

# 真空环境对防静电热控涂层导电性能的影响

沈自才, 赵春晴, 冯伟泉, 丁义刚, 刘宇明, 郑慧奇, 赵雪  
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 文章通过试验研究了近紫外辐照前后的真空环境对防静电热控涂层的电学性能影响, 探讨了真空环境对防静电热控涂层电学性能影响的机理, 给出了地面模拟试验过程中关于数据分析的建议。研究发现: 真空环境将引起防静电热控涂层的表面电阻率降低、导电性能增强, 而氧空位的增加和吸附氧的释放则是其表面电阻率降低的主要原因。

**关键词:** 真空; 静电防护; 热控涂层; 电学性能

**中图分类号:** V416.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1379(2009)01-0005-04

## 1 引言

热控涂层是航天器热控系统的重要组成部分, 它能够改变航天器的表面热物理性质, 以便在辐射热交换中有效地控制航天器的温度, 使之在内外热交换过程中, 内部仪器、设备工作时的温度不超过允许范围, 以保证航天器内部的正常工作环境。其原理是调节物体表面的太阳吸收率 $\alpha_s$ 和红外发射率 $\epsilon_{th}$ 来控制物体的热平衡<sup>[1]</sup>。

地球同步轨道(GEO)存在的地磁亚暴环境有严重的充放电效应, 极地轨道的沉降电子会造成电荷在卫星表面热控涂层上积累, 当超过击穿阈值时, 卫星表面将发生放电, 这将对卫星带来极大的破坏作用<sup>[2]</sup>。由于卫星外表面大部分被用于温控的热控涂层所覆盖, 所以可以通过提高热控涂层的导电性能来达到防静电的目的, 如在镜反射热控涂层外表面镀一层氧化铟锡(ITO)透明导电薄膜、在涂料型热控涂层中添加导电组分等。具有导电性能的热控涂层也被称为防静电热控涂层, 如ITO/F46/Ag热控涂层等。

然而, 热控涂层在大气下与在真空状态下的性能存在较大差异, 从真空状态进入大气中后, 其电学性能存在一定的回复效应<sup>[3]</sup>。这说明真空环境对热控涂层的性能有着较大影响。

本文系统研究了紫外辐照前后真空环境对防静电热控涂层电学性能的影响, 并提出了产生这种

影响的原因, 给出了研究辐照环境对防静电热控涂层电学性能影响过程中的数据分析建议。

## 2 辐照试验

本试验在北京卫星环境工程研究所的空间综合环境设备上进行了。试验样品分别为ITO/Kapton/Al、ITO/F46/Ag、OSR二次表面镜, 每种试验样品的数量为2个; 其中ITO膜厚度为0.1  $\mu\text{m}$ , 位于热控涂层的最外层。当真空度达到 $10^{-3}$  Pa后, 开启紫外源; 当紫外辐照达到500 ESH后, 关闭紫外源。分别在辐照前的大气状态、高真空状态、紫外辐照25 ESH、500 ESH、辐照后大气状态以及大气状态一段时间后测量样品的表面电阻率。试验所用的近紫外源为1000 W汞氙灯, 利用太阳模拟器辐照装置, 具体试验参数见表1。

表1 真空紫外辐照试验参数表  
Table 1 Test parameters of VUV radiation

光源能量	曝辐照度	辐照度	真空度	试件温度	热沉温度
1000 W	$500 \times (1 \pm 10\%) \text{ ESH}$	$\sim 4 \text{ SC}$	$< 10^{-3} \text{ Pa}$	$\sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$	$\leq -35 \text{ }^\circ\text{C}$

表面电阻率采用原位测量<sup>[4]</sup>, 其测试原理图及测试装置图分别见图1和图2。用GENESIS 60S型X射线光电子能谱仪(XPS)对热控涂层的ITO膜层氧的存在进行了分析, 用TSPTT-200型四极质谱仪对辐照前后的涂层放气情况进行了分析。

收稿日期: 2008-06-30; 修回日期: 2008-10-27

作者简介: 沈自才(1980-), 男, 博士学位, 工程师, 主要从事深空探测及空间辐射环境效应研究。E-mail: zicaishen@163.com。

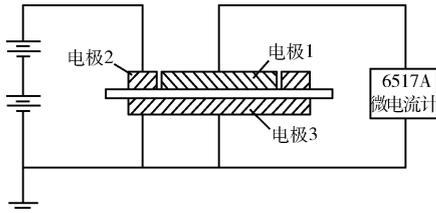


图1 表面电阻率原位测试示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of surface resistivity testing



图2 表面电阻率原位测试布置图  
Fig. 2 Layout of surface resistivity testing

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 从大气状态到紫外辐照前期

分别在大气状态下、真空度  $2.6 \times 10^{-3}$  Pa和紫外辐照 25 ESH后对3种防静电热控涂层进行表面电阻率测试,测试结果见图3~图5。其中每种涂层2组图形的差别可能由于辐照度及样品本身的不均匀性导致,但变化规律是一致的。

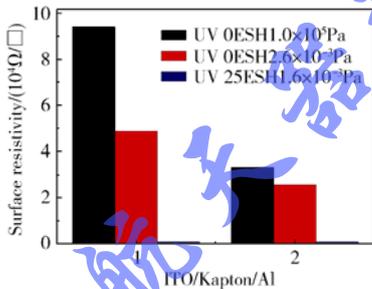


图3 ITO/Kapton/Al 从大气到辐照前期表面电阻率变化  
Fig. 3 Surface resistivity change of ITO/Kapton/Al before irradiation

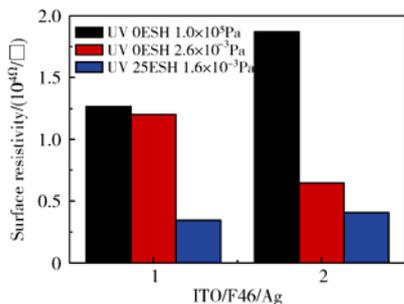


图4 ITO/F46/Ag 从大气到辐照前期表面电阻率变化  
Fig. 4 Surface resistivity change of ITO/F46/Ag before irradiation

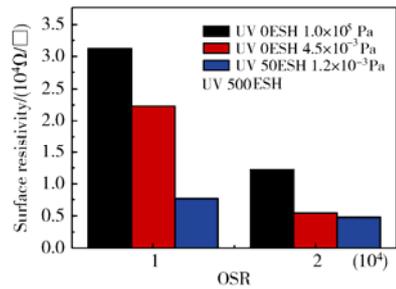


图5 OSR 从大气到辐照前表面电阻率变化  
Fig. 5 Surface resistivity change of OSR before irradiation

由图3~图5可知,样品从大气环境进入真空状态后,表面电阻率降低;当紫外辐照 25 ESH后,表面电阻率进一步降低。

#### 3.2 紫外辐照后期至大气状态

分别在紫外辐照 500 ESH、由真空回至大气状态以及大气状态一段时间后对3种防静电热控涂层进行表面电阻率测试,测试结果分别见图6~图8。

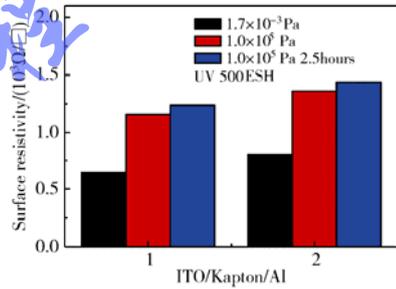


图6 ITO/Kapton/Al 辐照后表面电阻率变化  
Fig. 6 Surface resistivity change of ITO/Kapton/Al after irradiation

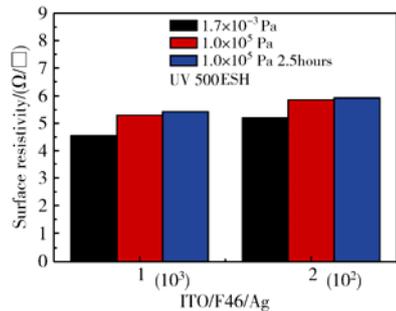


图7 ITO/F46/Ag 辐照后表面电阻率变化  
Fig. 7 Surface resistivity change of ITO/F46/Ag after irradiation

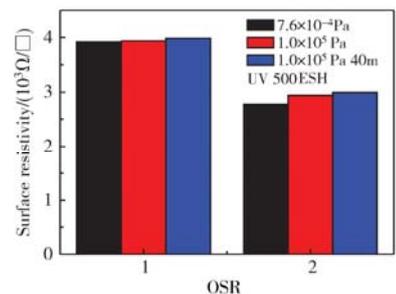
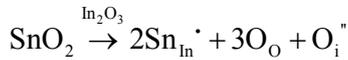


图8 OSR 辐照后表面电阻率变化  
Fig. 8 Surface resistivity change of OSR after irradiation

由图 6~图 8 分析可知：样品从真空状态进入大气状态后，表面电阻率升高；当在大气环境中放置一段时间后，表面电阻率进一步升高。

#### 4 机理研究

ITO 薄膜的导电性缘于它是一种 N 型半导体，高导电率主要是由于高电子浓度的缘故。ITO 薄膜中的载流子主要来自于铟掺锡和形成氧空位而处于弱激发状态的电子。当  $\text{Sn}^{4+}$  进入  $\text{In}_2\text{O}_3$  的晶格时，很容易取代  $\text{In}^{3+}$  的位置形成替位固溶体<sup>[5]</sup>。当  $\text{Sn}^{4+}$  置换部分  $\text{In}^{3+}$  时，为保证电中性，易变价的  $\text{Sn}^{4+}$  将捕获一个电子而变成  $(\text{Sn}^{4+} + e)$ ，即  $\text{Sn}^{3+}$ 。这个电子与  $\text{Sn}^{3+}$  的联系是弱束缚的，是载流子来源之一。



同时在 ITO 薄膜中还存在着另外一种缺陷，这就是氧空位。 $\text{In}_2\text{O}_3$  中的部分氧离子  $\text{O}^{2-}$  脱离原晶格，即形成氧空位。



氧空位相当于一个带正电荷的中心，能束缚电子。被束缚的电子处于氧离子空位上，为邻近的  $\text{In}^{3+}$  所共有，它的能级距导带很近，当受激发时该电子可跃迁到导带中，因而使 ITO 薄膜具有导电性<sup>[6]</sup>。

对防静电热控涂层进行 XPS (X 射线光电子谱) 分析，研究其氧元素的存在状态，对其氧元素分峰，见图 9。

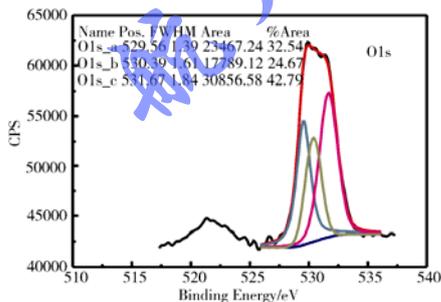


图 9 辐照前 O 元素能谱峰图

Fig. 9 Energy spectrum of oxygen before irradiation

由图 9 可以看出，辐照前薄膜表面的  $\text{O} 1\text{s}_\text{a}$  峰和  $\text{O} 1\text{s}_\text{c}$  峰分别对应于足氧状态和缺氧状态：低结合能的  $\text{O} 1\text{s}_\text{a}$  峰代表了  $\text{In}_2\text{O}_3$  晶格中氧原子，即  $\text{In}-\text{O}$  键中的氧； $\text{O} 1\text{s}_\text{c}$  峰代表着 ITO 膜中氧空位的数目，而氧空位直接同薄膜中的载流子浓度

数量相关<sup>[7]</sup>。通常认为，一个氧空位提供 2 个自由电子，并在能带结构中引入施主杂质能级。

对紫外辐照前后的防静电热控涂层进行氧元素质谱实时检测分析 (图 10)，虚线为本底无涂层状态紫外辐照下的情况，实线为放入样品后紫外辐照下的情况。由对比可知，紫外辐照开始后，存在着一段时间的氧元素的释放，这说明在紫外辐照下，防静电热控涂层 ITO 膜层可能存在着化学吸附氧的析出。

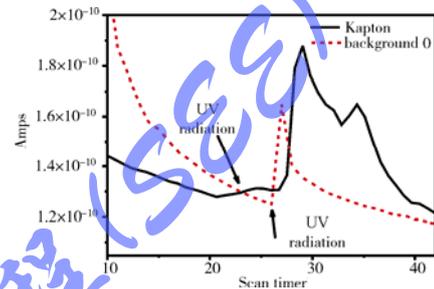


图 10 紫外辐照前后的 O 元素放气情况

Fig. 10 Oxygen deflation before and after irradiation

由于 ITO 膜中存在氧空位缺陷，大气条件下，表面存在着对氧的化学吸附。化学吸附氧的存在减少了导带中自由电子的数量。随着真空度的提高，化学吸附氧的数量将逐渐减少，从而使涂层的表面电阻率降低。当对其进行紫外辐照后，在紫外辐照的作用下，化学吸附氧获得能量进一步解吸附，同时 ITO 膜价带中的束缚电子也将吸收辐照能量跃迁到导带，从而使得 ITO 膜导带中的自由电子增多，导电性能增强，表面电阻率降低。

当将紫外辐照后的防静电热控涂层从真空状态下转回大气中，ITO 膜层中的氧空位缺陷又将开始吸附氧，从而减少了导带中的自由电子数量，引起导电性能下降，表面电阻率升高；随着在大气状态中放置的时间增长，氧空位缺陷的吸附氧数量将进一步增加，表面电阻率也将进一步增加，直到吸附氧达到饱和。

#### 5 讨论

由上面的研究分析可以知道，真空环境对防静电热控涂层的导电性能有着重要的影响。在紫外辐照前，随着真空度的提高，ITO 防静电热控涂层的表面电阻率将降低；而辐照后从真空状态下恢复到

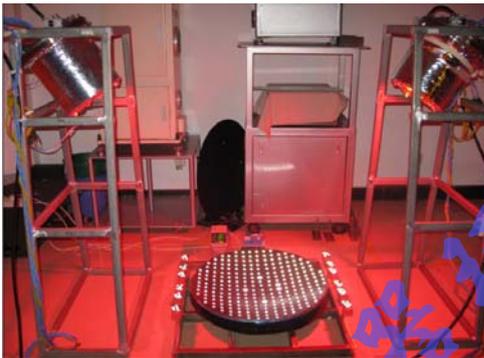
大气状态后,其表面电阻率又将增大。分析原因,是由于ITO半导体膜层中存在氧空位的缘故。所以,防静电热控涂层随航天器从地面发射升空后,其初期的导电性能将比在地面时有所提高。

在对防静电热控涂层导电性能的地面模拟试验中,由于在紫外辐照初期存在着吸附氧继续解吸的可能,因此在数据分析时,未辐照或者短期辐照的试验数据不适宜用来拟合分析涂层导电性能的长期退化趋势。

#### 参考文献 (References)

- [1] 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1991: 138-173
- [2] Purvis C K, Garrett H B, Whittlesey A C, et al. Design guidelines for assessing and controlling spacecraft charging effects, NASA Technical Paper 2361[R], 1984
- [3] 冯伟泉, 丁义刚, 闫德葵, 等. 空间电子质子和紫外综合辐照模拟试验研究[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(2): 69-72
- [4] GB1410—1989, 固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法[S], 1990
- [5] 张树高, 黄伯云, 方勋华. ITO薄膜的半导化机理、用途和制备方法[J]. 材料导报, 1997, 11(4): 11-14
- [6] 王旭东, 等. 电子通量对ZnO/K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>热控涂层光学性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(3): 476-480
- [7] 陈猛, 裴志亮, 白雪冬, 等. ITO薄膜的XPS和AES研究[J]. 材料研究学报, 2000, 14: 173-178

#### 图片解读



这张照片是在大气环境下对卫星天线变形测量系统的调试。问题的起因还得从预研课题《真空低温环境下卫星天线变形测量技术》说起。

该课题是由北京卫星环境工程研究所承担,它主要为了实现在真空低温环境下的非接触测量,其变形测量的相对精度要求达到1:20 000。

它是采用交会照相测量原理通过两台CCD摄像机对真空低温环境卫星天线的变形进行非接触测量。具体测量过程可描述为:在温度 $t_1$ 时,利用两台CCD摄像机对预先粘贴有标志点的天线进行拍照,在每次测量过程中摄像机需调整几种姿态,满足从不同位置、不同角度对天线拍照的需要,以提高测量精度;天线加热或者冷却达到一相对稳定的温度 $t_2$ 时,再用CCD摄像机对变形后的天线进行拍照;然后利用CCD图像处理软件对图像进行处理,得出天线变形前后每个标志点的坐标,将变形前后的坐标按矢量相减,就可以得到天线各点的变形量。

照片所展示的是该测量系统在大气环境下的联合调试现场,它除了不具备真空低温环境外,其他状态都与正式试验时完全一致。

粘贴有标志点的卫星天线装在天线支撑架上,在天线与支撑架之间安装有天线加热板,天线加热板上布有温控点,用来实施对天线的加热及温控。天线的两边布有微晶玻璃标尺,上面粘贴有编码标志点,标志点中心的间距经过了计量部门的计量,作为长度控制点和长度基准点。悬挂在支架上的两个CCD摄像机及温控小舱是整个天线变形测量系统的关键部分,CCD摄像机用来对天线进行拍照,温控小舱则为CCD摄像机的正常工作提供了必备的环境条件,保证了摄像机在整个测试过程中始终处于常温常压状态。在摄像机基座底部装有电动旋转台,在测试过程中可带动摄像机绕其轴线旋转,满足从多个位置,多个角度拍摄照片的需要。红色的光则是与摄像机镜头同轴的LED环形光源发出的,为摄像机拍照时提供照明。

(向艳红 供稿)