

The Honeywell logo is displayed in white text on a dark green background. The background of the entire page features a grayscale image of an industrial refinery with large storage tanks and complex piping. Two large green chevrons, one pointing down and one pointing up, are positioned on the left side of the page, creating a central white triangular area.

Honeywell

炼化行业低碳发展白皮书

Low Carbon Technologies for Refining, Petrochemical,
and Chemical Industries

霍尼韦尔(中国)有限公司可持续发展研究院低碳中心



序言

双碳目标是挑战也是机遇

2020年9月，在第七十五届联合国大会上，中国宣布力争二氧化碳排放到2030年前达到峰值，2060年前实现碳中和。这在中国社会发展史上是值得铭记的一刻，因为这不仅仅是一个功在千秋的承诺，更是中国作为一个强国的自信，毕竟要实现双碳目标，我国经济和社会发展都将要克服巨大的挑战。当前我国是全球最大的碳排放国，GDP能耗约是发达国家的两三倍，从碳达峰到碳中和仅有30年的过渡期，时间很紧、任务很重。

我认为，实现碳中和与经济发展并行，工业要从产业结构调整和技术进步两方面入手，从火力发电慢慢过渡到以光、风等可再生资源为主的发电。而针对炼化行业，化石能源要从能源燃烧时代向资源应用时代转变。

化石能源的资源化利用。化石能源的资源化利用是指诸如煤炭、石油、天然气等不再作为能源，而是作为原料或材料投入使用。如，石油化工行业要调整产品结构，需要将目前约20%的原油用于生产烯烃等化学品、80%的原油用于生产汽油等油品的产品比例发生扭转。煤化工行业要研发绿色低碳的创新型路径，与石油化工形成互为补充、协调发展的产业格局。随着未来家庭炊事的电气化变革，天然气将更多作为工业化原料应用。

加速可再生能源发展。碳中和目标的提出，对于风能、太阳能、生物质能等可再生能源的发展起到巨大的促进作用。在碳中和背景下，可再生能源终将结束化石能源所属的时代，我国想要如期实现碳中和，必将加速可再生能源时代的到来。

另外，藻类产油技术、生物质利用技术、资源循环利用技术、CCUS等技术对二氧化碳加以回收都是实现碳中和的重要抓手。在未来充沛能源的支撑下，通过光合作用、矿化处理、化学品合成等二氧化碳资源化利用方式是回收二氧化碳、实现碳中和理想的可行途径。

未来30年，我国势必将迎来一场涉及广泛领域的大变革，除了自主研发，也需要学习国外已有的先进技术和理念，积极开展中外合作，毕竟可持续发展是一个全人类共有的目标。我相信，霍尼韦尔作为一家全球领先的创新型高科技企业，其百年来积累和发展的碳减排技术和理念必将有很多值得我们研究和学习。很荣幸能为霍尼韦尔的第一本低碳白皮书作序，期待这本白皮书可以为中国的炼化行业转型升级点上一盏明灯。

谢谢！

清华大学教授、博士生导师、中国工程院院士

| 目 录

序 言	1
-----------	---

第一部分：中国的双碳目标和炼化企业面临的挑战	3
------------------------------	---

1 中国的承诺与双碳目标	3
2 双碳目标及“十四五”规划对炼化行业的影响	4
3 炼化行业面临的挑战与机会	4

第二部分：用于炼化企业的低碳技术	5
------------------------	---

1 原 料	5
1.1 可再生资源炼制技术	6
1.2 材料循环利用技术	7
1.3 原油的深度加工技术	8
1.4 石化原料轻烃化技术	8
1.5 绿氢制造技术	9
2 工 艺	9
2.1 炼厂转型与分子管理技术	10
2.2 降低能耗的工艺技术	11
2.3 绿氢应用技术	11
3 排 放	12
3.1 高效燃烧技术	12
3.2 节能和能量回收技术	13
3.3 碳捕集、利用与封存技术	14
4 运 营	17
4.1 互联工厂解决方案	17

总 结	18
-----------	----

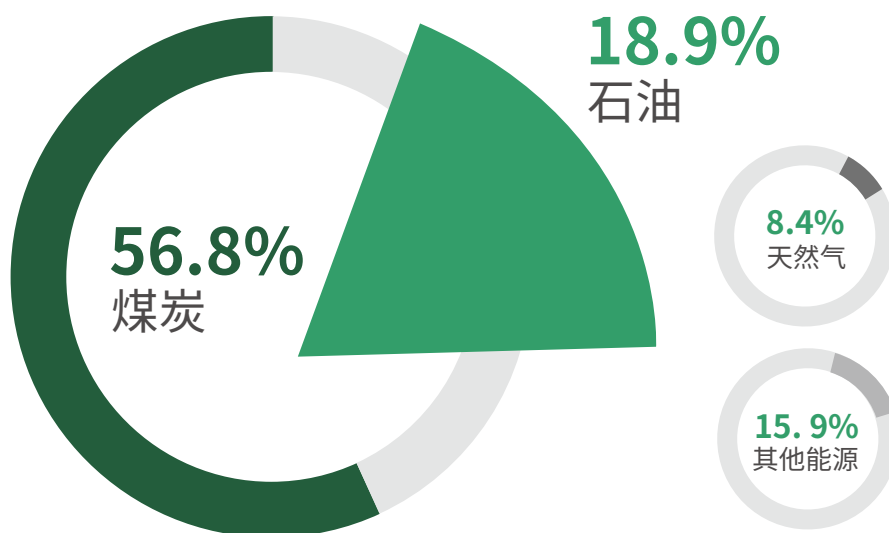


第一部分：中国的双碳目标和炼化企业面临的挑战

1 中国的承诺与双碳目标

2020 年 9 月第七十五届联合国大会上，中国宣布，力争二氧化碳（CO₂）排在 2030 年前达到峰值，2060 年前实现碳中和。同年 12 月的气候雄心峰会上，中国宣布，到 2030 年，中国单位国内生产总值 CO₂ 排放将比 2005 年下降 65% 以上，非化石能源占一次能源消费比重将达到 25% 左右。

据统计，2020 年世界 CO₂ 排放的总量约为 323 亿吨，中国的碳排放是 99 亿吨¹。从能源消费结构来看，2020 年我国一次能源消费总量达到 49.8 亿吨标准煤²，其中煤炭、石油、天然气等化石能源的消费占能源消费总量的 84.1%，化石能源的应用产生了大量 CO₂ 排放。



数据来源：国家统计局

水能、风能、太阳能、核能等

- 煤炭占能源消费总量的比重 (%)
- 石油占能源消费总量的比重 (%)
- 天然气占能源消费总量的比重 (%)
- 水能、风能、太阳能、核能等其他能源占能源消费总量的比重 (%)

2020 年中国能源消费总量占比

1 BP 世界能源统计年鉴 2021

2 2020 年国民经济和社会发展统计公报

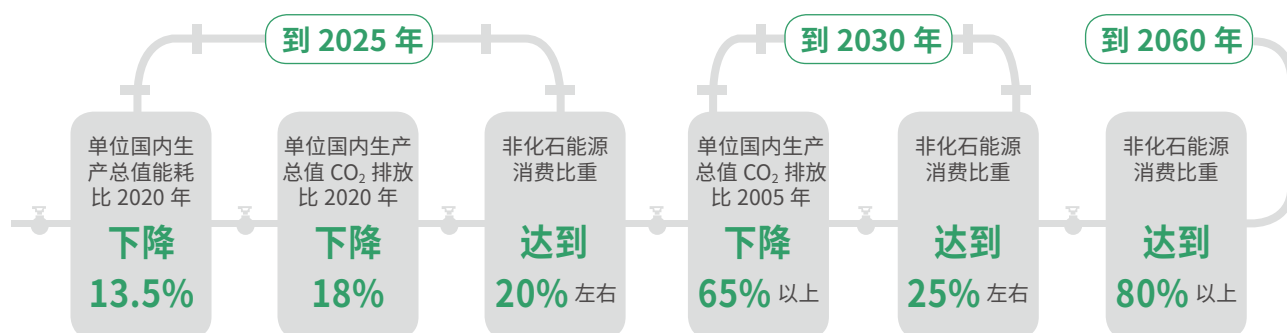


2 双碳目标及“十四五”规划对炼化行业的影响

化石能源是工业、建筑、交通等行业的主要消费原料，其中又以工业领域的能耗最多，以钢铁、建材、石化、化工、有色、电力等六大初级产品产业消耗最大、排放最多。炼化（炼油、化工）行业作为石油、煤炭等化石能源的直接加工处理行业，是我国节能减排、实现碳中和的重点领域之一。

2021 年 10 月，中国发布了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（以下简称《意见》），明确提出了 2025 年、2030 年、2060 年三大阶段目标。

《意见》提出了 11 个方面的要求和措施，包括要推进社会发展全面绿色转型、深度调整产业结构、加快构建



清洁低碳安全高效能源体系、加快推进低碳交通运输体系、提升城乡建设绿色低碳发展质量、加强绿色低碳重大科技攻关和推广应用、持续攻关提升碳汇能力、提高对外开放绿色低碳发展水平、健全法律法规标准和统计监测体系、完善政策机制等。《意见》表示，石油消费“十五五”时期进入峰值平台期，与此同时

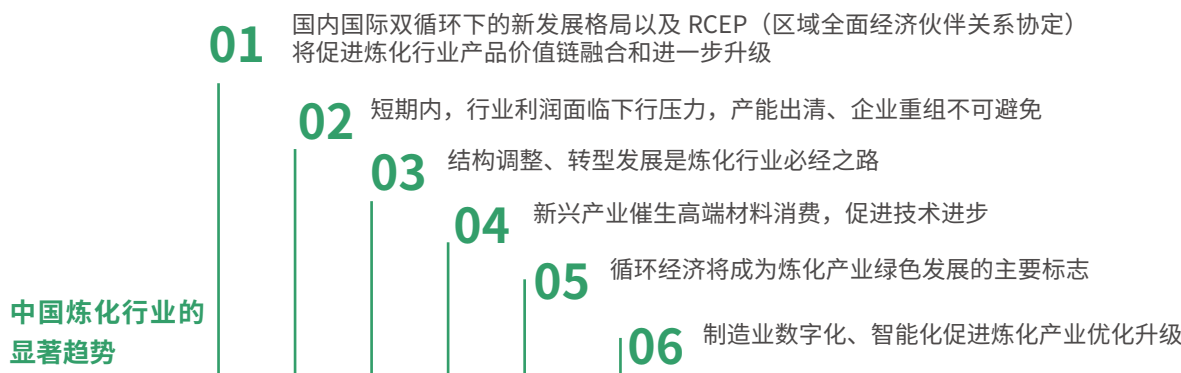
将积极发展非化石能源，实施可再生能源替代行动，不断提高非化石能源消费比重。

以上措施对炼化行业提出了新的要求，一方面继续淘汰落后产能、推进产能整合；另一方面通过核心的技术创新来推动清洁生产、绿色发展以实现产业价值链提升。

3 炼化行业面临的挑战与机会

“十四五”期间，中国炼化行业发展的基本面将有所改变，市场环境面临一系列新挑战。一方面，双碳目标倒逼化石能源消费提前达峰；另一方面，能源结构的调整将限制化石能源的消费增长。

在石油产品消费方面，随着钢铁、煤炭、水泥等大宗商品需求达峰，相关的公路运输量下降，柴油消费呈现缓步下降趋势。预计，虽然汽油保有量仍然增长，随着新能源汽车的渗透率加快，汽油消费也会出现同样情况。





随着新能源不断渗透，正如金院士在序言中所说，化石原料作为能源的功能会不断减少，但在化工产品方面，人民生活水平的不断提高会带动对化工产品需求的不断提高，化石原料资源化将为中国的炼化企业带来新的机会。预计“十四五”期间，“三烯三苯”等主要化工原料需求年均增长 6% 左右，增速高于成品油³。所以，利用化石原料来生产更多的化工产品将是今后中国炼化企业的主旋律之

一，但是在这个转型过程中，炼化企业要利用分子管理等技术来提高原料的转化效率，降低碳排放。在碳达峰、碳中和背景下，炼化企业应加快结构调整和产业转型升级，大力开展绿色炼油、循环技术应用、二氧化碳捕集和利用技术研究，积极拥抱产业变革、顺应发展趋势，实现可持续、高质量发展。在新技术的驱动下，炼化企业的转型和低碳化生产必将给中国企业带来更多新的机会。

第二部分：用于炼化企业的低碳技术

炼化行业加工过程的 CO₂ 排放占全国总量的 5% 左右⁴，要实现“双碳”目标，炼化行业要提高对碳减排的认识，加强节能降耗和原料、产品结构快速调整，积极推进技术创新。霍尼韦尔作为炼化行业的解决方案供应商正通过一系列创新来助力

炼化行业在实现碳减排的同时进一步提高生产效率，增加效益。霍尼韦尔协助炼化行业找准碳排放的主要来源和可行的减排方法与技术，在原料、工艺、排放、运营等方面有针对性地提出行业减排的技术方案。



1 原料

在原料方面，增加可再生资源的使用有利于减少化石能源的使用和减少碳排放，主要手段包括动植物油脂、生物质等可再生资源的利用与炼制技术；材料循环利用技术可以进一步减少化石能源的开采与使用，从而降低碳排放；原油的深度加工技术，将原油更多地转化成石化

产品同样可以降低化石原料的开采和使用；轻烃具有较高的氢碳比，利用轻烃来生产化学品具有更高的转化效率，因此，石化原料的轻烃化可以减少碳排放；利用可再生能源，通过电解水来制造绿氢也可为炼化企业提供低碳排放的原料。

³ “双碳”目标下中国炼化行业“十四五”发展新特点分析与展望

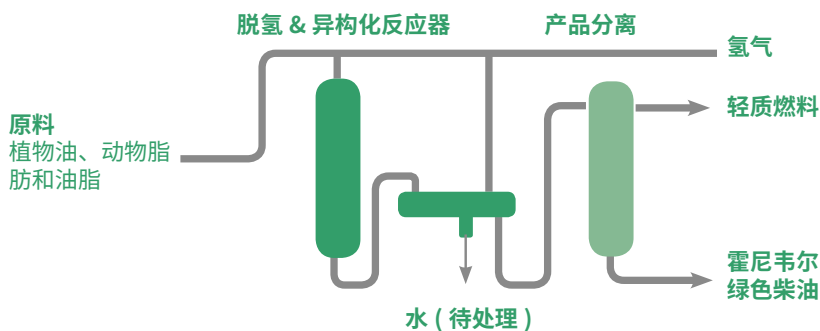
⁴ “十四五”炼化行业碳减排路径



1.1 可再生资源炼制技术

我国有非常丰富的生物质能源，包括农林废弃物、不可食用植物、废弃油脂等，需要全产业链考虑，充分利用，提高经济性。在炼化行业，生物质能源可以转化成交通

运输行业的燃油，也可以通过化学转化等途径生产化学品，具有广阔的前景。



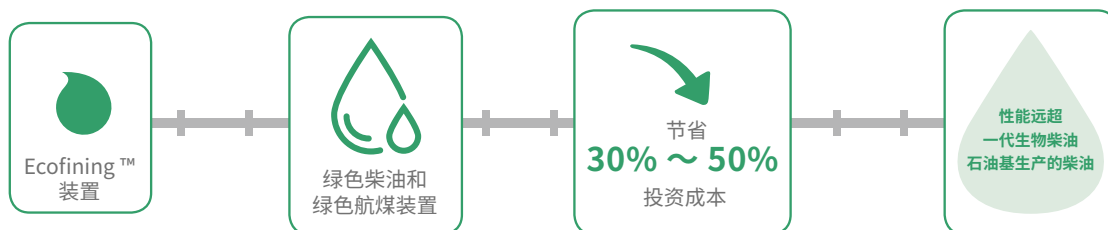
可再生柴油的单段式 Ecofining™ 技术

霍尼韦尔提供的 Ecofining™ 工艺以植物油、动物脂肪、藻类油、地沟油等可再生资源为原料，通过加氢和异构化装置，生产绿色柴油和绿色航煤，有效减少化石原料的使用从而减少碳排放。Ecofining™ 工艺还可对工艺过程中生产的副产品进行高效利用，将加氢和异构化过程中产生的燃料气进行循环再利用，减少整个工艺过程中的碳排放。

霍尼韦尔新推出的单反应器 Ecofining™ 工艺技术，用于可再生柴油生产。这种创新技术是一种投产快、资金成本低的解决方案，对于重新利用加氢处理或加氢裂化装置的闲置产能是一种理想的解决方案。如：柴油加氢装置可以很容易改造成 Ecofining™ 装置，从而将以化石资源为原料的加氢装置改造成以可再生资源为原料生产绿色柴油和绿色航煤的装置，这种改造比建新装置要节省 30% ~ 50% 投资成本，其生产的绿色柴油性能表现远超一代生物柴油，

甚至部分性能优于石油基生产的柴油。与其它单反应器技术相比，该技术可再生柴油的产率更高。

单反应器 Ecofining™ 工艺生产的霍尼韦尔绿色柴油（Honeywell Green Diesel™）燃料具有和石油基柴油完全相同的化学性质，可直接用于车辆，无需进行任何调整。相比于从石油制成的柴油，该燃料的全生命周期温室气体排放量可减少多达 80%。同时由于设计简单，该技术可快速投入使用，投资要低于其它设计。单反应器 Ecofining™ 工艺还提供了更大的灵活度，为未来拓展至双反应器 Ecofining™ 工艺创造条件。双反应器设计可加工使用过的食用油和动物油脂等原料以生产可再生航空燃料。如果炼厂有一台额外的反应器或可以增加一台反应器进行绿色原料加工，这项成熟技术是炼油厂改造的理想选择。



在农林生物质燃料的利用方面，霍尼韦尔 RTP（快速热处理技术）技术可将林业、农业的纤维素生物质原料（如秸秆等）快速热裂解转化为绿色燃料。该绿色燃料是一种轻质的、易流动的、可清洁燃烧的液体生物燃料，可用于供热或者发电，也可作为原料参与到炼化工艺中产出汽油、柴油，相比使用化石能源可减少多达 70% 的温室气体排放。

未来，生物基原料的生化反应技术也有广阔的前景。一般来说，水生植物利用太阳光的效能比陆生植物高数十倍。如藻类的生长可以高效利用太阳能，并且其体内富含油脂，改变藻类的基因结构使其更加富产油脂，再通过相应的反应技术制造油料使之参与到炼化工艺中也将有效减少碳排放。



案例

2021 年 10 月，霍尼韦尔和伍德集团联合推出了可用于生产碳中和航空燃料的整套技术包。这套技术包以霍尼韦尔 Ecofining™ 工艺技术和伍德集团的制氢技术为核心，将特定的生物原料加工成可再生航空燃料。

霍尼韦尔 Ecofining™ 工艺可将地沟油、脂肪和油脂转化为霍尼韦尔绿色航空燃料™，直接替代石油航空燃料。伍德集团制氢技术将进一步使 Ecofining™ 工艺的副产品转化为可再生氢。可再生氢随后经 Ecofining™ 工艺再次处理以去除杂质，产生更清洁的可再生燃料。在制氢过程中产生的二氧化碳由霍尼韦尔氢气解决方案技术套件进行捕集并实现永久地下封存，最终通过技术的整合有效实现航空燃料生产的碳中和。

1.2 材料循环利用技术

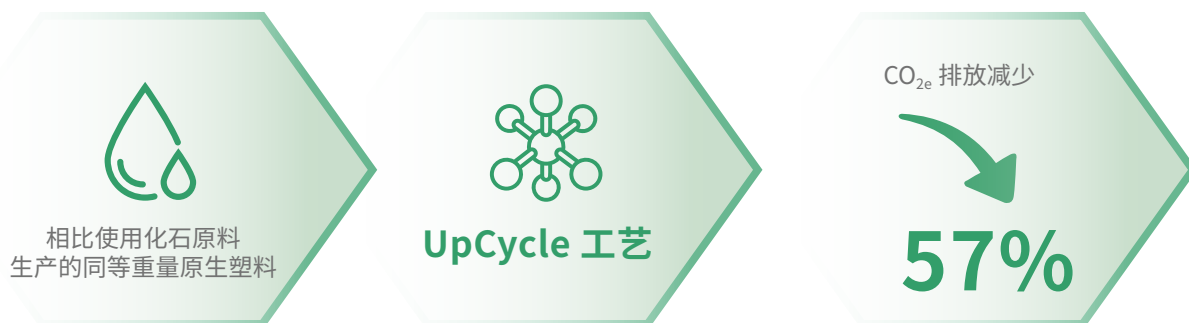
材料循环利用是通过再制造技术将已经使用过的工业或者生活废物再制造后继续作为产品使用。因此，材料循环利用也是碳减排的重要抓手。

以塑料制品为例，目前我国每年生产塑料消费制品已突破 6000 万吨，其中存在大量不利于物理回收循环的 PE、PP 等废塑料，严重威胁环境质量和生态系统健康。塑料循环利用技术，是推动炼化行业高质量发展的重要课题。提高一次性塑料回收的比例，通过裂解技术增加回用料塑料，既能降低原生化工原料的消耗，又可以减少塑料垃圾焚烧处理产生的 CO₂，从而大幅降低碳排放。

霍尼韦尔最新推出的 UpCycle 工艺技术，采用行业内领先的分子转化、热裂解和污染物管理技术，可将废弃塑料转化成聚合物原料，用于制造新塑料。UpCycle 工艺技术大幅拓宽了可回收塑料的种类，包括原本无法回收的废塑料，如彩色、柔性、多层的包装材料和聚苯乙

烯。若能结合其他化学和机械回收工艺，以及改良后的收集和分类过程，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%。该工艺全程采用模块化设计，可根据实际废塑料成分组合工艺模块，搭配自动化精细塑料分拣技术，增加对废塑料杂质的包容度，全程无水洗，避免废水的产生。此外，霍尼韦尔还依托其强大的技术储备及设备设施能力，针对工艺过程中可能产生的杂质、采用其自身的燃烧器、热氧化炉及控制技术并结合脱碳、脱氯、脱氮等减排技术，在确保碳减排的同时还会考虑其它非 CO₂ 温室气体以及有害物的排放达标。而且，通过霍尼韦尔废塑料循环利用技术生产的塑料油，对于下游乙烯丙烯单体生产企业来说无需改进工艺设施，可以直接混合到现有的原料中去使用。

相比于使用化石原料生产的同等重量原生塑料，采用 UpCycle 工艺技术生产的新型再生塑料能减少 57% 的二氧化碳当量 (CO_{2e}) 排放⁶。而比之于传统的废塑料处理



5 http://www.xinhuanet.com/video/sjxw/2021-09/18/c_1211374260.htm

6 霍尼韦尔全生命周期分析报告



方式（如焚烧和填埋），该过程还可以减少 77% 的 CO_{2e} 排放量⁶。降低 CO_{2e} 排放量是所有热解技术产品最瞩目的几大进步之一⁷。AMI International 于 2020 年 9 月发布的一项研究显示，截至 2030 年，包括 UpCycle 工艺技术在內的一系列先进回收技术每年有望回收 500 万~1500 万

吨塑料废弃物（实际利用率将取决于各种因素，包括利好的法规、分类体系的现状及全生命周期分析结果等）。

除了塑料循环利用外，纤维、橡胶、树脂等也可以循环利用减少化石原料的使用，从而降低碳排放。

1.3 原油的深度加工技术

减少化石原料的使用就是减少碳排放，在可预见的未来，石化产品的需求还会增加，而化工行业还需要依赖原油来生产石化产品。因此，如何提高原油到石化产品的转化率也是碳减排（减少化石原料的使用）的重要方向。

霍尼韦尔的 Uniflex™ 工艺技术就是将原来难以利用的重油组分通过裂解生产石化产品的原料。Uniflex™ 工艺通过在临氢环境中向进料中注入一种专利纳米级催化剂从而稳定裂解产品，抑制焦炭的生成。Uniflex™ 工艺的主要产品包括石脑油和柴油，这两种产品的体积占

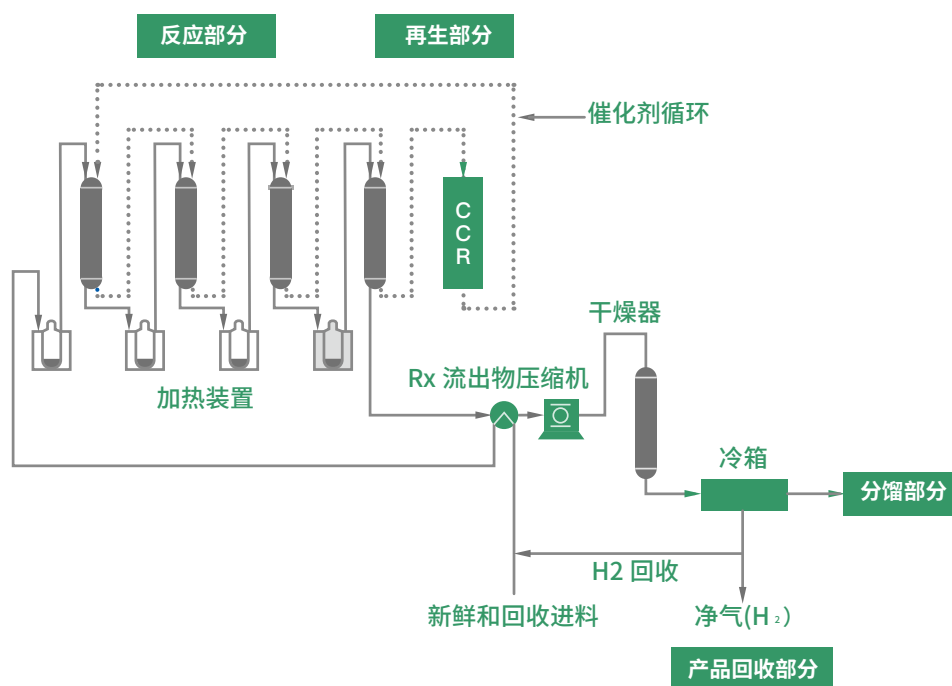
总产品体积的 80% 以上。石脑油和柴油经进一步处理可以生产石化产品，Uniflex™ 工艺将未转化渣油（即沥青）的含量降至最低，仅占总重量的 10%。与延迟焦化相比，Uniflex™ 工艺的重要优势是显著的转化率提升，这些轻组分用于生产石化产品，因此减少了原油的用量。

通常情况下，Uniflex™ 能够将炼油利润率提高 60%~100%，对于年加工 200 万吨的装置来讲，这就意味着每年增加 3 亿~5 亿美元的利润。

1.4 石化原料轻烃化技术

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程，以煤制烯烃为例，为了生产足够多的氢气，工艺过程需要一个



7 塑料能源 LCA 报告：关于混合塑料垃圾化学循环的塑料能源技术的全生命周期评估
巴斯夫 LCA 报告：全生命周期热解评估——三大案例



变换反应，由一氧化碳加水生成氢气和 CO_2 ，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最主要的定向丙烯生产技术。预计到 2030 年，这一技术贡献的丙烯产量有望达到 42%。霍尼韦尔 Oleflex™ 丙烷脱氢技术是占据市场主导地位的丙烷脱氢工艺，因为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），所以霍尼韦尔 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 CO_2 排放、更低的操作成本和更高的在线率。同时，霍尼韦尔 Oleflex™ 工艺也可以用于 C4 的单独脱氢，或者 C3/C4 的混合脱氢。

丁二烯的生产主要来自乙烯裂解装置的副产。随着乙烯原料的轻质化，副产的丁二烯的量也逐渐减少，于是需要丁二烯的定向生产技术来填补日益扩大的供需缺口。霍尼韦尔 OXO-D 技术是世界上领先的丁烯定向生产丁二烯技术。该技术以丁烯 -1 或者丁烯 -2 为原料通过脱氢来生产丁二烯。霍尼韦尔该技术工艺以及其专有的催化剂结合贫氧条件反应，使工艺消耗的蒸汽用量更低，产生的 CO_2 排放更低，产生的废水、废固液都更少。

1.5 绿氢制造技术

氢气无论是作为炼化工艺过程的原料还是化工产品都具有非常重要的作用。当前炼化行业的制氢主要是以天然气和煤炭等化石原料为主的“灰氢”技术，今后，绿氢的制造与利用将成为一个主要的低碳技术逐渐普及。

“绿氢”技术是通过光伏、风电等可再生能源发电

后产生电流去电解水，生产氢气。该技术在无排放 CO_2 的同时产生大量的氢气和氧气。未来，随着非化石能源发电的占比增高，可以代替现有的“灰氢”技术，从而解决在制氢领域的碳排放问题。在绿氢制造技术上，霍尼韦尔利用其膜制造和催化剂生产领域的优势，正在开发高效的质子膜、阴离子膜、催化剂和膜电极等。

2 工 艺

炼化行业的 CO_2 排放主要包括两大类：直接排放和间接排放。直接排放主要包括化石燃料燃烧后的燃烧排放、生产工艺过程中的工艺排放以及各种设备部件泄露导致的逃逸排放；间接排放主要指外购的化石能源转换的电、蒸汽所产生的排放⁸。此外，我们也应该考虑炼化行业上下游的排放，上文提到原料方面的减排技术，其实就是减少上游的排放。

除了利用非化石原料外，我们也可以通过少用化石原料来减少排放，先进的工艺技术将是增效减排最重要的途径。今天炼厂下游的产品主要是汽油和柴油等，随着新能源车的普及，社会对汽柴油的需求会大大降低，因此炼厂转型，即由生产汽柴油改成



多产石化产品也是炼化行业低碳技术最重要的一环。炼化行业要在工艺方面通过技术革新，优化工艺，以达到转型和增效来减少碳排放。

2.1 炼厂转型与分子管理技术

电气化的推进抑制了成品油需求的增长，而生活水平的提升带来了下游化学品需求增长。炼化企业要顺应市场需求及时改变产品结构，将由生产成品油为主转向生产化工材料为主，找到一条原油制化学品的长期盈利路径是炼化企业转型的关键。炼厂转型之路的优劣在于工艺改造时能否做到高效的碳氢转化效率和低能耗，也就是在最低能耗下将原油中的碳氢原子最大限度地转化到石化产品中。

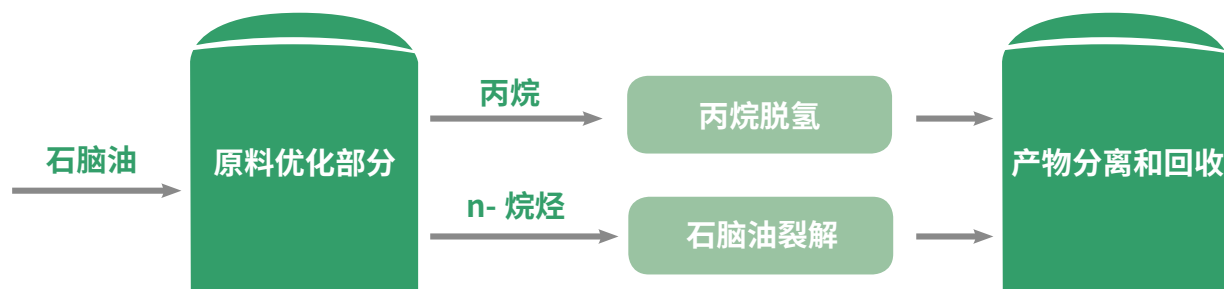
分子管理技术是提高碳氢转化效率最有效的途径。所谓分子管理技术就是通过对原料中不同分子进行鉴定，并根据它们的特性来决定将其送入具有高碳氢转化效率的反应器，生产有用的石化产品。比如，在轻石脑油组分内，直链的烷烃是好的裂解原料，那么将直链烷烃送入蒸汽裂解可以提高乙烯和丙烯的产率；与此同时，环烷烃一类的轻石脑油则是重整反应制造芳烃的最佳原料，因此把轻石脑油中的直链烷烃与环烷烃分开，并分别送入两个不同的反应装置生产烯烃和芳烃，将可以同时提高两个装置的碳氢转化效率，也就是产率，这样的技术就是一种分子管理技术。

霍尼韦尔的 MaxEne™ 工艺过程技术正是这样一种技术，它将石脑油中的直链烷烃与异构烷烃（包括支链

烷烃与环烷烃）通过连续的吸附过程进行分离，然后将直链烷烃送入蒸汽裂解制造烯烃，而异构烷烃则可以送入连续重整生产芳烃，通过这种分子管理技术可以将乙烯收率提高达 50%。连续吸附分离是霍尼韦尔先进的 Sorbex™ 技术系列之一，可以实现在较低成本下的多组分同时分离。

催化裂化（FCC）装置是目前以生产汽油为主的炼厂的核心工艺，如果汽油需求降低，我们可以将其改造成多产丙烯的模式，改造后，由 FCC 出来的 C4+ 烯烃也会增加，通过分子管理技术烯烃裂解可以把这些烯烃更进一步裂解来增产丙烯和乙烯；选择性裂解烯烃比蒸汽裂解的烯烃产率高，可以从 50% ~ 60% 之间提高到 80% 以上，再次证明我们可以通过分子管理技术来增加碳氢转化效率。

另一个通过分子管理技术来提高碳氢转化效率，也就是产率的工艺技术是霍尼韦尔的 IOS™（集成烯烃系统）工艺技术。IOS™ 是基于分子管理概念对一系列围绕蒸汽裂解装置的工艺的优化集成，用于增产轻质烯烃，提高运营利润和投资回报率，同时提供前所未有的灵活性来管理副产品并减少环境足迹。下列简化流程图显示关键技术在 IOS™ 中的应用。采用霍尼韦尔的 IOS™ 后，炼化企业可以减少 20% ~ 30% 的乙烯裂解原料，从而



大大降低生产乙烯的全生命周期碳排放。

以上这些分子管理技术适用于新装置建设或旧装置改造，可以促进从石化燃料到石化产品生产的过渡，满足从原油到化学品和原油到烯烃的策略。

还有许多炼厂转型的技术可以在今天和未来应用，比

如在炼厂添加芳烃抽提和二甲苯装置，则可以完成重整从生产高辛烷值汽油到生产芳烃的改造。加氢裂解工艺过程可以从生产柴油为主向生产石脑油和 LPG 为主转化，而石脑油和 LPG 可以用来生产石化产品，也可以将煤油和柴油通过低压加氢裂解，生产重石脑油和 LPG 用于生产芳烃和烯烃；如果从分子管理技术来



看，从 FCC 装置产出的轻循环油（LCO）含有大量的芳环，可以通过 LCOX™ 将 LCO 转化成芳烃。

炼厂升级的方法不一而足，霍尼韦尔可以给炼化企业

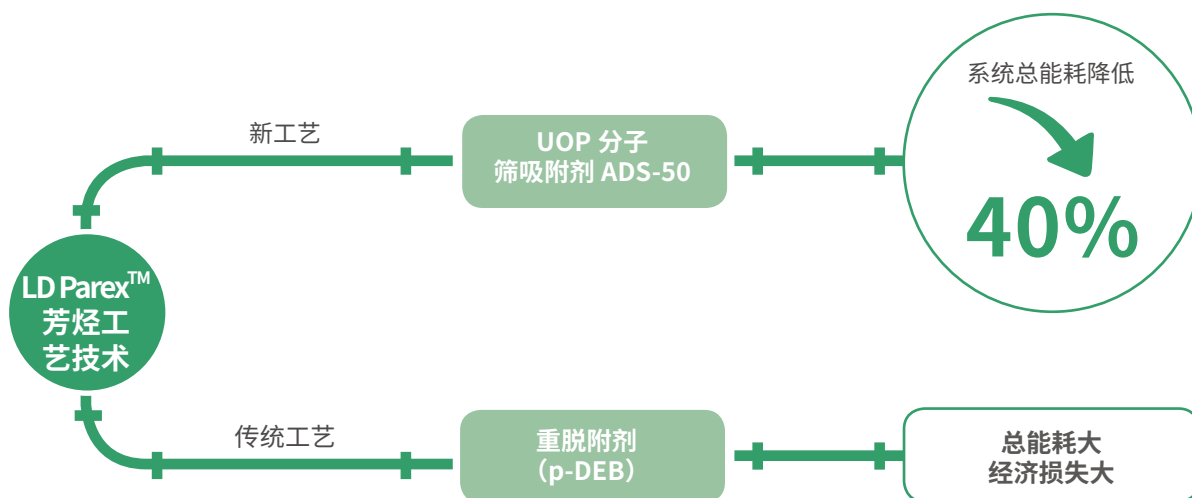
进行全面评估来探讨升级的机会，根据装置的规模和设备的极限提供经济又高效的改造建议，同时也可以根据各炼厂不同时期的碳减排需求提供逐步改造的技术方案。

2.2 降低能耗的工艺技术

炼化企业的能耗包括热、电和蒸汽（也是碳排放的重要来源）的使用，通过改造工艺技术来降低工艺过程中的能耗是目前最受欢迎的低碳技术，因为这种技术既减排又能为客户带来经济效益。霍尼韦尔拥有多项节能减排的工艺技术，如高能效催化裂化（FCC）技术、新型混合制冷剂冷箱设计及其工艺集成技术、Polybed™ PSA 集成乙烯回收工艺技术、LD Parex™ 芳烃工艺技术等等。

霍尼韦尔的 LD Parex™ 芳烃工艺技术就是一项具有能

源效率阶梯式改进的工艺技术。相比传统芳烃工艺，新工艺的重大突破是 UOP 分子筛吸附剂 ADS-50 的商业化，这一吸附剂具有足够的选择性和更高的容量，并可以使用轻型解吸剂（甲苯），比使用重脱附剂（p-DEB）的传统工艺更经济，并显著降低了能耗。LD Parex™ 芳烃工艺技术同时采用了先进的热集成和能量回收技术来确保整个芳烃系统能量消耗更低、碳足迹更小、经济效益更优。新工艺与传统工艺相比，系统总能耗降低 40% 以上。



2.3 绿氢应用技术

中国是一个多煤、少油、少气的国家，发展煤化工符合国家的战略，但需要一条绿色的发展道路，绿氢与煤化工的结合就是一条绿色发展道路。以煤制烯烃为例，煤炭中的碳 / 氢原子比大于 1，而产品烯烃中的碳 / 氢比是 0.5，因此煤制烯烃工艺需要大量的氢气。目前通用的工艺是通过水煤气变换反应由一氧化碳加

水来制造氢气，这个制氢过程会产生大量 CO₂ 排放。绿氢是一种不产生 CO₂ 排放的制氢方式，在煤化工领域，可以通过绿氢的应用来代替变换反应从而大大降低煤化工的碳排放。除了煤化工外，其它的化工过程如果需要氢气，也可以通过绿氢的应用来减少碳排放。



3

排放

炼化企业的直接排放包括工艺排放和燃烧排放，其主要燃烧设备有热电锅炉、蒸汽锅炉、工艺炉、涡轮和火炬等。前面已经讨论了如何减少工艺过程中的排放，而对于燃烧过程中的排放，高效燃烧技术，包括富氧燃烧是

一条可行的技术路径。除了直接减少排放外，工艺过程以及燃烧过程中排放的 CO_2 通过 CO_2 捕集、利用与封存技术也是减碳的有效手段。节能技术，包括整个工厂换热器网络优化、能量回收利用等技术也可以帮助减排。

3.1 高效燃烧技术

炼化企业的燃烧工艺过程需要解决高效能源利用，降低污染物排放，以及减少碳排放等问题。霍尼韦尔致力于提供

高品质、工业级燃烧系统及技术解决方案，以提高燃烧效率和降低排放。

分级燃烧技术

空气或燃料分级技术可以降低 NO_x （氮氧化物）排放。分级燃烧的特点就是减缓燃烧过程，让火焰峰值温度均匀而不出现高温区， NO_x 的生成对温度尤为敏感，因此低火焰温度可以减少 NO_x 的生成。

无焰燃烧技术

这是一种分级燃烧的极致，使燃料和空气在整体炉膛内进行充分混合和燃烧，无明显可视火焰存在，可实现高温燃烧过程中极低的 NO_x 排放。

富氧或纯氧燃烧技术

提高氧化剂中氧气浓度的同时，减少氮气的比例，从而减少因加热氮气带来的热损失，进而明显减少烟气总量，是一种节能的高效燃烧。

烟气预热空气技术

通过燃烧后产生的烟气来预热燃烧用的空气，不但减少了燃烧热量直接随烟气排出带来的损失，而且被预热的空气也可以明显增加燃烧的火焰温度，从而实现更高的整体热效率。采用烟气预热空气的自身预热式烧嘴可以明显提高系统热效率。

智能电子比例调节控制系统

霍尼韦尔的智能电子比例调节控制系统能精确控制和优化在不同负荷条件下的空气燃料的混合比例，使燃料完全燃烧释放热量，达到高效应用。



案例

恒力石化股份有限公司（以下简称“恒力”）作为国内大型石油炼化公司之一，于 2017 年以来持续采用凯勒特先进的火炬和低氮氧化物燃烧器技术，并于 2021 年采用凯勒特新研发的低火模式（LFM）新技术。

通常，当炉温低于 650℃ 时，氮氧化物燃烧器排出的一氧化碳水平就会升高。而采用低火模式的凯勒特燃烧器可将氮氧化物和一氧化碳的排放量均保持在 50mg/Nm³ 以下的理想水平，从而既降低 NO_x 物和 CO 排放来减少环境影响，又不影响运行的安全性和稳定性。

恒力表示：“我们之所以选择凯勒特的燃烧技术，一方面在于它是燃烧技术领域的全球领导者，另一方面它率先在中国攻克了 NO_x 物燃烧器的 CO 排放课题。而且凯勒特燃烧器无需停炉等操作即可完成更换。”

3.2 节能和能量回收技术

炼化企业是耗能大户，但工艺过程中也产生大量的能量，如热能等。如何有效地回收生产过程中的能量和提高能量利用率对节能降耗实现碳减排具有重要意义。霍尼韦尔认为在能量利用上首先应考虑换热网络的优化，将工艺过程的换热、公用工程等综合考虑并进行系统优化，充分利用工艺过程中的热能和制冷。当然许多炼化企业在设计时就很好地考虑了换热网络的优化，进一步节能需要从工艺条件的改变后再优化网络才能实现。

在换热网络之外，还有可能存在一些多余的废热，对于炼化企业来说，低质量能量很大程度上被浪费了。

霍尼韦尔有机朗肯循环（Organic Rankine Cycle, ORC）技术，可以将低品位热能（一般需高于 120 °C）转化为电能。ORC 技术将热能转化为电能没有额外 CO₂ 产出，能降低一次能源的消耗。据测算，用 ORC 发一度电可以节省等效标准煤 0.5kg，或者说减少碳排放 1.2kg 左右（不同工厂根据不同装机量、效率略有差异）。炼化企业使用 ORC 技术，利用低品位热能发电可减少 CO₂ 排放，同时又为企业节省电费，从经济角度和社会效益上均有一定的意义。

同时，霍尼韦尔拥有综合性能卓越的 ORC 工业介质。以现在常用的 HFC-245fa 制冷剂为例，其 GWP（全

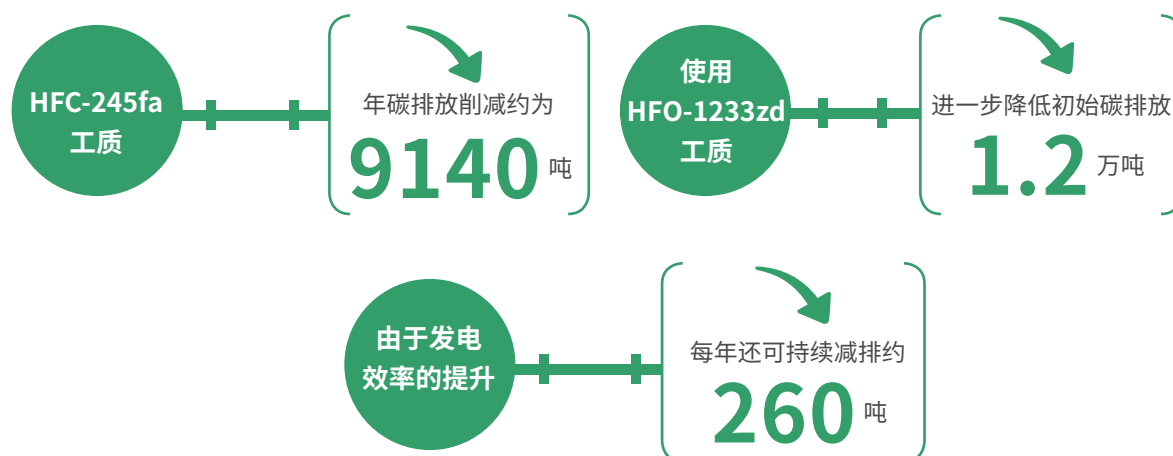


球变暖潜值) 为 858⁹，即使用 1 吨的 HFC-245fa 制冷剂相当于 858 吨的 CO₂ 排放。若使用环保性能更优秀的 HFO-1233zd 制冷剂，其 GWP 仅为 1⁹，直接减排约 99%，与此同时，在发电过程中可增加约 3%~6% 的电力，具有初始原料减排以及过程增效双重优势。

炼化企业多余的燃气也可以通过燃气轮机发电来回收能量，同时高压流体如气体和液体可以通过透平机来回收能量，这些技术在以前也许由于投资回报率相对低而难以执行，但考虑到碳减排和碳税，这些项目将不仅有很好的社会效益，也可以在经济上有很强的吸引力。

案例

中国宝武钢铁集团旗下上海宝钢节能环保技术有限公司于 2018 年在钢铁烧结工艺中采用 ORC 技术进行余热回收发电，其中使用了霍尼韦尔的 HFC-245fa 工质，年发电量约为 1099 万度，相当于年节约标准煤 3517 吨，折合约 9140 吨的年碳排放削减。如果在类似规模项目里使用 HFO-1233zd 工质，可以进一步降低约 1.2 万吨的初始碳排放，且由于发电效率的提升，每年还可持续减排约 260 吨。



3.3 碳捕集、利用与封存技术

CO₂ 捕集、利用与封存 (CCUS) 技术通过回收炼化企业产生的 CO₂ 来助力炼化企业实现净零碳排放。在 CO₂ 捕集和分离方面，霍尼韦尔已经拥有很成熟的商业技术经验，包括：

化学溶剂法：通过可逆化学反应来吸收和分离 CO₂，一般吸收反应操作在相对温度低的环境下，而 CO₂ 分

离在较高温度下进行。常用的化学溶剂有胺类化合物和碳酸钾溶液（加促进剂）。霍尼韦尔最新开发的具有专利的化学溶剂技术 PZAS 与其它溶剂法相比有两个显著的优点：其一，新溶剂在吸收塔中具有更快的动力学反应速度，因此吸收塔的直径可以比常规溶剂法小，节省投资成本；其二，新溶剂具有更强的抗热氧化降解能力，因此 CO₂ 分离塔可以在更高温度下运行，更高的

9 Chapter 8 of Climate Change 2013 – the Physical Science Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.



运行温度意味着分离的 CO₂ 的压力更高。一般利用 CO₂ 的反应都在较高的压力下进行，封存 CO₂ 也需要高压 CO₂，如果从分离塔出来的 CO₂ 的压力较高的话，就可以节省压缩机投资及压缩能耗，减少碳排放（压缩用电）和增加经济效益。

物理溶剂法：通过 CO₂ 气体在溶剂中的溶解来实现吸收，CO₂ 在物理溶剂中的浓度符合 Henry 定律，分压越高则溶解度越高，分压越低则溶解度越低。物理溶剂法就是通过变压来实现吸收（高压）和分离（低压）。霍尼韦尔的 SeparALL™技术采用 Selexol™物理溶剂，可以用来捕集具有高 CO₂ 分压气体中的 CO₂。

吸附法：通过变压吸附（PSA）和变温吸附（TSA）装置来实现 CO₂ 的捕集与分离。在 PSA 技术中，CO₂ 在高压下吸附，在固体吸附剂上与来料中的其它组分分离，然后在低压下与吸附剂分离而得到浓度较高的 CO₂。TSA 则是在低温下实现 CO₂ 吸附，高温下 CO₂ 与吸附剂分离。霍尼韦尔可以为客户提供这两种吸附技术。

液体 CO₂ 分离技术：通过将含 CO₂ 的原料气液化后

经过精馏来分离各组分。这种技术的特点有两个：其一，如果原料气中含有一些有用的组分如氢气，可以通过这种分离方法实现副产品（如氢气）的高收率分离；其二，从这种分离过程出来的 CO₂ 呈液体状态，可以用泵来加压，节省大量的能量。霍尼韦尔在液体 CO₂ 分离领域有非常丰富的实践经验，这种技术结合变压吸附可以应用在蓝氢制取领域。目前工业上最广泛的灰氢制取是天然气和煤制氢，但在这个过程中，大量的 CO₂ 排放到空气中，如果将 CO₂ 捕集后利用或者封存，那么这样制造的氢气就是低碳排放的蓝氢。采用霍尼韦尔 PSA 结合液体 CO₂ 分离的技术来回收氢气和捕集 CO₂，可以增加氢气的回收率(>99%)并降低 CO₂ 增压的运行成本。在目前绿氢成本高企的情况下，蓝氢是一个相对低成本和 CO₂ 减排的好工艺技术。

膜分离技术：高分子膜在天然气净化领域已经有很长的应用历史，含 CO₂ 的粗天然气通过一个膜分离装置后，甲烷将被阻断在有机膜一侧，而 CO₂ 透过有机膜被分离。霍尼韦尔的 CO₂ 膜分离技术目前处于世界领先水平。在 CCUS 领域，CO₂ 最好的应用之一就是捕集的 CO₂ 送到采油井进行驱油（EOR），高压的 CO₂ 注入油井后，其产生的压力可以将油井中的油气



挤压出来，但是同时打到井下的一部分 CO₂ 也会返回外溢，而通过膜分离技术就可以分离溢出的 CO₂，并将它再次注入，这样可以减少 CO₂ 的逃逸。霍尼韦尔的膜分离技术已长期用于位于美国德克萨斯州的世界第一个 EOR 油井。

霍尼韦尔有多种碳捕集技术和多年的工业实践，可以根据 CO₂ 的分压情况、所需的 CO₂ 捕集率以及工厂的具体情况来提供合适的技术。

在 CO₂ 资源化利用方面，科学界、企业界均在进行相应的研究工作，霍尼韦尔也在进行大量的实验研究工作，包括把 CO₂ 转化成甲酸、甲醇等碳氢化合物以及利用 CO₂ 和甲烷制合成气等研究工作。相信新的合成技术还会不断涌现，比如近日，我国在 CO₂ 制淀粉领域实现了突破。CO₂ 不仅可以参与到化学品合成中，矿化处理也是一种理想的封存方式，CO₂ 与自然界的矿物质进行反应变成碳酸盐，现在科学界正在研究如何加快其反应速度。

案例

沃巴什谷资源有限责任公司（Wabash Valley Resources）位于美国印第安纳州西特雷霍特（West Terre Haute）的气化厂改建项目是美国迄今为止最大的碳封存项目之一，该项目将采用霍尼韦尔的一系列技术，每年预计将捕集和封存 165 万吨 CO₂ 并生产清洁氢能。

在该项目中，霍尼韦尔负责提供技术授权、基础工程设计和专业设备，包括模块化 MOLSIV™ 分子筛脱水装置、模块化 Ortloff CO₂ 分馏装置和 Polybed™ 变压吸附装置，用于分离气化装置中的 CO₂ 和处理合成气。其中，Ortloff CO₂ 分馏技术可生产高纯度的液态 CO₂ 流，同时分离出将由变压吸附装置纯化的富氢流，CO₂ 流将被送往永久性地质封存，而富氢流则可作为氢气涡轮机燃料用于发电。富氢流还可用于化学合成，或作为清洁的运输燃料销售。

霍尼韦尔提供

技术授权
基础工程设计
专业设备

模块化 MOLSIV™ 分子筛脱水装置

模块化 Ortloff CO₂ 分馏装置

Polybed™ 变压吸附（PSA）装置

高纯度的液态 CO₂ 流





4 运营

原料、工艺、排放环节的减排技术固然重要，但炼化企业向智能化、互联化转型，通过提升能源效率降低碳排放也是破题的关键。智能化、互联化等数字技术的应用是帮助炼化行业提升效率实现碳减排的手段之一。

对炼化企业而言，如何把专家体系和工厂运营实时连接起来，是实现数据互联的核心，数据互联的基础是“数字孪生”技术，霍尼韦尔互联工厂解决方案通过数字技术的应用可实现对炼化行业的运营生产的全方位优化提升效率，减少碳排放。

4.1 互联工厂解决方案

数字孪生（Digital Twin），是指通过数字化的手段在虚拟的数字世界中构建一个与物理世界中的实体一致的数字镜像，以此来实现对该物理实体的了解、分析和优化。借助数字孪生工具，企业可以在云端运行一个完全模拟现场的高保真模型，专家从云端获取现场的运行状态和实时数据，同时比对数字孪生模型的运行状态，对

现场过程性能进行分析，提供优化和可靠性指导，预防和避免设备故障和非计划停车，进一步提高生产效率。当然，除了数字孪生技术外，模型的优化决策技术也很重要，即基于模型决策可以提高决策的科学性和准确性，加入优化求解器就可以获得优化的结果，用计划优化软件排产和选择原料就是基于模型优化决策的典型应用。



霍尼韦尔应用数字孪生技术以及模型优化决策技术把实时测量的大量数据，结合霍尼韦尔对炼化过程的经验积累，通过建模实现炼化过程的预测和优化。炼化企业可以根据市场需求下，适当调整操作产出一定范围内的产品，通过数字化模型使过程操作处于最优状态，从而节省化石能源减少碳排放。霍尼韦尔先进控制和实时优化技术能够在提高收率、产率和质量的同时，通过减少生产波动、优化能源分配等因素节能降耗、减少燃料使用，起到减少碳排放的作用。

在生产运营方面，霍尼韦尔互联工厂解决方案中的智能

生产管理执行系统（MES）立足中国炼化行业特色，结合流程行业生产过程和生产组织方式特点，与霍尼韦尔百年工艺过程专利技术、工业自动化和控制行业的丰富实践、以及霍尼韦尔自有的生产企业精益管理知识全面融合，对于装置生产实现实时在线能源管理和优化，并和生产班组绩效管理结合，在同一平台上实现了生产流程管理的数字化、自动化、智能化以及生产管理的精益化、信息化、透明化和智能化，使炼化企业提效的同时减少碳排放。

（具体可以参考霍尼韦尔智能制造研究院 2019 出版的《流程工业智能工厂白皮书》）

| 总 结

在“双碳”目标的背景下，炼化企业面临着挑战，但也存在巨大的机会，该目标可以促进炼化行业产业结构的转型与优化、提高行业技术水平，通过“双碳”目标的实现可以提高中国炼化行业产业链在世界范围内的竞争力。

炼化企业的低碳化可以从原料入手，加大可再生资源 and 材料循环利用，通过深度炼油技术来增加原油到石化产品的利用率，减少原油用量，同时石化产品原料的轻烃化也是一条可行的减碳路径。

先进的工艺技术是减碳的核心，这其中，重中之重是炼厂的转型技术，将化石能源转化成生产石化产品和材料的资源，也就是化石能源资源化。在转型过程中要以分子管理技术为基础，因为分子管理技术可以增加从原料到产品的碳、氢转化效率，降低化石原料的需求，减少碳排放。节能可以减少炼化企业的碳排放，而最大的节能潜力来自于工艺技术的进步，因此炼化企业需要开发更多以节能为目标的先进工艺。新能源的利用也将是未来炼化企业低碳和绿色发展的重点，将以新能源为基础制造的绿氢在炼化工艺中进行应用可以大大降低碳排放。以煤制烯烃为例，充分利用绿氢，可以降低甚至完全消除工艺过程的碳排放。煤炭是中国最丰富的资源之一，发展低碳、绿色的煤化工对中国具有十分重要的战略意义。

对炼化行业的排放直接进行处理也是减排的重要手段。燃烧是炼化行业几乎每一个企业都要面对的过程，高效率的燃烧可以减少燃料的量并降低排放，燃烧的新技术可以帮助炼化行业直接减排。通过换热网络的优化，可以更多地利用工艺过程中产生的热和冷源，从而降低能耗（碳排放）。在换热网络已经优化的前提下，能量回收，比如余热回收发电等可进一步减排。如果通过原料改进、工艺改造后，还是无法消除碳排放，CCUS 可以作为手段来减少或者消除碳排放，通过捕集、利用或者封存 CO₂ 的技术可以大大降低炼化企业的碳排放。

最后一项减排技术就是通过数字化技术让炼化企业的运行更加智能，通过智能运行来增加炼化企业的效率、降低能耗和碳排放。

为应对气候变化带来的诸多挑战，霍尼韦尔正通过一系列创新技术和解决方案，助力炼化行业在实现碳减排的同时，进一步提高收益。相信在双碳目标的驱动下，中国将走向更加智能、安全、健康、可持续发展的美好未来。



| 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特性材料和技术集团，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。《炼化行业低碳发展》白皮书是低碳中心发布的第一本针对炼化行业的白皮书，后续还将有更多的研究洞见与大众见面。

霍尼韦尔特性材料和技术业务集团是全球领先的特性材料、工艺技术和自动化方案供应商。该集团下属霍尼韦尔 UOP 拥有超过 4900 个专利和应用，并且全球 36 种炼油工艺中的 31 种是霍尼韦尔 UOP 的发明。此外，UOP 技术助力全球 60% 汽油、40% 液化天然气和 70% 聚酯纤维的生产。集团下属过程控制部是分布式控制系统（DCS）的发明者，引领工业自动化行业长达半个世纪之久，其技术应用于全球超过 15,000 家生产基地，覆盖超过 125 个国家和地区。集团下属高性能材料部专业生产多样的高性能产品，包括环境友好型制冷剂、发泡剂和气雾剂。

编辑委员会

感谢参与撰写霍尼韦尔《炼化行业低碳发展》白皮书的各位编者：

周麓波 费志浩 何剑波 张奎山 卢 静 刘 焘 徐水根 范少龙 顾 昕 彭树文 姚正杰
吴 翀 高真熙 张 兰

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。



霍尼韦尔特性材料和技术集团亚太区
霍尼韦尔(中国)可持续发展研究院低碳中心

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



扫一扫联系我们

@Copyright 2021 by Honeywell

Honeywell