

<http://pmse.scu.edu.cn>

添加剂及其含量对交联聚乙烯高压电缆绝缘材料性能影响

侯帅¹, 傅明利¹, 黎小林¹, 展云鹏¹, 张繁², 徐曙², 巩俊强²

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东广州 510663; 2. 深圳供电局有限公司, 广东深圳 518000)

摘要:为优化高压电缆交联聚乙烯(XLPE)绝缘材料配方,采用凝胶萃取、热延伸、转矩流变仪和失重法研究材料交联特性,采用红外光谱表征XLPE热氧老化特性,并测试了XLPE的力学性能和电学性能。结果表明,随交联剂过氧化二异丙苯(DCP)含量增大,XLPE凝胶含量及交联速率增大、力学性能变化较小、交流击穿强度的温度敏感性降低。优先考虑交联特性,确定DCP含量为1.8 phr。随抗氧化剂含量增加,XLPE交联度降低、热延伸率稍有提高。相比单独使用0.3 phr抗氧化剂300的XLPE,抗氧化剂1010和1035各以0.15 phr复配使用可发生协同作用,从而更显著地抑制XLPE中羰基的形成和热氧老化,还可以在不降低交联度的前提下,改善XLPE抗焦烧性,避免预交联对XLPE性能的影响,且该材料具有更优的击穿强度温度特性和更低的介电损耗。

关键词:交联聚乙烯;绝缘材料;交联剂;抗氧化剂;击穿强度;热氧老化

中图分类号: 文献标识码:A 文章编号:1000-7555(2023)02-000

交联聚乙烯(XLPE)是高压电力电缆最主要的绝缘材料,决定着高压电缆电压等级和供电可靠性^[1]。高压XLPE绝缘材料配方主要由低密度聚乙烯(LDPE)、交联剂和抗氧化剂构成。交联剂采用过氧化二异丙苯(DCP),其含量对XLPE性能有显著影响,若含量过少,则无法满足材料交联生产效率,造成交联度不足,进而影响力学性能和耐温性能。若DCP含量过高,会导致材料过度交联,还会导致交联副产物产量增加,对电缆绝缘层脱气工艺提出更高要求,若交联副产物无法通过脱气排出,甚至会使电缆绝缘中出现微孔,显著降低电缆绝缘层性能^[2]。抗氧化剂作为XLPE绝缘必须的组分,其种类和含量对XLPE电气、热和力学性能有显著影响^[3]。同时,抗氧化剂作用机理是清除聚合物中的活性自由基,因此对材料交联反应也有显著影响^[4]。高压电缆用XLPE绝缘材料配方构成虽然简单,但全面而严苛的性能要求以及复杂的添加剂间相互作用导致其设计难度大。以往对基于LDPE和DCP的交联体系已有研究,但极少有研究关注抗氧化剂和

DCP的相互影响,并针对高压电缆绝缘的应用需求进行优化。

设计优化高压电力电缆XLPE绝缘材料配方,不仅应关注DCP和抗氧化剂两类添加剂各自的作用效果,也要综合考虑添加剂之间的相互作用,这对改善高压电缆绝缘料加工和使用性能至关重要。本文以LDPE为基础树脂,首先研究DCP含量对XLPE材料交联、力学和电气性能的影响;之后研究了抗氧化剂种类、含量和复配对XLPE性能影响,分析了添加剂之间相互作用及机理,最终得到了性能更优的高压电缆XLPE绝缘材料配方。

1 实验部分

1.1 原料与试剂

LDPE: LD200GH,燕山石化,密度0.922 g/cm³,熔融指数2.0 g/10 min;DCP:阿克苏诺贝尔;抗氧化剂300:熔点161~164 °C,百灵威;抗氧化剂1010:熔点110~125 °C,天津力生化工;抗氧化剂1035:熔点78 °C, BASF。

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0021

收稿日期:2022-05-16

基金项目:南方电网公司科技项目(SZKJXM20190588)

通讯联系人:侯帅,主要从事高压电缆绝缘技术研究,E-mail: houshuai@csg.cn;

傅明利,主要从事高电压与绝缘技术研究,E-mail: fuml@csg.cn

Tab.1 Components of XLPE cable insulation materials

Materials	$m(\text{LDPE})/\text{g}$	$m(\text{DCP})/\text{g}$	$m(\text{Antioxidant 300})/\text{g}$	$m(\text{Antioxidant 1035})/\text{g}$	$m(\text{Antioxidant 1010})/\text{g}$
#1	100	1.6	0.3		
#2	100	1.7	0.3		
#3	100	1.8	0.3		
#4	100	1.9	0.3		
#5	100	1.8			0.3
#6	100	1.8			0.5
#7	100	1.8		0.3	
#8	100	1.8		0.5	
#9	100	1.8		0.15	0.15
#10	100	1.8		0.25	0.25

Tab.2 Characterization of crosslinking degree of XLPE with different contents of DCP

Materials	Gel content/%	Thermal elongation/%	Permanent deformation/%
#1	77.8±0.4	90±5	0
#2	81.6±0.3	80±4	0
#3	85.0±0.2	75±2	0
#4	85.3±0.3	70±3	0

1.2 试样制备

在 110 °C, 50 r/min 的转矩流变仪 (RM200C, 哈尔滨哈普电气) 中加入 LDPE 混炼至完全熔融, 加入抗氧剂混炼 5 min, 然后加入 DCP 混炼 3 min, 得到可交联聚乙烯。使用不同规格不锈钢模具, 将可交联聚乙烯在 110 °C, 15 MPa 的平板硫化机 (XLB25-D, 湖州星力橡胶机械) 上热压 15 min 成型, 然后在 175 °C, 15 MPa 交联 30 min, 保持压力冷却, 得到不同规格 XLPE 试样, 并置于 80 °C 真空烘箱脱气处理 48 h, 以消除交联副产物和残余内应力。材料编号与配比见 Tab.1。

1.3 测试与表征

1.3.1 交联特性分析: 凝胶含量测试依据标准 JB/T 10437-2004, 热延伸测试依据标准 GB/T 2951.21-2008, 采用 RYS-III 型 (东莞市华京鹰机械设备) 热延伸试验仪, 每种材料重复测量 3 次取均值。

交联反应动力学曲线测试在 150 °C, 20 r/min 的转矩流变仪中进行。加入 35 g LDPE, 熔融后加入抗氧剂混炼 5 min, 再迅速加入 DCP, 同时开始记录转矩随时间变化曲线, 即交联反应动力学曲线。

1.3.2 产气量测试: 采用失重法测量交联产气量。用精密天平 (EX1205, 上海赞维衡器) 称取 5 g 可交联聚乙烯, 经热压交联制成 1 mm 厚试样后, 立即测量试样质量, 材料损失质量即交联过程产气量, 试样放入 80 °C 真空烘箱脱气处理, 不同时间后称重, 测得材料产气量。

1.3.3 加速热老化实验: 依据测试标准 JB/T 10437-2004。将试样悬挂于恒温热老化箱 (DK-150, 无锡市苏德试验设备) 中, 试样间有足够距离, 防止老化过程粘连。对老化前后试样进行 1.3.4 节和 1.3.5 节所述测试。

1.3.4 力学性能测试: 采用 5A 哑铃型试样, 依据标准 JB/T 10437-2004, 利用拉力试验机 (CMT4103, 美国 MTS 公司) 测试拉伸强度和断裂伸长率, 每组测 5 个试样, 取数据平均值。

1.3.5 羰基指数测试: 采用傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR-6100, 日本 JASCO), 试样制备方法同 1.2 节, 厚度 300 μm , 波数范围 500~4000 cm^{-1} 。羰基指数 (CI) 为红外光谱图中 1725 cm^{-1} 处羰基吸收峰强度 (A_{1725}) 与不随老化而变化的 2010 cm^{-1} 处吸收峰强度

(A_{2010})的比值,即

$$CI = \frac{A_{1.725}}{A_{2010}} \quad (1)$$

1.3.6 电性能测试:采用圆柱电极测试交流击穿强度,试样和电极浸入二甲基硅油中以避免沿面放电,试样厚度 100 μm ,以 500 V/s 的速率加压至试样击穿,每组测试 10 个试样,采用二参数 Weibull 分布统计数据;采用宽频介电谱分析仪(Concept40,德国 Novocontrol)测试介质损耗角正切($\tan\delta$),试样厚度为 200 μm 。

2 结果与讨论

2.1 交联剂 DCP 含量对 XLPE 性能影响

Tab.2 为不同 DCP 含量 XLPE 凝胶含量及热延伸率。随 DCP 含量增大, XLPE 凝胶含量增大,热延伸率减小,说明材料交联度增大。DCP 含量为 1.7~1.9 phr 时,凝胶含量皆高于 80%、负载伸长率皆低于 80%、永久变形率皆为 0,均符合高压电缆用 XLPE 绝缘标准要求^[5]。DCP 含量为 1.6 phr 时,交联度不满足要求;含量为 1.7 phr 时,交联度虽满足标准,但没有充分裕度。考虑到电缆制造交联管道中,绝缘层厚度较大且温度分布不均,绝缘层中部容易出现交联度不足的情况,因此 1.7 phr 的含量也难以满足实际需求。DCP 含量为 1.9 phr 时交联度相比 1.8 phr 没有明显提升,说明长链分子交联已足够充分,不宜进一步增大交联剂含量。

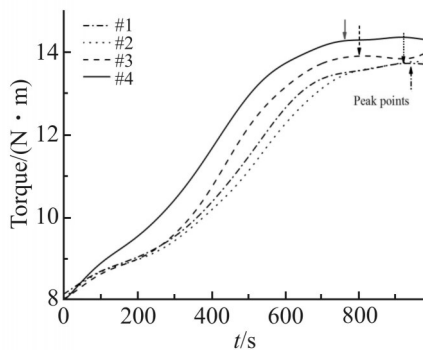


Fig.1 Crosslinking kinetic curves of XLPE materials with different contents of DCP

材料交联反应动力学曲线见 Fig.1。随着高温下交联反应的发生, XLPE 三维网络分子结构逐渐形成,材料黏度增大,混炼转矩增大。随 DCP 含量增加,交联引起的转矩最大值逐渐增大,到达最大转矩所需时间也逐渐减小,说明材料交联度及交联速率均逐渐增大。交联反应动力学曲线常用于对比衡量材料的挤出加工窗口宽度,曲线达到峰值所

需时间越长,则材料加工窗口越宽,越不容易在挤出过程中出现预交联(焦烧)。预交联会导致 XLPE 中夹带焦粒,严重影响电缆绝缘层性能。因此,保障交联度前提下,交联动力学曲线越为平缓,则对于长期挤出加工和绝缘可靠性越有益。综合凝胶含量、热延伸和交联反应动力学曲线结果,DCP 含量为 1.8 phr 时, XLPE 兼具充分的交联程度和较缓的交联曲线。

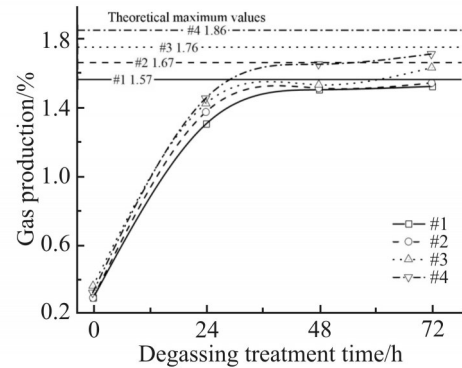


Fig.2 Gas production of XLPE materials with different contents of DCP

不同 DCP 含量下 XLPE 交联反应产气量随脱气时间变化见 Fig.2,其中理论产气最大值为 DCP 占材料总质量的百分比。可见,交联反应过程(脱气 0 h)也伴随交联副产物的排出,这一过程产气量占理论最大值的 17%~20%,虽然交联过程时间短,但交联温度较高,导致副产物挥发加剧,因此在较短时间内就会导致产气。同时,该现象也说明若不经历脱气,绝缘中残余交联副产物约在总量的 80% 以上。从 4 条曲线变化可见,随 DCP 含量增大,每个脱气时间节点的产气量均逐渐增加。48 h 的产气量和 72 h 的产气量相差不明显,进一步延长脱气时间取得的脱气效果微弱。

过氧化物交联用于高压电力电缆 XLPE 材料的优势在于:完成交联反应后,DCP 全部转化为易挥发副产物,可以从 XLPE 中完全排出,从而避免交联剂成分残留导致材料电气性能受损。因此,副产物越能快速且充分地脱出,对于材料的电气性能越有利。从最终脱气效果来看,经 72 h 脱气后,随 DCP 含量增大,4 种材料产气量分别达到理论值的 97.5%, 92.8%, 93.2% 和 92.5%。同样条件下,1.6 phr DCP 的材料脱气效果最优,其它材料相差不大。

不同 DCP 含量 XLPE 力学性能如 Fig.3 所示,所有材料拉伸强度皆大于 20 MPa、断裂伸长率皆大于 450%,符合标准 T/CEEIA 514-2021 要求^[5],随 DCP 含量增加,拉伸强度和断裂伸长率变化不明显。

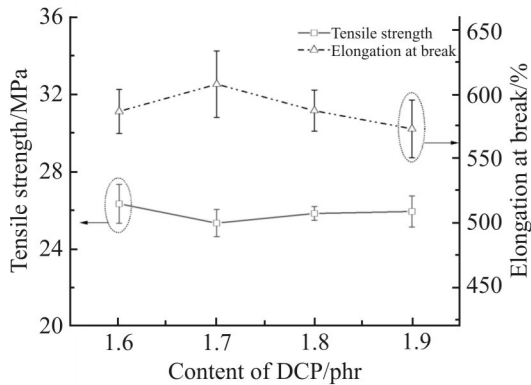


Fig.3 Mechanical properties of XLPE materials with different contents of DCP

不同 DCP 含量 XLPE 交流击穿强度随温度变化趋势见 Fig.4。随测试温度上升, XLPE 击穿强度均逐渐降低。有研究表明聚合物绝缘材料的击穿场强与温度符合 Arrhenius 公式^[6], 如式(2)所示

$$E(T) = A \exp\left(\frac{\varphi}{K_B T}\right) \quad (2)$$

式中: $E(T)$ ——特征击穿场强; A ——指前因子; K_B ——玻尔兹曼常数, 1.38×10^{-23} J/K, T ——绝对温度, K; φ ——击穿活化能, eV。对不同温度下击穿场强和绝对温度的倒数在半对数坐标下拟合, 得到的曲线斜率, 即 φ 值。 φ 越大说明材料击穿场强的温度依赖性越强。

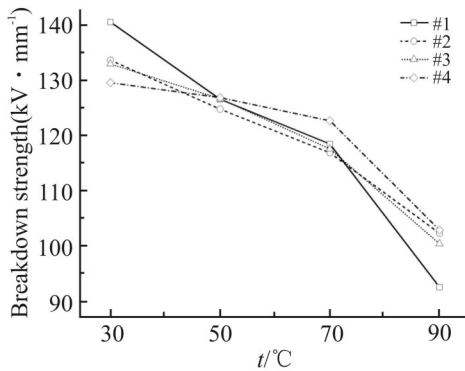


Fig.4 Variation of AC breakdown strength of XLPE with different contents of DCP on the temperatures

依据式(2)对 Fig.4 数据进行拟合(Fig.5), 90 °C 下的测试结果明显不符合该规律, 而其它 3 个温度下的结果符合 Arrhenius 公式。对比 4 种材料的 φ 值可知, 随 DCP 含量增大, φ 值逐渐降低, 说明 DCP 含量越少, 材料击穿场强的温度依赖性更强, 若把 90 °C 下的结果纳入考虑, 依然符合这一规律。

30 °C 时, DCP 含量为 1.6 phr 的 XLPE 击穿强度最大, 原因可能是 DCP 含量低, 交联副产物量低, 杂质或微孔缺陷较少, 在电场作用下形成的载流子较

少, 因此击穿强度较高。而随着测试温度升高, 其击穿强度降低迅速, 甚至低于其它 XLPE, 原因可能是 1.6 phr DCP 的 XLPE 交联度较低, 热稳定性较差, 抵御热变形或热击穿的作用较差, 因此随着测试温度升高, 交流击穿强度降低迅速^[7]。而 30 °C 时, DCP 含量为 1.9 phr 的 XLPE 击穿强度最小, 可能是交联副产物残留较多的原因, 随温度升高其击穿强度降低缓慢, 可能与其较高的交联度有关。90 °C 下, 4 种材料的击穿场强均显著下降, 导致该温度下不符合 Arrhenius 公式, 其原因一方面与材料 90 °C 下发生微观结构变化有关, 另一方面也与电场、热场共同作用下抗氧剂 300 的解离有关, 交联度较高时, 这种变化不显著, 交联度低时, 这种变化对击穿场强的负面影响尤为显著。综合对比 DCP 含量对 XLPE 交联度、交联速率、脱气、力学性能和电气性能的影响, 确定 DCP 含量为 1.8 phr。

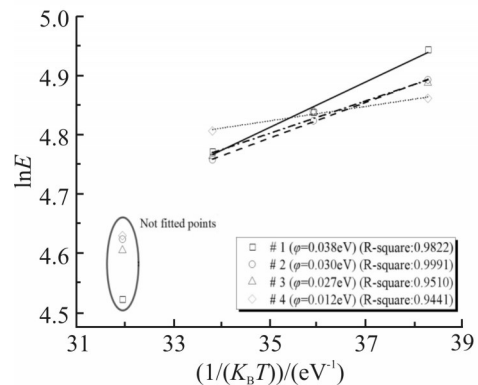


Fig.5 Fitting results of the relationship between AC breakdown strength of XLPE with different DCP contents and temperatures

2.2 抗氧剂对 XLPE 性能影响

抗氧剂 300 分子中含有硫元素, 其分子结构的特殊性使其兼具游离基终止剂和氢过氧化物分解剂的双重功能, 因此其抗老化效果通常优于一般抗氧剂。35 kV 及以下等级 XLPE 电缆绝缘材料一般选用抗氧剂 300 作为抗氧剂。然而, 抗氧剂 300 熔点较高 (161~164 °C), 且相对分子质量小, 沸点较低 (475.6 °C, 101.325 kPa), 挤出过程中不易分散, 在高温交联管道内容易形成气隙缺陷, 影响绝缘层性能; 此外, 前文测试表明, 含抗氧剂 300 的 XLPE 在 90 °C 下击穿场强明显下降。为优选出适用于更高电压等级 XLPE 绝缘材料的抗氧剂, 在确定 DCP 含量后, 研究了抗氧剂 1010、1035 及其复配使用对 XLPE 性能的影响, 寻求综合性能更优的 XLPE 高压交流电缆绝缘材料配方。

Tab. 3 为抗氧剂对 XLPE 交联性能影响。含 0.3

Tab.3 Effect of different antioxidants on crosslinking degree of XLPE

Materials	Gel content/%	Thermal elongation/%	Permanent deformation/%
#5	87.4±0.5	54±5	0
#6	87.7±0.5	68±5	0
#7	88.5±0.3	65±3	0
#8	86.9±0.4	75±4	0
#9	88.8±0.2	63±3	0
#10	87.7±0.2	65±3	0
#3	85.0±0.2	75±2	0

phr 抗氧剂 300 的 XLPE 交联度最小。抗氧剂 1010 含量对 XLPE 交联度影响较小。随抗氧剂 1035 及复配 1010/1035 含量增加, XLPE 交联度稍有降低, 原因是抗氧剂作为自由基清除剂, 影响了 DCP 引发的自由基交联反应, 致使 XLPE 的交联度降低^[8,9]。

Fig.6 为不同抗氧剂/XLPE 的交联动力学曲线。含复配抗氧剂的 XLPE 达到峰值扭矩所需的交联时间大于同含量下单一抗氧剂/XLPE, 说明 2 种抗氧剂共同使用可发挥协同作用, 抑制 XLPE 过早发生交联, 有效避免预交联对 XLPE 性能的影响。

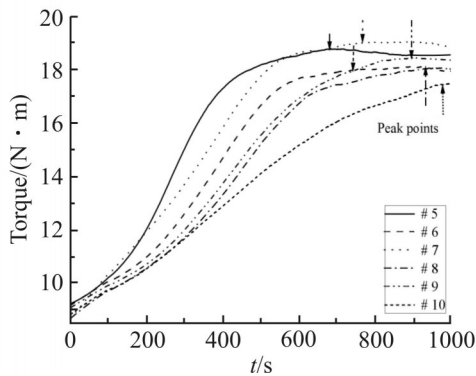


Fig.6 Crosslinking kinetic curves of XLPE materials with different antioxidants

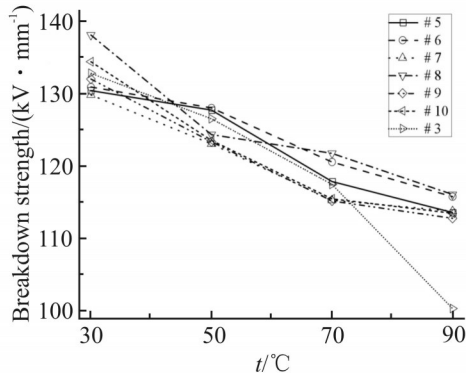


Fig.7 Variation of AC breakdown strength of XLPE materials with different antioxidants

Fig.7 为不同抗氧剂/XLPE 交流击穿强度随温度变化曲线。随抗氧剂含量增加, XLPE 各温度下交流击穿强度都有升高趋势。随测试温度升高, 0.3 phr 抗氧剂 300/XLPE 击穿强度降低较快, 而其它各材料击穿强度变化相对不明显。按照式(3)对数据进行拟合, 结果见 Fig.8。除了含有 0.3 phr 抗氧剂 300 的 XLPE 绝缘材料, 其它材料拟合优度 R-square 在 0.89~0.96 之间, 均满足 Arrhenius 公式规律。这说明相比抗氧剂 300, 基于抗氧剂 1010 和 1035 的 XLPE 材料击穿性能具有更低的温度敏感性, 原因之一可能是基于 1010 和 1035 的 XLPE 具有相对较高的交联度; 此外, 抗氧剂 300 含有硫元素, 且相对分子质量相对更小, 在电场和高温共同作用下可能更容易发生解离。相比之下, 抗氧剂 1010 (熔点 115~118 °C, 沸点 1005.8 °C (101.325 kPa)) 和抗氧剂 1035 (熔点 78 °C, 沸点 664.94 °C (101.325 kPa)) 均为含长烷基链的分子结构, 与 XLPE 相容性更优、均匀性更好, 同时高温下分子结构稳定性更优。

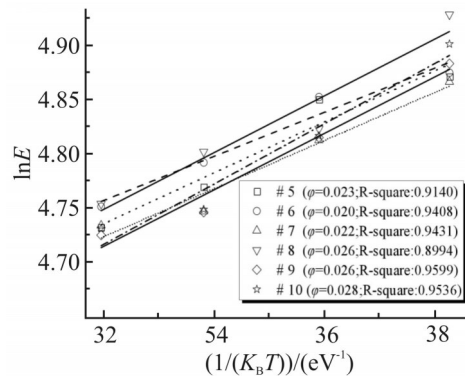


Fig.8 Fitting results of the relationship between AC breakdown strength of different XLPE and temperature

Fig.9 是不同抗氧剂/XLPE 的 $\tan\delta$ 随频率变化曲线。XLPE 虽为非极性介质, 但 XLPE 中不能完全脱去含有极性基团的交联副产物, 如苯乙酮、枯基醇

等,同时抗氧剂和XLPE大分子均不可避免存在羰基和醚、酯等极性基团,导致出现了偶极松弛损耗。因此,当频率增加,XLPE的 $\tan\delta$ 开始出现增加趋势,到 10^5 Hz后急剧增大。此外,在频率低于 10^5 Hz时,随抗氧剂含量增加,XLPE的 $\tan\delta$ 增加,这是由于抗氧剂含量增加,极性基团增多导致的。虽然适当增大抗氧剂含量有利于提高XLPE各个温度下的击穿强度,但由于材料 $\tan\delta$ 增大,抗氧剂用量应予以限制。在低频段,15/10/35/XLPE, 0.3/1010/XLPE和0.3/1035/XLPE材料的 $\tan\delta$ 相对较低,均小于 3×10^{-4} ,符合标准对于 $\tan\delta$ 的要求^[5]。对于本文涉及的几种抗氧剂,其总含量应限制在0.3 phr以内。

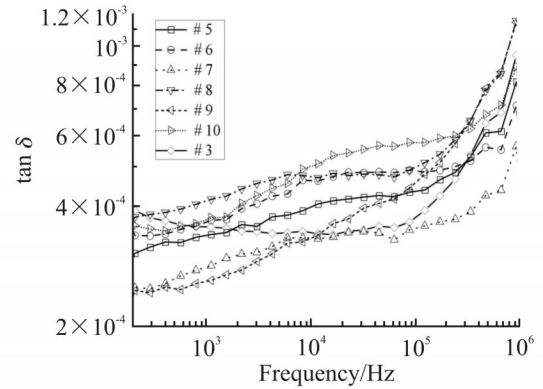


Fig.9 Variation of dielectric loss of XLPE insulation materials with different antioxidants vs. frequency

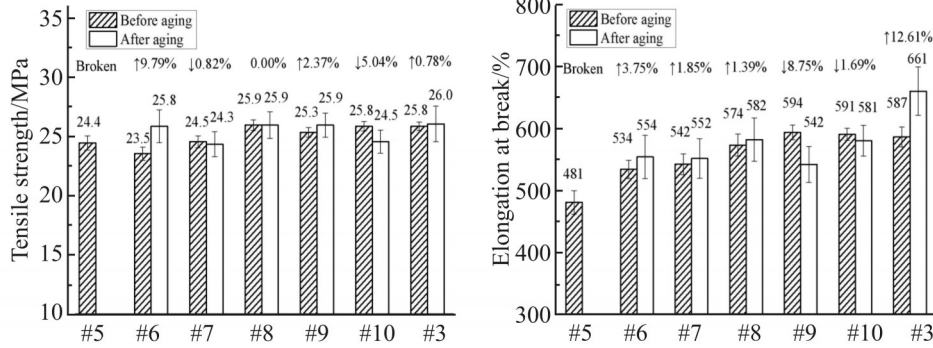


Fig.10 Mechanical properties of XLPE insulation materials with different antioxidants before and after thermal aging

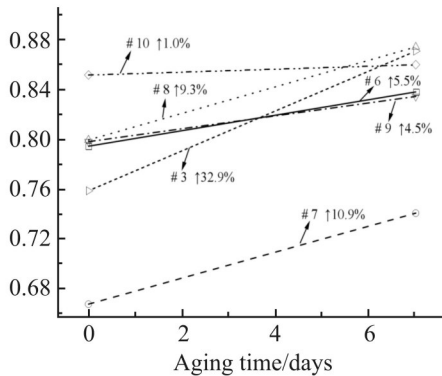


Fig.11 Variation of carbonyl index of XLPE insulation materials with different antioxidants before and after thermal aging

对不同抗氧剂/XLPE试样进行了空气加速热老化实验,测试了老化前后绝缘材料的羰基指数和力学性能变化。Fig.10为老化前后不同抗氧剂/XLPE材料的力学性能及其变化率,老化前所有材料都符

合标准要求^[5],其中仅添加0.3 phr抗氧剂1010的XLPE力学性能相对较差,且其试样在老化过程中严重变形、发黄,部分区域发生破损,无法进行后续测试,表明其不能承受标准老化实验。其它材料老化后拉伸强度和断裂伸长率没有显著变差,各材料性能变化率皆小于20%,符合标准要求^[5]。

材料老化前后羰基指数及其增长率如Fig.11所示。抗氧剂1010/1035复配体系XLPE的羰基指数增长率最低,进一步说明2种抗氧剂的复配会发生协同作用,其机理如图12所示。抗氧剂1035是含有硫元素的双功能抗氧剂,兼具主抗氧剂和辅助抗氧剂的功能,1010作为低效抗氧剂可以为高效抗氧剂1035产生的自由基提供氢原子,使其再生为高效抗氧剂,同时形成的低效抗氧剂自由基也可与过氧化物结合。此外,1010可使活性大分子自由基转化为ROOH基团,该氧化基团可以被1035的硫元素还

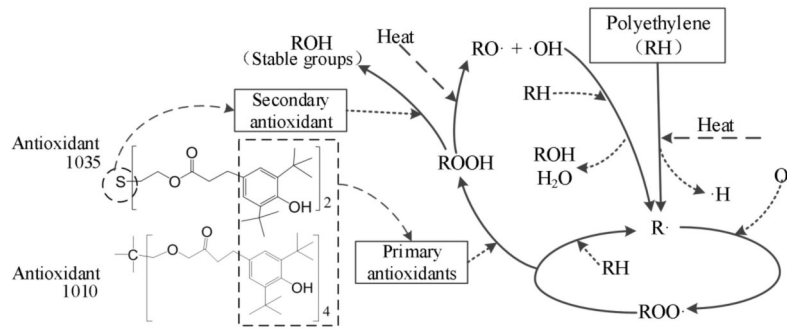


Fig.12 Mechanism of thermal aging of XLPE and the synergistic effects of antioxidants

原转化为更稳定的产物。抗氧剂 1010 和 1035 之间既可以产生均协同效应,也可以产生杂协同效应,从而加强了抗氧剂总体抑制热氧老化的作用^[10]。

综合考虑抗氧剂种类及添加量对 XLPE 交联度、交联速率、力学性能、电气性能和耐热老化性能的影响,在优选的 1.8 phr DCP 含量下,相对较优的抗氧剂配方是 0.15 phr 抗氧剂 1010 和 0.15 phr 抗氧剂 1035 组成的复配体系。2 种抗氧剂存在协同作用,使改良后材料配方相比基于抗氧剂 300 的配方,在交联度、抗焦烧性能、击穿性能、介电损耗和抗氧化性能方面均有突出优势,用于 110 kV 及以上等级绝缘材料将具有更稳定可靠的长期工作性能。

3 结论

(1) 在 1.6~1.9 phr 范围内,随 DCP 含量增大, XLPE 交联度和交联速率增大,副产物增多,力学性能变化较小,材料交流击穿强度的温度敏感性显著降低。优先考虑交联特性,推荐高压交流电缆 XLPE 绝缘 DCP 含量为 1.8 phr。

(2) 随抗氧剂含量增加, XLPE 交联度降低,热延伸率提高。抗氧剂 1010 和 1035 复配使用可以在不降低 XLPE 交联度的前提下,改善其抗焦烧性,减少预交联对 XLPE 绝缘材料性能的影响。

(3) 抗氧剂 1010 和 1035 各以 0.15 phr 复配使用可发生协同作用,相比基于抗氧剂 300 的 XLPE,复配材料具有更优的击穿强度温度特性和更低的 $\tan\delta$,且该复配材料热氧老化速率降低,材料交联性能、电气性能和抗热氧老化性能均得到改善。

参考文献:

[1] 林木松,郭坤,张晟,等. 电缆绝缘聚合物材料的老化成因机理及其研究现状[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(12): 149-162.

Lin M S, Guo K, Zhang S, *et al.* Aging mechanism and research progress of cable insulation material[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2017, 33(12): 149-162.

[2] Ghorbani H, Saltzer M, Abid F, *et al.* Effect of heat-treatment and sample preparation on physical properties of XLPE DC cable insulation material[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23: 2508-2516.

[3] Blivet C, Larche J, Israeli Y, *et al.* Non-Arrhenius behavior: influence of antioxidants on lifetime predictions for materials used in the cable and wire industries[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2022, 201: 109978.

[4] Zhang C C, Wang T T, Sun W F, *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: 541-549.

[5] 中国电器工业协会. T/CEEIA 514-2021, 66kV-220kV 交流电力电缆用可交联聚乙烯绝缘材料和半导电屏蔽料[S]. 北京: 科学技术文献出版社, 2021.

[6] Kim H K, Shi F G. Thickness dependent dielectric strength of a low-permittivity dielectric film[J]. *Dielectrics & Electrical Insulation IEEE Transactions on*, 2001, 8: 248-252.

[7] Zhao W, Zhong L, Yang X, *et al.* Effects of revulcanization on XLPE crystalline morphology and AC breakdown performance [C]//2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Perth, WA, Australia: IEEE, 2018: 678-684.

[8] Almalaika S, Riasat S, Lewucha C. Reactive antioxidants for peroxide crosslinked polyethylene[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2017, 145: 11-24.

[9] 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.

Liang F Z, Su G M, Tang K D, *et al.* Effect of antioxidant 300 on water tree ageing characteristic of crosslinked polyethylene [J]. *Insulating Materials*, 2018, 51(8): 26-30.

[10] Zhang X H, Yang H M, Song Y H, *et al.* Influence of binary combined systems of antioxidants on the stabilization of peroxide-cured low-density polyethylene[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 126: 1885-1894.

Effects of Additives and Their Contents on Performance of XLPE High Voltage Cable Insulation Material

Shuai Hou¹, Mingli Fu¹, Xiaolin Li¹, Yunpeng Zhan¹, Fan Zhang², Shu Xu², Junqiang Gong²

(1. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;

2. Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen 518000, China)

ABSTRACT: To optimize the components of cross-linked polyethylene (XLPE) insulation material for high voltage cable, gel extraction, thermal elongation, torque rheometer and weight loss method were applied to investigate the crosslinking characteristics of materials, the thermal aging characteristics of XLPE were characterized by infrared spectroscopy, and the mechanical and electrical properties of XLPE were tested. The results show that the gel content and crosslinking degree of XLPE increase, the mechanical properties slightly change and the temperature sensitivity of AC breakdown strength significantly reduces as the content of crosslinking agent (DCP) increases. The content of DCP is determined to be 1.8 phr with priority given to crosslinking characteristics. With the increase of antioxidant content, the crosslinking degree of XLPE insulation decreases and the thermal elongation increases slightly. Compared with XLPE using 0.3 phr antioxidant 300 alone, the combination of 0.15 phr antioxidant 1010 and 0.15 phr antioxidant 1035 realizes a synergistic effect to more significantly inhibit the formation of carbonyl group and thermal-oxidative aging process. Besides, they improve the scorch resistance of XLPE without reducing the crosslinking degree, thus avoiding the influence of pre-crosslinking on the performance of XLPE insulation. Moreover, the improved XLPE insulation material has the less temperature sensibility in breakdown and lower dielectric loss.

Keywords: crosslinked polyethylene; insulation material; crosslinking agent; antioxidant; breakdown strength; thermal oxidation