



# 变革性的 石脑油制 乙烷/丙烷工艺

提升乙烯裂解效率  
减少副产品并降低碳排放

# 目录

- 3 引言
- 4 第1节 – 全球石化行业现状
- 6 第2节 – 乙烷供应和价格起伏不定
- 8 第3节 – 乙烯生产的增长前景
- 10 第4节 – 推动卓越运营
- 13 第5节 – NEP技术的优势
- 17 第6节 – 案例分享：新型轻质原油制聚烯烃联产装置
- 19 第7节 – 案例分享：利用新型蒸汽裂解炉减少丙烯产量
- 21 结语

# 引言

凭借独创的石脑油制乙烷/丙烷工艺 (NEP)，霍尼韦尔UOP加快乙烯生产技术革新来帮助全球生产商应对严峻的市场挑战并从竞争中杀出重围。

有了NEP工艺，即使在乙烷和丙烷匮乏的地区，生产商仍能实现高效的轻质烯烃生产。

与混合原料裂解装置和石脑油裂解装置相比，NEP工艺使得烯烃生产具有低风险、低成本和高价值等诸多优势。

作为一种变革性的解决方案，NEP技术助力全球各地提升乙烯裂解效率，大幅减少副产品并降低碳排放。



**Keith Couch**  
霍尼韦尔UOP高级业务发展总监



**Gregory Funk**  
霍尼韦尔UOP业务发展总监

## 全球需求

### 石化产品在现代社会无处不在。

它们主要应用于水处理、服装加工、汽车轻量化以及家居建材等领域，与我们的衣食住行息息相关。其他应用还包括医疗和食品行业，比如提供食品包装以防止食物变质并方便全球配送。

自2000年以来，全球塑料需求近乎翻倍。尽管在后疫情时期利润创新高，但石化行业依然面临诸多挑战，包括通货膨胀、原料供应安全、成本上涨、地缘政治风险、竞争力、可持续性以及项目融资等。

## 乙烯需求持续增长

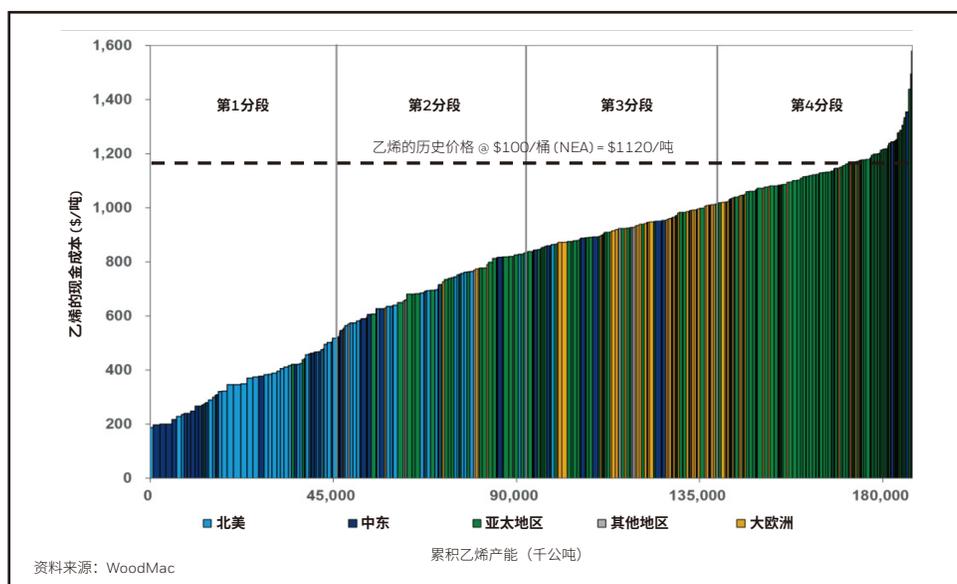
另一个挑战是乙烯需求持续增长——这是许多树脂和塑料生产的基础化工原料。2023年，全球乙烯总产量超过1.85亿吨，高居石化市场榜首。预计2023—2030年期间，乙烯市场将以4%的复合年增长率（CAGR）稳步增长。在全球环境问题日益成为热点的大背景下，要满足如此高涨的全球需求，如何促进节能减排、降本增效成为了当务之急。

蒸汽裂解是全球乙烯生产的主流工艺技术。蒸汽裂解炉通常在850°C以上的超高温并伴随超过1.0 wt%的蒸汽的苛刻条件下通过分子断裂和脱氢反应将碳氢化合物转化成乙烯。

## 乙烯的生产成本

乙烯生产成本在全球范围内不尽相同。乙烯裂解炉从原料上主要分为以乙烷原料为主的气体裂解炉和以液体原料为主的液体裂解炉。相比液体裂解炉，气体裂解炉具有超高成本效益、每吨原料和单位投入所获得的收率高、每吨乙烯的碳排放量低等优势。这些都是项目融资时非常重要的考虑因素。

下图所示为2023年乙烯的现金成本—产能曲线。图中的每根垂直柱对应全球的一套乙烯生产装置，其高度代表各资产的现金生产成本，而宽度则代表产能（吨）。每根柱按全球地理区域颜色编码。成本越高、竞争力越低的生产商在图中越靠右，通常集中在亚太地区和欧洲。这些生产商主要依赖进口液体原料（如石脑油），每吨原料的成本较高且效果不及乙烷。此外，液体裂解炉的建设成本也远高于气体裂解炉。



图表左侧所示为成本更低、竞争力更强的生产商，一般位于北美和中东地区。这些生产商使用以乙烷为主要原料的气体裂解装置，乙烯收率更高且原料价格更低廉。气体裂解炉每吨乙烯的资本支出低很多，利润总体上远高于液体裂解炉（集中在右侧）。

对于本地无乙烷供应的其他地区，生产商过去只有两种选择：1) 依赖进口的液体原料不得不接受较高的生产成本和较低的收率，或2) 从美国墨西哥湾沿岸或中东进口乙烷。

尽管上述比较很有参考价值，但这种全球格局并非一成不变。

**值得注意的是，乙烷无法直接钻井开采，而是油气开采的副产物。**

在2010年之前，北美乙烷和石脑油的成本几乎持平。美国页岩气的蓬勃发展使得天然气凝析液 (NGL) 和凝析油产量激增。随着供应过剩，北美的乙烷价格迅速走低，使其现货价格一直低于石脑油。由于需求有限，大部分乙烷一度被弃置或回注到天然气管道中作为燃料烧掉而未凸显作为石化原料的价值。

到2020年，全球有26个国家和地区使用乙烷作为乙烯生产原料。<sup>1</sup>然而，随着全球需求的增长和油井老化导致的地区乙烷产量下降，美国积极拓展乙烷海外市场，主要包括欧洲、印度和中国。这些市场都大力投资乙烷进口，大部分计划从美国采购。

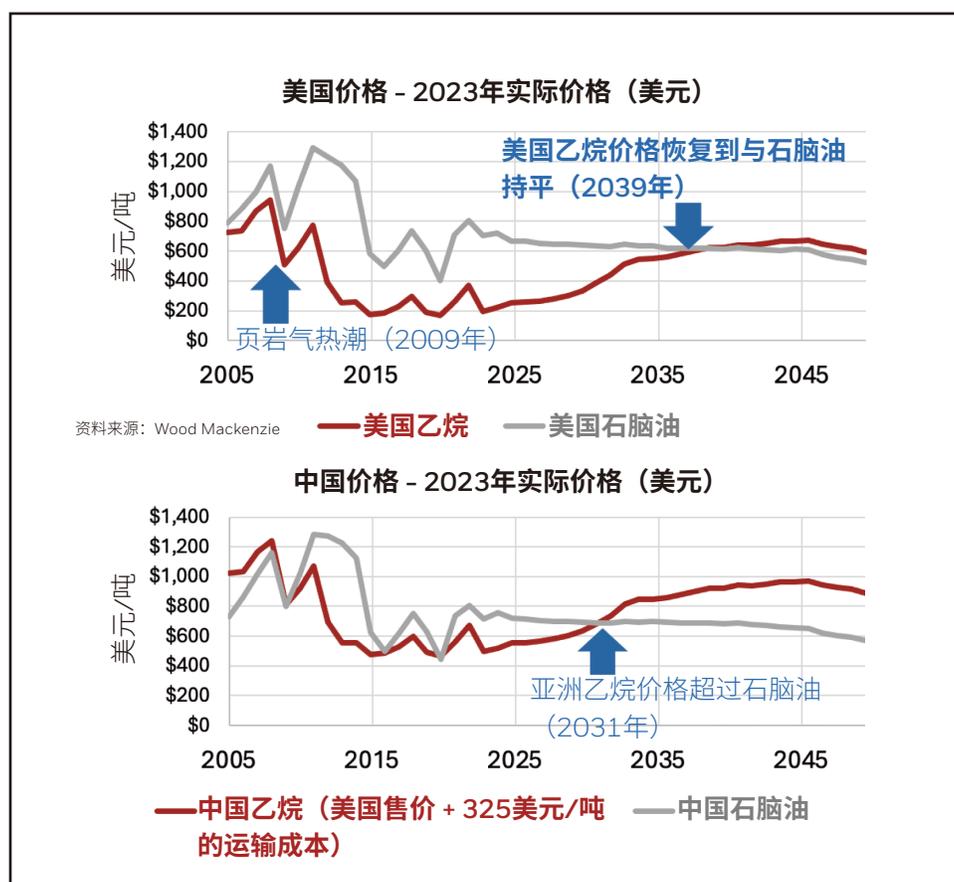
海运乙烷投资成本高昂，需要专门设计的特种运输船。一套200万吨年乙烷裂解装置的进料量需要10艘世界级运输船、配套码头和基础设施，成本接近25亿美元。随着许多船队转向使用甲醇、氨和液化天然气等低碳强度燃料，许多造船厂大量订单积压。几乎同时交付10艘运输船来高效组建船队存在巨大的风险。

投资建立专门的供应链来进口乙烷也会暴露于液化天然气 (LNG) 市场的庞大风险之下。LNG市场通常具有繁荣—萧条的周期性。俄乌冲突导致欧洲天然气价格飙升，随之吸引全球主要天然气生产国纷纷涌入LNG项目。LNG市场的这种摇摆不定很可能导致局势逆转。许多LNG交易商认为这种情况迫在眉睫，并通过签署短期LNG供应合同的方式来管控风险，进一步加剧了乙烷市场的波动。

## 乙烷价格不断上涨

在乙烷市场波动加剧的背景下，由于国内消费增长、出口增多和生产成本上涨，预计北美廉价乙烷的过剩供应的时代即将结束。乙烷价格预计将在未来五到十五年内迅速攀升，基本上在未来五到七年内增长三倍。

随着供需趋向平衡，我们预计未来五到十年内乙烷成本将会上升，最终和石脑油价格持平，恢复约20年前情况。如果这些预测准确，这将对依赖从美国进口乙烷的客户造成巨大的生产成本压力，从而造成重大的商业风险。



## 原油制化工品 (C2C) 联产装置的增长和劣势

大多数咨询公司预测，未来乙烯生产的增长将主要源自整合炼油厂和混合原料裂解装置的原油制化工品 (C2C) 联产装置。

这一观点承认了乙烷原产区与乙烯消费区之间存在根本性脱节。中国、印度和东南亚是乙烯的基本增长区域。为此，中东和整个亚洲的其他国有石油公司 (NOC) 正大笔投资石化行业，实现超越以原油为基础的经济向多元化发展。所有这些地区都在积极利用自有或供应充足且低风险的原料—原油来推动区域发展。

C2C技术因对二甲苯 (pX) 增长而真正崛起，比如利用可编制涤纶纱线—聚酯生产的关键组分来制造各种饮料瓶和功能性服饰。在聚酯需求高涨之际，韩国在2011年至2014年间率先投建了一批对二甲苯联产装置，包揽了全球商业重石脑油的供应。由于缺乏原料来支持聚酯需求增长，中国则推动以对二甲苯生产为主的C2C项目的发展。

近几年，由于对二甲苯产能明显过剩，尤其在中国，C2C的发展有所放缓。尽管如此，乙烯需求增长依然超过对二甲苯产能四倍。鉴于投资所谓单一来源海运乙烷市场相关的供应链风险、基础设施成本、地缘政治风险和国家政策，不少高增长地区正在改变对C2C的看法，将重点从对二甲苯转向轻质烯烃。乙烯实质上替代了之前的对二甲苯。然而，这实际上也使项目开发者不得不转向成本更高、效率更低、碳排放更高的液体裂解炉。



## 可持续发展需求正在影响乙烯的生产方式

作为乙烯生产的主要来源，蒸汽裂解由于高达约850°C的操作温度而成为化工行业的排放大户。高温、高蒸汽工艺需要大量的资本和能量投入。此外，该过程还会产生甲烷，其碳足迹比燃烧天然气高出20%。

在蒸汽裂解中，丙烯是乙烯生产的高价值副产品，其他副产品还有裂解气油和裂解重油。然而，利用丙烷脱氢装置生产丙烯的效率要高很多，且其碳足迹比蒸汽裂解工艺低10倍。

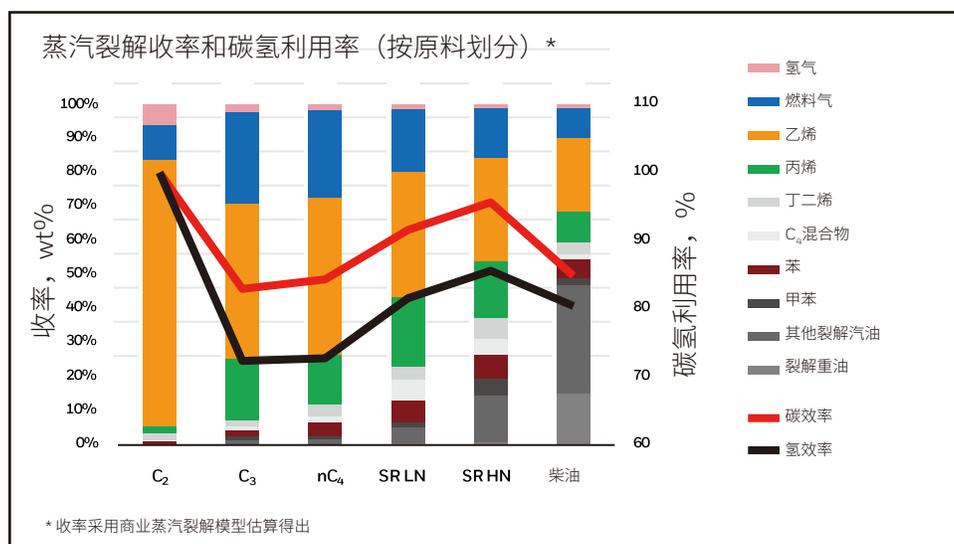
蒸汽裂解所产生的裂解汽油芳烃，其碳足迹比重整装置生产的芳烃高出7倍。此外，随着许多船队纷纷转向甲醇、氢、氨和液化天然气等低碳排强度燃料，以裂解重油作为船用燃料的长期滞销风险不断加剧。因此，混合原料蒸汽裂解炉既不环保可持续也不具成本效益。

## 上述挑战要求生产商更加坚定地押注卓越运营。

卓越运营始于“分子管理”，即将合适的分子送入合适的工艺装置来生产所需产品，同时更大限度降低资本支出、运营支出和碳足迹。

### 高效的乙烯生产

目前全球约96%的乙烯采用蒸汽裂解工艺来生产。虽然蒸汽裂解灵活适应各种原料，但每种原料（如下图所示）带来的收率各不相同。



在蒸汽裂解炉中使用乙烷原料制乙烯生产效率更高。如上图第一根柱所示，比之其他原料，乙烷 (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) 制乙烯收率更高。乙烷原料中约80%的碳最终转化为乙烯，收率超高。燃料气或甲烷产量（蓝色部分）较低，氢气产量（粉色部分）很高，而氢气是一种高价值的副产品，尤其是在亚洲等地区。

需要注意的是，原料越重，乙烯产量越低，而丁二烯、C<sub>4</sub>混合物、苯和甲苯等芳烃副产品，以及裂解重油等重质副产品的产量也会明显增加。

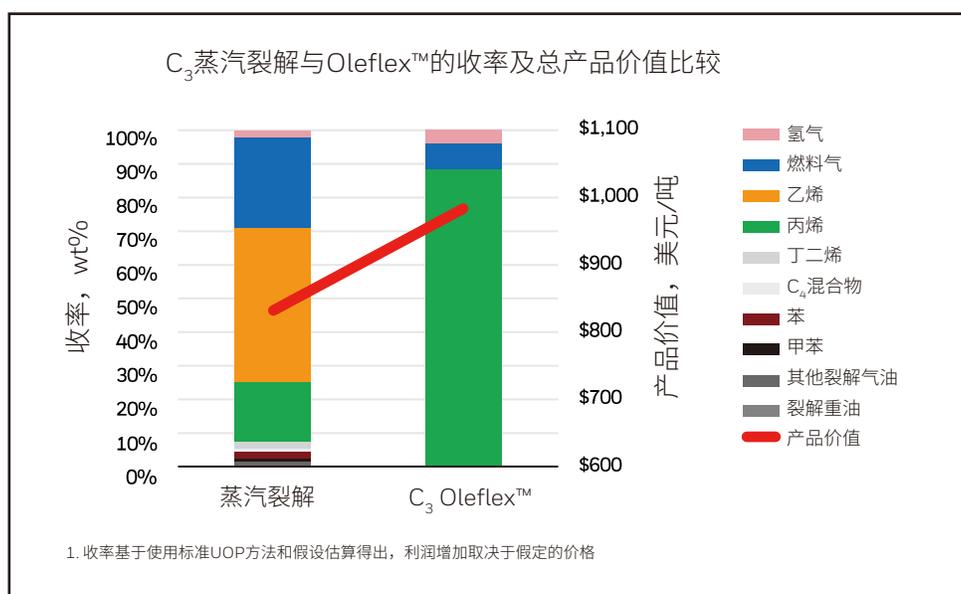
甲烷是该过程最令人失望的副产品之一。甲烷不仅会降低碳利用率，而且所损失的每个碳原子还会带走四个宝贵的氢原子。从蒸汽裂解装置中消除碳密集型甲烷的最佳方法之一就是源头上杜绝它。

另外值得注意的是，将丙烷 (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) 引入蒸汽裂解炉时（从左边开始第二根柱），乙烯的产量会减少，但丙烯的产量会增加，这是许多生产商所希望的。然而，相比于以乙烷作为原料，蒸汽裂解炉使用丙烷为原料时燃料气产量增长近三倍，氢气产量也较低，而重质副产品开始略微增加。

由于卓越运营始于将合适的分子送入合适的工艺装置中，制丙烯的优化方案是采用专产丙烷脱氢 (PDH) 装置，比如霍尼韦尔UOP Oleflex™技术。

## 蒸汽裂解 Vs. UOP Oleflex™技术

下图对比了C<sub>3</sub>蒸汽裂解和Oleflex™技术的收率和生产价值。图中左侧柱同样显示了蒸汽裂解炉中使用丙烷作为原料时的收率分布。右侧柱则显示了将相同的丙烷分子投入Oleflex™装置时的收率分布。



在Oleflex™装置中，近90%的丙烷转化为丙烯。此外，燃料气的收率很低，而高价值的氢气收率很高。



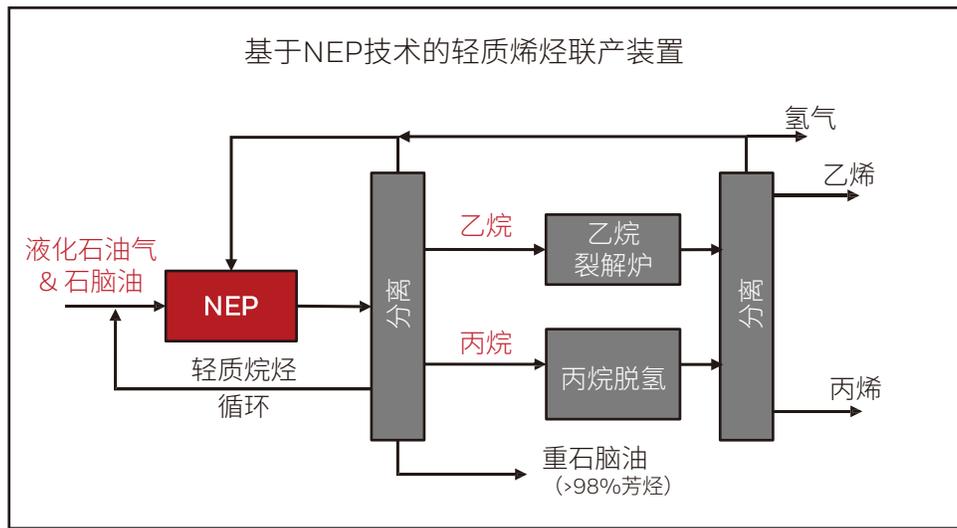
## 液体裂解炉 Vs. 蒸汽裂解炉

除了蒸汽裂解炉，液体裂解炉（主要用于亚洲和欧盟地区）也被用来生产乙烯和丙烯。液体裂解炉造价高昂，以高成本的石脑油为原料且效果较差。而在北美和中东地区，蒸汽裂解炉通常使用乙烷（目前较低廉）作为原料，收率更高、资本支出和运营支出更低。

对于蒸汽裂解装置，生产轻质烯烃更有效的原料是乙烷；而对于PDH装置，更有效的原料则是丙烷。要实现可持续的卓越运营，生产商就要应对原料供需的波动并采用降本增效的技术。为此，石化生产商亟需一种经过优化的、灵活的和更高效的方式来专产乙烷和丙烷，这也是霍尼韦尔UOP研发NEP（石脑油制乙烷/丙烷）工艺的初衷。NEP工艺以液化石油气或石脑油为原料来制备乙烷和丙烷。

## 什么是NEP?

下面流程图说明了如何运用石脑油制乙烷/丙烷工艺在轻质烯烃联产装置中处理液化石油气或石脑油:



NEP工艺能够将液化石油气和/或石脑油转化为乙烷和丙烷，并可视需要调整乙烷和丙烷的产量比，意味着可根据市场需求变化来选择多生产乙烷还是丙烷，甚至完全不需要丙烷。若不需要丙烯产品，则可取消PDH装置。

C2C联产装置中的任何装置所产生的多余氢气、轻烷烃和环烷烃或者商业可获得原料都可送入NEP装置。虽然NEP装置中不会转化芳烃，但允许原料中存在芳烃。是否将其去除只是权衡分离成本和装置水力负荷的一种经济优化。

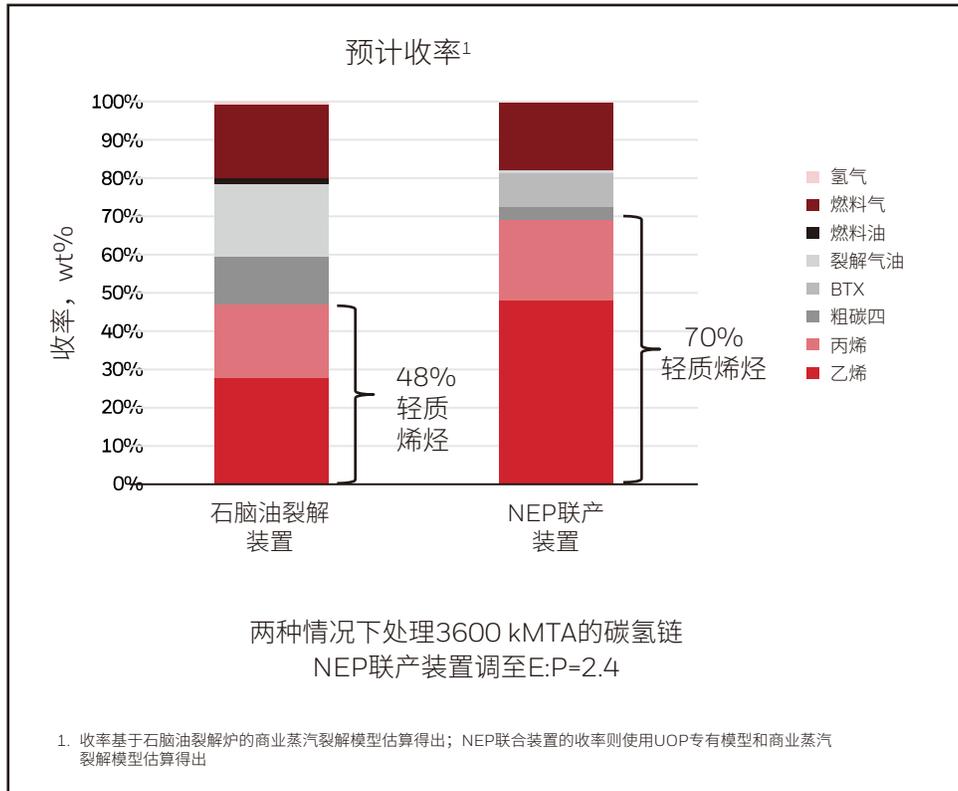
---

NEP减少了生产目标产品所需的原料用量，  
从而降低了供应成本、能耗和运营开支，  
进而减少项目所涉及全部装置的规模。

---

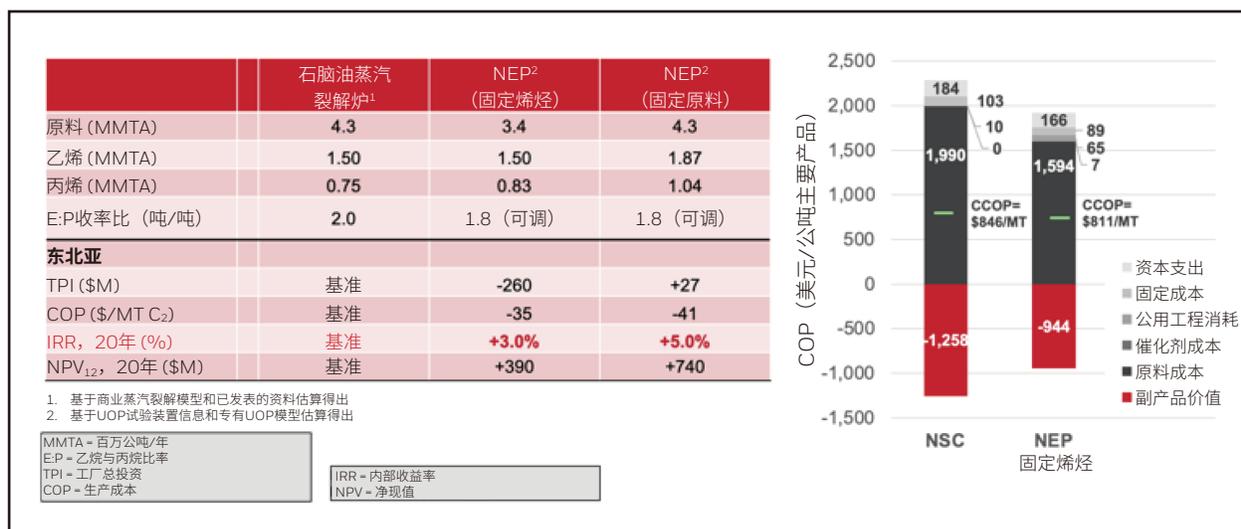
## NEP工艺 Vs. 石脑油裂解技术

利用NEP装置可将石脑油裂解技术的轻质烯烃（乙烯和丙烯）收率从约50%提高到70%以上，即意味着我们可使用相同数量的原料生产更多的高价值目标产品。另外，切记蒸汽裂解炉的主要产品是乙烯。由于混合原料蒸汽裂解装置中乙烯的相对收率较低，因此需增加整个装置的规模来达到所需的目标产量。下面示例显示，相比于基于NEP的联产装置，同等乙烯产量的MFSC（混合进料蒸汽裂解装置）的规模几乎是前者的两倍。



## 利用高收率降低成本

下图中的对比显示了如何通过NEP装置的高收率来减少原料消耗，从而将原料采购量减少多达50%。通常情况下，得益于更高的原料利用率和更少的低价值副产品，生产商可将生产现金成本降低约30~70美元/公吨。这意味着运营利润增加了多达35%，从而使得基于NEP技术的烯烃联产装置更具竞争力和融资可行性。



此外，乙烷（蒸汽）裂解装置的资本成本约为液体或石脑油裂解装置的一半，这降低了总体资本投资并允许添加NEP装置和PDH（丙烷脱氢装置）。

## 产量可调节

NEP生产的乙烷和丙烷比例的范围可从完全不生产丙烷到乙烷-丙烷产量比0.25（1比4）。同时从原料角度看NEP工艺非常灵活，其收率结构受原料碳原子数量的影响很小（丁烷、己烷、石脑油等）。此外，它对异构烷烃具有很强的耐受性，不会像传统蒸汽裂解炉那样引发问题。考虑到异构烷烃对蒸汽裂解炉性能的不利影响，基于MFSC经济性，传统的C2C联合装置的总化学平收率大约限制在70%的中等水平。而NEP对异构烷烃的耐受性使得基于NEP的C2C联合装置中的原料转化率超过95%，从而降低了每吨乙烯的原料消耗，并使原油制净烯烃的收率达到-80%。



## 多重优势提升成本效益和可持续性

NEP工艺不仅大幅提高了独立运行的蒸汽裂解炉的每吨原料的乙烯收率，还减少了一体化C2C联产装置需处理的原油量。

通过将石脑油裂解炉转换为乙烷裂解炉，生产商可提高单套处理能力并获得更大的资本效率。目前石脑油裂解装置规模如果为每年约180万公吨，引入NEP技术之后，通过乙烷裂解可以提高到乙烯产量至每年约220万公吨。也就是说通过NEP技术我们可以突破常规蒸汽裂解装置瓶颈。

随着行业逐步推进未来电加热裂解，乙烷裂解炉的电气化比液体裂解炉更简单，优势更多。

与石脑油裂解的联产装置相比，基于NEP技术的联产装置的每吨轻质烯烃的碳排放可减少50%之多。此外，若客户对无C<sub>4</sub>或芳香烃副产品的低碳解决方案感兴趣，UOP还有进一步降低碳排放并提高烯烃收率至75%的解决方案。

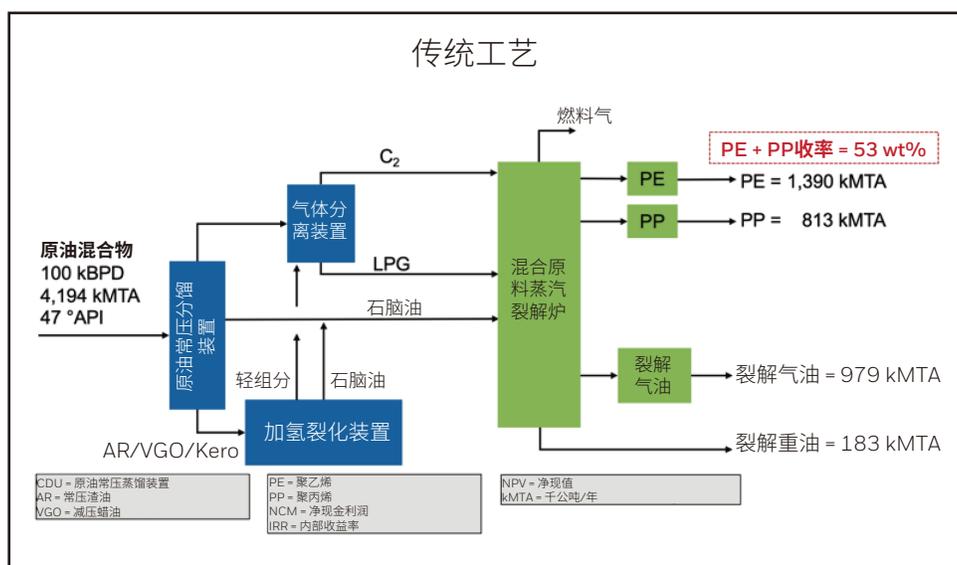
NEP技术的最后一项优势是能更有效地利用工厂的占地面积。NEP技术支持堆叠布局，非常适合新建和现有场地的改造应用。此外，NEP装置无需与工厂的其他部分紧密耦合。若客户有额外的空间，即使离现有设施数里之遥也可使用小型管道将NEP装置连接到蒸汽裂解炉。使用NEP系统，传统C2C联合装置占地面积可节省多达10%。

# 案例分享： 新型轻质原油制聚烯烃联产装置

# 6

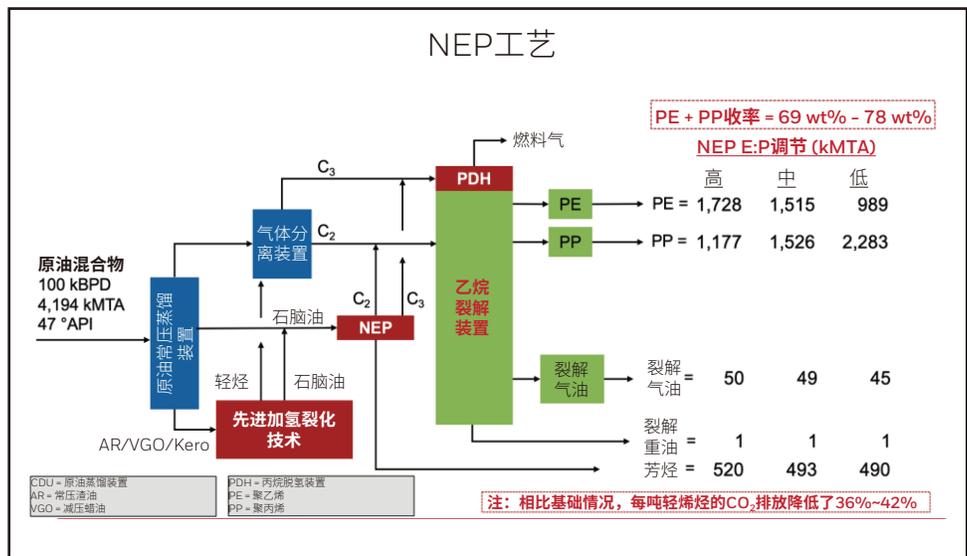
本案例中的客户希望UOP帮助打造一个全新的新建轻质原油制聚烯烃联合装置。

客户的目标是提升聚烯烃收率，减少乃至消除副产品并提高投资回报率。但是该客户并未明确聚乙烯和聚丙烯之间的确切比例，而是希望UOP通过研究确定合适的聚乙烯和聚丙烯比。客户的可用原料为每天10万桶轻质原油混合物。



通过原油蒸馏装置将原料分离成某些关键馏分。其中轻烃和一些石脑油将直接送入混合进料蒸汽裂解炉；而常压渣油、减压蜡油和煤油则送入加氢裂化装置。加氢裂化装置可将大分子分解为小分子，主要用来生产石脑油以供给混合进料蒸汽裂解炉。液化石油气和石脑油通常将被分别送入混合进料蒸汽裂解炉的单独炉膛中以生产乙烯和丙烯，然后得到产品将按固定比例转化为相应的聚合物，聚乙烯和聚丙烯的收率比约为1.7:1。

基于这种传统C2C联合装置的聚乙烯和聚丙烯的总收率约为53%。换句话说，进料中的碳只有约53%最终转化为聚乙烯和聚丙烯这两种目标产品。此外，每年还会产生将近一百万吨的裂解气油副产品（需要处理），以及约20万吨年的裂解重油。



使用传统方法，聚合物的总产率仅约为53%；而使用NEP技术，碳利用率可达69%~78%，并且裂解气油的产量大幅降低，而裂解重油的产量几乎为零。NEP装置会产生一些芳烃。对此，客户可基于经济方面和下游战略考虑将芳烃与裂解气油调和或将芳烃返回到上游进行转化，以完全消除这些副产品物流。

这种基于NEP技术的原油制化工品联合装置的初始投资回报率比基准情况高约4%~5%，这意味着净现值增加了40亿~50亿美元，具体取决于NEP装置的调整。与基准情况相比，基于NEP技术的联合装置的每吨轻烯烃的碳排放（范围1、2和3）减少了36%~42%。该案例的总投资比基准情况高出约10%~20%，考虑到所创造的增量价值，这一额外投资可忽略不计。

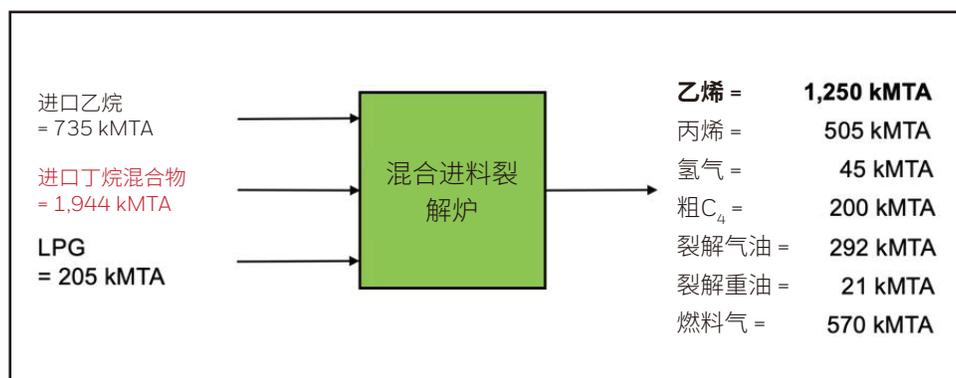
NEP是一种碳改进技术，  
也是一种脱碳手段——利润丰厚的可持续性  
项目，无疑是明智之选。

# 案例分享： 利用新型蒸汽裂解炉减少丙烯产量

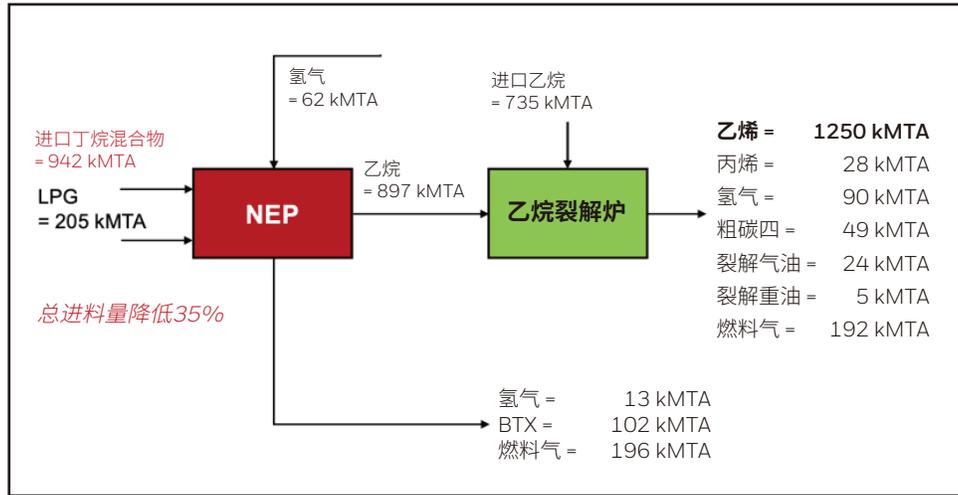
# 7

该案例中的客户筹建一个新的蒸汽裂解装置。

客户规划125万吨年乙烯产能；他们不需要丙烯或其他副产品，但是要求投资回报更大化，且使用的原料约为20万吨年本地液化石油气和73.5万吨年进口乙烷，以及适量的进口丁烷混合物。



上述简易的流程框图显示了达到125万吨/年乙烯年产目标所需的进口乙烷、进口丁烷混合物和液化石油气的用量。请注意，这种传统混合原料裂解工艺需要194万吨/年进口丁烷混合，并会产生大量的副产品，包括丙烯、粗碳四、裂解气油和裂解重油。



UOP的NEP技术可利用进口丁烷混合物和可用的液化气来制备乙烷，然后将其与进口乙烷混合。现在，客户可使用不到一半的进口丁烷混合物来达到125万吨的年产目标，同时大幅减少了副产品。该工艺的丙烯产量减少了94%，燃料气、粗C<sub>4</sub>副产品、裂解气油和裂解重油的产量也明显减少。这种方法实现了乙烷裂解制乙烯，并通过备用供应链降低了原料采购的风险，从而增强了对北美进口乙烷价格波动和上涨的对冲能力。

据估算，基于NEP的联合装置的资本支出比基础工况混合原料裂解装置要低25%，内部收益率则要高约6%。

UOP的NEP技术正在重新定义石化联合装置  
设计理念。

# 结语

NEP是一项战略性、面向未来的技术，有望帮助生产商应对行业挑战，实现卓越运营并保持竞争力。

有了NEP工艺，生产商只需一半的原料就能达成产能目标。

NEP可采用液化石油气和石脑油等丰富的原料制乙烷和丙烷，确保现有设施在未来不受潜在的原料供应和价格波动风险的影响。

NEP可帮助生产商减少乃至消除不必要的副产品。

NEP投资回报率更高，显著改善了内部收益率并大幅削减碳排放。

NEP工艺在原料方面具有灵活性。

UOP的NEP技术随时可对外授权。

---

<sup>1</sup> 普氏能源资讯（2021年）《The Future of Ethane as a Global Commodity》。

**更多信息，请访问：**

欲了解更多信息，请联系您的UOP代表  
或访问网站[www.honeywell.com.cn/ess](http://www.honeywell.com.cn/ess)  
在线联系我们。

**霍尼韦尔（中国）有限公司**

地址：上海环科路555弄1号楼  
邮编：201203  
电话：400-842-8487  
网址：[www.honeywell.com.cn](http://www.honeywell.com.cn)

© 2024 UOP LLC，霍尼韦尔旗下公司。版权所有。

**Honeywell**  
**UOP**