



乙烯、丙烯 生产技术与经济分析

王子宗 主编

中国石化出版社

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

乙烯、丙烯生产技术与经济分析

王子宗 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书介绍了 11 种乙烯、丙烯生产方法及经济分析。这 11 种乙烯、丙烯生产方法是有工业化业绩和经工业化示范的,它们是蒸汽裂解、催化热裂解(CPP)、催化裂解(DCC)、Superflex、先进催化裂解(ACO)、碳四烯烃催化裂解(OCC)、烯烃歧化(S-OMT)、丙烷脱氢、甲醇制烯烃(MTO)、甲醇制丙烯(MTP)、乙醇脱水等。本书介绍了每种生产方法的技术及特点、流程简述及工艺流程简图、工业化业绩及工业化关注问题、原料的来源及对原料的要求、界区投入产出数据表、投资估算、经济测算等内容,还介绍了 11 种乙烯、丙烯生产方法经济测算中成本、效益等有关内容的比较。

图书在版编目(CIP)数据

乙烯、丙烯生产技术与经济分析 / 王子宗主编.
—北京:中国石化出版社,2015.4
ISBN 978-7-5114-3251-3

I. ①乙… II. ①王… III. ①乙烯-化工生产②丙烯-化工生产③乙烯-化工生产-经济分析④丙烯-化工生产-经济分析 IV. ①TQ221.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 063174 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

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 12.5 印张 289 千字

2015 年 5 月第 1 版 2015 年 5 月第 1 次印刷

定价:56.00 元

《乙烯、丙烯生产技术与经济分析》 编委会

主 编 王子宗

编写人员

高 耸	徐惟兴	李广华	吴 雷	王振维
盛在行	余龙红	张必强	刘 健	王鑫泉
雷正香	赵文忠	余兰兰	谭天舒	

序

乙烯、丙烯是重要的基本有机化工原料，随着国民经济的飞速发展，我国对乙烯、丙烯的需求势头强劲。近年来随着原油价格高涨，生产乙烯、丙烯的成本越来越高，生产企业的利润越来越低。因此，调整和优化原料结构实现生产乙烯、丙烯原料的多元化，已成为乙烯、丙烯装置降本增效的重要手段，相应地处理不同原料的生产工艺技术也呈现多元化趋势。

在这种情况下，如何针对原料选取合适的生产工艺技术并对其是否具有较好的利润收益进行技术经济评价，是实现原料多元化的重要途径。本书介绍了以石油、煤炭和生物基乙醇为原料的 11 种乙烯、丙烯生产方法，在根据现有的先进生产技术、采用科学的经济测算方法和考虑影响测算的因素基础上，通过对测算结果的分析 and 比较，对 11 种乙烯和丙烯生产方法给出了相对适当的建议。

本书融合了编著者多年从事乙烯、丙烯生产技术的研究、工程设计、生产操作、技术经济分析等方面的实际经验，可为我国今后乙烯、丙烯的发展及其原料多元化提供重要参考依据。

袁晴棠

2014年12月

前 言

我国乙烯工业从 20 世纪 60 年代起步，经过几十年的发展，尤其是改革开放以来的快速发展，已取得举世瞩目的成绩，乙烯、丙烯的产能及产量均居世界第二位。尽管如此，我国乙烯、丙烯的产量仍不能满足我国国民经济发展和人民生活水平提高的需要，因此，今后还需继续建设乙烯、丙烯生产装置，提高乙烯、丙烯产能。我国生产乙烯、丙烯的起始原料主要是石油，而我国的石油资源相对短缺，供不足需，目前原油对外依存度已接近 60%，乙烯、丙烯等化工用油与燃料用油之间矛盾加剧，乙烯、丙烯的原料供应面临新的挑战，生产乙烯、丙烯原料路线的多元化是今后的必然选择。原料多元化是指用石油、煤炭、生物质乙醇等为原料生产乙烯、丙烯，原料多元化有利于降低乙烯、丙烯原料供应风险，原料多元化需要开发相应生产乙烯、丙烯的先进生产技术。

本书按照原料多元化的思路，介绍采用不同原料路线的 11 种乙烯、丙烯生产技术和经济测算方面的有关情况，是参编者几十年从事乙烯、丙烯的生产技术开发、设计的经验积累，代表我国乙烯、丙烯生产技术的先进水平。经济测算采用的方法和模型是科学的，对测算结果的分析、影响测算结果因素的探讨是比较全面的。本书内容丰富，资料翔实，对已有乙烯厂的原料结构调整、对规划中乙烯厂的原料选择提供帮助；对从事石化行业的科研、技术人员，设计、规划工作者，以及大专院校的相关专业师生等，具有很好的参考作用。

本书由王子宗主编，参加本书编著者有：高耸、徐惟兴、李广华、吴雷、王振维、盛在行、余龙红、张必强、刘健、王鑫泉、雷正香、赵文忠、佘兰兰、谭天舒等。

本书介绍的情况均是 2011 年前的情况，其后乙烯、丙烯生产技术的进步以及市场变化，本书未涉及。在编写过程中，我们虽然力求完善，但因本书涉及面广、内容多，再则限于我们的水平和经验，书中难免会有不妥之处，望批评、指正。

编 者

2014 年 8 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 发展乙烯、丙烯工业需走原料多元化道路	(1)
第二节 生产乙烯、丙烯原料多元化的经济性分析	(2)
第二章 生产技术	(3)
第一节 蒸汽热裂解	(3)
第二节 催化热裂解(CPP)	(16)
第三节 催化裂解(DCC)	(26)
第四节 Superflex 工艺技术	(33)
第五节 先进催化裂解制烯烃(ACO)	(41)
第六节 烯烃催化裂解(OCC)	(50)
第七节 烯烃歧化	(58)
第八节 丙烷脱氢(PDH)	(67)
第九节 甲醇制烯烃(MTO)	(79)
第十节 甲醇制丙烯(MTP)	(89)
第十一节 乙醇脱水制乙烯	(96)
第三章 经济测算	(106)
第一节 测算范围和测算基本原则	(106)
第二节 基础数据与参数的选取	(107)
第三节 价格体系说明	(110)
第四节 测算分析及测算表格	(111)
第五节 综合分析	(160)
第四章 生产技术评价及经济比较结果分析	(167)
第一节 生产技术评价	(167)
第二节 经济比较结果分析	(169)
附表	(172)
1. 1000kt/a 蒸汽裂解装置	(172)
2. 1500kt/a 催化热裂解(CPP)装置	(173)
3. 1700kt/a 催化裂解(DCC)装置	(175)
4. 500kt/a Superflex 装置	(177)

5. 500kt/a ACO 装置 (178)

6. 80kt/a 烯烃催化裂解(OCC)装置 (180)

7. 200kt/a 烯烃歧化装置..... (181)

8. 450kt/a 丙烷脱氢(PDH)装置 (183)

9. 1800kt/a 甲醇制烯烃(MTO)装置 (185)

10. 1660kt/a 甲醇制丙烯(MTP)装置 (186)

11. 100kt/a 乙醇脱水制乙烯装置 (188)

参考文献 (190)

第一章 绪 论

第一节 发展乙烯、丙烯工业需走原料多元化道路

石化工业是国家的支柱产业。乙烯、丙烯是石化工业的基础原料，乙烯、丙烯的产能是衡量一个国家石化工业发展水平的重要标志。我国乙烯工业从 20 世纪 60 年代起步，经过几十年的发展，尤其是改革开放以来的快速发展，已取得举世瞩目的成绩，2010 年乙烯产能为 15.12Mt，产量为 14.22Mt；2010 年丙烯产能为 14.94Mt，产量约为 13.24Mt。乙烯、丙烯的产能及产量均居世界第二位。

2010 年，我国共有 24 个乙烯生产企业，29 套乙烯生产装置，总产能为 15.12Mt。其中，中国石化集团有 14 个企业，15 套乙烯生产装置，总产能为 9.385Mt；中国石油集团有 6 个企业，9 套乙烯生产装置，总产能为 3.71Mt；中国海油总公司 1 个企业，1 套乙烯生产装置，产能为 0.95Mt；华锦集团、神华集团、沈阳化工集团等 3 家企业，4 套乙烯生产装置，总产能为 1.07Mt。中国石化集团、中国石油集团、中国海油总公司、其他集团的乙烯产能分别约占全国总产能的 62.1%、24.5%、6.3%、7.1%。2010 年，我国丙烯生产企业有 80 多家，其中大部分为炼厂丙烯生产企业，其次为蒸汽裂解生产丙烯的企业，还有少量其他类型丙烯生产企业，总产能为 14.94Mt。

尽管我国乙烯、丙烯的产能、产量已居世界第二位，但仍不能满足我国国民经济发展和人民生活水平提高的需要。2010 年我国乙烯、丙烯的当量需求分别为 30.50Mt、21.44Mt，按当量需求计，乙烯、丙烯的自给率分别约为 46.6%、61.8%。预测 2015 年乙烯产能 23.35Mt、当量需求 35.80Mt、自给率 65.2%；预测 2015 年丙烯产能 22Mt、当量需求 25.80Mt、自给率 85.2%。因此，今后还需继续建设乙烯、丙烯生产装置，提高乙烯、丙烯产能。

目前，我国乙烯主要是以石脑油为主通过蒸汽热裂解的乙烯装置产生，丙烯主要是由炼厂催化裂化装置和乙烯装置产生，同时还有少量乙烯、丙烯是用催化热裂解、煤基甲醇制烯烃装置产生的。沈阳化工集团 500kt/a 催化热裂解项目，是世界首套利用流化催化裂化技术加工重油直接裂解生产乙烯、丙烯的装置，2009 年 7 月投产，2010 年 4 月进入商业化运行阶段。2010 年，煤基甲醇制烯烃示范工程先后建成并相继投入试运行，其中神华包头 1800kt/a 甲醇制 600kt/a 烯烃(DMT0)项目于 2010 年 8 月投料试车成功，产出合格聚合级乙烯和丙烯产品，并于 2011 年进入商业化运行阶段。而神华宁煤集团和大唐国际多伦 500kt/a、460kt/a 甲醇制丙烯(MTP)项目在试车过程中曾暴露某些问题，通过整改，分别于 2011 年 5 月、8 月相继投产。中原石化采用 S-MTO 技术的 600kt/a 甲醇制烯烃项目于 2011 年 10 月一次开车成功，产出合格的乙烯、丙烯产品。

MTO、MTP 示范工程的初步成功，再次激发国内企业投资煤制烯烃项目的热情，出现了超出资源和环境承载力、盲目规划、无序发展的现象。国家发改委多次发文指出，煤化工的无序发展将带来诸多问题，一是加大产业风险，二是加剧煤炭供需矛盾，三是增加节能减排工作难度，四是引发区域水资源供需失衡，因此，必须实行严格产业准入政策、加强项目

审批管理、强化要素资源配置、落实行政问责等措施，规范煤化工产业有序发展。

到目前为止，我国生产乙烯、丙烯的起始原料基本是石油。而我国的石油资源相对短缺，供不足需，2010 年原油产量 203Mt、表观消费量 439Mt、对外依存度为 53.8%，预计 2015 年的对外依存度会超过 60%。随着原油对外依存度的提高、国际原油价格不断飙升、化工用油与燃料用油之间矛盾升级，以及乙烯、丙烯生产规模的不断扩大，乙烯、丙烯的原料供应问题越来越突出，仅依赖石油为原料路线生产乙烯、丙烯的传统方法，面临新的挑战。

生产乙烯、丙烯原料路线的多元化是应对挑战的有效途经。原料多元化是指用石油、煤炭、生物质乙醇等为原料生产乙烯、丙烯，其中石油，包括用石油的各个馏分，如乙烷、丙烷、石脑油、碳四至碳八烃类、加氢尾油、蜡油、渣油等为原料生产乙烯、丙烯。原料多元化有利于降低乙烯、丙烯原料供应风险。原料多元化，需要开发相应生产乙烯、丙烯的先进生产技术。

“十一五”以来，适应原料多元化，开发出数种新的生产乙烯、丙烯的先进技术，并进行了工业化示范装置建设。到目前为止，有工业化业绩和经工业化示范的生产乙烯、丙烯的工艺技术有：蒸汽热裂解、催化热裂解(CPP)、催化裂解(DCC)、Superflex、先进催化裂解制烯烃(ACO)、烯烃催化裂解(OCC)、烯烃歧化、丙烷脱氢(PDH)、甲醇制烯烃(MTO)、甲醇制丙烯(MTP)、乙醇脱水制乙烯等 11 种。本书将介绍每种乙烯、丙烯生产方法的技术及特点、流程简述及工艺流程简图、工业化业绩及工业化关注问题、原料的来源及对原料的要求、界区投入产出数据表、投资估算、经济测算等内容。

第二节 生产乙烯、丙烯原料多元化的经济性分析

发展乙烯、丙烯工业需走原料多元化的道路，同样，生产乙烯、丙烯需要选择经济性好的原料路线。11 种乙烯、丙烯生产技术采用 11 种原料，它们的经济性如何？本书对每种乙烯、丙烯生产技术进行经济测算，并从成本、效益等有关方面进行比较分析。

经济测算的基础，一是每种生产技术的(装置)投入、产出数据表，二是采用统一的价格体系，三是采用相同的建厂条件。根据测算的基础，运用经济测算的模型测算出每种乙烯、丙烯生产技术的经济效益等有关指标，还对各种乙烯、丙烯生产技术的经济效益差异进行了详细的分析比较。

由于经济测算的基础不是一成不变的，因此经济测算的结果也不是绝对的，因为装置投入、产出数据会随着技术进步而变化，采用的价格体系不一定与市场的实际情况相一致，建厂条件千差万别而不可能相同，所以项目决策时必须要考虑这些因素的变化。

本书介绍这 11 种乙烯、丙烯生产技术及经济比较，是中国石化工程建设有限公司几十年从事乙烯、丙烯的生产技术开发、设计的经验积累，代表我国乙烯、丙烯生产方法的最先进水平。介绍这 11 种乙烯、丙烯生产技术及经济比较，目的是为我国今后乙烯、丙烯的发展提供生产技术状况，为乙烯、丙烯生产原料多元化指出方向，为规划拟建乙烯、丙烯项目提供翔实素材。

生产乙烯、丙烯原料多元化，是我国今后发展乙烯、丙烯工业的方向，原料多元化有利于降低生产乙烯、丙烯仅仅依赖石油的原料风险，原料多元化有利于降低乙烯、丙烯的生产成本，原料多元化有利于进一步扩大乙烯、丙烯产能满足国民经济发展和人民生活水平提高的需要。

第二章 生产技术

第一节 蒸汽热裂解

一、生产技术及特点

蒸汽热裂解技术包括管式炉蒸汽裂解和深冷分离两部分，原料从轻烃直到减压柴油、加氢尾油均适宜采用该技术路线。裂解气分离流程则主要有：顺序分离流程、前脱乙烷前加氢流程和前脱丙烷前加氢流程。顺序分离流程即按照组分由轻到重的次序首先脱甲烷的流程，国外鲁姆斯(Lummus)公司和德西尼布(Techinip)均采用顺序分离流程；前脱乙烷前加氢流程即首先进行脱乙烷的流程，林德(Linde)公司采用前脱乙烷前加氢的分离流程；前脱丙烷前加氢流程即首先进行脱丙烷的流程，斯通-韦伯斯特(Stone&Webster)公司(目前已被德西尼布收购，为便于区分，以下仍称S&W)、凯洛格-布朗路特(KBR)公司、中国石化(Sinopec Tech.)和Lummus/ST(鲁姆斯与中国石化联合开发)均采用前脱丙烷前加氢的分离流程。

(一) 国外生产技术及特点

1. Lummus 公司

在乙烯工业中，Lummus 公司的技术占有重要地位，它已有 50 多年的烯烃装置的设计经验。目前，全球共有 150 多套乙烯装置采用 Lummus 公司的技术，总的生产能力超过 33.00Mt，约占世界乙烯生产能力的 45%。

该公司开发的 SRT 型裂解炉具有结构简单，炉管热分布均匀，反应介质在炉内停留时间短等特点。特别是近年来开发的 SRT-VI 型炉，进一步提高了裂解反应的选择性，增加了乙烯收率，减少了原料的消耗量。SRT-VI 型炉采用 4-1 型结构的炉管，即 4 根入口小直径管和 1 根出口大直径管。多根入口小直径管大大增加了传热面积，提高了管壁的热通量，因此可以迅速提高反应物的温度，出口大直径管可以降低烃分压，同时也可延长清焦的周期，提高裂解炉的在线率。Lummus 公司开发了浴缸式废热锅炉，根据流体力学的特点用陶瓷铸造的 TLE 入口，保证了短停留时间；采用较大的管径，减少了结垢。

在急冷部分采用了急冷油减黏系统，有效降低了汽油分馏塔(亦称急冷油塔)塔釜循环急冷油的黏度，可提高釜温至 200℃ 左右。

在降低能耗方面，Lummus 公司近年来也做了大量的改进。如采用低压脱甲烷流程，丙烯塔热泵流程和二元制冷及三元制冷等。

其流程主要特点如下：

- ① 采用 SRT-VI 型炉，热效率高，对原料适应性强，既适用于轻质原料，也适用于重质原料，乙烯收率高；
- ② 采用顺序分离流程，低压脱甲烷；
- ③ 采用 CH_4 、 C_2H_4 二元混合制冷；

- ④ 丙炔加氢采用催化精馏新技术;
- ⑤ 低压丙烯精馏塔, 并和丙烯机形成热泵。

2. S&W 公司

S&W 公司是著名乙烯专利商之一。在世界范围内已有 120 多套乙烯装置采用了 S&W 技术, 相当于目前世界上 30% 的乙烯生产能力。

该公司开发的 USC 超选择性裂解炉以其高裂解深度、短停留时间和低烃分压见长。其裂解炉管有 U 型、W 型、M 型三种。U 型炉管结构更加简单, 在炉管第一程采用小口径管, 而第二程采用大口径管, 这样加大了升温段的传热比表面积。最近, S&W 公司对传统的 U 型炉管的构型作了改进, 使入口管和出口管间隔排列, 炉管占据的空间比传统构型减少 20%, 炉膛温度更为均匀。改进的构型已在德国 VEBA 乙烯装置中使用。并开发了一种直管式 SLE, 其体积小, 压降低, 维修简单, 换管方便, 不需要离线清焦。

对年处理量大于 100kt 的液体原料裂解炉, S&W 推荐采用双辐射段炉膛的炉子。两个炉膛可以裂解不同的原料, 可以一个炉膛裂解, 一个炉膛清焦, 使用 100% 底烧嘴。清焦气可以返回炉膛, 有利于环境保护。

S&W 公司设置重燃料油汽提塔, 用乙烷炉裂解气把循环急冷油中的中间馏分汽提出来并返回汽油分馏塔以调节循环急冷油黏度。根据裂解原料的轻重不同, 可以设计低温 (180℃ 左右) 和高温 (210℃) 汽油分馏塔塔系统。

十几年前, S&W 公司和 Mobil 公司合作开发了先进回收系统 ARS (Advanced Recovery System) 分离工艺, 在裂解气深冷系统采用分凝分馏器技术, 降低了脱甲烷塔负荷, 从而使乙烯制冷负荷降低, 达到进一步节能的效果。近年来, S&W 公司对传统的采用热、冷两台分凝分馏器的流程作了改进, 可以取消热分凝分馏器, 用两台板翅式换热器和分离罐取代, 只保留冷分凝分馏器, 甚至也取消冷分凝分馏器, 用热集成精馏系统 HRS (Heat-integrated Rectifier System) 替代, 以减少投资, 并可多回收氢气, 但能耗略有增加。

乙烯精馏塔采用开式热泵技术, 以降低装置能耗。

其流程主要特点如下:

① USC (超选择性) 裂解炉

- 高热效率 (93% ~ 94%);
- 既适用于轻质原料, 又适用于重质原料;
- 高烯烃收率。

② SLE (选择线性换热器) 急冷锅炉

- 最小体积;
- 短停留时间;
- 结焦量非常低, 不需离线清焦。

③ ARS 和 HRS

- 在分凝分馏器内传热和传质同时进行;
- 采用乙烯精馏塔开式热泵技术;
- 降低了冷剂的耗量;
- 采用双塔脱丙烷和双塔脱甲烷。

3. KBR 公司

KBR 是 Kellogg 和 B&R 合并组成的公司, 隶属于美国哈里伯顿 (Halliburton) 公司。

原 Kellogg 公司乙烯技术的特点是采用毫秒裂解炉和顺序分离流程；B&R 的分离技术是：对气体裂解原料采用前脱乙烷前加氢技术，对液体裂解原料采用前脱丙烷前加氢技术。

KBR 公司成立以后，被获准使用埃克森 (Exxon) 公司的裂解技术，而 Exxon 的技术有其独到之处，多年来一直处于秘而不宣的状态，外人了解很少，因此，KBR 的技术实际上是把 Kellogg、B&R 和 Exxon 三家的技术揉合在一起，形成的一个新技术，称之为“SCORE” (Selective Cracking Optimum Recovery) 技术。

1) 裂解技术

KBR 裂解炉的炉管构型有 SC-1 (单程)、SC-2 (两程) 和 SC-4 (四程) 三种。构型不同，物料在炉管内的停留时间不同。停留时间越长，乙烯的收率会越低。当前，KBR 大多推荐使用 SC-1 型裂解炉，有最高的乙烯选择性和收率。

SC-1 型裂解炉具有下列特点：

- ① 乙烯收率高，烯烃选择性高；
- ② 采用单程的辐射段炉管，简单耐用；
- ③ 急冷换热器 (废热锅炉) 不需要机械清焦；
- ④ 在同一台炉子内可以裂解多种原料；
- ⑤ 可以在线清焦，延长运转在线率，与传统设计相比有竞争性；
- ⑥ 采用低 NO_x 烧嘴，保护环境，只设底烧嘴。

2) 分离技术

KBR 介绍，对气体原料 (乙烷) 推荐采用前脱乙烷前加氢分离流程，对液体原料 (例如石脑油) 采用前脱丙烷前加氢流程。

对油急冷系统作了改进，取消重燃料油汽提塔，而在汽油分馏塔的底部增加了闪蒸分离段，把淬冷后的裂解气中所含的重燃料油和焦粒等分离出来，从塔底排出。结合轻燃料油汽提塔从塔底排出的轻燃料油，共同达到控制循环急冷油黏度的目的。

对酸性气体的脱除，KBR 认为可以只用碱洗，而不必设置胺洗系统，这样虽然会多消耗一些碱，但碱的来源一般没有困难，可以避免胺洗系统的结垢问题和操作困难。

对 C_2 分离系统也作了改进，并申请了专利。即对脱乙烷塔在塔顶加高一段，原脱乙烷塔塔顶的乙烷、乙烯、乙炔继续在增高的塔段内分馏，使塔顶可以得到聚合级乙烯产品，其产量可以达到装置乙烯产量的 30%，由此可以减小乙烯塔系统的设备尺寸和冷量需求。

在丙烯塔设计了开式热泵系统，并和丙烯压缩机进行组合，具有节能效果。

KBR 乙烯技术的特点如下：

① 裂解技术

- 原料适应性广，可用乙烷-VGO 等各种原料；
- 单程炉管，停留时间短，收率高；
- 可以分区裂解不同原料；
- 可以在线清焦，延长运转在线率。

② 急冷油系统设有黏度控制措施

③ 分离技术

- 前脱丙烷前加氢流程 (液体原料)；
- 不推荐胺洗；
- 脱乙烷塔可以直接生产 30% 产量的乙烯；

- 丙烯塔和丙烯机组成开式热泵。

4. Linde 公司

Linde 公司是世界上著名的石化公司之一，尤其在深冷和空气分离方面见长。在乙烯技术方面，Linde 公司于 1931 年建成了世界上第一套用深冷分离法生产乙烯的工厂。1965 年，Linde 公司采用热裂解、裂解气净化及低温气体分离等技术建成了第一套大型的生产乙烯的工厂。目前，Linde 公司称在世界范围内建有 300 多台裂解炉，15 个国家的 30 余套大型的生产乙烯的工厂采用 Linde 公司的技术。

Linde 公司采用的是前脱乙烷前加氢流程，原料经裂解、急冷、压缩后，先分离 C_2 和更重组分，然后再分离甲烷、乙烯和丙烯等； C_2 加氢采用的是前加氢流程。

Linde 公司的裂解炉为 Pyrocrack 型，裂解炉在设计方面有独到之处。Pyrocrack1-1 型裂解炉为两程炉管，第一程为两根小口径炉管，第二程为一根较大口径炉管。此种炉管第一程具有较大比表面积，第二程具有较大的流通面积有利于降低烃分压。这样加大了升温段的传热面积和管壁的热强度，同时减少反应物的停留时间，降低烃分压，从而提高了烯烃的收率。20 世纪 80 年代，由于市场情况的变化，Linde 公司相应开发了重质原料如柴油、加氢尾油等的裂解技术。在裂解重质原料方面，Linde 公司最先在壳牌 Shell 公司二次注汽技术的基础上开发了自己的技术，并取得了相应的经验。

Linde 公司的分离系统采用的是前脱乙烷前加氢流程。特别是近几年来开发了双塔脱乙烷技术，裂解气经压缩之后进入双塔双压脱乙烷系统。乙炔加氢采用等温式反应器，乙炔转化为乙烯的选择性为 50%。Linde 公司还采用乙烯精馏塔开式热泵与乙烯制冷组合循环系统，可同时减少投资和能耗。

Linde 公司裂解炉特点：

- 在裂解炉设计方面具有独到之处；
- 适用于以柴油、加氢尾油为原料的重质裂解料；
- 二次注汽技术；
- 辐射段可以是单炉膛或双炉膛。

Linde 公司分离流程特点如下：

- 前脱乙烷；
- C_2 加氢采用前加氢，等温反应器；
- 乙烯精馏塔采用开式热泵系统，并与乙烯制冷组合；
- 可用溶剂吸收法回收乙炔。

5. TPL/KTI 公司

TPL/KTI 报价技术为 TOPKIN 技术，TOPKIN 技术由荷兰国际动力学技术公司 (KTI) 的 GK 型裂解炉及 TPL 的顺序“渐近”分离技术所组成。而 TPL 公司属于德西尼布集团。

德西尼布集团在乙烯方面也有近 30 年的经验。荷兰 KTI、法国德西尼布及意大利 TPL 公司于 1971 年成立了乙烯技术开发联盟以建立具有竞争性的现代乙烯技术。从联合至今已设计了共 16 套乙烯装置，总能力达 5000kt 以上，而改扩建装置则达到 15 套，其设计 600kt 的乙烯装置达 11 套，并已有着丰富的总承包经验。

KTI 公司有着 30 多年设计裂解炉的经验，其裂解炉为 GK 型，KTI 在裂解炉设计方面有着自己的特点，具有世界上唯一商业化的产率预测软件 SPYRO。KTI 公司利用 SPYRO 软件及根据自己的经验开发并设计出先进的 GK-V 型裂解炉。GK-V 型裂解炉为两程炉管，第

一程为两根小口径炉管，第二程为一根较大口径炉管。此种炉管第一程具有较大比表面积，第二程有较大的流通面积有利于降低烃分压。这样提高了升温段的管壁热强度，同时减少反应物停留时间，降低烃分压，从而提高了烯烃的收率。

TPL 公司的顺序“渐近”分离技术是以最小的能耗达到分离的目标。基本原理是对相邻关键组分实行不完全分离，而对碳数相差较远的组分实行完全分离，为实现理想分离顺序而采用多步分离的方法。

顺序“渐近”分离流程采用中压双塔脱甲烷。

(二) 国内技术现状及特点

对于裂解技术，较早投产的乙烯装置的裂解技术主要以引进国外技术为主。随着以 CBL 北方炉为代表的国内裂解技术的不断进步，在装置新建和改造中，已经有相当数量的北方炉投入使用。而中国石化与 Lummus 公司合作开发的裂解炉规模为 100kt/a，合作开发的裂解炉更具参与国际市场竞争的实力，并已在国内多套乙烯装置中建成了数十台裂解炉。

中国石化工程建设有限公司(SEI)联合国内其他科研单位已完成了国家科技攻关计划 150kt/a 乙烯大型裂解炉开发，该技术为：两个辐射段共用一个对流段，裂解炉辐射段采用 2-1 型炉管；裂解炉可以分炉膛裂解不同原料，也可以分炉膛裂解和烧焦。第一台工业化 150kt/a 乙烯大型裂解炉已经在国内镇海 1Mt/a 乙烯装置上建设投产。国家科技攻关计划 200kt/a 乙烯大型裂解炉开发已完成，并已通过了国家的验收，具备了工业化的条件。

裂解炉设计采取了以下措施：

- 采用高选择性辐射段炉管；
- 提高裂解炉的热效率，热效率 94%；
- 采用新型燃烧器降低空气过剩系数；
- 提高保温隔热效果降低散热损失；
- 抑制结焦和延长裂解炉运转周期；
- 根据不同裂解原料尽可能多发生超高压蒸汽。

对于分离技术，中国石化工程建设有限公司(SEI)已采用自有技术完成了天津和中原等中型乙烯装置的改造。SEI 联合国内其他科研单位完成了国家科技攻关计划 800kt/a 乙烯分离成套工艺包开发，并首次应用在武汉 800kt/a 乙烯装置上，已经建成投产。该技术的特点为：

- 采用前脱丙烷前加氢分离工艺技术路线；
- 深冷分离采用低能耗分离技术 LECT(Low Energy Consumption Technology)。

裂解炉来的裂解气经急冷后进入裂解气压缩系统。裂解气压缩机为 5 段压缩机，裂解气经前 4 段压缩后进入碱洗塔，然后经干燥后进入高压脱丙烷塔，高压脱丙烷塔塔顶气体进入裂解气压缩机第 5 段压缩后去 C_2 前加氢系统。加氢后裂解气经冷却冷凝进高压脱丙烷塔回流罐，该回流罐的气相和回流后剩余液相分别去下游的冷分离系统。

冷分离系统是 LECT 技术的核心，包括前冷冷箱、 C_1 分离系统和 C_2 分离系统。高压脱丙烷塔回流罐的气相经预冷后进碳三洗涤塔，该塔既脱除进料中的 C_3 ，又使大部分 C_2 和少量 C_1 分配到塔釜；高压脱丙烷塔回流罐的液相进预脱甲烷塔，该塔分出塔顶不含 C_3 气体，塔釜液不含 C_1 ，分别进入脱甲烷塔和脱乙烷塔。

裂解气深冷后进 C_2 洗涤塔，降低尾气中的乙烯损失。脱甲烷塔釜液不含 C_3 ，直接进乙烯塔。

低压乙烯塔和乙烯制冷压缩机构成开式热泵。采用热泵有效地降低了 -40°C 丙烯冷剂的负荷。

热分离系统包括 C_3 加氢、丙烯塔和脱丁烷塔。

制冷系统采用乙烯和丙烯复迭制冷流程，其中丙烯设4个冷冻级位，分别为 25°C 、 -1°C 、 -21°C 、 -40°C 。由于脱甲烷塔釜液相可为 C_3 洗涤塔和预脱甲烷塔提供冷量，所以乙烯冷剂只设两个温度级位： -76°C 和 -101°C 。

C_2 加氢是SEI与北京化工研究院(BRICI)合作开发的前加氢技术。

C_3 加氢采用北京化工研究院提供的液相催化加氢技术。

低能耗技术(LECT)充分考虑了能量的合理利用，通过对冷区流程的改进，降低了冷剂的负荷。本流程的特点概括如下：

- 汽油分馏塔设置盘油循环取热，减少塔顶回流汽油量，同时也可作为下游的分馏塔提供再沸器热源。

- 增加重燃料油汽提塔，用高温乙烷炉裂解气对急冷油汽提，使中间馏分返回急冷系统循环，重质组分(HFO)作为产品采出，从而达到控制急冷油黏度，提高汽油分馏塔塔釜温度的目的。

- 裂解气压缩机采用五段，压缩比较低，减少了裂解气在压缩机内结焦的趋势。

- 裂解气压缩机前四段采用注水冷却技术，降低压缩时裂解气温度，可以有效控制裂解气在压缩机内焦粒的生成。

- 双塔双压前脱丙烷系统降低了塔釜再沸器的结焦；

- C_2 前加氢系统不仅脱除了全部的乙炔，同时也脱除了部分的MAPD，降低了 C_3 加氢系统的负荷。

- C_3 洗涤塔、 C_2 洗涤塔、冷箱、预脱甲烷塔和脱甲烷塔合理的流程组合使物料得到了合理分配，既减少了冷量消耗也减少了乙烯的损失。

- C_3 洗涤塔使全部 C_3 被洗涤到塔釜，其塔顶物料不含 C_3 ，同时大量 C_2 也被洗涤到塔釜。这样脱甲烷塔的上部三股进料中只含有 H_2 、 CH_4 和 C_2 组分。采用 C_3 洗涤塔，制冷压缩机的功耗降低。

- C_2 洗涤塔采用分凝分馏塔CFT(Condensing Fraction Tower)专利技术，用尾气的冷量冷凝塔顶气相而形成的液相进行回流洗涤，可以达到以下效果：①进入 C_2 洗涤塔的温度提高，所以冷凝的轻组分减少，降低了进入脱甲烷塔的液量；②进入氢气系统的乙烯含量大幅度降低，乙烯损失减少，乙烯回收率提高。

- 乙烯塔和乙烯机组成开式热泵系统，乙烯塔在低压下操作，回流比降低。同时热泵系统也使丙烯机的负荷大幅度降低。

综合能耗：本技术的开发以典型的石脑油裂解原料为基础，综合能耗达到国际领先水平。

随着乙烯装置裂解原料变重，乙烯装置综合能耗会有所上升。

二、工艺流程简述

以典型的Lummus/ST顺序分离技术为例，乙烯装置工艺流程简图见图2-1-1。

典型的Lummus/ST顺序分离技术装置的生产能力为 1000kt/a 聚合级乙烯，年操作时间为 8000h ，操作弹性为 $50\%\sim 110\%$ ，按5年大修一次进行设计。

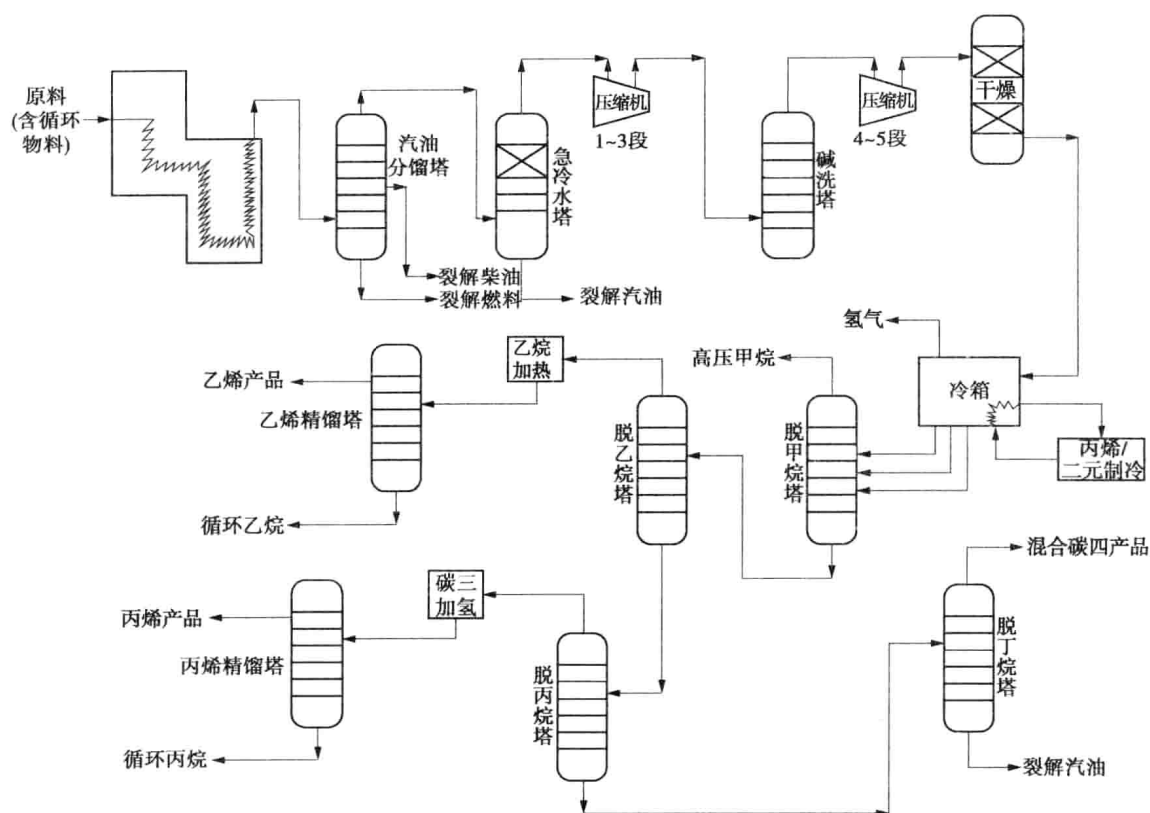


图 2-1-1 乙烯装置顺序分离工艺流程简图

乙烯装置包括以下系统或单元：

裂解炉系统，急冷系统，稀释蒸汽发生系统，压缩、碱洗及干燥系统，激冷及脱甲烷系统，甲烷化单元，脱乙烷及乙炔加氢系统，乙烯精馏系统，脱丙烷及 C_3 加氢系统，丙烯精馏系统，脱丁烷塔系统，二元制冷及丙烯制冷系统，废碱液氧化及中和系统，火炬系统，其他公用工程和辅助设施。

1. 裂解炉

裂解炉区共有 11 台裂解炉。其中，1 台循环乙烷裂解炉，5 台轻质原料裂解炉（简称轻油炉），5 台重质原料裂解炉（简称重油炉）。各种炉型的单台炉的公称能力均为 100kt 乙烯/a。循环乙烷裂解炉以循环乙烷或循环乙烷、丙烷为裂解原料。在轻油炉中，有 2 台炉可以作为循环乙烷炉的备用炉，可以裂解循环乙烷或循环乙烷、丙烷，同时可以裂解石脑油和 LPG 与芳烃抽余液的混合物；其余 3 台轻油炉只能裂解石脑油。重油炉的裂解原料为加氢尾油和石脑油。

2. 重油炉的工艺流程

由界区外来的原料分别经 6 组流量调节阀进入裂解炉对流段上部的上原料预热器 (UFP) 进行预热。

由界区外来的稀释蒸汽分为一次稀释蒸汽和二次稀释蒸汽两股。一次稀释蒸汽经 6 组流量调节阀后与从原料预热器 (LFP) 出来的原料混合并部分汽化。此油气混合物一同进入上混合过热器 (UMP) 过热。二次稀释蒸汽经 6 组流量调节阀后进入对流段稀释蒸汽过热器 (DSSH) 过热，并与来自上混合过热器 (UMP) 的油气混合物混合使其完全汽化并过热。然后