

拥抱能源转型 成就可持续未来



序 言

能源作为现代社会发展的重要物质基础，其转型与升级对于促进经济社会持续健康发展具有重大意义。随着全球气候变化问题日益严峻，推动能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系，已成为全球共识和紧迫任务。此白皮书分析了在全球经济体迈向净零排放的背景下，能源领域尤其是炼化行业在转型过程中的角色和行动指南，为我们展现了节能降碳的创新实践、前沿趋势和未来愿景。

中国坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深入贯彻党的二十大和二十届三中全会精神，全面落实新发展理念，坚定不移走绿色低碳发展道路。中国能源转型的实践与成就，不仅为国内经济社会发展提供了有力支撑，也为全球能源转型和应对气候变化作出了积极贡献。

在国家战略的引领下，我国能源行业正经历着一场以技术创新、环保转型和智能化管理为核心的深刻变革。技术创新正推动传统能源的高效利用和清洁能源的快速发展，通过研发和应用新技术，我们不断优化能源结构，提高能源利用效率。环保转型强调绿色、低碳、循环的发展路径，通过减少污染物排放和提升资源循环利用率，促进能源产业与生态环境的和谐共生。智能化管理利用大数据、云计算、物联网等现代信息技术，实现生产过程的自动化、管理的信息化和决策的智慧化，提高能源行业的整体运行效率和安全水平。

当前，受全球经济承压、炼油效率提升和汽车电气化等因素影响，全球石油需求持续放缓。需求疲软和利润率的降低给原油加工企业造成了更大的压力。炼化企业转型升级已成为行业发展的关键要务。从绿色减碳的角度来看，炼化行业作为碳排放的重要来源，其减排任务尤为紧迫。然而，碳减排技术的创新难度大、成本高，对行业的转型升级构成了一定的阻碍。炼化企业能源转型的核心问题在于如何经济高效地利用绿色技术，在保证经济效益的同时实现绿色升级。

与此同时，能源含“绿”量不断提升，我国能源转型取得显著成就，清洁能源消费比重显著提升，煤炭消费比重下降，清洁能源发电装机容量达到17亿千瓦。中国风电、光伏发电装机规模在2023年较10年前增长了10倍，清洁能源发电装机占总装机的58.2%，新增清洁能源发电量占全社会用电增量一半以上。



李云鹏
中国石油和化学工业联合会党委书记

曾任天津远洋运输公司干部处处长、中国远洋运输（集团）总公司总裁事务部副总经理、纪委副书记、组织部部长兼人事部总经理，中国远洋运输（集团）总公司总裁助理、党组成员、党组纪检组组长、副总经理、总经理、董事，中国石油化工集团公司（中国石油化工有限公司）党组副书记、副总经理。现任中国石油和化学工业联合会党委书记。天津大学在职研究生硕士学位。

炼化的绿色化水平也在逐步提升。炼化行业的转型路径主要体现在两方面：一是“替代路径”，即通过使用绿色电力、绿色氢能等清洁能源，加快废塑料、生物质燃料等可再生资源的利用，推动炼化用能及原料的清洁化；二是“降耗路径”，即通过提高生产效率和智能化水平，采用分子炼油、高效催化等先进技术，提高石油资源的利用效率，增加高附加值产品的产出。通过热能回收、碳捕集等技术在排放终端实现减碳降耗。而智能化技术在炼化的广泛应用也成为优化工艺和绿色低碳的助手，如霍尼韦尔在盛虹石化的节能改造项目，为行业企业提供了借鉴方案。

本白皮书创新地提出未来炼厂的“六大能效理论体系”，综合考虑了技术工艺、可持续性和资本投资三个维度，为炼化企业提供了多角度评估和决策的工具，为能源行业切实推动绿色转型提供了方案策略，也为其他高排放行业提供了转型的参考。

能源转型是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革，需要长期的努力和坚持。我们将继续坚持新发展理念，以供给侧结构性改革为主线，推动能源消费革命、供给革命、技术革命和体制革命，加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系，同时，也将继续秉持共商共建共享的全球治理观，与国际社会一道，深化能源领域合作，共同推动全球能源可持续发展，为建设清洁美丽世界、构建人类命运共同体作出新的更大贡献。

能源转型，道阻且长。行而不辍，未来可期。

中国石油和化学工业联合会 李云鹏

目 录



序言	2
第一章 能源转型时代	6
能源转型的驱动要素	7
能源行业转型的两条路径	10
原料替代	11
降耗减排	12
第二章 未来炼厂能效因子	14
六大能效因子	15
碳效率	15
氢效率	16
能耗效率	17
排放效率	18
水效率	19
资本效率	20
第三章 应用思路及实践	21
应用案例	22
初始配置	22
优化配置	23
国内能源转型趋势展望	27
内蒙古久泰：从乙烯到高附加值 eSAF	27
盛虹石化：双管齐下 持续“变绿”	28
结语	29

第一章 能源转型时代

从木柴到煤炭再到油气，在过去的两个世纪里，我们获取能量的方式发生了巨大变化。在石油时代，是炼厂将石油转化为可以直接使用的燃料，这也直接导致过去炼油产业始终是以燃料生产为根本，人类获取原油大部分被用来生产燃料油，即汽油、柴油和重质船用燃料油等。



能源转型的驱动要素

从木柴到煤炭再到油气，在过去的两个世纪里，我们获取能量的方式发生了巨大变化。在石油时代，是炼厂将石油转化为可以直接使用的燃料，这也直接导致过去的炼油产业始终以燃料生产为根本，人类获取的原油大部分被用来生产燃料油，即汽油、柴油和重质船用燃料油等。

如今，炼化行业正在发生深刻巨变，其驱动力量主要来自气候影响和需求变化。

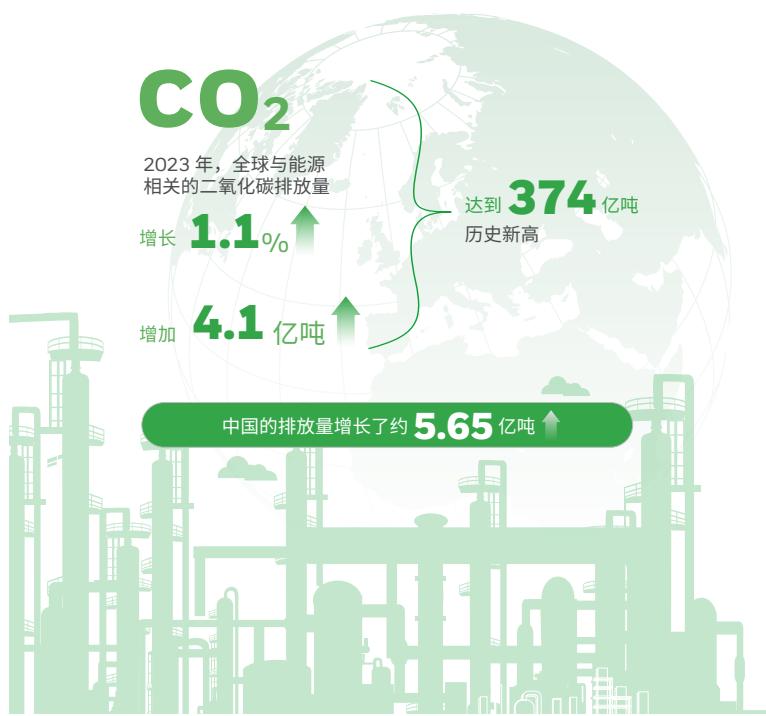
首先，能源生产所带来的碳排放对气候的影响深远。化石燃料作为迄今为止全球气候变化的主要促成因素，占全球温室气体排放量的 75% 以上，占所有二氧化碳排放量的近 90%¹。而炼化行业同样是温室气体排放的重要来源，且能源集中度高、排放强度大，排放量占全球温室气体总排放量的约 7%²。

2015 年，为应对迫在眉睫的气候挑战，全球 193 个国家和欧盟在巴黎签署《巴黎协定》，各国承诺将全球平均气温“较工业化前水平升高控制在 2°C 以内”，并努力“将气温升幅限制在工业化前水平以上 1.5°C 之内”——这意味着全球应在本世纪中叶前实现二氧化碳净零排放。

但世界气象组织 2024 年 6 月发布的报告却预言，未来 5 年中，有 80% 的可能性至少有 1 年的全球年平均温度将比工业化前水平暂时高出 1.5°C³。

碳排放数据也佐证了这一趋势，2023 年，全球与能源相关的二氧化碳排放量增长 1.1%，增加 4.1 亿吨，达到 374 亿吨的历史新高。中国的排放量增长了约 5.65 亿吨，是迄今为止全球最大的增幅，也是疫情后中国排放密集型经济增长的延续⁴。

气候挑战正在倒逼能源转型，对传统化石能源生产的监管限制相应增加，能源企业将直接面临产品市场需求下降和经营成本上升等问题，相关企业甚至面临竞争力下降、监管罚款、限制生产等风险。淘汰现有落后化石燃料基础设施、停止新增技术落后项目、使



1 联合国网站，<https://www.un.org/zh/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>

2 国际能源署（IEA）报告

3 联合国：未来 5 年全球温度可能暂时超过高于工业化前水平 1.5°C 的水平
<https://news.un.org/zh/story/2024/06/1129126>

4 CO₂ Emissions in 2023 – Analysis – IEA

用碳捕集与封存（CCS）技术改造化石燃料发电厂，以及向低碳燃料转型等措施皆能有效改善这一困境。

其次，可再生能源、新能源汽车等行业高歌猛进，化石燃料使用即将达峰。近年来，由风电、太阳能光伏和电动汽车（EV）引领的新型清洁能源经济蓬勃发展⁵。

可再生能源方面，国际可再生能源署（IRENA）于2024年3月发布的统计数据显示，2023年电力领域的可再生能源部署

创下新纪录，达到了3870吉瓦的全球总装机容量，可再生能源占据了新增装机容量的86%⁶。

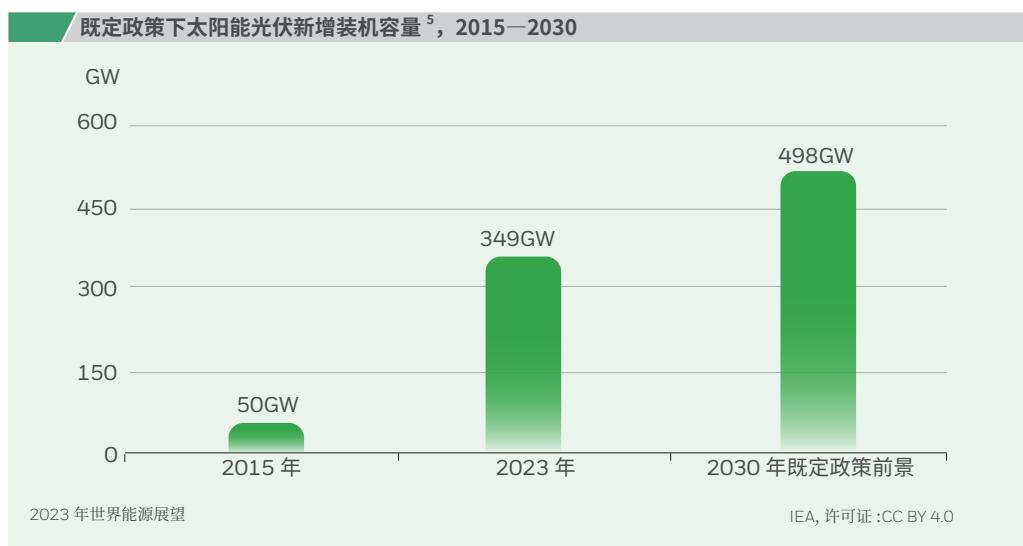
而且，清洁能源系统关键组成部分的产能也正在迅速扩大，可再生能源在全球发电总量中的份额持续增加。

新能源汽车方面，2020年，全球每25辆售出的轿车中有1辆是电动汽车；到了2023年，全球每5辆售出的轿车中就有1辆是电动汽车⁷。



2030年既定政策情景下的太阳能光伏装机容量增加到

500GW



与此同时，随着能源转型推进，现有政策下石油需求增长将明显放缓。据IEA预测，对于石油中用作化石燃料的部分（不包括生物燃料、石化原料和其他非能源用途），其需求受能源转型和电动车销量上涨影响将于2028年见顶。

最后，市场对高端化工产品的需求日益增长，

相关需求缺口凸显。当前，全球化工产品与燃料产品的需求前景出现分化，化工产品需求仍以较快速度增长，而燃料产品的需求即将达峰，化工产品的增长将成为未来石油需求增长的主要驱动力⁸。

因此，炼油厂的产出或将需要转向特殊油品和高端化工产品，以适应不断变化的需求模

5 国际能源署（IEA）：《2023年世界能源展望》

<https://origin.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023/executive-summary>

6 国际可再生能源署：可再生能源的增长创下新高，但发展程度需要平等

<https://www.irena.org/News/pressreleases/2024/Mar/Record-Growth-in-Renewables-but-Progress-Needs-to-be-Equitable-ZH>

7 《华尔街日报》网站：2023年12月17日《2023年：地球变暖，清洁能源起飞》

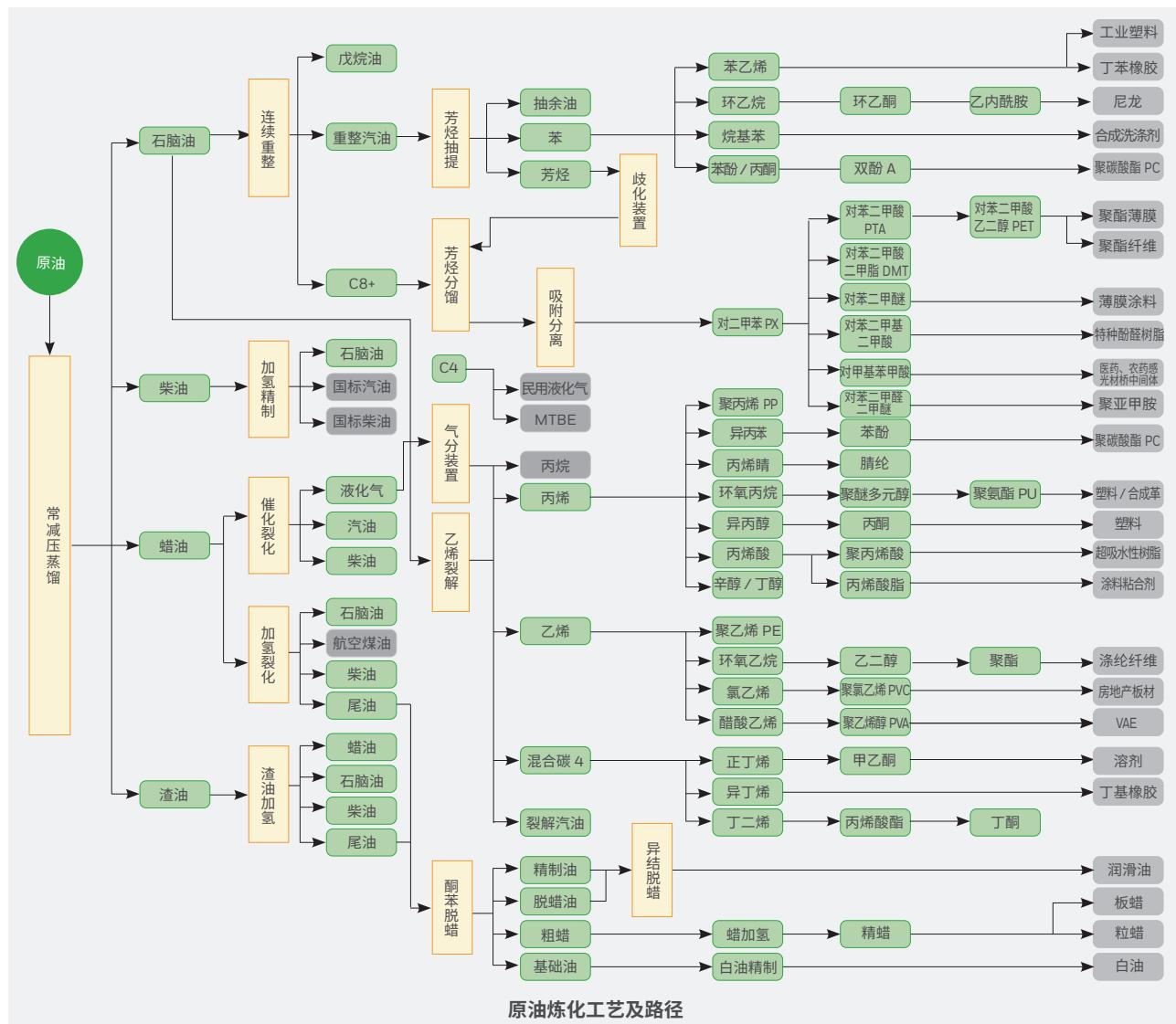
8 《国际石油经济》2023年第4期



式，而只有拥有石化生产能力的炼厂才能实现将原油转化为更有价值的产品。

综上所述，能源转型的三大驱动要素引发

当前能源转型的要点，“减排”即降低二氧化碳排放，“减油增化”即降低燃料产品生产，使用更多清洁能源，同时提高化学产品占比。



能源行业转型的两条路径

由于能源行业相关企业所处的地理格局不同，所从事的产业链也不尽相同，因此不存在单一且统一的转型路径及目标。

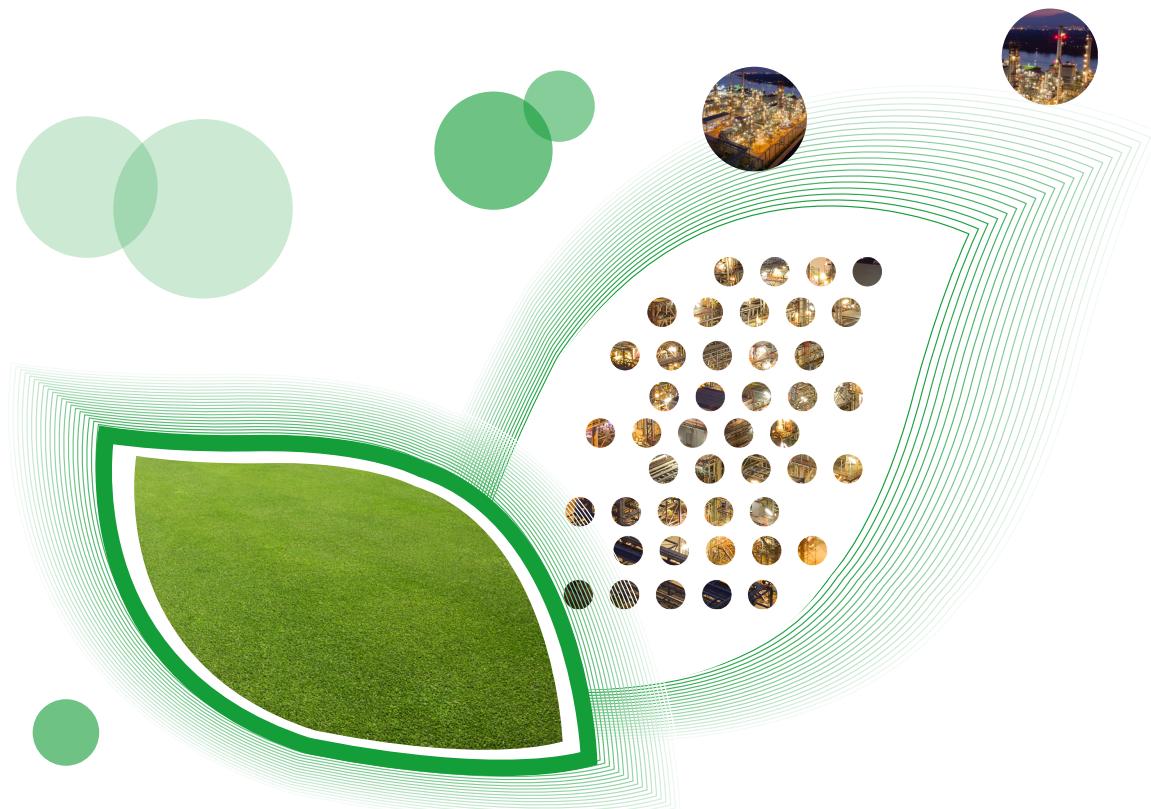
以炼化企业为例，若从业务角度出发，企业可采用多种原料，生产多样化产品，建设综合性炼化一体化工厂，从而延伸更长的产业链，拓展更多的相关业务，以应对市场不确定性的变化。若从运营角度出发，高效的规划、设计和管理也非常重要，可引入各类新的原料，如废塑料、废弃生物质，更好地利用风能、太阳能等绿色能源，进一步生产多种高附加值产品，最终建设新型能源、新化工和新材料综合体。

针对“存量”和“增量”业务，也可以制定相应的能源转型策略。对于“存量”部分的降碳策略，可通过改进现有工艺路线、产品和生产设施，在节能降耗的同时让低效产能

有序退出；对于“增量”部分，可通过“减油增化”等产品调整和能源结构调整等深度转型，通过产品升级提升产品品质，推动产品多元化发展和电气化改造，并实施清洁能源替代，利用以CCUS(碳捕集、利用与封存)为代表的先进负碳技术抵消化石燃料与过程碳排放。

此外，企业还可通过精细化管理、数字化运营和精益生产来为能源转型提供助力。例如，霍尼韦尔UOP的互联服务可帮助炼化企业获得业务洞察，通过提供更高的运营可见性，从而识别炼油和石化生产过程中的优化机会，进一步提升运营表现。

转型路径多种多样，本白皮书仅从具有代表性的“原料替代”和“提效降耗”两条能源转型路径进行拆解和分析。





原料替代

原料替代，本质上是将石油或者煤炭等原料替换成生物质等可再生原料、废弃物原料或者二氧化碳等工业废气，通过高效技术的创新和应用，绿色能源的应用和耦合，实现低碳甚至减碳发展。

以生物质原料为例，企业可引入生物质原料并建设独立的生物质加工装置，不仅能以较经济的方式生产液体燃料，且其能源密度比乙醇和生物柴油高，还可与石油产品及其配送系统相兼容。此外，利用生物质原料还可生产高附加值生物基化学品或氢气，实现原料可再生并降低碳排放。

近年来，全球各地针对原料替代开展了部分生物质合成油技术研究与生产示范，但仍面临不小的挑战，例如原料必须易得、运输方便并易于处理，同时应尽可能使用工厂现有的工艺和装置等。

在原料替代方面，霍尼韦尔可从全生命周期维度助力企业寻找适合自身情况的原料，通过原料替代迈入高质量发展的新阶段。

▶ 二氧化碳循环利用

上世纪 80 年代，霍尼韦尔发明了甲醇制烯烃的技术（MTO），至此进一步丰富了制备烯烃的路径。后来，霍尼韦尔 UOP 又开发了甲醇制航空燃料（MTJ）工艺技术 eFining™，使用绿氢和二氧化碳耦合而成的 eMethanol（电子甲醇）作为原料，能够可靠、高效和低成本地生产 eSAF（即电子航空可持续燃料）。

相比于传统航空燃料，UOP eFining™ 工艺制备的 eSAF 可减少 88%⁹ 的温室气体（GHG）排放，且可与传统航空燃料混合并作为石油基航空燃料的直接替代燃料，无需对飞机发动机或燃油系统进行任何改动。

作为首批用于商业航空可持续航空燃料生产的技术之一，该技术可将低利用率的现有资产转化为高产量的可再生燃料生产装置，从而生产需求不断增长的可再生燃料。此外，这项技术还将帮助企业满足未来的法规规定，并享受随之而来的优惠政策。

▶ 废气塑料循环利用

此外，聚合物原料替代也可“另辟蹊径”。在炼化过程中采用的聚合物原料也可通过塑料废品转化而来——霍尼韦尔 UpCycle 工艺技术可将大多数塑料废品转化为聚合物原料，甚至可回收彩色、柔性、多层包装或聚苯乙烯等原本无法回收的废塑料。



霍尼韦尔 UpCycle 工艺技术有望将全球可回收的塑料废弃物比例提高到

↑ 90%

对于炼化企业来说，利用 UpCycle 工艺技术进行原料替代，不仅减少制造原生塑料过程中的化石燃料消耗，还减少了传统的废物处理。结合其他化学及机械回收工艺并改进废品收集和分类，霍尼韦尔 UpCycle 工艺技术有望将全球可回收的塑料废弃物比例提高到 90%¹⁰，大幅拓宽了可回收塑料的种类，成为替代原料的新来源。

▶ 可再生原料替代

在氢气原料替代方面，当前炼化产业仍以灰

⁹ 温室气体减排量数据基于 UOP 碳强度分析。该分析源自第三方的一项研究，该研究系关于利用生物质加工过程中捕获的二氧化碳和绿氢生产生物质甲醇，并与化石燃料碳强度进行比较。

¹⁰ 假设分拣和收集工作得到改善，从而能够回收绝大部分塑料废品，同时包括霍尼韦尔 UOP UpCycle 工艺在内的化学回收技术得以广泛应用。根据参与回收塑料废品的消费者或社区数量，以及回收设施的可用性，90% 回收率这个数值可能会有所变化。根据霍尼韦尔 UOP 对美国环保署《推进可持续材料管理：2018 年事实和数据》以及 IHSMarkit《2019 全球聚合物消费数据》的分析。

氢为主，基本依赖化石原料制氢以及炼厂和乙烯装置副产氢，用能仍然以化石能源为主。霍尼韦尔的“绿氢”技术也可帮助炼化企业降低成本，并实现二氧化碳减排。2022 年，霍尼韦尔开发出新型催化剂涂层膜（CCM）

技术，能够利用可再生电力驱动的电解槽将水电解成氢和氧从而生产绿氢。该技术已经过领先电解器制造商的测试，并证实其电流密度是目前市售 CCM 的 1.3 倍，可将非 CCM 电堆组件的成本降低 29%¹¹。

降耗减排



对于炼厂这类能源企业来说，汽、煤、柴油及化工用油（石脑油）是它们的主要产品。在“双碳”目标下，原油直接制烯烃工艺成为许多新建炼厂多产化学品的首选技术途径。当前，基于炼油向化工转型的需要，炼厂正在不断改进工艺技术，如重油催化裂解多产低碳烯烃、蜡油及柴油加氢裂化多产化工原料、轻石脑油催化重整多产芳烃和氢气等技术。

与此同时，越来越多的炼厂也开始配置二氧化碳捕集及利用装置，炼厂生产工艺布局总体上将发生较大变化，化工型炼厂或将是未来炼厂发展的主流方向。

此外，炼厂的耗能大户主要是加热炉等设备，例如常减压蒸馏、焦化、连续重整、柴油加

氢等装置的加热炉，能耗高、碳排放量大。在能源转型过程中，炼厂可通过换热流程的优化、先进节能技术的应用以及生产用能电气化等措施实现减排。

在“降耗减排”路径下，霍尼韦尔同样拥有相应的创新技术支持炼厂实现能源转型。

▶ 原料轻烃化减排

在能源转型过程中，以石化原料轻烃化技术为例，从天然气到原油，再到煤炭等化石原料都可以作为化工产品的原料，但原料越轻，其分子里的氢 / 碳比越高，比如天然气甲烷的氢 / 碳比为 4，而煤的氢 / 碳比要小于 1，氢 / 碳比低的原料在生产工艺中往往需要生产氢气，而氢气生产过程一般是碳排放的过

¹¹ 基于一款 PEM 水电解系统，该系统使用可再生能源年运行 5000 小时，生产 2300 公吨氢气。在相同电池电压下运行时，电流密度更大，法拉第效率更高



程，以煤制烯烃为例，为了生产足够多的氢气，工艺过程需要变换反应，由一氧化碳加水生成氢气和二氧化碳，这就增加了碳排放，因此，原料轻烃化也是降低碳排放生产化工产品的途径之一。

霍尼韦尔的烷烃脱氢技术（PDH）就是化工产品原料轻烃化的典型代表——霍尼韦尔有丙烷脱氢制丙烯、丁烷脱氢制丁烯并进一步脱氢生产丁二烯的技术。丙烷脱氢制丙烯是目前市场上主要的定向丙烯生产技术之一。预计到 2027 年，这一技术贡献的丙烯产量有望达到 42%¹²。作为业内主流的丙烷脱氢工艺之一，霍尼韦尔 Oleflex™ 丙烷脱氢技术采用基于环保高效的铂系催化剂的移动床工艺，并配有催化剂连续再生系统（CCR），因此霍尼韦尔 Oleflex™ 工艺技术具有更低的丙烷消耗，更低的生焦量，也就是更低的二氧化碳排放、更低的操作成本和更高的在线率，不额外增加环保风险和治理支出。

► 乙烷裂解减排

霍尼韦尔的石脑油制乙烷 / 丙烷（NEP）作为新一代原料优化技术，主要用于将乙烷送入乙烷裂解炉以优化乙烯和氢气，再将丙烷送入丙烷脱氢装置以优化丙烯和氢气。该技术应用乙烷裂解装置，不仅支持多样化的原料来源，还能显著提高烯烃收率，调整产品结构，降低生产每吨烯烃所产生的二氧化碳排放量并提高投资回报率。

值得一提的是，霍尼韦尔还能根据不同类型

工艺加热炉的应用要求提供定制化燃烧器，如炼油常减压加热炉、乙烯裂解、焦化装置、柴油加氢，蜡油加氢，渣油加氢，CCR（连续催化重整），芳烃装置和丙烷脱氢工艺加热炉等。其中，高性能的凯勒特低氮燃烧器是霍尼韦尔 UOP 为应对中国新的排放标准所研发的技术之一，采用独特的低氮燃烧技术，有效降低炼化一体化工艺加热炉中的 NOx 排放。

其他能源行业及工业企业的低碳转型也可以同时参考霍尼韦尔在高温热泵应用及余热回收利用领域的综合解决方案。目前，霍尼韦尔 Solstice® 低全球变暖潜值系列产品正帮助各厂家在保证最终产品性能不降低的前提下，减少碳足迹并提高能效。

综上所述，国内外企业可通过“原料替代”和“降耗减排”两条路径，加速自身能源转型进程。而作为本白皮书重点关注的能源及化工企业，很多已逐步开始引入循环原料和生物质原料，并加速革新催化裂化、焦化、加氢裂化、沸石催化剂等技术，应用和耦合绿色能源，通过多元化低碳化的原料和生产来寻求减碳。

但在实际应用中，业内仍急需一套完整、科学且具有一定普适性的理论转型模型，来对不同炼化企业的能源转型进行适配和指导，助力企业更好更快地决策和转型。

未来炼厂“六大能效因子”模型为企业转型提供了这样的思维框架。



国内外企业可通过“原料替代”和“降耗减排”两条路径，加速自身能源转型进程

¹² 《霍尼韦尔 UOP 丙烷脱氢前沿技术展望报告》



第二章

未来炼厂能效因子

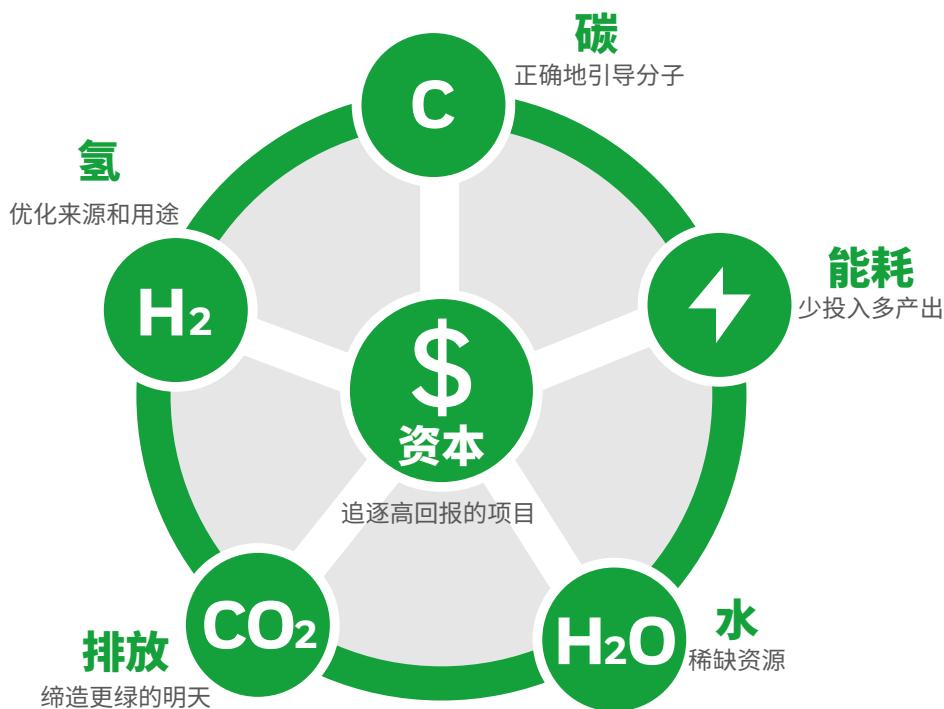
霍尼韦尔在《未来炼厂白皮书》中对未来炼厂的 6 个关键指标：碳效率、氢效率、能耗效率、排放效率、资本效率和水效率进行了量化，并基于行业共识和洞察，针对炼化企业建立了完整的框架分析体系。今天，霍尼韦尔进一步优化了这个模型，炼化企业可在项目执行过程中进行前后对比及评估，还可与同类型项目进行横向对比，实现价值增值更大化。



六大能效因子

2021 年，霍尼韦尔在《未来炼厂白皮书》中对未来炼厂的 6 个关键指标：碳效率、氢效率、能耗效率、排放效率、资本效率和水效率进行了量化，并基于行业共识和洞察，针对炼化企业建立了完整的框架分析体系。

今天，霍尼韦尔进一步优化了这个模型，炼化企业可在项目执行过程中进行前后对比及评估，还可与同类型项目进行横向对比，实现价值增值更大化。



C 碳效率

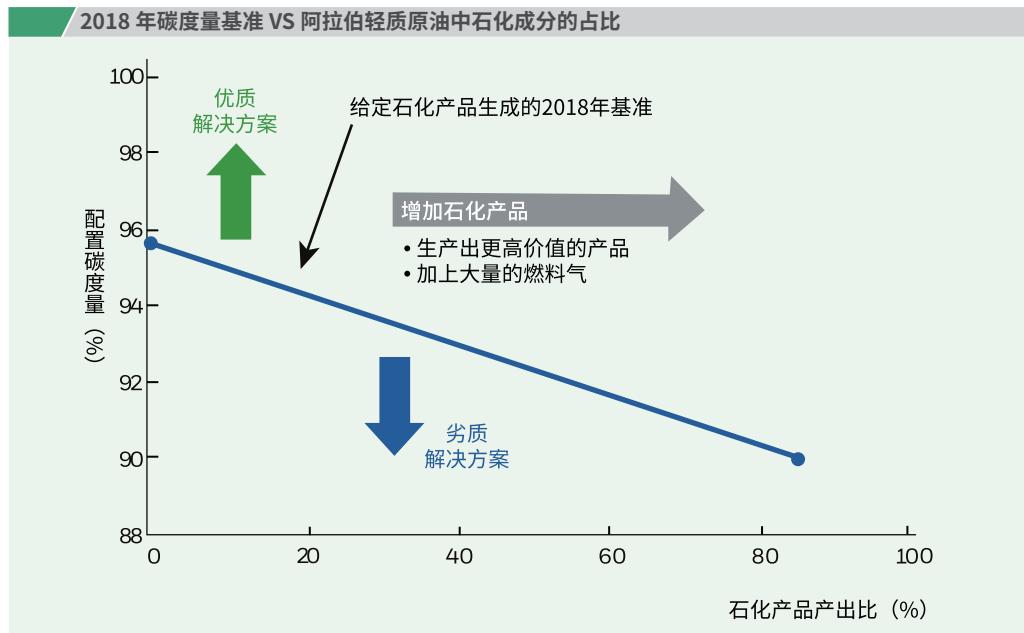
原油是一种宝贵的富碳资源，任何联合生产装置的目标都是将原油转化为市场所需的高价值产品，也就是尽可能用最短的流程、最少的工作量将碳原子进行正确的“放置”。

研究碳效率涉及如何正确地引导碳分子，从而尽可能优化分子的改变或重排，进而提高分子转化率。因此，理解和优化碳效率对于我们迈向更可持续的能源未来至关重要。

原油中的碳转化为高价值产品的效率由配

置的“碳度量”决定，下图中的参考线代表了阿拉伯轻质原油从燃料到最大石化产品的基准碳度量性能。图表横坐标所表示的是以原油加工量计的化学品收率，而不是净产品，因此基准线无法完全达到 100% 的石化产品，因为装置加工过程中必然存在石油焦、燃料气、硫和其他较小成分的损失，而且随着装置苛刻度的提高，这类加工损失是增加的。

在实际应用中，用户必须面对一个基本决策——在将原油升级为更轻、更有价值的



产品时，可以选择脱碳或加氢路径，如果用户更加注重碳效率，那么答案将是“加氢”。如果采用脱碳技术，比如延迟焦化装置或流化催化裂化装置，由于碳原子流失到了低价值的焦炭副产品，最终结果的碳度量将低于基准线，需要重新优化配置或重新审视与碳有关的目标。反之，若将丙烷和丁烷发送到脱氢装置进行烯烃生产，则将比在蒸汽裂解装置中处理更具碳效率。

将实际配置的碳度量与基准配置的碳度量进行比较，可以衡量碳度量的性能，即碳效率，其定义如下：

$$\text{碳效率, \%} = \frac{100 \times \text{配置碳度量}}{\text{基准配置碳度量}}$$

面向碳效率的研究有助于用户设定碳的基准线，可对范围内的每项配置进行评估优化，并采用符合碳策略的工艺，从而尽可能地将碳转化为高价值产品。

影响碳效率的因素多种多样，如石化产品的数量、原油的质量、配置设计或配置复杂性等，若持续性地面向业务目标对配置进行优化，尽可能减少或避免排斥碳的过程，采用对高价值产品有选择性的技术，同时将低价值副产品降至更低，碳效率将持续提升，最终的碳效率超越基准也并非不可能。

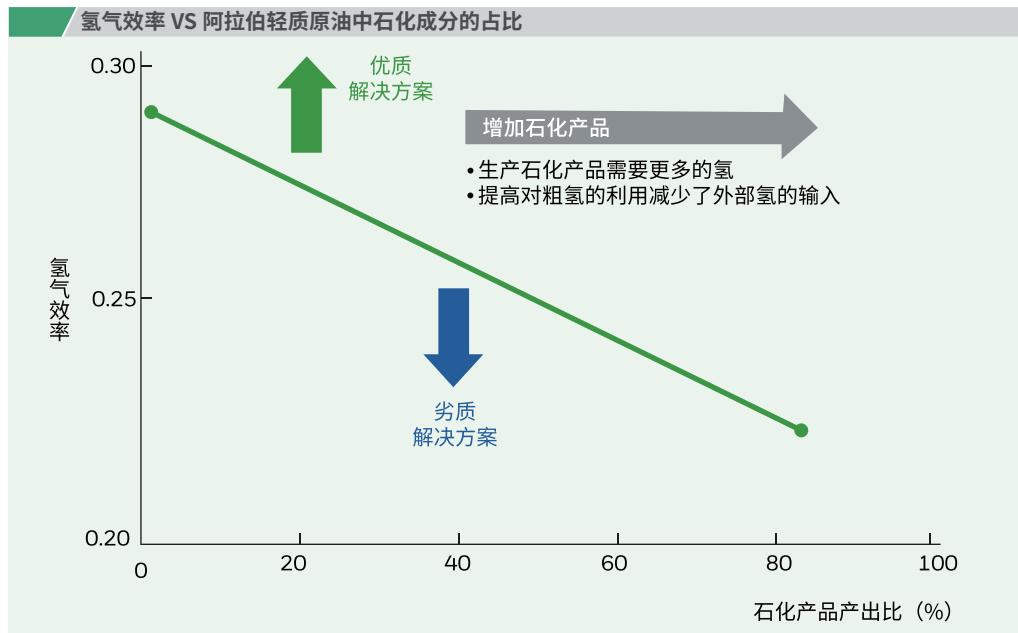
H₂ 氢效率

氢是许多转化工艺的基本原料，为了使氢气效率更大化，重要的是考虑所有设施内氢气的来源和用途。下图中的参考线代表了阿拉伯轻质原油从燃料到最大石化产品的基准氢度量性能。

氢度量可以直接通过计算得出，我们可将其与基准相比。其定义如下：

$$\text{氢效率, \%} = \frac{100 \times \text{可售产品中的氢气}}{(\text{原料中的氢气} + \text{氢气装置中的氢气})}$$

在实际应用过程中，通常需要添加额外的氢气来满足复合物的生产要求，而所需氢气的量将取决于原油质量、目标产品和氢气来源



等因素，以及这些因素的整合方式。管理或操作不当将直接导致氢气的浪费。

每一种不同类型的原油，都有一个独特

的产品分布，模型可根据氢的有效利用程度来衡量氢的利用效率，根据目标综合考量和优化各项指标，从而优化氢的来源和用途。

能耗效率

能源消耗是运营费用的一部分，也是温室气体排放的主要因素。我们的目标应该是用更少的能量消耗来达到所需要的产品量。评估能耗效率，将有助于选择燃料类型，设计公用工程消耗系统，研究原油质量、设施复杂性和石化生产水平对能源需求的影响。

上文提到，通过利用更有效的工艺，可以提高碳和氢气的效率。相应地，能耗效率被用来确保上述这些策略能够在更优化的能源条件下实现，联合装置消耗的能量也将得到量化。下图中的参考线代表了阿拉伯轻质原油利用高效的联合循环燃气轮机发电厂从燃料到最大石化产品的基准性能。同时，所有电力需求都由天然气燃料的涡轮发电机提供。生产可销售的燃料和石化产品需要进行多个不同的加工步骤，其中大部分过程依赖于能源，例如流体的机械输送、工艺加热 / 冷却、

蒸汽发生、吸热反应等。因此，燃料或石化产品的生产消耗了大量的能源。据估计，这种能源消耗占到了最佳联合装置设计的运营成本的 30% ~ 40%。

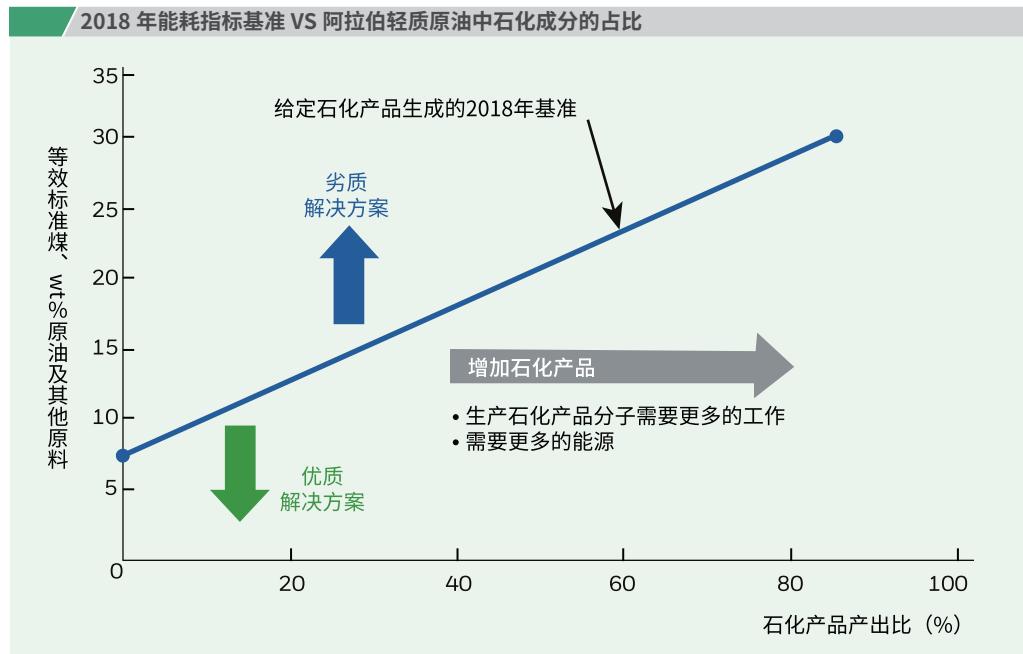
能源效率衡量了配置在使用能源或公用工程消耗资源方面相对于基准性能的有效性，为了更简单地量化公用工程的消耗，并实现在同一基础上的一致性比较，公用工程消耗效率在模型中被视为以等效甲烷消耗的能量。

随着化学品产量的提升，装置的能源消耗往往是增加的，公用工程的基线和化学品比例通常呈现正相关。我们要做的是选择和创造更好的组合，使得公用工程消耗高于基准水平，或者说利用更少的能耗来达到相同的化学品收率。



据估计，这种能源消耗占到了最佳联合装置的运营成本

30% ~ 40%



将基准配置的公用工程消耗度量与实际配置的公用工程消耗度量进行比较，可以衡量公用工程消耗度量的性能，即能耗效率，其计算公式如下：

$$\text{能耗效率, \%} = \frac{100 \times \text{基础配置能耗基准}}{\text{设计能耗基准}}$$

为了最小化能源消耗，必须将工艺装置的能源需求和能源系统设计视为一个单一的综合网络。每种能源的总消耗量决定了整个复杂系统的总能源使用量。而总能源消耗

量则与能源系统和燃料类型有关。当用户购买能源时，也会将其转换为等效的甲烷需求，并纳入能量平衡中。通过这种方式，能源效率考虑了不同能源系统设计的影响。它涵盖了诸如购买的电力、天然气燃烧燃料加热器、涡轮发电机、传统锅炉和煤气化等能源供应系统。

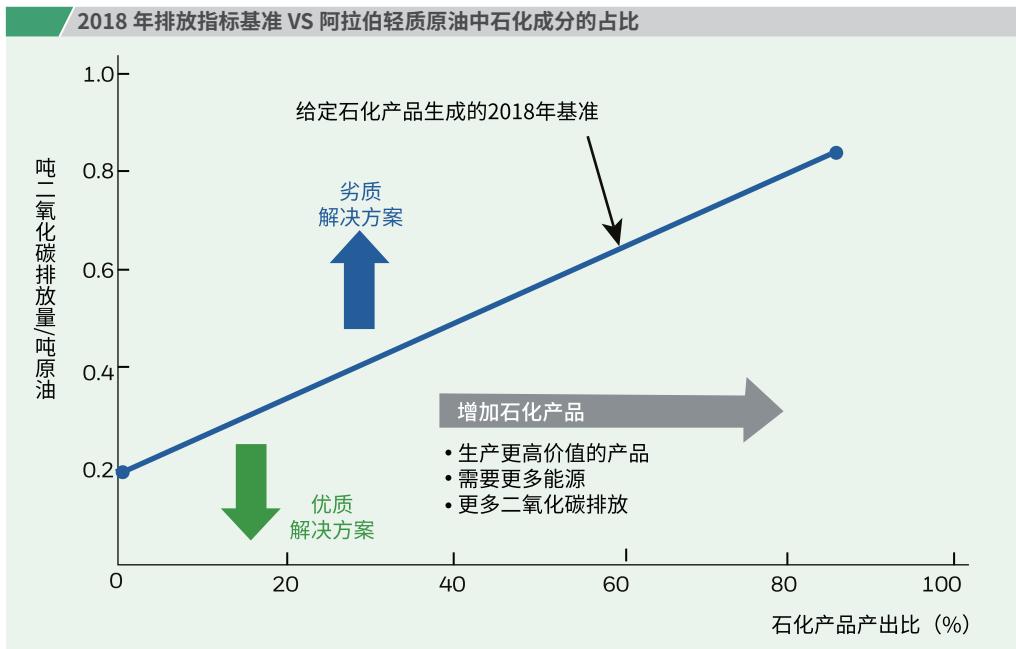
一个设计良好、能源系统高效的复杂系统应该能够在不同目标下实现基准性能，并帮助用户尽可能减少资源使用、降低运营成本、为保持长期竞争力奠定基础。

CO₂ 排放效率

排放效率衡量温室气体的排放，其目标是尽量减少二氧化碳排放。作为能源密集型产业，燃料和石化产品的生产是温室气体的重要来源。随着各界对温室气体排放越来越关注，排放效率的目标也被设定为将温室气体排放最小化。二氧化碳是复杂系统中温室气体排

放的主要贡献者，排放效率因素考虑了包括燃烧排放二氧化碳和作为反应副产物产生的二氧化碳的主要来源。

从联合装置中排放的二氧化碳量由排放度量来量化，即排放度量基准与阿拉伯轻质



原油石化产品总进料的百分比。如上图中的参考线基于阿拉伯轻质原油，旨在代表燃料到最大石化产品之间的排放效率的基准性能。

排放效率将燃料选择、原油质量、原料复杂程度、石化生产水平等因素纳入了考量，衡量了配置在减少二氧化碳排放方面相对于基准性能的优越性。在模型中，排放效率的计算方式与公用工程消耗效率相同。

与公用工程消耗效率类似，排放效率考虑了燃料选择、原油质量、装置复杂性以及石化生产水平的影响。公用工程消耗系统的燃料选择至关重要。例如，低热值煤炭会降低排放效率，因为相对于基准，它会导致排放增加，而基准反映了天然气的使用情况。

此外，排放效率与能耗效率直接相关，追求最大的能耗效率将改善排放效率。

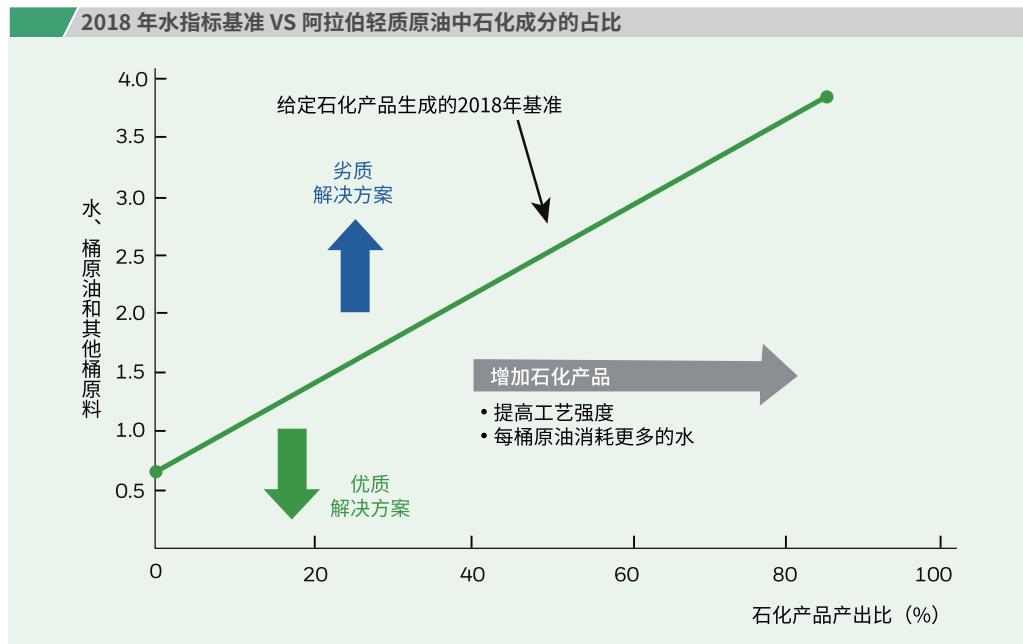
水效率

水是一种稀缺资源，不平衡的水资源分配、污染和日益增长的人类需求都对淡水资源的供应造成了压力。

生产燃料和石化产品需要大量的水，如蒸汽加热、水冷却等，水也可作为生产氢气的原料。然而，对于炼厂而言，水的供给往往比实际使用要少得多，因为水的损失非常严重，如冷却塔蒸发、排污损失等。

下图中的参考线基于阿拉伯轻质原油，旨在代表燃料到最大石化产品之间水效率的基准性能。

模型重点关注原油质量、产能和加工强度等因素，通过相关工艺和产品尽量减少整个设施的用水量，节约成本并推进可持续发展。在模型中，水效率的确定方式与能耗效率和排放效率相同。



\$ 资本效率

资本效率是项目中资本部署的有效性的度量标准。在这一度量中，碳、氢、能耗、排放和水等稀缺资源都与资本效率相互平衡。

由于六大要素相互紧密关联并相互影响，所以它们并不总是在同一点上被优化——在任何项目中，六大要素之间都会产生冲突和制衡，随着某个或某几个要素的调整，剩余要素可能也会随之变动。从中，炼油商可以平衡企业级业务目标与复杂的运营目标、市场需求、监管限制和其他因素，从而拥有可持续的商业计划，以实现可落地、可持续的资本增长战略。所以，资本效率是六大要素中关键的一环，因为它直接关系到投资的质量。

对于用户而言，尽管每个项目都有特定的目标，但该模型评估的六大要素通常是所有项目共同的驱动因素，最终，这六个效率将用于平衡企业的运营目标与市场需求、监管限制和其他因素，目标是尽可能高效地部署资本，从而获得最大的投资回报。

在实际应用中，作为根据标准市场价格和资本成本框架来确定的一种指标，内部收益率是衡量资本效率有效性的重要参考。碳、氢、能耗、排放和水这五个效率都是影响内部收益率的关键因素，而评估资本效率将有助于用户理解和平衡项目中的各项要素，最终实现更好的项目决策。



值得一提的是，标准化的内部收益率将与实际项目经济有所不同，但它可以在共同基础上比较不同地区不同项目的配置设计效果。随着项目进度的推进，资本效率的评估以尽可能高效且盈利为目标，帮助用户发掘最具盈利能力的项目，从而助力用户更好地理解和提升自身在市场中的竞争地位，打造具有可持续性的市场竞争力。

第三章

应用思路及实践

本章节将展示一个真实的商业项目案例，其中应用了六大能效因子模型来评估和优化原始方案，并最终为客户创造了更具经济性的解决方案。案例考虑了相关技术的应用方式，以及每个技术模块的内部及外部如何应用分子管理。为确保基准配置平衡，案例使用了一个线性模型来分析可能进行的改进。



通过使用六大能效因子模型，企业可将各种配置选项与业内最佳基准进行比较，从而客观评估各种配置选项的优劣。在企业相关项目开发的早期阶段，确定各项指标

的范围至关重要，它可以防止项目后期阶段的昂贵返工和延误。而且始终保持与业务驱动因素相一致的优化配置，提高项目在整个生命周期内保持竞争力的可能性。

应用案例

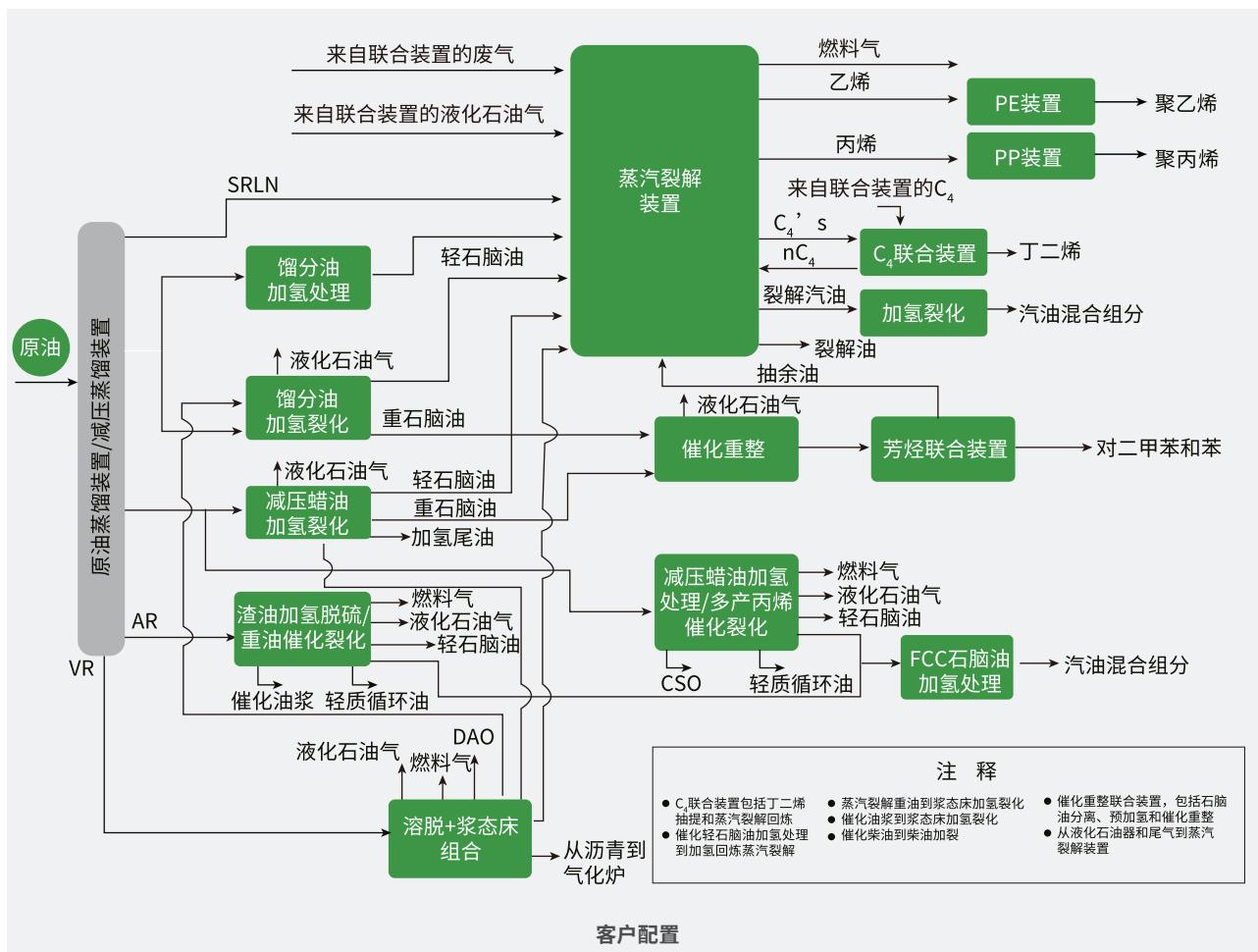
本章节将展示一个真实的商业项目案例，其中应用了六大能效因子模型来评估和优化原始方案，并最终为客户创造了更具经济性的解决方案。案例考虑了相关技术的

应用方式，以及每个技术模块的内部及外部如何应用分子管理。为确保基准配置平衡，案例使用了一个线性模型来分析可能进行的改进。

初始配置

这个商业案例基于一个年产 2000 万吨烯烃（41 万桶 / 天）的综合化工项目，主要生产

燃料和石油化工产品，目标是尽可能地提高烯烃的盈利能力，以及尽可能地减少燃料消



耗，与此同时，二甲苯（PX）的生产被限制在300万吨以下。其原始配置如上图所示。

来的内部收益率 (IRR) 为 24.0%，净现值 (NPV) 为 323 亿美元。

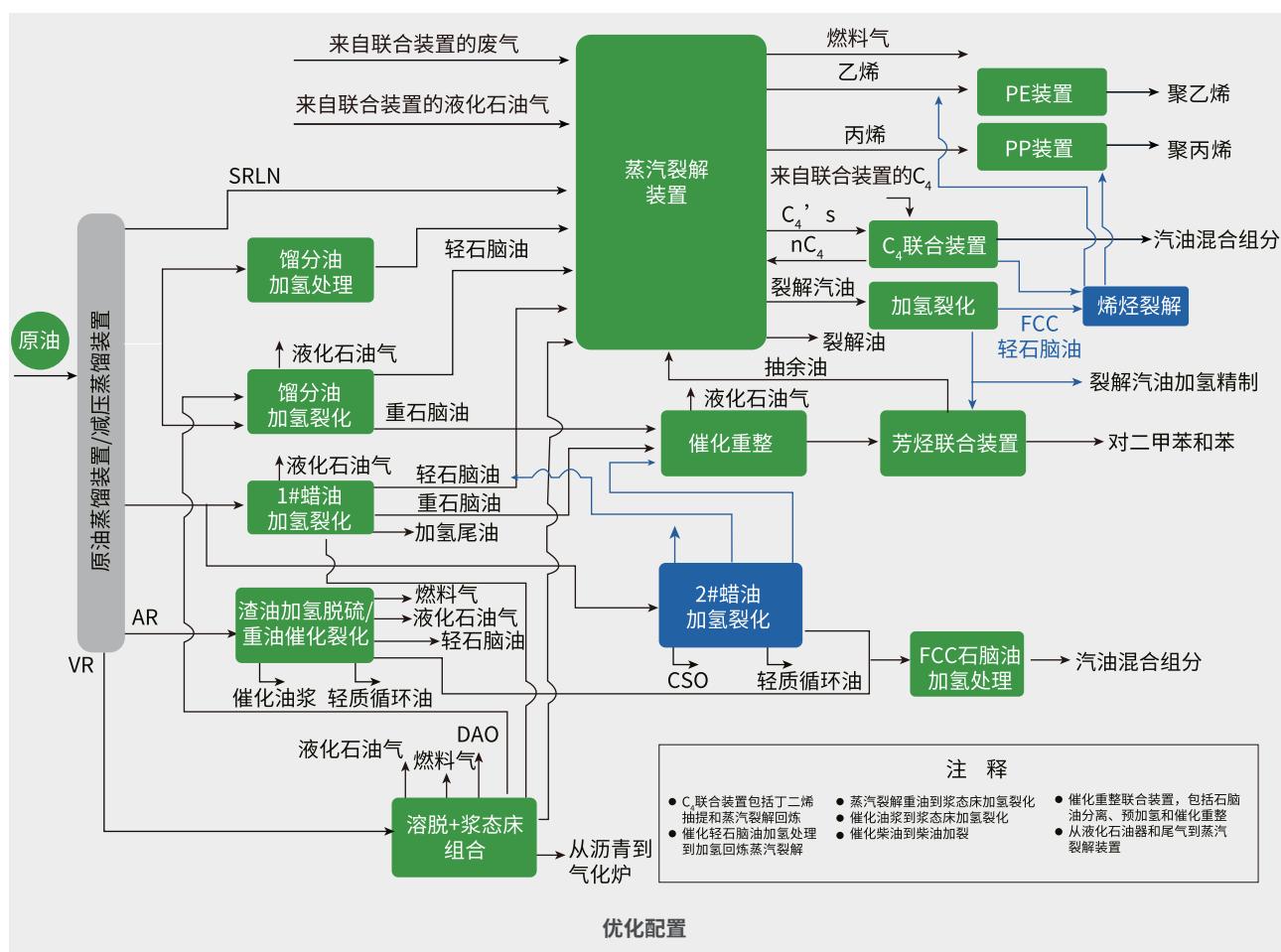
在原始设计中，生产的石油化工产品消耗约 60% 的原油和其他原料，生产的燃料较少，消耗约 21% 的原油和其他原料。这个配置带

企业的目的有两个，一是优化配置从而提高盈利能力，二是进一步提升石油化工产品的产量。

优化配置

六大能效因子模型将被用来分析这个问题。该案例原本是一套高产丙烯的催化裂化装置，但由于催化生焦较多、碳排放大、生产的油品多，装置收益比较差。霍尼韦尔 UOP 进行了如下举措。最终，该项目增加了化工品收率，提高了碳效率，并且平衡了乙烯和芳烃的规模。

- 将蒸汽裂解装置的裂解汽油导入芳烃联合装置。这一变化利用了蒸汽裂解装置与芳烃联合装置之间的协同效应，汽油产量减少，对二甲苯产量保持不变，将裂解汽油送至芳烃之后，在维持同样的 PX 产量的情况下，可以减少进入催化重整的石脑油，从而给乙烯裂解装置提供更多的石脑油原料。





- 新流程增加蜡油加氢裂化装置；删除减压蜡油加氢精制和高产丙烯催化裂化装置。这一改进使 FCC 焦炭产量降低了 31%，并为烯烃生产提供了更多原料，这一步骤也降低了资金成本和项目复杂度。

- 将蒸汽裂解装置和剩余重油催化裂化装置中的 C₄/C₅ 烯烃导向烯烃裂解工艺 (OCP)，用于生产轻质烯烃。由于 C₄/C₅ 不需要加氢后返回裂解装置，一方面提高了流程的氢效率，同时可以利用石脑油补充此举剩余的蒸汽裂解装置的产能。此外，OCP 还生产了额外的净烯烃，该工艺在将 C₄/C₅ 烯烃转化为

丙烯和乙烯方面效率更高。与石化产品更深度的整合，本质上会产生更多的燃料气，在这种情况下，通过改进蒸汽裂解装置的进料和在 OCP 中进行更具选择性的转化，可使得燃料气产量的增加最小化。

结果表明，虽然该应用案例优化新增了蜡油加氢裂化装置，增加了投资，但是氢效率得到提升，收益改善非常明显，化学品收率从 60% 提高的 68%，燃料气收率从 30% 降低到 21%，资金效率也得到了提高。

六大能效因子的优化情况见下表。

六大能效因子优化结果（客户配置与优化配置）

	碳效率 %	氢效率 %	能耗效率 %	排放效率 %	水效率 %	资本效率 % (如内部收益率)
客户配置	85.8	94.7	56.7	40.0	68.5	24.0
优化配置	86.5	96.0	57.4	40.4	69.8	25.8
效率 Delta 指标	+0.7	+1.3	+0.7	+0.4	+1.3	+1.8

► 碳效率

经核算，案例初始配置的碳效率为 85.8%。

初始配置包括两套 FCC（流化催化裂化）单元，生成的焦炭降低了碳效率，而且有待优化的碳流路也间接影响了碳效率。霍尼韦尔

UOP 通过优化策略与配置解决了这两个问题，并提高了碳效率，碳效率从 85.8% 提升到了 86.5%。

此外，若用户解除指定相应的限制，霍尼韦



尔 UOP 将能够在蒸汽裂解器和芳烃联合装置之间实现更多的整合和分子管理机会，从而进一步提高碳效率。去除多余的 FCC 单元也将有助于提高碳效率，这些变化将需要重新设计配置，并在新的框架下重新评估。

▶ 氢效率

经核算，案例初始配置的氢效率为 94.7%。

来自蒸汽裂解和高苛刻度重整操作产生的大量氢气，被深入整合到石化产品中。这不仅抵消了直接的氢气需求，并大大缩小了单独制氢装置的规模。这些因素共同导致了初始较高的氢效率。

新增蜡油加氢裂化装置的氢气消耗基本可以通过取消蜡油加氢精制、减少预加氢规模、减少裂解副产物加氢循环的规模，以及提高乙烯副产氢气来平衡。取消高产丙烯催化裂化之后，实际上是减少了催化结焦和副产干气导致的氢气消耗。但是霍尼韦尔 UOP 又通过 OCP 和乙烯裂解的组合，在不影响氢效率的情况下非常高效地提高了化学品的收率。

▶ 能耗效率

在该案例中，能耗效率被引申为公用工程消耗效率，即包含供冷、供热、供气、供电等在内的公用工程效率。经核算，案例初始配置的公用工程消耗效率达到了 56.7%。

作为燃料来源，煤炭是项目现场附近的廉价且丰富的资源，煤炭气化被用来为公用工程消耗产生氢气和燃料气体。这种方法使得客户配置的公用工程消耗效率达到了 56.7%。

由于需要显著增加石化产品的产量，霍尼韦尔 UOP 采用优化策略实现了更高效的能源利用，公用工程消耗效率因此从 56.7% 提高到 57.4%，虽然能耗有所增加，但带来了化工品收率的大幅提高，说明这样的能耗效率是合理且划算的。

▶ 排放效率

经核算，案例初始配置的排放效率为 40.0%。

二氧化碳的排放与公用工程消耗 / 能源消耗趋势一致，并且受到是否选择煤炭作为燃料的强烈影响。煤炭的高碳含量 / 低热值导致客户配置的排放效率仅为 40.0%。若将碳元素更深入地整合到石化产品中，将会导致更多的二氧化碳排放。所以，优化的关键在于随着石化产品生产水平的提高，要尽量减少能源消耗的增加。

为优化排放效率，霍尼韦尔 UOP 提升了能源使用的效率，将排放效率从 40.0% 提高到了 40.4%。在化工品比例大幅度提高的时候，二氧化碳的排放增加非常有限，表明霍尼韦尔 UOP 提出的优化流程是非常合理的。



通过应用新配置，氢效率从 94.7% 增加到了 96%



▶ 水效率

经核算，案例初始配置的水效率为 68.5%。与公用工程消耗和排放类似，随着石化产品生产增加，水效率也会有所提高。水效率并不是用户早期评估阶段的目标，因此尚未探索出最小化淡水消耗和提高水效率的选项。尽管如此，霍尼韦尔 UOP 依然做出了两项相关举措。



其一，取消高苛刻度的 FCC 单元，消除了为反应器产生蒸汽而驱动主风机和富气压缩机的需求，此举减少了水消耗约 352 万吨 / 年。相应地，锅炉给水系统的排污水损失也下降了 18 万吨 / 年；其二，移除 FCC 分馏部分，减少了冷却水负荷 13.4 亿立方米 / 年，导致排污 / 蒸发冷却损失减少了 270 万立方米 / 年。蜡油加氢裂化装置替代高苛刻度蜡油催化裂化装置，使得水效率得到了综合提升。

两项举措将水效率由 68.5% 提升至 69.8%。

▶ 资本效率

以更高的效率增加石化产品的生产，增强了项目的盈利能力。相关的优化举措使得资本成本仅增加了 1%，而净现金利润增长了 6 美元 / 桶或 8.9 亿美元 / 年。内部收益率 (IRR) 则从 24.0% 增加到 25.8%，净现值 (NPV) 增长了 52 亿美元。

六大能效因子模型是一个前瞻性的决策框架和方法论，是一个帮助集中和简化投资分析的工具，它为我们提供了一种数据驱动的方法来实现更具经济性的性能和增长。

本实际案例展示了从各个要素纬度对于现有装置流程或者新建装置规划相对于最新技术基准的对比。该模型不仅有助于促成企业的需求、愿景和预算之间的一致性，还能够平衡运营目标、市场需求和监管限制，从而推动用户据此制定策略，来提高新设施或现有设备的性能，实现更好的商业决策、更好的未来前景。



国内能源转型趋势展望

近年来，新能源技术的快速突破，“双碳”目标的倒逼，振兴发展的强劲需求，使炼化行业处在能源变革和转型升级的风口浪尖之上。作为保障国家能源产业供应链安

全的关键一环，我国炼化企业需同时应对自身发展、能源和化工产品灵活供应以及产业结构持续调整等多重挑战，能源转型日益迫切。

内蒙古久泰

从乙烯到高附加值 eSAF

以内蒙古久泰集团（以下简称“内蒙古久泰”）为例，在炼化行业能源转型的背景下，内蒙古久泰于近日宣布采用霍尼韦尔 UOP eFining™ 工艺技术，用于打造年产 10 万吨的甲醇制可持续航空燃料（SAF）项目。

作为一种甲醇制航空燃料工艺技术，霍尼韦尔 UOP eFining™ 能可靠地将绿氢与二氧化碳合成的电子甲醇，大规模地转换为可持续航空燃料，即 eSAF，且成本低于同类技术。

此前，内蒙古久泰采用煤制烯烃工艺，并将烯烃直接作为最终产品直接推向市场。随着近年煤价高企，烯烃价格低迷，继续通过传统工艺生产附加值较低的烯烃产品，已无法满足企业能源转型的需求。

在本次合作中，内蒙古久泰利用霍尼韦尔 UOP eFining™ 工艺技术将原有的甲醇制烯烃（MTO）装置改造为可持续航空燃料生产装置，通过整合甲醇制烯烃装置的剩余产能，不仅拓宽了可持续航空燃料的原料类型，实现“原料替代”，更大提升了最终产品（eSAF）的附加值，优化升级了产品结构，摆脱了行业内卷，提升了市场竞争力和企业盈利能力。

特别值得一提的是，相比于传统航空燃料，该工艺制备的 eSAF 可减少 88% 的温室气体排放，实现了生产减排。未来，双方将借助中国西北地区丰富的风力资源，共同致力于推动可持续航空燃料的高效量产，为航空业的低碳未来贡献绿色能源。

盛虹石化

双管齐下 持续“变绿”

近年来，盛虹石化产业集团（以下简称“盛虹石化”）积极布局，采用能源替代与节能降耗双管齐下的策略，与业界同仁一道推进“能源转型”。

在“替代方案”方面，盛虹石化关注到生产中主要使用化石能源来加热，既产生大量碳排放，也使得宝贵的油、煤、气无法发挥作为原料的更大价值，基于此，盛虹石化计划引入核电蒸汽，用于减少碳排放。在“降耗方案”方面，盛虹石化建立了“绿色、低碳、循环”的生产体系，已拥有虹港石化、斯尔邦石化两家国家级绿色工厂；与此同时，盛虹石化持续探索二氧化碳的资源化利用，并在行业内率先实现了“二氧化碳—绿色甲醇—锂电池新材料”绿色负碳产业链的贯通。

在不断“变绿”的过程中，盛虹石化与霍尼韦尔的合作已成为国内炼化企业转型中成功案例，双方围绕丙烷脱氢装置、智能工厂和先进控制等方面开展了全方

位的深度合作，建成行业首个智能化工厂。主要成果体现在三方面，一是深化“人工智能+工业互联网应用”，实现数字技术从工具、助手到引领、驱动的根本性转变；二是打造智能装置行业标杆，PDH 装置性能、生产成本、碳排放等关键指标行业领先，装置自控率达 98.41%，丙烯收率提高 0.12%¹³；三是盛虹石化与霍尼韦尔建设数智化联合创新中心，生产迈向自主化。这在一定程度上指明了以石油化工为代表的流程行业数字化转型的趋势。

未来，包括内蒙古久泰和盛虹石化在内的众多炼化企业，将持续推进新旧产能置换，淘汰落后产能，并持续推进“减油增化增特”，减少成品油产量，增加化工材料生产，增加特种油品生产。与此同时，炼化企业还需持续推进科技创新，实现产品与技术高端化，管理精细化、智能化和数字化，推进绿色低碳发展，从节能降耗向全方位减排发力。

13 数据来源：盛虹石化



结语

随着世界主要经济体净零目标的明确，各国已迎来新一轮能源革命，可持续发展和能源转型已成为全球经济发展的重要主题。能源行业就是这个主题的风口浪尖。

其中，油转化、低碳化关键及核心技术对炼化行业的支撑作用将愈加凸显。我们建议，转型中的炼化企业应首先对新旧产能进行置换，淘汰落后产能，并持续推进“减油增化增特”，减少成品油产量，增加化工材料生产，增加特种油品生产。在工艺技术方面开展科技创新，实现产品与技术高端化，管理精细化、智能化和数字化。最后，还需持续落实绿色低碳发展，从节能降耗向全方位减排发力。

在实际应用中，炼化企业的破局无法一蹴而就，转型对炼化企业而言是一场大考——对行业和市场的认知是否能够与时俱进，核心产品和炼化工艺技术是否过硬，企业的现金流是否健康等。决策者需辩证看待所遇到的问题和困难，加强与新材料、新技术、新装备和专业服务机构等多方合作，扩大业务生态圈，提高自身运营和创新能力，制定严谨的资本支出方法，找到契合自身实际情况的转型之路，做到事先周详规划，事中科学落地，事后复盘优化。

本白皮书提出并更新了六大能效理论体系，即由碳和氢构成的“工艺维度”（技术维度），由能耗、排放和用水构成的“绿色维度”（可持续维度），以及由成本独立构成的“投资维度”（资本维度）。遵循该理论体系并进行科学评估，炼化企业可在流程、现场或企业层面上更好地协调多个相互制约和影响的业务需求，从而用科学的框架和方法，制定面向未来行业发展方向的决策和规划。运用得当，可以实现少投入多产出，从而提高生产力和效率，并提高投资资本回报率。事实上，这一治理体系对其他行业一样成立。

而面向更广泛的能源相关行业，如电力、钢铁、水泥等重点减排领域，企业同样可以借用六大能效理论的思路，从技术维度、可持续维度及投资维度等多个维度，分析和探讨转型路线和策略，同时采用霍尼韦尔先进的低碳技术，最终实现迈向智能化、绿色化、运营高效化的转型。

霍尼韦尔后续将同合作伙伴一起推出针对更广阔行业减排技术的示范和产业化应用白皮书，为各行各业的可持续发展提供我们的解题思路。我们期待与大家的交流与合作，为我们共同的家园的可持续发展尽一份力。



关于我们

霍尼韦尔（中国）有限公司可持续发展研究院隶属于霍尼韦尔能源与可持续技术集团，前身为 2018 年成立的霍尼韦尔（中国）有限公司环境保护研究院。升级后的研究院融合了该业务集团的创新力量和专家，涵盖了研发、技术、市场、产品等各个领域。可持续发展研究院低碳中心成立于 2021 年 8 月，专注于研究低碳技术发展和市场需求，以霍尼韦尔创新的产品和技术为引擎，推动低碳解决方案在中国市场的开拓和实施，助力客户可持续发展以及中国“碳达峰”和“碳中和”目标的实现。

本书是可持续发展研究院针对能源转型发布的第九本白皮书，前八本包括《未来炼厂》系列三部曲、《炼化行业低碳发展白皮书》、《霍尼韦尔 2022 低碳发展绿皮书》、《未来燃料——霍尼韦尔氢能工业与应用发展》、《为可持续航空加油》，及《变革性的石脑

油制乙烷丙烷工艺（NEP）白皮书》。

霍尼韦尔能源与可持续技术集团 (ESS) 致力于为各行各业客户开发并提供推动能源转型、可持续与脱碳的先进技术和材料，以及高性能工业解决方案，以解决全球 70% 的碳排放问题，助力客户实现绿色增长。该集团旗下属霍尼韦尔 UOP 是石油和天然气领域领先的供应商，其工艺技术奠定了全球大多数炼油企业的发展基石，助力企业高效生产汽油、柴油、石化产品和可再生燃料，并不断推出促进清洁能源和资源循环再生的可持续工艺技术，包括生产可持续航空燃料的多种工艺、塑料循环再生技术、碳捕集技术，以及氢气的生产和提纯工艺等。集团同时生产环境友好型制冷剂和发泡剂、气雾剂和溶剂，用于尖端半导体的差异化解决方案、高强度工业纤维、高性能精细化学品和研究化学品，以及工业用添加剂等。

编辑委员会

感谢参与撰写本次《拥抱能源转型 成就可持续未来》白皮书的各位编者：Keith Couch、Matthew Griffiths、Joseph Ritchie、何剑波、罗超、秦超、吴翀、杨悦。感谢他们基于对行业发展和相关技术应用的洞察和提出的独到见解和前瞻看法。





霍尼韦尔(中国)有限公司
可持续发展研究院

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



了解更多
扫码关注官方微信公众号

© Copyright 2024 Honeywell