

电子辐照下聚合物介质深层充电现象研究*

全荣辉^{1)†} 张振龙²⁾ 韩建伟²⁾ 黄建国²⁾ 闫小娟^{1)‡}

1) 中国科学院研究生院, 北京 100039)

2) 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

(2008 年 7 月 23 日收到, 2008 年 8 月 19 日收到修改稿)

空间辐射环境中, 聚合物介质的深层充放电效应是威胁航天器安全的重要因素之一. 文中在 Chudleigh 和 von Berlepsch 所发展的电位衰减模型基础上引入传输电流项, 考虑了电子入射引起的感应电导率和感应电场的影响, 提出了新的分析研究介质材料深层充电规律和特征的模型. 通过该模型, 分析了不同辐射条件下介质的表面电位、内部电荷与电场分布的变化, 并设计实验及援引其他实验数据对模型分析结果进行验证. 分析和实验结果表明, 聚合物介质在深层充电过程中的平衡电位随着入射电子束流强度和介质电阻率的增加而增大, 决定深层充电平衡时间的主要是介质电阻率.

关键词: 深层充电, 电荷传输模型, 电子束, 聚合物

PACC: 7210B, 7220, 7755, 7360H

1. 引 言

空间辐射环境下, 高能电子容易在航天器外围介质材料内部或穿过航天器屏蔽层在其内部的介质材料上沉积. 当这些介质材料表面与周围其他部件的电位差或者材料内部沉积电荷产生的电场超过一定阈值时会发生放电现象, 即深层充放电效应^[1, 2]. 介质的深层充放电效应可以影响材料的绝缘性能, 产生的放电脉冲会干扰航天器上电子仪器的正常工作, 严重时会使航天器发生故障^[3-5]. 聚合物介质材料如聚酰亚胺薄膜等常被应用于太阳电池板及其他航天器部件中, 这些材料的深层充放电现象日益引起人们的关注^[6, 7].

在过去的几十年里, 已有较多模型提出用于模拟聚合物材料在辐照截止时内部电荷与表面电位的衰减过程^[8-10], 而模拟材料深层充电过程的模型却比较少. 目前已建立的聚合物介质材料充电模型以 RIC 模型和 GR 模型为代表. RIC 模型忽略了迁移电流的影响, 对聚合物介质内电荷传输现象仅是一种近似描述. GR 模型在 RIC 模型基础上进一步考虑了电离产生正电荷的影响及正负电荷的复合过程, 但由于包含未知参数过多, 方程较为复杂, 不利于对实

际情况的分析与应用^[11].

本文参考 Chudleigh 和 von Berlepsch 所发展的电位衰减模型^[12, 13], 引入传输电流项, 模拟了聚合物材料的深层充电过程. 新的模型不仅结构简单, 而且将介质内电荷平均传输时间和束缚时间等微观参量与介质表面电位、内部电荷与电场等宏观参量相联系, 揭示聚合物介质深层充电的主要特征和规律.

2. 模型的建立

对于单面接地的聚合物绝缘介质, 在忽略介质的表面电荷泄漏和载流子扩散条件下, 电子辐照下聚合物介质内部电荷传输过程的 RIC 模型为

$$\epsilon \frac{\partial E}{\partial x} = -\rho_F - \rho_T, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_F + \rho_T)}{\partial t} = -\frac{\partial J_0}{\partial x} + \frac{\alpha \mu \rho_F E}{\partial x} + \frac{\alpha g E}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_T}{\partial t} = \frac{\rho_F}{\tau_T} \left(1 - \frac{\rho_T}{\rho_m}\right), \quad (3)$$

式中电场强度 E , 自由电荷密度 ρ_F , 束缚电荷密度 ρ_T 和辐射感应电导率 g 均为时间和空间分布函数, ϵ 为介电常数, J_0 为入射电子在介质内沉积电流的空间分布函数, μ 为迁移率, τ_T 为电荷平均束缚时

* 中国科学院知识创新工程重要方向(批准号 2527A55, 2520A1S)资助的课题.

† E-mail: quansilin@sina.com

间, ρ_m 为材料空穴浓度与电子电量的乘积. RIC 模型在已知 $J_0, g, \epsilon, \mu, \tau_T$ 及 ρ_m 等参数条件下, 可以求解出材料内电场强度 E , 自由电荷密度 ρ_F 和束缚电荷密度 ρ_T 随时间变化的分布. 但由于 RIC 模型中未考虑由束缚电荷 ρ_T 的释放而引起的自由电荷 ρ_F 变化过程, 同时忽略了迁移电流的影响, 因此物理上仅是一个近似模型.

GR 模型在 RIC 模型基础上考虑了入射电子电离产生的正电荷的影响, 其方程如下:

$$\epsilon \frac{\partial E}{\partial x} = \rho_+ - \rho_F - \rho_T, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_F + \rho_T)}{\partial t} = -\frac{\partial J_0}{\partial x} + \frac{\alpha \mu \rho_F E}{\partial x} + G - \alpha_f \rho_+ \rho_F - \alpha_i \rho_+ \rho_T, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_T}{\partial t} = \frac{\rho_F}{\tau_T} \left(1 - \frac{\rho_T}{\rho_m}\right) - \alpha_i \rho_+ \rho_T, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_+}{\partial t} = G - \alpha_f \rho_+ \rho_F - \alpha_i \rho_+ \rho_T - \frac{\alpha(\mu_+ \rho_+ E)}{\partial x}, \quad (7)$$

式中 ρ_+ 为正电荷密度, α_f 和 α_i 为复合系数, G 为电荷产生率. 与 RIC 模型相比, GR 模型更准确地计算了电子辐照下介质内电荷输运现象的微观过程, 但由于其引入的参数如 α_f 和 α_i 等对于大多数材料为未知参数, 而且方程复杂, 在实际应用上不如 RIC 模型方便.

参考 Chudleigh 和 von Berlepsch 所发展的电位衰减模型^[12, 13], 本文引入传输电流项 $\mathcal{K}(x, t)$, 形成新的模型如下:

$$\mathcal{K}(x, t) = J_0(x) + \mu n e E(x, t), \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho_F(x, t)}{\partial t} = \frac{\rho_T(x, t)}{\tau_T} - \frac{\rho_F(x, t)}{\tau_F} - \frac{\partial \mathcal{K}(x, t)}{\partial x}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho_T(x, t)}{\partial t} = \frac{\rho_F(x, t)}{\tau_F} - \frac{\rho_T(x, t)}{\tau_T}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial E(x, t)}{\partial x} = -\frac{\rho_F(x, t)}{\epsilon} - \frac{\rho_T(x, t)}{\epsilon}, \quad (11)$$

$$V(t) = \int_0^L E(x, t) dx, \quad (12)$$

模型中 e 为电子电荷, L 为介质厚度, $V(t)$ 为介质表面电位, τ_F 为电荷平均传输时间, τ_T 为电荷平均束缚时间, 其表达式为

$$\tau_F = (n v S_C)^{-1}, \quad (13)$$

$$\tau_T = \left(\delta \exp\left(-\frac{E_T}{kT}\right) \right)^{-1}, \quad (14)$$

其中 n 为介质载流子浓度, v 为自由电荷迁移速度, S_C 为电荷碰撞截面, δ 为束缚电荷跃迁频率, E_T 为能穴深度, k 为 Boltzmann 常数, T 为温度.

深层充电期间, 入射电子电流在聚合物介质内部的沉积分布 $J_0(x)$ 随聚合物介质种类和入射电子能量不同而改变. 文中采用 EGSnrC 软件, 通过设定入射电子能量, 束流强度和聚合物介质种类, 由软件相应的蒙特卡罗程序计算获得介质内 $J_0(x)$ 分布^[14].

当电荷在聚合物介质内部不断沉积, 感应电场强度会逐步增加, 此时载流子迁移率将会改变. 考虑入这一效应, 模型中介质载流子迁移率表述为^[15]

$$\mu = \mu_0 \left| \frac{E(x, t)}{E_0} \right|^\lambda, \quad (15)$$

其中 μ_0 为对应参考场强 E_0 时的迁移率, λ 为与介质厚度 L 有关的常数.

辐照期间, 由于入射电子的电离效应, 介质内载流子浓度 n 将有显著提高, 即辐射感应电导率现象^[16]. 载流子浓度 n 的增加与介质内电子能量的沉积有关, 在本文中表示为

$$n = \kappa \frac{I_0 E'}{R} + n_0, \quad (16)$$

式中 κ 为常数, I_0 为入射电子束流强度, E' 为电子束能量, R 为电子射程, n_0 为介质本征载流子浓度.

改进后模型可以在已知 $I_0, E', n_0, \kappa, \mu_0$ 等参数条件下, 分析计算出介质在深层充电时 $E(x, t)$ 和 $V(t)$ 的变化过程, 也可以通过拟合 ρ_F 和 ρ_T 的变化曲线得出 τ_F 和 τ_T , 进而结合其他参数计算出介质内电荷的碰撞截面 S_C 和载流子能穴深度 E_T . 因此该模型统一了深层充电过程的宏观与微观参量, 同时具有分析介质内部电荷微观输运过程的理论意义和揭示深层充电危害规律的应用价值.

3. 实验设计

聚合物介质表面电位的变化趋势研究提供了一种了解其内部电荷传输规律的手段. 目前普遍认为介质内部的电荷输运过程是影响聚合物表面电位的主要因素, 而忽略了介质表面传导的影响^[17, 18]. 通过实验监测介质表面电位的变化过程, 可以获取聚合物介质在深层充电过程中的电学参数特征.

实验采用了德国出产的 EK-100-FL 型电子枪, 该电子枪电子能量范围为 5—100 keV, 电子束流强

度 $10\text{--}100\text{ nA/cm}^2$. 电子枪的电子能量和束流强度均连续可调, 电子束斑直径可达几十厘米. 实验装置原理如图 1 所示.

实验样品采用扬州亚邦公司出产的聚酰亚胺薄膜, 辐照前在样品背部镀上电极, 然后进行烘干处理^[19].

电子枪位于样品正前方, 电子束流辐照在样品正面上. 样品其余部分由铝板进行屏蔽. 样品电流经背电极引出穿过罗氏线圈后接电流表. 实验期间电位探头位于样品上方零电位点处, 测量时停止电子辐照, 将探头迅速下降至样品辐照部位前进行介质表面电位测量. 实验在高真空环境下进行, 真空度小于 $1 \times 10^{-6}\text{ Torr}$ ($1\text{ Torr} = 133\text{ Pa}$), 温度保持在 $20\text{ }^\circ\text{C}$.

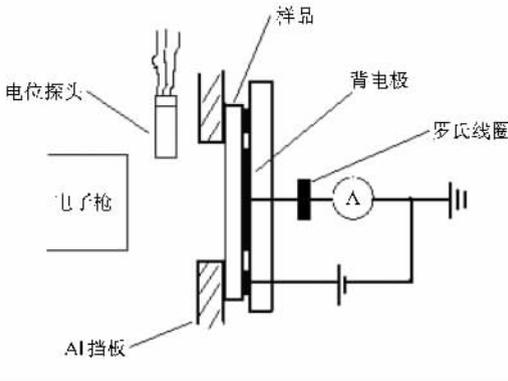


图 1 实验原理图

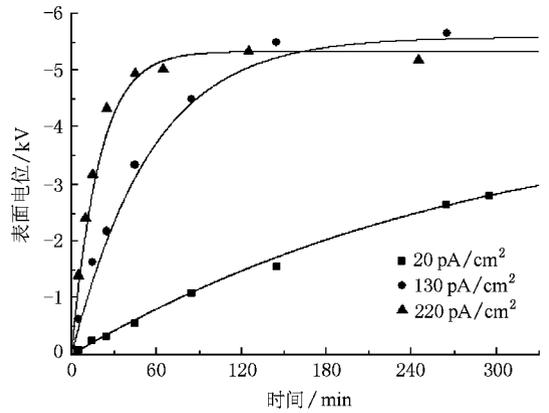


图 2 不同束流强度电子辐照下介质表面电位的变化过程

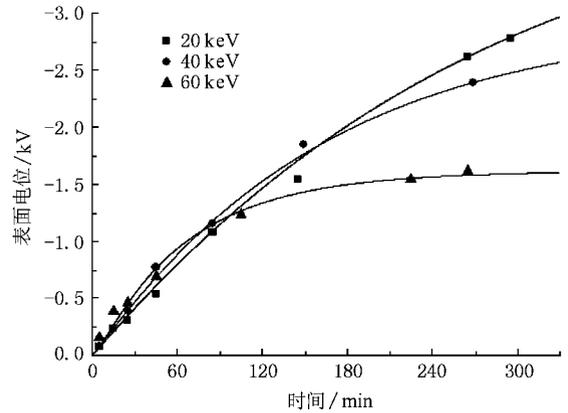


图 3 不同能量电子辐照下介质的表面电位变化

4. 实验结果及模拟分析

4.1. 电子辐照下聚合物介质表面电位变化

实验测试了厚度为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的聚酰亚胺薄膜在不同束流强度和能量电子辐照下的深层充电过程, 同时结合实验条件采用上述建立的模型进行分析计算, 得到表面电位随时间变化的结果如图 2 和图 3 所示.

图 2 中标记点给出了 20 keV 电子辐照下, 聚酰亚胺薄膜表面电位随不同电子束流强度变化过程的实验结果. 实验采用的束流强度分别为 20 , 130 和 220 pA/cm^2 . 由图 2 中实验数据可以看出, 随着电子束流强度的增强, 介质内深层充电平衡时间明显缩小, 在辐照初始时刻介质表面电位迅速上升. 图 3 标记点为介质表面电位在不同能量电子辐照下的实验结果, 表明介质的表面电位随着入射电子能量的增加而减少, 且越快趋于平衡.

图 2 和图 3 中的实线为改进后模型计算结果. 模型分析计算时采用的初始条件为 $E(x, 0) = \rho_f(x, 0) = \rho_T(x, 0) = 0$. 计算过程为: 由 EGS_{mc} 软件结合实验条件计算出不同辐照条件下聚酰亚胺薄膜内 $J_0(x)$ 的沉积分布, 代入 (8) 式可以得到传输电流 $\mathcal{K}(x, t)$ 分布, 根据 (9) 和 (10) 式计算出 ρ_F 和 ρ_T 的分布; 由 (11) 式得出介质内部电场 $E(x, t)$ 的变化, 通过 (12) 式求出这个时刻介质的表面电位 $V(t)$ 值, 根据时间步长再重复以上过程, 最终得到介质在深层充电过程中表面电位随时间的变化曲线.

在模拟计算时, μ_0 取值为 $5.07 \times 10^{-14}\text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, E_0 为 $10^5\text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, κ 取值为 $7.8 \times 10^{-14}\text{ pA}^{-1} \cdot \text{J}^{-1}$, L 为 $50\text{ }\mu\text{m}$, λ 取 0.12 , τ_T 取 600 s , τ_F 取 90 s ^[20, 21].

从图 2 和图 3 可以看到, 模型计算结果与实验数据符合很好. 由模型计算结果可知, 当电子入射束流强度增加时, 介质内载流子浓度 n 明显增加. 图 2 中不同束流强度电子辐照下, 介质内载流子浓度 n

的量级从 $10^{16}/\text{m}^3$ 提高到 $10^{18}/\text{m}^3$. 载流子浓度的增加将导致介质电导率的增强, 此时由图 2 可见介质内深层充电平衡时间明显缩小, 在辐照初始时刻介质表面电位迅速上升.

图 3 计算结果表明, 入射电子能量的增加将导致介质内电荷沉积深度增加. 在相同电荷量下, 沉积电荷越靠近接地的背电极, 介质的表面电位越小. 表现在图 3 中介质表面电位随入射电子能量的增加而减少.

4.2. 电子辐照下聚合物内部电荷与电场分布变化

利用改进后模型计算聚合物介质深层充电过程中表面电位变化的同时, 可以获得介质内部电荷与电场分布随时间的变化. 实验上采用 LIPP (激光脉冲压力信号) 技术能够很好地测量材料内部的电荷分布^[22]. 图 4 为改进后模型对聚合物介质内部电荷分布的计算结果与 RIC 模型、GR 模型及 LIPP 测试结果的比较, 其中入射电子能量为 30 keV, 其束流强度为 $2 \text{ nA}/\text{cm}^2$, 辐照时间为 20 s.

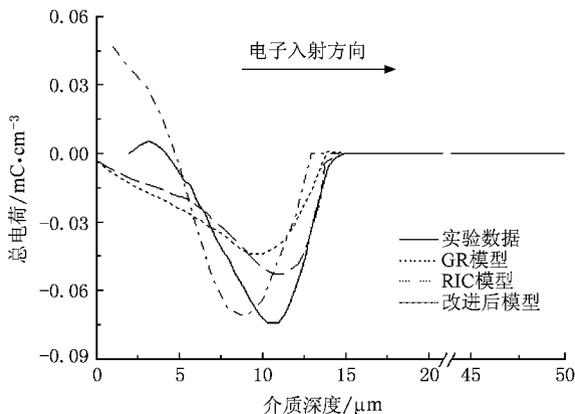


图 4 30 keV 电子辐照下聚合物内部电荷分布 LIPP 测试结果来源于文献 [11]

入射的高能电子将在介质内激发二次电子, 这些二次电子具有一定能量而发生迁移. 当入射沉积的电子数量低于迁移的二次电子数量时, 介质内部该区域将带上正电荷. 电子辐照下, 聚合物介质表层中电子入射电流低于迁移电流, 介质表层区域将带上正电荷. 由于模型未考虑聚合物介质入射面电荷由表面传导而引起的泄漏现象, 因此模型计算结果中聚合物介质入射面正电荷偏高. 与 LIPP 测试结果相比, 改进后模型在介质深层的总电荷幅度和分布形状上基本符合.

图 5 为对应于图 3 中电子能量 40 keV 时聚合物

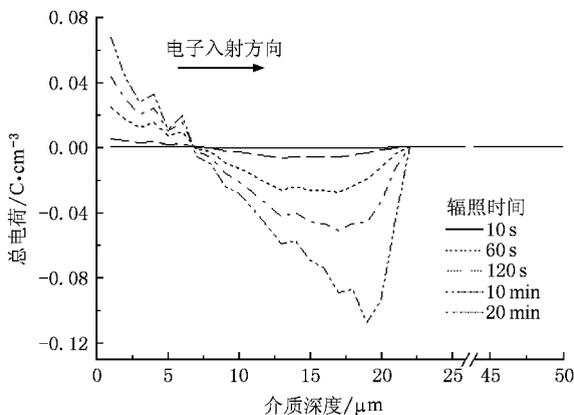


图 5 40 keV 电子辐照下介质内电荷沉积分布随时间的变化

介质内沉积电荷分布随时间变化过程的计算结果. 图 5 表明随着辐照时间的持续, 介质内电荷分布中心向介质内接地一侧迁移. 同时, 随着沉积电荷量的增加, 电荷分布曲线变窄, 主要沉积电荷集中在电子射程附近. 这一结论与文献 [11] 所获得的结果一致.

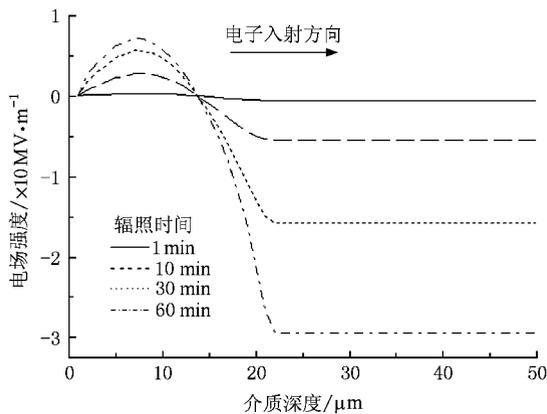


图 6 40 keV 电子辐照下聚合物内部电场分布随时间的变化

图 6 为对应于图 5 聚合物介质内部场强分布随时间的变化. 由图 6 可以看出, 随着辐照时间的增加, 电场强度不断增加, 但电场分布形状基本不变. 同时图 6 表明, 在深层充电过程中, 对于单面接地介质材料, 其内部最大电场分布处于接地端. 因此, 对于单面接地聚合物介质材料深层充放电效应的防护应侧重避免材料在接地端一侧的击穿.

5. 深层充电平衡电位和时间的计算分析

当电子束持续辐照聚合物介质时, 若介质内未

发生放电现象,介质深层充电最终将达到一个平衡状态.此时介质表面平衡电位记为 V_{\max} ,所需的时间为平衡时间,记为 τ .介质深层充电平衡电位 V_{\max} 不仅与入射电子束流强度有关,而且与电子能量、介质的电导率、介质厚度及接地方式相关^[2].本文借助上述建立的模型分析研究电子束流强度和介质电阻率对平衡电位 V_{\max} 和平衡时间 τ 的影响.

改变入射电子束流强度,保持图 5 中其他参量不变时,可以得到平衡电位随束流强度变化结果如图 7 所示.图 7 说明介质表面平衡电位随着入射电子束流强度的增加呈指数增加,其指数值计算结果为 0.87 ± 0.01 .

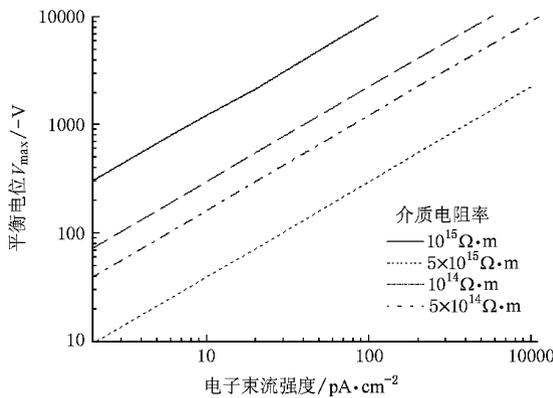


图 7 不同束流强度电子辐照下的平衡电位

从图 7 同时可以看出随着介质电阻率的不同, V_{\max} 随电子束流强度的变化处于不同的直线上.介质电阻率越高,介质平衡电位越高.这一结果也在图 8 中得到体现.图 8 为不同束流强度下平衡电位随介质电阻率变化的计算结果.图 8 表明 V_{\max} 随着辐照介质电阻率的增加也呈指数增加,指数值为 0.89 ± 0.01 .图 8 的指数值与图 7 的基本一致,说明介质电阻率和电子束流强度对平衡电位 V_{\max} 的影响遵从相同的规律.

图 9 为深层充电平衡时间 τ 随介质电阻率的变化情况.由图 9 可见,当介质电阻率从 $1 \times 10^{13} \Omega \cdot m$ 增加到 $1 \times 10^{15} \Omega \cdot m$ 时,介质的表面电位平衡时间迅速增加,且随着电子束流强度增加而基本不变.目前广泛使用的大部分介质材料的电阻率均低于 $10^{14} \Omega \cdot m$,因此图 9 的计算结果说明决定深层充电平衡时间的是介质电阻率.

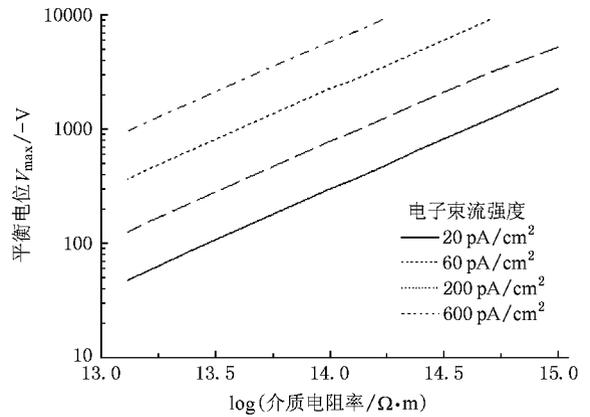


图 8 深层充电平衡电位随介质电阻率的变化

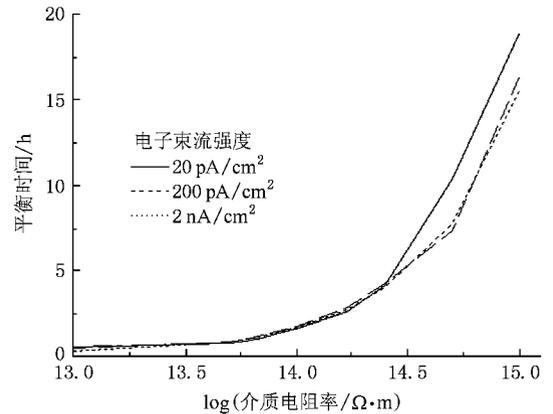


图 9 深层充电平衡时间随介质电阻率的变化

6. 结 论

改进后模型计算了聚合物介质深层充电过程中的表面电位变化过程与内部电荷分布,并且通过实验数据验证了模型计算结果,二者符合较好.改进后模型的计算结果表明介质在深层充电过程中的平衡电位随着入射电子束流强度和介质电阻率的增加而增大,决定介质深层充电平衡时间的是其电阻率.

在聚合物介质厚度不变时,介质平衡电位的增加表明介质内部电场最终可以达到的强度在不断增强,当内部电场达到或超过聚合物介质击穿阈值时将会引起放电现象.因此,为了防护深层充放电效应,空间中聚合物介质必须避免受到高束流强度电子的持续辐照.

当聚合物介质电阻率过高时,介质深层充电平衡时间较长.在相同束流强度电子辐照下,高电阻率

介质内部将累积更多的电荷,介质的表面电位与内部电场更高,具有更大的放电风险.因此,航天器内聚合物介质必须在满足绝缘要求时选用低电阻率材料,以减少深层充放电效应的影响.

由于聚合物介质内载流子迁移率较低,因此本文忽略了载流子扩散的影响.本文仅模拟了单面接

地聚合物材料的长时间深层充电过程,忽略了电极效应和极化效应.但作为一个完整的模型,以上的考虑是必须的,同时通过实验进一步验证改进后模型中平衡电位和时间的计算结果,也是下一步需进行的工作.

- [1] Lanzerotti L J , Breglia C , Maurer D W , Johnson III G K , MacLennan C G 1998 *Adv. Space Res.* **22** 79
- [2] Huang J G , Chen D 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1611 (in Chinese) [黄建国、陈 东 2004 物理学报 **53** 1611]
- [3] Violet M D , Frederickson A R 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 1512
- [4] Frederickson A R , Benson C E , Bockman J F 2003 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **208** 454
- [5] Gussenhoven M S , Mullen E G 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 221
- [6] Chen S H 2004 *Aerospace Shanghai* **3** 39 (in Chinese) [陈树海 2004 上海航天 **3** 39]
- [7] Santos L F , Chinaglia D L , Faria R M 1999 *Synth. Met.* **101** 484
- [8] Molinié P 2005 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **12** 939
- [9] Gupta D K 1990 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **25** 503
- [10] Pouillès V , Lebey T , Castelan P 1996 *J. Appl. Phys.* **70** 8620
- [11] Sessler G M , Figueiredo M T , Ferreira G F 2004 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **11** 193
- [12] Chudleigh P W 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 4591
- [13] von Berlepsch H V 1985 *J. Phys. D* **18** 1155
- [14] <http://www.irs.inms.nrc.ca/EGSrc/EGSrc.html>
- [15] Sahli S , Bellel A , Ziari Z , Kahlouche A , Segui Y 2003 *J. Electrostat.* **57** 169
- [16] Quan R H , Han J W , Huang J G , Zhang Z L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6642 (in Chinese) [全荣辉、韩建伟、黄建国、张振龙 2007 物理学报 **56** 6642]
- [17] Wintle H J 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 2927
- [18] Pouilles V , Lebey T , Castelan P 1996 *J. Appl. Phys.* **79** 8620
- [19] Zhang Z L , Quan R H , Yan X J 2008 *Spacecraft Environment Engineering* **25** 22 (in Chinese) [张振龙、全荣辉、闫小娟 2008 航天器环境工程 **25** 22]
- [20] Murakami Y , Hayashi N , Waldi E P , Hozumi N , Nagao M 2007 *Jpn. J. Appl. Phys.* **46** 1553
- [21] Sørensen J , Rodgers D J , Ryden K A , Latham P M , Wrenn G L , Levy L , Panabiere G 2000 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **47** 491
- [22] Ahmed N H , Srinivas N N 1997 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **4** 644

Phenomenon of deep charging in polymer under electron beam irradiation^{*}

Quan Rong-Hui^{1,2)†} Zhang Zhen-Long²⁾ Han Jian-Wei²⁾ Huang Jian-Guo²⁾ Yan Xiao-Juan^{1,2)}

¹ *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

² *Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

(Received 23 July 2008 ; revised manuscript received 19 August 2008)

Abstract

Deep charging and discharging effect is one of the key factors threatening the satellites safety in space environment. We develop a new model and simulate the surface potential evolution, internal charge distribution and electrical field distribution in the polymer charged by electron beam of different intensities. The results are compared with experimental results, which show that the polymer's surface potential increases with electron beam intensity and its resistance, and the time to reach charging equilibrium is determined mainly by the polymer's resistance.

Keywords : deep charging, charge transport model, electron beam, polymer

PACC : 7210B, 7220, 7755, 7360H

^{*} Project supported by Funds of the Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering (Grant Nos. 2527A5S, 2520A1S).

[†] E-mail : quansilin@sina.com