

热控涂层电子辐照效应

刘宇明 郑慧奇 丁义刚 姜利祥 沈自才

(北京卫星环境工程研究所,北京 100094)

文 摘 研究防静电 Kapton 二次表面镜(ITO/Kapton/Al)、S781 白漆两种典型热控涂层,在不同能量电子辐照后太阳吸收比退化情况,并利用 X 射线光电子能谱和扫描电子显微镜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,不同能量电子对样品的太阳吸收比退化作用程度是有区别的。而样品光谱反射率、表面形貌、表面成分的损伤效应类似,说明不同能量电子辐照下,样品的退化机理是一致的。

关键词 电子辐照,防静电 Kapton 二次表面镜,S781 白漆,太阳吸收比

Effects of Electron Irradiation on Thermal Control Coatings

Liu Yuming Zheng Huiqi Ding Yigang Jiang Lixiang Shen Zicai

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094)

Abstract The ITO/Kapton/Al Films and the S781 white coatings were two typical thermal control coatings used on spacecrafts. The effects of electron irradiations of different energy on the solar absorptance(α_s) of them were studied. The X-ray photoelectron spectra(XPS) and the scanning electronic microscope(SEM) were used to analyze the element contents and the morphologies of the samples. The results show that for the same irradiation flux, the α_s of thermal control coatings are degraded to different degree after different energy electron irradiation. The changes of the reflection spectrums, the morphologies and the atomic contents of the samples are similar due to the same mechanism after electron irradiation of different energy.

Key words Electron irradiation, ITO/Kapton/Al films, S781 white coatings, Solar absorptance

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质,达到热控制目的^[1]。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,热控涂层的热辐射性能会发生变化^[2-7],造成热控设计偏离原来设定的指标,严重的会造成航天器可靠性下降。

在地球中高轨道,电子辐照环境是影响热控涂层性能的主要环境因素之一。空间中电子能量分布在很广的一个范围内,而对热控涂层太阳吸收比(α_s)产生影响的电子,其能量主要集中在几万 eV 到几十万 eV。研究这一范围内不同能量的电子对热控涂层 α_s 的辐照损伤效应,对正确评估轨道电子环境对热控涂层 α_s 的辐照效应,建立正确的地面模拟方法有重要作用。

热控材料有很多种,其中,防静电聚酰亚胺二次

表面镜(ITO/Kapton/Al)、S781 白漆是具有代表性的两种,它们分别属于有机聚合物薄膜类和漆类热控涂层。ITO/Kapton/Al 薄膜通过在厚度为 30 μm 的 Kapton 薄膜背面镀铝形成二次表面镜,并在 Kapton 薄膜表面镀氧化锡钨(InSnOx)透明导电膜形成防静电层。S781 白漆是我国自行研制的一种性能比较优异的热控涂层,以硅树脂为黏合剂,氧化锌为颜料。本文主要研究多种能量电子辐照对 ITO/Kapton/Al 薄膜、S781 白漆 α_s 的影响,并对辐照前后样品的表面形貌和成分进行分析。

2 实验

选用的热控涂层为 ITO/Kapton/Al 薄膜和 S781 白漆, α_s 分别在 0.34 和 0.22 左右。采用 20、40、60 keV 三种能量的电子分别进行辐照,每次的束流密度均为 7.2 nA/cm²。设备内真空度优于 1×10^{-3} Pa,样品温控在 10-20 $^{\circ}\text{C}$,利用热沉模拟-30 $^{\circ}\text{C}$ 的冷黑背景。辐照实验过程中利用热控涂层太阳吸收比原位测量

收稿日期:2009-11-23;修回日期:2009-12-30

基金项目:国家高新技术研究发展计划("836"计划),编号:2006AA04Z414

作者简介:刘宇明,1976 年出生,工程师,主要从事空间辐照效应研究。E-mail:lyming1996@yahoo.com.cn

装置测量热控涂层的 α_s 。利用 XPS 和 SEM 观测辐照前后热控涂层表面成分和形貌。

3 结果与分析

3.1 电子辐照对热控涂层 α_s 的影响

图 1 是 ITO/Kapton/Al 薄膜在电子辐照过程中 $\Delta\alpha_s$ 的退化情况。 $\Delta\alpha_s$ 随电子注量变化的规律可以用指数函数进行描述^[8], 见图 1。可以看出: 在电子辐照的前期, ITO/Kapton/Al 薄膜的 $\Delta\alpha_s$ 退化较快, 电子注量达到 $0.5 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$ 时, 对应 20、40、60 keV 辐照样品的 $\Delta\alpha_s$ 分别 0.079、0.108、0.126, 以初始时薄膜的 α_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 $\Delta\alpha_s$ 退化较慢, 有逐渐稳定的趋势。电子注量从 $1.0 \times 10^{16} - 1.5 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$ 这段辐照过程中, 对应 20、40、60 keV 辐照样品的 $\Delta\alpha_s$ 分别从 0.102、0.134、0.150 退化到 0.117、0.148、0.163, 相对于初始 α_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。

对比三种能量的电子辐照对 ITO/Kapton/Al 薄膜 α_s 退化作用, 在相同的电子注量下, 20 keV 电子辐照产生的 α_s 退化作用最小, 60 keV 电子辐照产生的 α_s 退化作用最大。

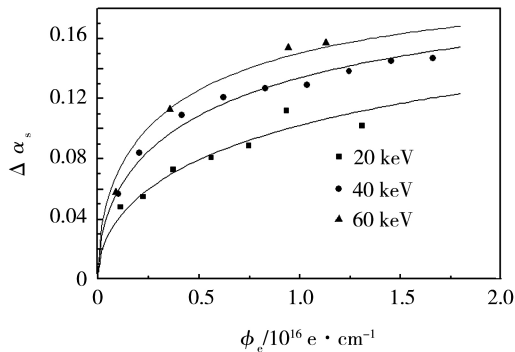


图 1 ITO/Kapton/Al 薄膜的 $\Delta\alpha_s$ 在电子辐照过程中的退化情况

Fig. 1 Solar absorptance changes of ITO/Kapton/Al films in electron irradiations

图 2 是 S781 白漆在电子辐照过程中 $\Delta\alpha_s$ 的退化情况。 $\Delta\alpha_s$ 随电子注量变化的规律同样可以用指数函数进行描述。

在电子注量范围内, S781 白漆的 $\Delta\alpha_s$ 退化速度变化不大, 电子注量达到 $0.5 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$ 时, 对应 20、40、60 keV 辐照样品的 $\Delta\alpha_s$ 分别 0.022、0.021、0.015, 以初始时薄膜的 α_s 为 0.210 计算, 退化量分别达到 10.4%、10.0%、7.10%。而电子注量从 $1.0 \times 10^{16} - 1.5 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2$, 对应 20、40、60 keV 辐照样品的 $\Delta\alpha_s$ 分别从 0.035、0.034、0.025 退化到 0.043、0.042、0.032, 由此可以得到在这段辐照过程中, $\Delta\alpha_s$ 退化量

分别约为 3.8%、3.8%、3.3%。

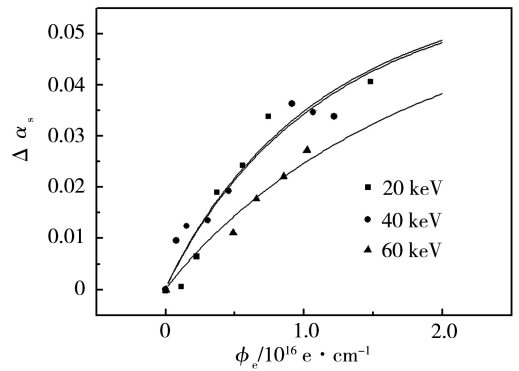


图 2 S781 白漆的 $\Delta\alpha_s$ 在电子辐照过程中的退化情况

Fig. 2 Solar absorptance changes of S781 in electron irradiations

对比三种能量的电子辐照 S781 白漆 α_s 退化作用, 在相同的电子注量下, 20 与 40 keV 电子辐照产生的 α_s 退化作用基本一致, 60 keV 电子辐照产生的 α_s 退化作用最小。这个结果与 ITO/Kapton/Al 薄膜的结果截然不同。ZnO 是非透明的, 对可见光起主要反射作用的表层厚度很小 ($1 \mu\text{m}$ 以下), 当电子能量升高到一定值时, 电子主要对更深层的 ZnO 起作用, 因此对光的反射率影响较小, α_s 退化量反而减小。而 Kapton 是透明的, 其对可见光的反射作用主要取决于 Kapton 薄膜性能和反射面铝。当电子能量由 20 升高到 60 keV, 吸收剂量最大值的深度从约 $5 \mu\text{m}$ 变为约 $30 \mu\text{m}$ ^[9]。在低能时 Kapton 薄膜中只有表层的性能产生变化, 能量升高后, 薄膜中深层 Kapton 的性能也会发生变化, 并影响薄膜的 α_s , 因此 α_s 退化量会增加。

3.2 电子辐照后 ITO/Kapton/Al 薄膜的反射光谱

图 3 是电子辐照后 ITO/Kapton/Al 薄膜的反射光谱。电子辐照对样品反射光谱的影响主要集中在 500–1 000 nm 的波长。而太阳光谱辐射能量较强的部分主要集中在 300–1 200 nm, 因此这部分波段内 ITO/Kapton/Al 薄膜的反射率下降, 是造成 α_s 上升的主要原因。

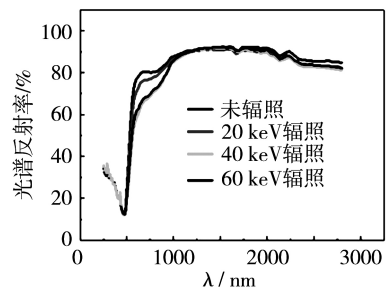


图 3 ITO/Kapton/Al 薄膜的反射光谱

Fig. 3 Reflection spectrums of ITO/Kapton/Al films before and after electron irradiations

由于不同能量电子对 ITO/Kapton/Al 薄膜损伤

程度不同而且辐照的电子注量亦不同,因此辐照后的 α_s 退化程度不同,这点同样反映在反射光谱中。20 keV 电子辐照后,样品的 α_s 退化最小,其反射光谱发生的变化也最小;40 和 60 keV 电子辐照后,样品的 α_s 退化基本相同,反射光谱变化也基本一致。从图 3 中可以判断的是不同能量电子对样品反射光谱的影响趋势是一致的,即电子在样品内部产生的缺陷或“吸收中心”的性质是一样的。

3.3 电子辐照后 ITO/Kapton/Al 薄膜的表面形貌

图 4 是 ITO/Kapton/Al 薄膜在经过不同能量电子辐照后的 SEM 照片。

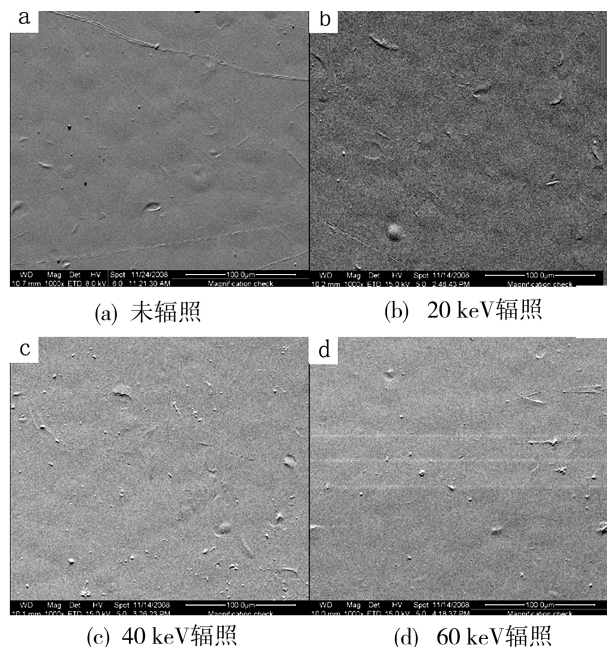


图 4 不同能量电子辐照前后 ITO/Kapton/Al 薄膜的表面形貌

Fig. 4 SEM images of ITO/Kapton/Al films before and after electron irradiations of different energy

从 SEM 照片可以看出,辐照前后样品表面都比较平整,都有些颗粒、褶皱、凸起等缺陷。样品表面没有出现电子辐照 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。

3.4 电子辐照后 ITO/Kapton/Al 薄膜的表面成分

ITO/Kapton/Al 薄膜表面成分主要由氧化锡、Kapton 和吸附有机分子组成。氧化锡即为 ITO 导电膜,厚度一般在几十纳米。由于 ITO 膜有破损、厚度薄,所以 Kapton 的成分同样会被 XPS 分析仪器检出。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。

样品表面 C 的来源有两个:一个是 Kapton 中的碳原子;另一个是吸附的有机分子。有机分子中碳原子的峰位一般在 284.8 (C-C), 286.3 (C-OH), 287.6 (CHO), 288.6 eV (COOH)。而 Kapton 的碳峰在 284.6、285.6、288.2 eV。在进行 C1s 峰的精细能谱分析中,很难单独定量分析。例如 284.6 和 284.8 eV 两个峰位的分峰分析,285.6 和 286.3 eV 两个峰位的分峰分析。因此将碳峰的分析结果作为参考,并结合 O1s 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。

未辐照样品, O1s 峰主要有两个峰位, 529.9 (来源于 InSnO_x) 和 531.7 eV (可能来源于 InSnO_x 也可能来源于 Kapton)。InSnO_x 的峰位大约在 529.8 和 531.6 eV 处。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 是根据 ITO/Kapton/Al 薄膜 XPS 精细谱图得到的辐照前后样品表面成分分析的详细结果。

表 1 不同能量电子辐照前后 ITO/Kapton/Al 表面成分分析¹⁾

Tab. 1 Analysis for each element in ITO/Kapton/Al surface before and after electron irradiations of different energy

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

注:1)-未对该元素进行精细分析。

通过表 1 分析可得到如下结论。

(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 O1s 的 529.9 eV 峰和 531.7 eV 峰主要来源于 InSnO_x。

(2)未辐照样品中,C1s 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 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 在该峰处强度增强。

(5)由于 C1s 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 C1s 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 O1s 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,电子辐照会造成样品表面 InSnO_x 薄膜厚度减小。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

不同能量电子对不同热控涂层的损伤效应程度不同。在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;而 S781 白漆电子能量在 40–60 keV,电子能量越高,对 S781 白漆的 α_s 影响越大,电子能量在 20–40 keV 时的电子辐照效应损伤程度基本一样。

对比电子辐照对两种热控涂层 α_s 的影响,可以看出,在相同电子辐照注量下,ITO/Kapton/Al 薄膜比 S781 白漆的 α_s 退化严重。说明 S781 白漆抗电子辐照的能力更强。

在设计轨道电子辐照环境热控涂层性能退化地面模拟参数时,应考虑每种热控涂层电子辐照损伤程度与电子能量的关系,同一轨道下,不同热控涂层的电子辐照模拟试验应有区别。

通过对辐照后热控涂层的反射光谱、表面形貌、表面成分分析,可知电子能量虽然不同,但是对热控涂层的损伤效应是相同的,因此可以通过效应等效,将不同能量的电子辐照等效成为一种能量的电子辐照,从而解决利用单一能量电子模拟空间电子辐照效应的地面模拟方法。

参考文献

- [1] 闵桂荣,张正纲,何知朱,等. 卫星热控制技术. 第一版[M]. 北京:中国宇航出版社,1991:138
- [2] 刘宇明,冯伟泉,丁义刚,等. SR107-ZK 在空间辐照下物性变化研究[J]. 宇航材料工艺,2007,37(4):61–64
- [3] 刘宇明. 空间紫外辐射环境及效应研究[J]. 航天器环境工程,2007(6):359–365
- [4] 刘宇明,冯伟泉,丁义刚,等. S781 白漆在空间辐照环境下物性变化分析[J]. 航天器环境工程,2007(4):235–238
- [5] 李瑞安,李春冬,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
- [6] 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
- [7] 刘宇明. 空间环境中 S781 和 SR107 性能退化研究[J]. 航天器环境工程,2008(5):435–437
- [8] 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(1):15–17
- [9] 冯伟泉,丁义刚,闫德葵,等. 地球同步轨道长寿命卫星热控涂层太阳吸收率性能退化研究[J]. 中国空间科学技术,2005(2):34–40

(编辑 李洪泉)