

# 含分布式光纤的变压器油老化寿命评估研究

孙 路<sup>1</sup>, 田 源<sup>1</sup>, 高树国<sup>1</sup>, 李东阳<sup>2</sup>, 刘云鹏<sup>2</sup>, 范晓舟<sup>2</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 华北电力大学 a. 新能源电力系统国家重点实验室; b. 河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘 要:**为探索分布式光纤对变压器绝缘系统老化寿命的影响,对含分布式光纤变压器油样在110、120、130℃下进行加速热老化试验,在热老化期间定时取样并测试击穿电压,然后基于击穿电压累积损失率,分析含光纤变压器油活化能与纯油活化能的关系,并提出一种含光纤变压器油活化能的计算方法,构建含光纤变压器油的热老化寿命模型。结果表明:变压器油中内置光纤会影响变压器绝缘系统的强度,乙烯-四氟乙烯共聚物(ETFE)光纤对变压器油的老化影响最小;基于计算活化能与击穿电压累计损失动力学方程建立的含ETFE、聚四氟乙烯(PTFE)、热塑性聚酯弹性体(TPEE)光纤变压器油的3个寿命评估模型的计算结果与工程经验中的10℃寿命准则的评估结果较为吻合,验证了模型的有效性。

**关键词:**分布式传感光纤;变压器油;寿命评估;活化能

中图分类号:TM214 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)09-0063-05

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.09.011

## Ageing Lifetime Evaluation of Transformer Oil Containing Distributed Optical Fiber

SUN Lu<sup>1</sup>, TIAN Yuan<sup>1</sup>, GAO Shuguo<sup>1</sup>, LI Dongyang<sup>2</sup>, LIU Yunpeng<sup>2</sup>, FAN Xiaozhou<sup>2</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Company Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. a. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources; b. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of distributed optical fiber on the ageing life of transformer insulation system, we carried out accelerated thermal ageing tests on the transformer oil sample containing distributed optical fiber at 110, 120, 130℃. The breakdown voltage of the samples was measured regularly during thermal ageing process. On the basis of the breakdown voltage cumulative loss rate, the relationship between the activation energy of the transformer oil containing optical fiber and pure oil was analyzed, a method for calculating activation energy of transformer oil containing optical fiber was proposed, and a thermal ageing life model of transformer oil containing optical fiber was constructed. The results show that the optical fiber in the transformer oil can affect the strength of the transformer insulation system, and the ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) optical fiber has the least effect on the ageing of transformer oil. The calculated results of three life evaluation models of transformer oil containing ETFE, poly(tetrafluoroethylene) (PTFE), and thermoplastic polyester-ether elastomer (TPEE) fiber established based on calculated activation energy and breakdown voltage cumulative loss kinetic equation, are in good agreement with the evaluation results of 10℃ life criterion in engineering experience, which verifies the effectiveness of the model.

**Key words:** distributed sensing optical fiber; transformer oil; life evaluation; activation energy

收稿日期:2021-09-10 修回日期:2021-11-10

基金项目:国家电网公司科技项目(5204DY200035)

作者简介:孙路(1988-),男(汉族),河北石家庄人,高级工程师,主要从事变压器状态监测与故障诊断方面的技术研究。

## 0 引言

光学传感技术的应用为电力设备状态感知、监测预警提供了新的技术方法。基于布里渊散射原理,在变压器内部沿绕组布置分布式传感光纤,可

实现对变压器绕组应力应变及温度参量的测量,提高设备状态监测的灵敏度,同时为数字孪生电网的构建提供设备基础状态参量<sup>[1-2]</sup>。对于内置在变压器中的分布式传感光纤需在石英光纤芯外增加护套,保护光纤不易弯折<sup>[3]</sup>,但不同护套材料会对变压器油绝缘系统产生不同影响。

目前内置于变压器内的分布式传感光纤护套材料主要有交联聚烯烃、聚氨酯、乙烯-四氟乙烯共聚物(ETFE)等。在内置光纤护套材料的老化研究中,文献[4]对荧光光纤温度传感器的交联聚烯烃、聚氨酯和聚氯乙烯护套材料进行热老化试验,得出交联聚烯烃护套和聚氨酯护套均发生一定程度分解,而聚氯乙烯护套性能变化不大。文献[3,5]对内置的分布式光纤的乙烯-四氟乙烯共聚物(ETFE)、聚四氟乙烯(PTFE)、热塑性聚酯弹性体(TPEE)护套材料进行油中加速热老化试验,发现光纤护套材料会加速变压器油老化。在变压器油纸绝缘系统的寿命评估研究中,文献[6]研究发现,油的击穿电压、油中溶解气体、含水量与油纸绝缘系统的剩余寿命具有显著相关性。文献[7-8]基于损失累积动力学模型,构建了温度-水分含量的油纸绝缘寿命模型。文献[9-11]通过频域介电谱特征量分析了油纸绝缘系统的老化状态。

以上研究成果为探究内置传感光纤的影响与评估油绝缘系统寿命提供了一定的理论基础,但目前尚未涉及含分布式光纤变压器油绝缘系统寿命的评估研究报道。本研究对含分布式光纤的变压器油样在不同温度下进行加速热老化缩比试验,在热老化期间定时取样并测试击穿电压,然后基于击穿电压累积损失率,分析含光纤变压器油活化能与纯油活化能的关系,提出一种含分布式光纤的变压器油活化能计算方法,研究含光纤变压器油的热老化寿命模型。

## 1 试验

### 1.1 试验材料及流程

试验材料为克拉玛依25#环烷基变压器油和通信用传感光纤(护套材料分别为ETFE、PTFE、TPEE)。对所有材料采用相同的预处理方法,使其处于同等初始老化状态。试样的具体制备流程如下:

(1)将各类新光纤试样在温度为80℃、真空度低于50 Pa的条件下脱气并干燥48 h;

(2)将已脱气干燥的光纤试样放入变压器油样中,在温度为40℃、真空度低于50 Pa的条件下充分浸渍24 h,其中光纤试样与变压器油试样的质量分别为9.25 g和185 g(光纤与变压器油的质量比约为1:20);

(3)根据0.05 cm<sup>2</sup>铜/1 g变压器油的比例加入铜片<sup>[12]</sup>;

(4)含各类光纤的油样作为试验组,无光纤纯油样作为对照组;

(5)将制备的4组试样(每组9瓶)放置于DZF-0620A型真空老化箱内,设定控制温度,然后对老化箱连续抽真空3次后再通氮气,保持老化箱内为一个标准大气压。

加速热老化试验分别在110、120、130℃下进行,老化时间为24 h,热老化期间每隔3 h取样进行测量。

### 1.2 特征量选取及测量方法

电气强度是变压器油主要的电气特性指标之一。根据IEC 156:1995测量不同含光纤油样在不同老化状态下的击穿电压,试验环境温度为20℃,相对湿度为35%。试验步骤如下:试验电极为两个直径为25 mm的圆盘铜电极,电极间距设置为2.5 mm,在施加电压之前,将待测油样放入油杯中,使油面在电极上方5 cm处,接着在室温下静置30 min,以1 kV/s的升压速度均匀升压,直至油样被击穿,记录击穿电压值;静置5 min,重复以上步骤,结果取平均值。

## 2 结果及分析

在热老化过程中,变压器油的击穿电压变化规律及剩余寿命的评估可通过热降解动力学方程描述。试验采用110、120、130℃高温进行加速热老化,通过击穿电压累积损失动力学方程对各类含光纤油样耐压试验数据进行拟合,并基于Arrhenius方程对高温下的击穿电压累积损失率进行外推,可得出接近实际运行条件下材料的性能变化规律,进而实现不同温度下含光纤变压器油的寿命评估。

### 2.1 含分布式光纤变压器油的寿命评估步骤

(1)建立变压器油的击穿电压累积损失方程

基于热降解动力学方程可得变压器油的击穿电压累积损失动力学方程如式(1)所示。

$$w_U = 1 - \frac{U_t}{U_0} = A(1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

式(1)中:  $U_0$  为新变压器油的击穿电压(57 kV);  $U_t$  为热老化  $t$  时刻变压器油的击穿电压;  $w_U$  为击穿电压累积损失率,  $w_U=0$  代表变压器油为未老化状态,  $0 < w_U < 1$ ;  $k$  为变压器油绝缘失效的速率。

(2) 获得主曲线及时温平移因子  $\alpha_T$

在相同坐标系下绘制不同温度的击穿电压累积损失率变化曲线, 将最低试验温度设为参考温度  $T_{ref}$ , 沿时间轴平移非参考温度下的曲线, 使之与  $T_{ref}$  下的曲线形成连续相接的整体, 构造主曲线, 则各温度  $T$  下时温平移因子  $\alpha_T$  的计算如式(2)所示。参考温度  $T_{ref}$  对应的平移因子为 1。

$$\alpha_T = t_{ref}/t_T \quad (2)$$

式(2)中:  $t_T$  为温度  $T$  下曲线上某点平移前的时间;  $t_{ref}$  为曲线平移并构成主曲线的一部分后该点对应的时间值。

(3) 活化能  $E_a$  的计算

采用时温叠加(time-temperature superposition, TTSP)法外推式(1), 假设高温加速老化的过程与低温时的过程相同, 表征材料微结构的参数也恒定不变, 则化学反应速率  $k$  应遵循 Arrhenius 方程, 如式(3)所示。

$$k = A \exp[-E_a/(RT)] \quad (3)$$

式(3)中:  $A$  为指前因子;  $E_a$  为活化能, J/mol;  $R$  为气体常数, 其值为 8.314;  $T$  为温度, K。

根据式(2)~(3), 相同绝缘材料的曲线平移因子同样满足 Arrhenius 方程, 如式(4)所示。

$$\alpha_T = \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (4)$$

当热老化机理恒定时, 平移因子和绝对温度的关系应遵循式(4), 即试验数据在以  $\ln \alpha_T$  为横坐标和  $(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T})$  为纵坐标的坐标轴上应该为一条直线, 其斜率为  $\frac{E_a}{R}$ , 将该斜率乘以 8.314 可以得到活化能  $E_a$ 。由此可以外推其他老化温度  $T$  下的平移因子  $\alpha_T$ 。

(4) 主曲线的动力学方程拟合

使用式(1)拟合主曲线, 得到参考温度  $T_{ref}$  下的参数  $A$  和  $k$ , 由此可以计算  $T_{ref}$  下变压器油的击穿电压下降至  $U_t$  所需的时间  $t_{ref}$ 。进一步根据式(2), 求得温度  $T$  下变压器油的击穿电压由  $U_0$  下降至  $U_t$  所需的时间  $t_T$ 。如果设定  $U_{tend}$  为寿命终点, 则计算变压器油的击穿电压下降至  $U_{tend}$  所需的时间即为该试样在温度  $T$  下的寿命  $L$ 。

(5) 含分布式光纤的变压器油寿命评估模型

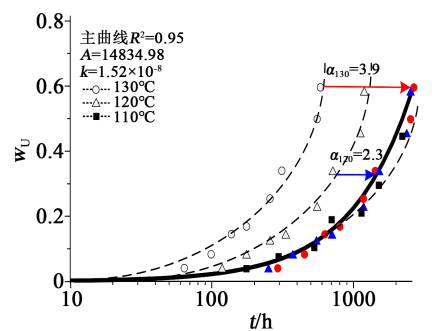
由步骤(1)~(4), 可得任意热老化温度下含分布式光纤变压器油的外推寿命模型, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} \alpha_T = \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \\ w_U = 1 - \frac{U_t}{U_0} \\ t_{ref} = -\ln(1 - w_U/A)/k \\ t_T = t_{ref}/\alpha_T \end{cases} \quad (5)$$

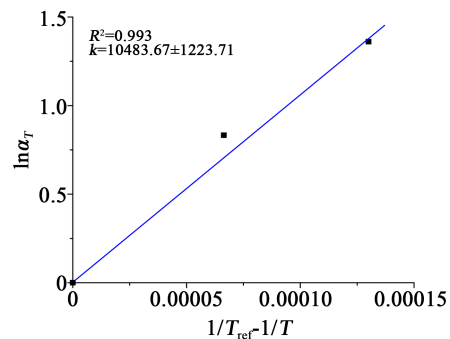
## 2.2 含分布式光纤的变压器油寿命评估模型

在热老化过程中, 变压器油的击穿电压可直观地反映变压器绝缘系统的稳定性。按 2.1 中的步骤, 分别对 110、120、130℃ 下对应的各类油样加速热老化试验数据进行主曲线构造和拟合(选择 110℃ 作为参考温度), 计算得出各类油样的活化能  $E_a$ , 代入式(5)得出该类含分布式光纤变压器油的寿命评估模型。

图 1 为纯油样的主曲线拟合结果以及平移因子与老化温度之间的关系。从图 1(a) 可以看出, 纯油样在 3 个温度下的平移因子分别为:  $\alpha_{110}=1.0$ 、 $\alpha_{120}=2.3$ 、 $\alpha_{130}=3.9$ 。由图 1(b) 可计算得到本试验中纯油样的活化能  $E_a=(87.16 \pm 10.17)$  kJ/mol。



(a) 主曲线



(b) 平移因子与温度的关系

图 1 纯油样的主曲线及平移因子与温度关系

Fig.1 Main curves of pure oil sample and relationship between translation factor and temperature

图2为含TPEE光纤油样的主曲线拟合结果以及平移因子与老化温度之间的关系。从图2可以看出,含TPEE光纤油样在3个温度下的平移因子分别为: $\alpha_{110}=1.0$ 、 $\alpha_{120}=1.8$ 、 $\alpha_{130}=3.4$ 。由图2(b)可计算得到本试验中含TPEE光纤油样的活化能 $E_a=(78.23\pm 2.75)$ kJ/mol。

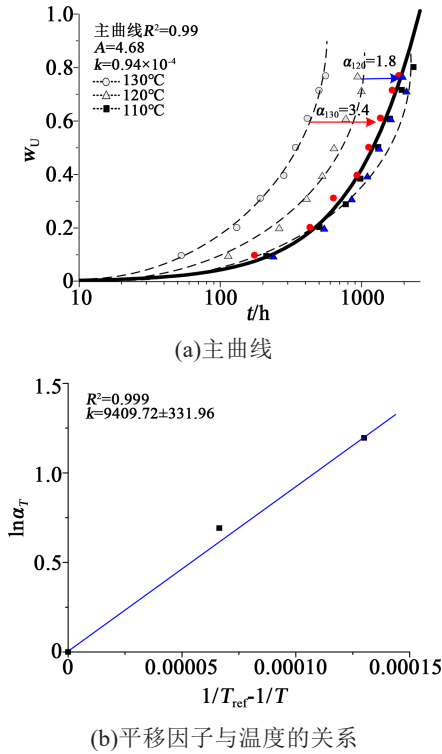


图2 含TPEE光纤油样的主曲线及平移因子与温度关系  
**Fig.2 Main curves of oil sample containing TPEE fiber and relationship between translation factor and temperature**

图3为含PTFE光纤油样的主曲线拟合结果以及平移因子与老化温度之间的关系。从图3可以看出,含PTFE光纤油样在3个温度下的平移因子分别为: $\alpha_{110}=1.0$ 、 $\alpha_{120}=2.0$ 、 $\alpha_{130}=3.6$ 。由图3(b)可计算得到本试验中含PTFE光纤油样的活化能 $E_a=(81.95\pm 2.86)$ kJ/mol。

图4为含ETFE光纤油样的主曲线拟合结果以及平移因子与老化温度之间的关系。从图4可以看出,含ETFE光纤油样在3个温度下的平移因子分别为: $\alpha_{110}=1.0$ 、 $\alpha_{120}=2.2$ 、 $\alpha_{130}=3.7$ 。由图4(b)可计算得到本试验中含ETFE光纤油样的活化能 $E_a=(83.78\pm 8.87)$ kJ/mol。

2.3 含分布式光纤的变压器油寿命评估模型分析

在2.2中得到了各类含分布式光纤变压器油的

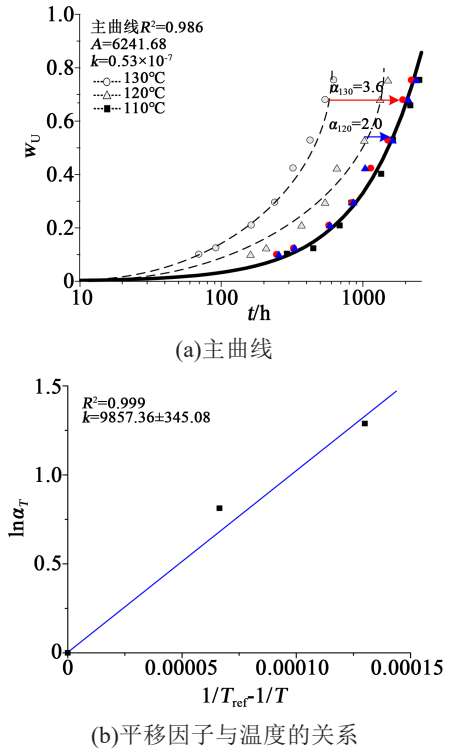


图3 含PTFE光纤油样的主曲线及平移因子与温度关系  
**Fig.3 Main curves of oil sample containing PTFE fiber and relationship between translation factor and temperature**

寿命评估模型,模型中各油样的Arrhenius活化能从大到小依次为纯油样、含ETFE光纤油样、含PTFE光纤油样、含TPEE光纤油样。

根据Arrhenius的定义,活化能代表了材料在化学反应过程中,普通分子变成活化分子需要吸收能量,只有活化分子才能够发生反应。纯油样的热老化活化能明显大于含纤油样的热老化活化能,这表明在变压器油中内置光纤会影响原有绝缘系统的强度。但不同光纤护套材料对变压器油的影响不同,本试验中ETFE紧套光纤对变压器油的热老化影响最小。

热老化 $t$ 时刻变压器油的击穿电压可通过式(6)进行计算。

$$U_t = U_0(1 - w_U) \tag{6}$$

从前文各主曲线中读取横坐标时间 $t$ 及纵坐标击穿电压累积损失率 $w_U$ ,根据式(6)即可计算得出在不同温度下老化 $t$ 后变压器油的击穿电压。经过计算,各类油样活化能大小排序与热老化后各类油样的耐压性能顺序一致。此外,计算结果表明,在试验温度范围内,温度每上升 $10^\circ\text{C}$ ,变压器油击穿

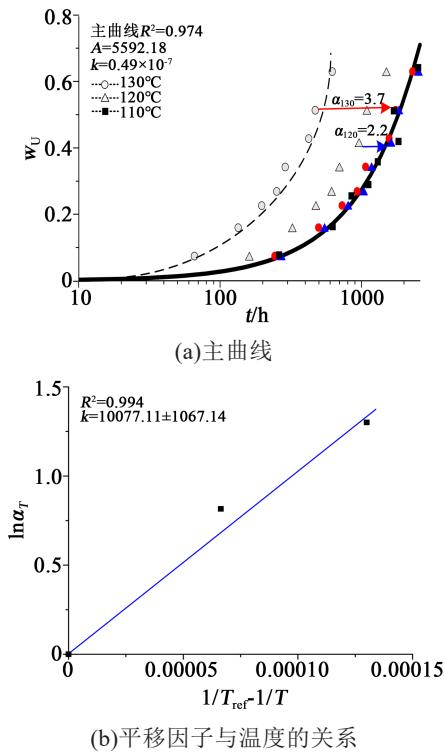


图4 含ETFE紧套光纤油样的主曲线及  
平移因子与温度关系

Fig.4 Main curves of oil sample containing ETFE fiber  
and relationship between translation factor and  
temperature

电压的下降速率增加1.8~2.3倍,这与工程经验中的10°C寿命准则较为吻合。综上可知所得模型可对含分布式光纤变压器油进行寿命评估。

### 3 结论

(1)基于本研究提出的一种含分布式光纤变压器油的活化能计算方法,得到各类含光纤变压器油的Arrhenius活化能从大到小依次为纯油样、含ETFE光纤油样、含PTFE光纤油样、含TPEE光纤油样,排序结果与热老化后各类油样的耐压性能顺序一致。

(2)不同光纤护套层对变压器油的影响不同,本研究中ETFE光纤对变压器油的热老化影响

最小。

(3)根据各类含纤变压器油样活化能,构建老化平移因子,结合老化平移因子与击穿电压累积损失动力学方程建立了含光纤变压器油寿命评估模型,模型计算结果表明,在试验温度范围内,温度每上升10°C,变压器油的击穿电压下降速率增加1.8~2.3倍。

### 参考文献:

- [1] 刘铁根,于哲,江俊峰,等. 分布式与分布式光纤传感关键技术研究进展[J]. 物理学报,2017,66(7):070705.
- [2] 白浩,周长城,袁智勇,等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考[J]. 南方电网技术,2020,14(8):18-24.
- [3] 刘云鹏,田源,姜烁,等. 光纤护套材料对变压器油热老化特性影响研究[J]. 绝缘材料,2017,50(12):54-59.
- [4] 高树国,高骏,潘瑾,等. 荧光光纤温度传感器护套材料在变压器油中的热老化[J]. 高电压技术,2017,43(8):2599-2607.
- [5] 刘云鹏,姜烁,田源,等. TPEE与ETFE对绝缘油热老化特性影响分析[J]. 绝缘材料,2018,51(6):77-82.
- [6] 姚杨. 基于变压器预试数据的固体绝缘状态评估方法[D]. 济南: 山东大学,2020.
- [7] 杨丽君. 变压器油纸绝缘老化特征量与寿命评估方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
- [8] 杨丽君,彭攀,高竣,等. 基于频域介电响应特征指纹的油纸绝缘受潮及老化状态区间识别[J]. 电工技术学报,2018,33(9):179-188.
- [9] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2004,11(1):144-154.
- [10] SAHA T K, PURKAIT P, MULLER F. Deriving an equivalent circuit of transformer insulation for understanding the dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):149-157.
- [11] WANG S Q, ZHANG G J, WEI J L, et al. Investigation on dielectric response characteristics of thermally aged insulating pressboard in vacuum and oil-impregnated ambient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2010,17(6): 1853-1862.
- [12] 廖瑞金,周旋,杨丽君,等. 铜对变压器油热老化影响的试验分析[J]. 高电压技术,2010,36(5):1090-1095.