



2006-2007

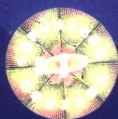
化学工程

学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN CHEMICAL ENGINEERING

中国科学技术协会 主编

中国化工学会 编著



 中国科学技术出版社



2006-2007

化学工程

学科发展报告

REPORT ON ADVANCES IN CHEMICAL ENGINEERING

中国科学技术协会 主编

中国化工学会 编著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

2006—2007 化学工程学科发展报告/中国科学技术协会主编;
中国化工学会编著. —北京:中国科学技术出版社,2007.3

ISBN 978-7-5046-4512-8

I. 2... II. ①中... ②中... III. 化学工业—研究报告—
中国—2006—2007 IV. TQ

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 022271 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:010-62103210 传真:010-62183872

<http://www.kjpbooks.com.cn>

科学普及出版社发行部发行

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:10.5 字数:252 千字

2007 年 3 月第 1 版 2007 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:28.00 元

ISBN 978-7-5046-4512-8/TQ·18

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

序

基于我国经济社会发展和国际社会竞争态势的客观要求,党中央、国务院做出增强自主创新能力、建设创新型国家的战略部署,这是综合分析我国所处历史阶段和世界发展大势做出的重大战略决策。学科创立、成长和发展,是科学技术创新发展的科学基础,是科学知识体系化的象征,是创新型国家建设的重要方面,是国家科技竞争力的标志。在科学技术繁荣、发展的过程中,传统的自然科学学科得以不断深入发展,新兴学科不断产生,学科间的相互渗透、相互融合的趋势不断增强;边缘学科、交叉学科纷纷涌现,新的分支学科不断衍生,科学与技术趋向综合化、整体化。及时总结、报告自然科学的学科最新研究进展,对广大科技工作者跟踪、了解、把握学科的发展动态,深入开展学科研究,推进学科交叉、融合与渗透,推动多学科协调发展,促进原始创新能力的提升,建设创新型国家具有非常重要的意义。为此,中国科协在连续4年编制《学科发展蓝皮书》基础上,自2006年开始启动学科发展研究及发布活动。

按照统一要求,中国力学学会、中国化学会、中国地理学会等30个全国学会申请承担了2006年相应30个一级学科发展研究任务,并编撰出版30本相应学科发展报告。在此基础上,中国科协学会学术部组织有关专家编撰了全面反映这30个一级学科的总报告——《学科发展报告综合卷(2006—2007)》。

中国科协是中国科学技术工作者的群众组织,是国家推动科学技术事业发展的重要力量,开展学术交流、活跃学术思想、促进学科发展、推动自主创新是其肩负的重要任务之一。开展学科发展研究及学科发展报告发布活动,是贯彻落实科技兴国战略和可持续发展战略,弘扬科学精神,繁荣学术思想,展示学科发展风貌,拓宽学术交流渠道,更好地履行中国科协职责的一项重要举措。这套由31卷、近800余万字构成的系列学科发展报告(2006—2007),对本学科近两年来国内外科学前沿发展情况进行跟踪,回顾总结,并科学评价了近年来学科的新进展、新成果、新见解、新观点、新方法、新技术等,体现了学科发展研究的前沿性;报告根据本学科的发展现状、动态、趋势以及国际比较和

战略需求,展望了本学科的发展前景,提出了本学科发展的对策和建议,体现了学科发展研究的前瞻性;报告由本学科领域首席科学家牵头、相关学术领域的专家学者参加研究,集中了本学科专家学者的智慧和学术上的真知灼见,突出了学科发展研究的学术性。这是参与这些研究的全国学会和科学家、科技专家劳动智慧的结晶,也是他们学术风尚和科学责任的体现。

希望中国科协所属全国学会坚持不懈地开展学科发展研究和发布活动,持之以恒地出版学科发展报告,充分体现中国科协“三服务、一加强”(为经济社会发展服务,为提高全民科学素质服务,为科学技术工作者服务,加强自身建设)的工作方针,不断提升中国科协和全国学会的学术建设能力,增强其在推动学科发展、促进自主创新中的作用。



2007年2月

前 言

根据中国科协《关于开展学科发展进展研究及发布活动的通知》(科协学发[2006]27号),中国化工学会承担了《化学工程学科发展报告(2006—2007)》的研究、编撰任务。本报告由中国化工学会石油化工专业委员会和化学工程专业委员会负责具体实施,并邀请了中国石化股份公司上海石油化工研究院院长谢在库教授担任首席科学家。

鉴于化学工程学科是一个范围很广的学科,本次研究选择了化学反应工程、化工分离工程、萃取分离工程、化工系统工程、生物化工、煤化学工程、石油化工、聚合物工程、化学工程基础、微化学工程与技术、过程工业作为报告的重点,将精细化工、无机化工等其他分学科作为下一次研究的内容。由于《化学工程学科发展报告(2006—2007)》是中国化工学会首次承担中国科协下达的“学科发展研究”任务,我们的研究还属于尝试性工作,因此本报告肯定有不少需要改进之处,希望本报告能够为以后的研究作一次铺垫。

本报告研究过程中,获得了中国石化股份公司、上海石油化工研究院以及参与此项研究工作的专家学者所在单位的大力支持。中国石化集团公司总工程师、中国化工学会理事长、中国工程院院士曹湘洪教授、中国科学院副院长李静海院士等光临学术研讨会,对研究工作给予指导。上海石油化工研究院钟思青博士、肖剑博士、徐依菡同志等也参与了相关工作。在此,对各位专家学者和工作人员的辛勤工作表示衷心感谢!

中国化工学会
2006年12月

目 录

序	韩启德
前言	中国化工学会

综合报告

化学工程学科的研究现状与发展前景	(3)
一、引言	(3)
二、化学工程学科在国民经济中的地位和作用	(4)
三、国民经济和社会发展对化学工程学科的战略需求	(5)
四、近年化学工程学科所取得的重大成果和学科进展	(7)
五、国民经济和社会发展需要化学工程学科解决的若干重大科学与技术 问题	(29)
六、发展的目标、前景展望和研究方向建议	(34)
参考文献	(38)

专题报告

化学反应工程的新进展	(43)
化工分离工程学科进展	(51)
萃取分离工程的新进展	(60)
化工系统工程的研究现状与发展	(64)
生物化工学科进展	(77)
煤化学工程研究进展	(86)
石油化工学科进展	(100)
聚合物工程进展	(111)
化学工程基础学科研究进展	(123)
微化学工程与技术研究进展	(133)
过程工业面临的挑战与研究重点探讨	(141)

ABSTRACTS IN ENGLISH

Comprehensive Report

Advances in Chemical Engineering	(151)
--	-------

Reports on Special Topics

Advances in Chemical Reaction Engineering	(153)
The Progress of Chemical Separation Engineering Discipline	(153)
Advances in Solvent Extraction Process	(154)
The Status and Development of Chemical System Engineering	(154)
Advances in Biochemical Engineering in China	(155)
Advances in Coal Chemical Engineering	(155)
Advances in Petrochemical Engineering	(156)
Advances in Polymer Engineering	(156)
Recent Fundamental Researches on Chemical Engineering	(157)
Advances in Microchemical Engineering & Technology	(157)
Challenges Faced by the Process Industry and Its Research Focuses	(158)

综合报告

化学工程学科的研究现状与发展前景

一、引言

化学工程是研究化学工业以及其他相关过程产业中所进行的物质转化、改变物质组成、性质和状态及其所用设备的设计、操作和优化的共同规律的一门工程学科。它以物理学、化学、数学的原理为基础,基础理论与工程应用相结合,涉及产品研制、工艺开发、过程设计、系统模拟、装备强化、操作控制、环境保护和生产管理等内容。

化学工程作为一门学科,最早出现于 19 世纪末期。至 20 世纪 20 年代,从理论上分析和归纳了化学类型过程工业生产的物理和化学变化过程,提出了单元操作的概念,将复杂的过程工业生产过程归纳为有限的单元操作,初步奠定了化学工程的科学基础。“单元操作”被公认为化学工程学科体系第一个阶段的标志。

20 世纪中期,在单元操作和传递过程研究成果的基础上,在各种反应过程中发现了若干具有共性的问题。对于这些问题的研究以及它们对反应动力学的各种效应的研究,构成了一个新的学科分支,即化学反应工程,从而使化学工程的内容和方法得到了充实和发展。这个时期形成的“三传一反”,即传质、传热、动量传递及反应工程,成为化学工程学科发展第二阶段的标志,也是 20 世纪化学工业与化学工程学科相互促进并迅速发展的黄金时代。

单元操作和反应工程的理论基础是化工热力学。化工热力学研究传递过程的方向和极限,为过程分析和设计提供所需的有关基础数据。随着生产规模的扩大和资源、能源的大量消耗,使得早先看来并不重要的问题逐渐突显出来。由于在化工过程中各个过程单元相互影响、相互制约,因此很有必要将化工过程看作一个综合系统,运用电子计算机和数学模型,并建立起整体优化的概念。于是系统工程这一学科在化学工程中得到了迅速发展,形成了化工系统工程这一学科分支。它是系统工程方法与单元操作和化学反应工程这两个学科分支相结合的产物。为了保持操作的合理和优化,过程动态特性和控制方法也成了化学工程的重要内容。

20 世纪末,特别是本世纪以来,国内外化工界都在关注和探讨未来化学工程的发展方向,认为化学工程在经历了单元操作和“三传一反”这两个发展阶段后,正孕育着一个新的发展阶段。随着人们对生态环境的要求日益严格,为同时满足市场对产品特定使用性能的要求以及社会和环境对生产工艺的制约,必须发展一个针对不同时间和空间尺度范围内多学科、非线性、非平衡过程和现象进行集成的系统方法。有学者认为时空多尺度是新发展阶段的本质特点。

化学工程应用领域既是国民经济建设与社会发展的重要工程领域,又与信息、生物、材料、计算机、资源、能源、海洋、航天等高新技术领域相互渗透,推动高新技术的发展。化学工程发展至今,基础理论已经非常完善,学科发展重点在于应用化学工程理论满足国民

经济和社会发展的需求。

对化学工程学科发展进行研究,有利于掌握研究动态,吸收国内外最新的研究成果,确定我国化学工程学科发展的目标和研究方向,提高研究工作的效率。对促进学科发展和提升我国自主创新能力,具有非常重要的指导意义。

由于化学工程涵盖的范围非常广泛,本报告重点探讨化学反应工程、化工分离工程、化工系统工程、生物化学工程、煤化学工程、石油化学工程、聚合物化学工程、化学工程基础学科、微化学工程与技术和过程工程等分学科,无机化工、精细化工等其他分学科作为下一次研究的内容。

经过认真思考和分析,产业界认为近两年化学工程学科的进展仍然集中体现在以“三传一反”为核心的传统研究领域,但通过与计算科学、材料科学等学科的相互交叉与渗透,在传统的化学工程研究领域引入新的研究方法和新材料,使化学工程学科取得了多方面的进展,而这些进展尤其体现在近两年的一系列重大成果产业化上。

本报告以近两年我国化学工程应用领域取得的重大成果产业化为主要内容,对化学工程学科近年的发展情况进行了回顾。根据国民经济和社会发展的需求,对化学工程学科未来发展的目标、前景和研究方向提出建议。由于这是首次进行学科进展研究,本报告肯定有不少需要改进之处,有待今后的进一步充实。

二、化学工程学科在国民经济中的地位和作用

化学工业是我国国民经济的重要支柱产业之一。据统计,2005 年我国石油和化学工业增加值完成 8 733.5 亿元,比“九五”末期增长 96%,年均递增 14.4%;销售收入 33 063.4 亿元,比“九五”末期增长 153.4%,年均递增 20.4%;实现利润 370.9 亿元,比“九五”末期增长 185.6%,年均递增 23.4%;资产总计 26 603.6 亿元,比“九五”末期增长 55.2%,年均递增 9.2%。主要经济指标占全国工业比重为:工业增加值占 13.2%,销售收入占 13.5%,利润占 25.8%^[1]。在国民经济高速增长的推动下,2005 年全国主要化工产品产量快速增长,已有 20 多种化工产品的生产和消费居世界前列,其中乙烯 7 555 kt,合成氨 45 962.5 kt,化肥 48 880 kt,硫酸 44 622 kt,纯碱 14 211 kt,烧碱 12 400 kt,甲醇 5 356 kt,醋酸 1 370 kt,纯苯 3 061 kt,聚氯乙烯 6 429 kt,染料 650 kt,涂料 3 826 kt,轮胎 3 1819.9 万条^[2],基本满足了国民经济发展的需要。由于石油和化学工业的发展离不开化学工程学科的支撑和推进,所以化学工程学科的发展同样在国民经济和社会发展中举足轻重的地位。

除石油和化学工业外,化学工程还渗透到其他学科,在信息、新材料、生物、资源、能源、海洋、航空航天等领域也得到广泛应用。例如在原子能和微电子工业中,贫矿铀的富集、核反应堆用高纯水的制造、高纯氩气和氮气的制造等,需要化学工程的支撑;在航空航天业中,高能燃料制造、太空气体分析以及载人空间飞行器和空间站舱内空气净化、CO₂ 的去除、饮用水的制备及生活污水的再利用等,需要化学工程的支撑;在新能源工业中,氢能源、燃料电池、风能和水电的开发利用,需要化学工程的支撑;在人类健康和保健中,具有血液透析、血液氧合、脱毒作用的人工肾、人工肺和人工肝的制造,需要化学工程的支

撑。日常生活中,果汁、白糖、生啤、食盐等制造也离不开蒸发、膜滤、结晶或电渗析等化学工程技术。

三、国民经济和社会发展对化学工程学科的战略需求

我国是世界上最大的发展中国家,我国国民经济需要继续保持高速发展。为实现可持续发展的要求,需要资源、环境、经济和社会的和谐发展。这对化学工程学科提出了战略性需求。

(一)能源、新能源和替代石油资源的需求

目前我国化石能源资源在世界已探明储量中,石油占 2.7%,天然气占 0.9%,煤炭占 15%,但三者的产量却分别占全球总量的 4.2%、1.5%和 33.5%。国民经济的高速发展需要更多能源的支撑。2005 年,我国原油进口已达 127 Mt。如果到 2020 年全社会汽车保有量控制在 1 亿辆左右,预计届时石油需求量约 450 Mt,如果按照近年石油消费增长速度发展,则有可能突破 600 Mt^[3]。因此,开发更多的能源及高效能源利用技术,对保持国民经济持续增长意义重大。能源技术开发需要化学工程学科的支撑。

从长远发展战略看,石油、煤、天然气都是不可再生资源。着眼未来,必须大力推广以可再生能源为主的多元化能源,尤其是生物乙醇和生物柴油等新能源。我国十分重视能源多元化问题,目前已建成四大燃料乙醇基地,总产能超过 1 Mt/a,但与总需求相差甚远。2006 年 1 月 1 日起,我国正式实施《中华人民共和国可再生能源法》,进一步推进了可再生能源资源的发展。由于目前国内外燃料乙醇生产大都以淀粉和糖基农作物为原料,这在一定程度上制约了燃料乙醇的进一步发展,未来必须转向以玉米秸秆等农作物废弃物和城市垃圾为原料的新生产工艺。为此,需要进行相关技术的开发,满足国民经济可持续发展的需求。而这些再生资源利用技术的开发同样是化学工程学科在新世纪内最重要的研究课题之一。

石油作为使用最方便的液体燃料,是国民经济发展和国家安全最重要的战略物资之一。然而,石油资源日益枯竭,国际油价高升,使国民经济的稳定发展和国家安全面临严峻的挑战。为此,国内外石油替代技术开发十分活跃。2005 年我国原油产量 181 Mt,进口量 127 Mt,消费 320 Mt,石油对外依存度为 43%,我国能源的安全问题十分突出^[4]。从近期看,发展煤基合成油、以煤为原料经甲醇合成低碳烯烃等化工技术是替代石油资源的可取途径。

我国煤炭资源储量约 1 000 Gt,可供开采量约 200 Gt,按 2004 年产量 1.9 Gt 计,约可开采 100 年^[5]。如通过直接或间接液化工艺将其部分转化为液体燃料,无疑是解决我国石油资源不足的最有效途径之一。中国科学院山西煤炭化学研究所(以后简称中科院山西煤化所)经过 20 余年努力,于 2001 年建成 kt/a 级以煤为原料间接法浆态床合成油试验装置和催化剂制备装置,目前正在规划 100 kt/a 级工业示范装置。但建设 Mt/a 级工业装置还面临许多工程问题,必须加快相关化学工程技术开发进程。

(二) 化工新产品的需求

据预测,2010 年我国原油、乙烯等产品产量较目前有较大幅度的增长,但自给率仍然较低,其中原油为 54.55%,乙烯为 61.17%,芳烃、五大通用合成树脂和合成橡胶分别为 62.75%、51.08% 和 69.0%^[6]。

高新技术的发展,对新材料、新功能化学品提出了需求。其中新材料包括有机硅材料、有机氟材料、纳米材料、工程塑料和功能膜材料等。新功能化学品包括电子化学品、建筑化学品、汽车化学品、功能性涂料、粘合剂、密封胶、水处理剂及生物化工产品等。预计“十一五”期间,我国将成为仅次于美国和日本的世界第三大化学品生产国^[7]。新材料和新功能化学品的战略需求,离不开化学工程学科的支撑。

(三) 过程工业提高生产效益的需求

2004 年我国国内生产总值约占全球的 4%,但消耗一次性能源却占全球的 12%。其中化学工业作为原料消耗的能源占总能源消耗的 40%,化工行业单位产值能耗为美国、加拿大和墨西哥的 4.1 倍^[7],所以,各种节能技术的潜力很大。根据我国“十一五”化学工业降低能耗的目标设想^[8]:石油天然气开采下降 1%~2%;原油加工同比下降 10.6%,达 66 kg 标油/t;乙烯降到 650 kg 标油/t,同比下降 6.2%;合成氨降至 1 600 kg 标煤/t,同比下降 6.5%;烧碱约低于 1 200 kg 标煤/t;其他主要产品能耗也得有不同程度的下降,以使 5 年内总能耗下降 20%。如此设想,除通过提高原料档次节能措施(如用天然气替代煤制合成氨,每吨氨可从 2 t 标煤/t·氨下降到 1.15 t 标煤/t·氨)以及提高技术装备水平节能措施(如用离子膜碱替代隔膜碱,每吨产品可降低能耗 0.41 t 标煤)外,目前正在开发的各种化学工程新技术,如膜分离技术、超临界流体技术以及各种相关耦合和集成技术将会在化学工业等行业的节能降耗中发挥重要作用。

(四) 可持续发展的需求

人口、资源、环境的相互协调发展是构建和谐社会的一个重要组成部分,国民经济的高速发展绝不能以牺牲环境为代价。然而,目前我国环境污染问题还相当突出,并影响到国民经济的持续增长和国民身体健康。在全国检测的 340 个城市中,城市空气质量达到二级以上的城市仅占 41.5%,而劣于三级的有 91 个,占 26.7%^[9]。

据统计,我国石油加工、炼焦和化学原料制品制造业废水排放量占全国工业废水排放总量的 17.5%,居第一位;废气、烟尘和粉尘排放量分别居全国第四位和第三位;固体废弃物产生量和排放量分别占全国工业固体废弃物的 7.8% 和 6.8%,危险废物产生量居第一位^[10]。

根据《2004 年中国海洋环境质量公报》报道,我国海洋重度污染区主要集中在黄海的江苏沿岸海域,东海的长江口,杭州湾和宁波近岸局部海域,黄海和东海重度污染面积为 28 760 km²,占全国海域重度污染面积的 89.7%^[11]。而这些地区又是我国化学工业的主要生产区。

所以,我国废水、废气、废渣问题已严重地威胁着人类的生存,如不及时处理,将给予

孙后代带来严重的隐患,也在一定程度上制约我国国民经济的进一步发展。

生态园区建设是化学工业实施可持续发展最重要的措施之一。通过物流、能流和信息流相互关联,达到资源、能源、投资的最优利用,并能从根本上解决资源—环境—经济的可持续发展,实现人类生产活动与自然的协调发展。目前生态工业园区建设已成为国际研究前沿。生态园区的建设、根治“三废”、“变废为宝”是化学工程学科 21 世纪面临的严峻课题。

四、近年化学工程学科所取得的重大成果和学科进展

我国产业界、学术界和工程界携手合作,通过多年持续不断的协力攻关,在石油和化学工业领域取得了多项关键性技术突破,实现了多套化工装置的大型化和国产化,取得了一批具有自主知识产权、达到国际领先或先进的技术成果,如己内酰胺技术、乙烯生产技术、多产异构烷烃的催化裂化技术(MIP)、芳烃联合装置生产技术、乙苯/苯乙烯生产技术、聚丙烯技术、双向拉伸聚丙烯(BOPP)技术、生物质乙醇/乙烯技术、煤化工(煤气化/甲醇反应器/甲醇制烯烃(MTO))、大型聚酯工程等,有力地促进了化学工程学科的进展。

(一)重点领域技术取得了突破性进展,一批成果达到世界领先水平

1. 非晶态合金和磁稳定床技术

非晶态合金是一类具有短程有序、长程无序结构特点的新材料。由于它具有独特的电磁性能、机械性能和耐磨性能,已被广泛应用于配电设备、电动机、电磁传感器等电力设备的制造。作为催化材料的研究国外始于 1980 年。非晶态合金具有表面缺陷多和表面原子配位不饱和的特点,所以催化活性中心数目多、催化活性高,另外所有金属和类金属均可形成非晶态合金,而且组成变化大,非晶态合金符合具有开发前景的新催化材料领域的要求。但非晶态合金是由有序结构的原子簇混乱堆积而成,在热力学上属于非平衡的亚稳态,限制了它在催化反应中的应用。中国石化石油化工科学研究院(以下简称石科院)通过将大半径稀土原子引入非晶态合金,可阻止镍原子的迁移,使其晶化温度由 355 ℃ 提高到 520 ℃。成功开发了非晶态镍铝合金及适合于黏稠、易氧化体系的急冷关键设备,如坩埚、喷嘴、铜辊等;同时将碱洗废液用于分子筛合成,实现零排放清洁生产,最后制成骨架化、多孔、比表面积大的 Ni-Al 非晶态合金催化剂^[12]。

磁稳定床是以磁性颗粒为固相、在均匀磁场下形成的特殊床层形式,它兼有固定床和流化床的优点,可以强化反应过程。Exxon 公司 20 世纪 60 年代就将磁稳定床作为导向性基础研究的重要领域,但主要集中于气-固反应体系的研究。Ni-Al 非晶态合金催化剂具有优异的低温加氢活性,且磁性也满足磁稳定床的要求。石科院将磁稳定床反应器开发作为新反应工程基础研究的重点方向,并开展冷模实验,通过实验认识了磁稳定床的床层结构与磁场强度、催化剂物性、流体流速等操作参数间的关系,得到了磁稳定床的操作相图。通过优化线圈设计,优化线圈安装间距,设置磁隔栅内构件,采用强制水冷,建立了均匀磁场放大设计的数学模型,解决了均匀磁场放大和线圈长周期安全运转的技术难题,使磁稳定床能够应用于大规模的工业化过程中。

利用非晶态镍合金具有的铁磁性特点,与具有流化床和固定床优点的磁稳定床相结合,开发了磁稳定床己内酰胺加氢精制新工艺^[12-13]。经过小试、冷模中试后,在中国石化巴陵分公司建成一套 6 kt/a 的工业示范装置,空速为一般固定床的 20~30 倍,与釜式反应器相比,杂质加氢脱除效果提高 3~5 倍,催化剂耗量降低 50% 以上,而且动力消耗少。目前已建成两套 250 kt/a 的工业装置,在国际上首次实现了磁稳定床反应器的工业应用。

2. 甲苯歧化与烷基转移技术

甲苯歧化与烷基转移技术是生产苯和二甲苯的重要途径,它贡献的苯和二甲苯占整个芳烃联合装置苯和二甲苯产量的 50%~70%。芳烃联合装置的催化重整和甲苯歧化装置的副产碳十及其以上重芳烃主要用作燃料或高沸点溶剂油,产品附加值低,造成资源损失。因此,如何加工和利用好碳十芳烃是国内外研究的重大课题。

国外甲苯歧化与烷基转移技术以甲苯和碳九芳烃为原料生产苯和二甲苯,碳十芳烃则是副产品。为综合利用碳十芳烃,增加了加氢脱烷基装置把碳九和碳十芳烃转化为苯和二甲苯,增加了投资,而且氢气消耗多,成本高。

中国石化上海石油化工研究院(以下简称上海石化院)发明了一种由非贵金属和特殊的高硅沸石组成的新型分子筛催化材料^[14-15],这种催化材料由采用专有的方法把金属均匀分散在高硅沸石上而合成,具有抗水、耐结焦和处理高碳十芳烃含量原料的能力,而且在高负荷和高转化率下仍具有高选择性、高稳定性的优点。以该催化剂为核心,开发的甲苯歧化与烷基转移成套技术,在一个反应器里不仅完成甲苯与碳九芳烃的歧化与烷基转移过程,而且同时实现了碳十芳烃轻质化生成高附加值苯、二甲苯的过程,可使芳烃联合装置副产物重芳烃减少 50%,苯和二甲苯增产 5%,开辟了廉价碳十芳烃综合利用的新途径。

为解决装置大型化带来的核心设备反应器的放大问题和装置的节能,上海石化院采用流体力学模拟技术,开发了具有锥型挡板的新型气体预分布构件的大型轴向固定床反应器,使大型轴向反应器气流更加均匀;采用流程模拟技术,首次开发了分馏系统全热集成技术,较大幅度地降低了甲苯歧化装置的能耗;首次在国内的甲苯歧化装置中应用了高效焊接板式换热器,充分回收反应产物的热量,并有效解决了设备大型化带来的工程问题。该技术已申请和获得授权数十项中国专利和外国专利,形成了从催化剂、核心设备到工艺流程的专利保护体系,主要技术经济指标达到国际领先水平。在与国外著名专利商的竞标中,多次竞标成功,成套技术在国内的新建和改扩建市场占有率达 100%,催化剂全面替代进口。成套技术和催化剂还成功推广至国外装置。

该成套技术工业应用有效地解决了低附加值碳十芳烃的出路问题,该技术出口海外,使中国从长期引进歧化技术的国家变成了歧化成套技术出口国意义重大。

3. 己内酰胺技术

己内酰胺(CPL)主要用于生产聚己内酰胺纤维树脂,广泛应用于纺织、汽车、电子、机械等领域,尤其在工程塑料领域增长较快。2004 年,中国 CPL 表现消费量达 697 kt,产量为 248 kt,自给率仅 35%,是需要大力发展的产品。

世界上普遍的生产方法是荷兰 DSM 公司的 HPO 法。该工艺以苯/环己烷为原料经过氧气无催化氧化生成环己酮、环己酮与硫酸羟胺发生肟化反应生成环己酮肟、环己酮肟再在发烟硫酸作用下发生贝克曼重排反应生成 CPL。该工艺在羟胺合成、肟化反应、重排反应三道工序都使用硫酸,氨中和后产生大量的副产物硫酸铵,而硫酸铵的经济价值较低,存在生产成本低、环境污染严重的问题。

国内己内酰胺生产一直依赖国外技术,中国石油化工集团公司(以下简称中国石化)通过引进国外技术相继建成了 3 套 50 kt/a 的己内酰胺生产装置,由于受其工艺流程长、生产技术复杂、操作难度大、环境污染严重、制造成本高等原因,生产企业一直处于亏损状态。为增强企业竞争力,中国石化致力于开发具有自主知识产权的己内酰胺生产新工艺,实现低投入、高产出,组织石油化工科学研究院、巴陵分公司、中国科学院大连化学物理研究所(以下简称中科院大连化物所)、湖南大学等科研院所,进行环己烷仿生催化氧化、环己酮氨肟化、环己酮肟气相重排、CPL 精制等新工艺的开发,已获得突破性进展^[12-13,16]。

仿生催化氧化工艺保留了原环己烷氧化工业生产中直接使用空气作为氧源的优点,降低了反应温度和压力,提高了单程转化率和总收率,减少了过程能耗和废液排放量,氧化副产物由多种复杂组分变为以己二酸为主要组分,己二酸的回收利用还可以提高经济效益。该技术在物耗、能耗、环保等方面具有明显的优势,已完成工业应用试验,经济技术指标先进,技术具有独创性。

环己酮氨肟化工艺将环己酮、氨、过氧化氢置于同一反应器中,采用钛硅分子筛催化剂一步合成环己酮肟。与其他工艺相比,具有流程短、环境友好、反应条件温和、设备投资低的优势。

在固体酸催化剂作用下,环己酮肟气相重排成 CPL,由于不使用硫酸和氨,也就不产生副产物硫酸铵,可以大幅度降低生产成本。

己内酰胺加氢精制新工艺利用非晶态镍合金具有的铁磁性特点,与具有流化床和固定床优点的磁稳定床相结合,开发了磁稳定床己内酰胺加氢精制新工艺,在国际上首次实现了磁稳定床反应器的工业应用。

中国石化开发的 CPL 成套新工艺,具有流程短、反应步骤少、反应条件温和、产品质量优、杂质种类与数量少、三废少、投资少、运行成本低、环境友好的优点,拥有自主知识产权,填补了国内己内酰胺产品生产技术的空白,技术成熟可靠,已分别用于中国石化巴陵分公司和中国石化石家庄炼化股份有限公司己内酰胺装置的扩能技术改造和新装置建设。

清华大学与中国石化石家庄炼化股份有限公司合作,开展了甲苯法己内酰胺萃取过程的研究,开发了基于新的混合溶剂萃取新工艺,完成了工业试验。工业运行指标:萃取单元总收率提高 0.6%,溶剂再生能耗减少 50% 以上,单元萃取处理能力超过 160%,己内酰胺产品的光密度由 0.07~0.08 下降到 0.05 左右,解决了原引进装置产品质量差、操作成本高的问题,在己内酰胺萃取领域属国际先进水平^[17]。

(二) 成套技术集成再创新取得重大进展

1. 芳烃联合装置成套技术

芳烃联合装置由预加氢、催化重整、芳烃抽提、二甲苯分馏、甲苯歧化、吸附分离、二甲