

◎ 国家自然科学基金项目 (31500495) 资助

◎ 长沙理工大学出版资助

变压器纸质绝缘材料

Paper Insulating Materials for Transformers

◎ 陈启杰 编著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

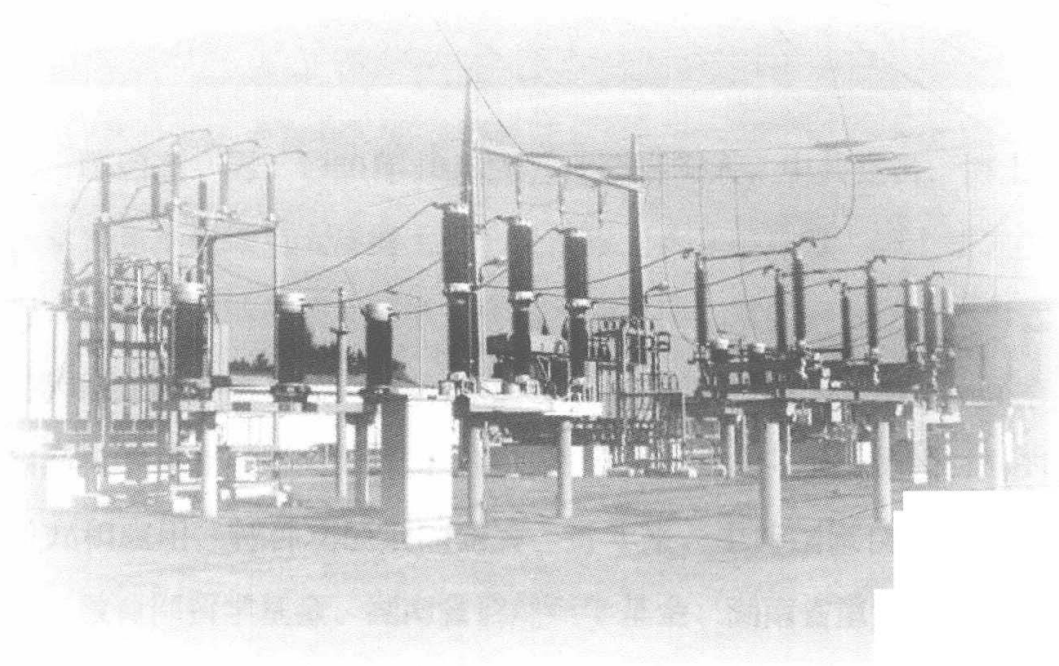
项目(31500495)资助

资助

变压器纸质绝缘材料

Paper Insulating Materials for Transformers

© 陈启杰 编著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

图书在版编目(CIP)数据

变压器纸质绝缘材料 / 陈启杰编著. — 徐州: 中国矿业大学出版社,
2018.10

ISBN 978-7-5646-4205-1

I. ①变… II. ①陈… III. ①变压器—绝缘材料—研究 IV. ① TM21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 239154 号

书 名 变压器纸质绝缘材料

编 著 陈启杰

责任编辑 章 毅

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516) 83885307 83884995

出版服务 (0516) 83883937 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> **E-mail** : cumtpvip@cumtp.com

印 刷 湖南省众鑫印务有限公司

开 本 710×1000 1/16 **印张** 14 **字数** 201千字

版次印次 2018年10月第1版 2018年10月第1次印刷

定 价 88.00元

(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)



陈启杰 男，1980年10月生，江西吉安人，中共党员，博士，加拿大新不伦瑞克大学博士后，长沙理工大学副教授，硕士研究生导师，湖南省特种纸及纸板工程技术研究中心常务副主任，湖南省特种纸业协会秘书长，湖南省特种纸战略创新联盟副理事长，国家自然科学基金项目同行评议专家。主要研究方向：纸质绝缘材料的研究和应用，特种功能纸的研发。近年来，主持国家自然科学基金、教育部留学基金、湖南省自然科学基金、湖南省重大科技成果转化项目等多项，发表学术论文五十余篇，获湖南省技术发明二等奖1项，湖南省科技进步二等奖1项，湖南省教学成果三等奖1项，湖南省科技创新教职工二等奖1项。获国家授权发明专利13项。获长沙理工大学“师德标兵”“优秀教师”“优秀共产党员”等荣誉称号。

前 言

国民经济的飞速发展和人们生活水平不断提高,对电力的依赖度和要求越来越高,电力的发展也显得尤为重要,我国超、特高压变压器的运行寿命由原来的20~25年提升到30~50年,核电项目配套变压器的运行寿命要求则提升到60年。绝缘材料性能的好坏直接影响着输变电设备的使用寿命和安全性,纸质绝缘材料是变压器用的关键绝缘材料,其性能决定了变压器的使用寿命。我国从20世纪80年代才开始进行变压器纸质绝缘材料的研究和开发,技术相对落后,与国际先进水平存在一定差异。特别是近来,随着国家特高压输变电技术的发展,变压器用纸质绝缘材料的品种和技术要求越来越高。近二十年来,国内关于变压器纸质绝缘材料方面的著作较少,相关的资料和数据比较匮乏。本书作者参考了国内外最新的文献和专利,并根据自己多年在变压器纸质绝缘材料制备和应用方面的研究成果及工作经验编著成此书,希望借此能推动我国变压器绝缘材料特别是纸质绝缘材料方面的研究、开发和应用,为特高压输变电及高铁领域的纸质绝缘材料发展做出贡献。本书获长沙理工大学出版资助以及国家自然科学基金项目(31500495)资助。

本书共分为6章:第1章介绍了变压器纸质绝缘材料的概述、基本性能、选择原则、现状及其发展;第2章介绍了变压器纸质绝缘材料的原料种类、纤

纤维素及其衍生物、纸质绝缘材料的制造及工艺体系优化；第3章介绍了变压器纸质绝缘材料的处理及其机械、电气性能及其质量标准；第4章介绍了变压器纸质绝缘材料的绝缘老化、绝缘老化程度的判断及提高绝缘寿命的途径；第5章介绍了 Nomex 绝缘纸和新型纤维素绝缘纸等纸基高性能绝缘材料；第6章介绍了层压件、油隙垫块、绝缘端圈、角环、静电板、瓦楞纸板、酚醛纸筒、绝缘纸螺杆、L 型绝缘件等纸质绝缘件的制造。本书得到湖南广信科技股份有限公司魏冬云先生的指导，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正！

陈启杰

2018 年 9 月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 绝缘材料概述	1
1.1.1 绝缘材料的定义	1
1.1.2 绝缘材料的作用	1
1.1.3 绝缘材料的特点	2
1.1.4 绝缘材料的种类	2
1.1.5 绝缘材料的常用标准	2
1.2 纸质绝缘材料的基本性能	4
1.2.1 电气性能	4
1.2.2 耐热性能	7
1.2.3 力学性能	8
1.2.4 理化性能	9
1.3 纸质绝缘材料的选择原则	10
1.3.1 纸质绝缘材料的性能要求	10
1.3.2 纸质绝缘材料的选用原则	11
1.4 纸质绝缘材料的现状与发展	11

第2章 纸质绝缘材料的制造	17
2.1 造纸植物纤维原料	17
2.1.1 植物纤维原料的分类	17
2.1.2 植物纤维原料的化学成分	18
2.1.3 针叶材的生物结构及细胞形态	25
2.1.4 主要植物细胞的构造	26
2.2 纤维素及纤维素衍生物	35
2.2.1 纤维素的化学结构及生物合成	35
2.2.2 纤维素的分子量和聚合度	37
2.2.3 纤维素的物理结构	40
2.2.4 纤维素大分子间的氢键及其影响	44
2.2.5 纤维素的物理化学性质	45
2.3 纸质绝缘材料的制造工艺	54
2.3.1 硫酸盐法制浆	54
2.3.2 纸浆的洗涤、筛选和净化	58
2.3.3 纸浆的酸处理	62
2.3.4 打浆	63
2.3.5 纤维物料的流送和贮存	73
2.3.6 纸料的流送和纸页湿法成形	76
2.3.7 纸页的压榨	82
2.3.8 纸页的干燥	89
2.3.9 纸页的压光	90
2.3.10 纸质绝缘材料的生产	91
2.4 纸质绝缘材料生产工艺体系的优化	104

第3章 纸质绝缘材料的性能	107
3.1 纸页的结构参数	107
3.2 纸质绝缘材料的处理	109
3.2.1 变压器油的要求	109
3.2.2 纸质绝缘材料的要求	110
3.2.3 纸质绝缘材料的干燥	111
3.2.4 纸质绝缘材料的浸渍	115
3.3 纸质绝缘材料的机械性能	115
3.3.1 机械性能指标	116
3.3.2 湿纸坯抄造质量对机械性能的影响	124
3.3.3 热压工艺和设备对机械性能的影响	125
3.4 纸质绝缘材料的电气性能	126
3.4.1 影响纸质绝缘材料电气性能的因素	127
3.4.2 局部放电	128
3.4.3 绝缘布置原则和成型绝缘	132
3.4.4 角环圆角对局部放电的影响	134
3.5 纸质绝缘材料的质量标准	135
第4章 纸质绝缘材料的绝缘老化	137
4.1 绝缘老化概述	137
4.1.1 电老化	137
4.1.2 热老化	137
4.1.3 机械力老化	138
4.1.4 水分促进老化	138
4.2 绝缘老化程度的判断	138

4.2.1	测定纸质绝缘材料抗张强度和聚合度	139
4.2.2	测定油中溶解气体含量	139
4.2.3	测定油中糠醛浓度	140
4.2.4	新型绝缘寿命检测技术	141
4.3	提高绝缘寿命的途径	142
4.3.1	严格的生产工艺	142
4.3.2	添加高性能的耐高温抗老化剂	143
4.3.3	添加高性能纤维	143
4.4	天丝纤维配抄对绝缘纸板性能的影响	144
4.5	纳米纤维素对绝缘纸老化性能的影响	147
第5章	纸基高性能绝缘材料	151
5.1	Nomex 绝缘纸	151
5.1.1	Nomex 绝缘纸的发展	151
5.1.2	Nomex 绝缘纸的性能	152
5.1.3	Nomex 绝缘纸在变压器中的应用	155
5.1.4	采用 Nomex 绝缘纸的变压器的优势	156
5.2	新型纤维素绝缘纸	157
5.2.1	抗热老化的纤维素绝缘纸	159
5.2.2	提升击穿强度的纤维素绝缘纸	163
5.2.3	改善空间电荷分布的纤维素绝缘纸	165
第6章	纸质绝缘件的制造	169
6.1	变压器绝缘的分类	169
6.2	绝缘件的设计原则	172

6.3 层压件的制造	172
6.4 油隙垫块的制造	175
6.5 绝缘端圈的制造	177
6.6 角环的制造	179
6.6.1 正角环和反角环	180
6.6.2 小角环	180
6.6.3 扇形护套	181
6.7 静电板的制造	183
6.8 瓦楞纸板的制造	184
6.9 酚醛纸筒的制造	185
6.10 绝缘纸螺杆的制造	186
6.11 L 形绝缘件的制造	188
6.12 纸质绝缘件用胶黏剂	191
6.12.1 胶黏剂的概念	191
6.12.2 胶黏剂的主要种类	192
6.12.3 纸质绝缘件胶黏剂的选用原则	192
6.13 纸质绝缘件的保管和运输	194
6.13.1 对库房的要求	194
6.13.2 绝缘材料的保管	195
6.13.3 绝缘件的保管	195
6.13.4 绝缘件的运输	196
参考文献	199

第1章 绪 论

1.1 绝缘材料概述

1.1.1 绝缘材料的定义

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。绝缘材料可以将两个彼此导电的部件相互隔离，同时还能起到散热、固定、储能、防潮、防尘等作用。

1.1.2 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。

1.1.3 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。

1.1.4 绝缘材料的种类

1.1.4.1 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。

1.1.4.2 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。

1.1.4.3 固体绝缘材料

固体绝缘材料包括有机和无机两类,有机固体绝缘材料包括绝缘漆、绝缘胶、绝缘纸、绝缘纤维制品、塑料、橡胶、漆布漆管及绝缘浸渍纤维制品、电工用薄膜、复合制品和黏带、电工用层压制品等。无机固体绝缘材料主要有云母、玻璃、陶瓷及其制品。纸质绝缘材料属于固体绝缘材料,其主要的类型为绝缘纸和纸板,其成品只含有优质纤维,无任何杂质,具有良好的抗压性、拉伸性和抗弯折性。

1.1.5 绝缘材料的常用标准

国内标准有:GB 国家标准(强制);GB/T 国家标准(推荐);JB 机械部标准(强制),现称行业标准(强制);JB/T 机械部标准(推荐),现称行业标准(推荐)。

国外标准有：IEC 国际电工委员会标准；ISO 国际标准化组织标准；ASTM 美国材料试验学会标准；ASA 美国标准协会标准；ANSI 美国国家标准研究所标准；NEMA 美国全国电气制造商协会标准；JIS 日本工业标准；DIN 德国工业标准；BS 英国标准；NF 法国标准；TOCT 俄罗斯国家标准。

(1) 国际标准化组织。英国、美国、比利时、加拿大、荷兰、挪威、瑞士七国先后于1921年、1923年两次商讨成立国际标准化机构，未做出约束性决定。1926年在美国开会才定下来建立国际标准化协会，起草了组织章程，设7人小组委员会进行筹备。1928年在布拉格举行成立大会，定名为国际标准化协会(ISA)，有20个国家参加，到1938年有21个国家参加，1946年10月14日~26日，中国等25个国家的64名代表在伦敦成立新的国际标准化组织(ISO)，会址设在瑞士日内瓦。ISO 日内瓦办事处于1947年底正式开始办公。

ISO 是世界上最大的非政府性标准专门机构，成为联合国甲级咨询机构，其主要活动是制定国际标准，协调世界范围内的标准化工作。1978年9月我国以中国标准化协会名义恢复在ISO的合法地位。到1980年，ISO 会员已有88个，其中正式成员71个。

(2) 国际电工委员会。国际电工委员会 IEC 成立于1906年，是世界最早的非政府性电工领域的国际标准化机构，是乙级咨询机构，1947年以前会址在伦敦。ISO 成立后，1947年，IEC 作为一个电气部门并入 ISO，会址在日内瓦。其主要职能是制定 IEC 国际标准，促进国际经济和贸易的发展。IEC 标准反映了经济发达国家已达到的先进技术水平，是世界上有关国家的专家经过试验研究和相互协商并得到大多数成员国同意后制定的。目前，IEC 共有60个成员、技术委员会(TC) 89个、分技术委员会(SC) 107个，包括美国、英国、法国、德国、意大利、日本、加拿大及俄罗斯等几乎所有发达的工业化国家，也包括中国、巴西、印度及埃及等许多有影响的发展中国家。所有参加国生产和消耗的总能量约占全球总量的95%，制造和使用的电工、电子产品约占全球总量

的90%。IEC 标准涉及全世界市场中的50%的产品，因此在电工、电子领域，IEC 具有绝对的代表性，其标准享有极高的权威性。

1.2 纸质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。

1.2.1 电气性能

绝缘材料的电气性能是变压器最关键的性能，是决定变压器性能的重要因素。

1.2.1.1 绝缘电阻

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，规定在绝缘材料上施加电压1 min 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10 min 后所测得的电阻值为绝缘材料的绝缘电阻。

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1 min 的绝缘电阻值来进行比较；对

于大型变压器, 由于1 min 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, 一般采用电阻比来进行判断, 即采用60 s 与15 s 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所示为一个受潮的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 ($73.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) 绝缘材料的绝缘状态, 曲线3反映的是干燥后运行72 h 并冷却至 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的绝缘状态。

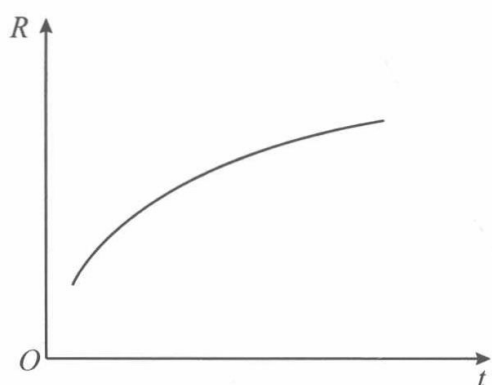


图 1-1 绝缘电阻随时间变化的曲线

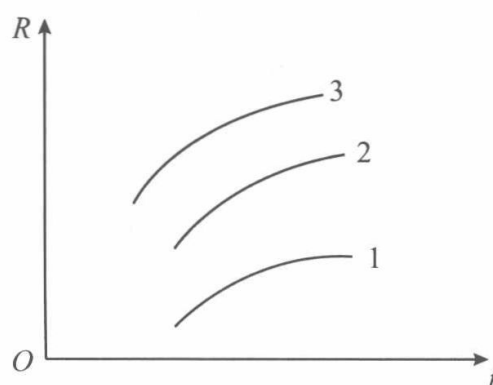


图 1-2 受潮的绝缘材料的绝缘电阻随时间变化的曲线

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。

1.2.1.2 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:

$$E_j = \frac{U_j}{h} \times 10^{-2}$$

式中: E_j 为介质的电气强度 (kV/m); U_j 为介质的击穿电压 (kV); h 为击穿处介质的厚度 (cm)。

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

固体材料出现电击穿后, 它自身是不能恢复的, 只能进行更换; 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。

1.2.1.3 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。工程上用介质耗角正切 ($\tan \delta$) 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。

1.2.1.4 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, 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,