

X 射线辐照下聚酰亚胺材料空间电荷分布特性的数值模拟

钟辉¹, 陈玉¹, 李志超¹, 王以宁¹, 侯潇涵¹, 王双¹, 刘鑫¹, 苏兆锋², 李进玺², 朱小锋³

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西北核技术研究所, 710024, 西安;
3. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 621900, 四川绵阳)

摘要: 针对特种装备用聚酰亚胺材料在 X 射线辐射环境下, 介电强度下降导致装备可靠性降低的问题, 提出了改进的双极性载流子输运模型, 分析聚酰亚胺在辐射环境下的载流子输运机制。通过在连续性方程的源项中添加载流子激发率, 表征 X 射线辐照引起电子-空穴对的激发过程。基于偏微分方程组的高精度求解算法, 在偏置电场强度为 $20 \sim 100 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 X 射线辐射剂量率为 $0 \sim 10 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下, 开展聚酰亚胺空间电荷和总电流密度的数值模拟。研究结果表明: 偏置电场与辐射剂量率越大, 聚酰亚胺内部的空间电荷积累越多; 在不同剂量率 X 射线的辐照作用下, 积累电荷的极性由负极性转变为正极性, 其电荷密度与剂量率成正相关, 最高可达 $41.2 \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$; 材料总电流密度随时间呈幂指数方式增长, 随后趋于稳定; 辐照作用下的该幂指数与辐射剂量率呈负相关, 但均高于无辐照时的情况; 无辐照条件下, 随着偏置电场的增加, 电流密度稳态值从 $1.1 \times 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加至 $7.9 \times 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, 并且该电流密度的稳态值和偏置电场存在分段的幂指数关系; 在同一偏置电场下, 电流密度与辐射剂量率成正比, 随着辐射剂量率的增加, 电流密度稳态值可增加至 $1.2 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。该研究对介质材料 X 射线辐射效应的模拟提供了借鉴意义。

关键词: 双极性载流子输运; 载流子激发率; 空间电荷; 数值模拟; 辐射效应

中图分类号: TM215.1; O487 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202606005 **文章编号:** 0253-987X(2026)06-0064-11

Numerical Simulation of Space Charge Distribution Characteristics of Polyimide Materials under X-Ray Irradiation

ZHONG Hui¹, CHEN Yu¹, LI Zhichao¹, WANG Yining¹, HOU Xiaohan¹,
WANG Shuang¹, LIU Xin¹, SU Zhaofeng², LI Jinxi², ZHU Xiaofeng³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

3. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: To address reliability degradation of equipment due to reduced dielectric strength of polyimide materials used in special equipment under X-ray irradiation, an improved bipolar carrier transport model was developed to analyze the carrier transport mechanism of polyimide exposed to radiation. The carrier excitation rate was incorporated into the source term of the continuity

收稿日期: 2025-09-23。 作者简介: 钟辉(1998—), 男, 博士生; 陈玉(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFF0705600); 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室开放基金资助项目(NKLIPR2318); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xzy022024067)。

网络出版时间: 2026-01-30

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20260129.1455.002>

equation to characterize electron-hole pair excitation process induced by X-ray irradiation. Using the high-precision solution algorithm of partial differential equations, numerical simulations of space charge and total current density of polyimide were performed under bias electric field intensities of 20—100 kV · mm⁻¹ and X-ray radiation dose rates of 0—10 Gy · s⁻¹. The results showed that, larger bias electric fields and higher radiation dose rates led to greater space charge accumulation within the polyimide. Under X-ray irradiation at different dose rates, the polarity of the accumulated charge was observed to reverse from negative to positive, and the accumulated charge density was positively correlated with the dose rate, reaching a maximum of 41.2 C · m⁻³. The total current density of the polyimide materials was found to increase with time following a power-law relation before approaching a steady state; the power-law exponent under irradiation decreased with increasing dose rate but remained larger than that without irradiation. In the absence of irradiation, the steady-state value of current density grew from 1.1×10^{-9} A · m⁻² to 7.9×10^{-8} A · m⁻² as the bias electric field increased, and a segmented power-law exponent dependence between the steady-state value of current density and the bias electric field was identified. At a fixed bias electric field, the steady-state value of current density was proportional to the irradiation dose rate and could increase up to 1.2×10^{-5} A · m⁻² as dose rate rose. The study provides a reference for the simulation of X-ray radiation effect on dielectric materials.

Keywords: bipolar carrier transport; carrier excitation rate; space charge; numerical simulation; radiation effect

X射线是一种典型的强电离辐射,当X射线与介质材料进行相互作用时,材料表面或深层将发生充放电现象。其中,电荷的输运特性与材料的陷阱分布有关^[1]。在X射线辐照下,绝缘介质内存在的陷阱会影响电荷的注入、输运和消散过程^[2-3],进而影响空间电荷的积聚特性。介质内部空间电荷的不断积聚会导致局部电场的升高,当超过阈值时,则会发生体击穿^[4],从而影响特种装备的正常运行。聚酰亚胺材料具有优异的介电性能和耐辐照性能,广泛应用于特种电力线缆、航天器系统、核电站辐射监测装置等各类装备中,为强辐射环境下特种装备的可靠性运行提供了重要保障。

空间电荷及其机理的研究,对介质材料走向更广泛的应用具有重要的指导意义。近年来,随着计算机技术和数值仿真模拟技术的发展,介质材料内部电荷输运机理的研究日渐深入。先前的空间电荷测试表明,电荷在介质内部传输时存在明显的双极性现象,即空穴和电子均为主要的载流子源^[5]。通过电致发光测试可知,介质内部的载流子输运存在正负电荷的复合现象^[6-7]。由于经典的单极性模型难以解释上述现象,因此,学者们普遍采用双极性载流子输运模型(BCT模型)描述材料的空间电荷行为^[8-12]。

英国伦敦国王学院的Alison等^[8]从半导体物理学的概念出发,首次提出了BCT模型。该模型综

合考虑了电子和空穴两种载流子的动力学过程。英国莱斯特大学的Roy等^[9]对BCT模型进行了改进与应用。通过BCT模型计算了低密度聚乙烯(LDPE)材料在恒定电压、阶跃增加的电压以及极化-去极化条件下的空间电荷,描述了LDPE外部电流、电致发光强度和电荷分布的一般特征。随后,Roy等^[10]又将陷阱载流子的热脱陷过程引入模型中,进一步丰富了模型的物理意义。然而,现有的文献缺乏针对X射线辐照条件下,介质材料空间电荷分布的数值模拟研究,对介质材料的X射线辐射效应规律认识还不够清晰。

BCT模型包括反应-扩散-对流微分方程组,国内外学者们对其求解方法进行了长期的研究,发展出各种高精度、低数值振荡、快速的求解方法与程序^[11-12],从而更高效、更精准地与实验测试结果进行对比。本文基于这些高精度的数值求解方法,改进了常规的BCT模型,对不同偏置电场、不同X射线辐照条件下,聚酰亚胺的空间电荷分布开展求解工作,并分析了求解结果与仿真条件的关系。

1 模型研究与数值模拟方法

1.1 X射线辐照下的BCT模型

电荷输运的微观机理是基于能带理论和载流子多重捕获传输理论发展而来^[13-15]。载流子从电极

与介质的界面处注入,随后,载流子在电场力的作用下发生定向迁移。然而,由于介质材料中陷阱的存在,载流子将被能隙中的陷阱捕获,暂时不参与电流的传输。一般情况下,载流子在陷阱中长时间存在,并且浅能级陷阱中的载流子还可再次被激发至导带,使其以间歇性传输的形式传导电荷。载流子的复合发生在对异号载流子之间。异号载流子可能是自由与陷阱载流子,也可能是一对陷阱载流子。

介质材料载流子的迁移过程与陷阱对载流子的捕获和复合密切相关。因此,该迁移过程因受载流子陷阱的调控而具有特殊性。载流子在介质内的运动(扩散和漂移)包含连续的入陷和脱陷事件。BCT模型正是以上述过程为前提和假设而提出的。

X射线的本质为光子,能量大约为 0.1 ~ 200.0 keV,这些光子作用于受辐照物质后,将其全部或部分能量通过光电效应或康普顿效应传递给核外电子,使电子脱离原子核的束缚,从价带进入导带,成为自由电子,同时,价带位置将新增等量的自由空穴。本文在建模过程中考虑了材料在 X 射线的作用下,电子空穴对的激发过程^[15-16]。该过程会在导带和价带分别产生电子和空穴,并且,这些电子和空穴将进一步参与到输运过程中。其中,电子空穴对的激发率与 X 射线辐射剂量率密切相关。图 1 为 X 射线辐照下 BCT 模型所代表的载流子输运机制,包括电极处电子和空穴的注入、传导、入陷、脱陷以及复合过程。

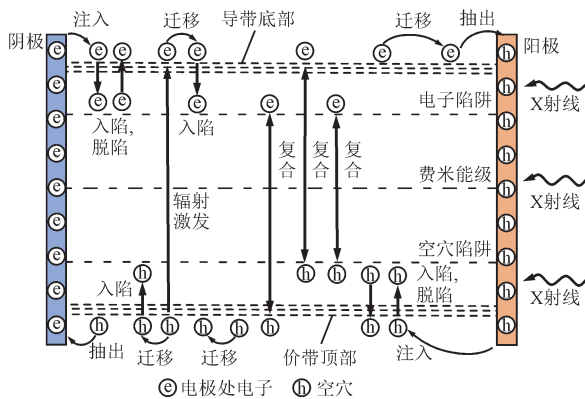


图 1 X 射线辐照下的 BCT 模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of BCT model under X-ray irradiation

在外施电场后,电极和材料界面将积累感应电荷,当聚合物内无电荷注入时,电极界面处形成面感应电荷密度 σ ,其计算表达式为

$$\sigma = \epsilon_0 \epsilon_r E_{dc} = \epsilon_0 \epsilon_r V_{dc} / L \quad (1)$$

式中: ϵ_r 为材料相对介电常数, $F \cdot m^{-1}$; ϵ_0 为真空介电

常数, $F \cdot m^{-1}$; E_{dc} 为试样的平均电场强度, $V \cdot m^{-1}$; V_{dc} 为试样两端的电势差, V ; L 为试样厚度, m 。

当电子和空穴从电极注入到材料内部后,形成的自由电荷和受陷电荷会在电极界面处形成感应电荷,界面处形成的总感应电荷密度将随材料内部各类电荷的空间位置和电荷量而改变,其计算式^[17]为

$$\rho_{ca} = \frac{1}{\Delta x_{el}} \left[- \int_0^L \frac{L-x}{L} \rho(x,t) dx - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V_{dc}}{L} \right] \quad (2)$$

$$\rho_{an} = \frac{1}{\Delta x_{el}} \left[- \int_0^L \frac{x}{L} \rho(x,t) dx + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V_{dc}}{L} \right] \quad (3)$$

式中: ρ_{ca} 、 ρ_{an} 分别为阴极和阳极处的感应电荷密度, $C \cdot m^{-3}$; x 为试样内部的空间坐标, m ; 本文以 $x=0$ 表示材料与阴极的界面, $x=L$ 表示阳极界面; $\rho(x,t)$ 为 t 时刻,在位置 x 处的空间电荷密度, $C \cdot m^{-3}$; Δx_{el} 为电极界面处的空间剖分尺寸, m 。

当电极界面电场低于 $100 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时,采用肖特基注入模式,其电流密度表达式^[18]为

$$j_e(0,t) = A_R T^2 \exp\left(-\frac{\omega_{ei}}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{q}{k_B T} \sqrt{\frac{q E_F(0,t)}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r}}\right) \quad (4)$$

$$j_h(L,t) = A_R T^2 \exp\left(-\frac{\omega_{hi}}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{q}{k_B T} \sqrt{\frac{q E_F(L,t)}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r}}\right) \quad (5)$$

电荷的抽出不设势垒,其电流密度表达式为

$$j_e(L,t) = \mu_e E_F(L,t) n_{fe}(L,t) \quad (6)$$

$$j_h(0,t) = \mu_h E_F(0,t) n_{fh}(0,t) \quad (7)$$

式中: j_e 、 j_h 分别为电子和空穴引起的传导电流密度, $A \cdot m^{-2}$; A_R 为理查森常数, $A \cdot m^{-2} \cdot K^{-2}$; ω_{ei} 、 ω_{hi} 分别为电子和空穴的注入势垒, eV ; T 为温度, K ; k_B 为玻尔兹曼常数, $J \cdot K^{-1}$; E_F 为电场强度, $V \cdot m^{-1}$; q 为元电荷, C ; μ_e 、 μ_h 分别为电子和空穴的迁移率, $m^2 \cdot s^{-1} \cdot V^{-1}$; n_{fe} 、 n_{fh} 分别为自由电子和自由空穴的电荷密度, $C \cdot m^{-3}$ 。

介质材料 BCT 模型的一维基本方程组由如下的表达式组成。

泊松方程

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} = -\frac{n_{fe} + n_{fh} + n_{te} + n_{th}}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (8)$$

传导方程

$$j(x,t) = j_h + j_e = (\mu_h n_{fh} + \mu_e n_{fe}) E_F(x,t) \quad (9)$$

电流连续性方程

$$\frac{\partial n_a(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial j_a(x,t)}{\partial x} = s_a(x,t) \quad (10)$$

式中: V 为电势, V ; ρ 为模型中 4 种载流子(自由电子,自由空穴,陷阱电子,陷阱空穴)的电荷密度之

和, $C \cdot m^{-3}$; n_{te} 、 n_{th} 分别为陷阱电子和陷阱空穴的电荷密度, $C \cdot m^{-3}$; j 为传导电流密度, $A \cdot m^{-2}$; n_a 为 4 种载流子电荷密度, $C \cdot m^{-3}$; j_a 为自由载流子(电子和空穴)引起的传导电流密度, $A \cdot m^{-2}$; s_a 为源项, $C \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$, 代表局域范围内各类载流子密度变化量的总和, 包含载流子复合、入陷、脱陷这 3 个过程。

由于 X 射线辐照也会产生电子空穴对, 本文在自由电荷的源项中引入辐射激发项 G_0 , 表示在 X 射线辐照下以恒定速率产生的自由载流子。4 种载流子的源项 s_{fe} 、 s_{fh} 、 s_{te} 、 s_{th} 表达式分别为

$$s_{fe} = G_0 - S_1 n_{th} n_{fe} - S_3 n_{fh} n_{fe} - B_e n_{fe} \left(1 - \frac{n_{te}}{n_{ote}}\right) + D_e n_{te} \quad (11)$$

$$s_{fh} = G_0 - S_2 n_{te} n_{fh} - S_3 n_{th} n_{fh} - B_h n_{fh} \left(1 - \frac{n_{th}}{n_{oth}}\right) + D_h n_{th} \quad (12)$$

$$s_{te} = -S_2 n_{te} n_{fh} - S_0 n_{th} n_{te} + B_e n_{te} \left(1 - \frac{n_{te}}{n_{ote}}\right) - D_e n_{te} \quad (13)$$

$$s_{th} = -S_1 n_{th} n_{fe} - S_0 n_{th} n_{te} + B_h n_{th} \left(1 - \frac{n_{th}}{n_{oth}}\right) - D_h n_{th} \quad (14)$$

式中: G_0 为自由电子和空穴对应的辐射激发速率, $C \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$, 与辐射剂量率成正比; $S_0 \sim S_3$ 为电子和空穴的复合系数, $C^{-1} \cdot m^3 \cdot s^{-1}$; B_e 、 B_h 分别为电子和空穴被深陷阱捕获的截面系数, s^{-1} 。

n_{ote} 、 n_{oth} 分别为电子和空穴陷阱的电荷密度, $C \cdot m^{-3}$; D_e 、 D_h 分别为受陷的电子和空穴从深陷阱中脱出的脱陷系数, s^{-1} 。

由于电场作用下 Poole-Frenkel 效应的存在, 脱陷势垒将降低, 脱陷系数 D_a 的表达式为^[13]

$$D_a = \nu_0 \exp\left(-\frac{\Delta U_a - \xi}{k_B T}\right) \quad (15)$$

$$\xi = \sqrt{q^3 E_F / \pi \epsilon_r \epsilon_0} \quad (16)$$

$$\nu_0 = k_B T / h \quad (17)$$

式中: ν_0 为电子或空穴的逃逸频率, s^{-1} ; ξ 为电场作用下考虑 Poole-Frenkel 效应的电子跳跃势垒减小量, eV, 是脱陷势垒的修正值; ΔU_a 为电子或空穴的陷阱深度, eV; h 为普朗克常数, $J \cdot s$ 。

1.2 BCT 模型的计算方法

1.2.1 泊松方程

用泊松方程表述的具有偏微分函数的复杂系统有多种求解方法, 如有限差分法(FDM)^[19]和边界元法(BEM)^[13,20]。求解之前需将求解域进行离散化剖分, 采用一维平板电极结构, 在试样厚度方向上进行

剖分。其中, 阴极在坐标原点处; 阳极在 L 处; 剖分单元长度为 Δx_i ($i = 1, 2, \dots, n$); 剖分单元数为 n ; 剖分后将产生 $n+1$ 个主节点 x_i 和 n 个副节点 $x_{i+(1/2)}$; 副节点间距为 Δh_i 。空间求解域的离散化如图 2 所示。本计算采用等间距剖分, 即 $\Delta x_i = \Delta h_i = \Delta x$, Δx 为空间网格步长。

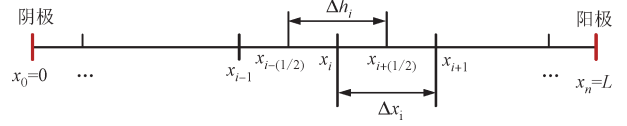


图 2 空间求解域的离散化

Fig. 2 Discretization of spatial calculation domain

利用 FDM 方法将式(8)离散化, 得到一个 $n+1$ 维的线性方程组。对于每个主节点, 其电势为 V_i , 载流子的电荷密度为 ρ_i , 代入已知的电势边界条件 V_0 和 V_n 可消去 2 个方程, 得到 $n-1$ 维的线性方程组, 其表达式为

$$\begin{bmatrix} \rho_1 - V_0 A_e \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \vdots \\ \rho_{n-1} - V_n A_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2A_e & A_e & 0 & \cdots & 0 \\ A_e & -2A_e & A_e & \cdots & 0 \\ 0 & A_e & -2A_e & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -2A_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_{n-1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: 系数 $A_e = -\epsilon_0 \epsilon_r / \Delta x^2$ 。初始时刻, 各类载流子密度均为 0, 使用 LU 分解易得出各主节点的电势 V_i , 进而求解出各副节点的电场 $E_{i+(1/2)} = -\partial V / \partial x$ 。主节点处的电场 E_i 可通过插值获得。

1.2.2 传导方程

传导方程的求解思路是通过各个主节点处的载流子电荷密度 n_i , 计算各个副节点处的载流子电荷密度 $n_{i+(1/2)}$ 。目前, 常用的算法包括 FTCS 算法^[17]、一阶迎风算法^[17]、WENO 算法^[20]以及 Quickest 算法^[21]。

FTCS 算法和一阶迎风算法均无法对快速变化的载流子电荷密度产生足够的跟随响应。Quickest 算法由 Leonard^[21]首次提出, 使用 3 个主节点处的电荷密度 n_i 、 n_{i+1} 、 n_{i+2} 对副节点的电荷密度 $n_{i+(1/2)}$ 进行二次插值, 具体节点的选取方式与载流子输运方向有关, 其表达式为

$$n_{i+(1/2)} = \begin{cases} [n_{i+1} + n_i - c_i(n_{i+1} - n_i)]/2 - \\ (1 - c_i^2)(n_{i+1} - 2n_i + n_{i-1})/6, u_i \geq 0 \\ [n_{i+1} + n_i - c_i(n_{i+1} - n_i)]/2 - \\ (1 - c_i^2)(n_{i+2} - 2n_{i+1} + n_i)/6, u_i < 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: u_i 为第 i 个节点处载流子的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 以电子的迁移方向为正方向, 即图 2 中从左指向右的方向; 系数 $c_i = \mu E_i \Delta t / \Delta x$ 。其中, Δt 为时间步长, s ; μ 为迁移率, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ 。式(19)需满足 $\mu E_i \Delta t < \Delta x$, 且 Δt 必须小于每个剖分单元内电荷入陷、脱陷和复合等现象的最短时间。

1.2.3 电流连续性方程

式(10)通过算子分离可以分解为反应项方程和对流项方程, 其表达式分别为

$$\frac{\partial n_a(x, t)}{\partial t} = s_a(x, t) \quad (20)$$

$$\frac{\partial n_a(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial j_a(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (21)$$

式(20)仅考虑了陷阱入陷、脱陷、复合对连续方程的影响, 不考虑载流子的输运过程, 可使用三阶、五阶龙格库塔法进行求解^[13]。式(21)仅考虑载流子输运, 将时间和空间进行离散化, 可结合前述的 Quickest 或 WENO 算法完成计算。

由于反应项方程和对流项方程的结果之间是相互耦合的, 为提高求解精度, Liu 等^[22]的研究指出, 在求解反应项方程之前和之后均求解一次对流项方程, 能够获得更精确的数值结果。设 t_k 为上一时间点, t_{k+1} 为本次所求解的时间点, 这种方法的具体求解如下过程。

首先, 仅考虑载流子激发、陷阱受陷-脱陷和复合对连续方程的影响, 在半个时间步长 $\Delta t/2$ 内计算式(20), 得到 $n_a(x_i, t_{k+(1/2)})$ 。

然后, 仅考虑载流子输运项, 将第一步得出的求解结果 $n_a(x_i, t_{k+(1/2)})$ 代入式(21) 计算, 时间步长为 Δt , 其表达式为

$$n_a(x_i, t_{k+1}) = n_a(x_i, t_{k+(1/2)}) - (j_{i+(1/2)} - j_{i-(1/2)}) \frac{\Delta t}{\Delta x} = n_a(x_i, t_{k+(1/2)}) - c_i [n_a(x_{i+(1/2)}, t_k) - n_a(x_{i-(1/2)}, t_k)] \quad (22)$$

式中: $n_a(x_{i+(1/2)}, t_k)$ 与 $n_a(x_{i-(1/2)}, t_k)$ 即为式(19)中的 $n_{i+(1/2)}$ 与 $n_{i-(1/2)}$, 其中, $n_{i-(1/2)}$ 为将 $n_{i+(1/2)}$ 的下标 i 替换为 $i-1$ 后即可得到; $j_{i+(1/2)}$ 与 $j_{i-(1/2)}$ 为第 $i+(1/2)$ 和 $i-(1/2)$ 副节点处的传导电流密度。

最后, 将第 2 步的计算结果再次代入式(20), 计

算步长为 $\Delta t/2$, 即可得到下一时刻各节点处的电荷密度 $n_a(x_i, t_{k+1})$ 。将各节点电荷密度加和后, 进行新一轮计算, 直至算出预设时间后的空间电荷分布。

1.2.4 求解结果的后处理

求解完空间电荷之后, 还需要进行后处理操作。首先, 为防止求解过程中产生数值震荡, 需要引入基于柯朗-弗里德里希斯-列维(CFL)条件的改进修正算法, 作为各个载流子电荷密度的通量限制器^[17]。其核心逻辑为: 如果当前时间步计算得到的载流子电荷密度 n_i^k 与前一个时间步的电荷密度 n_i^{k-1} 之差超过了相邻网格的电荷密度 (n_i^k, n_{i-1}^k) 之差, 则不更新当前时间的计算值, 而沿用上一个时间步的计算值。另外, 如果每次计算得到的载流子电荷密度的符号与真实带电情况异号, 则进行符号限制, 设置该电荷密度为 0。

另外, 在最终求解到空间电荷分布之后, 需要对其波形与高斯波形进行一次卷积操作。理想状态下, 在电极与试样的边界处产生的感应电荷为面电荷, 其厚度为 0, 而实际测试中, 由于测试系统空间分辨率大于 0, 这一面电荷将在空间上展开为体电荷, 从测试结果来看, 表现为在电极附近的一对高斯峰。因此, 在求解时也需要通过卷积还原这一峰值。本数值模拟程序的总体流程图如图 3 所示。

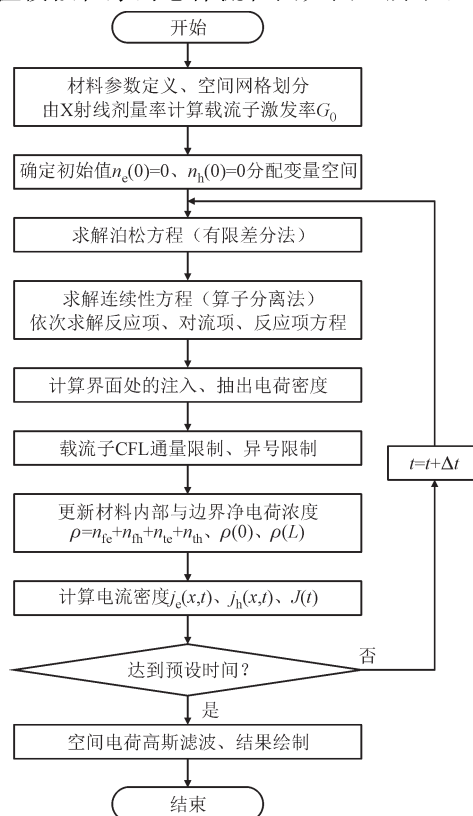


图 3 基于 BCT 模型的空间电荷数值模拟流程图

Fig. 3 Flow chart of space charge numerical simulation based on BCT model

2 聚酰亚胺材料的 BCT 模型求解

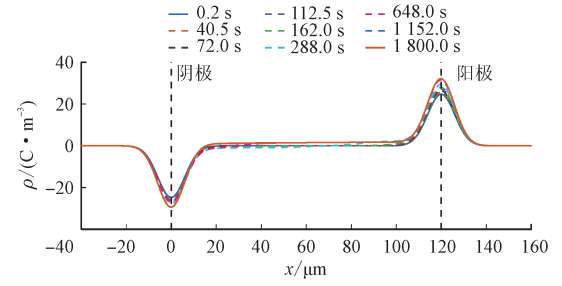
2.1 聚酰亚胺材料在不同偏置电场下的求解结果

使用 BCT 模型对聚酰亚胺材料的空间电荷分布进行数值模拟,仿真参数的设置如表 1 所示。其中,表 1 中的参数,在结合文献[17]与聚酰亚胺材料属性的基础上进行了适当调整。此外,自由载流子激发率 G_0 设为 0,以表示无 X 射线辐照情况;阳极电压设置为 2.4~12.0 kV,每次增加 2.4 kV,得到的试样偏置电场强度 E_F 分别为 20、40、60、80、100 kV · mm⁻¹。仿真计算无 X 射线辐照、不同偏置电场下材料内部的空间电荷分布,其结果如图 4 所示。

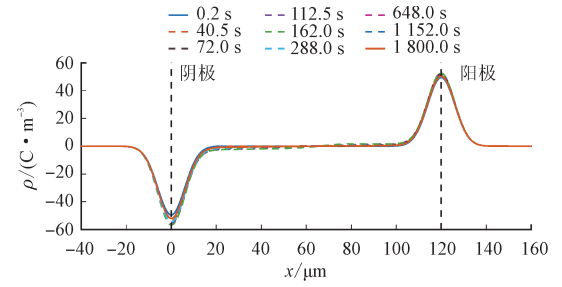
表 1 BCT 模型参数及条件设置

Table 1 Parameters and conditions of the BCT model

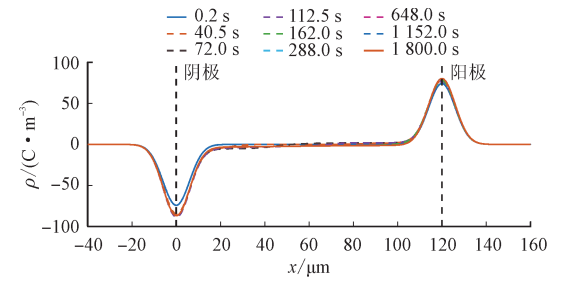
参数	数值
阴极电压 V_0/V	0
阳极电压 V_{an}/kV	2.4~12.0
w_{ei}/eV	1.28
w_{hi}/eV	1.3
$n_{ote}/(C \cdot m^{-3})$	-100
$n_{oth}/(C \cdot m^{-3})$	100
电子陷阱深度 $\Delta U_e/eV$	0.90
空穴陷阱深度 $\Delta U_h/eV$	0.94
B_e/s^{-1}	0.1
B_h/s^{-1}	0.2
$\mu_e/(m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1})$	1×10^{-14}
$\mu_h/(m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1})$	2×10^{-14}
$S_0/(C^{-1} \cdot m^3 \cdot s^{-1})$	10^{-5}
$S_1/(C^{-1} \cdot m^3 \cdot s^{-1})$	10^{-5}
$S_2/(C^{-1} \cdot m^3 \cdot s^{-1})$	10^{-5}
$S_3/(C^{-1} \cdot m^3 \cdot s^{-1})$	0
$\Delta x/m$	6×10^{-8}
$\Delta t/s$	2×10^{-2}
L/m	120×10^{-6}
T/K	300
ϵ_r	3.5
$\epsilon_0/(F \cdot m^{-1})$	8.854×10^{-12}
$A_R/(A \cdot m^{-2} \cdot K^{-2})$	1.202×10^6
$k_B/(J \cdot K^{-1})$	1.381×10^{-23}
$h/(J \cdot s)$	6.626×10^{-34}
q/C	1.602×10^{-19}



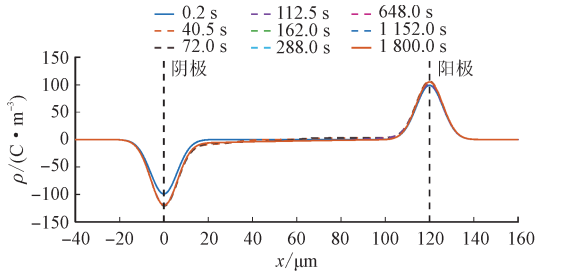
(a) $E_F = 20 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$



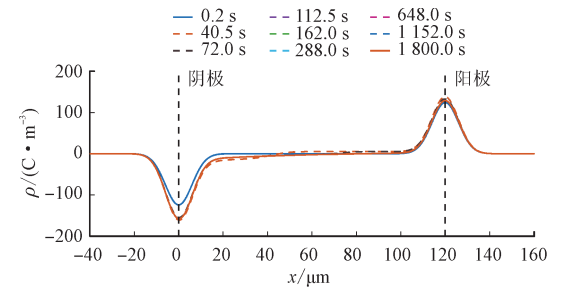
(b) $E_F = 40 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$



(c) $E_F = 60 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$



(d) $E_F = 80 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$



(e) $E_F = 100 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$

图 4 不同偏置电场强度下聚酰亚胺的空间电荷时间特性

Fig. 4 Space charge time characteristics of polyimide under different bias electric field intensities

由图4可知,随着施加电压时间的增加,材料内部的空间电荷将不断发生变化。在初始时刻,材料内部几乎没有电荷积累,仅在电极界面附近迅速引起感应电荷。 $E_F = 20 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时,如图4(a)所示,试样内部整体将积聚少量的正极性电荷,随着偏置电场 E_F 的增加,试样内部的空间电荷逐渐转变为负极性。

当 $E_F \geq 60 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时,如图4(c)~(e)所示, x 为 $10 \sim 40 \mu\text{m}$ 的阴极附近存在一定的同极性电荷积聚,即与相邻电极上的感应电荷极性相同的电荷。此外,由于电荷的扩散效应,将导致电极处感应电荷向材料内部扩散迁移,感应电荷的峰值相比施加电压的前期有所减小。图5汇总了聚酰亚胺在不同偏置电场下极化 30 min 后的空间电荷波形。由图可知,随着偏置电场的增大,空间电荷在电极处的感应电荷峰值有所增加,最高在阴极处可达 $-157.6 \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$, 内部积累电荷为负极性,且积累电荷量增大,这些规律与大部分常规空间电荷测试获得的结果一致^[23-25]。

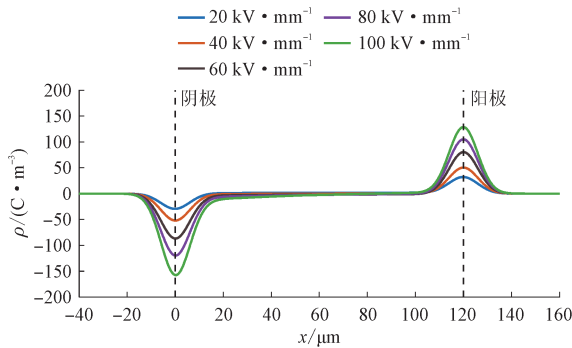


图5 聚酰亚胺在不同偏置电场强度下的 30 min 极化后的空间电荷

Fig. 5 Space charge distribution of polyimide after 30 min polarization under different bias electric field intensities

计算得到空间电荷分布之后,可以通过电流连续性方程求解传导电流,考虑载流子存在电荷密度梯度下的扩散效应,可以求得扩散电流。另外,电场强度随时间的变化将引起总电流中的位移电流^[11,18]。综上,载流子运动引起的电流密度分布 $j_a(x, t)$ 、材料内部总电流密度分布 $J(x, t)$,以及材料总电流随时间变化 $J(t)$ 的表达式分别为

$$j_a(x, t) = \mu_a n_a E_F(x, t) - \frac{\mu_a k_B T}{q} \frac{\partial n(x, t)}{\partial x} \quad (23)$$

$$J(x, t) = j_e(x, t) + j_h(x, t) + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial E_F(x, t)}{\partial t} \quad (24)$$

$$J(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n J(x_i, t) \quad (25)$$

图6给出了不同偏置电场下聚酰亚胺的总电流密度变化曲线。其中,区间拟合直线用灰色虚线标出。由图可知,该组曲线具有十分明显的特征:电流密度随时间呈幂指数形式增加,即 $J(t) \propto t^A$,并在不同时间内达到稳定,电场越高,到达稳定的时间越短。此外,在电流密度曲线的上升段,指数 A 的拟合值如表2所示。由表可知,随着 E_F 的增加,指数仅有小幅增加,且高电场下的 A 值基本保持不变。

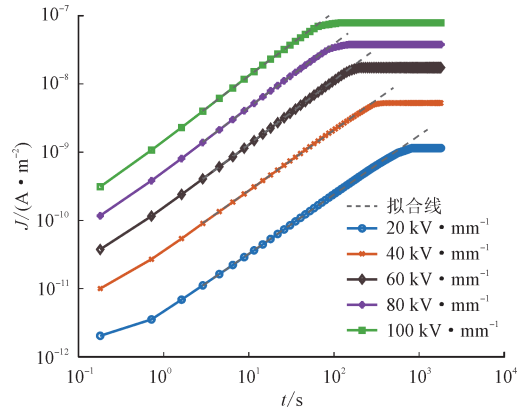


图6 不同偏置电场强度下的总电流密度曲线

Fig. 6 Total current density under different bias electric field intensities

表2 不同偏置电场强度下 $J(t)$ 曲线上升段拟合结果
Table 2 Fitting results of the rising part of $J(t)$ curves under different bias electric field intensities

$E_F / (\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$	A 拟合值
20	0.87
40	0.89
60	0.94
80	0.93
100	0.94

电流密度的稳态值 J_{st} 与偏置电场的关系如图7所示, J_{st} 从 $1.1 \text{ nA} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加到 $79 \text{ nA} \cdot \text{m}^{-2}$, 二者存在分段的幂指数关系。

此外,图7中的虚线为数据点的分段拟合线,分段拟合表达式为

$$J_{st} \propto \begin{cases} E_F^{2.195}, & E_F \leq 40 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1} \\ E_F^{2.925}, & E_F > 40 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1} \end{cases} \quad (26)$$

闵道敏^[13]通过数学推导得出了空间电荷限制电流(SCLC)随偏置电压的关系式,并通过数值迭代的方法计算了聚酰亚胺的 SCLC 特性。可以看到,在本文的偏置电场计算范围内,聚酰亚胺材料的伏安特性可近似看作由陷阱限制 SCLC 区转变为陷阱填满 SCLC 区,转变点位于电场强度为 $40 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处,

与文献计算结果一致。

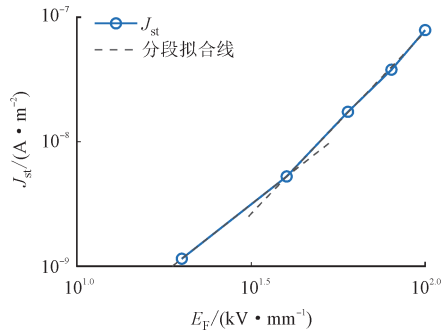


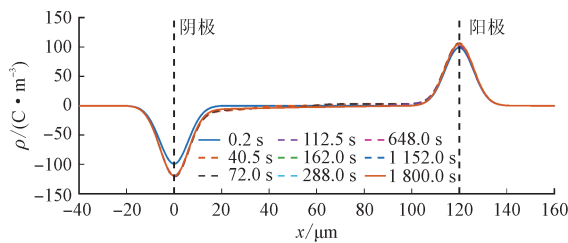
图7 无辐照情况下稳态电流密度与偏置电场的关系

Fig. 7 Relationship between steady state current density and bias electric field without irradiation

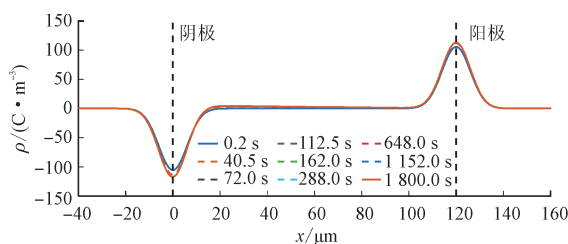
2.2 聚酰亚胺材料不同剂量率下的求解结果

文献[15]指出, X射线辐射下自由电荷的激发率 g_0 与 X射线辐射剂量率 R 成正比, 并存在线性关系: $g_0 = 2.32 \times 10^{17} R$ 。该激发率以 $\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 为单位, 物理意义为单位体积、单位时间内产生的电子空穴对数量, 将该单位转换为本文使用的电荷密度, 可得 $G_0 \approx 0.037R$, 单位为 $\text{C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此, 本计算设置自由载流子激发率 G_0 分别为 $0.037, 0.148, 0.296, 0.370 \text{ C} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 仿真聚酰亚胺在不同剂量率 ($R = 1, 4, 8, 10 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$) 下的空间电荷分布, 并保持外施电场 $E_F = 80 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ 不变。

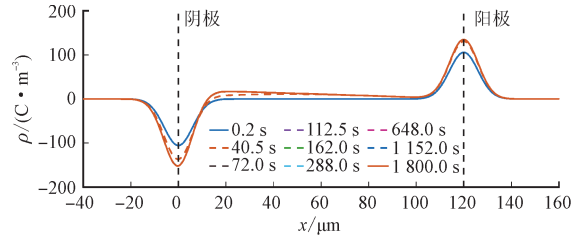
求解结果如图8所示, X射线辐照对聚酰亚胺空间电荷的影响非常显著。在 X射线辐照过程中, 阴极和阳极电极处的感应电荷峰值随时间变化而显著增大, 以最高辐射剂量率 $R = 10 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ 为例, 阴极处的电荷峰值可达 $-218.9 \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$, 阳极处的电荷峰值可达 $178.3 \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$ 。



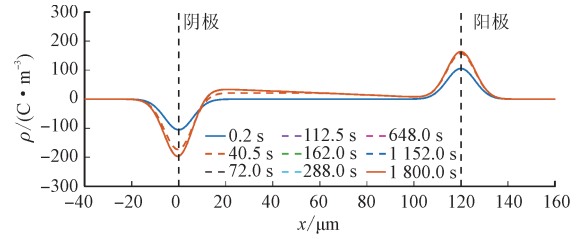
(a) $R=0$



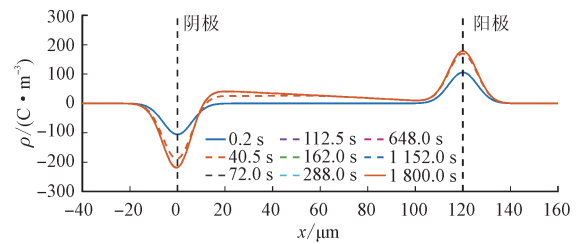
(b) $R=1 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$



(c) $R=4 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$



(d) $R=8 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$



(e) $R=10 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$

图8 聚酰亚胺在不同辐射剂量率下的空间电荷时间特性

Fig. 8 Space charge time characteristics of polyimide under different radiation dose rates

此外, 试样内部的空间电荷出现了明显的正极性电荷积聚, 特别是在阴极附近 $x=20 \mu\text{m}$ 处, 正极性电荷密度为 $41.2 \text{ C} \cdot \text{m}^{-3}$, 与无辐照情况相反, 相对于阴极感应电荷表现为异极性电荷积聚。此外, 聚酰亚胺靠近阴极侧的内部空间电荷大于阳极处, 随空间位置的增加呈现线性逐渐递减的规律。

图9总结了不同剂量率 X射线辐照、外施电场 E_F 为 $80 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ 下, 极化 30 min 后, 材料的空间电荷分布。由图可以更加直观的观察, 材料内部的空间电荷积累方式由无辐照情况下的负极性积聚转变为大量的正极性积累, 同时, X射线辐射剂量率越大, 积聚的空间电荷也越大, 特别是在阴极处更是如此。目前, 针对 X射线辐照环境下的空间电荷研究鲜有报道, 唐超等^[23]对 LDPE 材料进行了 γ 射线辐照后, 发现试样阴极附近存在正电荷积聚峰, 累积辐照剂量的增加将导致陷阱密度和陷阱深度的增加, 从而引起电荷积累总量的增加, 该结论与本文的数值模拟结果吻合。

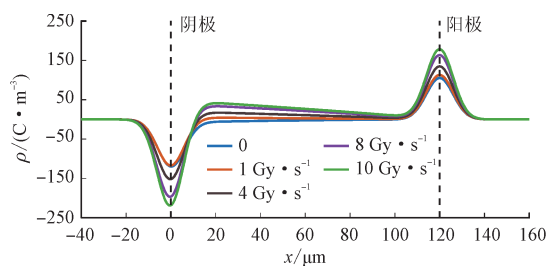


图 9 聚酰亚胺不同辐射剂量率 30 min 极化后的空间电荷
Fig. 9 Space charge distribution of polyimide after 30 min polarization under different radiation dose rates

图 10 给出了不同辐射剂量率下聚酰亚胺的总电流 $J(t)$ 变化曲线。随着 X 射线剂量率的不断增加, 电流密度在 2 ~ 3 s 后同样呈幂指数形式增加, 即 $J(t) \propto t^A$, 并逐渐达到稳态值。图 10 中的拟合情况用灰色虚线标出, 指数 A 的拟合值如表 3 所示。由表可知, 指数 A 与剂量率 R 呈负相关, 但均高于无辐照时的情况。

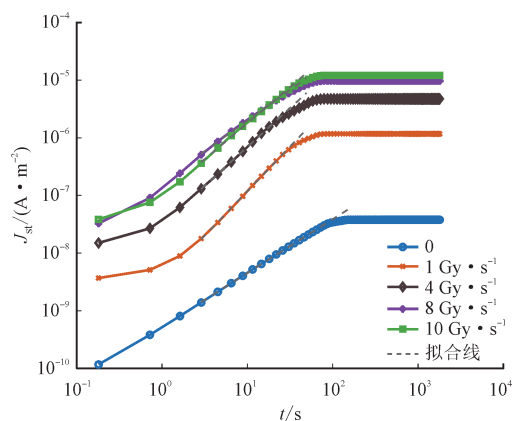


图 10 不同剂量率下的总电流密度曲线
Fig. 10 Total current density under different radiation dose rates

表 3 不同剂量率下 $J(t)$ 曲线上升段拟合结果

Table 3 Fitting results of the rising part of $J(t)$ curves under different dose rates

剂量率 $R/(\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1})$	A 拟合值
0	0.93
1	1.54
4	1.35
8	1.25
10	1.06

电流密度的稳态值 J_{st} 与剂量率的关系如图 11 所示, 在相同偏置电场情况下, J_{st} 从约 $3.8 \times 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$

增加到 $1.2 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, 增大了约 300 倍。 J_{st} 随剂量率的增加而线性增加, 拟合结果为 $J_{\text{st}} = 1.21 \times 10^{-6} R$ 。文献[15-16]在低剂量率范围内, 测量了 X 射线辐照下聚酰亚胺等介质材料的辐照感应电导率, 其稳态值 σ_{st} 随辐射剂量率成正比, 由于电流密度与电导率的关系为 $\sigma_{\text{st}} = J_{\text{st}}/E_{\text{F}}$, 二者仅相差一个常数, 因此本文获得的规律与该文献吻合。

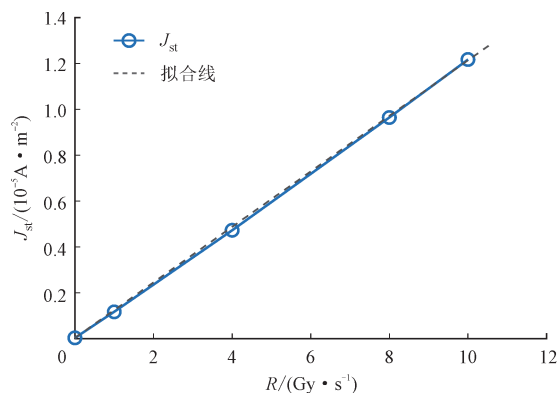


图 11 X 射线辐照下稳态电流密度与剂量率的关系
Fig. 11 Relationship between steady-state current density and radiation dose rate under X-ray irradiation

本文的数值模拟结果表明, 更高的偏置电场或更大的剂量率能够引起聚酰亚胺材料内部, 尤其是阴极电极处的空间电荷积聚。剂量率的增加对空间电荷的影响更为显著, 将导致材料空间电荷积聚电荷符号的反转, 及电荷密度的显著增大。基于本文工作, 以下几个方向仍有待开展更为深入的探索: 扩展求解时与模型适配的计算条件, 在模型中考虑更多因素, 获取更高电场和辐射剂量率下的空间电荷规律; 开发 X 射线辐照下的空间电荷原位测试装置, 进行数值模拟与原位测试结果的对比验证; 进行短路条件下, 去极化空间电荷的行为研究。

3 结 论

衡量介质材料在 X 射线辐照等特殊环境下介电性能的空间电荷动力学数值模拟一直是特种装备领域关注的重点。本文介绍了 BCT 模型的理论机理及求解方法, 在常规 BCT 模型中引入了电子空穴对激发率参数, 其代表了 X 射线辐照引起的材料辐射效应。基于学者们开发的计算方法, 开展了改进 BCT 模型的数值模拟, 计算了聚酰亚胺材料在不同偏置电场 ($E_{\text{F}} = 20 \sim 100 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$) 与不同 X 射线辐射剂量率 ($R = 0 \sim 10 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$) 下的空间电荷分布特性和不同条件下的电流密度曲线, 对特种材料

优化和特种装备抗X射线辐射加固设计具有指导意义。本文得到如下主要结论如下。

(1)在无X射线辐照情况下,空间电荷密度随着偏置电场的增大而增加,界面处的感应电荷密度最高在阴极处可达 $-157.6\text{ C}\cdot\text{m}^{-3}$ 。同时,阴极附近存在部分同极性的负电荷积累,并随着偏置电场的增加而增加。

(2)受稳态X射线辐照之后,空间电荷密度随着辐射剂量率的增大而增加,阴极处的电荷峰值最高可达 $-218.9\text{ C}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在试样内部尤其是阴极附近出现了明显的异极性正电荷积聚,积聚的电荷量与剂量率呈正相关。

(3)总电流密度随时间呈幂指数形式 $J\propto t^A$ 上升,然后达到稳态值 J_{st} 。 A 值基本不随偏置电场的增加而变化。随着辐射剂量率从0增加到 $1\text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}$,指数 A 从0.93增加到1.54;当剂量率继续增大, A 值逐渐减小至1.06。稳态值 J_{st} 随着偏置电场 E_{F} 的增大呈分段的幂指数关系,分段点在电场强度为 $40\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 处,幂指数拟合关系分别为 $J_{\text{st}}\propto E_{\text{F}}^{2.195}$ 和 $J_{\text{st}}\propto E_{\text{F}}^{2.925}$ 。 J_{st} 与剂量率的线性拟合关系为 $J_{\text{st}}=1.21\times 10^{-6}R$ 处。

参考文献:

- [1] ACERBI F, ALTAMURA A R, DI RUZZA B, et al. Radiation damage effects of protons and X-rays on silicon photomultipliers [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, 1047: 167791.
- [2] 王双, 李敬, 李晨阳, 等. 形状记忆环氧材料漏电流抑制技术及耐辐照性能提升方法 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(12): 165-174.
WANG Shuang, LI Jing, LI Chenyang, et al. Leakage current suppressing techniques and X-ray irradiation resistance performance enhancement methods for shape memory epoxy materials [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(12): 165-174.
- [3] 宋小凡, 闵道敏, 高梓巍, 等. 聚酰亚胺纳米复合电介质中指数分布陷阱电荷跳跃输运对储能性能的影响 [J]. 物理学报, 2024, 73(2): 233-244.
SONG Xiaofan, MIN Daomin, GAO Ziwei, et al. Effect exponentially distributed trapped charge jump transport on energy storage performance in polyetherimide nanocomposite dielectric [J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(2): 233-244.
- [4] 郭佳, 周凯, 任显诚, 等. 纳米石墨烯掺杂浓度对XLPE击穿性能的影响 [J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 91-96.
- [5] GUO Jia, ZHOU Kai, REN Xiancheng, et al. Influence of graphene nanosheet concentration on breakdown strength of XLPE [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(13): 91-96.
- [6] KUMAOKA K, KATO T, MIYAKE H, et al. Development of space charge measurement system with high positional resolution using pulsed electro acoustic method [C]//Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 389-392.
- [7] PRAKASH A, KATIYAR M. Correlation between electroluminescence, charge transport and photophysical properties of polymer blends [J]. Synthetic Metals, 2017, 223: 184-191.
- [8] 王辉耀, 魏福贤, 吴雨廷, 等. 激基复合物有机发光二极管中平衡载流子增强电荷转移态的反向系间窜越过程 [J]. 物理学报, 2023, 72(17): 202-210.
WANG Huiyao, WEI Fuxian, WU Yuting, et al. Enhanced reverse inter-system crossing process of charge-transfer stated induced by carrier balance in exciplex-type OLEDs [J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(17): 202-210.
- [9] ALISON J M, HILL R M. A model for bipolar charge transport, trapping and recombination in degassed crosslinked polyethylene [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 1994, 27(6): 1291-1299.
- [10] ROY S L, SEGUR P, TEYSSÉDRE G, et al. Description of bipolar charge transport in polyethylene using a fluid model with a constant mobility: model prediction [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2004, 37(2): 298-305.
- [11] ROY S L, TEYSSÉDRE G, LAURENT C. Charge transport and dissipative processes in insulating polymers: experiments and model [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(4): 644-654.
- [12] 张灵, 陈健宁, 周远翔, 等. 聚合物绝缘空间电荷动力学的理论模型与数值仿真研究进展 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 3037-3054.
ZHANG Ling, CHEN Jianning, ZHOU Yuanxiang, et al. Progress on theoretical models and numerical simulation of space charge kinetics in polymeric insulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 3037-3054.
- [13] MIN Daomin, LI Shengtao. A comparison of numerical methods for charge transport simulation in insulating materials [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(3): 955-964.

- [13] 闵道敏. 聚合物介质材料电荷捕获输运特性和机理的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2013.
- [14] XING Zhaoliang, ZHANG Chong, CUI Haozhe, et al. Space charge accumulation and decay in dielectric materials with dual discrete traps [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(20): 4253.
- [15] ZHONG Hui, CHEN Yu, YUE Dongli, et al. Radiation-induced conductivity of alumina materials under steady-state X-ray irradiation: numerical calculations and measurements [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1-8.
- [16] ZHONG Hui, CHEN Yu, HOU Xiaohan, et al. Radiation-induced conductivity of polyimide under monochromatic X-ray irradiation: calculation, numerical simulation, and measurement [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-9.
- [17] 吴建东. 低密度聚乙烯纳米复合介质中电荷输运的实验研究和数值模拟 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [18] ROY S L, BAUDOUIN F, LAURENT C, et al. Analysis of current-voltage characteristics in insulating polymers using a bipolar charge transport model [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2022, 29(6): 2101-2109.
- [19] SALEM M, ALDABBAGH O. Numerical solution to Poisson's equation for estimating electrostatic properties resulting from an axially symmetric Gaussian charge density distribution: charge in free space [J]. *Mathematics*, 2024, 12(13): 1948.
- [20] REN Hanwen, LI Qingmin, LI Chengqian, et al. Applicability analysis of the prevailing algorithms for reliable solution of the bipolar charge transport model [J]. *Physica Scripta*, 2019, 94(7): 075802.
- [21] LEONARD B P. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1979, 19(1): 59-98.
- [22] LIU Hongliang, ZHANG Yameng, LI Haodong, et al. Stability and convergence of the canonical Euler splitting method for nonlinear composite stiff functional differential-algebraic equations [J]. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, 14(6): 1276-1301.
- [23] 唐超, 廖瑞金, 周天春, 等. 伽马射线对低密度聚乙烯的空间电荷陷阱特征影响 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(22): 188-194.
- TANG Chao, LIAO Ruijin, ZHOU Tianchun, et al. Influence of gamma irradiation on space charge trapping characteristics in low density polyethylene [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(22): 188-194.
- [24] 曹丹, 梁启璐, 展云鹏, 等. 聚丙烯/聚烯烃弹性体复合材料空间电荷和电导特性 [J]. *西安交通大学学报*, 2025, 59(4): 60-69.
- CAO Dan, LIANG Qilu, ZHAN Yunpeng, et al. Space charge and conductance characteristics of polypropylene/polyolefin elastomer composites [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2025, 59(4): 60-69.
- [25] 王聰, 李晓, 屠幼萍, 等. 传导电流可测的PEA空间电荷测试系统 [J]. *电测与仪表*, 2014(20): 15-20.
- WANG Cong, LI Xiao, TU Youping, et al. PEA space charge test system with measurable conduction current [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2014(20): 15-20.

(编辑 刘懿莹)