

文章编号: 100026893(2002)052047204

# 银膜的原子氧剥蚀效应及其防护的试验研究

赵小虎, 沈志刚, 邢玉山, 麻树林

(北京航空航天大学 流体力学研究所, 北京 100083)

## EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF ATOMIC OXYGEN EFFECTS ON SILVER FOILS AND ITS PROTECTIVE COATING

ZHAO Xiao2hu, SHEN Zh2gang, XING Yu2shan, MA Shu2lin

(Institute of Fluid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘 要:** 空间太阳能电池板作为空间飞行器电源系统的重要组成部分, 它的正常工作对飞行器的运行起着非常重要的作用, 而作为互连片的银材料, 可能会与空间环境中的原子氧发生反应, 生成不导电的氧化物, 从而影响空间太阳能电池板的有效寿命。本文在原子氧效应地面模拟试验设备中, 对银以及镀有不同防护层的银膜进行了原子氧效应地面模拟试验研究, 对试验前后试样的外观、质量进行了比较, 获得了银在设备中的反应特点, 同时对不同防护镀层的有效性进行了验证, 为银互连片在空间太阳能电池板上的应用及其防护提供了设计依据。

**关键词:** 太阳能电池; 银互连片; 原子氧效应; 地面试验

**中图分类号:** V41615 **文献标识码:** A

**Abstract:** The space solar cell is the main component of a solar photovoltaic system that provides power for a spacecraft. The regular work of the space solar cell is very important for the running of spacecraft. However, the silver interconnects may interact with the atomic oxygen in the space environments to generate nonconducting oxide, which will affect the effective lifetime of solar cells. Therefore, the study of silver foils with and without different protective coatings was conducted in this paper with ground-based AO effects simulation facility. The sample material before and after the experiments is compared in the aspect, mass and surface morphology. The reaction characteristics of the material in the facility were acquired and the validity of different protective coatings was verified.

**Key words:** solar cell; silver interconnect; atomic oxygen effects; ground experiment

太阳能是一种非常理想的能源, 对于运行在外层空间的飞行器而言, 装配于其上的太阳能电池板可以将太阳能转换成电能, 提供给飞行器各系统。一般而言, 太阳能电池板都敷在飞行器的体外以最大限度地接受太阳能, 因而也将面临飞行器在轨道上所遇到的各种环境因素的考验, 特别是原子氧(atomic oxygen, AO)。

在低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO, 200km~600km)环境中, 主要组分有 N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, He, H 及 AO 等<sup>[1,2]</sup>, 其中 AO 的含量最高。虽然在空间高真空环境下各组分的数密度并不高, 但由于飞行器的运行速度大, 因此粒子有较大的通量和较高的撞击动能。当飞行器以轨道速度在 LEO 环境中运行时, 原子氧撞击飞行器表面的通量和平均动能分别为 10<sup>14</sup>~10<sup>15</sup>atoms/(cm<sup>2</sup>#s)和

5eV, 再加上原子氧本身具有很强的氧化性, 因此这一过程中将会发生复杂的物理、化学变化, 引起材料的剥蚀和性能的退化<sup>[3,4]</sup>。目前原子氧剥蚀效应研究受到了越来越多的关注, 已成为空间 LEO 环境效应研究的重要组成部分。

由于银具有良好的导电性能, 因此空间太阳能电池板组件之间的电连接都用银互连片, 但是空间飞行试验指出<sup>[5]</sup>, 暴露在空间原子氧环境下的银材料会遭受严重的氧化, 生成不导电的氧化物, 从而影响太阳能电池板的正常工作和使用寿命。而且所生成的氧化物结构松散, 容易脱落, 从而露出下面的银层, 很快又会被氧化, 这个过程的重叠进行, 导致银互连片可能会被完全氧化, 失去其导电性能。而对太阳能电池板而言, 轻则输出功率下降, 重则无法工作, 因此必须选择必要的措施加以保护。

目前, 空间常用的抗原子氧防护涂层主要有:

1 剥蚀率很小的聚合物材料(如 Teflon 等氟化

物)以及在原子氧环境中非常稳定的材料(如聚磷酸酯、 $\text{SiO}_2$ 等); $\circ$ 可与原子氧反应形成玻璃化氧化物层从而保护底层材料不被原子氧剥蚀的无机或半无机的聚合物(如硅树脂); $\gg$ 可抵抗原子氧剥蚀的金属(如Al, Sn)及金属氧化物涂层( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )等。由于金属与金属氧化物涂层有着可以忽略的剥蚀率,是涂层比较好的选择之一<sup>[6]</sup>。

原子氧效应研究中广泛采用了地面模拟试验研究,这种方法成本低、周期短,能够定性地了解原子氧能量、通量和环境粒子对材料性能的影响,从而为空间材料的选择和评定提供应用和设计依据。本文在原子氧效应地面模拟设备中对金属银膜以及镀有不同保护层的银膜进行了原子氧效应地面模拟试验研究(试验样品由天津电子部第十八研究所提供),得出了一些有价值的结果。

## 1 试验设备

原子氧效应地面模拟试验设备是自行设计与研制的,它属于目前国外LEO环境原子氧效应研究中最为常用的等离子体设备,关于设备构成及运行特性的详细介绍见文献[7]。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 原子氧通量的估计

由于原子氧通量的直接准确测量这个问题目前尚未能解决,因此本次试验中仍以标准材料Kapton的质量损失作为模拟设备中原子氧等效通量的计算依据。Kapton是在空间应用非常广泛的一种聚合物材料,其在原子氧的作用下剥蚀比较严重,具有着公认的基本不变的剥蚀率(一般取 $R_{ey} = 310 @ 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{atom}^{[5]}$ )。用Kapton材料的质量损失推算得到的通量称为等效原子氧通量,计算方法如下:

已知Kapton材料的剥蚀率(erosion yield)  $R_{ey} = 310 @ 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{atom}$ , 原子氧暴露试验后Kapton材料的质量损失  $\$M$ 。

则等效累计通量(Fluence)

$$F = \$M / (QA R_{ey})$$

其中: A 是试样面积; Q是材料密度。

### 2.1.2 银膜的原子氧暴露试验结果

图1是银膜经等效累计通量为  $212 @ 10^{20} \text{ atoms/cm}^2$  (5#) 及  $518 @ 10^{21} \text{ atoms/cm}^2$  (24#) 的原子氧暴露试验前后的外观对比照片,表1是银

膜的原子氧暴露试验质量结果。试验中发现,在原子氧暴露试验后,银膜表面会生成一层疏松、易脱落的黑色氧化物(见图1),小通量暴露后银膜的质量增大(表面的氧化物尚未完全脱落)。而洗去氧化物后的底层银材料也不再是原来的银白色,略显灰色。由于银膜表面生成的氧化物容易脱落,因此其质量结果只具有参考价值,而不能定量地进行比较说明。



图1 银膜经不同通量原子氧暴露试验前后的外观对比照片  
(a) 15#, 试验前; (b) 5#,  $F = 212 @ 10^{20} \text{ atoms/cm}^2$ ;  
(c) 24#,  $F = 518 @ 10^{21} \text{ atoms/cm}^2$

Fig1 The photograph of Ag foils before and after AO exposure experiment

表1 银膜的原子氧暴露试验质量结果

Table 1 The AO exposure experiment results for Ag foils

样品号	等效原子氧累计通量/ $(\text{atoms}\cdot\text{cm}^{-2})$	试验前质量/g	试验后质量/g	质量变化/g
5	$212 @ 10^{20}$	011237	011248	增大 010011
24	$518 @ 10^{21}$	011154	010552	减小 010602

如果延长试验时间,在大通量的原子氧暴露试验后,由于银材料表面生成的疏松氧化物容易脱落,下面的银层则被暴露在氧环境中,并继续同氧原子反应,最终导致银膜的完全被氧化。在本阶段试验过程中,24#银膜试样被长期放在真空中,由Kapton材料的质量损失推算得到的等效累计通量达  $518 @ 10^{21} \text{ atoms/cm}^2$ , 暴露试验后银膜已面目全非,变得非常薄而且试样表面全是小孔(见图1),质量也由原来的 011154g 减小至 010552g,估计剩余物质已经全是银的氧化物(整个呈黑色),由此可见,原子氧对银膜的作用是非常强烈的。

图2是原子氧暴露试验前银膜试样的扫描电镜(SEM)照片,可以看到平时看起来呈银白色的非常光滑的银表面,高倍放大后其表面同样高低不平,而且还有孔状缺陷。图3是银膜在原子氧暴露试验后的SEM照片,可以看到,试验后的银膜表面生成了松散的粉状氧化物,呈鳞片状结构,有分层脱落的趋势,这与国外空间和地面试验的结果相符<sup>[8]</sup>。

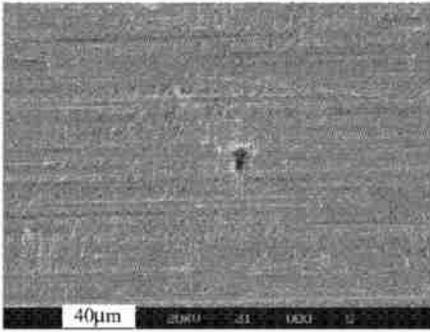


图 2 原子氧暴露试验前的银膜试样

Fig2 The SEM photograph of the sample before AO exposure experiment

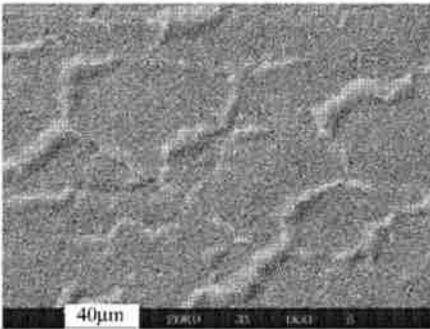


图 3 原子氧暴露试验后的银膜试样 ( $F = 2.2 \times 10^{20} \text{ atoms/cm}^2$ )

Fig3 The SEM photograph of the sample after AO exposure experiment

### 213 镀有不同防护层银膜的原子氧暴露试验结果

试验证明在原子氧环境下银膜的外观、质量、性能都会发生较大的变化, 因此当银互连片被应用在空间 LEO 环境中时, 最好能有防护措施, 否则可能会给太阳能电池乃至空间飞行器带来严重的后果。本文对镀金银膜、镀有不同厚度纯锡及铅锡合金的银膜进行了原子氧暴露试验研究, 结果总结如下。

镀金银膜 A, B(镀层厚度为 1Lm) 的原子氧暴露试验质量损失结果见表 2。

表 2 镀金银膜的原子氧暴露试验质量结果

Table 2 The AO exposure experiment results for Au/ Ag foils

样品号	等效原子氧累计 通量/ atoms# cm <sup>2</sup>	试验前 质量/g	试验后 质量/g	质量变化 /g
A	31 78 @10 <sup>21</sup>	010911	01 0590	01 0321
B	31 78 @10 <sup>21</sup>	010891	01 0189	01 0702

由于已知金在空间原子氧环境下的剥蚀率为零, 因此试验前对镀金银膜是抱有很大希望的。结果发现, 在原子氧暴露试验后, 两个试样的质量都产生了较大的损失, 但质量损失量却相差较大, 而且外观也有较大变化(见图 4), 试样最上面是呈黄色的非常薄的一层, 可以很轻易地拿下来, 而

下面则完全为黑色的粉状氧化物。分析认为, 镀金保护层之所以无法保护银材料不与原子氧作用, 可能是由于镀层工艺导致在银表面未能将金镀成致密无缺陷的一层保护层引起的, 而原子氧则经镀层的缺陷作用于下面的银层, 导致暴露试验后, 所镀的一层金整体被掀起来, 并将银充分暴露在原子氧环境中, 形成黑色的氧化物, 引起试样质量、性能的变化。此外, 在试验条件和镀层工艺相同的条件下, 两个样品的质量损失相差较大, 这说明镀层并不均匀。

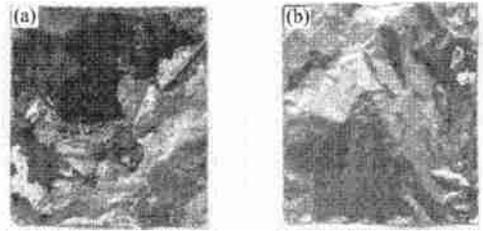


图 4 镀金银膜经长时间原子氧暴露试验后的外观照片

Fig4 The photo of Au/ Ag foils after AO exposure experiment

镀有不同厚度(1Lm, 2Lm, 3Lm)的纯锡、铅锡合金银膜经等效累计通量为  $1198 \times 10^{21} \text{ atoms/cm}^2$  的原子氧暴露试验后的质量结果见表 3。从外观上看, 试验后的试样表面颜色暗淡, 失去原有金属光泽, 但质量变化很小, 说明这两种镀层均能较好地起到保护底层材料的作用。而镀 1Lm 铅锡合金银膜的质量略有增大, 可能是表面沾有其它颗粒污染物的缘故。

表 3 镀锡、铅锡合金银膜的原子氧暴露试验质量结果

Table 3 The AO exposure experiment results for Sn/ Ag and PbSn/ Ag foils

材 料	试验前质量 /g	试验后质量 /g	质量变化/g
银 膜	011148	01 1037	- 01 0111
镀 1Lm 纯锡银膜	011234	01 1232	- 01 0002
镀 2Lm 纯锡银膜	011354	01 1353	- 01 0001
镀 3Lm 纯锡银膜	011358	01 1355	- 01 0003
镀 1Lm 铅锡合金银膜	011352	01 1353	+ 01 0001
镀 2Lm 铅锡合金银膜	011472	01 1472	- 01 0000
镀 3Lm 铅锡合金银膜	011497	01 1496	- 01 0001

注: 银膜的质量损失是将试验后银膜表面黑色氧化物粉末清洗后称得的。

### 3 结 论

(1) 银膜在原子氧的作用下变化较大, 试验后的金属表面生成了一层黑色的、易脱落的粉状氧化物; 随原子氧累计通量的增大, 银膜会被完全氧化, 因此, 银材料在空间原子氧环境中使用时必须设法保护其不与原子氧直接接触。

(2) 虽然金不与原子氧作用, 但镀金银膜在原

子氧暴露试验后,质量有较大的损失,表面变化明显,所镀金层被掀起,下层的银仍会与原子氧反应生成黑色氧化物,起不到保护作用,这可能与镀层工艺有关。

(3) 镀有不同厚度的纯锡、铅锡合金的银膜在原子氧暴露试验后,表面失去原有金属光泽,色彩暗淡,但质量却没什么变化,这两种镀层可以起到保护下层的银不与原子氧反应的作用。

### 参 考 文 献

- [1] Coulter D R, Liang R H. O<sub>2</sub> atoms degradation mechanisms of materials[R]. N87226178, 1987. 39- 46.
- [2] Durcanin J T, Chalmers D R. The definition of the low earth orbital environment and its effect on thermal control materials [R]. AIAA 8721599, 1987.
- [3] Leger L J, Mason B S. Review of LEO flight experiments [R]. N87226174, 1987. 1- 10.
- [4] Lee A L, Rhoads G D. Prediction of thermal control surface degradation due to atomic oxygen interaction[R]. AIAA 85-1065, 1985.
- [5] Silverman E M. Spacecraft environmental effects on spacecraft: LEO materials selection guide[R]. N9610860, 1986. 121~ 1419.
- [6] Packirisamy S, Schwam D, Litt M H. Atomic oxygen resistant coatings for Low Earth Orbit space structures[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30: 308- 320.
- [7] 沈志刚, 赵小虎, 王忠涛, 等. 灯丝放电电磁场约束型原子氧

效应地面模拟设备[J]. 航空学报, 2000, 21(5): 425- 430.

(Shen Z G, Zhao X H, Wang Z T, et al. Ground-based atomic oxygen effects simulation facility with the filament discharge and bound of magnetic field[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(5): 425- 430.)

- [8] Ketsdever A D, Wearer D P, Mumtaz E P. The production of energetic atomic beams via charge exchange for the simulation of the Low Earth Orbit environment [R]. AIAA2960225, 1996.

作者简介:



沈志刚(1958- ) 男, 博士, 教授, 博士生导师。研究兴趣: 低地球轨道空间环境对空间飞行器的影响, 空间环境原子氧剥蚀效应研究, 空间环境地面模拟试验研究; 超细颗粒的制备技术研究, 固体废料的处理、开发与应用等。电话: 82317516。

E2mail: szg @buaapowder. net. cn



赵小虎(1974- ) 男, 博士研究生。研究兴趣: 空间环境中原子氧与材料相互作用的现象与机理以及在地面设备中如何对其进行模拟; 流体力学在工程上的应用; 实验室设备、测量仪器的自我更新与改造。电话: 82317516。

Email: Zltiger@buaapowder. net. cn

(责任编辑: 蔡 斐)