

大型变压器

现场真空煤油汽相干燥技术

北京电机工程学会

国家电网公司华北分部 编著

华北电力科学研究院有限责任公司



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

大型变压器

现场真空煤油汽相干燥技术

北京电机工程学会
国家电网公司华北分部 编著
华北电力科学研究院有限责任公司



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着电力设备的电压等级越来越高,其绝缘性能成了制约电网安全运行的最重要因素之一,变压器也不例外,进而干燥工艺成为了保证绝缘性能关键的一环。变压器煤油汽相干燥技术是目前最先进的变压器干燥技术,有加热温度高、加热速度快、绝缘出水快、温度分布均匀、最终的含水量更低、可以冲洗掉产品上的尘埃和污垢等优点。

本书共分7章,主要包括:变压器绝缘基础知识、变压器绝缘受潮的诊断方法、变压器干燥处理方法、汽相干燥处理方法、现场真空煤油汽相干燥技术、典型现场真空煤油汽相干燥装置及系统、现场汽相干燥应用实例,并提供两个附录,供读者参考借鉴之用。

本书适用于从事变压器真空煤油汽相干燥装置设计、制造、运行、维护、现场应用的相关技术人员,并可供相关专业科研院所、高等院校师生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型变压器现场真空煤油汽相干燥技术/北京电机工程学会,国家电网公司华北分部,华北电力科学研究院有限责任公司编著. —北京:中国电力出版社,2015.8

ISBN 978-7-5123-7951-0

I. ①大… II. ①北… ②国… ③华… III. ①变压器干燥法
IV. ①TM407

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 144264 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>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年8月第一版 2015年8月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 6.5印张 167千字

定价 32.00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

本书编委会

主任委员：赵玉柱

副主任委员：牛晓民 朱晓岭 王金萍 邓 春
吕志瑞

主 编：马继先

副 主 编：龙凯华 蔡 巍

编写人员：郝 震 郭绍伟 杨海超 刘少宇
刘连睿 孙云生 王 珣 杨大伟
周 毅 张金祥 许 竞 侯力枫
钱 欣 杨 旭 李凤海 王建新
潘 卓 艾晨光 毛 婷 赵燕坤
关庆罡 李昊扬 邬彦威

前 言

随着电力设备的电压等级越来越高，其绝缘性能成了制约电网安全运行的最重要因素之一，变压器也不例外。目前 500kV 变压器已成为我国的常规产品，750kV、1000kV 变压器也相继投入运行。为了保证超高压、特高压变压器的绝缘性能，除了采用先进的设计技术、选择优质的绝缘材料外，干燥工艺也是关键的一环。干燥的目的就是要将固体绝缘材料中的水分排除掉，然后浸以合格的变压器油，形成良好的油—纸绝缘结构，保证变压器的整体绝缘性能和机械性能。

从变压器的结构我们知道，变压器的器身除了铁芯、夹件、导线外，几乎全是绝缘材料。例如匝绝缘、撑条、垫块、端绝缘、绝缘筒、角环、引线支架等，基本上都是由纤维质的绝缘材料构成。绝缘材料的含水量太大严重影响变压器的绝缘性能和使用寿命。因此，国家标准、行业标准及企业标准对不同电压等级、不同容量变压器绝缘材料的含水量都有明确规定。

纤维质的绝缘材料的含水量一般为 6%~8%，干燥终结要求的含水量一般为 0.1%~0.5%，这样排除的水量按 5.5% 计算，一台绝缘重量为 10t 的变压器干燥过程中要排除 550kg 的水。实践中处理一炉产品排出 200~300kg 水是常有的事。大产品一炉最多的出水曾经达到过 1000kg。

20 世纪 60 年代以前，变压器干燥先后采用过真空干燥、热风循环真空干燥、热油干燥、变压法干燥等工艺。20 世纪 60 年代美国西屋公司首先发明了变压器真空煤油汽相干燥设备，并申请了专利。后来瑞士的 MICAFIL 公司购买了这项专利，并在此基础上作了改进工作，20 世纪 70 年代已成熟应用，MICAFIL 公司因此成为生产真空煤油汽相干燥设备的专业厂家。挪威的

NATIONAL INDUSTRY 公司也自己设计制作了一套真空煤油汽相干燥设备。20 世纪 80 年代,我国引进了煤油汽相干燥设备,开始了其在中国的应用。

变压器真空煤油汽相干燥技术是目前最先进的变压器干燥技术,有加热温度高、加热速度快、绝缘出水快、温度分布均匀、最终的含水量更低、可以冲洗掉产品上的尘埃和污垢等优点。目前我国大型变压器制造厂全部采用真空煤油汽相干燥技术,在使用该技术后我国变压器制造水平有了大幅提高,变压器安全运行水平也有了大幅提高。

运行中水分进入变压器后,如果仅仅是表面轻微受潮,通过正确的抽真空工艺基本可以将水分清除出去。但如果是绝缘材料严重受潮,一般的抽真空工艺就不能把水分彻底清除。

如某一台 SFP-360000/500 主变压器,检修时用潮湿空气破解真空,造成该变压器绝缘严重受潮,后经过一个月的抽真空及热油循环处理,仍不能彻底恢复。

变压器发生事故后,现场抢修中绝缘暴露时间一般比较长,如需更换部件时间会更长。这些变压器检修后绝缘状况都会不同程度下降。如南方某水电厂一台 SFP-360000/500 变压器事故后,需要更换绕组。因地理位置限制,返厂运输极其困难,决定在现场使用热油喷淋干燥技术处理,修复后在试验过程中发生了绝缘筒沿面放电。检查发现原因是绝缘筒干燥不彻底。

目前运行的变压器,一部分老旧变压器由于制造时没有采用真空煤油汽相干燥工艺处理,绝缘电阻一般为数百兆欧至数千兆欧。还有部分变压器由于种种原因绝缘电阻也很低。如某供电公司 110kV 及以上变压器共 76 台,其中绝缘电阻低于 10000M Ω 的为 12 台,绝缘电阻低于 3000M Ω 的为 3 台。这些变压器长期运行不仅存在绝缘击穿放电的隐患,含水量大还可能加速变压器老化,减少变压器寿命。

2010 年,华北电力科学研究院创新性地研究解决了现场真空干燥室、装置集成安装、外置双室瀑布式蒸发器、变压器油

箱底部残油回收、变压器油箱加热保温、自动控制和保护、变压器油与煤油分离、真空注油同步完成等大型变压器真空煤油汽相干燥现场化的关键技术，研制了国内外第一套大型变压器现场真空煤油汽相干燥装置。首次实现了大型变压器真空煤油汽相干燥技术的现场应用，现场应用效果表明该装置布局合理、运输方便、拆装简捷、安全可靠，能够现场干燥各类变压器。目前，大型变压器真空煤油汽相干燥技术在我国已经开始现场应用，国家能源局《防止电力生产事故的二十五项重点要求》及国家电网公司《十八项电网重大反事故措施》都将其列为推荐项目。

本书第一章介绍了变压器相关绝缘基础知识、第二章至第四章总结了变压器干燥工艺发展历程、第四章至第七章重点描述了真空煤油汽相干燥技术及现场应用，希望为变压器真空煤油汽相干燥装置设计、制造、运行、维护、现场应用提供参考。

由于时间仓促、水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请各位读者批评指正！

本书编写组

2015 年 4 月

目 录

前言

第一章 变压器绝缘基础知识	1
第一节 变压器的功能和分类	1
第二节 油浸式变压器绝缘材料	4
第三节 变压器典型电场和绝缘结构	14
第四节 油纸绝缘系统吸湿特性	19
第五节 水分对变压器的影响	24
第二章 变压器绝缘受潮的诊断方法	28
第一节 变压器绝缘受潮原因	28
第二节 变压器绝缘受潮的诊断方法	29
第三章 变压器干燥处理方法	56
第一节 变压器干燥处理的必要性	56
第二节 变压器干燥处理	58
第三节 煤油汽相干燥的技术优点	76
第四章 汽相干燥处理方法	80
第一节 真空煤油汽相干燥装置基本原理	80
第二节 真空煤油汽相干燥设备及系统原理	83
第三节 真空煤油汽相干燥设备的安全保障	100
第四节 真空煤油汽相干燥处理常见故障及排除方法	107
第五章 现场真空煤油汽相干燥技术	110
第一节 现场真空煤油汽相干燥技术方案	110
第二节 现场真空煤油汽相干燥的工艺质量控制	122

第六章 典型现场真空煤油汽相干燥装置及系统	133
第一节 现场真空煤油汽相干燥主要设备	133
第二节 现场真空煤油汽相干燥控制系统	142
第七章 现场汽相干燥应用实例	153
第一节 现场实施方案	153
第二节 应用于 110kV 变压器	158
第三节 应用于 500kV 变压器	161
附录一 500kV 变压器现场真空煤油汽相干燥装置技术 规范	166
附录二 大型变压器现场汽相干燥作业指导书	175
参考文献	195

第一章

变压器绝缘基础知识

第一节 变压器的功能和分类

在当今社会中,电能已经渗透到人类生活的各个方面,成为国民经济、人民生活中不可缺少的一部分。由发电、输电、变电、配电、用电组成的电力网络将发电厂和用户紧密连接在一起,变压器在其中有着广泛的应用。

变压器是利用电磁感应原理,由绕在同一个铁芯上两个或更多的绕组,以相同的频率变换交流电压和电流,传输交流电能的一种静止电气设备。

在电力系统中,变压器起到变换电压的重要作用。发电厂发出的电能往往需要远距离传输才能到达用户地区,在传输功率一定的情况下,传输电压越高,线路损耗越小,输送距离也越远,所以发电厂需要采用变压器升高电压后进行传输。当电能被输送到用户端时,需要采用降压变压器将线路上的高压电变换成符合各种电气设备要求的电压。在电力网络内部存在多种电压等级,在不同电压等级间进行电能传输均需要使用变压器。据相关统计,每增加 1kW 的发电装机容量,需要配置 6~8kVA 的变压器。

变压器除了广泛应用在电力系统外,还应用在很多工业企业中,如供电给电炉、整流设备等,在控制和试验设备中也使用各种型号的变压器。

变压器种类众多,有多种分类方式,用户依据电压等级、容量、成本、维护工作量等方面综合考虑,选择合适的变压器。



如按照额定电压进行分类,可分为配电变压器(额定电压 10kV、35kV)、高压变压器(额定电压 66kV、110kV、220kV、330kV)、超高压变压器(额定电压 500kV、750kV)、特高压变压器(额定电压 1000kV)等。目前,在我国交流特高压工程中应用的是 $3 \times 1000\text{MVA}/1000\text{kV}$ 的变压器,另外单台容量达到 1500MVA 的特高压变压器也已研制成功,如图 1-1 所示。由于特高压变压器体积巨大,整体运输不便,普遍采用分体运输,现场组装的方式安装。

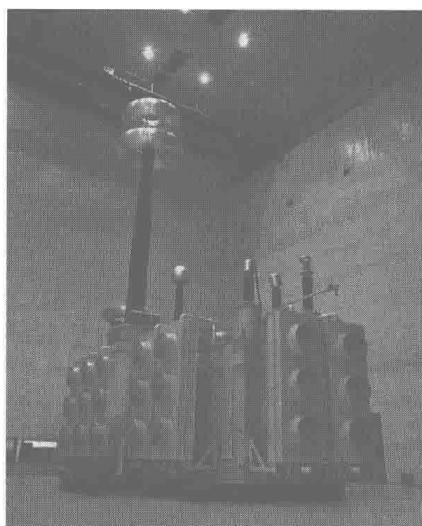


图 1-1 世界第一台
1500MVA/1000kV 变压器

按照使用用途进行分类,有电力变压器、特种变压器、仪用变压器、试验变压器、调压器等。电力变压器是指在电力系统应用的变压器,用以实现交流电能的远距离传输,减少线路的电能损失和压降。特种变压器是在工业企业中有特殊用途的变压器,如电炉变压器、电焊变压器、整流变压器等。仪用变压器又称互感器,分为测量高电压的电压互感器和测量大电流的电流

互感器。试验变压器和调压器是为能满足一些特殊试验的要求而制造。如一些试验需要很高的电压,则需专门的高压试验变压器,有些试验要求在一定范围内调节电压,则需要调压器。

按照绕组数目和连接方式分类,可分为双绕组变压器、三绕组变压器、自耦变压器等。双绕组变压器是指同一台变压器有两种电压等级的绕组;三绕组变压器是指同一台变压器有三种电压等级的绕组;自耦变压器是指输出绕组和输入绕组有一部分是共用的,与同等容量的双绕组变压器相比,自耦变压器



使用的材料更少。

按照相数分类,可分为单相变压器和三相变压器,单相变压器只能变换单相电压,三相变压器能同时变换三相电压。

按照调压方式分类,可分为无励磁调压变压器和有载调压变压器。只有在不带电运行情况下才能调节分接电压的变压器称为无励磁调压变压器;而有载调压变压器能在负荷运行状态下完成分接电压切换。

按照中性点绝缘水平分类,可分为全绝缘变压器和分级绝缘变压器。全绝缘变压器的绕组首端与尾端绝缘水平相同;分级绝缘变压器的绕组尾端绝缘水平比绕组首端低。

根据绕组的绝缘和冷却介质的不同,变压器可分为干式变压器、气体绝缘变压器和油浸式变压器。干式变压器是指采用固体绝缘材料(如环氧树脂)作为绝缘介质,利用空气作为冷却介质的变压器。干式变压器的优点是不易燃烧、体积小、噪声低、运行维护比较简单,但是由于采用空气自然冷却和风扇冷却,容量较小,主要应用在 35kV 及以下电压等级中。气体绝缘变压器是指采用人工合成某种气体(如 SF_6)作为绝缘和冷却介质的变压器,具有不易燃烧、噪声低、维护量少等优点,由于受到气体冷却效果、密封性能等因素制约,目前应用较少。油浸式变压器是指采用绝缘油(变压器油)作为绝缘和冷却介质的变压器。

绝缘油是将石油中润滑油馏分进行各种化学和物理精制后加入添加剂而成的一类矿物油。绝缘油由于具有以下几项性能,在变压器制造领域得到广泛应用。

(1) 绝缘油可将不同电位的带电部分隔离开来,增加绝缘强度,使其不易形成短路和击穿。绝缘油与纤维素材料配合使用,绝缘性能更加优异,可有效减小绝缘距离。

(2) 变压器运行时产生空负荷损耗和负荷损耗,这两部分损耗以发热的形式表现出来。若不把热量散发出去,线圈和铁芯内积蓄的热量会使变压器内部温度升高,从而损坏线圈外部包覆的固体绝缘,以致烧毁线圈。绝缘油黏度低,热传导性能



好。线圈和铁芯产生的热量，先是被油吸收，然后通过油的循环而使热量散发出来，从而保证变压器的安全运行。

(3) 绝缘油填充在绝缘材料的空隙中，浸泡铁芯和绕组，保护其免受潮湿空气的影响。

(4) 绝缘油能将纤维素等材料的氧含量减少到最低程度，保护绝缘纸和绝缘纸板不受氧气作用，减少绝缘材料老化，延长变压器寿命。

(5) 有载调压变压器的分接开关在切换分接位置时会产生电弧，绝缘油可使电弧迅速熄灭。

为了保证绝缘油的优异性能，在生产过程中必须对其进行净化处理，使其不含或少含酸、硫、碱、水、纤维、空气等杂质。若绝缘油中含有少量水和空气，将导致绝缘油的电气性能明显降低。若酸、硫、碱含量大时，会腐蚀绝缘纸板、绕组、线圈。因此，在安装和大修变压器时，要严格按照相应标准进行试验，保证绝缘油的质量。

目前，除在一些特殊场合采用干式变压器和气体绝缘变压器外，中大型变压器普遍是油浸式，因此本书介绍的内容主要针对油浸式变压器。

第二节 油浸式变压器绝缘材料

一、变压器绝缘材料的性能

变压器绝缘件不仅要满足不同电位部分之间的隔离，还有机械强度和热稳定性的要求，具体包括以下三个方面：

(一) 电气性能

变压器在运行过程中不仅要长期承受工作电压，还要耐受各种过电压，并且过电压往往是决定变压器绝缘水平的主要依据。绝缘水平的高低直接关系到变压器的制造成本和运行可靠性。一般情况下，220kV 及以下电压等级变压器的绝缘水平主



要由工频耐受电压和雷电冲击过电压决定；330kV 及以上电压等级变压器的绝缘水平主要由操作冲击过电压决定。

（二）机械性能

当变压器绕组流过电流时，在漏磁场和电流作用下，绕组内导体会受到电动力的作用，特别在短路故障时，在很大短路电流作用下，绕组将承受巨大的电动力。因此，变压器内部的绝缘结构和材料应有足够的动稳定性和机械强度。

（三）热稳定性能

变压器在运行中电路系统和磁路系统均会产生热量，直到达到稳定的温升。高温将加速绝缘材料的老化、分解，缩短其寿命。一般根据温升值的要求选择合适等级的绝缘材料。

二、油浸式变压器绝缘材料介绍

油浸式变压器绝缘材料主要包括绝缘油、绝缘纸板、电工层压木、上胶纸、电瓷等，图 1-2 是典型的变压器内部结构，下面对主要材料进行介绍。

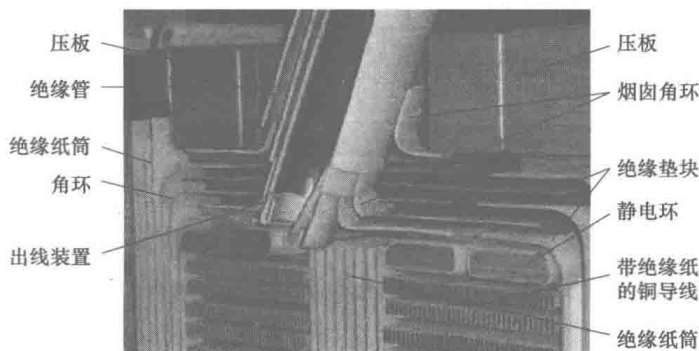


图 1-2 典型变压器绝缘结构

（一）绝缘油

绝缘油是天然石油经过一系列的蒸馏、精炼，加入添加剂而形成的矿物油，其化学组成很复杂，大约含有 2900 多种化合物，主要属于三种烃类，即烷烃、环烷烃和芳香烃。



(1) 烷烃是一种饱和烃，其碳原子之间以单键结合，化学通式是 C_nH_{2n+2} ($n>3$)。烷烃的化学性质不活泼，但在高温和催化剂的作用下，可以被氧气氧化，发生断链。在无氧状态加热到一定温度后，烷烃分子将断裂，裂化成小分子烷烃和烯烃，因此烷烃的热稳定性是三种烃类最差的，但其对抗氧化剂的感受性好，仍是绝缘油的良好成分。

(2) 环烷烃是碳原子以单键连成环状，其余价键与氢原子相结合的产物，化学通式是 C_nH_{2n} ($n\geq 3$)。环烷烃有很好的电气性能，但抗氧化性能较差，容易氧化生成酸和其他氧化物，它对抗氧剂的感受性较好，溶解能力强，能够溶解变压器油在高压电场下形成的碳粒及氧化产生的油泥，避免它们沉积在变压器的线圈上，从而影响变压器的冷却性能。环烷烃的析气性介于烷烃和芳香烃之间。

(3) 芳香烃对绝缘油的氧化安定性、电气性能、对氧化沉淀的溶解性能和析气性都有极重要的意义，比烷烃和环烷烃的化学性质都活泼些。芳香烃在变压器油中起天然抗氧剂的作用，有利于改善绝缘油的抗氧化安定性，具有吸气功能，可改善变压器油的析气性，但是介电性能不够好，易与氧化物反应生成沉淀。

绝缘油一般依据其凝固点进行分类，10 号、25 号、45 号油的凝固点分别是 -10°C 、 -25°C 、 -45°C 。

要保证变压器的安全稳定运行，必须保证绝缘油能发挥其绝缘、冷却和灭弧性能，因此在安装和大修变压器时均要对绝缘油进行一系列试验，保证其质量。表 1-1 是 GB/T 50150—2006《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》所要求的绝缘油试验项目。

表 1-1 绝缘油试验项目

序号	项目	标准	说 明
		投入运行前的油	
1	外观	透明、无杂质或悬浮物	外观目视



续表

序号	项目	标准	说 明
		投入运行前的油	
2	水溶性酸 pH 值	≥ 5.4	按 GB 7598《运行中变压器油、汽轮机油水溶性酸测定法（比色法）》进行试验
3	酸值 (mgKOH/g)	≤ 0.03	按 GB 7599《运行中变压器油、汽轮机油酸值测定法（BTB）法》进行试验
4	闪点（闭口） ($^{\circ}\text{C}$)	≥ 140 （10 号、25 号油） ≥ 135 （45 号油）	按 GB 261《石油产品闪点测定法》进行试验
5	水分 (mg/L)	110kV 及以下电压等级 ≤ 20 ；220kV ≤ 15 ；500kV ≤ 10	按 GB 7601《运行中变压器油水分含量测定法（库仑法）》或 GB 760《运行中变压器油水分测定法（汽相色谱法）》进行试验
6	击穿电压 (kV)	35kV 及以下电压等级 ≥ 35 ；60 ~ 220kV ≥ 40 ；330kV ≥ 50 ；500kV ≥ 60	按 GB 507《绝缘油介电强度测定法》和 DL 429.9《电力系统油质试验方法 绝缘油介电强度测定法》方法进行试验
7	$\tan\delta$ (90 $^{\circ}\text{C}$)	注入前： ≤ 0.005 注入后： ≤ 0.007	按 GB 5654《液体绝缘材料工频相对介电常数、介质损耗因数和体积电阻率的试验方法》进行试验
	体积电阻率 (90 $^{\circ}\text{C}$)($\Omega \cdot \text{m}$)	$\geq 6 \times 10^{10}$	按 GB/T 5654《液体绝缘材料工频相对介电常数、介质损耗因数和体积电阻率的测量》或 DL/T 421《绝缘油体积电阻率测定法》
8	油中含气量 (V/V) (%)	330~500kV ≤ 1	按 DL 423《绝缘油中含气量的测试方法（真空法）》或 DL 450《绝缘油中含气量的测试方法（二氧化碳洗脱法）》进行试验
	油泥与沉淀物 (%，质量分数)	≤ 0.02	按照 GB/T 511《石油产品和添加剂机械杂质测定法（重量法）》
9	油中溶解气体 色谱分析	见本规程中相应设备章节	取样、试验和判断方法分别按 GB 7595《运行中变压器油质量标准》、SD 304 和 GB 7252《变压器油中溶解气体分析和判断导则》的规定



以下对其中重要指标进行解释:

(1) 外观。油的外观可在一定程度反映油的质量。合格绝缘油是透明的, 略带淡黄色, 无杂质或悬浮物。绝缘油老化后会形成沥青和污物, 导致颜色变暗, 严重时可能呈棕色。

(2) 闪点。绝缘油加热到某一温度时, 挥发的油蒸气与空气形成的混合气体, 靠近明火就能着火时, 这一温度称为变压器的闪点。合格的 10 号、25 号油的闪点大于 140°C , 45 号油的闪点大于 135°C 。

(3) 水分。若绝缘油中含水量高, 不仅会造成油的耐电强度下降, 还会与油中其他元素化合成低分子酸。

(4) 介质损耗。绝缘油在交流电场的作用下发生的能量损耗称为油的介质损耗。合格的绝缘油介损角 ($\tan\delta$) 很小, 当油中含有极性杂质、水分或沉淀物时, 介损角将明显增大。

(5) 击穿电压。绝缘油的耐电性能以击穿电压来表示。当油中水分、杂质含量较高时, 击穿电压显著降低。

(6) 含气量。含气量是油中含有的所有气体(空气、烃类气体、氢气、 CO 、 CO_2) 的体积百分比。当变压器绝缘材料和油未发生分解时, 油中含气主要是空气。若绝缘油的含气量过高, 油中的气泡会引起绝缘材料局部放电, 同时空气中的氧气也会与纤维素等发生氧化反应, 加速绝缘老化。

(二) 绝缘纸板

绝缘纸板、绝缘纸都是以木浆为原料, 从化学组成来说, 是由纤维素、半纤维素、木质素和各种微量金属等物质组成的, 其中最主要成分就是纤维素。变压器所使用的绝缘纸是尽量除去各种极性物质的高质量纸, 其包含的杂质(木质、糖类、无机盐等) 总量不超过百分之几。绝缘纸的主要成分是 α -纤维素, 它是由聚合度达到 2000 的链状高聚合碳氢化合物, 化学通式为 $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$, 分子结构如图 1-3 所示。

绝缘纸另一重要成分是半纤维素, 它是聚合度小于 200 的碳氢化合物。绝缘纸纤维长度可达 $1\sim 4\text{mm}$, 平均聚合度在