第 49 卷 第 12 期：4900-4910 高电压技术 Vol.49, No.12: 4900-4910
2023 年 12 月 31 日 High Voltage Engineering December 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221605

220 kV XLPE 绝缘材料长期老化性能及寿命评价

侯 帅[1]，傅明利[1]，贾 磊[1]，伍国兴[2]，罗智奕[2]，徐 曙[2]
（1. 南方电网科学研究院有限责任公司，广州 510663；2. 深圳供电局有限公司，深圳 518000）

摘 要：高压电力电缆用交联聚乙烯(XLPE)绝缘材料的长期老化性能决定电缆的运行可靠性和工作寿命，为了评价 220 kV 国产 XLPE 绝缘材料长期工作可靠性，文中以进口 220 kV XLPE 电缆绝缘料作参照，系统地对比研究了国产 220 kV 试制电缆料在长期电、热老化特性上的差异。针对两款 220 kV 交流电缆绝缘料，首先开展了长期热氧老化实验，并采用力学性能测试、红外光谱和差示扫描量热法(DSC)对材料热氧老化行为进行了表征。之后针对片状试样开展了恒压电老化寿命测试，根据老化寿命理论模型，分别获得了两款 220 kV XLPE 绝缘材料的热氧老化和电老化寿命。热氧老化测试结果表明：国产试制料的氧化速率较慢，但结晶性能和机械性能较差，以机械性能降至初值的 30%为绝缘失效标准，进口料与国产试制料的热氧老化寿命分别为 32.85 年和 29.14 年，国产试制料整体耐热氧老化性能稍逊于进口料。恒压长期电老化测试结果表明：进口商用料与国产试制料电老化寿命 *n* 指数分别为 16.84 和 17.03，国产试制料的整体耐电老化性能相对稍优；国产 220 kV 电缆绝缘材料的长期老化性能已经达到与进口同级材料接近水平。

关键词：交联聚乙烯；电缆绝缘；热氧老化；电老化；老化寿命

Long-term Aging Performances and Life Evaluation of 220 kV XLPE Insulation Materials

HOU Shuai[1], FU Mingli[1], JIA Lei[1], WU Guoxing[2], LUO Zhiyi[2], XU Shu[2]
(1. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;
2. Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen 518000, China)

Abstract: The long-term aging performance of cross-linked polyethylene (XLPE) insulation material for high-voltage power cables will determine the operating reliability and working life of cables. This work aims to evaluate the long-term working reliability of the domestic 220 kV XLPE insulation material. An imported 220 kV XLPE cable insulation material was taken as a reference, and the electrical and thermal aging characteristics of domesticaly trial-produced 220 kV cable material were comparatively studied. For the two 220 kV AC cable insulation materials, the long-term thermal-oxidative aging tests were carried out, and the mechanical properties, infrared spectroscopy and differential scanning calorimetry (DSC) were used to characterize the thermal-oxidative aging behavior of the materials. Then the constant stress electrical aging tests were carried out using sheet samples. According to the aging life theoretical model, the thermal-oxidative aging and electrical aging lives of the two 220 kV XLPE insulating materials were evaluated. The thermal-oxidative aging test results show that the oxidation rate of domestic trial-produced material is slower, however, its crystallization and mechanical property are relatively inferior. If when the mechanical property is dropped to 30% of the initial value is set as the insulation failure criterion, the thermal-oxidative aging life of imported and domestic materials are 32.85 years and 29.14 years, respectively. The thermal-oxidative aging resistance of domestic trial-produced material is slightly inferior to that of imported material. The constant stress long-term electrical aging test results show that the n indexes of electrical aging life for imported material and domestic trial-produced material are 16.84 and 17.03, respectively. The electrical aging resistance of the domestic trial-produced material is relatively better. The long-term aging performances of domestic 220 kV cable insulation material have reached the level close to that of imported materials.

Key words: cross-linked polyethylene; cable insulation; thermal-oxidative aging; electrical aging; aging life

基金资助项目：南方电网公司重点科技项目(SZKJXM20190588)。
Project supported by Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid (SZKJXM20190588).

0　引言

交联聚乙烯(XLPE)作为电力电缆绝缘材料在电力系统中得到广泛使用。我国对于高压 XLPE 电缆需求量十分巨大，但长期以来，国内聚乙烯基础原料产品没能与高压电缆料生产厂家的需求紧密结合，导致我国高压电缆料的质量和电压等级迟迟赶不上国际水平[1]。近几年，在石化企业和电缆料制造企业的共同努力下，电缆绝缘专用树脂质量水平明显上升，国产 110 kV 电缆绝缘料产品进一步成熟，并实现了 220 kV 等级电缆绝缘料的研发[1-2]。然而，目前 220 kV 等级高压电缆用 XLPE 绝缘材料完成国产化试制时间尚短，其老化性能的研究仍不够充分，尤其对于该材料和已投运商用材料的寿命评估仍然未得到足够的重视和实验分析，这极不利于国产绝缘材料的进一步改良和推广应用。

XLPE 电缆在运行过程中长期承受电、热应力，随运行时间的增加，绝缘层将不可避免地出现老化，致使绝缘内部产生缺陷，导致输电损耗增加甚至发生绝缘失效，因此探究电缆绝缘材料的长期耐老化特性对于电力系统安全稳定运行具有重要意义。

XLPE 绝缘材料老化形式包括电老化、热老化和电热联合老化[3]。Dakin 认为绝缘材料老化的本质是一种化学反应过程[4-5]，升高温度可以提高化学反应的速率，无论反应顺序或速率常数是否随时间变化，都可以找到老化过程中最重要的化学反应的数学函数，该函数可以给出物理性能与老化时间之间的关系。因此在给出绝缘材料的某一物理性能极限值后，便可以由老化前后实验所得的性能变化数据与老化时间拟合关系得到材料的老化寿命。赵学童等运用自由能增量理论定量地分析了电荷陷阱对 XLPE 电缆绝缘电老化过程的影响机理[3]，发现浅陷阱密度与 XLPE 的电老化速率正相关，而深陷阱对电老化过程起抑制作用。任成燕等评估了不同运行年限 110 kV 电缆 XLPE 绝缘的老化状态[6]，发现随着服役年限增加，XLPE 电缆绝缘产生极性基团和物理缺陷形成新的陷阱，增加了介质的浅陷阱密度，降低了绝缘的击穿性能。Y. Kemari 等研究了 XLPE 绝缘热氧老化过程中的结构变化与介电性能的相关性，发现较低温度下热老化会促进结晶结构完善，进而改善交流介电性能，而高温下的热老化则会使结晶劣化，进而使介质损耗因数增大[7]。X. Dai 等对超高压电缆用 XLPE 绝缘材料热氧老化特性进行了多角度分析[8]，认为机械性能主要与材料结晶结构有关，而介电性能由结晶结构、降解小分子和微观界面共同决定。现有关于电缆用 XLPE 绝缘材料热(氧)老化行为和电老化的研究报道较多，但大多集中于探讨老化对于 XLPE 某一具体性能或微观结构的影响，较少有研究对材料的老化寿命做出评估。

对国产高压电缆绝缘材料长期老化性能的评价，有助于完善 XLPE 电力电缆绝缘的评价和设计体系，推进实现更加精准、有效的电缆老化程度和剩余寿命的预测，对于电缆的运行维护也有重要参考价值。本文以某进口商用 220 kV XLPE 商用电缆绝缘料作为参照，对国产 220 kV XLPE 试制电缆绝缘料进行老化特性研究，对两种电缆绝缘材料分别进行了长期热氧老化和电老化实验。对不同老化温度、不同老化时间材料进行基础理化性能测试，根据热氧老化模型对其寿命进行了评估；搭建了长期电老化实验装置，测试了绝缘材料恒压电老化寿命。根据不同电应力下的电老化实验结果，估计了材料寿命指数。通过对比两种电缆绝缘料老化前后的各项性能及老化寿命，总结归纳两款绝缘料在老化特性上的异同，评价了 220 kV 国产绝缘材料的长期工作可靠性。

1　实验材料及方法

1.1　试样制备

本文选用的主要实验材料：北欧进口 220 kV XLPE 商用电缆绝缘料(后文简称进口商用料)、青岛某公司产 220 kV XLPE 试制电缆绝缘料(后文简称国产试制料)。

材料与试样制备步骤：在 110 ℃、60 r/min 的转矩流变仪中加入 220 kV 可交联电缆绝缘料颗粒，混炼 5 min，使交联剂、抗氧剂及其它助剂在材料中均匀分散，混炼后得到两种未交联的共混物。取一定量混炼材料置于模具中，在 110 ℃的平板硫化机中充分预热，在 15 MPa 压力下热压成型，随后放入 15 MPa、175 ℃的平板硫化机中交联 30 min，制得固定尺寸试样备用。试样取出后放入 80 ℃的真空烘箱中脱气 48 h，以去除试样中残余应力和交联副产物。

1.2　XLPE 材料长期热氧老化性能测试

依据标准 JB/T10437—2004“电线电缆用可交联聚乙烯绝缘料”中空气热老化测试方法进行实验。试样规格为 100 mm×100 mm×(1±0.01) mm，悬挂于

带有鼓风的热氧老化箱中，保证试样之间有足够距离，防止在老化过程中出现粘连。基片旋转速度设置为 10 r/min。未老化试样需在室温烘箱中放置相同时间后一同进行测试，以最大限度保障数据的可比性，避免不同批次试样制备或测试所带来的影响。具体老化温度 θ 及老化周期见表 1。

热氧老化过程中，XLPE 会发生热氧降解，在材料内部引入羰基，本文通过红外光谱测试表征 XLPE 电缆料的化学成分变化。测试采用 FTIR−6100 红外光谱仪，波数范围为 400~4000 cm^{-1}，分辨率为 2 cm^{-1}，试样厚度为 200 μm。

采用差示扫描量热(DSC)法表征 XLPE 的结晶性能和热性能变化。测试步骤：称量(8±0.5) mg 试样(在试样中部的颜色和外观均匀处裁切取样)，放入铝质坩埚内，加盖置于 DSC 分析仪样品池中，测试过程以高纯氮气作为保护气，升降温速率均为 10 ℃/min。温度控制方案依次为：由 25 ℃升至 150 ℃，其目的是消除材料的热历史对熔融过程的影响；150 ℃下恒温 5 min 后降温至 25 ℃，期间测试材料结晶过程热流变化；25 ℃下恒温 5 min 后升温至 150 ℃，期间测试材料熔融过程热流变化。

为获知国产试制料和进口商用料在热氧老化前后机械性能差异，依据标准 GB/T 22078.1—2008 和 GB/T 2951.11—2008，制备 5A 型哑铃试样，采用电子拉力试验机测试两种材料应力−应变曲线，拉伸速率为 250 mm/min，每种材料测试 10 个试样，对其拉伸强度和断裂伸长率取平均值作为最终结果。

1.3 长期恒压电老化寿命测试装置

电老化采用自行搭建的可同时容纳至少 200 个试样进行加压实验的恒压电老化寿命测试系统，该老化系统由低压操作区、高压实验区、以及实时监控区 3 部分组成，测试系统示意图如图 1 所示。

为抑制电极边缘效应，避免电老化过程中存在局部放电对结果造成影响，使用如图 2 所示的环氧树脂包封电极开展电老化测试。实验过程中，高压引线与环氧包封圆柱电极之间使用外套透明玻璃管的半导电纸进行连接，每个试样箱底部放置接地铝板作为地电极，相邻高压电极间留有足够距离，整个老化过程所处的环境温度为 25~30 ℃。加压老化过程中，一旦试样失效，便会有瞬间大电流流过线路，半导电纸表面温度会迅速升高达到其着火点，燃烧后失效试样从线路中断开，此时的累计加压时间即为该试样的失效寿命。

表 1 热氧老化实验条件

Table 1 Experimental conditions for thermal-oxidative aging

试样批次	老化周期		
	θ=100 ℃	θ=135 ℃	θ=160 ℃
0	0	0	0
Ⅰ	1 个月	1 周	2 天
Ⅱ	2 个月	3 周	4 天
Ⅲ	3 个月	5 周	6 天
Ⅳ	4 个月	7 周	8 天

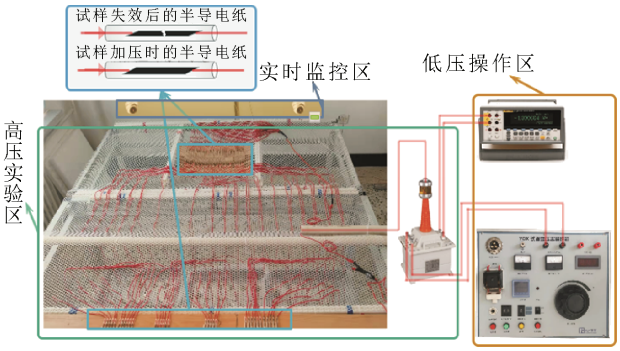


图 1 恒压电老化实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the constant stress aging test system

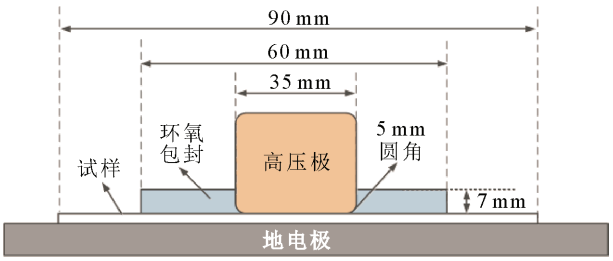


图 2 交流电老化实验电极与试样结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of electrodes and sample for AC electrical aging test

1.4 长期恒压电老化寿命测试方案

根据 IEC/TS–61251：2008 及 IEC62593：2007 标准，准确绘制电应力与老化时间的曲线需要在不同电应力下进行多组测试，且电应力老化因子的选取要保障试样的寿命不低于足够的时长。按标准规定，对于厚度较小的新材料薄膜试样，最强老化因子的确定应至少能给出所期望的相当于工频电压下 1000 h 的寿命。为了确定实验场强，对制备的同批 25 个试样(厚度约为(100±5) μm)首先进行了交流击穿实验，试样击穿场强的 Weibull 分布如图 3 所示，可见两种材料击穿场强均在 116 kV/mm 左右。

为试验探索出合理的老化应力设置区间，对两种材料分别制备 3 组试样，每组包含两种材料的试样各 35 个，对 3 组试样分别施加约 90、80 及 70 kV/mm 的平均场强。对接地线采用高频电流传感器(HFCT)线圈进行局部放电信号的定性监测，加压过程中发现，除去发生击穿的时刻，其它时间均不存在大于 10 pC 的局部放电信号，说明本文采用环氧树脂包封电极能有效抑制电极边缘效应，避免老化过程中局部放电的影响。结果表明，90 kV/mm 场强下试样于加压 5 h 后全部失效；80 kV/mm 场强下，国产试制料、进口商用料在加压 1 h 时分别剩余 5 个、3 个试样未破坏，在不到 100 h 时间内，试样全部失效；在 70 kV/mm 场强下，50%以上的试样在持续加压的过程中不发生击穿，且持续时间超过了 1000 h。基于此试验结果，为满足最强老化因子下预计寿命不低于 1000 h 这一要求，电老化实验过程中最大老化场强的选择应不高于 70 kV/mm。故本文统一采用 7 kV 的恒定电压进行实验，以不同的厚度分批制备试样，从而提供不同场强下的电老化因子，大量地制备了 100~130 μm 厚度范围的试样，将每种材料中厚度均匀且一致的试样作为一组，视为该厚度所对应场强老化因子下的测试对象，每个厚度(老化场强)下试样数量为 4~5 个，由于试样数量有限，每小组试样的寿命以平均值进行简化统计，视为该老化场强下的特征寿命。

以上试验中还发现，在加压初期，由于缺陷及其它因素的影响，部分试样在线性升压过程中击穿。因此，在正式进行恒压电老化实验之前，对所有试样采用了阶梯耐压的方式进行初步筛选，目的是剔除劣质试样，避免这部分试样对结果统计造成影响。具体过程为：依次在 3、5 和 7 kV 的恒定电压下对试样进行 4 h 加压，累计完成 12 h 的耐压实验后，筛选得到可正式进行恒压电老化实验的足量试样再开展实验。由于筛选过程的加压周期短、电场较低，该过程导致的材料老化可以忽略不计。

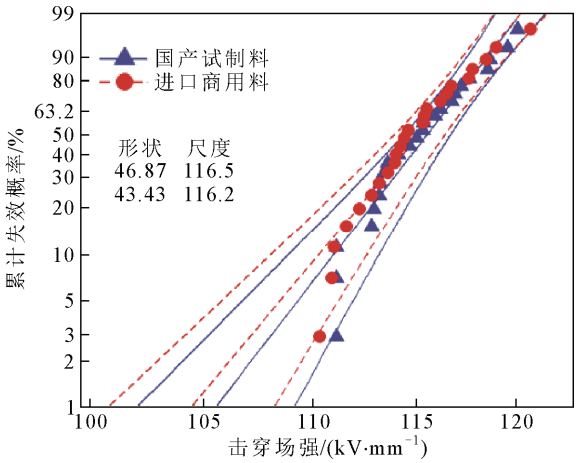
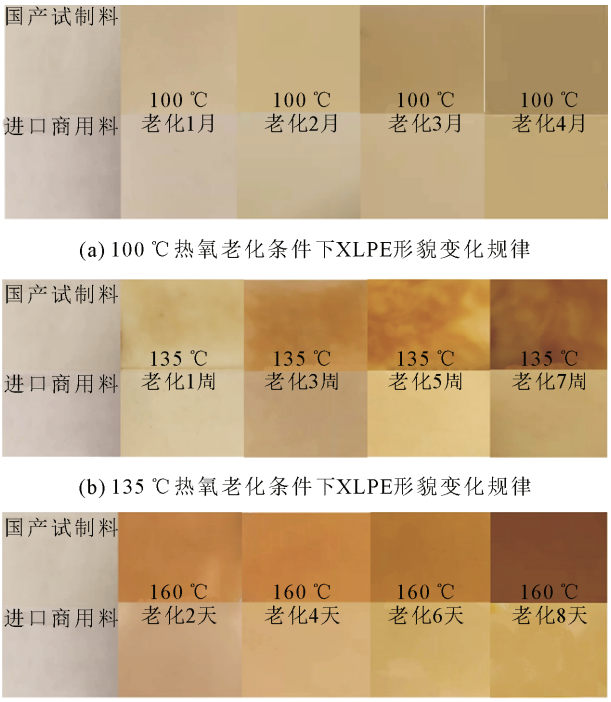


图 3　XLPE 材料交流击穿场强威布尔分布

Fig.3　Weibull distribution of AC breakdown strength of XLPE



(a) 100 ℃热氧老化条件下XLPE形貌变化规律

(b) 135 ℃热氧老化条件下XLPE形貌变化规律

(c) 160 ℃热氧老化条件下XLPE形貌变化规律

图 4　不同温度下老化前后 XLPE 试样形貌变化

Fig.4　Variation of appearance of XLPE samples before and after aging at different temperatures

2　结果与讨论

2.1　长期热氧老化实验结果分析

不同温度下两种材料试样外观随老化时间的变化见图 4。随着老化过程的推进，试样颜色变黄(黄变)愈发明显。无论老化温度和进程如何，国产试制料颜色均比进口材料更深。XLPE 黄变现象一般与材料内部的抗氧剂消耗和大分子降解所形成的自由基数量有关，从黄变程度和速率判断，国产试制料的老化程度相对更为严重。

对经过不同老化条件处理的试样进行拉伸性能测试，测试结果如图 5 所示。可见，老化温度越高，两种材料机械性能劣化速率越快，劣化程度越严重；而同一老化温度下，整体上老化时间越长，材料劣化越严重。在同样的老化条件下，进口商用

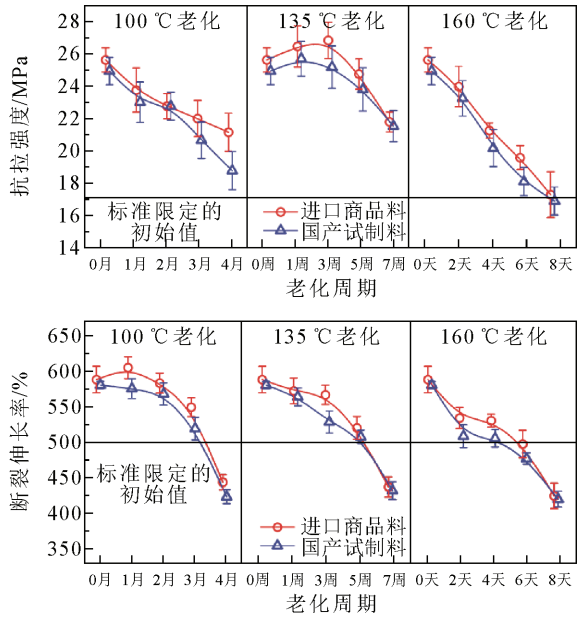


图 5 长期热氧老化对 XLPE 机械性能的影响

Fig.5 Effect of long-term thermal-oxidative aging on the mechanical properties of XLPE

料的拉伸强度和断裂伸长率整体上优于国产试制料，这与两种材料黄变程度变化规律基本相符。

依据 220 kV 电压等级电缆标准 GB / T 18890.3—2015 规定，绝缘层材料的拉伸强度不得低于 17 MPa，断裂伸长率不得低于 500%。由图 5 可见，3 个老化温度下，两种 XLPE 材料的断裂伸长率均因老化而下降至不再满足标准规定的程度。相比而言，两种材料的拉伸强度在 3 个老化条件的末期仍能基本满足标准限定的初始值要求。从这一现象分析，材料的机械性能之中，断裂伸长率更适宜用作衡量材料热氧老化程度的重要指标，其对热氧老化的敏感性相对更强，且与热氧老化时间之间整体上更接近单纯的负相关关系。

材料中的羰基含量可作为辅助分析聚合物热氧老化行为的重要化学参数，一般通过“羰基指数” C_{I} 来定量评价[9-10]，老化前后 XLPE 绝缘材料的红外光谱变化如图 6 所示，羰基指数 C_{I} 变化如图 7 所示，其中羰基指数由式(1)计算得到。

$$C_{\mathrm{I}}=\frac{A_{1720}}{A_{2019}} \tag{1}$$

式中：2019 cm^{-1} 处的吸收峰为 1303 cm^{-1}(非结晶结构吸收峰)与 719 cm^{-1}(亚甲基面内摇摆振动，受结晶情况影响)的合频振动峰[10]，由红外光谱分析可以发现，该吸收峰强度不随热氧老化而变化，因此可以作为羰基指数计算的基准。

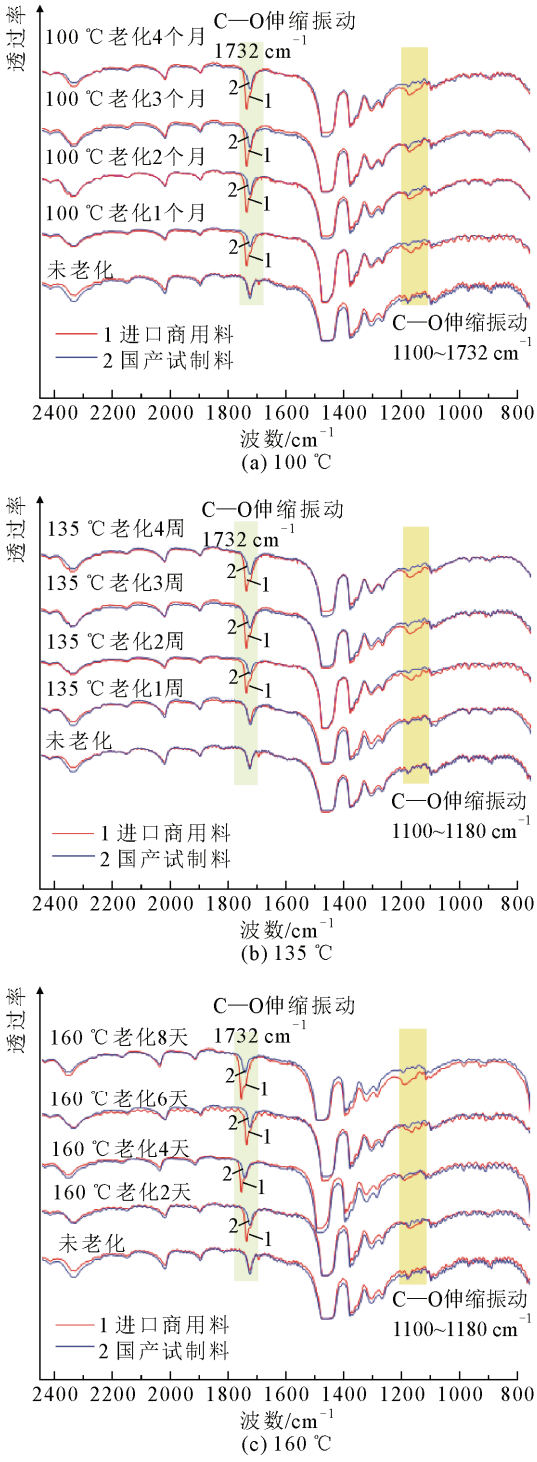


图 6 长期热氧老化前后 XLPE 材料红外光谱

Fig.6 Infrared spectra of XLPE materials before and after long-term thermal-oxidative aging

由图 6 可以看到老化前后 XLPE 绝缘材料的典型吸收峰变化，1732 cm^{-1} 左右处为 XLPE 大分子链断裂氧化生成醛、酸、酯等羰基化合物中羰基 C═O 的吸收峰，在 1100~1180 cm^{-1} 范围内为大分子链氧化反应后形成醚键后 C—O 单键振动引发的吸收

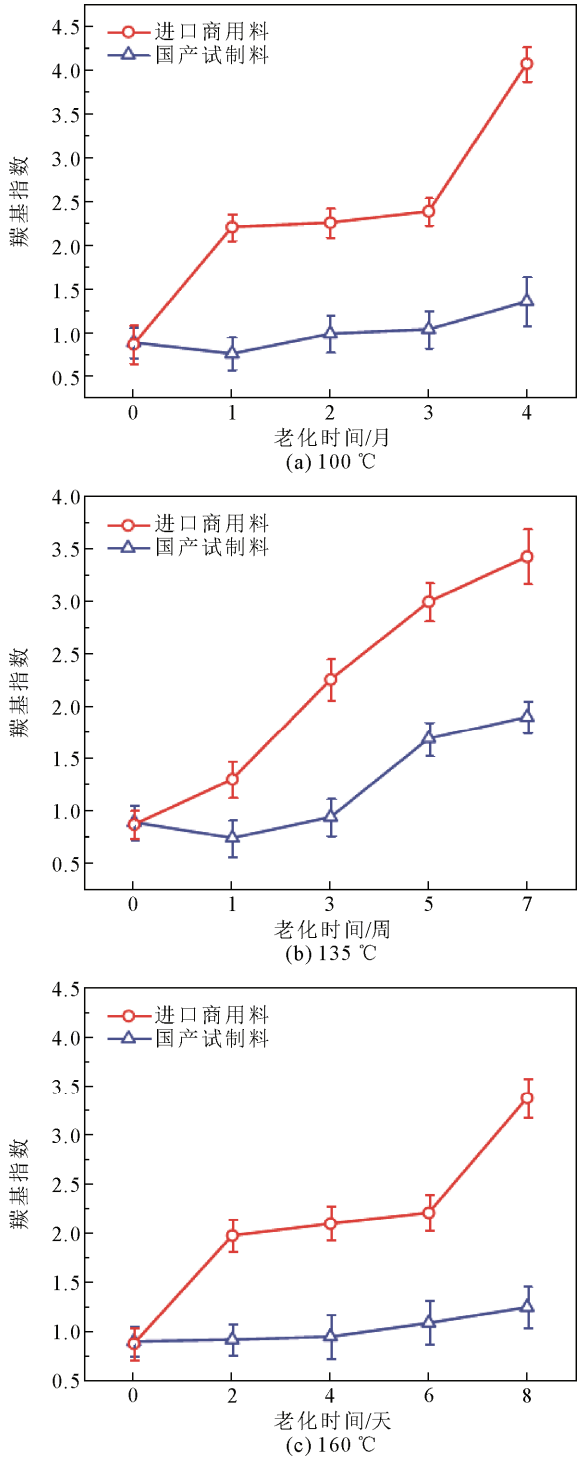


图 7　长期热氧老化前后 XLPE 材料羰基指数变化

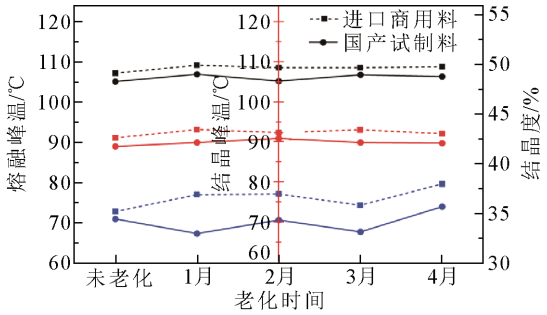
Fig.7　Variation of carbonyl index of XLPE materials before and after long-term thermal-oxidative aging

峰。XLPE 绝缘材料一旦发生热氧老化，其消耗掉的氧主要以 C═O 羰基和 C—O 单键两种形式存在于聚合物大分子上，且两种分子结构之间可以相互转化。其中，羰基红外吸收峰强度较高，对于热氧老化过程也较为敏感，在相对较低温度或相对较短时间内的老化行为，也能体现出羰基含量的变化。而 C—O 单键红外吸收峰强度较为微弱，在热氧老化过程中的变化也并不显著。结合图 6 和图 7 可知，进口商用料 C═O 羰基和 C—O 单键含量随老化温度的升高和老化时间的延长显著增大，而国产试制料的两处吸收峰变化均较为微弱。这说明国产试制料在同等老化条件下消耗掉氧气的含量相对较少，材料氧化速率相对较慢。

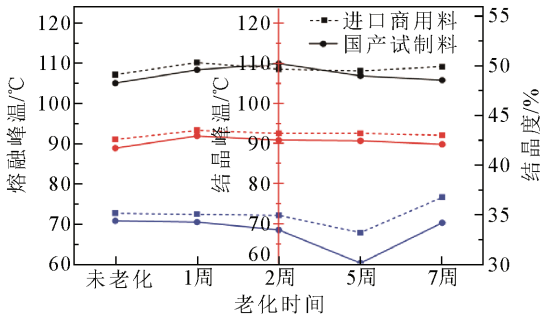
羰基含量能表征材料老化后产物的化学成分以及老化过程的氧化反应速率，但由于聚合物材料的性能受材料凝聚态结构和化学成分的共同影响，且羰基指数也仅仅是材料化学成分的量度之一，因此，材料的老化程度和性能变化与羰基指数的直接关联十分有限，羰基指数并不能真实地反应 XLPE 绝缘材料的性能劣化，仅能辅助于材料老化机理的分析。结合两种材料的黄变行为以及机械性能变化规律，可以进一步印证这一点。

热氧老化对聚合物的影响不仅反应在化学成分的变化上，通常也会反映到聚合物的聚集态结构上，进而改变材料的结晶性能[12-13]。采用 DSC 法对经过不同条件老化前后试样熔融、结晶过程的热流曲线进行测定，通过对 DSC 曲线进行分析获得不同老化温度下两种材料的结晶性能参数，并绘制出其随老化时间的变化规律，如图 8 所示。通过对比可以发现，无论老化条件和老化进程如何，国产试制料的结晶度始终低于进口商用料。并且除了极个别数据点以外，大体上国产试制料的结晶峰温和熔融峰温均稍小于进口商用料。相比之下，进口商用料具有较高的结晶度以及较高的结晶峰温和熔融峰温，反映出进口材料更容易结晶，且片晶厚度相对较大。

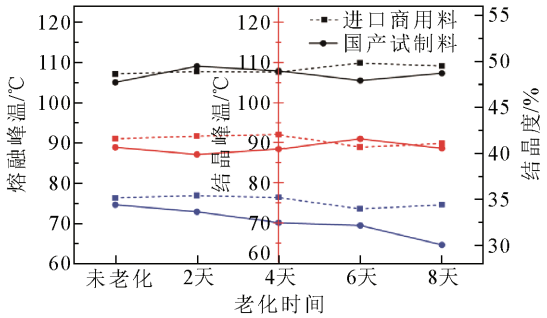
在老化过程中，加速热氧老化所选取的温度(135、160 ℃)超出了 XLPE 结晶熔融温度(105 ℃)，这是为了实现加速老化。因此，老化过程中 XLPE 材料以非结晶状态存在(100 ℃下 XLPE 结晶处于部分熔融状态)，此时测得的材料结晶性能只是对大分子热氧老化之后再结晶能力的考量。XLPE 材料的结晶性能受多种因素共同影响，基础树脂分子链结构、添加剂成核作用以及交联网络结构的变化均会对材料的聚集态结构和结晶性能参数造成复杂影响[14]。在 XLPE 热氧老化过程中，添加剂会被消耗，大分子链状结构会被破坏，大分子的再交联和降解则以可逆反应的形式同时存在于老化进程之中。正



(a) 100 ℃热氧老化对XLPE DSC结晶性能参数影响



(b) 135 ℃热氧老化对XLPE DSC结晶性能参数影响



(c) 160 ℃热氧老化对XLPE DSC结晶性能参数影响

图 8 不同温度老化前后 XLPE 的 DSC 结晶性能参数

Fig.8 DSC crystallization parameters of XLPE samples before and after aging at different temperatures

因如此，整体上看，两种材料的结晶峰温、熔融峰温和结晶度随老化时间的延长均呈现出不规则的波动，材料结晶性能参数与其老化程度之间没有直接的关联性。因此，结晶性能也不足以作为单独衡量 XLPE 电缆绝缘材料老化程度的主要判据。

2.2 XLPE 绝缘材料热氧老化寿命评估

老化寿命终止是指 XLPE 绝缘材料由于老化导致其关键性能不再满足正常服役的需求。老化寿命终止判据的确定对于老化寿命评价结果具有重要影响，因此材料寿终的判定标准应选择在老化过程中变化明显的关键性能指标。对典型的聚合物绝缘材料，有研究表明热氧老化前后聚酯薄膜击穿场强的变化不大，而力学特性参数变化明显[15]。IEC 相关标准也建议以力学性能作为评价聚合物绝缘材料寿命的参数。结合前文长期热氧老化前后的拉伸测试结果，两个力学性能指标之中，断裂伸长率随老化程度变化幅度相对更大，且该参数的衰减明显地随温度增加和时间的延长而加剧，因此更适合作为寿命判据。本文参考 IEC 相关标准，并按照以 Arrhenius 方程为基础的 Dakin 热老化模型进行热氧老化寿命评估[5]。依据相关文献，断裂伸长率降低至初始值的 50%通常视作材料寿命终止[16]，依据式(2)计算老化前后断裂伸长率保留率 P。

$$P=\frac{\varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{b0}} \tag{2}$$

式中：ε_{b0}、ε_{b1} 分别为老化前后试样的断裂伸长率。在半对数坐标系中，对老化前后断裂伸长率保留率与实验温度下热老氧化时间对数进行拟合，拟合结果如图 9 及表 2 所示。

可见，材料断裂伸长率保留率与老化时间服从对数关系为：

$$\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t}=-KC^{m} \tag{3}$$

式中：C 为老化过程中变化着的物理性能的变化量大小；K 为化学反应速率常数；m 是决定反应顺序的指数。根据表 2 的拟合结果，可外推得到不同老化温度下材料断裂伸长率保留率下降到 50%时对应的寿命时间值，如表 3 所示。

Dakin 热老化模型指出，无论反应的顺序如何或速率常数是否随时间变化，都可以找到老化过程中最重要化学反应的数学函数，即式(3)的积分式(4)，该式给出了物理性能与老化时间的函数关系。

$$f_0(C)=-Kt \tag{4}$$

当以绝缘材料断裂伸长率降低至初值的 50%($f_0(C_{50\%})$)来判定绝缘性能失效时，可结合如下所示的 Arrhenius 方程：

$$K=A\mathrm{e}^{-\frac{B}{T}} \tag{5}$$

式中：A、B 是化学反应速率常数；T 是老化温度。

经过推导，便可得出该化学反应速率下的老化时间对数与老化温度的函数关系，如下所示：

$$\frac{f_0(C_{50\%})}{t}=A\mathrm{e}^{-\frac{B}{T}} \tag{6}$$

$$\frac{C_0}{t_{50\%}}=A\mathrm{e}^{-\frac{B}{T}} \tag{7}$$

式中：C_0 表示在某一老化条件下，物理性能大小为未老化时的 50%对应的值。等式两边同时取对数，便可得到老化温度 T 关于寿命终止时间 $t_{50\%}$ 对数的函数，如下所示：

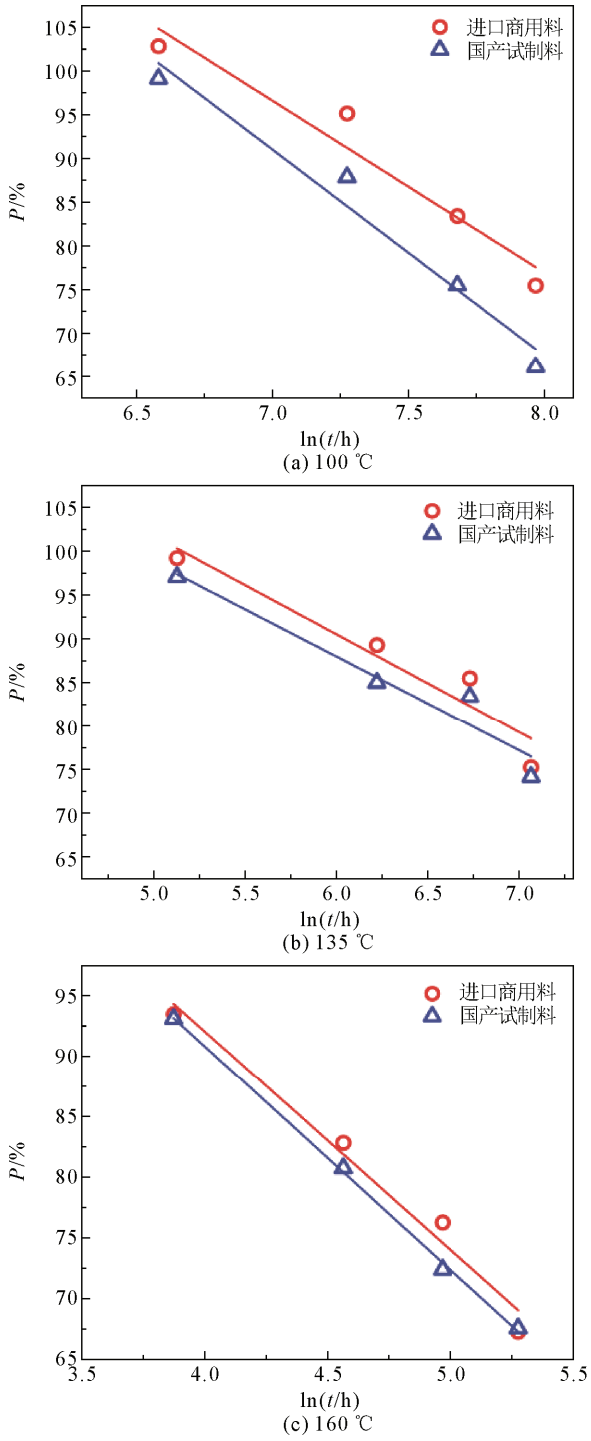


图 9　断裂伸长率保留率与 ln*t* 关系线性拟合结果

Fig.9　Linear fitting results of the relationship between retention of elongation at break and ln*t*

$$\ln t_{50\%} = \frac{B}{T} + \ln C_0' \tag{8}$$

依据此式，便可外推出材料在正常工作温度下的绝缘失效的时间，即绝缘层的热氧老化寿命。按照式(8)在半对数坐标下进行拟合，拟合结果如图 10 及表 4 所示。

表 2　断裂伸长率保留率与老化时间关系拟合方程及拟合优度

Table 2　Fitted equation and fitting quality of the relationship between retention rate of elongation at break and aging time

老化温度/℃	材料	拟合方程	拟合优度
100	进口商用料	$P=-7.10\ln t+111.27$	0.9192
	国产试制料	$P=-6.77\ln t+107.97$	0.9372
135	进口商用料	$P=-7.36\ln t+106.62$	0.9457
	国产试制料	$P=-7.63\ln t+103.04$	0.9696
160	进口商用料	$P=-9.43\ln t+100.17$	0.9690
	国产试制料	$P=-9.80\ln t+103.17$	0.9980

表 3　断裂伸长率保留率下降到 50%时的寿命

Table 3　Insulation life when the elongation at break retention rate drops to 50%

老化温度/℃	进口商用料寿命/年	国产试制料寿命/年
100	0.64	0.60
135	0.25	0.12
160	0.02	0.03

高压交流电缆线芯最高长期运行温度一般为 90 ℃，假设电缆运行中始终工作于满载的状况，以 363 K 为温度点，计算 220 kV XLPE 电缆料的使用寿命，将 *T*=363 K 代入表 4 中，可得进口商用料的使用寿命为 1.45 年，国产试制料的使用寿命为 1.20 年。显然，若以断裂伸长率降低至初始值的 50%视作材料寿命终止判据，初步计算得到的两种 220 kV XLPE 电缆料使用寿命远远低于实际电缆工作寿命，这说明这一判据在此并不适用，应根据具体测试方法的不同做调整。其主要原因在于：本文依据“空气热老化”相关标准规定的条件进行长期热氧老化性能研究，试样处于循环空气环境中，氧含量丰富；而实际电缆运行过程中，绝缘层位于内、外屏蔽层之间，且处于密封的外护层保护之下，绝缘层所处的环境氧气含量较低，且电缆结构内空气不具有流动性，因此热氧老化缓慢。

由以上结果可知，本文热氧老化实验所提供的老化因子过于严苛，为了得到较为接近实际情况的寿命评估结果，最终采用断裂伸长率初始值的 30%作为寿终判定标准($t_{30\%}$)。经过重新推算，可得进口商用料的使用寿命为 32.85 年，国产试制料的使用寿命为 29.14 年，可见国产试制料的热氧老化寿命稍逊于进口商用料，但差距较小。若考虑电缆并非始终工作于满载情况，而是长期工作于较低负载下，绝缘层所处温度远低于 90 ℃，此时两种 XLPE 绝

缘的热氧老化寿命将变得相对更长，可以预期，两种材料均能以较大的裕度实现 30 年以上的设计寿命。

XLPE 绝缘材料的热氧老化性能是由基础树脂大分子结构、材料纯净度和材料配方体系共同决定的[1-2]。结合前文热氧老化行为表征结果，在材料中含有抗氧剂的前提下，国产材料表现出更低的氧含量和更小的氧化反应速率，依据抗氧剂作用机理，其并不影响材料中氧含量的增加，只会改变材料中自由基的形式。由此推测，国产材料热氧老化寿命短，并非源于其抗氧剂的功效差或过早消耗，主要原因可能是国产材料 XLPE 大分子中含有更多的弱点结构，如叔碳原子或不饱和键等，弱点结构的存在使得国产材料在有限的氧消耗量下，即可发生更多的大分子降解，从而导致其热氧老化寿命相对较低。若材料中叔碳原子或不饱和键含量大，还会导致 XLPE 大分子的支化度增大和规整性变差，使分子更不容易结晶，这一推测也与材料的结晶性能测试结果相符。此外，由于 XLPE 中的结晶会影响材料的屈服强度和应变强化，因此，材料结晶性能变差也会助长材料的机械性能的劣化。在以上化学成分和物理结构的综合影响下，国产材料最终表现为热氧老化性能相对稍差。

2.3 长期恒压电老化实验结果分析

在 7 kV 恒定电压下对 200 个试样进行了老化，其中国产试制料、进口商用料试样各 100 个。在老化开始前的阶梯耐压阶段，国产试制料、进口商用料分别剔除 41、39 个缺陷试样，如图 11 所示。可见，同样的试样制备条件下，两种材料含缺陷试样数目基本相当，加压过程中破坏的试样比恒压过程中破坏的试样多；第一个升压阶梯破坏的试样比后续升压阶梯过程破坏试样多，由于被剔除试样破坏所需场强较低，分析其内部缺陷主要是肉眼不可见的外来非绝缘杂质，而并非材料的本征性缺陷。

对筛选得到的两种材料试样继续进行恒压电老化实验，直至试样完全破坏。结果表明，在不同的时间间隔均有试样发生失效，不同老化时间段的失效试样个数统计见图 12。可见，老化时间不低于 1000 h 的两种材料试样数量相近。仅从两种材料试样破坏所处的时间分布来看，两种材料表现接近。

2.4 XLPE 绝缘材料恒压电老化寿命指数估计

在交流电场下，许多实验结果和统计理论都认为电老化寿命规律具有反幂定律的形式，尽管反幂定律公式中仅考虑单一因素电场，具有一定的局限

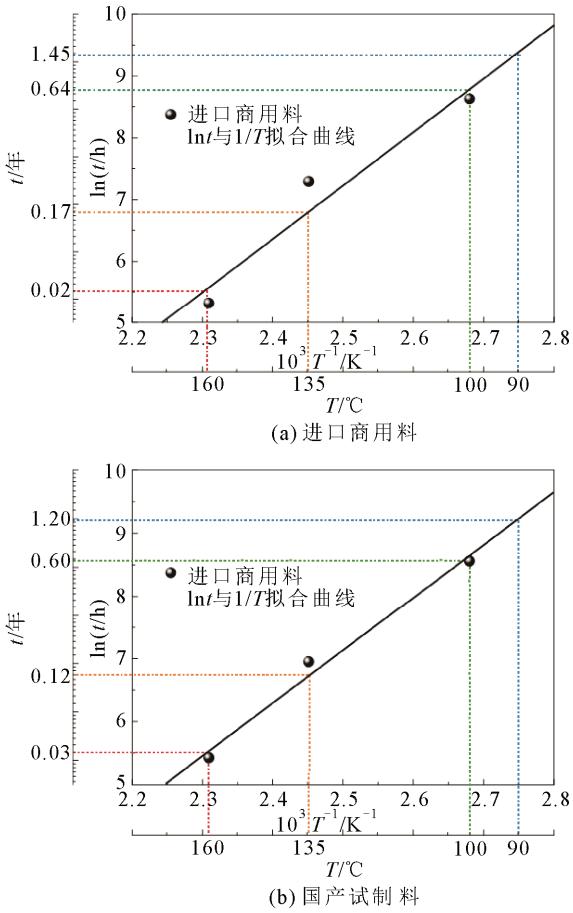


图 10 XLPE 试样热氧老化温度与失效时间关系拟合结果

Fig.10 Fitting results of the relationship between thermal-oxidative aging temperature and aging life of XLPE samples

表 4 XLPE 绝缘材料热氧老化寿命模型

Table 4 Thermal-oxidative aging life models of XLPE insulating materials

老化温度	拟合方程	拟合优度
国产试制料	$\ln t_{30\%}=\frac{8321.67}{T}-13.66$	0.987
进口商用料	$\ln t_{30\%}=\frac{8627.85}{T}-14.32$	0.947

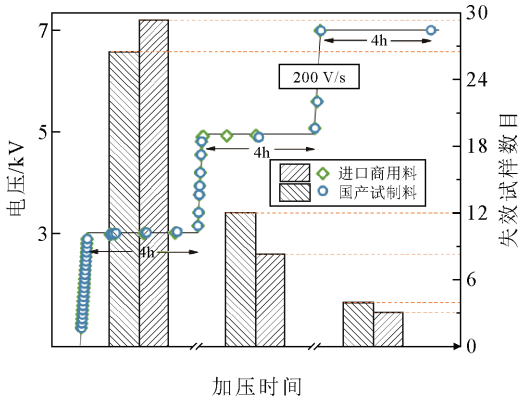


图 11 含缺陷试样剔除个数

Fig.11 Amount of removed inferior samples

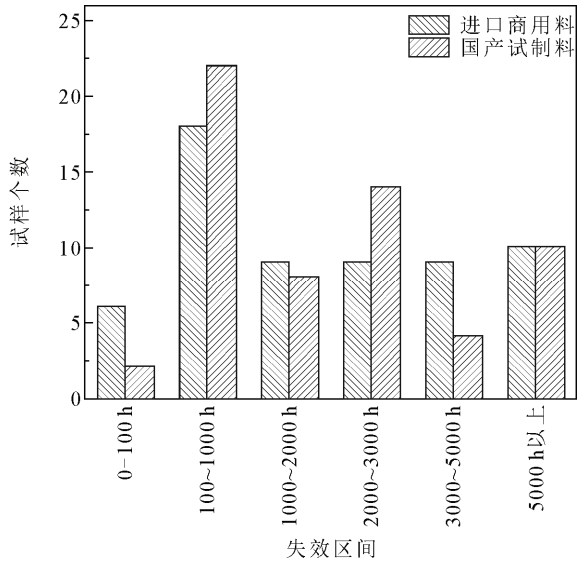


图 12　不同老化时间段的失效试样个数

Fig.12　Amount of failed samples in different aging time periods

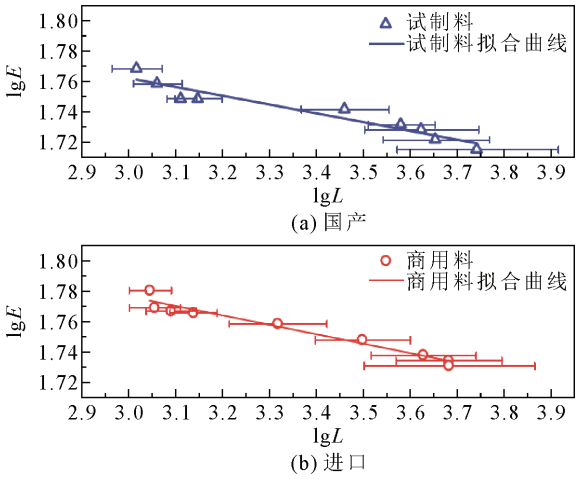


图 13　XLPE 试样承受电场强度与失效时间关系拟合结果

Fig.13　Fitting results of the relationship between electric field and electrical aging life of XLPE samples

表 5　电场强度与击穿时间双对数坐标拟合结果

Table 5　Fitted equation and fitting quality of the relationship between electric field and electrical aging life

材料	拟合方程	拟合优度
进口商用料	$\lg E=-0.0594\lg L+1.9551$	0.9435
国产试制料	$\lg E=-0.0587\lg L+1.9384$	0.9009

性，但其在电缆绝缘设计和寿命预测中依然发挥着重要作用[15]。电老化反幂定律如式(9)所示。

$$L=C'E^{-n} \tag{9}$$

式中：L 为试样失效时间；E 为电场强度；C'和 n 是与实验环境温度以及其它条件有关的常数。

电场强度与试样击穿时间的关系图中，电场强度常以线性或对数刻度绘制为纵坐标，试样击穿时间绘制在横坐标上，通常使用对数刻度。对式(9)等号两侧同时取对数，如式(10)所示。

$$\lg E=A'-\frac{1}{n}\lg L \tag{10}$$

式中，A'为与 n 值有关的常数。式(10)对应的耐压曲线可以给出电老化测试的最终结果，凭此关系曲线可以评估试样在指定应力条件下的耐电寿命。

对筛选出的厚度相同的试样，统计得到相应击穿场强下的多个失效时间，对失效时间取平均值视作该场强下 XLPE 试样的特征寿命。对由此得到的多组击穿场强–平均失效时间数据按式(10)拟合，拟合结果如图 13 及表 5 所示。

由图 13 可见，进口商用料、国产试制料斜率分别为–0.0594、–0.0587，斜率很小，说明电应力的小幅降低也会使寿命大大增加。斜率的倒数即为与式(10)中指数 n 一致的数值，计算得到进口商用料、国产试制料的寿命指数 n 值分别为 16.84、17.03，可见国产试制料 n 值更大。国产试制料在电场单一老化因素作用下，工作稳定性和寿命相对更优。但值得强调的是，以小型片状试样开展恒定应力电老化性能测试时，由于忽略了厚度效应的影响，因此所得到的 n 值与基于同轴结构模型电缆电老化所测得的值是有差异的，与国内电力电缆设计采用的 n 值有一定差距[17]，这部分差异一方面来源于击穿强度的厚度依赖性，一方面源于电缆挤出制造的工艺差别。本文测试只是对两种材料同等条件下的电老化性能作对比分析，在考虑到上述因素的影响时，可以认为两种材料电老化性能差异不大。

3　结论

1）与 220 kV 进口商用料相比，在不同热氧老化条件下，国产试制料的拉伸性能和结晶性能均相对稍差，结晶度和结晶熔融峰温整体上稍低。

2）与进口商用料相比，国产试制料的羰基指数随老化程度加深增长相对缓慢，氧化速率相对较小，但由于其大分子中可能含有更多的老化弱点基团，导致其大分子容易发生热降解，热氧老化性能稍差，热氧老化寿命相对稍短。

3）断裂伸长率最宜用作试样热氧老化寿命终止判据，空气热老化条件提供的老化因子过于严苛，若以断裂伸长率降至初值的 30%为绝缘失效标准，

进口商用料与国产试制料的热氧老化寿命分别为32.85 年和 29.14 年，国产料耐热氧老化性能稍逊于进口料，但二者均能达到 30 年以上预期工作寿命。

4）国产试制料、进口商用料电老化寿命指数 n 值分别为 17.03、16.84，国产试制料在电老化性能方面表现稍优，但二者相差不大。220 kV 国产试制料在长期工作可靠性上已经达到进口同级别绝缘材料相近水平。

参考文献 References

[1] 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.

[2] 侯 帅，傅明利，黎小林，等. 220kV 交联聚乙烯电缆绝缘料性能对比研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(6)：2483-2494.
HOU Shuai, FU Mingli, LI Xiaolin, et al. Comparative study on performances of 220kV XLPE cable insulation materials[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2483-2494.

[3] 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.

[4] DAKIN T W. Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1948, 67(1): 113-122.

[5] DAKIN T. Electrical insulation deterioration[J]. Electro-Technology, 1960, 66: 123-130.

[6] 张 伟，胡修翠，高 超，等. 长期服役 XLPE 电缆绝缘的空间电荷与热性能[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3533-3541.
ZHANG Wei, HU Xiucui, GAO Chao, et al. Space charge and thermal characteristics of long-service Crosslinked polyethylene cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3533-3541.

[7] KEMARI Y, MEKHALDI A, TEYSSÈDRE G, et al. Correlations between structural changes and dielectric behavior of thermally aged XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6): 1859-1866.

[8] DAI X Z, HAO J, LIAO R J, et al. Multi-dimensional analysis and correlation mechanism of thermal degradation characteristics of xlpe insulation for extra high voltage submarine cable[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(5): 1488-1496.

[9] 杨 颖，游 蛟，贾志东，等. 10kV 交联聚乙烯电缆运行状态评估分析[J]. 高电压技术，2017，43(5)：1684-1692.
YANG Ying, YOU Jiao, JIA Zhidong, et al. Evaluation analysis of 10 kV XLPE cable's operation condition[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1684-1692.

[10] 谢 侃，陈冬梅，蔡 霞，等. PE 微观结构的红外光谱实用表征[J]. 合成树脂及塑料，2005，22(1)：48-52.
XIE Kan, CHEN Dongmei, CAI Xia, et al. Study on the practical characterization of the microstructure of polyethylene by infrared spectroscopy[J]. China Synthetic Resin and Plastic, 2005, 22(1): 48-52.

[11] 李 欢，李建英，马永翔，等. 不同温度热老化对 XLPE 电缆绝缘材料晶体结构的影响研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(22)：6740-6748.
LI Huan, LI Jianying, MA Yongxiang, et al. Effects of thermal aging on the crystal structures of the XLPE cable insulating material at different temperatures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6740-6748.

[12] LAMBRI O A, BONIFACICH F G, GARCÍA J Á, et al. Mechanical energy losses in commercial crosslinked low-density polyethylene in the temperature range between 200 and 400 K[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(23): 47605.

[13] 董 澎，王 柯，李军方，等. 超高分子量聚乙烯烧结制品的链缠结调控及其对性能影响[J]. 高分子学报，2020，51(1)：117-124.
DONG Peng, WANG Ke, LI Junfang, et al. Chain entanglement control of UHMWPE sintered products and its effect on properties[J]. ACTA Polymer Sinica, 2020, 51(1): 117-124.

[14] 刘耀南，邱昌容. 电气绝缘测试技术[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，1994.
LIU Yaonan, QIU Changrong. Electrical insulation test technology[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Machine Press, 1994.

[15] 樊林禎，李 琦，袁 浩，等. 接枝对聚丙烯绝缘材料热氧老化的影响及机理[J]. 中国电机工程学报，2022，42(11)：4227-4237.
FAN Linshen, LI Qi, YUAN Hao, et al. Influence and mechanism of grafting on thermal oxidative aging of polypropylene[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4227-4237.

[16] 欧阳本红，刘松华，邓显波，等. 高压 XLPE 电缆绝缘厚度优化设计[J]. 高电压技术，2016，42(8)：2388-2393.
OUYANG Benhong, LIU Songhua, DENG Xianbo, et al. Optimization design for insulation thickness of high-voltage XLPE cable[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2388-2393.



侯 帅(通信作者)
1988—，女，硕士，高工
主要从事电力电缆及绝缘材料研究
E-mail: houshuai@csg.cn

HOU Shuai
Senior engineer
Corresponding author



傅明利
1962—，男，博士，高级技术专家
长期从事高电压设备安全运行及资产全生命周期管理、高电压交直流绝缘、绝缘系统故障诊断和新型绝缘材料应用技术的研究
E-mail: fuml@csg.cn

FU Mingli
Ph.D.

收稿日期 2022-09-28 修回日期 2023-01-13 编辑 曹昭君