

钱旭耀 编著

变压器油 及相关故障诊断处理技术

BIANYAQIYOU
JI XIANGGUAN GUZHANG
ZHENDUAN CHULI JISHU



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

BIANYAQIYOU
JI XIANGGUAN GUZHANG
ZHENDUAN CHULI JISHU

变压器油 及相关故障诊断处理技术

钱旭耀 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书共分9章,比较系统地介绍了电力变压器绝缘和冷却介质、石油的化学组成和变压器油的炼制工艺、变压器油的性能指标和质量监督、变压器油的老化和污染、变压器油中溶解气体产生机理、油中溶解气体在线监测装置、变压器油中溶解气体故障分析技术、变压器油处理装置和变压器油处理工艺方面的理论知识、应用技术。

本书内容丰富,叙述条理清晰,专业知识的阐述追求现场的可操作性、可指导性和实用性,既反映当前我国变压器油及油相关性故障处理技术的最新发展趋势,又理论联系实际,强调实用价值。书中内容便于自学,可供电力行业从事变压器类设备油务处理、变压器运行维护和检修的工程技术人员和工人学习、参考,也可作为电力变压器安装、运行维护和检修人员的培训教材和大专院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

变压器油及相关故障诊断处理技术/钱旭耀编著.
北京:中国电力出版社,2006
ISBN 7-5083-4571-1

I. 变... II. 钱... III. ①变压器油②变压器故障—故障诊断 IV. ①TE626.3②TM407

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第080607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>)
汇鑫印务有限公司印刷
各地新华书店经售

*

2006年10月第一版 2006年10月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 18印张 440千字
印数 0001—3000册 定价 28.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

随着国民经济的快速发展,电力需求快速增长,电力装机容量与电网规模不断扩大,我国电力工业进入了大电网、大机组、高电压、高自动化的发展时期;厂网分开、西电东送、南北互供、全国联网的格局已初步形成;建设 1000 千伏级交流和 ± 800 千伏级直流系统的大容量、远距离、低损耗的特高压国家电网已拉开序幕。各电压等级变压器,尤其是超高压交流、直流换流变压器数量和容量骤增,电力变压器已从 220、330kV 和 500kV 向 750kV 和 1000kV 特大型、特高压变压器方向发展。作为整个庞大而复杂电力系统最基本、关键的电器元件——变压器类设备,其可靠性直接关系到电力系统的安全可靠运行。作为油浸式变压器类设备内绝缘的矿油型绝缘油(通常称为“变压器油”),对变压器类设备的可靠运行有着决定性的影响,进一步提高变压器油运行的可靠性,从选用、运输、现场油务处理、运行、维护监督等环节加强变压器油的全过程管理,提高变压器油的运行维护水平,是摆在从事变压器类设备管理工程技术人员面前的首要任务。变压器油除了具有冷却、绝缘及灭弧的作用外,还是信息载体。当前电力系统设备维修模式已从传统的“定期维修”向更科学合理的以可靠性为中心(RCM)的“状态维修”转变,在这样的变革形势下,科学利用变压器油所载有效信息进行变压器绝缘状态(尤其是绝缘故障)的识别,在基于变压器油信息的故障(简称“油相关性故障”)分析诊断处理中扮演着日益重要的角色。

国内有关变压器油技术方面的专业书籍一般注重于油品的性能指标、油质标准、试验检测方法及有关标准规范等知识体系的介绍,学术味较重,读者对象主要是从事油品绝缘或化学监督的相关技术人员。从目前国内已出版的相关性专业书籍看,尚无一本能够覆盖变压器油选用、油务处理、运行、维护监督等全过程和变压器油相关性故障分析诊断处理的具有较强现场指导作用的专业书籍。变压器油技术并不单单是一个油品问题,从变压器设备的整个寿命周期的角度来看,它更是一个复杂的系统工程问题。鉴于这种认识,本书结合当前电力行业变压器油选用、处理、运行监督和变压器油相关性故障分析诊断处理技术,立足工程实践,在总结作者本人长期从事变压器类设备监造、安装和检修工作的经验和借鉴当前国内外变压器油技术大量研究成果的基础上,比较详细地介绍变压器油及变压器油相关性故障分析处理的理论知识、经验总结和前沿性技术成果;书中专业知识的阐述追求现场的可操作性、可指导性和实用性,读者对象定位为电力行业从事变压器类设备油务处理、变压器运行维护和检修的工程技术人员和工人。

书中引用了国内同行大量的基础性资料、试验数据和研究成果,在此谨向他(她)们致以诚挚谢意。在多年专业工作和本书编写过程中得到了浙江省电力公司卢为民教授级高级工程师、楼其民教授级高级工程师和吴锦华高级工程师,国电浙江北仑发电有限公司沈维君高级工程师、吕一农高级工程师、张国鸣高级工程师,浙江省火电建设公司杜成峰高级工程

师、张马林高级工程师，浙江省电力教育培训中心陈敢峰高级技师等师长、专家的鼓励和支持，浙江省火电建设公司邹建明高级工程师对全书进行了认真的审阅，提出了许多意见和建议，浙江省火电建设公司叶国良工程师在本书的编写和校正过程中付出了辛勤的劳动，给予了很大的帮助，作者在此谨向这些专家和同行表示衷心的感谢。

作者期望本书能为生产一线从事变压器类设备油务处理及变压器安装、运行维护、检修的工程技术人员和工人在具体工作中解决常见故障和疑难问题时有所帮助。由于编写时间仓促，加之作者水平有限，书中不妥和错误之处在所难免，恳请专家、同行和读者给予批评指正。

钱旭耀

2005 年 11 月

目 录

前 言

第一章 电力变压器的绝缘和冷却介质

1

- 第一节 液体绝缘材料和液体浸渍变压器..... 1
- 第二节 气体绝缘材料和气体绝缘变压器 10

第二章 原油的化学组成和变压器油的炼制工艺

15

- 第一节 原油的性质和化学组成 15
- 第二节 生产变压器油的原油 19
- 第三节 变压器油的炼制工艺 21
- 第四节 变压器油技术数据 24

第三章 变压器油的性能指标和质量监督

39

- 第一节 变压器油物理性能 39
- 第二节 变压器油化学性能 45
- 第三节 变压器油电气性能 53
- 第四节 变压器油质量标准 60
- 第五节 变压器油质量监督 68
- 第六节 变压器油的选用 74

第四章 变压器油的老化和污染

79

- 第一节 变压器油老化机理 79
- 第二节 变压器油的污染 85
- 第三节 变压器油老化对其相关性能的影响 88
- 第四节 油品老化对变压器类设备运行的影响 90
- 第五节 变压器油介质损耗增大原因分析 91
- 第六节 变压器油的防劣措施和维护 95

第五章 油浸式变压器油中溶解气体产生机理 100

第一节	变压器油中溶解气体的来源	100
第二节	变压器油中气体的产生机理	103
第三节	气体在变压器油中溶解的传质过程	109
第四节	变压器内部故障时的产气特征	113

第六章 变压器油中溶解气体在线监测装置 122

第一节	变压器油中溶解气体在线监测技术	122
第二节	典型的油中气体在线监测装置	130
第三节	变压器油中溶解气体在线监测技术的进展	136

第七章 变压器油中溶解气体故障分析技术 138

第一节	油中溶解气体的选取	138
第二节	变压器油中溶解气体分析过程	139
第三节	以特征气体法诊断故障	148
第四节	以比值法诊断故障	162

第八章 变压器油处理装置 179

第一节	变压器油离线净化处理装置	179
第二节	典型真空滤油机使用说明	183
第三节	变压器在线滤油装置	195
第四节	变压器有载分接开关在线滤油装置	199
第五节	变压器油再生处理方法及装置	204
第六节	真空设备	204
第七节	干燥空气发生器	216

第九章 变压器油处理工艺 222

第一节	变压器油的净化处理	222
第二节	大型变压器安装现场油处理工艺	223
第三节	变压器油的吸附再生处理	228
第四节	变压器含气量增高原因及处理	237
第五节	变压器油中含乙炔的脱气处理	240
第六节	变压器绝缘受潮分析及处理	241
第七节	变压器油流静电带电问题	266

参考文献 279

第一章

电力变压器的绝缘和冷却介质

电力变压器按绕组的绝缘和冷却介质分类，可以分为液体浸渍变压器、气体绝缘变压器和干式变压器。

● 第一节 液体绝缘材料和液体浸渍变压器

液体浸渍变压器是指用绝缘液体浸渍绕组及绕组外的绝缘，绝缘液体既作为绝缘介质，同时又作为散热冷却介质的变压器。目前在变压器中使用的绝缘液体主要有变压器油和硅油（Silicon oil）、复敏绝缘液（Formel）、Midel7131 合成脂、 β 液（Beta）、 α 液（Alpha）、聚 α 烯（Paos）等高燃点的绝缘液体。液体浸渍变压器按浸渍的绝缘液体介质分类又可分为普通油浸式变压器和耐高温绝缘液浸式变压器两类。

一、变压器油和普通油浸式变压器

（一）变压器油

变压器类设备用的矿物绝缘油（通常称为“变压器油”）是天然碳氢化合物的混合物，主要由烷烃、环烷烃、芳香烃等烃类组分组成，生产变压器油的原油主要可分为石蜡基原油和环烷基原油，变压器油的性能在一定程度上取决于油基的组分和精炼程度。变压器油存在燃烧的可能性，使用处置过程中对环保生态方面有影响。但由于变压器油具有性能优良和价格低廉的特点，目前绝大多数的电力变压器仍使用变压器油作为绝缘和冷却介质。

19 世纪末，变压器开始使用变压器油作为绝缘和冷却介质，出现了油浸式变压器。变压器油除天然存储量丰富、价格低廉外，还由于具有下列特点，因而得到广泛的应用。

（1）和绝缘纸（纤维材料）结合使用，具有极高的击穿电压，可以减少绝缘距离，降低成本；

（2）变压器油的黏度低，传热性能良好，使充油设备有良好的热循环回路，以达到冷却散热的目的；

（3）隔绝设备（铁心和绕组）绝缘与空气的接触，防止绝缘受潮，减缓设备的老化，延长设备的使用寿命；

（4）在油浸开关设备中，变压器油主要起到灭弧作用。

（二）普通油浸式变压器

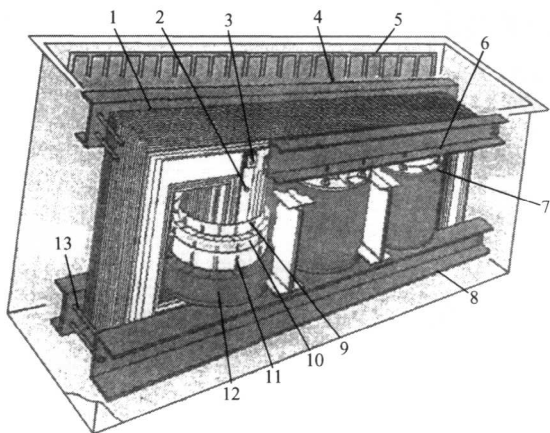


图 1-1 心式变压器结构

- 1—铁心；2、3—铁心拉板；4—上夹件；5—油箱屏蔽；6—绕组压钉；7—绕组压板；8—下夹件；9—绝缘筒；10—低压绕组；11—垫块；12—高压绕组；13—夹件螺栓

部件。电力变压器按铁心形式可分为心式变压器和壳式变压器。

(1) 心式变压器。心式变压器的结构如图 1-1 所示，铁心的铁心柱有近似圆柱形的截面，铁轭在不同的设计中可以有不同的形式。变压器的高压绕组和低压绕组同心排列，器身（铁心连同绕组）呈垂直布置。绕组结构可以采用圆筒式、螺栓式、连续式、层式、纠结式、内屏蔽式等，采用哪种结构取决于绕组的电压和电流。

表 1-1 油浸式电力变压器的分类

电压等级/kV	绕组结构	调压方式
35	三相双绕组	无励磁调压
		有载调压
110	三相双绕组	无励磁调压
	三相三绕组	有载调压
220	三相双绕组	无励磁调压
	三相三绕组	有载调压（自耦）
330	三相双绕组	无励磁调压
	三相三绕组	有载调压（自耦）
500	单相双绕组	无励磁调压 有载调压（自耦）
	单相三绕组	
	三相双绕组	

(2) 壳式变压器。壳式变压器绝缘结构与心式变压器相比要复杂一些，结构相对紧凑，其结构如图 1-2 所示。铁心一般是水平布置，心柱截面为矩形，每柱有 2 个旁轭。绕组呈扁平矩形，高压和低压绕组的线饼呈垂直布置、交错排列。壳式铁心的优点是铁心片规格少、心柱截面大而长度短、夹紧和固定方

1. 普通油浸式变压器的分类

普通油浸式变压器属于静止电气设备，按照不同的使用条件，其电压等级、容量、结构及冷却方式等也不一样。根据三相绕组结构及调压方式，35~500kV 油浸式电力变压器可按表 1-1 大致分类。一般认为，油浸式电力变压器容量为 630kVA 及以下的属小型变压器，800~6300kVA 的属中型变压器，8000~63000kVA 的为大型变压器，9000kVA 及以上的统称为特大型变压器。

2. 油浸式电力变压器的结构

油浸式电力变压器主要部件是绕组和铁心。绕组是变压器的电路，铁心是变压器的磁路，二者构成变压器的核心即电磁部分。除了电磁部分，变压器还有油箱、冷却装置、绝缘套管、调压和保护装置等

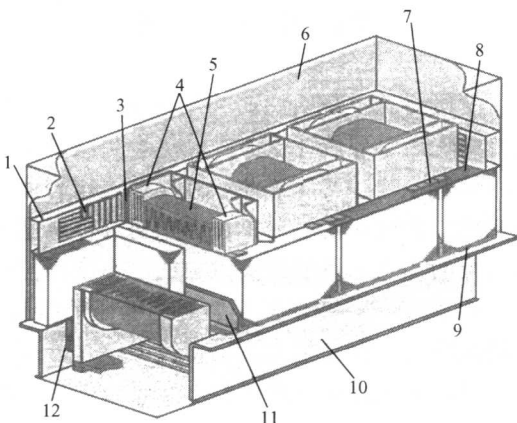


图 1-2 壳式变压器结构

- 1—铁心夹件；2—油箱屏蔽；3—上部木楔；4—低压绕组；5—高压绕组；6—上节油箱；7—楔形屏蔽；8—上部垫块；9—下部垫块；10—下节油箱；11—支撑梁；12—下部木楔

二、高燃点绝缘液和耐高温绝缘液浸式变压器

变压器油用作电气设备绝缘和冷却材料已有 70 多年的历史。实践证明变压器油有优良的电气、热工性能,是最好的液态绝缘材料,但存在燃点较低、易燃的缺点,不宜用在防火要求较高的场所。为了解决这一问题,人们开始寻找能在变压器中使用的不燃或难燃的冷却和绝缘介质,以代替变压器油。1929 年英国斯旺 (Swan) 公司发明了阿斯卡列 (Askarel) 不燃油。其主要成分是聚氯联苯 (PCB), PCB 具有很高的化学稳定性和电气绝缘强度。1933 年英国通用电气公司 (GEC) 制造了第一台使用聚氯联苯作为绝缘和冷却介质的变压器并投入运行。在其后的几十年中,各国共生产了数万台采用 PCB 的变压器。到 20 世纪 60 年代,发现聚氯联苯 (PCB) 在安全使用方面对环保有影响。日本在 1972 年立法禁止使用聚氯联苯,1975 年已停止生产聚氯联苯和聚氯联苯变压器。美国在 1977 年也已停止生产聚氯联苯。随后欧洲各国也相继停止使用聚氯联苯。我国在变压器中没有使用过聚氯联苯。至今美国仍有充有聚氯联苯 (PCB) 的变压器在运行。

发现生物对 PCB 不降解、有毒性、存在环境污染问题后,人们积极寻找 PCB 的代用油,做了大量的研究工作,相继研制出了硅油 (Silicon oil)、复敏绝缘液 (Formel)、Midel7131 合成脂、 β 液 (Beta)、 α 液 (Alpha)、聚 α 烯 (Paos) 等高燃点的液体绝缘介质,制造了注充硅油、Formel、Midel7131、 β 液、 α 液、聚 α 烯等高燃点液体绝缘介质的混合型、半混合型、复合型的液浸式变压器。这种变压器相对一般使用的配电变压器可缩小体积,改善其防火阻燃性能,在环境温度较高的使用场所超铭牌运行能力较强,可作为介于干式变压器和常规的油浸式变压器的一种选择。由于其价格适中,环保性能较好,有一定的发展空间,对 110kV 级变压器,也不失为一种可供选用的产品。国内已有半混合型和混合型的耐高温液浸式变压器在运行,相应的 IEC 60076—14《耐高温绝缘液浸式电力变压器》标准也正在制定中。

(一) 对高燃点绝缘液的要求

高燃点绝缘液是因变压器油防火性能不高而发展起来的,因而对它们有以下要求:

(1) 无毒,对人和环境无害。

(2) 与变压器所用的材料相容。这些材料包括金属 (硅钢片、铜、铝、锡),橡胶 (天然橡胶、异丁烯橡胶、氯丁橡胶、氟橡胶),器身橡胶 (绝缘纸、绝缘纸板、聚酯亚胺、聚四氟乙烯、聚丙烯、NOMEX 纸等),浸渍树脂 (硅树脂、环氧树脂、二苯醚等)。

(3) 其电气和热工性能与变压器油相近,不致影响变压器的绝缘和冷却性能。

(4) 高燃点绝缘液的燃点要比变压器油高 1 倍。20 世纪 70 年代,在寻找变压器油的代用品的过程中,人们要求代用品的着火点不低于 300°C ,且不“扩散火灾”。虽然 300°C 是一个任选温度参数值,但由于它比变压器油着火点高 1 倍以上,因此,被广泛用于表示某种绝缘液体是高燃点的“恰当指标”。

(5) 最好具有再充装的性能。一台已注充变压器油的变压器,在放油后大约有 5% 残油留在铁心与绕组中。硅油难以再注充,因硅油中若有万分之几的变压器油 (对于硅油即为杂质),就会使其绝缘性能降低,并产生泡沫。所以硅油变压器难以将硅油更换为变压器油和其他高燃点绝缘液。

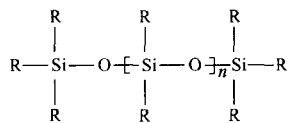
当用高燃点绝缘液取代变压器内的变压器油时,变压器必须用氟化物 (液) 清洗,以除去剩余的微量变压器油或其他高燃点绝缘液。如果未经清洗,则残余的杂质可降低其电气性

能和燃点,甚至达到不能接受的程度。目前高燃点绝缘液中 α -2液、 β 液具有再充装的功能。

(二) 常用的高燃点绝缘液

1. 硅油

由于聚氯联苯的环保问题,20世纪70年代人们发现硅油是可以代替聚氯联苯的介质。硅油是指分子中含有以 $[-\text{Si}-\text{O}-]$ 为骨架的线性低分子量聚硅氧烷液体化合物。硅油分子的典型结构如图1-3所示,一般 $n=15\sim 50$ 。若硅油分子结构中R



为甲基($-\text{CH}_3$),称为甲基硅油;若R一部分为甲基,一部分为苯基,称为苯甲基硅油。目前,适合变压器使用的硅油多为甲基硅油,甲基萘基聚硅氧烷、甲基十二烷基硅氧烷、甲基乙基硅氧烷和聚二甲基硅氧烷四种。其中甲基十二烷基硅氧烷使用较多。图1-3 硅油分子的典型结构

硅油最大的特点是无毒、不燃、凝点低、热稳定性好。但它的缺点是黏度大、浸渍困难,在高压电场下容易产生气体。当分子结构中引进部分苯基后,可以改善其吸气性。

硅油的稳定性高于变压器油和PCB,具有很强的耐受高温的能力,硅油的燃点为 400°C 左右,比矿物油高约 30°C ,超过 400°C 就会燃烧,点燃时释放的热和烟很少。当外部的热源消失后,或把液体的温度降到 400°C 以下,则燃烧便会停止,火会自动熄灭。这是因为硅油燃烧时放热的速度大大低于烃类油,而且燃烧时液体的上部会形成一层二氧化硅覆盖物,减少液体和氧气的接触,导致火自动熄灭。因此,硅油具有自熄灭的性能。

甲基硅油的介质损耗较小,随温度和频率的变化改变也小。硅油的电气强度比较低,一般只有 $35\sim 40\text{kV}$,而且发生击穿之后产生的碳粒很难下沉。硅油容易吸潮,吸潮之后介质损耗和介电常数增大,绝缘电阻和电气强度降低。

硅油的黏度比较大,不利于散热,但由于其热膨胀系数比变压器油高约 40% ,对流能力还是很好的。另一方面,由于硅油的热膨胀系数大,所以硅油变压器的储油柜比使用变压器油的变压器储油柜容积要大。

硅油和变压器一般常用的绝缘材料(绝缘纸、绝缘纸板、聚乙烯、NDMEX绝缘纸)相容,因此,可用硅油注入变压器而不需改变变压器的结构。此外,硅油还可以作为聚氯联苯的替代物。

硅油能从某些成分的天然橡胶和异丁烯橡胶中吸附其增塑剂,因此,在使用这些橡胶时,应先进行试验。此外,硅油不与黄铜、硅橡胶相容。

由于硅油具有不恰当的吸湿性,因此,硅油变压器不适用于潮湿环境。

硅油与矿物油性能对比见表1-3。

表 1-3

硅油与矿物油性能对比

项 目	IEC TC-10B 要 求	美国道康公司 DC-561 (硅油)	日 本 TSF451-50 (硅油)	晨光化工院 GY-101 (硅油)	25# 变压器油 (矿物油)
外观	透明无杂质	透明无杂质	透明无杂质	透明无杂质	透明无杂质
运动黏度/ $\times 10^6 \text{m}^2/\text{s}$	36.5~41.5 (40°C) 13.5~18.5 (100°C)	50 (25°C)	50 (25°C)	50 (25°C)	<13 (40°C)
闪点/ $^{\circ}\text{C}$	≥ 280	> 285	> 300	≥ 285	> 140

续表

项 目	IEC TC-10B 要 求	美国道康公司 DC-561 (硅油)	日 本 TSF451-50 (硅油)	晨光化工院 GY-101 (硅油)	25 [#] 变压器油 (矿物油)
自燃/℃	—	>315	—	365	165
水分/mg/kg	<60	50	—	—	—
酸值/mg (KOH) /g	≤0.02	—	—	—	<0.03
击穿电压/kV	≥50	≤35	>50	≥35	>45
介质损耗因数	0.0005 (90℃)	0.00002 (100Hz, 25℃)	0.0001 (50℃)	1.85×10^{-5} (100Hz, 23℃)	0.0005 (60Hz, 23℃)
体积电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$	1×10^{15} (100℃)	1×10^{15} (25℃)	$>1 \times 10^{15}$	7.1×10^{14} (23℃)	1×10^{14}
蒸发损失/%	<0.3	—	—	—	—
介电常数	—	2.71 (100Hz, 25℃)	2.5 (100℃)	2.7 (100Hz, 23℃)	2.21 (60Hz, 23℃)
密度/g/cm ³	—	0.96 (25℃)	0.962 (25℃)	0.96 (25℃)	0.895 (20℃)
热膨胀系数/1/℃	1.06×10^{-3}	—	—	1.04×10^{-3}	6.6×10^{-4} (20℃)

美国 UL 认证试验室根据美国材料试验学会 (ASTM) 规定, 对石油类产品的可燃值的测定结果表明硅油的热性能是良好的, 见表 1-4。硅油的电气强度如图 1-4 所示。硅油和其他绝缘介质的典型性能见表 1-5。由图 1-4 可见, 硅油即使在含水量比较大的情况下, 击穿

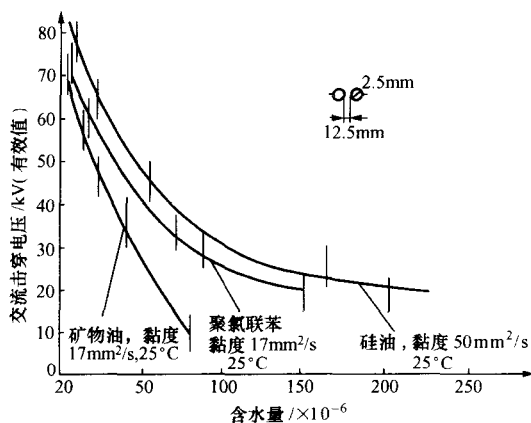


图 1-4 硅油和变压器油的击穿电压 (球形标准电场)

表 1-4 石油类的可燃值

介 质	可燃值 (UL 试验室测定值)
水	0
R-113 (氟利昂)	0
变压器聚氯联苯	1~2
硅 油	4~5
变压器油	20~30
煤 油	30~40
乙 醇	60~70
汽 油	90~100
乙 醚	100

电压仍比矿物油要高。

表 1-5 硅油和其他绝缘介质的典型性能

绝缘介质名称		硅 油	变压器油	聚氯联苯
化 学	化学名称	聚二甲基硅氧烷	石蜡基或环烷基碳氢化合物	5 氯联苯+3 氯苯
	化学结构	$[(CH_2)_2SiO]_n(CH_3)_2$	C_nH_m	$C_{12}H_5Cl_5$ & $C_6H_3Cl_3$
绝 缘 性 能	电气强度/kV	40	40	40
	介电常数	2.7	2.2	4.3
	介质损耗因数 (25℃/100℃)	0.0001/0.0015	0.0004/0.009	0.0003/0.04
	体积电阻/ $\Omega \cdot cm$ (25℃)	1.0×10^{15}	1.0×10^{12}	5.0×10^{12}
热 性 能	倾点/℃	-55	-57	-37
	热导率/W/($m^2 \cdot ^\circ C$)	0.1626	0.1310	0.1265
	比热容/J/($kg \cdot ^\circ C$) (25℃)	1713	1870	1256
	热膨胀系数/1/℃	0.00104	0.00076	0.0007
物 理 性 能	密度/g/cm ³ (25℃)	0.960	0.875	1.525
	界面张力/mN/m	16.8	40	40.5
	黏度/mm ² /s (25℃/50℃)	50/32	16/8	15/8
	闪点/℃	300	150	195
	着火点/℃	343	160	无
	燃烧时主要分解物	SiO ₂ , H ₂ , CO, H ₂ O, CO ₂ , CH _n	H ₂ , CO, H ₂ O, CO ₂ , CH _n	HCl, C, H ₂ O, CH, CO, CO ₂ , Dioxins, 呔喃

自 1974 年第一台硅油变压器在美国问世以来，据统计，其产量已超过 3 万台。1985 年我国吉林省通化变压器厂成功试制出地铁用 315kVA 硅油变压器，并已在北京地铁投入运行，效果良好。由于国内硅油售价过高，且货源有限，从而限制了大批量的生产和推广硅油变压器。

2. 复敏绝缘液体 (Formel)

复敏绝缘液体 (Formel) 简称 F 液，为四氟乙烯、三氟乙烷、二氟乙烷、二氟已烷的混合物，是英国 20 世纪 80 年代初开发的不燃液体介质，对人体没有毒性，在电气、环保和生物降解方面性能优良。其特性见表 1-6。

表 1-6 复敏绝缘液体 (Formel) 的典型特性

着火点/℃	—	体积电阻/ $\Omega \cdot cm$	1014
闪点/℃	—	沸点/℃	102
自燃/℃	—	凝点/℃	-33
TLV/ $\times 10^{-6}$	50	密度/kg/L	1.62
电气强度/kV	70	黏度/Pa · s	0.884
介质损耗因素 (23℃)	0.001	热膨胀系数/1/℃	1.07210^{-3}

1983 年第一台 F 液浸变压器投入运行，到 20 世纪 90 年代初在美国、日本、加拿大、

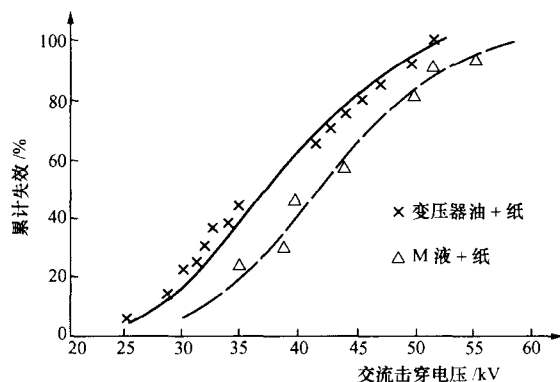


图 1-5 变压器油与 M 液交流击穿电压性能比较

可自行生物降解。其燃点为 275°C ，为变压器油的 1.7 倍。与变压器油相比，尽管其黏度较大，但比热和导热性较高、热膨胀小，因此其冷却性能与变压器油相当。其击穿电压较高（见图 1-5、图 1-6），凝固点低，且不宜受潮。M 液与变压器所用材料相容。500kVA 变压器油与 M 液温升比较见表 1-7，由于其性能与变压器油基本一样，深受制造厂和用户的重视。

表 1-7 500kVA 变压器油与 M 液

温升比较 (K)

温升部位	变压器油	M 液
顶部	54	55
中部	42.3	43.2
绕组中部	60.4	60.7

M 液由德国 Beek 公司生产，国内尚无厂家生产此产品。

英国 GEC 公司 1973 年试制出首台 M 液变压器，到 1986 年已有超过 1000 台 M 液变压器在英、德、美、加等国投入运行，其最大容量已达 12000kVA，电压达到 40kV。我国沈阳变压器厂 1989 年与德国合作，制造了 2 台 630kVA 的 M 液变压器，运行在大港发电厂。

4. β 液

β 液全称 Beta Fluid 高燃点液，是一种提高变压器和开关装置安全性的绝缘液体，能有效抑制电弧着火或燃烧，符合 ASTM D5222《高燃油》标准，因此也叫作高燃点 β 液。 β 液是从 100% 碳氢化合物石油中精炼得到的，生物可降解，无毒，对环境无污染。它与开关和变压器结构中所有材料，如硅钢片、铜线、绝缘材料等有很好的相容性。 β 液的燃点为 308°C ，是工业标准的防火绝缘油，价格适中，只是黏度比变压器油稍大，散热能力比变压器油低 10% 左右，应在变压器油道和散热上给予足够重视。

β 液作为变压器绝缘和冷却介质，具有以下特点和性能：

澳大利亚约有 600 台浸 F 液的配电变压器在运。浸 F 液的变压器尺寸紧凑，密封性好，维护方便，过载后可避免绝缘老化，热传导性能良好。我国早在 1988 年，广州高压电器厂就已成功研制充 Formel 绝缘液的 S12 型配电变压器，容量为 1000~1600kVA，电压为 6~11kV，同年通过省级鉴定，由于 F 液价高、来源困难，未获推广。

3. Midel7131 合成脂

Midel7131 合成脂简称 M 液，其化学成分为季戊四醇聚酯，是无毒透明液体，

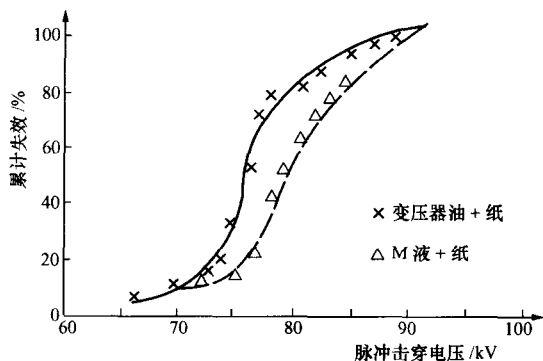


图 1-6 变压器油与 M 液脉冲击穿电压性能相比

(1) 燃点 308°C 、闪点 272°C ，几乎是普通变压器油的 2 倍。 β 液完全燃烧的产物为 CO_2 和 H_2O ，不完全燃烧产物为 CO_2 、 H_2O 和 CO ，电弧作用下产物为 C_2H_2 。

(2) 具有较高的绝缘强度，介电常数是 2.2，与普通变压器油基本相当。

(3) 可完全生物降解并且没有毒性。生长在土壤中的微生物把它作为食物链的一部分对其进行分解，所以 β 液不会在环境中长期聚集而造成污染。

(4) β 液的密度 (20°C) 是 $0.86\text{g}/\text{mm}^3$ 。

(5) 与变压器油有相同的热膨胀系数。

(6) β 液的黏度 (100°C) 为 12.2cSt，普通油的黏度约为 3cSt， β 液的黏度明显高于普通变压器油的黏度。

(7) β 液的凝点为 -24°C 。但实际表明，当温度在 -10°C 时， β 液就变得很黏稠了，几乎不能流动。所以使用环境温度应在 -10°C 以上，以保证绕组、铁心的散热能力。

(8) β 液经过处理后可以再循环使用， β 液的价格约为普通变压器油价格的 5 倍。

β 液由美国 DSI 公司生产并销售。

β 液浸变压器和普通油浸变压器相比具有良好的技术经济性，为电力用户提供一个新的选择。沈阳变压器研究所从 1999 年起即对 β 液在我国配电变压器和电力变压器上的应用进行了研究，2000 年 4 月与美国 DSI 公司签约，生产 β 液浸 SRZ9 型 110kV、31500kVA 电力变压器和 SR9 型 10kV、1600kVA 配电变压器。江苏中电电气集团自 2001 年开始研制采用耐热达 220°C 的杜邦 NDMEX 绝缘纸与 β 液结合的液浸式配电变压器，符合美国标准 NEC450—23，在结构设计上为全密封，采用气垫式和压力释放阀保护，高低压套管采用全绝缘结构，不仅使外形缩小，且能可靠保证人身安全，具有免维护、过载能力强、噪声低等优点，既适用于安全、防火的高层建筑，又适宜户外运行。

5. α -1 液

α -1 液以合成碳氢化合物 (86% C 和 14% H) 为基础，分子量 632，为高燃点绝缘液，性能与 β 液相近。 α -1 液为美国 DSI 公司生产，具有以下特性：

(1) 黏度中等，比变压器油、有机酯、M 液高，但比硅油、难燃石油低，满足有载分接开关 (TPC) 的要求，与变压器油类似、相容。

(2) 有较好的低温流动性。

(3) 可用于变压器有载分接开关。

(4) 100% 生物降解。

6. α -2 液

α -2 液是 DSI 公司生产的又一绝缘液，性能与 α -1 液接近。 α -2 液适宜在温度很低的条件下运行，油的黏度很低，在 -70°C 条件下流动性仍很好；含有抗氧化剂，可以在 150°C 条件下运行，和常规变压器所用的绝缘材料相容；它的燃点为 250°C ，比常规变压器油的燃点高约 100°C 。 α -2 液的优点是可以回复填装。

目前许多变压器制造商已采用 α -1 液，如 ABB、B&B、Interstat、Ferranti、Jimlco、Kuhlman Neeltran、Tennessee 公司等，产品用户主要在南、北美洲及欧洲。

7. 聚 α 烯

自 20 世纪 70 年代中期 PCB 停止生产以来，已出现了若干代用液，但各有缺点。硅基液不可降解，缺乏回复变换操作功能；脂基液性能不错，却非常昂贵；石油液是高黏滞性

的, 低温性能欠佳。

聚 α 烯(PAOS)是针对上述代用液的缺点发展起来的合成石蜡基碳氢化合物, 黏度与低温性能都有改善, 有较好的电气性能。

PAOS是由聚合接着还原较小的碳氢化合物分子和I-癸烯制成的。PAOS仅由碳与氢两个元素组成, 其化学结构几乎完全是直链的, 在 α 位置上有一个复链, 由于制造过程中不遇杂质, 因而有极好的电气性能和氧化稳定性。可以制成各种分子量的PAOS, 以改变其性能。PAOS防火高于 300°C , 则要求分子量为630~650。

顺便提到分子量与液体的黏度和燃点的关系, 分子量低则黏度低、传热好、燃点低, 反之则相反。要传热好又要燃点高, 只能在某一分子量上去平衡, 传热与燃点都具中间值。

PAOS由于有较好的性能, 已在变压器上应用, 并逐步扩大, 但我国尚未使用。

硅油、M液、 α 液、 β 液等诸多高燃点油种, 综合各种因素还是 β 液最为合适。 β 液无毒, 与变压器用全部材料都相容, 燃点 308°C , 价格适中(约20元/kg), 只是黏度比变压器油稍大, 只需在油道和散热上给予足够重视就可以了。同时, 生产 β 液变压器基本不需特殊的专用设备。

第二节 气体绝缘材料和气体绝缘变压器

气体绝缘材料主要指 SF_6 气体。 SF_6 气体在常态下是一种无色、无嗅、无毒、不燃、无腐蚀性、化学性能稳定的惰性气体, 绝缘性能和灭弧性能明显优于变压器油, 可以广泛地用于断路器、组合电器、变压器和互感器等电气设备上。

一、 SF_6 气体的性能

1. 交流电气强度

SF_6 气体优良的电气特性主要体现在绝缘特性和熄灭电弧特性上。由于 SF_6 的负电性(即吸附电子的能力), 很难被击穿, 即使经电弧放电, 亦能很快恢复, 具有很高的介电强度。在均匀电场中, SF_6 绝缘强度约为空气的2.3~3倍, 但比变压器油低, 仅相当于变

压器油绝缘强度的2/3。但随着气体压力的提高, 其耐压强度将会随之提高。在0.25MPa气压下, 其绝缘强度与变压器油相当; 当气体压力为0.3~0.4MPa时, SF_6 气体的击穿强度大于等于变压器油的强度。 SF_6 气体和空气的击穿电压如图1-7所示。

SF_6 气体压力的提高, 关系到气体绝缘变压器油箱的机械强度和制造成本的提高, 因此, 要权衡绝缘强度与制造成本两者最佳配合的气体压力。国外 SF_6 气体绝缘变压器产品中, 6~10kV级一般采用的 SF_6 气体压力为0.12MPa; 66~110kV级为0.13~0.14MPa(20°C 时绝对压力), 在满载时最大压力可以升到0.18MPa; 275kV级为0.4MPa; 500kV级为0.6MPa。随着压力的增大, 其外壳(箱体)的结构必将日益复杂。

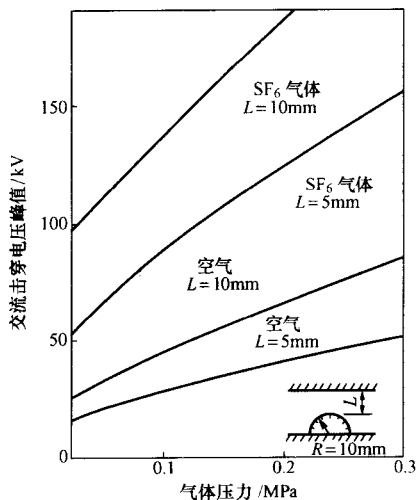


图 1-7 SF_6 气体和空气的击穿电压