



您可能感兴趣的文章、专题：

[“煤矿智能化综述及关键技术”专题](#)

[“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题](#)

[“煤地质与煤结构”专题](#)

[“煤矿安全+智能化”专题](#)

[“深部煤层瓦斯精准抽采”专题](#)

[“中国煤科首席科学家”专题](#)

[“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题](#)

[2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文](#)

[2021《煤炭科学技术》封面文章](#)

[煤炭行业青年科学家论坛\(2021 年\)](#)

## 特约综述



移动扫码阅读

王国法,任世华,庞义辉,等.煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J].煤炭科学技术,2021,49(9):1-8. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.001

WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, *et al.* Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of "dual carbon" target[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9):1-8. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.001

## 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径

王国法<sup>1,2,3</sup>,任世华<sup>3,4</sup>,庞义辉<sup>2</sup>,曲思建<sup>5</sup>,郑德志<sup>3</sup>

(1.中国煤炭科工集团有限公司,北京 100013;2.中煤科工开采研究院有限公司,北京 100013;3.煤炭科学研究总院,北京 100013;  
4.中国矿业大学(北京)管理学院,北京 100083;5.煤炭科学技术研究院有限公司,北京 100013)

**摘要:**煤炭是我国能源体系的基石,长期以来煤炭工业为我国经济社会发展和国家能源安全稳定供应提供了有力保障。回顾“十三五”期间,我国煤炭工业在国家供给侧结构性改革和行业高质量发展政策引导下,不断改革行业发展模式,在煤炭消费革命、供给革命、技术革命、体制革命、国际合作方面取得的丰硕成果和巨大成绩。分析了在“碳达峰,碳中和”目标下,我国煤炭工业面临的任务和挑战,提出基于我国能源资源禀赋和经济社会发展要求,在未来 100 年中,煤炭仍将在我国多能互补现代能源体系中扮演稳定器和压舱石的重要角色,以煤矿智能化为标志的煤炭技术革命、技术创新成为行业发展的核心驱动力,煤炭智能绿色开发与清洁低碳利用是发展主题,煤炭低碳利用技术的颠覆性创新将使煤炭成为最有竞争力的能源和原材料资源。要坚定不移地建设智能化煤矿,淘汰落后产能,发展以煤矿智能化支撑的柔性生产供给体系,发挥煤炭为“双碳”兜底、为能源安全兜底、为国家安全兜底的作用,实现新时期、新煤炭、新格局高质量发展目标。

**关键词:**煤炭革命;能源消费结构;煤矿智能化;碳达峰;碳中和;柔性生产供给体系;清洁低碳利用

中图分类号:TD821

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)09-0001-08

## Development achievements of China's coal industry during the 13th Five-Year Plan period and implementation path of "dual carbon" target

WANG Guofa<sup>1,2,3</sup>, REN Shihua<sup>3,4</sup>, PANG Yihui<sup>2</sup>, QU Sijian<sup>5</sup>, ZHENG Dezhi<sup>3</sup>

(1. China Coal Technology & Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China;  
3. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing,  
Beijing 100083, China; 5. China Coal Research Institute, Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** Coal is the cornerstone of China's energy system. For a long time, the coal industry has provided a strong guarantee for China's economic and social development and the country's safe and stable supply of energy. During the "13th Five Year Plan" period, under the guidance of national supply-side structural reforms and high-quality industry development policies, China's coal industry continued to reform the industry development model, and achieved fruitful results in coal consumption revolution, supply revolution, technological revolution, system revolution and national cooperation. The tasks and challenges faced by China's coal industry under the goal of "carbon's peak and carbon's neutrality" were analyzed, and it was proposed that based on China's energy resource endowment and economic and social development requirements, in the next 100 years, coal would continue to play an important role as stabilizer and ballast in China's multi-energy complementary modern energy system. The coal technology revolution and technological innovation marked by the intelligentization of coal mines have become the core driving force for the development of the industry. The intelligent green development and clean and low-carbon utilization of coal are the development themes. The disruptive innovation of low-carbon utilization technology will make coal the most competitive energy and raw material resource. We must unswervingly build intelligent coal mines, eliminate outdated produc-

收稿日期:2021-02-12;责任编辑:郭鑫

基金项目:中国工程院咨询研究资助项目(2020-XY-11)

作者简介:王国法(1960—),男,山东文登人,中国工程院院士,中国煤炭科工集团首席科学家,博士生导师。E-mail:wanguofa@tdkcsj.com

tion capacity, develop a flexible production, and supply system supported by intelligent coal mines, and give full play to the role of coal as the foundation for “dual carbon”, the foundation for energy security, and the foundation for national security, so as to achieve high-quality development goals in a new era, new coal, and new pattern.

**Key words:** coal revolution; energy consumption structure; coal mine intelligence; peak carbon dioxide emissions; carbon neutrality; flexible production and supply system; clean and low-carbon utilization

## 0 引言

煤炭作为我国工业生产原料和最基础能源,是实现清洁高效利用的最经济、最安全的矿产资源。煤炭是我国主体能源和重要工业原料,不仅为国民经济和社会平稳较快发展提供保障,同样对国家能源安全、稳定供应给予支持<sup>[1-2]</sup>。“十三五”期间,持续推进供给侧结构性改革作为国家持续推进政策的时代背景下,煤炭工业全面落实能源安全新战略,推进自身消费革命、供给革命、技术革命、体制革命、国际合作,全面实施煤炭绿色开采和清洁高效利用,支撑我国能源结构全面优化和多能互补的现代能源体系建设,促进国民经济和社会的高质量发展<sup>[3]</sup>。

面对“CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值,力争2060年前实现碳中和”的目标,煤炭作为我国最重要的基础能源和能源安全的压舱石,必须走智能绿色低碳开发利用创新之路,以煤矿智能化为标志的煤炭技术革命、技术创新成为行业发展的核心驱动力,煤炭资源智能绿色开发与清洁低碳利用是发展主题,技术创新将支撑煤炭资源成为最有竞争力的能源和原材料资源。

## 1 “十三五”煤炭工业发展成效

### 1.1 煤炭消费革命

1) 煤炭清洁高效利用水平大幅提高。煤炭消费总量控制效果明显,占一次能源消费总量的比重持续下降,2020年占比为56.8%<sup>[4]</sup>。建成了全球最大的清洁煤电供应体系,全面开展燃煤电厂超低排放改造。实现超低排放煤电机组超过9亿kW,超过7.5亿kW煤电机组实施节能改造,供电煤耗率逐年降低<sup>[5]</sup>。在超低排放技术的支撑下,燃煤电厂经过改造后的烟尘质量浓度达到2.78 mg/m<sup>3</sup>、SO<sub>2</sub>质量浓度23 mg/m<sup>3</sup>左右、NO<sub>x</sub>质量浓度31 mg/m<sup>3</sup>左右,均优于天然气发电排放标准。高效煤粉型工业锅炉技术持续创新,拥有自主知识产权,并且实现了产业化发展。普通燃煤锅炉的燃尽率仅70%,在高效煤粉型锅炉技术的支持下,煤炭达到了98%的高燃尽率,相比于使用天然气的锅炉,污染物排放指标大致相当。同时,关键技术的创新和突破,如洁净

煤、节能环保解耦炉具技术大力促进了煤炭清洁而高效的利用<sup>[6]</sup>。散煤综合治理和煤炭减量替代成效显著,落实《燃煤锅炉节能环保综合提升工程实施方案》,提高锅炉系统高效运行水平。“十三五”期间散煤用量消减超过2亿t<sup>[7]</sup>。

2) 煤炭转化取得突破。推动煤炭从燃料到燃料与原料并重的方向发展是我国煤炭工业很长一段时间以内的着力点。只有推进现代煤化工的发展,改革煤炭利用技术,才能够实现煤炭资源的清洁高效利用。“十三五”期间,我国在大型先进煤气化、煤直接制油、煤间接制油、煤制乙二醇、大型煤制甲醇、煤制烯烃等技术方面取得了重大的突破,大型设备的开发和运用使得煤炭清洁高效转化示范工程顺利实施,我国煤炭转化发展迅速,技术创新和产业化均名列世界前茅。

### 1.2 煤炭供给革命

1) 煤炭供应保障能力显著提升。2016—2019年,煤炭累计新增查明资源储量2 279亿t<sup>[8]</sup>。全国煤炭资源开发、生产布局不断优化,资源开发重心逐渐向资源禀赋好、开采条件优、生产成本低的区域转移。2016—2020年,全国煤炭产量由34.1亿t增加到39.0亿t,累计生产煤炭184亿t左右<sup>[9]</sup>,煤炭生产重心不断优化,逐渐进行产能集中,先进产能比重大幅度提高。煤炭工业向区域集中发展的格局逐渐建立,中西部作为主要产煤区,其战略地位越发凸显,晋陕蒙三省(区)煤炭产量占全国总产量的比例超过70%<sup>[10]</sup>。神东、黄陇、宁东、新疆等14个大型煤炭基地产量占比不断提升,全国煤炭资源已经形成从科学规划到高效绿色利用的具有持续发展的新体系。煤炭生产运输协同保障体系逐步完善,煤炭储备体系建设不断健全,初步形成企业社会责任储备为主体、地方政府储备为补充的储备体系。煤炭安全稳定供应保障能力实现跨越式提升,满足了国民经济持续快速发展的需要。

2) 供给侧结构性改革加快。大型煤炭基地建设和企业兼并重组不断推进,累计关闭退出落后产能10亿t/a左右。全国煤矿数量由改革开放初期的8万多处减少到2020年底的4 700处左右,增加先进产能6亿t/a左右。全国生产煤矿产能41亿

t/a,平均单井(矿)产能提高到110万t/a以上。大型现代化煤矿成为全国煤炭生产的主体。全国建成年产120万t以上的大型现代化煤矿1200处以上,产量占全国的80%左右,其中,建成年产千万吨级煤矿52处,产能8.2亿t/a;年产30万t以下的小煤矿数量、产能分别下降到1000处以下、1.1亿t/a左右<sup>[7]</sup>。

3)煤炭产业结构不断优化。“十三五”期间,

表1 1978、2001、2020年全国煤炭产量

Table 1 China coal production concentration in year of 1978, 2001, and 2020

年份	全国总产量/(万t·a <sup>-1</sup> )	全国煤炭产量前4家企业产量/万t	比例/%
1978	61 786	2 303(大同)、2 150(开滦)、1 373.8(平顶山)、1 360.1(阜新)、小计7 186.9	11.64
2001	130 559	5 432.99(神华)、3608.99(兖州)、3 502.3(大同)、2233.82(开滦)、小计14 778.1	11.30
2020	390 000	53 000(国家能源)、31 000(晋能控股)、27 000(山东能源)、22 000(中煤)、小计133 000	34.10

### 1.3 煤炭技术革命

经过“十三五”期间的稳步发展,煤炭科技不断创新,关键技术持续突破。以煤矿智能化开采为引领的煤炭基础理论与关键技术、重大装备研制取得新的突破,煤炭清洁高效利用与低碳绿色发展从理念到工程示范和产业化发展取得重大进展,煤炭科技贡献率逐年提高。2020年,全国煤矿采煤机械化程度达到78.5%,掘进机械化程度已达60.4%,建成约500个智能化采掘工作面<sup>[11]</sup>。

1)煤炭地质勘探。以煤矿安全高效生产为重点的煤矿地质保障体系初步形成。“十三五”以来,地质勘查理论体系不断完善,勘查手段不断创新,尤其是煤炭地质勘探关键技术不断突破。在地球物理勘探方面,已经发展成为包括地震、电磁法、测井及综合探测等多个技术系列,开发了井下直流电法、瞬变电磁法、无线电坑道透视、地质雷达、槽波地震、瑞利波等多种物探技术与装备,超前探测距离达到200m,在掘进工作面、回采工作面前方或内部的水、火、瓦斯、顶板、煤尘等灾害地质的超前探测方面发挥重要作用。煤矿井下反射槽波超前探测技术与装备达到国际领先水平。在煤矿井下钻探方面,煤矿井下随钻测量定向技术与装备处于国际领先水平,我国自主研发的大功率定向钻进技术与装备创造了顺煤层定向钻孔深度3353m的世界纪录,并实现了煤矿井下随钻测量由“有线传输”向“无线传输”的跨越;研制了针对突出煤层气抽采钻孔施工的智能钻探技术装备,在远距离自动控制钻进、遥控自动钻进装备研制方面取得重大突破。在透明矿井构建(矿山地质信息化)方面,我国的数字化矿山起步较晚,初期以地质信息系统或GIS系统为基础构建,三维空间分析功能较弱。近几年,随着软件技术的进步和国外矿业工程软件在国内的应用范围不

2020年我国大型煤炭基地产量占比约为96.6%,比2015年提高3.6%。前8家大型煤炭企业产量18.55亿t,占全国的47.6%<sup>[7]</sup>。1978、2001、2020年我国煤炭企业产量前4名之和占全国煤炭产量比例对比见表1。产能集中促进了煤炭工业由“速度”为先到“质量”优先的产业转型,尤其是作为供应链最重要的大型煤炭企业集团、大型现代化煤矿,带动能力更加突出。

断扩大,国内数字矿业软件在功能上取得了长足进步,具备强大的专业矿图编辑、矿山勘探测量数据和资源储量管理、三维矿山建模等功能。三维地质建模技术流程如图1所示。

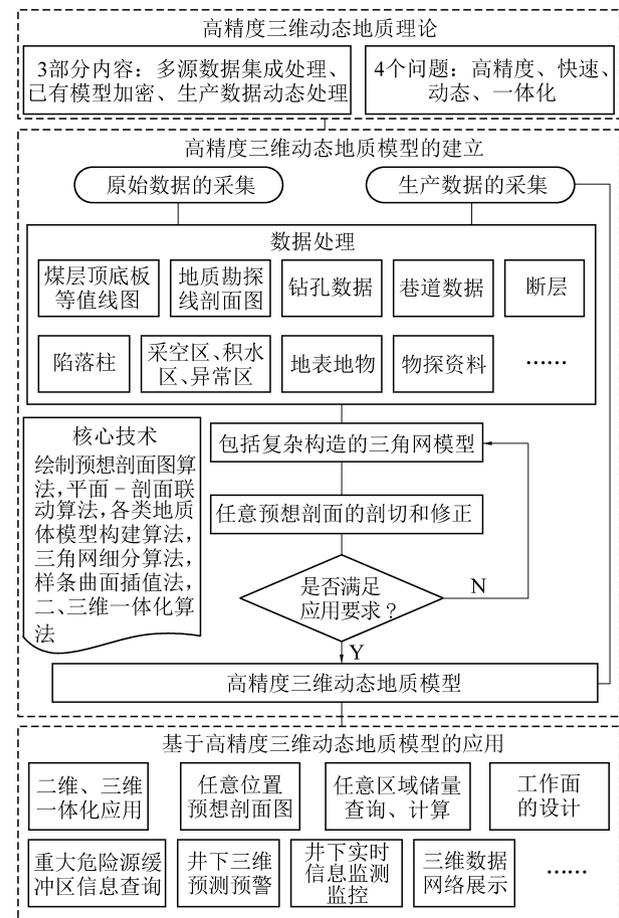


图1 三维地质建模技术流程

Fig.1 Technical process of 3D geological modeling

2)煤炭绿色高效开发。围绕安全高效绿色开采的综采技术和成套装备研发取得新进展。在矿井建设方面,深厚土层中冻结法及机械破岩钻井技术取得突破。冻结法凿井方面解决多圈冻结壁、高强

混凝土井壁等关键技术,穿过冲积层厚度达到754.96 m,冻结深度958 m,创造世界冻结深度纪录;非爆破机械破岩的竖井钻机、反井钻机和竖井掘进机钻井技术体系逐渐形成,形成了长斜大直径定向反井钻井、盾构法长距离斜井成套技术装备。“800 m深厚土层中冻结法凿井关键技术”“西部弱胶结地层1500万t/a煤矿深立井建设与提升关键技术”获得2019年中国煤炭工业协会科技进步一等奖;智能快速掘进关键技术取得突破,如掘进机位姿检测与导航技术(图2),很大程度缓解了煤矿采掘失衡矛盾。

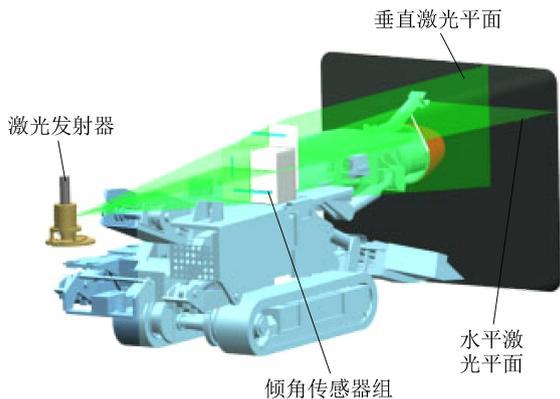


图2 激光标靶和倾角传感器组合导航技术

Fig.2 Laser target and tilt sensor combined navigation technology

技术创新助力煤矿安全生产水平稳步提升。矿井灾害防治理论体系不断完善,冲击地压防治、瓦斯灾害防控、矿井水害防治、煤层自燃与火灾防治、复合动力灾害防控等关键技术取得新突破,形成了以灾害预测和防控为核心的理论与技术体系<sup>[4]</sup>。在煤岩瓦斯动力灾害方面,初步搭建完成煤矿瓦斯突出预警平台,实现了激光甲烷传感器高稳定性量测、有线+无线综合传输、突出灾害预警准确率达90%。井下煤层钻进装备实现了松软煤层钻进300 m、中硬煤层3353 m和无线遥控自动钻进等重大技术突破。在水害防治方面,井工煤矿开采涌水量预测的“动—静储量法”“倒置大井法”等解析法取得重要进展,突破了经典井流理论仅适用于地面抽水井的局限。同时,煤自然发火预测预报综合指标体系进一步完善,光纤测温技术在采空区温度监测方面也取得了一定进展;基于光谱技术的煤矿气体分析仪器及在线式火灾束管监测系统应用广泛;采空区帷幕注氮(二氧化碳)防灭火工艺应用范围较广;三维矿井通风智能分析技术已达到国际领先水平;基于光散射原理和静电感应原理的GCD1000型粉尘浓度传感器实现了煤矿粉尘的远程在线监测;高效生氧、快速密闭技术与装备已达到国际领先水平。

“十三五”期间,煤矿安全生产水平持续稳定好

转。全国煤矿事故总量、重特大事故、百万吨死亡率均有明显下降。通过先进的生产技术装备的升级和安全监测监控系统的推广使用,提高了防御灾害的能力、抗灾能力,煤矿安全生产水平稳步提升。2020年全国煤矿发生事故123起,死亡228人<sup>[12]</sup>,与2015年相比,分别减少229起、少死亡370人,百万吨死亡率从0.162下降至0.058<sup>[13]</sup>,如图3所示。

在煤炭智能绿色开采方面,完善了充填开采、煤与瓦斯共采、保水开采等绿色开采技术体系。提出了针对西部浅埋煤田保水开采岩层控制理论和技术,提出了基于煤柱群布置,减轻地层非均匀沉降的方法,实现了井下减压和地表减损,有效指导了生态脆弱矿区煤炭资源开采和生态环境保护<sup>[14-15]</sup>。

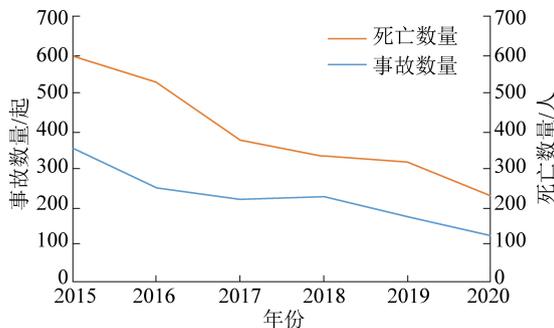


图3 2015—2020年煤矿事故起数和死亡人数

Fig.3 Number of accidents and deaths in coal mines from 2015 to 2020

3) 煤机装备与智能开采。初步形成具有我国煤炭资源赋存条件特色的智能化开采格局。“十三五”以来,煤炭绿色开发与智能精准开采技术体系逐步建立,制定了煤矿智能化发展规划和实施方案,为煤矿智能化建设描绘了路线图和施工图。在智能开采装备研发方面,发明了工作面直线度精确检测与智能控制、采煤机记忆截割控制、刮板输送机智能控制、工作面集中远程智能控制等多项关键技术,研发了适用各种煤层条件的智能化综采(放)成套装备,促使不同区域、不同煤层条件实现了智能安全高效开采。在智能化远程管控研发方面,研发了综采工作面采煤、支护、运输等智能化协调控制技术,开发了矿井人员与车辆等移动目标精确定位关键技术与系统,开发了煤矿供电无人值守及防越级跳闸技术与系统,研发了一体化矿山生产综合智能监控系统,研发了面向智能开采的煤矿安全高效生产空间信息处理关键技术,建立了煤矿智能化建设理论和技术体系<sup>[16-17]</sup>。2020年大型煤炭企业的采煤机械化程度达98%以上。研制出世界首台9 m采高智能化采煤机、8~9 m一次采全高智能化液压支架、7 m超大采高智能化综放开采液压支架和智能化超前支护液压

支架、大运量智能刮板输送机、掘锚一体机+锚运破+大跨距转载快掘、全断面快速掘进系统等先进装备。采煤工作面机器人、钻锚机器人、选矸机器人和巡检机器人等多种煤矿机器人已在煤矿井下应用。

4) 矿山生态环保。初步构建了煤矿区生态修复与水资源保护技术体系。2020年煤矸石综合利用率达到72%,矿井水利用率、土地复垦率分别达到79%、57%<sup>[7]</sup>。并且形成了集生态损害监测、土壤介质构造和植被重生的“三位一体”的多元复垦技术体系。位于徐州东部的国家4A级湿地公园便是通过综合复垦技术由采煤沉陷区重建而来,是矿区生态治理的示范性工程。针对鄂尔多斯盆地提出采煤区地质环境保护的核心就是保护地下水位的新理念,以及不同分区可保护水位的开采方法。西部煤矿区实现了采煤塌陷地和矸石山微生物修复,建成了以“导储用”为特征的地下水库,在神东矿区建成35座地下水库,使矿区由耗水大户变为供水基地。

#### 1.4 煤炭体制改革

1) 煤炭行业市场化程度和经济运行质量稳步提高。市场化改革稳步推进。不断健全煤炭市场化体制机制,持续深化交易市场建设和完善价格指数体系。在定价机制方面,形成了煤炭“中长期合同制度”和“基础价+浮动价”的定价机制,为煤炭工业稳步发展发挥了压舱石的作用。在投资体制方面,股权和投资主体逐步形成多元局面。此外,优化市场作为主要决定主体的有效机制,重点突出市场在价格方面的绝对作用,不断通过改革煤炭订货会制度。实行资源有偿使用,煤炭资源开发、管理秩序逐步改善。煤炭企业,尤其是大型煤炭企业集团完成了更合理转变,由改革开放前生产导向转化为市场导向,逐步建立和完善了现代企业制度,大多数国有煤炭企业通过债转股、资产并购重组、改制上市等方式进行了公司制改造,企业改革不断深化。

2) 法制建设不断完善。在市场化不断加快发展过程中,推进《煤炭法》等煤炭法律及行政法规制修订工作,加强法律法规实施监督检查,加快煤炭领域规章规范性文件的“立改废”进程,建立了社会主义市场经济下的煤炭产业政策体系。

3) 引导资源配置方向。制定实施《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》以及能源发展规划和系列专项规划、行动计划,明确煤炭发展的总体目标和重点任务,引导社会主体的投资方向,完善煤炭领域财政、税收、产业和投融资政策。

#### 1.5 煤炭国际合作

煤炭领域国际程度不断提升,煤炭工业合作成

为中美战略对话重要部分,不断与国际能源署、世界能源理事会、世界采矿大会、世界煤炭协会等国际组织深度合作,与包括俄罗斯、印度、澳大利亚、印度尼西亚、波兰、乌克兰等主要产煤国交流日趋活跃<sup>[18]</sup>,逐步从跟随式合作发展到以我国为主的国际合作;大型企业发挥资本、管理、技术、装备、人才、产能等优势,推进境外上市、并购重组、产能合作、装备出口,深度融入国际市场,实现互利共赢,既树立了中国煤炭工业的良好形象、促进了友谊,也为“一带一路”战略的实施架设了桥梁。

## 2 “双碳”目标下的能源格局与煤炭兜底作用

面对我国“CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值,力争2060年前实现碳中和”的战略目标,煤炭行业将加快调整优化产业结构,进一步向智能、绿色、低碳发展,推进淘汰落后产能。

### 2.1 “双碳”目标下能源格局变化

1) 我国能源需求仍将保持增长。“十四五”时期及未来一段时间内,同步推进“四化”——工业化、城镇化、信息化和农业现代化,依旧是我国发展重要目标,并会持续处于实现上述目标的关键阶段。在此背景下,能源消费-供给关系将更加合理,能源需求将稳步增长。

2019年,我国人均一次能源消费为3.47 t标准煤/a,居全球第48位,远低于发达国家。美国、加拿大等发达国家用电量超1 000 kW·h,而我国人均用电量刚达到其1/2水平<sup>[19-20]</sup>,能源需求仍会增加。2012—2020年我国能源消费总量与增速水平如图4所示。随着我国经济发展方式不断转型,从高速发展逐渐转变为健康持续发展,经济发展以人为本,以发展质量为核心,经济增速放缓带来节能减排技术不断进步将使能源利用效率显著提升,能源需求在未来增速将缓慢下降。

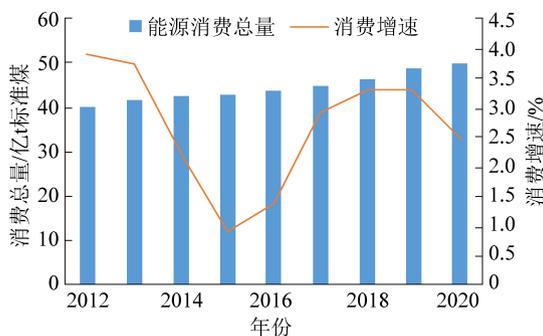


图4 2012—2020年我国能源消费总量及增速  
Fig.4 Total energy consumption and growth rate from 2012 to 2020 in China

2) 煤炭在能源消费结构占比将持续下降。2017年以前,煤炭在我国能源消费结构占比一直在60%以上,2020年降至57%(图5),在进一步加强煤炭煤电对能源稳定保障作用的同时,“碳达峰”与“碳中和”的目标与愿景将推动我国能源向绿色、低碳、和谐发展,促进化石能源的清洁高效利用。建立多能融合供应体系将是“十四五”时期及未来一段时间能源发展的重要任务<sup>[21]</sup>,促进化石能源的清洁高效低碳利用,大力发展可再生能源,安全有序发展核电,习近平总书记提出到2030年非化石能源在能源供应中的比例将达到25%左右,到2030年煤炭占一次能源消费的比例有望降至50%以下。

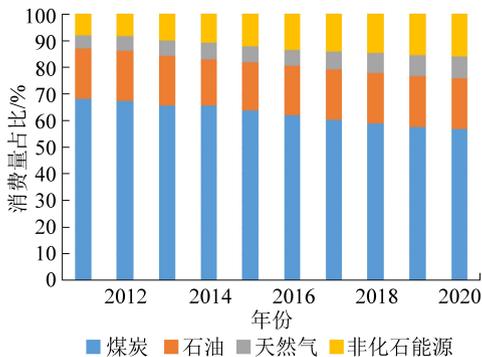


图5 近10年来我国能源消费结构变化

Fig.5 Energy consumption structure changes in past 10 years in China

3) 各种能源的比较优势取决于其技术创新进展。根据2019年数据测算,同等热值的煤炭、石油、天然气比价为1:7:3,可以说煤炭是我国最经济安全的能源资源。

2020年,原煤入选率达到74%,总量超过28亿t;燃煤电厂超低排放和节能改造全面推进,9.5亿kW煤电机组实现超低排放。此外,稳步推进现代煤化工升级示范是技术创新重要一环,基本实现产业化、园区化、基地化格局。现代煤化工技术的不断创新,煤制油气、醇烃类燃料开发规模不断扩大,加快了煤炭“由黑变白”、资源由重变轻转变的步伐。

在建立新能源体系过程中,各种能源的比较优势将取决于其本身技术创新的进展。煤炭清洁利用技术的创新将使煤炭成为最有竞争力的能源和原材料资源,煤炭仍将在下个100年中扮演重要角色。

## 2.2 “双碳”目标下煤炭面临的挑战

1) 面临不利的发展环境。在“双碳”目标下,“去煤化”论调被反复炒作,在短期内仍将作为我国主体能源的煤炭资源被社会舆论诟病和嫌弃。为实现“双碳”战略目标,国家及地方政府势必进行能源资源战略调整,可能会出台一些压缩煤炭产能、降低

煤炭相关产业资金投入等政策,使煤炭资源处于不利的发展环境中。

2) 优质易开发煤炭资源逐年减少。近年来,随着煤炭资源的大规模高强度持续开发,煤炭资源开采深度、灾害程度、开采成本等逐年增加,优质焦煤、化工用煤等储量大幅减少,煤炭资源开采成本增加,老矿区面临资源枯竭转型难题,煤炭资源实现绿色、低碳开发面临技术与经济双重困难。

3) 生态硬约束使开采成本大幅度增加。采矿与生态既是矛盾,又可友好协调,生态保护的红线要求煤炭必须绿色开发,建设绿色矿山,充填开采、矸石处理、保水开采、塌陷区治理等现有煤炭资源绿色开发技术普遍存在效率低、效益差等问题,煤炭资源绿色开发势必将大幅增加煤炭开发利用成本,降低煤炭资源价格竞争优势,煤炭资源绿色高效开发技术体系亟待提升。

4) 煤炭生产和供给模式不适应新发展要求。新时期,煤炭市场多种不确定因素增加,市场对煤炭需求的弹性要求提高,国内煤炭市场供需结构将发生重大改变,煤炭现有生产和供给模式不适应新发展要求,需要建立新型柔性煤炭生产与供给体系。

## 2.3 “双碳”目标下煤炭的兜底作用

1) 煤炭依然是我国能源的基石。根据《中国矿产资源报告(2020)》,截至2019年底,我国煤炭探明资源储量约1.74万亿t,是我国最丰富的能源。我国能源资源禀赋决定了煤炭资源在能源结构中的主体地位短期内无以替代,正如习近平总书记多次指出:“我们的国情还是以煤为主。在相当长一段时间内,甚至从长远来讲,还是以煤为主的格局,……还要做好煤炭这篇大文章”。2021年5月28日,习近平总书记在两院院士大会和科协大会上的报告中特别肯定了煤炭清洁高效燃烧,提出要从国家最急需需求和需求出发,在石油天然气、基础原材料、高端芯片、工业软件、农作物种子、科学实验用仪器设备等方面的关键核心技术上进行全力攻关。

2020年12月21日,国务院新闻办公室发布《新时代的中国能源发展》白皮书,明确提出推进煤炭安全智能绿色开发利用,努力建设集约、安全、高效、清洁的煤炭工业体系,煤炭仍然是我国最经济安全的能源资源。

2) 新能源需要煤炭作为稳定器。风、光等新能源的不稳定性给新能源体系增加了脆弱性,美国德州在极端天气下的大停电等表明了新能源的脆弱性,值得深思。在大规模低成本储能技术未获得突破的前提下,新能源难以实现全面或高比例纳入现

有能源。利用化石能源,尤其是煤炭、煤电转变成新能源,新能源和化石能源相互形成助力,耦合发展将以新能源为主,低碳体系建立的重要途径。

3) 油气资源不足,煤炭资源为国家能源安全发展兜底作用无法改变。2020年,我国原油对外依存度73%,天然气对外依存度43%。在国际能源博弈和地缘政治冲突不断加剧的背景下,油气进口安全风险增加。目前,在我国没有任何一种能源能够替代煤炭在能源体系中的兜底保障作用,煤炭依然是国家能源安全的压舱石。

应当深刻认识我国能源资源禀赋,经济社会发展要求和能源发展规律,碳达峰不是能源达峰,碳中和不是零碳。新时期,煤炭工业需要坚定不移地开展智能化煤矿建设,创新发展煤炭的智能绿色开发和清洁低碳利用,建立煤炭智能化柔性先进生产和供给体系,发挥煤炭为“双碳”兜底、为能源安全兜底、为国家安全兜底的作用。

### 3 “双碳”目标下煤炭的发展之路

在“双碳目标”背景下,煤炭工业需要在全面落实能源安全的基础上,充分发挥在能源体系中的稳定器和压舱石作用,发展煤炭柔性生产供应体系,适应煤炭消费需求的不确定性,全面推进煤炭的智能绿色开采及清洁高效利用,加快建设以智能、绿色、低碳为特征的现代煤炭工业体系,促进煤炭工业高质量发展。

#### 3.1 提升以智能化为支撑的煤炭柔性生产供给保障能力

煤矿智能化是新时期煤炭高质量发展的必由之路,建设智能化煤矿,发展以煤矿智能化支撑的柔性生产供给体系,发挥煤炭为“双碳”兜底、为能源安全兜底、为国家安全兜底的作用,实现新时期、新煤炭、新格局高质量发展目标。

要将研发重点放到核心基础零部件、工艺和材料方面。如通过突破精准地质信息系统及随掘随采探测技术与装备、智能化无人开采、矿山机器人、煤矿物联网等实现无人采煤。同时通过新一代信息技术构建从集团至矿业公司再至企业的多级大数据中心。通过煤矿开采全过程的数据链条的构建实现煤矿决策的智能化和运行的自动化,促进煤炭的柔性供给。

#### 3.2 降低煤炭开发利用能源消耗强度

实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革,对能源生产和消费部门影响较大,提高煤炭企业的绿色发展能力更势在必行。综合利用余热、余压、节水节材等节能项目,采用先进节能

技术和装备应用到煤炭开采的各个环节。同时,继续推进二次再热先进高效超超临界煤电技术、清洁高效热电联产技术、特殊煤种超超临界循环流化床等一系列清洁发电技术。我国在煤电低碳发展方面,掌握了百万千瓦超超临界二次再热机组关键技术,600 MW超临界循环流化床锅炉关键技术通过产能10万t/a的二氧化碳捕集和封存示范项目的建立减少碳排放,通过已达到国际领先水平的污染物脱除、煤基能源废水处理实现节能环保。

#### 3.3 推动煤炭从燃料向燃料和原料转变

煤炭可通过具有减少碳流失项目的煤化工实现低碳发展。煤化工易于对转化过程中产生的高浓度二氧化碳具有捕捉作用,有利于实现节能减排。30%~40%的固碳作用可通过煤制甲醇、烯烃、乙二醇等工艺路线使部分碳元素进入产品而实现。综合利用煤炭转化与可再生能源、碳捕集利用和封存,实现煤炭发展的低碳循环、清洁高效。推动煤炭向原料与燃料并重的转变,促进行业转型。并综合考虑环保、安全、市场几种因素,推进现代煤炭工业的高质高质量发展,推进煤炭气化、煤炭液化(含煤油共炼)、煤制天然气、煤制烯烃等的发展,延长煤化工产业链,促进煤基新材料技术进步,实现规模化发展。

#### 3.4 研发实用的碳捕集、利用和封存技术

碳捕集、利用和封存技术(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)将成为实现工业脱碳化的重要技术路径,应在第一代和第二代技术基础上,科学评估国内外CCUS技术,对新一代CCUS技术路线进行系统规划,重点突破降低能耗和成本的关键技术,以电力行业为重点,进行技术研发示范,力争在特定区域建立碳捕获集群。

研发实用的碳捕集、利用和封存技术,重点突破CCUS降低能耗和成本的关键技术,创新研究发展CO<sub>2</sub>的回收、循环和资源化利用意义重大,除了对CO<sub>2</sub>进行捕捉封存、驱油驱气(包括驱煤层气)、富氧燃烧等之外,其在工业、农业、食品、医药、消防特别是在生产附加值高、市场用量大、未来前景广阔的化工产品和高性能材料等领域,CO<sub>2</sub>作为原料加以有效利用开发相关的下游产品,以便建立我国独具特色的以CO<sub>2</sub>为原料的工业体系,前景十分广阔。

利用CO<sub>2</sub>生产全降解塑料。我国是世界上最大的塑料生产国和消费国,也是最大的塑料原料进口国,充分利用大量的CO<sub>2</sub>制取可全降解的塑料、包括其他工程塑料、化工新材料、高性能的特种材料等等,可极大地促进我国塑料原料的来源多元化、降低对进口的依赖,并大幅降低塑料制品的生产成本,故

该路径将来极有可能形成较大规模的产业化。

生产合成氨和尿素特别是合成具有广泛用途的一系列尿素衍生物。合成氨与原料气“脱碳”放出的CO<sub>2</sub>一起,可生产尿素及其进一步的尿素衍生物,有利于形成一个很完整的化工产业链。

利用CO<sub>2</sub>为原料进行催化加氢,以合成醇类(如甲醇)、脂类、烃类(如甲烷)、酸类(如甲酸)等的化工原料、进而生产一系列用途广泛的以含氧含碳化合物为主的精细化工品或大宗化工原料。

采用高分子合成方法,以CO<sub>2</sub>为原料合成如聚碳酸酯类、橡胶类、染料类、特种溶剂类等的高价值产品或半成品(进一步加工之原料),总之,确实要从源头上减排二氧化碳,将大量的二氧化碳有效转化利用、变废为宝,特别是聚焦于它的化学利用,以高价值的化工品和高性能材料为主要目标产品。要加快研发布局,加大攻关力度;科学地选择目标产品和反应路径,有效降低CO<sub>2</sub>资源化利用的成本。

#### 参考文献(References):

- [1] 谢和平,吴立新,郑德志.2025年中国能源消费及煤炭需求预测[J].煤炭学报,2019,44(7):1949-1960.  
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960.
- [2] 王国法,刘峰,庞义辉,等.煤矿智能化:煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J].煤炭学报,2019,44(2):349-357.  
WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui, et al. Coal mine intellectualization; the core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 349-357.
- [3] 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所.中国能源革命进展报告[R].北京:国务院发展研究中心资源与环境政策研究所,2020:1-2.
- [4] 国家统计局.中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[R].北京:国家统计局,2021.
- [5] 罗盾.为什么煤电不可缺失(上):灵活性煤电的必要性[J].能源,2021(6):50-54.  
LUO Dun. Coal mine intellectualization: why coal power cannot be lost (I): the need for flexible coal power[J]. Energy, 2021(6): 50-54.
- [6] 梅丹.构建现代化煤炭经济体系,促进煤炭工业高质量发展[N].内蒙古日报(汉),2018-07-24(2).
- [7] 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.
- [8] 中华人民共和国自然资源部.2017/2018/2019/2020中国矿产资源报告[R].北京:中华人民共和国自然资源部,2017-2020.
- [9] 国家统计局.2016—2020年煤炭平衡表[EB/OL].[2020-06-7] <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=COL>.
- [10] 中国煤炭工业协会.煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见

- [R].北京:中国煤炭工业协会,2021.
- [11] 刘峰,曹文君,张建明,等.我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J].煤炭学报,2021,46(1):1-15.  
CAO Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1-15.
- [12] 尤文顺,丁震,曹正远.国家能源集团煤矿智能化建设探索与实践[J].工矿自动化,2021,47(S1):4-6.  
YOU Wenshun, DING Zhen, CAO Zhengyuan. Exploration and practice of intelligent construction of coal mines of CHN Energy[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(S1): 4-6.
- [13] 国家矿山安全监察局.2015—2020年全国煤矿事故分析报告[R].北京:国家矿山安全监察局,2016—2021.
- [14] 顾大钊.煤矿地下水理论框架和技术体系[J].煤炭学报,2015,40(2):239-246.  
GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 239-246.
- [15] 袁亮.我国煤矿安全发展战略研究[J].中国煤炭,2021,47(6):1-6.  
YUAN Liang. Study on the development strategy of coal mine safety in China[J]. China Coal, 2021, 47(6): 1-6.
- [16] 王国法,庞义辉,刘峰,等.智能化煤矿分类、分级评价指标体系[J].煤炭科学技术,2020,48(3):1-13.  
WANG Guofa, PANG Yihui, LIU Feng, et al. Specification and classification grading evaluation index system for intelligent coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 1-13.
- [17] 王国法,任怀伟,庞义辉,等.煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展[J].煤炭科学技术,2020,48(7):1-27.  
WANG Guofa, REN Huaiwei, PANG Yihui, et al. Research and engineering progress of intelligent coal mine technical system in early stages[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 1-27.
- [18] 张翔.十年脚步,煤炭前程[N].中国煤炭报,2017-02-24(3).
- [19] 李江涛,翁玉艳,张春成,等.数说能源:中国与世界[J].中国电力企业管理,2021(3):47-50.  
LI Jiangtao, WENG Yuyan, ZHANG Chuncheng, et al. Energy: China and the world[J]. China Power Enterprise management, 2021(3): 47-50.
- [20] 吴舒萍,黄庆丰,姜阳.基于高中低发展层次比较法预测我国人均用电量饱和趋势[J].湖南理工学院学报(自然科学版),2020,33(4):38-44.  
WU Shuping, HUANG Qingfeng, JIANG Yang. Forecast for China's saturation trend of per capita electricity consumption based on comparison method of low, middle and high levels[J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences), 2020, 33(4): 38-44.
- [21] 李元丽.王国法院士:能源革命不是把煤炭“革”掉[N].人民政协报,2021-05-18(4).