

文章编号: 2095-4980(2024)10-1172-08

真空环境温度对聚酰亚胺表面充电特性的影响

原青云, 张希军, 段赛赛

(陆军工程大学石家庄校区 电磁环境效应国家级重点实验室, 河北 石家庄 050003)

摘要: 空间环境温度的变化会对航天器表面介质材料的带电程度造成不同的影响, 为此, 本文基于电流平衡方程建立了温度对聚酰亚胺表面充电影响的数值模型。在此基础上, 利用航天器材料表面充电模拟实验系统, 研究电子辐照下温度变化对聚酰亚胺表面充电特性的影响。仿真结果表明, 当温度一定, 束流密度分别为 0.5 nA/cm^2 、 1 nA/cm^2 、 2 nA/cm^2 时, 聚酰亚胺表面充电平衡电位随着束流密度的增大而增大; 当束流密度一定时, 在 $243\sim 363 \text{ K}$ 范围内, 聚酰亚胺表面充电平衡电位随着温度的升高而减小。束流密度越大, 温度变化对平衡电位的影响越小, 这一研究结论可为航天器介质材料面对温度变化时带电防护提供参考。

关键词: 束流密度; 平衡电位; 聚酰亚胺; 表面充电; 温度

中图分类号: TN386.5

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024127

Impact of vacuum environmental temperature on surface charging characteristics of polyimide

YUAN Qingyun, ZHANG Xijun, DUAN Saisai

(National Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang Hebei 050003, China)

Abstract: Variations in space environment temperatures can have distinct effects on the level of charging on dielectric materials surfaces of spacecraft. To address this, a numerical model has been established in this paper based on the current balance equation to study the impact of temperature on the surface charging of polyimide. Subsequently, utilizing a spacecraft material surface charging simulation experiment system, the influence of temperature changes on the surface charging characteristics of polyimide under electron irradiation is investigated. The simulation results indicate that when the temperature is fixed, the surface charging equilibrium potential of polyimide increases as the beam current density increases at levels of 0.5 nA/cm^2 , 1 nA/cm^2 , and 2 nA/cm^2 . Conversely, when the beam current density is held constant, the surface charging equilibrium potential of polyimide decreases with the rise in temperature within the range of 243 K to 363 K . The larger the beam current density, the less significant the effect of temperature changes on the equilibrium potential. This research finding can serve as a reference for the charging protection of dielectric materials on spacecraft in response to temperature variations.

Keywords: beam density; equilibrium potential; polyimide; surface charging; temperature

聚酰亚胺以其良好的耐辐射、耐高低温、抗电晕腐蚀等特性, 在航空航天领域得到广泛应用^[1-2]。聚酰亚胺是聚合物材料, 其电导特性受温度的影响很大, 从而影响其在空间环境下的带电水平。航天器运行于轨道环境中, 当经过阴影区和光照区时, 会面临环境温度在 $-180\sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 变化的情况^[3]。温度变化会导致聚酰亚胺的差异带电, 且温度较低时聚酰亚胺中的沉积电荷很难泄放, 这些情况容易引发静电放电, 造成材料击穿、性能下降, 放电产生的电磁脉冲会对航天器的敏感器件造成干扰甚至损伤^[4-6]。因此需进行考虑温度效应的航天器介质材料带电特性研究。

目前, 一些理论被提出用于描述电子辐照下介质材料内电荷输运特性^[7-9]。J R Dennison 等^[10]研究了聚乙烯受

温度和电场强度影响时电导率的变化规律，并建立了相应的模型，对不同温度下低密度聚乙烯辐射诱导电导率的变化规律进行研究；J I Minow 等^[11]对航天器介质材料处于低温环境时的充放电机理及过程进行了论述；D C Ferguson 等^[12]对低温环境下介质材料带电特性进行实验研究，并测量放电电磁脉冲信号，但实验涉及的温度太少，仅局限于 L2 轨道的温度；乌江等^[13]研究不同温度下聚酰亚胺薄膜陷阱特性对其绝缘性能的影响；周书星等^[14]针对 InP HEMT 外延结构材料开展不同能量和注量电子束辐照实验，获得辐照前后 InP HEMT 外延材料二维电子气浓度和迁移率归一化退化规律，分析了不同能量和注量电子束辐照对外延材料电学特性的影响；蒙志成等^[15]建立不同温度下的聚酰亚胺材料表面充电数值模型，并利用地面模拟实验设备开展了不同温度下聚酰亚胺表面充电特性的实验研究，结果表明，当环境温度变化范围为 273.15~363.15 K 时，聚酰亚胺薄膜的表面充电平衡电位逐渐降低；王金晓等^[16]采用脉冲电声法测试了 0.3~1.0 MeV 电子辐照下聚酰亚胺材料内部的沉积电荷分布特性，研究了电子能量和入射电子数对材料内部沉积电荷分布的影响规律。

本文利用航天器材料表面充电模拟实验系统，进行不同温度下航天器介质材料电子束辐照实验，分析真空环境电子辐照下温度对聚酰亚胺表面充电特性的影响。研究结果可为考察空间电子辐照条件下温度对星用介质材料带电特性影响提供理论参考，从而采取更好的防护措施避免因温度变化导致的介质材料静电放电。

1 数值模型

航天器表面带电效应是指在空间等离子体和太阳辐射影响下，空间电荷沉积到介质表面然后泄放的过程。航天器介质材料表面充电的过程是电流平衡的过程，当介质表面电荷沉积的速率等于电荷泄放的速率时，表面充电达到平衡状态^[17]，此时，表面的总电流 $I_T=0$ 。

$$I_T = I_e(U) - [I_i(U) + I_{se}(U) + I_{si}(U) + I_b(U) + I_{ph}(U) + I_l(U)] \quad (1)$$

式中： I_T 为表面的总电流； $I_e(U)$ 为入射的电子电流； $I_i(U)$ 为入射的离子电流； $I_{se}(U)$ 为入射的电子电流引起的二次电子流； $I_{si}(U)$ 为入射的离子电流引起的二次离子流； $I_b(U)$ 为背散射电子流； $I_{ph}(U)$ 为光电子流； $I_l(U)$ 为表面泄漏电流。电流单位均为 A。

在电子束辐照条件下，表面电流平衡方程通常表示为^[18]：

$$J_0 = J_s + J_{ES} + J_c + J_D \quad (2)$$

式中： J_0 为入射电子流密度； J_s 为表面泄漏电流密度； J_{ES} 为二次电子发射电流密度； J_c 为传导电流密度； J_D 为位移电流密度，电流密度单位均为 A/m^2 。

$$J_c = \sigma E = \sigma \frac{U}{L} \quad (3)$$

式中： σ 为材料电导率，单位为 S/m ； E 为电场强度，单位为 V/m ； U 为表面电位，单位为 V ； L 为试样厚度，单位为 m 。

当不同能量的电子入射到介质中时，会沉积在不同的深度。其电子射程式为^[19]：

$$r = \frac{0.55E_0}{\rho} \left(1 - \frac{0.9841}{1+3E_0} \right) \times 10^{-2} \quad (4)$$

式中： r 为入射电子在介质中的最大射程，单位为 m ； E_0 为电子的入射能量，单位为 MeV ； ρ 为介质材料的密度，单位为 g/cm^3 。

定义 L_1 为试样中除电子射程以外的厚度：

$$L_1 = L - R \quad (5)$$

则

$$J_D = \frac{\varepsilon}{L_1} \times \frac{dU}{dt} \quad (6)$$

式中 ε 为材料介电常数，单位为 F/m 。

结合载流子输运理论，介质电导率可表示为^[20]：

$$\sigma = en\mu \quad (7)$$

式中： e 为单位载流子所带的电荷量； n 为载流子密度； μ 为载流子迁移率。

电子辐射环境下，介质的二次电子发射系数受电导率的影响^[21]：

$$\delta = \delta_0 \exp(-\sigma D) \quad (8)$$

式中： δ_0 为材料在常温时的二次电子发射系数，聚酰亚胺为 0.6； D 为辐射剂量。

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right) \quad (9)$$

式中： σ_0 为材料的本征电导率； E_A 为电子跳跃时需越过的势垒高度； k 为玻尔兹曼常数； T 为温度。

电子作为负极性载流子，其在 2 个相邻局域态之间的迁移率表示为：

$$\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right) \quad (10)$$

式中 μ_0 为 T 趋于无穷大时电子的迁移率。

研究绝缘材料带电特性时，表面泄漏电流的表达式为：

$$J_s = \frac{U}{R_s} \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_s - \Delta E_{PF}}{kT}\right) \quad (11)$$

式中： R_s 为试样半径； E_s 为表面陷阱能量，取值为 0.1~0.3 eV； ΔE_{PF} 为由电场引起的材料表面陷阱能量变化。

将式(3)和式(6)~(11)代入式(2)，得到聚酰亚胺表面充电电位的微分方程式：

$$\frac{dU}{dt} + \left(\frac{A}{B} + \frac{e\mu n}{BL}\right)U = \left(\frac{1-\delta}{B}\right)J_0 \quad (12)$$

式中： $A = \frac{\sigma_0}{R_s} \exp\left(-\frac{E_s - \Delta E_{PF}}{kT}\right)$ ； $B = \frac{\epsilon}{L_1}$ 。

当初始条件 $t=0$ ， $V(0)=0$ 时，式(12)的解为：

$$U(t) = \frac{[(1-\delta)J_0L]}{\left[\frac{\sigma_0}{R_s} \exp\left(-\frac{E_s - \Delta E_{PF}}{kT}\right)L + e\mu n \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right)\right]} - \frac{[(1-\delta)J_0L]}{\left[\frac{\sigma_0}{R_s} \exp\left(-\frac{E_s - \Delta E_{PF}}{kT}\right)L + e\mu n \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right)\right]} \times \exp\left\{-\frac{t\left[\frac{\sigma_0}{R_s} \exp\left(-\frac{E_s - \Delta E_{PF}}{kT}\right)L + e\mu n \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right)\right]}{(\epsilon L/L_1)}\right\} \quad (13)$$

2 实验装置及方法

2.1 实验装置

本文实验在航天器介质材料表面充电实验系统中进行，如图 1 所示。该系统主要由以下几部分组成：

1) 真空系统：直径为 500 mm，长为 500 mm，极限真空度可达 2.7×10^{-5} Pa。

2) 电子枪：能量范围为 0~30 keV，电子束流密度范围为 $0.1 \sim 10$ nA/cm²。

3) 温度控制系统：通过对温控板进行电加热和压缩机机械制冷的方式进行温度控制，范围在 213~363 K。

4) 检测及电位监控系统：对真空装置内的真空度、电子能量、电子束流密度、温度和试样表面电位进行监控。

2.2 实验方法

将不同厚度的聚酰亚胺薄膜裁剪为直径为 70 mm 的圆状，用导电银胶将其紧密贴附于直径为 70 mm、厚度为

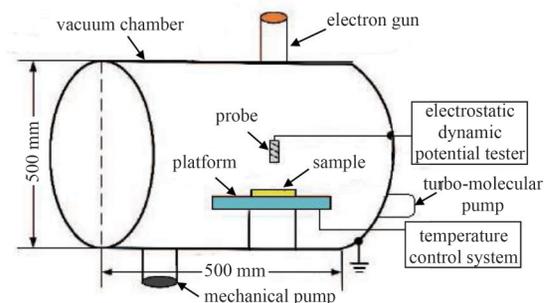


Fig.1 Schematic diagram of integrated experiment system
图 1 综合实验系统原理框图

1 mm 的金属圆板上，经过 24 h 固化和干燥处理，确保试样背面接地良好；然后将粘有聚酰亚胺薄膜的金属圆板紧密贴附于温控板上，使其良好接地与导热。

实验所选取的温度分别为 243 K、258 K、273 K、288 K、303 K、318 K、333 K、348 K 和 363 K，温度间隔为 15 K；电子枪能量设为 25 keV，束流密度分别设为 0.5 nA/cm²、1 nA/cm² 和 2 nA/cm²。材料的厚度为 25 μm、50 μm、100 μm。实验时，先通过制冷、加热控制系统将温控板控制到所需温度，之后保持 30 min 确保试样与温控板所设置的温度一致。在真空度低于 6×10⁻⁴ Pa 时打开电子枪，设置所需的电子能量和束流密度，预热 10 min 后进行辐照实验。为使不同温度下的实验相互独立，避免累积效应，在每个温度下充电实验结束后对试样进行消电处理，之后再继续进行下一项实验。

3 实验结果及分析

3.1 温度对聚酰亚胺整体充电水平的影响

图 2 为不同束流密度和温度下 50 μm 聚酰亚胺表面电位随充电时间的变化情况。由图 2 可得，当温度和束流密度一定时，聚酰亚胺表面电位随着充电时间的增加而增大，然后达到稳定值；当温度变化范围为 243~363 K 时，在同一温度下，随着束流密度的增大，聚酰亚胺表面充电平衡电位(绝对值)逐渐增大。聚酰亚胺表面充电平衡电位与温度的关系如图 3 所示。由图 3 可得，在同一束流密度下，随着温度的升高，聚酰亚胺表面充电平衡电位(绝对值)逐渐减小。在 243~363 K 温度范围内，当束流密度为 0.5 nA/cm² 时，表面充电平衡电位的变化范围为 -4 010~-876 V；束流密度为 1 nA/cm² 时，表面充电平衡电位的变化范围为 -8 235~-2 040 V；束流密度为 2 nA/cm² 时，表面充电平衡电位的变化范围为 -12 353~-5 377 V。

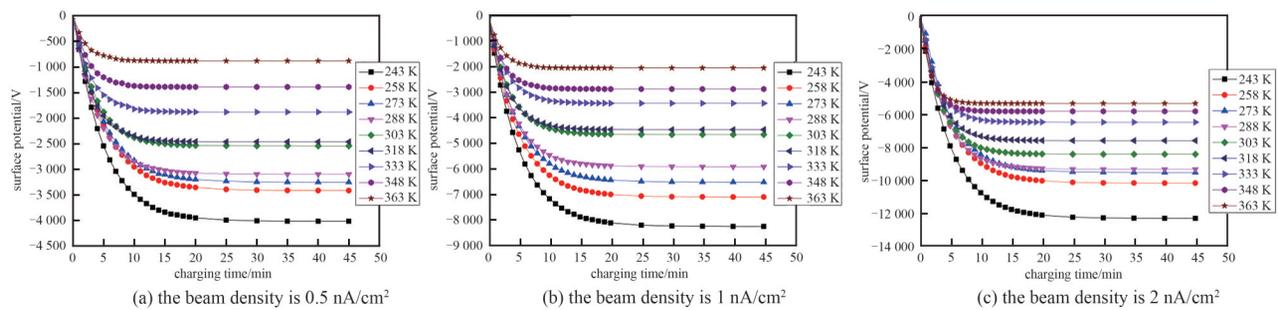


Fig. 2 Change of the surface potential of polyimide with the charge time at different temperatures and beam densities

图 2 不同温度和束流密度下聚酰亚胺表面电位随充电时间的变化

图 2 和图 3 的实验结果可通过温度和电场强度对介质电导率的影响进行解释。当温度较低时，介质的电导率较低，介质上电荷的沉积速率大于电荷的泄放速率，介质材料表面充电平衡电位较高；当温度升高时，介质电导率变大，介质的电导能力升高，使介质上电荷的泄放速率加快，造成介质表面充电平衡电位峰值降低。此外，介质的电导率不仅受温度的影响，还受介质表面电场强度的影响。随着电场强度的增大，介质的电导率增大，从而加快介质表面电荷的泄放，使表面电位降低。由于介质表面电场强度相对于其内部电场强度较小，因此介质表面电荷的泄放主要受温度的影响。

利用式(13)计算得到不同温度(243 K、258 K、273 K、288 K、303 K、318 K、333 K、348 K和363 K)

下聚酰亚胺表面充电电位随时间变化关系，如图 4 所示。计算时，聚酰亚胺的密度为 1.44 g/cm³，电子枪能量为 25 keV，束流密度为 1 nA/cm²，圆状聚酰亚胺薄膜的厚度为 50 μm，直径为 70 mm，E_s 为 0.2 eV，ε 为 2.97×10⁻¹¹ F/m，σ₀ 为 10⁻¹⁵ S/m，δ₀ 为 0.6。

由图 4 可得，随着充电时间的增加，聚酰亚胺表面电位逐渐增大后达到一平衡值，之后随着充电时间的增加

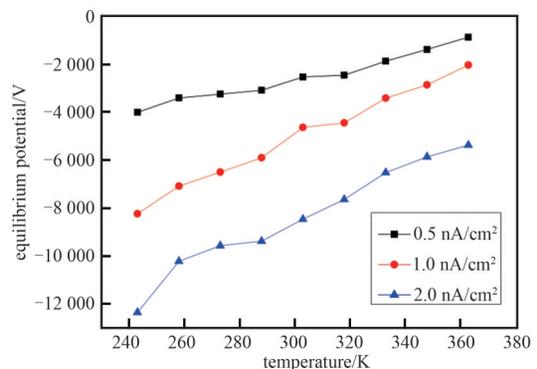


Fig.3 Relationship between the surface charging balance potential of polyimide and temperature under different beam densities

图 3 不同束流密度条件下聚酰亚胺表面充电平衡电位与温度的关系

不再增大。温度不同，充电所能达到的平衡电位不同，随着温度的升高，聚酰亚胺表面充电平衡电位逐渐减小。

对比图 4 和图 2(b)发现，通过合理设置模型参数，不同温度下的数值计算结果与实验数据拟合较好，从而验证了数值模型的适用性。

3.2 不同温度范围表面充电平衡电位的变化规律

由于聚酰亚胺表面充电平衡电位随温度的变化曲线呈现单调性，为分析温度变化对不同束流密度条件下聚酰亚胺表面充电平衡电位的影响程度，定义变化幅度为 $P=|(U_1-U_2)/U_1|$ 。其中 U_1 为基准平衡电位，为温度在 243 K 时的试样表面充电平衡电位， U_2 为温度在 363 K 时试样的表面充电平衡电位。将不同束流密度条件下聚酰亚胺的表面充电平衡电位在 363 K 时相对于 243 K 时的变化幅度进行对比与统计，结果如表 1 所示。

表 1 温度在 243~363 K 范围内时不同束流密度条件下聚酰亚胺表面充电平衡电位的变化幅度

Table 1 Changes of the surface charging balance potential of polyimide under the condition of different beam densities when the temperature is in the range of 243~363 K

beam density/(nA·cm ⁻²)	0.5	1.0	2.0
P/%	78.1	75.2	56.5

由表 1 可以看出：在 243~363 K 范围内时，随着束流密度的增大，试样表面充电平衡电位在 363 K 时相对于 243 K 时的变化幅度逐渐减小。说明在该温度范围内，束流密度越大，温度变化对其表面充电平衡电位的影响就越小。这种现象可通过介质充电过程的等效电路进行解释。

模拟温度变化情况下介质材料充电过程的等效电路图如图 5 所示^[22]。其中，G 为电子枪； C_0 为试样表面与相邻介质间的杂散电容； I_0 为电子辐照引起的入射到试样中的电流；电荷沉积区电容为 C_1 ；电荷迁移区电容为 C_2 。

$$C_1 = \epsilon S / R \quad (14)$$

$$C_2 = \epsilon S / (L - R) \quad (15)$$

式中 S 为面积，单位为 m^2 。

由于在电荷沉积区，有高能电子的注入，因此在该区域内会产生辐射诱导电导率，且辐射诱导电导率大于材料的暗电导率^[23]。由于电荷沉积区和电荷迁移区厚度不一样，载流子浓度和迁移率也有区别，受到温度影响的电导率也不一样，因此试样表面充电平衡电位可表示为：

$$U = I_0 R S^{-1} (\sigma_{nc} + \sigma_{T1})^{-1} + I_0 (L - R) S^{-1} (\sigma_{T2})^{-1} \quad (16)$$

式中： σ_{nc} 为辐射诱导电导率； σ_{T1} 为电荷沉积区中受温度影响的电导率； σ_{T2} 为电荷迁移区中受温度影响的电导率。电导率单位均为 S/m。

由式(16)可得，束流密度越大， I_0 对表面充电平衡电位影响的主导作用就越强；且 I_0 越大，辐射诱导电导率越大，即 σ_{nc} 就越大。温度变化时，改变的主要是受温度影响的电导率，在束流强度和辐射诱导电导率都很大的情况下，受温度影响的电导率对表面充电平衡电位的影响作用就显得很微小。另外，从微观层面进行分析：由于聚酰亚胺是聚合物，从其结构特点进行分析，聚合物材料中存在许多缺陷，结合电子触发极化松弛模型^[24]，电荷会被介质中或深或浅的陷阱所俘获，介质受到高能电子辐照时，陷阱会积聚能量，其中的束缚电荷会脱陷形成自由电荷，导致极化松弛。由二次电子发射雪崩模型可知，当越来越多的高能电子注入时，初始电子碰撞介质表面形成二次电子，二次电子与从陷阱脱出的自由电荷在向接地端移动的过程中与介质继续碰撞，造成更

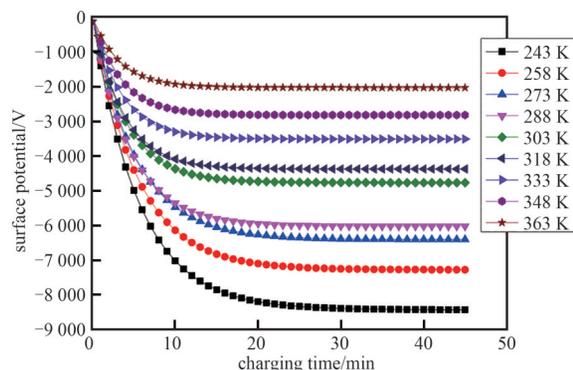


Fig.4 Numerical simulation results of the surface potential of polyimide with the charge time at different temperatures

图 4 不同温度下聚酰亚胺表面电位随时间变化的数值模拟结果

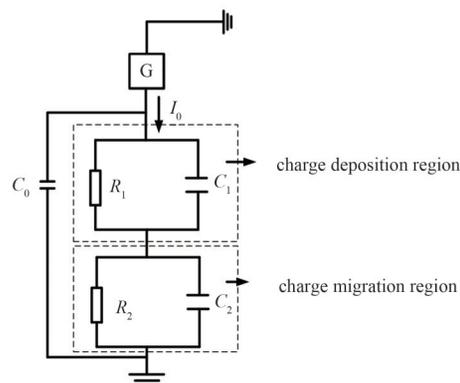


Fig.5 Equivalent circuit diagram of polymer charge under the condition of temperature change

图 5 模拟温度变化情况下介质材料充电过程的等效电路图

大程度的电子增值过程，产生电子崩。

当电子能量不变，电子束流密度增大时，初始电子越多，电子在表面积聚的程度就越大，导致二次电子发射越剧烈。在图 5 的电荷沉积区内，载流子的输运过程主要为高能电子注入引起的二次电子雪崩。温度升高时，会增加输运电子的动能，增大电荷活性，但电子撞击的影响作用已超过温度对电子的加速作用。因此束流密度越大，温度变化对材料表面充电平衡电位变化的影响越小；随着温度的升高，温度对载流子的加速作用逐渐超过电子雪崩的作用，因此束流密度越小，温度变化对材料表面充电平衡电位变化的影响越大。

3.3 不同温度下材料厚度对表面充电电位的影响规律

图 6 给出了入射电子能量为 25 keV、束流密度为 1 nA/cm²时，不同温度和厚度下聚酰亚胺表面电位随充电时间的变化情况。不同厚度聚酰亚胺表面充电平衡电位与温度的关系如图 7 所示。由图 6 和图 7 可以看出，随着厚度的增加，聚酰亚胺表面充电平衡电位整体呈现逐渐增大的趋势。

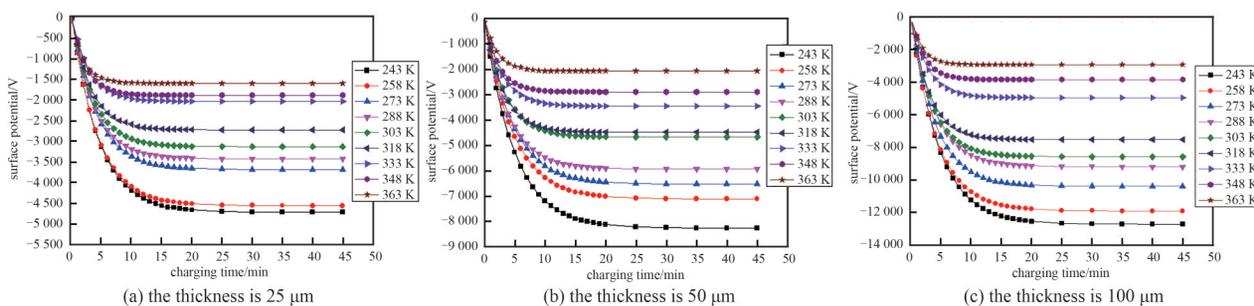


Fig.6 The change of the surface potential of polyimide with the charge time at different temperatures and thicknesses

图 6 不同温度和厚度下聚酰亚胺表面电位随充电时间的变化

在 243~363 K 温度范围内，表面充电平衡电位的变化范围为：厚度为 25 μm 时，为 -1 665~-475 V；厚度为 50 μm 时，为 -4 010~-876 V；厚度为 100 μm 时，为 -8 355~-1 391 V。

表 2 给出了在 243~363 K 温度范围内，不同厚度聚酰亚胺表面充电平衡电位的变化幅度。由表 2 可以看出，随着温度的升高，聚酰亚胺试样厚度越大，表面充电平衡电位变化的幅度越大。表明在 243~363 K 温度变化范围内，聚酰亚胺试样的厚度越大，温度变化对其表面充电平衡电位的影响就大。

根据介质材料充电等效电路如图 5 所示。试样表面充电电位为电荷沉积区电位与电荷迁移区电位之和：

$$U = I_0 R_1 + Q/C_2 \quad (17)$$

式中： R_1 为电荷沉积区等效电阻，单位为 Ω ； Q 为电荷迁移区的电荷量，单位为 C 。

表 2 不同厚度聚酰亚胺表面充电平衡电位的变化幅度

thickness/ μm	25	50	100
$P/\%$	66.5	75.2	77.1

由式(17)可知，随着试样厚度的增大，电荷迁移区的等效电容减小，在其他条件如注入电流不变的情况下，注入的电荷量不变，因此电荷迁移区的电位随着厚度的增大而增大，导致试样整体的电位增大。

对于电荷沉积区，由于高能电子的注入，该区域内电子活跃程度大，且基于本文设置的电子能量，电子的最大沉积深度不大，电荷沉积区相比于电荷迁移区厚度较小，陷阱数量和能量均较小，因此载流子的产生程度远大于复合程度。产生过程主要取决于高能电子的注入及其与聚合物中分子等粒子的电离程度，该过程受温度影响的程度较小。而在电荷迁移区，由于高能电子很少或几乎没有，且厚度大于电荷沉积区，因此在电荷迁移区内，电荷的产生作用很弱，载流子在陷阱中的复合作用强于电荷沉积区，如电子与陷阱中的空穴进行复合，空穴与陷阱中的电子进行复合，当温度升高时，会促进被陷阱俘获的载流子进行脱陷作用，成为自由载流子，

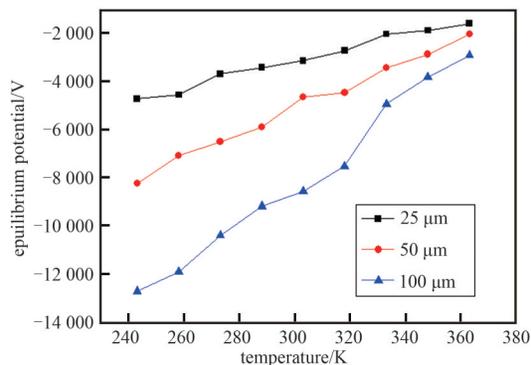


Fig.7 Relationship between the surface charge balance potential of polyimide and temperature under different thicknesses

图 7 不同厚度下聚酰亚胺表面充电平衡电位与温度的关系

使电荷向接地端的输运作用增强。因此温度变化主要是影响电荷迁移区的电荷输运过程。

因此,在基于 25 keV 能量的电子束辐照条件下,高能电子入射的最大深度不变,当聚酰亚胺试样厚度越大时,电荷迁移区厚度与电荷沉积区厚度的比值也就越大。试样整体厚度的增大,在有热脱陷作用的情况下,其表面充电平衡电位受到温度变化的影响就越大。

4 结论

本文研究表明,介质材料电导率是影响介质材料充电水平的关键因素,而电导率受温度影响较大。在一定能量的电子辐照下,温度、束流密度对介质材料表面电位均有明显的影响。在束流密度一定,当温度变化范围为 243~363 K 时,随着温度的升高,聚酰亚胺表面充电平衡电位逐渐减小;当温度一定时,束流密度越大,聚酰亚胺表面电位越大。另外,聚酰亚胺试样厚度越大,温度变化对其表面充电平衡电位变化的影响越小,在相同的电子束辐照下,厚度越大,温度变化时,聚酰亚胺表面充电平衡电位的稳定性越好。因此,为有效避免空间电子辐照环境和温度变化引发的航天器绝缘材料深层充电效应,必须对绝缘材料做好屏蔽以避免高能量、大束流电子的辐照,同时适当提高材料环境温度。

通过合理设置模型参数,得到不同温度下的数值模拟结果与实验数据拟合较好,验证了模型的可靠性,实验数据与数值模拟结果存在差异,可能是模型的一些参数未能精确反映实际情况,在下一步的研究工作中应进行完善。

参考文献:

- [1] LIAW D J, WANG K L, HUANG Y C, et al. Advanced polyimide materials: syntheses, physical properties and applications[J]. *Progress in Polymer Science*, 2012, 37(7): 907–974. doi:10.1016/j.progpolymsci.2012.02.005.
- [2] LI Shengtao, PAN Shaoming, LI Guochang, et al. Influence of electron beam irradiation on DC surface flashover of polyimide in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(2): 1288–1294. doi:10.1109/TDEI.2017.006103.
- [3] HANNA R, PAULMIER T, MOLINIE P, et al. Radiation induced conductivity in space dielectric materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(3): 033713. doi:10.1063/1.4862741.
- [4] 李宏伟, 韩建伟, 蔡明辉, 等. 卫星充放电效应对典型星载电子设备影响的实验研究[J]. *航天器环境工程*, 2021, 38(3): 370–374. (LI Hongwei, HAN Jianwei, CAI Minghui, et al. Experimental study of the effects of spacecraft charging and discharging on typical satellite-borne electric instrument[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(3): 370–374.) doi: 10.12126/see.2021.03.019.
- [5] LAURENT C, TEYSSEDRE G, ROY S L, et al. Charge dynamics and its energetic features in polymeric materials[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, 20(2): 357–381. doi:10.1109/TDEI.2013.6508737.
- [6] MIN Daomin, CHO Mengu, KHAN A R, et al. Surface and volume charge transport properties of polyimide revealed by surface potential decay with genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(2): 600–608. doi: 10.1109/TDEI.2012.6180255.
- [7] SESSLER G M, FIGUEIREDO M T, FERREIRA G F L. Models of charge transport in electron-beam irradiated insulators[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2004, 11(2): 192–202. doi:10.1109/TDEI.2004.1285887.
- [8] BAUDOIN F, ROY S L, TEYSSEDRE G, et al. Bipolar charge transport model with trapping and recombination: an analysis of the current versus applied electric field characteristic in steady state conditions[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(2): 025306. doi:10.1088/0022-3727/41/2/025306.
- [9] DENNISON J R, SIM A, BRUNSON J, et al. Engineering tool for temperature, electric field and dose rate dependence of low conductivity spacecraft materials[C]// *The 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. Orlando, Florida: AIAA, 2009: 092407. doi: 10.2514/6.2009-562.
- [10] DENNISON J R, BRUNSON J. Temperature and electric field dependence of conduction in low-density polyethylene[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(5): 2246–2252. doi:10.1109/TPS.2008.2003443.
- [11] MINOW J I, PARKER L N. Spacecraft charging in low temperature environment[C]// *The 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. Reno, NV: AIAA, 2007: 1–10.
- [12] FERGUSON D C, SCHNERIDER T A, VAUGHN J A. Effects of low temperature on charging of spacecraft dielectrics[C]// *The 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. Reno, NV: AIAA, 2008: 1–11.
- [13] 乌江, 李帅强, 何敏恒, 等. 不同温度下聚酰亚胺薄膜陷阱特性对其绝缘性能的影响[J]. *高电压技术*, 2022, 48(12): 4873–4881. (WU Jiang, LI Shuaiqiang, HE Minheng, et al. Effect of trap characteristics on insulation performance of polyimide film at

- different temperatures[J]. *High Voltage Engineering*, 2022,48(12):4873–4881. doi:10.13336/j.1003–6520.hve.20220158.
- [14] 周书星,方仁凤,陈传亮,等. 不同能量和注量电子辐照对 InP HEMT 材料电学特性影响[J]. *原子能科学技术*, 2021,55(12):2274–2281. (ZHOU Shuxing, FANG Renfeng, CHEN Chuanliang, et al. Effects of electron irradiation at different energy and fluences on electrical properties of InP HEMT structure[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021,55(12):2274–2281.) doi:10.7538/yzk.2021.youxian.0483.
- [15] 蒙志成,孙永卫,原青云,等. 温度对聚酰亚胺表面充电特性影响的实验与数值模拟[J]. *高电压技术*, 2018,44(9):2988–2993. (MENG Zhicheng, SUN Yongwei, YUAN Qingyun, et al. Experimental and numerical simulation for the effect of temperature on the surface charge of polyimide[J]. *High Voltage Engineering*, 2018,44(9):2988–2993.) doi:10.13336/j.1003–6520.hve.2018.0828028.
- [16] 王金晓,秦晓刚,梅飞,等. 高能电子辐照下介质材料内沉积电荷分布试验研究[J]. *航天器环境工程*, 2022,39(6):620–625. (WANG Jinxiao, QIN Xiaogang, MEI Fei, et al. Experimental study on dielectric materials deposited charge distribution under high-energy electron irradiation[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2022,39(6):620–625.) doi:10.12126/see.2022055.
- [17] 许滨. 航天器表面带电规律及防护方法研究[D]. 石家庄:军械工程学院, 2013. (XU Bin. Research on the surface electrification law and protection methods of spacecraft[D]. Shijiazhuang, China: Ordnance Engineering College, 2013.)
- [18] MOLINIE P, DESSANTE P, HANNA R, et al. Polyimide and FEP charging behavior under multienergetic electron-beam irradiation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012,19(4):1215–1220. doi:10.1109/TDEL.2012.6259993.
- [19] WEBER K H. A simple range-energy relation for electrons in the 3 keV to 3 MeV region[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1964,25(2):261–264. doi:10.1016/0029–554X(63)90196–4.
- [20] FERREIRA G F L, FIGUEIREDO M T D. Currents and charge profiles in electron beam irradiated samples under an applied voltage: exact numerical calculation and Sessler's conductivity approximation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003,10(1):137–147. doi:10.1109/TDEL.2003.1176577.
- [21] STACEY A, PRAWER S, RUBANOV S, et al. Temperature enhancement of secondary electron emission from hydrogenated diamond films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009,106(6):063715. doi:10.1063/1.3224881.
- [22] TATAROĞLU A, ALTINDAL Ş. The effects of frequency and γ -irradiation on the dielectric properties of MIS type Schottky diodes[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, 254(1):113–117. doi:10.1016/j.nimb.2006.10.066.
- [23] 全荣辉,韩建伟,黄建国,等. 电介质材料辐射感应电导率的模型研究[J]. *物理学报*, 2007,56(11):6642–6647. (QUAN Ronghui, HAN Jianwei, HUANG Jianguo, et al. Modeling analysis of radiation induced conductivity in electrical insulator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007,56(11):6642–6647.) doi:10.3321/j.issn:1000–3290.2007.11.079.
- [24] NAKANO Y, KOJIMA H, TSUCHIYA K, et al. Transient charging characteristics in surface flashover development process due to explosive electron emission in vacuum[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2015,193(2):10–17. doi:10.1002/eej.22739.

作者简介:

原青云(1979–), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为装备静电安全性研究. email: qingyun@163.com.

段赛赛(1992–), 女, 硕士, 助教, 主要研究方向为装备静电安全性研究.

张希军(1969–), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为装备静电安全性研究.