

空间材料深层充放电效应试验研究

张振龙¹, 韩建伟¹, 全荣辉^{1,2}, 安广朋¹

(1. 中国科学院 空间科学与应用研究中心, 北京 100190; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 利用电子枪发射的单能电子束、以及放射源发射的能谱结构接近空间电子环境的 β 射线电子, 模拟试验了几种常用空间介质材料和某卫星部件的深层充电过程; 结合对放电电流脉冲和电场脉冲的测量, 观测了深层放电脉冲信号及其对试验电路的影响。试验结果表明, 在类似实际空间强度的 pA 量级电子束辐照下, 介质材料可以累积大量电荷, 其表面电位可以达到近万 V; 随后发生的介质材料放电可产生高强度的放电电流脉冲和电场脉冲, 放电脉冲对试验电路造成较强的干扰。

关键词: 空间材料; 深层充放电; 电子辐照; 模拟试验

中图分类号: TM215.1; V416.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2009)03-0210-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2009.03.003

1 引言

空间辐射环境下, 高能电子容易在航天器外层介质材料内或航天器内部的介质材料上沉积; 当沉积电荷产生的电位过高或内部场强超过介质击穿阈值时, 将产生静电放电, 这就是深层充放电效应^[1]。国际上已有的空间飞行实践表明, 空间等离子体表面充放电和空间高能电子深层充放电是导致航天器异常或故障最主要的空间环境效应, 而且后者导致的异常或故障较前者多出 25%, 说明深层充放电效应对卫星安全造成最严重的威胁^[2,3]。放电脉冲可导致卫星系统逻辑错误或翻转, 严重时将直接导致元器件击穿或烧毁。深层充放电效应引发了 1990-2000 年的 60 余例卫星异常或故障, 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^[3,4]。我国的“探测 1 号”、“探测 2 号”卫星的异常和故障经分析与深层充放电效应密切相关^[5]。因此, 深入研究深层充放电效应对保障我国卫星系统安全有着重要意义。

目前, 中国科学院空间科学与应用研究中心已经建成国内首台专用的卫星深层充放电效应模拟装置^[6], 可以针对空间材料深层充放电的机理、对卫星系统的影响、相关的试验评价技术和防护技术进行试验研究, 为工程设计提供有益的参考。

2 试验设置

深层充放电效应模拟装置有电子枪和放射源两种电子环境模拟手段^[6]。利用电子枪提供的束流密度、能量可精确调控的电子束, 可对材料进行充放电过程机理和防护技术原理的研究。利用⁹⁰Sr 放射源发射的连续能量电子, 较真实地模拟空间恶劣电子环境, 较准确地试验评价不同材料的深层充电程度以及放电对器件和电路的影响。装置主要技术性能为: 电子枪电子束流密度 $10 \text{ pA/cm}^2 \sim 100 \text{ nA/cm}^2$, 能量 $5 \sim 100 \text{ keV}$; 放射源电子束流密度 $1 \sim 10 \text{ pA/cm}^2$, 最高能量 2.28 MeV ; 样品台温度 $-50 \sim +100^\circ\text{C}$ 可调; 真空度优于 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。

试验设置如图 1 所示。

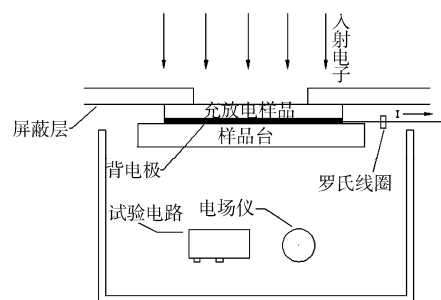


图 1 深层充放电效应试验设置图

Fig. 1 Configuration of deep charging & discharging test

电子枪和放射源位于样品台正上方, 试验期间电子枪或放射源产生的电子束流垂直入射在正面直

收稿日期: 2008-12-08; 修回日期: 2009-05-08

作者简介: 张振龙 (1976-), 男, 硕士学位, 副研究员, 现从事空间环境效应研究。联系电话: (010) 62573205。

径为 3 cm 的介质样品上, 样品其余部分用厚度为 5 mm 的铝板进行屏蔽。电位探头位于样品上方零电位点处^[7], 探测时停止电子辐照, 将探头迅速下降至样品辐照部位前 2 cm 处。由于样品表面电位衰减缓慢, 探测过程对样品表面电位的影响较小^[8]。

试验材料包括聚酰亚胺、聚甲醛树脂、环氧树脂、聚四氟乙烯等航天器常用介质材料, 通过背部镀敷的电极穿过罗氏线圈接地; 还包括某卫星用部件, 与其电源系统构成回路。采用法拉第筒测量电子束流强度, 弱电流计测量样品接地电流, 罗氏线圈监测放电电流脉冲, 宽频带电场仪监测放电电场脉冲^[6]。设计了一个晶振电路产生固定周期的时序信号, 利用高速数字存储示波器监测该试验电路受到放电脉冲的干扰。

3 试验结果

3.1 介质材料的深层充电现象

聚合物介质由于其绝缘性能和机械性能好, 被广泛应用作航天器绝缘材料。但由于部分聚合物介质的电阻率过高, 导致注入材料中的电荷泄放缓慢, 从而大量累积, 产生较高的电位, 有较高的静电放电风险。图 2 为不同厚度的聚酰亚胺薄膜材料在 20 pA/cm^2 、40 keV 的电子束流辐照下表面电位的变化过程, 试验温度保持在 20°C 。由图 2 可以看出, 在相同充电条件下, 材料的表面电位随着辐照时间的延长而逐渐升高, 并最终达到平衡电位。材料越厚其电容越小, 沉积同样的电荷表现出更高的电位。对于 $175 \mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺, 其表面平衡电位不低于 8000 V , 内部平均电场不低于 $4.6 \times 10^7 \text{ V/m}$ (峰值电场 $5.3 \times 10^7 \text{ V/m}$)。

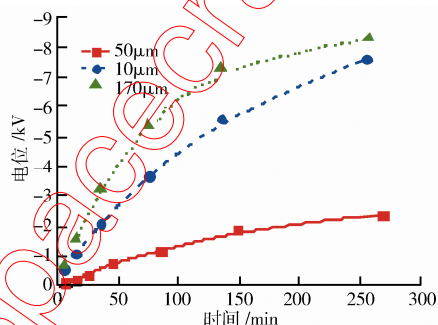


图 2 不同厚度聚酰亚胺薄膜在充电期间表面电位的变化
Fig. 2 Surface potential in polyimide films of different thickness under electron irradiation

在上述的辐照试验结束后, 使样品继续在真空

环境下保持, 其储存的电荷会缓慢地泄漏, 表面电位相应地缓慢衰减。图 3 是测量到的归一化的电位衰减过程, 3 种不同厚度的样品的电位衰减时间常数比较接近, 分别为 1667 min、1751 min 和 1639 min。可见沉积到该聚酰亚胺材料内部的电荷泄漏非常缓慢, 经过 28 h 才降低至最初的 $1/e$ 水平。进一步测算可得出该聚酰亚胺材料的电阻率为 $3.7 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{m}$ 。通常, 出现在地球外辐射带的高能电子增强事件会持续数天或更长时间, 介质材料被充电至高负电位的可能性极大。对于运行于地球内辐射带的中、低轨卫星, 其长时间遭遇辐射带电子轰击, 也有较大的可能被充至较高负电位。

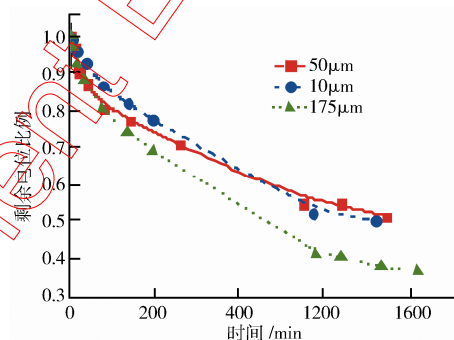


图 3 不同厚度聚酰亚胺薄膜表面电位衰减过程
Fig. 3 Surface potential decay in polyimide films of different thickness

3.2 试验模拟 GEO 电子环境导致的深层充电过程

GEO 电子环境中, 能量大于 0.1 MeV 的电子通量密度峰值可以达到 1 pA/cm^2 以上^[9]。 ^{90}Sr 放射源能谱分布与 GEO 环境电子能谱分布接近, 如图 4 所示。

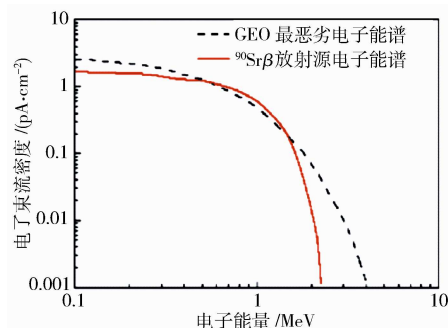


图 4 ^{90}Sr 放射源电子能谱和 GEO 电子能谱
Fig. 4 Integral electron spectra of ^{90}Sr radiation source compared with predicted GEO worst-case

利用 ^{90}Sr 放射源发射的电子模拟 GEO 恶劣电子环境, 控制其束流密度在 $1 \sim 10 \text{ pA/cm}^2$ 之间, 试验研究聚合物介质材料和某卫星部件的深层充电过程。

对厚度为 2 mm 的聚四氟乙烯 (Teflon) 和聚甲醛树脂 (Delrin) 进行辐照试验, 辐照束流密度为 5 pA/cm^2 , 图 5 为测量到的材料表面电位随辐照时间的变化。可见, 在经历 7 h 的辐照后, 聚甲醛树脂表面电位约为 -1 500 V, 而聚四氟乙烯的表面电位达到了 -4 500 V。这是由于聚四氟乙烯电阻率比聚甲醛树脂的电阻率高 3 个数量级, 更大的电阻率导致更多电荷累积在材料内部, 进而使得样品表面电位更高。

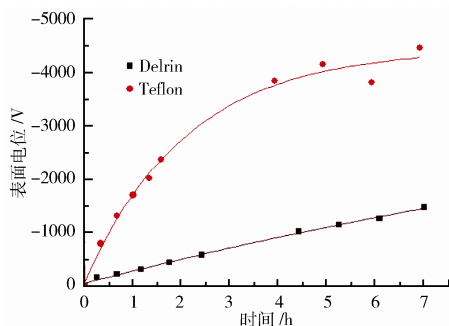


图 5 试验模拟 GEO 电子对介质材料的深层充电过程
Fig. 5 Experimental simulation of deep dielectric charging in GEO environment

某卫星用机构包括聚酰亚胺介质材料的衬底、与电源相接的金属环 (0 V 或者 100 V) 以及悬浮的金属环。对此机构以束流密度约 2 pA/cm^2 的 ^{90}Sr 放射源电子进行辐照, 48 h 后停止辐照, 继续在真空环境中保持。图 6 是对悬浮金属环和介质圆盘的边缘测量到的电位结果, 其中介质圆盘由于形状不规则、电位探针定位精度不高, 导致测量结果一致性相对较差。

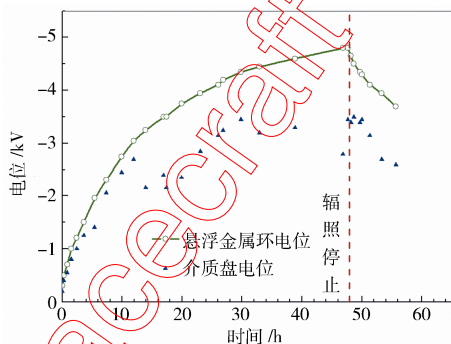


图 6 试验模拟 GEO 电子对某卫星用机构的深层充电过程
Fig. 6 Experimental simulation of a satellite component charged by GEO electron

经过 48 h 的辐照, 悬浮金属环和介质盘边缘分别被充至 -4.8 kV 和 -3.2 kV 电位; 辐照停止后, 经过 16 h, 悬浮金属环和介质圆盘边缘的电位分别

降至 -3.7 kV 和 -2.6 kV。可见, 该机构被高能电子束辐照后, 会形成数值相差较大的电位分布, 如与电源相接的 0 V、100 V 两端, 充电形成的 -4.8 kV 和 -3.2 kV 表面之间, 都具有很高的放电风险^[10]。辐照停止后, 电位衰减较缓慢, 放电风险仍较高。

3.3 介质材料的放电及对试验电路的影响

采用不同束流密度的 60 keV 电子束, 持续辐照 2 mm 厚的环氧树脂电路板 (FR4), 使其充至较高电位, 观测其间可能发生的放电现象及对试验用电路的影响。图 7 是在长达 45 h 内测量到的材料表面电位随着辐照持续进行而升高以及伴随着放电而迅速降低的结果。

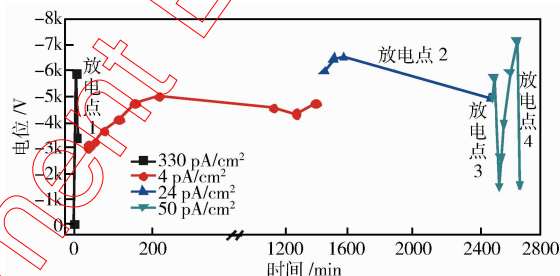


图 7 介质材料充电和放电期间表面电位的变化
Fig. 7 Surface potential evolution of dielectrics during charging and discharging

试验一开始, 采用 330 pA/cm^2 的电子束流辐照, 在 5 min 内表面电位即达到约 -6 kV, 很快就导致了第 1 次放电, 电位降至 -3.5 kV 左右; 随后改用 4 pA/cm^2 的较弱束流辐照, 200 min 后电位达到 -5 kV 左右, 随后直到 15 h 后测得电位约为 -4.6 kV, 电位变化不大; 然后改用 24 pA/cm^2 的束流辐照, 经 3 h 后电位达到约 -6.6 kV, 在随后的 15.5 h 内发生第 2 次放电, 最后测量到的电位为 -5 kV 左右; 继续改用 50 pA/cm^2 的较强束流辐照, 经 20 min 后电位接近 -5.8 kV, 随后发生第 3 次放电, 电位降至 -1.5 kV; 继续进行辐照, 经 110 min 电位再次达到 -7.2 kV, 随后很快发生第 4 次放电, 电位再次降至 -1.5 kV。

上述试验结果表明, 采用 330 pA/cm^2 、 50 pA/cm^2 的束流辐照, 很容易导致材料在较短时间内达到较高电位并发生放电; 24 pA/cm^2 的束流经过较长的时间, 也能够导致材料充以较高电位和发生放电; 采用 4 pA/cm^2 的较弱束流, 在试验期间没有观测到明显的放电现象; 放电之后样品仍残留部分电荷, 具有一定的表面电位。

介质放电伴随着放电电流脉冲和电磁脉冲的产生,图8是上述样品发生放电时测量到的距离介质样品 30 cm 处的电场脉冲和流经地线的电流脉冲,其中电流脉冲峰值强度约为 15 A,电场脉冲峰值强度约为 32 V/m。放电瞬间,距离放电样品 30 cm 处的无源时序电路和有源时序电路的输出波形受到的影响如图9所示。可见放电电磁脉冲导致无源时序脉冲信号产生畸变,在有源时序脉冲信号中叠加强烈的干扰信号。若无相应的防护措施,这些畸变和干扰信号会导致后续的逻辑电路出现错误,进而威胁卫星系统的安全。上述放电过程产生的较强的电流脉冲,若通过时钟线、信号线、接地线等直接进入电路系统,轻则导致系统逻辑出错等“软错误”,重则导致器件烧毁等“硬毁伤”。

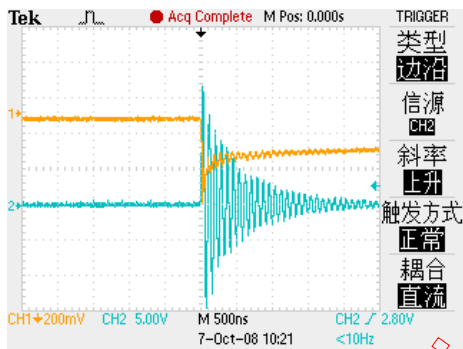


图8 介质材料放电产生的脉冲电场信号(上)和脉冲电流(下)

Fig. 8 Electric field pulse (top) and current pulse (bottom) generated from dielectric discharging

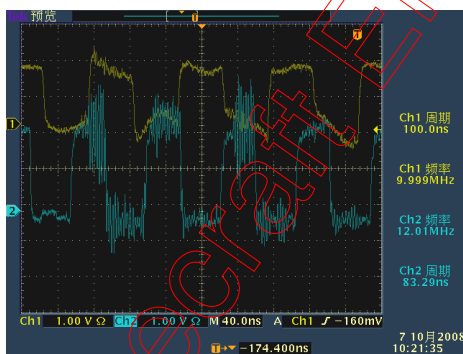


图9 介质材料放电脉冲对无源(上)和有源(下)时序电路信号的干扰

Fig. 9 Interruption of passive (top) and active (bottom) timer sequence by dielectric discharging

4 结论

利用卫星深层充放电模拟装置初步模拟试验了空间材料的深层充放电效应及其影响。在束流密度几十 pA/cm^2 的单能电子枪电子和几 pA/cm^2 的连

续能量放射源电子的辐照下,聚合物介质材料可以累积大量的电荷,致使其表面负电位在数 h 和数十 h 内升高至数 kV 和接近 10^4 V 量级,这些充电电荷的泄漏较慢;监测到介质放电产生的 10 A 量级的电流脉冲和距离放电样品 30 cm 处数十 V/m 的电场脉冲,观测到放电脉冲对时序电路的显著干扰。

空间材料深层充放电现象是十分复杂的物理过程,除与电子束流密度、材料种类和厚度密切相关外,还受到材料构型等因素的影响。在航天器内部发生的深层放电现象,其放电脉冲将直接耦合入航天器电路中,对航天器安全产生严重的危害。进一步深入研究航天器深层充放电规律,寻找最佳的屏蔽设计滤除深层放电脉冲的影响是未来需要进行的工作。

参考文献 (References)

- [1] Lanzerotti L J, Breglia C, et al. Studies of spacecraft charging on a geosynchronous telecommunications satellite[J]. Advance in Space Research, 1998, 22(1): 79-82
- [2] Koons H C, Mazur J E, Selesnick R S, et al. The impact of the space environment on space systems, Aerospace Technical Report TR-99(1670)-1[R], 1999
- [3] Wrenn G L. Conclusive evidence for internal dielectric charging anomalies on geosynchronous communications spacecraft[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1995, 32(3):514
- [4] Failures and anomalies attributed to spacecraft charging, NASA-RP-1375[R], 1995-08
- [5] Han Jianwei, Huang Jianguo, Liu Zhenxing, et al. Correlation of Double Star anomalies with space environment[J]. Journal of Spacecraft And Rockets, 2005, 42(6): 1061-1065
- [6] 韩建伟, 张振龙, 等. 卫星介质深层充放电模拟实验装置研制进展[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(1): 47-50
- [7] 张振龙, 全荣辉, 等. 电子辐照下聚酰亚胺薄膜的深层充电现象研究[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(1): 22-25
- [8] Wintle H J, Pépin M P. Decay of surface charge between electrodes on insulator surfaces[J]. Journal of electrostatics, 2000, 48:115-126
- [9] Alfred L V. The hazardous space particle environment[J]. IEEE transactions on plasma science, 2000, 28(6): 1831-1839
- [10] ECSS-E-ST-20-06C, Space engineering——spacecraft charging[S], 2008-07-31