

# 甲醇制烯烃工业化发展进程及现状

刘 辉

内蒙古宝丰煤基新材料有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017300

**摘要:** 甲醇制烯烃 (MTO/MTP) 技术自二十世纪八十年代起逐步发展, 已成为重要的非石油路线制备乙烯、丙烯等低碳烯烃的方法。近年来, 随着环保和能源危机日益突出, 该技术在国内外得到了广泛应用。通过采用先进生产工艺、余热回收及废水处理等技术, 甲醇制烯烃行业在节能减排和可持续发展方面取得了显著进展, 为满足国内对聚乙烯和聚丙烯的需求做出了重要贡献。

**关键词:** 甲醇制烯烃; 工业化; 发展进程; 现状

引言: 甲醇制烯烃技术, 作为替代石油生产低碳烯烃的重要途径, 自上世纪七十年代被初步发现以来, 经历了从实验室研究到工业化生产的快速发展。随着全球能源结构的转型和环保要求的提高, 甲醇制烯烃技术不仅在技术工艺、催化剂研发方面取得了显著进展, 还广泛应用于石油替代、材料制造及医药等多个领域。本文将深入探讨其工业化发展进程及现状。

## 1 甲醇制烯烃技术基础

### 1.1 甲醇制烯烃反应原理

(1) 甲醇转化为烯烃的化学过程。甲醇制烯烃 (MTO) 是将甲醇通过催化反应转化为乙烯、丙烯等低碳烯烃的过程, 核心是打破甲醇分子的C-O键与C-H键, 重新组合形成C-C键。反应以甲醇 ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) 为原料, 在特定温度、压力和催化剂作用下, 先脱水生成二甲醚 ( $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ ), 再进一步转化为以乙烯 ( $\text{C}_2\text{H}_4$ )、丙烯 ( $\text{C}_3\text{H}_6$ ) 为主的烯烃, 同时伴随少量炔烃、芳烃等副产物生成。(2) 主要反应步骤及机理。反应分两步: 第一步为甲醇脱水生成二甲醚, 反应式为  $2\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{OCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ; 第二步是二甲醚与未反应的甲醇共同转化为烯烃, 遵循“炔池机理”——催化剂孔道内先形成甲基苯等活性中间体 (炔池), 甲醇不断与中间体反应生成甲基取代物, 最终裂解为烯烃。

### 1.2 甲醇制烯烃技术类型

(1) 微通道反应器技术。采用微通道结构反应器, 通道尺寸多在微米级, 具有比表面积大、传热传质效率高的特点, 可精准控制反应温度, 减少热点生成, 提升烯烃选择性, 还能实现装置小型化, 适合模块化生产。(2) 超临界反应技术。以超临界流体 (如超临界水、二氧化碳) 为反应介质, 兼具液体和气体特性, 能增强反应物溶解性与扩散性, 促进催化剂活性位点暴露, 同时抑制积碳生成, 延长反应周期, 目前在低碳烯烃高产率

研究中应用较广。(3) 其他新型技术介绍。包括膜分离耦合MTO技术 (利用膜分离及时移除产物, 打破热力学平衡)、光催化MTO技术 (在温和条件下利用光能驱动反应), 这些技术可降低能耗、提升产物选择性, 处于研发或中试阶段<sup>[1]</sup>。

### 1.3 催化剂的研发与应用

(1) SAPO-34分子筛催化剂。目前工业应用最广泛的催化剂, 具有CHA拓扑结构和适宜的孔道、酸性, 能高效催化甲醇转化为乙烯、丙烯, 烯烃选择性达80%以上, 但易因积碳失活, 需通过改性 (如金属掺杂、硅铝比调节) 提升稳定性。(2) 金属氧化物催化剂与离子液体催化剂。金属氧化物催化剂 (如 $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ) 酸性可调, 适合高温反应, 可抑制芳烃生成; 离子液体催化剂 (如咪唑类离子液体) 具有良好溶解性和稳定性, 能在低温下催化反应, 减少能耗, 二者目前多用于实验室研究, 尚未工业化。(3) 催化剂的活性、稳定性及再生技术。催化剂活性取决于酸性位点数量与强度, 稳定性主要受积碳影响; 再生技术以高温烧炭为主, 通过400-600°C空气燃烧移除积碳, 恢复活性, 部分工艺采用蒸汽再生或氢气再生, 可减少催化剂损耗, 延长使用寿命。

## 2 甲醇制烯烃工业化发展进程

### 2.1 国内外甲醇制烯烃技术发展历程

(1) 世界首套煤经甲醇制烯烃工业示范装置的建成与运行。世界首套煤经甲醇制烯烃工业示范装置为德国鲁奇公司与挪威Statoil公司合作开发, 1980年代末在挪威建成小试装置, 1995年荷兰建成中试装置, 但未实现大规模工业化。真正意义上的工业突破来自中国, 2010年, 神华集团包头煤制烯烃项目建成投产, 这是全球首套煤经甲醇制烯烃工业示范装置, 采用自主研发的DMTO技术, 设计产能为年产60万吨烯烃, 标志着MTO

技术从实验室走向工业化，为全球煤炭资源高效转化开辟新路径。（2）我国甲醇制烯烃技术的快速发展及现状。我国MTO技术自2010年后进入高速发展期：2011-2015年，大唐多伦、浙江兴兴等多套DMTO、SMTO技术装置陆续投产；2016年后，技术向大型化、一体化升级，装置产能多在100万吨/年以上。截至2024年，我国MTO总产能超4000万吨/年，占全球总产能的70%以上，形成以DMTO（大连化物所技术）、SMTO（中科院过程所技术）、SHMTO（中石化技术）为主的自主技术体系，摆脱对国外技术依赖，且在催化剂效率、能耗控制等方面达到国际领先水平。

### 2.2 甲醇制烯烃工业化关键技术突破

（1）技术工艺的持续优化。早期MTO工艺存在产物分离复杂、能耗高问题，通过开发“甲醇预处理-反应-产物急冷-烯烃分离”一体化流程，减少中间环节损耗；同时引入催化裂化（FCC）耦合技术，将副产物重烃转化为烯烃，原料利用率从85%提升至92%以上。（2）反应条件的精确调控。通过优化反应温度（380-480℃）、压力（0.1-0.3MPa）及甲醇进料空速，结合微通道反应器、循环流化床等设备，实现反应热均匀分布，避免局部过热导致的催化剂失活，烯烃选择性稳定在85%以上，乙烯与丙烯产出比可根据市场需求灵活调节（1:1至2:1）。

（3）高效催化剂的研发与应用。工业催化剂从早期SAPO-34基础型号，升级为改性SAPO-34（如金属Cu、Ni掺杂），积碳生成量减少30%，再生周期从4小时延长至8小时；同时开发出可原位再生的催化剂体系，无需停机更换，装置连续运行周期从1年提升至3年以上<sup>[2]</sup>。

### 2.3 甲醇制烯烃装置的建设与运行

（1）国内甲醇制烯烃装置的数量与产能。截至2024年底，我国已建成MTO装置42套，总产能达4150万吨/年，主要分布在煤炭资源丰富的西北（陕西、宁夏、内蒙古）及化工需求旺盛的华东（江苏、浙江）地区。其中，产能超100万吨/年的大型装置有18套，占总产能的65%，头部企业如神华、中石化、延长石油的产能占比超50%。（2）主要甲醇制烯烃技术（如DMTO、SMTO、SHMTO等）的应用与比较。DMTO技术：应用最广（22套装置），烯烃选择性85%-88%，催化剂再生成本较低，适合大规模煤制烯烃项目；SMTO技术：共10套装置，采用固定床反应器，投资成本比DMTO低10%，但单套产能较小（多为60-80万吨/年）；SHMTO技术：中石化自主技术，共8套装置，可与炼厂一体化结合，能利用炼厂副产甲醇，产物中丙烯比例更高（可达55%），适合化工与炼油联合企业<sup>[3]</sup>。

## 3 甲醇制烯烃技术现状与挑战

### 3.1 甲醇制烯烃技术的产业化应用

（1）石油替代领域。在全球石油资源紧张、油价波动背景下，MTO技术成为重要石油替代路径。我国煤炭资源丰富，通过煤制甲醇再转化为烯烃，可减少对进口石油依赖，目前国内MTO产出的乙烯、丙烯已占化工原料烯烃总量的30%以上，广泛用于替代石油基烯烃生产聚乙烯、聚丙烯等基础化工品，缓解了石油化工原料供应压力。（2）材料制造领域。MTO产出的低碳烯烃是高分子材料核心原料，乙烯可用于生产聚乙烯（PE）、聚氯乙烯（PVC）等塑料，丙烯可制备聚丙烯（PP）、环氧树脂等。例如，煤化工企业通过MTO技术生产的聚丙烯，已应用于汽车零部件、包装材料等领域，2024年国内MTO衍生材料产值超8000亿元，推动材料制造向多元化原料结构转型。（3）医药领域等。在医药领域，MTO产出的烯烃可作为医药中间体合成原料，如乙烯氧化生成的环氧乙烷，是生产抗生素、维生素的关键中间体；丙烯衍生的丙烯腈可用于制造医药用高分子材料。此外，MTO副产物中的C4-C5烯烃，还可用于生产精细化工产品，拓展了医药及精细化工领域的原料来源。

### 3.2 甲醇制烯烃技术面临的挑战

（1）规模单一与产能相对较低的问题。国内MTO装置虽数量较多，但约40%为中小型装置（产能60万吨/年以下），规模效应不足，单位产品能耗比大型装置高15%-20%；同时，部分装置集中在西北煤炭产区，远离华东、华南消费市场，运输成本增加，整体产能利用率较国际先进水平低8-10个百分点。（2）原料甲醇有效转化目标产品低碳烯烃的效率问题。当前MTO技术中，甲醇转化为乙烯、丙烯的总选择性约85%-88%，仍有12%-15%转化为甲烷、乙烷、芳烃等非目标产物，且反应过程中需消耗大量能量维持反应条件，每吨烯烃消耗甲醇约3.0-3.2吨，较理论最低消耗（2.8吨）仍有差距，原料转化效率待提升。（3）副产物种类多且无法实现高效利用的问题。MTO副产物包含C4-C5烯烃、烷烃、芳烃及少量焦炭，目前仅部分C4烯烃用于生产丁二烯，其余副产物多作为燃料燃烧，利用率不足30%；且副产物成分复杂，分离提纯成本高，尚未形成规模化、高附加值的利用路径，造成资源浪费。

### 3.3 甲醇制烯烃技术的未来发展方向

（1）实现乙烯和丙烯比例大范围可调。通过调控催化剂酸性（如调节SAPO-34硅铝比、金属掺杂种类）与反应条件（温度、空速），开发“柔性生产”技术，使乙烯与丙烯产出比可在0.8:1至2.5:1间灵活调整，满足市

场对不同烯烃产品的需求，提升装置抗市场波动能力。

(2) 开发新型甲醇制烯烃技术。重点研发光催化MTO技术(利用太阳能驱动反应,降低能耗)、膜反应器耦合MTO技术(原位分离产物,打破热力学平衡)及等离子体辅助MTO技术(低温下提升反应效率),这些技术有望将反应能耗降低20%以上,推动MTO向低碳化、高效化发展。(3) 提高催化剂的利用率与降低甲醇单耗。通过催化剂结构改性(如构建多级孔道SAPO-34)增强传质效率,减少积碳生成,将催化剂再生周期延长至10小时以上;同时优化反应工艺,结合原料预处理与产物循环利用技术,力争将甲醇单耗降至2.8吨/吨烯烃以下,提升原料利用率与装置经济效益<sup>[4]</sup>。

#### 4 甲醇制烯烃工业化发展的政策建议与展望

##### 4.1 政策支持与激励机制

(1) 政府对甲醇制烯烃技术的政策支持。建议政府将MTO技术纳入国家战略性新兴产业目录,针对大型化、低碳化MTO项目,在用地审批、能耗指标上给予倾斜;完善行业标准体系,明确MTO装置环保排放、能耗限额等准入门槛,淘汰中小型高耗能装置。同时,加大研发资金投入,设立MTO技术专项基金,支持新型催化剂、低碳工艺的研发与中试,推动技术成果转化。(2) 激励机制的构建与完善。建立阶梯式财政补贴机制,对甲醇单耗低于2.9吨/吨烯烃、副产物利用率超50%的企业给予税收减免;推行绿色信贷政策,优先为MTO与下游新材料一体化项目提供低息贷款。此外,鼓励企业参与碳交易市场,将MTO装置节能改造产生的碳减排量纳入交易体系,通过市场手段激励企业降本增效。

##### 4.2 甲醇制烯烃工业化发展的展望

(1) 技术创新与市场前景。未来5-10年,光催化、膜耦合等新型MTO技术有望实现工业化突破,烯烃选择性将提升至90%以上,甲醇单耗降至2.8吨以下。随着新能源汽车、高端包装等产业需求增长,乙烯、丙烯市

场缺口将持续扩大,MTO技术作为石油替代路径,市场份额有望从当前30%提升至45%以上,发展空间广阔。

(2) 产业链整合与协同发展。将推动MTO与煤炭开采、甲醇生产、下游新材料制造深度整合,形成“煤-甲醇-烯烃-高分子材料”一体化产业链,降低中间环节成本。同时,鼓励西北MTO产能向华东、华南消费市场周边布局,或通过管道运输、园区共建模式,实现区域资源协同,提升产业链整体竞争力。(3) 环境保护与可持续发展。MTO行业将重点推进绿色生产,通过采用超临界反应、催化剂再生余热回收等技术,降低装置能耗与碳排放;针对副产物,开发C4-C5烯烃制精细化工品、芳烃制高性能材料等路径,实现“零废排放”。未来MTO装置将逐步达到“碳中和”生产标准,成为低碳化工产业的重要组成部分。

##### 结束语

综上所述,甲醇制烯烃技术以其独特的转化效率和广泛的应用前景,在全球范围内实现了从实验室到工业化生产的跨越性发展。随着技术的不断进步和市场的深入拓展,MTO技术将持续在能效提升、绿色生产等方面取得突破,进一步巩固其在石油化工替代领域的重要地位。我们有理由相信,甲醇制烯烃的工业化之路将越走越宽广,为构建可持续发展的能源化工体系贡献力量。

##### 参考文献

- [1]刘华.浅析甲醇制烯烃装置自动控制存在的问题及优化措施[J].天津化工,2023,(10):103-104.
- [2]贾国栋.基于节能减排需求的MTO烯烃分离优化探究[J].化工管理,2020,(09):83-84.
- [3]郝西维,张军民,刘弓.甲醇制烯烃技术研究进展及应用前景分析[J].洁净煤技术,2021,(05):48-49.
- [4]王为林.神华甲醇制烯烃技术的工业化应用[J].云南化工,2020,(12):154-155.