

温度梯度场对电声脉冲法空间电荷测量波形的影响*

陈曦 王霞[†] 吴镔 彭宗仁 成永红

(西安交通大学, 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

(2009 年 12 月 24 日收到; 2010 年 1 月 18 日收到修改稿)

电力设备运行中的温升现象严重影响绝缘的使用寿命, 因此高温下的空间电荷测量引起了许多学者的关注. 但温度升高时, 聚合物材料的声阻抗、Young 模量、密度、声波在其中传播的速度、衰减特性均发生变化, 因此无法准确测量出介质中的空间电荷特性. 而对于温度梯度场下的绝缘介质(如电缆发热场)的空间电荷测量, 温度的梯度分布对介质的声阻抗、弹性模量、密度、声速及声波衰减的影响将更为复杂. 本文基于电声脉冲测量方法中声波的传播特性和温度对聚乙烯材料特性的影响, 分析了温度梯度场对空间电荷测量结果的影响并进行了波形恢复.

关键词: 温度梯度, 聚乙烯, 空间电荷, 校正

PACC: 7250, 7215J, 7220, 7750

1. 引 言

近 20 年来, 非破坏性固体介质中空间电荷测量是国际绝缘领域的一个前沿课题, 引起了全世界广大学者的关注. 研究表明, 固体中的空间电荷不仅畸变电场, 降低绝缘击穿电场强度^[1,2], 而且是引起聚合物绝缘电老化的主要因素^[3-5]. 目前, 电声脉冲法(PEA)已经广泛用于固体电介质空间电荷分布的测量^[6], 其基本测量原理是检测脉冲电压作用下由样品中的空间电荷产生的声波, 通过检测声波的时间函数求得空间电荷沿试样厚度的分布. 由于绝大多数电介质存在介质损耗与色散, 声波在其中传播时, 幅值衰减和传输速度都与声波的频率有关, 当含有不同频率分量的声波通过电介质后, 必然导致波形的畸变^[7]. 目前, 国内外对由介质损耗、色散引起的空间电荷波形恢复方面已取得了成功^[8,9].

众所周知, 电力设备运行中的温升现象严重影响绝缘的使用寿命, 因此高温下的空间电荷测量也引起了许多学者的关注^[10,11]. 但温度升高时, 不仅聚合物材料的声阻抗、Young 模量、密度、声波在其中传播的速度、衰减特性均发生变化, 而且 PEA 测量系统的压电传感器的压电特性也会随之改变, 因此无法真实反映出介质中的空间电荷特性. 而对于温度梯度场下的绝缘介质(如电缆发热场)的空间

电荷测量, 温度的梯度分布对介质的声阻抗、弹性模量、密度、声速及声波衰减的影响将更为复杂. 目前, 温度效应对 PEA 空间电荷测量结果影响的研究国内外仍属空白.

本文基于已有的温度梯度, 用 PEA 空间电荷测量设备, 在不同温度差(试样两面, $\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C} - 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)下测量了聚乙烯试样中空间电荷分布. 根据 PEA 测量方法中声波的传播特性和温度对聚乙烯材料特性的影响, 分析了温度梯度场对空间电荷测量结果的影响, 并进行了波形恢复. 本文的波形恢复方法也可用于指导同一温度(高温)场下波形的恢复, 但不包括由于材料本身的损耗和色散引起波形衰减的恢复, 这方面的文章见文献[8,9].

2. 温度对聚乙烯材料特性的影响

温度升高时, 聚乙烯的密度 ρ , Young 模量 E , 声阻抗 Z 及传播的声速 v 等均会发生变化. 已有研究表明, 温度从 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 聚乙烯的 Young 模量从 $3 \times 10^9\text{ Pa}$ 降到 $1.5 \times 10^9\text{ Pa}$ ^[12]. 在温度 $20 - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 聚乙烯中传播的声速变化满足下列关系:

$$v_{\text{LDPE}} = 2272.5 - 9.5T, \quad (1)$$

由此得出聚乙烯声速与温度的变化关系如图 1 所

* 国家自然科学基金(批准号:50907050)和高等学校科技创新工程重大项目培育基金(批准号:707053)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: wxflying@mail.xjtu.edu.cn

示^[13]. 另外, 聚乙烯密度随温度的变化关系如图 2 所示^[14,15].

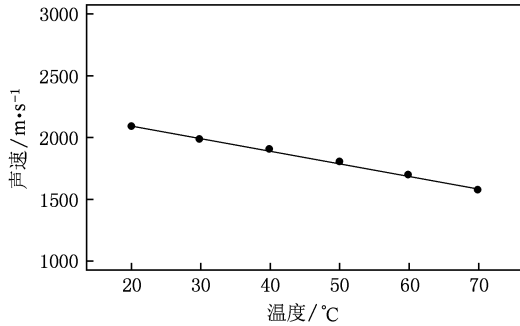


图 1 聚乙烯中声速对温度的依赖性

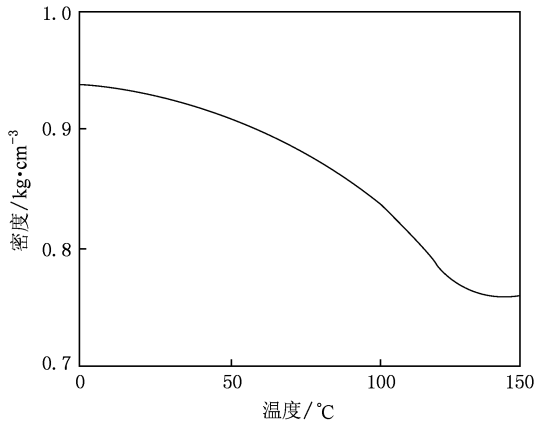


图 2 聚乙烯密度对温度的依赖性

已知聚乙烯的声阻抗 $Z = \rho \cdot v$, 声速 $v = \sqrt{E/\rho}$, 因此温度的变化导致聚乙烯材料密度、Young 模量的变化必然导致传播声速和声阻抗的变化. 另外, 温度升高时, 质点间碰撞几率增大, 声波在介质中传播时与热声子(即晶格振动)、电子、点缺陷、位错等相互作用增强, 使得介质的衰减和色散加剧, 引起声衰减^[16].

3. PEA 测量系统中声波传播特性

图 3 所示为 PEA 测量基本原理图. PEA 空间电荷测量原理^[7]表明: 当纳秒级脉冲电压作用到试样上后, 由于空间电荷的存在使得试样体内感应出静电力. 这个力反过来作用于电荷使其发生微小位移, 这种位移会产生一个拉伸/压缩波, 通过试样和电极到达压电传感器, 声信号转换为电信号, 经放大器放大到最后的示波器显示及计算机存储.

由图 3 可见, 任一时刻试样内部产生的力的大小为电荷量与脉冲电场的乘积, 其表达式为

$$f(t) = \sigma e_p(t), \quad (2)$$

其中 σ 为电荷量; $e_p(t)$ 为脉冲电场. 假设在力的作用下试样产生的微小形变量为

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} C(\tau) f(t - \tau) v d\tau, \quad (3)$$

其中, C 为 Young 模量的倒数为

$$C = 1/\rho v^2, \quad (4)$$

则产生的声波(压缩与膨胀波)为

$$p(t) = kZu = kZ \frac{\partial \xi}{\partial t}, \quad (5)$$

其中, u 为粒子速率, k 为声阻抗匹配系数. 已知 $Z = \rho v$, 则:

$$\begin{aligned} p(t) &= k\rho v \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} C(\tau) f(t - \tau) v d\tau \right] \\ &= k\rho v^2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial C(\tau)}{\partial t} f(t - \tau) d\tau \\ &= k \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{+\infty} C \frac{v}{d} \delta(\tau) f(t - \tau) d\tau \\ &= k \frac{v}{d} f(t) \\ &= k \frac{v}{d} \sigma e_p(t), \end{aligned} \quad (6)$$

其中, d 为试样厚度, v 为试样中传播的声速. 由(6)式可见, 温度升高时介质密度、声阻抗、Young 模量的变化并不影响试样中声波强度. 也就是说, 同一直流、脉冲电场下, 声波的幅值只与声速、试样的测量厚度密切相关.

4. 温度梯度场空间电荷波形的校正

温度梯度场下, 试样两面温度不等. 本实验室 PEA 测试系统中最大温差 $\Delta T = 40^\circ\text{C}$, 下电极温度固定 20°C , 上电极(半导体层与试样接触面)温度从 $20\text{--}60^\circ\text{C}$ 变化. 相关的 PEA 测量系统介绍参见文献^[7].

本文已指出: 温度升高时, 声波在聚乙烯试样内传播的速度 v 降低. 因此, 对同一厚度试样, 声波传过试样所需时间增加. 图 4 所示为上下电极不同温度差($\Delta T = 0\text{--}40^\circ\text{C}$)下聚乙烯试样在 10 kV/mm 低场强下的空间电荷分布. 为避免电极注入电荷对界面电荷峰值的影响, 采集刚加上电压时刻的空间电荷波形.

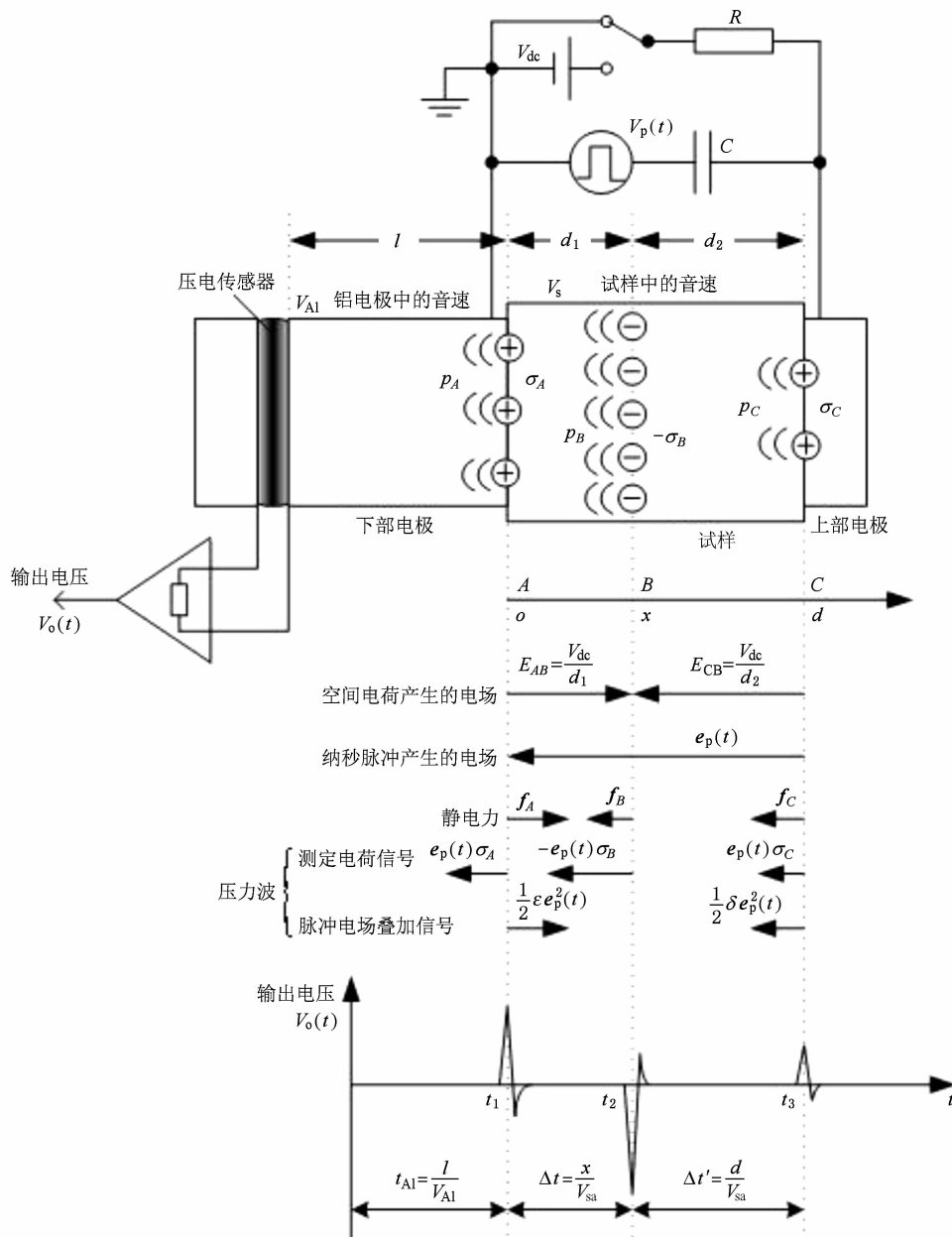


图 3 PEA 法测量原理

由图 4 可见,随着上电极(阴极)温度的升高,声速的降低使得声波传过试样的时间增加,阴极处界面电荷逐渐向右侧移动.同时发现阴极处界面电荷随温度的升高也逐渐降低.

为研究温度梯度场下声速的变化特性,根据图 4 做出温度梯度场下声波在聚乙烯中传输时间与温度差的关系图,如图 5 中黑点虚线所示.由声速与温度变化(1)式,可知温度梯度场下声速也将呈梯度分布,即从低温到高温侧声速逐渐降低.假设试样内某处 Δz 温度为 T_0 ,则相应声速为 v_{T_0} . 声波传过此

处所需要的时间为 $\Delta z/v_{T_0}$,对整个试样积分,可得出声波传过温度梯度场试样所需要的时间,见图 5 中黑色实线所示.由图 5 可见,温度梯度场下声波在试样中的传播时间与上下电极温度差近似成线性关系.同时测量结果与计算结果相符合.

为进一步分析温度梯度场下声波的衰减特性,根据图 4 做出温度梯度场下阴极界面电荷的衰减率与温度差关系图,如图 6 中黑点虚线所示.由 PEA 测量原理中声波强度(6)式可知,声波幅值只与声速、试样测量厚度密切相关,则试样高温侧(阴

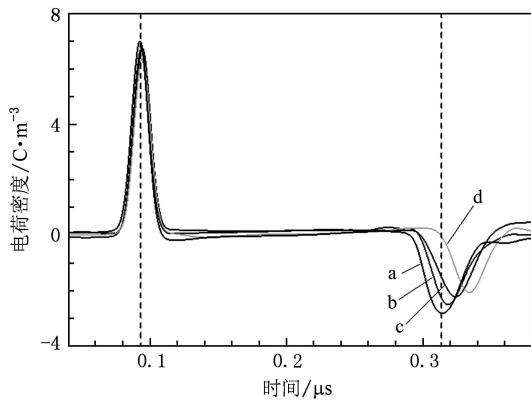


图4 不同温差下聚乙烯试样在 10 kV/mm 下的空间电荷特性 (图中 4 条曲线的 ΔT 分别为 a, 0 °C; b, 10 °C; c, 20 °C; d, 40 °C)

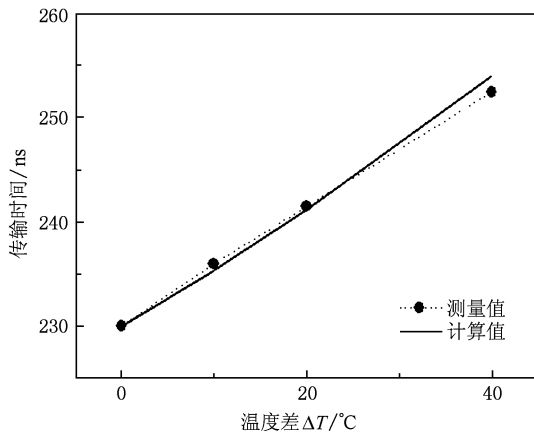


图5 声波在聚乙烯中传播时间与温度差的关系

极) 温度为 T_0 时的界面电荷与常温时界面电荷的比值为: $\frac{v_{T_0}/d_{T_0}}{v_{20^\circ\text{C}}/d_{20^\circ\text{C}}}$. 上式中 $v_{T_0}, v_{20^\circ\text{C}}$ 分别为高温侧电极温度为 $T_0, 20^\circ\text{C}$ 时的声速; $d_{T_0}, d_{20^\circ\text{C}}$ 分别为高温侧电极温度为 $T_0, 20^\circ\text{C}$ 时测得的试样厚度. 由此得出因声速变化引起高温侧界面电荷的衰减如图 6 中黑色实线所示.

由图 6 可见, 温度梯度场下, 阴极处 (高温侧) 界面电荷的衰减与上下电极温度差近似成线性关系, 同时测量结果与计算结果相吻合. 此结果表明, 聚乙烯材料在温度 20—60 °C 的温度变化范围内, 可忽略由温度改变引起的介质损耗和色散变化对声波衰减的影响. 因此, 在后续的波形恢复中, 只需考虑声速的变化对电荷密度幅值、测量系统分辨率和

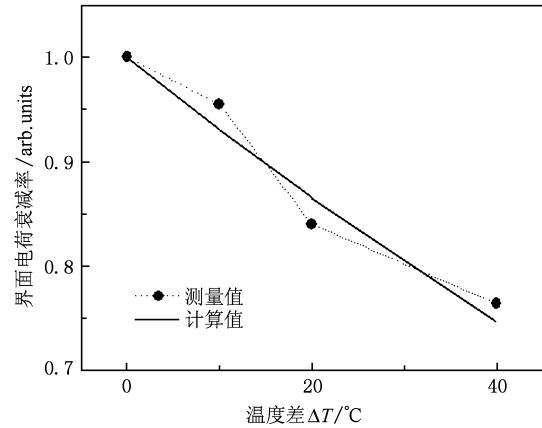


图6 界面电荷 (高温侧) 衰减与温度差的关系

试样厚度的影响, 并进行了波形校正.

4.1. 纵轴电荷密度校正

为恢复温度梯度场下因声速梯度变化引起的高温侧电荷密度的衰减, 根据 (6) 式, 首先假设室温下声速不变时试样体内任一位置产生的声波为:

$$p_0(t) = k \frac{v_0}{d_0} \sigma e_p(t), \quad (7)$$

式中, v_0 为聚乙烯在室温时传播的声速, 约为 2080 m/s; d_0 为室温时试样测量厚度. 其次假设温度梯度场 ΔT 下声速变化时试样体内任一位置测量的声波为:

$$p_m(t) = k \frac{v_{\Delta T}}{d_{\Delta T}} \sigma e_p(t), \quad (8)$$

(7) 式是室温下未衰减的声波, (8) 式是温差下衰减的声波. 结合 (7) 和 (8) 式可得

$$p_0(t) = p_m(t) \frac{v_0}{v_{\Delta T}} \frac{d_{\Delta T}}{d_0}. \quad (9)$$

本文温度梯度用空间电荷测量系统中, 下电极 (测量电极) 为恒定温度 20 °C, 故 PVDF 压电传感器压电性能保持不变. 因此声电转换后经放大到示波器直至计算机的信号处理, 最终温度梯度场下电荷密度的校正方法为:

$$\rho_0(t) = \rho_m(t) \frac{v_0}{v_{\Delta T}} \frac{d_{\Delta T}}{d_0}. \quad (10)$$

4.2. 横轴时间位置校正

由前述分析表明, 由于高温下声速的降低使得声波在试样内的传播时间增长, 见图 4 所示. 在示波器同一采样频率 f_s 下, 测量系统的分辨率为:

$$\Delta z = v/f_s, \quad (11)$$

由(11)式可见,高温下声速的降低有利于提高测量系统的分辨率 Δz . 但在温度梯度场下,低温侧到高温侧声速梯度降低导致测量分辨率 Δz 的梯度增加,结果使得高温侧的界面电荷波形展宽. 温度梯度场 ΔT 下声速变化时横轴时间位置真实分辨率为:

$$\Delta z' = v_{\Delta T}/f_s, \quad (12)$$

因此,通过对温度梯度场下试样体内每一点的温度计算相应的声速,再由(12)式准确标定时间轴.

4.3. 试样体内的温度梯度分布

温度梯度场下,假设下电极(接近压电传感器处)为低温侧,固定为常温 20°C , 设为坐标零点;上电极(高压电极)为高温侧,设为沿聚乙烯试样纵向 x 轴正方向. 试样体内温度分布为

$$T = 20 + \frac{T_h - 20}{d}x, \quad (0 < x < d), \quad (13)$$

(13)式中 T_h 为高温侧电极温度,测量过程中为已知值, d 为试样厚度.

4.4. 电荷波形校正结果

结合(1),(10),(12)和(13)式,对图4中不同温差下空间电荷测量结果进行校正,如图7所示. 由图7可见,经过对电荷密度幅值、时间轴分辨率的校正,不同温度梯度场下空间电荷测量结果有较好的一致性,其中虚线为恢复前的波形,实线为恢复后的波形.

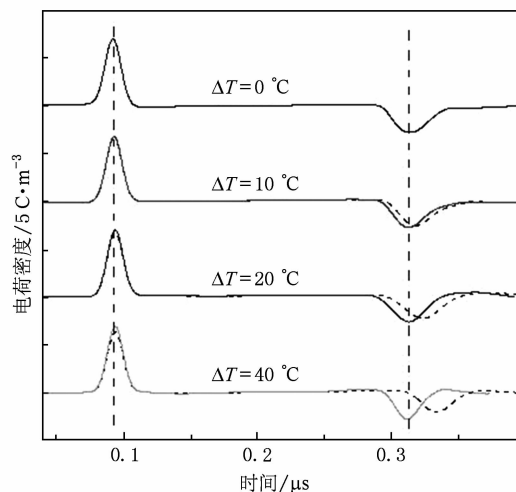


图7 温度梯度场下电荷密度的恢复

5. 结 论

本文主要研究了温度梯度场对 PEA 空间电荷测量波形的影响及其恢复方法,得出如下结论:1) 温度升高时聚乙烯密度、Young 模量、声阻抗的变化,并不影响空间电荷的测量结果;2) 空间电荷测量信号的幅值与聚乙烯中传播的声速大小成正比;3) 温度梯度场导致声速的梯度场,进而致空间电荷测量信号的梯度衰减以及试样高温侧界面电荷的展宽;4) 引进声速的梯度场能有效恢复温度梯度场下空间电荷测量信号的幅值和试样厚度.

[1] Yang Q, An Z L, Zheng F H, Zhang Y W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3834 (in Chinese) [杨 强、安振连、郑飞虎、张治文 2008 物理学报 **57** 3834]
 [2] An Z L, Yang Q, Zheng F H, Zhang Y W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5502 (in Chinese) [安振连、杨 强、郑飞虎、张治文 2007 物理学报 **56** 5502]
 [3] Chong Y L, Chen G, Miyake H, Matsui K, Tanaka Y, Takada T 2006 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39** 1658
 [4] Liu F D, Yang B T, Tu D M, Liu Y N 1992 *Acta Phys. Sin.* **41** 333 (in Chinese) [刘付德、杨百屯、屠德民、刘耀南 1992 物理学报 **41** 333]
 [5] Yang Q, An Z L, Zheng F H, Zhang Y W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8529 (in Chinese) [杨 强、安振连、郑飞虎、张治文 2009 物理学报 **58** 8529]
 [6] Fukunage K 2004 *IEEE Electr. Insul. Mag.* **20** 18

[7] 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]
 [8] Maeno T 1999 *Trans. IEE Jpn.* **119-A** 1114
 [9] Wu C Y, Zhong L S, Wang X, Tu D M 2005 *Proc. CSEE* **25** 137 (in Chinese) [吴超一、钟力生、王 霞、屠德民 2005 中国电机工程学报 **25** 137]
 [10] Fabiani D, Montanari G C, Laurent C, Teyssedre G, Morshuis F H F, Bodega R, Dissado L A 2008 *IEEE Electr. Insul. Mag.* **24** 5
 [11] Fu M, Dissado L A, Chen G, Fothergill J C 2008 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **10** 851
 [12] Bambery K R, Fleming R J 1997 *J. Therm. Anal.* **50** 19
 [13] Zhang C, Kaneko K, Mizutani T 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 3839

- [14] Nishimura H, Inoue F, Nakashiba A 1994 *Polym. Engng. Sci.* **34** 1529
Hideo N 1993 *Polym. Engng. Sci.* **33** 1146
- [15] Akio N, Hiroyuki N, Fumio I, Tomokazu N, Katsuhiko H,
[16] Fan T B, Zhang D, Zhang Z, Ma Y, Gong X F 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3372

Effect of temperature gradient on space charge waveform in pulsed electroacoustic method^{*}

Chen Xi Wang Xia[†] Wu Kai Peng Zong-Ren Cheng Yong-Hong

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

(Received 24 December 2009; revised manuscript received 18 January 2010)

Abstract

Temperature rise of power equipment in service seriously affect the lifetime of insulation, so many researchers have focused on space charge measurements at high temperature. But the changes of polymeric properties (e. g. sound impedance, Young's modulus, density, velocity of sound wave, decay characteristic etc.) at high temperature make measurement of space charge profiles in polymer inaccurate. What is more, the changes of polymeric properties are more complex under temperature gradient. In this paper, based on the propagation characteristic of sound wave in pulsed electroacoustic method and temperature dependence of polyethylene properties, the effect of temperature gradient on space charge measurement is analyzed and the space charge waveform is recovered.

Keywords: temperature gradient, polyethylene, space charge, recovery

PACC: 7250, 7215J, 7220, 7750

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50907050), the Cultivation Fund of the Key Scientific and Technical Innovation Project, Ministry of Education of China (Grant No. 707053).

[†] Corresponding author. E-mail: wxflying@mail.xjtu.edu.cn