

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.04.020

# 基于高温介电谱测量的 XLPE 老化状态评估

邓红雷<sup>1</sup>, 杨浩<sup>1</sup>, 谢月<sup>2</sup>, 刘刚<sup>1</sup>, 赵一枫<sup>1</sup>, 范星辉<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;

2. 广东技术师范大学自动化学院, 广东 广州 510665)

**摘要:**为研究交联聚乙烯(XLPE)经历热老化后在不同温度下介电特性的变化,文中开展了XLPE的热和热-辐射老化实验。文中对试样进行80℃、100℃、135℃、155℃条件下100h—800h的热老化,在相同情况下引入100Gy/h伽马射线的热-辐射老化,并完成25℃—200℃条件下的介电谱测量。实验结果发现:引入射线条件后,试样的活化能与Cole-Cole曲线中校正因子 $\beta$ 的数值出现了明显减小;老化温度与辐射条件相同时,试样的电导率与松弛峰峰值频率 $f_p$ 随着老化时间的增加而增大,可反映试样老化过程中介电特性的变化;温度不同时,低频下复介电常数和复介电模量的差异比高频下更加明显。文中实验结果表明,高温低频下的介电特性可以有效反映XLPE绝缘劣化状况。

**关键词:**交联聚乙烯(XLPE);热老化;介电谱;复介电模量;伽马射线;绝缘状态评估

**中图分类号:**TM215.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)04-0156-06

## 0 引言

交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆由于具备优异的电气性能、简单的敷设方式等特点而被广泛应用于我国电力输电网络<sup>[1-2]</sup>。然而,在实际运行过程中,温度等因素会引起电缆绝缘的逐渐老化,最终造成严重的电力事故<sup>[3-4]</sup>。尤其是在核电站中应用XLPE电缆,辐射会加快电缆绝缘的劣化。因此,研究XLPE在热-辐射条件下的老化状况具有重要的工程意义。

已有学者研究发现,XLPE试样在不同老化时间和不同老化温度下内部分子链受到的破坏程度不同<sup>[5]</sup>;辐射条件会引起分子链的断裂,从而加快XLPE电缆绝缘的氧化反应和交联反应。文献[6]的研究结果表明低密度聚乙烯的羰基指数随着辐射剂量增加而增大。文献[7]研究发现,辐射下聚合物的电导率和介电损耗会发生改变。文献[8]研究发现,热老化会加速XLPE的降解,进而导致介电损耗增加和体积电阻率减少。文献[9]的研究结果表明,XLPE试样劣化后介电常数和电导率随着羰基指数的增大而增大。文献[10]研究了运行不同时间后高压XLPE电缆绝缘的介电特性,结果表明低频下介质损耗因数随着老化程度的增加而增加。文献[11]的研究结果表明高频介电常数、离子浓度和扩散系数以及直流电导率随着老化温度的增加而增大。文献[12]测量了不同温度下环氧树脂的

介电特性,结果表明复介电模量是一种分析聚合物绝缘材料介电行为的有力工具。文献[13]发现使用电模量研究聚合物行为能更加有效地反映材料本身的介电松弛特性。上述研究主要集中于材料的热老化,对于热-辐射老化条件下XLPE的研究则鲜有报道,而热-辐射老化条件下XLPE电缆内部分子链断裂程度和氧化程度更加严重。

介电谱测试作为可用以探究材料内部微观结构极化机制的试验方法,可反映材料的介电特性。研究XLPE绝缘在辐射下老化后的介电特性,可有效地评估核电站中电缆的绝缘老化状况。文中对未老化试样和在热、热-辐射条件下老化得到的试样进行25℃—200℃间多个温度点的介电谱实验。通过分析不同温度和频率下介电常数、电导率和活化能等参数的变化来研究不同老化条件下XLPE绝缘介电特性,进而对辐射条件下老化的XLPE电缆绝缘状态进行评估,并初步探寻高温低频条件下介电谱用于评估XLPE绝缘状态的可行性。

## 1 实验

### 1.1 试样制备及老化实验

实验选取XLPE颗粒,使用平板硫化机压制试样。首先,将硫化机在140℃下预热5min后,放入颗粒,在140℃、15MPa压强下预交联10min;然后,将硫化机升温至180℃,在180℃、15MPa压强下交联15min;最后,将得到的试样在室温下冷却10min,并裁剪至15cm×10cm大小,试样见图1。

采用热老化和热-辐射老化2种老化方式。热

收稿日期:2022-02-12;修回日期:2022-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977083)

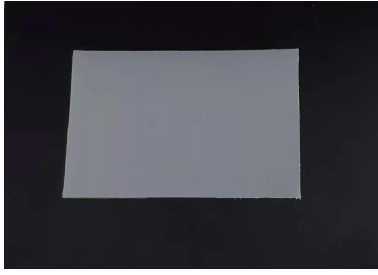


图1 压片得到的试样

Fig.1 The pressed sample

老化实验中,老化温度为 80 ℃、100 ℃、135 ℃、155 ℃,老化时间为 100 h、200 h、400 h、600 h、800 h。热-辐射老化实验中,老化温度和老化时间与热老化一致,同时引入 100 Gy/h 的<sup>60</sup>Co 伽马射线。将热老化和热-辐射老化用 H 和 HR 进行标注,标注后接老化温度与时间以指代具体试样。

### 1.2 介电谱测试

介电谱是指电介质的复介电常数对外电场变化的响应,其本质上反映电介质在电场作用下内部微观组成部分的极化、弛豫和共振机制<sup>[14]</sup>。复介电常数包括实部介电常数  $\varepsilon'$  与虚部介质损耗  $\varepsilon''$ 。将电介质放入两电极之间,可通过测量其电容  $C$  计算  $\varepsilon'$ ,如式(1)所示。当电介质中发生松弛极化时,电荷运动会产生能量损耗,通过测量电介质的等效电导率  $\gamma$  可计算  $\varepsilon''$ <sup>[14]</sup>,如式(2)所示。

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\gamma}{\omega \varepsilon_0} \quad (2)$$

式中: $C_0$ 为真空电容; $\varepsilon_0$ 为真空介电常数; $\omega$ 为角频率, $\omega = 2\pi f$ 。

将老化后的 XLPE 试样裁剪成厚度为 1 mm,直径为 25 mm 的圆形片状试样。对试样进行超声清洗和干燥处理后,在溅射仪中对试样上下表面做喷金处理。对处理后的试样用直径 25 mm 的电极夹持,使用 Concept 80 型宽频介电谱仪测试不同老化时间下 XLPE 试样的介电特性。

实验的温度范围为 25 ℃—200 ℃,以 25 ℃ 为步长依次递增温度,频率  $f$  范围为  $10^{-2} \sim 10^6$  Hz。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 老化过程中 XLPE 试样复介电常数的变化规律

图 2、图 3 分别为 200 ℃、50 Hz 条件下热老化和热-辐射老化实验的复介电常数与老化时间关系。

由图 2 可知,老化温度低于 155 ℃ 时,不同老化温度下热老化试样的复介电常数不随老化时间增

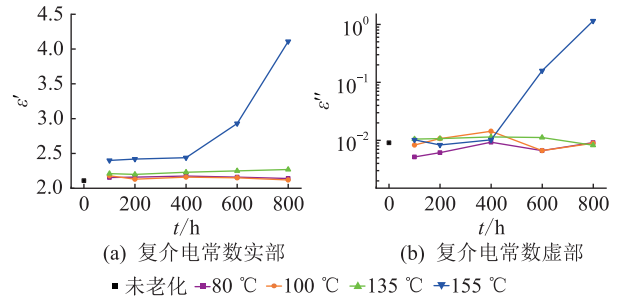


图2 热老化试样复介电常数与老化时间的关系

Fig.2 Relationship between complex dielectric constant and aging time of heating aged samples

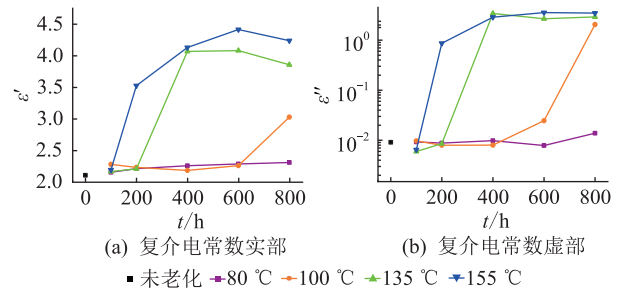


图3 热-辐射老化试样复介电常数与老化时间的关系

Fig.3 Relationship between complex dielectric constant and aging time of heating-radiation aged samples

加而出现明显变化;老化温度为 155 ℃ 时,随着老化时间的增加,试样的复介电常数出现明显增大。由图 3 可知,在老化时间为 800 h 的情况下,不同温度下热-辐射老化试样的复介电常数出现不同程度的增大,且出现明显拐点的时间随老化温度增加而减少。由图 2 和图 3 可知,各试样老化 800 h 后复介电常数的变化更加明显,故文中重点分析各试样老化 800 h 的介电特性。

### 2.2 复介电常数频谱图分析

以 H155-800 (热老化温度 155 ℃,老化时间 800 h) 试样为例,其复介电常数频谱如图 4 所示。

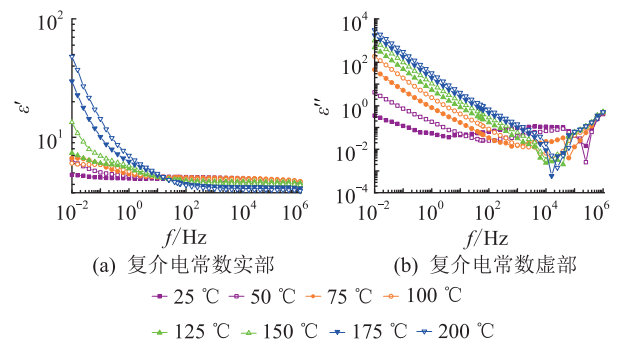


图4 H155-800 复介电常数频谱

Fig.4 Complex dielectric constant spectra for H155-800

由图 4(a) 可知,相同温度下,频率高于 10 Hz 时, $\varepsilon'$  不随频率变化而变化;当频率低于 10 Hz 时,

$\epsilon'$ 随着频率减小而增大。频率低于 10 Hz 时,相同频率下  $\epsilon'$ 随着温度升高而增大;而当频率高于 10 Hz 时,相同频率下  $\epsilon'$ 未随温度出现明显变化。由图 4(b)可知,当频率低于 10 Hz 时,相同温度下  $\epsilon''$ 随着频率降低而增大。由此可知高温低频下复介电常数频谱图的变化更加明显。

由文献[15]可知,XLPE 熔融温度为 104 °C,在温度低于 104 °C 时,结晶区的存在使带电粒子运动困难,热运动较弱,与热运动有关的弛豫极化因需要更长的弛豫时间而难以建立,所以此时  $\epsilon'$ 接近  $\epsilon_\infty$ ,且  $\epsilon''$ 较小。温度高于 104 °C 时,结晶区完全熔融,粒子迁移受到的阻力减小,热运动加强,极化建立所需的时间减少,因此  $\epsilon'$ 增大,同时电介质的能量损耗也相应增加,即  $\epsilon''$ 增加<sup>[16]</sup>。

### 2.3 介质损耗角正切值分析

XLPE 由非极性大分子链组成,极性较弱,所以 XLPE 的损耗主要为电导损耗、次级松弛损耗以及材料中抗氧化剂、交联剂等带来的附加损耗<sup>[17]</sup>。在 XLPE 热老化过程中,分子链断裂、氧化后产生的小分子会增加试样极性,松弛损耗增大<sup>[18]</sup>。XLPE 的损耗可由介质损耗角正切值  $\tan \delta$  反映<sup>[14]</sup>。

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j\tan \delta) \quad (3)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4)$$

式中: $\epsilon^*$ 为复介电常数; $\tan \delta$ 为介质损耗角正切值。

根据式(4),以不同老化温度下热老化 800 h 的试样为例进行计算,结果如图 5 所示。

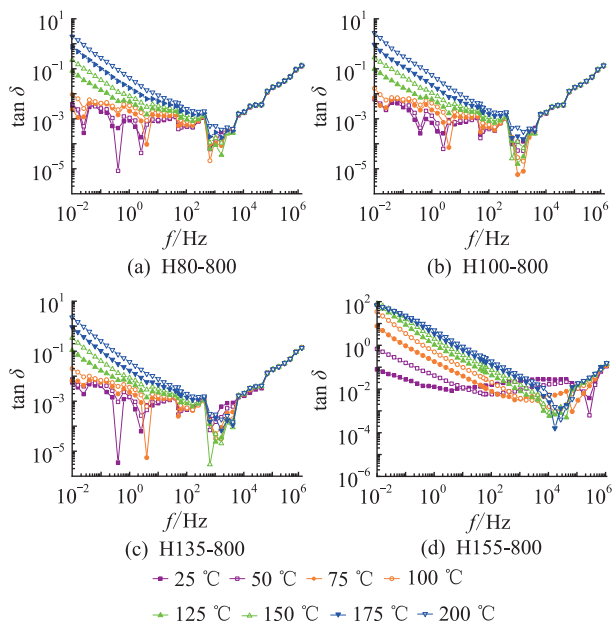


图 5 热老化 800 h 试样介质损耗角正切值频谱  
Fig.5 Dielectric dissipation factor spectra for 800 h heating aged samples

由图 5(a)~(c)可知,当频率低于 100 Hz 时,相同频率下,  $\tan \delta$  随着温度升高而增大;当频率高于 100 Hz 时,因试样松弛不完全导致  $\tan \delta$  无明显变化<sup>[16]</sup>。温度高于 100 °C 时,  $\tan \delta$  在相同温度下随着频率降低而增大。上述变化在图 5(d)中更加明显,且在温度低于 100 °C 的情况下也出现了类似变化。温度低于 100 °C 时,试样中粒子热运动能量较低,所需的松弛时间更长,因此  $\tan \delta$  变化不明显。

### 2.4 电导率分析

对材料施加外电场时,内部的电流密度<sup>[14]</sup>如式(5)所示。

$$J = j\omega\epsilon_0\epsilon'E + \omega\epsilon_0\epsilon''E \quad (5)$$

式中: $J$ 为电流密度; $E$ 为电场强度。此时,比值  $J/E$  的实部为电介质电导率  $\sigma$ <sup>[14]</sup>。

$$\sigma = \omega\epsilon_0\epsilon'' \quad (6)$$

通过式(6)计算各老化条件下温度为 200 °C 时的电导率  $\sigma$ ,如图 6 所示。

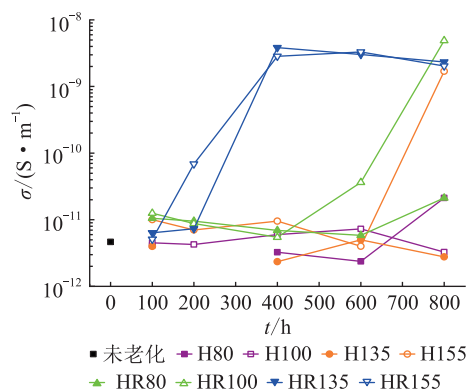


图 6 200 °C 时各试样电导率

Fig.6 Conductivity for each sample measured at 200 °C

由图 6 可知,老化温度低于 135 °C 时,热老化试样的  $\sigma$  不随老化时间增加而变化;而热-辐射老化试样的  $\sigma$  出现不同程度的增加。老化温度为 155 °C 时,热老化试样与热-辐射老化试样的  $\sigma$  均随老化时间增加而增大。H155、HR100、HR135、HR155 出现  $\sigma$  明显拐点的老化时间分别为 600 h、600 h、400 h、200 h,说明热与辐射 2 个老化条件均会加速材料的劣化。在 HR100、HR135、HR155 等条件下,通过对比  $\sigma$  的变化可知,在其他条件相同的情况下,老化温度越高,  $\sigma$  出现拐点所需的老化时间越短。

### 2.5 复介电模量频谱图分析

文献[13]研究表明复介电模量是分析电介质极化的有力工具,复介电模量定义<sup>[14]</sup>如式(7)所示。

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + \frac{j\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} = M' + jM'' \quad (7)$$

式中: $M'$ 为复介电模量实部; $M''$ 为复介电模量虚部。

以试样 H155-800 为例,通过式(7)计算,得到的复介电模量频谱如图 7 所示。

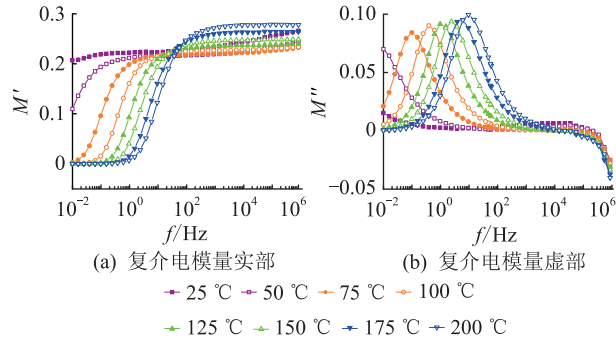


图 7 H155-800 复介电模量频谱

Fig.7 Spectra of electric modulus for H155-800

由图 7(a)可知, $M'$ 在不同频率下出现 3 种不同变化过程,且跃变过程的起始频率随温度的升高而增大。由图 7(b)可知, $M''$ 中出现了不同位置的松弛峰,将松弛峰处的频率定义为 $f_p$ , $f_p$ 随温度的升高而增大。借鉴文献[19]的研究,文中以 $M''$ 的变化分析介电特性的变化。

结合图 4(b)和图 7(b)可知,松弛峰出现的频率范围与 $\epsilon''$ 下降的频率范围相同,这说明松弛峰的出现是由粒子热运动造成<sup>[20]</sup>。当粒子的频率低于峰值频率时,粒子的平均自由行程较大;达到峰值频率之后,粒子的平均自由行程开始减小<sup>[21]</sup>。根据图 7 可知,复介电模量虚部频谱图中的松弛峰更能体现电介质的老化状况。

如图 8 所示为不同的老化温度下热-辐射老化 800 h 试样的复介电模量虚部频谱图。对比图 8 中 4 个试样在频率范围为 $10^{-2} \sim 10^6$  Hz 时的变化,图 8(a)中出现了 4 个松弛峰,图 8(b)和图 8(c)中出现了 6 个松弛峰,图 8(d)中出现了 7 个松弛峰。由此可知,松弛峰的数量随着老化温度的增加而增加。

200 °C 下热-辐射老化试样 $f_p$ 与老化时间的关系如图 9 所示。由图 9 可知,4 个试样老化 100 h 后的 $f_p$ 大小相近。老化时间超过 100 h 后,随老化时间增加,HR80 的 $f_p$ 变化较小;HR100、HR135 和 HR155 的 $f_p$ 均在老化时间超过 400 h 后明显增大,且 HR100、HR135 和 HR155 的 $f_p$ 出现明显拐点的老化时间分别为 600 h、200 h 和 100 h,可见老化温度的增加减少了 $f_p$ 出现明显拐点所需的时间。

## 2.6 活化能分析

由 2.5 节可知,松弛峰的出现与分子热运动有关,文中使用 Arrhenius 方程<sup>[22-23]</sup>进行描述,如式(8)所示。

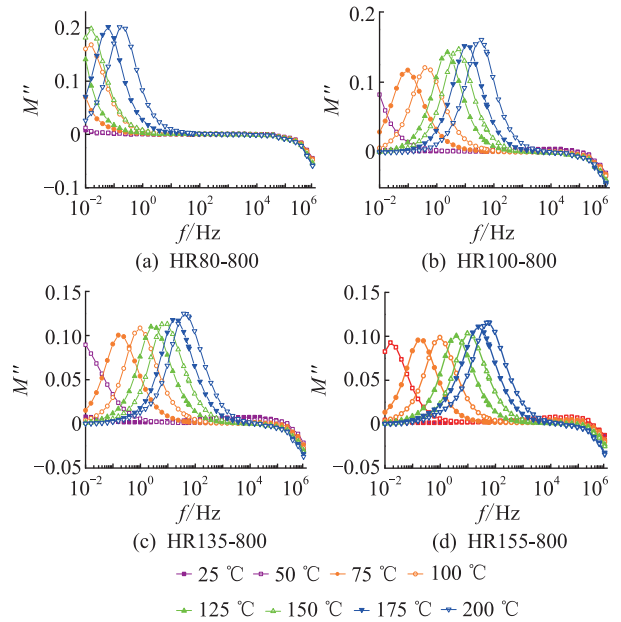


图 8 热-辐射老化试样复介电常数虚部频谱

Fig.8 Spectra of imaginary part of complex dielectric modulus for heating-radiation aged samples

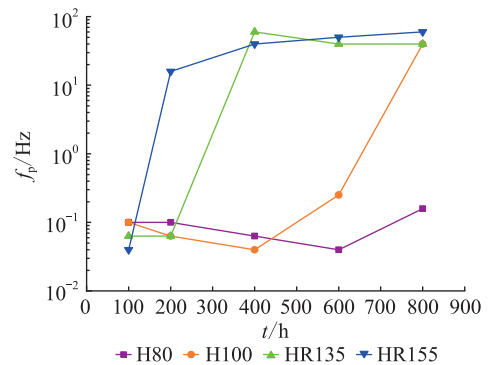


图 9 200 °C 时热-辐射老化试样松弛峰峰值频率

Fig.9 The peak frequency of relaxation peak for heating-radiation aged samples at 200 °C

$$f_p = f_0 e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (8)$$

将式(8)两边取对数则可得式(9)。

$$\ln f_p = \ln f_0 - \frac{E_a}{kT} \quad (9)$$

式中: $f_0$ 为常数; $E_a$ 为活化能; $k$ 为玻尔兹曼常数; $T$ 为温度。

使用式(9)计算热-辐射老化 800 h 试样的数据并拟合得到对应试样的活化能,得到各试样的活化能如图 10 所示。

由图 10 可知,热-辐射老化试样随着老化温度的提高,活化能从 0.35 eV 下降至 0.26 eV;活化能在老化温度从 80 °C 增加到 100 °C 时出现明显下降。对比 4 个热-辐射老化试样可知,测试温度相同时, $f_p$ 随老化温度的增加而增大。

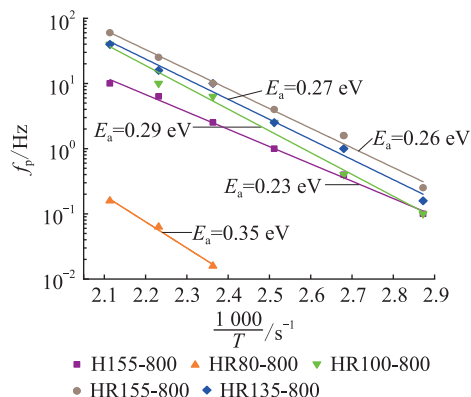


图 10 H155-800 与热-辐射老化试样活化能  
Fig.10 Activation energy for H155-800 and heating-radiation aged samples

### 2.7 Cole-Cole 图分析

XLPE 由非极性大分子链组成,所以 XLPE 的极化过程往往被认为符合德拜弛豫过程。当分子链结构遭到破坏时,试样中会出现多个松弛极化,极化过程发生偏离,因此可借助 Cole-Cole 图以获得介质弛豫极化的信息<sup>[24]</sup>。作图时,圆心通常在下方,连接圆心与  $\epsilon_\infty$  得到一条直线,此直线与实轴的夹角为  $\alpha$ 。通常借助校正因子  $\beta$  来表征极化弛豫的偏离程度。 $\beta$ <sup>[14]</sup> 的求解如式 (10) 所示。

$$\beta = 1 - \frac{2}{\pi}\alpha \quad (10)$$

$\beta = 1$  时,极化弛豫为德拜弛豫;随着介电松弛分布变宽, $\beta$  开始减小。分别将老化效果明显的 H155-800 试样、不同老化温度下热-辐射老化 800 h 的试样以及未老化试样在 200 °C 下的复介电模量数据拟合为 Cole-Cole 曲线如图 11 所示,对应试样的  $\beta$  见表 1。

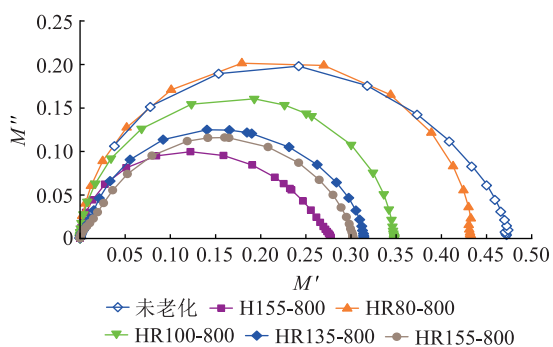


图 11 200 °C 时 H155-800 和热-辐射老化试样及未老化试样的 Cole-Cole

Fig.11 Cole-Cole plot for H155-800,heating-radiation aged samples and unaged sample at 200 °C

由表 1 可见,未老化试样的  $\beta$  为 0.94,接近 1.0,极化弛豫接近简单的德拜弛豫;随着老化温度的提高, $\beta$  开始下降,说明分子链结构遭到了破坏,试样

中出现多个松弛极化。

表 1 200 °C 时 H155-800 和热-辐射老化试样及未老化试样的  $\beta$

Table 1  $\beta$  for H155-800,heating-radiation aged samples and unaged sample at 200 °C

老化条件	$\beta$	老化条件	$\beta$
未老化	0.944	HR100-800	0.889
H155-800	0.756	HR135-800	0.833
HR80-800	0.967	HR155-800	0.733

### 3 结论

文中主要研究了热老化和热-辐射老化的 XLPE 在不同温度条件下的介电特性,可得到如下结论:

(1) 射线的引入会加速材料的老化,热老化实验中 155 °C、800 h 时出现明显劣化,而热-辐射老化实验中 100 °C、800 h 时出现明显劣化;

(2) 测试温度高于 100 °C,频率低于 1 Hz 时,试样的复介电常数实部和复介电模量虚部变化更加明显,更能反映 H100 和 H135 等劣化不严重试样的劣化情况;

(3) 在老化温度与辐射条件相同时,试样的电导率与松弛峰峰值频率  $f_p$  随老化时间的增加而增大,活化能随老化时间的增加而减小;

(4) 根据复电模量虚部峰值频率、电导率、活化能及  $\beta$  的变化可知,相较于低温条件,高温条件下的介电特性更能反映试样老化状况。

#### 参考文献:

[1] 赵一枫,刘刚,谢月,等. 退役高压 XLPE 电缆绝缘空间电荷行为研究[J]. 电力工程技术,2020,39(3):151-157,172.  
ZHAO Yifeng, LIU Gang, XIE Yue, et al. Space charge behavior of retired high-voltage XLPE cables [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 151-157, 172.

[2] 杨亮,周恺,倪周,等. 考虑负荷特性的 XLPE 电缆绝缘老化程度研究[J]. 智慧电力,2020,48(10):113-119.  
YANG Liang, ZHOU Kai, NI Zhou, et al. Analysis of XLPE cable insulation aging considering load characteristics [J]. Smart Power, 2020, 48(10): 113-119.

[3] 李欢,李建英,马永翔,等. 不同温度热老化条件下交联聚乙烯电缆绝缘热性能和力学性能的劣化趋势研究[J]. 绝缘材料,2018,51(1):57-63.  
LI Huan, LI Jianying, MA Yongxiang, et al. Degradation trend of thermal and mechanical properties of XLPE cable insulation thermal ageing at different temperatures [J]. Insulating Materials, 2018, 51(1): 57-63.

[4] XIE Y, ZHAO Y F, FAN X H, et al. Experimental study on cable rejuvenation via simulated cable operation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 708-711.

- [5] XIE Y, LIU G, ZHAO Y F, et al. Rejuvenation of retired power cables by heat treatment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 668-670.
- [6] 唐超, 廖瑞金, 周天春, 等. 伽马射线对低密度聚乙烯的空间电荷陷阱特征影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 188-194, 1.
- TANG Chao, LIAO Ruijin, ZHOU Tianchun, et al. Influence of gamma irradiation on space charge trapping characteristics in low density polyethylene[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 188-194, 1.
- [7] ADAMEC V. Temporary changes in electrical properties of polymer dielectrics due to ionizing radiation[J]. Journal of Polymer Science Part A-2: Polymer Physics, 1968, 6(7): 1241-1253.
- [8] NEDJAR M. Effect of thermal aging on the electrical properties of crosslinked polyethylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 111(4): 1985-1990.
- [9] HVIDSTEN S, VANDBAKK M, MAUSETH F. Dielectric properties of organic contaminations in XLPE cable insulation[C]//2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Montreal, QC, Canada. IEEE, 2012: 684-687.
- [10] 朱晓辉, 孟峥峥, 王浩鸣, 等. 运行高压交联聚乙烯电力电缆的介电性能[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1090-1095.
- ZHU Xiaohui, MENG Zhengzheng, WANG Haoming, et al. Dielectric properties of operated high voltage XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1090-1095.
- [11] MIN D M, YAN C Y, HUANG Y, et al. Dielectric and carrier transport properties of silicone rubber degraded by gamma irradiation[J]. Polymers, 2017, 9(10): 533.
- [12] TIAN F Q, OHKI Y. Electric modulus powerful tool for analyzing dielectric behavior[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3): 929-931.
- [13] 范星辉, 谢月, 刘刚, 等. 不同温度下退役高压电缆绝缘介电特性研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 60-66, 74.
- FAN Xinghui, XIE Yue, LIU Gang, et al. Insulation dielectric properties of retired high voltage cables at different temperatures[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 60-66, 74.
- [14] 殷之文. 电介质物理学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2003: 588-598.
- YIN Zhiwen. Dielectric physics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2003: 588-598.
- [15] 张怡. 交联聚乙烯直流电-热联合老化特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- ZHANG Yi. Research on characteristics of XLPE after DC electro-thermal aging[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [16] TIAN F Q, OHKI Y. Charge transport and electrode polarization in epoxy resin at high temperatures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(4): 045311.
- [17] 徐俊, 王晓东, 欧阳本红, 等. 热老化对交联聚乙烯电缆绝缘理化结构的影响[J]. 绝缘材料, 2013, 46(2): 33-37.
- XU Jun, WANG Xiaodong, OUYANG Benhong, et al. Effect of thermal aging on the physicochemical structure of XLPE cable insulation[J]. Insulating Materials, 2013, 46(2): 33-37.
- [18] 赵莉华, 杨兰, 李巍巍, 等. 交联聚乙烯热老化与绝缘性能的关联关系[J]. 中国电力, 2020, 53(9): 118-124.
- ZHAO Lihua, YANG Lan, LI Weiwei, et al. Relationship between thermal aging and insulation properties of XLPE[J]. Electric Power, 2020, 53(9): 118-124.
- [19] OHKI Y. Dielectric relaxation phenomena of several insulating polymers analyzed by electric modulus spectra[C]//2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Sydney, NSW, Australia. IEEE, 2015: 192-195.
- [20] 冯婷婷, 张竣淇, 田昊. 基于弛豫过程的XLPE电缆绝缘老化状态评估[J]. 绝缘材料, 2019, 52(3): 58-62.
- FENG Tingting, ZHANG Junqi, TIAN Hao. Ageing state assessment of XLPE cable based on relaxation process[J]. Insulating Materials, 2019, 52(3): 58-62.
- [21] 胡丽斌, 陈杰, 李陈莹, 等. XLPE电缆绝缘加速热老化特性[J]. 绝缘材料, 2020, 53(2): 59-63.
- HU Libin, CHEN Jie, LI Chenying, et al. Accelerated thermal ageing characteristics of XLPE cable insulation[J]. Insulating Materials, 2020, 53(2): 59-63.
- [22] 康文斌, 蒙绍兴, 李世军, 等. 硅橡胶绝缘介质的分子链运动与电极极化特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 3798-3807.
- KANG Wenbin, MENG Shaoxing, LI Shijun, et al. Molecular chain motion and electrode polarization properties of silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 3798-3807.
- [23] 吴广宁, 钟鑫, 包健康. 温度对油纸绝缘介电频谱特性的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4081-4088.
- WU Guangning, ZHONG Xin, BAO Jiankang. Effect of temperature on dielectric spectrum characteristic of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4081-4088.
- [24] 周利军, 王媚, 周韞捷, 等. 介电谱用于评估XLPE电缆绝缘劣化状态的研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(1): 52-56.
- ZHOU Lijun, WANG Mei, ZHOU Yunjie, et al. Deterioration condition evaluation of XLPE cable insulation by dielectric spectroscopy[J]. Insulating Materials, 2019, 52(1): 52-56.

#### 作者简介:



邓红雷

邓红雷(1975),男,博士,副教授,研究方向为电力设备在线监测、交直流混合配电网(E-mail:denghl@scut.edu.cn);

杨浩(1998),男,硕士在读,研究方向为绝缘材料及材料老化;

谢月(1990),男,博士,副教授,研究方向为高电压与绝缘材料。

(下转第219页)

## Comprehensive evaluation for the adaptability of electrochemical energy storage conditions based on cloud model

HAN Xiaojuan, MU Zhiguo, WEI Zixuan

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The energy storage system is a complex energy system that changes with time. Multiple indicators are required to describe its performance, and different application scenarios have different requirements for the energy storage system. To solve the above problems, a cloud model-based method for evaluating the adaptability of electrochemical energy storage conditions is proposed. In the application scenario of energy storage participating in power grid peak and frequency regulation, comprehensive evaluation indicator domain and standard domain for energy storage system suitable for power grid peak regulation and frequency regulation are established firstly. Then, the entropy weight method is used to calculate weight matrix of energy storage system evaluation indicators. The forward cloud generator is used to calculate the membership matrix of the decision-making indicators of the energy storage system to be evaluated. Finally, the comprehensive score of the adaptability of the energy storage system to be evaluated is calculated according to the fuzzy subset on the comprehensive evaluation standard domain of the energy storage system, and the one with the highest score is selected as the best energy storage system for this application scenario. The working condition adaptability of five electrochemical energy storage systems is simulated and analyzed. The results show that the lithium iron phosphate battery has the highest score. The lithium iron phosphate battery has the best working condition adaptability in the peak and frequency regulation scenario, which is consistent with the actual engineering.

**Keywords:** energy storage type selection; working condition adaptability; peak and frequency regulation; decision fusion; entropy weight method; cloud model

(编辑 吴楠)

(上接第 161 页)

## Aging assessment of XLPE based on high temperature dielectric spectra

DENG Honglei<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>1</sup>, XIE Yue<sup>2</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>, ZHAO Yifeng<sup>1</sup>, FAN Xinghui<sup>1</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. School of Automation, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

**Abstract:** To study the changes in dielectric properties for thermally aged cross-linked polyethylene (XLPE) at different temperatures, the pure thermal and thermal-radiation aging tests are done. Thermal aging is carried at 80 °C, 100 °C, 135 °C and 155 °C, lasting for 100 to 800 hours. The same conditions combined with 100 Gy/h gamma rays are done for thermal-radiation aged samples, and the dielectric spectra are measured from 25 to 200 °C. The results show that the activation energy and values of  $\beta$  decrease obviously after the introduction of rays. At the same aging temperature and radiation conditions, electrical conductivity and relaxation peak frequency increase as the increasing aging time, which is a good reflection of dielectric properties during the aging process. Under different temperatures, the deviation in complex permittivity and modulus at lower frequency becomes more distinct compared with the values at a higher frequency. Finally, the dielectric properties under high temperature and low frequency could be a good indicator for the evaluation of XLPE degradation.

**Keywords:** cross-linked polyethylene (XLPE); thermal aging; complex permittivity; dielectric modulus; gamma radiation; insulation condition assessment

(编辑 李栋)