

绝缘树脂材料 工艺与应用

姜其斌 李鸿岩 陈红生 主编



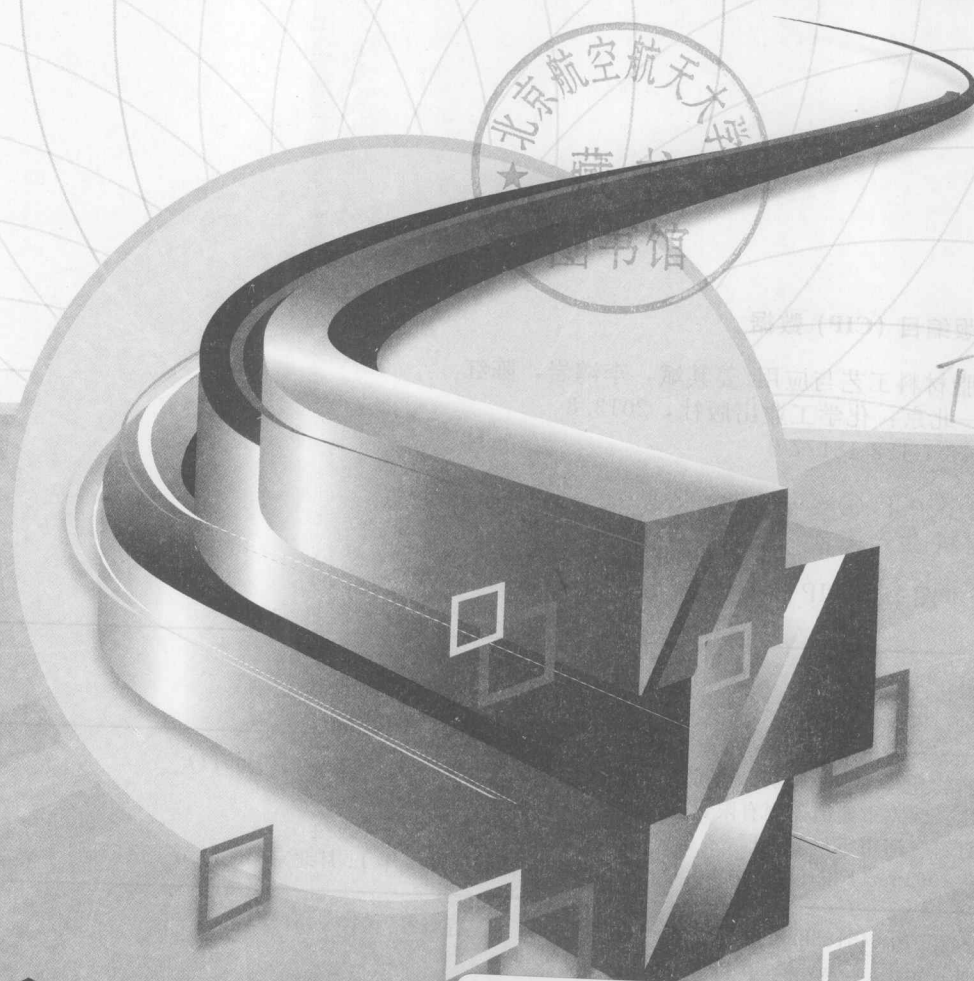
化学工业出版社

014009743

TQ320.6
20

绝缘树脂材料 工艺与应用

姜其斌 李鸿岩 陈红生 主编



化学工业出版社

· 北京 ·



北航

C1695903

23700010

本书作者多年从事电机电器绝缘结构设计和关键绝缘材料的研究开发及应用的实践积累,结合在高分子材料工程化应用的研发实力及已拥有的国家级高分子材料检测分析能力,深入地研究了各种绝缘材料的合成技术、结构性能、工艺原理、产品的绝缘技术检测分析及应用领域与现状,尽可能地反映出绝缘材料领域的新理论、新知识、新技术。可供从事电机绝缘系统、高分子材料、绝缘材料、树脂制备与应用等相关领域的专业技术人员;普通高等院校中从事高分子绝缘材料专业的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

绝缘树脂材料工艺与应用/姜其斌,李鸿岩,陈红
生主编. —北京:化学工业出版社,2013.8
ISBN 978-7-122-18177-0

I. ①绝… II. ①姜…②李…③陈… III. ①合成树脂-绝缘材料-生产工艺 IV. ①TQ320.6②TM21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 184891 号

责任编辑:白艳云
责任校对:宋 夏

装帧设计:张 辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京市振南印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张20¼ 字数405千字 2013年11月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:88.00 元

版权所有 违者必究

序

绝缘材料是制造电气设备的核心基础材料，现代电力工业的进步离不开绝缘材料的发展和支撑。近年来，随着社会经济高速发展，轻量化、高电压、大电流和耐电晕等需求对电机和电器的绝缘系统及其材料提出更高的要求，研究和开发各种性能优良的绝缘材料日趋重要。

在各种绝缘材料中，基于树脂类的高分子材料占据了很重要的地位，也是整个电力工业中应用最为普遍的一种绝缘材料。绝缘树脂材料具有丰富的形态变化以及分子结构的可设计性，一直是研究者关注的焦点，也成为设计合理可靠的绝缘结构的关键。目前，国内绝缘制品的开发及应用者却对此类材料的分子种类、设计原理、聚合机理等理论知识以及工艺应用的理解还不够。基于此考虑，编者汇编此书，希望能解决相关科研技术人员的迫切需求。

姜其斌博士、教授级高级工程师长期从事绝缘材料产品的研究和开发工作，主持和参与了包括国家“863计划”项目在内的多项国家级和省级课题，同时也是中国电工技术学会绝缘材料与绝缘技术专业委员会委员和《绝缘材料》杂志编委，积累了丰富的绝缘材料产品研发与应用经验。李鸿岩博士长期从事绝缘结构的设计与开发、电气绝缘性能的检测评价等领域工作，陈红生教授级高级工程师长期从事电机绝缘系统的设计及工程化应用研究工作，均积累了丰富的应用经验与成果，为本书的编写打下了良好基础。

本书的内容涵盖了目前主要使用的绝缘树脂材料，对制备工艺原理做了系统的阐述，反映了国内外该领域的研究、生产及应用现状，并且着重介绍了绝缘树脂材料性能评价与检测分析方法，汇总了绝缘材料产品工程化应用过程中的应用经验及测试数据，使本书有理论、有分析、有实例、有经验，具有较强的实用性、可读性。可作为绝缘树脂材料科技人员的入门教材，也可作为一本详细的技术手册或专业参考书籍使用，相信此书能够很好地为绝缘树脂材料乃至高性能绝缘系统及材料的突破提供助力，早日实现绝缘制品领域的强国梦！

湘潭大学校长



(罗和安)

2013年6月8日

前言

绝缘材料是电气产品的关键材料,电气工业的迅猛发展促使绝缘材料从品种、数量、性能、制造、应用等多方面获得了较大的发展。20 世纪初,合成树脂的出现给绝缘工业带来了革新,酚醛树脂、环氧树脂、聚酯树脂、聚酰亚胺树脂、聚氨酯树脂等耐高温、耐高压绝缘材料获得大批量生产,绝缘浸渍漆、耐高温绝缘薄膜、层压绝缘板等制品广泛应用于电机绝缘。绝缘材料、绝缘工艺、绝缘结构等技术都取得了较大的发展,绝缘树脂的合成方法不断优化,如有机硅绝缘树脂合成;合成工艺不断改进,如无溶剂真空压力浸渍工艺;绝缘产品的质量不断提高。

随着我国经济快速发展,铁路运输、舰船、风力发电、航空航天等领域成为我国经济发展、能源及国防建设的大动脉,其对电机及绝缘系统提出了更高的要求,给绝缘工业的发展带来新的机遇与挑战。在如此新形势条件下,绝缘材料的未来发展趋势将如何,怎样根据绝缘材料的使用环境及性能要求,进行深入了解绝缘材料结构及设计原理,以便开发并生产出性能最佳、成本最低的绝缘材料及制品,将是促使我国绝缘工业发展达到国际先进水平的关键动力,也是本书编著的重要初衷。

笔者所在的南车株洲时代新材料科技股份有限公司(CSR/Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., 简称 TMT 公司),是主要致力于高分子材料及其工程化应用的高新技术企业,其主要应用领域分布在铁路、城市轨道交通、风力发电、汽车、工程机械、工业装备、军事、化工等行业。公司主要从事高分子绝缘材料、减振降噪产品、高分子复合改性材料三大系列产品的研制开发、生产、销售和服务。其中,绝缘材料产品作为 TMT 公司主导产品之一,其技术研发工作,尤其是轨道交通牵引电机、变压器及风力发电机的绝缘结构及其关键绝缘材料的研发,已达到国际专业水平,可替代同类进口产品广泛应用于全国各大特种变压器、发电机、电机电器、轨道交通电气设备、高科技军事装备等领域。本书作者根据多年从事电机电器绝缘结构设计和关键绝缘材料的研究开发及应用的实践,结合公司在高分子材料工程化应用的研发实力及已拥有的国家级高分子材料检测分析能力,深入地研究了各种绝缘材料的合成技术、结构性能、工艺原理、产品的绝缘技术检测分析及应用领域等,积累了一系列相关技术资料,尽可能地反映出绝缘材料领域的新理论、新知识、新技术。

绝缘材料的分类方法有多种,我国机电工业系统生产的绝缘材料主要有漆、树脂与胶类;浸渍纤维制品类;层压制品类;塑料类;云母制品类;膜、黏带和复合制品类。这些绝缘材料都以合成树脂为基体主材,高分子绝缘树脂在绝缘材料中占有很重要的位置。为了对各类绝缘材料有着更深入的了解,编者在内容取材和编排上采取了独特的论述方式,以高分子树脂为纲,介绍了绝缘树脂材料的性能、工艺、检测及应用情况。就总体布局来看,该书由四个部分汇集而成:第一部分(第 1 章)对绝缘材料整体水平的发展历程以及发展现状进行了概述;第二部分(第 2~8 章)对已付诸生产和应用的绝缘树脂材料,如环氧树脂绝缘材料、聚酯树脂绝缘材料、聚酰亚胺树脂绝缘材料、聚氨酯树脂绝缘材料、有机硅树脂绝缘材料、聚烯烃树脂绝缘材料以及其他绝缘材料和绝缘涂料进行了着重介绍,分别阐述了它们的合成、制造工艺、性能及应用;第三部分(第 9 章)介绍了绝缘材料的性能及绝缘技术的

检测分析方法；第四部分（第10章）展望了新国际经济形势下绝缘材料的发展及应用方向。本书涉及面广、系统性强，突出了理论知识与实际应用相结合的特点，在推动复合型高性能系列新型绝缘材料的研发过程中发挥着重要的作用。

本书由姜其斌、李鸿岩、陈红生主编，参与编写的人员还有：李再轲博士、陈磊博士、张步峰博士、许双喜博士、赵慧宇博士、王文志博士、杨金博士，由姜其斌负责统稿，全书的校稿工作还得到了伍小丽的支持。

在本书的编写过程中，得到了TMT公司董事长曾鸿平先生、总经理杨军博士、副总经理兼总工程师刘建勋先生等各位领导的大力支持，同时在南车株洲电机有限公司教授级高级工程师陈红生先生的指导下，进一步充实了绝缘材料产品工程化应用过程中的测试数据，在TMT公司技术中心全体同仁的支持下，在不断地产品研发和技术数据积累的基础上，形成本书的各种素材，在此一并表示衷心的感谢！此外，要特别感谢中国工程院院士丁荣军先生多年来一直支持TMT公司和编者的工作！

最后感谢化学工业出版社的领导和编辑，他们的辛勤工作促成了本书的出版。

本书既可为绝缘材料研发技术人员对材料选取、合成、加工、性能及应用研究提供科学参考，也可供有关高新技术产业的工程技术人员阅读，还可以作为普通高等院校从事高分子绝缘材料专业研究的辅导教材。

由于编写时间仓促，加之编者水平的限制，本书中不妥之处，敬请读者批评指正！

编者

2013年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 绝缘材料概述	1
1.1.1 绝缘材料的发展简况	1
1.1.2 绝缘材料的分类与命名	1
1.1.3 绝缘材料的基本性能及参数	4
1.2 绝缘树脂的发展	7
1.2.1 绝缘树脂的发展历史	7
1.2.2 绝缘树脂的研究开发现状	8
1.2.3 绝缘树脂在电机电器中的作用	10
第2章 环氧树脂绝缘材料	11
2.1 概述	11
2.1.1 环氧树脂的性能及特点	11
2.1.2 环氧树脂的技术指标	12
2.1.3 环氧树脂在电气绝缘产品中的应用	13
2.2 环氧树脂的类型	15
2.2.1 缩水甘油醚类环氧树脂	16
2.2.2 缩水甘油酯型环氧树脂	18
2.2.3 缩水甘油胺型环氧树脂	19
2.2.4 脂环族环氧树脂	19
2.2.5 脂肪族环氧树脂	20
2.3 环氧树脂合成原料	20
2.3.1 原材料	20
2.3.2 固化剂	21
2.3.3 稀释剂	30
2.3.4 增塑剂与增韧剂	31
2.3.5 填料	31
2.3.6 促进剂	32
2.4 环氧树脂合成原理	32
2.4.1 双酚 A 型环氧树脂合成原理	33
2.4.2 脂环族环氧树脂合成原理	37
2.4.3 环氧树脂固化原理	38
2.5 环氧树脂的应用	40
2.5.1 环氧树脂绝缘漆及胶	40
2.5.2 环氧树脂云母制品	51
2.5.3 环氧树脂浇注制品	57
2.5.4 环氧树脂层压制品	64
2.5.5 环氧树脂拉挤制品	72
2.5.6 环氧玻璃布真空压力浸胶制品	77
2.5.7 环氧树脂缠绕制品	82
2.5.8 环氧玻璃纤维浸渍制品	86
第3章 聚酯树脂绝缘材料	92
3.1 概述	92
3.2 聚酯树脂合成原料	93
3.2.1 二元酸或衍生物	93
3.2.2 多元醇	94
3.2.3 其他辅助材料	95
3.3 聚酯树脂的类型	101
3.3.1 不饱和聚酯树脂	101
3.3.2 聚碳酸酯	106
3.3.3 聚芳酯	107
3.4 聚酯树脂的合成原理	107
3.4.1 不饱和聚酯的合成	109
3.4.2 聚碳酸酯的合成	110
3.4.3 聚芳酯的合成	111
3.5 聚酯树脂的应用	112
3.5.1 邻苯二甲酸酐-甘油树脂	112
3.5.2 植物油改性醇酸树脂漆	114
3.5.3 脂肪酸改性醇酸树脂	117
3.5.4 线型聚酯与聚酯漆膜	119
3.5.5 聚酯漆包线漆	122

第4章 聚酰亚胺树脂绝缘材料 124

4.1 概述	124	4.3.4 气相沉积法	134
4.2 聚酰亚胺合成原料	125	4.4 聚酰亚胺的类型	134
4.2.1 二酐	126	4.4.1 加聚型聚酰亚胺	134
4.2.2 二胺	126	4.4.2 缩聚型聚酰亚胺	139
4.2.3 其他助剂	127	4.5 聚酰亚胺的应用	142
4.3 聚酰亚胺合成原理	127	4.5.1 聚酰亚胺薄膜	142
4.3.1 溶液缩聚法	127	4.5.2 聚酰亚胺胶黏剂	147
4.3.2 熔融缩聚法	133	4.5.3 聚酰亚胺工程塑料	151
4.3.3 界面缩聚法	134	4.5.4 聚酰亚胺绝缘漆	155

第5章 聚氨酯树脂绝缘材料 157

5.1 概述	157	5.4 聚氨酯的制造工艺	165
5.2 聚氨酯合成原料	157	5.4.1 直接法	165
5.2.1 多元异氰酸酯	157	5.4.2 预聚体法	165
5.2.2 多羟基化合物	158	5.5 聚氨酯的类型	165
5.2.3 多羟基聚合物	159	5.6 聚氨酯的应用	165
5.2.4 其他助剂	160	5.6.1 聚氨酯漆	166
5.3 聚氨酯合成原理	161	5.6.2 聚氨酯丙烯酸酯绝缘涂料	170
5.3.1 异氰酸酯的反应机理	161	5.6.3 聚氨酯绝缘模制树脂	172
5.3.2 聚氨酯的合成机理	164	5.6.4 聚氨酯黏合剂	180

第6章 有机硅树脂绝缘材料 182

6.1 概述	182	6.3.3 加成型硅树脂的合成	198
6.2 有机硅树脂合成原料	182	6.4 有机硅树脂的类型与性能	199
6.2.1 烷基氯硅烷 (R_nSiCl_{4-n})	184	6.4.1 有机硅树脂的类型	199
6.2.2 烷基烷氧基硅烷 [$R_nSi(OR')_{4-n}$]	187	6.4.2 有机硅树脂的性能	201
6.3 有机硅树脂的合成原理	188	6.5 有机硅绝缘树脂的应用	205
6.3.1 缩合型硅树脂的合成	188	6.5.1 有机硅电绝缘漆	205
6.3.2 过氧化物型硅树脂的合成	197	6.5.2 有机硅树脂的其他应用	211

第7章 聚烯烃绝缘树脂 221

7.1 概述	221	7.3.2 聚合方法	227
7.2 聚烯烃合成原料	221	7.4 聚烯烃的类型	228
7.2.1 烯烃类单体	221	7.4.1 聚乙烯	228
7.2.2 催化剂	222	7.4.2 聚丙烯	230
7.2.3 引发剂	223	7.4.3 聚1-丁烯	232
7.2.4 溶剂	224	7.4.4 聚四氟乙烯	232
7.3 聚烯烃合成原理	224	7.5 聚烯烃在绝缘制品中的应用	233
7.3.1 聚合机理	224	7.5.1 聚乙烯在绝缘制品中的应用	233

7.5.2 聚丙烯在绝缘制品中的应用	234	7.5.4 聚四氟乙烯在绝缘制品中的应用	235
7.5.3 聚 1-丁烯在绝缘制品中的应用	235		

第 8 章 热塑性弹性体绝缘材料 236

8.1 概述	236	8.2.6 热塑性硫化物	250
8.2 热塑性弹性体的分类	238	8.3 热塑性弹性体在绝缘领域中的应用	252
8.2.1 聚苯乙烯类热塑性弹性体	238	8.3.1 TPE 在电缆及绝缘层领域的 应用	252
8.2.2 聚烯烃类热塑性弹性体	242	8.3.2 TPE 在家用电器中的应用	253
8.2.3 聚氨酯类热塑性弹性体	243	8.3.3 TPE 在汽车领域中的应用	253
8.2.4 聚酯类热塑性弹性体	246		
8.2.5 聚酰胺类热塑性弹性体	249		

第 9 章 高电压与绝缘技术检测分析方法 254

9.1 常规性能测试	254	9.2.5 表观分解温度	264
9.1.1 黏度	254	9.2.6 绝缘材料热导率	265
9.1.2 固化中挥发分含量	257	9.2.7 绝缘材料线性热膨胀系数	267
9.1.3 贮存稳定性	257	9.3 电气性能测试	269
9.1.4 凝胶时间	258	9.3.1 绝缘电阻与电阻率	269
9.1.5 表面干燥时间	259	9.3.2 介电常数及介质损耗的测量	273
9.2 热性能测试	260	9.3.3 击穿电压	281
9.2.1 玻璃化转变温度	260	9.3.4 局部放电的测量	285
9.2.2 软化温度	262	9.3.5 耐电弧测试	292
9.2.3 耐热性	263	9.3.6 耐漏电起痕（耐电痕化）测试	293
9.2.4 分解温度	264		

第 10 章 绝缘树脂材料的发展及应用趋势 298

10.1 绝缘树脂材料的发展趋势	298	10.2 绝缘树脂材料未来应用方向	305
10.1.1 耐高温绝缘材料	299	10.2.1 在轨道交通领域中的应用	305
10.1.2 高绝缘等级绝缘材料	301	10.2.2 在汽车领域中的应用	307
10.1.3 轻质高强高分子材料	302	10.2.3 在军工产品中的应用	308
10.1.4 阻燃型绝缘材料	303	10.2.4 在电器、电子信息行业中的 应用	309
10.1.5 电子元器件专用绝缘材料	304		
10.1.6 环保型绝缘材料	304		

参考文献 312

第 1 章 绪 论

绝缘材料中，有一类特殊的材料就是树脂基绝缘材料。目前几乎所有的有机树脂都有一定的绝缘性能，同时绝缘树脂具备浸渍和密封功能，能够渗透到各种不同的基体中，而能用到各种电机电器中，因此绝缘树脂的使用也显得日益突出，并在各种不同的绝缘处理中处于特殊和重要的地位。

1.1 绝缘材料概述

1.1.1 绝缘材料的发展简况

绝缘材料又称为电介质，它在电流、电压作用下，只有微小的电流通过，其电阻率一般大于 $10^7 \Omega \cdot \text{m}$ ，是可用以隔离不同电位带电体的材料。在电器设备中，它把电位不同的导体隔离开来，以保证电机电器的正常运行，达到能量的转换、能量的传输与信息传输的目的。绝缘材料是一切电机电器中必不可少的材料，大体上，电机电器设备是由导电材料、磁性材料、绝缘材料与结构材料构成的，除绝缘材料外，其他都是金属材料。

20 世纪中叶，随着航空航天、机械、化工、电力电子与传动、矿物绝缘电缆、灯饰照明、各种连接器以及仪器、设备、继电器等发展，绝缘材料越来越引起了科研工作者和工程技术人员的高度重视。对电机电器及输变电产品来说，绝缘材料是一种必不可少的材料。电机等电气设备的体积、质量及使用寿命在很大程度上取决于所用的绝缘材料。电气设备日趋小型化、轻量化、高性能化，也让绝缘材料的发展及其要求越来越高。

20 世纪以前，有关绝缘的知识很少，绝缘材料基本上都是来自于天然的材料，人们使用的是具有绝缘性能的天然橡胶材料、天然虫胶材料等。最早的电动机甚至是使用丝绸、棉纱、棉布做绝缘材料，为了提高耐水性能，采用虫胶、琥珀等天然树脂与植物油、沥青进行浸渍。

到 19 世纪末，由于交流电机和三相输电线路的出现，输出电设备的大功率和高电压对绝缘材料提出了新要求，天然云母片贴制绝缘制品进入发电机、电动机的绝缘，油纸绝缘结构进入了电缆制造。

随着电机电器行业的发展，天然材料的电气绝缘性能很难满足实际应用要求，为了克服天然材料的缺点，对天然绝缘材料进行了广泛的改性，从而促进了合成树脂及以其为基础的新型绝缘材料的出现。

1.1.2 绝缘材料的分类与命名

1.1.2.1 绝缘材料的分类

绝缘材料的分类可以按照如下三种形式来进行。

(1) 按物理状态进行分类

① 气体。除空气、氮气、氢气、氦气外，有六氟化硫、二氧化碳等。气体绝缘材料可用于特种结构的电容器、高压断路器、发电机组等。

② 液体。使用最多的是矿物绝缘油，如变压器油、电容器油、电缆油等，还有硅油、氟油、多环芳烃等合成绝缘油。在变压器、电容器、电缆及高压断路器中都使用液体绝缘材料。

③ 固体。各种高分子绝缘材料，无机材料等均为固体绝缘材料，它的范围更大，应用

更广。

(2) 按化学成分进行分类

① 无机材料。云母、陶瓷、玻璃、石棉、碳化硅等。无机材料耐热性较高，一般用于有特殊要求的场合。

② 有机材料。天然树脂与合成树脂为基料的各种绝缘材料；天然橡胶与合成橡胶制成的绝缘材料；纤维素绝缘材料如合成纤维制成的纸、纸板和织物等。由有机材料与无机材料组成的复合材料用途也很广泛。

(3) 按实际应用形式进行分类 机电工业系统的绝缘材料厂生产的绝缘材料通常分为以下六大类：漆、树脂与胶类；浸渍纤维制品类；层压制品类；塑料类；云母制品类；膜、黏带和复合制品类。

在实际应用中，绝缘材料的性能受温度影响很大。高温条件下，绝缘材料电阻下降，耐电性及机械强度降低，介电损耗、应力变形增大，绝缘材料性能明显恶化。因此，提高绝缘材料的耐热性能对保证电机等设备的安全运行、延长其使用寿命具有重要意义。原机械工业部根据国际电工委员会（IEC）的规定，结合我国的具体情况，将绝缘材料按长期使用的极限温度进行了分类，如表 1-1 所示，温度超过 250℃，则按间隔 25℃ 设置相应耐热等级。

表 1-1 绝缘材料的耐热等级

耐热等级	温度/℃	耐热等级	温度/℃
Y	90	H	180
A	105	200	200
E	120	220	220
B	130	250	250
F	155		

1.1.2.2 绝缘材料的命名

绝缘材料的种类很多，原机械工业部颁布了绝缘材料产品的型号，具体由四位阿拉伯数字（必要时增加第五位数字和附加数字或字母）组成。第一位数字表示大类，参见“按实际应用形式分类”。第二位数字表示小类。即每大类内根据产品的组成、用途或形状分为若干小类，并以数字代表，如表 1-2 所示。第三位数字，表示产品的参考工作温度，如表 1-3 所示。第四位数字以及必要时增加的第五位数字，表示产品品种顺序号。其中，云母制品型号中不附加数字的为白云母制品，附加数字的意义为：1 为粉云母制品；2 为金云母制品；3 为鳞片云母制品。

表 1-2 绝缘材料小类代号

大类代号	大类名称	小类代号	小类名称
1	漆、树脂与胶类	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	胶黏漆、树脂类
		5	融覆粉末类
		6	硅钢片漆类
		7	漆包线漆类
		8	胶类

续表

大类代号	大类名称	小类代号	小类名称
2	浸渍纤维制品类	0	棉纤维漆布类
		1	—
		2	漆稠类
		3	合成纤维漆布类
		4	玻璃纤维漆布类
		5	混织纤维漆布类
		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
		1	无机底材层压板类
		2	防电晕及导磁层压板类
		3	覆铜箔层压板类
		4	有机底材层压管类
		5	无机底材层压管类
		6	有机底材层压棒类
4	塑料类	7	无机底材层压棒类
		0	水粉填料塑料类
		1	其他有机填料塑料类
		2	石棉填料塑料类
		3	玻璃纤维填料塑料类
		4	云母填料塑料类
		5	其他矿物填料塑料类
5	云母制品类	6	无填料塑料类
		0	云母带类
		1	柔软云母板类
		2	塑性云母板类
		3	—
		4	云母带类
		5	换向器云母板类
		6	—
		7	衬垫云母板类
6	膜、黏带和复合制品类	8	云母箔类
		9	云母管类
		0	薄膜类
		1	—
		2	薄膜黏带类
		3	橡胶及织物黏带类
		4	—
		5	薄膜绝缘纸及薄膜玻璃漆布复合箔类
		6	薄膜合成纤维纸复合箔类
		7	多种材质复合箔类

注：表中的空号留供新型材料使用。

表 1-3 绝缘材料参考工作温度代号

代号	参考工作温度/℃	代号	参考工作温度/℃
1	105	4	155
2	120	5	180
3	130	6	>180

绝缘材料产品型号举例：1032 为三聚氰胺醇酸浸渍漆；4221 为氨基石棉压塑料；2750 为有机硅玻璃漆管；5438-1 为环氧玻璃粉云母带；3240 为环氧酚醛层压玻璃布板；6530 为聚酯薄膜醇酸玻璃纸复合箔。

层压板产品型号是与 ISO 和 IEC 标准型号相一致的，由四位英文字母和数字组成。头两个字母表示树脂，后两个字母表示补强材料，最后的数字表示顺序号。

表示树脂的字母含义：PF 为酚醛树脂；EP 为环氧树脂；UP 为不饱和聚酯；PI 为聚酰亚胺；SI 为有机硅；MF 为三聚氰胺甲醛。

表示补强材料字母含义：CP 为纤维素纸；GM 为玻璃毡；CC 为棉布；PC 为聚酯纤维布；GC 为玻璃布；PM 为聚酯纤维毡。

例如：PFCP3 表示纤维素纸补强的酚醛树脂为胶黏剂的第三号板，可简称为“3 号酚醛纸板”。EPGC1 表示玻璃布补强的以环氧树脂为胶黏剂的第一号板，可简称为“1 号环氧玻璃布板”。

覆铜箔层压板产品是参考 IEC 的标准而制成的。由 5~6 位英文字母和两位数字组成。产品型号第一个字母 C 表示覆铜箔，第 2~3 个字母表示基材选用的胶黏剂（树脂）。PF 为酚醛树脂；TF 为聚四氟乙烯；EP 为环氧树脂；PI 为聚酰亚胺；UP 为不饱和聚酯；BT 为双马来酰亚胺三嗪；SI 为有机硅。

第 4~5 两个字母表示基材选用的补强材料。CP 为纤维纸；AC 为芳香族聚酰胺纤维布；GC 为玻璃纸；AM 为芳香族聚酰胺纤维毡；GM 为玻璃毡。

如覆铜箔板的基材内芯以纤维纸为补强材料，两面贴附无碱玻璃布者，可在“CP”之后加“(G)”表示。

在字母末尾，用一短横线连着两位数字，表示同一类型不同性能的产品顺序编号：覆铜箔酚醛纸层压板编号为 01-20；覆铜箔环氧纸层压板编号为 21-30；覆铜箔环氧玻璃布层压板编号为 31-40；覆铜箔环氧合成纤维布或毡层压板编号为 41-50；覆铜箔聚酯玻璃纤维布或毡层压板编号为 51-60；耐高温覆铜箔层压板编号为 61-70；高频用覆铜箔层压板编号为 71-80。

产品编号后加 F 字母表示有自熄性（阻燃性），如 CPFCP-02 产品为 02 号覆铜箔酚醛纸层压板，简称“2 号板”。

云母制品中有部分制品采用 IEC 标准型号，例如 P9 代表换向器粉云母第 9 号板，S3 代表换向器云母第 3 号板，HP5 代表电热粉云母第 5 号板（P 为粉云母；S 为片云母；H 为电热）。

1.1.3 绝缘材料的基本性能及参数

随着机电工业向高电压、大容量等方面的发展，对绝缘结构的质量和可靠性提出了越来越高的要求。而绝缘结构的制造关键在于绝缘材料的合理选择和应用。要使绝缘结构的性能满足于各方面的要求，首先必须确保绝缘材料的性能达到实际应用要求。

绝缘材料在应用方面的性能归纳起来包括电、机、化、热、环境以及经济性等方面的性能，如表 1-4 所示。

表 1-4 绝缘材料的应用性能

电性能	介电强度、体积和表面电阻、介电常数、介质损耗角正切、耐弧性、抗电痕性、耐电晕性、沿面放电强度、各种特性的频率系数
力学性能	拉伸强度、压缩强度、剪切强度、弯曲的强度、弹性模量、硬度、抗冲击和抗撕裂强度、黏度、延展性、可绕性、加工性、疲劳性、耐磨性、开裂性
化学性能	耐腐蚀性、电化学稳定性、抗老化和抗氧化性、可溶性、耐溶剂性,对邻近材料和环境的相容性,毒性和环境污染
其他性能	密度、折射率、透明度、颜色、多孔性、透气性、吸湿性、表面吸水性、抗霉菌性、抗照射、抗辐射性和经济性

(1) 绝缘材料的介电性能 绝缘材料的介电性能通常用介质极化、介质电导、介质损耗和介电强度四个基本性能来表征;其相应的特性参数为相对介电常数(ϵ_r)、绝缘电阻率(ρ_v 、 ρ_s),介质损耗角正切($\tan\delta$)以及介电强度(E_j)。在电力设备中除电容器绝缘材料因要求介质储藏能量而需要较高介电常数外,其他用途的绝缘材料均不要求高介电常数,而是要求能耐受运行中的电压并具有足够的寿命。对一般电力设备所用绝缘材料而言,电气性能要求是介电强度,而其他性能则处于从属地位,但是也必须指出,这些其他性能特别是它们对于各种条件的变化,能反映出绝缘状态是否良好,因而也一定程度地联系着绝缘材料或结构的介电强度。因此,有机地、综合地研究这些性能以及对各种条件的变化,对于全面的了解绝缘性能是十分必要的,这在工程上也是十分有用的。例如大型电机绝缘,其介电强度是最重要的电气性能,但是耐压试验是一种破坏性试验,不能轻率进行,其试验电压值也不宜过高,人们常以非破坏性试验如测量绝缘电阻、绕组的电容和介质损耗以及它们对温度、湿度、电压和电压作用时间等因素的函数关系来评价绝缘质量,从而可以在进行耐压试验以前对其介电强度先作一定的判断。关于绝缘性能的相关性方面的试验研究,近年来已有很大发展。电力部门对于电气设备经常性、预防性试验中,也广泛地采用测量绝缘电阻、电容和介质损耗以及局部放电的方法来校验绝缘质量,预防绝缘故障。

表 1-5 为某些绝缘材料的介电性能的参考值。由于材料成分,制造工艺、测试条件差别很大,即便同一种材料的性能也有很大差别,表列数值仅作参考,其中介电强度 E_j 以平均击穿场强表示。

表 1-5 某些绝缘材料的介电性能的参考数值

名称	结构性质	ϵ_r	$\rho_v / \Omega \cdot \text{cm}$	$\tan\delta$	$E_j / (\text{kV/mm})$	密度 / (g/cm^3)	长期容许工作温度 / $^{\circ}\text{C}$	热导率 / [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]	比热容 / [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
变压器油	中性或弱极性	2.2	$10^{14} \sim 10^{15}$	0.002	16	0.89	105	0.2	1.8
十二烷基苯	中性或弱极性	2.3	$10^{14} \sim 10^{15}$	0.001	20	0.87	105	0.2	—
三氯联苯	偶极性	5.6	$10^{12} \sim 10^{13}$	0.002	16	1.45	105	0.15	1.1
蓖麻油	偶极性	4.0	$10^{11} \sim 10^{12}$	0.002	15	0.96	105	0.15	—
甲基硅油	非极性	2.6	$10^{14} \sim 10^{15}$	0.0001	18	0.96	180	0.15	1.6
石蜡	非极性	2.23	$10^{15} \sim 10^{18}$	0.0005	12	0.85	60~70	0.23	3.2
沥青	弱极性	2.5~3.0	$10^{15} \sim 10^{16}$	0.01	12	1.0	105	0.1	—
白云母	离子式不均匀	7.0	$10^{14} \sim 10^{16}$	0.0005~0.001	40~100	2.6~3.0	250	0.5	0.86~1.2
碱玻璃	离子式均匀	5.3~7.0	$10^{13} \sim 10^{14}$	0.01~0.02	20~40	2.6~6.0	250~400	0.8~1.2	0.7~0.9

续表

名称	结构性质	ϵ_r	$\rho_v / \Omega \cdot \text{cm}$	$\tan \delta$	$E_i / (\text{kV/mm})$	密度/ (g/cm^3)	长期容许工 作温度/ $^{\circ}\text{C}$	热导率/ [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]	比热容/ [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]
石英玻璃	离子式均匀	3.8	$10^{15} \sim 10^{17}$	0.0002	20~40	2.6	>1000	1.2	0.79
普通高压瓷	离子式不均匀,(主要为玻璃相)	5.5~6.5	10^{14}	0.02~0.05	10~20	2.4	>180	1.1~1.6	—
超高频滑石瓷	离子式不均匀,(主要为结晶相)	6.0~7.0	$10^{16} \sim 10^{17}$	0.001~0.005	15~20	2.8	>180	1.7~2.7	—
聚乙烯	非极性高分子	2.2~2.4	$10^{16} \sim 10^{17}$	0.0002~0.0004	20~30	0.92	70	0.17~0.27	1.0~2.2
聚苯乙烯	弱极性高分子	2.5~2.6	$10^{17} \sim 10^{18}$	0.0001~0.0004	20~30	1.06	70	0.17~0.27	1.0~2.2
聚四氟乙烯	非极性高分子	2.0~2.2	$10^{17} \sim 10^{18}$	0.0001~0.0003	20~30	2.2~2.3	250	0.2~0.35	1.0~2.2
聚碳酸酯	弱极性高分子	2.9	10^{16}	0.001	20~30	1.2	140	0.17~0.27	1.0~2.2
聚氯乙烯	极性高分子	3.0~3.5	10^{13}	0.02~0.05	10~20	1.3~1.5	60~70	0.17~0.27	1.0~2.2
环氧树脂	极性高聚物	3.7	$10^{16} \sim 10^{17}$	0.003~0.005	20~30	1.2	130	0.2~0.5	1.0~2.2
有机玻璃	极性高分子	3.0~3.6	$10^{13} \sim 10^{14}$	0.02~0.05	20~30	1.18	70	0.17~0.27	1.0~2.2
聚酯薄膜	极性高分子	2.5~3.0	$10^{12} \sim 10^{17}$	0.002~0.003	200~300	1.4	140	0.17	1.0~2.2
醋酸纤维薄膜	极性高分子	4.0~4.5	10^{15}	0.005~0.01	120~160	1.3	105	—	1.0~2.2
聚酰亚胺薄膜	极性高分子	3.2	10^{17}	0.03	240	1.3	220	—	—
聚丙烯薄膜	非极性高分子	2.2	$10^{15} \sim 10^{16}$	0.0007	200~300	0.9	105	—	—
酚醛树脂(热固化后)	极性高聚物	4.0~4.5	$10^{13} \sim 10^{14}$	0.01~0.02	—	1.25	105	0.15~0.20	1.5
橡胶	弱极性高分子	2.4	10^{16}	0.002	20	—	—	0.9~1.0	—
橡皮	极性复合物(不同硫化程度)	3.0~7.0	10^{15}	0.02~0.10	20~30	—	60	—	—
硅橡皮	弱极性复合物	3.0	$10^{14} \sim 10^{15}$	0.001~0.01	20~24	—	180	—	—
纤维素	极性高分子	6.6	$10^{13} \sim 10^{14}$	0.006	—	1.55	90	—	1.6
电缆纸(干)	极性复合物,多孔性	1.7~3.2	10^{17}	0.002~0.0025	8~10	0.6~1.2	90	—	1.6
油浸电缆纸	极性复合物	3.0~3.8	10^{16}	0.005	80~100	1.35	105	0.15~0.2	1.6
酚醛胶纸布	极性复合物	7.0	$10^{10} \sim 10^{11}$	0.02~0.05	10~20	1.4	105	0.13~0.23	1.3~1.6
酚醛布板	极性复合物	6.0~7.0	$10^9 \sim 10^{10}$	0.02~0.1	6~12	1.4	105	0.13~0.23	1.3~1.6
漆布	极性复合物	3.0~4.5	10^{14}	0.04~0.1	20~30	1.2~1.4	105	0.13~0.23	1.3~1.6

一般而言,有机固体非极性材料的相对介电常数较低,体积电阻率较高,介质损耗较低,耐热性较低(聚四氟乙烯例外),吸湿性亦较小;极性材料则相反,如为多孔性(如纤维材料)则吸湿性很大。材料的介电强度一般决定于其致密程度和均匀程度,如材料纯净,均一性良好则击穿场强较高。例如纸的介电强度很低,经过真空干燥和浸渍消除了空隙,介电强度即可提高数十倍。

除上述介电性能外,绝缘材料的耐弧性,耐电痕性和耐电晕性也是很重要的电气性能,对于耐受长期电压的介电强度有极重要的关系,近年来其试验研究也有很大发展。

(2) 绝缘材料的力学性能 材料的力学性能主要包括拉伸、压缩、弯曲、剪切等强度,拉伸和压缩模量、伸长率以及某些较不易下定义的性能如耐磨性、可绕性、抗撕裂性等。在很多情况下,绝缘材料的力学性能直接影响着其应用性能,例如聚酯(涤纶)薄膜在低压电机绝缘中的大量应用,是它的力学性能比其他薄膜材料均优越的缘故。人们希望电机用绝缘材料具有足够的机械强度,但并不希望过硬而致难以包绕。

(3) 绝缘材料的热性能 固体绝缘材料的热性能如耐热性和导热性,在中小型电机中常起主要作用。电机在运行过程中因不断消耗能量而发热,因此电机内部的绝缘材料长期在热态下工作,使其逐渐老化而降低甚至完全丧失应具有的电气性能和机械强度,电机就因此而损坏,因此,选用的绝缘材料必须具有良好的耐热性能。电机的使用温度、尺寸、重量和技术经济指标常因绝缘材料的耐热性和导热性的改进而改进。

(4) 绝缘材料的化学及其他性能 绝缘材料对环境条件的稳定性和相容性,在某些情况下也可以成为决定其性能及应用的重要因素。例如是否有日光照射?是否有紫外光、X射线或原子能辐射?有无有害的化学物,如酸、碱或有害气体臭氧、氯、氟等?有无溶剂或高湿度?各材料之间有无相互侵蚀作用?这些都是可能危害绝缘材料的环境条件。例如,电力机车经常运行,在启动、加速等复杂的情况下,使得电机的使用环境恶劣,动态工况复杂,主要体现在高温、振动及腐蚀性强等,因此要求电机用绝缘材料在高温、湿热的恶劣环境下,具有较高的抗氧化和抗腐蚀性能。值得指出的是,在实际应用中除了性能满足要求外,还需要考虑绝缘材料对周围环境是否有危害作用,如有毒、易燃、易爆,有腐蚀性等。氯化联苯在几年前还被认为是一种颇为“理想”的电容器浸渍剂,其化学稳定性更是一个突出的优点,可是现在因其对人体有毒,而且因为其化学稳定性,在自然界极难分解,而逐渐造成环境污染和公害,人们不得不重新评价其优越性。为保障人民健康,我国已停止使用,目前世界各国正研究无毒浸渍剂以取代之。

在直流电或低频电压作用下,绝缘的耐受电解的性能也是十分重要的。

近年代,人们对于绝缘材料的阻燃性提出了高的要求,以保障安全。

在大批生产中,经济性是极为重要的因素。材料的来源是否充足,价格是否低廉,储运是否方便,以及绝缘工艺是否简便都是需要考虑的。

绝缘材料的各项性能并非是孤立而是互相关联的,例如机电性能常和温度有关,而电气性能又常因机械负荷而受影响。因此,综合平衡地考虑材料性能和评价材料是选择和应用材料的首要条件。这要求绝缘技术人员能将有关介质的理论知识应用于实际绝缘结构设计中。

1.2 绝缘树脂的发展

1.2.1 绝缘树脂的发展历史

20世纪初,人们研制成功了第一个合成聚合物——酚醛树脂,它成为绝缘材料领域中

的重要发明,也在绝缘材料领域使用了一个世纪。由于天然材料很难满足电工技术的发展,酚醛树脂具有较好的电性能和较高的耐热性,而且适合工业化的大批量生产,所以酚醛树脂很快在绝缘材料上得到了广泛应用,先后制成了以其为基的浸渍漆、浸渍纤维的制品、塑料和层状制品如层压绝缘板、管和棒等。然而,酚醛树脂的介质损耗大、对表面泄漏敏感等不利因素限制了其在绝缘材料中的应用和发展。

基于这个问题,在20年代后期发展了脲醛树脂、苯胺甲醛树脂、三聚氰胺树脂和醇酸树脂等,相比于酚醛树脂,这类树脂力学性能较好、介电损耗较低、吸湿性较小。

从30年代起,合成聚合物材料进入蓬勃发展阶段,聚氯乙烯、氯丁橡胶、聚四氟乙烯等均被成功研究,对绝缘材料的发展起了重要的作用,同时玻璃纤维、聚酰胺纤维等纤维及纤维制品也获得了显著发展。

40年代成功合成了有机硅树脂,随之发展了一系列以有机硅树脂为基的H级绝缘材料,也因此电机绝缘耐热等级中增加了H级耐热等级。除有机硅树脂外,不饱和树脂和环氧树脂也是这一时期发展起来的,均广泛应用于电机电器行业。这一阶段还出现了粉云母制品,粉云母纸的出现使人们摆脱了片云母资料稀缺的困扰,它的成功研制是近代绝缘材料发展史上的一次重大改革。

随着电机电器和材料科学的发展,绝缘材料已逐渐向以合成树脂为基的绝缘材料过渡,新型绝缘材料产品在50年代真正开始获得迅速广泛的应用。首先,无溶剂聚酯漆成功用于高压电机,第一次实现使用无溶剂树脂绝缘结构的制造,随后,综合性能更优异的无溶剂环氧漆取代了聚酯漆成功应用于大型高压电机中,无溶剂漆开始了工业化应用。其次,薄膜及复合箔产品被用作电机的槽绝缘。再次,粉云母制品得到迅速发展,大量用作大型高压电机定子绝缘,逐渐淘汰了沥青片云母绝缘等产品。同时,六氟化硫绝缘气体问世,其优异的灭弧性能可用于高压电器,用作断路器的空气绝缘等。

到60年代,伴随着航空航天技术的发展,出现了一系列含芳环和杂环的耐高温绝缘树脂材料,如聚酰亚胺、聚苯并咪唑、聚芳酰胺、聚二苯醚、聚酯亚胺、聚砒、聚芳砒、聚苯硫醚、聚酚醚等,这些耐热绝缘树脂的发展迎来了绝缘材料科学技术的高潮。

70年代以来,在电器设备和聚合物工业向大型化发展的同时,工业发达国家逐渐面临着资源短缺、环境污染日益严重等问题,为了适应绝缘工业的发展需求,开始了对现有绝缘材料的改性时代。其主要研究发展低损耗高强度的高压绝缘材料,高压电机用环氧云母绝缘材料在提高其力学性能和实现无气隙方面作了许多改进,电力电容器介质由复合结构成功发展成了全膜电容器;发展加工性能好、成本低的耐高温绝缘材料,一系列成型加工性能好的热塑性耐热树脂逐渐在电工行业中得到了应用,耐热浇注胶等都取得了一定的进展;发展环保无公害的绝缘材料,无溶剂漆等环保绝缘材料的应用逐渐扩大,停止使用一些有毒或致癌的绝缘材料;通过使用耐燃单体或与耐燃树脂共混,或添加阻燃剂等来发展阻燃型的绝缘材料,从而拓展绝缘材料的应用范围。

随着树脂产品的不断发展和改性研究,新的绝缘树脂产品不断出现,目前几乎所有的树脂材料都开始作为绝缘材料应用到电机电器的各种不同的场合中。常见的用于高分子绝缘树脂产品有酚醛树脂、聚酯树脂、环氧树脂、聚酰亚胺树脂、聚氨酯树脂、有机硅树脂等。这一系列具有阻燃、高耐热、高介电强度、低温快固化、低(无)毒,以及良好的力学性能和耐腐蚀性能的绝缘树脂材料,是新世纪理想的绝缘材料。

1.2.2 绝缘树脂的研究开发现状

随着电气电子工业的发展,发电设备高压大容量化,输变电设备高压,超高压、特高压