

## 卫星柔性热控薄膜材料充放电效应试验

陈益峰<sup>1\*</sup>,王金晓<sup>1</sup>,冯娜<sup>2</sup>,秦晓刚<sup>3</sup>,杨生胜<sup>3</sup>,季启政<sup>2</sup>,韩炎晖<sup>2</sup>,柳青<sup>3</sup>

(1. 许昌学院 表面微纳材料研究所, 河南 许昌 461000; 2. 北京东方计量测试研究所, 北京 100086;

3. 兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**针对柔性热控薄膜材料导电/绝缘多层复合、微纳尺寸厚度的结构特点,采用10~70 KeV电子辐照的方法开展了kapton基二次表面镜薄膜材料充放电特性的测试试验,获得了表面充电电位、静电放电频次等关键参数,并采用蒙特卡罗方法研究了辐照电子在多层薄膜材料内的输运规律。研究表明由于kapton基二次表面镜薄膜结构的特殊性,当辐照电子能量为10 KeV时未发生静电放电现象,随着电子能量不断增加,薄膜材料的表面充电电位幅值与静电放电频次呈先上升后下降的变化规律,且在电子能量为25 KeV时空间充放电效应最为显著。

**关键词:**kapton基二次表面镜;空间充放电效应;静电放电频次;表面充电电位

中图分类号:V416.5 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2024)01-087-06

## Experimental on space charging and discharging effect of flexible thermal control films of satellite

CHEN Yifeng<sup>1\*</sup>, WANG Jinxiao<sup>1</sup>, FENG Na<sup>2</sup>, QIN Xiaogang<sup>3</sup>, YANG Shengsheng<sup>3</sup>, JI Qizheng<sup>2</sup>, HAN Yanhui<sup>2</sup>, LIU Qing<sup>3</sup>

(1. Institute of Surface Micro and Nano Materials, Xuchang University, Xuchang 461000, China;

2. Beijing Orient Institute of Measurement & Test, Beijing 100086, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Technology & Physics, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In view of the conductive/insulating multilayer composite structure and micro/nano-size thickness of flexible thermal control film materials, a test was conducted on the charging and discharging characteristics of kapton-based secondary surface mirror film materials using 10~70 KeV electron irradiation. The key parameters such as surface charging potential and electrostatic discharge frequency were obtained. The transport law of irradiated electrons in multilayer thin film materials was studied by Monte Carlo method. The results show that there is no electrostatic discharge when the irradiated electron energy is 10 KeV due to the particularity of the kapton-based secondary surface mirror film structure. With the continuous increase of the electron energy, the surface charging potential amplitude of the film material and the electrostatic discharge frequency show a trend of first increasing and then decreasing. The space charging and discharging effect is most significant when the electron energy is 25 KeV.

**Keywords:** kapton-based secondary surface mirror; space charging and discharging effect; electrostatic discharge frequency; surface charging potential

地磁亚暴期间,运行于地球同步轨道(geosynchronous earth orbit, GEO)的卫星将遭遇大通量的高能等离子体,导致卫星表面产生数千甚至上万伏的充电电位<sup>[1-4]</sup>,诱发的静电放电不仅造成卫星表面功能材料的损伤,同时放电脉冲还将耦合干扰器件与电路的正常工作,造成卫星电子系统的异常与故障<sup>[5-8]</sup>。

柔性热控薄膜材料常用于卫星的外表面,可有效将卫星内部温度环境与空间差异巨大的热环境相隔离,保障卫星系统的正常运行,因此其空间

环境的适应性和性能的稳定性对于卫星在轨安全至关重要<sup>[9-12]</sup>。由于柔性热控薄膜材料功能的特殊性,一般由多层的不同材料复合而成。kapton(聚酰亚胺)基二次表面镜薄膜是应用较为广泛的柔性热控薄膜材料,其包含三层结构:最外层的氧化铟锡(indium tin oxides, ITO)具有较好导电型,其厚度为数百纳米,可将空间电子在其表面沉积的电荷均匀化;kapton材料由于较好的稳定性而作为中间基底层,厚度约为数十微米;最内层为铝或金材料,主要作为太阳辐射的反射层,其

厚度为数百纳米<sup>[13]</sup>。

目前,国内外航天机构建立的 GEO 表面带电效应模拟试验方法中通常采用能量为 12 KeV 的电子模拟空间辐射环境<sup>[14-16]</sup>,但由于 kapton 基二次表面镜薄膜材料最外层的 ITO 材料具有数百纳米的厚度,导致 12 KeV 电子很难穿透 ITO 并到达易发生充放电效应的 kapton 层<sup>[17-18]</sup>,可能造成试验中柔性热控薄膜材料的充放电效应不明显。

然而,地磁亚暴发生时 GEO 的等离子体具有较高能量,美国宇航局(national aeronautics and space administration, NASA)建议的 GEO 双麦等离子体环境模型中将电子的峰值能量设置为 27.5 KeV<sup>[1-2, 19]</sup>。由此可知:仅采用能量较低电子辐照的试验方法是无法全面复现柔性热控薄膜材料充放电效应的在轨真实状态<sup>[20]</sup>。因此,亟须研究辐照电子能量对柔性热控薄膜材料充放电效应的影响规律,为建立适用于多层薄膜类材料的充放电效应模拟试验方法奠定基础。

本文针对 kapton 基二次表面镜薄膜材料的结构特点,采用不同能量电子辐照的方法开展二次表面镜薄膜材料充放电效应的测试试验,并完成其充放电特性研究,分析辐照电子能量对充放电效应的影响规律。

## 1 试验方法

本项试验的测试装置示意图如图 1 所示,采用电子枪产生的辐照电子模拟空间高能电子环境,为研究电子能量对柔性热控薄膜材料充放电效应的影响规律,试验中辐照电子的能量分别设置为 10 KeV、25 KeV、40 KeV、55 KeV 和 70 KeV,不同能量电子的辐照时间均为 120 min;并利用法拉第筒与静电计 6517A 监测辐照电子的束流密度,试验中辐照电子的束流密度均设置为 1 nA/cm<sup>2</sup>。

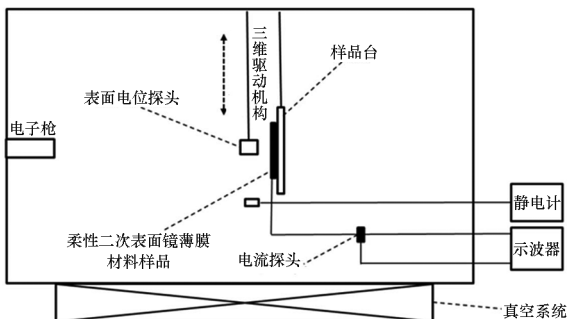


图 1 测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test device

试验中的测试样品采用兰州空间技术物理研究所研制的 kapton 基防静电镀铝柔性二次表面镜薄膜,主要包括 ITO、kapton、铝三层结构。ITO 层主要用于表面电荷均匀化,但凭 ITO 材料密度(7.2 g/cm<sup>3</sup>)远大于 kapton 材料密度(1.4 g/cm<sup>3</sup>),增加 ITO 层厚度将直接增大薄膜材料的质量,降低卫星效能,同时考虑到薄膜材料采用的大面积磁控溅射加工工艺以及 ITO 材料的光学性能(可见光透过率为 85%),增加 ITO 厚度将增大薄膜制备难度并降低热控效果,因此工程应用中仅镀敷一层极薄的 ITO 材料,厚度约为 200 nm<sup>[21]</sup>。

kapton 材料凭借优异的耐高低温性能和柔韧性成为广泛使用的基底材料,目前 GEO 卫星通常采用 kapton 层厚度为 50 μm 的热控薄膜。反射层材料一般选取金属,由于铝具有较好的机械强度和附着性能,因此成为常用的反射材料,层厚一般为 200 nm<sup>[13]</sup>。

试验中测试参数主要有表面充电电位和静电放电脉冲频次。样品表面电位采用非接触式表面电位测量仪(Terk341A)测试,将表面电位探头放置于三维驱动机构上,测试时通过三维驱动机构将探头移至样品表面,测试完成后将探头移出电子辐照区域。在电子辐照前 40 min 内每间隔 5 min 测试一次,之后每间隔 20 min 测试一次。

静电放电脉冲则用电流探头(Tektronix CT-2)和数字示波器(Terk DPO4104)测试,试验过程中始终保持监测状态。

静电放电脉冲频次  $F$  用式(1)计算:

$$F = N/T \quad (1)$$

式中: $T$  为统计时间,本试验中每 30 min 统计一次; $N$  为在统计时间  $T$  内共观测到的静电放电次数。

## 2 试验结果与分析

本项研究针对柔性热控薄膜材料样品,采用不同能量电子辐照的方法,测试 kapton 基二次表面镜薄膜的表面充电电位和静电放电频次等充放电特性参数,从而研究其充放电效应规律。图 2 是不同能量电子辐照下,kapton 基二次表面镜薄膜样品的表面充电电位随辐照时间的变化规律,并在图中标出了 25 KeV 和 40 KeV 电子辐照时薄膜样品发生静电放电的时间位置。

从图 2 可以看出:在 10 ~ 70 KeV 的电子辐照下,kapton 基二次表面镜薄膜材料表面充电电位的幅值均随辐照时间增加而升高;当辐照时间为 20 min 左右时,不同能量电子辐照下的薄膜材料

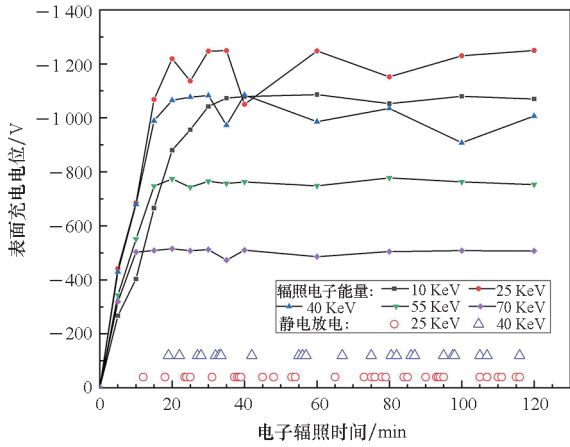


图 2 不同能量电子辐照下 kapton 基二次表面镜薄膜材料的表面充电电位随辐照时间的变化规律,以及 25 KeV 和 40 KeV 电子辐照时薄膜发生静电放电的时间

Fig.2 Variation of surface charging potential of kapton-based secondary surface mirror film material with irradiation time under different energy electron irradiation, and time of electrostatic discharge of the film under 25 KeV and 40 KeV electron irradiation

的表面充电电位都达到了平衡状态。

同时,随着辐照电子能量的升高,材料平衡电位的幅值呈先增加后下降的趋势。当辐照电子能量为 10 KeV 时,其平衡电位仅为 -1 100 V 左右;而当辐照电子能量增加至 25 KeV 时,平衡电位约为 -1 250 V。这主要是由于辐照电子将在材料表面产生负电荷积累,从而对后续辐照的电子产生阻挡效应,使得能量较低电子无法到达材料表面,而能量高的电子能够突破阻挡作用,并在材料表面进一步积累,导致表面充电电位的幅值更高。

随着辐照电子能量的进一步增加, kapton 基二次表面镜薄膜材料表面平衡电位呈下降趋势。当辐照电子能量增加至 40 KeV 时,平衡电位约为 -1 000 V;当电子能量为 55 KeV 时,平衡电位约为 -800 V;当电子能量为 70 KeV 时,平衡电位约为 -500 V。

为分析这一试验现象,本项研究采用多层屏蔽仿真程序软件 (multi-layered shielding simulation software, MULASSIS) 模拟了不同能量电子在 kapton 基二次表面镜薄膜材料中的运输轨迹,结果如图 3 所示。MULASSIS 由欧洲宇航局 (European space agency, ESA) 开发,是基于蒙特卡罗运输软件 Geant4 的一维多层辐射屏蔽仿真程序,已广泛应用于空间辐射粒子与材料作用过程的仿真分析<sup>[22]</sup>。仿真计算中设置的 kapton 基二次表面镜薄膜各层材料的特性与结构参数如表 1 所示。

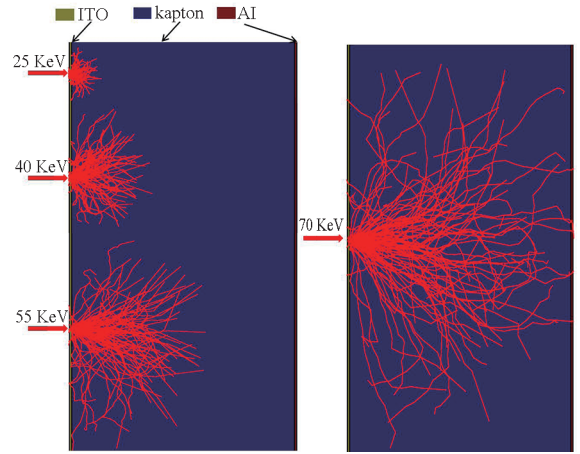


图 3 不同能量电子在 kapton 基二次表面镜薄膜材料中的运输轨迹模拟结果

Fig.3 Simulation results of transport trajectories in kapton-based secondary surface mirror film materials with different energy electron

表 1 kapton 基二次表面镜薄膜各层材料的特性与结构参数

Tab.1 Properties and structural parameters of each layer of kapton-based secondary surface mirror film material

膜层	材料	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	元素组成	厚度/μm
1	ITO	7.2	SnIn <sub>18</sub> O <sub>29</sub>	0.2
2	kapton	1.4	C <sub>22</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	50.0
3	Al	2.7	Al	0.2

从图 3 可以看出,随着辐照电子能量的增加,电子在薄膜材料中 kapton 层的穿透深度越大,则沉积在 kapton 层的电荷越靠近 Al 层,而 Al 层为接地状态,大量电荷将通过 Al 层泄漏;当辐照电子能量增加至 70 KeV 时,有部分电子直接穿透 kapton 层,并从 Al 层中直接泄露。因此,当辐照电子能量越大时,在二次表面镜薄膜材料内部沉积电荷量却随之减少,导致表面充电电位的幅值下降。

同时,从图 2 可以看出,当表面充电电位达到平衡后,10 KeV、55 KeV 和 70 KeV 电子辐照下样品的表面充电电位变化不大,而 25 KeV 和 40 KeV 电子辐照下样品的表面充电电位出现多次的波动。对照薄膜样品发生静电放电发生的时间可以发现:当表面充电电位发生较大波动时,电位测试前薄膜样品均发生多次且连续的静电放电,如 25 KeV 电子辐照时,第 25 min 和第 40 min 的电位测试前数分钟内薄膜发生了 3~4 次静电放电,且间隔时间很短,同样的情况发生在 40 KeV 电子辐照的第 35 min、第 100 min 等时间的电位测试。

因此,在 25 KeV 和 40 KeV 电子辐照时表面充

电电位的波动应是由 kapton 基二次表面镜薄膜材料在短时间内发生多次静电放电造成的。当薄膜样品发生多次且连续的静电击穿时,材料内部沉积电荷将被大量的泄漏,导致表面充电电位幅值减小,从而使得测试过程中出现表面充电电位波动。

为进一步研究辐照电子能量对薄膜材料静电放电规律的影响,图 4 给出了 kapton 基二次表面镜薄膜材料样品分别在 10 KeV、25 KeV、40 KeV、55 KeV 和 70 KeV 电子辐照下的静电放电频次的测试结果。

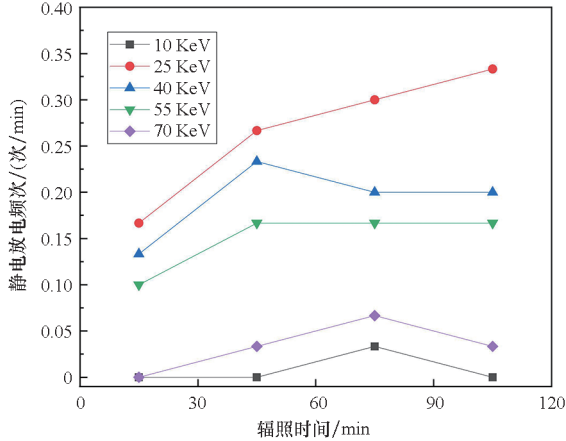


图 4 不同能量电子辐照下, kapton 基二次表面镜薄膜材料样品静电放电频次的测试结果

Fig.4 Test results of electrostatic discharge frequency of Kapton-based secondary surface mirror film materials under different electron election irradiation

从图 4 可以看出,当辐照电子能量为 10 KeV 时, kapton 基二次表面镜薄膜样品放电频次很小,整个试验过程中仅发生一次放电,这主要是由于电子能量较低,绝大部分电子主要在 ITO 层中,而 ITO 具有很好的导电型,使得表面电荷均匀化,很难诱发静电击穿。

随着能量的增加,将有更多的辐照电子穿透 ITO 层而沉积在 kapton 层,而 kapton 层是薄膜材料中易发生静电放电的部位,因此当辐照电子的能量为 25 KeV 时,薄膜样品的放电率明显增加,达到了 0.15 ~ 0.35 次/min。当辐照电子能量进一步增加时,薄膜材料样品放电频次反而减小,能量为 40 KeV 时放电频次为 0.13 ~ 0.23 次/min; 能量为 55 KeV 时放电频次为 0.10 ~ 0.16 次/min; 能量为 70 KeV 时放电频次为 0 ~ 0.06 次/min。这主要是由于随着辐照电子能量的增加,更多的电子将穿透 kapton 层到达金属 Al 层,造成 kapton 层中沉积电荷量减少,从而导致静电放电的频次降低。

同时,在电子辐照介质材料的过程中将产生辐射诱导电导率<sup>[23]</sup>,且能量越高的电子产生的辐射诱导电导率越大,导致更大的电流泄漏,使得材料内部沉积的电荷量越少。表 2 是不同电子辐照环境下,薄膜材料中 kapton 层内的辐射诱导电导率的计算结果。

表 2 不同电子辐照环境下, kapton 基二次表面镜薄膜材料中 kapton 层内的辐射诱导电导率计算结果

Tab.2 Calculation results of radiation-induced conductivity in kapton layer of kapton-based secondary surface mirror film materials under different electron irradiation environments

辐照环境	本征电导率 $\sigma_0 /$ ( $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	剂量率 $D /$ ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )	辐射诱导电导率 $\sigma_{(D)} /$ ( $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )
无辐照		0	$10^{-13}$
10 KeV, 1 nA/cm <sup>2</sup>		0	$10^{-13}$
25 KeV, 1 nA/cm <sup>2</sup>	$10^{-13}$	$1.71 \times 10^2$	$2.29 \times 10^{-12}$
40 KeV, 1 nA/cm <sup>2</sup>		$4.29 \times 10^2$	$3.90 \times 10^{-12}$
55 KeV, 1 nA/cm <sup>2</sup>		$6.64 \times 10^2$	$5.04 \times 10^{-12}$
70 KeV, 1 nA/cm <sup>2</sup>		$8.67 \times 10^2$	$5.89 \times 10^{-12}$

表 2 中剂量率  $D$  由 MULASSIS 计算获得。辐射诱导电导率  $\sigma_{(D)}$  由式(2)<sup>[24]</sup> 计算给出:

$$\sigma_{(D)} = \sigma_0 + k \cdot D^{\Delta} \quad (2)$$

式中,  $k$  为辐射诱导系数,  $\Delta$  为剂量率系数。对于 kapton 材料,  $\sigma_0$  取  $10^{-15} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $k$  取  $10^{-13} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$ ,  $\Delta$  取 0.6。

从表 2 中可以看出:当辐照电子能量为 10 KeV 时,由于电子未能穿透 kapton 基二次表面镜薄膜中的 ITO 层,因此在 kapton 层中的剂量率为 0,材料的电导率未发生变化;随着辐照电子能量的增加, kapton 层内的剂量率和辐射诱导电导率均呈不断增加的趋势,且比无辐照时材料的电

导率大一个数量级以上,同时当电子能量从 25 KeV 增加至 70 KeV 时,材料的电导率从  $2.29 \times 10^{-12} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  上升至  $5.89 \times 10^{-12} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 此时 kapton 层的导电性能增加了近 3 倍,导致更多的电荷能够泄漏,从而使得 kapton 基二次表面镜薄膜材料静电放电的频次减小。

### 3 结论

本文针对空间柔性热控薄膜材料的组成与结构特点,以 kapton 基二次表面镜薄膜材料为试验对象,采用能量为 10 ~ 70 KeV 的电子辐照的方法,并利用非接触式表面电位测量仪和静电放电监测装置分别测试表面充电电位和静电放电脉冲,完成了不同能量电子辐照下 kapton 基二次表面镜薄膜材料充放电效应模拟试验,获得了表面充电电位、静电放电频次等关键参数,并分析研究了辐照电子在多层薄膜材料内的输运规律,为空间薄膜功能材料的空间环境适用性分析和空间应用提供了有效的环境数据和设计指导。

研究结果表明随着辐照电子能量的增加, kapton 基二次表面镜薄膜材料的表面充电电位幅值与静电放电频次均呈先上升后下降的规律,并在辐照电子能量为 25 KeV 时充放电效应最为显著,其中表面充电电位约为 -1 250 V,静电放电频次最大为 0.35 次/min,这主要是当能量较低时,辐照电子没法穿透 ITO 层,导致薄膜材料充放电效应不明显,而能量更高的辐照电子将直接穿透 kapton 层而不在其中沉积,同时产生更大的辐射诱导电导率,导致材料内部沉积电荷更容易泄漏,因此表面电位幅值和放电频次也随之下降。

### 参考文献 (References)

- [1] Office of the NASA Chief Engineer. Mitigating in-space charging effects-a guideline: NASA-HDBK-4002A [S]. Washington: NASA, 2022.
- [2] 郝建红, 黄赛, 赵强, 等. 太阳风作用下航天器表面充电效应分析[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(3): 131-138.  
HAO J H, HUANG S, ZHAO Q, et al. Analysis of charging effect on spacecraft surface under solar wind[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2022, 44(3): 131-138. (in Chinese)
- [3] LAI S T. Fundamentals of spacecraft charging: spacecraft interactions with space plasmas[M]. Princeton: Princeton University Press, 2012.
- [4] MANDELL M J, DAVIS V A, COOKE D L, et al. Nascap-2k spacecraft charging code overview[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(5): 2084-2093.
- [5] KIM S Y, CASTET J F, SALEH J H. Spacecraft electrical power subsystem: failure behavior, reliability, and multi-state failure analyses[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 98(1): 55-65.
- [6] 王同权, 沈永平, 王尚武, 等. 空间辐射环境中的辐射效应[J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(4): 36-39.  
WANG T Q, SHEN Y P, WANG S W, et al. Radiation effects in the space radiation environment [J]. Journal of National University of Defense Technology, 1999, 21(4): 36-39. (in Chinese)
- [7] 刘尚合, 胡小锋, 原青云, 等. 航天器充放电效应与防护研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2108-2118.  
LIU S H, HU X F, YUAN Q Y, et al. Research progress in charging-discharging effects and protection of spacecraft[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2108-2118. (in Chinese)
- [8] 李宏伟, 韩建伟, 蔡明辉, 等. 卫星充放电效应对典型星载电子设备影响的实验研究[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(3): 370-374.  
LI H W, HAN J W, CAI M H, et al. Experimental study of the effects of spacecraft charging and discharging on typical satellite-borne electric instrument [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2021, 38(3): 370-374. (in Chinese)
- [9] 王磊, 曹韞真, 范含林. 黑色防静电热控薄膜环境适应性研究[J]. 宇航学报, 2012, 33(7): 996-1000.  
WANG L, CAO Y Z, FAN H L. Environmental adaptability test for black antistatic thermal control film[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(7): 996-1000. (in Chinese)
- [10] 刘东青, 程海峰, 郑文伟, 等. 红外发射率可变材料在航天器热控技术中的应用[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(2): 145-149.  
LIU D Q, CHENG H F, ZHENG W W, et al. Application of variable infrared-emissivity materials to spacecraft thermal control [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(2): 145-149. (in Chinese)
- [11] 蔡震波. 新型航天器抗辐射加固技术的研究重点[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(2): 173-176.  
CAI Z B. The radiation hardening techniques for new generation spacecraft [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(2): 173-176. (in Chinese)
- [12] FERGUSON D C. New frontiers in spacecraft charging[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(2): 139-143.
- [13] 杨森, 冯煜东, 王艺, 等. 航天器柔性热控薄膜研究现状[J]. 真空科学与技术学报, 2013, 33(8): 771-777.  
YANG M, FENG Y D, WANG Y, et al. Latest progress in applications of flexible thermal control films in space industry[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(8): 771-777. (in Chinese)
- [14] 李得天, 杨生胜, 秦晓刚, 等. 卫星充放电效应环境模拟方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.  
LI D T, YANG S S, QIN X G, et al. The environment simulation of satellite charging effect [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2019. (in Chinese)
- [15] 陈益峰, 袁小平, 梅飞, 等. 不同温度下环氧玻纤布基板体积电阻率测试与内带电效应研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(6): 94-99.  
CHEN Y F, YUAN X P, MEI F, et al. Bulk resistivity measurement and internal charging effect of epoxy glass fiber cloth substrate under different temperatures [J]. Insulating Materials, 2023, 56(6): 94-99. (in Chinese)

- [16] 李睿, 刘继奎, 徐跃民, 等. 太阳帆板驱动机构的表面充放电效应研究[J]. 空间科学学报, 2014, 34(3): 360-366.  
LI R, LIU J K, XU Y M, et al. Study of surface charging and discharging effects on solar array drive assembly[J]. Chinese Journal of Space Science, 2014, 34(3): 360-366. (in Chinese)
- [17] 陈益峰, 冯娜, 季启政, 等. 柔性二次表面镜薄膜材料带电环境与充放电特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2409-2415.  
CHEN Y F, FENG N, JI Q Z, et al. Space environment and charge characteristics of flexible second-surface mirrors[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2409-2415. (in Chinese)
- [18] 冯娜, 季启政, 张絮洁, 等. GEO 卫星多层隔热组件充放电特性仿真[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 424469.  
FENG N, JI Q Z, ZHANG X J, et al. Simulation of internal charging characteristics for multi-layer thermal insulation in GEO satellites[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 424469. (in Chinese)
- [19] GINET G P, O'BRIEN T P, HUSTON S L, et al. AE9, AP9 and SPM: new models for specifying the trapped energetic particle and space plasma environment[J]. Space Science Reviews, 2013, 179: 579-615.
- [20] WILSON G, DENNISON J R, JENSEN A E, et al. Electron energy-dependent charging effects of multilayered dielectric materials[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(12): 3536-3544.
- [21] 卢榆孙, 冯煜东, 李华. 在大面积柔性基底上制备空间应用薄膜研究[J]. 中国空间科学技术, 1996, 16(5): 32-40.  
LU Y S, FENG Y D, LI H. Study of preparing films on large area flexible substrate for space application [J]. Chinese Space Science and Technology, 1996, 16(5): 32-40. (in Chinese)
- [22] LEI F, TRUSCOTT R R, DYER C S, et al. MULASSIS: a Geant4-based multilayered shielding simulation tool [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49(6): 2788-2793.
- [23] 王俊, 杨生胜, 秦晓刚, 等. 空间介质材料辐射诱导电导率测试方法: QJ 20700—2018[S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2018.  
WANG J, YANG S S, QIN X G, et al. Test method for radiation induced conductivity of dielectric materials in space: QJ 20700—2018 [S]. Beijing: State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, 2018. (in Chinese)
- [24] FREDERICKSON A R. Spacecraft dielectric material properties and spacecraft charging[M]. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986.

(编辑:王颖娟,杨琴)