

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.016

基于泄漏电流与热失重的盆式绝缘子活化能计算方法

何金¹, 辛晓虎², 邢向上¹, 公衍峰³, 孔晓利²

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384; 2. 国网天津市电力公司蓟州供电分公司, 天津 301900;
3. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 盆式绝缘子作为气体绝缘金属封闭开关(GIS)的关键部件,长期受电热应力作用易发生绝缘缺陷与老化裂解,是GIS设备故障的主要原因之一。通过活化能表征可以有效地描述盆式绝缘子材料的劣化程度,因此开展盆式绝缘子劣化过程中活化能有效计算方法的研究具有重要意义。文中首先基于加速老化试验样本,开展热分析动力学研究,采用传统的热失重实验解析盆式绝缘子热解反应过程,并结合 Flynn-Wall-Ozawa 法对盆式绝缘子的活化能进行计算;进一步地,建立基于泄漏电流计算电导活化能的方法,开展不同老化实验样本的电导活化能计算。最后与传统的 Flynn-Wall-Ozawa 法进行对比,分析发现两种方法的计算结果以及老化关联规律基本一致,进一步对两种方法在材料老化程度的表征手段与关联规律进行理论分析。上述研究为盆式绝缘子无损计算活化能的手段提供了理论指导与实验分析,有助于揭示盆式绝缘子的热解老化机理。

关键词: GIS 盆式绝缘子; 材料老化; 热失重; 泄漏电流; 活化能

Calculation Method of Activation Energy of Insulating Spacer Based on Leakage Current and Thermal Weightlessness

HE Jin¹, XIN Xiaohu², XING Xiangshang¹, GONG Yanfeng³, KONG Xiaoli²

(1. Tianjin Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China; 2. State Grid Tianjin Electric Power Company Jizhou Power Supply Branch, Tianjin 301900, China; 3. State Key Lab of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The insulating spacer, a key element of gas insulated metal closed switchgear(GIS), is prone to insulation defects and aging cracking due to long-term electrical thermal stress, which is one of the main reasons for the failure of GIS equipment. The characterization of activation energy can effectively describe the deterioration degree of the insulating spacer material, so it is important to study the effective calculation method of activation energy during the deterioration process of the insulating spacer. In this paper, the thermal analysis kinetics is studied based on the accelerated aging test samples. The pyrolysis process of the insulating spacer is analyzed by traditional thermal weightlessness test, and the activation energy of the insulating spacer is calculated by Flynn-Wall-Ozawa method. Furthermore, a method for calculating conductive activation energy based on leakage current is set up to perform conductive activation energy calculation of different aging experiment samples. Finally, it is found through comparison and analysis with the traditional Flynn-Wall-Ozawa method that the calculation results and the aging correlation of the two methods are basically identical. Furthermore, the characterization means and correlation of the aging degree of the two methods are analyzed in theory. The above research provides theoretical guidance and experimental analysis for calculating activation energy of insulating spacer without damage, and helps to reveal the pyrolysis aging mechanism of the insulating spacer.

Key words: GIS insulating spacer; material aging; thermal weightlessness; leak current; activation energy

收稿日期:2023-10-13; 修回日期:2023-12-24

基金项目:国网天津市电力公司科技项目(KJ22-1-35)。

Project Supported by the Science and Technology Program of State Grid Tianjin Electric Power Company(KJ22-1-35).

0 引言

随着电力系统的快速发展,传统的敞开式高压电器正在被气体绝缘金属封闭开关(gas insulated switchgear, GIS)所取代,其占地空间小、运输装配便捷并且采用封闭金属外壳设计,用以填充绝缘气体和灭弧介质,在电力系统中被广泛应用^[1-3]。盆式绝缘子在 GIS 设备中作为标准的绝缘器件,主要用于对高压导体进行支撑、实现管道对地绝缘以及隔离不同的绝缘气体,盆式绝缘子器件的绝缘性能直接与 GIS 设备整体的安全稳定运行直接关联。盆式绝缘子的核心部件由环氧树脂、固化剂以及辅助填料浇筑而成。目前多采用 Al_2O_3 作为填料与环氧浇筑物以一定比例填充,已实现绝缘子高固化度、提高结构力学性能以及耐气体腐蚀性等优点^[4-6]。目前基于 GIS 设备运行数据发现,GIS 设备运行的内部故障中有相当比例与盆式绝缘子绝缘失效有关^[7],随着 GIS 运行年限的增加和电压等级的逐步提高,GIS 设备所发生的故障比例,有超过 50% 是发生在盆式绝缘子器件中^[8-10]。通过进一步解析盆式绝缘子故障发生的类型,其多由绝缘子内部浇筑材料在电热应力作用下发生气泡或气隙导致的潜伏性绝缘缺陷^[11-12]。目前有关盆式绝缘子设备的潜伏性缺陷诊断方式多集中在 SF_6 气体分析^[13]、光学探伤手段^[14]、介电性能研究^[15]等单一实验条件中进行,对绝缘子潜伏性缺陷缺少统一的有效的参量表征。

针对绝缘材料多应力作用下的劣化过程及潜伏性缺陷的有效观测,国内外学者开始将表征材料稳定性与理化性能的活化能作为评估材料绝缘能力的特征参量^[16-17]。目前关于活化能参量在材料绝缘性能评估方面的应用分为以下几部分,电缆用交联聚乙烯材料老化过程中活化能变化^[18]、硅橡胶材的失效机理研究^[19]、以及变压器不同油纸聚合度下绝缘特性^[20]。现阶段对于表征环氧树脂复合材料下的盆式绝缘子绝缘性能多采用介电特性以及击穿场强等手段^[21-22],如何有效的将活化能计算与表征手段应用于环氧树脂材料的盆式绝缘子器件中,对于有效评估材料的绝缘性能具有一定的意义。

文中以某生产厂家所采用的盆式绝缘子浇筑材料生产的环氧树脂复合材料热老化样品为例,利用热失重法开展不同升温速率下材料的热失重实验,并利用 Flynn-Wall-Ozawa 法计算化学活化能,进一步推导建立基于泄漏电流法下的电导活化能计算方法,与热失重方法进行比对,分析两种计算方法得出的活化能计算结果。

1 实验步骤

1.1 实验试样

实验材料由盆式绝缘子浇筑使用的环氧树脂复合材料,制作工艺为盆式绝缘子关键浇筑件浇筑工艺,浇筑成直径为 100 mm、厚度为 1 mm 的圆饼状试样,在实验开始前,使用无水乙醇对材料表面进行擦拭,在电热烘干箱内进行低温干燥。

1.2 热老化试样制备方案

材料的玻璃化转变温度附近,高聚物的理化性能会发生变化,并且在玻璃化转变温度附近的老化进程与速度会因材料的玻璃化反应有一定的差异性。依据环氧树脂复合材料的 DSC 热流测试曲线,可以得出未发生老化的试样其玻璃化转变温度在 130 °C 范围。为实现老化温度的纵向参数比较,对试样分别开展 $T_1=100\text{ °C}$ 与 $T_2=130\text{ °C}$ 两个温度下的热老化实验,设定老化天数为 20、40、60、80、100 天 5 个老化时间,每个时间设定老化样品为 5 片,取实验的平均值作为有效值。老化期间,定时对试样的位置进行更改,以保证老化程度均匀,并对热氧老化箱内部进行通风换气,保证热氧反应条件相同。

1.3 热失重实验方案

具体的测试步骤叙述如下:

1) 本次热失重实验采用 TGA-DSC3+ 同步热分析联用仪见图 1,实验前控制阀门出口压力为 0.1 MPa,通入高纯氮气 30 min,以将炉中的气体排尽。

2) 每次实验量取质量为 10 mg 的被测样品粉末置于 70 μL 氧化铝坩埚,轻敲坩埚使样品充分接触。

3) 分别设置 5、10、15、20、25 K/min 的升温速率,温度区间范围为 35~600 °C,用配套软件记录样品质量随温度的变化数据。



图1 热重—差示扫描量热仪

Fig. 1 Thermogravimetric differential scanning calorimeter

1.4 泄漏电流测量方案

为实现试样的泄漏电流试样的有效测量,设计三电极测量装置,其结构见图2,三电极系统电极由黄铜磨制,高压电极与保护电极外直径为48 mm,测试电极直径为28 mm,测试时试样通过弹簧螺栓压紧固定。

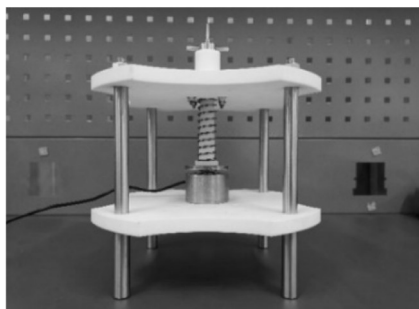


图2 三电极系统

Fig. 2 Three electrode system

搭建泄漏电流测量平台,实现对环氧树脂复合材料不同测量温度条件的泄漏电流测量,见图3。包括高压直流电源、三电极系统、温控箱、Keithley6517B高阻计以及计算机组成。

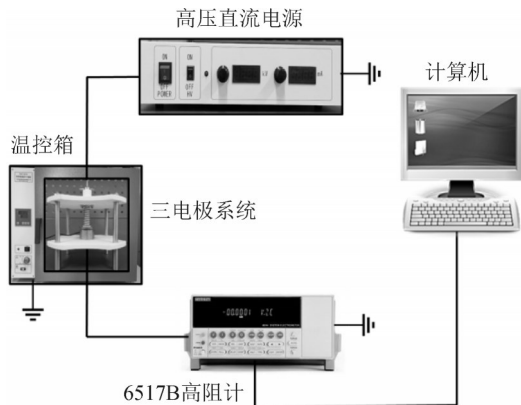


图3 泄漏电流测量平台

Fig. 3 Leakage current measuring platform

分别对100℃和130℃老化温度下不同老化时间的环氧树脂复合试样的样品进行泄漏电流测试,测试温度为40、50、60、70℃,施加电场为1 kV/mm。实验开始前将被测样品放入80℃的干燥箱中短路放电12 h,以去掉残余电荷。随后将处理好的样品放入三电极系统,设定好测试温度,达到设定温度后再保持60 min,保证烘箱内部温度均匀。然后对样品施加电压,通过LabVIEW程序来实时读取泄漏电流大小,记录10 min后的稳态数值。每个试样测量3次取平均值,用以保证结果的精确性。

2 实验结果与数据分析

2.1 热氧加速老化实验样品

两种老化温度下的老化样品见图4,其中样品

表面材质随老化时间的加深,随着老化温度的升高,同一老化时间下130℃温度下的样品表面颜色逐渐加深。



图4 热氧加速老化实验样品

Fig. 4 Hot oxygen accelerated aging test sample

2.2 环氧树脂复合试样的热失重结果

对未老化样品的热失重实验结果见图5,环氧树脂复合材料的呈现明显的双台阶反应,随着升温速率提高,失重曲线整体向正方向移动,且第1台阶的质量损失率在5%左右,盆式绝缘子环氧树脂复合材料的绝缘失效点认为在4.3%以内^[23],在第1台阶主要发生材料的物理反应,质量最大损失率在5%以内,处于绝缘性能有效变化区间,因此文中对环氧树脂复合材料的第1台阶反映的化学活化能进行计算,以判断材料的老化阶段及绝缘状态。不同升温速率下环氧树脂试样的DTG曲线见图6。

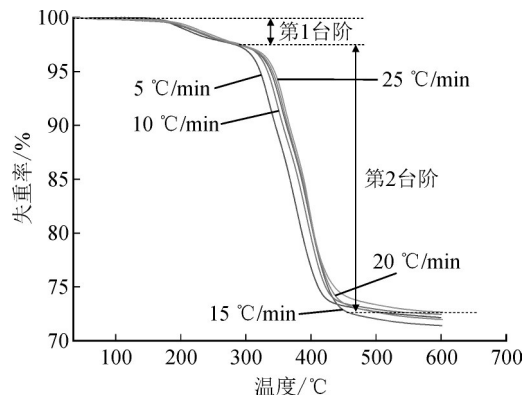


图5 不同升温速率下环氧树脂试样的热失重曲线

Fig. 5 Thermogravimetric curves of epoxy resin samples at different heating rates

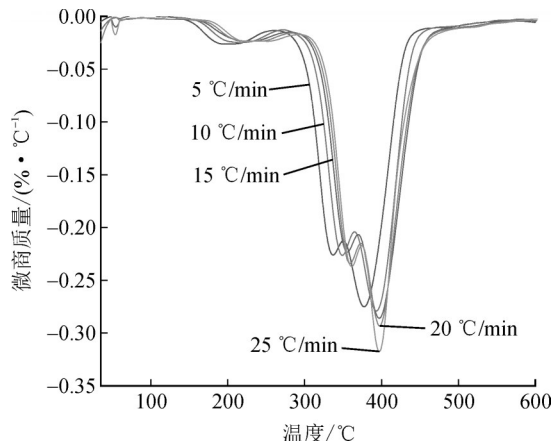


图6 不同升温速率下环氧树脂试样的DTG曲线

Fig. 6 DTG curves of epoxy resin samples at different heating rates

2.3 热失重计算方法

环氧树脂复合材料在热解反应中采用非等温升的反应模式, 实现动态调节, 在氮气氛围下环氧树脂复合材料的热解反应往往通过建立反应动力学方程来表述, 进一步基于热失重实验数据构造最概然反应机理函数等反应动力学参数。

聚合物的反应过程的微分表示形式为

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha) \quad (1)$$

式(1)中: α 为反应时间 t 时刻的质量分数; t 为当前的反应时间; k 为 DTG 曲线中 t 时刻的反应速率; $f(\alpha)$ 为反应机理函数的微分表示形式。

热解反应发生在非均相反应体系中, 一般采用 Arrhenius 方程来表示反应速率 k 与反应温度 T 之间的关系

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

式(2)中: A 为指前因子; E_a 为化学反应活化能; R 为摩尔气体常量, 将式(2)代入式(1)可得非均相反应体系在非固定温度条件作用下的动力学方程为

$$\frac{d\alpha}{dT} = \left(\frac{A}{\beta}\right) \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) f(\alpha) \quad (3)$$

由热失重实验获取材料的 TG 数据与 DTG 数据, 结合式(3)相关参量, 即可计算得到材料的化学反应活化能。

2.4 Flynn-Wall-Ozawa 法

Flynn-Wall-Ozawa 法是目前常用的等转化率求解活化能的方法, 其计算公式由式(3)可以推导两种表示形式:

$$\lg \beta = \lg \left[\frac{AE_a}{RG(\alpha)} \right] - 2.315 - 0.4567 \frac{E}{RT} \quad (4)$$

$$\ln \beta = \lg \left[\frac{AE_a}{RG(\alpha)} \right] - 5.3305 - 1.0516 \frac{E}{RT} \quad (5)$$

式(4)、(5)中, $G(\alpha)$ 为反应机理函数的积分表示形式。在基于式(4)和式(5)求解化学反应活化能过程可以采用两种思路。一是建立不同转化率 β 下的峰值温度 T , 在 T 温度附近的转化率 α 数值近似等价, 且在 $0 \sim \alpha$ 区间的 $\lg[AE_a/RG(\alpha)]$ 项可以看作常量, 进而构建 $\lg \beta - 1/T$ 的线性求解公式; 二是不同升温升温速率下在等转化率处的反应机理函数 $G(\alpha)$ 是定值, 因此可以建立 $\lg \beta - 1/T$ 的线性关系模型, 通过斜率求解反应的化学活化能。文中依据 2.2 节内容, 对反应过程的第 1 台阶活化能进行求解, 其转化率示意图见图 7。

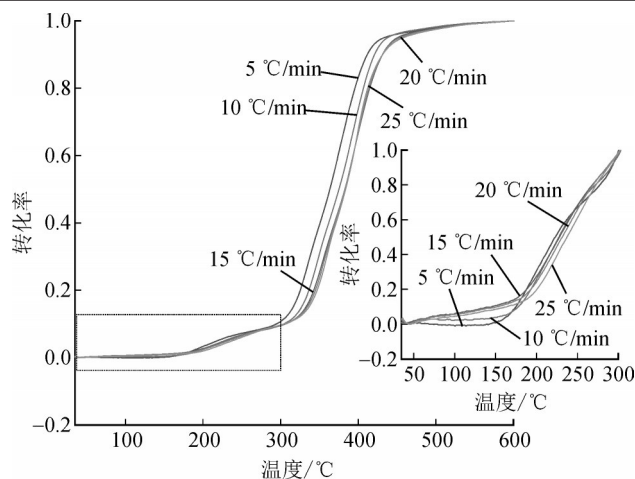


图7 未老化试样热失重转化率曲线

Fig. 7 Thermogravimetric conversion curve of unaged sample

不同老化程度的活化能计算结果见图 8。图 8 中, 活化能数值随材料的老化加剧呈现整体下降趋势, 其加速老化温度升高, 材料的活化能数值下降速率加快。

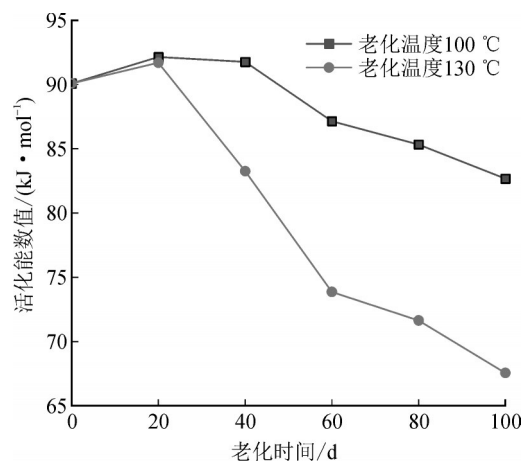


图8 老化试样活化能变化曲线

Fig. 8 Change curve of activation energy of aging sample

2.5 电导活化能的泄漏电流计算法

聚合物材料的内部载流子运动, 属于陷阱跃迁过程, 在电场作用下, 载流子随电场方向发生定向移动, 产生电导电流, 这一过程的单位时间载流子迁移数可以表示为

$$\Delta n = \frac{n_0}{6} v \exp\left(-\frac{E_a - \frac{qEr}{2}}{k_b T}\right) - \frac{n_0}{6} v \exp\left(-\frac{E_a + \frac{qEr}{2}}{k_b T}\right) \quad (6)$$

式(6)中: n_0 为载流子的浓度; v 为振动频率; q 为单位时间的电荷量; E 为施加的定向电场; r 为陷阱间的平均间距; k_b 为玻尔兹曼常数; E_a 为载流子所需跃迁的能量势垒, 即电导活化能。

进一步依据双曲正弦函数可以对式(6)进一步简化为

$$\Delta n = \frac{n_0}{3} v \exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right) \sinh\left(\frac{qEr}{2k_b T}\right) \quad (7)$$

根据载流子迁移率的定义为

$$\mu = \frac{\Delta nr}{n_0 E} = \frac{rv}{3E} \exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right) \sinh\left(\frac{qEr}{2k_b T}\right) \quad (8)$$

由式(7)、(8)可以得到直流电导与迁移率的关系式为

$$\gamma = qn_0 \mu = \frac{qn_0 rv}{3E} \exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right) \sinh\left(\frac{qEr}{2k_b T}\right) \approx \frac{r^2 q^2 v n_0}{6k_b T} \exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right) \quad (9)$$

直流电导与泄漏电流的关系式为

$$\gamma = \frac{I}{sE} \quad (10)$$

联立式(9)、(10)可以得到

$$\ln I = -\frac{E_a}{k_b T} + \ln\left(\frac{r^2 q^2 v_0 n s E}{6k_b T}\right) \quad (11)$$

式(11)中,对数项在温度变化过程中变化明显,认为是常数项,因此可以化简为

$$\ln I = \ln C - \frac{E_a}{k_b T} \quad (12)$$

依据式(12),可通过测定温度梯度下环氧树脂复合材料的泄漏电流,根据 $\ln I - 1/T$ 的线性关系求解斜率,进而得到电导活化能。

对 100 °C 与 130 °C 两个老化温度下的试样进行泄漏电流测量,每次测量取 40、50、60、70 °C 4 个实验温度,测量过程中选取 10 min 以后的稳定数值作为测量值,每次测量重复 4 次,取平均值绘制图 9。

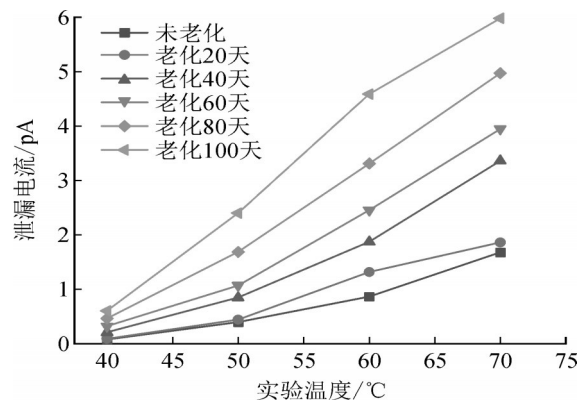
根据式(12),建立 $\ln I - 1/T$ 的线性关系见图 10,根据斜率可求出未老化环氧树脂复合试样的电导活化能数值为 88.44 kJ/mol。

进一步结合公式推导,对各老化时间段的环氧树脂复合试样的活化能求解,可得表 1 所示不同老化状态的电导活化能数值,对表 1 所示电导活化能与热失重法计算的化学活化能绘制图 11 所示趋势图。

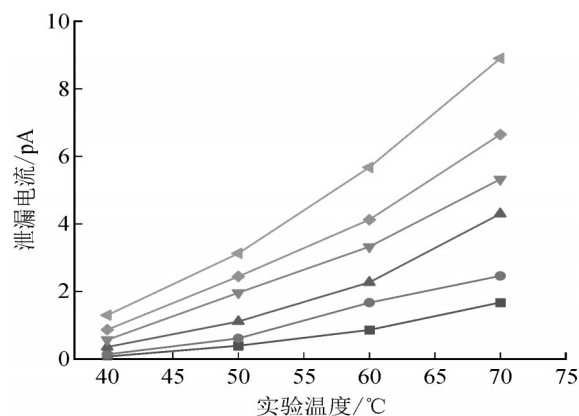
2.6 结果分析

1) 依据环氧树脂复合试样的热失重反应台阶,对 100 °C 与 130 °C 老化温度下的 10 个老化时间小组的样本进行化学活化能计算,选用等转化率计算方法获得材料的整体化学反应活化能随老化加深而呈现衰减趋势,这是由于实验材料在老化温度加剧的情况下,其分子结构先后发生二次固化、水氧挥发与劣化等过程。

2) 在同一老化试样中,不同测试温度下泄漏电流呈现与测试温度正向变化的趋势,其次泄漏电流



(a) 老化温度 100 °C 制备试样



(b) 老化温度 130 °C 制备试样

图 9 不同老化时间环氧树脂复合试样的泄漏电流

Fig. 9 Leakage current of epoxy resin composite samples at different aging times

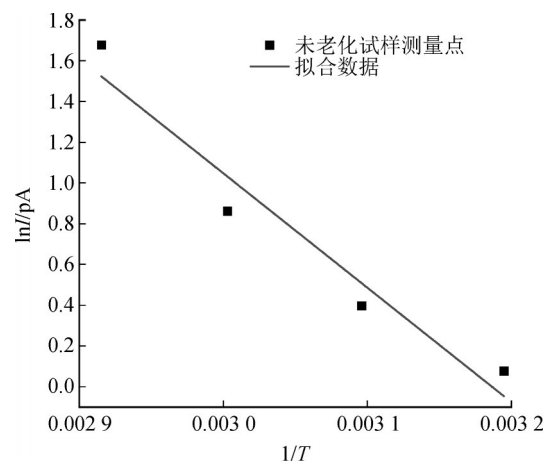


图 10 未老化环氧树脂复合试样的泄漏电流拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of leakage current of non aged epoxy resin composite sample

随材料老化加深呈上升趋势,这是由于材料老化进程加剧,导致其陷阱密度降低,深浅陷阱数量减少,束缚载流子能力降低,在外加场强撤后,材料更易发生载流子迁移,形成泄漏电流。

3) 依据聚合物电导跃迁机理,建立泄漏电流与电导活化能的关系式,获取加速老化试样的电导活化能,建立其与老化程度的关联关系,随老化加深

表1 不同老化状态的电导活化能

Table 1 Conductance activation energy in different aging states

老化时间/d	100 ℃下的电导活化能/ (kJ·mol ⁻¹)	130 ℃下的电导活化能/ (kJ·mol ⁻¹)
0	88.44	88.44
20	90.79	86.10
40	81.70	72.71
60	74.84	64.76
80	69.81	59.16
100	67.68	56.95

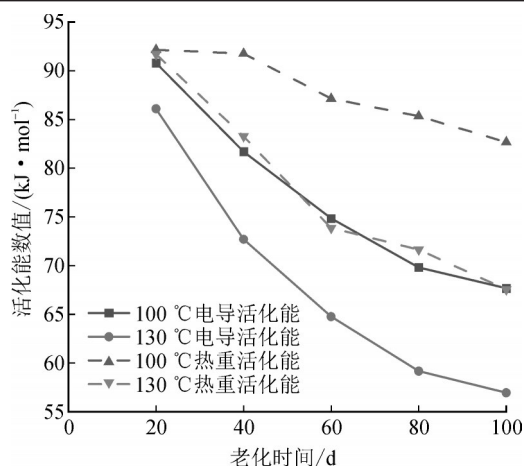


图11 化学与电导活化能的比对曲线

Fig. 11 Comparison curve of chemical and conductivity activation energies

呈现出与化学活化能等价性的变化规律,且两者计算结果近似,活化能衰减速率最大值均出现在40~60天范围。

3 结论

环氧树脂复合材料作为盆式绝缘子关键浇筑件的原料,其活化能计算结果可以有效的表征材料的劣化程度,为器件运行的可靠性提供理论指导。目前现有活化能计算手段多采用热失重法,对实验样本造成不可逆的破坏性,基于泄漏电流与活化能的关联关系出发,可建立起无损探测样本活化能的手段,文中通过 Arrhenius 理论推导两种计算方法,建立计算结果与老化程度的关联关系,来分析计算结果的可靠性,主要结论如下:

1)环氧树脂复合材料的热解过程呈现双梯度形态,在不同老化状态下的化学活化能,其关联规律随老化程度的倍增,发生加速衰减的趋势,并在玻璃化转变温度 130 ℃老化过程中衰减趋势最大,材料在老化 40~60 天区间阶段的衰减率最高,达到 11.29%。

2)测定不同老化阶段的泄漏电流,不同老化阶段试样其电流随测量温度增加而增加,在 130 ℃的老化温度下,材料的泄漏电流测量值逐渐呈现指数式上升,基于泄漏电流与电导活化能的拟合关系,获得试样的电导活化能数值,其结果与老化程度的关联规律与化学活化能基本一致。

3)电导活化能与化学活化能均是建立在阿伦尼乌斯公式的推导过程,其求解所得数值与材料的老化程度呈现负相关关系,反应材料的老化进程,电导活化能仅需获取样本不同温度下的泄漏电流即可求解,对活化能在工程应用与表征材料老化程度的无损探测提供了可行性的启发与一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 齐波,高春嘉,邢照亮,等. 直流/交流电压下 GIS 绝缘子表面电荷分布特性[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21):5990-6001.
QI Bo, GAO Chunjia, XING Zhaoliang, et al. Distribution characteristic for surface charge on GIS insulator under DC/AC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21):5990-6001.
- [2] 李鹏,李金忠,崔博源,等. 特高压交流输电变电装备最新技术发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4):1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, et al. Achievements in the newest technology of UHV AC power transmission equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4):1068-1078.
- [3] HUANG Yulong, YAO Liangzhong, LI Naihu, et al. Reliability tests of a wireless system of monitoring and controlling for high voltage Switch cabinets[C]//2010 International Conference on Power System Technology. Zhejiang, China: IEEE, 2010: 1-5.
- [4] 凌华. 220 kV GIS 与 AIS 对比与分析[J]. 电子技术与软件工程, 2016(23):242-256.
LING Hua. 220 kV GIS and AIS comparison and analysis [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2016 (23):242-256.
- [5] 田浩,郝留成,刘随军,等. GIS 绝缘件用高性能环氧浇注材料的研究[J]. 绝缘材料, 2013, 46(3):9-13.
TIAN Hao, HAO Liucheng, LIU Suijun, et al. Research of high-performance epoxy casting material for GIS insulating part[J]. Insulating Materials, 2013, 46(3):9-13.
- [6] 费龙菲. 高压开关用环氧浇注件耐热性能的研究[J]. 绝缘材料, 2004, 37(1):27-29.
FEI Longfei. Study on heat-resistant performance of epoxy resin casting workpiece for high voltage switchgear[J]. Insulating Materials, 2004, 37(1):27-29.
- [7] OKUBO H. Recent activity and future trend on ageing characteristics of electrical insulation in GIS[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applica-

- tions of Dielectric Materials. Brisbane, Australia: IEEE, 1994: 837-840.
- [8] 王建生, 邱毓昌. 气体绝缘开关设备中局部放电的在线监测技术[J]. 电工电能新技术, 2000, 19(4): 44-48.
WANG Jiansheng, QIU Yuchang. On-line partial discharge monitoring techniques for gas insulated substations[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2000, 19(4): 44-48.
- [9] OKUBO H. Recent activity and future trend on ageing characteristics of electrical insulation in GIS from manufacturer's view point[C]//Proceedings of 1994 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Brisbane, QLD, Australia: IEEE, 1994: 837-840.
- [10] 吴细秀, 程诗敏, 周帆, 等. 母线通流温升对GIS内绝缘特性影响的仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 7-14.
WU Xixiu, CHENG Shimin, ZHOU Fan, et al. Influence of temperature rise due to rated - current flowing through busbar on the internal insulation characteristics of GIS: A simulation study[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 7-14.
- [11] 吴海军. 环氧树脂真空浇注工艺过程及注意事项[J]. 变压器, 2000, 37(5): 33-36.
WU Haijun. Resin vacuum cast process and its points for attention[J]. Transformer, 2000, 37(5): 33-36.
- [12] 俞翔霄, 俞赞琪, 陆惠英. 环氧树脂电绝缘材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
YU Xiangxiao, YU Zhanqi, LU Huiying. Epoxy resin electrical insulating material[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [13] ZHOU Y, YE R, DONG M, et al. Research on SF₆ gas decomposition detection method based on electrochemical sensors[C]//2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Xi'an, China: IEEE, 2016: 530-533.
- [14] 李波, 胡秀敏, 何志琴, 等. X射线无损检测的GIS设备缺陷检测研究[J]. 电子设计工程, 2021, 29(1): 78-82.
LI Bo, HU Xiumin, HE Zhiqin, et al. Research on X-ray non-destructive testing for defects of GIS equipment[J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(1): 78-82.
- [15] 张利, 屈斌, 王永宁, 等. GIS壳体振动机理和局部放电优化诊断与应用[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 80-86.
ZHANG Li, QU Bin, WANG Yongning, et al. GIS shell vibration mechanism and partial discharge optimization diagnosis[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 80-86.
- [16] 廖瑞金, 郭沛, 周年荣, 等. 水分和老化对油浸绝缘纸温度介电谱和活化能的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1407-1415.
LIAO Ruijin, GUO Pei, ZHOU Nianrong, et al. Influence of water content and aging on temperature domain dielectric spectroscopy and activation energy of the transformer oil impregnated papers[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1407-1415.
- [17] 刘刚, 金尚儿, 梁子鹏, 等. 基于等温松弛电流法和活化能法的110 kV XLPE电缆老化状态评估[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2372-2381.
LIU Gang, JIN Shang'er, LIANG Zipeng, et al. Aging state assessment of 110 kV XLPE cable based on isothermal relaxation current method and activation energy method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2372-2381.
- [18] 刘刚, 刘斯亮, 金尚儿, 等. 基于理、化、电特性110 kV XLPE绝缘电缆剩余寿命的综合评估[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 72-79.
LIU Gang, LIU Siliang, JIN Shang'er, et al. Comprehensive evaluation of remaining life of 110 kV XLPE insulated cable based on physical, chemical and electrical properties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 72-79.
- [19] 蒋沙沙. 硅橡胶加速老化及失效机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
JIANG Shasha. Research on accelerated aging and failure mechanism of silicone rubber[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [20] 吴旭涛, 李秀广, 李军浩, 等. 交直流复合电压下油纸绝缘沿面局部放电特性研究[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 128-131.
WU Xutao, LI Xiuguang, LI Junhao, et al. PD characteristics over oil/paper interface stressed by AC and DC composite voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 128-131.
- [21] 谢伟, 杨征, 程显, 等. 环氧树脂材料热氧老化特性研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(20): 4397-4404.
XIE Wei, YANG Zheng, CHENG Xian, et al. Study on thermo-Oxygen aging characteristics of epoxy resin material[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(20): 4397-4404.
- [22] 戚相成, 杨国清, 王德意. 氟化协同偶联剂改性纳米SiO₂/环氧树脂的热氧老化特性研究[J]. 大电机技术, 2021(6): 1-9.
QI Xiangcheng, YANG Guoqing, WANG Deyi. Research on thermo-oxidative aging characteristics of nanosilica/epoxy resin modified by plasma fluorination cooperation with coupling agent[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2021(6): 1-9.
- [23] 任鹏. GIS盆式绝缘子电热老化的热动力学特性与绝缘寿命预测方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
REN Peng. Thermodynamic characteristic of GIS basin insulator thermal aging and insulation life prediction method[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- 何金(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为高电压技术与带电检测技术(E-mail: hejin198802@ali-yun.com)。
辛晓虎(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事变电设备运检与带电检测工作(E-mail: xxhwjh@126.com)。