第 49 卷 第 1 期：311-320 高电压技术 Vol.49, No.1: 311-320
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220279

交联聚乙烯试样中空间电荷输运特性的数值模拟

陈 驰[1]，李佳兴[1]，王 霞[2]，吴 锴[2]，王 闯[1]，王德意[1]
（1. 西安理工大学电气工程学院，西安 710048;
2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室，西安 710049）

摘 要：挤塑型交联聚乙烯(XLPE)高压直流电缆绝缘中空间电荷的积聚会造成局部场强畸变，导致材料的绝缘性能下降。电缆内导体的热效应在绝缘层产生的温度梯度会进一步影响电荷行为，纳米颗粒改性是抑制空间电荷的一种有效措施，但抑制作用具体如何实现，尤其是对于微观层面载流子输运过程的影响规律还需深入分析。试样内空间电荷的数值仿真可以探究各种微观粒子之间的相互作用和演化过程，因此文中基于载流子抽出受限的双极性电荷输运模型，对温度梯度下的电荷行为，深陷阱与浅陷阱对于载流子迁移过程的影响进行了研究。结果表明：低温侧会因抽出受限而积聚异极性电荷，深陷阱会限制载流子输运且深陷阱作用存在瓶颈，随着迁移率增大，电荷分布由同极性变为异极性分布，当迁移率足够大时，异极性电荷不再增长甚至开始降低。
关键词：交联聚乙烯；空间电荷；双极性电荷输运模型；温度梯度；陷阱特性；迁移率

Numerical Simulation of Space Charge Transport Characteristics in Crosslinked Polyethylene Samples

CHEN Chi[1], LI Jiaxing[1], WANG Xia[2], WU Kai[2], WANG Chuang[1], WANG Deyi[1]
(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The accumulation of space charge in the insulation of extruded cross-linked polyethylene (XLPE) high voltage DC cable will cause local field strength distortion and reduce the insulation performance of the material. The temperature gradient generated by the thermal effect of the conductor in the cable in the insulating layer will further affect the charge behavior. The modification of nanoparticles is an effective measure to suppress the space charge, whereas, how to realize the inhibition, especially for the carrier transport process at the micro level, needs to be deeply analyzed. The numerical simulation of space charge in the sample can explore the interaction and evolution process between various micro particles. Based on the bipolar charge transport model with limited carrier extraction, this paper studies the charge behavior under temperature gradient and the effects of deep traps and shallow traps on the carrier migration process. The results show that the low temperature side will accumulate heteropolar charges due to limited extraction, deep traps will limit carrier transport, and there is a bottleneck in the role of deep traps. With the increase of mobility, the charge distribution changes from homopolar to heteropolar. When the mobility is large enough, the heteropolar charge will not increase or even begin to decrease.
Key words: XLPE; space charge; bipolar charge transport model; temperature gradient; trap characteristics; mobility

0 引言

在“推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系，全球能源互联网”的大背景下，高压直流(HVDC)输电因能很好地解决可持续性能源并网、跨海输电、大容量远距离以及特殊场合的输电走廊等方面的问题而得到迅猛发展[1-2]。高压直流电缆作为构建直流电网的核心部件，主要有油纸绝缘高压直流电力电缆和挤压型聚合物直流电缆两种。以交联聚乙烯(XLPE)为绝缘介质的直流电缆具有介质损耗和导体损耗低，载流量大、强度高、易安装以及耐高温等特点[3]，因此得到了广泛应用。但由于聚乙烯材料的本征缺陷和制作工艺影响，会在材料内部形成能量水平处于禁带的局域态，即电荷陷阱，在直流高压作用下，会使载流子受陷于绝缘层中而形成空间电荷[4]。空间电荷的持续积累会

基金资助项目：国家自然科学基金(51707155)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51707155).

使局部电场发生严重畸变，加速材料老化、降低击穿强度[5]，造成难以预料的后果。因此，研究聚合物材料内部空间电荷积聚规律对高压直流电缆的发展具有重要意义。

目前，国内外对于高压直流电缆绝缘内部空间电荷的研究有实验检测和数值模拟两种手段[6-9]。吴锴等研究电缆板状试样和同轴试样均发现温度梯度会导致低温侧积聚异极性电荷[10-12]，尤其是具有同轴结构效应的全尺寸电缆，实验结果并未对温度梯度的贡献程度进行说明。关于异极性电荷的形成有两种解释，分别是杂质电离和载流子抽出受限，文献[13]认为使用注入载流子抽出受限理论解释高温高电场情况下的异极性电荷生成机理更为合适。此外，实验结果表明引入能级较高的深陷阱可以抑制电荷的注入和降低载流子的迁移率，从而提高材料的击穿、抗老化等电气性能[4,14]。吕泽鹏等基于双极模型解释了深陷阱密度变化对异极性电荷积聚的抑制作用，但对入陷率和陷阱能级未作分析[15]。钟小燕等和 Tian F 等基于双极模型探讨了俘获系数和陷阱能级对电荷分布的影响，但模型未考虑异极性电荷积聚[16-17]。而且以上研究未对实验中增加纳米颗粒质量分数到一定程度时，材料绝缘性能反而开始下降的现象在微观层面作出解释[4]。HOANG A T 和 J. Zhao 等基于具有恒定迁移率的双极性载流子输运模型研究了载流子迁移率对电荷分布的影响[18-19]。然而迁移率梯度变化情况下的作用效果还需深入研究。

因此，本文基于抽出受限的双极电荷输运模型，对温度梯度下 XLPE 试样内部电荷的分布及异极性电荷的生成机理做出了解释，并从俘获系数、陷阱密度和陷阱深度 3 方面分析了深陷阱作为陷阱中心对载流子的限制作用。最后，结合浅陷阱作用直接探讨了载流子迁移率对电荷输运的影响。

1 双极性载流子电荷输运模型

1.1 物理过程

双极性载流子输运模型认为材料中存在自由电子、自由空穴、陷阱电子和陷阱空穴这 4 种类型的电荷，双极性特征表明材料内部载流子主要来自电极的注入，即阳极注入空穴、抽出电子；阴极注入电子、抽出空穴。价带中的空穴和导带中的电子在电场作用下会发生定向迁移形成漂移电流，同时因载流子浓度差而形成扩散电流。聚乙烯材料内部能带结构和双极性电荷输运机理见图 1。

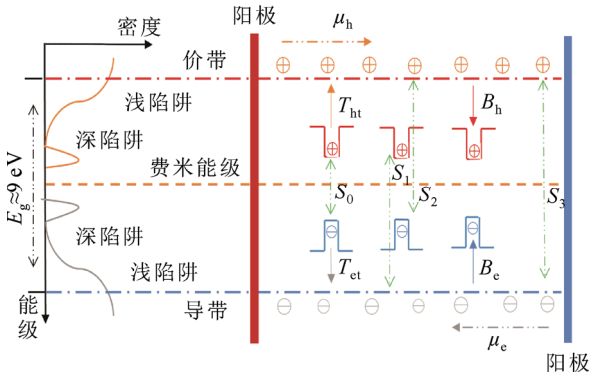


图 1 聚乙烯材料内部能带结构和双极性电荷输运机理

Fig.1 Internal energy band structure and bipolar charge transport mechanism of polyethylene materials

模型对于自由电子、自由空穴的俘获能力由俘获截面系数 B_e 和 B_h 的表征，陷阱电子、陷阱空穴受到热激发或其它激励发生脱陷继续迁移的能力用脱陷系数 T_{et} 和 T_{ht} 表征。复合系数 S_0、S_1、S_2、S_3 分别表示陷阱电子和陷阱空穴、自由电子和陷阱空穴、陷阱电子和自由空穴以及自由电子和自由空穴这 4 种类型载流子的复合过程。

1.2 载流子的注入和抽出

模型在不考虑杂质电离的情况下，由电极注入全部载流子。当外加电场小于 100 kV/mm 时，电极注入电荷的过程遵循 Schottky 定理[9]，如下所示：

$$J_{hi}(0,t)=AT^2\exp\left(-\frac{ew_{hi}}{kT}\right)\exp\left(\frac{e}{kT}\sqrt{\frac{eE(0,t)}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}}\right) \quad (1)$$

$$J_{ei}(d,t)=AT^2\exp\left(-\frac{ew_{ei}}{kT}\right)\exp\left(\frac{e}{kT}\sqrt{\frac{eE(d,t)}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}}\right) \quad (2)$$

式中：J_{hi} 和 J_{ei} 分别为电极注入的电子和空穴电流密度，单位 A/m^2，0 和 d 分别代表阳极和阴极的位置；A 为 Richardson 常数，值为 1.2×10^6 A/(m·K)^2；T 为温度；e 为元电荷；w_{ei} 和 w_{hi} 分别为自由电子与空穴的注入势垒；k 为 Boltzmann 常数；E 为电场强度；ε_0、ε_r 分别为真空介电常数和相对介电常数。

载流子迁移到对电极后的抽出过程受到电极和材料的界面形态与表面局域态密度的影响，S.Le Roy 等人给载流子的传输方程乘以抽出率 C 来描述势垒对载流子的抽出受限作用[20]，C 的取值范围为 0~1，即表示载流子无法抽出到完全抽出。电极抽出的电流密度为：

$$J_{ed}(0,t)=C_e e\mu_e n_e|E(0,t)| \quad (3)$$

$$J_{hd}(d,t)=C_h e\mu_h n_h|E(d,t)| \quad (4)$$

式中：$J_{ed}(0, t)$和$J_{hd}(d, t)$分别为 t 时刻阳极抽出的电子与阴极抽出的空穴电流密度；C_e 和 C_h 分别为电子与空穴的抽出率；n_e 和 n_h 分别为电子与空穴的电荷密度；μ_e 与 μ_h(合并写为 $\mu_{e/h}$)分别为电子与空穴的迁移率，具体计算式为[21]

$$\mu_{e/h}=\frac{2d_s v}{E(x,t)}\exp\left(-\frac{eW_{Se/h}}{kT}\right)\sinh\left(\frac{eE(x,t)d_s}{2kT}\right) \quad (5)$$

式中：d_s 为浅陷阱之间的平均距离；v 为陷阱电子和陷阱空穴的逃逸频率，$v=kT/h$，h 为普朗克常数；x 为试样中的位置；$W_{Se/h}$(W_{Se} 与 W_{Sh} 的合称)是浅陷阱中电子和空穴的跳跃势垒高度。

1.3　材料内部电荷输运物理模型

载流子输运模型的基本方程组[22]如式(6)—式(8)所示，分别为电流传导方程、连续性方程、泊松方程。

$$J_\alpha=\mu_\alpha n_\alpha E(x,t)-D_\alpha\frac{\mathrm{d}n_\alpha}{\mathrm{d}x} \quad (6)$$

$$\frac{\partial n_\alpha(x,t)}{\partial t}+\frac{\partial J_\alpha(x,t)}{\partial x}=s_\alpha(x,t) \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 V(x)}{\partial x^2}=-\frac{\rho_{all}(x)}{\varepsilon_0\varepsilon_r} \quad (8)$$

式中：下标 α 为载流子种类，包含了自由电子 eμ、自由空穴 hμ、陷阱电子 et、陷阱空穴 ht 4 类电荷；n_α、μ_α 分别为对应的电荷密度与迁移率；x 代表试样内任意一位置到阳极的距离；t 为极化时刻；传导电流 J_α 包含可移动的电子和空穴；D_α 为扩散系数，满足 $D_\alpha=(kT/e)\mu_\alpha$；$V$ 为电位；$\rho_{all}(x)$表示 x 处 4 类载流子的总电荷密度；s_α 为源项，不考虑载流子的迁移变化，仅含 4 类载流子之间的相互作用而引起的各自密度发生的变化[21]。

1.4　基本参数的设定

不同材料的模型参数取值不同[15-18]，本模型参考了现有研究的取值范围[7-9,19-23]，设定了模型的基本参数，如表 1 所示。在确定参数以后，将 XLPE 平板试样均匀剖分成了若干单元层，通过数值算法实现模型的离散化求解。

2　模拟结果与讨论

2.1　温度梯度对空间电荷的影响

电缆在运行时的热效应明显，会在聚乙烯绝缘层形成内高外低的温度梯度，有研究表明，高温会促进载流子的注入和抽出，以及在绝缘材料内部的迁移过程。此外，聚合物材料的绝缘电阻呈现负温度特性，温度梯度会导致电场也呈梯度分布[12]。为进一步探究温度梯度下空间电荷的积聚特性，本节设定阴极为低温电极，T_d 恒为室温 20 ℃，而阳极设为高温电极，将基本参数的温度 T_0 分别设置为 20、30、40、50 ℃，同时，将高温阳极的电子抽出率 C_e 依次为设为 0.5、0.55、0.6、0.65。若假定材料的热导率为常数，XLPE 平板试样中的温度将因两电极的温差而呈现梯度分布，认为温度在试样内部均匀分布，于是测量了 XLPE 平板试样在不同温度梯度(ΔT=0、10、20、30 ℃)下空间电荷和电场的稳态分布，分别如图 2、图 3 所示。

从图 2 可知，不存在温度梯度时，阳极处电荷积聚量大约 5 C/m³，阴极处因注入势垒更低而积聚了较多的负极性电荷。随着阳极温度增加，介质中出现温度梯度，使阳极处积聚的正极性电荷量增多，

表 1　模型的基本参数

Table 1　Parameter values of the model

参数类型	数值	单位
试样厚度	500	μm
阳极电位 V	25	kV
电极温度 T	293.1	K
相对介电常数 ε_r	2.3	1
电子注入势垒 w_{ei}	1.2	eV
空穴注入势垒 w_{hi}	1.22	eV
复合系数 S_0、S_1、S_2	1×10^{-3}	$m^3/(s\cdot C)$
复合系数 S_3	0	$m^3/(s\cdot C)$
浅陷阱深度 $W_{Se/h}$	0.6	eV
深陷阱深度 $W_{et/ht}$	0.95	eV
陷阱密度 $N_{et/ht}$	1	C/m^3
浅陷阱间的平均距离 d_s	1.25	nm
俘获系数 $B_{e/h}$	1×10^{-3}	S^{-1}
抽出系数 $C_{e/h}$	0.5	1

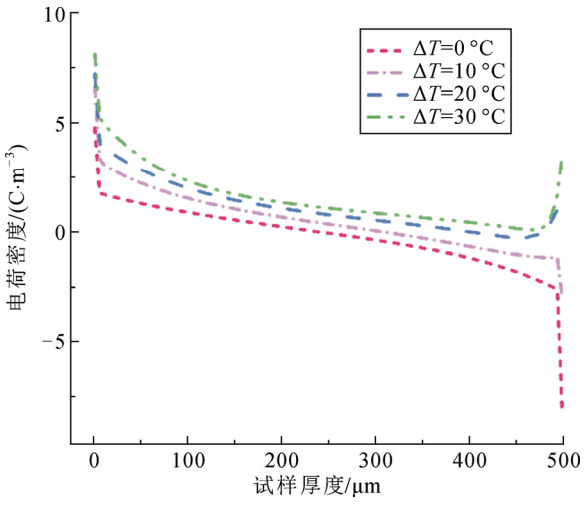


图 2　不同温度梯度下的空间电荷分布

Fig.2　Space charge distribution under different temperature gradients

而阴极处积聚的负极性电荷量明显减少。随着温度梯度的增强，阳极处的正极性电荷量进一步增多，并在电场作用下逐渐向阴极迁移，且升温会促进迁移过程，使试样中正极性电荷量增多。当温度梯度增加至ΔT=20 ℃时，阴极处开始出现异极性电荷，而且温度梯度越大，电荷积聚量越多，ΔT=30 ℃时，低温侧的异极性电荷积聚量达到 4.1 C/m^3，高温侧因注入和抽出效果被加强，同极性电荷增多，试样内部整体电荷极性与高温侧电极极性相同，这与吴锴等人所得实验结果保持一致[10-12]。

从图 3 可以看出，阳极处正极性电荷削弱了原始电场，温度梯度越大，畸变也越明显，ΔT=30 ℃时，电场强度减小至 22.5 kV/mm。阴极低温侧的电场逐渐增强，且温度梯度越大，异极性电荷积聚量越多，电场强度增加幅度越大，ΔT=30 ℃时，电场强度增至 62.5 kV/mm。高温会促进载流子的注入和抽出，同时会加剧电荷在浅陷阱中的入陷、脱陷过程，从而使载流子的迁移加快。温度梯度下，XLPE 电缆高温侧载流子的输运过程得到提高，在忽略了杂质电离时，载流子在低温侧受到界面阻挡形成异极性电荷，且随着温度梯度的增强而增多。接下来对温度梯度和抽出受限对于异极性电荷积聚的贡献程度展开讨论。首先，仅考虑温度梯度的影响，认为载流子从材料迁移到电极的过程中不受阻挡，即设定电子和空穴的抽出率都为 1。此时不同温度梯度下空间电荷的分布情况如图 4 所示。

从图 4 可知，由于载流子移动到对侧电极后抽出不受任何阻挡，所以与阴极注入的电荷发生复合作用的电荷量减少，电极处的同极性电荷相比于抽出受限时略微增多。随着阳极温度增大，阳极处的同极性电荷增多，温度梯度作用下电荷迁移速率加快，且阳极高温会促进空穴的注入，试样中正极性电荷量增大，输运到阴极处的正极性电荷也越多。当温度梯度达到ΔT=20 ℃时，试样中整体的空间电荷分布变为正极性分布，且温度梯度越强，试样内部正极性电荷量越多。此时，阴极注入的负极性电荷量远小于试样中的正极性电荷，对外呈现正极性的净电荷分布，ΔT=30 ℃时，低温侧阴极附近也积聚了大约 2 C/m^3 的异极性电荷。图 5 为不考虑温度效应，仅考虑载流子抽出受限的情况。设定两电极温度都为 20 ℃，而电子和空穴的抽出率 C 分别设定为 0.9、0.7、0.4、0.1。

从图 5 可以看出，当抽出率为 0.9 时，电荷分

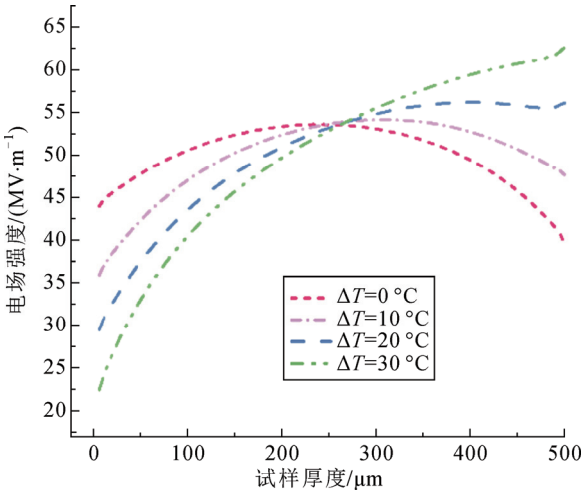


图 3 不同温度梯度下的电场强度分布

Fig.3 Electric field intensity distribution under different temperature gradients

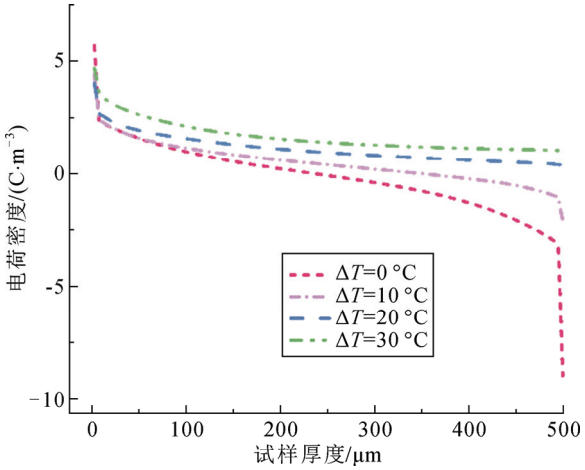


图 4 抽出不受限时不同温度梯度下的空间电荷分布

Fig.4 Space charge distribution under different temperature gradients with unlimited extraction

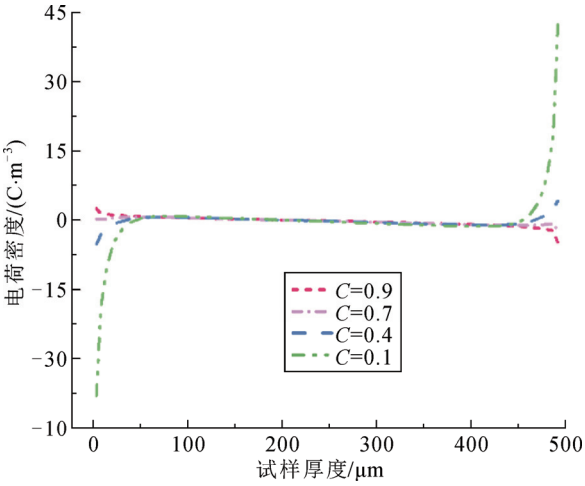


图 5 无温度梯度时不同抽出率下的空间电荷分布

Fig.5 Space charge distribution at different extraction rates without temperature gradient

布呈现标准的同极性分布，阳极积聚正极性电荷，阴极积聚负极性电荷。随着抽出率减小，迁移到试样对侧的异极性电荷不能顺利抽出，堆积在界面附近，同极性电荷量随之减少。当抽出率为 0.4 时，积聚异极性电荷速率大于同极性电荷的生成速率，此时空间电荷分布变为异极性分布，界面处积聚了一些异极性电荷，且抽出率越低，异极性电荷量越多，当抽出率为 0.1 时，阳极处积聚的负极性电荷达 38 C/m^3，阴极处积聚的正极性电荷超过 40 C/m^3。因此，载流子抽出受限是异极性电荷产生的主要因素，温度梯度会促进这一效果，使低温侧积聚更多的异极性电荷。

2.2　陷阱特性对空间电荷分布的影响

在 XLPE 绝缘材料中存在物理陷阱和化学陷阱，一般认为物理陷阱是由于 XLPE 中分子链的折叠、弯曲等结构性缺陷造成，属于深陷阱；而化学陷阱是由于分子链的断裂、侧链，以及材料在生产过程中引入的杂质、副产物等造成的缺陷，为浅陷阱[4]。欧阳本红等基于表面电位衰减法测量了正电晕充电下 XLPE 的陷阱分布情况[24]，同样发现交联副产物是出现较多空穴浅陷阱的主要原因，且空穴浅陷阱浓度小于空穴深陷阱。从图 1 左侧 XLPE 能带中的载流子陷阱分布可知，空穴陷阱和电子陷阱大致对称分布在费米能级两侧，深陷阱的能级更高，电子和空穴分别沿着导带和价带迁移，而在迁移过程中，电极和空穴可能会被陷阱俘获，导致空间电荷积聚，入陷的电荷可能在光、电、热等外界因素刺激下发生脱陷，重新进入迁移过程，脱陷的电荷可能会再入陷，直至被对侧电极抽出。这些过程伴随着能量变化，影响着 XLPE 绝缘材料的放电、老化、击穿等性能，有研究对不同年限的 XLPE 电缆绝缘切片进行分析，发现陷阱能级和陷阱密度与 XLPE 绝缘寿命的减少有很大关系[25]。由于浅陷阱能级较低，电荷被俘获后要不了多久便可以发生脱陷，再次进入迁移过程，而深陷阱能级较高，陷阱较深，俘获的电荷在陷阱中的滞留时间就越长，受缚电荷想要脱陷需要较高的能量，换言之，深陷阱对载流子迁移过程的限制作用更大。因此，本文在探讨陷阱特性对载流子输运过程的作用时，将浅陷阱中的电荷入陷、脱陷过程视为对载流子迁移率的影响，而重点关注深陷阱作为陷阱中心时对载流子输运过程的影响，俘获系数、陷阱密度、陷阱深度是决定深陷阱作用大小的主要参数。

1）俘获系数 $B_{e/h}$ 的影响

国内外文献中对于俘获系数取值范围较大，在 5×10^{-4}~7×10^{-3} s^{-1} 以及 1×10^{-2}~2×10^{-1} s^{-1} 范围内都较为常见，取值相差好几个数量级[16-18,22-23]。本小节在基本参数的基础上，对俘获系数进行调整，将深陷阱对自由电子的俘获系数 B_e 分别设定为 0.01、0.001、0.0005、0.0001 s^{-1}。有研究表明，自由空穴的俘获系数更大，一般为自由电子的两倍，且本小节着重研究俘获系数的作用，故设定 $B_h=2B_e$[8,16,18]。模拟得到稳定时刻的空间电荷和电场分布见图 6、图 7。

从图 6 可以看出，当自由电子的俘获系数 B_e=0.0001 s^{-1} 时，在阳极(x=0)和阴极(x=d)附近，分别积聚了约 12 C/m^3 和 5 C/m^3 的异极性电荷，且试

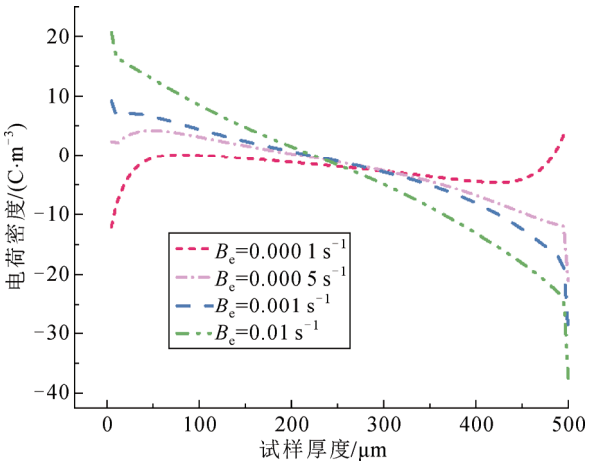


图 6　不同俘获系数下的空间电荷分布

Fig.6　Space charge distribution under different capture coefficients

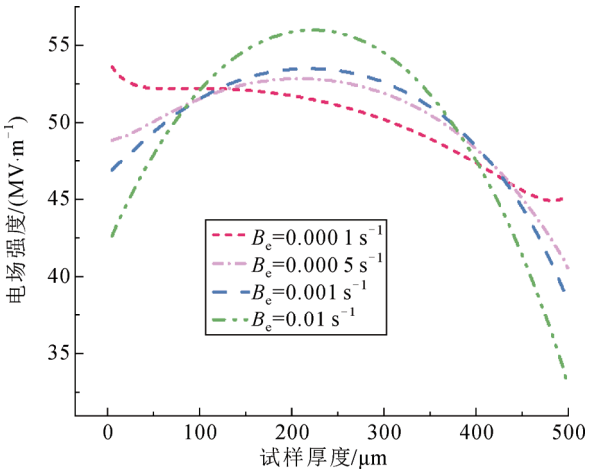


图 7　不同俘获系数下的电场强度分布

Fig.7　Electric field intensity distribution under different capture coefficients

样内部主要以负极性电荷为主。在俘获系数较小时，阳极注入的空穴和阴极注入的电子的迁移过程并未受到多大影响，输运到对侧电极后由于载流子抽出受限而积聚在试样两侧，形成异极性电荷积聚。阳极积聚的负极性电荷量大于阴极积聚的正极性电荷量与肖特基注入势垒有关，因基本参数设定了电子的注入势垒小于空穴，所以在试样中迁移的自由电子量多于自由空穴，从而在阳极附近积聚了更多的异极性电荷。此外，这还与设定的 B_h 更大有关，自由空穴的俘获系数大于自由电子，导致各单元层中输运的自由空穴电荷量小于自由电子，使各单元的净电荷对外呈现负极性，最终在阳极附近出现大量负极性电荷堆积。随着俘获系数增大，阳极附近开始积聚正极性电荷，并朝着阴极迁移，而阴极附近开始积聚负极性电荷，且朝着阳极迁移。当 B_e=0.01 s^{-1} 时，阳极处的正极性电荷量超过了 20 C/m^3，阴极处的负极性电荷量达到 37 C/m^3，整体呈现明显的同极性分布。

从图 7 可以看出，在 B_e=0.0001 s^{-1} 时，阳极处积聚的异极性电荷导致试样界面处的电场增加，试样中的负极性电荷使内部电场减小，阴极处的异极性电荷略微使电场回升。随着俘获系数增大，呈现的同极性电荷分布使界面处电场降低，试样内部电场抬高。

2）陷阱密度 $N_{et/ht}$ 的影响

高宇、杜伯学等采用表面电位衰减法测量了高压 XLPE 电缆绝缘的陷阱能级分布，发现在浅能级区域，空穴陷阱密度较大，而在深能级区域，电子陷阱密度更大[26]。在本文的双极性载流子输运模型中，认为陷阱为单一能级，仅考虑深陷阱作为陷阱中心的作用。陷阱密度的常见取值范围为 0.1~100 C/m^3，但大于 10 C/m^3 后对电荷的分布影响甚小[15]。于是为考虑充分，设定了电子陷阱密度 N_{et} 分别为 0.01、0.1、1、5 C/m^3，而设定空穴陷阱密度 N_{ht}=0.9N_{et}，然后模拟得到了稳定时刻 XLPE 绝缘中的空间电荷分布，如图 8 所示。

从图 8 可以看出，当电子陷阱密度 N_{et} 为 0.01 C/m^3，其空间电荷分布与俘获系数较小时类似，不过在阳极和阴极处都积聚了大约 20 C/m^3 的异极性电荷，这是由于电子的陷阱密度大于空穴，相当于空穴陷阱对自由空穴的俘获能力降低，那么就有更多的自由空穴迁移到阴极，因抽出受限而积聚在阴极附近。随着 N_{et} 增加至 0.1 C/m^3，阳极附近的负极性电荷量减少，出现少许正极性电荷，同样阴极附近的正极性电荷量明显降低，且出现少量负极性电荷。陷阱的作用得到加强，试样各单元层中迁移的电荷越容易被俘获，随着陷阱密度的进一步增加，电荷分布变为明显的同极性分布，即此时各单元层中注入电荷的速率是大于抽出和入陷的速率的。文献[15]中实验和仿真结果也均表明，积聚的异极性电荷会随着深陷阱体密度的增加而减少。

3）陷阱深度 $W_{et/ht}$ 的影响

在双极性载流子输运模型中，被俘获的载流子重新进入迁移过程的能力用脱陷率 $T_{et/ht}$ 表征，与温度和深陷阱的深度有关，对于陷阱深度的取值范围相对较小，常见范围为 0.85~1.05 eV[8-9,16-18]。在本小节中，不考虑温度影响，将基本参数中的陷阱深度 $W_{et/ht}$ 分别设定为 0.8、0.88、0.95、1.2 eV，得到了电荷密度分布见图 9。

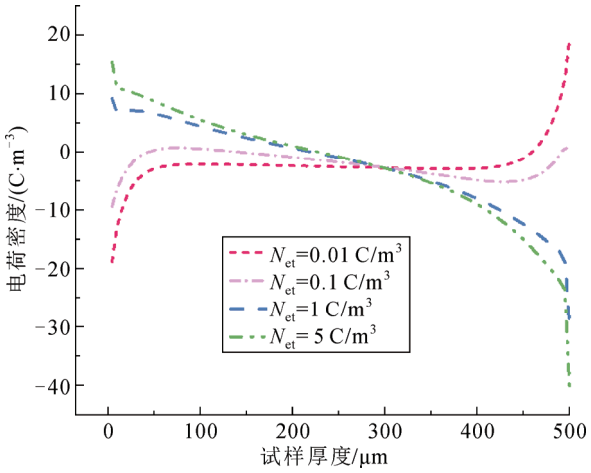


图 8 不同陷阱密度下的空间电荷分布

Fig.8 Space charge distribution under different trap densities

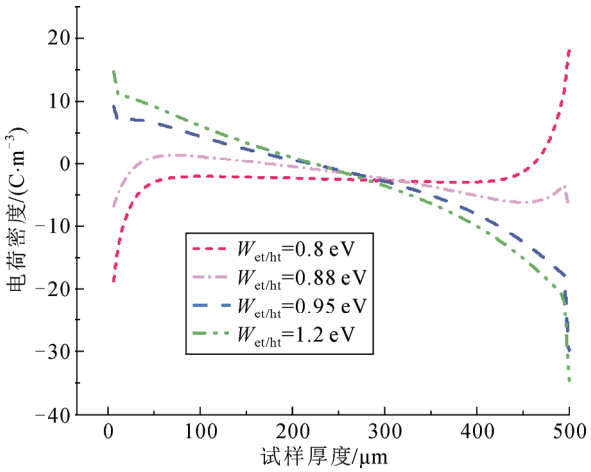


图 9 不同陷阱深度下的空间电荷分布

Fig.9 Space charge distribution at different trap depths

从图 9 可知，当深陷阱的深度为 0.8 eV 时，试样两侧积聚了大量异极性电荷，最大处均接近 20 C/m^3，试样内部主要积聚为负极性电荷。当陷阱深度升为 0.88 eV 时，阳极附近积聚的异极性电荷减少，试样内部迁移的正电荷明显增多，阴极附近的正极性电荷消失，出现 5 C/m^3 左右的负极性电荷。随着陷阱深度进一步增加，电荷分布规律与前述俘获系数和陷阱密度保持一致，试样中积聚的空间电荷最终彻底变为同极性分布。

有研究表明，给聚合物材料添加纳米颗粒可以对材料中的载流子陷阱进行调控，纳米材料具有较大的比表面积和表面能，相当于引入能级较高的深陷阱，深陷阱可以抑制电荷的注入和降低载流子的迁移率[14]，从而提高材料的击穿、抗老化等电气性能。实验结果还表明，少量纳米颗粒的填充可以明显提高绝缘性能，但随着纳米颗粒质量分数的增加，深陷阱的作用降低，材料绝缘性能反而开始下降[4]。

在对深陷阱特性作用研究中，不同取值的俘获系数 $B_{e/h}$、陷阱密度 $N_{et/ht}$、陷阱深度 $W_{et/ht}$ 得到的仿真结果与纳米改性实验结果保持一致，当三者的取值较小时，会在两电极附近积聚异极性电荷，但随着俘获系数、陷阱密度和陷阱深度的取值增大，深陷阱作为陷阱中心发挥作用的能力就越强，试样中输运的电荷发生入陷的几率就越大，必然会降低正在迁移的自由电子和自由空穴的数量。在整体载流子未发生变化情况下，相当于降低载流子的迁移率，从而发生注入电荷堆积。最终，使试样内部的空间电荷变为同极性分布。但结合纳米掺杂改性实验的结论，本文同样认为深陷阱对载流子输运过程的影响存在瓶颈。为通过仿真验证这一说法，将基本参数中陷阱密度 $N_{et/ht}$ 分别设为 0.1、1、5、100 C/m^3，此时的 N_{et} 与 N_{ht} 取值相等，得到自由空穴和自由电子的电荷密度变化如图 10、图 11 所示。

从图中可以看出，当陷阱密度 $N_{et/ht}$ 为 0.1 C/m^3，深陷阱作用较小，自由电子和自由空穴能较为顺利的迁移到对侧电极附近，因载流子抽出受限而积聚于试样两侧，阴极附近的自由空穴密度达到 32 C/m^3，阳极附近的自由电子接近 25 C/m^3。随着陷阱密度增加，两侧的异极性电荷明显减少，因深陷阱对载流子迁移的限制作用，试样内部的自由电子和自由空穴量随之降低。但随着陷阱密度 $N_{et/ht}$ 增加至 100 C/m^3，尽管陷阱密度增加了几十倍，但试样内部的自由电子和自由空穴量仅略微减少。在整体

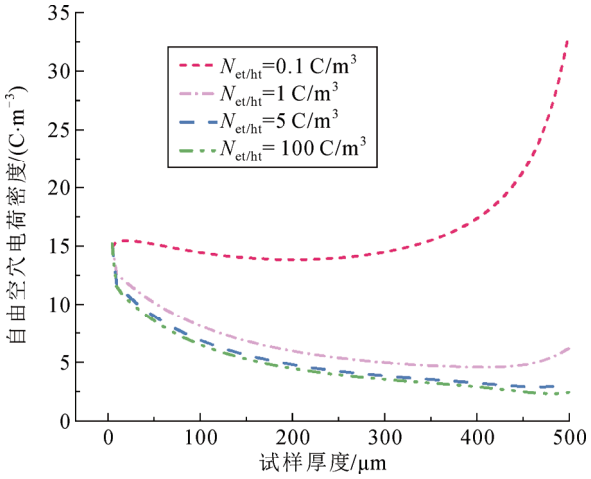


图 10　不同陷阱密度下自由空穴的电荷密度

Fig.10　Charge density of free hole under different trap density

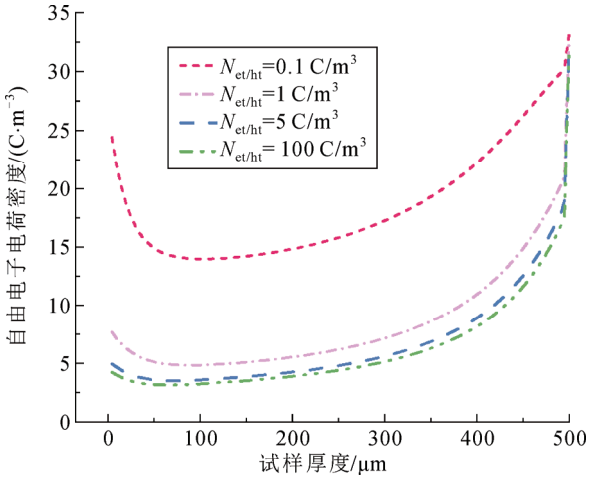


图 11　不同陷阱密度下自由电子的电荷密度

Fig.11　Charge density of free electrons under different trap densities

电荷量未变情况下，深陷阱的作用已趋近饱和，就实际而言，过多的深陷阱相当于给绝缘材料引入了较多杂质，从而使绝缘性能下降。

2.3　载流子迁移率对空间电荷分布的影响

在了解了深陷阱作为陷阱中心间接调控着载流子的迁移过程后，本节将同时考虑浅陷阱的作用，直接探讨载流子迁移率对空间电荷输运过程的影响。在 XLPE 绝缘中，空穴和电子的传导特性并不一致，空穴一般是通过穿过 XLPE 的结晶区实现传导，表现为链内特性；而电子更倾向于在低密度区域传导，一般沿着无定形区和结晶区/无定形区界面中的自由体积进行传导，表现为链间特性[4]。高宇、杜伯学基于表面电位衰减法测量了 XLPE 板状试样的载流子迁移率，发现由于材料内部浅能级空穴的陷阱密度明显大于电子的陷阱密度，从而导致正电

荷比负电荷具有更高的迁移率[26]。因此，在本小节中，设定 $\mu_h=5\mu_e$，钟小燕等[16]和 J. Zhao 等[19]在基于双极性载流子输运模型研究载流子迁移率影响时也做过类似处理，但他们将同一时刻下试样内部不同位置的载流子迁移率简化为恒定值。对于等间距剖分的一维轴对称平板试样而言，尽管初始电场均匀分布且未设定温度梯度，但随着试样内部空间电荷的持续积聚，将对原电场产生畸变，从式(5)可知，试样各个位置的迁移率大小也将随之改变。本文通过给浅陷阱间的平均距离 d_s 设定不同取值来控制迁移率大小，其取值范围一般在 0.5~5 nm[17,21]，本节将 d_s 分别取 0.75、1.25、2.25、4 nm。同时将基本参数的空穴和电子注入势垒均设为 1.2 eV，保证试样内部两种极性的电荷总量相等，以着重探讨载流子迁移率的作用。于是得到试样内部各个位置的空穴迁移率大小如图 12 所示。

从图 12 可知，试样不同位置的迁移率大小并不相等，d_s 取值较小时，浅陷阱之间的距离较小，载流子越容易受到陷阱的限制，此时不同位置载流子的迁移率相差较小。当 d_s 取值越大，载流子迁移率越大，越靠近阳极增长越明显，即试样不同位置迁移率差值也就越大。随后对 d_s 不同取值时的空间电荷和电场强度分布进行了模拟，结果见图 13、14。

从图 13 可知，当载流子迁移率较小(d_s=0.75 nm)时，阳极注入的空穴和阴极注入的电子不能及时迁移至对侧电极，在试样两侧出现堆积，此时空间电荷呈现同极性分布，此时试样两侧电场强度降低，而试样内部的电场强度升高。随着 d_s 增大至 1.25 nm，载流子的迁移能力提高，两电极附近的同极性电荷减少，由于自由空穴的迁移率更大，使得更多的自由空穴迁移至阴极，受界面阻挡作用不能及时被电极抽出而积聚于阴极附近，导致负极性电荷明显减少，净电荷分布呈现出由负极性逐渐转为正极性的趋势，并出现了少量正极性电荷。当 d_s 达到 2.25 nm，载流子迁移能力再度提升，阳极和阴极附近均积聚了大量异极性电荷，空间电荷呈现典型的异极性分布。随着迁移率再次大幅增大，两电极附近的异极性电荷积聚量并没有明显增加，甚至出现了小幅度减少，原因在于异极性电荷的积聚会使试样两侧的电场强度有所抬高，而削弱试样内部的电场，从载流子注入与抽出定义可知，两侧电场强度的增加会促进同极性电荷注入和异极性电荷抽出，这一结论可从图 14 电场强度分布上得到验证。

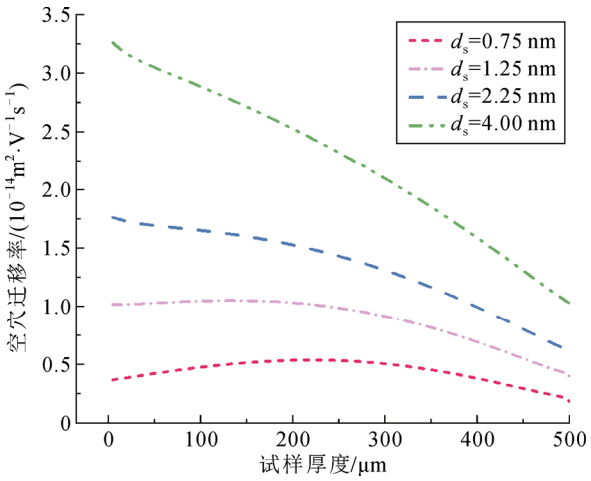


图 12 不同 d_s 取值下自由空穴的迁移率

Fig.12 Mobility of free holes under different d_s values

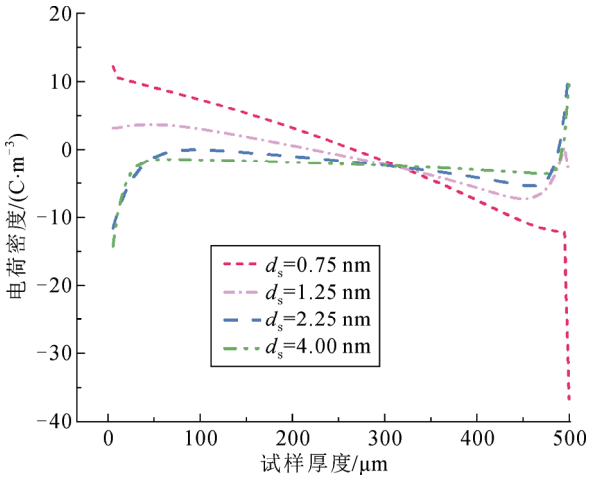


图 13 不同 d_s 取值下的空间电荷分布

Fig.13 Space charge distribution under different d_s values

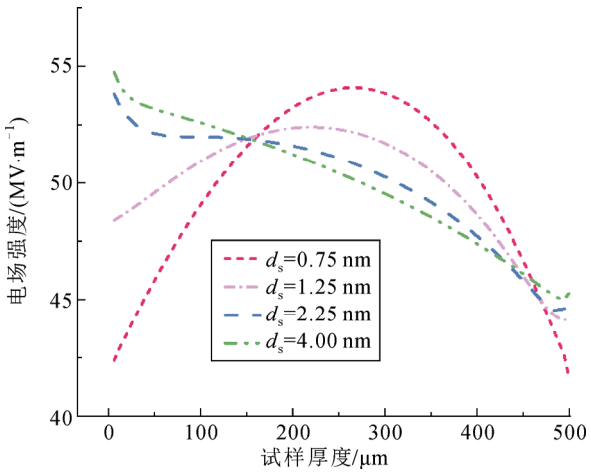


图 14 不同 d_s 取值下的电场强度分布

Fig.14 Electric field intensity distribution under different d_s values

从空间电荷和电场强度分布上可以发现，当 d_s 取值较大时，阳极积聚的异极性量更多，且试样内部电荷分布以负极性电荷为主，使内部电场较原电场有所降低。本文分别计算了 d_s 取 4 nm 时的自由电子、自由空穴、陷阱电子和陷阱空穴电荷密度来解释这一现象，结果见图 15。

从图 15 可以看出，由于载流子的迁移率较高，自由电子和空穴大都被输运到了对侧电极处，因抽出受限而积聚在附近。空穴迁移率更高，导致试样中的自由空穴电荷密度更低，电子迁移率较低，发现更多的自由电子被陷阱俘获为陷阱电子，陷阱电子电荷量达到陷阱空穴的两倍以上，这也是当迁移率较高时，试样内净电荷分布呈现负极性的主要原因。除此之外，发现因空穴迁移率更高，会使更多的自由空穴被抽出且电子注入的抑制作用更强，最终，导致试样中的正极性电荷总量已经明显少于负极性电荷，这仍归因于电荷输运过程中的自我调节能力，这一效果会持续至电荷输运达到平衡或限制条件破坏。

3　结论

1）在温度梯度下，高温侧同极性电荷增多，试样内部整体电荷极性与高温侧极性相同，低温侧积聚异极性电荷。在不考虑杂质电离时，载流子抽出受限是异极性电荷产生的主要因素，而温度梯度会促进这一效果。

2）随着深陷阱的作用增强，电极附近积聚异极性电荷会逐渐变为同极性分布，且深陷阱对载流子输运过程的影响存在瓶颈。同极性电荷分布会降低试样两侧电场强度，抬高内部电场，而异极性电荷效果正好相反。

3）积聚空间电荷会改变试样各个位置的迁移率，迁移率越大，不同位置迁移率差值也就越大。当正负极性电荷注入与抽出相同时，随着迁移率增大，电荷分布由同极性变为异极性分布，当迁移率足够大时，异极性电荷不再增长甚至开始降低。

4）迁移率较小的载流子易被俘获，在不同极性载流子注入相同情况下，最终迁移率较小的载流子电荷总量较大。

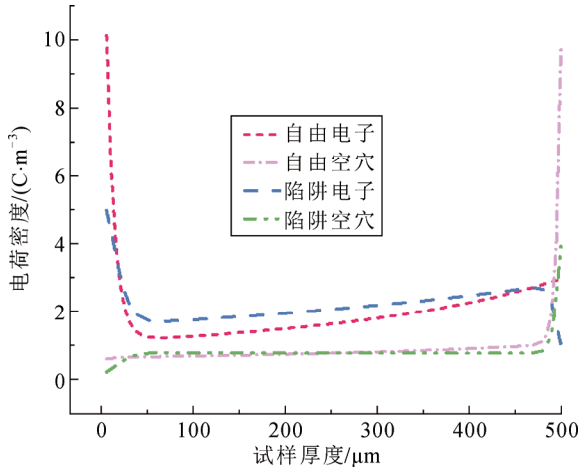


图 15　d_s=4 nm 时 4 种载流子的电荷密度

Fig.15　Charge density of four carriers at d_s=4 nm

参考文献　References

[1] 杜伯学，韩晨磊，李　进，等. 高压直流电缆聚乙烯绝缘材料研究现状[J]. 电工技术学报，2019，34(1)：179-191.
DU Boxue, HAN Chenlei, LI Jin, et al. Research status of polyethylene insulation for high voltage direct current cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 179-191.

[2] 刘　耀，赵小令，吴佳玮，等. 高压直流海缆工程应用现状及展望[J]. 高压电器，2022，58(2)：1-8.
LIU Yao, ZHAO Xiaoling, WU Jiawei, et al. Application status and prospect of HVDC submarine cable projects[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 1-8.

[3] 陈　新，李文鹏，李震宇，等. 高压直流 XLPE 绝缘材料及电缆关键技术展望[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1577-1585.
CHEN Xin, LI Wenpeng, LI Zhenyu, et al. Prospect on key technology of the XLPE insulation materials and HVDC Cables[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1577-1585.

[4] 高　宇，王小芳，李　楠，等. 聚合物绝缘材料载流子陷阱的表征方法及陷阱对绝缘击穿影响的研究进展[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2219-2230.
GAO Yu, WANG Xiaofang, LI Nan, et al. Characterization method for carrier trap and the effect on insulation breakdown within polymer insulating materials: a review[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2219-2230.

[5] 张　杰，赵学童，边浩然，等. 电荷陷阱对 XLPE 绝缘电老化特性的影响[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2991-3000.
ZHANG Jie, ZHAO Xuetong, BIAN Haoran, et al. Effect of charge traps on electrical aging of XLPE insulation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2991-3000.

[6] 张　灵，陈健宁，周远翔，等. 聚合物绝缘空间电荷动力学的理论模型与数值仿真研究进展[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：3037-3054.
ZHANG Ling, CHEN Jianning, ZHOU Yuanxiang, et al. Progress on theoretical models and numerical simulation of space charge kinetics in polymeric insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 3037-3054.

[7] 王　霞，陈　驰，熊锦州，等. 基于外半导电层注入的全尺寸电缆用脉冲电声法空间电荷测量技术[J]. 高电压技术，2017，43(5)：1677-1683.
WANG Xia, CHEN Chi, XIONG Jinzhou, et al. PEA space charge measurement technology for full-scale cables based on pulse injection from outer semi-conductive layer[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1677-1683.

[8] BOUFAYED F, TEYSSÈDRE G, LAURENT C, et al. Models of bipolar charge transport in polyethylene[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(10): 104105.

[9] LE ROY S, SEGUR P, TEYSSEDRE G, et al. Description of bipolar charge transport in polyethylene using a fluid model with a constant

mobility: model prediction[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(2): 298-305.

[10] CHEN X, WANG X, WU K, et al. Effect of voltage reversal on space charge and transient field in LDPE films under temperature gradient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 140-149.

[11] 陈 曦，王 霞，吴 锴，等. 温度梯度场对高直流电压下聚乙烯中空间电荷及场强畸变的影响[J]. 电工技术学报，2011，26(3)：13-19.
CHEN Xi, WANG Xia, WU Kai, et al. Space charge accumulation and stress distortion in polyethylene under high DC voltage and temperature gradient[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 13-19.

[12] 陈 驰，王 霞，吴 锴，等. 温度梯度下 XLPE 同轴和平板结构试样空间电荷行为对比性研究[J]. 高电压技术，2021，47(11)：4078-4086.
CHEN Chi, WANG Xia, WU Kai, et al. Comparative study on space charge behaviors for coaxial and flat structures XLPE speci-men under temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4078-4086.

[13] 刘 通，傅明利，侯 帅，等. 温度梯度影响高压直流电缆用交联聚乙烯中空间电荷分布的作用机理[J]. 高电压技术，2015，41(8)：2665-2673.
LIU Tong, FU Mingli, HOU Shuai, et al. Mechanism of space charge distribution in XLPE used in HVDC cables under temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2665-2673.

[14] WANG X, LV Z P, WU K, et al. Study of the factors that suppress space charge accumulation in LDPE nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1670-1679.

[15] 吕泽鹏，吴 锴，王 霞，等. 低密度聚乙烯纳米复合材料中空间电荷积聚对试样厚度的依赖性[J]. 高电压技术，2012，38(10)：2755-2765.
LÜ Zepeng, WU Kai, WANG Xia, et al. Dependence of charge accumulation in low density polyethylene nanocomposites on sample thickness[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2755-2765.

[16] 钟小燕，郑跃胜，党 斌，等. 直流电场下聚合物空间电荷分布的极性效应[J]. 中国电机工程学报，2016，36(24)：6693-6701.
ZHONG Xiaoyan, ZHENG Yuesheng, DANG Bin, et al. Polarity effect on space charge distributions in polymer under DC electric field[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6693-6701.

[17] TIAN F Q, HOU C Y. A trap regulated space charge suppression model for LDPE based nanocomposites by simulation and experiment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2169-2177.

[18] HOANG A T, SERDYUK Y V, GUBANSKI S M. Charge transport in LDPE nanocomposites Part II—computational approach[J]. Polymers, 2016, 8(4): 103.

[19] ZHAO J, XU Z, CHEN G, et al. Effect of field-dependent mobility on current density and dynamics of space charge in polyethylene[C]// Proceedings of 2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Virginia Beach, USA: IEEE, 2010: 120-123.

[20] LE ROY S, TEYSSEDRE G, LAURENT C, et al. Relative importance of trapping and extraction in the simulation of space charge distribution in polymeric insulators under DC potentials[C]// Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Winchester, UK: IEEE, 2007: 494-497.

[21] LE ROY S, TEYSSEDRE G, LAURENT C. Numerical methods in the simulation of charge transport in solid dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(2): 239-246.

[22] LE ROY S, BAUDOIN F, GRISERI V, et al. Charge transport modelling in electron-beam irradiated dielectrics: a model for polyethylene[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(31): 315402.

[23] Min D M, Cho M, Li S T, et al. Charge transport properties of insulators revealed by surface potential decay experiment and bipolar charge transport model with genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 2206-2215.

[24] 欧阳本红，赵健康，周福升，等. 基于等温表面电位衰减法的直流电缆用低密度聚乙烯和交联聚乙烯陷阱电荷分布特性[J]. 高电压技术，2015，41(8)：2689-2696.
OUYANG Benhong, ZHAO Jiankang, ZHOU Fusheng, et al. Characteristics of trapped charge distribution in LDPE and XLPE used in DC cables based on isothermal surface potential decay method[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2689-2696.

[25] LIU N, CHEN G, XU Y. Trapping parameters and their relation to insulation status of XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1154-1166.

[26] 高 宇，杜伯学. 采用表面电位衰减法表征高压交联聚乙烯电缆绝缘中空间电荷的输运特性[J]. 高电压技术，2012，38(8)：2097-2103.
GAO Yu, DU Boxue. Characterizing space charge transportation in HV XLPE cable insulation based on surface potential decay measurement[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 2097-2103.



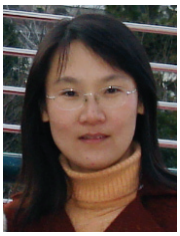
陈 驰(通信作者)
1990—，男，博士，讲师
主要从事绝缘材料空间电荷特性的研究工作
chenchi0129@stu.xjtu.edu.cn

CHEN Chi
Ph.D.
Corresponding author



李佳兴
1998—，男，硕士生
主要从事固体电介质材料内部空间的仿真研究工作
E-mail: ljx19xaut@163.com

LI Jiaxing



王 霞
1976–，女，博士，副教授
主要研究方向为聚合物绝缘中空间电荷测量、绝缘破坏机理与改性技术
E-mail: wxflying@mail.xjtu.edu.cn

WANG Xia
Ph.D.
Associate professor



吴 锴
1969—，男，博士，教授，博导
主要从事绝缘材料电老化及击穿理论，局部放电检测及内在机理研究
E-mail: wukai@mail.xjtu.edu.cn

WU Kai
Ph.D., Professor

收稿日期 2022-03-05 修回日期 2022-07-26 编辑 曹昭君