

# 我国煤炭清洁高效转化发展研究

严晓辉<sup>1\*</sup>, 杨芊<sup>2</sup>, 高丹<sup>3</sup>, 易群<sup>4</sup>, 张凯<sup>1</sup>, 谢克昌<sup>5</sup>

(1. 国家能源投资集团有限责任公司科技部, 北京 100013; 2. 中国煤炭加工利用协会, 北京 100013; 3. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 4. 武汉工程大学化工与制药学院, 武汉 430205; 5. 中国工程院, 北京 100088)

**摘要:** 能源是国民经济的命脉, 而当前我国能源发展形势严峻, 原油、天然气的对外依存度较高; 立足以煤为主的基本国情, 加强煤炭清洁高效利用是国家战略要求也是现实的必然选择, 其中推进煤炭清洁高效转化是重要路径之一。本文梳理了煤炭清洁高效转化发展的基本现状, 提炼了高端化、多元化、低碳化、智慧化等产业发展趋势以及煤转化制清洁燃料、煤制大宗及特殊化学品、煤转化过程污染物控制等技术发展趋势。在分析水资源、碳排放、产品竞争力、扶持政策等发展挑战的基础上, 提出了规划引领、示范引领、创新引领的发展思路。研究建议, 明确煤炭清洁高效转化在能源体系中的战略地位, 建立国家煤制油气战略储备机制, 加强金融信贷、能源统计政策支持, 以研发平台建设提升行业科技创新能力。

**关键词:** 煤炭; 清洁高效; 能源安全; 现代煤化工; 特种油品; 煤基新材料

中图分类号: F407 文献标识码: A

## Development of Clean and Efficient Coal Transformation in China

Yan Xiaohui<sup>1\*</sup>, Yang Qian<sup>2</sup>, Gao Dan<sup>3</sup>, Yi Qun<sup>4</sup>, Zhang Kai<sup>1</sup>, Xie Kechang<sup>5</sup>

(1. Science and Technology Department, China Energy Investment Corporation, Beijing 100013, China; 2. China Coal Processing and Utilization Association, Beijing 100013, China; 3. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. School of Chemical Engineering & Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China; 5. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Energy is the lifeblood of the national economy. At present, China's energy development situation is severe, and its external dependence on crude oil and natural gas is relatively high. Considering the national conditions of coal, strengthening the clean and efficient utilization of coal is strategically significant; specifically, the clean and efficient coal transformation is an important approach. This study summarized the status quo of clean and efficient coal transformation, and analyzed the high-end, diversified, low-carbon, and intelligent development trend of the industry as well as the technology development trends that include coal transformation to clean fuels, coal transformation to bulk and special chemicals, and pollutant control in coal transformation. Moreover, the study analyzed the development challenges regarding water resources, carbon emissions, product competitiveness, and supporting policies, and proposed a development idea that is led by planning, demonstration, and innovation. The research suggests that the strategic position of clean and efficient coal transformation in the energy system should be clarified, the national coal-to-oil-and-gas strategic reserve mechanism should be established, financial credit and energy statistics policy support should be strengthened, and the scientific

收稿日期: 2022-09-06; 修回日期: 2022-10-24

通讯作者: \*严晓辉, 国家能源投资集团有限责任公司科技部高级工程师, 研究方向为能源发展战略和科技管理;

E-mail: xiaohui.yan@chnenergy.com.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“能源战略(2035)”(2019-ZD-20), “推进现代能源体系建设进程评估及发展战略研究”(2022-XZ-33)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

and technological innovation ability should be improved by building research and development platforms.

**Keywords:** coal; clean and efficient; energy security; modern coal chemical industry; special oil products; new coal-based materials

### 一、前言

能源是国民经济的命脉，当前我国能源发展形势严峻：从国际来看，全球新型冠状病毒肺炎（COVID-19）疫情依然在持续，经济复苏动力不足；受地缘政治等因素的影响，能源和粮食危机有所显现；从国内来看，受COVID-19疫情反复、局部地区自然灾害严重、部分地区电力需求快速增长等因素的影响，能源供需持续偏紧，能源保供任务较为艰巨。与此同时，我国油气对外依存度依然较高，原油、天然气的对外依存度分别由2017年的67.4%、38.4%增长至2021年的72%、44.9% [1,2]。国家立足经济社会发展全局，强调了以煤为主的基本国情以及能源的可靠供给，因而煤炭是实现能源安全自主可控的首选。

煤炭是我国的主体能源，按照绿色低碳的发展方向，对标碳达峰、碳中和（“双碳”）战略目标，控制总量、兜住底线，实施有序减量替代，促进煤炭消费转型升级。推进煤炭清洁高效转化是实现煤炭清洁高效利用的重要途径之一 [2]。经过多年的科技攻关和升级示范，我国煤炭转化产业实现了由煤炭资源向油气燃料和化学品转化的全产业链贯通，为发挥煤炭所拥有的资源和原料双重属性优势、保障国家能源安全开辟了新途径 [3~7]。为了提高煤炭作为化工原料的综合利用效能，促进煤化工产业高端化、多元化、低碳化发展，仍需加快关键核心技术攻关，积极发展煤基特种燃料、煤基生物可降解材料 [8]。

本文在系统梳理我国煤炭清洁高效转化发展成就的基础上，研判煤炭清洁高效转化的产业和技术发展趋势，针对面临的挑战提出未来发展思路，以期为产业发展和管理研究提供基础参考。

### 二、我国煤炭清洁高效转化发展现状

煤炭转化指采用化学方法将煤炭转化为气体、液体、固体产品或半产品，而后深加工为燃料和化工产品的工艺过程；相关技术按照工艺流程分为热解、气化、液化（直接和间接）等，按照终端产品

形式分为煤制燃料、煤制化学品、相关污染物处理等。本文提及的煤炭清洁高效转化主要指以传统煤化工为基础，以煤炭清洁高效转化为目标的现代煤化工 [9~11]。目前，我国煤炭清洁高效转化利用取得重大进展，系列示范工程建成投产并实现商业化运行；可替代石油消耗约 $3 \times 10^7$  t/a，成为保障能源安全的战略路径之一 [2]。

#### （一）产能和产量已具规模

通过近20年发展，我国先后建成了 $1.08 \times 10^6$  t/a煤直接液化、 $6 \times 10^5$  t/a煤制烯烃、 $4 \times 10^6$  t/a煤间接液化等示范工程，拥有自主知识产权并实现了长周期安全稳定运行。2021年，我国煤制油总产能为 $9.31 \times 10^6$  t/a，已成为石化烯烃重要补充的煤（甲醇）制烯烃总产能为 $1.672 \times 10^7$  t/a，煤制乙二醇总产能为 $6.75 \times 10^6$  t/a，煤制天然气总产能为 $6.125 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/a [12~15]。产业的发展对于缓解我国石油供应的严峻形势，实现石油化工原料替代与煤炭清洁高效利用，保障国家能源安全具有战略意义。

#### （二）园区化、基地化格局初步形成

根据国家产业规划布局，依托14个大型煤炭基地、9个大型煤电基地，构建了内蒙古鄂尔多斯、陕西榆林、宁夏宁东、新疆准东4个现代煤化工产业示范区，山西、河南、安徽淮南、贵州毕节、湖北荆州等散状布局点，以东部沿海为外延的集约化产业发展格局。根据国家“十四五”规划纲要，2021年新增了山西晋北、新疆哈密两个煤制油气基地。目前，园区化、集群化、基地化的产业格局初步形成，多数煤炭转化项目都包含了煤炭开采、煤炭转化等上/下游关联产业，部分项目与石化、电力等行业实现多联产，进一步提高了综合效益。

#### （三）部分地区的经济社会发展带动作用突出

煤炭清洁高效转化产业具有技术密集、资金密集特征，辐射带动效应强；工业增加值是煤炭直接销售的4~15倍，带动了基础设施建设、工程装备设计与制造、物流配送、新材料加工等多个行业发展，增加了就业岗位和税收。以宁夏煤业 $4 \times 10^6$  t/a

煤间接液化示范项目为例,年总产值超过 800 亿元,提供就业岗位 10 万个 [16];项目建成投产对增强能源自主保障能力、推动煤炭清洁高效利用、促进地区经济社会发展具有重要意义 [7]。

#### (四) 产业技术整体达到国际先进水平

以国家能源投资集团有限责任公司、中国科学院、华东理工大学、山东能源集团有限公司、陕西煤业化工集团有限责任公司等为代表的企业、科研院所和高校,在煤气化、煤直接液化、煤制烯烃、煤间接液化、煤炭分质分级利用等方面开展了众多的基础和应用研究。目前,我国掌握了具有自主知识产权的系列煤炭清洁高效转化技术,部分技术达到国际先进或领先水平,如大型煤气化技术、高温费托合成技术处于国际先进水平,煤制烯烃、煤制芳烃、低温费托合成、煤制乙二醇、煤油共炼技术处于国际领先水平,煤直接液化、粉煤中低温热解及焦油轻质化技术为国际首创 [7]。产业技术的提升为增强煤炭作为化工原料的综合利用效能、全面改善煤炭清洁高效利用水平提供了关键基础。

#### (五) 关键装备国产化进程加速

煤炭清洁高效转化关键装备基本实现了国产化。在气化方向,开发了多种具有自主知识产权的高效低成本煤气化技术,如华东理工大学“四喷嘴”、清华大学“晋华炉”、航天长征化学工程股份有限公司“航天炉”等,摆脱了相关技术的进口依赖。在液化方向,中国神华煤制油化工有限公司建成了世界首套煤直接液化装置并实现安全稳定和长周期运行,装备国产化率超过 98% [18];国家能源集团宁夏煤业有限责任公司建成的煤间接液化示范工程已经达产 ( $4 \times 10^6$  t/a),其中的关键技术、设备和材料的综合国产化率达到 98.5%,涵盖合成油费托合成及油品加工成套技术、干煤粉气化技术、大型空分成套技术、特种泵阀、特种材料等 [17]。关键设备国产化方面的突破,保障了煤炭清洁高效利用产业链、供应链的安全稳定和经济可靠。

### 三、煤炭清洁高效转化产业和技术发展趋势

#### (一) 煤炭清洁高效转化产业发展趋势

煤炭清洁高效转化产业的发展需把握关键期、

机遇期、窗口期,围绕内蒙古鄂尔多斯、陕西榆林、山西晋北、新疆准东、新疆哈密五大煤制油气基地的产业布局,按照生态优先、以水定产、总量控制、集聚发展的要求,促进煤化工产业的高端化、多元化、低碳化、智慧化发展。

在高端化方面,聚焦国家战略和产业需求,开展关键核心技术、前沿引领技术、现代工程技术、颠覆性技术攻关;围绕煤直接液化、煤间接液化、煤制化学品等主要方向开展“延链”“补链”“强链”,提高煤基新材料、煤基特种燃料等高附加值产品的生产量,以降本/降耗/增效体现产业高端化发展水平。

在多元化方面,积极开展产品多元化、工艺路线多元化,加快实现由单一的油品、聚烯烃产品向包括油品、煤基化学品(如烯烃、芳烃)、煤基新材料在内的多元化产品体系转变。研究和示范多元化的工艺路线,推动煤炭清洁高效转化与石油化工、新能源、生物化工的耦合应用。

在低碳化方面,充分利用绿电、绿氢、绿氧以及储电、储热等多种方案,替代原料煤和燃料煤的消耗,实现产业源头减碳。积极发展低能耗碳捕集技术,利用现代煤化工  $\text{CO}_2$  浓度高且集中度高的特点,探索  $\text{CO}_2$  驱油、高效合成甲醇等资源利用技术,生产含氧化合物,实现过程减碳、产品固碳。

在智慧化方面,积极探索第五代移动通信技术的产业基础应用,在新建项目中应用数字化、智能化、开放化等理念,通过智能车间、智能工厂的“点”式布局、工业互联网平台的“线”上发力来补齐要素短板。广泛应用工业软件,实现工业生产的实时采集和反馈,工业生产的透明化、可视化以及决策的智能化,促进降本和增效。

#### (二) 煤炭清洁高效转化技术发展趋势

从终端产品分类的角度看,未来煤炭清洁高效转化技术攻关主要围绕煤制清洁燃料、化学品及其污染物处理展开。科学延伸产业链,提升资源利用效率,实现煤炭在“生产-加工-利用”过程中的充分利用,追求煤炭转化污染物的近零排放。

##### 1. 煤转化制清洁燃料技术

在煤气化方面,突破煤种适应性差、氧耗/水耗高、气化装备可靠性及操作弹性差的发展瓶颈,发展高可靠的煤气化关键装备及配套技术,建成大

容量、高效、低水耗的煤气化示范装置。

在煤制天然气方面，重点解决反应过程中放热与移热匹配难题；开发新型短流程甲烷化工艺及催化剂，实现国产催化剂的规模化应用，显著降低生产能耗与成本；注重开发劣质原料气制取合成气技术，提高富含CO<sub>2</sub>、富含甲烷和氢等原料气的利用水平。

在煤液化方面，以提高系统能效、显著降低水耗、优化产品结构为目标，开展关键技术与系统集成研究。①对于煤直接液化，开发高效节水液化新工艺及催化剂、温和液化工艺、煤与煤焦油/重油类加氢共处理等工艺，发展高值特种油品及芳烃等的制备技术，研究液化残渣制高端碳材料、沥青等综合利用技术。②对于煤间接液化，开发高效、高选择性钴基/铁基费托合成新工艺及催化剂，大幅减少甲烷及CO<sub>2</sub>排放；开发超清洁航空煤油、超净柴油、高端润滑油、固液石蜡、高熔点费托蜡等产品加工技术；发展煤直接-间接液化耦合工艺，建设直接-间接一体化示范工程。

在低阶煤分级分质利用方面，针对煤炭热解分级转化与联产技术难以实现长周期稳定运行等难题，研究气/固/液分离、废水处理、装备规模化稳定运行等关键共性技术；建设百万吨级煤热解及联产示范工程，形成产业化潜力突出、配置灵活可调、高油气收率的热解联产清洁燃料及化学品新工艺。

### 2. 煤制大宗及特殊化学品技术

在大规模、高选择性煤制大宗含氧化合物技术方面，开发煤制乙醇技术，形成1×10<sup>6</sup> t/a产能的工业示范；开发煤制聚甲氧基二甲醚、低碳醇等含氧清洁燃料及化学品技术，形成5×10<sup>5</sup> t/a产能的工业示范；突破合成气直接制低碳醇、高碳伯醇、丙烯酸工艺及催化剂，完成工业性试验并形成整套技术。煤直接转化目标产物的选择性大于80%，过程能耗降低5%以上。

在煤转化制烯烃/芳烃技术方面，开发新一代甲醇制烯烃反应器及催化剂，显著减少甲醇消耗量，实现乙烯/丙烯产品比例灵活调控，形成1×10<sup>6</sup> t/a产能的工业示范；开展甲醇制芳烃、甲醇甲苯制对二甲苯反应器及催化剂研究，形成1×10<sup>6</sup> t/a产能的煤制芳烃工业示范；突破合成气直接制烯烃、甲醇石脑油耦合制烯烃、合成气直接制芳烃等高选择

性、高稳定性催化剂制备技术，开展反应器与工艺的耦合设计及开发，形成成套工艺技术。

在煤转化与可再生能源制氢耦合技术方面，研究煤转化过程与可再生能源制氢耦合工艺，发展新型复合电极材料、大规模电解装备，提高电流密度并降低制氢能耗。建立1×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>/h流量的可再生能源制氢与煤化工耦合全流程试验装置。开展可再生能源制氢与煤转化耦合系统稳定运行技术研究，提高系统运行的可靠性。

### 3. 煤转化过程污染物控制技术

在煤转化过程中的固废处理方面，研究固废协同制备绿色充填材料，废弃催化剂无害化、精细化处理技术，多种废盐固废协同利用技术，实现固废处理的资源化、减量化、无害化。

在煤转化过程中的废水处理方面，针对煤热解、固定床气化、直接液化等工艺产生的高盐、高浓度有机物废水难以处理问题，突破多环芳烃、酚等有机物脱除技术，提高废水的可生化性；开发废水污染物资源化回收-强化处理-分质回用的集成技术，建成百吨/时级废水处理及回收利用试验装置，以经济可行的方式实现煤转化废水近零排放。

在煤转化过程中的粉尘、挥发性有机物等气体污染物处理方面，针对煤热解、焦化生产过程中污染源分散、种类多样、难处理等特点，重点开发挥发性有机物及颗粒物捕集净化、低氮燃烧、烟气脱硫脱硝除尘一体化等技术，开展示范推广，实现污染物的源头消减、过程消纳、末端资源化、近零外排。

## 四、我国煤炭清洁高效转化发展面临的挑战

### （一）水资源短缺

我国煤炭清洁高效转化产业基本分布在黄河流域内的西部缺水地区，通过持续努力已在节水方面取得长足进步；煤制油水耗先进值约为6吨水/吨油，煤制烯烃水耗先进值降至20吨水/吨烯烃以下，单位国内生产总值水耗已低于西部地区产业平均值[16]。然而，黄河流域生态保护和高质量发展成为国家战略，将在全流域加强水资源节约集约利用，实行水资源消耗总量和强度双控并以水定产。水资源评估已被列为项目环评的重要内容，将是未来煤炭清洁高效转化产业发展的“硬”约束。

## （二）碳排放约束

在“双碳”战略目标的背景下，碳排放成为煤炭清洁高效转化产业发展的瓶颈问题。煤炭转化的CO<sub>2</sub>排放主要源自工艺过程中煤气化变换单元反应产生的高浓度CO<sub>2</sub>、热车间产生的低浓度CO<sub>2</sub>。根据行业测算，煤间接液化制油、煤直接液化制油、煤制烯烃、煤制乙二醇的吨产品碳排放量分别为6.5 t CO<sub>2</sub>、5.8 t CO<sub>2</sub>、11.1 t CO<sub>2</sub>、5.6 t CO<sub>2</sub>。未来碳税等政策发布执行，将提升整个产业链的生产运营成本，进而影响产业发展路径选择。

## （三）产品竞争力整体不强

“十三五”时期建设的煤炭转化项目，以煤制油品、煤制气、煤制烯烃、煤制醇醚类化学品为主，方案雷同、产品同质化问题较为突出。产品经济性受到多方面影响：煤基化学品价格对标石油化工产品，与国际油价、原料煤价直接关联；煤制烯烃项目以中低端产品为主，集中在通用端的专用料牌号，而高端应用的专用料（如 $\alpha$ -烯烃）偏少；煤制乙二醇产品结构单一，产品纯度难以提高，杂质繁多且难以清除。这些问题将长期伴随产品竞争力提升、高端聚酯产品开发等过程。

## （四）政策扶持的精准性有待提升

煤炭转化产业项目投资强度较大，产业发展仍处于初期，在低油价条件下竞争力不强，需要政策扶持以培育产业发展。然而，已有扶持政策零散存在于能源、区域规划或者子规划层面，缺乏行业针对性，相关基础标准、产品标准、方法标准的体系性有待完善。以煤制油为例，当前的产品标准仅能对照采用石油化工行业相关标准；受制于石化企业产品准入制约，具有“一大三高四低”特点的特种煤制油品不能实现优质优价，也无法直接进入终端市场；基于石油基油品制定的消费税率较高，导致中低油价条件下煤制油企业出现了普遍性亏损，影响了行业发展信心和增产积极性 [19]。

## 五、我国煤炭清洁高效转化发展思路

立足以煤为主的基本国情，开展煤炭清洁高效利用，增加新能源消纳能力，推动煤炭和新能源优化组合，这是国家层面的总体要求。实现“双碳”

愿景与保障能源安全不可偏废，宜采取系统思维，实施统筹协调，实现稳妥应对。在当前及未来一定时期内，煤炭仍是主体能源，基础能源、兜底保障作用的发挥离不开清洁高效利用。相应地，作为主要方式之一的煤炭清洁高效转化，需要采取新发展思路。

一是规划引领、合理布局、集约发展。更好发挥国家宏观调控作用，处理好煤炭清洁高效转化项目建设与区域经济发展的关系，统筹煤、水、生态环境资源；坚持科学论证，避免逢“煤”必“化”，实施合理布局，规避盲目建设；结合资源禀赋，有序推动陕西榆林、内蒙古鄂尔多斯、山西晋北、新疆准东、新疆哈密等地区的煤制油气战略基地建设。

二是示范引领、传统升级、融合互补。开展关键核心技术示范先行，引导产业可持续发展。推进焦化、聚氯乙烯、合成氨、合成甲醇等传统煤化工的升级改造，提升环保水平并淘汰落后产能；通过技术改造和运营优化，降低生产成本，提升产品及服务品质，增强市场综合竞争力。推动煤炭清洁高效转化行业与电力热力、盐化工、信息技术的融合发展，开展煤炭清洁转化与石油化工的产业融合与产品协调，弥补石化原料不足，形成与传统石化产业互为补充、良性循环的市场格局。

三是创新引领、产业培育、绿色低碳。实施煤炭清洁高效转化核心关键技术攻关，注重新工艺、新产品、新装备开发；围绕创新链布局产业链，为新技术成果的转化应用提供例行通道，积极培育煤炭转化新业态。发挥煤基资源制氢的技术经济优势，攻关大规模制氢、分布式制氢、储氢、氢燃料电池等氢技术产业化发展难题，为氢能的经济、规模利用提供条件。开展低能耗、低成本的碳捕集及资源化利用技术研究，实施CO<sub>2</sub>转化制醇类化学品和驱油的商业示范；以制氢-储氢为纽带，加强与冶金、可再生能源的耦合互补及应用示范，培育产业发展的新方向和新业态。

## 六、对策建议

### （一）明确煤炭清洁高效转化在能源体系中的战略地位

建议在能源领域法律修订工作中，立足以煤为

主的基本国情，明确煤炭清洁高效转化在保障能源安全方面的战略地位；适时发布“煤炭深加工产业‘十四五’发展规划”，避免“十二五”“十三五”时期有关产业政策突变或衔接不畅等现象。统筹“十四五”时期煤炭清洁高效转化重大工程示范布局、重点技术攻关方向，从全产业链视角出发，明确“原料用能不纳入能源消费总量控制”等统计细则，促进行业稳健发展。

### (二) 建立国家煤制油气战略储备机制

国家“十四五”规划中提出，加强五大煤制油气战略基地建设，将煤制油气产业与粮食保障、油气勘探开发等并列。然而，以国家煤制油气战略储备机制为代表的产业政策并未发布实施。可参照粮食保障性收购价格形成机制，论证制定煤制油气产品的保障性收购价格；也可参照《石油价格管理办法（试行）》中的石油价格调整和熔断机制，结合煤制油品的经济性特征制定价格熔断机制；还可基于现行的煤基油品消费税机制，提取一定比例资金作为保障煤基油品价格熔断的基金 [20]。

### (三) 加强金融信贷、能源统计政策支持力度

建议合理加大金融支持力度，秉持“实现了清洁高效利用的煤炭也是清洁能源”的观点，在国家煤炭清洁高效利用再贷款中安排专项资金，重点支持煤炭清洁高效转化科技攻关，形成“研发一批、储备一批、应用一批”的技术研发格局。对于国家统筹布局的重大示范工程项目，建议项目能耗、碳排放等指标单列，而不计入项目所在地区的能耗总量和强度统计；由此鼓励地方政府积极承担国家重大项目，加快推进煤炭领域重大示范工程和战略基地建设，从而促进煤炭清洁高效利用产业的深化发展 [20~22]。

### (四) 以研发平台建设提升行业科技创新能力

建议以国家级、省部级研发平台为主体，以北京怀柔实验室为科技攻关牵引、科技领军企业为应用示范牵引，加快实施煤炭清洁高效转化领域的国家级重点实验室、国家技术创新中心、国家工程研究中心、国家能源研发中心等研发平台建设。集聚科研院所、高校、优势企业的创新资源，完善能源科技攻关体系，围绕水资源减量消耗、CO<sub>2</sub>减排、

产品附加值提升等关键目标，构建原创技术策源地和产业链“链长”。推动“煤炭清洁高效利用”科技重大项目、相关重点攻关任务的高质量实施，以科技创新能力的显著提升来驱动煤炭清洁高效转化行业的高质量发展。

#### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** September 6, 2022; **Revised date:** October 24, 2022

**Corresponding author:** Yan Xiaohui is a senior engineer from Science and Technology Department, China Energy Investment Corporation. His major research fields include energy development strategies and technology management. E-mail: xiaohui.yan@chnenergy.com.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering projects “Energy Strategies (2035)” (2019-ZD-20) and “Promoting the Assessment on Construction Process and the Research on Development Strategies of Modern Energy System” (2022-XZ-33)

#### 参考文献

- [1] 刘朝全, 姜学峰, 吴谋远. 2021年国内外油气行业发展报告 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2022.  
Liu C Q, Jiang X F, Wu M Y. Report on the development of oil and gas industry at home and abroad in 2021 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [2] 张亚雄. 推进“双碳”, 煤炭行业并非夕阳产业 [N]. 光明日报, 2022-07-02(09).  
Zhang Y X. To promote “double carbon”, the coal industry is not a sunset industry [N]. Guangming Daily, 2022-07-02(09).
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. “十四五”现代能源体系规划 [EB/OL]. (2022-01-29)[2022-07-15]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zc/fb/ghwb/202203/t20220322\\_1320016.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zc/fb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html?code=&state=123).  
National Development and Reform Commission. The 14th Five Year Plan for modern energy system [EB/OL]. (2022-01-29)[2022-07-15]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zc/fb/ghwb/202203/t20220322\\_1320016.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zc/fb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html?code=&state=123).
- [4] 新华网. 中共中央 国务院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 [EB/OL]. (2021-10-24)[2022-07-15]. [http://www.news.cn/2021-10/24/c\\_1127990632.htm](http://www.news.cn/2021-10/24/c_1127990632.htm).  
Xinhua Net. The opinions of the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council on the complete, accurate and comprehensive implementation of the new development concept to do a good job of carbon peaking and carbon neutrality [EB/OL]. (2021-10-24)[2022-07-15]. [http://www.news.cn/2021-10/24/c\\_1127990632.htm](http://www.news.cn/2021-10/24/c_1127990632.htm).
- [5] 谢克昌. “乌金”产业绿色转型 [J]. 中国煤炭工业, 2016 (2): 6-7.  
Xie K C. Green transformation of “black gold” industry [J]. China Coal Industry, 2016 (2): 6 - 7.
- [6] 谢克昌. 中国煤炭清洁高效可持续开发利用发展战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
Xie K C. Research on the development strategy of clean, efficient

- and sustainable development and utilization of coal in China [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [7] 谢克昌. 让煤炭利用清洁高效起来 [N]. 人民日报, 2020-09-22(20).  
Xie K C. Make coal utilization clean and efficient [N]. People's Daily, 2020-09-22(20).
- [8] 中国经济网. 乌金赋能 [EB/OL]. (2022-09-08)[2022-09-30]. [http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202209/08/t20220908\\_38091193.shtml](http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202209/08/t20220908_38091193.shtml).  
China Economic Net. Black gold endows energy. [EB/OL]. (2022-09-08)[2022-09-30]. [http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202209/08/t20220908\\_38091193.shtml](http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202209/08/t20220908_38091193.shtml).
- [9] 卫小芳, 王建国, 丁云杰. 煤炭清洁高效转化技术进展及发展趋势 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 409-416.  
Wei X F, Wang J G, Ding Y J. Progress and development trend of clean and efficient coal utilization technology [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 409-416.
- [10] 孙旭东, 张蕾欣, 张博. 碳中和背景下我国煤炭行业的发展与转型研究 [J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 1-6.  
Sun X D, Zhang L X, Zhang B. Research on the coal industry development and transition in China under the background of carbon neutrality [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(2): 1-6.
- [11] 孙旭东, 张博, 彭苏萍. 我国洁净煤技术 2035 发展趋势与战略对策研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 132-140.  
Sun X D, Zhang B, Peng S P. Development trend and strategic countermeasures of clean coal technology in China toward 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 132-140.
- [12] 中国煤炭工业协会. 2021 煤炭行业发展年度报告 [R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2022.  
China Coal Industry Association. 2021 annual report on coal industry development [R]. Beijing: China Coal Industry Association, 2022.
- [13] 中国煤炭工业协会. 2020 煤炭行业发展年度报告 [R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2021.  
China Coal Industry Association. 2020 annual report on coal industry development [R]. Beijing: China Coal Industry Association, 2021.
- [14] 中国煤炭工业协会. 2019 煤炭行业发展年度报告 [R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2020.  
China Coal Industry Association. 2019 annual report on coal industry development [R]. Beijing: China Coal Industry Association, 2020.
- [15] 中国煤炭工业协会. 2018 煤炭行业发展年度报告 [R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2019.  
China Coal Industry Association. 2018 annual report on coal industry development [R]. Beijing: China Coal Industry Association, 2019.
- [16] 杨芊, 颜丙磊, 杨帅. 现代煤化工“十三五”中期发展情况分析 [J]. 中国煤炭, 2019, 45(7): 77-83.  
Yang Q, Yan B L, Yang S. Development situation analysis on modern coal chemical industry in middle period of the 13th Five-Year Plan [J]. China Coal, 2019, 45(7): 77-83.
- [17] 中国青年网. 神华宁煤集团每年 400 万吨煤炭间接液化项目建设纪实 [EB/OL]. (2016-12-28)[2022-07-15]. [http://news.youth.cn/gn/201612/t20161228\\_8992271\\_1.htm](http://news.youth.cn/gn/201612/t20161228_8992271_1.htm).  
Youth.cn. Construction record of 4 million tons coal indirect liquefaction project of Shenhua Ningxia Coal Group [EB/OL]. (2016-12-28)[2022-07-15]. [http://news.youth.cn/gn/201612/t20161228\\_8992271\\_1.htm](http://news.youth.cn/gn/201612/t20161228_8992271_1.htm).
- [18] 国家能源局. 百万吨级煤直接制油系列关键装备国产化 [EB/OL]. (2019-05-06)[2022-07-15]. [http://www.nea.gov.cn/2019-05/06/c\\_138037326.htm](http://www.nea.gov.cn/2019-05/06/c_138037326.htm).  
National Energy Administration. Localization of key equipment for direct oil production from million ton coal [EB/OL]. (2019-05-06)[2022-07-15]. [http://www.nea.gov.cn/2019-05/06/c\\_138037326.htm](http://www.nea.gov.cn/2019-05/06/c_138037326.htm).
- [19] 中国税务网. “十三五规划”减税政策或将影响化工行业 [EB/OL]. (2016-03-14)[2022-07-15]. <https://www.chinaacc.com/shuishou/csxz/zh1603144014.shtml>.  
China Taxation Network. The 13th Five-Year Plan tax reduction policy may affect the chemical industry [EB/OL]. (2016-03-14)[2022-07-15]. <https://www.chinaacc.com/shuishou/csxz/zh1603144014.shtml>.
- [20] 严晓辉, 袁明, 李井峰, 等. 基于层次分析法的现代煤化工综合利用效能评估方法研究与建议 [J]. 中国煤炭, 2022, 48(7): 137-143.  
Yan X H, Yuan M, Li J F, et al. Research and suggestion on evaluation method of comprehensive utilization efficiency of modern coal chemical industry based on analytic hierarchy process [J]. China Coal, 2022, 48(7): 137-143.
- [21] 谢克昌. “十四五”期间现代煤化工发展的几点思考 [J]. 煤炭经济研究, 2020, 40(5): 1.  
Xie K C. Some thoughts on the development of modern coal chemical industry during the 14th Five-Year Plan period [J]. Coal Economic Research, 2020, 40(5): 1.
- [22] 胡迁林, 赵明. “十四五”现代煤化工发展思考 [J]. 中国煤炭, 2021, 47(3): 1-8.  
Hu Q L, Zhao M. Thinking on the development of modern coal chemical industry during the 14th Five Year Plan period [J]. China Coal, 2021, 47(3): 1-8.