

# 电机绕组用非金属材料活化能推算方法

管兆杰<sup>1,2</sup>

(1. 上海电器设备检测所有限公司, 上海 201401;  
2. 上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063)

**摘要:** 电机绕组用非金属材料容易随着温度和时间的变化发生性能劣化, 非金属材料的活化能可以将实际使用条件和加速老化条件联系起来, 用于鉴定非金属材料的热寿命, 其值直接决定材料热寿命鉴定的温度和老化时间。本文介绍了非金属材料目前活化能推算的主要方法, 包括: 热重分析法、DSC 分析法、热重分析和热老化试验结合法以及热老化试验评定法等。并详细给出每种方法的具体实施过程, 以及方法之间的区别及适用范围, 便于不同评定材料推算方法的选择。

**关键词:** 热寿命鉴定; 非金属材料; 热失重; 活化能

中图分类号: TM211 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)06-0036-04

doi: 10.12177/emca.2022.050

## Introduction to the Determination Method of Activation Energy of Non-Metallic Materials for Motor Windings

GUAN Zhaojie<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Testing & Inspection Institute for Electrical Equipment, Shanghai 201401, China;  
2. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

**Abstract:** Non-metallic materials used for motor windings were prone to performance degradation with changes in temperature and time. The activation energy of non-metallic materials could be used to identify the thermal life of non-metallic materials by connecting the actual service conditions and accelerated aging conditions. Its value directly determined the temperature and aging time for the thermal life identification of materials. This article mainly introduced the current main methods of activation energy estimation, including thermogravimetric analysis, DSC analysis, combination of thermogravimetric analysis and thermal aging test, and thermal aging test evaluation methods. The specific implementation process of each method, the differences between the methods and the scope of application were given in detail, so as to facilitate the selection of determination methods for different evaluation materials.

**Key words:** thermal life identification; non-metallic materials; thermal weight loss; activation energy

## 0 引言

军工行业用电气设备、核电用电气设备、航空航天用电气设备等是一类较为特殊的产品, 其使用可靠性直接关系到国民的生命和财产安全。电机是这些设备里最重要的部件之一, 而电机绕组作为电机的“心脏”, 其中所使用的非金属材料较

容易随着温度和时间的变化发生性能劣化, 因此电机绕组在使用前一般需进行热寿命鉴定。

阿伦尼乌斯公式是瑞典的阿伦尼乌斯所创立的化学反应速率常数随温度变化关系的经验公式, 采用阿伦尼乌斯模型对非金属材料施加热应力进行人工加速老化。该方法将使用条件与加速老化条件通过材料的活化能特性联系起来, 可以用

收稿日期: 2022-05-13; 收到修改稿日期: 2022-05-30

作者简介: 管兆杰(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电气产品可靠性检测技术研究。

来鉴定产品的寿命。阿伦纽斯模型是目前最为成熟和广泛使用的热老化模型,其主要假设是,在一定温度作用下所发生的化学反应与材料性能的劣化程度之间存在着一定的关系,反应速率取决于运行温度以及材料的活化能参数。在一定的温度范围内,可通过提高温度,缩短作用时间的方法来等效地获得材料的劣化程度。

根据阿伦纽斯方程,材料寿命关系如式(1)所示:

$$\frac{t_1}{t_2} = \exp\left[\varphi\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) / \lambda\right] \quad (1)$$

式中: $t_1$  为鉴定寿命时间; $t_2$  为加速热老化时间; $T_1$  为运行温度; $T_2$  为加速热老化温度; $\varphi$  为反应活化能; $\lambda$  为玻尔兹曼常数,取 0.000 086 17 eV/K。

活化能是用来定义一个化学反应发生所需克服的能量障碍,是指分子从常态转变为容易发生化学反应的活跃状态所需要的能量。阿伦尼乌斯公式中的活化能又称阿伦尼乌斯活化能或经验活化能。非金属材料进行热寿命鉴定时,活化能的选择至关重要,如果选择过低,会导致需要较高的老化温度或者较长的老化时间进行热寿命鉴定才可满足设计要求,一定程度上增加了时间成本或增大了鉴定失败的风险,如果活化能选择较高,热寿命鉴定结果可靠性就会降低。本文主要介绍了几种目前非金属材料行业常用活化能分析方法,并对不同方法之间进行比较,以及方法推广使用的可能性,为电气设备非金属元器件热寿命鉴定时活化能的确认提供更多可选方法。

## 1 活化能推算方法介绍

### 1.1 概述

目前非金属材料或系统活化能分析方法主要包括热重分析(TG 或 TGA)或差示扫描量热分析(DSC)方法以及热老化试验方法。TGA 或 DSC 分析方法主要是对材料进行热重分析和差示扫描量热分析,根据反应速率或氧化诱导时间和活化能的关系,对试验数据进行分析,计算材料活化能。热老化试验方法主要是对材料进行三个温度下的热老化寿命评定,根据热评定结果获得材料的热寿命方程,根据热寿命方程斜率计算材料活化能。

### 1.2 热重分析推算方法

活化能主要是指分子从常态转变为容易发生

化学反应的活跃状态所需要的能量,热质量损失主要是通过通过对材料加热,使物质逐渐挥发、分解,测量其随温度升高的质量的变化。因此材料不同质量损失率下对应的温度与其活化能存在一定关系,可以通过对材料进行热失重试验分析其活化能。

使用热重分析法分析活化能,目前提到此方法的标准包括:ISO 11358-2-2014、JB/T 1544-2015 等。

#### 1.2.1 ISO 11358-2-2014 分析法<sup>[2]</sup>

根据标准 ISO 11358-2—2014 可知,同一转化率下升温速率和对应温度下的关系式如下:

$$\lg\beta + 0.4567\left(\frac{E_a}{RT}\right) = C \quad (2)$$

式中: $\beta$  为升温速率; $E_a$  为活化能; $R$  为气体常数,8.314 J/(K·mol); $T$  为温度; $C$  为常数。

对同一样品进行同一温度范围,不同升温速率下的热重分析,可以得到不同升温速率下样品质量变化和温度的关系,如图 1 所示。根据样品的总质量损失及不同温度下的样品剩余质量,即可得到在某一转化率下样品升温速率和失重温度的关系。根据同一转化率下  $\lg\beta$  和  $1/T$  的线性关系,可以得到不同转化率下的活化能。若转化率较高,此方法不适用,因此一般情况下选择转化率为 1%~20% 时进行活化能的分析<sup>[3]</sup>。

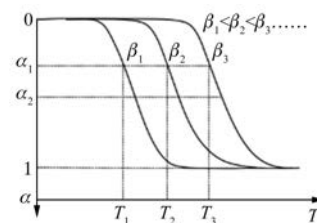


图 1 不同升温速率下的热失重曲线

此方法通过材料不同升温速率下的热重分析,可以得到材料不同转化率下的活化能,一般情况下热寿命评定中的活化能依据转化率为 5% 时对应的活化能。

#### 1.2.2 JB/T 1544-2015 分析法<sup>[4]</sup>

该方法主要适用于浸渍漆和漆布活化能的确认,但 GB/T 22718-2008 中提到绝缘结构活化能的获取也可使用此方法,因此目前行业中各类绝缘材料以及绝缘系统也大多使用此方法进行活化能的初步估计。

依据标准 JB/T 1544-2015, 试样在 3 K/min 或 5 K/min 的升温速率下, 并在常压干燥空气气氛下进行 TGA 分析。在热失重曲线上, 取质量损失 5%~50% (间隔 5%) 所对应的 10 个温度数值, 并按下式(3)计算材料的表观裂解活化能  $E_p$  :

$$E_p = E_0 + RC_0 \sum_{n=1}^{10} t_n \left( \frac{\Delta W}{W_a} \right)_n^{1/2} \quad (3)$$

式中:  $E_0$  为常数;  $C_0$  为系数;  $t_n$  为对应于每个  $W/W_a$  的温度值的数值;  $\Delta W/W_a$  为失重百分数;  $\Delta W$  为试样在  $t_n$  下失去质量的数值;  $W_a$  为试样总质量的数值。

$E_0$ 、 $RC_0$  按试验条件取值, 具体如表 1 所示。其中,  $t_n \left( \frac{\Delta W}{W_a} \right)_n^{1/2}$  查标准 JB/T 1544-2015 可得。该方法主要是将材料固定失重率下的温度和经验数据相结合, 计算其活化能。

表 1 不同条件下的  $E_0$ 、 $RC_0$  按试验条件取值

试验条件	粉末状		漆布状	
	$E_0$	$RC_0$	$E_0$	$RC_0$
3 °C/min	57 739	8.37	50 208	9.20
5 °C/min	57 739	8.20	50 208	8.62

### 1.3 DSC 分析推算方法<sup>[5]</sup>

差示扫描量热法(DSC)是在程序控制温度下, 测量输给物质和参比物的功率差与温度关系的一种技术。高分子材料在加热和冷却过程中会发生融化、凝固、氧化分解等物理化学变化, 同时伴随着热效应的产生, 在 DSC 分析中, 一旦被测物质发生反应, 就会产生热效应, 在差热分析曲线上出现吸热峰或放热峰, 根据峰类型及峰位置所对应的温度即可对被测样品进行分析。

氧化诱导时间(OIT)反应的是一定温度下材料开始与氧气或空气接触直到发生氧化反应的时间。OIT 通常用来评估聚合物材料的热氧化稳定性, 一般情况下, DSC 用于 OIT 的测量。OIT 的测量可以计算热氧化降解过程中的活化能, 结合单点老化试验结果可以得到高分子材料的寿命曲线, 对其进行不同使用温度下的寿命评估<sup>[6]</sup>。

OIT 是一定温度下材料开始与氧气或空气接触直到发生氧化反应的时间, 间接代表材料的转化率, 因此氧化诱导时间和活化能以及温度有如下关系:

$$\ln t_{OIT} = \frac{E_{ad}}{RT} + C_B \quad (4)$$

式中:  $t_{OIT}$  为氧化诱导时间;  $E_{ad}$  为活化能;  $C_B$  为常数。

对待测样品进行不同温度下的 OIT 测定, 可以得到氧化诱导时间和试验温度的关系曲线, 如图 2 所示。  $\ln t_{OIT}$  和  $1/T$  成线性关系, 其斜率为  $E_{ad}/R$ , 因此根据测量样品不同温度下的 OIT 即可得到样品的活化能。

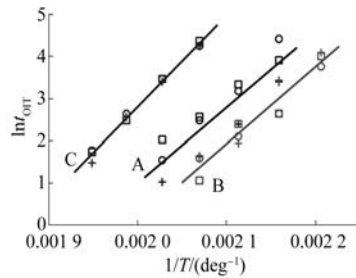


图 2 氧化诱导时间和温度的关系图

### 1.4 分析法和热老化法相结合 GB/T 4074.8-2009<sup>[7]</sup>

标准 GB/T 4074.8-2009 中提到的活化能分析方法主要是依据 TG 分析和单点热老化试验相结合的方法评估漆包绕组线中漆包线漆的活化能。

#### (1) 热老化试验

20 组以上试样分别进行初始质量确认、初始耐压试验以及热老化周期性试验和诊断周期性试验, 诊断周期性试验过程中试样失效后称量失效试样质量及其裸导体质量。

根据热老化试验结果按式(5)计算试样失重百分数  $C_f$ , 用于后续活化能的计算。

$$C_f = \frac{\sum W_0 - \sum W_n}{\sum W_0 - \sum W_c} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $C_f$  为试样质量损失百分数;  $\sum W_0$  为试样初始质量之和;  $\sum W_n$  为失效试样质量之和;  $\sum W_c$  为失效试样裸导体质量之和。

#### (2) 漆包线漆 TG 分析

取漆膜 15 mg 试样干燥 2 h 后, 分别以 1、3、5 °C/min 的升温速率, 在空气气氛下进行热重试验。

对三个升温速率下的热重曲线, 选择失重百

分数为 0.5  $C_f$  (以质量损失 5% 为进位单位), 按式 (6) 计算活化能  $E_f$ 。

$$E_f = -4.348 \frac{d(\lg\beta)}{d\left(\frac{1}{\theta}\right)} \quad (6)$$

式中:  $E_f$  为活化能;  $\beta$  为升温速度;  $\theta$  为动态温度。

根据升温速率和失重率下对应温度的关系, 可以推算试样的活化能。

### 1.5 GB/T 11026 热老化试验法<sup>[8]</sup>

阿仑尼乌斯方程给出了化学反应速率与温度之间的关系, 热氧化分解过程为

$$\ln[k(T)] = -\frac{E_{ad}}{RT} + C \quad (7)$$

式中:  $k(T)$  为转化率。

对于高分子材料热寿命评定中, 一般假设温度引起预设性能变化所需的时间的对数与相对应的绝对温度的倒数之间存在着线性关系, 可用下式表示:

$$\ln t = \frac{E_a}{RT} + C \quad (8)$$

依据 GB/T 11026 系列标准, 可以根据材料预估性能选择至少三个热老化温度, 并结合材料的功能性选择合适的性能判定指标, 根据至少三点热老化试验温度和试样对应寿命拟合得到寿命曲线, 并推算其活化能。

## 2 方法比较与应用

热重分析法分析活化能, 目前主要提到此方法的标准包括: ISO 11358-2-2014、JB/T 1544-2015, 热重分析活化能方法主要都是依据材料的热失重曲线进行活化能的推算。标准 ISO 11358-2-2014 中提到的方法是依据同一转化率下, 不同升温速率与其对应温度的关系进行活化能的计算, 该方法一般用于塑料类材料, 若材料的热分解速率受升温速率的影响较小, 使用该方法进行活化能分析较困难。标准 JB/T 1544-2015 中提到的方法是依据材料热失重曲线及其经验公式进行活化能计算, 该方法主要用于浸渍漆和漆布的活化能推算, 浸渍漆作为绝缘系统的主绝缘材料, 因此此方法在绝缘系统的活化能推断中也有一定应用, 但数据仅供参考。

DSC 分析方法主要通过对待测样品进行不同

温度下的 OIT 测定, 得到氧化诱导时间和试验温度的关系曲线, 根据  $\ln t_{OIT}$  和  $1/T$  的线性关系, 可以进行活化能的推算。该方法主要用于有明显氧化诱导时间的塑料材料活化能的分析。

热重分析和热老化试验相结合的方法主要是通过热老化试验推算材料整个寿命期的质量损失情况, 并结合 TGA 分析结果进行相关分析计算。标准 GB/T 4074.8-2009 中提到的方法依据热老化评估中试样失效时的总损失质量以及不同升温速率下某一质量损失下与对应温度的关系可以计算活化能。热重分析确认活化能的方法测试周期较短, 仅进行 TG 分析或者较短时间的热老化, 一般一个月内可以获得待评材料的活化能。

热老化试验分析活化能目前主要依据 GB/T 11026 系列进行, 该方法要求材料在至少三个温度点下进行热寿命试验, 且最高温度点试样寿命超过 100 h, 最低温度点试样寿命超过 5 000 h, 因此该方法的评估时间接近 1 年。但此方法是根据材料实际老化寿命进行推算, 与 TG 分析方法相比其结果的准确性较高。

## 3 结 语

本文汇总了目前绝缘材料行业以及绕组线行业关于非金属材料活化能推算的方法, 分析了各类方法的理论依据, 主要原理包括以下几点:

(1) 同一转化率下, TGA 分析升温速率与失重温度存在线性关系, 其斜率为活化能相关关系式;

(2) 氧化诱导时间和试验温度存在线性关系, 其斜率为活化能相关关系式;

(3) 材料耐热温度和耐受时间存在线性关系, 其斜率为活化能相关关系式。

因此, 各方法之间可能存在一定通用的可能性, 但不同方法的分析结果可能存在一定差距还待后续继续研究。

### 【参 考 文 献】

- [1] 国防科学技术工业委员会. 核电厂安全级电气设备质量鉴定试验方法与环境条件: EJ/T 1197-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

(下转第 102 页)