

环氧树脂 电绝缘材料

俞翔霄 俞赞琪 陆惠英 编著

HUANYANG SHUZH
DIAN JUEYUAN
CAILIAO



化学工业出版社

本书作者根据四十余年环氧树脂电绝缘材料的研制和应用经验,结合应用实例,重点从材料选用、配方设计原理、制造工艺及设备、产品性能等角度对环氧绝缘漆、层压绝缘制品、云母绝缘制品、引拔成型制品、缠绕制品、浸渍及浇注制品进行了详细的介绍。同时对其应用领域及三废治理等进行了阐述。

本书理论与实践相结合,通过应用实例介绍相关技术,实用性强,可供电气绝缘材料研究、生产和应用的科研人员 and 专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环氧树脂电绝缘材料/俞翔霄,俞赞琪,陆惠英编著.
北京:化学工业出版社,2006.12
ISBN 978-7-5025-9293-6

I. 环… II. ①俞…②俞…③陆… III. 环氧树脂-
电介质:固体绝缘材料 IV. TM215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 144487 号

责任编辑:李晓文 赵卫娟
责任校对:顾淑云

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市延风装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张 28½ 字数 573 千字 2007 年 2 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:58.00 元

版权所有 违者必究

序

电之于现代文明，无论给予多高的评价也不为过。绝缘材料和导电材料之于电，两者如形如影、相辅相成，在发、送、用电的一切场合均不可缺少。

从早期天然电绝缘材料之纸张、沥青虫胶、云母等发展到今天种类繁多的高分子合成电绝缘材料，始终伴随着现代电气工业飞速发展到今天和明天。

作为一类最重要的电绝缘材料，环氧树脂自 20 世纪 30 年代问世以来，已经历半个多世纪。以其优良的电绝缘性、物理和力学性能、耐化学药品性能和超强的黏结强度，作为绝缘涂料、浇注料、模压料、胶黏剂、层压材料、云母制品等被广泛用作电绝缘材料而用于现代电气工业的所有领域。从某种意义上说，环氧树脂的产量及其应用水平从一个侧面反映了一个国家现代工业、尤其是电气工业发达的程度和水平。

本书系统介绍各种门类环氧树脂电绝缘材料的配方设计、固化剂和辅料配伍、制备流程、工艺条件及其与材料性能的相关性原理，同时对其应用领域及其发展趋势做了概略介绍。本书作者长期从事环氧树脂电绝缘材料的研发和工业生产技术主管工作，积累了半个世纪以来我国环氧树脂电绝缘材料领域的丰富经验。可见本书是一本兼备理论和实践、具有较强实用价值的电绝缘材料专著，为从事该领域研发、生产及应用的科技人员提供了不可多得的参考资料。

王槐三

2006 年 10 月于成都·四川大学

前 言

电绝缘材料是电气产品的关键材料,电气产品的发展促进了绝缘材料的发展。环氧树脂的出现促进了绝缘材料的更新换代,质量进一步提高,进而使电气产品得到进一步的发展。自1958年环氧树脂在我国投产以来,已开发了门类众多的环氧树脂绝缘材料,广泛应用于电气产品上,大至700MW发电机组的主绝缘,小至微电子元件的包封绝缘。随着电气产品电压等级提高,容量的增大,产品的小型化和工作环境日益向新的领域拓宽;绝缘工艺的更新,要求绝缘材料耐高电压、耐高温、耐高频、耐辐照、耐湿热、耐寒、耐化学腐蚀,同时具有良好的应用工艺性等。随着环氧树脂及其固化剂、辅助材料新产品的涌现,可以制造更多更新的绝缘材料,以适应电气技术的发展和更新。

环氧树脂的出现也给电气制造工业的绝缘带来革新,实现了绝缘工艺的机械化、自动化,提高了绝缘质量和工效,节约了能源,减少了材料消耗。如真空压力浸渍工艺广泛用于高压电机及电器中,环氧粉末喷涂广泛应用于微电子和微电机中,连续沉浸及滴浸工艺广泛应用于中、小型低压电机制造中……因此不仅为电气工业提供了新材料而且提供了新工艺。

作者从事绝缘材料开发、研究、制造和应用四十余年,深感只有把环氧树脂复合物的化学机理与绝缘材料的产品研制相结合,把绝缘材料的产品开发与电气产品的特性和电气技术的发展相结合才能研制性能好、成本低、应用方便、安全可靠的绝缘材料,才能使产品在市场竞争中立于不败之地。本书总结了环氧树脂电绝缘材料的研制和应用经验,反映了近年来环氧树脂绝缘材料的发展和应用成果。全面系统地介绍了各种门类的环氧树脂绝缘材料的配方原理、制造工艺、材料选用、产品性能、应用工艺、开发前景。所举实例都经过实践验证,切实可行,已应用于电气产品上。

本书坚持理论与实践相结合,有理论、有分析、有实例、有经验,是一本实用性、可读性很强的图书,可供从事电气绝缘材料研制、生产和应用人员,教学单位的科技人员参考和应用。

本书第1、3、6、7、9、10章由俞翔霄教授级高级工程师主笔;第2、8、11、12、13、14章由俞赞琪讲师主笔;第4、5章由陆惠英教授级高级工程师主笔。全书由俞翔霄统稿。

由于环氧树脂电绝缘材料发展迅速,新品种不断涌现,加之作者水平有限,书中不当之处,敬请读者指正为盼。

俞翔霄

2006年10月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 绝缘材料的发展简况与趋势	1
1.2 绝缘材料的分类及编号	4
1.2.1 按物理状态分类	4
1.2.2 按化学成分分类	4
1.2.3 按实际应用形式分类	4
1.2.4 按产品的参考工作温度分类	4
1.2.5 原机械工业部型号	5
1.3 绝缘材料的基本特性	7
1.3.1 介电性能	7
1.3.2 力学性能	20
1.3.3 热性能	21
1.3.4 物理化学通性	24
1.3.5 工艺性及相容性	26
1.4 绝缘材料在电气工业中的作用	27
1.5 环氧树脂在电气产品中的应用	28
第 2 章 环氧树脂及其固化剂和辅助材料	33
2.1 环氧树脂	33
2.1.1 环氧树脂的种类	33
2.1.2 双酚型环氧树脂	34
2.1.3 多酚型缩水甘油醚环氧树脂	41
2.1.4 醇类缩水甘油醚环氧树脂	41
2.1.5 缩水甘油酯型环氧树脂	42
2.1.6 缩水甘油胺型环氧树脂	44
2.1.7 三聚氰酸环氧树脂 (TGIC)	44
2.1.8 脂环族环氧树脂	44
2.1.9 脂肪族环氧树脂	45
2.2 环氧树脂的固化和固化剂	46
2.2.1 胺类的固化反应和固化剂	47
2.2.2 羧酸和酸酐类固化反应和固化剂	61
2.2.3 合成树脂固化剂	69

2.2.4	潜伏性固化剂	70
2.2.5	特种固化剂	72
2.3	辅助材料	73
2.3.1	稀释剂	74
2.3.2	增塑剂及增韧剂	77
2.3.3	填料	81
2.3.4	促进剂	84
第3章	环氧树脂绝缘漆及胶	90
3.1	概述	90
3.1.1	绝缘漆的定义及用途	90
3.1.2	绝缘漆的分类	90
3.2	环氧绝缘漆及胶用原材料	91
3.2.1	植物油	91
3.2.2	树脂	93
3.2.3	干燥剂和促进剂	95
3.2.4	着色剂及改性剂	97
3.2.5	溶剂和稀释剂	98
3.3	环氧绝缘浸渍漆	99
3.3.1	浸渍方式及用途	100
3.3.2	浸渍漆的设计要求及原理	102
3.3.3	有溶剂环氧浸渍漆实例	109
3.3.4	少溶剂环氧快干漆实例	110
3.3.5	环氧无溶剂浸渍漆实例	116
3.3.6	阻燃环氧浸渍漆实例	134
3.3.7	环氧绝缘浸渍漆的技术指标及检查方法	135
3.4	环氧覆盖绝缘漆	137
3.4.1	原材料	137
3.4.2	设计要求及原理	137
3.4.3	制造实例	139
3.4.4	技术指标及检查方法	154
3.5	环氧胶黏漆及胶	155
3.5.1	设计要求及原理	155
3.5.2	原材料	156
3.5.3	制造实例	157
3.5.4	技术指标与检查方法	160
3.6	环氧绝缘粉末涂料	160
3.6.1	概述	160

3.6.2	环氧粉末的涂装方式	162
3.6.3	环氧粉末设计要求及原理	163
3.6.4	环氧粉末的原材料	166
3.6.5	环氧粉末的实例	167
3.6.6	环氧粉末的应用及检查方法	176
3.7	环氧绝缘漆的发展方向及前景	177
第4章	环氧层压制品	178
4.1	概述	178
4.2	原材料	179
4.2.1	环氧胶黏剂	179
4.2.2	增强材料	179
4.2.3	辅助材料及其他	183
4.3	设计及原理	184
4.4	环氧预浸渍料的制造	186
4.4.1	生产设备	186
4.4.2	生产工艺参数	190
4.4.3	影响预浸渍料质量的主要因素	191
4.4.4	预浸渍料各项性能指标对环氧层压制品性能的影响	194
4.4.5	预浸渍料指标检查方法	196
4.5	环氧层压板的制造	197
4.5.1	生产设备和模板	198
4.5.2	制造工艺	200
4.5.3	压制工艺参数对层压板性能的影响	202
4.5.4	层压板易出现的质量问题和解决措施	203
4.6	环氧酚醛玻璃布板的改进	204
4.6.1	理论分析和探讨	205
4.6.2	热塑性酚醛树脂的合成	206
4.6.3	环氧热塑性酚醛复合胶的配制	207
4.6.4	环氧热塑性酚醛复合胶预浸料的性能	207
4.6.5	环氧热塑性酚醛玻璃布层压板的性能	207
4.6.6	二甲苯树脂改性环氧酚醛玻璃布层压板	208
4.7	特种环氧层压板	210
4.7.1	环氧双马来酰亚胺玻璃布层压板	210
4.7.2	环氧三聚氰胺酚醛玻璃布层压板	213
4.7.3	环氧玻璃毡层压板	215
4.7.4	环氧聚酯纤维毡布层压板	216
4.7.5	环氧桦木层压板	216

4.7.6 环氧酚醛纸基层压板	218
4.8 环氧覆铜箔层压板	219
4.8.1 环氧覆铜箔层压板的制造	220
4.8.2 环氧复合基覆铜箔基板的制造	222
4.9 环氧层压管筒	225
4.9.1 环氧层压管筒制造工艺流程和设备	225
4.9.2 环氧层压管的制造	227
4.9.3 各种因素对层压管性能的影响	229
4.9.4 层压管易出现质量问题的原因	231
4.9.5 环氧酚醛玻璃布层压管的改进	232
4.9.6 特种环氧玻璃布层压管的制造	236
4.9.7 环氧玻璃布层压管的应用	237
4.10 环氧玻璃布层压棒	237
4.10.1 环氧玻璃布层压棒的生产工艺流程	237
4.10.2 环氧玻璃布层压棒的生产设备及模具	237
4.10.3 层压棒的制造	238
4.10.4 环氧玻璃布层压棒的性能与用途	239
4.11 环氧胶纸电容式套管芯	240
4.11.1 胶纸电容式套管芯生产工艺流程	241
4.11.2 220kV 胶纸电容式套管芯环氧胶黏剂的配方设计	241
4.11.3 220kV 环氧胶纸电容式变压器套管芯的生产工艺	242
4.11.4 220kV 胶纸电容式套管芯的技术标准和实测数据	243
4.12 环氧层压制品的标准和检查方法	244
第5章 环氧云母制品	245
5.1 概述	245
5.2 原材料	245
5.2.1 云母	245
5.2.2 补强材料	252
5.2.3 环氧云母制品用胶黏剂	252
5.3 环氧云母带	253
5.3.1 设计要求及原理	253
5.3.2 名称、组分、性能和用途	253
5.3.3 制造设备	254
5.3.4 环氧桐油酸酐粉、片云母带的制造	255
5.3.5 F级桐马-环氧粉云母带的制造	263
5.3.6 环氧少胶云母带的制造	269
5.3.7 中胶环氧粉云母带的制造	273

5.3.8 环氧云母带的开发与展望	274
5.4 环氧柔软云母板	275
5.4.1 设计要求及原理	275
5.4.2 名称、组分、介电强度	275
5.4.3 制造设备	275
5.4.4 制造工艺	276
5.4.5 实例	277
5.5 环氧换向器云母板	286
5.5.1 设计要求及原理	286
5.5.2 工装设备	287
5.5.3 环氧换向器粉、片云母板的制造工艺流程	288
5.5.4 环氧换向器云母板的制造	288
5.5.5 环氧换向器云母板的性能	290
5.5.6 环氧换向器云母板的应用	290
5.6 环氧塑性云母板	291
5.6.1 设计要求及原理	291
5.6.2 环氧塑性云母板的制造	291
5.6.3 环氧塑性云母板的性能	292
5.6.4 环氧塑性云母板的应用	292
5.7 环氧衬垫云母板	293
5.7.1 设计要求及原理	293
5.7.2 环氧衬垫云母板的制造	293
5.7.3 环氧衬垫云母板的应用	294
5.8 环氧云母箔	294
5.8.1 设计要求及原理	294
5.8.2 环氧云母箔的制造	294
5.8.3 环氧云母箔的性能	294
5.8.4 环氧云母箔的应用	295
5.9 环氧云母绝缘制品的性能检查	295
第6章 环氧引拔成型制品	296
6.1 概述	296
6.1.1 引拔制品特性	297
6.1.2 引拔制品的应用	299
6.2 原材料	299
6.2.1 增强材料	299
6.2.2 胶黏剂	302
6.2.3 其他助剂	303

6.3 设计要求及原理	303
6.3.1 材质的选择	304
6.3.2 模具与加热及牵引力	305
6.4 引拔设备	306
6.4.1 纱架和布纱	306
6.4.2 浸渍装置和浸胶方式	306
6.4.3 胶量控制	307
6.4.4 引拔模预成型	307
6.4.5 模具结构与加热方式	307
6.4.6 牵引机构与其他装置	309
6.5 制造实例	309
6.5.1 环氧引拔槽楔	309
6.5.2 环氧引拔棒	312
6.6 引拔成型中常出现的缺陷及原因分析	313
6.7 技术指标及性能的检查方法	314
6.8 环氧引拔成型制品的应用	315
6.8.1 环氧引拔槽楔的应用	315
6.8.2 环氧合成绝缘子芯棒的应用	315
第7章 环氧玻璃布真空压力浸胶制品	317
7.1 概述	317
7.1.1 制品的种类	318
7.1.2 特性	318
7.2 原材料	324
7.2.1 胶黏剂	324
7.2.2 增强材料	324
7.3 工艺流程及设备	324
7.3.1 卷坯机	325
7.3.2 模具及支架	325
7.3.3 混胶机及压力罐	326
7.4 设计要求及原理	326
7.4.1 真空压力浸胶用环氧胶黏剂的要求	328
7.4.2 玻璃布必须具备条件	328
7.4.3 玻璃布与环氧胶的用量及计算	328
7.4.4 真空压力浸胶工艺参数	329
7.5 制造工艺实例	330
7.5.1 F级真空压力浸胶环氧玻璃布管	330
7.5.2 耐 SF ₆ 真空浸胶管	331

7.5.3 真空压力浸胶制品常见缺陷及原因分析	332
7.6 技术指标及检查方法	332
7.7 环氧真空压力浸胶制品的应用	334
第8章 环氧树脂玻璃纤维缠绕制品	335
8.1 概述	335
8.1.1 缠绕成型工艺的类型	335
8.1.2 纤维缠绕成型制品的特点	336
8.2 原材料	336
8.2.1 纤维及其织物	336
8.2.2 环氧树脂胶液	337
8.3 设计要求及原理	337
8.3.1 材料选用	337
8.3.2 芯模	338
8.3.3 纤维缠绕规律	339
8.3.4 结构形式	339
8.3.5 缠绕成型工艺的设计	339
8.4 缠绕成型设备	341
8.4.1 缠绕机	341
8.4.2 缠绕机辅助装置	341
8.5 环氧玻璃纤维缠绕制品实例	342
8.5.1 工艺装备	342
8.5.2 工艺流程	342
8.5.3 生产准备	343
8.5.4 工艺过程	343
8.5.5 产品质量检测	343
8.5.6 不同材质制成的变压器线圈用压圈板的性能比较	343
8.6 环氧玻璃纤维布带缠绕管、筒制造工艺实例	344
8.6.1 工艺装备	344
8.6.2 工艺流程	345
8.6.3 生产准备	345
8.6.4 工艺过程	345
8.6.5 产品质量指标	346
8.7 阻燃环氧玻璃布缠绕制品	346
8.7.1 环氧胶的配制	346
8.7.2 缠绕	347
8.7.3 烘焙固化成型、脱管及涂表面漆	347
8.7.4 阻燃环氧玻璃布缠绕管的性能	347

8.7.5 应用试验	347
8.8 湿法缠绕成型制品常见的缺陷、原因和解决措施	348
8.9 制品的性能及检验	349
8.10 环氧玻璃纤维缠绕绝缘在高压电器上的应用实例	349
8.10.1 绕包式干式变压器	349
8.10.2 绕包式干式电抗器、滤波器、阻波器等	350
第9章 环氧玻璃纤维浸渍制品	351
9.1 概述	351
9.2 原材料	352
9.2.1 漆布用无碱玻璃布技术指标	352
9.2.2 80支/14股无碱无捻玻璃纤维纱性能要求	353
9.2.3 浸渍漆及胶	353
9.3 生产设备	353
9.3.1 生产漆布用设备	353
9.3.2 生产绑扎带的工艺流程和设备	354
9.4 设计要求及原理	354
9.4.1 环氧玻璃漆布的设计要求及原理	354
9.4.2 环氧玻璃纤维绑扎带的设计要求及原理	355
9.5 环氧玻璃漆布的制造工艺、性能及应用	356
9.5.1 漆的配方及工艺	356
9.5.2 漆的技术指标及实测性能	356
9.5.3 环氧玻璃漆布的制造	356
9.5.4 环氧玻璃漆布的技术指标	357
9.5.5 温度指数评定	358
9.6 耐热环氧绑扎带制造工艺、性能及用途	358
9.6.1 F级环氧胶	358
9.6.2 环氧绑扎带的制造	359
9.6.3 绑扎带的质量指标	359
9.6.4 热老化试验	359
9.6.5 绑扎带的应用试验	360
9.6.6 绑扎带的试验方法	361
第10章 环氧浇注制品	363
10.1 概述	363
10.1.1 环氧浇注绝缘的特点	363
10.1.2 浇注料的分类及用途	363
10.1.3 浇注料在高压电工产品上的应用	364
10.2 环氧树脂浇注绝缘技术	365

10.2.1	真空浇注法	366
10.2.2	环氧树脂自动压力凝胶工艺	368
10.3	原材料	369
10.4	设计及原理	369
10.4.1	性能基本要求	369
10.4.2	各组分的选择	370
10.4.3	抗开裂问题	373
10.5	环氧浇注电流互感器的制造工艺实例	376
10.5.1	工艺过程	376
10.5.2	浇注料固化物的性能	377
10.6	环氧浇注干式变压器的工艺实例	377
10.6.1	工艺过程	378
10.6.2	供干式变压器环氧浇注料的性能	378
10.7	耐 SF ₆ 的环氧浇注料及盘式绝缘子制造	379
10.7.1	氧化铝对环氧浇注料固化物性能的影响	379
10.7.2	耐 SF ₆ 盘式绝缘子的浇注工艺主要参数	383
10.7.3	耐 SF ₆ 的环氧浇注料的性能	384
10.8	GIS 耐热环氧浇注料	384
10.8.1	GIS 用耐热环氧浇注料的配方筛选	384
10.8.2	GIS 耐热环氧浇注料的主要性能	385
10.9	国外耐 SF ₆ 环氧浇注料和户外环氧浇注料	386
10.9.1	耐 SF ₆ 环氧浇注料的配方举例	386
10.9.2	耐 SF ₆ 环氧浇注料固化物的一般性能	386
10.9.3	耐户外气候的环氧浇注料的组成与性能	386
10.10	环氧阻燃灌注胶	387
10.10.1	环氧阻燃灌注胶的研发	387
10.10.2	室温固化阻燃灌注胶	387
10.11	环氧浇注制品易出现的质量问题	388
第 11 章	环氧树脂在电力电容器绝缘介质中的应用	390
11.1	概述	390
11.2	常用电容器浸渍剂	391
11.3	作为添加剂的环氧树脂的选择	392
11.4	含环氧树脂的浸渍剂对浸渍电容器元件的性能影响	393
11.4.1	浸渍剂的净化及配制	393
11.4.2	模型电容器的浸渍	394
11.4.3	模型电容器的性能测试	394
11.5	结论	396

第 12 章 绝缘材料老化	397
12.1 老化机理	398
12.1.1 热老化	398
12.1.2 电老化	401
12.1.3 化学老化	406
12.1.4 高能辐射老化	407
12.1.5 生物老化	408
12.2 老化评定——绝缘材料耐久性评定	409
12.2.1 热老化试验	410
12.2.2 电老化试验	416
12.2.3 辐射老化试验	420
第 13 章 环氧树脂电绝缘材料制造和应用的安全与防护	421
13.1 原材料及产品的毒性	421
13.1.1 环氧化合物的毒性	421
13.1.2 固化剂的毒性	423
13.1.3 溶剂的毒性	424
13.1.4 填料的毒性	424
13.2 原材料和产品的易燃性和可爆性	425
13.3 环氧树脂绝缘材料制造和应用过程的安全防护措施	425
第 14 章 环氧树脂绝缘材料生产与应用中的三废治理	427
14.1 废气的产生与治理	427
14.1.1 干洁空气的组成及大气质量控制的有关规定	428
14.1.2 有机废气的治理	431
14.2 废水的产生与治理	433
14.2.1 水质的检测与有关标准	433
14.2.2 废水的治理	434
14.3 废料的产生与治理	437
参考文献	438

第 1 章 概 论

1.1 绝缘材料的发展简况与趋势

21 世纪以前,绝缘材料基本上都是来自天然材料或其制品,最早的电动机是用丝绸、棉纱、棉布作绝缘材料,为了提高耐水性,采用虫胶、琥珀等天然树脂与植物油、沥青进行浸渍。后来,为了克服天然材料的缺点又用硫化的天然橡胶、硝酸纤维素与醋酸纤维素来改性。到 19 世纪末,由于交流电机和三相输电线路的出现,对绝缘提出新的要求,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。

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。由于天然材料很难满足电工技术发展,所以酚醛树脂很快在绝缘材料上获得广泛应用,先后制成浸渍漆、浸渍纤维的制品、塑料和层状绝缘板、管和棒。之后又出现了脲醛树脂、苯胺甲醛树脂、三聚氰胺树脂和醇酸树脂等。

从 20 世纪 30 年代起,合成聚合物材料进入蓬勃发展阶段,如聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯、聚乙烯、聚四氟乙烯、氯丁橡胶、丁苯橡胶以及尼龙 66 等相继出现。20 世纪 40 年代又发展了有机硅树脂、不饱和聚酯树脂和环氧树脂。与此同时相继出现玻璃纤维和粉云母制品,促进了各类绝缘材料和制品的发展。

20 世纪 50 年代以来,随着现代聚合物化学与工业的发展,开始了以合成聚合物为基础的绝缘材料发展时期,并迅速发展了新型的绝缘材料品种,如无溶剂漆应用于电机浸渍;薄膜复合制品用于电机槽绝缘;粉云母纸替代稀缺的云母制成各类型的云母制品,被广泛应用于发电机和高压电机的主绝缘;六氟化硫问世并在高压电器产品中获得应用等。到 20 世纪 60 年代由于航空与航天技术的发展,耐高温绝缘材料的研究与制造出现了高潮,如聚酰亚胺、聚芳酰胺、二苯醚树脂、聚芳砜、加聚型聚酰亚胺、酚醚树脂、聚海因树脂、聚苯并咪唑等,这些都是耐高温绝缘材料。所以人们认为 20 世纪 60 年代是绝缘材料发展史上的高峰期。进入 20 世纪 70 年代,聚合物工业在进一步向大型工业化发展的同时,开始从大量发展新的聚合物向对现有材料进行改性上过渡。在机电工业中,主要也是研究绝缘材料的改性,扩大材料的应用范围,发展新的绝缘材料品种。

我国绝缘材料工业解放前基础极差,仅上海、沈阳有生产云母制品、层压制

品、绝缘油漆及胶和漆布的小工厂；在第一个五年计划期间建成了综合性的哈尔滨绝缘材料厂；1958年后建成西安绝缘材料厂、东方绝缘材料厂、北京绝缘材料厂等；到1973年全国有28个绝缘材料厂；到1993年全国绝缘材料生产企业已发展到了300余家，其中主要企业48家，合资企业8家，工业总产值达23亿元。绝缘材料的产量在1953年仅589.3t，到1973年为26707t，在这20年间增长45.2倍，到1993年为102899t，具体数值见表1-1。

表 1-1 我国绝缘材料产量情况

产品类别 \ 年份	1953	1963	1973	1983	1993
产品总量	589.3	3600	26707	30933	102899
F、H级产品	0	0	0	274.3	5659.4
油漆树脂	285.5	1637	10928	13420	17266
浸渍纤维	15.1	222.5	1194	579	1729
层压制品	221.7	1413	12013	11451	34109
压塑料	63	181.3	1795	1735	6282
云母制品	57	287.1	1014	605	5615
薄膜	—	0.8	324	1062	10551
复合制品	—	—	133	1442	14711
其他	—	39.3	—	167	

绝缘材料是随着我国电力工业发展而发展的。因此绝缘材料将有更大的增长需要。

在品种上，解放初期以生产A级绝缘材料为主，它的原料以天然材料为主，如沥青、松香、植物油、棉布、丝绸、纸和片云母。20世纪60年代随着我国石油化工的发展，开发了以合成高分子材料为主的绝缘材料。玻璃布代替棉；粉云母纸代替片云母；醇酸树脂代替沥青漆、油性漆；合成薄膜代替油性漆布和青壳纸。从而使电机绝缘等级由A级提高到B级绝缘的品种有142种之多。由于我国在电机工业发展的技术政策受到前苏联的影响，20世纪60年代大力鼓劲，由E、B级绝缘跳到H级绝缘，大力发展以有机硅树脂为基材的各类H级绝缘材料。而到了20世纪70年代后期欧美、日本大力发展F级绝缘材料，我国也开始结合国情大力发展F级绝缘材料，仅在1978年至1982年的时间内就开发了57个品种，材料基本配套，到1993年产量达到5659.4t。这是因为F级绝缘材料在成本上比B级绝缘材料提高不多，而允许工作温度却由130℃提高到155℃，可以提高容量1~2级，质量减轻25%，体积缩小30%，所以技术经济指标优越。在20世纪80~90年代除了开发以聚酯树脂、环氧树脂为基材的F级绝缘材料之外，还开发了以二苯醚树脂，聚酰亚胺树脂、耐热聚酯树脂、耐热环氧树脂为基材的H级、C级绝缘材料。

我国绝缘材料工业从无到有，从小到大虽有一定规模，但不论从品种上、质量上还是数量上与电气工业的发展都有一定差距。绝缘材料工业的发展前提是依机电工业发展的速度和规模而定，它的发展基础则以有机合成材料——合成树脂、工程

塑料、合成纤维为基础。随着我国石油化工工业的发展,为绝缘材料工业提供了可靠的有机合成材料,促进了我国绝缘材料工业的发展。但与国外相比差距更大,表现为品种少、质量差、成本高。西欧、日本等国则以生产 F、H 级绝缘材料为主,约占 60%~70%,例如美国 Schanectdy 公司、法国 Alstom 公司、德国 Beck 公司的 F、H 级绝缘漆多达几十种。F、H 级绝缘材料品种,如耐热合成纤维,美国、日本均有十几种,而我国仅有两种。质量、数量均差距很远,不少绝缘材料用的环氧树脂、耐热薄膜、化工材料均需依靠进口。

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、特高压化,中小型低压电机小型轻量化,电气设备环境多样复杂化,家用电器的绿色化、多功能化、安全化,使绝缘材料从数量到品种、从质量到性能、从制造到应用,从测试评定到基础理论研究等方面均将有很大的发展,其发展趋势大致有下列几个方面。

(1) 发展耐高压绝缘材料。主要研究 1000MW 发电机组用环氧粉云母绝缘和 (750~1000) kV 超高压输变电设备绝缘。要求绝缘材料具有高的介电强度,低的介电损耗,良好的耐电晕腐蚀能力,高的力学性能,特别是热态力学性能,绝缘材料整体密实无气隙,以满足现代发电设备与输变电设备向高压大容量的方向发展。

(2) 发展耐热高的绝缘材料。推动中小型电机的绝缘由 E、B 级向 F、H 级, C 级方向发展,实现特种电机,例如,冶金、起重、轧钢、煤矿等,直流电机 H 级绝缘、牵引电机 C 级绝缘等,使电机体积缩小、出率和可靠性提高,除此还应开发耐热冲击性好,强度高的浇注料。

(3) 发展阻燃绝缘材料。由于城市建筑向高层发展,家用电器广泛使用,对电器中绝缘材料与工程塑料的阻燃性要求越来越高;航空、水运、矿用电器中绝缘材料也要阻燃和自熄,必须达到 UL 标准以确保人民生命安全。

(4) 发展无公害绝缘材料。人类对生存环境的认识进一步提高,减少绝缘材料在生产、加工和使用过程中的环境污染,各国都有明文规定,限制使用有机溶剂及有害溶剂,发展无溶剂漆、水溶性漆、无污染绝缘漆、高固体量漆、热熔树脂、粉末涂层和无酚漆包线漆等。

(5) 发展节能、降耗的绝缘材料。降低绝缘材料在生产、加工和使用过程中的能量和材料消耗是绝缘材料发展的重要方向之一。发展低温快干的浸渍绝缘漆,开发低压电器用的高介电性能、高耐热性、高耐弧性和高尺寸稳定性的热固性塑料和增强塑性塑料,保证低压电器向小型化、智能化、模块组合化方向发展,同时也大大节约了材料,降低了能耗。

(6) 发展特殊绝缘材料。国外开发了耐深冷、耐寒、耐辐照、耐化工腐蚀、耐水、耐油、耐冷冻、耐 SF₆ 及高阻、高介、高强、高弹和低耗等绝缘材料,以适应新能源技术的发展和电气设备发展之需。

(7) 发展高性能电子绝缘材料。IT 产品的迅速发展要求开发第三代玻璃布覆