

SHIYOUHUAGONG ZHIYEJINENG PEIXUN JIAOCAI

石油化工职业技能培训教材



# 汽(煤、柴)油加氢装置操作工

中国石油化工集团公司人事部 编  
中国石油天然气集团公司人事服务中心

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

# SHIYOUHUAGONG ZHIYEJINENG PEIXUNJIAOCAI



## 石油化工职业技能培训教材

责任编辑：黄彦芬  
责任校对：张小宏  
封面设计：七星工作室

ISBN 978-7-80229-320-5



9 787802 293205 >

定价：30.00 元

# 前言

为了进一步加强石油化工行业技能人才培养队伍建设,满足职业技能培训和鉴定的需要,中国石油化工集团公司人事部、中国石油天然气集团公司人事服务中心联合组织编写了《石油化工职业技能培训教材》。本套教材的编写依照劳动和社会保障部制定的石油化工生产人员《国家职业标准》及中国石油化工集团公司人事部编制的《石油化工职业技能培训考核大纲》,坚持以职业活动为导向,以职业技能为核心,以“实用、管用、够用”为编写原则,结合石油化工行业生产实际,以适应技术进步、技术创新、新工艺、新设备、新材料、新方法等要求,突出实用性、先进性、通用性,力求为石油化工行业生产人员职业技能培训提供一套高质量的教材。

根据国家职业分类和石油化工行业各工种的特点,本套教材采用共性知识集中编写、各工种特有知识单独分册编写的模式。全套教材共分为三个层次,涵盖石油化工生产人员《国家职业标准》各职业(工种)对初级、中级、高级、技师和高级技师各级别的要求。

第一层次《石油化工通用知识》为石油化工行业通用基础知识,涵盖石油化工生产人员《国家职业标准》对各职业(工种)共性知识的要求。主要内容包括:职业道德,相关法律法规知识,安全生产与环境保护,生产管理,质量管理,生产记录、公文和技术文件,制图与识图,计算机基础,职业培训与职业技能鉴定等方面的基本知识。

第二层次为专业基础知识,分为《炼油基础知识》和《化工化纤基础知识》两册。其中《炼油基础知识》涵盖燃料油生产工、润滑油(脂)生产工等职业(工种)的专业基础及相关知识,《化工化纤基础知识》涵盖脂肪烃生产工、烃类衍生物生产工等职业(工种)的专业基础及相关知识。

第三层次为各工种专业理论知识和操作技能,涵盖石油化工生产人员《国家职业标准》对各工种操作技能和相关知识的要求,包括工艺原理、工艺操作、设备使用与维护、事故判断与处理等内容。

《汽(煤、柴)油加氢装置操作工》为第三层次教材,在编写时采用传统教材

模式，不分级别，在编写顺序上遵循由浅到深、先基础理论知识后技能操作的编写原则，在章节安排上打破了常规操作法按操作顺序编写的惯例，把设备使用(操作)知识和工艺操作知识分开编写，使得技能人员通过对有关设备从理论到技能的学习后，达到自觉把所学知识应用到操作中的目的。

《汽(煤、柴)油加氢装置操作工》教材由齐鲁石化负责组织编写，主编朱文红(齐鲁石化)，参加编写的人员有艾中秋(沧州炼油厂)、齐立志(齐鲁石化)、邓华强(齐鲁石化)、徐国威(抚顺石化)；本教材已经中国石油化工集团公司人事部、中国石油天然气集团公司人事服务中心组织的职业技能培训教材审定委员会审定通过，主审郑世桂、叶华伟，参加审定的人员有王玉国、王卿、王友法、史开洪、刘汝宾、岑奇顺、张孔远、汪东红、范云峰、杨基和、高卫亭、崔淑文、潘勇，审定工作得到了九江石化、抚顺石化、沧州石化、镇海石化、茂名石化、江苏工业学院等单位的大力支持；中国石化出版社对教材的编写和出版工作给予了通力协作和配合，在此一并表示感谢。

由于石油化工职业技能培训教材涵盖的职业(工种)较多，同工种不同企业的生产装置之间也存在着差别，编写难度较大，加之编写时间紧迫，不足之处在所难免，敬请各使用单位及个人对教材提出宝贵意见和建议，以便教材修订时补充更正。

# 目 录

## 第1章 概 述

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 1.1 加氢精制技术的发展过程概述 .....     | ( 1 ) |
| 1.1.1 加氢精制技术的发展过程 .....     | ( 1 ) |
| 1.1.2 汽(煤、柴)油加氢精制的作用 .....  | ( 2 ) |
| 1.1.3 加氢精制技术新进展 .....       | ( 4 ) |
| 1.2 汽(煤、柴)油加氢精制典型装置简介 ..... | ( 6 ) |
| 1.2.1 汽油加氢精制 .....          | ( 6 ) |
| 1.2.2 柴油加氢精制 .....          | ( 7 ) |
| 1.2.3 煤油加氢精制 .....          | ( 9 ) |

## 第2章 加氢精制的工艺原理

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| 2.1 加氢精制工艺原理概述 .....         | ( 12 ) |
| 2.2 加氢精制的化学反应 .....          | ( 12 ) |
| 2.2.1 脱硫反应 .....             | ( 12 ) |
| 2.2.2 脱氮反应 .....             | ( 14 ) |
| 2.2.3 脱氧反应 .....             | ( 14 ) |
| 2.2.4 烯烃和芳烃饱和 .....          | ( 15 ) |
| 2.2.5 脱金属反应 .....            | ( 15 ) |
| 2.3 加氢过程的热力学和动力学 .....       | ( 16 ) |
| 2.3.1 加氢脱硫反应过程的热力学和动力学 ..... | ( 16 ) |
| 2.3.2 加氢脱氮反应过程的热力学和动力学 ..... | ( 18 ) |
| 2.3.3 加氢脱氧反应过程的热力学和动力学 ..... | ( 18 ) |
| 2.3.4 芳烃饱和反应过程的热力学和动力学 ..... | ( 19 ) |
| 2.4 汽煤柴油加氢的主要规律 .....        | ( 20 ) |
| 2.4.1 汽油馏分加氢的主要规律 .....      | ( 20 ) |
| 2.4.2 直馏喷气燃料馏分加氢的主要规律 .....  | ( 21 ) |
| 2.4.3 柴油馏分加氢的主要规律 .....      | ( 22 ) |
| 2.5 影响汽煤柴油加氢的主要因素 .....      | ( 24 ) |
| 2.5.1 反应压力 .....             | ( 24 ) |
| 2.5.2 反应温度 .....             | ( 25 ) |
| 2.5.3 空速 .....               | ( 26 ) |
| 2.5.4 氢油比 .....              | ( 26 ) |

|                      |        |
|----------------------|--------|
| 2.6 加氢精制典型工艺流程 ..... | ( 26 ) |
| 2.6.1 反应单元 .....     | ( 26 ) |
| 2.6.2 分馏单元 .....     | ( 27 ) |
| 2.6.3 脱硫单元 .....     | ( 28 ) |

### 第3章 催化剂

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| 3.1 概述 .....            | ( 29 ) |
| 3.1.1 催化剂的作用 .....      | ( 29 ) |
| 3.1.2 催化剂的组成 .....      | ( 29 ) |
| 3.1.3 催化剂的特性 .....      | ( 30 ) |
| 3.1.4 多相催化反应的反应特点 ..... | ( 31 ) |
| 3.2 加氢精制催化剂 .....       | ( 32 ) |
| 3.2.1 分类 .....          | ( 32 ) |
| 3.2.2 加氢精制催化剂的组成 .....  | ( 34 ) |
| 3.2.3 性能及评价 .....       | ( 35 ) |
| 3.2.4 加氢催化剂的发展趋势 .....  | ( 37 ) |
| 3.3 催化剂的失活与再生 .....     | ( 41 ) |
| 3.3.1 催化剂的失活 .....      | ( 41 ) |
| 3.3.2 催化剂的再生 .....      | ( 42 ) |

### 第4章 原料及产品

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| 4.1 加氢精制装置原料 .....       | ( 44 ) |
| 4.1.1 原料油 .....          | ( 44 ) |
| 4.1.2 补充氢 .....          | ( 47 ) |
| 4.1.3 注水 .....           | ( 47 ) |
| 4.2 加氢精制装置产品 .....       | ( 48 ) |
| 4.2.1 汽油的质量标准与质量控制 ..... | ( 48 ) |
| 4.2.2 煤油的质量标准与质量控制 ..... | ( 49 ) |
| 4.2.3 柴油的质量标准与质量控制 ..... | ( 50 ) |

### 第5章 工艺操作

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| 5.1 加氢精制装置的开工 .....         | ( 51 ) |
| 5.1.1 开工准备 .....            | ( 51 ) |
| 5.1.2 系统气密 .....            | ( 59 ) |
| 5.1.3 分馏系统水联运、油联运 .....     | ( 64 ) |
| 5.1.4 催化剂装填 .....           | ( 67 ) |
| 5.1.5 催化剂干燥与反应系统氢气气密 .....  | ( 72 ) |
| 5.1.6 氢气状态下急冷氢及紧急泄压试验 ..... | ( 73 ) |
| 5.1.7 催化剂预硫化 .....          | ( 75 ) |

|            |                    |             |
|------------|--------------------|-------------|
| 5.1.8      | 反应系统进料及分馏操作调整      | (79)        |
| 5.1.9      | 脱硫系统开工             | (81)        |
| 5.1.10     | 开车盲板的拆装            | (83)        |
| <b>5.2</b> | <b>加氢精制装置的停工</b>   | <b>(83)</b> |
| 5.2.1      | 停工准备               | (83)        |
| 5.2.2      | 反应停进料和热氢带油         | (84)        |
| 5.2.3      | 反应器解氢和反应系统氮气置换     | (84)        |
| 5.2.4      | 原料和分馏系统退油          | (85)        |
| 5.2.5      | 脱硫系统停工             | (85)        |
| 5.2.6      | 原料、分馏系统的蒸汽吹扫       | (86)        |
| 5.2.7      | 系统隔离               | (88)        |
| 5.2.8      | 催化剂无氧卸剂            | (88)        |
| 5.2.9      | 装置停工的安全环保控制        | (90)        |
| <b>5.3</b> | <b>加氢精制装置的正常操作</b> | <b>(91)</b> |
| 5.3.1      | 原料系统               | (91)        |
| 5.3.2      | 反应系统               | (92)        |
| 5.3.3      | 分馏系统               | (99)        |
| 5.3.4      | 脱硫系统               | (105)       |
| 5.3.5      | 公用工程系统             | (108)       |

## 第6章 事故分析及判断处理

|            |                 |              |
|------------|-----------------|--------------|
| <b>6.1</b> | <b>事故处理原则</b>   | <b>(113)</b> |
| <b>6.2</b> | <b>紧急停工</b>     | <b>(114)</b> |
| 6.2.1      | 紧急停工的一般原则       | (114)        |
| 6.2.2      | 紧急停工的处理方案       | (114)        |
| 6.2.3      | 紧急停工的注意事项       | (115)        |
| <b>6.3</b> | <b>工艺事故的处理</b>  | <b>(115)</b> |
| 6.3.1      | 原料油中断           | (115)        |
| 6.3.2      | 循环氢中断           | (116)        |
| 6.3.3      | 新氢中断            | (117)        |
| 6.3.4      | 高压窜低压           | (117)        |
| 6.3.5      | 反应器床层“飞温”       | (118)        |
| 6.3.6      | 临氢装置的泄漏和着火      | (118)        |
| <b>6.4</b> | <b>公用工程故障处理</b> | <b>(119)</b> |
| 6.4.1      | 装置停电            | (119)        |
| 6.4.2      | 停循环水            | (120)        |
| 6.4.3      | 停仪表风            | (120)        |
| 6.4.4      | 停蒸汽             | (121)        |
| 6.4.5      | 停燃料气(油)         | (121)        |

|            |                    |              |
|------------|--------------------|--------------|
| 6.4.6      | 高压水中断              | (121)        |
| <b>6.5</b> | <b>设备事故处理</b>      | <b>(121)</b> |
| 6.5.1      | DCS 故障             | (121)        |
| 6.5.2      | 加热炉事故处理            | (122)        |
| 6.5.3      | 热油管线、法兰泄漏着火        | (123)        |
| 6.5.4      | 高压换热器泄漏            | (123)        |
| 6.5.5      | 分馏塔底泵抽空            | (123)        |
| 6.5.6      | 分馏塔回流泵抽空           | (123)        |
| 6.5.7      | 分馏塔冲塔              | (124)        |
| 6.5.8      | 分馏塔淹塔              | (124)        |
| 6.5.9      | 临氢系统法兰泄漏或高压管线破裂    | (124)        |
| <b>6.6</b> | <b>加氢精制装置的化学中毒</b> | <b>(125)</b> |
| 6.6.1      | 硫化氢                | (125)        |
| 6.6.2      | 硫化剂                | (128)        |
| 6.6.3      | 羰基镍                | (130)        |

## 第 7 章 设 备

|            |                     |              |
|------------|---------------------|--------------|
| <b>7.1</b> | <b>加热炉</b>          | <b>(131)</b> |
| 7.1.1      | 加热炉的分类及结构           | (131)        |
| 7.1.2      | 加热炉开工操作             | (133)        |
| 7.1.3      | 加热炉的停工操作            | (134)        |
| 7.1.4      | 加热炉的正常操作            | (134)        |
| 7.1.5      | 加热炉异常现象分析及处理        | (137)        |
| 7.1.6      | 加热炉的腐蚀              | (140)        |
| 7.1.7      | 加热炉检修的主要内容及检修后的验收标准 | (141)        |
| <b>7.2</b> | <b>加氢精制反应器</b>      | <b>(143)</b> |
| 7.2.1      | 概述                  | (143)        |
| 7.2.2      | 加氢反应器的结构及各构件的作用     | (143)        |
| 7.2.3      | 反应器内构件的安装技术要点       | (145)        |
| 7.2.4      | 停车过程中加氢反应器的保护       | (145)        |
| <b>7.3</b> | <b>压缩机</b>          | <b>(146)</b> |
| 7.3.1      | 往复式新氢压缩机            | (147)        |
| 7.3.2      | 新氢压缩机异常现象分析及处理      | (156)        |
| 7.3.3      | 离心式循环氢压缩机工作原理       | (158)        |
| 7.3.4      | 离心式循环氢压缩机异常现象分析及处理  | (170)        |
| <b>7.4</b> | <b>空冷器</b>          | <b>(172)</b> |
| 7.4.1      | 空冷器的作用及特点           | (172)        |
| 7.4.2      | 空冷器的使用              | (173)        |
| 7.4.3      | 空冷器异常现象分析及处理        | (173)        |



|                           |       |
|---------------------------|-------|
| <b>7.5 泵</b> .....        | (174) |
| 7.5.1 泵的作用及特点 .....       | (174) |
| 7.5.2 进料泵的操作 .....        | (176) |
| 7.5.3 离心泵异常现象的分析及处理 ..... | (178) |
| 7.5.4 往复泵的操作 .....        | (180) |
| 7.5.5 往复泵异常现象分析及处理 .....  | (180) |
| 7.5.6 备用泵的维护 .....        | (180) |
| <b>7.6 换热器</b> .....      | (180) |
| 7.6.1 换热器的结构、类型及其特点 ..... | (181) |
| 7.6.2 换热器的投用 .....        | (184) |
| <b>7.7 高压分离器</b> .....    | (186) |
| <b>7.8 原料过滤器</b> .....    | (186) |
| <b>7.9 设备的损伤与防护</b> ..... | (187) |
| 7.9.1 加氢精制装置设备腐蚀 .....    | (187) |
| 7.9.2 加氢精制装置设备工艺防腐 .....  | (191) |

## 第8章 自动控制及联锁

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| <b>8.1 复杂自动控制</b> .....      | (192) |
| 8.1.1 原料罐氮封分程控制 .....        | (192) |
| 8.1.2 反应进料泵控制 .....          | (193) |
| 8.1.3 高压分离器物位(液位)控制 .....    | (194) |
| 8.1.4 反应系统压力控制 .....         | (196) |
| 8.1.5 反应器压降的检测和反应温度的控制 ..... | (199) |
| <b>8.2 工艺联锁</b> .....        | (202) |
| 8.2.1 反应进料加热炉熄火联锁 .....      | (202) |
| 8.2.2 反应系统紧急泄压联锁 .....       | (203) |
| 8.2.3 高压分离器液位低联锁 .....       | (204) |
| 8.2.4 补充氢压缩机停机联锁 .....       | (204) |
| 8.2.5 循环氢压缩机停机联锁 .....       | (204) |
| <b>8.3 加氢精制装置的安全监控</b> ..... | (204) |

## 第9章 加氢精制过程的技术经济 and 环境保护

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| <b>9.1 加氢精制装置生产运行分析常用工艺计算</b> ..... | (206) |
| 9.1.1 加工能力、加工负荷和加工损失的分析 .....       | (206) |
| 9.1.2 氢耗的计算 .....                   | (206) |
| 9.1.3 加氢脱硫率、加氢脱氮率的计算 .....          | (207) |
| 9.1.4 装置收率的分析与计算 .....              | (207) |
| 9.1.5 过剩空气系数的概念及计算 .....            | (207) |
| 9.1.6 加热炉热负荷和热效率的计算 .....           | (208) |

|                                   |              |
|-----------------------------------|--------------|
| 9.1.7 催化剂上硫率和硫化剂的用量 .....         | (208)        |
| <b>9.2 加氢精制过程的用能分析和能耗计算 .....</b> | <b>(209)</b> |
| 9.2.1 加氢精制装置能耗构成 .....            | (210)        |
| 9.2.2 工艺条件对能耗的影响 .....            | (211)        |
| <b>9.3 加氢精制的环境保护 .....</b>        | <b>(213)</b> |
| <b>9.4 装置标定 .....</b>             | <b>(213)</b> |
| 9.4.1 标定方案的编写 .....               | (213)        |
| 9.4.2 标定数据的采集 .....               | (214)        |
| 9.4.3 标定的核算 .....                 | (214)        |
| 9.4.4 标定报告的撰写 .....               | (214)        |
| <b>9.5 车间班组经济核算 .....</b>         | <b>(218)</b> |
| 9.5.1 班组经济核算的目的 .....             | (218)        |
| 9.5.2 班组经济核算方法 .....              | (218)        |
| <b>参考文献 .....</b>                 | <b>(220)</b> |

# 第 1 章 概 述

## 1.1 加氢精制技术的发展过程概述

加氢精制是炼厂提高油品质量的重要手段，主要用于生产满足相应标准规范的石油产品或满足下游装置对原料质量的需求。加氢精制能使原料油中的含硫、氮、氧等非烃化合物氢解，使烯烃、芳烃加氢饱和并能脱除金属和沥青质等杂质，具有处理原料范围广、液体收率高、产品质量好等优点。

目前加氢精制技术主要用于二次加工装置汽油、柴油的精制，也用于某些原油直馏产品（如直馏喷气燃料馏分）的精制或改质。

### 1.1.1 加氢精制技术的发展过程

现代炼油工业的加氢技术是在第二次世界大战以前的煤和煤焦油高压催化加氢技术的基础上发展起来的。1949年铂重整技术的工业应用，除生产高辛烷值汽油组分外还副产廉价的氢气，对现代加氢技术的发展起了关键作用，从此加氢技术走上了蓬勃发展之路。1950年炼油厂开始出现了加氢精制装置，进入20世纪60年代以后，随着世界经济增长，对石油产品的需求大幅度提高，而大量的二次加工油品需要精制提高其安定性，加氢精制技术进入快速发展阶段。20世纪70年代，美国、日本等许多国家含硫原油和高硫原油的加工量大增，不仅大量的直馏汽（煤、柴）油需要脱硫，而且催化裂化原料油需要脱硫、脱氮和芳烃饱和，相继出现了固定床蜡油加氢脱硫装置，固定床渣油加氢处理装置。在加氢催化剂方面，也出现了较大的进展，先后出现了以氧化铝为载体的钨镍、钨镍和钨镍氧化硅-氧化铝、贵金属催化剂等。这些加氢技术的发明和工业应用，使加氢技术由产生、发展走向成熟。2005年底，世界原油一次加工能力达到42.43亿吨，其中二次加工装置能力较大的有：加氢（含加氢精制、加氢裂化等）21.55亿吨，催化裂化7.84亿吨，催化重整5.73亿吨，远超过了延迟焦化和其他热加工装置的加工能力。加氢技术是20世纪也将是21世纪炼油工业的三大支柱技术之一。

20世纪90年代以来，世界炼油企业加工的原油明显变重，原油中硫和重金属含量明显上升，而实施可持续发展战略，保护人类赖以生存的环境，是21世纪各国的发展趋势。因此，各国政府公布的环保法规日趋严格，要求炼油企业采用清洁生产工艺和生产清洁燃料的呼声越来越迫切。美国于1993年10月开始使用清洁柴油，1997年开始使用清洁汽油。日本从1996年开始使用清洁汽油，1997年开始使用清洁柴油。部分发展中国家也相继出台了使用清洁燃料的法规。我国从2000年7月1日开始在北京、上海、广州三大城市执行车用无铅汽油标准（GB 17930—1999），从2003年在全国执行，从2002年开始在全国使用按轻柴油新标准（GB 252—2000）生产的柴油。

清洁燃料是减少常规汽柴油对大气造成污染的升级换代产品。生产清洁燃料的关键是降低硫含量和芳烃含量。降低硫含量和芳烃含量也是降低汽车尾气排放物中 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ 、CO、HC和PM的关键技术之一。降低汽柴油的硫含量和芳烃含量主要还是依靠加氢精制技术。

我国早在20世纪50年代初期就已经开始进行加氢技术的研究和开发，首先开发了油母

页岩粗轻油预饱和加氢工艺，并取得油页岩轻油加氢精制等技术成果。20世纪60年代以后，随着大庆、胜利等油田的相继开发，加氢技术便转向天然石油加工。随着焦化和催化裂化装置在炼油厂的比重不断增加，为改善其汽油、柴油的质量，加氢技术得到了快速发展。进入20世纪80年代，加氢精制催化剂制备技术有了较大的发展，催化剂的加氢脱氮、脱硫活性与使用寿命都有了明显的提高，已经发展成多种产品系列。90年代随着精制催化剂活性进一步提高，加氢精制深度进一步加深，精制原料进一步扩大，同时还开发了中压加氢改质技术，可以在中压下一次通过，从催化裂化柴油馏分或直馏重柴油馏分的混合油生产高芳烃潜含量的重整原料、低硫低芳烃柴油组分，其尾油也是优良的乙烯原料。

由于柴油机具有明显的节能优势，减少其尾气污染物排放和污染物治理技术也取得了明显成效。成品油市场中柴油需求增长速度远高于汽油，芳烃和乙烯原料的需求增长，仅仅依靠原油加工量的增长已不能满足需要。因此，加氢工艺和技术受到世界各大石油公司的普遍重视，加氢装置建设和技术开发明显加快。

### 1.1.2 汽(煤、柴)油加氢精制的作用

#### 1.1.2.1 汽油馏分

作为加氢精制原料的汽油馏分主要是焦化汽油。焦化汽油具有硫含量高、氮含量高、辛烷值低、不饱和烃及胶质含量高、氧化安定性差等特点，通过加氢精制后可改善这些性能。表1-1是焦化汽油馏分加氢精制后的结果。

表1-1 焦化汽油馏分加氢生产石脑油数据

| 催 化 剂                       | 481-3   |        | RN-10            |                   |
|-----------------------------|---------|--------|------------------|-------------------|
| 主要反应条件                      |         |        |                  |                   |
| 氢分压/MPa                     | 3.5~4.0 |        | 3.0 <sup>①</sup> |                   |
| 体积空速/h <sup>-1</sup>        | 1.5~2.0 |        | 1.68             |                   |
| 反应入口温度/℃                    | 240     |        | 217              |                   |
| 反应温度/℃                      |         |        | 311              |                   |
| 氢油体积比                       | 400     |        | 562              |                   |
| 原料及产品性质                     | 原料(大庆)  | 产 品    | 原料(中东混合)         | 产 品               |
| 密度(20℃)/g·cm <sup>-3</sup>  | 0.7307  | 0.7221 | 0.7253           | 0.7184            |
| 馏程/℃                        |         |        |                  |                   |
| 初馏点                         | 59      | 77     | 46               | 54                |
| 干 点                         | 210     | 205    | 184              | 188               |
| 溴价/gBr·(100g) <sup>-1</sup> | 68.0    | 0.5    | 68.5             | 0.14 <sup>②</sup> |
| 颜色(GB/T 3555-92)            |         | > +30  |                  |                   |
| 硫/μg·g <sup>-1</sup>        | 515     | 2.5    | 3998             | 17.6              |
| 氮/μg·g <sup>-1</sup>        | 96      | 0.3    |                  |                   |
| 烷+环烷烃/(% (体积))              | 50.4    | 94.0   |                  |                   |

注：① 高压分离器压力。

② 烯烃含量，%。

焦化汽油加氢精制后，可作为汽油调合组分使用。但是随着人们对清洁汽油需求的增加，焦化汽油加氢精制后作为汽油调合组分越来越不经济，现在焦化汽油通常经过不同深度加氢精制后作为乙烯裂解原料，或作为重整原料等等。

直馏石脑油馏分一般经加氢预精制作为催化重整原料，其作用是脱除原料油中对重整催化剂有害的杂质，其中包括硫、氮、氧、砷、铅、铜，同时进行烯烃饱和等，改进安定性，满足催化重整原料的要求。

### 1.1.2.2 煤油馏分

煤油馏分的馏程一般为 150~300℃。目前,在世界大多数国家,该馏分大多用于生产喷气燃料,此时所用原料的馏分的馏程一般为 150~260℃,灯用煤油的馏程一般为 180~300℃。

喷气燃料的组成中最理想的组分是环烷烃及支链烷烃。它们都有良好的燃烧性、热安定性和低温流动性。芳烃的燃烧性能不好,而且含量高时对以聚合物弹性体为材料的密封件有负面影响;烯烃易氧化、聚合生成胶质;硫化物是煤油馏分中常见的含量较高的非烃化合物,其含量过高时会对发动机燃烧室的清洁产生影响;硫醇的存在会对飞机的零件产生腐蚀,并且会使油品产生臭味。

喷气燃料加氢精制的作用主要是降低硫、氮含量,以减少对设备元件的腐蚀和改善储存安全性,降低芳烃含量,从而减少对机械零件的损害。

表 1-2 为用 RN-1、RN-2 及 FDS-4A 催化剂,对胜利直馏煤油馏分和伊朗直馏煤油馏分进行加氢精制的结果。

表 1-2 直馏煤油馏分加氢精制

| 催 化 剂                      | RN-1    |         | RN-2    |         | FDS-4A           |                  |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|------------------|------------------|
| 主要反应条件                     |         |         |         |         |                  |                  |
| 氢分压/MPa                    | 3.6     |         | 3.6     |         | 1.8 <sup>①</sup> |                  |
| 反应温度/℃                     | 321     |         | 307     |         | 260              |                  |
| 体积空速/h <sup>-1</sup>       | 1.55    |         | 2.53    |         | 1.8              |                  |
| 氢油体积比                      | 473~516 |         | 683     |         | 114              |                  |
| 原料与产品性质                    | 胜利煤油    | 产 品     | 伊朗煤油    | 产 品     | 中东混合煤油           | 产 品              |
| 密度(20℃)/g·cm <sup>-3</sup> | 0.8082  | 0.8037  | 0.7893  | 0.7859  | 0.7859           | 0.7800           |
| 馏分范围/℃                     | 174~243 | 177~245 | 150~230 | 154~230 | 160~224          | 167~227          |
| 硫/μg·g <sup>-1</sup>       | 100     | <1      | 1577    | <0.5    | 880              | 100              |
| 硫醇硫/μg·g <sup>-1</sup>     | 12.1    | <1      | 108.4   | <0.5    | 94               | 2                |
| 芳烃/%                       | 16.6    | 12.1    | 16.8    | 12.4    | 13.3             | 11.4             |
| 烟点/mm                      | 22      | 26      | 26      | 30      | 29               | 30               |
| 色度(ASTM-1500)/号            | >5      | <1      |         |         |                  | >30 <sup>②</sup> |

注:① 高压分离器的压力。

② 赛氏比色, GB/T 3555—92。

灯用煤油加氢精制的作用主要是降低含硫量、脱除臭味,饱和部分芳烃以及改善其燃料性能,增加无烟火焰高度,减少灯芯上的积炭量。

### 1.1.2.3 柴油馏分

柴油调合组分有多种来源,其中主要是直馏柴油、焦化柴油和催化柴油。这些柴油馏分都不同程度含有一些杂质和各种非理想组分,它们的存在对柴油的使用性能产生很大的影响,柴油加氢精制的目的是生产优质柴油或优质柴油的调合组分。

焦化柴油馏分的硫、氮含量都较高,溴价、实际胶质也明显高于催化裂化柴油。氮化物的存在将影响油品的颜色和安定性。通过加氢精制可以降低氮、硫含量,产品储存安定性明显改善。

表 1-3 是胜利焦化柴油加氢精制的工业数据。

表 1-3 胜利焦化柴油加氢精制结果

| 项 目                  | 数 据       | 项 目                           | 数 据       |           |
|----------------------|-----------|-------------------------------|-----------|-----------|
| 主要反应条件               |           | 原料与产品性质                       | 原料油       | 产品        |
| 氢分压/MPa              | 4.8       | 密度(20℃)/g·cm <sup>-3</sup>    | 0.8343    | 0.8139    |
| 平均反应温度/℃             | 332       | 馏程/℃                          | 260 ~ 334 | 203 ~ 334 |
| 液时空速/h <sup>-1</sup> | 1.0       | 硫/μg·g <sup>-1</sup>          | 7015      | 34.4      |
| 循环氢/油(体积)            | 650 ~ 750 | 氮/μg·g <sup>-1</sup>          | 2000      | 100       |
| 精制油收率/%              | > 99      | 碱性氮/μg·g <sup>-1</sup>        | 821       | 16.4      |
| 氢耗/%                 | 0.72      | 实际胶质/mg·(100mL) <sup>-1</sup> | 201       | 10.2      |
|                      |           | 溴价/gBr·(100g) <sup>-1</sup>   | 46        | 1.2       |
|                      |           | 消光值(460nm)                    | > 2       | 0.01      |

催化柴油当中含有相当数量的硫、氮等杂质和一定数量的烯烃、芳烃，硫、氮以及烯烃影响柴油的安定性，是造成油品储存不安定与变色的主要原因。催化裂化柴油加氢不仅能降低硫、氮的含量，改善其安定性，而且可以在催化剂的作用下，使催化裂化柴油馏分中的双环、三环芳烃加氢部分开环而不发生脱烷基反应，达到了原料烃类分子不变小、提高了十六烷值的目的。表 1-4 是催化裂化柴油加氢精制的的数据。

表 1-4 催化裂化柴油馏分加氢精制数据

| 催 化 剂                          | RN - 10            |           |                    |           | FH - 5             |        |
|--------------------------------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|--------|
| 主要反应条件                         |                    |           |                    |           |                    |        |
| 入口氢分压/MPa                      | 3.8                |           | 3.6                |           | 2.8                |        |
| 床层平均温度/℃                       | 339                |           | 337                |           | 304                |        |
| 液时空速/h <sup>-1</sup>           | 2.53               |           | 2.02               |           | 2.23               |        |
| 氢油体积比                          | 300                |           | 370                |           | 377                |        |
| 原料与产品性质                        | 原料油(掺渣油催<br>化裂化柴油) | 产 品       | 原料油(掺渣油催<br>化裂化柴油) | 产 品       | 原料油(掺渣油催<br>化裂化柴油) | 产 品    |
| 密度(20℃)/g·cm <sup>-3</sup>     | 0.8847             | 0.8759    | 0.9003             | 0.8839    | 0.8795             | 0.8677 |
| 馏程/℃                           | 156 ~ 346          | 196 ~ 342 | 187 ~ 364          | 195 ~ 358 |                    |        |
| 硫/μg·g <sup>-1</sup>           | 4115               | 200       | 4330               | 320       | 5300               | 500    |
| 氮/μg·g <sup>-1</sup>           | 461                | 107       | 626                | 176       | 631                | 244    |
| 凝点/℃                           | -6                 | -8        | -10                | -10       |                    |        |
| 实际胶质/mg·(100ml) <sup>-1</sup>  | 112                | 35        | 311                | 23        | 163                | 17     |
| 酸度/mgKOH·(100ml) <sup>-1</sup> | 2.0                | 0.29      | 4.0                | 0.57      |                    |        |
| 溴价/gBr·(100ml) <sup>-1</sup>   | 12.0               | 1.3       | 10.2               | 3.3       | 16.6               | 1.66   |
| 十六烷指数                          | 38.8               | 41.0      | 35.6               | 39        | 41                 | 45     |
| 脱硫率/%                          |                    | 95.1      |                    | 92.6      |                    | 90.6   |
| 脱氮率/%                          |                    | 76.6      |                    | 71.9      |                    | 61.3   |

由上述可见，多数柴油原料馏分必须经过加氢精制或改质后才能作为商品柴油组分。

### 1.1.3 加氢精制技术新进展

#### 1.1.3.1 高空速重整原料预精制技术

为适应重整装置扩能改造及连续重整预加氢技术的需要，近年来重整预加氢向着高空速、低氢油比的方向发展。针对进口含硫原油不断增加，重整预加氢原料含硫量大幅度增加的特点，研制开发了加氢脱硫性能优异的催化剂。

我国重整原料油加氢精制的工艺操作条件一般为氢分压 1.5MPa、温度 260 ~ 300℃、空速 10 ~ 12h<sup>-1</sup>、氢油体积比 100:1，生成油质量符合双(多)金属重整催化剂对进料的要求。

### 1.1.3.2 重整汽油选择性加氢技术

石脑油经催化重整后的生成油中富含芳烃和溶剂油馏分，同时也含有少量的烯烃。芳烃和溶剂油产品对烯烃都有严格的要求，必须脱除。同时烯烃的存在，会在抽提溶剂中聚合而污染抽提溶剂。随着连续重整技术的发展和推广应用及固定床半再生催化重整反应苛刻度的提高，重整生成油中的烯烃含量增加，脱除其中较高含量烯烃的问题将更加突出。

### 1.1.3.3 催化裂化汽油选择性加氢脱硫技术

由于我国汽油调合组分中，催化裂化汽油占 75% 左右，降低汽油中的硫含量和烯烃含量可有效地减少汽车尾气中有害物的排放量。汽油中 90% 以上的硫化物和 90% 左右的烯烃来自催化裂化汽油组分。所以，降低催化裂化汽油组分中的硫含量和烯烃含量是满足未来汽油质量指标要求的关键。

催化裂化汽油中硫的分布情况如下：轻汽油组分( $C_5 \sim 120^\circ\text{C}$ )占催化汽油的 60%，含硫量占催化汽油含硫量的 15%；中汽油组分( $120 \sim 175^\circ\text{C}$ )占催化汽油的 25%，含硫量占催化汽油含硫量的 25%；重汽油组分( $175 \sim 220^\circ\text{C}$ )占催化汽油的 15%，含硫量占催化汽油含硫量的 60%。此外，高辛烷值组分集中在轻汽油(烯烃)和重汽油(芳烃)中。采用传统的加氢方法处理催化汽油虽然能有效地降低硫和烯烃含量，但造成汽油辛烷值急剧下降。因此，催化汽油降硫要采取选择性加氢脱硫技术。也可采取全馏分加氢之后用临氢异构或芳构化，恢复汽油的辛烷值。

### 1.1.3.4 低压喷气燃料加氢精制技术

随着国民经济的增长及航空事业的发展，对喷气燃料的需求迅速增长。直馏精制的主要目的：脱硫醇、降酸值、改善颜色。但传统的非临氢喷气燃料精制方法对原料的适应性较差，并存在不同程度的环境污染问题。而加氢精制不仅能够达到直馏喷气燃料精制的目的，并且需要时还能降低硫含量，提高烟点。

喷气燃料加氢精制反应条件可根据原料性质、产品要求及现实条件来确定，一般在氢分压  $0.5 \sim 4.0\text{MPa}$ 、体积空速  $2 \sim 6\text{h}^{-1}$ 、氢油比  $(50 \sim 200):1$ 、反应温度  $200 \sim 320^\circ\text{C}$  之间。

### 1.1.3.5 低硫柴油生产技术

低硫柴油生产技术需求的背景是环保和市场对清洁柴油需求的上升。表 1-5 是柴油的主要质量指标。

表 1-5 柴油的主要质量指标

| 规格                                 | 欧盟 III<br>EN 590—98 | 欧盟 II<br>EN 590—99 | 中国(车用柴油)<br>GB/T 19147—2003 | 京标 B(柴油)<br>DB 11/239—2004 |
|------------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 硫/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | 350                 | 500                | 500                         | 350                        |
| 多环芳烃/%(体积)                         | 11                  |                    |                             | 11                         |
| 十六烷值 不小于                           | 51                  | 49                 | 49                          | 51                         |
| 十六烷指数 不小于                          | 46                  | 46                 | 46                          | 46                         |
| 90%点馏出温度/ $^\circ\text{C}$         |                     |                    | 355                         | 355                        |
| 95%点馏出温度/ $^\circ\text{C}$         | 360                 | 370                | 365                         | 365                        |

柴油质量升级发展趋势：低硫含量、低 95% 馏出温度、低密度、高十六烷值、低多环芳烃。

柴油的低硫和无硫是世界各国和地区柴油新规格的发展趋势。如何经济合理地生产低硫柴油将是我国目前和今后一段时期内炼油工业需要重点解决的课题之一。

### 1.1.3.6 低硫低芳烃柴油生产技术

目前,世界发达国家对柴油的硫含量、芳烃含量及十六烷值等指标的要求日趋严格,柴油馏分中芳烃化合物的脱除问题,已引起了极大关注。

近年来,用于生产低硫、低芳烃柴油的催化剂及工艺,发展较快并日臻完善。

采用非贵金属催化剂,针对不同种类原料在中等压力下单段可以得到质量符合世界燃油规范 II 类油品规格要求的柴油。

以催化柴油为原料生产低硫、低芳烃柴油,普遍采用两段法工艺,即第一段采用 Ni-Mo/氧化铝催化剂,第二段采用具有一定耐硫性能的贵金属催化剂。

对于直馏柴油和焦化柴油,可采用常规加氢催化剂,在中等压力下生产低硫、低芳烃柴油。

对于催化柴油,采用常规加氢催化剂,则需要在较高的压力、较低的空速条件下生产低硫、低芳烃柴油。采用非贵金属/贵金属两段法,可以在较低的压力等级下生产低硫、低芳烃柴油。

目前,国内已开发出了用于此技术的贵金属催化剂,但未见工业化可以作为技术储备,待市场需要时可工业化。在国外已经工业化的两段加氢工艺有以下几种:

UOP 公司的两段加氢工艺 Unionfining - Unisar; ABB Lummus Global 公司和 Criterion Catalysts 的两段加氢工艺 Synsat; HALDOR Topsøe 公司的两段加氢工艺 IDQ; UNITED CATALYSTS - SUD CHEMIC 公司的芳烃加氢工艺等。

### 1.1.3.7 催化裂化原料加氢处理技术

催化裂化是我国炼油行业重油轻质化的主要手段。

催化裂化原料油加氢预处理是提高催化裂化产品质量、减少催化裂化烟气中  $SO_x$  排放量最有效的方法。

催化原料经加氢处理后,硫、氮、极性物、金属含量都有不同程度降低,多环芳烃部分饱和,从而使催化裂化产品分布进一步改善,汽油、柴油硫含量降低;再生器烟气中  $SO_x$  浓度降低。

从表 1-6 可以看出催化原料经过预处理后对催化裂化的效果是十分明显的。

表 1-6 催化原料加氢预处理后  
对催化裂化产品的影响

| 原 料                                    | 未经加氢处理的<br>催化原料 | 加氢处理的<br>催化原料 |
|--|-----------------|---------------|
| 原料硫含量/%                                | 2.5             | 0.15          |
| 轻柴油硫含量/%                               | 3.0             | 0.2           |
| 汽油硫含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | 2000            | 50            |

目前,中国石化石油化工科学研究院和中国石化抚顺石油化工研究院均已开发出了用于催化裂化原料加氢处理的催化剂。Criterion Catalyst Co. 可用于催化原料加氢预处理的催化剂: DN-190、DN-200、DC-150、C-447。AKZO 可用于催化原料加氢预处理的催化剂: KF-859(NiMo 型)、KF-902(NiCoMo 型)。

## 1.2 汽(煤、柴)油加氢精制典型装置简介

### 1.2.1 汽油加氢精制

#### 1.2.1.1 焦化汽油加氢

焦化汽油常与焦化柴油等一起加氢,随着焦化装置规模扩大,焦化汽油产量也逐渐增大,出现了焦化汽油单独加氢的装置,加氢后的焦化汽油既可做汽油的调合组分,也可做重



整装置的原料，炼化一体化的企业作为乙烯裂解原料。

焦化汽油加氢精制的典型流程见图 1-1。

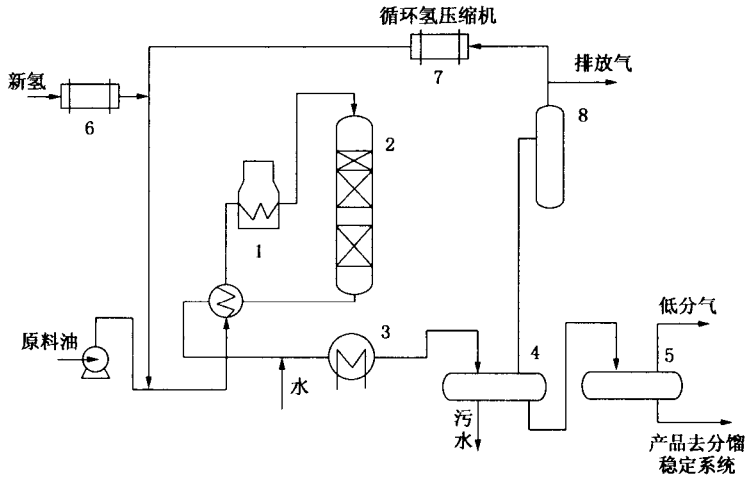


图 1-1 某焦化汽油加氢精制装置原则流程图

1—加热炉；2—反应器；3—冷却器；4—高分；5—低分；6—新氢压缩机；7—循环氢压缩机；8—沉降罐

原料油和氢气混合与反应产物换热后经加热炉加热进反应器，经过加氢反应后从反应器底部流出与原料换热、冷却后进入高压分离器，分离出的氢气循环使用，液相进入低压分离器分离出轻烃后进入分馏稳定系统。

### 1.2.1.2 催化汽油加氢

目前国内开发的催化裂化汽油加氢技术主要有两种基本流程，一种是选择性加氢脱硫，一种是全馏分加氢脱硫，辅助以异构或芳构化反应。选择性加氢已经工业应用的主要是中国石化石油化工科学研究所的 RSDS 技术、RIDOS 技术和中国石化抚顺石油化工研究院的 OCT-M 技术、OCT-M 技术。

OCT-M 技术原则工艺流程图见图 1-2，RIDOS 技术原则工艺流程图见图 1-3；全馏分加氢则主要是中国石化抚顺石油化工研究院的 OTA 技术。

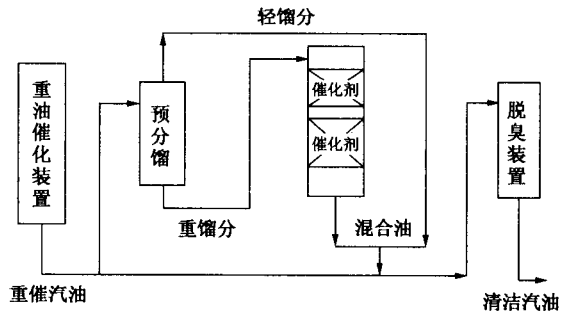


图 1-2 OCT-M 技术工艺原则流程图

### 1.2.2 柴油加氢精制

柴油加氢精制原则流程基本相似，存在的区别主要有：炉前混氢与炉后混氢、冷高分与热高分、有无循环氢脱硫塔、分馏塔还是汽提塔、分馏系统热源是进料加热炉还是塔底重沸炉、有无脱硫化氢塔等。

#### 1.2.2.1 流程 1

该流程描述的是某炼油厂以催化裂化柴油为原料的加氢精制装置，加工能力为 80 万吨/年(见图 1-4)。

该装置采用炉前混氢、冷高分流程、不设低分。特点是流程简单、能耗较低。

#### 1.2.2.2 流程 2

该流程描述的是某炼油厂焦化柴油加氢精制装置，由于原料中石脑油含量高，产品石