第 49 卷 第 2 期：505-514 高电压技术 Vol.49, No.2: 505-514
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220155

金属屏蔽设置对极端电子辐射下滑环绝缘构件深层充电影响因素分析

王 健[1]，刘人郢[1]，肖若凡[1]，刘继奎[2]，黄旭炜[3]，李庆民[1]
（1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室，北京 102206；2. 北京控制工程研究所，北京 100089；
3. 重庆邮电大学自动化学院，重庆 400065）

摘 要：在太空极端电子辐射环境中，高能电子穿透金属屏蔽会引发滑环绝缘构件的深层充放电现象从而诱发功率传输部件(solar array drive assembly，SADA)的绝缘故障，甚至导致整星的失效。屏蔽外壳的材料、结构及配置方案等会对滑环绝缘构件的深层充电产生直接影响，因此有必要深入研究外壳的屏蔽作用并提升其防护效用，从而降低放电事故的可能性。为此建立三维滑环绝缘构件深层充电模型，得到了滑环绝缘构件电场和电势的三维分布。研究了金属屏蔽材料、屏蔽结构以及双层屏蔽对电子辐照下滑环绝缘构件最大电场的影响。结果表明，相同面密度下高原子序数金属材料比低原子序数金属材料能更好地屏蔽高能电子，但高原子序数金属材料因韧致辐射具有更高的光子透射率，容易对绝缘材料造成损伤；局部加强的屏蔽结构在质量一定的情况下能进一步降低滑环绝缘构件内部的电场畸变，在 1 mm 铝屏蔽质量的基础上，最大降低程度约 25%；采用双层金属屏蔽时，高原子序数的金属材料在滑环绝缘构件内侧更有利于高能电子的屏蔽,其原因在于低原子序数金属材料在最外侧时会先降低高能电子的能量，从而更好利用高原子序数金属材料具有高背散射系数的特点。

关键词：滑环绝缘构件；极端电子辐射；屏蔽外壳；深层充电；韧致辐射

Analysis of Metal Shield Setting Influence Factors on Deep Dielectric Charging of Slip Ring Insulating Components Under Extreme Electron Radiation

WANG Jian[1], LIU Renying[1], XIAO Ruofan[1], LIU Jikui[2], HUANG Xuwei[3], LI Qingmin[1]
(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100089, China; 3. College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In the extreme electron radiation environment of space, the penetration of high-energy electrons through the metal shield will lead to the deep dielectric charging of slip ring insulating components, which will induce the insulation failure of the Solar Array Drive Assembly (SADA), and even lead to the failure of the whole satellite. The material, structure and configuration scheme of the shielding shell will have a direct impact on the deep dielectric charging of the slip ring insulating components. Therefore, it is necessary to deeply study the shielding effect of the shell and improve its protective effect, so as to reduce the possibility of discharge accidents. In this paper, a 3-D deep charging model of slip ring insulating components is established and the 3-D distribution of electric field and potential of slip ring insulating components is obtained. The effects of metal shielding material, shielding structure, and double-layer shielding on the maximum electric field of slip ring insulating components under electron irradiation are studied. The results show that, under the same area density, high atomic number metal materials can better shield high-energy electrons than low atomic number, but high atomic number metal materials have higher photon transmittance due to bremsstrahlung radiation and are likely to cause damage to insulating materials. The locally strengthened shielding structure can further reduce the electric field distortion in the slip ring insulating components under certain quality. On the basis of 1 mm aluminum shielding quality, the maximum reduction is about 25%. When using double-layer metal shielding, the metal materials with high atomic number inside the slip ring insulating components is more conducive to the shielding of high-energy electrons. The reason is that when the low atomic number metal material is on the outermost side,the energy of high-energy electrons will first

基金资助项目：国家自然科学基金(52177140)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52177140).

be reduced, so as to make better use of the characteristics of high atomic number metal materials with high backscattering coefficient.

Key words：slip ring insulating components; high-energy electron radiation; shielding shell; deep dielectric charging; bremsstrahlung

0 引言

太阳帆板驱动机构(solar array drive assembly，SADA)直接暴露于太空环境下，当高能电子增强事件发生时，滑环绝缘构件面临着极端的电子辐射环境。部分高能电子会穿透 SADA 的金属屏蔽外壳，入射到滑环绝缘构件内部，从而引发电场畸变，当电场超过介质击穿阈值时会引发静电放电(electrostatic discharge，ESD)[1-2]。空间环境引发的航天器故障中，因高能电子辐照引发的故障约占 54%[3]，滑环绝缘构件的充放电效应已经严重影响航天器的安全运行。

当前，国内外研究人员针对航天用滑环绝缘构件内带电问题已经开展了地面模拟实验和计算机仿真分析。原青云等人基于电荷守恒定律提出了一种更适合内带电的三维仿真(charge conservation law，CCL)模型，并与(radiation induced conductivity，RIC)模型进行对比，所提模型具有更高的计算效率和精度；采用 Geant4 仿真软件获得了滑环绝缘构件在电子辐照下的电荷沉积速率和辐射剂量率，并基于所提 CCL 模型开展了地球同步轨道恶劣环境下滑环绝缘构件内带电三维仿真分析。分析表明，滑环绝缘构件内最大电场强度随着屏蔽厚度的增加而逐渐降低，但航天器在太空中同样面临着极端的温度环境，当温度低至 183 K 时，即使铝屏蔽的厚度为 3 mm 时，介质内仍存在放电发生的可能性[4-6]。西安交通大学的李盛涛等人利用 Weber 半经验公式建立电荷的沉积模型，利用电流连续性方程、电荷传导方程和泊松方程建立沉积电荷输运模型，通过基于有限元法的多物理场软件对方程联立求解得到了滑环绝缘构件二维仿真结果。通过该模型分析了不同辐照条件下的滑环绝缘构件内部空间电荷、电势和电场随时间和空间的分布特性，进一步研究了屏蔽厚度、绝缘挡边高度和绝缘材料对深层充电最大电场的影响，同样得到屏蔽设置对滑环绝缘构件的深层充电有着重要影响的结论，采用 2.5 mm 的铝屏蔽相较于没有屏蔽时，最大电子束流密度降低了约 2 个数量级[7-8]。美国的 NASA 先后开发了多款针对航天器深层充电的仿真软件，并结合地面模拟实验、仿真分析以及航天器设计经验指出：针对航天器的内带电效应，屏蔽结构的等效铝厚度应该至少设置为 2.8 mm[9]。

由上文可知，屏蔽是 SADA 对抗高能电子辐射的首道防线，对深层充电的防护起着更加直接的作用。目前，航天器的辐射屏蔽分为主动屏蔽和被动屏蔽[10]，主动屏蔽采用静电场、磁场、等离子体等使入射的电子发生偏转或者中和，而目前该项技术主要运用到航天器或者太空舱的整体屏蔽，而针对 SADA 部件采用主动屏蔽在工程实现上具有一定难度。SADA 现主要采用被动防护技术，采用铝合金蒙皮的方法进行高能电子的辐射屏蔽，西安交通大学尚鹏辉等人的研究表明，随着屏蔽厚度的增加，平板介质深层充电最大电场降低程度逐渐减弱[11]，随着未来高压大功率导电滑环的应用，高电压和高能电子辐照相互耦合会进一步提高电场畸变，对金属蒙皮的防护作用会提出更高的要求，而此时单纯增加屏蔽厚度势必会大幅增加 SADA 和航天器的自重，因此现有金属屏蔽效率不足。有必要针对滑环绝缘构件的结构和内带电基本特性，深入研究屏蔽外壳的材料、结构及配置方案对深层充电的防护作用。

本文采用 Geant4 和 COMSOL 联合仿真，建立了滑环绝缘构件的三维仿真模型，得到了三维电势和电场的基本分布特征，以此为基础，研究了金属屏蔽设置对滑环绝缘构件深层充电的影响，可为 SADA 抗辐射深层充电设计提供有益的参考价值。

1 卫星滑环绝缘构件三维深层充电模拟

本文根据 SADA 中滑环组件的结构特点，对三维仿真模拟进行适当简化，建立高能电子在静电力作用下减速沉积和在电场力作用下泄放过程的物理模型。

1.1 滑环绝缘构件三维模型设置

卫星或航天器的主要能量来源为太阳能，而太阳帆板驱动机构用于调整太阳能电池阵列的方向，从而最大效率地获得太阳能。SADA 内部通过导电环的滑动电接触来实现功率和信号的传输，滑环组

件主要由金属屏蔽外壳、电刷、绝缘构件、铜制电极组成。滑环组件的结构示意图如图 1 所示。

由于卫星的运行特性，滑环组件必须实时旋转从而实现太阳电池阵对日定向。在地球静止轨道，滑环组件的转速约为每 24 h 1 转，而在低地球轨道，滑环组件的转速约为每 90 min 1 转，电刷的存在对 SADA 深层充电特性的影响可忽略不记。滑环组件外侧环道传输电流大小要大于内测环道，因此设置最外侧两个环道的宽度为 6 mm，内侧环道宽度为 4 mm。沉积在聚酰亚胺绝缘介质内的电子会通过铜制电极进行泄放，因此，铜制电极可以视为接地条件。为减少模型计算量，选取图 1 中红色方框的局部区域进行仿真，同时忽略滑环组件弧度对深层充电特性的影响。在 SADA 中设置有多组滑环组件，位于内层的滑环组件不仅有金属屏蔽壳的保护，同时外层的滑环组件也可进一步屏蔽高能电子。由文献[7]可知，垂直入射的高能电子产生的深层充电效应要高于水平入射的高能电子，因此设置高能电子的入射方向为垂直入射，高能电子穿透金属屏蔽后运动方向会发射偏转。为使得绝大部分电子最后都沉积在滑环组件中，设置金属屏蔽距离滑环组件的高度为 2 mm。滑环绝缘构件的三维模型设置和高能电子辐照模拟如图 2 所示，射线 A 主要为入射的高能电子，射线 B 为产生的部分次级粒子。

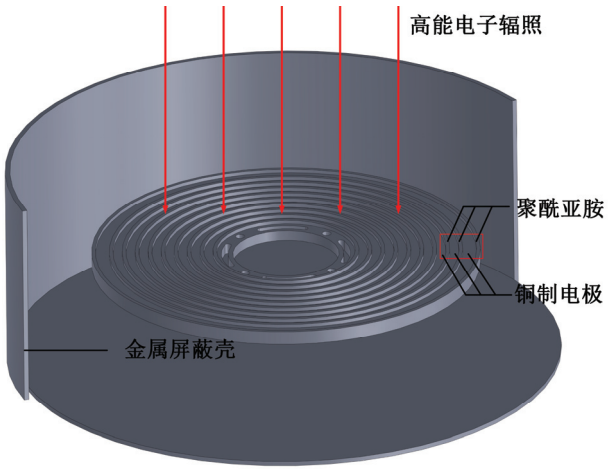


图 1　滑环组件结构示意图

Fig.1　Structure diagram of slip ring assembly

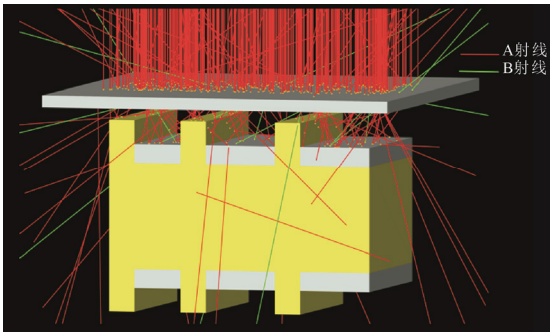


图 2　滑环绝缘构件三维局部模型和高能电子辐照模拟

Fig.2　3-D local model of slip ring insulating components and simulation of high energy electron irradiation

1.2　极端电子辐射环境设置

外辐射带的带电粒子主要包括质子和电子，但是电子通量明显大于质子的通量，外辐射带高能电子通量比内辐射带增大 1 个数量级左右，地球同步轨道位于外辐射带边缘，是通信和导航卫星的高密集区域，介质深层充电效应严重。FLUMIC 电子辐射环境模型给出了 L 范围为 $3R_E$~$7.5R_E$(大约为外辐射带范围)的积分电子能谱(L 是赤道面跟磁力线的交点离地心的距离，R_E=6371.2 km 是地球半径)。FLUMIC3 模型考虑了地磁高度(L)、太阳活动(f_{sc})及季节(f_{oy})等影响因素，用于欧洲太空局内带电仿真软件 DICTAT 的高能电子环境模型[12]，因此 FLUMIC3 模型能够用于滑环绝缘构件三维深层充放电仿真。FLUMIC3 模型中的电子积分能谱符合指数规律衰减，其表达式[13]为

$$F_E(>E_e)=F_0\exp(-E_e/E_0) \tag{1}$$

式中：$F_E(>E_e)$为能量大于 E_e 的积分电子通量，MeV；E_0 为指数衰减能量，MeV；F_0 按照外辐射带恶劣电子环境设置。由文献[11]可知，当 f_{sc}=0.85、f_{oy}=0.70、L=6.6 时，高能电子辐射通量最大，接近于 NASA 建议的最恶劣情况。

在 SADA 中，由于金属屏蔽壳的存在，能量较低的电子会被阻挡到 SADA 外部，对导电滑环的深层充放电没有影响，能量>5 MeV 的高能电子实际通量极低，不足以引起深层充电效应，可以忽略不计，因此仿真设置的电子能量范围为 0.1~5 MeV。Geant4 采用蒙特卡洛模拟方法，高能电子发射数量足够多时才能得到一般规律，但是随着模拟高能电子数量的增加，数据统计量呈比例增长。因此，本文兼顾仿真的准确性与数据统计难度，设置电子能量抽样间隔为 0.05 MeV，模拟电子发射总数为 10^8。对 Geant4 中电子发射能谱进行统计，与 FLUMIC3 模型进行对比，如图 3 所示，虚线表示 FLUMIC3 的高能电子积分能谱，实线表示 Geant4 模拟的高能电子能谱，从图 3 中可以看出，Geant4 可以很好地模拟极端太空辐射环境。

1.3 电子沉积和输运模型

金属屏蔽会阻挡绝大部分高能电子，但仍有一部分电子会穿透金属屏蔽，最后沉积在绝缘介质和铜制电极中，沉积在绝缘介质中的高能电子会通过铜制电极形成泄放通道。滑环绝缘构件的深层充电过程分为高能电子在静电力作用下的减速沉积和在电场力作用下的泄放。本文主要采用蒙特卡洛法模拟高能电子的入射沉积过程，采用有限元法模拟电子的输运过程。电子与靶材料相互作用的过程非常复杂，主要的物理过程包括电离、多重散射、韧致辐射、光电效应、康普顿散射、伽马转化等，会产生正电子、伽马射线等次级粒子。本文对电子射入滑环绝缘构件内辐射剂量率和电荷沉积速率进行统计，计算式由式(2)—式(4)[14]给出：

$$t_s = \frac{N_e e_Q}{J_i A_i} \tag{2}$$

$$\dot{D} = \frac{E_{G4} e_Q \times 10^8}{t_s A \rho_m \Delta x} \tag{3}$$

$$Q_j = \frac{N_{G4} e_Q}{A \Delta x T} \tag{4}$$

式中：t_s为辐射模拟时间，s；$\dot{D}$为辐射剂量率，rad/s；Q_j为电荷沉积速率，A/m^3；N_e为模拟粒子数；J_i为辐射电子通量，A/m^2；A_i为辐射电子源面积，m^2；E_{G4}为单位路径上的能量沉积，MeV；A为分块的面积，m^2；ρ_m为聚酰亚胺介质密度，kg/m^3；Δx为分块厚度，m；N_{G4}为沉积电子数量；e_Q=1.6×10^{-19} C为电子电量。

电子的输运过程采用基于电荷守恒定律的CCL模型进行仿真[5]，其计算式为：

$$\nabla \cdot J = -Q_j \tag{5}$$

$$J = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} E \tag{6}$$

$$E = -\nabla U \tag{7}$$

式中：J为介质内传导电流密度和位移电流密度之和；E为电场强度，V/m；σ为介质电导率，S/m；U为电位，V；ε为介质的介电常数，F/m。

聚酰亚胺介质受到高能电子辐照时，原子因电离产生电子空穴对，从而使得介质电导率明显增加，这部分因辐射电子能量沉积而增加的电导率称为辐射诱导电导率。因此，聚酰亚胺材料的电导率由暗电导率和辐射诱导电导率组成，受到辐射后的表达式[14]为

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_r \tag{8}$$

式中：σ_0为暗电导率或本征电导率，S/m，主要受到温度和电场的影响；σ_r为辐射诱导电导率，S/m，其大小受到辐射剂量率$\dot{D}$的影响。

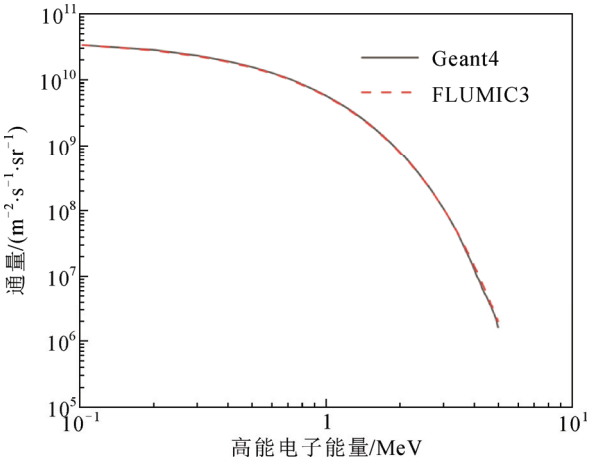


图3 FLUMIC3电子环境能谱与Geant4模拟能谱比较

Fig.3 Comparison between FLUMIC3 electronic environment energy spectrum and Geant4 analog energy spectrum

绝缘介质中的载流子受到温度和电场强度的影响，从而导致电导率表现出温度和电场的增强效应，暗电导率的表达式[15]为

$$\sigma_0(E,T) = \frac{C}{kT}\exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \times \left(\frac{2+\cosh(\beta E^{0.5}/2kT)}{3}\right) \times \left(\frac{2kT}{e_Q E\delta}\sinh\left(\frac{e_Q E\delta}{2kT}\right)\right) \tag{9}$$

式中：T为温度，K；C为由材料的性质决定的常数；E_a为聚酰亚胺介质激发能，J；k为波耳兹曼常数；δ为电子在介质晶格间的跳跃距离，nm；β由介质的介电常数决定。

聚酰亚胺的辐射诱导电导率表达式[16]为

$$\sigma_r = k_{RIC}\dot{D}^{\alpha} \tag{10}$$

式中：k_{RIC}为与材料性质相关的常量，S·m^{-1}·rad^{-1}·s；α为辐射电导率指数，与材料自身的性质相关，取值范围在0.5~1之间。

2 滑环绝缘构件三维深层充电基本特性

根据前文分析，合理设置滑环绝缘构件的相关物理参数，得到滑环绝缘构件在高能电子辐照下电场和电势的三维分布规律，从而得出滑环绝缘构件深层充电的基本特性。

2.1 仿真参数设置

在Geant4和COMSOL中建立滑环绝缘构件的整体尺寸为22.6 mm×16.2 mm×12 mm，采用采样步长为 0.2 mm 的探测器记录辐照期间电子的辐射剂

量率和电荷沉积速率。滑环绝缘构件采用的绝缘介质为掺杂玻璃纤维改性的聚酰亚胺，仿真相关物料参数见表 1[7,11,17]。

2.2　滑环绝缘构件三维电场和电势分布

空间中不同能量的高能电子部分会穿透 SADA 的金属屏蔽外壳，最后沉积在聚酰亚胺绝缘介质和铜制电极上。铜制电极由于具有很大的电导率和直接接地，其沉积的电子会快速地泄放，而沉积在聚酰亚胺中的电子由于较低的电导率和间接接地会在内部形成电场畸变。沉积的电子在电场的作用下形成泄放电流，并随着电场的增大而逐渐增大，当入射电子的电流等于泄放电流时，滑环绝缘构件深层充电达到动态平衡。此时，滑环绝缘构件内部电场和电势达到最大值。

设置金属屏蔽的材料为铝，铝屏蔽厚度为 1 mm，滑环绝缘构件深层充电达到动态平衡时三维电场和电势的分布如图 4 和图 5 所示。

从图 4 可以看出，在 1 mm 铝壳的屏蔽下，滑环绝缘构件内部存在着明显的电场畸变，最大电场强度为 2.88×10^8 V/m，超过绝缘介质的放电阈值[18]，存在放电发生的可能性，且最大值出现在“三结合”(绝缘介质、电极和真空)点处。滑环绝缘构件内的电场分布受到接地结构的影响较大，沉积在聚酰亚胺中的电子会通过最短路径向接地点泄放，而绝大部分沉积的电子距离铜制电极上边缘更近，会在此处形成电荷的积聚，因此最大电场出现在“三结合”点处。同时，最外侧的绝缘介质由于只有单面接地，沉积的电子更难泄放，电场畸变程度更为严重。

从图 5 可以看出，滑环绝缘构件出现负的电势分布，绝对值最大值为 1.48×10^5 V，出现在滑环绝缘构件的上表面。在绝缘介质中心区域，电势的绝对值随着深度的增加而逐渐降低。整体来看，电势表现出“U”形分布的特点，这是由于沉积在绝缘挡边中心区域的电子相较于沉积在两侧的电子具有更远的泄放距离。最外侧的绝缘介质由于只有单侧接地，电子更难泄放，具有更高的电势绝对值，同时呈现半“U”形的分布特点。

3　屏蔽设置对深层充电特性的影响

3.1　屏蔽材料

文献[7]表明，滑环绝缘构件内的最大电场强度随铝屏蔽厚度的增大而逐渐降低，而不同金属材料原子结构存在差异，对高能电子具有不同的屏蔽效果。本文选取不同原子序数且常用于航天领域的 4 种金属材料，研究在相同面密度下对滑环绝缘构件深层充电的影响，4 种金属材料分别为铝、钛、银和金。仿真结果如图 6 所示，从图 6 中可以看出，滑环绝缘构件内的最大电场随着金属屏蔽面密度的增加而逐渐降低。不同屏蔽材料的电子屏蔽能力之间也存在差异，总体上高 Z(原子系数)金属材料可以在相同质量下提供更好的屏蔽效果，且高 Z 金属材料通常具有更高的密度，相同质量下具有更小的体

表 1　仿真中相关参数设置

Table 1　Related parameters setting in simulation

参数	符号	数值
相对介电常数(1 kHz)	ε_r	3.45
密度/(kg·m^{-3})	ρ_m	1 350
温度/K	T	270
改性聚酰亚胺本征电导率/(S·m^{-1})	σ_0	3.1×10^{-15}
RIC 系数/(S·m^{-1}·rad^{-1}·s)	k_{RIC}	3.37×10^{-15}
辐射电导率指数	α	0.8

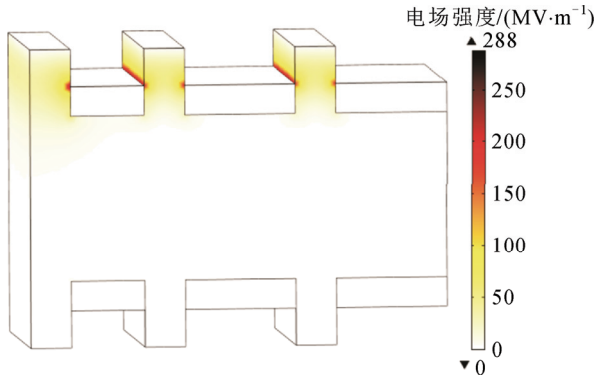


图 4　滑环绝缘构件三维电场分布

Fig.4　3-D electric field distribution of slip ring insulating components

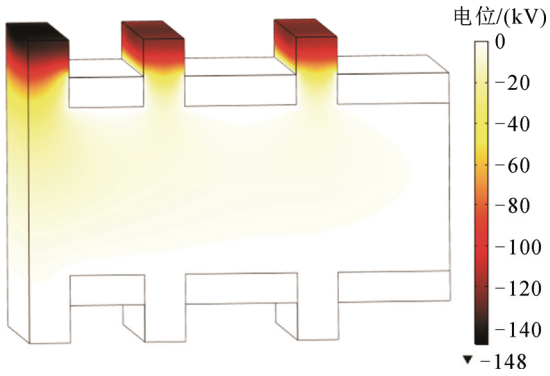


图 5　滑环绝缘构件三维电势分布

Fig.5　3-D potential distribution of slip ring insulating components

积。为了将滑环绝缘构件的深层充电最大电场降低到静电放电阈值之下，金属 Al、Ti、Ag 以及 Au 应该采用的最小面密度分别为 10.50、9.74、7.94、6.94 g/cm^2，如果将屏蔽的材料从 Al 换为 Ag，则滑环屏蔽的总体质量将降低 33.9%。

不同金属屏蔽材料对高能电子的屏蔽能力存在差异，以面密度为 2.70 g/cm^2 的 4 种金属材料作为屏蔽，仿真得到屏蔽后的高能电子能谱分布，结果如 7 所示。从图 7 中可以看出，经过金属屏蔽后，高能电子通量整体下降 1 个数量级，总体上来看随着原子序数的增加，高能电子通量逐渐降低，也从侧面证明了相同面密度下，采用高 Z 金属作为屏蔽材料的滑环绝缘构件的辐致电场畸变程度更低。

仅从屏蔽效果、质量和体积角度考虑，高 Z 金属更适合作为 SADA 的屏蔽材料，但高 Z 金属材料通常更容易产生韧致辐射，产生的光子会对 SADA 内的绝缘材料和信号传输产生潜在的影响。因此在 Geant4 中使不同能量的电子入射相同面密度(2.7 g/cm^2)的不同金属，得到透射光子率。透射光子率 P 定义如下

$$P=\frac{N_{\mathrm{p}}}{N_{\mathrm{e}}} \tag{11}$$

式中：N_{e} 和 N_{p} 分别为入射电子数和出射光子数。

仿真得到的结果如图 8 所示，可知透射光子率随着入射电子能量的增大而逐渐增大，且增长速率逐渐降低；高 Z 金属材料的透射光子率明显大于低 Z 金属材料，代表着会有更多的光子入射到 SADA 内；而由光子形成的 γ 射线和 X 射线会对滑环组件内的聚酰亚胺产生损伤。经仿真计算，采用 FLUMIC3 高能电子模型入射面密度为 2.7 g/cm^2 的金屏蔽时，经过 1 d 的辐照后其辐射剂量会达到 kGy 量级，已经达到绝缘材料损伤的剂量范围。文献[19-20]采用辐射剂量为 kGy 量级以上的 γ 射线辐照电缆后发现，其绝缘材料内部出现了微裂纹，放电通道易于沿着此裂纹发展，造成击穿电压的下降。滑环绝缘构件的屏蔽材料在实际选择时应该从材料结构特性、高能电子屏蔽能力以及二次辐射等角度综合考虑。

3.2 屏蔽结构

根据 3.1 节的分析可知，增加金属屏蔽的厚度可以显著降低滑环绝缘构件内因高能电子辐照引发的电场畸变，但航天器对重量和体积都有着严苛的要求，增加金属屏蔽的厚度会大幅增加航天器的重

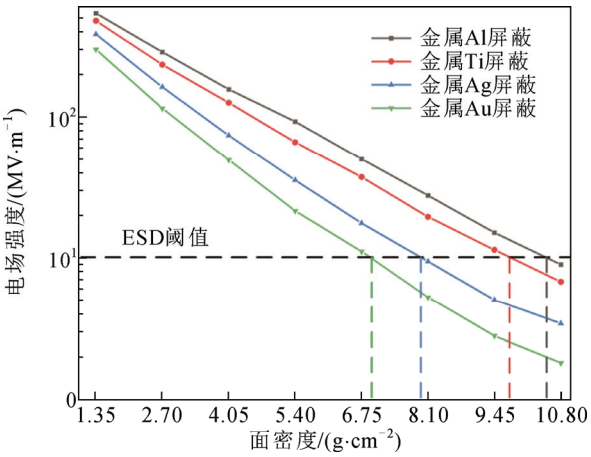


图 6 不同屏蔽材料和面密度对最大电场的影响

Fig.6 Influence of different shielding materials and area densities on maximum electric field

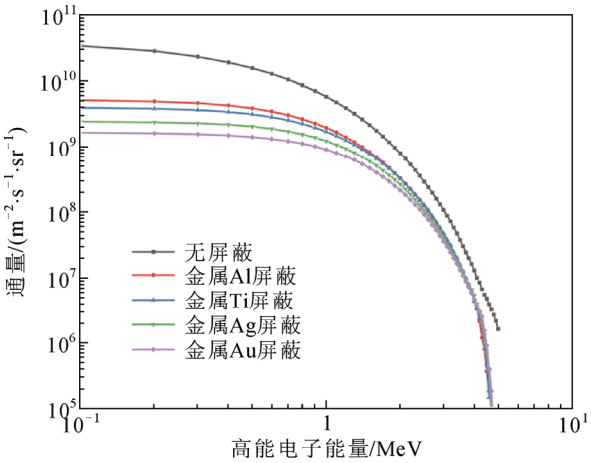


图 7 2.70 g/cm^2 面密度下不同金属材料屏蔽后的能谱

Fig.7 Energy spectrum after shielding of different metal materials at 2.70 g/cm^2 areal density

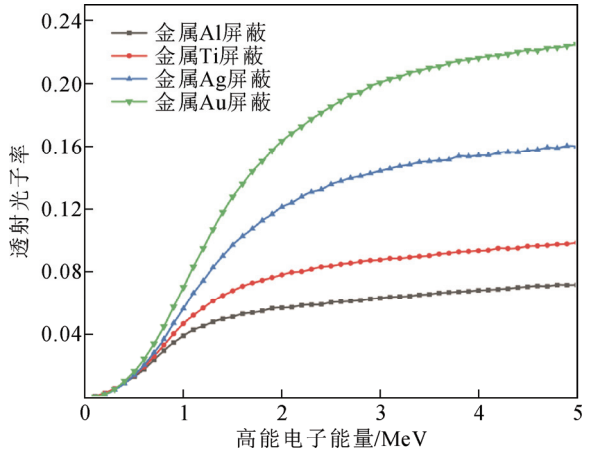


图 8 不同入射电子能量的透射光子率

Fig.8 Transmitted photon rate of different incident electron energies

量。近年来，木星的探测成为太空探索的焦点之一，而木星辐射环境更加恶劣，高能电子的能量最高可达 GeV 量级以上，能谱更硬[21]，如果采用简单的大面积增加金属屏蔽蒙皮，势必会对航天器载荷造成较大的压力。

图 9 所示为屏蔽材料选为铝且厚度在 1 mm 时滑环绝缘构件内电荷沉积速率的切面分布图，从图 9 中可以看出，沉积在铜制电极中的电子主要集中分布于上表层，入射深度较浅，铜制电极下方的聚酰亚胺几乎没有电子的沉积。沉积在绝缘挡边中的电子随着深度的增加会逐渐减少，入射深度更深且更加分散。由于铜质电极直接接地，沉积在其中的电子会快速泄放掉，不会引起电荷的积聚。而沉积在聚酰亚胺中的电子会在电场力的作用下向接地面泄放，但聚酰亚胺具有较低的电导率，电荷泄放速度缓慢，会在“三结合”点处形成积聚效应。因此，沉积在聚酰亚胺中的电子对电场畸变程度影响更大。

针对滑环绝缘构件的结构和深层充电的基本特性，在保持铝屏蔽总体质量不变的前提下，合理设计屏蔽的结构可以实现更好的屏蔽效果。本文采用局部加强的屏蔽结构，研究其对滑环绝缘构件深层充电的影响，局部加强的屏蔽示意图如图 10 所示。在绝缘挡边的上方局部加强金属屏蔽的厚度，L 代表局部加强的宽度，D 代表局部加强的厚度。为方便比较局部加强与传统铝壳的屏蔽效果，在传统铝壳厚度为 1 mm 的基础上，保持屏蔽总体质量不变，改变局部加强的宽度和厚度，记录滑环绝缘构件内的最大电场。

在局部加强金属屏蔽下，电场最大值仍出现在三结合点处，电势分布仍然呈现“U”形分布。仿真结果如图 11 所示，从图 11 中可以看出，局部加强铝屏蔽结构的场强最大值要总体小于传统结构的。在保持局部加强宽度不变的情况下，最大电场强度随着局部加强深度的增加先减小后增大，出现极小值。同样的，在保持局部加强深度不变的情况下，最大电场强度随着局部加强宽度的增加先减小后增大，出现极小值。分析原因：受到质量不变的限制，当局部加强宽度或者深度过大时，铜质滑道上方的铝屏蔽过薄，部分高能电子在经过该区域铝屏蔽时，运动方向发生改变并倾斜入射到绝缘挡边上或者直接穿透铜质电极而沉积在电极下方的聚酰亚胺中。当局部加强的宽度为 3.5 mm、深度为 1 mm 的时候，滑环绝缘构件的最大电场强度最低，相较于传统结构的下降了约 25%。因此，如果采用局部加强的屏蔽方案，应该考虑局部加强宽度和局部加强深度的相互配合，从而能够在有限的金属屏蔽重量下实现更好的屏蔽效果。而传统屏蔽结构要达到

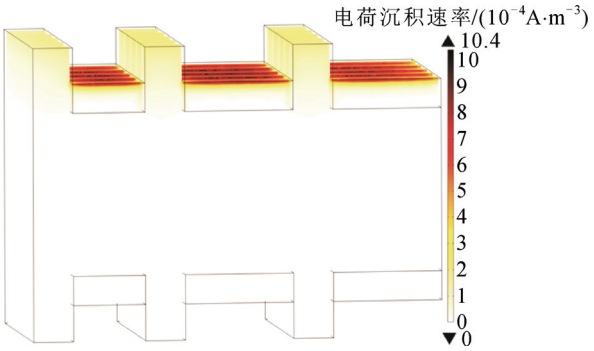


图 9　电荷沉积速率切面分布图

Fig.9　Sectional distribution of charge deposition rate

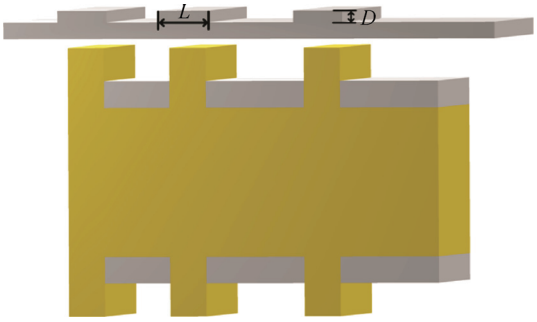


图 10　金属屏蔽局部加强示意图

Fig.10　Schematic diagram of local reinforcement of metal shield

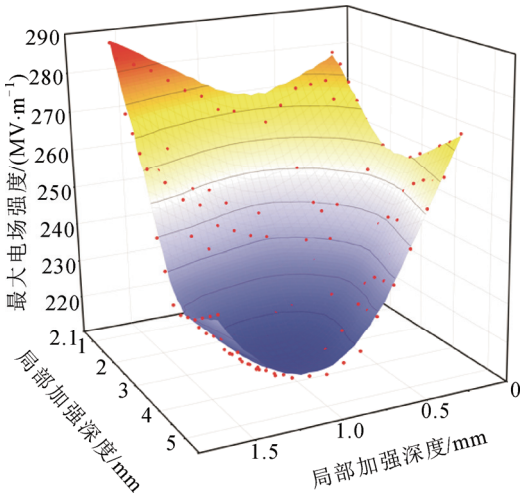


图 11　局部加强参数对最大电场影响

Fig.11　Effect of local reinforcement parameters on the maximum electric field

相同的屏蔽效果，其屏蔽厚度需要 1.26 mm，因而优化后的屏蔽结构总体质量相当于降低了 20.63%。

3.3 双层屏蔽

铝金属材料在航天器中有着重要的应用，以铝为主的合金材料具有高强度、高韧性、耐腐蚀的特点，可以满足太空各种极端的环境。目前，太阳帆板驱动机构的外壳仍以金属铝为主。根据 3.1 节的分析可知，高 Z 金属材料相较于低 Z 金属材料能更好地阻挡电子，但更容易发生韧致辐射而产生二次辐射问题，对滑环组件的信号传输产生潜在的影响。因此，可以在现有铝屏蔽的基础上，在表面涂一层高 Z 金属材料，以实现更好的高能电子屏蔽效果。本文选用金涂层，仿真研究在 4 mm 铝屏蔽质量的基础上，Al 层质量分数和叠放顺序对 SADA 内滑环绝缘构件辐致最大电场的影响。Al 层质量分数定义为

$$\omega = \frac{\rho(\mathrm{Al})}{\rho(\mathrm{Au}) + \rho(\mathrm{Al})} \tag{12}$$

式中：ρ(Al)和 ρ(Au)分别为 Al 层和 Au 层的单位面密度。保持 ρ(Al)和 ρ(Au)总的单位面密度不变。

仿真结果如图 12 所示，可见当采用 4 mm 单层铝屏蔽时，最大电场强度为 8.89 MV/m，双层屏蔽结构屏蔽效果整体优于单层铝屏蔽的。随着 Al 层质量分数的增大，滑环绝缘构件内最大场强逐渐增大，且 Au 涂层在滑环绝缘构件内侧时，高能电子辐射屏蔽效果明显更好。随着 Al 层质量分数的增大，Au 涂层在滑环绝缘构件内侧和外侧引发最大电场强度的差值出现先增大后减少的趋势，当 Al 层的质量分数为 0.6 时，最大差值达到 0.84 MV/m。未来滑环组件若采用双层结构，合理设置层序会实现更好的防护效果，而相较于传统的单层铝屏蔽结构，同样可以在满足防护需求的同时，进一步降低滑环屏蔽的整体质量。

高能电子入射金属材料时，将会与发生一系列相互作用，对电子输运产生主要影响的物理过程主要有以下 3 种：与核外电子发生非弹性碰撞、与原子核发生弹性碰撞以及与原子核发生非弹性碰撞。当高能电子与核外电子发生非弹性碰撞时，电子会在运动方向没有明显变化的情况下损失能量。入射电子与核外电子发生非弹性碰撞的概率与材料的 Z/A 比值呈正比[22-23]，其中 A 为材料的相对原子质量。低 Z 材料具有更低的平均原子质量，铝的 Z/A 值为 0.48，金的 Z/A 值为 0.40，因此，铝相对于金能更有效地降低入射电子的能量。而电子与原子核发生非弹性碰撞会产生韧致辐射，入射电子的能量和方向均会发生改变，电子与原子核发生弹性碰撞会在不改变能量的情况下发生大角度偏转，多次偏转后入射电子可能会从反方向射出材料。电子与原子核的相互作用与材料 Z^2/A 值呈正比[24]，铝的 Z^2/A 值为 6.26，金的 Z^2/A 值为 31.68，因此，金相对于铝具有更好的电子阻挡能力。图 13 为 1 MeV 的高能电子入射金和铝的运动轨迹，可见金材料会有更多的电子从材料内部散射出来。

根据上述的分析可知，材料的背散射系数会对电子的输运产生重要影响，因此，在 Geant4 中设置不同能量的电子入射不同厚度的金和铝，入射电子能量的范围与 FLUMIC3 模型相同，即 0.1～5 MeV。得到的背散射系数如图 14 所示，可见材料的背散射系数随着入射电子能量的增加和材料厚度的减少而逐渐降低，当材料的厚度达到一定值时，不同能量

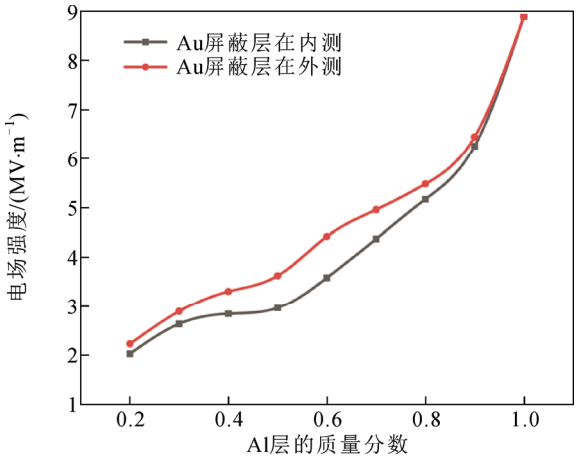
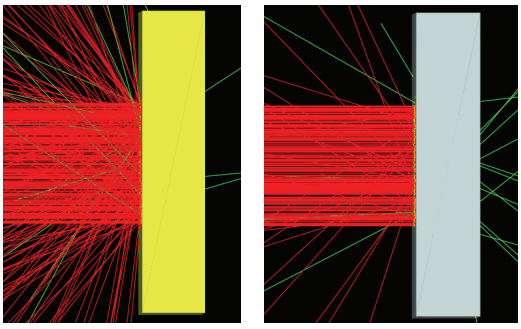


图 12 Al 层质量分数和层序对最大电场的影响

Fig.12 Influence of Al layer mass fraction and sequence on the maximum electric field



(a) 金屏蔽 (b) 铝屏蔽

图 13 1 MeV 高能电子入射金和铝的运动轨迹

Fig.13 Trajectory of 1 MeV high-energy electron incident on gold and aluminum

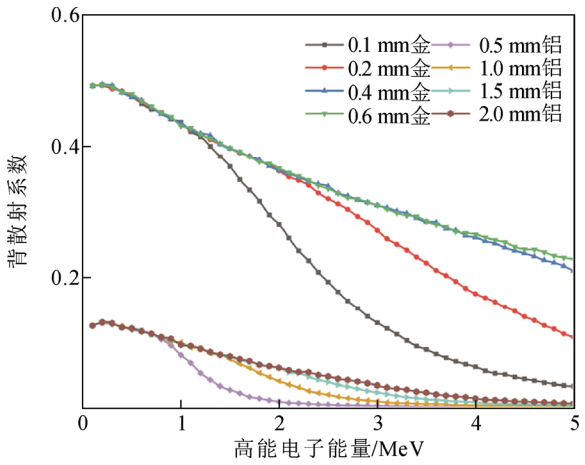


图 14　不同能量电子和材料厚度下的背散射系数

Fig.14　Backscattering coefficients at different electron energies and material thicknesses

电子下的背散射系数趋于稳定。铝材料总体上相较于金材料具有更低的背散射系数。

当铝设置在滑环绝缘构件屏蔽最外侧而金设置在滑环绝缘构件屏蔽最内侧时具有更好的屏蔽效果，其主要原因在于：高能电子先于铝的核外电子发生非弹性碰撞而大幅降低入射电子的能量，而能量更低的电子在金材料会有着更高的背散射系数，因而更多的入射电子最终不能穿透双层金属屏蔽。同时参考图 8 的仿真结果，经过铝屏蔽减速后的入射电子在金中会有更低的光子透射率，从而减少二次辐射对 SADA 的潜在影响。

4　结论

本文采用 Geant4 与 COMSOL 联用的方法得到 SADA 内滑环绝缘构件三维深层充电的基本特性，并在此基础上研究了屏蔽材料、屏蔽结构和双层屏蔽层序对滑环绝缘构件内电场畸变的影响，通过研究得出：

1）在极端高能电子辐射环境下，滑环绝缘构件放电敏感点主要集中在三结合点处，电势分布呈现“U”形分布特点。

2）高 Z 金属材料能在相同质量下提供更好的屏蔽效果，且高 Z 金属材料通常具有更大的密度，体积更小。但高 Z 材料更容易产生韧致辐射，产生的 γ 射线和 X 射线会对绝缘介质造成潜在的危害。

3）采用局部加强屏蔽结构可以在有限的重量下实现更好的屏蔽效果，但应注意局部加强厚度和宽度的相互配合，实现最优的屏蔽效果。

4）采用双层屏蔽时，高 Z 金属在滑环绝缘构件内侧时更有利于高能电子的屏蔽，主要原因是高 Z 材料具有更高的背散射系数且背散射系数随着电子能量的增大而逐渐降低。低 Z 材料在最外侧时会先降低高能电子的能量，从而更好利用高 Z 材料具有高背散射系数的特点。

本文所提出的深层充电防护提升方法对 SADA 屏蔽实际设计具有一定的参考意义，未来可以考虑采用多层的局部加强屏蔽结构或者研制一种原子序数梯度分布的复合屏蔽材料，从而更好地发挥屏蔽外壳的作用。

参考文献　References

[1] 刘　浩，刘尚合，苏银涛，等. 基于网格状 ITO 薄膜的航天器太阳电池阵静电放电防护[J]. 航空学报，2015，36(10)：3494-3500.
LIU Hao, LIU Shanghe, SU Yintao, et al. Electrostatic discharge protection of spacecraft solar cell array based on meshed ITO film[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3494-3500.

[2] 刘继奎，张可墨，柳　青，等. 航天器大功率传输介质深层充放电试验研究[J]. 高电压技术，2018，44(3)：864-869.
LIU Jikui, ZHANG Kemo, LIU Qing, et al. Internal charging and discharging tests of large power transfer dielectric on spacecraft[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 864-869.

[3] KOONS H C, MAZUR J E, SELESNICK R S, et al. The impact of the space environment on space systems[C] // Proceedings of the 6th Spacecraft Charging Technology Conference.[S. l.]: ESA, 1998: 7-11.

[4] 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)：323035.
YUAN Qingyun, WANG Song, HUANG Xinxin. 3-D simulation of internal dielectric charging characteristics of spacecraft dielectric disc structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(9): 323035.

[5] 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)：195201.
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): 195201.

[6] 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)：195201.
YUAN Qingyun, WANG Song. A new charging model for exposed dielectric of spacecraft[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(19): 195201.

[7] LI G C, LI S T, MIN D M, et al. Deep dielectric charging characteristics of ring structure irradiated by energetic electrons[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 2349-2357.

[8] WANG X P, MIN D M, PAN S M, et al. Coupling effect of electron irradiation and operating voltage on the deep dielectric charging characteristics of solar array drive assembly[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2021, 68(7): 1399-1406.

[9] NASA. Mitigating in-space charging effects-a guideline: NASA-HDBK 4002A[R]. Washington, USA: NASA, 2017.

[10] 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.

[11] SHANG P H, ZHANG B, WU J, et al. Grounding method and working voltage influence on deep dielectric charging of polyimide in GEO environment[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(6): 1975-1982.

[12] 陈益峰，冯　娜，季启政，等. 柔性二次表面镜薄膜材料带电环境与充放电特性[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2409-2415.
CHEN Yifeng, FENG Na, JI Qizheng, et al. Space environment and charge characteristics of flexible second-surface mirrors[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2409-2415.

[13] RODGERS D J, HUNTER K A, WRENN G L. The FLUMIC electron environment model[C]//Proceedings of 8th Spacecraft Charging Technology Conference. Huntsville, USA:[s. n.], 2003.

[14] 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.

[15] 王　松，武占成，唐小金，等. 聚酰亚胺电导率随温度和电场强度的变化规律[J]. 物理学报，2016，65(2)：025201.
WANG Song, WU Zhancheng, TANG Xiaojin, et al. Study on temperature and electric field dependence of conductivity in polyimide[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 025201.

[16] 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.

[17] 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[J]. 物理学报，2015，64(12)：125201.
YI Zhong, WANG Song, TANG Xiaojin, et al. Computer simulation on temperature-dependent internal charging of complex dielectric structure[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(12): 125201.

[18] 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)：059401.
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): 059401.

[19] TOMAN G J, MANTEY M. Cable system aging management for Nuclear Power Plants[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. San Juan, USA: IEEE, 2012: 315-318.

[20] 胡诗萌，杨振国. 射线辐照对核电用乙丙橡胶绝缘材料的性能影响及损伤机理研究[J]. 复旦学报(自然科学版)，2016，55(4)：496-503.
HU Shimeng, YANG Zhenguo. Evaluation on irradiation aging and degradation mechanism of ethylene-propylene rubbers for nuclear cable insulators[J]. Journal of Fudan (Natural Science), 2016, 55(4): 496-503.

[21] KOLLMANN P, EBERT R W, HAGGERTY D K, et al. Plasma and energetic particle observations in Jupiter's deep tail near the magnetopause[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2014, 119(8): 6432-6444.

[22] FAN W C, DRUMM C R, ROESKE S B, et al. Shielding considerations for satellite microelectronics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(6): 2790-2796.

[23] UZEL R, ÖZYILDIRIM A. A study on the local shielding protection of electronic components in space radiation environment[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies(RAST). Istanbul, Turkey: IEEE, 2017: 295-299.

[24] 王建昭，马继楠，张庆祥，等. 木星系探测中多层材料的辐射屏蔽优化设计方法[J]. 航天器环境工程，2019，36(6)：601-606.
WANG Jianzhao, MA Jinan, ZHANG Qingxiang, et al. Optimization design of radioprotection by multilayer materials in Jovian system exploration missions[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(6): 601-606.



王　健(通信作者)
1985—，男，博士，副教授
研究方向为航天器空间环境效应下的绝缘及放电特性
E-mail: wangjian31791@ncepu.edu.cn

WANG Jian
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



刘人郢
1997—，男，硕士生
研究方向为航天器空间环境效应下的绝缘及放电特性
E-mail: ncepulry@ncepu.edu.cn

LIU Renying



刘继奎
1975—，男，研究员
研究方向为航天器跟踪与指向机构及电传输、润滑等技术
E-mail: sadabjljk@sina.com

LIU Jikui
Professor



李庆民
1968—，男，博士，教授，博导
研究方向为高电压与绝缘技术、先进输电技术
E-mail: lqmeee@ncepu.edu.cn

LI Qingmin
Ph.D., Professor

收稿日期　2022-02-07　修回日期　2022-04-03　　编辑　曾文君