

电网设备状态检测技术培训教材



油中溶解气体分析

国网技术学院 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电网设备状态检测技术培训教材



油中溶解气体分析

国网技术学院 编



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为切实提高电网设备状态检测人员技术水平,确保状态检测人员技术集中培训工作规范、有序实施,国家电网公司组织编写了《电网设备状态检测技术培训教材》丛书。丛书目前有六个分册,本分册为《油中溶解气体分析》。

本分册主要包括油中溶解气体分析原理、油中溶解气体样品采集、绝缘油中溶解气体分析、充油电气设备内部故障诊断技术。附录包括练习题库、作业指导书、实际操作考核、试验报告和变电站(发电厂)第二种工作票。

本书可供电力工程技术人员和管理人员学习及培训使用,也可作为电力职业院校教学及新入职员工培训的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

油中溶解气体分析 / 国网技术学院编. —北京: 中国电力出版社, 2015. 5

电网设备状态检测技术培训教材

ISBN 978-7-5123-7566-6

I. ①油… II. ①国… III. ①变压器油-溶解气体-气体分析-技术培训-教材 IV. ①TE626. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 072830 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 5 月第一版 2015 年 5 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 6.25 印张 97 千字

印数 0001—6000 册 定价 20.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《电网设备状态检测技术培训教材》

编 审 人 员

吕 军 彭 江 冀肖彤 张祥全 周新风

杨本渤 徐玲玲 闫春雨 焦 飞 程 序

杨 柳 杨 健 陈威斋 张 鑫 赵义术

马志广 战 杰 牛 林

《油中溶解气体分析》 分册

编 写 人 员

主 编 李艳萍 (国网技术学院)

副 主 编 赵 利 (国网山东电力集团公司)

编写人员 马江泓 (国网新疆电力公司)

侯 冰 (国网新疆电力公司)

刘新宇 (国网新疆电力公司)

赵 举 (国网新疆电力公司)

程 林 (国网电力科学研究院)

张洪波 (河南中分仪器股份有限公司)

刘兴华 (国网山东电力集团公司)

高 鹏 (国网山东电力集团公司)

张 彦 (国网技术学院)

马梦朝 (国网技术学院)

鲁国涛 (国网技术学院)

崔金涛 (国网技术学院)

黄金鑫 (国网技术学院)

方建筠 (国网技术学院)



前言

近年来,国家电网公司大力推行电网设备状态检测技术,为切实提高电网设备状态检测人员技术水平,确保状态检测工作规范、扎实、有效开展,公司先后于2013年和2014年委托国网技术学院组织开展了状态检测人员技术集中培训并积累了一定经验。为确保后续培训工作规范、有序实施,国家电网公司组织专家编写了《电网设备状态检测技术培训教材》丛书。

本丛书编写坚持系统、精炼、实用、配套的原则,整体规划,统一协调,分步实施。目前已完成《红外热像检测》《电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量》《开关柜暂态地电压与超声波局部放电检测》《GIS特高频与超声波局部放电检测》《油中溶解气体分析》和《SF₆气体检测》六个分册,每个分册主要由学习任务、练习题库、作业指导书、技能操作考核、检测报告、变电站(发电厂)第二种工作票组成。

本丛书是在国网技术学院两年集中培训试用基础上经过修改完善形成的任务导向型培训教材,也是国家电网公司各单位状态检测技术研究及应用成果的结晶。本丛书可供电力工程技术人员和管理人员学习及培训使用,也可作为电力职业院校教学及新入职员工培训的参考资料。

由于时间仓促,书中疏漏之处在所难免,望广大读者批评指正。

编者

2015年4月



目 录

前言

任务一

油中溶解气体分析原理	/ 1
一、绝缘材料的裂解产气原理	/ 2
二、充油高压设备的故障气体特征	/ 4
三、油中溶解气体分析方法原理	/ 4

任务二

油中溶解气体样品采集	/ 8
一、取样容器的准备工作	/ 8
二、现场取样	/ 9
三、油样保存和运输	/ 11
四、注意事项	/ 11

任务三

绝缘油中溶解气体分析	/ 13
一、样品的脱气处理	/ 13
二、油中溶解气体的分析（气相色谱法）	/ 16
三、油中溶解气体分析（光声光谱法）	/ 18
四、变压器油中溶解气体分析在线监测	/ 24

任务四

充油电气设备内部故障诊断技术 / 28

一、充油电气设备故障诊断步骤 / 28

二、充油电气设备有无故障的判断 / 29

三、故障类型判断 / 33

四、故障程度诊断 / 40

五、典型案例分析 / 45

附录 A 油中溶解气体分析题库 / 52

附录 B 油中溶解气体分析作业指导书 / 65

附录 C 油中溶解气体分析实际操作考核 / 79

附录 D 油中溶解气体分析试验报告 / 84

附录 E 变电站（发电厂）第二种工作票 / 86

参考文献 / 89



● **学习情境描述** 本学习情境为充油电气设备油中溶解气体分析学习,利用气相色谱法或光声光谱法对油中溶解气体进行检测,通过分析油中溶解气体含量,对充油电气设备故障进行判断和评价。

● **教学目标** 了解充油电气设备内部绝缘材料的产气机理,熟悉气相色谱法及光声光谱法的原理及在油中溶解气体分析中的应用,掌握现场样品的采集和处理措施,熟练掌握油中溶解气体的检测方法及充油电气设备内部故障诊断技术。

● **教学环境** 多媒体教室,相关音像资料,油中溶解气体分析实训室。

任务一 油中溶解气体分析原理

教学目标 通过本任务的学习,掌握充油电气设备绝缘油中溶解气体分析的目的、产气原因、故障特征气体分析的方法原理。

任务描述 本任务为充油电气设备绝缘油中溶解气体分析的基础知识。

任务准备 预习充油电气设备的基础知识,油中溶解气体分析的相关标准。

任务实施 系统学习充油电气设备绝缘油中溶解气体分析的原理,通过讲解熟悉绝缘油中溶解气体产生的原理、故障气体特征、检测原理及分析方法。学员参照相关标准和资料理解、熟悉油中溶解气体分析原理。

相关知识 GB/T 7597—2007《电力用油(变压器油、汽轮机油)取样方法》、GB/T 17623—1998《绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法》、DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》、IEC 567—1992《从充



油电气设备取气样和油样及分析游离气体和溶解气体的导则》、IEC 60599—2007《运行中矿物油浸电气设备溶解气体和游离气体分析的解释导则》，《变压器油色谱分析与故障诊断》，操敦奎，中国电力出版社，2010.4。

油中溶解气体分析技术是基于色谱法的发展。色谱法是 1903 年由俄国植物学家米哈伊尔·茨维特创立的，至今虽仅有半个多世纪的历史，由于其具有分离效能高、分析速度快、定量结果准、易于自动化等特点，已经成为举世公认的重要近代分析手段之一。

我国油中溶解气体的分析始于 20 世纪 60 年代，油中溶解气体的分析一般不需要设备停电，而且对发现电力充油设备内部故障的早期诊断非常灵敏、有效，为目前设备状态检修提供了可靠依据。目前，按照工作原理分为气相色谱法、光声光谱法、红外光谱法。其使用装置可分为实验室色谱仪、便携式色谱仪和色谱在线检测装置。

一、绝缘材料的裂解产气原理

油中溶解气体的分析适用于充有矿物绝缘油和以纸或层压纸板为绝缘材料的电气设备，其中包括变压器、电抗器、电流互感器、电压互感器和油纸套管等；主要监测对判断充油电气设备内部故障有价值的气体，即氢气（ H_2 ）、甲烷（ CH_4 ）、乙烷（ C_2H_6 ）、乙烯（ C_2H_4 ）、乙炔（ C_2H_2 ）、一氧化碳（CO）、二氧化碳（ CO_2 ）。定义总烃为烃类气体含量的总和，即甲烷、乙烷、乙烯和乙炔含量的总和。

充油电气设备所用材料包括绝缘材料、导体（金属）材料两大类。绝缘材料主要是绝缘油、绝缘纸、树脂及绝缘漆等；金属材料主要是铜、铝、硅钢片等材料。故障下产生的气体也主要是来源于纸和油的热裂解。

1 绝缘油的热裂解产气

绝缘油是由天然石油精炼而获得的矿物油，其化学成分主要是由碳、氢两个元素所结合成的碳氢化合物，即烃类，其主要组成是烷烃、环烷烃和芳香烃。绝缘油在化学结构上，原子间的化学键一般有四种，即 C—H、C—C、C—O、H—O 等。其中碳与碳的化学键又分为三种，即单键（C—C）、双键（C=C）键和三键（C≡C），分别叫做烷键、烯键和炔键，烯键和炔键都属于不饱和键。这些化学键都具有不同的键能如表 1-1 所示。

表 1-1

有关键能的数值

kJ/mol

化学键	键能	化学键	键能
H—H	104.2	C≡C	194
C—H	94~102	C—O	84
C—C	71~97	C=O	174
C=C	147	H—O	110.6

从表 1-1 可以看出,不同化学键具有不同的键能数值,说明了要想使不同的碳键断裂或烃类化合物脱氢,所需要的能量是不同的,变压器等充油设备在正常运行条件下,产生的热量是不足以使碳键断裂或烃类化合物脱氢的,当设备内部存在某些故障时,产生的能量会使烃类化合物的键断裂,产生低分子烃类或氢气,所产生的烃类气体的不饱和程度随裂解能量密度(温度)的增加而增加,即低温下的热解气以饱和烃为主,高温下的热解以烯烃、炔烃为主,故障气体的产生和故障温度的关系见图 1-1。随着热解温度升高的过程,热解气各组分出现的顺序是:烷烃—烯烃—炔烃。这是由 C—C、C=C、C≡C 化学键具有不同的键能所决定的,因此可以说分子结构是决定故障产气特征的本质原因。

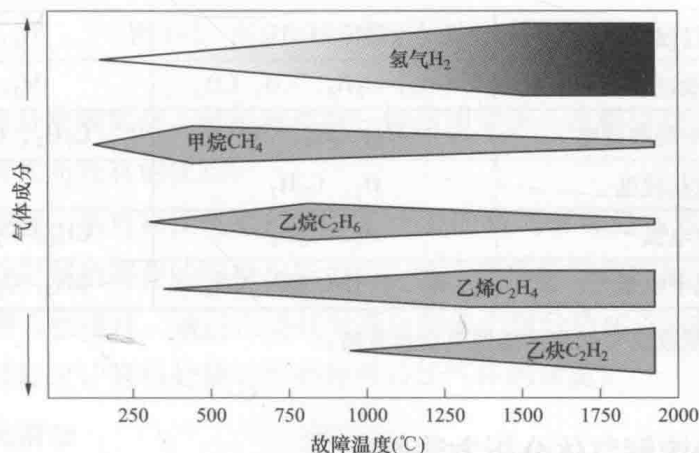


图 1-1 故障气体的产生和故障温度的关系

2 固体绝缘材料的裂化产气

绝缘纸主要成分是纤维素,其分子结构式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 。绝缘纸热解的有效温度高于 105°C ,完全裂解和碳化高于 300°C ,但如果延长加热时间或存在某

些催化剂时，则在 150~200℃ 也会产生热分解。绝缘纸在分解时，因分子链反应在生成水的同时，生成大量的 CO、CO₂ 和少量的低分子烃类气体。绝缘纸热解气体主要是 CO₂，随着温度升高，开始出现 CO，继而 CO/CO₂ 的比值不断上升，至 800℃ 时，CO/CO₂ 的比值达到 2.5，而且伴随出现少量的甲烷、乙烯等烃类气体。

绝缘纸老化的另一个特征就是糠醛含量增高，根据糠醛的浓度便可推算出纤维绝缘材料的老化程度。

二、充油高压设备的故障气体特征

绝缘油里分解出的气体形成气泡，在油里经对流、扩散不断地溶解在油中。这些故障气体的组成和含量与故障的类型及其严重程度有密切关系。因此，分析溶解于油中的气体就能尽早发现设备内部存在的潜伏性故障，并可随时监视故障的发展状况。

不同的故障类型产生的主要气体组成和次要气体组成可归纳为表 1-2。

表 1-2 不同故障类型产生的主要气体和次要气体

故障类型	主要气体组成	次要气体组成
油过热	CH ₄ , C ₂ H ₄	H ₂ , C ₂ H ₆
油和纸过热	CH ₄ , C ₂ H ₄ , CO, CO ₂	H ₂ , C ₂ H ₆
油纸绝缘中局部放电	H ₂ , CH ₄ , CO	C ₂ H ₂ , C ₂ H ₆ , CO ₂
油中火花放电	H ₂ , C ₂ H ₂	
油中电弧	H ₂ , C ₂ H ₂	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆
油和纸中电弧	H ₂ , C ₂ H ₂ , CO, CO ₂	CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆

注 进水受潮或油中气泡可能使氢含量升高。

三、油中溶解气体分析方法原理

实现油中溶解气体故障分析的方法，目前主要采用气相色谱法和光声光谱法两种。

1 气相色谱法

色谱法（也称色谱分析、色层法、层析法）：是一种物理分离方法，它利用

混合物中各物质在两相间分配系数的差别，当溶质在两相间做相对移动时各物质在两相间进行多次分配，从而使各组分得到分离。实现这种色谱法的仪器就叫色谱仪。

混合气体用色谱法分离的原理如图 1-2 所示，当混合物在两相间做相对运动时，样品各组分在两相间进行反复多次的分配，不同分配系数的组分在色谱柱中的运行速度就不同，滞留时间也就不一样。分配系数小的组分会较快地流出色谱柱；分配系数越大的组分就越易滞留在固定相间，流过色谱柱的速度较慢。这样，当流经一定的柱长后，样品中各组分得到了分离。当分离后的各个组分流出色谱柱而进入检测器时，记录仪就记录出各个组分的色谱峰。

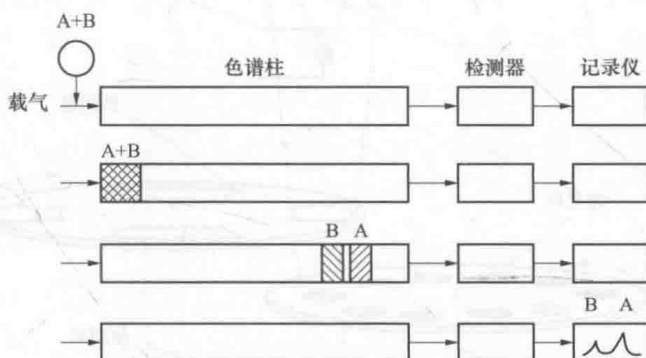


图 1-2 混合气体在色谱柱里的分离

色谱法具有分离效能高、分析速度快、样品用量少、灵敏度高和适用范围广等许多化学分析法所没有的优点。

主要检测流程：来自高压气瓶或气体发生器的载气首先进入气路控制系统，把载气调节并稳定到所需要的流量与压力后，流入进样装置把样品（油中分离出的混合气体）带入色谱柱，通过色谱柱分离后的各个组分依次进入检测器，检测后得到的电信号经过计算机处理后得到每种特征气体的含量。

2 光声光谱法

(1) 光声效应。气体光声效应是由气体分子吸收电磁辐射（如红外辐射等）所致，气体分子按其特征吸收一定量电磁辐射后，导致气体温度上升，部分能量随即以释放热能方式退激，并导致气体及周围介质产生压力波动。若将气体置于密闭容器内，气体的温度变化则产生成比例的压力波。

首先是需要确定每种气体特定的分子吸收光谱，从而可对红外光源进行波长



调制使其能够激发某一特定气体分子；其次则是确定气体吸收能量后退激产生的压力波强度与气体浓度间的比例关系。

因此，通过选取适当的波长并结合检测压力波的强度，不仅可验证各种气体的存在，并可进一步确定其浓度。甚至对某些混合物或化合物也可做出定性、定量分析，而这也正是光声光谱技术的特点。

(2) 基本原理。光声光谱检测原理如图 1-3 所示。

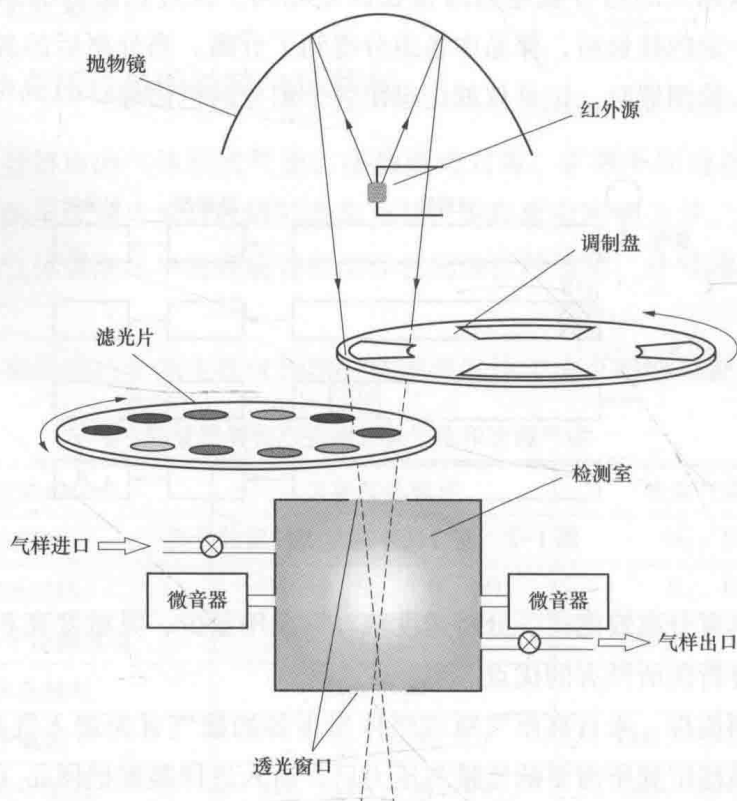


图 1-3 光声光谱检测原理图

1) 光源输出稳定的红外光，经一定频率旋转的调制盘调制，透过不同颜色的滤光片，产生周期性（照射与不照射）的窄带光。

2) 对采集到的变压器油进行动态顶空脱气，脱出的气体经气路进入到密封的容器。

3) 利用调制出的周期性窄带光对混合气体进行周期性的激发，利用不同气体拥有特定的吸收波长的特性，每一种经调制的窄带光可使某一种故障气体周期

性的受激退激，从而产生周期性的温度变化，进而导致周期性的压力变化。

4) 利用气室两端的高灵敏度微音器（相当于麦克风）探测这种压力的变化，将其转化成电信号，通过混合气体浓度与电信号之间的对应关系以及计算方法，得出某一种故障气体的浓度。

总结以上原理，其检测过程主要为两方面：一个是通过使用不同的滤光片选择窄带光，激发某一种气体，从而实现对故障气体的定性检测，即检测为哪一种故障气体；另一个是通过找到光声效应产生的电信号与气体浓度间的关系，从而实现对故障气体的定量检测，即检测具体该种故障气体的浓度。

任务二 油中溶解气体样品采集

教学目标 通过本任务的学习应掌握油中溶解气体分析样品容器的要求，熟练掌握取油、气样的方法，掌握样品保存及处理相关注意事项。

任务描述 本任务主要是为油中溶解气体分析提供合格的样品，学习容器准备、现场取样、样品保存和运输等工作流程。

任务准备 了解玻璃注射器操作及全密封方式取样注意事项。

任务实施 系统学习实验室样品容器的准备及现场取样的方法。

相关知识 GB/T 7597—2007《电力用油（变压器油、汽轮机油）取样方法》、DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》。

一、取样容器的准备工作

1 取样容器要求

应使用密封良好且无卡塞的 100mL 玻璃注射器。

2 取样容器检查校验

(1) 注射器的刻度校正：称取注射器的重量 M_1 ，抽取蒸馏水并调整到 40mL 处刻度，再称取注射器与水的重量 M_2 ，计算出 40mL 的实际体积量 $M_2 - M_1$ 。

(2) 注射器气密性检查：检验注射器气密性常用的三种方法。

1) 注射器抽取一定的气体后，用胶皮头封闭，将注射器浸入水中，压缩注射器内的气体，观察针头座周围有无气泡形成。形成的气泡越小越少，则该部位的密封性越好。

2) 用手抵住注射器的管芯（应注意安全），将针头插入正常运行的色谱仪进样口，观察一段时间，基线变化越小，注射器的密封性越好。

3) 将注射器出口用橡胶头密封,反复抽拉注射器管芯,放松后管芯越接近原来位置,气密性越好。

③ 注射器的清洗

取样注射器使用前,按顺序用中性洗涤剂水、自来水、蒸馏水洗净,在105℃下充分干燥后,立即用密封胶帽盖住头部待用,保存在专用样品箱内。如果一次清洗多支注射器时,应注意对应注射器编码,防止混淆不配套。

二、现场取样

① 取样基本要求

(1) 取样要求全密封,即取样连接方式可靠,既不能让油中溶解气体逸散,也不能混入空气,操作时油中不得产生气泡。

(2) 对于可能产生负压的密封设备,禁止在负压下取样,以防负压进气。

(3) 设备的取样阀门应配上带有小嘴的连接器,在小嘴上接软管。取样前应排除取样管路中及取样阀门内的空气和“死油”,所用的胶管应尽可能的短,同时用设备本体的油冲洗管路,取油样时油流应平缓。

② 取样需要的器具

(1) 充油设备必须具有专用取样阀。

(2) 专用带有小嘴的三通阀连接器。

(3) 100mL 注射器、橡胶头及其他辅助工具材料等。

③ 准备工作

(1) 根据现场工作时间和工作内容填写工作票,履行工作票许可手续。

(2) 正确佩戴好安全帽、进入工作现场,在工作地点悬挂“在此工作”标示牌,检查安全措施是否满足工作要求,整齐摆放工器具及取样箱、取样容器。

(3) 取样标签。

1) 填写样品标签,完毕后粘贴在注射器上。

2) 标签内容:变电站名称、设备名称、取样日期等。

④ 取油样步骤

(1) 取油样部位:一般应在设备底部取样阀取样,特殊情况下可以在不同位置取样。