

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.236

# 植物与矿物绝缘油热故障产气差异性分析

尹惠<sup>1</sup>, 韩秋篁<sup>2</sup>, 王飞鹏<sup>2</sup>, 相晨萌<sup>2</sup>, 史常凯<sup>1</sup>, 白雪峰<sup>1</sup>, 古凌云<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司 配电变压器节能技术北京市重点实验室, 北京 100192;

2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:**为研究不同种类绝缘油在热故障下油中溶解气体差异,对山茶籽绝缘油、FR3绝缘油、25#矿物绝缘油及油纸绝缘体系进行了90~250℃及300~800℃模拟变压器热故障试验,使用色谱法分析了热故障下油中溶解气体,得到相应气体组分、百分含量同热故障温度的对应关系。实验表明,热故障下山茶籽绝缘油的主要溶解气体为H<sub>2</sub>与C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>,FR3绝缘油为C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>;矿物绝缘油低温(<300℃)热故障下为H<sub>2</sub>与CH<sub>4</sub>,中、高温(≥300℃)热故障下为CH<sub>4</sub>与C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>。植物绝缘油与矿物绝缘油热故障特征气体的差异表明,在变压器故障诊断中应根据绝缘油类型建立适用的油中溶解气体分析方法。

**关键词:**植物绝缘油;热故障;溶解气体;油纸绝缘;色谱分析;矿物绝缘油

中图分类号:TM214

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2022)01-079-08

## Difference analysis of gases produced under thermal faults between vegetable and mineral insulating oils

YIN Hui<sup>1</sup>, HAN Qiu Huang<sup>2</sup>, WANG Fei Peng<sup>2</sup>, XIANG Chen Meng<sup>2</sup>,  
SHI Chang Kai<sup>1</sup>, BAI Xue Feng<sup>1</sup>, GU Ling Yun<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Distribution Transformer Energy-Saving Technology, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, P. R. China; 2. State Key Lab of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** To investigate the difference of dissolved gases under thermal faults between vegetable and mineral insulating oils, simulated thermal-fault experiments were conducted for camellia insulating oil, Envirotemp FR3 fluid, 25# mineral insulating oil and the paper-oil insulation systems at the temperature of 90 – 250 °C and 300 – 800 °C. The dissolved gases in oils under thermal faults were analyzed using chromatography to obtain the components and percentage contents of the specific gases as well as their relationship with the temperature. The experiment results show that the main dissolved gases under thermal faults of the camellia insulating oil are H<sub>2</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, and that of the FR3 insulating oil is C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>; for the mineral insulating oil, the main dissolved gases are H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> under thermal faults at lower temperatures (<300 °C), while those are

收稿日期:2019-12-09 网络出版日期:2019-12-23

基金项目:配电变压器节能技术北京市重点实验室开放基金项目(PDB51201801264)。

Supported by the Open Fund of Beijing Key Laboratory of Distribution Transformer Energy-Saving Technology (PDB51201801264).

作者简介:尹惠(1989—),男,工程师,主要从事高压电器试验及新型绝缘材料研究,(E-mail)ethanjones\_cn@163.com。

通讯作者:王飞鹏,男,特聘研究员,博士生导师,主要从事工程电介质及应用、电功能聚合物及应用研究,  
(E-mail)fpwang@cqu.edu.cn。

CH<sub>4</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> at medium and higher temperatures ( $\geq 300$  °C). The identification of different types of specific gases under thermal faults between vegetable and mineral insulating oils suggests that suitable methods of DGA (dissolved gas-in-oil analysis) for specific type of insulating oil should be developed in the fault diagnosis of transformers.

**Keywords:** vegetable insulating oil; thermal fault; dissolved gas; paper-oil insulation; chromatographic analysis; mineral insulating oil

变压器是现代电力系统的重要组成部分,其运行状态将影响电网供电质量及可靠性。在变压器可能发生的各类故障中,由绝缘问题引发的故障占据了多数。对于油浸式变压器,其油纸绝缘系统在变压器运行过程中受到电、磁和温度场的综合作用,将发生绝缘油和绝缘纸的老化,并伴随局部过热性故障<sup>[1]</sup>。而传统矿物绝缘油的闪点和燃点较低<sup>[2]</sup>,热故障引发变压器燃烧和爆炸的可能性增高。为此,基于预判变压器老化状态及潜在故障,发展出多种变压器故障诊断方法,如,油中溶解气体分析(DGA, dissolved gas-in-oil analysis)<sup>[3-5]</sup>、油中糠醛分析<sup>[6-10]</sup>、纸的聚合度分析<sup>[11-14]</sup>等。其中,DGA 诊断法在故障早期可检测出发展中的内部故障,准确度高,受电磁场等因素干扰小,在矿物绝缘油变压器故障诊断中获得了广泛的应用。

近年来,植物绝缘油因燃点高、自然降解率高、油纸绝缘配合度好、原料可再生等优势大量用于油浸变压器<sup>[2, 15-17]</sup>,在变压器热故障诊断研究中得到重视<sup>[18-21]</sup>。由于植物绝缘油与矿物绝缘油组成成分的差异<sup>[2]</sup>,传统应用于矿物绝缘油变压器的 DGA 诊断法已不能直接应用于植物绝缘油变压器中,需针对特定的植物绝缘油进行模拟变压器热故障下油中溶解气体研究,得到气体组分、含量及变化趋势等规律,提出适用于植物绝缘油变压器的油中气体诊断方法。

文中通过模拟植物绝缘油与矿物绝缘油热故障试验,分析 2 种不同类型绝缘油的油中溶解气体规律及差异性,为建立适用于特定植物绝缘油变压器的 DGA 故障诊断方法提供依据。

## 1 实验方法

### 1.1 试样及处理

选取实验室精炼的山茶籽绝缘油、商用 FR3 绝缘油(原料基于大豆油)、25 # 矿物绝缘油及牛皮绝缘纸作为试验材料,在实验前对试样进行预处理,其中,绝缘油、绝缘纸分别置于 90 °C 真空干燥箱中干燥 48 h,在真空环境冷却后取出,将纯油样密封,按油纸质量比 15:1 将干燥后的绝缘纸分别浸入相应绝缘油中,并放于 40 °C 真空干燥箱中静置 24 h,制备油纸绝缘试样。表 1 所示为试验用各类绝缘油的基本理化及电气特性。

表 1 试验用各类绝缘油基本理化及电气特性

Table 1 Fundamental physical, chemical and electrical properties of the insulating oils

参数	山茶籽绝缘油	FR3 绝缘油 <sup>[22]</sup>	矿物绝缘油
外观	淡黄色	浅绿色	透明
密度(20 °C)/(g · cm <sup>-3</sup> )	0.90	0.92	<0.895
运动粘度(40 °C)/(mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	39.9	32~34	≤13.0
倾点/°C	-28	-18~-23	<-22
闪点/°C	322	320~330	≥135
酸值/(mgKOH · g <sup>-1</sup> )	0.03	0.013~0.042	≤0.03
交流击穿电压(2.5 mm)/kV	70	73	≥35
介质损耗因数(90 °C)/%	0.88	2	≤0.1
体积电阻率/Ω · m	1 × 10 <sup>10</sup> (90 °C)	—	7 × 10 <sup>11</sup> (25 °C)
相对介电常数(90 °C)	2.9	—	2.2

## 1.2 模拟热故障试验装置

为模拟变压器在不同温度(低温: $<300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,中温: $300\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,高温: $>700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,依据 IEC 60599 标准<sup>[23]</sup>)下的热故障,获得相应热故障下绝缘油中溶解气体,设计了 1 套试验装置,如图 1 所示。该试验装置由管式电阻炉、加热管(容积 25 mL)、金属油杯(容积 500 mL)和温控装置等部分构成。温控装置可以设置并显示电阻炉的加热温度,加热管壁上附着的热电偶温度传感器(图中未画出)可以实时监测油样在热故障试验时的热点温度。

表 2 所示为进行热故障试验时,当加热管温度到达预设值并维持稳定后,依据变压器不同温度热故障持续时间,确定相应试验温度下的加热持续时间。

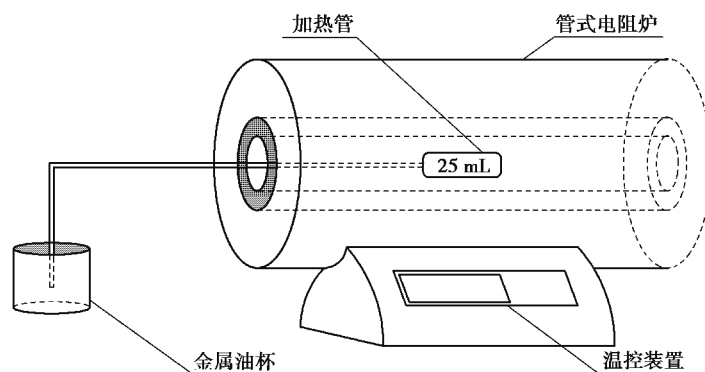


图 1 模拟变压器热故障试验装置示意图

Fig. 1 Sketch of transformer thermal-fault-simulation unit

## 1.3 试验方法

基本实验步骤如下:

- 1) 试样预处理;
- 2) 设置热故障试验中对应的管式电阻炉加热温度,开启加热电源并等待电阻炉温度达到稳定的设定值;
- 3) 将预处理后的试样置于金属油杯中,如图 1 所示,并通过金属导管将试样通入电阻炉加热管中;
- 4) 待加热管温度维持在稳定的设定值,继续加热试样至设定的试验时间,如表 2 所示;
- 5) 加热结束后,静置 30 min,使热故障试验产生的气体充分扩散并溶解于试验油样中,取出油样,用色谱仪测定油中溶解气体的成分和含量,取 3 次测量的平均值作为最终结果,计算每组数据的标准偏差。

表 2 模拟热故障试验加热时间

Table 2 Heating duration of simulated thermal fault tests

试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	90	120	150	200	250	300	400	500	600	700	800
试验时间/h	168	168	168	2	1	1/2	1/12	1/12	1/15	1/20	1/24

## 2 结果与讨论

### 2.1 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下热故障油中溶解气体分析

将预处理后的 3 种被试油样在  $90\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内进行热故障试验,分别用色谱法分离不同油样、不同温度热故障下,油中溶解气体,得到气体(除  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  外)百分含量与热故障温度的对应关系,如图 2 所示。图中山茶籽绝缘油在被试热故障温度区间内百分含量最高的油中溶解气体为  $\text{C}_2\text{H}_6$  与  $\text{H}_2$ ,FR3 绝缘油中占比最高的气体为  $\text{C}_2\text{H}_6$ ;相比之下,矿物绝缘油中  $\text{H}_2$  与  $\text{CH}_4$  2 种气体百分含量最高。可见,植物绝缘油与矿物绝缘油在被试温度下热故障特征气体存在明显差异。同时,山茶籽绝缘油中  $\text{H}_2$  百分含量随温度的变化大体呈 U 型曲线关系, $\text{C}_2\text{H}_6$  百分含量随温度变化总体呈倒 U 型曲线关系;FR3 绝缘油中  $\text{C}_2\text{H}_6$  百分含量随温度的变化趋势相对平稳;矿物绝缘油中  $\text{H}_2$  百分含量随温度的升高而下降, $\text{CH}_4$  百分含量随温度升高而

上升。说明不同绝缘油中热故障特征气体随温度的变化规律存在差异。另外,在被试热故障温度区间内,不同种类绝缘油中均无明显的  $C_2H_2$  产生,推测该现象与试验所施加的热故障能量有关。

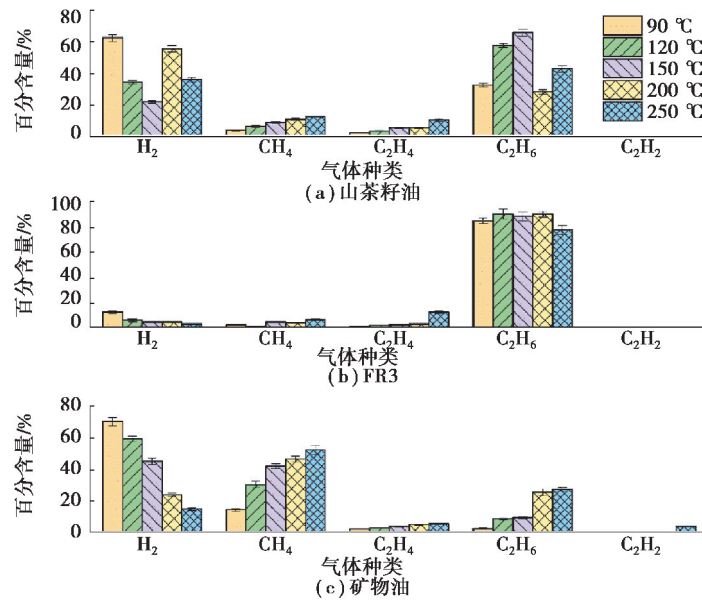


图 2 300 °C 以下热故障不同油中溶解气体百分含量对比

Fig. 2 Percentage content of dissolved gases in various oils under thermal faults below 300 °C

油纸绝缘在 300 °C 以下热故障模拟试验中,不同种类绝缘油中溶解气体百分含量与温度的对应关系,如图 3 所示。与相应温度范围内单纯绝缘油热故障试验结果不同的是,山茶籽绝缘油中  $H_2$  的百分含量大幅上升, $C_2H_6$  的百分含量明显下降;FR3 绝缘油中除  $C_2H_6$  以外, $H_2$  等气体的百分含量有所增加。说明油中含纸会增加相应温度热故障下植物绝缘油中  $H_2$  的含量,原因是绝缘纸主要成分纤维素在植物绝缘油中受热分解产生了较多的  $H_2$ 。对比图 3 与图 2 中矿物绝缘油的产气情况可以看出,油纸绝缘在较低温度(90 °C)热故障中产生了较多的  $C_2H_6$ ,而在相对较高温(200~250 °C)热故障中产生了较多的  $H_2$ ,说明油中含纸对矿物绝缘油相应热故障下,油中溶解气体的影响与热故障温度具有一定相关性,原因在于矿物绝缘油浸纸的受热分解过程与热故障能量大小相关。

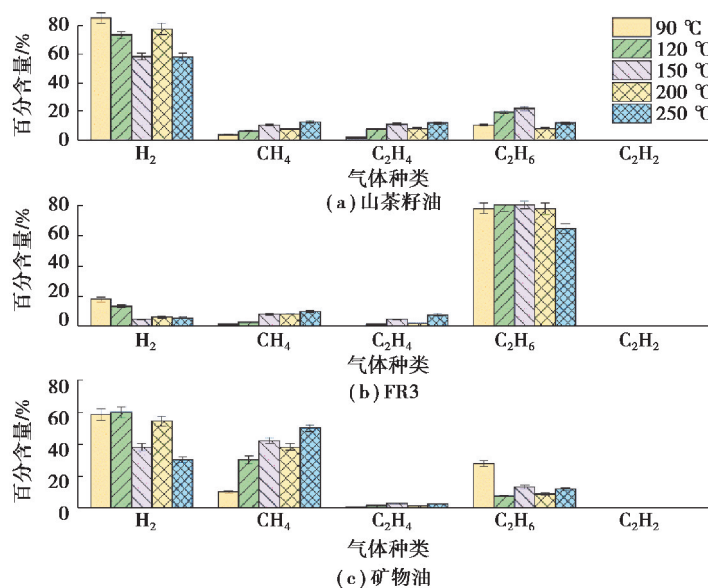


图 3 300 °C 以下热故障不同油纸混合绝缘油中溶解气体百分含量对比

Fig. 3 Percentage content of dissolved gases in various oils for paper-oil insulation under thermal faults below 300 °C

表 3 列出了 3 种绝缘油及相应油纸绝缘在 90 °C、200 °C 热故障时的 CO、CO<sub>2</sub> 含量。表中各油样在油中含纸情况下,热故障油中溶解 CO、CO<sub>2</sub> 含量均明显提高,尤其在 200 °C 热故障下,油纸绝缘产生的 CO<sub>2</sub> 含量较单纯绝缘油提高 10 倍以上,温度升高明显加剧了含纸绝缘油中溶解气体产生。说明油浸绝缘纸在较高温度热故障下更易分解产生相应气体。另外,200 °C 热故障下,油中含纸对矿物绝缘油溶解气体含量的影响明显弱于对植物绝缘油,说明油浸绝缘纸的分解受到绝缘油种类及成分的影响。

表 3 300 °C 以下热故障油中溶解 CO 和 CO<sub>2</sub> 含量Table 3 Contents of CO and CO<sub>2</sub> dissolved in oils under thermal faults below 300 °C

绝缘形式	绝缘油类型	热故障温度/°C	CO/×10 <sup>-6</sup>	CO <sub>2</sub> /×10 <sup>-6</sup>
油	山茶籽油	90	49.3	1 111.2
		200	68.8	1 149.6
	FR3	90	24.2	918.9
		200	29.5	542.7
	矿物油	90	15.89	800.5
		200	85.4	781.4
油纸绝缘	山茶籽油	90	65.3	1 837.0
		200	1 157.2	17 883.4
	FR3	90	29.2	1 379.3
		200	468.5	11 568.4
	矿物油	90	190.3	2 638.6
		200	327.9	8 192.8

## 2.2 300 °C 以上热故障油中溶解气体分析

将预处理后的 3 种被试油样在 300~800 °C 温度范围内进行热故障试验,分别用色谱法分离不同油样、不同温度热故障下,油中溶解气体,得到气体(除 CO 和 CO<sub>2</sub> 外)百分含量与热故障温度的对应关系,如图 4 所示。图中植物绝缘油在被试热故障温度区间内百分含量相对较多的油中溶解气体同 300 °C 以下温度区间内热故障试验所得结果基本一致,如图 2 所示。不同的是山茶籽绝缘油中 CH<sub>4</sub> 百分含量明显增多,其含量随温度升高已接近 H<sub>2</sub> 的对应值。矿物绝缘油在被试热故障温度区间百分含量最多的 2 种气体分别为 CH<sub>4</sub> 及 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>,同 300 °C 以下温度区间内热故障试验所得结果存在差异。随热故障试验温度升高,矿物绝缘油中 CH<sub>4</sub> 百分含量呈下降趋势,C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 总体呈上升趋势。另外,矿物绝缘油在 700~800 °C 热故障试验中分解产生了少量 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体,说明热故障能量的提高加速了植物绝缘油与矿物绝缘油相应组分的分解,产生对应的热故障特征气体。

油纸绝缘在 300~800 °C 热故障模拟试验中,不同种类绝缘油中溶解气体百分含量与温度的对应关系如图 5 所示。与图 4 试验数据对比可得,山茶籽绝缘油含纸情况下 H<sub>2</sub> 的百分含量明显提高,与 300 °C 以下温度区间内热故障试验所得规律一致;油纸绝缘情况下 FR3 绝缘油在 300~700 °C 热故障中 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 百分含量进一步增加,而在热故障温度达到 800 °C 时,C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 含量有所增长;矿物绝缘油含纸情况下,总体 CH<sub>4</sub> 百分含量降低而 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 百分含量升高;在 300~400 °C 热故障试验中,矿物绝缘油含纸情况下油中溶解的 H<sub>2</sub> 含量亦有所增加,结合 300 °C 以下温度区间内热故障试验所得结果,可以得出 200~400 °C 热故障中矿物绝缘油中浸纸时更易分解产生 H<sub>2</sub>。另外,油中含纸情况下矿物绝缘油在 600 °C 热故障中有少量 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 产生,这一现象与油浸绝缘纸的分解有关。

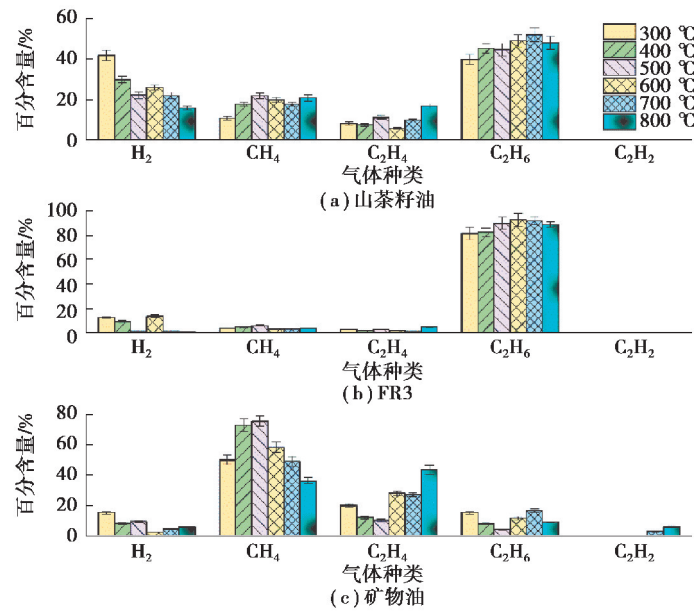


图 4 300 °C 以上热故障不同油中溶解气体百分含量对比

Fig. 4 Percentage content of dissolved gases in various oils under thermal faults above 300 °C

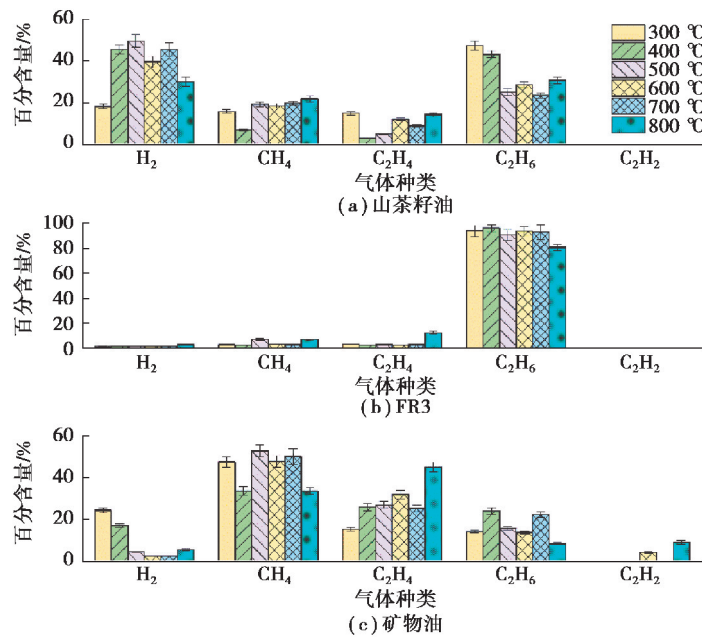


图 5 300 °C 以上热故障不同油纸混合绝缘油中溶解气体百分含量对比

Fig. 5 Percentage content of dissolved gases in various oils for paper-oil insulation under thermal faults above 300 °C

表 4 列出了 3 种绝缘油及相应油纸绝缘在 400 °C 及 700 °C 热故障时的 CO、CO<sub>2</sub> 含量。与表 3 试验数据不同的是,表 4 中各油样在油中浸纸情况下,其 CO 含量并无显著增长,甚至出现明显下降,同时,油中浸纸时 CO<sub>2</sub> 含量的增长幅度也不及 300 °C 以下热故障试验结果明显,说明随热故障试验温度的升高油浸绝缘纸中 CO、CO<sub>2</sub> 的析出呈现一定的饱和趋势。

表 4 300 °C 以上热故障油中溶解 CO 和 CO<sub>2</sub> 含量  
Table 4 Contents of CO and CO<sub>2</sub> dissolved in oils under thermal faults above 300 °C

绝缘形式	绝缘油类型	热故障温度/°C	CO/×10 <sup>-6</sup>	CO <sub>2</sub> /×10 <sup>-6</sup>
油	山茶籽油	400	74.64	2 664.4
		700	1854.30	10 517.3
	FR3	400	434.60	2 430.7
		700	1553.30	8 945.1
	矿物油	400	250.80	2 038.8
		700	1797.90	9 845.1
油纸绝缘	山茶籽油	400	160.20	3 628.4
		700	1792.40	12 481.1
	FR3	400	171.50	3 536.2
		700	1487.30	21 527.1
	矿物油	400	190.30	3 160.1
		700	327.90	43 957.3

从实验数据的分散性来看,文中使用气相色谱法分析热故障油中溶解气体的成分及含量,经多次测量得到每组数据的平均值及标准差,由图 2~图 5 的试验结果可知,各个数据点的偏差程度均在±10%以内,数据的分散性在合理范围内。

### 3 结 论

文中模拟不同种类植物绝缘油与矿物绝缘油变压器热故障试验,采用色谱法分析了低温(300 °C 以下)与中、高温(300 °C 以上)热故障下油中溶解气体成分及其含量,分析了植物绝缘油与矿物绝缘油在不同温度热故障下油中溶解气体的差异性。

1) 在 90~800 °C 热故障下,山茶籽绝缘油(纸)中溶解特征气体为 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 及 H<sub>2</sub>,中、高温(300 °C 以上)热故障可参考 CH<sub>4</sub> 含量变化;FR3 绝缘油(纸)中溶解特征气体为 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>,H<sub>2</sub> 与 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 在判断其热故障状态时具有参考意义;矿物绝缘油(纸)在低温(300 °C 以下)热故障下油中溶解特征气体为 H<sub>2</sub> 及 CH<sub>4</sub>,在中、高温(300 °C 以上)热故障下油中溶解特征气体为 CH<sub>4</sub> 及 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>,C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 及 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 在判断其热故障状态时可作为参考。

2) 植物绝缘油与矿物绝缘油以及不同种类植物绝缘油之间热故障油中溶解气体及其含量存在一定差异性,运用 DGA 手段分析及预判变压器热故障时需要结合不同的绝缘油类型及产气特性,必要时辅助特定的试验进行。

对不同种类绝缘油热故障下油中溶解气体的分析需要后续故障诊断方法的进一步研究及细化方能运用于实际变压器的故障预判中。

#### 参考文献:

- [1] Munajad A, Subroto C, Suwarno. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy analysis of transformer paper in mineral oil-paper composite insulation under accelerated thermal aging[J]. Energies, 2018, 11(2): 364.
- [2] Mehta D M, Kundu P, Chowdhury A, et al. A review on critical evaluation of natural ester vis-a-vis mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part 1[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 873-880.
- [3] Faria H Jr, Costa J G S, Olivas J L M. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 46: 201-209.

- [4] Lakehal A, Ghemari Z, Saad S. Transformer fault diagnosis using dissolved gas analysis technology and Bayesian networks[C/OL]. 2015 4th International Conference on Systems and Control (ICSC). New York, USA: IEEE, 2015 [2019-09-25]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7152759>.
- [5] Sun H C, Huang Y C, Huang C M. A review of dissolved gas analysis in power transformers[J]. Energy Procedia, 2012, 14: 1220-1225.
- [6] Cennamo N, Maria L, D'Agostino G, et al. Monitoring of low levels of furfural in power transformer oil with a sensor system based on a POF-MIP platform[J]. Sensors, 2015, 15(4): 8499-8511.
- [7] Chen W G, Gu Z L, Zou J X, et al. Analysis of furfural dissolved in transformer oil based on confocal laser Raman spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 915-921.
- [8] Somekawa T, Fujita M, Izawa Y, et al. Furfural analysis in transformer oils using laser Raman spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 229-231.
- [9] Lin Y D, Yang L J, Liao R J, et al. Effect of oil replacement on furfural analysis and aging assessment of power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2611-2619.
- [10] Yang L J, Lin Y D, Liao R J, et al. Effects of temperature and aging on furfural partitioning in the oil-paper system of power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1393-1401.
- [11] Munajad A, Subroto C, Suwarno. Study on the effects of thermal aging on insulating paper for high voltage transformer composite with natural ester from palm oil using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS)[J]. Energies, 2017, 10(11): 1857.
- [12] Wang W, Yue C P, Gu J F, et al. Status assessment of polymeric materials in mineral oil under electro-thermal aging by frequency-domain dielectric spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 831-841.
- [13] Zou J X, Chen W G, Wan F, et al. Raman spectral characteristics of oil-paper insulation and its application to ageing stage assessment of oil-immersed transformers[J]. Energies, 2016, 9(11): 946.
- [14] Liao R J, Liu J F, Yang L J, et al. Quantitative analysis of insulation condition of oil-paper insulation based on frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 322-334.
- [15] Rafiq M, Lv Y Z, Zhou Y, et al. Use of vegetable oils as transformer oils—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 308-324.
- [16] Ab Ghani S, Muhamad N A, Noorden Z A, et al. Methods for improving the workability of natural ester insulating oils in power transformer applications: A review[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 163: 655-667.
- [17] Mehta D M, Kundu P, Chowdhury A, et al. A review of critical evaluation of natural ester vis-a-vis mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part II[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1705-1712.
- [18] Bandara K, Ekanayake C, Saha T P, et al. Performance of natural ester as a transformer oil in moisture-rich environments[J]. Energies, 2016, 9(4): 258.
- [19] Fernández I, Delgado F, Ortiz F, et al. Thermal degradation assessment of Kraft paper in power transformers insulated with natural esters[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 104: 129-138.
- [20] Abdelmalik A A. Analysis of thermally aged insulation paper in a natural ester-based dielectric fluid[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2408-2414.
- [21] Budrugaec P, Lingvay I, Pica A, et al. Study regarding the behaviour of an insulating vegetable oil exposed to accelerated thermal aging[J]. Revista De Chimie, 2017, 68(11): 2514-2518.
- [22] Cargill. Envirotemp FR3 fluid formulated for performance[Z/OL]. [2019-12-22]. <https://www.cargill.com/doc/1432076501275/envirotemp-fr3-brochure.pdf>.
- [23] Mineral oil-impregnated electrical equipment in service-Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis; DIN EN 60599-2008[S/OL]. BSI British Standards. [2019-09-25]. <https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Undated>.