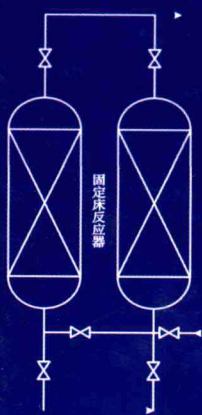


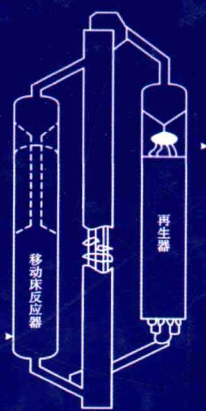
催化裂化化学与工艺

Chemistry & Process of Catalytic Cracking

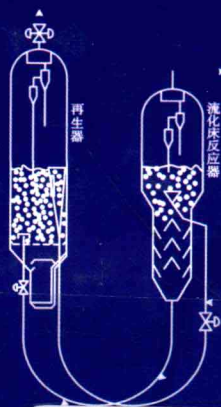
许友好 著



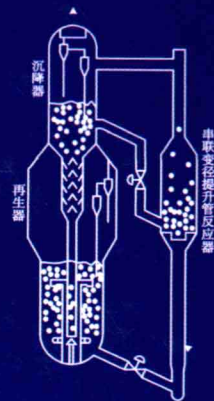
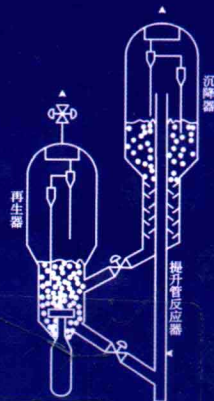
国外 (1936年)



国外 (1943年)



1956年
1974年



中国 (2002) 年



科学出版社

催化裂化化学与工艺

许友好 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从历史性、科学性和资料性三方面系统总结了我国催化裂化工艺技术,较为完整地反映了我国催化裂化工艺研究、开发和应用历程。针对我国催化裂化发展历程,详细阐述了我国馏分油催化裂化、渣油催化裂化以及催化裂解工艺技术的研究、开发、应用以及存在的问题,内容包括所加工的原料性质和表征、催化剂研究和开发、中小型试验研究、工业试验和工业应用以及在应用过程中存在的问题。

本书内容翔实,具有较高的理论水平和较强的实用价值,对促进催化裂化工艺技术研究、开发和应用均有积极作用,是广大炼油工作者,尤其是从事催化裂化事业的工作者提高技术水平和开阔技术视野的必备读物,也是从事催化裂化技术研究和开发人员的必备参考资料。

本书可供炼油工业的广大科技工作者,包括教育、科研、设计、生产管理等方面的专业人员以及院校的高年级学生,尤其是从事催化裂化一线生产的技术人员、研究与开发的科研人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

催化裂化化学与工艺/许友好著. —北京:科学出版社,2013.3

ISBN 978-7-03-036892-8

I. ①催… II. ①许… III. ①石油炼制-催化裂化 IV. ①TE624.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第040685号

责任编辑:尚 雁 顾晋怡 罗 吉 / 责任校对:邹慧卿 李 影 鲁 素
责任印制:赵德静 / 封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2013年3月第一次印刷 印张:79 3/4

字数:1900 000

定价:398.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 我国催化裂化工艺技术的开发历程	1
1.2 催化裂化工艺开发历程启示	14
1.3 我国流化催化裂化工艺现状及其发展	20
1.4 催化裂化过程反应化学发展历程	22
1.5 催化裂化工艺技术研究方向	31
参考文献	33

第一篇 催化裂化工艺基础知识

第 2 章 催化裂化工艺过程反应化学	37
2.1 引言	37
2.2 正碳离子化学	39
2.3 催化裂化反应机理	68
2.4 FCC 工艺过程反应化学类型	78
2.5 不同烃类化合物的反应化学	127
2.6 硫、氮化合物的反应化学	248
符号说明	257
参考文献	258
第 3 章 催化裂化工艺基础知识	270
3.1 引言：催化裂化工艺发展历程	270
3.2 密相流化床催化裂化工艺	293
3.3 FCC 流态化基本原理	342
3.4 裂化催化剂基础知识	385
3.5 催化裂化原料和产品及其性质	446
符号说明	475
参考文献	478

第二篇 蜡油催化裂化工艺

第4章 蜡油催化裂化工艺	485
4.1 引言：蜡油催化裂化工艺概要	485
4.2 蜡油性质、组成及分布	491
4.3 蜡油催化裂化过程反应化学	522
4.4 蜡油催化裂化催化剂	579
4.5 蜡油催化裂化中小型实验研究	627
4.6 高效烧焦再生工艺	704
4.7 蜡油催化裂化工艺工业应用	744
4.8 蜡油催化裂化装置运行问题分析及对策	794
符号说明	820
参考文献	822
第5章 重油催化裂解工艺	827
5.1 引言：乙烯和丙烯生产能力及其市场需求	827
5.2 催化裂解工艺研究	831
5.3 催化裂解中型试验研究	854
5.4 催化裂解工艺工业应用	873
5.5 缓和催化裂解工艺的研究	886
符号说明	911
参考文献	912

第三篇 渣油催化裂化工艺

第6章 渣油催化裂化	917
6.1 引言：渣油催化裂化工艺概要	917
6.2 渣油催化裂化原料性质及其组成	922
6.3 渣油的催化裂化过程反应化学	959
6.4 渣油催化裂化催化剂	1005
6.5 渣油催化裂化中小型试验研究	1075
6.6 渣油催化裂化工艺反应系统特点	1118
6.7 渣油催化裂化工业装置及其应用	1154
6.8 渣油催化裂化工艺存在问题分析	1239
符号说明	1262
参考文献	1264

第 1 章 绪 论

20 世纪 40 年代以前，裂化汽油几乎都是由热裂化方法产生的，热裂化汽油中含有大量的烯烃和二烯烃，在贮存过程中容易生成胶质。为了增产汽油和提高汽油辛烷值以满足第二次世界大战的军事需要，1936 年，催化裂化工艺诞生，这是炼油技术发展中的一项重大突破，标志着炼油工业开始由热裂化向催化裂化转变。由于催化裂化工艺能够生产高品质的汽油，并且所用的原料也是多种多样的。因此，催化裂化工艺在石油炼制工业中得到了迅速发展，近 80 年来，催化裂化工艺一直是石油炼制工业中重要的二次加工工艺。催化裂化工艺能够使减压蜡油（VGO）、常压渣油（AR）、减压渣油（VR）、焦化蜡油（CGO）、脱沥青油（DAO）等重质原料，在固体酸催化剂的作用下，有选择地转化为液化气（LPG）、汽油、柴油等轻质燃料及轻烯烃（尤其是丙烯）等化工原料。催化裂化装置一般包括有反应-再生、产品分馏、吸收稳定和产品精制四部分。催化裂化工艺基本原理是烃类原料在固体酸性催化剂上发生裂化反应，同时消耗一定的热量，一般反应温度在 450~530℃，反应压力为 0.1~0.3MPa，在裂化反应过程中，除生成油气外，还生成少量的焦炭沉积在催化剂表面上。在很短的时间内（一般为几秒钟到几分钟），催化剂的活性因其表面上的积炭量增大而大大下降，这时就必须将催化剂上的积炭烧掉以恢复催化剂的活性，这一烧去焦炭的过程称为催化剂的“再生”，同时释放出一定的热量。由此可见，催化裂化工艺过程一方面是必须周期性地反应和再生，这需要保证固体酸性催化剂平稳循环输送，另一方面必须周期性地由吸热过程转为放热过程，这需要保证吸热和放热处于平衡状态。如何解决这两对矛盾就成为催化裂化工艺技术发展的基本动力。

正是在这种动力的推动下，催化裂化工艺技术从固定床催化裂化、移动床催化裂化发展到流化床催化裂化，在随后几十年里，流化催化裂化工艺技术自身又取得了突飞猛进的发展。国内外催化裂化技术的发展史，陈俊武（2005）主编的《催化裂化工艺与工程》一书的绪论已作详细和精彩的论述，本书在此不作论述。本书此章只论述我国催化裂化工艺技术的开发历程及其启示，催化裂化工艺开发与反应化学之间的关系，催化裂化工艺技术发展前景及其面临的挑战。

1.1 我国催化裂化工艺技术的开发历程

自 20 世纪 50 年代以来，我国催化裂化工艺技术取得了跨越式发展，催化裂化装置实现了从无到有，研究方式实现了跟踪模仿到自主创新。到目前为止，国内催化裂化工艺技术水平处于国际先进水平，已有 150 多套不同类型的催化裂化装置建成投产，处理量已接近

150Mt/a, 其中渣油含量占 40%。国内催化裂化工艺技术开发主要分成三个阶段: 一是催化裂化工艺技术起步阶段, 典型的成就是建立石油二厂 0.6Mt/a 密相输送流化催化裂化装置, 实现了从无到有的质的飞跃; 二是催化裂化工艺技术快速发展阶段, 典型的成就是沸石催化剂的提升管催化裂化工艺的开发, 快速流化床烧焦罐再生技术的开发和渣油催化裂化工艺技术的开发; 三是自主创新阶段, 典型的成就是生产低碳烯烃的催化裂解工艺技术的开发。下面详细论述我国催化裂化工艺技术的开发历程。

1.1.1 催化裂化工艺技术起步

我国流化催化裂化工艺起步可追溯到 20 世纪 50 年代初期, 在肖光琰博士建议并指导下进行催化重整、悬浮催化裂化研究。50 年代中后期, 当时中国科学院大连化学物理研究所, 北京石油学院(现石油大学)和石油工业部北京石油科学研究院(现中国石化石油化工科学研究院)都先后开展了有关催化剂、催化裂化工艺和流态化技术的研究试验。1956 年, 肖光琰博士来到北京石油科学研究院负责页岩油馏分催化裂化工艺及催化剂研究。这些开拓性的研究虽未获得重大成果, 但加深了对催化裂化工艺的理解, 积累了若干经验, 据此编制了发展规划, 并对当时国外几种催化裂化工艺技术工业应用情况进行了分析对比。在催化裂化工艺技术研究开发基础上, 1961 年 11 月, 石油工业部派敖明模、何振鹏赴古巴洛佩兹炼油厂考察, 发现了当时标志着炼油先进水平的 IV 型催化裂化装置的具体面貌, 并认为流化催化裂化装置对我国炼油技术开发具有借鉴之处, 石油工业部领导很快地抓住这难得的机遇, 停止建设苏联设计的 1A 型催化裂化装置, 立即组织各方面技术力量, 集中财力、物力和人力, 自主开发同高并列式密相流化催化裂化技术。这一战略决策转变, 对促进我国炼油工业的迅速发展, 尤其催化裂化工艺技术, 起到了不可磨灭的作用。

1961 年 12 月, 石油工业部副部长刘放在北京香山召开会议, 组织了二十多名领导和专家, 听取了赴古巴考察的人员对 IV 型催化裂化装置的简单介绍, 并部署催化裂化工艺的研究、开发和设计工作。1962 年 1 月 4 日石油工业部就决定成立炼油厂新技术核心领导小组, 由孙晓风任组长, 副组长张定一, 成员有侯祥麟、杨达、任向文、顾敬心等同志。1962 年 1 月 8 日就召开了炼油厂新技术小组会议, 会议形成了四项决定: 一是炼油厂新技术的重点为同高并列式密相流化催化裂化工艺, 包括微球催化剂及舌型塔盘蒸馏塔; 二是新技术开发和设计要先行; 三是派陈俊武等五位年轻工程师去国外炼油厂作短期学习, 收集有关 IV 型流化催化裂化工艺的资料; 四是炼油厂新技术所需费用作为单项列入当年财务计划。随后, 研究开发和工程设计部门相关人员认真地研究了从国外考察取得的技术资料以及出版文献所公开的生产工艺数据, 归纳出四大问题, 一是短时间提不出符合我国原料油性质的、完整的、准确的试验研究数据; 二是绝大多数设计人员从未设计过催化裂化装置, 缺乏感性认识, 对已有的资料技术内涵还吃不透; 三是对关键设备和仪表的设计和制造, 国内均未设计过和生产过; 四是催化裂化装置 90 多个主要工艺参数是由仪表自动控制的, 对高度自动化的催化裂化装置的操作经验几乎是空白。按照常规的开发方式, 开发一个新型的工业催化裂化装置, 必须要通过小型实验装置研究、中型实验装置研究、半工业化试验装置设计、验证和考察, 然后再进行大型工业装置设计和运转等四个步骤。采用如此开发方式, 势必大大推迟建设时

间。当时石油工业部领导在集中研究开发和工程设计部门相关人员的意见基础上,决心采用非常规的开发方式,将研究开发、工程设计、设备制造、工程施工、生产操作等方面力量组织起来,力争系统外的相关部门大力协助,争取在短时间内建设成一个试验性的大型工业装置。因此,研究开发和工程设计部门人员在所掌握的资料的基础上,结合我国已有的研究成果,共同确定了初步工艺设计基础数据,作为基础设计的依据,同时在设计过程中,建立了小型实验装置和中型实验装置,并进行了针对性的试验,使设计数据得到验证。设计人员经过科学分析和细致周密的计算,抓住了催化裂化装置设计重点在于反应、再生部分,其中关键是催化剂流化、密相输送和催化剂损失。催化剂流化取决于反应器、再生器底部的分布板性能;催化剂密相输送要求反应器和再生器压力平衡稳定,这与压力控制设备双动滑阀的质量密切相关;催化剂损失大小的关键在于旋风分离器与翼阀的效率和性能。这为有目的地试制关键设备以及研究和选用工艺参数奠定了可靠的基础。

正是基于上述的开发思路,1962年1月13日,从北京设计院和抚顺设计院抽出设计骨干,成立了密相输送流化催化裂化装置设计小组,顾敬心为组长,陈俊武为装置设计师。1962年3月25日,通过初步设计中间审查,10月底初步设计在石油工业部审查通过,1962年8月,石油工业部派8位同志赴国外催化裂化装置进行实地考察,历时半年的考察,取得了丰硕成果,不仅获得了施工图设计所需的资料,而且获得大量炼油技术资料,开阔了我国炼油技术视野。在此期间,陈俊武记下了珍贵的十几本笔记,为掌握炼油新技术提供了重要的信息。1963年2月底,考察人员回国并立即向石油工业部领导汇报,石油工业部领导听了汇报后,马上组织三支力量,一是全力以赴进行施工图设计,二是组织攻关特殊设备材料,三是尽快将带回来的资料翻译成中文版。1963年3月初,考察人员就到了抚顺设计院并进行了分工:陈俊武负责催化裂化施工图设计,杜克勤负责仪表和滑阀研制,何宇在石油科学研究院负责资料的翻译出版。密相输送流化催化裂化技术设计工作就此全面展开,在设计过程中,将研究开发与设计工作平行交叉地组织起来,对关键设备的设计,采取合作攻关方法。如滑阀,就由北京设计院、抚顺设计院和兰州炼油厂协同攻关而取得突破的。这种开发方式不仅保证了设计质量,而且节约了大量的时间,仅仅用了五个半月就设计出了全套施工图纸。施工图设计于1963年秋完成,年底通过了石油工业部组织的审查。

密相输送流化催化裂化技术开发是由北京石油科学研究院负责,1962年1月25日,炼厂新技术核心领导小组与石油科学研究院进行了对接,安排了开发进度,1962年2月底,提出文献中推荐的催化裂化设计基础数据,1962年4月,提出微球型催化剂分步沉淀试验结果;1962年7月底提出催化裂化中型实验装置不循环试验结果;1962年底提出催化裂化中型实验装置循环试验结果。石油科学研究院在催化裂化工艺研究方面做了大量的基础的工作,对我国催化裂化工艺技术的发展起了重要作用。早在1957年,石油科学研究院配合兰州炼油厂进行了移动床催化裂化工艺和催化剂研制试验研究,稍后又开展了流化床催化裂化装置模型与工艺研究。移动床催化裂化试验装置的建设和试验是由林楚峤负责的,而流化床催化裂化试验装置的建设和试验是由熊国卿负责,李再婷负责小型固定流化床装置的建设并试验。1961年,第一套中型流化床催化裂化装置是在熊国卿负责下建成的,处理量为0.25~0.5t/d,这为我国后来的催化裂化工艺研究和开发奠定了可靠试验基础。熊国卿将个人荣誉

置之度外，全身心投入到这套中型催化裂化装置建设中。1961~1963年，在这套中型催化裂化装置上，采用大庆馏分油，进行了大量的工艺条件试验研究，提供数据与古巴及其他国家的试验数据对比，为我国第一套工业化流化催化裂化装置的初步设计提供了工艺基础数据。为配合石油二厂 0.60Mt/a 密相输送流化催化裂化装置的开工，石油科学研究院在武宝琛博士负责和指导下，大庆炼油厂、兰州炼油厂、石油五厂都派来了熟练技术工人参与中型催化裂化装置的建设，仅用了 70 天时间，于 1964 年建成了一套模拟工业装置仪表控制的处理量为 0.36t/d 的中型流化催化裂化装置，随后，进行了 7 次试验，取得了 32 套试验数据，起到了摸索条件、指示方向的作用，为大型工业装置制订试运方案，确定合理操作条件作出了贡献。同时，为石油二厂技术人员及操作骨干在中型装置上进行培训，积累操作经验，为大型工业装置培训了一批操作骨干。在催化剂研制方面，萧光琰（1958，1959a，1959b）在 20 世纪 50 年代中期就开始了合成硅酸铝裂化催化剂的研究工作，研究内容包括采用共胶法、浸渍法和混合法试制氧化铝含量不同的硅酸铝裂化催化剂，催化剂制备方法的研究，考察制备条件对催化剂组成、物理结构和裂化性能的影响。石油科学研究院（北京石油炼制研究所，1958）和王君钰等（1959）在 20 世纪 50 年代后期就在实验室研制小球裂化催化剂和天然白土裂化催化剂。1960 年以后，在闵恩泽主持下，对小球催化剂的制备流程、工艺条件、原料规格、控制分析方法、产品性能等问题进行了系统实验研究，在此研究基础上，与北京石油设计院和兰州炼油厂密切合作，于 1964 年 4 月建成了硅酸铝小球催化剂生产装置。为配合石油二厂 0.60Mt/a 密相输送流化催化裂化装置所需的硅酸铝微球催化剂，从 1962 年起，在闵恩泽主持和负责下，选择了开发速度快，操作比较简单，设备制造不太复杂的工艺方法，同时将实验室研制配方与工艺条件和在中型实验装置上解决的喷雾干燥成型问题结合起来，缩短了催化剂开发周期。1963 年 5 月和 6 月，闵恩泽和兰州炼油厂有关技术人员到上海永星洗涤剂厂了解喷雾干燥设备和操作生产经验，掌握了雾化器的选择，干燥塔的各部位尺寸比例等许多关键技术要点。高压泵和真空过滤机是上海大隆机械厂和上海化工机械厂试制的第一批产品。正是在研究、设计、生产和设备制造部门共同努力下，兰州炼油厂于 1965 年 12 月建成了我国第一套 3kt/a 的微球催化剂生产装置，生产出合格的微球催化剂，随后微球催化剂就应用到我国第一套催化裂化装置上，取得满意的工业应用结果。随着催化裂化装置的增多以及加工能力的增加，1970 年、1976 年和 1978 年相继在长岭炼油厂、齐鲁石化公司催化剂厂和石油六厂建成投产年产 6kt、4.5kt 和 2kt 的微球催化剂生产装置，从而形成了我国四个裂化催化剂制备基地（闵恩泽，1997）。

1963 年下半年，石油工业部领导决定在大庆炼油厂按照石油二厂流化催化裂化装置施工图再建设一套，当时，工程技术人员认为应该等石油二厂流化催化裂化装置投产后再另建其他装置，时任石油工业部部长余秋里再三向技术人员摸底，追问如果还有问题没有解决，应该提出来，设法解决，同时还承诺第二套完全由部领导全部负责。针对当时技术情况，技术人员提出自动滑阀、高效旋风分离器和塔内高温保温材料均是没有完全掌握的技术，石油工业部领导立即决定组织攻关，并由石油工业部邀请冶金工业部、建材工业部有关科研部门协助成立小组，分工负责攻关。事后证明，攻关所取得成果不仅用于第一套催化裂化装置，而且用于大庆炼油厂第二套催化裂化装置以及随后其他催化裂化装置。第一套催化裂化装置

共有工艺设备 82 台，其中 39 台国内当时未生产过，机泵设备 43 台，其中 7 台国内当时未生产过，仪表 146 套，其中 80% 国内不能提供。为此，石油工业部成立了设备配套办公室，对关键的设备和仪表，逐台逐件地分类排队，组织各方面力量进行集体攻关。例如，催化裂化装置关键设备之一是气动调节风动单动和双动滑阀（简称滑阀），由上千个零部件组成，要求十分精密灵敏，自动调节，并且滑动距离的误差不超过 1.4mm，当时只有美国能够制造出灵敏度达到 1/400，精确度达到 1/100 的滑阀。石油工业部将滑阀试制工作交给兰州炼油厂，并成立了专门攻关小组，石油化工规划院袁宗虞负责滑阀设计工作。参加滑阀研制和设计的技术人员针对滑阀耐高温、耐磨、灵敏度和精确度要求高的特点，将整套滑阀按阀体、传动和控制系统分解成若干个单体，对各个单体进行攻关。在当时一机、二机等部的 12 个厂矿和研究院（兴平机械厂、新兰仪表厂、万里机电厂、上海热工仪表研究所、上海工具厂、北京钢铁研究院等）帮助下，只用了 10 个月时间，就制成了控制性能良好，灵敏度高于同期国外产品的滑阀。催化裂化装置关键设备之二是反应器和再生器。0.6Mt/aFCC 装置反应器和再生器直径 6.2m，高度 20 多米，各净重量达到 100 多吨，并且内壁设有耐热、耐磨衬里。石油工业部将试制工作交给了石油二厂建设公司金属结构预制场，经过设计人员和一线工人协同攻关，只用了五个半月的时间，就制造出了反应器和再生器，质量全部达到设计要求，并经受住了生产的考验。为此，许多单位和个人作出了突出贡献，其中一线工人张连生和恩启永拼焊成了简易的胎具；于洪发利用半自动切割器不仅可以切割大小曲面、大小杯口，而且切口光滑，尺寸准确到不差半个冲眼；张生发采用了一个巧妙的办法解决了反应器分布板上小短管焊接问题，用小短管作内芯，先用合金钢堆焊在外面，再用碳钢焊在合金钢的外面，最后用车床加工成适用的短管。建材工业部建设材料研究院和冶金工业部建设科学研究院承担了耐热、耐磨衬里材料研究工作。这套催化裂化装置的仪表特点为品种多，精度高，结构小巧，动作灵敏，并且还装有声、光信号和完善的自动保护系统。兰州炼油厂仪表车间负责试制，针对试制的仪表，分成调节器、变送器和小尺寸三针二次仪表等三大类，组织技术人员和一线工人进行攻关，将试制的仪表与国外样机进行对比，设计出近 300 种零件图纸并进行反复修改，同时与国内 19 个单位密切合作，只用了 14 个月的时间，就将整套仪表全部制造和配套起来，质量满足设计要求。沈阳鼓风机厂采用边设计、边试制、边试验、边改进方法，前后正式试车 16 次，修改了 9 次设计，完成了大功率的鼓风机试制。北京气体分析仪器厂试制成功了国内第一台氧气分析器，性能超过国外同类产品。上海新建机器厂提供了新型分馏塔，杭州透平机械厂提供了一百马力透平，沈阳水泵厂提供了端面密封，上海汽轮机厂提供风动闸阀等。1964 年，在兰州炼油厂试制成功我国第一台单动滑阀和双动滑阀以及第一批国产气动单元组合式小尺寸仪表。

在石油工业部卓有成效的组织下，密相输送流化催化裂化工艺技术的研究、设计和生产部门紧密合作，初步完成了石油二厂 0.6Mt/a 密相输送流化催化裂化装置设计。1964 年春，正式拉开这套催化裂化装置建设的大幕，抚顺炼油建设公司组织了五个施工队，进行了十个平行流水作业和十个立体交叉作业，将土建施工与设备安装交叉进行。在整个施工过程中，广大职工树立严谨细致的工作作风，日夜奋战在施工现场，突破了一个个施工难关，仅仅用了七个半月的时间，就建成了这套催化裂化装置，包括 200 多台设备，5000 多个阀门，30

多公里的管线，4000多立方米混凝土，工程质量全优，于1965年3月完成终交。在此期间，抚顺设计院张福貽带领有关设计人员在现场配合施工，陈俊武负责生产准备，编写开工操作规程，组织操作人员培训。石油科学研究院武宝琛负责中型试验装置建设和试验，一套技术复杂、自动化水平很高的中型催化裂化装置建成运转，距离大型工业催化裂化装置的开工已经不到三个月了，研究人员一面和设计、生产人员制定了全面配合大型工业装置试生产的试验计划，同时进行中型试验，在短短一个多月里，进行了7次试验，取得了降低催化剂活性和各种轻、重原料油催化裂化反应的第一手数据32套，同时还逐步建立了催化剂活性、定碳、筛分等十几种特殊分析项目，为工厂培养了一批分析人员。在开工前，石油工业部又选派12人到古巴炼油厂学习，正好赶上该装置处于检修期，对装置内部各部件的结构，检修内容，检修时所用的专用工具有了更加深入的了解，并参加开工过程倒班，学习了开工、停工、正常生产操作和事故处理方法，对操作参数的控制及其变化规律，开工和操作出现的异常现象有了更加具体的感受，翻译了操作规程。回国时还邀请了五名国外操作骨干，帮助我们的密相输送流化催化裂化装置开工。

1965年3月后，这套工业催化裂化装置进入开工前期阶段，在石油工业部工作组任向文、朱吉人等领导主持下，对开工方案进行了认真细致的讨论，细化为单机试运方案、水联运方案、油联运方案和开工方案，并以“大字报”形式挂出来，并成立指挥部和参谋部。接下来所遇到的问题是开工时所用的催化剂，是先用兰炼生产的小球催化剂磨成粉状的微球，还是直接用从英国购置的3A微球催化剂开工。经过反复争论，最后决定采用3A催化剂开工。但又产生另一个难题，由于3A新鲜催化剂初始活性高，造成开工进料时反应深度大，装置运行难以处于稳定状态，可能产生安全问题，国外专家主张等候半年到一年，等待他们的FCC装置上逐步置换出的平衡催化剂，然后采用平衡催化剂开工。面对这种情况，石油科学研究院武宝琛、李再婷提出用蒸汽老化的方法，降低开工新鲜催化剂的活性。石油科学研究院催化裂化工艺室全力以赴开展这项工作，在中小型实验装置进行试验研究，很快取得了可喜的试验结果，建议采用新鲜3A催化剂开工，先用蒸汽老化催化剂48h，使催化剂活性降低10~15个单位，从而使催化裂化装置开工顺利按计划步骤进行。国外专家起初反对这一办法，事后也认为这是技术上的一项创举。1965年4月初开始倒班，正式进入开工阶段，单机试运、水联运、油联运都顺利通过，从4月下旬开始启动主风机烘衬里、检查与热紧，准备喷油。接下来三大关键步骤：一是向再生器装催化剂，实现单器流化。随着催化剂的加入，再生器内的催化剂料位不断上升，很快就封住了料腿，喷燃烧油以便床层温度上升工作也很顺利，烟囱带出的粉尘不多，证明流化床和旋风分离器处于良好的工作状态。两器流化也很快地建立起来，单、双动滑阀的开关调节都很灵活；二是新鲜3A催化剂的老化。经过48h高温水蒸气减活，催化剂活性下降，符合石油科学研究院的中型试验研究结果；三是向反应器喷油，喷油过程也相当顺利，只是分馏塔顶压力高，车间领导孙玉宝、张俊德和徐宗诗分析认为可能是分馏塔顶冷却器入口存在着阻力，经指挥部同意，略作处理后，处理量就提高到75t/h，达到设计水平。开工后，对该装置进行了多次考核标定，这些标定结果在4.7节再作详细讨论。

1965年5月5日，我国第一套0.6Mt/a同高并列式密相流化催化裂化装置在抚顺石油二

厂建成投产，在处理能力、产品收率和产品质量等方面均达到了设计目标，顺利地实现了试生产一次成功。这表明这套完全由国内自行设计、自行制造设备、自行施工的催化裂化装置设计是先进的，设备制造的质量是可靠的，工程质量是优良的。这是在石油工业部卓有成效的组织下，调动了石油工业部内部各方面的力量，开展石油工业部内外单位的大协作，加速了科研、设计、设备试制及必要的国外订货、施工建设和生产准备等一系列工作的步伐，在短短的三年时间内实现了从无到有的质的飞跃。这套催化裂化装置建成和投产标志着我国炼油工业达到了一个新阶段，大大缩短了我国与西方发达国家在炼油领域内的差距，为我国随后全面发展炼油新工艺、新技术提供了宝贵的经验，同时也推动了我国炼油工业的设备和仪表制造技术的快速发展。围绕这套催化裂化装置建设实践过程，当时参与的各方人员进行了总结，在开发新技术和新工艺方面形成了八点共识。从现在的角度来看，其中有些共识和启示仍然具有重大的现实意义。

(1) 开发新技术和新工艺，必须走自力更生的道路。只有这样，才能掌握主动权，赢得时间，才能比较快地赶上和超过世界先进水平。如果只靠国外引进新技术，只是踩着别人的脚印走，就只能永远落在后面，不能后来居上。因为从国外引进的新技术不可能是最先进的。坚持自力更生发展新技术，不仅可以更好地培养人才，壮大科学技术队伍，使本部门的科学研究、设计、施工以及生产技术水平大大地向前推进一步，而且可以应用和发展我国已有的科学技术成就，将科学研究工作推向一个新的水平，促进其他工业向前发展。因此，自力更生是发展新技术的唯一正确道路。

(2) 开发新技术和新工艺，打的是一场科学技术仗。但是在这里起决定作用的不是设备，而是人，是人的革命精神，因而打的又是一场政治仗和志气仗。在打科学技术仗的时候，首先必须取得政治仗的胜利，才能打赢科学技术仗，才能把新技术搞上去。而赢得科学技术仗的胜利，把新技术搞上去，又能巩固和扩大政治仗的胜利。

(3) 开发新技术和新工艺，要敢闯，敢和技术上的难题较量，敢和国外最先进的水平较量，要不服输。别人能搞的，我们就能搞；别人没有搞的，我们也要搞。有了这股劲，人们思想就活了，就能搞出大名堂。在具体工作中要遵照毛主席的教导，破除迷信和遵照科学相结合。迷信要彻底地破除，科学要严格地遵守。

(4) 开发新技术和新工艺，必须狠抓新设备。新设备是新工艺的物质基础，也是提高技术水平的基本尺度。新技术搞成搞不成，搞得快还是搞得慢，往往卡在设备制造上。工艺想得再妙，图纸画得再好，造不出设备来也是一场空。抓新设备，也必须立足于国内，走自力更生的道路。只有这样，才能赢得时间，保证建设进度，同时使设备制造水平不断提高，为今后发展新技术打下可靠的物质基础。

(5) 开发新技术和新工艺，必须要发动群众，大搞领导干部、技术人员和工人三结合。只有这样，才能充分发挥人们的主观能动性，打破那些束缚人们发挥创造性的老框框；才能充分发扬技术民主，集中群众的智慧，技术工作就可以做得更全面，就可以使理论和实际结合得更好。

(6) 开发新技术和新工艺，要充分运用社会主义制度的优越性，要大搞系统内外大协作。只有这样，才能充分运用兄弟单位的科学技术成果，充分发挥已有的工业基础作用，可以攻克很多技术关键。

(7) 开发新技术和新工艺, 要做好研究开发、工程设计、设备制造、工程施工和生产操作的协同配合, 集中力量攻关。在建设催化裂化装置过程中, 采用了研究开发、工程设计、设备制造、工程施工和生产操作联合兵种作战的办法, 同时, 从头到尾贯穿了一家做主, 一贯到底, 一鼓作气, 一次成功的办法, 做到了高度集中统一。如果做到这样, 就必须打破过去那套机械的分工, 提倡负责到底, 每个部门既要对自己的成果负责到底, 也要对整个新技术搞上去负责到底。集中兵力打歼灭战, 可以使每个阶段的主攻方向明确, 可以把有限的人力、物力集中到解决关键问题上去。可以用比较快的速度突破关键技术和设备, 从而带动全局进展。

(8) 开发新技术和新工艺, 必须要有一个好的工作作风。催化裂化装置的建设 and 投产是在没有任何经验的情况下搞起来的, 工作条件比较差。正是这样, 将一切工作放在质量第一基础上, 狠抓工作作风, 用严谨细致工作作风之长, 补技术不足之短。事实证明, 只要有了好的工作作风, 有了高度的责任心, 就可以产生巨大的物质力量, 再艰苦的任务也能完成, 再尖端的技术也能搞得成, 搞得好, 搞得规格, 搞得科学。

1965年9月, 大庆炼油厂第二套 0.60Mt/a 同高并列式催化裂化装置建成投产, 随后立即开始了 1.2Mt/a 带有管式反应器的三器流化循环的催化裂化装置放大设计, 并于 1967年10月在胜利炼油厂建成投产, 由于催化剂损失较大, 1968年2月至5月, 石油工业部组织了流化试验小组, 对已运转的两套 0.60Mt/a 同高并列式催化裂化装置进行调查和测试, 研究大直径流化床正常流化和催化剂损失的内在关系, 找出了催化剂损失的影响因素, 并对设备和操作参数进行了必要的改进, 于 1968年8月完成了整改并正式投产。通过这次技术攻关, 加深了对流化催化裂化装置的认识, 为随后的大型催化裂化工艺研究和开发积累了更多的工业装置运行的经验。随着越来越多的工业催化裂化装置相继投产, 国内在催化裂化工艺研究开发、工程设计, 施工建设和生产操作等方面的水平不断提高, 今天, 已建成了 100 多套不同技术类型的催化裂化装置, 处理能力已近 150Mt/a, 为我国经济建设和社会发展作出了巨大的贡献。

1.1.2 催化裂化工艺技术的发展

1.1.2.1 沸石催化剂的提升管催化裂化工艺的开发

沸石催化剂的提升管催化裂化工艺是 20 世纪 60 年代中期首先由美国石油公司开发成功的, 与密相流化床催化裂化工艺相比, 具有轻质油收率高, 尤其是汽油产率大幅度增加, 生产方案灵活等优点, 从而很快地取代密相流化床催化裂化工艺。为沸石催化剂工业应用提供更加适宜的反应器, 武宝琛在个人处境极其艰难的情况下, 仍甘愿冒险提出负责提升管催化裂化工艺的研究与开发, 得到了当时催化裂化研究室领导陈祖庇的支持。武宝琛为了能够进行提升管催化裂化这项工艺的研究, 于 1973 年建成了一套处理量为 0.24t/d 的中型提升管催化裂化装置, 并在这套中型装置上进行了多种沸石催化剂和不同类型的原料油评价试验, 为大型工业化提升管催化裂化装置的设计和开工提供了有用的工艺设计基础数据。在取得满意的试验结果和工业装置所需的设计基础数据后, 与玉门石油管理局炼油厂、石油化工规划设计院等单位合作, 于 1974 年 8 月首先将玉门炼油厂 0.12Mt/a 同高并列装置改造成我

国第一套高低并列式提升管催化裂化装置,取得满意的工业试验结果。接着与石油化工规划设计院、抚顺石油二厂合作,将抚顺石油二厂的流化床催化裂化装置改造成提升管催化裂化装置,使其处理能力提高到 0.9Mt/a。此后,国内所有的改造或新建的催化裂化装置都采用了提升管反应器,迄今已有上百套的提升管催化裂化装置。与此同时,进行了稀土 X 型沸石催化剂研究与开发,1965 年进入中型试制阶段,1972 年 13X 沸石催化剂在兰州炼油厂工业试制成功,并于 1973 年在玉门炼油厂 0.12Mt/a 同高并列式流化床催化裂化装置上进行了工业试验,标志着我国裂化催化剂制造工业开始登上了一个新的台阶。在研制 X 型沸石同时还研制 Y 型沸石,1974 年南京炼油厂进行了用水玻璃加晶化导向剂合成钠 Y 型沸石和稀土 Y 型沸石焙烧工艺的半工业试验(南京炼油厂,1975),1975 年在兰州炼油厂建成 Y 型沸石生产装置就采用此工艺流程。在稀土 Y 型沸石进一步制备稀土 Y 型裂化催化剂的研究过程中,石油化工科学研究院先后开发了 REY-1、REY-2、REY-3 三种低铝沸石催化剂以及 REY-4、REY-5 两种高铝催化剂,1975 年 Y 型沸石催化剂在兰州炼油厂催化剂工业生产装置上试产成功,使沸石催化剂的生产技术又向前推进了一大步。该催化剂于 1975 年 11 月在玉门炼油厂提升管催化裂化装置上使用,取得满意的结果。

1.1.2.2 快速流化床烧焦罐再生技术

快速流化床烧焦再生技术是国外 20 世纪 70 年代实现工业化的一项新的再生技术,其重要特点是气体成为连续相,而催化剂成为分散相,正好与密相流化床气固相相反,实现了无气泡气固接触,从而大幅度提高烧焦强度。我国从 20 世纪 70 年代后期起,研究单位、设计单位就开始进行快速床再生的研究,中国科学院化工冶金研究所作了冷模试验,洛阳石化工程公司炼油实验厂做了热模试验,而石油化工科学研究院在武迟领导下,林楚峤于 1977 年对高效再生技术进行了中型试验研究,取得了高效再生冷模和热模试验数据。洛阳石化工程公司和北京石油设计院分别完成了乌鲁木齐石化总厂和荆门炼油厂两套工业装置的设计。1978 年 9 月,洛阳石化工程公司设计的乌鲁木齐石化总厂加工能力为 0.6Mt/a 提升管加快速床再生催化裂化装置建成并试运。在这套催化裂化装置设计中,采用了具有内循环管烧焦罐的快速床再生技术,取得了很好的效果。接着,石油化工科学研究院、北京石油设计院和荆门炼油厂合作,将原有的流化催化裂化装置改造成提升管反应器加快速床再生器的催化裂化装置,也取得很好的效果。改造后,这套催化裂化装置的年加工能力由 0.6Mt/a 提高到 0.8Mt/a,烧焦强度提高了 3~5 倍,生产操作灵活性明显地改善,从而提高了催化裂化反应的选择性,导致轻质油收率增加,气体和焦炭产率降低。

为了提高催化裂化催化剂的再生效率,石油化工科学研究院朱惟雄等于 1977 年开始研究一氧化碳助燃剂,1978 年研制出含铂的一氧化碳助燃剂,当年先后在玉门炼油厂和独山子炼油厂催化裂化装置中使用,取得良好效果,并很快使用到许多炼油厂。1981 年还试制成功了含钨一氧化碳助燃剂,先后在济南炼油厂和胜利炼油厂进行工业使用试验,其效果与铂助燃剂相近。

20 世纪 80 年代以来,我国在再生技术方面又取得了新的进展,掌握三种流化床型(鼓泡床,湍流床、快速床),两种再生方式(完全和不完全燃烧),以及单段和两段(单个再生器或两个再生器)等各种床型和方式的组合型式。这样在选择和设计再生器时,形成了多种

床型和方式组合起来的新型再生工艺技术, 提供了更多的选择机会, 堪称百家争鸣, 百花齐放。然而, 这些所有的再生工艺技术在气固流态化上未发生根本的改变。

1.1.2.3 渣油催化裂化工艺

渣油催化裂化是重油深度加工提高炼油厂经济效益的有效方法, 它作为一项炼油新工艺, 已为很多国家所重视, 而且正在蓬勃的发展。我国原油大多数偏重, 大于 350℃ 的常压重油占原油的 70%~80%, 大于 500℃ 的常压重油占原油的 40%~50%, 因此, 渣油催化裂化早就引起我国炼油界的关注。20 世纪 60 年代中期我国就开始使用无定形硅酸铝催化剂, 石油化工科学研究院在中型流化床催化裂化装置上先后进行了大港、大庆和玉门常压重油的催化裂化试验, 并于 1972 年在玉门炼油厂以微球硅酸铝催化剂成功地进行了玉门原油全馏分催化裂化工业试验。沸石催化剂在我国 FCC 装置推广使用后, 1977 年洛阳石化工程公司炼油实验厂开始掺炼任丘减压渣油, 掺炼量为 16%, 取得了有用的数据。此后, 牡丹江炼油厂、安庆石化总厂、东方红炼油厂、镇海石化总厂、九江炼油厂等 10 多个单位进行了掺炼各种原油的渣油工业生产和试验, 都取得很好的效果, 为我国全炼常压重油和高残炭催化裂化原料提供了宝贵的经验。另外, 洛阳石化工程公司应用该公司炼油实验厂多年的研究成果与运转经验, 与兰州炼油厂合作, 将兰州炼油厂原来加工能力为 0.3Mt/a 的移动床催化裂化装置改建成国内第一套同轴式提升管催化裂化装置, 掺炼 20%~25% 的长庆减压渣油和二段脱沥青油, 并采用两段再生、助燃剂完全再生及再生器水平式内取热盘管等新技术。1982 年 10 月, 该装置建成投产后, 各项主要指标均达到设计要求, 装置处理能力达到 0.6Mt/a, 轻质油收率提高 10%。同轴式催化裂化装置的关键控制机构是高温塞阀, 经过生产运转的考验, 证明塞阀的设计、制备完全成功。这套装置的成功投产, 是催化裂化工程设计技术上的重大发展。

20 世纪 80 年代初, 大庆常压渣油催化裂化技术的开发被列为国家科委重点攻关项目。1982 年, 石油工业部(后改为中国石油化工总公司)又将此项目作为“十大技术”之一组织协作攻关, 成立了攻关小组, 陈俊武任组长, 闵恩泽等人任副组长, 参加单位为石油化工科学研究院、洛阳石化工程公司、北京设计院、石家庄炼油厂和九江炼油厂。同年, 根据牡丹江炼油厂的试验数据, 组织对石家庄炼油厂新建的 1.20Mt/a 提升管催化裂化装置进行改造, 改造后进行大庆常压渣油和掺炼 80% 任丘常压渣油工业试验。随后在九江炼油厂 FCC 装置上进行了掺炼管输减压渣油工业试验。这两套渣油催化裂化装置工业试验成功, 推动了我国渣油催化裂化技术的迅速发展。

为了提高催化裂化催化剂的性能和质量, 以适应渣油催化裂化工艺的要求, 1979 年, 石油化工科学研究院王全荣、吕玉康等开始研制 Y-7 半合成沸石催化剂, 1981 年 9 月齐鲁石化公司催化剂厂按照石油化工科学研究院开发的工艺, 试生产了 Y-7-09 型半合成沸石大堆积密度催化剂, 以后在此催化剂基础上, 又开发出 CRC-1 催化剂, 于 1983 年 4 月在乌鲁木齐石化厂催化裂化装置试用成功, 随后, CRC-1 催化剂应用于石家庄炼厂大庆常压渣油催化裂化工业试验; 1983 年, 长岭炼油厂开发和生产了 KBZ 半合成大比重催化剂; 1984 年兰州炼油厂开发和生产了全白土型大比重 LB-1 催化剂。1985 年前后, 石油化工科学研究

院吕玉康等经过反复试验探索,提出了多次交换和焙烧技术路线,成功地研制出性能更好的超稳 Y 型沸石(代号 DASY)为活性组元渣油催化剂,其商品名称为 ZCM-7 催化剂。1988 年,ZCM-7 催化剂在武汉石油化工厂引进的重油催化裂化装置上进行了工业试验,取得了令人满意的试验结果,并很快地应用到其他渣油催化裂化装置上。

为了适应渣油催化裂化工艺发展的要求,解决重金属对催化剂的污染问题,1979 年,石油化工科学研究院进行了金属钝化剂的研究,试制了二丙基二硫代磷酸锑钝化剂,称为 MP-25,在独山子炼油厂催化裂化装置上成功地应用。1985 年,石油化工科学研究院又研制出性能更好的油溶性液体锑钝化剂 MP-85,该钝化剂的特点是接触空气或暴露在阳光下不发生沉积和变质,便于工业应用,而且制造方法简便,生产成本不高,很快就应用到工业装置。为了适应渣油催化裂化技术的发展需要,中国科学院力学所、洛阳设计院和北京设计院成功地开发了多种进料喷嘴,其中主要的有 KH 型、LPC 型和 BX 型,并广泛地应用到不同类型的催化裂化装置上。取热器是渣油催化裂化装置的关键设备之一,1982 年 10 月,我国首套大型工业化内取热器在兰州炼油厂催化裂化装置试验应用取得成功,同时在这套装置上应用了国内首台大型两级烟气轮机。外取热器开发和应用也取得成功,北京设计院开发的密相下流式外取热器,于 1983 年 9 月在牡丹江炼油厂催化裂化装置上试验应用取得成功,随后应用到多套催化裂化装置上;洛阳设计院开发了上流式外取热器,于 1985 年 2 月在九江石化厂催化裂化装置上试验应用取得成功,随后也应用到多套催化裂化装置上。此外,还开发出 PV 型旋风分离器、第三级旋风分离器核心部件 EPVC 型和 PT 型两种分离单管,YL 型烟气轮机以及各种型号的隔热耐磨衬里,这些设备广泛地应用到多套催化裂化装置上(侯祥麟,2001)。从技术角度来看,喷嘴和取热器是渣油催化裂化装置的两项关键设备和关键技术。

1.1.3 催化裂解工艺研究和开发

我国催化裂化工艺技术自主创新标志性的成果就是催化裂解工艺技术(简称 DCC)。在研究和开发催化裂解工艺技术之前,石油化工科学研究院对 ZSM-5 沸石研究和制备做了大量的工作,已积累了一定的经验。ZSM-5 沸石是 20 世纪 80 年代出现的一种新的催化材料。由于 ZSM-5 沸石孔道的特殊结构,具有择形催化裂化性能。因此,当时在催化裂化工业中的应用主要是作为提高汽油辛烷值的助剂,其机理是只有直链烃分子能进入孔道,汽油中辛烷值最低的直链分子选择性裂化后,得以使汽油中其他组分的综合辛烷值提高。在武迟指导下,霍永清对 ZSM-5 沸石作为高辛烷值助剂进行了试验研究,并成功地应用到工业催化裂化装置。

李再婷以直馏轻柴油为原料,分别使用新鲜及蒸汽老化的 ZSM-5 催化剂,在常规催化裂化条件下进行裂化,研究其反应途径及裂化产品。试验结果显示,与常规催化裂化一样,有一次反应及二次反应,也有一次产品与二次产品。碳三为二次反应的产品,是由一次反应的产品—汽油,进行二次反应得到的,在催化裂化条件下,其产率约为 3%。同时还观察到一个现象,在新鲜 ZSM-5 沸石上裂化得到的碳三以丙烷为主,而在老化 ZSM-5 沸石上裂化得到的碳三以丙烯为主。从 ZSM-5 沸石作为辛烷值助剂及轻柴油在 ZSM-5 沸石上裂化的二次产品中得到的碳三组分,李再婷获得有益的启示,即 ZSM-5 沸石由于其特殊的孔道结构有望作为制取丙烯的催化剂。蒸汽老化后的 ZSM-5 更有利于烯烃的生产,正适合催化裂化

连续反应一再生的特点,由于再生温度较高,在运转过程中催化剂会自然老化。在新鲜 ZSM-5 沸石上,碳三产品中丙烷为主是由于酸性中心相对较多而导致丙烯氢转移反应的结果。此外,还认识到产品中的丁烯是一次反应的产物,但仍能再生成正碳离子而继续反应。初步选定了 ZSM-5 沸石催化剂后,自然能联想到最适合择形催化剂的原料首推直链烃类,即石蜡基原料为优选。工艺条件的选择是基于热力学的分析,大分子重油裂化只需较低的活化能,而较小分子(汽油)裂化需较高的活化能,这表明一次裂化产品——汽油二次裂化时,应在较高的温度下进行。空速的选择也以低为宜,因二次反应需较长的反应时间。借鉴蒸汽裂解制乙烯的工艺,在蒸汽裂解过程中注入了大量水蒸气,水蒸气降低了烃类的分压,进一步认识到生产丙烯的过程由于温度的升高必然产生大量的气体,一个体积增加的反应,显然是低烃分压操作更为有利。因此,在催化裂解探索试验中,就考虑到要注入较多的水蒸气。

基于上述的构思,催化裂解工艺的探索试验是在小型固定流化床(FFB)装置上进行的,采用原料为石蜡基的大庆 VGO,催化剂选用的是以前进行蒸汽裂解的碳五馏分芳构化时所用的催化剂,以高岭土为基质,含 HZSM-5 沸石,定下的第一个试验条件是 580℃,空速 1.0h⁻¹ 及水蒸气注入量占原料油的 60%。当时的思路是首先选用一个工业上可以实现的,有利于最大量生产丙烯的最苛刻的条件,而不是考虑寻找最佳的反应条件。这种决定是首先探求所设想的途径是否有研究发展的前景,如能取得较为满意的结果也为开发此技术树立信心。小型探索试验结果表明,在试验条件下,丙烯产率高达 23.4%。接下来可以从容地对多种不同沸石含量催化剂、不同原料油进行不同温度、空速、剂油比及水蒸气量的试验,以确定最佳的催化剂、原料及最佳组合的反应参数。

由于当时中国的化工市场对乙烯和丙烯需求极其强劲,如何开发能够裂解重质油制取低碳烯烃尤其是丙烯是一个十分关注的问题。令人鼓舞的小型探索试验结果一经汇报,就得到了中国石化领导及专家顾问的极大关注。中国石化副总经理张万欣与石油系统老领导李人俊、张定一及侯祥麟等来院听取详细汇报,对该项目的初步结果给予高度评价,对进一步的试验给予支持。卢成铨院长指示为该项目开绿灯,有矛盾时其他项目让路,原中型提升管催化裂化装置立即改造,进行催化裂解中型试验研究。卢成铨院长请汪燮卿副院长代表院领导主抓此项工作。汪燮卿提议成立矩阵题目组,以便于协调各研究室的工作,动员全院力量支持催化裂解中型试验研究。在中型试验的同时开展配套的研究工作,诸如气体中杂质的分析、裂解汽油的芳烃抽提、裂解汽油的选择性加氢精制、裂解柴油的调和及进一步的化工利用等。中型试验研究结果表明,对于大庆蜡油,丙烯产率超过 20%,乙烯、丙烯和丁烯之和超过 40%。1988 年完成中型试验研究,当年 9 月,通过了中国石化总公司的中型试验评议,建议尽快工业化。随后,中国石化总公司对催化裂解技术的工业应用试验进行了安排,决定在安庆石化总厂建第一套大型工业催化裂解装置,在这之前,先在济南炼油厂 0.06Mt/a 催化裂解装置上进行工业试验。因此,催化裂解首次工业试验装置规模为 0.06Mt/a,是由济南炼油厂 0.3Mt/a 催化裂化装置按催化裂解工艺要求改造而成的。在石油化工科学研究院、北京设计院、济南炼油厂和齐鲁催化剂厂通力合作,于 1990 年 11 月 11 日 10 时 40 分喷油,实现了催化裂解装置一次投料开车成功,装置运行了 6 个月,正式考核标定于 1991 年 5 月 24 日进行的,进行了 5 次标定,取得完整的工业运行数据。工业催化裂解装置考核标定结果表