

BIANYAQI GUZHANG
SEPU ZHENDUAN FENXI

变压器故障 色谱诊断分析

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组编
周舟 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

BIANYAQI GUZHANG
SEPU ZHENDUAN FENXI

变压器故障 色谱诊断分析

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组编

周舟 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为更系统地利用气相色谱法对变压器故障进行分析判断,供从业者学习参考,国网湖南省电力公司电力科学研究院基于多年色谱分析试验的经验总结,组织编写了本书。

全书共分 6 章,涵盖了变压器油的产气原理、变压器的故障与产气特征、变压器油中气体分析检测技术、变压器故障判断流程、电性故障色谱分析案例以及热性故障色谱分析案例。

本书可供从事变压器运维、检修等相关工作的技术人员和管理人员使用,也可供相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

变压器故障色谱诊断分析 / 周舟主编; 国网湖南省电力公司电力科学研究院组编. —北京: 中国电力出版社, 2015.12
ISBN 978-7-5123-8456-9

I. ①变… II. ①周… ②国… III. ①气相色谱—应用—
变压器故障—故障诊断 IV. ①TM407

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 247207 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 5.5 印张 92 千字

印数 0001 册—2000 册 定价 23.00 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



编 写 组



主 编：周 舟

副 主 编：陈绍艺 刘 凯

编写组成员：张玉福 周年光 刘小玲 冯 兵

何铁祥 钱 晖 龚尚昆 万 涛

常 燕 吴俊杰 李 臻 陶 靖

胡 旭



前言

应用气相色谱法检测电气设备用绝缘油中的溶解气体组分含量，进而诊断电气设备的潜伏性故障，是国内外电力科技工作者多年理论与现场工作经验的积累。特别是该检测技术可在设备不停电时进行，可以定期地对运行中设备的状态进行评价，确保设备的安全可靠运行。当前，电力系统设备检修模式已从传统的定期检修模式向更科学合理的状态检修模式转变，在这种形势下，科学地利用变压器油中溶解气体信息进行变压器绝缘状态的识别，通过色谱数据分析诊断变压器故障日益重要。现在，遍布电力行业的各发、供电单位和制造、使用充油电气设备的相关单位，均配有专用的气相色谱仪和专业分析人员，全国同行业均采用统一的分析方法和故障诊断导则，对电气设备中绝缘介质进行定期和不定期监测，最大限度地保障了电气设备的安全经济运行，指导设备状态检修工作的开展。

本书就是基于以上现状，系统地介绍了变压器油的产气原理，设备故障类型与产气特征，油中溶解气体分析检测技术，以及变压器色谱分析的一整套诊断流程，包括有无故障的判定、故障类型和故障状态的诊断、故障处理措施等。书中结合典型案例的色谱分析结果，介绍了变压器常见的内部故障，并对这些故障易于发生的部位进行了总结归纳。希望通过大量的色谱分析结论与实际查证设备内部缺陷相联系，丰富专业人员的现场诊断、处理经验，进一步弥补色谱诊断技术不能准确定位设备内部故障的不足，为生产一线从事变压器安装、运行维护、检修的专业技术人员进行故障诊断、检查定位提供一些有益的参考。

书中引用了国内外同行一些基础资料、试验数据和研究成果，在此谨向他们致以诚挚谢意。由于编者水平有限，再加上收集资料所限，无论在理论认知还是在实践经验上，对各种典型故障的分析都感到缺乏和不足，恳请广大读者批评指正。

编者

2015年11月



前言

1 变压器油的产气原理	1
1.1 变压器油中气体的来源	1
1.2 变压器油中气体的产气机理	2
2 变压器的故障与产气特征	6
2.1 变压器的电性故障及其产气特征	6
2.2 变压器的热性故障及其产气特征	9
3 变压器油中气体分析检测技术	11
3.1 气相色谱法	11
3.2 气相色谱质谱联用法	12
3.3 静态顶空进样气相色谱法	13
3.4 在线色谱分析技术	14
4 变压器故障判断流程	15
4.1 判断变压器是否存在故障	15
4.2 判断变压器故障类型	17
4.3 判断变压器故障状态	20
4.4 制订反事故措施	24
5 电性故障色谱分析案例	25
5.1 局部放电故障	25
5.2 火花（低能量）放电	29
5.3 电弧（高能量）放电	35
6 热性故障色谱分析案例	50
6.1 低温过热故障	50
6.2 中温过热故障	57
6.3 高温过热故障	64



变压器油的产气原理

常用的变压器油主要是指变压器类设备用的矿物绝缘油，也包含植物绝缘油、硅油等，它具有冷却、绝缘及灭弧的作用。矿物绝缘油是一种天然碳氢化合物的混合物，由石蜡基原油和环烷基原油提炼而来，主要包括烷烃、环烷烃、芳香烃等烃类组分。变压器安装后以及运行过程中，变压器油会吸收、产生多种气体，变压器中的绝缘材料也会释放出一些气体，主要包括氮气（ N_2 ）、氧气（ O_2 ）、氢气（ H_2 ）、甲烷（ CH_4 ）、乙炔（ C_2H_2 ）、乙烯（ C_2H_4 ）、乙烷（ C_2H_6 ）、丙烯（ C_3H_6 ）、丙烷（ C_3H_8 ）、一氧化碳（ CO ）、二氧化碳（ CO_2 ）等，这些气体的生成与变压器的运行状态相关，通过对油中溶解气体的定性、定量分析，可诊断运行中的变压器内部是否正常，并及时发现变压器内部存在的潜伏性故障。

1.1 变压器油中气体的来源

1.1.1 油中溶解的气体

在变压器油的炼制、运输和储藏等过程中，不可避免地会与大气接触并吸入空气。在强迫油循环的变压器中，油泵的空穴作用和管路密封不严等都会使空气混入，如在101.3kPa、25℃时，空气在油中溶解的饱和含量约为10%（体积比），但是油中溶解的空气中 N_2 占71%、 O_2 占28%，与空气的组成不同。其原因是 O_2 在变压器油中的溶解度比 N_2 大，所以变压器密封性良好是保证变压器油含气量正常的前提条件之一。

1.1.2 运行中产生的气体

1.1.2.1 正常运行中产生的气体

正常运行的变压器油中， O_2 和 N_2 是溶解气体的主要组成。但由于存在诸多原因，即使是正常运行的变压器，变压器油中也含有一定量的故障特征气体。

(1) 残留气体在运行时溶解。油精炼过程中未完全脱除的气体，在制造厂干燥、

浸渍及电气试验过程中，被各类固体材料吸附的气体，如金属材料奥氏体不锈钢、碳素钢等吸藏的 H_2 等，在运行时逐步析出并溶解于油中。

(2) 安装过程中产气。变压器安装时，热油循环处理过程中会产生 CO_2 ，有时还会产生少量 CH_4 。同时，在变压器本体油箱或辅助设备上施焊的过程中，即使不带油，箱壁上残余油受热也会分解产生气体。

通常由于上述两种情况产生的油中气体在运行的前几年增长较快，以后趋于稳定。

(3) 变压器油的老化产气。变压器在使用的过程中，变压器油会在光、电、热、氧、辐射以及铜、铁等催化材料的影响下发生缓慢的化学反应，其中包括氧化、裂解、碳化等过程。在反应的过程中会产生氢气、低分子烃类气体、某些氧化产物及其缩合物和固体 X 蜡等物质，这一过程称为变压器油的老化。

在变压器正常运行过程中，变压器油的老化分解会产生多种气体，其中包括少量的 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_3H_6 、 C_3H_8 等低分子烃类以及 CO 、 CO_2 等碳的氧化物。其中，碳的氧化物含量最多，其次为 H_2 和烃类气体。

1.1.2.2 故障运行中产生的气体

当变压器出现故障时，在热性或电性故障能量作用下，故障点附近的油和固体绝缘材料会裂解产生气体。这些气体的含量和组分与故障类型、故障能量级别及其所涉及的固体绝缘材料有关。其中对变压器故障诊断有价值的气体主要包括 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 CO 、 CO_2 。

1.2 变压器油中气体的产气机理

1.2.1 变压器油的电裂解

变压器在运行过程中，变压器油中不可避免地会存在杂质和气体，在工作场强下，某些部位上的气体将发生低强度的起始放电并使油分解。从动力学角度解释变压器油的电劣化产气机理，是基于电场能量使油中发生和发展游离基链式反应的理论，变压器油中溶解的气体在电场作用下将发生游离，气体游离过程中释放出高能电子，它与油分子发生碰撞，有可能击断 C-H 或 C-C 键，把其中的 H 原子或 CH_3 原子团游离出来，形成游离基，促使产生 2 次气泡，如若以 e' 表示电场能量，则





上述反应只要电场能量足够即可发生，其产气速率与化学键强度成反比，即键强度越高产气速率越低。同时产气速率也与电场强弱和液相表面气体的压力有关，可以用经验关系式描述

$$\frac{dp}{dt} = k(u - u_s)^n p^\gamma \quad (1-5)$$

式中 $\frac{dp}{dt}$ ——产气速率；

k ——常数，为 0.06；

u ——工作电压，kV；

u_s ——析气时起始电压，一般为 (3 ± 0.5) kV；

p ——油面气体压力；

n ——常数，为 1.82；

γ ——常数，为 0.16。

如上所述，在电场的作用下，变压器油电裂解过程是按游离基链式反应进行的，其反应历程十分复杂。反应速度随着温度的上升而增加， O_2 和 H_2O 的存在及其含量高低对反应影响很大，且铜和铁等金属也起催化剂作用，使反应加速。

当变压器出现放电时， C_2H_2 和 H_2 成为特征气体，且随着放电能量的增大， C_2H_2 的含量越来越高。对于放电能量较低的故障，油中 CH_4 可能是主要成分。

1.2.2 变压器油的热裂解

变压器油主要是由烷烃、烯烃、环烷烃、芳香烃等组成，其中含有大量由 C-C 键组合在一起的 CH_3^* 、 CH_2^* 和 CH^* 化学基团。变压器热故障的高温能量会导致 C-H 键和 C-C 键断裂，从而产生氢原子和碳氢化合物的游离基，并重新化合产生氢气和低分子烃类气体，如 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_2 和一些碳的固体颗粒及碳氢聚合物等。在有游离基存在的情况下，裂解反应将自发进行，即使外界不供给能量反应仍将自动持续下去，反应速度随着温度上升而增加，振动与冲击是油裂解反应的加速剂。与电裂解机理相同，变压器油的热裂解产气也主要由不同化学键结构的碳氢化合物的热稳定性决定，裂解能量密度越大，产生的烃类气体的不饱和度越高。不同的键断裂需要不同的能量，因此，裂解产物依次为烷烃、烯烃、炔烃、焦炭。C-C 键断裂需要更高的温度和能量，然后迅速以 C-C 键 (607kJ/mol)、C=C 键 (720kJ/mol)

和 C=C 键 (960kJ/mol) 的形式重新化合生成烃类气体, 油炭化生成碳粒的温度需要 500~800℃, 其产物沉积在变压器内部。

英国中央研究所哈斯特 (Halstead) 根据动力学理论, 模拟研究了故障下矿物油的热裂解产气规律。假定在裂解过程中, 温度恒定、矿物油的活化能变化固定, 即无论发生什么样的裂解反应, 分解出的产物都是烃类气体及碳颗粒。如果裂解后的产物处于平衡状态, 即系统的总压力为 101.3kPa, 由化学反应的平衡常数及热动力学模拟可知不同气体组分的平衡分压与温度的关系, 如图 1-1 所示。

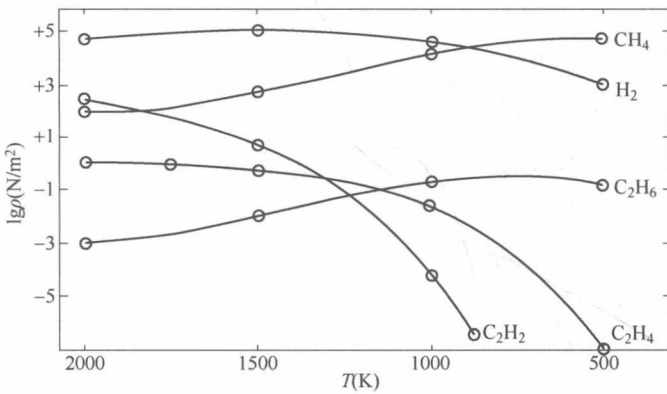


图 1-1 哈斯特气体分压和温度关系

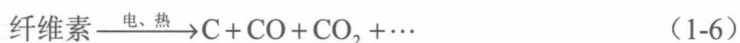
从图 1-1 可以看出, H₂ 产气量多, 但与温度的相关性不明显; 烃类气体各自有唯一的依赖温度, C₂H₂ 仅在接近 1000K 的时候产生才尤为明显。由哈斯特研究可知: 故障能量的大小决定了烃类气体的产气速率, 并且各气体组分在不同的温度下相互比例也不同。在一定温度下, 产气速率会出现一个最大值。随着温度的上升, 各气体组分最大产气速率出现的次序是: CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂。

1.2.3 固体绝缘材料的裂解

变压器的绝缘结构可以分为外绝缘和内绝缘, 目前电力变压器故障多为发生在油箱内的绝缘故障。油箱内绝缘多为由油、纸、纸板和其他固体绝缘等构成的油纸绝缘结构。

正常情况下, 变压器油无论是在过热还是在放电条件下, 反应产生大量 CO 和 CO₂ 的可能性都几乎为零。当故障涉及固体绝缘材料时, 情况将发生变化。因为固体绝缘材料的主要成分是纤维素, 它是一种高分子聚合物, 其单体是单糖, 分子中含有大量的氧原子。在过热或放电的情况下固体绝缘材料在 105~300℃ 就可以发

生裂解、碳化等反应，产生 H_2O 、 CO 、 CO_2 及少量烃类气体和呋喃化合物，且油会被氧化，即



其中， CO 和 CO_2 的生成受多种因素的影响，如温度、油中氧的含量和纸的湿度等。

固体绝缘材料与变压器油分子结构中的化学键具有不同的键能，固体绝缘材料中的 C-O 键弱于油中的 C-H 键，因此，在大于 105°C 时聚合链断裂，大于 300°C 时则完全裂解和碳化。在相同的温度下，固体绝缘材料产生的 CO 、 CO_2 远大于油裂解产生的量，所以，油中溶解的 CO 、 CO_2 可作为反映固体绝缘材料的劣化指标。



变压器的故障与产气特征

引起变压器故障的因素有很多，如设计制造工艺不良造成的电位梯度分布不均匀；磁屏蔽不良造成过热、导线或绝缘损伤等；运输不慎受振动，使紧固件松动、线圈位移或引线损伤等；运行中过励磁振动、过电压、近区短路冲击等造成部件松动、绕组变形或绝缘损伤等；维护管理不善造成本体受潮、缺油、散热不良等。从故障的表现形式来看，变压器的内部故障可以划分为热性故障和电性故障。

特征气体法基于哈斯特（Halstead）试验发现：任何一种烃类气体的产气速率是随温度变化的。在特定温度下，某一种气体的产气速率会呈现最大值。随着温度的升高，产气速率最大的气体依次为 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 ，证明故障的温度与溶解气体含量之间存在着对应关系。通过分析油中溶解气体组分的含量，即可以判断出变压器内部可能存在的潜伏性故障及其类型（种类）。GB/T 7252—2001（DL/T 722—2014）《变压器油中溶解气体分析和判断导则》中将故障类型分为局部放电、低能量放电、低能量放电兼过热、电弧放电、电弧放电兼过热、低温（ $t < 150^\circ\text{C}$ ）过热、低温（ $150^\circ\text{C} < t < 300^\circ\text{C}$ ）过热、中温（ $300^\circ\text{C} < t < 700^\circ\text{C}$ ）过热、高温（ $t > 700^\circ\text{C}$ ）过热。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》（Mineral oil-impregnated electrical equipment in service-Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis）将原来9种典型故障改为6种，即局部放电、低能量放电、高能量放电、低温（ $t < 300^\circ\text{C}$ ）过热、中温（ $300^\circ\text{C} < t < 700^\circ\text{C}$ ）过热、高温（ $t > 700^\circ\text{C}$ ）过热。

在对国内变压器故障类型的不完全统计分析中，过热性故障变压器占故障总台数的63%；高能量放电故障变压器占故障总台数的18%；过热兼高能放电故障变压器占故障总台数的10%；火花放电故障变压器占故障总台数的7%；其余2%的为变压器受潮或局部放电故障。

2.1 变压器的电性故障及其产气特征

变压器内部电磁回路向周围空间或绝缘材料放电的故障称为电性故障。根据能

量密度的不同，电性故障可分为高能量放电（电弧放电）和低能量放电（局部放电和火花放电）两种类型。高能放电能量密度最高，会导致绝缘受电弧击穿；局部放电的能量密度最低，常常发生在气隙和悬浮带电体的空间；火花放电是一种间歇性的放电。

2.1.1 电弧放电及其产气特征

电弧放电又称高能量放电，是气体放电中最强烈的一种自持放电。电弧放电以线圈匝、层间击穿为主要故障模式，属于较严重的放电现象。其特点是：放电突然剧烈、产气急剧、产气量大、一般难以预测。

电力变压器内部发生电弧放电故障时，局部温度可高达 1500~6000℃。电弧放电故障的特征气体主要组分是 C₂H₂ 和 H₂，一般 C₂H₂ 占总烃 20%~70%，H₂ 占氢烃总量的 30%~90%；次要组分是 CH₄、C₂H₄ 和 C₂H₆，且在大多数情况下 C₂H₄ 的含量高于 CH₄。此类故障能量较大，发展速度很快，产气量大，且在故障发展过程中，气体来不及溶解于油中就聚集到气体继电器内，严重时可引起气体继电器动作，变压器跳闸。当电弧放电涉及固体绝缘材料时，也会产生大量的 CO 和 CO₂。气体继电器中的气体和油中会含有较多的 CO，同时当绝缘材料发生电弧放电时，不仅会产生 CO、CO₂，也会使绝缘材料受到严重破坏，进一步降低绝缘。因此，若不及时处理电弧放电故障，严重时有可能造成变压器的重大损坏或爆炸事故。

电弧放电可能的原因有变压器内部短路，如低压线圈对地、线圈之间、引线接头之间、导体与箱体之间、线圈与铁芯之间等；环绕主磁通的相邻导体间放电；铁芯的绝缘螺丝、固定铁芯的金属环之间的放电等。

实验室中模拟电弧放电时变压器油中溶解气体的分析结果如表 2-1 所示。从表 2-1 中可知，在电弧作用下，油-纸绝缘分解出较多的 C₂H₂ 等气体。

表 2-1 模拟电弧放电产生的气体（体积比%）

气体种类	H ₂	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	CO	CO ₂	O ₂	N ₂
变压器油	57~74	14~24	0~3	0~1	0~1	0~3	1~3	2~12
油浸纸板	41~53	14~21	1~10	1~11	13~24	1~2	2~3	4~7
油-酚醛树脂	41~54	4~11	2~9	0~3	24~35	0~2	1~3	2~6

2.1.2 火花放电及其产气特征

通常，当相邻导体间施加高电压时，导体间的绝缘体无法承受电压的作用而电

离，两个导体间的通道被瞬间连通，电荷沿放电通道瞬间释放的现象称为火花放电。火花放电属于低能量放电，放电时电流猛增，温度急剧升高。当电源功率不够时，电压会下降，使放电不能持续，出现闪光立即熄灭现象。待电压恢复，会再次进行放电。如电源回路能提供足够电流，火花放电即转变为电弧放电，维持电弧通道以热电离为主。

由于火花放电故障能量较小，一般总烃含量不太高，其特征气体为 C_2H_2 、 H_2 。溶解在油中的 C_2H_2 在总烃中所占比例可达 25%~90%， C_2H_4 约占总烃的 20% 以下， H_2 占氢烃总量的 30% 以上。火花放电除了产生烃类气体外，只要有固体绝缘材料介入，也会产生 CO 和 CO_2 。当 H_2 和 CH_4 的增长速度加快，同时 C_2H_4 又紧接着出现时，变压器就会有由低能放电发展成高能放电的危险。

变压器内部火花放电主要可能出现在屏蔽环、绕组中相邻的线饼间或导体间，蓝线开焊处或铁芯的闭合回路中，夹件间、套管与箱壁、高压线圈与地端，木质绝缘块、绝缘构件胶合处、绕组垫块以及纸板的沿面放电等。

实验室中模拟火花放电产生的气体见表 2-2。

表 2-2 模拟火花放电产生的气体（体积比%）

气体种类	H_2	CH_4	C_2H_2	CO	CO_2
变压器油	77.0	4.0	18.0	无	无
油浸纸板	41.0	8.7	41.2	2.0	7.1

2.1.3 局部放电及其产气特征

局部放电是指油和固体绝缘中的气泡和尖端，因耐压强度低、绝缘薄弱、电场集中，发生重复性击穿现象。局部放电的放电能量较小，起始阶段不稳定，间断出现。变压器油表面上的局部放电和内部局部放电相比，前者放电起始电压比较低，放电量也比较大，放电重复率比较高。

局部放电的特征气体组分含量会根据放电能量的密度不同而发生变化。一般情况下，主要成分是 H_2 ，占氢烃总量的 90% 以上；总烃的含量不高，除 H_2 外， CH_4 含量最高，占总烃的 90% 以上。同时， C_2H_2 会随着放电量密度的增高而出现，但在总烃中所占比例一般不超过 2%。这是局部放电与电弧放电和火花放电区别的主要标志。当变压器油的温度升高时，释放的气体一般会增加，且在高场强和高温下局部放电会更加严重。

变压器内部局部放电的原因主要有：①绝缘受潮或损伤、金属毛刺；②油纸中

存在气泡；③接地不良导致悬浮电位。

实验室中模拟局部放电，变压器油中溶解气体的分析结果如表 2-3 所示。

表 2-3 模拟局部放电产生的气体（体积比%）

气体种类	H ₂	CH ₄	CO	CO ₂
变压器油	50	45	无	5
油浸纸板	26	54	10.5	9.5

2.2 变压器的热性故障及其产气特征

热性故障是指局部过热，它和变压器正常运行时的发热是有区别的。正常运行时，温度的热源来自绕组和铁芯，即所谓铜损和铁损，温度一般不大于 85℃。据统计，热性故障一般占变压器故障的 60% 以上。热性故障属于慢性故障，通过色谱监测能够及时有效发现故障缺陷，避免故障进一步发展造成变压器损坏。热性故障可分为低温（ $t < 300^{\circ}\text{C}$ ）过热、中温（ $300^{\circ}\text{C} < t < 700^{\circ}\text{C}$ ）过热和高温（ $t > 700^{\circ}\text{C}$ ）过热三种。

2.2.1 低温过热及其产气特征

低温过热可分 150℃ 以下的低温过热和 150~300℃ 的低温过热。低温过热时一般会出现变压器油温报警，短时间内不会造成变压器损坏，但对变压器运行寿命产生较大影响。

在低温过热时，总烃的主要成分为 CH₄ 和 C₂H₆，分别约占总烃量的 30% 和 65%~70%，温度较高时有微量 C₂H₄，不会产生 C₂H₂。C₂H₄ 含量低从另一方面反映了过热属于低温范围内，故障点的能量密度较低，因为随着温度升高，油中 C₂H₄ 含量比例会不断升高。当故障涉及固体绝缘材料时，还会产生较多的 CO 和 CO₂。

低温过热故障通常是由于应急性负载造成的过负荷，油道堵塞导致散热不良、层间绝缘不良、轻微漏磁等原因引起的。

2.2.2 中温过热及其产气特征

中温过热故障是指温度在 300~700℃ 范围内的过热故障。中温过热可以造成绝缘油的快速劣化甚至结焦，与变压器固体绝缘相邻时，还会造成固体绝缘材料的迅速破坏，容易引发更大的故障。

中温过热故障中, H_2 、总烃超标。变压器绝缘油总烃中 C_2H_4 、 C_2H_6 、 CH_4 和 H_2 均会出现明显增长, 当故障涉及固体绝缘时, CO 、 CO_2 的含量也出现较大增加。所有特征气体中以 C_2H_4 、 CH_4 、 CO_2 为主, C_2H_6 、 H_2 、 CO 含量次之, H_2 通常占氢烃总量的 27% 以下, C_2H_4 气体产生速率要明显高于 CH_4 。

造成中温过热故障的原因主要有分接开关接触不良、引线夹件螺丝松动或接头焊接不良、涡流引起铜过热、铁芯漏磁、局部短路和层间绝缘不良、铁芯多点接地等。

2.2.3 高温过热及其产气特征

高温过热是指温度在 $700^{\circ}C$ 以上的过热故障。高温过热故障对变压器安全稳定运行具有很大威胁, 故障在短时间内容易迅速发展, 当故障涉及固体绝缘时, 绝缘很快受到破坏, 严重时引起变压器烧毁。

变压器油温度在 $140\sim 500^{\circ}C$ 范围内时油分解主要产生烷类气体, 其中主要是 CH_4 和 C_2H_6 , 随温度的升高 ($500^{\circ}C$ 以上) 油分解急剧地增加, 其中烯烃和 H_2 增加较快, C_2H_4 尤为显著, 而温度更高 (约 $800^{\circ}C$ 左右) 时, 还会产生少量 C_2H_2 气体。因此, 在发生高温过热故障时, 变压器油中溶解的总烃、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 CH_4 、 H_2 等气体成分浓度不断增加, 当故障涉及固体绝缘时, CO_2 、 CO 也会出现明显增加。增加特征气体中以 C_2H_4 、 CH_4 、 H_2 为主, C_2H_6 、 CO_2 、 CO 次之。此时 CH_4 、 C_2H_4 、 H_2 的含量之和占氢烃总量的 80% 以上, C_2H_4 含量还超过了 CH_4 , H_2 的含量在 27% 以下。

变压器内部过热故障主要存在于绕组铁芯、油箱、夹件、拉板、无载分接开关、连接螺栓及引线等部件。变压器高温过热故障的原因和中温过热故障的因素相似, 主要包括引线夹件螺丝松动或接头焊接不良、绕组匝间或层间短路、铁芯片间短路、涡流引起铜过热以及铁芯多点接地等原因。



变压器油中气体分析检测技术

3.1 气相色谱法

气相色谱法（GC）是色谱法的一种，是以气体为流动相（载气），采用冲洗法的柱色谱分离分析技术。气相色谱法具有高效能、高选择性、高灵敏度、分析速度快、样品用量小、定性重复性好、定量精度高、设备简单及应用范围广等优点。

正是基于气相色谱的上述优点，电力系统广泛采用该法对变压器油中溶解气体组分含量进行检测，分析设备潜伏性故障。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不停电时进行，且不受外界因素影响，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。

3.1.1 分离原理

气相色谱法的分离原理主要是基于色谱法的两相分配原理。利用被测混合气体在流动相和固定相中吸附力或溶解度不同（也就是说分配系数不同），当两相做相对运动时，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运动速度不同，滞留时间也就不一样，分配系数小的组分会较快流出色谱柱；分配系数越大的组分就越易滞留在固定相内，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。当分离后的各组分流出色谱柱进入检测器时，记录仪将记录各组分的色谱峰。

由于色谱柱中存在着分子扩散和传质阻力等原因，使所记录的色谱峰并不是以一条矩形的谱带出现，而是一条接近高斯分布曲线的色谱峰。

3.1.2 检测原理

检测器用于测量从色谱柱分离出物质的质量或浓度，即利用被分离的样品各组