

电子质子混合辐射下星用聚酰亚胺深层 电场畸变特性研究

乌江¹, 党旭耀¹, 崔鹏飞¹, 党孟航¹, 尚鹏辉², 曹雯¹

(1. 西安工程大学电子信息学院, 710048, 西安; 2. 电子科技大学长三角研究院(湖州), 313000, 浙江湖州)

摘要: 为了评估复杂空间环境下航天器介质深层充电水平,对高能电子与质子混合辐射下介质深层电场分布进行数值计算研究。基于蒙特卡罗的粒子辐射方法和电场有限元数值计算方法,提出了一种双带电粒子混合辐射的 GEANT4-COMSOL 联合充电评估方法,针对航天器聚酰亚胺介质建立了厚度 4 mm 的平板模型,并考虑了入射带电粒子在介质中的电荷沉积量、能量沉积分布以及介质中的非线性暗电导和辐射诱导电导。通过联合充电评估方法,分别计算了聚酰亚胺介质在 5 组不同能量组合的单能电子和单能质子混合辐射下电位分布与电场强度分布,以及在太阳同步轨道中南极、北纬 45°、赤道 3 个典型位置的能谱电子和质子混合条件下的电场畸变特性。研究结果表明:当不同能量单能电子和质子混合辐射时,电子和质子因电荷沉积深度分布存在差异,电场均呈现“双峰型”分布;在太阳同步轨道下能谱电子和质子混合辐射时,3 个典型位置的最大电场强度分别为 0.372、0.196、0.210 MV·m⁻¹,在南极区域介质内电场强度最高。电子与质子混合辐射的电场分布结果表明,两种电荷所引发的介质内电场畸变特性,即电场增强或削弱,在辐射深度上存在复杂的分布特性,并在特定辐射与纬度条件下会达到严重的充电危害水平。

关键词: GEANT4-COMSOL 联合充电评估方法;电子;质子;太阳同步轨道;混合辐射;电场畸变
中图分类号: TM215.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202606006 **文章编号:** 0253-987X(2026)06-0075-11

Study of Deep Electric Field Distortion Characteristics in Spacecraft Polyimide under Mixed Electron-Proton Radiation

WU Jiang¹, DANG Xuyao¹, CUI Pengfei¹, DANG Menghang¹, SHANG Penghui², CAO Wen¹

(1. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. Yangtze Delta Region Institute (Huzhou), University of Electronic Science and Technology of
China, Huzhou, Zhejiang 313000, China)

Abstract: To evaluate the deep charging level of spacecraft dielectrics in complex space radiation environments, numerical calculations of deep electric field distributions in the dielectric under mixed radiation of high-energy electrons and protons were performed. A GEANT4-COMSOL coupled charging evaluation method was proposed by combining Monte Carlo particle radiation and numerical simulation of electric field using FEM. A 4 mm-thick slab model for spacecraft polyimide was established, and charge deposition, energy-deposition distributions of incident charged particles in the dielectric, as well as nonlinear dark conductivity and radiation-induced

收稿日期: 2025-07-28。 作者简介: 乌江(1986—),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2024GX-YBXM-519);湖州市自然科学基金资助项目(2023YZ-04)。

网络出版时间: 2025-09-24

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250922.2031.013>

conductivity in the dielectric were taken into account. Using the coupled charging evaluation method, distributions of potential and electric field intensity were calculated for polyimide dielectric exposed to mixed radiation of monoenergetic electrons and protons in five different energy-combination sets. Furthermore, electric field distortion characteristics were evaluated under mixed radiation of electrons and protons with energy spectrum at three typical locations in the sun-synchronous orbit (i. e., the Antarctic region, 45°N , and the equator). The study results indicate that, under mixed radiation of monoenergetic electrons and protons in different energy sets, differences in charge deposition depth between electrons and protons produce a “double-peaked” electric field profile; under mixed radiation of electrons and protons with energy spectrum in sun-synchronous orbit, the maximum electric field intensities at the three typical locations were 0.372 , 0.196 , and $0.210\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$, respectively, with the Antarctic region exhibiting the highest electric field intensity in the dielectric. The electric field distributions under mixed irradiation of electrons and protons demonstrate that the electric field distortion characteristics in the dielectric induced by the two charge species—manifesting as either enhancement or attenuation—are characterized by complex radiation depth-dependent distributions, and that, under specific radiation and latitudinal conditions, the resulting dielectric charging may reach levels that pose serious hazard risks.

Keywords: GEANT4-COMSOL coupled charging evaluation method; electron; proton; sun-synchronous orbit; mixed radiation; electric field distortion

卫星被广泛应用于通信、环境监测以及社会保障等多个领域,然而卫星始终暴露在空间高能粒子辐射环境中。带电粒子极易穿透航天器蒙皮而形成内部介质的电荷积聚现象,当沉积电荷产生的电场强度达到临界值时,就会触发静电放电,对电子系统造成干扰而导致卫星异常或故障^[1-3]。影响卫星安全运行的重要原因之一,是卫星介质材料与复杂空间环境相互作用引起的介质充放电现象^[4-5]。据美国宇航局对4个权威机构数据库的统计分析,约300起航天器故障中,有54%的故障是由静电放电引起的^[6-7]。因此,为确保卫星能够长期、安全、稳定地运行,研究介质材料在带电粒子辐射下的深层充电过程与电场分布显得尤为重要。

数十年来,各个研究机构和学者通过实验或仿真计算方法来研究高能粒子辐射引发的深层充电过程。例如:李盛涛等^[8-10]采用一维电荷输运模型模拟在电子辐射条件下卫星介质的深层充电问题;秦司晨^[11]研究了不同温度下电子辐射的电荷积聚特性;刘人郅^[12]进一步研究了屏蔽材料、绝缘挡板参数对辐致电场的影响,得到了驱动滑环深层充电基本特性。上述研究主要针对电子辐射对航天器介质材料深层充电的影响。针对质子辐射的研究,国外学者Green^[13]研究了航天器介质中质子产生内静电放电和电荷存储,结果表明质子辐射充电电场可以达到介

质击穿水平。Udalagama等^[14]研究了MeV级质子和keV级电子在聚甲基丙烯酸甲酯中的空间能量沉积分布,相比于电子,质子能够保持高度紧凑的空间能量沉积。国内学者秦晓刚等^[15]利用GEANT4软件模拟10 MeV质子在聚酰亚胺中的注量和剂量沉积曲线,验证了GEANT4-RIC方法在质子充放电评估中的可行性。但是,在真实的空间环境中,同时存在高能电子与质子,而目前的实验或仿真计算仅考虑了单能电子或单能质子独立辐射条件下的深层充电过程,对单能电子和质子混合辐射的研究较少,因此本文提出了双带电粒子混合辐射模型,研究电子和质子对航天器介质充电过程的协同作用。

除此以外,仅模拟单能带电粒子辐射下介质内电场分布存在一定局限性,真实的轨道环境下,电子质子通常以能谱分布的方式存在。目前,欧洲航天局和美国国家航空航天局均已发布多种轨道环境下的粒子通量数据,其中AP9/AE9模型在国际上被广泛应用。我国风云系列卫星也持续开展在轨带电粒子监测,为地面模拟实验提供实测在轨数据。在上述能谱数据与仿真模型基础上,已有相关研究开展了能谱辐射条件下介质的屏蔽特性与充电行为。例如:刘婧等^[16]通过模拟能谱电子辐射聚合物的充电过程,获得了介质内电场和电位分布;田天等^[17]重点研究了质子在介质材料内部充电中的作用,选

取 TC-2 卫星姿控分系统故障前的质子和电子通量数据,分别计算了二者引起的内部最大电场。但是,关于能谱条件下电子与质子混合辐射导致的电场分布计算暂未见相关成果,同时也缺乏特定轨道下的卫星介质深层充电风险评估与分析。

针对以上问题,本文基于蒙特卡罗与有限元算法,采用 GEANT4-COMSOL 联合充电评估方法,建立了卫星典型介质聚酰亚胺的平板模型,系统分析了不同能量单能电子和质子混合辐射后的充电特性。进一步地,结合 AP9/AE9 辐射带模型与卫星在轨能谱数据,模拟太阳同步轨道中 3 个典型位置处聚酰亚胺介质的深层充电特性,研究了能谱电子与质子混合辐射条件下介质材料内部电场分布畸变特性并进行充电风险评估。

1 粒子辐射模型

高能带电粒子入射卫星介质时,会发生一系列碰撞反应,其中入射电子主要与介质内核外电子发生非弹性碰撞和弹性碰撞,而入射质子与核外电子发生弹性碰撞,与原子核发生非弹性碰撞,弹性碰撞主要改变质子的方向,非弹性碰撞产生次级质子。图 1 为带电粒子入射绝缘介质发生反应示意图。

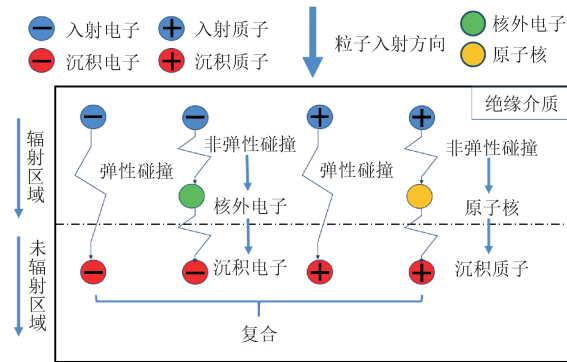


图1 带电粒子碰撞过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the collision process of charged particles

高能电子和质子辐照介质材料后,将与其产生相互作用,导致电荷在材料内部发生沉积,沉积位置受粒子能量和介质厚度影响。同时,沉积电荷通过电导过程进行泄放,泄放速率由辐射诱导电导率 σ_{RIC} 和电场决定的电导率 σ_E 构成的总电导率决定,其中辐射诱导电导率表征高能粒子对辐射区介质的辐射电离效应。因此,介质中最终的净电荷密度取决于电荷沉积和泄放这两个相互竞争过程的动态平衡。当沉积速率大于泄放速率时,净电荷密度增大;

反之,净电荷密度减小。

净电荷的持续积累在卫星介质中产生静电场,其大小取决于净电荷密度和电荷层深度。当电荷沉积与泄放速率相等时,电场达到动态平衡。若平衡电场强度超过材料的局部放电阈值,便会诱发介质放电。从物理机制分析,辐射条件下的电场形成可分为两个步骤:初始阶段为高能带电粒子辐射引起的快速电荷注入与沉积;后续阶段为沉积电荷在介质内部通过本征电导与辐射诱导电导等多重机制进行的迁移与重分布过程。

因此,本文采用基于蒙特卡罗方法的物理模拟软件 GEANT4 模拟高能粒子和样品的相互作用过程,进而通过 COMSOL 有限元方法联立求解三维电荷输运方程。建立 GEANT4-COMSOL 联合充电评估模型,如图 2 所示。以聚酰亚胺介质为仿真研究对象,首先在 GEANT4 中构建介质材料模型并设置粒子源参数,完成粒子注入物理过程,获得微元体积内的电荷沉积量和辐射剂量。将该数据导入 COMSOL 模型中,设置材料尺寸、接地方式与网格划分等参数,并计算介质材料内电位和电场随深度的分布特性。

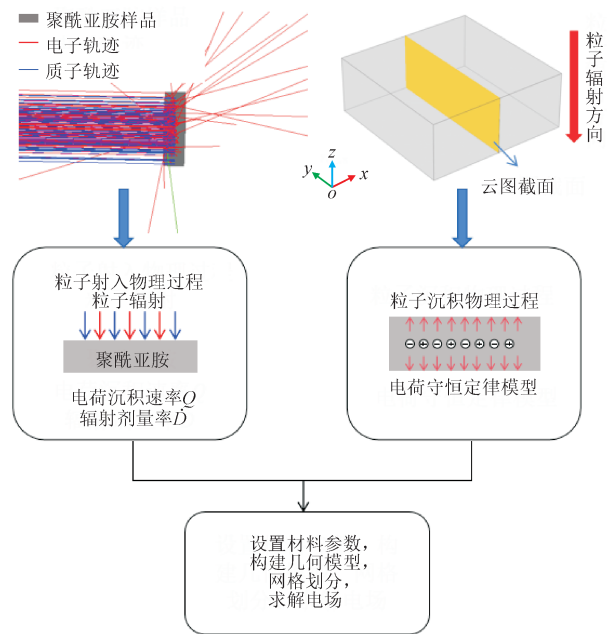


图2 GEANT4-COMSOL 联合充电评估模型

Fig.2 GEANT4-COMSOL joint charging evaluation model

1.1 粒子注入物理过程

高能粒子如质子、电子在辐射材料时发生电荷沉积,这一过程称为粒子注入物理过程。此时,会在介质内部不同位置形成非均匀的电荷分布,同时通过能量沉积产生相应的辐射剂量。电荷沉积速率由

沉积电荷量决定,而辐射剂量率则影响了介质的辐射诱导电导率,二者构成表征注入过程的核心参数。本文使用欧洲核子中心开发的 GEANT4 软件,模拟了高能电子与质子快速注入介质的过程。统计粒子入射绝缘介质内的电荷沉积量 q 和辐射剂量 ΔD ,并通过计算得到电荷沉积速率 Q 和辐射剂量率 $\dot{D}$ [18]

$$\dot{D} = \frac{\Delta D}{t} \quad (1)$$

$$Q = \frac{(q_{es} + q_{ps})e}{Vt} \quad (2)$$

$$t = \frac{N_i e}{j_i S} \quad (3)$$

式中: t 为辐射模拟时间, s; q_{es} 是介质内空间电子沉积数; q_{ps} 是介质内空间质子沉积数; $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C 为电子电量; V 为分块体积, m^3 ; N_i 为入射粒子数; j_i 为入射电流密度, A/m^2 ; S 为辐射源面积, m^2 。

1.2 电荷传输物理过程

电荷传输物理过程是介质内沉积电荷向接地侧运动的过程,此过程基于电荷守恒定律模型进行模拟 [19]。根据泊松方程,介质内电场强度由净电荷密度和介电常数决定,要分析入射质子和电子在介质内产生的电场分布,需要联立求解电流连续性方程(描述电荷守恒)、欧姆定律(描述电流与电场关系)和泊松方程(描述电荷与电场关系)。

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分别为

$$\frac{\partial(q_e + q_p)}{\partial t} + \nabla \cdot j_c = -Q \quad (4)$$

$$j_c = (\sigma_E + \sigma_{RIC})E \quad (5)$$

$$\nabla \cdot E = \frac{q_e + q_p}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (6)$$

$$\sigma_E = \begin{cases} 3.571 \times 10^{-17}, & 0 < E/(V \cdot m^{-1}) \leq 10^7 \\ 3 \times 10^{-15} - 6.06 \times 10^{-19}/E, & 10^7 < E/(V \cdot m^{-1}) \leq 4.86 \times 10^7 \\ 1.9 \times 10^{-13} - 9.06 \times 10^{-6}/E, & 4.86 \times 10^7 < E/(V \cdot m^{-1}) \end{cases}$$

综合研究表明,带电粒子深层充电模型的计算精度取决于 4 个关键参数:电场作用下的电导率 σ_E ,辐射诱导电导率 σ_{RIC} [23],电荷沉积速率 Q 和辐射剂量率 $\dot{D}$ 。

2 粒子辐射差异性分析

由于电子与质子共同作用下的电介质内部充电效应,无论是从仿真计算或是实验研究角度,都没有有效的对比数据,因此本文将参考文献数据,横向对

$$E = -\nabla\varphi \quad (7)$$

式中: q_e 和 q_p 分别为电子电荷密度和质子电荷密度, C/m^3 ; j_c 是传导电流密度, $A \cdot m^{-2}$; E 为电场强度, $V \cdot m^{-1}$; σ_E 是随电场变化的电导率, $S \cdot m^{-1}$; σ_{RIC} 是辐射诱导电导率, $S \cdot m^{-1}$; $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$ 为真空介电常数; $\epsilon_r = 2.6$ 是材料的相对介电常数; φ 为电位, V 。

当电子、质子同时辐射聚酰亚胺后,两种带电粒子分别在材料内部产生大量沉积,因此式(4)中的总电荷密度由电子电荷密度和质子电荷密度组成。在式(6)中,电荷密度同样由两种粒子的电荷密度组成。式(5)中总电导率由随电场变化的电导率和辐射诱导电导率组成。

分析由辐射剂量导致的辐射诱导电导率 σ_{RIC} 。研究表明,辐射诱导电导率是电介质材料在电离辐射作用下表现出的瞬态电导率增强现象,可表示 [20] 为

$$\sigma_{RIC} = k_{RIC}(T)(\dot{D}_e + \dot{D}_p)^{\Delta(T)} \quad (8)$$

$$\Delta(T) = (1 + T/T_{RIC})^{-1} \quad (9)$$

$$k_{RIC}(T) = k_{RIC0} k_{RIC1}^{(T)} (T/T_{RIC})^{3/2-2\Delta(T)} \quad (10)$$

式中: $\dot{D}_e$ 是电子辐射剂量率, $\dot{D}_p$ 是质子辐射剂量率, rad/s ; k_{RIC} 是比例系数, S/m ; $\Delta(T) = 0.718$, 取决于材料中的陷阱能态分布; $T = 293$ K 为温度; T_{RIC} 是温度常数, K ; $k_{RIC0} = 1.6 \times 10^{-14} S \cdot m^{-1} \cdot (rad \cdot s^{-1})^{-1}$, 与载流子的迁移率成正比; $k_{RIC1} = 4.6 \times 10^{-5} S \cdot m^{-1} \cdot (rad \cdot s^{-1})^{-1}$ 。

通过式(8)、(12),分别求得介质的辐射诱导电导率和随电场变化的电导率 [21-22],代入式(5)并且联立式(4)~(7),即可求出绝缘介质内部电场分布及其随时间的变化情况,总电导率 σ 可表示为

$$\sigma = \sigma_E/(V \cdot m^{-1}) + \sigma_{RIC} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} 0 &< E/(V \cdot m^{-1}) \leq 10^7 \\ 10^7 &< E/(V \cdot m^{-1}) \leq 4.86 \times 10^7 \\ 4.86 \times 10^7 &< E/(V \cdot m^{-1}) \end{aligned} \quad (12)$$

比不同单能电子与单能质子下的粒子辐射结果。

2.1 单能电子辐差异分析

将电子入射时电荷沉积的最大深度定义为电子在聚酰亚胺中的射程,对比本文仿真结果与文献 [24] 的差异。图 3 为入射电子能量 60 keV、注量 5×10^7 、聚酰亚胺平板厚度 0.1 mm 的辐照条件下,介质内部电子沉积数量分布。可以看出,60 keV 电子在聚酰亚胺中的射程约为 48 μm ,与文献值 43.2 μm 基本吻合。

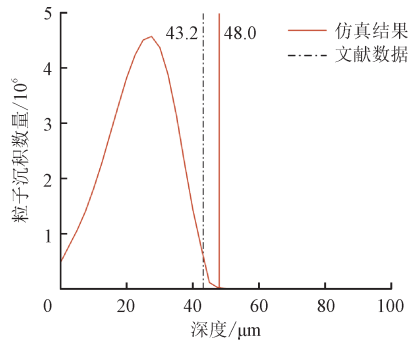


图3 60 keV 电子辐射下聚酰亚胺电荷沉积随深度分布情况

Fig. 3 Verification of the charge depth distribution in polyimide under 60 keV electron radiation

2.2 单能质子辐射差异分析

通过 GEANT4 模拟粒子注入物理过程对比质子入射沉积分布,介质材料按文献[25]设置为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 0.1\text{ mm}$ 的聚酰亚胺平板,质子辐射源为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 方形平面束,选择 4 组质子能量,注量均为 5×10^7 个,沿厚度方向划分 100 个微元,记录每层微元内的辐射剂量。文献值与本文仿真值对比如表 1 所示,仿真结果如图 4 所示。

表 1 质子最大入射深度计算结果对比

Table 1 Comparison of the calculation results of the maximum incidence depth of protons

质子能量/MeV	质子最大入射深度/ μm	
	文献值	本文仿真值
1.0	19	20
1.5	37	38
2.0	59	61
2.5	84	86

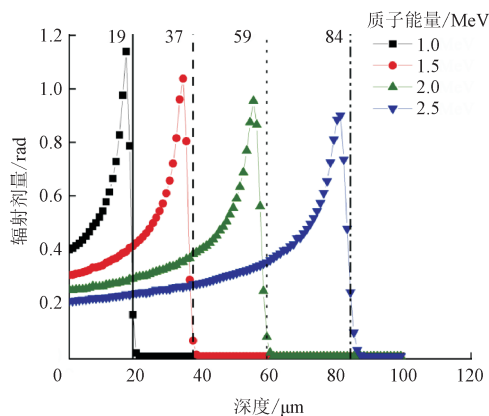


图4 不同能量质子辐射剂量随深度的分布

Fig. 4 Radiation dose distribution of protons of different energies with depth

分析可知,本文仿真值与文献值的偏差约 $2 \sim 3\text{ }\mu\text{m}$,处于误差允许的范围。由质子辐射对比结果可知,大部分质子沉积在射程附近,呈现高度局域化分布,这是由于质子质量较大,在与材料发生电磁相互作用及核反应过程中能量损失显著。

3 单能电子和质子混合辐射仿真结果

3.1 辐射模型

本文采用 GEANT4-COMSOL 联合充电评估方法,模拟高能电子与质子混合辐射下聚酰亚胺平板的电场畸变特性。在 GEANT4 中建立尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 的聚酰亚胺平板模型,辐射源为同等尺寸的方形平面源,平行置于样品上方 100 mm 处,整个系统处于真空环境。粒子沿样品法线方向(—Z 方向)辐照,未设置屏蔽层。将聚酰亚胺材料划分为 $100 \times 100 \times 80$ 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。入射电子与质子束流密度设置为 $1 \times 10^{-8}\text{ A/m}^2$,入射质子和电子注量均为 5×10^7 个,采用较细化网格划分。在 COMSOL 软件中建立相同尺寸的样品模型,模型采用双面接地边界条件,通过 AC/DC 模块中的电流物理场求解电荷输运过程,并配置相应的材料参数与物理场设置,计算介质内的电位与电场分布。

为了确定混合辐射的对照组,先选取 16 MeV 单能质子与 1 MeV 单能电子进行辐射仿真。图 5 为两种单能粒子下聚酰亚胺介质中的电荷沉积速率,可知此时两种粒子主要沉积在介质材料的中间部位。

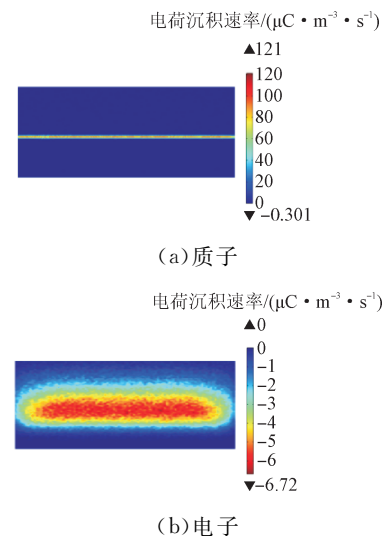


图5 16 MeV 质子和 1 MeV 电子下电荷沉积速率随深度的分布

Fig. 5 Distribution of charge deposition rate with depth under 16 MeV protons and 1 MeV electrons

根据图5所示的电荷沉积分布情况,设置如下混合辐射仿真分组:首先,固定质子能量为16 MeV,电子能量分别设为0.4、1.0、1.5 MeV,此时质子主要沉积在材料中部,电子分别沉积在材料的上部、中部和下部;随后,固定电子能量为1 MeV,质子能量分别设为8、16、20 MeV,电子主要沉积在材料中部,质子分别沉积在材料的上部、中部和下部。交叉组合后形成5种不同的混合辐射分组,用于系统地分析两种粒子沉积在不同空间位置时电位分布与电场畸变特性,具体分组见表2。

表2 5种不同混合辐射工况分组情况

Table 2 Grouping situation of five different mixed radiation conditions

组别	电子能量/MeV	质子能量/MeV
1	0.4	16
2	1.0	16
3	1.5	16
4	1.0	8
5	1.0	20

为分析电子与质子混合辐射所致的电场畸变特性,计算了不同能量单能电子和单能质子单独辐射时的电荷沉积速率,结果如图6所示。根据结果分析可知,电子与质子的电荷沉积速率峰值均随能量增加而降低,且低能粒子沉积分布较高能粒子更集中。进一步对比表明,质子沉积表现出更强的空间集中性,其电荷沉积速率峰宽比电子更窄,峰值也相对更高,反映出质子通常会产生更集中的局部损伤和离化效应,而电子更倾向于在较大范围内引发能量的传递。上述分析表明,在电子与质子混合辐射条件下,两者在聚酰亚胺中引发的电场分布可能会相互干扰,形成电场畸变现象。

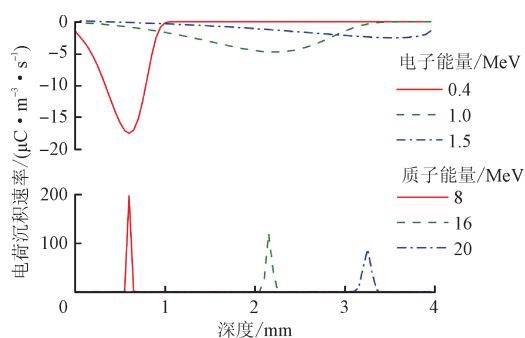


图6 电子与质子单独辐射时的电荷沉积速率分布
Fig. 6 Charge deposition rate distribution of various energies of electron and proton

3.2 混合辐射结果与讨论

第一组0.4 MeV电子和16 MeV质子混合辐射时的结果如图7所示。由图7(a)可知:电子沉积在介质材料的上半部分,形成负电荷积聚区;质子沉积于材料中部,形成分布更为集中的正电荷区。在上、下两侧接地的边界条件下,上表面电位为0,导致上部的负电荷会向上接地侧进行泄放,而中部积聚的质子则形成显著的正电位区域。整体电位呈中部最高,并向两端逐渐衰减至0的分布特征,如图7(c)所示。相应地,从图7(d)电场分布可知:介质上部因电子沉积且邻近接地极,电位梯度较小,电场强度接近于0;中上部因电子与质子沉积区之间存在显著电位差,形成高电场区,电场强度最大值为 8.56×10^5 V/m;中部为质子主沉积区,电位达到峰值 1.11×10^3 V,但由于电位变化平缓,该区域电场强度较低。从中部至下接地极,电位逐渐降低,对应出现一段分布较为均匀的电场。

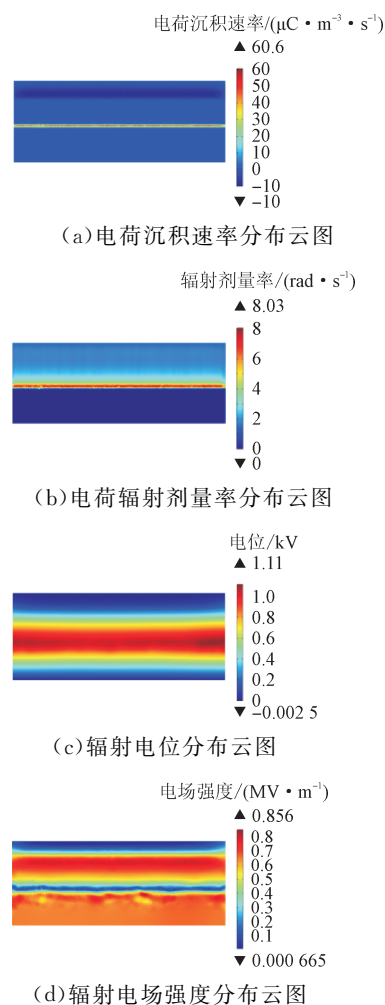


图7 0.4 MeV电子和16 MeV质子混合辐射的充电特性
Fig. 7 Charging characteristics under 0.4 MeV electrons and 16 MeV protons mixed radiation

图 8 为其余 4 组混合辐射工况下电位分布云图。综合全部 5 组混合辐射电位分布结果,可根据电子与质子的沉积位置分为两种典型情况进行分析。第一种情况是质子能量为 16 MeV 时,其集中沉积于介质中部,形成显著的正电荷区,当电子能量为 1 MeV 时,电子和质子沉积区域重叠,导致图 8(a)正电位峰值小于图 8(b)和图 7(c),主要原因为正负电荷的中和效应削弱了中部区域的净电荷量。相比之下,电子能量为 0.4 MeV 和 1.5 MeV(分别对应图 7(c)和图 8(b))时,电子分别沉积在介质材料的上部和下部,与质子沉积区明显分离,因此其中部正电位水平基本相当。第二种情况是电子能量固定为 1 MeV,研究质子能量变化时充电特性,如图 8(a)、8(c)、8(d) 所示,1 MeV 电子沉积于介质中部,形成负电位区,而图 8(c)和图 8(d)中 8 MeV 与 20 MeV 质子分别沉积在材料上部和下部形成正电位区,因其远离电子沉积区,对最大负电位的影响较小,故图 8(c)和图 8(d)中的负电位峰值较为接近。然而,图 8(a)中,因 16 MeV 质子同样沉积于中部,与电子发生中和,导致该组负电位峰值亦出现明显削弱。

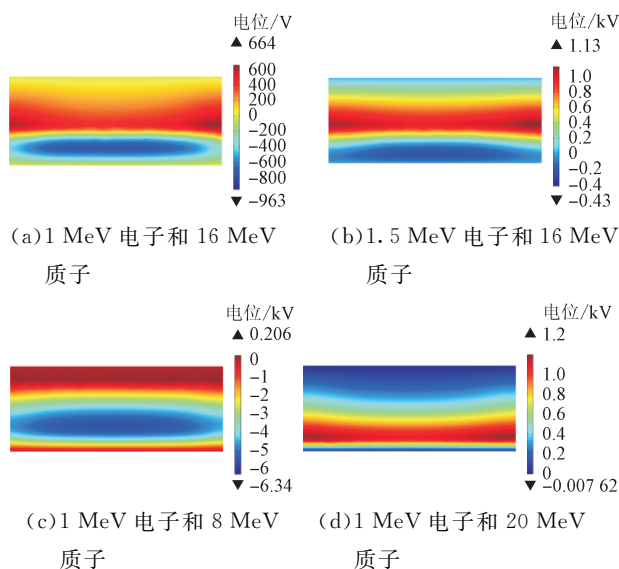


图 8 4 种不同混合辐射工况下介质内电位分布云图

Fig. 8 Contour diagram of potential distribution within the dielectric under four different mixed radiation conditions

通过上述分析可知,当电子与质子二者沉积区域重合时,若同一区域两者数量相等,两种带电粒子产生的电位相互抵消,导致该区域电场强度下降。然而,结合图 6 分析可知,质子沉积分布较电子更为集中,其沉积速率峰值显著高于电子,所以在两者沉积峰值区域,质子的沉积比电子显著升高。综合分析 5 组混合辐射工况可知,其余 4 组工况条件下的

电场强度分布云图如图 9 所示。

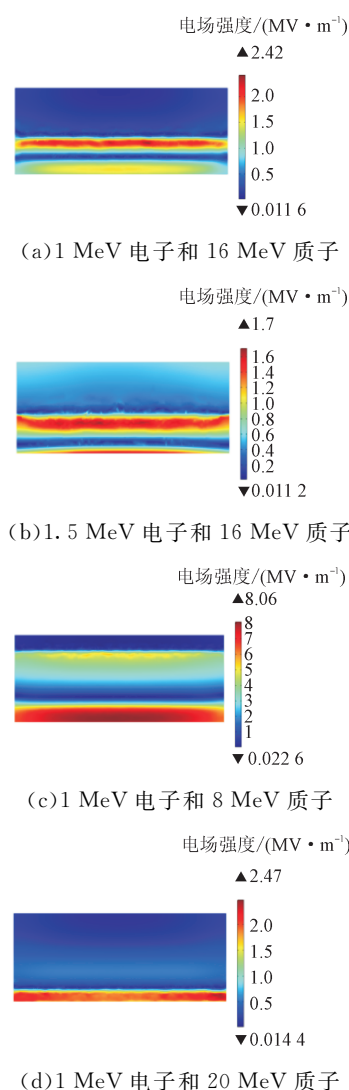


图 9 4 种不同辐射工况下介质充电电场分布云图

Fig. 9 Contour diagram of the electric field distribution of dielectric under four different mixed radiation conditions

由图(9)可知,不同混合辐射条件下电场强度云图均出现了“双峰型”电场畸变现象。但是,云图仅反映电场强度的空间分布和幅值,无法显示其方向,需进一步探究电子与质子沉积耦合作用所引发的电场畸变现象。

由于本文在辐射过程中存在两种极性相反的粒子,因此研究二者的相互作用须考虑电场方向问题。设定参考方向后,依据粒子所带电荷的极性确定电场方向:与参考方向相同为正,相反则为负。图 10 为带电粒子辐射时的电场方向示意图。其中,上、下两端为接地侧,电位为 0。

当仅考虑电子沉积于材料中间区域时,该区域形成负电位区,而材料两端接地保持 0 电位,所以实

际电场分布为图 11 中电子单独辐射产生的电场分布红色曲线。若进一步考虑电场的参考方向,则可得到 1 MeV 电子与 16 MeV 质子单独辐射及两者混合辐射条件下的电场分布,如图 11 中蓝色曲线所示。

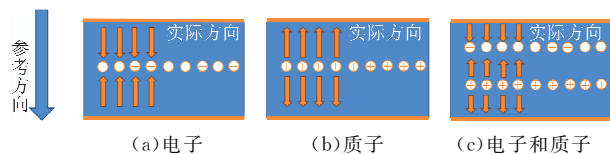


图 10 不同沉积带电粒子引发电场方向示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the direction of the electric field induced by different deposited charged particles

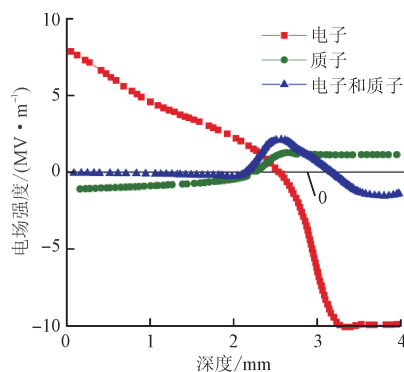


图 11 1 MeV 电子和 16 MeV 质子混合辐射电场分布

Fig. 11 Electric field distribution under 1 MeV electrons and 16 MeV protons mixed radiation

分析结果表明,电子和质子形成的电场极性相反,存在相互抵消效应,但从场强数值进行分析,在 0~2.0 mm 深度范围内,电子单独辐射时电场强度显著高于质子单独辐射,而混合辐射时电场几乎为 0,说明电子、质子和两者共同辐射电场在数值上不存在线性叠加关系。在深度约 2.4 mm 附近,电子和质子的辐射电场均为正极性,因此混合辐射时电场因叠加效应而显著增强。当深度大于 2.4 mm 时,电子辐射电场为负,质子辐射电场为正,但电子辐射电场远大于质子辐射电场,造成综合电场小于 0。根据图 5 得出的结论,1 MeV 电子和 16 MeV 质子单独辐射时粒子主要沉积在材料中间区域,但质子空间分布更为集中,导致中心区域质子数密度高于电子,所以材料上部和下部电场主要由电子沉积主导,中间区域电场由质子沉积主导。

根据电场强度云图和选定的参考方向,绘制出其他 4 组电子与质子单独辐射以及混合辐射时的电场分布随深度变化曲线,如图 12 所示。

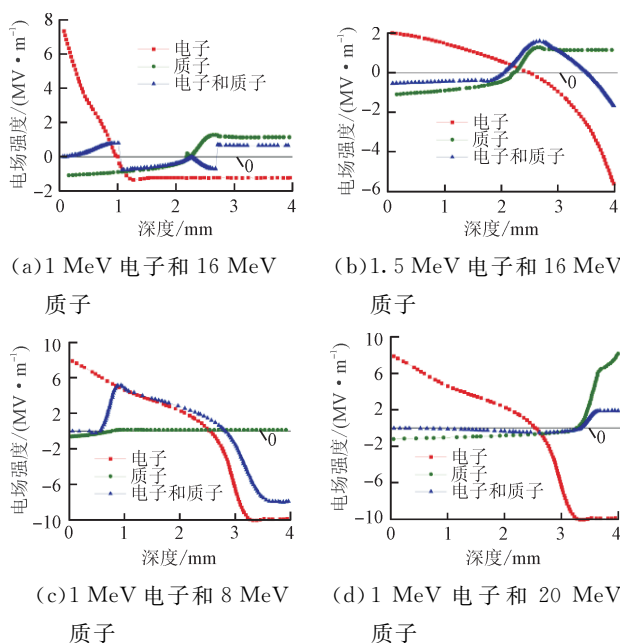


图 12 4 种不同混合辐射工况下介质内电场分布

Fig. 12 Electric field distributions of four groups of electrons and protons

图 12 分析结果表明,混合辐射下的电场强度分布可由电子与质子各自产生的电场叠加得到。当电子产生电场和质子产生电场方向相同时,混合辐射电场增强,二者产生的电场方向相反时,则混合辐射电场减弱。因此,电介质内部不同深度处的电场畸变情况需结合实际辐照条件进行具体分析。

4 太阳同步轨道电子和质子混合辐射电场分布

实际空间环境通常存在多种粒子且粒子能谱分布多变,因此需要在 GEANT4 中建立多粒子的能谱辐射源,模拟复杂的空间环境。为了评估太阳同步轨道(sun-synchronous orbit, SSO)下电子与质子混合辐射下聚酰亚胺介质深层电场分布,并考虑到对称位置下辐射条件的相似性,选择 800 km 高度 SSO 中的南极点、北纬 45°点以及赤道点 3 个位置。

本文采用轨道平静期带电粒子的能谱数据进行充电效应仿真,即不考虑磁暴、宇宙射线等特殊事件。参照美国国家航空航天局 AP9/AE9 辐射模型和其他卫星数据,计算 800 km 轨道下电子和质子的积分能谱。图 13 为太阳同步轨道下不同纬度处的电子、质子通量。

通过混合辐射仿真计算方法,分别计算了 SSO 南极点、北纬 45°、赤道点位置在电子、质子混合辐射下的聚酰亚胺介质电场强度,分布云图如图 14 所示。

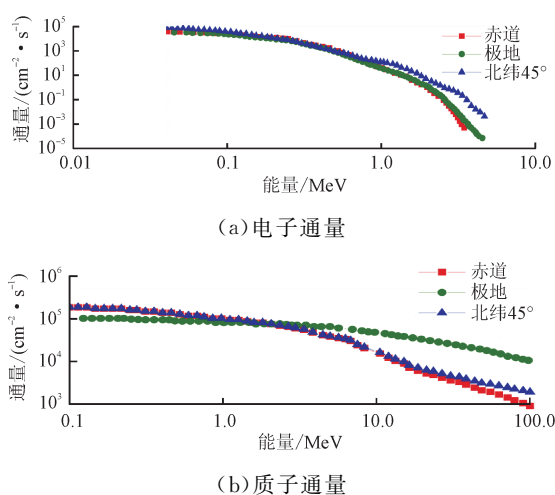


图 13 太阳同步轨道下不同纬度处的电子与质子通量
Fig. 13 Electron and proton fluxes at different latitudes in sun-synchronous orbits

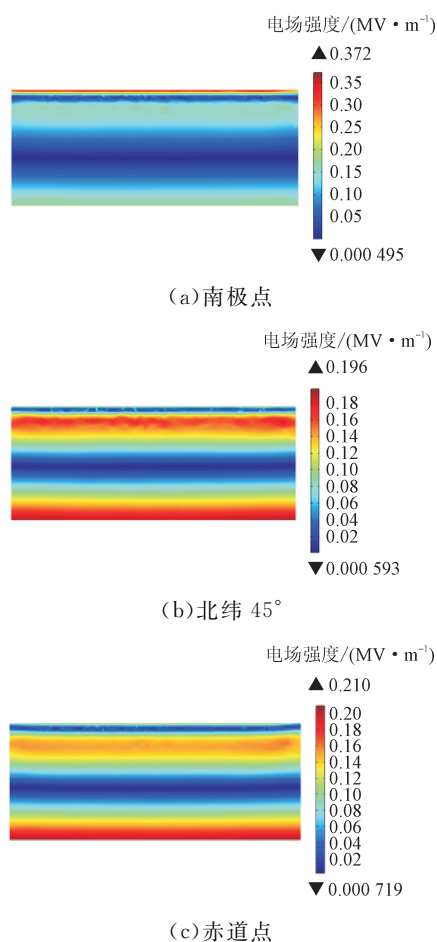


图 14 SSO 混合辐射介质充电电场分布云图
Fig. 14 Contour diagram of electric field distribution for SSO hybrid radiation medium charging

在 SSO 轨道环境下,南极点、北纬 45°、赤道点 3 个典型位置最大电场分别为 0.372、0.196、0.210 MV/m, 并且其电场强度随深度均呈现双峰

型分布特征。对比表明,在南极位置电场强度最大,在北纬 45°附近电场强度最小。分析 SSO 下 3 个位置的最大电场强度可知,在南极处位置处介质充电危害最严重,北纬 45°附近充电危害最弱。

通过以上分析可知,介质内电场强度分布的畸变程度,要依据实际辐射环境,判断多粒子能谱条件下介质内最大电场强度的相互增强或相互削弱现象。

5 结 论

本文采用 GEANT4-COMSOL 联合充电评估方法,建立电子与质子混合辐射模型,得到单能电子和质子混合辐射时的充电特性和电场分布规律,在此基础上计算 SSO 轨道能谱电子和质子混合辐射时的充电特性,得到结论如下。

(1)单能电子和单能质子混合辐射时,在聚酰亚胺介质中均出现双峰型电场分布,两种电荷所产生的电场畸变特性在辐射深度上存在复杂的分布特性,可依据电场参考实际方向判断两者的相互削弱或者相互增强作用。

(2)太阳同步轨道 3 组位置混合辐射结果表明,在北纬 45°附近运行时产生的电场强度最小,而在南极位置电场强度最大。电子与质子混合辐射方法可以有效地评估真实环境下的充电危害水平。

本文以太阳同步轨道平静期的空间粒子通量为依据,未考虑太阳质子事件等极端环境因素,对于 SSO 轨道能谱与其他环境辐射的叠加效应,将在后期进一步开展相关研究工作。

参考文献:

- [1] 原青云, 张希军, 段赛赛. 真空环境温度对聚酰亚胺表面充电特性的影响 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(10): 1172-1179.
YUAN Qingyun, ZHANG Xijun, DUAN Saisai. Impact of vacuum environmental temperature on surface charging characteristics of polyimide [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(10): 1172-1179.
- [2] ECOFFET R. Overview of in-orbit radiation induced spacecraft anomalies [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(3): 1791-1815.
- [3] 黄建国, 韩建伟. 航天器内部充电效应及典型事例分析 [J]. 物理学报, 2010, 59(4): 2907-2913.
HUANG Jianguo, HAN Jianwei. Analysis of a typical internal charging induced spacecraft anomaly [J]. Acta

- Physica Sinica, 2010, 59(4): 2907-2913.
- [4] 尚鹏辉, 张博, 王鹏, 等. 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 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(4): 154-161.
SHANG Penghui, ZHANG Bo, WANG Peng, et al. Influence of grounding mode and working voltage on the internal charging characteristics of polyetherimide under electron irradiation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(4): 154-161.
- [5] 全荣辉. 航天器介质深层充放电特征及其影响 [D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2009.
- [6] 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.
- [7] 刘尚合, 胡小锋, 原青云, 等. 航天器充放电效应与防护研究进展 [J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2108-2118.
LIU Shanghe, HU Xiaofeng, YUAN Qingyun, et al. Research progress in charging-discharging effects and protection of spacecraft [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2108-2118.
- [8] 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): 585-594.
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): 585-594.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 秦司晨. 温度循环和电子辐照下聚醚酰亚胺电荷积聚机理及效应 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
- [12] 刘人郢. 高能电子辐射下航天器驱动滑环的深层充电特性及多维优化设计 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- [13] GREEN N W. Proton induced internal electrostatic discharges and charge storage in spacecraft dielectrics [C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2007: AIAA 2007-97.
- [14] UDALAGAMA C, BETTIOL A A, WATT F. Stochastic spatial energy deposition profiles for MeV protons and keV electrons [J]. Physical Review: B, 2009, 80(22): 224107.
- [15] 秦晓刚, 贺德衍, 杨生胜, 等. 行星际空间质子引起介质深层充电的 GEANT4 模拟研究 [J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 526-530.
QIN Xiaogang, HE Deyan, YANG Shengsheng, et al. Geant4 simulation of interplanetary proton induced deep dielectrics charging [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(2): 526-530.
- [16] 刘婧, 张海波. 空间电子辐照聚合物的充电特性和微观机理 [J]. 物理学报, 2019, 68(5): 250-257.
LIU Jing, ZHANG Haibo. Charging characteristics and micromechanism of space electrons irradiated polymers [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(5): 250-257.
- [17] 田天, 焦维新, 陈旭, 等. 用蒙特卡罗方法研究质子在航天器内部充电中的作用 [J]. 空间科学学报, 2011, 31(1): 93-99.
TIAN Tian, JIAO Weixin, CHEN Xu, et al. Study on the effects of protons to spacecraft internal charging with Monte Carlo method [J]. Chinese Journal of Space Science, 2011, 31(1): 93-99.
- [18] 秦晓刚, 贺德衍, 王骥. 基于 Geant4 的介质深层充电电场计算 [J]. 物理学报, 2009, 58(1): 684-689.
QIN Xiaogang, HE Deyan, WANG Ji. Geant4-based calculation of electric field in deep dielectric charging [J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(1): 684-689.
- [19] 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): 145-154.
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): 145-154.
- [20] 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.
- [21] 张懿议, 马海帮, 王倩, 等. 非线性电导聚合物材料研究进展 [J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 461-471.

- ZHANG Yiyi, MA Haibang, WANG Qian, et al. Research progress of nonlinear conductivity polymer materials [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 461-471.
- [22] 卜文, 王威望, 李盛涛. 铝屏蔽间隙对聚醚醚酮高能电子辐射下介质深层充电特性的影响 [J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 4031-4041.
- BU Wen, WANG Weiwang, LI Shengtao. Effect of aluminum shielding gap on deep dielectric charging characteristics of polyetheretherketone under high energy electron irradiation [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 4031-4041.
- [23] 原青云, 王松, 黄欣鑫. 航天器介质盘环结构内带电特性三维仿真分析 [J]. 航空学报, 2019, 40(9): 283-292.
- YUAN Qingyun, WANG Song, HUANG Xinxin. 3-D simulation of internal dielectric charging characteristics of spacecraft dielectric disc structure [J]. Acta Astronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(9): 283-292.
- [24] 唐夫乐. 基于 GEANT4 的航天器介质抗内带电数值模拟 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [25] MIYAJI Y, MIYAKE H, TANAKA Y. A study on the estimation of RIC (radiation-induced conductivity) of proton irradiated polyimide [J]. Polymers, 2023, 15(2): 337.
- (编辑 陶晴)