

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.010

GIS内X射线诱导带电粒子源项与放电敏感区关联模拟

彭兆裕¹, 王 山², 龙云峰¹, 马宏明², 杨 舟³, 邱鹏锋¹, 李 旭¹,
孙再超⁴, 杨凯越⁵, 罗光鸿⁶

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650000; 2. 云南电网有限责任公司, 昆明 650000; 3. 云南电网有限责任公司怒江供电局, 云南 怒江 673100; 4. 云南电网有限责任公司临沧供电局, 云南 临沧 677000; 5. 云南电网有限责任公司楚雄供电局, 云南 楚雄 675000; 6. 云南电网有限责任公司德宏供电局, 云南 德宏 678400)

摘要: X射线辅助局部放电检测可通过辐射电离提供初始电子,降低微小缺陷放电的统计时延,从而提高隐蔽缺陷的激发和检出概率。针对GIS内部金属、气体和固体绝缘多介质并存条件下辐射诱导二次带电粒子源项尚不明确的问题,文中基于Geant4建立包含SF₆气体、中心导体、金属外壳、金属嵌件和环氧绝缘子的GIS真型粒子输运模型,对0.1、1、5、10 MeV入射光子开展蒙特卡罗输运计算。通过统计能量沉积、 γ 光子相互作用过程、二次电子及正电子产生通道和带电粒子空间分布,分析预电离源项形成规律及其与潜在放电敏感区域的空间关系。结果表明:100 keV光子主要受入射端金属外壳屏蔽约束,二次电子射程较短,预电离源项主要集中于外壳和金属嵌件附近;1 MeV时康普顿散射占比达89.84%,二次电子分布向中心导体、绝缘子和气隙邻近区域扩展;在文中GIS几何模型和入射方向条件下,5~10 MeV光子使中心导体附近成为主要能量沉积和相互作用区域,并出现电子—正电子对产生。研究结果可为X射线辅助GIS缺陷检测参数选择及辐射—放电耦合建模提供源项依据。

关键词: GIS; X射线; Geant4; SF₆; 康普顿散射; 二次电子; 能量沉积

Simulation of the Spatial Correlation Between X-ray-induced Charged-particle Source Terms and Discharge-sensitive Regions in GIS

PENG Zhaoyu¹, WANG Shan², LONG Yunfeng¹, MA Hongming², YANG Zhou³, QIU Pengfeng¹,
LI Xu¹, SUN Zaichao⁴, YANG Kaiyue⁵, LUO Guanghong⁶

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China; 2. Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China; 3. Nujiang Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yunnan Nujiang 673100, China; 4. Lincang Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yunnan Lincang 677000, China; 5. Chuxiong Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yunnan Chuxiong 675000, China; 6. Dehong Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yunnan Dehong 678400, China)

Abstract: X-ray-assisted partial discharge detection can provide initial electrons through radiation ionization, thereby reducing the statistical time lag of discharges at microscopic defects and enhancing excitation and detection probability of concealed defects. In view of the ambiguity regarding radiation-induced secondary charge particle source terms under the multi-media coexistence condition of metals, gas and solid insulation within GIS, a full-scale GIS

收稿日期:2026-03-22; 修回日期:2026-05-21

基金项目:南方电网公司科技项目(基于短波外源辐照的组合电器设备绝缘件缺陷高效激发及快速检出关键技术研究 课题一:短波外源激发绝缘缺陷放电检测方法及其联合检测装置开发)。

Project Supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (Research on Key Technologies for the Efficient Excitation and Rapid Detection of Insulation Defects in Switchgear Based on Short-wave External Irradiation—Topic 1: Development of a Method for Detecting Insulation Defect Discharges via Short-wave External Excitation and a Combined Partial Discharge Detection Device).

particle transport model incorporating SF₆ gas, central conductor, metal enclosure, metal inserts, and epoxy insulators is developed using Geant4 in this study. Monte Carlo transport calculation is performed for incident photons and energies of 100 keV, 1 MeV, 5 MeV, and 10 MeV. By statically analyzing the statistical energy deposition, γ -photon interaction processes, generation channels of secondary electron and positron production, as well as the spatial distribution of charged particles, the formation characteristics of the pre-ionization sources terms and their spatial correlation with potential discharge-sensitive regions are investigated. The results indicate that 100 keV photons are primarily shielded and constrained by the metal enclosure at the incident end, with secondary electrons exhibiting a short secondary range, and the pre-ionization sources terms being mainly concentrated near the enclosure and metal inserts. At 1 MeV, Compton scattering accounts for 89.84% of the interactions, and the distribution of secondary electrons extends toward the central conductor, insulator and the regions adjacent to gas gaps. Under the GIS geometric model and incident direction conditions adopted in this paper, 5 ~ 10 MeV photons render the vicinity of the central conductor the primary region for energy deposition and interactions, where electron-positron pair production also occurs. The study results can provide source-term references for parameters selection in X-ray-assisted GIS defect detection and for radiation-discharge coupled modeling.

Key words: GIS; X-rays; Geant4; SF₆; Compton scattering; secondary electrons; energy deposition

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)因结构紧凑、绝缘强度高、运行可靠性好,被广泛应用于高压和超高压电力系统中^[1-3]。随着特高压输电、柔性直流输电以及高可靠性电力装备的发展,GIS/GIL等紧凑型气体绝缘设备对缺陷检出灵敏度和状态评估准确性提出了更高要求。

局部放电检测是评估高压设备绝缘状态的重要手段。目前常用方法包括脉冲电流法、特高频法、超声法、光学法以及多方法联合检测等^[4-6]。其中,特高频检测、缺陷模式识别及抗电磁干扰能力提升等方向已成为GIS局部放电在线监测与状态诊断的重要研究内容,然而对于微小气隙、弱放电缺陷或初始电子供应不足的缺陷,放电起始往往受初始电子供应和统计时延控制,导致缺陷在有限试验时间内难以被有效激发和识别^[6-9]。尤其在SF₆强电负性气体中,自由电子易发生吸附和复合,放电起始不仅取决于局部电场强度,还与初始电子的产生、输运及损失过程密切相关^[9]。

X射线辅助局部放电检测为提高隐蔽缺陷可观测性提供了新的思路。X射线可通过光电效应、康普顿散射等过程在介质中产生二次电子,为缺陷区域提供初始电子,从而缩短放电统计时延并提高微弱缺陷的检出概率^[10-13]。已有研究表明,X射线辐照能够影响介质气隙、油纸绝缘、GIS绝缘子及电缆终端金属颗粒缺陷的局部放电起始和放电重复特性^[10-14]。已有国外研究表明,脉冲X射线诱导局部放电可用于GIS固体绝缘件例行试验,并能改善固体介质局

放测试的稳定性和重复性^[15-22]。然而,现有研究多集中于放电现象、信号特征和缺陷检测效果,对X射线进入GIS后在金属、SF₆气体和环氧绝缘子等多介质结构中的能量沉积、二次带电粒子产生及空间分布规律仍缺乏细致分析。

由于GIS内部结构复杂,单纯依靠实验难以直接获得光子相互作用位置、二次电子产生通道和带电粒子输运轨迹。Geant4蒙特卡罗工具包可用于复杂几何和多材料体系中的粒子输运计算,能够描述光电效应、康普顿散射、瑞利散射和电子—正电子对产生等电磁相互作用过程^[23-25]。因此,将Geant4用于X射线辐照GIS的粒子输运建模,有助于从微观源项层面分析X射线诱导预电离电子的产生、输运和空间分布特征,为后续局部电场—电子输运—放电发展耦合模型提供源项输入。

基于此,文中建立包含SF₆气体、中心导体、金属外壳、金属嵌件和环氧绝缘子的GIS真型Geant4模型,选取0.1、1、5、10 MeV 4种入射光子能量开展蒙特卡罗输运计算。通过统计不同粒子在各体积中的能量沉积、 γ 光子相互作用过程、二次电子和正电子产生通道以及带电粒子空间分布,分析X射线辐照下GIS内部预电离源项的形成规律,并进一步讨论其与导体边缘、金属嵌件邻近区、绝缘子表面及三结合点等潜在放电敏感区域之间的空间关系。需要说明的是,文中不直接求解局部放电起始电压、放电重复率和放电发展过程,而是重点获得辐射诱导预电离源项,为X射线辅助GIS缺陷检测参数选择和后续辐射—放电耦合建模提供依据。

1 仿真模型与后处理方法

1.1 Geant4几何、材料与粒子源设置

文中采用Geant4蒙特卡罗工具包构建GIS辐射运输模型。几何模型包括世界体、SF₆气体区、中心导体、金属外壳、金属嵌件以及环氧绝缘子,见图1。世界体是包含整个GIS仿真模型的最大外部空气包络区域,用于限定粒子运输空间,不代表GIS的实际物理部件;后处理统计中不计入世界体中的纯运输步。

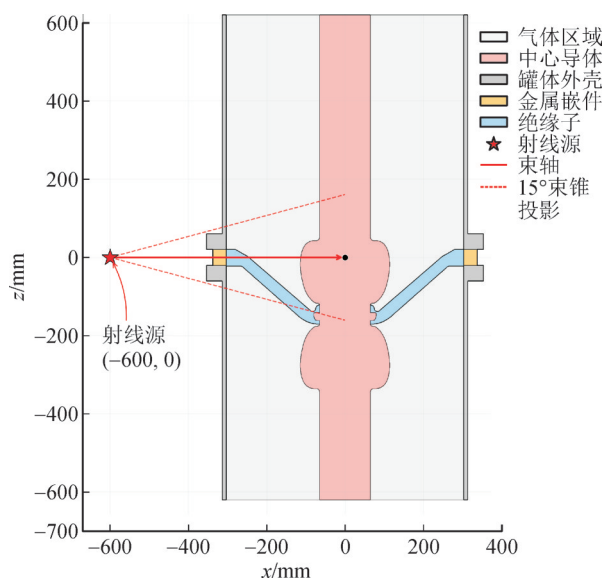


图1 GIS仿真几何模型及关键部件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the GIS simulation geometric model and key components

GIS气体区近似为半径303.21 mm、总长1 240 mm的圆柱区域,SF₆气压压强按0.4 MPa条件设置,其等效密度根据气压与常温(293 K)条件设定为24.22 kg/m³。文中利用SolidWorks输出STL文件(工业三维CAD模型通用的标准三角网格数据格式)并导入Geant4,在建模过程中对模型进行了适当简化,剔除了螺栓、倒角及微小装配缝隙等对整体辐射运输无显著影响的次要结构,以提高计算效率,同时尽量保持壳体、导体及绝缘子等主要部件的型面特征。为贴合工程实际,罐体外壳(厚度统一设置为10 mm)、中心导体和金属嵌件均采用工业通用的铝合金材料(Al-Mg-Si合金,等效密度 2.7×10^3 kg/m³,其中Al、Mg、Si质量分数分别设为97.2%、0.8%、2.0%)。固体绝缘件采用盆式绝缘子模型,采用实际工程配比的酸酐固化环氧树脂材料近似(双酚A型环氧树脂基体掺杂氧化铝填料),其整体等效密度为1.6 g/cm³,各元素等效质量分数设置为:Al(28.4%)、O(47.1%)、C(21.2%)、H(3.3%)。

入射粒子在Geant4程序中定义为G4Gamma光子。需要说明的是,在Geant4电磁物理过程中,X射线和 γ 射线均作为光子进行运输计算,采用G4Gamma为程序中的统一光子粒子类型。射线源点位于 $x=-0.6$ 、 $y=0$ 、 $z=0$ 处,目标点为GIS模型中心,入射方向在以源点—模型中心连线为轴的15°圆锥角内随机抽样。文中选取0.1、1、5、10 MeV 4种入射能量开展对比计算。其中,100 keV用于表征低能X射线在外壳和金属嵌件附近的局部吸收行为;1 MeV用于分析光子穿透能力增强后对中心导体和绝缘子区域的影响;5、10 MeV作为高能光子穿透和级联相互作用增强的上限工况,用于揭示高能辐射下电子—正电子对产生及深部结构源项变化规律。需要指出的是,文中不同能量工况下源项分布规律均对应于上述特定GIS几何模型、材料等效参数、10 mm外壳厚度、源点位置及15°入射锥角条件。若GIS尺寸、外壳厚度、射线入射窗口、缺陷位置或照射方向发生变化,预电离源项的空间分布和适宜能量范围可能发生改变。

1.2 输出量与统计方法

程序通过RunAction和SteppingAction部分对 γ 、 e^- 和 e^+ 3类粒子进行筛选、追踪和统计,输出逐步轨迹文件,并进一步生成粒子—体积能量沉积统计、粒子过程统计、 γ 相互作用统计、二次粒子产生统计、事件级统计和带电粒子轨迹汇总。后处理时剔除世界体中的纯运输步,记录区域覆盖 $x=-650 \sim 350$ mm、 $y=-350 \sim 350$ mm、 $z=-650 \sim 650$ mm,可包含主要GIS结构及入射端附近的辐射作用区域。

为揭示X射线辐照下的二次带电粒子源项特征,文中从5个方面开展后处理分析:①是统计不同粒子在各体积内的能量沉积分数,用于判断辐射能量主要注入的结构部件。②是绘制 γ 相互作用过程在不同体积中的计数热图,用于识别主导光子过程及其空间分布。③是统计不同 γ 过程产生二次电子和正电子的通道,用于评估自由带电粒子源项强度。④是分析带电粒子轨迹长度与沉积能量关系,用于判断二次粒子射程和能量损失特征。⑤是给出带电粒子停止位置和轨迹空间分布,用于判断其与导体边缘、金属嵌件、绝缘子表面及三结合点等潜在放电敏感区域之间的空间接近关系。

在 γ 光子相互作用统计中,文中排除了世界体积中的纯运输步、粒子运输过程和空白过程,主要统计光电效应、康普顿散射、瑞利散射及电子—正电子对产生等真实电磁相互作用。其中,瑞利散射计入真实光子相互作用计数,但其能量转移机制与

光电效应和康普顿散射不同,因此相互作用计数并不等同于能量沉积贡献。需要说明的是,相互作用计数与能量沉积分数具有不同物理含义:前者表征特定物理过程发生频次,后者表征粒子能量实际沉积到介质中的比例。二者结合使用,能够更全面地刻画X射线在GIS内部形成预电离源项的空间和能量特征。

为增强源项统计结果的工程可换算性,文中进一步定义单位入射光子对应的二次带电粒子产额

$$Y_{\text{ch}} = \frac{N_{\text{e1}} + N_{\text{e2}}}{N_{\gamma,0}} \quad (1)$$

式(1)中: N_{e1} 、 N_{e2} 分别为统计区域内产生的二次电子和正电子数; $N_{\gamma,0}$ 为入射光子数。若实际X射线源进入统计区域的等效入射光子率为 N_{γ} ,统计区域体积为 V_{Ω} ,则该区域内的等效外部电离源项密度可估算为

$$S_{\text{p},\Omega} \approx \frac{Y_{\text{ch},\Omega} \cdot N_{\gamma}}{V_{\Omega}} \quad (2)$$

式(2)中, $Y_{\text{ch},\Omega}$ 为指定区域 Ω 内单位入射光子产生的二次带电粒子产额。由于实际工程中的 N_{γ} 束斑面积、照射时间和局部统计体积与具体射线源和试验布置有关,文中主要给出单位入射光子产额及其换算关系,不将相对占比结果直接外推为普适的工程绝对源项强度。

1.3 统计误差与粒子数收敛性分析

蒙特卡罗辐射输运模拟的准确性与样本数(入射光子数)密切相关。为抑制统计涨落并确保计算结果的收敛性,文中开展了粒子数敏感性分析。以 SF_6 气体区在1 MeV入射条件下的能量沉积标准差作为收敛性评价指标,当入射粒子数由1 000逐渐增加至 10^6 时,统计标准差(relative standard deviation)随粒子数 N 增加呈现出明显的收敛趋势。当粒子数 $N=5 \times 10^5$ 时,气体区的能量沉积及二次带电粒子产额的统计标准差均已降至0.5%以下。基于此,文中后续各工况的计算均采用 10^6 个入射光子,保证了数值模拟结果的稳定性和科学性。

2 仿真结果分析

2.1 GIS内部能量沉积分布特征分析

4种入射能量下,不同粒子在GIS各体积中的沉积能占比表现出显著能量依赖性,见图2。100 keV时,光子和电子沉积能主要集中于金属外壳,约为55%,其次为金属嵌件,约为26%~28%;说明低能X射线穿透能力有限,主要在入射侧外壳和嵌件附近发生吸收或散射。此时气体区沉积占比约2%以下,表明 SF_6 气体的直接电离并非低能入射条件下的主导通道。

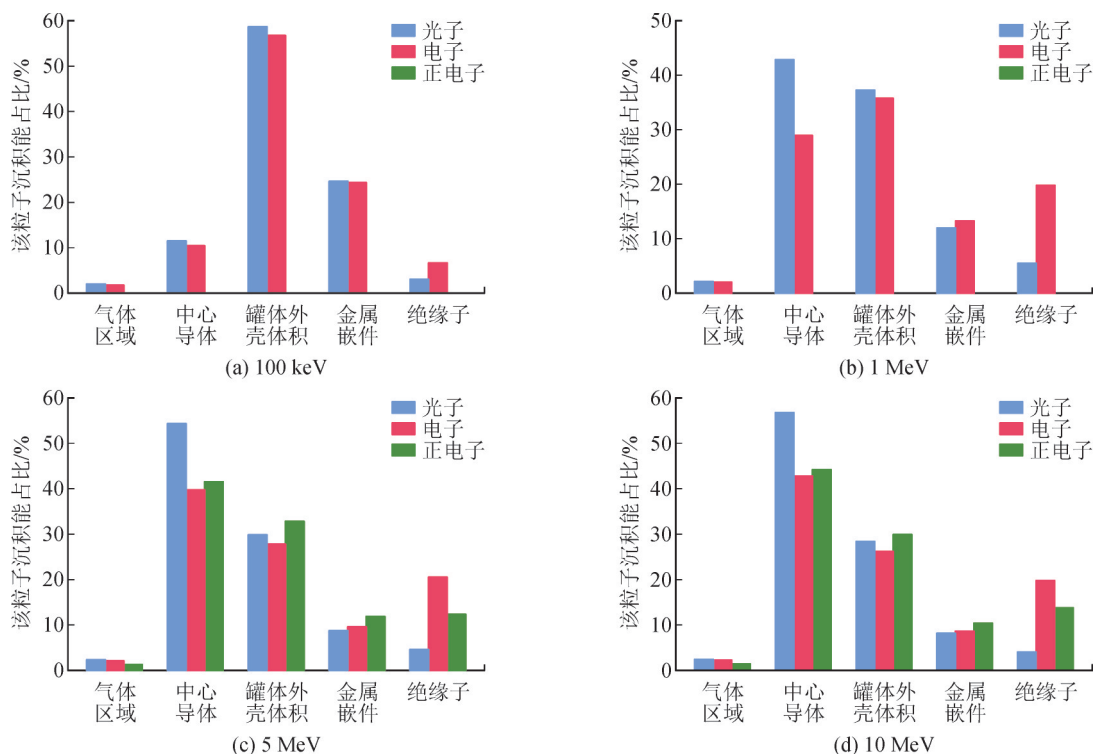


图2 4种入射能量下不同粒子在GIS各体积中的沉积能占比

Fig. 2 Proportion of deposition energy for different particles in each volume of the GIS at four incident energy levels

当入射能量升至1 MeV时,能量沉积中心由入射端外壳向中心导体和外壳共同主导过渡,中心导体与外壳成为主要沉积区域;同时,电子在绝缘子中的沉积占比明显上升,反映二次电子可更充分地输运至绝缘支撑结构附近并在固体介质中耗能。在文中GIS几何模型和入射方向条件下,5、10 MeV时中心导体成为最强能量沉积体积,光子沉积占比约55%~56%,电子沉积也以中心导体为主;绝缘子中电子沉积仍保持较高水平,说明高能二次电子可能在绝缘子表面附近形成更明显的预电离和能量沉积背景;其是否进一步改变局部电场或触发放电,还需结合电场分布、电子附着和表面电荷输运

过程进一步判断。

2.2 γ 相互作用过程分析

图3中 γ 相互作用热图显示,康普顿散射在全部入射能量下均为主导过程。如表1的计数汇总可得,0.1、1、5、10 MeV的康普顿散射占比分别约为72.58%、89.84%、80.23%、73.84%。其中1 MeV下康普顿散射占比最高,符合中能光子与中低原子序数材料相互作用时康普顿过程占优的规律。100 keV下光电效应和瑞利散射仍有明显贡献;10 MeV下光电效应计数增加并不代表单个高能光子的光电截面增强,而更可能与多次散射后低能光子和次级光子的再相互作用有关。

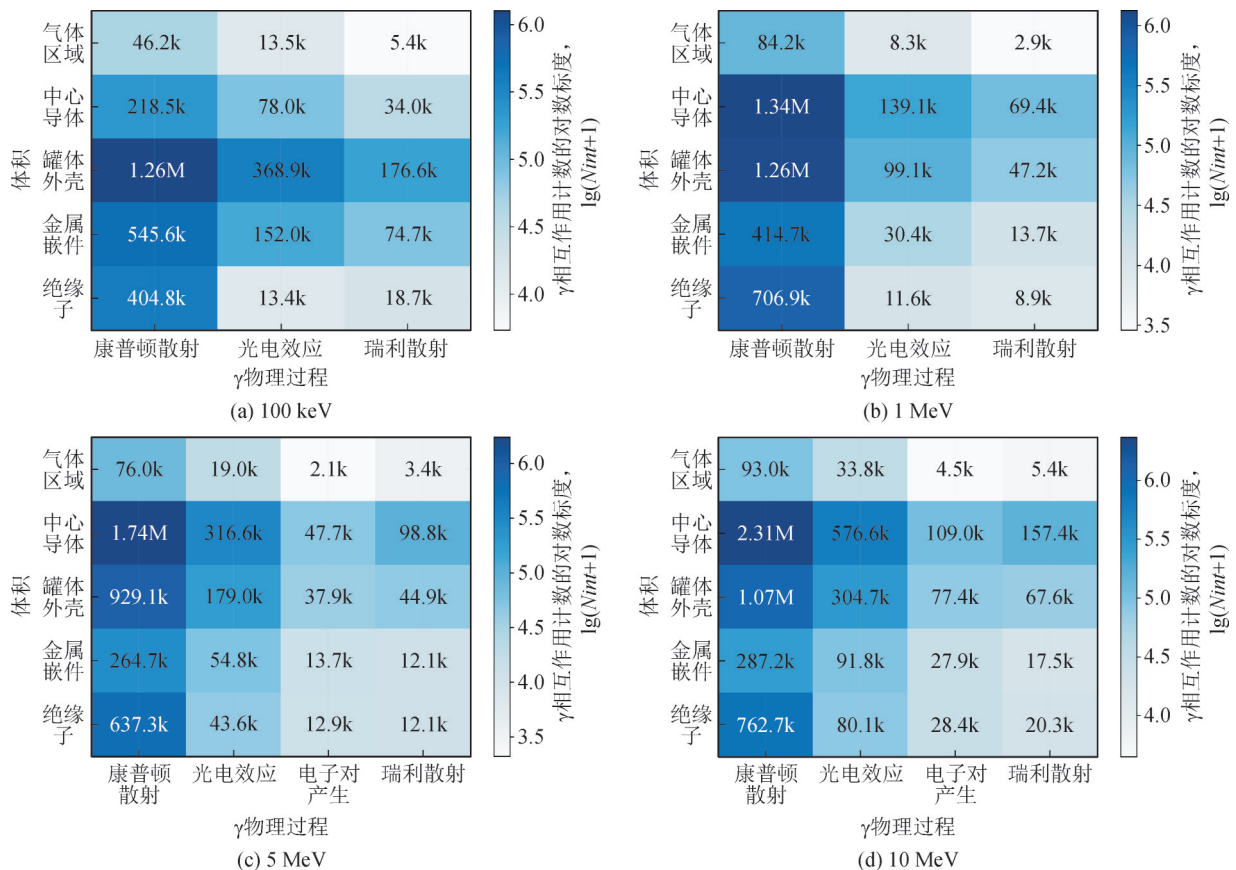


图3 γ 相互作用过程在不同体积中的分布热图对比

Fig. 3 Comparison of heatmaps showing the distribution of γ -interaction processes across different volumes

表1 γ 相互作用计数及物理过程占比

(源于程序底层统计文件)

Table 1 Counts and process distribution for γ interactions (derived from underlying program statistical files)

能量/ MeV	总相互作用 数/ 10^3	康普顿散 射占比/%	光电效应 占比/%	瑞利散射 占比/%	正电子—电子 对产生占比/%
0.1	3 410.3	72.58	18.35	9.07	0.00
1.0	4 236.4	89.84	6.81	3.35	0.00
5.0	4 545.7	80.23	13.49	3.77	2.51
10.0	6 125.3	73.84	17.75	4.38	4.04

从体积分布看,100 keV条件下约52.94%的相互作用计数位于金属外壳,说明入射端外壳对低能X射线具有明显屏蔽和吸收作用。1 MeV时,中心导体和外壳贡献接近,分别约为36.55%、33.20%,表明光子已能有效穿透至GIS中心导体附近。5、10 MeV时,中心导体贡献分别约为48.47%、51.48%,成为最主要相互作用区域。气体区直接 γ 相互作用计数仅约1.91%~2.25%,但这并不意味着其对放电无影响,因为金属和绝缘介质中产生的二次电子仍

可能逸入气隙或靠近绝缘子表面等潜在放电敏感区域。

文中统计了不同能级下二次带电粒子产生的主要机制,其中 $\text{compt} \rightarrow e^-$ 、 $\text{phot} \rightarrow e^-$ 、 $\text{conv} \rightarrow e^-$ 分别表示由康普顿散射、光电效应以及电子—正电子对产生。由图4可知,康普顿散射是二次电子的最主要来源。100 keV 时 $\text{compt} \rightarrow e^-$ 为约 2.475×10^6 次, $\text{phot} \rightarrow e^-$ 为约 6.258×10^5 次;1 MeV 时 $\text{compt} \rightarrow e^-$ 约 3.806×10^6 次,而 $\text{phot} \rightarrow e^-$ 约 2.885×10^5 次,说明中能区二次电子源项高度依赖康普顿散射。5 MeV 和 10 MeV 条件下,电子—正电子对产生通道开始出现,对产生过程计数分别约为 1.143×10^5 次和 2.472×10^5 次,对应产生电子和正电子对。正电子的出现意味着高能光子不再仅提供电子源,还会引入正电子输运和湮灭光子,从而增加辐射场级联过程的复杂性。但从数量贡献看,在 5 MeV 和 10 MeV 条件下,

电子—正电子对产生占比分别为 2.51% 和 4.04%, 仍明显低于康普顿散射占比。因此,在文中能量范围内,康普顿散射产生的二次电子仍是 GIS 内部预电离源项的主导来源;电子—正电子对产生主要体现为高能工况下源项组成的复杂化,而非局放起始的主导触发机制。正电子沿输运路径沉积能量,并在湮灭后产生次级光子,可能进一步引起局部次级相互作用,但其对局放的定量贡献仍需结合电场和气体放电模型进一步分析。折算为每个入射光子的二次带电粒子产额,100 keV 时约为 3.15 个/入射光子,10 MeV 时约为 6.10 个/入射光子,表明高能 X 射线辐照可在 GIS 内部形成更强的预电离源项。需要强调的是,二次带电粒子是否真正参与放电,还取决于其产生位置、初始能量和运动方向,以及 SF₆ 中的电子附着、复合和局部电场加速条件。因此,二次粒子产额是判断放电影响的必要但非充分条件。

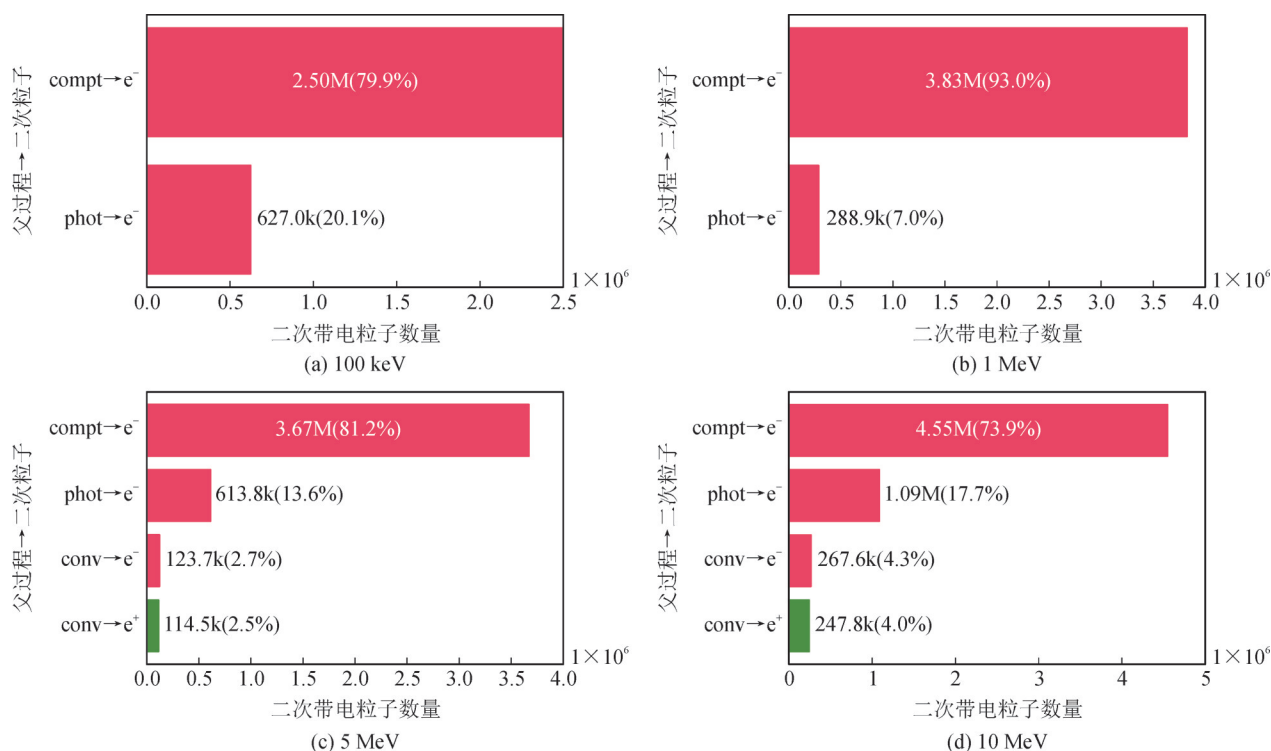


图4 γ 相互作用产生二次带电粒子的主要通道

Fig. 4 Major channels for the production of secondary charged particles via γ interactions

从单位入射光子产额看,二次带电粒子产额随入射能量升高总体增加。以文中 10^6 个入射光子的统计结果折算,100 keV 工况约为 3.15 个/入射光子,1 MeV 工况约为 4.11 个/入射光子,5 MeV 工况约为 4.52 个/入射光子,10 MeV 工况约为 6.10 个/入射光子。该指标可作为不同能量工况下预电离源项强弱的相对比较依据;若需获得实际单位体积、单位时间的电子源项密度,还需结合 X 射线源强、束斑面

积、照射时间和局部 ROI 体积进一步换算。

2.3 带电粒子分布与沉积能量特征分析

如图5所示,带电粒子轨迹长度与单条轨迹沉积能量的双对数散点抽样图呈现两类典型特征:一类为短轨迹、高局部沉积的密集带,主要对应低能电子或在高密度材料中迅速耗能的电子;另一类为较长轨迹且沉积能随轨迹长度增加而上升的分支,反映高能二次电子在气体或低密度区域中具有更长

输运距离。100 keV时,数据主要集中在较短射程和较低沉积能范围内;1 MeV后,电子轨迹长度和沉积能量上限显著提高;5 MeV和10 MeV时,电子与正电子均可达到MeV量级沉积能,并呈现更宽的轨迹长度分布。从局部放电角度看,长程带电粒子并非在产生点瞬时释放全部能量,而是沿输运路径形成离散化电离串。若该电离串与导体边缘、金属嵌

件邻近区、绝缘子三结合点等潜在放电敏感区域空间接近,则可能提高这些区域初始电子出现概率;若其靠近绝缘子表面,则可能通过表面电荷注入、预电离背景增强和局部电荷积累影响后续放电发展;但这种影响是否能够发展为可测信号,还需进一步结合局部电场和表面电荷输运过程判断。

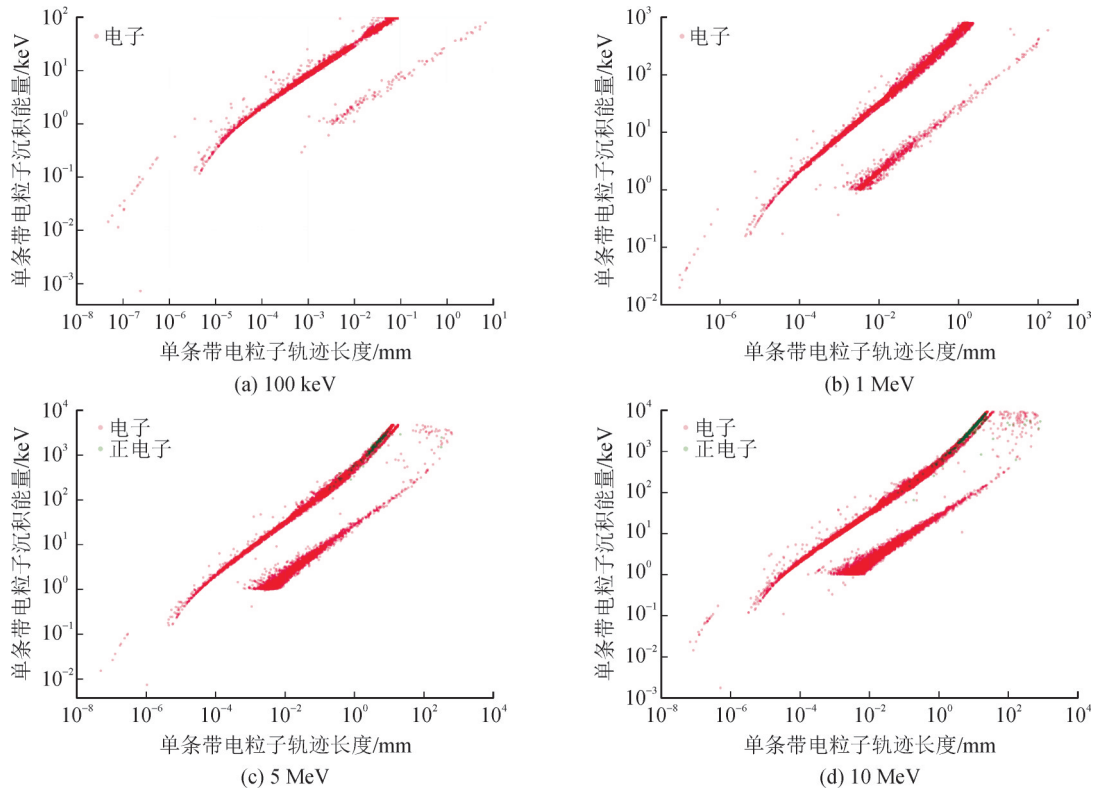


图5 带电粒子轨迹长度与沉积能量关系

Fig. 5 Relationship between the trajectory length of charged particles and deposition energy

图6的带电粒子停止位置空间分布显示,100 keV时电子主要停止在左侧入射端外壳及金属嵌件附近,中心区域仅有少量散点。1 MeV时,电子停止点明显进入中心导体、绝缘支撑和气隙邻近区域,局部团簇分布增强。5 MeV时,电子停止点在中心导体周围和绝缘支撑附近显著增多,并开始出现正电子停止点;10 MeV时,停止点和轨迹在整个 x - z 截面内进一步扩展,入射端至中心导体附近形成密集电子云,正电子空间分布也随之扩大。

3 X射线诱导预电离源项与GIS潜在放电敏感区域的空间关联分析

3.1 辐射源项与气体放电模型的耦合分析框架

从源项角度看,X射线辐照产生的二次电子可作为外部电离源项参与SF₆气体中的电子输运、附着、复合及雪崩发展过程。在流体动力学近似下,

SF₆气体中的电子连续性方程可写为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (n_e v_d) = (\alpha - \eta) n_e |v_d| - r n_e n_i + S_p \quad (3)$$

式(3)中: n_e 、 n_i 分别为电子密度和正离子密度; v_d 为电子漂移速度; α 为流体电离系数; η 为气体附着系数; r 为复合系数; S_p 即为外部辐射电离源项($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)。文中未计算局部电场分布,因此不评价 α - η 的局部正负和雪崩条件。由该方程可知,辐射诱导二次电子能否影响局部放电起始,并不只取决于二次电子产额,还取决于其产生位置、局部电场强度、电子附着/复合损失以及雪崩发展条件。只有当外部电离源项出现在局部电场较强且有效电离能力高于附着损失的区域时,才可能显著增加有效电子密度并影响局部放电统计时延;若局部场强不足,二次电子更可能通过附着、复合或介质沉积等过程损失。

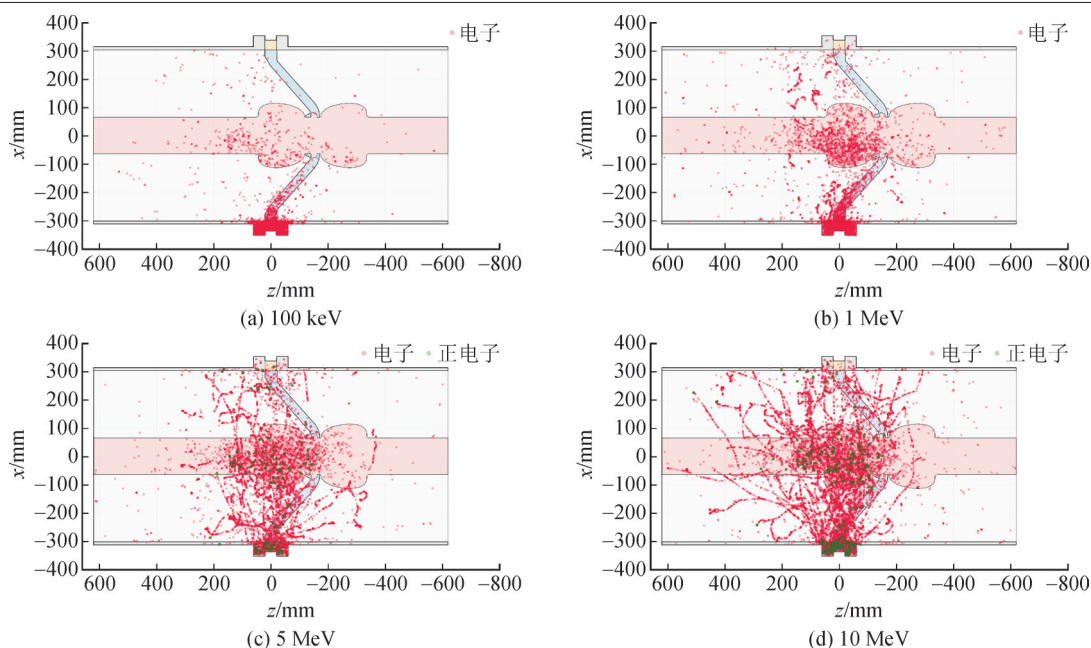


图6 带电粒子停止位置空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of charged particle stopping positions

为初步评价辐射源项与放电敏感区域之间的空间联系,文中将导体边缘、金属嵌件邻近区、绝缘子表面及三结合点等区域作为典型放电敏感区域,结合图6中带电粒子停止位置和轨迹分布进行空间接近性分析。需要强调的是,典型放电敏感区域主要依据GIS绝缘结构中的几何不连续、金属—气体—固体介质界面和工程放电经验进行定义。文中尚未给出这些区域的三维局部电场分布,也未计算电极边缘和三结合点处的场强增强系数。因此,文中仅从粒子输运角度讨论预电离源项与上述区域的空间接近性,不直接判断这些区域是否满足电子雪崩或局部放电起始条件。结果表明,100 keV入射条件下,电子停止点主要集中在入射端外壳及金属嵌件附近;当入射能量提高至1 MeV及以上时,二次电子停止点和轨迹逐渐向中心导体、绝缘支撑及气隙邻近区域扩展,与上述典型放电敏感区域的空间接近性增强。该结果仅说明较高能量入射光子产生的预电离源项在空间上更接近典型放电敏感区域,是否改变局部放电统计时延仍需进一步耦合电场计算、电子附着/复合模型及表面电荷输运模型定量验证。

3.2 高能工况下正电子产生及空间湮灭效应定量分析

随着入射能量达到5、10 MeV,电子—正电子对产生通道开始出现。根据表1统计,5、10 MeV条件下对产生过程占比分别为2.51%、4.04%,明显低于对应工况下康普顿散射的80.23%、73.84%。因此,在文中能量范围内,康普顿散射仍是二次电子源项

形成的主导机制。然而,对产生过程会引入正电子输运及其湮灭过程,使高能工况下的辐射场级联作用更加复杂。

正电子在介质中慢化后可与介质电子发生湮灭反应($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$),产生能量约为0.511 MeV的次级 γ 光子。这些次级光子具有一定穿透能力,仍可能在周围气体、绝缘子或金属邻近区域进一步发生光电效应或康普顿散射,从而对预电离源项 S_p 的空间分布产生一定影响。因此,高能工况下的正电子输运和湮灭过程可作为辐射场级联效应的补充机制。其对局部放电起始的实际贡献仍需结合局部电场分布、SF₆电子附着/复合过程及表面电荷输运模型进一步定量分析。

3.3 工程适用性、参数选择建议与辐射安全边界

在实际GIS缺陷检测中,X射线能量、照射方向、照射时间和剂量率共同影响预电离源项的形成位置、强度及工程适用性。根据文中模拟结果,100 keV低能光子受金属外壳和金属嵌件屏蔽影响较明显,气体区直接相互作用和能量沉积占比较低,预电离源项主要集中在入射端外壳及金属嵌件附近。当入射能量提高至1 MeV时,康普顿散射占比较高,二次电子分布向中心导体、绝缘子和气隙邻近区域扩展,说明较高能量光子更有利于在典型放电敏感区域附近形成预电离源项。因此,在文中GIS几何、源点位置和入射方向条件下,1 MeV工况相较100 keV更容易使二次电子分布扩展至中心导体、绝缘子和气隙邻近区域。对于后续现场或试验

平台研究, 300 keV ~ 1 MeV 可作为初始能量扫描范围之一, 但该范围并不等同于不同 GIS 结构和不同照射方式下的普适最优选择。

在照射方式方面, 工程现场通常不需要也不适合开展全空间均匀辐照。较为可行的方式是结合绝缘子、金属嵌件、盆式绝缘子三结合点及导体边缘等典型缺陷敏感区域, 采用局部定向辐照方式, 以提高辐射诱导预电离源项与潜在放电敏感区域之间的空间接近性。对于 5 ~ 10 MeV 高能光子工况, 其在常规现场局部放电检测中受射线源体积、防护要求和现场实施条件限制, 工程应用难度较大; 但在大型电力装备工业 CT、高能数字成像或厚壁结构无损检测场景中具有一定参考意义。文中设置该能量段主要用于分析高能光子穿透和级联相互作用增强时, 二次粒子源项对 GIS 绝缘环境可能产生的瞬态影响, 为后续高能无损检测条件下的绝缘安全评估提供参考。

辐射安全性和绝缘材料长期性能也是 X 射线辅助局部放电检测工程应用中必须考虑的问题。对于无明显缺陷且局部电场未达到放电发展条件的 GIS 结构, 辐射产生的二次电子通常会通过漂移、附着、复合或沉积等过程损失, 不一定发展为持续放电。但在现场应用中, 仍需控制照射剂量率、照射时间、脉冲占空比和累计剂量, 避免不必要的表面电荷积累和辐射防护风险。酸酐固化环氧树脂材料通常具有较好的耐辐射性能, 其辐射降解需要较高的累计吸收剂量; 相比之下, X 射线辅助局部放电检测一般采用短时、低占空比或脉冲式照射方式, 单次试验累计剂量相对较低。在控制剂量率、照射时间和累计剂量, 并满足放射防护规范条件下, 材料老化风险较低, 人员安全和设备运行风险可控。现场应用时仍需设置必要的屏蔽、安全距离和剂量监测措施, 确保检测过程满足相关辐射防护要求。

需要说明的是, 文中主要基于 Geant4 开展 X 射线在 GIS 多介质结构中的粒子输运和预电离源项分析, 尚未开展一手 X 射线辅助局部放电实验验证。为提供间接参考, 文中对已有 X 射线辅助局部放电试验研究进行了对照分析。相关文表明, X 射线照射可降低部分缺陷类型的局部放电统计时延, 并改善放电重复性的稳定性。该现象与文中模拟得到的较高能量光子可在导体、绝缘子及气隙邻近区域形成预电离源项的趋势相一致, 可为文中模型合理性提供间接支撑。后续研究将进一步结合 X 射线辅助局部放电试验平台, 对不同光子能量、照射方向、

剂量率和缺陷类型下的局部放电响应进行实验验证, 并在此基础上建立辐射源项、电场分布和放电起始概率之间的定量关系。

4 结论

文中建立了面向 X 射线辐照 GIS 的 Geant4 粒子输运模型, 获得了多能级入射光子在 GIS 中的能量沉积、相互作用过程和二次带电粒子分布, 需要说明的是, 文中主要研究辐射诱导预电离源项, 并未直接求解局部放电起始概率和放电发展过程。主要得到以下结论:

1) 入射能量显著影响能量沉积位置和空间作用范围。在文中 GIS 几何模型和入射条件下, 随着入射光子能级升高, 能量沉积和 γ 相互作用由入射端外壳及金属嵌件区域向中心导体、绝缘子和气隙邻近区域扩展。

2) 康普顿散射是文中能量范围内二次电子产生的主导机制, 其中 1 MeV 时康普顿散射占比最高, 约为 89.84%。5、10 MeV 下虽出现电子—正电子对产生, 但其占比分别仅为 2.51% 和 4.04%, 明显低于康普顿散射贡献, 因此应将其视为高能工况下的补充机制, 而非主导源项机制。

3) 尽管 SF_6 气体区直接 γ 光子相互作用计数占比仅约 1.91% ~ 2.25%, 金属和固体绝缘介质中产生的二次电子仍可能逸入气隙或到达绝缘子表面附近, 从而提供初始电子、形成预电离背景, 需要强调的是, 该结果仅表明辐射诱导源项在空间上可能接近潜在放电敏感区域, 并不等同于局部放电起始条件的直接判断。二次电子是否能够触发可测局放, 还取决于局部电场、电子附着、复合和电子雪崩发展条件。

4) 在文中构建的真型 GIS 几何模型、源点位置和入射方向条件下, 带电粒子停止位置和轨迹分布表明, 1 MeV 及以上入射光子产生的二次电子云, 与导体边缘、金属嵌件邻近区、绝缘子表面和三结合点等潜在放电敏感区域存在更明显的空间接近关系。

参考文献:

- [1] GB/T 7674—2020 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备[S].
GB/T 7674—2020 Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above[S].
- [2] GB 8905—1988 六氟化硫电气设备中气体管理和检测导则[S].
GB 8905—1988 The guide for management and measuring SF_6 gas in electrical equipment[S].
- [3] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版

- 社,2002.
- Yan Zhang, Zhu Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing:China Electric Power Press,2002.
- [4] GB/T 7354—2018 高电压试验技术 局部放电测量[S].
GB/T 7354—2018 High-voltage test techniques-partial discharge measurements[S].
- [5] GB/T 42287—2022 高电压试验技术 电磁和声学法测量局部放电[S].
GB/T 42287—2022. High-voltage test techniques-measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods[S].
- [6] 李军浩,韩旭涛,王昊天,等. 电气设备局部放电检测技术述评:2015—2025[J]. 高电压技术,2025,51(7):3132-3158.
Li Junhao, Han Xutao, Wang Haotian, et al. Review of partial discharge detection technology in electrical equipment: 2015—2025[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(7):3132-3158.
- [7] 马跃虎,田 禄,牛 勃. GIS盆式绝缘子局部放电缺陷定位分析[J]. 内蒙古电力技术,2019,37(2):24-29.
Ma Yuehu, Tian Lu, Niu Bo. Analysis of partial discharge defects localization in GIS basin-type insulator[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2019, 37(2):24-29.
- [8] 李庆民,王 健,李伯涛,等. GIS/GIL中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术,2016,42(3):849-860.
Li Qingmin, Wang Jian, Li Baitao, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3):849-860.
- [9] 李彦飞,汤贝贝,韩 冬,等. SF₆放电的发射光谱特性分析与放电识别[J]. 电工技术学报,2022,37(7):1866-1874.
Li Yanfei, Tang Beibei, Han Dong, et al. Spectroscopy analysis of emission spectrum characteristics and discharge recognition of SF₆ gas discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7):1866-1874.
- [10] 张 强,李成榕. X射线激励下局部放电的研究进展[J]. 电工技术学报,2017,32(8):22-32.
Zhang Qiang, Li Chengrong. Review on X-ray induced partial discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8):22-32.
- [11] 黄兴泉,郭 琳,李成榕,等. X射线激励下介质中气隙放电的研究[J]. 电工技术学报,2000,15(3):25-27.
Huang Xingquan, Guo Lin, Li Chengrong, et al. Study of dielectric discharge in cavities under X-ray irradiation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(3):25-27.
- [12] 郭 琳,李成榕,丁立健,等. 油/纸绝缘中的受激放电现象分析[J]. 电工技术学报,2001,16(4):80-84.
Guo Lin, Li Chengrong, Ding Lijian, et al. Analyzing of discharge induced by X-ray irradiation in oil/paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(4):80-84.
- [13] 郑书生,孔 举,戴敏婷,等. X射线激励XLPE电缆终端金属颗粒局部放电的研究[J]. 电工技术学报,2025,40(3):913-927.
Zheng Shusheng, Kong Ju, Dai Minting, et al. Study on partial discharge of metal particles in XLPE cable terminal excited by X-ray[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3):913-927.
- [14] 雷汉坤,贾志杰. 检测GIS固体绝缘内部放电缺陷的特高频和X射线数字成像联合方法研究[J]. 高压电器,2018,54(1):224-229.
Lei Hankun, Jia Zhijie. Research on combined method of ultra high frequency and X-ray digital imaging for detecting internal discharge defects of GIS solid insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1):224-229.
- [15] Mole G. Location of discharging cavity in 33 kV metalclad busbar by the use of X-rays[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1967, 114(10):1558-1560.
- [16] Rizzetto S, Fujimoto N, Stone G C. A system for the detection and location of partial discharges using X-rays[C]//Conference Record of the 1988 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1988:262-266.
- [17] Braun J M, Rizzetto S, Fujimoto N, et al. Modulation of partial discharge activity in GIS insulators by X-ray irradiation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(3):460-468.
- [18] Fujimoto N, Rizzetto S, Braun J M. Partial discharge XV improved PD testing of solid dielectrics using X-ray induced discharge initiation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(6):33-41.
- [19] Tehlar D, Riechert U, Behrmann G, et al. Pulsed X-ray induced partial discharge diagnostics for routine testing of solid GIS insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6):2173-2178.
- [20] Adili S, Franck C M. Application of pulsed X-ray induced partial discharge measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5):1833-1839.
- [21] Adili S, Herrmann L G, Franck C M. Investigating the inception mechanism of pulsed X-ray triggered partial discharges by time resolved measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5):1780-1788.
- [22] Koch M, Bujotzek M, Franck C M. Inception level of partial discharges in SF₆ induced with short X-ray pulses[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2014:11-14.
- [23] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. Geant4—a simulation toolkit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 506(3):250-303.
- [24] Allison J, Amako K, Apostolakis J, et al. Recent developments in Geant4[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016(835):186-225.
- [25] Berger M J, Hubbell J H, Seltzer S M, et al. XCOM: photon cross sections database(version 1.5)[EB/OL].[2026-03-22]. <http://physics.nist.gov/xcom>.
- 彭兆裕(1986—),男,硕士研究生,正高级工程师,主要研究方向为高压开关设备故障检测诊断方面研究工作(通信作者)(E-mail:3821820736@qq.com)。