

0826703

5053

5604



变压器油中气体 分析与诊断

操 敦 奎 编著

中国水利电力企业管理协会
武汉电力企业管理协会

b ianyaqi
youzhongqiti
fenxi
yuzhenduan



3

4

变压器油中气体分析与诊断

湖北省电力试验研究所 操敦奎 编著

一九八七年十月

责任编辑：钱增甫
李惠临

封面设计：祝朝宇

变 压 器 油 中 气 体 分 析 与 诊 断

(内部资料, 不准翻印)

编辑：中国水利电力企业管理协会
武汉电力企业管理协会

地址：汉口利济北路 126 号

湖北新生报印刷厂印

3.85

内 容 提 要

本书从理论到实践系统地对变压器油/纸绝缘材料的化学组成和分解产气机理以及气体在油中的举动；气相色谱分析的基本知识和仪器使用维护；充油电气设备油中溶解气体分析的方法和设备内部状况的诊断方法等均作了介绍。

作者提出的利用油中溶解气体分析诊断充油电气设备内部故障的一整套检测、追踪、诊断、处理的方法（包括改良电液法和某些定量判断公式及经验数据）在该项检测技术领域取得了新的进展，并且编制了计算机定量分析计算和诊断程序。

本书内容丰富，切合实际，叙述条理清楚，深入浅出。适合于电力部门从事油中气体分析、电气运行、检修、试验的技术人员和工人，充油电气设备制造厂家和工矿企业动力部门的有关人员学习和参考，也可供大专院校的有关专业作教学参考资料。

前 言

利用气相色谱法分析绝缘油中溶解气体，检测充油电气设备内部早期故障，已成为变压器等充油电气设备绝缘监督的一个重要手段。实践证明，这项检测技术的开发和应用，使变压器等充油电气设备内部故障的检测技术取得了新的突破，特别是这一检测技术可以在设备不停电时进行，而且不受外界电的因素影响，因此可以定期地在设备运行中对其内部状况进行诊断，确保设备的安全可靠运行，并且有利于实现将设备的定期维修方式改革成内部状态预知维修的方式。在实践中已充分显示了这项检测技术的重大经济效益。

我国六十年代中期就开展了这项检测技术的研究，并且取得了初步成果。自七十年代以来，这一检测技术得到了推广和发展。水电部已颁发了SD187—86《变压器油中溶解气体分析和判断导则》，有关国家标准亦即将颁布。目前，全国各电力部门和一些充油电气设备制造厂家都开展了这一检测工作，从事这方面工作的人员和使用的检测仪器之多，可以说是居于世界首位的。十多年来，国内利用油中溶解气体分析技术对充油电气设备，特别是电力变压器内部早期故障的诊

断，积累了很丰富的经验，并且发表了不少有价值的论文。

但是，到目前为止，尚没有一本较全面、系统、深入地介绍这方面内容的书籍出版，甚至一些大专院校的有关专业的教材中也很少包括这方面的内容，使得从事变压器油中溶解气体分析和绝缘监督工作的技术人员一直缺乏这方面的学习和参考资料。本书就是为适应这种需要而编写的。

本书从理论到实践较系统地介绍了变压器油/纸绝缘材料的化学组成和分解产生气体的机理以及气体在变压器油中的举动；从实用性出发简述了气相色谱法的基本知识和仪器的使用维护；围绕SD187—86导则的要求，介绍了油中溶解气体分析的方法，即取样、脱气、分析和数据处理等有关内容。最后系统地分析介绍了变压器油中溶解气体分析的诊断技术，包括有无故障的判定，故障类型、状态和严重性的诊断以及综合诊断和故障处理措施等。书中提出的利用油中溶解气体分析诊断充油电气设备内部故障的一整套检测、追踪、诊断、处理的方法，包括改良电协研法和某些定量判断公式和经验数据，是该项检测技术的新进展。这将使该项检测技术的有效性和可靠性得到进一步的提高。

本书对新的技术和动态给予了注意，并且编制了包括油中溶解气体分析定量计算和诊断设备内部是否存在故障，故障类型以及故障源的温度、能量、油中气体饱和水平及其达到气体继电器动作所需时间的估算等内容的计算机程序。

本书不仅对初学该项检测技术的人员提供了一本内容较全面的学习资料，而且对已从事这方面工作的技术人员，电力系统中的电气运行、检修和试验工作方面的技术人员，变

压器、互感器、套管制造厂家的质检技术人员以及工矿企业动力部门的有关技术人员,也是一本可供学习和参考的资料,并且也可作为大专院校有关专业的教学参考资料。

本书在编写过程中,承蒙蒋德福教授,黄齐嵩付教授,李荫材高级工程师,贾瑞君和许维宗工程师等的不吝赐教,并得到了杨莉等许多现场工作同志的大力协助,在此谨致衷心的感谢!

由于本人水平有限,经验不足,加之时间匆促,书中谬误之处定然不少,敬请读者批评指正。

作 者

1986年12月

目 录

第一章 变压器油中溶解气体分析的原理

§ 1—1	概述	(1)
§ 1—2	变压器绝缘材料的化学组成	(5)
§ 1—3	油纸绝缘材料热分解产气的 模拟试验结果	(10)
§ 1—4	油纸绝缘材料分解产气的机理	(16)
§ 1—5	绝缘油分解产气的热力学研究结果	(20)
§ 1—6	气体在绝缘油中的溶解	(23)
§ 1—7	气体在变压器中的扩散、吸附和损失	(29)
§ 1—8	正常变压器油中气体的含量	(33)
§ 1—9	少油设备油中溶解气体的含量	(39)
§ 1—10	变压器内部故障类型与油中 气体含量的关系	(47)

第二章 气相色谱法的一般知识

§ 2—1	色谱分析的原理	(51)
-------	---------	--------

§ 2—2	气相色谱仪的基本流程·····	(54)
§ 2—3	固定相的一般知识·····	(59)
§ 2—4	鉴定器简介·····	(71)
§ 2—5	色谱理论和操作条件的选择·····	(88)
§ 2—6	定性定量方法·····	(98)

第三章 油中溶解气体分析方法

§ 3—1	分析的气体对象·····	(105)
§ 3—2	适用气相色谱仪及其流程·····	(109)
§ 3—3	油中气体分析·····	(113)
§ 3—4	取样·····	(117)
§ 3—5	从油中脱出溶解气体·····	(128)
§ 3—6	脱气率的测定·····	(135)
§ 3—7	利用气相色谱仪进行气体分析·····	(141)
§ 3—8	数据处理·····	(143)
§ 3—9	油中溶解气体分析自动化的动向·····	(148)

第四章 设备故障诊断技术

§ 4—1	故障诊断步骤·····	(151)
§ 4—2	有无故障的判定·····	(153)
§ 4—3	故障严重性诊断·····	(155)
§ 4—4	故障类型诊断·····	(160)
§ 4—5	故障状况诊断·····	(170)
§ 4—6	测定油中总气量和氧气含量对 故障诊断的作用·····	(182)

§ 4—7	气体继电器动作原因的判别·····	(184)
§ 4—8	固体绝缘材料热分解判断·····	(190)
§ 4—9	防止少油设备爆炸的有关问题·····	(196)
§ 4—10	综合诊断和故障处理措施·····	(202)
§ 4—11	油中气体定量计算和故障诊断程序·····	(208)
§ 4—12	诊断时的注意事项·····	(222)
§ 4—13	故障诊断实例·····	(229)

附录一、国内外有关诊断方法汇集·····	(237)
----------------------	---------

附录二、充油电气设备故障原因统计·····	(251)
-----------------------	---------

附录三、设备档案卡片格式·····	(258)
-------------------	---------

附录四、气相色谱仪维护和检修·····	(260)
---------------------	---------

1、仪器的使用维修·····	(260)
2、仪器故障检查及排除·····	(265)
3、部分异常基线的分析·····	(273)

第一章 变压器油中溶解气体 分析的原理

§ 1 — 1 概 述

早期预测变压器等充油电气设备内部故障，对于安全供电，防止事故于未然，是极为重要的。作为绝缘监督的手段，过去国内外广泛采用直流泄漏、绝缘电阻、介损测量、交流耐压和局部放电测量等电气绝缘特性试验。但是，这些试验的共同缺点是要要求被试设备停运，很难测出事故发生前的极小的内部故障。虽然局部放电试验是检出绝缘局部缺陷的较好的方法，但往往受外部干扰，影响检测的准确性。正因如此，人们才把这种早期故障称为潜伏性故障。

众所周知，在正常情况下，充油电气设备内的油/纸绝缘材料，在热和电的作用下，会逐渐老化和分解，产生少量的各种低分子烃类及二氧化碳、一氧化碳等。若存在潜伏性过热或放电故障时，就会加快这些气体的产生速度。当产气速度慢，产气量小时，气体大部分溶于油中。随着故障的发展，产气量大于溶解量时，便有一部分气体以自由气体的形态释放出来。

大家知道，1921年发明并普遍应用于保护变压器的

巴克霍尔茨继电器，即气体继电器，就是基于热分解气体释放的原理而设计的。但是，只有故障相当严重或存在时间相当长，释放的气量相当多时，气体继电器才可能报警或动作。这时如以点燃气体继电器内部积存的自由气体的方法来判别是否发生了故障，也是极不可靠的，因为气体继电器中，只有可燃性气体成分达20%（有人试验气体继电器内的CO达12.5%， H_2 达4.1%， C_2H_2 达2.3%）左右时，才可点燃。所以气体继电器中积存的气体，即令不燃，也不能判定设备无内部故障。虽然也可以按表1—1所示的根据气体颜色来定性判别故障，但灵敏度也很低。

因此，人们曾采用奥氏气体分析法，试图分析气体继电器内主要气体成分。但因该方法操作复杂，分析速度慢，精度较低，早已很少采用。1939年西德通用电气公司(AEG)开始使用试剂法，即用一只或几只装有对某种可燃性气体成分分别显示色变的特定试剂的玻璃管，连接到气体继电器的放气阀上，当气体通过玻璃管时，若某试剂的颜色改变，即可知其中含有某种可燃性气体成分。此方法简便，直至五十年代初，英国还对其加以改进，推广应用。但因它只能定性分析少数几种可燃性气体，如氢、乙炔、一氧化碳等，加之应用中还有其它缺点，所以应用受到限制。

美国曾先后使用过分光计、气体分离分析器等来分析这些气体，但是，这类方法分析时间长，操作不易。六十年代初，美国使用可燃性气体总量(TCG)检测装置来测定变压器储油柜油面上的气体。此装置只能测定TCG。针对此局限性，欧美各国相继使用质谱仪对变压器内自由气体进行组

分分析。尽管质谱仪对低分子烃类、一氧化碳、二氧化碳和氢气等的分析获得了较好的效果，但质谱仪价格昂贵，操作复杂。因此，日本等国研究使用气相色谱仪来分析气体，并在分析油面自由气体的同时，基于设备内部潜伏性故障阶段，

表 1—1 根据产生气体的颜色判别故障

气体颜色类别	故障判别
灰 色	油的分解（油中电弧）
黄 色	木支撑等木材的损伤
白 色	绝缘纸的损伤

分解气体大部分溶于油中的原理，亦分析油中溶解气体，以便更有利于发现内部早期故障。

油中溶解气体分析，包括从变压器中取出油样，再从油中取出溶解气体，用气相色谱法分析该气体的成分和含量，判定设备有无内部故障，诊断其故障类型，并推定故障点的温度、故障能量等。这一方法亦称为油中溶解气体分析诊断技术。

目前，除取油样至实验室分析之外，各国还陆续开发了油中氢气在线连续监视装置。日本还研制出现场油中气体六组分（ H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 CO 、 CO_2 ）检测装置，并正在推广应用。

我国于六十年代中期对变压器油中溶解气体分析进行了研究，并取得了一定的成绩。七十年代初，开始将气相色谱法应用于变压器潜伏性故障检测中，迄今为止，已广泛推广应用。油中氢气监测装置亦研制成功，并投入在线监测。采用示色灵敏度较高的试剂，银氨络合物—— $Ag(NH_3)_2NO_3$ ，

和硝酸银溶液的GQJ—1型故障气体检测装置亦在变压器在线监测中开始应用。该装置检测结果的判断如表1—2所示。

表1—2

第1支试管中硝酸银溶液的反应	第2支试管中银氨络合物溶液的反应	气体的主要成份	出现气体可能的原因	做进一步检查和试验
不变色	灰褐色沉淀	一氧化碳	固体绝缘材料热老化或介损劣化	1、取油样进一步采用气相色谱法分析油中溶解气体组成。
乳白沉淀	乳白沉淀	乙炔	油击穿导致油热分解	2、检查绝缘电阻。
乳白沉淀	黄色随后是灰褐色沉淀	乙炔、一氧化碳、碳	油击穿、绕组闪络、绝缘碳化。	3、作短路试验。 4、作空载试验。
不变色	不变色	空气	由于油温变化或其它原因使油中析出空气	1、在有隔膜保护和充氮保护时应检查有关设备。 2、检查油泵和气体继电器和储油柜等。

实践表明，油中溶解气体分析技术对保证电力系统安全可靠运行有一定的作用。且分析方法简单，速度快。因此，

十余年来，该方法应用广泛，已累积了许多实践经验，特别是在改进取样、脱气和分析技术的同时，在诊断方法方面亦取得了很大的进展。

§ 1—2 变压器绝缘材料的化学组成

充油变压器的绝缘材料主要是油浸纸。绝缘油是由天然石油经过蒸馏、精炼而获得的一种矿物油。它是由各种碳氢化合物所组成的混合物。碳、氢两元素占其全部重量的95~99%，其它为硫、氮、氧及极少量金属元素等。石油基碳氢化合物有烷烃、环烷烃、芳香烃和烯烃等。

1. 烷烃

大家知道，物质原子以化学键联系构成分子，造成物质差别的主要因素是化学键及其键合方式。

烷烃分子的碳原子之间以单键结合，其余的价键都与氢结合，是饱和烃，同系物的化学通式为 C_nH_{2n+2} （ n 为大于1的正整数）。分子中碳原子连成直链状的烷烃叫正构烷烃，直链上带支链的叫异构烷烃。最简单的烷烃是 CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_4H_{10} 等。

常温下， $C_1 \sim C_4$ 烷烃是气体； $C_5 \sim C_{17}$ 烷烃是液体，十八烷烃是固体。固体烷烃也叫做石蜡。

烷烃的化学性质最不活泼。但是，在高温或催化剂作用下，可以被氧气氧化，发生断链。在无氧且加热到 $400^\circ C$ 以上时，烷烃分子将断裂，亦称烷烃裂化。裂化将生成小分子烷烃和烯烃。烷烃在无氧且加热至 $700^\circ C$ 以上时，会发

生深度裂化或称“裂解”，其主要产物是低分子烯烃。所以说，在绝缘油的烃类中，烷烃的热稳定性是最差的。烷烃的抗氧化安定性比环烷烃差，但对抗氧化剂的感受性较好，它仍是作为绝缘油的良好成分。

2. 环烷烃

环烷烃是碳原子以单键连成环状，其余价键与氢原子相结合的化合物。其化学通式为 C_nH_{2n} ($n > 3$)。三员和四员环烷烃的化学性质比较活泼，五员以上的环烷烃的性质与烷烃相似，比较稳定。但是，它在高温、催化剂作用下，也可被氧气氧化，生成醇、酸类产物，不过比烷烃要难些。所以说环烷烃的热稳定性比烷烃优越。

环烷烃存在于绝缘油中能使该油具有良好的介电性能及抗氧化安定性。并且，它对抗氧化剂也有良好的感受性。

3. 芳香烃

芳香烃分子中都含有苯环。苯是芳香烃中最基本的化合物。芳香烃依分子中所含苯环的数目而分为单环和多环两大类。单环芳香烃包括苯及苯的同系物等。多环芳香烃有苯环之间以一单键相连的联苯类；以苯环取代了脂肪烃分子中的氢原子的多苯代脂肪烃类；以及两个或两个以上苯环彼此共用两个相邻碳原子连接起来的稠环芳香烃类等。

芳香烃比烷烃和环烷烃的化学性质都活泼些。在一定条件下，芳香烃加氢可生成相应的环烷烃。多环芳香烃易被氧化生成酸及胶状物等。芳香烃的苯环在 1000°C 以上时才可开环分解，其热稳定性最好。它在绝缘油中起天然抗氧化剂的作用，有利于改善油的抗氧化安定性与介电稳定性，并具有

吸气性能,对改善绝缘油的析气性有重要作用。但是,油中芳香烃成分太多时,将使油的安定性差,因此,使绝缘油氧化最少且无析气性的芳香烃含量即为最佳含量。

4. 烯烃

石油原油中几乎没有烯烃,但它在石油高温裂解中会大量产生。烯烃的特征是分子中含有碳碳双键 $C=C$,是一种不饱和烃。其化学通式为 C_nH_{2n} 。最简单的烯烃是 C_2H_4 、 C_3H_6 等。

常温下, $C_2 \sim C_4$ 烯烃是气体, C_5 以上是液体,高分子烯烃是固体。烯烃化学性质活泼,可与多种物质发生反应。

此外,绝缘油中一般不含炔烃,但在电弧作用下,油的分解产物中会有低分子炔烃,如乙炔烃。炔烃的化学通式为 C_nH_{2n-2} ,它的碳碳之间存在叁键 $C \equiv C$,也是不饱和烃,

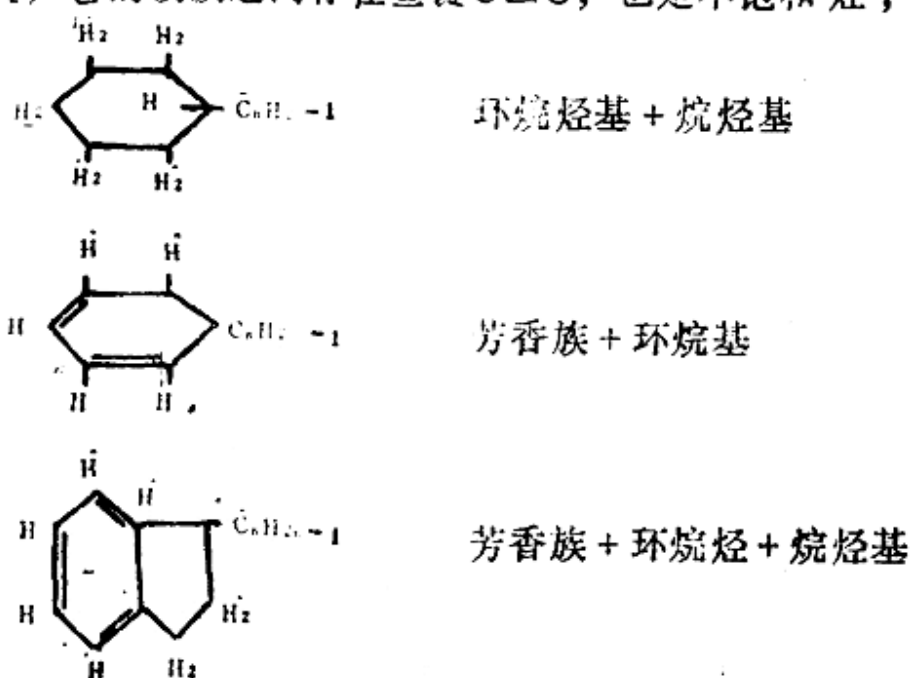


图 1-1 碳氢化合物结合的实例