

地面试验模拟介质深层充电有效性仿真分析*

龙明兵¹⁾²⁾ 朱翔^{1)†} 李宏伟¹⁾³⁾ 赵旭¹⁾张琬迎¹⁾ 陶孟泽¹⁾ 韩建伟^{1)3)‡}

1) (中国科学院国家空间科学中心, 太阳活动与空间天气全国重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

3) (中国科学院大学航空宇航学院, 北京 100049)

(2025 年 2 月 28 日收到; 2025 年 4 月 24 日收到修改稿)

高能电子引发的介质深层充放电效应, 是空间环境诱发地球同步轨道及中地球轨道航天器故障的重要原因之一. 地面模拟试验评估星用介质在轨深层充放电性能至关重要, 鉴于试验设备通常具有一定的局限性, 需开展对模拟试验评估的有效性进行分析. 本文介绍了介质深层充电的关键物理模型, 利用 DICTAT 程序, 仿真分析在相同的地球同步轨道应用遭遇的电子束流强度量级下, 铯源衰变电子、单能电子与地球同步轨道环境电子辐照聚四氟乙烯介质, 在舱表、舱内和单机内的 3 种不同屏蔽构型, 及不同介质厚度下的充电效果差异. 结果表明, 不同辐照条件下, 介质中沉积电子通量和介质接地处电子通量的差异是影响地球同步轨道充电效果的关键因素; 铯源可较有效模拟舱表和舱内介质的充电效果; 0.5 MeV 单能束可较有效模拟舱表介质的充电效果. 为增强试验评估有效性, 给出了不同屏蔽下的试验束流条件建议.

关键词: 介质深层充电, DICTAT 仿真, 电子通量, 试验束流建议**PACS:** 72.10.Bg, 52.25.Mq, 94.05.Jq, 94.30.Kq**DOI:** 10.7498/aps.74.20250248**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250248

1 引言

航天器在地球同步轨道 (geosynchronous orbit, GEO) 及中地球轨道 (medium Earth orbit, MEO) 运行期间, 会遭受外辐射带 0.1—10 MeV 能量范围内的高能电子辐射, 此类高能电子可穿透航天器的金属屏蔽层, 诱发介质深层充放电效应 (deep dielectric charging). 在高能电子暴期间, 高能电子通量的激增会显著提高这一风险^[1–5]. 介质深层充电是一个相对缓慢过程, 涉及高能粒子在介质中积累、泄漏和电场建立, 一旦电场强度超过介质击穿阈值, 可能发生电击穿, 引发内部静电放电 (internal

electro-static discharge, IESD). IESD 事件不仅损伤材料, 还可能干扰电子系统的正常运行, 对卫星电子仪器和整体安全构成严重威胁^[6,7].

在轨飞行试验是准确评估深层充放电效应相对有效的技术手段, 但其存在试验周期长、技术难度大、成本高昂等固有局限性, 难以实现大规模应用. 因此, 地面模拟试验成为当前研究该效应的重要替代方案. 现有地面模拟装置主要分为两类: 一种是基于 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射性同位素源的装置, 通过 β 衰变产生最大能量 2.28 MeV 的连续能谱电子束; 另一种是电子枪和电子加速器系统, 可生成几十 keV 至数 MeV 的单能电子束, 束流强度可调节^[8]. 需特别指出的是, 地面模拟环境与真实空间辐射环境存

* 中国科学院重点部署项目 (批准号: KGFZD-145-23-03) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhuxiang@nssc.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: hanjw@nssc.ac.cn

在本质差异. 在一系列关于深层充放电效应研究的模拟试验中, 研究者选择与实际空间电子环境束流强度相似的 pA/cm^2 量级的单能或者一定范围的连续能谱电子束流, 对具有不同屏蔽特性、介质厚度及组分特征的试样进行辐照实验, 试图模拟真实空间条件下的深层充放电现象与风险评估^[9-12], 然而, 不同能量电子在介质中的沉积特性存在显著差异, 这可能导致基于地面试验的空间效应评估出现系统性偏差 (过评估或欠评估)^[13], 因此需针对不同样品介质的地面模拟试验评估的有效性进行研究分析.

本研究基于欧洲航天局 (ESA) 开发的介质深层充电分析程序 DICTAT^[14], 系统分析了地面模拟试验中介质深层充电效应评估的有效性. 具体研究内容如下: 首次系统地量化分析现有地面模拟试验在介质深层充电评估中存在的有效性偏差问题. 第 2 节介绍介质深层充电过程中的关键物理量及其计算公式. 第 3 节通过 DICTAT 仿真平台, 对比分析舱表、舱内和单机内的不同厚度聚四氟乙烯 (Teflon) 对试验模拟充电效果的影响. 第 4 节提供不同屏蔽下满足较宽厚度适用的有效模拟的电子条件选取建议, 且仿真分析了介质材料普适性问题. 第 5 节为研究总结.

2 介质深层充电物理模型

卫星内部的平板介质结构件采用多种接地方式, 包括外表面、内表面或两表面接地^[15]. 本文以内表面接地平板介质为例, 分析其内部充电过程, 探讨影响深层充电关键物理量的变化. 电子在平板介质结构中沉积示意如图 1 所示.

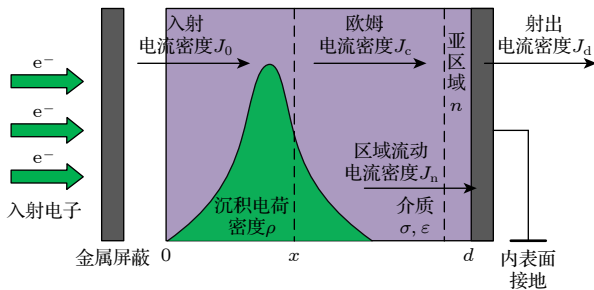


图 1 电子在平板介质结构中沉积示意图

Fig. 1. Demonstration of electron deposition in flat dielectric.

介质深层充电是电荷积累与泄漏这两个动态物理过程的相互竞争. 高能电子穿透屏蔽后在介质

内沉积, 形成沉积电荷, 导致表面电压上升和内部电场建立. 介质内部最大电场强度是介质击穿和放电的决定性因素, 在介质深层充电达到平衡状态的过程中, 介质内部电场会不断增大^[16]. 在评估不同电子条件对介质充电效果影响时, 应以介质内部平衡状态下的最大电场为评估标准, 这一电场受流动电流密度和电导率的共同影响.

将文献^[16]描述介质中任意深度 x , 任意时刻 t 处的电场强度 $E(x, t)$, 根据边界条件 $E(x, 0) = 0$ 和一阶非齐次微分方程通解, 可转化得到:

$$E(x, t) = \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma(x)}{\varepsilon} t\right) \right] \cdot \frac{e}{\sigma(x)} [\varphi_J(0) - \varphi_J(x)], \quad (1)$$

其中, $\sigma(x)$ 指深度 x 处区域的电导率, ε 是材料介电常数, $\varphi_J(0)$ 和 $\varphi_J(x)$ 是通过介质外表面和深度 x 处的平面入射电子通量, e 为电子电荷. 介质深层充电是一个由浅入深逐步达到平衡的过程, 电场强度随深度增大^[16]. 在考虑介质结构厚度为 d 时, 平衡状态下所有沉积的电流密度将流向接地表面, 在介质-接地面交界处 (亚区域 n), 最大电场 $E_{\max}$ 出现, 该区域放电风险最高^[14]. 根据 (1) 式, 可计算介质在充电平衡时的内部最大电场为

$$E_{\max} = E(n, t_e) = \frac{e}{\sigma(n)} [\varphi_J(0) - \varphi_J(d)] = \frac{J_f(n)}{\sigma(n)}, \quad (2)$$

其中, $\varphi_J(d)$ 是通过介质内表面的电子通量, $J_f(n)$ 和 $\sigma(n)$ 是亚区域 n 的流动电流密度和电导率. 达到平衡时通过深度 x 处的流动电流密度如下计算:

$$J_f(x) = J_{\text{deposited}}(0 - x) = J_0 - J_x = \varphi_J(0) \cdot e - \varphi_J(x) \cdot e, \quad (3)$$

其中, J_0 和 J_x 是介质外表面和 x 处的电流密度, 单位为 $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$.

在介质充电过程中, 电导率的变化受温度、强电场、强辐射的共同影响, 可表示为^[14]

$$\sigma = \sigma_{\text{dark}}(E, T) + \sigma_{\text{ric}}(\dot{D}) = \sigma_{\text{dark}} + k_p \dot{D}^\Delta, \quad (4)$$

其中, σ_{dark} 为介质暗电导率, σ_{ric} 为辐射诱发电导率 (单位: $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), k_p 是 RIC 剂量率因子 (单位: $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$), $\dot{D}$ 是辐射剂量率 (单位: rad/s), Δ 是与介质材料性能有关的无量纲指数, 取 0.6—1.0.

文献^[17]描述了介质暗电导率与电场 E 和温度 T 变化关系, 而辐射剂量率随深度的变化可用电子通量所产生的电流密度表示为^[14,16]

$$\dot{D}(x) = k_r \cdot \gamma_e \cdot \varphi(x) \cdot e = k_r \cdot \varphi_J(x) \cdot e, \quad (5)$$

其中, $k_t = 1.92 \times 10^{11} \text{ rad} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ 是一个常数因子, 对于平板介质 $\gamma = \pi$ 是几何因子, $\varphi(x)$ 是方向入射电子通量.

3 地面试验模拟与空间环境深层充电效果的仿真对比研究

本研究系统分析了航天器舱表 (0 mm 铝屏蔽)、舱内 (~0.8 mm 铝屏蔽) 和单机内 (~3.8 mm 铝屏蔽) 3 种典型屏蔽构型下, 不同厚度 Teflon 对试验模拟充电效果的影响, 以揭示在相同空间束流强度下, 地面试验中使用的铯源衰变电子和单能束电子, 模拟 GEO 环境电子对介质充电效果评估的有效性.

3.1 仿真工具与输入电子能谱

本研究采用欧洲航天局 (ESA) 官方支持的 SPENVIS 平台 [18] 进行仿真. 该平台面向全球科研用户开放, 提供多种空间环境效应的模拟工具, 其中包括集成的 DICTAT 模块, 专门用于模拟航天器介质的深层充电现象, 通过计算电子在介质中沉积电流来评估最大电场与静电放电风险 [14]. 本文针对星上常用的电介质 Teflon 材料的内表面接地平板结构, 严格遵循 SPENVIS 平台的服务条款完成了仿真, 所用 ESA 推荐介质材料的物理性能参数列于表 1.

为系统评估地面模拟试验与空间实际环境对介质充电效果的差异性影响, 本研究设计并实施了 5 组电子辐照条件的对比仿真, 具体包括: 两种连续能谱, 一种基于 NASA-HDBK-4002 手册 [19] 建议的 GEO 卫星最恶劣环境电子能谱; 另一种是中国科学院国家空间科学中心 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源装置在一定垂直距离处的电子能谱, 两种连续电子能谱的平面积分通量强度均为 $2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 能谱分布以及不同能量电子对应铝和 Teflon 中射程如

图 2 所示. 以及 3 种单能电子束, 取上述两种连续能谱中均包含的能量值, 分别为 0.5, 1 和 2 MeV, 每种能量的通量强度与 GEO 恶劣环境相同, 均为 $2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

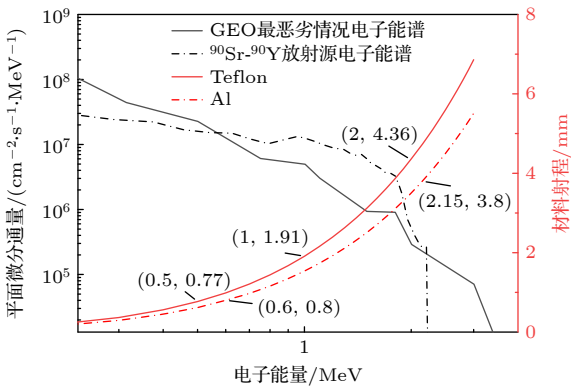


图 2 GEO 恶劣环境电子能谱和 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源电子能谱分布和不同能量电子对应 Al 和 Teflon 中射程
Fig. 2. Electron energy spectrum of GEO harsh environment and electron distribution of ^{90}Sr - ^{90}Y radioactive source and electrons of different energies correspond to Al and Teflon intermediate ranges.

3.2 仿真模拟结果

Teflon 在不同铝屏蔽下相同空间束流强度的各电子能谱辐射充电效果与介质厚度关系如图 3 所示. 分析结果显示, 对于 0.5—6 mm 厚度 Teflon: 1) 随着介质厚度的增大, 介质在各电子能谱辐射下的充电平衡最大电场强度均先增大后趋于饱和, 且在无屏蔽时, 饱和部分充电效果相似. 2) 铯源在较宽厚度范围内可较为有效模拟 GEO 环境辐射舱表和舱内的介质充电效果, 仅对舱表的薄介质有较低倍欠评估, 对舱内的中等厚度介质有低倍过评估. 3) 0.5 MeV 单能束亦可较有效模拟舱表 GEO 环境辐射, 仅对 1 mm 中等厚度介质有较低倍过评估; 4) 1 MeV 和 2 MeV 单能束辐照模拟有效评估舱表和舱内的介质整体适用厚度范围较小. 对舱表介质, 厚度越小充电效果欠评估相差倍数越大.

表 1 介质材料的物理性能参数
Table 1. Physical performance parameters of the dielectric materials.

电介质	Teflon	Mylar	Plexiglas	Cmxglass	Polythene	Expoy	Etfe	Kapton
$k_p/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s})$	2.0×10^{-16}	3.0×10^{-20}	2.2×10^{-17}	1.0×10^{-16}	4.5×10^{-16}	6.5×10^{-16}	2.0×10^{-16}	1.0×10^{-15}
$\sigma/(\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	1.0×10^{-16}	1.0×10^{-16}	1.0×10^{-15}	1.0×10^{-13}	1.0×10^{-14}	2.5×10^{-15}	1.0×10^{-16}	1.0×10^{-15}
Δ	0.7	0.8	1.0	1.0	0.8	1.0	0.8	0.6
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.17	1.4	1.2	2.61	0.93	1.5	1.7	1.42
$\varepsilon_r/(\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$	2.15	3.0	4.0	3.8	2.26	3.6	2.5	3.45

对舱内介质, 1 MeV 在整体厚度范围内为较高倍过评估, 2 MeV 对较薄介质有较高倍欠评估、对厚介质有较高倍过评估. 5) 对于单机内 3.8 mm 铝屏蔽条件下, 铯源大量电子基本被屏蔽, 导致介质充电效果较低, 不适用于该屏蔽下的模拟评估. 0.5 MeV, 1 MeV 和 2 MeV 能量电子被完全屏蔽, 导致其无法使得介质充电. 若选用 GEO 电子能谱包含的 2.5 MeV 和 3 MeV 单能束, 通量强度与 GEO 恶劣环境相同, 均为 $2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 模拟辐照 Teflon 充电效果, 整体有较高倍过评估.

3.3 充电效果差异的物理分析

由 (2) 式可知, 介质亚区域 n 的流动电流密度 $J_f(n)$ 反映电荷输运能力 (正比于电场), 而总电导率 $\sigma(n)$ 反映电荷耗散能力 (反比于电场). 为统一分析图 4 中参数随厚度的变化趋势, 将总电导率转换为总电阻率 $\rho(n) = 1/\sigma(n)$, 使得物理意义更直观 (电阻率与电场同向变化, 二者均随厚度增大而

增大). 图 4 展示了无屏蔽条件下 Teflon 在相同空间束流强度的各电子能谱辐射下, 亚区域 n 电流密度和电阻率随介质厚度的关系. 随着介质厚度增大, 电流密度和电阻率均呈现先增大后饱和的趋势. 与图 3 所示最大电场强度变化规律一致, 且电流密度变化趋势与电场强度的相关性更显著. 这表明电流密度为影响最大电场的主要要素, 其对饱和最大电场的影响差异不大.

铯源与 GEO 能谱电子分布对比 (图 2) 表明: 铯源在中高能段 ($> 1 \text{ MeV}$) 电子通量占比高, 低能段电子通量强度略低于 GEO 能谱. 这一差异导致在较薄介质条件下, 铯源辐照时低能电子沉积比例相对较少 (大量中高能电子穿透介质), 使得介质-接地面交界处出现三方面协同效应: 1) 沉积电子通量较小, 导致流动电流密度微低; 2) 介质接地处电子通量较大, 使总电阻率微低; 3) 二者共同作用使介质充电平衡最大电场略低与 GEO 能谱辐射.

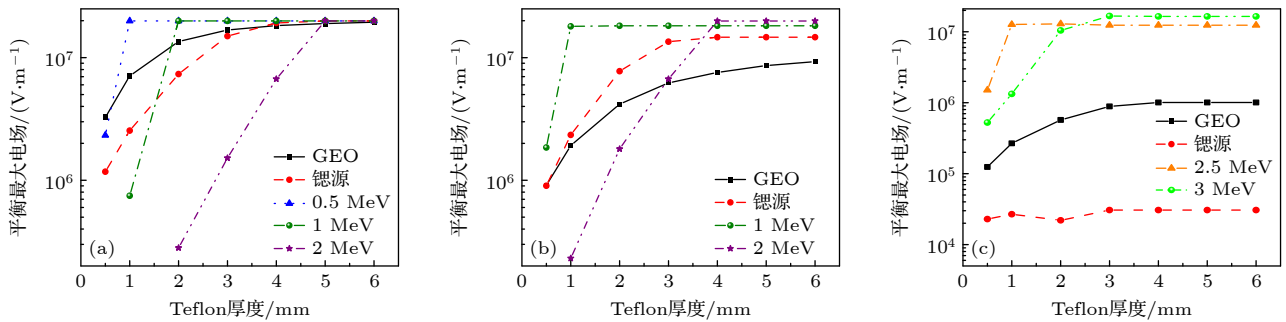


图 3 Teflon 在不同铝屏蔽下相同空间束流强度的各电子能谱辐射充电效果与介质厚度关系 (a) 无屏蔽; (b) 0.8 mm 铝屏蔽; (c) 3.8 mm 铝屏蔽

Fig. 3. Relation between the radiation charging effect of each electron energy spectrum of Teflon with the same spatial beam intensity and the thickness of the medium under different aluminium shielding: (a) No shielding; (b) 0.8 mm aluminium shield; (c) 3.8 mm aluminium shield.

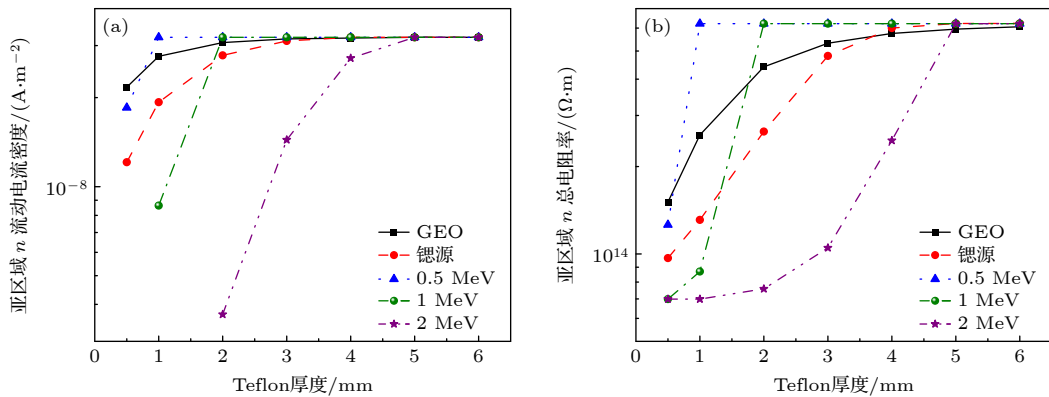


图 4 无屏蔽 Teflon 在相同空间束流强度的各电子能谱辐射下亚区域 n 电流密度和电阻率与介质厚度关系 (a) 流动电流密度; (b) 总电阻率

Fig. 4. Relationship between sub-region current density and resistivity and dielectric thickness of unshielded Teflon under different electron energy spectrum radiation with the same spatial beam intensity: (a) Flow current density; (b) total resistivity.

在单能电子束模拟辐照介质充电过程中, 电子沉积主要发生在射程前的衰减区间. 基于 Weber^[20] 和 Sørensen^[21] 研究的电子在材料中射程 R 与衰减距离 a , 可计算出 0.5, 1 和 2 MeV 电子在 Teflon 中沉积厚度范围分别为 0.12—0.77 mm, 0.61—1.91 mm 和 1.75—4.36 mm. 特别地: 1) 在 0.5 mm 厚度时, 0.5 MeV 电子已接近射程末端, 较 GEO 能谱相比, 均是大通量电子沉积, 流动电流密度和电阻率均差异较小, 使得介质充电平衡最大电场相近. 2) 0.5 MeV 电子在 Teflon 薄材料中能完全沉积; 而相同束流强度的 GEO 能谱包含的高能电子会部分穿透 (使 0.5 MeV 电子完全沉积的同等厚度) 介质, 导致 GEO 能谱辐射下的电流密度和电阻率偏低, 使得充电电场偏低. 3) 当介质厚度增大时, 0.5 MeV 电子辐照导致的平衡最大电场已饱和, 而 GEO 能谱中的高能电子持续沉积, 电流密度和电阻率均增大, 使得充电电场增大, 两种辐射条件的电场差异逐渐减小; 且当介质厚度足够大时, 二者充电效果趋于一致.

1 MeV 和 2 MeV 单能电子束辐照较薄介质时, 无电子或仅少量电子沉积, 大量电子射出介质, 而 GEO 能谱中大量低能电子沉积介质充电, 导致这两种单能电子束条件较 GEO 能谱辐射相比, 流动电流密度和电阻率低, 介质充电平衡最大电场低. 2 MeV 电子, 其主要在 Teflon 的中高厚度间沉积, 因此对宽范围的薄介质材料明显欠评估. 1 MeV 和 2 MeV 单能电子束对厚介质材料有一定过评估, 与 0.5 MeV 电子在特定厚度介质下较 GEO 能谱先能够完全沉积, 平衡最大电场较先达到饱和的机制具有相似性.

当存在 0.8 mm 铝屏蔽时, 1) 对镅源与 GEO 能谱, 屏蔽层将 0.6 MeV 及以下电子完全吸收, 而图 2 显示镅源在大于 0.6 MeV 能段的电子通量强度略高于 GEO 能谱, 导致在中高厚度介质中: ①沉积电子通量较大, 导致流动电流密度微高, ②介质接地处电子通量较小, 使总电阻率微高, 二者共同影响介质充电平衡最大电场略高. 2) 对单能电子束, 1 MeV 和 2 MeV 电子经屏蔽后能量分别降至约 0.4 MeV 和 1.4 MeV, 其再入射介质沉积行为分别与无屏蔽时的 0.5 MeV 和 1 MeV 电子类似, 但由于这些单能电子束散射后的剩余通量仍然高于 GEO 能谱, 因此沉积于介质中的电子通量较大, 使充电平衡最大电场较高.

当存在 3.8 mm 铝屏蔽时, 2.15 MeV 及以下电子几乎被完全屏蔽, 镅源残余电子通量远低于 GEO 能谱, 见图 2. 因此, 镅源模拟介质充电平衡最大电场较低. 对于采用总束流强度相同的 2.5 MeV 和 3 MeV 单能束模拟辐照 Teflon 充电效果, 与 GEO 仅剩的低通量高能电子相比, 这些单能束电子经过铝屏蔽传输后, 沉积于介质中电子通量较大, 导致流动电流密度较高, 而介质接地处电子通量较少, 使总电阻率较高, 二者共同影响介质充电平衡最大电场较高.

根据图 3 数据分析, 提出单能电子束的有效模拟优化方案: 1) 0.5 MeV ($2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 电子束, 可有效模拟评估 GEO 能谱电子对舱表无屏蔽下 Teflon 介质在较宽厚度范围内的充放电影响; 2) 对于在 0.8 mm 和 3.8 mm 铝屏蔽条件下的舱内和单机设备内, 考虑模拟 GEO 能谱电子辐射有效评估的整体适用介质厚度范围较大, 可分别选取 1 MeV 和 3 MeV 能量电子束, 因为它们在宽厚度范围内与 GEO 充电效果差异比近似, 通过适当降低其通量, 使得充电效果过评估程度降低, 从而实现更有效的评估.

4 有效模拟的试验电子条件选取建议

单能电子束和镅源电子条件与 GEO 环境电子能段分布的差异, 有可能通过调节试验电子的总通量, 以影响介质中沉积电子通量以及介质接地处电子通量, 从而使介质充电平衡时的最大电场更接近 GEO 环境辐射, 进而实现有效模拟评估的试验目的.

4.1 优选束流条件

为满足较宽厚度介质均可有效模拟的需求, 经多次尝试和验证, 分别选 0.5 MeV ($2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 1 MeV ($2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 3 MeV ($1.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 单能电子束可较为有效模拟 GEO 环境辐射舱表、舱内和单机内 Teflon 介质的充电效果, 仿真结果如图 5 所示. 调整束流后的单能电子束对 Teflon 充电平衡最大电场值, 与 GEO 环境电子辐射的平衡最大电场值较为相近, 在 3 种屏蔽条件下, 有效模拟评估的整体适用介质厚度范围均较大, 局部最大差异小于 2 倍, 大部分厚度下相差不超过 1 倍, 表现为轻微过评估或欠评估.

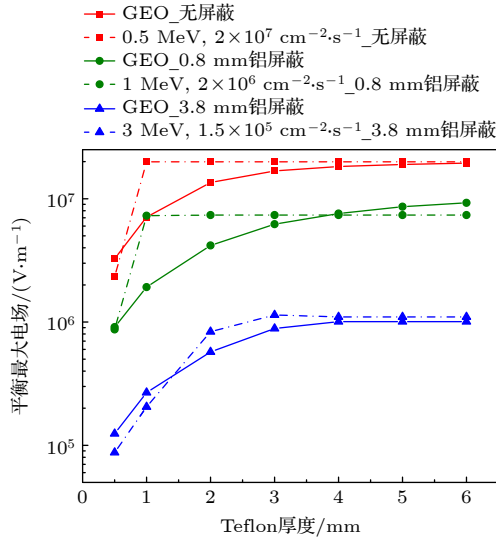


图5 三种单能束电子条件与 GEO 环境电子辐射舱表、舱内和单机内 Teflon 的充电效果对比

Fig. 5. Comparison of the charging effects of Teflon on the surface, inside the cabin, and inside the single machine under three single-energy beam electron conditions and the GEO environmental electron radiation cabin.

4.2 材料普适性分析

为研究上述束流条件对表1中其他常用星用介质材料是否具有普适性, 本文对剩余7种介质进行充电仿真, 其充电效果的仿真结果对比如图6所示. 从图中可看出, 8种介质材料在3.8 mm 铝屏蔽条件下, 充电效果差异在整体质量厚度下相差均不超过1倍, 表现为轻微过评估或欠评估. 对于舱表和舱内的两种屏蔽下, 除 Kapton 材料外, 其他6种介质材料的充电效果差异均优于 Teflon 材料, 这些介质材料在较宽质量厚度范围内具有较大的有效模拟评估适用性, 局部最大差异小于2倍, 大

部分质量厚度下相差不超过1倍, 表现为轻微过评估或欠评估. 仅 Kapton 材料在局部最大差异反而增大.

在相同的屏蔽条件和电子辐射下, 对于具有相同质量厚度下的不同介质材料, 它们中沉积电子通量和介质接地处电子通量相同, 导致介质亚区域 n 的流动电流密度 $J_f(n)$ 和辐射剂量率 $\dot{D}(n)$ 相同. 因此, 不同介质充电最大电场的局部差异大小取决于介质亚区域 n 总电导率比值, 且从图5可发现, 局部最大差异出现在单能电子足以完全沉积且最大电场开始饱和时 (介质质量厚度为 0.217 g/cm^2 , 对应 $\dot{D}_{\text{GEO}}$ 在 0 和 0.8 mm 铝屏蔽下分别为 0.085 和 0.025 rad/s). 此时, 不同介质的电场局部差异与 k_p 和 Δ 影响的 GEO 电子辐射下介质辐射电导率和单能电子辐照介质最大电场饱和时暗电导率的比值成正比. 这个比值与 $\sigma_{\text{dark, ms}}$ 、 k_p 和 Δ 关系为

$$\frac{E_{\text{单能}}}{E_{\text{GEO}}} \propto \frac{\sigma_{\text{dark, GEO}} + k_p \cdot (\dot{D}_{\text{GEO}})^\Delta}{\sigma_{\text{dark, ms}} + k_p \cdot (\dot{D}_{\text{ms}})^\Delta} \approx \frac{k_p \cdot (\dot{D}_{\text{GEO}})^\Delta}{\sigma_{\text{dark, ms}}} \quad (6)$$

因此, k_p 越大、 Δ 或 $\sigma_{\text{dark, ms}}$ (该电导率为表1中介质常温暗电导率受单能电子辐照饱和时的强电场影响后的值) 越小, 局部差异越大. 且此时 Teflon 和 Kapton 暗电导率分别较常温暗电导率增大了 16 倍和 3 倍 (无屏蔽)、3.2 倍和 1.23 倍 (0.8 mm 铝屏蔽), 因此结合表1可知, Kapton 材料较 Teflon 材料: k_p 大 5 倍、 $\sigma_{\text{dark, ms}}$ 大 2 倍 (无屏蔽) 和 3.8 倍 (0.8 mm 铝屏蔽)、 Δ 低 0.1, 使得 Kapton 材料在舱表和舱内的两种屏蔽下, 局部最大差异反而增大.

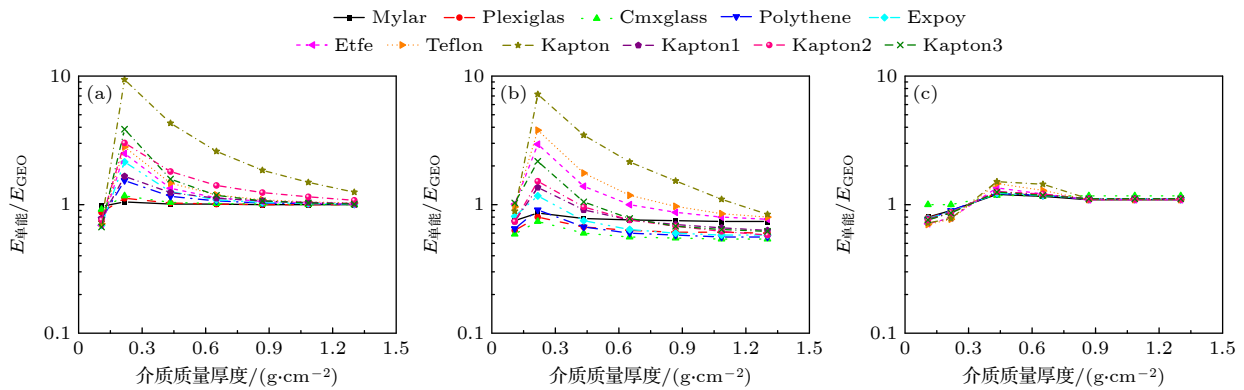


图6 单能束电子条件与 GEO 环境电子辐射8种介质材料的充电效果对比关系 (a) 无屏蔽; (b) 0.8 mm 铝屏蔽; (c) 3.8 mm 铝屏蔽

Fig. 6. Comparison of charging effects of eight dielectric materials under single-energy beam electron conditions and GEO environmental electron radiation: (a) No shielding; (b) 0.8 mm aluminium shield; (c) 3.8 mm aluminium shield.

文中仿真采用的 Kapton 物理性能参数基于欧空局 (ESA) 推荐值, 对 4.1 节中优选束流条件的单能电子模拟存在局限性. 但 Kapton 材料的 σ_{dark} , k_p 和 Δ 会因材料异质性、测试方法和环境条件等因素而有所不同, k_p , σ_{dark} 和 Δ 取值范围分别为 10^{-18} — $10^{-14} \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{s}$, 10^{-20} — $10^{-16} \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 0.6 — 1 [19,22–24]. 在保持 Kapton 材料其他参数不变的情况下, 分别改变其中一个参数条件: k_p 降低 1 个量级、 σ_{dark} 增大 1 个量级、 Δ 提高至 1, 分别定义为材料 Kapton1, Kapton2 和 Kapton3. 图 6 显示结果表明, 这些修改后介质的充电效果差异均优于原先 Kapton 材料, 且与其他材料相似.

5 结 论

本文利用 DICTAT 程序仿真分析在相同空间束流强度下, 地面试验的铯源衰变电子、单能束电子与 GEO 环境电子对不同厚度 (0 mm, 0.8 mm 和 3.8 mm) 铝屏蔽下的 (0.5—6 mm) Teflon 介质充电效果差异. 通过分析介质充电过程中的各物理影响因素, 得出以下结论.

1) 试验电子条件与实际空间环境的电子能段分布存在差异, 导致在不同厚度铝屏蔽下, 不同厚度介质中沉积电子通量和介质接地处电子通量有所区别, 这种差异性影响介质达到充电平衡时, 亚区域 n 的流动电流密度和电导率, 从而使充电效果相对于空间深层充电可能存在不同程度欠评估或过评估.

2) 在相同空间束流强度下, 铯源可较为有效模拟 GEO 环境辐射舱表和舱内 Teflon 的充电效果; 0.5 MeV 单能束可较为有效模拟舱表 GEO 环境辐射, 更高能量单能束辐照模拟有效评估的整体适用介质厚度范围均较小. 具体来说, 选取 3 MeV ($1.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 单能束可较为有效模拟 GEO 环境辐射单机内常用星用介质材料的充电效果, 对于较宽厚度范围介质充电效果差异相差不超过 1 倍. 选取 0.5 MeV ($2 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 和 1 MeV ($2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 单能束可为有效模拟 GEO 环境辐射舱表和舱内除 Kapton 材料外其他常用星用介质的充电效果, 仅局部存在相差 2 倍过评估.

参考文献

[1] Fennell J F, Koons H C, Roeder J L, Blake J B 2001

- Spacecraft Charging: Observations and Relationship to Satellite Anomalies* Aerospace Report TR-2001(8570)-5 (El Segundo CA: The Aerospace Corporation) pp2–6
- [2] Huang J G, Han J W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2907 (in Chinese) [黄建国, 韩建伟 2010 物理学报 **59** 2907]
- [3] Liu S H, Hu X F, Yuan Q Y, Xie X N 2019 *High Volt. Eng.* **45** 2108 (in Chinese) [刘尚合, 胡小锋, 原青云, 谢喜宁 2019 高电压技术 **45** 2108]
- [4] Wei D J, Zhu L Y, Wu J W, Tong Z A, Xia S W, Lin J Y 2023 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **51** 3384
- [5] Fennell J F, Koons H C, Chen M W, Blake J B 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 2029
- [6] Garrett H B, Whittlesey A C 2012 *Guide to Mitigating Spacecraft Charging Effects* (Hoboken: Wiley) pp25–35
- [7] Yu X Q, Chen H F, Zong Q G, Wang J Z, Shi W H, Zou H, Zou J Q, Zhong W Y, Chen Z, Shao S P, Jia X H 2016 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **63** 1306
- [8] Han J W, Zhang Z L, Huang J G, Quan R H, Li X Y 2007 *Spacecraft Environ. Eng.* **24** 47 (in Chinese) [韩建伟, 张振龙, 黄建国, 全荣辉, 李小银 2007 航天器环境工程 **24** 47]
- [9] Zhang Z L, Han J W, Quan R H, An G P 2009 *Spacecraft Environ. Eng.* **26** 210 (in Chinese) [张振龙, 韩建伟, 全荣辉, 安广朋 2009 航天器环境工程 **26** 210]
- [10] Paulmier T, Dirassen B, Payan D, Van Eesbeek M 2009 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **16** 682
- [11] Liu J K, Zhang K M, Liu Q, Wang S, Wang B, Guo F 2018 *High Volt. Eng.* **44** 864 (in Chinese) [刘继奎, 张可墨, 柳青, 王松, 王斌, 国锋 2018 高电压技术 **44** 864]
- [12] Molinie P, Dessante P, Hanna R, Paulmier T, Dirassen B, Belhaj M, Payan D, Balcon N 2012 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **19** 1215
- [13] Chen W, Yang H L, Guo X Q, Yao Z B, Ding L L, Wang Z J, Wang C H, Wang Z M, Cong P T 2017 *Sci. Bull.* **62** 978 (in Chinese) [陈伟, 杨海亮, 郭晓强, 姚志斌, 丁李利, 王祖军, 王晨辉, 王忠明, 丛培天 2017 科学通报 **62** 978]
- [14] Sorensen J, Rodgers D J, Ryden K A, Latham P M, Wrenn G L, Levy L, Panabiere G 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 491
- [15] Huang J G, Chen D 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1611 (in Chinese) [黄建国, 陈东 2004 物理学报 **53** 1611]
- [16] Huang J G, Chen D 2004 *Chin. J. Geophys.* **47** 392 (in Chinese) [黄建国, 陈东 2004 地球物理学报 **47** 392]
- [17] Adamec V, Calderwood J H 1975 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **8** 551
- [18] SPENVIS (Space Environment Effects and Education System), ESA <https://www.spennis.oma.be/> [2025-2-17]
- [19] NASA Office of the Chief Engineer 2022 *NASA-HDBK-4002B: Mitigating In-Space Charging Effects—A Guideline* (Washington D. C. : NASA) pp37–105
- [20] Weber K H 1963 *Nucl. Instrum. Methods* **25** 261
- [21] Sørensen J 1996 *Proceedings of the ESA Symposium on Environment Modelling for Space-Based Applications Noordwijk, Netherlands, June 10–12, 1996* p129
- [22] Plis E A, Engelhart D P, Likar J, Hoffmann R C, Cooper R, Ferguson D 2018 *J. Spacecr. Rockets* **55** 775
- [23] DuPont 2022 *Kapton® Summary of Properties* (Wilmington: DuPont) pp10–11
- [24] McAlees M 2000 *Raw Material Challenges and New Technology Innovations in Pressure Sensitive Tape* (Circleville: DuPont) pp294–298

Simulation analysis of effectiveness of deep dielectric charging in ground tests^{*}

LONG Mingbing¹⁾²⁾ ZHU Xiang^{1)†} LI Hongwei¹⁾³⁾ ZHAO Xu¹⁾
ZHANG Wanying¹⁾ TAO Mengze¹⁾ HAN Jianwei^{1)3)‡}

¹⁾ (State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²⁾ (School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³⁾ (School of Aeronautics and Astronautics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 28 February 2025; revised manuscript received 24 April 2025)

Abstract

The deep charge-discharge effect in dielectrics induced by high-energy electrons is a major cause of spacecraft anomalies and failures in geosynchronous orbit (GEO) and medium earth orbit (MEO). To evaluate the in-orbit deep charging and discharging behavior of satellite dielectric materials, ground-based simulation testing is essential. However, due to limitations in ground test conditions, it is necessary to conduct a comprehensive analysis of the effectiveness of such evaluations. This paper introduces the key physical model of deep dielectric charging, taking a grounded planar dielectric with an irradiated inner surface as a representative case to analyze the internal charging process and the evolution of critical physical quantities governing deep charging phenomena. In this study, the DICTAT simulation tool is used to investigate the charging effects of three distinct electron sources: strontium-90 decay electrons, monoenergetic electron beams, and GEO ambient electrons. In ground-based simulations, researchers typically use monoenergetic or continuous-spectrum electron beams with flux intensities on the order of $\text{pA}\cdot\text{cm}^{-2}$ to irradiate test specimens with varying shielding configurations, dielectric thicknesses, and material compositions, aiming to replicate *in-situ* deep charging phenomena and assess associated risks. Therefore, the simulations are conducted under electron flux levels representative of GEO orbital conditions. This study focuses on polytetrafluoroethylene (PTFE) dielectric samples under three typical spacecraft shielding configurations: 1) externally mounted on the cabin surface, 2) housed inside the pressurized cabin, and 3) embedded within standalone electronic subsystems, while systematically incorporating variations in dielectric thickness. The results show that the disparity between the electron flux deposited within the dielectric bulk and the flux at dielectric interfaces critically governs the severity of charging under varying irradiation conditions. Two key findings emerge as follows. 1) Discrepancies in electron energy spectra and their influence: the differences in energy spectra between the test electron source and the actual space environment lead to variations in deposited electron flux across different aluminum shielding thicknesses and dielectric depths. This discrepancy influences the equilibrium charging state by changing the current density and conductivity in sub-region- n (the dielectric-ground interface), potentially resulting in either underestimation or overestimation of deep charging effects compared with true space conditions. 2) Effectiveness of different electron sources for simulation: strontium-based sources (e.g. Sr-90 β -decay spectra) effectively replicate the internal charging behavior of Teflon (PTFE) materials on cabin exteriors and inside pressurized compartments under GEO-like electron flux conditions. 0.5 MeV monoenergetic

^{*} Project supported by the Key Deployment Project of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. KGFZD-145-23-03).

[†] Corresponding author. E-mail: zhuxiang@nssc.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: hanjw@nssc.ac.cn

electron beams are suitable for simulating surface dielectric charging on cabin exteriors. However, higher-energy monoenergetic beams exhibit limited applicability at varying dielectric thicknesses. Despite the similar flux intensity used in the tests compared with that in the actual space environment, the differences in energy distribution between the test beams and space electrons can lead to underestimation or overestimation of the charging effects. Based on the simulation results, this work provides recommendations for selecting appropriate test beam parameters under different shielding conditions to improve the accuracy of ground-based evaluations of in-orbit deep dielectric charging.

Keywords: deep dielectric charging, DICTAT simulation, electron flux, experimental beam current recommendation

PACS: 72.10.Bg, 52.25.Mq, 94.05.Jq, 94.30.Kq

DOI: [10.7498/aps.74.20250248](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250248)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250248](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250248)

地面试验模拟介质深层充电有效性仿真分析

龙明兵 朱翔 李宏伟 赵旭 张琬迎 陶孟泽 韩建伟

Simulation analysis of effectiveness of deep dielectric charging in ground tests

LONG Mingbing ZHU Xiang LI Hongwei ZHAO Xu ZHANG Wanying TAO Mengze HAN Jianwei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 137201 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250248

CSTR: 32037.14.aps.74.20250248

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250248>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电子能量损失谱探测银纳米棒与介质层强耦合的数值模拟

Numerical simulation of strong coupling between silver nanorod and dielectric layer detected by electron energy loss spectrum

物理学报. 2022, 71(14): 147302 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220194>

吉瓦级强流相对论多注电子束二极管的优化设计与实验研究

Optimal design and experimental research of several-gigawatt multiple electron beam diode

物理学报. 2021, 70(3): 038401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201336>

eXTP聚焦镜电子偏转器仿真分析与设计

Simulation analysis and design of electron deflector for eXTP focusing telescope

物理学报. 2025, 74(5): 059502 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241649>

射频/直流驱动大气压氩气介质阻挡放电的一维仿真研究

One-dimensional simulation of Ar dielectric barrier discharge driven by combined rf/dc sources at atmospheric pressure

物理学报. 2022, 71(24): 245202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221361>

恒流充电有限柱体电极浓度分布及扩散诱导应力解析分析

Analytical analysis of concentration distribution and diffusion-induced stress of finite-length cylindrical electrode under galvanostatic operation

物理学报. 2024, 73(15): 158201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231753>

氢原子钟双选态束光学系统仿真分析

Simulation analysis of hydrogen atomic clock double state-selection beam optical system

物理学报. 2023, 72(1): 013702 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221363>