

变压器油加速热老化过程中的多参量相关-回归分析

任双赞, 钟力生, 于钦学, 曹晓珑

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 研究了变压器油在不同注氧量、120 ℃加速热老化条件下,其流动带电度与介质损耗、体积电阻率、酸值以及界面张力等4种性能参数随老化时间的变化规律,并利用相关-回归分析方法研究了变压器油的流动带电度与这4种参数之间的相关性及拟合关系. 研究表明:油中氧气会加剧变压器油的热老化;油的流动带电度与介质损耗及酸值呈显著正相关,与体积电阻率及界面张力呈显著负相关,并与这4种参数均满足指数回归模型. 此外,还利用多元回归分析确定了油的流动带电度与介质损耗、体积电阻率、酸值及界面张力等参数的共同依存关系. 以上研究结果为今后进一步探讨变压器油在热老化条件下性能参数的变化及预测提供了参考和分析依据.

关键词: 变压器油;热老化;相关性;回归分析

中图分类号: TM214 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)10-0088-05

Multi-Parameter Correlation-Regression Analysis for Transformer Oil under Accelerating Thermal Aging

REN Shuangzan, ZHONG Lisheng, YU Qinxue, CAO Xiaolong

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The correlation and regression relationship of electrostatic charging tendency (ECT) with 4 parameters, i. e., dissipation factor, volume resistivity, acid number and interfacial tension of transformer oil are investigated, which was aged with different oxygen injection content at 120 ℃. It is concluded that the oxygen speeds up the thermal aging; the ECT has a positive correlation with the dissipation factor and acid number, while has a negative correlation with the volume resistivity and interfacial tension. In addition, the relationships of ECT with the four parameters obey exponential regression model, and the dependences are sought out with multiple regression analysis.

Keywords: transformer oil; thermal aging; correlation; regression analysis

在大型强迫油循环冷却超高压变压器中,变压器油起着冷却和绝缘的双重作用. 在长期高温和电场的作用下,变压器油会逐渐劣化,导致其绝缘性能下降,影响设备的安全运行.

变压器油的劣化可通过其自身电气及理化性能指标进行表征^[1]. 文献[2-3]研究了变压器油界面张力与介质损耗及酸值的关系,文献[4-5]发现变压器油的流动带电度(简称带电度)与介质损耗及电导率有一定的相关性,但没有给出参量间具体的拟合关

系,文献[6-7]尝试利用多参数关联分析手段研究变压器油的热老化,初步确定了变压器油的击穿电压与水分、酸值、闪点等参量间的函数关系.

基于以上的研究,本文以变压器油的带电度为基础,研究了在加速热老化过程中带电度与油的介质损耗、体积电阻率、酸值及界面张力等电气及理化参量之间的相关性,并通过一元线性、指数、多元回归等数学方法量化了带电度与这4种参量间的依存关系.

1 实 验

1.1 试样制备

以国产超高压 25 号变压器油为研究对象,将油样在 120 ℃条件下进行加速热老化实验. 老化前油样先经过过滤,在 60 ℃加热条件下进行严格的脱水、脱气处理 4 h,直至满足油中水分低于 10 mg/L,油中残余氧气量 $V_{O_2,oil}^*$ (油中残余氧气与处理油样的体积比)低于 0.000 5. 在老化过程中,油中注入氧气量 $V_{O_2,oil}$ (油中注入氧气与老化油样的体积比)分别为 0、0.002、0.005 和 0.01,老化时间分别为 0、100、250、450 和 675 h. 实验用老化罐如图 1 所示. 阀 1 所控制的管道与真空泵相连,注油前此油罐应被抽至真空状态(本实验中,真空抽至 60 Pa 时即认为满足要求). 阀 2 所控制的管道为进油管道,向罐内注油及实验取油均通过此阀. 阀 3 所控制的管道为进气管道,老化过程中油内氧气即通过此阀注入.

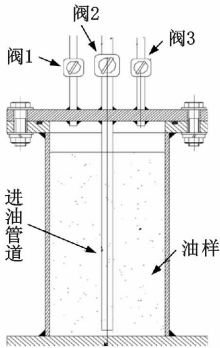


图 1 老化用油罐示意图

1.2 实验方法

油样老化结束后,对其电性能参数(带电度、介质损耗、体积电阻率)和理化参量(界面张力、酸值)进行了测量. 带电度是通过实验室内搭建的微静电测量系统^[8]进行测量的,介质损耗、体积电阻率、酸值和界面张力的测量依据相应标准及装置完成,如表 1 所示.

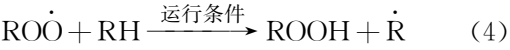
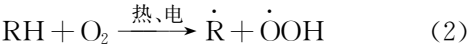
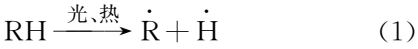
表 1 参数测量标准及装置

参数	依据标准	装置
介质损耗	GB/T5654—85	西林电桥 2821
体积电阻率	GB/T5654—85	ZC36 型高阻计
酸值	GB264—83	
界面张力	GB6541—86	标准化界面张力仪

2 实验结果及讨论

实验结果(平均值)如图 2 所示,变压器油的带电度、介质损耗和酸值均随老化时间呈逐渐增加的趋势,体积电阻率和界面张力则逐渐降低,各参量随油中注氧量的增加劣化变得更加明显. 文中酸值单位为 mg/g,表示的是中和每克变压器油中的酸性成分所需氢氧化钾的质量.

从油的老化机理考虑,变压器油在高温作用下,极易发生氧化、裂解等化学反应,并会产生新的化学成分促进油的老化,其主要过程的反应式如下



式(1)和式(2)为老化感应期(诱导期),式(3)~式(5)为老化发展期. $\dot{R}$ 等字母上加点表示为游离基,性质非常活泼,极易反应生成其他物质,经长时间老化后会影 响变压器油的性能.

从影响各参量的因素考虑,文中变压器油的带电度是通过微静电测量装置进行测量的,表征的是老化油样在固-液界面电荷的分离能力. 电荷分离能力与油中杂质及极性分子含量密切相关^[9],又因油样在老化前经过了严格的过滤处理,所以老化后带电度的不断增长主要是变压器油中的极性分子随老化时间越来越多所致.

液体电介质的损耗主要包括两部分:极化损耗和电导损耗. 在老化初期,变压器油中的偶极子(极性分子)很少,所以其损耗以电导损耗为主

$$\tan\delta = \gamma/\omega\epsilon_0\epsilon_r \tag{6}$$

式中:tanδ 为介质损耗;γ 为电导率;ω 为频率;ε_r 为变压器油相对介电常数. 随着老化的进行,油中极性分子逐渐增多,劣化产物又进一步加剧离子电导,两者的共同作用也会导致介质损耗逐渐增加. 体积电阻率反映的是直流电场下电导电流的大小,电导电流受杂质离子影响较大. 变压器油的介质损耗与体积电阻率存在如下关系

$$\tan\delta = 3.6 \times 10^8/\rho_v \epsilon_r \tag{7}$$

式中:ρ_v 为变压器油体积电阻率. 所以,变压器油的体积电阻率会随老化时间逐渐下降.

变压器油的界面张力是指变压器油与水之间的

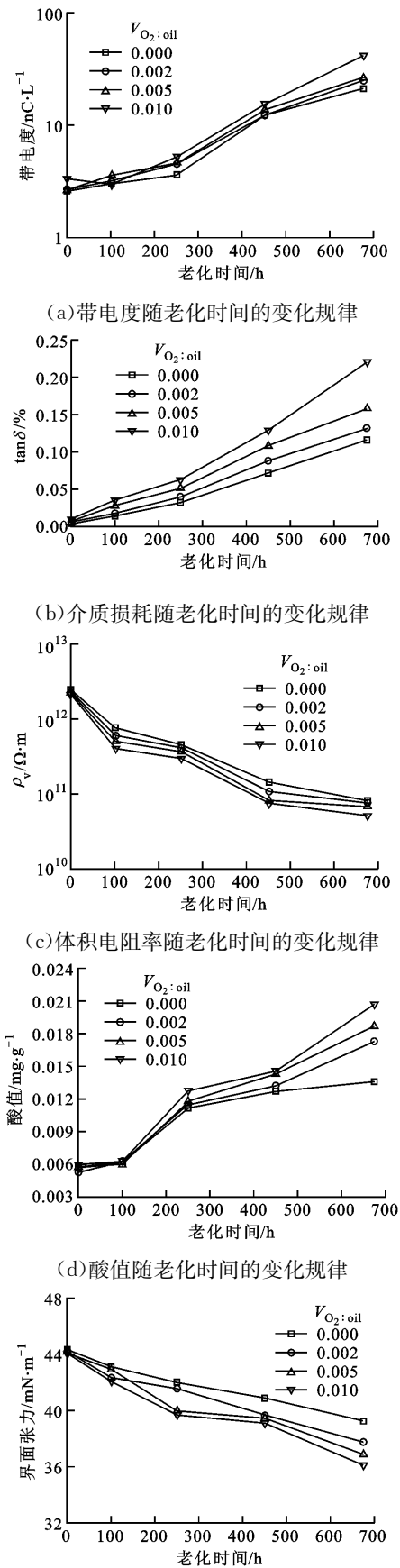


图 2 变压器油各参数随老化时间的变化规律

界面所具有的张力,变压器油所含极性物质(亲水性物质)越少,油分子的极性越小,处于界面上的油分子和水分子之间的作用力也就越小,界面张力就越高.实验中,油样的界面张力随老化时间逐渐减小,说明老化油样中极性物质越来越多,又因油中酸值反映的是油中各种酸性物质的总和,而酸性物质多为亲水性物质,所以酸值增加和界面张力减小会呈明确的负相关^[3].

前面提到亲水性物质一般为极性物质,油中极性物质又会影响油的带电度和介质损耗,所以从实验结果及原理分析可知,变压器油的带电度与其他 4 种电气及理化参量均存在着一定的相关性.

3 相关-回归分析

3.1 相关分析

为了进一步明确变压器油的带电度和介质损耗、体积电阻率、酸值以及界面张力之间是否存在具体的必然联系,特引用下式来量化表征带电度与其他参数之间的相关性

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)^{1/2}} \tag{8}$$

并通过 F 检验对 r 表征的线性相关是否显著进行验证

$$F = \frac{U/1}{Q/(n-2)} \sim F(1, n-2) \tag{9}$$

式(8)、式(9)中: $\bar{x}$ 为自变量 x 的平均值; $\bar{y}$ 为因变量 y 的平均值; n 为实验数据的个数; U 和 Q 分别表示回归平方及和残差平方和

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \tag{10}$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{11}$$

对于任意给定的显著性水平 α ,查自由度为(1, $n-2$)的 F 分布临界值表,可得临界值 $F_\alpha(1, n-2)$.若 $F > F_\alpha(1, n-2)$,则可认为 x 与 y 呈显著线性相关^[10].检验结果如表 2、表 3 所示.

表 2 变压器油带电度和其他参量之间的相关分析

被分析参量	r	F
带电度与介质损耗	0.962 8	228.52
带电度与体积电阻率	-0.798 9	31.76
带电度与酸值	0.880 7	62.21
带电度与界面张力	-0.871 7	56.97

表 3 F 分布临界值($n=20$)

α	0.001	0.005	0.010	0.025	0.050	0.100
$F_{\alpha}(1,n-2)$	15.38	10.22	8.28	5.98	4.41	3.01

由表 2 和表 3 可以看出,变压器油的带电度与其他 4 个参量通过相关分析所得到的 F 均大于任一显著水平 α 下的 $F_{\alpha}(1,n-2)$,所以说变压器油的带电度和介质损耗、体积电阻率、酸值及界面张力之间均为显著线性相关,与介质损耗及酸值呈显著正相关,与体积电阻率及界面张力呈显著负相关。

3.2 回归分析

由前面分析可知,变压器油的带电度与介质损耗、体积电阻率、酸值及界面张力均为显著线性相关,故可用一元线性回归模型(模型 I)对它们之间的拟合关系进行回归

$$y = a + bx \tag{12}$$

通过画散点图,发现也可以用指数回归模型(模型 II)进行回归

$$y = y_0 + A\exp(-x/t) \tag{13}$$

通过拟合指数

$$R^2 = 1 - Q/\hat{\sigma} \tag{14}$$

$$\hat{\sigma} = \sum_{i=1}^n (y_i - \overline{y})^2 \tag{15}$$

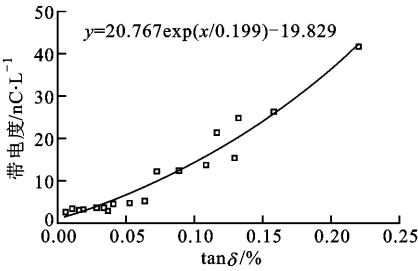
对这两种模型的回归效果进行了对比,结果如表 4 所示。

表 4 两种回归模型拟合效果的对比

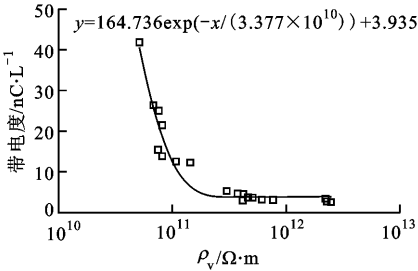
被分析参量	R^2	
	模型 I	模型 II
带电度与介质损耗	0.927 0	0.956 6
带电与体积电阻率	0.638 0	0.938 6
带电度与酸值	0.775 6	0.917 7
带电度与界面张力	0.759 9	0.893 1

由表 4 可以看出,虽然一元线性回归模型也可以较好地拟合带电度与其他参量之间的关系,但指数回归模型的拟合效果明显更准确一些,所以在本文中采用模型 II 对变压器油的带电度与介质损耗、体积电阻率、酸值及界面张力之间的关系进行了回归拟合,结果如图 3 所示。

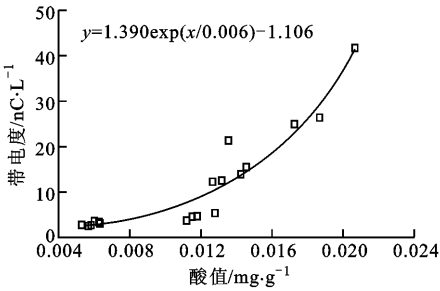
参照文献[6],还可对变压器油的带电度与其他特征参量进行多元回归,以进一步确定带电度与其他各参量的共同制约关系。常用的多元线性回归模型如



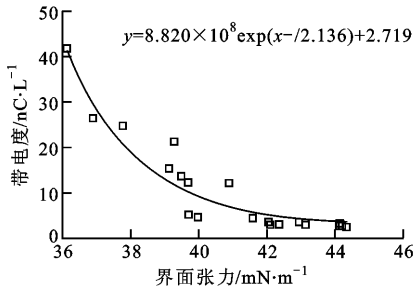
(a)带电度与介质损耗的拟合关系



(b)带电度与体积电阻率的拟合关系



(c)带电度与酸值的拟合关系



(d)带电度与界面张力的拟合关系

图3 变压器油带电度与其他特征参量之间的回归拟合关系

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 \tag{16}$$

其中带电度作为因变量 y ,介质损耗、体积电阻率、酸值、界面张力依次为自变量 x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 。前面的研究表明,在单独对油的带电度与其他 4 个参量分别进行回归时,采用指数回归模型比一元线性回归模型效果要好,即带电度与其他 4 个参量更符合指数回归,所以本文对带电度与其他 4 参量进行多元回归时也采用非线性的指数回归模型。为方

便拟合,可将带电度与其他参量之间的指数关系线性化,即对式(13)两边取对数,可得

$$\ln y = \beta + Bx$$

(17)

类似可得多元线性方程

$$\ln y = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_4 x_4$$

(18)

其中 c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 和 c_4 等值可通过最小二乘法计算得到. 最终拟合结果如下

$$\ln y = -5.358 + 1.403.147x_1 - 1.0 \times 10^{-13}x_2 + 70.530x_3 + 0.138x_4$$

其中拟合指数 $R^2=0.940$. 为检验其回归效果,采用下式对其进行检验

$$F = \frac{U/p}{Q/(n-p-1)} \sim F(p,n-p-1)$$

(19)

式中: p 为自由度. 本次拟合中 $n=20$, $p=4$, $F=59.239$,均大于表 5 中所示任一显著水平 α 下的 $F_\alpha(p,n-p-1)$,所以说该多元回归效果显著,即变压器油的带电度可由介质损耗、体积电阻率、酸值、界面张力等进行多参量非线性关联表征.

表 5 F 分布临界值($n=20, p=4$)

α	0.001	0.005	0.010	0.025	0.050	0.10
$F_\alpha(p,n-p-1)$	8.25	5.80	4.89	3.80	3.06	2.36

4 结 论

(1)随着老化时间的增加,变压器油的带电度、介质损耗、酸值呈逐渐增加的趋势,体积电阻率和界面张力则逐渐减小,各参量随油中注氧量的增加劣化更加明显.

(2)在 120 ℃热老化条件下,变压器油的带电度与介质损耗及酸值呈显著正相关,与体积电阻率及界面张力呈显著负相关,带电度与各参量均满足指数回归模型.

(3)通过多元回归分析得到热老化条件下变压器油的带电度与其他性能参数之间的共同依存关系,即 $\ln y = -5.358 + 1.403.147x_1 - 1.0 \times 10^{-13}x_2 + 70.530x_3 + 0.138x_4$.

参考文献:

[1] 姚志松,姚磊. 变压器油的选择、使用和处理[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

[2] 王文昌. 变压器油界面张力与介质损耗率的关系[J].

变压器,1995,32(9):6-9.

WANG Wenchang. The relationship between interfacial tension and dissipation factor of transformer oil [J]. Transformer, 1995,32(9):6-9.

[3] 王文昌. 变压器油界面张力与酸值的关系[J]. 变压器,1996,33(5):8-11.

WANG Wenchang. The relationship between interfacial tension and acid number of transformer oil [J]. Transformer, 1996,33(5):8-11.

[4] 于钦学,谢恒堃,任文娥. 用多参数研究变压器油的热老化[J]. 变压器, 1998,35(12):14-16.

YU Qinxue, XIE Hengkun, REN Wen'e. Study on thermal aging of transformer oil by multiparameter [J]. Transformer, 1998,35(12):14-16.

[5] KANNO M, OOTA N, SUZUKI T, et al. Changes in ECT and dielectric dissipation factor of insulation oils due to aging in oxygen [J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2001, 8(6):1048-1053.

[6] 宋斌,杨玲君,于萍,等. 多参数关联分析研究变压器油的热老化特性[J]. 高电压技术,2005,31(1):17-19.

SONG Bin, YANG Lingjun, YU Ping, et al. Research of thermal aging characteristics of transformer oil by multi-parameter regression analysis [J]. High Voltage Engineering, 2005,31(1):17-19.

[7] 李睿,曹顺安,盛凯. BP 神经网络用于预测多参数关联变压器油的性能[J]. 计算机与应用化学,2008,26(6):737-740.

LI Rui, CAO Shun'an, SHENG Kai. BP artificial neural network for the prediction of transformer oil performance with multi-parameter correlation [J]. Computers and Applied Chemistry, 2008,26(6):737-740.

[8] LIU Qiang, ZHAO Junwei, WANG Xianjin, et al. Experiment research on the streaming electrification of transformer oil under aging [EB/OL]. [2010-02-12]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04580272>.

[9] CROFTS D W. The static electrification phenomena in power transformers [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1988,23(1):137-146.

[10] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2003.

(编辑 杜秀杰)