

# 干式变压器绝缘试样活化能与热老化程度的关联特性

张鑫<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 马昊<sup>1</sup>, 张蔚<sup>2</sup>, 李庆民<sup>2</sup>

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384;  
2. 高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:**干式变压器在中低压配电网中的应用愈加广泛,但干式变压器主要绝缘材料环氧树脂的本征特性与老化程度的关联规律还不甚明确。活化能是电介质内部微观运动单元在运动时克服的能量势垒,是绝缘材料老化状态的微观本征反映。为研究干式变压器用环氧树脂的活化能及其他特性表征参数与热老化程度之间的关联规律,本文对干式变压器用环氧树脂试样进行不同温度的热老化,测量试样的不同温度下的介电谱和电气强度。结果表明,随着老化时间的增加,试样的界面极化松弛活化能呈现减小-增加-略有减小-最终增加的变化趋势,原因是老化过程中极性基团、自由基的增加和减少会使陷阱深度加深或降低。随着老化时间增加,试样的相对介电常数、介损因数呈现减小-增加-略有减小-最终增加的变化趋势,且在老化后期相同老化时间时,温度越高相对介电常数、介损因数越高,击穿场强随着老化时间呈现上升-下降-略有上升-最终下降的趋势,介电参数与电气参数随老化的变化表明温度越高试样老化越严重。本文研究发现活化能、相对介电常数、介损因数、击穿场强随老化时间的变化规律有一定的相关性,建立了热老化这一缓慢化学反应与松弛活化能之间的作用联系。

**关键词:**环氧树脂; 热老化; 活化能; 陷阱深度

**DOI:** 10.12067/ATEEE1910036      **文章编号:** 1003-3076(2020)03-0009-08      **中图分类号:** TM85

## 1 引言

干式变压器的绝缘强度高、安装简单、维护方便、应用环境广泛,在中低压配电网中的应用越来越普遍。干式变压器的主要绝缘材料为环氧树脂,环氧树脂包裹变压器绕组,但其导热性较差,长期承受热和电的双重作用,易加速环氧树脂的劣化过程形成绝缘缺陷,威胁干式变压器的安全运行<sup>[1-4]</sup>。因此需要开展对干式变压器用环氧树脂在老化过程中状态特征量的变化规律的研究,发展干式变压器老化状态的表征和评估技术,这对电网的安全稳定运行有着重要的工程意义。

目前国内外学者对环氧树脂及其复合材料状态特征量随着老化的变化情况开展了一定的实验研究。文献[5]制作了环氧树脂试样,并进行不同老化状态下试样的介电性能测试,初步得到相对介电

常数、介质损耗因数随老化的变化规律。文献[6]对电热联合老化的环氧树脂试样进行研究,发现热老化机理和电老化机理有明显不同,从材料内部基团和化学键断裂的方面解释电热作用具有协同效应。文献[7]通过研究发现热老化会使环氧树脂基质发生氧化和分子重排,导致材料模量增加、自由体积分数明显降低。文献[8]对发电机定子绝缘环氧树脂复合绝缘进行加速多应力老化实验,通过红外光谱和X射线能谱技术分析绝缘材料中组分的变化,结果表明环氧树脂引起水解反应,绝缘材料发生结构变化。文献[9]对环氧树脂在两种电场环境中进行电老化,发现溶胀、开裂和颗粒状隆起是三个典型的表面老化特征,它们在老化过程中相继形成,随着老化时间的增加,环氧树脂表面的有机基团数量减少,而无机填料的质量分数增加。文献[10]研究环氧树脂的相对介电常数实部、虚部在湿热老化

**收稿日期:** 2019-10-25  
**基金项目:** 国家电网公司科技项目“基于活化能定量表征的干式绝缘设备缺陷检测与老化评估技术研究”(KJ19-1-29)  
**作者简介:** 张鑫(1988-),男,河北籍,工程师,硕士,研究方向为变压器状态检测;  
李庆民(1968-),男,山东籍,教授,博导,研究方向为高电压与绝缘技术、放电物理(通讯作者)。

环境下随老化时间的变化规律,通过德拜方程对实验结果进行拟合,发现环氧树脂材料裂解产生的游离小分子含量与极化损耗呈正相关。文献[11]研究环氧树脂固化反应的影响因素,利用散射理论和陷阱模型解释了添加 SiO<sub>2</sub> 环氧树脂性能提高的原因,得出高温会破坏材料结构导致绝缘能力下降。文献[12]对根据设备部位结构特点设计的一种环氧树脂试件进行加速点老化实验,表明试件的局部放电过程分为 3 个阶段,试件的介损因数与老化时间具有一定的线性关系,并用方程拟合得到设定使用年限时最大的介损因数,可作为电气绝缘寿命的参考依据。文献[13]对环氧云母复合材料的加速老化试样进行介电谱测试,表明试样的复电容实部和虚部随着老化周期增加明显增大,并根据频-温平移法计算得到某个状态下绝缘的活化能,但并未将活化能和老化状态建立联系。

活化能描述的是电介质微观运动单元极化、弛豫和共振机制,表征运动单元运动时需克服的能量势垒,是材料绝缘状态的微观本征反映。目前基于活化能表征绝缘材料的研究也多有进展。文献[14]发现油浸绝缘纸活化能与水分有很好的线性关系,可以用来评估绝缘纸的水分含量。文献[15]分析不同老化状态绝缘油的活化能,并辅以绝缘油酸值测试,构建绝缘寿命预测式。但对于环氧树脂活化能与老化程度的关联规律研究较少<sup>[16]</sup>。

为此,本文对干式变压器用环氧树脂试样进行不同温度的热老化实验,对老化试样进行介电谱测试、电气强度测试,得到最能明显反映绝缘状态变化的低频段弛豫的松弛活化能与老化状态的关联规律,探究活化能与常规表征材料老化程度的介损因数、相对介电常数和电气强度的关联关系,从微观陷阱能级角度解释环氧树脂活化能在热老化过程中的变化趋势,为基于活化能评估干式变压器老化状态提供参考。

2 实验设置

2.1 试样准备

本文实验样品原材料为山东泰开变压器有限公司浇注干式变压器用环氧树脂,制作工艺同变压器浇注工艺,浇注成直径 100mm、厚度 1mm 的圆片状试样。实验前用无水乙醇擦拭净试样表面,并在室温烘干箱中恒温干燥。

2.2 热老化试验方案

当温度高于玻璃化转换温度时,环氧树脂材料转变为玻璃态,分子间联系减弱,以此温度为界将呈现不同的物理性质。所以热老化温度参考环氧树脂的玻璃化转换温度,设置 100℃、130℃、160℃ 三个热老化实验环境。将试样分为 A、B、C 三个大组,每组分为 11 小组,每小组 6 个试样。将 A、B、C 三组试样分别放入 100℃、130℃、160℃ 的鼓风老化箱中,老化时间设置为 0h、96h、192h、288h、384h、480h、576h、672h、768h、864h、960h、1056h。每次老化周期结束后,取出每组试样,其中 1 个用于测量介电频谱,5 个用于测量交流击穿电压。

2.3 介电谱试验

本文采用 Omicron 公司生产的 DIRANA 绝缘诊断分析仪测量试样的介电谱,实验电极为自制三电极系统,制作标准参考 GB/T 1049-2006。金属电极材质为黄铜,绝缘材料为聚四氟。上、下电极直径均略小于试样直径,为尽可能消除空隙,电极与支撑板之间设有弹簧,保证试样与电极紧密接触。测量实验进行时将保护电极和测量仪器可靠接地,将三电极系统放入鼓风恒温箱中,每次改变温度时在目标温度附近恒温 10min 以保证实验系统均匀达到目标温度。测量频率范围为 0.001~1000Hz,测量温度范围为 30~100℃,温度间隔为 10℃。每片试样每个温度条件下测量 3 次,选取曲线平滑且数值居中的曲线作为该试样在该温度条件下的介电谱曲线。测试装置如图 1 所示。



图 1 测试装置

Fig.1 Test device

2.4 交流击穿实验

交流击穿实验参考 GB/T 1048.1-2006,采用柱-板电极作为击穿实验电极,电极均为黄铜磨制。为增加爬电距离降低沿面闪络概率,接地电极直径适当缩小,具体尺寸和实验情况如图 2 所示。

击穿实验测量时将电极和试样可靠、充分接触,

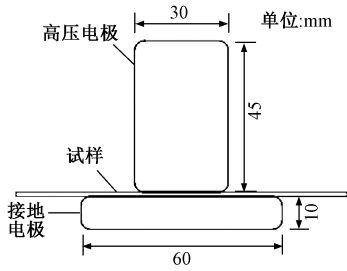


图2 交流击穿实验电极

Fig.2 AC breakdown test electrode

将电极和试样牢固固定在油杯中,充入植物变压器油,使电极覆没在油中。实验方式采用短时实验方式,升压速度为 1.2kV/s,使试样在 10~20s 之间发生击穿。每个老化程度下有 5 片试样,测试之前测量试样厚度,将 5 片试样的击穿场强的平均值作为该老化程度对应的击穿场强。

### 3 环氧树脂老化试样的活化能变化规律

#### 3.1 活化能的计算方法

电介质的双势阱模型是描述电介质内部微观运动单元运动的模型,电介质运动单元在势阱中存在时间的介电弛豫衰减函数为:

$$\tau = \frac{\pi}{\omega_0} e^{E_a/(kT)} \quad (1)$$

式中, $\tau$  为弛豫时间; $\omega_0$  为运动单元在势阱中的振动角频率; $E_a$  为运动单元运动时要克服的势垒,称为松弛活化能; $k$  为 Boltzmann 常数; $T$  为热力学温度。不同类型运动单元的弛豫时间不同,但均随温度升高而缩短,表现在介电谱曲线上即试样的一组不同温度介电谱曲线,呈现随着温度升高向右平移的趋势。这是由于在某一频率外力作用下,达到同一程度力学状态的时间随温度升高而缩短,即外力作用时间和温度的影响具有等效作用。基于此等效原理得到“频-温平移法”<sup>[15]</sup>,平移不同温度下介电谱曲线重合成为一条主曲线,定义 $f_0$  为温度为 $T_0$  时介电谱某点平移前对应的频率, $f$  为平移后该点在温度 $T$  时介电谱上对应的频率,则从式(1)可推得:

$$\ln f_0 - \ln f = \frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (2)$$

实测获得不同温度下的介电谱曲线后,将弛豫对应特征频段附近的曲线进行平移重合,由式(2)可拟合 $(\ln f_0 - \ln f)$  与 $(1/T - 1/T_0)$  的关系,其斜率即为 $E_a/k$ ,从而求出活化能。

大量实验数据表明,绝缘材料的性能劣化,主要

反映在低频的介电性能改变。老化会由小到大、由部分到整体影响材料的微观结构,影响微观运动单元的弛豫过程,所以特征频段较低的弛豫的松弛活化能更能反映绝缘材料的劣化程度。低频段电介质的电导损耗随频率降低急剧上升,弛豫反映在介损因数曲线的变化趋势,在低频段会被电导损耗的变化遮盖,但表示电荷积累的相对介电常数不受电导的影响,应以相对介电常数作为平移曲线,获得特征频段在低频段弛豫的松弛活化能<sup>[14]</sup>。环氧树脂偶极子极化的特征频率一般为 $10^6$ Hz,频率较高,界面极化的特征频段 $f \leq 10^2$  Hz,所以应选取界面极化的特征频段的曲线作为平移曲线,计算得到界面极化的松弛活化能。本文以 30℃ 时相对介电常数曲线作为主曲线,将 40~100℃ 下相对介电常数曲线平移至主曲线,使移动的曲线与主曲线尽可能多的重合,形成一条扩展频率后的主曲线。获得各个温度下曲线的平移量,按照式(2)拟合 $(\ln f_0 - \ln f)$  与 $(1/T - 1/T_0)$  的线性关系,通过斜率计算得到各个老化状态下的松弛活化能。

界面极化的松弛活化能本质为参与界面极化的载流子、空间电荷在电场作用下越出陷阱的高度。热刺激去极化电流法(TSDC)通过式(3)拟合 $\ln I$  与 $1/T$  的关系,通过求解直线斜率 $-H/k$ ,可求得活化能 $H$ 。

$$\ln [I(T)] = \ln A - \frac{H}{kT} \quad (3)$$

式中, $I(T)$  为热刺激去极化电流; $A$  为根据引起热刺激去极化电流机制而确定的表达式。此处测得的活化能对于界面极化即为陷阱深度,与介电谱法测得的界面极化活化能具有相同物理意义。研究表明,陷阱可作为一种聚合物老化的有效表征参数。因此可通过老化对陷阱的影响将老化这个缓慢化学过程与松弛活化能建立联系。

#### 3.2 不同老化状态的活化能

不同老化程度的活化能如图 3 所示。可以看出,随着老化加深,活化能呈现先降低后升高,略有降低之后最终升高的变化趋势,总体而言活化能随着老化的加深而升高。这是因为陷阱本质为禁带中的局域态,高聚物微观结构中晶相与非晶相共存,呈现短程有序、长程无序,由于分子链折叠、断链、交联、支链、侧基、空洞、界面、曲折,在禁带中产生对空间电荷、载流子有捕获能力的能级中心,即陷阱。陷阱深度在 103kJ/mol 以下的陷阱为浅陷阱,介电谱



实验由于温度限制,测得的陷阱为浅陷阱。文献[17]指出,在老化过程中,产生的化学杂质、化学键断裂产生的极性基团、生成孔洞和裂纹均会导致陷阱的产生和陷阱深度的变化。在许多高聚物(包括环氧树脂)的热老化实验研究中<sup>[18,19]</sup>,均发现一定热的作用导致聚合物出现“二次固化”现象,在热作用下环氧树脂内残余的固化剂使环氧树脂进一步交联,陷阱深度变浅,活化能降低,图3曲线的第一次下降即对应此阶段。其后活化能的第一次升高是由于二次固化基本完成后,热作用使聚合物中参与的固化剂发生降解产生游离酸,同时环氧树脂分子链中联系较弱的化学键断裂,侧基消去,两种反应产生极性基团、自由基吸附界面极化粒子,使陷阱深度加深,活化能增加。下一个阶段活化能有小幅下降,是因为固化剂基本分解完全,同时伴随挥发,环氧树脂中的极性基团、自由基数量有所降低,对载流子和空间电荷的吸附作用减弱,陷阱深度略有变浅,活化能有所降低。而后固化剂逐渐挥发完全,环氧树脂分子链的断裂和侧基消去成为老化的主要化学反应,随着老化的进行产生越来越多的极性基团,再次加深陷阱深度,使活化能最终趋于上升<sup>[6]</sup>。

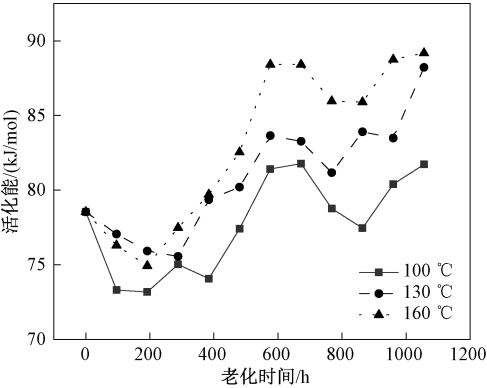


图 3 松弛活化能随老化时间的变化规律

Fig.3 Variation of relaxation activation energy with aging time

文献[20]基于动态力学曲线计算了不同老化状态下发电机主绝缘界面极化弛豫的松弛活化能,随着试样老化程度的加深,活化能逐渐变大。文献[21]在电缆老化实验中发现,老化程度越深的试样,深能级的陷阱越多,三个温度老化下试样材料的活化能均增大。本文实验中活化能总体而言随着老化的加深而升高,与其他高聚物绝缘材料活化能随老化状态的变化规律一致,可为基于活化能评估干式变压器绝缘状态提供参考。

4 环氧树脂介电特性及击穿场强与老化的关系

4.1 不同老化状态的介电特性

在老化温度 100℃下老化不同时间的环氧树脂试样在测试温度 30℃下的相对介电常数如图4所示,其中  $f$  的单位为 Hz。在测试频段内,相对介电常数随频率降低而升高,这是由于随着频率升高跟不上电场变化频率的运动单元减少,电介质内电荷积累作用减弱,导致相对介电常数降低。

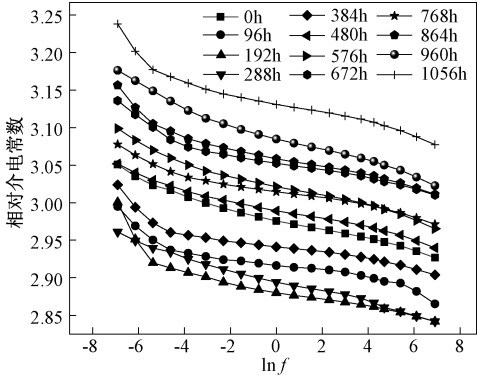


图 4 不同老化状态的相对介电常数谱

Fig.4 Relative permittivity spectrum of different aging states

图5为不同老化温度、相同测试温度下试样的相对介电常数曲线关于时间的积分值随老化时间的变化情况,由图4和图5可以看出,试样的介电常数随老化程度的加深,呈现略减-增加-略减-增加的趋势。以老化温度为 100℃的试样为例,在 0~288h 相对介电常数积分值随老化时间增加而降低,这是由于在初始老化阶段环氧树脂发生“二次固化”反应,试样中残余的固化剂使环氧树脂分子发生进一步交联,电介质中极性基团数量减小,使载流子和空间电荷不易被极性基团捕获,电介质中电荷积累能力降低,所以该阶段介电常数的积分值降低;在 288~576h 相对介电常数的积分值随老化时间增加而增加,这是由于“二次固化”基本完成后参与固化剂发生降解,但又未及时挥发,同时环氧树脂大分子链开始断裂,电介质中极性基团的数量增多,对载流子和空间电荷的捕获能力增加,导致相对介电常数积分值增加;在 576~768h 相对介电常数积分值略有降低,是由于固化剂基本分解完毕,分解物挥发使电介质内极性基团的数量略有下降,导致相对介电常数积分值略有回落;在 768~1056h 环氧树脂大分子在热的作用下继续断裂,产生更多易于捕获空间电荷

和载流子的极性基团和化学键,使相对介电常数积分值随着老化时间增加而上升<sup>[6]</sup>。

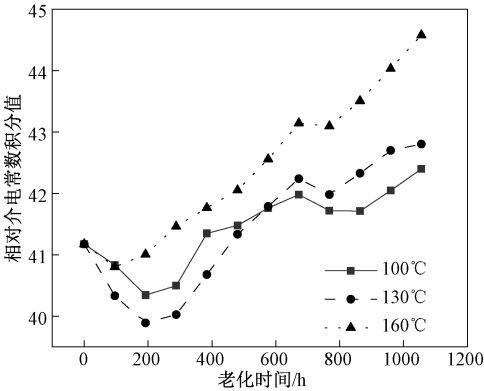


图5 不同老化温度、相同测试温度下试样相对介电常数积分值随老化时间的变化规律

Fig.5 Variation of integral value of relative dielectric constant of sample with aging time at different aging temperatures and same test temperature

图6为不同老化温度下老化1056h的试样在相同测试温度下的相对介电常数谱。可以看出,老化温度越高,相同老化时间时相对介电常数越大。表明老化温度越高,环氧树脂试样内部产生的极性基团越多,老化越严重。

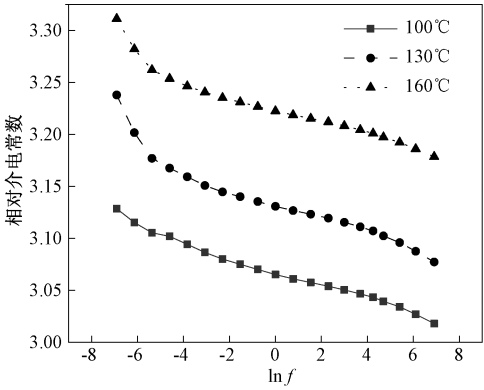


图6 不同老化温度下老化1056h的试样在相同测试温度下的相对介电常数谱

Fig.6 Relative permittivity spectra of samples aged at 1056h at different aging temperatures and same test temperature

根据前文分析可知,环氧树脂老化对低频段弛豫过程的影响较为明显,因此主要关注老化对低频段介损因数曲线的影响。实验发现不同老化程度的介损曲线主要在 $e^{-7}\text{Hz}\leq f\leq e^{-3}\text{Hz}$ 频段有所区别,不同老化温度、不同老化时间在该频段介损因数曲线关于频率的积分如图7所示。

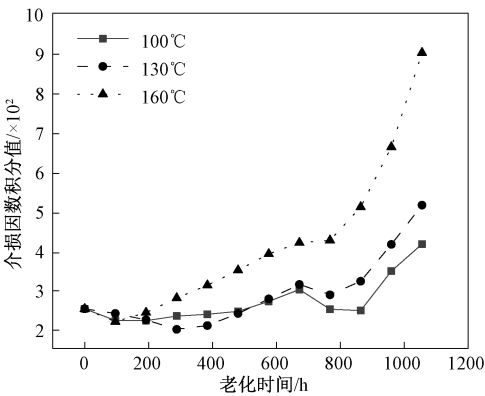


图7 不同老化温度、相同测试温度下试样的介损因数曲线积分值随老化时间的变化规律

Fig.7 Variation of integral value of dielectric loss factor curve of sample with aging time at different aging temperatures and same test temperature

由图7可知,随着老化时间的增加,环氧树脂的介损因数前期略有降低或上升较缓慢,而后稍有降低后较快上升。在后期相同老化时间下,160℃的介损因数积分值最大,随老化时间的上升速度最快。介损因数变化趋势与相对介电常数和活化能的变化趋势有较好的对应性,在老化初期由于“二次固化”导致聚合物中自由基减少,极化损耗略有降低或缓慢上升;而后因为固化剂降解和环氧树脂分子链断裂导致内部自由基增多,介质损耗继续缓慢上升,在固化剂降解完全时降解产生的游离酸挥发,使试样中自由基的数目减少,介质损耗略有下降;最后阶段环氧树脂分子链断裂成为主要反应,介质损耗随老化时间的增加快速上升<sup>[6]</sup>。

图8为不同老化温度下老化1056h的试样在相同测试温度下的介损因数谱。可以看出,老化温度越高,相同老化时间时相对介损因数越大。这表明老化温度越高,环氧树脂试样内部产生的极性基团越多,老化越严重。

4.2 不同老化试样的击穿场强

针对5个相同老化状态下的环氧树脂样品进行交流击穿实验,取平均值作为该老化程度下的击穿场强,对不同老化状态下的试样重复实验,所得试样的电气强度随老化时间的变化趋势如图9所示。击穿场强随老化时间呈现增加-减小-略增加-减小的变化趋势,这是因为“二次固化”使环氧树脂分子间的联系更紧密,虽然陷阱变浅,载流子和空间电荷比较容易脱陷,但环氧树脂分子之间联系紧密,需要较大的电压才能形成贯穿的导电通道;接下来二次固化

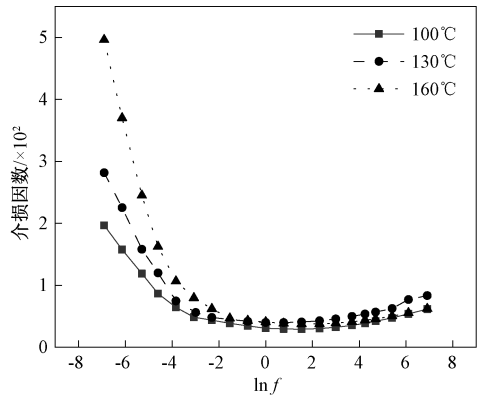


图 8 不同老化温度下老化 1056h 的试样在相同测试温度下的介损因数谱

Fig.8 Dielectric loss factor spectrum of samples aged at 1056h at different aging temperatures and same test temperature

完成、固化剂分解阶段,陷阱深度变深,电极的注入电荷被陷阱捕获形成空间电荷,空间电荷的聚集使电介质中的电场分布严重畸变,导致击穿场强降低;下一阶段固化剂分解产物挥发导致活化能略有下降,击穿场强也随之上升;最后一个阶段环氧树脂热裂解反应成为主要反应,活化能升高,击穿场强随之降低。总体而言,在整个老化阶段,随着老化的进行,击穿场强呈下降趋势<sup>[6]</sup>。

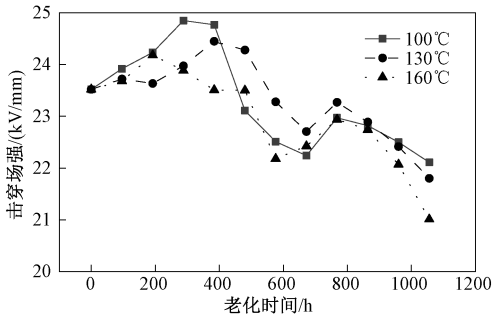


图 9 不同老化温度下试样的电气强度随老化时间的变化

Fig.9 Variation of electrical strength of samples with aging time at different aging temperatures

以 130℃ 老化试样的活化能、击穿场强、相对介电常数积分值、介损因数积分值在整个老化阶段内的最大值为基准值,将实验数据归一化处理,获得这 4 个特性参数随老化时间的变化规律,如图 10 所示。可以看出 4 个特征参数有一定对应关系:在 0~288h“二次固化”阶段,活化能减小,击穿场强略有增加,相对介电常数积分值增加中略有减小,介损因数积分值减小;在 288~576h 固化剂分解、环氧树脂

分子链断裂阶段,活化能增加,击穿场强减小,相对介电常数积分值增加,介损因数积分值增加;在 576~768h 固化剂挥发、环氧树脂继续劣化阶段,活化能略有降低,击穿场强略有上升,相对介电常数积分值略有减小,介损因数积分值略有减小;在 768~1056h 环氧树脂继续劣化阶段,活化能增加,击穿场强下降,相对介电常数积分值明显增加,介损因数积分值明显增加。

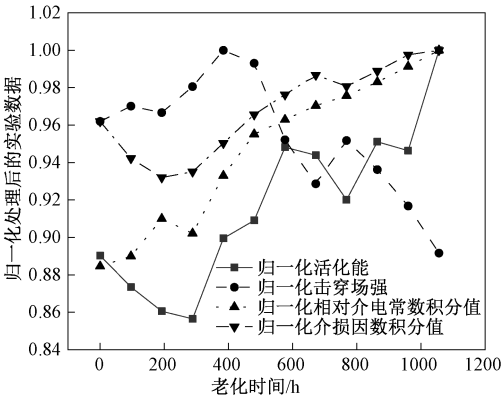


图 10 特性参数归一化处理后随老化时间的变化

Fig.10 Variation of characteristic parameters with aging time after normalization treatment

击穿场强、相对介电常数积分值、介损因数积分值随老化时间的变化规律与活化能的变化规律有一定对应性,可将活化能的变化规律与常规测量的特性参数变化规律联系起来,如以击穿场强下降至初始值 50%时作为绝缘寿命终点,得到对应时刻活化能的数值,作为寿命终止判据,为基于活化能评估干式变压器绝缘老化状态和寿命预测提供参考依据。

5 结论

本文测量了干式变压器用环氧树脂圆片试样在不同老化程度、不同温度下的介电谱和电气强度,计算每个状态的活化能,观察活化能、介电特性和电气强度随老化时间的变化关系,得出以下结论:

- (1)随着老化的进行,环氧树脂的界面极化活化能呈现降低-增加-略有降低-最终升高的变化趋势,原因是“二次固化”、固化剂分解、固化剂分解物挥发、环氧树脂分子链断裂反应过程中极性基团、自由基对电介质内微观陷阱深度的影响。
- (2)在老化过程中,试样的介损因数和相对介电常数呈现曲折上升的趋势;在老化后期相同老化时间时,温度越高相对介电常数、介损因数越高,表明温度越高试样老化越严重。

(3) 击穿场强随老化进行呈现曲折下降的趋势,产生曲折的原因是电介质材料内部不同热老化反应阶段对陷阱深度的影响,陷阱加深导致材料内空间电荷聚集,使材料中电场分布严重畸变,导致击穿场强最终随着老化时间而下降。

(4) 在整个老化阶段,试样击穿场强、相对介电常数积分值、介损因数积分值与活化能的变化趋势有较好的对应性,可以将活化能的变化规律与常规测量的特性参数变化规律联系起来,为基于活化能评估干式变压器绝缘老化状态和寿命预测提供参考依据。

### 参考文献 (References):

- [1] 马伟伟 (Ma Weiwei). 环氧树脂浇注干式变压器局放特性研究 (Study on PD characteristics of epoxy resin cast dry type transformer) [D]. 济南: 山东大学 (Jinan: Shandong University), 2017.
- [2] 温敏敏, 宋建成, 宋渊, 等 (Wen Minmin, Song Jiancheng, Song Yuan, et al.). 基于局部放电统计特征参量分析的矿用干式变压器绝缘状态评估 (Evaluation of insulation state of mine dry-type transformer based on statistical analysis of partial discharge) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (8): 2398-2405.
- [3] 兰贞波, 文武, 阮江军, 等 (Lan Zhenbo, Wen Wu, Ruan Jiangjun, et al.). 基于有限元法的干式变压器多物理场分析计算 (Analysis and calculation of multi-physics field of dry-type transformer based on finite element method) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2015, 51 (8): 107-113.
- [4] 赵义焜, 张国强, 李康, 等 (Zhao Yikun, Zhang Guoqiang, Li Kang, et al.). 高频变压器绝缘材料的环氧预浸处理对放电特性的影响 (Effect of epoxy prepreg on discharge characteristics of high frequency transformer insulation materials) [J/OL]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, DOI: 10.12067/ATEEE1903025.
- [5] 黄炎光, 易鹭 (Huang Yanguang, Yi Lu). 热老化对干式变压器环氧树脂介电性能的影响 (Effect of heat aging on dielectric properties of dry-type transformer epoxy resin) [J]. 绝缘材料 (Insulation Materials), 2016, 49 (9): 53-56, 60.
- [6] 王有元, 王施又, 黄炎光, 等 (Wang Youyuan, Wang Shiyu, Huang Yanguang, et al.). 干式变压器环氧树脂热老化特性研究 (Study on thermal aging characteristics of dry type transformer epoxy resin) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2018, 44 (1): 187-194.
- [7] Yang Y, Xian G, Li H, et al. Thermal aging of an anhydride-cured epoxy resin [J]. Polymer Degradation and Stability, 2015, 118: 111-119.
- [8] Jia Z, Hao Y, Xie H. The degradation assessment of epoxy/mica insulation under multi-stresses aging [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13 (2): 415-422.
- [9] Xie Q, Wang Y, Liu X, et al. Characteristics of microsecond-pulse surface flashover on epoxy resin surfaces in SF6 [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23 (4): 2328-2336.
- [10] 谢荣斌, 薛静, 陈实, 等 (Xie Rongbin, Xue Jing, Chen Shi, et al.). 环氧树脂的湿热老化特性研究 (Study on hygrothermal aging characteristics of epoxy resin) [J]. 绝缘材料 (Insulation Materials), 2019, 52 (6): 21-29.
- [11] 芦竹茂 (Lu Zhumao). 环氧树脂绝缘材料中的电树枝研究 (Study on electric branch in epoxy resin insulation) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2012.
- [12] 王海燕, 陈硕, 朱志豪, 等 (Wang Haiyan, Chen Shuo, Zhu Zhihao, et al.). 固体开关柜环氧树脂材料绝缘特性研究 (Study on insulation properties of epoxy resin materials for solid switchgear) [J]. 绝缘材料 (Insulation Materials), 2019, 52 (2): 35-40.
- [13] 高波, 郝长金, 尹小兵, 等 (Gao Bo, Hao Changjin, Yin Xiaobing, et al.). 发电机主绝缘加速老化的频域介电特性 (Frequency domain dielectric properties of accelerated aging of generator main insulation) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2019, 23 (3): 57-64.
- [14] 廖瑞金, 郝建, 杨丽君, 等 (Liao Ruijin, Hao Jian, Yang Lijun, et al.). 变压器油纸绝缘频域介电特征量与绝缘老化状态的关系 (Relationship between dielectric characteristics of dielectric oil-paper insulation and insulation aging state) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (5): 43-49, 76.
- [15] 张明泽, 刘骥, 吕佳璐, 等 (Zhang Mingze, Liu Ji, Lv Jialu, et al.). 换油周期对变压器油纸绝缘老化性能影响规律研究 (Study on the influence of oil change cycle on the insulation aging performance of transformer oil paper) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2019, 34 (22): 4827-4838.
- [16] 李庆民, 任鹏, 彭鹏, 等 (Li Qingmin, Ren Peng, Peng Peng, et al.). 基于活化能的绝缘老化评估方法研究进展 (Research progress of insulation aging assess-



- ment method based on activation energy) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (1): 59-68.
- [17] 田付强 (Tian Fuqiang). 聚乙烯基无机纳米复合电介质的陷阱特性与电性能研究 (Study on trap characteristics and electrical properties of polyvinyl inorganic nanocomposite dielectrics) [D]. 北京: 北京交通大学 (Beijing: Beijing Jiaotong University), 2012.
- [18] 曹雨, 吴建东, 刘松, 等 (Cao Yu, Wu Jiandong, Liu Song, et al.). 单因子老化中定子线棒等温松弛电流的研究 (Isothermal relaxation current research of stator bar insulation in single factor aging experiments) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (1): 242-248.
- [19] 刘云鹏, 刘贺晨, 高丽娟, 等 (Liu Yunpeng, Liu Hechen, Gao Lijuan, et al.). 电声脉冲法研究热老化对160kV 直流电缆绝缘材料陷阱特性的影响 (Study on the effect of thermal aging on the trap characteristics of 160kV DC cable insulation materials by electroacoustic pulse method) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (24): 105-112.
- [20] 宋建成, 高乃奎, 成永红, 等 (Song Jiancheng, Gao Naikui, Cheng Yonghong, et al.). 大电机定子复合绝缘材料老化的动态力学分析 (Dynamic mechanical analysis of aging of large motor stator composite insulation) [J]. 复合材料学报 (Journal of Composite Materials), 2002, 19 (5): 102-107.
- [21] 何东欣 (He Dongxin). 交联聚乙烯电缆交流空间电荷与老化特性研究 (Study on charge and aging characteristics of AC space of XLPE cable) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2017.

## Correlation between activation energy and thermal aging degree of insulating samples from dry-type transformer

ZHANG Xin<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, MA Hao<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, LI Qing-min<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China;

2. Beijing Key Lab of High Voltage & EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Dry-type transformers are more widely used in power grids in low-voltage distribution networks, but the correlation between the intrinsic properties of the main insulation materials of dry-type transformers and the degree of aging is still not clear. The activation energy is the energy barrier that the microscopic motion unit in the dielectric overcomes during the movement, and is the microscopic intrinsic reflection of the aging state of the insulation material. In order to study the relationship between the activation energy of epoxy resin for dry-type transformers and other characteristic characterization parameters and the degree of heat aging, the epoxy resin samples for dry-type transformers are subjected to heat aging at different temperatures to measure dielectric spectrum and electrical strength of the samples. The results show that with the increase of aging time, the interfacial polarization relaxation activation energy of the sample shows a decreasing-increasing-slightly decreasing-final increasing trend due to the increase of polar groups and free radicals during aging. And reduction will deepen or reduce the depth of the trap. As the aging time increases, the relative dielectric constant and dielectric loss factor of the sample show a decreasing-increasing-slightly decreasing-final increase trend, and at the same aging time in the late aging period, the higher the temperature, the higher the relative dielectric constant and the higher the dielectric loss factor, and the breakdown field strength shows an increase-decrease-slightly increase and final decrease trend as the aging time increases. As for the dielectric parameters and electric parameters, the higher the temperature, the more severe the aging of the sample. In this paper, it is found that the activation energy, relative dielectric constant, dielectric loss factor and breakdown field strength have certain correlation with the aging time, and the relationship between the slow chemical reaction and the relaxation activation energy is established.

**Key words:** epoxy resin; heat aging; activation energy; trap depth