

油煤分析与技术

薛金凤 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

油煤分析与技术/薛金凤编著. —武汉:武汉大学出版社,2010.9
ISBN 978-7-307-08071-3

I. 油… II. 薛… III. ①电力系统—润滑油—分析 ②电厂燃料系
统—煤—分析 IV. TE626.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 150104 号

责任编辑:任仕元 于 涛 责任校对:黄添生 版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北省金海印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:14.25 字数:328千字 插页:1

版次:2010年9月第1版 2010年9月第1次印刷

ISBN 978-7-307-08071-3/TH·15 定价:28.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

在我国电力装机总量中，火力发电所占比例最大，达 75% 以上。在未来 30 年内，这种以火电为主的状况不会发生很大改变。

煤炭和石油是火力发电厂赖以生存和发展的物质基础，其中煤炭是我国最主要的能源资源。由于现有能源生产技术落后，目前的煤炭利用效率仅在 27%~28% 之间，浪费严重。提高能源生产质量和能源生产率，加大煤电转化率，是火电厂的一项长期而艰巨的任务。

电力工业生产中对动力燃料和润滑绝缘油等的质量控制的好坏不仅直接影响设备的安全和寿命，而且影响煤炭能量的利用效率。为了建设节约型社会，为了我国工业的自身发展，避免事故发生，就必须充分利用石油、煤炭资源，切实做好各种煤样的采制和各项指标的化验以及电力用油的质量监督和运行维护工作。

本教材是根据电力用油和电力燃煤课程教学基本要求编写的。全书共分十章：第一章，石油及其产品的组成、分类和质量标准；第二章，油品的理化、电气性能；第三章，电力用油的运行监督和维护；第四章，充油电器设备潜伏性故障诊断；第五章，六氟化硫气体；第六章，煤炭的分类、组成和基准换算；第七章，煤样的采集与制备；第八章，煤的组成成分分析；第九章，煤的发热量检测与应用；第十章，煤的物理特性与检测。

本书编写的指导思想是立足于油、煤分析的基本原理、基本理论、基本知识、基本概念以及基本技能的培养和训练，力求理论联系实际，注重培养学生独立分析和解决油、煤分析中的问题的实际能力。全书适度地增加或反映了近年来油、煤分析中的新技术、新方法和新内容。

本书主要供电厂化学专业的学生使用，同时也可供从事油务工作、煤质检测工作的一线人员使用，对其他用油、用煤行业的相关人员也具有参考价值。

电厂化学油、煤分析监督技术对电力生产影响很大，其内容丰富而又庞杂，技术性强且变化又快，因此，书中难以一一尽述。此外，由于水平有限和编写时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正，以期修订再版时加以更正。

编著者

2010 年 6 月

目 录

第一章 石油及其产品的组成、分类和质量标准	1
第一节 石油的分类和化学组成	1
第二节 石油的炼制	4
第三节 电力用油的分类和质量标准	10
思考题	21
第二章 油品的理化、电气性能	22
第一节 矿物油的物理性能	22
第二节 矿物油的化学性能	42
第三节 矿物油的电气性能	53
第四节 磷酸酯抗燃油的性能	63
思考题	64
第三章 电力用油的运行监督和维护	66
第一节 汽轮机油的运行监督和维护	66
第二节 抗燃油的运行监督和维护	76
第三节 变压器油的运行监督和维护	82
思考题	94
第四章 充油电器设备潜伏性故障诊断	95
第一节 故障类型及其特征气体	95
第二节 气体的产生机理和传质过程	97
第三节 油中的溶解和游离气体分析	101
第四节 潜伏性故障诊断方法	103
思考题	110
第五章 六氟化硫气体	111
第一节 六氟化硫气体的性质	111
第二节 六氟化硫气体的作用	114
第三节 运行六氟化硫设备的管理	117
思考题	124

第六章 煤炭的分类、组成和基准换算	125
第一节 煤的形成与分类	125
第二节 煤炭的组成和特性指标	129
第三节 煤的基准及其应用	134
思考题	140
第七章 煤样的采集与制备	141
第一节 采样的基本概念和原理	141
第二节 煤样的采集	145
第三节 煤样的制备	151
思考题	156
第八章 煤的组成成分分析	158
第一节 水分的测定	158
第二节 灰分的测定	164
第三节 挥发分的测定	166
第四节 碳氢元素的测定	170
第五节 氮元素的测定	176
第六节 煤中硫元素的测定	178
第七节 现代分析技术	188
思考题	189
第九章 煤的发热量检测与应用	192
第一节 发热量的基本概念	192
第二节 发热量的测定	194
第三节 冷却校正和热容量标定	200
第四节 发热量的应用	206
思考题	207
第十章 煤的物理特性与检测	209
第一节 密度	209
第二节 煤粉细度	212
第三节 煤的可磨性	215
第四节 煤灰熔融性	218
思考题	221
参考文献	223

第一章 石油及其产品的组成、分类和质量标准

天然石油经过加工调和变成各类成品油。电力系统常用的汽轮机润滑油、变压器绝缘油及开关设备使用的断路器油等，都是由石油加工炼制而来的。石油是电力用油的主要来源。

本章将主要介绍石油的组成、分类，炼制加工技术，石油产品的分类和电力用油的分类与质量标准。

第一节 石油的分类和化学组成

天然石油又称原油，是一种黏稠的可燃性液体物质，通常呈黑色、褐色，密度一般小于 1g/cm^3 ，在 $0.77\sim 0.96\text{g/cm}^3$ 之间。

一、石油的商品分类

石油分类的主要目的是为了便于判断石油的经济价值，促进石油加工和贸易。

石油的分类方法很多，常用的工业分类法主要有密度分类法、含硫量分类法、含蜡量分类法、族组成分类法和含胶量分类法等。这里主要介绍族组成分类法。

根据石油中烃类族组成，通常把以烷烃为主的石油称为石蜡基原油，把以环烷烃、芳香烃为主的石油称为环烷基原油，把介于二者之间的石油称为混合基（中间基）原油。

烃类族组成的分类方法主要有两种，即特性因数分类法和关键馏分特性分类法。

（1）特性因数分类法。特性因数（ K ）是表征石油烃类组成的一种特性数据，用公式表示为：

$$K = \frac{T^{\frac{1}{3}}}{d_{15.6}^{15.6}}$$

式中： T ——以热力学温度表示的烃类的沸点；

$d_{15.6}^{15.6}$ ——烃类的相对密度。

不同族类的烃，其特性因数 K 值是不同的，烷烃的 K 值最大。根据原油特性因数 K 值的大小，将原油大致分为三类，见表 1-1。

表 1-1 石油的特性因数分类

名称	石蜡基	中间基	环烷基
特性因数 K 值	>12.1	$11.5\sim 12.1$	$10.5\sim 11.5$

(2) 关键馏分特性分类法。首先，用特定的仪器将原油分别在常压和减压条件下蒸馏出两个馏分，常压蒸馏出的沸点范围为 250~275℃ 的馏分称为第一关键馏分，减压蒸馏出的沸点范围为 395~425℃ 的馏分称为第二关键馏分。然后，测定两关键馏分的密度和密度指数，并据表 1-2 中的密度分类标准分别确定两馏分的类别。最后据表 1-3 确定原油的类别。

表 1-2 关键馏分的分类指标

关键馏分	石蜡基	中间基	环烷基
第一关键馏分	$\rho_{20} < 0.8210 \text{g/cm}^3$, 密度指数 > 40	ρ_{20} 为 $0.8210 \sim 0.8562 \text{g/cm}^3$, 密度指数为 $33 \sim 40$	$\rho_{20} > 0.8562 \text{g/cm}^3$, 密度指数 < 33
第二关键馏分	$\rho_{20} < 0.8723 \text{g/cm}^3$, 密度指数 > 30	ρ_{20} 为 $0.8723 \sim 0.9305 \text{g/cm}^3$, 密度指数为 $20 \sim 30$	$\rho_{20} > 0.9305 \text{g/cm}^3$, 密度指数 < 20

表 1-3 关键馏分的特性分类

编号	第一关键馏分 分类	第二关键馏分 分类	原油分类	编号	第一关键馏分 分类	第二关键馏分 分类	原油分类
1	石蜡基	石蜡基	石蜡基	5	中间基	环烷基	中间—环烷基
2	石蜡基	中间基	石蜡—中间基	6	环烷基	中间基	环烷—中间基
3	中间基	石蜡基	中间—石蜡基	7	环烷基	环烷基	环烷基
4	中间基	中间基	中间基				

我国乃至世界上的石油当中，石蜡基原油居多，混合基原油次之，环烷基原油很少。我国克拉玛依油田是世界上少数环烷基油田之一。

二、石油的分子组成

石油的分子组成十分复杂，是由碳、氢、氧、氮、硫、磷及多种金属元素组成的混合物。但是基本化学元素主要是碳和氢，其中碳元素约占 83%~87%，氢元素约占 11%~14%；其次是氧、硫、氮三种元素，含量一般在 1% 以下，个别情况可高达 5%~6%。

由碳、氢两种元素构成的化合物统称为烃类化合物。烃是石油中最基本的化合物，石油中的烃类化合物主要是由烷烃、环烷烃和芳香烃三大类组成。此外，石油中还含有少量的非烃类物质，主要是含氧化合物、含硫化合物、含氮化合物、胶质和沥青质等，它们主要是由氧、氮、硫与碳氢元素组成的化合物。这些烃类和非烃类物质具有不同的物理化学性质，对石油产品性能的影响各不相同。下面介绍烃类和非烃类物质的化学性质及其对成品油性能的影响。

1. 烷烃

烷烃是石油的主要烃类之一，化学通式为 C_nH_{2n+2} (n 为由 1 开始的整数)，按结构可分为直链型烷烃和支链型烷烃两类。

直链型烷烃也称正构烷烃，由于大分子直链型烷烃与同分子量的支链烷烃相比，在较高的温度下易于凝固，形成石蜡，故俗称为石蜡烃，简称石蜡。

烷烃分子依其含碳原子个数的不同，即分子量的不同，其存在的形式也不同。在常温、常压下，含 1~4 个碳元素的烷烃呈气态，是石油天然气的主要成分；含 5~15 个碳元素的烷烃呈液态，是汽油、柴油、绝缘油、润滑油等液体石油产品的主要成分；含 16 个以上碳元素的正构烷烃呈固态，俗称石蜡，其熔点随分子量的增大而升高。

烷烃含量在 25%~30% 的石油称为石蜡基石油。石蜡基石油具有烷烃的一些性质，例如化学稳定性好、闪点和凝固点高、黏度高和黏温性好、对水和氧化产物的溶解能力较差等，特别适合炼制要求黏温性好、对凝固点要求不高的汽轮机润滑油。

2. 环烷烃

环烷烃几乎是一切石油的主要成分。它的结构较为复杂，有单环、双环和多环之分，并带有烷基侧链。单环环烷烃的化学分子通式为 C_nH_{2n} ，双环环烷烃的化学通式为 C_nH_{2n-2} ，依此类推。

环烷烃含量超过 75% 的石油称为环烷基石油。环烷基石油具有环烷烃的特性，化学稳定性及热稳定性都很好，且黏度低、凝固点低、低温流动性好，是炼制电气绝缘油的最好原油。

3. 芳香烃

在天然石油中芳香烃的含量相对较低，一般不超过 30%。芳香烃是具有环状结构的化合物，与环烷烃相似，也有单环、双环和多环之分，单环芳香烃的化学通式为 C_nH_{2n-6} 。

芳香烃因具有独特的大 π 键结构，故其对成品油性能的影响也较为复杂。一般来说，单环芳香烃氧化稳定性较好，电气性能与环烷烃没有明显的差别；而多环芳香烃的氧化稳定性差，易于被氧化而形成酸、醛、酚等化合物，甚至形成油泥，使油品的酸值升高，颜色加深，通常是炼制电力用油时要去除的不良成分。

多环芳香烃虽然氧化稳定性差，且其中一些物质对人体具有致癌作用，但是对于电气绝缘油也有有益的一面。因为其氧化稳定性差，它是成品油中的一种天然的抗氧化剂，即通过自身的被氧化，而保护其他结构的烃类化合物；多环芳香烃的大 π 键的化学键能相对较低，在外界能量的作用下易于断裂，极易与运行充油电气设备产生的一 H 、一 CH_3 等自由基发生加合反应，即具有一定的吸气性。另外，与烷烃、环烷烃相比，芳香烃化合物极性较强，具有一定的溶剂性，对运行使用中油品产生的极性氧化产物有较强的溶解能力，不易形成沉淀性油泥，这对电气设备使用的绝缘油来说非常重要。

4. 非烃类化合物

非烃类化合物在天然石油中的含量很低，但影响很大。

(1) 含氧化合物。原油中的含氧化合物大致可分为两种类型：一类是酸性含氧化合

物，如脂肪酸、环烷酸、芳香羧酸、酚类和呋喃类化合物等，其中以环烷酸为最多，约占90%，通常把这类酸统称为石油酸；另一类是中性含氧化合物，如酮、醛和脂类等，它们在石油中的含量很少。

含氧化合物是形成酸性物质的基础，它的存在不仅使油品的安定性变差，其中的酸性组分还具有较强的腐蚀性。

(2) 含硫化合物。原油中的含硫化合物除少量以单质和硫化氢存在外，主要是以有机硫化物形态存在。有机硫化物可分为两类：非噻吩类硫化物和噻吩类硫化物。

非噻吩类硫化物包括硫醇($R-SH$)、硫醚($R-S-R'$)和二硫化物($R-S-S-R'$)等。噻吩类硫化物是杂环硫化物，包括噻吩、苯并噻吩、二苯并噻吩、萘并噻吩及其烷基衍生物等。

含硫化合物常参与生成胶类物质的反应，对油品储存安定性影响较大，影响的递减顺序大致如下：

硫酚(芳基硫醇) $\gg$ 脂肪族硫醇 $>$ 单质硫 $>$ 多硫化合物、二硫化物 $>$ 硫醚 $\gg$ 噻吩
其中，硫醇对油品安定性的危害最大，而噻吩的危害最小，某些噻吩和硫醚还具有抗氧化剂的作用。此外，元素硫、硫化氢和硫醇等一些活性较强的含硫化合物，又称为“活性硫”，易腐蚀金属；硫醚、二硫醚在较高温度下因分解产生硫化氢、元素硫或硫醇等，可腐蚀金属；噻吩类硫化物一般不腐蚀金属。

(3) 含氮化合物。原油中的含氮化合物根据碱性的强弱可分为碱性氮化物和碱性氮化物。

胺系和吡啶系的氮化物属于碱性氮化物。胺系氮化物有二乙胺、四氢吡咯、苯胺和2,6-二甲基苯胺等，吡啶系氮化物有吡啶、2-甲基吡啶、喹啉、四氢喹啉和菲啶等。吡咯系和酰胺系氮化物属于非碱性氮化物。吡咯系氮化物有吡咯、2-甲基吡咯、吡啶、1-甲基吡啶和吡嗪等，酰胺系氮化物有乙酰胺、苯甲酰胺和乙酰基苯胺等。

含氮化合物可参与成盐反应或聚合成胶质的反应，促使油品质量下降、安定性变坏；某些稠环芳香氮化物还具有致癌性。

(4) 胶质和沥青质。胶质和沥青质是由各种不同结构的高分子化合物组成的复杂混合物，集中了原油中的大部分硫、氮、氧以及绝大部分金属。

原油的颜色主要与胶质和沥青质的含量有关，它们的含量愈高，原油颜色愈深。

胶质和沥青质在石油加工，特别是在油品使用中的危害很大。

总之，非烃类化合物的化学稳定性、热稳定性及光稳定性都很差，是形成油泥沉淀的主要组分，必须去除。从原油中去除非烃类物质，制备成品油的过程称为原油的炼制。

第二节 石油的炼制

对于大多数炼油企业来说，电气设备使用的绝缘油和汽轮机使用的润滑油，一般仅占原油加工量的2%~3%。然而由于电力用油的特殊性，对炼制工艺的要求却很高，可以说，炼制工艺直接决定着油品的使用寿命和设备的运行安全。

在炼油企业中，从原油制取电力用油，一般经过五步工艺流程，即预处理、常压蒸馏、减压蒸馏、精制和调和。

一、预处理

原油预处理的主要目的是去除其中的水分，分离出原油中存在的机械杂质及无机盐类。

从地下开采出的石油，含有大量的水分、机械杂质和无机盐类等。虽然原油在开采出后，就地经过沉降和脱水，但水分、机械杂质的分离很不彻底，尤其是乳化水和悬浮物仍然较多，含盐量（主要是氯化物）也比较高。这样的原油不能直接投入炼油设备进行加工，否则这些物质会引起设备的腐蚀、结垢，故需在加工前脱除。

原油预处理的方法很多，一般常用热沉降法、离心分离法、化学药剂法和电脱盐法等，以经济实用为原则。

热沉降法是通过将原油进行加热，使其黏度降低，促使乳化水破乳，由于水分和机械杂质的比重较大，可通过自然沉降而分离。为加快分离速度也可使用离心机分离。

原油中含有的盐类和乳化水，通过热沉降法和离心分离法，往往难以取得满意的分离效果。此时，一般需要向原油中添加一定剂量的破乳剂或絮凝剂等化学药品，促使乳化水破乳、盐类絮凝或溶于水中，再通过热沉降和离心分离的方法将其去除。

电脱盐是一种较新的用于去除石油中的水和盐类物质的技术。原理是在适当温度下，向原油中注入适量的新鲜水和破乳剂（某些生产装置还要注入适量脱钙剂），并进行充分混合，在高压电场和破乳剂的作用下，微小水滴逐步聚结成大水滴，借助重力从油中沉降分离。由于原油中的大部分盐类是溶解在水中的，因此，在脱水的同时可以达到脱盐的目的。向原油中加入新鲜水的目的是溶解残留在原油中的盐类，同时使原有的盐水得到进一步稀释。加入破乳剂的目的是破坏水的乳化状态。

二、蒸馏

蒸馏工艺分为常压蒸馏和减压蒸馏。常压蒸馏和减压蒸馏习惯上合称常减压蒸馏。常减压蒸馏又被称为原油的一次加工。

1. 常压蒸馏

常压蒸馏是在大气压力下，把石油加热至 350℃ 左右后，送入炼油厂中细高的常压塔。“热油”中沸点较低的烃类汽化后，迅速上升，经过层层塔盘直达塔顶。由于常压塔塔体非常高，塔体内的温度自下而上是逐渐降低的，所以，被汽化的烃类气体在上升过程中，会被逐渐冷却。沸点高的组分行程较短，在温度较高的低位塔盘上冷凝成液体；而沸点低的组分则会继续上升，在温度较低的高位塔盘上冷凝为液体。

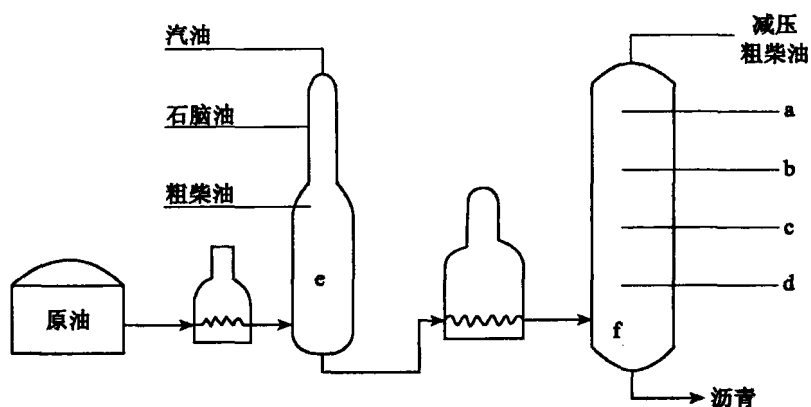
由此可见，常压蒸馏工艺可将石油中的低沸点烃类组分，按照沸点的高低进行分离，从常压塔塔体自上而下，依次得到沸点从低到高的馏分油，即燃料油馏分。我们生活中常用的汽油和柴油等产品，就是燃料油馏分进一步加工后的成品油。

常压蒸馏塔塔底余下的是 350℃ 以上的高沸点石油组分，通常被称为“重油”。分离重油必须采取减压蒸馏，因为原油在常温下被加热到 400℃ 以上时，馏分中的许多理想组分将会裂解成低分子烃，从而无法制得润滑油馏分。

2. 减压蒸馏

减压蒸馏是指在不提高热油温度的前提下，通过抽真空降低蒸馏塔内的大气压力，使石油化学组分的沸点随系统压力的降低而降低，从而像常压蒸馏那样被分离成不同沸点范围的馏分的工艺过程。

被送入减压蒸馏塔的重油，经过减压蒸馏，被分离成不同沸点范围的润滑油馏分。电力用油就是润滑油馏分进一步加工形成的产品。图 1-1 是从石油中获取润滑油馏分的炼油装置示意图。



a—轻质馏子油；b—重质馏子油；c—轻质润滑油；d—重质润滑油；e—常压蒸馏塔；f—减压蒸馏塔

图 1-1 从石油中获取润滑油馏分的炼油装置示意图

三、精制

成品油精制的主要目的是提高油品的氧化安定性，改善其黏温性能和低温流动性等指标。

润滑油馏分与原油的族组成类似，主要含有烷烃、环烷烃和芳香烃。这三种烃类对油品性能的影响是不同的，如不控制其组成，往往难以获得符合要求的成品油。

对润滑基础油而言，最理想的烃类是含 20 个碳原子的异构烷烃，该类烷烃具有高黏度指数、低倾点和极好的抗氧化性能。带有长支链的烷烃、长侧链少环烷烃也是非常理想的组分，这样的烷烃分子挥发度比芳香烃低。

正构烷烃虽然具有黏度指数高和抗氧化性能强的特点，然而由于其倾点高，并不是理想的基础油成分。一些分支多的异构烷烃、带有长烷烃支链的芳香烃化合物抗氧化性差，多环烷烃和多环芳香烃的黏度指数低，氧化稳定性亦差，这些也不是理想的组分。

此外，减压蒸馏获取的润滑油馏分中仍含有原油中存在的非烃类化合物等不良组

分, 这些组分会使油品短期内产生颜色加深、酸值升高、黏度增大, 甚至形成沉淀淤渣等现象。

因此, 在生产高质量润滑基础油加工工艺中, 希望对这些非理想化合物, 用化学转化法将其转化为需要的分子结构, 或用物理和(或)化学的方法将其除去, 这就是精制工艺要解决的问题。

1. 酸碱精制

酸碱精制是电力用油加工过程中传统的经典工艺。酸碱精制工艺使用的主要化学物质有硫酸、发烟硫酸、氧化钙和苛性钠等。

酸碱精制工艺的过程是, 馏分油首先与硫酸进行混合反应, 分离出反应形成的酸渣; 然后再与碱溶液或氧化钙混合, 中和油中残存的硫酸和(或吸附)反应形成的酸性产物; 最后经过水洗, 去除油品中碱性产物。

酸碱精制工艺的特点是, 利用硫酸与馏分油中的不良组分进行化学反应。如硫酸与馏分油中含氧、硫、氮等的非烃化合物、特定结构的芳香烃、不饱和烯烃等不稳定化合物起化学反应, 形成磺化酸渣而被去除, 从而显著改善成品油的抗氧化安定性。

在酸碱精制过程中, 由于除去了密度较大的非烃化合物和部分芳香烃, 使油品的密度有所下降, 而黏度指数有所升高。

另外, 由于在酸碱精制过程中除去了馏分油中大部分天然降凝剂, 提高了油品的凝固点。该工艺对油品的闪点指标几乎没有影响。

酸碱精制过程中, 硫酸的浓度及用量, 精制的温度及硫酸与馏分油接触时间的长短, 对精制深度有很大的影响。因此, 应根据馏分油的组成及成品油的技术要求, 通过试验来选定工艺条件。

该工艺的主要缺点是硫酸反应物的选择性差, 馏分油损耗大, 既浪费资源, 又产生大量难以处理的、没用的酸渣, 污染环境。因此, 在现代油品加工中, 该工艺已极少采用, 基本被淘汰。

2. 溶剂精制

溶剂精制是一种物理液-液抽提工艺, 现在被世界上大多数基础油生产商所采用。

溶剂精制就是利用不同溶剂对润滑油馏分中的芳香烃及其他不良组分选择性萃取的原理, 进行分离去除。

芳香烃虽然溶解性好, 但由于芳香烃是天然油品中最活泼的成分, 容易被氧化而大大缩短润滑油的使用寿命, 因此是溶剂精制所要除去的主要组分。

适合作润滑油精制的溶剂很多, 主要有糠醛、N-甲基-2-吡咯烷酮(NMP)和苯酚等。

溶剂精制除了可以获得低芳香烃含量的油品外, 其抽提液蒸去溶剂后, 还可得到橡胶工业和印刷工业等需要的高芳香烃含量的工艺用油。

经溶剂精制获得的低芳香烃含量的油品与原料油相比, 抗氧化安定性显著提高, 其密度和黏度则有所降低。精制过程抽出的液量越大, 即精制深度越深, 黏度指数提高越多。精制油的凝固点有所上升, 硫含量大幅度降低, 颜色变浅, 闪点几乎不变。

溶剂精制与酸碱精制相比, 其主要优点是能有控制地萃取馏分油中的芳香烃, 并可

有效地予以利用，不产生无用而又污染环境的废渣，馏分油几乎没有损耗。

溶剂精制的主要缺点是溶剂萃取不能彻底除掉所有馏分油中的不良组分，去除率仅为杂质（芳香烃、极性物质、含硫及含氮化合物）的 50%~80%。

溶剂精制的基础油一般称为 I 类基础油，其饱和烃含量小于 90%（芳香烃含量大于 10%），硫含量低于 300 μ g/g。

3. 白土精制

白土精制是利用吸附材料的物理吸附性能，除去液体中的少量极性杂质。在油品加工过程中，常使用漂白土作为吸附剂。由于该工艺一般不独立使用，而常在酸碱精制和溶剂精制后，用来去除油品中残留的胶质和沥青组分，故又称为白土补充精制。

白土精制的优点是可以明显地改善油品的颜色、气味，提高油品的氧化安定性；其缺点是吸附剂选择性差，产生大量污染环境的废渣，且油品的损耗大。

为了尽可能地减少油品损耗及工业废渣，该工艺一般只作为润滑油精制加工的最后道工序，以降低白土的用量和馏分油的损耗。

4. 加氢技术

加氢技术主要有三种：加氢精制、加氢处理和加氢裂化。

（1）加氢精制。加氢精制是指在保持原料油分子骨架结构不发生变化或变化很小的情况下将杂质脱除，以达到改善油品质量为目的的加氢反应，即“在有催化剂和氢气存在下，将石油馏分中含有硫、氮、氧及金属的非烃类组分加氢脱除以及烯烃、芳烃发生加氢饱和反应”。

该工艺主要用于去除非烃类化合物，使含有硫、氮、氧等的非烃化合物通过加氢反应生成硫化氢、氨、水等气体从油中分离出来，从而使油品的颜色变浅，安定性提高，产品质量提高。

加氢精制与白土精制相似，常作为润滑油加工的最后一道工序，但产品收率比白土精制收率高，没有白土供应和废白土处理等问题，是取代白土精制的一种较好的方法。

（2）加氢处理。加氢处理是介于加氢裂化和加氢精制之间的一种工艺，是指在比加氢精制苛刻一些的条件下，除了加氢精制的各种反应以外，还有多种加氢裂化反应，使大部分或全部非理想组分经过加氢变为环烷烃或烷烃，并转化为理想组分。例如，多环烃类加氢开环，形成少环长侧链的烃。因此，加氢处理生成油的黏温性能较好。

该工艺不仅能改善油品的颜色、安定性和气味，而且可以提高黏温性能，可以代替溶剂精制-白土精制联合处理工艺，具有一举两得的作用。

（3）加氢裂化。加氢裂化是指通过催化加氢反应，使原料油中 10% 及以上的大分子变小的一些加氢过程，包括馏分油加氢改质、渣油加氢改质、减压瓦斯油加氢改质生产润滑基础油料和其他加氢工艺（催化脱蜡和异构脱蜡）等。根据压力的高低可分为三类：常规（高压）加氢裂化、缓和加氢裂化和中压加氢改质。

加氢裂化可改善原料油中的分子组成，去除大部分硫、氮和芳香烃化合物；使部分芳香烃通过加氢开环，形成烷烃；大分子正构烷烃被裂化，变成小分子烷烃或异构烷烃。该工艺操作灵活，可按产品需求调整，但不属于润滑油精制的工序。加氢裂化的尾油可以作为精制润滑油的原料。例如，加氢裂化尾油经溶剂脱蜡-加氢精制工艺可得到

润滑基础油。

5. 脱蜡精制

脱蜡的主要目的就是降低成品油的凝固点或倾点，改善其低温流动性指标。

成品油凝固点高、低温流动性差的主要原因是馏分油中含有高熔点的石蜡。因此，含蜡量过高的润滑馏分油不适合加工电力用油。因为低温流动性好是电力用油的共同特点，尤其对绝缘油而言，该指标在使用上具有重要意义。因此，尽管石蜡不是馏分油中的不良组分，但对石蜡基馏分油来说，在电力用油的加工工艺中，脱蜡是一道必不可少的工序。

脱蜡工艺方法主要有冷冻脱蜡、溶剂脱蜡和加氢脱蜡等。

(1) 冷冻脱蜡。冷冻脱蜡属于物理分离工艺方法，适用于黏度低、脱蜡深度要求不高的成品油加工。

该工艺是人为地降低馏分油的温度，促使油品中的大分子正构烷烃——石蜡结晶析出，然后通过低温过滤将其去除。

(2) 溶剂脱蜡。溶剂脱蜡 (SDW) 也属于物理分离工艺，传统工艺采用的溶剂主要有糠醛、甲基乙基酮/甲苯、甲基乙基酮/甲基丁基酮、甲基乙基酮/丙酮 (MEK) 等。

实际上，溶剂脱蜡是冷冻脱蜡工艺的改进和发展。由于冷冻法析出的石蜡机械过滤性很差，滤除效率很低。为了提高石蜡的滤除效率，人们先将溶剂与馏分油混合，然后再将稀释油冷却到 $-10\sim-20^{\circ}\text{C}$ ，使蜡形成结晶并沉积，最后经过滤将其除去，以降低成品油的倾点或凝固点。

溶剂脱蜡获得的产品是脱蜡基础油 (SDWO) 和含油蜡。溶剂脱蜡与冷冻脱蜡工艺相比，石蜡的含量更低，倾点或凝固点改善更加明显。

(3) 加氢脱蜡。与冷冻脱蜡和溶剂脱蜡不同，加氢脱蜡是一种化学反应技术。目前加氢脱蜡主要有两种：催化脱蜡和异构脱蜡。

催化脱蜡是使蜡原料油通过催化剂，油中的一些蜡组分进入催化剂孔道发生裂化反应，转变成非蜡组分；油中的一些非蜡组分不进入催化剂孔道中，从而保持不变；最终使蜡发生选择性转化，从而达到分离的目的。与溶剂脱蜡相比，催化脱蜡具有投资省、操作费用低的优点。但在某些情况下，产品收率低一些，主要是因为催化脱蜡脱除了更多的烷烃的缘故。尽管如此，催化脱蜡的成本优势依然大于收率降低的损失。因此，催化脱蜡自问世以来，在工业上便得到了广泛的应用。例如目前常用溶剂精制-溶剂脱蜡-催化脱蜡或溶剂精制-催化脱蜡联合处理工艺生产Ⅰ类或Ⅱ类基础油。

异构脱蜡是面向 21 世纪生产高质量的Ⅱ类、Ⅲ类基础油的一项新技术。它是把油中的蜡通过异构化反应转化为润滑油基础油。该工艺加氢程度高，明显改变了馏分油的族组成，使残留的绝大部分芳香烃饱和，除掉了绝大部分含氮及含硫化合物，且通过异构化将直链分子等转化为理想的带支链的分子。通过此工艺生产的基础油无色，饱和度高，纯度高，倾点、黏度指数及氧化安定性都得以有效控制和提高。它不像溶剂脱蜡那样把蜡与油分开，也不像催化脱蜡那样，把蜡裂化为气体和石脑油。该技术与溶剂脱蜡和催化脱蜡相比，得到的基础油收率最高，黏度指数也较高。采用异构脱蜡的原料油必

须是经加氢裂化或加氢处理的尾油、蜡油或软蜡，最好是加氢裂化尾油（去除了硫和氮）。目前应用的加氢裂化/加氢处理-异构脱蜡-加氢精制工艺不仅可获得性能优良的Ⅱ类、Ⅲ类基础油，生产能力也比其他工艺高。

四、调和

经过蒸馏和适当的精制工艺获得的油品，基本上不含有不良组分，且其闪点、黏度、黏度指数、凝固点等技术指标也调整到一定的范围，通常把这种油称为“基础油”。石油加工企业常说的一、二、三、四线油，指的就是图 1-1 中所示的减压蒸馏出的 a、b、c、d 馏分油分别通过精制而得到的基础油。

美国石油学会（API）根据基础油组成的主要特性把基础油分成 5 类：Ⅰ类为溶剂精制基础油，有较高的含硫量和不饱和烃（主要是芳香烃）含量；Ⅱ类主要为加氢处理基础油，其硫氮含量和芳香烃含量较低，烷烃（饱和烃）含量高；Ⅲ类主要是加氢异构化基础油，不仅硫、芳香烃含量低，而且黏度指数高；Ⅳ类为聚 α -烯烃（PAO）合成基础油；Ⅴ类则是除Ⅰ～Ⅳ类以外的各种基础油。

从前文的介绍中可知，基础油的品质是受石油加工工艺限制的。因此，从固定工艺获得的基础油一般不能直接作为成品油使用，因为单一的基础油技术指标往往难以满足用户的使用要求。

目前，国内外通常在现有工艺条件下，采用调和的方法来解决：①把两种或两种以上的基础油，根据成品油的指标要求，按照一定的比例调和而成，如三线基础油的黏度或黏度指数较成品润滑油要求的指标低，就可加入适量黏度或黏度指数更高的四线基础油；②在基础油中加入适量品种的专用添加剂，满足成品油的某些特殊指标要求，如要提高油品的抗氧化安定性，可加入抗氧化剂，如要提高油品的防锈性能，则可加入防锈剂等。

基础油的调和温度一般为 50～60℃。在该温度下，一方面，基础油与添加剂的黏度均较低，容易快速、充分地混合；另一方面，基础油和添加剂受到的热应力小，不会引起基础油的氧化及添加剂的分解。

基础油经过调和后形成的产品才是商用成品油。我国生产的绝缘油，基本上都在调和时添加了抗氧化剂，在汽轮机油中，同时添加了一定量的抗氧化剂和防锈剂。

由此可见，基础油质量和添加剂技术的突破，是生产高品质成品油的关键。

第三节 电力用油的分类和质量标准

一、石油产品的分类

我国参照 ISO/DIS 8681 国际标准，制定了石油产品及润滑剂的分类标准 GB 498—1987《石油产品及润滑剂的总分类》，见表 1-4。该标准把电力用油分在“润滑剂和有关产品”的 L 类中。

表 1-4

GB 498—1987 石油产品及润滑剂的总分类

类 别	类 别 含 义	类 别	类 别 含 义
F	燃料	S	溶剂和化工原料
L	润滑剂和有关产品	W	蜡
B	沥青	C	焦

为了使用方便,根据应用领域,GB/T 7631.1—2008《润滑剂和有关产品 (L类) 的分类第1部分:总分组》又把L类的产品分成19个组别,见表1-5。该标准把变压器油、断路器油、电容器油、电缆油一起归并为电器绝缘——N组,将抗燃油列入液压系统——H组,将汽轮机油划到汽轮机—T组。

GB/T 7631.1—2008还对润滑剂和有关产品(L类)分类当中的各个组别,作了进一步的详细分类,至今尚未全部颁布,如N组中的产品代号未定,而H组、T组的分类代号已经实施。在H组分类标准中,电力系统广为使用的磷酸酯无水合成液——抗燃油的代号应为L-HFDR;在T组分类标准中,电力系统蒸汽机组使用的矿物汽轮机油的标准代号应为L-TSA。

表 1-5

GB/T 7631.1—2008 润滑剂和有关产品 (L类) 的分类

第1部分:总分组

组别	应用场合	组别	应用场合	组别	应用场合
A	全损耗系统	H	液压系统	U	热处理
B	脱膜	M	金属加工	X	用润滑脂的场合
C	齿轮	N	电器绝缘	Y	其他应用场合
D	压缩机 (包括冷冻机和真空泵)	P	气动工具	Z	蒸汽气缸
E	内燃机油	Q	热传导液		
F	主轴、轴承和离合器	R	暂时保护防腐蚀		
G	导轨	T	汽轮机		

根据GB 498—1987石油产品及润滑剂的分类标准可知,我国石油产品及润滑剂的产品编码形式为:

类别	-	品种		产品规格
----	---	----	--	------

例如L-TSA 32汽轮机油,则可解释为:L——润滑剂类(类别);TSA——一般用途汽轮机油(品种);32——汽轮机油品牌牌号为32号(产品规格)。

二、电力用油分类和质量标准

按照 GB 498—1987 石油产品及润滑剂的分类标准，电力用油使用的绝缘油、汽轮机油、抗燃油均属于 L 类，因此，电力用油的分类代码第一位均应为 L，其组别代码分别应为 N、H、T。然而由于我国推广实施该标准的力度不够及标准本身的不完善等原因，目前在这三种油品中，唯有汽轮机油标准按照规范标准得到实施。

我国的电力用油基本上按照用途划分为汽轮机油（属于润滑油）、抗燃油（属于液压油）、绝缘油三大类。

1. 汽轮机油

润滑油主要用于机械转动设备，其在转动部件间形成油膜，避免部件间直接接触，防止设备磨损，减少摩擦损耗。

我国电力行业使用的主要润滑油是汽轮机油。目前使用的汽轮机油主要是精制矿物油调和而成的成品油，其基础油属 I 类，也有少量加氢精制的 II 类、III 类基础油调制的润滑油。

我国两个现行汽轮机标准油，即 GB 2537—1981《汽轮机油》和 GB/T 11120—1989《汽轮机油》，均是用 I 类基础油调和后的产品。二者的主要区别是，GB 2537—1981 标准油在调和时添加了抗氧化剂，属抗氧化汽轮机油；而 GB/T 11120—1989 标准油在调和时不但添加了抗氧化剂，而且还添加了防锈剂，属抗氧化、防锈汽轮机油。

GB 2537—1981（1988）标准，按 50℃ 时运动黏度的中心值，将新油分为 HU-20、HU-30、HU-40、HU-45 和 HU-55 五个牌号。

GB/T 11120—1989 标准，按 40℃ 时运动黏度的中心值，将新油划分为 32、46、68 和 100 四个牌号，其中每个牌号按油品的泡沫性、抗氧化安定性和空气释放值等指标上的差异，又细分为优级品、一级品和合格品三个等级。电力系统常用的 32 号、46 号油的技术标准见表 1-6。

表 1-6 GB/T 11120—1989 L-TSA 汽轮机油

项 目	优级品		一级品		合格品		试验方法
黏度等级	32	46	32	46	32	46	GB/T 3141
运动黏度 (40℃, mm ² /s)	28.8~ 35.2	41.4~ 50.6	28.8~ 35.2	41.4~ 50.6	28.8~ 35.2	41.4~ 50.6	GB/T 265
黏度指数 ^①	90	90	90	90	90	90	GB/T 1995
倾点 ^② (℃) ≤	-7	-7	-7	-7	-7	-7	GB/T 3535
闪点 (开口,℃) ≥	180	180	180	180	180	180	GB/T 267
密度 (20℃, g/cm ³)	报告	报告	报告	报告	报告	报告	GB/T 1884
机械杂质	无	无	无	无	无	无	GB/T 511