

# “双碳”背景下现代煤化工发展路径

门虎

国家能源集团煤焦化有限责任公司，内蒙古乌海市，016000；

**摘要：**煤炭作为我国主体能源之一，其清洁高效利用是保障能源安全与实现碳中和目标的关键。现代煤化工通过化学转化将煤炭转化为高附加值产品，已成为传统产业升级的重要方向。然而，在“双碳”战略约束下，煤化工产业面临碳排放强度高、能源消耗大等挑战，亟需探索低碳化发展路径。煤炼焦技术作为煤化工产业链的核心环节，其工艺优化与技术创新对降低全流程碳排放具有决定性作用。本文结合“双碳”目标要求，系统分析现代煤化工的转型方向，重点探讨煤炼焦技术的优化策略，以推动行业绿色可持续发展。

**关键词：**“双碳”；现代煤化工；发展路径

**DOI：**10.64216/3080-1508.25.03.025

## 1 “双碳”目标的内涵与要求

“碳达峰、碳中和”目标（简称“双碳”目标）是中国基于全球气候治理责任与国内绿色转型需求所作出的重大战略决策。其核心内涵是在2030年前实现碳排放达峰，2060年前实现碳中和，即通过大幅降低单位GDP碳排放强度、优化能源结构、推动全社会向低碳乃至零碳转型，实现经济发展与碳排放脱钩。双碳目标不仅是一项环保约束，更是系统性重塑能源、工业、交通、建筑等高碳排放行业发展路径的深层变革。实现路径涵盖提升非化石能源比重、构建新型电力系统、推动能源终端电气化、加强碳捕集利用与封存（CCUS）技术、建立全国碳市场等多个维度。在此背景下，传统高碳行业如煤炭与煤化工被置于绿色低碳发展的转型压力中心，但也因此孕育出绿色工艺创新、高附加值升级、碳资产管理等新兴发展机遇。双碳目标并非一刀切地压缩传统能源，而是鼓励在安全、经济和环保之间寻求动态平衡，推进煤炭清洁高效利用与绿色低碳转型。

## 2 “双碳”目标对现代煤化工的影响

### 2.1 挑战与机遇并存

“双碳”目标的提出，给现代煤化工行业带来了前所未有的结构性挑战与发展机遇。一方面，煤化工作为资源型、能耗高、碳排放密集的行业，面对碳达峰与碳中和时间表，其高排放特征已成为政策监管的重点对象，包括能耗双控、碳排放限额、环保审批从严等制度日趋收紧，导致项目投资门槛提高、运营成本加大、扩张空间受限。尤其在碳定价机制逐步完善后，碳排放将直接

转化为经济成本，迫使企业主动转型升级。另一方面，煤化工的高温高压工艺环境与原料复杂性为碳捕集、封存与利用（CCUS）、绿色氢气耦合合成、高端煤基材料研发等技术路径提供了试验平台。当前一些龙头企业正在探索以“煤制油+CCUS”“煤制烯烃+可再生氢”模式构建近零碳排放流程。此外，现代煤化工具备较强的原料多样性和产品链延展性，如煤制芳烃、煤制氨基酸、煤基碳纤维等新兴方向，均可为传统路线拓展出高附加值的新空间。因此，现代煤化工必须在“双碳”框架下，跳出现有路径依赖，向绿色、安全、智能、集约的新型发展模式迈进，实现从“高碳高耗”向“低碳高质”转型。

### 2.2 技术瓶颈与突破方向

技术创新是现代煤化工实现“双碳”目标的核心驱动力。目前煤化工行业在多环节仍存在明显技术瓶颈：一是碳排放源强度高，现有工艺路径如煤制甲醇、煤制烯烃等CO<sub>2</sub>生成量大，需开发更低碳的催化路线和反应体系；二是碳捕集利用（CCU）效率低，部分示范项目CCUS成本仍高于碳交易价格，经济性不强；三是过程能效仍有限，热集成、废热回收和能量优化控制系统尚未形成规模化落地应用。为突破上述瓶颈，亟需从源头、过程与末端三个维度协同发力。源头上，可推进“煤-可再生能源”耦合流程，如利用绿氢代替部分煤基还原剂或调节剂，构建低碳煤化路线。过程上，发展新型高选择性催化剂和集成反应器，如等离子体催化、膜分离-反应耦合等新工艺已成为研究热点。末端上，加快部署

碳捕集与利用一体化系统，并与甲醇、合成气等产品深度耦合，提高碳资源循环利用效率。

### 2.3 政策与市场双重压力

在“双碳”背景下，现代煤化工面临日益强化的政策规范与市场倒逼机制双重压力。从政策端来看，“能耗双控”“碳达峰实施方案”“产业目录调整”等文件明确限制高能耗、高排放项目，煤化工产业链上的扩张受到严格约束，新增项目需满足更高能效指标和环保标准；同时，碳市场机制持续完善，全国统一碳排放权交易市场已初步建成，煤化工企业将被纳入强制履约范围，碳排放成本逐渐显性化。此外，绿色金融政策对高碳行业投资设限，绿色信贷门槛抬高，也对传统煤化工融资形成实质约束。从市场端看，下游化工产品价格受制于国际油价波动与新能源替代，传统煤制烯烃、煤制油项目的经济性压力加剧；而终端客户对绿色产品、低碳认证的需求逐步增强，倒逼企业进行产品碳足迹管理与绿色供应链改造。可以预见，现代煤化工必须在“政策引导—技术支撑—市场转型”三者之间实现动态平衡。一方面，紧跟国家“双碳”政策导向，积极参与碳市场机制，建立碳资产管理体系；另一方面，加强绿色低碳产品布局，开发可持续性强、市场附加值高的新材料、新能源产品，提升应对外部压力的战略韧性与市场适应能力。

## 3 “双碳”背景下现代煤化工发展路径

### 3.1 推动低碳工艺技术创新

近年来，行业逐步向绿色催化、工艺集成和过程强化等方向转型。例如，通过开发低温、高选择性的催化材料，可以有效降低反应能耗并减少副产 $\text{CO}_2$ ；而膜分离-反应耦合、等离子体辅助转化等前沿工艺也正应用于合成气调质与高值化转化过程。在煤制氢路径上，引入可再生能源制绿氢技术，实现绿氢与煤气化氢的掺混耦合，不仅降低整体碳足迹，还提升氢能比重。

另一方面，模块化、智能化装置也正在改变煤化工传统“重资产、重流程”的运行模式。通过数字孪生技术与AI模型的深度融合，可对复杂工艺系统进行能效优化与实时调控，大幅提升碳利用效率和系统响应速度。此外，绿色溶剂的替代使用（如离子液体吸收 $\text{CO}_2$ ）、

中低温废热梯级利用等技术，正逐步补齐煤化工绿色转型“短板”。

### 3.2 强化产业协同与循环耦合

在“双碳”战略驱动下，构建资源—能源—环境系统一体化的产业协同与循环耦合模式，成为现代煤化工实现减污降碳的突破口。煤化工产业链长、工艺复杂，若能与周边行业实现能量与物质流的深度互补，不仅有助于资源的梯级利用，也可显著降低单位产品碳排放强度。当前，典型路径包括“煤电一体化”、“煤—氢—甲醇联产”、“煤化工+钢铁/建材”多能互供等。以“煤电一体化”为例，煤气化产生的高温废热可用于电力发电，副产蒸汽供给化工装置，同时尾气中的 $\text{CO}_2$ 可通过CCUS技术注入邻近油田提高采收率（EOR），形成碳资源的闭环流动。在“化工—农业—建材”三元耦合中，煤制氨副产二氧化碳可用于温室增产或合成碳酸钙材料，实现废弃物资源化利用。此外，推动工业园区区循环经济体系建设，通过多工厂、跨行业的数据协同平台，实现原料共享、能流互补和污染物综合治理，有望构建出“零排放+零碳增长”的工业生态系统。借助大数据分析 with 工业互联网平台，耦合系统的运行效率与安全性也将持续优化。

### 3.3 优化煤炼焦技术

#### 3.3.1 干熄焦技术的推广与余热回收

干熄焦（CDQ）是实现煤焦工业节能降碳的重要技术路径之一。与传统湿熄焦相比，干熄焦通过惰性气体循环冷却高温焦炭，避免水熄过程中产生大量水蒸气和有害污染物，同时显著回收高品位的显热资源。据测算，干熄焦每吨焦炭可回收热能约0.6GJ，减少 $\text{CO}_2$ 排放超过300公斤，节能减排效益显著。当前，干熄焦系统正从“单体设备优化”向“系统集成协同”发展，集成高效锅炉、热电联产系统与智能控制平台，可实现余热的动态分配与梯级利用，有效提升能效水平。部分先进企业已将干熄焦余热用于发电或供热，实现“自用+外供”双赢模式。

此外，结合干熄焦烟气的超低排放处理与余热再压缩回收（RTO+热泵）技术，可进一步提高资源利用率并控制碳排放。当前技术瓶颈主要集中在余热稳定输出、

系统长周期运行以及设备投资回报周期等方面,但随着新材料与自动控制技术的发展,这些问题正逐步被攻克。未来,干熄焦将不只是节能措施,而是现代炼焦系统低碳化、智能化、资源化转型的基础模块。

### 3.3.2 智能配煤系统的优化与精准调控

配煤过程对焦炭质量和炼焦效率起着决定性作用,而在“双碳”背景下,如何通过智能化手段优化配煤结构,实现热值、硫分、灰分的精准调控,成为焦化行业提升碳效率的重要手段。目前,基于大数据与机器学习的智能配煤系统正逐步替代传统人工经验模型,利用实时采样分析、历史数据建模与智能预测算法,对煤种性能、价格、碳排因子等多维度进行全方位评估。先进系统可实现“碳排放-经济性-焦炭性能”三重优化目标,同时动态调整配煤比例,提升焦炉反应效率与产品一致性。部分龙头企业已实现配煤智能决策闭环,通过工控系统实现煤流路径自动切换与配比精细控制,平均降低CO<sub>2</sub>排放5%以上。

此外,结合地质溯源与煤炭全生命周期碳足迹分析,可建立“碳标签”数据库,为绿色焦炭生产提供依据。未来,配煤系统还将融合物联网传感器、边缘计算与5G通讯技术,实现跨厂区、跨区域的协同调度,为建设智能、低碳的现代焦化体系提供核心支持。

### 3.3.3 二氧化碳原位捕集与资源化利用

在现代煤化工炼焦过程中,CO<sub>2</sub>是主要的温室气体排放源之一,如何实现原位捕集与高值资源化利用,成为实现低碳炼焦的技术前沿方向。近年来,以强化吸附、膜分离与低温冷凝为核心的CO<sub>2</sub>原位捕集技术取得显著进展,部分焦炉系统已集成碳捕集模块,通过与焦炉烟气热值耦合,实现高浓度CO<sub>2</sub>的稳定回收。同时,CO<sub>2</sub>资源化利用路径也呈现多样化趋势,典型技术包括:与绿氢耦合合成甲醇、合成气或DME(乙醇醚);催化转化为高分子聚合物原料(如聚碳酸酯);或与矿渣反应形成建筑材料碳酸盐化制品等。

在炼焦工艺中布设“小规模、模块化”CO<sub>2</sub>利用系统,既降低了长距离运输与贮存成本,又提升了碳资源的场地内循环利用率。部分高端技术如电催化CO<sub>2</sub>还原、光催化转化等也正在实验验证阶段,未来有望实现规模化应用。政策层面,若结合碳交易与绿色产品认证机制,

二氧化碳资源化利用将具有明显经济激励效应。综上,CO<sub>2</sub>原位捕集与资源化正成为煤焦行业迈向碳中和目标的“最后一公里”解决方案,其创新与突破将直接影响现代煤化工绿色转型的广度与深度。

## 3.4 完善绿色标准与政策支撑

在“双碳”战略深入推进的背景下,现代煤化工要实现可持续发展,必须依托系统完备、科学严谨的绿色标准体系和政策支持机制。当前,虽然国家已出台多项节能减碳相关标准,但在煤化工行业的适配性、操作性与前瞻性方面仍存在不足,尤其在碳排放核算方法、绿色产品认证、全生命周期评价(LCA)等方面尚未形成统一规范,导致行业绿色转型缺乏明确路径。为此,应加快制定涵盖原料选择、工艺流程、能效指标、排放限值及碳足迹评估的煤化工绿色标准体系,推动从项目准入、设计建设到运营监管全过程的绿色规范化管理。同时,政策层面需通过“碳金融+税收激励+政府补贴”的复合机制,支持企业绿色改造和低碳技术创新。如设立煤化工绿色低碳发展专项基金,支持关键低碳工艺技术、CCUS示范工程和智能制造平台建设。此外,要强化碳市场机制对煤化工企业的约束与引导作用,推动碳排放权与绿色产品溢价相挂钩,使绿色煤化工发展具备可持续的市场激励。完善的标准体系与政策引导将为煤化工绿色低碳转型提供制度保障与发展动力,是实现“双碳”目标的根本支撑。

## 3.5 构建数字化赋能平台

### 3.5.1 工业互联网平台的实时监控与智能调控

工业互联网平台是实现煤化工数字化转型的核心载体,其关键在于通过“设备互联+数据融合+智能算法”,实现对复杂工艺系统的全生命周期感知、响应与优化。在现代煤化工生产中,能耗高、流程长、变量多,对安全性、能效与环保的监测调控提出了更高要求。基于工业互联网构建的实时监控系統可对锅炉、反应器、分离塔等关键设备进行全天候数据采集,并通过边缘计算或云平台对异常状态进行快速预警,从而显著降低能耗与非计划停机时间。同时,借助智能调控模块,系统能够根据负荷变化、原料属性、外部环境等动态参数自动调整操作参数,实现能量优化与排放控制的动态平衡。

例如,通过实时调整空燃比、压力分布等参数,可以精细化控制气化炉的运行状态,最大化热效率并降低碳排放。更进一步,通过设备间的信息协同,可实现全厂级能量网络与物料流优化,打破传统“单点优化”瓶颈。工业互联网平台不仅提高了运行效率,更为碳减排管理提供了强有力的数据支撑,是绿色煤化工“智造升级”的基础设施。

### 3.5.2 机器学习算法驱动的能效优化

在煤化工复杂生产过程中,影响能效与碳排的因素众多,传统规则型控制方法难以兼顾实时性与准确性。引入机器学习算法,特别是基于神经网络、随机森林、强化学习等模型的预测与优化方法,可显著提升系统能效与操作智能化水平。通过训练历史工艺数据与传感器实时数据,模型可对未来能耗趋势、关键设备状态以及碳排放水平进行精准预测,从而指导操作人员优化控制策略。例如,针对煤气化单元,机器学习模型可动态判断反应效率与副产物比例,并自动推荐最佳进料组成和操作温度,从而提高原料转化率与热值利用率。在能耗密集的合成塔、冷凝系统中,算法还可实现能量流的最优路径分配,提升热交换效率并降低系统负荷。

此外,结合机器学习与工艺仿真可构建“虚拟工厂”,在无风险环境中实现多方案对比与能耗最优解推演。未来,随着模型泛化能力的提升和算法部署效率提高,煤化工行业将逐步实现“从经验控制到数据驱动”的技术跃迁,在稳产增效的同时大幅降低碳强度。

### 3.5.3 区块链技术赋能的碳排放溯源

碳排放溯源的真实性与可追溯性,是“双碳”目标落实过程中的核心问题。区块链技术因其不可篡改、全流程记录与去中心化管理特性,为煤化工碳排放管理带来全新解决方案。通过将碳排放数据、能耗数据与排放因子等关键指标上传至区块链平台,可实现从原料进厂、生产加工、产品出厂的全过程碳足迹记录,为碳资产管理与绿色审计提供坚实数据支撑。例如,在煤制烯烃流

程中,可将煤种来源、气化效率、CO<sub>2</sub>排放量等参数实时记录并加密存储于区块链上,并与碳交易平台无缝对接,实现可信的碳减排量核算与交易。

此外,区块链可与物联网设备集成,实现设备级别的自动化数据上传与验证,防止人为干预或数据造假。在碳足迹认证和绿色供应链中,区块链还可为下游客户提供透明可信的产品“碳身份证”,助力企业提升绿色品牌竞争力。

## 4 结束语

“双碳”目标不仅是环境保护的底线约束,更是推动高碳行业转型升级的系统工程。对于现代煤化工而言,这既是挑战重重的“压舱石”,更是迈向高端化、智能化、绿色化发展的“加速器”。在当前政策趋紧、市场倒逼、技术革新的多重驱动下,煤化工行业必须转变发展思路,跳出传统路径依赖,从资源消耗型向资源效率型、从污染密集型向环境友好型转型升级。推动低碳工艺技术革新、强化产业链耦合、优化炼焦系统、构建碳排放智能监管平台,是破解行业碳困境、提升绿色竞争力的核心路径。

### 参考文献

- [1] 袁博,牛凯远,刘一扬,等. “双碳”背景下鄂尔多斯现代煤化工产业低碳路径探讨[J]. 能源与节能, 2024, (10): 11-13.
- [2] 李民,吕丰,孙保全,等. 双碳目标约束下现代煤化工企业绿色低碳发展路径浅析[J]. 中外能源, 2024, 29 (01): 17-21.
- [3] 郑泽. “双碳”背景下现代煤化工发展路径[J]. 化工管理, 2023, (26): 7-9.
- [4] 范玮. “双碳”背景下现代煤化工与新能源耦合发展路径研究[J]. 煤炭经济研究, 2023, 43 (05): 74-81.
- [5] 宋世杰,杨岚. “双碳”背景下煤化工产业绿色低碳发展路径探讨[J]. 新西部, 2022, (12): 23-27.