

# 多元受阻酚抗氧剂对交联聚乙烯绝缘直流击穿行为的影响

张大维, 尹渭, 章迅

(国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200051)

**摘要:**受阻酚型抗氧剂常用于XLPE绝缘中的主抗氧剂以提升其加工特性和长时电气特性,为了深入探讨受阻酚抗氧剂对XLPE绝缘直流击穿行为的影响,本文制备了两种含有不同多元受阻酚抗氧剂的XLPE绝缘试样,并对其性能进行测试。结果表明:添加受阻酚抗氧剂可以明显提升XLPE绝缘的电气强度与击穿稳定性,这是由于添加受阻酚抗氧剂能够向XLPE绝缘中引入深陷阱,提高了陷阱密度,但是两种多元受阻酚抗氧剂引入的深陷阱能级与类型不同,因此对XLPE绝缘电气强度的提升程度不同;此外,添加受阻酚抗氧剂有利于提高XLPE的结晶度与结晶均匀性,但影响并不明显。

**关键词:**交联聚乙烯;受阻酚抗氧剂;直流击穿特性;结晶;电荷陷阱

**中图分类号:** TM215.1 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.01.002

## Effect of multi-hindered phenolic antioxidant on DC breakdown behavior of XLPE insulation

ZHANG Dawei, YIN Wei, ZHANG Xun

(State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200051, China)

**Abstract:** Hindered phenolic antioxidant is a main antioxidants commonly used in cross-linked polyethylene (XLPE) insulation to improve its processability and long-term electrical performance. In order to discuss the effect of hindered phenolic antioxidants on the DC breakdown behavior of XLPE insulation deeply, two kinds of XLPE insulation samples containing different multi-hindered phenolic antioxidants were prepared, and their properties were measured. The results show that the addition of hindered phenolic antioxidants can obviously improve the electric strength and breakdown stability of XLPE insulation, this is because the addition of hindered phenolic antioxidant can introduce deep traps into XLPE insulation and increase the trap density. However, the energy levels and types of deep traps introduced by the two multi-hindered phenolic antioxidant are different, therefore the effects of them on the improving the electric strength of XLPE insulation are different. In addition, the addition of hindered phenol antioxidant can improve the crystallinity and crystallization uniformity of XLPE, but the effect is not obvious.

**Key words:** cross-linked polyethylene; hindered phenolic antioxidant; DC breakdown characteristic; crystallinity; charge traps

## 0 引言

随着新型城镇化的推进和“双碳”目标的提出,城市电网加速建设,远距离、大容量、高电压等级的光伏风电等清洁能源将不断输送接入电网,其中的关键设备是高压直流电缆<sup>[1-2]</sup>。交联聚乙烯(XLPE)作为当前高压直流电缆最常用的主体绝缘,为了进一步提升其加工特性和长时电气特性,工业上会适量加入抗氧剂<sup>[3]</sup>。而受阻酚类抗氧剂作为高压直流

电缆XLPE绝缘料常用的主抗氧剂<sup>[3-4]</sup>,可能会对XLPE绝缘的击穿特性产生影响。因此,有必要探讨受阻酚抗氧剂对XLPE绝缘直流击穿行为的影响机制,从而为高压直流电缆进一步选择合适的抗氧剂提供理论依据。

当前针对受阻酚类抗氧剂在高压直流电缆的研究,主要集中在分析其对电缆绝缘老化如电树枝等方面的影响<sup>[5-7]</sup>,而受阻酚类抗氧剂属于极性小分子,势必会影响绝缘介质内部的电荷陷阱特性,进而对其击穿特性产生影响<sup>[8-9]</sup>。

基金项目:国网上海市电力公司科技项目(52090020007G)

抗氧剂对聚烯烃绝缘电气性能的影响方面已取得部分进展。蔡静等<sup>[10]</sup>研究了抗氧剂对低密度聚乙烯绝缘材料电导特性和直流电气强度的影响,结果表明,添加抗氧剂的低密度聚乙烯直流电气强度比纯低密度聚乙烯要高,而且在高场强下添加抗氧剂的低密度聚乙烯电导率也较低。刘畅等<sup>[11]</sup>研究了具有同分异构型的两种硫代受阻酚抗氧剂对高压直流电缆用聚丙烯击穿特性的影响,指出抗氧剂苯环上取代基的位置会影响其对聚丙烯直流击穿特性的作用。文献[12-13]研究了将抗氧剂接枝至XLPE链上后对XLPE绝缘材料直流电气性能的影响,结果表明在较低的抗氧剂含量下,接枝改性的XLPE可有效抑制空间电荷积累、降低直流电导电流密度并提高直流电气强度。当前向绝缘料中添加受阻酚类抗氧剂是提升XLPE电学性能的主要措施,因此受阻酚类抗氧剂在XLPE绝缘中有着重要作用,而多元受阻酚抗氧剂在抗老化性能上表现突出<sup>[14-6]</sup>,但缺少其对XLPE绝缘直流击穿行为的深入研究。

基于上述分析,选取两种多元受阻酚抗氧剂与XLPE绝缘进行共混,研究其对XLPE绝缘直流击穿特性的影响机制。通过凝胶萃取测试、差示扫描量热分析(DSC)和X射线衍射分析(XRD)研究不同抗氧剂对XLPE绝缘交联和结晶特性的影响;测试不同试样的直流电气强度和热刺激电流特性,并基于量子化学的模拟方法探讨多元受阻酚抗氧剂对XLPE绝缘陷阱特性的影响机制。

## 1 实验

### 1.1 试样制备

低密度聚乙烯作为基料;过氧化二异丙苯下(DCP)作为交联剂;三元受阻酚抗氧剂A和四元受阻酚抗氧剂B,其分子结构式如图1所示。

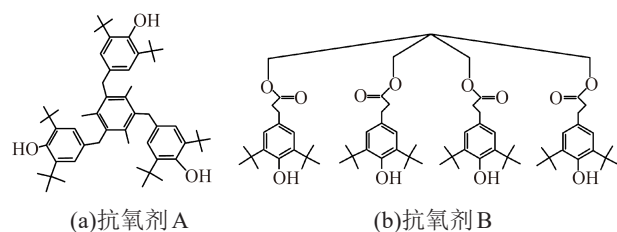


图1 抗氧剂分子结构式

Fig.1 Molecular structure of antioxidant

试样制备前,使用真空干燥箱将低密度聚乙烯基料在60℃下干燥6h以去除水分的干扰。使用密炼机在115℃、20 r/min条件下将LDPE、DCP、抗氧剂熔融共混15 min,DCP添加量为2.0份,抗氧剂添

加量为0.2份。将上述共混物试样使用硫化机在115℃下预热10 min,然后在180℃、15 MPa条件下热压15 min,使用水循环冷却至室温,将获得的XLPE试样置于70℃的真空干燥箱中12 h,通过脱气将其交联副产物排出,获得最终的XLPE试样。将仅添加2.0份DCP的试样命名为XLPE-D,将添加2.0份DCP和0.2份三元受阻酚抗氧剂A的试样命名为XLPE-A,将添加2.0份DCP和0.2份四元受阻酚抗氧剂B的试样命名为XLPE-B。

### 1.2 直流击穿特性实验

采用计算机控制型直流击穿试验装置测试试样的直流击穿特性,选择直径为25 mm的球型电极,以1 kV/s线性匀速升压,测试环境为室温变压器绝缘油中,试样厚度为(0.15±0.01)mm,每个试样取15个测试点。采用Weibull分布对试样的电气强度数据进行分析,如式(1)所示。

$$P = 1 - \exp\left(-\left(\frac{E}{\alpha}\right)^\beta\right) \quad (1)$$

式(1)中: $P$ 为累计击穿失效概率; $E$ 为试样测试的电气强度; $\alpha$ 为尺度参数,表示击穿概率为63.2%时的电气强度; $\beta$ 为形状参数,表示电气强度的分散性, $\beta$ 值越大说明电气强度的均匀性越好。

### 1.3 凝胶含量测试

采用凝胶萃取法对3种试样进行凝胶含量(Gel)测试。选择120目不锈钢滤网折成网包并称重为 $m_0$ ,称取0.3 g左右的试样放入网包后再称重为 $m_1$ ,封口放入盛有二甲苯溶剂的回流冷凝器-圆底烧瓶中,140℃下回流萃取10 h,再将网袋取出在真空干燥箱中140℃下干燥6 h,冷却后称重为 $m_2$ ,则试样凝胶含量的计算方法如式(2)所示。每个试样的凝胶含量测试3次取平均值。

$$\text{Gel} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (2)$$

### 1.4 结晶特性测试

采用差示扫描量热仪对不同试样进行熔融、结晶测试。称取7 mg左右的试样,在150 mL/min的氮气流速保护下,以10℃/min的速率先从25℃升温至150℃,保温5 min,然后降温至25℃,保温3 min,再升温至150℃,获得热流-温度曲线,通过曲线拟合得到试样的熔融焓( $\Delta H_m$ ),根据式(3)计算试样的结晶度( $X_c$ )。根据式(4)计算试样的片晶厚度( $L$ )。

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{100}} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中, $\Delta H_{100}$ 为XLPE结晶度为100%时的熔融焓,其值为287.3 J/g。

$$T_m = T_{m0} \left(1 - \frac{2\sigma_e}{\Delta H_m L}\right) \quad (4)$$

式(4)中: $T_m$ 为片晶的熔融温度,可由DSC实验获得; $L$ 为片晶的平均厚度; $T_{m0}$ 为无限大晶体的平衡熔融温度,取值为414.6 K; $\sigma_e$ 为单位表面自由能,其值为 $9.3 \times 10^{-2} \text{ J/m}^2$ ; $\Delta H_m$ 为单位体积XLPE晶体的熔融热焓,其值为 $2.88 \times 10^8 \text{ J/m}^3$ 。

采用X射线衍射仪对不同试样进行连续扫描,铜靶作为靶材,光管电压为40 kV,电流为40 mA,扫描速率为 $0.2^\circ/\text{min}$ ,扫描范围为 $10^\circ \sim 30^\circ$ 。已知XLPE会在(110)面和(200)面上形成尖锐的衍射峰,晶粒尺寸( $D$ )和晶面间距( $d$ )可分别通过式(5)和式(6)求得。

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (5)$$

$$d = \frac{n\lambda}{2\sin \theta} \quad (6)$$

式(5)~(6)中: $k$ 为Scherrer常数,其值为0.89; $\lambda$ 为X射线波长,其值为 $0.15418 \text{ nm}$ ; $\theta$ 为入射角; $\beta$ 为半峰宽; $n$ 为衍射级次,取值为1。

### 1.5 热刺激电流实验

采用热刺激电流系统测试不同试样的热刺激电流(TSDC)特性。以 $30^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率将温度从 $25^\circ\text{C}$ 升温至极化温度 $70^\circ\text{C}$ ,然后给试样施加 $100 \text{ kV/mm}$ 直流电压,在该电压下保持极化30 min。极化结束后,以 $30^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率降温至去极化温度 $-130^\circ\text{C}$ ,保持该温度5 min。再以 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率线性升温至 $140^\circ\text{C}$ ,记录热刺激去极化电流-温度曲线。通过式(7)拟合计算可获得电荷陷阱特性。

$$j(T) = A \exp \left[ -\frac{E_a}{k_B T} - \frac{1}{\gamma \tau_0} \int_{T_0}^{T'} \exp \left( -\frac{E_a}{k_B T} \right) dT \right] \quad (7)$$

式(7)中: $j(T)$ 是热刺激电流; $A$ 是常数; $E_a$ 是陷阱能级; $\gamma$ 是升温速率; $\tau_0$ 是松弛时间; $T_0$ 和 $T'$ 分别是去松弛峰的起始和终止温度; $k_B$ 是玻尔兹曼常数。

## 2 实验结果

### 2.1 直流击穿测试结果

不同XLPE试样直流电气强度的Weibull分布特性如图2所示,根据Weibull分布曲线拟合获得试样的尺度参数 $\alpha$ 和形状参数 $\beta$ ,如表1所示。从表1可知,XLPE-A和XLPE-B试样的直流电气强度分别为 $532.51 \text{ kV/mm}$ 和 $520.49 \text{ kV/mm}$ ,明显高于XLPE-D试样的电气强度 $501.72 \text{ kV/mm}$ ,说明添加受阻酚抗氧剂有利于提升XLPE试样的直流电气强度。对比不同XLPE试样的形状参数 $\beta$ 可知,添加抗氧剂的XLPE试样 $\beta$ 值也明显增大,降低了XLPE试样电

气强度的分散性,即提高了XLPE试样直流击穿行为的稳定性,这可能是因为抗氧剂抑制了试样内部缺陷的形成以及促进结晶完善。因此,添加抗氧剂不仅能够提高XLPE试样的电气强度,同时有利于增强其击穿稳定性,而不同受阻酚抗氧剂对XLPE试样直流击穿特性的影响存在一定的差异,添加三元受阻酚抗氧剂的XLPE电气强度和击穿稳定性略优于添加四元受阻酚抗氧剂的XLPE试样。

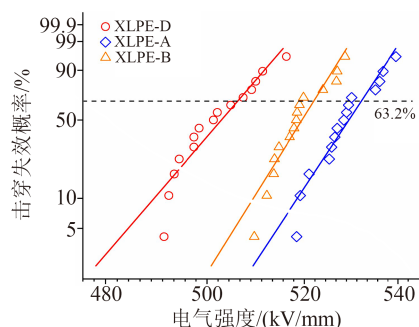


图2 不同XLPE试样电气强度的威布尔分布  
Fig.2 Weibull distribution of electric strength of different XLPE samples

表1 不同XLPE试样的形状参数和尺寸参数  
Tab.1 Scale parameter and shape parameter of different XLPE samples

试样	$\alpha/(\text{kV/mm})$	$\beta$
XLPE-D	501.72	13.72
XLPE-A	532.51	19.44
XLPE-B	520.49	17.93

### 2.2 结晶特性分析

不同XLPE试样的DSC曲线如图3所示,根据DSC曲线拟合可获得XLPE试样的主熔融峰温度和熔融焓,如表2所示。由表2可知,不同XLPE试样的主熔融峰温度差异十分小,均在 $(103 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,但其熔融焓存在一定的差异,其中添加抗氧剂的XLPE熔融焓比纯XLPE试样的更高,XLPE-A试样的熔融焓最大为 $100.78 \text{ J/g}$ 。

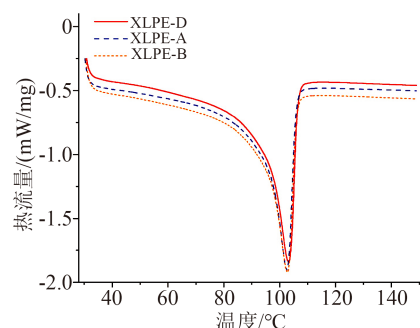


图3 不同XLPE试样的DSC曲线  
Fig.3 DSC curves of different XLPE samples

表2 不同XLPE试样的熔融参数

试样	XLPE-D	XLPE-A	XLPE-B
主熔融峰温度/°C	104.1	102.9	102.2
熔融温度/°C	108.2	109.4	108.9
熔融焓/(J/g)	95.35	100.78	97.68

结合试样的熔融焓,由式(3)可求得不同XLPE试样的结晶度,通过凝胶含量测试表征XLPE的交联度,结果如图4所示。由图4可知,不同XLPE试样的交联度都大于82%,但加入抗氧剂的XLPE试样交联度均小于XLPE-D试样的交联(85.74%),其中XLPE-A的交联度最小为82.93%,说明抗氧剂一定程度上会降低XLPE试样的交联度。对比不同试样的结晶度,发现添加抗氧剂的XLPE试样结晶度大于XLPE-D试样的结晶度(33.19%),其中XLPE-A的结晶度最高为35.08%。交联反应形成交联网络会抑制结晶过程,因此交联度与结晶度呈现负相关性。另外,添加受阻酚抗氧剂虽然会对XLPE试样的交联度和结晶度产生影响,但差异并不明显。

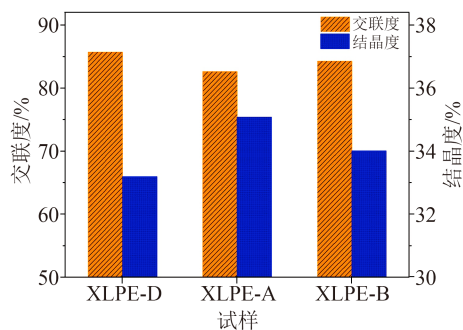


图4 不同XLPE试样的交联度和结晶度

Fig.4 Crosslinking degree and crystallinity of different XLPE samples

为了进一步表征不同XLPE试样的结晶特性,测试了试样的XRD曲线,结果如图5所示,根据式(5)和式(6)计算可得不同晶面的晶粒尺寸和晶面间距,如表3所示。

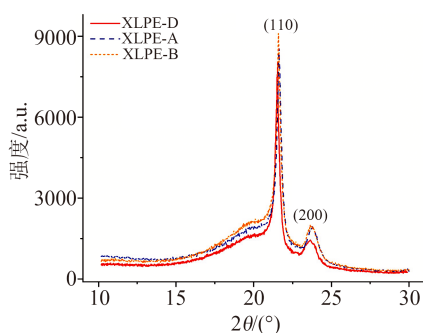


图5 不同XLPE试样的XRD曲线

Fig.5 XRD curves of different XLPE samples

表3 不同XLPE试样的结晶特性

试样	XLPE-D	XLPE-A	XLPE-B	
片晶厚度/nm	8.05	8.35	8.25	
D/nm	(110)	17.83	15.43	16.29
	(200)	13.34	12.61	12.88
d/nm	(110)	0.47	0.41	0.44
	(200)	0.39	0.34	0.37

从表3可知,XLPE-D试样的晶粒尺寸最大,在(110)和(200)两个晶面的晶粒尺寸差异最大;而添加抗氧剂的XLPE试样晶粒尺寸略小,其中XLPE-A试样在(110)和(200)两个晶面上的晶粒尺寸最小,分别为15.43 nm和12.61 nm,且晶面的晶粒尺寸差异也最小,为2.82 nm,说明其结晶更均匀。对比不同试样的晶面间距可知,XLPE-D试样的晶面间距最大,XLPE-A试样的晶面间距最小。结合结晶度、晶粒尺寸、晶面间距和片晶厚度可以发现,添加受阻酚抗氧剂的XLPE试样结晶度和片晶厚度均比XLPE-D的大,表明其内部晶粒较紧密,结晶排列的分散程度较小,晶体结构更加越完善,说明添加受阻酚抗氧剂有利于促进XLPE试样结晶更加均匀。

XLPE属于半结晶聚合物,其结晶过程包括晶核形成和晶粒生长,而晶核形成又分为均相成核和异相成核。随着交联反应的进行,XLPE内产生交联键,形成交联网络,会限制大分子连段的运动,进而影响其结晶度;异相成核是指大分子与杂质分子相互作用,进而形成晶核,而抗氧剂在XLPE会成为异相成核的中心,有助于晶核的形成,促进XLPE的结晶,使得结晶更完善。综上可知,抗氧剂一定程度上会改善XLPE绝缘的结晶特性。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 XLPE绝缘电荷陷阱特性

研究表明,XLPE的高结晶度和均匀结晶均有助于提高其直流电气强度<sup>[14]</sup>,由2.2节可知,虽然添加受阻酚抗氧剂提高了XLPE试样的结晶度并改善了其结晶特性,但是提高程度不明显,而从图2中可知,XLPE-A和XLPE-B的直流电气强度相比XLPE-D试样提升十分明显,说明添加受阻酚抗氧剂能提升XLPE绝缘电气强度的主导因素不是其结晶特性的改善。

受阻酚抗氧剂属于极性小分子,会向XLPE中引入新的电荷陷阱,在外施直流电压下,新的电荷陷阱会影响XLPE绝缘中载流子的迁移行为,进而

改变其直流击穿特性<sup>[11,15]</sup>。为了验证受阻酚抗氧剂向XLPE绝缘中引入了电荷陷阱及其陷阱特性,本研究通过测试不同试样的热刺激去极化电流特性(如图6所示),再根据式(7)对热刺激去极化电流曲线进行拟合获得不同XLPE试样的陷阱特性,如表4所示。

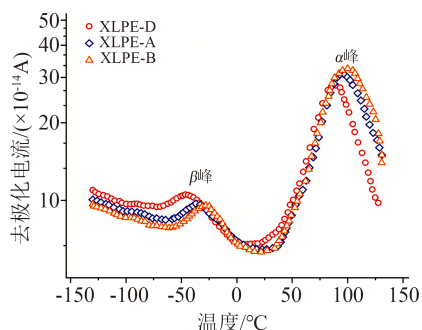


图6 不同XLPE试样的TSDC曲线

Fig.6 TSDC curves of different XLPE samples

表4 不同XLPE试样的陷阱深度

试样	电流峰	陷阱深度/eV
XLPE-D	$\alpha$	0.89
	$\beta$	0.15
XLPE-A	$\alpha$	1.43
	$\beta$	0.18
XLPE-B	$\alpha$	1.28
	$\beta$	0.20

由图6和表4可知,添加受阻酚抗氧剂会影响XLPE绝缘的电荷陷阱特性。每个样品的热刺激电流曲线均出现两个明显的电流峰,但两个峰的面积与温度存在一定差异,高温下 $\alpha$ 松弛峰和低温下 $\beta$ 松弛峰分别对应电荷陷阱的深陷阱和浅陷阱<sup>[16]</sup>。对比图6中的曲线可以发现,XLPE-A和XLPE-B试样中的 $\alpha$ 松弛峰的面积与温度都大于XLPE-D,说明抗氧剂会向XLPE绝缘中引入深陷阱,且深陷阱能级明显高于XLPE-D试样。由表4可进一步量化对比XLPE-A和XLPE-B的陷阱特性,二者对应的深陷阱能级分别为1.43 eV和1.28 eV,XLPE-A试样的深陷阱能级最大。说明添加受阻酚抗氧剂向XLPE绝缘中引入了深陷阱,增大了绝缘内的深陷阱密度,从而使载流子在移动的过程中易被陷阱捕获,载流子动能无法持续累积,降低了其平均自由程,减少其碰撞导致的分子链断裂,进而提高了XLPE绝缘的直流电气强度。

### 3.2 受阻酚抗氧剂分子能带分布

为了深入分析受阻酚抗氧剂对XLPE绝缘直流电气强度的影响机理,使用Gaussian量子化学模拟

软件<sup>[11,17]</sup>分别计算XLPE、抗氧剂A和抗氧剂B的能带分布,结果如图7所示。XLPE的带隙为8.23 eV,与已有文献中的值相近<sup>[18]</sup>,根据前线分子轨道理论可知<sup>[11,18]</sup>,最低未占分子轨道(LUMO)具有电子亲和性,能够表征抗氧剂分子的电子陷阱特性,最高占据分子轨道(HOMO)具有空穴亲和性,能够表征抗氧剂分子的空穴陷阱特性。由图7可知,LUMO能级从大到小依次为XLPE、抗氧剂A、抗氧剂B,HOMO能级从小到大依次为XLPE、抗氧剂B、抗氧剂A,可以发现两种受阻酚抗氧剂在XLPE的禁带中引入了新的能级,说明两种抗氧剂均能向XLPE中引入新的深陷阱能级,增大了XLPE绝缘的深陷阱密度,从而提升了其直流击穿特性。其中抗氧剂A向XLPE中引入的深空穴陷阱能级明显比抗氧剂B向XLPE中引入的深电子陷阱高,因此抗氧剂A对XLPE绝缘直流电气强度的提升幅度更大。

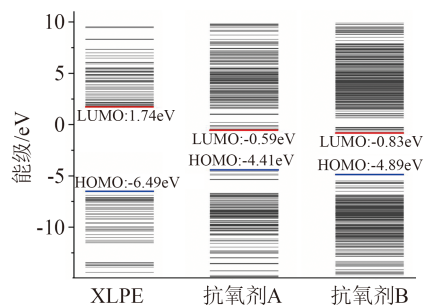


图7 XLPE和抗氧剂的能带分布

Fig.7 Energy band distribution of XLPE and antioxidants

抗氧剂A的前线分子轨道分布如图8所示。从图8可以发现,占据HOMO基轨道的官能团主要为抗氧剂分子的部分苯环和酚羟基,占据LUMO轨道的官能团主要为抗氧剂分子的苯环。抗氧剂B的前线分子轨道分布如图9所示。从图9可以发现,占据HOMO基轨道的官能团同样主要为抗氧剂分子的部分苯环和酚羟基,而占据LUMO轨道的官能团主要为抗氧剂分子的部分苯环和酯基。对比图8和图9可见,抗氧剂A和抗氧剂B中占据前线分子轨道的官能团数量与种类有所差异,进而引起二者的能带分布不同,向XLPE绝缘引入的深陷阱能级与种类不同,这是两种多元受阻酚抗氧剂对XLPE绝缘直流电气强度影响有差异的主要原因。

结合热刺激去极化电流特性和能带分布的分析可知,不同受阻酚抗氧剂能够向XLPE绝缘中引入不同能级的深陷阱,为绝缘内部提供载流子的俘获位点,限制了载流子的迁移,即缩短了载流子的平均自由程,削弱载流子的能量,减少其碰撞导致的分子链断裂,从而提升了XLPE绝缘的直流电气强度。

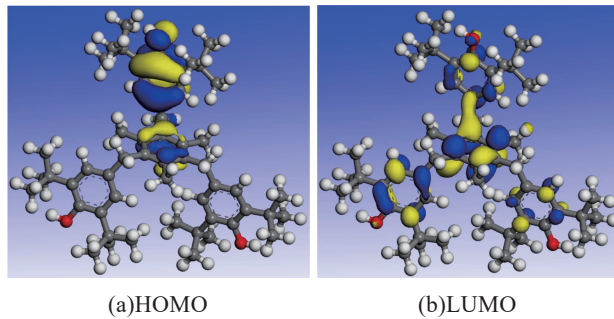


图8 抗氧化剂A的前线分子轨道

Fig.8 Frontier molecular orbital of antioxidant A

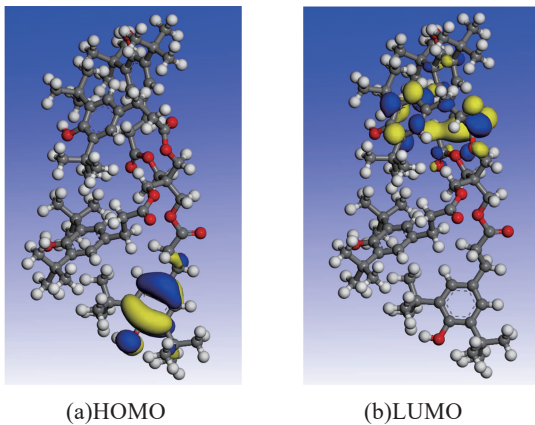


图9 抗氧化剂B的前线分子轨道

Fig.9 Frontier molecular orbital of antioxidant B

## 4 结论

(1)添加多元受阻酚抗氧剂能够改善XLPE绝缘的直流击穿特性,不仅提升了XLPE绝缘的电气强度,也增强了其击穿稳定性,且不同种类的抗氧剂对直流电气强度的提升程度不同。

(2)添加多元受阻酚抗氧剂一定程度上能够改善XLPE绝缘的结晶特性,稍微提高结晶度,使得晶粒尺寸和晶面间距减小,XLPE绝缘结晶趋向完善,有利于提高击穿稳定性,但这不是XLPE绝缘直流电气强度提升的主导因素。

(3)多元受阻酚抗氧剂能够向XLPE绝缘中引入深陷阱,不同抗氧剂引入的深陷阱能级与类型不同,但均能够增大绝缘中的深陷阱密度,这是提升XLPE绝缘直流电气强度的根本机制。

(4)多元受阻酚抗氧剂分子的LUMO和HOMO轨道主要是由苯环和酚羟基占据,其中三元受阻酚抗氧剂A提供更多深空穴陷阱,四元受阻酚抗氧剂B提供更多深电子陷阱,三元受阻酚抗氧剂提供的深陷阱能级更高,这是不同受阻酚抗氧剂对XLPE绝缘电气强度提升程度不同的主要原因。

## 参考文献:

[1] 李盛涛,王诗航,李建英. 高压直流电缆料的研究进展与路径分

析[J]. 高电压技术,2018,44(5):1399-1411.

- [2] 张翀,查俊伟,王思蛟,等. 高压直流电缆绝缘材料的发展与展望[J]. 绝缘材料,2016,49(2):1-9.
- [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):1571-1579.
- [4] 张斌,姜新梅,俞浩,等. 高压电缆用交联聚乙烯绝缘料抗氧体系研究[J]. 上海塑料,2021,49(3):44-48.
- [5] 李欢,翟双,陈杰,等. 交联聚乙烯电缆绝缘中不同尺度缺陷结构综述[J]. 绝缘材料,2019,52(12):1-9.
- [6] 王玉如,何书艳,王华,等. 受阻酚类抗氧剂对聚乙烯抗热氧化性能的影响[J]. 精细石油化工,2021,38(4):61-65.
- [7] 梁凤芝,苏桂明,唐科达,等. 抗氧剂300对交联聚乙烯树枝老化特性的影响[J]. 绝缘材料,2018,51(8):26-30.
- [8] SU J G, DU B X, HAN T, et al. Multistep and multiscale electron trapping for high-efficiency modulation of electrical degradation in polymer dielectrics[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(12):7045-7053.
- [9] CHEN L H, HUAN T D, RAMPRASAD R. Electronic structure of polyethylene: Role of chemical, morphological and interfacial complexity[J]. Scientific Reports, 2017,7:6128.
- [10] 蔡静,韩宝忠,李春阳. 抗氧剂对聚乙烯电缆直流介电性能的影响[J]. 电站系统工程,2016,32(4):75-78.
- [11] 刘畅,李忠磊,周硕凡,等. 硫代受阻酚复合抗氧剂对聚丙烯直流电缆绝缘空间电荷与直流预压击穿特性的影响[J]. 电气工程学报,2021,16(2):42-49.
- [12] ZHANG C V, WANG T Y, SUN W G, et al. Grafting of antioxidant onto polyethylene to improve DC dielectric and thermal aging properties[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021,28(2):541-549.
- [13] 张洪宇. 抗氧剂接枝改性XLPE直流介电及耐热老化性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2020.
- [14] 陈向荣,孟繁博,夏峰,等. 脱气处理对高压直流用500kV XLPE绝缘特性及其聚集形态的影响[J]. 中国电机工程学报,2021,41(10):3645-3656,3688.
- [15] 苏鹏飞,吴建东,祝曦,等. 脱气处理对直流电缆绝缘击穿场强的影响[J]. 中国电机工程学报,2020,40(2):663-672.
- [16] WANG S H, CHEN P X, LI H, et al. Improved DC performance of crosslinked polyethylene insulation depending on a higher purity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(3):1809-1817.
- [17] YUAN H, ZHOU Y, ZHU Y J, et al. Origins and effects of deep traps in functional group grafted polymeric dielectric materials [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020,53:475301.
- [18] YANG Zhaodi, ZHANG Hui, ZHAO Hong, et al. Trap mechanism based on frontier molecular orbitals of additives in polyethylene insulators: A theoretical study and molecular design strategy[J]. International Journal of Quantum Chemistry, 2015, 115(20):1483-1489.

收稿日期:2022-03-05 修回日期:2022-04-21

作者简介:张大维(1978-),男(汉族),江苏无锡人,工程师,研究方向为电能计量。