

综述

空间电子辐射环境中绝缘介质电荷沉积特性及陷阱参数研究综述*

李国倡¹⁾²⁾ 李盛涛^{2)†}

1) (青岛科技大学先进电工材料研究院, 青岛 266042)

2) (西安交通大学, 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

(2019年8月19日收到; 2019年9月11日收到修改稿)

空间电子辐射环境中绝缘介质充放电特性与介质表面电荷交换过程或内部电荷迁移过程密切相关. 介质表面/内部电荷运动很大程度上取决于材料的微观特性, 空间电荷与陷阱是反映绝缘介质微观特性的重要参数. 本文综述了电子辐射环境中绝缘介质内部空间电荷和陷阱的形成、作用机理、测量方法、存在的问题及国内外研究现状. 首先, 简要介绍了入射电子与介质材料的相互作用机理及沉积电荷的形成; 分析了电子束辐射下介质内部电荷迁移模型, 辐射诱导电导模型 (RIC 模型) 和电子-空穴对的产生/复合模型 (GR 模型) 的优缺点; 对比分析了经典电声脉冲法 (PEA) 以及适用于电子束辐射下空间电荷测量的“短路 PEA”和“开路 PEA”, 并总结了电子辐射下 PEA 装置设计中存在的主要技术难点; 其次, 简要介绍了电子束辐射下陷阱的形成及作用机理, 分析了聚合物介质陷阱参数的提取方法, 如热刺激电流法、表面电位衰减法 (电晕注入方式或电子辐射方式)、空间电荷衰减法, 指出在同一真空环境中完成电子注入和表面电位测量的方法较适合空间介质材料陷阱参数的表征, 并以聚酰亚胺为例, 进行了陷阱参数提取; 最后, 从理论模型、参数表征和测量技术等方面, 展望了空间绝缘介质亟需解决的科学问题.

关键词: 空间辐射环境, 空间电荷特性, 陷阱分布, 电声脉冲法

PACS: 94.05.Hk, 94.05.sj, 21.10.Ft, 77.84.-s

DOI: 10.7498/aps.68.20191252

1 引言

空间等离子体、高能粒子、原子氧等辐射环境与航天器介质/器件相互作用会诱发多种航天器异常现象^[1-4]. Koons 等^[5]对航天器异常故障统计表明, 在 299 例故障中, 由空间介质充放电引起的故障占总故障的 54.2%. 根据入射电子能量和材料特性的不同, 电子在材料中的穿透深度不同. 当入射电子能量较低时 (keV 级), 电子会停留在接近介质表面很浅的位置 (μm 级), 形成表面充放电现象;

当入射电子能量较高时 (MeV 级), 高能电子会穿透航天器屏蔽层及材料表面, 透入介质材料内部, 在介质内部沉积, 形成深层充放电现象^[4].

空间辐射电子与介质材料相互作用, 无论是表面充放电现象还是深层充放电现象, 均涉及电荷的运动过程, 而电荷的运动特性与材料的陷阱分布有关系. 电子束辐射下, 绝缘介质的陷阱能级和陷阱密度会影响电荷注入、输运和消散过程, 进而影响空间电荷积聚特性, 介质内部空间电荷的不断积聚会导致局部电场集中, 当局部畸变电场超过材料击穿阈值时会发生体击穿; 此外, 介质内部空间电荷

* 国家自然科学基金 (批准号: 51907095, 11575140)、中国博士后科学基金 (批准号: 2019M653629) 和青岛市应用基础研究计划 (批准号: 18-2-2-23-jch) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sli@mail.xjtu.edu.cn

的积聚还会导致表面电位的升高, 对不同绝缘材料和结构, 其表面电位不同, 易导致介质不等量带电, 从而引发沿面闪络或电弧放电 [1,2,4].

对于外施电压下聚合物介质材料空间电荷和陷阱的作用机理、测量方法和数值仿真等方面的研究较多 [6-11]. 以电声脉冲法 (PEA) 为代表的空间电荷测量装置的成熟应用, 极大地促进了电介质空间电荷理论和材料空间电荷特性的发展. 此外, 热刺激电流法、光刺激电流法、表面电位衰减法等测量方法, 已被广泛应用于介质材料陷阱参数的提取 [12-14]. 在模型与数值仿真方面, 发展了电荷跳跃运输模型、陷阱动态捕获模型等用于描述聚合物介质空间电荷积聚特性和陷阱入陷、脱陷的动态过程 [10,11,15].

基于上述研究基础, 国内外学者积极开展了空间辐射环境下材料微观特性的表征方法和测量技术研究. 法国 Laurent 团队 [16-18] 将经典 PEA 装置改进为适用于电子辐射环境测量要求的“短路 PEA”和“开路 PEA”; 并采用双极性电荷运输模型, 分析空间电荷测量数据, 拟合优化材料的微观参数. 美国 Dennison 团队 [19-20] 研究了电子束辐射下绝缘材料辐射诱导电导率测量方法和辐射充电后介质表面电位原位测量方法. 在国内, 中国科学院空间中心 [21-23]、航天五院 [24,25]、西安交通大学 [26-29]、军械工程学院 [30-33] 等单位做了较多的实验和计算工作. 我们课题组 [34,35] 采用表面电位衰减法研究了电子束辐射后聚酰亚胺的陷阱特性; 采用表面电位衰减理论和遗传算法, 提取了材料表面/体电阻率和载流子迁移率等参数.

本文介绍了入射电子与介质材料的相互作用机理及介质内部沉积电荷和陷阱的形成, 总结了电子束辐射下介质内部电荷迁移模型的优缺点; 对比分析了经典 PEA 以及适用于电子束辐射下空间电荷测量的“短路 PEA”和“开路 PEA”, 并总结了电子辐射下 PEA 装置设计中存在的主要技术难点; 对比分析了聚合物介质陷阱参数的提取方法; 展望了空间绝缘介质领域亟需解决的理论和实验问题.

2 电子束辐射下介质电荷沉积特性

2.1 电子束辐射下介质内部沉积电荷的形成

当入射电子垂直入射到一定厚度的介质中时,

会与介质发生弹性碰撞和非弹性碰撞等物理过程, 逐渐将能量转移给材料, 材料靶原子获得能量会发生激发或电离过程 [1,26]. 入射电子能量的损失可以用阻止本领描述, 图 1 为入射电子与介质材料相互作用及能量损失示意图.

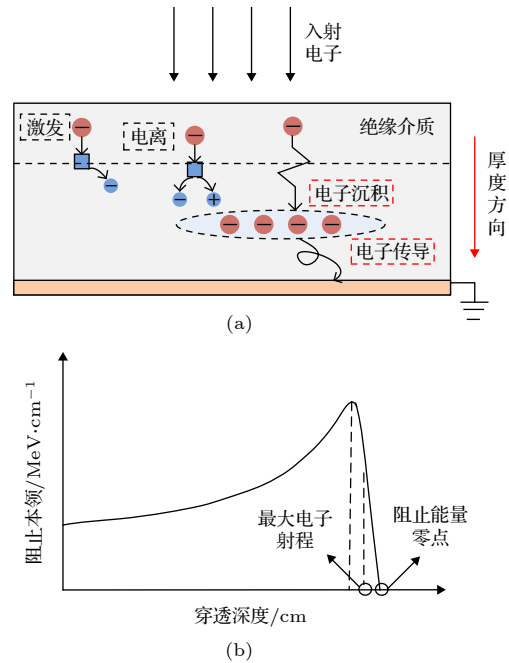


图 1 入射电子与介质材料相互作用及能量损失示意图 (a) 入射电子与介质材料相互作用示意图; (b) 阻止能量与穿透深度关系图

Fig. 1. Schematic diagram of interaction between incident electron and dielectric material and energy loss: (a) Interaction between incident electron and dielectric material; (b) diagram of stopping power and penetration depth.

按照统计分布可知, 电子能量转移沿介质深度方向呈现先增加后减小的趋势, 峰值点出现在入射路径的末端, 如图 1(b) 所示. 在距离表面较近的位置, 材料中原子获得的能量较小, 发生激发和电离的概率较小; 在一定深度处, 当电子能量损失达到最大时, 动量转移和能量损失达到最大值, 晶格中原子位移的概率、材料中原子的发热、激发和电离也达到最大. 之后, 电子能量逐渐衰减为零, 逐渐沉积在材料内部, 按照统计分布规律, 电子会随机停留在某位置. 此外, 由于材料自身的暗电导和高能电子辐射引起的辐射诱导电导的作用, 介质内部电荷泄漏过程会加快. 通常, 电子沉积速率远大于电荷泄漏速率, 导致介质内部危险电荷不断沉积.

根据图 1(b) 所示的曲线, 电子在材料中的射程为从介质表面到阻止能量峰值点与能量零点的

中点之间的距离^[1,2]. 入射电子在介质中的射程主要和入射电子能量和材料密度相关, 可以通过Weber 半经验公式计算^[26,27], 表达式为

$$R = \frac{\alpha E_0}{\rho} \left(1 - \frac{\beta}{1 + \gamma E_0} \right), \quad (1)$$

其中, R 是电子在材料中的射程, 单位 cm; α , β , γ 分别为 $0.55 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{MeV})$, 0.9841 MeV^{-1} , 3 MeV^{-1} ; E_0 是电子初始能量, 单位 MeV; ρ 是介质的密度, 单位 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

材料内部电荷沉积可以通过电荷沉积公式计算, 单位时间介质内部注入电荷表达式为^[26,27]

$$Q(x, t) = 14.42 \frac{x^3}{R^4} j_0 (1 - \eta) \exp \left[-3.605 \left(\frac{x}{R} \right)^4 \right], \quad (2)$$

其中, $Q(x, t)$ 是单位时间注入电荷密度, 单位 $\text{C}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; j_0 是入射电子束流密度, 单位 A/m^2 ; η 是背散射系数; x 是电子穿透深度, 单位 cm.

计算中假定电子沿试样表面垂直入射, 电子能量为 0.3 MeV , 束流密度考虑恶劣电子环境为 $2 \times 10^{-8} \mu\text{A}/\text{mm}^2$, 选取三种典型材料聚酰亚胺 (PI)、聚四氟乙烯 (PTFE)、环氧树脂 (EP), 厚度为 1 mm . 图 2 为典型绝缘介质内部电荷沉积速率分布.

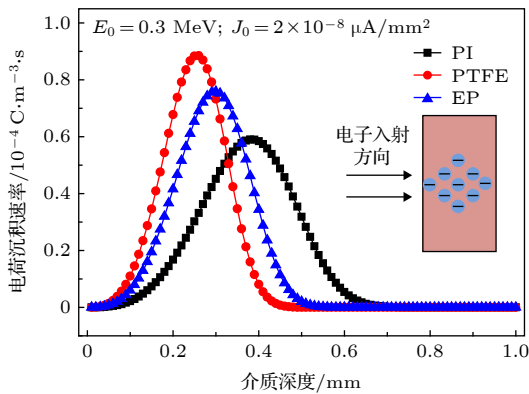


图 2 典型绝缘介质内部电荷沉积速率分布

Fig. 2. The charge deposition rate distributions in typical insulation dielectric.

不考虑介质内部电荷泄漏的情况下, 介质内部电荷沉积如图 2 所示. 可以看出, 介质内部沉积电荷沿深度方向呈现先增加后降低的趋势, 在一定深度处达到最大值. 将三种材料进行对比, PTFE 内部沉积电荷最多, 在距离介质表面 0.26 mm 处, 沉积电荷速率为 $8.86 \times 10^{-5} \text{ C}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, EP 和 PI 内部沉积电荷速率分别为 $7.65 \times 10^{-5} \text{ C}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 和

$5.88 \times 10^{-5} \text{ C}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$. 这是由于 PTFE 的密度约为 $2.20 \text{ g}/\text{cm}^3$, 电子在材料内部运动过程中, 受到的阻止能量较大, 多数电子沉积在距离介质表面较近的位置.

2.2 电子束辐射下介质内部电荷迁移模型

基于外施电压下聚合物介质的电荷输运模型, 发展适用于电子辐射环境下的电荷迁移模型. 比较典型的模型包括: 辐射诱导电导模型 (radiation induced conductivity, RIC 模型) 和电子-空穴对的产生/复合模型 (generation and recombination, GR 模型)^[4,26,27,36-40], 模型示意图如图 3 所示. 入射电子进入介质内部, 其能量会逐渐衰减并在一定深度处停留; 同时, 在温度、电场等激励作用下, 沉积电荷会向接地电极泄漏. 由于电子能量和材料特性的不同, 电子在材料内部的穿透深度不同, 会在其内部形成“辐射区”和“未辐射区”. 上述两个区域的电荷传导机制有所不同, 对于辐射区, 由于辐射作用会导致电荷传导过程明显加快, 电荷到达未辐射区后, 传导过程减慢, 主要由受温度和电场影响的材料本征电导控制.

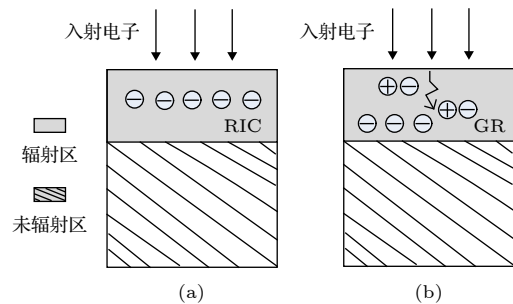


图 3 电子束辐射下介质内部电荷迁移模型示意图 (a) RIC 模型; (b) GR 模型

Fig. 3. Schematic diagram of charge transfer model under electron beam radiation: (a) RIC model; (b) GR model.

RIC 模型从宏观上描述了电荷在介质内部的迁移过程, 即在高能电子辐射下, 介质内部产生辐射诱导电导, 将该模型与用于描述材料本征电导的“电荷跳跃模型”结合, 可以用于研究电子辐射下材料不同区域的电荷传导特性; GR 模型从微观上考虑电子-空穴对的产生/复合过程, 较为精确地描述了介质内部电荷迁移过程, 但模型中包含一些不确定的微观参数值, 比如载流子对的产生率、复合率等. 目前, 工程应用中多采用 RIC 模型或基于 RIC 的改进模型. 因为电子辐射下, 材料的辐射诱

导电导率比较容易测量,通过对不同剂量率下材料电导率实验数据的拟合,易于得出公式中的未知参数;此外,通过测量外施电压下材料的本征电导率,可以拟合得出电荷跳跃电导模型中的相关参数. 相比而言,GR模型中电子和空穴对的产生率和复合率不易通过实验数据确定.

2.3 电子束辐射下空间电荷的测量方法

随着电介质空间电荷理论的深入研究以及测试技术的发展,空间电荷测量技术快速发展,相继出现了多种非破坏性测量方法. 根据测量原理的不同,代表性测试方法包括热扩散法、压力波法和电声脉冲法^[6,7]. 其中,电声脉冲法已广泛应用于外施电压下聚合物材料、电缆结构等空间电荷特性的研究.

空间辐射环境下介质表面/深层充放电过程与介质表面/内部电子注入、迁移和积聚特性相关. 采用PEA法可以直观地观察介质内部电荷输运过程,结合数学模型还可以进一步提取材料微观参数、分析材料充放电特性. 然而由于电子辐射环境的复杂性,对PEA装置测试电极、传输线路、传感器等均有特殊的设计和屏蔽要求. 目前,国内尚没有成熟的电子束辐射下空间电荷原位测量装置. 通常,空间辐射环境中,介质内部沉积电子会滞留长达数天甚至数月,因此,可以考虑采用离线测量方法,即先在模拟空间测试系统中对样品进行电子辐射处理,再采用电声脉冲测试装置进行空间电荷测试.

郑晓泉等^[41,42]采用离线测量方法,研究了高

能电子辐射后PTFE、三元乙丙橡胶(EPDM)、聚乙烯(PE)和EP等材料中的空间电荷特性. 实验中,首先采用高能电子(1.2 MeV)对上述试样辐射一定时间(10 min),然后,将静置1 h后的试样,在PEA系统中测量无直流电压下空间电荷分布. 实验结果发现,电子束辐射后试样内部,可以观察到明显的负极性空间电荷积聚,相同辐射条件下,EPDM中电荷积聚最多,存储电荷能量较强,注入深度约为190 μm ,抗辐射能力较差;其余三种材料存储电荷能力近似,但阻挡电荷穿透能力不同. 我们课题组采用离线测量方法,初步研究了电子辐射处理之后PI的电荷分布.

为了对比电子辐射处理后离线电荷测量方法的可靠性,实验中分别在模拟空间测试系统中采用相同辐射条件对聚酰亚胺试样的上表面和下表面分别进行辐射处理;然后,将其取出进行空间电荷测试. 试样选用厚度125 μm 的Dupont聚酰亚胺材料,辐射条件设置为:电子能量30 keV,束流密度10 μA ,辐射时间10 min. 电子辐射完成后,将试样取出,采用电声脉冲法测量样品空间电荷分布,试样更换时间约为1 h,电荷衰减时间为30 min. 空间电荷测量中不施加直流电压,仅采用高压脉冲源使试样内部电荷产生扰动,测量沉积在试样内部的电荷. 对比图4(a)和图4(b)可知,电子辐射处理后,靠近试样的上表面和下表面位置存在明显的沉积电荷. 分别进行上表面和下表面处理的试样,上表面附近电子数量为 $-2.65 \text{ C}/\text{m}^3$,下表面附近电子数量为 $-4.10 \text{ C}/\text{m}^3$. 随衰减时间延长,30 s至1800 s,材料内部电子衰减速率非常慢,这

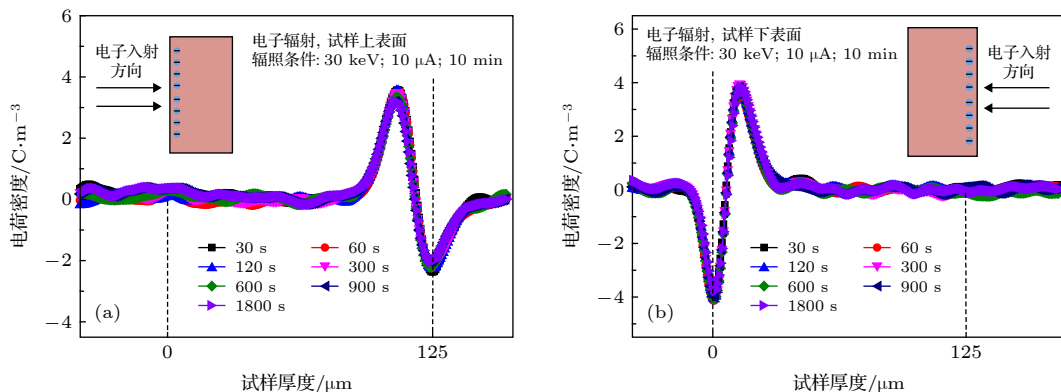


图4 电子辐射处理后PI空间电荷衰减曲线 (a) 电子辐射处理试样上表面; (b) 电子辐射处理试样下表面

Fig. 4. Space charge decay curve of polyimide treated by electron radiation treatment: (a) The upper surface of the sample is treated; (b) the bottom surface of the sample is treated.

是由于聚酰亚胺材料的电阻率非常大,注入到材料表层的电子较难经过试样内部达到地电极.根据Weber半经验公式^[26,27],能量30 keV的电子在PI内部的穿透深度约为11.5 μm ,大部分电子主要沉积在材料的表面.

相比电子辐射处理后材料内部电荷离线测量方法而言,电子辐射期间材料的空间电荷原位测量方法更为直观,可以直接观察电子辐射期间材料内部沉积电子分布,但空间电荷测试系统受电子辐射环境的影响较大.法国Laurent团队^[16–18]较系统地开展了电子束辐射下空间电荷原位测量、材料特性分析及数值仿真等方面的工作.将经典PEA装置改进为适用于电子辐射环境测量要求的“短路PEA”和“开路PEA”.经典PEA中激励模块(包括:外施电压和高压脉冲)和探测模块通过上下电极分别施加于试样两侧.改进后的整个系统,通过金属板支撑,放置于真空腔体内,可以调节装置位置,以满足实验中电子束垂直入射的要求.根据上下电极处理方式的不同,可以分为“短路PEA”和“开路PEA”,如图5所示^[4].第一种方法,将激励模块和探测模块置于试样下方,试样上表面通过离子溅射仪涂覆极薄的金属电极($\sim 30\text{ nm}$),高压脉冲通过金属电极施加于试样.辐射时,电子可以穿透极薄的金属电极,注入到介质内部.该方法将试样的上下表面均做接地处理,故称为“短路法”;第二种方法,将试样上表面做悬浮处理,不涂覆金属电极,其表面电位会随着电子辐射条件的变化而变化,称为浮动电位.设计可移动机构,在距离试样上表面几微米的位置设置一金属电极,高压脉冲可以通过该电极施加于试样.

与经典PEA相比,上述两种装置测量中,试样与下电极无法通过机械压力使其充分接触,以利于声信号的传输.因此,可以通过导电胶带保证试样与下电极的良好接触.此外,对于经典PEA,上电极施加电压已知,可以由空间电荷分布计算出电场分布;而上述两种方法,实验中,需要采用非接触式表面电位计,将探头至于试样上方,测量辐射后试样的表面电位分布.电子辐射下PEA装置设计中,存在的主要技术难点有:1)为了满足厚试样的测试需求,需要选择适合的高压脉冲源和PVDF传感器,同时对测试电极有特殊的设计要求;2)屏蔽设计,整个装置放置于高能电子辐射环境下,对传输线路、激励模块和探测模块的屏蔽要求

较高,微小扰动经过放大,均会对测量结果产生较大影响;3)系统校准,借助辅助测试手段或实验方法有效校准测量装置.

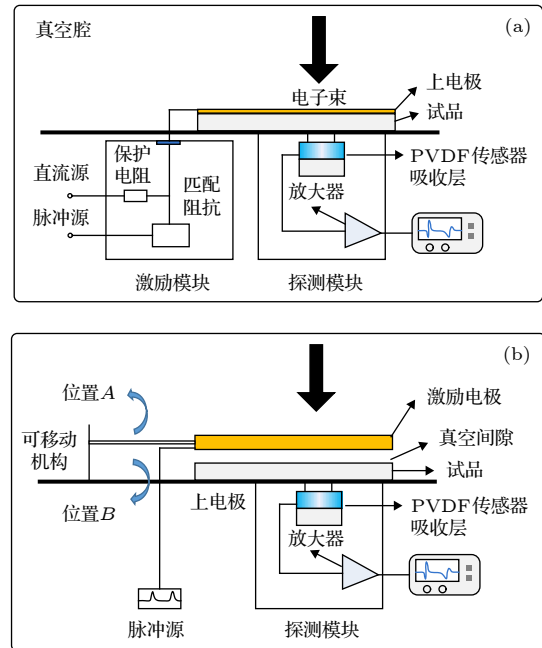


图5 电子束辐射下绝缘介质空间电荷原位测量装置示意图 (a) 短路PEA; (b) 开路PEA

Fig. 5. Schematic diagram of space charge in situ measurement setup under electron beam radiation: (a) Short circuit PEA; (b) open circuit PEA.

3 电子束辐射下介质内部陷阱参数分布

3.1 电子束辐射下介质内部陷阱形成

由于聚合物材料形态结构的复杂性,以及受生产工艺,杂质粒子、老化、电子辐射等因素的影响,其内部不可避免地存在物理或化学缺陷^[6],导致晶格的周期性被破坏,从而形成安德森局域态,局域态会捕获自由移动电荷,因此,也称为电荷捕获中心或陷阱中心^[8].

高能电子束辐射(MeV级)下,聚合物介质会发生微降解,分子链发生断链,从而在禁带中形成大量局域态.一方面,高能电子碰撞材料靶原子,可能使原子产生移位,出现晶格缺陷,导致介质内部杂质能级升高;此外,激发和电离过程中容易导致辐射诱导化学缺陷^[1,2],从而会在介质内部引入较深能级的陷阱.聚合物介质内部陷阱中心捕获电荷,会降低载流子有效迁移率;同时局部电荷的积

聚会导致电场畸变. 电子束辐射下介质陷阱参数的变化取决于电子能量、束流和时间等辐射条件, 通常 keV 级能量的电子辐射不会对材料带来大的破坏, 陷阱参数变化较小.

3.2 陷阱参数提取方法

按照介质表面或内部注入电荷方式及外部激励的不同, 介质材料陷阱参数提取方法主要包括: 热刺激电流法、表面电位衰减法 (电晕注入方式或电子辐射方式)、空间电荷衰减法等^[9,10,43–47], 从基本原理、优缺点等方面对常用陷阱提取方法做了对比, 如表 1 所列. 介质材料中陷阱参数提取的基本

原理为: 通过电极/介质界面注入、针-板电晕注入或电子辐射等方式向介质表面或内部注入电荷, 电荷在向介质内部迁移过程中, 会被陷阱中心捕获, 成为陷阱电荷, 对于能级较浅的陷阱电荷, 能够在较短时间内克服势垒, 重新成为自由移动电荷; 而对于能级较深的陷阱电荷, 只有在光、热、电场等外部激励下, 才能脱离陷阱中心. 因此, 测量中, 电荷注入过程完成后, 通过施加外部激励, 可以刺激被捕获电荷, 使其脱离陷阱中心. 陷阱电荷脱陷过程中引起的电流、表面电位、电荷变化, 可以反映介质内部陷阱特性的变化, 进而结合数学模型, 可以计算出陷阱能级和陷阱密度.

表 1 绝缘介质陷阱参数提取方法对比

Table 1. Comparison of calculation methods of trap parameters.

方法	基本原理	优缺点
等温表面电位衰减法 (ISPD)	采用电晕注入或电子辐射方式向介质表层注入电荷, 通过测量等温电位衰减曲线, 提取陷阱参数.	优点: 可以区分电子陷阱和空穴陷阱 ^[39,45] ; 电子辐射注入方式更适合空间介质材料陷阱参数的测量 ^[28,34] . 缺点: 电荷注入深度较浅 (约 1–2 μm), 主要反映材料表面或表层陷阱信息; 不适用于较厚试样 ^[46] .
热刺激电流法 (TSC)	采用热刺激或光刺激使介质内部被捕获电荷脱陷, 通过分析电流特征峰, 提取陷阱参数.	优点: 反映材料内部陷阱信息; 可以区分陷阱能级 ^[39,47] . 缺点: 无法区分陷阱类型.
电声脉冲法 (PEA)	通过分析去压后总电荷量随时间的衰减规律, 提取陷阱参数.	优点: 可以反映介质内部电荷动态过程 ^[9,10,47] . 缺点: 无法区分陷阱类型; 计算模型有待完善.

将上述方法应用于电子辐射后介质材料陷阱参数的提取. 郑晓泉等^[48]采用热刺激电流法测量了低能电子束辐射 (0–20 keV) 后聚酰亚胺材料的陷阱参数. 结果表明, 辐射后聚酰亚胺的陷阱能级由辐射前的 0.61 eV 升高至 0.79 eV, 总体陷阱密度增大. Chen 等^[9,10]建立了基于双重陷阱能级的电荷动态捕获模型, 采用空间电荷衰减法, 研究了直流电压作用下低密度聚乙烯 (LDPE) 的陷阱参数. 测量不同加压时间下的空间电荷衰减曲线, 结合模型, 拟合得出 LDPE 中两个陷阱能级分别为 0.88 eV 和 1.01 eV. 本课题组^[34]采用表面电位衰减法研究了电子束辐射后聚酰亚胺的陷阱特性. 实验中, 电子辐射停止后, 保持真空环境不变, 直接在真空腔体内部采用非接触式表面电位计测量聚酰亚胺表面的电位衰减.

综合上述方法, 分析认为在相同真空环境下, 完成电子注入和表面电位测量的方法较为适合电子束辐射后介质材料陷阱参数的测量. 一方面, 对于热刺激电流法和空间电荷衰减法, 电子辐射装置和测量装置分别属于不同的测量系统, 不能在相同环境下完成电子辐射和陷阱测量. 而操作过程中环境温度、湿度、真空度的改变可能对陷阱特性产生

影响, 因此, 这两种方法不能全面的反映和提取材料的陷阱信息; 另一方面, 本身电子辐射处理, 会向介质内部注入电荷, 对于聚酰亚胺、聚四氟乙烯等高阻性绝缘材料, 电荷在介质内部滞留时间较长. 如果辐射完成后, 再进行热刺激电流或空间电荷测量, 通过施加电压的方式注入电荷, 这部分电荷与试样内部由于辐射滞留的电荷发生复合或叠加, 会影响测量结果; 此外, 热刺激电流法和空间电荷衰减法对试样厚度具有特殊要求.

3.3 电子束辐射下聚酰亚胺陷阱参数提取

在真空腔体内部安装了二维移动平台和非接触式表面电位计, 用于实现电子束辐射下材料表面电位的测量, 如图 6 所示. 电子能量为 0.1–40 keV; 束流密度为 10 nA–500 μA .

实验中, 由于非接触式表面电位计的最大量程为 10 kV, 故电子能量不能过高, 设置为 3–11 keV. 发射电流为 10 μA , 聚酰亚胺厚度为 50 μm . 测量了不同能量电子辐射下聚酰亚胺的表面电位衰减曲线, 并采用 Simmons 理论分析表面电位衰减数据, 计算得出不同能量电子辐射条件下聚酰亚胺的表面陷阱分布谱图, 如图 7 所示^[34].

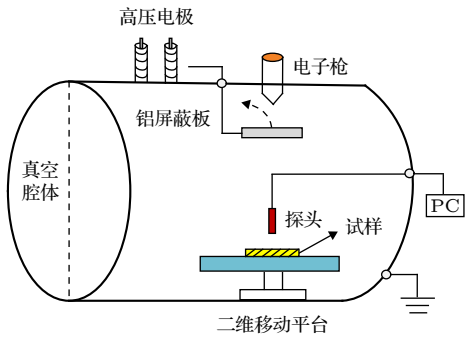


图 6 电子辐射下绝缘介质表面电位测量系统

Fig. 6. Surface potential measuring system of insulation under electron radiation.

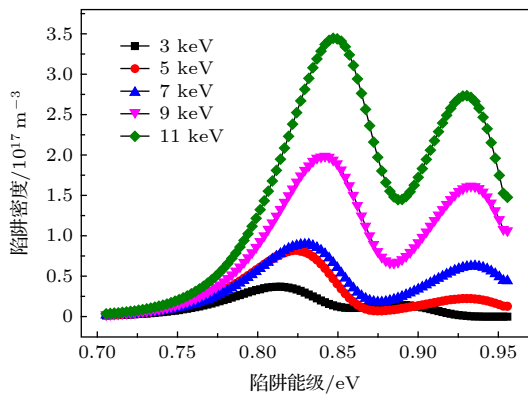


图 7 不同能量电子辐射下 PI 陷阱能谱分布图^[34]

Fig. 7. Trap energy spectrum distribution of PI under electron radiation with different energies^[34].

由图 7 可以看出, 电子辐射后, 聚酰亚胺表面陷阱分布谱图存在两个峰值, 分别对应陷阱电荷数量最大的两个陷阱能级, 为便于分析, 将其分别定义为相对较浅陷阱能级和相对较深陷阱能级. 相同能量电子辐射下, 以 11 keV 为例, 浅陷阱电荷数量大于深陷阱的数量, 两个能级峰值 0.85 eV 和 0.93 eV 对应的陷阱密度分别为: $3.44 \times 10^{17} \text{ m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ 和 $2.74 \times 10^{17} \text{ m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$. 浅陷阱电荷在较短时间内会迅速脱陷, 表现为介质表面电位衰减速率较快, 而深陷阱电荷则长时间滞留在介质表层, 表现为介质表面电位衰减缓慢, 深陷阱电荷的数量决定了表面电位趋于稳定时表面电位的大小, 其能级则决定了趋于稳定的衰减时间. 不同能量电子辐射下聚酰亚胺的表面陷阱分布表现为不同的特性. 随着电子能量的增加, 浅陷阱能级轻微增大, 从 0.81 eV 增加至 0.85 eV. 深陷阱能级则基本保持不变. 此外, 随着电子能量增大, 陷阱电荷密度明显增加, 对比 3 keV 和 11 keV, 浅陷阱电荷密度从 $7.69 \times 10^{16} \text{ m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ 增加至 $3.44 \times 10^{17} \text{ m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$, 深陷阱

电荷密度则从 $1.47 \times 10^{16} \text{ m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ 增加至 $2.74 \times 10^{17} \text{ m}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$.

由于实验条件限制, 本文实验中电子能量选取 3—11 keV, 属于低能电子. 由聚酰亚胺陷阱能谱分布可以看出, 低能电子辐射下, 对于不同能量 (3—11 keV) 的电子, 表面陷阱能级和陷阱电荷密度的变化范围并不大, 因此, 选择合适的辐射条件, 可以将电子辐射处理作为一种电荷注入方式, 通过测量表面电位衰减曲线, 进而提取材料固有陷阱参数. 该方法与电晕注入电荷法相比, 其优点是注入电荷的类型、能量和数量可以控制, 通过简单计算可以得出介质表面/表层沉积电荷分布, 便于更精确地计算陷阱参数; 此外, 该方法表面电位的测量在真空环境下进行, 可以避免电晕实验中环境温度、湿度等外界因素带来的干扰, 测量得到的表面电位原始数据更为准确.

4 结论与展望

相比普通环境下绝缘介质的特性而言, 空间辐射环境中材料内部微观结构及宏观性能变化更为复杂, 绝缘介质内部电荷迁移机制、放电特性和影响因素亦有所不同. 本文围绕“绝缘介质内部沉积电荷和陷阱参数”, 从微观过程、作用机理、表征方法和测量技术等方面做了总结, 分析了机理模型和表征测量中的重点和技术难点问题. 主要结论和展望如下:

1) RIC 模型从宏观上描述了电荷在介质内部的迁移过程, 易于通过拟合实验数据得到未知参数; GR 模型则从微观上考虑了电子-空穴对的产生/复合过程, 较为精确, 但模型中包含一些不易确定的微观参数值, 不利于工程问题分析, 需要进一步发展、完善电子束辐射下介质内部电荷迁移模型;

2) 受电子辐射环境影响, 材料内部微观参数不易直接测量, 尤其是高能电子辐射下微观参数的原位测量较难实现; 采用表面电位、泄漏电流等易于测量的参数, 结合反演数学模型, 提取材料载流子迁移率、陷阱能级、密度等微观参数是较好的研究思路;

3) 电声脉冲法 (PEA) 可以直观地反映介质内部空间电荷分布, 然而电子辐射环境对空间电荷测试系统影响较大, 尤其是 MeV 级高能量电子辐射下介质空间电荷原位测量较难实现, 需要重点解决

真空、辐射环境中 PEA 装置测试电极、传输线路、传感器等各部分的屏蔽设计及系统工作稳定性。

参考文献

- [1] Lai S T 2011 *Fundamentals of Spacecraft Charging* (New Jersey: Princeton University Press) pp156–167
- [2] Lai S T (translated by Li S T, Zheng X Q, Chen Y, Min D M) 2015 *Fundamentals of Spacecraft Charging* (Beijing: Science Press) pp135–141 (in Chinese) [黎树添 著 (李盛涛, 郑晓泉, 陈玉, 闵道敏 译) 2015 航天器带电原理 (北京: 科学出版社) 第 135—141 页]
- [3] Gupta S B, Kalaria K R, Vaghela N P 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 1072
- [4] Li S T, Li G C 2017 *Chin. Sci. Bull.* **62** 990 (in Chinese) [李盛涛, 李国倡 2017 科学通报 **62** 990]
- [5] Koons H C, Mazur J E, Selesnick R S, Blake J B, Frnnell J F, Rober J L, Anderson P C 2000 *6th Spacecraft Charging Technology Conference* Massachusetts, United States, Sep. 1–4, 2000 p7
- [6] Zhou Y X, Wang N H, Wang Y S, Sun Q, Liang X D, Guan Z C 2008 *Transactions of China Electrotechnical Society* **23** 16 (in Chinese) [周远翔, 王宁华, 王云杉, 孙清, 梁曦东, 关志成 2008 电工技术学报 **23** 16]
- [7] Xin X L, Wu G N, Xu H H, Luo Y, Cao K J 2011 *Insulating Materials* **44** 59 (in Chinese) [辛正亮, 吴广宁, 徐慧慧, 罗杨, 曹开江 2011 绝缘材料 **44** 59]
- [8] Li G C, Li S T, Min D M, Zhu Y W 2013 *Sci. China* **43** 375 (in Chinese) [李国倡, 李盛涛, 闵道敏, 朱远惟 2013 中国科学 **43** 375]
- [9] Liao R J, Zhou T C, Chen G, Yang L J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 017201 (in Chinese) [廖瑞金, 周天春, 陈 G, 杨丽君 2012 物理学报 **61** 017201]
- [10] Zhou T C, Chen G, Liao R J, Xu Z Q, 2009 *J. Appl. Phys.* **110** 043724
- [11] Laurent C, Teyssedre G, Le R S, Baudoin F 2013 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **20** 357
- [12] Yang B T, Tu D M, Liu Y N 1992 *J. Appl. Phys.* **10** 233 (in Chinese) [杨百屯, 屠德民, 刘耀南 1992 应用科学学报 **10** 233]
- [13] Haque N, Dalai S, Chatterjee B, Chakravorti S 2017 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **24** 1896
- [14] Din D M, Mengu C, Arifur R K, Li S T 2012 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **19** 600
- [15] Severine L R, Teyssedre G, Laurent C, Segur P 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 298
- [16] Perrin C, Griseri V, Laurent C, Fukunaga K, Maeno T, Levy L, Payan D, Schwander D 2008 *High Performance Polymers* **20** 535
- [17] Perrin C, Griseri V, Laurent C, Fukunaga K 2008 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **15** 958
- [18] Griseri V, Fukunaga K, Maeno T, Laurent C, Levy L 2004 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **11** 891
- [19] Hodges J L, Dennison J R, Dekany J, Wilson G, Evans A, Sim A 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 255
- [20] Dennison J R, Brunson J, Swaminathan P, Green N W, Frederickson A R 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 2191
- [21] Huang J G, Chen D 2004 *Chin. J. Geophys.* **47** 392 (in Chinese) [黄建国, 陈东 2004 地球物理学报 **47** 392]
- [22] Huang J G, Chen D 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 961 (in Chinese) [黄建国, 陈东 2004 物理学报 **53** 961]
- [23] Quan R H, Han J W, Zhang Z L 2013 *Acta Phys. Sin.* **64** 245205 (in Chinese) [全荣辉, 韩建伟, 张振龙 2013 物理学报 **64** 245205]
- [24] Qin X G, He D Y, Wang J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 684 (in Chinese) [秦晓刚, 贺德衍, 王骥 2009 物理学报 **58** 684]
- [25] Chen Y F, Yang S S, Qin X G, Liu Q, Shi L, Kong F L, Tang D T, Li C H 2010 *Vacuum and Cryogenics* **16** 167 (in Chinese) [陈益峰, 杨生胜, 秦晓刚, 柳青, 史亮, 孔风连, 汤道坦, 李存惠 2010 真空与低温 **16** 167]
- [26] Li S T, Li G C, Min D M, Zhao N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 059401 (in Chinese) [李盛涛, 李国倡, 闵道敏, 赵妮 2013 物理学报 **62** 059401]
- [27] Li G C, Min D M, Li S T, Zheng X Q, Ru J S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 209401 (in Chinese) [李国倡, 闵道敏, 李盛涛, 郑晓泉, 茹佳胜 2014 物理学报 **63** 209401]
- [28] Li G C 2017 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Jiaotong University) (in Chinese) [李国倡 2017 博士学位论文 (西安: 西安交通大学)]
- [29] Li W Q, Hao J, Zhang H B 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 086801 (in Chinese) [李维勤, 郝杰, 张海波 2015 物理学报 **64** 086801]
- [30] Yi Z, Wang S, Tang X J, Wu Z C, Zhang C 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 125201 (in Chinese) [易忠, 王松, 唐小金, 武占成, 张超 2015 物理学报 **64** 125201]
- [31] Cao H F, Liu S H, Sun Y W, Yuan Q Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 149402 (in Chinese) [曹鹤飞, 刘尚合, 孙永卫, 原青云 2013 物理学报 **62** 149402]
- [32] Cao H F, Liu S F, Sun Y W, Yuan Q Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 149401 (in Chinese) [曹鹤飞, 刘尚合, 孙永卫, 原青云 2013 物理学报 **62** 149401]
- [33] Fan Y J, Sun X J, Sun Y W, Zhou L D 2018 *High Power Laser and Particle Beams* **30** 114002 (in Chinese) [范亚杰, 张希军, 孙永卫, 周立栋 2018 强激光与粒子束 **30** 114002]
- [34] Li G C, Li S T, Pan S M, Min D M 2016 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **23** 2393
- [35] Min D M, Cho M, Li S T 2012 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **19** 2206
- [36] Baudoin F, Le Roy S, Teyssedre G 2008 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 025306
- [37] Le Roy S, Baudoin F, Griseri V, Laurent C, Teyssedre G 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 315402
- [38] Le Roy S, Baudoin F, Griseri V 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 023704
- [39] Teyssedre G, Laurent C 2005 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **12** 857
- [40] Boufayed F, Teyssedre G, Laurent C 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 104105
- [41] Liu X D, Zheng X Q, Zhang Y Q, Yang S S, Qin X G, Wang L 2007 *Electrical and Electrical Technology* **26** 55 (in Chinese) [刘晓东, 郑晓泉, 张要强, 杨生胜, 秦晓刚, 王立 2007 电工电能新技术 **26** 55]
- [42] Ma L C, Zheng X Q, Liu X D, Zhang Y Q, Ma L C 2007 *Proc. CSEE* **27** 32 (in Chinese) [马丽婵, 郑晓泉, 刘晓东, 张要强 2007 中国电机工程学报 **27** 32]
- [43] Li G C, Li S T, Pan S M 2016 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **23** 1846
- [44] Gao Y, Wang X F, Li N, Xu B B, Wang J L, Du B X 2019 *High Voltage* **45** 2219 (in Chinese) [高宇, 王小芳, 李楠, 许棒棒, 王继隆, 杜伯学 2019 高电压技术 **45** 2219]
- [45] Shen W W, Mu H B, Zhang G J 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 083706

[46] Simmons J G, Tam M C 1973 *Phys. Rev. B* **7** 3706

[47] Wei Y H, Chen G, Zhang G J, Liu N, Li G C 2016 *AIP Adv.* **6** 075120

[48] Zhang Z J, Miao J, Wang X Q, Wu W B, Yang P, Zheng X Q 2014 *High Voltage Engineering* **40** 117 (in Chinese) [张振军, 苗军, 王学强, 吴文斌, 杨沛, 郑晓泉 2014 高电压技术 **40** 117]

REVIEW

Review of charge deposition characteristics and trap parameters of dielectric in space electron radiation environment*

Li Guo-Chang¹⁾²⁾ Li Sheng-Tao^{2)†}

1) (*Institute of Advanced Electrical Materials, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China*)

2) (*State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 19 August 2019; revised manuscript received 11 September 2019)

Abstract

Charging and discharging characteristics of dielectric in space electron radiation environment are closely related to the surface charge exchange process and internal charge transfer process. Surface or internal charge movement of dielectric depends largely on the microscopic characteristics of the material, and space charge and trap are important parameters reflecting the microscopic characteristics of dielectric. In this work, the formation, mechanism, measurement method, existing problems and research status of space charge and trap in insulation material in electronic radiation environment are reviewed. Firstly, the interaction mechanism between incident electron and dielectric material and the formation of deposition charge are briefly introduced. The advantages and disadvantages of radiation-induced conductance model and electron-hole pair generation/recombination model are analyzed. The classical electro-acoustic pulse method (PEA) and “short circuit PEA” and “open circuit PEA” which are suitable for space charge measurement under electron beam radiation are compared with each other and analyzed, and further, the main technical difficulties in designing PEA device under electron beam radiation are reviewed. Secondly, the methods of extracting trap parameters, including thermal stimulation current method, surface potential decay method, space charge decay method are compared with each other.

It is pointed out that the method of injecting the electrons and the method of measuring the surface potential in the same vacuum environment are more suitable for measuring the trap parameters of space dielectric materials. Finally, the scientific problems that need solving in space insulation are prospected from the aspects of theoretical model, parameter characterization and measurement technology.

Keywords: space radiation environment, space charge characteristics, trap distribution, electro-acoustic pulse method

PACS: 94.05.Hk, 94.05.sj, 21.10.Ft. 77.84.–s

DOI: 10.7498/aps.68.20191252

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51907095, 11575140), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2019M653629), and the Qingdao Applied Foundation Basic Research Program, China (Grant No. 18-2-2-23-jch).

† Corresponding author. E-mail: sli@mail.xjtu.edu.cn