

电子辐照下接地方式及工作电压 对聚醚酰亚胺内带电特性的影响

尚鹏辉¹, 张博¹, 王鹏¹, 郑晓泉¹, 贺博¹, 乌江^{1,2}

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安工程大学电子信息学院, 710048, 西安)

摘要: 为了探究高能电子辐照下接地方式及高工作电压与沉积电荷共同作用对介质内部充电性能的影响,提出了一种三维介质内带电评估方法。首先采用 Geant4 软件模拟高能电子与介质的作用过程得到对应的电荷沉积速率及剂量率,再通过有限元方法求解三维电荷输运方程得出介质内的电场分布,最后以聚醚酰亚胺为研究对象,计算了不同接地方式、工作电压下介质内电场分布。结果表明:电子辐照下,接地方式主要影响接地面积及沉积电荷到接地侧的最大传输距离;增大接地面积、减小电荷传输距离能有效降低介质内电场强度。工作电压对介质内电场的影响取决于施压方式及电压,当工作电压从 100 V 增大到 5 000 V,样品正面悬浮、底面加压($S-V_s$)或正面加压、底面悬浮(V_s-S)时,介质内电场强度最大值相差不大且均不随工作电压变化,稳定在 3.04×10^7 V/m;样品正面接地、底面加压($G-V_s$)时,内电场强度最大值从 2.1×10^7 V/m 减小至 1.78×10^7 V/m,而正面加压、底面接地(V_s-G)时,最大电场则从 2.11×10^7 V/m 增大到 2.50×10^7 V/m。综上,高工作电压下可以增大聚醚酰亚胺样品的接地面积并采用正面接地、底面加压的施压方式来降低其内部放电风险。

关键词: 高能电子辐照;介质内带电;接地方式;内电场强度

中图分类号: TM215.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202104017 **文章编号:** 0253-987X(2021)04-0154-08



OSID 码

Influence of Grounding Mode and Working Voltage on the Internal Charging Characteristics of Polyetherimide Under Electron Irradiation

SHANG Penghui¹, ZHANG Bo¹, WANG Peng¹, ZHENG Xiaoquan¹, HE Bo¹, WU Jiang^{1,2}

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

2. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: An evaluation method for the 3-D dielectric is proposed to explore the effects of grounding mode and interaction of high working voltage and deposited charge on the internal charging performance of the dielectric under electron irradiation. Firstly, Geant4 software is used to simulate the interaction process of high-energy electrons and the dielectric in the space environment to obtain the corresponding charge deposition rate and dose rate, and then the charge transport equation is solved by a finite element method to obtain the electric field distribution in the dielectric. Then, the distribution characteristics of electric field in polyetherimide under different grounding modes and working voltages are calculated. The results show that the

收稿日期: 2020-09-22。 作者简介: 尚鹏辉(1991—),男,博士生;乌江(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51607134)。

网络出版时间: 2020-12-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20201225.1450.002.html>

grounding mode mainly affects the grounding area and the maximum transmission distance between the deposited charge and the grounding electrode, which implies that, increasing the grounding area or reducing the charge transmission distance can effectively reduce the internal electric field of the dielectric. The influence of the working voltage on the internal electric field in the dielectric depends on the voltage applying method and the voltage value. When the voltage increases from 100 V to 5 000 V, the electric field in the dielectric remains unchanged at 3.04×10^7 V/m in the cases of S- V_s (i. e. suspending the irradiation side while applying voltage on the other side) and V_s -S (i. e. applying voltage on the irradiation side while suspending the other side); the maximum internal electric field strength decreases from 2.1×10^7 V/m to 1.78×10^7 V/m in the case of G- V_s (i. e. grounding the irradiation side while applying voltage on the other side), and increases from 2.11×10^7 V/m to 2.50×10^7 V/m in the case of V_s -G (i. e. applying voltage on the irradiation side while grounding the other side). It is concluded that the grounding area of polyetherimide sample can be increased under high working voltage, and the G- V_s voltage applying mode can be used to reduce the risk of internal discharge.

Keywords: energetic electron irradiation; deep dielectric charging; grounding mode; internal electric field intensity

空间环境与航天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,其中高能电子辐照下引起的介质深层充放电危害尤为严重^[1]。介质的深层充放电是指高能电子(0.1~10 MeV)穿透介质表面,沉积在介质内部建立内部电场,当内部电场强度超过材料击穿阈值时发生的静电放电现象^[2]。当前,针对典型航天介质的深层带电问题主要是通过建立相关模型计算高能电子辐照下介质内部的最大电场强度,将此电场强度与介质击穿阈值相比较来评估介质的放电风险^[3]。国外不同的研究机构开发了 NUMIT^[4]、DICTAT^[5]和 SPIS^[6]等软件来评估介质的放电风险。国内针对此问题也进行了较为深入的研究,例如李盛涛等通过建立一维电荷输运方程来模拟分析电子辐射下绝缘介质的充放电问题^[7-9]。李国倡等通过建立二维充放电模型计算了高能电子辐照下聚四氟乙烯的深层充电特性,指出最大电场出现在靠近接地处^[10]。Tang 等通过 COMSOL 软件建立并分析了三维印刷电路板模型充放电特征,结果表明采用一维模型计算得到的电场最大值比三维模型计算值小得多,三维模型更加精确^[11]。

当前研究主要集中在材料本身或者对电荷传输模型优化上,计算模型多采用正面辐照,背面接地形式。实际上,接地方式是影响介质内部电场的重要因素,沉积电荷将在内电场的作用下向接地侧泄放,接地的位置及接地方式都将影响介质内电场分布。于向前等报道了电子辐照下接地方式会严重影响介

质的充电电势,进一步影响内部电场的分布,但未能揭示其具体作用机理^[9],所以有必要进一步结合实际工况探明其影响机制。同时,高电压大功率航天器的发展也对航天介质材料带来了新的挑战^[12],高能电子辐照和高工作电压共同作用下电介质的内部充电特性尚不明晰。

本文从这两点出发,以航天介质材料聚醚酰亚胺(PEI)为研究对象,建立了三维电介质内带电评估方法。本方法先采用基于蒙特卡洛法的 Geant4 软件来模拟高能电子与材料的作用过程,再通过有限元方法求解三维电荷输运方程即可求出对应辐照条件下电介质内部的电场分布。最后采用此带电评估方法计算了不同接地方式及工作电压下聚醚酰亚胺内部电场的分布特征,并对其成因进行了理论分析。

1 三维电荷输运模型

高能电子辐照下,高能电子可能穿透屏蔽层沉积在电介质内部。电介质内部的净电荷密度主要取决于电荷沉积速率和泄放速率,而泄放速率取决于介质电导率,因此这是一个竞争过程。当电荷沉积速率大于电荷泄露速率时,对应的净电荷密度增大,反之则减小。由泊松方程可得,介质内电场幅值取决于净电荷密度和介质的介电常数,因此电子辐照下电介质内部电场分布特性可以通过求解电流连续性方程、欧姆定律和泊松方程这3个互相耦合的方程来获得^[13-15]。

1.1 电荷输运物理模型

方程(1)~(4)分别是电流连续性方程、欧姆定律、泊松方程、电场强度与电位的关系方程。

$$\frac{\partial q_s}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j}_c = q_d \quad (1)$$

$$\mathbf{j}_c = (\sigma_{\text{dark}} + \sigma_{\text{RIC}}) \mathbf{E} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{q_s}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (4)$$

式中: q_s 是介质内空间电荷密度, C/m^3 ; $\mathbf{j}_c$ 是传导电流密度, A/m^2 ; q_d 是电荷沉积速率, $\text{C}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; $\mathbf{E}$ 为电场强度, V/m ; σ_{dark} 是材料暗电导率, S/m ; σ_{RIC} 是辐射诱导电导率, S/m ; ϵ_0 为真空介电常数, F/m ; ϵ_r 是材料的相对介电常数; φ 为电位, V 。

1.2 辐射诱导电导率

研究表明,电子辐射过程中介质的电导率将有所增大,称之为辐射诱导电导率^[16],可由以下公式表示

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{RIC}} &= k_{\text{RIC}}(T)(\dot{D})^{\Delta(T)} \\ \Delta(T) &= [1 + T/T_{\text{RIC}}]^{-1} \\ k_{\text{RIC}}(T) &= k_{\text{RIC0}} k_{\text{RIC1}}^{\Delta(T)} [T/T_{\text{RIC}}]^{3/2-2\Delta(T)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $\dot{D}$ 是辐射剂量率, rad/s ; k_{RIC} 是比例系数, S/m ; $\Delta(T)$ 是与材料本征性质和温度有关的指数系数,一般设定为 $0.5 \sim 1$,取决于材料中的陷阱能态分布; T_{RIC} 是温度常数, K ; k_{RIC0} 与载流子的迁移率成正比; k_{RIC1} 与温度有关,取决于导带中载流子的概率。

1.3 Poole-Frenkel 效应

暗电导率可以通过 Poole-Frenkel 电导率公式^[10]进行计算。

$$\sigma_{\text{dark}} = \frac{\sigma_0}{3} \left[2 + \cosh \left(\frac{\beta_F \sqrt{E}}{2k_B T} \right) \right] \quad (6)$$

式中: σ_0 是材料本征电导率, S/m ; k_B 是玻尔兹曼常数; T 是热力学温度, K ; e 为电子电量; β_F 为弗兰克尔系数,公式为

$$\beta_F = \sqrt{\frac{e^3}{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}}$$

首先通过公式(5)(6)求得介质的辐射诱导电导率和暗电导率,代入式(2),采用有限元法联立求解式(1)~(4)即可求出电介质内部各个位置电荷及电场分布随辐照时间的变化。分析发现,模型的关键在于获得介质的本征电导率 σ_0 以及电荷沉积速率 q_d 和辐射剂量率 $\dot{D}$ 这两个与电子辐射过程密切相关的物理量,其值的准确性直接影响了内部电场的计算结果。由此本文采用表面电位衰减方法来测量

聚醚酰亚胺的本征电导率;采用欧洲核子中心开发的基于蒙特卡罗方法的物理模拟软件 Geant4^[17]来模拟高能电子和样品的作用过程,然后通过有限元方法联立求解三维电荷输运方程。

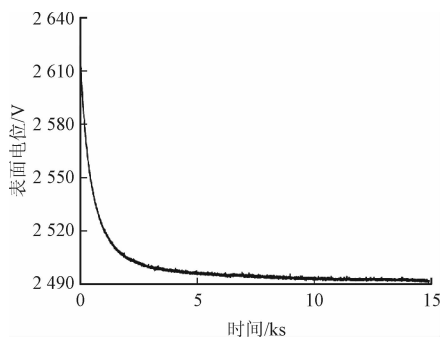
2 模型仿真参数

2.1 PEI 本征电导率

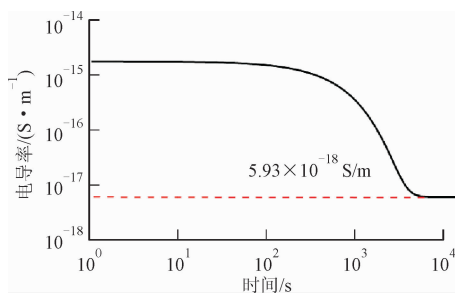
材料的本征电导率是介质内带电分析中的一个关键参数。研究表明,采用电荷衰减法测定这类高绝缘性能材料的电导率精度更高,更适用于典型航天介质电导率的测定^[18]。为了减小辐射诱导电导率的影响,采用表面电位衰减法来进行 PEI 电导率的测定。电导率与表面电位的关系如下^[19]

$$\frac{d\varphi_s}{dt} = -\frac{\varphi_s \sigma(\varphi_s)}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (7)$$

表面电位衰减和电导率的实验结果如图 1 所示。



(a) 表面电位



(b) 电导率

图 1 PEI 表面电位衰减和电导率的测定

Fig. 1 Determination of surface potential and conductivity of PEI

2.2 仿真参数设定

在 Geant4 中,构建了一个尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 PEI 样品模型,整体置于真空环境中,将其划分为 $100 \times 100 \times 20$ 个体积微元来探测及记录辐照过程中的电荷沉积及能量沉积。经验及 CRRES 观测数据显示,当入射电子束流密度小于 1

$\times 10^{-9} \text{ A/m}^2$ 时很少发生介质内部放电事件^[20],因此在本文中设定入射电子束流密度为 10 倍阈值强度,即 $1 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2$ 来探究接地方式及工作电压对内部电场的影响。将入射电子个数设定为 3×10^6 个,初始能量设定为 0.3 MeV,粒子源为一平面源,尺寸 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,置于样品正上方 10 cm 处,电子沿样品法线方向入射。在 COMSOL 中,同

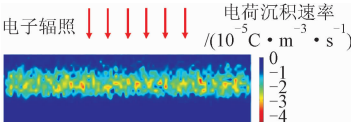
表 1 计算中应用的参数

Table 1 Parameters in the calculation

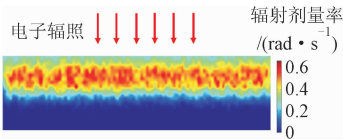
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\sigma_0/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	ϵ_r	$\Delta(T)$	$k_{\text{RIC0}}/(\text{S} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1})$	k_{RIC1}
1.27	5.93×10^{-18}	2.6	0.718	1.6×10^{-14}	4.6×10^{-5}

2.3 电荷沉积速率和辐射剂量率

图 2 所示为设定辐照条件下,PEI 内部电荷沉积速率和辐射剂量率的分布。由图 2 可见,当初始能量为 0.3 MeV 时,入射电子未能穿透样品,主要沉积在样品的中部,最大电荷沉积速率为 $-4.61 \times 10^{-5} \text{ C}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。辐射能量也主要沉积在样品靠近辐照面的上半部分,辐射剂量率最大值为 0.67 rad/s ,样品底部未检测到辐射剂量。



(a) 电荷沉积速率



(b) 辐射剂量率

图 2 PEI 样品中电荷沉积速率及剂量率的分布
Fig. 2 Distributions of charge deposition rate and dose rate in PEI samples

3 接地方式对 PEI 内部电场分布的影响

3.1 接地方式及内电场计算结果

图 3 为 4 种接地方式对介质内带电特性的影响,分别为底面接地、正面接地、侧面接地、两面接地。然后设定对应的边界条件采用有限元方法来求解传输模型方程组。

不同接地方式下 PEI 内部电场随辐照时间的变化如图 4 所示。可以看出,介质内部电场最大值随辐照时间增加逐渐增大,最终趋于稳定;当辐照条

样建立了 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的样品模型,通过添加偏微分方程组分别导入三维电荷输运模型,定义相关参数,将 Geant4 中计算得到的电荷沉积速率及剂量率采用插值方式导入计算模型中,根据具体接地方式及工作电压设置微分方程组对应的边界条件,进行网格剖分求解器设置后即可进行求解。计算中应用的主要参数如表 1 所示。

件相同时,样品侧面接地时内部电场强度最大,达到 $7 \times 10^7 \text{ V/m}$;正面及底面接地次之,且这 2 种情况下内部电场值基本相同,其值为 $3.8 \times 10^7 \text{ V/m}$;两面接地时内部电场最小,稳定在 $3.5 \times 10^7 \text{ V/m}$ 。

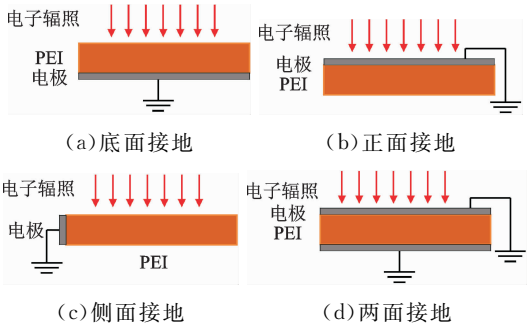


图 3 PEI 样品 4 种接地方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of four grounding modes for PEI samples

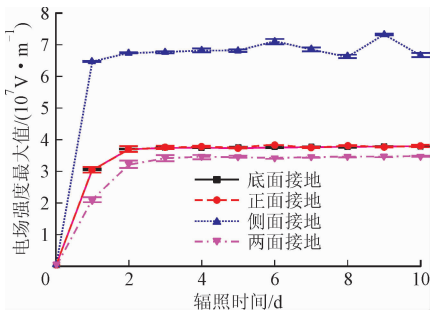


图 4 4 种接地方式下 PEI 内部最大电场强度与辐照时间的关系
Fig. 4 The relationship between the maximum internal electric field intensity in PEI and irradiation time under the four grounding modes

3.2 计算结果分析

分析认为,电子辐照下,介质中的沉积电荷将以较低的电导率向接地侧传输。内部电场强度主要取决于净电荷密度,而净电荷密度由电荷沉积速率和

电荷泄放速率共同决定。当沉积速率大于泄放速率时,介质内部净电荷密度增大,内部电场增强,反之则减小,当两者速率相同时内部电荷保持动态平衡,电场强度也趋于稳定。仿真计算中忽略了电极的厚度,辐照条件相同,所以4种接地方式下电荷沉积速率相同,造成这种差异的主要原因在于电荷泄放速率不同。

进一步分析4种接地方式可得:底面接地时,接地面积为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,沉积电荷向底面传输,最大传输距离为试样厚度,即 1 mm ;正面接地时,接地面积为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,沉积电荷向辐照面传输,最大传输距离为 1 mm ;侧面接地时,接地面积为 $10\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,沉积电荷向左侧接地面传输,最大传输距离为 10 mm ;两面接地时,接地面积为 $2\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,沉积电荷可以向辐照面及底面传输,最大传输距离应小于 1 mm 。从电荷传输来看,接地面积越大,电荷向接地侧的传输距离越短,越有利于电荷的泄放。由此4种接地方式对应的电荷泄放能力应为两面接地>底面接地=正面接地>侧面接地,相同辐照条件下,内部电荷积聚量及电场强度关系为侧面接地>底面接地=正面接地>两面接地,这与计算结果一致。

4 工作电压对 PEI 内部电场分布的影响

4.1 4种工况下电压对内电场的影响

如图5所示,考虑了4种工况:A($S-V_s$,正面悬浮,底面加压),B($G-V_s$,正面接地,底面加压),C(V_s-S ,正面加压,底面悬浮),D(V_s-G ,正面加压,底面接地)。设定对应的边界条件,计算辐照时间为 24 h ,工作电压为 100 、 500 、 $1\ 000$ 、 $5\ 000\text{ V}$ 时PEI样品内部的最大电场,计算结果如图6所示。

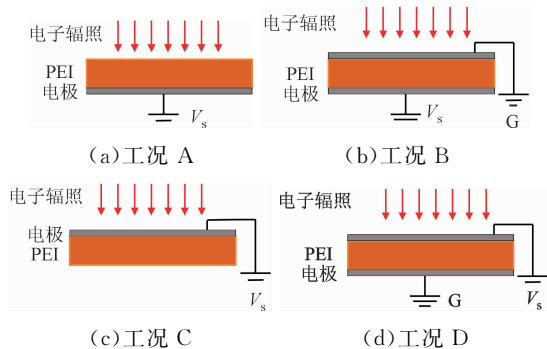


图5 PEI样品4种工况示意图

Fig. 5 Schematic diagram of four working modes of PEI samples

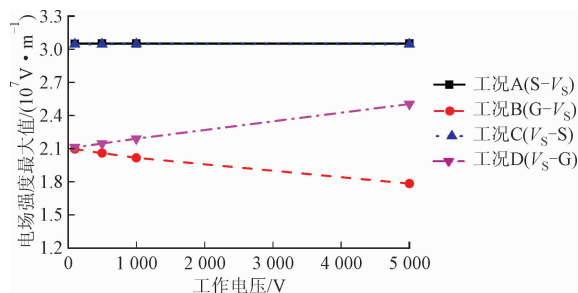


图6 4种工况下PEI样品内部电场强度最大值与工作电压的关系

Fig. 6 The relationship between the maximum internal electric field intensity and the working voltage of PEI samples under four working modes

如图6所示,当外加电压从 100 V 提高到 $5\ 000\text{ V}$ 时,A、C两种工况下,PEI内部最大电场基本相同且最大值保持在 $3.04\times 10^7\text{ V/m}$ 左右,不随电压变化而变化;工况B下,PEI内部最大电场强度由 $2.1\times 10^7\text{ V/m}$ 逐渐减小至 $1.78\times 10^7\text{ V/m}$;工况D下,最大电场强度由 $2.11\times 10^7\text{ V/m}$ 增大到 $2.50\times 10^7\text{ V/m}$ 。初步来看采用工况B有利于降低PEI内部电场强度。

4.2 电压施加方式对内电场的影响

分析4种工况差异可得:A、C工况下PEI样品一面悬空,另一面加压,工作电压形成的电场施加在高压极和无穷远处之间,距离无穷远,所以电场趋近于零。这就导致了样品内部电场强度主要由沉积电荷形成的电场决定,基本不随外加电压的变化而变化,这与计算结果一致;B、D两种工况下,工作电压施加在高压极与接地极之间,由电压电场关系得, $E=V_s/d$,其中 E 为外施电场, V_s 为工作电压, d 为样品厚度,取 1 mm ,因此当工作电压为 100 V 时,外施电场为 $1\times 10^5\text{ V/m}$;当工作电压为 $5\ 000\text{ V}$ 时,外施电场为 $5\times 10^6\text{ V/m}$ 。在B、D工况下,内部电场由沉积电荷电场和外施电压电场共同决定。这就可以解释为何外施电压变化对工况A、C基本无影响,但不能说明为何对工况B、D作用相反。

4.3 B、D工况下工作电压对内电场的影响

4.3.1 工作电压为 100 V 及 $5\ 000\text{ V}$ 时内电场分布 为了进一步探明工况B、D的差异,计算了辐照时间为 24 h ,电压为 100 V 和 $5\ 000\text{ V}$ 时PEI内部的电场强度分布,结果如图7所示。

计算结果显示,在B、D两种工况下,沉积电荷电场和外施电压电场共同作用使PEI内部形成两个反向电场区域。当工作电压为 100 V 时,2种工

况电场强度分布差异不大,从辐照面到底面均呈现先减小后增大的特点,最小值出现在样品的中部,最大值出现在辐照面附近,分别为 2.1×10^7 V/m 和 2.11×10^7 V/m。可见,此时外加电场对内电场影响较小,沉积电荷电场起主导作用。

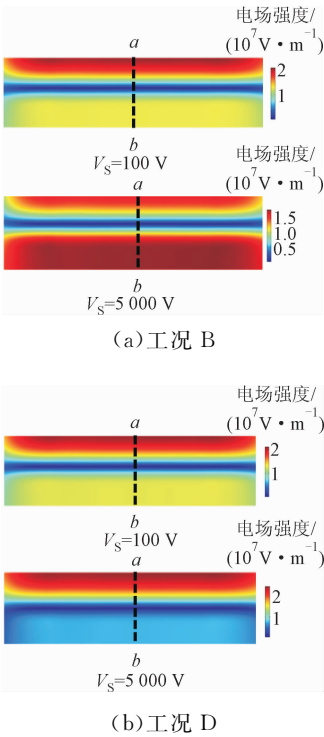
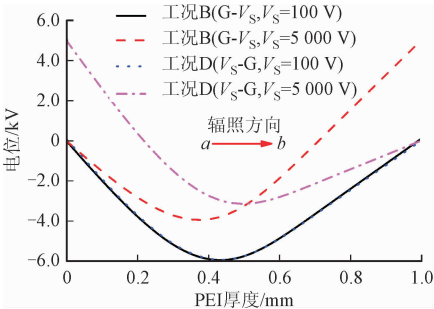


图 7 B、D 两种工况下 PEI 内部电场分布
Fig. 7 The electric field distributions inside PEI under B and D working modes

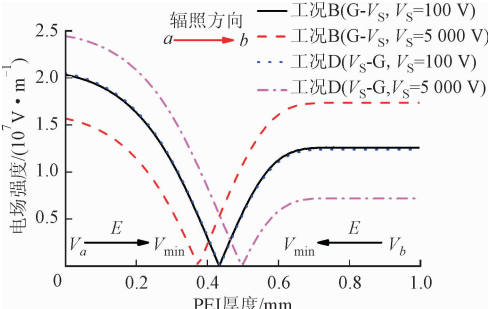
工作电压为 5 000 V 时,PEI 内部电场同样呈现先减小后增大的特点,其中工况 B 下电场强度最大值为 1.78×10^7 V/m,出现在样品的底部,即施加工作电压处;工况 D 下电场强度最大值为 2.50×10^7 V/m,出现在辐照面附近,亦是施加电压处。此时最大电场出现的位置与 100 V 时不同,外加电压电场对内部电场的影响显著增强。

图 7 中从 a 点到 b 点的电位及电场分布如图 8 所示。

分析图 8a 可得,2 种工况下,从 a 点到 b 点电位先减小后增大,即从 V_a 减小到 $V_{\min}$ 再增大到 V_b ,所以 PEI 内部形成两个反向电场区域,一个由 $V_a \rightarrow V_{\min}$ 记作 E_1 ,另一个为 $V_b \rightarrow V_{\min}$ 记作 E_2 ,分界点即为电位最小值 $V_{\min}$ 处,这与图 8b 的电场分布相对应。另一方面,当 V_s 为 100 V 时,2 种工况下电位及电场强度分布基本一致;当 V_s 增大到 5 000 V 时,如图 8b 所示,工况 B 下, E_1 减小, E_2 增大, $V_{\min}$ 向 a 点移动;工况 D 下, E_1 增大, E_2 减小, $V_{\min}$ 向 b



(a) PEI 内部从 a 点到 b 点的电位分布



(b) PEI 内部从 a 点到 b 点的电场强度分布

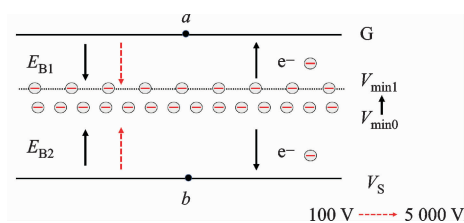
图 8 B、D 两种工况下 PEI 内部 a 点到 b 点的电位及电场分布

Fig. 8 The potential and electric field distributions from point a to point b inside PEI under B and D working modes

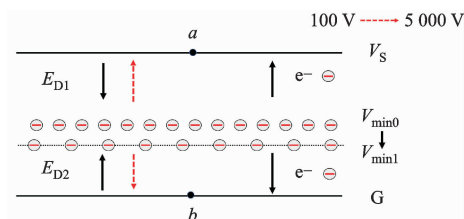
点移动。

4.3.2 B、D 工况下电场差异成因分析 为了便于分析,图 9 给出了 B、D 工况下电压从 100 V 增大到 5 000 V 时 PEI 内部电场变化示意图,其中黑色箭头表示方向,红色箭头表示变化(增大或减小); E_{B1} 、 E_{B2} 和 E_{D1} 、 E_{D2} 分别表示 B、D 工况下样品内部的两个反向电场; $V_{\min0}$ 和 $V_{\min1}$ 分别表示 $V_s = 100$ V 和 $V_s = 5 000$ V 时内部电位的最小值。

从电荷运输的角度来看,对于工况 B,当辐照条件不变时,PEI 内部电荷沉积速率不变,沉积电荷在 E_{B1} 的作用下向接地侧移动,在 E_{B2} 的作用下向 V_s 侧移动;当电荷转移速率和电荷沉积速率相同时,内部达到动态平衡,此时电场达到稳定。当工作电压 V_s 从 100 V 增大到 5 000 V 时, E_{B2} 增大,由 Poole-Frenkel 效应得,此时 E_{B2} 区域电荷泄放速率增大,而辐射条件不变,故电荷沉积速率不变,此区域内电荷动态平衡被打破,净电荷密度减小,所以 $V_{\min0}$ 的幅值将减小。 $V_{\min0}$ 幅值减小对应 E_{B1} 减小,此区域内电荷泄放速率降低,而电荷沉积速率不变,所以静电荷密度增加,一个幅值较低的 $V_{\min1}$ 将在此区域内出现,表现为电位最低点的上移,与图 8b 中 $V_{\min}$ 左



(a) 工况 B



(b) 工况 D

图9 B、D工况下外施电压增大时PEI内电场变化示意图
Fig. 9 The changes of the internal electric field in PEI under B and D working modes when applied voltage increases

移一致。

同理,对于工况D,当工作电压 V_S 从100 V增大到5 000 V时, E_{D1} 增大,由Poole-Frenkel效应得,此时 E_{D1} 区域电荷泄放速率增大,而辐射条件不变,电荷沉积速率不变,故此区域内电荷动态平衡被打破,净电荷密度减小,所以 V_{min0} 的幅值将减小。 V_{min0} 幅值减小对应 E_{D2} 减小,导致此区域内电荷泄放速率降低,而电荷沉积速率不变,所以静电荷密度增加,一个幅值较低的 V_{min1} 将在此区域内出现,表现为电位最低点的下移,与图8b中 V_{min} 右移一致。

5 结 论

本文采用一种可行的三维介质内带电评估方法,以典型航天介质材料聚醚酰亚胺为研究对象,重点研究了高能电子辐照下接地方式及工作电压对介质内电场分布的影响,得出以下结论。

(1)电子辐照下接地方式主要影响接地面积及沉积电荷到接地侧的最大传输距离;增大接地面积并减小最大传输距离能够有效降低PEI内电场强度。在设定的辐照条件下,当样品两面接地时,电场强度最小为 3.5×10^7 V/m。

(2)工作电压对内电场的影响与其施加方式有关,当样品辐照面或底面既不接地也不加压(A、C工况)时,PEI内电场保持不变;当样品一面接地一面加压(B、D工况)时,内电场受工作电压的影响(电压从100 V升高到5 000 V时),表现为B工况

下内电场强度从 2.1×10^7 V/m减小至 1.78×10^7 V/m,D工况下电场强度从 2.11×10^7 V/m增大到 2.50×10^7 V/m。

(3)电子辐照下提升工作电压需综合考虑介质外加电压电场及沉积电荷电场的共同作用,同时结合实际工况进行评估,选取最有利于降低介质内电场的工作方式。

参考文献:

- [1] 李盛涛, 李国倡. 空间介质充放电研究现状及展望[J]. 科学通报, 2017, 62(10): 990-1003.
LI Shengtao, LI Guochang. Dielectric charging research status and prospect [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(10): 990-1003.
- [2] 原青云, 王松. 一种新的航天器外露介质充电模型[J]. 物理学报, 2018, 67(19): 208-217.
YUAN Qingyun, WANG Song. A new charging model for exposed dielectric of spacecraft [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(19): 208-217.
- [3] 王松, 易忠, 唐小金, 等. 地球同步轨道环境下外露介质深层带电仿真分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 687-692.
WANG Song, YI Zhong, TANG Xiaojin, et al. Analysis of exposed dielectric bulk charging in geosynchronous orbit environment via computer simulation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 687-692.
- [4] JUN I, GARRETT H B, KIM W, et al. Review of an internal charging code, NUMIT [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5): 2467-2472.
- [5] 张振龙, 贡顶, 韩建伟, 等. 航天器内部充电风险评估模型的问题及改进[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(1): 180-186.
ZHANG Zhenlong, GONG Ding, HAN Jianwei, et al. Correction of spacecraft internal charging threat assessment model [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(1): 180-186.
- [6] ROUSSEL J F, ROGIER F, DUFOUR G, et al. SPIS open-source code: methods, capabilities, achievements, and prospects [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5): 2360-2368.
- [7] 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[J]. 物理学报, 2013, 62(5): 593-602.
LI Shengtao, LI Guochang, MIN Daomin, et al. Influence of radiation electron energy on deep dielectric charging characteristics of low density polyethylene [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(5): 593-602.

- [8] 黄建国, 陈东. 卫星介质深层充电的计算机模拟研究 [J]. 地球物理学报, 2004, 47(3): 392-397.
HUANG Jianguo, CHEN Dong. A study of deep dielectric charging on satellites by computer simulation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(3): 392-397.
- [9] 于向前, 宋思宇, 陈鸿飞, 等. 木星轨道卫星深层介质充电电势仿真研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(6): 995-1001.
YU Xiangqian, SONG Siyu, CHEN Hongfei, et al. Simulation research on satellite deep dielectric charging potential in Jupiter orbit [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(6): 995-1001.
- [10] 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 [J]. 物理学报, 2014, 63(20): 454-461.
LI Guochang, MIN Daomin, LI Shengtao, et al. Research of deep dielectric charging characteristics of polytetrafluoroethene irradiated by energetic electrons [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(20): 454-461.
- [11] TANG Xiaojin, YI Zhong, MENG Lifei, et al. 3-D internal charging simulation on typical printed circuit board [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(12): 3448-3452.
- [12] PAN Shaoming, MIN Daomin, WANG Xiaoping, et al. Effect of electron irradiation and operating voltage on the deep dielectric charging characteristics of polyimide [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(2): 549-556.
- [13] 李盛涛, 闵道敏, 郑晓泉, 等. 聚酰亚胺电荷捕获和输运特性的研究 [C]//第十四届全国工程电介质学术会议论文集. (2013-10-17) [2020-07-02]. <http://www.d.wanfangdata.com.cn/conference/8211377>.
- [14] 秦晓刚. 介质深层带电数值模拟与应用研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2010: 29-32.
- [15] 原青云, 孙永卫, 张希军. 基于电荷守恒定律的航天器内带电三维仿真简化模型 [J]. 物理学报, 2019, 68(19): 151-160.
YUAN Qingyun, SUN Yongwei, ZHANG Xijun. A three-dimensional simplified simulation model based on charge conservation law for internal charging in spacecraft [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(19): 151-160.
- [16] 王燕, 张振龙, 全荣辉, 等. 用于深层充电评估的卫星介质电导率测量技术研究 [J]. 航天器环境工程, 2012, 29(4): 425-429.
WANG Yan, ZHANG Zhenlong, QUAN Ronghui, et al. Measurement of dielectric conductivity for assessment of deep charging [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(4): 425-429.
- [17] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. Geant4: a simulation toolkit [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research: Section A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, 506(3): 250-303.
- [18] DENNISON J R, BRUNSON J, SWAMINATHAN P, et al. Methods for high resistivity measurements related to spacecraft-charging [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(5): 2191-2203.
- [19] 高宇, 杜伯学. 采用表面电位衰减法表征高压交联聚乙烯电缆绝缘中空间电荷的输运特性 [J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 2097-2103.
GAO Yu, DU Boxue. Characterizing space charge transportation in HV XLPE cable insulation based on surface potential decay measurement [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 2097-2103.
- [20] MICHAEL G, RYSCHKEWITSCH. Mitigating in space charging effects: a guideline NASA-HDBK-4002A [S]. Washington DC: USA, NASA, 2011.

(编辑 亢列梅)