

ICS 29.180

K41

备案号：63055-2018

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 984 —2018

代替 DL/T 984 —2005

油浸式变压器绝缘老化判断导则

Guide for the diagnosis of insulation aging
in oil-immersed power transformer

2018-04-03发布

2018-07-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言.....	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 绝缘老化测试项目	2
4.1 概述	2
4.2 纸绝缘的聚合度	2
4.3 油中糠醛	2
4.4 油中溶解气体	2
5 绝缘老化判据及影响因素	2
5.1 纸绝缘的聚合度.....	2
5.2 油中糠醛	3
5.3 油中一氧化碳和二氧化碳	4
6 其他.....	5
附录 A (资料性附录) 变压器绝缘老化机理及寿命	6
附录 B (规范性附录) 绝缘纸(板)聚合度测试方法	11
附录 C (资料性附录) 变压器绝缘老化典型实例	15
附录 D (资料性附录) 绝缘油中丙酮含量分析测定方法	21
附录 E (资料性附录) 介电响应特性测量方法.....	23

前 言

本标准按照GB/T1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准代替DL/T984—2005《油浸式变压器绝缘老化判断导则》。本标准与DL/T984—2005相比，除编辑性修改外，主要技术内容变化如下：

- 增加了“GB1094.1和GB/T2900.15界定的以及下列术语和定义适用于本标准”的内容(见第3章)；
- 增加了“糠醛”的定义(见3.2)；
- 增加了“c) 变压器运行超过30年”的取样内容(见5.1.3)；
- 增加了“f) 运行中变压器在滤油前后分别取样；g) 运行超过10年”的取样内容(见5.2.3)；
- 增加了“其他”(见6)；
- 增加了资料性附录“变压器绝缘老化机理及寿命”(见附录A)、“绝缘油中丙酮含量分析测定方法”(见附录D)和“介电响应特性测量方法”(见附录E)；
- 增加了资料性附录“变压器绝缘老化典型实例”(见附录C)；
- 删除了第4章变压器寿命及绝缘老化机理；
- 删除了规范性附录B“油中糠醛含量(用高效液相色谱仪)测量方法”；
- 修改了第5章绝缘老化判断的测试项目及原理的章名(见4)；
- 修改了第6章判据及影响因素的章名(见5)；
- 修改了规范性附录“绝缘纸(板)聚合度测试方法”的部分内容(见附录B)。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电力变压器标准化技术委员会(DL/TC 02)归口。

本标准起草单位：中国电力科学研究院、国网湖北省电力公司电力科学研究院、广东电网公司电力科学研究院、重庆大学、国网山东省电力公司电力科学研究院、国网上海市电力公司、国网江苏省电力公司检修分公司、国网福建省电力有限公司电力科学研究院、国网浙江省电力公司、国网电力科学研究院、国网吉林省电力有限公司、电力工业电气设备质量检验检测中心、国网陕西省电力公司电力科学研究院、国网吉林省电力有限公司电力科学研究院、阿尔斯通电网技术中心有限公司、常州东芝变压器有限公司、吴江变压器有限公司、江苏华鹏变压器有限公司、大唐国际发电股份有限公司张家口发电厂。

本标准主要起草人：刘雪丽、李博、凌愨、程焕超、张淑珍、王瑞珍、付强、李剑、辜超、周晓凡、徐建刚、陈金祥、施广宇、吴锦华、林春耀、宫淑君、薛辰东、朱建新、汪可、刘孝为、李绍英、朱红梅、吕彦冬、洪睿钧、林灿华、刘锐、耿基明。

本标准历次发布情况为：

- DL/T 984—2005。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心(北京市白广路二条一号，100761)。

油浸式变压器绝缘老化判断导则

1 范围

本标准规定了油浸式变压器绝缘老化程度的测试项目、判断方法和判据。
本标准适用于矿物油纸绝缘的油浸式变压器和电抗器。

2 规范性引用文件

下列文件对于本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本标准。

- GB/T 265 石油产品运动黏度测定法和动力黏度计算法
- GB/T 1094.1 电力变压器 第1部分：总则
- GB/T1094.7 电力变压器 第7部分：油浸式电力变压器负载导则
- GB/T 2900.5—2013 电工术语 绝缘固体、液体和气体
- GB/T2900.15 电工术语 变压器、互感器、调压器和电抗器
- GB/T7597 电力用油(变压器油、汽轮机油)取样方法
- GB/T 12914 纸和纸板抗张强度的测定
- GB/T14542 运行变压器油维护管理导则
- GB/T 17623 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法
- GB/T22898 纸和纸板 抗张强度的测定 恒速拉伸法(100mm/min)
- DL/T 572 电力变压器运行规程
- DL/T 596 电力设备预防性试验规程
- DL/T 722 变压器油中溶解气体分析与判断导则
- SH/T 0802 绝缘油中2,6-二叔丁基对甲酚测定法

3 术语和定义

GB/T1094.1 和GB/T2900.15 界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

聚合度 degree of polymerization

一个纤维素分子中所包含的 D- 葡萄糖单体的数量，称为该纤维素分子的聚合度。组成每个纤维素分子的 D- 葡萄糖单体的数量是不同的。在实验室测出的绝缘纸(板)黏均聚合度，代表该样品纤维素分子聚合度的平均水平。

[GB/T2900.5—2013, 术语和定义212-04-18]

3.2

糠醛(2-呋喃甲醛) furfural

呋喃2位上的氢原子被醛基取代的衍生物，绝缘纸(板)劣化的主要特征产物之一。

4 绝缘老化测试项目

4.1 概述

油浸式变压器寿命实际是指绝缘纸和纸板(以下简称纸绝缘)的寿命。纸绝缘寿命的判据,主要取决于机械性能。测试变压器中纸绝缘的聚合度和油中溶解的糠醛及 CO、CO₂等有特征性的老化产物含量,可综合判断变压器纸绝缘的老化状态。绝缘油和纸绝缘的老化机理参见附录A。

变压器油老化判断可按 GB/T14542 和 DL/T596 中有关规定进行。

4.2 纸绝缘的聚合度

大型变压器所使用的新纸绝缘的聚合度一般为1000~1200。聚合度同纸的抗张强度有相关性,因此测试样品的聚合度对判断变压器整体老化程度,或对可以直接取到纸样的故障部位的老化情况是有意义的。测试纸绝缘的聚合度对样品无尺寸、形状等严格要求,应在变压器放油后采集。测试方法参见附录B。

4.3 油中糠醛

油中糠醛质量浓度的增加在某种程度上反映了纸绝缘的聚合度下降,测试油中糠醛的含量,可以反映变压器纸绝缘的老化情况。合格的新变压器油中糠醛含量应不大于0.05mg/kg。测试方法见 SH/T0802。

4.4 油中溶解气体

纸绝缘的正常老化与故障情况下的裂解均可产生 CO 和 CO₂, 两种情况下油中溶解的 CO 和 CO₂ 含量没有严格的界限,规律也不明显。此外,从空气中吸收的CO₂及油的长期氧化形成的CO和CO₂也会影响油中溶解的CO和CO₂含量。

从变压器运行过程的产气速率来观察,油中溶解的CO和CO₂含量能够在一定程度上区分变压器纸绝缘的正常老化和故障情况下的裂解。正常运行的变压器在投运前期,油中溶解的CO和CO₂,特别是CO产气率是比较高的,然后逐年下降;多年运行后,其含量的增长曲线渐趋饱和。当绝缘发生局部或大面积的深度老化时,油中溶解的CO和CO₂产气速率就会剧增。测试方法见 GB/T17623。

5 绝缘老化判据及影响因素

5.1 纸绝缘的聚合度

5.1.1 判据

5.1.1.1 纸绝缘的抗张强度等随聚合度的下降而逐渐下降。当聚合度降到250时,抗张强度已经低于50%,说明纸绝缘深度老化;聚合度约为150时,纸绝缘完全丧失机械强度。

5.1.1.2 当变压器中采集的纸绝缘样品的聚合度降低到250时,应对该变压器的纸绝缘老化引起注意;如果从气体分析中已发现存在局部过热的可能,则部分绝缘有可能已炭化,绝缘强度会受到影响,此时糠醛含量较高,不宜再继续运行;或鉴于对设备的可靠性要求较高,且有条件更换时,也可考虑退出运行。

5.1.1.3 纸绝缘样品的聚合度降低到近150时,变压器应退出运行。变压器纸绝缘聚合度具体判据见表1。

表 1 变压器纸绝缘聚合度具体判据

样品聚合度 DP _v	>500	500~250	250~150	<150
诊断意见	良好	可以运行	注意(根据情况作决定)	应退出运行

5.1.2 影响因素

聚合度是表征纸的机械强度的一个重要参数，由于变压器复杂的绝缘结构和取样位置的限制，所取纸板或垫块等样品的聚合度往往高于老化严重部位纸绝缘的聚合度。但是，正常老化的变压器，其不同部位纸的聚合度分布具有一定的规律性(参见附录C中C.1和C.2)，因此用能取到的样品聚合度也可大致判断变压器绝缘老化状况。如果属于故障性的局部绝缘加速老化，在不能取到该老化部位样品的情况下，测试结果反映的老化程度是不真实的，只能代表取样部位的聚合度。

另一方面，样品的聚合度有时可能比实际情况偏低，如取某些引线的外包绝缘纸，即使纸已过度老化，但不一定代表变压器内部绝缘情况。引线绝缘的老化可能是引线设计电流密度过大或焊接不良，此时内层绝缘比外层绝缘老化严重；也可能是油的过度老化，因酸性腐蚀引起外层绝缘严重劣化。还有，在设备检修中被焊接高温烤焦的纸绝缘的聚合度也显著偏低。此外，取引线绝缘时应避免取属于棉纤维的白布带。

为了从测试结果得到正确判断，应在多个部位取样(加以标明)，以便尽可能真实反映整体绝缘的聚合度。

5.1.3 取样

变压器有吊检机会时，在下述任一情况下取纸样分析：

- a) 油中糠醛含量超过注意值；
- b) 负载率较高的变压器运行25年左右；
- c) 变压器运行超过30年；
- d) 变压器准备退役前。

取样部位包括线圈上下部位的垫块、绝缘纸板、引线纸绝缘、散落在油箱内的纸片等，各不同部位的取样量应大于2g。

5.2 油中糠醛

5.2.1 判据

变压器油中糠醛的含量应随运行时间的增加而增加，但不同变压器除了制造上的固有差异外，还因运行中环境温度、负载率等不同，造成在相同运行时间内糠醛含量的分散性；另外，变压器油纸比例不同，测试结果用单位体积油中糠醛的毫克量表示，使相同老化状况的不同设备的测试结果出现不同；变压器油处理也是影响糠醛含量的重要因素。变压器的运行时间同糠醛含量的对数之间表现为一个线性区域，见图1。图1中不同运行年限落入区域A的变压器油中糠醛含量的下限值 $[\log(f) = -1.65 + 0.08t]$ ，其中f为糠醛含量，单位为mg/L，t为运行年数]，作为可能存在绝缘非正常老化的注意值。

当油中糠醛含量落入区域A时，应了解变压器在运行中是否经受或多次经受急救性负载、运行温度是否经常过高、冷却系统和油路是否异常，以及含水量是否过高等情况；绝缘的局部过热老化，也能够引起油中糠醛含量高于注意值。为了诊断设备绝缘是否的确存在故障，应当根据具体情况缩短分析周期，监测油中糠醛和CO、CO₂含量及其增长速度，并应避免外界因素对测试结果的影响。对运行时间不很长(如小于10年)的变压器，当油中糠醛含量过高时尤其需要重视(参见附录C中C.3)。

纸绝缘的聚合度与油中糠醛含量的对数之间有较好的相关性，参见附录A。

5.2.2 影响因素

油中糠醛含量虽能反映绝缘老化状况，但测试结果会受多种因素影响。因此，设备在运行过程中可能出现糠醛含量波动的情况。主要有以下影响因素：

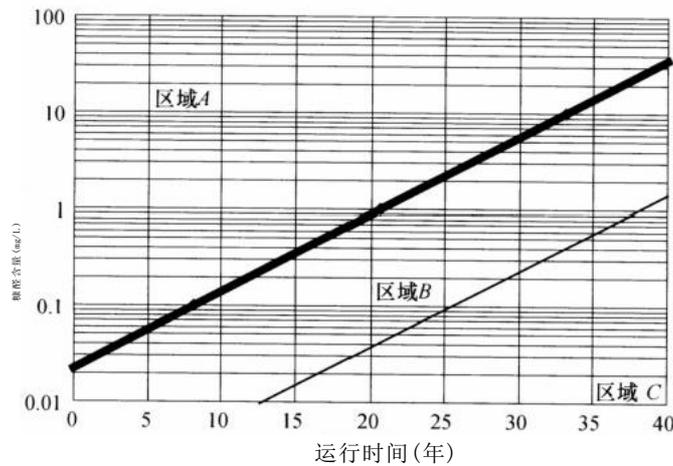


图 1 变压器油中糠醛含量同运行时间的关系

- a) 作为一般多相平衡体系，糠醛在油和纸之间的平衡关系受温度影响。变压器运行温度变化时，油中糠醛含量会随之波动。
- b) 变压器进行真空滤油处理时，随着脱气系统真空度的提高、滤油温度的升高、脱气时间的增加，油中糠醛含量相应下降。变压器油经过某些吸附剂处理后，油中糠醛全部消失。
- c) 变压器油中放置硅胶(或其他吸附剂)后，由于硅胶的吸附作用，油中糠醛含量明显下降。装有净油器的变压器，油中糠醛含量随吸附剂量和吸附剂更换时间的不同而有不同程度的下降，每次更换吸附剂后可能出现一个较大降幅。
- d) 变压器更换新油或油经处理后，纸绝缘中仍然吸附有原变压器油。这时，油中糠醛含量先大幅度降低，然后由于纸绝缘中的糠醛向油中扩散，油中糠醛含量逐渐回升，最后达到平衡。
- e) 在纸绝缘接近寿命末期时，纤维素降解产生糠醛的速度较慢，甚至低于糠醛自身热分解的速度，有可能导致末期糠醛含量的降低，进行诊断时需要加以分析。

针对上述情况，应在更换新油或油处理前以及之后数周各取一个油样品，以便获得油中糠醛的变化数据。对于非强油循环冷却的变压器，油处理后可适当推迟取样时间，以便使糠醛在油纸之间达到充分的平衡。变压器继续运行后的绝缘老化判断，应将换油或油处理前后的糠醛变化差值计算进去。

对于需要重点监视的变压器，应定期测定糠醛含量，观察变化趋势，一旦发现糠醛含量高，就应引起重视。在连续监测中，测到糠醛含量高而后再降低，往往是受干扰所致。

5.2.3 取样

5.2.3.1 按照 GB/T 7597取油样。

5.2.3.2 在下述情况下取油样：

- a) 需了解绝缘老化情况时；
- b) 油中气体色谱分析判断有过热故障，需确定是否涉及纸绝缘时；
- c) 在取纸样测聚合度前；
- d) 大修前和变压器重新投运1个月~2个月后；
- e) 超过注意值时，可在1年内检测1次；
- f) 运行中变压器在滤油前后分别取样；
- g) 运行超过10年。

5.3 油中一氧化碳和二氧化碳

DL/T722 中对CO₂/CO 提供了经验判据，并对CO 和 CO₂ 产气速率提出了注意值。但对判断绝缘老

化而言，与5.1.1和5.2.1相比，用CO 和CO₂ 判断绝缘老化的不确定性更大。根据大量变压器油中气体分析结果，得出以下判断经验：

- a) 正常情况下，随着运行年数的增加，绝缘材料老化使CO 和 CO₂ 的含量逐渐增加。由于CO₂ 较易溶解于油中，而CO 在油中的溶解度小、易逸散，因此 CO₂/CO 一般是随着运行年限的增加而逐渐变大的。当CO₂/CO 大于7时，认为绝缘可能老化，也可能是大面积低温过热故障引起的非正常老化，参见附录C 中 C.3。
- b) 对变压器投运后 CO 含量的增长情况，有下列规律：
 - 1) 随着变压器运行时间增加，CO 含量虽有波动，但总是增加的趋势；
 - 2) 变压器自投入运行后，CO 含量开始增加速度快，而后逐渐减缓，正常情况下不应发生陡增；
 - 3) 不同变压器(如生产厂家不同、年代不同)投运初期CO 含量差别很大。

据此提出以下经验公式，不满足时应引起注意

$$C_n \leq C_{n-1} \times 1.2^n \quad (n \geq 2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

C₀—运行n 年的CO 年平均含量；

n ——运行年数。

- c) 对变压器油中 CO₂ 气体分析结果，有以下经验公式，不满足时应引起注意

$$C \leq 1000 \times (2+n) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

C—运行n 年的CO₂ 年平均含量；

n ——运行年数。

6 其他

丙酮作为变压器的绝缘老化产物之一，其与聚合度之间的关系参见附录A，其测试方法参见附录D。随着检测技术的发展，丙酮有可能成为新的绝缘老化判断项目。

介电响应测试方法也具有成为判断变压器绝缘老化新测试项目的潜质，其测试原理、具体测试步骤及分析方法参见附录E。

附录 A
(资料性附录)
变压器绝缘老化机理及寿命

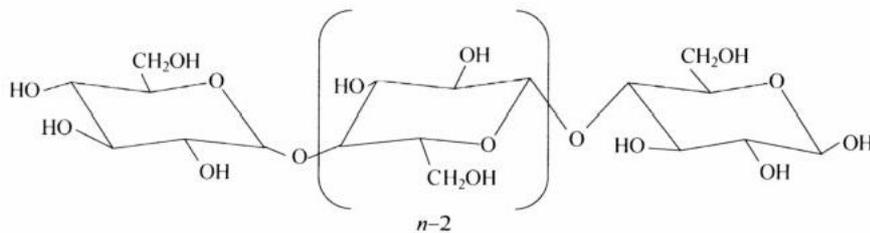
A.1 绝缘老化机理

绝缘油和纸绝缘在电、热应力以及氧气和水分的作用下都会发生降解，这一降解过程也称为老化过程；当老化到一定程度不能发挥其应有的功能时，称为寿命终止。

A.1.1 纤维素绝缘材料

变压器的纸绝缘属于纤维素绝缘材料，它是由大约75%~85%的 α -纤维素、10%~20%的半纤维素、2%~6%的木质素和少于0.5%的无机物等构成。纤维素是由葡萄糖酐和糖苷键所连接在一起的线性缩合聚合物，其结构如图A.1所示。 α -纤维素又是由约2000个葡萄糖单体($C_6H_{10}O_5$)组成的长链状高聚合碳水化合物，其中约有70%的结晶部分和30%的无定型部分。半纤维素是葡萄糖单体少于200的碳水化合物，这种成分的少量存在会对机械强度产生不利影响。

绝缘纸的制造，主要是采用未漂白的针叶木硫酸盐纸浆。硫酸盐纸浆被加工成不同类型不同密度的绝缘纸。工程中可以加入各种含氮化合物来改善纤维素的老化特性。采用牛皮纸作为绝缘后，在绕组顶部的最大设计热点温度为98℃，而采用热性能更好的绝缘纸后，其最大设计热点温度提升到110℃。



图A.1 纤维素的结构图

变压器的油纸绝缘在热的作用下将会发生分子裂解的化学反应，即热解降解反应。温度升高时反应加速，加之水解和氧化的作用，使绝缘材料加剧分解。运行中的变压器纸绝缘的热分解、水解和氧化三种反应是同时存在的，这三种降解反应的机理如下：

- a) 热分解：热分解使纤维素分子链发生解环或断裂，而解环和断裂可以在纤维素分子的任何部位发生。热分解也可能只发生在分子链的尾端，把最后一个环链解开，产生CO和CO₂等气体以及糠醛及其他呋喃化合物等液体。C—O键的热稳定性比油中的C—H键要弱，在正常运行温度下，键也可能被打开。但变压器在正常运行或者过载(运行温度低于140℃)时，热分解发生的范围不大。

在150℃以上时，纤维素结构中的化学结合水开始被脱除，会发生去氢反应。在油中氧含量较多时，部分氢与氧化合成水，导致进一步水解。试验证明，纤维素的分解作用，至少在温度近200℃时，仍不会产生大量烃类气体，但CO和CO₂增加较快，这就是有些变压器绝缘导体低温过热故障，油中气体总烃含量不大的原因。

- b) 水解：纤维素是由许多D葡萄糖单体($C_6H_{10}O_5$)通过1-4糖苷键连接而成的线性高分子聚合物。1-4糖苷键对于酸的水溶液和高温水的作用是不稳定的，容易断裂产生水解反应，即水分子透过纤维素的长分子之间，水与相邻的两个葡萄糖环的氧反应，形成两个OH基，各附于一

个环，使聚合物分离为两个部分。每次分裂就消耗1个水分子。油纸氧化所产生的酸是水解作

用的催化剂。纤维绝缘材料中所含水分越多，纤维素水解速度越快。

- c) 氧化：由于纤维素纸的葡萄糖环的碳原子存在醇羟基 (CH₂OH)，它的化学性质非常活泼，氧可能侵袭第六位C原子形成醛基—C $\begin{matrix} \text{O} \\ // \\ \text{H} \end{matrix}$ 。醛基再氧化而生成羧基，由于同分异构化，在葡萄糖苷碳上形成双键。于是，葡萄糖苷碳键就变得很不牢固，容易发生水解。羧基发生水解时纤维素链断裂，因此醇羟基的氧化归根到底是纤维素链发生断裂。

在实际的变压器中，这三种过程是同时发生的，形成非线性的Arrhenius曲线，这样就会增加应用单一活化能去描述复杂降解过程的难度。温度和环境决定了哪种降解过程占支配地位。在不同的反应之间很可能有协同作用发生，例如氧化降解可能会促进水解降解。但是，为了分析方便，假设各个过程是独立的。总的降解就是各个降解过程的综合，如公式 (A.1) 所示

$$\eta_{\text{Tot}} = \left(A_{\text{Oxi}} e^{\frac{-E_{\text{Oxi}}}{RT}} + A_{\text{Hyd}} e^{\frac{-E_{\text{Hyd}}}{RT}} + A_{\text{Pyr}} e^{\frac{-E_{\text{Pyr}}}{RT}} \right) \cdot t \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

其中，A为环境因数，E为活化能，下标 Oxi、Hyd、Pyr 分别表示氧化、水解和热分解三种过程。某种程度上可以认为这些降解反应的速率主要是由给定温度下的活化能和环境决定的。老化速率和温度的相关性取决于在给定区域内哪种过程占支配地位，不同老化机制的老化反应率与温度的关系如图A.2所示。

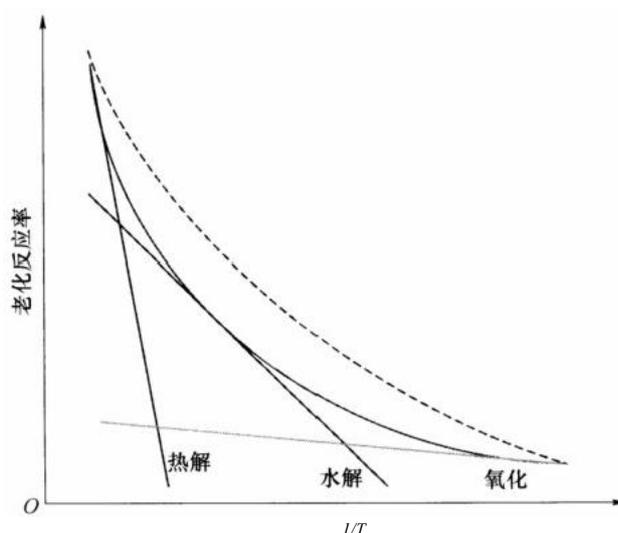


图 A.2 不同老化机制的老化反应率与温度 (T) 的关系

纤维素降解机理说明，即使是在相同的运行温度下，变压器绝缘老化速度也会因含水量、含氧量等诸多因素的不同而不同。纸绝缘的纤维素分子在热、氧、水等因素长期作用下发生降解，大分子断链成为较小的分子，使聚合度降低、材料的韧性和机械强度下降。

此外，变压器油纸绝缘处于高电场下还会产生电老化。如果各部位绝缘的工作场强远没有超过允许的使用场强，则这种电老化相对热老化而言是很小的，可以忽略不计；如果作用场强超过了允许值，就会产生具有不同能量放电特征的绝缘分解气体。本标准对电老化的机理不作详细分析。

A.1.2 变压器油

矿物变压器油主要是由许多不同分子量的碳氢化合物组成的混合物，基本以烷烃、环烷烃和少部分芳香烃为主。

在变压器的正常运行温度下，油不会产生热分解。油的老化虽与温度有关，但主要是氧化导致，铜是油氧化的催化剂。实际上，对不能与氧气完全隔离的油纸绝缘设备，即使长期不运行，也同样存在老

化问题。油中吸收氧在水分、温度作用下使老化加速，生成醇、醛、酮等氧化物及酸性化合物，最终析出油泥。油劣化产生的酸类化合物和纸劣化产生的酸类化合物部分相同，而这些酸性的油氧化产物反过来影响纸的劣化速率。绝缘油氧化严重时，析出水分和油泥，油泥沉淀于固体介质表面，会影响散热，容易使得局部温度升高，进一步加速油的氧化和绝缘的老化、变质。油氧化反应形成少量的CO和CO₂，随着运行中气体的积累，CO和CO₂将成为油中气体的主要组分，此外还有少量H₂和低分子的烃类气体。烃类气体的迅速增加是在非正常的油温(有故障)下产生的。电或热故障可以使某些C—H键和C—C键断裂，伴随生成少量活泼的氢原子和不稳定的碳氢化合物的自由基，这些氢原子或自由基通过复杂的化学反应迅速重新化合，形成氢气和低分子烃类气体(如甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等)，随着不同故障能量和时间的作用也可能生成碳氢聚合物(X-蜡)及固体炭粒。

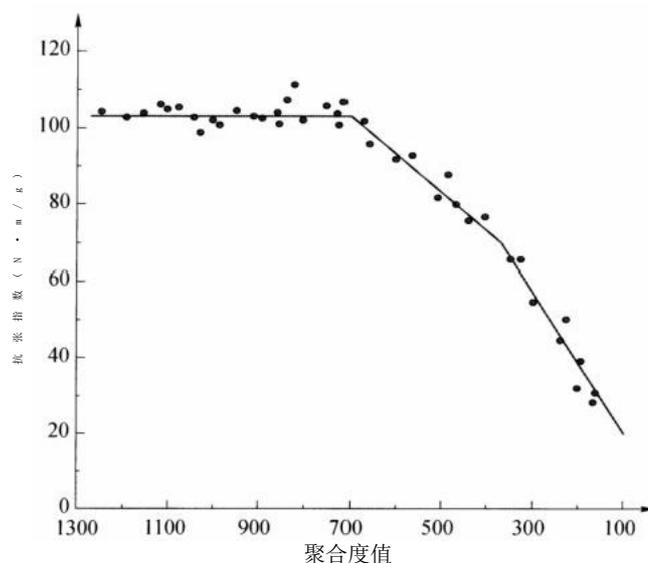
A.1.3 油纸绝缘老化生成物

纸绝缘降解的结果，其一为纤维素大分子的断裂，表现为聚合度的下降和机械强度的降低；其次是伴随降解过程，可得到溶解在油中的多种老化产物，如CO、CO₂、糠醛、丙酮、羧酸、多糖化合物、水等。变压器绝缘老化的产物较为复杂，见于报道的绝缘老化生成物有水、糖类产物、有机酸、挥发性化合物、类糠醛化合物、酚醛树脂降解、丙酮等。随着检测技术的发展，这些产物也有着成为绝缘老化判断测试项目的潜力。

A.2 油纸绝缘老化测试技术

A.2.1 抗张强度与聚合度的关系

纸的抗张强度与聚合度有相关性。工程中曾采用抗张强度残留率60%、平均聚合度残留率40%~50%作为制造厂设计的绝缘寿命。抗张指数和聚合度之间的关系如图A.3所示。纸的抗张强度可以参考GB/T 12914和GB/T 22898进行测试。测试样品的抗张强度对判断变压器整体老化程度，或可以直接取到纸样的故障部位的老化情况是有意义的。



图A.3 抗张指数和聚合度之间的关系

A.2.2 糠醛含量与聚合度的关系

工程中一般通过糠醛含量间接计算出纸绝缘的平均聚合度，如公式(A.2)所示，进而判断绝缘老化

状态。

$$\log(F_2)=1.15-0.0035DP, \dots\dots\dots(A.2)$$

式中:

F_2 ——糠醛的含量, mg/L;

DP_2 ——纸绝缘的聚合度。

A.2.3 丙酮生成量与聚合度的关系

变压器油中溶解气体和糠醛含量能够客观反映变压器内部绝缘老化情况,但由于油中气体容易扩散和糠醛容易被吸附等原因,难以准确判断变压器的绝缘老化程度。丙酮是变压器绝缘长期运行后的一种产物。由于它不易被吸附,难以扩散,受氧气和水分影响较小,成分较为稳定等特点,具有成为变压器绝缘老化判定指标的参考价值。试验结果表明,丙酮生成量和(残)剩余平均聚合度的关系如图A.4所示。可考虑将0.012mg/g~0.1mg/g的丙酮生成量作为变压器绝缘老化的注意值。

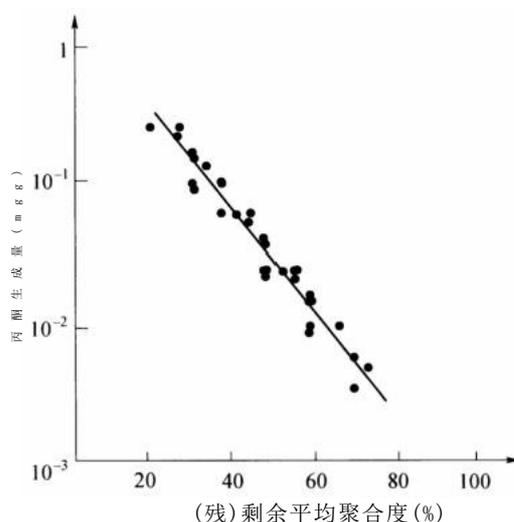


图 A.4 丙酮生成量和(残)剩余平均聚合度的关系

A.2.4 介电响应法

介电响应法的原理在于电介质材料绝缘老化后其弛豫极化会发生显著变化,因此可采用介电响应法反映其老化程度。介电响应法主要分为时域和频域两种测量方式。时域测量方法包括回复电压法(Recovery Voltage)和极化去极化电流法(Polarization and Depolarization Current)。频域测量方法主要是指频域谱法(Frequency Domain Spectroscopy)。但是,利用介电响应评估变压器的绝缘老化程度这项技术尚处于初步研究阶段,仍然需要进行深入的研究和测试经验的积累。

目前,利用介电响应法来评估纸中水分的技术日趋成熟。纸中水分是影响绝缘老化速率的一个重要因素,也是与油纸绝缘老化程度紧密关联的参量,准确测量的纤维素中的水分含量显得尤其重要。当前仍采用通过测量油中水分的平衡曲线间接推测纸中水分的方法,但该方法存在误差较大的缺点。介电响应无损测量及含水量评估方法作为一种新的测试方法,可以准确地测量绝缘纸板中的水分,并且拥有由于具有不吊心、无损测量等优点。因此,可以通过该方法来测量纸中水分,进而反映变压器的绝缘老化速度。

A.3 油纸绝缘的寿命

油浸式变压器主要由金属材料和绝缘材料组成,高温条件下,绝缘材料先于金属材料损坏。因此,

变压器的寿命主要由其油纸绝缘材料的寿命决定。变压器寿命(油纸绝缘的寿命)主要与运行温度和油纸绝缘的聚合度有关。

由于绝缘油可以在变压器使用寿命期间再生或更换,而纸绝缘的老化过程是不可逆的,而且纸绝缘也是不易更换,因此,纸绝缘的寿命决定了变压器的实际使用寿命。纸绝缘的寿命主要取决于纸绝缘的机械寿命。除制造质量外,变压器的实际寿命与运行条件关系很大。

A.3.1 温度

变压器的实际寿命与运行温度关系很大。在 GB/T1094.7 和 DL/T 572 中,是按“6度法则”的相对老化率来计算相对寿命损失的。也就是说,在80℃~140℃的范围内,变压器的温度每上升(或下降)6℃,变压器绝缘寿命的损失会加倍(或减半)。这是IEEE 负载导则中 Arrhenius 方程的简化表达形式。

变压器运行中的热点温度是受到严格限制的。在较高温度下运行的相对寿命损失值可以用较低温度下少损失的来补偿。变压器负载大小直接对寿命有影响,负载率较低的变压器应比负载率较高的变压器运行年限更长。正常运行的变压器应有30年以上寿命,达不到预期寿命而退役,通常是设备隐患或其他原因所致。

A.3.2 绝缘剩余寿命

当纸绝缘老化,纤维素分子链断裂时,聚合度的值会从初始值(DP₀)开始减小,纸绝缘的老化服从Arrhenius方程,即

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = Ae^{-\frac{E_A}{RT}t} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

A——由化学环境决定的常数;

E_A——活化能, kJ/mol;

R——摩尔气体常数,取值为8.314J/(mol·K);

T——绝对温度, K。

由此,可以采用公式(A.4)对油-纸绝缘的剩余寿命进行大致预测,即

$$L = \frac{1}{A \times 24 \times 365} \left(\frac{1}{DP_{end}} - \frac{1}{DP_v} \right) \times e^{\frac{E_A}{RT}} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

L——剩余寿命,年;

DP_{ma}——考虑变压器的安全运行定义的寿命终点聚合度值;

DP_v——进行预测时当前的聚合度值。

理论上,可以吊心取纸样进行当前聚合度的测试,但由于变压器温度分布的不均匀性,很难明确取样部位聚合度值与热点或其他部位聚合度值之间的相关性关系。可以通过研究绕组材料在不同温度下E_A值和A值的变化规律,设定一定的置信区间来提高预测的可靠性。此外,水分含量不同也会影响A值的大小,进行计算时需要加以考虑。

实际上,由于变压器运行过程中很难对其进行吊罩取样测量当前的DP_v值,因此执行时可以采取油样测量糠醛含量F,并根据回归公式log(Fn)=1.15-0.0035DP_v,进行聚合度值的大致估计。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/796011020113010120>