

聚乙烯绝缘中温度梯度效应对直流电场的畸变特性

陈曦, 王霞, 吴锴, 成永红, 彭宗仁

(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: 针对直流电缆内外温差与直流电场共同作用下会影响绝缘材料内部空间电荷分布和电场分布的问题,利用自行研制的温度梯度下的空间电荷测量装置,通过设定不同的上、下电极温度,实现试样上、下表面的不同温差,然后采用阶梯升压方式(10、30、50、70 MV/m),测量在不同温度差(ΔT 为 0~40 ℃)下聚乙烯中的电场分布,最后得出了温度差和电场分布的关系. 结果表明:温度差越大,外施场强越高,试样体内低温侧场强畸变越严重;由于高场强下电极上同极性电荷的注入,加压时间的增加对畸变场强有一定的缓和作用.

关键词: 空间电荷;温度梯度;电场分布;聚乙烯

中图分类号: TM215.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)04-0062-04

Temperature Gradient Effect on Distortion of DC
Electrical Field in Polyethylene

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

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

Abstract: Space charge profiles and stress distributions in cable bulk are strongly affected by high voltage direct current (HVDC) voltage, especially with the cooperation of the temperature difference between inner and outer insulations. A modified space charge measurement system suitable for temperature gradient was designed to fulfill the temperature difference via changing the upper and lower electrode temperature. Then space charge profiles and stress distributions in low density polyethylene (LDPE) were measured under different temperature differences (from 0 ℃ to 40 ℃), as applied DC stresses of 10, 30, 50, and 70 MV/m, respectively. The relationship between temperature difference and stress distribution was obtained. The test results show that the increasing temperature difference and applied stress results in a more distorted stress at the low temperature site of sample. And due to the injection of homo-charges from the electrode under high electrical stress, the distorted stress is reduced with the increasing poling time.

Keywords: space charge; temperature gradient; electric field distribution; polyethylene

随着国民经济和电力工业的高速发展,为满足远距离、大容量输电,电力系统联网,远距离海流电缆送电,超高压、特高压直流输电技术逐渐提上日程. 在运行过程中电缆导体发热,使得电缆绝缘内侧温度升高,且由内向外温度逐渐降低,形成温度梯度. 这种温度梯度效应对交流供电电缆不会产生影响,但会大大降低直流供电电缆的使用寿命. 这是由于交流电场下电缆绝缘中电场分布决定于介电常数,几乎与温度无关,而直流电场下电缆中的电场强度取决于绝缘电阻和电荷分布,与温度、外施电压密切相关^[1].

众所周知,聚合物绝缘电阻具有负温度特性,即随着温度的升高电阻逐渐降低^[1]. 直流电压下绝缘电场强度的分布与电阻成正比. 在温度梯度作用下,

收稿日期: 2009-11-13. 作者简介: 陈曦(1983—),女,博士生;王霞(联系人),女,讲师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50907050);高等学校科技创新工程重大项目培育资金资助项目(707053).

高温侧电阻低,低温侧电阻高,呈梯度分布,因此场强分布从高温侧到低温侧逐渐增强。其次,温度梯度效应加剧了电极上电荷的注入和迁移,进一步畸变了绝缘层表面的场强,导致绝缘击穿^[1]。总之,直流电缆运行中的温度梯度效应引起的电阻梯度变化进而引起场强梯度的变化,进一步加剧位于绝缘层表面的电荷积聚和电场畸变,严重影响电缆运行的稳定性。

根据国内外的发展来看,大多数学者的研究主要集中在均一温度直流电场下聚合物材料中空间电荷的分布、捕获和脱陷,以及绝缘材料的老化和击穿等方面。例如文献[2]在实验中直接观察到陷阱电荷脱陷时形成的电树枝,文献[3]通过压力波法和热刺激放电法,发现了低密度聚乙烯(LDPE)在较低直流电场下的空间电荷行为等,文献[4]等测试了从30~90℃范围内电缆中的空间电荷分布情况等。对于直流电缆运行中温度梯度场下的空间电荷效应,文献[5-7]测量了温度梯度下交联聚乙烯电缆绝缘中的空间电荷分布,结果表明,温度梯度场下电缆外绝缘空间电荷积聚、场强畸变严重,实验中电缆施加的场强为30 MV/m,温度梯度为20℃。实际上,电缆在运行过程中,满负荷运行导体的温度可能达到90℃,因此温度梯度可能超过70℃。另外,长期运行中电缆局部场强可能远高于工作场强,因此不同场强、不同温度梯度下的聚合物绝缘中电场畸变特性有待研究。本文作者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,研究了聚乙烯材料在不同温度梯度、不同外施场强作用下的电场强度的畸变特性及规律。

1 实验方法

1.1 空间电荷测量

通过改进原有电声脉冲法(PEA)空间电荷测量系统^[8],设计中空的上、下测量电极,引入高、低温恒温循环浴(恒温循环水浴或油浴),通过改变上、下电极温度实现试样上、下表面不同的温度差,从而产生沿厚度方向的温度梯度,其测量装置如图1所示。上电极采用半导体电极,下电极为铝电极,声耦合剂为硅油。实验采用阶梯升温方式,即分别在不同温度差(0、10、20、30、40℃)下,测量不同场强(10、30、50、70 MV/m)时聚乙烯试样中空间电荷分布及场强畸变特性。同一温度差下试样采用阶梯升压方式,测量系统主要包括以下几个部分:

(1)直流高压电源,电压范围为0~60 kV;

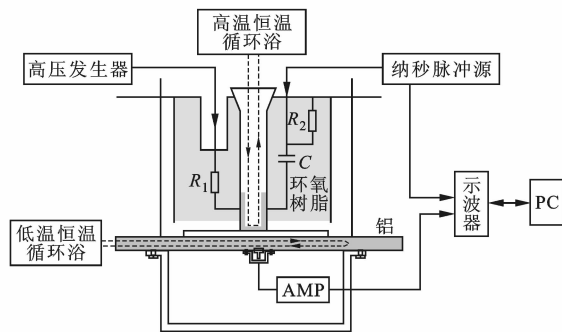


图1 温度梯度下 PEA 测量系统装置图

(2)纳秒脉冲源,脉宽为10 ns,幅值为1 kV;

(3)测量电极系统上,电极可调温度为室温~70℃(油浴),下电极固定温度为20℃(水浴);

(4)高、低温恒温循环浴,温度范围为0~100℃(高、低温各一套);

(5)美国力科 WaveRunner 104MXi 系列四通道示波器;

(6)计算机与示波器通讯,保存采集信号。

1.2 试样的制备

大庆产18D低密度聚乙烯,密度约为0.917 g/cm³,在130℃的平板硫化机上热压制成板状试样,尺寸为100 mm×100 mm×0.5 mm。

2 实验结果

考虑篇幅限制,文中仅示出 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 时不同直流电场作用下的空间电荷和场强分布,见图2。正电极在低温侧,Al表示为铝电极,负电极在高温侧,SC表示为半导体电极,图中箭头表示在加压1~20 min过程中的空间电荷变化趋势。从图2可见,随着场强的增加,试样高温侧的界面电荷越来越少,伴随着低温侧附近的负电荷积聚越来越多。在低场强下(10 MV/m),阳极附近负电荷随加压时间的增加逐渐增加;在高场强下(30~70 MV/m),阳极附近负电荷随加压时间的增加却逐渐减少,且场强越高,负电荷减少量越明显。

利用泊松方程^[8]对图2中空间电荷特性进行积分运算,可以得到相应试样内的场强分布,如图3所示。图中虚线处表示两个电极的位置,箭头所示表示在加压1~20 min过程中场强的变化趋势。从图3可见,当外施平均场强分别为10、30、50、70 MV/m时,阳极处的最大畸变场强分别增大至13、50、120、230 MV/m,比平均外施电场分别增加了1.3、1.7、2.4、3.4倍,可以看出随着外施场强的增大,其阳极处的场强畸变越严重,同时也发现,随着场强的增

大,低温侧的最大畸变场强随着加压时间的增加呈现减小的趋势,且场强越高,减少量越明显.

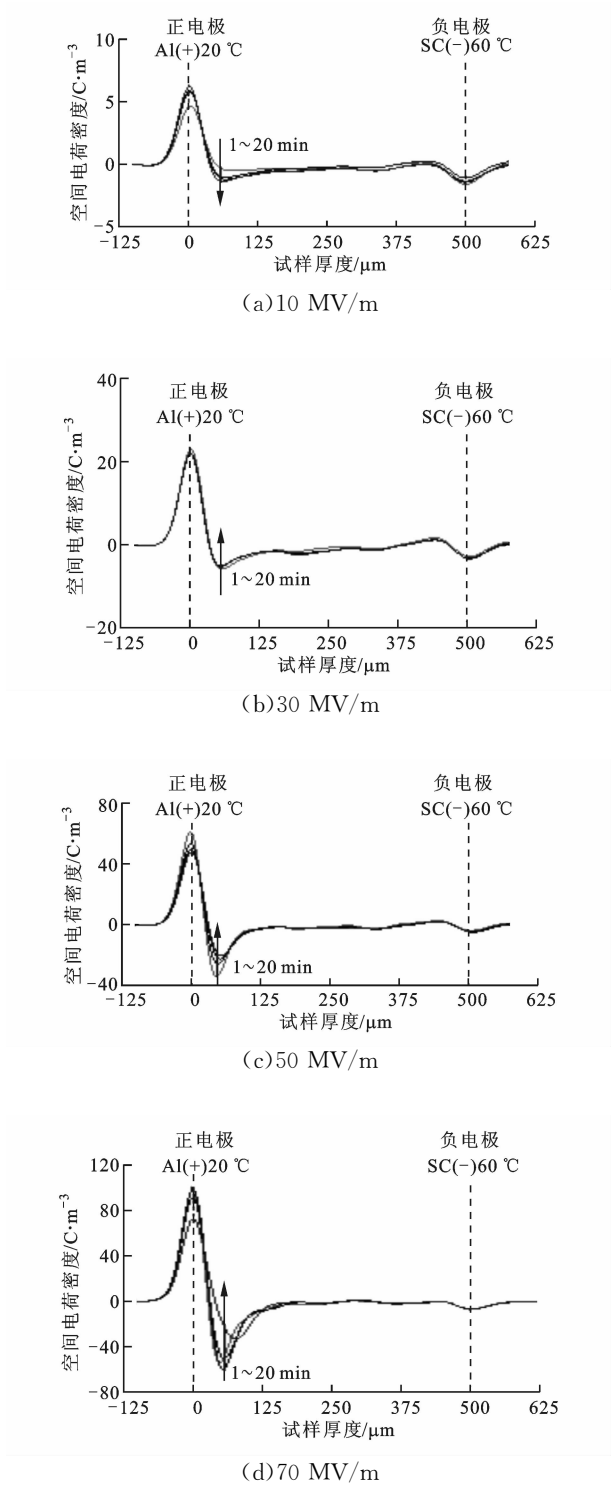


图2 $\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同直流电场下 LDPE 空间电荷分布

为进一步研究聚乙烯中电场畸变与试样上、下表面温度差的关系,我们做出不同温度差 ΔT 、不同场强下加压过程中阳极附近(低温侧)最大场强 $E_{\max}$ 的变化图,如图4所示.由图中可见:在低场强 10

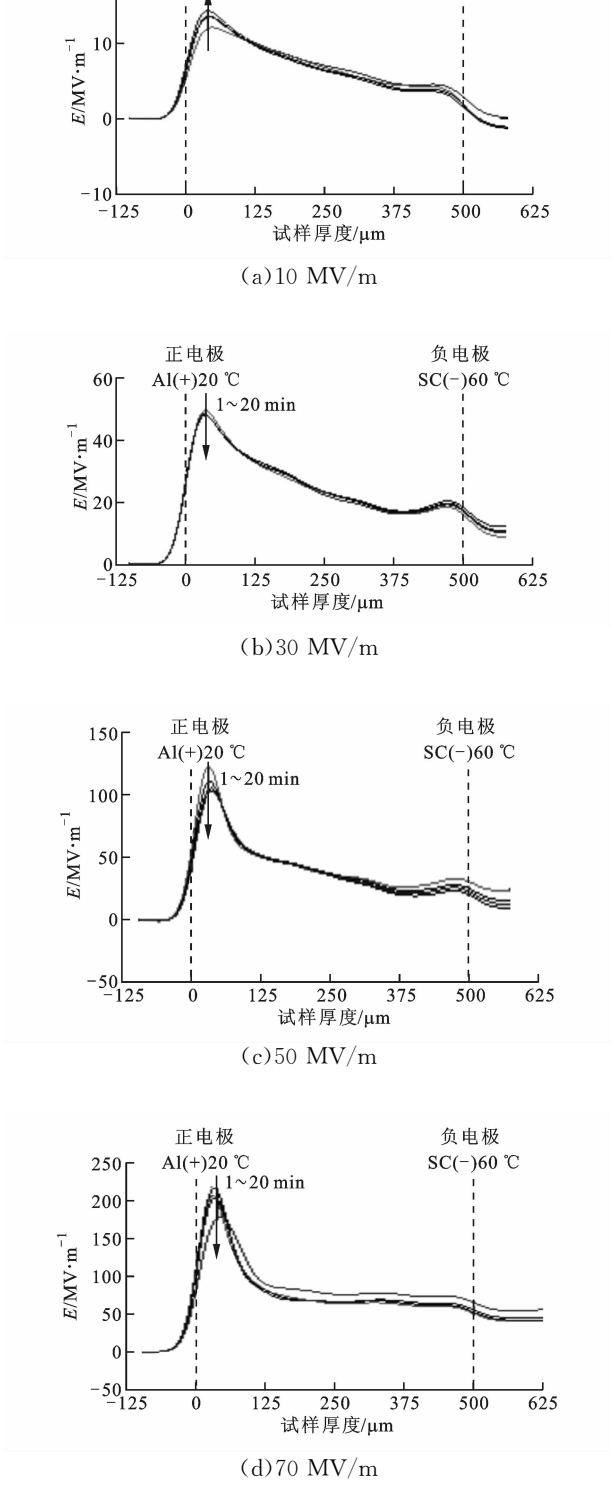


图3 $\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同直流电场下 LDPE 电场强度分布

MV/m 下,最大畸变场强随温度差的增加变化不大;当场强升高到 30 MV/m,最大畸变场强随温度差的增加开始增加,同时随着加压时间的增加又略有降低;当场强升高到 50 MV/m 或 70 MV/m,最

大畸变场强随温度差增加急剧增大,同时温度差越大,高场强下最大畸变场强随加压时间的增加其减少量也增大。

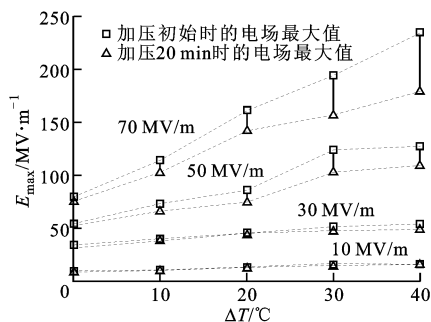


图4 加压1~20 min 聚乙烯中不同温度差、不同场强下最大畸变场强的变化图

3 讨论

聚合物绝缘材料在直流电场作用下,材料内部会形成空间电荷。一般来讲,聚合物中的空间电荷主要由两部分组成:其一是由电极注入的可迁移的和入陷的载流子,在高电场作用下,它们是主要因素,称同极性空间电荷,即靠近阴极处为负电荷,靠近阳极处为正电荷;其二是因为有机或无机杂质在电场作用下被电离并发生迁移造成的,当电场较低时,它们是主要因素,称为异极性电荷,即靠近阴极处为正电荷,靠近阳极处为负电荷。这些空间电荷畸变了聚合物内部电场的分布,使其介电性能发生变化^[9]。在温度梯度场下,由于聚合物绝缘电阻的负温度特性使得载流子电导从高温侧到低温侧逐渐降低,即高温侧电导大而低温侧电导小,载流子易聚集于低温侧,致使低温侧场强严重畸变。温度梯度越高,高温侧电导越大,低温侧场强畸变越严重。

由图2可见,温度差为40℃时,随着外施场强的增加,高温侧的负电荷峰越来越小,而低温侧的异极性负电荷量却越来越多。这表明在高温下,低温侧异极性负电荷不仅是由于杂质粒子的迁移,而且是由于电极上同极性电荷的注入引起的。低温侧(正电极)的异极性负电荷畸变了此处的场强。因此,在图3场强分布图中,温度差越大,外施场强越高,低温侧场强畸变越严重,高温侧由于同极性电荷的注入使其附近场强有所降低。

另外,由图2可见,在低场强10 MV/m下,低温侧的异极性负电荷随着加压时间增加略有增多,这是由于高温侧负电极上电荷注入引起的。当场强达到30 MV/m时,低温侧的异极性负电荷量随着

加压时间增加略有减少。随着外施场强进一步提高,此异极性负电荷量减少越明显。同时在图3中可见,异极性负电荷的减少有助于缓和低温侧的畸变电场。有研究表明:聚乙烯在15 MV/m的场强下电极会发生明显的同极性电荷注入现象^[10-11]。由图3a可见,低温侧最大畸变场强为13 MV/m,未达到聚乙烯注入阈值场强,因此没有发生明显的低温侧阳极上的同极性正电荷注入。图3b中最大畸变场强为50 MV/m,图3c中为150 MV/m,图3d中为220 MV/m,远超过了聚乙烯注入阈值场强,因此发生了明显的电极上正电荷注入,且场强越高,注入现象越明显。

从图4可明显看到,高温度差、高直流电场下同极性电荷的注入对畸变电场有缓和作用。

直流电缆带负荷运行时,导体发热处于高温侧,外屏蔽层接地处于低温侧,电缆绝缘温度由内向外成梯度分布(高温到低温),因此外屏蔽层(低温侧)场强集中。另外,直流电缆运行过程中,外屏蔽层引发的水树、电树、过电压条件下对场强的畸变和倍增作用会加速直流电缆在运行过程中的早期破坏,因而击穿通常发生在外屏蔽层的表面。

4 结论

本文通过测量了不同温度梯度、不同直流电场作用下聚乙烯材料中的空间电荷特性,得出了试样上、下表面温度差与电场的分布关系,主要结论如下:

- (1)温度差越大,外施场强越高,试样体内低温侧场强畸变越严重;
- (2)高场强下发生电极上同极性电荷注入,随着加压时间的增加对场强畸变有一定的缓和作用;
- (3)温度差与最大畸变场强近似线性增长关系。

参考文献:

- [1] 张兵. 直流电缆绝缘设计[J]. 高电压技术, 2004, 30(8): 20-21, 24.
ZHANG Ping. Design on the insulation of the DC cable[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(8): 20-21, 24.
- [2] LE G C, BLAISE G. Breakdown phenomena related to trapping/detrapping processes in wide band gap insulator[J]. IEEE Trans on EI, 1992, 27(3):472-481.
- [3] 郑飞虎,张治文,宫斌,等. 低密度聚乙烯中空间电荷包的形成与迁移过程[J]. 中国科学:E辑, 2005, 35(7): 701-707.
- [4] LIM F N, FLEMING R J. The temperature depend-

- ence of space charge accumulation and DC current in XLPE power cable insulation[C]//1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999: 66-69.
- [5] 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.
- [6] FU M, DISSADO LA, 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.
- [7] 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.
- [8] 高田达雄. 电声脉冲法测量空间电荷的原理和方法[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1994.
- [9] IEDA M. CARRIER injection, space charge and electrical breakdown in insulating polymers [J]. IEEE Trans on EI, 1987, 22(3): 261-267.
- [10] ABOU-DAKKA M, BULINSKI A, BAMJI S. Space charge development and breakdown in XLPE under DC field[J]. IEEE Trans on DEI, 2004, 11(1): 41-48.
- [11] MONTANARI G C, DAS-GUPTA D K. Polarization and space charge behavior of unaged and electrically aged across-linked polyethylene[J]. IEEE Trans on DEI, 2000, 7(4): 474-479.
- [本刊相关文献链接]**
- 一种非对称双原子分子的电子位移极化率计算模型. 西安交通大学学报, 2009, 43(4): 90-94.
- 水分对变压器绝缘纸性能影响的分子动力学模拟. 西安交通大学学报, 2009, 43(4): 111-115.
- 一种可用于绝缘子沿面放电状态识别的算法. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1269-1274.
- 环氧及其复合材料气固界面快脉冲闪络特性. 西安交通大学学报, 2008, 42(6): 703-707.
- 改进粒子群算法及其在超导电缆参数优化中的应用. 西安交通大学学报, 2007, 41(2): 219-222.

(编辑 杜秀杰)