

石油炼制以及 超低硫汽油和柴油燃料生产简介

受以下组织委托编制：



国际清洁交通委员会（ICCT）

2011年10月24日

目录

1. 引言	1
2. 石油炼制简介	2
3. 原油简介	3
3.1 原油的化学成分	3
3.2 原油特性表示	5
3.2.1 API 重力 (密度)	5
3.2.2 硫含量	6
3.2.3 根据 API 重力和硫含量将原油分级	6
3.3 原油质量和炼制经济学	8
3.3.1 平均原油质量呈下降趋势	8
3.3.2 原油质量影响原油价格	9
4. 炼制加工基本原理	11
4.1 按构成和复杂性对炼油厂进行分级	12
4.2 炼制工艺过程等级	15
4.2.1 原油蒸馏	15
4.2.2 转化 (裂化) 工艺过程	16
4.2.3 提质加工工艺过程	19
4.2.4 处理 (加氢处理) 工艺过程	21
4.2.5 分离工艺过程	22
4.2.6 辅助设施	23
4.2.7 产品混合	23
5. ULSF 生产的基本原理	25
5.1 汽油和柴油混合原料的主要特性	25
5.1.1 汽油混合原料	25
5.1.2 柴油混合原料	26
5.1.3 转化单元的特殊作用	27
5.2 符合 ULSG 和 ULSD 标准所涉及的炼制工艺过程	27
5.3 为符合更严格的硫标准而对炼油厂进行升级	28
5.3.1 ULSG 生产	29
5.3.2 ULSD 生产	29
5.4 符合 ULSF 标准的成本经济分析	29
5.4.1 投资要求	29
5.4.2 炼制成本	29
5.4.3 能量消耗和 CO ₂ 排放	30
6. 参考文献	32

EXHIBIT 目录**EXHIBIT**

Exhibit 1: 原油中主要类别的烃类化合物.....	4
Exhibit 2: 轻原油和重原油的典型自然产量.....	5
Exhibit 3: 原油等级.....	7
Exhibit 4: 一些重要原油的 API 重力和硫含量.....	7
Exhibit 5: 平均区域性和全球原油质量: 2008 年 (实际的) 和 2030 年 (预计的).....	8
Exhibit 6: 全球原油质量趋势 (2008 年到 2030 年).....	9
Exhibit 7: 理想化 (非常理想化) 复杂炼油厂的流程简图.....	11
Exhibit 8: 原油蒸馏和下游加工示意图.....	12
Exhibit 9: 炼油厂分级方案.....	13
Exhibit 10: 炼油厂等级和特征产量结构.....	14
Exhibit 11: 炼制工艺过程的重要等级.....	15
Exhibit 12: 主要转化工艺过程的突出特点.....	17
Exhibit 13: 主要提质加工工艺过程的突出特点.....	19
Exhibit 14: 标准汽油混合原料的典型体积份额和特性.....	25
Exhibit 15: 标准柴油混合原料的典型体积份额和特性.....	26
Exhibit 16: 生产超低硫燃料 (ULSF) 的炼制工艺过程.....	27
Exhibit 17: 生产 ULSF 的工艺过程中大约的氢消耗量.....	30

1. 引言

本指南叙述了石油炼制的基本原理，因为这与超低硫燃料（ULSF）的生产，尤其是超低硫汽油（ULSG）和超低硫柴油（ULSD）的生产有关¹。本指南是由 HART 能源和 MathPro 公司为国际清洁交通委员会（ICCT）执行的对在巴西、中国、印度和墨西哥进行超低硫汽油（ULSG）和超低硫柴油（ULSD）生产和供应经济学综合分析的第一项工作成果。

本指南旨在（1）为总体分析提供背景和组织框架，（2）识别在超低硫汽油（ULSG）和超低硫柴油（ULSD）生产中决定炼制成本的技术因素，以及（3）方便对分析结果的解释。本指南叙述了：

- ◆ 石油炼制行业的基础
- ◆ 原油及其特性
- ◆ 炼油厂的工艺过程种类和炼油厂构造
- ◆ 构成汽油和柴油燃料的经炼制产生的物质流（调合原料）的特性
- ◆ 生产超低硫汽油（ULSG）和超低硫柴油（ULSD）的炼油厂工艺过程类型

本指南是为那些对超低硫汽油（ULSG）和超低硫柴油（ULSD）生产感兴趣，但是对炼制操作，特别是对硫控制不熟悉的读者而编写。

¹ 在本指南中，我们将超低硫燃料（ULSF）定义为硫含量<30ppm 的燃料。

2. 石油炼制简介

石油炼制是从井源到泵的石油供应链中一个独特又关键的环节。其他环节主要是通过运送和储存石油而使其增值，例如：将原油提升到地面；将原油从油田运送到储存设施然后到炼油厂；将炼制品从炼油厂运送到转运基地和最终用户所在地；等等。炼制则是通过将（本身具有不多最终使用价值的）原油转化成一系列炼制品（包括运输燃料）而使其增值。炼制的主要经济目标是：在将原油转化成成品的过程中使增加的价值最大化。

石油炼制厂是采用极其复杂加工方案的大型资本密集型制造工厂。它们将原油和其他输入物质流转化成许多精制石油（副）产品，包括：

- ◆ 液化石油气（LPG）
- ◆ 汽油
- ◆ 喷气发动机燃料
- ◆ 煤油
（用于照明和加热）
- ◆ 柴油燃料
- ◆ 石化原料
- ◆ 润滑油和蜡
- ◆ 家用燃料油
- ◆ 燃料油（用于发电、船用燃料、工业和区域供热）
- ◆ 沥青（用于铺设路面和屋顶）。

这些产品中，运输燃料具有最高价值，燃料油和沥青具有最低价值。

许多炼制品（例如：汽油）会制成多个等级的产品，以符合不同的规格和标准（例如：辛烷值、含硫量）。

目前有超过 660 个炼油厂在 116 个国家运营，每天可生产超过 8500 万桶炼制品。每个炼油厂都有自己独特的物理构型，以及独特的运营特性和经济情况。炼油厂的构型和性能特性主要是由炼油厂的位置、建造时期、资本投资资金的可获得性、可获得的原油、产品需求（来自当地和/或出口市场）、产品质量要求、环境规章和标准以及炼制品的市场规格和要求而确定的。

北美的大多数炼油厂是按照使汽油产量最大化而构造，但却是以牺牲其他炼制品的产量为代价。在其他地方，大部分现有炼制厂以及几乎所有的新建炼制厂都是按照使馏出物（柴油和喷气发动机燃料）产量最大化而构造，在某些地区，是按照使石化原料产量最大化而构造，因为这些产品在上世界上大多数地区都有最快的增长需求。

3. 原油简介

炼油厂是将原油转化成石油成品的地方。因此，一个人若想要了解石油炼制的基本原理，必须从原油开始。

3.1 原油的化学成分

世界上的炼油厂以或多或少的量加工数百种不同的原油（通常根据地理产地进行标识）。

每一种原油都是独特的，都是数千种化合物的复杂混合物。原油中的大多数化合物都是烃（由碳原子和氢原子组成的有机化合物）。原油中的其他化合物不仅含有碳和氢，也含有少量（但是重要的）其他（“杂”-）元素——最显著的是硫，以及氮和某些金属（例如：镍、钒等）。构成原油的化合物有从最小、最简单的烃分子—— CH_4 （甲烷）——到含有多达 50 个或更多碳原子（以及氢和杂元素）的大而复杂的分子。

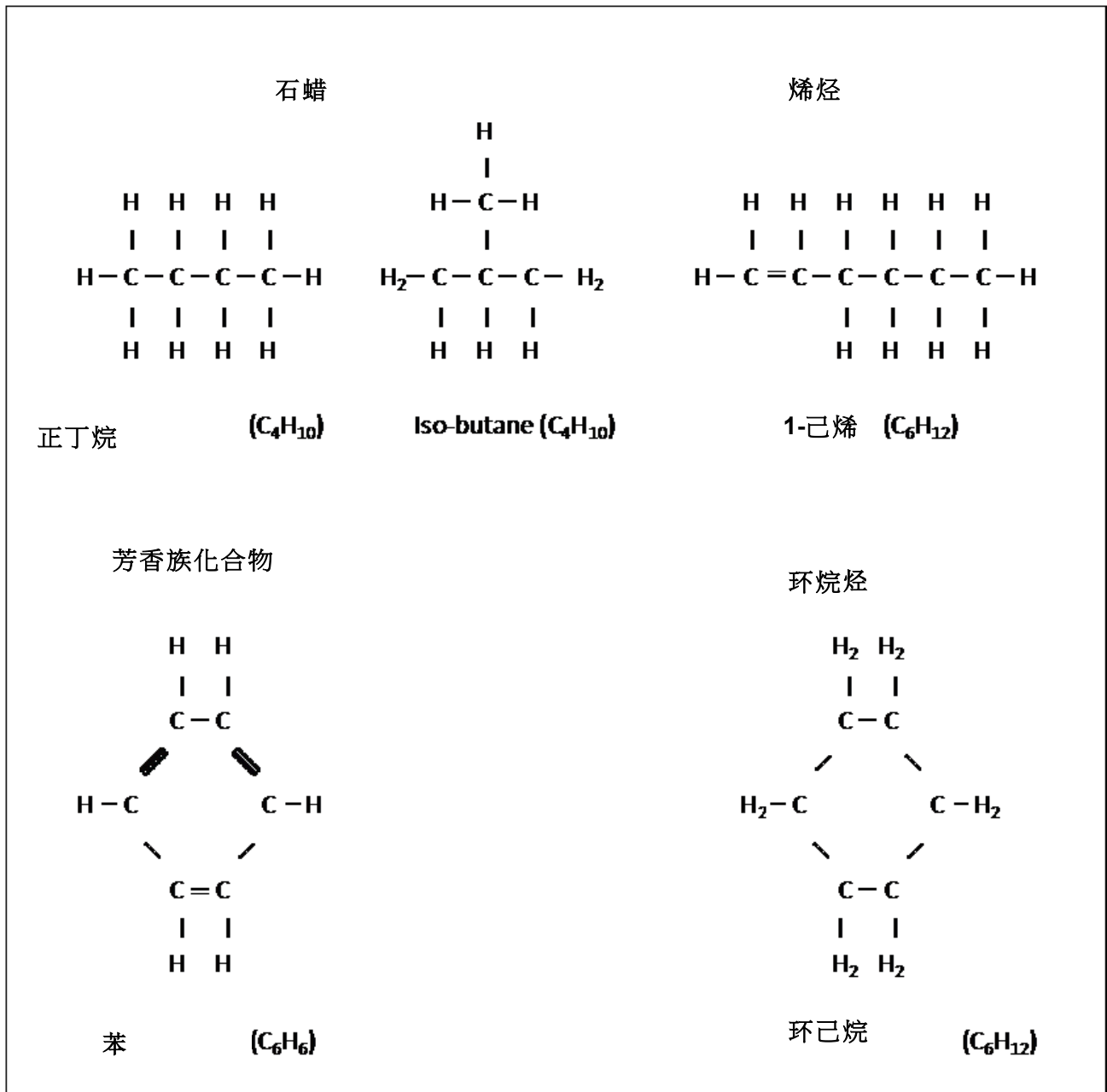
任何给定烃类或分子的物理化学特性不仅取决于分子中碳原子的数量，而且取决于原子之间化学键的性质。碳原子会很容易的以各种方式——单键、双键和三键——彼此结合，以形成不同类别的烃类，如下页 **Exhibit 1** 所示。

石蜡、芳香族化合物和环烷烃是原油的天然成分，也可由各种炼制操作生产而得。原油中通常没有烯烃；烯烃是用某些主要专用于汽油生产的炼制操作而生产的。如 **Exhibit 1** 所示，芳香族化合物具有比环烷烃更高的碳氢比（C/H），而环烷烃的 C/H 比又比石蜡的高。

原油越重（密度越大），其 C/H 比就越高。由于石油炼制的化学反应，原油的 C/H 比越高，则生产一定量汽油和馏出燃料所要求的精制加工程度越深、费用越贵。因此，原油的化学成分及其沸程分布影响炼油厂的投资要求和炼油厂能量消耗，而这是炼制总成本中最大的两个组成部分。

某种原油中的各种烃类所占比例、其碳数分布以及杂元素浓度决定着炼油厂可从原油制得的炼制品的产量和质量，从而决定原油的经济价值。不同原油要求有不同的炼制设施和操作，以使其所生产的产品品种结构的价值达到最大化。

Exhibit 1: 原油中主要类别的烃类化合物



3.2 原油特性表示

评定原油的炼制价值需要完整描述原油及其组分，包括特性的评分。但是，有两个特性对于快速分类和进行原油比较是特别有用的：*API 重力*（密度的一种度量单位）和*硫含量*。

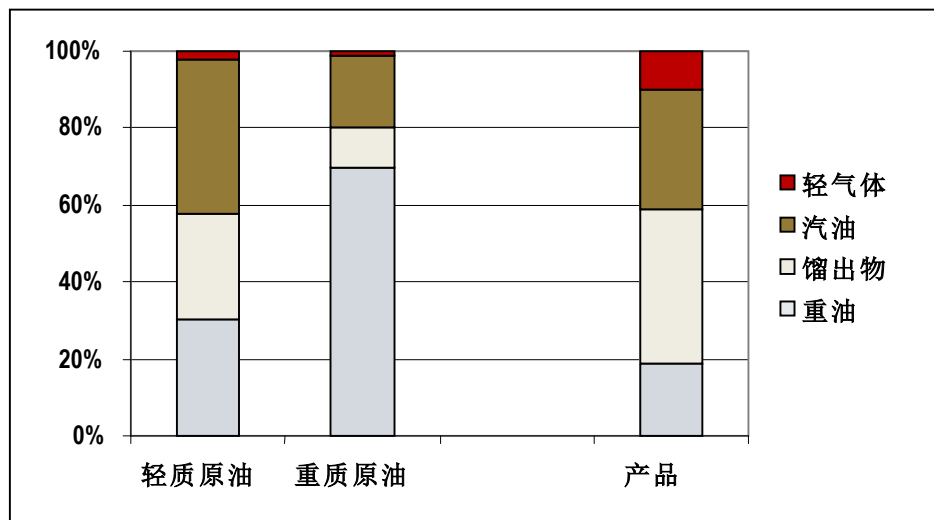
3.2.1 API 重力（密度）

原油的*密度*表示其大体的轻重。较轻的原油含有较高比例的小分子，炼油厂可将这些小分子加工成汽油、喷气发动机燃料和柴油（其需求正在增长）。较重的原油含有较高比例的大分子，炼油厂可（1）制成重的工业燃料、沥青和（市场需求不大，有时还会萎缩的）其他重产品，或者（2）加工成可制成运输燃料产品的较小分子。

在炼油行业，石油的密度通常用 *API 重力* 表示，该参数的单位是度 ($^{\circ}API$) ——例如： $35^{\circ}API$ 。*API 重力* 与密度成反比（即：物质越轻，其 *API 重力* 越高）。规定水的 *API 重力* 为 10° 。

Exhibit2 给出了按照其轻质气体、汽油组分、馏出物（主要是喷气发动机燃料和柴油）组分和重油的自然产量来衡量的典型轻原油（ $35^{\circ}API$ ）和典型重原油（ $25^{\circ}API$ ）的质量。该 EXHIBIT 也显示了发达国家对这些产品类型的平均需求图。

Exhibit 2: 轻原油和重原油的典型自然产量



资料来源: Hart 源咨询公司 (2010 年)

轻、重原油中的重油自然产量均超过对重质炼制品的需求量，重原油的重油自然产量为轻质原油的重油自然产量的两倍。原油的这些一般特性意味着（1）炼油厂必须能够将至少一部分、或者大部分重油转化成轻质产品，以及（2）原油越重，为生产任何给定产品品种结构所需的转化能力越高。

3.2.2 硫含量

在原油中所含的所有杂元素中，硫对炼制有最重要的影响。

- ◆ 炼油厂物质流中含有高硫含量时，会（1）使那些可促进某些炼制过程中希望发生的化学反应的催化剂失活（“中毒”），（2）导致炼油厂设备腐蚀，以及（3）导致向空气中排放硫化物，而向空气中排放硫化物是不希望发生的并且可能受到严格的监管控制措施的约束。
- ◆ 车辆燃料中的硫会导致产生不希望产生的车辆排放硫化物，并干扰针对常规排放物（例如：挥发性有机化合物、氮氧化物和微粒）的车辆排放控制系统。

因此，炼油厂必须能够从原油和炼制物质流中除去硫，直至达到必要的范围，从而消除这些不良影响。原油的硫含量越高，所要求的硫控制程度越大，相关的成本就越高。

原油和炼制物质流的硫含量通常用重量百分数（wt%）或重量百万分率（ppmw）表示。在炼油行业中，原油在其硫含量小于阈值 [例如：0.5 wt%（5,000 ppmw）] 时称为无硫原油（低硫原油），而在硫含量高于阈值时称为含硫原油（高硫原油）。大多数含硫原油的硫含量在 1.0–2.0 wt% 范围，但是有些则为硫含量 > 4 wt%。

对于任一原油，硫浓度倾向于随碳数增加而逐渐增大。因此，燃料油和沥青沸程内的粗馏分的硫含量高于喷气发动机燃料和柴油沸程内的粗馏分的硫含量，而喷气发动机燃料和柴油沸程内的粗馏分的硫含量又高于汽油沸程内粗馏分的硫含量。同理，例如汽油沸程内的较重组分的硫含量高于该沸程内较轻组分的硫含量。

3.2.3 根据 API 重力和硫含量将原油分级

Exhibit 3 显示了根据原油 API 重力和硫含量对其进行分级的一种广泛使用方案。每一原油等级是根据 API 重力范围和硫含量范围进行定义；类别名称以定性术语指出这些范围。

Exhibit 4 列出了世界石油贸易中的一些重要原油，并指出了每一种原油的 API 重力/硫分级。

Exhibit 3: 原油等级

原油等级	特性范围	
	重力 (°API)	硫 (wt.%)
轻质无硫	35-60	0-0.5
轻质含硫	35-60	> 0.5
中质中等含硫	26-35	0-1.1
中质含硫	26-35	> 1.1
重质无硫	10-26	0-1.1
重质含硫	10-26	> 1.1

Exhibit 4: 一些重要原油的API重力和硫含量

原油	原产国	原油等级	特性	
			重力 (°API)	硫 (wt.%)
布伦特原油	英国	轻质无硫	40.0	0.5
西德州中级原油	美国		39.8	0.3
阿拉伯超轻质出口原油	沙特阿拉伯	轻质含硫	38.1	1.1
大庆原油	中国	中质中等含硫	33.0	0.1
费卡多斯出口原油	尼日利亚		29.5	0.2
阿拉伯轻质出口原油	沙特阿拉伯	中质含硫	34.0	1.9
科威特出口混合原油	科威特		30.9	2.5
马尔林姆出口原油	巴西	重质无硫	20.1	0.7
卡诺里蒙原油	哥伦比亚		25.2	0.9
奥连特出口原油	厄瓜多尔	重质含硫	25.0	1.4
玛雅重质出口原油	墨西哥		21.3	3.4

3.3 原油质量和炼制经济学

3.3.1 平均原油质量呈下降趋势

炼油厂原油品种的平均 API 重力和硫含量大体上随地区而变化；有些地区可对较轻、含硫较低的原油品种而不是其他原油品种进行加工。但是，随着时间的变化，全球原油品种结构的平均质量已经并且正在逐渐下降。平均 API 重力已经并且正在下降，但是下降速度较慢。平均硫含量已经并且正在以较快的速度增大，在可预见的将来，这种趋势可能还会继续。

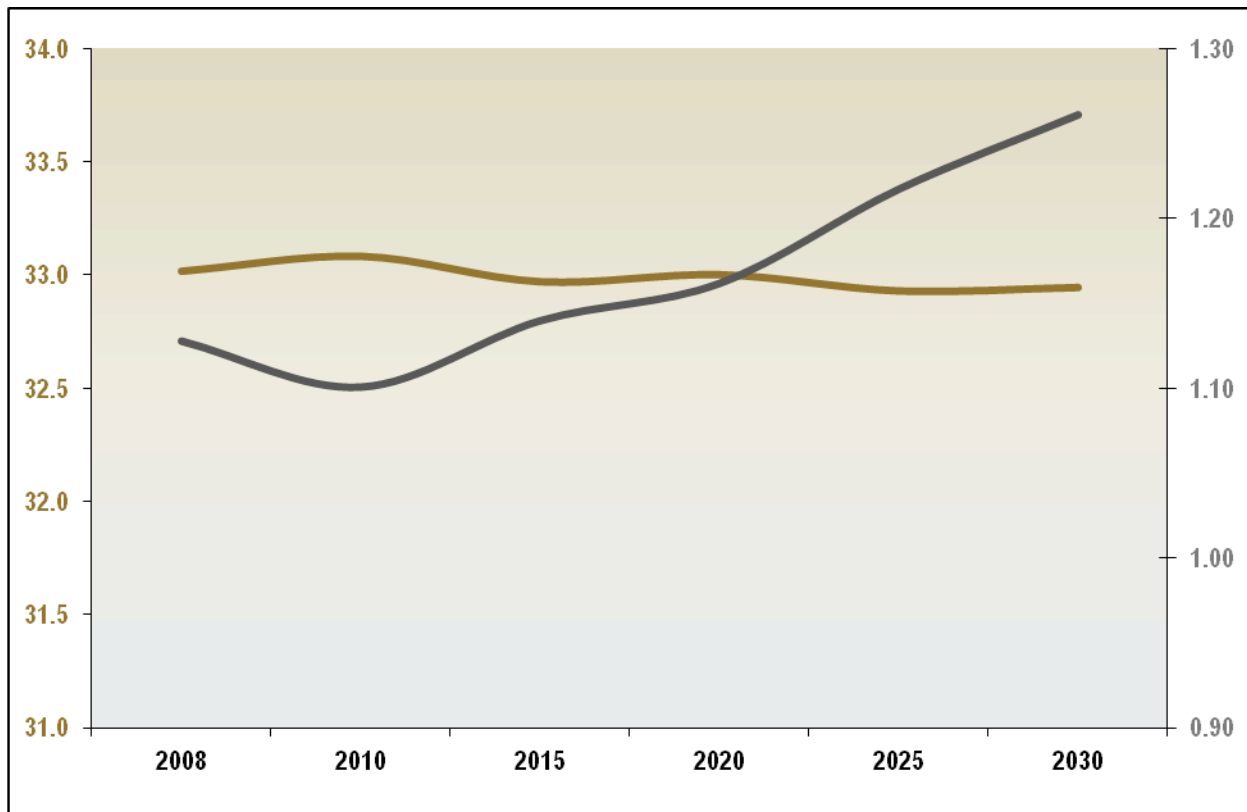
下面两个 exhibit 说明了这种趋势，**Exhibit 5** 根据 API 重力和硫含量给出了 2008 年（实际的）和 2030 年（预计的）世界各地区的估计原油质量，**Exhibit 6** 显示了从 2008 年到 2030 年的平均 API 重力和硫含量的预计时间曲线。

**Exhibit 5: 平均区域性和全球原油质量：
2008年（实际的）和2030年（预计的）**

地区	2008年（实际的）		2030年（预计的）	
	重力 (°API)	硫 (wt%)	重力 (°API)	硫 (wt%)
北美	31.2	1.21	28.7	1.66
拉美	25.1	1.59	23.5	1.57
欧洲	37.1	0.37	37.4	0.38
独联体	32.5	1.09	35.1	0.97
亚太	35.4	0.16	35.7	0.16
中东	34.0	1.75	33.9	1.84
非洲	36.5	0.31	37.1	0.26
世界平均	33.0	1.1	32.9	1.3

资料来源：由哈特能源咨询公司分析（2010年）

Exhibit 6: 全球原油质量趋势（2008年到2030年）
 (—) °API、 (—) 硫 [wt%]



资料来源：由哈特能源咨询公司分析（2010年）

这些趋势反映了世界原油储备的平均质量与原油年产量的平均质量之间的变化关系。世界总原油储备平均比目前世界所生产原油具有更低的 API 重力和更高的硫含量。中东（绝大部分为中质含硫原油）、南美（绝大部分为重质含硫原油）和加拿大（绝大部分为重质含硫原油）的大储量原油在全球原油供应中所占份额在逐渐增加。欧洲和亚洲生产的原油在平均水平上具有高 API 重力和低硫含量，但是其在全球原油供应中所占的份额在减少。

3.3.2 原油质量影响原油价格

大众媒体常常提到“原油的价格”，似乎所有原油定价都是相同，其实不然。原油质量越高，其市场价格相对于现行原油平均价格就越高。换句话说，轻质无硫原油比中质和重质含硫原油的价格要高。

轻质无硫原油比起较重、含硫较多的原油具有更高的炼制价值，因为（1）轻质原油中的可制成具更高价值的轻质产品的组分的自然产量更高，以及（2）无硫原油含有较少的硫。所以，和较重、含硫较多的原油相比，轻质无硫原油所需的加工能量较少，并且只需较低的基本投资就可达到给定的产品要求和质量标准。

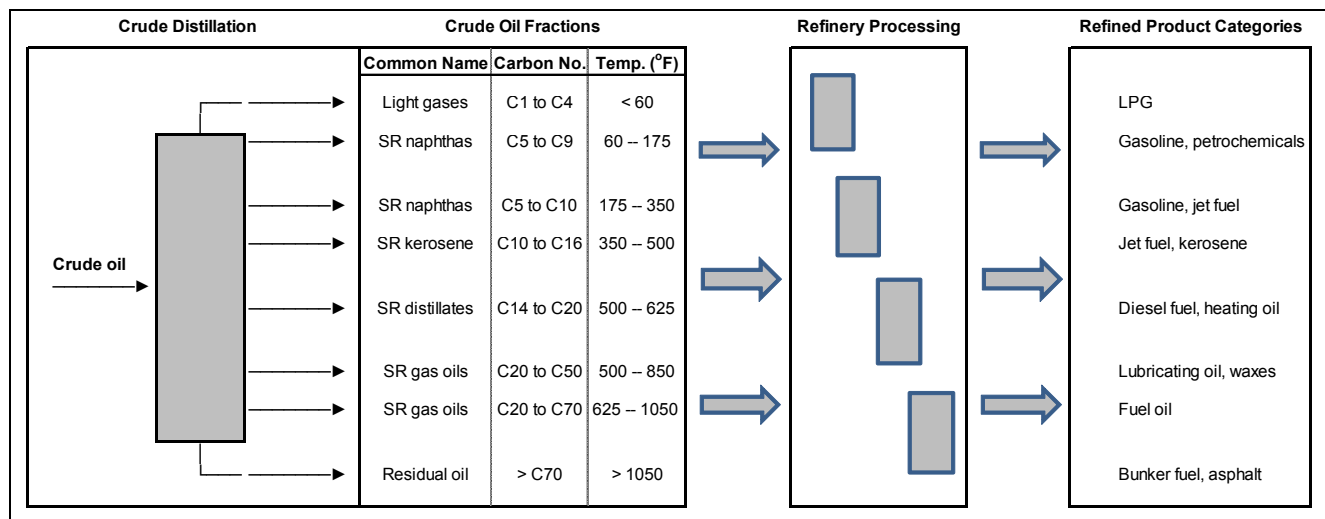
因此，炼油厂在满足产品要求和质量标准时面临一项关键的经济选择。它们可以为较高质量原油付出较高的价格，以获取其经济利益，也可以选择承受较高的炼油厂股份资本投资和较高的炼制成本，但可利用质量较低的原油的相对较低的价格优势。

由于很多技术和经济因素的相互影响，轻质无硫/重质含硫原油的价差会随时间而波动，并随地域而变化。这些因素包括质量差异、原油供需平衡、当地产品市场和产品规格，以及当地的炼制产能和提质加工能力。但是，一般情况下，轻质无硫/重质含硫原油的价差趋向于（1）随世界石油价格水平的上升而增大（从绝对价格来说），以及（2）在轻质无硫原油平均价格的大约 15%到 25%之间变化。

产品市场，但是改变仅限于其炼制设施的性能特性和其所加工原油的特性所规定的物理限制以内。最后，炼制操作的复杂性使其能够仅凭使用有关炼制的数学模型便能够从经济意义上得到完全理解和优化。在市场环境变化及引入新的（通常更严格的）产品规定时，炼制操作的数学模型是唯一可靠的作出可达成（即：可行的）且经济的（最佳的）响应的方式。

Exhibit 8 简单示意性地表示了一个炼油厂，这对本指南比较有用。本 exhibit 以示意的形式说明了在原油蒸馏过程中原油如何分离成特定沸程（碳数）的馏分，给出了这些粗馏分的标准工业名称，并且指明了如何按顺序炼制加工这些物质流，以生产出具有标准产品品种结构的成品炼制品。²

Exhibit 8: 原油蒸馏和下游加工示意图



本节的余下部分（1）先叙述根据炼油厂所用炼制工艺过程组合而对炼油厂进行标准分级的方案（4.1 小节），然后（2）简要叙述炼油厂将原油转化成成品的重要工艺过程类型（4.2 小节）。

4.1 按构成和复杂性对炼油厂进行分级

每个炼油厂的构成和操作特性都是独特的。它们主要是由炼油厂的位置、建造时期、建议的原油品种结构、炼制品的市场要求以及炼制品的质量规格（如：硫含量）所决定的。

在此，术语 *构成* 表示在一个给定炼油厂内特定的炼制工艺过程单元、各种单元的大小（处理能力）、它们的主要技术特性以及连接这些单元的流动类型。

虽然没有两个炼油厂具有完全相同的构成，但是可将类似炼油厂分成一类，并用炼油厂 *复杂性* 进行定义。

在此，术语 *复杂性* 有两种意思。一种是非技术意思：错综又复杂的，由许多连接的部分组成的。另一种意思是炼制行业的一个技术术语：这是一个数值，指出了在一个给定炼油厂的原油蒸馏单元（根据定义其复杂性为 1.0）下游炼

²Exhibit7 中的标记 SR 表示“直馏 (straight run)”，这是一个炼制术语，意思是指定的物质流直接来自原油蒸馏单元而没有经过进一步的加工。

制工艺过程的范围、能力和资本密集度。炼油厂的复杂性越高，则炼油厂的资本投资密集度越高且炼油厂通过以下方式使原油增值的能力越大：

- (1) 将更多重质粗馏分转化成较轻、高价值产品，以及
- (2) 生产出具有更严格质量规格的轻质产品（例如：ULSF）。

一般来讲，所有炼油厂均属于根据工艺过程构型和炼油厂复杂性所定义四个级别之一，如 **Exhibit 9** 所示。

Exhibit 9: 炼油厂按复杂性分级方案

构型	复杂性	
	分级	范围
拔顶	低	< 2
轻度加氢	中	2 -- 6
转化（即裂化）	高	6 -- 12
深度转化（即焦化）	很高	> 12

- ◆ **拔顶炼油厂**只有原油蒸馏和基本的支持操作。它们没有能力改变其所加工原油的自然产量构成；它们仅可简单地将原油分离成轻质气体和炼油厂燃料、石脑油（汽油沸程）、馏出物（煤油、喷气发动机燃料、柴油和家用燃料油）以及残余或重质燃料油。在某些情况下，一部分石脑油材料可能适用于生产辛烷值很低的汽油。

拔顶炼油厂没有用于控制产品硫含量的设施，因此不能生产超低硫燃料（ULSF）。

- ◆ **轻度加氢炼油厂**不但包括原油蒸馏和支持操作，还包括催化重整、各种加氢处理单元和产品混合。这些工艺过程能够（1）将石脑油提质加工成汽油，以及（2）控制炼制品的硫含量。催化重整提质加工直馏石脑油以符合汽油辛烷值规格并为加氢处理单元生产副产品氢。加氢处理单元会从轻质产品（包括汽油和柴油燃料）中除去硫，以符合产品规格和/或允许对较高硫含量的原油进行加工。

轻度加氢炼油厂在对汽油需求低的地区普遍存在，它们没有能力改变其所加工原油的自然产量结构。

- ◆ **转化（或裂化）炼油厂**不但包括轻度加氢炼油厂中的所有工艺过程，最重要的是还包括催化裂化和/或加氢裂化。这两种转化工艺过程会将那些在大多数原油中具有高自然产量的重质粗馏分（主要是瓦斯油）转化成可加工成汽油、喷气发动机燃料、柴油燃料和石化原料生产的轻质炼制物质流。

转化炼油厂有能力按需要改进其所加工原油的自然产量结构，以满足市场对轻质产品的需求，但是它们仍然（不可避免地）会生产一些重质、低价值产品，例如：残余燃料和沥青。

- ◆ **深度转化（或焦化）炼油厂**，顾名思义，是一种特殊类型的转化炼油厂。它们不但包括用以转化瓦斯油馏分的催化裂化和/或加氢裂化，还包括焦化。焦化单元会“破坏”最重且最不具价值的粗馏分（残油），将其转化成轻质物质流，以作为进入可生产有更大价值轻质产品的其他转化工艺过程（例如：催化裂化）和提质加工工艺过程（例如：催化重整）的附加进料。

具有充分焦化产能的深度转化炼油厂会破坏其原油品种结构中的几乎所有残油，并将这些残油转化成轻质产品。

几乎所有的美国炼油厂都是转化或深度转化炼油厂，亚洲、中东、南美和轻质产品需求快速增长的地区的炼油厂也是这样。相反，欧洲和日本的大部分炼油产能均来自轻度加氢和转化炼油厂。

Exhibit 10 总结了不同类型炼油厂的显著特点，同时指出了恒定原油质量下其特征产品产量结构。³

在美国和许多其他国家，包括巴西、中国、印度和墨西哥，转化和深度转化炼油厂构成原油加工总产能的95%以上，在原油蒸馏产能>50千桶/天的炼油厂中构成几乎100%的原油加工产能。在这些国家中的所有新建炼油厂都是转化或深度转化炼油厂。因此，下一节（第5节）的讨论特别适用于这两类炼油厂。

Exhibit 10: 炼油厂等级和特征产量结构

炼油厂类型	特征工艺过程	产品产量结构 (vol%)		备注
		汽油	柴油和喷气发动机燃料	
拔顶	原油蒸馏	31	30	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 产品含硫量与粗馏分的硫含量相同 ◆ 产品产量和质量仅由原油特性确定 ◆ 汽油具有低辛烷值
轻度加氢	原油蒸馏 重整 加氢处理	28	30	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 产品含硫量可通过加氢处理进行控制 ◆ 有一定的产品产量和质量改进能力 ◆ 可通过重整提高汽油辛烷值
转化（裂化）	原油蒸馏 催化裂化和/或加氢裂化 重整 烷基化和其他提质加工 加氢处理	44	32	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 产品含硫量可通过加氢处理进行控制 ◆ 具有很大的产量和质量改进能力
深度转化（焦化）	原油蒸馏 焦化 催化裂化和/或加氢裂化 重整 烷基化和其他提质加工 加氢处理	47	42	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 产品硫含量可通过加氢处理进行控制 ◆ 可产出最大产量的高价值炼制品 ◆ 质量改进能力最大 ◆ 几乎所有残油都可裂化，成为轻质产品

注：

(1) 汽油和馏出物燃料产量是根据加工平均质量原油而估计的标称值

资料来源：哈特能源咨询公司

³根据具体的原油品种结构和炼油厂工艺单元的具体性能特性，实际炼油厂产量结构可能会与这些结构显著不同。

4.2 炼制工艺过程等级

原油在炼油厂的许多不同的工艺过程中经受的物理和化学转化，每种工艺过程是由一个分立的设施或工艺单元执行。大型现代化炼油厂包括多达五十个不同的工艺过程，这些工艺过程以密切相互作用的方式工作着。但是，在本指南中，这些工艺过程可以看作几个概括的等级，如 **Exhibit 11** 所示。

Exhibit 11: 炼制工艺过程的重要等级

等级	功能	例子
原油蒸馏	◆ 将原油进料分离成沸程馏分，以便进一步加工	◆ 常压蒸馏 ◆ 真空蒸馏
转化 (“裂化”)	◆ 将重质粗馏分破裂 (“裂化”) 成较轻炼制物质流，以便进一步加工或混合	◆ 流化床催化裂化 (FCC) ◆ 加氢裂化
提质加工	◆ 重排分子结构，以改进汽油和柴油组分的特性 (例如: 辛烷值) 和价值	◆ 催化重整 ◆ 烷基化、异构化
处理 (精制)	◆ 从炼制物质流和混合原料中除去杂原子杂质 (例如: 硫) ◆ 从炼制物质流中除去芳香族化合物 (芳烃分离)	◆ FCC 进料加氢处理 ◆ 重整炉进料加氢处理 ◆ 汽油和馏出物加氢处理 ◆ 苯饱和
分离	◆ 用物理或化学方法分离炼制物质流中的组分，以便进行质量控制或进一步加工	◆ 分馏 (许多的) ◆ 芳香族化合物萃取芳烃抽提
调合	◆ 将混合原料混合，以生产出符合产品规格和环境标准的成品	◆ 汽油混合 ◆ 喷气发动机燃料和柴油混合
辅助设施	◆ 炼油厂燃料、电力和蒸汽供应; 硫回收; 石油运输; 原油和产品储存; 排放控制; 等等	◆ 发电 ◆ 硫回收

下页简要地讨论这些类别。

4.2.1 原油蒸馏

原油蒸馏是每个炼油厂的前端，不管炼油厂的大小或总体构型如何。它具有影响其下游炼制工艺过程的独特功能。

原油蒸馏将未处理原油进料 (通常是原油的混合物) 分离成若干中间炼制物质流 (称为“粗馏分”或“馏分”)，这些物质流用其沸程 (其挥发性或蒸发倾向的一种度量标准) 来表征。离开原油蒸馏单元的每一种馏分 (1) 都用唯一

沸程（例如：180–250°F、250–350°F等）来定义，并且（2）其是由数百或数千种不同的碳氢化合物组成，所有这些碳氢化合物的沸点都在馏分沸程以内。这些馏分包括（按照沸程增加顺序）轻气体、石脑油、馏出物、瓦斯油和残油（如 Exhibit 7 中所示）。每种馏分都流向不同的炼制工艺过程，以进行进一步加工。

石脑油是属于汽油沸程的物质；通常将它们送到提质加工单元（进行辛烷值提高、硫控制等），然后送到汽油混合单元。馏出物（包括煤油）通常经过进一步处理，然后混合到喷气发动机燃料、柴油和家用燃料油中。瓦斯油流向转化单元，在那里被破裂成较轻（汽油、馏出物）物质流。最后，残油（或残渣）被输送到其他转化单元，或者被混合到重质工业燃料和/或沥青中。残渣具有相对较小的经济价值——事实上低于其所出自原油的价值。大多数现代炼油厂都将低价值的重质最终产品转化或提质加工成更有价值的轻质产品（汽油、喷气发动机燃料、柴油燃料等）。

因为进入炼油厂的所有原油都必须经过原油蒸馏，所以炼油厂的产能通常用原油蒸馏处理能力来表示。

4.2.2 转化（裂化）工艺过程

在转化工艺过程中进行化学反应，以将（经济价值低的）大的、高沸点烃分子破裂（“裂化”）成较小、较轻的分子，以便经进一步加工之后，参合到汽油、喷气发动机燃料、柴油燃料、石化原料和其他高价值轻质产品中。转化单元形成现代炼制操作的基本核心，因为它们（1）能够让炼油厂大量产出运输燃料和其他有价值轻质产品，（2）提供操作灵活性，以便在原油质量波动的情况下维持轻质产品的产出，以及（3）允许有效地使用重质含硫原油。

主要感兴趣的转化工艺过程是流化床催化裂化（FCC）、加氢裂化和焦化。⁴

Exhibit 12 给出了这三个工艺过程某些突出特性的简单对比。

需要对 EXHIBIT 12 中的 C/H 比调整项作一些说明。如前面注解的那样，原油越重（越浓），则其 C/H 比越高。类似地，在任何给定的原油内，某沸程馏分越重，则其 C/H 比越高。同样的现象也适用于炼制品：产品越重，则其 C/H 比越高。因此，总的说来，炼制操作必须降低其所加工的原油和中间物质流的 C/H 比。这一负荷的大部分（但是并非全部）落在转化工艺过程上。

一般来讲，降低 C/H 比可用以下两种方式之一来完成：去除过量的碳（以石油焦炭形式存在），或者增加氢。FCC 和焦化是采用前一种方法；加氢裂化是采用后一种方法。

流化床催化裂化

根据工业范围的处理能力和对经济性与操作的总体影响，FCC 是原油蒸馏下游最重要的单一炼制工艺过程。该工艺过程在高温低压下工作，用一种催化剂⁵将来自原油蒸馏（以及其他重质物质流）的重质瓦斯油转化成轻气体、石化原料、汽油混合原料（FCC 石脑油）和柴油燃料混合原料（轻循环油）。

⁴ 减粘裂化, 是另一种转化工艺过程, 功能上类似于焦化。减粘裂化主要在欧洲使用。

⁵ 催化剂是促进或加速特定化学反应而本身不参加反应的物质（通常是金属或金属氧化物）。

Exhibit 12: 主要转化工艺过程的突出特点

特点	FCC	加氢裂化	焦化
主要进料			
SR 馏出物	◆	◆	
SR 瓦斯油	◆	◆	
SR 残油			◆
焦化器瓦斯油	◆		
FCC 油浆		◆	◆
工艺过程类型			
催化	◆	◆	
热			◆
C/H 比调整			
去除碳	◆		◆
增加氢		◆	
主要功能			
增加轻质产品产量	◆	◆	◆
生产附加 FCC 进料			◆
消除异质原子（包括硫）		◆	
裂化产品的硫含量	中到高	< 100 ppm	很高

FCC 提供了（1）高产量的汽油和馏出物（在 FCC 进料体积的 60–75% 的范围），（2）高可靠性和低操作成本，以及（3）适应原油质量和炼制品要求的操作灵活性。在大型面向运输燃料的炼油厂中，FCC 单元占炼油厂汽油和馏出燃料（例如：柴油）总产出的 40% 以上。FCC 所产出的汽油与馏出物（G/D）的比取决于 FCC 操作条件和催化剂。在美国炼油厂中，G/D 比在夏季高于冬季，这反映了燃料需求结构的变化。在其他地方，G/D 比趋向于比美国低，也是适应当地的需求结构。

FCC 也生产出大量轻气体（C1 到 C4），包括烯烃。轻质烯烃是具有高反应活性的化学品，可作为石化原料或（生产高辛烷值、低硫汽油混合原料的）炼油厂提质加工过程的原料。在适当选择了催化剂的情况下，FCC 单元能够设计成最大限度地生产汽油混合原料（FCC 石脑油）、馏出物混合原料（轻循环油）或石化原料。

硫是 FCC 催化剂“毒害物”，即：接触硫会降低 FCC 催化剂的效力。为解决这一问题，许多炼油厂在 FCC 前都有脱硫单元，用于除去 FCC 进料中的大部分硫。即使在适当位置有了这种脱硫单元，由 FCC 单元所产生的炼制物质流仍然含有一些硫，这些硫原先存在于 FCC 进料中。实际上，未经处理的 FCC 产品（FCC 石脑油和轻循环油）是汽油和柴油燃料中硫的主要来源。

未反应的 FCC 进料（称为“油浆”）在炼油厂中有各种处置方式，包括馈送到焦化单元（在有 FCC 和焦化两种单元的炼油厂中）。

加氢裂化

加氢裂化和 FCC 一样，主要是将来自原油蒸馏（以及其他重质炼制物质流）的馏出物和瓦斯油转化成汽油和馏出物。加氢裂化是一个催化工艺过程，在中温和高压下工作。它应用由外部产生的氢，将馏出物和重质瓦斯油进料裂化成轻气体、石化原料以及汽油和柴油燃料的混合原料。

和 FCC 一样，加氢裂化提供高产量的轻质产品和很大的操作灵活性。加氢裂化的产品产量取决于该单元的设计和操作系统。在一个操作极限，加氢裂化器可基本上将其所有进料转化成汽油混合原料，产量约为进料体积的 100%。或者，加氢裂化器可生产喷气发动机燃料和柴油燃料，两者产量可占 85%到 90vol%，同时还产出少量的汽油原料。

加氢裂化较之 FCC 有显著优势；输入到加氢裂化器的氢不但会引起裂化反应，还会引起从加氢裂化物质流中消除杂质原子（特别是硫）的反应。这些“加氢处理”反应产生具有很低硫含量和其他改进特性的加氢裂化物质流。

因此，加氢裂化物质流对于 ULSF 生产是特别有用的混合原料。加氢裂化物质流不但接近无硫，而且芳香族化合物含量也低。芳香族化合物是具有环形分子的碳氢化合物（Exhibit 1）。馏出物沸程的芳香族化合物的发动机性能差（即：十六烷值低）且排放特性差。加氢裂化中的化学反应会使芳环打开，因此产生具有突出性能和排放特性、具有很高价值的馏出物混合原料。所以，有 FCC 和/或焦化单元的炼油厂中的加氢裂化器常常接收进料形式的来自这些单元的高芳香族化合物含量、高硫含量的馏出物物质流。

加氢裂化在转化重质瓦斯油及生产低硫产品方面比 FCC 或焦化更有效，但是加氢裂化器的制作和操作也比较贵，主要因为其很高的氢消耗量。

焦化

焦化是一种热、非催化转化工艺过程，将来自原油蒸馏的残油（最重残余物）裂化成一系列的较轻中间物，以便进行进一步的加工。焦化是炼制行业将残油——“原油桶的残渣”——转化成有价值较轻产品的主要（但不是唯一）的方式。

产自焦化的裂化产品包括轻气体（包括轻质烯烃）、必须进一步加工的低质量石脑油（*焦化器石脑油*）和馏出物物质流（*焦化器馏出物*），以及大量的*焦化器瓦斯油*和*石油焦炭*（约为进料重量的 25-30%）。

焦化器瓦斯油主要用作附加 FCC 进料。但是，焦化器瓦斯油含有高浓度的硫和其他污染物，因此和直馏瓦斯油相比，焦化器瓦斯油就会成为价值较低的 FCC 进料。

根据原油情况，焦化器生产的石油焦炭可出售以用于各种最终用途，用作炼油厂或外部电站的燃料，或者简单地掩埋掉。

4.2.3 提质加工工艺过程

提质加工工艺过程进行化学反应，组合或重构低价值物质流中的分子，以生产较高价值的物质流，主要是高辛烷值、低硫汽油混合原料。主要的提质加工工艺过程均使用催化剂（包括小的烃分子）并且适用于生产汽油。

多数提质加工工艺过程中的最重要环节是催化重整、烷基化、异构化、聚合和醚化。

Exhibit 13 简单概括了这些工艺过程的一些突出特性。

按照设备产能和对于汽油生产的重要性的下降顺序，下面简单讨论一下这些工艺过程。

催化重整

催化重整（或者简称“重整”）是应用最广的提质加工工艺过程，特别是在美国炼油厂中。重整单元加工各种石脑油物质流（主要但不是哈唯一来自原油蒸馏的直馏石脑油）。⁶重整炉对这些石脑油物质流进行许多催化反应，显著增加这些物质流的辛烷值（有些情况下，辛烷值会增加 50）。重整炉输出（称为重整产品）是有很高价值、高辛烷值汽油混合原料。重整产品约占美国汽油调和品的 25%。

Exhibit 13: 主要提质加工工艺过程的突出特点

	重整	烷基化	异构化	聚合	醚化
主要进料					
SR 石脑油（中质和重质）	◆				
SR 石脑油（轻质）			◆		
天然汽油			◆		
异丁烷		◆			
C3 烯烃		◆		◆	
C4 烯烃		◆		◆	◆
甲醇/乙醇					◆
主要产品					
汽油 混合原料	重整产品	烷基化产物	异构物	聚合汽油	MTBE

⁶ SR 石脑油和其他石脑油物质流在汽油沸程内（约 60–400°F）。

其他	氢				
主要功能					
提高炼油厂的汽油产量	◆	◆		◆	◆
增加汽油调和品的辛烷值	◆◆◆	◆◆	◆	◆	◆◆◆
控制汽油调和品的辛烷值	◆				
生产炼油厂的氢	◆				

重整中的主要化学反应可生产芳香族化合物（有环形分子的碳氢化合物，如 Exhibit 1 中所示）。汽油沸程的芳香族化合物具有很高的辛烷值和用于生产汽油所希望具有的其他特性。

催化重整是一个核心炼制工艺过程。它是在炼油厂增加汽油辛烷值的主要来源，也是调节汽油调和品辛烷值的主要方式。重整可生产出辛烷值 > 100 RON 的重整产品。⁷ 重整是通过控制操作条件而控制产品辛烷值的唯一炼制工艺过程。操作条件的较小调节也会让重整炉在不同“严格度”下工作，生产辛烷值在 85 到 100 RON 范围任何值的重整产品。

重整炉还有另一项重要的炼制功能。芳香族化合物的 C/H 比高于其重整生产得到的碳氢化合物。因此，重整炉以副产品形式生产氢。重整炉生产的氢可供应美国炼油厂中所消耗氢的约 45%。

重整产品中高浓度的芳香族化合物是重整产品辛烷值的主要来源。这些芳香族化合物作为石化原料也是有价值的。因此，靠近石化中心的许多炼油厂都有工艺过程用来抽提其中一些芳香族化合物，以作为石化原料销售。

芳香族化合物，特别是苯，被认为是有毒化合物，这给从较低芳香族化合物含量的来源产生辛烷值增加带来了外部压力。

烷基化

烷基化是使轻质烯烃（主要是 C4 和一些 C3）与异丁烷（参见 Exhibit 1）化合而生成高辛烷值（约 90–94 RON）汽油混合原料（烷基化产物）的过程。轻质烯烃和大部分或全部异丁烷都来自炼油厂的 FCC 单元。⁸ 因此，烷基化单元只在有 FCC 单元的炼油厂中才有。美国的 FCC 产能占有国家中的大部分，因此具有大部分烷基化产能。

由于烷基化工艺过程的性质原因，因此烷基化产物不含有芳香族化合物和硫，而使其成为有很高价值的汽油混合原料。

⁷ 研究法辛烷值（RON）和马达法辛烷值（MON）是汽油辛烷值的两种标准度量单位。汽油等级的辛烷值规格通常规定为 RON 和 MON 的平均值（指定为泵处(R+M)/2）。

⁸ 有些靠近天然气生产场所的炼油厂可从天然气液体装置获得附加的异丁烷。

实际上，根据工艺过程情况，所有烷基化单元都使用强液体酸催化剂——氢氟酸（HF）或硫酸（ H_2SO_4 ）。两种工艺过程均要求小心操作，因为酸可能会引起环境和公众健康危害。对 HF 单元的关注主要是由于其可能释放高毒性的 HF 蒸气。对 H_2SO_4 单元的关注更多集中在大量浓强酸的搬运、储存和运输。

异构化

异构化会使轻质 SR 石脑油中低辛烷值 C5 和 C6 正构石蜡分子（Exhibit 1）发生重排，从而生产出相应的较高辛烷值 C5 和 C6 异构石蜡，因此会显著增加所得石脑油物质流（异构物）的辛烷值，使其成为有价值的汽油混合原料。

作为附加的工艺过程益处，异构化可生产基本上不含硫和苯的产品。因此，有些炼油厂最近已经增加了异构化产能，作为符合对其汽油产出所提出的严格新苯标准的一种方法。

聚合

聚合会将两种或三种轻质烯烃分子（C3 或 C4）化合起来，产生高辛烷值烯烃汽油混合原料（聚合汽油）组分。

聚合是相对较便宜的工艺过程。但是，它并未广泛使用，因为聚合汽油是一种相对不希望产生的汽油混合原料。聚合汽油高度烯烃化，而烯烃在汽油中是不稳定的（它们在储存中易形成胶质）。

醚化

醚化是将由 FCC 装置产生的 C4 和/或 C5 烯烃与购得的醇（甲醇或乙醇）化合，生产醚（一类含氧有机化合物）的过程。

醚是优质的汽油混合原料，具有很高的辛烷值和其他希望的混合特性。

最常用的醚化工艺过程是将甲醇与异丁烯（一种 C4 烯烃）化合，生产甲基叔丁基醚（MTBE）。商业应用中的其他醚（虽然只是少量）包括（用乙醇和异丁烯制造的）乙基叔丁基醚（ETBE）和（用甲醇和异戊烯（一种 C5 烯烃）制造的）叔戊基甲基醚（TAME）。醚是用基于炼油厂的单元（往往较小）和专用商业工厂（往往较大）而生产的。

根据联邦法律，MTBE 已经从美国汽油调和品中逐步淘汰（到 2006 年为止），以响应公众关心的有报告称 MTBE 泄漏到地下水中的问题。这种淘汰已经让美国炼油厂停止了它们的醚化单元。但是，美国商业工厂继续生产一些 MTBE，供出口到欧洲、墨西哥和其他地方的市场。在这些地区，将醚类（主要是 MTBE 和 ETBE）当做汽油混合原料来使用仍在继续并不断增长。在 2010 年，墨西哥每天大约消耗 4.3 万桶 MTBE，而中国每天大约消耗 4.9 万桶 MTBE。

4.2.4 处理（加氢处理）工艺过程

处理工艺过程执行化学反应，以便为各种目的而消除杂原子（如：硫、氮、重金属）和/或某些来自原油馏分和炼制物质流的特定化合物。最重要的目的是（1）符合炼制品规格（例如：汽油和柴油燃料中硫含量、汽油中苯含量

等），以及（2）防止许多炼制工艺过程中的催化剂因为长时间接触杂原子而出现失活（“中毒”）。⁹ 迄今为止，各种处理技术中使用最广泛的是催化加氢或加氢处理。

加氢处理装置可通过让含有杂原子的炼制物质流与催化剂中存在的氢发生反应而除去杂原子。氢与杂原子化合，形成易于从炼制物质流中分离的非烃分子。¹⁰

加氢处理具有许多形式和不同加氢程度，因此，它在炼制行业和文献中有许多名称。注重消除硫的加氢处理常常称为加氢脱硫；注重消除氮的加氢处理称为加氢脱氮；等等。在高严格条件下（即：高温、高压和高氢浓度）进行的加氢处理常常还涉及一些附带的加氢裂化。这种深度加氢处理称为加氢精制。在低严格条件下进行的加氢处理用于改进特制制品的某些特性（例如：各种润滑油特性），以符合规格。轻度加氢处理常常称为加氢补充精制。

生产轻质产品的大多数炼油厂有许多加氢处理单元。它们可处理从轻质石脑油到重质残渣的许多不同原油馏分、中间炼制物质流、原料和混合原料，并用于许多用途。例如：

- ◆ 所有催化重整炉都有石脑油加氢处理装置，用于将重整炉进料的硫含量降到 <1 ppm，以保护重整炉催化剂。有些重整炉还有后加氢处理装置（苯饱和单元），以消除来自重整产品的苯。
- ◆ 许多 FCC 单元，特别在处理含硫原油品种或者生产低硫汽油和柴油燃料的炼油厂内，都有 FCC 进料加氢处理装置。这些加氢处理装置用于降低 FCC 排放的硫氧化物，保护 FCC 催化剂不会因氮和金属而引起中毒，提高裂化产量，以及降低 FCC 产品（包括那些流向汽油和柴油混合工艺过程的产品）的硫含量。

生产低硫汽油的炼油厂中几乎所有 FCC 单元都有后加氢处理装置（FCC 石脑油加氢处理装置），用于消除 FCC 石脑油中大部分的硫，FCC 石脑油是 FCC 生产的一种重要的汽油混合原料。

- ◆ 馏出物加氢处理装置用于消除来自个别馏出物燃料混合原料或这些混合原料混合物以及其他炼制物质流的硫，以符合成品中对硫的规格要求（有时，还要符合芳香族化合物和辛烷值规格要求）。

4.2.5 分离工艺过程

实际上，所有炼制物质流都是碳氢化合物的混合物。分离工艺过程利用这些化合物的物理和化学特性差异，将一个炼制物质流分离成两个或更多新的物质流。

蒸馏或分馏是最常用的分离工艺过程，利用沸点温度的差异，进行分离，分离成相对较轻的（低沸点）和相对较重的（高沸点）混合物。蒸馏使用的是已经被认可的技术，它毫无疑问是使用最广的炼制工艺过程；蒸馏单元（分馏器）是炼油厂内随处可见。

蒸馏单元要求输入大量的热能，以使待分离混合物中较易挥发的组分沸腾。因此，炼油厂的蒸馏单元，包括原油蒸馏（4.1.1 节），总共占用炼油厂内总能量消耗的相当大部分。

抽提是另一种常用的分离工艺过程，它利用不同化合物在液体溶剂中相对溶解性的差异，以除去烃混合物中特定的化合物。抽提最常见的炼制应用是芳香族化合物抽提，选择性地从催化重整所产生的高芳香族化合物含量的重整产

⁹有些催化剂不能忍耐超过 1 ppm 的硫浓度。

¹⁰例如：氢与硫反应，生成硫化氢，硫化氢是一种轻质易分离的气体。

品流（4.1.3节）中除去某些芳香族化合物（参见 EXHIBIT 1）。抽提的芳香族化合物（苯、甲苯和二甲苯）是主要的石化原料。

4.2.6 辅助设施

炼油厂包括许多具有不同复杂性和用途的附加工艺过程单元。有些用于生产特制产品（蜡、润滑油、沥青等）；有些用于控制向空气和水的排放物；还有一些用于为上面讨论的干线工艺过程提供支持。

主要的支持设施包括

- ◆ 氢生产和回收
- ◆ 硫回收（从脱硫工艺过程中回收）
- ◆ 轻气体处理和分离
- ◆ 废水处理
- ◆ 油运输和储存
- ◆ 电和蒸汽生产

加氢裂化器和加氢处理装置要求输入大量的氢。如上所述，炼油厂的部分氢要求（美国炼油厂总量的大约 45%）通过重整炉中产生的副产品氢来满足。其余的氢要求通过炼油厂内专门的氢生产单元或者通过从附近的商业氢工厂购买氢来满足。这些单元用天然气生产氢。因为专门生产的氢，不管来自哪里，都比较贵，所以大多数炼油厂都有一些设施，用于回收和循环利用加氢裂化和加氢处理流出物质流中用过的氢。

炼油厂的工艺过程利用燃料和物质流来加热和/或煮沸工艺物质流，并提供促进化学反应所需要的能量，同时这些过程利用电让泵和压缩机运转。有些炼油厂购买燃料（天然气）、电和/或蒸汽；而另一些炼油厂则自行生产部分或全部的燃料（天然气）、电和/或蒸汽。现场生产燃料（天然气）、电和/或蒸汽涉及传统蒸汽锅炉和发电设施或热电联产。热电联产是利用购买的天然气或炼油厂生产的轻气体作为燃料，以很高的热效率进行的电和蒸汽的综合生产。

4.2.7 产品混合

不管炼油厂的大小或总体构型如何，产品混合都是在每一个炼油厂后端进行的操作，它是以各种比例将炼制物质流混合，以最低成本生产成品炼制品，这些炼制成品的特性符合所有适用的行业和政府标准。各种标准是关于以下方面的：物理特性（例如：密度、挥发性、沸程）；化学特性（例如：硫含量、芳香族化合物含量等）和性能特性（例如：辛烷值、烟点）。

每种成品的生产都要求多个组分混合，因为（1）炼油厂不会以充足的量生产单个混合组分，以满足任何一种主要混合产品（例如：汽油、喷气发动机燃料和柴油燃料）的需求，（2）许多混合组分的特性，对于其必须混入的炼制品的相关标准，只是部分而不是全部符合，以及（3）成本最小化要求炼制品混合成在可能的范围内符合而不是超过规格。通常，汽油是约 6–10 种混合原料的混合物；柴油燃料是约 4–6 种混合原料的混合物。

汽油混合是最复杂和高度自动化的混合操作。在现代炼油厂中，自动化系统对混合原料和添加剂进行计量和混合。（由混合样品实验室分析所补充的）线上分析仪连续监测混合特性。以最低生产成本生产要求的产品量并符合所有混合规格的混合配方，用计算机控制和数学模型来确定。其他产品的混合通常涉及很少的自动化和数学分析。

5. ULSF 生产的基本原理

本节叙述关于转化和深度转化炼油厂中 ULSG 和 ULSD 生产的四个主题。

1. 为生产汽油和柴油燃料而混合的炼制物质流和混合原料的主要特性，特别是硫含量
2. 生产 ULSG 和 ULSD 所需要的炼制工艺过程
3. 为符合 ULSG 和 ULSD 标准而升级现有炼油厂的途径
4. 与符合 ULSF 标准相关的炼制成本

5.1 汽油和柴油混合原料的主要特性

5.1.1 汽油混合原料

个体炼油厂生产一到四个等级的汽油（根据其辛烷值、硫含量和其他物理特性进行区分）。通常，每个等级都是六到十种混合原料（炼油厂生产或购买的）的混合物。所有的等级都是由同样一组混合原料但是以不同配方混合而成的。

Exhibit 14 列出了最常用的汽油混合原料并给出了每种混合原料的较重要混合特性（包括硫含量）的典型范围。

Exhibit 14: 标准汽油混合原料的典型体积份额和特性

来源	混合原料	典型份额 (Vol%)	典型特性						
			辛烷值		硫 (ppm)	RVP (psi)	芳香族 化合物 (vol%)	苯 (vol%)	烯烃 (vol%)
			RON	MON					
原油蒸馏	直馏石脑油	5 - 10	71	70	≈ 120	12	-	-	-
提质加工单元	异构物	0 - 10	82	80	1	13	-	-	-
	烷基化产物	5 - 10	94	92	< 10	3	-	-	-
	重整产品	20 - 30	97	88	< 4	5	60	5	-
转化单元	FCC 石脑油	30 - 35	92	80	500 - 1500	5	25	1	30
	焦化器石脑油	0 - 5	88	80	≈ 500	19	0.5	0.5	50
	加氢裂化的石脑油	5 - 15	78	76	< 4	11	2	2	-
购买	天然气液体	0 - 5	73	71	≈ 150	13	3	1	1
	MTBE	0 - 15	118	102	< 5	8	-	-	-

乙醇	0 - 10	123	103	< 5	18	-	-	-
----	--------	-----	-----	-----	----	---	---	---

Exhibit 14 显示了许多混合原料特性的范围，因为特定特性值取决于原油特性和（对于某些混合原料，特别是重整产品和 FCC 石脑油）生产它们的单元中的加工严格程度。例如：根据经验，FCC 石脑油的硫含量大约为生产这种 FCC 石脑油所用原油中硫含量的 1/10。因此，含硫 2%（重量百分数）（20,000 ppm）的原油可生产出硫含量约为 0.2%（重量百分数）（2000 ppm）的 FCC 石脑油。

给出的特性是针对“未经处理的”物质流的，即：针对那些未经进一步加工来改进其特性的物质流的。特别地，给出的硫含量没有反映生产出物质流的单元下游侧的加氢处理。

在硫控制加工之前，由于 FCC 石脑油的高硫含量和在汽油调和品中高体积份额，所以它是汽油中硫的主要来源，贡献了汽油中硫的 90%。焦化器石脑油和直馏石脑油贡献了余下硫的大部分。

因此，ULSG 生产要求对 FCC 石脑油进行严格脱硫（主要通过加氢处理）。在深度转化炼油厂中，ULSG 生产也要求对焦化器石脑油进行脱硫。对于大多数严格的硫标准，ULSG 生产也要求对直馏石脑油和天然气液体进行脱硫。

5.1.2 柴油混合原料

个体炼油厂生产一或两个等级的柴油（主要根据其硫含量，也根据十六烷值、密度和其他物理特性来区分）。通常，每个等级都是三到五种炼油厂生产的混合原料 [在有些地方，加上购买的生物柴油和（几种情况下）费托柴油] 的混合物。和汽油一样，所有的柴油等级都是由同样一组混合原料但是以不同配方混合而成的。

Exhibit 15 列出了最常用的柴油混合原料并给出了每种混合原料的较重要混合特性的典型范围。

Exhibit 15: 标准柴油混合原料的典型体积份额和特性

来源	混合原料	典型份额 (Vol%)	典型特性			
			硫 (ppm)	十六烷值	芳香族化合物 (vol%)	比重
原油蒸馏	直馏煤油	25 - 33	≈ 3000	45	19	0.82
	直馏馏出物	31 - 35	≈ 7000	53	21	0.85
转化单元	FCC 轻循环油	15 - 21	≈ 12500	22	80	0.93
	焦化器馏出物	8 - 10	≈ 32000	33	40	0.89
	加氢裂化的馏出物	7 - 15	≈ 100	45	20	0.86

本 exhibit 没有显示混合原料特性的范围，但是（和汽油混合原料一样）这些特性的值取决于原油品种的特性。

和前面一样，给出的特性是针对“未经处理的”物质流的，即：针对那些未经进一步加工来改进其特性的物质流的。特别地，给出的硫含量没有反映生产出物质流的单元下游侧的加氢处理。

在硫控制加工之前，FCC 轻循环油是柴油调和品中硫含量最大的单个贡献因子。焦化器馏出物（在深度转化炼油厂中）和直馏馏出物贡献了余下的硫。

ULSD 生产要求对所有炼油厂生产的柴油混合原料进行严格脱硫（主要通过加氢处理）。

5.1.3 转化单元的特殊作用

Exhibit14 和 15 表明

- ◆ 提质加工工艺过程可根据其工艺技术和和催化剂要求，生产出 ULSG 混合原料。
- ◆ 转化工艺过程——FCC、加氢裂化和焦化——可生产用于汽油和柴油两者的混合原料。在许多炼油厂中，特别是 FCC 单元，是汽油调和品和柴油调和品两者的最大单个贡献因子。
- ◆ FCC 和焦化是汽油调和品和柴油调和品（特别是汽油调和品）中硫的主要来源。

因此，生产 ULSG 和 ULSD 的主要任务是控制由转化工艺过程所生产的汽油和柴油混合原料的硫含量（虽然直馏煤油和馏出物物质流也要求脱硫）。

5.2 符合 ULSG 和 ULSD 标准所涉及的炼制工艺过程

使用已经被认可的炼制工艺过程的高级型式，炼油厂可以按照出厂控制要求生产出硫含量低至<5 ppm 的 ULSG 和 ULSD。¹¹

当前硫控制技术的许多要素都是过去十年针对美国、加拿大、西欧和日本以及其他地方所采用的严格 ULSG 和 ULSD 标准而开发的。到目前为止，人们已充分了解严格硫控制技术的经济学、性能和和可靠性。

Exhibit 16 给出了对符合 ULSD 标准有贡献的主要炼制工艺过程。

Exhibit 16: 生产超低硫燃料（ULSF）的炼制工艺过程

工艺过程	工艺过程类型	主要目的	降低以下产品中的硫	
			汽油	柴油
加氢裂化	转化	产量提高	✓	✓
FCC 进料加氢处理	处理	产量提高	✓	✓
FCC 石脑油加氢处理	处理	硫控制	✓	
其他石脑油加氢处理	处理	硫控制	✓	
馏出物加氢处理	处理	硫控制		✓

Exhibit 16 以两种类型显示了这些工艺过程。

¹¹ 此外，可用管道技术和操作程序将这些燃料输送到硫含量<10 ppm 的最终使用场所。

- ◆ **硫控制：**这些工艺过程的唯一目的就是实现为符合现行 ULSF 标准而需要的硫控制。实际上在所有情况下，ULSF 生产都要求进行这些工艺过程，并且大多数情况下，这些工艺过程足以达到这种目的。

这些工艺过程的投资是“维持经营性的”投资。它们不产生投资经济回报，只是能够让炼油厂符合现行硫的标准，因而维持经营。

- ◆ **产量提高：**这些工艺过程的主要目的是通过将重质粗馏分转化成较轻物质流而增加炼油厂的轻质产品的产量。加氢裂化直接增加炼油厂的轻质产品的产量；FCC 进料加氢处理通过改进 FCC 操作（4.2 节）间接达到同一目的。这些工艺过程可为符合 ULSF 标准而做出贡献，但是不是为符合 ULSF 标准而要求的。一般情况下，单独这些工艺过程不足以生产 ULSF。

这些工艺过程的投资主要是“赢利性的”投资。做这些投资可提高产品实现和总体炼制经济效益，足以产生令人满意的投资回报。这些投资提供了辅助益处，包括一些关于硫控制的益处，但是这些益处本身很难充分从经济上证明这些工艺过程投资的合理性。

ULSF 生产也要求适当的氢生产、炼油厂能量供应、硫回收、石油运输和储存能力。

两种炼油厂产能投资（以及其他投资）开始在以下方面起作用：（1）新的、“基层”炼油厂的设计和建设，以及（2）为增加原油处理能力和产品产量以及符合新监管标准而对现有炼油厂的扩建。但是，大多数情况下，为符合新监管标准而产品需求不同时增加的情况下对炼油厂进行升级时，只有硫控制投资开始起作用。

5.3 为符合更严格的硫标准而对炼油厂进行升级

大体上说，有三种途径用于按照新的、更严格的标准对生产 ULSF 或生产 ULSF 的现有炼油厂进行升级。

- ◆ 为硫控制增加新的、“基层”工艺过程单元——很可能是用于 ULSG 的 FCC 石脑油加氢处理和用于 ULSD 的馏出物加氢处理并且（不太可能）是 FCC 石脑油加氢处理；
- ◆ 为硫控制扩大现有工艺过程单元的产出能力；以及
- ◆ 改进现有工艺过程单元，以便能够进行更严格的硫控制。¹²

在有些情况下，最实用或经济的生产 ULSF 途径可能是这三种途径的一定组合。¹³ 每种途径都要求进行升级或者增加氢生产和回收、炼油厂能量供应、硫回收、石油运输和储存能力，以及其他支持设施，还有新的催化剂、新的操作程序等。

因为每个炼油厂都是独特的，所以每个炼油厂可能都有独特的升级途径。

¹² 改进通常涉及以下几种情况的组合：（1）提供附加的反应器容积，（2）增大氢的浓度，（3）增大反应器中液/蒸气接触，以及（4）换用更有效的催化剂。

¹³ 这套升级途径不包括改变炼油厂原油品种结构。在不增加投资让炼油厂的加工能力符合新的原油产量结构的情况下，换用低硫原油是不太经济也是不太可行的。类似地，与满足增加的国内和出口需求相比，换用低硫原油不包括明确建设新炼油厂以生产 ULSF。

5.3.1 ULSG 生产

Exhibit 15 表明，降低汽油的硫含量要求（按优先顺序）对 FCC 石脑油、焦化器馏出物（在深度转化炼油厂中）和直馏石脑油进行脱硫。

- ◆ **FCC 石脑油** 是汽油中硫的主要贡献因子，在适当构建的 *FCC 石脑油加氢处理装置* 中可以将硫脱到 <10 ppm。这些单元可以设计或升级成使 FCC 石脑油的硫含量降低 >97%，并且能够生产硫含量低至 10 ppm 的 FCC 石脑油。在转化炼油厂中，单独进行该步骤就足以符合低至 10 ppm 的汽油含硫标准。
- ◆ **焦化器石脑油** 是在深度转化炼油厂中生产出来的，通常（为直接混合到汽油）在 FCC 石脑油加氢处理装置中或（为用作重整炉进料）在石脑油加氢处理装置中进行脱硫。
- ◆ **直馏石脑油** 来自原油蒸馏单元，在异构化单元（4.1.3 节中讨论的一种提质加工工艺过程）中进行脱硫，如果炼制厂已经有一个异构化单元的话。否则，如果有必要，直馏石脑油可在专用（新的）加氢处理装置中进行脱硫。另一种方法，尽管不常用，还是应该提一下。几个大型的美国炼油厂有在特别高严格程度下（几乎接近加氢裂化）工作的 FCC 进料加氢处理装置。这些单元可完成高程度的 FCC 进料脱硫，使 FCC 石脑油不需要进一步脱硫（即：没有 FCC 石脑油加氢处理）就可让炼油厂的汽油符合很严格的硫标准。

5.3.2 ULSD 生产

Exhibit 16 表明，降低柴油的硫含量要求对以下所有主要的柴油燃料混合原料进行脱硫：直馏煤油和柴油、轻循环油、焦化器馏出物（在深度转化炼油厂中）和加氢裂化馏出物（在有加氢裂化器的炼油厂中）。

通常的做法是先将所有这些物质流进行混合，然后在单个馏出物加氢处理装置对其进行脱硫。符合一种新的、更严格的柴油硫含量标准涉及更换、扩大和/或改进现有的馏出物加氢处理装置，这样的更换、扩大和/或改进要根据该装置的具体能力和待符合的硫标准来进行。

上述所讨论的严格 FCC 加氢处理类型能够大大降低 FCC 所生产轻循环油的硫含量，但是还远远不足以在不需要附加的馏出物加氢处理能力的情况下就符合更严格的柴油硫含量标准。

5.4 符合 ULSF 标准的成本经济分析

5.4.1 投资要求

为符合给定的 ULSF 标准所要求的资本投资不但取决于所选择的升级途径，还取决于当地经济因素，例如：炼油厂所有权、人工成本、施工周期、货币汇率、税率等。

这些因素使 ULSF 生产投资要求很难普遍化。

5.4.2 炼制成本

与符合新的、更严格汽油或柴油硫含量标准相关的附加每加仑炼制成本的主要组成部分有：

- ◆ 与新的或升级的工艺过程能力和支持设施投资相关的资本费用
- ◆ 附加氢供应的成本

涉及硫控制的各种工艺过程中氢消耗量取决于炼油厂原油品种结构和各种工艺过程中的操作严格程度。**EXHIBIT 17**给出了所关心工艺过程中氢消耗的大约水平。

Exhibit 17: 生产ULSF的工艺过程中大约的氢消耗量¹⁴

工艺过程	工艺过程类型	主要目的	大约 H ₂ 消耗量 (标准立方英尺/桶)
加氢裂化	转化	产量提高	1200 - 2500
FCC 进料加氢处理	处理	产量提高	800 - 2000
FCC 石脑油加氢处理	处理	硫控制	50 - 200
其他石脑油加氢处理	处理	硫控制	25 - 100
馏出物加氢处理	处理	硫控制	250 - 1000

◆ 弥补损失的产品产量所需的成本

加氢处理工艺过程总是会引起一些产量损失，这是由不希望发生（但是不可避免的）将加氢处理装置进料转化成轻气体的副反应所引起的。产量损失较小，通常约占体积的1%，但是它会随着加氢程度增大而增大。

◆ 弥补损失的汽油辛烷值所需的成本

FCC 石脑油含有高浓度的烯烃化合物（Exhibit 1）。烯烃易于与氢反应，生成石蜡——这是一种称为**烯烃饱和**的反应，是脱硫过程的一个副反应。石蜡的辛烷值一般比烯烃低，因此烯烃饱和化（以其发生的程度）降低了FCC 石脑油的辛烷值。将FCC 石脑油加氢处理催化剂设计成可限制烯烃饱和，但是它们不会将其完全消除。因此，FCC 石脑油加氢处理会导致辛烷值损失约1%。损失的辛烷值必须通过使用相应操作成本增加提质加工单元（主要是重整）的产出来进行弥补。

上述成本类型中的前三类适用于ULSG和ULSD两者；最后一类只适用于ULSG。

最后，符合新的、更严格ULSF标准所要求的炼制成本是新的硫和以前硫标准的函数。例如：符合10 ppm硫标准所要求的成本在当前标准为500 ppm时高于为50 ppm时。

5.4.3 能量消耗和CO₂排放

降低一种炼制物质流或一种成品（如：汽油、柴油燃料、残渣燃料）的硫含量要求一定的炼油厂能量支出，因而导致一定的炼油厂CO₂排放量增加。必须消耗炼油厂能量，以便（1）生产必要的脱硫所要求的附加的氢，（2）增加

¹⁴氢用量以每桶（Bbl）烃产量所用标准立方英尺数（Scf）来度量。按照能含量来讲，大约20,000标准立方英尺的氢相当于1桶燃料油。

为弥补脱硫引起的产品产量损失所需要的炼油厂和工艺过程产出，以及（3）提高为弥补脱硫引起的辛烷值损失所需要的重整和其他提质加工操作的严格程度。要求的炼油厂能量增加来自于燃烧附加的（购买的）天然气以及在较小程度上燃烧附加的釜馏气（各种炼制工艺过程副产品的轻气体物质流的一种混合物）。附加碳氢化合物的燃烧导致附加的炼油厂 CO₂ 排放。（此外，氢装置以副产品生产 CO₂。）

和炼制成本一样，与符合新的、更严格 ULSF 标准相关的附加能量消耗和 CO₂ 排放的幅度是新的硫和以前硫标准的函数。例如：符合 10 ppm 硫标准相关的附加能量要求和 CO₂ 排放在当前标准为 500 ppm 时高于为 50 ppm 时。

有关美国炼油厂能量消耗的最新历史记录提供了与低硫燃料生产相关的附加能量消耗幅度的粗略指示。到 2005 年为止的二十年中，在每桶的基础上，美国炼油厂能量消耗总量下降了约 10%。每桶原油能量消耗的下降趋势在 2006 年发生了逆转，到 2010 年止，每桶原油的能量消耗已经比 2006 年的水平增加了大约 5%。这种逆转可能是由于遵守了大部分国家于 2006 年实施的新联邦汽油硫（第 2 级）和柴油燃料硫（ULSD）标准而引起的。

6. 参考文献

1. Berger, Bill D., Anderson, Kenneth E.; *Modern Petroleum, A Basic Primer of the Industry*; Oil & Gas Journal Books; 1978
2. Gary, James H., Handwerk, Glenn E., and Kaiser, Mark J.; *Petroleum Refining Technology and Economics*; Fifth Edition; CRC Press; 2007
3. Leffler, William L.; *Petroleum Refining in Nontechnical Language*; Third Edition; PennWell Corp.; 2000
4. Little, Donald M.; *Catalytic Reforming*; PennWell Publishing Company; 1985
5. Maples, Robert E.; *Petroleum Refinery Process Economics*; 2nd Edition; PennWell Corp.; 2000
6. Meyers, Robert A., Editor-in-Chief; *Handbook of Petroleum Refining Processes; Second Edition*; McGraw-Hill; 1997
7. Meyers, Robert A., Editor-in-Chief; *Handbook of Petroleum Refining Processes; Third Edition*; McGraw-Hill; 2003
8. Oil Price Information Service (OPIS); OPIS Energy Glossary;
<http://www.opisnet.com/market/glossary.asp#S>
9. Parkash, Surinder; *Refining Processes Handbook*; Gulf Professional Publishing; 2003
10. U.S. Energy Information Administration; Glossary; <http://205.254.135.24/tools/glossary/index.cfm?id=petroleum>
11. U.S. Energy Information Administration; Crude Oil and Refined Products Glossary;
www.icapenergy.com/us/docs/crudeglossary.pdf
12. *U.S. Petroleum Refining: Assuring the Adequacy and Affordability of Cleaner Fuels*; National Petroleum Council; June 2000