拟低轨航天器长期服役下的原子氧辐照环境, 本研究对 KS-B 涂层进行了累计积分通量为 3.9×10^{22} atoms/cm² 的原子氧辐照试验。试验后, 涂层外观状态良好, 呈现黑色, 未出现起皮、开裂、脱落等现象, 如图 1 所示。辐照后, 涂层结合力优于 2 级。KS-B 涂层原子氧暴露前后的反射率变化光谱如图 2 所示, 太阳吸收比及半球发射率的变化见图 3 及表 1。可以看出, 当辐照剂量到 2.08×10^{22} atoms/cm² 时, KS-B 涂层的 α_s 逐渐增加至 0.974; 辐照剂量从 2.08×10^{22} atoms/cm² 到 2.6×10^{22} atoms/cm², α_s 逐渐从 0.974 降至 0.971; 经超过 2.6×10^{22} atoms/cm² 的原子氧辐照后, 涂层太阳吸收比逐渐平稳。KS-B 涂层的 α_s 和 ϵ_H 都略微增大, α_s 从 0.967 增加至 0.970, $\Delta\alpha_s = 0.003$; ϵ_H 从 0.903 增加至 0.907, $\Delta\epsilon_H = 0.004$ 。KS-B 涂层太阳吸收比及半球发射率的增加可能与涂层表面形貌变粗糙有一定的相关性。原子氧辐照前后涂层 α_s 及 ϵ_H 均发生增大, 但均不超过 0.01, 说明涂层性能相对稳定, 具有较好的耐原子氧性能。

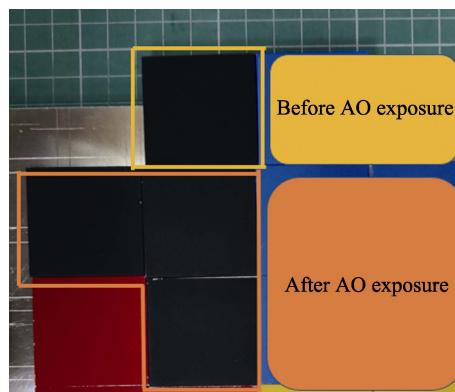


图 1 原子氧辐照前后 KS-B 涂层外观状态

Fig.1 Appearance state of KS-B coating before and after AO exposure

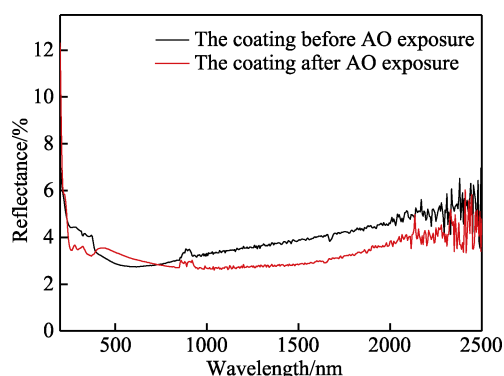


图 2 KS-B 涂层原子氧辐照前后的发射率变化光谱图

Fig.2 Emissivity spectrum of KS-B coating before and after AO exposure

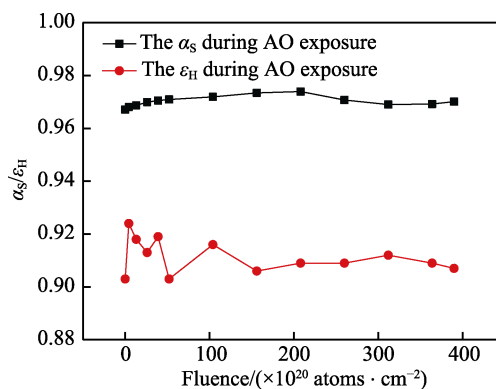


图 3 原子氧辐照下 KS-B 涂层 α_s 与 ϵ_H 变化曲线

Fig.3 α_s and ϵ_H curve of KS-B coating during AO exposure

表 1 KS-B 涂层原子氧暴露前后的 α_s 和 ϵ_H 变化
Tab.1 α_s and ϵ_H value of KS-B coating before and after AO exposure

| Parameter | Before AO exposure | 4.3×10^{20} atoms/cm ² | 1.3×10^{21} atoms/cm ² | 2.6×10^{21} atoms/cm ² | 3.9×10^{21} atoms/cm ² | 5.2×10^{21} atoms/cm ² | 1.04×10^{22} atoms/cm ² |
|--------------|---|---|--|---|---|--|---|
| α_s | 0.967 | 0.968 | 0.969 | 0.970 | 0.971 | 0.971 | 0.972 |
| ϵ_H | 0.903 | 0.924 | 0.918 | 0.913 | 0.919 | 0.903 | 0.916 |
| Parameter | 1.56×10^{22} atoms/cm ² | 2.08×10^{22} atoms/cm ² | 2.6×10^{22} atoms/cm ² | 3.12×10^{22} atoms/cm ² | 3.64×10^{22} atoms/cm ² | 3.9×10^{22} atoms/cm ² | Value change |
| α_s | 0.973 | 0.974 | 0.971 | 0.969 | 0.970 | 0.970 | 0.003 |
| ϵ_H | 0.906 | 0.909 | 0.909 | 0.912 | 0.909 | 0.907 | 0.010 |

图 4 为硅酸钾与原子氧辐照前后涂层红外光谱， 1010 cm^{-1} 为 SiO_2 膜层中 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 反对称伸缩振动峰^[15-17]。图 5 为 KS-B 涂层原子氧辐照前后的微观形貌。相比于辐照前，原子氧辐照后，KS-B 涂层表面形貌更为粗糙。其原因可能是原子氧具备一定的动

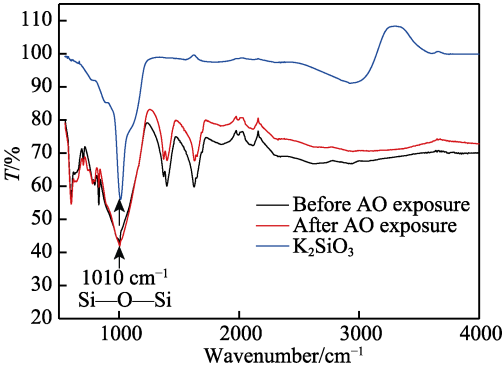


图 4 硅酸钾与原子氧辐照前后 KS-B 涂层红外光谱
Fig.4 FT-IR spectrum of K_2SiO_3 and KS-B coating before and after AO exposure

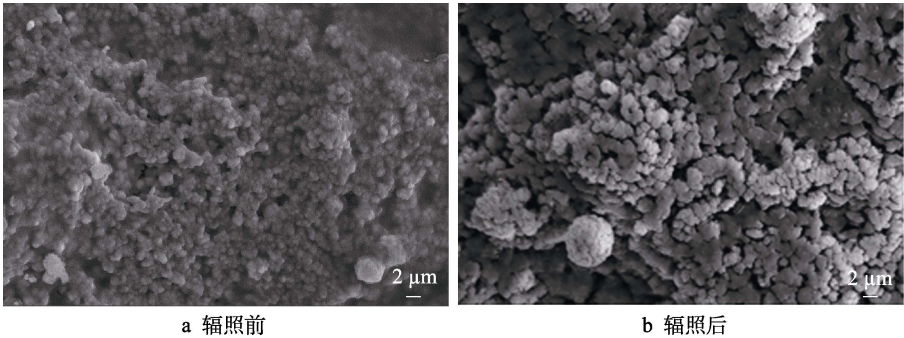


图 5 原子氧辐照对 KS-B 涂层微观形貌的影响

Fig.5 Effect of atomic oxygen exposure on morphology of KS-B coating: a) before AO exposure; b) after AO exposure

表 2 原子氧辐照对 KS-B 涂层表面元素含量的影响
Tab.2 Effect atomic oxygen exposure on surface elemental concentrations of KS-B coating

| | Cu | Cr | K | Zn | Si | O |
|--------------------|------|-------|------|------|-------|-------|
| Before AO exposure | 4.85 | 10.47 | 7.28 | 1.82 | 13.03 | 62.55 |
| After AO exposure | 5.05 | 10.25 | 9.57 | 2.10 | 12.58 | 60.44 |

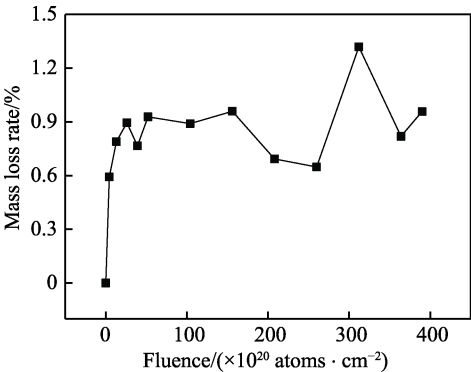


图 6 原子氧辐照对 KS-B 涂层质量损失率的影响
Fig.6 Mass loss rate of KS-B coating during AO exposure

能，在和涂层发生碰撞时，对涂层表面疏松颗粒及 SiO_2 膜层具有剥蚀作用。表 2 为 KS-B 涂层原子氧辐照前后的表面元素含量。从表 2 中可以看出，其中 Cu、Cr 等金属元素含量增加，对应的 Si、O 元素含量减少。据文献报道， SiO_2 是一种常用的防原子氧剥蚀材料，其原子氧剥蚀率小于 $5 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-3}/\text{atom}^{[18]}$ ，但长期暴露在原子氧环境中，仍能被原子氧轻微剥蚀，导致涂层表面 Si、O 元素的降低。KS-B 涂层原子氧辐照后，微观形貌发生了轻微糙化，表面组分含量变化较小，呈现出了较好的耐原子氧剥蚀性能。

原子氧辐照对 KS-B 涂层质量损失率的影响如图 6 所示。当涂层初始暴露在原子氧环境中时，原子氧对 KS-B 涂层 SiO_2 膜层轻微地剥蚀，并且 KS-B 涂层体系内少量结合水以及吸附气体挥发，造成涂层质量损失加快；当原子氧剂量达到 $2.6 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^2$ 时，涂层质量趋于稳定。整体来看，KS-B 涂层的质损率较低，在辐照剂量为 $3.9 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^2$ 时，质量损失率仅为 0.96%，具有较好的抗原子氧侵蚀能力。

2.2 真空-紫外辐照对 KS-B 涂层性能的影响

在 LEO 轨道中，100~400 nm 的紫外辐照占太阳总辐照的 8%，但却是热控涂层性能退化或失效的关键因素。据文献报道，热控涂层在受到真空-紫外辐照后，光学、热学性能产生了不同程度的退化^[19]，致使航天器零部件失效。

本研究对 KS-B 涂层进行了累计 5000 ESH(太阳时) 的真空-紫外辐照试验，试验后，涂层外观状态良好，呈现黑色，未出现起皮、开裂、脱落等现象，辐照前后涂层外光状态如图 7 所示。KS-B 涂层真空-紫外辐照前后的反射率变化光谱如图 8 所示，在 200~2500 nm 波段，反射曲线呈现略微下降趋势。KS-B 涂层真空紫外辐照前后 α_s 和 ϵ_H 的变化情况见表 3。试样在紫外辐照不同阶段的热辐射变化情况见图 9。从图 9 中可以看出，KS-B 涂层在辐照不同阶段，太阳吸收比及半球发射率趋于稳定，没有明显的波动。从表 3 中可以看出，紫外辐照前后，KS-B 涂层的 ϵ_H 没有变化， α_s 从 0.968 增加至 0.971， $\Delta \alpha_s=0.003$ 。以上结果说明，紫外辐照后，涂层性能退化较小，表

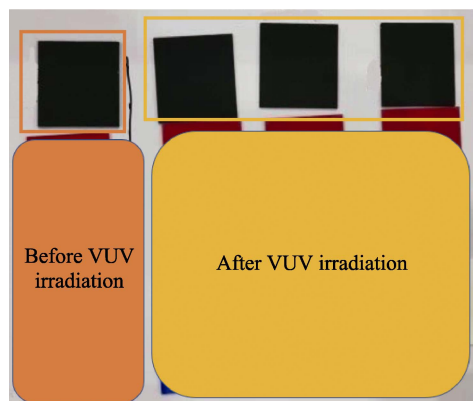


图 7 真空紫外辐照前后 KS-B 涂层外观状态

Fig.7 Appearance state of KS-B coating before and after VUV irradiation

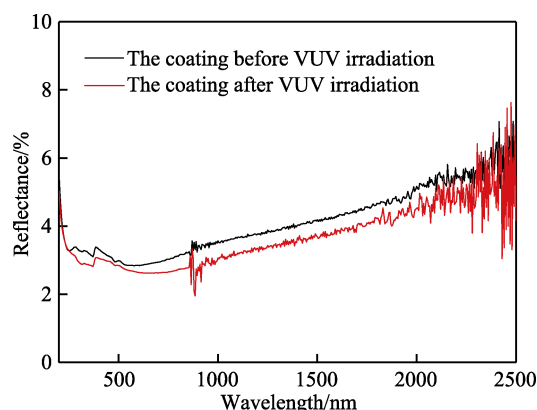


图 8 KS-B 涂层真空-紫外辐照前后的反射率变化光谱图

Fig.8 Reflectivity spectrum of KS-B coating before and after VUV irradiation

表 3 真空紫外辐照前后的 α_S 和 ε_H 变化
Tab.3 α_S and ε_H value before and after VUV irradiation

| Parameter | Before VUV irradiation | 300 ESH | 600 ESH | 1000 ESH | 2000 ESH | 3000 ESH | 4000 ESH | 5000 ESH | Value change |
|-----------------|------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| α_S | 0.968 | 0.972 | 0.973 | 0.973 | 0.974 | 0.975 | 0.972 | 0.971 | 0.003 |
| ε_H | 0.911 | 0.912 | 0.911 | 0.909 | 0.908 | 0.91 | 0.909 | 0.911 | 0 |

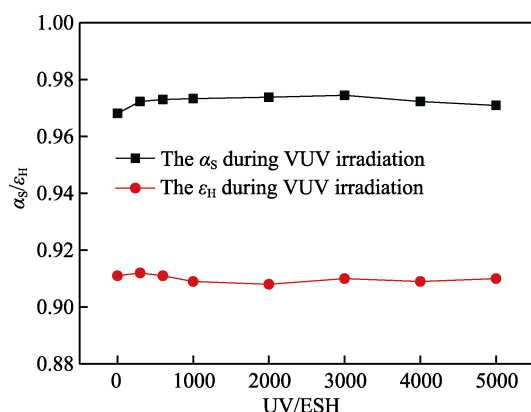
图 9 真空紫外辐照 KS-B 涂层 α_S 和 ε_H 变化曲线

Fig.9 α_S and ε_H curve of KS-B coating during VUV irradiation

明 KS-B 涂层具有优异的抗紫外辐照性能。

2.3 空间电离辐射对 KS-B 涂层性能的影响

LEO 轨道中存在着高能粒子, 对热控涂层影响较大的是真空-质子和真空-电子。长时间的真空-质子和真空-电子辐照容易引起热控涂层性能退化, 造成航天器运行失效。因此有必要对涂层进行低轨真空-质子及真空-电子模拟辐照试验。

经真空-质子和真空-电子综合辐照试验后, KS-B 涂层外观状态良好, 未出现起皮、开裂、脱落等现象。KS-B 涂层真空-质子及真空-电子辐照前后的反射率变化光谱如图 10 所示, 热辐射性能情况见表 4。辐照前后, KS-B 涂层 α_S 从 0.968 增加到 0.969, $\Delta\alpha_S=0.001$, 半球发射率无变化。结果表明, 低轨真空-质子与真空-电子辐照对 KS-B 涂层太阳吸收比及半球发射率

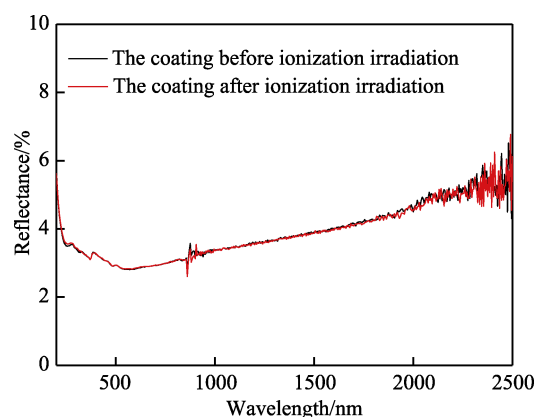


图 10 KS-B 涂层电离辐照前后的发射率变化光谱图

Fig.10 Emissivity spectrum of KS-B coating before and after ionization irradiation

表 4 电离辐照前后的 α_S 和 ε_H 变化
Tab.4 α_S and ε_H value before and after ionization radiation

| Parameter | Before ionization irradiation | After ionization irradiation | Value change |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------|--------------|
| α_S | 0.968 | 0.969 | 0.001 |
| ε_H | 0.91 | 0.91 | 0 |

影响较小, KS-B 涂层具有优异的抗真空-质子及真空-电子性能。

3 结论

本研究对 KS-B 热控涂层进行原子氧、真空-紫外、真空-质子及真空-电子辐照模拟试验。通过分析, 得出以下结论:

1) 原子氧辐照后, KS-B 涂层表面形貌结构糙化, Si、O 元素含量小幅降低, 主要原因是原子氧对 SiO_2 膜层进行剥蚀。原子氧初始暴露时, 随着 KS-B 涂层内结合水、吸附气体的挥发以及原子氧的剥蚀作用, KS-B 涂层的质量损失率逐渐增加, 暴露后最终质损率为 0.84%。受涂层表面形貌及成分影响, α_s 增加 0.003, ε_H 增加 0.004。综合来看, 原子氧辐照后, KS-B 涂层性能未发生明显改变, 表明涂层具有较好的耐原子氧性能。

2) 真空-紫外辐照后, 200~2500 nm 波段反射整体下降, KS-B 涂层 α_s 升高 0.003, ε_H 无变化。真空-紫外辐照对 KS-B 涂层 α_s 和 ε_H 影响较小, 因此 KS-B 涂层具有较强的耐紫外辐照性能。

3) 电离辐照后, KS-B 涂层太阳光谱反射基本无变化, 涂层太阳吸收比升高 0.001, 半球发射率不变, 电离辐照对 KS-B 涂层 α_s 和 ε_H 影响较小, 因此 KS-B 涂层具有较强的低轨耐电离辐照性能。

4) 综合原子氧、真空紫外、真空-质子与真空-电子辐照试验结果来看, KS-B 涂层材料体系设计合理, 涂层耐空间辐照性能优异, 满足空间站长寿命在轨运行应用需求。

参考文献:

- [1] HALL D F, FOTE A A. Thermal control coatings performance at near geosynchronous altitude[J]. Journal of Thermodynamics and heat transfer, 1992, 6(4): 665-671.
- [2] SKURAT V E, DOROFEEV Y I, BARBASHEV E A, et al. Simulation of polymer film and surface behavior in a space environment[J]. Applied surface science, 1996, 92: 441-446.
- [3] ZANG Z, GU S, SHI L, et al. Study on spacecraft anomaly caused by space environment[J]. Chinese journal of space science, 1998, 18(4): 342-347.
- [4] GROSSMAN E, GOUZMAN I. Space environment effects on polymers in low earth orbit[J]. Nuclear instruments and methods in physics research: Section B, 2003, 208: 48-57.
- [5] SHIN K B, KIM C G, HONG C S, et al. Prediction of failure thermal cycles in graphite/epoxy composite materials under simulated low earth orbit environment[J]. Composites part B engineering, 2000, 31(3): 223-235.
- [6] SILVEMAN E M. Space environmental effects on spacecraft: LEO materials selection guide[R]. California: TRW Space & Electronic Group, 1995.
- [7] 张建贤, 邹永军, 徐蕾, 等. 消光漆在光学系统的国内外应用[J]. 宇航材料工艺, 2014(6): 88-90.
ZHANG Jian-xian, ZOU Yong-jun, XU Lei, et al. Matte coating and its application in optical system[J]. Aerospace materials & technology, 2014(6): 88-90.
- [8] BRUCE A B, SHARON K R, KIM K D G, et al. LDEF spacecraft ground laboratory and computational modeling implications on space station freedom's solar array materials and surfaces durability[C]//The Conference Record of the Twenty-second IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Las Vegas, NV: IEEE, 1991.
- [9] KEVIN M B, HELEN B G, BEMARD L S. Photovoltaic array environmental protection program[C]//Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Washington, DC: IEEE, 1989: 361-369.
- [10] SHARON K R, RAYMOND M O, JILL M C. Atomic oxygen effects on SiO_2 coated Kapton for photovoltaic arrays in low earth orbit[C]//The Conference Record of the Twenty-second IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Las Vegas, NV: IEEE, 1991: 1544-1547.
- [11] BESHKAR F, AJABSHIR S Z, NIASARI M S. Preparation and characterization of the CuCr_2O_4 nanostructures via a new simple route[J]. J mater sci: Mater electron, 2015, 26: 5043-5051.
- [12] ENGQ F G, ZHAO X, GAO X H, et al. Low-temperature combustion synthesis of CuCr_2O_4 spinel powder for spectrally selective paints[J]. Sol-gel sci technol, 2012, 61: 281-288.
- [13] YE M Q, HAN A, CHU Z S, et al. Synthesis and characterization of Mn-doped copper chromite black pigments[J]. Adv mater res, 2013, 602/604: 71-75.
- [14] 张宗波, 郎冠卿, 姜海富, 等. 低地球轨道航天器涂层防护技术研究进展[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(1): 109-114.
ZHANG Zong-bo, LANG Guan-qing, JIANG Hai-fu, et al. Review of protection coating techniques for LEO spacecrafts[J]. Spacecraft environment engineering, 2016, 33(1): 109-114.
- [15] INMOCENZI P. Infrared spectroscopy of sol-gel derived silica-based film: A spectra-microstructure overview[J]. Journal of non-crystalline solids, 2003, 316(2): 309-319.
- [16] JUNG H Y, GUPTA R K, OH E O, et al. Vibrational spectroscopic studies of sol-gel derived physical and chemical bonded ORMOSILs[J]. Journal of non-crystalline solids, 2005, 351(5): 372-379.
- [17] TOGNONVI M T, ROSSIGNOL S, BONNET J P. Effect of alkali cation on irreversible gel formation in basic medium[J]. Journal of non-crystalline solids, 2011, 357(1): 43-49.
- [18] PACKIRISAMY S, SCHWAM D, LITT M H. Atomic oxygen resistant coatings for low earth orbital structures[J]. Journal of materials science, 1995, 30(2): 308-320.
- [19] 章俞之, 曹韞真, 吴岭南, 等. 几种热控涂层的真空-紫外辐照试验[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(2): 126-131.
ZHANG Yu-zhi, CAO Yun-zhen, WU Ling-nan, et al. Ultraviolet irradiation tests of some thermal control coatings in vacuum[J]. Spacecraft environment engineering, 2011, 28(2): 126-131.