

# 高能电子辐射下聚四氟乙烯深层充电特性\*

李国倡 闵道敏 李盛涛<sup>†</sup> 郑晓泉 茹佳胜

(西安交通大学, 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

(2014年4月14日收到; 2014年6月4日收到修改稿)

介质深层充放电现象是诱发航天器异常故障的重要因素之一。分析了高能电子辐射下介质内部电荷沉积、能量沉积特性和电导特性, 考虑了真空与介质界面电荷对电场分布的影响, 建立了介质二维深层充电的物理模型, 并基于有限元方法实现了数值计算。计算了高能电子辐射下聚四氟乙烯的深层充电特性。结果表明: 真空环境下, 介质的表面存在较弱的反向电场, 随着介质深度增大, 电场减小至零, 随后逐渐增大, 最大值出现在靠近接地附近, 但在接地点, 电场存在小幅降低。分析了不同辐射时间下(1 h, 1 d, 10 d 和 30 d), 介质内部最大电位和最大电场的时空演变特性。随着辐射时间的增加, 最大电位由  $-128 \text{ V}$  增加至  $-7.9 \times 10^4 \text{ V}$ , 最大电场由  $2.83 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$  增加至  $1.76 \times 10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。讨论了入射电子束流密度对最大电场的影响, 典型空间电子环境( $1 \times 10^{-10} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ )下, 电子辐照 10 d 时, 介质内部最大电场为  $2.95 \times 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。而恶劣空间电子环境( $2 \times 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ )下, 电子辐射 42 h, 介质内部最大电场即达到  $10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ , 超过材料击穿阈值(约为  $10^8 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ ), 极易发生放电现象。该物理模型和数值方法可以作为航天器复杂部件多维电场仿真的研究基础。

**关键词:** 介质深层充电, 聚四氟乙烯, 高能电子辐射, 二维电场仿真

**PACS:** 94.05.Hk, 94.05.Jq, 52.25.Mq

**DOI:** 10.7498/aps.63.209401

## 1 引言

高能电子与航天器介质材料相互作用引起的介质深层充放电现象, 是威胁航天器安全运行的重要因素之一。在对 299 例航天器故障分类中<sup>[1]</sup>, 由静电放电(ESD)引起的异常故障占 54.2%, 而这部分故障中, 45.7% 是由介质深层充放电引起的。介质深层充放电<sup>[2]</sup>是高能电子穿透介质表面, 沉积在介质内部, 建立内电场, 当内电场超过材料击穿阈值时发生 ESD 的现象。放电产生的能量和电磁脉冲会破坏航天器的电子控制系统和电源系统。

1990—1991 年, 在 CRRES 卫星上进行的一系列内带电试验<sup>[3,4]</sup>是介质深层带电研究的分水岭。自此, 对内带电问题的研究和报道逐渐增多。国外较早开展介质深层充放电的理论研究和数值仿真, 开发出了介质深层带电仿真模拟软件。Frederickson<sup>[5,6]</sup>开发了 NUMIT 软件, 用于计算介质内

部的一维电场; CERN (欧洲核研究组织)<sup>[5,7]</sup>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, 分析电子在介质内部的沉积特性。ESA (欧洲空间局)<sup>[5,8]</sup>开发出了 DICTAT (介质深层充电风险评估工具), 可以建立简单柱体或平面的一维模型, 计算电子在介质内部的沉积和运行, 得出最大电场。在国内, 黄建国等<sup>[9–12]</sup>计算了聚四氟乙烯和环氧树脂的介质深层充电特性(一维分布)。李学胜和焦维新<sup>[13]</sup>基于 GEANT4 软件计算了航天器内部充电产生的电场。秦晓刚等<sup>[7,14]</sup>建立了 GEANT4-RIC 模型, 研究了平板介质一维深层带电的数值模拟方法。前期工作中<sup>[15]</sup>, 我们研究了入射电子能量对 LDPE 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(一维分布)的分布特性。

在前期研究基础上, 本文主要研究平板形结构

\* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 51337008)和国家自然科学基金(批准号: 11275146)资助的课题。

† 通讯作者。E-mail: sli@mail.xjtu.edu.cn

聚四氟乙烯(PTFE)材料的电荷输运特性。建立了高能电子辐射下平板形结构的介质二维深层充电物理模型。计算中考虑了真空与介质界面电荷对电场分布的影响; 分析了介质内部空间电荷、表面电位和最大电场的时空演变特性; 讨论了束流密度对最大电场的影响。该模型和方法具有一定普适性, 可以推广应用到具有轴对称结构的复杂部件的多维电场分析。

## 2 高能电子辐射下介质二维深层充电物理模型

卫星部件的典型构件主要有平板形(太阳帆板、集成电路板等)和圆柱形(如电缆)两种。本文主要研究高能电子辐射下平板形构件的二维深层充电特性。图1给出了高能电子辐射下平板形构件的深层充电示意图, 其中图1(a)是电子辐射示意图; 图1(b)是内部电荷沉积、运输和积聚过程示意图, 其电子入射方向与(a)中是一致的, 即从正上方垂直入射。

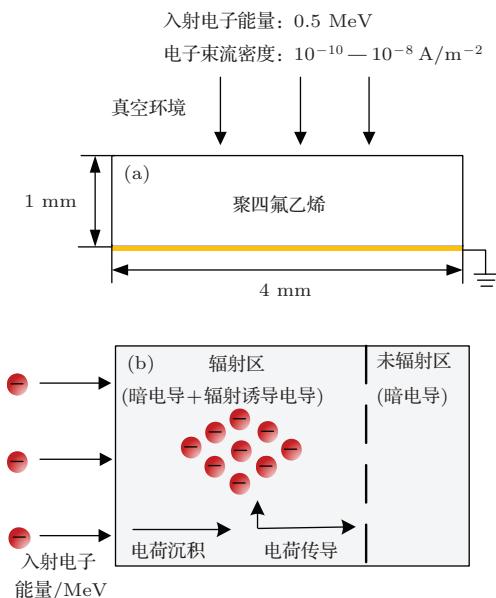


图1 高能电子辐射下平板形构件的深层充电示意图  
(a) 平板形构件电子辐射示意图; (b) 平板形构件电荷沉积、运输和积聚过程示意图

计算中考虑了真空与介质界面电荷对电场分布的影响。入射电子能量和电子束流密度主要参考地球同步轨道(GEO)发生介质深层充放电的参数<sup>[16]</sup>, 电子能量取0.5 MeV, 电子束流密度为 $10^{-10} - 10^{-8} \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ 。绝缘材料选择航天器常用材料(PTFE), 尺寸为 $4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ , 如图1(a)所示。

高能电子辐射下, 电荷在介质内部的运动主要分为两个物理过程, 即电荷的沉积过程和电荷的传导过程, 如图1(b)所示。入射电子在介质内部受到弹性散射或非弹性散射等物理过程的作用, 能量逐渐转移给材料的靶原子, 电荷逐渐沉积。此外, 由于材料自身的暗电导特性和高能电子辐射引起的辐射诱导电导, 会加快电荷的传导。当电荷沉积速率大于电荷泄漏速率时, 介质内部将积聚空间电荷, 空间电荷的积聚量会决定电场的大小和分布。

### 2.1 电荷沉积和能量沉积特性

当入射电子穿入介质材料时, 与靶原子相互作用, 其能量逐渐减小, 产生电荷的沉积过程; 同时, 靶原子吸收辐射能量会发生电离和电子激发过程, 能量的沉积会导致材料电导率增大。

考虑电子垂直入射的情况, 电子最大射程表达式为<sup>[17]</sup>

$$R = \frac{\alpha W_0}{\rho} \left( 1 - \frac{\beta}{1 + \gamma E_0} \right), \quad (1)$$

其中,  $R$ 是入射电子在介质中的最大射程;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 为相关参数, 分别为 $0.55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{MeV}^{-1}$ , 0.9841,  $3 \text{ MeV}^{-1}$ ;  $W_0$ 是入射电子能量;  $\rho$ 是介质的密度。

单位时间内电荷沉积表达式<sup>[18]</sup>为

$$Q(x, t) = 14.42 \frac{x^3}{R^4} j_0 (1 - \eta) \times \exp \left( -3.605 \left( \frac{x}{R} \right)^4 \right), \quad (2)$$

其中,  $Q(x, t)$ 是单位时间内沉积电荷密度;  $j_0$ 是入射电子电流密度;  $\eta$ 是背散射系数, 其值约为0.2;  $x$ 是电子穿透深度。

单位时间内单个电子能量沉积表达式<sup>[18]</sup>为

$$W(x, t) = 1.544 \frac{W_0}{R} \exp \left( -2.2 \left( \frac{x}{R} - 0.7 \right)^2 \right). \quad (3)$$

### 2.2 电导特性

高能电子辐射下, 介质内部电导包括材料本身暗电导和辐射诱导电导两部分。计算中考虑电导分别沿水平和垂直方向分布。暗电导采用Poole-Frenkel电导<sup>[19]</sup>, 主要受温度和电场的影响。其中沿垂直于辐射面方向和平行于辐射面方向的电导表达式分别为

$$\sigma_{\text{PF}-x} = \frac{\sigma_0}{3} \left[ 2 + \cosh \left( \frac{\beta_F \sqrt{E_x}}{2k_B T} \right) \right], \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{PF}-y} = \frac{\sigma_0}{3} \left[ 2 + \cosh \left( \frac{\beta_F \sqrt{E_y}}{2k_B T} \right) \right], \quad (5)$$

$$\beta_F = \sqrt{\frac{q^3}{\pi \epsilon}}, \quad (6)$$

其中,  $\sigma_0$  是初始电导率;  $k_B$  是玻尔兹曼常数;  $T$  是温度;  $E_x$  和  $E_y$  分别是垂直于辐射面和平行于辐射面电场分量.

辐射诱导电导 (RIC) 率表达式 [19,20] 为

$$\sigma_{\text{RIC}}(\dot{D}) = k_{\text{RIC}}(T) \cdot (\dot{D})^{\Delta(T)}, \quad (7)$$

其中,  $\dot{D}$  是辐射剂量率, 由电子能量沉积可以得出;  $k_{\text{RIC}}(T)$  是比例系数, 与  $k_{\text{RIC}0}$ ,  $k_{\text{RIC}1}$  和  $T_{\text{RIC}}$  有关;  $\Delta(T)$  是温度指数系数, 一般取 0.5—1.0 之间, 取决于介质中陷阱的能态分布:

$$\Delta(T) = [1 + T/T_{\text{RIC}}]^{-1}, \quad (8)$$

$$k_{\text{RIC}}(T) = k_{\text{RIC}0} \cdot k_{\text{RIC}1}^{\Delta(T)} \times [T/T_{\text{RIC}}]^{3/2-2\Delta(T)}, \quad (9)$$

其中,  $T$  为介质温度;  $T_{\text{RIC}}$  为温度常数;  $k_{\text{RIC}0}$  代表与温度无关的量;  $k_{\text{RIC}1}$  与温度有关, 取决于导带中载流子的概率.

### 2.3 二维泊松方程求解

综合考虑电荷的沉积过程和传导过程, 可以得出介质内部的空间电荷, 再通过求解二维泊松方程可以计算出电场分布.

首先, 给出电荷传导方程 [21], 其中沿垂直于辐射面方向和平行于辐射面方向的电流传导表达式分别为

$$j_x = \sigma_x E_x, \quad (10)$$

$$j_y = \sigma_y E_y. \quad (11)$$

泊松方程表达式:

$$\frac{\partial E_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial E_{xy}}{\partial y} = \frac{\rho}{\epsilon_r \epsilon_0}. \quad (12)$$

电荷连续性方程表达式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial j_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial j_{xy}}{\partial y} = Q(x, t), \quad (13)$$

其中,  $\rho$  是体电荷密度, 代表介质内部电荷沉积和传导之后积聚的空间电荷;  $Q(x, t)$  是单位时间内电荷沉积量, 可由 (2) 式得出.

采用有限元法, 首先, 将 (4), (5) 和 (7) 式中的总电导分别代入 (10) 和 (11) 式, 得出传导电流密度; 然后, 将 (10) 和 (11) 式代入 (13) 式, 得出含变

量  $E_x$  和  $E_y$  的空间电荷密度  $\rho$ ; 最后, 将空间电荷密度代入泊松方程 (12) 式, 即可求出二维电场分布. 泊松方程求解中, 根据平板形构件模型, 正面接受电子辐射, 背部接地. 边界条件采用狄氏边界条件: 背部电位为零, 即  $x = d$  时,  $u = 0$ . 同时, 真空区域的无限远处, 电位为零. 初始值为:  $t = 0$  时,  $u = 0$ .

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 基于有限元方法的二维电场计算

本文采用基于有限元法的多物理场数值分析软件 COMSOL 对高能电子辐射下电荷输运特性进行计算 [22]. 通过自定义偏微分方程组, 描述了高能电子沉积和传导的物理过程. 通过求解二维泊松方程、电荷连续性方程和电荷传导方程, 得出了介质内部空间电荷、电位和电场分布随时间和空间的分布特性. 图 2 给出了平板介质网格剖分图.

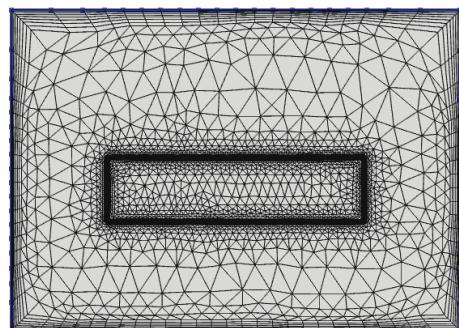


图 2 平板介质网格剖分图

有限元法基本思路 [22] 是将连续区域离散化, 利用有限互不重叠的几何单元近似逼近几何体. 有限元网格剖分中单元形状、数量和密度等参数会影响计算结果的精度和计算时间. 为提高计算精度, 计算中采用分区域剖分网格, 如图 2 所示. 介质和真空界面的电荷会影响电场分布, 界面附近沿着法线方向进行较密集的四边形网格剖分. 远离区域则采用自由三角形网格剖分法, 采用 Delaunay 算法创建非结构化三角形网格. 其中, PTFE 介质域网格剖分较密集. 最大单元尺寸为 0.47 mm, 真空区域最大单元尺寸为 0.7 mm.

表 1 给出了仿真计算中主要参数的数值, 包括温度、入射电子能量和束流密度以及介质电导特性等.

航天器不同子系统具有不同的运行温

度<sup>[23]</sup>, 如, 电子设备工作温度为−20—50 °C, 机械设备工作温度为−100—80 °C. 对于温度变化特性, 本文不做讨论, 取室温环境(298 K). 典型GEO轨道环境引起介质深层带电的能量范围为0.1—10 MeV<sup>[16]</sup>, 考虑到试样厚度为1 mm, 电子能

量取0.5 MeV, 穿透深度约为厚度的一半. 电子束流密度在 $10^{-10}$ — $10^{-8}$  A·m<sup>-2</sup>范围时, 卫星发生ESD的危险性较大<sup>[16]</sup>. PTFE化学结构对称, 为非极性电介质材料, 室温下频率1 kHz时, 相对介电常数为2.2, 密度为2160 kg·m<sup>-3</sup><sup>[24]</sup>.

表1 模拟计算中主要参数

参数	符号	数值
环境温度/K	$T$	298
电子能量/MeV	$E_0$	0.5
电子束流密度/A·m <sup>-2</sup>	$J_0$	$10^{-10}$ — $10^{-8}$
PTFE在1 kHz时的相对介电常数	$\epsilon_r$	2.2
PTFE密度/kg·m <sup>-3</sup>	$\rho$	2160
Pool-Frenkel初始电导率/S·m <sup>-1</sup>	$\sigma_0$	$3.7 \times 10^{-19}$
RIC与温度无关的系数/S·s·m <sup>-1</sup> ·rad <sup>-1</sup>	$k_{RIC0}$	$1.6 \times 10^{-11}$
RIC与温度相关的系数	$k_{RIC1}$	$4.6 \times 10^{-5}$
RIC温度常数/K	$T_{RIC}$	447

介质内部由于电荷的积聚会产生较高的内电场, 强电场作用会降低体内势垒高度, 加快电荷传导. 因此, 电荷输运过程中, 暗电导采用Poole-Frenkel电导<sup>[19]</sup>. 辐射诱导电导的比例系数 $k_{RIC}(T)$ 和温度指数系数 $\Delta(T)$ 由高能电子辐射下PTFE的电导特性试验拟合得出<sup>[8]</sup>.

### 3.2 PTFE的深层充电特性

计算了高能电子辐射下(能量为0.5 MeV, 束流密度为 $2 \times 10^{-9}$  A·m<sup>-2</sup>), 航天器常用材料PTFE的深层充电特性. 因为航天器材料充电时间较长<sup>[14]</sup>, 电子辐射时间分别设为1 h, 1 d, 10 d 和30 d. 这里具体给出了电子辐射30 d时, 介质内部空间电荷、内部电位和内部电场分布的计算结果, 如图3—5所示.

介质内部空间电荷分布与单位时间内电荷的沉积量、电荷传导量和辐射时间有关. 通常, 单位时间内电荷沉积速率数量级为 $10^{-8}$ — $10^{-5}$  C/(m<sup>3</sup>·s), 在较短辐射时间下, 内部电荷积聚量较少, 引起的内电场也较小. 由于航天器长期处于空间环境辐射下, 介质内部积聚空间电荷量大大增加, 容易导致内部产生较高的电场. 由图3可以看出, 当电子辐射30 d时, 沿着电子垂直入射方向, 介质内部积聚空间电荷随着深度的增加逐渐增大, 在深度约0.4 mm处, 最大值约为

12.49 C/m<sup>3</sup>. 这部分电荷会产生较高的内电场, 最大电场达到 $10^7$ — $10^8$  V·m<sup>-1</sup>, 极易引起静电放电.

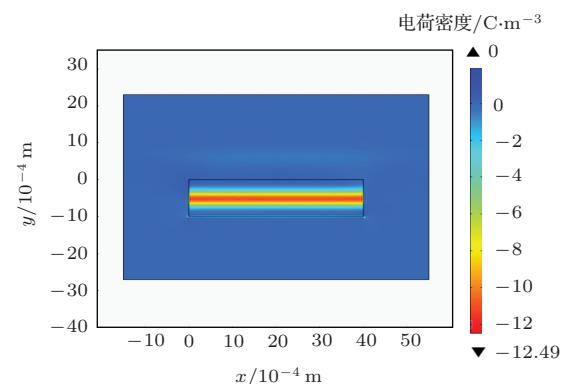


图3 (网刊彩色) 电子辐射30 d时介质内部空间电荷分布

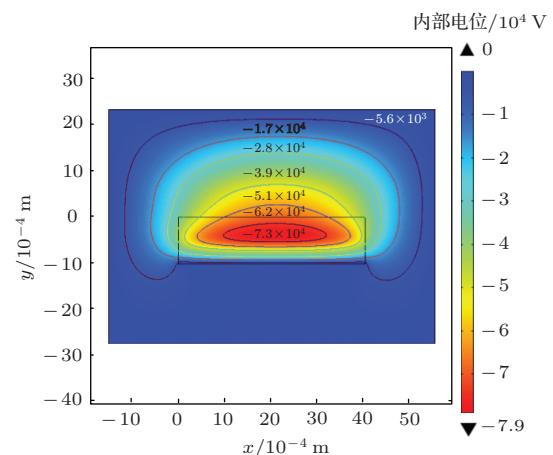


图4 (网刊彩色) 电子辐射30 d时介质内部电位分布

图4给出了介质内部电位分布。随着介质深度的增加，电位逐渐增大，在距离表面附近(约0.4 mm)达到最大值(约 $7.9 \times 10^4$  V)，之后电位逐渐减小至零。该结论与介质深层带电的一维解析RIC模型<sup>[7]</sup>的计算结果相似。在介质的表面均存在较高的电位，但区别在于一维模型中最大电位出现在介质表面，而二维模型最大电位出现在距离表面一定深度处。这是由于在二维模型计算中考虑了真空区的影响，根据电磁场理论，当不同介质的界面存在电荷时，电位分布是连续的。

电荷在介质内部积聚，会产生内电场，最大电场是判断材料发生静电放电的重要参量。图5给出了介质内部电场分布。由于真空和介质的交界面沉积电荷的存在，会影响介质的电场分布。在介质的表面存在较弱的反向电场，随着介质深度增大，逐渐减小至零。之后，电场逐渐增大，在靠近接地点附近，达到最大值(约 $1.76 \times 10^8$  V/m)，但在接地点，电场存在小幅降低。该结论与真空环境下电声脉冲法(PEA)的测量趋势一致。文献[19]采用开路PEA法测量了电子辐射下聚酰亚胺的电荷分布和电场分布。入射电子能量为130 keV，束流密度为50 pA/cm<sup>2</sup>，试样厚度为250 μm。电子辐射60 min时，介质表面电场存在反向电场，约为 $-0.8 \times 10^4$  V/m，在距离表面50 μm处，电场减小为零，之后，随着深度增加，电场逐渐增加至最大值 $5 \times 10^4$  V/m，在深度235 μm处，开始有小幅降低。通过定性分析可以看出，采用开路PEA法测量得出的电场分布和图5计算结果一致。

## 4 讨 论

### 4.1 最大电位和最大电场的时空演变特性

介质深层充电特征参数内部电位和内部电场随着材料位置的不同呈现不同的分布。同时，在不同辐射时间下，其数量也会发生变化。图6和图7给出了高能电子辐射下(能量为0.5 MeV，束流密度为 $2 \times 10^{-9}$  A/m<sup>2</sup>)，辐射时间分别为1 h，1 d，10 d和30 d时介质内部最大电位和最大电场的分布。

表面电位是介质深层特性的重要特征参数之一。当表面电位较高时，容易与周围部件、相邻金属或接地体形成不等量带电，易引发放电<sup>[5]</sup>。由图6可以看出，在真空电子辐射环境下，介质的表面电位较高，但电位最大值出现在靠近介质表

面一定距离处。随着辐射时间的延长，介质内部最大电位显著增大，由-128 V(辐射1 h)增加到 $-7.9 \times 10^4$  V(辐射30 d)。当电子辐射时间超过10 d时，最大电位数量级达到 $10^4$  V，极易与周围部件形成较高的不等量带电。

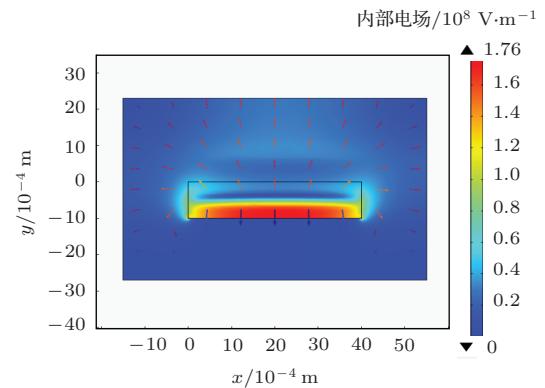


图5 (网刊彩色) 电子辐射30 d时介质内部电场分布(箭头向下代表电场正方向)

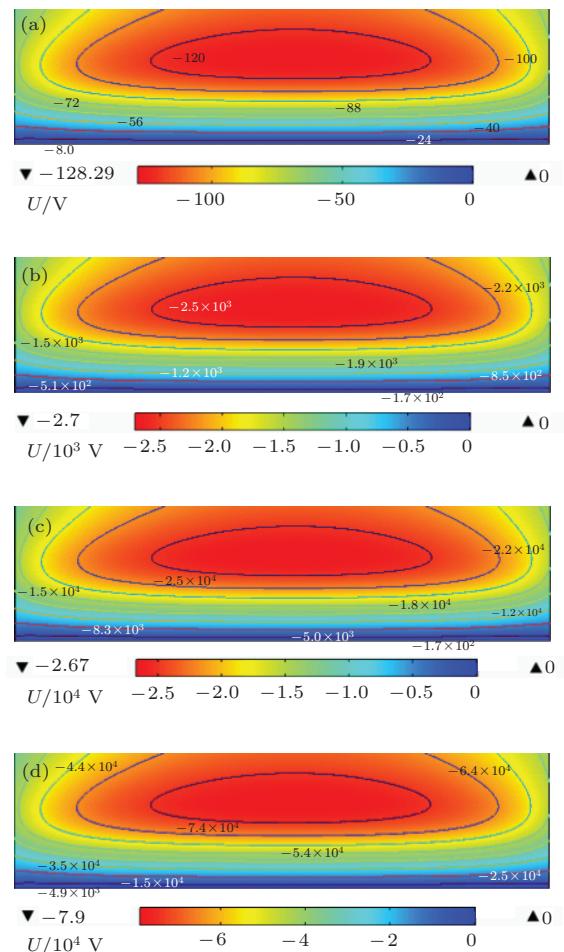


图6 (网刊彩色) 不同辐射时间t下电子辐射区电位U分布 (a)  $t = 1$  h,  $U_{\max} = -128$  V; (b)  $t = 1$  d,  $U_{\max} = -2.7 \times 10^3$  V; (c)  $t = 10$  d,  $U_{\max} = -2.67 \times 10^4$  V; (d)  $t = 30$  d,  $U_{\max} = -7.9 \times 10^4$  V

不同辐射时间下, 介质内部电场分布如图7所示。总体上来看, 介质内部电场随着辐射时间的增加而升高。电子辐射1 h, 最大电场( $2.83 \times 10^5$  V/m)较低; 电子辐射1 d, 电场随辐射时间的延长逐渐增大, 最大电场为 $5.97 \times 10^6$  V/m; 电子辐射30 d时, 最大电场达到 $1.76 \times 10^8$  V/m。研究表明<sup>[5]</sup>, 当介质中的内部电场超过一定阈值(约10<sup>8</sup> V/m), 可能会发生瞬时放电。因此, 在较长的电子辐射下, 沉积电荷引起的内部电场较高, 更容易引发放电和击穿。

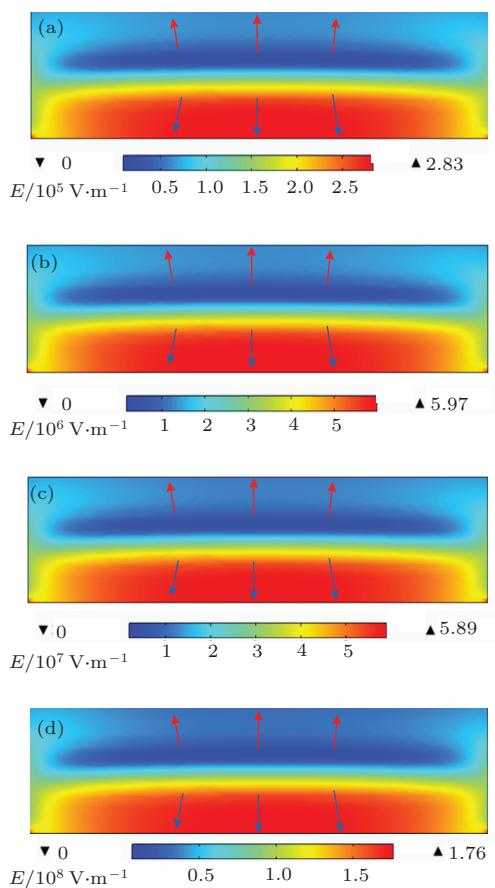


图7 (网刊彩色) 不同辐射时间  $t$  下, 电子辐射区电场  $E$  分布(箭头向下代表电场正方向) (a)  $t = 1$  h,  $E_{\max} = 2.83 \times 10^5$  V/m; (b)  $t = 1$  d,  $E_{\max} = 5.97 \times 10^6$  V/m; (c)  $t = 10$  d,  $E_{\max} = 5.89 \times 10^7$  V/m; (d)  $t = 30$  d,  $E_{\max} = 1.76 \times 10^8$  V/m

## 4.2 束流密度对最大电场的影响

电子束流密度对介质内部空间电荷的分布影响较大, 进一步影响内部最大电场。典型空间环境下, 航天器表面表现为较低的正电位, 当出现地磁亚暴时, 能量在数百keV到数MeV的电子束流密度会在数天时间内增大2—3个数量级, 并持续10 d左右<sup>[25]</sup>, 极易引起较严重的不等量带电或

介质内部ESD。根据美国航空航天局(NASA)发布的空间辐射环境技术指导手册<sup>[16]</sup>, 入射电子束流密度数量级为 $10^{-10}$ — $10^{-8}$  A/m<sup>2</sup>时, 卫星发生ESD的危险性较大, 其中, 束流密度数量级为 $10^{-8}$  A/m<sup>2</sup>时, 发生ESD的概率明显增大, 属于恶劣空间电子环境。对比了电子辐照10 d时, 典型电子环境( $1 \times 10^{-10}$  A/m<sup>2</sup>)和恶劣空间电子环境( $2 \times 10^{-8}$  A/m<sup>2</sup>)下PTFE内部电场分布, 如图8和图9所示。

典型空间电子环境( $1 \times 10^{-10}$  A/m<sup>2</sup>)下, 介质内部最大电位为-1334 V, 最大电场为 $2.95 \times 10^6$  V/m, 最大值出现在靠近接地附近。此时, 产生的内部电场较小, 较为安全。

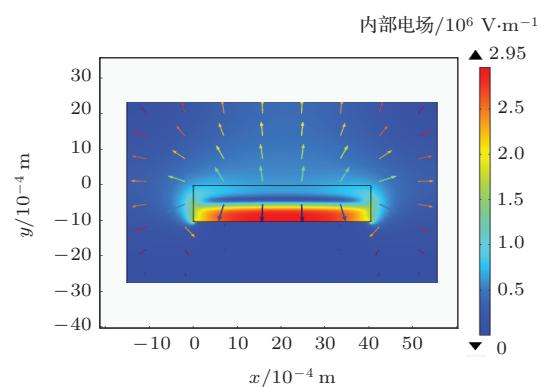


图8 (网刊彩色) 典型空间电子环境( $1 \times 10^{-10}$  A/m<sup>2</sup>) 介质内部电场分布(箭头向下代表电场正方向)

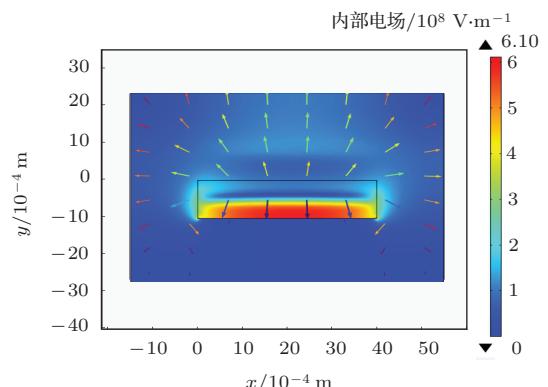


图9 (网刊彩色) 恶劣空间电子环境( $2 \times 10^{-8}$  A/m<sup>2</sup>) 介质内部电场分布(箭头向下代表电场正方向)

当出现地磁亚暴时, 高能电子束流在较短时间内迅速增大。恶劣空间电子环境( $2 \times 10^{-8}$  A/m<sup>2</sup>)下, 当电子辐射42 h, 介质内部最大电场达到 $10^8$  V/m, 接近材料击穿阈值(约 $10^8$  V/m), 极易发生放电现象。电子辐射10 d时, 介质内部最大电场高达 $6.1 \times 10^8$  V/m, 如图9所示。介质内部电荷的大量积聚, 是造成较高内电场产生的主要原因。

当介质内部场强超过一定阈值(未超过击穿阈值)时,如果能够及时释放电荷,则能有效缓解介质深层带电。实验研究表明<sup>[26]</sup>,采用半导电无机添加剂对聚酰亚胺和聚四氟乙烯进行改性,复合材料的非线性特性阈值场强有一定程度的降低。聚合物介质材料的非线性电导改性,是今后研究的热点问题。

## 5 结 论

本文建立了高能电子辐射下介质二维深层充电物理模型,并基于有限元法实现了数值计算。计算了高能电子辐射下,聚四氟乙烯的深层充电特性。通过分析介质中电荷输运规律,可以得出以下结论。

1) 在真空环境下,介质的表面存在较弱的反向电场,随着介质深度增大,电场减小至零,然后逐渐增大,最大值出现在靠近接地附近,但在接地点,电场存在小幅降低。该结论与在真空环境下采用开路PEA法测量得出的电场分布趋势一致。

2) 分析了不同辐射时间下(1 h, 1 d, 10 d 和 30 d),介质内部最大电位和最大电场的时空演变特性。随着辐射时间的增加,最大电位由-128 V 增加至 $-7.9 \times 10^4$  V,最大电场由 $2.83 \times 10^5$  V/m 增加至 $1.76 \times 10^8$  V/m。

3) 讨论了入射电子束流密度对最大电场的影响。典型空间电子环境( $1 \times 10^{-10}$  A/m<sup>2</sup>)下,电子辐照10 d时,介质内部最大电场为 $2.95 \times 10^6$  V/m,最大值出现在靠近接地附近。恶劣空间电子环境( $2 \times 10^{-8}$  A/m<sup>2</sup>)下,电子辐射42 h,介质内部最大电场即达到 $10^8$  V/m,超过材料击穿阈值(约 $10^8$  V/m),极易发生放电现象。

## 参考文献

- [1] Koons H C, Mazur J E, Selesnick R S, Blake J B, Fennell J F, Roeder J L, Anderson P C 2000 *6th Spacecraft Charging Technology Conference* Hunstville, USA, September 1, 2000 p7
- [2] Min M D, Cho M G, Khan A R, Li S T 2012 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insulat.* **19** 600
- [3] Garrett H B, Whittlesey A C 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 2017
- [4] Frederickson A R, Holeman E G, Mullen E G 1992 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **39** 1773
- [5] Lai S T 2011 *Fundamentals of Spacecraft Charging* (Princeton and Oxford: Princeton University Press) p146
- [6] Jun I, Garrett H B, Kim W, Minow J I 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 2467
- [7] Qin X G, He D Y, Wang J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 684 (in Chinese) [秦晓刚, 贺德衍, 王骥 2009 物理学报 **58** 684]
- [8] Rodgers D J, Ryden K A, Latham P M, Wrenn G L, Lévy L, Dirassen B 2000 *Engineering Tools for Internal Charging DICTAT* p8
- [9] Huang J G, Chen D 2004 *J. Geophys.* **47** 392 (in Chinese) [黄建国, 陈东 2004 地球物理学报 **47** 392]
- [10] Huang J G, Chen D 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 961 (in Chinese) [黄建国, 陈东 2004 物理学报 **53** 961]
- [11] Quan R H 2009 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [全荣辉 2009 博士学位论文 (北京: 中国科学院研究生院)]
- [12] Quan R H, Zhang Z L, Han J W, Huang J G, Yan X J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1205 (in Chinese) [全荣辉, 张振龙, 韩建伟, 黄建国, 闫小娟 2009 物理学报 **58** 1205]
- [13] Li X S, Jiao W X 2007 *J. Space Sci.* **27** 309 (in Chinese) [李学胜, 焦维新 2007 空间科学学报 **27** 309]
- [14] Qin X G 2010 *Ph. D. Dissertation* (Lanzhou: Lanzhou University) (in Chinese) [秦晓刚 2010 博士学位论文 (兰州: 兰州大学)]
- [15] Li S T, Li G C, Min D M, Zhao N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 059401 (in Chinese) [李盛涛, 李国倡, 闵道敏, 赵妮 2013 物理学报 **62** 059401]
- [16] Ryschkewitsch M G 2011 *Mitigating in Space Charging Effects—A Guideline* (Washington: NASA) p33
- [17] Søensen J, Rodger D S, Ryden K A, Latham P M, Wrenn G L, Levy L, Panabiere G 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 491
- [18] Touzin M, Goeuriot D, Guerret-Piécourt C, Juvé D, Tréheux D, Fitting H J 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 114110
- [19] Perrin C, Griseri V, Inguimbert C, Laurent C 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 205417
- [20] Dennison J R, Sim A, Brunson J, Gillespie J, Hart S, Dekany J, Sim C, Arnfield D 2009 *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition* Orlando, Florida, January 5–8, 2009 p0562
- [21] Roy S L, Baudoin F, Griseri V, Laurent C, Teyssedre G 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 315402
- [22] Wang G, An L 2012 COMSOL *Multi-Physics Engineering Practice and Theoretical Simulation—Multi-Physics Field Numerical Analysis Technolog* (Beijing: Elecronic Industry Press) p22 (in Chinese) [王刚, 安琳 2012 COMSOL Multi-Physics 工程实践与理论仿真——多物理场数值分析技术 (北京: 电子工业出版社) 第 22 页]
- [23] Li S T, Min D M, Lin M, Li W W, Li J Y 2010 *International Conference on Solid Dielectrics* Potsdam, Germany, July 4–9, 2010 p2
- [24] Perrin C, Griseri V, Laurent C, Fukunaga K, Maeno T, Levy L, Payan D, Schwander D 2008 *High Perform. Polym.* **20** 535
- [25] Yan X G, Chen D, Han J W, Huang J G 2008 *Spacecraft Environ. Engineer.* **25** 120 (in Chinese) [闫小娟, 陈东, 韩建伟, 黄建国 2008 航天器环境工程 **25** 120]
- [26] Wu J, Kang Y L, Zhang Z J, Zheng X Q 2012 *Vacuum and Cryogenics* **18** 26 (in Chinese) [乌江, 康亚丽, 张振军, 郑晓泉 2012 真空与低温 **18** 26]

# Research of deep dielectric charging characteristics of polytetrafluoroethylene irradiated by energetic electrons\*

Li Guo-Chang Min Dao-Min Li Sheng-Tao<sup>†</sup> Zheng Xiao-Quan Ru Jia-Sheng

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

(Received 14 April 2014; revised manuscript received 4 June 2014)

## Abstract

Deep-layer dielectric charge and discharge in insulating material irradiated by energetic electrons are one of the major factors causing spacecraft anomalies. In this paper we establish a two-dimensional physical model of deep-layer dielectric charging, based on charge distribution and energy deposition of incident electrons and conductivity properties. The model is accomplished by finite element method, and the deep-layer dielectric charging characteristics of polytetrafluoroethylene irradiated by energetic electrons are calculated. The calculation results show that in the vacuum environment, in the surface of the dielectric there exists a weak reverse electric field, and it first decreases to zero and then increases with the increase of depth. The maximum electric field appears near the ground, but the electric field presents a slight reduction at the position of ground point. Space-time evolution characteristics of the maximum potential and maximum electric field in different radiation times (one hour, one day, ten days and 30 days) within dielectric are analyzed. With the increase of radiation time, the maximum potential increases from  $-128$  V to  $-7.9 \times 10^4$  V, and the maximum electric field increases from  $2.83 \times 10^5$  V·m<sup>-1</sup> to  $1.76 \times 10^8$  V·m<sup>-1</sup>. Finally, the influence of electron-beam density on the maximum electric field is discussed. In a typical space environment ( $1 \times 10^{-10}$  A·m<sup>-2</sup>), the maximum electric field reaches  $2.95 \times 10^6$  V/m·m<sup>-1</sup> for ten days. However, in severe space environment ( $2 \times 10^{-8}$  A·m<sup>-2</sup>), the maximum electric field rapidly reaches  $10^8$  V/m for 42 hours, exceeding the breakdown threshold (about  $10^8$  V·m<sup>-1</sup>), which may easily cause electrostatic discharge). The physical model and numerical method can be used as a research basis of multi-dimension electric field simulation of spacecraft complex parts.

**Keywords:** deep dielectric charging, polytetrafluoroethylene, energetic electrons radiation, two dimension electric field simulation

**PACS:** 94.05.Hk, 94.05.Jq, 52.25.Mq

**DOI:** [10.7498/aps.63.209401](https://doi.org/10.7498/aps.63.209401)

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51337008) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11275146).

† Corresponding author. E-mail: [sli@mail.xjtu.edu.cn](mailto:sli@mail.xjtu.edu.cn)