

# 中华人民共和国国家标准

## 变压器油中溶解气体分析和判断导则 GB 7252-87

Guide for the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil

### 1 总则

#### 1.1 概述

正常情况下充油电气设备内的绝缘油及有机绝缘材料，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、一氧化碳等气体，这些气体大部分溶解在油中。当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。随着故障发展，分解出的气体形成的气泡在油里经过对流、扩散，不断地溶解在油中。在变压器里，当产气速率大于溶解速率时，会有一部分气体进入气体继电器。故障气体的组成和含量与故障的类型和故障的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掌握故障的发展情况。

当变压器的气体继电器内出现气体时，分析其中的气体，同样有助于对设备的情况作出判断。

#### 1.2 适用范围

本导则适用于充油电气设备，其中包括变压器、电抗器、电流互感器、电压互感器、充油套管等。

#### 1.3 检测周期

出厂前的检测按有关规定执行并提供试验数据。

投运时及运行中的设备按 SD 37-86《变压器油中溶解气体分析和判断导则》执行。

### 2 取样

#### 2.1 从充油电气

##### 2.1.1 概述

取样部位应注意所取的油样能代表油箱本体的油。一般应在设备下部的取样阀门取油样，在特殊情况下，可由不同的取样点取样。

取样量，对大油量的变压器、电抗器等可为 50~250ml，对少油量的设备要尽量少取，以够用为限。

##### 2.1.2 取油样的容器

杭州高电

Professional high voltage test

高压测量仪器智造 电力试验工程服务

应使用密封良好的玻璃注射器取样。当注射器充有油样时，芯子能自由滑动，可以补偿油的体积随温度的变化，使内外压力平衡。

### 2.1.3 取油样的方法

一般对电力变压器及电抗器可在运行中取样。对需要设备停电取样时，应停运后尽快取样。对于可能产生负压的密封设备，应防止负压进气。

设备的取样阀门应配上带有小嘴的连接管，在小嘴上接软管。取样前后排除取样管路中及取样阀门内的空气和“死油”，同时用设备本体的油冲洗管路（少油量设备可不进行此步骤）。取油样时油流应平缓。

用注射器取样时，最好在注射器和软管之间接一小型金属三通阀，如图 1 所示，按下述步骤取样：将“死油”经三通阀排掉；转动三通阀使少量油进入注射器；转动三通阀并推压注射器芯子，排除注射器内的空气和油；转动三通阀使油样在静压力作用下自动进入注射器（不应拉注射器芯子，以免吸入空气或对油样脱气）。当取到足够的油样时，关闭三通阀和取样阀，取下注射器，用小胶头封闭注射器（尽量排尽小胶头内的空气）。整个操作过程应特别注意保持注射器芯子的干净，以免卡涩。

图 1 用注射器取示意图

①-连接胶管；②-三通阀；③-注射器

## 2.2 从气体继电器放气嘴取气样

### 2.2.1 概述

当气体继电器内有气体聚集时，应取气样进行色谱分析。这些气体的组分和含量是判断设备是否存在故障及故障性质的重要依据之一。为减少不同组分有不同回溶率的影响，必须在尽可能短的时间内取出气样，并尽快分析。

### 2.2.2 取气样的容器

应使用密封良好的玻璃注射器取气样。取样前应用设备本体油润湿注射器，以保证注射器润滑和密封。

### 2.2.3 取气样的方法

取气样时应在气体继电器的放气嘴上套一小段乳胶管，乳胶管的另一头接一个小型金属三通阀与注射器连接（要注意乳胶管的内径与气体继电器的放气嘴及金属三通阀连接处要密封）。操作步骤和连接方法如图 1 所示：转动三通阀的方向，用气体继电器内的气体冲洗连

接管路及注射器；转动三通阀，排空注射器；再转动三通阀取气样。取样后，关闭放气嘴，转动三通阀的方向使之封住注射器口，把注射器连同三通阀和乳胶管一起取下来，然后再取下三通阀，立即改用小胶头封住注射器(尽可能排尽小胶头内的空气)。

取气时应注意不要让油进入注射器并注意人身安全。

### 2.3 样品的保存和运输

油样和气样应尽快进行分析，油样保存期不得超过 4 天，气样保存期应更短些。在运输过程及分析前的放置时间内，必须保证注射器的芯子不卡涩。

油样和气样都必须避光保存，在运输过程中应尽量避免剧烈振荡。油样和气样空运时要避免气压变化的影响。

### 2.4 样品的标签

取样后的容器应立即贴上标签。推荐的标签格式见附录 b(参考件)。

## 3 从油中脱出溶解气体

### 3.1 脱气方法

目前常用的脱气方法分类如图 2 所示。

图 2 常用脱气装置分类

图 2 中除水银法外的三类真空法均属于不完全的脱气方法，在油中溶解度越大的气体脱出率越低。不同的脱气装置或同一装置采用不同的真空度，将造成分析结果的差异。因此使用真空释放法脱气，必须对脱气装置的脱气率进行校核。

溶解平衡法目前使用的是机械振荡法，其特点是操作简便，重复性和再现性一般能满足要求，但测试结果的准确性主要取决于所采用的奥斯特瓦尔德 (Ostwald) 系数  $K$  值的准确性。

奥斯特瓦尔德系数定义为：

即：当气、液两相达到平衡时，对某特定气体来说：

式中： $C_{oi}$ --在平衡条件下，溶解在油中组分  $i$  的浓度，ppm；

$C_{gi}$ --在平衡条件下，气相中组分  $i$  的浓度，ppm；

$K_i$ --组分  $i$  的奥斯特瓦尔德系数。

各种气体在矿物绝缘油中的奥斯特瓦尔德系数见表 1。

表 1 各种气体在矿物绝缘油中的奥斯特瓦尔德系数  $K_i$

脱气这一环节是油中溶解气体分析结果差异的主要来源。故要达到本导则第 4.3.5 款所要求的平行试验的一致性，必须首先保证脱气结果的重复性。

## 2.2 脱气装置的密封性

脱气装置应保证良好的密封性，真空泵抽气装置应接入真空计以监视脱气前真空系统的真空度（一股残压不应高于 40Pa），要求真空系统在泵停止抽气的情况下，在两倍脱气所需的时间内残压无显著上升。用于溶解平衡法的玻璃注射器应对其密封性进行检查。

## 3.3 脱气率

为了尽量减少因脱气这一操作环节所造成的分析结果的差异使用不完全脱气方法时，应测出所使用的脱气装置对每种被测气体的脱气率，并用脱气率将分析结果换算到油中溶解的各种气体的真空含量。各组分脱气率  $\eta_i$  的定义是：

式中： $U_{gi}$ --脱出气体中某组分的含量，ppm；

$U_{ei}$ --油样中实有某组分的含量，ppm。

可用已知各组分浓度的油样来校核脱气装置的脱气率。脱气率一般不容易测准，因受油的粘度，温度，大气压力等因素的影响，即使是同一台脱气装置，其脱气率也不会是一个常数，因此，一般采取多次校核的平均值。

## 3.4 其他注意事项

因脱气装置的结构不同，容量不同，故用油量不作统一规定，但同一装置的每次试验应尽可能使用同样的油量。必须测出使用油样的体积和脱出气体的体积，至少精确到两位有效数字。

为了提高脱气效率和降低测试的最小检出浓度，对真空脱气法一般要求脱气室体积和进油样体积相差越大越好。对溶解平衡法在满足分析进样量要求的前进下，应注意选择最佳的气、液两相体积比。

脱气装置应与取样容器连接可靠，防止进油进带入空气。

气体自油中脱出后应尽快转移到储气瓶或玻璃注射器中去，以免气体与脱过气的油接触时，因各组分有选择性回溶而改变其组成。脱出的气样应尽快进行分析，避免长时间的储存而造成气体逸散。

要注意排净前一个油样在脱气装置中的残油或残气，以免可燃气体含量较高的油样污染下一个油样，用真空泵饱和食盐水法脱气时，要注意先对食盐水进行脱气，必要时更换食盐水。

#### 4 气体分析方法

4.1 从气体继电器所取的气样及从油中得到的溶解气体的气样，均用气相色谱仪进行组分和含量的分析。分析对象为：

氢 (H<sub>2</sub>):

甲烷 (CH<sub>4</sub>), 乙烷(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), 乙烯(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), 乙炔(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>);

一氧化碳 (CO), 二氧化碳(CO<sub>2</sub>)。

本导则所指的总烃是指甲烷 (简称 C<sub>1</sub>), 乙烷, 乙烯, 乙炔(以上三者统称为 C<sub>2</sub>)图种气体的总和。

一般对丙烷 (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), 丙烯(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>), 丙炔(C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>)(以上三者统称 C<sub>3</sub>)不要求做分析。在计算总烃含量时, 不计 C<sub>3</sub> 的含量。如果已经分析出结果来, 应做记录, 积累数据。

氧 (O<sub>2</sub>), 氮(N<sub>2</sub>)虽不作判断指标, 但应尽可能分析。

#### 4.2 对气相色谱仪的要求

气相色谱仪应满足下列要求:

- a. 色谱柱对所检测组分的分离度应满足定量分析要求;
- b. 仪器基线稳定, 有足够的灵敏度。对油中气体最小检知浓度: 乙炔不大于1ppm, 氢不大于 10ppm。

推荐适合上述分析要求的气相色谱仪流程图见表 2。

表 2 色谱仪流程图举例

注：TCD--热导检测图；FID--氢火焰离子化检测器；Ni--镍触媒。

### 4.3 气体分析步骤

#### 4.3.1 进样

通常使用注射器进样。应选择气密性好并经校准的注射器，以保证良好的进样重复性。

#### 4.3.2 仪器的标定

用外标法对各组分进行定性和定量分析。用测量与个组分的保留时间对各组分定性，用测量某色谱峰面积或峰高进行定量。

影响色谱仪灵敏度的因素很多，为保证测试结果的准确性，至少应在分析的当天用外标气样标定一次。

外标气样有如下两种：

- a. 混合标气：由有关部门专门配制的适当浓度并准确标定的包括各测定组分的混合气样。
- b. 自配标气：用已知浓度的“纯”气样自行配制的标准气样。

配标准气样可以用特制的大容量配气瓶或 100ml 玻璃注射器。以载气为底气，注入定量的“纯”气，混合均匀后即可使用。配气用的所有容器及注射器的真空容积都是必须用蒸馏水称重法精确校准。配好的气样一般不宜在配气容器中长时间储存，以免因气体逸散而影响标定的准确性。

为了提高分析的准确度，应尽可能采用混合标气标定。

用注射器进样时，仪器的标定和组分测定必须用同一注射器，并且进样体积应相同，以减少误差。

#### 色谱峰面积的测量

各组分峰面积最好用积分仪测量，也可以用测量峰高和半高峰宽来计算。为保证半高峰宽测量的准确性，应采用较快护录纸速，并最好采用读数放大镜。如果同一组分的半高峰宽的标定和所分析的样品浓度范围内变化不大，则可以只测量或数个该组分的半高峰宽，以其平均值作为计算的依据。

#### 4.3.3 分析结果的表示方法

分析结果用每升油中所含各气体组分的微开数以 ppm 表示。

由于油的体积随温度和压力变化不大，一般可以不进行修正。对于脱出的气体则应换算到压

力为 101325Pa, 温度为 20℃时的体积。换算公式为:

式中:  $V_g$ --脱出气体换算到压力为 101325Pa, 温度为 20℃时的体积, ml;

$V'_g$ --脱出气体在压力为 P 温度为 t 时的实测体积, ml;

P--脱出气体压力(脱气时的大气压), Pa;

t--环境温度, °C。

分析结果的记录符号:

- a. “0”表示未测出数据;
- b. “-”表示对该组分未作分析;
- c. 当小于 0.5ppm 时, 以“痕量”表示;
- d. 当大于或等于 0.5ppm 时, 记录实测数据。

#### 4.3.4 计算

若使用积分仪测量峰面积, 可采用下式计算各组分浓度:

式中:  $C_i$ --组分 i 的浓度, ppm;

$C_s$ --外标物的浓度, ppm;

$f_i$ --组分 i 的克分子相对校正因子;

$\eta_i$ --脱气装置对组分 i 的脱气率;

$V_g$ --脱出气体在压力为 101325Pa; 温度为 20℃时的体积, ml;

$V_o$ --被脱气的油样体积, ml

$A_i$ --组分 i 在积分仪上给出的峰面积, mV·s;

$A_s$ --外标物在积分仪上给出的峰面积, mV·s。

当不使用积分仪时，若外标物与被测组分一致，则采用下式计算各组分的浓度：

式中： $\eta_i$ 、 $C_i$ 、 $C_s$ 、 $V_g$ 、 $V_o$  的意义和单位与(5)式同；

$h_i$ --组分  $i$  的峰高，mm；

$h_s$ --外标物的峰高，mm；

$k_i$ --测定组分  $i$  时仪器的讯号衰减倍数；

$k_s$ --标定时仪器的讯号衰减倍数。

若外标物与被测组分不一致时，则需要测量峰高和半高峰宽，用下式来计算各组分的浓度：

式中： $f_i$ 、 $\eta_i$ 、 $C_i$ 、 $C_s$ 、 $V_g$ 、 $V_o$ 、 $h_i$ 、 $h_s$ 、 $k_i$ 、 $k_s$  的意义和单位与(6)式同；

$W_{h/2i}$ --组分  $i$  的半高峰宽，mm；

$W_{h/2s}$ --外标物的半高峰宽，mm；

$\mu_i$ --测定组分  $i$  时仪器所用的纸速，mm/min；

$\mu_s$ --标定时仪器所用的纸速，mm/min。

当使用氢火焰离子化鉴定器，以乙烯或乙炔为外标物时，各种气体的克分子相对校正因子  $f_i$  可采用表 3 所列的数值。

表 3 各种气体在氢火焰离子化检测器上的克分子相对校正因子  $f_i$

用转化法在氢火焰离子化检测器上测定一氧化碳、二氧化碳时，应对镍触媒将一氧化碳、二氧化碳转化为甲烷的转化率作考察。若转化率视为 100%时，则可采用甲烷的克分子相对校正因子进行计算。

#### 4.3.5 试验结果的重复性和再现性

本试验方法从取样到取得分析结果之间操作环节较多，应力求减少每个操作环节可能带来的误差。



对同一气样的多次进样的分析结果，应在其平均值的 $\pm 2.5\%$ 以内。

应检验配气装置及操作方法的重复性，要求配气结果的重复性在平均值的 $\pm 2.5\%$ 以内。

对分析结果的重复性和再现性的要求是：同一试验室的两个平行试验结果，当含量在 10ppm 以下时，相差不应大于 1ppm；当含量在 10ppm 以上时，不应大于平均值的 10%。不同试验室间的平行度验结果相差不应大于平均值的 30%。

## 5 试验结果的判断

### 5.1 油和固体绝缘材料产生的气体

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、氯、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。在油纸绝缘中存在局部放电时，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，油裂解产生的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。表 4 为不同故障类型产生的气体组分。

表 4 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过彻底脱气，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。

### 5.2 油中溶解气体的注意值

#### 5.2.1 运行中的设备

运行中设备内部油中气体含量超过表 5 所列数值时，应引起注意。

表 5 油中溶解气体含量的注意值

注：① 气体浓度达到注意值时，应进行追踪分析、查明原因。注意值不是划分设备有无故障的唯一标准。该表数值不适用于从气体继电器放气嘴取出的气样。

② 影响电流互感器和电容式套管油中氢气含量的因素较多，有的氢气含量低于表中数值，若增加较快，也应引起注意；有的只有氢气含量超过表中数值，若无明显增加趋势，也可判断为正常。

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。

推荐下列两种方式来表示产气速率（未考虑气体损失）：

a. 绝对产气速率即每运行小时产生某种气体的平均值，按下式计算：

式中： $r_a$ --绝对产生速率，ml/h；

$C_{i2}$ --第二次取样测得油中某气体浓度，ppm；

$C_{i1}$ --每一次取样测得油中其气体浓度，ppm；

$\Delta t$ --二次取样时间间隔中的实际运行时间，h；

$G$ --设备总油量，t；

$\rho$ --油的密度，t/m<sup>3</sup>。

变压器和电抗器总烃产气速率的注意值如表 6 所示。

表 6 总烃产气速率的注意值

注：当产气速率达到注意值时，应进行追踪分析。

b. 相对产气速率即每运行月（或折算到月）某种气体含量增加原有值的百分数的平均值，按下式计算：

式中： $\gamma_r$ --相对产气速率，%/月；

$C_{i2}$ --第二次取样测得油中某气体浓度，ppm；

$C_{i1}$ --第一次取样测得油中某气体浓度，ppm；

$\Delta t$ --二次取样时间间隔中的实际运行时间，月。

相对产气速率也可以用来判断充油电气设备内部状况，总烃的相对产气速率大于 10%时应引起注意。对总烃起始含量很低的设备不宜采用此判据。

### 5.2.2 出厂和新投运的设备

出厂和新投运的设备，油中不应含有乙炔，其他各组分也应该很低。出厂试验前后两次分析结果不应有明显差别。

### 5.3 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注意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，若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 30ppm 时，即使总烃含量正常，也可能有固体绝缘过热故障。

对贮油相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。

### 5.4 判断故障性质的三比值法

本导则推荐采用三比值法（五种特征气体的三对比值）作为判断变压器或电抗器等充油电气设备故障性质的主要方法。三对比值以不同的编码表示。三比值法的编码规则和判断方法分别见表 7 和表 8。

表 7 三比值法的编码规则

表 8 判断故障性质的三比值法

续表 8

注：① 随着火花放电强度的增长，特征气体的比值有如下增长的趋势：乙炔/乙烯比值从 0.1~3 增加到 3 以上；乙烯/乙烷比值从 0.1~3 增加到 3 以上。

② 在这一情况中，气体主要来自固体绝缘的分解，这说明了乙烯/乙烷比值的变化。

③ 这种故障情况通常由气体浓度的不断增加来反映。甲烷/氢的值通常大约这 1，实际值大于 1 与很多因素有关，如油保护系统的方式，实际的温度水平和油的质量等。

④ 乙炔含量的增加表明热点温度可能高于 1000℃。

⑤ 乙炔和乙烯的含量均未达到应引起注意的数值。

在应用三比值法时应该注意到：

a. 只有根据各组分含量的注意值或产气速率的注意值有理由判断可能存在故障时才能进一步用三比值法判断其故障的性质。对气体含量正常的变压器等设备，比值没有意义。

b. 表中每一种故障对应于一组比值，对多种故障的联合作用，可能找不到相对应的比值组合。

c. 在实际中可能出现没有包括在上表中的比值组合，对于某些组合的判断正在研究中。例如，121 或 122 对应于某些过热与放电同时存在的情况；202 或 201 对于有载调压变压器，应考虑切换开关油室的油可能向变压器的本体油箱渗漏的情况。

## 5.5 判断故障的步骤

### 5.5.1 运行中设备

a. 将试验结果的几项主要指标(总烃、甲烷、乙炔、氢)与表 5 列出的注意值作比较，同时注意产气速率与表 6 列出的注意值作比较，短期内各种气体含量迅速增加，但尚未超过表 5 中的数值，也可判为内部有异常状况；有的设备因某种原因使气体含量基值较高，超过表 5 的注意值，但增长速率低于表 6 产气速率的注意值，仍可认为是正常设备。

b. 对一氧化碳和二氧化碳的指标按第 5.3 条所述原则进行判断。

c. 当认为设备内部存在故障时，可用三比值法对故障的类型作出判断。

d. 在气体继电器内出现气体的情况下，应将继电器内气样的分析结果按附录 A(被充件)的方法与油中取出气体的分析结果作比较。

e. 根据上述结果以及其他检查性试验(如测量绕组直流电阻空载特性试验、绝缘试验、局部放电试验和测量微量水分等)的结果,并结合该设备的结构、运行、检修等情况,综合分析判断故障的性质及部位,根据具体情况对设备采取不同的处理措施(如缩短试验周期;加强监视、限制负荷、近期安排内部检查;立即停止运行等)。

### 5.5.2 出厂前的设备

按 5.5.2 款的规定进行比较,并注意积累数据。当根据试验结果怀疑有故障时,应结合其他检查性试验进行综合判断。

### 5.6 设备档案卡片

为了对设备进行长期监视,应建立设备油中溶解气体分析情况的档案卡片。推荐卡片格式见附录 C(参考件)。

### 附录 A 平衡判据(补充件)

分析和比较油中溶解气体和气体继电器中的自由气体的浓度,可以判断自由气体与溶解气体是否处在平衡状态,进而可以判断故障的持续时间。当气体继电器发出信号时,可使用平衡判据。此时除取气体继电器中的自由气体进行色谱分析外,同时取油样进行溶解气体的色谱分析,二者进行比较。

比较方法:首先要把自由气体中各组分的浓度值利用各组分的奥斯特瓦尔德系数  $K_i$  计算出油中溶解气体的理论值,或从油中溶解气体各组分的浓度值计算出自由气体的各组分的理论值,然后再进行比较。

计算方法:见第 3.1 条(2)式。

判断方法:

a. 如果理论与实测值近似相等,可认为气体是在平衡条件下放出来的。这里有两种可能,一是故障气体各组分含量均很少,说明设备是正常的;另一种是溶解气体含量略高于自由气体的含量,则说明设备存在产生气体较慢的潜伏性故障。

b. 如果气体继电器中的故障气体含量明显超过油中溶解气体含量时,说明释放气体较多,设备存在产生气体较快的故障。

附加说明:

本标准由全国变压器标准化技术委员会提出。

本标准由水电部电力科学研究院归口。

本标准主要起草人贾瑞君。