



变压器制造技术丛书

绝缘材料与绝缘件制造工艺

变压器制造技术丛书编审委员会 编

机械工业出版社

变压器制造技术丛书

绝缘材料与绝缘件制造工艺

变压器制造技术丛书编审委员会 编

机械工业出版社

484521

本书系统地叙述了变压器制造用绝缘材料的概念、组成、基本性能及适用范围,并详细地阐述了变压器常用绝缘件的制造工艺。

本书共分六章,主要内容有:绝缘材料的基本知识;变压器常用绝缘材料;变压器常用绝缘件的制造,绝缘零件制造设备及常用工具、量具;绝缘件质量控制及质量检验。

本书是较为全面地阐述变压器常用绝缘件制造工艺的专业书,可供变压器制造行业技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

绝缘材料与绝缘件制造工艺/变压器制造技术丛书编审
委员会编. —北京:机械工业出版社,1998.5

(变压器制造技术丛书)

ISBN 7-111-06120-9

I. 绝… II. 变… III. ①绝缘材料-基本知识-②变压器
-绝缘材料-生产工艺 IV. TM21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 01041 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:荆宏智 版式设计:王颖 责任校对:程俊巧

封面设计:姚毅 责任印制:郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 3 月第 1 版第 3 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·6.5 印张·151 千字

7 001—9 000 册

定价:10.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、68326677-2527

《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	
本书编者	王洪章	王丽芬		
本书审者	魏春华			

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》和工程技术人員继续教育的要求,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

目 录

前言

第一章 绝缘材料的基本知识	1
第一节 概述	1
第二节 绝缘材料的基本特性	8
复习思考题	24
第二章 变压器常用的绝缘材料	25
第一节 气体电介质	25
第二节 液体电介质	27
第三节 绝缘纤维制品	33
第四节 绝缘漆	41
第五节 绝缘胶	49
第六节 浸渍纤维制品	50
第七节 电工用薄膜和塑料	53
第八节 电工用层压制品	56
第九节 电瓷与橡胶	58
复习思考题	59
第三章 变压器绝缘件的制造	61
第一节 变压器绝缘的分类	61
第二节 层压件的制造	63
第三节 油隙垫块的制造和配制	66
第四节 绝缘端圈的制造	67
第五节 软角环的制造	69
第六节 静电板的制造	70
第七节 成型绝缘件的制造	71
第八节 酚醛纸筒的制造	73
第九节 绝缘材料与绝缘件的保管与运输	74
复习思考题	76
第四章 绝缘零件的制造设备	77
第一节 油压机	77
第二节 冲床	78
第三节 剪板机	80
第四节 圆剪机	81
第五节 带锯机	82
第六节 纸板条倒边机	84

第七节 三辊滚板机	85
第八节 鸽尾撑条切割机	86
第九节 瓦楞机	87
第十节 60in 卷管机	88
第十一节 绝缘件制造的辅助设备	89
复习思考题	90
第五章 绝缘零件制造用的量具、工具	91
第一节 量具	91
第二节 工具	92
第六章 质量控制和质量检验	94
第一节 工序质量控制	94
第二节 质量检验	96

第一章 绝缘材料的基本知识

第一节 概 述

一、定义

1. 绝缘材料

电阻率为 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质所构成的材料在电工技术上称为绝缘材料,又称为电介质。绝缘材料对直流电流有非常大的阻力,由于它的电阻率很高,在直流电压作用下,除了有极微小的表面泄漏电流外,实际上几乎是不导电的;而对交流电流则有电容电流通过,一般也认为是不导电的。绝缘材料的电阻率越大,其绝缘性能就越好。

2. 半导体材料

介于绝缘材料和导电材料之间的材料,称为半导体材料。它的电阻率有一个较宽的范围。这里所指的半导体材料并不是用于制造半导体晶体的材料。

二、绝缘材料的作用

绝缘材料在变压器中用以将导电部分彼此之间和导电部分对地(零电位)之间的绝缘隔离。用于各种支承件时,还应具有良好的力学性能。另外,绝缘材料在不同的电工产品中还起着不同的作用,如散热冷却、固定、储能、灭弧、改善电位梯度、防潮、防霉以及保护导体等。

三、绝缘材料的特点

绝缘材料在电场作用下能够被极化,并且能在其中建立电场,因此,其本身储存有一定的电能。由于电介质的极化,绝缘材料就会消耗电能而使自身发热。

四、绝缘材料的种类

1. 气体绝缘材料

通常情况下,常温常压下的干燥气体一般均有良好的绝缘性能,如空气、氮气、氢气、二氧化碳、六氟化硫等。其中,空气和六氟化硫在变压器行业中应用比较广泛。

2. 液体绝缘材料

液体绝缘材料通常以油状存在,又称绝缘油。如变压器油、开关油、电容器油、电缆油等,还有十二烷基苯、聚丁二烯、硅油和三氯联苯等合成油以及蓖麻油。

3. 固体绝缘材料

如绝缘漆、绝缘胶、绝缘纸、绝缘纸板、瓦楞纸板、电工用塑料及薄膜、电工层压板(棒、管)、电瓷、橡胶等。另外,还有浸渍纤维制品、绝缘云母制品、复合制品以及粘带等都属于固体绝缘材料。

五、绝缘材料的基本性能

变压器的使用寿命,实际是指变压器所用绝缘材料的使用期限。变压器在规定的使用期限内,要求绝缘材料应具有可靠的性能。绝缘材料的基本性能包括电气性能、耐热性能、力学性能和理化性能等。

1. 电气性能

绝缘材料的电气性能,是变压器最关键的性能,是决定变压器取舍的重要因素。

(1) 绝缘电阻 是指对绝缘材料用直流电压量度电阻时,加上的电压时间甚久,至线路上的充电电流及吸收电流完全消失,在单独的泄漏电流之下所测得的电阻值。

一般情况下,多规定在绝缘材料上施加电压 1min 以后,所测得的电阻值为绝缘材料的绝缘电阻。对高电压大容量变压器则规定施加电压 10min 后所测得的电阻值。

绝缘电阻分为表面绝缘电阻和体积绝缘电阻。表面绝缘电阻表示阻碍电流沿电介质表面通过能力的大小;体积绝缘电阻表示阻碍电流沿电介质内部通过能力的大小。

工程上常以绝缘电阻值的大小来判断电动机、电器、变压器等电气设备是否受潮及受潮程度。绝缘材料受潮后,绝缘电阻会显著下降。为了比较产品绝缘性能的优劣,对中小型变压器,常取 1min 的绝缘电阻值来进行比较;对于大型变压器,由于 1min 的阻值在 $R=f(t)$ 曲线上所处位置不同,因此无法比较它们的绝缘性能,一般采用吸收比来进行判断,即采用 60s 与 15s 的电阻值之比。

采用绝缘电阻-时间特性曲线($R-t$ 曲线)可判断绝缘结构的吸湿情况(见图 1-1),该曲线的特点是:电压高、绝缘性能好的产品,其绝缘电阻趋于稳定的时间就会更长一些。

例如,图 1-2 所示为一个受潮绝缘材料的绝缘状态,曲线 1 反映的是干燥前绝缘材料的受潮情况,曲线 2 反映的是干燥后(73.5°C)绝缘材料的绝缘状态,曲线 3 反映的是干燥后运行 72h 并冷却到 27°C 时的绝缘状态。

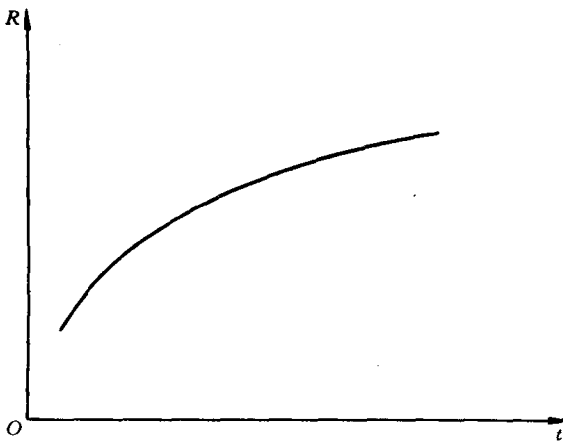


图 1-1 绝缘电阻随时间变化的曲线

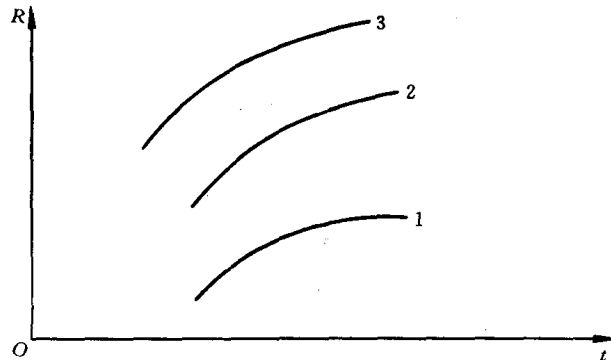


图 1-2 受潮绝缘材料的绝缘电阻随时间变化的曲线

绝缘电阻与电压之间的关系曲线是判断绝缘性能的另一个依据。良好的绝缘材料的绝缘电阻是不随电压(游离电压之前)变化而变化的,而有缺陷的绝缘材料随着电压的增加,其绝缘电阻对不同性质的绝缘缺陷有不同的反映。

(2) 电气强度 当电场强度超过该介质所能承受的允许值(临界值)时,该介质就失去了绝缘性能,这种现象称为介质的电击穿。发生介质击穿时的电压称为击穿电压,而相应的电场强度称为介质的电气强度。二者的关系为

$$E_j = \frac{U_j}{h}$$

式中 E_j ——介质的电气强度(kV/cm);

U_j ——介质的击穿电压(kV);

h ——击穿处介质的厚度(cm)。

绝缘材料的电气强度取决于其预加工情况、温度、湿度和其他因素。变压器所用绝缘材料的电气性能还与变压器本身结构和使用条件有密切的关系。

固体绝缘材料出现电击穿后,它自身是不能恢复的,只有进行更换;而液体和气体的绝缘材料发生电击穿后,再经过一段时间还能恢复原来的绝缘性能,属于弹性击穿。

绝缘材料在电场作用下,会产生游离放电直至击穿,这与电场强度有密切关系。电场强度越大,分布越不均匀,其要求绝缘材料的电气强度就越高。变压器的导电部件要求消除尖角、毛刺及对有关部位的屏蔽,其目的就是均匀电场分布,防止绝缘介质的游离或放电。

(3) 介质损耗 在交变电场中,绝缘材料吸收电能以热的形成耗散的功率称为介质损耗。工程上用介质损耗角正切($\tan\delta$)来反映,即 $\tan\delta$ 值越大,介质损耗也就越大,介质温度越高,材料老化就越快。影响介质损耗的因素有温度、湿度、电场强度和施加电压的频率。

(4) 介电常数 介电常数是表征在交变电场下电介质极化程度的一个物理量。对各向同性的线性绝缘介质而言,其介电常数为

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

式中 ϵ ——电介质的介电常数;

ϵ_0 ——真空介电常数;

ϵ_r ——电介质的相对介电常数。

通常情况下,一般采用介质的相对介电常数(ϵ_r)来衡量电介质的极化程度,即 ϵ_r 值越大,表示电介质在电场作用下的极化程度越大。变压器所采用的各种绝缘材料,当温度为 20°C、频率为 50Hz 时,介电常数为 2~8。影响相对介电常数的因素有温度、湿度,还有施加电压的频率。

有关绝缘材料电气性能的详细内容请参阅第一章第二节。

2. 耐热性能

变压器在投入运行以后,其中的绝缘介质就处于较高温度的环境中,同时在电场的作用下,绝缘材料本身也产生热量。如果绝缘材料受热和散热不能平衡,温度就会继续升高,绝缘材料便迅速失去绝缘性能而导致击穿。我们把绝缘材料的这种破坏称为热击穿。造成绝缘材料热击穿的因素,除外围温度外,主要决定于绝缘材料本身的介质损耗。这与绝缘材料本身的质量、加工方法及绝缘结构有着密切的关系。

反映耐热性能的指标有耐热性、热稳定性、最高允许工作温度和耐热等级等。

(1) 耐热性 表示绝缘材料在高温作用下,不改变介电性能、力学性能、理化性能等特性的能力。

(2) 热稳定性 是指在温度反复变化情况下,绝缘材料不改变其介电性能、力学性能、理化性能等特性,并能保持正常状态的能力。

(3) 最高允许工作温度 是指绝缘材料能长期(15~20年)保持所必须的理化性能、力学性能和介电性能而不起显著劣变的温度。绝缘材料的最高允许工作温度取决于其耐热性。

(4) 耐热等级 表示绝缘材料的最高允许工作温度。在这样的温度下,它能在预定的使用期限内维持其介电性能、力学性能、理化性能等特性。在允许的工作温度范围内,绝缘材料按耐热等级分为七个等级,参见表 1-1。

表 1-1 绝缘材料的耐热等级

耐热等级	Y	A	E	B	F	H	C
最高允许工作温度/°C	90	105	120	130	155	180	180 以上

Y 级绝缘包括:纤维素材料(木材、纸、纸板)、棉纤维、天然丝、天然橡胶、聚酰胺纤维、聚乙烯、聚氯乙烯等。

A 级绝缘包括:油性漆、油性树脂及其漆包线漆、浸在液体电介质内的纤维材料、矿物绝缘油等。

E 级绝缘包括:酚醛和三聚氰胺甲醛树脂的塑料、胶纸板、胶布板,聚酯薄膜、聚酯纤维、聚乙烯醇缩甲醛漆及其漆包线、聚胺酯及其漆包线、油改性的三聚氰胺电机绝缘浸渍漆等等。

B 级绝缘包括:玻璃漆布、玻璃胶布板、聚酯漆及其漆包线,环氧树脂等等。

F 级绝缘包括:聚酯酰亚胺漆及其漆包线、改性硅有机漆等。

H 级绝缘包括:聚酰亚胺漆及其制品、硅有机漆、硅橡胶、玻璃布、聚二基醚及其制品等。

C 级绝缘包括:电瓷等。

绝缘材料的等级必须根据电气设备的最高允许工作温度来选用。

3. 力学性能

变压器上所用的绝缘材料,都要形成一个单独或复合的构件。运行中要承受压向力、拉力及振动力的作用,这就要求绝缘材料在允许工作温度下有良好的力学性能。如绕组上的油隙垫块和器身上的端部绝缘,除能承受绕组的自重力、夹紧力外,还应承受住短路时的轴向作用力,因此要选用密度高、收缩率小、力学性能好的纸板制作。为了使绝缘材料获得好的力学性能,在制造时要消除杂质,使用前要进行干燥处理,以除掉其中的水分和空气,防止因水解和氧化作用而影响绝缘材料的力学性能。

反映力学性能的指标有硬度和强度等。

(1) 硬度 表示材料表面受压后不变形的能力。

(2) 强度 表示材料受力(拉力、压向力、弯曲力、冲击力、振动力)后不变形的能力。

4. 理化性能

变压器在长期的运行中,温度较高的变压器油对所有的绝缘材料不能有腐蚀、溶解等现象,同时各种绝缘材料对变压器油的性能不能有不良的影响,即不会促使变压器油加速老化。对于户外用的绝缘材料,则要求在长期的使用中,能耐受紫外线以及雨水等因素的侵蚀。

反映理化性能的指标有以下几个:

(1) 闪点 指石油产品用闭口杯在规定条件下加热到它的蒸气与空气的混合气接触火焰发生闪火时的最低温度(也称为闭口杯法闪点)。

(2) 粘度 表示液体克服邻近层间相对运动所产生的内部阻力的一种特性。

粘度有以下几种表示方法,即相对粘度、条件粘度、绝对粘度和运动粘度等。在变压器行业中通常采用条件粘度(条件粘度是指在规定的条件下,测定出某液体在标准容器内流经规定孔眼所需要的时间),单位是“s”。如绝缘漆的粘度采用的就是这种表示方法。

(3) 固体含量 表示树脂溶液、绝缘漆、涂料中的溶剂或稀释剂挥发后遗留下来物质的重量(在绝缘漆中,固体含量还代表漆基的实际重量)。

(4) 灰分 表示绝缘材料内所含不燃物的数量(%)。

(5) 吸湿性 表示材料在温度为 20°C 和相对湿度为 97%~100% 的空气中的吸湿能力。

187:00

在实际工作中,把材料放在底部有水的严密封闭的容器中(相对湿度接近 100%、温度为 20°C),24h 后所增加重量的百分数作为吸湿性指标。

(6) 吸水性 表示材料在 20°C 的水中浸没 24h 后,材料重量增加的百分数。

(7) 透湿性 表示水汽透过绝缘材料的能力。

(8) 溶解度 表示在一定温度和压力下,物质在一定量的溶剂中所溶解的最大量。

(9) 酸值 在试样中所含游离态酸的数量的定量值。其大小用 KOH 去滴定试样直至达到中性,所用 KOH 的数量值就可以用来表示酸的数量。单位为 mg/g,分子为所用 KOH 的毫克数,分母为试样克数。

(10) 耐油性 表示绝缘材料耐受变压器油或其他矿物油侵蚀的能力。

(11) 化学稳定性 表示材料抵抗和它接触的物质侵蚀能力(如氧、臭氧及酸、碱、盐溶液等)。

六、绝缘材料的选用原则

1. 对绝缘材料的性能要求

要求绝缘电阻大,电气强度高,介质损耗小,机械强度大,有良好的耐热性和抗潮性。

2. 绝缘材料的选用原则

(1) 应满足电工产品各种性能的要求 在电气性能方面,要求绝缘材料的绝缘电阻大,电气强度高,介质损耗小,介电性能好。在力学性能方面要求绝缘材料结实、紧密,有足够的抗拉、抗压、抗弯强度。在耐热性能方面,要求在产品的主要绝缘部位,应选用与产品耐热等级相同的绝缘材料;在其他绝缘部位,可按其实际达到的最高温度分别选用相应耐热等级的绝缘材料。

(2) 应满足不同使用场所或有特殊规定的要求 在沿海空气特别潮湿的地区,要求绝缘材料有较高的抗潮性和防霉性。在有腐蚀性气体存在的地方,要求绝缘材料有较好的抗腐蚀性。在热带地区,温度为 40°C 以上,空气相对湿度为 90% 以上,要求绝缘材料应具有优良的抗潮性及耐霉性。

(3) 经济性 在选用绝缘材料时,要考虑我国的棉、麻、绸等农副产品的资源,同时也不能优材劣用、大材小用,更不能造成浪费,应合理地、经济地选用绝缘材料。其目的是在满足电工产品电气性能、耐热性能及力学性能的基础上,降低产品原材料的成本。

七、绝缘材料的产品分类及型号编制方法

1. 绝缘材料的产品分类

(1) 按应用或工艺特征划分六类,并以数字表示

- | | |
|-------------|-----------------|
| 1——漆、树脂和胶类; | 2——浸渍纤维制品类; |
| 3——层压制品类; | 4——塑料类; |
| 5——云母制品类; | 6——薄膜、粘带和复合制品类。 |

(2) 在各大类中按使用范围及形态划分小类,并以数字表示

1) 漆、树脂及胶类

- | | |
|-------------|-------------|
| 0——有溶剂浸渍漆类; | 1——无溶剂浸渍漆类; |
| 2——覆盖漆类; | 3——瓷漆类; |
| 4——胶粘漆、树脂类; | 5——熔敷粉末类; |
| 6——硅钢片漆类; | 7——漆包线漆类; |
| 8——胶类。 | |

484521

2) 浸渍纤维制品类

- | | |
|-------------|------------|
| 0——棉纤维漆布类； | 2——漆绸类； |
| 4——玻璃纤维漆布类； | 6——防电晕漆布类； |
| 7——漆管类； | 8——绑扎带类。 |

3) 层压制品类

- | | |
|----------------|--------------|
| 0——有机底材层压板类； | 2——无机底材层压板类； |
| 3——防电晕及导磁层压板类； | 4——复铜箔层压板类； |
| 5——有机底材层压管类； | 6——无机底材层压管类； |
| 7——有机底材层压棒类； | 8——无机底材层压棒类。 |

4) 塑料类

- | | |
|-------------|----------------|
| 0——木粉填料塑料类； | 1——其他有机物填料塑料类； |
| 2——石棉填料塑料类； | 3——玻璃纤维填料； |
| 4——云母填料塑料类； | 5——其他矿物填料塑料类； |
| 6——无填料塑料类。 | |

5) 云母制品类

- | | |
|------------|--------------|
| 0——云母带类； | 1——柔软云母板类； |
| 2——塑料云母板类； | 3——玻璃塑型云母板类； |
| 4——云母带类； | 5——换向器云母板类； |
| 7——衬垫云母板类； | 8——云母箔； |
| 9——云母管。 | |

6) 薄膜、粘带和复合制品类

- | | |
|----------------|---------------------|
| 0——薄膜类； | 2——薄膜粘带类； |
| 3——橡胶及织物粘带类； | 5——薄膜绝缘纸及薄膜玻璃漆布复合箔。 |
| 6——薄膜合成纤维纸复合箔； | 7——多种材质复合箔。 |

注：绝缘材料的分类号均以 0 至 9 取 10 个数，其中空缺号为将来新产品预备号。

2. 绝缘材料的型号编制方法

电气绝缘材料产品的型号，一般用四位数字表示，必要时可增加第五位和附加数字及附加字母，其表示图式如图 1-3 所示。

例如，5535—2，表示金云母换向器云母板，参考工作温度为 130℃，第五次设计。

云母制品型号中，没有附加数字的为白云母制品，有附加数字的：1 为粉云母制品，2 为金云母制品，3 为鳞片云母制品。

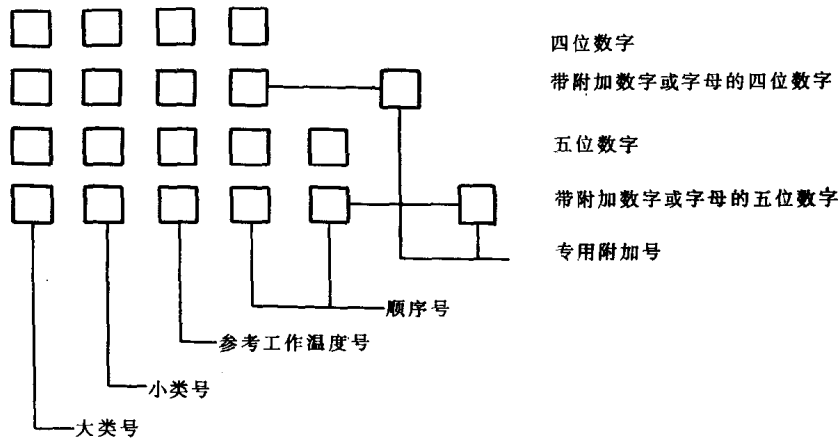
八、绝缘材料的试验

绝缘材料试验(包括入厂时的复试)的主要目的是检查绝缘材料的性能是否达到了预定的技术指标，能否满足使用要求。下面只介绍常用的纸板试验方法。

1. 电气强度试验

在大张纸板上切取 150mm×150mm 的方形试样数件，在真空度为 $9.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 和 $104^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 的条件下干燥 4h，然后放在同样真空度下的 $90^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 的变压器油中浸 4h 后，用一个直径为 50mm、边缘圆角半径为 2.5mm 的黄铜电极和一平板电极在油中紧贴试样的两面，以

2kN/s 的速度使电极间的电压稳步升高到标准值而试样不被击穿。每次试样不少于 10 件, 测击穿电压时计算其平均值。试验装置如图 1-4 所示。



注: 参考工作温度号

- 1—参考工作温度为 105°C 2—参考工作温度为 120°C 3—参考工作温度为 130°C
4—参考工作温度为 155°C 5—参考工作温度为 180°C 6—参考工作温度大于 180°C

图 1-3 绝缘材料的型号表示图示

2. 抗拉强度

切取 50mm×200mm 的条形试样数件, 将有自动记数的标准拉力机的两个夹子间的距离调到 100mm, 然后把试样均匀地放入夹子内夹紧, 缓慢开动拉力机直到把试样拉断为止。按拉断时记取的数据进行计算, 如果计算出的抗拉强度大于标准值则为合格, 否则为不合格。抗拉强度按下式计算

$$\sigma_b = \frac{F}{A}$$

式中 σ_b ——抗拉强度;
 A ——试样截面积;
 F ——拉断力。

3. 纸板压缩率的试验

纸板压缩率是指纸板在垂直于纸面的一定压力作用下厚度变化的程度, 用百分率表示。把标准试样平放在标准压力机的平台板之间, 在 0.1MPa 的压力下, 测得此时试样的厚度, 然后开动压力机达到规定压力时, 再测定其厚度, 最后按下式计算出试样的压缩率

$$B = \frac{H_1 - H_2}{H_2} \times 100\%$$

式中 B ——压缩率;
 H_1 ——压缩前试样厚度;
 H_2 ——压缩后试样厚度。

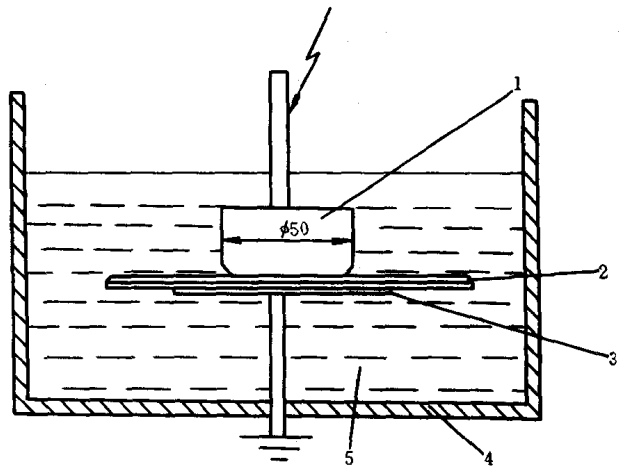


图 1-4 电气强度试验装置示意图

- 1—高压电极 $\phi 50\text{mm}$ 、 $R2.5\text{mm}$ 2—试样 3—接地平板
电极 4—铁板槽 5—变压器油

4. 纸板收缩率的测定

切取宽 25~50mm,长 170~175mm 的试样三件,沿长度方向在纸板的两端距边缘 10~15mm 处用刀划出痕迹并测得两痕迹间的尺寸,然后将试样放在干燥炉内干燥彻底后,用原测量工具再次测得两痕迹间的尺寸,最后按下式计算出收缩率

$$L = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100\%$$

式中 L ——纸板收缩率;

L_1 ——干燥前两刀片痕迹尺寸;

L_2 ——干燥后两刀片痕迹尺寸。

5. 纸板含水率的测定

纸板含水量是指纸板在 100~105°C 的温度下烘干至恒量时的水分排出量;含水率即纸板烘干前后重量之差与烘干前重量之比,用百分数表示,其计算公式为

$$X = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \times 100\%$$

式中 X ——纸板含水率;

G_1 ——试样烘干前重量;

G_2 ——试样烘干后重量。

6. 纸板灰分的测定

纸板灰分是指纸板彻底烧化所剩余残渣的重量与恒干时的重量之比,用百分率表示。切取一块彻底风干的 2g 重的纸板作试样,放在坩埚内小心燃烧使之完全灰化,称其重量,每次称重的重量均准确到 0.0001g,最后按下式计算

$$Y = \frac{(G_1 - G) \times 100}{G_2(100 - W)} \times 100\%$$

式中 Y ——纸板的灰分率;

G ——坩埚的净重;

G_1 ——燃烧后盛有灰分的坩埚重量;

G_2 ——风干试样的重量;

W ——试样的含水率。

上述的试验是绝缘材料的制造和入厂检验的常规试验。应该强调指出的是,由于制造批量大,进厂的数量也多,取样试验结果只能表示其基本情况,不能说明全部材料的真正的内在质量,所以还应根据试验的结果进一步分析和判断,以便对质量得出比较符合实际的结论。

第二节 绝缘材料的基本特性

电介质在外电场作用下会发生电导、极化、损耗、击穿、老化等过程,我们把电介质的这些现象称为电介质的基本特性(电导、极化、损耗、击穿在电气工程上的等同代表符号为 γ 、 ϵ_r 、 $\tan\delta$ 、 E_j)。

一、电介质的电导

1. 概念

绝缘材料并不是绝对不导电的材料。当对绝缘材料施加一定的直流电压 U 后,绝缘材料中会流过极其微弱的电流。我们把绝缘材料的这种现象称为电介质的电导。

流过电介质的电流随着时间的增加是逐渐减小的,并达到一恒定值。此电流由三部分组成:

(1) 瞬时充电电流 此电流由介质的几何电容和位移极化产生,随着时间的增加逐渐衰减,用 i_c 表示。

(2) 吸收电流 由缓慢极化、导电离子产生的体积电荷等产生,也是随着时间的增加逐渐衰减的,用 i_a 表示。

(3) 泄漏电流 绝缘材料在直流电压作用下有极微小的泄漏电流,由材料内部的带电质点导电而产生。这主要是绝缘材料在制造过程中原料本身的离子不能消除,又可能混入导电的离子,这些离子在直流电压作用下产生的位移就形成了泄漏电流。泄漏电流的大小与绝缘材料本身含离子量有着密切的关系,用 i_b 表示。

三种电流关系如图 1-5 所示。

$$i = i_c + i_a + i_b$$

泄漏电流与时间无关,而决定于电压,并且与绝缘的工艺处理质量有关。如果绝缘材料中含水量较高,油中及固体绝缘表面含有杂质,都会引起绝缘的泄漏电流增大。

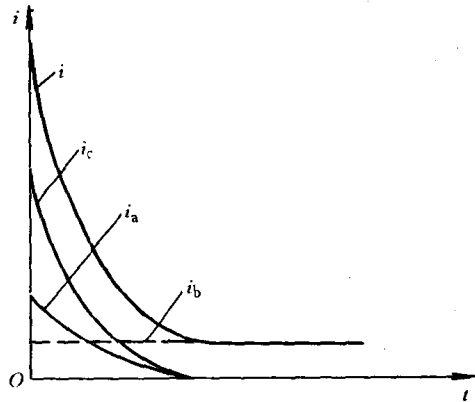


图 1-5 直流电压作用下通过绝缘材料的电流

2. 电介质的电导率 (γ) 及电介质的电阻率

(ρ)

(1) 电介质的电导率 在电场强度不太高时,泄漏电流密度 J_b 和直流电场强度 E 的关系符合欧姆定律,其比值就是电介质的电导率,用 γ 表示,即

$$\gamma = \frac{J_b}{E}$$

(2) 电介质的电阻率 电介质的电阻率与其电导率互为倒数,用 ρ 表示

$$\rho = \frac{1}{\gamma}$$

电介质的电阻率分为表面电阻率和体积电阻率。表面电阻率表征材料表面的电导特性,而体积电阻率表征电介质内部的电导特性。绝缘材料的体积电阻率通常在 $10^9 \sim 10^{21} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

3. 影响电介质电阻率的因素

(1) 温度 随着温度的升高,其电阻率呈指数式下降,即

$$\rho = Ae^{B/t}$$

式中 ρ ——电介质的电阻率;

t ——电介质的温度;

A, B ——常数。

这是因为当温度升高时,分子热运动加剧,分子的平均动能增大,使分子动能达到活化能的几率增加,离子容易迁移的缘故。

(2) 湿度 绝缘电阻随湿度的增大而降低的特性,对多孔性材料(如纸)的影响特别显著,水分的浸入使电介质增加了导电离子,水又能促使杂质及极性分子的离解,电介质表面的电阻对其表面水分的影响很敏感。

电器设备特别是户外设备,在运行过程中,往往由于受潮引起绝缘材料电阻率下降,造成泄漏电流过大而使设备损坏。因此,定期检查设备绝缘电阻的变化,可以预防事故的发生。

图 1-6 所示为良好绝缘和有缺陷绝缘中的电流及绝缘电阻随时间的变化曲线,曲线 1 为有缺陷绝缘的电流曲线,曲线 2 为良好绝缘的电流曲线,曲线 3 为良好绝缘的绝缘电阻曲线,曲线 4 为有缺陷绝缘的绝缘电阻曲线。

(3) 杂质 电介质表面受杂质污染并吸附水分,会使表面电阻率迅速下降。

绝缘材料的原材料大都存在着杂质,在制造过程中又会混进一些杂质。这些杂质在电介质内部直接增加了导电离子,使材料的电阻率下降。杂质特别容易混入极性材料中,混入后又能促使极性分子的离解。因此,在电介质内部导电离子增加。

绝缘电阻值对绝缘材料中所含杂质的反映很灵敏。工程上常用测量体积电阻率的办法来了解、控制绝缘材料的杂质含量。

(4) 电场强度 在电场强度不太高的情况下,电场强度对固体、液体电介质的离子的迁移能力和电阻率的影响很小。在高的电场强度下,离子的迁移能力随电场强度的增强而增大,使电阻率下降。当电场强度达到使电介质临近击穿时,由于出现大量电子迁移,使绝缘电阻呈指数式下降。在电场强度足够大的情况下,电介质的绝缘电阻几乎消失,泄漏电流急剧增大,导致绝缘发生电击穿。

二、电介质的极化

1. 定义

电介质在没有外电场作用时不呈现电的极性,而在外电场作用下,电介质的两端出现了等量的异性电荷,呈现了电的极性。我们把这种现象称为电介质的极化。

介质极化形式包括:电子位移极化、原子位移极化、偶极子转向极化和夹层极化等。

2. 介电常数

电介质的介电常数在电工基础学中称为电容率。在电气绝缘中,介电常数是表征在交变电场下介质极化程度的一个参数。介电常数用 ϵ 表示。

对各向同性的线性绝缘介质而言,其介电常数 ϵ 为

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

式中 ϵ_0 ——真空介电常数($\epsilon_0 = 8.84 \times 10^{-14} \text{F/cm}$);

ϵ_r ——电介质的相对介电常数。

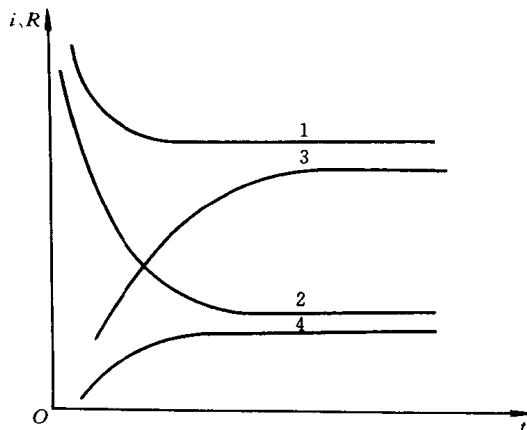


图 1-6 良好绝缘和有缺陷绝缘中的电流及绝缘电阻随时间变化的曲线