



## 我国乙烯生产工艺现状与发展趋势分析

李振宇, 王红秋, 黄格省, 任文坡, 张博, 魏寿祥

(中国石油天然气股份有限公司石油化工研究院, 北京 102206)

**摘要:** 介绍了管式炉蒸汽裂解、石脑油催化裂解、重油催化裂解、原油直接裂解以及煤(甲醇)、生物质乙醇、合成气、甲烷制乙烯等乙烯工艺, 阐述了各工艺的发展现状和特点, 并从成本、投资、原料和产品等几个方面分析了我国乙烯生产的未来发展趋势, 结论认为, 低油价下石脑油制烯烃将长期在我国烯烃生产路线中占据主导地位, 在原料低成本化、多元化和炼化一体化上具有更大优化空间; 煤、甲醇等非石油路线会受到抑制, 但随着在建煤制烯烃(包括MTO)项目的投产和煤制烯烃技术的进步, 其在乙烯总产能的占比还将增大, 甲醇制烯烃的发展主要取决于稳定廉价的甲醇来源; 乙烷裂解制烯烃则取决于我国乙烷资源的市场供应和价格情况; 应加强甲烷制乙烯和合成气制乙烯的研究开发投入, 力争催化剂等核心技术的突破和解决工程技术问题。

**关键词:** 乙烯; 石脑油; 煤; 甲醇; 乙烷; 甲烷; 乙醇; 合成气

**中图分类号:** TQ81.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6613(2017)03-0767-07

**DOI:** 10.16085/j.issn.1000-6613.2017.03.001

## Analysis on status and development trend of ethylene production technology in China

LI Zhenyu, WANG Hongqiu, HUANG Gesheng, REN Wenpo, ZHANG Bo, WEI Shouxiang

(Petrochemical Research Institute of PetroChina Company Limited, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Ethylene technologies including steam pyrolysis, naphtha catalytic cracking, heavy oil catalytic cracking, direct crude-to-ethylene, coal (methanol) to olefin, biomass ethanol dehydration to ethylene, syngas-to-ethylene and methane to ethylene are reviewed. The development status and characteristics of each process are described and the development trend of ethylene industry in China is analyzed in many ways including cost, investment, raw material and product. It is concluded that the naphtha-base ethylene will occupy the dominant position for a long time in China and have greater optimization space in the raw material cost, diversification and integration. With low oil price, CTO/MTO and other non-oil routes will be suppressed, but with CTO/MTO project under construction coming on stream and technological progress, the proportion of CTO/MTO capacity accounting for the total ethylene capacity will increase. MTO is decided by the stable inexpensive methanol source. Ethane-base ethylene is decided by ethane supplies and the price in China. R & D investment of methane to ethylene and syngas to ethylene should be enhanced, striving for breakthroughs in core technologies such as catalysts and for solving engineering problems.

**Key words:** ethylene; naphtha; coal; methanol; ethane; methane; ethanol; syngas

如果以 1921 年乙烯生产工业化作为开端, 世界乙烯工业已走过 90 多年历程。2014 年, 世界乙烯产能为 1.53 亿吨, 乙烯生产装置 271 套, 平均规模为 56.5 万吨/年, 同比增长 4.3%。世界范围内,

收稿日期: 2016-11-02; 修改稿日期: 2017-01-04。

第一作者: 李振宇(1974—), 男, 高级工程师, 工学博士, 现主要从事炼油、石油化工、煤化工及新能源领域发展战略研究工作。联系人: 王红秋, 高级工程师。E-mail: whq459@petrochina.com.cn。

已建和在建生产能力在 100 万吨/年以上的裂解装置已达 40 多套<sup>[1-2]</sup>。美国是世界最大的乙烯生产国, 2014 年乙烯生产能力为 2842.6 万吨, 占世界总产能的 18.5%; 中国排名第二, 占世界总产能的 13.4%。

过去几年, 中国乙烯产能和需求量均呈现增长态势, 产能从 2011 年的 1536.5 万吨增至 2015 年的 2137.5 万吨, 年均增幅为 6.8%; 产量从 2011 年的 1553.6 万吨增至 2015 年 1730.3 万吨, 年均增幅为 2.2%; 当量需求量从 2011 年的 3132.4 万吨增至 2015 年的 3733.0 万吨, 年均增幅为 3.6%。截至 2015 年底, 我国共有乙烯生产装置 45 套, 石脑油裂解制乙烯和煤(包括 MTO)制乙烯分别占乙烯总产能的 84.7%和 13.1%, 另外, 还有两套乙烯生产装置分别采用 CPP 和 DCC 技术。

到目前为止, 世界上约 98%的乙烯生产采用管式炉蒸汽裂解工艺, 还有 2%的乙烯产能采用煤(甲醇)制烯烃等其他乙烯生产技术。另外, 正在探索或研究开发的非石油路线制取乙烯的方法有: 以甲烷为原料, 通过氧化偶联(OCM)法或一步法无氧制取乙烯; 以生物质乙醇为原料经催化脱水制取乙烯; 以天然气、煤或生物质为原料经由合成气通过费-托合成(直接法)制取乙烯等。

## 1 石油路线乙烯工艺

### 1.1 管式炉蒸汽裂解制乙烯

对于一套乙烯装置来说, 裂解炉技术和可操作性是基石。大型化、提高裂解深度、缩短停留时间、提高裂解原料变化的操作弹性已成为裂解炉技术的主要趋势。近年来, 各乙烯技术专利商在炉膛设计、烧嘴技术、炉管结构、炉管材料、抑制结焦技术等方面均取得了一些进展。已建的最大石脑油裂解炉能力为 20 万吨/年, 最大的乙烷裂解炉能力为 23.5 万吨/年<sup>[3]</sup>。

分离过程是乙烯生产的核心过程, 目前世界乙烯分离技术主要分为 3 大类, 即顺序分离技术、前脱丙烷前加氢技术和前脱乙烷前加氢技术。为了降低分离装置的能耗和设备投资、改进操作工艺、减少设备腐蚀、延长操作周期和减少废弃物生成, 各专利商开发了新的乙烯分离单元技术和分离设备。二元/三元制冷技术可用单一的制冷系统满足一套裂解装置中温度和压力变化所需的冷量, 降低了投资成本, 提高了可靠性。催化精馏技术将催化反应和精馏分离过程集成在一起, 简化工艺流程, 减少设备投资。热集成精馏系统将取代分凝分馏塔, 成

为第二代先进回收技术(ARS)的核心设备, 大幅提高分离效率。分壁式精馏塔用于乙烯分离, 不仅可提高分离效率, 还能减少设备, 节省投资。但分壁式精馏塔的应用难点在于它的控制方案较复杂, 因此需要加强分壁式精馏塔的动态特性研究, 确定优化控制方案<sup>[4]</sup>。

经过多年开发, 管式炉蒸汽裂解工艺已经成熟, 现有乙烯装置主要通过各种先进技术和流程的组合, 不断地进行工艺整体优化。未来蒸汽裂解生产乙烯技术的发展方向仍是向低能耗、低投资、提高裂解炉对原料的适应性和延长运转周期方向发展。

### 1.2 石脑油催化裂解制乙烯

石脑油催化裂解是结合传统蒸汽裂解和 FCC 技术优势发展起来的, 表现出了良好的原料适应性和较高的低碳烯烃收率, 多年来经过学术界和工业界的不懈努力, 取得了许多进展。

根据反应器类型, 石脑油催化裂解技术主要分为两大类。一是固定床催化裂解技术, 代表性技术有日本工业科学原材料与化学研究所和日本化学协会共同开发的石脑油催化裂解新工艺, 以 10%La/ZSM-5 为催化剂, 反应温度 650℃, 乙烯和丙烯总产率可达 61%, P/E 质量比约为 0.7。另外还有俄罗斯莫斯科有机合成研究院与莫斯科古波金石油和天然气研究所共同开发的催化裂解工艺, 韩国 LG 石化公司开发的石脑油催化裂解工艺以及日本旭化成公司等开发的工艺。尽管固定床催化裂解工艺的烯烃收率较高, 但反应温度降低幅度不大, 难以从根本上克服蒸汽裂解工艺的局限。另一类是流化床催化裂解技术, 代表性技术有韩国化工研究院和 SK 能源公司共同开发的 ACO 工艺, 该工艺结合 KBR 公司的 Ortho-flow 流化催化裂化反应系统与 SK 能源公司开发的高酸性 ZSM-5 催化剂, 与蒸汽裂解技术相比, 乙烯和丙烯总产率可提高 15%~25%, P/E 质量比约为 1<sup>[5-6]</sup>。

我国也有多家机构从事相关研究。中国石化北京化工研究院从 2001 年开始进行石脑油催化裂解制低碳烯烃研究, 在反应温度为 650℃, 水/油质量比为 1.1, 空速为 1.97h<sup>-1</sup>的条件下, 乙烯收率为 24.18%, 丙烯收率为 27.85%。另外中国石化上海石油化工研究院、中国科学院大连化学物理研究所等研究机构也开发了石脑油催化裂解制烯烃技术<sup>[7]</sup>。

从理论上讲, 石脑油催化裂解技术是降低反应温度、减少结焦、提高乙烯收率和节能降耗的有效

技术, 尽管各工艺在实验室研究阶段都取得了较理想的效果, 然而由于种种技术和工程上的困难, 工业化进程十分缓慢。

### 1.3 重油催化裂解制乙烯

我国在重油催化裂解制乙烯领域进行了卓有成效的开发研究并取得了重要进展。中国石化洛阳石油化工工程公司开发的重油接触裂解技术(HCC), 在提升管出口温度为 700~750℃、停留时间小于 2s 的工艺条件下, 以大庆常压渣油为原料, 选用选择性好、水热稳定性和抗热冲击性能优良的 LCM-5 催化剂, 乙烯产率可达 19%~27%, 总烯烃的产率可达到 50%。2001 年采用该工艺在中国石油抚顺石化分公司建设了工业试验装置<sup>[8]</sup>。

中国石化石油化工科学研究院在深度催化裂化技术(DCC)基础上开发的催化热裂解技术(CPP), 采用具有正碳离子反应和自由基反应双重催化活性的专用催化剂 CEP-1, 在反应温度 620~640℃, 反应压力 0.08~0.15MPa(表压), 停留时间 2s, 剂油比 20~25 条件下, 以大庆减压瓦斯油掺 56%渣油为原料, 按乙烯方案操作, 乙烯收率为 20.37%, 丙烯收率为 18.23%。2009 年, 该技术在沈阳化工集团 50 万吨/年 CPP 装置上实现工业化应用<sup>[9]</sup>。

### 1.4 原油直接裂解制乙烯

为避免依赖于炼油厂或气体加工厂提供原料, 一些公司开发出直接裂解原油的工艺, 其主要特点在于省略了传统原油炼制生产石脑油的过程, 使得工艺流程大为简化<sup>[10]</sup>。

2014 年, 埃克森美孚公司在新加坡建成了全球首套原油直接裂解制乙烯装置, 乙烯产能为 100 万吨/年。其主要工艺改进是在裂解炉对流段和辐射段之间加入一个闪蒸罐, 原油在对流段预热后进入闪蒸罐, 气液组分分离, 气态组分进入辐射段进行裂解, 液态组分则作为炼厂原料或者直接卖出。以原油价格为 50 美元/桶计, 东南亚地区石脑油价格高于原油价格, 该工艺将显著降低裂解原料成本。

沙特阿美公司也拥有自主的原油直接制乙烯技术。该技术与埃克森美孚公司技术完全不同。其工艺过程为原油直接进入加氢裂化装置, 去除硫并将高沸点组分转化为低沸点组分; 之后经过分离, 瓦斯油及更轻的组分进入蒸汽裂解装置, 重组分则进入沙特阿美公司自主研发的深度催化裂化装置, 最大化生产烯烃。但是该技术目前还停留在设计阶段, 并没有建成生产装置。IHS 认为, 该技术比传

统石脑油裂解生产成本低 200 美元/吨, 但是加氢裂化和催化裂化装置将增加投资成本, 以 15%税前投资回报率计, 该技术与沙特石脑油裂解成本相当。

## 2 非石油路线乙烯工艺

### 2.1 甲醇制烯烃

甲醇制烯烃技术是以天然气或煤为原料转化为合成气, 合成气生成粗甲醇, 再经甲醇制备乙烯、丙烯的工艺, 突破了石油资源紧缺、价格起伏大的限制。代表性工艺有 UOP/Hydro 的甲醇制烯烃(MTO)工艺、Lurgi 的甲醇制丙烯(MTP)工艺、中国科学院大连化学物理研究所的 DMTO 技术和中国石化上海石油化工研究院的 S-MTO 技术, 都已实现工业化应用。

UOP/Hydro 的 MTO 工艺采用类似于流化催化裂化流程的工艺, 乙烯和丙烯选择性可达 80.0%, 低碳烯烃选择性超过 90.0%, 可灵活调节丙烯和乙烯的产出比在 0.7~1.3 范围内。中国科学院大连化学物理研究所针对 DMTO-I 技术在应用中存在 C<sub>4</sub> 以上烯烃副产物的利用问题, 开发了甲醇转化与烃类裂解结合的 DMTO-II 技术, 工业试验表明, DMTO-II 技术的甲醇转化率达到 99.9%, 乙烯+丙烯选择性 85.7%, 1t 乙烯+丙烯消耗甲醇 2.7t; 专用催化剂流化性能良好, 磨损率低。此外, 中国石油化工集团开发的 S-MTO 工艺于 2012 年在中原石化 60 万吨/年甲醇制烯烃装置首次成功应用, 该装置运行结果表明, 对甲醇原料计双烯收率为 32.7%, 产品总收率为 40.9%, 甲醇转化率为 99.9%。

截至 2015 年底, 中国已有 20 套煤(甲醇)制烯烃/丙烯装置投产, 其中乙烯产能合计 281 万吨。如果原油价格继续保持低位行情, 而甲醇及煤的价格下跌幅度有限, MTO、CTO 企业经营压力加大<sup>[11]</sup>。

### 2.2 生物乙醇制乙烯

国内外已有多家公司可提供由生物乙醇原料生产乙烯及其副产品的技术, 2010 年 9 月, 巴西 Braskem 石化公司的 20 万吨/年绿色乙烯装置建成投产, 这是世界上第一套以甘蔗乙醇(采用蔗糖发酵)为原料生产乙烯再生产聚乙烯的装置。我国乙醇制乙烯尚处于小规模生产阶段<sup>[12-13]</sup>。乙醇催化脱水制乙烯过程的技术关键在于选用合适的催化剂。已报道的乙醇脱水催化剂有多种, 具有工业应用价值的主要有活性氧化铝催化剂和分子筛催化剂。

目前采用生物乙醇脱水路线制乙烯在技术上是可行的, 但是尚需解决一些规模化生产的关键技

术问题。主要是研究开发低成本乙醇生产技术；研究开发过程耦合一体化工艺技术，对乙醇脱水生产技术进行过程集成化；研究开发高性能催化剂，降低催化剂成本；装置大型化，提高能源综合利用效率，进一步降低生产成本，使生物乙烯的生产路线和经济效益能够与当前石油制乙烯的价格持平或更具有经济效益<sup>[14]</sup>。

### 2.3 合成气制乙烯

由合成气合成乙烯大多采用  $H_2/CO$  进料比为 1 以下，温度为  $250\sim 350^\circ C$ ，压力低于  $2.1MPa$ 。通常认为设计和研制催化剂体系达到调控产物选择性的目的是费托合成领域研究的重点之一。费托合成最有活性的催化剂是铁、钴、镍。但是，钴和镍易形成饱和烃，活化铁对短链烯烃具有较高的活性，鲁尔化学 (Ruhchemie) 公司用这种催化剂取得了较好的结果，将钛、锌和钾加到铁中 ( $100Fe/25Ti/10ZnO/4K_2O$ )，将含有  $H_2/CO$  比为 1 的合成气原料，在  $340^\circ C$  和  $1.04MPa$  下通过这种催化剂，转化率以  $CO$  和  $H_2$  计算为 87%，选择性是乙烯为 33.4%、丙烯为 21.3%、丁烯为 19.9%、 $C_2\sim C_4$  饱和烃为 9.9%、甲烷为 10.1%，其余为  $C_5$  以上烃类 (在试验室规模的固定床反应器中)<sup>[15]</sup>。

日本在化学试验室中成功地将合成乙醇的铈催化剂和脱水的硅铝酸盐催化剂结合使用，由合成气一步制得乙烯。这种方法是将两种催化剂分成两层装于管式反应器中，通入合成气同时进行反应，乙烯收率可达 52%，选择性为 50%。德国 BASF 公司在实验室已开发成功一种非均相催化剂，目前在进行中试，由于要高选择性地得到低碳烯烃有相当的难度，并且选择性 F-T 合成的催化剂寿命还有待提高，近期难以实现工业化。中国科学院大连化学物理研究所提出的合成气直接转化制烯烃的新路线 (OX-ZEO 过程)，不同于传统费托过程，创造性地采用一种新型的双功能纳米复合催化剂，可将合成气 (纯化后的  $CO$  和  $H_2$  混合气体) 直接转化，高选择性地一步反应获得低碳烯烃 (高达 80%)，且  $C_2\sim C_4$  烃类选择性超过 90%<sup>[16-17]</sup>。

### 2.4 甲烷直接制乙烯

#### 2.4.1 甲烷氧化偶联制乙烯

2010 年，美国锡卢里亚公司 (Siluria) 使用生物模板精确合成纳米线催化剂，可在低于传统蒸汽裂解操作温度  $200\sim 300^\circ C$  的情况下，在  $5\sim 10$  个大气压下，高效催化甲烷转化成乙烯，活性是传统催化剂的 100 倍以上。该公司设计的反应器分为两部

分：一部分将甲烷转化成乙烯和乙烷；另一部分将副产物乙烷裂解成乙烯。这种设计使反应器的给料既可以是天然气也可以是乙烷，提高乙烯收率，同时节约能耗。2015 年 4 月，Siluria 公司投资 1500 万美元，与巴西 Braskem 公司、德国林德公司以及沙特阿美石油公司旗下的 SAEV 公司合作在得克萨斯州建成投运 365 吨/年的 OCM 试验装置，并正在建设乙烯产能 ( $3.4\sim 6.8$ ) 万吨/年的示范工厂，计划于 2017 年建成运行。最终目标为单系列产能 100 万吨/年<sup>[18]</sup>。

OCM 制乙烯技术的核心是催化剂。近十年来，在催化剂组成 (配方) 及催化剂制备方面，国内外许多研究机构对甲烷氧化偶联催化剂做了大量研究工作，取得了一些新的进展，但从催化性能看，以  $C_2$  或  $C_2$  以上的单程收率为衡量指标，绝大多数催化剂都没有超过之前已有的  $NaWMnO/SiO_2$  系列催化剂所能达到的 25% 左右的水平。对于个别报道中  $C_2$  收率达到 30% 左右的反应结果，有待于进一步证实<sup>[19]</sup>。

#### 2.4.2 甲烷无氧制乙烯

近年来中国科学院大连化学物理研究所等单位对催化甲烷无氧转化技术进行了深入研究。大连化学物理研究所基于“纳米限域催化”新概念，开发出硅化物 (氧化硅或碳化硅) 晶格限域的单中心铁催化剂，实现了甲烷在无氧条件下选择活化，一步高效生产乙烯、芳烃和氢气等高值化学品。当反应温度为  $1090^\circ C$ ，每克催化剂流过的甲烷为 21L/h 时，甲烷单程转化率达 48.1%，生成产物乙烯、苯和萘的选择性大于 99%，其中生产乙烯的选择性为 48.4%。催化剂在测试的 60h 内，保持了很好的稳定性。与天然气转化的传统路线相比，该研究彻底摒弃了高耗能的合成气制备过程，大大缩短了工艺路线，反应过程本身实现了  $CO_2$  的零排放，碳原子利用效率达到 100%<sup>[20]</sup>。

## 3 对我国乙烯生产未来趋势研究判断

### 3.1 低油价下石油乙烯原料具有更大优化空间

蒸汽裂解制乙烯技术的原料适应范围宽，乙烷、轻烃、液化气、石脑油、加氢尾油、柴油等均，原料成本在总成本中所占比例高达 60%~80%。采用的原料不同，乙烯的生产成本也有很大的差别。但如果综合考虑乙烯和裂解副产品的价值，在当前原油价格低位运行的情况下，石脑油裂解装置与乙烷裂解装置的竞争差距有所缩小。石脑油裂解

装置的乙烯生产成本约为 4500 元/吨，北美和中东乙烷裂解装置的乙烯生产成本分别在 1500 元/吨和 1000 元/吨左右，中东和北美以乙烷为原料的乙烯生产成本依然保持绝对的竞争优势。

低油价下，替代能源的发展和煤、甲醇等非石油路线生产烯烃将会受到抑制，而石脑油生产烯烃将存在原料低成本化、多元化和炼化一体化的更大优化空间，石油化工竞争力增强。对于千万吨炼油、百万吨乙烯一体化企业，由于柴汽比的降低以及成品油消费增速的趋缓，炼油从大量生产柴油、汽油将转向生产更多的高标号汽油、航空煤油和清洁柴油以及低成本化工原料。这种变化趋势是长期的，国家“十三五”期间结构调整步伐还将加快，将会有更多的低成本优质原料进入乙烯裂解装置。应充分利用蒸汽裂解副产物多样化的优势，做好碳四、碳五和芳烃的综合利用。下游的配套产品应充分体现差异化、高端化、高附加值化，避免加剧通用产品过剩。

### 3.2 低油价下煤制烯烃仍然具有盈利能力

煤制烯烃成本变化与油价变化关系不大，而石脑油制烯烃成本与油价变化密切相关，在 35~55 美元/桶低油价下，石油烯烃成本优势明显、盈利空间较大，而煤制烯烃也能实现盈亏平衡；在 65~75 美元/桶油价下，煤制烯烃成本与石脑油制烯烃成本相当，具有较好盈利水平；当油价在 90 美元/桶以上时，煤制烯烃具有良好效益，而石脑油制烯烃则面临高成本、低利润的状况，如图 1 所示。随着油价走高，煤制烯烃盈利水平增强。特别是煤制烯烃在 85 美元/桶油价下，完全可以满足新建装置内部收益率大于 12% 的要求，盈利能力强。

甲醇制烯烃成本构成中甲醇原料成本占比在

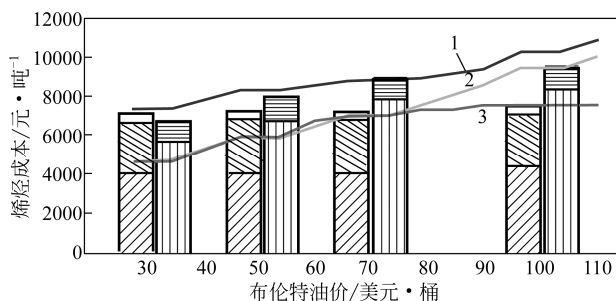


图 1 煤制烯烃、甲醇制烯烃与石脑油制烯烃成本对比

▨煤制烯烃可变成本(含 VAT); ▩煤制烯烃固定成本;  
□煤制烯烃运费; ▤甲醇制烯烃可变成本(含 VAT); ▥甲醇制烯烃固定成本; ■甲醇制烯烃运费

1—进口烯烃价格(含 VAT); 2—石脑油制烯烃成本(含 VAT);  
3—生产 1 吨烯烃进口甲醇成本(含 VAT)

75%以上，其成本变化与进口甲醇价格变化有较大程度的关联，进口甲醇价格升高，导致甲醇制烯烃成本也随之升高，盈利空间很小。在当前低油价下，甲醇制烯烃成本明显高于石脑油制烯烃成本，面临较大压力。

### 3.3 煤制烯烃投资强度高，水资源和碳排放将影响其进一步发展

煤化工项目一次性投资很高，其中煤气化装置的投资占比高达 50%。煤基一体化装置以 PE/PP 为目标产品，大都采用增产乙烯和丙烯的 MTO 二代技术，普遍规模为煤基 180 万吨/年甲醇制 68 万吨/年聚烯烃，投资约 210 亿元。由于煤化工项目一次性投资高、融资难度大，尤其是民营企业资本实力相对较弱、贷款利率高，融资成本要高于国企，因此许多民企的煤化工项目都存在因资金链紧张导致规划项目取消或项目建设进度延迟的问题。甲醇制烯烃由于省略了煤气化和甲醇生产装置，因此一次性投资要大大低于煤制烯烃，一套外购甲醇制 60 万吨/年烯烃、聚烯烃一体化装置投资在 90 亿元左右。

以煤为原料生产烯烃，原料煤炭国内就可满足供应，且原料价格基本不受国际油价波动的影响。但以煤为原料生产烯烃，面临着低油价、水资源和碳排放等多重压力。从煤和石油组成来看，煤的氢/碳原子比为 0.2~1.0，而石油的氢/碳原子比达 1.6~2.0。煤炭由于其组成中碳多氢少，以煤生产石化产品的过程必然伴随着氢/碳原子比的调整，其大规模、低成本来源只能是与水发生反应，从而不可避免地排放大量的 CO<sub>2</sub>，消耗大量水资源并排放大量的污水，而石油组成中由于氢多碳少，其转化（或直接利用）过程中排放的 CO<sub>2</sub> 大大减少，如表 1 所列<sup>[21]</sup>。另外，碳税对煤化工项目的影响很大，目前煤制烯烃装置的成本测算未考虑碳交易税。按照国家示范项目规划要求的能效值来计算单位烯烃二氧化碳排放，由此计算煤制烯烃的碳税约为 100 元/吨，如果国家征收碳税，煤化工项目的竞争力将大大减弱。

### 3.4 实现产品高性能化，提升附加值，是提升烯烃产品竞争力的关键

采用石脑油蒸汽裂解技术，双烯收率为 50%左

表 1 石脑油和煤制烯烃碳排放及耗水量对比

来源	原料消耗或转化 能耗	生产过程 CO <sub>2</sub> 排放量/t·t <sup>-1</sup>	耗水(废水) 量/t·t <sup>-1</sup>
煤制烯烃	5.7 标煤/t	11	22
石脑油制烯烃	550kg 标油/t(能耗)	1~2	3.5~4.5

右，副产品包括丁二烯、苯、甲苯、二甲苯及碳五组分等，产品多样化，应该充分发挥共聚牌号生产优势，开发满足市场需求的管材料、车用料、医用料、高性能膜料等合成树脂产品，改变生产均聚通用产品同质化竞争的局面，实现产品的高性能化和高附加值化，提质增效，增强市场竞争力。采用乙烷蒸汽裂解技术生产乙烯，乙烯收率约为 80%，丙烯及其他产品收率较低，产品较单一，下游配套方案单一，难以实现产品的差异化。

与石脑油蒸汽裂解技术相比，煤制烯烃（包括 MTO）双烯收率约 75%，副产物种类和数量较少。煤制烯烃（包括 MTO）的主要副产物混合碳四以丁烯为主，约占 93%，丁烷和丁二烯含量很少，如表 2 所列，因此其碳四的利用途径与石脑油蒸汽裂解技术的碳四利用完全不同，主要通过 OCU/OCP 技术生成乙烯和丙烯。而石脑油制烯烃的碳四收率约为 15%，主要以丁二烯为主，通过丁二烯抽提工艺分离得到丁二烯产品。

表 2 石脑油和煤制烯烃混合碳四组成对比

来源	异丁烷	正丁烷	异丁烯	1-丁烯	2-丁烯	丁二烯	炔烃
煤制烯烃 (包括 MTO)	0.3	4.8	4.4	22.6	66.5	14	—
石脑油制烯烃	1	2	22	14	11	48	2

### 3.5 我国聚烯烃市场将形成新的格局

煤制烯烃成本变化与油价波动关联度较小，即使在低油价形势下，煤制烯烃产能也在不断扩张，截止 2016 年 3 月，国内煤制烯烃（包括 MTO）产能已达到 839 万吨，占到国内烯烃产能的 18.7%，目前在建产能 884 万吨/年（均在 2020 年前后建成），加上部分处于规划阶段的项目将很快进入建设期，预计 2016 年年底将形成 976 万吨/年产能，2020 年建成投运的煤制烯烃产能占国内烯烃总产能将超过 20%，2025 年将达到 28%，届时国内烯烃市场将形成石油烯烃（含丙烷脱氢制丙烯）、煤制烯烃、进口烯烃（当量）“三分天下”的市场格局，如图 2 所示。

同时，煤制烯烃企业也在努力扩大下游聚烯烃产品牌号种类与数量，例如中天合创的聚烯烃装置就包括 12 万吨/年釜式法高压聚乙烯（可生产高 VA 含量 EVA）和 25 万吨/年管式法高压聚乙烯，市场竞争力将逐渐显现，因此无论从产能增长还是产品结构方面来看，煤制烯烃将对石油烯烃企业带来越来越大的冲击，值得石油企业高度重视。

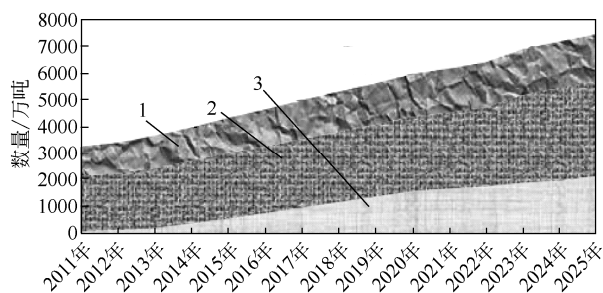


图 2 我国聚烯烃产量、进口量现状及趋势预测  
1—净进口量；2—石油基产量；3—煤基产量

## 4 建议

在当前我国经济新常态、国际油价低位运行、全球石化市场竞争日趋激烈的新形势下，我国乙烯生产企业既面临良好机遇，也面临严峻挑战，作者建议应从以下几个方面做好工作。

(1) 石脑油蒸汽裂解制乙烯的发展应力争实现炼化一体化，裂解原料轻质化、多元化，生产装置的园区化、基地化，下游产品差异化、高端化等，充分利用蒸汽裂解副产物多样化的优势，做好碳四、碳五和芳烃的综合利用，以降低生产成本，提升竞争力。

(2) 低油价下，煤制烯烃产业需要转变过去的规模扩张型的粗放发展模式，坚持精细化发展策略，创新建设运行模式、细化原料加工路径、提高资源利用率、降低成本，同时重视环保、节能、减排、节水等环节，以适应未来更为苛刻的环保要求。

(3) 甲醇制烯烃的发展主要取决于稳定廉价的甲醇来源，可考虑在中东布局天然气制甲醇项目作为国内制烯烃的原料，或者顺应“一带一路”的思路特别是中亚布局天然气制甲醇到烯烃项目，降低原料成本，同时考虑延伸甲醇制烯烃产业链向精细化工发展，提高产品附加值。

(4) 可考虑进口乙烷裂解制乙烯，但应首先落实稳定、连续、价格合理的乙烷原料供应途径，避免原料断档造成装置不能运行，同时也要避免原料价格飙升造成装置运行成本高企。

(5) 继续研究和开发甲烷制乙烯、合成气制乙烯技术。加强甲烷制乙烯和合成气制乙烯的研究开发投入，力争催化剂等核心技术的突破和解决工程技术问题，早日实现工业化应用。

### 参考文献

[1] NICHOLS L. Ethylene in evolution: 50 years of changing markets

- and economics[J]. *Hydrocarbon Processing*, 2013 (4): 27-30.
- [2] LEENA Koottungal. International survey of ethylene from steam crackers - 2015[J]. *Oil&Gas*, 2015, 113 (7): 85-91.
- [3] Ethylene.http://www.technip.com/en/our-business/onshore/ethylene.
- [4] 王红秋. 世界乙烯技术发展日新月异[J]. *中国化工信息*, 2015 (33): 15.
- WANG Hongqiu. Rapid growth of ethylene technology in the world [J]. *China Chemnews*, 2015 (33): 15.
- [5] 魏晓丽, 毛安国, 张久顺, 等. 石脑油催化裂解反应特性及影响因素分析[J]. *石油炼制与化工*, 2013, 44 (7): 1-7.
- WEI Xiaoli, MAO Anguo, ZHANG Jiushun, et al. Study on reaction characteristics and influence factors of naphtha catalytic cracking[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2013, 44 (7): 1-7.
- [6] 王志喜, 王亚东, 张睿, 等. 催化裂解制低碳烯烃技术研究进展[J]. *化工进展*, 2013, 32 (8): 1818-1825.
- WANG Zhixi, WANG Yadong, ZHANG Rui, et al. Advances of catalytic pyrolysis for producing light olefins[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32 (8): 1818-1825.
- [7] 刘剑, 孙淑坤, 张永军, 等. 石脑油催化裂解制低碳烯烃技术进展及其技术经济分析[J]. *化学进展*, 2011, 29 (11): 33-37.
- LIU Jian, SUN Shukun, ZHANG Yongjun, et al. Advance in catalytic cracking of naphtha to light olefins and techno-economic analysis[J]. *Chemical Industry*, 2011, 29 (11): 33-37.
- [8] 沙颖逊, 崔中强, 王明党, 等. 重油直接裂解制乙烯技术的开发[J]. *炼油设计*, 2000, 30 (1): 16-19.
- SHA Yingsun, CUI Zhongqiang, WANG Mingdang, et al. Development of ethylene production using heavy oil contact cracking process[J]. *Petroleum Refinery Engineering*, 2000, 30 (1): 16-19.
- [9] 王大壮, 王鹤洲, 谢朝钢, 等. 重油催化热裂解(CPP)制烯烃成套技术的工业应用[J]. *石油炼制与化工*, 2013, 44 (1): 56-60.
- WANG Dazhuang, WANG Hezhou, XIE Chaogang, et al. Commercial trial of CPP complete technology for producing light olefins from heavy feedstock[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2013, 44 (1): 56-60.
- [10] ExxonMobil's and Aramco's direct crude-to-ethylene production technologies cut refining costs[J]. *Chemical Week*, 2016 (7): 25.
- [11] 石胜启, 吴凤明. 甲醇制烯烃技术工业化进展[J]. *现代化工*, 2016 (4): 38-42.
- SHI Shengqi, WU Fengming. Progress of industrialization of MTO/MTP technologies[J]. *Modern Chemical Industry*, 2016 (4): 38-42.
- [12] 胡徐腾, 李振宇, 黄格省. 非石油原料生产烯烃技术现状分析与前景展望[J]. *石油化工*, 2012, 41 (8): 869-876.
- HU Xuteng, LI Zhenyu, HUANG Gesheng. Present situation and prospect of olefin production technology from non-petroleum raw materials[J]. *Petrochemical Technology*, 2012, 41 (8): 869-876.
- [13] 贾宝莹, 杜平, 杜风光, 等. 生物乙醇制乙烯初探[J]. *化工进展*, 2012, 31 (5): 1028-1032.
- JIA Baoying, DU Ping, DU Fengguang, et al. Research on the preparation of ethylene from bio-ethanol[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31 (5): 1028-1032.
- [14] 王菊, 钟思青, 张成芳, 等. 乙醇脱水制生物基乙烯工艺研究[J]. *化学工程*, 2015, 43 (11): 72-78.
- WANG Ju, ZHONG Siqing, ZHANG Chengfang, et al. Process of dehydration of ethanol to bioethylene[J]. *Chemical Engineering*, 2015, 43 (11): 72-78.
- [15] 董丽, 杨学萍. 合成气直接制低碳烯烃技术发展前景[J]. *石油化工*, 2012, 41 (10): 1201-1206.
- DONG Li, YANG Xueping. New advances in direct production of light olefins from syngas[J]. *Petrochemical Technology*, 2012, 41 (10): 1201-1206.
- [16] 刘忠范. 合成气定向转化制低碳烯烃[J]. *物理化学学报*, 2016, 32 (4): 803-804.
- LIU Zhongfan. Direct production of light olefins from syngas[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2016, 32 (4): 803-804.
- [17] 焦祖凯, 朱连勋, 孙锦昌, 等. 合成气直接制低碳烯烃铁基催化剂研究进展[J]. *工业催化*, 2013, 21 (7): 10-13.
- JIAO Zukai, ZHU Lianxun, SUN Jinchang, et al. Development in iron-based catalyst for direct conversion of synthesis gas to light olefins[J]. *Industrial Catalysis*, 2013, 21 (7): 10-13.
- [18] Methane to ethylene via new oxidative coupling process[J]. *Worldwide Refining Business Digest Weekly*, 2014 (2): 37.
- [19] 张明森, 冯英杰, 柯丽, 等. 甲烷氧化偶联制乙烯催化剂的研究进展[J]. *石油化工*, 2015, 44 (4): 401-409.
- ZHANG Mingsen, FENG Yingjie, KE Li, et al. A review of catalysts for oxidative coupling of methane[J]. *Petrochemical Technology*, 2015, 44 (4): 401-409.
- [20] 胡徐腾. 天然气制乙烯技术进展及经济性分析[J]. *化工进展*, 2016, 35 (6): 1733-1739.
- HU Xuteng. Technology progress and economy analysis on natural gas to ethylene[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35 (6): 1733-1739.
- [21] 李振宇, 黄格省. 推动我国能源生产革命的途径分析[J]. *化工进展*, 2015, 34 (10): 3523.
- LI Zhenyu, HUANG Gesheng. Analysis on ways to promote energy production revolution in China[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34 (10): 3521-3529.