

# 我国洁净煤技术 2035 发展趋势与战略对策研究

孙旭东<sup>1,2</sup>, 张博<sup>1,2</sup>, 彭苏萍<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 煤炭在我国能源结构中长期保持基础性地位。实现煤炭资源的清洁高效利用, 亟待大力发展洁净煤技术。本文在界定洁净煤技术概念的基础上, 辨识了洁净煤技术的先进性特征, 预判了面向 2035 的关键前沿技术, 结合国内外主要前沿技术的发展现状, 明确了我国洁净煤技术发展战略目标与路径, 据此提出了相应的政策建议。研究发现, 我国在 700 °C 超超临界、整体煤气化联合循环/整体煤气化燃料电池联合循环(IGCC/IGFC)等先进发电技术及煤炭深加工产业的技术研发、装备制造和工程示范等方面具有一定的国际竞争力, 但在自主创新能力、体制机制、区域或企业间平衡发展等方面仍存在诸多问题, 应当着眼于煤炭能源长远发展, 前瞻规划面向 2035 的洁净煤技术与产业发展方向, 积极部署先进技术研发与工程示范, 全面提升我国洁净煤技术发展水平, 有效改善煤炭清洁高效利用的产业发展环境。

**关键词:** 煤炭; 洁净煤技术; 能源战略; 2035

**中图分类号:** T-9; TD-05; F426 **文献标识码:** A

## Development Trend and Strategic Countermeasures of Clean Coal Technology in China Toward 2035

Sun Xudong<sup>1,2</sup>, Zhang Bo<sup>1,2</sup>, Peng Suping<sup>2</sup>

(1. School of Management, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China;  
2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** China's energy structure has long been dominated by coal. To achieve clean, high-efficiency utilization of coal in the country, it's urgent to develop clean coal technologies (CCTs). After defining the concept of CCT, this paper identifies the advanced characteristics of CCT and predicts key cutting-edge technologies for 2035. By reviewing the development of major cutting-edge technologies in China and abroad, we give the strategic goal and path of China's CCT development and corresponding policy suggestion. China has achieved a global leading position in technology research and development, equipment manufacturing, and demonstration project of advanced power generation technologies such as 700 °C ultra-supercritical technology, integrated gasification combined cycle/integrated gasification fuel cell combined cycle (IGCC/IGFC), and other technologies in coal deep processing industry. It has international competitiveness and advantages of research and development. However, there are still many problems in terms of independent innovation capability, scientific research mechanism and talent cultivation, and balanced development between regions and enterprises. It is necessary to plan for the long-term development of coal energy, deploy the development of modern coal chemical

收稿日期: 2019-05-16; 修回日期: 2019-06-05

通讯作者: 彭苏萍, 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室教授, 中国工程院院士, 研究方向为能源系统工程与能源战略, E-mail: psp@cumtb.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目“面向 2035 的洁净煤工程技术发展战略研究”(L1624054); 国家重点研发项目“CO<sub>2</sub> 近零排放的煤气化发电技术”(2017YFB0601900)

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

industry scientifically, actively deploy disruptive technology research and development and its engineering demonstration, and comprehensively improve CCT research and development and its industrial environment.

**Keywords:** coal; clean coal technology; energy strategy; 2035

## 一、前言

发展洁净煤技术, 实现煤炭清洁高效利用一直是全球关注的重点 [1,2], 煤炭是我国长期以来最重要的一次能源 [3]。根据国家统计局数据显示, 2018 年我国煤炭消费总量达到  $2.74 \times 10^9$  t 标准煤, 占能源消费总量的 59%。燃煤发电在我国电力结构中具有重要基础地位, 预计到 2030 年燃煤发电占比仍将达到约 50%。然而大规模、高强度的煤炭开发利用, 一方面造成了我国一些重要产煤区水资源与地表生态破坏; 另一方面也引发了诸多地区大范围煤烟型空气污染等环境问题。与此同时, 我国是全球最大的  $\text{CO}_2$  排放国, 其中燃煤引起的  $\text{CO}_2$  排放占我国化石燃料排放总量的 80% 左右 [4]。洁净煤技术的发展对于促进我国煤基能源的可持续发展, 保障国家能源安全, 治理大气污染及应对气候变化都具有重要的战略意义。

在国外, 煤炭资源的主要用途为燃煤发电, 美国、欧洲、日本、澳大利亚等发达国家和地区均高度重视清洁燃煤发电技术的开发与示范, 特别是先进燃煤发电技术及  $\text{CO}_2$  减排技术成为研究的热点 [5]。我国已建成世界上规模最大的清洁高效煤电系统, 排放标准世界领先。煤炭清洁利用产业已被确定为“绿色产业”, 大力发展洁净煤技术成为促进我国煤炭产业转型升级的重要途径。随着技术创新能力的提升与能源、环境问题治理的日益突显, 在燃煤发电、煤化工和资源综合利用等诸多领域, 洁净煤技术具有巨大应用前景和市场潜力。

为推动科技发展和科技竞争力提升, 世界各国纷纷开展工程科技发展战略研究工作, 重视开展技术预见, 并据此制定中长期的科技战略规划 [6], 提前布局基础研究、关键技术研发和重大工程示范, 如美国的年度重大科技战略计划和战略研究报告、欧洲的“里斯本战略”和“欧盟 2020 战略”、日本每 5 年一次的技术预见调查等, 均涵盖能源领域。我国也公布了《能源技术革命创新行动计划(2016—2030)》, 中国工程院、中国科学院等研究机构也已

开展了系统的技术预见工作 [7,8]。

今后 10~15 年是我国洁净煤技术发展的关键时期。积极发展先进的、颠覆性的煤炭转化与利用技术, 大力推进面向 2035 的洁净煤技术创新, 有利于提升我国煤炭企业和行业的科技竞争力, 实现我国煤炭工业的高质量发展, 形成引领世界的煤炭清洁高效转化与利用的新兴产业, 推动我国构建绿色低碳、安全高效的现代能源体系, 支撑能源革命和能源强国建设。

## 二、洁净煤技术的概念与范畴

### (一) 洁净煤技术的概念与分类

洁净煤技术又称清洁煤技术 (CCT), 指在煤炭清洁利用过程中旨在减少污染排放与提高利用效率的燃烧、转化合成、污染控制、废物综合利用等先进技术 (不包括开采部分) [9], 其主要技术方向见表 1。根据煤炭利用过程, 可简要分为前端的煤炭加工与净化技术, 中端的煤炭燃烧、转化、污染物控制技术和后端的废弃物处理、碳减排及综合利用技术 3 大类。

### (二) 前沿洁净煤技术的遴选标准

技术是具有生命周期的, 其随着时间的推移不断完善和进步, 甚至产生突破性或颠覆式的更新换代, 因而需要对当前洁净煤技术的先进性开展动态评价, 以形成具有时效性的洁净煤技术范畴。表 2 构建了洁净煤技术先进性评价指标体系, 从技术的洁净贡献系数、成熟度、领先程度、应用前景和突破难度 5 个维度给出了洁净煤技术的遴选标准。

## 三、洁净煤关键前沿技术发展研判与发展现状

### (一) 洁净煤技术发展重点领域与技术方向

全球洁净煤技术的发展方向长期受各个国家洁净煤政策与行动计划的引导。总体上, 全球洁净

表 1 洁净煤技术分类

技术类型	子项主要技术
煤炭加工与净化技术	选煤、洗煤、型煤、水煤浆、配煤技术
煤炭高效洁净燃烧技术	循环流化床燃烧、加压流化床燃烧、粉煤燃烧、超临界发电、超超临界发电、整体煤气化联合循环 (IGCC)、整体煤气化燃料电池联合循环 (IGFC)、富氧燃烧
煤炭转化与合成技术	气化、液化、氢燃料电池、煤化工、煤制烯烃、分质分级转化技术
污染物控制技术	工业锅炉和窑炉、烟气净化、脱硫、脱硝、除尘、颗粒物控制、汞排放
废弃物处理技术	粉煤灰、煤矸石、煤层气、矿井水、煤泥
碳减排技术	碳捕获和埋存 (CCS) 技术, 碳捕获、利用和埋存 (CCUS) 技术
综合利用技术	多联产技术

表 2 前沿洁净煤技术选择指标体系

评价指标	指标说明	参考评价标准
洁净贡献系数	煤炭清洁效率利用贡献程度	提升煤炭利用效率、减少污染物比率、较少碳排放比率
技术成熟度	技术成熟程度	9 级技术成熟度评价标准 [10,11]
技术领先程度	较同类或上一代技术的优势程度	技术性能评估参数、技术优势差距
技术应用前景	未来市场化和产业化的可能性	技术产业化竞争力、技术市场需求分析
技术突破难度	技术实现的难度和可能性	技术实现时间、技术进步速度

注：专家根据技术先进性表现进行指标的定量打分，评价指标采用极大型指标，取值范围为 0-10 分。

技术发展可以分成“减污染”与“碳减排”两个阶段。①前期是主要围绕燃烧与污染物控制的洁净技术发展时期，其中主要引导政策包括美国的洁净煤技术规范计划 (CCTDP, 1984 年) 和洁净煤计划 (CCPI, 2002 年)；欧盟的第五框架计划 (1998—2002 年) 和第六框架计划 (2002—2006 年)；日本 2000 年提出的“21 世纪煤炭计划”等。②近年来，各国更加关注 CO<sub>2</sub> 减排和先进发电技术，其中 CCS/CCUS、整体煤气化联合循环 / 整体煤气化燃料电池联合循环 (IGCC/IGFC) 是最受关注的洁净煤技术。相关重要的推动政策有美国的《清洁电力计划》和《碳排放标准》，欧盟提出的欧盟第七框架计划 (2007—2013 年) 和“能源 2020”以及 2015 年日本制定的“IGFC 发展规划”等。

我国在 1997 年印发的《中国洁净煤技术“九五”计划和 2010 年发展纲要》是最早的促进中国洁净煤技术发展的指导性文件。在“十一五”期间，洁净煤技术被列入国家高技术研究发展计划 (863 计划)，成为能源技术领域主题之一。进入“十三五”以来，我国颁布了《煤炭工业发展“十三五”规划》《关于促进煤炭安全绿色开发和清洁高效利用的意见》《煤炭清洁高效利用行动计划(2015—2020 年)》《国家能源局关于印发〈煤炭深加工产业示范“十三五”规划〉的通知》等一系列政策文件。另外，

2016 年，国家发展和改革委员会与国家能源局联合发布《能源技术革命创新行动计划 (2016—2030 年)》，具体给出了面向 2030 年煤炭开采和清洁利用等相关技术的发展路线图。同时，煤炭清洁高效利用已被列入我国科技创新 2030 重大工程和项目。

本文根据《面向 2035 洁净煤工程技术发展战略》项目研究成果，确定了 10 项面向 2035 的洁净煤前沿技术，相应的技术先进性评分见表 3。结合技术的先进性、突破难度和应用前景等具体表现 (见图 1)，综合研判排名前三的 700 °C 超超临界燃煤发电技术、先进 IGCC/IGFC 技术和 CCUS 技术为我国面向 2035 年最主要的洁净煤前沿技术。

## (二) 前沿洁净煤技术发展态势

### 1. 700 °C 超超临界发电技术

超超临界发电技术是通过高温、高压来提升热效率，700 °C 超超临界发电技术指在 700 °C/35 MPa 及以上的条件下的机组发电技术，研究表明通过增加再热次数其效率可达 50% 以上 [12]，其节能减排经济效益是 600 °C 超超临界技术的 6 倍 [13]，同时可以降低 CO<sub>2</sub> 的捕获成本，有助于推进 CCUS 技术的应用。

早在 20 世纪 90 年代末期，美国、欧盟等国家和地区在现有 600 °C 超超临界发电技术的基础上提

表 3 面向 2035 的洁净煤前沿技术及先进性评分

序号	面向 2035 的前沿洁净煤技术	先进性得分
1	700 °C 超超临界发电技术	43
2	先进 IGCC/IGFC 技术	41
3	CCUS 技术	39
4	燃煤发电污染物深度控制技术	36
5	高灵活性智能燃煤发电技术	36
6	煤制清洁燃料和化学品技术	34
7	先进循环流化床发电技术	33
8	煤炭分级转化技术	31
9	煤转化废水处置与回用技术	31
10	共伴生稀缺资源回收利用技术	30

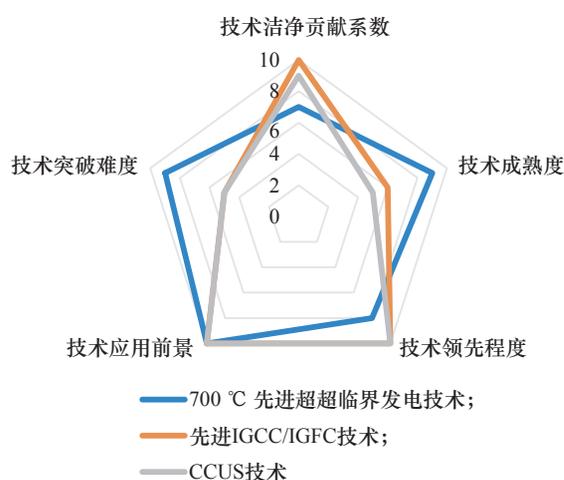


图 1 主要前沿洁净煤技术具体评估结果

出了 700 °C 先进超超临界燃煤发电研究计划，如欧盟的“AD700”先进超超临界发电计划、美国的“超超临界燃煤发电机组锅炉材料和汽轮机研究”计划等，推动了锅炉和汽轮机高温材料研发、加工性能测试及关键部件测试等技术取得重大突破 [14]，但在示范电站建设方面进展并不顺利，截至目前全球尚未形成 700 °C 超超临界燃煤示范电站。

我国是国际上投运 600 °C 超超临界机组最多的国家，同时注重 700 °C 超超临界燃煤发电技术创新发展。为此，我国在 2010 年成立 700 °C 超超临界燃煤发电技术创新联盟，2011 年设立 700 °C 超超临界燃煤发电关键设备研发及应用示范项目，2015 年 12 月全国首个 700 °C 关键部件验证试验平台成功实现投运。

## 2. 先进 IGCC/IGFC 技术

IGCC/IGFC 发电技术被视为具有颠覆性的煤炭

清洁利用技术，可实现燃煤发电近零排放的清洁利用，供电效率有望达到 60% 以上，大大降低供电煤耗，一旦取得突破将是具有革命性意义的洁净煤技术。

IGCC 是煤气化制取合成气后，通过燃气—蒸汽联合循环发电方式生产电力的过程，被认为是有发展前途的清洁煤发电技术之一，美国、日本、荷兰、西班牙等国家已相继建成 IGCC 示范电站。2012 年 11 月我国华能天津 250 MW IGCC 示范机组投入商业运行，该示范电站是我国首套自主研发、设计、建设、运营的 IGCC 示范工程，已实现粉尘和  $\text{SO}_2$  排放浓度低于  $1 \text{ mg/Nm}^3$ 、 $\text{NO}_x$  排放浓度低于  $50 \text{ mg/Nm}^3$ ，排放达到了天然气发电水平，同时发电效率比同容量常规发电技术高 4%~6% [5]。

IGFC 是以气化煤气为燃料的高温燃料电池发电系统，包括固体氧化物燃料电池（SOFC）和熔融碳酸盐燃料电池（MCFC），兼备 IGCC 技术的优点，其效率可达 60% 以上。IGFC 不同于 IGCC 的物理燃烧发电方式，其采用燃料电池直接发电，实现了煤基发电由单纯热力循环发电向电化学和热力循环复合发电的技术跨越，其煤电效率理论上可提高近一倍，同时还具有降低  $\text{CO}_2$  捕集成本，实现  $\text{CO}_2$  及污染物近零排放的优势。

目前，以 SOFC 为代表的高温燃料电池技术快速发展，美国和日本燃料电池产业的商业化应用走在世界前列。2010 年，美国布鲁姆能源公司（Bloom Energy）制造了全球第一个商业化 SOFC 产品（ES-5000 Bloom Energy Server），功率为 100 kW。2017 年，日本三菱重工公司推出了代号为 Hybrid-FC

的 250 kW SOFC 与微型燃气轮机联合发电系统商业化产品, 系统整体效率为 65%。我国同样重视高温燃料电池技术发展, 在国家级重大科研项目的支持下, 开展了高温燃料电池电堆、发电系统和相关基础科学问题的研究。我国于 2017 年启动了“CO<sub>2</sub> 近零排放的煤气化发电技术”国家重点研发项目, 使我国领先世界各国较早地布局了 IGFC 相关技术研发和开展 IGFC 发电系统试验平台示范。

### 3. CCUS 技术

CCUS 技术是把生产过程中排放的 CO<sub>2</sub> 进行提纯, 继而投入到新的生产过程中进行循环再利用。CCUS 技术是 CCS 技术的升级, 可实现 CO<sub>2</sub> 的再利用。前沿技术包括: 先进的 CO<sub>2</sub> 捕集技术, 地质、化工、生物和矿化等 CO<sub>2</sub> 利用前沿技术以及 CO<sub>2</sub> 地质封存关键技术等 [15]。

近年来, 全球各国正积极推进 CCUS 技术的发展和运用。2018 年, 配有碳捕获与封存装置的美国 Petra Nova 煤电厂正式投运 (装机容量为 240 MW, 年减排 1×10<sup>6</sup> t CO<sub>2</sub>), 成为首家实现碳减排的商业化电厂。同年, 美国提出 CO<sub>2</sub> 捕集与封存获得税收抵免 50 美元/t, CO<sub>2</sub> 驱油与封存获得税收抵免 35 美元/t 的优惠政策以推动 CCUS 技术发展。在 CO<sub>2</sub> 清洁高效转化与利用方面, 德国等国家在固体氧化物电解池 (SOEC) 技术方向上已取得一定的进展, 其技术方案是利用可再生能源电力电解水和 CO<sub>2</sub> 制取合成气、天然气以及液态燃料。我国也十分重视低碳技术, 不断加快推进 CCUS 示范项目, 如 2017 年陕西延长石油 (集团) 有限公司开展了延长石油 3.6×10<sup>5</sup> t/a CO<sub>2</sub> 捕集、管输、驱油和封存一体化示范、2018 年开始施工建设的华润电力 (海丰) 有限公司碳捕集测试平台、神华国华锦界电厂 1.5×10<sup>5</sup> t/a CO<sub>2</sub> 捕集装置等 [5]。综上, 世界各国在 CO<sub>2</sub> 捕集、CO<sub>2</sub> 驱油、CO<sub>2</sub> 封存和 CO<sub>2</sub> 利用等方面取得了进展, 但在商业化方面仍存在一定困难。

## 四、面向 2035 的我国洁净煤技术发展战略目标与主要任务

### (一) 我国洁净煤技术发展战略思路与目标

煤炭是我国的主体能源和重要工业原料, 基于洁净煤技术创新推动煤炭清洁高效利用将是保障我国能源安全与能源行业可持续发展的重要举措。洁

净煤技术的发展需依靠科技创新, 在提高煤炭发电效率、推动现代煤化工产业升级示范以及燃煤污染物超低排放和 CO<sub>2</sub> 减排、煤炭资源综合利用等方面取得突破性发展。其中, 为实现高效、节能和低污染的目标, 开发清洁、低碳、高效的发电技术是煤炭利用的核心, 研发现代煤化工技术是煤炭转化的重点。

到 2035 年全面形成煤炭清洁高效利用技术体系。煤炭集中高效利用比例提高到 90% 以上; 燃煤发电及超低排放技术进入国际领先水平, 完成 900 MW 级 IGCC 发电系统、100 MW 级 IGFC 发电系统示范, 发电效率达到 60%, 污染物实现近零排放, CO<sub>2</sub> 捕集率达到 95% 以上。面向 2035 年构建的我国洁净煤技术发展战略目标及技术路线图详见图 2。在该技术路线图中, 先进发电技术重点发展 700 °C 超超临界发电技术、IGCC/IGFC 技术和 CCUS 技术; 煤炭转化技术重点发展煤炭深加工的先进技术。

### (二) 我国洁净煤技术发展战略任务与实施路径

1. 持续提升燃煤发电效率, 逐步实现燃煤污染物近零排放

加快优化用煤结构, 提高电煤消费比重, 大幅缩减工业用煤和民用散烧煤, 使燃煤发电成为主要的用煤领域。全面实施燃煤电厂超低排放, 是推进煤炭清洁化利用、改善大气环境质量的重要举措, 是煤电持续发展的关键因素。全面实施燃煤电厂节能及超低排放升级改造, 坚决淘汰关停落后产能和不符合相关强制性标准要求燃煤机组。到 2035 年, 煤炭用于发电 (燃烧 + 燃料电池) 的比重和煤炭发电效率进一步提高, 超低污染物排放煤电机组和近零排放 IGFC 燃料电池发电占全国煤电的 90% 以上 (超低污染物排放煤电机组占燃煤发电的 80%), 彻底消除散煤及小锅炉的散煤使用。

2. 推动煤炭深加工产业升级示范

进一步提升高效率、低消耗、低成本的煤制燃料和化学品等现代煤炭深加工技术并实现工业化应用, 形成具有自主知识产权的燃煤污染物净化一体化工艺设备成套技术, 实现煤化工废水安全高效处理, 突破煤化工与炼油、石化化工、发电、可再生能源、燃料电池等系统耦合集成技术并完成工业化示范, 加快形成天然气、乙二醇、超清洁油品、航

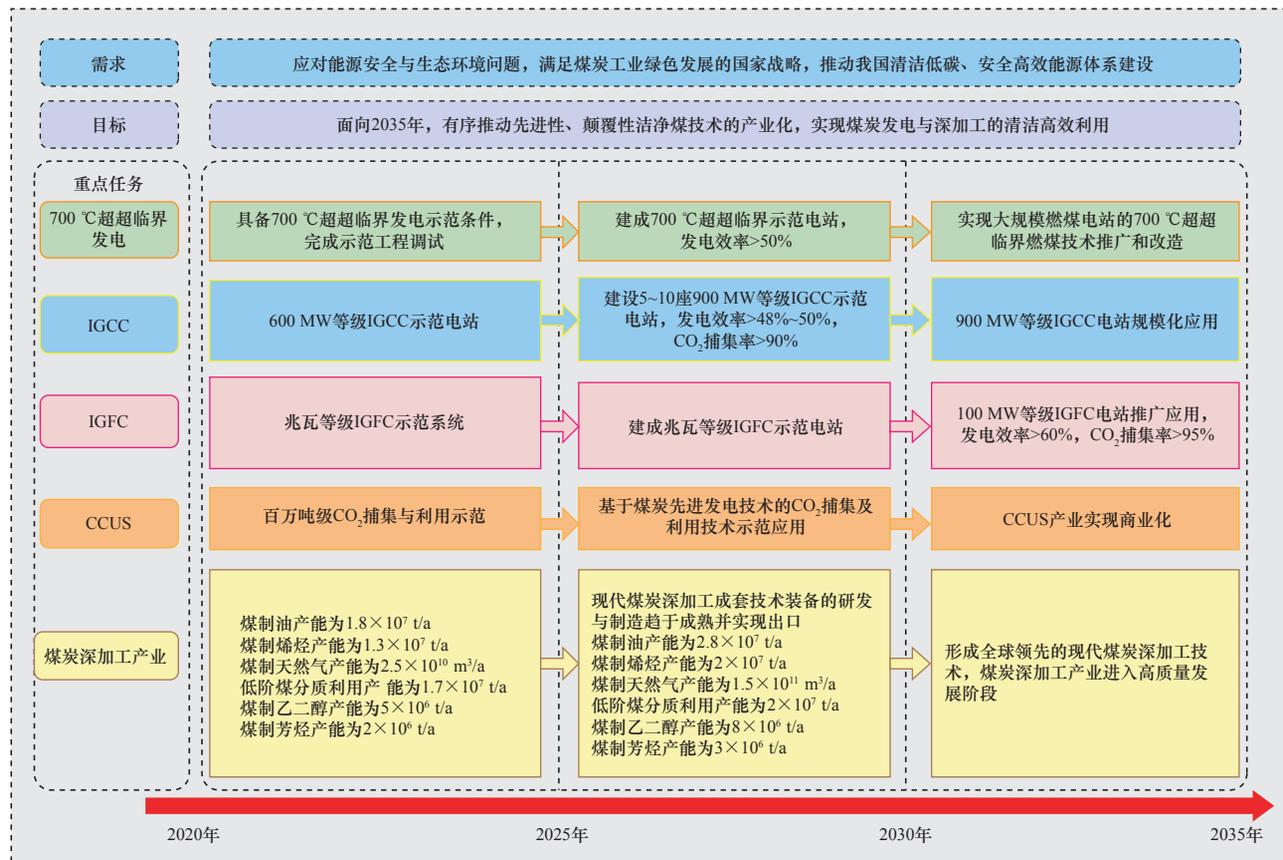


图2 洁净煤技术面向2035的发展战略目标及技术路线图

天和军用特种油品、基础化学品、专用和精细化学品等能源化工产品市场。

加快推动煤炭深加工产业工艺技术装备的研发与升级示范。重点内容包括：①加快提升煤间接液化产能，实施能量梯级利用，继续研发用于航天、军用等的特种油品；②推动百万吨级煤间接液化示范项目，研发新的工艺、催化剂和高温费托工艺，加快实现润滑油、液蜡、烯烃等商业推广；③开展煤制烯烃、煤制乙二醇、煤制芳烃等煤制化学品研发，通过新工艺技术、设备及催化剂实现产品高端化、差异化发展；④优化已建成的煤制天然气示范项目，加大具有自主知识产权的甲烷化成套工艺技术、设备及催化剂开发力度，提高在高负荷条件下连续、稳定和清洁生产的能力；⑤加强低阶煤分质分级利用及水处理技术研发及示范，进一步优化和完善低阶煤的热解技术工艺和设备、突破气固液分离难、提升焦油品质、半焦合理高效利用、焦油加工延伸等技术；⑥煤炭深加工共性技术研发与示范，主要包括大型空分技术、气化

技术、先进节水、环保治理技术和资源化技术。

3. 积极推进 CO<sub>2</sub> 捕集、利用与封存产业的发展为提升 CCUS 技术商业化推广应用的经济性，需要重点研发新一代高效低能耗的 CO<sub>2</sub> 吸收剂和捕集材料、CO<sub>2</sub> 规模化的输送技术与 CCS 技术、增压富氧燃烧、CO<sub>2</sub> 采油 / 气 / 水 / 热等前沿新技术。加强电站和捕集端深度整合、高参数大流量设备研制、地质封存长期监测等应用技术研究。提升 CO<sub>2</sub> 近零排放的煤气化发电技术（重点为 IGCC 和 IGFC）等先进发电技术与 CCUS 技术的协同研发能力，将 CO<sub>2</sub> 捕集与封存作为煤炭清洁发电利用的示范建设重点内容，并进一步突破 CO<sub>2</sub> 驱采原油技术、SOEC 制备合成气、CO<sub>2</sub> 重整煤（半焦）制 CO 技术等 CO<sub>2</sub> 利用的前沿技术，加快推进 CO<sub>2</sub> 利用产业化。

4. 加强颠覆性技术的基础研究与技术攻关

加大对 700 °C 先进超超临界发电技术、IGCC/IGFC 的煤炭清洁发电技术的基础研究与技术攻关。重点研究系统设计优化，包括电站总体设计、锅炉

和汽机总体设计；高温耐热合金材料的研发，重点是掌握具有自主知识产权的高温材料、主机关键部件的制造方法，实现超超临界等发电技术的商业化大规模应用。

IGCC 突破性技术的研究重点包括：适应不同煤种、系列化、大容量的先进煤气化技术，适用于 IGCC 的 F 级以及 H 级燃气轮机技术、低能耗制氧技术、煤气显热回收利用技术等，同时通过高效、低成本 IGCC 工业示范，掌握和改进 IGCC 系统集成技术，降低造价，积累 IGCC 电站的实际运行、检修和管理经验。

为进一步提升 IGCC 效率和 CO<sub>2</sub> 捕集经济性，需要重点开发大型 IGFC 颠覆性煤炭发电技术，即整体煤气化熔融碳酸盐燃料电池（IG-MCFC）和整体煤气化固体氧化物燃料电池（IG-SOFC）。其中 IG-MCFC 要突破大面积 MCFC 关键部件设计与制造技术、大容量电池堆组装与烧结运行技术、CO<sub>2</sub> 膜气体分离技术和 IG-MCFC 系统集成技术；IG-SOFC 要重点突破煤气化燃料 SOFC 发电技术、透氧膜供氧技术、SOEC 电解技术和 IG-SOFC 系统集成与优化技术。到 2035 年，实现 IGFC 电站兆瓦级产业化，同时具有全产业链的兆瓦级的燃料电池（SOFC、MCFC）和 IGFC 电站的制造能力。

### 5. 设立 IGCC/IGFC 重大工程科技专项

以提高煤炭发电效率，实现煤炭发电近零排放，推动煤气化发电多联产产业化为目标，集中攻克新一代 IGCC 和 IGFC 工程科技中的重大关键技术，进一步提升煤炭发电效率，重点突破近零排放的煤气化发电技术，全面提升煤气化发电清洁高效利用领域的工艺、系统、装备、材料、平台的自主研发能力，取得基础理论研究的重大原创性成果，实现工业应用示范，为实现煤气化发电多联产产业化提供科技支撑。

## 五、我国洁净煤技术发展对策和建议

未来 20 年，我国仍将是全球煤炭资源开发利用大国，但煤炭在能源消费结构中的比重将持续降低，煤炭消费总量将步入平台期，燃煤发电将成为主要的用煤领域。受地区和企业间洁净煤技术发展不平衡、核心技术自主创新能力短板、管理机制与政策环境不完善、科技投入与人才培养有待加强等

多重因素制约，当前我国尚未实现煤炭的清洁高效利用，但在部分洁净煤技术的研发、装备制造和工程示范等方面已取得全球领先水平。特别是在 700℃ 超超临界发电技术、先进 IGCC/IGFC 技术以及煤炭深加工技术产业化方面已具有一定的国际竞争力，因此，亟待面向 2035 重点发展洁净煤前沿技术。

### （一）加快调整用煤结构与产业，前瞻规划洁净煤技术与煤炭产业的长远发展

加强国家中长期煤炭发展的顶层设计，保持洁净煤技术相关政策的连续性和有效性，规范技术创新的周期性、与煤炭能源政策协调管理。财税政策需向用煤结构优化与节能提效方面倾斜，开展煤炭清洁高效利用的配套法律、法规、政策及环保激励机制研究，建立完善的市场激励手段引导企业优先发展和运用先进洁净煤技术。持续提升发电用煤效率，逐步管控燃煤发电污染物排放从超低排放进入近零排放时代。

建立清洁高效利用产业“用煤”的行业技术选择标准，针对煤炭利用与转化效率、污染物排放和碳排放情况建立洁净煤技术的备选库、可行性评价规范和补贴标准，通过规范化技术管理实现洁净煤技术发电的持续、可靠、达标、经济运行。基于碳市场交易、碳排放的政策引导，将 CCUS 技术成本转移至最终消费端，提升 CCUS 技术的经济可行性。积极引导先进煤化工、煤炭分质分级利用，研究“低阶煤制氢”“煤基燃料电池发电”等技术，为未来煤炭的更大规模充分利用提供可能。

### （二）优先发展适应国情的煤炭深加工技术路线，科学布局现代煤化工产业

提高煤炭深加工用煤质量，降低燃料用煤比例；优先发展适应中国国情的煤炭分级利用技术，深入研究煤质与气化炉的适用性，开展低阶煤提质、煤炭气化、新型催化剂等关键技术攻关。

建立现代煤化工产业合理布局的评价体系，对建成示范的煤制油、煤制烯烃、煤制气等技术方案开展综合评价，优化深加工技术及产业发展路径，淘汰污染大、效率低的落后煤化工项目。协调地方政府加强监管力度，完善现代煤化工标准规范和环境审批流程。对具有自主知识产权的煤化工技术、

装备研发和示范情况开展科学评估，特别是开展对成套技术装备的向外输出潜力分析，推动煤炭深加工产业“走出去”，开拓国外煤炭资源与市场。

### （三）依托重大科研项目，积极部署颠覆性技术研发与工程示范

加强清洁高效燃煤发电、低污染物排放和碳减排等洁净煤技术研发的政策扶植，明确煤炭清洁高效转化与利用技术的重点发展方向，鼓励企业与研究机构联合开展煤炭清洁高效发电技术研发与工程示范。加快开展燃煤电站超低排放、IGCC/IGFC、700℃超超临界、CCUS等先进技术的研发和示范，并在产业政策上给予支持。

设立洁净煤技术发展专项基金，集中攻关一批制约煤炭清洁利用和低碳转化的基础性问题。建立国家洁净煤技术研发清单，制定合理的研发目标和分阶段实施的研发计划，引导企业加强洁净煤技术研发，基于技术发展、装备研发规律，建立企业洁净煤技术研发的扶植和激励政策。

### （四）提升全产业链煤炭清洁高效利用水平，加强技术创新的人才制度保障

建立以绿色煤炭资源为基础的煤炭资源精准开发利用模式，制定绿色煤炭资源评价相关行业技术标准。通过提升绿色矿区煤炭资源基数和产量比重，从投入端开始，实现全产业链我国用煤质量和煤炭清洁高效利用水平提升。通过前端绿色煤炭资源安全高效开发及洗选加工来保障后端利用清洁[16]。探寻依托煤炭资源优势，降低煤炭清洁利用成本，同时减少煤炭开发、利用或转化过程对环境影响的煤炭工业发展优化路线。

加强对洁净煤技术创新人才的自主培养，通过行业、企业、院校合作，形成本科—硕士—博士连续性、跨学科的洁净煤工程科技人才培养通道，以适应煤炭新兴产业技术创新引领发展需求为培养目标，鼓励其有煤炭背景的大专院校设立煤炭清洁高效利用工程基础研发与科研管理相关的专业方向，采取优先录取和专业学费减免的政策，并充分发挥大型企业在洁净煤新技术研发、应用和推广的主体作用与资源集聚优势，与大专院校合作，为相关企业定向、联合培养洁净煤领域的专业技术人才。

#### 参考文献

- [1] 谢克昌. 中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
Xie K C. Strategy research on clean, high-efficiency and sustainable coal development and utilization in China [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2014.
- [2] 王显政. 能源革命和经济发展新常态下中国煤炭工业发展的战略思考 [J]. 中国煤炭, 2015 (4): 5–8.  
Wang X Z. Strategic consideration of China coal industry development during energy revolution and new normal of economic development [J]. China Coal, 2015 (4): 5–8.
- [3] 彭苏萍. 煤炭资源强国战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
Peng S P. Research on development strategy of “great power of coal resources” [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2018.
- [4] 彭苏萍, 张博, 王佟. 煤炭资源可持续发展战略研究 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2015.  
Peng S P, Zhang B, Wang T. Research on sustainable development strategy of China’s coal [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2015.
- [5] 中国工程科技发展战略研究院. 2019中国战略性新兴产业发展报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.  
Chinese Institute of Engineering Development Strategies. Developing report on China’s strategic emerging industries (2019) [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2019.
- [6] 陈进东, 宋超, 张永伟, 等. 中国工程科技2035技术预见评估: 中日技术预见比较研究 [J]. 情报杂志, 2018, 37(10): 62–69.  
Chen J D, Song C, Zhang Y W, et al. The evaluation of technology foresight on China’s engineering science and technology to 2035: A comparative study of technology foresight between China and Japan [J]. Journal of Intelligence, 2018, 37(10): 62–69.
- [7] 王崑声, 周晓纪, 龚旭, 等. 中国工程科技2035技术预见研究 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 34–42.  
Wang K S, Zhou X J, Gong X, et al. Technology foresight on China’s engineering science and technology to 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(1): 34–42.
- [8] 张博, 郭丹凝, 彭苏萍. 中国工程科技能源领域2035发展趋势与战略对策研究 [J]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 64–72.  
Zhang B, Guo D N, Peng S P. Development trends and strategic research for China’s energy engineering science and technology to 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(1): 64–72.
- [9] 樊金璐. 能源革命背景下中国洁净煤技术体系研究 [J]. 煤炭经济研究, 2017, 37(11): 11–15.  
Fan J L. Study on China clean coal technology system under the background of the energy revolution [J]. Coal Economic Research, 2017, 37(11): 11–15.
- [10] 孙旭东, 张博, 葛宏志. 能源产业成熟度评价方法理论研究 [J]. 中国矿业, 2017, 26(10): 65–69.  
Sun X D, Zhang B, Ge H Z. Theoretical evaluation model of the energy industry maturity levels [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(10): 65–69.
- [11] 王礼恒, 屠海令, 王崑声, 等. 产业成熟度评价方法研究与实践 [J]. 中国工程科学, 2016, 18(4): 9–17.  
Wang L H, Tu H L, Wang K S, et al. Assessment of industry maturity levels: Research and practice [J]. Strategic Study of CAE,

- 2016, 18(4): 9–17.
- [12] 徐炯, 周一工. 700 °C 高效超超临界火力发电技术发展的概述 [J]. 上海电气技术, 2012, 5(2): 50–54.  
Xu J, Zhou Y G. Overview of the development of 700 °C USC technique [J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2012, 5(2): 50–54.
- [13] 黄瓯, 彭泽瑛. 700 °C 高超超临界技术的经济得益分析 [J]. 热力透平, 2010 (3): 170–174.  
Huang O, Peng Z Y. Economy of 700 °C high USC technology [J]. Thermal Turbine, 2010 (3): 170–174.
- [14] 张晓鲁. 关于加快发展我国先进超超临界燃煤发电技术的战略思考 [J]. 中国工程科学, 2013, 15(4): 91–95.  
Zhang X L. Some consideration about the future development strategy of advanced ultra supercritical coal-fired power generation technology [J]. Strategic Study of CAE, 2013, 15(4): 91–95.
- [15] 叶云云, 廖海燕, 王鹏, 等. 我国燃煤发电CCS/CCUS技术发展方向及发展路线图研究 [J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 80–89.  
Ye Y Y, Liao H Y, Wang P, et al. Research on technology directions and roadmap of CCS/CCUS for coal-fired power generation in China [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 80–89.
- [16] 张博, 彭苏萍, 王佟, 等. 构建煤炭资源强国的战略路径与对策研究 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 88–96.  
Zhang B, Peng S P, Wang T, et al. Strategic paths and countermeasures for constructing a “great power of coal resources” [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1): 88–96.