美国发展煤炭清洁高效利用技术对中国的启示

熊书玲[1]，郑 佳[1]，屠鑫煜[1]，王淑洁[1]，刘仁厚[2]
（1. 中国科学技术信息研究所，北京 100038；
2. 中国科协创新战略研究院，北京 100038）

摘 要: 近年来，美国一直通过“煤炭优先”计划等推动先进燃煤电厂、先进煤化工等技术和装备的发展，并进一步提高效率、降低与碳捕集相关的成本从而支持“煤 + 碳捕集、利用与封存（carbon capture，utilization and storage，CCUS）”技术的开发与部署，同时还重点研发从煤及煤基能源等中回收稀土元素的技术。系统梳理了美国煤炭清洁高效利用全过程的研发投入、研发方向和研发机构等情况，结合中国清洁煤技术发展现状，提出在“双碳”目标下发展煤炭清洁高效利用前沿技术的发展建议，可为中国进一步构建绿色低碳、安全高效的现代能源体系提供参考。

关键词： 美国；清洁煤；高效利用；绿色低碳
中图分类号： G323；X752 **文献标识码：** A DOI：10.3772/j.issn.1009-8623.2024.05.008

煤炭是目前全球储量最为丰富、分布最为广泛的能源资源。2021 年，中国化石能源消费占一次能源消费的比例约为 83.6%，其中煤炭消费量占能源消费总量的比例高达 56%，居世界首位[1]；美国化石能源消费占一次能源的比例约为 79%，其中煤炭消费量占能源消费总量的比例约为 10.8%，是世界上煤炭储量最丰富的国家[2]。

煤炭的清洁高效利用技术路线可以主要分为前端的加工与净化技术、中端的先进煤电技术和煤化工技术以及后端的污染物控制、综合利用及废弃物处理技术，具体如图 1 所示[3-7]。总体而言，煤炭的清洁高效利用技术重点领域包括提高煤电效率的先进设备及技术，如先进汽轮机 / 燃气轮机、增压流化床燃烧器系统、整体煤气化联合循环发电（IGCC）技术和超超临界发电技术等；燃烧前、燃烧中污染物控制（减少二氧化硫、氮氧化合物等非温室气体排放以及汞等污染物的控制）；优化煤炭利用（除发电外，将煤炭转化利用为氢气、液体燃料、烯烃等煤基多联产）；污染物控制及利用，如“煤 + 碳捕集、利用与封存（carbon capture，utilization and storage，CCUS）”技术[8-15]。近年来，全球重点关注碳减排和先进煤电技术[16-20]。

随着能源、环境以及气候变化等问题日益突出，推进煤炭清洁高效利用，对保障中国能源安全、推动经济社会发展具有重大意义[21-22]。本文系统梳理了近年来美国能源部在煤炭清洁高效利用技术领域的研发投入、研发方向和研发机构等基本情况，进一步从超超临界发电技术、整体煤气化联合循环技术、煤制油 / 烯烃技术、煤气化技术以及碳减排、废弃物处理及综合利用技术等角度进行分析，结合中国清洁煤技术发展现状，旨在为推动构建绿色低碳、安全高效的现代能源体系提供参考，进而支撑“双碳”目标的实现。

1 美国煤炭清洁高效利用技术发展现状

1.1 先进燃煤发电技术

在先进燃煤发电技术中，当蒸汽参数超过临界

第一作者简介： 熊书玲（1988—），女，博士，副研究员，主要研究方向为绿色低碳发展、未来技术与产业。
通信作者简介： 郑佳（1982—），女，博士，研究员，主要研究方向为科技政策与产业发展研究。电子邮箱：zhengj@istic.ac.cn
项目来源： 中央级公益性科研院所基本科研业务费重点工作项目“未来技术产业化成熟度研究”（ZD2023-16）。
收稿日期： 2023-11-15

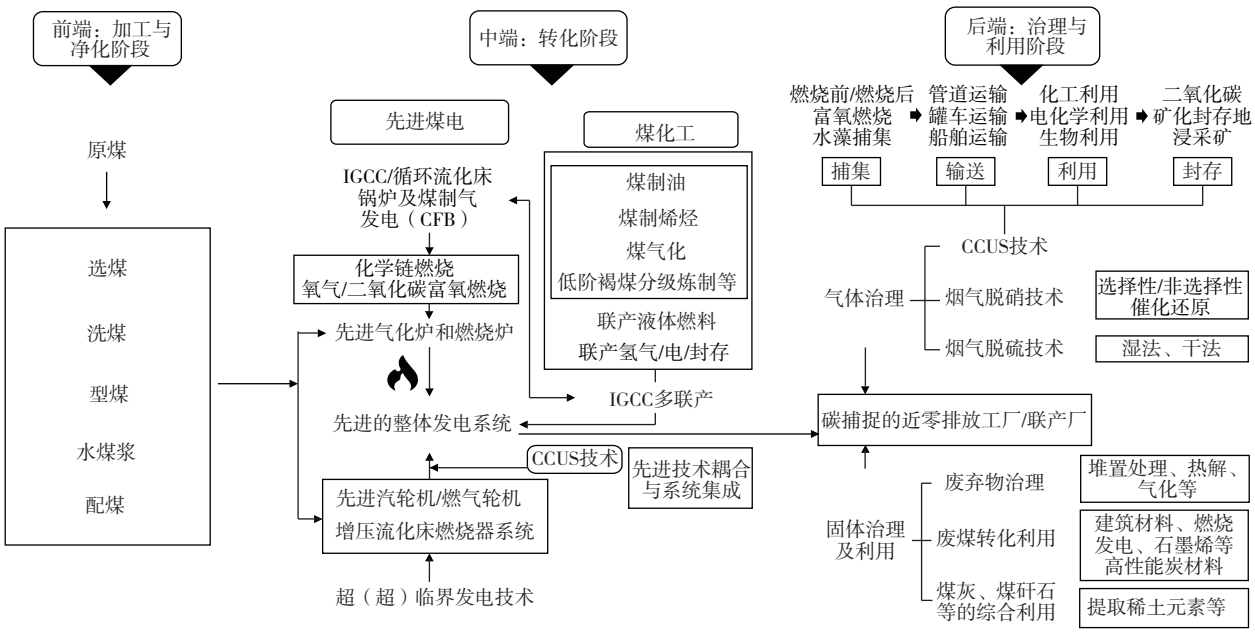

图 1　煤炭清洁高效利用技术路线图

状态点的参数时为超临界状态，而超超临界发电是在此参数基础上提高蒸汽压力和温度，使得同等大小的锅炉释放出来更大的能量，从而提升燃煤发电效率。近年来，美国能源部（DOE）的化石能源办公室（FE）和国家能源技术实验室（NETL）等一直通过支持“煤炭优先”计划等，寻求开发设计未来所需的先进燃煤电厂，以提供安全、稳定和可靠的电力。2019 年，美国能源部投资 1 亿美元用于未来煤炭优先发电厂所需创新和尖端部件，包括先进制造或装配部件的工艺，改进燃煤电厂的设计方式，开发可提供安全、稳定、灵活、可靠的电力且几乎零碳排放的未来燃煤电厂。2020 年，美国能源部在“煤炭优先”计划下投入 1.18 亿美元，其中，3 700 万美元用于支持开发未来先进燃煤电厂的关键组件（如超临界二氧化碳涡轮机高温密封件等），8 100 万美元用于先进燃煤电厂概念的设计开发和系统集成研究。

目前，先进燃煤发电主要研发方向有先进 IGCC 的商业示范、先进碳捕集增压流化床燃烧发电系统的设计开发和系统集成设计、用于改进燃煤发电状态监测的传感器、用于先进超超临界锅炉的耐腐蚀和耐侵蚀涂层材料、混合燃气轮机和超超临界燃煤锅炉概念工厂的前端工程设计研究等。

在上述研究中，美国主要参与的高校及科研院所有缅因大学、华盛顿大学、克莱姆森大学、肯塔基大学、犹他大学、利哈伊大学、北达科他大学和伊利诺伊大学、燃气技术研究所（Gas Technology Institute）、南方研究所（Southern Research Institute）、电力研究所（Electric Power Research Institute）等；主要参与的企业有通用电气（General Electric）公司、通用电气蒸汽动力（General Electric Steam Power）公司、氢能国际（Hydrogen Energy International）公司、微光束技术（Microbeam Technologies）公司、Oceanit 实验室公司、阿尔斯通电力（Alstom Power）公司、应用热涂层（Applied Thermal Coatings）公司、巴尔工程（Barr Engineering）公司和西门子（Siemens）公司等。表 1 为美国 DOE 重点资助的燃煤发电项目情况。

1.2　先进煤化工技术

先进煤化工技术包括煤制烯烃 / 芳烃、煤制乙二醇、煤制油等。与煤炭的一次转化方式不同，煤化工技术主要分为煤焦化、煤气化与煤液化 3 种。2019 年，美国 DOE 为“煤制高附加值产品”研发项目投入 1 000 万美元，通过高压涡流式氧 – 煤燃烧器、煤的化学链燃烧和化学链氧解耦燃烧等新技术的研发和示范推进洁净煤技术的发展。2020 年，美国 DOE 为“先进煤化工技术”研发项目投入 1 400 万美元，支持开发高性能低成本的煤基原料及其衍生品转化为建筑材料（屋面瓦、隔热材料、瓷砖等）、基础设施组件材料（下水道和隧道的组

表 1　美国 DOE 重点资助的燃煤发电项目

资助时间	项目名称	资助金额 / 万美元	主要研究机构
2017 年 10 月	用于改进燃煤发电极端环境监测的无线传感器成熟技术	约 200	缅因大学
	用于煤基发电锅炉原位腐蚀监测的高温电化学传感器	约 133	西弗吉尼亚大学研究公司
	评估蒸汽循环升级以提高美国燃煤电厂竞争力	约 118	电力研究所
	提高燃煤冷凝器效率的先进防污垢涂层	200	Oceanit 实验室公司
2019 年 6 月	燃煤锅炉管现场状态监测用分布式同轴电缆传感器的测试与验证	300	克莱姆森大学
	燃煤电厂的瞬态效率、灵活性和可靠性优化	约 200	通用电气公司
	利用等离子点火和燃烧稳定技术改善现有燃煤锅炉的灵活性、可靠性和经济性	约 362	通用电气蒸汽动力公司
	在相关燃煤电厂环境中改进冷凝器传热和性能技术研究	200	电力研究所
	燃煤电厂先进蒸汽轮机	1 190	通用电气公司、西门子公司
2019 年 9 月	嵌入式传感器的先进制造；燃煤电厂冷却技术；燃煤电厂的建模及预测	930	克莱姆森大学、西门子公司、西弗吉尼亚大学研究公司；燃气技术研究所、北达科他大学等；通用电气公司、西门子公司、南方研究所

件、废水或固体废物处理设施组件、道路和桥梁组件等）、高价值碳基材料（导电油墨、增强型纺织品、电池电极、超级电容器材料等）以及碳泡沫材料，实现煤基原料到高价值材料的高效经济转化。

目前，先进煤化工主要的技术研发方向包括：从低阶煤提取高价值碳产品的煤炭提质或热解技术、将煤炭转化为高价值聚氨酯产品 / 锂离子电池级石墨 / 碳纳米材料和吸附剂 / 碳纤维 / 煤塑料复合材料原料、利用高效且超快速的微波或低温等离子体技术从民用煤中生产高价值的工业碳和 3D 打印复合材料、将煤炭转化为极高质量的石墨烯、煤基原料及其衍生品转化为碳基建筑和碳泡沫材料、先进煤 / 生物质气化发电及制氢系统、利用煤作为附加值产品生产锂离子电池负极材料等。

在上述研究中，美国主要参与的高校及科研院所有俄亥俄大学、肯塔基大学、乔治·华盛顿大学、伊利诺伊大学、威廉·马什·莱斯大学、巴特尔纪念研究所（Battelle Memorial Institute）等；主要参与的企业有赛默索尔（Thermosolv）公司、拉马科碳（Ramaco Carbon）公司、H 追求先锋（H Quest Vanguard）公司、塞姆塑料 EHC（Semplastics EHC）公司、沃巴什谷资源（Wabash Valley Resources）公司等。表 2 为 DOE 重点资助的先进煤化工项目情况。

1.3　“煤 + CCUS”技术

CCUS 技术是把生产过程中排放的二氧化碳进行提纯，继而投入新的生产过程中进行循环再利用或封存。美国 DOE 化石能源办公室和国家能源技术实验室一直专注于进一步提高效率和降低与碳捕获相关的成本来支持“煤 + CCUS”技术的开发与部署。2009 年以来，美国通过《美国复苏和再投资法案》《清洁电力计划》等大力资助“煤 + CCUS”技术发展。2018 年，《美国国内税收法》第 45Q 条为二氧化碳封存设立税收抵免，法案规定在 2024 年前开工的项目，通过强化采油永久封存的二氧化碳可抵税 35 美元 /t，而地质封存的二氧化碳可抵税 50 美元 /t。2019 年和 2020 年，美国能源部又先后投入约 1.1 亿美元和 1.31 亿美元资助开发高性能、低成本的先进“煤 + CCUS”技术，用

表 2　美国 DOE 重点资助的先进煤化工项目

资助时间	项目名称	资助金额 / 万美元	主要研究机构
2019 年 9 月	低阶煤的低排放公用燃料	约 189	赛默索尔公司
	利用美国国内煤作为制造高价值煤塑料复合材料的原料	150	俄亥俄大学
	用于高价值复合材料的煤转换为碳纤维（C2CF）连续加工工艺	约 148	肯塔基大学
	利用美国国内煤生产碳纤维的高产沥青合成工艺实验验证和连续测试	约 88	拉马科碳公司
	从民用煤中生产高价值的工业碳和3D打印复合材料的高效、超快速微波等离子体工艺	75	H 追求先锋公司
	以每吨 100 美元的价格将美国国内煤炭转化为极高质量的石墨烯	75	威廉・马什・莱斯大学
2021 年 10 月	将煤作为附加值产品的锂离子电池负极材料	75	塞姆塑料 EHC 公司

于煤和天然气发电厂碳捕获系统的前端工程设计研究、工业烟气中二氧化碳捕集技术的初步工程设计和燃烧后二氧化碳捕集技术的工业规模示范，高效捕集碳密集型企业（如燃煤电厂、煤化工企业）排放的二氧化碳。

目前，“煤 + CCUS”技术的主要技术研发方向有离子传输膜氧气技术、工业来源的二氧化碳捕获和压缩、煤电厂碳捕获系统的前端工程设计研究、直接空气捕获技术的创新研究和开发，以及福陆(Fluor)公司的Econamine FG PlusSM碳捕获工艺、瑞姆根动力系统（Ramgen Power Systems）公司的超音速激波压缩和发动机技术、利用燃煤电厂产生的二氧化碳生产有附加值产品的技术、确保盐碱地储层中二氧化碳地下安全存储等。

在上述研究中，美国主要参与的高校及科研院所有燃气技术研究所、西南研究所（Southwest Research Institute）、电力研究所、华盛顿大学、肯塔基大学、伊利诺伊大学、北达科他大学、哈佛大学、伦斯勒理工学院、哥伦比亚大学、阿克伦大学、新墨西哥矿业技术学院、特拉华大学和伊利诺伊州立大学等；主要参与的企业有北新电力（Basin Electric Power）公司、NRG 能源公司、空气化工产品（Air Products& Chemicals）公司、膜技术与研究（Membrane Technology and Research）公司、离子清洁能源（ION Clean Energy）公司、美国雪佛龙（Chevron USA）公司、瑞姆根动力系统公司、阿尔斯通电力公司、电芯（Electricore）公司、普莱克斯（Praxair）公司等。表 3 为美国 DOE 重点资

表 3　美国 DOE 重点资助的“煤 + CCUS”技术项目

资助时间	项目名称	资助金额 / 万美元	主要研究机构
2020 年 9 月	天然气烟气的碳捕获测试	1 300	美国雪佛龙公司
		1 300	离子清洁能源公司
		1 300	燃气技术研究所
2019 年 9 月	煤和天然气发电厂碳捕获系统的前端工程设计研究	5 540	伊利诺伊州立大学、电力研究所、离子清洁能源公司、膜技术与研究公司等
2020 年 4 月	伊利诺伊州储存走廊	约 1 812	伊利诺伊州立大学
	确保圣胡安盆地盐碱地储层中的二氧化碳安全存储项目	约 1 750	新墨西哥采矿和技术学院
	在密西西比州肯珀县建立二氧化碳存储综合设施的项目	约 1 748	南方各州能源委员会

助的“煤 + CCUS”技术项目情况。

1.4 煤炭 / 煤基能源中稀土元素提取技术

美国 DOE 从煤炭及其副产品中回收稀土元素的核心技术领域包括：（1）分离技术。包括商业分离系统和转型概念发展；（2）使能技术。包括资源识别、采集和表征，技术经济分析，现场 / 过程传感器；（3）工艺系统开发，包括高纯度产品生产、小试和中试规模的预浓缩生产。自 2014 年起，美国 DOE 化石能源办公室和国家能源技术实验室开始研究确定从煤炭及其副产品中提取稀土元素的经济可行性。2014 年，美国 DOE 制订了“DOE-NETL 稀土回收可行性计划”（2020 年更改为“关键矿产可持续发展计划”），以建立美国国内稀土供应链，进而增强美国关键矿产的安全保障 [23-24]。2019 年和 2021 年，该计划项目资金分别增至 1 800 万美元和 2 300 万美元。2020 年 9 月，美国 DOE 投资 1.22 亿美元启动“煤炭、稀土和关键原材料（CORE-CM）”多年期（2021—2023 年）研发计划，整合国家实验室、高校和私营企业研究力量，对含有煤炭、稀土元素和其他关键矿物资源的盆地开展资源评估，开发从煤矸石等矿产废弃物中回收稀土元素、碳基产品的处理加工技术，并将在美国煤炭资源丰富的地区（如乌因塔盆地、圣胡安河 – 拉顿 – 布莱克梅萨盆地、绿河风河盆地、粉河盆地、阿巴拉契亚盆地、墨西哥湾沿岸黑武士盆地、伊利诺伊盆地、威利斯顿盆地和阿拉斯加北坡盆地等）建立多个煤基高价值产品创新中心。

目前，美国主要利用烟煤褐煤、粉煤灰、选煤（洗煤）副产品、来自沥青煤层的矿山酸性废水等作为原料回收稀土元素。主要的技术研发方向包括：盆地煤炭、稀土等矿物资源可持续开采技术开发，稀土等关键矿物资源的高效分离纯化工艺，从煤基资源中回收稀土元素和关键材料的工艺放大和优化，将煤炭、稀土等矿物资源转化为高价值中间产品和最终产品及推进其商业化应用进程等。

在上述研究中，美国主要参与的高校及科研院所有肯塔基大学、宾夕法尼亚州立大学、美国莱斯大学、伊利诺伊大学、弗吉尼亚理工学院、新墨西哥采矿和技术学院、北达科他大学、怀俄明大学、西弗吉尼亚大学水资源研究所和北达科他州大学能源研究所等；主要参与的企业有伊康纳斯化工（Equinox Chemicals）公司、再生品投资（Inventure Renewables）公司、马歇尔米勒 & 联合（Marshall Miller& Associates）公司、德照科技（Tetra Tech）公司、X 照明（Xlight）公司、物理科学（Physical Sciences）公司、协同复合解决方案（Collaborative Composite Solutions）公司等。表 4 为 DOE 重点资助的从煤 / 煤副产品中提取稀土元素项目情况。

1.5 燃煤残渣转化利用技术

燃煤残渣转化利用方法主要包括燃烧、热解、制备沥青类产物、气化以及其他利用途径。近年来，美国 DOE 化石能源办公室和美国国家能源技术实验室长期资助和管理与燃煤残渣相关的创新减排技术研究项目，以改善燃煤残渣管理。2020 年，美国 DOE 化石能源办公室在“碳利用计划”下投入 1 700 万美元支持 11 个研发项目，包括提供 700 万美元合成甲酸等高价值有机产品、提供 600 万美元开发藻类固碳技术、提供 200 万美元生产碳纳米

表 4　美国 DOE 重点资助的从煤 / 煤副产品中提取稀土元素项目

资助时间	项目名称	资助金额 / 万美元	主要研究机构
2017 年 6 月	从废煤中高效、经济、大规模生产适销稀土产品	约 100	伊康纳斯化工公司
	从废煤中回收稀土元素	100	再生品投资公司
	从美国国内煤和煤副产品中生产适销稀土元素	100	马歇尔米勒 & 联合公司
2019 年 9 月	使用创新、低成本工艺技术从煤基能源中规模化生产稀土氧化物和关键材料的示范研究	1 500	肯塔基大学
	从北达科他州煤相关原料中提取和浓缩稀土元素的中试试验		北达科他州大学能源研究所
	集成矿山酸性废水处理和稀土 / 关键矿物工厂的开发测试		西弗吉尼亚大学研究公司

管、提供 200 万美元提高混凝土和水泥的二氧化碳吸收量。2021 年，美国 DOE 化石能源办公室提供近 700 万美元支持 7 个研发项目，利用从尾矿和灰烬等煤炭废物中提取的材料，开发用于增材制造的煤基增强细丝或树脂，并生产用于制造电池、燃料电池和储能设备的石墨。

目前，在燃煤残渣转化利用方面主要的技术研发方向包括：将二氧化碳和燃煤残渣转化为建筑产品，利用燃煤残渣生产增值产品的疏水 – 亲水分离工艺，生产升级煤炭产品和具有商业价值副产品的新型 Charfuel 煤炭精炼工艺，将气体二氧化碳排放和燃煤残渣快速转化为低碳“绿色”二氧化碳混凝土产品，用于增值产品的表面改性粉煤灰，煤基石墨烯颗粒黏结丝的实验室规模生产以及用燃煤残渣合成模压石墨制品等。

在上述研究中，美国主要参与的高校及科研院所有加州大学洛杉矶分校、伊利诺伊大学、伊利诺伊理工学院、特拉华大学、北达科他大学、俄亥俄大学和试金石（Touchstone）研究实验室等；主要参与的企业有矿物精炼（Minerals Refining）公司、碳燃料（Carbon Fuels）公司、塞姆塑料 EHC 公司、贝克休斯能源转型（Baker Hughes Energy Transition）公司等。表 5 为美国 DOE 重点资助的燃煤残渣转化利用项目情况。

表 5　美国 DOE 重点资助的燃煤残渣转化利用项目

资助时间	项目名称	资助金额 / 万美元	主要研究机构
2018 年 10 月	将二氧化碳和燃煤残渣转化为建筑产品的工艺演示	150	加州大学洛杉矶分校
	从废煤中生产增值产品的疏水 – 亲水分离工艺的中试试验	200	矿物精炼公司
	生产升级煤炭产品和有商业价值副产品的新型煤炭精炼工艺 18 程序升温脱附（TPD）中试项目	200	碳燃料公司
2020 年 6 月	在二氧化碳混凝土中实现二氧化碳利用：系统设计、产品开发和工艺演示	200	加州大学洛杉矶分校
2021 年 10 月	通过废料增强长丝的碳化结构的熔融沉积成型增材制造	100	俄亥俄大学
	煤基石墨烯颗粒黏结丝的实验室规模生产	100	特拉华大学
	利用碳供应链废料和副产品制造用于储能的石墨	100	俄亥俄大学
	用废煤合成模压石墨制品	100	试金石研究实验室
	煤和煤矸石深加工生产快速充电锂离子电池负极用石墨	100	北达科他大学

2　中国清洁煤技术发展现状

在“双碳”背景下，中国为推动能源绿色低碳转型，主要从煤炭清洁高效转化技术、先进燃煤发电技术两个方向对煤炭清洁高效利用技术进行了重点部署，如图 2 所示。

中国煤电机组节能降耗改造持续推进，例如，华能在燃煤机组上领先于全国平均水平，供电能耗上低于 300 g/（kW・h），650 ℃超超临界发电技术将使供电煤耗进一步降低到 254 g/（kW・h），发电效率提高到 50%。中国大容量循环流化床锅炉技术已完成了 300 MW 等级循环流化床锅炉的自主研制与示范运行，并实现了批量生产。自主开发、设计、制造的 600 MW 超临界循环流化床锅炉燃煤工程示范项目已经投入商业运行。中国煤气化技术在工程化应用等方面处于国际领先水平，自主开发的煤气化甲烷化关键技术、焦炉煤气制天然气技术、催化气化和煤加氢气化等技术均已建立了中试装置或进入工艺试验阶段，向国际先进水平靠拢。部分新的煤气化技术尚处于研发和中试阶段，并开展了不同煤种的试验，地下煤气化完成了工业试验装置的建设和运行。中国 CCUS 技术研究起步较晚，但发展迅速，已经开展了多项工程示范。燃烧前捕集技术整体处于工业示范阶段，与美国先进水平基本同步；燃烧后捕集技术处于中试或工业示范阶段，相比美国先进水平存在一定的差距；富氧燃烧技术国内外均处于中试阶段，整体发展缓慢。

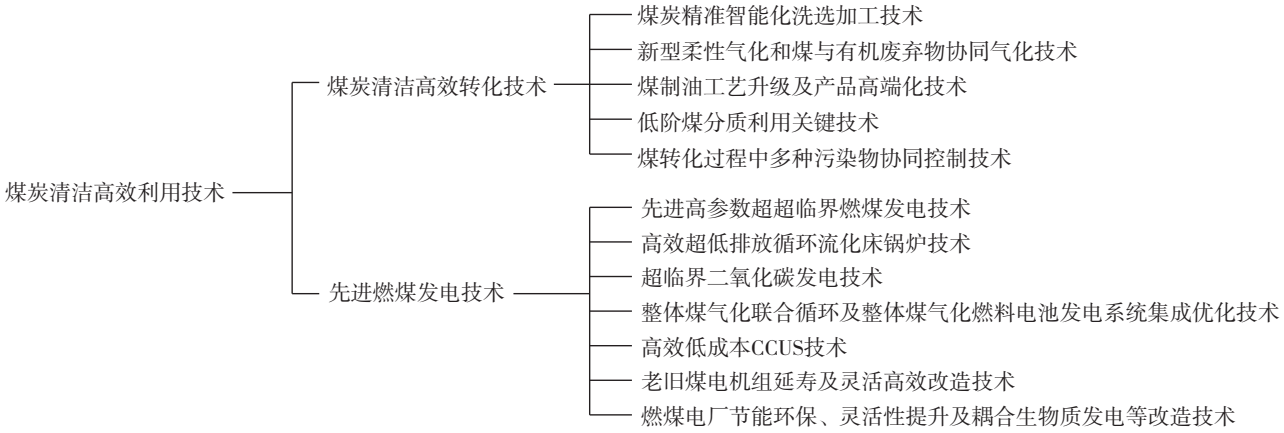

图 2　中国清洁煤领域重点技术方向

3　启示与建议

近年来，中国在煤炭清洁高效利用方面的技术发展很快，取得了一系列重大成果。结合经济、社会发展趋势，中国煤炭清洁高效利用技术重点包括：以高效超超临界技术为主攻方向提高煤电效率；减少非温室气体排放，主要有二氧化硫、氮氧化合物等污染物控制技术；优化煤炭利用，持续推动煤转化技术发展；减少二氧化碳排放，推进“煤 + CCUS”技术攻关。

未来中长期内，中国在煤炭清洁高效利用领域的核心技术仍有待突破[25–28]。目前其在高效利用和综合治理方面与美国等发达国家仍存在一定差距，亟待面向“双碳”目标重点发展煤炭清洁高效利用前沿技术。结合以上分析，提出如下发展建议：

（1）建议加强科技项目布局，重点实施煤炭清洁高效利用科技研发，如煤基特种燃料、近零碳排放煤化工工艺，大力发展 CCUS 技术，加强对新一代超超临界燃煤发电、IGCC 等先进煤电技术研发部署与工程示范。

（2）通过科学规划布局现代煤化工，在末端环节加强二氧化碳资源化利用技术，推动煤炭深加工产业升级示范等，以实现未来先进煤化工产业可持续发展。

（3）完善“煤 + CCUS”技术的政策支持与标准规范体系，开发低成本、低能耗 CCUS 技术，以及大规模“煤电 + CCUS”技术一体化项目，积极推进“煤 + CCUS”技术与产业发展。

（4）开发煤和煤副产品中稀土元素提取技术，研究评估有利用价值或潜在利用价值的稀土元素的可利用性、赋存状态、分布规律，验证中国从煤和煤副产品中回收稀土元素的经济可行性。■

参考文献：

[1] 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.

[2] 何金祥 , 郭娟 . 美国煤炭工业的现状与发展前景 [J]. 自然资源情报 , 2022(3): 1-6.

[3] 童健活 . 煤炭清洁高效利用的探索与发现 [J]. 能源与环保 , 2021, 43(1): 70-73, 78.

[4] 张楠 . 煤炭清洁高效转化技术研究 [J]. 科研开发 , 2020(2): 139-140.

[5] 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): 35-42.

[6] 陆津津 , 吴鹏超 . 煤化工产业中洁净煤气化技术分析 [J]. 石化技术 , 2017(12): 56.

[7] 石晓敏 , 栗继祖 . 基于专利数据的我国洁净煤技术研发现状与热点研究 [J]. 技术与创新管理 , 2022, 44(2): 151-158.

[8] 王倩 , 王卫良 , 刘敏 , 等 . 超 (超) 临界燃煤发电技术发展与展望 [J]. 热力发电 , 2021, 50(2): 1-9.

[9] 何波 . 我国煤炭工业节能减排技术现状及发展思考 [J]. 能源研究与信息 , 2015, 31(4): 198-204.

[10] 任永强 , 车得福 , 许世森 , 等 . 国内外 IGCC 技术典型分析 [J]. 中国电力 , 2019, 52(2): 7-13.

[11] 白尊亮 . 中美日典型 IGCC 电站对比研究 [J]. 中外能源 , 2021, 26(5): 9-15.

[12] 张勇 , 闫媛媛 . 整体煤气化联合循环 IGCC 技术发展综述 [J]. 节能与环保 , 2013(5): 14-16.
[13] 郭晋伟 . 煤制油技术产业发展现状及前景探析 [J]. 山西化工 , 2022, 42(5): 41-42.
[14] 王忠臣 , 李晓宏 , 何炳昊 , 等 . 煤液化制油技术研究进展 [J]. 化工设计通讯 , 2019, 45(2): 18-20.
[15] 秦阿宁 , 吴晓燕 , 李娜娜 , 等 . 国际碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术发展战略与技术布局分析 [J]. 科学观察 , 2022, 17(4): 29-37.
[16] 陆诗建 . “ 双碳 ” 目标下 CCUS 在引领煤炭行业低碳转型过程中的作用 [J]. 可持续发展经济导刊 , 2021(11): 28-30.
[17] 宋晓波 , 胡伯 . 碳中和背景下煤炭行业低碳发展研究 [J]. 中国煤炭 , 2021, 47(7): 17-24.
[18] 刘峰 , 郭林峰 , 赵路正 . 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径 [J]. 煤炭学报 , 2022, 47(1): 1-15.
[19] 谢和平 , 任世华 , 谢亚辰 , 等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇 [J]. 煤炭学报 , 2021, 46(7): 2197-2211.
[20] 彭苏萍 . 煤炭行业低碳转型发展的工程路径与技术需求厂 [J]. 能源 , 2021(8): 49-51.
[21] 李宏 . 碳中和背景下我国煤炭行业的发展与转型研究 [J]. 低碳世界 , 2021, 11(8): 23-24.
[22] 卢晓燕. 碳中和背景下中国煤炭行业转型发展路径研究 [J]. 煤炭经济研究 , 2021, 41(8): 64-68.
[23] 张所续 , 周季鑫. 美国关键矿产政策演变及战略举措 [J]. 中国国土资源经济 , 2022, 35(2): 12-21.
[24] 张所续 , 罗晓玲 . 美国关键矿产政策内涵的演变与启示 [J]. 中国矿业 , 2020, 29(12): 15-21.
[25] 赵震宇 , 姚舜 , 杨朔鹏 , 等 . “ 双碳 ” 目标下 : 中国 CCUS 发展现状、存在问题及建议 [J]. 环境科学 , 2023, 44(2): 1128-1138.
[26] 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.
[27] 张胜利 , 汤家轩 , 王猛 . “ 双碳 ” 背景下我国煤炭行业发展面临的挑战与机遇 [J]. 中国煤炭 , 2022, 48(5): 1-5.
[28] 孙博超. 新发展格局下我国煤炭行业高质量发展对策研究 [J]. 煤炭经济研究 , 2021, 41(5): 54-58.

Enlightenment to China from the Development of Clean and Efficient Utilization Technology of Coal in United States

XIONG Shuling[1], ZHENG Jia[1], TU Xinyu[1], WANG Shujie[1], LIU Renhou[2]
(1. Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing　100038;
2. National Academy of Innovation Strategy, Beijing　100038)

Abstract: In recent years, the United States has been promoting the development of advanced coal-fired power plants, advanced coal chemical technology and equipment through the “coal first” program, and supporting the development and deployment of “coal + carbon capture, utilization and storage (CCUS)” technology by further improving efficiency and reducing costs associated with carbon capture, while focusing on technologies to recover rare earth elements from coal and coal-based energy. The paper systematically summarizes the research and development investment, research direction and research institutions of the whole process of clean and efficient utilization of coal in the United States, combined with the development status of clean coal technology in China, and puts forward development suggestions for the development of clean and efficient utilization of cutting-edge coal technology under the “Peak Carbon Dioxide Emissions and Carbon Neutrality” goal, which can provide references for further building a green, low-carbon, safe and efficient modern energy system in China.

Keywords: the United States; clean coal; efficient use; green and low-carbon