

## 变压器故障分析中气相色谱技术的运用

**摘要** 气相色谱技术是近年来兴起的一项新技术，能够对运行中的变压器进行实时监测，通过采集变压器箱体內的少量油样，分析油中气体的组分及其含量，就可以判断变压器是否存在故障、故障的性质以及故障的大致部位。

**关键词** 变压器故障 气相色谱技术 运用

变压器是供配电系统中的核心设备，我集团供配电系统中，共有油浸式变压器50多台，有110KV主变压器、6KV高压电机变压器、400V变压器以及特殊用于静电除尘的高压变压器。这些设备一旦出现故障，将对生产产生停电面大、周期长的严重影响。及时了解油浸变压器内部运行情况并发现故障苗头，对保证变压器安全、可靠、优质运行有十分重要的意义。对于油浸式变压器，线圈和铁蕊全部浸没在变压器油中，无法通过肉眼及直接测量来判断变压器的故障隐患，必须采用一定的技术方法来了解变压器的运行状况。气相色谱技术的运用充分解决了这一难题。

### 一 气相色谱法的原理

色谱法又叫层析法，它是一种物理分离技术。它的分离原理是使混合物中各组分在两相间进行分配，其中一相是不动的，叫做固定相，另一相则是推动混合物流过此固定相的流体，叫做流动相。当流动相中所含的混合物经过固定相时，就会与固定相发生相互作用。由于各组分在性质与结构上的不同，相互作用的大小强弱也有差异。因此在同一推动力作用下，不同组分在固定相中的滞留时间有长有短，从而按先后秩序从固定相中流出，这种借在两相分配原理而使混合物中各组分获得分离的技术，称为色谱分离技术或色谱法。当用液体作为流动相时，称为液相色谱，当用气体作为流动相时，称为气相色谱。

色谱法具有：（1）分离效能高、（2）分析速度快、（3）样品用量少、（4）灵敏度高、（5）适用范围广等许多化学分析法无可与之比拟的优点。

气相色谱法的一般流程主要包括三部分：载气系统、色谱柱和检测器。具体流程见下图：

当载气携带着不同物质的混合样品通过色谱柱时，气相中的物质一部分就要溶解或吸附到固定相内，随着固定相中物质分子的增加，从固定相挥发到气相中的试样物质分子也逐渐增加，也就是说，试样中各物质分子在两相中进行分配，最后达到平衡。这种物质在两相间发生的溶解和挥发的过程，称分配过程。分配达到平衡时，物质在两相中的浓度比称分配系数，也叫平衡常数，以K表示， $K = \text{物质在固定相中的浓度} / \text{物质在流动相中的浓度}$ ，在恒定的温度下，分配系数K是个常数。

由此可见，气相色谱的分离原理是利用不同物质在两相间具有不同的分配系数，当两相作相对运动时，试样的各组分就在两相中经反复多次地分配，使得原来分配系数只有微小差

别的各组分产生很大的分离效果，从而将各组分分离开来。然后再进入检测器对各组分进行鉴定。

SP-3430气相色谱分析仪充分利用这一原理，能够快速、高效、准确地分析出变压器油中气体的组分及其含量，根据这些气体的组分类型及其含量，我们就可以准确地分析、判断变压器是否存在故障、故障的性质以及故障的大致部位。

## 二 变压器的故障产生的气体及故障类型

### 1 变压器绝缘材料产生的气体组分

油和固体绝缘材料在电或热的作用下分解产生的各种气体中，对判断故障有价值的气体有甲烷、乙烷、乙烯、乙炔、氢、一氧化碳、二氧化碳。正常运行的老化过程产生的气体主要是一氧化碳和二氧化碳。在油纸绝缘存在局部放电时，油裂解产生的气体主要是氢和甲烷。在故障温度高于正常运行温度不多时，产生的气体主要是甲烷。随着故障温度的升高，乙烯和乙烷逐渐成为主要特征。在温度高于1000℃时，例如在电弧弧道温度（3000℃以上）的作用下，油裂解产生和气体中含有较多的乙炔。如果故障涉及到固体绝缘材料时，会产生较多的一氧化碳和二氧化碳。

绝缘油和绝缘材料在不同温度和能量作用下主要产生的气体组分，归纳如下：

1) 在140℃以下时有蒸发汽化和较缓慢的氧化。

2) 绝缘油在140℃到500℃时油分解主要产生烷类气体，其中主要是甲烷和乙烷，随温度的升高（500℃以上）油分解急剧地增加，其中烯烃和氢增加较快，乙烯尤为显著，而温度（约800℃左右）更高时，还会产生乙炔气体。

3) 油中存在电弧时（温度超过1000℃，使油裂解的气体大部分是乙炔和氢气，并有一定的甲烷和乙烯等。

4) 设备在运行中，由于负荷变化所引起的热胀和冷缩，用泵循环油所引起的湍流，以及铁芯的磁滞伸缩效应所引起的机械振动等，都会导致形成空穴和油释放溶解气体。如果产生的气泡集在设备绝缘结构的高电压应力区域内，在较高电场下会引起气隙放电（一般称为局部放电），而放电本身又能进一步引起油的分解和附近的固体绝缘材料的分解，而产生气体，这些气体在电应力作用下会更有利于放电产生气体。这种放电使油分解产生的气体主要是氢和少量甲烷气体。

5) 固体绝缘材料，在较低温度（140℃以下）长期加热时，将逐渐地老化变质产生气体，其中主要是一氧化碳和二氧化碳，且后者是主要成分。

6) 固体绝缘材料在高于200℃作用下，除产生碳的氧化物之外，还分解有氢、烃类气体，温度不同，一氧化碳和二氧化碳的比值有所不同，这一比值在低温时小而高温时大。

7) 铁钢等金属材料起催化作用，水与铁反应产生氢气。此外，奥氏不锈钢材能储藏氢，与绝缘油接触释放出来溶解于油中。

下表为不同故障类型产生的气体组分：

有时设备内并不存在故障，而由于其他原因，在油中也会出现上述气体，要注意这些可

能引起误判断的气体来源。例如：有载调压变压器中切换开关油室的油向变压器本体渗漏或某种范围开关动作时悬浮电位放电的影响：设备曾经有过故障，而故障排除后绝缘油未经彻底脱气，部分残余气体仍留在油中；设备油箱曾带油补焊；原注入的油就含有某几种气体等。还应注意油冷却系统附属设备（如潜油泵，油流继电器等）的故障产生的气体也会进入到变压器本体的油中。运行中设备内部油中气体含量超过下表所列数值时，应引起注意。

仅仅根据分析结果的绝对值是很难对故障的严重性作出正确判断的，必须考察故障的发展趋势，也就是故障点（如果存在的话）的产气速率。产气速率是与故障消耗能量大小、故障部位、故障点的温度等情况直接有关的。如总烃的相对产气速率大于10%时应引起注意。

## 2 对一氧化碳和二氧化碳的判断

当故障涉及到固体绝缘时会引起一氧化碳和二氧化碳含量的明显增长。但根据现有统计资料，固体绝缘的正常老化过程与故障情况下劣化分解，表现在油中一氧化碳的含量上，一般情况下没有严格的界限，二氧化碳含量的规律更不明显。因此，在考察这两种气体含量时更应结合具体变压器的结构特点（如油保护方式）、运行温度、负荷情况、运行历史等情况加以综合分析。

对开放式变压器一氧化碳含量一般在300ppm以下。如总烃含量超出正常范围，而一氧化碳含量超过300ppm，应考虑有涉及到固体绝缘过热的可能性；如一氧化碳含量虽然超过300ppm，但总烃含量在正常范围，一般可认为是正常的；对某些有双饼式线圈带附加外包绝缘的变压器，当一氧化碳含量超过300ppm时，即使总烃含量正常，也可能有固体绝缘过热故障。

对贮油柜中带有胶囊或隔膜的变压器，油中一氧化碳含量一般均高于开放式变压器。

突发性绝缘击穿事故时，油中溶解气体中的一氧化碳、二氧化碳含量不一定高，应结合气体继电器中的气体分析作判断。

## 3 变压器等充油设备内部发生故障的部位

了解变压器内部可能发生的故障类型，对气相色谱分析结果定论时有很大的帮助，变压器等充油设备内部发生故障的部位主要归纳为：

### 1) 过热故障发生的部位

①过热性故障在变压器内常发生的部位主要为：载流导线和接头不良引起的过热故障。如分接开关动静触头接触不良、引线接头虚焊、线圈股间短路、引线过长或包扎绝缘损伤引起导体间相接产生环流发热，超负荷运行发热、线圈绝缘膨胀、油道堵塞而引起的散热不良等。另一种是磁路故障，如铁芯多点接地、铁芯片间短路、铁芯与穿芯螺钉短路、漏磁引起的油箱、夹件、压环等局部过热。

②过热性故障占少油设备（互感器和电容套管）故障比例较少，发生的部位主要为：电流互感器的一次引线紧固螺母松动，分流比抽头紧固螺母松动等；电容套管的穿缆线鼻与引线接头焊接不良，导管与将军帽等连接螺母配合不当等。

### 2) 放电故障发生的部位

①高能放电（电弧放电）在变压器、套管、互感器内均有发生。引起电弧放电故障原因通常是线圈匝层间绝缘击穿，过电压引起内部闪络，引线断裂引起的闪弧，分接开关飞弧和电容屏击穿等。这种故障气体产生剧烈、产气量大，故障气体往来不及溶解于油而聚集到气体继电器引起瓦斯动作。

②低能量放电一般是火花放电，是一种间歇性的放电故障，在变压器、互感器、套管中均有发生。不同电位的导体与导体、绝缘体与绝缘体之间以及不固定电位的悬浮体，在电场极不均匀或畸变以及感应电位下，都可能引起火花放电。

③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，电场集中发生的局部放电。这种放电不断蔓延与发展，会引起绝缘的损伤（碳化痕迹或穿孔）。如电流互感器和电容套管的电容芯绕包工艺不良或真空干燥工艺不良等，都会造成局部放电。

### 三 诊断变压器等充油设备内部的潜伏性故障

在诊断变压器等充油设备内部的潜伏性故障时，应综合考虑以下三个方面的因素，做到准确判断变压器的故障类型及故障的大致部位：

#### 1 故障下产气的累计性

充油电气设备的潜伏性故障所产生的可燃性气体大部分会溶解于油。随着故障的持续，这些气体在油中不断积累，直至饱和甚至析出气泡。因此，油中故障气体的含量及其累计程度是诊断故障的存在与发展情况的一个依据。

#### 2 故障下产气的速率

正常情况下充油电气设备在热和电场的作用下也会老化分解出少量的可燃性气体，但产气速率很缓慢。当设备内部存在故障时，就会加快这些气体的产气速率。因此，故障气体的产气速率，也是诊断故障的存在与发展程度的另一个依据。

#### 3 故障下产气的特征性

变压器内部在不同故障下产生的气体有不同的特征。例如局部放电时总会有氢；较高温度的过热时总会有乙烯；而电弧放电时也总会有乙炔。因此，故障下产气的特征性是诊断故障性质的又一个依据。

### 四 气相色谱分析运用举例

#### 例 1：利用色谱分析结果判断出变压器存在放电现象

2001年底，新厂区3#锅炉静电除尘器L#电场的电压升不起来，正常时应该升到4~7万伏，因该电场电压升不到要求范围内，除尘效率严重下降。

对于这个故障的处理过程是：我们首先检查了控制电路，在排除控制电路的因素后，然后把注意力集中到静电除尘器的升压变压器上。因该变压器内部装有高压硅堆、均压电阻、电容和取样电路，且均浸没在变压油中，结构特殊，属于特种变压器，不允许随便拆开。为了准确判断故障，首先对其进行了常规检测，包括变压器直流电阻、绝缘电阻等项目的检测，没有发现问题，于是采用气相色谱分析法作进一步测试诊断。

我们取该台变压器油样后拿到色谱分析仪上进行分析，测出样品中溶解气体的成分和含

量如下表所示：

从表中数据可以看出，该变压器油中气体的总烃含量大大超过注意值 150 ppm，且烃类气体为主要成分，乙炔含量远远超过 5 ppm 的注意值，但因氢气和甲烷的含量很少，造成烃类气体含量较高的原因，可能是由于变压器存在长时间的间隙性放电造成的。根据前述理论，判断该变压器存在严重的金属性电弧放电现象，应立刻停运并建议吊芯检查。

事后修理人员对该升压变压器进行吊芯检修，箱盖上孔盖一打开，就有刺鼻的气味溢出，变压器芯子吊出箱体，整个芯子象涂上一层墨，那是由于电弧放电裂解变压油产生的积碳附着在铁芯绕组和硅堆上形成的。用变压油反复冲洗，经细心检查，发现该变压器确实存在电弧放电现象，故障部位位于高压线圈引出线与高压套管螺杆的连接处。由于该变压器结构的特殊性，厂家为了装配方便，把高压引出线通过一个马鞍型卡子与穿墙螺杆作接触性连接，由于长时间的运行，这个连接点出现了松动，造成接触不良，使变压器长时间处于电弧放电的情况下运行，马鞍型铜卡子已烧蚀了一个不规则的洞。问题找到后我们对其进行了改进，取消了马鞍型卡子，直接将高压引线用螺栓紧压在穿墙螺杆上，在进行了一系列检修后，将芯子重新装回箱体并更换了变压器油，完毕通电试运行，一切正常。

#### 例 2：利用色谱分析结果判断出变压器存在过热现象

今年 2 月份，根据运行人员反映，新厂区 4 # 锅炉静电除尘器 2 # 电场无法运行，只要一开机，高压控制柜的电源开关就跳闸，微机显示为过流动作。

接到反映后，我们配合运行人员一起检查了所有控制线路、主电源回路、电场内部的所有控制电路，均没有发现问题，最后断定问题只可能出在变压器本身，于是拆除变压器的高低电压引线，对变压器进行常规的检测，绝缘电阻正常，直流电阻也正常，也没有发现问题。再进行第二步变压油色谱分析来帮助检查。

取回变压器油样后，我们将其放到气相色谱分析仪上进行分析，结果令我们大吃一惊，其分析结果如下表所示：

从表中数据可以看出，因其乙炔含量为 0 ppm，基本上可以断定变压器不存在放电现象，但烷类及烃类气体含量非常高，总烃含量是注意值 150 ppm 的 100 多倍，且乙烷及乙烯是总烃的主要成分，二氧化碳含量也非常高。由此可以判断该变压器存在严重的过热故障，过热使固体绝缘材料分解出上述气体，故障点温度大概为： $322 \text{Log}(6887.47 / 7014.92) + 525 = 520^\circ\text{C}$ 。故建议该电场不得投运并立即吊芯检查，以免使故障扩大。

接下来对该变压器进行了吊芯检查，整个铁芯吊出来后，立刻可看到有一个线圈的绝缘材料已有被烧焦的痕迹，故障为低压线圈匝间短路，因存在短路故障造成很大的短路电流，故该电场一开机电源开关就跳闸。回想吊芯前的检测，未发现问题的原因在于，低压线圈虽然是匝间短路，但未造成低压线圈对高压线圈、及低压线圈对地短路，故绝缘电阻测试正常。按理说线圈匝间短路变压器的直流电阻应降低，但是由于该线圈本身的电阻值就很小，部分线圈匝间短路后其直流电阻变化不明显，故造成直流电阻也正常的假象，所以测变压器直流电阻时没有发现问题。

因该变压器线圈绕组绝缘烧坏，维修较困难且修理费用比较贵，已不值得再修理，故最后决定更换新的变压器。

## 六 总结

在用气相色谱连续检测充油电气设备内部故障的过程中，如果发现油中各种气体的含量中有一项达到了注意值范围时，应开始引起注意，采取措施进行其它电气试验等，以便对设备有无异常作出分析和判断。当试验结果中一项超过注意值上限时，应采取措施，尽早停止运行，并用其它试验进行验证，进一步找出故障点，防止重大事故的发生。

用气相色谱法对充油电气设备油中气体含量的分析，能判明设备存在的故障，更重要的是分析判断故障的性质，是过热性故障还是放电性故障及故障的大概部位是在裸金属部分还是介入了固体绝缘，从而进一步估计故障的危害性，以便及时采取措施，作出正确处理，防患于未然。

综上所述，利用气相色谱分析变压器油的气体组分及其含量，能够使技术人员充分掌握并监测变压器的运行状态，能够提前知道变压器内部是否存在潜伏性故障，即在变压器运行中（不停电、不吊芯的情况下），通过常规检测及色谱分析就可以把变压器内有无故障、有什么性质故障诊断出来，这对于变压器的维护保养起到关键性的指导作用，从而更好地保证电力系统的安全运行。

#### 参考文献

- [ 1 ] 中华人民共和国电力行业标准 D L / T 5 9 6 — 1 9 9 6：电力设备预防性试验规程．中国电力出版社，1 9 9 6
- [ 2 ] 中华人民共和国能源部部标准 S D 1 8 7 — 8 6：变压器油中溶解气体分析和判断导则．水利电力出版社，1 9 8 6
- [ 3 ] 电力用油（气）实用技术问答．中国水利水电出版社

林 云

玉溪红塔烟草（集团）有限责任公司动力部

[\[网站导航\]](#) | [\[设为首页\]](#) | [\[联系方式\]](#) | [\[意见反馈\]](#)

www.tobacco.org.cn All Rights Reserved.

版权所有 中国烟草学会

本网站由中国烟草物资电子商务网提供技术支持