

# 结合电子束辐照与压电压力波法空间电荷分布实时测量的空间电荷包迁移行为的研究\*

潘佳萍 张冶文<sup>†</sup> 李俊 吕天华 郑飞虎

(同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

(2023 年 8 月 18 日收到; 2023 年 9 月 26 日收到修改稿)

空间电荷包现象是一种特殊的空间电荷现象, 具体表现为空间电荷以包的形态沿着极化电场的方向进行迁移. 目前针对空间电荷包现象的研究还存在一些不足, 研究的对象通常集中在聚乙烯及其交联产物中的正极性空间电荷包. 本文提出了一套用于负极性空间电荷包特性研究的一体化实验系统, 可进行电子束辐照与压电压力波法空间电荷分布实时测量相结合的实验研究, 并简要介绍了该系统的结构与功能. 该系统适用于不同厚度范围各类绝缘电介质样品在不同电场下的实验研究. 本文使用该实验系统初步研究了在不同外加电场 (15, 20, 25, 30 kV/mm) 下聚丙烯与聚甲基丙烯酸甲酯样品内负极性空间电荷包的迁移行为, 并从实验结果中提取了负极性载流子 (电子) 的迁移特性. 聚丙烯与聚甲基丙烯酸甲酯样品中电子的迁移速率均存在随着电场的增加而减小的负微分迁移率现象, 聚丙烯中该现象出现的阈值电场约为 26.0 kV/mm, 聚甲基丙烯酸甲酯中该现象出现的阈值电场约为 19.5 kV/mm, 消失的截止电场约为 27.5 kV/mm.

**关键词:** 绝缘聚合物, 空间电荷包, 电子束辐照, 载流子迁移率

**PACS:** 77.22.Jp, 77.22.-d, 77.84.Jd

**DOI:** 10.7498/aps.73.20231353

## 1 引言

聚合物电介质以其低廉的成本与优良的电气性能, 成为了高压直流输电领域的主要绝缘材料<sup>[1]</sup>. 然而在聚合物电介质的应用中, 也出现了一些亟待解决的问题, 例如空间电荷的积累问题<sup>[2]</sup>. 在某些运行环境中 (如持续施加高电压、宇宙射线辐照等环境), 空间电荷会在绝缘电介质内部发生注入、积累、迁移等一系列行为, 使得材料内部的电场发生畸变<sup>[3]</sup>, 影响材料的绝缘性能, 给电气设备的稳定运行带来安全隐患. 研究聚合物电介质内部的空间电荷行为对我国高压电缆事业的发展, 双碳战略目标的实现具有重大意义. 空间电荷包现象是一种较为独特的空间电荷行为, 具体表现为同极性的空间

电荷在聚合物材料中积聚, 并维持包络的形态沿着极化电场的方向进行迁移<sup>[4-8]</sup>. 空间电荷包的迁移会导致电介质内部的局部电场发生起伏变化, 甚至可能超过其击穿的阈值电场, 加速电介质材料的击穿与损坏. 因此, 聚合物电介质中的空间电荷包迁移行为是一个有重要意义的研究方向.

聚合物电介质中的空间电荷包现象由来已久. Hozumi 与 Suzuki<sup>[4]</sup> 利用电声脉冲法最先在外加极化电场大于 100 kV/mm 的交联聚乙烯电缆中观测到了明显的正极性空间电荷包产生、迁移现象, 迁移率为  $10^{-16}$ — $10^{-14}$  m<sup>2</sup>·V<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>. 随后, Hozumi 等<sup>[9]</sup> 又在含抗氧化剂和苯丙酮的交联聚乙烯与聚乙烯薄片样品中观测到了空间电荷包现象, 电荷包出现的阈值电场为 70 kV/mm. Matsui 等<sup>[5]</sup> 研究了在 100—400 kV/mm 极化电场下, 低密度线性聚乙烯

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51877153) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: yewen.zhang@tongji.edu.cn

样品内的正极性空间电荷包在样品击穿前后的分布特性, 并发现与高电场相比, 在较低的电场下空间电荷包移动速度更快, 移动距离更长. 郑飞虎等<sup>[7]</sup>则首次在 50 kV/mm 这一更低的极化场强下观测到了正极性空间电荷包的形成和迁移现象. 此后, 较低极化电场下空间电荷包的形成机理与迁移规律也开始受到关注. Fabiani 等<sup>[10]</sup>对纳米粒子掺杂的交联聚乙烯与环氧树脂片状样品施加了 30—50 kV/mm 的外加电场并观测到了快速迁移的空间电荷包, 电荷包迁移率达到了  $10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Zhao 等<sup>[11]</sup>使用高压脉冲激励在聚乙烯样品内注入了正极性空间电荷包, 并利用电声脉冲法观测了其在 10—70 kV/mm 电场下的迁移行为, 发现了电荷包迁移速率随着电场的增加而逐渐减小的现象. 空间电荷包形成的阈值电场、来源等尚未明确, 不同的实验研究得到的结果并不统一, 材料性质、预处理手段、温度等均会对实验结果造成影响. 而对于空间电荷包迁移行为的研究, 除了提取载流子的迁移率外, 其迁移特性与电场的关系也值得研究. 基于某些实验结果中空间电荷包的迁移速率随着电场的增加而逐渐减小的现象<sup>[5,11]</sup>, 夏俊峰等<sup>[6,12]</sup>提出了负微分迁移率模型, 该模型的仿真结果<sup>[13]</sup>与正极性电荷包的实验数据有较好的一致性. 目前, 关于空间电荷包产生、迁移等行为的实验与仿真研究仍存在许多不足: 实验的研究对象局限于聚乙烯及其交联产物, 空间电荷包的极性通常是正极性. 对其他电介质材料以及负极性空间电荷包的系统研究较为欠缺, 聚乙烯材料中的空间电荷包在迁

移时出现的负微分迁移率现象是否存在于其他电介质材料内也值得探究. 近年出现了一种电子束辐照加工与空间电荷分布测量分步进行的研究手段, 在完成电子束辐照后利用激光压力波法直接观测聚乙烯样品中辐照注入的负极性空间电荷包的迁移行为<sup>[14]</sup>, 为本文的研究提供了有效的实验基础与经验.

本文提出了一套结合电子束辐照与空间电荷分布实时测量的实验系统, 简要介绍了该系统的结构与实验流程, 并利用该系统研究了辐照注入的负极性空间电荷包在不同材料样品中的迁移行为, 从实验结果中提取了构成电荷包的负极性载流子(电子)的迁移特性.

## 2 实验系统与测量方法

### 2.1 电子束辐照系统介绍

本文使用的实验系统如图 1 所示, 该系统由电子束辐照装置与空间电荷分布测量装置组成. 图 1(a) 为电子束辐照系统的整体结构示意图与实物图, 石英玻璃腔室顶部的不锈钢均压环连接了电子束的加速高压源, 底部的不锈钢腔室可靠接地. 不锈钢腔室的中间装有一个直径 40 cm 的接地铝制平台, 可以直接放置实验样品进行电子束辐照加工, 也可以放置空间电荷分布测量装置进行一体化的实验研究. 用于辐照的热电子由材质为钨的电镜灯丝产生, 灯丝下装有一个底面开孔的金属碗状栅极. 灯丝与栅极的小孔位于同一铅垂线上, 使得灯丝产生

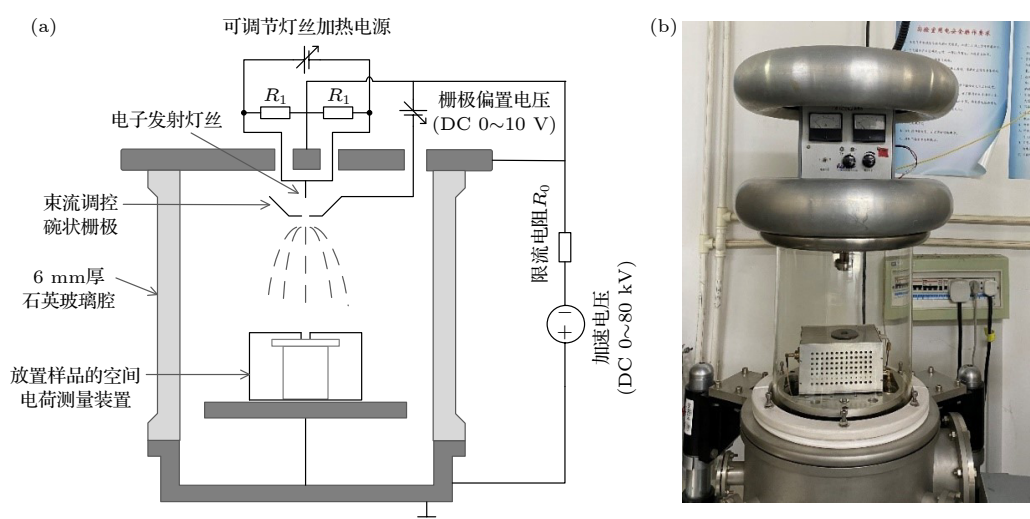


图 1 电子束辐照系统的结构示意图与实物图 (a) 结构示意图; (b) 实物图

Fig. 1. Schematic diagram and actual photo of the electron beam irradiation system: (a) Structure diagram; (b) actual photo.

的电子能够穿过小孔进行发射. 金属栅极由导电的单臂支架连接在独立的直流电压上 (电压由光纤继电器的收信端提供), 用于控制电子束束流的发射. 当束流控制装置工作时, 栅极的电压会在灯丝上下两侧提供一个与其加速方向相反的电势差. 当电子的能量大于钨的逸出功 (约为 4.52 eV<sup>[15]</sup>) 时, 电子才能从灯丝中逃逸出来成为热电子. 栅极反向电压的调节通过光纤继电器组件来实现, 该组件由控制单元-发信端-连接光纤-收信端组成. 控制单元用于控制发信段与收信端的输出信号, 通过手动切换或自动延时切换两种方式, 可实现对两个已设置的电压值的瞬时切换控制, 使得栅极的反向电压能够被实时且瞬时调控.

为了验证束流控制装置的可靠性, 使用了一个连接至静电计的电流探头记录了栅极控制下的束流量. 电流探头被放置于与空间电荷分布测量装置中的样品台相同的高度上, 因此测量得到的束流量也可用于计算后续实验中样品内辐照注入的初始电荷量. 图 2 为不同栅极电压控制下, 加速电压从 0 增加到 60 kV 的过程中电子束束流量变化的曲线. 当栅极的电压范围在 5—10 V 时, 灯丝发射电子的效率在不同的加速电压下都几乎为 0. 当栅极电压调节为 4 V 后, 逐渐出现了明显的热电子发射现象, 且随着加速电压的增加, 电子束束流量逐渐增加. 随着栅极电压的降低, 灯丝发射电子的效率逐渐提高, 验证了束流控制装置的可行性与可靠性. 在对样品进行电子束辐照时, 调节加速电压上升的过程中将栅极电压设置为电子发射效率最低的 10 V, 保证加速电压变化的过程中没有电子发射, 完成指定的加速电压设置后再将栅极电压瞬间

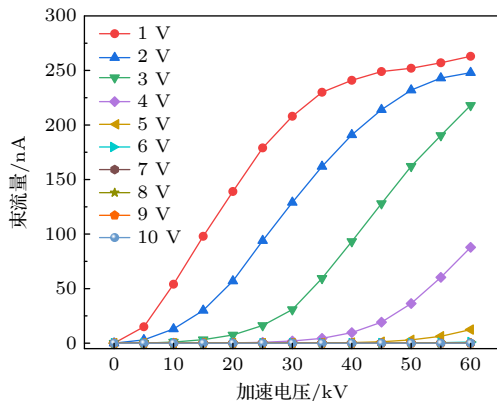


图 2 金属栅极调控下的电子束束流量

Fig. 2. Electron beam flux controlled by metal grid.

切换为发射电压 (1—4 V), 使得电子束辐照过程中注入样品的电子能量恒定.

## 2.2 压电压力波法空间电荷分布测量装置

实验系统中空间电荷分布的实时测量通过压电压力波法<sup>[16]</sup>来实现. 压力波 (pressure wave propagation, PWP) 法的基本原理为: 压力波脉冲在样品内传播时会对样品产生扰动, 引起样品内分布的电荷发生微小的偏移, 这一偏移会造成外部回路上电流/电压的变化, 该测量信号  $i_m(t)$  的理论表达式<sup>[16]</sup>如下:

$$i_m(t) = C_0 B \int_0^{d_0} E(x) \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} dx, \quad (1)$$

其中  $C_0$  为样品电容;  $B$  是与材料性质有关的常数;  $p(x, t)$  是在样品内传播的压力波;  $E(x)$  为样品内的电场分布;  $d_0$  为样品厚度. 通过低电场下的标定信号与泊松方程, 可以从测量得到的电流信号中提取到样品内的空间电荷分布  $\rho(x)$ .

图 3 为压电压力波法空间电荷分布测量装置的内部结构示意图, 装置内部被一块石英玻璃样品台分隔为上下两个部分, 上半部分为样品辐照、极化以及测量信号采集区, 下半部分为声脉冲产生结构. 声脉冲的产生源为 28  $\mu\text{m}$  厚的铜-镍电极聚偏二氟乙烯 (polyvinylidene difluoride, PVDF) 压电薄膜. 在外加的电脉冲信号作用下, 压电薄膜可通过逆压电效应产生与电信号频率一致的声脉冲信号. 该声脉冲信号经过石英玻璃样品台进入样品, 对样品内部的空间电荷进行扰动, 从而产生包含电荷分布信息的测量信号.

## 2.3 结合电子束辐照与空间电荷分布实时测量的实验方法

对于聚合物材料中的负极性空间电荷包现象, 目前并没有较为系统的研究方法. 近年出现的结合电子束辐照技术与空间电荷分布测量技术的方法<sup>[14]</sup>, 在聚乙烯样品内负极性电荷包迁移行为的研究中得到了实践. 然而该方法中电子束辐照与空间电荷分布的测量在不同的实验装置中进行, 在不同装置之间取放样品可能会导致同一样品内电子束辐照与空间电荷分布测量的区域不完全对应, 影响实验结果的精确性. 本节提出的电子束辐照系统, 可在同一实验系统内完成电子束的辐照与压电压力



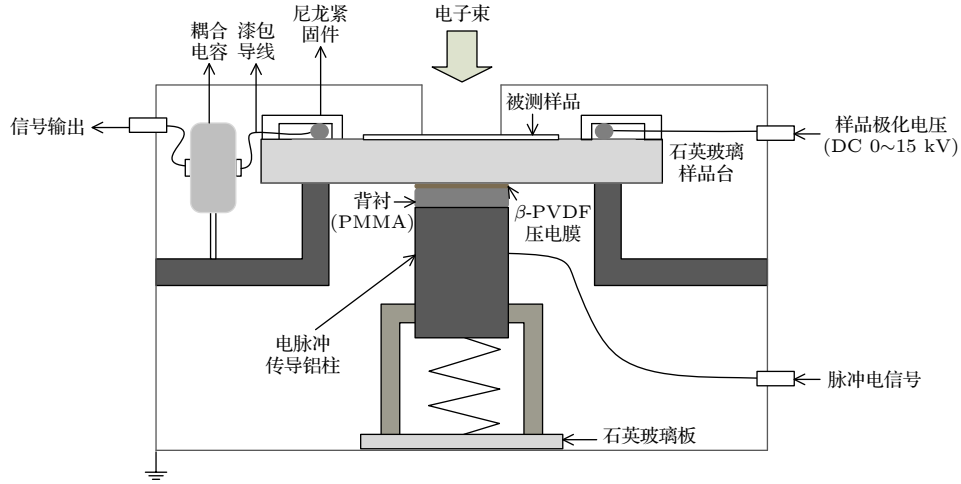


图3 压电压力波法测量装置的结构示意图

Fig. 3. Schematic diagram of the piezo-PWP method measurement device.

波法空间电荷分布的实时测量。发射电子的灯丝、碗状栅极的小孔、压电压力波法测量装置上盖板的环形电极，样品及两侧电极的正中心区域、压电薄膜均位于同一铅垂线上，使得样品内进行电子束辐照与空间电荷分布测量的区域始终保持一致。

使用本实验系统研究负极性空间电荷包现象时，先通过电子束辐照技术在样品内注入电子形成负极性空间电荷包，随后利用压电压力波法测量装置的高压回路对样品施加不同大小的外加电场，并通过压电压力波法测量样品内辐照注入的电荷包的实时分布。为了验证本实验系统与实验方案的可行性，对四个相同规格 (300  $\mu\text{m}$ ) 的聚丙烯 (polypropylene, PP) 样品进行了相同条件的电子束辐照 (辐照能量 60 keV, 辐照时间 20 s, 栅极电压 1 V), 图4为辐照后样品内的初始空间电荷分布结果 (撤压信号)。负极性的电荷信号峰代表样品内形成的负极性空间电荷包, 该电荷包在阳极与阴极分别感应出对应的电极信号峰。下轴为压力波在样品中的传导时间, 通过样品中的声速可将其换算成上轴中对应的样品厚度。图4中信号峰的半峰宽约为 25 ns, 因此对于聚丙烯样品, 本装置的测量分辨率约为 67  $\mu\text{m}$ 。在相同的辐照条件下, 四个聚丙烯样品内形成的空间电荷包深度与大小基本一致, 证明了本套实验系统与实验方案的稳定性与可重复性。根据电子束辐照的经验公式<sup>[17]</sup>, 加速电子在样品内可抵达的最大深度为

$$R = \frac{\alpha E_0}{\rho} \left( 1 - \frac{\beta}{1 + \gamma E_0} \right) \times 10^{-2}, \quad (2)$$

其中  $R$  (单位为 m) 为电子的最大射程;  $E_0$  (单位为 MeV) 为电子的加速能量;  $\rho$  (单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 为被辐照材料的密度;  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为常量  $0.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{MeV}^{-1}$ ,  $0.9841$ ,  $3 \text{ MeV}^{-1}$ 。根据设置的辐照条件与聚丙烯的材料特性, 代入 (2) 式可以得到理论上空间电荷包的注入深度约为 60.9  $\mu\text{m}$ 。根据图4的测量结果, 样品内形成的空间电荷包深度在距离阴极 (辐照面) 约 67.6  $\mu\text{m}$ , 与经验公式的结果十分接近, 说明该负极性空间电荷包由辐照注入的电子构成。根据图2的电子束束流曲线, 栅极电压为 1 V, 加速电压为 60 kV 时的电子束束流量为 263 nA, 理论上辐照 20 s 注入样品内部的电荷总量应为  $5.26 \times 10^{-6} \text{ C}$ 。通过对图4的空间电荷分布测量结

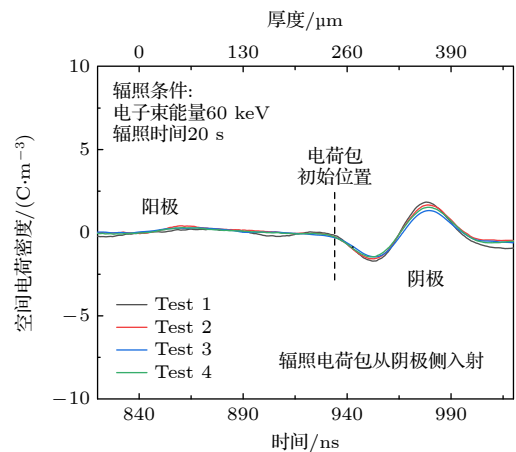


图4 相同辐照条件下不同聚丙烯样品内的初始空间电荷分布 (撤压信号)

Fig. 4. Space charge distribution in different PP samples under the same irradiation conditions (without applied voltage).

果进行积分求解, 得到实际注入样品内的初始空间电荷总量约为  $1.54 \times 10^{-8}$  C, 与理论值相差数百倍, 说明辐照电子在注入样品时发生了大量的损失. 在到达样品前, 获得加速能量的电子会经过测量装置上盖板环形电极的管状通道, 在这一过程中, 大量的电子将沿着上盖板的接地回路流出测量装置, 因此, 实际注入样品内部的初始空间电荷总量远小于根据标定的电子束束流值计算得到的电荷量.

本套实验系统实现了电子束辐照与空间电荷分布测量的一体化, 在同一装置中, 电子束辐照的流程与空间电荷分布实时测量的流程可以同步进行, 也可以按照实验方案的设计分步进行. 在使用该系统进行聚合物内的负极性空间电荷包迁移行为研究时, 电荷包的注入与空间电荷分布的实时测量都在同一装置内进行, 实验流程更具有连贯性与系统性. 除了负极性空间电荷包迁移行为的研究外, 本系统还可用于材料的电子束辐照加工、不同材料的空间电荷注入特性、材料的能量陷阱分布等研究, 具有广泛的应用场景与实用价值.

### 3 不同外加电场下负极性空间电荷包的迁移行为

完成电子束辐照系统的设计与搭建后, 使用该系统研究了聚丙烯材料内负极性空间电荷包的迁移行为. 实验样品为平板硫化机热压制成的聚丙烯平板样品, 其直径为 6 cm, 厚度为 300  $\mu\text{m}$  (误差  $\pm 10$   $\mu\text{m}$ ), 样品两侧蒸镀了直径为 3 cm, 厚度为 200 nm 的圆形铝电极. 样品两侧的铝电极分别与样品台上表面的银电极以及上盖板的环形电极紧密贴合, 为待测样品提供均匀的极化电场. 辐照条件为 60 keV, 20 s, 外加电场分别为 15, 20, 25, 30 kV/mm. 由迁移距离  $d$ , 迁移时间  $t$  以及迁移过程中的局部电场  $E(x)$ , 可以计算出负极性空间电荷包内电子的迁移速率  $v$  及迁移率  $\mu$  如下:

$$v = d/t, \quad (3)$$

$$\mu = v/E(x). \quad (4)$$

图 5 为 15, 20, 25, 30 kV/mm 的外加电场下, 持续加压 72 h 聚丙烯样品内空间电荷分布的加压信号. 加速电子在样品阴极侧入射并形成负极性空间电荷包, 该电荷包在外加电场驱动下缓慢地由阴极 (辐照面) 向阳极迁移, 迁移速率先快后慢. 在相

同的时间间隔内, 不同外加电场下电荷包的迁移距离有明显差异, 例如持续加压 1—4 h 的时间区间内, 15, 20, 25, 30 kV/mm 的外加电场下空间电荷包分别迁移了约 12.0, 14.5, 16.3, 13.1  $\mu\text{m}$ , 这说明空间电荷包的迁移速率与电场强度密切相关. 根据加压信号, 可以得到用于计算电荷包电子迁移率的样品内部局部电场分布, 如图 6 所示. 由图 6 可知, 利用电子束辐照技术注入电荷包后, 同极性电荷的分布使得样品阴极侧的电场变小. 在加压过程中, 样品内的局部电场主要由初始电荷包内电子的数量以及电荷包的实时位置决定. 随着加压时间的持续增加, 样品内部电场的畸变程度逐渐加剧. 在 15, 20, 25, 30 kV/mm 的外加电场下, 样品内局部电场的最大畸变值分别达到了 18.3, 24.1, 29.8, 34.6 kV/mm.

根据空间电荷包的实时分布结果及样品内局部电场的分布结果, 可以提取得到不同外加电场下, 聚丙烯样品内电子的迁移速率及迁移率. 在本实验的电场区间内, 电子迁移速率的数值范围在  $10^{-12}$ — $10^{-9}$  m/s, 迁移率的数值范围在  $10^{-19}$ — $10^{-16}$   $\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . 在 15, 20, 25, 30 kV/mm 的外加电场下, 72 h 内电子的平均迁移速率分别为  $1.42 \times 10^{-10}$ ,  $1.60 \times 10^{-10}$ ,  $1.42 \times 10^{-10}$ ,  $2.25 \times 10^{-10}$  m/s, 电子的平均迁移率分别  $8.94 \times 10^{-18}$ ,  $7.59 \times 10^{-18}$ ,  $5.78 \times 10^{-18}$ ,  $7.27 \times 10^{-18}$   $\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . 聚丙烯材料内电子的迁移速率与电场的关系将在下一节中进一步分析.

### 4 分析与讨论

聚丙烯是一种含结晶相的半结晶性材料, 分子链的端基和侧链、晶区与非晶区之间的界面等都有可能形成捕获载流子的能量陷阱 [18], 且在沿样品厚度方向上能量陷阱的深度与密度分布并不均匀 [19]. 样品内的不同区域可能有完全不同的能量陷阱分布, 因此同一外加电场下不同测量时间节点 (对应样品内不同位置的区域) 提取得到的电子迁移速率/迁移率具有较大的分散性. 为了从分散的数据中提取到电荷包电子的迁移速率随局部电场的变化规律, 将同一电场下的数据归为一个集合求取平均值, 并以误差棒的形式表现该集合的离散程度, 得到图 7 中的聚丙烯样品内电子平均迁移速率-电场关系图及对应的多项式拟合曲线. 由图 7 可知, 聚丙烯样品内电荷包电子的平均迁移速率与对应

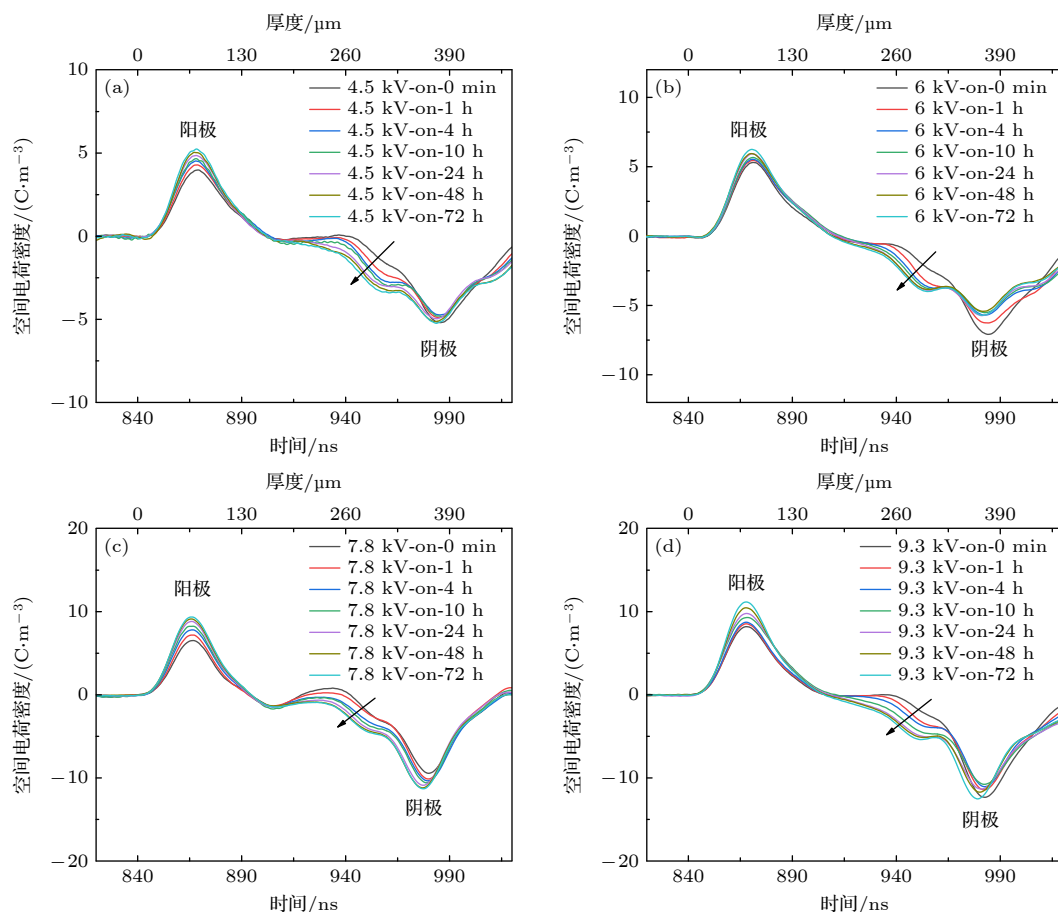


图 5 不同外加电场下聚丙烯样品内部的空间电荷分布 (a) 15 kV/mm; (b) 20 kV/mm; (c) 25 kV/mm; (d) 30 kV/mm

Fig. 5. Space charge distribution inside PP samples under different applied electric fields: (a) 15 kV/mm; (b) 20 kV/mm; (c) 25 kV/mm; (d) 30 kV/mm.

多项式曲线的拟合优度为 1, 曲线的峰值出现在约 26.0 kV/mm 处. 根据该曲线的结果可知, 在 15—32 kV/mm 的电场区间内, 随着电场的增加, 聚丙烯样品内电荷载流子的迁移速率出现了先增加后减小的趋势, 即电子的迁移速率出现了负微分迁移率现象<sup>[12]</sup>. 负微分迁移率模型认为, 在某一特定的电场区间内, 载流子的迁移速率会出现随着电场的增加而减小的现象, 而造成该现象的原因可能是电致应力导致聚合物的微观结构发生改变, 从而产生了更多捕获载流子的能量陷阱<sup>[20]</sup>. 随着电场的进一步增加, 由分子结构改变产生的新能量陷阱趋于饱和, 陷阱对载流子迁移速率的调控作用逐渐弱化, 载流子迁移速率又将随着电场的增加而增加. 根据本文的研究结果, 聚丙烯材料内电子的负微分迁移率现象出现的阈值电场约为 26.0 kV/mm. 但在本实验的测试电场区间内, 并未观测到在更高的电场下, 电子的迁移速率恢复成随着电场的增加而增加的状态, 即未提取到聚丙烯样品内电子负微分

迁移率现象消失的截止电场.

使用相同的实验系统与研究方法 (实验电场 15, 20, 25, 30 kV/mm), 对 300  $\mu\text{m}$  厚的聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 样品内的负极性空间电荷载流子迁移行为进行了研究, 并提取得到了聚甲基丙烯酸甲酯样品内电子的迁移速率与电场的关系, 如图 8 所示. 随着电场的增加, 聚甲基丙烯酸甲酯样品内电子的迁移速率出现了先增加再减小随后继续增加的现象, 电子的负微分迁移率现象出现的阈值电场约为 19.5 kV/mm, 该现象消失的截止电场约为 27.5 kV/mm. 聚甲基丙烯酸甲酯样品内电子负微分迁移率现象出现的阈值电场低于聚丙烯样品.

聚丙烯 (含结晶相, 非极性) 与聚甲基丙烯酸甲酯 (无定形相, 极性) 是两种微观结构与分子极性都具有明显差异的绝缘电介质材料, 但在实验结果中两种材料内的负极性载流子 (辐照电子) 均出现了负微分迁移率现象. 此外, 聚乙烯材料中正极

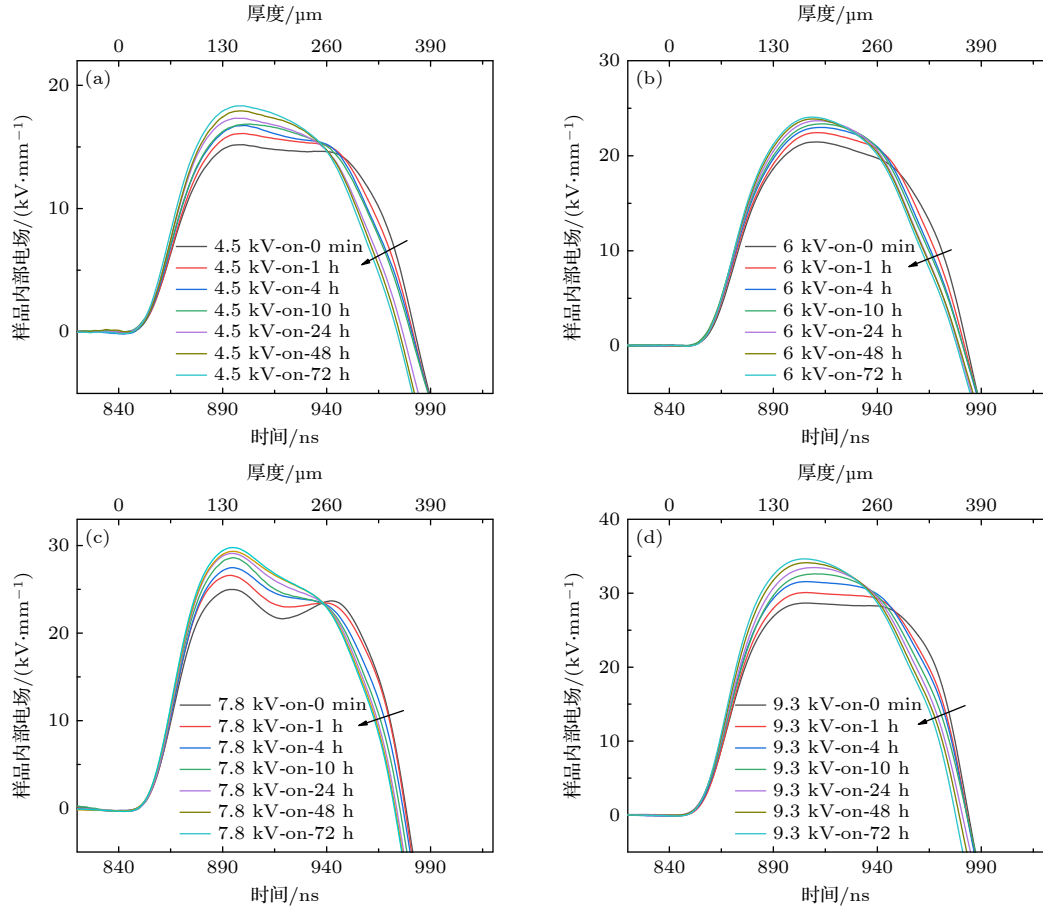


图 6 不同外加电场下聚丙烯样品内部的局部电场分布 (a) 15 kV/mm; (b) 20 kV/mm; (c) 25 kV/mm; (d) 30 kV/mm

Fig. 6. Electric field distribution inside PP samples under different applied electric fields: (a) 15 kV/mm; (b) 20 kV/mm; (c) 25 kV/mm; (d) 30 kV/mm.

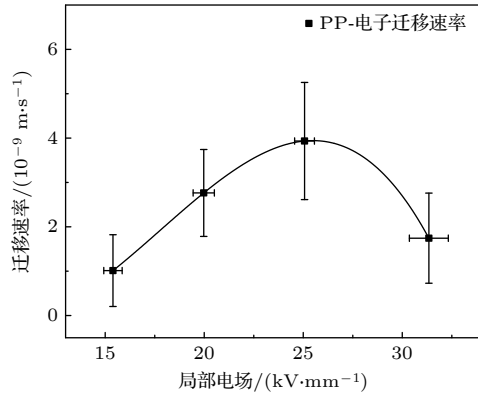


图 7 聚丙烯样品内电子的迁移速率与局部电场的关系  
Fig. 7. Migration rate of electrons as a function of the local electric field inside PP samples.

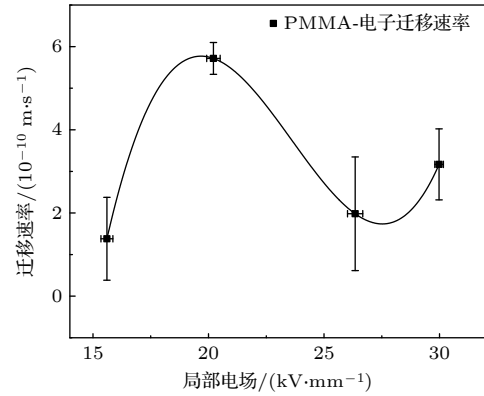


图 8 聚甲基丙烯酸甲酯样品内电子的迁移速率与局部电场的关系  
Fig. 8. Migration rate of electrons as a function of the local electric field inside PMMA samples.

性载流子<sup>[11,21]</sup>与负极性载流子<sup>[14]</sup>的负微分迁移率现象也获得了许多实验结果的论证. 载流子负微分迁移率现象出现的电场区间与材料自身的特性密切相关, 对于载流子迁移率受陷阱调制的绝缘电介质材料, 由电致应力导致的微观结构变化现象较为

普遍, 载流子的负微分迁移率现象在绝缘电介质材料中或具有普遍性.

本文提出的实验系统适用于各类不同材料的辐照加工与实验研究. 在空间分辨率确定的情况下, 为了保证良好的测量效果, 实验样品的厚度一



一般在 300  $\mu\text{m}$  以上, 除此以外对样品的性质没有严格要求. 利用该系统可以对不同绝缘电介质材料内的负极性空间电荷包迁移行为进行研究并从中提取到电子的迁移速率与电场的关系特性. 实验系统的耐压值约为 17 kV, 对于 300  $\mu\text{m}$  厚的样品, 系统可提供的最大极化电场约为 55 kV/mm. 针对不同的研究材料选择不同的实验电场区间, 可以提取不同材料内电子负微分迁移率现象出现的阈值电场与消失的截止电场.

## 5 结 论

本文提出了一套结合电子束辐照与空间电荷分布实时测量的实验系统, 并利用该系统初步研究了聚丙烯与聚甲基丙烯酸甲酯材料内的电子迁移特性, 得到了以下结论.

1) 本文提出的实验系统可进行材料的电子束辐照加工与压电压力波法空间电荷分布的实时测量, 不同的实验流程均可在同一装置内进行. 与其他研究方法相比, 使用该系统进行空间电荷包迁移行为研究的实验流程更具有连贯性与系统性. 实验系统的耐压值约为 17 kV, 空间电荷分布测量的分辨率约为 25 ns, 适用于不同厚度的多种聚合物材料样品在不同电场区间内的实验研究.

2) 使用本文的实验系统对聚丙烯与聚甲基丙烯酸甲酯材料内负极性空间电荷包的迁移行为进行了研究, 并从中提取了电子迁移速率与电场的关系. 聚丙烯内电子出现负微分迁移率现象的阈值电场约为 26.0 kV/mm, 聚甲基丙烯酸甲酯内电子出现负微分迁移率现象的阈值电场约为 19.5 kV/mm, 该现象消失的截止电场约为 27.5 kV/mm. 载流子的负微分迁移率现象在绝缘电介质材料中或具有普适性, 其出现的阈值电场与材料自身特性密切相关. 使用本文的实验系统可以提取不同材料内电子负微分迁移率现象出现的阈

值电场与消失的截止电场.

## 参考文献

- [1] Du B X, Han C L, Li J, Li Z L 2019 *Trans. Chin. Electrotech. Soc.* **34** 179 (in Chinese) [杜伯学, 韩晨磊, 李进, 李忠磊 2019 *电工技术学报* **34** 179]
- [2] Tu D M, Wang X, Lü Z P, Wu K, Peng Z R 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 017104 (in Chinese) [屠德民, 王霞, 吕泽鹏, 吴锴, 彭宗仁 2012 *物理学报* **61** 017104]
- [3] Zhang Y W, Lewiner J 1996 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **3** 778
- [4] Hozumi N, Suzuki H 1994 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **1** 1068
- [5] Matsui K, Tanaka Y, Takada T, Fukao T, Fukunaga K, Maeno T, Alison J M 2005 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **12** 406
- [6] Xia J F, Zhang Y W, Zheng F H, Lei Q Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8529 (in Chinese) [夏俊峰, 张治文, 郑飞虎, 雷清泉 2009 *物理学报* **58** 8529]
- [7] Zheng F H, Zhang Y W, Gong B, Zhu J W, Wu C S 2005 *Sci. China Ser. E: Technol. Sci.* **48** 354
- [8] Kon H, Suzuoki Y, Mizutani T, Ieda M, Yoshifuji N 1996 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **3** 380
- [9] Hozumi N, Takeda T, Suzuki H, Okamoto T 1998 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **5** 82
- [10] Fabiani D, Montanari G, Dissado L, Laurent C, Teyssedre G 2009 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **16** 241
- [11] Zhao J, Chen G, Lewin P L 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 034116
- [12] Xia J F, Zhang Y W, Zheng F H, Lei Q Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 508 (in Chinese) [夏俊峰, 张治文, 郑飞虎, 雷清泉 2010 *物理学报* **59** 508]
- [13] Xia J F, Zhang Y W, Zheng F H, An Z L, Lei Q Q 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 034101
- [14] Zhang Y W, Zhao H, Guo Sh Z, Zheng F H, An Z L 2016 *Trans. Chin. Electrotech. Soc.* **31** 145 (in Chinese) [张治文, 赵晖, 郭世忠, 郑飞虎, 安振连 2016 *电工技术学报* **31** 145]
- [15] Jin W F 1997 *Dielectric Physics* (Beijing: China Machine Press) p116 (in Chinese) [金维芳 1997 *电介质物理学* (北京: 机械工业出版社) 第 116 页]
- [16] Zheng F H, Zhang Y W, Wu C S, Li J X, Xia Z F 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1137 (in Chinese) [郑飞虎, 张治文, 吴长顺, 李吉晓, 夏钟福 2003 *物理学报* **52** 1137]
- [17] Weber K H 1963 *Nucl. Instrum. Methods* **25** 261
- [18] Ieda M 1984 *IEEE Trans. Electr. Insul.* **EI-19** 162
- [19] Xia Z F 2001 *Electret* (Beijing: China Science Press) pp199–206 (in Chinese) [夏钟福 2001 *驻极体* (北京: 科学出版社) 第 199—206 页]
- [20] Jones J P, Llewellyn J P, Lewis T J 2005 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **12** 951
- [21] Chen G, Zhao J 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 212001



# Migration behavior of space charge packet researched by using electron beam irradiation and real-time space charge distribution measurement in piezo-pressure wave propagation (PWP) method<sup>\*</sup>

Pan Jia-Ping   Zhang Ye-Wen<sup>†</sup>   Li Jun   Lü Tian-Hua   Zheng Fei-Hu

(*Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China*)

( Received 18 August 2023; revised manuscript received 26 September 2023 )

## Abstract

The space charge packet is a special sort of space charge phenomenon that is characterized by the migration of aggregated space charge in the form of a packet in the sample. Currently, most of the experimental and simulation studies on the generation and migration of space charge packets focus on the space charge packets with positive polarity in polyethylene and their cross-linking products, while the characteristics of the space charge packets with negative polarity still need studying. This paper presents an integrated experimental system for studying space charge packet with negative polarity, which enables experimental studies combining electron beam irradiation technique and real-time space charge distribution measurement. The beam flux for electron beam irradiation is controlled by a metal grid with an optical fiber-electric relay, and the space charge distribution measurement is performed by the piezo-pressure wave propagation method. The system achieves a withstand voltage value of 17 kV and a measuring resolution of 25 ns for space charge distribution measurement and is suitable for experimental studies of various material samples with different thickness ranges under different electric fields. In this work, the migration behaviors of space charge packets with negative polarity in polypropylene (PP) and polymethyl methacrylate (PMMA) samples under different applied electric fields (15, 20, 25, 30 kV/mm) are studied by using the experimental system. The relationship between the migration properties of carriers with negative polarity (electrons) and the electric field can be extracted from the experimental results. The “negative differential mobility” phenomenon is found for both materials, i.e. the migration rate decreases with the increase of the electric field. The threshold electric field for the “negative differential mobility” phenomenon of electrons in PP sample is about 26.0 kV/mm while the threshold electric field for the “negative differential mobility” phenomenon of electrons in PMMA sample is 19.5 kV/mm, and the phenomenon disappears at an electric field of 27.5 kV/mm. The electric field where the “negative differential mobility” phenomenon of electrons appears and disappears in different materials can be extracted by using the experimental system proposed in this paper.

**Keywords:** insulating polymers, space charge packet, electron beam irradiation, carrier mobility

**PACS:** 77.22.Jp, 77.22.-d, 77.84.Jd

**DOI:** [10.7498/aps.73.20231353](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231353)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51877153).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [yewen.zhang@tongji.edu.cn](mailto:yewen.zhang@tongji.edu.cn)



结合电子束辐照与压电压力波法空间电荷分布实时测量的空间电荷包迁移行为的研究

潘佳萍 张冶文 李俊 吕天华 郑飞虎

**Migration behavior of space charge packet researched by using electron beam irradiation and real-time space charge distribution measurement in piezo-pressure wave propagation (PWP) method**

Pan Jia-Ping Zhang Ye-Wen Li Jun Lü Tian-Hua Zheng Fei-Hu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 027701 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231353

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231353>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

磷化铟高电子迁移率晶体管外延结构材料抗电子辐照加固设计

Structure parameters design of InP based high electron mobility transistor epitaxial materials to improve radiation-resistance ability

物理学报. 2022, 71(3): 037202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211265>

铝中气泡在电子束辐照下的异常放热现象

Anomalous heat-releasing phenomenon from bubbles in aluminum induced by electron beam irradiation

物理学报. 2018, 67(21): 216101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181140>

单层CrI<sub>3</sub>电荷输运性质和光学性质应变调控的第一性原理研究

First-principles study of strain-tunable charge carrier transport properties and optical properties of CrI<sub>3</sub> monolayer

物理学报. 2022, 71(20): 207102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221019>

非金属原子掺杂的GaN纳米管: 电子结构、输运特性及电场调控效应

Non-metallic atom doped GaN nanotubes: Electronic structure, transport properties, and gate voltage regulating effects

物理学报. 2022, 71(11): 116101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212342>

二维XO<sub>2</sub> (X = Ni, Pd, Pt)弹性、电子结构和热导率

Elastic constants, electronic structures and thermal conductivity of monolayer XO<sub>2</sub> (X = Ni, Pd, Pt)

物理学报. 2021, 70(24): 246301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211015>

空间电子辐照聚合物的充电特性和微观机理

Charging characteristics and micromechanism of space electrons irradiated polymers

物理学报. 2019, 68(5): 059401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181925>