

国家示范性 高职院校建设规划教材

燃料油 生产技术

杨兴锴 李 杰 主编

化学工业出版社

国家示范性 高职院校建设规划教材

燃料油 生产技术

杨兴锴 李杰 主编

 化学工业出版社

·北京·

本书全面介绍了以石油为原料生产各种燃料油的主要工艺及装置。内容涉及各工艺装置的原料及产品的组成、来源和性质；过程原理及工艺流程；主要设备结构及性能；装置生产控制操作策略及方法。可作为高职高专或成人教育炼油技术专业教材使用，也可供炼油行业从事教育、科研、设计、生产及管理的技术及管理人员阅读及参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

燃料油生产技术/杨兴锴, 李杰主编. —北京: 化学工业出版社, 2010.3
国家示范性高职院校建设规划教材
ISBN 978-7-122-07461-4

I. 燃… II. ①杨… ②李… III. 燃料油-生产工艺-高等学校: 技术学院-教材 IV. TE626.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 011106 号

责任编辑: 张双进
责任校对: 吴 静

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 装: 化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张 29½ 字数 774 千字 2010 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

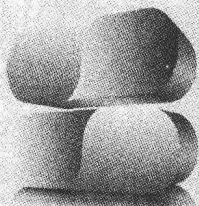
购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

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: 45.00 元

版权所有 违者必究



前 言

以石油为原料生产各种燃料油是目前石油的主要用途之一。燃料油在社会能源结构中占据突出位置。目前，我国原油年加工能力超过3亿吨，其中汽油和柴油的年生产能力达1.5亿吨以上，几乎所有的炼油企业都是以生产燃料油为主。

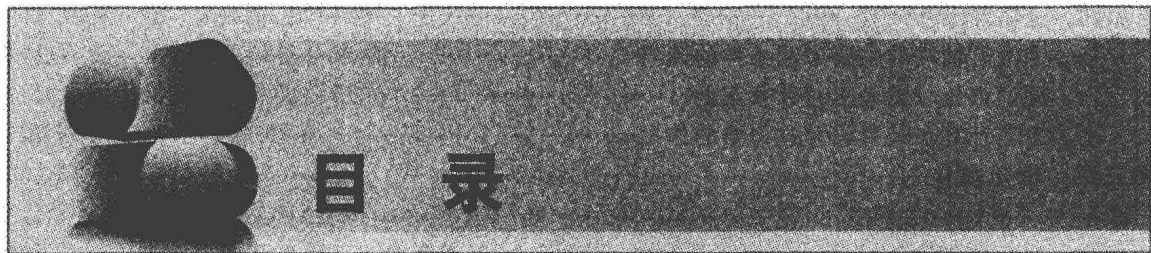
伴随节能、环保及安全等方面要求日益严格；世界范围内原油重质化及劣质趋势逐渐加大，促使对燃料油结构调整及品质升级，原油加工生产工艺、生产方法、生产控制操作进一步优化、科学。

《燃料油生产技术》以燃料油生产为主线，对生产燃料油主要装置的生产原理；原料来源、组成、性质；产品结构、组成、性质及用途；工艺流程及影响过程的主要因素；典型、特殊设备结构及操作方法；生产过程控制策略及控制方法等内容进行了阐述。本书大量应用图、表等专业工程语言，力争做到理论和实际相结合，原理和应用相结合，理论上以实用、够用和能用为主，注重实际应用和操作。

本书由兰州石化职业技术学院袁科道（第一、二章）、王宇（第四、六章）、杨兴锴（第五章）、张远欣（第七章）、罗资琴（第八章），辽宁石化职业技术学院李杰（第三章）、刘小隽（第九章）编写。由杨兴锴和李杰对全书进行统稿。

由于编者能力、水平、时间有限，在编写过程中出现的偏颇，望读者海涵，并敬请提出宝贵意见。

编者
2010年1月



| | |
|-----------------------------------|-----|
| 第一章 原油评价 | 1 |
| 第一节 原油评价及原油分类 | 1 |
| 一、原油评价 | 1 |
| 二、原油分类 | 14 |
| 第二节 原油加工生产方案与燃料油生产过程 | 17 |
| 一、原油加工生产方案 | 17 |
| 二、燃料油生产过程 | 21 |
| 第二章 原油常减压蒸馏 | 25 |
| 第一节 概述 | 25 |
| 一、原油蒸馏目的 | 25 |
| 二、原油蒸馏产品 | 26 |
| 三、原油蒸馏方法及特点 | 28 |
| 四、原油蒸馏系统构成 | 37 |
| 第二节 原油预处理 | 37 |
| 一、原油预处理原理、方法及主要设备 | 37 |
| 二、原油预处理过程操作及控制 | 42 |
| 第三节 原油蒸馏工艺流程 | 46 |
| 一、原油蒸馏工艺流程的类型 | 46 |
| 二、影响原油蒸馏主要操作因素 | 50 |
| 三、减压蒸馏及抽真空系统 | 54 |
| 四、原油蒸馏过程中防腐措施 | 61 |
| 五、原油蒸馏过程的技术进步 | 63 |
| 第四节 原油蒸馏主要设备 | 68 |
| 一、加热炉 | 68 |
| 二、分馏塔 | 81 |
| 三、汽提塔 | 85 |
| 第五节 原油蒸馏过程操作技术 | 87 |
| 一、开工 | 87 |
| 二、正常控制操作 | 89 |
| 三、停工 | 104 |
| 第六节 原油蒸馏工艺计算 | 106 |
| 一、原油分馏塔工艺计算所需的基础数据和设计计算步骤 | 106 |

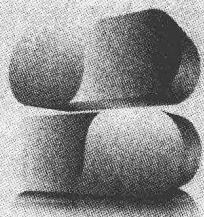
| | |
|------------------------------|------------|
| 二、计算参数 | 107 |
| 三、物料平衡计算 | 107 |
| 四、全塔热平衡计算 | 108 |
| 五、原油分馏塔的主要工艺条件的确定 | 109 |
| 六、原油常压分馏塔工艺计算案例 | 113 |
| 七、工艺计算在装置设计过程中的作用 | 123 |
| 第三章 催化裂化 | 125 |
| 第一节 概述 | 125 |
| 一、催化裂化目的 | 125 |
| 二、催化裂化原料、产品及特点 | 125 |
| 三、催化裂化方法 | 129 |
| 四、催化裂化系统构成 | 130 |
| 五、催化裂化发展概况 | 131 |
| 第二节 催化裂化反应 | 131 |
| 一、催化裂化反应类型 | 131 |
| 二、催化裂化反应特点 | 133 |
| 第三节 催化裂化催化剂 | 134 |
| 一、催化裂化催化剂类型、组成及结构 | 134 |
| 二、催化裂化催化剂评价 | 135 |
| 第四节 流态化原理及催化剂输送 | 138 |
| 一、流态化原理 | 138 |
| 二、催化剂输送 | 139 |
| 第五节 催化剂再生 | 141 |
| 一、催化裂化再生反应 | 142 |
| 二、催化剂再生技术 | 142 |
| 第六节 催化裂化工艺流程 | 146 |
| 一、反应-再生系统 | 146 |
| 二、分馏系统 | 147 |
| 三、吸收-稳定系统 | 147 |
| 四、烟气能量回收系统 | 148 |
| 第七节 催化裂化主要设备 | 149 |
| 一、提升管反应器及沉降器 | 149 |
| 二、再生器 | 150 |
| 三、反再系统特殊设备 | 151 |
| 四、烟气能量回收设备 | 154 |
| 第八节 催化裂化操作技术 | 159 |
| 一、反再系统操作技术 | 159 |
| 二、分馏系统操作技术 | 165 |
| 三、吸收稳定系统操作技术 | 166 |
| 四、催化裂化过程操作法及步骤 | 170 |
| 五、催化裂化反应-再生系统仿真操作 | 183 |
| 第九节 催化裂化计算 | 184 |
| 一、计算内容 | 184 |

| | |
|-------------------------|-----|
| 二、计算案例 | 184 |
| 第十节 催化裂化新技术 | 190 |
| 一、催化裂化工艺新技术 | 190 |
| 二、催化裂化设备新技术 | 192 |
| 三、催化裂化催化剂新技术 | 192 |
| 第四章 热破坏加工 | 194 |
| 第一节 概述 | 194 |
| 一、热破坏加工目的 | 194 |
| 二、热破坏加工过程、地位及作用 | 194 |
| 第二节 热破坏加工化学反应 | 196 |
| 一、热破坏加工化学反应类型 | 196 |
| 二、热破坏加工化学反应机理 | 198 |
| 三、反应热与反应速率 | 199 |
| 四、重油热反应特点 | 199 |
| 五、延迟焦化反应原理 | 200 |
| 第三节 减黏裂化 | 201 |
| 一、原料和产品 | 201 |
| 二、工艺流程 | 202 |
| 三、影响减黏裂化因素 | 202 |
| 第四节 焦炭化 | 203 |
| 一、焦化目的和任务 | 203 |
| 二、原料和产品 | 204 |
| 三、焦化工艺流程 | 206 |
| 四、影响焦化的主要因素 | 212 |
| 五、延迟焦化主要设备及其操作 | 215 |
| 六、延迟焦化装置的操作技术 | 227 |
| 七、延迟焦化技术发展及应用 | 235 |
| 第五章 催化重整 | 237 |
| 第一节 概述 | 237 |
| 一、催化重整目的 | 237 |
| 二、催化重整地位和作用 | 237 |
| 三、催化重整原料和产品 | 241 |
| 四、催化重整工艺过程 | 243 |
| 五、催化重整发展历程及趋势 | 245 |
| 第二节 催化重整的化学反应 | 247 |
| 一、重整化学反应类型 | 247 |
| 二、重整反应的热力学和动力学特征 | 248 |
| 第三节 催化重整催化剂 | 254 |
| 一、重整催化剂的组成 | 254 |
| 二、重整催化剂评价 | 256 |
| 三、重整催化剂使用方法及操作技术 | 257 |
| 第四节 催化重整原料的选择和预处理 | 266 |
| 一、原料的选择 | 266 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 二、重整原料的预处理 | 270 |
| 第五节 催化重整反应-再生系统工艺过程 | 281 |
| 一、工艺流程 | 281 |
| 二、重整反应的主要影响因素及操作参数 | 295 |
| 三、重整反应工艺计算 | 300 |
| 四、重整产物分离过程 | 303 |
| 第六节 芳烃抽提和精馏 | 307 |
| 一、重整芳烃的抽提过程 | 307 |
| 二、芳烃精馏 | 310 |
| 第七节 催化重整主要设备 | 312 |
| 一、反应器类 | 314 |
| 二、加热炉 | 321 |
| 三、塔器 | 323 |
| 四、换热器 | 324 |
| 五、容器 | 328 |
| 六、转动设备 | 329 |
| 第八节 催化重整系统操作技术 | 331 |
| 一、重整系统开工 | 331 |
| 二、正常生产控制操作技术 | 333 |
| 三、重整系统停工 | 339 |
| 第六章 催化加氢 | 340 |
| 第一节 概述 | 340 |
| 一、催化加氢目的 | 340 |
| 二、催化加氢在炼油工业中的地位和作用 | 340 |
| 三、催化加氢原料和产品 | 344 |
| 四、催化加氢工艺过程 | 352 |
| 五、催化加氢发展历程及趋势 | 354 |
| 第二节 催化加氢反应 | 356 |
| 一、加氢处理反应 | 356 |
| 二、烃类加氢反应 | 358 |
| 第三节 催化加氢工艺流程 | 360 |
| 一、催化加氢工艺组成 | 360 |
| 二、加氢处理工艺流程 | 365 |
| 三、加氢裂化工艺流程 | 374 |
| 四、影响加氢的因素 | 377 |
| 五、催化加氢装置开工、停工操作技术 | 385 |
| 第七章 高辛烷值汽油组分生产 | 390 |
| 第一节 概述 | 390 |
| 一、汽油标号要求与基础组分构成 | 390 |
| 二、提高汽油辛烷值的途径 | 391 |
| 三、汽油抗爆剂 | 391 |
| 四、高辛烷值汽油组分的生产原料 | 393 |
| 第二节 炼厂气的精制与分馏 | 394 |

| | |
|----------------------------------------------|-----|
| 一、气体精制 | 394 |
| 二、气体分馏 | 395 |
| 第三节 烷基化 | 397 |
| 一、概述 | 397 |
| 二、异丁烷与小分子烯烃的烷基化反应 | 397 |
| 三、烷基化原料及要求 | 398 |
| 四、烷基化催化剂 | 400 |
| 五、硫酸法烷基化 | 401 |
| 六、氢氟酸法烷基化 | 404 |
| 七、固体酸直接烷基化技术 | 407 |
| 八、间接烷基化技术 | 408 |
| 第四节 轻质烷烃异构化工艺 | 408 |
| 一、概述 | 408 |
| 二、异构化催化剂 | 410 |
| 三、C ₅ /C ₆ 异构化工艺 | 411 |
| 第五节 小分子烯烃叠合制汽油工艺 | 411 |
| 一、叠合过程的化学反应 | 412 |
| 二、叠合催化剂 | 413 |
| 三、叠合工艺流程 | 414 |
| 第八章 燃料油精制与调和 | 415 |
| 第一节 精制 | 415 |
| 一、酸碱精制 | 416 |
| 二、脱硫醇 | 418 |
| 三、脱蜡 | 421 |
| 第二节 燃料添加剂 | 422 |
| 一、石油添加剂的分类 | 423 |
| 二、燃料油添加剂 | 423 |
| 第三节 燃料油调和 | 429 |
| 一、燃料油调和比例的计算方法及调和油品性质的确定 | 429 |
| 二、调和过程步骤 | 438 |
| 三、油品调和的方法 | 438 |
| 第九章 清洁燃料及清洁生产技术 | 441 |
| 第一节 清洁燃料 | 441 |
| 第二节 生物汽油生产技术 | 441 |
| 一、生物汽油 | 441 |
| 二、生物乙醇的生产 | 442 |
| 第三节 生物柴油生产技术 | 443 |
| 一、生物柴油 | 443 |
| 二、生物柴油的发展 | 443 |
| 三、生物柴油的生产 | 444 |
| 第四节 清洁生产技术 | 445 |
| 一、清洁生产及其发展 | 445 |
| 二、炼油厂清洁生产案例 | 446 |

| | |
|---------------------------------------------------------------|-----|
| 附录 | 450 |
| 附表 1 石油炼制造业清洁生产标准 (HJ/T 125—2003) | 450 |
| 附表 2 常减压装置清洁生产标准 (HJ/T 125—2003) | 451 |
| 附表 3 催化裂化装置清洁生产标准 (HJ/T 125—2003) | 451 |
| 附表 4 焦化装置清洁生产标准 (HJ/T 125—2003) | 452 |
| 附表 5 车用汽油 (Ⅱ) 技术要求和实验方法 (GB 17930—2006) | 452 |
| 附表 6 车用乙醇汽油调和组分油 (Ⅱ) 技术要求和实验方法 (GB 22030—2008) | 453 |
| 附表 7 车用汽油 (Ⅲ) 技术要求和实验方法 (GB 17930—2006) | 454 |
| 附表 8 车用乙醇汽油调和组分油 (Ⅲ) 技术要求和实验方法 (GB 22030—2008) | 455 |
| 附表 9 车用乙醇汽油技术要求和实验方法 (GB 18351—2004) | 456 |
| 附表 10 车用柴油技术要求和实验方法 (GB 19147—2003) | 457 |
| 附表 11 柴油机燃料调和用生物柴油 (DB100) 技术要求和实验方法 (GB 20282—2007) | 458 |
| 附表 12 喷气燃料油技术要求指标 | 459 |
| 参考文献 | 460 |



第一章 原油评价

第一节 原油评价及原油分类

原油是一种极为复杂的混合物，其主要组成是烃类，还含有硫、氮、氧等化合物及少量金属有机化合物。不同油田生产的原油，因组成不同，往往具有不同的性质。即使同一油田，由于采油层位不同，原油性质也可能出现差异。以大庆原油为代表，我国大部分原油属于低硫含蜡原油。但也有些油区的地质构造十分复杂、原油性质有较大差别。如胜利油区各油田的原油，大部分属于中间基，但又有少量属于石蜡基、环烷基，且含硫较多。

对新开采的原油，必须先进行“原油评价”。原油评价就是通过各种实验、分析，取得对原油性质的全面的认识。本节将简要介绍原油评价的内容及方法，并着重介绍大庆原油的评价过程与结果。

一、原油评价

1. 原油评价的意义和目的

不同性质的原油，必须相应采用不同的加工方法，以生产适当的产品，使原油得到合理利用。例如，低硫石蜡基原油的轻馏分油适合生产高质量的煤油、柴油，不需要深度精制；其重油适合生产高黏度指数润滑油。环烷基原油的凝点较低，适合生产低凝点的油品及道路沥青。

所以，原油评价的意义在于通过实验、分析，掌握原油的组成与性质等基础参数，为原油加工方案的制订做准备。根据对所加工原油的性质、市场对产品的需求、加工技术的先进性和可靠性，以及经济效益等诸方面的分析，制订合理的加工方案，提高企业的经济效益。

按原油评价的目的不同，可将原油评价分为四个层次。

① 原油的一般性质分析。适用于勘探开发过程中及时了解单井、集油站和油库中原油的一般性质，并掌握原油性质变化的规律与动态。

② 原油的简单评价。通过一般性质分析初步确定原油性质与特点。适用于原油性质的普查、尤其适用于地质构造复杂、原油性质多变的产油区。

③ 原油的常规评价。除了原油的一般性质外，还包括原油的实沸点蒸馏数据及窄馏分性质。适用于为一般炼油厂设计提供数据。

④ 原油的综合评价。除原油的一般性质、原油的实沸点蒸馏数据及窄馏分性质等两项内容外，还包括直馏产品的产率和性质。根据需要，也可增加某些馏分的化学组成、某些重馏分或渣油的二次加工性能等。

通常，又将①、②两类合并为一个层次。

2. 原油评价的内容和方法

常规的原油评价包括原油性质分析、原油实沸点蒸馏、馏分油及渣油的性质分析。原油的详细评价（综合评价）除上述内容外，还包括馏分油及渣油的烃族组成或 C₆、C₇ 以前的单体烃组成、润滑油原料的评价等。根据我国大部分原油含蜡及含烷烃多的特点，原油评价中还包括单体正烷烃含量的测定。按照炼油厂在设计及生产方面所提出的不同要求，原油评价工作的内容及深度有所差别。

原油评价中，原油、馏分油及渣油的性质分析大部分采用与石油产品相同的标准试验方法，也有一部分分析项目尚未标准化。

原油的综合评价的一般流程如图 1-1 所示。

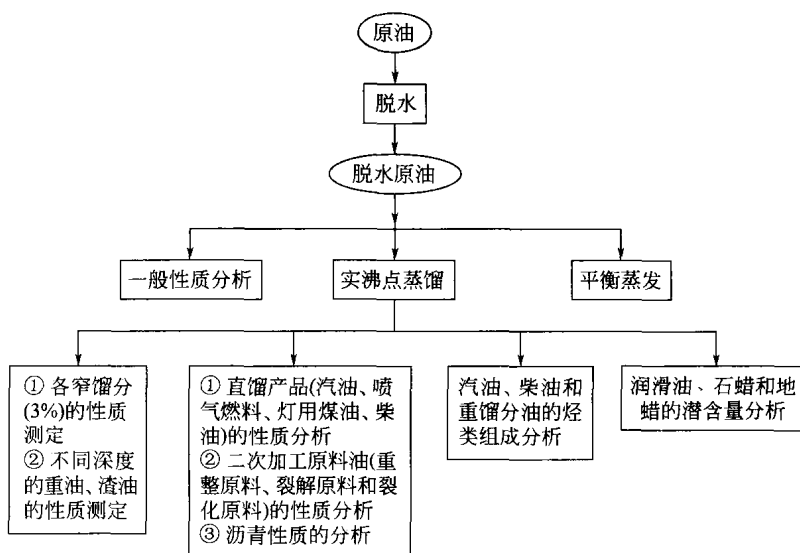


图 1-1 原油综合评价的一般流程

(1) 原油性质分析 原油性质分析项目及方法见表 1-1。

表 1-1 原油的性质分析

| 项 目 | 方 法 | 项 目 | 方 法 |
|-------------|------------|-----|------------|
| API 度(°API) | GB 1885—83 | 闪点 | GB 267—77 |
| 密度 | GB 2538—81 | 灰分 | GB 2538—81 |
| 运动黏度 | GB 2538—81 | 酸值 | GB 7304—87 |
| 凝点 | GB 2538—81 | 碳 | 见参考文献 |
| 倾点 | GB 3535—83 | 氢 | 见参考文献 |
| 蜡含量 | 见参考文献 | 硫含量 | X 光荧光法 |
| 沥青质 | 见参考文献 | 氮含量 | 见参考文献 |
| 胶质 | 见参考文献 | 镍含量 | 见参考文献 |
| 残炭 | GB 2538—81 | 钒含量 | 见参考文献 |
| 水分 | GB 2538—81 | 馏程 | GB 2538—81 |
| 盐含量 | GB 6532—86 | | |

其中密度是原油最重要的性质之一。一般来说，密度小的原油，即密度指数°API 大的原油含轻馏分多。通常将°API 小于 20，即 20℃时密度大于 0.930g/cm³ 的原油称为重质原油。当密度相同时，石蜡基原油比中间基或环烷基原油含轻馏分少。原油的硫含量对炼油过程及产品质量有很大影响。国际贸易中有时以密度及硫含量作为原油计价的指标。

我国大部分原油属高含蜡原油，因此，把蜡含量列为原油的常规分析项目之一。蜡含量的测定尚无统一的标准方法，测得的结果随方法不同有较大差别。当测定蜡含量时，首先要除去原油中的沥青质、胶质，然后再在选择性溶剂中冷冻，使蜡析出定量。

沥青质和胶质含量的测定方法也尚未标准化。以下所述的沥青质，系指不溶于正庚烷而溶于苯的物质；胶质系指脱沥青质后的原油在液体色谱分离中，被硅胶或氧化铝所吸附的极性最强的非烃化合物。

(2) 原油的实验室蒸馏

① 原油的半精馏试验。本试验适用于少量油样（300mL）的蒸馏，采用汉柏（Hemp-le）蒸馏瓶，整套装置与美国矿务局原油常规分析所用的相同。但在操作条件上根据中国原油含轻馏分少的特点而有所变动，200℃后的馏分在较低残压下蒸馏。蒸馏在常压、1.33kPa(10mmHg)及小于0.27kPa(2mmHg)三段压力下进行。馏分切割点见表1-2。收集各馏分后，测定其密度、凝点。从半精馏试验可以得到接近于实沸点蒸馏的馏分收率，并按250~275℃及395~425℃两个馏分的°API（由密度换算）确定原油的属性类别。

表 1-2 原油半精馏试验切割条件

| 蒸馏压力/kPa(mmHg) | 减压下馏分沸点/℃ | 相当常压下馏分沸点/℃ |
|----------------|----------------------|-------------|
| 常压 101.3(760) | — | 初馏~100 |
| | | 100~150 |
| | | 150~200 |
| 1.33(10) | 约 117 | 200~250 |
| | 117~138 | 250~275 |
| | 138~158 | 275~300 |
| | 158~200 | 300~350 |
| | 200~240 | 350~395 |
| | 240~265 ^① | 395~425 |
| | 265~285 | 425~500 |
| <0.27(<2) | 约 300 | 450~500 |

① 相当于美国矿务局方法中 5.33 kPa(40mmHg) 压力下的 275~300℃馏分。

② 原油的实沸点蒸馏及高真空蒸馏。原油的实沸点蒸馏是指在一种标准蒸馏设备中进行的蒸馏（ASTM D2892）。这种蒸馏设备的分馏效率相当于 15 个理论塔板，回流比为 5 : 1。蒸馏在常压及减压条件下进行。为避免裂化，釜底温度不能超过 350℃。由于精馏柱所产生的压差，使釜中的残压不可能太低。因此，实沸点蒸馏只能蒸出相当于常压下小于 400℃的馏分。更高沸点的馏分是改用不带精馏柱的高真空蒸馏设备蒸出，蒸馏残压需小于 0.27kPa(2mmHg)。最终沸点根据残压的大小可蒸至相当于常压下 500~550℃。在蒸馏过程中，切割一系列的窄馏分、宽馏分或直馏产品，分别测定这些馏分或产品的收率及性质，得到实沸点曲线、中百分率-性质曲线及其他评价数据。

③ 平衡汽化。在实验室平衡汽化设备中，将油品加热汽化，使气、液两相在恒定的压力和温度下密切接触一段足够长的时间后迅即分离，即可测得油品在该条件下的平衡汽化分率。在恒压下选择几个合适的温度（一般至少要 5 个）进行试验，就可以得到恒压下平衡汽化率与温度的关系。

以汽化温度对汽化率作图，即可得油品的平衡汽化曲线。根据平衡汽化曲线，可以确定油品在不同汽化率时的温度（如精馏塔进料段温度），泡点温度（精馏塔侧线温度和塔底温度），露点温度（精馏塔顶温度）等。

但由于平衡汽化的实验工作量很大，在实践中，一般通过三种蒸馏曲线的换算来求得平衡汽化数据（参看第二章 原油常减压蒸馏）。

④ 恩氏蒸馏。恩氏蒸馏是一种简单蒸馏，它是以规格化的仪器和在规定的试验条件下进行的，故是一种条件性的试验方法。

将馏出温度（气相温度）对馏出量（体积百分数）作图，就得到恩氏蒸馏曲线。

在原油评价过程中，一般不对原油做恩氏蒸馏。但是对各馏分油来说，由恩氏蒸馏数据可以计算油品的一部分性质参数，因此，它也是油品的最基本的物性数据之一。

恩氏蒸馏的本质是渐次汽化，基本上没有精馏作用，因而不能显示油品中各组分的实际沸点。但它能反映油品在一定条件下的汽化性能，而且简便易行，所以广泛用作反映油品汽化性能的一种规格试验（参看第二章 原油常减压蒸馏）。

（3）馏分油性质测定

① 窄馏分性质测定。原油在实沸点蒸馏中切割成窄馏分，每个馏分占原油的 3%~5%（质量分数）。也可以按每 20~50℃切割一个馏分规定各馏分的密度、几个温度下的黏度、凝点、酸度或酸值、硫含量、苯胺点及折光指数。我国高含蜡原油中大于 350℃的窄馏分在室温下均呈凝固状态。在测定密度时，必须在 70℃的恒温浴中测定液体密度，然后将 70℃下的密度换算至 20℃时的密度（GB 1884~1885）。按实沸点馏分的收率、性质绘制实沸点曲线（实沸点-总收率曲线）、百分率-性质曲线（见图 1-2）。将窄馏分性质及收率数据进行计算机处理，可以得到各种宽馏分性质，以等值曲线表示（见图 1-2）。

石油馏分的物理性质与烃族组成有关。从一些物理性质的关联，可以得到表明烃族组成的参数。其中在炼油工程中最常用的有特性因数、黏重常数、相关指数。从窄馏分的沸点、密度、黏度，即可计算上述参数，计算公式及意义见表 1-3。

表 1-3 特性参数的计算及意义

| 特性参数 | 计算公式 | 石油馏分的特性参数值 | | |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|--------------|
| | | 石蜡基 | 中间基 | 环烷基 |
| 特性因数(K) | $K = \frac{1.216 \sqrt[3]{T}}{d_{15.6}^{15.6}}$ | >12.1 | 11.5~12.1 | <11.5 |
| 相关指数(BMCI) | $BMCI = \frac{48640}{T} + 473.7d_{15.6}^{15.6} - 456.8$ | 0~12(烷烃) | 24~52(环烷烃) | 55~100(单环芳烃) |
| 黏重常数(VGC) | $VGC = \frac{d_{15.6}^{15.6} - 0.24 - 0.0381g_{v100}}{0.755 - 0.0111g_{v100}}$ | <0.82 | 0.82~0.85 | >0.85 |

② 直馏产品及宽馏分性质测定。直馏产品的切割方案是根据原油特点及产品需求而定在使是同一原油，也可以有多种切割方案。表 1-4 为中国含蜡原油生产各种发动机燃料时的一种切割方案及分析项目。分析项目是根据石油产品标准而决定的。

（4）润滑油原料的评价 润滑油品种繁多，性能要求各异。在原油评价中，不可能对各类润滑油都做出评价，一般只研究从原油中生产汽油机润滑油及柴油机润滑油的可能性及潜含量，考察的性能主要是黏度指数。

评价馏分润滑油原料时，先将馏分油进行溶剂脱蜡，然后将脱蜡油在硅胶-氧化铝双吸附剂上进行色谱分离。采用不同极性的溶剂作冲洗剂，分别得到饱和烃、轻芳烃、中芳烃、重芳烃及胶质。并分别测定饱和烃、饱和烃+轻芳烃及饱和烃+轻芳烃+中芳烃的性质。一般以（饱和烃+轻芳烃）作为润滑油的理想组分。

评价残渣润滑油原料时，先将脱沥青质后的渣油通过氧化铝吸附柱，以不同溶剂冲洗进行吸附分离，得到饱和烃+轻芳烃、饱和烃+轻芳烃+中芳烃再分别脱蜡。测定脱蜡组分



的黏度指数等主要性质。

表 1-4 直馏产品及宽馏分的切割方案及分析项目^①

| 实沸点 范围/℃ | 初馏点 ~130 | 130~ 230 | 230~ 350 | 350~ 500 | >350 或>500 | 实沸点 范围/℃ | 初馏点 ~130 | 130~ 230 | 230~ 350 | 350~ 500 | >350 或>500 |
|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| 产品 | 直馏汽 油或重 整原料 | 喷气 燃料 | 轻柴油 | 裂化 原料 | 渣油 | 产品 | 直馏汽 油或重 整原料 | 喷气 燃料 | 轻柴油 | 裂化 原料 | 渣油 |
| 密度 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 硫醇型硫含量 | | ✓ | | | |
| 馏程 | ✓ | ✓ | ✓ | | | 碘值 | | ✓ | | | |
| 闪点 | | ✓ | ✓ | | ✓ | 凝点 | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| 腐蚀 | ✓ | ✓ | ✓ | | | 苯胺点 | | ✓ | ✓ | | |
| 硫含量 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 柴油指数 | | | ✓ | | |
| 酸度 | ✓ | ✓ | ✓ | | | 十六烷指数 | | | ✓ | | |
| 辛烷值 | ✓ | | | | | 软化点 | | | | | ✓ |
| 冰点 | | ✓ | | | | 针入度 | | | | | ✓ |
| 运动黏度 | | | | | | 延展度 | | | | | ✓ |
| 20℃ | | ✓ | ✓ | | | 残炭 | | | | ✓ | ✓ |
| -40℃ | | ✓ | | | | 金属含量(钒、镍) | | | | ✓ | ✓ |
| 芳烃含量 | | ✓ | | | | | | | | | |

① ✓表示要测定的主要项目。对重整原料和裂化原料，还要测定烃族组成或结构族组成。

(5) 烃类组成分析 原油评价中的烃类分析以三种形式表示。第一种是单体烃分析，对轻汽油馏分，可以用气相色谱法分析出绝大部分的单体烃，对其他馏分，可以用气相色谱法分析出不同碳数的正烷烃。第二种是烃族组成分析，即以烃的类型为单位，分为饱和烃(P)、环烷烃(N)及芳烃(A)。用质谱法还可以分析出不同环数的环烷烃、芳烃。但随着馏分变重，一个分子中往往兼有环烷环、芳烃环及烷链。因此，第三种分析以结构族组成表示。馏分油的结构族组成分析采用 $n-d-M$ 法 (ASTM D3238)。该法规定以 20℃ 温度下测得的折光指数、密度以及相对分子质量，按一组公式计算出结果。我国许多原油大于 350℃ 馏分呈凝固态，所以要测定 70℃ 温度下的折光指数、密度，用另一组公式计算。 $n-d-M$ 法测得的结果如下。

$C_P\%$ ——烷烃及烷链上的碳原子占总碳原子的百分数；

$C_N\%$ ——环烷环上的碳原子占总碳原子的百分数；

$C_A\%$ ——芳烃环上的碳原子占总碳原子的百分数；

R_N ——平均分子中的环烷环数；

R_A ——平均分子中的芳烃环数；

R_T ——平均分子中的总环数。

渣油的组成非常复杂，其中除烃类外，还含有较多的硫、氮、氧等非烃化合物。对渣油的详细组成分析已超出原油评价的范围。在原油评价中，对渣油的族组成分析有四组分法(SARA法)，即用溶剂沉淀法及液体色谱法将渣油分为饱和烃(S)、芳烃(A)、胶质(R)、沥青质(A) 4个组分。渣油的结构族组成近年来研究很多，但尚未标准化。常用的有密度法及布朗-拉德纳(Brown-Ladner)的核磁共振法等。核磁共振法以碳、氢、氧元素分析及质子核磁共振(H-NMR)为基础，按下式计算结构参数。

$$f_a = \frac{\frac{C}{H} - \frac{H_a^*}{X} - \frac{H_o^*}{Y}}{\frac{C}{H}} \quad (1-1)$$

$$\sigma = \frac{\frac{H_a^*}{X} + \frac{O}{H}}{\frac{H_a^*}{X} + \frac{O}{H} + H_{ar}^*} \quad (1-2)$$

$$\frac{H_{aru}}{C_{ar}} = \frac{\frac{H_a^*}{X} + H_a^* + \frac{O}{H}}{\frac{C}{H} - \frac{H_a^*}{X} - \frac{H_o^*}{Y}} \quad (1-3)$$

式中 f_a ——芳烃碳与总碳之比，即芳烃度 (Aromaticity)；

C/H ——碳氢原子比；

O/H ——氧氢原子比；

H_a^* ——芳烃分子中 a 位碳原子上的氢占总氢的分数；

H_o^* ——其他非芳烃部分的氢占总氢的分数；

H_{ar}^* ——芳环碳原子上的氢占总氢的分数；

σ ——芳环外周碳的取代率；

H_{aru}/C_{ar} ——芳环部分假设未被取代时的氢碳原子比，表示芳环的缩合度，其值愈小，则缩合度愈大；

X、Y——常数，一般等于 2。

3. 原油评价案例

以大庆原油为例，所做的原油评价数据及结果如下。

(1) 大庆原油一般性质测定与分析 原油含水量大于 0.5% 时先脱水。原油经脱水后，进行一般性质分析。原油性质分析项目及方法见表 1-1，得到的结果列于表 1-5 (为了便于比较、分析，这里同时列出其他几种国产原油的数据)。

表 1-5 几种国产原油的一般性质

| 性 质 | 大庆 | 胜利 | 大港 | 克拉玛依 | 辽河 |
|----------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 密度(20℃)/(g/cm ³) | 0.8587 | 0.9005 | 0.8826 | 0.8808 | 0.8818 |
| 50℃运动黏度/(10 ⁻⁶ m ² /s) | 19.5 | 83.4 | 17.3 | 32.3 | 21.9 |
| 凝点/℃ | 32 | 28 | 28 | -57 | 21 |
| 含蜡量(吸附法)/% | 25.1 | 14.6 | 15.4 | 2.1 | 8.7 |
| 沥青质/% | 0.1 | 5.1 | 13.1 | 0.5 | — |
| 硅胶胶质/% | 8.9 | 23.2 | 9.7 | 15.0 | 15.7 |
| 酸值/[mg(KOH)/100mL] | — | — | — | 0.74 | 0.98 |
| 残炭/% | 3.0 | 6.4 | 3.2 | 3.8 | 4.8 |
| 元素分析/% | | | | | |
| C | 86.3 | 86.3 | 85.7 | 86.1 | — |
| H | 13.5 | 12.6 | 13.4 | 13.3 | — |
| S | 0.15 | 0.88 | 0.12 | 0.12 | 0.18 |
| N | — | 0.41 | 0.23 | 0.27 | 0.31 |
| 微量元素/(μg/g) | | | | | |
| V | <0.1 | 1.0 | <1 | — | 0.6 |
| Ni | 2 | 26 | 18 | — | 32 |
| <300℃馏出物/% | 25.6 | 18.0 | 26.0 | 31.0 | — |

由表 1-5 可见，大庆原油密度低，黏度小，凝点、含蜡量高，氢元素含量、小于 300℃ 馏分多，沥青质、胶质少，残炭低，重金属镍的含量也很少。是典型的低硫石蜡基原油，适合生产石脑油、汽油、亦能为催化裂化提供高质量原料。

(2) 大庆原油实沸点蒸馏及窄馏分性质测定与分析 大庆原油实沸点馏程及窄馏分性质列于表 1-6，将其与其他我国主要油区原油的实沸点蒸馏馏分收率比较 (数据从略)，可知：

表 1-6 大庆原油实沸点馏程及窄馏分性质数据

| 馏分号 | 沸点范围 /℃ | 占原油的质量分数/% | | 密度(20℃) / (g/cm ³) | 运动黏度/(10 ⁻⁶ m ² /s) | | | 凝点 /℃ | 苯胺点 /℃ | 酸度 [mg(KOH)/100mL] | 闪点(开) /℃ | 折射率 | | 平均相对分子质量 |
|-----|---------|------------|-------|--------------------------------|-------------------------------------------|------|------|-----------------|--------|--------------------|----------|------------------------------|------------------------------|----------|
| | | 每馏分 | 累计 | | 20℃ | 50℃ | 100℃ | | | | | n _D ²⁰ | n _D ⁴⁰ | |
| 1 | 初馏~112 | 2.98 | 2.98 | 0.7108 | — | — | — | — | 54.1 | 0.98 | — | 1.3995 | — | 98 |
| 2 | 112~156 | 3.15 | 6.13 | 0.7461 | 0.89 | 0.64 | — | — | 59.0 | 1.58 | — | 1.4172 | — | 121 |
| 3 | 156~195 | 3.22 | 9.35 | 0.7699 | 1.27 | 0.89 | — | -65 | 62.2 | 2.67 | — | 1.4350 | — | 143 |
| 4 | 195~225 | 3.25 | 12.00 | 0.7958 | 2.03 | 1.26 | — | -41 | 66.4 | 3.02 | 78 | 1.4445 | — | 172 |
| 5 | 225~257 | 3.40 | 16.00 | 0.8092 | 2.81 | 1.63 | — | -24 | 71.2 | 2.74 | — | 1.4502 | — | 194 |
| 6 | 257~289 | 3.40 | 19.46 | 0.8161 | 4.14 | 2.26 | — | -9 | 77.2 | 3.65 | 125 | 1.4560 | — | 217 |
| 7 | 289~313 | 3.44 | 22.90 | 0.8173 | 5.93 | 3.01 | — | 4 | 84.8 | 4.39 | — | 1.4565 | — | 246 |
| 8 | 313~335 | 3.37 | 26.27 | 0.8264 | 8.33 | 3.84 | 1.73 | 13 | 88.0 | 7.18 | 157 | 1.4612 | — | 264 |
| 9 | 335~355 | 3.45 | 29.72 | 0.8348 | — | 4.99 | 2.07 | 22 | 91.6 | 7.98 | — | — | 1.4450 | 292 |
| 10 | 355~375 | 3.43 | 33.15 | 0.8363 | 6.24 | 2.61 | 2.61 | 29 | — | 0.08 ^① | 184 | 1.4455 | — | 299 |
| 11 | 374~394 | 3.35 | 36.50 | 0.8396 | — | 7.70 | 2.86 | 34 | — | 0.09 | — | 1.4472 | — | 328 |
| 12 | 394~415 | 3.55 | 40.05 | 0.8479 | — | 9.51 | 3.33 | 38 | — | 0.22 | 206 | 1.4515 | — | 349 |
| 13 | 415~435 | 3.39 | 43.44 | 0.8536 | — | 13.3 | 4.22 | 43 | — | 0.12 | — | 1.4560 | — | 387 |
| 14 | 435~456 | 3.88 | 47.32 | 0.8686 | — | 21.9 | 5.86 | 45 | — | 0.06 | 238 | 1.4641 | — | 420 |
| 15 | 456~475 | 4.05 | 51.37 | 0.8732 | — | — | 7.05 | 48 | — | 0.05 | — | 1.4675 | — | 438 |
| 16 | 475~500 | 4.52 | 55.89 | 0.8786 | — | — | 8.92 | 52 | — | 0.03 | 282 | 1.4697 | — | — |
| 17 | 500~525 | 4.15 | 60.04 | 0.8832 | — | — | 11.5 | 55 | — | 0.03 | — | 1.4730 | — | — |
| 渣油 | >525 | 38.5 | 98.54 | 0.9375 | — | — | — | 41 ^① | — | — | — | — | — | — |
| 损失 | — | 1.46 | 100.0 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

① 为软化点; ② 以下为酸值, mg(KOH)/g。