煤科院煤化工分院建院65周年专栏（Ⅰ）

移动阅读

王晓磊，陈贵锋，李文博，等. 双碳背景下煤炭清洁高效利用方向构建［J］. 煤质技术，2021，36(6):1-5.
WANG Xiaolei，CHEN Guifeng，LI Wenbo，et al. Construction of clean and efficient utilization direction of coal under the background of Double Carbon［J］. Coal Quality Technology，2021，36（6）：1-5.

双碳背景下煤炭清洁高效利用方向构建

王晓磊[1,2,3]，陈贵锋[1,2,3]，李文博[1,2,3]，黄 澎[1,2,3]，王乃继[2,3,4]

（1. 煤炭科学技术研究院有限公司 煤化工分院，北京 100013；2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室，北京 100013；
3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室，北京 100013；4. 煤科院节能技术有限公司，北京 100013）

摘 要：在双碳目标的背景下，基于我国以煤为主的能源结构和基本国情，煤炭清洁高效利用是实现能源转型的必由之路和首要任务，同时也是保障我国能源安全的基石。煤炭利用形成了集合理利用、转化和污染物控制为一体的洁净煤技术体系，虽已取得重大进展，但在推广应用中仍面临转化过程基础理论、工艺优化等核心问题探索以及解决反应器放大、系统集成等重大工程技术难题。建议从国家层面加强顶层设计，在煤制液体燃料及化工品、煤炭气化、煤炭高效燃烧和污染物控制及碳减排等4个方向进行攻关，从理论探索、核心技术开发、工程应用技术等方面解决煤炭利用过程中的效率、污染控制和碳排放问题，进一步推动低能耗、低水耗、低成本、低排放的煤炭清洁高效转化以及煤炭分质分级利用，从而推动煤炭利用实现“零污染物排放、零碳排放”。

关键词：煤炭清洁高效利用；煤制液体燃料；化工品；煤炭气化；煤炭高效燃烧；污染物控制；碳减排

中图分类号：TQ536；F426.21 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-7677（2021）06-001-05

Construction of clean and efficient utilization direction of coal under the background of Double Carbon

WANG Xiaolei[1,2,3]，CHEN Guifeng[1,2,3]，LI Wenbo[1,2,3]，HUANG Peng[1,2,3]，WANG Naiji[2,3,4]

（1. *Beijing Research Institute of Coal Chemistry*，*China Coal Research Institute Corporation Ltd.*，*Beijing* 100013，*China*；2. *State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization*，*Beijing* 100013，*China*；3. *National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control*，*Beijing* 100013 *China*；4. *China Coal Research Institute Company of Energy Conservation*，*Beijing* 100013，*China*）

Abstract：Under the background of Double Carbon goal，based on China’s coal based energy structure and basic national conditions，clean and efficient utilization of coal is not only the only way and primary task to realize energy transformation，but also the cornerstone to ensure China’s energy security. Coal utilization has formed a clean coal technology system integrating rational utilization，conversion and pollutant control. Although significant progress has been made，it still faces core problems such as basic theory of conversion process and process optimization in popularization and application，as well as major engineering and technical problems such as reactor amplification and system integration. It is suggested that the top-level design needs to be strengthened at the national level，key problems should be solved in four directions：coal to liquid fuel and chemicals，coal gasification，efficient coal combustion，

收稿日期：2021-08-24 **责任编辑**：傅 丛 **DOI**：10.3969/j.issn.1007-7677.2021.06.001
基金项目：国家重点研发计划资助项目（2019YFE0103300）
作者简介：王晓磊（1984—）女，内蒙赤峰人，副研究员、硕士，主要研究方向为煤炭清洁高效利用。E-mail：wxl_ stone@163.com

pollutant control and carbon emission reduction, so as to solve the problems of efficiency, pollution control and carbon emission in the process of coal utilization from the theoretical exploration of core technology development, engineering application technology and other aspects. Coal clean and efficient transformation and coal classified utilization with low energy consumption, low water consumption, low cost and low emission should be further promoted, in order to realize the "zero pollutant emission and zero carbon emission" for coal utilization.

Key words: clean and efficient utilization of coal; coal to liquid fuel; chemicals; coal gasification; high efficient combustion of coal; pollutant control; carbon emission reduction

0 引 言

我国能源结构正向绿色低碳转型，但煤炭作为主体能源地位在短期内难以改变。在双碳目标的背景下，我国加速构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系，绿色能源转型与保障能源安全两者相互关联，煤炭作为可再生能源平抑波动的稳定器，相当长的时期内将与可再生能源相互依存，并支撑可再生能源的大规模消纳需求[1-2]。

我国是全球最大的能源生产和消费国。近年来，我国油气对外依存度持续上升，能源安全面临严峻挑战。2020 年，我国原油和天然气对外依存度分别为 73% 和 43%[3]，我国煤炭占一次能源消费比重 56.8%。据预测，到 2030 年我国煤炭占一次能源消费的比重仍将约达 50%。煤炭是我国能源供应的"稳定器"和"压舱石"，起到兜底保障作用[4]。

煤炭在补充石油不足、缓解石油对外依存度方面发挥了重要作用。煤炭通过转化可以生产 90% 以上的燃料油和化工产品，近年来煤液化、煤制烯烃等技术产业化，具备了替代 5% 进口石油的能力，预计未来 10 年左右其替代能力将达 10%，煤炭正在由燃料为主向作为原料转变。

煤炭转化可以实现煤炭的清洁高效低碳利用[1]。煤直接液化与煤制天然气的能效分别达 58%、60%；煤炭转化产生的 CO_2 浓度高，利于 CO_2 的捕集及无害化处置；在转化过程中，煤中硫转变成硫磺，得到资源化利用；煤制烯烃等化学品可将碳固定在产品中，从而实现减碳。燃煤发电供热可以实现超低排放。目前，我国建成一批大容量、高参数煤电超（超）临界机组，装机比例超过 10%，形成全球最大的煤电供应体系，污染物排放可达天然气标准。

综上所述，煤炭清洁利用已取得重大进展，是保障我国能源安全的基石[5-6]。但现实推广应用中煤炭清洁利用也面临着重大科学和技术问题，需加强顶层设计[7]并从国家层面对其利用方向进行构建。

1 煤炭清洁利用面临的科学和技术问题

根据中国煤炭工业协会《2020 煤炭行业发展年度报告》，目前我国建成投运各种大型气化炉 320 多台(套)，形成煤制油产能 931 万 t、煤制气产能 51.05 亿 Nm^3、煤制烯烃产能 1 582 万 t、煤制乙二醇 489 万 t、煤制合成氨产能 6 000 多万 t[8]。传统粗放的煤炭利用方式是 SO_2、NO_x 和 CO_2 等排放的主要来源，必须改变现有的利用方式，促使煤炭利用向高效率、近零污染和低碳排放的清洁高效利用的方式转变。煤炭清洁利用主要包括两大途径：①高效率超低排放的供热和发电；②由燃料向原料转变，生产清洁的油气产品、大宗化工新材料和精细化学品，同时推动煤炭转化与可再生能源联合制氢、制材料和化学品等。

煤炭清洁利用的核心是解决煤炭利用过程中的效率、污染控制和碳排放问题，需要从理论探索、核心技术开发、工程应用技术等方面开展研究。

我国煤炭利用的基础理论探索、部分关键核心技术及装备研制等方面与国际先进水平仍有较大差距，亟需攻关突破与进一步节能提效，以达低碳、节水以及降低成本之功效。火力发电领域灵活燃烧发电、整体煤气化联合发电(IGCC)均为清洁低碳需解决的关键技术问题。此外，各种反应器与燃烧器的研发设计、新材料研究、大型装备与系统集成等重大工程技术问题和大型科学仪器、表征手段等也是煤炭清洁高效利用的发展趋势[9-10]。煤炭清洁高效利用面临的重大科学问题主要包括以下 5 个方面：

(1) 煤炭清洁转化的过程调控机理、反应路径、产物定向转化、分子裁剪等基础理论；

(2) 催化剂界面结构调控催化特性、高碳大分子高效低碳转化相关的碳碳键、碳氢键活化机制；

(3) 各种蒸馏、精馏、加氢、裂化等关键反应和分离装备的过程强化、设计方法和放大准则；

(4) 单元技术耦合集成系统技术的工程科学；

(5) 煤清洁转化利用过程污染物产生和控制机制。

2　煤炭清洁高效利用方向

2.1　总体目标

瞄准我国可再生的清洁能源短缺、油气对外依存度高、大宗化工材料大量依靠进口等经济社会发展重大需求，聚焦煤炭转化、煤炭高效燃烧和污染物控制及碳减排等相关领域，开展探索性、基础性、战略性研究，从原理层面解决煤炭利用碳排放和燃烧污染物排放控制问题，提供以煤为基础的清洁能源生产与利用技术、以煤为基础的高端材料制造技术，从而推动煤炭利用实现“零污染物排放、零碳排放”。

2.2　重点攻关方向

在 2030 年前“碳达峰”的历程中，煤炭清洁高效利用的重要作用在于保障可持续发展中减碳，从而在现有及未来的能源结构体系之间实现柔性的可持续转变[11]。基于此，煤炭清洁高效利用将重点在煤制液体燃料及化工品、煤炭气化、煤炭高效燃烧和污染物控制及碳减排等 4 个方向攻关。煤炭清洁高效利用方向架构如图 1 所示。

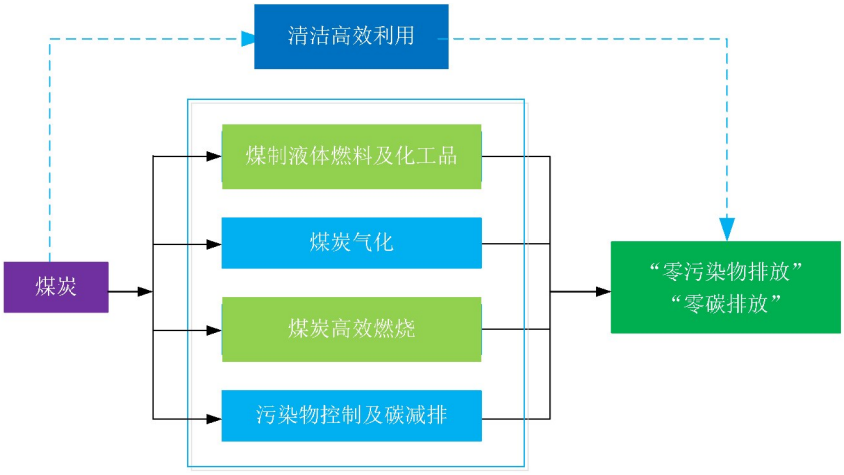

图 1　煤炭清洁高效利用方向架构

Fig. 1　Construction framework of clean and efficient utilization of coal

2.2.1　煤制液体燃料及化工品

煤液化制油是保障我国能源供给、能源安全以及改善能源结构的战略性举措，可有效缓解我国能源安全带来的挑战，已成为我国能源安全战略的重要组成部分；由于煤基油品具有大比重、高热值、高热容、高热安定性、低凝点、富含高张力笼状烃类物质等特点，相比于石油基油品，煤基油品更适于制备航空煤油等高能特种燃料；煤制化工品可将煤中碳转移到液体产品中，从而减少碳排放。

煤炭液化包括直接液化和间接液化，两者均实现了百万吨级工业示范，相关设备大部分已实现国产化，但在反应过程优化、催化剂性能提升、产物精细化和高质化利用、降低水耗能耗以及固废资源化利用等方面仍有较大提升空间；煤制化工品需进一步降低水耗和能耗，实现产品的灵活调变；煤转化与可再生能源制氢的大规模耦合刚起步，还需在系统规模匹配、稳定运行配合、工艺优化方面加强研究[12-14]。

攻关内容：突破富油煤全过程高效利用关键技术装备，攻克 1 批煤炭液化及低阶煤分质分级利用关键技术，发挥煤液化油品特点，研发高端特种燃料和高附加值化工产品及功能化学品；延伸煤制烯烃、乙二醇等多元化、差异化产业链，开展煤基生物可降解材料项目示范[14]，建设煤转化与可再生能源制氢耦合示范工程。

2.2.2　煤炭气化

煤气化技术是煤炭清洁高效转化的龙头技术。近年来，多喷嘴对置式水煤浆气化技术、水煤浆水冷壁废锅煤气化技术、东方炉粉煤气化技术、航天粉煤加压气化技术、“神宁炉”干煤粉气化技术等逐步实现自主化，已进入大型化、长周期运行阶段。但现有技术和装备与国际先进技术相比仍有差距，在双高煤（高灰分、高灰熔融性）适应性、装置可靠性、进一步大型化、降低投资和运行成本等方面仍有较大发展空间[15-17]。

攻关内容：系统掌握煤气化过程中污染物迁移转化机理，拓宽对难气化原料煤和复杂原料的适应性，开发 5 000 t/d 大型气化炉，单位有效气成本降低 20%，突破催化气化、加氢气化等新型煤气化关键技术并优化工艺，降低装置投资和运行成本。

2.2.3 煤炭高效燃烧

高效煤粉燃烧技术及煤粉工业锅炉系统已日趋成熟，可使工业锅炉热效率达 90% 以上[18]，但技术产品相对单一；火电企业要求煤电实现深度调峰、提高机组运行灵活性；在发达国家较为成熟的生物质与矿物燃料耦合燃烧技术也面临燃烧效率低等问题[19]。煤炭高效燃烧需向绿色、低碳、智能化等方向转型，通过先进煤炭燃烧技术，从燃料源头降碳、燃烧中提高能效，实现燃烧技术体系升级革新，部分替代分布式能源领域天然气，达到与天然气相当的燃烧和减排作用[20]。

攻关内容：研发新型煤炭清洁燃烧技术，建成百万吨级“固体天然气”制备示范工程，碳排放强度降低 50% 以上，其中固体天然气指燃烧和排放特性与天然气相同的人工粉体燃料；开发以煤基燃料为主的高效燃烧技术，系统综合热效率达到 98% 以上，烟气污染物达到近零排放；在分布式用能领域实现替代天然气燃料 500 亿 m^3。

2.2.4 污染物控制及碳减排

现代煤化工污染物控制技术有待进一步提升，如煤化工废水处理技术存在瓶颈，并未实现真正意义上的“零排放”[21-22]。而日益严格的环保要求燃煤过程中的烟尘、SO_2 和 NO_x 同时达到零排放；工业窑炉烟气量较小，现有脱硫脱硝技术投资及运行成本高，亟需开发 1 种投资、运行成本低的脱硫脱硝一体化新工艺技术及装备；大量煤化工含盐废水及高有机物含量、高复杂有机物成分的浓盐废水亟需低成本的资源化利用技术[23-24]。现有低碳/脱碳技术无法支撑我国实现“碳中和”目标，CCS、CCUS 技术仍为碳减排研究的主要攻关技术之一。

攻关内容：研发高效污染物脱除技术、多污染物协同控制技术，实现工业窑炉烟气中尘、硫、硝和重金属污染物等一体化脱除；突破煤化工高盐废水、高浓有机废水深度处理技术，实现废水零排放；研发煤化工“三废”资源化利用技术，建立绿色现代化煤化工产业体系；有效推进甲烷和 CO_2 自热重整制合成气、CO_2 催化转化制高值化学品和燃料等资源化利用技术，同时通过工艺优化、提高能效等措施，尽可能减少 CO_2 排放量。

3 结 语

经过 20 多年的快速发展，中国的煤炭转化技术正加速迈向清洁高效低碳方向，煤化工产业向高端化、多元化、低碳化发展，燃煤发电供热追求超低排放、极致高效，燃煤工业锅炉污染物排放也可达到超低排放标准，充分说明煤炭可以被清洁高效利用。

煤炭清洁高效利用是我国“碳中和”历程中不可或缺的板块。不同来源的能源消费预测均指出，未来几十年我国能源结构仍将持续富煤、缺油、少气的格局，在进行关键核心技术攻关和颠覆性技术创新的同时，重视已有利用方式的更新，提高煤炭作为化工原料的综合利用效能，从而推进我国煤炭由基础能源向主要能源和兜底保障转变，加速清洁高效、安全低碳的现代能源体系的建设，从而高质量保障我国能源安全和能源清洁供应。

参考文献（References）：

[1] 王国法. 碳中和目标下，煤炭的坚守与转身 [N]. 中国煤炭报，2021-02-06.

[2] 朱妍，仲蕊. 中国工程院院士谢克昌：节能提效才是减碳第一优选 [N]. 中国能源报，2021-05-17.

[3] 金雅宁，倪正，田喆，等. 碳中和愿景目标对油气行业的挑战与机遇 [J]. 石油化工技术与经济，2021，37（1）：1-6.
JIN Yaning，NI Zheng，TIAN Zhe，et al. Chanllenges and Opportunities of the Carbon Neutral Vision and Goals to the Oil and Gas Industry [J]. Technology & Economics in Petrochemicals，2021，37（1）：1-6.

[4] 陈浮，于昊辰，卞正富，等. 碳中和愿景下煤炭行业发展的危机与应对 [J]. 煤炭学报，2021，46（6）：1808-1820.
CHEN Fu，YU Haochen，BIAN Zhengfu，et al. How to handle the crisis of coal industry in China under the vision of carbon neutrality [J]. Journal of China Coal Society，2021，46（6）：1808-1820.

[5] 门卓武，李初福，李井峰. 现代煤化工技术开发的机遇与方向 [J]. 能源科技，2020，18（8）：60-62.
MEN Zhuowu，LI Chufu，LI Jingfeng. Opportunities for and Directions of Modern Coal Chemical Technology Development [J]. Energy Science and Technology，2020，18（8）：60-62.

[6] 徐振刚. 中国现代煤化工近 25 年发展回顾·反思·展望 [J]. 煤炭科学技术，2020，48（8）：1-25.
XU Zhengang. Review，rethink and prospect of China’s modern coal chemical industry development in recent 25 years [J]. Coal Science and Technology，2020，48（8）：1-25.

[7] 刘中民. 现代煤化工行业有必要加强顶层设计 [N]. 中国能源报，2021-02-01.

[8] 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，2021：1-35.

[9] 谢克昌. 加强关键技术创新，推进煤化工高端化[C]//2019 第八届中国国际煤化工发展论坛. 北京：中国石油和化学工业联合会，2019.

[10] 安斌. 反应器改进对煤热解工艺的影响及其研究现状[J]. 煤质技术，2020，35（1）：18-23.
AN Bin. Effect of reactor improvement on coal pyrolysis process and the research status[J]. Coal Quality Technology，2020，35（1）：18-23.

[11] 中国煤炭网. 煤化工在“碳中和”历程中不可或缺[EB/OL]. http://www.ccoalnews.com/news/202108/24/c148257.html.

[12] 陈贵锋，李振涛，罗腾. 现代煤化工技术经济及产业链研究[J]. 煤炭工程，2014，46（10）：68-71.
CHEN Guifeng，LI Zhentao，LUO Teng. Research on Technology Ecomomic and Industrial Chain of Chain of Modern Coal Chemistry Industry[J]. Coal Engineering，2014，46（10）：68-71.

[13] 张锁江. 煤制高附加值化学品绿色工艺[C]//2019 第八届中国国际煤化工发展论坛. 北京：中国石油和化学工业联合会，2019.

[14] 王明华. 新发展格局下现代煤化工产业面临的挑战与对策研究[J]. 中国煤炭，2021，47（1）：99-102.
WANG Minghua. Research on the challenges and countermeasures of modern coal chemical industry under the new development pattern[J]. China Coal，2021，47（1）：99-102.

[15] 程晓磊，张鑫. 现代煤气化技术现状及发展趋势综述[J]. 煤质技术，2021，36（1）：1-9.
CHENG Xiaolei，ZHANG Xin. Summary of present situation and development trend of modern coal gasification technology[J]. Coal Quality Technology，2021，36（1）：1-9.

[16] 李广民，丁满福. 煤气化关键技术和装备创新路径解析[J]. 中国化工装备，2021（5）：3-6.
LI Guangmin，DING Manfu. Analysis of Key Technology and Equipment Innovation Path of Coal Gasification[J]. China Chemical Industry Equipment，2021（5）：3-6.

[17] 王辅臣. 煤气化技术在中国：回顾与展望[J]. 洁净煤技术，2020，26（6）：243-247.
WANG Fuchen. Coal gasification technologies in China：Review and prospect[J]. Clean Coal Technology，2020，26（6）：243-247.

[18] 牛芳. 我国煤粉工业锅炉技术及应用推广现状分析[J]. 煤质技术，2020，35（4）：6-12.
NIU Fang. Current status and development trend of pulverized coal industrial boiler in China[J]. Coal Quality Technology，2020，35（4）：6-12.

[19] 张世鑫，邱国华，刘海峰，等. 煤和生物质、固废直燃耦合发电技术应用[C]//2021 年全国能源环境保护技术论坛. 宁波：中国煤炭学会环境保护专业委员会、杭州研究院，2021：74-83.

[20] 吕清刚，李诗媛，黄粲然. 工业领域煤炭清洁高效燃烧利用技术现状与发展建议[J]. 中国科学院院刊，2019，34（4）：392-400.
LYU Qinggang，LI Shiyuan，HUANG Canran，Current Situation and Development Suggestions of Coal Clean and Efficient Combustion Technology in Industry Field[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences，2019，34（4）：392-400.

[21] 孙磊磊，刘志学，吴琼慧，等. 现代煤化工污染治理技术分析与环境管理政策建议[J]. 煤质技术，2019，34（3）：1-6.
SUN Leilei，LIU Zhixue，WU Qionghui，et al. Technological analysis and environmental management policy suggestions of modern coal chemical industry pollution management[J]. Coal Quality Technology，2019，34（3）：1-6.

[22] 夏立全，陈贵锋，李文博，等，焦化废水处理技术进展与发展方向[J]. 洁净煤技术，2020，26（4）：56-63.
XIA Liquan，CHEN Guifeng，LI Wenbo，et al. Progress and perspectives of coking wastewater treatment technology[J]. Clean Coal Technology，2020，26（4）：56-63.

[23] 韦锋涛，贾铭椿，王晓伟，等. 高含盐废水浓缩处理技术研究进展[J]. 现代化工，2019，39（9）：21-25.
WEI Feng-tao，JIA Ming-chun，WANG Xiao-wei，et al. Research progress in concentration treatment technologies for high salinity wastewater[J]. Modern Chemical Industry，2019，39（9）：21-25.

[24] 齐亚兵，张思敬，杨清翠. 煤化工高含盐废水处理技术研究进展[J]. 应用化工，2021，50（8）：2303-2308.
QI Ya-bing，ZHANG Si-jing，YANG Qing-cui，Research progress on high-salinity wastewater treatment technologies in coal chemical industry[J]. Applied Chemical Industry，2021，50（8）：2303-2308.