

基于活化能的干式绝缘设备的寿命预测方法及应用研究

任 鹏¹, 刘红磊¹, 李云鹏¹, 张 蔚², 李庆民¹

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 国网上海松江供电公司, 上海 201699)

摘 要:对干式绝缘设备用环氧树脂试样进行老化实验,对不同老化程度的试样进行电气强度和介电谱实验,计算其活化能。发现随着老化程度的加深,环氧树脂的活化能呈现降低-升高-略有降低-升高的变化趋势,电气强度呈现曲折下降的趋势。通过阿伦尼乌斯方程得到的热老化加速因子(AF)可将高温加速老化时间转化为工作温度运行时间。以试样电气强度下降至起始值的50%作为材料寿命终结的标志,得到环氧树脂材料寿命终结对应的活化能为209.7 kJ/mol。建立了基于活化能判断环氧树脂类干式绝缘状态和预测寿命的方法,并以干式变压器为例提出了干式绝缘设备的介电谱测量接线方式和测试方法。对工程实际的干式变压器运用寿命预测方法,得到干式变压器的活化能为69.4 kJ/mol,预测其最少剩余寿命为36.5年。

关键词:活化能;干式绝缘;寿命预测;电气强度;老化加速因子

中图分类号:TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)03-0091-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.03.015

Life Prediction Method and Application of Dry Type Insulation Equipment Based on Activation Energy

REN Peng¹, LIU Honglei¹, LI Yunpeng¹, ZHANG Wei², LI Qingmin¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State grid Shanghai songjiang electric power supply company, Shanghai 201699, China)

Abstract: The epoxy resin samples for dry type insulation equipment were conducted ageing test. The electric strength and dielectric spectrum of the samples with different ageing degree were tested, and their activation energy were calculated. It is found that with the increase of ageing degree, the activation energy of the epoxy resin shows a change trend of decreasing-increasing-slightly decreasing-increasing, and the electric strength shows a zig-zag downward trend. The accelerated ageing time at high temperature can be converted into operating time at working temperature by the accelerated ageing factor (AF) obtained by Arrhenius equation. Taking that the electric strength decreases to 50% of the initial value as a sign of life end for material, we could obtain the activation energy corresponding to the life end of epoxy resin material, which is 209.7 kJ/mol. The judging method of the insulation state and life for epoxy resin dry type insulation based on activation energy is established, and the connection mode and test method of dielectric spectrum measurement for dry type insulation equipment are proposed by taking dry type transformer as an example. The life prediction method is applied to an actual dry type transformer in the project, it is obtained that the activation energy of the dry-type transformer is 69.4 kJ/mol, and the its minimum

收稿日期:2020-05-31 修回日期:2020-07-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51929701、51737005、52081330507);中央高校基本科研业务费资助项目(2019QN114);国家电网公司科技项目(KJ19-1-29)

作者简介:任鹏(1987-),男(汉族),山东莱芜人,博士生,主要从事绝缘材料的老化评估方面的研究工作;李庆民(1968-),男(汉族),山东菏泽人,教授,主要从事高电压与绝缘技术、放电物理等领域的研究工作。

residual life is predicted to be 36.5 years.

Key words: activation energy; dry insulation; life prediction; electric strength; ageing accelerating factor

0 引言

干式绝缘设备是保证电网稳定运行必不可少的一类设备,包括干式变压器、干式电抗器等。干式绝缘设备用绝缘的可靠性直接关系到电网的经济运行和安全稳定,通常需要具有优良的力学性能和电气强度,但在制造过程中总会形成一些先天性的局部缺陷,如气泡、裂缝和电极毛刺等。干式绝缘设备绝缘结构复杂,绝缘缺陷多样,因此需要研究干式绝缘设备用环氧树脂在老化过程中状态量的变化规律,进而提出适用于工程实际的绝缘寿命预测方法^[1-4]。

目前学者对发电机线棒、电缆、GIS用盆式绝缘子和干式变压器用环氧树脂绝缘材料已进行一些研究。文献[5]对发电机线棒的环氧云母绝缘进行宽频介电谱测试,研究了固化温度、固化时间对环氧云母的影响,发现适当的高温可以提高材料的固化程度,进而提高绝缘材料的介电性能。文献[6]对电机定子线棒缩比模型进行热、电老化试验,分析线棒绝缘内陷阱分布变化,结果表明线棒绝缘在老化过程中存在“后固化”的现象,绝缘内陷阱密度先增大后减小。文献[7]对不同老化时间、老化温度下的电机定子线棒主绝缘环氧云母材料进行参数对比,发现电老化使环氧云母绝缘材料的介电性能下降,介质损耗因数和介电常数随老化程度的提高而增大。文献[8]对GIS用盆式绝缘子环氧树脂材料在纳秒脉冲下开展沿面闪络老化试验,发现随着SF₆气体压强的增大,环氧树脂的纳秒脉冲沿面闪络电压升高。文献[9-10]对干式变压器用环氧树脂进行加速热老化试验,研究了环氧树脂的质量损失,但并未对质量损失与绝缘性能进行相关性分析。文献[11]对干式变压器用环氧树脂进行热老化和交流击穿试验,发现材料的击穿电压随老化时间呈现增大-减小-增大-减小-增大的变化趋势,环氧树脂试样的分子链在高温下发生断裂,试样质量和击穿电压减小。

活化能可以反映绝缘材料微观层面的粒子运动和化学反应过程中需要克服的能量势垒,能够从材料本征特性上揭示其老化状态。近年来,一些学者开始考虑采用绝缘的本征特性活化能来研究其老化过程,例如,文献[12]计算出交联聚乙烯的活化

能为114.3 kJ/mol,在150℃下的热老化终止寿命接近336 h,预计交联聚乙烯在工作温度70℃下的使用寿命大约为74年,与实际值较为接近。文献[13]分析了不同老化状态绝缘油的活化能,并辅以绝缘纸板聚合度和绝缘油酸值等测试,构建了绝缘寿命预测关系式。目前学者针对干式绝缘设备活化能测量与计算的研究较少,尚未开展基于活化能评估干式绝缘设备老化状态和寿命预测的研究,因此需要进一步研究活化能与老化状态之间的关系,并建立环氧树脂材料寿命终结的标准,以提出基于活化能预测干式绝缘设备寿命的方法。

本研究对干式绝缘设备用环氧树脂试样进行不同温度的热老化试验,对老化试样进行介电谱测量获取活化能,再进行击穿实验获取电气强度,得到活化能与老化状态的关联规律,探究表征材料寿命终结的活化能标准,研究加速老化时间与工程实际运行时间的等效表征关系,建立基于活化能预测干式绝缘设备寿命的方法,探究工程实际中干式绝缘设备活化能的获取方法,并将寿命预测方法应用于工程现场。

1 实验

1.1 试样

实验材料为山东泰开变压器有限公司的浇注干式变压器用环氧树脂,制作工艺同变压器浇注工艺,浇注成直径为100 mm、厚度为1 mm的圆片状试样,绝缘耐温等级为F级。试验前用无水乙醇擦拭试样表面,并在室温烘干箱中低温干燥。

1.2 热老化实验方案

在玻璃化转变温度附近,高聚物的许多性能会发生急剧变化,在该温度附近试样的老化方式和老化速度可能会由于物理状态不同而存在差异。根据DSC测试获得未老化环氧树脂样品的玻璃化转变温度约为130℃,故本研究将试样分为A、B、C 3大组,分别对应热老化温度为100、130、160℃,每大组分11小组A1~A11,分别对应老化时间为0、96、192、288、384、480、576、672、768、864、960、1 056 h,每个小组为5个试样。定时变换试样在老化箱中的摆放位置,保证老化程度均匀。定时向老化箱中通风换气,保证热氧反应环境基本相同。

1.3 击穿实验方案及平台

交流击穿实验参考 GB/T 1048.1—2006, 选用柱-板电极作为击穿试验平台, 如图 1 所示。实验时为避免沿面闪络, 在杯中充入变压器油, 浸没试样和电极。采用短时实验方式, 升压速度为 1.2 kV/s, 使试样在 10~20 s 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 片试样电气强度的平均值作为该老化程度对应的电气强度。

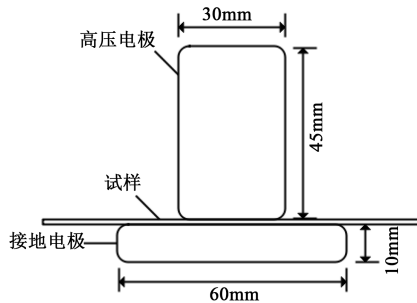


图1 交流击穿试验电极

Fig.1 AC breakdown test electrode

1.4 介电谱实验

实验仪器为Omicron公司的DIRANA型介质响应分析仪, 所用电极为自制三电极系统。介质响应分析仪上的测试输出端连至高压电极, 通道1输入端连接低压电极, 保护电极连接地线。试验时将三电极放入电热鼓风干燥箱, 保证试验环境温度恒定。试验测试频率为 $10^{-3} \sim 10^3$ Hz, 测试温度为 $30 \sim 100^\circ\text{C}$, 温度间隔为 10°C 。

2 环氧树脂活化能和电气强度的关系

2.1 不同老化状态环氧试样的活化能

基于介电谱求取活化能的方法一般基于频温等效原理, 即在某种弛豫占主导地位的特征频段, 可把温度对弛豫时间的影响映射到温度对特征频段的影响上, 反映在介电谱曲线上的现象为温度升高, 介电谱曲线形状不发生变化, 仅整体向高频方向平移。若定义 f_0 表示温度为 T_0 时介电谱上某点平移前对应的频率, f 表示平移后该点在温度 T 时介电谱上对应的频率, 则可得到式(1)。

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

式(1)中: k 为 Boltzmann 常数, $k=1.39 \times 10^{-23}$ J/K; E_a 为活化能。

实测获得不同温度下的介电谱曲线, 由式(1)

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。此方法求得的活化能与热刺激去极化电流法测得的陷阱深度有着相同的物理含义。研究表明, 陷阱深度可作为一种聚合物老化的有效表征参数, 因此可将老化过程与活化能建立联系。

对不同老化程度的环氧树脂试样进行介电谱测量, 得到不同老化程度试样的活化能如图 2 所示。

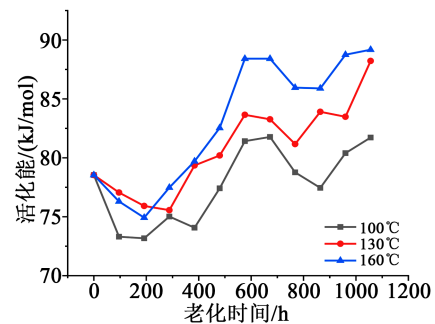


图2 环氧试样活化能随老化时间的变化规律

Fig.2 Variation of activation energy of epoxy resin with ageing time

从图2可以看出, 随着老化程度加深, 环氧试样的活化能呈现先降低后升高, 随后略有降低最终升高的变化趋势, 总体而言活化能随着老化程度的加深而升高。图2曲线的第一次下降是由于热老化过程中出现的“二次固化”, 在热作用下环氧试样在残余固化剂作用下进一步交联, 试样陷阱能级变浅^[6]。随后曲线的第一次升高是由于固化剂降解产生游离酸, 同时环氧树脂分子链中联系较弱的化学键断裂, 两种反应产生极性基团和自由基, 使陷阱深度加深, 活化能提高^[4]。下一个阶段曲线小幅下降是因为固化剂基本分解完全并伴随气体挥发, 环氧树脂中的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。之后主要由于环氧树脂分子链断裂, 大量极性基团产生, 再次加深了陷阱深度, 使活化能最终趋于上升^[15]。

2.2 不同老化状态环氧试样的电气强度

试样电气强度随老化时间的变化趋势如图 3 所示。从图 3 可以看出, 环氧试样的电气强度随老化时间呈现增大-减小-略微增大-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;二次固化完成后,进入固化剂分解阶段,此时陷阱变深,电极的注入电荷被陷阱捕获并形成空间电荷,空间电荷的聚集会畸变电介质中的电场分布,导致电气强度降低;下一阶段固化剂分解产物挥发导致活化能略有下降,电气强度也随之上升,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,电气强度随之降低。总体而言,在整个老化阶段,随着老化的进行,电气强度呈下降趋势^[11]。

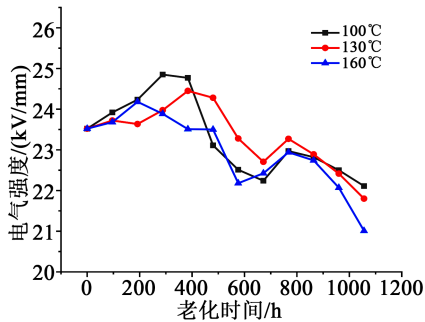


图3 不同老化温度下环氧试样电气强度随老化时间的变化

Fig.3 The change of electric strength of epoxy resin with ageing time under different ageing temperature

将活化能变化规律与电气强度变化规律联系起来,以电气强度下降至某种程度作为绝缘寿命终点,可得到对应时刻活化能的数值,以此作为寿命终止判据,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。

3 基于活化能的环氧树脂类干式变压器寿命预测方法

3.1 基于温度加速因子的老化时间等效表征

通过以上试验结果发现环氧树脂材料的老化程度与活化能有定量联系,基于活化能可定量表征材料的老化状态,外推其剩余寿命。但实验室对环氧树脂材料模拟的老化条件高于长期工作温度,因此需要与现场运行温度下干式变压器的运行时间作等效转换。

针对加速实验模型,当温度是唯一显著载荷时,多使用 Arrhenius 稳态温度加速模型。由于该温度实验中仅有温度应力,因此采用 Arrhenius 稳态温度加速模型,如式(2)所示。

$$\frac{dM}{dt} = A \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (2)$$

式(2)中: M 为失效敏感参数; t 为试验时间;单位为h; A 为常数; E_a 为初始状态活化能; T 为绝对温度,单位为K^[16-19]。不同温度下的 M 可表示为式(3)~(4)。

$$M_0 = \int_0^{t_0} A \exp\left(\frac{-E_a}{kT_0}\right) dt = A \exp\left(\frac{-E_a}{kT_0}\right) t_0 \quad (3)$$

$$M = \int_0^t A \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) dt = A \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) t \quad (4)$$

式(3)~(4)中: T_0 为材料正常工作温度; T 为实验室加速热老化温度; t_0 为材料正常工作温度下对应的某一状态点的时间; t 为加速热老化温度下对应同一状态点的时间。在正常条件和加速条件下,材料的失效判据相同,即 $M=M_0$,进一步得到式(5)。

$$t_0 = \frac{\exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right)}{\exp\left(\frac{-E_a}{kT_0}\right)} t = \exp\left(\frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) t \quad (5)$$

定义 AF 为老化加速因子,如式(6)所示。

$$AF = \exp\left(\frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可得式(7)。

$$t = \frac{t_0}{AF} \quad (7)$$

式(7)的数值含义是材料在 T 温度下 t 单位的有效时间等效于 T_0 温度下 $1/AF$ 倍 t_0 单位的有效时间。相同材料的同一失效标志点对应相同的失效活化能,由此可将实验室较高温度下加速热老化的时间与现场正常工作温度下的运行时间等效转化。热失重法提供了一种快速热老化的实验方法^[20],利用热分析动力学对热失重实验数据进行处理可求得材料热解过程的化学反应活化能。假定干式变压器的长期工作温度为80°C,以实验室老化温度为130°C为例,由热失重法求得其化学活化能为136.15 kJ/mol,由式(6)求得其老化加速因子为314.6,即在130°C下老化1 h等效于80°C下老化314.6 h。

3.2 基于活化能的寿命预测方法

根据 GB/T 11026.2—2012,本研究选择电气强度下降至起始值的50%作为材料寿命终结的标志。首先对130°C下材料电气强度与老化时间的曲线进行拟合,得到图4。

为得到电气强度下降至起始值50%时对应的

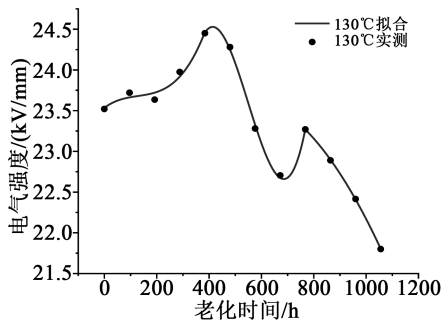


图4 130℃环氧试样电气强度与老化时间的关系

Fig.4 Relationship between electric strength of epoxy resin and ageing time at 130℃

老化时间,将电气强度拟合曲线进行延伸,得到图5。

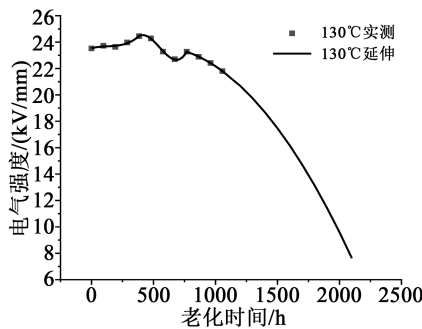


图5 130℃环氧试样电气强度与老化时间的预测关系

Fig.5 Prediction relationship between electric strength of epoxy resin and ageing time at 130℃

根据延长曲线,计算得到环氧试样电气强度下降至起始值50%对应的时间为1 880 h。根据3.1节计算得到的老化加速因子,可将环氧树脂材料在130℃下的加速寿命转换到80℃下的运行寿命为67.5年。

对130℃下环氧试样活化能与老化时间的关联关系进行拟合,结果如图6所示。

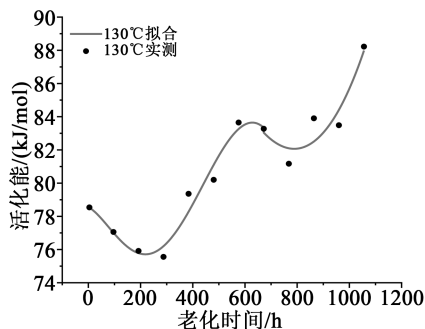


图6 130℃环氧试样活化能与老化时间的关系

Fig.6 Relationship between activation energy of epoxy resin and ageing time at 130℃

为得到在130℃下老化至寿命终止时(1 880 h)对应的活化能,将活化能拟合曲线进行延伸,得到图7。

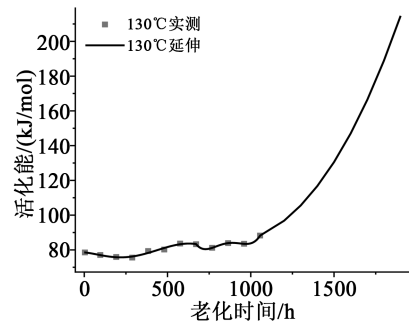


图7 130℃环氧试样活化能与老化时间的预测关系

Fig.7 Prediction relationship between activation energy of epoxy resin and ageing time at 130℃

已知130℃时环氧树脂材料到达寿命终止的时间为1 880 h,根据图7可知,寿命终止时对应的活化能为209.7 kJ/mol,可确定环氧树脂寿命终结时的活化能数值,作为基于活化能判断环氧树脂材料老化状态和寿命预测的寿命终止标准值。

图8为不同老化温度下环氧试样活化能的波动曲线。由图8可以看出,在3个老化温度下环氧树脂活化能的变化规律相似,均出现波折上升的现象,活化能均在起始的活化能附近波动,环氧树脂的活化能在老化的第一阶段中在起始值的93.2%~113.5%波动,这对实际评估干式绝缘设备的寿命有重要的指导意义:评估干式绝缘设备的老化状态及剩余寿命时,需要在设备全新未使用的状态下先测量其起始活化能,之后判断设备老化状态与绝缘寿命时,应该在不同时间点对其进行多次测量,并进行前后对比,观察活化能是否在起始活化能的93.2%~113.5%波动,若在此区间波动,则认为设备处于老化前期,若出现单调上升,则认为设备已处于老化中、后期或从老化前期向老化中、后期过渡的时期。

在对绝缘设备的状态进行分析时,先判断设备所处的老化时期,之后再判断其剩余寿命。以130℃老化为例,当干式绝缘设备的活化能处于老化前期时,可以预测其最少剩余寿命,即设备最坏情况下处于老化前期向老化中、后期过渡的状态,由图8(b)可知此状态对应的老化时间为864 h,活化能为83.9 kJ/mol,其在130℃下的等效剩余寿命为1 016 h,则干式绝缘设备在80℃下的最少剩余寿命为36.5年。

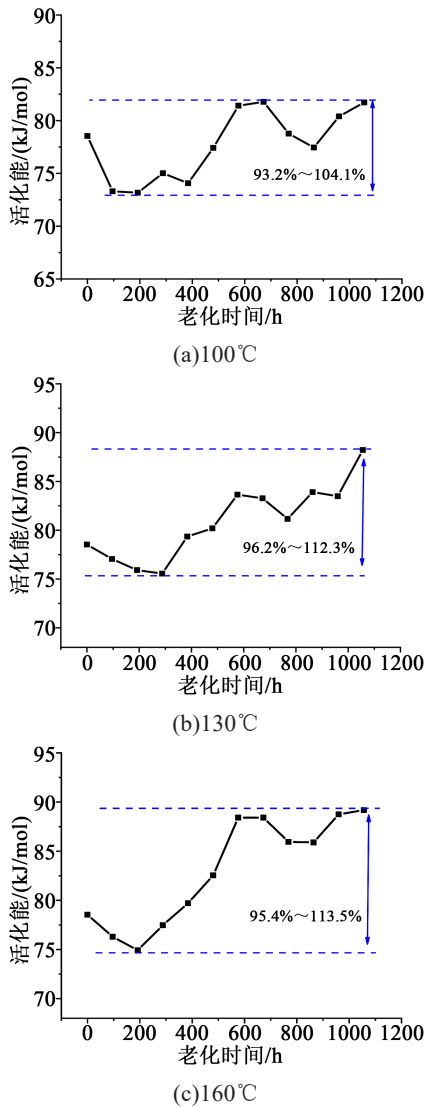


图8 不同老化温度下环氧试样活化能的波动

Fig.8 Fluctuation of activation energy of epoxy resin at different ageing temperatures

若干式绝缘设备的活化能处于老化中、后期时,将活化能数值与130°C下活化能与老化时间的关联规律模型比较,即可获得其对应的等效剩余寿命。如干式绝缘设备某个状态的活化能为140 kJ/mol,根据图7此状态对应的老化时间为1557 h,其在130°C下的等效剩余寿命为323 h,干式绝缘设备在80°C下的预测剩余寿命为11.6年。

4 基于活化能预测干式绝缘寿命方法的应用

为探究实际干式绝缘设备的测量接线方法,以干式变压器为例探究其接线方法。由于干式变压器的三相布线、绝缘结构基本相同,本研究制作干式变压器单相的缩小比例模型,与真实变压器的结

构完全相同。干式变压器的缩比模型如图9所示。

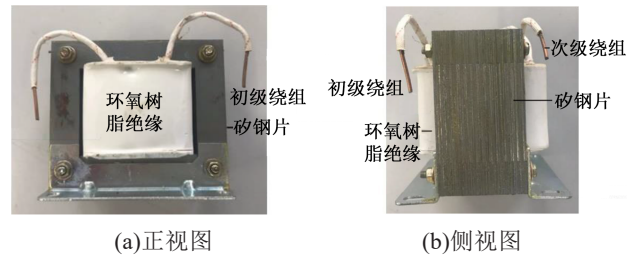


图9 干式变压器的缩比模型
Fig.9 Shrinkage model of dry transformer

缩比模型与真实干式变压器的单相结构相同,均为导线围绕铁芯绕制,绕组之间为环氧树脂绝缘层,初级绕组、次级绕组在测量时可看作埋入环氧树脂绝缘的电极。由于工程实际中绝缘损坏更容易出现在绕组间绝缘,测量时将初级绕组、次级绕组自身短接,高压电极、低压电极分别接于初级绕组、次级绕组,即可对绕组间绝缘进行介电谱测量。

在对实际的干式变压器进行测量时,可将三相初级绕组、三相次级绕组分别短接,然后将高压电极、低压电极分别接于单相的初级绕组、次级绕组,此时测量电流分别通过三相内相间的环氧树脂绝缘材料,分析测量结果即可得到干式变压器三相的综合活化能。

在工程现场中对干式变压器进行介电谱测量时,选择温差较大的日期(昼夜温差超过10°C),在日最高气温点(17°C)和日最低气温点(7°C)分别进行一次介电谱测量,测量频率为10³~10⁸ Hz,一次介电谱测量时间不超过120 min,在测量时间段内环境温度变化不大,可认为干式变压器内部温度基本不变。干式变压器三相的介电谱测量结果如图10所示。

对复电容实部曲线进行求导,获得两个温度下

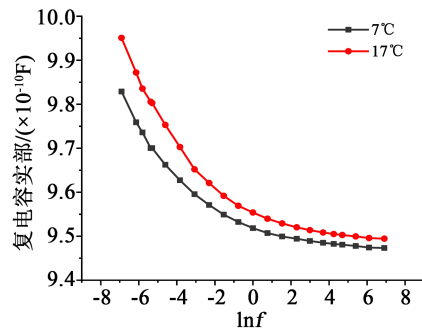


图10 现场干式变压器三相介电谱测量结果
Fig.10 Field measurement results of three phase dielectric spectra of dry type transformer

导数曲线的平移量($\ln f_0 - \ln f$)及 $(1/T - 1/T_0)$,即可获得变压器的活化能为69.4 kJ/mol,低于起始活化能,在起始活化能附近波动,故未进行多状态介电谱测量,亦可推出变压器处于活化能波动的老化前期,预测变压器的最少剩余寿命为36.5年。

测量干式变压器的介电谱也可以单相分别测量,即高压电极、低压电极分别接于单相的初级绕组、次级绕组,此时测量电流通过单相内相间的环氧树脂绝缘材料,分析测量结果即可得到干式变压器某一相活化能。而如果变压器已运行一段时间,某相的绝缘缺陷可能会在运行的过程中暴露出来,而导致单相与三相的活化能相差较大,此时对单相进行介电谱测试可以分辨出绝缘老化更严重的相间绝缘。

5 结 论

(1)随着老化的进行,环氧树脂活化能呈现降低-升高-略有降低-最终升高的变化趋势,电气强度随老化进行呈现曲折下降的趋势,原因是“二次固化”、固化剂分解、固化剂挥发、环氧树脂分子链断裂4个反应阶段极性基团、自由基对电介质内微观陷阱深度的影响,从而影响材料内空间电荷聚集,使材料中电场分布严重畸变。

(2)借用阿伦尼乌斯方程得到热老化加速因子 AF ,环氧树脂试样130℃转化到80℃的 AF 为314.6。本研究以试样电气强度下降至起始值的50%作为材料寿命终结的标志,得到环氧树脂材料在130℃老化下的寿命为1 880 h,折算到80℃下的运行寿命为67.5年,寿命终结对应的活化能为209.7 kJ/mol。

(3)建立了基于活化能的环氧树脂类干式绝缘预测寿命的方法。本方法需要测量与比较多个老化状态下的活化能,若测量时段内结果在活化能初始值的93.2%~113.5%波动,可估算其最少剩余寿命时间;若在测量时段已出现单调上升状态,则可根据活化能的数值在活化能与老化的关系找到对应老化时间,获得材料的剩余寿命时间。

(4)以干式变压器为例提出了干式绝缘设备的介电谱测量接线方式,测量时将初级绕组、次级绕组自身短接,高压电极、低压电极分别接于初级绕组、次级绕组,在日温差超过10℃的日最高气温点、日最低气温点分别进行介电谱测量,获得设备活化能即可预测其剩余寿命。

参考文献:

- [1] CHAMPION J V, DODD S J. Inter-foil electrical breakdown in high voltage ERIP condenser bushings[C]//Proceedings of the 2000 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics. Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2001: 329-332.
- [2] 吴明清,田浩,侯国良,等. 多场耦合对直流环氧绝缘材料机械性能和热性能的影响[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2947-2951.
- [3] 汤浩,李金忠,张贺军,等. 特高压直流换流变压器阀侧套管高环温强电流下轴径向的温度分布规律[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5494-5503.
- [4] ZHANG S, PENG Z, LIU P, et al. Inner insulation structure optimization of UHV RIP oil-SF₆ bushing using electro-thermal simulation and advanced equal margin design method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1768-1777.
- [5] 刘骥,李秀婧,魏新芳. 环氧-云母复合绝缘固化过程介电响应特性[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(6): 22-28.
- [6] 曹雨,吴建东,刘松,等. 单因子老化中定子线棒等温松弛电流的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 242-248.
- [7] 陈庆国,单志铎,付强,等. 基于FDS的电机线棒环氧云母绝缘老化特性[J]. 复合材料学报, 2017, 34(9): 1926-1933.
- [8] 谢庆,刘熊,吴高林,等. SF₆中环氧树脂纳秒脉冲沿面闪络实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6727-6735, 6926.
- [9] PIERCE L W. Hottest spot temperatures in ventilated dry type transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1): 257-264.
- [10] 柳再本. 干式变压器绝缘树脂老化实验[J]. 高压电器, 2006, 42(5): 385-392.
- [11] 王有元,王施又,黄炎光,等. 干式变压器环氧树脂热老化特性研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 187-194.
- [12] 霍瑞美,刘飞,江平开. 交联聚乙烯TG快速热寿命评估方法的研究[J]. 绝缘材料, 2013, 46(6): 19-24.
- [13] 张明泽,刘骥,吕佳璐,等. 换油周期对变压器油纸绝缘老化性能影响规律[J]. 电工技术学报, 2019, 34(22): 209-220.
- [14] 王有元,刘玉,王施又,等. 电热老化对干式变压器中环氧树脂特性的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3906-3916.
- [15] 刘云鹏,刘贺晨,高丽娟,等. 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[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 105-112.
- [16] 王易君,周本权,史平安,等. 温度试验加速加载有效性分析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 63-66.
- [17] 杨玉兴,程德斌. 加速试验工程运用综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2012, 30(6): 44-47.
- [18] 刘巧斌,史文库,刘鹤龙,等. 基于步进应力加速老化和改进Arrhenius模型的橡胶贮存寿命预测[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(5): 56-61.
- [19] 张仕念,颜诗源,张国彬,等. 导弹产品基于阿伦尼乌斯方程的环境等效温度计算方法[J]. 装备环境工程, 2018, 15(6): 74-77.
- [20] 任鹏,李庆民,彭鹏,等. 基于热解动力学状态参量的GIS盆式绝缘子剩余寿命预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6774-6783.