

“十三五”国家重点图书出版规划项目
炼油装置技术手册丛书

加氢裂化装置 技术手册

别东生 编著



中国石化出版社

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

“十三五”国家重点图书出版规划项目
炼油装置技术手册丛书

加氢裂化装置技术手册

别东生 编著



中国石化出版社

内 容 提 要

本书从实际应用的角度出发,重点介绍了近二十年来国外加氢裂化过程的新进展。内容主要包括:加氢裂化过程的发展和在炼油厂的作用和地位;加氢裂化过程特点和类型;加氢裂化过程催化剂;加氢裂化过程化学反应和操作变数;工业加氢裂化过程;加氢裂化装置的改造;有加氢裂化过程的组合加工过程;加氢裂化过程主要设备;加氢裂化过程的技术经济性;加氢裂化过程设备的腐蚀/损伤和材料选择。

本书是一本有关石油炼制和加氢裂化过程方面的专业性比较强的技术手册,内容新颖,涉及面广,可以作为从事石油炼制行业的工程技术人员、操作人员、专业教师和学生在学习、研究和吸收国外先进技术过程中的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

加氢裂化装置技术手册/别东生编著. —北京:
中国石化出版社, 2019. 1
(炼油装置技术手册丛书)
ISBN 978-7-5114-5189-7

I. ①加… II. ①别… III. ①石油炼制-加氢裂化-
生产设备-技术手册 IV. ①TE624. 4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 025025 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号
邮编:100020 电话:(010)59964500
发行部电话:(010)59964526
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail:press@sinopec.com
北京科信印刷有限公司印刷
全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 26.25 印张 612 千字
2019 年 2 月第 1 版 2019 年 2 月第 1 次印刷
定价:180.00 元

《炼油装置技术手册丛书》

编 委 会

主 任	刘根元			
委 员	凌逸群	俞仁明	王 强	罗 强
	常振勇	王治卿	张 涌	赵日峰
	余夕志	江正洪	宋云昌	谈文芳
	周志明	王子康		

前 言

加氢裂化过程的发展和进步是在原料市场重质化/劣质化和成品油市场轻质化和优质化条件下进行的。

自从加氢裂化装置工业化以来，经过 60 多年的发展，已经发展成一个大家族。工业加氢裂化过程发展到今天，已经成为石油炼制业的核心装置。它的核心位置主要体现在下列几方面：

- 技术上成熟，主要体现在：所用催化剂和催化剂系统的性能更全面；过程的操作灵活性和安全性更高；设备材料的腐蚀损伤机理更明了，防护技术更有效，材料选择技术和设备制造技术更进步等。

- 催化剂和催化剂系统种类齐全，可供选择的范围比较宽，有的催化剂供应商可以根据用户的要求(如，原料性质、装置处理能力、产品要求和装置运转周期等)定制或优化专用催化剂或催化剂系统。

- 能处理所有类型的石油系原料，如石脑油、中馏分油、VGO、LCO、CGO、DAO、AR、VR、沥青、合成原油，如果条件合适，甚至可以处理煤粉。

- 如果所选用的催化剂或催化剂系统和操作条件合适：能生产各种优质产品，如 ULSG、低芳烃喷气燃料、高十六烷值 ULSD 和高 VI 润滑油基础油；能为其他过程提供优质原料，如高芳潜重整石脑油，用作 FCC、润滑油生产和蒸汽裂解等过程的低硫和低芳烃尾油。

- 改变操作条件、更换催化剂或调整过程流程，能够灵活地处理各类原料和改变产品分布。

- 能很好地同其他过程(如蒸馏、FCC、SDA、焦化、减黏、加氢裂化、择形裂化、择形异构化、润滑油生产、蒸汽裂解和气化等过程)联合组成组合加工过程，能把 AR、VR 和沥青等劣质原料，经济地转化成各种优质产品，如低硫、低凝点和高十六烷值柴油和高 VI 润滑油基础油。

- 可以用少量投资，把其他临氢加工过程，如加氢处理或加氢精制装置，改造成加氢裂化装置。

- 尽管一次投资比较多，由于它的综合效益高，会很快得到补偿，这一点是明确的。

- 大型综合性和复杂型炼油厂是不能没有加氢裂化装置的。

由于有关加氢裂化技术的进步和发展比较快，与此相关的文献和资料很多。受篇幅所限，针对《加氢裂化装置技术手册》的特点，在编写过程中，在内容取舍上，采取下列几个原则：

- 在论述某一过程时，尽量采用来自工业装置的技术数据。
- 在描述某项技术时，尽量采用国外相关过程的技术数据，因为在加氢裂化领域，国外技术依然有很多值得我们学习的地方。
- 在介绍国外加氢裂化过程时，尽量采用美国、欧洲和日本近 20 年已经工业化的技术或数据。
- 在催化剂研制和应用方面(尽管非常重要)，相关的国外文献(如近几年公布的专利说明书)非常多，尽管涉及的内容有些很新颖，并有一定前瞻性，但是由于多数都还没有工业化，受篇幅所限，在编写过程中，没有包括这方面的内容。
- 尽量选取有代表性的大炼制公司的已经工业化的技术数据。
- 在选取具体实例、内容和数据时，尽量选取有关新装置、老装置改造和已经工业化的组合加工技术。
- 在收集催化剂方面的数据和内容时，更侧重于催化剂和催化剂系统的应用技术。
- 由于油品市场对优质中馏分油和尾油需求的持续增长，对 MPHC 和 MHC 技术，特别是国外 MHC 过程有比较详细的介绍和描述。
- 鉴于加氢裂化过程的操作条件和操作环境的苛刻性和对设备材料的严格要求，比较详细地介绍了过程对材料的腐蚀损伤机理和相关设备的选材原则。
- 书中的每一条目尽量做到简单明了，以便增大信息量。如需详细内容，请按参考文献查找原文。

作为本书的编著者，我衷心希望这本书能给你——还战斗在炼油生产第一线的年轻的战友们一些许帮助和启发。受业务水平和能力所限，文章中出现的错误和不足肯定会给您带来困扰，敬请谅解。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 加氢裂化过程的发展和在炼油厂的作用和地位	(5)
第二节 加氢裂化过程的特点和类型	(11)
第二章 加氢裂化过程原料和产品	(34)
第一节 衡量加氢裂化原料和产品质量的重要指标	(34)
第二节 加氢裂化过程原料	(45)
第三节 加氢裂化产品	(57)
第三章 加氢裂化过程催化剂	(60)
第一节 加氢裂化过程用的催化剂	(60)
第二节 临氢加工过程催化剂的制备	(83)
第三节 加氢裂化催化剂的装填、活化、中毒/失活	(85)
第四节 临氢加工过程催化剂再生、复原和利用	(99)
第五节 加氢裂化过程商品催化剂	(103)
第四章 加氢裂化过程化学反应和操作变数	(124)
第一节 加氢裂化过程的主要化学反应	(124)
第二节 加氢裂化过程的操作变数	(139)
第五章 工业加氢裂化过程	(151)
第一节 以馏分油为原料的常规加氢裂化过程	(153)
第二节 中压或缓和加氢裂化	(166)
第三节 重/渣油或劣质油加氢裂化过程	(171)
第四节 生产优质柴油和润滑油料的加氢裂化过程和择形催化脱蜡过程	(196)
第六章 加氢裂化装置的改造	(204)
第一节 UOP 老装置改造的三个案例	(205)
第二节 Shell 公司的用加氢裂化技术增产柴油的几个老装置改造案例	(212)
第三节 EMRE 的由 HT 装置改造的缓和加氢裂化装置	(217)
第四节 CLG 用 SSRS 技术改造加氢裂化装置	(224)
第五节 H-Oil 法渣油加氢裂化装置的沥青污染问题	(225)
第七章 有加氢裂化过程的组合加工过程	(227)
第一节 加氢裂化-FCC 组合加工过程	(228)

第二节	加氢裂化-加氢精制组合加工过程	(236)
第三节	同热加工过程组合的加氢裂化组合加工过程	(238)
第四节	溶剂脱沥青-加氢裂化-气化组合加工过程	(244)
第五节	加氢裂化-润滑油组合加工过程	(246)
第六节	西班牙 Tarragona 炼油厂加氢裂化-石油化工组合加工过程	(250)
第七节	加氢裂化-气化组合加工过程	(253)
第八节	有沸腾床加氢裂化过程的组合加工过程	(259)
第八章	加氢裂化过程主要设备	(263)
第一节	加氢裂化反应器	(263)
第二节	加氢裂化分离设备	(283)
第九章	加氢裂化过程的技术经济性	(296)
第一节	加氢裂化过程的技术经济性	(296)
第二节	有加氢裂化装置的组合加工过程的技术经济性比较	(301)
第三节	多产中馏分的加氢裂化过程工业应用案例的技术经济性分析	(305)
第四节	择形脱蜡过程同溶剂脱蜡过程的技术经济性对比	(318)
第十章	加氢裂化过程设备的腐蚀/损伤和材料选择	(320)
第一节	炼油厂设备常用材料、化学组成、机械性质和抗腐蚀性	(320)
第二节	加氢裂化过程设备的腐蚀、损伤和预防/缓解腐蚀和损伤的方法	(333)
第三节	炼油厂设备腐蚀控制技术和材料选择原则	(367)
第四节	加氢裂化设备的材料选择	(383)
参考文献		(397)
附录 缩略语		(400)

第一章 绪 论

已经有 140 年发展历史的石油炼制工业，自从 20 世纪 90 年代以来，面临下列几方面的压力和挑战^[1-5]：

- 原油质量劣质化，如原油越来越重，污染物含量越来越多，越来越难处理。
- 世界原油市场上存在大量的、价格比较低的劣质原油或机会原油。而有些原油对于某些炼油厂来说是难以接受的，原因是这些炼油厂的装置配置太过简单，不能经济地处理这些劣质的机会原油。
- 环保法规对炼油厂的排放要求越来越严厉，要求炼油厂必须持续减少排放。
- 石油产品规格标准对产品的质量要求越来越高，要求炼油厂必须生产更多清洁的或者对环境友好的燃料，如 ULSG(超低硫汽油)和 ULSD(超低硫柴油)等。
- 必须采用更先进的技术和操作模式，建设更多的新装置或改造现有的老装置，才能把更多的劣质油，如 VR(减压渣油)，转化成价值更高的产品。

到 2030 年，全世界的汽车将由目前的 9 亿辆上升到 21 亿辆，在该过程中，虽然会有一些新的替代能源出现，但是主导运输业的依然是以石油为基础的汽油、喷气燃料和柴油，这种趋势是确定无疑的^[6]。

图 1-1 为世界油品对运输燃料的需求。从图 1-1 可以看出：市场对汽油的需求量持续平稳；对中馏分油(煤油和柴油)的需求量还将稳步上升；对燃料油(主要是 VR)的需求将进一步下降。图 1-2 为 2015 年前 VR 产量和市场对渣油型燃料油需求量的关系，从图 1-2 中的趋势看出，这两种产品的供求关系是不平衡的^[2]。

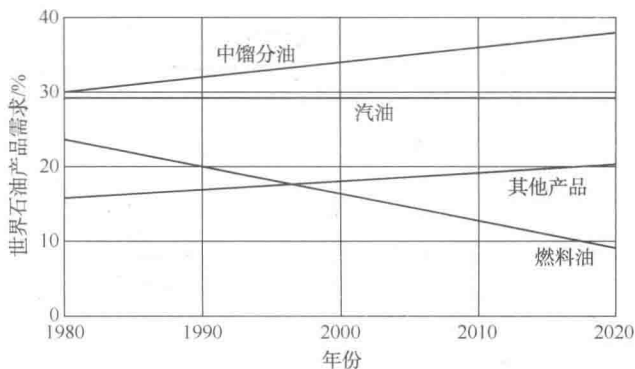


图 1-1 世界对运输燃料的需求趋势^[2]

面对上述挑战或压力，对于炼油厂来说没有更多的选择，只能依靠技术进步或技术创新来适应市场的变化和 demand。那么什么样的炼油厂才能满足上述要求呢？

对于一座现代化炼油厂来说，不管是处于设计阶段还是处于运行过程中，必须确保：

- 有满足当地市场需求的经济规模，能处理更多的重质或劣质原料。
- 采用更多、更先进的技术，具有更高的炼制效率。

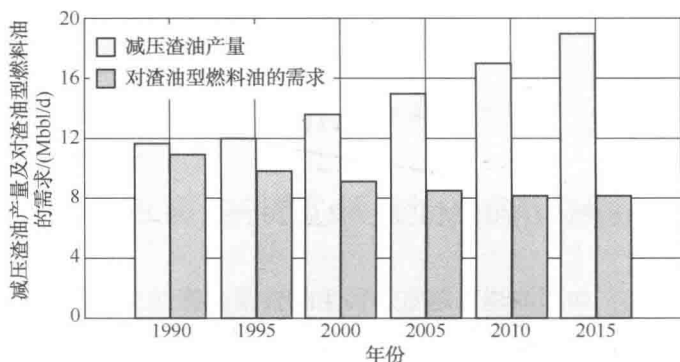


图 1-2 用作渣油燃料的减压塔底油的供求趋势^[2]

注: 1Mbbl/d = 15.9 × 10⁴ m³/d, 下同

- 能根据市场和季节变化, 灵活地调整产品分布和质量。
- 操作安全性和可靠性得到进一步提升。
- 能把排放降到最低水平, 能满足国家或地区对环境的要求。

在世界范围内, 炼油厂虽然各种各样, 但是可以大致分成三个类型: 常规炼油厂、经过改造的炼油厂和先进炼油厂。

常规炼油厂: 如图 1-3 所示, 其特点是:

- 流程和装置配置比较简单。
- 只能处理质量比较好的原料, 如低硫轻质原油(如 North Sea Ekofisc 和 Arab Light 原油);
- 商品率比较低;
- 对市场的应变能力差, 几乎没有操作灵活性。

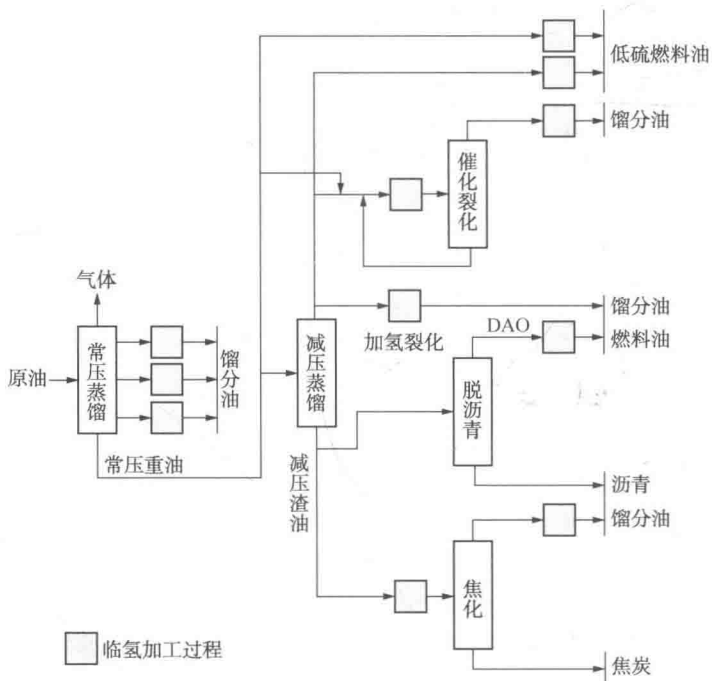


图 1-3 常规炼油厂示意流程^[2]

在该流程中,虽然配置了一套加氢裂化装置,但是如果要生产低温流动性比较好的中馏分油,该装置必须采用多床层催化剂系统,如前床层采用的加氢裂化催化剂不仅要有比较强的裂化功能,还需要有加氢异构化功能。为了确保产品的稳定性,还需要在反应器的后面设加氢精制催化剂床层,如果必要,还需要:

- 采用更多的新技术(如改变流程或在反应器中安装内部构件)和采用更先进的催化剂或催化剂系统,以便改善临氢加工过程的操作性能,提高 H_2 和催化剂的利用效率。

- 调整操作条件,以便进一步提高装置处理能力,把更多的劣质重馏分油转化成汽油、优质中馏分油或尾油。

- 这类炼油厂虽然会消耗更多的氢气和催化剂,使操作费用明显增加,但是这些费用可以通过生产更多的高附加值产品,如优质柴油,得到补偿。

先进炼油厂:装置配置如图 1-4 所示,能处理劣质超重原料。

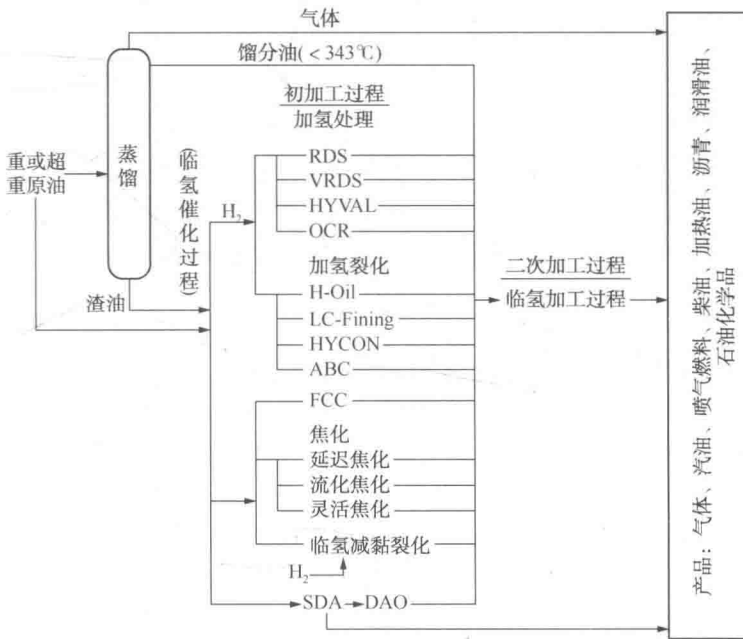


图 1-4 能改质重或超重质原料的先进炼油厂^[2]

这类炼油厂,也称复杂型炼油厂,其特点是^[2,7]:

- 不仅规模大,而且加工手段齐全,大量采用先进的催化临氢加工技术,如加氢处理、加氢裂化和加氢精制等技术,流程复杂,使炼油厂具有更高的操作灵活性。

- 老装置改造多采用更先进的技术(如新一代催化剂、更合理的组合加工过程、更先进的反应器内部构件),使老装置的操作更安全,开工周期更长。

- 不仅能够处理质量更差的原料,如超重原料或机会原油,还能够生产更多高附加值产品。

- 几乎所有中间产品都采用临氢后处理技术,使炼油厂能够为适应市场变化,能选择性地生产更多的优质馏分油。

- 有的厂还利用气化技术,把难处理的焦炭或沥青转化成更有价值的产品,如复杂型

炼油厂急需的氢气，多余的燃料气可用于发电和发生蒸汽。

图 1-5 为某现代化复杂型炼油厂装置配置方块图。从图 1-5 可以看出，对一个复杂型炼油厂来说，加氢裂化装置是炼制过程中必须的，最重要的核心装置之一。

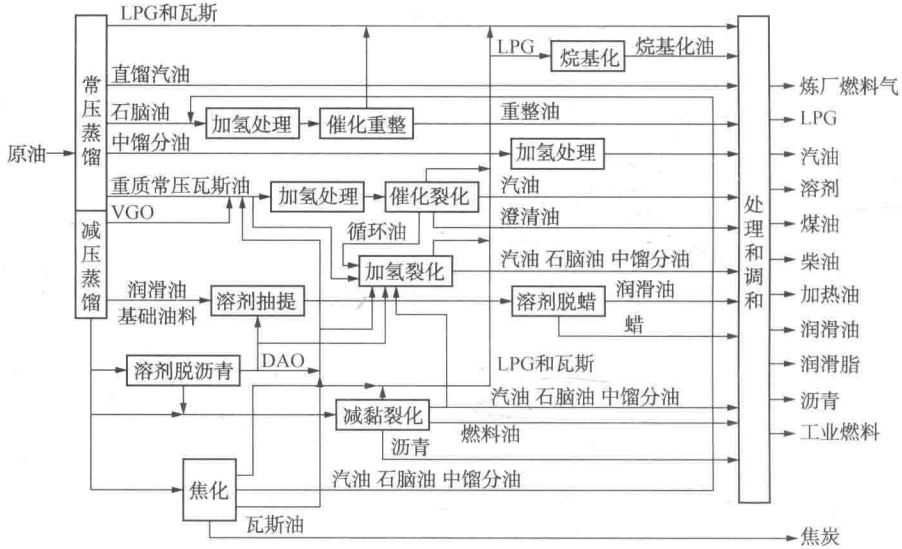


图 1-5 现代化炼油厂的装置配置方块图

近 20 年来，世界各国或地区相继公布了一些更严厉的，同石油产品质量或规格有关的法规和标准，以欧洲为例^[3]：

- EU (欧盟) 指令性要求，柴油 (包括路用柴油和非路用柴油) 硫含量 2005 年时为 50μg/g，2009 年实现低于 10μg/g。
- 欧洲的非船用重质燃料油硫含量规格已经是 1%。2005~2010 年，非出海用的船用燃料油硫含量要降到 1%~1.5% (质)。对非船用和非出海用的重质燃料油的更严格限制，意味着多数高硫燃料油将退出市场，高硫燃料油只能用于出口或用于海船。
- 欧洲的炼油厂必须进一步降低厂区总排放，使有些硫含量比较高的 VR 不能用作炼油厂燃料，多余的 VR 必须转化成符合 EU 硫含量规格的，比较轻的高价值产品。如何经济地处理这些渣油，对任何炼油厂来说都是严峻挑战。

欧美两地区，对石油产品的需求明显不同，欧洲需要更多的柴油，北美需要更多的汽油，因此两地的炼油厂在加氢裂化过程的应用上有明显区别。欧洲的加氢裂化过程主要用于多产柴油，而北美的加氢裂化过程主要用于多产汽油。由于柴油发动机技术的进步，北美近几年对柴油的需求量也在增加^[5]。

实际上，上述这些条款，不仅适用于欧洲的炼油厂，也是世界上其他国家或地区努力的方向。

尽管目前世界仍处于经济不景气当中，但是 2020 年前世界对柴油的需求趋势依然是持续地缓慢增长。预计 2020 年世界对柴油的需求量将达到 4.48Mm³/d，而 2009 年时需求量为 3.86Mm³/d。2008 年，世界对柴油和汽油之间的需求量差，约为 0.41Mm³/d，2020 年预计为 0.79Mm³/d^[8]。

柴油市场有两个，路用柴油和非路用柴油。非路用柴油涉及水上用的柴油，如加热、机车和拖拉机用柴油，这类柴油预计年增长率为 0.4%。路用柴油，包括用于 LDVs(轻负荷柴油车)、HGVs(重负荷柴油车)和公交车柴油，到 2020 年预计会年增长 1.8%。

到 2020 年之前，非路用柴油用量占柴油总量的比例，总的趋势是下降的，到 2020 年下降到 40%，而 1990 年时，这个比例是 58%。

路用柴油用量占柴油总量的比例总的趋势是上升的，到 2020 年接近 60%，而 1990 年时，这个比例刚超过 40%。在 1990~2020 年，世界范围内轻负荷柴油车、重负荷柴油车和公交车用柴油用量变化比较大，分别为：从 74%下降到 71%；从 13%上升到 19%；从 13%下降到 10%。这意味着，高质量柴油需求量增速比较快。

预计亚太地区和 EU-25 地区对中馏分油，特别是柴油的需求增长速度最快，从 2008~2020 年的 12 年中，将分别增长 0.11Mm³/d 和 0.17Mm³/d。而在世界范围内，路用汽油/柴油比将下降，将从 2000 年的 1.9 下降到 2020 年的 1.3。欧洲将继续这种趋势，汽/柴比将跌落到 0.4，而北美仍将维持它们的以汽油为主的市场定位。

对产品的质量要求将更加严格，如路用 ULSD 柴油必须是低硫(低于 10μg/g)和高十六烷值(低芳烃)的。制定这些规格的目的是控制发动机的 NO_x 和排放，因为这些排放物对环境的影响非常大。今后十几年之内，所有柴油都将实现“零硫”要求。

上述这些因素，特别是市场对高质量中馏分油的需求增加和对燃料油的需求下降，以及它们之间的价格差的进一步拉大，都将刺激 VGO(减压瓦斯油)和渣油加氢裂化过程快速发展。

第一节 加氢裂化过程的发展和在炼油厂的作用和地位

加氢裂化过程属临氢加工过程之一。临氢加工过程是现代化炼油厂不能缺少的和应用最多的石油炼制过程。这类过程，除了加氢裂化过程之外，还包括加氢处理[HDM(加氢脱金属)、HDS(加氢脱硫)、HDN(加氢脱氮)和 HDO(加氢脱氧)]、加氢饱和、加氢精制、催化脱蜡、加氢异构化、加氢转化和临氢减黏等过程。

现代加氢裂化过程几乎能够处理或加工任何石油馏分，除了能在催化剂存在下把大分子进料裂化成小分子产物(沸点比进料低，占进料的 10%以上)之外，通过调整操作条件和催化剂系统，还能脱掉进料中的其他一些不纯物，如金属、硫、氮和高碳化合物等。如果采用结构适当的择形催化剂或催化剂系统，该过程不仅能裂化大分子烃，还能使长链脂肪烃异构化。这类反应不仅能够维持石脑油产品辛烷值，还能改善中馏分油和尾油的低温流动性和黏温性等特殊性能，如尾油的 BMCI 和 VI(黏度指数)。

一、加氢裂化过程的发展

工业加氢裂化过程是一个有近 60 年历史的烃转化过程。现代加氢裂化过程最早源于(1915 年在德国)煤的液化，最初阶段可以回溯到 20 世纪 20 年代。当人们认识到催化裂化汽油质量已经不能满足使用要求时，为加氢裂化技术的发展创造了条件。加氢裂化过程简要发展历程如下^[4,7,9-11]：

- 加氢裂化过程的应用是由 I. G. Farben Industrie 于 1927 年完成的，目的是生产更多的

汽油和喷气燃料；

- 二次世界大战期间，德国利用煤液化技术开发出包括加氢裂化技术在内的古典三段加氢技术；

- 20 世纪 30 年代早期，Esso Research and Engineering Co. 把加氢裂化技术带到美国，用于改质石油和产品；

- 1939 年，英国 Imperial Chemical Industries 开发出用于加氢裂化装置的第二段催化剂，用于生产航空汽油；

- 20 世纪 50 年代中，美国出现馏分油固定床加氢裂化技术；

- 1959 年，美国 Chevron 推出 Isocracking 技术，并在 Richmond 炼油厂进行了工业试验；

- 第一套工业装置于 1960 年在 Chevron 的 Richmond CA 炼油厂开工。UOP(环球石油产品公司) 推出 Lomax 加氢裂化技术；

- 20 世纪 60 年代初，使用低活性无定形催化剂的加氢裂化过程主要用于转化 AGO(常压瓦斯油)、CGO(焦化瓦斯油) 和 LCO(轻循环油)，生产汽油，如 1962 年，Chevron 建成第一套两段工业 Isocracking 装置，主要用于生产石脑油；

- 随后，Unocal 推出 Unicracking 技术，接着美国 Gulf、荷英 Shell、法国 IFP(法国石油研究院)、德国 BASF(德国巴斯夫公司) 和英国 BP(英国石油公司) 也推出了各自的加氢裂化技术；

- 1964 年，Unocal 研发的分子筛催化剂在 Unicracking 两段装置上工业应用；

- 20 世纪 60 年代中，使用分子筛催化剂，两段流程(第一段加氢裂化，第二段比较小)，经济性明显提高；

- 20 世纪 60 年代后期~70 年代中期，开始采用一段流程。加氢裂化技术发展迅速，主要体现在：设计方法的进步；催化剂技术趋于成熟；出现即能生产石脑油，又能大量生产中馏分油的单段串联流程，过程灵活性提高；新建装置多以最大量生产中馏分油为主；

- 20 世纪 70 年代，多数加氢裂化装置用于生产汽油馏分[USA(美国)] 和中馏分油(欧洲)。Mobil 公司用 ZSM-5 择形沸石开发出 MDDW(Mobil 馏分油脱蜡技术)、Mobil 润滑油脱蜡技术(MLDW)；

- 1976 年，临氢加工过程催化剂器外再生技术工业化；

- 20 世纪 70 年代末，开始把过剩的 VGO HDS 能力，改造成缓和加氢裂化过程，最大量地生产中馏分油；

- 20 世纪 70~80 年代，性质比较特殊的加氢裂化尾油的利用引起重视，采用一次通过流程和部分转化流程，生产用作 FCC(流化催化裂化)、蒸汽裂解和润滑油厂原料的尾油；

- 1982 年 MHC(缓和加氢裂化) 技术开始应用；

- 1983 年，Mobil 的中压加氢裂化过程工业化；

- 1986 年，UOP 开发出低成本 MHC 过程；

- 1990 年，Mobil 用改性 ZSM-5 开发出双功能贵金属催化剂和贵金属合成沸石，并先后推出 MIDW(Mobil 的异构脱蜡过程) 和能够生产润滑油基础油的 MSDW(ExxonMobil 的选择性脱蜡过程)；

• 90年代,以最大量生产中馏分油为目的的加氢裂化过程发展迅速,其中新建装置加工能力的90%是用来生产中馏分油;

• 1993年, Chevron采用中孔分子筛 SAPO-11 为载体的贵金属催化剂,推出 Chevron 的择形异构化技术,生产高 VI 润滑油;

• 进入 21 世纪,一些老技术得到了进一步改进和发展,如新一代催化剂或催化剂系统开发技术、老装置改造技术、同加氢裂化过程有关的组合加工技术、上流式沸腾床、膨胀床、悬浮床技术、反应器内部构件技术、加氢裂化设备选材技术等。

实际上,使用加氢裂化技术的第一批工厂包括处理褐煤的德国的 Leuna 厂。加氢活性很高的硫化钨是早期加氢裂化过程使用的催化剂之一,用于过程的第一段。该过程的反应压力比较高(20~30MPa)。使用这类催化剂的加氢裂化过程,几乎能完全把硫、氮和氧含量都比较高的煤、芳烃原料和重质馏分油转化成石蜡烃和异构烷烃。

比较老的氢解型加氢裂化过程是二次大战期间和战后在欧洲完成的,该过程使用的催化剂是 WS_2 和 MoS 。这些过程能够连续运转,需要比较高的反应温度和操作压力,操作压力有时超过 21MPa。

在二次世界大战期间,两段加氢裂化过程在德国、英国和美国都有一定规模的应用,所处理的原料包括煤焦油和石油系瓦斯油。在美国, New Jersey 的 Standard Oil 公司经营了一个位于 Baton Rouge 的工厂,用 Venezuelan 煤油和轻瓦斯油馏分生产汽油。装置的反应温度约为 400℃,反应压力在 20.0~30.0MPa 之间。

战后,虽然加氢裂化技术有较快发展,但一直到 20 世纪 50 年代结束时,其经济性仍不确定。催化剂的改进和发展使该过程能在比较低的压力(即 6.9~15.2MPa)条件下操作,其结果是导致设备壁厚下降。壁厚下降和机械加工工程的进步,使反应器的设计和热传递更容易。这些进步因素,再加上能从蒸汽重整过程得到成本比较低的氢气,使该过程在炼油厂的应用进入一个新阶段。新一代加氢裂化过程的第一套装置建在美国,以转化多余的燃料油为目的,生产汽油^[7]。

20 世纪 50 年代出现的高性能和高压压缩比发动机,导致生产高辛烷值汽油的催化裂化技术迅速发展。催化裂化过程在生产大量汽油的同时,还产生大量难处理的循环油。这些油料很难在催化裂化装置中转化成汽油和更轻的产品。50 年代后期,使用煤油的航空发动机和柴油发动机的发展,需要大量优质中馏分油(航空煤油和柴油),而加氢裂化技术能够把大量催化裂化过程副产的难处理油或其他重质油转化成航空发动机和柴油发动机使用的优质煤油和柴油^[10]。

实际上,加氢裂化技术的快速发展是在 20 世纪 60 年代以后。早期的加氢裂化过程使用无定形硅铝催化剂。60 年代,由于开发出以分子筛为基础的新型加氢裂化催化剂,使加氢裂化过程得到迅速发展。这个时期的工业加氢裂化催化剂中,使用频率最高的是分子筛。

催化剂的改进使加氢裂化装置能在比较低的压力下操作。市场对高辛烷值无铅汽油和优质中馏分油的大量需求,促进了加氢裂化技术的发展。加氢裂化技术的进步主要体现在能够处理劣质原料,生产高质量产品。也就是说,加氢裂化过程能够使炼油厂用质量比较差的原料,生产出氢含量高、碳含量低、分子结构合理的优质产品^[12]。

总之,加氢裂化过程给炼油厂提供了处理更多劣质原料和调整产品分布的灵活性。加氢裂化过程的操作强度比加氢处理要苛刻得多,因为该过程主要目的是把原料转化成低相对分

子质量产品，而不仅仅是为了脱除原料中的杂原子和金属^[7]。

自从工业加氢裂化过程问世以来，至今已经有近 60 年的历史。近 60 年的发展使加氢裂化技术成为现代石油炼制过程的核心装置之一。特别是世界进入清洁能源时代以来，加氢裂化过程在炼油厂的地位和重要性显得更加突出。

二、加氢裂化过程在炼油厂的作用和地位

加氢裂化过程能把各种原料转化成一系列优质产品，是现代大型炼油厂的核心装置之一。

从 20 世纪 90 年代起加氢裂化技术又进入一个快速发展期。促进加氢裂化技术快速发展和更广泛应用的主要原因是：原油的重质化和劣质化，而加氢裂化过程能满足重质和劣质原料油深加工的需要；各国或地区的环保法规愈加严厉，对炼油厂排放的限制更加严格；发动机技术的进步，要求炼油厂必须提供更多优质馏分油[如，重整石脑油料、润滑油(基础油)料、FCC 料和蒸汽裂解料]。

长期以来，相当一部分炼油厂，特别是以生产汽油为主要目的的炼油厂，都是把 FCC 装置作为核心装置。但是随着市场对清洁能源的需求越来越强劲，FCC 装置在炼油厂的核心地位已经动摇，主要原因是：

- 催化裂化过程催化剂对原料性质，如硫含量，有一定限制，如果原料中的硫含量高，那么除了有高硫烟气排放问题外，在催化裂化过程转化的产品中，硫含量也不会低。
- 由常规 FCC 装置生产出来几种产品，在质量上都存在问题，已经满足不了市场对清洁能源的需求，如石脑油中的不理想组分(如，烯烃、芳烃或硫)含量太高，已经不是一种好的汽油调和料。
- 副产大量难处理的 LCO、重循环油和澄清油，这些数量比较多的劣质油料，如果不经过进一步处理或利用，将严重影响炼油厂的经济性。

从目前的技术水平看，FCC 装置必须同加氢裂化过程结合，在加氢裂化过程的帮助下，才能发挥多产汽油馏分的核心作用。FCC 过程的优势已经不是能够经济地和大量地生产高辛烷值汽油，而是能比较经济地大量地把劣质 VGO 和渣油转化成还需要进一步加工的石脑油、LCO、重循环油和澄清油。

加氢裂化过程发展快和在炼油厂的重要性越来越大的主要原因是^[2,9,12-18]：

- 技术成熟，采用不同的技术(如，催化剂技术)、反应模式(如固定床，还是流化床)或流程(如一次通过，还是循环)，就能够处理不同的原料，包括金属、硫、氮、芳烃含量多的重质或劣质原料。也就是说加氢裂化过程对原料有比较强的适应能力。
- 能够适应新环保法规和新发动机技术的需要，生产对环境友好的和市场需要的产品，如优质石脑油、中馏分油和尾油。
- 调整操作条件和更换催化剂，就可以灵活地改变生产方案，使柴/汽比更合理。
- 采用择形催化剂技术，可以改变原料的分子结构，维持石脑油辛烷值，生产低倾点柴油和高 VI 润滑油基础油。
- 氢气来源和价格，对于复杂型炼油厂来说，已经不是问题。
- 由于催化剂技术的进步、操作压力的降低和氢气资源比较充足(如重整氢和气化过程合成氢)，使装置的投资和操作费用进一步降低，使过程操作更安全，更容易控制。

• 能与其他过程联合组成组合加工过程，如同 FCC、焦化、溶剂脱沥青、蒸汽裂解、润滑油厂和气化等装置联合，明显提高炼油厂的综合经济效益。

• 材料冶炼技术和设备制造技术的进步，使加氢裂化过程的运转更安全、更可靠。

加氢裂化过程是 21 世纪前 10 年炼油厂二次加工能力增长最快的(见图 1-6)。由于加氢裂化技术的快速进步和对市场的适应能力，已经确立了它在炼油厂中的核心地位。

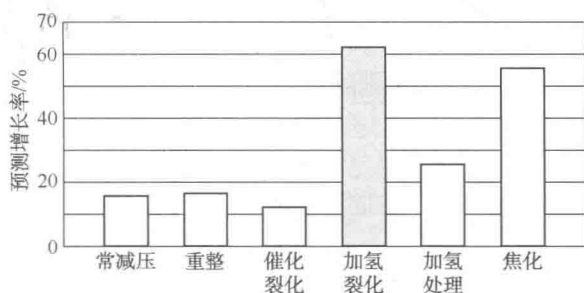


图 1-6 2005 年对加氢裂化过程加工能力的预测^[9]

从目前的技术水平看，不管是简单或复杂型炼油厂，不管是生产汽油为主的还是以生产中馏分油为主的炼油厂，如果要在比较经济的前提下生产更多清洁燃料(如 ULSD 和 ULSD)，并维持合理的汽/柴比，在炼制过程中必须配置有一定规模的加氢裂化装置。

针对质量越来越差的原料和越来越严厉的环境要求，仅以单一的某个过程或简单组合过程，已经难以经济地大量生产能满足市场需求的高质量产品。现代化大型复杂型炼油厂是不能没有加氢裂化装置的，而且该装置一定是炼油厂总加工流程中的核心装置。

大量实践证明，在可供选择的许多组合加工过程中，加氢裂化过程是不可缺的。采用以加氢裂化过程为核心的组合加工过程或技术，是炼油厂能够经济并灵活地应对原油和油品市场变化的最佳选择。

(一)用加氢裂化技术能多产优质中馏分油

图 1-7 为以加氢裂化装置为核心装置的炼油厂装置配置。其配置主要是同生产中馏分油有关的装置。

从图 1-7 可知，加氢裂化装置能为该炼油厂带来下列好处：

• 能把各种难处理的原料，如 FCC 循环油、DAO(脱沥青油)、CGO、AR、VR，转化成高价值产品，改善炼油厂对原料变化的适应性。

• 能大量生产中馏分油调和料。

• 能为生产优质汽油提供各种原料，如异丁烷、低硫石脑油。

• 能为 FCC 装置、润滑油厂和石油化工厂提供高质量尾油。

• 可以比较灵活地、大幅度地调整产品分布或柴/汽比，可以比较好地适应油品市场的变化。

• 能大幅度地提高炼油厂的经济性。

由此可以得出：加氢裂化装置是最大量地生产优质中馏分油的炼油厂不可或缺的核心装置。它不仅能处理各种劣质原料，为汽油生产装置提供优质原料，还能为 FCC、润滑油厂和石油化工厂提供优质尾油。