

● 变压器制造技术丛书 ●

变压器处理工艺

变压器制造技术丛书编审委员会 编

机械工业出版社

05
K1

变压器制造技术丛书

变压器处理工艺

变压器制造技术丛书编审委员会 编



机械工业出版社

本书系变压器制造技术丛书之一，主要内容包括：传统真空干燥处理；气相干燥处理；其他干燥处理；变压器油净化；变压器注油、试漏及充氮运输以及其他基础知识。

本书主要用于变压器处理工艺专业技术培训教材，也可作为运行和维修部门的工程技术人员及大中专院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

变压器处理工艺/变压器制造技术丛书编审委员会编. —北京: 机械工业出版社, 1998.4

(变压器制造技术丛书)

ISBN 7-111-06022-9

I. 变… II. 变… III. ①变压器干燥法 ②变压器故障-维修 IV. TM407

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 25538 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 吴天培 版式设计: 王颖 责任校对: 张莉娟

封面设计: 姚毅 责任印制: 王国光

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998年6月第1版第1次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·8.75印张·203千字

0 001—4.000册

定价: 13.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

变压器制造技术丛书 编审委员会名单

主任	熊观银			
副主任	杨师和	邢瑞祥		
委员	邢瑞祥	朱哲滨	钱敬明	魏春华
	杨师和	张金琢	王勉	王显文
	熊观银	王承志	李宪霞	杭小民
主编	魏春华	王显文	王承志	

本书编写人 乔印凭

本书主审 王显文

EA001/08

前 言

《变压器制造技术丛书》是为适应变压器行业技术发展的迫切需要，满足变压器行业操作工人的专业培训和工程技术人员的业务学习参考要求，同时满足社会不同文化层次读者的需要，根据原国家机械委电器局制定的变压器行业《工人技术等级标准》和工程技术人员继续教育的要求，受全国变压器行业职工教育研究会的委托，由沈阳变压器有限责任公司、保定天威集团、西安变压器厂等单位组织有实践经验的工程技术人员，参照《变压器专业工种技术工人培训教材》（内部发行），结合目前国内外变压器发展的最新技术，对原书作了大量的删减、补充和修改后编写而成的。新编的《变压器制造技术丛书》共分八册：

- 1 绝缘材料与绝缘件制造工艺
- 2 变压器绕组制造工艺
- 3 变压器铁心制造工艺
- 4 变压器装配工艺
- 5 变压器处理工艺
- 6 变压器试验
- 7 变压器油箱制造工艺
- 8 干式变压器制造工艺

本套书以操作工人为主要读者对象，同时照顾工程技术人员继续教育的需要和全国变压器行业各厂家的通用性，内容从原 35~220kV 电力变压器，扩大为 35~500kV 的各类变压器，包括从小型配电变压器到大型五柱铁心变压器；从传统的常规心式变压器到性能较优越的壳式变压器。在技术水平方面，除介绍国际 80 年代水平的内容外，还考虑到今后的发展，介绍了一些具有 90 年代甚至跨世纪水平的最新技术，以满足不同读者的需要。

由于编著者来自不同工厂、不同岗位，因此在掌握内容的深度和广度上不尽相同，各册书之间的水平和尺度免不了有所差别，也免不了存在一些局限性和片面性，甚至有错误之处，恳请有关专家、学者和广大读者提出宝贵意见，以便今后再版时进一步完善。

由于各企业工艺条件不同，在制造方法上也不完全相同，本套书中所述的工艺方法、工艺参数及具体操作规定和要领仅供参考，望不要生搬硬套本套书内容并代替各厂现行技术文件。

在编写本套书过程中，承蒙机械部教育司及机械工业出版社和编写厂家所在省市的上级领导给予的大力支持和指导，在此表示感谢。对原《变压器专业工种技术工人培训教材》的组织者和全体作者，以及承担本套书编写任务的厂家和编印过程中做了大量工作的同志表示谢意。

变压器制造技术丛书编审委员会

1997 年 12 月

编者的话

为适应变压器制造业的需要，受行业教育研究会委托，根据编审委员会要求，将原出版的《变压器处理工艺》，重新进行了修改，并适当增加和完善了部分内容。本书主要适用于变压器处理工艺专业技术培训，以及运行和维修部门的工程技术人员，以指导现场安装维修变压器，也可作为技术学校和大中专院校的有关专业师生参考。由于水平所限，本书内容及文字难免有欠缺之处，望读者多提宝贵意见。

在此，对在编纂过程曾给予协助和提供帮助的同事表示感谢。

1997年9月

目 录

前言

编者的话

第一章 传统真空干燥处理	1
第一节 真空干燥原理及方式	1
第二节 常用主要设备	7
第三节 加热真空干燥工艺	15
第四节 循环热风加热真空干燥工艺	17
第五节 真空干燥处理的故障及排除	22
复习思考题	24
第二章 气相干燥处理	25
第一节 气相干燥的特点	25
第二节 气相干燥装置原理	25
第三节 气相干燥设备及系统原理	27
第四节 气相干燥用油	45
第五节 气相干燥工艺	48
第六节 气相干燥设备的安全与防爆	54
第七节 气相干燥处理常见故障及排除方法	56
复习思考题	58
第三章 其他干燥处理	59
第一节 变压器电干燥处理	59
第二节 现场干燥处理	64
复习思考题	68
第四章 变压器油净化	69
第一节 变压器油	69
第二节 变压器油的净化原理及方式	75
第三节 油处理系统	76
第四节 净油设备	80
第五节 变压器油的净化处理工艺	88
复习思考题	91
第五章 变压器注油、试漏及充氮运输	92
第一节 变压器注油	92
第二节 热油循环	94
第三节 变压器成品试漏	95
第四节 变压器的充氮和充氮运输	96

复习思考题	98
第六章 其他基础知识	99
第一节 变压器及变压器装配的基本知识	99
第二节 有关变压器运行知识	102
第三节 常用仪器仪表	105
第四节 电气知识	111
第五节 气动知识	116
第六节 液压传动知识	121
第七节 变压器油量的估算	129
复习思考题	130

第一章 传统真空干燥处理

第一节 真空干燥原理及方式

一、真空干燥的目的

在变压器器身上，除了铁心和导线外几乎全是绝缘材料（固体绝缘）。例如，线圈的匝间绝缘、撑条、垫块、端绝缘、静电板、铁轭绝缘、层压纸板压圈、纸板筒、角环、引线绝缘以及引线支架等，全是由纤维质的绝缘材料构成的，通常其中含有质量分数4%~8%的水分。在器身装配过程中，绝缘材料还会进一步受潮或浸湿。材料中的水分，不仅使绝缘材料膨胀，影响几何尺寸，更重要的是，绝缘材料内的含水量，严重地影响着介质的电气强度、介质损耗和油的含水量。

绝缘纸板的水的质量分数与闪络电压的关系，见图1-1，由图可以看出，只要水的质量分数在1%以下，在不同温度下，闪络电压都较高，其变化也小。水的质量增大时，闪络电压降得很快。

绝缘纸板的水的质量分数与介质损耗角的关系如图1-2所示，当水的质量分数小于0.1%时，介质损耗角很小，且趋于平稳。

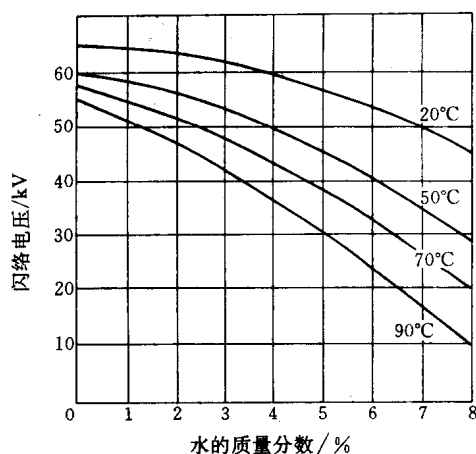


图 1-1 5mm 厚层压纸板闪络电压与水的的关系

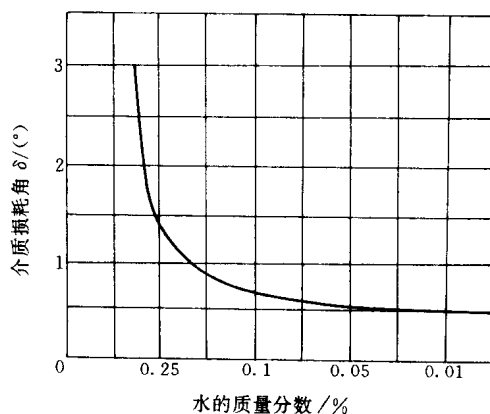


图 1-2 1.0mm 厚绝缘纸板介质损耗角与水的的关系

绝缘纸板中水的质量分数与油中水的质量分数（用百万分之一表示）的关系，见图1-3，由图可以看出，纸中水的质量分数低于1%时，油中水的质量分数小于 15×10^{-6} （80°C时），这可以认为是变压器运行条件下绝缘中水的质量分数的极限值。当纸中水的质量分数大于2%时，油中水的质量分数大于 30×10^{-6} ，使闪络电压有明显的降低。在变压器真空干燥处理中，应根据变压器的不同电压等级及容量严格控制绝缘件的最终含水量。由于考虑器身可能重新

吸潮及为运行储备一定的裕度, 为保证电气性能, 变压器中水的质量分数都控制在1%以下, 变压器的电压越高, 其绝缘中水的质量分数控制得越低。如500kV级变压器, 要求绝缘的水的质量分数在0.3%以下。随着电力工业的发展, 变压器的电压等级越来越高, 使用的绝缘材料越来越多。为了提高变压器的可靠性和具有较长的使用寿命, 除了在结构上采取措施外, 绝缘干燥处理在变压器制造中占有非常重要的地位。尤其高电压大容量变压器, 对绝缘干燥处理质量要求更加严格。通过真空干燥处理, 将绝缘材料脱水、脱气, 充分发挥油浸纸绝缘电介质的优越性能, 这就是变压器真空干燥处理的目的。

二、加热—真空干燥原理

如上所述, 加热干燥处理, 是为了把存在于绝缘材料微毛细孔中的水分, 变成水蒸气分子, 并扩散、迁移, 从而使绝缘材料干燥。然而, 绝缘材料中水分的蒸发、扩散、迁移, 主要取决于绝缘材料内部与外围空间的水蒸气分压差 Δp 。绝缘材料中的水蒸气分压越高, 周围空间压力越低, 则 Δp 越大, 绝缘材料中的水分蒸发、扩散、迁移也越快。所以, 关键在于如何增大 Δp , 办法有二:

其一是要提高绝缘材料的水蒸气分压, 也就是给绝缘材料加热, 提高绝缘材料的温度, 如图1-4所示。当绝缘材料中水的质量分数为5%、温度为40℃时, 水蒸气分压为 $1.2 \times 10^3 \text{Pa}$, 60℃时为 $4 \times 10^3 \text{Pa}$, 80℃时为 $12 \times 10^3 \text{Pa}$; 而当绝缘材料中水的质量分数在1%、温度为40℃时, 其水蒸气分压为133Pa, 60℃时为 $5 \times 10^2 \text{Pa}$, 80℃时为 $1.6 \times 10^3 \text{Pa}$ 。由此可见, 当绝缘材料温度每提高20℃时, 其水蒸气分压可提高两倍以上, 即绝缘材料温度越高, 水蒸气分压也越高。同时由图1-5也可以看出, 在同一含水量下, 温度越高扩散因数越大。由此可见提高温度对于干燥处理是非常重要的。

其二是降低绝缘材料周围空间的压力, 即对干燥罐抽真空。真空度越高, 周围空间压力越小, Δp 增大, 水分也越易蒸发。如图1-6所示, 温度为20℃时, 如果把真空

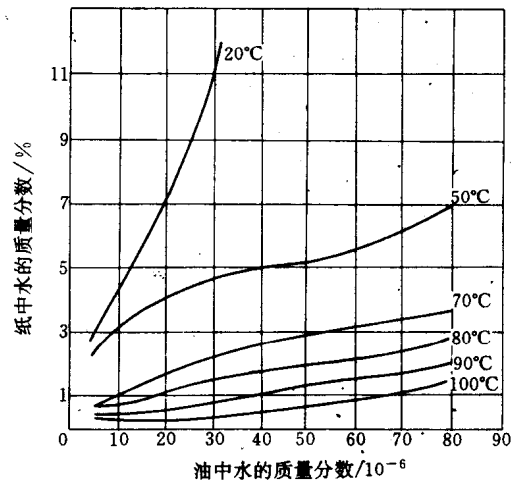


图1-3 油、纸中水的质量分数的平衡曲线

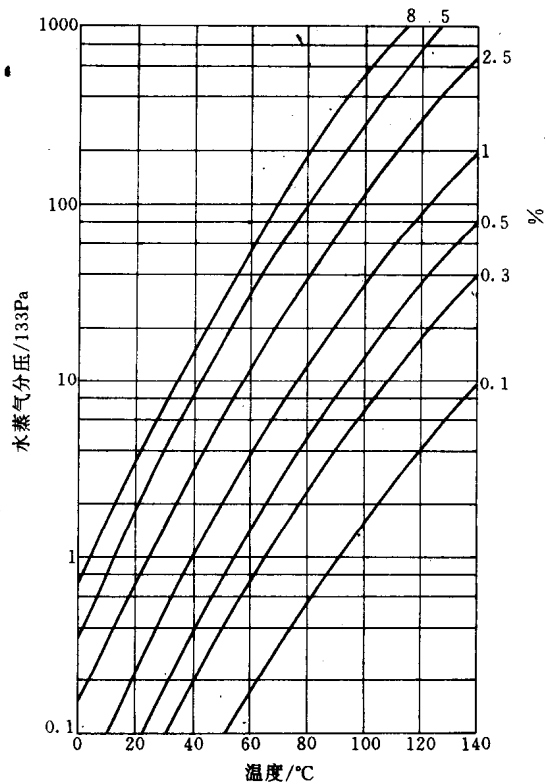


图1-4 对于不同含水量绝缘水蒸气分压与温度的关系

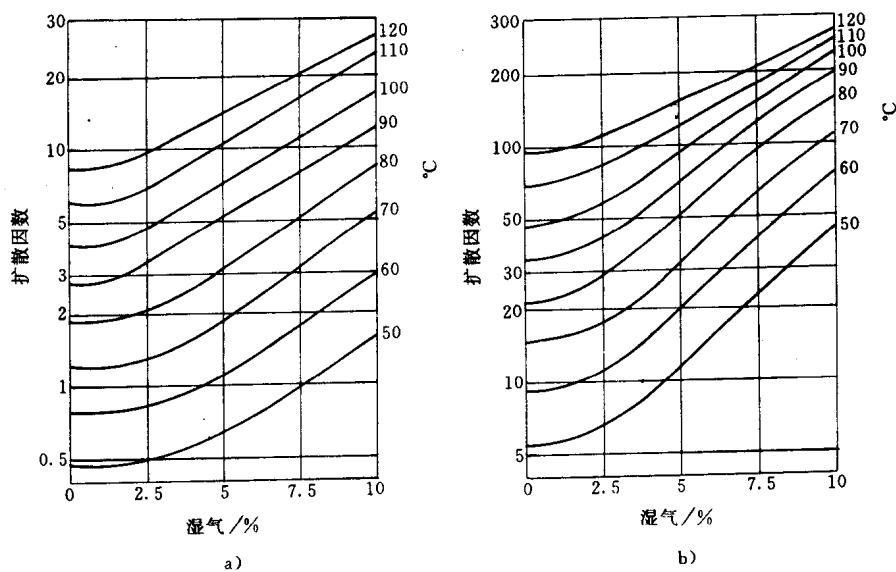


图 1-5 在各种干燥温度下，无油变压器纸板的扩散因数
a) 在大气压力下 b) 在 13~133Pa 真空范围内

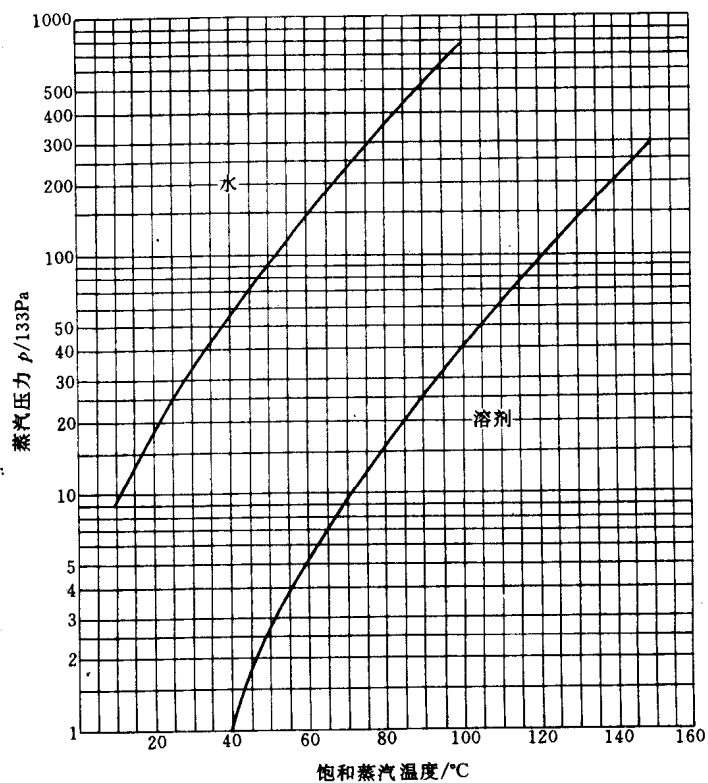


图 1-6 溶剂和水蒸气压力曲线

罐的压力降到 $2.6 \times 10^3 \text{Pa}$ 以下，水分便可开始蒸发，由此看出，同时采取加热—真空的干燥方法，可有效地增大 Δp ，促进水分的蒸发，提高干燥的效率。目前在世界上有各种不同的真空干燥方式，如热风循环加热真空干燥、喷油加热真空干燥、气相加热真空干燥和电流加热电干燥等，尽管它们采用的设备和管道系统各异，但基本原理是相同的，即加热—真空干燥原理。

三、真空干燥处理方式

1. 传统真空干燥方式

这种干燥方式，是以空气为载热介质，在大气压力下，将变压器器身或绕组逐步预热到 105°C 左右，才开始抽真空，继续处理。工艺过程曲线如图 1-7 所示。

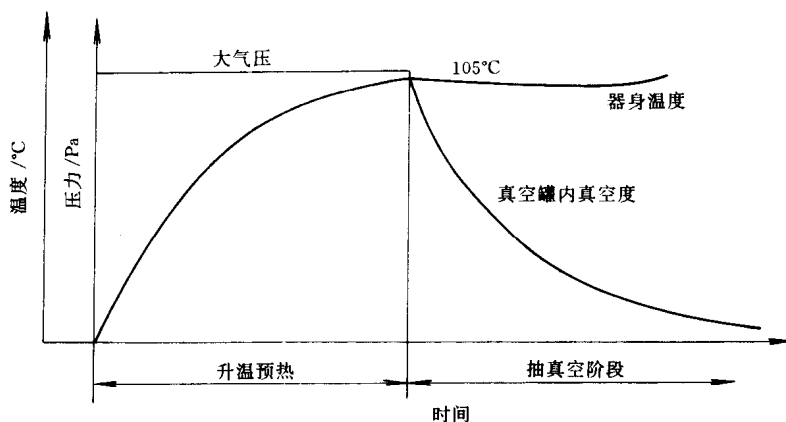


图 1-7 传统真空干燥处理过程曲线

这种干燥方法，预热是在大气压力下（有氧）进行的。因此，干燥温度不能太高，一般在 105°C 左右。由于热传递较慢，内外加热不均匀（内冷外热）。高电压大容量变压器由于具有较厚的绝缘层，往往预热需要 100 多个小时，生产周期很长，而且干燥得不彻底，很难满足变压器对绝缘的要求。但这种处理方式，设备简单，操作简便，所以目前被多数变压器厂所采用。

2. 喷油干燥方式

此种干燥方式是在真空下，对变压器器身喷以热的变压器油来加热器身。由于加热过程是在真空下进行的，所以加热温度可比传统干燥加热温度稍高，同时由于热油被喷到器身的各个部位，可沿器身流下，加大了受热面积，因此，加热也比传统方式均匀，干燥时间相对较短。但因为喷油是在绝缘材料中的水分尚未蒸发前进行的，而绝缘材料浸入变压器油后，其扩散系数较无油材料降低甚多，又影响水分的蒸发，因此，干燥时间也相当长。其干燥过程曲线如图 1-8 所示。

这种干燥方式，对绝缘比较薄而且有油道、低电压的变压器较为适宜，而对绝缘比较厚的产品，不宜使用。目前，国内各厂家极少采用。在变压器检修中，利用油箱做干燥罐时，可采用此法。

3. 气相干燥方式

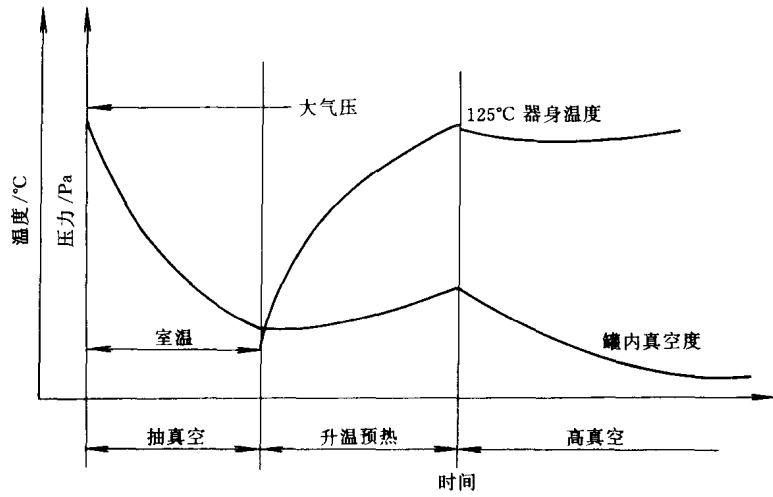


图 1-8 喷油真空干燥处理过程曲线

气相干燥方式是综合了上述两种干燥方式优点的基础上发展起来的。其干燥是在几乎无氧的条件下进行的，因此可以提高真空罐内的温度，达 130℃ 左右，而且又不降低绝缘材料中水分扩散系数（和喷油比），因此干燥均匀、彻底、周期短。它的过程曲线如图 1-9 所示。

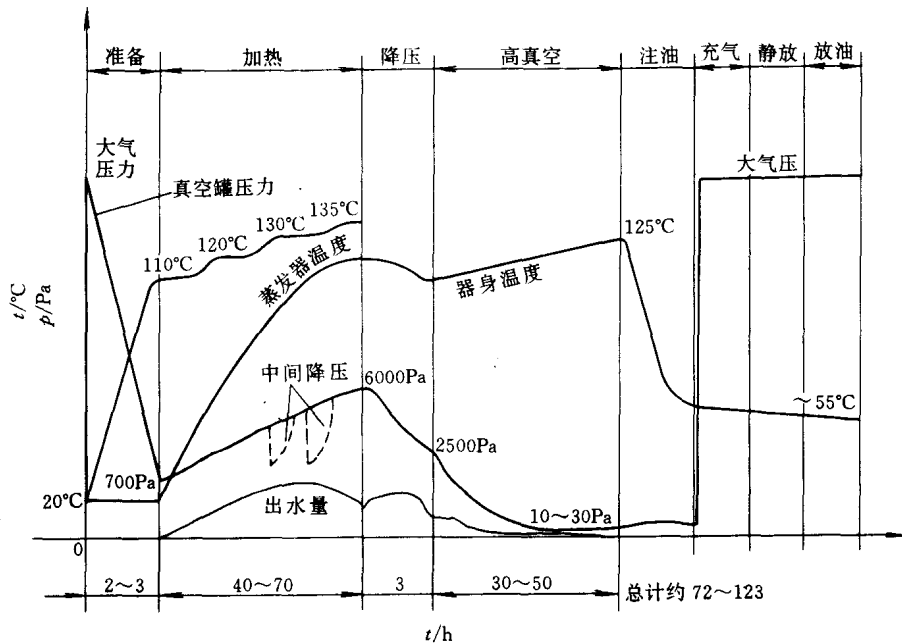


图 1-9 气相干燥过程曲线图

比较上述三种干燥方式，以大型产品为例：传统干燥周期为 100%，喷油干燥周期为 60% 左右，而气相干燥周期仅为 30%~40%。

4. 电干燥方式

此种干燥方式,是在大气压力下给器身上的绕组加以低频电流,当器身温度达到 110°C 以后,再提高真空度和温度。由于采用直接通电加热,所以,电干燥方式具有干燥快、节约能源等优点。对油浸大型变压器,应注意可能出现局部过热问题。这种干燥方式一般用于小型变压器或干式变压器的干燥。其干燥过程曲线如图 1-10 所示。具体方法见第三章第一节。

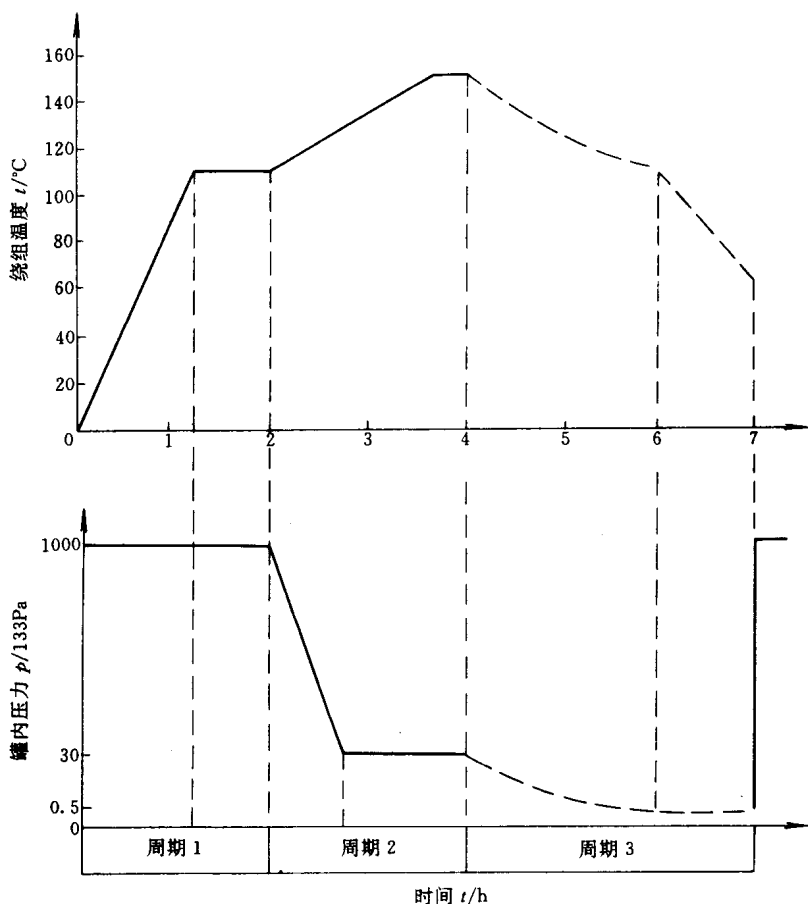


图 1-10 电干燥过程曲线

5. 外壳涡流加热法

如图 1-11 所示,这种加热干燥方式,是在真空罐或油箱本身外壳表面包上石棉等保温材料,然后在保温层外面绕上一定匝数的导线(匝数及导线截面须经计算),接成单相、三相均可。当通入交流电后,由于电磁感应作用,在钢板箱体外壳中产生涡流发热,但由于箱体已有保温层,所以对外散热很少,多数的热量进入箱体内部空间而渐渐加热器身。这种方法,由于导线绕在箱体的侧面上,此部分的温度较高,而箱底温度低,往往对底部还需补充加热,加热温度一般靠闭合或断开电源来控制。这种方法常在修理现场无法用蒸气加热或蒸气压力不足的情况下采用,正常情况下不宜采用。

综上所述,目前国内外流行的干燥处理方式是多种多样的,一个工厂或一个产品采用什么样的干燥方式,要根据实际情况并考虑它的经济合理性。例如,对于 110kV 及以下产品可采用加热—真空干燥方式;而对于大容量 220kV 级及以上变压器则采用气相干燥等。

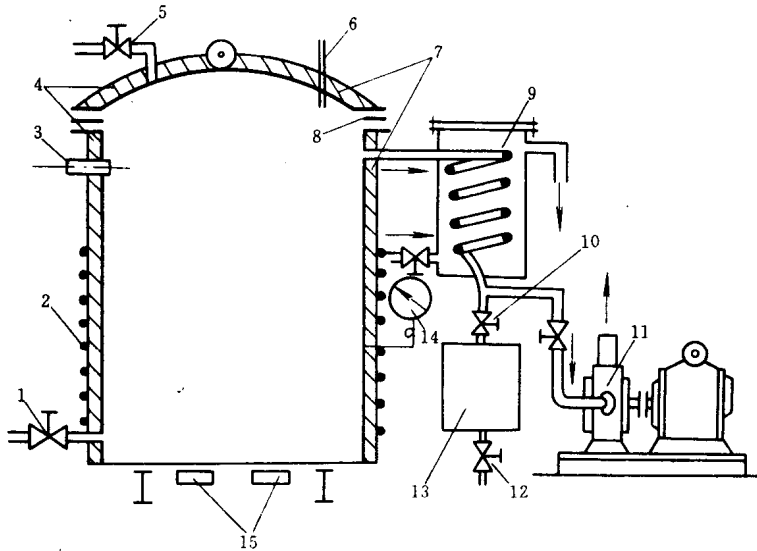


图 1-11 真空罐外壳涡流加热系统示意图

1—真空注油阀 2—涡流加热用导线 3—测量绝缘电阻用套管 4—真空罐体 5—放气阀 6—测温元件
7—绝缘保温材料 8—密封衬垫 9—带有蛇形管的冷凝器 10—放水截止阀 11—真空泵 12—放水阀
13—凝结水箱 14—真空度指示表 15—辅助加热器

第二节 常用主要设备

一、真空罐

真空罐是真空干燥处理的主要设备。它分为立式和卧式两种。对大容量高电压要求真空浸油的变压器多使用立式真空罐。

1. 立式真空罐

真空罐罐盖设置在罐顶部的叫立式真空罐。它主要由具有保温层的罐盖、罐体和加热器等组成。在罐上应附有测量绝缘电阻、温度和真空度的装置，以及注油、放油、进气、抽气管口，各联接处均有密封胶条。

(1) 立式真空罐的特点

- 1) 一般罐体较大，便于大型变压器器身干燥处理。
- 2) 罐体大部分座落在地下，减少了吊高，便于大型变压器的出入炉。
- 3) 用罐盖自重和压差压紧密封胶条，密封性能较好，也便于制造。
- 4) 适合于真空浸油的变压器器身处理。
- 5) 立式真空罐性能指标：真空度较高，能真空浸油。

(2) 立式真空罐的使用和维护

1) 罐盖在开闭前应认真检查密封装置是否良好，开闭装置是否正常。开闭罐应平稳，以免损伤保温层和密封胶条。

2) 应经常检漏，以免因有泄漏而影响真空度。

3) 保温层应保持良好状态，如有损坏，应及时修复。否则由于保温性能差而影响加热时

间和温度均匀。

4) 经常检查加热管漏气与否,尤其在罐体内部的加热管,会由于漏气而使器身处理毫无意义。

5) 应使测量元件(温度、真空、电阻)经常处于良好状态,否则会影响处理过程的正确判断。

6) 在打开罐盖前一定要解除真空,以免损伤设备。

2. 卧式真空罐

卧式真空罐是指罐体侧开门的真空罐。其结构组成与立式罐基本相同。

(1) 卧式真空罐的特点

1) 罐体座落在地面上(不需挖深地坑)可放在两个跨距之间,两头开门,两跨的产品均可通过小车出入炉。

2) 罐体可放在跨柱间,或者放在没有天车的简易厂房内,可以节约厂房的高大面积。

3) 操作人员进出罐检查或放置测量元件安全方便。

4) 观察和维护方便。

(2) 使用和维护 与立式真空罐大体相同。

二、真空泵

1. ZJ 型机械增压泵

ZJ 型机械增压泵又叫罗茨真空泵。该泵在 $133\sim 1\text{Pa}$ 真空范围内有较大的抽速,但不能在大气状态下工作,也不能将气体直接排向大气。因此,不能单独使用,必须配置前级泵,以获得预真空,气体通过前级泵排到大气中。也不允许在大于进排气压强差的条件下工作,否则将会因为过载过热而损坏。

(1) 特点 它具有结构紧凑、转速高、抽速大、体积小、功率小、起动快等特点。

(2) 结构与工作原理 如图 1-12 所示,它主要由泵体、转子、端盖等组成。

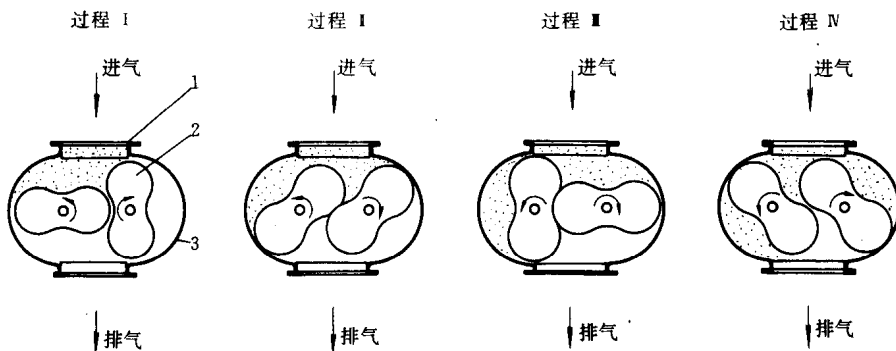


图 1-12 罗茨泵工作原理图

1—端盖 2—8 字形转子 3—泵体

机械增压泵是一种(在中真空下工作的)具有分子泵作用的容积真空泵,其工作原理如下:在泵腔内平行地安装在轴上两个 8 字形转子。一个为主动转子,另一个为从动转子,用传动比为 1 的一对同步齿轮带动,两个转子作相反方向旋转,从而产生了抽气和排气作用。

由于转子与转子之间、转子与泵体之间、转子与端盖之间具有一定的间隙,所以转子旋

转时互不摩擦，可以实现高转速。又由于间隙小，对中真空的气流具有较大的阻力，从而获得了较高的压缩比和抽气速率。

(3) 技术特性 (见表 1-1) ZJ 型机械增压泵 $p-s$ 性能曲线见图 1-13。

表 1-1 ZJ 型机械增压泵的技术数据

产品型号		ZJ-150	ZJ-600	ZJ-1200	ZJ-2500
极限真空/Pa		0.7	0.7	0.7	0.7
抽气速率	L/s	150	600	1200	2500
133~1.33Pa 时	m ³ /h	540	2160	4320	9000
泵轴转速	r/min	2860	2920	1460	2940
配套电动机	型号	JO2 31-2	JO2 42-2	JO2 61-4	JO2 61-2
	功率/kW	3	715	13	17
	转速/r·min ⁻¹	2860	2920	1460	2940
配用前级真空泵型号		2X-15	H-70 或 2X-70	H-150	H-150×2 H-300
进气口直径/mm		100	200	300	300
排气口直径/mm		100	150	200	200
允许入口压力/Pa		1333	1333	666	666
允许最高温升/°C		40	40	40	40
润滑油牌号 [SY1634-70 (88)]		KK-1 型机械真空泵油			
总重/kg		342	640	1250	1250

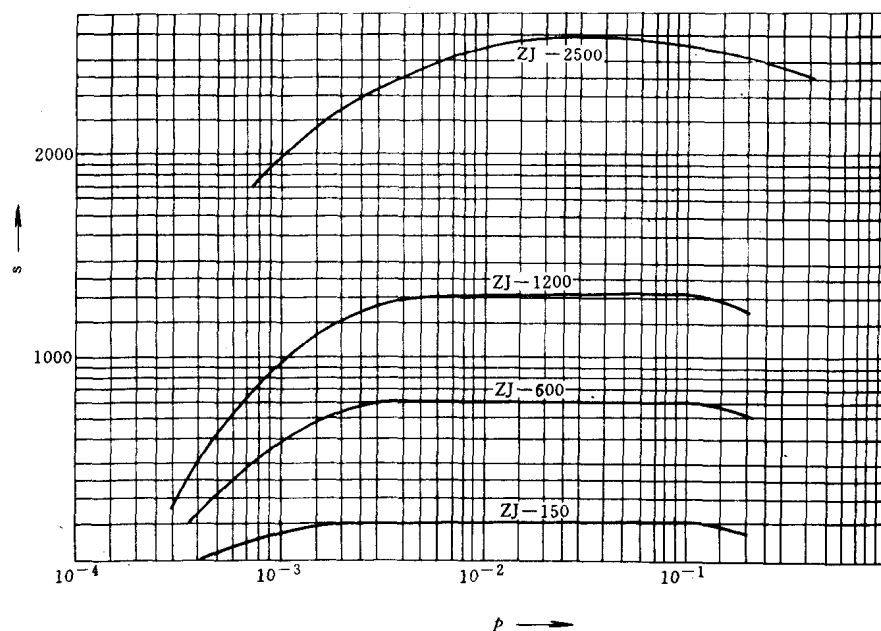


图 1-13 ZJ 型机械增压泵 $p-s$ 性能曲线图