

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209834

固体电介质空间电荷与电流和电位的 同步联合测量系统*

孙云龙, 韩永森, 李忠华

(哈尔滨理工大学工程电介质及其应用技术教育部重点实验室 哈尔滨 150080)

摘要:为了综合、全面地获取固体电介质的介电响应信息,准确表征固体电介质的介电性能,提出了一种基于“分区同时”测量策略的空间电荷与电流以及空间电荷与开路电位的同步同时联合测量方案。该联合测量方案基于现有的电流测量单元、电位测量单元以及空间电荷测量单元,通过T型滤波器和阻交电感对测量单元进行合理组合,保证测量过程中各单元之间无互相干扰,从而实现电流、开路电位和空间电荷的同步联合测量。以碳化硅(SiC)掺杂的低密度聚乙烯(LDPE)试样的电流、电位和空间电荷同步联合测量结果为基础,对测量系统进行了校验。研究表明,电流测量基础噪声在pA数量级,在1~10 kV电压测量效果良好,空间电荷测量精度并未受到影响。联合测量方案在技术上简单易行,能够实现对固体电介质的电流、电位和空间电荷同步同时联合测量,同时该联合测量系统具有进一步扩展的空间,为后续多种测量技术的同步联合应用提供参考与基础。

关键词:极化电流;电位;空间电荷;同步联合测量

中图分类号: TH73 TM215 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Simultaneous measurement system for space charge, current and potential of solid dielectrics

Sun Yunlong, Han Yongsen, Li Zhonghua

(Key Laboratory of Engineering Dielectric and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In this article, a simultaneous measurement system of space charge and current as well as space charge and the potential in open circuit based on the “region division but at the same time” measurement strategy is proposed to obtain the dielectric response information comprehensively and to accurately characterize the dielectric properties of solid dielectrics. The simultaneous measurement system consists of the readymade current measurement unit, potential measurement unit and space charge measurement unit. Those measurement units are reasonably combined through a T-filter and an inductance to isolate alternating component to ensure that there is no mutual interference between each unit during the measurement process. In this way, the simultaneous measurement of the current, space charge and the potential in open circuit could be achieved. The measurement system is validated by the measurement results of the current, potential, and space charge of low-density polyethylene (LDPE) samples with silicon carbide (SiC) filler. Results show that the basic noise of current measurement is quantitative in pA, the voltage measurement is good in the range of 1~10 kV, and the accuracy of space charge measurement is not affected. The proposed simultaneous measurement system is simple and easy to achieve technically, which can realize simultaneous measurement of current, potential, and space charges of solid dielectrics. In addition, the combined simultaneous measurement system still has room for further expansion and provides reference and basis for combined simultaneous application of multiple measurement technologies.

Keywords: polarization current; potential; space charge; simultaneous measurement

0 引言

电介质是电力、能源、航空航天等领域重要的基础材料,其介电性能直接关乎上述领域绝缘结构的安全可靠性,因此,电介质的介电响应过程一直以来都是研究者们关注的重点^[1-2]。综合评估电介质的介电性能以及探索介电响应的物理本质,需要采用不同的测量方法,从多视角考察电介质的各项介电特性。例如,对于电介质的电导特性,通常对被测试样施加一定时间的直流电场,测量流经试样的准稳态电导电流,以此获取介质电导与外加电场之间的关系;对于电介质的松弛极化特性,可以采用热刺激电流法、等温松弛电流法、电压衰减和回复电压法等来描述;对于介质的陷阱特性和空间电荷特性,通常可以采用热刺激电流法、表面电位衰减法、电致发光测量和空间电荷测量来表征,其中空间电荷测量主要包括电声脉冲(pulsed electro-acoustic, PEA)法和压力波(pressure wave propagation, PWP)法^[3-4]。

然而,采用单一的测量方法获取介质的介电响应信息具有一定的局限性和片面性。为克服这一不足并实现对电介质介电响应特性较为全面地描述与研究,可以结合不同的测量方法,综合分析测量结果之间的内在关联。Auge等^[5]和Montanari等^[6]通过对聚乙烯基材料的极化退极化电流和空间电荷测量结果的综合分析发现,空间电荷注入的阈值场强与电流特性转变的阈值场强一致,两种测量结果反映同一物理过程,可以提供相互补充、相互验证的介电响应信息。但该研究中的电流与空间电荷是分立的实验结果,二者无法建立起直接、定量的联系。另外,聚合物基电介质在结构上存在近程有序、远程无序的多层次、多级别结构,属于典型的软物质,其极化过程具有历史记忆效应,即极化状态不仅取决于当前的激励条件和环境条件,还与介质所经历的历史极化状态相关^[7-8]。分立的实验并不能保证每次测量过程中的外界条件(激励电压、环境温度波动、压力等)完全一致,这就使得实验结果所对应的物理过程并不完全相同,进而影响对介质介电响应过程的深层次分析与信息挖掘。

同步联合测量方法的出现为上述问题提供了解决方案。国内外学者针对基于PEA方法的空间电荷与电流的联合测量开展了一系列研究,其主要测量思想可以归纳为如下3种,“同区同时”测量、“同区分时”测量和“分区分时”测量。“分区”是指同一被测试样的不同位置,由于被测区域为同一试样的不同位置并且所受电场条件相同,因此认为“分区”位置处的物理过程一致^[9]。“分时”是指对电流和空间电荷在时序上交替测量。其中,“同区同时”是最理想的联合测量方案,相应的联合测量结果不仅对应同一物理过程,并且在时间上完全对应,但

空间电荷测量过程中的脉冲电场会对电流测量产生干扰。Fukuma等^[10-11]与Nagao等^[12]采用了光电转换式电流测量单元,并将电流测量单元放置于高压侧,以此来消除脉冲电场对电流测量的影响,但该方法的电流测量灵敏度为 μA 级,仅适用于临界击穿场强下的测量,无法测量 μA 级以下的微电流,很大程度上限制了该联合测量方法的应用。

Mori等^[13]和Kasuga等^[14]采用玻璃片在空间电荷测量系统中低压侧下电极与压电传感器之间实现电气隔离,通过开关控制下电极与接地电极和电流表的选择性接通,实现极化和短路过程空间电荷与电流的“同区分时”联合测量。由于压电传感器与下电极之间绝缘玻璃片的存在,会导致空间电荷测量过程中声信号进一步衰减,这对压电传感器的灵敏度提出了更高的要求,同时也使空间电荷信号的恢复变得更为复杂。文献[15-16]在传统空间电荷测量系统电极的基础上,设计了“四电极”结构,解决了空间电荷测量与电流测量电极之间的兼容问题,采用“分区分时”的策略实现空间电荷与电流的联合测量,相比于其他联合测量方案,该联合测量方案更易于实现。与“同时”测量相比,“分时”测量也存在一定的局限性,联合测量过程需要依靠开关切换实现空间电荷与电流的交替测量,开关切换速率会影响极化暂态过程空间电荷或电流信息的获取。尽管可以采用数学手段对数据拟合处理,来近似获取完整的响应过程,但对类似于加压极化初期介电行为变化很快的过程,即使通过数学拟合也不能保证得到真实的极化过程。另外,开关切换动作引起电路状态的改变可能也会对电流测量产生一定的影响。

本文提出一种“分区同时”的联合测量方案。通过对测量系统电路结构分析,设计并实现空间电荷与电流的同步联合测量以及开路环节电位衰减与空间电荷的同时、同步联合测量,并通过实测结果验证了联合测量方案的可行性。该联合测量方法简单易行,并克服了现有联合测量方案中的不足,为开展电介质介电行为的深入研究提供了一种多维度、多视角的研究手段。

1 同步联合测量的原理基础

1.1 “分区分时”测量原理

受“分区”测量的启发,本文将“分区”稍作扩大:被测试样是由同一批原料经相同的制备工艺制备而成,筛选出厚度均匀并且相同的一对试样。经过筛选的一对试样可以看作是较大的“同一片试样”的不同区域,如图1所示,将这样的一对试样称为“物理孪生试样”。当处于完全相同的外界环境和电场条件下时,“物理孪生试样”将具有近乎相同的介电响应特性,利用这一特点可以实

现对“物理孪生试样”同时进行空间电荷与电流的联合测量,即实现空间电荷与电流“分区同时”的联合测量。

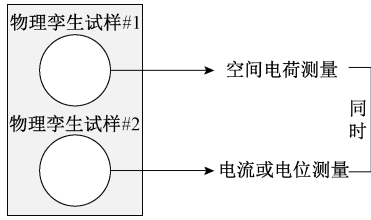


图 1 “物理孪生试样”的“分区同时”测量示意图
Fig. 1 Schematic of partition-simultaneous measurement for physical twin samples

1.2 物理孪生试样的介电响应

为了验证“物理孪生试样”在相同的环境和电场条件下具有一致的介电行为,将制备的碳化硅(SiC)掺杂的低密度聚乙烯(LDPE/SiC)物理孪生试样#1和试样#2置于图2所示的电场激励下,其余外界条件均保持一致,通过电流时域响应特性表征二者所经历的极化物理过程。

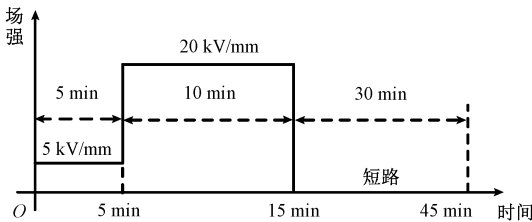


图 2 物理孪生试样的电场历程

Fig. 2 Electric field applied to the physical-twin samples

电流时域响应如图3所示,其中短路电流为取绝对值后的结果。图3表明:试样#1和试样#2在相同的电场激励和外界条件下,电流时域响应特性一致,因此可以认为两试样具有相同的介电响应特性,所经历的极化物理过程相同。

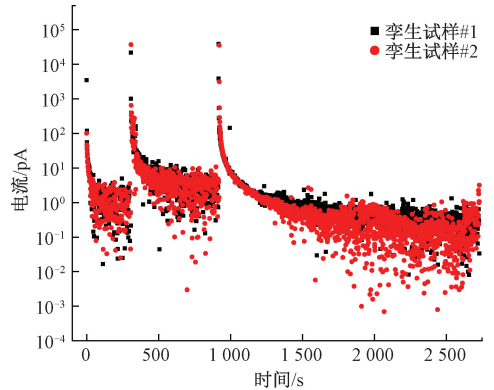


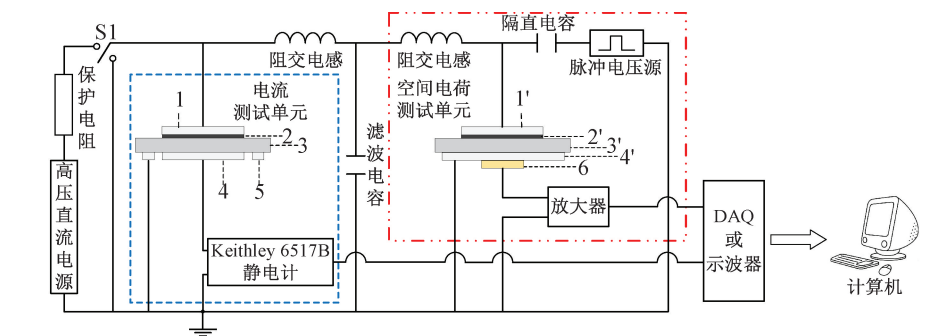
图 3 相同电场历程下物理孪生试样的极化行为
Fig. 3 Polarization behavior of physical-twin samples under the same electric field process

上述结果为空间电荷与电流和电位的同步联合测量提供了基本原理。

2 同步联合测量系统的设计原理

2.1 空间电荷与电流同步联合测量系统

基于对“物理孪生试样”概念与“分区同时”测量方案,设计了同步联合测量系统如图4所示。



1(1'). 高压极 2(2'). 半导体片 3(3'). 物理孪生试样 4(4'). 电流测量极/PEA接地电极 5. 电流保护极 6. PEA压电传感器
图 4 空间电荷与电流联合测量系统原理示意图

Fig. 4 Schematic for the simultaneous measurement system of space charge and current

测量系统主要由空间电荷测量单元与电流测量单元组成,二者电极材料相同,共用同一个高压直流电源,并通过一个T型滤波器耦合在一起,通过上位机实现对测量系统的控制以及实验过程中空间电荷与电流数据的自动记录保存。

图4的空间电荷与电流同步联合测量系统对应的等效电路如图5所示。

结合本文实际搭建的同步联合测量系统,图5中各元器件含义及大小如下。

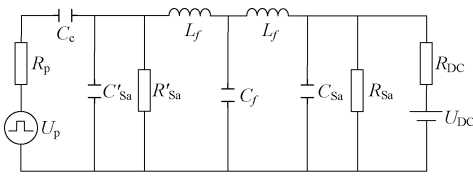


图5 空间电荷与电流联合测量系统等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit for the simultaneous measurement system of space charge and current

- 1) U_p 、 R_p 分别为脉冲源及其内阻,脉冲源 U_p 频率约为 100 MHz, $R_p = 50 \Omega$ 。
- 2) C_c 为隔直电容(耦合电容), $C_c = 1 \text{ nF}$;
- 3) C_{sa} 、 R_{sa} (C'_{sa} 、 R'_{sa}) 为被测试样的等效电容和电阻, C_{sa} (C'_{sa}) 通常不会超过 nF 数量级, R_{sa} (R'_{sa}) 对应的电阻率一般大于 $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ 数量级;本文中使用的被测试样厚度 0.25 mm, 直径 66 mm, 相对介电常数约 2.5, 则 R_{sa} (R'_{sa}) $\approx 7.3 \times 10^{12} \Omega$, C_{sa} (C'_{sa}) $\approx 30.3 \text{ pF}$ 。

4) L_f 、 C_f 构成 T 型滤波器, $L_f \approx 55 \text{ mH}$, $C_f = 1 \text{ nF}$; T 型滤波器的作用一方面是为了隔绝脉冲电压信号对电流测量单元的影响,另一方面使脉冲电压能够作用在空间电荷被测试样上,保证空间电荷测量单元正常工作。

5) U_{DC} 、 R_{DC} 分别为直流高压源和限流电阻, $R_{DC} = 50 \text{ k}\Omega$ 。

综合上述电路参数和等效电路结构,通过分析可知,对于频率约 100 MHz 的脉冲源而言, $Z_{C_c} = Z_{C_f} \approx 1.6 \Omega$, $Z_{C_{sa}} \approx 52 \Omega$, $Z_{L_f} \approx 3 \times 10^7 \Omega$, 脉冲电压最终可以作用在被测试样 C'_{sa} 上,而寄生试样 C_{sa} 则基本不受脉冲电压影响,这就保证了空间电荷测量过程不会对电流测量产生影响。另外, T 型滤波器中的阻交电感直流电阻约 1.5Ω , 在短路过程中可忽略电感对空间电荷测量单元的影响。

2.2 空间电荷与电流、开路电位联合测量系统

在图 4 的电流与空间电荷联合测量系统的基础上,增加开路环节的电位测量单元,设计了如图 6 所示的电流、电位和空间电荷的同步联合测量系统。

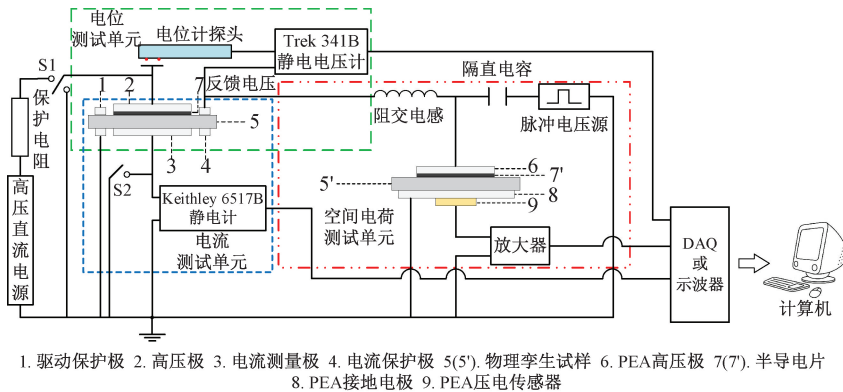


图6 空间电荷与电流、开路电位联合测量系统原理

Fig. 6 Schematic diagram of simultaneous measurement of space charge, current and potential in open circuit

联合测量系统中的电流测量单元与电位测量单元共用一套电极系统,采用带有驱动保护极的电极系统消除开路环节电荷的沿面泄露^[17]。空间电荷测量单元中的高压由驱动保护极通过阻交电感引入,实现在测量过程中“物理孪生试样”所承受的电压始终保持一致。与图 4 的联合测量系统相比,该联合测量系统中的电流测量单元经由电位测量单元实现与空间电荷测量单元之间的隔离,从而阻断了二者在测量过程中的相互干扰。由于开路环节电位衰减非常缓慢,因此,阻交电感对电位测量并无影响。联合测量系统通过开关 S1 实现极化、短路与开路过程的切换,通过开关 S2 实现极化、退极化电流的测量以及开路环节电流表的切出。测量系统的控制以及实验过程中数据的自动记录与保存均由上位机实现。

3 同步联合测量系统的实验验证

3.1 电流测量单元校验

同步联合测量系统处于工作状态时,为了验证测量系统中采用的阻交电感能够有效抑制空间电荷测量单元中的脉冲电场对电流测量单元的影响,保证电流测量结果的准确性,分别测量 LDPE/SiC 试样在施加脉冲电场前后的短路电流,结果如图 7 所示。其中,联合测量系统 #1 和联合测量系统 #2 的电流测量结果分别对应图 4 和 6 的同步联合测量系统。

对比图 7 中短路电流结果可以发现,施加脉冲前,电流测试单元独立工作时存在 0.2 pA 左右的基础直流偏置。施加脉冲后,联合测量系统 #2 的电流结果并无明显变化,一方面由于阻交电感对脉冲的隔绝作用,另

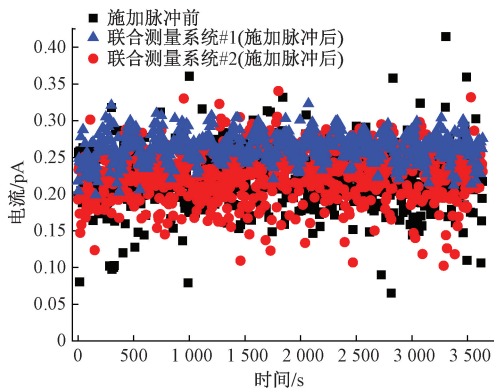


图 7 施加脉冲前后的短路电流

Fig. 7 Current in short circuit before and after pulse voltage source working

一方面由于脉冲并未直接作用在电流测量单元的高压极板上;而联合测量系统#1 直流偏置约为 0.25 pA,并夹杂干扰,但总体大小并不影响电流的测量精度。图 7 结果表明,两种同步联合测量系统均可以满足对电流的测量要求。

3.2 空间电荷测量单元校验

由于联合测量系统是在常规的空间电荷测量系统、电流测量系统以及电位测量系统基础上组合而成,因此空间电荷测量系统自身的测量精度无需校验,只需对比组合前后空间电荷测量结果之间的偏差即可验证联合测量系统空间电荷测量的准确性。将联合测量系统#1 和联合测量系统#2 在正常工作状态下得到的 LDPE/SiC 试样的空间电荷参考波形,与空间电荷测量系统独立测量的参考波形信号对比,结果如图 8 所示。

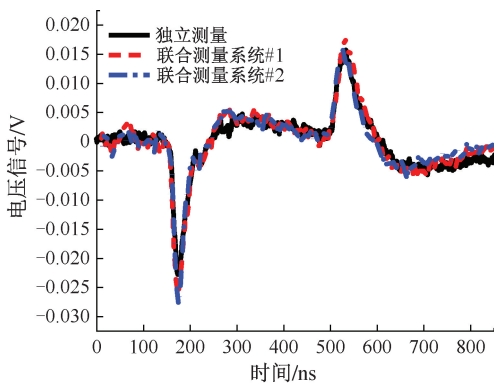


图 8 空间电荷参考测量信号对比

Fig. 8 Reference signals of space charge of the simultaneous measurement systems

由图 8 可以看出,联合测量系统得到的空间电荷参考波形信号与空间电荷测量系统独立测量的参考波形一致,表明同步联合测量系统能够准确测量空间电荷。

3.3 电位测量单元校验

为了验证同步联合测量系统#2 中电位测量单元的测量精度,在同步联合测量系统对 LDPE/SiC 试样施加幅值 1 000~9 000 V 的直流电压,直流高压由 Keithley 2290-10 型程控源输出。电位实时测量结果如图 9 所示,由图 9 可以看出,由联合测量系统测得电位与实际输出一致,系统可以满足开路环节电位的测量。

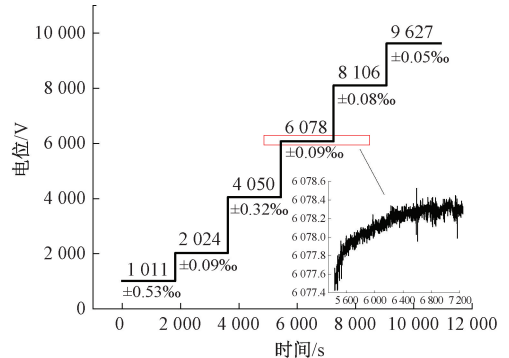


图 9 同步联合测量系统中的电位测量结果

Fig. 9 Potential measured by simultaneous measurement system

3.4 联合测量系统的实际测试结果

以测量回路较复杂的空间电荷与电流、电位同步联合测量系统为例,在电场强度 5 kV/mm 下测量 LDPE/SiC 试样的电流、开路电位与空间电荷,其中极化时间为 1 h,开路时间约为 2 h。联合测量结果分别如图 10~12 所示。

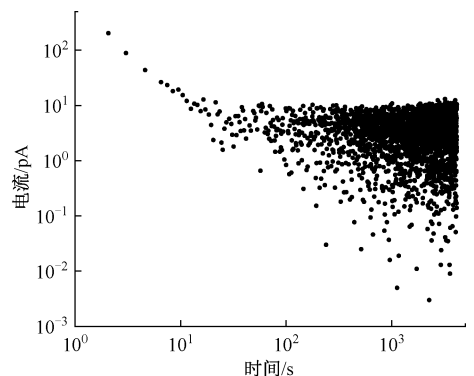


图 10 同步联合测量系统的电流实测结果

Fig. 10 Current measured by the simultaneous measurement system for current

图 10 的电流测量结果与以往研究中单独的电流测量精度基本一致^[18]。从电位测量结果上看,被测试样的开路电位在 2 h 左右的时间内仅仅衰减了约 4%,开路退极化过程缓慢,对应的空间电荷分布在该过程中同样基本保持不变。

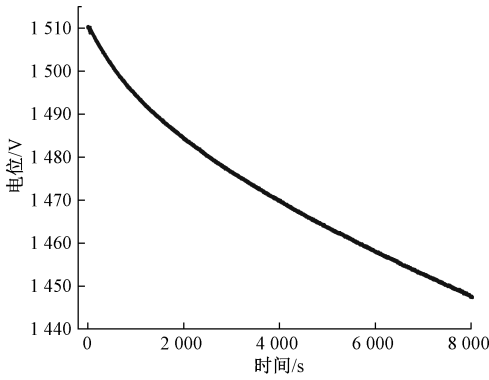


图 11 同步联合测量系统的开路电位实测结果

Fig. 11 Potential in open circuit condition measured by the simultaneous measurement system

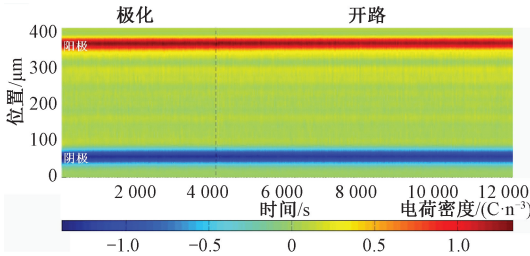


图 12 同步联合测量系统的空间电荷实测结果

Fig. 12 Space charge measured by the simultaneous measurement system for space charge

为了进一步反映试样在开路过程中的空间电荷变化情况,利用式(1)并结合图 12 空间电荷分布结果计算了试样体内的平均净电荷密度,如图 13 所示。

$$q(t) = \frac{1}{L} \int_0^L \rho(x, t) dx \quad (1)$$

式中: q 为体平均净电荷密度; L 为试样厚度; ρ 为试样体内空间电荷密度。

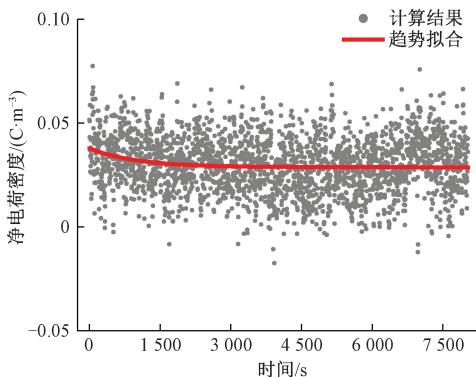


图 13 开路过程试样内平均净电荷密度

Fig. 13 Average net charge density in the sample during open circuit process

图 13 更清晰地体现出开路过程中试样内部的净电荷密度衰减十分缓慢,这正与电位测量结果的变化规律相对应。根据图 13 的试样体内平均净电荷密度可估算介质的载流子视在迁移率,如式(2)所示^[19]:

$$\mu(t) = -\frac{\varepsilon}{q^2(t)} \times \left| \frac{dq(t)}{dt} \right| \quad (2)$$

式中: μ 为视在迁移率; ε 为介质的介电常数。

同时,根据开路条件下的电路方程可知^[20]:

$$\gamma = -\varepsilon \frac{dV(t)}{dt} \times \frac{1}{V(t)} \quad (3)$$

式中: γ 为电导率, $\gamma = q \times \mu$; $V(t)$ 为开路衰减电位。

因此,由开路电位衰减估算载流子视在迁移率为:

$$\mu(t) = -\frac{\varepsilon}{q(t)} \times \frac{dV(t)}{dt} \times \frac{1}{V(t)} \quad (4)$$

上述两种方式估计得到的载流子视在迁移率如图 14 所示。

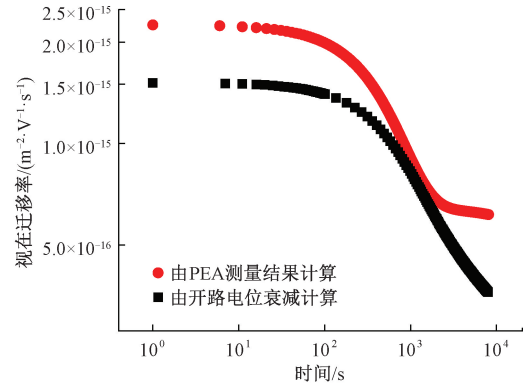


图 14 开路过程试样内平均净电荷密度

Fig. 14 Average net charge density in the sample during open circuit process

图 14 表明,随着开路时间的增加,试样的表观电场在也在逐渐降低,对应的迁移率随之不断减小;并且由联合测量结果中的电位和空间电荷结果计算得到的视在迁移率大小和变化趋势基本一致,这也从侧面反映了联合测量系统得到测量结果具有较好的关联性和有效性。

上述验证性实验结果充分说明了同步联合测量结果可以为研究电介质的介电响应过程提供多维度的分析视角。

4 结 论

本文基于对被测试样“分区”测量和“物理孪生试样”的概念,设计并实现了能够对空间电荷与电流和开路电位同步、同时测量的联合测量系统。同步联合测量系统主要由空间电荷测量单元、电流测量单元和电位测量

单元组成,该联合测量系统是将相互独立的测量单元按照经过设计的电路结构合理组合在一起,具有简单易实现的优势。组合后的测量系统的校验结果表明,联合测量系统中的各部分测量单元均能保持原有的测量精度,能够实现对空间电荷和电流、开路电位的同步同时测量,获得实时关联的空间电荷与电流和开路电位结果,避免了以往空间电荷与电流同步联合测量系统中空间电荷与电流测量结果在时序上不能完全对应的情况。同时,基于本文提出的同步联合测量思路,可以继续引入其他测量单元,进一步扩展空间电荷与电流、电位的同步联合测量系统,为多视角、多维度深入研究电介质的介电特性提供更新、更全面的实验手段。

参考文献

- [1] 程时杰. 先进电工材料进展[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4273-4285.
CHENG SH J. Progress in advanced electrical materials[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4273-4285.
- [2] 马伟明. 关于电工学科前沿技术发展的若干思考[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4627-4636.
MA W M. Thoughts on the development of Frontier technology in electrical engineering[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4627-4636.
- [3] 张颖, 李悠, 王暄. 基于太赫兹波的高分辨率空间电荷测试方法及系统[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 9-15.
ZHANG Y, LI Y, WANG X. High resolution space charge measurement method and system based on THz wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 9-15.
- [4] 郭佳, 雷勇, 周凯, 等. 用于 HVDC 电缆主绝缘料选型的空间电荷检测系统[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 213-219.
GUO J, LEI Y, ZHOU K, et al. Space charge detection system of the main insulation materials selection for HVDC cable [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 213-219.
- [5] AUGE J L, LAURENT C, FABIANI D, et al. Investigating dc polyethylene threshold by space charge. Current and electroluminescence measurements [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(6): 797-803.
- [6] MONTANARI G, MAZZANTI G, PALMIERI F, et al. Space-charge trapping and conduction in LDPE, HDPE and XLPE[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34: 2902.
- [7] 雷清泉, 李盛涛. 关于工程电介质中几个经常涉及的问题与思考 [J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2473-2480.
LEI Q Q, LI SH T. Several important issues and thinking about engineering dielectrics [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2473-2480.
- [8] 李景德. 电介质理论[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
LI J D. The dielectric theory [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [9] ALISON J M. A high field pulsed electro-acoustic apparatus for space charge and external circuit current measurement within solid insulators [J]. Measurement Science and Technology, 1998, 9(10): 1737-1750.
- [10] FUKUMA M, NAGAO M, KOSAKI M, et al. Simultaneous measurements of space charge distribution and external circuit current up to electrical breakdown in LDPE film [C]. 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1998: 144-147.
- [11] FUKUMA M, FUKUNAGA K, MAENO T. Space charge and external circuit current measurements in LDPE films during breakdown tests [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 35(1): 14-18.
- [12] NAGAO M, TAKAMURA N, KURIMOTO M, et al. Simultaneous measurement of space charge and conduction current on LDPE/MgO nanocomposite [C]. 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2012: 311-314.
- [13] MORI T, MIYAKE H, TANAKA Y, et al. Simultaneous measurements of space charge distribution and external current [C]. Proceedings of 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2011: 370-373.
- [14] KASUGA H, FUJITOMI T, MIYAKE H, et al. Simultaneous measurement of space charge distribution and external circuit current in XLPE under HVDC at high temperature [C]. 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), 2016: 227-230.
- [15] WANG Y L, WU J D, YIN Y. Relationship between

space charge behavior and trap energy density distribution: A simultaneous measurement [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3): 738-745.

- [16] 王亚林, 吴建东, 易姝慧, 等. 固体介质空间电荷与松弛电流的同步测量及应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 931-939.

WANG Y L, WU J D, YI SH H, et al. Simultaneous measurement and application of space charge and relaxation current for solid dielectric[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 931-939.

- [17] SUN Y L, LI Z H, HAN Y S, et al. An effective method to avoid charge leakage along the surface in voltage response measurement [J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(5): 055104.

- [18] SUN Y L, LI Z H, HAN Y S, et al. Quantitative investigation of the nonlinear polarization in Epoxy/SiC nanocomposite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(1): 66-73.

- [19] MONTANARI G C, MORSHUIS P H F. Space charge phenomenology in polymeric insulating materials [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(4): 754-767.

- [20] COELHO R, ALADENIZE B, CORNET N, et al. On the transient potential in insulators [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(5): 760-770.

作者简介



孙云龙, 2015 年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2021 年于哈尔滨理工大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学讲师, 主要研究方向为非线性绝缘介质介电机理与相关测试技术。

E-mail: ylsun@hrbust.edu.cn

Sun Yunlong received his B.Sc. degree and Ph.D. degree from Harbin University of Science and Technology in 2015 and 2021, respectively. Now he is a lecturer in Harbin University of Science and Technology. His main research interests include nonlinear theory and relative measurement technology.



韩永森, 2004 年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2011 年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 2018 年于西安交通大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学副教授, 主要研究方向为非线性介质介电特性及机理。

E-mail: hys2006@hrbust.edu.cn

Han Yongsen received his B.Sc. degree and Ph.D. degree from Harbin University of Science and Technology in 2004 and 2011, respectively, and Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2018. Now he is an associated professor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include dielectric properties and mechanism of nonlinear dielectrics.



李忠华(通信作者), 1983 年于哈尔滨电工学院获得学士学位, 1988 年于哈尔滨电工学院获得硕士学位, 1997 年于西安交通大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性绝缘介质介电机理与相关测试技术。

E-mail: drzhli@hrbust.edu.cn

Li Zhonghua (Corresponding author) received his B.Sc. degree and M.Sc. degree from Harbin Institute of Electrical Engineering in 1983 and 1988, and Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1997, respectively. Now, he is a professor and Ph.D. supervisor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include nonlinear dielectric theory and relative measurement technology.