

电力变压器技术丛书

BIANYAQI ZHIZAO GONGYI

变压器制造工艺

保定天威保变电气股份有限公司 组编

主 编 赵静月

副主编 张 庆 康运和



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

电力变压器技术丛书

变压器制造工艺

保定天威保变电气股份有限公司 组编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

本书介绍了电力变压器、配电变压器的制造工艺及质量控制标准。其中包括绝缘材料的性能和用途,各种绝缘件、部件制造工艺及质量控制标准;各种导线的性能和用途,各种形式线圈的绕制工艺、处理工艺及质量控制标准,线圈整体套装工艺及质量控制标准;硅钢片的性能参数,铁心片的剪切工艺、铁心叠装工艺及质量控制标准,磁屏蔽的制造工艺及质量控制标准;常用金属材料的性能参数,各种焊接方法及设备,钢板预处理、下料工艺,油箱、升高座、联管、储油柜的制造工艺及质量控制标准,焊缝试漏及无损检测工艺,表面处理工艺及质量控制标准,铜、铝屏蔽制造工艺及质量控制标准;器身套装插铁工艺,引线装配工艺,器身干燥处理及变压器油处理工艺,真空浸油、总装配工艺,试漏检漏工艺及质量控制标准。各工序主要工装、设备的技术参数,作业环境基本要求。

本书可作为变压器制造厂工艺人员和高等学校教师及学生的参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

变压器制造工艺/赵静月主编. —北京:中国电力出版社, 2009

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8328 - 6

I. 变… II. 赵… III. 变压器 - 生产工艺 IV. TM405

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 213948 号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

策 划: 周 娟 责任编辑: 杨淑玲

责任印制: 陈焊彬 责任校对: 常燕昆

北京盛通印刷股份有限公司印刷·各地新华书店经售

2009 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 31.5 印张 · 787 千字

定价: 68.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

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

本社购书热线电话 (010 - 88386685)

前 言

变压器是电力系统的重要设备之一，它的产品质量直接关系到电网的安全运行，而制造工艺与产品质量密切相关。本书以保定天威保变电气股份有限公司的变压器制造工艺为基础，同时也收集了国内外其他变压器制造厂的先进工艺方法，介绍了现代变压器制造工艺，对提高变压器生产技术人员和技师的技术水平有一定帮助。

本书共分5章。第1章由邵晓静高级工程师、张庆高级工程师编写；第2章由刘克昌高级工程师编写；第3章由于新才高级工程师、谢银祥高级工程师编写；第4章由康运和高级工程师、屈永建高级工程师、葛惠卿高级工程师、张海燕高级工程师编写；第5章由戴普辉高级工程师、张丙旭高级工程师、李强高级工程师、赵静月高级工程师编写。全书由赵静月担任主编，康运和、张庆担任副主编。

保定天威保变电气股份有限公司、电气设备结构有限公司的领导对本书的编写给予了大力的支持，我们在此致以衷心的感谢。

由于我们水平所限，书中难免有不妥和错误，衷心欢迎广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绝缘件制造工艺 (1)

1.1 绝缘(材料)的基本知识 (1)

1.2 常用绝缘材料的性能和用途 (6)

1.2.1 绝缘纸板 (6)

1.2.2 电工层压木 (8)

1.2.3 上胶纸 (8)

1.2.4 电缆纸 (9)

1.2.5 电工皱纹纸 (9)

1.2.6 铝箔皱纹纸 (11)

1.2.7 酚醛纸板、酚醛布板 (11)

1.2.8 环氧玻璃布板 (13)

1.2.9 酚醛树脂 (13)

1.2.10 聚乙烯醇(PVA) (13)

1.2.11 蒸馏水 (14)

1.3 绝缘件制作工艺及质量控制标准 (14)

1.3.1 绝缘纸板的下料 (14)

1.3.2 纸圈的制作 (18)

1.3.3 层压纸板压制 (19)

1.3.4 端圈的制作 (22)

1.3.5 静电环的制作 (23)

1.3.6 屏蔽板的制作 (25)

1.3.7 线圈撑条的制作 (26)

1.3.8 线圈垫块的制作 (29)

1.3.9 线圈小角环的制作 (34)

1.3.10 油隙撑条的制作 (35)

1.3.11 硬纸板筒的制作 (36)

1.3.12 酚醛纸筒的制作 (40)

1.3.13 压板、托板的制作 (42)

1.3.14 角环压制 (45)

1.3.15 导线夹的制作 (46)

1.3.16 铁心油道的制作 (47)

1.3.17 夹件绝缘的制作 (47)

1.3.18 拉板绝缘的制作 (48)

1.3.19 特形绝缘件的制作 (48)

1.3.20 瓦楞纸板的制作 (49)

1.3.21 折弯件的制作 (49)

1.4 工艺流程、工艺布置的设置方法, 作业环境基本要求 (49)

1.4.1 绝缘车间工艺布置 (49)

1.4.2 绝缘件制造中的基本要求 (51)

1.5 绝缘件检验量具及工具 (52)

第2章 线圈制造工艺 (56)

2.1 线圈的基本知识 (56)

2.1.1 线圈的基本概念 (56)

2.1.2 线圈的作用及结构形式 (61)

2.1.3 常用导线的形式和用途 (63)

2.1.4 常用绝缘材料的性能和用途 (74)

2.2 绕制线圈的设备及工装 (78)

2.2.1 卧式绕线机 (78)

2.2.2 立式绕线机 (81)

2.2.3 箔式绕线机 (82)

2.2.4 卷铁心线圈绕线机 (83)

2.2.5 绕线模 (83)

2.2.6 铜焊机 (84)

2.2.7 线圈检查工具 (84)

2.3 线圈绕制工艺 (84)

2.3.1 基本操作过程 (84)

2.3.2 圆筒式线圈的绕制 (88)

2.3.3 箔式线圈的绕制 (92)

2.3.4 连续式线圈的绕制 (94)

2.3.5 螺旋式线圈的绕制 (105)

2.3.6 纠结式线圈的绕制 (113)

2.4 线圈的干燥及压装 (132)

2.4.1 线圈干燥压装用工装、设备 (132)

2.4.2 线圈的修整 (135)

2.4.3 线圈压装 (137)

2.4.4 线圈干燥工艺 (139)

2.5 线圈车间厂房设置、作业环境

基本要求	(139)	3.7.1 变压器噪声的产生	
2.5.1 线圈车间厂房设置	(139)	机理	(237)
2.5.2 作业环境基本要求	(140)	3.7.2 影响铁心片磁致伸缩的	
第3章 铁心制造工艺	(141)	因素及其控制方法	(239)
3.1 铁磁材料与磁路	(141)	3.7.3 影响铁心噪声的因素	(241)
3.1.1 铁心磁路	(141)	3.8 铁心损耗	(244)
3.1.2 铁心材料(硅钢片、非晶		3.8.1 空载损耗和空载电流的	
合金)	(143)	概念	(244)
3.2 铁心结构类型	(155)	3.8.2 影响铁心损耗的因素	(246)
3.2.1 铁心的组成与作用	(155)	3.8.3 降低铁心损耗的某些技术	
3.2.2 铁心的发展与分类	(155)	性措施	(250)
3.2.3 常用铁心的结构形式	(158)	3.9 磁屏蔽的制作	(252)
3.2.4 铁心截面与心柱直径	(160)	3.9.1 磁屏蔽的作用与分类	(252)
3.2.5 片形	(162)	3.9.2 板式磁屏蔽的制造	
3.2.6 铁心的接缝结构	(163)	工艺	(252)
3.2.7 铁心的填充、叠装、叠片与工		3.9.3 立式磁屏蔽的制作	(254)
艺系数的基本概念	(168)	第4章 油箱及结构件制造工艺	(258)
3.2.8 铁心的绝缘与接地结构	(170)	4.1 变压器油箱的结构形式	(258)
3.3 铁心片的剪切	(171)	4.1.1 钟罩式油箱	(258)
3.3.1 剪切设备	(171)	4.1.2 桶式油箱	(258)
3.3.2 铁心片下料套裁	(182)	4.1.3 波纹式油箱	(258)
3.3.3 铁心片纵剪	(184)	4.1.4 壳式变压器油箱	(258)
3.3.4 铁心片横剪下料	(188)	4.2 油箱及结构件制造的焊接方法	
3.3.5 铁心片检验工具	(190)	及设备	(258)
3.3.6 铁心片的存放与运输	(191)	4.2.1 焊条电弧焊	(258)
3.4 铁心叠装	(193)	4.2.2 气体保护焊	(266)
3.4.1 铁心叠装用设备、工装	(193)	4.2.3 埋弧焊	(271)
3.4.2 铁心叠装	(195)	4.2.4 螺柱焊	(274)
3.4.3 铁心起立	(208)	4.2.5 手弧焊、气体保护焊、埋弧	
3.4.4 铁心绑扎	(209)	焊焊接质量的检测	(277)
3.5 卷铁心制造	(213)	4.3 材料准备	(280)
3.5.1 铁心卷制	(213)	4.3.1 常用材料的牌号表示	
3.5.2 铁心退火	(216)	方法	(280)
3.6 铁心的质量控制与问题		4.3.2 常用材料的化学成分及	
处理	(226)	力学性能	(281)
3.6.1 铁心的检查与测量	(226)	4.3.3 常用材料的焊接性及加工	
3.6.2 常见铁心叠装问题的原因		性能	(282)
分析与预防处理方法	(229)	4.3.4 常用材料的采购及预	
3.6.3 重大铁心问题的处理	(230)	处理	(283)
3.6.4 铁心退火的常见质量问题、		4.4 零件下料	(284)
产生原因及排除方法	(236)	4.4.1 气割下料	(284)
3.7 铁心噪声	(237)	4.4.2 等离子切割下料	(291)

4.4.3	激光切割	(294)	4.12.2	升高座的加工	(354)
4.4.4	剪切下料	(295)	4.12.3	变压器油箱及结构件的 制作流程图	(359)
4.4.5	锯割下料	(297)	4.13	波纹式油箱简介	(359)
4.4.6	常用零部件的下料	(298)	4.14	夹件制造	(361)
4.5	箱沿制作	(300)	4.14.1	拼接式夹件	(361)
4.5.1	箱沿的结构形式	(300)	4.14.2	板式夹件制作	(369)
4.5.2	箱沿用料及加工	(300)	4.14.3	槽钢式夹件	(370)
4.5.3	箱沿的组焊	(301)	4.14.4	折弯式夹件	(370)
4.6	箱壁分片制作	(303)	4.14.5	夹件焊接变形的预防及 焊后整形	(370)
4.6.1	箱壁下料	(303)	4.15	焊接的消除应力处理	(374)
4.6.2	箱壁调平	(304)	4.15.1	焊接应力与变形产生 的原因	(375)
4.6.3	箱壁加强铁焊装	(304)	4.15.2	热应力分布形式	(375)
4.6.4	整体折板式箱壁的分片 制造	(306)	4.15.3	避免应力集中的结构 形式	(375)
4.7	油箱组立	(306)	4.15.4	焊接应力与变形的预防	(375)
4.7.1	截面为矩形的油箱组立 工艺步骤及方法	(306)	4.15.5	焊后消应力的方法	(376)
4.7.2	其他形状油箱箱壁的 组立	(308)	4.16	油箱、附件检漏及无损 探伤	(377)
4.8	钟罩式油箱的制作	(308)	4.16.1	气压试漏	(377)
4.8.1	装配的原理与方法	(308)	4.16.2	氦气检漏	(378)
4.8.2	变压器油箱概述	(312)	4.16.3	氨检漏法	(379)
4.8.3	下节油箱的制造	(312)	4.16.4	焊缝气压试漏	(380)
4.8.4	上节油箱的制作	(319)	4.16.5	水压检验	(381)
4.8.5	火焰矫正方法	(324)	4.16.6	无损检测	(382)
4.9	桶式油箱制造	(328)	4.16.7	油压试漏	(387)
4.9.1	桶式油箱的焊装	(330)	4.17	油箱强度试验	(387)
4.9.2	箱盖制造	(334)	4.17.1	试验前的准备工作	(388)
4.9.3	桶式油箱的焊接	(337)	4.17.2	测量点的选择及测量 基准线固定	(388)
4.10	升高座及联管的配装	(338)	4.17.3	各状态下的数据测量与 记录	(388)
4.10.1	箱顶通气联管配装	(338)	4.17.4	进行机械强度试验需要 注意的事项	(389)
4.10.2	储油柜及储油柜系统 联管的配焊	(340)	4.17.5	判定试验结果并编制 试验报告	(389)
4.11	冷却装置的配装	(341)	4.18	油箱及附件的二次试装	(389)
4.11.1	概述	(341)	4.18.1	二次试装的范围	(389)
4.11.2	片式散热器式冷却装置 的配装	(342)	4.18.2	二次试装过程中问题的处理	
4.11.3	冷却器式冷却装置的配装	(344)			
4.11.4	联管的加工	(346)			
4.12	储油柜及升高座的制造	(351)			
4.12.1	储油柜的加工	(351)			

	及试装时注意事项	…… (389)			
4.18.3	油箱准备就位	…… (390)	5.1.3	拆除紧固装置 (不叠上铁轭铁心)	…… (420)
4.18.4	储油柜及其所属联管的试装	…… (390)	5.1.4	安装下铁轭绝缘	…… (420)
4.18.5	升高座及通气联管的试装	…… (391)	5.1.5	线圈套装	…… (420)
4.18.6	有载开关、滤油机联管的试装	…… (391)	5.1.6	线圈整体套装	…… (422)
4.18.7	冷却装置联管试装	…… (391)	5.1.7	插上铁轭 (含步进方式)	…… (428)
4.18.8	灭火装置联管的试装	…… (392)	5.1.8	插板试验	…… (429)
4.19	油箱及附件除锈	…… (392)	5.2	变压器器身引线连接	…… (429)
4.19.1	机械抛丸	…… (392)	5.2.1	准备	…… (429)
4.19.2	手工喷丸 (砂)	…… (393)	5.2.2	引线焊接	…… (429)
4.19.3	酸洗磷化除锈	…… (394)	5.2.3	焊线试验	…… (440)
4.19.4	人工清理	…… (398)	5.3	变压器器身试装配	…… (440)
4.20	油箱及附件喷漆	…… (399)	5.4	变压器器身干燥	…… (441)
4.20.1	对喷漆环境的要求	…… (399)	5.5	真空浸油	…… (448)
4.20.2	油漆的性能要求及技术指标	…… (399)	5.6	变压器总装配	…… (449)
4.20.3	喷漆的操作工艺	…… (401)	5.6.1	线圈轴向压紧	…… (449)
4.20.4	油箱及附件喷漆所用的设备工具	…… (404)	5.6.2	器身的清理和紧固	…… (451)
4.20.5	涂漆的病态特征及预防措施	…… (406)	5.6.3	油箱及屏蔽安装	…… (452)
4.20.6	涂漆场所及个人的安全与防护	…… (414)	5.6.4	器身下箱和扣罩	…… (453)
4.21	油箱车间布置和安全与环保	…… (415)	5.6.5	升高座及套管式电流互感器的安装	…… (454)
4.21.1	油箱车间的选址	…… (415)	5.6.6	储油柜的安装	…… (455)
4.21.2	油箱车间的生产能力	…… (415)	5.6.7	套管的安装	…… (457)
4.21.3	油箱车间的必要设施	…… (416)	5.6.8	变压器真空注油	…… (463)
4.21.4	油箱车间的安全保障	…… (416)	5.6.9	冷却装置安装	…… (466)
4.21.5	油箱车间的采暖及采光通风	…… (416)	5.6.10	变压器整体试漏	…… (471)
4.21.6	油箱车间的工业管线	…… (417)	5.6.11	中小型变压器总装配	…… (473)
4.21.7	油箱车间的三废处理	…… (417)	5.7	拆封、包装、运输	…… (473)
第5章	变压器装配工艺	…… (419)	5.7.1	拆卸	…… (473)
5.1	变压器器身装配	…… (419)	5.7.2	包装	…… (473)
5.1.1	组部件验收	…… (419)	5.7.3	运输	…… (474)
5.1.2	拆上铁轭 (叠上铁轭铁心)	…… (419)	5.8	变压器解体运输与现场组装	…… (476)
			5.9	变压器油的处理与储存	…… (478)
			5.10	总装车间厂房设置、作业环境基本要求	…… (484)
			5.11	主要设备及工装	…… (485)
			参考文献	…… (495)	

第1章 绝缘件制造工艺

1.1 绝缘（材料）的基本知识

在变压器中，需要大量的绝缘材料，但在某些起特殊作用的绝缘件中，也使用一些半导体材料和导电材料，下面对其进行简单介绍。

1. 绝缘材料在变压器中的主要地位和作用

绝缘材料用在变压器中，主要是起绝缘作用和机械支撑作用。首先它有良好的绝缘性能，用以对导电部分彼此之间、导电部分对地（零电位）之间进行绝缘隔离；其次，它有良好的机械性能，可以加工成各种绝缘支撑件。

绝缘材料的好坏决定着变压器的使用寿命。

2. 定义

(1) 绝缘材料。体积电阻率为 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ 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。

(3) 导电材料。在电压的作用下，电流能很好的通过的材料叫导电材料。它的电阻率很小，如电解铜是 $0.0172 \mu\Omega \cdot \text{m}$ ，铝是 $0.029 \mu\Omega \cdot \text{m}$ 。

3. 绝缘材料的分类

(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、六氟化硫气等，目前用六氟化硫绝缘的气体变压器应用很广泛。

(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、电容器油等。

此外，液体绝缘材料还有绝缘胶等。

(3) 固体绝缘材料。常见的固体绝缘材料主要为绝缘纸、绝缘纸板、木材、电工层压木、酚醛纸板、酚醛布板、玻璃布板等。

4. 绝缘材料的基本性能

(1) 电气性能。绝缘材料的电气性能是变压器最关键的性能，是决定绝缘材料取舍的重要因素。电气性能主要包含如下几个方面：

1) 绝缘电阻。加在绝缘体的两个电极之间的直流电压，除以通过两个电极之间的电流所得的商即为绝缘电阻。

在加压初期，线路中同时存在充电电流、吸收电流和泄漏电流，一般我们将加压时间延长，至充电电流和吸收电流完全消失，只有泄漏电流时再进行测量。

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。

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。

绝缘材料的电气强度取决于材料本身的预加工情况、温度、湿度等相关因素。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，再经过一段时间后还能恢复原来的绝缘性能，属于弹性击穿。

3) 介质损耗。在交变电场中，绝缘材料吸收电能以热的形式耗散的功率称为介质损耗。介损用介质损耗角的正切 ($\tan\delta$) 来反映，即 $\tan\delta$ 越大，介损就越大，介质温度就越高，材料老化就越快。

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

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

式中， ε 为电介质的介电常数； ε_0 为真空介电常数； ε_r 为电介质的相对介电常数。

通常情况下，采用相对介电常数来衡量电介质的极化程度， ε_r 越大，电介质在电场作用下的极化程度越大。

(2) 耐热性能。变压器在投入使用后，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，绝缘材料就迅速失去绝缘性能而导致击穿，这种绝缘介质的破坏称为热击穿。

反映绝缘材料耐热性能的指标有耐热性、稳定性、最高允许工作温度和耐热等级等，其基本定义如下：

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）保持所必需的介电性能、力学性能、理化性能而不起显著劣变的温度。

4) 耐热等级。表示绝缘材料的最高允许工作温度。绝缘材料耐热等级主要为 90℃、105℃、120℃、130℃、155℃、180℃、200℃、220℃等。

(3) 力学性能。变压器上所用的绝缘件，除起绝缘作用外，运行中都要承受压力、拉力等各种力的作用，这就要求绝缘材料在允许工作温度下有良好的力的性能。

反映绝缘材料力学性能的指标有强度和硬度等，其定义分别如下：

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。绝缘件长期浸泡在变压器油中，变压器油对绝缘材料不能有腐蚀和溶解等现象，绝缘材料对变压器油的性能不能有不良的影响。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。

对于气体绝缘材料，主要理化性能指标包括熔点、升华点、酸度等。

对于液体绝缘材料，主要理化性能指标包括闪点、凝点、粘度、酸值、界面张力、固体含量等。

对于固体绝缘材料，主要理化性能指标包括灰分、酸值、吸湿性、与变压器油的相容性等。

5. 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。

(1) 电介质的电导。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后, 绝缘材料中会流过极其微弱的电流, 这种现象为电介质的电导。

流过电介质的电流随着时间的增加是逐渐减少的, 并达到一恒定值。此电流分为三部分:

- 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。
- 2) 吸收电流。由缓慢极化、导电离子产生的体积电荷等产生, 随着时间的增加逐渐衰减。
- 3) 泄漏电流。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率较高, 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。

当电场强度不太高时, 泄漏电流密度和直流电场强度的商即为电介质的电导率, 电导率的倒数即为电介质的电阻率。

影响电介质电阻率的主要因素如下:

- 1) 温度。随着温度的升高, 其电阻率呈指数式下降。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概率增加, 离子容易迁移。
- 2) 湿度。绝缘电阻随湿度的增大而降低。这是因为水分的侵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。
- 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。这是因为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。杂质又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, 造成电介质内部导电离子增加。
- 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, 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。

(2) 电介质的极化。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, 这种现象为电介质的极化。

介电常数是表征在交变电场下介质极化程度的一个参数, 在实际工作中, 通常使用相对介电常数 ϵ_r 。影响相对介电常数的因素如下:

- 1) 频率。由于极化的形成是需要一定时间的, 当电场频率增高到某种极化来不及形成时, 则这种极化形式在此频率以上就不存在。因此, ϵ_r 随电场频率增高而逐级下降。
- 2) 温度。温度上升, 使缓慢松弛极化及时建立, 从而增大了极化强度, 但当温度继续上升时, 又会使偶极子热运动增强, 使他们在电场方向定向困难, 减小极化强度, 所以, ϵ_r 在某一温度下会出现峰值。随着频率的升高, 曲线的峰值向高温方向移动。
- 3) 湿度。水的相对介电常数很大, 由于绝缘材料中的介质不均匀, 所以绝缘材料受潮后会增加夹层极化, 使 ϵ_r 增大。

在变压器中, 常用绝缘材料的相对介电常数如下:

- 1) 空气: 1.000 58。
- 2) 变压器油: 2.2 ~ 2.5。
- 3) 绝缘纸(板): 4.4 (浸油后)。
- 4) 蒸馏水: 81。
- 5) 乙醇: 33。

6) 环氧树脂: 4.1。

由于整个绝缘系统中的电场是按 ε_1 成反比分布的, 即 $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = E_2/E_1$, 所以介电常数小的绝缘材料所承受的电场强度高, 而介电常数大的绝缘材料承受的场强低。假如绝缘处理得不好, 留有气泡, 因为 $\varepsilon_0/\varepsilon_1 = E_1/E_0$, 所以 $E_0 = \varepsilon_1 E_1$, 即气泡中的电场强度应是绝缘介质中电场强度的 ε_1 倍, 当绝缘介质中的介电常数 ε_1 较大时, 气泡中的电场强度可能相当强, 以致引起气泡局部放电, 导致绝缘老化。所以, 绝缘在电场作用下, 气泡先行游离, 引起局部放电, 导致绝缘老化, 所以绝缘系统中绝对不允许有气泡存在。

(3) 电介质的损耗。在交变电场下, 绝缘材料从交变电场中吸收电能以热的形式耗散的功率称为介损, 即在交变电场下, 绝缘材料所发生的电能损耗。

这种损耗包括两部分, 即由电导引起的损耗和由极化引起的损耗。

介损一般由 $\tan\delta$ 来表示。影响介损的主要因素如下:

1) 频率。温度不变时, 在低频范围内, 频率增大, 介质容抗减小, 瞬时充电电流与极化引起的吸收电流无功分量增大, $\tan\delta$ 减小; 在高频条件下, 每秒极化周期数很大, 介质损耗值仍很大, 所以, 高频条件下务需采用 $\tan\delta$ 很小的介质作为绝缘。

2) 温度。温度上升时, 介损增加。介损与温度之间的变化关系和绝缘材料的种类、性能有关, 和产品的绝缘结构有关, 在同样材料、同样结构的情况下, 又与绝缘介质的干燥、吸潮、老化等情况有关。

3) 湿度。绝缘材料吸湿后, 泄漏电流增大, 水分又会增大介质的极化, 故绝缘材料吸湿后, 通过介质的有功电流增大, 使 $\tan\delta$ 下降, 介损会明显增大。

4) 电压。当绝缘介质处理良好时(干燥、清洁、无气泡), 在外加电压作用下, 电场强度与 $\tan\delta$ 之间在一定电压下近似水平直线, 过了这一段, 电压再升高时, $\tan\delta$ 的增长加快, 曲线会向上弯曲。

在变压器中, 介质损耗大, 是导致电介质发生热击穿的根源。这是因为如果介损大, 它产生的热量就多, 介质发热严重, 导致介质温度升高, 电导增大; 在电导较大的部位因电流大也会产生热量。如果产生的热量来不及散发出去, 就会使电介质的温度继续升高, 温度的升高反过来又会使电介质的电导增大。如此恶性循环, 最后使电介质丧失绝缘性能, 导致热击穿。

(4) 电介质的击穿。当施加于电介质上的电场强度高于临界值时, 会使通过电介质的电流剧增, 使电介质发生破裂或分解, 完全失去绝缘性能, 这种现象称为电介质的击穿。

1) 气体电介质的击穿。气体电介质的击穿一般是由电子碰撞游离引起的。在强电场作用下, 气体中的带电质点获得巨大的能量向阳极运动, 并撞击气体分子使之游离为正离子和电子; 这些电子从电场中获得能量, 并在向阳极运动的过程中继续撞击其他的气体分子使之游离, 这种连锁反应的结果就形成了一条电子向阳极运动的高电导通道, 导致气体最终被击穿。

影响气体间隙放电电压的因素有电场分布形式、外施电压波形和气体状态。

2) 液体电介质的击穿。液体电介质的击穿特性和它的纯净度有关。纯净液体电介质主要分为电击穿和气泡击穿。

影响因素主要有纯净度、电源频率、电压作用时间、电场均匀度、温度和压力等。

3) 固体电介质的击穿。固体电介质的击穿有电击穿、热击穿及电化学击穿等。

电击穿: 在强电场作用下, 电介质内部带电质点剧烈运动, 发生碰撞电离, 破坏分子结构, 增加电导, 形成电子崩。当电子崩发展到足够强时, 将引起固体电介质的击穿。

热击穿: 当固体介质加上电场时, 介质中将发生损耗, 引起发热, 使介质温度升高。而温度上升时, 介质的电阻将变小, 这又会使电流进一步增大, 损耗发热也随着增大。因此, 如果

介质中发生的热量比发散的热量，则介质温度将不断上升，进一步将引起介质分解、碳化等，致使介质击穿。

电化学击穿包括局放引起的劣化击穿、有机材料的树枝状放电劣化、漏电痕迹引起的劣化等。

影响固体电介质热击穿的主要因素有：电压作用时间、温度、频率、湿度、电场均匀程度、电压种类、累积效应和机械负荷等。

(5) 电介质的老化。电器设备中的绝缘材料在运行过程中，由于各种因素的长期作用而发生一系列不可恢复的物理、化学变化，而导致绝缘材料电气性能和力学性能的劣化，这种现象称为绝缘材料的老化。

老化有环境老化、热老化和电老化三种形式。

环境老化：又称大气老化，是由于紫外线、臭氧、烟雾和酸碱等因素引起的污染性化学老化。

热老化：在温度作用下，绝缘材料中某些成分逸出，内部成分氧化、裂解、变质，与水发生水解反应等，而逐渐失去绝缘性能。

电老化：绝缘材料在高压作用下的局部放电，产生强氧化物、臭氧，从而使材料发生臭氧裂解，产生氮的氧化物，与潮气结合成硝酸，形成腐蚀因素，还会产生高速带电粒子轰击绝缘材料的分子，促使其电离、裂变，使介损增大，材料局部发生过热，导致绝缘材料性能恶化。

影响因素有热、电、光、氧、机械作用、高能辐射及微生物等。

6. 绝缘纸板的实验

(1) 电气强度实验。在大张纸板上切取 $150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 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 2kV/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。

(2) 抗拉强度实验。切取 $50\text{mm} \times 200\text{mm}$ 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 ，然后把试样均匀的放入夹子内夹紧，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

$$\sigma_b = F/A$$

式中， σ_b 为抗拉强度 (Pa)； F 为拉断力 (N)； A 为试样截面积 (m^2)。

(3) 纸板压缩率实验。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，测得此时样件的厚度 H_1 ，然后开动压力机达到规定压力时，再测定其厚度 H_2 ，则厚度压缩率 B 按下式进行计算

$$B = (H_1 - H_2)/H_2 \times 100\%$$

(4) 纸板收缩率的测定。切取宽 $25 \sim 50\text{mm}$ ，长 $170 \sim 175\text{mm}$ 的试样三件，沿长度方向在纸板的两端距边缘 $10 \sim 15\text{mm}$ 处用刀划出痕迹并测得两痕迹间的尺寸 L_1 ，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 L_2 ，最后按下式计算出收缩率 L

$$L = (L_1 - L_2)/L_1 \times 100\%$$

(5) 纸板含水率的测定。纸板含水率是指纸板在 $100 \sim 105^\circ\text{C}$ 的温度下烘干至恒量时的水分排出量，其计算公式为

$$X = (G_1 - G_2)/G_1 \times 100\%$$

式中, X 为纸板含水率 (%); G_1 为试样烘干前重量 (g); G_2 为试样烘干后重量 (g)。

(6) 纸板灰分的测定。纸板灰分是指纸板被彻底烧化后剩余残渣的重量与恒干时的重量之比, 用百分率表示。切取一块纸板做试样, 放在坩埚内小心燃烧使之完全灰化, 称其重量, 每次称重的重量须准确到 0.000 1g, 最后按下式进行计算

$$Y = (G_2 - G) / (G_1 - G_1 \times W) \times 100\%$$

式中, Y 为纸板灰分率 (%); G_1 为试样的重量 (g); G 为坩埚的重量 (g); G_2 为燃烧后盛有灰分的坩埚的重量 (g); W 为试样含水率 (%)。

1.2 常用绝缘材料的性能和用途

1.2.1 绝缘纸板

1. 绝缘纸板的成分

电工绝缘纸板是以 100% 的纯硫酸盐木浆为原料制成的, 可以彻底干燥、去气和浸油, 具有良好的电气性能和机械性能。

2. 常用绝缘纸板的规格

根据厚度的不同, 绝缘纸板有 0.5mm、1mm、1.5mm、2mm、2.5mm、3mm、4mm、5mm、6mm、8mm 等不同规格。

根据幅面不同, 绝缘纸板有 1000mm × 2000mm、2030mm × 4200mm、2100mm × 3200mm、3200mm × 4200mm 等。

3. 绝缘纸板的分类和不同用途

根据密度的不同, 可以将纸板分为以下几种:

绝缘纸板	低密度板: 密度为 0.75 ~ 0.9g/cm ³ , 强度较低, 机械性能较差, 但成型性好, 主要用于制作成型件。
	中密度板 (标准板): 密度为 0.95 ~ 1.15g/cm ³ , 硬度较好, 电气强度较高, 主要用于绝缘纸筒、撑条、垫块等一般绝缘件及层压制品。
	高密度板: 密度为 1.15 ~ 1.3g/cm ³ , 电气性能和机械性能均很高, 主要用于压板、垫板、油隙垫块等不弯折的零件。

4. 常用绝缘纸板的技术性能

(1) 国产 DY100/00 绝缘纸板技术性能数据见表 1-1。

表 1-1 国产 DY100/00 绝缘纸板技术性能数据

参数名称	单位	参数指标
紧度	g/cm ³	1.1 ~ 1.35
纵、横向抗张强度	MPa	75 ~ 100
水分	%	6
灰分	%	1.0
水抽提液 pH 值		6 ~ 9
水抽提液电导率	mS/m	5 ~ 10
电气强度	MV/m	油中 30 ~ 40
伸长率	%	纵向 3.0; 横向 4.0
收缩率	%	纵向 ≤ 0.5; 横向 ≤ 0.7; 厚度 ≤ 5.0

(2) 泰州魏德曼高压绝缘有限公司 T4 绝缘纸板技术性能数据见表 1-2。

表 1-2 泰州魏德曼高压绝缘有限公司 T4 绝缘纸板技术性能数据

参数名称	厚度范围/mm	单位	参数指标
厚度	1.0~8.0	%	$\leq \pm 7.5$
紧度	≤ 1.6	g/cm ³	1.00~1.20
	1.6~3.0		1.10~1.25
	3.0~6.0		1.15~1.30
	6.0~8.0		1.20~1.30
纵向拉伸强度	≤ 1.6	MPa	≥ 100
	1.6~3.0		≥ 105
	3.0~8.0		≥ 110
横向拉伸强度	≤ 1.6	MPa	≥ 75
	1.6~3.0		≥ 80
	3.0~8.0		≥ 85
伸长率	1.0~8.0	%	横向 ≥ 4.0 ; 纵向 ≥ 3.0
压缩性	≤ 1.6	%	≤ 10.0
	1.6~3.0		≤ 7.5
	3.0~6.0		≤ 5.0
	6.0~8.0		≤ 4.0
收缩率	1.0~8.0	%	纵向 ≤ 0.5 ; 横向 ≤ 0.7 ; 厚度 ≤ 5.0
水分	1.0~8.0	%	≤ 6.0
灰分	1.0~8.0	%	≤ 1.0
水抽出物电导率	≤ 1.6	mS/m	≤ 5.0
	1.6~3.0		6.0
	3.0~7.0		8.0
	7.0~8.0		10.0
水抽出物 pH 值	1.0~8.0		6.0~9.0
油中电气强度	≤ 1.6	kV/mm	≥ 40
	1.6~3.0		≥ 35
	3.0~8.0		≥ 30

(3) 瑞士魏德曼 T4 绝缘纸板的技术性能数据见表 1-3。

表 1-3 瑞士魏德曼 T4 绝缘纸板的技术性能数据

参数名称	厚度范围/mm	单位	参数指标
紧度	1.0~1.5	g/cm ³	1.14
	2.0~3.0		1.19
	4.0~6.0		1.21
	7.0~8.0		1.23
纵向拉伸强度	1.0~3.0	MPa	130
	4.0~8.0		145
横向拉伸强度	1.0~3.0	MPa	95
	4.0~8.0		105

续表

参数名称	厚度范围/mm	单位	参数指标
纵向伸长率	1.0~3.0	%	5.0
	4.0~8.0		6.0
横向伸长率	1.0~3.0	%	5.0
	4.0~8.0		6.0
收缩率	1.0~8.0	%	纵向0.3; 横向0.5; 厚度3.9
水分	1.0~8.0	%	≤6.0
灰分	1.0~8.0	%	0.4
水抽出物电导率	1.0~8.0	mS/m	6.6
水抽出物 pH 值	1.0~8.0		6.0~9.0
吸油量	1.0~8.0	%	13
纵向挠曲强度	1.0~8.0	MPa	105
横向挠曲强度	1.0~8.0	MPa	90
压缩率	1.0~1.5	%	7.2
	2.0~3.0		4.9
	4.0~8.0		3.6
压缩恢复量	1.0~1.5	%	55
	2.0~3.0		61
	4.0~8.0		76
电气强度, 50Hz	1.0	kV/mm	50
	3.0		40
1.2/50 μ s 时经受的 脉冲电压强度	1.0	kV/mm	110
	3.0		90

1.2.2 电工层压木

电工层压木是采用色木、桦木及水曲柳等优质木材经蒸煮、旋切干燥而成的单板，涂以绝缘胶，经高温、高压而成。

常用国产层压木幅面一般为 1500mm × 1500mm、2000mm × 2000mm、1500mm × 3000mm，厚度从 20mm 开始，以 5mm 为基数递增。

常用进口层压木幅面一般为 1000mm × 2000mm，最大尺寸可达 4200mm × 3400mm，厚度 6~200mm。

上述板材主要用于加工压板、托板等大尺寸工件，目前，国产层压木还有大杠形式，规格一般为 50 × (50、60、70) × 3000，主要用于加工导线夹。

国产层压木的性能指标见表 1-4。

1.2.3 上胶纸

上胶纸为一种纸面上带胶的绝缘纸，通常由电缆纸或未漂浸渍纸等刷酚醛树脂胶而得。

常用的上胶纸均为双面上胶纸。来料为卷状，在纸层与层之间夹一层塑料膜便于纸张分开，使用时去掉即可。常用的双面上胶纸宽度为 620mm 和 950mm。

表 1-4 国产层压木的性能指标

参数名称		单位	参数指标			
			DXCW-1	DXCW-2	DXCW-3	
物理性能	密度		t/m^3	0.9-1.0	1.0-1.1	1.1-1.25
	含水率		%	≤ 7		
	干燥后厚度收缩率			≤ 1.5		
	吸油率			>10	>6	>3
	浸油后极限厚度膨胀率			≤ 0.5		
与变压器油相容性		良好				
力学性能	抗拉强度	平行层向	MPa	≥ 50	≥ 60	≥ 80
	抗压强度	平行层向		≥ 50	≥ 70	≥ 100
		垂直层向		≥ 120	≥ 150	≥ 200
	抗弯强度	平行层向		≥ 100	≥ 110	≥ 120
垂直层向		≥ 100	≥ 110	≥ 120		
弹性模量	平行层向	≥ 7000	≥ 9000	≥ 10000		
电气性能	电气强度	20℃变压器(垂直)	MV/m	≥ 9		
		90℃变压器(垂直)		≥ 7		
		20℃变压器(沿面)	kV/25mm	≥ 45		
		90℃变压器(沿面)		≥ 35		
	介质损坏角 正切 50Hz	20℃变压器		≤ 0.02		
		90℃变压器		≤ 0.13		
相对介电常数 50Hz	20℃变压器		≤ 3			
	90℃变压器		≤ 3.6			

双面上胶纸主要用于压制层压纸板。使用时,在两张纸板间铺一张双面上胶纸代替刷酚醛树脂胶,不仅操作简便,而且节省了刷胶时的晾置时间,提高了效率。

双面上胶纸另一主要用途是用于卷制酚醛纸管。

双面上胶纸的主要技术指标见表 1-5。

表 1-5 双面上胶纸的主要技术指标

名称	胶含量	挥发物含量	可溶性树脂含量
指标	50%~55%	<14%	>85%

1.2.4 电缆纸

变压器常用的电缆纸是由纯硫酸盐木浆制成。其牌号为 DLZ、GDL 和 BZZ 等。电缆纸具有较高的机械强度和电气强度。

电缆纸主要用于变压器绕组导线的匝绝缘、层压绝缘,以及引线、分接线、静电环的绝缘等。各种电缆纸技术性能见表 1-6、表 1-7。

1.2.5 电工皱纹纸

绝缘皱纹纸是由电工用绝缘纸经起皱加工而制成的,沿其横向有皱纹,使用时将皱纹拉开。皱纹纸常用于油浸式变压器的绕包绝缘,如绕组出头、引线、静电环的绝缘包扎,常用皱纹纸的技术性能见表 1-8。