

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.018

# 低交联度 LLDPE 用于 XLPE 绝缘的机械及直流电气性能

李银格<sup>1,2</sup>, 曹亮<sup>1,3</sup>, 刘相辰<sup>1</sup>, 刘泳斌<sup>1</sup>, 高景晖<sup>1</sup>, 钟力生<sup>1</sup>

(1. 电力设备与电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049;

2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080;

3. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715)

**摘要:**为了降低直流电缆绝缘材料的电导率,并提升电导率及直流击穿场强的温度稳定性,同时改善绝缘的高温力学性能,文中引入低交联度线性低密度聚乙烯(linear low density polyethylene, LLDPE)作为直流电缆绝缘材料。文中对比添加不同含量过氧化二异丙苯(dicumyl peroxide, DCP)的 LLDPE 和低密度聚乙烯(low density polyethylene, LDPE),通过热延伸、动态热机械测试及拉伸试验分析其力学性能,并测试直流电导率和直流击穿场强。结果表明,DCP 质量分数为 0.7%~2.0% 范围内,交联 LLDPE 具有更低的热延伸率,DCP 质量分数为 0.7% 即可满足高压直流电缆对交联聚乙烯(crosslinked polyethylene, XLPE)热延伸率的要求。由此结果,结合减少副产物的目的,选出 DCP 质量分数为 0.7% 的 LLDPE 作为传统 XLPE (DCP 质量分数为 2.0% 的 LDPE) 的对比及替代绝缘材料。动态热机械测试(dynamic mechanical analysis, DMA)及拉伸试验验证了 DCP 质量分数为 0.7% 的 LLDPE 比传统 XLPE 拥有更高的杨氏模量及断裂伸长率;电导率及直流击穿实验表明前者在 30~90 °C 拥有更低的电导率及更优的电导率和直流击穿场强的温度稳定性。由于实际电缆中的交联副产物难以脱尽且分布不均,严重影响电缆长期安全运行,可考虑将 DCP 质量分数为 0.7% 的低交联度 LLDPE 用作直流电缆绝缘材料,从而在满足高温机械性能的同时降低直流电导率并增强电导率的温度稳定性。

**关键词:**低交联度;线性低密度聚乙烯(LLDPE);热延伸;交联密度;动态热机械测试(DMA);电导率

**中图分类号:**TM854

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2023)02-0154-07

## 0 引言

柔性直流输电技术因其在远距离、大容量、低损耗方面的优势而应用广泛<sup>[1-4]</sup>。高压直流(high voltage direct current, HVDC)电缆作为柔性直流输电技术的关键设备,其电缆绝缘主要沿用了高压交流电缆的绝缘材料交联聚乙烯(crosslinked polyethylene, XLPE)<sup>[1,5]</sup>。XLPE 电缆生产制造简单、传输能力强、易于安装和维护、使用成本低、对环境影响小,在世界各地得到了广泛的应用<sup>[6-7]</sup>。

由于需要添加抗氧剂、交联剂和其他助剂等以提高高温下的机械性能、抗变形和化学腐蚀特性及长期运行稳定性等性能, XLPE 电缆绝缘在生产过程中不可避免地会产生交联副产物等杂质<sup>[5-12]</sup>,这些杂质是绝缘体内空间电荷形成、导致场强畸变、引起局部绝缘劣化的重要因素之一<sup>[13]</sup>。当外部施加电场时,杂质的存在可能会增加 XLPE 绝缘空间电荷的浅陷阱,破坏局部电场的均匀性,导致局部放电,加速材料老化<sup>[2,13]</sup>。此外,绝缘层的电导率会随着杂质浓度的升高而升高,增加能源损

耗。尽管工厂在 3 层共挤工艺后对缆芯进行了脱气处理,但脱气工艺不仅耗时耗能,而且无法完全排除绝缘层中的副产物<sup>[14-15]</sup>。Ren 等人研究指出 HVDC 电缆绝缘径向位置上电场的不均匀分布情况,并认为可能是由交联副产物的存在、交联度和结晶度的不均匀分布造成的<sup>[14]</sup>。Ren 等人还报告脱气 25 d 可改善电缆绝缘的空间电荷特性和导电性能<sup>[15]</sup>。Hussin 等人研究发现副产物可增加试样中浅陷阱的数量,减少深陷阱中的电荷数量<sup>[16]</sup>。减少交联副产物的方法之一是减少过氧化二异丙苯(dicumyl peroxide, DCP)的添加,但由于传统 XLPE 使用低密度聚乙烯(low density polyethylene, LDPE)作为基料,其机械性能对 DCP 添加量高度依赖,在低交联度下,材料的高温力学性能无法满足要求。文献[17]已经证明,DCP 质量分数为 2.0% 的交联线性低密度聚乙烯(linear low density polyethylene, LLDPE)在电阻率和机械性能方面、以及在 30~90 °C 温度范围内的电导及直流击穿的温度稳定性方面,均优于同等 DCP 含量的 LDPE。LLDPE 在高温下力学性能和导电性的优异表现使得低交联 XLPE 可能满足 HVDC 电缆绝缘的要求。因此,应探索使用低交联度 LLDPE 作为 HVDC 电缆绝缘材料,实现提高 XLPE 绝缘材料的高温力学性能、降低电导率

收稿日期:2022-06-07;修回日期:2022-08-22

基金项目:国家重点基础研究计划资助项目“浮式风电用动态缆测试技术研究”

及增强电导率的温度稳定性。

文中提出使用 DCP 质量分数为 0.7% 的交联 LLDPE 作为 HVDC 电缆绝缘,并且使用交联 LDPE 作对比。通过热延伸、动态热机械测试(dynamic mechanical analysis, DMA)和拉伸试验对材料的力学性能进行分析,并且测试 2 种材料的直流电导率和直流击穿场强,讨论低交联度 LLDPE 作为直流电缆绝缘,在满足降低副产物含量的同时改善绝缘材料机械性能及直流电导率、直流击穿场强的温度稳定性。

## 1 试样制备及试验方法

### 1.1 试样制备

采用压片硫化的片状及块状试样进行测试。选用已商用的密度均为  $0.923 \text{ g/cm}^3$  (25 °C 条件下) 的 LLDPE 和 LDPE 基料,并分别使用 DCP 质量分数含量为 0、0.7%、1.4% 和 2.0% 的 4 种配方进行交联制样。文中所有显示的添加 DCP 试样均为交联反应后的试样。为表述简便,将其分别命名为 LL-0、LL-0.7、LL-1.4、LL-2.0、L-0、L-0.7、L-1.4 和 L-2.0。

制样时,采取浸渍吸收的处理方式,试样添加相应含量的 DCP 交联剂后,用广口瓶盛放,并置于 70 °C 的烘箱中,摇晃至 DCP 均匀涂覆吸收后静置 24 h。将吸收 DCP 后的颗粒置于模具中,使用平板硫化机先在 120 °C 温度下进行 5 min 预交联,然后在 180 °C、20 MPa 下进行 10 min 交联压片,再通过水冷系统将试样冷却至室温。在开始试验之前,将所有试样置于 70 °C 的通风烘箱中处理 24 h。

### 1.2 试验方法

首先使用凝胶含量分析和热延伸的方法分析材料的交联网络结构,再通过 DMA 和拉伸测试分析其机械性能,最后用直流电导率及直流击穿场强测量系统分析材料直流导电性能。

按照 JB/T 10437—2004 的要求,使用凝胶含量测试系统对材料的交联度进行测试。将试样制作成  $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  的颗粒,在 110 °C 的二甲苯溶液中浸泡 24 h,然后在 110 °C 真空烘箱中干燥 24 h。凝胶含量百分比为最终试样剩余重量占原始总重的百分比。

热延伸试验是材料高温力学性能表征的重要方法之一。在 200 °C 下,使用配备特殊量架的烘箱对所有交联后的试样进行热延伸试验,方法依照 GB/T 2951.11—2008。制作厚度为 1 mm、总长度为 75 mm 的标准哑铃形试样,并在其上标记长度为 20 mm 的工作区间  $l_0$ 。所有试样均装有砝码,压力为

0.2 MPa,放置在 200 °C 烘箱中静置 15 min 后,测量标记之间的新长度  $l_1$ 。然后剪掉载有砝码的夹具,使试样在烘箱中停留 5 min,再取出并冷却。冷却至室温后再次测量标记之间的长度  $l_2$ 。记录载荷下的热延伸率  $\lambda = (l_1 - l_0) / l_0 \times 100\%$ ,和冷却后的永久伸长率  $\gamma = (l_2 - l_0) / l_0 \times 100\%$ 。

DMA 用于分析在周期性振动力作用下,材料的力学和粘弹性随时间、温度或频率的变化。在 DMA 测试中,通过梅特勒-托莱多 DMA/SDTA 系统测量试样。试样厚度为 4 mm,用双悬臂夹具固定。DMA 试验在 30~90 °C 进行,加热速率为 3 °C/min。

使用拉伸试验分析材料基本力学性能,依照 GB/T 1040.3—2006 中的要求,在拉伸试验中由应力-应变曲线可以得到材料的刚度、塑性及强度参数等。测试试样为标准哑铃型试样,其工作区域宽 4 mm,长度大于 20 mm,厚度约为 1 mm,由 CMT4503-5kN 电子万能试验机进行试验,测试温度为 25 °C,拉伸速率为 100 mm/min,变形传感器为位移型。

材料的直流电导率由 Keithley 6517B 静电计测量导电电流后计算得出。使用三电极系统,在 30、50、70、90 °C、20 kV/mm 的直流电场下,测量记录第 15 min 的电流值,通过计算得出其电导率。测试试样的尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$ 。对于每个温度,测量 3 个试样,并将其平均值用作电导率。

材料的直流击穿性能可以反映其在直流电场下保持电气绝缘性质的能力。使用上下电极对称的柱-柱电极系统,电极直径为 25 mm,倒角曲率半径为 3 mm,将电极浸没在植物油中以防沿面闪络。使用高压直流发生器作为高压源,升压速率为 1 kV/mm,测量温度为 30、50、70、90 °C。每种配方在每个温度点进行 15 次击穿测试,并使用双参数 Weibull 统计分析试验结果。

## 2 交联网络结构分析

LLDPE 及 LDPE 配方材料的交联度与 DCP 含量的关系见图 1。在 DCP 质量分数在 0~2.0% 范围内,LLDPE 和 LDPE 基试样在相同 DCP 含量下的交联度的差异较不明显,2 种材料的交联度均随 DCP 含量的增加而增加,而交联度的增长速度也均随 DCP 含量的增加而减慢。

交联 LLDPE 及交联 LDPE 的热延伸率与 DCP 含量的关系见图 2。依据 IEC 62067—2011,在 DCP 质量分数为 0.7%~2.0% 范围内,交联 LLDPE 材料的热延伸率保持在 60% 以下,满足 IEC 对高压电缆 XLPE 绝缘热延伸率的要求 ( $\lambda \leq 175\%$ )。交联

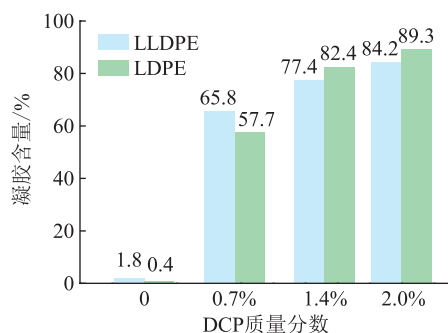


图1 LLDPE 和 LDPE 交联度与 DCP 含量的关系

Fig.1 Crosslinking degree of LLDPE and LDPE samples versus DCP content

LDPE 材料的伸长率远高于相同 DCP 含量的交联 LLDPE,且只有 DCP 质量分数为 2.0%的试样(此时其  $\lambda = 173.75\%$ )符合标准。L-0.7 所有参与测试的试样在测试时均出现断裂情况,并未得到其热延伸率数值,而 LLDPE 在仅添加质量分数为 0.7%的 DCP 后其热延伸率就已达到标准。在 DCP 质量分数为 0.7%~2.0%的范围内,2 种材料的热延伸率都随 DCP 含量的增加而降低,这是由于交联键的增加使其网络结构更稳定且更耐高温。试样的永久伸长率如表 1 所示,除 L-0.7 试样断裂无法测得外,L-1.4 试样未达标,其余试样均符合 IEC 62067—2011 标准( $\gamma \leq 15\%$ )。

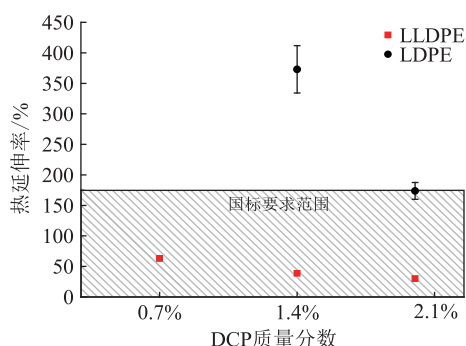


图2 LLDPE 和 LDPE 热延伸率与 DCP 含量的关系

Fig.2 DCP content dependence of elongation for LLDPE and LDPE materials

表1 LLDPE 和 LDPE 永久伸长率与 DCP 含量的关系

Table 1 DCP content dependence of permanent elongation for LLDPE and LDPE materials

材料	永久伸长率/%	标准差/%
LL-0.7	-1.25	3.21
LL-1.4	-2.29	1.04
LL-2.0	-0.64	1.80
L-1.4	33.10	3.78
L-2.0	10.93	4.97

交联度与热延伸率均反映了材料的交联网络

结构。交联度表示交联部分的质量所占总质量分数的占比,而热延伸率则反映了交联节点的密度,即交联网络的疏密程度<sup>[18]</sup>。

将不同配方试样的交联度与热延伸率进行对比,相同 DCP 含量的 LLDPE 和 LDPE 基试样交联度相近但热延伸率差别较大。首先,由图 1 可知,材料从线性结构变为三维网状结构,早期形成速度快、交联效率更高,后期交联效率降低。例如,对于 LLDPE,当 DCP 质量分数从 0 增至 0.7%时,交联度从 1.84%升至 65.79%,但当 DCP 质量分数从 0.7%增至 2.0%时,交联度仅增加 18.43%。此前得到使用凝胶渗透色谱方法测试的 2 种基料的分子量及其分布,其中 LLDPE 及 LDPE 的数均分子量分别为  $2.12 \times 10^4$  g/mol 和  $1.53 \times 10^4$  g/mol。分子量直接影响着交联效率,文中选择的 LLDPE 分子量较 LDPE 更高,较高的分子量有助于前者交联网络的形成。其次,LDPE 材料的分子链规整度低,侧链和支链多,交联反应可能发生在分子内部,产生“无效交联”的情况,导致 LDPE 的交联网络强度受到影响。最后,使用凝胶含量分析所得到的交联点为固定的永久交联点,即化学交联点,而热延伸率所反应的不仅有化学交联点,还包括分子链间“物理缠结”所形成的临时纠缠,在较小的形变测试中,物理缠结点与化学交联共同作用。相比于自身片段密度更高的 LDPE 材料,LLDPE 的线性结构更易形成分子间的缠绕,产生更多的物理缠结,降低热延伸率。

目前常用的传统 XLPE 是 DCP 质量分数 2.0%的 LDPE(即文中的 L-2.0),根据热延伸的测试结果,结合尽量少添加 DCP 以减少副产物生成的目的,文中将 LL-0.7 与 L-2.0 进行对比分析研究,探究两者机械性能、直流电导率以及温度稳定性的差异。

### 3 机械性能分析

首先对比分析试样的动态热机械性能。LLDPE 交联体系及 L-2.0 材料的 DMA 测试结果如图 3 所示,其中图 3(a)为材料杨氏模量随温度的变化规律,图 3(b)为材料损耗角正切值随温度的变化规律。由图 3(a)可知,在 30~90 °C 的温度范围内,交联前后的 LLDPE 试样的杨氏模量在同一温度下均大于 L-2.0,且 LLDPE 试样的杨氏模量在测量温度范围内随着交联剂添加量的上升而下降。此前已经得到不同交联度的 LLDPE 及 LDPE 熔融曲线,不同交联度的 LLDPE 均有比 LDPE 更高的结晶度及结晶度的温度稳定性,且结晶度随着 DCP 含量的增加而减小,因此 LLDPE 材料在宏观上表现出比

LDPE 更高的杨氏模量<sup>[19]</sup>。由图 3(b) 损耗角正切随温度变化曲线可知, L-2.0 的损耗角正切值峰值温度约为 63.30 °C, 而交联前后的 LLDPE 试样损耗角正切值均大于 90 °C, 在 30~90 °C 的温度范围内, 损耗角正切值随温度的上升而上升。

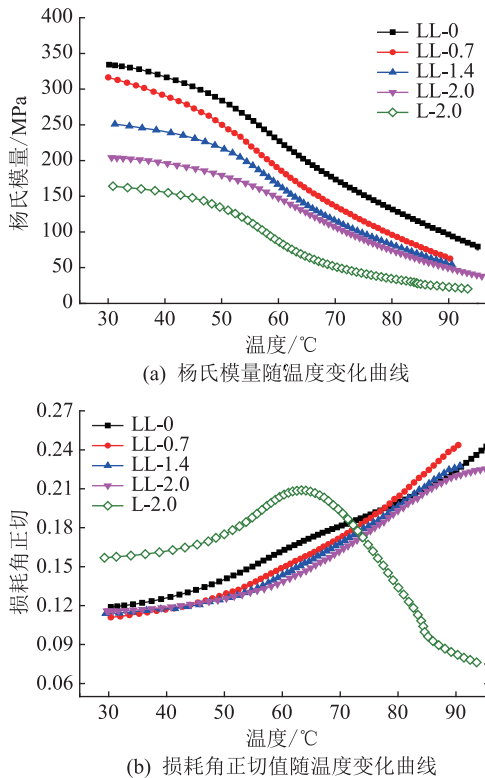


图3 交联体系动态热机械性能曲线  
Fig.3 Dynamic mechanical thermal analysis of crosslinking formula

图 4 为以 LL-0、LL-2.0、L-0 和 L-2.0 为示例所做的典型的拉伸应力-应变曲线。图中的第一个峰值为试样拉伸的屈服点, 通常认为试样开始拉伸时的线性线段部分为弹性变形区, 此区域材料为弹性形变, 可以在应力撤销时完全恢复, 弹性形变区至屈服点处为弹性+塑性形变区; 屈服点后, 分子取向逐渐向拉伸方向排列; 屈服点后, 试样出现细颈区且不断扩张, 直至工作区完全变细硬化, 然后应力继续开始增加, 至试样断裂。

由图 4 可知, LLDPE 及 LDPE 试样的交联将造成屈服点的降低和屈服硬化尾峰变缓, 这是受交联网络的影响, 分子间相对移动更加困难, 交联网络限制链段重排, 使应力下的分子链应变区间变小。

图 5 为 LLDPE 和 LDPE 交联体系弹性模量随 DCP 变化关系。2 种基料的弹性模量均随 DCP 添加量的增加而减小, 且 2 种基料的弹性模量在交联后的差距较交联前缩小。同样的 DCP 添加量下, LLDPE 的弹性模量高于 LDPE 材料。

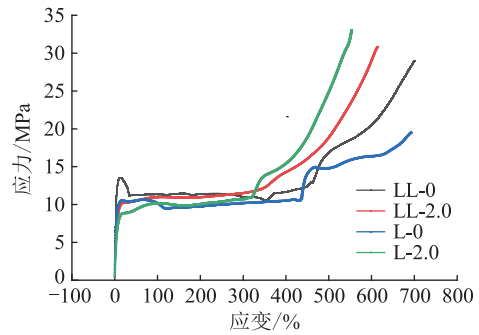


图4 LL-0、LL-2.0、L-0 和 L-2.0 的拉伸应力-应变关系  
Fig.4 Tensile stress-strain curves of LL-0, LL-2.0, L-0 and L-2.0

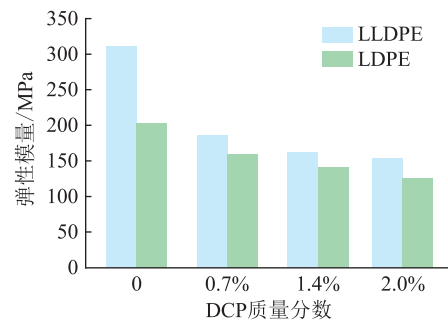


图5 LLDPE 和 LDPE 弹性模量与 DCP 含量的关系  
Fig.5 The relationship between elastic modulus and DCP content for LLDPE and LDPE

图 6 为 LLDPE 和 LDPE 交联体系断裂伸长率随 DCP 含量的变化。2 种基料的断裂伸长率均随 DCP 含量的增加而减小, 同等 DCP 含量下, LLDPE 的断裂伸长率高于 LDPE 材料。

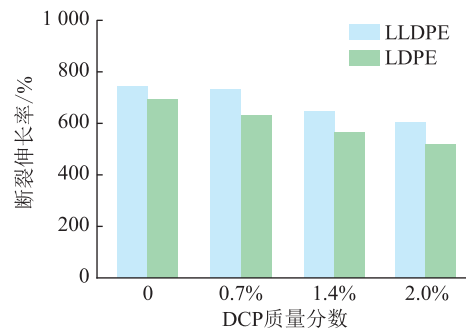


图6 LLDPE 和 LDPE 断裂伸长率与 DCP 含量的关系  
Fig.6 The relationship between elongation at break and DCP content for LLDPE and LDPE

#### 4 直流电导率及直流击穿场强分析

根据文献[20-21]报道, 聚乙烯及 XLPE 由欧姆电导到强场电导过渡的阈值场强约出现在 10~15 kV/mm 区间, 因此选择 20 kV/mm 场强进行电导率的测量, 在此场强下, 聚合物材料的电导率和温度满足 Arrhenius 方程<sup>[22]</sup>, 如式(1)所示。

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Phi}{k_B T}\right) \quad (1)$$

式中： $\sigma_0$ 为电导率参考值； $\Phi$ 为活化能； $k_B$ 为玻尔兹曼常数； $T$ 为温度。

对脱气后的 LL-0.7 和 L-2.0 的直流电导率在 30~90 °C 的温度范围内、20 kV/mm 下进行测试并作图,如图 7 所示。由图 7 可知,在 30~90 °C 的范围内,LL-0.7 的电导率均小于同等温度下的 L-2.0。由式(1)可知,在 30~90 °C 范围内,LL-0.7 和 L-2.0 试样的  $\lg \sigma$  与  $1/T$  应呈线性关系,由电导率的斜率结合式(1)可计算出 2 种材料的活化能,分别为 0.24 eV 和 0.30 eV。这表明在 30~90 °C 的温度范围内,LL-0.7 的电导率比 L-2.0 的电导率有更好的温度稳定性。

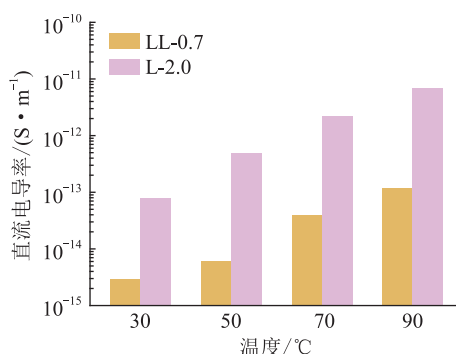


图 7 LL-0.7 和 L-2.0 直流电导率与温度的关系 (20 kV/mm)

Fig.7 The relationship between conductivity and temperature for DC breakdown strength of LL-0.7 and L-2.0 (20 kV/mm)

使用两参数 Weibull 统计对 LL-0.7 及 L-2.0 在 30、50、70 和 90 °C 条件下的直流击穿测试结果进行分析,其直流击穿场强随温度变化的尺度参数见图 8。在 30 °C 时 L-2.0 的直流击穿场强高于 LL-0.7,前者达到 452.46 kV/mm,但当温度上升至 50 °C 时,L-2.0 的直流击穿场强迅速下降至 256.80 kV/mm,并在温度上升时持续下降,到 90 °C 时的击穿场强仅为 218.60 kV/mm。LL-0.7 试样在 30 °C 时直流击穿场强为 358.60 kV/mm,随着温度的上升,其击穿场强变化不明显,90 °C 时击穿场强为 300.80 kV/mm。定义  $\delta_{BD}$  为 30~90 °C 的测试温度范围内材料直流击穿场强的变化率,如式(2)所示。

$$\delta_{BD} = \frac{E_{BD30} - E_{BD90}}{E_{BD30}} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $\delta_{BD}$ 为材料在 30~90 °C 的直流击穿场强变化率； $E_{BD30}$ 为材料在 30 °C 时的直流击穿场强； $E_{BD90}$ 为材料在 90 °C 时的直流击穿场强。

由式(2)可知, $\delta_{BD}$ 数值增加,则直流击穿场强在

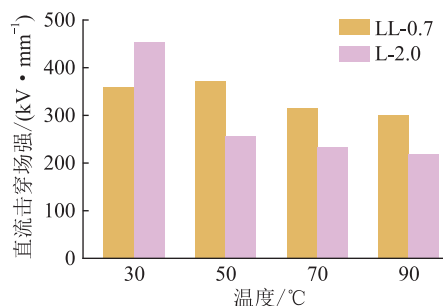


图 8 LL-0.7 和 L-2.0 直流击穿场强与温度的关系

Fig.8 The relationship between DC breakdown strength and temperature of LL-0.7 and L-2.0

所测温度范围内的变化率提高,意味着其温度稳定性降低。由所得测试结果可知,LL-0.7 和 L-2.0 的  $\delta_{BD}$  值分别为 16.12% 和 51.69%,即 LL-0.7 的直流击穿场强温度稳定性优于 L-2.0。

高压直流电缆绝缘系统的实际情况更为复杂。副产物的脱气既不能彻底,其残余副产物的分布也不均匀。但由以上试验分析可知,使用 LL-0.7 代替 L-2.0 可以改善绝缘系统的直流导电性和直流击穿场强的温度稳定性。热延伸试验、DMA 试验及拉伸试验均表明,LL-0.7 比 L-2.0 具有更好的力学性能。

## 5 结论

将不同 DCP 含量的 LLDPE 和 LDPE 进行比较研究,提出使用低交联度 LLDPE (添加质量分数为 0.7% 的 DCP,交联度为 65.8%) 代替传统 XLPE (LDPE 中添加质量分数为 2.0% 的 DCP,交联度为 89.3%) 作为直流电缆绝缘的可行性。该方式不仅可降低交联剂含量以减少交联副产物的产生,且同时满足直流电缆绝缘对高温力学性能和低副产物含量、良好的直流电导率、直流击穿场强及温度稳定性的要求。

(1) 对比机械性能,L-2.0 仅满足热延伸标准的最大值,其热延伸率为 173.75%,而 LL-0.7 的热延伸率仅为 62.92%;在 30~90 °C 范围内,当温度相同时,LL-0.7 的杨氏模量高于 L-2.0;LL-0.7 的弹性模量及断裂伸长率高于 L-2.0;

(2) 对比直流电导率和直流击穿性能,LL-0.7 的电导率和电导率温度稳定性优于 L-2.0,高温 (50~90 °C) 情况下的直流击穿场强及其温度稳定性高于 L-2.0。通过降低 XLPE 中的 DCP 含量,可以减少电缆绝缘中的副产物含量,有利于改善实际电缆中因副产物不能完全脱气而在运行时积聚空间电荷及增加损耗的问题。

低交联度 LLDPE 是一种兼顾高压直流电缆绝缘的高温机械和低电导率性能的方法,其为未来典

型绝缘系统中绝缘材料性能的改善提供一种途径。

#### 参考文献:

- [1] CHEN G,HAO M,XU Z Q,et al. Review of high voltage direct current cables[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015,1(2):9-21.
- [2] LIU R S. Long-distance DC electrical power transmission[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2013,29(5):37-46.
- [3] 汪惟源,窦飞,蔡晖,等. 柔性输电技术在江苏跨江输电通道的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(2):141-146.  
WANG Weiyuan,DOU Fei,CAI Hui,et al. Research on application of flexible AC/DC transmission technologies in Yangtze-river-crossing transmission channels of Jiangsu province [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(2):141-146.
- [4] LONG W,NILSSON S. HVDC transmission;yesterday and today [J]. IEEE Power and Energy Magazine,2007,5(2):22-31.
- [5] HANLEY T L,BURFORD R P,FLEMING R J,et al. A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2003,19(1):13-24.
- [6] HAMPTON R N. Some of the considerations for materials operating under high-voltage,direct-current stresses[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2008,24(1):5-13.
- [7] 钟力生,任海洋,曹亮,等. 挤包绝缘高压直流电缆的发展[J]. 高电压技术,2017,43(11):3473-3489.  
ZHONG Lisheng,REN Haiyang,CAO Liang,et al. Development of high voltage direct current extruded cables[J]. High Voltage Engineering,2017,43(11):3473-3489.
- [8] 金作林,陈小月,文习山,等. 海上风电场 220 kV 海底长电缆送出线工频及操作过电压研究[J]. 电瓷避雷器,2020(1):47-53.  
JIN Zuolin,CHEN Xiaoyue,WEN Xishan,et al. Study on power frequency and operating overvoltage of 220 kV long submarine cable in offshore wind farm[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1):47-53.
- [9] 廖思哲,郑刚. 地下配电电缆接地系统的雷电过电压特性研究[J]. 电瓷避雷器,2020(4):137-142.  
LIAO Sizhe,ZHENG Gang. Study on lightning overvoltage characteristics of underground distribution cable grounding system [J]. Insulators and Surge Arresters,2020(4):137-142.
- [10] 周恺,杨亮,倪周,等. 基于小波变换的 XLPE 电缆介质损耗在线监测研究[J]. 智慧电力,2021,49(6):99-106.  
ZHOU Kai,YANG Liang,NI Zhou,et al. Online monitoring of XLPE cable dielectric loss based on wavelet transform [J]. Smart Power,2021,49(6):99-106.
- [11] 陈玉,孙冠姝,张靖雯,等. 基于有限元分析的光纤复合低压电缆热场仿真和结构优化[J]. 智慧电力,2021,49(10):1-7.  
CHEN Yu,SUN Guanshu,ZHANG Jingwen,et al. Thermal field simulation and structure optimization of optical fiber composite low voltage cable based on finite element analysis [J]. Smart Power,2021,49(10):1-7.
- [12] FOTHERGILL J C. The coming of Age of HVDC extruded power cables [C]//IEEE Electrical Insulation Conference. Philadelphia,PA,USA. IEEE,2014:124-137.
- [13] HUSSINN, CHEN G. Analysis of space charge formation in LDPE in the presence of crosslinking byproducts [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(1):126-133.
- [14] REN H Y,ZHONG L S,YANG X Y,et al. Electric field distribution based on radial nonuniform conductivity in HVDC XLPE cable insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2020,27(1):121-127.
- [15] REN H Y,ZHONG L S,LIU M H,et al. Effects of degassing duration on space charge and DC conductivity in HVDC XLPE cable insulation [C]//12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Xi'an,China. IEEE,2018:124-127.
- [16] HUSSIN N. The effects of crosslinking byproducts on the electrical properties of low density polyethylene [D]. Southampton, South East England,UK;University of Southampton,2011.
- [17] LI Y G,ZHONG L S,CAO L,et al. Temperature stability of DC conductivity and breakdown of crosslinked LLDPE [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2020,27(6):2064-2070.
- [18] ANDERSSON L H U,HJERTBERG T. The effect of different structure parameters on the crosslinking behaviour and network performance of LDPE [J]. Polymer,2006,47(1):200-210.
- [19] LI Y G,ZHONG L S,CAO L,et al. DC breakdown characteristics of LLDPE-based XLPE with different crosslinking degrees [C]//Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Perth,WA,Australia. IEEE,2018:1-4.
- [20] MONTANARI G C,MAZZANTI G,PALMIERI F,et al. Space-charge trapping and conduction in LDPE, HDPE and XLPE [J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2001,34(18):2902-2911.
- [21] VU T T N,TEYSSÉDRE G,VISSOUVANADIN B,et al. Electric field profile measurement and modeling in multi-dielectrics for HVDC application [C]//IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Bologna,Italy. IEEE,2013:413-416.
- [22] DISSADO L A,FOTHERGILL J C. Electrical degradation and breakdown in polymers [M]. London;P. Peregrinus,1992.

#### 作者简介:



李银格

李银格(1995),女,博士在读,研究方向为高压直流电缆绝缘材料(E-mail:lyg511lyg@stu.xjtu.edu.cn);

曹亮(1990),男,博士,讲师,研究方向为高电压技术;

刘相辰(1997),女,硕士在读,研究方向为高电压技术。

## Mechanical and DC electrical properties of low crosslinking degree LLDPE for XLPE insulation

LI Ying<sup>1</sup>, CAO Liang<sup>1,2</sup>, LIU Xiangchen<sup>1</sup>, LIU Yongbin<sup>1</sup>, GAO Jinghui<sup>1</sup>, ZHONG Lisheng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China; 2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 3. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** A way to improve high-temperature mechanical behavior and reduce conductivity of direct-current cable insulation material is introduced by using low-crosslinked linear low density polyethylene (LLDPE). LLDPE and low density polyethylene (LDPE) with different dicumyl peroxide (DCP) content are analyzed. The mechanical properties of LLDPE and LDPE with DCP are assessed by hot-set test, dynamic mechanical analysis (DMA) and tensile test. The DC conductivity and DC breakdown strength of these materials are also tested. The results show that crosslinked LLDPE behaves better than LDPE does in elongation in the range from 0.7 wt.% to 2.0 wt.% DCP addition, and crosslinked LLDPE meets the requirements of HVDC cable insulation for crosslinked polyethylene (XLPE) elongation with 0.7 wt.% DCP addition. In this condition, LLDPE with 0.7 wt.% DCP addition is chosen to be a substitute for traditional XLPE for the purpose of minimizing by-products. DMA and tensile test results verify that LLDPE with 0.7 wt.% DCP addition has higher Young's modulus and elongation at break than traditional XLPE does. DC conductivity and DC breakdown experiments show that LLDPE with 0.7 wt.% DCP addition has low conductivity, good temperature stability of conductivity and DC breakdown strength at the temperature range from 30 °C to 90 °C. As the crosslinking by-products in the actual cable are difficult to be removed completely and unevenly distributed, it seriously affects the long-term safe operation of the cable. The low crosslinked LLDPE is recommended as the replacement of the traditional XLPE for the insulation material in HVDC cable insulation system, so as to reduce DC conductivity and enhance the temperature stability of conductivity while meeting high temperature mechanical properties.

**Keywords:** low crosslinking degree; low-crosslinked linear low density polyethylene (LLDPE); hot-set test; crosslinking density; dynamic mechanical analysis (DMA); conductivity

(编辑 李栋)

(上接第 129 页)

## Edge computing node deployment method for distribution network considering task migration

YANG Kai, CHEN Zhong, DENG Xuhui, LIU Bo

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Deploying edge computing nodes on the demand side can effectively reduce the pressure of data transmission and storage of the power network and improve the quality of electric power service. At present, the deployment location of edge nodes is mostly determined from the dimension of grid topology, and the service scope of nodes is defined by the grid method. The working process among nodes is independent. Therefore, the flexibility of the location and capacity determination of edge nodes is low, and it may cause waste of equipment computing resources. Therefore, an edge computing node deployment method considering task migration is proposed in this paper. Firstly, an edge computing architecture considering task migration is proposed based on the characteristics of edge devices and the spatial characteristics of residential areas. Secondly, feature data is formed according to spatial information and load characteristics of residential nodes. Then the number, address and service scope of nodes are determined by using the improved density peak analysis algorithm. Finally, a heuristic algorithm is designed to realize the task migration among the edge nodes to ensure the balanced utilization of computing resources of nodes and improve the stability of the system. A residential area in Nanjing is taken as an example to design simulation experiments. The results show that the proposed edge nodes deployment method can effectively reduce the data transmission costs of residential nodes. Also, the task migration algorithm can effectively balance the computing resources among edge devices and improve execution efficiency of edge computing services.

**Keywords:** edge calculation; location and capacity determination; node deployment; task migration; calculate equilibrium; density peak analysis

(编辑 方晶)