



空间介质充放电研究现状及展望

李盛涛*, 李国倡

西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049

* 联系人, E-mail: sli@mail.xjtu.edu.cn

2016-07-20 收稿, 2016-09-03 修回, 2016-09-05 接受, 2017-02-07 网络版发表

国家自然科学基金重点项目(51337008)和国家自然科学基金(11575140, 11275146)资助

摘要 空间环境与航天器介质材料相互作用引起的介质充放电现象是威胁航天器安全运行的重要因素之一。尤其是随着航天器工作电压的提高, 该问题尤为突出, 严重制约了高电压、大功率航天器的发展。本文综述了国内外空间介质充放电领域的研究现状、存在的问题及未来发展。首先, 介绍了空间介质充放电现象及其危害, 当前我国航天器发展对空间介质的工程需求; 分析了空间介质充放电发展历程及新时期深空探测、国际空间站的发展对空间介质的新要求和挑战。其次, 从介质充放电机理、放电抑制措施、数值计算和计算机仿真等方面, 总结了介质表面充放电和介质深层充放电的研究现状和存在问题。再次, 介绍了空间介质充放电试验与材料特性的研究热点问题, 包括: 电子辐射下表面电位衰减与材料特性; 电子辐射下介质内部空间电荷原位测量与材料特性; 电子辐射下介质真空沿面闪络特性。最后, 结合当前研究中存在的问题, 展望了空间介质带电领域亟需解决的科学问题。

关键词 空间环境, 介质充放电效应, 机理分析与数值仿真, 介质充放电试验

1 引言

1.1 空间介质充放电现象及其危害

航天器运行在恶劣的空间环境中, 如等离子体、高能粒子、原子氧、紫外线、高真空、冷热循环等, 空间环境与航天器相互作用会诱发多种航天器异常现象, 如介质表面充放电、介质深层充放电、单粒子翻转、辐射损伤等^[1~3]。空间环境对绝缘介质充电所引起的放电现象会对太阳能电池阵、电池阵驱动机构、高功率电缆和电路板等航天器部件造成极大损害^[1,2,4,5]。静电放电会造成绝缘介质的劣化或老化, 甚至直接造成介质沿面闪络或击穿, 损坏航天器部件; 静电放电产生的电磁脉冲会干扰周围电子设备的正常运行, 造成航天器运行故障^[1,2,6,7]。

根据入射电子能量和介质带电位置的不同, 介质充放电包括表面充放电和深层充放电两类^[1~3,8]。

介质充放电效应示意图如图1所示。介质表面充放电是指空间等离子体环境中的低能电子(1~50 keV)、离子和太阳光等, 与材料表面发生“电荷交换过程”而引起的充电与放电现象。环境电子或离子与介质材料表面靶原子相互作用, 介质表面会产生二次电子、背散射电子; 此外, 当航天器运行于向阳面时, 阳光照射下, 介质表面会产生光电子^[3]。上述过程共同作用会导致介质表面发生充电与放电现象。对于不同介质, 由于其二次电子发射系数、背散射系数和光电子系数等材料属性不同, 其表面电荷交换过程不同, 从而会导致介质表面电位不同, 容易引发介质间的不等量带电^[1,2], 导致介质表面发生放电现象。

介质深层充放电是指空间辐射环境下, 高能电子穿透航天器金属屏蔽层, 进入绝缘介质内部, 经过弹性碰撞、非弹性碰撞或散射等物理过程, 最终沉积在介质内部^[9,10], 或者穿透较薄的介质; 同时, 受材

引用格式: 李盛涛, 李国倡. 空间介质充放电研究现状及展望. 科学通报, 2017, 62: 990–1003

Li S T, Li G C. Dielectric charging research status and prospect (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 990–1003, doi: 10.1360/N972016-00092

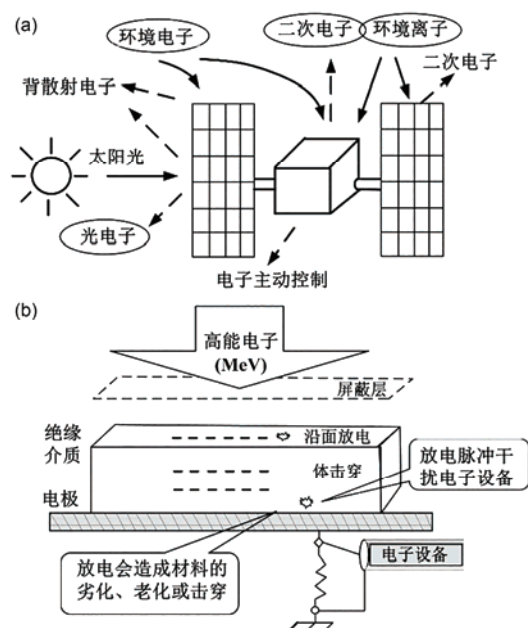


图1 介质充放电效应示意图。(a) 空间等离子体环境引起的表面电荷交换;(b) 空间高能电子辐射引发的深层充放电

Figure 1 Schematic of dielectric charging. (a) Surface charging exchange processes induced by plasma environment; (b) deep dielectric charging induced by energetic electrons

料内部本征电导和辐射诱导电导的作用, 电子传导过程会加快。对于高阻性绝缘材料而言, 电子沉积速率远大于电荷泄漏速率, 因此, 介质内部会不断积聚空间电荷, 从而导致局部电场集中。当沉积电子产生的电场超过材料击穿阈值时会导致介质内部发生放电。此外, 介质内部沉积电子还会导致表面电位的增加, 对于不同结构和特性的介质, 也可能引起介质表面发生放电。

空间环境对介质充电所引起的表面或深层放电现象是导致航天器发生异常故障的主要因素^[7,11~14]。Koons等人^[14]对航天器异常故障统计表明, 在299例故障中, 由空间介质充放电引起的故障占总故障的54.2%。从1980~2005年, Tafazoli^[7]对156例在轨航天器异常现象统计表明, 45%的航天器异常现象是由航天器电源系统故障造成的。航天器电源故障影响因素较多, 其中, 太阳电池阵、电池阵驱动机构和传输电缆等部件的绝缘材料及绝缘结构是引起充放电现象的薄弱环节。尤其是随着航天器工作电压和功率需求的提高, 较高的工作电压会影响介质充电与放电过程, 其与空间环境耦合作用, 对航天器部件会产生更大的威胁。一旦太阳电池阵展开或驱动机构发生

故障, 将导致航天器电源系统失效, 严重时造成航天器失控^[11~13]。2008年11月11日, 由中国发射的尼日利亚卫星, 太阳帆板驱动机构发生故障, 导致卫星电源耗尽, 完全失效^[13]。

1.2 当前我国航天器发展对空间绝缘介质的工程需求

随着人们对空间探测的逐步深入, 航天器的体积变得越来越大, 运行的时间越来越长, 所使用的电子设备越来越多, 功能需求的增加使得航天器需要更大功率的电源系统。为降低能量传输损耗并减轻电缆重量, 需要发展高电压技术。而随着航天器工作电压的提高, 高工作电压与空间环境的耦合作用, 使得空间绝缘介质及其部件的损坏几率相应增加。一方面, 高工作电压对绝缘材料及绝缘结构提出了更高的要求, 传统采用的增加绝缘距离的方法会导致卫星尺寸过大和重量大幅提高, 而绝缘材料厚度的增加会导致散热困难; 另一方面, 高工作电压会影响绝缘介质充电与放电过程, 改变向介质表面辐射电子的运动轨迹, 诱发并维持介质表面电弧放电。高工作电压与高能电子耦合作用, 会共同影响介质充电与放电过程, 增加材料的损坏几率。

当前, 我国航天器介质充放电效应易发故障主要包括^[5,15~26]: (1) 太阳能电池单元间的电弧放电问题。低能电子辐射下, 太阳能电池单元之间的聚酰亚胺材料容易发生表面电弧放电。(2) 太阳电池阵驱动机构导电环间绝缘材料闪络电压极低问题。(3) 大功率电缆内部充放电引起的绝缘损毁问题。高能电子辐射下, 大功率电缆部件内部积聚电荷, 容易引发内部放电。(4) 电路板结构充放电引发的脉冲放电干扰问题。尤其是随着高电压和大功率航天器的发展, 上述问题尤为突出。

2 空间介质充放电发展历程

早在20世纪20年代, Mott-Smith和Langmuir就开始了对太空中孤立体静电带电问题的最初理论探索^[1,2,27]。随着1957年第一颗人造卫星的发射, 人类进入太空时代, 与之相关的空间介质充放电问题逐渐引起人们的关注。1980年之前, 人们认为介质表面充放电是引起航天器异常的主要原因, 相关研究主要集中在表面充电现象^[1,2,28]; 随着航天器异常故障的发生和20世纪90年代CRRES卫星的发射, 介质深

层充放电开始受到关注,对于航天器充电的研究进入一个新的时期^[8,27,29]. Garrett^[28,29]分别于1981年和2000年发表综述论文,总结了1980年之前航天器表面充电的研究进展,以及1980~2000年期间,航天器表面充电和深层充电的研究发展. 21世纪以后,人们在空间环境探测、基础理论研究和地面模拟试验等方面取得了丰硕成果;然而空间介质充放电现象依然是威胁航天器安全运行的主要因素. 尤其是随着高电压和大功率航天器的发展,空间介质充放电领域面临着新的挑战. 在前人研究基础上,将空间介质充放电的研究大致分为5个阶段: (1) 初始关注阶段; (2) 介质表面充放电的关注与研究; (3) 介质深层充放电的关注与研究; (4) 空间介质充放电的发展; (5) 当前新的要求和挑战,如图2所示^[1~3,6~8,14,27~34].

3 空间介质充放电基础研究

3.1 介质表面充放电

(i) 介质表面充放电模型. 介质表面充电的理论基础是Garrett^[28]提出的局部电流平衡方程. 通过综合考虑环境入射电子、离子和材料二次电子、背散射电子和光电子等多种电荷交换过程,计算航天器表面电位分布,表达式如下^[35]:

$$j_{\text{net}} = j_i(\phi_d) - j_e(\phi_d) + j_{\text{se}}(\phi_d) + j_{\text{si}}(\phi_d) + j_{\text{ph}}(\phi_d) + j_{\text{be}}(\phi_d) + j_c(\phi_d),$$

其中, ϕ_d 是表面电位; j_{net} 是航天器电流; $j_i(\phi_d)$ 是入射正离子的电流密度; $j_e(\phi_d)$ 是入射电子的电流密度; $j_{\text{se}}(\phi_d)$ 是电子诱发二次电子的电流密度; $j_{\text{si}}(\phi_d)$ 是离子诱发二次电子的电流密度; $j_{\text{ph}}(\phi_d)$ 是光电子的电流密度; $j_{\text{be}}(\phi_d)$ 是电子诱发背散射电子的电流密度; $j_c(\phi_d)$ 是介质表面金属导体的电流密度.

基于局部电流平衡方程及其改进模型,人们在表面电位计算、测量评估以及带电抑制等方面做了大量工作^[1,2,36~42]. Dennison课题组^[43~45]研究了电子束辐射下高阻性绝缘材料辐射诱导电导率测量方法和表面电位原位测量方法;并采用介质表面形貌修正方法,研究了材料表面状态对表面充电过程的影响. 材料表面特性及其对表面充电的影响是表面充电研究的焦点问题. 国内,买胜利等人^[46]采用PIC方法,模拟计算了恶劣空间环境下不同二次电子发射特性对材料表面平衡电位的影响;为了更精确地计算材料二次电子发射特性,张健等人^[47]推导了金属二次电子发射系数,计算了不同表面材料的航天器表面充电电位;材料表面二次电子发射特性会影响表面充电电位,反之,介质表面电位亦会反作用影响表面二次电子发射,陈益峰等人^[1,2,48]研究了介质表面带

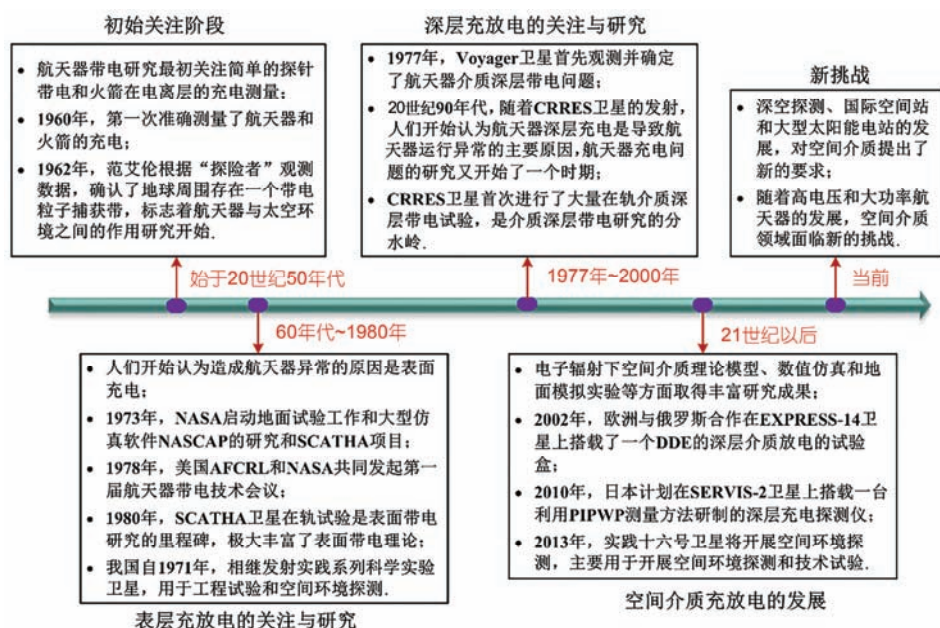


图2 (网络版彩色)空间介质充放电研究发展历程

Figure 2 (Color online) The development history of dielectric charging

电对二次电子发射特性的影响,分析了材料表面零电位、负电位和正电位三种状态下二次电子发射系数的变化。

材料表面特性、几何结构和空间位置的不同,导致不同介质表面充电电位不相等。航天器不同绝缘介质之间或金属与介质之间容易形成不等量带电,从而引发放电。按照放电位置划分,表面放电主要包括金属或悬浮导体对空间等离子体环境放电、不同绝缘介质之间放电、金属-绝缘介质界面放电和绝缘介质表面放电等形式^[1,2]。由于上述不同放电形式会直接或间接地诱发沿着绝缘介质的闪络放电,从而对绝缘材料产生直接破坏,因此,本文重点介绍沿着介质表面的闪络放电。沿面闪络多起始或发生于太阳能电池阵三结合点(金属-绝缘介质-真空),电池阵驱动机构绝缘环等部位^[1,2]。Cho^[5,35]研究了太阳能电池阵三结合点初始电子发射、初始电弧触发和持续电弧发展的过程。

沿面闪络指沿着真空-绝缘体界面发生的贯穿性电击穿现象,其本质是高电场下材料表面、表层和界面(电极与材料)电荷的产生、输运倍增和相互作用过程^[49,50]。目前被大多数人所认可的是二次电子雪崩模型(SEEA)模型和电子触发极化松弛理论模型(ETPR模型)^[49~53]。

然而,与传统意义上的真空沿面闪络问题相比,空间环境下绝缘材料沿面闪络机理、特性和影响因素有所不同^[25,26,54,55]。而现有理论仅适用于真空或其他气氛环境,不能很好地解释电子辐射下真空沿面闪络现象。在空间复杂环境中,绝缘材料受到高能电子辐射、极端温度、绝缘材料特性和结构等因素的影响,其沿面闪络电压远低于地面真空环境中材料的闪络电压^[16,17,25,26,55]。目前,空间环境下绝缘材料真空沿面闪络特性和机理尚不完全清楚。

(ii) 表面充放电仿真软件。自20世纪60~70年代,国际上发展了早期的电脑软件用于计算空间带电。1980年左右,美国国家航空航天局(NASA)开发了NASCAP软件(NASA带电分析程序),之后发展了多个修正版本^[1,2,34]。当前,NASCAP-2K是美国最流行并且最有效的航天器充电分析软件。欧洲航天器等离子体相互作用网(SPINE)协会开发了航天器等离子体相互作用系统(SPIS)。日本研发了多用途航天器带电分析工具(MUSCAT),它包含了NASCAP和SPIS中的绝大部分航天器带电计算能力^[1,2,34]。国内,中

国科学院空间科学与应用研究中心、兰州空间技术物理研究所、西安交通大学、军械工程学院等单位针对航天器典型绝缘材料和结构件表面带电问题进行了大量的数值计算工作^[36~42]。

(iii) 表面充放电抑制方法。随着人们对表面充放电问题的探索,设计了多种表面充放电抑制方法^[1,2,56~59],主要分为两大类:主动式和被动式^[1,2]。主动式是通过命令控制;被动式是自主的,没有控制。第一种方法是通过装置吸取航天器结构地的电子,并将电子发射到航天器以外的空间;第二种方法是通过航天器表面尖端或涂层等,有效减小航天器的不等量带电问题,其缺点是长期使用可能会消耗整个航天器表面的涂层。针对以上两种防护方法,目前航天器表面充放电抑制的主要措施包括尖角法、热灯丝发射法、导电栅网法、局部表面导电涂层法、高二次电子发射系数法、电子和离子发射法以及蒸发法等,见表1^[1,2,56~59]。目前,国内卫星表面带电抑制应用中,大多采用被动控制方式,主动控制技术尚处于研究中,兰州空间技术物理研究所等单位研究了基于等离子体接触器的电位主动控制技术^[37]。

3.2 介质深层充放电

(i) 介质深层充放电模型。自20世纪90年代,对介质深层充放电的研究和报道逐渐增多。在深层充电模型方面,比较典型的模型可以分为两类:辐射诱导导电模型(RIC)与电子-空穴对的产生和复合模型(GR),也称为双极性电荷输运模型^[60~65]。RIC模型

表1 表面充放电抑制方法

Table 1 Surface charging mitigation methods

抑制方法	控制类型	抑制原理	说明
热灯丝法	主动式	热电子发射	产生不等量带电
尖峰法	被动式	场致发射	产生不等量带电
离子发射法	主动式	离子发射	长期使用破坏电 镀层
低能量等离 子体发射	主动式	电子和离子的 发射	综合了电子发射和 离子发射的优点
蒸镀法	主动式	极性分子蒸发 吸附电子	对介质深层带电 无效
导电网格法	被动式	静电屏蔽;	周期性表面电位
局部导电涂 层法	被动式	增加表面导 电性	长期实用,导电性 会改变
高二次电子 发射法	被动式	二次电子发射	仅适用于一定范围 的电子

从宏观上描述了电子在介质内部的输运过程, 即在高能电子辐射下, 介质内部产生辐射诱导导电. 其优点是工程上易于实现. GR模型从微观上考虑电子-空穴对的产生和复合过程, 较精确地描述了介质内部电荷输运过程, 但模型中包含一些不易确定的微观参数值, 如载流子的产生率、复合率和陷阱参数等. 法国Laurent课题组^[60,62,64,65]采用GR模型, 研究了高能电子辐射下低密度聚乙烯(LDPE)的电荷输运特性, 并采用电声脉冲法(开路PEA法; PEA: 电声脉冲法)测量电子束辐射下介质内部的空间电荷分布. 通过对试验数据拟合修正了LDPE载流子产生率、复合率等参数. 由于GR模型中聚酰亚胺、聚四氟乙烯等空间材料的微观参数较难确定, 目前, 针对工程应用高能电子辐射下介质深层带电特性的计算大多采用RIC模型或在其基础上改进模型.

(ii) 介质深层充放电数值计算. 国外, Fredericksen小组^[1,2,66]开发了NUMIT软件, 用于计算沿介质深度方向的一维电荷分布和电场分布. 欧洲核研究组织(CERN)开发了GEANT4软件, 通过蒙特卡罗法仿真高能粒子透入物质及相互作用, 分析高能粒子在介质内部的分布特性, 这是一款面向对象的开放软件, 应用该软件, 国内研究者做了很多计算工作^[1,2,8]. 欧洲空间局(ESA)开发出了介质深层充电风险评估工具(DICTAT), 可以建立简单柱体或平面的一维模型, 计算介质内部电场, 并将最大电场与击穿临界电场比较, 作为航天器介质内带电异常威胁的评估^[1,2,67,68].

结合我国工程应用, 国内也开展了大量数值计算工作. 黄建国等人^[69,70]采用RIC模型, 计算了聚四氟乙烯和环氧树脂的介质深层充电特性, 计算结果与DICTAT软件结果较为吻合. 李学胜和焦维新^[71]采用GEANT4软件计算了航天器内部充电产生的电场, 将结果与CRRES卫星实际测量数据做了比较. 秦晓刚等人^[8,72]建立了GEANT4-RIC模型, 研究一维平板介质深层带电的数值模拟方法. 李盛涛等人^[9]研究了入射电子能量对介质深层充电特性的影响, 主要仿真计算介质深层充电过程中空间电荷、表面电位和最大电场沿着电子垂直入射方向(一维)的分布特性.

国内外对于介质深层带电特性的数值计算, 大多针对材料的一维特性, 无法满足航天器复杂结构的工程需求. 近几年, 针对航天器结构件的研究逐渐增多, Tang等人^[24,73]采用GEANT4和COMSOL软件,

研究了电路板的三维内带电特性. 李盛涛课题组^[10,74]研究了高能电子辐射下平板型结构的二维带电模型, 并在其基础上研究了FLUMIC能谱辐射下环形结构的二维电荷输运模型和特性. 建立了FLUMIC能谱辐射下环形结构的二维电荷输运模型, 示意图如图3所示. 计算并讨论FULMIC能谱平静电子环境和恶劣电子环境两种情况下, 环形部件内部电荷输运特性^[74,75]. 从绝缘材料屏蔽设计、材料特性和结构尺寸3个方面, 讨论并获得电子能谱辐射下, 环形部件内部积聚空间电荷、内部电位和内部电场的时空演变特性.

得出的主要结论包括^[74]: (1) 高能电子辐射引起的环形结构导电环、绝缘环与真空的三结合点处电场畸变是导致闪络电压发生的首要因素; 在其基础上, 较高的工作电压会进一步诱发和维持闪络的产生和发展. (2) 研究了材料特性对深层充电特性的影响. FULMIC能谱恶劣空间电子环境下, 选用3种高阻性绝缘材料聚酰亚胺(PI)、聚四氟乙烯(PTFE)和环氧树脂复合材料作为导电环间的绝缘材料, 3种材料内部最大电场顺序为PTFE>FR4>PI. (3) 研究了结构尺寸对内部电场的影响. 计算比较了不同绝缘环厚度(3, 5和10 mm)时, 内部电场变化. 发现连续能谱辐射下, 随着绝缘环厚度的增加, 绝缘环内部最大电位和最大电场明显增大.

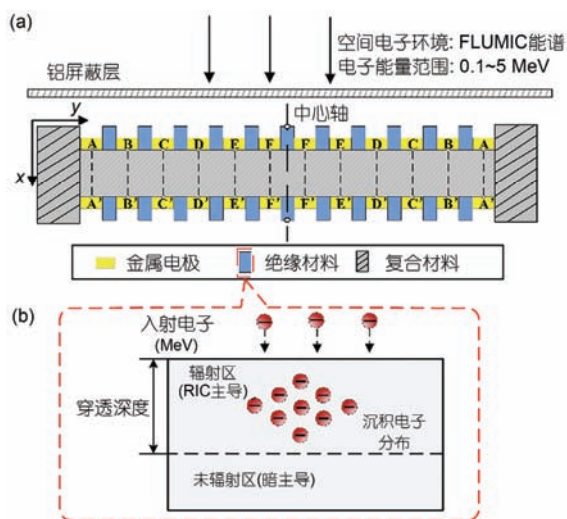


图3 (网络版彩色)高能电子辐射下环形结构深层充放电示意图. (a) 环形结构二维示意图; (b) 环形结构内部电荷输运示意图

Figure 3 (Color online) Schematic diagram of deep charging in ring structure. (a) 2-D ring structure irradiated by energetic electrons; (b) charge deposition, transport and accumulation processes in the ring structure

空间环境中,绝缘介质受到电子束辐射、直流电压、高真空和极端温度等因素耦合作用下,其充电与放电特性和机制更为复杂.例如,直流工作电压会影响介质表面辐射运动电子轨迹,进而影响放电过程;温度会影响介质内部沉积电荷传导过程;真空度会影响介质表面闪络放电过程.因此,下一步研究中需要综合考虑上述主要影响因素,建立多因素耦合作用模型,分析耦合作用下介质的充电与放电特性.

(iii) 介质深层充放电抑制方法. 高能电子辐射下,空间介质内部容易沉积电子,使材料内部局部电场畸变,导致静电放电.如何有效抑制材料内部电子积聚是重要研究课题.目前静电放电抑制方法的研究大多针对表面带电^[76],采用防护层和屏蔽技术可以有效缓解介质深层带电,其最大缺点是会增加航天器重量.国外,Manners等人^[1,2,77]研究表明,将金属原子引入到分子级别的晶格是一种较好地抑制介质深层带电的方法.通过打开聚合物的分子链,注入金属原子,进而形成纯均匀的金属电介质.实验室初步试验表明,辐射条件下金属化聚合物的放电问题得到了一定程度的缓解,但对于电导率的精细控制仍需要进一步研究.

国内,郑晓泉课题组^[78~80]研究利用介质材料的非线性电导特性,通过对绝缘材料的改性处理,从而实现空间辐射环境下介质内部危险电荷自动释放,以此来调控介质表面不等量带电和介质内部电场,使其远低于材料的电气强度或大幅降低放电脉冲能量,从而实现对航天器带电的主动防护.前期实验研究发现,通过调控无机微米粉末的种类、含量等参数,可以使航天器典型介质材料获得非线性电导特性^[78~80].然而,由于改性配方体系与改性介质加工工艺仍不完善,所获得的介质非线性电导率特性仍未达到预期,模拟辐射环境下,材料特性仍不稳定,因此,需要进一步深入开展理论与试验研究.

4 空间介质充放电试验与材料特性研究

国内外空间介质带电试验研究主要集中于模拟空间辐射环境中测量绝缘介质或航天器结构件的辐射诱导电导、表面电位、材料二次电子发射系数、放电脉冲/能量、击穿阈值等参数,将其用于分析和评估介质表面或深层充放电特性^[5,65,81~86].介质表面电位和内部空间电荷可以直观地反映电子束辐射下介质充电过程与特性;结合数学模型,可以进一步提取材

料微观参数,研究材料微观特性.

本节将重点介绍电子束辐射下介质表面电位与内部空间电荷原位测量与材料特性;进而介绍电子束辐射下沿面闪络特性的最新研究进展,分析电子束辐射后和辐射期间两种情况下,介质沿面闪络特性与电荷输运过程的内在关联.

4.1 电子辐射下表面电位衰减与材料特性

空间环境下,绝缘材料表面/体积电阻率、陷阱能级/密度、载流子有效迁移率等微观参数不容易直接测量,表面电位则是易于测量的宏观参数,它不仅可以直接地反映介质充电过程,还可以结合数学模型,计算材料的微观参数,进而用其分析材料微观特性^[63,87~89].

在模拟空间辐射环境中采用非接触式表面电位计测量不同温度下(298~338 K)聚酰亚胺的二维等温电位衰减分布.建立基于遗传算法的二维等温表面电位衰减模型,分析表面电位衰减实验结果,计算得到材料微观参数.图4给出了298 K时表面电位衰减初始时刻($t=0$ h)和一定时间后($t=94.8$ h)聚酰亚胺二维表面电位衰减分布. $t=0$ h,辐射中心电位为-2056 V; $t=94.8$ h时,电位衰减至-1441 V.

实验条件:电子能量为3 keV;发射电流为30 μ A;辐射时间为3 min;试样厚度为27 μ m.通过试样底部加热板可以改变试样温度,并采用热电偶和温度控制器控制其温度,将非接触式表面电位计(TREK, 341B)探头固定于二维移动平台,用于测量表面电位的二维分布.

结合遗传算法可以计算得出聚酰亚胺材料的表面电阻率 R_s 、体欧姆电阻率 ρ_v 和载流子迁移率 μ ,见表2^[63].

4.2 电子辐射下介质内部空间电荷原位测量与材料特性

采用电声脉冲法(pulsed electro-acoustic, PEA)可以直观地观察材料内部沉积电子分布,进而研究电子辐射下材料沉积、传导和积聚特性^[60,81,90].20世纪80年代,日本Takada首次提出采用电声脉冲法测量材料内部的空间电荷.经过30多年的发展和完善,该方法已成为研究聚合物介质材料微观特性的重要实验手段.

法国Laurent课题组^[81,91,92]在空间电荷原位测量、

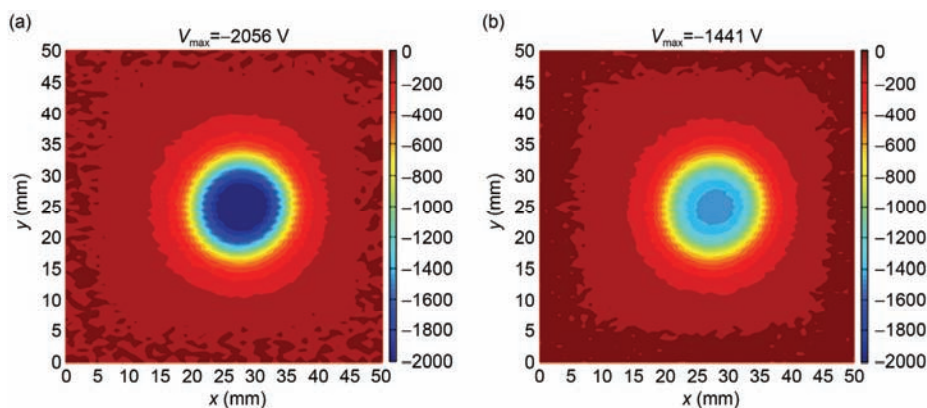


图4 (网络版彩色)介质二维表面电位分布。(a) $t=0$; (b) $t=94.8$ h

Figure 4 (Color online) Two dimension distributions of surface potential. (a) $t=0$; (b) $t=94.8$ h

表2 聚酰亚胺材料的特征参数

Table 2 Characteristics parameters of polyimide

编号	$R_s(\times 10^{19} \Omega)$	$\rho_v(\times 10^{17} \Omega \cdot m)$	$\mu(\times 10^{-19} m^2(V \cdot s))$	误差(%)
1	1.02	2.89	1.50	0.8280
2	1.02	2.97	1.51	0.8288
3	1.00	2.75	1.47	0.8260
均值	1.01	2.87	1.49	0.8276

电子辐射下材料特性分析与数值仿真等方面进行了较多工作. 研究中对经典PEA装置改进, 将改进后的系统, 通过金属支撑装置, 放置于模拟辐射环境中. 根据上下电极处理方式的不同, 将其分为“短路PEA”和“开路PEA”两种方法, 如图5所示^[81,91~93]. 对于经典PEA装置, 激励模块(外施电压和高压脉冲)和探测模块通过上下电极分别施加于试样两侧. 改进后的“短路PEA”装置将激励模块和探测模块置于试样下方, 避免电子辐射的影响, 高压脉冲通过金属电极施加于试样. 电子辐射时, 入射电子可以穿透极薄的金属电极, 注入到介质内部; “开路PEA”装置的试样上表面做悬浮处理, 实验中, 通过专门的移动机构分别实现电子辐射和空间电荷测量, 该方法更接近实际空间辐射环境.

通过测量电子束辐射下介质内部空间电荷分布, 一方面, 可以直观地观察沉积电荷分布, 用于验证电荷输运模型; 另一方面, 结合电荷输运模型, 通过对空间电荷测量数据拟合, 可以进一步优化材料的微观参数. Laurent对上述两种方法进行了对比分析, 并测量了低密度聚乙烯(LDPE)、聚酰亚胺(PI)和聚四氟乙烯(PTFE)材料的空间电荷特性. 目前, 国内还没有

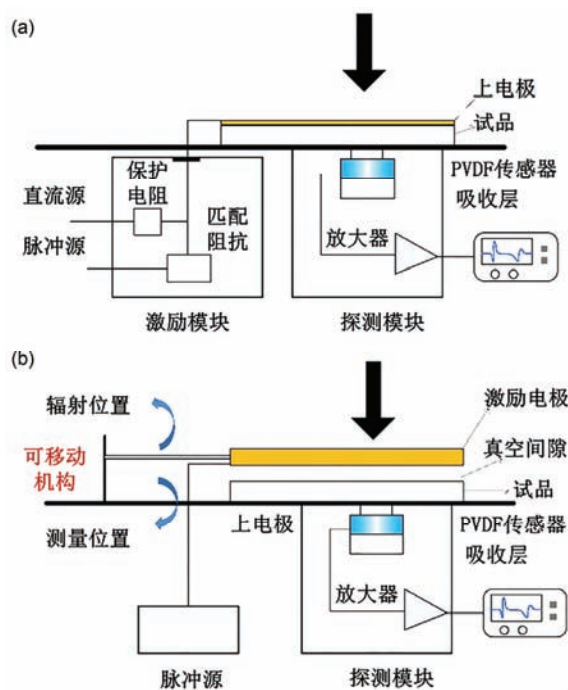


图5 (网络版彩色)电子束辐射下介质空间电荷原位测量装置示意图。(a) “短路PEA”装置; (b) “开路PEA”装置

Figure 5 (Color online) Schematic of space charge measurement setup under electron radiation. (a) “Short circuit PEA”; (b) “open PEA”

成熟的电子束辐射下空间电荷原位测量装置. 设计中存在的难点主要包括: 电子辐射环境对装置中的传输线路、激励模块和探测模块等屏蔽要求较高; “经典PEA”装置对绝缘材料厚度具有特殊的要求, 一般最佳厚度为几百微米; 而针对空间绝缘介质或部件厚试样的测量, 需要设计匹配的高压脉冲源、测试电极和PVDF传感器; 此外, “经典PEA”装置工作于大

气环境,将改装后的装置置于真空电子辐射环境下,由于装置的敏感性和工作环境的特殊性,在系统调试过程中存在较多干扰因素。

4.3 电子辐射下真空沿面闪络特性

在模拟空间环境系统中,开展了电子束辐射处理后和电子束辐射期间,PI真空沿面闪络性能测试^[54,55,94]。基于电荷输运模型,计算了低能电子束辐射下,PI表层积聚电荷分布以及三结合点电场畸变程度;实验测量了不同能量电子辐射下,PI材料的表面电位衰减曲线,采用Simmons理论,计算并获得了电子束辐射下PI表面/表层陷阱分布规律。结合沿面闪络实验现象,研究了PI表面运动电荷、表层积聚电荷以及陷阱分布对沿面闪络的影响机制。实验结果如图6所示,辐射条件设置如下:电子能量为5~30 keV;电子枪发射电流为100 μA ,辐射距离为500 mm;辐

射时间为10 min。

通常认为,电子束辐射会对材料带来破坏,导致闪络电压降低,但经过反复试验确认,实验结果表明,辐射处理后PI闪络电压较辐射之前明显升高,并且随着电子能量增加,闪络电压有上升趋势。分析认为,低能电子束辐射下,入射电子会沉积在材料表层,形成空间电荷区,进而建立较高的内部电场,该电场会影响三结合点电场畸变,影响初始电子发射过程;此外,该电场会对介质表面的二次电子产生反作用力影响二次电子输运/倍增过程。

为了定量分析低能电子束辐射下,PI表层积聚电荷分布以及三结合点电场畸变程度,根据闪络测试辐射条件和测试电极尺寸,建立了低能电子束辐射下的指形电极二维充电模型^[55,94]。计算结果表明,电子辐射前,20 kV直流电压作用下最大畸变电场出现在“指形电极-聚酰亚胺-真空”的三结合点,最大值为 $-1.41 \times 10^7 \text{ V/m}$ (方向向左)。20 keV电子辐射10 min后,PI内部最大畸变电场为 $1.33 \times 10^7 \text{ V/m}$ (方向向右)。这部分电场与直流电压产生的外部电场 E_1 方向相反。极大地削弱了阴极三结合点场强,从而导致电极发射电子减小,抑制了沿面闪络过程的发展,这是导致闪络电压提高的主要原因。

此外,电子辐射下材料劣化也会使陷阱参数发生变化,已有研究表明,深陷阱的增多会在一定程度上会抑制沿面闪络的发展。这是因为电子在深陷阱中滞留时间较长,使得材料表面自由电子减少,从而限制了二次电子的输运和倍增过程,提高了沿面闪络电压。我们实验测量了不同能量电子束辐射下(3~11 keV),PI材料的表面电位衰减曲线,采用Simmons理论,计算了电子束辐射下PI表面/表层陷阱分布^[54]。结果表明,随着电子能量的增加,PI材料内部深陷阱密度明显升高,电子能量3 keV时,最大陷阱密度为 $3.71 \times 10^{16} \text{ m}^{-3} \text{ eV}^{-1}$,对应陷阱能级为 $\sim 0.81 \text{ eV}$;能量11 keV时,最大陷阱密度增大至 $3.44 \times 10^{17} \text{ m}^{-3} \text{ eV}^{-1}$,陷阱能级为 $\sim 0.85 \text{ eV}$ 。此外,深陷阱能级有小幅增加(0.81~0.85 eV)。电子束辐射后,材料深陷阱能级和密度的增加,是导致沿面闪络电压升高的原因之一。

电子辐射期间,随着入射电子能量的增加,材料直流沿面闪络电压明显降低,此外,不同能量的电子对材料沿面闪络的影响过程不同。对于相对较低能量的电子(<17.5 keV),更容易受到材料表层积聚电

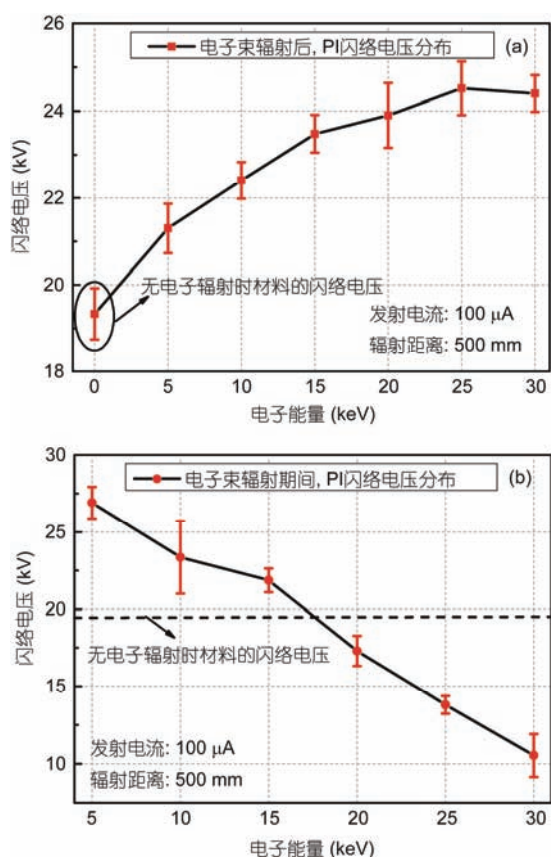


图6 (网络版彩色)不同条件下聚酰亚胺直流沿面闪络电压分布。(a) 电子辐射停止后;(b) 电子辐射期间

Figure 6 (Color online) Surface flashover voltage distributions of polyimide under different cases. (a) After electron radiation; (b) during electron radiation

荷的排斥,不利于电子输运和倍增.此时,材料表层空间电荷积聚对闪络特性的影响大于材料表面电子的影响,因此,材料闪络电压大于电子辐射之前的闪络电压;而相对较高能量的电子(>17.5 keV),更容易到达材料表面,参与闪络过程的发展,材料表面电子运动对闪络的影响大于表层空间电荷积聚的影响,导致材料沿面闪络电压远低于电子辐射之前的闪络电压.图7为电子辐射下真空沿面闪络示意图,简要描述了闪络起始和发展过程中电荷的输运过程.

电子辐射下真空沿面闪络的产生和发展涉及入射电子沉积/输运过程、直流电压下初始电子发射、二次电子输运/倍增过程以及电子辐射和直流电压的耦合作用,其过程较为复杂^[54,55,94].其本质是材料表面和表层入射电子、电极发射电子的产生、输运和相互作用问题.一方面,入射电子沉积在材料表层,会形成空间电荷区,建立反作用电场,影响阴极三结合点电场畸变,同时材料表面负电位会影响后续入射电子的运动轨迹以及电极初始发射电子、二次电子的迁移和倍增过程;另一方面,电子辐射期间,入射到材料表面的电子会受到直流电压的作用,向阳极方向迁移,同时,部分电子会充当闪络放电中的初始电子,影响闪络放电过程的发展;此外,还存在材料表面陷阱电荷的捕获和脱陷,解吸附气体分子碰撞电离和电子倍增等过程.

由于空间环境下绝缘材料真空沿面闪络过程的复杂性,其特性和机理尚不完全清楚.下一步需要深入开展系统地电子束辐射下沿面闪络实验研究;在

其基础上,结合理论模型,分析沿面闪络起始和发展过程中介质表面、表层或内部电荷的协同作用机制.

5 展望

(i) 多因素作用下介质内部电荷输运特性和机制.介质的电荷输运特性决定着材料的沿面闪络、击穿等宏观电气性能,然而多因素作用下介质的电荷输运特性和机制尚不完全清楚.空间电子束辐射、直流电压、高真空和极端温度等因素耦合作用下介质的电荷输运特性和机制较为复杂.目前研究多集中于单一变量,未充分考虑多因素协同作用对电荷输运特性的影响.

(ii) 电子束辐射下介质真空沿面闪络特性和机理.电子束辐射下绝缘介质直流沿面闪络电压远低于其在真空或气体中的闪络电压,是发展高电压、大功率航天器技术的关键科学问题.然而电子束辐射下真空沿面闪络特性和机理尚不完全清楚.目前,有关电子束辐射下绝缘介质的真空沿面闪络特性的研究,缺乏系统的实验结果和相关的理论.

(iii) 大功率部件的三维带电模型与仿真.随着卫星工作电压和功率需求的提高,高工作电压和高能电子耦合作用,对大功率部件高压太阳电池阵、驱动机构、大功率电缆等会产生更大的威胁.当前,介质深层充放电的数值仿真主要关注材料的一维特性或简单结构,对复杂部件带电模型和仿真的研究较少,无法满足大功率部件的工程需求.因此,有必要开展大功率部件的三维带电模型与仿真工作.

(iv) 空间绝缘复合材料的研究与应用.作为第三代绝缘材料,纳米复合材料是国际电气绝缘领域研究的前沿和热点.大量实验研究表明,纳米复合材料具有良好的空间电荷抑制作用;同时,可以改善聚合物材料的击穿、局部放电和沿面闪络等电气性能,这些特性有望使其成为缓解航天器带电的理想绝缘材料.由于聚合物形态学及其纳米电介质多层次结构的复杂性,对于纳米电介质多层次结构与宏观特性的关联性认识还不够清晰,应加快机理研究.

(v) 电子束辐射下材料微观参数表征与测量.电子束辐射下绝缘材料特征参数,如表面电阻率、体积电阻率、载流子有效迁移率、陷阱能级和密度等较难精确测量.采用表面电位衰减、空间电荷等易于测量的数据,结合模型,提取材料微观参数是较好的研究思路.电声脉冲法(PEA)可以观察介质内部空间电

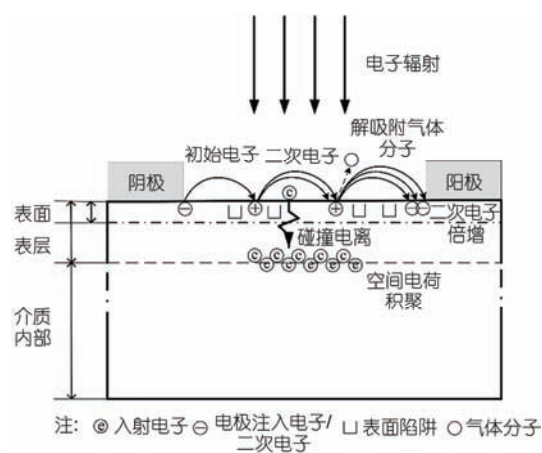


图7 电子辐射下真空沿面闪络示意图

Figure 7 Schematic of surface flashover in vacuum under electron radiation

荷分布,但由于技术条件的限制,待测试样的厚度不能太薄或太厚,而空间介质一般相对较厚,限制了其在空间介质领域的应用。应加快研制满足空间环境下使用的空间电荷原位测量装置。

参考文献

- 1 Lai S T. Fundamentals of Spacecraft Charging. Princeton: Princeton University Press, 2011
- 2 Li S T, Zheng X Q, Chen Y, et al. Fundamentals of Spacecraft Charging (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015 [李盛涛, 郑晓泉, 陈玉, 等. 航天器带电原理. 北京: 科学出版社, 2015]
- 3 Quan R H. Research of deep dielectric charging and discharging in spacecraft (in Chinese). Dissertation for Dcotoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2009 [全荣辉. 航天器介质深层充放电特征及其影响. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2009]
- 4 Amorim E, Levy L, Vacquie S. Electrostatic discharges on solar arrays: Common characteristics with vacuum arcs. J Phys D: Appl Phys, 2002, 35: L21-L23
- 5 Cho M. Charging and Discharge in Vacuum and Space. In: Proceedings of IEEE International on Vacuum Electronics Conference. Kitakyushu, 2007. 1-4
- 6 Gupta S B, Kalaria K R, Vaghela N P, et al. An overview of spacecraft charging research in India: Spacecraft plasma interaction experiments—SPIX-II. IEEE Trans Plasma Sci, 2014, 42: 1072-1077
- 7 Tafazoli M. A study of on-orbit spacecraft failures. Acta Astronaut, 2009, 64: 195-205
- 8 Qin X G. Research on numerical simulation and application of deep dielectric charging effect (in Chinese). Dissertation for Dcotoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2010 [秦晓刚. 介质深层带电数值模拟与应用研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2010]
- 9 Li S T, Li G C, Min D M, et al. Influence of radiation electron energy on deep dielectric charging characteristics of low density polyethylene (in Chinese). Acta Phys Sin, 2013, 62: 059401 [李盛涛, 李国倡, 闵道敏, 等. 入射电子能量对低密度聚乙烯深层充电特性的影响. 物理学报, 2013, 62: 059401]
- 10 Li G C, Min D M, Li S T, et al. Research of deep dielectric charging characteristics of polytetrafluoroethene irradiated by energetic electrons (in Chinese). Acta Phys Sin, 2014, 63: 209401 [李国倡, 闵道敏, 李盛涛, 等. 高能电子辐射下聚四氟乙烯深层充电特性. 物理学报, 2014, 63: 209401]
- 11 Xie F Y. 2008 Global orbit communication satellite failure (in Chinese). Satel TV IP Multimed, 2009, (3): 20-21 [谢丰奕. 2008 年全球多颗在轨通信卫星失效. 卫星电视与宽带多媒体, 2009, (3): 20-21]
- 12 Liu H. An overview of 2010 foreign satellite failure (in Chinese). Sapce Int, 2011, (5): 1-7 [刘豪. 2010 年国外卫星故障综述. 国际太空, 2011, (5): 1-7]
- 13 Liang B, Xu W F, Li C, et al. The status and prospect of orbital servicing in the Geostationary Orbit (in Chinese). J Astronaut, 2010, 31: 1-13 [梁斌, 徐文福, 李成, 等. 地球静止轨道在轨服务技术研究现状与发展趋势. 宇航学报, 2010, 31: 1-13]
- 14 Koons H C, Mazur J E, Selesnick R S, et al. The impacts of the space environment on space systems. In: Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Conference. Hanscom, 2000. 7-11
- 15 Fujii H, Hasegawa T, Osuga H, et al. Surface flashover on printed circuit boards in vacuum under electron beam radiation. In: XXIIInd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum-Matsue. 2006, 754-757
- 16 Li R, Liu J K, Xu Y M, et al. Study of surface charging and discharging effects on solar array drive assembly (in Chinese). Chin J Space Sci, 2014, 34: 360-366 [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. 空间科学学报, 2014, 34: 360-366]
- 17 Zhang Z L, Quan R H, Han J W, et al. Internal charging-discharging test and simulation for satellite components (in Chinese). Atom Energy Sci Technol, 2010, 44: 539-544 [张振龙, 全荣辉, 韩建伟, 等. 卫星部件内部充放电试验与仿真. 原子能与科学技术, 2010, 44: 539-544]
- 18 Masui H, Toyoda K, Cho M. Electrostatic discharge plasma propagation speed on solar panel in simulated Geosynchronous Environment. IEEE Trans Plasma Sci, 2008, 36: 2387-2394
- 19 Amorim E, Levy L, Vacquie S. Electrostatic discharges on solar arrays: Common characteristics with vacuum arcs. J Phys D: Appl Phys, 2002, (35): L21-L23
- 20 Hosoda S, Okumura T, Kim J, et al. 400 V Solar array technology for LEO plasma environment: Laboratory test results. In: Proceedings of the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, 2005. 1-6
- 21 Kawakita S, Kusawake H, Takahashi M, et al. Sustained arc between primary power cables of a satellite. In: Proceedings of the 2nd International Energy Conversion Engineering Conference. Rhode Island, 2004. 1-6

- 22 Hosoda S, Okumura T, Kim J, et al. Development of 400 V solar array technology for low earth orbit plasma environment. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2006, 34: 1986–1996
- 23 Quan R H, Zhang Z L, Han J W. Experimental simulation of deep discharging in typical floating conductor structures of spacecraft (in Chinese). *Spacecr Environ Eng*, 2011, 28: 21–24 [全荣辉, 张振龙, 韩建伟. 航天器典型悬浮导体结构深层放电现象的模拟试验研究. *航天器环境工程*, 2011, 28: 21–24]
- 24 Tang X J, Yi Z, Meng L F, et al. 3-D internal charging simulation on typical printed circuit board. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2013, 41: 3448–3452
- 25 Zhang Z J, Zheng X Q, Wu J, et al. DC surface flashover characteristics of polyimide in vacuum under electron beam irradiation. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2015, 22: 604–610
- 26 Zhang Z J, Miao J, Wang X Q, et al. Surface flashover characteristics of polyimide during electron beam radiation under DC voltage in vacuum (in Chinese). *High Volt Eng*, 2014, 40: 117–123 [张振军, 苗军, 王学强, 等. 真空、直流电压的电子辐射环境中聚酰亚胺材料的沿面闪络特性. *高电压技术*, 2014, 40: 117–123]
- 27 Yang C B. Research of deep charging and discharging monitoring aboard a GEO spacecraft (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2007 [杨垂柏. 地球同步轨道航天器深层充放电探测研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2007]
- 28 Garrett H B. The charging of spacecraft surfaces. *Rev Geophys Space Phys*, 1981, 19: 577–616
- 29 Garrett H B, Whittlesey A C. Spacecraft charging: An update. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2000, 28: 2017–2028
- 30 Feng W Q. An overview of the 10th conference of spacecraft charging technology (in Chinese). *Spacecr Environ Eng*, 2007, 24: 348–353 [冯伟泉. 第十届航天器带电技术会议(10th SCTC)论文综述. *航天器环境工程*, 2007, 24: 348–353]
- 31 Lu Y S. Study and measurement of conduction of spacecraft's surface material (in Chinese). *Chin Space Sci Technol*, 1986, (3): 1–7 [卢榆孙. 航天器表面材料电导的研究与测量. *中国空间科学技术*, 1986, (3): 1–7]
- 32 Deforest S E. Spacecraft charging at synchronous orbit. *J Geo Phys Res*, 1972, 77: 651–659
- 33 Yu S L. Status and prospect of space environment detection in China (in Chinese). *Satell Appl*, 2009, 17: 13–17 [余世里. 我国空间环境探测的现状与展望. *卫星应用*, 2009, 17: 13–17]
- 34 Ryschkewitsch M G. NASA-HDBK-4002A Mitigating in Space Charging Effects A Guideline. NASA Technical Handbook, National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2011
- 35 Ose T, Sanmaru Y, Cho M, et al. Emission spectral analysis of arc plasma on solar array in GEO environment. In: *Proceedings of International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. Matsue, 2006
- 36 Jiang C H, Zhang Z Y. Numerical simulation of spacecraft surface charging (in Chinese). *Spacecr Environ Eng*, 2008, 25: 143–147 [姜春华, 赵正予. 航天器表面充电的数值模拟. *航天器环境工程*, 2008, 25: 143–147]
- 37 Tian L C, Shi H, Li J, et al. Simulation of spacecraft surface charging and active control of spacecraft surface potential (in Chinese). *Spacecr Environ Eng*, 2012, 29: 144–149 [田立成, 石红, 李娟, 等. 航天器表面充电仿真计算和电位主动控制技术. *航天器环境工程*, 2012, 29: 144–149]
- 38 Lu Y S. Study of models for charging on spacecraft surface: II surface electrical potential models of spacecraft and their calculation (in Chinese). *Chin Space Sci Technol*, 1988, (4): 37–43 [卢榆孙. 航天器表面充电模型研究: II——航天器表面电势模型和计算. *中国空间科学技术*, 1988, (4): 37–43]
- 39 Lu Y S. Study of models for charging on spacecraft surface: I study of space electrical environment models (in Chinese). *Chin Space Sci Technol*, 1988, (1): 40–46 [卢榆孙. 空间电环境模型研究航天器表面充电模型研究. *中国空间科学技术*, 1988, (1): 40–46]
- 40 Cao H F, Liu S H, Sun Y J, et al. Characteristics plasma environment isolated conductor surface charging time domain (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 149401 [曹鹤飞, 刘尚合, 孙永卫, 等. 等离子体环境下孤立导体表面充电时域特性研究. *物理学报*, 2013, 62: 149401]
- 41 Cao H F, Liu S H, Sun Y J, et al. Area effect of isolated conductor's surface charging inside spacecraft (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 149402 [曹鹤飞, 刘尚合, 孙永卫, 等. 航天器内部孤立导体表面带电面积效应研究. *物理学报*, 2013, 62: 149402]
- 42 Li W Q, Hao J, Zhang H B. Surface potential dynamic characteristics of the insulating sample under high-energy electron irradiation (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 086801 [李维勤, 郝杰, 张海波. 高能电子辐照绝缘厚样品的表面电位动态特性. *物理学报*, 2015, 64: 086801]
- 43 Hodges J L, Dennison J R, Dekany J, et al. *In situ* surface voltage measurements of dielectrics under electron beam radiation. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2014, 42: 255–265
- 44 Dennison J R, Brunson J, Swaminathan P, et al. Methods for high resistivity measurements related to spacecraft charging. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2006, 34: 2191–2203
- 45 Evans A, Dennison J R. The effects of surface modification spacecraft charging parameters. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2012, 40: 305–310
- 46 Mai S L, Wang L, Li K, et al. Numerical simulation of the effects of secondary electron emission characteristic on material surface charging (in Chinese). *Vac Cryogenic*, 2006, 12: 87–90 [买胜利, 王立, 李凯, 等. 材料二次电子发射特性对表面充电过程影响的数值模拟研究. *真空与低温*, 2006, 12: 87–90]

- 47 Zhang J, Xie A G, Wang L, et al. Numerical calculation of the effects of secondary electron emission characteristic on surface charging (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2012, 32: 862–868 [张健, 谢爱根, 王玲, 等. 材料次级电子发射特性对表面充电影响的数值计算研究. *空间科学学报*, 2012, 32: 862–868]
- 48 Chen Y F, Yang S S, Qin X G, et al. Theory study of secondary electron emission defended on surface charge or insulator (in Chinese). *Vac Cryogenic*, 2010, 16: 167–170 [陈益峰, 杨生胜, 秦晓刚, 等. 介质材料带电对二次电子发射影响的研究. *真空与低温*, 2010, 16: 167–170]
- 49 Gao W, Sun G S, Yan P. Review of flashover mechanism in high vacuum (in Chinese). *High Volt Technol*, 2005, 31: 1–4 [高巍, 孙广生, 严萍. 高真空条件下绝缘闪络机理研究的评述. *高电压技术*, 2005, 31: 1–4]
- 50 Zhang G J, Zhao W B, Zheng N, et al. Research progress on surface flashover phenomena across solid insulation in vacuum (in Chinese). *High Volt Eng*, 2007, 33: 30–35 [张冠军, 赵文彬, 郑楠, 等. 真空中固体绝缘沿面闪络现象的研究进展. *高电压技术*, 2007, 33: 30–35]
- 51 Ni F Y. Surface flashover properties in vacuum of polystyrene nanodielectric composite (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2011 [倪凤燕. 聚苯乙烯纳米复合材料的真空沿面闪络性能的研究. 博士学位论文. 西安: 西安交通大学, 2011]
- 52 Nevrovsky V A. On mechanisms of a surface flashover of dielectrics in a strong electric field. In: *Proceedings of International Symposium Discharge and Electrical Insulation in Vacuum*. Santa Fe, 1990. 365–367
- 53 Miller H C. Surface flashover of insulators. *IEEE Trans Electr Insul*, 1989, 24: 765–786
- 54 Li G C, Li S T, Min D M, et al. Dynamic charge transport characteristics in polyimide surface and surface layer under low-energy electron radiation. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2016, 23: 2393–2403
- 55 Li G C, Li S T, Min D M, et al. Effect of electron irradiation on DC surface flashover of polyimide in vacuum. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2016, 23: 1846–1853
- 56 Lai S T. A critical overview of spacecraft charging mitigation methods. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2003, 31: 1118–1124
- 57 Purvis C K, Garrett H B, Whittlesey A C, et al. Design guidelines for assessing and controlling spacecraft charging effects. NASA Tech Paper 2361, NASA Lewis Research Center, Cleveland, OH, 1984
- 58 Cohen H A, Lai S T. Discharging the P78-2 satellite using ions and electrons. In: *Proceeding AIAA 20th Aerospace Science Meeting*. Orlando, 1982. AIAA-82-0266
- 59 Lai S T, Murad E. Mitigation of spacecraft charging by means of polar molecules. S.Patent, 6500275 B1, 2002
- 60 Laurent C, Teyssedre G, Roy S L, et al. Charge dynamics and its energetic features in polymeric materials. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2013, 20: 357–381
- 61 Sessler G M, Figueiredo M T, Leal Ferreira G F. Models of charge transport in electron-beam irradiated insulators. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2004, 11: 192–202
- 62 Baudoin F, Roy S Le, Teyssedre G, et al. Bipolar charge transport model with trapping and recombination: An analysis of the current versus applied electric field characteristic in steady state conditions. *J Phys D: Appl Phys*, 2008, 41: 025306
- 63 Min D M, Cho M, Khan A R, et al. Surface and volume charge transport properties of polyimide revealed by surface potential decay with genetic algorithm. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2012, 19: 600–608
- 64 Perrin C, Griseri V, Inguibert C, et al. Analysis of internal charge distribution in electron irradiated polyethylene and polyimide films using a new experimental method. *J Phys D: Appl Phys*, 2008, 41: 205417
- 65 Touzin M, Goeuriot D, Guerret-Piécourt C, et al. Electron beam charging of insulators a self-consistent flight-drift model. *J Phys D: Appl Phys*, 2006, 99: 114110
- 66 Jun I, Garrett H B, Kim W, et al. Review of an internal charging code, NUMIT. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2008, 36: 2467–2472
- 67 Sørensen J, Rodger D S, Ryden K A, et al. ESA's tools for internal charging. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2000, 47: 491–497
- 68 Pisacane V L. *The Space Environment and Its Effects on Space Systems*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008. 1–20
- 69 Huang J G, Chen D. A study of deep dielectric charging on satellites by computer simulation (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2004, (3): 392–397 [黄建国, 陈东. 卫星介质深层充电的计算机模拟研究. *地球物理学报*, 2004, (3): 392–397]
- 70 Huang J G, Chen D. A study of characteristics for deep dielectric charging on satellite (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2004, 53: 961–966 [黄建国, 陈东. 卫星中介质深层充电特征研究. *物理学报*, 2004, 53: 961–966]
- 71 Li X S, Jiao W X. Simulation and validation for CRRES satellite internal charging effects (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2007, 27: 309–314 [李学胜, 焦维新. CRRES 卫星内部充电的模拟计算与验证. *空间科学学报*, 2007, 27: 309–314]
- 72 Qin X G, He D Y, Wang J. Geant4-based calculation of electric field in deep dielectric charging (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2009, 58: 684–689 [秦晓刚, 贺德衍, 王骥. 基于 Geant4 的介质深层充电电场计算. *物理学报*, 2009, 58: 684–689]

- 73 Yi Z, Wang S, Tang X J, et al. Computer simulation on temperature-dependent internal charging of complex dielectric structure (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 125201 [易忠, 王松, 唐小金, 等. 不同温度下复杂介质结构内带电规律仿真分析. *物理学报*, 2015, 64: 125201]
- 74 Li G C, Li S T, Min D M, et al. Research of deep dielectric charging characteristics of ring structure irradiated by energetic electrons. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2015, 22: 2349–2358
- 75 Yan X J, Chen D, Huang J G. A space energetic electron environment model for spacecraft deep dielectric charging evaluation (in Chinese). *Spaceccr Environ Eng*, 2008, 25: 120–124 [闫小娟, 陈东, 黄建国, 等. 诱发卫星深层充电的高能电子环境模式研究. *航天器环境工程*, 2008, 25: 120–124]
- 76 Lai S T. A critical overview on spacecraft charging mitigation methods. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2003, 31: 1118–1124
- 77 Manners I, Balmain K. Materials and methods of charge dissipation in space vehicles. U.S. Patent, 6-361-869 B1, 2002
- 78 Bai Q Q, Wu J, Wang J F, et al. Influence of non-Linear filler on electrical parameter of polyimide (in Chinese). *Aerospace Mater Technol*, 2010, 40: 53–55 [白婧婧, 乌江, 王金锋, 等. 非线性添加剂对聚酰亚胺介电性能的影响. *宇航材料工艺*, 2010, 40: 53–55]
- 79 Wang J F, Zheng X Q, Li S T, et al. Internal charging protection technology of typical space polymer dielectric material (in Chinese). *J Beijing Univ Aeronaut Astronaut*, 2011, 37: 180–184 [王金锋, 郑晓泉, 李盛涛, 等. 典型空间聚合物介质的抗内带电改性技术. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37: 180–184]
- 80 Zheng X Q, Li S T, Wu J, et al. Modification technology on Anti-deep-charge of polymer dielectric for spacecraft (in Chinese). *Aerospace Mater Technol*, 2009, (5): 45–47 [郑晓泉, 李盛涛, 乌江, 等. 航天器用聚合物介质抗内带电改性技术. *宇航材料工艺*, 2009, (5): 45–47]
- 81 Perrin C, Griseri V, Laurent C, et al. Space charge detection in Kapton and PTFE polymer films by the open pulsed electro-acoustic method (in Chinese). *High Performance Polymers*, 2008, 20: 535–548
- 82 Liu X D, Zheng X Q, Zhang Y Q, et al. Study on space charge and dielectric character of dielectric after high energy electron radiation (in Chinese). *Adv Technol Electr Eng Energy*, 2007, 26: 55–59 [刘晓东, 郑晓泉, 张要强, 等. 高能电子辐照后高聚物内部空间电荷和介电性能研究. *电工电能新技术*, 2007, 26: 55–59]
- 83 Zheng X Q, Liu X D, Zhang Y Q, et al. The influence of high energy electron on dielectric electrical performance (in Chinese). *Proc Chin Soc Electr Eng*, 2007, 27: 32–37 [郑晓泉, 刘晓东, 张要强, 等. 高能电子束辐照对有机介质电气性能的影响. *中国电机工程学报*, 2007, 27: 32–37]
- 84 Zhang Z L, Quan R H, Han J W, et al. Internal charging-discharging test and simulation for satellite components (in Chinese). *Atom Energy Sci Technol*, 2010, 44: 538–544 [张振龙, 全荣辉, 韩建伟, 等. 卫星部件内部充放电试验与仿真. *原子能科学技术*, 2010, 44: 538–544]
- 85 Hoffmann R, Hodges J L, Hayes J, et al. Measurement of charging and discharging of high resistivity spacecraft materials by electron beams. In: *Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Orlando, 2009
- 86 Yang G M, Sessler G M. Radiation-induced conductivity in electron-beam irradiated insulating polymer films. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Electrets*. Berlin, 1991. 782–787
- 87 Min D M, Cho M, Li S T. Charge transport properties of insulators revealed by surface potential decay experiment and bipolar charge transport model with genetic algorithm. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2012, 19: 2206–2215
- 88 Min D M, Cho M, Khan A R, et al. Charge transport properties of dielectrics revealed by isothermal surface potential decay. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2012, 19: 1465–1473
- 89 Min D M, Cho M, Khan A R, et al. Revealing of surface and bulk resistivity of dielectrics by isothermal surface potential decay through experiment and simulation. In: *Proceedings of the 28th International Symposium on Space Technology and Science*. Okinawa, 2011
- 90 Roy S L, Baudoin F, Griseri V, et al. Charge transport modeling in electron-beam irradiated dielectrics a model for polyethylene. *J Phys D: Appl Phys*, 2010, 43: 315402
- 91 Perrin C, Griseri V, Laurent C. Measurement of internal charge distribution in dielectrics using the pulsed electro-acoustic method in non-contact mode. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2008, 15: 958–964
- 92 Griseri V, Fukunaga K, Maeno T, et al. Pulsed electro-acoustic technique applied to *in-situ* measurement of charge distribution in electron-irradiated polymers. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul*, 2004, 11: 891–898
- 93 Li S T, Li G C. Space charge and trap distributions of dielectric radiated by electrons (in Chinese). In: *Proceedings of the Second Conference of Radiation Physics Science (CRPS)*. Lanzhou, 2016 [李盛涛, 李国倡. 电子束辐射下绝缘介质空间电荷特性与陷阱参数分布. 见: 第二届全国辐射物理学术交流会. 兰州, 2016]
- 94 Li G C, Li S T, Min D M, et al. The charge transport characteristics of polyimide under electron beam and dc voltage. In: *Proceedings of the IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. Sydney, 2015. 120–123

Summary for “空间介质充放电研究现状及展望”

Dielectric charging research status and prospect

LI ShengTao* & LI GuoChang

State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

* Corresponding author, E-mail: sli@mail.xjtu.edu.cn

Dielectric charging phenomenon, caused by the interaction effect between space environment and spacecraft material, has a severe threat to the normal operation of spacecraft. Especially, the problem becomes more serious with the improvement of spacecraft operation voltage. An overview of dielectric charging research status, existing problems and prospect are reviewed. Firstly, dielectric charging phenomenon, hazards, research history and new challenges are introduced. There have five development stages: the initial attention, the focus of surface dielectric charging, the focus of deep dielectric charging, the rapid development of dielectric charging and new challenges and demands. The development demands of spacecraft dielectric in China are analysed. There have several insulation positions, which are easy to occur fault in practice. They include surface flashover on insulation material between solar cells of solar array, surface flashover on insulation material between electrodes of solar array drive assembly, the insulation material in cables and pulse discharge of circuit board. Secondly, the specific research status and existing problems of surface dielectric charging and deep dielectric charging are summarized from the following aspects: dielectric charging mechanism, dielectric charging mitigation and numerical simulation. Next, the top issues about dielectric charging experiments and material characteristics are introduced. They include *in-situ* surface potential decay measurement and characteristics of dielectric radiated by electrons, *in-situ* space charge measurement and material characteristics under electron radiation, surface flashover characteristics of dielectric radiated by electrons in vacuum. Two kinds of space charge *in-situ* measurement, short-circuit PEA (Pulsed Electro-Acoustic) and open PEA are introduced. At present, there do not have the mature *in-situ* space charge measurement setup under electron radiation in China, the difficult points in design and debugging are analysed. It is interesting of the surface flashover of dielectric under electron radiation. The latest experimental results indicated that the flashover voltage shows a distinctly different variation tendency under the two cases (after electron radiation and during electron radiation). The first case of after electron radiation, flashover voltage becomes higher than that without electron radiation. Because of the effect of deposited electrons in dielectric surface layer and the changes of trap distribution inside material. The trap distributions of polyimide after electron radiation are calculated based on surface potential decay measurement and Simmons theory. The results show that the shallow trap level increases slightly with the increase of electron energy (3–11 keV), ranging from 0.81–0.85 eV, while the deep trap level remains unchanged about 0.94 eV; the second case of during electron radiation, flashover voltage exhibited a dramatic drop from 26.9 kV (energy: 5 keV) to 10.5 kV (energy: 30 keV), due to the combined effect of incident kinetic electrons flowing to dielectric surface and deposited electrons in dielectric surface layer. Finally, the key scientific issues in the field of space dielectric charging are put forward and prospected based on the present research status.

space environment, dielectric charging effect, mechanism analysis and numerical simulation, dielectric charging experiment

doi: 10.1360/N972016-00092