

# SiO<sub>2</sub> 涂层提高 PEI 绝缘材料 耐原子氧剥蚀能力的验证

王征<sup>1</sup>, 张义<sup>1</sup>, 范壮壮<sup>1</sup>, 李江<sup>1</sup>, 邹翔<sup>2</sup>, 李成宾<sup>2</sup>, 张翔<sup>2</sup>

(1.中国空间技术研究院, 北京 100094; 2.郑州航天电子技术有限公司, 郑州 450001)

**摘要:** **目的** 验证 SiO<sub>2</sub> 涂层对 PEI 绝缘材料耐原子氧剥蚀能力的提升效果。**方法** 以某航天器舱外用电连接器 PEI 绝缘材料为研究对象, 将全氢聚硅氮烷 (PHPS) 作为涂层材料, 利用底涂浸涂、面涂喷涂的 KH-AORX 湿化学法镀膜工艺, 把 PHPS 直接转化为二氧化硅 (SiO<sub>2</sub>) 无机防护涂层。基于型号在轨 15 年的工作寿命要求, 开展 5 年原子氧总通量为  $2.61 \times 10^{26}$  atoms/m<sup>2</sup>、原子氧通量率为  $6.5 \times 10^{15}$  atoms/(cm<sup>2</sup>·s) 的试验验证, 分析试验前后的材料质量损失率、原子氧剥蚀率和外观形貌的变化。**结果** 采用的 KH-AORX 湿化学法镀膜工艺可实现将 PHPS 涂层材料作用于 PEI 绝缘材料并直接转换为 SiO<sub>2</sub> 保护涂层。涂层边缘厚度及中心厚度具有较好的一致性, 涂层硬度及附着力满足设计指标要求。已涂覆 SiO<sub>2</sub> 的 PEI 绝缘体经历 5 年通量的原子氧剥蚀后, 质量损失率为 0.05%, 拟合计算后, 经历 15 年通量的原子氧剥蚀后的质量损失率为 0.29%。经电子显微镜检查, PEI 绝缘体表面 SiO<sub>2</sub> 涂层未见起层、脱落和基体暴露现象。**结论** 利用 KH-AORX 湿法镀膜工艺在 PEI 绝缘材料上将 PHPS 转化为 SiO<sub>2</sub> 涂层, 能够获得较大的膜层, 且膜层厚度分布均匀。SiO<sub>2</sub> 涂层能有效提高 PEI 绝缘材料的耐原子氧性能, 满足舱外应用在轨服役寿命要求。

**关键词:** SiO<sub>2</sub> 涂层; PEI 绝缘材料; 原子氧; 质量损失; 试验验证

**中图分类号:** TB430.30 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)11-0288-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.033

## Verification of Atomic Oxygen Erosion Resistance of PEI Insulation Materials by SiO<sub>2</sub> Coating

WANG Zheng<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, FAN Zhuang-zhuang<sup>1</sup>, LI Jiang<sup>1</sup>,  
ZOU Xiang<sup>2</sup>, LI Cheng-bin<sup>2</sup>, ZHANG Xiang<sup>2</sup>

(1.China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

2.Zhengzhou Aerospace Electronic Co., Ltd, Zhengzhou 450001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to verify the protective effect of SiO<sub>2</sub> coating on the atomic oxygen erosion resistance of PEI insulation materials. With PEI insulation material of electrical connector selected from the cabin of a spacecraft as the research object and PHPS as the coating material, KH-AORX liquid phase coating method of bottom coating and surface coating was used to directly convert PHPS into silica (SiO<sub>2</sub>) inorganic protective coating. Based on the requirement of 15-year service life for the model in orbit, a 5-year experiment with total atomic oxygen flux of  $2.61 \times 10^{26}$  atoms/m<sup>2</sup> and the atomic oxygen flux rate

收稿日期: 2020-02-28; 修订日期: 2020-04-20

Received: 2020-02-28; Revised: 2020-04-20

作者简介: 王征 (1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为宇航用元器件质量保证。邮箱: wz6252@163.com

**Biography:** WANG Zheng (1977—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: quality assurance of aerospace components. E-mail: wz6252@163.com

**引文格式:** 王征, 张义, 范壮壮, 等. SiO<sub>2</sub> 涂层提高 PEI 绝缘材料耐原子氧剥蚀能力的验证[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 288-295.

WANG Zheng, ZHANG Yi, FAN Zhuang-zhuang, et al. Verification of atomic oxygen erosion resistance of PEI insulation materials by SiO<sub>2</sub> coating[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 288-295.

of  $6.5 \times 10^{15}$  atoms/(cm<sup>2</sup>·s) was carried out. The changes of material mass loss rate, atomic oxygen denudation rate and appearance before and after the experiment were analyzed. KH-AORX liquid phase coating method could make PHPS coating material act on PEI insulation material and directly convert it into SiO<sub>2</sub> protective coating. The edge thickness and center thickness of the coating had good consistency, and the hardness and adhesion of the coating met the design requirements. The mass loss rate of PEI insulator coated with SiO<sub>2</sub> was 0.05% after 5 years of atomic oxygen denudation, and 0.29% after 15 years of atomic oxygen denudation after fitting calculation. According to the electron microscope examination, the SiO<sub>2</sub> coating on the surface of PEI insulator showed no delamination, peeling and substrate exposure. Using KH-AORX liquid phase coating method to convert PHPS into SiO<sub>2</sub> coating on PEI insulation material can obtain a large film with uniform thickness distribution. The SiO<sub>2</sub> coating can effectively protect the atomic oxygen resistance of PEI insulation material, and meet the on-orbit service life requirements of extravehicular application.

**KEY WORDS:** SiO<sub>2</sub> coating; PEI insulation materials; atomic oxygen; mass loss; test verification

航天器在轨期间要经受带电粒子辐照、原子氧、真空紫外光、超高真空和高低温循环等空间环境因素的影响。特别是在低地球轨道, 气体总压为  $10^{-6} \sim 10^{-5}$  Pa, 粒子数密度为  $10^7 \sim 10^9$  cm<sup>3</sup>, 主要成分有 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、Ar、He、H 和原子氧 (Atomic Oxygen, AO), 其中 AO 的含量最高, 其撞击量可达 4.5 eV<sup>[1-2]</sup>。航天器在空间轨道飞行时, AO 束流会以相对较高的通量撞向飞行器表面, 航天器表面的材料及裸露的器件受到 AO 的氧化腐蚀后, 会导致表面材料及器件性能衰退, 甚至失效<sup>[3-4]</sup>, 很大程度上缩短了航天器在轨服役寿命<sup>[5-7]</sup>。随着航天事业的飞速发展, 我国空间航天任务呈现出高密度发射现状, 同时要求航天器具有长期在轨服役能力 (例如空间站要求在轨服役周期至少 15 年)。在低地球轨道运行 15 年以上, 特别是空间站型号, 要实现反复地舱体间的对接分离, 对暴露在空间环境下的器件进行 AO 防护是重中之重。因此, 为了延长航天器使用寿命, 低地球轨道环境下航天器表面材料的耐 AO 能力一直是航天科研人员的研究热点<sup>[8-17]</sup>, 航天器用元器件质量保证阶段亦应充分考虑 AO 效应对暴露在空间环境中的元器件的影响。

聚醚酰亚胺 (PEI) 具有低熔融黏度和良好的流动性, 可用于典型的热塑性塑料熔融加工工艺和设备制造成型件<sup>[18]</sup>。PEI 的力学性能优良, 有较高的拉伸强度和弯曲强度; 电气性能方面, PEI 介质损耗因数低, 具有良好的温度特性, 且有较高的绝缘电阻值, 是较为理想的电子电气绝缘材料, 已被大量应用于航天器舱内用电连接器的绝缘体材料。试验表明, PEI 材料在经历累积通量为  $7.83 \times 10^{26}$  atoms/m<sup>2</sup> 的 AO 剥蚀后, 绝缘性能及强度均出现了大幅下降, 已远不能满足航天舱外空间任务的要求。研究表明, SiO<sub>2</sub> 保护层能够有效提高绝缘材料的抗 AO 腐蚀性, 通过特殊工艺将 SiO<sub>2</sub> 涂覆在材料表面, 形成一层有效的保护层, 从而保护材料不受 AO 的剥蚀效应<sup>[19]</sup>。

空间站等航天任务中对于提高航天器用空间材料抗 AO 侵蚀能力一般采取两种加固方式: 一是从分子结构出发, 选用抗 AO 侵蚀新材料<sup>[20]</sup>; 另一个方法

是在原有材料表面涂覆抗 AO 防护涂层<sup>[21-23]</sup>。本文基于 KH-AORX 湿化学法镀膜工艺的研究, 通过底涂浸涂、面涂喷涂循环涂覆流程以及精准多层控温烘焙相结合的先进工艺控制方法, 首次实现了在 PEI 绝缘材料载体上以 PHPS 陶瓷先驱体转化制备 SiO<sub>2</sub> 涂层, 有效解决了其他 SiO<sub>2</sub> 涂层工艺带来的外观易现裂纹、涂层边缘薄、硬度及附着力批次性合格率低等质量问题。通过对涂覆 SiO<sub>2</sub> 涂层 PEI 绝缘材料耐 AO 效果进行空间试验验证, 分析了试验前后 PEI 绝缘材料质量损失率、AO 剥蚀率、外观形貌的变化, 旨在验证涂覆 SiO<sub>2</sub> 的 PEI 绝缘材料耐受 15 年累积通量为  $7.83 \times 10^{26}$  atoms/m<sup>2</sup> AO 剥蚀的能力。空间试验验证数据分析表明, 采用 KH-AORX 湿化学法镀膜工艺的 PEI 绝缘材料理论上已能满足航天器舱外任务在轨 15 年服役寿命的要求, 这为保证航天型号任务设计寿命的实现提供了有力的试验数据。

## 1 SiO<sub>2</sub> 涂层机理分析

基于地球低轨道空间环境特点及航天器特定部位功能性要求, PEI 绝缘材料耐 AO 涂层应具备以下性能: 良好的耐 AO 侵蚀的能力; 线膨胀系数与基体材料相匹配, 结合力良好; 无裂纹、起泡、破碎、翘起、局部脱落等影响性能的缺陷; 长期耐受 LEO 环境下高真空、温度冲击、带电粒子辐射、紫外线辐射等环境的能力; 良好的耐摩擦和抗剥落性能; 满足热真空释气要求。根据以上要求, 耐 AO 涂层采用液相涂布陶瓷先驱体全氢聚硅氮烷 (PHPS) 直接转化为 SiO<sub>2</sub> 无机涂层的技术方案。

PHPS 是一种主链为 Si—N 键, 侧基全部为 H 的无机聚合物。PHPS 用作涂层材料的优势主要包括:

1) PHPS 作为涂层材料, 具有黏度可控、溶解性好的特点, 其涂覆工艺性优于其他涂层材料, 可采用浸涂、喷涂等方式涂覆, 便于应用于结构比较复杂的构件。

2) 由于 PHPS 结构中存在大量反应性基团 Si—H



3 结果与讨论

3.1 涂覆 SiO<sub>2</sub> 的 PEI 绝缘体零件

3.1.1 质量损失率

涂覆 SiO<sub>2</sub> 的 PEI 绝缘体零件经历了 1~5 年累积通量的 AO 试验，其质量损失率结果见表 3。采用数值拟合方法，预计经历 15 年通量的 AO 剥蚀后的质

量损失率变化趋势如图 2 所示。通过表 3 和图 2 可知，经历 5 年通量的 AO 试验后，涂覆 SiO<sub>2</sub> 的 PEI 绝缘体零件的质量损失率为 0.05%。依据试验过程中 1~5 年每个阶段的质量损失率数据，并采用数值拟合方法，预计经历 15 年通量的 AO 剥蚀后的质量损失率为 0.29%。对于质量损失率数据中出现负值的原因，经分析是由于 PEI 绝缘体零件表面 SiO<sub>2</sub> 涂层在制备过程中未完全转化，其在 AO 辐照作用下进一步转化为 SiO<sub>2</sub>，从而发生质量增加现象。

表 3 涂覆 SiO<sub>2</sub> 的 PEI 绝缘体零件质量损失率结果  
Tab.3 Test results of mass loss rate of PEI pure parts coated with SiO<sub>2</sub>

Sample	Sample Status	After1 years	After 2 years	After 3 years	After 4 years	After 5 years
1#	Insulation material part coated with SiO <sub>2</sub>	-0.04%	-0.05%	-0.02%	0.02%	0.05%

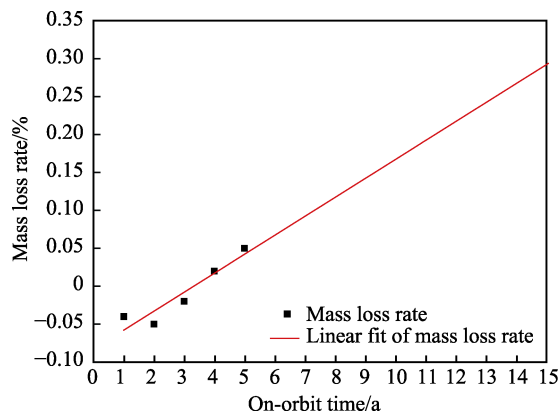


图 2 1#试品质量损失率变化趋势  
Fig.2 Trend of mass loss rate of 1# sample

3.1.2 光学显微镜外观检查结果

涂覆 SiO<sub>2</sub> 的 PEI 绝缘体零件试验前及经历了 5 年累积通量的 AO 试验后，其光学显微镜外观检查结果如图 3 所示。试验前，经光学显微镜检查，试品的

SiO<sub>2</sub> 涂层完整，未见裂纹、孔洞、起泡等缺陷。AO 试验完成后，经光学显微镜检查，试品 SiO<sub>2</sub> 涂层未见裂纹、孔洞、涂层脱落和基体暴露现象。

3.1.3 SEM 外观形貌

涂覆 SiO<sub>2</sub> 的 PEI 绝缘体零件经历 5 年累积通量的 AO 试验后，其电子显微镜外观检查结果如图 4 所示。经电子显微镜检查，试品表面未见涂层起层、脱落和基体暴露现象，但孔口边缘棱角处存在轻微剥蚀现象。经分析，试品孔口边缘棱角处出现剥蚀现象的原因为：AO 辐照之后，防护涂层表面氧化，发生质量和密度变化，造成局部体积收缩，产生收缩应力，从而出现微裂纹现象。对绝缘体零件结构进一步分析发现，零件的边缘棱角处未进行倒角钝化处理，致使在零件边缘棱角处制备的 SiO<sub>2</sub> 膜层厚度分布不均匀。随着 AO 辐照累计量增加，防护涂层表面发生不同程度的氧化，可以通过在零件边缘棱角处增加倒角钝化的工艺处理方式避免发生剥蚀现象。

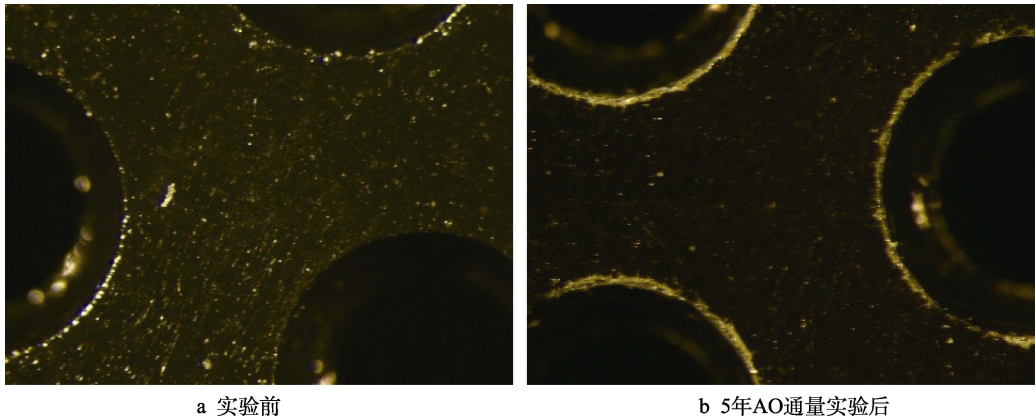


图 3 5 年 AO 通量试验前后光学显微镜检查外观形貌（1#样品）

Fig.3 Images examined by optical microscopes before and after 5 years of atomic oxygen flux (1# sample): a) Before test; b) After 5 years of atomic oxygen flux

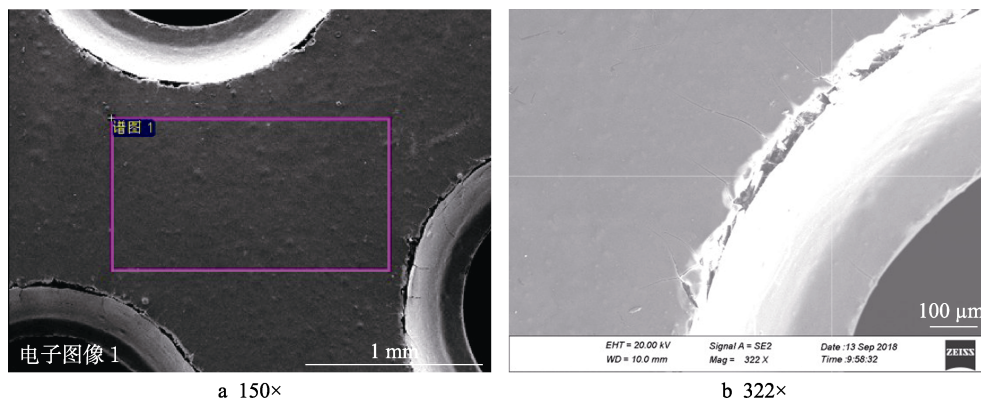


图4 5年AO通量试验前后SEM检查外观形貌  
Fig.4 SEM images before and after 5 years of atomic oxygen flux

## 3.2 PEI 绝缘材料试片

### 3.2.1 质量损失率

对 PEI 绝缘材料试片进行了 1~5 年累积通量的 AO 试验, 其质量损失率结果见表 4。采用数值拟合方法, 预计经历 15 年通量的 AO 剥蚀后的质量损失率变化如图 5 所示。通过表 4 和图 5 可知, 经历 5 年通量的 AO 试验后, PEI 绝缘材料试片的质量损失率为 6.24%。基于试验过程中 1~5 年每个阶段的质量损失率数据, 采用数值拟合方法, 预计经历 15 年通量的 AO 剥蚀后的质量损失率约为 17%。

表 4 PEI 绝缘材料试片质量损失率结果  
Tab.4 Test results of mass loss of PEI insulation sample

Sample	Sample Status	After 1 years	After 2 years	After 3 years	After 4 years	After 5 years
2#	Insulation material sample	2.05%	3.26%	4.33%	5.31%	6.24%

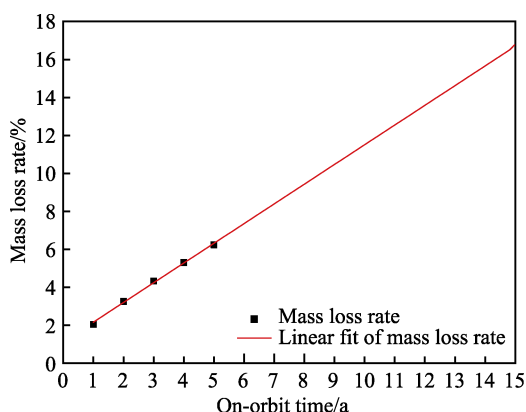


图 5 2#试片质量损失率变化趋势  
Fig.5 Change trend of mass loss rate of 2# sample

### 3.2.2 剥蚀率

PEI 绝缘材料试片经历 1~5 年累积通量的 AO 试验, 其剥蚀率结果见表 5。采用数值拟合方法, 预计经历 15 年通量的 AO 试验后剥蚀率的变化趋势如图 6

所示。通过表 5 和图 6 可知, 经历 5 年通量的 AO 试验后, PEI 绝缘材料试片的剥蚀率为  $0.72 \times 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{atom}$ 。基于试验过程中 1~5 年每个阶段的剥蚀率数据, 采用数值拟合方法预计经历 15 年通量的 AO 剥蚀后, 原始绝缘材料试片的剥蚀率为  $0.5 \times 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{atom}$ 。

表 5 PEI 绝缘材料试片剥蚀率结果  
Tab.5 Test results of erosion yield of PEI insulation sample  
 $\times 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{atom}$

Sample	Sample Status	After 1 years	After 2 years	After 3 years	After 4 years	After 5 years
2#	PEI insulation sample	1.18588	0.94271	0.83563	0.76820	0.72260

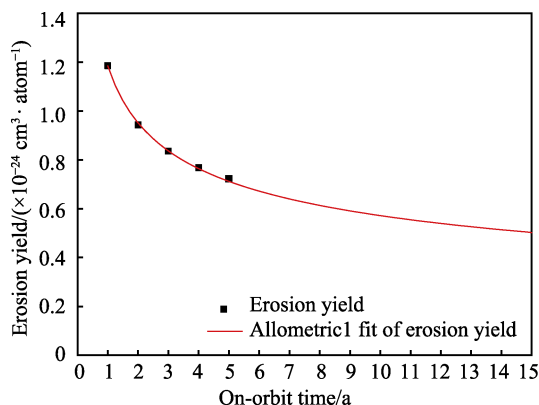


图 6 2#试片剥蚀率变化趋势  
Fig.6 Erosion yield change trend of the 2# sample

### 3.2.3 光学显微镜外观检查结果

PEI 绝缘材料试片试验前及经历 5 年累积通量的 AO 试验后, 光学显微镜外观检查结果如图 7 所示。经光学显微镜检查, 经历 5 年通量的 AO 试验后, 绝缘材料试片出现了严重的剥蚀现象。由于绝缘体材料试片为 20%玻纤增强 PEI 复合材料, 从照片可以看出, 材料试片中的 PEI 基材被严重剥蚀, 内部填充的玻璃纤维完全暴露出来, 呈现典型的 AO 剥蚀形态。



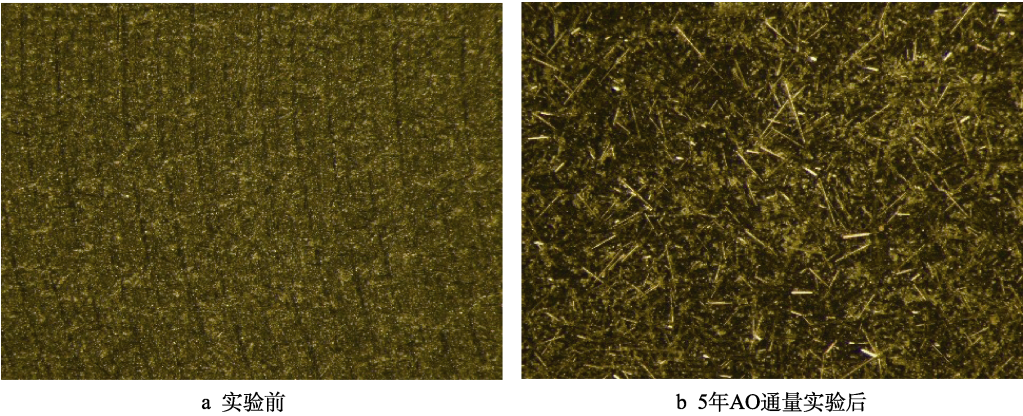


图 7  5 年 AO 通量试验前后光学显微镜检查外观形貌（2#样品）  
Fig.7 Images examined by optical microscopes before and after 5 years of atomic oxygen flux (2# sample): a) Before test; b) After 5 years of atomic oxygen flux

3.2.4 SEM 外观形貌

利用扫描电子显微镜（SEM）对 PEI 绝缘材料试片在经历 5 年累积通量 AO 试验后的外观形貌进行了检查，结果如图 8 所示。可以看出，PEI 绝缘材料试

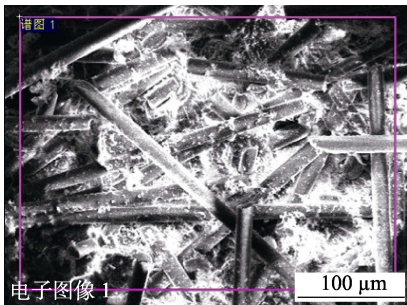


图 8  SEM 检查外观形貌（2#样品）  
Fig.8 SEM images (2# sample)

片内部填充的玻璃纤维完全暴露，受剥蚀破坏较为严重。

3.3 涂覆 SiO<sub>2</sub> 的绝缘材料试片

3.3.1 质量损失率

涂覆 SiO<sub>2</sub> 的绝缘材料试片经历了 1~5 年累积通量的 AO 试验，其质量损失率结果见表 6。采用数值拟合方法，预计经历 15 年通量的 AO 剥蚀后的质量损失率变化趋势如图 9 所示。通过表 6 和图 9 可知，经历 5 年通量的 AO 试验后，涂覆 SiO<sub>2</sub> 的绝缘材料试片的质量损失率为 0.27%，而拟合计算得出累积 15 年通量 AO 后的质量损失率约为 0.7%，年平均质量损失率约为 0.047%。与未涂覆 SiO<sub>2</sub> 绝缘体材料试片相比，耐 AO 能力提高了近 24 倍。

表 6  涂覆 SiO<sub>2</sub> 的绝缘材料试片质量损失率试验结果  
Tab.6 Test results of mass loss rate of insulation material sample coated with SiO<sub>2</sub>

Sample	Sample Status	After1 years	After 2 years	After 3 years	After 4 years	After 5 years
3#	Insulation materialsample coated with SiO <sub>2</sub>	0.10%	0.13%	0.17%	0.23%	0.27%

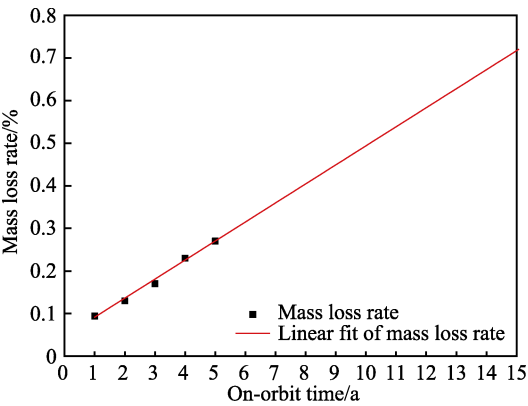


图 9  3#试品质量损失率变化趋势  
Fig.9 Change trend of mass loss rate of 3# sample

3.3.2 显微镜表面形貌

利用光学显微镜对试验前和经历 5 年 AO 通量试验后的涂覆 SiO<sub>2</sub> 的绝缘材料试片外观形貌进行检查，如图 10 所示。通过光学显微镜检查可以看出，经历 AO 试验后，试品的 SiO<sub>2</sub> 涂层完整，未见裂纹、孔洞、起泡等缺陷。

3.3.3 SEM 外观形貌

利用扫描电子显微镜（SEM）对涂覆 SiO<sub>2</sub> 的绝缘材料试片在经历 5 年累积通量 AO 试验后的外观形貌进行检查，结果见图 11，能谱分析见图 12。可以看出，涂覆 SiO<sub>2</sub> 的绝缘材料试片表面涂层出现了微裂纹现象，但未见起层、脱落和基体暴露现象。对裂

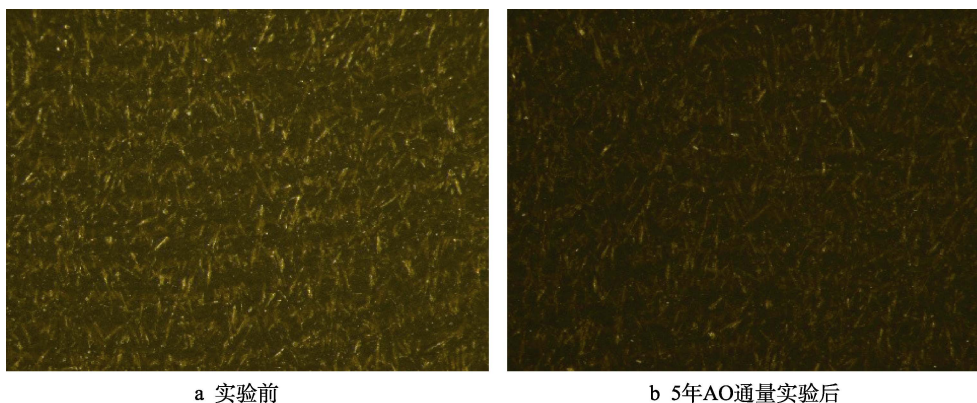


图 10 5 年 AO 通量试验前后光学显微镜检查外观形貌 (3#样品)

Fig.10 Images examined by optical microscopes before and after 5 years of atomic oxygen flux (3# sample): a) Before test; b) After 5 years of atomic oxygen flux

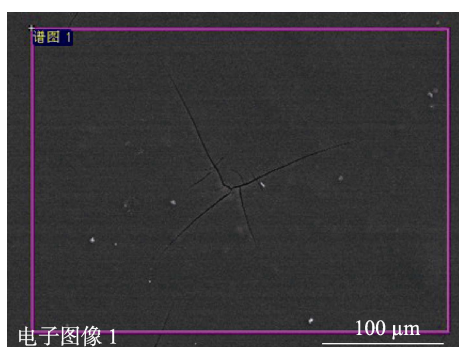


图 11 5 年 AO 通量试验后 SEM 检查外观形貌 (3#样品)  
Fig.11 SEM images after 5 years of atomic oxygen flux (3# sample)

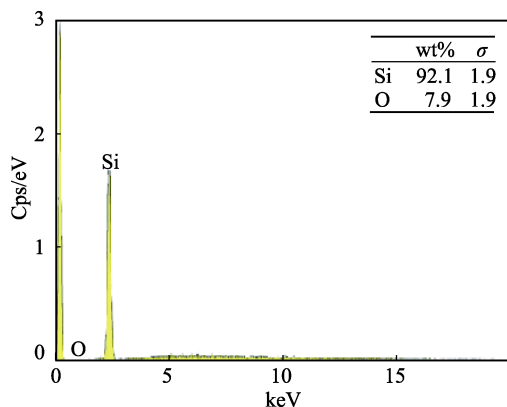


图 12 裂纹能谱分析图 (3#样品)

Fig.12 Energy disperse X-ray microanalysis image of the crack (3# sample)

纹处再次进行了能谱分析, 均含硅 (Si) 和氧 (O) 元素, 且未发现基体材料元素, 表明  $\text{SiO}_2$  涂层未出现贯穿性裂纹。

对于  $\text{SiO}_2$  涂层表面出现微裂纹的现象, 分析原因为: AO 辐照之后, 防护涂层表面氧化, 发生质量和密度变化, 造成局部体积收缩, 产生收缩应力, 从而出现微裂纹现象。 $\text{SiO}_2$  涂层表面出现微裂纹现象对 AO 防护能力的影响分析: 1) 涂层表面向纯  $\text{SiO}_2$  转化, 形成  $\text{SiO}_2$  阻隔层, 阻止涂层进一步被 AO 腐蚀,

裂纹部分为应力释放位置, 其下方仍存在底涂层, 不会出现贯穿现象 (裂纹处能谱分析结果已证明); 2) 涂层微裂纹附近氧化会产生氧化硅, 对阻止进一步腐蚀有帮助作用。

对于已涂覆  $\text{SiO}_2$  的绝缘体材料试片, 经电子显微镜检查, 表面涂层裂纹比已涂覆  $\text{SiO}_2$  的绝缘体材料零件严重。分析原因为, 涂覆  $\text{SiO}_2$  涂层的绝缘体材料试片和零件表面  $\text{SiO}_2$  涂层的应力状态不同。绝缘体零件为多孔结构, 相对于材料试片, 无大面积连续涂层区域, 而绝缘体表面的孔在一定程度上起到了消除涂层应力的作用, 因此绝缘体零件表面  $\text{SiO}_2$  涂层仅在孔口边缘应力集中处存在剥蚀现象, 而平面区域未见裂纹。

## 4 结论

本文分别对涂覆  $\text{SiO}_2$  的 PEI 绝缘体零件、PEI 绝缘材料试片和涂覆  $\text{SiO}_2$  的 PEI 绝缘材料试片进行了 1~5 年 AO 通量试验验证, 并通过数值拟合计算出累积 15 年通量 AO 后的质量损失率和剥蚀率, 借助光学显微镜、SEM 进行了外观形貌检查及微裂纹的能谱分析, 得出以下结论:

1) PEI 绝缘材料试片经历 5 年通量的 AO 腐蚀后, 其质量损失率为 6.24%, 预计经历 15 年通量的 AO 剥蚀后, 其质量损失率为 17%。经光学显微镜检查, PEI 绝缘材料试片表面剥蚀明显, 内部填充的玻璃纤维完全暴露。未进行防护加固的 PEI 材料试片耐受 AO 侵蚀能力较差, 15 年通量后的质量损失率为 17%, 已无法满足型号既定的任务需要。

2) 涂覆  $\text{SiO}_2$  的 PEI 绝缘体零件和 PEI 绝缘材料试片经历 5 年通量的 AO 剥蚀后, 质量损失率分别为 0.05% 和 0.27%。基于回归拟合计算, 预计经历 15 年通量的 AO 剥蚀后, 质量损失率分别为 0.29% 和 0.7%, 相较于未涂覆  $\text{SiO}_2$  涂层的绝缘材料试片, 耐 AO 侵蚀能力大幅度提升。

3) 综合三种试品 AO 试验前后的质量损失率、剥蚀率、SEM 检查及能谱分析等,说明涂覆 SiO<sub>2</sub> 涂层的 PEI 绝缘材料试品的质量损失率明显优于未涂覆 SiO<sub>2</sub> 涂层的 PEI 绝缘材料试品,因此该 SiO<sub>2</sub> 涂层对 PEI 绝缘材料具有良好的耐 AO 防护能力。

#### 参考文献:

- [1] ZHAO W, LI W, LIU H. Erosion of a polyimide material exposed to simulated atomic oxygen environment[J]. Chinese journal of aeronautics, 2010, 23(2): 268-273.
- [2] BANKS B A, DE GROH K K, MILLER S K. Low earth orbital atomic oxygen interactions with spacecraft materials[J]. Mrs proceedings, 2004, 851(6): 34-35.
- [3] 于登云, 向树红, 于丹. 空间环境监测与试验体系初步设想[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(3): 205-208.  
YU Deng-yun, XIANG Shu-hong, YU Dan. Space environmental monitoring and test system[J]. Spacecraft environment engineering, 2008, 25(3): 205-208.
- [4] SHIMAMURA H, NAKAMURA T. Mechanical properties degradation of polyimide films irradiated by atomic oxygen[J]. Polymer degradation and stability, 2009, 94: 1389-1396.
- [5] BRUCE A B, SHARON K R M. Overview of space environment effects on materials and GRC's test capabilities[C]// 2005 NASA Seal/Secondary Air System Workshop. Ohio: Presented at the Seals Workshop, 2005.
- [6] TIGHE A P, IWANOSKY B, VAN EESBEEK M, et al. Overview of results from the materials exposure and degradation experiment (MEDET) after 18 months in orbit on the ISS[J]. Citius altius fortius, 2009, 22(1): 51-61.
- [7] KLEIMAN J I, ISKANDEROVA Z A, PEREZ F J, et al. Protective coatings for LEO environments in spacecraft applications[J]. Surface and coatings technology, 1995, 76-77(2): 827-834.
- [8] RUTLEDGE S, BANKS B, CALES M. A comparison of atomic oxygen erosion yields of carbon and selected polymers exposed in groundbased facilities and in low Earth orbit[C]// The 25<sup>th</sup> Plasmadynamics and Lasers Conference. Colorado Springs, CO, USA: [s. n.], 1994.
- [9] DE GROH K K, BANKS B A, MCCARTHY C E, et al. Misse 2 peace polymers atomic oxygen erosion experiment on the international space station[J]. High performance polymers, 2008, 20(4-5): 388-409.
- [10] GROH H, MILLER S, SMITH I, et al. Adhesion of silicone elastomer seals for nasa's crew exploration vehicle[C]// The 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Hartford, CT, USA: [s. n.], 2008.
- [11] LAIKHTMAN A, GOUZMAN I, VERKER R, et al. Atomic oxygen and uv irradiation effects on fluorosilicone rubber: Comparison of rf plasma and in-flight exposure[J]. High performance polymers, 2008, 20(4-5): 447-460.
- [12] BANKS B A, BACKUS J A, MANNO M V, et al. Prediction of atomic oxygen erosion yield for spacecraft polymers[J]. Journal of spacecraft and rockets, 2011, 48(1): 14-22.
- [13] YAGNAMURTHY S, CHEN Q, CHEN C G, et al. Erosion yield of epoxy—Silica nanocomposites at the lower earth orbit environment of the international space station[J]. Journal of composite materials, 2013, 47(1): 107-117.
- [14] MINTON T K, WERGHT M E, TOMCZAK S J, et al. Atomic oxygen effects on POSS polyimides in low earth orbit[J]. ACS applied materials & interfaces, 2012, 4(2): 492-502.
- [15] ATAR N, GROSSMAN E, GOUZMAN I, et al. Atomic-oxygen-durable and electrically-conductive CNT-POSS-polyimide flexible films for space applications[J]. ACS applied materials & interfaces, 2015, 7(22): 12047-12056.
- [16] BRNNSVOLD A L, MINTON T K, GOUZMAN I, et al. An investigation of the resistance of polyhedral oligomeric silsesquioxane polyimide to atomic—Oxygen attack[J]. High performance polymers, 2004, 16(2): 303-318.
- [17] MINTON T K, WU B, ZHANG J, et al. Protecting polymers in space with atomic layer deposition coatings[J]. ACS applied materials & interfaces, 2010, 2(9): 2515-2520.
- [18] 张宗波, 肖凤艳, 罗永明, 等. 全氢聚硅氮烷(PHPS)涂层材料研究进展[J]. 涂料工业, 2013, 43(4): 74-49.  
ZHANG Zong-bo, XIAO Feng-yan, LUO Yong-ming, et al. Research progress in perhydropolysilazane coatings[J]. Paint & coatings industry, 2013, 43(4): 74-49.
- [19] GONZALEZ R I, PHILLIPS S H, HOF LUND G B. In situ oxygen—Atom erosion study of polyhedral oligomeric silsesquioxane—Siloxane copolymer[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2000, 37(4): 463-467.
- [20] WANG P, TANG Y S, YU Z, et al. Advanced aromatic polymers with excellent antiatomic oxygen performance derived from molecular precursor strategy and copolymerization of polyhedral oligomeric silsesquioxane[J]. ACS applied materials & interfaces, 2015, 7(36): 20144-20155.
- [21] 赵琳, 李中华, 郑阔海. 原子氧防护涂层技术研究[J]. 真空与低温, 2011, 17(4): 187-192.  
ZHAO Lin, LI Zhong-hua, ZHENG Kuo-hai. The study on atomic oxygen protective coatings[J]. Vacuum and cryogenics, 2011, 17(4): 187-192.
- [22] 孙九立, 张秋禹, 刘金华, 等. 低地球轨道环境中原子氧对空间材料的侵蚀及防护方法[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(8): 631-635.  
SUN Jiu-li, ZHANG Qiu-yu, LIU Jin-hua, et al. Atomic oxygen erosion on space materials in LEO environment and protection methods[J]. Corrosion and protection, 2010, 31(8): 631-635.
- [23] 赵云峰. 航天特种高分子材料研究与应用进展[J]. 中国材料进展, 2013, 32(4): 217-228.  
ZHAO Yun-feng. Progress on research and application of special polymer materials in aerospace industry[J]. Materials China, 2013, 32(4): 217-228.
- [24] 多树旺, 李美栓, 张亚明, 等. 低地轨道环境中的原子氧对空间材料的侵蚀与防护涂层[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(3): 152-156.  
DUO Shu-wang, LI Mei-shuan, ZHANG Ya-ming, et al. Atomic oxygen attack on space materials in LEO environment and protective coatings[J]. Corrosion science and protection technology, 2002, 14(3): 152-156.
- [25] BRUCE A B, RIKAKO D. Atomic oxygen protection of materialism low earth orbit[C]// Society for the Advancement of Material and Process Engineering Conference. CA(US): NASA Glenn Research Center Cleveland, 2002.