

## 烷基苯绝缘油热老化过程中的多参量关联性分析

廖建平<sup>1</sup>, 刘志峰<sup>1</sup>, 杨小爱<sup>2</sup>, 高帆<sup>1</sup>, 陈宇飞<sup>1</sup>, 徐永焯<sup>1</sup>, 汪红梅<sup>2</sup>, 朱志平<sup>2</sup>

(1. 南方电网超高压输电公司电力科研院, 广东 广州 510663;

2. 长沙理工大学 电力与交通材料防护湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**为研究充油高压电缆内部铜和绝缘纸对烷基苯绝缘油性能的影响,将烷基苯绝缘油置于 4 种不同环境中,在 120℃ 的条件下进行 50 天热老化实验,测定老化过程中油样酸值、介质损耗因数、界面张力、水含量等老化特征参量,并采用回归分析法研究 4 个指标之间的关联性。结果表明:随老化时间增加,油样老化程度加剧,其中铜加快了烷基苯绝缘油的老化,绝缘纸对烷基苯绝缘油的老化无明显作用;绝缘油的介质损耗因数与其酸值、水含量呈正相关性,与界面张力呈负相关,且均呈指数函数关系,其回归拟合方程为 $y=A_1 \cdot \exp(\pm x/t_1)+y_0$ ,拟合优度大于 0.94;多元线性回归结果中介质损耗因数与酸值、界面张力、水含量存在共同制约关系。

**关键词:**烷基苯绝缘油;热老化;相关性;回归分析

## Multi-parameter correlation analysis of alkylbenzene insulating oil during thermal ageing

LIAO Jianping<sup>1</sup>, LIU Zhifeng<sup>1</sup>, YANG Xiaoi<sup>2</sup>, GAO Fan<sup>1</sup>,  
CHEN Yufei<sup>1</sup>, XU Yongye<sup>1</sup>, WANG Hongmei<sup>2</sup>, ZHU Zhiping<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of EHV Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Materials Protection for Electric Power and Transportation, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of copper and insulating paper on the properties of alkylbenzene insulating oil inside oil-filled high-voltage cables, alkylbenzene insulating oil was placed in four different environments and subjected to a thermal ageing experiment at 120℃ for 50 days. Ageing characteristic parameters of oil sample such as acid value, dielectric loss factor, interfacial tension, and water content were measured during the ageing process, and the correlation between the four indicators was studied using regression analysis. The results show that as the ageing time increases, the ageing degree of oil sample intensifies, copper accelerates the ageing of alkylbenzene insulating oil, while insulating paper has no significant effect on the ageing of the oil. The dielectric loss factor of insulating oil is positively correlated with its acid value and water content, and negatively correlated with interfacial tension, both of which are exponential functions. The regression fitting equation is  $y=A_1 \cdot \exp(\pm x/t_1)+y_0$ , and the goodness of fit is greater than 0.94. In the results of multiple linear regression, there is a common constraint relationship between the dielectric loss factor, acid value, interfacial tension, and water content.

**Key words:** alkylbenzene insulating oil; thermal ageing; correlation; regression analysis

### 0 引言

在海底电缆、过江电缆等应用中,超高压、大容量充油电缆仍然扮演着不可或缺的角色。超高压充油电缆以烷基苯油作为绝缘介质,但随着运行时间延长,绝缘油会发生老化分解,导致理化电气性能变差,影响充油电缆的安全稳定运行。廖建平

等<sup>[1-2]</sup>综述了海底电缆用烷基苯绝缘油在理化特性、电气性能、老化性能以及生物毒性方面的特点,研究实验室加速劣化及其产气的规律,发现 $H_2$ 和 $C_2H_2$ 是烷基苯绝缘油的特征气体。I L HOSIER 等<sup>[3-4]</sup>在 4 个温度下将十二烷基苯电缆油放置于空气、氮气及含有各种添加材料(铜、铝、绝缘纸)的条件下进行热老化。采用光学、介电分析技术分析,结果发现高温对烷基苯油的老化有加速作用,其在空气中的老化程度远大于氮气下的老化程度,铜是形成油泥

**基金项目:**南方电网超高压输电公司科技项目(CGYKJXM2 0220080);湖南省教育厅科学研究重点项目(23A0269)。

的主要原因。烷基苯油的老化指标是其固有特性的客观反映,且含有关于电缆故障的信息,各项老化指标之间存在着内在联系。目前关于烷基苯绝缘油老化参量之间的相关性研究较少<sup>[5-6]</sup>。

从多参量的角度研究绝缘油理化特性与电气性能之间的关系,可用多元线性回归模型建立绝缘油老化的方程,以此作为参量预测和判断运行油质量。宋斌等<sup>[7]</sup>采用多元线性回归方法分别建立了介质损耗因数( $\tan\delta$ )和含水量等性能指标与时间函数关系模型。韩慧慧等<sup>[8]</sup>建立了变压器油中绝缘纸聚合度和糠醛的质量浓度、酸值等指标的多元线性回归关系。王文森等<sup>[9]</sup>利用主成分分析和偏最小二乘法构建油中溶解气体等多个指标关联关系,可用于检查变压器的异常运行状态。

油品劣化后,油质氧化生成酸性物质导致酸值增大,其中产生的脂肪酸(-COOH)、醇(-OH)等极性亲水基团和憎水的非极性基团(-R)会影响油水两相交界面上的分子定向排列状况。油中水分含量与油品的化学组成、劣化后的氧化产物有关。一般地,芳香烃较烷烃和环烷烃的溶解水能力比较强<sup>[10]</sup>,而烷基苯绝缘油中芳香烃含量高,因此油品本身吸水性强。加之油品劣化后产生的氧化产物如醇、醛、酮、酸等在一定条件下进行聚合、缩合等反应,生成树脂、沥青质等也会增加油的吸湿性。而水分和氧化产物均会增大油的电导电流,对介质损耗因数影响明显。绝缘油的老化参量之间相互影响,具有一定相关性<sup>[11]</sup>,例如介质损耗因数、酸值、界面张力、含水量是评估烷基苯绝缘油性能的4个重要指标,探讨4个特征参量的关联性,对于提升绝缘油运行监督水平及充油电缆故障检测有重要意义。

参照变压器绝缘油的研究状况,本文设计烷基苯绝缘油与普通绝缘纸、金属铜组成的4种试样,在120℃的条件下进行50天热老化实验,测定老化过程中绝缘油酸值、介质损耗因数、含水量、界面张力等老化特征参量变化值,分析四者的关联性,以期作为烷基苯油的运行监督提供一定理论指导。

## 1 试验

### 1.1 原材料和仪器

原材料:烷基苯绝缘油,江苏泰荣绝缘材料有限公司;绝缘纸为普通牛皮纸,友达绝缘材料有限公司;金属铜为T2软紫铜丝,上海时锡贸易有限公司。

主要仪器:YP1001N型电子天平,上海菁海仪器有限公司;J-5型微量水分仪,大庆日上仪器制造有限公司;ZHZ501型张力全自动测定仪,山东中惠仪器有限公司;AI-6000型油介损电阻率测量仪,济南泛华仪器设备有限公司;AA-6300型原子吸收光谱仪,日本岛津公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 绝缘油老化试验

将试验用油分装为380 g/份,放入500 mL磨口试剂瓶中。绝缘纸尺寸为23.8 cm×6 cm×1 mm(质量为1.6 g),铜丝长9.04 m,直径为1 mm(质量为63.5 g)。将绝缘纸和铜丝放入油中,置于真空干燥箱在60℃、-0.1 MPa的条件下除水24 h,再一起放入120℃的烘箱中进行加速老化试验,间隔3~5天测定样品的老化性能指标。所用烷基苯绝缘油理化特性如表1所示,用于热老化的4组试样组合如表2所示,每组试样准备两瓶样品一起老化。

表1 烷基苯油的特性  
Table 1 Characteristics of alkylbenzene oil

项目	烷基苯油
外观	无色透明,无悬浮物和沉淀物
运动黏度(40℃)/(mm <sup>2</sup> /s)	4.213
闪点(闭口)/℃	135
酸值/(mg(KOH)/g)	7.8×10 <sup>-3</sup>
介质损耗因数(90℃)	7.4×10 <sup>-4</sup>
击穿电压/kV	59.7

表2 用于热老化的油样组合  
Table 2 Oil samples combination for heat ageing

编号	用于热老化试验的油样
A	烷基苯油
AKC	烷基苯油+绝缘纸+铜
AK	烷基苯油+绝缘纸
AC	烷基苯油+铜

#### 1.2.2 理化及电气性能检测

酸值测试参照GB/T 28552—2012进行,称取8~10 g老化油样,加入50 mL无水乙醇,在80~85℃的恒温水浴锅中冷凝回流5 min。以溴百里香酚蓝(BTB)作为指示剂,用0.02~0.05 mol/L的KOH-乙醇溶液滴定至溶液颜色突变,记录消耗溶液体积,平行测定两次。介质损耗因数测试参照GB/T 5654—2007进行,用石油醚清洗电极杯和电极。取10 mL油样注入电极杯中直至电极杯溢油,选择3次自动测定模式,仪器升温至90℃后,读取介质损耗因

数值。油中水分含量测试参照 GB/T 7600—2014 进行,取 1 mL 待测油样注入电解池中,水分仪自动开始电解,电解至终点时,记录仪器数据。界面张力测试参照 GB/T 6541—1986 进行,利用纯水标定界面张力仪,将待测油样缓慢倒入装有纯水的界面张力杯中测定油界面张力值,重复测样两次。油和油泥中的铜金属含量测试参照 DL/T 1458—2015 进行,对样品进行微波消解,配制溶液,在原子吸收光谱仪上测定空白溶液和样品溶液,绘制标准曲线,计算出样品溶液中的铜含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 油样理化特性与性能参数随老化时间的变化

#### 2.1.1 颜色

颜色是可肉眼观察、反映油质氧化程度的重要参照。不同老化时间下油样的颜色如图 1 所示。

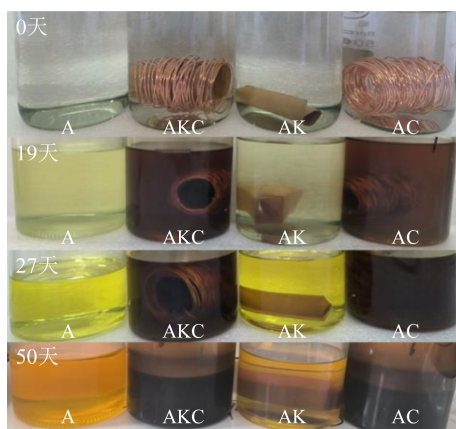


图 1 不同老化时间下油样的颜色变化

Fig. 1 Color changes of oil samples under different ageing time

从图 1 可以看出,随着老化时间增加,油样颜色从无色透明逐渐变黄,甚至变黑。其中 AKC、AC 老化后颜色比 A、AK 的颜色深,且在 120℃ 下老化 11 天后开始产生油泥,而 A、AK 始终未产生油泥。AK 外观颜色与 A 的颜色无差异,表明在本实验室条件下绝缘纸对油品的影响不大。含铜油样的老化程度均比无铜油样的老化程度深,说明铜对油品有显著影响,会加速烷基苯油的老化反应<sup>[12-13]</sup>。随着老化时间延长,各油品老化程度加深。

#### 2.1.2 酸值

酸值是直接反映油质氧化程度的主要参数。各油样在不同老后时间下的酸值如图 2 所示。从图 2 可知,A、AKC、AK、AC 油样老化后的酸值随热老

化时间的增加呈上升趋势。在 120℃ 热老化过程中,老化至 11 天前,AKC 和 AC 油样均未产生油泥,4 组油样的酸值相差不大。老化至第 11 天后,含铜油样 AKC、AC 开始产生油泥,此后 A 和 AK 油样的酸值逐渐大于相同热老化时间下 AKC 和 AC 的酸值。这是因为油样劣化后,油质会产生酸性物质,该酸性组分多为有机酸,其中羧酸会与铜反应生成羧酸铜盐<sup>[14]</sup>,这些产物可以加速油的老化<sup>[15]</sup>,导致烷基苯油更容易变质。因此 AKC、AC 老化后期酸值降低,导致了 A、AK、AKC、AC 油样之间酸值的差异。

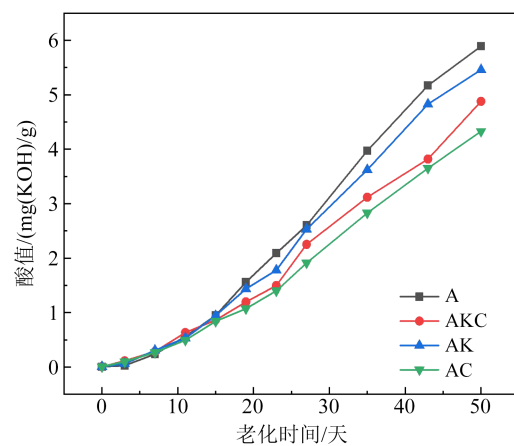


图 2 不同老化环境下油样的酸值变化

Fig. 2 Changes of acid value of oil samples under different ageing environments

用原子吸收光谱进一步确定老化油和油泥中铜金属的含量,对 AC 在 120℃ 下老化 48 天得到的油和油泥进行原子吸收测试,测试结果如表 3 所示。

表 3 绝缘油和油泥中的铜离子含量

名称	稀释后浓度 /(mg/L)	稀释 倍数	微波消解 /g	定容体积 /mL	铜离子含量 /(mg/L)
绝缘油	2.133	1	1.004	25	53.113
油泥	3.495	200	0.709	25	24 626.550

表 3 结果表明油和油泥中均含有铜离子,油泥中的铜含量约为油中铜含量的 460 倍。由此说明烷基苯绝缘油中有机酸腐蚀铜金属生成了羧酸铜盐,而溶解在烷基苯绝缘油中的羧酸铜盐继续加速油的老化,增加沉淀物的生成。

#### 2.1.3 水含量

油中水分主要是由外部侵入和油自身氧化产

生。油样在 120℃ 下热老化后产生的水含量如图 3 所示。由图 3 可知,随着老化时间增加,A 和 AK 水分含量逐渐增大,AKC 和 AC 水分含量呈波动趋势,这可能是由水的生成速率和蒸发速率以及水在老化油中的溶解度共同决定。在初始老化阶段,油中生成的产物结构能以化学结合或溶解的形式吸收水<sup>[16]</sup>,加之油品老化本身产生水,进而导致水含量增加。随着老化进入中期,水分的减少可能是由蒸发或空气湿度的变化导致的<sup>[17]</sup>。在老化 50 天后,不含铜油样 A 和 AK 的水含量分别约为 225 μg/mL 和 200 μg/mL,高于 AKC、AC 的水含量,主要原因是 AKC、AC 油中生成的酸性物质与铜反应生成羧酸铜盐消耗了油中部分水分。

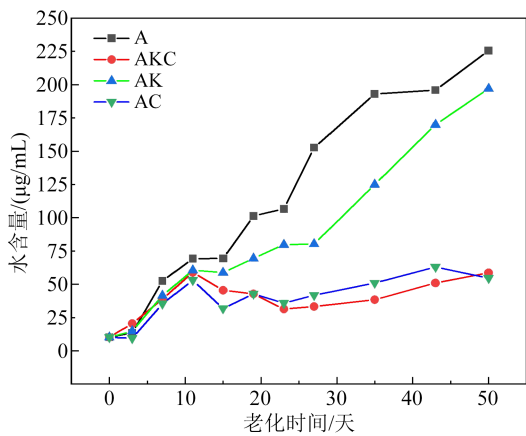


图3 不同老化环境下油样的水含量变化

Fig.3 Changes of water content of oil samples under different ageing environments

#### 2.1.4 介质损耗因数

介质损耗因数( $\tan\delta$ )反映了油质是否受导电污染物和极性产物的影响。 $\tan\delta$ 越大,绝缘油的介质损耗能量越大。油样在 90℃、50 Hz 下的  $\tan\delta$  随老化时间的变化如图 4 所示。从图 4 可见,随老化时间增加,含有铜丝的油样 AC、AKC  $\tan\delta$  逐渐增大,不含铜丝的油样 A、AK  $\tan\delta$  曲线增长则较为平缓,含铜油样的  $\tan\delta$  远大于不含铜油样。其中 A 和 AK 的  $\tan\delta$  最高增大 10%,而 AKC 和 AC 的  $\tan\delta$  最高增大 100% 左右,此结果证实了烷基苯绝缘油老化产物增多, $\tan\delta$  会随之增大,铜丝对烷基苯绝缘油老化有加速作用。

#### 2.1.5 界面张力

界面张力反映油中亲水性极性分子的总和,可以用来判断油质的老化程度。120℃ 下老化后油样界面张力测试结果如图 5 所示。由图 5 可知,油样界

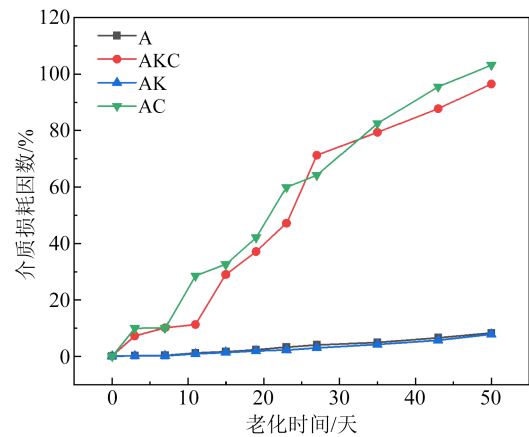


图4 不同老化环境下油样的介质损耗因数变化

Fig. 4 Changes of dielectric loss factor of oil samples under different ageing environments

面张力随着老化时间增加而下降,老化 15 天时界面张力下降至 16~20 mN/m,这是由于油质老化后产生各种有机酸、醇、醛及酮等极性分子,油中绝缘纸经老化后生成糠醛等极性物质,两者均影响油水界面的定向排列,最终导致其界面张力逐渐下降。

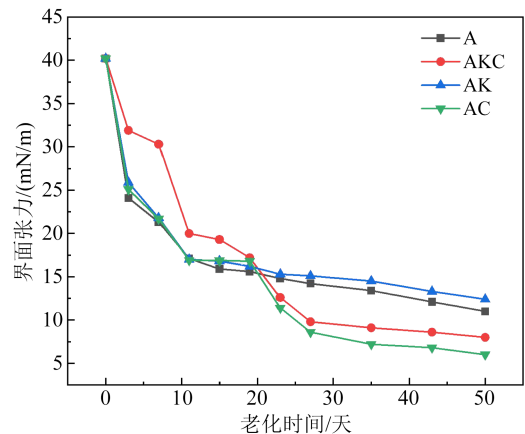


图5 不同老化环境下油样的界面张力变化

Fig. 5 Changes of interfacial tension of oil samples under different ageing environments

综上所述,烷基苯绝缘油老化后会不断生成醇、酮、酸类产品等极性物质,油中酸类产品增多导致酸值增大,极性产物增多导致界面张力不断减小及水含量变化,进一步影响介质损耗因数。因此烷基苯油的介质损耗因数与酸值、水含量、界面张力之间存在一定的相关性<sup>[18-19]</sup>。鉴于绝缘纸对烷基苯绝缘油的影响小于铜丝的影响,将 4 个环境中的烷基苯油样分成不含铜和含铜油样两类,对 4 个老化指标进行回归分析,探讨其中的相关性。

## 2.2 回归分析

### 2.2.1 Correl 函数介绍

Correl 函数本身用于统计学,目的是确定 X 和 Y 两组数据的相关性,若相关系数  $r=1$ ,说明两组数据严格正相关;若  $r=0$  则说明不相关<sup>[20]</sup>;  $|r|<0.4$  为低线性相关;  $0.4\leq|r|<0.7$  为显著线性相关;  $0.7\leq|r|<1$  为高度线性相关,Correl 函数表达如式(1)所示。

$$\text{Correl}(X,Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式(1)中: X, Y 分别为数据组; x, y 分别为数据点;  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  分别为数据组的平均值。

利用 Correl 函数进一步确定 4 个理化及电气性能参数之间的相关性,结果如表 4 所示。由表 4 得出,油样在 120℃ 下老化 50 天后的介质损耗因数与酸值、水含量呈现正相关,与界面张力呈现负相关。其中介质损耗因数与酸值的  $r$  值最高,介于 0.7~1,呈现高度线性相关。同理得出介质损耗因数与界面张力、水含量之间的相关程度,可用回归模型进行回归分析。

表 4 介质损耗因数与其他参量的相关性

Table 4 Correlation between dielectric loss factor and other parameters

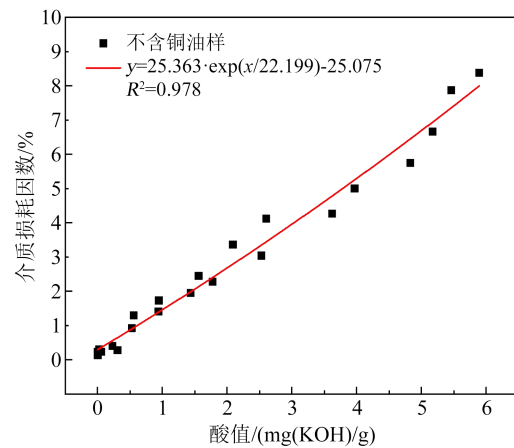
被分析参量	相关系数 $r$	
	不含铜油样	含铜油样
介质损耗因数和酸值	0.990	0.962
介质损耗因数和界面张力	-0.665	-0.890
介质损耗因数和含水量	0.968	0.645

### 2.2.2 介质损耗因数与酸值的相关性

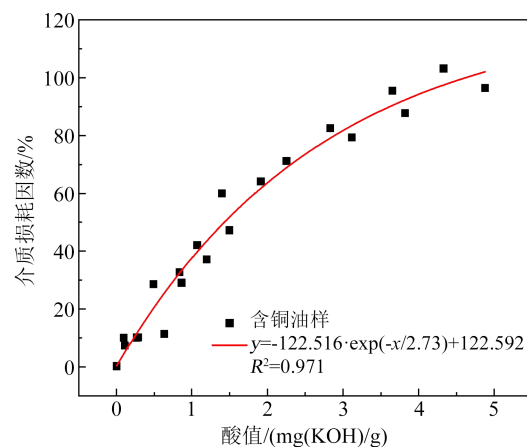
两种油样的介质损耗因数和酸值的拟合关系如图 6 所示。由图 6 可知,烷基苯绝缘油的介质损耗因数与酸值呈现正相关,且为指数函数关系 ( $y=A_1 \cdot \exp(\pm x/t_1)+y_0$ )。随着老化程度增加,油中极性产物增多,所含的有机酸性物质含量增加,导致酸值增大。同时有机酸类物质等在电场的作用下会增大绝缘油的电导电流,因此介质损耗因数也会增大。

### 2.2.3 介质损耗因数与界面张力的相关性

两种油样的介质损耗因数和界面张力的拟合关系如图 7 所示。由图 7 可知,烷基苯绝缘油的介质损耗因数与界面张力呈现负相关,且为指数函数关系 ( $y=A_1 \cdot \exp(\pm x/t_1)+y_0$ )。这是因为受油中羰基极性产物及油中酸性或中性氧化产物的影响,油水界



(a) 不含铜油样



(b) 含铜油样

图 6 两种油样的介质损耗因数和酸值的拟合关系

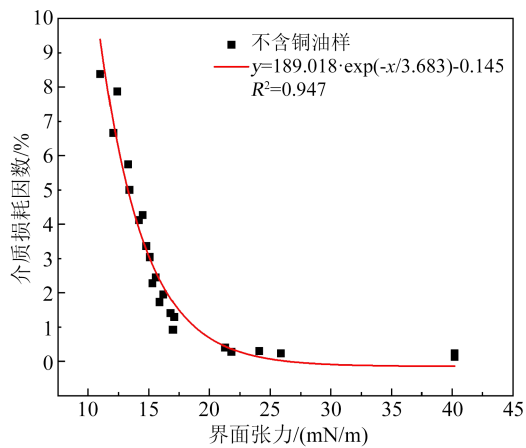
Fig.6 Fitting relationship between dielectric loss factor and acid value of two oil sample

面排列改变,使油品界面张力逐渐减小。与此同时,因绝缘油的体积电阻率对油的离子传导损耗敏感,油中酸性或中性氧化物的存在会降低绝缘油的体积电阻率,从而使介质损耗因数不断增大。

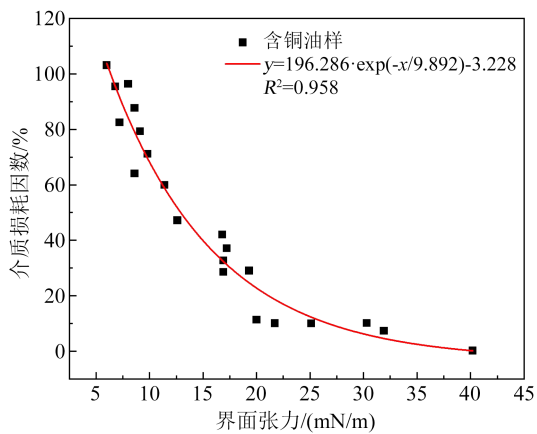
### 2.2.4 介质损耗因数与水含量的相关性

不含铜油样的介质损耗因数和水分的关系如图 8 所示。由图 8 可知,不含铜油样的介质损耗因数和含水量呈指数函数关系 ( $y=A_1 \cdot \exp(\pm x/t_1)+y_0$ )。油品老化后,油中含水量不断增加,老化产生的极性物质能以化学结合或溶解的形式吸收水分,使得含水量增大,加之水分子极性大,影响了介质损耗因数数值大小。含铜油样的介质损耗因数和含水量的拟合优度 ( $R^2$ ) 为 0.355,分散程度高,两者关系并不显著。

综上,图 6~8 均表明了烷基苯绝缘油老化后,其介质损耗因数和酸值、界面张力、含水量呈指数



(a) 不含铜油样



(b) 含铜油样

图7 两种油样的介质损耗因数和界面张力的拟合关系

Fig.7 Fitting relationship between dielectric loss factor and interfacial tension of two oil samples

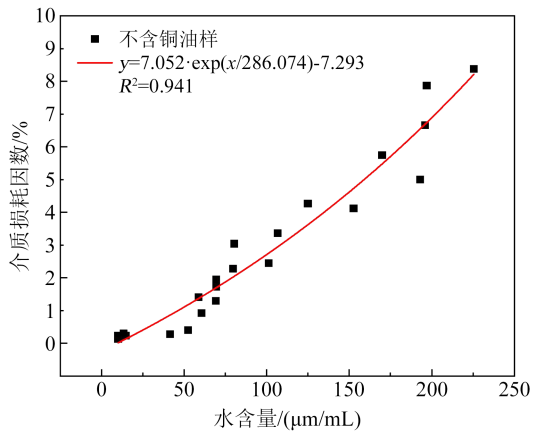


图8 不含铜油样的介质损耗因数和含水量的拟合关系

Fig. 8 Fitting relationship between dielectric loss factor and water content of oil samples without copper

函数关系( $y=A_1 \cdot \exp(\pm x/t_1)+y_0$ ),各模型拟合优度如表5所示。由表5可知,除含铜油样的介质损耗因数和含水量的指数回归模型 $R^2=0.355$ 外,其他指数回归

表5 各回归模型的拟合优度

Table 5 The goodness of fit for each regression model

被分析参量	$R^2$	
	不含铜油样	含铜油样
介质损耗因数和酸值	0.978	0.971
介质损耗因数和界面张力	0.947	0.958
介质损耗因数和含水量	0.941	0.355

模型的 $R^2$ 均在0.94以上,可以较好地拟合介质损耗因数和其他3个参量之间的关系。

### 2.2.5 多参数关联分析

将各参量进行多元线性回归,进一步确定介质损耗因数和酸值、界面张力、含水量的共同制约关系。由图6~8的拟合关系得出,介质损耗因数和其他3个参量间形成指数函数关系,因此将方程 $y=A_1 \cdot \exp(\pm x/t_1)+y_0$ 两边取对数,可将介质损耗因数和其他3个参量的指数函数关系线性化,得到多元线性方程,如式(2)所示。

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (2)$$

式(2)中: $x_1, x_2, x_3$ 分别代表自变量酸值、界面张力、含水量; $y$ 代表因变量介质损耗因数。进一步可得到式(3)。

$$\ln y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 \quad (3)$$

式(3)中: $a_0$ 为常数项; $a_1, a_2, a_3$ 为回归系数。

利用SPSS进行多元线性回归计算可得到 $a_0, a_1, a_2, a_3$ ,由此得到不含铜油样的多元线性方程为 $\ln y=0.998+0.254x_1-0.077x_2+0.004x_3, R^2=0.907$ ;含铜油样的多元线性方程为 $\ln y=6.771-0.222x_1-0.188x_2, R^2=0.888$ 。

## 3 结论

本文研究了烷基苯绝缘油老化后的介质损耗因数、酸值、界面张力和含水量的变化规律及参量之间的关系,初步建立了介质损耗因数与酸值、界面张力、含水量间的回归模型,得到主要结论如下:

(1)烷基苯绝缘油在120℃下进行老化,随着老化时间延长,油样的颜色变黄甚至变黑,介质损耗因数和酸值增大,界面张力减小;不含铜油样含水量增加,含铜油样含水量呈波动趋势。铜会加快烷基苯绝缘油的老化,而绝缘纸对烷基苯油的老化无明显作用。

(2)在热老化过程中,油样的介质损耗因数与酸值、含水量呈正相关,与界面张力呈负相关;介质

损耗因数与酸值、水含量、界面张力呈指数函数关系,其回归拟合方程为 $y=A_1 \cdot \exp(\pm x/t_1)+y_0$ ,除含铜油样的介质损耗因数和含水量的指数回归模型 $R^2=0.355$ 外,其余指数回归模型 $R^2$ 大于0.94。

(3)利用多元线性分析得出热老化过程中烷基苯绝缘油的介质损耗因数与其他参量的共同制约关系,不含铜油样的多元线性方程为 $\ln y=0.998+0.254x_1-0.077x_2+0.004x_3$ , $R^2=0.907$ ;含铜油样的多元线性方程为 $\ln y=6.771-0.222x_1-0.188x_2$ , $R^2=0.888$ 。

本文仅在实验室中研究,且选取老化特征参量及样本数量有限,与实际运行烷基苯油老化的情况有差距,后期建议增加样本数量,尤其是运行现场油样,提高老化特征参量拟合关系的有效性。

### 参考文献 References

- [1] 廖建平,楚金伟,高帆,等.海底电缆用烷基苯绝缘油的性能研究进展[J].绝缘材料,2021,54(10):20-25.  
LIAO Jianping, CHU Jinwei, GAO Fan, et al. Research progress on performance of alkylbenzene insulating oil for submarine cable [J]. Insulating Materials,2021,54(10):20-25.
- [2] 廖建平,楚金伟,高帆,等.烷基苯热解产气规律与基于DGA的充油电缆故障诊断[J].绝缘材料,2021,54(8):109-114.  
LIAO Jianping, CHU Jinwei, GAO Fan, et al. Pyrolysis gas production law of dodecylbenzene and fault diagnosis of oil-filled cable based on DGA[J]. Insulating Materials, 2021,54(8):109-114.
- [3] HOSIER I L, VAUGHAN A S, SUTTON S J, et al. Chemical, physical and electrical properties of aged dodecylbenzene 3: thermal ageing of mixed isomers in nitrogen and under sealed conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(4):1056-1064.
- [4] HOSIER I L, VAUGHAN A S, SUTTON S J, et al. Chemical, physical and electrical properties of aged dodecylbenzene: thermal ageing of mixed isomers in air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2007,14(5):1113-1124.
- [5] KALANTAR A, LEVIN M. Factors affecting the dissolution of copper in transformer oils[J]. Lubrication Science, 2008, 20(3): 223-240.
- [6] LYUTIKOVA M N, KOROBENNIKOV S M, RAO U M, et al. Mixed insulating liquids with mineral oil for high-voltage transformer applications: a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2022,29(2):454-461.
- [7] 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(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(1):17-19.
- [8] 韩慧慧,杨道武,王溯,等.用多参数回归关联方法分析变压器油纸绝缘老化特性[J].高电压技术,2010,36(12):2937-2941.  
HAN Huihui, YANG Daowu, WANG Su, et al. Insulation aging characteristics of transformer oil-paper by multi-parameter regression analysis[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2937-2941.
- [9] 王文森,贺馨仪,杨晓西,等.基于多参量数据回归分析的电力变压器状态监测方法[J].电网与清洁能源,2023,39(4):83-90.  
WANG Wensen, HE Xinyi, YANG Xiaoxi, et al. Power transformer condition monitoring method based on multivariate statistical analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(4): 83-90.
- [10] 汪红梅.电力用油(气)[M].北京:中国电力出版社,2015.  
WANG Hongmei. Electric oil (gas)[M]. Beijing: China Electric Power Press,2015.
- [11] 任双赞,钟力生,于钦学,等.变压器油加速热老化过程中的多参量相关-回归分析[J].西安交通大学学报,2010,44(10):88-92.  
REN Shuangzan, ZHONG Lisheng, YU Qinxue, et al. Multi-parameter correlation-regression analysis for transformer oil under accelerating thermal aging[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University,2010,44(10):88-92.
- [12] DE CARLO R M, SARZANINI C, BRUZZONITI M C, et al. Copper-in-oil dissolution and copper-on-paper deposition behavior of mineral insulating oils[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(2):666-673.
- [13] HAO J, LIAO R J, YANG L J, et al. Copper catalytic effect on the thermal deterioration and surface morphology performance of transformer oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering,2017,13(3):373-381.
- [14] HOSIER I L, VAUGHAN A S, SUTTON S J, et al. Chemical, physical and electrical properties of aged dodecylbenzene 2: thermal ageing of single isomers in air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(5):1393-1405.
- [15] 王灯,张丽,朱志平,等.变压器金属材料对油纸绝缘老化的影响[J].高电压技术,2019,45(9):2954-2963.  
WANG Deng, ZHANG Li, ZHU Zhiping, et al. Influence of metal material of transformer on oil-paper insulation after thermal aging[J]. High Voltage Engineering,2019,45(9):2954-2963.
- [16] HAO J, LIAO R J, CHEN G, et al. Influence of copper on the by-products of different oil-paper insulations[J]. Journal of Physics: Conference Series,2011:310.
- [17] 张炜,张玉波,俸波,等.基于平衡曲线的变压器绝缘纸含水量监测方法[J].绝缘材料,2020,53(3):77-82.  
ZHANG Wei, ZHANG Yubo, FENG Bo, et al. Moisture content monitoring method of transformer insulating paper based on balance curve[J]. Insulating Materials,2020,53(3):77-82.
- [18] 贺德华.基于多参量分析的油纸绝缘老化状态评估方法研究[D].福州:福州大学,2017.

- HE Dehua. Study on assess of oil-paper insulation aging status based on multi-paper meter analysis[D]. Fuzhou:Fuzhou University,2017.
- [19] 汪正江. 植物油纸绝缘多参量电老化特性及寿命模型[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- WANG Zhengjiang. Study of multiparameter electrical aging characteristics and lifetime model for vegetable oil-paper insulation[D]. Chongqing: Chongqing University,2015.
- [20] 鲍明显,熊建嘉,崔铭芳,等. 某单井站场管道积液及腐蚀特性研究[J]. 中国安全生产科学技术,2021,17(7):60-64.
- BAO Mingyu, XIONG Jianjia, CUI Mingfang, et al. Study on liquid accumulation and corrosion characteristics of pipelines in a single well station[J]. Journal of Safety Science and Technology,2021,17(7):60-64.
- 
- 收稿日期:2023-10-12;修回日期:2024-01-18。
- 作者简介:
- 廖建平(1983-),男(汉族),江西赣州人,高级工程师,主要从事绝缘油的测试与分析工作;
- 通信作者:汪红梅(1971-),女(汉族),湖北孝感人,副教授,主要从事电力化学及多功能材料的研究。