

“双碳”背景下内蒙古煤炭清洁高效利用的重要方向和先进支撑技术

王明培 刘一杨

摘要：“双碳”目标下，煤炭仍是我国主体能源，发挥着不可替代的能源“压舱石”作用。内蒙古作为国家重要能源和战略资源基地，赋存有丰富的煤炭资源，以煤炭清洁高效利用为实现“双碳”目标的重要技术途径，既保障了国家能源安全稳定供应，也促进了全区绿色低碳高质量发展。为构建煤炭全链条清洁高效利用体系，以深部煤炭资源绿色开发、煤电改造升级及新技术应用、煤化工高值化发展、煤基固废资源化利用以及产生二氧化碳大规模低成本处置的兜底技术等方面为主要方向，以先进代表性技术为支撑，协同发力实现“双碳”背景下内蒙古煤炭的清洁高效利用，助推自治区经济的稳定持续增长以及煤炭工业的绿色低碳高质量发展。

关键词：“双碳”目标 煤炭清洁高效利用 内蒙古 国家重要能源和战略资源基地

煤炭是一种重要的能源，为人类社会的可持续发展提供了强有力的支撑，也带来了一系列环境问题。站在全球角度，越来越多的国家开始减量、退出煤炭的使用，在 2050 年前，英国、德国、韩国、波兰等国家将陆续停止燃煤发电，关闭煤矿，我国也于 2021 年提出，大力支持发展中国家能源绿色低碳发展，不再新建境外煤电项目。但从国家现实分析，我国对煤炭仍然存在依赖，据预测，2030 年到 2035 年，我国能源消费将达到峰值 60 亿吨左右标煤，其中煤炭消费占比仍会维持较高水平。但是近年来，煤炭消费占比逐年下降，煤炭的原料属性逐步凸显。此外，煤炭利用产生的碳排约占国家的 70% 左右。因此，煤炭的清洁高效利用是支撑实现“双碳”目标的重要技术途径。

自治区凝心聚力、做深做实习近平总书记交给内蒙古的“五大任务”，加快建设国家重要能



源和战略资源基地，现已形成完整的煤炭、煤电、煤化工产业，其中，内蒙古煤炭资源、煤炭产能、电力装机均居全国第一，煤制烯烃、煤制气产能全国第一，煤制油、煤制乙二醇产能全国第二，煤炭产量暂居全国第二。同时，内蒙古积极落实“双碳”目标，提出到 2025 年，煤炭消费比重下降至 75% 以下。为实现能源保供与降碳减排的目标，内蒙古要从深部煤炭资源绿色开发、煤电改造升级及新技术应用、煤化工高值化发展、煤基固废资源化利用以及产生二

氧化碳大规模低成本处置的兜底技术等煤炭产业全链条流程统筹考虑，推动煤炭清洁高效利用，做好现代能源经济这篇大文章。

一、深部资源绿色开发

内蒙古埋深 1000-2000m 煤炭资源量占全区 2000m 以浅资源量的 80%，而目前技术水平条件下煤炭井工开采的极限深度为 1500m。资源开采在进入深部开采后将面临更大的安全、环境、经济及技术难题。因此，针对内蒙古丰富的深层煤炭资源，需要探索一条绿色高效安全的开发利用路径。

内蒙古乌兰察布、鄂尔多斯已相继进行了煤炭地下气化项目的工程示范。其中，鄂尔多斯市的中为能源煤炭地下气化技术唐家会矿区示范项目于 2020 年 3 月取得了科技厅颁发的《科学技术成果登记证书》。总体上，唐家会示范项目取得了良好的示范

效果，展示了煤炭地下气化技术的可行性，实现了气化工艺的稳定运行控制，获得了稳定的组分特征，证实了技术的环境友好。

在内蒙古推动该项技术规模化、产业化发展，一是将有助于内蒙古打造更大规模的国家天然气生产基地；二是提升煤化工产业竞争力；三是实现煤炭生产利用过程的环境友好，减少了固废外排，避免了井工开采瓦斯的排放，节约了水资源。

二、煤电改造升级及新技术应用

大力推动煤电清洁高效低碳发展是构建现代能源体系、保障能源安全、实现“双碳”目标的必然途径。目前，我国发电和供热行业二氧化碳排放量占全国排放量的比重超过40%，而内蒙古则占到了60%以上，是二氧化碳排放的重点行业。

（一）存量煤电改造升级

对于存量煤电，要通过三改联动进行改造升级。一是节能降耗改造。节能是前提，可降低煤电机组度电煤耗和二氧化碳排放；对于供电煤耗在300克标准煤/千瓦时以上的煤电机组，应加快创造条件实施节能改造。二是供热改造。积极关停采暖和工业供汽小锅炉，对具备供热条件的纯凝机组开展供热改造，提高能源利用率。三是灵活性改造。存量煤电机组灵活性改造应改尽改，适应未来大比例风光发电情况下火电机组的调峰需求，增加

发电调峰灵活性。

（二）增量煤电推广应用新技术

对于增量煤电，可推广新型先进燃煤发电技术。以超临界水蒸煤制氢热电多联产技术为例，与传统燃煤发电技术的“三低、两高”对比，具有“三高、两低”的优势。一是传统燃煤系统能效45%左右，如增加碳捕集，则降低至35%以下，而水蒸煤技术系统能效达到50%，制氢效率达到80%；二是传统燃煤发电逐步由支撑性电源转变为调节性电源后，年利用小时数有可能将降至2000小时，而水蒸煤技术可根据实际需求在发电、制氢之间进行转换，大幅提升机组利用时效；三是燃煤电厂排放出的二氧化碳浓度约为15%，捕集成本高达300-400元，而水蒸煤技术可直接产生90%以上的高浓度二氧化碳，可显著降低捕集成本；四是水蒸煤技术水耗大幅低于传统燃煤机组；五是燃煤机组每千瓦投资约3500元，而水蒸煤技术可降低20%的投资。此外，燃煤机组需要脱硫脱硝除尘，而水蒸煤技术不会直接向大气排放硫、氮，无硫无硝无焦无尘。

三、煤化工高值化发展

发展现代煤化工是实现煤炭清洁高效利用的必由之路。在“双碳”大背景下，内蒙古煤化工主要发展方向包括煤化工与新能源耦合、煤基新材料等。

（一）煤化工与新能源耦合

内蒙古提出，“十四五”末，可再生能源发电装机达到1.35亿千瓦以上，绿氢供给能力超过48万吨。“十五五”末，可再生能源发电装机突破3亿千瓦，仅鄂尔多斯市绿氢供应能力将达到100万吨。利用内蒙古丰富的绿电、绿氢资源与煤化工产业耦合，打造内蒙古绿色低碳化工产业。

目前，我国煤化工主要技术路径的碳利用率（化工产品含碳量与生产过程中消耗碳的比值）大约在30%左右，其余70%的碳主要排放到了大气中，成为温室气体。因此，需要推动灰氢转绿、以氢换煤、绿氢消碳，实现加氢减煤、减碳增效。

内蒙古主要煤化工产品为甲醇、乙二醇、乙烯、煤制油气等，每吨产品排放二氧化碳在3-10吨之间。如果通过绿电、绿氢替代，减少公用工程碳排与变换反应负荷，碳利用率可提高到70%左右，1吨绿氢可减排二氧化碳20吨左右；如采取绿电、绿氢制备合成氨，则可实现零碳排放。

（二）煤基新材料

2022年，我国风电和光伏发电装机容量分别占世界的41.2%和37.2%；锂离子电池产量750GWh，同比增长130%，约占全球市场的59.4%；正极材料、负极材料、隔膜、电解液等材料产量同比增长均达60%以上。与风机、光伏、储能电池制造相关的碳纤维、电解液、正负极材料吨产品价格均在10万元/吨高位运行。将传统的煤制甲醇烯烃产业链向下游纤

维、聚酯、电解液、正负极材料延伸，契合新能源材料发展热潮，可以实现煤化工产业的高值化发展。

同时，随着近年来环境改善诉求的不断增长和国家塑料污染治理力度持续加大，我国可降解材料产业迎来了重大的发展机遇。将传统的煤制甲醇产业向下游延伸，制成可降解塑料，能够显著提升煤炭的资源效益、经济效益、环境效益、减排效益。

四、煤基固废资源化利用

煤炭生产、利用过程中会产生占煤炭总量 15% 左右的固体废物，包括煤矸石、煤化工气渣、粉煤灰、脱硫石膏、炉渣等，不仅占用土地面积，还会对土壤、大气和水体等周围环境造成污染。以“资源化利用、规模化减量、无害化处置”原则，进行固废削减、处置、利用，提高资源利用效率，是实现碳达峰碳中和的重要途径之一。

一是提取硅铝等有价值元素。煤矸石、粉煤灰等固废中含有较高的氧化铝和二氧化硅。内蒙古鄂尔多斯市高铝粉煤灰中蕴藏的氧化铝资源非常丰富，立足当地铝、硅资源及绿电，打造我国铝硅产业基地，开辟新赛道、形成新优势。同时，促进固废和绿电融合消纳。

二是推动固废消纳与盐碱地改良耦合。积极推动荒漠化治理、盐碱地改良与固废资源化利用协同发展，利用亿吨级煤基固

废中含有的丰富有益元素以及亿吨级矿井疏干水，改良土壤，提高农作物质量和产量，在实现生态环境治理的同时，促进固废的规模化消纳，打造资源循环利用新产业。

五、“双碳”兜底技术——CCUS/CCS

内蒙古作为国家重要能源和战略资源基地，仍会消费部分化石能源，产生二氧化碳难以避免。而 CCUS/CCS 作为实现煤炭清洁高效利用的关键兜底技术，可助力全社会实现零碳排放。

一方面，内蒙古有鄂尔多斯盆地、银额盆地、二连盆地、海拉尔盆地，具有广阔的二氧化碳封存空间；另一方面，内蒙古具备良好的源汇匹配条件；同时，内蒙古还拥有一定规模的高浓度二氧化碳。以上优势奠定了内蒙古发展 CCUS/CCS 产业的基础。

内蒙古已完成示范的某集团 CCS 示范项目已累计完成二氧化碳注入封存超过 30 万吨，成本 240 元/吨；计划开展百万吨级的 CCUS 示范项目，预计成本可降至 120 元/吨以内。如利用中石油、中石化等企业拥有的废弃井进行二氧化碳地下封存，有望进一步降低 CCUS/CCS 成本，实现内蒙古二氧化碳大规模低成本处置。

煤炭清洁高效开发利用是内蒙古能源基地建设的重中之重，对保障国家能源安全，产业链供应链安全具有重要意义。因

此，要积极稳妥推动煤炭清洁高效利用，绿色高效开发丰富深部煤炭资源，稳步推进煤电机组“三改联动”，推动煤电由常规主力电源向基础保障性和系统调节性电源并重转型，加快煤炭由单一燃料向原料和燃料并重转变，加强固废资源化利用，提高资源利用效率，建立健全绿色低碳循环发展经济体系，提前布局二氧化碳大规模低成本处置的兜底技术——CCUS/CCS，系统筹划、多措并举实现内蒙古煤炭资源全链条绿色清洁高效开发利用，充分发挥煤炭在“双碳”目标实现中的兜底保障作用。■

参考文献：

- [1] 贾科华.新一轮煤电改造升级启动[N].中国能源报,2021-11-08.
 - [2] 于海江.三改联动 主辅协调[N].中国电力报,2022-06-16.
 - [3] 莫非.《全国煤电机组改造升级实施方案》发布[N].中国电力报,2021-11-04.
 - [4] 谢和平,鞠杨,高明忠,高峰,刘见中,任怀伟,葛世荣.煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系[N].煤炭学报,2018-05-15.
 - [5] 肖伟.“双碳”战略下传统煤电突围路径的思考与实践[J].能源,2022,(8).
 - [6] 尹华雷,张振.燃煤电厂机组调峰与供热节能减排降碳改造探讨[J].中国设备工程,2022,(6).
 - [7] 廖睿灵.全国已投运新型储能项目装机规模达 870 万千瓦[N].人民日报海外版,2023-02-17.
 - [8] 孙绍聘.紧扣落实战略定位服务和融入新发展格局[J].人民周刊,2022,(10).
- (作者单位：鄂尔多斯碳中和研究院)

责任编辑：康伟