



中国 炼油技术

中国石化出版社
[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

(第三版)

侯芙生 主编

中国炼油技术

(第三版)

侯芙生 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书系统总结了 60 年来我国炼油技术的进展和成果,是完整反映我国炼油水平和特色的精粹。针对中国炼油的实际,详细阐述了原油的分析评价、各种加工工艺技术、石油产品的生产和评定、炼油催化剂、油品添加剂、油品储运、炼油厂节能、炼油厂污染的防治、计算机管理信息系统及过程控制、炼油装置腐蚀与控制等整套炼油技术。

本书内容翔实,实用性强,对交流技术成果、促进炼油生产和新技术开发都有积极作用,是广大炼油工作者提高业务素质和技术水平的必备读物,也是开展继续工程教育的参考书。本书的主要读者对象是炼油工业的广大科技工作者,包括教育、科研、设计、基建、生产、管理、销售等方面的专业人员以及院校的高年级学生。

图书在版编目(CIP)数据

中国炼油技术/侯芙生主编. —3 版. —北京:中国石化出版社,2011. 12
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1282 - 9

I. ①中… II. ①侯… III. ①石油炼制 - 技术 - 中国
IV. ①TE62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 243628 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:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 66 印张 1583 千字

2011 年 12 月第 3 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

定价:298.00 元

第三版序

自《中国炼油技术》第二版于2001年出版以来，在炼油科技、教育和企业界，深受广大读者的欢迎。在这十年中，我国国民经济迅速发展，石油加工能力从2000年的2.76亿吨/年增加到2010年的5.28亿吨/年，跃居世界第二，炼油技术也相应得到快速发展。为了能反映我国近十年来炼油技术发展的新成果，体现我国当前炼油技术水平，中国石化出版社组织了《中国炼油技术》第三版的修订编写工作。

本版内容的编写原则和文风，仍保持第二版的做法，即要力图反映我国当前炼油技术的总体水平。在各有关章节中，删除陈旧的、落后的、错误的材料，补充和增加先进的、已商业化成功运行的技术材料。在保持原书基本框架的原则下，增加“制氢、加油站、助剂、生物质燃料、产品标准及腐蚀与控制”等内容；对原油性质、热加工、炼厂气加工、加氢技术、润滑油基础油生产、石油产品以及炼油厂的节能、污染防治等内容以及其他章节进行修订补充。鉴于新技术的创新和实践主要是由年轻一代专家完成的，而第二届编委都已年老退居二线，各章节的编写主要是由中青年科技人员完成的。本届编委会成员中尽可能聘任原第二届编委，实行老、中、青三结合，以利于今后工作的一贯性和延续性。

有关本书的出版工作，编委会成员、执笔者和编辑部成员做了大量卓有成效的工作，还得到中国石油化工集团公司、中国石油天然气集团公司和各有关部门、有关单位的通力支持，在此一并致谢。本书原主编侯祥麟院士生前在重病期间，还提出来要编写第三版的愿望。本书的出版，也表达了对侯老以及已逝世的前两版编委们的怀念。

侯美生

二〇一一年十二月

目 录

第一章 概论	(1)
第二章 原油评价	(8)
第一节 原油评价的内容及方法	(8)
第二节 我国主要原油的性质分析	(18)
第三节 我国主要进口原油的性质分析	(37)
第四节 原油的特点及对炼油工艺的影响	(49)
参考文献	(52)
第三章 原油蒸馏	(53)
第一节 原油脱盐脱水	(53)
第二节 原油蒸馏工艺过程	(59)
第三节 原油蒸馏的分馏塔	(70)
第四节 原油蒸馏的冷换设备	(79)
第五节 原油蒸馏的加热炉	(83)
第六节 大型化与减压深拔	(88)
第七节 原油蒸馏的过程控制	(92)
第八节 防腐蚀与产品精制	(95)
参考文献	(98)
第四章 延迟焦化和减黏裂化	(99)
第一节 延迟焦化	(99)
第二节 减黏裂化	(121)
参考文献	(123)
第五章 催化裂化	(124)
第一节 反应机理和操作参数	(124)
第二节 裂化反应及产品分离	(137)
第三节 催化剂再生和烟气轮机动力回收	(157)
第四节 催化裂化生产低碳烯烃技术	(177)
第五节 产品精制	(187)
参考文献	(191)
第六章 催化重整	(194)
第一节 原料油预处理	(194)
第二节 催化重整	(203)
第三节 重整催化剂的失活与再生	(227)
第四节 芳烃的抽提与精馏	(238)
第五节 芳烃的吸附分离与转化	(250)
第六节 C ₅ 、C ₆ 烷烃异构化	(261)
参考文献	(267)

第七章 炼厂气加工	(270)
第一节 炼厂气的产率与组成	(272)
第二节 炼厂气精制	(273)
第三节 干气提浓回收乙烯资源	(281)
第四节 气体分馏及丙烯精制	(284)
第五节 烷基化	(288)
第六节 甲基叔丁基醚生产工艺	(301)
第七节 催化叠合	(308)
第八节 催化裂化干气中乙烯与苯烃化制乙苯	(315)
第九节 丙烯聚合制聚丙烯	(321)
第十节 丁烯直接水合脱氢制甲乙酮	(327)
参考文献	(331)
第八章 加氢处理和加氢裂化	(333)
第一节 馏分油的加氢处理	(334)
第二节 渣油的加氢处理	(357)
第三节 加氢裂化	(366)
第四节 临氢降凝	(384)
第五节 加氢催化剂的预硫化与再生	(391)
第六节 加氢设备	(399)
参考文献	(405)
第九章 氢气回收利用与制氢	(408)
第一节 炼油厂氢源和供氢网络	(409)
第二节 低浓度氢的回收和提纯	(410)
第三节 轻质原料制氢	(413)
第四节 重质原料制氢	(424)
参考文献	(435)
第十章 润滑油基础油生产工艺	(437)
第一节 API I类基础油生产工艺	(438)
第二节 API II/III类基础油生产工艺	(475)
第三节 白油、橡胶填充油及其生产技术	(498)
参考文献	(506)
第十一章 石油蜡生产工艺	(508)
第一节 蜡脱油工艺	(508)
第二节 石油蜡的精制	(513)
第三节 液蜡的生产	(520)
第四节 石蜡成型技术	(528)
参考文献	(531)
第十二章 石油沥青生产工艺	(532)
第一节 石油沥青的适宜化学组成	(532)

第二节	石油沥青的资源	(536)
第三节	石油沥青生产工艺技术	(537)
第四节	石油沥青的储运	(553)
参考文献	.....	(556)
第十三章	润滑脂	(557)
第一节	润滑脂的分类	(559)
第二节	润滑脂的组分	(561)
第三节	润滑脂的性能及应用	(565)
第四节	润滑脂生产工艺	(572)
参考文献	.....	(586)
第十四章	合成润滑剂	(587)
第一节	酯类油	(587)
第二节	聚醚	(597)
第三节	硅油和硅酸酯	(601)
第四节	含氟润滑油	(608)
第五节	磷酸酯	(615)
第六节	合成烃润滑油	(620)
第七节	合成润滑油用添加剂	(627)
第八节	合成润滑脂	(632)
参考文献	.....	(640)
第十五章	石油炼制催化剂	(642)
第一节	催化裂化催化剂	(642)
第二节	催化重整催化剂	(660)
第三节	加氢处理催化剂	(668)
第四节	加氢裂化催化剂	(682)
第五节	其他催化剂	(691)
参考文献	.....	(698)
第十六章	润滑油和燃料添加剂	(701)
第一节	清净剂与分散剂	(701)
第二节	抗氧化剂	(712)
第三节	降凝添加剂	(716)
第四节	黏度指数改进剂	(719)
第五节	载荷添加剂	(721)
第六节	防锈、抗腐蚀、抗泡添加剂	(724)
第七节	润滑油复合添加剂	(727)
第八节	发动机燃料添加剂	(743)
参考文献	.....	(752)
第十七章	油品调和	(754)
第一节	调和工艺	(754)

第二节	车用汽油的调和	(760)
第三节	柴油的调和	(765)
第四节	生物燃料的调和	(771)
第五节	润滑油调和	(772)
第六节	船用燃料油的调和	(776)
第七节	油品调和与总流程优化	(777)
	参考文献	(779)
第十八章	石油产品	(781)
第一节	发动机燃料	(781)
第二节	润滑油	(800)
第三节	石油蜡	(829)
第四节	石油沥青	(837)
第五节	石油焦	(845)
	参考文献	(848)
第十九章	油品储运	(850)
第一节	油品储存	(850)
第二节	油品装卸	(863)
第三节	油品的长距离输送	(869)
第四节	汽车加油和加气站	(880)
	参考文献	(887)
第二十章	炼油厂的节能	(888)
第一节	节能技术进展概况	(888)
第二节	用能分析与评价	(889)
第三节	主要节能技术措施	(895)
第四节	循环经济与能源、资源的协同优化	(904)
	参考文献	(905)
第二十一章	污染防治与减排	(906)
第一节	炼油厂废水处理	(906)
第二节	含硫废水处理	(915)
第三节	酸碱废水处理	(918)
第四节	外排污水处理回用	(927)
第五节	凝结水除油除铁回收	(935)
第六节	汽提污水串级利用	(937)
第七节	污水处理场废气处理	(939)
第八节	硫磺回收及尾气处理	(942)
第九节	烟气脱硫	(950)
第十节	废水泥渣处理与处置	(952)
第十一节	噪声防治	(959)
	参考文献	(965)

第二十二章 计算机信息技术的应用	(967)
第一节 信息技术在炼油工业的应用架构	(968)
第二节 集散控制系统(DCS)	(969)
第三节 先进过程控制技术	(972)
第四节 炼油企业生产计划与调度的优化	(979)
参考文献	(985)
第二十三章 炼油装置腐蚀与控制	(987)
第一节 蒸馏装置	(988)
第二节 热加工	(996)
第三节 流化催化裂化装置	(1001)
第四节 催化重整装置	(1005)
第五节 炼厂气加工	(1011)
第六节 加氢处理	(1020)
第七节 制氢装置	(1028)
第八节 炼油厂污染与防治	(1034)
参考文献	(1039)

第一章 概 论

中国现代化炼油工业，是在中华人民共和国成立以后才开始建设的。在此之前，只有几个很小的炼油厂，加工少量的原油和生产很少的石油产品，大部分石油产品依靠进口。新中国成立后，石油资源的开发得到重视，由于西北地区油田的开发，原油产量逐步增长，对原有小炼油厂进行了改造和扩建，并从前苏联引进技术和设备于1958年在兰州建成了我国第一套百万吨级综合型炼油厂。

1960年大庆油田的开发，为炼油工业的发展奠定了物质基础。以后又陆续发现了胜利、辽河等许多新油田，原油产量迅速增长，1965年原油产量超过了10Mt，一批新炼油厂相继建成，1963年实现了石油产品基本自给。此后随着原油产量的不断增长，1978年超过了100Mt，1998年达到160Mt，炼油工业也得到持续发展，1998年原油加工能力发展到245Mt。

进入21世纪，随着宏观经济的快速增长，成品油消费量保持较大增长，石油化工行业也呈现快速发展，化工轻油需求大增。原油消费量的快速增长促进了炼油工业的迅猛发展，2009年我国原油加工能力发展到488Mt，11年内翻了一番，成为仅次于美国的世界第二炼油大国。

2009年全国共生产原油189.5Mt，最大的油田为大庆油田，原油产量约占全国的22.4%；其次为胜利油田占14.7%；海洋石油发展较快，产量占全国的16.8%；原油年产量超过千万吨的油田还有长庆、延长、新疆、辽河，分别占全国产量的8.3%、5.9%、5.8%、5.3%；原油年产量超过5Mt的塔河、吉林、塔里木3个油田，总产量共占9.5%；其他产量小于5Mt的油田生产的原油占全国总产量的11.3%。中国主要油田原油的共同特点是API度小、密度较大、轻馏分含量少。大庆油含蜡量高，胜利油含硫，塔河油高含硫，其他大都为低硫中间基原油。中国主要原油的性质见表1-1。

表1-1 中国主要原油的性质

原油	大庆	胜利	辽河	北疆	塔河	海洋/惠州
属性	低硫石蜡基	含硫中间基	低硫环烷-中间基	低硫石蜡-中间基	高硫中间基	低硫石蜡基
API度	31.6	20.8	17.1	21.0	16.5	39.0
密度(20℃)/(g/cm ³)	0.8640	0.9256	0.9487	0.9236	0.9512	0.8288
180℃馏出量/%	7.97	4.68	3.56	2.81	7.18	15.00
350℃馏出量/%	29.43	23.14	19.79	21.26	27.46	50.98
540℃馏出量/%	60.18	58.81	53.66	49.59	55.95	84.49
蜡含量/%	32.1	8.1	8.4	3.9	3.0	25.8
硫含量/%	0.10	0.95	0.33	0.28	2.10	0.05

我国近年来石油消费量的快速增长，使炼油工业原油供应格局发生了重大变化，国内生产的原油满足不了石油消费量的增长，炼制国产原油和进口原油的比例从1998年的82:18变化到2009年的48:52，进口依存度大幅增加。2009年我国进口原油203.8Mt；由沙特进口

的原油占 20.6%、安哥拉占 15.8%、伊朗占 11.4%、俄罗斯占 7.5%、苏丹占 6.0%、阿曼占 5.7%，合计为 67%，由进口量排名第 7 到第 10 位的伊拉克、科威特、利比亚和哈萨克斯坦进口的原油占 13%，与年进口量超过千万吨的前六个国家合计占进口原油的 80%。进口原油一般硫含量高，API 度低，密度偏大，有的酸含量高等，因此要采取相应的炼制措施和重油加工手段才可获得合格产品。几种进口原油的性质见表 1-2。

表 1-2 几种进口原油的性质

原 油	沙特沙中	安哥拉吉拉索	伊朗重质	阿曼	俄罗斯乌拉尔
属性	高硫中间基	低硫中间基	高硫中间基	含硫中间基	含硫中间基
API 度	30.6	31.3	30.5	30.7	32.5
密度(20℃)/(g/cm ³)	0.8692	0.8653	0.8698	0.8686	0.8592
350℃馏出量/%	45.92	45.37	46.09	42.71	49.40
蜡含量/%	4.01	2.66	4.09	3.42	8.51
硫含量/%	2.80	0.43	1.80	1.28	0.84

改革开放以来，我国炼油工业实现了突飞猛进的发展，形成了比较完整的体系和较强的综合实力，已具相当规模。产业布局贴近市场，贴近消费中心，逐步趋向合理，长三角、珠三角和渤海湾地区，石化产品聚集度进一步提高；炼油企业和装置大型化更加突显，2009 年已建成 17 个千万吨级炼油生产基地，其原油加工能力占全国总加工能力的 50% 左右。当前，新建炼油装置的规模，常减压蒸馏达到 12Mt/a，加氢裂化 4Mt/a，延迟焦化 4.2Mt/a，连续重整 2.1Mt/a，硫磺回收 220kt/a，均属世界当前同类装置的最大规模行列。

在全国经济快速增长中，汽车和交通运输业、石化工业的迅速发展，需要大量的液体运输燃料和化工轻油，加上近几年成品油价格没有理顺等原因，更促进了石油消费量的高速增长。为此，提高原油资源利用率，提高原油加工深度，提高轻质油收率，大量生产优质液体运输燃料和化工轻油，节能减排，是我国炼油工业今后一段时间的重点发展方向。

我国炼油企业生产装置的构成中，重油加工装置占的比例较高，到 2009 年末，催化裂化、延迟焦化和加氢裂化等重油转化的总加工能力达到 243.1Mt/a，占原油一次加工能力的 49.8%，见表 1-3。其中，催化裂化十年来受炼油企业产品结构调整影响，发展趋缓，占原油总加工能力的比重从 1998 年的 34.4% 下降到 2009 年的 25.9%，掺炼渣油(均折成减压渣油)的比例占进料的 30%。延迟焦化十年来发展最快，所占比例从 1998 年的 7.5% 提高到 2009 年的 12.3%，加工减压渣油的能力超过催化裂化，成为我国第一位的渣油深加工装置。由于中间馏分油和化工轻油需求的增长，十年来加氢裂化发展加快，其比例从 1998 年的 5.6% 上升到 11.6%。

表 1-3 我国重油深度加工装置构成

装置名称	加工能力/(Mt/a)	占原油总加工能力/%
催化裂化	126.5	25.9
延迟焦化	60.0	12.3
加氢裂化 ^①	56.6	11.6
总 计	243.1	49.8

① 包括渣油加氢处理。

为了保护环境,配合国家对汽车排放污染的严格控制,十年来,我国车用汽柴油质量标准不断提高,2000年全国停止生产含铅汽油,2003年全面实施汽油硫含量不高于0.08%,2005年实施硫含量不高于0.05%的国Ⅱ标准,到2010年已全部使用硫含量不高于150 $\mu\text{g/g}$ 的国Ⅲ标准清洁燃料;车用柴油硫含量由1994年的0.2%~1.0%至2003年的不大于0.05%再到2010年的不大于0.035%。汽柴油质量的升级,极大地促进了清洁燃料技术的发展。连续重整不仅可生产高辛烷值汽油,也是芳烃原料的主要来源,十年来发展非常迅速,催化裂化汽油选择性加氢脱硫技术和柴油加氢精制深度脱硫等技术成为近年来创新发展的重点。当前国内93号以上的高标号汽油的市场占有率已超过70%。

在发展天然原油加工的同时,为了满足国防、航空、航天以及电子等领域在各种高温、严寒、辐射、强化学介质等特殊条件下使用的需要,我国还有效地发展了各种具有特殊优良性能的合成油脂,包括酯类油、聚醚、聚硅氧烷、含氟油及磷酸酯等多类化合物。各种石油加工催化剂和油品添加剂的生产与应用已基本立足于国内。

随着炼油工业的发展,我国已拥有一支强大的、具有丰富经验的炼油生产和科研、设计队伍。随着机械工业的发展,各种炼油装备已基本立足于国内。

在炼油工艺技术的发展上,新中国成立初期,我国炼油厂只有原油蒸馏、馏分油热裂化、釜式焦化、柴油冷榨脱蜡、润滑油离心脱蜡和白土精制等几种简单的生产工艺技术。20世纪50年代,经过恢复和引进吸收,增加了移动床催化裂化、苯烃化、丙烷脱沥青、润滑油溶剂精制、酮苯溶剂脱蜡和白土处理等工艺技术,在炼油生产技术上前进了一大步,特别在润滑油方面,开始有了完整的配套技术和生产装置,但在发动机燃料的加工技术方面,距世界水平尚有不小差距。当时,热裂化汽油在车用汽油中占主要地位。

20世纪60年代开始,通过我国自己的研究与设计,先后建成了延迟焦化、流化催化裂化、催化重整、硫酸法烷基化、尿素脱蜡、加氢精制及加氢裂化等装置,掌握了当时世界上一些主要的炼油工艺技术,并在以后年代中得到发展与提高。与此同时,还进行了炼油催化剂和油品添加剂的研究与生产,为炼油新工艺和石油新产品的开发创造了条件。

1978年改革开放以来,前二十年为进一步完善和提高我国的炼油生产技术,经济有效地为市场提供更多更好的石油产品,开发了一批炼油新技术,如掺渣油催化裂化、催化裂解、加氢裂化、加氢处理、催化蒸馏醚化技术等,同时也引进了重油催化裂化、连续重整、氢氟酸烷基化、高压加氢裂化、渣油加氢处理和润滑油添加剂生产等少数技术,以资借鉴。后十年面对汽车尾气排放的严格控制,开发了生产清洁燃料工艺技术;发展油化一体化,增产化工原料;提高原油资源利用率,大量生产液体运输燃料;提高原油加工深度和含硫原油加工能力,适应加工高硫重质原油的需要;企业和装置实行大型化,增加原油加工能力,满足市场对石油产品需求的快速增长等成为炼油工业技术创新的重点。这十年间,包括加氢处理、加氢裂化和渣油固定床加氢处理的加氢技术,连续重整,延迟焦化,催化裂化汽油降烯烃、选择性加氢脱硫、多产丙烯以及硫磺回收等技术得到创新发展,实现了千万吨级炼油厂的改造和新建,中国炼油工艺技术和当代世界先进水平基本相当。

我国几种主要炼油工艺技术的发展及其现状分述如下。

1. 原油蒸馏

原油蒸馏是石油加工中最古老最基本的工艺过程,但它一直有所发展。特别是在20世纪70年代发生能源危机以后,我国炼油厂都对炼厂中消耗能量最大的装置进行了以降低能

耗、改善分馏效率为中心的技术改造,采用了优化换热流程,提高加热炉热效率,改进分馏塔板,推广干式减压蒸馏,低温余热利用等主要措施,以及各种新型、高效、低耗设备,特别是进入 21 世纪,蒸馏装置实行大型化,单套装置规模达到 12Mt/a,原油蒸馏装置的平均能耗大幅度下降,新设计的蒸馏装置能耗可降到每吨原油 385MJ,达到当代世界先进水平。同时提高减压馏分切割点,改善油品分割,提高轻油拔出率和产品质量。

2. 流化催化裂化

流化催化裂化是我国最主要的二次加工工艺,1965 年建成了第一套加工能力为 600kt/a 的流化催化裂化装置,随后又陆续建设了多套装置,最大加工能力 1.2Mt/a。20 世纪 70 年代,由于发展了沸石裂化催化剂,我国催化裂化向提升管反应器方向发展,并先后建成了并列式和同轴式两种类型的装置多套,最大装置加工能力达 3.0Mt/a。自 20 世纪 80 年代以来,我国在重油催化裂化(RFCC)领域取得了重大进展,自主开发了串联快速流化床再生、二段逆流再生等 RFCC 技术,采用内外取热器、高效雾化喷嘴、提升管出口快速分离、烟气能量回收和富氧再生、抗金属污染催化剂等一整套技术,使 RFCC 技术在工业装置上的应用得到普遍推广,RFCC 掺炼渣油(均折成减压渣油)在 2001 年最高达到 36%,目前掺炼比例仍维持在 30%左右,对提高加工深度、增加轻质油收率、提高经济效益,起到关键作用。为提高催化裂化油品质量,增加丙烯等化工原料,催化裂化新工艺不断创新:

DCC 工艺是最大量生产丙烯的催化裂解新工艺,采用 ZRP 为活性组分的 ZRP 系列催化剂,丙烯产率高达 18%~23%,丁烯产率 14%~17%,是国际上最早工业化生产丙烯的 FCC 家族技术。

MIP 工艺是为降低催化裂化汽油烯烃含量而开发的,MIP 将提升管反应器分为两个串联反应区,第一反应区实行充分裂化,第二反应区将裂化的烯烃再转化。在工业装置上运行,催化裂化汽油的烯烃含量(体积分数)可从 47.3%下降到 33.1%。MIP-CGP 采用专有催化剂,丙烯产率高达 9%。

FDCC 工艺是在常规 FCC 基础上,增设一根独立的 FCC 汽油提升管反应器,共用一个再生器,FDCC-I 型以降低汽油烯烃含量为目的,FDCC-III 型可多产丙烯。

两段提升管催化裂化(TSRFCC)是按催化剂接力原理、分段反应原理、短反应时间和大剂油比等原理开发的催化裂化新工艺,具有较强的操作灵活性,可显著提高轻质油收率,改善质量和提高柴汽比。

在 DCC 基础上,开发出了以生产乙烯和丙烯为主的 CPP 催化裂解新工艺。

中国催化裂化技术的发展是与裂化催化剂的发展分不开的,在大量研究工作的基础上,催化剂的活性组分从无定形硅铝向分子筛发展,基质的中孔分布得到改善,据此中国开发出了 REY、USY、REUSY、REHY 等系列 RFCC 催化剂,都具有良好的重油裂解性能、抗金属污染性能、焦炭选择性和水热稳定性等特点,典型的商品牌号如 ZCM-7、Orbit、Comet、LV-23、CC-20D 等,还有 LB 白土原位晶化等 RFCC 催化剂系列,此外还结合不同工艺开发了多种专用催化剂。

3. 连续重整

1965 年我国在自己研究的基础上,建成了第一套半再生式催化重整装置,以后陆续建设了多套装置。随着我国石化工业的大发展,催化重整在石油加工中占有越来越重要的地位,重整汽油既是高辛烷值组分,又是 BTX 芳烃的重要原料,副产氢气是炼油厂用氢的主

要来源。为满足上述需求,我国从 20 世纪 80 年代开始建设连续重整装置,进入 21 世纪,连续重整步入快速发展阶段,到 2008 年我国已拥有 29 套连续重整装置,总加工能力达到 22.5Mt/a。为满足连续重整不断发展的需求,我国自主开发的百万吨级连续重整装置已建成投产。国产连续重整采用的主要技术有:催化剂实现连续再生;闭锁料斗优化控制技术;催化剂无阀输送,降低催化剂磨损;再生气体采用干、冷循环,保护催化剂比表面积活性;再生氯化区含氯腐蚀气体单独抽出处理;采用一段烧焦,降低再生回路的复杂性;设置淘析风机,降低能耗;设置循环氮气系统,提高设备的安全可靠性等。

我国对催化重整催化剂的研发,有较强实力,自主开发的 PS - II 型和 PS - III 型催化剂用于 IFP 和 UOP 连续重整装置上,均取得良好效果。连续重整的发展趋势是降低反应压力,实现超低压反应,同时降低氢油比,提高空速,提高苛刻度,致使催化剂积炭速率加快,再生周期缩短,为此研制成 PS - IV 和 PS - V 高活性、高水热稳定性,具有高选择性和低积炭速率的 PS - VI 和 PS - VII 催化剂,目前国内连续重整装置大都使用 PS 系列催化剂。

4. 延迟焦化

近十多年,我国延迟焦化处理能力快速增长,2009 年已超过 60.0Mt/a,是我国第一位的重油深度加工装置。延迟焦化如此迅速发展,其原因一是高硫重质原油加工量大幅增长,需加快提高重油加工深度,增加轻质油收率;二是我国掌握了延迟焦化大型化技术,单套装置处理能力超过 1.2Mt/a;三是焦化装置投资低,建设周期短,见效快;四是高硫焦可作为 CFB 锅炉燃料。延迟焦化的主要创新技术有:大型化技术,加热炉采用多管程水平箱式双面辐射炉管,炉管实现多点注汽,在线清焦,延长开工周期;开发灵活调节循环比工艺,冷焦水实现密闭循环处理技术;提高焦化装置出焦系统的机械化程度,实现了焦炭塔顶盖和底盖的拆卸和安装的自动化;成功开发了焦化/CFB 组合工艺,解决了高硫焦的出路。

5. 加氢处理

20 世纪 50 年代初我国进行了加氢处理催化剂的研究,并将其应用于页岩油柴油的精制。由于催化裂化、焦化等深度转化能力的提高,以及进口原油数量的增加,催化裂化轻循环油、焦化馏分油和含硫常压馏分油在中等压力下的加氢处理技术相应得到发展。进入 21 世纪,由于市场对清洁燃料的需求增长,加氢处理呈现快速迅猛发展趋势,全国馏分油加氢处理能力从 1998 年的 29.2Mt/a 增加到 2009 年的 143.6Mt/a。加氢处理技术主要应用于:清洁汽油生产,采用如 RSDS 和 OCT - M 等技术,对催化裂化汽油进行选择性的加氢,可把汽油的硫含量降到符合国 III、国 IV 汽油标准;催化裂化轻循环油加氢,我国开发的 MCI 和 RICH 技术,可把催化裂化轻循环油经脱硫、烯烃和芳烃饱和,以及部分芳烃开环,十六烷值可提高十个单位以上;焦化馏分油和直馏含硫柴油深度加氢技术,采用相对活性高的脱硫催化剂,经加氢精制,可达到国 IV 或超低硫柴油标准;喷气燃料加氢,我国开发的 RHSS 临氢脱硫醇技术,可在很缓和的条件下脱除喷气燃料的硫醇,取代较复杂的酞菁钴经典脱硫醇方法;含硫蜡油加氢预处理技术,用以改善催化裂化原料质量,直接生产低硫催化裂化汽油,并降低催化裂化烟气中 SO_x 和 NO_x 的排放。加氢处理还普遍应用于催化重整原料预加氢、润滑油精制和石蜡精制等方面。

加氢催化剂对加氢精制的发展起到重要推动作用,催化剂向高活性、低反应温度、高空速、低氢耗和长寿命方向发展的思路,指导了 20 世纪多代催化剂的开发。进入 21 世纪,由于提高了对加氢精制催化剂的认知程度,促进更多催化剂上 II 类活性相的生成,对提高脱硫

相对活性,出现了重大突破,从而开发出脱硫相对活性比老一代催化剂高出 1.5 ~ 2.5 倍的新催化剂,如 FH-UDS 和 RS-1000 等催化剂。

6. 加氢裂化

我国在 20 世纪 50 年代初就进行了加氢裂化工艺和催化剂的研究,建成了页岩油加氢裂化装置,1966 年,在自己研究的基础上,建成了第一套天然原油馏分油加氢裂化装置。其后,在消化吸收引进高压加氢裂化的基础上,开发建设了多套高压加氢裂化装置。进入 21 世纪,加氢裂化实现快速发展,装置加工能力从 1998 年的 13.68Mt/a 增加到 2009 年的 44.96Mt/a,加氢裂化已成为我国炼油的主体技术。加氢裂化工艺的特点是可生产石脑油,作为高辛烷值汽油组分或 BTX 芳烃原料;可最大量生产喷气燃料和低硫柴油等中间馏分油;可生产 BMDI 值低的尾油,作为生产乙烯的裂解原料。在工艺上,我国主要采用一段串联和单段加氢裂化技术。中压加氢裂化也得到发展,如 RMC 中压加氢裂化有多套装置在运行,可提供近 80% 收率的化工轻油。

渣油加氢处理是重要的深度加工装置,可处理高硫、高残炭、高金属含量的劣质渣油。我国自主开发的 2.0Mt/a 减压渣油加氢处理于 1998 年建成投产,3.1Mt/a 常压渣油加氢处理装置于 2006 年建成投产。

我国加氢裂化催化剂从无定形硅铝发展到用 Y 分子筛为酸性组分,加快了催化剂的更新换代,如轻油型裂化段催化剂从 3825、3905、3955 一直到 FC-24;精制段催化剂从 3936、3996、FF-16 到 FF-36 等;渣油加氢处理催化剂,包括脱金属、脱氮、脱硫、脱残炭催化剂进行了配套系列化的开发。

7. 润滑油基础油和润滑脂

多年来,我国采用大庆等石蜡基原油,用常规方法生产高黏度指数的 API I 类基础油。进入 21 世纪,为满足高档润滑油品的需求,用加氢法生产 API II/III 类基础油得到较快发展,到 2009 年全国已拥有 1.2Mt/a 加氢法生产 API II、III 类基础油的能力。例如克拉玛依环烷基原油,采用高压全加氢技术,可以生出包括 150BS 光亮油在内的 II 类基础油。我国润滑油需求增长很快,2009 年全国润滑油消费量约为 6.0Mt,高档基础油产能远不能满足润滑油消费增长的需求,预计“十二五”期间我国将建成一批生产 API II、III 类基础油的全氢润滑油生产装置。我国石蜡资源丰富,石蜡产量和贸易量已经多年位居世界第一。我国润滑脂生产发展迅速,2009 年生产 378.4kt,居世界第一位。润滑脂生产厂平均规模提高到年万吨级以上;各种锂基润滑脂产量占到总产量的 82.64%;复合锂、复合铝、聚脲等高滴点、高质量润滑脂比例增加,产品结构比较合理。

随着工艺技术的发展,我国炼油工业在石油产品的数量品种和质量上,以及在生产过程中的能量节约、污染防治、过程控制等方面,获得了全面的发展和提高。

在石油产品方面,汽油、煤油、柴油和润滑油四类产品的产量,2009 年达到 235.45Mt。产品品种发展到上千种,其中包括各种高辛烷值清洁汽油、乙醇汽油、航空汽油和喷气燃料,各种高质量汽油机油、柴油机油、航空润滑油、船用机油、液压油、齿轮油、各种合成油、精白石蜡和食品蜡、高等级道路沥青、聚合物改性沥青、石油焦和针状焦及润滑脂等。此外,我国炼油厂还利用炼厂气中的烯烃生产苯乙烯、聚丙烯、丙烯腈和多种其他化工产品。在产品质量上,通过不断改进生产工艺,采用精制新技术,发展和使用各种油品添加剂,完善油品测试设备、发动机台架,采用国际通用规格标准,以及建立质量管理体系,使

各类石油产品的质量不断提高。

在节约能量方面,把加强用能管理和节能技术改造结合在一起,以节能技术的进步促进节能工作深入发展,采用能量平衡、焓平衡分析和评价等方法,不断挖掘节能潜力,进行全面综合优化,改造工艺过程,提高设备效率,合理利用蒸汽和低温热源,减少能量损失。应用计算机监控与管理等,使全国炼油厂平均综合能耗由1979年的4410MJ/t降低到1988年的2900MJ/t,降低了34%。1988年以后,炼油厂复杂程度增加,1997年曾一度增加到3520MJ/t。近十年来我国炼油企业加强技术改造,积极调整结构,装置实现规模化大型化和集约化,提高企业集中度,节能效果明显。同时不断技术创新技术,如加热炉强化传热技术、变频调节技术、换热器在线清焦技术、焦炭塔顶盖底盖自动开闭技术、油库活性炭吸附回收油气技术等,截止到2009年,可比炼油企业平均炼油综合能耗已降到2670MJ/t。

在污染防治方面,各炼油企业对排放污水普遍采用隔油、气浮和生化处理,污水经处理可达到外排标准。已有不少企业对外排合格污水再进行杀菌、过滤等适度处理,进一步降低污染物浓度和无机盐含量,控制微生物繁殖,控制对金属的腐蚀,达到污水回用要求,进入循环水系统,并根据水质添加相关的水处理剂,污水回用对炼油厂节水减排取得明显效果。对含硫、含氨污水采用单塔或双塔汽提技术,从废水中回收 H_2S 及 NH_3 ,降低了水中的固定氮含量。对废渣进行综合利用和焚烧处理。原油加工中产生的 H_2S 均经硫黄回收装置回收硫黄。此外,对生产中产生的各种有害气体、粉尘、噪声也都采取了相应的措施。

炼油企业信息化技术(IT)发展很快,在过程控制方面,已普遍从常规仪表过渡到集散型系统(DCS),提高了装置的控制精度和稳定操作水平。在主要炼油装置上应用了如多变量预估控制器等先进控制系统,有效降低了能耗,并且提高了目的产品收率、质量和经济效益等。在上述基础上,近年来炼油企业信息化建设和应用水平进一步提高,普遍应用ERP系统、全面预算管理系统、生产执行系统(MES)、先进控制系统(APC)、实验室信息管理系统(LIMS)、生产调度优化系统(ORION)、计量管理信息系统等。加油站实现IC卡自动加油和联网管理。IT技术有力地支撑了炼油行业的精细化管理。

综上所述,新中国成立以来,我国炼油工业发展迅速,技术创新,成效显著。从一个几乎全部依靠进口石油产品的国家,发展成为跻身于世界前列的炼油大国,掌握了当代世界主要的炼油技术,并有所创新和发展。炼油工业是我国国民经济的支持产业,经多方预测,“十二五”到“十三五”期间,我国原油需求量仍将有较大幅度增长。结合国情,我国炼油技术今后创新发展的重点是采用装置大型化技术,建设产业聚集度更高的大型炼油生产基地,进一步优化产业结构布局;采用炼油化工一体化技术,形成多个大型炼化基地,大力促进炼油和石化工业的持续发展;走原油深度加工道路,提高轻质油收率,最大量生产液体运输燃料和化工原料,提高原油资源利用率,实现原油的最有效利用,减少进口原油的依存度;进一步优化原油加工流程,提高原油加工的适应性,加工更多的含硫、含酸和重质原油;进一步调整结构,提升产品质量,发展高档油品,提高国际竞争力;进一步发展节能减排技术,控制污染排放,保护环境和节约能源;提高IT技术的应用水平,促进炼油工业生产更加现代化。为实现炼油技术的发展重点,中国炼油工业将一如既往,走技术创新之路,迎接未来广阔的发展前景。

第二章 原油评价

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。原油的品种非常复杂，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。我国目前已有十几个油区，每个油区又包括几个甚至几十个油田。其中大庆、胜利、长庆、延长、新疆、辽河、西北、吉林、塔里木及南海等油区产量较大，年产原油分别从约 5Mt 至 40Mt。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，但也有少量原油属于石蜡基、环烷基，且含硫较多。辽河油区、西北油区也有类似的情况。

我国原油产量近几年增长速度不快，在 2005 ~ 2009 年，原油产量在 181Mt 至 190Mt 之间变化。为了弥补国内原油资源的严重不足，我国进口了大量国外原油。2005 年我国的进口原油为 127Mt，到 2009 年增加到 204Mt，对外依存度由 2005 年的 41.19% 上升到 2009 年的 51.95%。在将来相当长的一段时期，进口原油仍将占较大比例。这些进口原油主要来自中东、西非、独联体、南美等地区，其中大部分是中间基原油，也有少部分是石蜡基原油和环烷基原油。

我国加工的原油不仅数量大，而且品种多。据不完全统计，2009 年我国炼油厂加工的原油已达到 136 种。这些原油特性差别较大，给炼油厂加工带来了很大的困难，同时也给炼油厂带来了机遇。不同性质的原油，要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喷气燃料、柴油，不需要深度精制，其重油适合生产高黏度指数润滑油，同时它也是容易裂解生成小分子的化工原料和车用汽油的好原料。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。因此，对于炼油厂加工的原油，必须先实验室进行一系列的分析、试验，习惯上称为“原油评价”。如果能够以原油评价的数据对原油进行优化选择和利用，将给炼油厂带来巨大的经济效益。本章将简要介绍原油评价的内容及方法，并对我国主要原油的性质进行分析，此外还对我国主要进口原油的性质单独列出一节进行讨论。由于国内外原油的种类较多，不可能逐一进行介绍，因此，本章主要选择四种我国产量和加工量较大，又有各自特点的原油——大庆、胜利、辽河、塔河原油进行不同类型原油的比较和讨论。为了更能说明问题，少部分内容采用了其他原油的数据，如华北原油 200 ~ 500℃ 馏分烃类组成的数据、华北和孤岛渣油不同烃类的结构参数等；而对国外原油，首先将主要进口原油按特性进行分类，然后分析了同一类型原油的共性。

第一节 原油评价的内容及方法

原油评价是指利用现代化的仪器和方法，对原油以及分馏出的馏分进行物理性质、化学性质和组成分析，根据得到的结果，对原油的加工性能进行评价的方法。按照需求的不同，