



国家电网
STATE GRID

国网技术学院培训系列教材

绝缘油及六氟化硫试验与分析

周桂萍 主 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网
STATE GRID

国网技术学院培训系列教材

绝缘油及六氟化硫试验与分析

周桂萍 主 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为了规范国家电网公司新入职员工培训内容,提高培训质量,国网技术学院依据国家电网公司新入职员工培训方案,结合自身实训设施和新员工培训特点,编写完成《国网技术学院培训系列教材》。

本书为《国网技术学院培训系列教材 绝缘油及六氟化硫试验与分析》分册,共分3个部分,主要包括绝缘油质量评价与监督体系、油中溶解气体色谱分析原理和应用、SF₆气体质量监督与评价。

本书可作为国家电网公司新入职员工的培训教学用书,也可作为各电力培训中心及电力职业院校的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

绝缘油及六氟化硫试验与分析 / 周桂萍主编. —北京:中国电力出版社, 2013.3

国网技术学院培训系列教材

ISBN 978-7-5123-4123-4

I. ①绝… II. ①周… III. ①液体绝缘材料—试验—职业培训—教材②气体绝缘材料—氟化物—试验—职业培训—教材 IV. ①TM214.06②TM213.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 043195 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京雁林吉兆印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013年3月第一版 2013年3月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 19.75印张 257千字

印数 0001—3000册 定价 60.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

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

《国网技术学院培训系列教材》

编 委 会

主	任	赵建国	钱 平		
副	主	任	费耀山	程 剑	马放瑞 李勤道
委	员	康梦君	张效胜	范永忠	石 椿
		孙明晔	肖成芳	黄保海	马敬卫
		王立志	陈威斋	冯 靖	张进久
		马 骐	王立新	王云飞	于洲春
		杨 健	高建国	陈祖坤	商自申
		王付生	刘汝水	赵桂廷	刘广艳
编写组组长		费耀山			
副 组 长		黄保海	陈祖坤	商自申	
成 员		周桂萍	李艳萍	宋云京	胥 婷
		冯凤玲	潘俊香	张杏梅	赵 利



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

前言

为贯彻落实国家电网公司“人才强企”战略，积极服务公司“三集五大”体系建设和智能电网发展对技能人才的需求，打造高素质的技能人才队伍，提升企业素质、队伍素质，增强新员工培训的针对性和时效性，创新国内一流、国际先进的示范性培训专业和标杆性培训项目，国网技术学院组织院内专职培训师、兼职培训师及国家电网公司系统内生产技术、技能专家，结合国网技术学院实训设施和新员工培训特点，坚持面向现场主流技术、技能发展趋势的原则，编写了《国网技术学院培训系列教材》。

《国网技术学院培训系列教材》以培养职业能力为出发点，注重从工作领域向学习领域的转换，注重情境教学模式，把“教、学、做”融为一体，适应成年人学习特点，以达到拓展思路、传授方法和固定习惯的目的。

《国网技术学院培训系列教材》开发坚持系统、精炼、实用、配套的原则，整体规划，统一协调，分步实施。教材编写针对岗位特点，分析岗位知识、技术、技能需求，强化技能培训、体现情境教学、覆盖业务范围、适当延伸视野，向学员提供全面的岗位成长所需要的素质、技能和管理知识。编写过程中，广泛调研和比较分析现有教材，充分吸取其他培训单位在探索培养高素质技能人才和教材建设方面取得的成功经验，依托行业优势，校企合作，与行业企业共同开发完成。

本书为《国网技术学院培训系列教材 绝缘油及六氟化硫试验与分析》分册。全书由周桂萍主编，李艳萍、胥婷、冯凤玲、潘俊香等参编，河北

电力科学研究院马慧芳高级工程师担任主审，山东电力研究院于乃海，国网技术学院宋云京、牛林、刘广艳参审。

由于编者自身认识水平和编写时间的局限性，本系列教材难免存在疏漏之处，恳请各位专家及读者不吝赐教，帮助我们不断提高培训水平。

编 者

2013 年 2 月



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

目 录

前言

情境一 绝缘油质量评价与监督体系	1
任务一 绝缘油的认知	2
任务二 绝缘油质量特性评价	14
任务三 绝缘油新油验收的依据	41
任务四 绝缘油全过程技术监督	57
实训项目 1 绝缘油运动黏度的测定	77
实训项目 2 石油产品凝（倾）点的测定	82
实训项目 3 石油产品闭口闪点的测定	84
实训项目 4 石油产品油对水界面张力测定	88
实训项目 5 绝缘油中水分含量的测定	93
实训项目 6 运行中变压器油水溶性酸的测定	98
实训项目 7 石油产品酸值的测定	103
实训项目 8 绝缘油击穿电压的测定	109
实训项目 9 绝缘油介质损耗因数的测定	114
实训项目 10 绝缘油体积电阻率的测定	118
情境二 油中溶解气体色谱分析原理和应用	121
任务一 油中溶解气体分析	122

任务二 油中溶解气体的检测方法	137
任务三 油中溶解气体组分含量的测定	148
任务四 充油电气设备潜伏性故障诊断	166
实训项目 1 绝缘油中溶解气体的脱出	191
实训项目 2 绝缘油中溶解气体的色谱分析	195
实训项目 3 绝缘油含气量的色谱分析	204
情境三 SF ₆ 气体质量监督与评价	212
任务一 SF ₆ 气体的认知	213
任务二 SF ₆ 新气的质量验收	228
任务三 SF ₆ 气体绝缘设备的现场充装工艺与质量监督	234
任务四 SF ₆ 设备运行气体的管理	251
实训项目 1 SF ₆ 气体湿度的测定	275
实训项目 2 SF ₆ 气体中空气、CF ₄ 的气相色谱测定法	280
附录 1 水的饱和蒸汽压表	284
附录 2 冰的饱和蒸汽压表	289
附录 3 SF ₆ 气体露点和体积分数换算对照表	293
附录 4 SF ₆ 气体测量结果的温度折算表	297
参考文献	305

绝缘油质量评价与监督体系

【情境描述】

本单元设计以下 4 项任务：

任务一：绝缘油的认知。

任务二：绝缘油质量特性评价。

任务三：绝缘油新油验收的依据。

任务四：绝缘油全过程技术监督。

通过任务一，使学员掌握绝缘油的来源和基本组成，了解绝缘油的分类，掌握绝缘油在充油电气设备中的作用。通过任务二，使学员掌握绝缘油的质量特性指标，掌握部分质量特性检测项目的原理和操作技术要求。通过任务三，使学员熟悉绝缘油新油质量验收的标准体系，掌握新油验收的方法和步骤，能依据相关标准评价新油质量。通过任务四，使学员能掌握运行油质量标准及应用原则，掌握设备运行阶段绝缘油检测项目、周期和质量要求，正确采集运行油，根据设备情况评价运行油质量，掌握绝缘油全过程技术监督内容和要求。

【教学目标】

1. 知识目标

- (1) 掌握绝缘油的基本组成和作用。
- (2) 掌握绝缘油的质量特性指标。



(3) 掌握绝缘油新油与运行油质量标准体系。

(4) 掌握绝缘油全过程技术监督内容和要求。

2. 能力（技能）目标

(1) 能依据相关标准评价新油质量。

(2) 能根据设备情况评价运行油质量。

(3) 掌握不同检测项目用油样的取样方法。

(4) 掌握设备安装阶段绝缘油检测项目和质量要求。

(5) 掌握设备运行阶段绝缘油检测项目、周期和质量要求。

【教学环境】

教学场所具有黑板、计算机、投影仪，可播放 PPT 课件及教学视频。实训场所具有运动黏度测定仪、界面张力测定仪、闭口闪点测定仪、倾点测定仪、微量水分测定仪、石油产品水溶性酸测定仪、石油产品酸值测定仪、绝缘介损及电阻率自动测定仪、绝缘油击穿电压全自动测定仪、注射器、针头等。

任务一 绝缘油的认知

【教学目标】

通过对本项任务的学习，能掌握绝缘油的来源和基本组成，了解绝缘油的分类及作用，掌握充油电气设备对绝缘油的基本要求；能对绝缘油有清晰的认知，为后续任务的学习打下坚实的基础；能够培养严谨科学的思维方式，增加安全生产意识。

【任务描述】

绝缘油在充油电气设备中主要起绝缘、散热和灭弧的作用，其质量优

劣直接影响到电气设备的安全运行。从事现场电气设备检修工作的人员，必须了解绝缘油的基本组成和特点、质量特性是通过哪些指标来表征的、绝缘油在电气设备中的作用以及运行过程中质量指标的变化规律。

目前用于变压器中的绝缘油 98% 以上为矿物型绝缘油，它是从原油（即天然石油）中炼制得到的，其主要成分是烷烃、环烷烃、芳香烃等烃类化合物。这些烃类化合物的不同组成决定了绝缘油的分类特征和质量特性。

【任务准备】

问题与思考：

1. 作为变压器的主要绝缘介质，绝缘油是从哪里来的？
2. 为什么绝缘油的质量优劣能够影响到充油电气设备的运行安全？

【任务实施】

一、绝缘油来源

根据油品加工来源不同，一般可将变压器用绝缘油分为矿物型绝缘油和合成型绝缘油两类。由于制备方便，绝缘性能好，目前用于变压器中的绝缘油 98% 以上为矿物型绝缘油。合成型绝缘油在变压器中的应用主要是基于变压器本身安全性和维护性的需求而产生的，用量很少。绝缘油的质量验收标准体系主要是针对矿物型绝缘油。

矿物型绝缘油是从天然石油中炼制得到的。天然石油又称原油，是由动物、细菌、藻类等死后埋藏在不断下沉缺氧的海湾、湖泊等地，经过漫长复杂的物理化学变化而逐渐形成的。原油是一种黏稠的具有可燃性的液体矿物，依据其产地不同，颜色差别很大，有红色、金黄色、墨绿色、黑色、褐红色等，其中胶质、沥青质的含量越高，颜色就越深。一般原油的颜色越浅代表油质就越好。

原油由不同的碳氢化合物混合组成，密度通常在 $0.77 \sim 0.96 \text{ g/cm}^3$ 。原



油的元素组成主要是碳（83%~87%）和氢（11%~14%）；此外，还有硫（0.06%~0.8%）、氮（0.02%~1.7%）、氧（0.08%~1.82%）及微量金属元素（镍、钒、铁、锑等）。原油的成分主要有油质（主要成分）、胶质（一种黏性的半固体物质）、沥青质（暗褐色或黑色脆性固体物质）和碳质（一种非碳氢化合物）。

二、绝缘油组成

电气设备所用绝缘油是原油经过蒸馏和各种精制工艺加工而成的优质石油产品，其性能在一定程度上与原油的特性有关，其结构组成与原油基本一致。烃类化合物（由碳、氢两种元素构成的化合物）是原油中最基本的化合物，其他各类有机化合物都可视为其相应烃类的衍生物。按照碳、氢元素排列组合方式的不同，烃类化合物主要可分为烷烃、环烷烃和芳香烃三大类。不同烃类的理化性质不同，对石油产品性能的影响也各不相同。

（一）烷烃

烷烃分子的碳原子之间以单键结合，属于饱和烃，其同系物的化学通式为 C_nH_{2n+2} （ n 为大于或等于 1 的正整数）。根据其分子结构，可将烷烃分为直链型烷烃（也称正构烷烃）和支链型烷烃（也称异构烷烃）。以 5 个碳原子的烷烃为例，直链型结构的称为正戊烷 [见图 1-1 (a)]，支链型结构的为 2-甲基丁烷，又称异戊烷 [见图 1-1 (b)] 和 2, 2-二甲基丙烷，又称新戊烷 [见图 1-1 (c)]。

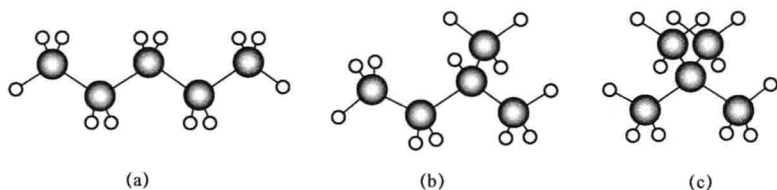


图 1-1 烷烃结构

(a) 正戊烷；(b) 异戊烷；(c) 新戊烷



直链型烷烃的熔点、沸点通常随分子质量的增加而增加（见图 1-2、图 1-3）。常温常压下，含 1~4 个碳原子的烷烃呈气态，这是天然气的主要成分；含 5~15 个碳原子的烷烃呈液态，是原油的主要成分；含 16 个以上碳原子的烷烃呈固态，俗称石蜡，悬浮于原油中。

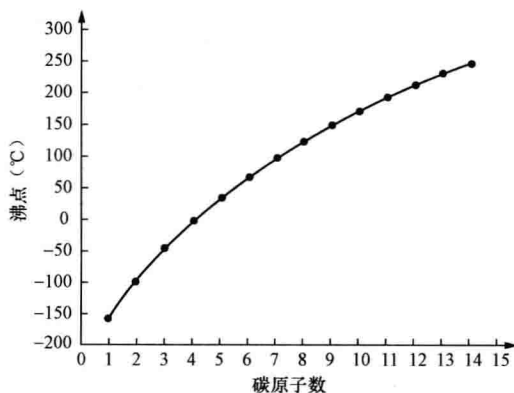


图 1-2 正构烷烃的沸点曲线

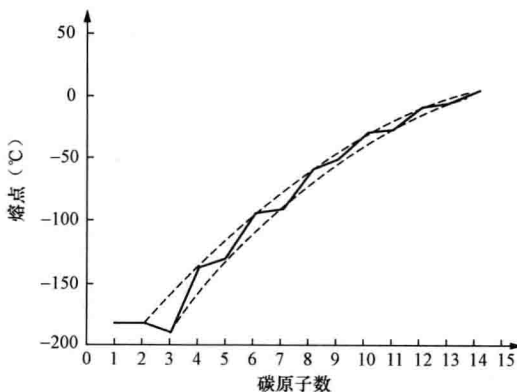


图 1-3 正构烷烃的熔点曲线

同碳原子数的正构烷烃与异构烷烃相比，其熔点和沸点都较高（见表

1-1)。因此，大分子正构烷烃在较高的温度下更易于凝固，形成石蜡，故俗称为石蜡烃，简称石蜡。通常将烷烃含量超过 50% 的石油称为石蜡基石油。

表 1-1 戊烷各异构体的沸点比较

名 称	分子式	沸点 (°C)
正戊烷	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$	36.1
异戊烷	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{CH}_3$	25
新戊烷	$(\text{CH}_3)_3\text{CCH}_3$	9

由于烷烃是饱和烃，它的化学性质较稳定，在一般情况下，不会与强酸、强碱、强氧化剂等试剂进行化学反应，但是在高温或催化剂的作用下可以被氧化，发生断链。在隔绝氧气加热条件下，烷烃分子会发生不同程度的断裂，生成小分子烷烃和烯烃，称为裂化。

烷烃还具有黏度高、闪点高、凝固点高、黏温性好的特点，但与其他烃类相比，其热稳定性较差，对水和氧化产物的溶解能力也较差。石蜡基石油特别适合炼制对黏温性要求较高的汽轮机用润滑油。由于烷烃对抗氧化剂的感受性较好，烷烃组分也是绝缘油的良好成分。

(二) 环烷烃

环烷烃是碳原子以单键形式连成环状的饱和烃，其结构有单环、双环和多环之分，其中单环环烷烃的化学通式为 C_nH_{2n} (n 为大于或等于 3 的正整数)，与烯烃相同。最简单的环烷烃是环丙烷，见图 1-4。

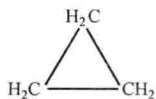


图 1-4 环丙烷结构

环烷烃几乎是一切石油的主要成分，它的密度比水小，并且不溶于水，沸点也比同碳原子数的烷烃高。三元和四元环烷烃由于分子中的张力较大，因此其化学性质比较活泼，与烯烃相似，容易与氢气、溴气发生加成反应。五元以上的环烷烃的性质与

烷烃相似，比较稳定，但是在高温或催化剂的作用下，它也可被氧化生成醇、酸等产物。相比而言，环烷烃的热稳定性比烷烃更优越。

由于环烷烃还具有较高的抗爆性、低凝点、低黏度、良好的低温流动性和介电性能等特点，因此以环烷烃为主要成分的环境基石油（环烷烃含量超过 50% 的石油），是炼制电气绝缘油的最好原料。

（三）芳香烃

芳香烃是指含有苯环结构的烃类化合物，根据分子中所含苯环的数目，可将芳香烃分为单环和多环两大类。单环芳香烃包括苯及苯的同系物，化学通式为 C_nH_{2n-6} （ n 为大于或等于 6 的正整数）。多环芳香烃是指分子中有一个以上苯环的化合物，如联苯、二苯基甲烷、萘、蒽等（见图 1-5）。

苯、甲苯等苯的低分子质量同系物都是无色液体，不溶于水，易溶于石油醚、醇等有机溶剂。芳香烃一般都比水轻，沸点随分子质量的升高而升高，熔点除与分子质量有关外，还与结构有关。苯及其同系物有毒，长期吸入它们的蒸气会损坏造血器官和神经系统。多环芳香烃分子中两个或两个以上的苯环，以共用两个邻位碳原子的方式稠和在一起的化合物称为稠环芳香烃，如萘、蒽，大多稠环芳香烃具有致癌作用。

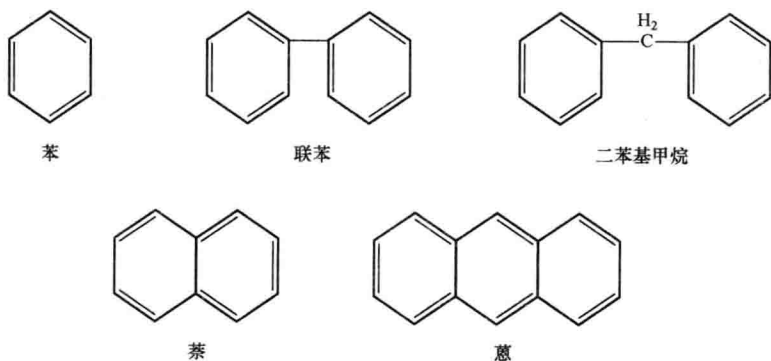


图 1-5 芳香烃基本结构



芳香烃比烷烃和环烷烃的化学性质活泼，它们的活性是由侧链的大小与数量决定的。因为苯的结构其实并不像分子结构式上表示的那样具有碳双键，因此它不具备烯烃的典型化学性质。苯环本身是比较稳定的，不易被氧化，不易进行加成反应。但是在一定条件下，如在加温或催化剂的作用下，芳香烃仍可与氢气、氯气等发生加成反应，生成环烷烃或其衍生物。在较高温度（1000℃以上）及特殊催化剂的作用下，苯才可被空气中的氧气氧化开环，因此其热稳定性比烷烃、环烷烃都好。

原油中芳香烃的含量相对较低，一般不超过 30%。由于芳香烃具有独特的不饱和共轭结构，因此它对成品油性能的影响也较为复杂。一般来说，单环芳香烃化学稳定性较好，其电气性能与环烷烃没有明显的差别；而多环芳香烃的化学稳定性较差，且随环数的增多，其稳定性进一步降低，不饱和性会增强。

与单环芳香烃不同，多环芳香烃易与氢发生加成反应，易被空气中的氧气氧化形成酸、醛、酚等化合物，甚至形成油泥，使油品酸值升高，颜色加深，还会降低油品的闪点，因此它通常是炼制绝缘油时需要去除的不良成分。

然而，正是由于多环芳香烃的不稳定性，它可以通过自身被氧化而保护其他烃类化合物，提高绝缘油在运行过程中抗氧化和抗酸能力。多环芳香烃在外界能量的作用下易于断裂，与运行充油电气设备产生的一H、—CH₃等自由基发生加成反应，因此具有一定的吸气性。另外，芳香烃极性较强，具有一定的溶解性，对运行油氧化产生的极性物质具有较强的溶解能力，可减少油泥的析出。除此之外，多环芳香烃还具有很好的电压稳定作用，可以代替液体电介质中的电压稳压器延缓油品老化的过程。因此，多环芳香烃对于电气绝缘油来说也有有益的一面。

（四）非烃类有机化合物

除主要的烃类化合物以外，原油中还含有一定量的非烃类有机化合物。



这些非烃类化合物是指分子结构中含有硫、氮、氧等元素的有机化合物及胶质、沥青质等。其中硫、氮、氧三种元素一般占原油的 2% 左右，其化合物含量占 10%~20%，甚至更多，它们主要集中在原油的高沸点馏分中。

原油中非烃类化合物可分为含氧化合物、含硫化合物、含氮化合物、胶质和沥青质四类。含氧化合物主要是酸性含氧化合物，其中环烷酸最多，占酸性物质 90% 以上，还有少量的脂肪酸、微量的芳香酸、环烷—芳香酸以及沥青酸。原油中含硫量的大小是评价原油性质的一项重要指标，通常将原油中含硫量大于 2% 的称为高硫石油，低于 0.5% 的称为低硫石油，介于 0.5%~2% 之间的称为中硫石油。我国多数原油属于低硫石油（如大庆原油）和中硫石油（如胜利原油）。原油中的含氮量变化不大，为 0.1%~0.4%，其含量与胶质、沥青质密切相关。胶质、沥青质是一些含有 C、H、O、N、S 等元素的多环化合物的混合物，其结构仍不清楚，大致是一些分子质量很高的杂环化合物的混合物。能够溶于酚的胶质在空气中可氧化缩合形成沥青质，不能溶于酚的是一些高分子的胶质，它们氧化后可生成酸，不能生成沥青质。胶质、沥青质可使油品颜色加深、氧化安定性下降、黏温性能变差、氧化后形成积碳。

虽然非烃类化合物在天然石油中的含量很少，但是其分子中具有极性基团，化学稳定性、热稳定性及光稳定性都很差，是形成油泥沉淀的主要成分，一般在炼制过程中应尽量去除。另外，由于这些组分的存在，增加了石油加工的难度和成本，因此含非烃类化合物较高的天然石油的经济价值相对较低。

三、绝缘油类型

原油种类繁多，成分复杂，分类方法也多种多样，但是按照主要馏分的特性可将原油大致分为环烷基原油、石蜡基原油和中间基原油三大类。用于炼制绝缘油的原油选择以环烷基原油和石蜡基原油为主，目前公认优先选择环烷基原油来炼制绝缘油。