



迈向2060碳中和 石化行业低碳发展白皮书

2022年4月

目录

致辞	4
内容摘要	5
第一章 全球及中国低碳发展需求	7
第一节 全球低碳发展需求	7
第二节 中国低碳发展需求	8
第三节 各行业系统化低碳发展	9
第二章 石化行业低碳转型，势在必行	12
第一节 低碳转型驱动因素	12
第二节 石化行业低碳发展分析	13
第三节 石化行业面临的挑战	16
第四节 低碳发展与低碳转型关键——重新平衡技术组合	17
第三章 石化行业2025年碳减排——实现途径	19
第一节 石化行业“双碳”平台建设	19
第二节 低碳发展的基础——碳盘查	20
第三节 碳资产管理工具	21
第四节 能源资源高效利用降碳技术	23
1. 换热网络集成优化技术	23
2. 蒸汽动力系统优化技术	24
3. 低温余热高效利用技术	25
4. 氢气资源高效利用技术	25
第五节 典型炼油工艺过程降碳技术	26
1. 原油催化裂解生产化工原料技术	26
2. 低生焦催化裂化技术	26
3. 低能耗柴油液相加氢精制技术	27
4. 低碳强度生产化工原料的加氢裂化技术	27
5. 高效设备降低催化裂化工艺排放	28
第六节 典型化工工艺过程低碳技术	28
1. 环己酮气相重排制备己内酰胺技术	28
2. 浆态床双氧水技术	29

第七节 智能化提升过程效率	30
1.分离系统智能优化技术	30
2.反应装置模拟优化技术	31
第八节 组分炼油	31
第四章 石化行业2030年碳达峰——技术支撑	33
第一节 生物基燃油与润滑油	33
1.生物航煤	33
2.生物柴油	34
3.生物基润滑油	34
第二节 循环经济技术革新	34
第三节 低碳强度基础化学品生产技术	35
1.低碳强度丙烯生产技术	35
2.低碳强度芳烃生产技术	35
第五章 石化行业2060年碳中和——路径策略	37
第一节 绿氢保障	37
1.电解水制氢技术	37
2.生物质气化制氢技术	38
第二节 CCUS技术	38
1.CO ₂ 加氢制航煤技术	38
2.CO ₂ 加氢制甲醇技术	39
3.CO ₂ 甲烷干重整制合成气技术	39
4.CO ₂ 辅助化学降黏提高稠油采收率技术	40
5.微藻固碳技术	40
第三节 电气化实施	40
第四节 典型炼油技术低碳发展路径——以催化裂化为例	41
第六章 迈向2060，石化行业低碳发展路线图	44
结语	46
主要工作人员	47
致谢	48
关于石科院	49

致辞



李明丰
中国石化石油化工科学研究院院长

碳达峰、碳中和是党中央经过深思熟虑做出的重大战略决策，事关中华民族永续发展和人类命运共同体构建，在全球应对气候变化过程中充分展现了大国风范与担当。

石化行业作为我国交通能源和基础化工原材料的重要保障行业，在国民经济发展中发挥着不可替代的作用，但在此过程中也排放着大量二氧化碳。我国每年在石油炼制与化学品生产过程中的碳排放量近6亿吨，占全国碳排放总量近6%，碳减排对于石化行业来说是一项现实且紧迫的任务。

作为复杂的流程工业体系，石化行业在碳减排过程中面临基础数据弱、制约因素多、减排任务重等多重问题。统筹整体与局部，石科院深入研究公共资源与区域资源协同降碳路径；平衡发展与减排，成立石油化工低碳经济研究中心，专业化支撑行业可持续低碳发展；立足短期与中长期，开发了系列化低碳技术，满足行业不同时期的减排需求；围绕立与破，打造循环经济与可再生能源体系，为石化行业高质量发展提供了科学降碳之路。



萧耀熙
德勤亚太区企业发展领导合伙人
德勤中国石油、天然气及化学品行业全国领导合伙人

从2015年《巴黎协定》的签署，为全球应对气候变化指明了方向和目标；到2020年中国碳达峰、碳中和气候目标的宣布，强调了低碳发展是根本的解决之道；再到2021年国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》，明确了石化化工行业碳达峰举措，对石化行业低碳发展，提出了更高要求。低碳转型已处于关键时期，即刻果敢行动，方能重塑未来。

在这样的背景下，中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院（以下简称“石科院”）与德勤中国共同撰写本报告。依托石科院对石化行业及技术的深刻理解，对石化行业2025年碳减排的实现途径、2030年碳达峰的技术支撑、2060年碳中和的路径策略以及迈向2060，石化行业低碳发展路线图进行了详细阐释。德勤中国石油、天然气及化学品行业，携手德勤研究、德勤气候变化与可持续发展研究院以及德勤全球对标中心，基于多年咨询服务经验及石化行业深度观察，指出了全球及中国低碳发展需求，并对石化行业低碳转型驱动因素、发展关键及面临挑战进行深入探讨。相信本文将帮助相关行业积极思考，通过技术的探索和突破，实现低碳发展的终极目标。

祝大家开卷有益，阅读愉快。

内容摘要

随着气候变化的影响加剧，中国紧跟世界的步伐，宣布了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的“双碳”气候目标。作为资源型和能源型产业，石化行业碳排放量在工业领域居于前列。《“十四五”工业绿色发展规划》提出，到2025年，乙烯等重点产品单位能耗需达到世界先进水平，石化行业资源利用水平明显提高，助力推进完善绿色制造体系。

为了更好的分析当下石化行业低碳发展的现状及关键步骤，中国石化石科院与德勤中国共同撰写本报告。从中国低碳发展需求出发，延伸至对石化行业低碳转型驱动因素、发展趋势、转型关键及面临挑战的梳理，并按照2025-2030-2060的减排时间目标，对各阶段的重点工作及技术发展展开详述。

石化行业2025年碳减排——实现途径：“十四五”期间，管理能力提升、能源资源高效利用、工艺优化、智能化提升的融合发展将为石化行业低碳转型提供重要保障。中国石化石科院通过石化行业“双碳”平台建设，为企业提供碳排放数据统计与核算服务，结合碳资产管理软件助力企业管理降碳，开发并推广能源资源高效利用技术、炼油/化工工艺过程降碳技术及智能优化降碳技术等，全面、精准、高效助力石化行业碳减排。德勤作为全球领先的专业服务机构，开发了面向低碳投资与运营的专业化管理软件。

石化行业2030年碳达峰——技术支撑：为实现石化行业2030年碳达峰的总体目标，上下游产业链需协同发力，科学规划产业发展，合理安排和推进产能建设，确保经济发展与绿色转型齐头并进。在2025年前碳减排的基础上，生物基燃油与润滑油、循环经济技术革新、低碳强度基础化学品生产技术将有力支撑和加速石化行业碳达峰的实现，同时为构建工业体系低碳产业链做好准备。

石化行业2060年碳中和——路径策略：实现石化行业2060年碳中和的战略目标，全面建设绿色低碳循环发展的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系，产业结构和能源结构将发生颠覆性调整，新能源的逐步替代和可再生能源的大力发展将成为关键引领。绿氢保障、CCUS、电气化实施等技术的升级和突破将成为石化行业实现碳中和的重要路径策略。

展望未来，伴随石化行业绿色低碳转型发展的趋势，以碳中和作为远景目标，既是行业本身面临的时代挑战，也是调整产业结构、提高竞争力、实现生态文明可持续发展的机遇。企业应化挑战为机遇，积极拥抱产业变革、顺应低碳发展趋势。通过不同时期可采用的碳减排技术对石油化工生产过程碳减排贡献进行预测，在2060模型测算情景下，典型炼油企业可实现净零排放。



第一章 全球及中国低碳发展需求



第一节 全球低碳发展需求

气候变化是全球面临的重要而紧迫的挑战，从环境、社会、经济等多个维度影响着人类的生存和发展。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 发布的报告中，阐述了气候变化带来的八大灾难性风险，分别是：

- 沿海洪灾带来的死亡与伤害
- 内陆洪灾导致的伤害与经济损失
- 极端天气对电力、应急及其他系统的破坏
- 酷暑对贫困地区的影响
- 气候变暖、干旱及洪灾威胁粮食安全
- 缺水造成的农业和经济损失
- 对海洋生态系统造成的损失
- 对陆地和内陆水域生态系统造成的损失

由中国社会科学院和中国气象局联合编纂的《气候变化绿皮书》中亦有进一步阐述：当前全球气候灾害带来的损失多于自然灾害经济损失的90%。1980-2018年间，全球自然灾害事件中，与气象因素相关的天气灾害、水文灾害和气候灾害发生次数分别由1980年间的135次、59次和28次增到2018年的359次、382次和57次。全球气候变化对自然生态系统和经济社会的影响正在加速，全球气候风险持续

上升。气候变化已经不是未来的挑战，而是眼前的威胁。如果面对气候变化无动于衷，全人类将遭受严重后果。

为应对气候变化，2015年，全球近两百个国家通过了《巴黎协定》，为全球合作应对气候变化指明了方向和目标，具有里程碑意义。按照这一协定，各方将共同加强举措，应对气候变化威胁，减少温室气体排放，制定了到本世纪末将全球平均温升控制在工业化前水平的2°C以内，并努力追求1.5°C温控目标。2021年11月，《联合国气候变化框架公约》第26次缔约方大会 (COP26) 在格拉斯哥闭幕，形成了《格拉斯哥气候协议 (Glasgow Climate Pact) 》。COP26期间，缔约方达成了多项共识，为缓解气候问题提供了确定、可预测的方法：

- 敦促并鼓励发达国家，兑现每年向发展中国家提供1,000亿美元绿色资金的承诺直至2025年
- 500家金融服务公司将提供超过130万亿美元民间资本助力净零排放实现
- 建设全球碳交易市场机制
- 确定全球甲烷减排承诺
- 逐步减少未采用碳捕集与封存措施的煤电，向低排放能源系统转型

截至目前，各缔约方已提交或正在制定各自的中长期低碳发展战略。我们认为，气候变化将是政府和企业未来十几年的关键议题，承担应对气候变化的共同责任、采取积极的行动将至关重要。同时，全球低碳发展的迫切需求也带来了大量机遇。气候相关财务信息披露工作组 (TCFD) 将气候相关机遇总结为：资源效率、能源来源、产品及服务、市场与弹性能力五个方面。

气候变化的影响波及全球，并可能产生难以挽回的损失。如何避免这种影响取决于我们当前及未来十年所做出的选择。为此，中国及全球各经济体纷纷加快推进减排计划，为迈入低排放未来提供了一条可行之路，在避免因气候变化产生最坏影响的同时，实现长远发展与繁荣。唯有携手与共，凝聚全球力量，即刻果敢行动，方能重塑未来。



第二节 中国低碳发展需求

2020年，中国正式宣布“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的“双碳”目标。2021年10月国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》，提出了到2025年单位国内生产总值（GDP）能源消耗比2020年下降13.5%，单位GDP二氧化碳排放比2020年下降18%的目标。2022

年1月国务院印发《“十四五”节能减排综合工作方案》，再次明确了2025年单位GDP能源消耗目标，指出到2025年重点行业能源利用效率和主要污染物排放控制水平基本达到国际先进水平，经济社会发展绿色转型取得显著成效。应对气候变化是中国可持续发展的内在需要，展望未来，中国到2035年要基本实

现社会主义现代化、到本世纪中叶建成社会主义现代化强国，绿色低碳转型发展是根本的解决之道。同时，对中国而言，绿色低碳转型发展之中亦蕴含着机遇：即刻采取行动减缓气候变化，打造经济繁荣发展的新引擎，引领全球新一轮经济增长浪潮。



脱碳成为中国经济发展新引擎

德勤通过情景模拟和分析发现，2021年至2070年，采取气候行动能够创造显著经济效益，为中国经济带来约116万亿元¹（按现值计算）的收益。根据我们的预测，只要制定大胆的气候政策决策，推动相关领域的快速投资和技术研发，预计第一年便会产生经济效益，并有助于实现到2050年将全球平均升温控制在1.5°C 以内的目标。看似高昂的成本，实为促进气候驱动型变革的长远投资，有助于创造一个更有保障的未来。我们亟需转变观念，不应将各项减缓全球变暖的举措视为非必要成本，而应视其为必需举措和拓展商机的全新布局。



中国可以向世界输出脱碳经验

中国在加大可再生能源消费方面处于领先地位，已成为全球最大的太阳能电池板、风力涡轮机、电池和电动汽车生产国，氢产量全球第一，在电动汽车生产和销售方面全球领先，对清洁能源的投入也位居世界前列。中国正快速推进脱碳进程，有望更加广泛地分享关键技术、方法和专业知识。这有助于加速全球的低碳未来转型，并为中国企业创造更多发展机遇。



引领全球迈向低排放未来

中国更容易实现经济的多元化和绿色产品与服务的规模化，低碳知识、技能、投融资、供应链网络将为中国打造高阶“绿色经济复合体”。此外，中国具备良好的经济基础，不仅能够提高绿色出口贸易比重，还可增加具备出口竞争优势的低排放产品种类和数量。这有助于我们发挥在消费经济、技术和先进制造领域的领导力，利用向低排放模式过度的契机，重新调整经济结构，充分利用清洁能源出口市场，推动低碳技术在世界各国的发展普及。加速脱碳将给中国和世界带来巨大利益，中国具备独特优势，有能力引领全球迈向全面低碳发展和系统性转型变革。

未来几年的政策和投资决定将在很大程度上影响中国和世界的经济与气候。在当前至未来十年的关键行动期，我们须把握变革机遇，制定正确决策，促进经济繁荣，为可持续发展注入新的动能，共同迈向美好未来。

1. 德勤报告《中国应对气候变化的转折点》

第三节 各行业系统化低碳发展

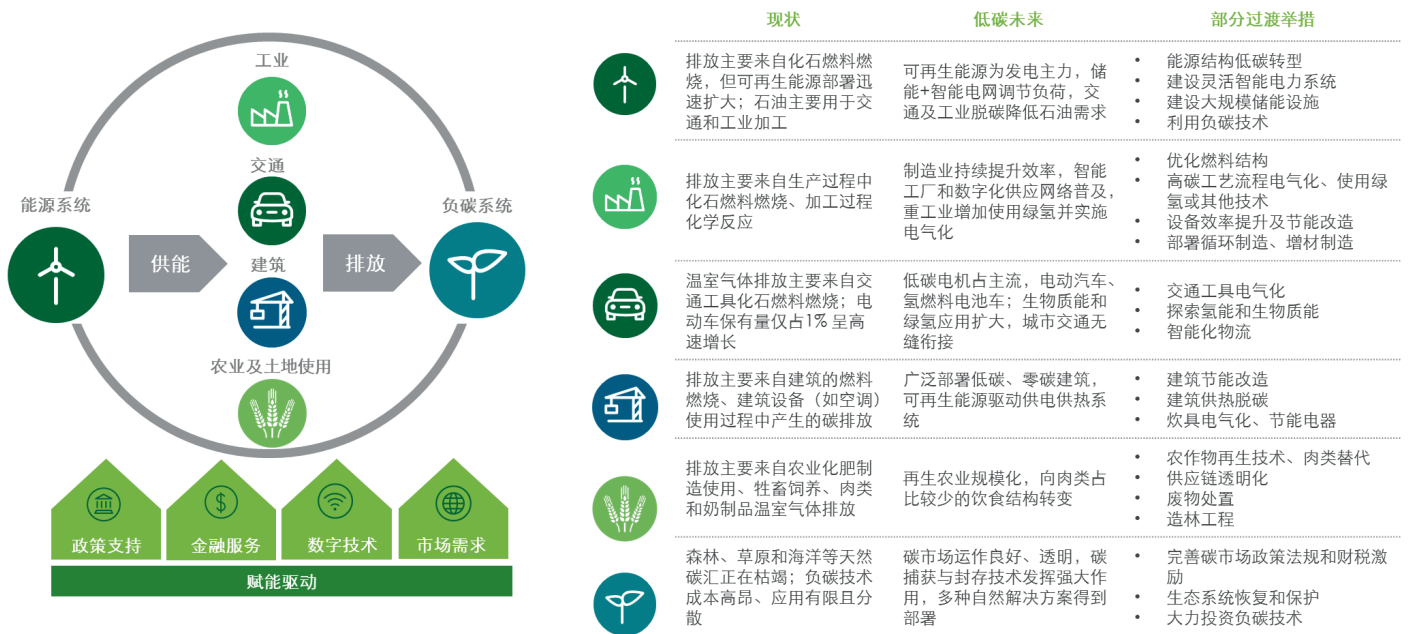
全球许多国家和企业都将低碳发展提上议程，纷纷提出碳排放目标和气候倡议，但全球碳减排仍然进展缓慢。联合国环境规划署《2021年排放差距报告》指出：“目前已宣布的减排承诺对全球温室气体排放影响有限，预计2030年排放量仅下降7.5%，要实现《巴黎协定》中2°C温控目标需要减排30%，1.5°C则需要减排55%。”

加快减排进程需要多个系统共同努力，主要包括能源、工业、交通、建筑、农业及

土地利用、负碳系统。这六个相互关联的核心系统，大致对应于当今温室气体排放的主要来源，以及从空气中去除二氧化碳的关键过程。另外，政府政策、金融服务和数字技术将发挥催化剂作用，支持和促进各行业低碳发展。包括消费者偏好、投资者要求在内的各种市场力量也将带动低碳转型，如交通系统脱碳将与能源行业和制造业脱碳产生交集，只有使用清洁、可再生能源和可持续的原材料（如废塑料化学循环的再生塑料），交通系统才能充分发挥减排的作用。

图1展示了上述六大核心系统的现状、低碳未来以及发展过程中的部分关键举措，图中列举的各项举措并非一成不变，在流程、技术、供应链和商业模式的深刻变革中将被不断完善。在实际减碳过程中，各系统之间深度关联且相互依赖，现实中的低碳发展需要多个系统协作。

图1：六大核心系统低碳发展



数据来源：Deloitte Insights, 德勤研究

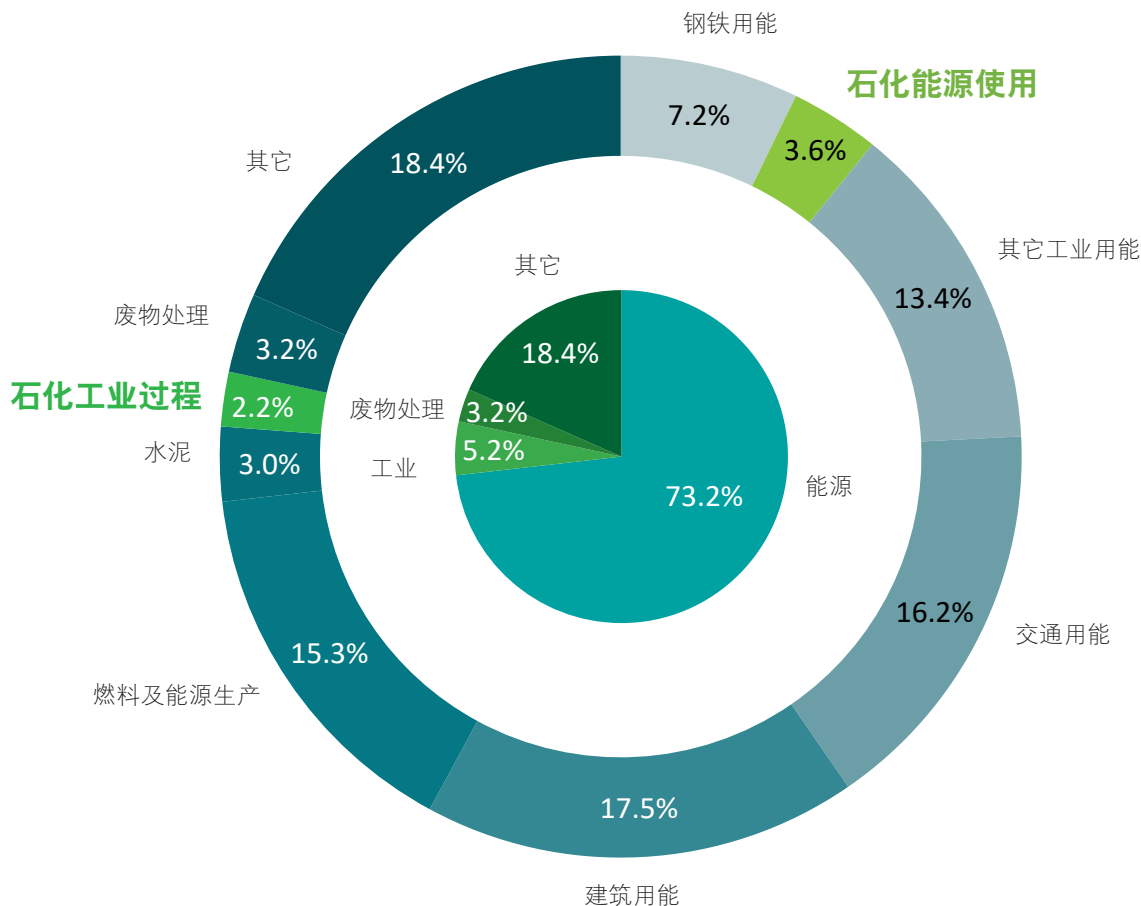
2. 《2021排放差距报告》，联合国环境规划署，2021-10-26，<https://www.unep.org/zh-hans/resources/emissions-gap-report-2021>

德勤中国石油、天然气及化学品行业领导合伙人萧耀熙表示：“作为资源和能源密集型行业，石化行业碳排放量在工业领域居于前列。石化行业的二氧化碳排放主要来自其产品生命周期中化石燃料的使用，以及生产这些产品过程中产生的工艺排放。”数据统计³显示，全球化学品和石化行业温室气体排放占总排放量的 5.8%，其中3.6% 来自能源使用，2.2% 来自工业过程。

低碳发展将对石化行业产生长远影响，政策推动、消费偏好变化、新技术应用将推动石化企业开发新的可持续产品和商业模式。比如未来可能有更多国家限制使用高碳排放强度的塑料制品，此时生产商将提高塑料制品中再生塑料的比例，循环经济理念将渗透到产品生产过程，以此为契机将会创造新的商业模式。

面对“双碳”目标要求，众多石化企业提出了碳减排目标并付诸实践，例如，中国石化宣布以净零排放为终极目标，力争2050年实现碳中和，并于2021年7月启动了中国首个百万吨级CCUS项目建设，为应对全球气候变化做出积极贡献。

图2：全球温室气体排放行业占比



数据来源：Our World in Data

3. Sector by sector: where do global greenhouse gas emission come from, Our World in Data, 2020-09, <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>



第二章 石化行业低碳转型，势在必行

第一节 低碳转型驱动因素

石化行业产品覆盖面广、产业关联度高，是支撑国民经济发展的基础性产业。作为二氧化碳排放量较大的行业之一，石化行业在多个方面受到碳达峰、碳中和浪潮的影响，同时也面临新的发展机遇。

从政策角度看，2021年10月，国务院印发《2030年前碳达峰行动方案》，针对石化行业低碳行动，明确提出：

- 优化产能规模和布局，加大落后产能淘汰力度，有效化解结构性过剩矛盾
- 严格项目准入，合理安排建设时序，严控新增炼油生产能力
- 引导企业转变用能方式，鼓励以电力、天然气等替代煤炭
- 调整原料结构，拓展富氢原料进口来源，推动石化化工原料轻质化
- 优化产品结构，促进石化、化工与煤炭开采、冶金、建材、化纤等产业协同发展，加强炼厂干气、液化气等副产气体高效利用
- 鼓励企业节能升级改造，推动能量梯级利用、物料循环利用
- 到2025年，国内原油一次加工能力控制在10亿吨以内，主要产品产能利用率提升至80%以上

2022年2月，国家发展改革委等四部委印发《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022年版）》，明确提出推动炼油行业节能降碳改造升级，举措包括：



前沿技术应用，推动渣油浆态床加氢等劣质重油原料加工、先进分离、组分炼油及分子炼油、低成本增产烯烃和芳烃、原油直接裂解等深度炼化技术开发应用



绿色工艺技术，如采用智能优化技术，实现能效优化；采用先进控制技术，实现卡边控制



重大节能装备，如开展高效换热器推广应用，通过对不同类型换热器的节能降碳效果及经济效益的分析诊断，合理评估换热设备的替代/应用效果及必要性，针对实际生产需求，合理选型高效换热器，加大沸腾传热，提高传热效率



能量系统优化，如推动蒸汽动力系统、换热网络、低温热利用协同优化，减少减温减压，降低输送损耗；推进精馏系统优化及改造，采用智能优化控制系统、先进隔板精馏塔、热泵精馏、自回热精馏等技术，优化塔进料温度、塔间热集成等，提高精馏塔系统能量利用效率



氢气系统优化，推进炼厂氢气网络系统集成优化。采用氢夹点分析技术和数学规划法对炼厂氢气网络系统进行严格模拟、诊断与优化，推进氢气网络与用氢装置协同优化，耦合供氢单元优化、加氢装置用氢管理和氢气轻烃综合回收技术，开展氢气资源的精细管理与综合利用，提高氢气利用效率，降低氢耗、系统能耗和二氧化碳排放

从市场及商业角度看，全球可持续投资联盟 (GSIA) 发布的《2020年全球可持续投资回顾》显示，截至2020年，在统计范围内的全球可持续投资总额已高达35.3万亿美元，比2018年统计值增长15%。德勤《2022全球化学品行业并购交易展望》亦提出，《2030年前碳达峰行动方案》推动了中国在环境、社会和公司治理领域的投资，同时促进了更多全球合作。随着碳达峰碳中和目标的提出，作为资源密集型和资金密集型产业，石化行业相关企业已经行动起来，加速转型升级，开启新一轮供给侧改革，通过大力发展氢能产业、持续培育可再生能源产业、重点布局新材料产业等举措，全面推动石化行业低碳转型发展。

双碳背景下，国际一流石化企业率先公开声明了碳中和或净零排放的目标年份，并通过快速战略调整、建立碳管理能力、积极投资降碳技术创新以迎接净零道路上面临的挑战。新一轮科技革命将从降碳技术应用、零碳技术应用、负碳技术应用三个层面驱动石化行业低碳发展。

在当前助力低碳生产与运营优化的技术中，能效提升是减缓碳排放增长的主要途径。国际能源署 (IEA) 预测，能源利用效率提升将使未来20年与能源相关的温室气体排放减少40%以上。此外，高耗能行业的产品碳足迹通常较高，对该类产品实现循环利用也是降低行业碳排放的重要途径。

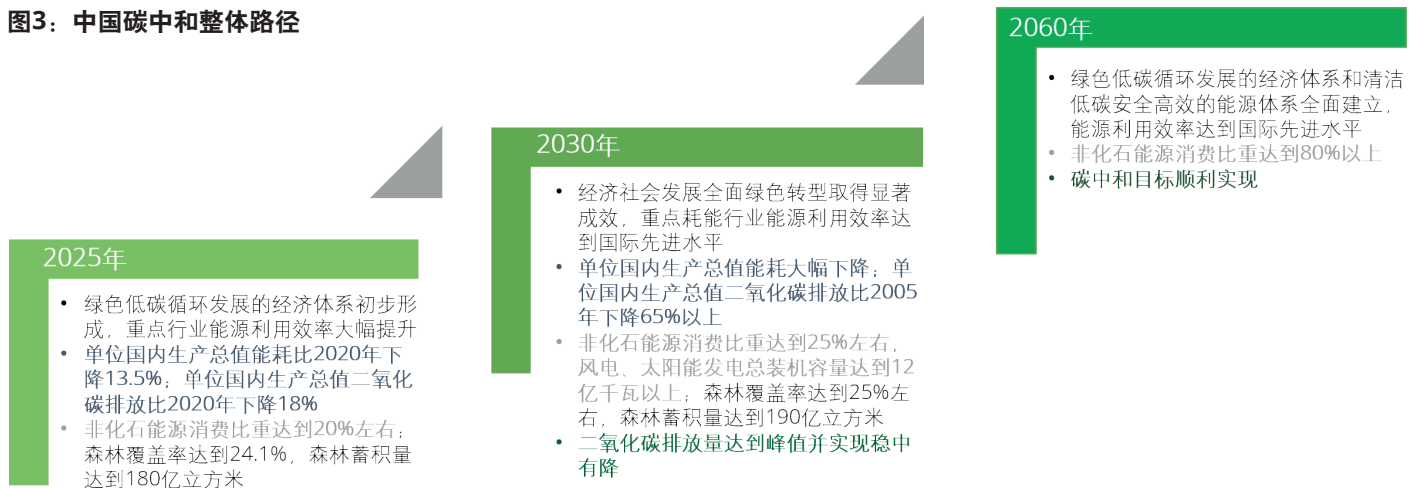
发展替代能源技术以及再电气化是零碳层面的主要路径。开发利用清洁能源替代化石能源，促进能源结构低碳化将实现碳排放总量的削减。除水、光、风、核等清洁能源以外，一流石化企业正加快部署低碳氢能、生物质能等新能源技术的研发与应用，实现经济效益和社会效益共赢。

负碳技术可抵消甚至再利用难以避免的碳排放，是最终实现碳中和目标的必要技术路径。随着技术进步与产业集群的形成，负碳技术将更具经济性与商业可行性，二氧化碳也将作为资源加以循环利用，从而赋能多种行业。

第二节 石化行业低碳发展分析

2021年10月，中共中央、国务院正式公布《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》，为未来四十年的碳中和工作进行了系统谋划和总体部署，明确2025年、2030年、2060年作为重要的转型时间节点，并设定了推进建设低碳循环发展经济体系、降低碳强度、提升非化石能源消费比重等低碳发展目标。

图3：中国碳中和整体路径



数据来源：《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》

石化行业能源集中度较高，是中国工业部门中高耗能、高排放行业之一，年排放量占全国总量的4%-5%⁴。2020年，石化和化工行业能源消费总量达6.85亿吨标准煤，相较于2010年上升59.7%⁵。根据国际能源署预测，到2050年，全球近半数新

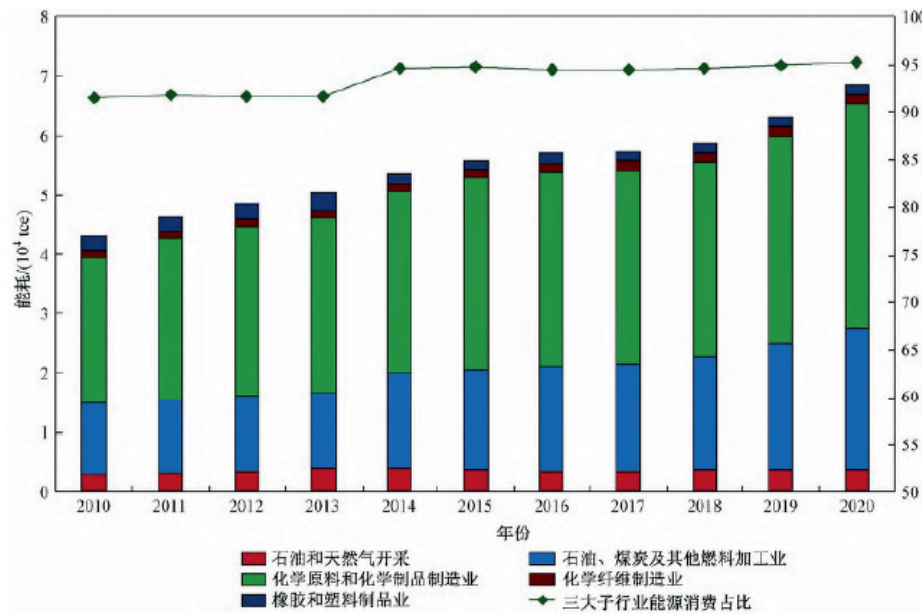
增原油需求将来自石化行业，石化将超越货运、航空和海运，成为原油消费增长最大的驱动力⁵。中国石化行业在“十三五”期间开启了以规模化和炼化一体化为主要方向的产业升级，但炼油规模扩大和乙烯产能增长等因素导致石化行业能源

消费总量呈现上升态势 (图4)。《“十四五”工业绿色发展规划》提出，到2025年，乙烯等重点产品单位能耗需达到世界先进水平，石化行业资源利用水平明显提高，助力推进完善绿色制造体系。

4. CEADs, 《中国分部门核算碳排放清单 1997 - 2019》

5. 庞凌云等, 2022, 中国石化化工行业二氧化碳排放达峰路径研究

图4: 2010-2020中国石化行业能源消费情况



数据来源：国家统计局

石化行业碳排放来源主要包括化石燃料的直接燃烧、工业过程的排放、企业购入电力和热力造成的间接排放以及供应链排放，其中以化石燃料及工业过程相关排放为主，占比近八成。尽管相比钢铁、水泥等工业行业，石化行业的碳排放总量较

低，但碳排放强度偏高，能效利用率低于世界先进水平。因此，产品具备燃料和原料双重属性的石化行业低碳转型对保障能源安全、助力能源转型、落实全经济领域碳达峰和碳中和有重要意义。



在石化行业不断优化产业与产品结构的同时，从排放来源分析，石化行业可以通过能效提升及工艺改进、使用替代原材料等方式减少直接排放，通过使用绿色电力减少间接排放，通过构建循环经济、开发生产绿色低碳产品、优化运输和储存等方式减少产品价值链排放，利用碳捕获、利用和封存技术（CCUS）使用碳抵消机制等能够帮助石化行业减少全生命周期碳排放，加快实现碳中和。

节能减排、能效提升：

- 加强全过程节能管理，淘汰落后产能
- 大幅降低资源能源消耗强度，全面提高能源综合利用效率，有效控制化石能源消耗总量
- 研发清洁高效可循环生产工艺，减少生产中的排放
- 识别运营中的节能减排机遇，进行工艺过程和设备升级

可再生能源替代、用能结构优化：

- 考虑投资分布式可再生能源发电装置，自发自用，替代外购电力

- 积极关注和探索参与省内、跨省可再生能源电力交易，采购绿电

碳捕集、利用和封存技术（CCUS）：

- 加快部署二氧化碳捕集驱油和封存项目、二氧化碳用作原料生产化工产品项目

循环经济：

- 开发新技术、新材料、新模式，推进废塑料等固体废弃物回收利用，减少石化废水污染

开发绿色低碳产品：

- 研发全生命周期碳足迹更低的绿色产品，减少产品在使用过程中的排放

运输、储存环节减排：

- 通过可持续燃料替代、电气化、智慧管理等减少运输、储存环节的排放

碳抵消机制：

- 对于节能减排、使用可再生能源之后的剩余排放，可以采用采购碳抵消产品，如中国国家核证减排（CCER）或者国际可再生能源证书（I-REC）的方式进行抵消

图5: 石化行业低碳转型路线



石化行业碳中和应遵循技术驱动、价值引领，坚持先立后破、循序渐进，将通过各个环节的不断脱碳，经历碳减排（2020-2025）、碳达峰（2025-2030）和碳中和（2030-2060）三个阶段。

数据来源：德勤研究



第三节 石化行业面临的挑战

石化行业低碳转型面临来自多方面的挑战：

低碳转型战略规划亟需推进

- 截至2022年1月，全球超过2200家企业已经加入科学碳目标倡议（SBTi），积极制定与《巴黎协定》目标相一致的企业减排目标。自2022年起，上市企业需依法披露包括温室气体排放等环境相关信息。监管方、投资界和消费者期待高碳企业采取科学、有效、透明的减排行动，低碳转型战略规划是企业与利益相关方进行沟通的有力工具。然而，大部分石化企业尚未制定与《巴黎协定》目标或国家自主减排目标相一致的目标及行动方案。

碳资产管理能力有待提升

- 2021年7月全国碳排放权交易市场正式上线，随着碳排放权交易市场行业覆盖范围扩大，定价机制的不断完善，石化行业整体面临的减排压力日益上升。同时，碳交易市场、碳金融等与碳资产挂钩的市场与金融工具能够为企业减排筹措资金、提升效率。石化企业由于生产流程复杂，产品种类繁多，且面临经常性的生产调整，普遍缺乏系统、成熟的碳资产核算管理方法与工具，碳资产管理能力提升面临挑战。

技术创新和技术应用有待推进

- 石化企业低碳发展面临技术突破和技术应用的双重挑战。首先，高碳排放生产环节缺少显著降碳技术手段，虽然开展了各类CCUS和BECCUS技术示范项目，但技术经济性尚需进一步提升，规模化应用仍有差距；绿氢、绿电大规模应用技术时机仍不成熟。其次，受复杂流程工业体系制约，低碳单元技术需要在总流程优化的基础上才能体现最大低碳价值，新技术与现有流程耦合难度增大；石化行业数字化进程相较于其他行业起步较晚，多能耦合的智慧低碳能源系统在石化行业尚未应用。

用能效率亟需提升

- 国际能源署指出，要实现既定目标的碳中和，要求节能提效对全球二氧化碳减排的贡献率需达到37%。多方测算表明，节能与能效提升对我国实现2030年前碳达峰目标的贡献率更是要达到70%以上。我国石化企业的能效水平相较于世界先进水平仍然偏低，亟需通过能量转换、能量利用、能量回收多个环节的优化实现能量利用效率的提升。

产业格局和盈利模式面临升级

- 全行业、全周期低碳转型逐步深化，来自化工行业下游产业对低碳原料、产品的需求日益上升；下游产业的变化，如新能源汽车的推广，降低了对石化行业传统高碳产品的需求；监管政策对高耗能项目新增产能的控制，以及新材料技术迭代、替代产品出现等，加剧了石化行业内部竞争与淘汰，行业集中度升高。在业务和产品调整的过程中，企业面临管理、运营模式和盈利能力重塑。

低碳发展标准体系建设亟需加快

- 现行低碳标准体系不足以全面支撑碳达峰碳中和工作，主要体现在标准体系不完善，低碳管理细则存在缺失。有必要理清现行的标准、政策、技术等各方面进展情况，解决石化行业重点领域、重点产品、关键企业碳盘查与碳足迹核算存在的方法问题，以及在低碳产品、碳捕集与利用等方面存在的标准缺失问题，以完善的标准体系支撑石化行业高质量低碳转型发展。





第四节 低碳发展与低碳转型关键——重新平衡技术组合

石化行业的减碳路径众多，同时各路径之间还存在多种耦合与相互影响的可能，各减排路径不仅相互依赖，还相互制约。能效提升、工艺流程改进可一定程度上降低生产过程碳排放，材料循环利用可一定程度上实现全生命周期碳减排，但这些减排手段还不足以实现净零排放。CCUS技术虽然是实现净零排放的关键技术，但其应用场景亟需拓展、技术经济性尚需大幅提升。因此，石化行业需要重新平衡并探索多种技术组合进行减排。

石化行业低碳转型需要重新平衡三大类技术，即：降碳技术、零碳技术以及负碳技术。

下列趋势将影响不同阶段不同技术的减排效果和经济学性：

- 可再生能源技术成本大幅下降，预计到2050年风电成本比2018年下降58%，同期太阳能发电成本下降71%⁶
- 绿氢成本大幅下降，预计到2030年，大多数市场绿氢成本将低于每千克2美元，到2050年降至每千克1美元⁷
- 电气化持续推进并逐步成为能量的主要承载形式，电力在最终能量消耗占比预计将从目前的20%增长到2050年的50%⁸

- CCUS技术成本下降，预期到2030年，我国全流程CCUS（按250公里运输计）技术成本为310~770元/吨二氧化碳，到2060年，将逐步降至140~410元/吨二氧化碳⁹
- 基础设施进一步完善，包括可再生能源电源、氢气、二氧化碳和热能管道，以及废物物流和回收利用协同性增强
- 碳排放定价机制和碳交易市场日渐成熟，碳价大幅上升，预计中国碳价将从2021年50元/吨左右增加到2030年100元/吨¹⁰

图6：石化行业脱碳技术类别

降碳技术	<ul style="list-style-type: none"> • 能效提升 • 智能化提升过程效率 • 短流程化学品生产 • 组分炼油 • 工艺过程降碳 	<ul style="list-style-type: none"> • 工艺供热电气化和可再生能源供热 • 低碳基础化学品生产 • 废塑料化学循环 • 专有设备降低工艺排放
零碳技术	<ul style="list-style-type: none"> • 生物基燃油与润滑油 • 绿氢制造与使用 	<ul style="list-style-type: none"> • 风能、太阳能、核能等零碳能源供电
负碳技术	<ul style="list-style-type: none"> • 二氧化碳捕集 • 二氧化碳合成利用（如制备合成气、甲醇） 	<ul style="list-style-type: none"> • 二氧化碳生物利用（如海藻养殖） • 二氧化碳地质利用和封存（如强化油气开采）

数据来源：石科院研究/德勤研究

6. 2050年太阳能发电成本将下降71%，BNEF, 2018-06, <https://www.china5e.com/news/news-1032591-1.html>

7. "2021 Hydrogen Levelized Cost Update", BloombergNEF, 2021-04

8. "Global Energy Transformation: A road map to 2050", IRENA, 2019, <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>

9. 《中国二氧化碳捕集利用于封存(CCUS)年度报告（2021）》，生态环境部规划院，<http://www.caep.org.cn/sy/dqhj/gh/202107/W020210726513427451694.pdf>

10. 《全国碳市场完全手册》，国金证券，2021-06，https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202107011501123385_1.pdf?1625151003000.pdf



第三章 石化行业2025年碳减排 ——实现途径

“十四五”期间，管理能力提升、能源资源高效利用、工艺优化、智能化提升的融合发展将为石化行业低碳转型提供重要保障。中国石化石科院快速响应国家与行业需求，成立石油化工低碳经济研究中心，积极推进石化行业“双碳”平台建设，为企业提供碳排放数据统计与核算服务，结

合碳资产管理软件助力企业管理降碳，开发并推广能源资源高效利用降碳技术、炼油/化工工艺过程降碳技术及智能优化降碳技术等，全面、精准、高效助力石化行业碳减排。德勤作为全球领先的专业服务机构，开发了面向低碳投资与运营的专业化管理软件。可以为企

业提供战略性、转型性变革提供高层指引。

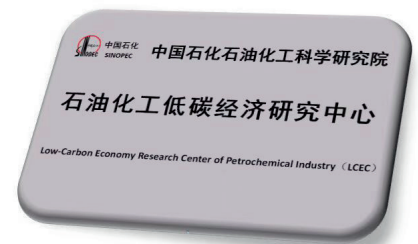


图7: 石化行业2025年碳减排——实现途径

管理能力提升	<ul style="list-style-type: none"> · 石化行业“双碳”平台 · 碳排放数据统计与核算 · 碳资产管理工具
能源资源高效利用降碳	<ul style="list-style-type: none"> · 换热网络集成优化技术 · 蒸汽动力系统优化技术 · 低温余热高效利用技术 · 氢气资源高效利用技术 · 组分炼油技术
典型炼油工艺过程降碳	<ul style="list-style-type: none"> · 原油催化裂解生产化工原料技术 · 低生焦催化裂化技术 · 低能耗柴油液相加氢技术 · 低碳强度生产化工原料的加氢裂化技术 · 高效设备降低催化裂化工艺排放
典型化工工艺过程降碳	<ul style="list-style-type: none"> · 环己酮肟气相重排制备己内酰胺技术 · 浆态床双氧水技术
智能化降碳	<ul style="list-style-type: none"> · 分离系统智能优化技术 · 反应装置模拟优化技术



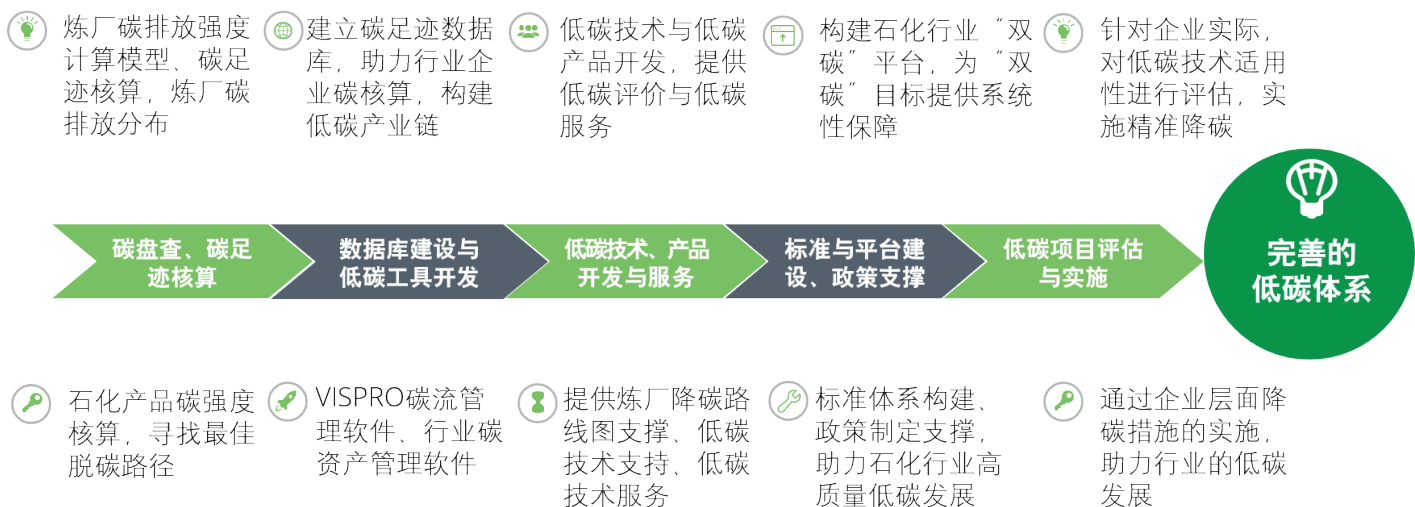
第一节 石化行业“双碳”平台建设

碳达峰、碳中和为石化行业的高质量发展指明了方向，“双碳”目标对行业碳排放数据、低碳技术、低碳产品、低碳标准提出了系统化的要求。

准确的碳排放数据统计与核算可以为行业、企业快速定位关键排放源，为行业快速确定降碳路径提供强有力的决策支撑。低碳技术是实现碳减排的关键手段，是生产低碳产品的核心要素。低碳标准可以为行业的低碳发展提供系统保障。

为此，中国石化石科院已构建完善的低碳体系，正在积极推进行业低碳技术评价验证平台、低碳产品检验检测平台、石化行业碳足迹数据库及低碳标准体系建设，最终以低碳技术实施助推行业低碳发展。

图8：中国石化石科院低碳体系



第二节 低碳发展的基础——碳盘查

面对石化行业碳减排的压力和挑战，必须采取切实有效的措施实施绿色低碳转型。准确的碳排放数据是行业和企业低碳发展的基础，需要建立在统一规范并且科学的核算体系之上。

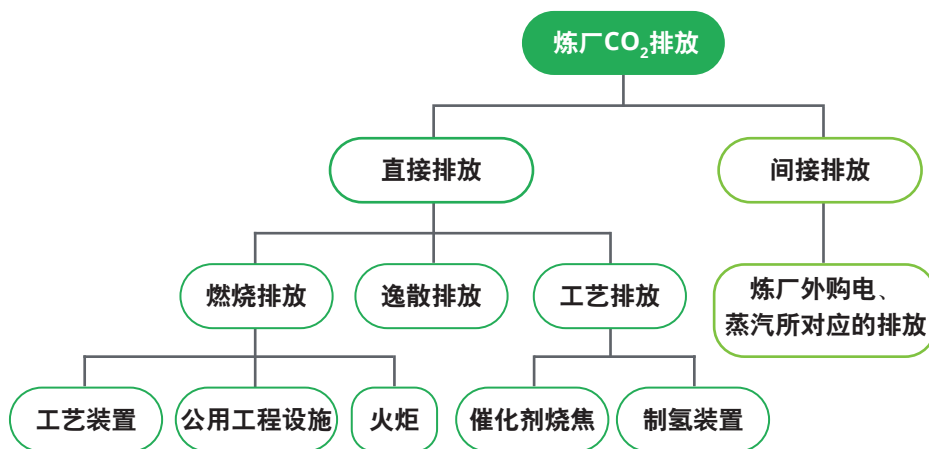
准确的碳排放数据统计与核算可以为行业和企业摸清碳家底，帮助其快速识别关

键排放源，制定碳减排战略决策，有针对性地开展各项碳减排工作，最终实现碳达峰碳中和目标。

石科院一直以来为石化行业发展提供强有力的技术支撑，积极响应国家碳达峰、碳中和重大战略决策，加快推动绿色低碳发展，重视碳排放数据统计与核算，针对石

化行业特点开展了大量的企业碳排放核算与石化产品碳足迹核算工作，并在此基础上不断完善石化行业碳排放统计核算方法以及标准体系建设。

图9：炼厂碳排放统计核算



第三节 碳资产管理工具

碳排放权是可以作为商品在市场上进行交易的，且其价值会随市场的供需变化而变化，这使其具备了资产属性。企业碳排放随着不同时期的运营方式、节能与降碳技术的实施而动态变化，随着行业碳排放整体管理水平的不断提升，碳排放强度会逐渐降低。但与此同时，包括配额分配方式在内的政策、消费者对低碳需求的标准也

在不断发生变化。企业需要不断平衡各方需求，才能实现碳资产价值的最大化。高效的碳资产管理工具将有助于企业在不同时期分析减排潜力、制定减排计划，最大化发挥碳的资产属性。

现全厂碳盘查、产品碳足迹计算以及碳流的优化。基于碳排放模型，可实现炼厂物料与碳流的双目标优化，为碳履约、碳资产管理提供可靠保障。

石科院VISPRO软件系统可以建立基于炼厂总流程模型的碳排放评估模型，可以实

图10: VISPRO建模展示

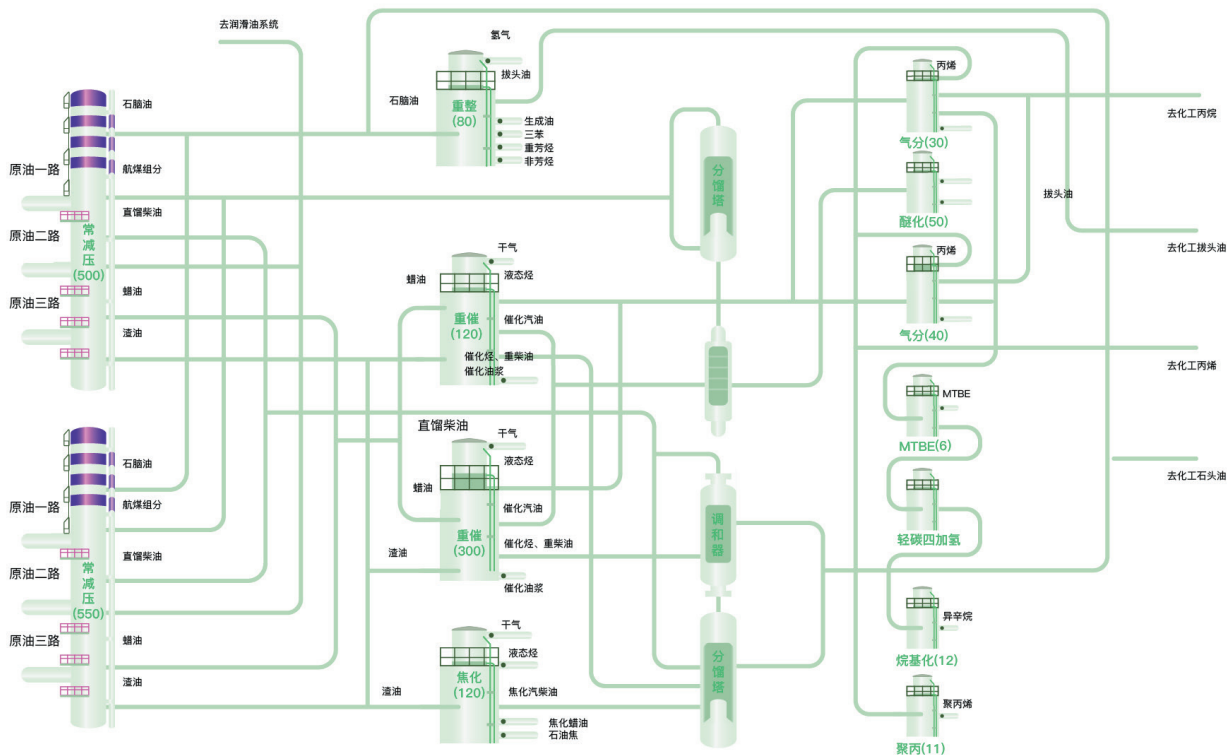
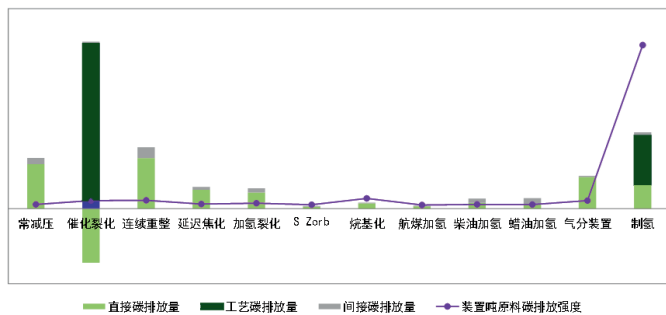
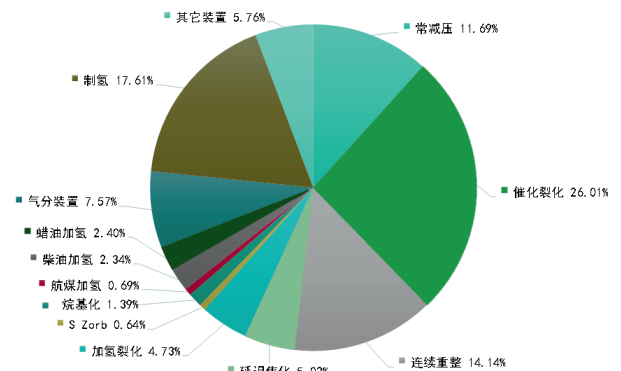


图11: VISPRO碳管理展示

炼厂主要装置碳排放强度和不同类型碳排放总量分析



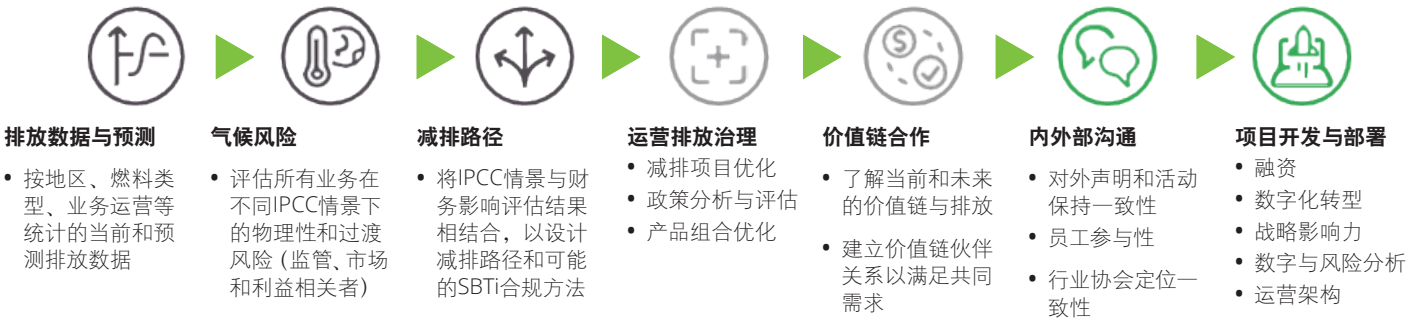
炼厂主要装置碳排放量占比



数据来源: 石科院研究

脱碳生命周期全面延伸到企业运营和价值链的方方面面。Deloitte Decarbonization Solutions™路线图为企业战略性、转型性变革提供高层指引。路线图包含七个主要步骤，并阐述了各步骤的重要性、固有的风险及确立稳健流程需要完成的主要工作。企业可参照这一框架，评估综合脱碳战略进展，并规划后续举措和未来行动方案。

图12: Deloitte Decarbonization Solutions™路线图



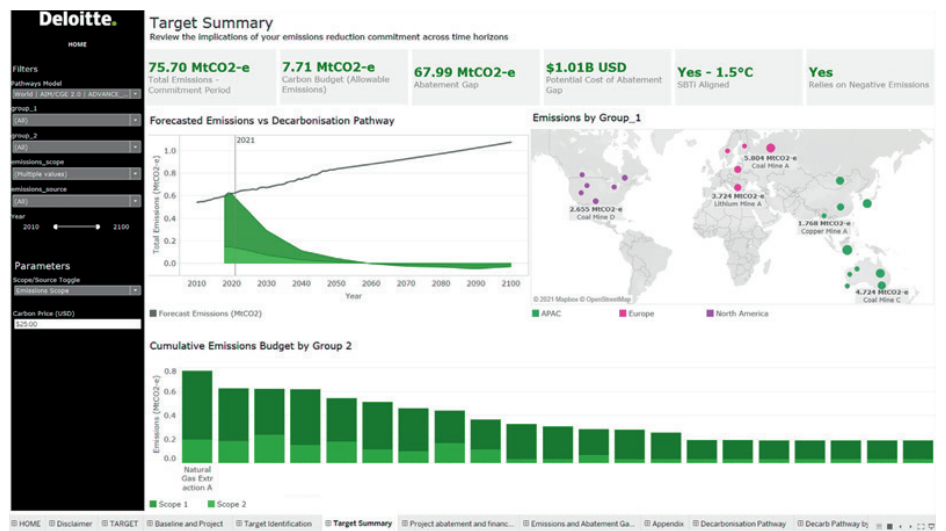
编制排放数据和预测数据

- 排放数据确立了基线，企业可以据此预测、衡量并监控相比目标的进度，以及评估最有可能实现脱碳的领域
- 企业需确保排放数据准确。否则，可能存在被监管机构处罚以及使投资者误判估值的风险

评估气候风险

- 气候相关财务信息披露工作组（TCFD）的框架提供了气候相关风险类型及机遇，其中风险包括过渡风险和物理性风险
- 过渡风险是指为实现低碳发展所作出的改变而引起的风险。应对过渡风险的一个关键要素在于要对不同利益相关方在未来十年里可能做出的回应做出判断。企业应当考虑不同减排行动可能对价值链参与者和企业本身产生的影响，尤其是收入和估值方面的影响
- 物理性风险包括对资产的直接损害及因供应链变革而产生的间接损害。除火灾、洪水、飓风外，原料可获取性、运输方式、产品需求的变化等因素也会带来此类风险

图13: 排放资料绘制



减排路径选择

- 在设定减排目标前，企业需要对排放变化可能对业务成本产生的影响做出判断，同时还应考虑设定的目标是否符合社会期望
- 为了准确制定减排路径，需了解过去、现在的排放，并结合未来排放目标，对减排路径面临的调整做出判断，最终选择适当的减排路径

项目管理

- 财务可行性对项目取得成功至关重要，碳减排项目也不例外。在对碳减排项目收益做出预期的同时，企业还应制定综合性减排计划，如项目实施时间、技术选择和实施地域
- 针对拟实施的减排项目，评估投资成本、收益和实施风险；分析各减排项目的价值链，确定项目部署的优先级，以最低的成本实现最大的收益

产业链合作

- 在碳排放产品价值链碳排放的约束内，企业愈加需要为产业链（包括上游和下游）中的排放承担责任。由于产业链的上下游碳排放超出了本企业的控制范围，因此会对本企业带来一定的风险
- 与运营排放相比，产业链排放更难监控，原因在于企业很难对上下游产业链产生约束。因此，产业链碳排放的治理需要产业链合作伙伴协作推进。企业携手推进低碳产业链构建，不仅能够利用协同作用解决复杂技术问题，还能对落后者施加更大压力，进而推进全产业链的低碳发展

内外部沟通

- 企业的内外部利益相关方都期望企业积极致力于经济高效的低碳转型。作为社会责任的承担者，企业需要对其减排行动及结果与利益相关方进行沟通或公开，高效的沟通机制对稳固利益相关方的支持和维持业务运营至关重要

项目部署

- 为保持碳减排的可持续性，脱碳目标须围绕三个维度开展：能够立即交付的短期项目；开发中期战略项目；针对长期性难以减排的项目
- 所部署的减排项目需要与业务工作紧密结合，并且要和先进项目进行对标，这样才可以吸引投资并降低资金成本

图14：减排目标选择

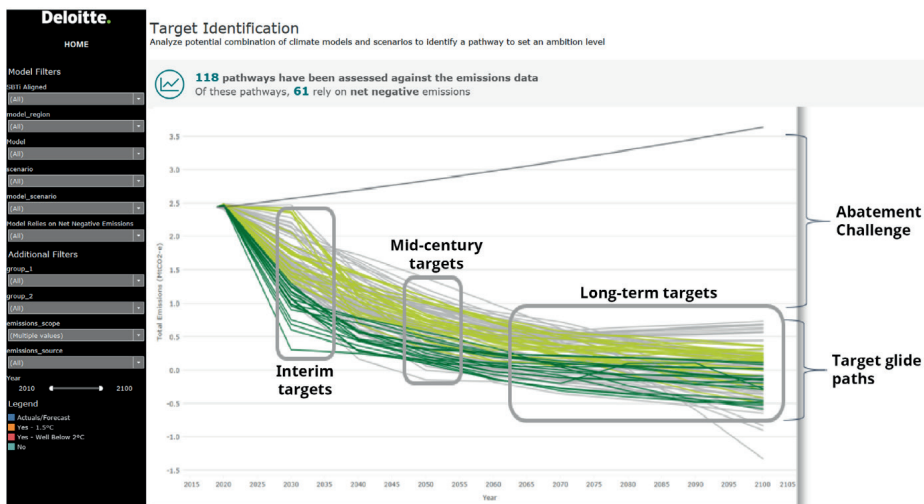
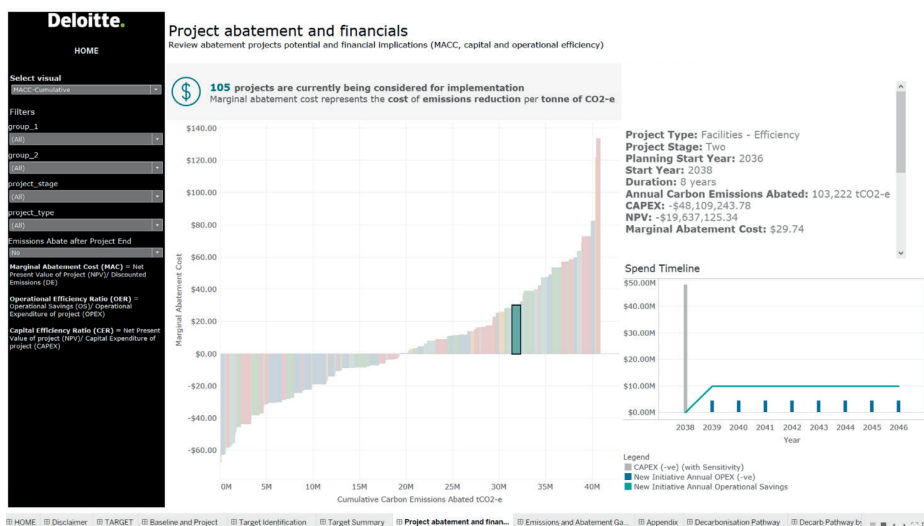


图15：优先考量最低成本减排



第四节 能源资源高效利用降碳技术

换热网络集成优化技术

换热网络在石化行业能量回收利用中扮演着至关重要的角色，提高换热网络热效率，对炼厂节能降碳、提高经济效益、长期稳定运行及环境保护具有重要意义。

换热网络集成优化技术采用夹点分析与数学规划相结合的方法，实现全厂及单装

置换热网络的严格模拟，对换热网络开展详细诊断与弹性分析，结合装置用能特点和限制条件，提出操作优化与改造优化建议，实现能量介质的优化分配和综合利用。通过搭建换热网络智能优化平台，针对不同炼厂的工艺及优化目标，自动生成换热网络优化方案，提供经济效益最佳的节能增效方案，助力石化行业节能降碳。

换热网络集成优化技术能够广泛运用于炼厂各装置及全厂装置间热联合，通过提高能量利用效率，减少加热炉燃料气及蒸汽消耗，实现节能降碳。以千万吨级常减压装置为例，通过换热网络集成优化可减少碳排放2~5万吨/年，能效提升1~3千克标油/吨，增效1500~3000万元/年。

图16：换热网络集成优化技术



数据来源：石科院研究

蒸汽动力系统优化技术

石化行业蒸汽动力系统具有多等级参数、多燃料来源、多产(汽)供(汽)需求和多周期条件等特点,处于能量转换环节的前端,一次能源必须首先转换为热、蒸汽和动力,才能为工艺装置所利用。蒸汽动力系统优化容易受到工艺装置、其他公用工程、辅助和附属生产系统的影响,在石化企业节能工作中,蒸汽动力系统优化的节能效果多体现为电力、蒸汽和燃料气消耗量的降低,是炼厂节能降碳的重要组成部分。蒸汽动力系统的合理配置与运行是承载企业工艺系统节能工作的必要基础

之一,也是将工艺系统节能效果转化为经济效益的关键环节之一。

蒸汽动力系统优化技术可满足石化行业节能降碳需求。采用流程模拟辅助建立蒸汽动力系统完整数学模型,构建混合整数非线性规划问题并优化求解,包含蒸汽系统设备调优与动力源驱动方式优化、蒸汽网络优化及蒸汽平衡配置优化。

蒸汽动力系统优化技术还可满足石化行业安全平稳运行需求。基于蒸汽管网水力学热力学耦合计算,对运行方案进行评

价分析;在线监测模块的实施,协助企业实现对蒸汽管网运行的实时监测和超限报警;根据企业不同运行阶段,对蒸汽动力系统运行状况进行统计分析或对改造方案进行评估与优化。

应用蒸汽动力系统优化技术,每节省1吨蒸汽,可减排CO₂0.17~0.29吨;对于千万吨级炼厂,通过开展蒸汽动力系统优化,可实现节能13~19千克标油/吨蒸汽,减少CO₂排放2.5~6万吨/年。

图17：蒸汽动力系统优化技术



数据来源：石科院研究

低温余热高效利用技术

与发达国家相比，我国石化行业的能源利用效率较为低下，其中低温余热资源没有得到充分利用是关键。目前美国的余热利用率为60%，欧洲的余热利用率是50%，而我国石化行业生产过程中余热利用率只有30%。低温余热是生产系统通过内部热量回收后仍无法利用的

热量，其本质也是来源于燃料热能的转化。因此，合理利用和回收低温余热对于节能降碳具有重要意义。

为满足石化企业节能降碳、提质增效的需求，需开展全厂低温热资源系统详细建模、诊断、分析与优化，结合流程模拟和计算流体力学进行辅助诊断与

分析，按照“温度对口、逐级利用”原则，基于全厂蒸汽动力系统平衡开展全厂低温热资源综合优化。

对于千万吨级炼厂，通过低温余热高效利用技术开展优化，在提高低温热回收利用率10%的情况下，全厂二氧化碳排放可减少4万吨/年。

图18：低温余热高效利用技术



数据来源：石科院研究

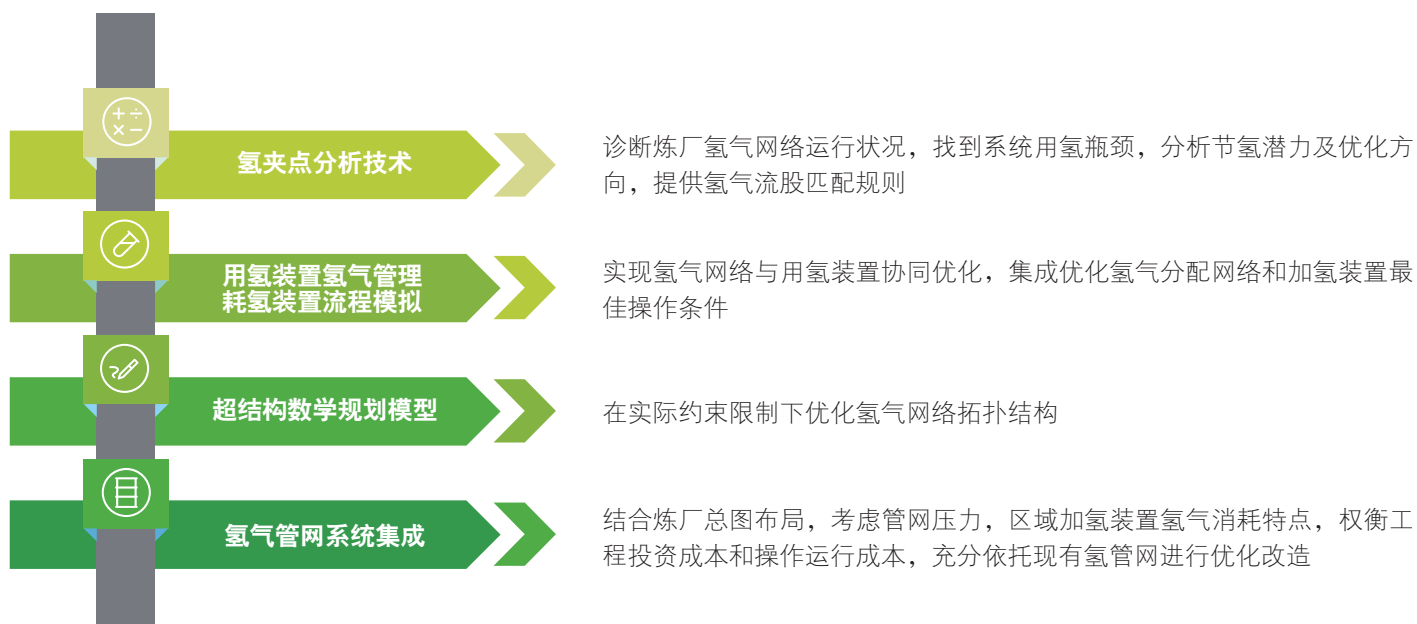
氢气资源高效利用技术

近年来，我国加工原油重质化、劣质化趋势加剧，油品清洁指标日益严格，加氢工艺在石化企业中得以广泛应用。石化企业氢气需求量逐年递增，然而碳基灰氢生产过程能耗与碳排放量巨大。因此，对氢气系统进行集成优化以提高氢气利用率，是石化企业减碳、增效的重要途径。

在“双碳”背景下，炼厂用氢理念应从氢气平衡逐步过度到氢气管理，从氢气资源回收利用、临氢装置节氢管理和氢气网络整合优化三个关键环节入手开展氢气网络系统集成优化，实现氢气资源的梯级高效利用，提高氢气利用效率，降低氢耗、系统能耗和二氧化碳排放。目前，工业生产的氢气主要还是碳基灰氢，其中煤制氢

的碳排放约为 $24\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ，天然气制氢的碳排放约为 $10\text{kgCO}_2/\text{kgH}_2$ 。对千万吨级炼厂开展氢气资源高效优化利用，可实现碳减排2~3万吨/年，年增经济效益3000~6000万元。

图19：氢气资源高效利用技术



第五节 典型炼油工艺过程降碳技术

原油催化裂解生产化工原料技术

炼化一体化集成技术可实现原油转化为化学品，但该路线加工流程长、投资强度高、碳排放高。原油催化裂解技术创新性实现了短流程生产化工原料的路线突破，是应对碳达峰、油转化而开发的一种原油直接制化学品的新技术。

其核心是基于烃分子的裂解反应特性和催化裂化反-再系统的工艺特性，采用分区耦合转化技术，实现了裂解性能差异显著的分子在同一系统的高效转化，可

大幅提高化学品选择性，降低加工过程碳排放。

与轻油蒸汽裂解+重油催化裂解集成技术相比，本技术路线碳排放降幅达30%以上。

低生焦催化裂化技术

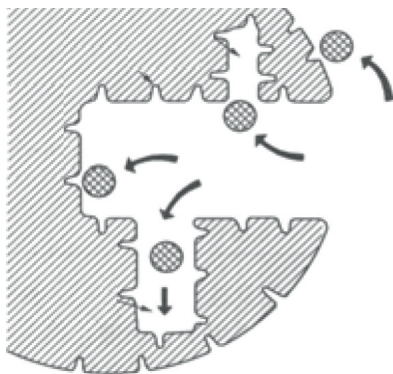
催化裂化是石化行业中碳排放大户，我国石化行业中因催化烧焦产生的碳排放超过5000万吨/年。“双碳”背景下，低生焦催化裂化技术是支撑石化行业碳

减排的有效手段。

低生焦催化裂化技术核心是采用中大孔弱酸性基质平台和高稳定性小晶粒分子筛，以及抗金属组元构建微-介-大孔结构和活性位可调控的催化裂化催化剂技术，在反应过程中可以实现重油的高效转化，降低生焦量，进而降低催化剂再生过程碳排放。

以200万吨/年催化裂化装置为例，本技术的应用可降低碳排放5万吨/年以上。

图20：低生焦催化裂化技术



数据来源：石科院研究

低能耗柴油液相加氢精制技术

传统的柴油加氢精制装置氢油体积比较高，氢气单程转化率低，导致氢气循环量较大，维持氢气循环消耗的能量占柴油加氢装置总能耗的50%左右，造成能量的不必要消耗。

柴油液相加氢精制技术省去了循环氢压缩机，在保证反应性能的前提下，显著降低了柴油加氢装置的能耗。相比传统的滴流床柴油加氢精制技术，本技术可实现装置能耗与碳排放降低50%以上。

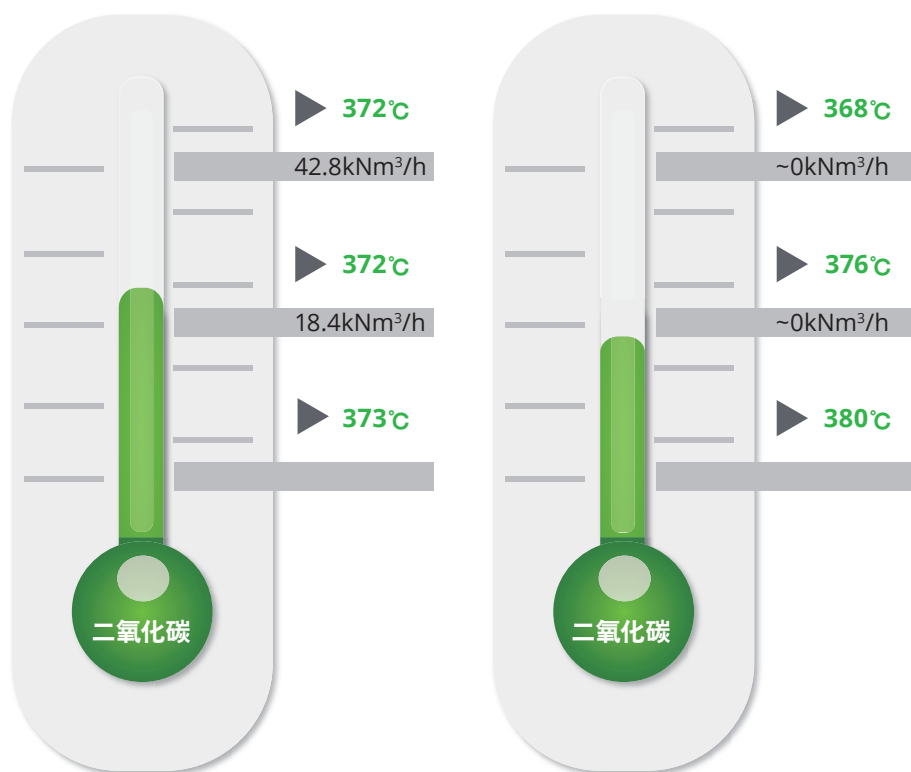
低碳强度生产化工原料的加氢裂化技术

加氢裂化装置能耗占炼油综合能耗的6%~10%，占炼厂氢气消耗的50%左右。随着炼油向化工转型的深入开展，这一比例将进一步扩大。降低加氢裂化过程能耗和碳排放，是加氢技术发展的重要方向。

低碳强度生产化工原料的加氢裂化技术通过开发高性能、高选择性加氢精制/加氢裂化催化剂和级配技术，基于加氢裂化反应区内目标化学反应的精准匹配，进行分区强化，提高加氢裂化过程选择性、降低化学氢耗的同时，充分利用加氢裂化反应热，实现各区域催化剂的最佳反应温度与加氢裂化反应温升的匹配。本技术从电耗、氢耗以及燃料气消耗等多角度实现了加工过程碳排放的降低。

以200万吨/年加氢裂化装置为例，采用本技术可实现综合能耗降低10%~20%，化学氢耗降低5%~10%，直接碳排放和间接碳排放合计可降低约5万吨/年。

图21：低碳强度生产化工原料的加氢裂化技术



数据来源：石科院研究

高效设备降低催化裂化工艺排放

汽提器是催化裂化装置中的重要组成部分，其性能的优劣直接影响催化裂化装置的经济效益、稳定操作和碳排放水平。

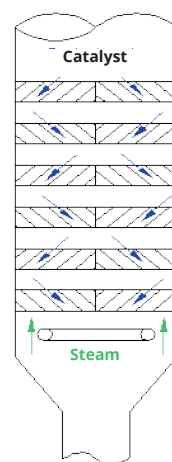
为进一步提高汽提效率、降低碳排放，石科院开发了导向板式填料汽提器。轴向上，汽提器被填料构件分成不同的区域，各构件之间留有空域；径向上，每个内构件又被导向板分成多个区域。由此，汽提器床层被内构件分成多个小流动单元，气

固相在每个单元内进行交换从而促进床层内气体和气-固“乳化相”之间的充分接触，使得汽提器在汽提效率、处理量、操作稳定性以及操作弹性等方面具有明显的优势，汽提效率可提高约20%，蒸汽量可降低20%，可有效降低碳排放。

催化裂化填料式汽提器技术可通过对待生剂进行汽提，减少再生器二氧化碳的排放，以200万吨/年的催化裂化装置为例，采用本技术可实现降低近11万吨/年碳排放。

数据来源：石科院研究

图22：催化裂化高效汽提器



第六节 典型化工工艺过程低碳技术

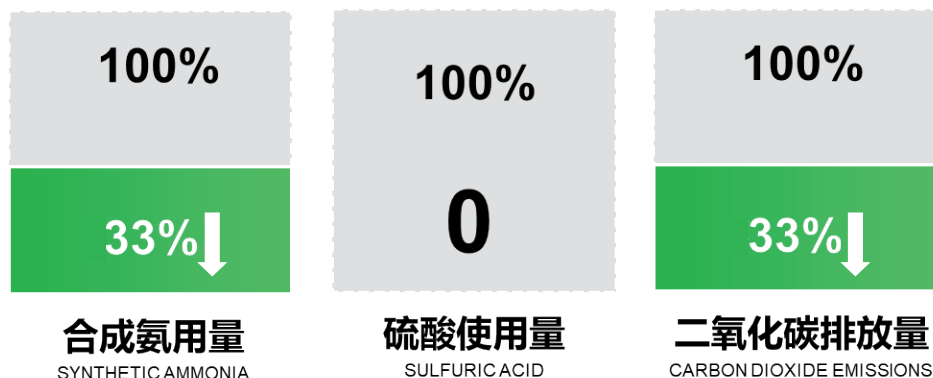
环己酮肟气相重排制备己内酰胺技术

己内酰胺是重要的基础有机化工原料，目前国内外己内酰胺的生产工艺基本全部为环己酮肟液相贝克曼重排（简称液相重排），该技术使用硫酸和液氨，副产低价值硫酸铵，工艺流程长、三废排放较高，亟需技术转型升级。

气相重排技术不使用硫酸和氨，具有原子经济性高、流程短、三废排放少的特点，2018年被列入《石化绿色工艺名录》，作为己内酰胺生产过程的颠覆性技术，其产业化快速推进，大幅提升了己内酰胺生产过程的竞争力，将引领己内酰胺行业的高质量绿色发展。

以60万吨/年己内酰胺生产装置为例，气相重排技术每年可实现碳减排110万吨，万元产值碳排放降低1.2吨，碳强度降幅超过65%。

图23：环己酮肟气相重排制备己内酰胺技术特点



数据来源：石科院研究

浆态床双氧水技术

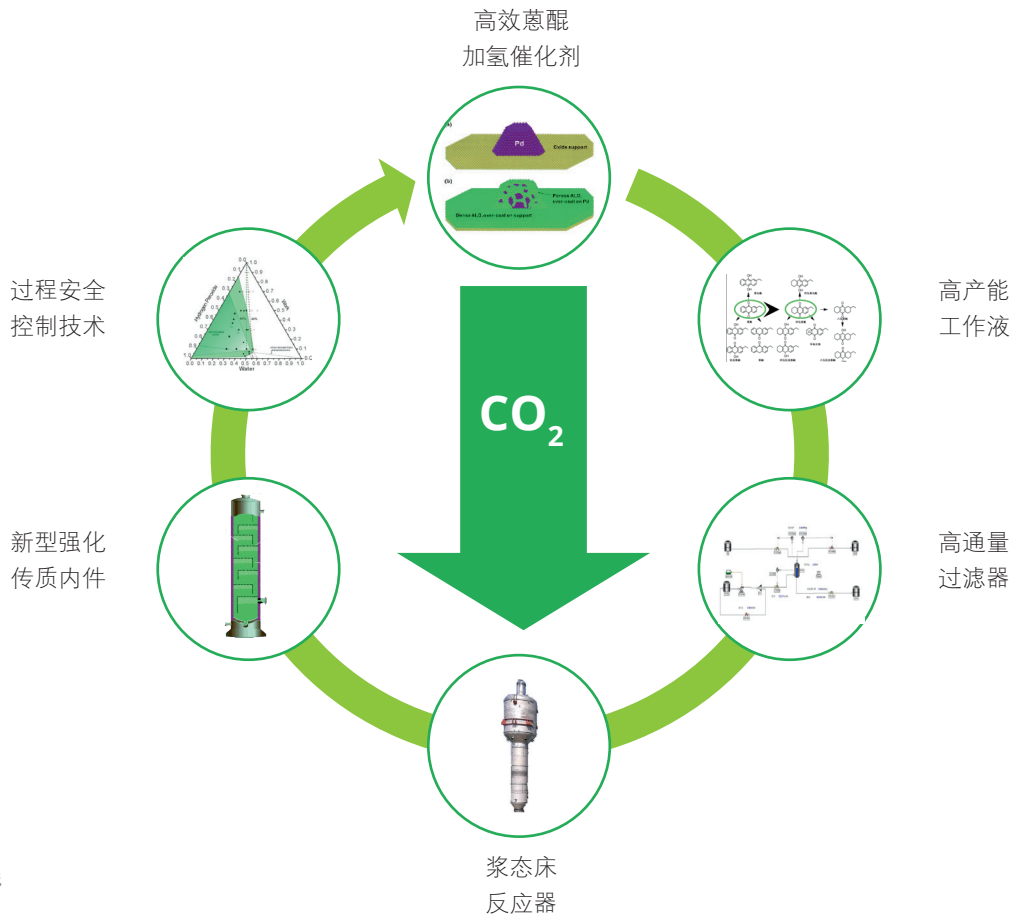
国内外双氧水生产技术以蒽醌法为主，受微球蒽醌加氢催化剂生产和浆态床反应工程技术制约，目前蒽醌加氢主要以固定床生产工艺为主，导致生产效率和规模受限，制约了下游己内酰胺、环氧丙烷等绿

色化工技术的大型化发展，是亟待解决的“卡脖子”技术。

浆态床双氧水生产工艺采用氧化过程强化、高产能工作液配方等一系列核心技术，成为现阶段最具竞争力的双氧水绿色

生产技术。国内首套浆态床双氧水生产工业示范装置于2019年建成投产，示范效应明显。与传统固定床技术相比，浆态床双氧水生产技术生产过程碳排放强度可降低27%。

图24：浆态床双氧水绿色生产工艺



数据来源：石科院研究



第七节 智能化提升过程效率

分离系统智能优化技术

石化行业包含众多复杂度极高的分离系统，除了龙头装置常减压之外，催化裂化、延迟焦化、加氢裂化等装置也都包含处理量大、结构复杂且工况变化频繁的复杂分离系统，其能耗占全厂总能耗的30%~50%，是石化企业节能降碳的重要优化环节。

随着石化行业自动化水平的提升，多数加工装置都实现了自动化控制，但控制参数及工艺设定值仍然以经验或半经验为主，

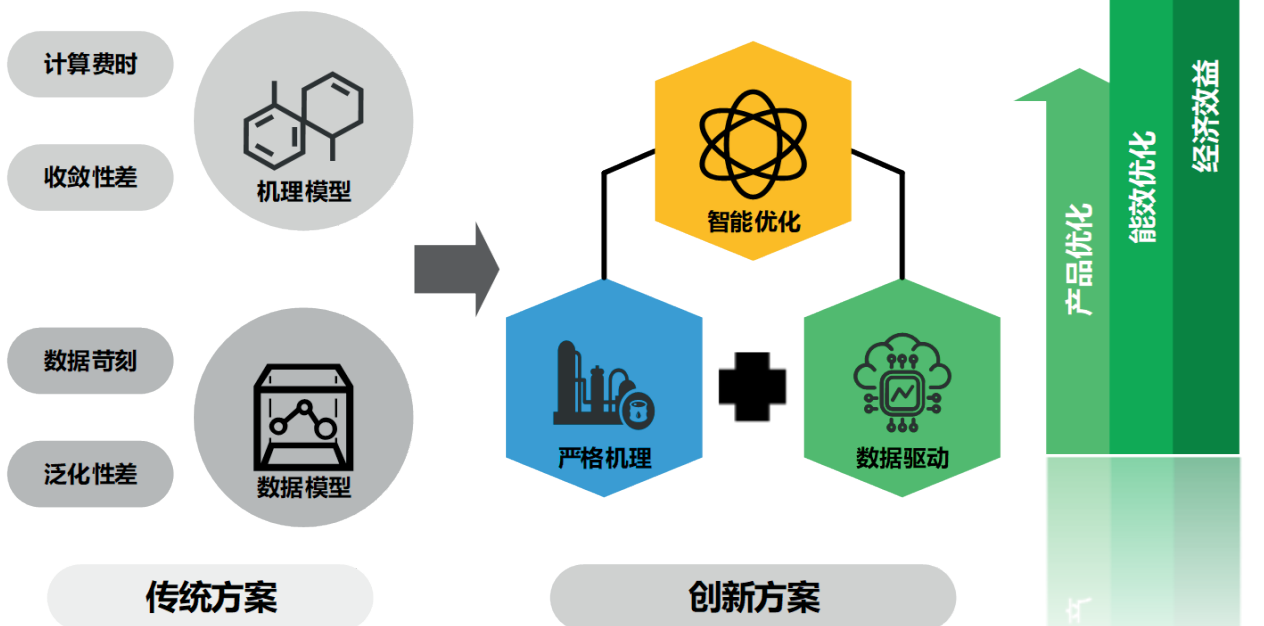
对装置稳定运行及产品分布造成较大风险。随着人工智能和大数据技术的发展与应用，石化行业的智能解决方案也越来越受到重视。采用人工智能和大数据挖掘手段，针对石化行业的复杂分离系统进行模拟与优化，对于石化企业提质增效、节能减排、技术创新均具有积极作用。

分离系统智能优化技术，采用基于人工智能驱动的工艺优化算法，将工艺机理模型、人工智能模型和高效优化算法有机结合，在保障模型精确度和收敛性的前提

下，提高模型运算速度，对生产工况和优化目标的调整给予及时响应，提供经济效益最大化（考虑能耗指标）的运行优化方案。

以千万吨级常减压装置为例，通过构建分离系统智能优化平台，可提高换热终温4~6℃，降低能耗0.5~2.1千克标油/吨，减少碳排放1.0~4.2万吨/年，提高装置轻收/总拔0.5%~1.5%，经济效益增加2000~5000万元/年。

图25：分离系统智能优化平台



数据来源：石科院研究

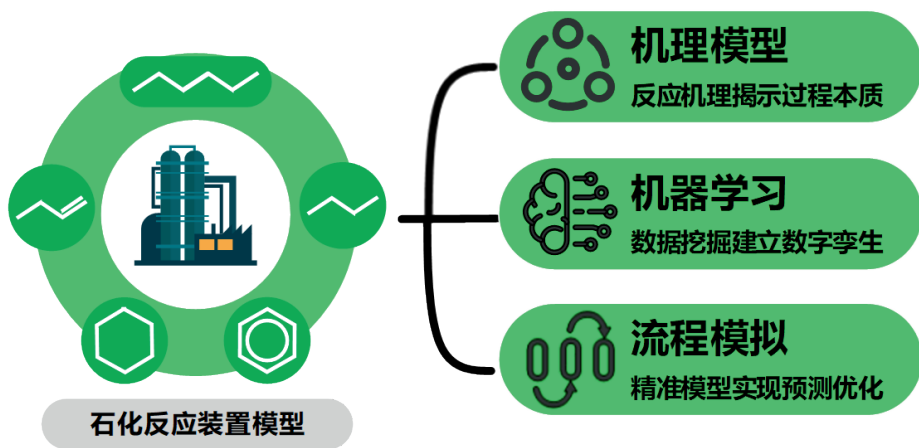
反应装置模拟优化技术

“双碳”战略的推进和全面落实，能耗双控指标的严控，均促使节能降碳成为石化行业发展的主旋律，以绿色低碳为导向的石化行业反应装置模拟优化是炼油过程技术创新与突破的重要抓手和必然趋势。基于工艺机理、流程模拟与数据驱动

技术，为炼厂反应装置建立单模式、多模式及协同模式下的模拟模型，充分发挥多样化、定制化建模优势，构建能量流驱动物质流、物质流产生或影响能量流的动态关联模型，促进基于生产效率、产品品质提高，加工能耗、碳排放降低的生产运行优化。

实际应用验证表明，通过开展反应装置模拟优化，可有效提高能源利用效率，降低加工过程碳排放，实现2%~15%的能耗与碳排放降低。

图26：反应装置模拟优化平台



数据来源：石科院研究



第八节 组分炼油

传统炼油将石油按照不同沸程切割成若干馏分，将不同馏分进一步加工生产石油产品。在该过程中各馏分中的部分组分不能被充分、合理利用，炼油的过程选择性和反应效率仍有进步空间。

组分炼油是提升石油炼制效率、降低炼油能耗的优选路径，其核心是采用先进的分离技术对原油或其不同馏分进行烃组分分离，然后对分离后的组分进行炼制。基于同类烃组分的集中加工，可大幅提高反应过程选择性、提升产品附加值、降低加工过程碳排放。

对于千万吨级炼厂的化工转型，采用组分炼油理念进行流程再造，可实现全厂碳排放降低近45万吨/年，万元产值碳排放降低0.26吨，碳强度降幅超过10%。

图27：组分炼油碳减排示意



总碳排放量降低**44.57万吨/年**
经过组分分离后，催化裂解装置烧焦量明显降低，组分分离方案总碳排放量降低44.57万吨/年



万元产值碳排放降低**0.26吨**
由于组分分离方案总碳排放量的降低以及产品产值的提高，万元产值碳排放降低0.26吨CO₂/万元

数据来源：石科院研究



第四章 石化行业2030年碳达峰

——技术支撑

为实现石化行业2030年碳达峰的总体目标，上下游产业链需协同发力，科学规划产业发展，合理安排和推进产能建设，确保经济发展与绿色转型齐头并进。新阶段、新要求、新气象，核心技术的创新为清洁生产、过程强化升级、产业价值提升提供强大助力，在2025年前碳减排的基础上，生物基燃油与润滑油、循环经济技术革新、低碳强度基础化学品生产技术将有力支撑和加速石化行业碳达峰的实现，同时为构建工业体系低碳产业链做好准备。

图28：石化行业2030年碳达峰——技术支撑

生物基燃油与润滑油技术	<ul style="list-style-type: none"> · 生物航煤 · 生物柴油 · 生物基润滑油
循环经济技术革新	<ul style="list-style-type: none"> · 废塑料化学循环技术
低碳强度基础化学品生产技术	<ul style="list-style-type: none"> · 低碳强度丙烯生产技术 · 低碳强度芳烃生产技术

第一节 生物基燃油与润滑油

生物航煤

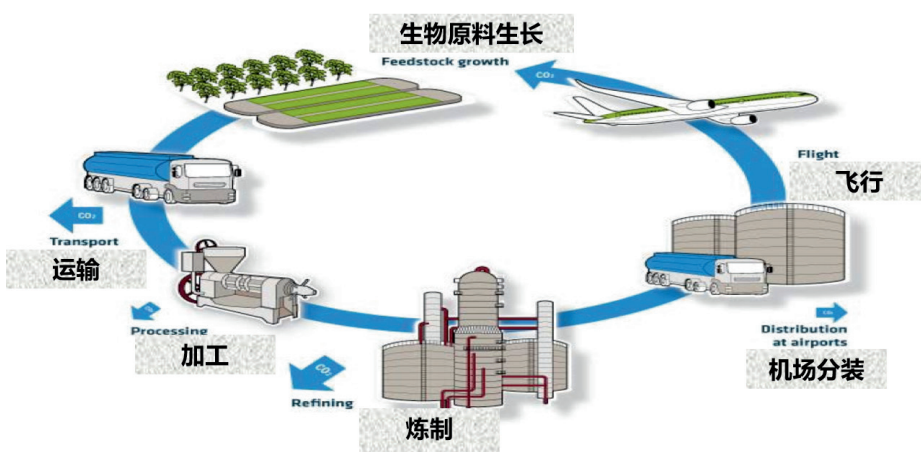
全生命周期研究表明，采用可持续的航空燃料依然是航空运输业应对碳减排的主要选择。生物油脂作为可持续原料的重要组成部分，目前依然是生物航空燃料的主要来源。

油脂类原料生产喷气燃料的技术通常采用加氢技术。油脂原料经过预处理脱除部分杂质后进行加氢处理反应，在加氢处理反应过程中脱除原料中的O、S、N及其它杂原子，然后通过加氢转化制备出喷气燃料组分。按照目前的标准要求，生物喷

气燃料在航空煤油中的最大调合比例可达50%。

基于不同的原料和加工过程，喷气燃料的碳排放效果有所差异。采用废弃油脂生产的喷气燃料相对于石油基喷气燃料，全生命周期碳减排可达80%以上。

图29：生物航煤全生命周期示意图



数据来源：石科院研究



石科院技术生产

生物柴油

加氢技术制备的烃基生物柴油具有热值高、十六烷值高、低温流动性好等优点。与化石能源相比，烃基生物柴油具有实现可持续发展的独特优势，可与现代交通运输体系相融合，在减少对化石能源的依赖，实现碳减排等方面具有重要意义。

油脂原料经过预处理脱除部分杂质后进行加氢处理反应，在加氢处理反应过程中脱除原料中的O、S、N及其它杂原子，然后采用异构化反应来调整产品的凝固点。加氢法生物柴油与石油基柴油烃组成类似，可以任意比例调合。与石油基柴油相比，以废弃油脂生产的生物柴油全生命周期碳减排可达80%以上。

生物基润滑油

我国润滑油生产和消费量巨大，98%以上由传统石油加工过程制备。润滑油泄露、溢出、蒸发或不当处理会对自然环境造成严重污染。随着环境保护受到广泛重视，生物基润滑油因具有可再生、可生物降解、可适用于环境敏感区域的优点，成为润滑油行业的新增长点。

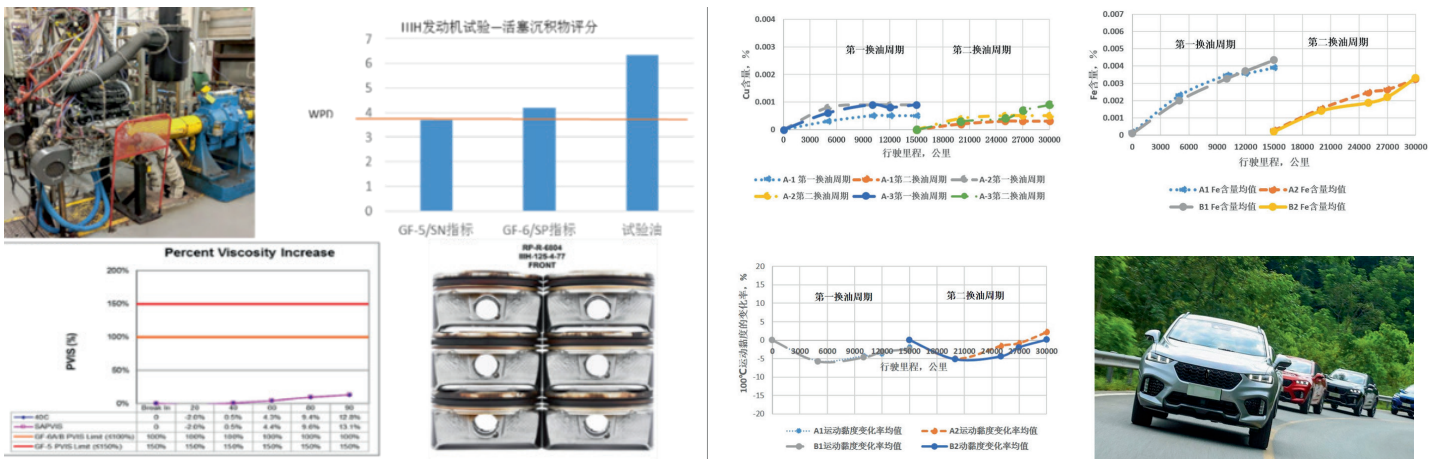
由石科院研制的生物基GF-5汽油机油采用生物基润滑油及功能添加剂高效复配技术，通过了理化性能测试、模拟评定测试和全部7个标准发动机评定试验，是目前我国唯一的具有自主知识产权的生物基GF-5发动机油技术；生物基液压油综合性能完全满足ISO15380中HEES类别的全部指标要求，部分性能远



超指标要求。生物基汽油机油、生物基液压油全部通过生物毒性实验，生物降解率高于60%。

生物基润滑油技术不仅可以减少石油依赖，还可大幅降低产品生命周期碳足迹。

图30：生物基GF-5汽油机油发动机试验及行车试验



数据来源：石科院研究



第二节 循环经济技术革新

实现废塑料的高价值循环利用已成为全球面临的重大课题。我国垃圾场废弃塑料存量约10亿吨，每年新生垃圾塑料超过6,000万吨，目前废塑料的利用主要采用焚烧发电形式，该过程会产生大量CO₂排放。

石科院废塑料化学循环技术可针对不同废塑料原料灵活选择不同的预处理技术路线，热解油收率大于80%。热解油进入石化企业可高效地转化为塑料单体或聚合物，实现了塑料的闭环循环，具有较强的碳减排竞争力和显著的循环经济效益。

与原油生产路线相比，废塑料化学循环生产塑料单体时，产品碳足迹降低40%以上。在原油80美元/桶价格体系下，与焚烧发电相比，废塑料化学循环万元产值碳排放降幅达80%以上。以我国三分之二的废塑料实施化学循环计算，每年可实现碳减排4,700万吨。



第三节 低碳强度基础化学品生产技术

低碳强度丙烯生产技术

“双碳”背景下，丙烷脱氢技术日渐成为支撑丙烯低碳生产的重要技术。丙烷脱氢反应工艺过程中丙烷单程转化率和丙烯选择性是决定体系碳排放的关键因素，较高的单程转化率和丙烯选择性可以提高反应效率、降低丙烷丙烯分离能耗。

通过对催化反应过程的本质认识，石科院经自主创新成功开发了高效移动床丙烷脱氢催化剂PST-100，其活性高、选择性好、积碳速率低，从而可有效提高转化率、提高目标产品收率、降低碳排放。

基于PST-100催化剂，石科院进行工艺

流程的创新设计，开发了低能耗低碳排放的移动床丙烷脱氢制丙烯成套技术（SPDH）。通过对反应压力、氢烃比的调节优化，进一步提高了反应单程转化率和选择性，通过加热炉节能优化、反应再生流程优化等方法进一步降低装置能耗。基于PST-100催化剂强度高、粉尘生成量低等优良特性，结合工艺优化设计实现装置长周期稳定运行，可大幅减少开停工过程的无效碳排放，确保丙烯碳足迹维持低位。

通过先进催化剂和先进工艺的结合，相较同等规模的丙烷脱氢装置，SPDH工艺的碳排放可降低10%以上。

图31：低碳强度的丙烷脱氢技术特点



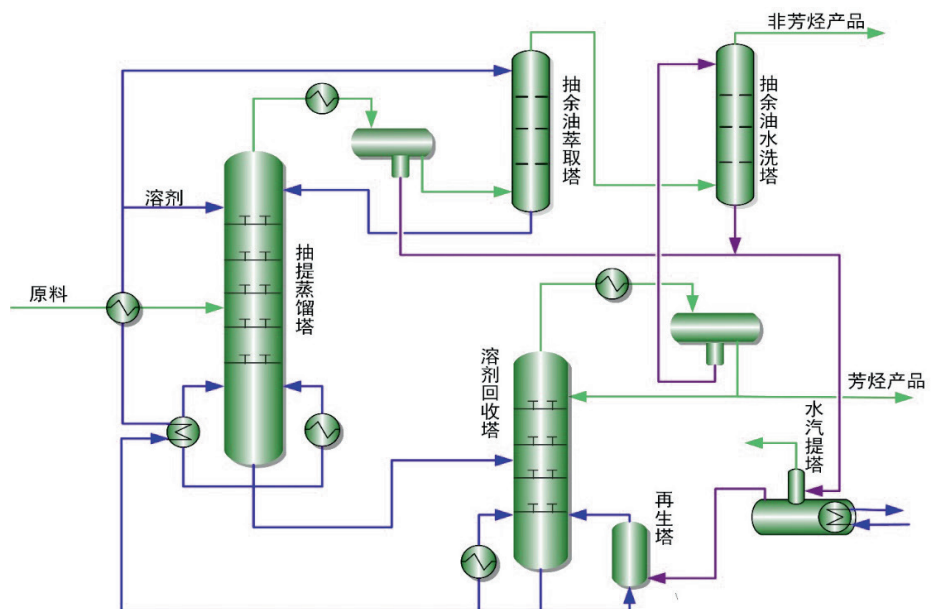
低碳强度芳烃生产技术

芳烃作为重要的化工原材料，其生产主要有液液抽提工艺和抽提蒸馏工艺。液液抽提工艺处理高芳烃含量原料时需要大量混兑抽余油产品，大量返洗液在抽提塔与汽提塔之间循环，过程能耗较高。抽提蒸馏工艺虽具有投资省、能耗低的优势，但生产BTX时苯产品收率偏低、甲苯纯度偏低。

石科院以抽提蒸馏技术为核心，创新组合液液抽提工艺，成功开发出新一代低能耗芳烃抽提技术（SED-BTX）。该技术在高纯度、高收率得到BTX产品的同时，大大降低了装置的能耗物耗，达到了节能降碳的目的。

采用SED-BTX工艺比传统的液液抽提工艺每吨进料综合能耗降低18%，万元产值碳排放降低58 kg。

图32：低碳强度芳烃生产流程



数据来源：石科院研究



第五章 石化行业2060年碳中和 ——路径策略

为实现石化行业2060年碳中和的战略目标，全面建设绿色低碳循环发展的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系，产业结构和能源结构将发生颠覆性调整，新能源的逐步替代和可再生能源的大力发展将成为关键引领。在“零碳”产业的构建过程中，应发挥行业优势，选择重点产品，突破关键技术，加强科技支撑。绿氢保障、CCUS、电气化实施等技术的升级和突破将成为石化行业实现碳中和的重要路径策略。

图33：石化行业2060年碳中和——路径策略

绿氢保障技术	<ul style="list-style-type: none"> · 电解水制氢技术 · 生物质气化制氢技术
CCUS技术	<ul style="list-style-type: none"> · CO₂加氢制航煤技术 · CO₂加氢制甲醇技术 · CO₂甲烷干重整制合成气技术 · CO₂辅助化学降黏提高稠油采收率技术 · 微藻技术
电气化技术	<ul style="list-style-type: none"> · 电气化实施技术
典型炼油技术低碳发展路径	<ul style="list-style-type: none"> · 以催化裂化为例

第一节 绿氢保障

电解水制氢技术

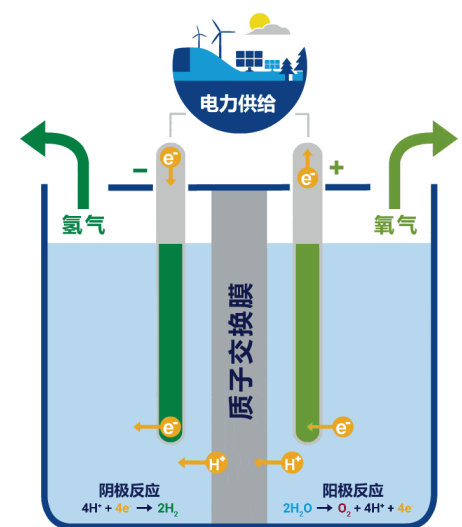
当前，国内氢气的年消费量约为3,000万吨，氢气主要来源于化石能源制氢，这种制氢方式会产生较大的碳排放。PEM电解水制氢是以水为原料，在可再生能源电力的驱动下将水转化为氢气和氧气，几乎不产生碳排放。

PEM电解水制氢采用具有良好化学稳定性、质子传导性和气体阻隔性的质子交换膜作为固体电解质，在电力驱动和阴阳极催化作用下将水分解为氢气和氧气，具有制氢效率高（>85%）、氢

气纯度高(99.999%)、出氢压力高（>3 MPa）、响应速度快（秒）、结构紧凑、体积小等优点，与波动性和随机性较大的风电、光电等可再生能源电力具有良好的互补性。

相比于煤制氢和天然气制氢，基于可再生能源电力的PEM电解水制氢每生产1吨H₂将分别减少20吨和10吨左右的CO₂排放。我国每年3,000万吨氢气产量中煤制氢与天然气制氢占比分别为65%和15%，如果其中10%用PEM电解水制氢替代，每年可实现碳减排3,500万吨。

图34：电解水制氢技术



数据来源：石科院研究

生物质气化制氢技术

生物质是唯一的天然可再生碳源和大部分化石燃料的有效替代品。相较于核能、水能、风能、地热能等，生物质能具有分布广泛性、丰富性、可再生性、低污染性的特点，被认为是理想的可再生能源。利用生物质生产绿氢不仅能够减少能源行业对化石资源的依赖，还能够降低CO₂排放，助力循环经济发展，是未来能源产业发展的重要方向之一。

结合不同生物质的气化特性，生物质经干燥、研磨、粉碎和造粒等步骤处理后，经生物质气化、生物质气净化、水汽变换、氢气提纯等手段，获得净碳排放近零的绿氢，可有效解决现有化石能源制氢过程中碳排放高的问题。

与现有天然气制氢相比，采用生物质制氢技术每生产1吨H₂可减少9吨左右的CO₂排放。

图35：生物质气化制氢技术



数据来源：石科院研究

第二节 CCUS技术

CCUS技术是全球应对气候变化的关键技术之一，因其可消纳、转化大量CO₂被认为是实现碳中和的有效且必要步骤。

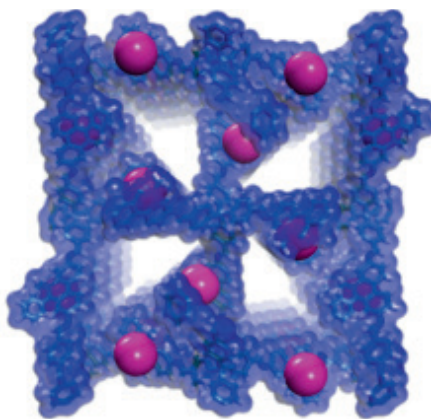
CO₂加氢制航煤技术

当前世界各国均在开发基于CO₂捕集技术的CO₂综合利用技术，CO₂加氢可以获得具有更高经济价值的多碳有机化合物，其中CO₂加氢直接制备喷气燃料是一项颠覆性战略技术。

基于新研究策略的新型材料和催化剂设计与催化体系构建是实现CO₂加氢转化的关键。石科院组合式高效CO₂制航煤成套技术可实现CO₂单程转化率达41.6%、航煤馏分选择性达51.1%的水平。

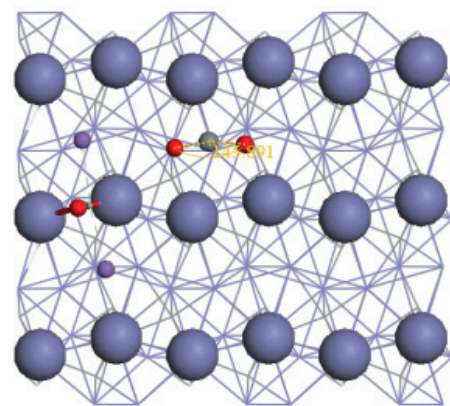
与石油基航煤相比，CO₂加氢制航煤全生命周期碳减排近3.0吨/吨航煤，以EIA2019年展望数据预测的2050年全球航煤需求6.49亿吨为基础，即使CO₂加氢制航煤实现20%的替代，全球每年的二氧化碳减排量仍可达近4亿吨。

图36：新型多孔反应材料



数据来源：石科院研究

图37：CO₂吸附计算模拟



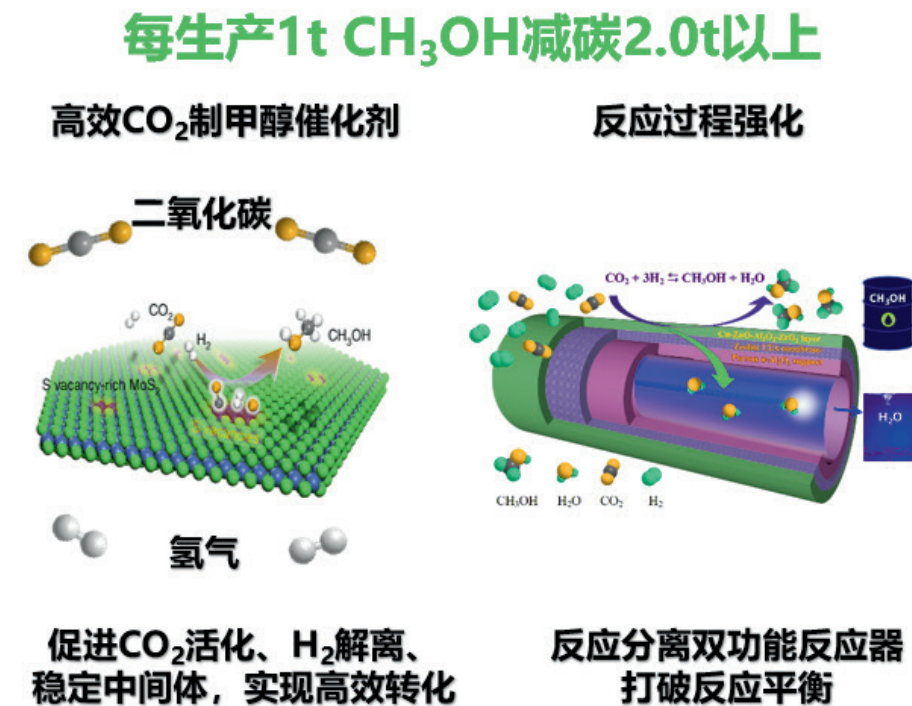
CO₂加氢制甲醇技术

CO₂加氢制甲醇技术既可实现CO₂资源化利用，又可将风能、太阳能制备的绿电转化为可储可运的化学能，是一种绿色低碳的储能技术，是实现碳中和的重要技术支撑。

石科院项目团队针对铜基催化剂体系开展研究，已完成催化剂开发，CO₂单程转化率≥15%，甲醇选择性≥85%，有机相甲醇含量≥99.5%。结合膜反应器打破热力学限制对反应过程进行强化，项目团队开发出先进的CO₂加氢制甲醇技术，可为10万吨/年装置提供工艺包技术支持。

与煤制甲醇相比，CO₂和绿氢反应制甲醇可减排2吨CO₂/吨甲醇。据国际货币基金组织预测，为实现2030年2℃的控温目标，每吨二氧化碳定价应在75美元左右，按照这一标准计算，10万吨甲醇生产实现的碳减排价值高达1,500万美元/年。

图38: CO₂加氢制甲醇技术



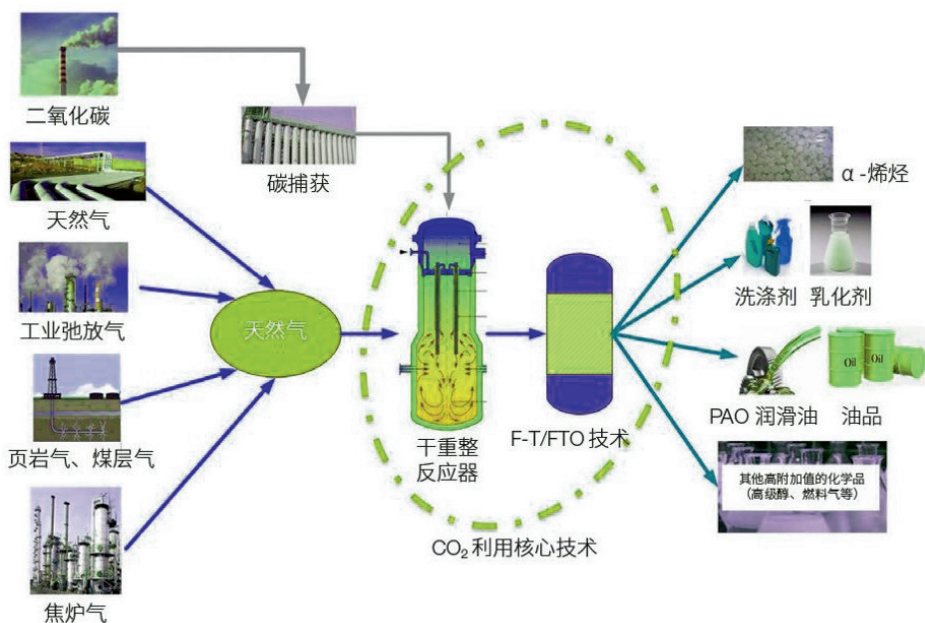
数据来源：石科院研究

CO₂甲烷干重整制合成气技术

甲烷 (CH₄) 干重整即CH₄和CO₂反应生成合成气，该反应同时利用了CH₄和CO₂这两种温室气体，而产品合成气又是化工领域重要的平台原料，可以用于甲醇合成、F-T合成、羰基合成等，因而甲烷干重整被认为是一条极具吸引力的CO₂大规模利用的有效途径。

以年产36万吨合成气装置为例，每年可以消耗6.2万吨CO₂，相当于340万棵树一年的CO₂吸收量，减排效果显著。

图39: CO₂甲烷干重整制合成气技术



数据来源：石科院研究

CO₂辅助化学降黏提高稠油采收率技术

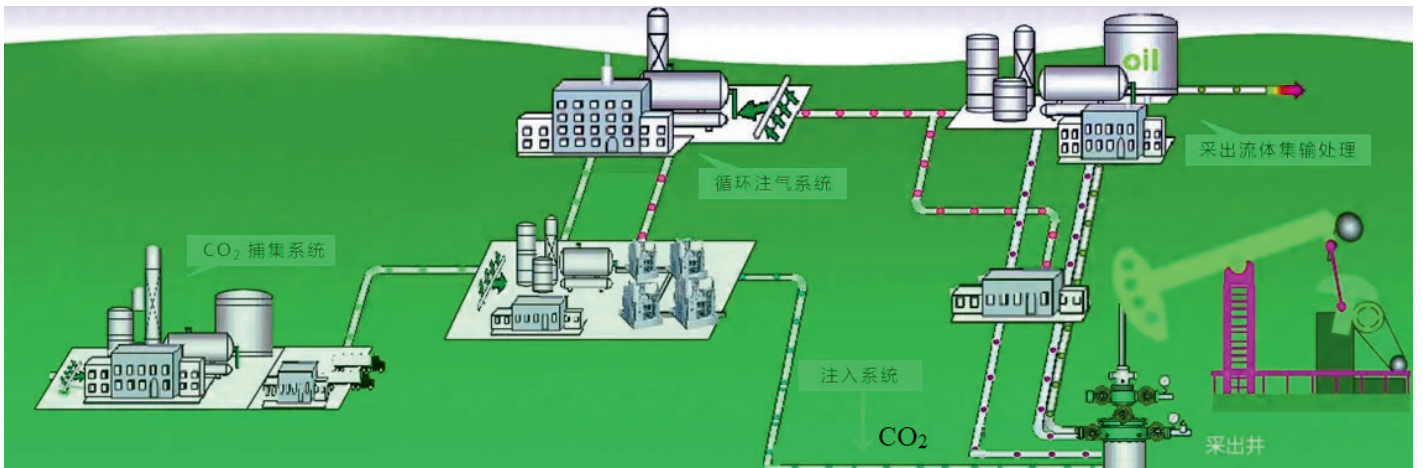
随着轻质原油地下储量逐渐减少，稠油比例日渐增大，对稠油的高效开采逐渐引起重视。然而稠油密度大、黏度高、流动性差，给开采和集输带来很大困难，开发难度远大于普通油藏，亟需寻求一种高效降

黏技术来提高稠油采收率，实现稠油高效开发。

CO₂与原油有很好的互溶性，可显著降低原油黏度，使原油体积大幅度膨胀，增加地层的弹性能量。CO₂溶于水使其碳酸

化，碳酸水与油藏的碳酸盐反应，可以提高地层渗透率，疏通油流通道。将捕集的工业尾气中的CO₂注入稠油油藏，可以辅助化学降黏，改善稠油流动性，提高稠油采收率。同时可以将注入的CO₂绝大部分消耗、滞留地下，实现CO₂封存。

图40：CO₂辅助化学降黏采油示意图



数据来源：石科院研究

微藻固碳技术

微藻是能够进行光合作用的单细胞生物，能够将无机碳与无机氮以极高的效率转化为有机碳（主要为糖类与脂质）和有机氮（主要为蛋白质），具有非常高的应用价值。

微藻一方面能够实现“加法”，生产大量富含脂肪与蛋白质的生物质；另一方面能够实现“减法”，将化石能源应用释放的CO₂与NO_x进行吸收与固定，助力碳达峰、碳中和与大气污染治理目标的实现。

每生产1吨微藻生物质，能够吸收1.83吨CO₂，同时吸收0.2吨NO_x。以3,400亩的规模开展微藻养殖，每年能够吸收1万吨CO₂，同时生产约5,400吨高蛋白微藻生物质，市场价值可达7,000万元。



数据来源：石科院研究



第三节 电气化实施

石化行业碳排放除了由化石能源燃烧引起的直接碳排放，还包括外购电力引起的间接碳排放，该部分碳排放约占石化行业总排放的10%左右。降低电力引起的碳排放主要包括两方面措施：一是应用节能新技术和新设备以及进行电力设施的优化；二是采用新型的电力系统，这也是最关键的

手段。随着以新能源为主体的新型电力系统建设目标的提出，我国电网会不断地向清洁化发展，石化行业由电力引起的碳排放将逐渐降低。

据国家统计局公开信息，2021年我国电力结构中以煤炭为主的火力发电约占

71.13%，据预测，2050年后我国电网中，风、光伏发电占比大幅度提升，占比均将在30%以上，水电和核电占比保持在10%左右，火电占比低于9%。至2060年，国家电网碳排放因子会降低97%左右，届时石化行业由电力引起的间接碳排放将比当前降低97%左右。



第四节 典型炼油技术低碳发展路径——以催化裂化为例

催化裂化是炼油工艺过程中的关键技术，在重油加工过程中起着不可替代的重要作用，然而催化裂化碳排放较高的特点决定了必须加快其低碳发展。催化裂化技术低碳发展路径可归纳为如下几方面：



1. 催化材料

在2025年前催化剂活性组分材料仍然为目前广泛采用的沸石分子筛，随着汽油需求达峰以及兼产丙烯需求，2030年前催化材料将转为择形沸石，其后随着固体碱材料的开发至2040年将转型为择形沸石及固体碱催化，预计到2050年催化材料将发展为沸石限域金属、固体碱及氧化物。



2. 反应模式

现行催化裂化主要采用提升管反应工艺，其后在多产丙烯等低碳烯烃的驱动下，反应模式将向提升管+床层或多反应区的反应模式转变，同时开发新结构流态化反应系统，并逐渐成为新型低碳催化裂化技术的未来反应模式。



3. 烧焦方式

2025年前仍会沿用现在的空气流化烧焦方式，同时研发纯氧再生与造气耦合技术，探索富氧再生+CCUS再生烧焦方式，随着炼厂碳中和目标的推进，低碳排放的烧焦方式将实现推广应用。

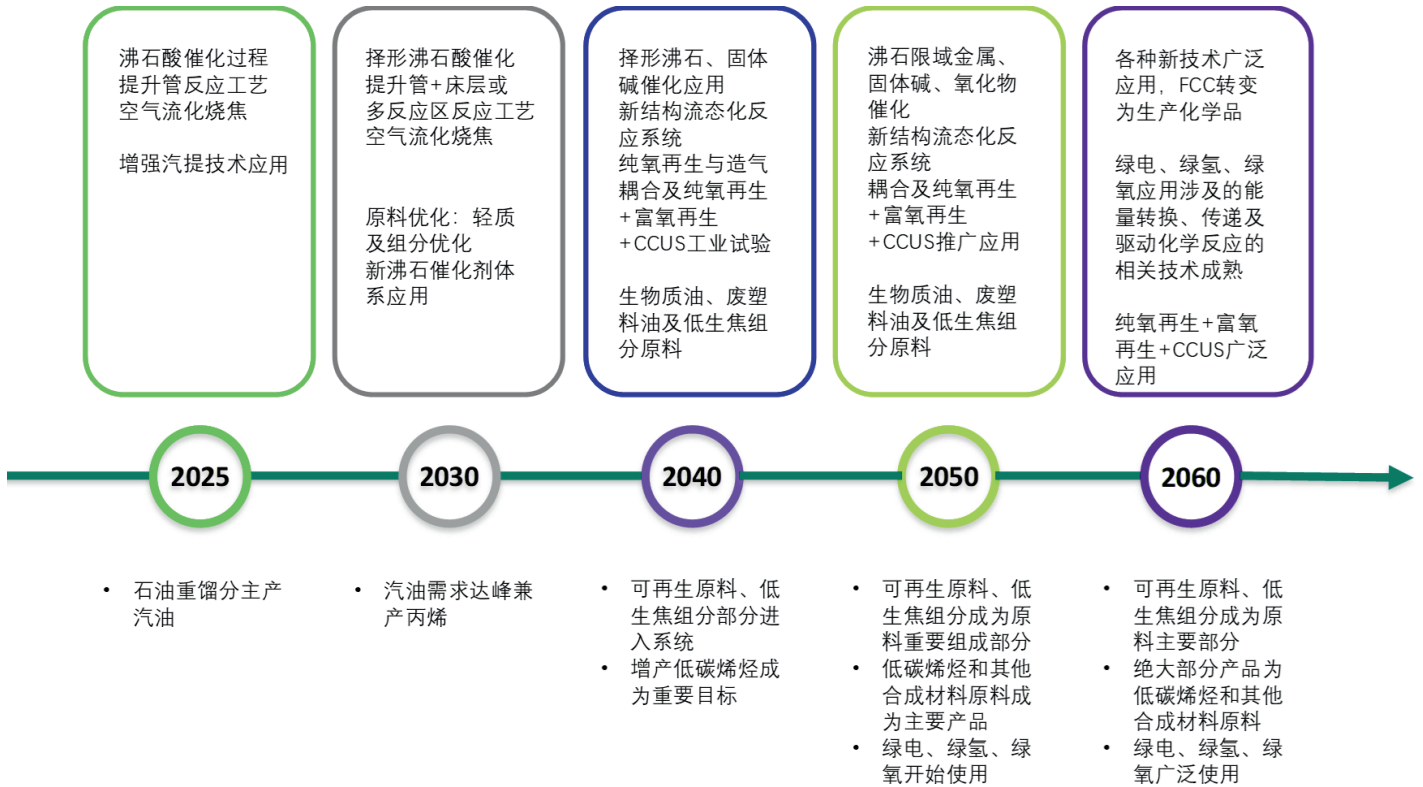


4. 原料类型

现行条件下催化原料轻质化是最为可行的降碳手段，生物质油、废塑料油等可再生原料及低生焦组分将越来越多的成为催化裂化原料。随着循环经济的深入发展，生物质油、废塑料油等可再生原料将成为未来催化裂化技术的主要原料组分。

未来低碳催化裂化技术将是加工可再生原料、低生焦组分生产低碳烯烃和其它合成材料原料的催化转化过程，并在能量转换、传递及驱动化学反应中广泛采用成熟的绿电、绿氢和绿氧，实现催化裂化技术的低碳发展。

图41：催化裂化技术的低碳发展路径



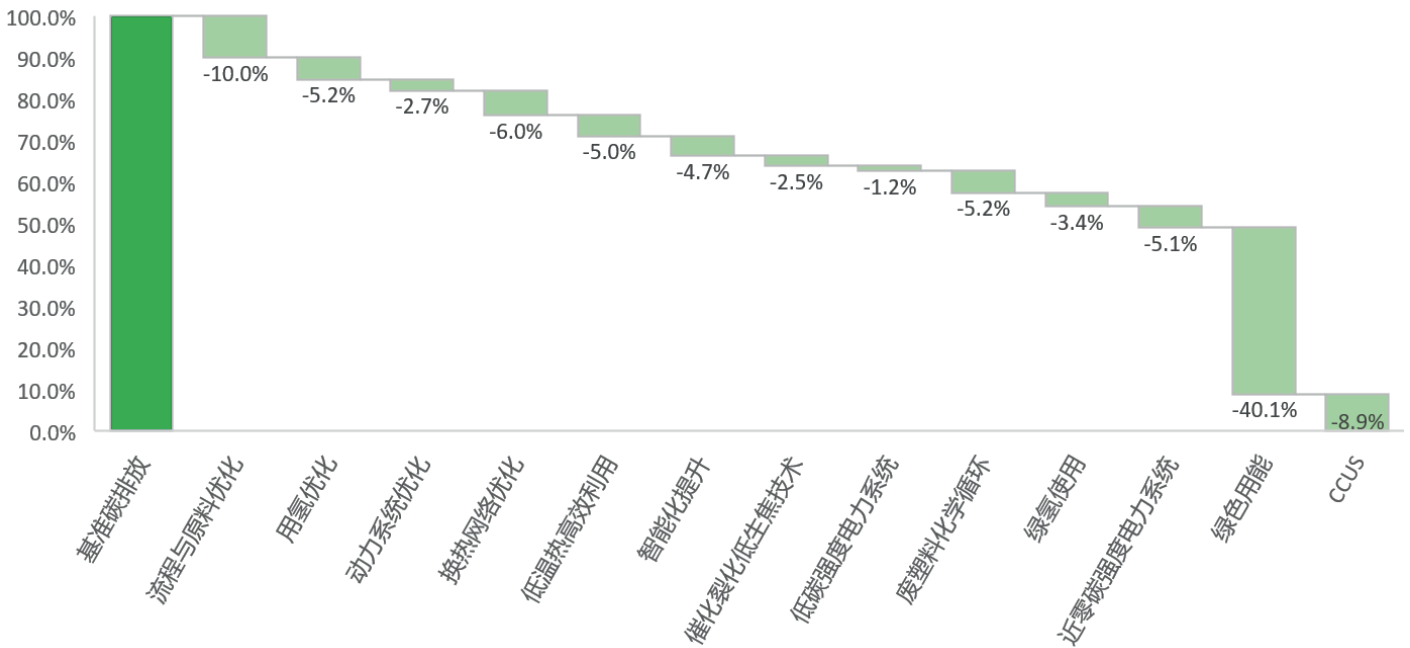
数据来源：石科院研究



第六章 迈向2060，石化行业低碳发展路线图

展望未来，伴随石化行业绿色低碳转型发展的趋势，以碳中和作为远景目标，既是行业本身面临的时代挑战，也是调整产业结构、提高竞争力、实现生态文明可持续发展的机遇。企业应化挑战为机遇，积极拥抱产业变革、顺应低碳发展趋势。一方面，通过能源资源高效利用、流程优化、清洁能源替代等方式促进现有装置能效提升；另一方面，关注并探索先进降碳技术的发展及商业化应用，积极开展试点，为低碳转型升级做好准备。通过不同时期可采用的碳减排技术对石油化工生产过程碳减排贡献进行预测，在2060模型测算情景下，典型炼油企业可实现净零排放。

图42：炼油企业碳减排路线图



数据来源：石科院研究

实现碳中和是一个较为漫长的转型发展过程，不能一蹴而就。根据《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》提出的2025年、2030年、2060年三大阶段目标，石化行业的碳减排过程和目标也应进行相应分解和细化。

以石油加工及石油制品生产过程为研究对象，结合各减排技术的技术成熟期，对不同阶段的碳排放总量及减排潜力进行预测。现阶段，成品油仍然是终端石油消费的主要产品，在测算模型中，石化行业的碳排放总量为5.22亿吨CO₂/年。

据预测，2025年国内原油加工量将达到7.9亿吨，同时成品油消费量近峰值，化工

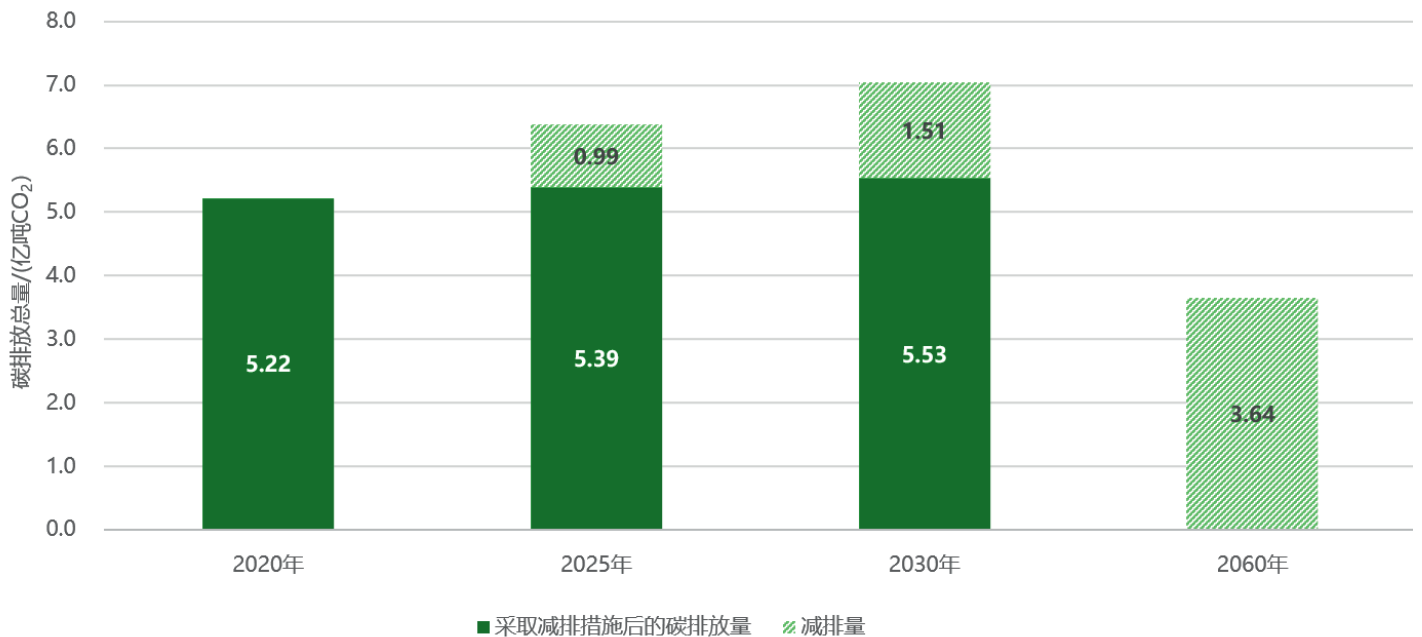
原材料产量大幅提升，若不采取任何减排措施，石化行业碳排放将达6.38亿吨。若企业积极采取能效提升、用氢效率提升等可行的降碳措施，同时考虑到从现在到2025年只有短短3年的时间，综合考虑可行减排措施实施率70%的情境下，可实现碳减排0.99亿吨，行业碳排放量约5.39亿吨。

随着“双碳”政策的持续推进，石油的燃料功能将会不断弱化，而人民生活水平的提高将带动石化原材料需求的不断攀升，炼化一体化企业的优势将进一步显现，推动中国在2030年左右达到石油需求峰值，预计约8.2亿吨，在该阶段若不采取任何减排措施，石化行业碳排放将达7.04亿吨。但随着节能降碳措施的深入实施，以

及系列工艺过程降碳技术的逐渐成熟及不断普及，可实现碳减排1.51亿吨，可将石化行业的碳排放总量控制在5.53亿吨CO₂/年。

接下来，随着化石燃料替代和电动汽车的加快普及，到2060年，石油消费量会逐步下降到2.5亿吨以下，由于该阶段石油主要以石化原材料为主，吨油加工碳排放强度将大幅升高，在不考虑任何减排措施的情况下，原油加工产生的碳排放将达3.64亿吨。但在该阶段清洁能源将在炼厂普及应用，CCUS、绿氢等技术也逐渐成熟并大规模商业化应用，将对石化行业起到极大的减排作用，根据模型预测，本阶段利用系列降碳技术可以助力石化行业整体实现净零碳排放。

图43：石化行业不同时期碳减排量预测



数据来源：石科院研究

结语

全球气候变化正在深刻影响着人类生存与发展，是当今国际社会共同面临的重大挑战。2020年9月我国提出碳达峰、碳中和的目标和愿景，这既是中国向世界的庄严承诺，彰显了在构建人类命运共同体中的大国担当；同时也是我国经济社会未来发展的重要指引，是实现高质量发展的必经之路。

“双碳”背景下，石化行业面临转型与脱碳的双重压力，但同时也面临新形势下的巨大发展机遇。能效提升、过程强化、资源高效利用在为石化行业实现降碳的同时，还可以为企业创造巨大经济价值，提升企业竞争力。可再生能源使用、循环经济构建在大幅降低生命周期碳排放的同时，还为行业的高质量发展提供了新动能。低碳产品设计与生产、绿氢供给、绿氢炼化则属于典型的行业间低碳耦合发展模式，可以在打造全社会低碳产业链与低碳供应链中充分贡献石化力量。

中国石化科院充分考虑石化行业发展现状与“双碳”目标要求，开发了系列低碳技术，可以为行业的高质量低碳发展提供全面技术支撑和一体化解决方案。

作为全球领先的专业服务机构，德勤在积极履行气候变化承诺的同时，整合内外部资源，为石化行业提供“端到端”的综合解决方案，通过提供气候变化与脱碳管理、可持续金融、ESG报告、可持续供应链和循环经济五大领域的专业服务，助力客户应对不断变化、难以预测的外部环境，引领企业迈向更可持续的未来。

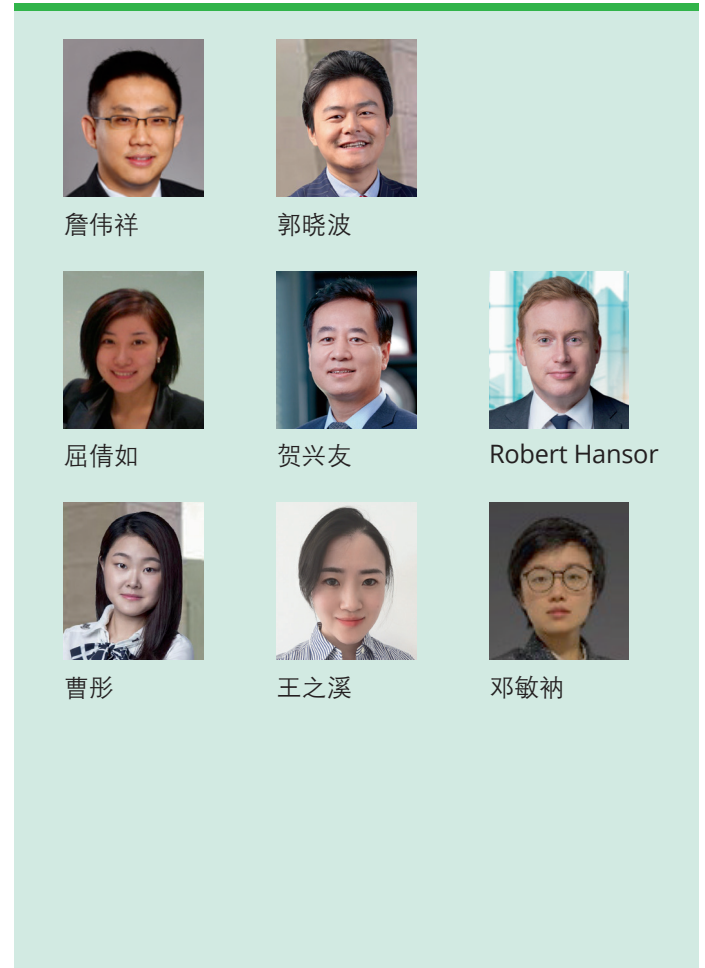


主要工作人员

中国石化石油化工科学研究院



德勤中国



联系人

吴昊
中国石化石油化工科学研究院技服中心（低碳中心）
wuhao.ripp@sinopec.com

曹彤
德勤中国能源、资源及工业行业
toca@deloitte.com.cn

致谢

碳达峰、碳中和目标的提出将石化行业转型发展推向了一个新的高度，本白皮书致力于低碳发展从愿景到行动的推进。白皮书的编写凝聚了中国石化石科院和德勤中国多领域专家的智慧 and 贡献，对以下参加本项目工作的人员致以衷心的感谢。

参加工作人员 (以姓氏笔画排序)：

于善青、习远兵、王肫、王春明、王威、王慧宇、叶思施、田雅楠、史晓迪、朱丙田、朱金泉、朱振兴、朱桢、伍芬琳、任晔、刘必心、刘宇键、刘昕洋、刘锋、纪柯、严加松、芦泽龙、李帆、李明洋、李强、李鹏、杨轶男、杨雪、杨超、何跃、况成功、张杨、张晓昕、陈文斌、陈莹、范瑛琦、鱼鲲、赵广乐、赵明、赵娜娜、赵锐、官滨、夏长久、顾方伟、顾玲、徐珂忻、徐润、栾学斌、高国华、梅红、龚剑洪、渠红亮、蒯雷、谢安、谢丽、甄栋兴、蔡立乐、蔡凯

在本书编写与校对过程中，中国石化石科院及德勤中国大量工作人员提供了宝贵的基础研究数据，并提出了许多有益的意见与建议，在此一并表示感谢。

由于石化行业低碳发展研究的创新性与技术的复杂性，书中内容若有不妥之处，衷心欢迎读者批评指正。

中国石化石科院和德勤中国将长期致力于石化行业的低碳发展研究，未来也将推出更多的低碳发展解决方案。



关于石科院



中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院（以下简称石科院）是中国石化直属的石油炼制与石油化工综合性科学技术研究开发机构，创建于1956年。石科院以石油炼制技术的开发和应用为主，注重油化结合，兼顾相关石油化工技术的研发。近年加强了在新型替代燃料和新能源领域的创新，正在向全方位的以炼油为主、油化结合的能源型研发机构转变。

石科院下设20个研究部门，拥有一支综合技术优势突出的科研队伍，目前职工总数1100余人，其中中国科学院、中国工程院院士4人。拥有近千套中小型炼油和石油化工试验装置及各种化学分析仪器，涉及炼油工艺、石油化工、精细化工和添加剂、油品应用、低碳发展研究等领域。石科院有炼油工艺与催化剂国家工程研究中心、石油化工催化材料与反应工程国家重点实验室、国家能源石油炼制技术研发中心、工业产品质量控制和技术评价实验室，中国石化润滑油评定中心、中国石化水处理技术服务中心、中国石化生物液体燃料重点实验室、中国石化重（劣）质油及非常规油气资源炼制技术重点实验室、中国石化分子炼油重点实验室、中国石化芳烃技术重点实验室等机构。石科院是全国石油产品标准化归口单位，是国家石油产品质量监督检验中心、中国石油学会石油炼制分会的挂靠单位。

经过60余年的建设和发展，石科院已经成为科研力量雄厚、装备齐全，石油炼制与石油化工科研开发、技术许可、技术咨询和技术服务相结合的综合性研究开发机构。截止2020年底，共获得部级以上奖励的科技成果987项，国家级奖励134项。累计申请国内专利9814件，获授权6701件；申请国外专利1436件，获授权889件。获中国国家知识产权局和世界知识产权组织联合颁发的中国专利金奖8项、银奖1项、优秀奖19项。

面向未来，石科院将不断增强自主创新能力，充分发挥科技创新的支撑和引领作用，努力打造世界一流的**绿色低碳能源化工科学研究院**，为石化行业高质量低碳发展提供全方位技术支撑。

石科院石油化工低碳经济研究中心（低碳中心）成立于2021年7月，聚焦于石化行业低碳数据库建设与低碳技术服务等工作，承担国家工信部石化行业“双碳”平台建设，系统性开展石化行业碳排放盘查、碳足迹核算、降碳潜力分析诊断、能效提升技术服务、资源高效利用研究、低碳技术应用规划、碳达峰碳中和路线图设计等工作，为企业提供系统化低碳技术服务，助力行业高质量低碳发展。



关于德勤

Deloitte (“德勤”)泛指一家或多家德勤有限公司, 以及其全球成员所网络和它们的关联机构(统称为“德勤组织”)。德勤有限公司(又称“德勤全球”)及其每一家成员所和它们的关联机构均为具有独立法律地位的法律实体, 相互之间不因第三方而承担任何责任或约束对方。德勤有限公司及其每一家成员所和它们的关联机构仅对自身行为及遗漏承担责任, 而对相互的行为及遗漏不承担任何法律责任。德勤有限公司并不向客户提供服务。请参阅 www.deloitte.com/cn/about 了解更多信息。

德勤是全球领先的专业服务机构, 为客户提供审计及鉴证、管理咨询、财务咨询、风险咨询、税务及相关服务。德勤透过遍及全球逾150个国家与地区的成员所网络及关联机构(统称为“德勤组织”)为财富全球500强企业约80%的企业提供专业服务。敬请访问www.deloitte.com/cn/about, 了解德勤全球约330,000名专业人员致力成就非凡的更多信息。

德勤亚太有限公司(即一家担保有限公司)是德勤有限公司的成员所。德勤亚太有限公司的每一家成员及其关联机构均为具有独立法律地位的法律实体, 在亚太地区超过100座城市提供专业服务, 包括奥克兰、曼谷、北京、河内、香港、雅加达、吉隆坡、马尼拉、墨尔本、大阪、首尔、上海、新加坡、悉尼、台北和东京。

德勤于1917年在上海设立办事处, 德勤品牌由此进入中国。如今, 德勤中国为中国本地和在华的跨国及高增长企业客户提供全面的审计及鉴证、管理咨询、财务咨询、风险咨询和税务服务。德勤中国持续致力于中国会计准则、税务制度及专业人才培养作出重要贡献。德勤中国是一家中国本土成立的专业服务机构, 由德勤中国的合伙人所拥有。敬请访问 www2.deloitte.com/cn/zh/social-media, 通过我们的社交媒体平台, 了解德勤在中国市场成就非凡的更多信息。

本通讯中所含内容乃一般性信息, 任何德勤有限公司、其全球成员所网络或它们的关联机构(统称为“德勤组织”)并不因此构成提供任何专业建议或服务。在作出任何可能影响您的财务或业务的决策或采取任何相关行动前, 您应咨询合资格的专业顾问。

我们并未对本通讯所含信息的准确性或完整性作出任何(明示或暗示)陈述、保证或承诺。任何德勤有限公司、其成员所、关联机构、员工或代理方均不对任何方因使用本通讯而直接或间接导致的任何损失或损害承担责任。德勤有限公司及其每一家成员所和它们的关联机构均为具有独立法律地位的法律实体。