

# 基于四氰基苯醌二甲烷掺杂的聚乙烯电气强度提升方法

陈纯松, 王家璇, 李逸飞, 朱明晓, 钟振芳

(中国石油大学(华东), 山东 青岛 266000)

**摘要:** 本文引入具备窄带隙的四氰基苯醌二甲烷有机小分子, 通过溶液共混制备了聚乙烯/四氰基苯醌二甲烷复合材料, 并考察四氰基苯醌二甲烷掺杂含量对复合材料直流击穿特性、高场电导及陷阱分布特性的影响。结果表明: 复合材料的电气强度随着四氰基苯醌二甲烷掺杂含量的增加先升高后降低, 四氰基苯醌二甲烷的掺入使聚乙烯的电气强度最大提高了约 54%, 且有效降低了电导率。陷阱分布测量与量子化学仿真证实四氰基苯醌二甲烷引入了电荷深陷阱, 增强了对载流子的捕获作用, 使聚乙烯的直流电气强度获得提升。

**关键词:** 聚乙烯; 窄带小分子掺杂; 介电性能; 深陷阱; 仿真建模

## A method for improving electric strength of polyethylene by doping tetracyano-benzoquinone dimethane

CHEN Chunsong, WANG Jiaxuan, LI Yifei, ZHU Mingxiao, ZHONG Zhenfang

(China University of Petroleum (East China), Qingdao 266000, China)

**Abstract:** In this paper, tetracyano-benzoquinone dimethane organic small molecules with narrow band gap were introduced, and polyethylene/tetracyano-benzoquinone dimethane composites were prepared by solution blending. The effects of doping content of tetracyano-benzoquinone dimethane on DC breakdown properties, high field conductance and trap distribution properties of the composite were investigated. The results show that the electric strength of the composite increases first and then decreases with the increase of the doping content of tetracyano-benzoquinone dimethane, the addition of tetracyano-benzoquinone dimethane increases the electric strength of polyethylene by a maximum of about 54%, and effectively decreases its conductivity. Trap distribution measurement and quantum chemical simulation confirm that tetracyano-benzoquinone dimethane introduces charge deep traps, enhances the trapping effect of charge carriers, and improves the DC electric strength of polyethylene.

**Key words:** polyethylene; narrow band small molecule doping; dielectric properties; deep trap; simulation modeling

## 0 引言

聚乙烯具有优异的绝缘性能和力学性能, 广泛用作电力电缆的绝缘材料<sup>[1-2]</sup>。但随着高压直流输电技术的发展, 在直流电压作用下, 聚乙烯内易积聚空间电荷, 导致电场分布畸变, 降低其电气强度且加速绝缘老化, 因此, 对聚乙烯聚合材料绝缘性能的提升具有重要意义。

国内外很多学者针对纳米填料掺杂提升聚乙烯的介电性能开展了研究。张晓虹等<sup>[3]</sup>研究认为掺杂无机填料引入了深陷阱, 提升了聚乙烯的电老化性能, 掺杂的填料捕获导带中的自由载流子, 从而减弱了高能电子对分子链的冲击, 使得放电通道难

以形成。R J FLEMING 等<sup>[4]</sup>研究了 MgO 纳米掺杂对 LDPE 空间电荷注入的影响, 结果表明在高电场下 LDPE 与 MgO 的相对介电常数不同产生的深陷阱是抑制空间电荷的原因。肖春等<sup>[5]</sup>通过研究纳米掺杂聚乙烯的陷阱能级, 发现不同含量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末和 MgO 粉末均能够使 LDPE 的陷阱能级明显变深, 纳米掺杂可以有效提高深陷阱电荷的俘获概率。YUAN C 等<sup>[6]</sup>在介电聚合物中加入半导体分子填料, 证明半导体分子可以通过固定自由电子并阻止空间电荷在介电聚合物中的注入, 大幅提高介电聚合物的绝缘性能。需要指出的是, 传统的无机填料与聚乙烯基体不兼容, 在制备过程中填料容易团聚, 导致电场畸变且产生较多的杂质电荷, 进一步加速材料的老化, 不利于高压直流(HVDC)电缆的稳定运行<sup>[7]</sup>, 因此探索新的聚乙烯改性方法具有重

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52007198); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME027)。

要意义。

本文引入具备窄带隙的四氰基苯醌二甲烷有机小分子,通过溶液共混与高温热压法,制备掺杂有机半导体小分子的聚乙烯绝缘薄膜,分析其直流电气强度和高场电导性能,通过等温表面电位衰减法对陷阱分布特征进行分析与探讨。

## 1 试验

### 1.1 主要原材料

低密度聚乙烯(LDPE)颗粒,陶氏化学公司;二甲苯(纯度为99%)、有机半导体小分子7,7,8,8-四氰基苯醌二甲烷,阿拉丁化学试剂公司,上述所有化学品均直接使用,未进一步净化与提纯。

### 1.2 聚乙烯/四氰基苯醌二甲烷复合材料制备

将50 mL二甲苯(二甲苯异构体+乙基苯)倒入圆底烧瓶中,加入1 g LDPE颗粒(质量比为50:1),并加入一定量的四氰基苯醌二甲烷小分子,在95℃下通过磁力搅拌至物料完全混合溶解。混合均匀后,将混合物放入真空干燥箱中,在150℃下加热24 h。再将获得的聚乙烯聚合物样品放到热压机上,加压至15 MPa,设定温度为150℃,热压时间为30 min,制作成薄膜样品。

### 1.3 电气性能测试

测量聚乙烯样品的直流电气强度,样品平均厚度为50 μm。将样品置于两个直径为13 mm的铜球状电极之间,通过线性升压法测量击穿电压(升压速率为1 kV/s),得到的电气强度数据采用双参数威布尔分布统计法进行处理与分析。

测量样品的高场电导特征,测试回路如图1所示,由高压源、测量电极、保护电阻以及高精度电流表构成,电极以及试样放在屏蔽箱中。测试前,将测试样品放在真空干燥箱内进行短路24 h处理,短路温度为60℃;测试过程中电压源从初始电压开始,升压步长为500 V,记录加压时间为5 min时电流表的数据。

采用等温表面电位衰减法可以反映聚乙烯高分子复合材料内部陷阱的分布规律<sup>[8]</sup>。根据电荷衰减的速度,可以确定聚乙烯复合绝缘材料内部陷阱捕获载流子的情况和绝缘层的特性。采用等温表面电位衰减法测量聚乙烯的陷阱分布特征,试验布置如图2所示。电位衰减采用的充电方式为电晕充电放电,在恒温台上采用正极电压通过针尖电极对薄膜样品进行电晕充电放电,恒温台温度为50℃,

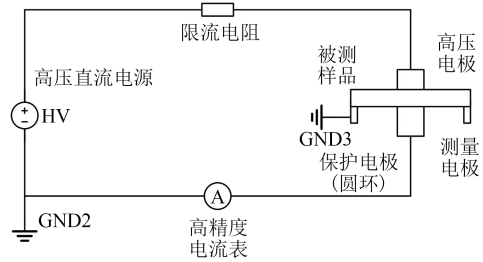


图1 高场电导测试回路

Fig.1 High field conductance test loop

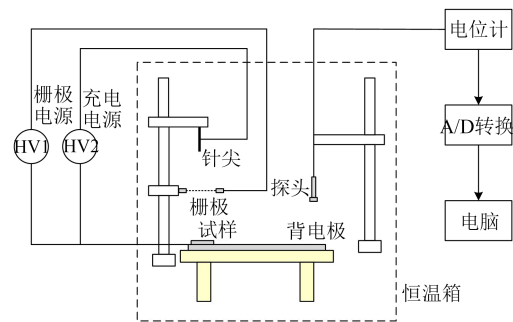


图2 表面电位衰减测试系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the surface potential attenuation test system

充电电压为6 kV,充电时间为5 min。充电完成后,利用静电电位计对试样表面的电压进行测量。聚乙烯材料样品的陷阱能级分布曲线由电位衰减曲线拟合而成,拟合公式如式(1)所示。

$$E_T = kT \ln(\gamma t) \quad (1)$$

式(1)中: $E_T$ 为表面陷阱能级,eV; $k$ 为玻尔兹曼常数,其值为 $1.38 \times 10^{-23}$  J/K; $T$ 为绝对温度,K; $\gamma$ 为试图逃逸频率, $s^{-1}$ ; $t$ 为表面电位衰减的时间,s。试图逃逸频率 $\gamma$ 可以表示为 $kT/h$ ,其中 $h$ 为普朗克常数,其值为 $6.63 \times 10^{-34}$  J·s。

表面陷阱密度与表面电位衰减速率之间的关系如式(2)所示。

$$N(E_T) = \frac{\varepsilon t}{q_e f_0 k T \delta L} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (2)$$

式(2)中: $N(E_T)$ 为陷阱的密度; $\varepsilon$ 和 $L$ 分别为试样的介电常数和厚度; $q_e$ 为基本电荷量,其值为 $1.60 \times 10^{-19}$  C; $\varphi(t)$ 为表面电位; $f_0$ 为陷阱的初始占用率,此处假设为1; $\delta$ 为注入电荷的深度,设为2 μm。

在等温势衰减过程中,较浅圈闭中的电荷比较深圈闭中的电荷更容易脱出。也就是说,电荷的释放时间取决于其陷阱的深度。表面电位衰减曲线可以用双指数方程拟合,如式(3)所示,然后将拟合结果代入式(2),得到陷阱的分布曲线。

$$\varphi(t) = a_1 e^{-b_1 t} + a_2 e^{-b_2 t} \quad (3)$$

式(3)中: $a_1$ 和 $a_2$ 为拟合参数; $b_1$ 和 $b_2$ 分别表示深陷阱和浅陷阱的衰减时间常数。

采用电声脉冲法(PEA)测量空间电荷分布。在PEA系统中,接地电极接收到的电压信号与空间电荷密度成正比。测量所用内电极和外电极的面积分别为 $700 \text{ cm}^2$ 和 $800 \text{ cm}^2$ ,每个样品分别粘贴厚度为 $50 \mu\text{m}$ 的铝箔作为电极。测量时,施加 $40 \text{ kV/mm}$ 电场使样品充分极化1 h,然后关闭电源并短接样品1 h,通过示波器进行空间电荷测量。观察材料的电荷积累以及消散情况,完成空间电荷与陷阱的测试,并对测试结果进行理论分析。

#### 1.4 聚乙烯与四氰基苯醌二甲烷建模仿真

利用Quantum Espresso(QE)软件对纯聚乙烯(PE)和四氰基苯醌二甲烷( $\text{C}_{12}\text{H}_4\text{N}_4$ )能带结构进行仿真计算。首先进行模型的构建,采用6个C原子的主链作为1个结构单元,采用 $10 \text{ \AA} \times 10 \text{ \AA} \times 10 \text{ \AA}$ 的晶胞得到聚乙烯的模型结构如图3(a)所示,聚乙烯 $k$ 点选取为 $(4, 4, 4, 0, 0, 0)$ 。需要注意的是,由于四氰基苯醌二甲烷小分子是独立存在的,分子之间无相互联系,且QE计算使用的是平面波基组,为了确保计算的准确性,在构建小分子时需要采用1个足够大的晶胞与足够大的截断能,故构建了 $30 \text{ \AA} \times 30 \text{ \AA} \times 30 \text{ \AA}$ 的晶胞,模型如图3(b)所示,计算小分子能级过程中 $k$ 点取值为 $(1, 1, 1, 0, 0, 0)$ 。波函数能量截断能均选取60,电荷密度能量截断均选取400(截断能常用于计算每个原子周围的电子能量最大值),确保建模后小分子之间没有相互作用,且能够满足精度要求。将建立的聚乙烯模型结构进行晶格优化与自洽计算,其中小分子仅需要自洽计算,这是由于其晶胞可以满足实际要求,对得到的结果进行能带与能级的计算,计算过程中使用的赝势是PBE泛函(Perdew-Burke-Ernzerhof)——一种近似的双组分广义梯度近似密度泛函方法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 直流击穿特性

掺杂不同含量四氰基苯醌二甲烷的聚乙烯样品电气强度测试结果如图4所示。从图4可以看出,纯聚乙烯样品的电气强度为 $220 \text{ kV/mm}$ ,在聚乙烯中掺杂少量四氰基苯醌二甲烷时,样品的电气强度随掺杂含量的增加先增大后减小。当掺杂四氰基苯醌二甲烷质量分数为0.07%时,样品的电气强

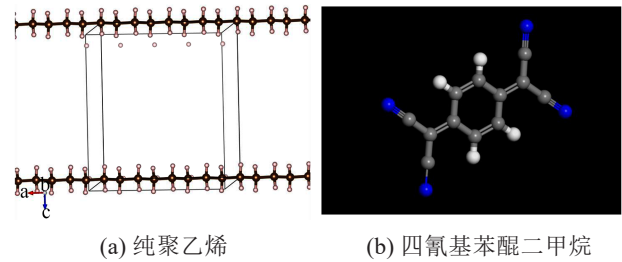


图3 聚乙烯与四氰基苯醌二甲烷的分子模型

Fig.3 Molecular model of polyethylene and tetracyano-benzoquinone dimethane

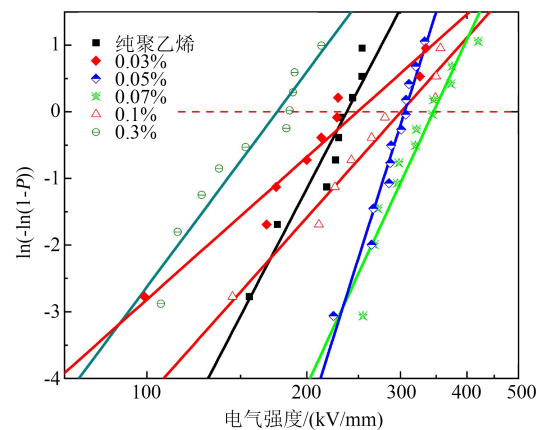


图4 样品的电气强度

Fig.4 Electric strength of samples

度最大,达到 $340 \text{ kV/mm}$ ,相比纯聚乙烯增大了约54%;继续掺杂四氰基苯醌二甲烷时,样品的电气强度开始下降;当掺杂四氰基苯醌二甲烷质量分数为0.3%时,样品的电气强度仅为 $180 \text{ kV/mm}$ ,比纯聚乙烯减小了约18%。

分析认为,在较低含量下,小分子极性官能团会引入电荷陷阱,导致电荷被陷阱捕获,此时电荷需要获得足够多的能量才能进行跃迁,从而提升了聚乙烯样品的击穿电压。值得注意的是,随着小分子掺杂量含量的增加,极性官能团过量时,载流子迁移率大幅提升,电荷容易在材料中自由传输到电极两端,使得电气强度降低<sup>[9-10]</sup>,因此四氰基苯醌二甲烷质量分数为0.3%的样品电气强度小于纯聚乙烯样品。

### 2.2 高场电导特性

图5为掺杂不同含量四氰基苯醌二甲烷的聚乙烯样品电流密度-电场强度( $J-E$ )特性曲线。从图5可以看出,在电场强度低于 $15 \text{ kV/mm}$ 时,除四氰基苯醌二甲烷质量分数为0.07%的样品外,其他样品的 $J-E$ 曲线斜率较小,电流密度随电场强度变化较小,同时在该电场强度下,电导电流出现一个转折

点,在转折点之后 $J-E$ 曲线斜率增大,意味着电流随着电场强度变大。这可以用空间电荷限制电流(SCLC)理论解释<sup>[11]</sup>,在固态介质中,随着电流密度增加,电场增强效应引起载流子之间的空间电荷积累,导致空间电荷效应逐渐显现,进一步限制了载流子运输<sup>[12]</sup>。在较低电场下,即加压初期,电介质的伏安特性与欧姆定律<sup>[13]</sup>,当场强上升到某一数值时,阴极注入的载流子浓度变大,由于在聚合物薄膜的禁带能隙中存在很多的局域态,也就是前面提到的陷阱,这些陷阱俘获大量的空间电荷,从而引起空间电荷限制电流,导致电流曲线出现转折,由欧姆电导区进入到空间电荷限制电流区。

掺杂四氰基苯醌二甲烷后聚乙烯样品的电流密度降低,且随掺杂含量的增加先降低后升高,当掺杂四氰基苯醌二甲烷质量分数为0.07%时,电流密度最低,且该样品转折点场强较纯聚乙烯和其他掺杂含量的样品变大。出现上述现象的原因可能是,此时引入的深陷阱密度较高<sup>[14]</sup>,导致俘获载流子的能力较其他样品强,电荷入陷使得转折电压升高。

### 2.3 电荷陷阱分布特性

为了进一步探究样品电气强度提升的原因,通过等温表面电位衰减法测试掺杂不同含量四氰基苯醌二甲烷的聚乙烯样品陷阱分布特征,测试结果如图6和图7所示。从图6可以看出,除掺杂四氰基苯醌二甲烷质量分数为0.3%的聚乙烯样品之外,其他样品的电位衰减速率明显低于纯聚乙烯。从图7可以看出,掺杂四氰基苯醌二甲烷的样品引入了新的陷阱能级,且陷阱能级均高于纯聚乙烯,这也证明四氰基苯醌二甲烷小分子在聚乙烯中引入了深陷阱<sup>[15]</sup>,与图6电位衰减曲线相对应。这是由于在聚乙烯材料中引入四氰基苯醌二甲烷小分子掺杂量比较少,而小分子的禁带宽度要比纯聚乙烯窄,二者之间存在能级差,在聚乙烯带隙中引入了深陷阱。深陷阱的引入以及捕获载流子效应<sup>[16]</sup>的增强导致空间电荷在聚乙烯材料的运输变慢,影响了电荷在聚乙烯内的移动消散平衡过程,因此在电极撤销后,掺杂有机半导体小分子的聚乙烯样品电位衰减速度要明显低于纯聚乙烯。

从图7还可以看出,除四氰基苯醌二甲烷掺杂质量分数为0.3%的样品以外,其他样品的深陷阱能级均为1.04~1.06 eV,且掺杂不同含量四氰基苯醌

二甲烷的样品陷阱能级大小也不同。绘制深陷阱能级与样品电气强度的关系如图8所示。从图8可以看出,样品的电气强度随深陷阱能级的增大而增大。这是因为深陷阱的引入容易捕获电子,降低聚合物样品内部的载流子浓度与迁移率,削弱了电子的能量,进而减轻了电子对样品内部分子链的冲

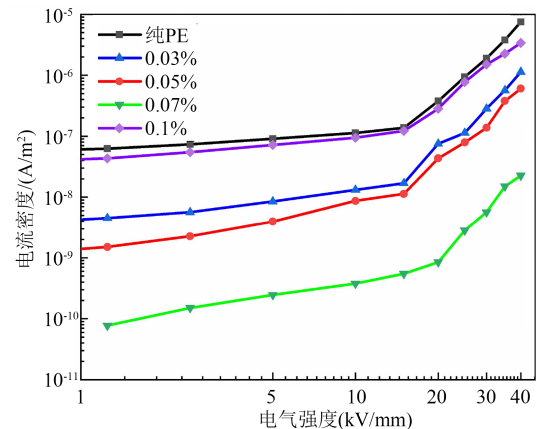


图5 样品的高场电导特性

Fig.5 High field conductance characteristics of samples

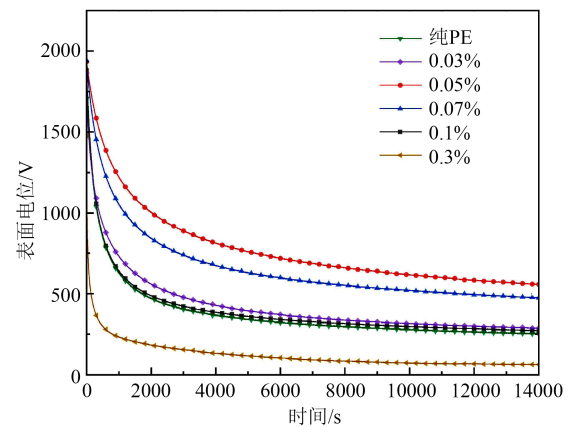


图6 样品的电位衰减曲线

Fig.6 Potential attenuation curves of samples

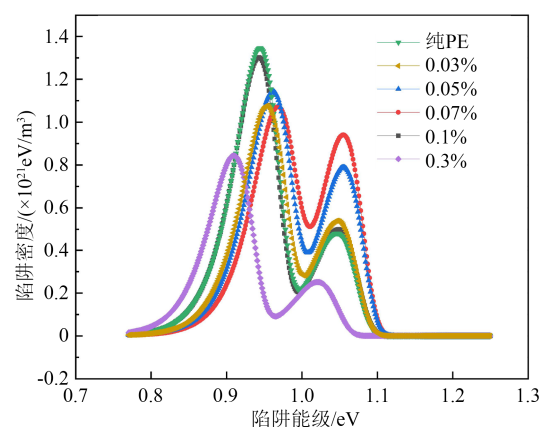


图7 样品的陷阱能级分布

Fig.7 Trap energy level distribution of samples

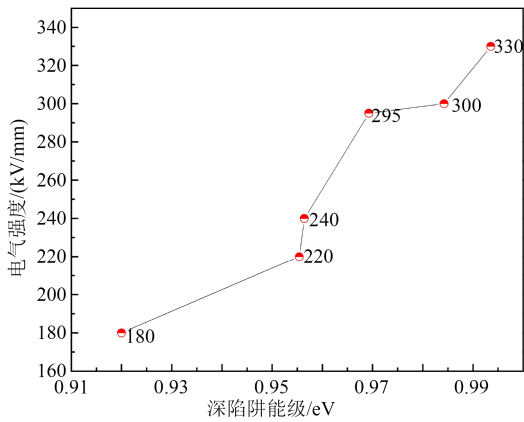


图8 深陷阱能级与电气强度的关系  
Fig.8 Relationship between deep trap level and electric strength

击,从而提高了电气强度<sup>[17]</sup>。

### 2.4 空间电荷分析

测试掺杂不同含量四氰基苯醌二甲烷的样品在 40 kV/mm 场强下的空间电荷分布情况,结果如图 9 所示。从图 9 可以看出,掺杂不同含量的四氰基苯醌二甲烷对于空间电荷有不同程度的抑制作用,效果最好的是掺杂四氰基苯醌二甲烷质量分数为 0.07% 的样品,与前面击穿测试结果相符。

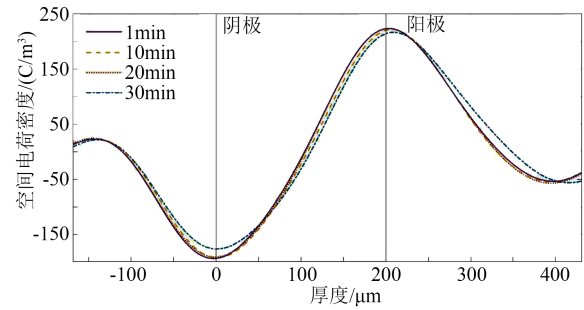
电场作用于纯聚乙烯时,由于大量的晶体粒子导致样品表面电位分布不均,陷阱深度较浅,电极注入样品的电荷随电场流入两极,形成大量的异极性电荷积聚在电极附近,异极性电荷的产生对电场起到一定的加强作用,因而造成试样中积累大量的空间电荷;而在掺杂四氰基苯醌二甲烷的样品中,由于掺杂的四氰基苯醌二甲烷为纳米小颗粒,小分子的存在引入大量的深陷阱,当电荷注入时,大部分电荷会被深陷阱捕获<sup>[16]</sup>,被捕获的电荷留存于电极表面,形成同极性电荷,从而削弱电极的电场,形成电极屏蔽层,在电荷输运过程中载流子容易与深陷阱处的电荷复合,因此表面电荷量较少。

通过前述分析可以看出,空间电荷分布与陷阱分布存在关联性,含深陷阱的样品倾向于产生较低的空间电荷密度。

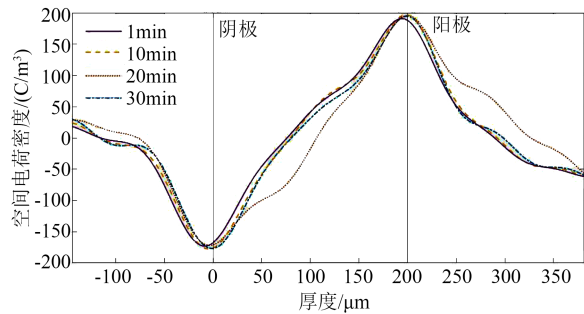
### 2.5 能级仿真计算分析

利用 QE 软件分别仿真得到聚乙烯能带和四氰基苯醌二甲烷能级结果如图 10 和图 11 所示。由于 PBE 密度泛函存在过度屏蔽(over-shielding)的问题,导致计算得到的能带宽度变窄<sup>[18]</sup>,能带间隔拉近,使计算得到的能带比实际略窄。

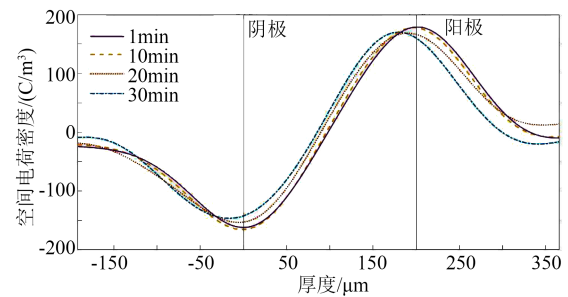
由图 10 和图 11 可以看出,聚乙烯的能带约为



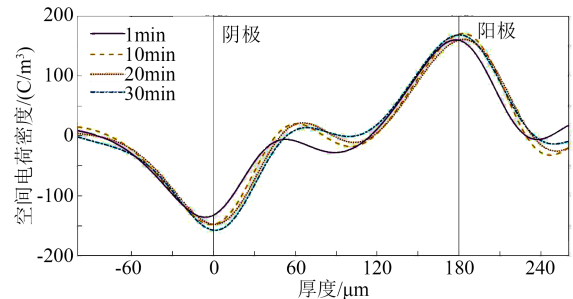
(a) 纯 PE



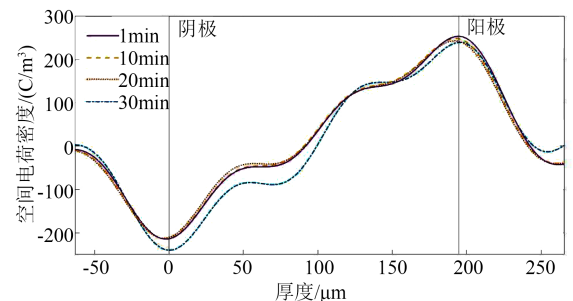
(b) 四氰基苯醌二甲烷质量分数为 0.03%



(c) 四氰基苯醌二甲烷质量分数为 0.05%



(d) 四氰基苯醌二甲烷质量分数为 0.07%



(e) 四氰基苯醌二甲烷质量分数为 0.1%

图9 不同掺杂含量样品的空间电荷分布  
Fig.9 Space charge distribution of samples with different doping content

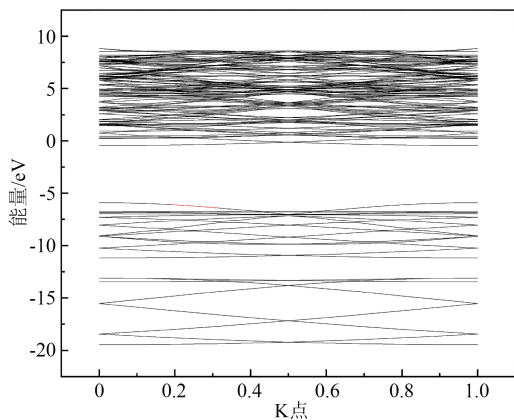
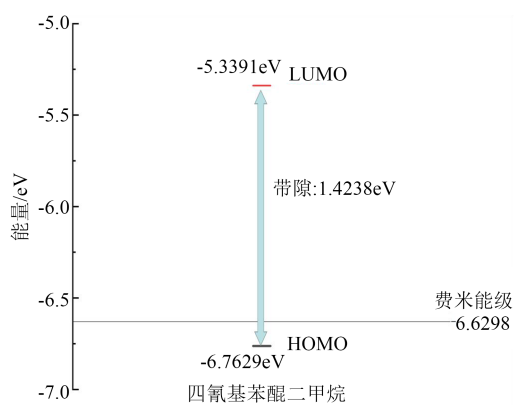
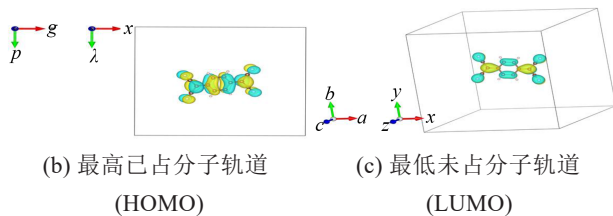


图10 聚乙烯能带仿真结果

Fig.10 Energy band simulation results of polyethylene



(a) 四氰基苯醌二甲烷能级



(b) 最高已占分子轨道 (HOMO)

(c) 最低未占分子轨道 (LUMO)

图11 四氰基苯醌二甲烷能级仿真结果

Fig.11 Energy level simulation results of tetracyano-benzoquinone dimethane

7.0 eV,而四氰基苯醌二甲烷的能级为1.423 8 eV。四氰基苯醌二甲烷小分子和聚乙烯中的空穴形成复合中心,这是引入新的陷阱能级的原因。分子轨道(MOs)是由原子轨道之间的相互杂化作用产生的,描述了原子轨道中电子的波函数特征。通过结合分子中每个原子的原子和杂化轨道的过程,以及自洽场(SCF)方法获得了分子轨道,如图11(b)和(c)所示MOs在LUMO和HOMO位置的分布表明所有的MOs都沿着氰基分布。因此,电子和空穴在跃迁到上层能级时会遇到阻碍,导致电子在该区域相对稳定,很容易被捕获而不能自由移动。表明引入小

分子氰基后,电子被吸引并积聚在一起,从而减轻了聚乙烯主链受到的电子冲击。由于带隙的变窄会导致更多的载流子被捕获到新引入的深陷阱中,进而限制载流子的移动,将载流子的能量以一种相对安全的形式释放,从而减轻其对聚乙烯分子链的冲击,不易形成放电轨道,从而提升了样品的电气强度和降低了电导率。

### 3 结论

本文制备了聚乙烯/四氰基苯醌二甲烷复合材料,并对其电气强度、高场电导及陷阱分布特征进行测试,得到如下结论:

(1)掺杂四氰基苯醌二甲烷后聚乙烯材料的电气强度提升、电导率降低,且改性效果随掺杂含量的增加先升高后降低,其中掺杂四氰基苯醌二甲烷质量分数为0.07%的样品电气强度较纯聚乙烯提升了约54%。

(2)掺杂四氰基苯醌二甲烷后在聚乙烯内引入了电荷深陷阱,深陷阱可以捕获导带上的载流子,减少载流子密度。

(3)利用DFT理论对聚乙烯和小分子进行建模仿真,发现四氰基苯醌二甲烷的带隙明显低于聚乙烯能带宽度,聚乙烯导带内自由电荷迁移时易被四氰基苯醌二甲烷捕获,形成电荷深陷阱,进而提升了聚乙烯的绝缘性能。

### 参考文献 References

- [1] 张亚,王晓阳,龚敏,等. 乙烯基非交联电缆屏蔽料性能与分散剂含量关系研究[J]. 高压电器,2024,60(4):33-39.  
ZHANG Y, WANG X Y, GONG M, et al. Study on the relationship between the properties of vinyl non-crosslinked cable shielding material and the content of dispersant[J]. High Voltage Electrical Apparatus,2019,60(4):33-39.
- [2] MACKAWA Y, YAMAGUCHI A, HARA M, et al. Development of XLPE insulated DC cable[J]. Electrical engineering in Japan, 1994,114(8):1-12.
- [3] 张晓虹,李毓庆,雷清泉. 改性无机填料对低密度聚乙烯电老化性能的影响[J]. 电工技术学报,1994(2):48-52.  
ZHANG X H, LI Y Q, LEI Q Q. Effect of modified inorganic fillers on electrical aging properties of low density polyethylene [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1994(2):48-52.
- [4] FLEMING R J, PAWLOWSKI T, AMMALA A, et al. Electrical conductivity and space charge in LDPE containing TiO<sub>2</sub>/nanoparticles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2005,12(4):745-753.
- [5] 肖春,张治文,宫斌,等. 聚乙烯中的微量水份对其空间电荷分布

- 的影响[J]. 四川大学学报(自然科学版),2005(增刊):368-372.
- XIAO C, ZHANG Y W, GONG B, et al. Effect of trace water in polyethylene on space charge distribution[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition),2005(S1):368-372.
- [6] YUAN C, ZHOU Y, ZHU Y J, et al. Polymer/molecular semiconductor all-organic composites for high-temperature dielectric energy storage[J]. Nature Communications,2020,11(1):3919.
- [7] POURRAHIMI A M, KUMARA S, PALMIERI F, et al. Repurposing poly(3-hexylthiophene) as a conductivity-reducing additive for polyethylene-based high-voltage insulation[J]. Advanced Materials,2021,33(27):2100714.
- [8] 许旭日,高宇,李敬,等. 基于等温表面电位衰减法预测不同厚度的聚乙烯纳米复合材料直流击穿场强[J]. 高电压技术,2022,48(7):2864-2872.
- XU X R, GAO Y, LI J, et al. Prediction of DC breakdown field strength of polyethylene nanocomposites with different thicknesses based on isothermal surface potential decay method[J]. High Voltage Engineering,2019,48(7):2864-2872.
- [9] ZHAO X D, ZHAO H, SUN W F. Significantly improved electrical properties of crosslinked polyethylene modified by UV-initiated grafting MAH[J]. Polymers,2020,12(1):62.
- [10] 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 B X, HAN C L, LI J, et al. Research status of polyethylene insulation materials for HVDC cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(1):179-191.
- [11] LE ROY S, BAUDOIN F, LAURENT C, et al. Analysis of current - voltage characteristics in insulating polymers using a bipolar charge transport model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2022,29(6):2101-2109.
- [12] 倪艳荣,郭永亮,李承斌,等. 纳米掺杂交联聚乙烯复合材料的空间电荷特性研究[J]. 绝缘材料,2023,56(3):33-40.
- NI Y R, GUO Y L, LI C B, et al. Study on space charge properties of nano-doped crosslinked polyethylene composites[J]. Insulating Materials,2023,56(3):33-40.
- [13] ZHOU L W, WANG X, ZHANG Y Q, et al. An experimental study of the crystallinity of different density polyethylenes on the breakdown characteristics and the conductance mechanism transformation under high electric field[J]. Materials, 2019, 12(17):2657.
- [14] ZHU X, YIN Y, PENG S, et al. Mobility-limited charge injection in cross-linked polyethylene under extra high electric field [J]. High Voltage,2021,6(5):782-792.
- [15] HE A, JIANG J, DING J, et al. Blocking effect of fullerene nanoparticles ( $nC_{60}$ ) on the plant cell structure and its phytotoxicity[J]. Chemosphere,2021,278:130474.
- [16] WANG W W, LI S T, TANAKA Y, et al. Interfacial charge dynamics of cross-linked polyethylene/ethylene-propylene-diene dual dielectric polymer as revealed by energy band structure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019, 26(6):1755-1762.
- [17] CHEN X R, YU L W, DAI C, et al. Enhancement of insulating properties of polyethylene blends by delocalization type voltage stabilizers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(6):2041-2049.
- [18] 屠德民,王霞,吕泽鹏,等. 以能带理论诠释直流聚乙烯绝缘中空间电荷的形成和抑制机理[J]. 物理学报,2012,61(1):409-415.
- TU D M, WANG X, LÜ Z P, et al. Interpretation of the formation and inhibition mechanism of space charge in DC polyethylene insulation by energy band theory[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(1):409-415.

收稿日期:2023-07-14;修回日期:2023-11-21。

#### 作者简介:

陈纯松(1997-),男(汉族),山东东营人,硕士生,主要从事聚乙烯介电性能提升方法的研究;

通信作者:钟振芳(1990-),女(汉族),山东莒县人,讲师,主要从事电气绝缘性能提升技术的研究。