

# 极性反转时间对聚乙烯中空间电荷及瞬态电场的影响

陈曦, 王霞, 吴锴, 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, 710049, 西安)

**摘要:** 基于电声脉冲空间电荷测量方法, 测量了聚乙烯片状试样在常温( $\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )及温度梯度( $\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下、 $-50\text{ kV/mm}$  场强直流预压 2 h 后, 分别以不同反转时间(20 s, 30 s, 60 s)反转到  $50\text{ kV/mm}$  场强, 再加压 2 h 过程中的空间电荷变化, 以及极性反转过程中最大瞬态电场的变化。结果表明: 常温下电压极性反转越快, 最大瞬态电场越大; 温度梯度下, 电压极性反转越快, 最大瞬态电场越小; 达到最大瞬态电场的时间均随着极性反转时间的增加而逐渐减少。

**关键词:** 温度梯度; 极性反转; 聚乙烯; 空间电荷; 瞬态电场

**中图分类号:** TM215.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 0253-987X(2010)10-0105-05

## Effect of Voltage Reverse Time on Space Charge and Transient Field in Polyethylene

CHEN Xi, WANG Xia, WU Kai, PENG Zongren, CHENG Yonghong

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

**Abstract:** Adopting pulsed electro-acoustic method space charge measurement method, space charge profiles and maximal transient fields of polyethylene (PE) films were measured at room temperature ( $\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and under temperature gradient ( $\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), when DC stress of  $-50\text{ kV/mm}$  was applied for 2 hours and then voltage polarity reverses to stress of  $50\text{ kV/mm}$  with the time of 20 s, 30 s and 60 s respectively. The test results show that the faster the voltage reversal at room temperature the higher the maximal transient field. However under temperature gradient ( $\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), the faster the voltage reversal the lower the maximal transient field, and the time reaching the maximal transient field decreases with the increase of voltage reverse time gradually.

**Keywords:** temperature gradient; voltage reversal; polyethylene; space charge; transient field

直流高压输电具有电能损失小、对生态环境好、适用于远距离传输及大电网间互联等优点, 已成为高压输电中的重要课题。但是, 直流高压电缆绝缘中容易积累空间电荷, 大大影响其使用寿命, 尤其在电缆连续运行后断电或电压极性反转运行时, 由于同极性空间电荷自身的反电场导致绝缘击穿<sup>[1]</sup>。另外, 电缆负荷运行时导体发热, 导致电缆绝缘层由内向外温度不等, 呈梯度分布, 而绝缘电阻的负温度特性导致了稳态场强的梯度分布, 同时温度梯度下空间电荷注入、迁移与聚集的加剧, 最终导致电缆绝缘低温侧局部场强的严重畸变。

目前, 国内外许多学者已开展了温度梯度场下直流电缆绝缘中空间电荷效应的研究工作<sup>[2-4]</sup>, 结果均表明, 温度梯度场加剧了绝缘低温侧场强的畸变。对于电压极性反转下的空间电荷效应, 文献[3]指出电压极性反转前、后(反转时间 90 s)电荷成镜像分

布<sup>[3]</sup>,但未提到极性反转过程中电荷分布改变对瞬态电场的影响。

已有研究表明,直流电缆在极性反转过程中会使电缆局部场强增加 50%~70%<sup>[5]</sup>,但不同极性反转时间对电缆绝缘瞬态电场的影响鲜有报道,温度梯度场下电压极性反转时间对最大瞬态场强影响的研究在国内外仍属空白。因此,研究极性反转时间对温度梯度场下聚乙烯中空间电荷及瞬态电场的影响,对新型直流电缆绝缘设计具有较高的理论和应用价值。

本文利用自行研制的可用于温度梯度测量的空间电荷测量设备,测量了聚乙烯片状试样在常温(温差  $\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )及温度梯度(温差  $\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下、50 kV/mm 场强直流预压 2 h 后,分别以不同反转时间(20 s,30 s,60 s)进行极性反转过程中的空间电荷特性及最大瞬态电场的变化,以此来研究极性反转时间对温度梯度场下聚乙烯材料中电场畸变的影响。

## 1 试验方法

### 1.1 试样制备

本文所使用的低密度聚乙烯(LDPE)原料是扬子石化-巴斯夫有限责任公司出产的 2220H 低密度聚乙烯,密度是  $0.919\text{ g/cm}^3$ ,把试样原材料颗粒在  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  的平板硫化机上热压制成片状试样,试样尺寸为  $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 。

### 1.2 温度梯度下的空间电荷测量

本文采用电声脉冲(PEA)空间电荷测量方法,其测量装置系统<sup>[6]</sup>如图 1 所示,主要包括以下几个部分:

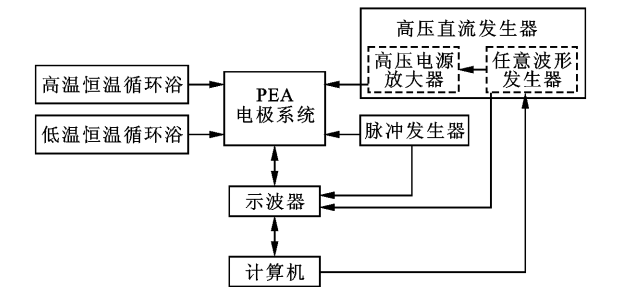


图 1 空间电荷测量系统框图

- (1)PEA 电极系统;
- (2)高/低温恒温循环浴,温度范围为  $0\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,用来实现试样上、下表面的不同温度,进而形成不同的温度梯度场;
- (3)高压直流发生器,由 RIGOL 任意波形发生器(100 MHz)和高压电源放大器(TREK 公司 30/

- 20 A)组成,用以精确实现不同的电压反转时间;
- (4)脉冲发生器的脉冲宽度为  $12\text{ ns}$ ,脉冲幅值为  $1\text{ kV}$ ;
- (5)示波器采用美国力科公司的 Wave Runner 104MXi 系列;
- (6)计算机用来与示波器通讯并保存采集信号。

### 1.3 电压极性反转过程

- (1)试样施加负直流电压  $-U_0$  并预压 2 h。
- (2)由任意波形发生器和高压放大器控制反转时间(20 s, 30 s, 60 s),由此来控制极性反转过程。
- (3)反转后试样施加正直流电压  $U_0$ ,作用 2 h。

电压极性反转与加压过程如图 2 所示。本试验中施加电压为  $25\text{ kV}$ ,已知试样厚度为  $0.5\text{ mm}$ ,计算得相应场强为  $50\text{ kV/mm}$ 。加压过程中每 15 min 采集一次测量波形,极性反转前后 1 min 及极性反转过程中每 1 s 采集一次测量波形。

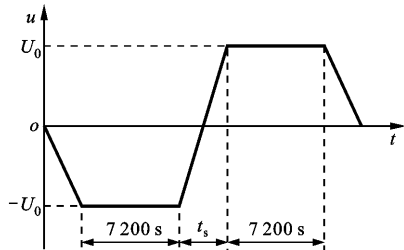


图 2 极性反转与加压过程

## 2 试验结果

图 3 为常温( $\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下,电压极性反转(反转时间  $t_s$  分别为 20 s,30 s,60 s)过程中的空间电荷分布图。由图 3 可见,电压极性反转越慢,铝电极附近的正电荷量就越少(图中椭圆虚线框所示),且极性反转前后电荷分布呈镜像关系。

图 4 为温差  $\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  下,电压极性反转( $t_s$  分别为 20 s,30 s,60 s)过程中的空间电荷分布图。由图 4 可见,温度梯度场下极性反转后铝电极附近残余的正电荷量远多于常温下(图中长方框虚线所示)。与常温下相同,电压极性反转越慢,铝电极附近残余的正电荷量就越少,同时温度梯度场下极性反转前后电荷分布也呈镜像关系。

为了解极性反转过程中最大场强的变化,根据上述空间电荷测量结果计算相应场强,得出在极性反转过程中最大场强的变化。在此,定义试样内的场强畸变因子  $F$ ,表示极性反转过程中最大畸变场强相对于外施电场的增加或减少比率<sup>[7]</sup>

$$F = \frac{E_{\max} - U_0 d^{-1}}{U_0 d^{-1}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $E_{\max}$  为试样中出现的最大电场强度; $U_0$  为外施直流电压; $d$  为试样厚度.

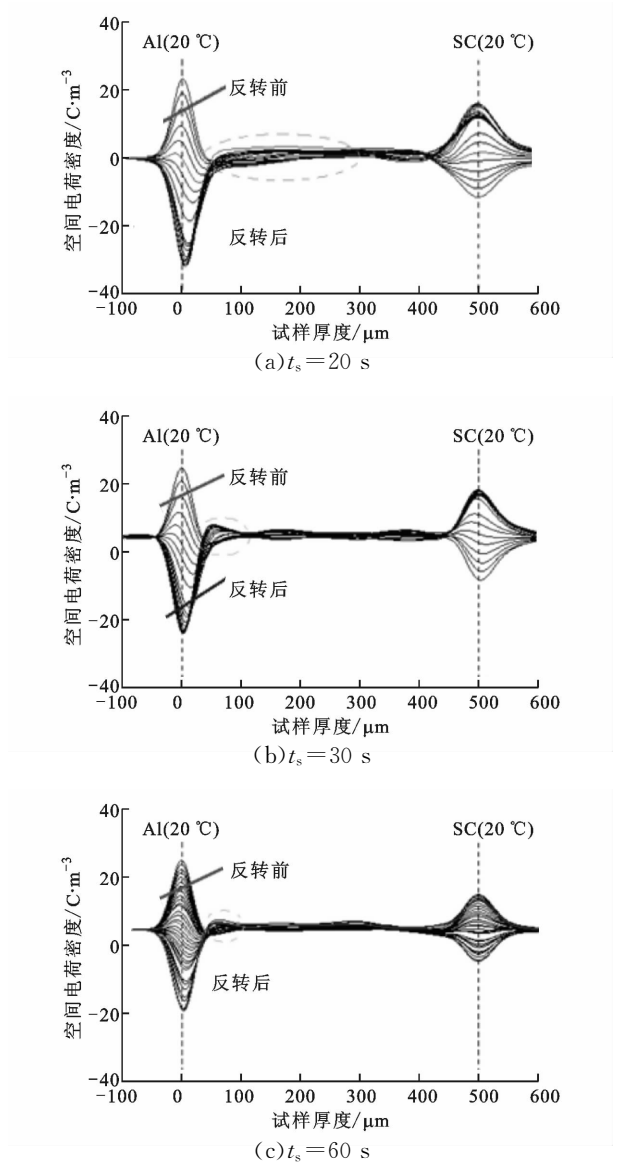


图 3  $\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时不同反转时间下的空间电荷分布图

$F$  越大,表示试样内场强畸变越严重,反之同理. 最大瞬态场强畸变因子、极性反转时间及最大瞬态场强出现时间的关系如表 1 所示.

| 表 1 电压极性反转时间对最大瞬态电场的影响      |                |        |                        |
|-----------------------------|----------------|--------|------------------------|
| $\Delta T/^{\circ}\text{C}$ | $t_s/\text{s}$ | $F/\%$ | 达到最大瞬态电场时间/ $\text{s}$ |
| 0(常温)                       | 20             | 49.57  | 17                     |
|                             | 30             | 23.50  | 8                      |
|                             | 60             | 7.40   | 7                      |
| 40(温梯)                      | 20             | 41.25  | 43                     |
|                             | 30             | 54.50  | 33                     |
|                             | 60             | 59.84  | 23                     |

由表 1 可见,相比常温条件,温度梯度场下试样内出现了最大瞬态场强. 常温下电压极性反转越快,最大瞬态电场越大,温度梯度下电压极性反转越快,

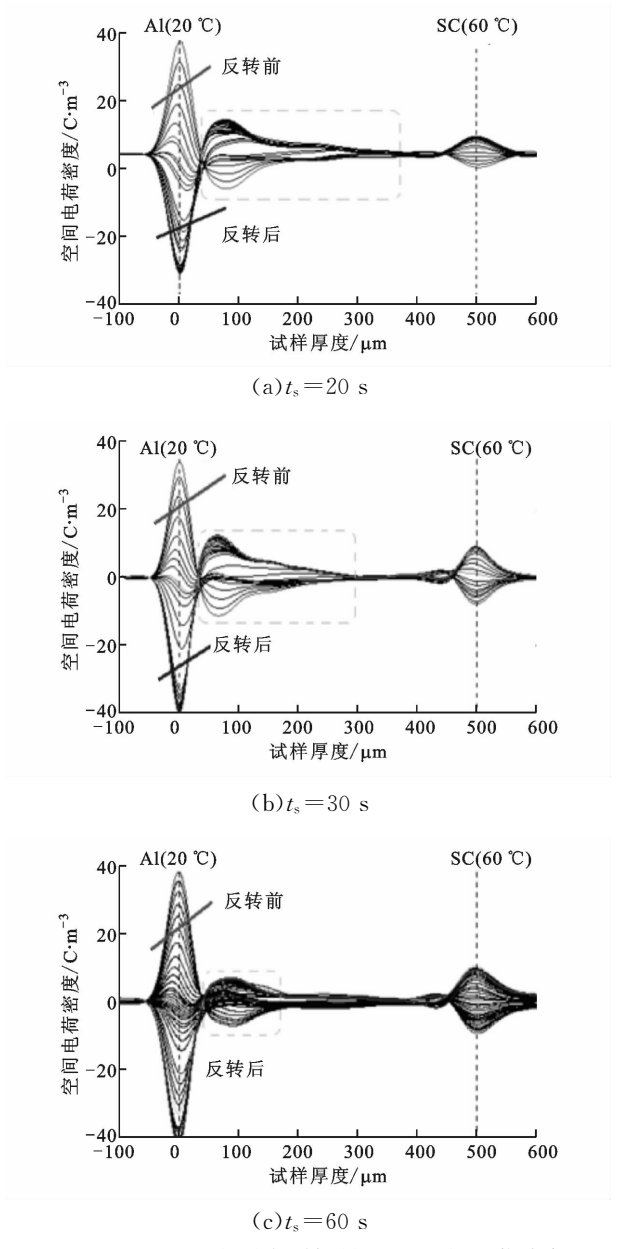


图 4  $\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时不同反转时间下的空间电荷分布图

最大瞬态电场越小. 达到最大瞬态电场的时间(当电压从 $-U_0$  到达  $U_0$  时刻开始计时)均随着极性反转时间的增加而逐渐减少,温度梯度下达到最大瞬态电场的时间远大于常温下所需的时间.

### 3 讨 论

聚乙烯的导带宽度只有 0.1 eV,在其禁带中存在大量的局域态,在电场作用下,正、负电荷移动较小距离后,掉入陷阱形成空间电荷. 在浅陷阱中的电荷可因为热运动而脱离陷阱继续在电场方向上移动,形成异极性空间电荷,在电极和介质的界面或介质内部通过 Schottky 或 Poole-Frenkel 效应发射电荷,在介质中形成同极性空间电荷<sup>[8]</sup>. 已有研究表

明:电缆击穿通常发生在电压撤去或电压极性反转时<sup>[1]</sup>,这正是由于入陷的同极性电荷在电缆断电或极性反转时局部区域( $\delta=1\sim 10\ \mu\text{m}$ )形成很高的反电场而导致的。

已知聚乙烯的体积电阻率约为  $10^{14}\sim 10^{15}\ \Omega\cdot\text{m}$ ,介电系数为  $2.3^{[5]}$ 。根据电缆绝缘并联等效模型,电缆充放电时间常数为

$$\begin{aligned}\tau &= \varepsilon\rho = 2.3 \times 8.85 \times 10^{-12} \times (10^{14} \sim 10^{15}) \\ &\approx 2\ 000 \sim 20\ 000\ \text{s}\end{aligned}\quad (2)$$

电缆充放电达到稳态一般需要  $5\tau$  时间,那么电缆达到稳态所需时间约为  $10^4\sim 10^5\ \text{s}$ ,即  $2.7\sim 27\ \text{h}$ 。本文选择加压时间为  $2\ \text{h}$ ,认为聚乙烯试样充放电已达稳态。已有文献指出:聚乙烯中载流子的迁移率约为  $3\times 10^{-14}\ \text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})^{[9]}$ 。忽略载流子迁移率对电场的依赖性。当外施场强为  $50\ \text{kV/mm}$  时,由公式  $v=\mu E$ ,计算得出聚乙烯试样内载流子迁移速率为  $1.5\ \mu\text{m/s}$ 。

由图3可见,铝电极和半导体电极上均发生了界面电荷在极性反转前(电压逐步降低时)向两侧移出电极位、在极性反转后(反向电压逐步升高时)由试样内移向电极位的过程。半导体电极上的电极移位现象没有铝电极上的明显。在电压降低过(极性反转前)中,试样内的电子(包括电极注入的和被电离可迁移的)在电场作用下反向迁移至阳极而消失,因此,使得极性反转前阳极界面正电荷移出电极位。空穴的迁移率远低于电子,空穴对极性反转前阴极界面电荷的移位不甚明显。在电子反向迁移过程中,部分电子如上所述到达电极消失,部分电子与体内空穴复合,部分电子为可迁移电子,参与电导电流。当电压极性反转后,残余未复合的、可迁移的电子因与外施负压极性相同,界面靠近试样内部,残余的电子和空穴再次反向移向电极的过程中,将界面负电荷逐渐推向电极位。同时,电压极性反转越慢,铝电极附近残余的空穴越少。这表明极性反转越慢,更多的电子在试样内和空穴相遇而发生复合,或到达阳极而消失掉。因此,极性反转后残余的空穴或电子较少,对场强的畸变影响也小。

由图4可见,在温度梯度场下,极性反转前铝电极界面正电荷发生了明显的随着电压的降低由界面逐渐移出电极、极性反转后铝电极界面负电荷随着电压的升高反而从试样内侧逐渐移向电极的现象。这同样表明,在电压极性反转过程中发生了电子的抽出。在温度梯度场下,极性反转前高温侧电极注入的大量同极性负电荷聚集在低温侧阳极,在极性反

转过程中,低温侧积聚的负电荷将快速移向阳极而消失。电压极性反转越慢,抽出的电子越多,则残余的负电荷量将越少。

根据空间电荷测量结果,我们做出在常温及温度梯度下聚乙烯中电荷注入与迁移模型,如图5所示。由于异极性电荷消散较快,图中未示出异极性电荷作用。在直流电场作用下,假设电荷(空穴和电子)注入深度均为  $\delta$ ,空穴或电子离开电极逐渐衰减(由电极到试样内部分别形成入陷的不可移动的和脱陷的可迁移的电子或空穴),并在试样内部发生复合。当电压逐渐降低时,为保持内外电场平衡,由于电荷同性相斥,异性相吸,体内同极性电荷逐渐反向电场方向移动并发生复合,而且部分电子因较高的迁移率迅速移向阳极而消失。当电压极性反转后,同极性电荷变为异极性,未复合的电子或空穴又反向移向电极侧,造成电极界面附近场强增加。如表1所示,当极性反转时间较快(如  $20\ \text{s}$ )时,同极性的空穴和电子在试样体内复合较少,因此在极性反转后出现的瞬态场强较高。当极性反转时间较长(如  $60\ \text{s}$ )时,同极性的空穴和电子在试样内复合较多,因此在极性反转后出现的瞬态场强较低。由于空穴迁移率远低于电子的迁移率,使得靠近空穴处的电极在极性反转后出现较高的瞬态电场。

图5b所示为温度梯度场下聚乙烯中的电荷注入与迁移模型,图中空穴用虚线表示,低温侧注入的空穴完全被高温侧注入的电子掩盖掉。温度的增加不仅能提高聚合物内载流子的迁移率,而且会降低电极上电荷注入势垒,加剧了 Schottky 效应和热电子发射<sup>[8]</sup>。另外,温度升高时,聚合物中的入陷载流子在热激励作用下易脱陷而定向迁移。因此,温度梯度场下聚乙烯中由于电极注入形成的电子和空穴的分布将如图5b所示。高温侧注入的电子与常温下不同,由于热激励和高温易脱陷,使得离开电极越远的低温侧电子越多,甚至掩盖或中和了阳极上同极性正电荷的注入。当电压极性反转时,试样内的电荷同样发生了同性相斥、异性相吸的迁移过程。不同的是,电子在发生先左后右的电荷迁移过程中,大量的电子将在  $10\ \text{s}$  内(假设电荷注入深度达  $10\ \mu\text{m}$ ,并结合电荷迁移速率  $1.5\ \mu\text{m/s}$  计算得出)到达电极而被复合掉。电压极性反转越慢,被电极复合掉的电子越多,即残余的电子越少,因此极性反转后因高温侧阳极空穴注入使场强畸变反而越严重。

由表1可见,温度梯度场下,极性反转越快,达到最大瞬态电场所需的时间越长。此现象表明,极性

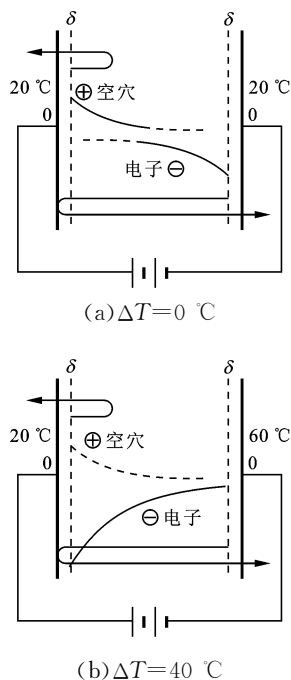


图 5 聚乙烯中电荷注入与迁移模型

反转越快,到达电极复合的电子越少.极性反转后高温侧的阳极需要更多的时间注入空穴,空穴迁移到阴极先中和大量残余电子,再起到异极性电荷作用而形成最大瞬态电场.极性反转越慢,残余电子越少,中和残余电子所需时间越短,消耗空穴量越少,因此形成的瞬态电场越高.在常温下,阳极附近残余的空穴量决定了极性反转后瞬态场强的大小.电压极性反转越快,残余的空穴量越多.极性反转后,残余的空穴向电极移动过程中与电极注入的同极性电子相互作用.极性反转越快,残余空穴量越少,注入电子与残余空穴作用时间越短,畸变场强越低.

在温度梯度场下,极性反转后阳极注入的空穴必须先中和残余电子才能显示出异极性电荷对场强的畸变作用.常温下,极性反转后残余空穴瞬时反应,产生最大畸变电场,阴极电子注入会缓和或降低畸变电场.因此,温度梯度场下达到最大瞬态电场的时间远大于常温下所需的时间.

## 4 结 论

(1)常温及温度梯度下极性反转过程中的最大瞬态电场均出现在反转前的正电极附近.

(2)室温时聚乙烯中最大瞬态电场随着极性反转时间的增加而降低,温度梯度下聚乙烯中最大瞬态电场随着极性反转时间增加而增大.

(3)常温及温度梯度下达到最大瞬态电场的时间均随着极性反转时间的增加而逐渐减少,但温度

梯度下达到最大瞬态电场的时间远大于常温下所需的时间.

## 参考文献:

- [1] 屠德民,刘文斌,庄国平,等.空间电荷自身反电场的介质击穿理论及电荷发射屏的研究[J].西安交通大学学报,1987,21(4):1-11.  
TU Demin, LIU Wenbin, ZHUANG Guoping, et al. Theory of dielectric breakdown caused by space charge effects and study of the charge emission shield[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1987, 21(4):1-11.
- [2] CHOO W, CHEN G. Electric field determination in DC polymeric power cable in the presence of space charge and temperature gradient under dc conditions [C]//2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008:321-324.
- [3] FU M, DISSADO L A, CHEN G, et al. Space charge formation and its modified electric field under applied voltage reversal and temperature gradient in XLPE cable[J]. IEEE Trans on DEI, 2008, 15(3):851-860.
- [4] FABIANI D, MONTANARI G C, LAURENT C, et al. HVDC cable design and space charge accumulation: part 3 [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(2):5-14.
- [5] 刘子玉,王惠明.电力电缆结构设计原理[M].西安:西安交通大学出版社,1995.
- [6] 陈曦,王霞,吴锴,等.聚乙烯绝缘中温度梯度效应对直流电场的畸变特性[J].西安交通大学学报,2010,44(4):62-65,124.  
CHEN Xi, WANG Xia, WU Kai, et al. Effect of temperature gradient on the distortion of DC electrical field in polyethylene [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010,44(4):62-65,124.
- [7] MORSHUIS P, JEROENSE M. Space charge measurement on impregnated paper: a review of the PEA method and a discussion of results [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(3):26-35.
- [8] 金维芳.电介质物理学 [M]. 2版.北京:机械工业出版社,1997.
- [9] HOZUMI N, MATSUMURA H, et al. Camer mobility in acetophenone-soaked polyethylene estimated by transient space charge[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. New York, NY, USA: IEEE, 2000: 943-946.

(编辑 杜秀杰)