防静电 Kapton 二次表面镜的电子辐照效应

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

摘要:文章研究防静电 Kapton 二次表面镜(ITO/Kapton/Al)在不同能量电子辐照后,太阳吸收比退化情况, 并利用 X 射线光电子能谱仪(XPS)和扫描电子显微镜(SEM)对样品表面的成分和形貌进行了分析。结果表 明,相同电子注量下,电子能量越高,对样品的太阳吸收率退化作用越大;电子辐照对样品表面形貌影响不大, 但是会降低表面氧化铟锡的含量;不同能量的电子对样品表面成分的损伤效应是一致的。

关键词: 电子辐照; 防静电 Kapton 二次表面镜; 太阳吸收比; 试验研究

中图分类号: O631.3⁺4; V416.5; O657.34 文献标识码: A 文章编号: 1673-1379 (2009) 05-0411-04 **DOI**: 10.3969/j.issn.1673-1379.2009.05.003

1 引言

热控涂层是航天器热控系统的重要组成部分, 航天器表面通过涂覆热控涂层来调节表面的热辐 射性能,达到热控制目的^[1]。热控材料有很多种类, 其中,防静电聚酰亚胺二次表面镜(ITO/Kapton/Al) 是航天器最常用的热控材料之一。ITO/Kapton/Al 薄膜通过在 Kapton 薄膜背面镀铝形成二次表面 镜,并在 Kapton 薄膜背面镀铝形成二次表面 镜,并在 Kapton 薄膜表面镀氧化铟锡(InSnO_x) 透明导电膜形成防静电层。在空间飞行过程中,由 于受到紫外辐照、带电粒子辐照、原子氧腐蚀等空 间环境的作用,ITO/Kapton/Al 的热辐射性能会发 生变化,造成热控系统偏离原来设定的指标,严重 的会造成航天器可靠性下降,寿命降低。因此,需 要研究 ITO/Kapton/Al 在各种空间辐照环境作用下 热辐射性能变化的情况,并在航天器热控设计中考 虑这些环境因素的影响。

国内对于空间辐照环境对 Kapton/Al 薄膜的影 响 已 有 较 多 的 研 究^[2,3],但 对 航 天 器 常 用 的 ITO/Kapton/Al 薄膜的空间辐照环境效应开展的工 作 尚 少 ^[4]。本 文 研 究 不 同 能 量 的 电 子 对 ITO/Kapton/Al 薄膜太阳吸收比 (*a*_s)的辐照损伤 效应,并对辐照前后样品的表面形貌和成分进行分 析。

2 试验方案

ITO/Kapton/Al 薄膜的电子辐照试验采用的

设备是北京卫星环境工程研究所的 **\$ 00** 综合辐 照试验设备,该套设备可以模拟低能电子(10~ 120 keV)、低能质子(10~50 keV)、太阳近紫外 (200~400 nm)、太阳远紫外(10~200 nm)辐 照环境,并且配有热控涂层 as原位测量装置、光 学材料透射率原位测量装置以及薄膜力学性能 原位测量装置。

选用的 ITO/Kapton/Al 薄膜为航天器用材料, α_s在 0.34 左右。采用 20 keV、40 keV、60 keV 3 种 能量的电子分别进行辐照试验,每次试验电子的束 流密度都为 4.5×10¹⁰ e/(cm²·s),合 7.2 nA/cm²。设 备内真空度优于 1×10⁻³ Pa,样品温控在 10~20 ℃ 之间,利用热沉模拟-30 ℃的冷黑背景。

利用热控涂层 *a*s 原位测量装置测量电子辐照 过程中 ITO/Kapton/Al 薄膜的 *a*so 利用 X 射线光电 子能谱仪(XPS)和扫描电子显微镜(SEM)观测 辐照前后 ITO/Kapton/Al 薄膜表面成分和表面形 貌。

3 试验结果与分析

3.1 电子辐照对 ITO/Kapton/Al 薄膜 α_s的影响

图 1 反映了 ITO/Kapton/Al 薄膜在电子辐照过 程中太阳吸收比的退化情况,其中太阳吸收比增量 (Δα_s)随电子注量变化的规律可以用指数函数进 行描述^[5]。

收稿日期: 2009-03-17; 修回日期: 2009-08-04

基金项目: 国家 863 计划资助项目(编号: 2006AA04Z414)

作者简介:刘宇明(1976-),男,博士学位,现从事空间辐照环境效应地面模拟试验技术研究。联系电话:(010)68746633。



- 图 1 ITO/Kapton/Al 薄膜的 △ αs 在电子辐照过程中的退化 情况
 - Fig. 1 The solar absorptance changes of ITO/Kapton/Al films under different energy electron irradiations

从图 1 可以看出:在电子辐照的前期, ITO/Kapton/Al 薄膜的 Δa_s 退化较快,电子注量达 到 0.5×10¹⁶ e/cm²时,对应 20 keV、40 keV、60 keV 辐照的样品 Δa_s 分别为 0.079、0.108、0.126,以初 始时薄膜的 a_s 为 0.340 计算,退化量分别达到 23%、 32%、37%。而在电子辐照的后期,ITO/Kapton/Al 薄膜的 Δa_s 退化较慢,有逐渐稳定的趋势。电子注 量从 1.0×10¹⁶~1.5×10¹⁶ e/cm² 这段辐照过程中,对 应 20 keV、40 keV、60 keV 辐照的样品 Δa_s 分别从 0.102、0.134、0.150 退化到 0.117、0.148、0.163, 相对于初始 a_s 的退化量分别约为 4.4%、4.1%、 3.8%,远小于相同电子注量下辐照前期的退化量。

对比相同注量下 3 种能量的电子辐照对 ITO/Kapton/Al 薄膜 as 的退化作用, 20 keV 电子辐 照产生的退化作用最小, 60 keV 电子辐照产生的退 化作用最大。这一结果与研究电子能量对 Kapton/Al 薄膜影响的文献报道结果一致^[6]。

将图 1 的横轴 ϕ_e 更改为 $\phi_e \cdot E_e$,即辐照注量与 能量的乘积,得到的 $\Delta \alpha_s$ 变化规律见图 2。从图 2 可以看出,当 $\phi_e \cdot E_e$ 相同时,ITO/Kapton/Al 薄膜的 $\Delta \alpha_s$ 与电子的能量基本无关。



图 2 不同能量电子辐照下 ITO/Kapton/Al 薄膜的 $\triangle \alpha_s$ 随 $\varphi_e \cdot E_e$ 的变化



3.2 电子辐照对 ITO/Kapton/Al 薄膜表面形貌的 影响

图 3 是 ITO/Kapton/Al 薄膜辐照前和每次辐照试验后的 SEM 照片。可以看出,辐照前后样品表面均比较平整,局部有些颗粒、褶皱、凸起等缺陷,没有出现电子辐照 Kapton/Al 薄膜时出现的充放电斑点和花纹^[2],说明 ITO 导电膜起到了防止薄膜表面放电的作用。



(a) 未辐照样品; (b) 20 keV 电子辐照后样品;
 (c) 40 keV 电子辐照后样品; (d) 60 keV 电子辐照后样品
 图 3 不同能量电子辐照前后 ITO/Kapton/Al 薄膜的表面形貌
 Fig. 3 SEM images of the ITO/Kapton/Al films before and after different energy electron irradiations

3.3 电子辐照对 ITO/Kapton/Al 薄膜表面成分的影响

ITO/Kapton/Al 薄膜表面成分主要由氧化铟 锡、Kapton 和吸附有机分子组成。氧化铟锡即为 ITO 导电膜,厚度一般在几十个纳米。由于 ITO 膜 有破损,而且薄,所以 Kapton 的成分同样会被 XPS 检出。ITO/Kapton/Al 薄膜表面会吸附空气中的有 机分子,在分析 XPS 谱图时这些有机分子成分必 须加以考虑。

图 4 是电子辐照前后 ITO/Kapton/Al 薄膜 XPS 谱图中 C 1s 峰的详细分析结果。



(a) 未抽照杆曲; (b) 20 keV 电了 抽照后杆曲; (c) 40 keV 电子辐照后样品; (d) 60 keV 电子辐照后样品

- 图 4 电子辐照前后 ITO/Kapton/Al 薄膜 XPS 谱图 C 1s 峰 的精细能谱
- Fig. 4 XPS peaks of C 1s of ITO/Kapton/Al surface before and after different energy electron irradiations

样品表面 C 的来源有两个,一个是 Kapton 中的 C 原子,另一个是吸附的有机分子。有机分子中 C 原 子的峰位一般在 284.8 eV (C一C 键)、286.3 eV (C一 OH 键)、287.6 eV (CHO 键)、288.6 eV (COOH 键)。 而 Kapton 的 C 峰在 284.6 eV、285.6 eV、288.2 eV。 在进行 C 1s 峰的精细能谱分析中,很难单独定量 分析,例如对 284.6 eV 和 284.8 eV 两个峰位以及 285.6 eV 和 286.3 eV 两个峰位进行分峰分析。因此 将 C 峰的分析结果作为参考,并结合 O 1s 峰的分 析结果和 Sn、In 的含量综合判断样品辐照前后的 表面成分变化。

图 5 是电子辐照前后 ITO/Kapton/Al 薄膜 XPS 谱图中 O 1s 峰详细分析结果。

未辐照样品的O1s峰主要有两个峰位:529.9 eV 和531.7 eV。InSnO_x的峰位大约在529.8 eV 和531.6 eV 处。未辐照样品 O 1s 峰的 529.9 eV 分峰来源于 InSnO_x,而 531.7 eV 分峰可能来源于 InSnO_x,也可能来源于 Kapton。经过电子辐照后,O1s 峰的强

度和位置没有发生很大变化。

表 1 给出了辐照前后样品表面各元素成分分 析的详细结果。



(a) 未辐照样品; (b) 20 keV 电子辐照后样品;
(c) 40 keV 电子辐照后样品; (d) 60 keV 电子辐照后样品
图 5 电子辐照前后 ITO/Kapton/Al 薄膜 XPS 谱图 O 1s 峰的精细能谱

Fig. 5 XPS peaks of O 1s in the ITO/Kapton/Al surface before and after different energy electron irradiations

样品		С					0			Ν	In	Sn
未辐照	峰位/eV	284.6	284.8	286.3	287.8	288.6	529.9	531.7	533.8			_
	含量/%	0.93	43.05	1.83	0.71	1.02	9.68	17.51	0.70	1.00	22.03	1.53
20 keV 辐照后	峰位/eV	284.6	284.8	285.6	286.3	288.5	529.7	531.5	533.3	_		_
	含量/%	_	45.06	_	5.29	2.04	9.94	18.68	0.52	1.88	15.00	1.58
40 keV 辐照后	峰位/eV	284.6	284.8	285.6	286.3	288.3	529.8	531.7	533.7	_	_	_
	含量/%		52.97	_	6.74	2.17	5.50	18.21	0.66	1.74	10.98	1.03
60 keV	峰位/eV	284.6	284.8	285.6	286.3	288.8	529.6	531.4	533.5	_		_
辐照后	含量/%	_	48.76	_	4.35	1.31	7.79	18.79	0.27	1.83	15.21	1.69

表 1 不同能量电子辐照前后 ITO/Kapton/Al 表面各元素成分分析 Table 1 Element contents of the ITO/Kapton/Al surface before and after different energy electron irradiations

注:"—"表示未对该元素的峰位进行精细分析。

综上,可以得到以下一些结论:

(1) 未辐照样品中, In 和 Sn 的总含量在 23% 左右, 对应 O 的含量应在 30%左右, 因此辐照前 O 1s 的 529.9 eV 峰和 531.7 eV 峰主要来源于 InSnO_r。

(2) 未辐照样品中, C 1s 主要来源于有机分子, 并主要以 C---C 键为主。

(3) 电子辐照后 In 成分有所减少,说明 InSnO_x 含量降低。

(4) 电子辐照后,O1s峰中 529.8 eV 处的峰强 度有所下降,对应 InSnO_x成分含量下降;40 keV 电子辐照后样品的 529.8 eV 峰强度下降最大,对应 InSnO_x成分含量下降最大。531.8 eV 处的峰强度基 本没有变化。InSnO_x成分含量会导致 529.8 eV 处和 531.8 eV 处的峰强度下降,而 531.8 eV 处的峰强度基本没有变化,说明 Kapton 的 O1s 在该峰处增强。

(5) 由于 C 1s 峰可能有多个峰位,单独分析结 果不准确,必须结合其他元素成分的变化进行分 析。从电子辐照后的 C 1s 峰谱图看,电子辐照后, C—O 键略有增加。考虑到 In 含量降低和 O 1s 峰 的变化情况,可以判断增加的 C—O 键来源于 Kapton。

通过以上分析可知,电子辐照会对样品表面 InSnO_x薄膜有一定影响,但是影响不大。在不同能 量电子辐照下,样品表面成分变化基本一致,说明 不同能量电子对 ITO/Kapton/Al 的成分损伤效应是 一致的。

4 结论

(1) 防静电 ITO/Kapton/Al 薄膜在电子辐照初 期, α_s 上升很快,在辐照后期, α_s 逐渐趋于稳定。 在试验所采用的电子能量范围内,当电子辐照注量 相同时,电子能量越高,对 ITO/Kapton/Al 薄膜的 α_s 影响越大;同时发现当辐照注量与能量的乘积相 同时,ITO/Kapton/Al 薄膜的 $\Delta \alpha_s$ 与电子的能量基 本无关,这种现象需要进一步验证和解释。

(2) 电子辐照对 ITO/Kapton/Al 薄膜的表面形 貌影响不大,但会影响薄膜表面成分,造成薄膜表 面 InSnO_x 含量降低,从而导致 Kapton 成分上升。 不同能量的电子对 ITO/Kapton/Al 薄膜表面形貌和 成分的损伤效应是一致的。

参考文献 (References)

- [1] 闵桂荣,张正纲,何知朱,等.卫星热控制技术[M]. 北京:宇航出版社,1991:138
- [2] 李瑞安,李春东,何世禹,等. Kapton/Al薄膜的电子辐 照损伤[J]. 材料研究学报,2007(6):577-580
- [3] 沈志刚,赵小虎,邢玉山,等. 空间材料 Kapton 的真 空紫外与原子氧复合效应研究[J]. 北京航空航天大学 学报,2003(11): 984-987
- [4] 赵春晴, 沈自才, 冯伟泉, 等. 质子辐照对防静电热控
 涂层导电性能影响[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(2):
 118-121
- [5] 刘宇明, 冯伟泉, 丁义刚, 等. 辐照环境中ZnO类热控 涂层性能退化预示模型研究[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(1): 15-17
- [6] 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(8):741-745

EEESDE

环境试验技术新动向

近日,北京卫星环境工程研究所在中国空间技术研究院科技委的支持下,组织召开了空间环境模拟 与航天器地面环境试验技术研讨会。会议由北京卫星环境工程研究所所长、环境工程与可靠性专业组组 长徐晓权研究员主持,北京空间飞行器总体设计部、北京卫星环境工程研究所、北京控制工程研究所、 东方红卫星公司等单位的相关专家参加了会议。

会议议题包括国外航天器环境模拟与试验的发展现状、国内航天器环境模拟与试验的现状和问题、 航天器环境试验设计与问题、关键分系统与部件空间环境适应性问题分析、小卫星对空间环境适应性问 题分析等5个方面。

会上,向树红、朱凤梧、王晓耕、高星等专家分别围绕5个会议议题进行了主题发言。随后大会 进行了热烈的研讨,就目前航天器环境设计与试验现状进行了阐述,认真分析了航天器环境设计与环 境试验等在组织管理、设备投入方面和试验技术和试验方法方面存在的问题,提出了许多具体的发展 建议。

在目前严峻的型号形势下,保证航天器的空间环境适应性,实现航天器长寿命可靠运行已经成为研 制部门关注的焦点,航天器环境工程与可靠性专业的技术发展引起越来越多专家和领导的关注。