

卫星介质深层充放电模拟实验装置研制进展

韩建伟, 张振龙, 黄建国, 全荣辉, 李小银

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

摘要: 文章介绍了深层充放电研究的国内外现状及中科院空间中心在研的卫星深层充放电实验模拟装置进展情况。铯 90/钷 90 β 放射源和 5~100 keV 电子枪被设计到一个真空系统内, 分别作为介质深层充电及介质电导率的测试手段。分别用 β 放射源和电子枪对介质样品进行了辐照试验, 观察到了 kV 级的充电电位和放电现象。在辐照样品之前进行的辐照空靶的实验均未观测到放电信号。该装置可为我国发展长寿命、高可靠的新一代通信、气象等中高轨卫星提供深层放电防护设计的基础数据、理论和技术支撑。

关键词: 深层充放电; 电介质; β 放射源; 电子枪

中图分类号: V416.8

文献标识码: B

文章编号: 1673-1379(2007)-01-0047-04

1 引言

空间高能电子导致的深层介质充电是上世纪 80 年代以后新发现的严重威胁卫星安全和可靠的重要空间环境效应。导致卫星深层充电的实际情况非常复杂, 卫星周围的空间高能电子无孔不入, 有多种途径产生深层充电。放电产生的电磁脉冲可以通过多种渠道传播、耦合至星上敏感器件, 导致器件功能受到干扰、中断甚至失效, 影响卫星的寿命与可靠性。反思 1978 年到 1990 年的卫星故障, 有 20 例可以明确诊断为深层充电所致。据不完全统计, 1990 年至 2000 年期间又有 60 余例卫星异常明确诊断是由深层充电诱发的, 其中包括损失严重的美国“银河 4 号”通信卫星和加拿大“ANIK E1”、“ANIK E2”通信卫星。2004 年 7、8 月和 11 月, 我国的“探测 1、2 号”两颗卫星出现频繁的异常和故障, 经诊断也是由深层充电所致。

从上世纪 80 年代起, NASA 和 ESA 全面启动了一系列的研究工作。最具有代表性的有美国 JPL 实验室以 Friderickson 为首的研究小组对深层充放电的机理、特征及规律进行了长期细致的地面模拟实验、数值仿真、空间飞行实验研究^[1~3]。在大量地面模拟实验基础上, 美国于 1991 年专门发射了“CRRES”卫星对深层充电进行飞行试验研究, 飞行试验覆盖了内、外辐射带, 并且经历

了从平静到强烈的各种太阳活动状态, 进一步验证了高能电子导致内部充电的机理, 取得了一系列重要的结果。2000 年以来, ESA 组织专门力量开展卫星深层充电危害评价技术研究, 先后研制了评估在轨卫星深层充放电危险性的仿真软件 ESADDC 及其升级版本 DICTAT^[4], 并开展相关的地面模拟实验以验证仿真软件的有效性。NASA 在多年研究的基础上, 制定了《防止深层充放电可靠性设计》(1995 年 9 月, PD-AP-1316) 和《防止卫星在轨深层充电诱发故障》(1999 年 2 月, NASA-HDBK-4002) 的技术手册^[5]。国际航天界积极地将卫星深层充放电的研究成果应用到后续的卫星设计中。

当前, 卫星深层充放电研究仍是国际研究热点, 研究重点主要在于深刻揭示深层充电的内在特点, 发展准确的模型评估充电危害, 细致研究放电通道及对卫星系统影响, 发展准确的实验评价技术, 发展有效在轨深层充放电监测技术等。在国内, 中科院空间中心(下简称“空间中心”) 在“九五”末期意识到深层充放电效应是危害我国后续卫星安全的重要因素, 为此开展了相关的工作。目前空间中心对造成深层充电的空间高能电子环境规律有了初步了解, 建立了基本的计算机仿真软件, 正在研制专用的实验模拟装置和开展初步实验研究。

收稿日期: 2006-10-15; 修回日期: 2007-01-17

作者简介: 韩建伟(1970-), 男, 博士学位, 研究员, 原子核物理专业, 现从事空间环境效应研究。联系电话: (010)62582852; E-mail: jwhan@earth.sepc.ac.cn。

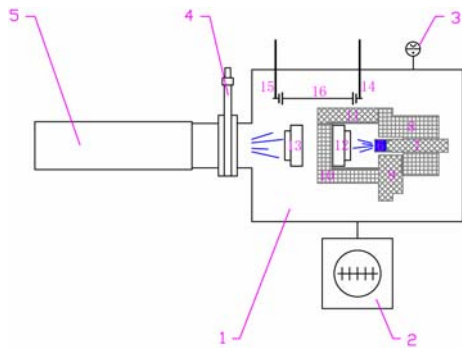
我国新一代卫星将逐渐采用大量高性能商用器件, 这些器件抵御深层充放电脉冲干扰的能力较弱。针对我国陆续部署的新一代中高轨卫星的长寿命设计, 开展空间材料的深层充放电机理、危害以及防护有效性评价技术的研究尤为重要。

2 卫星深层充放电模拟实验装置研制进展

空间中心正在研制的卫星深层充放电模拟实验装置, 是我国首个卫星深层充放电实验研究专用装置。铯 90/钷 90 β 放射源和 5~100 keV 电子枪被设计到一个真空系统内, 分别作为介质深层充放电及介质电导率的测试手段。

2.1 模拟装置简介

模拟装置示意图如图 1。本套模拟装置通过真空系统、温控系统和铯 90/钷 90 电子源 (EK-100-FL 型电子枪) 对卫星轨道的空间环境进行模拟。



1. 真空室; 2. 真空机组; 3. 真空计; 4. 闸板阀; 5. 电子枪;
6. Sr90/Y90 β 源; 7. 源柄; 8. 贮存屏蔽; 9. 贮存源闸; 10. 实验屏蔽;
11. 实验源闸; 12. 温控样品台 I; 13. 温控样品台 II; 14. 电位探针 I;
15. 电位探针 II; 16. 参考电位

图 1 深层充放电模拟实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the deep dielectric charging simulation facility

为有效利用空间及便于实验操作, 真空室主体结构设计为长方体形状。长方体的整个一面做成大活门, 电子枪通过一个闸板阀固定于真空室一侧, 密封 β 源的贮存屏蔽和实验屏蔽都位于真空室内, 实验时通过操作面板电动控制辐照充电及电位测量。真空系统采用分子泵高真空机组, 设计的极限压强 $\leq 1.0 \times 10^{-4}$ Pa, 单次持续运行时

间不少于两个月, 保证深层充放电装置对真空环境的模拟要求。为实现对空间温度环境的模拟, 设计加工了半导体温控样品台, 温控范围 $-40 \sim +100^\circ\text{C}$, 控温精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。温控系统采用密封管循环水冷却, 工作在高真空环境下, 不影响真空系统的真空度要求。

2.2 β 放射源实验

β 放射源是进行深层充电模拟辐照实验的主要部件, 采用铯 90/钷 90 β 源, 其发射的电子具有连续能谱, β 电子的最大能量 2.28 MeV。铯 90/钷 90源发射的电子能谱接近同步轨道最恶劣情况下的电子能谱 (如图 2 所示), 利用它可以“较真实地”模拟空间高能电子导致的深层充电。在进行模拟辐照实验时, 源柄由初始位向靶前推进的行程连续可调 (放射源前表面与被辐照样品表面之间的最近距离可达 3 mm), 由此改变电子束流密度。另外, 也可以通过在介质样品前设置不同厚度的铝防护层的方法改变电子束流密度。

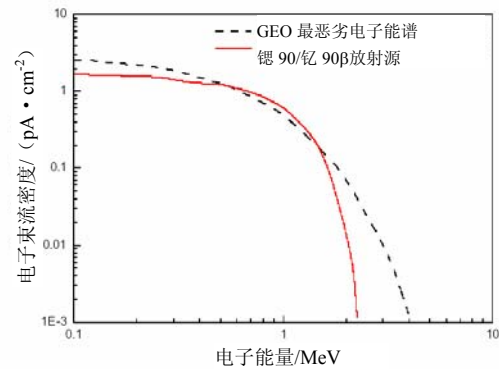
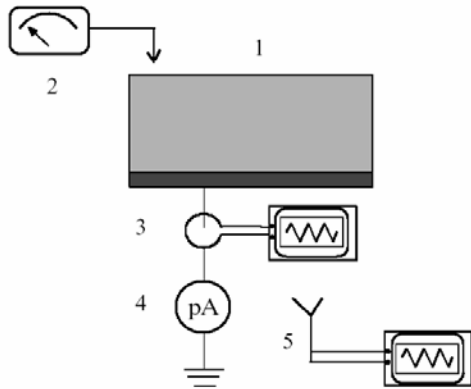


图 2 铯 90/钷 90 β 放射源电子能谱与 GEO 轨道最恶劣电子能谱比较

Fig.2 Comparison of electron spectrum between Sr90/Y90 beta source and the worst case in GEO

选用卫星常用介质材料 (如环氧树脂、聚四氟乙烯、聚酰亚胺等) 作为被测样品, 设计几种不同的几何构型和接地方式。样品距离放射源 3 cm 处, 200 keV 以上的电子以 $3 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的通量密度照射样品。通过监测被辐照样品的表面电位、接地电流、放电电流脉冲、放电电磁脉冲来研究深层充放电过程及规律。测试方案示意图如图 3。



1. 辐照样品; 2. 表面电位探针; 3. 放电电流脉冲监测仪;
4. 接地电流监测仪; 5. 放电磁脉冲监测仪

图 3 卫星介质深层充放电测试方案示意图

Fig.3 Sketch of satellite deep dielectric charging measurement

电阻率是影响介质深层充电效果的关键参数之一。中低能量电子枪是测量电阻率以便细致研究深层充电过程的重要装置。采用 EK-100-FL 型成品电子枪能够满足需求。该电子枪能够提供的电子束性能为: 能量在 5~100 keV 范围内可调, 束流强度从几十 pA 到几十 mA, 束斑直径可达数十 cm。

2.3 介质电导率测试

利用电子注入、非接触式表面电位测量法获取介质材料电导率, 如图 4 所示。利用中低能电子枪辐照介质样品使其表面达到一定的电位(通常接近放电危险电位), 之后停止照射使样品保存在真空室, 利用表面电位探针测量样品表面电位随时间的衰减关系, 根据测量到的衰减时间常数推算出样品的电导率。

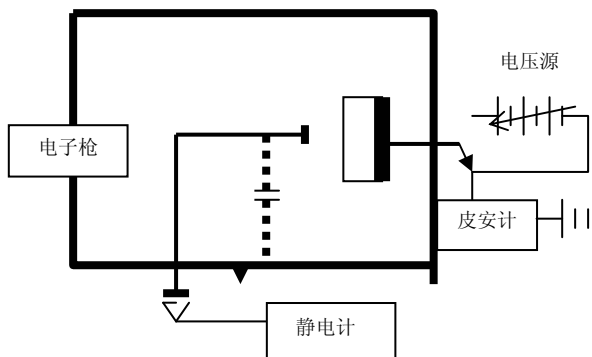


图 4 介质材料电导率测量方法示意图

Fig.4 Measurement of electrical conductivity for dielectric materials

目前, 该装置的主体结构已经建设完成, 实物照片见图 5、6。



图 5 深层充电实验模拟装置实物照片

Fig.5 Photo of the deep dielectric charging simulation facility



图 6 屏蔽体内部照片

Fig.6 Inside view of the radiation shield

3 初步试验结果

3.1 β放射源辐照实验

用 β 放射源开展了初步的辐照实验, 成功为介质样品充上几千伏的电位, 并观测到了放电现象。在模拟实验之前, 首先对表面电位探针测试读数进行了标定。使用高压电源为真空内的参考电位板供电, 电位探针伸至参考电位板前, 探针引线穿过真空容器壁后接于真空室外的静电电位计。测量结果显示电位信号在经过真空转接后有较大衰减, 但测量值与实际值之间的线性关系很好, 标定曲线如图 7 所示。在放置介质样品之前, 做了辐照空靶的实验, 放射源持续辐照一天无放电发生。β放射源辐照实验条件如下: 室温 24 °C, 真空度优于 4.0×10⁻⁴ Pa; 样品采用厚度 1.5 mm 的环氧树脂, 镀铜背电极, 样品暴露面直径 φ40 mm; β源活性区直径 φ30 mm, 距离样品 30 mm 进行辐照; 电位探针距离样品表面 8 mm。辐照 16 h 之后, 测得样品充电电位达到 3.64 kV。其间示波器还捕捉到多次放电脉冲, 其中一典型放电脉冲波形如图 8 所示。

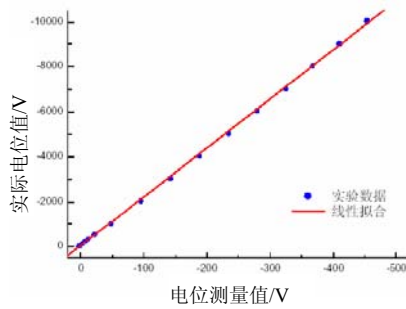


图7 电位标定曲线

Fig.7 Calibration curve of the surface potential probe

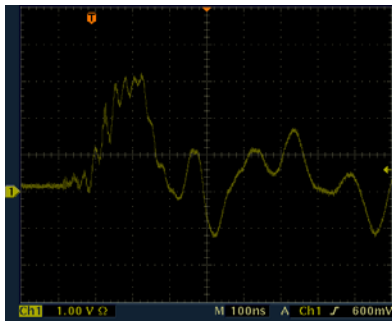


图8 初步实验获得的放电波形

Fig.8 Discharge waveform in the preliminary test

3.2 电子枪辐照试验

用中低能电子枪辐照相同的样品,也测到类似放电信号。在偏压 40kV,束流密度约 5 nA/cm^2 条件下,大约每隔 60 s 放电一次。如果改变电子枪的辐照条件,如降低电子的能量和束流,样品的放电频率也随之改变(降低)。在电子枪辐照实验中,测得样品最高充电电位达到几千伏。另外,利用电子枪进行了辐照空靶实验,最大偏压 60 kV,最大束流密度约 130 nA/cm^2 ,持续辐照时间 1.5 h,未测到放电信号,证明真空室内屏蔽良好,除样品外无其他介质和孤立导体被辐照充电。

4 结束语

卫星介质深层充放电效应是诱发中高轨道卫星运行故障和异常的重要因素之一。空间中心研制成功了我国首个卫星深层充放电实验研究专用装置,并在初步实验中成功观测到了介质表面充电电位及放电脉冲信号。该装置的建成,可为我国进一步开展针对新一代通信和气象卫星等的深层充放电的实验研究提供基本的技术手段,为数值仿真研究提供实验比对手段,为我国航天工程针对深层充放电危害的防护设计提供实验验证手段。

参考文献 (References)

- [1] Frederickson A R, Benson C E, *et al.* Measurement of charge storage and leakage in Polyimides[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2003-8, 208: 454~460
- [2] Swaminathan P, *et al.* Comparison of classical and charge storage methods for determining conductivity of thin film insulators[A]. Proceedings of the 8th spacecraft charging technology conference[C]. 2004
- [3] Bielby R M, Morris P A, *et al.* Determination of conductivity parameters of dielectrics used in space applications[A]. 2004 International conference on solid Dielectrics[C]. Toulouse, France, 2004-7-5~9
- [4] Engineering tools for internal charging (final report)[R]. DERA/CIS/CIS2/CR000277, Issue 1-0, 2000-3
- [5] Avoiding problems caused by spacecraft no-orbit internal charging effects[R]. NASA-HDBK-4002, 1999-2-17

An Environmental Simulation Facility for Study of Deep Dielectric Charging on Satellites

HAN Jianwei, ZHANG Zhenlong, HUANG Jianguo, QUANG Ronghui, LI Xiaoyin

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The simulation facility described in this paper is the first of its kind under development in China for investigation of deep dielectric charging on satellites. A Sr90/Y90 beta emitting source and a 5~100 keV electron gun are integrated in a single vacuum chamber for simulating deep dielectric charging/discharging and for measuring the conductivity of dielectric materials, respectively. Irradiation tests on dielectric materials were conducted using the beta source and the electron gun, separately, in which some discharging waveforms were recorded as a result of a few kVs of surface charging on the sample. This facility is designed to provide a theoretical and technical support for future design against deep dielectric charging on China's subsequent middle-and-high altitude Earth satellites.

Key words: deep dielectric charging; dielectric; beta emitting source; electron gun