

# LNG

## LNG利用研究论文集

华贲 主编

石油工业出版社

# LNG 利用 研究 论文 集

华 贵 主 编

石 油 工 业 出 版 社

## 内 容 提 要

本书汇编了近年来华南理工大学天然气利用研究中心的科研人员发表在国内相应领域著名杂志上的论文 30 余篇。内容包括 LNG 作为资源与能源的综合利用途径,国际与国内天然气价格机制、价格走势与市场分析,LNG 冷能利用技术,以天然气为燃料的分布式能源系统,天然气的下游应用技术,天然气特别是 LNG 汽车产业链的开发 6 个部分。本书内容丰富,论点鲜明,论据充足,有独到见解。可供与天然气和 LNG 产业链相关的企业、高校、研究机构、政府部门的管理和技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

LNG 利用研究论文集/华贲主编.  
北京:石油工业出版社,2007. 11  
ISBN 978-7-5021-6294-8

- I. L…
- II. 华…
- III. 液化天然气—综合利用—文集
- IV. TE64-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 157806 号

---

出版发行:石油工业出版社  
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)  
网 址:www. petropub. com. cn  
发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店  
印 刷:成都市新都华兴印务有限公司

---

2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷  
787×1092 毫米 开本:1/16 印张:11.75  
字数:295 千字 印数:1—1600

---

定价:38.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

## 序 一

近年来,我国经济的持续快速发展引致能源消耗,尤其是煤炭和石油消耗量的快速增长,加剧了整个国家能源、环境形势的严峻局面。我国政府在 2004 年发布的能源战略中,制定了包括加速引进海外 LNG 的加快发展天然气、调整能源结构、改善生态和环境的规划。

发达国家在国际市场油气低价位的有利条件下,30 多年来,通过天然气和 LNG 贸易,已使天然气在其一次能源中的构成达到近 1/4。而我国 LNG 贸易近几年才开始,而且在第一个  $370 \times 10^4 \text{t/a}$  级的澳大利亚—广东大鹏 LNG 项目刚刚生效时,就赶上了 2005 年新一轮国际石油价格大幅度上涨。从而造成了国际天然气和 LNG 贸易的 FOB 价格成倍上涨的局面。这给急需快速发展的我国天然气产业带来了极大的冲击和困惑。严峻的环境形势要求天然气快速发展,因为无论煤的洁净利用,还是核能及各种可再生能源,都不可能在短期内大幅度改善环境。目前,天然气国际贸易价格上涨,使国内天然气与煤的等热值比价达到 2.5~3.0 的状况,原来进口 LNG 项目主要依靠联合循环发电作为下游最大用户的规划已经在经济上很难实现。LNG 产业发展面临着两难的局面。

在这种形势下,华南理工大学天然气利用研究中心在华贲教授的领导下,面对上述诸多亟待研究解决的问题,发挥华南理工大学多学科交叉集成的优势,并广泛团结国内各相关领域的专业技术力量,开展了一系列的工作。如在论证只有通过分布式能源系统使天然气最高效利用才是承受高气价的唯一出路,天然气资源与能源协同优化利用,LNG 冷能的综合利用,LNG 产业链的开发,天然气经济领域中价格、市场走势等方面都取得了创新性的、有影响的成果。这些成果,除了反映在多次国际和全国性学术论坛上发表的专题报告之外,也在多种刊物上发表了数十篇论文。这里收集汇编的,是其中的一部分。可供有关人士研究参考,这对促进我国 LNG 事业的发展,是很有价值的。

中国工程院院士、清华大学教授



2007 年 7 月 31 日于北京

## 序 二

我国天然气地质储量为  $6.69 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 还有埋深 2 km 以内的煤层气资源量约  $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。为了满足工业、交通快速发展和改善主要因燃煤所造成的大气污染, 我国能源规划把加速发展天然气作为重要部分。到 2020 年, 天然气消耗将达  $2200 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 折合  $2.2 \times 10^8 \text{ t}$  油当量, 约相当于当时原油耗量的一半。其中, 近 4 成天然气须靠进口, 包括陆上跨国管道运输和海路船运液化天然气(LNG)。由于我国的天然气资源中有相当比例是分散、低丰度的中小气田, 采用就地液化—槽车运输—卫星气化站再气化的开发运营模式更为经济。因此, 在迅速扩大的中国天然气市场格局中, 通过 LNG 方式运营是一个十分重要而且将获快速发展的途径。

世界 LNG 贸易已有近 30 年历史, 而我国在几年前刚刚起步, 对相关的技术、工程、经济等领域的研究也开展较晚, 从事者寥寥。

华贲教授及其领导的华南理工大学天然气利用研究中心虽然在 3 年前才正式开展 LNG 相关领域的研究, 但已完成了多项重要的工程研究课题, 发表了论文 40 余篇。可贵的是, 这些论文中有许多都是既与实际工程密切结合又有一定理论深度的研究成果, 具有独到的见解和较高的学术水平。有些已被有关方面所采纳、应用, 取得了经济效益。

本人从事天然气勘探开发和发展战略研究及实践 20 余年, 深感天然气上、中、下游一体化研究开发的不足和滞后。华贲教授等的工作, 在天然气利用几个领域都起到了开拓性的作用。特此向读者推荐, 并希望能很快见到论文集的续集出版, 展示他们新的研究成果。

张 抗

2007.7 于北京

# 前 言

进入 21 世纪以来,中国经济的持续快速发展驱动了能源消费的大幅度增长。中国的能源资源状况决定了能源供应增长的部分主要依靠煤炭,从而使煤炭在中国一次能源中所占的比率在 2006 年上升到近 70%。由此而引致污染物排放量持续增加,环境进一步恶化。在这种形势下,我国政府于 2004 年正式出台了“节能优先,效率为本,煤为基础,多元发展,立足国内,开拓海外,统筹城乡,合理布局,依靠科技,创新体制,保护环境,保障安全”的能源战略,并确立了加速发展清洁的天然气和加速引进海外的 LNG 的能源结构调整战略。到 2020 年我国天然气消费量将达  $2200 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 约合  $2.5 \times 10^8 \text{ t}$  油当量,其中约  $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$  天然气需从国外进口。为此,沿海有 10 个 LNG 接收站已在策划和建设中。

国际 LNG 贸易已经开展了 20 多年。但我国第一个以 LNG 槽车运输、卫星气化站形式利用天然气的中原油田项目,自 20 世纪末才开始运作,规模也只有  $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ;第一个  $370 \times 10^4 \text{ t/a}$  级的广东大鹏船运 LNG 终端站,2003 年才开始建设。至于 LNG 从勘探开发、液化净化、国际贸易,到运输再气化、冷能利用,直至下游市场开拓的全产业链开发和利用的一系列技术、工程和经济课题的研发,在国内都还处于空白,亟须投入力量,奋起直追。在这种形势下,华南理工大学天然气利用研究中心于 2004 年 11 月正式成立。

面临上述诸多综合性的研究课题,华南理工大学天然气利用研究中心在研究工作的组织上立足于多学科交叉集成和协同;在管理体制上是以项目带动,团结、融合各学院、各类专业技术力量,共同取得创新成果。两年多以来,中心积极配合我国 LNG 事业的需要,立足国情,从宏观发展战略研究到具体的应用技术开发,开展了一系列的工作,取得了初步的成果。目前已完成深圳市发展改革局委托的以 LNG 为主要原料的“深圳 LNG 生态化工园区规划”项目,深圳大鹏 LNG 公司委托的“广东 LNG 下游供气品质标准及对策研究”项目,以及“中海油福建 LNG 项目冷能利用规划”、“福建德化 LNG 接收站冷能利用规划”、“广州市开发区萝岗循环经济规划—萝岗中心区能源规划”等多个项目。还有一批与国内外公司、大学、研究机构合作或受委托开展的科研开发项目正在进行或筹划中。截至 2006 年年底,中心已申请中国发明专利 5 项,获得批准实用新型专利 1 项。

在完成这些委托研究开发项目的同时,华南理工大学天然气中心的骨干研究人员也投身于近年来因国际石油价格剧烈变动而受到冲击的国际、国内 LNG 贸易、价格、市场走势等方面的研究,参与组织了多次国际和全国性学术论坛,并发表专题报告。本书收集汇编的是分散发表在十多种刊物上的、反映主要骨干近两年来在 LNG 领域理论和工程研究成果的部分论文,以便与各界人士、专家、学者交流探讨,共同促进我国 LNG 事业的发展。

在本书编辑过程中,广东油气商会和《天然气工业》杂志社做了大量的工作,促使本书的顺利出版,在此表示衷心感谢。

华 贲

2007 年 5 月 25 日于广州

# 目 录

## LNG 资源作为能源与化工原料资源的优化利用

- 利用海外 LNG 资源的战略思考 ..... 华 贲(3)
- 炼化化工产业资源与能源的集成优化配置 ..... 华 贲(8)
- 液化天然气轻烃分离流程模拟与优化 ..... 华 贲 熊永强等(13)
- 用好轻烃资源优化我国乙烯工业原料路线 ..... 华 贲 郭 慧等(17)
- 重视天然气资源和能源的综合优化利用 ..... 华 贲 郭 慧等(23)
- 加快发展煤层气产业 ..... 李亚军 郭 慧(28)

## LNG 项目的规划、价格与市场

- 试论国际 LNG 价格走势与下游供气成本控制及价格策略 ..... 华 贲(33)
- 中国 LNG 产业链的发展策略探讨 ..... 华 贲(42)
- 中国进口 LNG 项目如何摆脱价格和市场的困局 ..... 华 贲(48)
- LNG 接收站选址的思考 ..... 华 贲(54)

## LNG 汽化过程的冷能利用

- LNG 冷能利用现状及发展前景 ..... 李 静 李志红等(61)
- LNG 冷量优化集成利用技术 ..... 徐文东 华 贲等(65)
- 低温粉碎橡胶技术在我国的发展前景 ..... 杨艳利 华 贲等(68)
- 液化天然气冷量利用与轻烃分离集成优化 ..... 熊永强 李亚军等(72)

## 分布式冷热电三联供能源系统是天然气高效利用的最佳途径

- 分布式能源系统对中国天然气下游市场开拓的重要性 ..... 华 贲 左 政等(79)
- 分布式能源系统:联产和联供 ..... 龚 婕 华 贲(88)
- 我国分布式能源发展战略探讨 ..... 华 贲(94)
- 基于环境焗经济学的分布式能源系统设计与运行优化策略研究 ... 岳永魁 田中华等(100)

发展以分布式冷热电联供为核心的第二代城市能源供应系统·····	华 贲(105)
优化利用天然气资源 大力建设分布式能源站·····	华 贲 赖元楷(112)
分布式能源与天然气产业在中国协同发展的历史机遇·····	华 贲 龚 婕(120)

## 天然气下游市场应用技术

天然气管网压力能用于废旧橡胶粉碎的制冷装置·····	熊永强 华 贲等(129)
天然气能源利用技术在中国的发展战略探讨·····	华 贲 岳永魁等(134)
天然气与人工煤气的快速经济置换·····	罗东晓 李 明(139)
研制高适应性燃具的必要性·····	罗东晓 赖元楷(144)
液化天然气燃具基准气的选择·····	罗东晓 欧翔飞(149)
用于燃气调峰和轻烃回收的管道天然气液化流程·····	熊永强 华 贲等(152)
制定中国天然气质量标准的紧迫性·····	华 贲 李 明等(156)
天然气直接固体氧化物燃料电池研究进展·····	刘军民 廖世军(161)

## 天然气作为车用燃料

LNG 汽车在我国的发展优势及其产业链分析 ·····	熊 标 华 贲等(169)
加速开发中国 LNG 汽车产业链 ·····	华 贲 熊 标(173)



LNG 资源作为能源与  
化工原料资源的优化利用



# 利用海外 LNG 资源的战略思考

华 贲

我国政府 2004 年制定的全面能源发展战略中,一个重要策略就是用好国内外两种资源、两个市场。因为我国人均资源占有量不到世界平均水平的一半,而我国经济总量迅速扩大,长时间大量依靠国外能源将不可避免。我国政府、相关部门和公司在引进国外资源上都做了很大努力,从国外进口石油、天然气(NG)等清洁能源和战略资源。我国第一个引进液化天然气(以下简称 LNG)的深圳大鹏项目已于 2004 年 3 月正式开工;与俄罗斯、委内瑞拉等国的能源谈判也正在进行。如何引进并用好能源资源,是必须认真研究的战略问题。

## 一、国外 LNG 市场概述

海上 LNG 市场从 20 世纪 80 年代开始,年贸易量超过  $1 \times 10^8$  t。主要买家有日本、韩国、中国台湾等。2004 年开始石油市场新一轮的价格持续高涨,刺激了天然气市场的拓展。美国政府加紧了对世界天然气资源的争夺和控制,放缓开发本土油气,加紧进口,计划建设 40 个 LNG 接受港口终端站,并签署了在卡塔尔建设年产  $3000 \times 10^4$  t LNG 生产基地的意向性协议。

中国政府已制订的能源发展战略中,重视了 LNG 的引进。在 2020 年计划耗用的  $2200 \times 10^8$  m<sup>3</sup> 天然气中,进口 LNG 约  $1000 \times 10^8$  m<sup>3</sup> (约  $1 \times 10^8$  t 油当量)。已计划建设 7 个 LNG 接受港口终端站。2015 年以前,中国将建造 30 多艘大型 LNG 船。预计 2010 年进口 LNG 将达到  $1900 \times 10^4$  t,2015 年为  $3300 \times 10^4$  t,2020 年为  $6700 \times 10^4$  t。近几年,世界 LNG 将在 2000 年  $1 \times 10^8$  t 的基础上新增  $1 \times 10^8$  t 以上的生产能力(见表 1),其中相当一部分尚未确定市场目标。估计世界 LNG 市场将按 8% 以上的速度发展,单从数量上看,可以满足中国逐渐扩大的需求。

表 1 世界新建扩建的 LNG 项目表

国家	项目数量	投产时间	生产能力( $10^4$ t/a)	市场目标
马来西亚	1	2002 年 12 月	600	印度、日本
卡塔尔	1	2003 年	1000	印度
澳大利亚	6	2004—2005 年	2500	日本、印度、中国内地
印度尼西亚	3	2005—2007 年	2600	日本、韩国、中国
俄罗斯	2	2005 年	1200	
也门	1	2005 年	530	
埃及	1	2005 年	360	法国
伊朗	1	2010 年	1000	
特里尼达/多巴哥	1	2003 年	660	西班牙、美国
尼日利亚	1	2005 年 5 月	280	西班牙、葡萄牙
安哥拉	1	2002 年	400	
合计			11130	

从储量上看,俄罗斯、伊朗、卡塔尔、沙特阿拉伯、伊拉克、科威特、阿联酋、委内瑞拉、尼日利亚排前 9 名,应是未来提供 LNG 的潜力供应商,其中特别要关注俄罗斯。

但 LNG 市场也不仅仅是一个贸易问题,既包括各大国之间在经济、政治和军事各方面错综复杂的关系,也包括了在投资、贸易等方面各跨国公司之间的激烈竞争。我们要用好国外 LNG 资源,进入国际 LNG 市场,不是一个简单的问题。

## 二、天然气产业链与石油化工产业链的关系

从国外购买油气资源不是一个简单的贸易问题。油气资源的开发利用是一个产业链。源头是油气田的勘探和开发。油气采出以后,通过集输和初步分离,主要有 3 种产品,即原油、凝析油和天然气。“天然气”有两种:一种是含 10%~20%的乙烷、丙烷( $C_2^+$ )的“湿气”,另一种是含甲烷 95%以上的“干气”。天然气分离净化后的产业链的发展有两个路线:一个是通过管道或就地液化运输到市场销售;另一个是把湿气中的乙烷和丙烷分离出来,连同凝析油一起就地建设乙烯加工厂,以水蒸气裂解法制备乙烯作为商品销售。因此,以天然气为源头的化工产业链前端包括下列 5 个环节:①勘探开采;②集输净化;③分离;④运输(管道或 LNG 船);⑤对碳一化工,是甲烷的转化;对非碳一化工,是  $C_2^+$  裂解制乙烯。中东几乎全部和美国的 3/4 乙烯裂解原料是  $C_2^+$  和凝析油等轻烃。

一般的石油化工产业链的前端,是炼油厂的加工产品,从石脑油到加氢尾油的石油馏分,也包括  $C_2$  到  $C_4$  轻烃为原料的水蒸气裂解制乙烯和丙烯,占石化工业中端(三大合成和化工中间体)原料资源的 70%(另外 30%主要是  $C_4$ 、 $C_5$  轻烃和芳烃)。包括聚乙烯、聚丙烯及其他三大合成产品及中间体经后续加工成各种纤维、塑料、橡胶和精细化工产品的是产业链的下游(末端)。因此可以说,乙烷和乙烯是天然气非一碳化工产业链和石油化工产业链的交汇点。

## 三、天然气中的 $C_2^+$ 轻烃是乙烯工业的极好原料

引进 LNG 对我国整个国民经济特别是石化工业的发展具有重要的战略意义。作为城市燃气、负荷中心的电站燃料、汽车燃料和即将高速发展的“第二代能源供应系统——冷热电联供的分布式能源系统(DES/CCHP)”的燃料,对优化我国能源结构、提高能源利用效率、改善生态和环境,具有十分重要的意义。

与此同时,必须强调指出,天然气,特别是含有大量的  $C_2$ 、 $C_3$  烷烃的“湿天然气”和主要由  $C_3$ 、 $C_4$  构成的凝析油,都是乙烯工业的极好原料。乙烯工业是石油化工的龙头,是衡量一个国家石化工业发展的重要标志。乙烯成本中裂解原料费用所占比例很大,以石脑油和柴油为原料的乙烯装置原料费用占总成本的 70%~75%。用乙烷丙烷代替石脑油为裂解料,投资可节省 30%,能耗降低 30%~40%,综合成本降低 10%。中东以乙烷为原料生产乙烯,其乙烯生产成本低达 100 美元/t。而我国由于原油偏重、轻烃收率低,天然气开发利用起步晚,乙烯原料过于依赖国内炼油厂,导致乙烯装置原料品种杂而且偏重。按 2002 年数据,石脑油占 60%、柴油占 11%、加氢尾油占 12%,轻烃只占 10%,成本高达 530 美元/a。2003 年国内乙烯平均能耗为 30.6 GJ/t,几乎高出国外先进水平(17.3 GJ/t)的 1 倍。

我国乙烯工业目前正以极快的速度发展,但自给率仍只有 30%~40%。表 2 列出了近年来我国乙烯原料构成的变化情况。1998 年以前,我国乙烯原料近半数柴油及更重组分;与国外比较,直到 2002 年,我国乙烯原料仍是世界最重的国家;轻烃只占原料构成的 1/10(见表 2)。这是与我国石油偏重,并采取乙烯原料主要立足于国内炼油企业的策略分不开的。

表 2 我国乙烯装置原料构成表

年份	乙烯产量 (10 <sup>4</sup> t/a)	原料总量 (10 <sup>4</sup> t/)	原料组成(%)					乙烯耗原料比 (t/t)
			轻烃	石脑油	柴油	加氢尾油	其他	
1992	200.34	694.30	10.00	35.70	52.70	1.60	—	3.466
1996	303.67	1026.00	6.94	47.01	38.56	7.46	0.03	3.379
1998	377.24	1232.64	5.51	47.51	30.22	10.87	5.89	3.267
2000	469.77	1504.91	5.54	61.52	12.63	11.90	8.41	3.204
2002	541.90	1727.45	10.61	59.97	11.37	12.17	5.88	3.187

用乙烷生产乙烯装置生产成本为 200~240 美元/t,采用石脑油为原料制乙烯成本为 320~500 美元/t,而我国的乙烯生产成本更高。按照目前的规划,到 2010 年中国将增产乙烯约  $900 \times 10^4$  t/a,总产量将达  $1500 \times 10^4$  t,自给率提高到 56%。如果按目前的乙烯原料路线,则需新增裂解料  $2900 \times 10^4$  t,折原油约  $9500 \times 10^4$  t/a。中国炼油厂将为此付出沉重的负担,石油对外依存度也进一步加大,给我国能源安全带来更大的隐忧。因此,通过从国内开采和进口的 LNG 中分离出  $C_2^+$  作为乙烯原料,对保证我国石化工业的原料供应、提高乙烯工业竞争力意义重大。按 2010 年产乙烯  $1500 \times 10^4$  t 计算,如果新增的  $888 \times 10^4$  t 乙烯按 50% 的原料用乙烷、丙烷,则每年大致需从约  $5000 \times 10^4$  t 湿天然气中分离出  $C_2^+$   $700 \times 10^4$  t(包括可以利用油气藏中的凝析油)。若按国产进口各半考虑,国内要从气田产的  $2500 \times 10^4$  t/a(或  $300 \times 10^8$  m<sup>3</sup>/a)湿天然气中分离,进口则必须保障每年增加  $350 \times 10^4$  t 湿 LNG,7 年后达  $2500 \times 10^4$  t/a。并且利用到岸 LNG 的冷量,将  $C_2^+$  高效率、低成本分离出来。如可实现此目标则,第一,用乙烷丙烷代替石脑油为裂解料,投资可节省 30%,能耗降低 30%~40%,综合成本降低 10%。按照新增的  $888 \times 10^4$  t 乙烯的 50% 用乙烷、丙烷为原料计算,与完全用气体原料比较,可节约投资约 1110 亿元,利润增加 300 亿元/年。第二,可少进口原油近  $5000 \times 10^4$  t/a,显著降低我国石油的对外依存度。

甲烷是重要的碳一化工原料,主要有合成氨、甲醇、乙炔、氰化物、甲烷氯化物、硝化物和二硫化碳等十几个品种及一些二次加工产品。此外,正在研发的天然气直接转化为合成气技术是比碳一化工更广阔的资源利用途径。有的天然气转化技术,目的产品收率不高,但是如果把化工利用同能源利用集成起来,即令一次转化后的可燃气体进入 CCHP 系统,总效率就可能很高,并且能够承受比较高的天然气价位。

另一方面,从进口的 LNG 中分离出  $C_2^+$ ,除上述的解决化工原料方面的需要外,还有重要的经济原因。因为进口 LNG 的价格远高于煤,如果仅把 LNG 气化后作为发电或城市煤气的燃料,中国目前的市场是承受不起的。而通过包括 LNG 冷能在内的能源高效热电冷联供和分离  $C_2^+$  作为化工原料的综合利用,便可以把天然气的终端使用成本大幅度降低。研究表明,LNG 的冷能用于  $C_2^+$  分离和裂解制乙烯装置中的裂解产物深冷分离,是 LNG 冷量利用的最佳途径。 $2500 \times 10^4$  t/a LNG 冷量利用,可创利 70 亿元,加上分离出来的  $C_2^+$  替代石脑油使其价值得以提升,粗略估计,可使每立方米天然气成本降低 0.3 元左右,使得进口 LNG 的竞争力大大提升。这样,我们才能在更大的程度上用好海外的 LNG 资源。

#### 四、利用海外 LNG 中的 $C_2^+$ 资源制乙烯的方案选择

天然气作为化工原料的产业链主要包括 5 个环节,因此从海外进口 LNG 有 4 种产业链安排方案可供选择。

(1)从产业链末端,即从中东进口液态乙烯,船运回国。中东(如沙特阿拉伯)由于资源丰富,就地开采就地加工,原料和劳动力等各项成本很低,所以沙特阿拉伯的乙烯是世界上成本最低的。乙烯经液化、船运再汽化的成本远低于国内生产乙烯的成本。目前国际上液态乙烯市场已经有一定规模。但我国尚没有开展进口贸易。

(2)进口 LNG 湿气。在我国的进口终端站将其中的  $C_2^+$  分离出来,就地或者在附近建厂生产乙烯。LNG 沸点温度为  $-160^\circ\text{C}$  左右,含大量的冷能,将此冷能用于分离湿气中的  $C_2^+$  和分离裂解产物中的乙烯、丙烯,可把天然气液化耗费的大量冷能最充分地加以利用,比国内原有的以石脑油和更重的原料生产乙烯的成本低得多。但有一系列的系统技术问题需要研究,例如包括冷能利用、轻烃分离的优化、轻烃分离和乙烯裂解以后的分离装置之间的集成、终端站供气的调峰和轻烃分离连续生产之间的矛盾、LNG 接收站与分离装置、乙烯裂解装置的投资主体,LNG 组成的稳定性等商务问题。

(3)直接投资到海外去勘探开发油气田。将开发出来的原油、凝析油和湿天然气分离,湿气就地液化为 LNG,分别船运回国。这比途径(2)又往上游走了一步。虽然增加了上游的投资和相应的政治、军事安全风险,但也增加了能源和资源供应的保障。

(4)在途径(3)的基础上,进一步在当地投资建乙烯厂,进一步从湿天然气中分离出  $C_2^+$  烷烃,与凝析油一起,作为原料生产乙烯。把剩下的干气(甲烷)和产品乙烯液化,用特殊的冷运船运输回国。乙烯沸点为  $-104^\circ\text{C}$ ,甲烷沸点为  $-162^\circ\text{C}$ 。两者分别装运,也可同船分仓装运。而在接受港口的终端站,用 LNG 汽化的部分冷能提供贮存乙烯所需冷量,可大大降低乙烯贮存成本。此方案需解决 LNG 和乙烯两者气化时冷量的优化利用以进一步降低成本的问题,因这时已没有分离  $C_2^+$  烷烃和裂解产物要用的冷能了。

## 五、利用海外市场 LNG 的战略思考

上述几种 LNG 产业链各有优缺点,但我们的选择受到客观条件的约束,因为能源是当前国际政治、军事、经济斗争的焦点。在参与国际政治、经济斗争中,必须有全方位的战略,必须同时考虑争夺对象的能源资源的经济策略,即上述的 4 种选择。我们只能根据所选能源产地的地缘政治、军事和经济状况和最有利的经济路线来做出选择。单从能源和资源保障方面来看,上述 4 种方案以途径(3)、(4)两种最优,因掌握了整个产业链,掌握了从源头到终端所有过程的主动权。惟一的风险就是政治和军事方面的风险,也就是当投资所在地发生战争,或在战争发生的情况下,海运受到其他国家的干扰。而从技术经济方面看,前两种选择除了政治、军事方面的风险外还有经济贸易风险,如途径(1)从中东购买液态乙烯,只运输液态乙烯不如把 LNG 和乙烯同时集成同时运输经济,但在同一地方同时购买 LNG 和液态乙烯,市场供货很难保证。途径(2)方案的风险是能否始终买到 LNG 的湿气。至于途径(3)、(4)两种方案哪个更经济,还需进行深入的研究比较,并且还取决于在气田的深冷分离过程和在接受站的冷能利用过程与 LNG 和/或乙烯裂解分离过程的能量集成程度,和在不同地方投资和运行成本的比较。

## 六、结 论

用好国外 LNG 资源,在技术路线经济上的考虑有不同的方案,针对能源所在地的不同情况,进行深入的技术经济研究,选择最佳的路线,对于高效利用海外 LNG 资源是非常重要的。

## 参 考 文 献

- [1] 徐锭明. 中国能源网电子期刊[OL], 2004 年 2 月
- [2] 肖增均, 王振德, 韩福忠. 利用 LNG 配合进口乙烯发展我国乙烯的新思维[J]. 化工技术经济, 2005, (5)
- [3] 钱伯章. 当代天然气化工的技术进展[J]. 石油与天然气化工, 2001, (6)
- [4] 陶志华. 对我国乙烯工业发展的几点思考[J]. 化工技术经济, 2004, (11)
- [5] 瞿国华. 乙烯蒸汽裂解原料优化(二). 乙烯工业, 2003, 15(1)
- [6] 钱伯章. 世界乙烯工业及其进展[J]. 石化技术与应用, 2003, 21(1)
- [7] 华贲, 郭慧, 李亚军, 等. 用好两个市场的轻烃资源优化乙烯原料路线[J]. 石油化工, 2005, (8)

(本文发表于《天然气工业》2005 年第 5 期)

本研究得到国家重点基础研究开发规划项目 G2000026307 的资助。

**作者简介:**华贲, 华南理工大学天然气利用研究中心主任, 国家重点基础研究项目“高效节能的关键科学问题”首席科学家, 强化传热与过程节能教育部重点实验室学术委员会主任。地址: (510640) 广州天河区五山华南理工大学。电话: (020) 87113744。E-mail: cehuaben@scut.edu.cn

# 炼油化工产业资源与能源的集成优化配置

华 贲

## 一、我国资源与能源的严峻形势与炼化产业面临的挑战

进入 21 世纪以来,经济全球化和中国拉动内需所引发的汽车、房地产等产业高速发展所推动的钢铁、建材、冶金等重化工业投资迅速膨胀,使得中国的资源、能源和环境形势极其严峻,中国已经成为世界第二大石油进口国,铁矿石、铝矾土等资源的第一大进口国,并引发了这些商品价格的大幅上扬。2001—2005 年中国能源弹性系数为 1.5,达到历史新高。中国二氧化硫排放在 20 Mt/a 左右,居世界第一位,大大超过环境自净所能承受的负荷,环境污染每年给我国造成的损失占我国 GDP 的 7%~8%。“三高—低”的粗放型发展对人均资源和能源远低于世界平均水平的中国来说,是不可持续的,也必将不断削弱中国商品的竞争力。资源和能源对外依存度的不断增加,也影响到中国的国家战略安全。

几十年来,我国炼油化工产业为担负着保障全国交通燃料、润滑油和大部分化工产品供应需求的任务,是国民经济的主要支柱产业。在 20 世纪,世界化学工业经历了由煤化工向石油化工的转变。中国的炼油化工产业,也不例外地以石油为主要原料。目前我国工业能源消费量占总消费量的 60%以上,其中化工、石化等高耗能行业的能源消费又占整个工业终端消费的大部分,而且它们所消耗的一次能源大多也是石油加工产物。因此,我国经济持续快速发展对石油需求的急剧增加是通过炼油化工产业体现的。到 2004 年我国进口原油已达到  $1.27 \times 10^8$  t,对外依存度比各方预计提前几年达到了 40%。这引起了国内政治、经贸、外交、军事各方面的关注,在目前的形势下,有必要重新审视我国炼油化工产业的资源和能源完全依赖石油的格局,并考虑新的出路了。

## 二、传统观念和机制及其导致的资源配置问题

中国的炼油和石化工业经过几十年的发展,已经形成了相当大规模和比较全面的产业集群。炼油加工能力达到  $3 \times 10^8$  t/a,乙烯产能近  $700 \times 10^4$  t/a。但由于经济体制和管理机制方面的原因,在资源和能源的构成和配置方面一直沿袭着相对固定的模式。除了上述依赖石油以外,还存在以下问题:①自给自足,小而全,大而全,企业之间缺乏联合互补和物流与能流的循环;②特别是中间产品资源的价值不是由市场定位,而是人为规定财务结算的方法;③建设和规划受行政区划影响很大,全局市场优化配置不够;④更重视外延的发展,重产量、产值,对质量品种、节省资源和能源消耗等内涵的集约发展强调不够;⑤在三大国有石化集团公司垄断的格局下,在公司的内部各个企业之间存在着物流和能流的非市场机制的关联交易。

这些传统的模式造成了资源配置以及由其所导致的资源和能源的低效率和非优化使用甚至浪费,现举例如下。

(1)中国的一次能源构成中,高含氢的石油和天然气人均资源不到世界平均的 1/10。尽管油气资源非常稀缺,但在中国的化工厂、炼油厂里,大量含氢的副产气体被当作燃料烧掉,而



另一方面又用大量的石脑油、饱和  $C_3$ 、 $C_4$  轻烃等宝贵的化工原料烃类去制氢。

(2) 中国石化工业龙头企业乙烯工业 90% 是以石脑油、煤油、柴油、加氢尾油、减压馏分作为裂解原料, 乙烯的平均收率只有 32%。与此同时, 炼油厂每年副产的上千万吨乙烷、丙烷和丁烷等轻烃, 包括逾  $1000 \times 10^4 \text{ t}$  液化石油气 (LPG) 作为工业或民用燃料被烧掉。而用轻烃作为乙烯裂解原料时乙烯收率要比用重组分为裂解原料高 1 倍以上。

(3) 在西部较为分散的油井, 在获取石油的同时, 每年有上百亿立方米以甲烷为主、含有部分乙烷、丙烷和醚等轻烃的伴生气在井口放空烧掉。每年有上百亿立方米焦炉煤气, 在获取焦炭的同时, 在小炼焦厂被放空烧掉。

(4) 通过炼油厂生产芳烃, 只需要经过原油蒸馏和重整 2 道工序。而通过乙烯装置生产芳烃要经过 3~4 个生产工序, 增加了投资能耗和生产成本。由于中国乙烯原料重质化导致乙烯裂解产物中有大量重整原料的  $C_6$ — $C_9$  烃, 使得乙烯厂成为芳烃的重要来源。

(5) 中国化石能源以煤为主, 等热值的燃料油/煤比价一般高于国外 2~3 倍。在西部靠近煤矿的地区目前可逾 4 倍以上。这些地区的炼油厂以煤为产生蒸汽机锅炉燃料, 顶替出渣油, 通过催化、延迟焦化或丙烷脱沥青等二次加工手段生产高附加值产品, 是资源优化利用的重要途径。但由于体制的原因, 从 20 世纪 70 年代末起在炼油和石化厂附近建立烧煤热电厂, 向炼油厂提供蒸汽的“煤代油”项目, 很多都没有成功。炼油厂怕发电厂不正常供蒸汽影响装置运行, 而发电厂卖给炼油厂的蒸汽要求按照炼油厂烧渣油的成本来定价, 导致双方很难达成协议, 所以这些炼油厂或者自己再建烧煤锅炉, 或者迄今仍烧渣油产蒸汽。

(6) 国家能源发展规划中已重视天然气的利用, 加大天然气的进口, 特别是在沿海地区大力引进 LNG。按照目前国际 LNG 市场的情况和今后发展趋势, 可能在 LNG 中的  $C_2^+$  的轻烃分离出来作为乙烯原料, 把多余的冷能作为乙烯装置深冷部分的冷公用工程同时以甲烷作为炼油厂的制氢原料和热电联产的一次能源, 把轻烃顶替出来用作化工原料, 把燃料渣顶替出来进一步加工。这是一个极好的资源和能源优势互补、冷量优化利用的方案。但到目前为止的 LNG 引进项目规划和沿海石化工业发展的规划都是各自分割的, 没有统一考虑能源的合理利用和资源的优化配置。

(7) 由于以煤为主的能源结构所造成的环境污染, 要求洁净煤利用技术在中国要加速推行。洁净煤技术包括  $SO_x$ 、 $NO_x$  粉尘和  $CO_2$  的减排, 以及煤的液化和气化, 煤的热电冷和化工利用多联产技术等。煤的洁净利用与石化工业的发展两者之间缺乏在规划层面上的联系, 对资源和能源的协同优化缺乏考虑。

上述问题是由于传统观念、体制和机制方面的因素所造成的。在观念上, 是对于我国资源和能源的严峻形势以及节约和循环利用的科学道理认识不足。在体制上, 最主要的是国家的能源规划和战略考虑与石油化工资源规划和战略考虑相互脱节, 缺乏统筹和集成。在机制上, 国内三大石油公司之间缺乏统筹协调, 整个石油化工行业的规划缺乏资源与能源的全局集成优化的战略思考 and 对策。如果能够从资源和能源的协同优化利用的角度统筹规划、密切配合、优势互补, 可大大减少原油进口, 提高资源的利用效率。

### 三、炼化一体化在配置石化资源上的不足

“炼化一体化”配置的策略之一是炼油厂与乙烯厂的“一体化”或物流互供。BASF 和 Fina 联合建设的  $90 \times 10^4 \text{ t/a}$  乙烯装置与炼油厂实行一体化, 每年可产生 6000 万美元的协同效益, 新加坡的炼油厂和石化厂一体化和非一体化对比(乙烯装置能力  $60 \times 10^4 \text{ t/a}$ ), 节省投资 3050