

航天用 FR4 材料的本征电导率测试

李存惠 柳青 秦晓刚 陈益峰 杨生胜

(兰州空间技术物理研究所,兰州 730000)

文 摘 介质材料电导率是影响卫星充电过程的重要材料参数,它决定着航天器上电荷的分布状态以及电流平衡建立的快慢。常规的电导率测量方法完全不考虑空间真实带电环境,其测试结果用于卫星带电防护设计将会产生较大的误差。本文建立了用传统三电极法和电荷衰减法测试介质材料本征电导率的测试系统,对卫星常用的 FR4 材料进行了测试,测试结果与国外的结果相近。

关键词 电荷衰减法,FR4,体电阻,本征电导率

中图分类号:V45, TB321, O341

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.04.016

Evaluation of Dark Conductivity of FR4 Printed Circuit Board Used for Spacecrafts

LI Cunhui LIU Qing QIN Xiaogang CHEN Yifeng YANG Shengsheng

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract Conductivity of insulating materials is a key parameter to determine how accumulated charge will distribute across the spacecraft and how rapidly charge imbalance will dissipate. However, methods are often not applicable to situations encountered in spacecraft charging, conductivity is more appropriately measured for spacecraft charging applications as the decay of charge deposited on the surface of an insulator. These parameters determined from classical methods were used in design techniques to mitigating spacecraft charging effects may produce remarkable error. In this paper instrumentation for both classical and charge storage decay methods has been developed. Experiments were conducted by both methods on R4 Printed Circuit Board. The experiments are similar to results from Jet Propulsion Laboratory and Utah State University.

Key words Charge storage decay method, FR4 printed circuit board, Bulk resistivity, Dark conductivity

0 引言

卫星充放电是指卫星与空间等离子体、高能电子、地磁场和太阳辐射等环境相互作用而发生的静电电荷积累及泄放现象,当电子在介质材料中沉积时,由于电子的迁移率很小,电荷很难泄放,将在材料内部积累成为空间电荷,建立表面和内部电场。当介质材料电子积累的速率超过泄放的速率,空间电荷的密度和电场强度会随注入时间的延续而逐渐增加,超过材料的阈值时,就会发生放电^[1]。

介质材料本征电导率是影响卫星充电电位的重要材料参数,它决定了介质材料充电过程中电荷泄漏的快慢。目前,介质材料电导率的测量一般采用三电极法进行。

JPL 实验室等对空间带电问题的研究发现,常规的

电导率测量方法并不完全适合于空间带电环境,常规方法不适于空间条件的主要原因有^[2]:(1)电荷注入方法不同,常规三电极法电压是通过电源提供的,而介质材料充电产生的表面电位是由电荷注入形成的;(2)电极数目不同,常规三电极法在介质两侧都有电极,而介质内带电仅有一侧是电极,而另一侧则是电荷注入面;(3)研究目的不同,常规三电极法电导率测量与电源功率在介质中的损耗有关,而不考虑电荷注入后的数量和储存时间;(4)泄漏电流测量时间不同,常规三电极法的测量时间或读数时间为数分钟,而空间介质充电或衰减周期可达数月之久,介质电导率的变化在很长时间才会显现出来。

我国目前介质材料本征电导率测试普遍采用常规三电极法,其结果用于卫星带电防护设计将会产生较

收稿日期:2013-09-23

作者简介:李存惠,1984 年出生,硕士研究生,研究方向为空间环境技术。E-mail: tianianjiang@gmail.com

大的误差,因此开展介质材料本征电导率测试方法的研
究对卫星充放电效应的分析工作具有重要意义。本文
建立了用传统三电极法和电荷衰减法测试介质材料本
征电导率的测试系统,对卫星常用的 FR4 材料进行了测
试,测试结果与国外的结果相近。

1 试验

1.1 三电极法测量介质材料的本征电导率

常规测量介质材料体电阻的三电极法是向样品施
加一个已知的电压,再使用静电计或皮安计测量产生
的电流。考虑样品的几何因素,应当使用尺寸方便的电
极,电极尺寸应满足 ASTM:D 257—99《绝缘材料的直
流电阻或电导的试验方法》的要求。本文采用 Keithley
8009 型电阻率测试盒,配合 Keithley 6517A 静电计测试
样品体电阻。材料体电阻由电极的几何尺寸和样品的
厚度计算:

$$\rho = \frac{K_v}{t} \cdot \frac{V}{I} = \frac{\pi \left(\frac{D_\varphi}{2}\right)^2}{t} \cdot \frac{V}{I} = \frac{22.9}{t} \quad (1)$$

式中, ρ 为体电阻; K_v 为由测试盒的几何尺寸决定的
体电阻率测试盒的常数; V 为施加的电压; I 为测得
的电流; t 为样品的厚度; D_φ 为电极的有效直径,8009
型电阻率测试盒决定的有效面积为 22.9 cm^2 。

1.2 电荷衰减法测量介质材料的本征电导率

电荷衰减法测量介质材料本征电导率的原理为:首
先将介质材料样品置于一定能量的电子环境中辐照,使
其一侧充电到平衡状态,然后停止辐照监测该表面的电
位变化。由于受到辐射感应电导率影响,样品表面电位
在初始时刻的衰减较为迅速。

经一段时间后,辐射感应电导率将低于样品暗电
率,样品的本征电导率将对表面电位衰减起主要影响作
用,此时衰减时间常数仅与样品的本征电导率有关,测
量原理如图 1 所示。结合公式(2)、(3),确定电压衰
减时间常数,最后通过计算获得介质材料体电阻或本
征电导率,其中介电常数由一般方法测得:

$$V_s = V_{s_0} \cdot \exp(-t/\tau) \quad (2)$$

$$\tau = \varepsilon \rho \quad (3)$$

式中, V_s 为样品表面电位 V_{s_0} 为样品表面初始电位;
为样品电压衰减时间常数; ε 为样品材料的介电常数,为
相对介电常数与真空中绝对介电常数乘积; ρ 为样品
体电阻。

实验样品采用单面敷铜($t=2.0 \text{ mm}$)的 FR4 材料。
试验前对样品进行干燥处理。利用本所 SCF-900 航
天器带电地面综合模拟试验装置内的电子枪发射单能
电子束研究 FR4 材料的充电过程。该电子枪电子能量
范围为 $0 \sim 50 \text{ keV}$,电子束流密度 $0.1 \sim 100 \text{ nA/cm}^2$ 。
电子枪的电子能量和束流密度均连续精确可调,电子
束斑直宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 4 期

径可达 30 cm 。试验装置如图 2 所示。

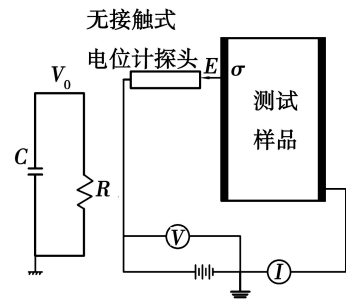


图 1 电荷衰减法测量介质材料体电阻的等效电路

Fig. 1 Schematic of charge storage resistivity test circuit

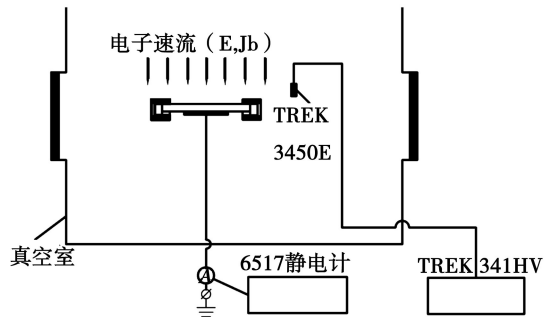


图 2 电荷衰减法测量材料体电阻的试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of the sample environments and electrical measurements for charge storage methods

电子枪位于样品正上方,电子束垂直辐照样品,电
子能量选取 14 keV ,束流密度为 2 nA/cm^2 ,充电直至平
衡。电位探头位于样品侧上方零电位处,测试时将探头
迅速下降至距样品充电表面 1 cm 处,进行感应非接
触式测量。由于样品表面电位衰减缓慢,快速地升降电
位探头对样品表面电位的影响较小^[3-4]。样品的表面
电位主要是由沉积电荷量和沉积深度决定,通过监测
表面电位的变化,可以在不破坏样品的前提下连续测
量,进而结合其他参量推测出样品内部电荷的沉积过
程以及在充电至饱和后样品中电荷的衰减过程。实验
真空度优于 $1.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$,温度保持在 20°C ,样品的
泄露电流用 Keithley 6517A 静电计测量,介电常数的
测试工作委托西安交通大学电气绝缘国家重点试验
室进行。

2 试验结果

图 3 为用三电极法施加不同电压测得的 FR4 材
料的体电阻,其结果表明:(1)国产 FR4 材料的体电
阻大约为 $3.0 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$;(2)介质材料的阻值与施
加电压的大小、测试时间关系不大;(3)样品所处的
环境条件(如温度、湿度、真空度)、样品状态(如纯
度、表面清洁程度、样品厚度和大小)、测试条件(如
夹具设计)等因素对测量结果会产生一定程度的影响^[5]。

常规三电极法的测量时间或读数时间为数分钟,
而空间介质充电或衰减周期可达数月之久,介质电
导率的变化在较长时间才会显现出来。用电荷衰减
法

测试 FR4 的本征电导率,测试结果见图 4。

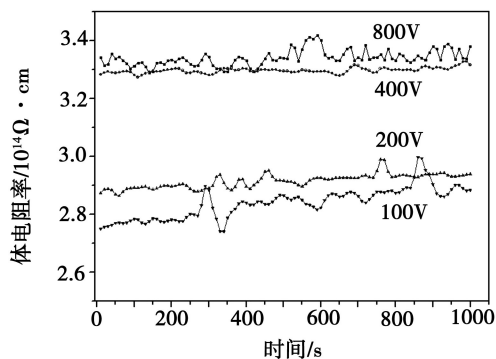


图3 用传统电导率测试方法对 FR4 材料进行测试的结果

Fig. 3 Classical resistivity measurements versus time for FR4 samples

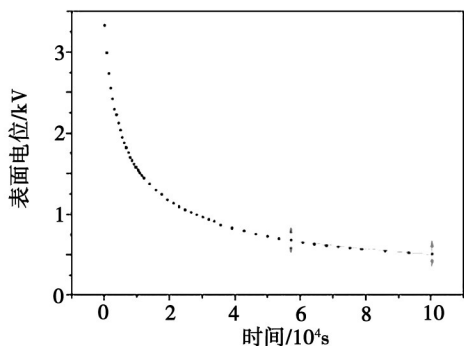


图4 样品表面电位的衰减曲线及拟合结果

Fig. 4 Potential decay characteristics of FR4 and fitting results

FR4 样品在电子束辐照下,初始时刻样品的表面电位迅速上升,在 40 min 内样品的表面电位上升到 3.3 kV 以上,但随着时间的进一步增加,样品表面的充电电流和泄露电流基本达到平衡。当辐射截止 2 min 后,开始测试样品表面电位的衰减变化。样品内部电荷 Q 的泄放类似于 RC 电路的泄放过程,即呈指数形式衰减,因此样品表面电位也呈指数形式衰减。由于受到辐射诱导电导率影响,样品表面电位在初始时刻的衰减较为迅速。当其他条件相同时,样品受到的辐射束流密度越大,在辐射截止时样品的辐射诱导电导率的初始值越大,表面电位衰减越迅速,衰减时间常数越小。经一段时间后,辐射感应电导率将低于样品本征电导率,样品的本征电导率将对表面电位的衰减起主导作用,此时衰减时间常数仅与样品的本征电导率有关,不同束流密度辐照下样品的衰减时间常

数应趋于同一值。对样品电位的衰减变化数据按式 (2) 进行拟合,可得介质材料 FR4 时间衰减常数为 1.52×10^5 , 结合本文测得的样品的介电常数 4.2, 可计算出材料的体电阻为 $4.09 \times 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

3 结论

电荷衰减法利用电子注入、非接触式表面电位测量法获取介质材料电导率。这种测试方法高精度、高可靠,该方法测得的介质材料电导更贴合于空间真实带电环境。本文参考国外的测试方法,建立了测试装置,对卫星常用的介质材料 FR4 进行了测试,初步验证了此种测试方法的可行性和正确性。

4 展望

采用这两种方法获得的电导率相差 2~4 个数量级。但由于国外的许多机构如 JPL、犹他州立大学和日本奈良大学等建立的相关的测试装置中对介质材料充电选用的电子能量一般在数 keV,甚至更低,为几百 keV,衰减电位的测试时间可持续数月以上,工况更接近空间真实的带电环境,因此国内在介质材料本征电导率测试领域,以后更应侧重于测试装置的研制、试验参数确定等方面,从根本上提高测试结果的准确性。

参考文献

- [1] Whittlesey A, Garrett H. Avoiding problems caused by spacecraft on-orbit internal charging effects[R]. NASA-HDBK-4002, 1999
- [2] Dennison J R, Sim A, Brunson. Comparison of classical and charge storage methods for determining conductivity of thin film insulators[C]. Alabama: Proceedings of the 8th Spacecraft Charging Technology Conference, 2003: 123-132
- [3] 全荣辉,韩建伟,黄建国. 电介质材料辐射感应电导率的模型研究[J]. 物理学报, 2007, 56(11): 6642-6647
- [4] Gross B, Sessler G M, West J E. Charge dynamics for electron irradiated polymer foil electrets[J]. Journal of Applied Physics, 1974, 45(7): 2741-2751
- [5] Frederickson A R, Benson C E, Bock-man J F. Measurement of charge storage and leakage in polyimides[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2003; 208(8): 454-460

(编辑 任涛)