

国家重点研发计划重点专项实施方案
(征求意见稿)

专项名称: 煤炭清洁高效利用和新型节能技术

所属领域: 能源

实施年限: 2016-2020

二〇一五年七月

目录

一、意义和必要性	1
二、国内外现状和发展趋势	3
(一) 国内外相关技术、产业和应用现状及发展趋势	3
(1) 煤炭高效发电	5
(2) 煤炭清洁转化	7
(3) 燃煤污染控制	12
(4) 二氧化碳捕集利用与封存	15
(5) 工业余能回收利用	17
(6) 工业流程及装备节能	20
(7) 数据中心及公共机构节能	23
(二) 本专项拟解决的重大科学问题和重大技术瓶颈	26
三、目标及主要任务	27
(一) 总体目标	27
(二) 主要任务与具体目标	28
方向一 煤炭高效发电	29
任务1 先进燃煤发电技术的基础研究	29
任务2 煤基燃料的燃烧发电共性关键技术开发示范	30
任务3 700℃等级超超临界发电技术	31
任务4 先进燃烧发电技术示范与运行优化	32
方向二 煤炭清洁转化	32
任务1 煤炭/合成气直接转化制燃料与化学品反应和催化基础研究	33
任务2 煤制清洁燃气关键技术研究	33
任务3 煤制液体燃料及大宗化学品关键技术研究	34
任务4 煤气化和煤分级转化技术工业示范	35
方向三 燃煤污染控制	36
任务1 燃煤污染物资源化利用关键技术	36
任务2 燃煤 PM _{2.5} 、重金属及有机污染物控制技术	37

任务 3 燃煤常规污染物超低排放技术（SO ₂ ，NO _X ，颗粒物）和一体化控制技术.....	37
方向四 二氧化碳捕集利用与封存.....	38
任务 1 基于 CO ₂ 减排和利用的关键基础科学问题.....	38
任务 2 基于 CO ₂ 减排的燃烧及 CO ₂ 分离捕获关键技术.....	39
任务 3 CO ₂ 利用和地质封存关键技术.....	39
方向五 工业余能回收利用.....	40
任务 1 高温散料与液态熔渣高效热回收技术.....	40
任务 2 工业含尘废气余热回收技术.....	41
任务 3 低品位余能回收技术与装备研发.....	41
方向六 工业流程及装备节能.....	42
任务 1 流程工业系统优化协同节能技术.....	42
任务 2 气体制备与全氧/富氧冶金技术.....	43
任务 3 通用机电装备节能技术.....	44
任务 4 工业锅炉及窑炉节能减排技术.....	44
方向七 数据中心及公共机构节能.....	45
任务 1 数据中心节能技术.....	45
任务 2 公共机构设备及系统节能.....	46
四、资金需求.....	46
(一) 总资金需求.....	46
(二) 分研发阶段资金需求.....	46
五、组织实施方式与保障措施.....	46
(一) 组织实施机制.....	46
(二) 保障措施.....	47
六、效益与风险分析.....	48
七、其他说明和附件.....	50
(一) 相关科技计划.....	50
(二) 出台的相关产业政策与产业规划.....	50

一、意义和必要性

2000-2014年，全球一次能源消费总量增长了38.4%，增长量为51.2亿吨标煤，而我国增长了203%，增量为28.5亿吨标煤。同期，全球一次能源结构整体变化整体趋势为石油和煤炭份额下降，天然气份额提高，非化石能源规模迅速上升。当前，**世界主要国家均加速调整能源结构和转变能源开发利用模式**，加快向绿色、多元、高效的可持续能源系统转型。

我国是世界最大的能源生产和消费国，但能源资源约束日益加剧，生态环境问题突出，调整结构、提高能效和保障能源安全的压力进一步加大，科技与体制机制创新亟待加强，能源发展面临两方面重要挑战：一方面，能源消费总量持续增加，约束矛盾突出，能源利用效率低下。我国能源转化和用能装备技术能效偏低，煤炭等化石能源清洁高效利用技术开发滞后，远未得到优质化利用；整体能源利用效率低，与发达国家差距明显，全社会节能仍有巨大潜力。另一方面，环境生态压力加大，碳排放问题突出。**化石能源特别是煤炭的大规模开发利用，对生态环境造成严重影响**，也是全球温室气体排放量最大的国家。

煤炭是我国长期的主导能源和重要工业原料，正在向基础能源的战略地位发生转变，煤炭利用的技术创新支撑了煤炭工业的长足发展、产量的快速增长、生产力水平的大幅提高，为经济社会健康发展做出了突出贡献。但煤炭利用方式粗放、能效低、污染重等问题没有得到根本解决。加快推动能源革命，以煤炭作为重点，实现节能优先的国家能源战略，**通过科技创新，进一步提高煤炭清洁高效利用水平，有效缓解资源环境压力，势在必行。**

煤炭清洁高效利用和全面实施节能是破解上述难题的主要途径。国务院发布的《能源发展战略行动计划（2014-2020）》明确提出能源发展要“重点实施节约优先、立足国内、绿色低碳和创新驱动四大战略”。主要任务包含“推进煤炭清洁高效开发利用”，“按照安全、绿色、集约、高效的原则，加快发展煤炭清洁开发利用技术，不断提高煤炭清洁高效开发利用水平”。“积极发展能源替代”，“稳妥实施煤制油、煤制气示范工程”。“着力实施能效提升计划”，“坚持节能优先，以工业、建筑和交通领域为重点，创新发展方式，形成节能型生产和消费模式”。国务院发布的《中国制造2025》提出“全面推行绿色制造”的重点任务，“加大先进节能环保技术、工艺和装备的研发力度，加快制造业绿色改造升级；积极推行低碳化、循环化和集约化，提高制造业资源利用效率；强化产品全生命周期绿色管理，

努力构建高效、清洁、低碳、循环的绿色制造体系”。煤炭利用必须以清洁、高效、可持续发展为核心目标，以研发和应用煤炭高效清洁利用技术为战略支点，积极推动实现煤炭清洁高效利用与社会、经济、资源、环境相协调，保障我国能源安全，支撑我国经济社会可持续发展，引领煤炭利用的世界潮流。以系统节能为切入点，以高耗能工业等重点领域关键环节为突破口，实行世界先进水平能效标准。

能源科技创新与发展是实现上述发展愿景，抢占世界能源领域制高点的重要手段。三十多年的改革开放，我国走过了西方发达国家 200 年的工业化历程，**煤炭利用和节能减排等领域取得重要进展。**

在燃煤发电技术方面，目前已经形成世界最大规模的超超临界机组，建立了世界最先进的超超临界发电机组。自主研发 600 兆瓦空冷机组打破了国外的技术垄断。建成投运了 250 兆瓦级煤气化联合循环（IGCC）示范电站；自主知识产权的 600 兆瓦超临界循环流化床锅炉技术取得了突破，并已投入商业化运行。

在煤转化技术方面，成功研发出 3000 吨/日先进煤气化技术及装备，开发了百万吨级煤直接液化工业示范装置成功运行，16-18 万吨级煤间接液化示范工程投入运行，多套 60 万吨级煤制烯烃工业装置建成并投产，13 亿 m³ 煤制天然气工程投入商业化运行。在新型煤气化、直接液化、煤制烯烃等技术整体上居于国际领先水平。投产或建设中的煤制油、煤制天然气、煤制烯烃等新型煤转化工厂总规模达到约 1500 万吨当量油/年。

在节能技术方面，我国先进连铸连轧钢铁生产工艺、多级旋风原料预热和熟料余热回收等技术广泛应用，技术进步成果对节能减排的贡献非常显著。主要工业产品单位能耗实现逐年大幅下降，供电煤耗由 2006 年的每千瓦时 355.5 克标煤降至 2014 年的 318 克标煤；吨钢综合能耗由 2006 年的 645 千克标煤降至 2014 年的 584.7 千克标煤；电解铝综合能耗每吨铝锭下降 1000 千瓦时；吨水泥生产的综合能耗由 2006 年的 120 千克标煤减少为 2013 年的约 80 千克标煤。仅这四个工业行业，年节煤量达到 2.9 亿吨标准煤，从 2006 年到 2013 年累计节煤量 10 亿吨标煤。

为适应国家能源可持续发展的重大需求，我国煤炭清洁高效利用和节能技术仍有必要进一步发展和提升水平。一方面，煤炭转化需要进一步提高效率、减少水消耗和控制污染；新一代 700℃ 超超临界发电与世界先进水平有较大差距；工业过程用煤的污染物控制显著落后于国外先进水平，发电过程重金属排放控制技术仍处于初级阶段；CO₂ 减排压力大、缺乏大规模低成本有效捕集、封存及利用技术。另一方

面，我国目前产业结构以高耗能行业为主，迫切需要研制出相应的新型节能技术以突破制约经济发展的瓶颈；以电动机械、流体机械和动力机械为主的通用装备量大面广，亟需研发新的节能减排技术；“互联网+”等现代信息技术的实施和普及，使大型数据中心和公共机构设备节能成为一个新的热点。

当前是实现我国经济复兴、创新能力持续提升的关键期。经济发展需求和资源、环境可承受条件的双重制约下，创新发展和生态文明的双重驱动下，**我国必须实现煤炭等化石能源的清洁化与高效化，大力发展可再生能源，全面实施节能工程**，以能源可持续发展支撑我国经济社会持续健康发展，为全面建成小康社会、实现中华民族伟大复兴的中国梦提供安全可靠的坚强保障。

实施“煤炭清洁高效利用和新型节能技术”重点研发计划意义重大。煤炭清洁高效利用技术的发展将有助于解决煤的利用所带来的环境问题，同时也将为国家能源安全提供重要保障。从资源量和开发利用条件等方面综合来看，在未来相当长时期内，煤炭仍将是**中国最稳定、最可靠的基础能源**。煤炭清洁高效利用技术可以将煤炭清洁转化为电力、热力、燃气、液体燃料和化学品等。

新型节能技术将引导我国重点领域能耗大幅下降，推进经济结构的转型与升级。高效的节能减排包括工业流程的资源与能源的协同利用、行业间副产物或中间产物的交叉与循环利用、跨行业产品的并行多联产等。新型节能技术和高耗能行业的有机结合还将加速节能环保这一新兴战略产业的规模化发展。

二、国内外现状和发展趋势

（一）国内外相关技术、产业和应用现状及发展趋势

抢占能源高技术领域的制高点，一直是世界工业发达国家间科技与经济实力比拼的核心区域，特别是在围绕能源开发、装备制造等交叉领域的高技术竞争，被认为是最重要的国家安全和实力因素。为此，欧、美、日等发达国家根据各自的国情纷纷制定了煤炭高效清洁利用技术研究计划，如：美国的 Vision21 计划、欧盟的兆卡计划、日本的新阳光计划等。美国的煤炭高效清洁利用技术的发展致力于发展以煤炭转化为核心的能源、燃料、化学品联产，通过燃料电池发电、副产交通燃料和化工原料，实现高效转化和近零排放的目标。欧盟发展煤炭高效清洁利用技术的主旨是减少对石油的依赖和煤炭利用造成的环境污染，使燃煤发电更加洁净，通过提高效率减少煤炭消耗。日本的煤炭利用特别追求高效率和高经济性。通过“阳光计划”、“新阳光计划”等的实施，使日本在煤炭高效清洁利用技术的某些领域处

于世界领先水平，如：超超临界发电技术、燃煤污染物控制技术和煤转化技术等。

针对我国以煤为主的能源结构，自国家“十五”计划以来，一直将煤炭高效清洁利用技术、重点工业行业节能技术作为国家科技计划的重点方向，在高效转化、清洁发电、污染物控制、温室气体减排、工业余能回收利用、工业流程及装备节能、数据中心及公共机构节能等方面进行了持续支持，形成了一批以国家重点实验室、国家工程技术研究中心、国家工程实验室等为代表的创新平台，培养和汇聚了一批高水平的煤炭高效清洁利用技术创新人才和团队，取得了一系列重要成果，支撑了我国煤炭高效清洁利用技术的创新发展，很多技术已经与国外同步，有的技术已经引领国内外发展趋势。如：600-1000兆瓦超超临界燃煤发电技术、600-1000兆瓦超超临界二次再热技术、600-1000兆瓦超超临界自大型空冷机组发电技术、IGCC发电技术、600兆瓦成循环流化床技术、3000吨/日新型水煤浆气化技术，2000吨/日两段式干煤粉加压气化技术、百万吨/年煤直接液化技术、16-18万吨/年煤间接液化技术等；在工业节能方面也取得了长足发展，全国供电煤耗降低约10%，年节煤1.45亿吨标准煤；吨钢综合能耗降低约9%，年节能3970万吨标准煤；吨电解铝综合能耗下降1000千瓦时，年节能1140万吨标准煤；吨水泥综合能耗降低约33%，年节能9660万吨标准煤等。技术进步成果对工业节能的贡献非常显著。我国公共机构节能成效显著，已建立公共机构能源资源消耗统计制度，并纳入国家统计体系，完成了对2005年至2010年全国公共机构能源资源消耗情况的汇总分析，纳入统计范围的公共机构达62万家。2005年至2010年，全国公共机构节能3391万吨标准煤，减排二氧化碳8477.5万吨，2011年单位面积能耗较2005年下降16.8%。

但我国煤炭高效清洁利用技术、重点工业行业节能技术仍有待进一步发展和提升水平。如：煤炭转化需要进一步提高效率、减少水消耗和控制污染；新一代700℃超超临界发电与世界先进水平有较大差距；工业过程用煤的污染物控制显著落后于国外先进水平；发电过程重金属排放控制技术仍处于初级阶段；CO₂减排压力大、缺乏大规模低成本有效捕集、封存及利用技术；我国的能源经济效率仍较低，我国一样为工业出口大国的德国相比，其工业单位能源投入产生的产品销售价值是我国的10倍以上，我国的整体用能水平与发达国家还有明显差距，在节能技术方面还有很大的提升空间。如今，能源、资源和环境的约束已成为我国社会经济发展的最大瓶颈，亟需加大对节能技术的研发力度，特别是工业余能回收、流程创新与优化节能、通用机电装备能效提高、大型数据中心及公共机构高效用能等值得重点研发。我国能源效率改进的潜力和余地巨大。

(1) 煤炭高效发电

国外现状及发展趋势

美国是世界上发展超临界火电机组最早的国家，目前拥有 9 台世界上最大的超临界机组，单机容量为 1300 兆瓦。目前正在进行新一代（760℃）的用于超超临界参数机组的锅炉材料研究计划，以开发温度和压力更高的燃煤发电机组；在 IGCC 发电技术上，美国 Wabash River IGCC 示范机组，净功率 262 兆瓦，设计净效率 40%（LHV）；Tampa 电站 IGCC 机组采用 Texaco 气化炉和 GE7FA 燃气轮机，净功率为 250 兆瓦，设计净效率 41%（LHV）；在 Pinon Pine 建成另一个 IGCC 电站采用 KRW 增压流化床空气气化技术，机组净出力 99.7 兆瓦，机组净效率 42%（LHV）。在超临界循环流化床技术上，完成了 460 兆瓦超临界循环流化床锅炉机组基础上，正在开发 550 兆瓦超临界循环流化床锅炉发电技术。

欧盟发展煤炭高效清洁利用技术的主要目标是减少各种燃煤污染物以及 CO₂ 和其它温室气体排放，使燃煤发电更加洁净，通过提高效率减少煤炭消费。目前正在研究开发的项目有整体煤气化联合循环发电，煤与生物质及工业、城市或农业废弃物共气化（或燃烧），固体燃料气化燃料电池联合循环，循环流化床燃烧技术等。在欧洲大约有 60 台超临界机组，其中具有代表性的超临界机组是 Hessler 电厂投运的 700 兆瓦机组（蒸汽参数为 30MPa/580℃/600℃）以及丹麦投运的二台 411 兆瓦超超临界二次再热超超临界机组（29MPa/582℃/580℃/580℃），在海水冷却的情况下，其热效率达到~47%。欧盟有两个 IGCC 示范项目，其中西班牙的 Puertollano 300 兆瓦 IGCC 示范电站是目前世界上单机容量最大的 IGCC 电站，净效率 45%（LHV）。

日本的煤炭高效清洁利用技术开发从内容上分为两部分：一是提高热效率，降低废气排放。如：超超临界机组延寿技术、煤气化联合循环发电及煤气化燃料电池联合发电技术等。二是进行煤炭燃烧前后净化，包括燃前处理、燃烧过程中及燃后烟道气的脱硫脱氮、煤炭的有效利用等。日本非常注重发电机组的效率，其超超临界技术采用的是引进、仿制、创新的技术路线。截止目前已有 60 多台超临界以上火力发电机组在运行。

因此，国外先进国家在煤炭燃烧发电方面的技术发展趋势是，研究开发更高参数、更低污染物排放的、燃料适应性更强的燃烧发电技术，包括超超临界燃烧发电技术、IGCC 技术和基于发电的多联产技术，目的是进一步提高运行发电效率，降低污染物排放。

国内情况及已取得成果

目前，我国实现了超超临界燃煤发电技术的跨越式发展，整体上达到了国际先进水平。2014 年底，超超临界机组总装机超过 1 亿千瓦，已成为我国新建机组的主力机组，与同等容量的亚临界机组相比，年可节约标煤 2200 万吨，减排 CO₂ 约 5720 万吨，其中上海外高桥三电厂年平均供电煤耗为 279 克标煤/千瓦时，达到了世界领先水平；打破国外技术垄断，自主研发成功 600 兆瓦等级大型空冷机组的空冷系统，开发并建成了世界首座 1000 兆瓦等级超超临界空冷机组，目前，采用自主知识产权空冷系统的机组总装机达到 6600 万千瓦，满足了煤电布局要求，年节水达 11 亿吨；我国首台套 1000 兆瓦等级二次再热超超临界机组正在调试阶段，与当今世界火力发电最高效率 47%相当；在国家相关部委共同支持下，华能集团在天津建成了我国第一套 250 兆瓦 IGCC 示范电站，其设计发电效率达到了 41%(LHV)，实现了我国在 IGCC 发电技术上零的突破，打破了国外在该技术上的垄断；我国循环流化床(CFB)锅炉技术开发与工业应用已基本成熟，完成了 300 兆瓦等级燃劣质燃料机组的自主研发和产业化应用，在发改委和科技部共同支持下，汇集了国内主要科研单位、大学和锅炉制造企业和电力生产企业，联合攻关，完成了世界最大的 600 兆瓦超临界循环流化床锅炉机组开发，并在四川白马投入商业运行，达到了世界领先水平；“十二五”期间针对 700℃超超临界发电技术开展了基础性研究，成立了 700℃发电产业联盟。目前我国超超临界机组技术水平、发展速度、装机容量和机组数量均已跃居世界首位。该成果对我国火电行业优化结构、全面提高燃煤发电效率、减少污染物排放有重大贡献。

国内清华大学、中科院、西安热工院、浙江大学等主要科研单位和大学、煤炭燃烧方面的重点实验室和工程中心、以及大量企业通过多种方式进行了煤炭高效发电技术研发，比较代表性企业有电力企业和制造企业，如五大电力公司、神华集团和三大电气集团等，基本形成了科研、技术开发示范及产业化应用的研发链和产业链体系。

国内外比较分析

目前，我国通过引进、消化吸收国外发达国家的先进超超临界发电技术，已经具备了设计、制造 600 兆瓦/1000 兆瓦等级超超临界发电机组的基础和能力，在 600 兆瓦/1000 兆瓦等级超超临界发电机组锅炉运行等方面积累了丰富的经验，这为进一步发展更高参数(超 600℃、超 700℃)超临界发电技术奠定了较好的技术基础。

但已制造的机组所使用的核心技术均为发达国家的技术许可，其发展和应用仍受到国外知识产权的束缚和技术壁垒的阻碍。

我国大容量循环流化床锅炉技术已完成了 300 兆瓦等级的自主研制与示范运行，并实现了批量生产，在燃烧劣质煤方面发挥了很大作用。我国自主开发、设计、制造的 600 兆瓦超临界循环流化床锅炉工程示范项目已经投入商业运行，达到了国际领先水平，形成了具有完全知识产权的循环流化床锅炉设计体系和产品体系。

下一代超超临界发电技术研究欧洲制定了 AD-700 计划；继而美国公布了 AD760 计划、日本公布了 A-USC 计划，欧洲、美国及日本等主要发达国家加强了对高温热部件、锅炉设计与制造技术、汽轮机设计与制造技术、辅机技术和热力系统优化技术等的研究。近年来，我国也已开展 700℃-发电技术研究，国家 863 计划立项支持，国家能源局成立了 700℃发电联盟，组织了国有发电公司、制造厂家、大学科研机构在高参数大容量机组的设计及制造、系统优化、高温部件材料等方面开展相关研究。目前，我国与国外发达国家相比还存在较大差距。

目前，国外已有 5 座煤基 IGCC 电站投入运行，“十二五”期间，华能天津 1×250 兆瓦等级 IGCC 示范工程已经投入运行，其效率和运行可靠性还有待于进一步提高，我国总体技术水平与世界先进水平相差 10 年。我国煤炭发电技术与国外技术水平比较如表 1 所示：

表1 我国煤炭发电技术与国外技术水平比较

关键技术名称		阶段	发展现状
超超临界发电	600℃	领跑	国内广泛应用，部分技术引进国外许可
	700℃	并跑	开展关键技术研发，材料瓶颈需要攻克
	二次再热	领跑	正在工业示范
空冷发电	600 兆瓦超临界	并跑	国内广泛应用
	1000 兆瓦超超临界	并跑	已推广应用，部分技术引进国外许可
IGCC	250 兆瓦	跟跑	示范电厂投运，优化完善
	300 兆瓦以上	跟跑	开展关键技术研发，已有较好基础
循环流化床发电	300 兆瓦	领跑	国内广泛应用，燃劣质煤
	600 兆瓦超临界	领跑	示范电厂投运，优化完善

(2) 煤炭清洁转化

煤炭清洁转化的关键技术包括煤气化、煤直接液化制油、煤间接液化制油、煤制天然气、煤制醇类化工产品、煤制烯烃、煤制芳烃等。

国外现状及发展趋势

在煤气化领域，国际上，德国、美国、荷兰、日本等发达国家持续进行固定床、流化床、气流床等各类煤气化工业化技术的研究，对催化剂气化、超临界水气化、加氢气化、低下气化等也完成了中试和工业试验。GE 水煤浆气化技术是最早实现工业化的气流床气化技术，也是应用最多的气化技术，采用单喷嘴激冷流程和废锅流程，在化工和煤气化联合循环发电中应用，继续研究采用高压干煤粉泵的气化技术和新的机构材料。Shell 干煤粉气流床气化技术采用多喷嘴废锅流程工艺，在发电和中国的化工装置中也广泛应用，近期也开发了激冷流程的工艺在煤化工装置中示范使用。GSP 气流床气化技术采用单喷嘴激冷流程工艺，在中国的煤制烯烃和煤制油工艺中应用，正在开发新的结构，以提高长周期运行的性能。。Lurgi 气化技术采用加压气化固定床工艺，在中国和美国的煤化工和煤制天然气装置中得到应用，BGL 液态排渣工艺技术也已开展工业示范，降低操作能耗和提高原料煤种适应性是持续研究的方向。

在煤液化领域，20 世纪中后期，美国、日本、德国、南非等发达国家相继完成了煤直接液化、煤间接液化等煤清洁转化技术的开发与技术储备。在煤直接液化方面，美国、德国、日本相继开发出 H-coal、IGOR、NEDOL 等直接液化工艺技术，均已完成 50-600 吨/天规模的中间试验和工业试验，开发了一系列工艺、催化剂、专用设备等关键技术和系统技术，具备了建设大规模液化厂的技术能力。在煤间接液化方面，南非 SASOL 公司于 20 世纪五十年代和八十年代共建设了三座间接液化厂，南非、法国、美国、荷兰、日本以及丹麦等发达国家的一些公司和研究机构也建立了不同规模的中试装置，形成了钴基固定床、铁系流化床、铁系浆态床、钴系浆态床等系列间接液化工艺。

在煤制天然气领域，技术领先的国家主要有美国、德国、英国、丹麦等国家，其中美国大平原是目前国际上仅有的煤制天然气商业化装置，且已连续运行超过 30 年。煤制天然气关键是甲烷化技术，国际上主要有 Topsoe（托普索）甲烷化工艺、Davy（戴维）甲烷化工艺、Lurgi（鲁奇）甲烷化工艺。美国大平原采用的 Lurgi 气化和 BASF 的甲烷化工艺。这些国家的绝热甲烷化技术也在中国大型煤制天然气工厂以及焦炉气制 LNG 装置中应用。这些国家持续研究新的工艺和催化剂，并正在中国开展等温甲烷化工艺的推广。

煤制醇醚技术方面，国外已经开发了不同工艺的合成气制甲醇、乙醇、丙醇、丁醇、辛醇及醇醚燃料技术，其中在大型煤制甲醇、丁醇、辛醇在中国的大型装置中得到广泛应用。在甲醇制烯烃技术方面，国际上主要有美国 UOP/Hydro 公司的 MT0 技术、德国 Lurgi 的 MTP 技术、Exxon 的 MT0 技术。UOP/Hydro 公司的 MT0 技术在 0.75 吨/天的中试基础上，正在国外开展大规模装置的建设，在中国已经有示范装置投入运行。Lurgi 的 MTP 技术在我国神华宁煤 50 万吨/年煤制烯烃项目得到成功应用。日本日挥公司也建立的大型中试装置。这些公司持续研究新的催化剂和新材料，并不断提高长周期运行的性能。

20 世纪七八十年代，发达国家提出并相继开发了低阶煤的热解工艺，如美国的 Toscoal、COED、Coalcon 和 Schroeder 工艺，苏联的 ETch-175 粉煤快速热解工艺，德国的鲁奇鲁尔煤气（Lurgi-Ruhr gas）以及澳大利亚的 CSIRO 热解工艺等。在热解工艺、装备、油品加工和系统方面开展了长期的研究，并建立了加大规模的中试装置和示范厂。在煤种的热解特性、热解工艺适应性、产业化推广方面在开展不懈的努力，近今年和中国的合作活跃。

国内情况及已取得成果

在煤气化领域，我国煤气化技术总体已经发展到较高的水平，目前部分新的煤气化技术尚处于研发和中试阶段。华东多喷嘴对置水煤浆气化、航天单喷嘴干煤粉气化、西北院多元料浆气化、华能两端干煤粉气化、清华熔渣非熔渣气化、上交二级供氧干排渣气化等不同的工艺已经大规模工业应用，规模为 1000-3000 吨/天。千吨级碎煤加压气化技术也工业应用。催化气化、加氢气化、超临界水气化建立了中试装置，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建设和运行。超大规模的气流床气化、新型催化气化等的产业化是努力的方向。

在直接液化方面，我国神华建立了世界上首个百万吨级的现代化煤直接液化装置，已实现了工业产周期运行，环保指标达到目前煤化工界世界最高水平。延长 50 万吨级煤油共炼装置也进入试车阶段。国内在新的液化工艺、催化剂等方面持续研究。在煤炭间接液化方面，我国开发了多种不同的具有自主知识产权的铁基低温浆态床、高温浆态床、高温流化床费托合成核心工艺和催化剂等技术，以及钴系催化剂固定床新工艺；百万吨级低温浆态床工业装置已经处于装置调试阶段，400 万吨级大规模高温浆态床工业装置也进入到建设后期。新型高效的催化剂新材料正在开

发之中，依托传统的焦化等煤化工装置，10万吨以上的工业示范装置已经建成运行，多套装置正在建设之中。以生产高品质航空燃料、基础润滑油、高品质蜡为目标的研究正在进行之中。

在煤制天然气领域，核心是合成气是甲烷化工艺，我国处于国外技术的引进-消化-吸收-再创新阶段，中科院、西南院、西北院、大唐、新奥等已经开发了绝热式多段甲烷化新工艺和催化剂，建立了中试装置，在焦炉气制 LNG 装置得到工业应用。等温甲烷化装置也已经开始应用。耐硫甲烷化、短流程甲烷化和新一代催化剂正在研究开发之中。

在煤制甲醇、醇醚燃料、甲醇制烯烃、甲醇制芳烃等领域，我国总体技术已经到了较高的水平，大型合成制甲醇工艺、催化剂和反应器技术应广泛应用。建立了一部分制二甲醚、合成气制乙醇、不同工艺的甲醇制烯烃、甲醇制芳烃、合成气制乙二醇大型中试装置。我国大连化物所 DMT0 甲醇制烯烃技术在神华包头 60 万吨/年煤制烯烃项目得到成功应用，第二代技术（DMT0-II）也已开发成功，国内建立了多套工业装置；上海石化 SMT0、清华大学流化床（FMTP）等技术正在进行示范。中科院福建物构所煤制乙二醇技术在通辽金煤 20 万吨/年煤制乙二醇项目验证后，建设的多个商业化项目开始运行。清华大学流化床 FMTA、山西煤化所两段固定床 MTA、北京化工大学 MTA 等煤制芳烃技术正在示范。国际上的煤转化废水处理技术主要由市政行业的废水处理技术往煤转化方面拓展而来，专门针对煤转化废水研究开发的技术很少，因此国际上可借鉴的煤转化废水处理的成熟技术很少，废水处理技术仍需要我国自主研发。

在煤炭分级利用领域：我国总体技术已经到了较高的水平，浙江大学在煤炭分级转化多联产方面建立了中试装置，并进行了产业化推广。煤炭科学研究院北京煤化所研发了多段回转炉（MRF）技术，并在上世纪 90 年代初，于内蒙古海拉尔市完成了 2 万吨/年（60 吨/天）规模的工业性实验，大连理工大学开发了固体热载体热解（DG）技术，并于 2010 年在陕西神木集团进行了 60 万/年工业示范，2009 年，中国科学院工程热物理所与陕西神木集团共同完成了 240 吨/天固体热载体粉煤快速热解制油技术工业示范。中国科学院过程工程研究所提出煤拔头技术，并在 2014 年完成了 10 吨/天的中试验证，同时验证了 150 千克/小时的气体热载体技术，并正在进行 20 万/年工业示范设计，上述煤炭分级利用技术大都进入了中试或工业示范阶段，正处于工业推广阶段。在热解工艺的优化、反应器的改进、油品加工、

热解气的综合利用、油电气热多联产等系统方面，还在继续研究。

在煤制工业燃气领域，主要采用空气或富氧空气进行常压流化床/循环流化床气化技术，目前我国总体技术已经达到了国家先进水平。比较典型的有：采用中国科学院工程热物理研究所技术的 4 万立方米/小时循环流化床气化炉先后在山东茌平和广西平果投入商业运行，科达节能生产的 2 万 m³/小时和 1 万 m³/小时循环流化床组合式气化炉先后广西和辽宁投入商业性，中国科学院山西煤化所 500 吨/天低压流化床气化炉投入运行。目前各类流化床和循环流化床气化炉已经投运超过 40 台，正在建设的有 50 台左右。

国内主要科研单位和大学以及大量企业通过多种方式进行了煤炭清洁转化技术研发，比较代表性企业有科研院所和大型化工企业，如浙江大学、中科院、煤炭科学技术研究院有限公司、西南院、华东理工大学、神华集团、大唐集团和新奥集团等，基本形成了科研、技术开发示范及产业化应用的产业链体系。

国内外比较分析

总体而言，我国煤转化的技术水平达到较高的阶段，和国外最先进水平相比，在煤气化、煤直接液化、煤制烯烃和部分煤化工领域处于领跑阶段，在煤间接液化、煤制天然气等领域处于跟跑阶段。我国煤炭发转化术与国外技术水平比较下表 2 所示：

表 2 我国煤炭转化技术与国外技术水平比较

关键技术名称		就绪水平	发展现状
煤气化	气流床气化	第 8-9 级	国内广泛应用, 并出口国外
	流化床气化	第 6-7 级	完成中试, 开展工业试示范
	固定床气化	第 7-9 级	大规模应用, 部分技术引进国外许可
	催化气化	第 4-6 级	开展中试研究
	加氢气化	第 4-5 级	开展中试研究
	超临界气化	第 3-5 级	开展小试研究
	地下气化	第 6-7 级	开展工业示范
煤液化	直接液化	第 7-8 级	完成工业示范, 优化完善
	间接液化	第 7-9 级	完成工业示范, 开展规模化应用
甲醇制烯烃	MTO	第 7-8 级	完成工业示范, 优化完善及开展工业化应用
	MTP	第 7-8 级	完成中试, 开展工业示范
甲醇制芳烃		第 6-7 级	完成中试, 开展工业示范
煤乙二醇		第 7-8 级	完成工业示范, 优化完善
煤制乙醇		第 5-7 级	完成中试, 开展工业示范
煤制天然气		第 6-7 级	完成中试, 正在工业侧线试验

煤制含氧化合物	第 6-7 级	完成中试，开展工业示范
---------	---------	-------------

(3) 燃煤污染控制

国外现状及发展趋势

日本及欧美发达国家在燃煤大气污染防治方面处于世界最先进的行列。国际上目前主流的 FGD 技术均采用石灰石-石膏法，副产品脱硫石膏在美国以抛弃为主，而日本、德国等则以回收为主。此外，欧盟陆续开发了其他先进脱硫工艺，如丹麦的 SDA 法、芬兰的 LIFAC 法、挪威的 NID 法、海水脱硫工艺、奥地利的 DCFB 循环流化床工艺以及加拿大 Consolv 的有机胺法等。FGD 的近期发展趋势在于：(1) 廉价、易运转、效率适中、占地少的适合现有电厂改造的脱硫技术，如美国能源部近期组织开发的 LIMB 多级喷射燃烧法、ADVACATE 烟道喷射法和等离子体法等。(2) 适合于高含硫量、高脱硫效率的新一代 FGD 技术，如双循环湿法烟气脱硫技术（德国的 FBE 公司、诺尔公司等），有望实现 $<50\text{mg}/\text{m}^3$ 的超低 SO_2 排放。

现有 NO_x 排放控制技术主要分为两类：低 NO_x 燃烧技术和尾部烟气脱硝技术。目前国际上主流采用两类技术的联合应用，以满足较严格的 NO_x 排放限值的要求。从低 NO_x 燃烧技术来看，日本及欧美公司是重要的技术源头，如美国的 B&W、Alstom Power（原 CE 公司）、日本三菱公司（MHI）、日立公司等。尾部烟气脱硝技术主要是选择性催化还原技术 SCR，非选择性催化还原技术 SNCR 等其他技术的占有率低于 10%。SCR 技术的核心——催化剂技术基本上掌握在日本及欧美公司手中。脱硝技术的近期发展趋势在于：1、解决 SCR 装置氨逃逸率、腐蚀和堵塞倾向；2、催化剂的宽温度适应性；3、催化剂的有效再生和妥善处理。

燃煤电站烟气除尘技术的应用已有很长的历史。目前，燃煤电站最常见的除尘设备主要以静电除尘器为主。一般来说，五电场静电除尘器对粒径大于 $10\ \mu\text{m}$ 的灰颗粒可以达到 99.9% 的脱除效率，对于粒径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的灰颗粒，其脱除效率则低很多。国内外已公开发表的结果显示对于粒径在 $0.1\ \mu\text{m}$ - $1\ \mu\text{m}$ 之间的灰颗粒，脱除效率在 95-98% 之间。国际上关于燃煤烟气细颗粒物（ $\text{PM}_{2.5}$ ）的高效控制技术主要有四种技术路线。(1) 第一种技术路线：提高和优化传统污染物控制设备脱除细颗粒物的捕获能力。例如，高频电除尘技术和低低温电除尘技术。(2) 第二种技术路线：发展不同控制方式的协同脱除技术。例如，美国电力研究所提出的静电和布袋串联的高效脱除技术；美国能源环境中心提出的复合式电袋协同技术；日本三菱重工发展的湿式电除尘技术等。(3) 第三种技术路线：细颗粒物的聚并、长大。针对

传统颗粒物脱除装置对细颗粒脱除率低，粗颗粒脱除率高的特点，通过电学、声学 and 化学等聚并方法，使得细颗粒物聚并促使其粒度增大，从而容易被脱除。(4) 第四种技术路线：在燃烧过程中添加吸附剂减少超细颗粒物的生成。常见的吸附剂包括硅石、矾土、高岭土、铁矾石、石灰石和氧化铝等。

燃煤电站中汞及典型有毒重金属（如 Pb、As 等）的控制国际上主要有两种方法。(1) 利用已有常规污染物控制装置来协同脱除 Hg 等重金属，例如用 SCR 脱硝装置将 Hg 等重金属催化氧化，然后利用尾部的湿法脱硫装置去除，利用除尘装置将颗粒态的 Hg 或吸附在灰颗粒表面的 Hg 及重金属脱除。目前欧洲倾向于使用该策略。(2) 增加单项 Hg 脱除技术，主要有两种：一是在尾部烟气中喷入活性炭，通过吸附等方法脱除；二是在炉前加入氧化性物质（例如氯化钙，溴化钙等）将零价 Hg 氧化为水溶性的二价汞，然后通过湿法脱硫塔吸收。美国国家能源技术实验室、URS 公司、美国电力研究院等有相关示范应用。

国内情况及已取得成果

燃煤常规污染物控制技术已经具有一定的竞争优势，除尘、脱硫、脱硝技术已经进入广泛的推广应用阶段。

烟气脱硫装置、低 NO_x 燃烧系统及烟气脱硝装置已经普及，一些关键技术已经达到了国际先进水平，特别是中低挥发分煤的低 NO_x 燃烧技术达到国际领先水平。

我国燃煤电厂除尘技术目前仍以电除尘器为主，约占现役机组的 90%以上。近几年由于环保法的严格控制，新技术发展和应用较快。自 2005 年首个电袋复合除尘器在天津津源热电 2 号炉 50 兆瓦机组成功投运以来，截止 2014 年大型电袋复合除尘器已在中国 1000 兆瓦机组应用 8 台，600 兆瓦机组应用 70 多台，300 兆瓦机组应用 220 多台，中国已成为世界上应用最多的国家。2010 年，我国首台低低温电除尘器在广东梅县粤嘉电厂 6 号炉 135 兆瓦机组成功投运，此后至 2014 年低低温电除尘器已在中国 1000 兆瓦机组应用 7 台，600 兆瓦机组应用 10 多台，且一大批配套低低温电除尘器正在建设过程中。2013 年 11 月，中国第一台湿式电除尘器在华电淄博热电厂 330 兆瓦机组成功投运，随后 2014 年在广东恒运电厂 600 兆瓦机组成功运行，包括浙江六横电厂等一批 1000 兆瓦机组目前已进入实施阶段，预计很快会打破日本三菱重工在 HeKinan 电站 3 台 700 兆瓦机组应用的机组装机容量记录；各种新型电极的湿式电除尘器获得示范，大幅度提高了设备的可靠性，减少了污水排放。总之，我国环保除尘装备制造业发展成绩突出。在煤质较好（挥发分高、

含硫量低)的情况下,通过现有技术的优化,实现了燃煤电厂污染物超低排放,大大拓展了燃煤发电机组的生存空间。

我国于2011年9月发布的新的《火电厂大气污染物排放标准》首次限定了汞及其化合物的排放浓度不得超过0.03毫克/立方米,在汞污染控制方面,我国仅依靠现有燃煤电厂广泛应用的除尘器、脱硫和脱硝设备来协同降低汞排放,汞及重金属的控制技术刚刚起步,目前尚无大型燃煤机组的应用业绩。

相比火电行业,其他燃煤工业行业的环保标准及技术装备水平相对落后。以水泥窑领域为例,FGD技术已普遍装备,400毫克/立方米的NO_x排放标准远远落后于火电行业。分级燃烧加SNCR技术近年来陆续装备。对于工业锅炉脱硫和脱硝,主要难点不是技术,原则上火电行业的脱硫脱硝技术可以移植过来,但重要的是如何解决小规模装置的经济性问题。

燃煤污染控制的主要研发单位包括高校、科研机构 and 中小型环保企业,是一个活跃的创新领域。主要的应用单位为大型电力、煤炭、冶金、建材和化工等企业,形成了从基础研究、技术开发示范及产业化应用的产业链体系。

国内外比较分析

我国燃煤污染物控制技术的发展主要经历了单一污染物脱除(除尘、脱硫)、单一技术组合脱除多种污染物(除尘、脱硫、脱硝)、多种污染物联合控制(除尘、脱硫、脱硝、脱汞等重金属)三个阶段。除尘-脱硫和除尘-脱硫-脱硝技术已经进入推广应用阶段,除尘-脱硫-脱硝-脱汞技术正在进行工业示范。目前,我国绝大部分火电厂都安装和投运了烟气脱硫装置,大部分电厂也陆续安装了低NO_x燃烧系统及烟气脱硝装置,燃煤电厂的除尘效率已达98~99%,但是静电除尘设备难以除去燃煤排烟中超细、超轻并易分散的粉尘,对烟气中的痕量有害化合物(如汞、砷、氟、有机污染物等)和PM_{2.5}的控制才刚刚起步。近年来已在发达国家得到成功应用的燃煤污染物一体化脱除与控制技术(如脱硫除尘一体化、脱硫脱硝一体化等)也在我国一些中小型锅炉中得到应用;工业过程用煤的污染物控制显著落后于国外先进水平,发电过程重金属排放控制技术仍处于初级阶段。我国燃煤污染控制技术与国外技术水平比较见表3:

表 3 我国燃煤污染控制技术与国外技术水平比较

	关键技术名称	阶段	发展现状
烟气除尘技术	干式静电除尘技术 (ESP)	并跑	国内广泛应用, 部分技术引进国外许可
	袋式除尘技术 (FF)	跟跑	国内开始大量应用, 部分技术引进国外许可
	湿式静电除尘技术 (WESP)	领跑	国内商业应用, 部分技术引进国外许可
烟气脱硫技术	湿法烟气脱硫技术 (WFGD)	并跑	国内广泛应用, 部分技术引进国外许可
	半干法烟气脱硫技术 (SDFGD)	并跑	国内自主开发, 在缺水地区批量应用
	有机胺法脱硫及回收技术	并跑	国内自主开发, 部分技术引进国外
NO _x 控制技术	选择性催化还原脱硝技术 (SCR)	并跑	国内广泛应用, 核心技术引进国外许可
	选择性非催化还原脱硝技术 (SNCR)	并跑	国内开始大量应用, 部分技术引进国外许可
	低 NO _x 燃烧技术 (LNB, LNCT)	领跑	国内自主开发, 广泛应用, 对劣质煤性能优于国外技术

(4) 二氧化碳捕集利用与封存

国外现状及发展趋势

目前国际上对于煤炭发电产生的 CO₂ 捕集埋存利用技术主要有三种方法: 1) 燃烧后烟气吸收法 (化学吸收、物理吸附、生物吸收、膜法); 2) O₂/CO₂ 富氧燃烧技术; 3) 燃烧前 IGCC+CCS 技术。除了上述有望实现工业应用的三种技术外, 膜法分离技术、离子液、化学链燃烧等新的减排技术设想也都在进行之中。

美国政府在减排温室气体方面的基本策略是: 一方面宣称减排温室气体要在保证可持续发展的前提下进行; 另一方面, 积极发展相关科技技术, 倡导科技发展是解决全球变暖的关键因素。鉴于美国国内能源结构中煤炭丰富的特点, 美国长期以来大力发展煤炭高效清洁利用技术, 以应对减排的要求与压力。美国政府已为 CCS

项目拨出 24 亿美元资金，用于 CCUS 的技术开发与工程示范。目前美国北达科他州和加拿大萨斯喀彻温 Weyburn-Midale 项目大平原合成燃料厂在将煤炭转化成合成天然气的过程中每年捕集 280 万吨 CO₂，捕集的 CO₂ 经管道运输至 200 英里外的加拿大，注入到废气油田，用于驱油；美国“FutureGen”计划，以整体煤气化联合循环 (IGCC) 和碳捕获与封存技术为核心，建造一座 275 兆瓦燃煤发电和制氢的近零排放示范发电厂；美国 Alstom 建有 15 兆瓦四角切圆富氧燃烧中试装置，并完成了多个煤种的富氧燃烧中试试验。Alstom 公司近年来一致致力于在 CO₂ 捕集方面的研究和开发，主要集中在燃烧后 CO₂ 捕捉技术和富氧燃烧技术。

欧盟一直是推进 CO₂ 减排的主要推动力量和重要实施者。早在 2007 年欧盟就宣布 2020 年将其温室气体排放量在 1990 年基础上减少 20% 以上，到 2020 年将可再生能源占总能源消耗的比例提高到 20%。2009 年 5 月份，欧洲委员会宣布投入 14 亿美元，计划在欧洲各国兴建 13 个 CCS 示范工程。这其中，碳排放大国获益最多。按照欧盟的规划，德国将建设 2 个 CCS 示范工程，荷兰有 3 个，英国有 4 个。德国，荷兰，英国，西班牙和波兰将分别获得约 2.45 亿美元的投资，除此以外，意大利将获得 1.35 亿美元，法国将获得 6700 万美元用于 CO₂ 运输基础设施建设。一些欧洲私营企业也已经跃跃欲试，希望率先建立示范工厂，以获得政府对 CCS 项目的投资。德国莱茵集团 (RWE)、法国道达尔集团、雪佛龙集团、意大利国家电力公司 (Enel)、英国石油公司 (BP)、英荷壳牌石油公司等著名跨国企业都已经宣布了 CCS 技术研发计划，这些公司都期待在不久的将来在 CCS 技术上进入商业化运作。瑞典能源巨头——瀑布能源公司 (Vattenfall)，已经成为世界上第一个开始运作 CCS 的试验工厂的企业。2008 年德国 Wattenfall 和美国 Alstom 公司联合在德国 Schwarze Pump 建立了 30 兆瓦等级的富氧燃烧半工业化示范装置，进行富氧燃烧半工业化示范研究，计划于 2015 年前建立若干套 200~300 兆瓦等级的富氧燃烧示范装置，并于 2020 年前后进行商业化推广与应用。挪威 Statoil 公司开发的 Sleipner 天然气田 CO₂ 封存项目运行时间最长，该气田于 1996 年投产，位于北海，建有世界上第 1 个工业级 CO₂ 捕获设施，处理方法是使用醇胺溶剂从天然气中吸收 CO₂ 并通过回注钻孔储存于深达 1000 米海床下的含盐地层中，处理能力约为每天 2800 吨。欧盟表示将利用 15 亿美元的启动基金建立至少 12 个碳捕集与封存项目，并通过出售排放许可再为项目提供高达 67 亿美元资金。

国内情况及已取得成果

我国的 CO₂ 捕获与封存技术研究起步较晚，发展相对落后，目前主要致力于一些关键性技术与中试示范性项目的建设。如：华能北京热电厂 CO₂ 捕集示范工程(3000 吨/年)、华能石洞口 CO₂ 捕集示范项目(100, 000 吨/年)、华中科技大学 35 兆瓦煤粉富氧燃烧工业实验装置、中科院 1 兆瓦循环流化床高浓度富氧燃烧中试装置等，这些项目的相继建设标志着我国低碳电力技术领域在某些关键技术上取得了重大突破。虽然我国 CO₂ 捕获、利用与封存技术的整体水平与国外先进水平相比还存在一定的差距，但由于 CO₂ 捕获技术成本整体较高，目前，其推广进程仍较为缓慢，我国与国外仍处在同台竞争阶段。在二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）技术开发方面发展迅速，开展了多项工程示范，完成了 10 万吨/年 CO₂ 捕集、5 万吨/年 CO₂ 驱油与 10 万吨/年封存技术示范。35 兆瓦富氧燃烧中试实验、微藻固碳技术等取得了重大突破。化学链燃烧技术、CO₂ 的化学利用技术等方面开展了与国际同步的研究。

国内主要科研单位和企业进行了高效技术研发和部分示范工程，2013 年建立产学研一体的产业技术创新战略联盟，比较有代表性科研单位有中科院、清华大学、矿业大学等，企业有华能、国电、中石油和中石化、东方电气，已经初步形成关键技术研发、集成、中试和示范方面的产业链体系。

国内外比较分析

我国在燃烧后二氧化碳捕捉与分离技术上相继建成了年产 3000 吨和 100, 000 吨的 CO₂ 捕捉与分离示范项目。目前，正在开展如何提高吸收剂的再生率、降低其分离能耗，提高能量利用效率，降低捕集设备投资；开发新的 CO₂ 吸收剂或新的分离方法（产生膜的技术或筛选效率更高的生物体、深冷分离）等方面的工作，在 CCUS 相关基础、共性关键技术研究方面与国外还存在一定的差距。我国在化学链燃烧技术研发方面，目前还处在 10~100 千瓦规模的实验室研究阶段，与国外存在较大的差距。要实现工业化应用，需要进一步开发高效、低廉、长效的氧化物载体，并在兆瓦级及以上化学链燃烧中试热态实验装置上对氧载体反应性（衰减与激活）、双床/多床炉内气流动特性优化等关键技术开展研究，逐步缩短与国外间的差距，为化学链燃烧的工程示范与推广应用做好技术准备。

总体说来，我国在 CCUS 技术方面，还存在 CO₂ 减排压力大、缺乏大规模低成本有效捕集、封存及利用技术等问题。

（5）工业余能回收利用

国外现状及发展趋势

工业余能是指工业生产过程中产生的可以再次回收利用的能量，现阶段未得到利用的主要包括高温散料、液态熔渣、工业含尘废气和低品位余能等多种。

在高温散料的余热回收方面，应用较早的是德国的洪堡五级旋风预热技术，它能够将水泥煅烧的热利用率和生产能力大幅度提高。进入 21 世纪以来，高温散料余热回收的研发和应用热点拓展到干熄焦、烧结和球团熟料、各类回转窑和竖窑的煅烧熟料的显热回收、发电和综合利用。德国 TSOA 公司以及日本新日铁所设计的干熄焦工艺具有代表性。2010 年以来，环冷机、链篦机的推广和各类固体散料换热装备等关键设备的开发已经成为高温散料余热回收的发展趋势。

在液态熔渣的余热回收方面，英国最早提出液态熔渣余热回收技术的方案，随后，日、韩、德、美等研究者对干式离心粒化法、转杯法和风淬法等方法进行了广泛的研究。2011 年以来，日本新日铁公司已对高炉熔渣余热回收技术进行了小型试验或工业化试验，能回收 40%-60% 的高炉熔渣显热，但相关技术还不完善，存在效率低、设备投资大、影响炉渣性能降低附加值等问题；英美等国也都在积极进行工业化的推广应用试验。目前，用于回收液态熔渣的技术主要是英国的离心转盘法和日韩的转鼓冷却法、转轮粒化法、风淬法，这已经成为高温工业熔渣余能回收的发展趋势。

在工业含尘废气的余能回收与净化方面，美国高温气体陶瓷净化除尘技术的研究起步较早，其主要的代表技术有陶瓷过滤技术、颗粒床过滤等，德、美、日等已开发出烛状陶瓷过滤器，除尘效率均达 99% 以上，英国太棉公司（TENMAT）研制的太棉高温气体过滤器是专门为超过袋式除尘器、电除尘器等传统除尘器所承受的工作温度而开发的一种硬式表面过滤器技术和错流过滤技术等。进入 2000 年以来，采用蓄热、换热和热管分别回收高、中、低温的工业废气余热已经成为一种热点模式。2013 年以来，日本、美国等国出现了集蓄热、换热、净化于一体的处理高温含尘废气的方法，成为了引领性的技术。

在低品位余能的利用方面，低温余热发电技术以德国和日本最为先进。为了提高废气余热利用，发达国家现多采用烧结机高温段废气发电和二次循环高温段废气发电技术，日本钢管扇岛厂的鼓风环冷机可利用废气量 86 万立方米/小时，温度 408℃~450℃，产生蒸汽 60 吨/小时发电。有机工质比水更适宜于回收低温余热发电，因此，ORC 循环系统研究受到了广泛关注，如以色列 ORMAT 公司的 OEC 技术、德国 GMK 和美国 Pratt & Whitney 公司的 ORC 循环技术等，已经开始应用于工业现场。实践表明，包含低温余热锅炉发电、有机朗肯循环、Kalina 循环、吸收式热泵等在

内的各类低品位余能回收方式都在得到世界各国的推崇和深入研究。

国内情况及已取得成果

“十二五”期间，我国在高温散料余热回收、液态熔渣热回收、低品位余热能等综合回收利用技术的研发和应用方面开展了一系列工作，为继续进行工业余能的回收利用提供了技术支持和理论指导。对高温散料和液态熔渣余热回收支持的研究主要包括冶金渣余热高效回收及其资源化利用关键技术，成果是综合利用多种工业固体废弃物进行资源循环优化配制，攻克了多金属熔渣运输、贮藏及熔制过程中的难点；另一项成果是煤炭焦化节能减排关键技术，在干熄焦、焦炉大型化和新型焦炉结构的研究方面取得了新的突破。同时，国内研究学者还对高炉渣离心粒化过程进行了相关研究，包括高炉渣余热物理回收法和化学回收法，并正在研究烧结烟气循环与炉冷矿料集成高效余热发电技术。

“十二五”期间，我国对非稳态高温、高含尘气体余热高效回收利用技术、转炉余能高效回收利用关键技术与系统集成等进行了研究，首次研发出以大规格壁流式蜂窝陶瓷为核心过滤元件的高温（ $\geq 450^{\circ}\text{C}$ ）含微尘烟气净化装备，烟气处理量为 ≥ 10000 立方米/小时，过滤后烟气粉尘浓度为 ≤ 15 毫克/立方米。但在高含尘废气的净化技术方面，尤其是对余热回收与净化一体化技术的研究还有待进一步深入。目前，我国也在开展换热除尘一体化的研究，将除尘器和换热器有效地结合在一起，在对工业高含尘废气进行余热回收的同时净化废气，达到经济和环境的双重效益，但是存在易堵塞、寿命短、长期运行困难等问题，需要继续研究改进。

在中低温余能回收技术方面，“十二五”期间，国家支持了低温热源发电装置的研制、中低温地热有机工质汽轮机关键技术与设备研制等。2014年，中船重工第七一二研究所成功研制出国内最大功率超低温余热回收发电装置，其热能利用率可达18%以上。近年来，针对提高低温余热有机朗肯循环效率的主要研究有：对ORC和氨-水Kalina循环在低品位余能利用进行了理论分析；筛选有机工质，目前主要是基于现有工质的热物性参数，采用热力学基本定律分析有机工质对朗肯循环效率的影响。超级热泵、新型热管和新型热力循环发电等是低品位余能利用的发展方向。

清华大学、北京科技大学、浙江大学、上海交通大学、北京工业大学、西安交通大学、东北大学、中科院工程热物理所等科研院所均有很强的研究团队，宝钢、首钢、金隅集团等大型企业均是实施工业余能回收利用的产业先锋，京津冀钢铁企业节能减排联盟、中国工业节能减排大学联盟等均是本方向的创新和实施载体。

国内外比较分析

总体来说，我国目前在工业余能回收利用及工业节能方面同国际处于并跑和跟跑共存的阶段，同时工业节能覆盖面广，包含冶金、化工、建材、电力、机械等高能耗的行业，其涉及的节能技术和竞争情况也因此而呈现出多样化，对节能技术的研究和推广需要灵活创新。目前，我国与发达国家在节能技术先进性上是平分秋色的，如在工业废气余热余压回收、富氧燃烧、高温散料与液态熔渣高效热回收技术等方面，日欧美的研究还处于领先地位；而在一些其他工业节能技术上，如干熄焦、蓄热燃烧等方面，我国已经能够做到和世界领先水平保持同步，亦拥有多个自主知识产权；国际上对低品位余能的回收利用起步较早，但我国在采用热经济学理论对低品位能源利用的技术也取得了长足的进步。

(6) 工业流程及装备节能

工业流程及装备节能技术包括流程工艺的创新、大规模化工冶金过程节能、传统流程工艺的优化、工艺装备和通用装备（机电装备、流体机械、工业锅炉及炉窑等）的节能技术等方面。

国外现状及发展趋势

高耗能流程工业以其目标产品的不同，由不同的单元工序和装备组成。单元工序的节能技术越来越趋近于现有能力的极限，因此对高耗能工业的流程创新和装备创新越发重要。工艺优化设计是流程工业节能减排的基础，工序界面协同控制技术是以开发最优工艺为目标，实现流程界面中各工序更合理地衔接和匹配的技术。近五年来，流程工业系统优化的手段不断创新，标志性的主要有 2012 年澳大利亚提出了 BLHAZID 来进行流程工业的过程风险控制和优化。如：20 世纪 90 年代以来，日本、韩国等开发的连铸连轧工艺的实现和推广极大地缩短了传统的钢铁生产流程，大幅度降低了吨钢综合能耗；2000 年以来，加拿大、奥钢联等发明的直接还原（DRI）钢铁生产短流程新工艺则成为了继续缩短钢铁流程的新热点。可见，对工业流程系统的优化协同是国际上流程工业发展的主流趋势。

制氧、氮等气体制备和应用技术在冶金、化工等流程工业生产中是不可或缺的。2009 年以来，法国的 AIR LIQUIDE、德国的 LINDE GUOUP、美国的 APCI 和 PRAXAIR 等机构在空分流程中的氧氮分离效率、气体产品的变比例供应模式与优化控制、分子筛低温解析等技术领域均有新的突破，显著降低了气体生产能耗。在全氧/富氧冶金方面，1986 年 NKK 公司第一次证明了氧气高炉的可行性，2010 年以后，全氧

高炉作为有效减少 CO₂ 排放的工艺技术，被日本、加拿大、德国等国竞相研究，在全氧高炉的理论研究和小型化试验或工业化试验方面已经取得了部分可喜的突破。高效气体制备与分离技术以及全氧/富氧冶金技术的研究已成为冶金、化工等领域的节能热点。

在通用机电装备方面，电动机械的节能主要有变频技术，流体机械，动力机械美国的 GE、德国的西门子、日本的三菱和瑞士的 ABB 等是通用机电装备的领军企业。通用机电装备在冶金、建材、化工、电力等各个工业领域随处可见，进入 2011 年以来，一些专用的高性能机电装备已经拓展到核电站、风力发电、航空航天、海洋开发、现代交通等新领域。机电装备的大型化、高效率、绿色生产与运行已成为通用机电装备和系统的发展。

燃煤工业锅炉目前在欧洲、美国等发达国家和地区仍有应用，但燃料质量控制、技术、服务及管理均已达到很高水平。技术含量最高的是德国煤粉工业锅炉系统，其热效率 >92%，采用低氮燃烧器，燃烧中加脱硫剂脱硫率约 50%，尾部的活性钙管道喷射干法增湿脱硫率不低于 85%，效率极高布袋式除尘器，满足德国环保排放标准的严格要求。在工业炉窑方面，世界技术领先的有法国的 Stein 和德国的 LOI 等，炉窑热效率高、超低排放、智能运行、多种煤质适应性技术、废气再循环技术、工业窑炉高温脉冲燃烧节能系统控制技术等方面已成为炉窑节能技术研发和推广应用的典范。

国内情况及已取得成果

我国在流程工业系统优化和新工艺开发等方面的研究，取得了较大的节能效果。“十二五”期间支持的研究有日产 5000 吨水泥熟料的 XDL 节能煅烧新工艺技术研究，达到节约标煤 10%、CO₂、SO₂ 和 NO_x 排放分别减少 10%、75%和 50%的效果。钢铁工业从工艺流程的改进和装备热效率的提高方面取得了显著的系统节能成果，吨钢综合能耗由 2006 年的 645 千克标煤降至 2014 年的 584.7 千克标煤。

我国气体制备与分离技术已发展了 50 多年，虽然在技术水平和生产能力上取得了巨大的进步，但在创新方面仍需继续努力。我国在全氧炼铁的研究上也起步较晚，但已经进行了相当多的有益尝试。在“十二五”期间，气体制备与分离和全氧/富氧冶金方面，国家重点支持的研究包括基于 LNG 冷能全液体空分系统及其关键技术、陶瓷窑炉富氧/全氧燃烧技术与装备等。近年来，富氧助燃技术在国内发展非常迅速，相关科研院所对富氧燃烧进行了积极的探索，在并取得了显著成效，节能效果平均可达到 5%~15%左右，富氧燃烧技术正逐渐缩小与国外之间的差距。

通用机电设备方面，在“十二五”期间，针对电机系统，主要是针对电机与不同负载特性的高效匹配性研究，开发了一批典型负载设备（风机、水泵、压缩机）的专用高效电机和机组产品，包括：YFE2 系列风机专用、YSE2 系列水泵专用、YYE2 系列压缩机专用三相异步高效电机；风机、水泵、压缩机专用变频调速电机；螺杆压缩机专用永磁变频调速电动机；直驱式离心清水泵专用电机和机组；大型高压潜水泵专用电机和机组。

2012 年，我国工业锅炉年耗煤约 4.8 亿吨，工业炉窑年耗煤约 2.6 亿吨，共计 7.4 亿吨。而目前的工业燃煤锅炉 65%是链条炉，运行效率通常在 70%以下，效率很低，节能潜力巨大，“十二五”期间，国家支持的研究有电站锅炉排烟余热及水分回收技术研究、新型高效煤粉锅炉、清洁燃煤系列化高效工业锅炉岛技术等。在工业炉窑方面，国家科技支撑计划对 210 吨/日等级的蓄热式横火焰玻璃窑炉的高温余能进行了回收示范，蓄热室排烟温度达到 200℃以下，系统节能率达到 18%以上，“十二五”期间国家完成了大型烧结系统余热综合回收发电关键技术及能源合同管理等项目，在 430 m² 烧结机上实现中温余能发电示范，发电功率 15 兆瓦以上，系统节能率达到 20%以上。

在化工、冶金节能方面，“十二五”期间，针对典型高能耗过程，开发了一批新型温和高效节能新工艺，如乙二醇节能工艺、新型钒钛矿流化床焙烧工艺等，节能效率 20%以上，获得国家多个 973 计划项目支持。

在工业流程及装备节能技术方面，北京科技大学、清华大学、浙江大学、天津大学、西安交通大学、东北大学、中科院、上海电气、中国钢研等科研院所均有很强研究团队，宝钢、中冶京城、中石化、北京神雾等大型企业均是实施工业流程及装备节能的产业先锋，京津冀钢铁企业节能减排联盟、中国工业节能减排大学联盟、河北钢铁集团等均是本方向的创新和实施载体。

国内外比较分析

总体来说，我国的工业流程及装备节能技术在国际上处于并跑的阶段。我国流程工业的系统优化研究已形成基于流程模型控制的理论体系框架，但在生产过程中非均衡用能和能质强化传递的优化理论方面还有提升空间；我国富氧技术的应用水平与发达国家相当，但目前世界上多数国家对于全氧冶金技术的应用还在试验阶段；由于流体机械面广量大，电力消费量占到全国用电量的 50%，环境污染物和温室气体排放量大等原因，我国流体机械产品性能以及能源利用效率虽与国际先进水平保持同步，但仍有提升空间，例如，可提高水泵效率及空化性能指标、风机和压

缩机的效率水平；我国工业锅炉和窑炉技术及能源利用效率都有了较大的改进和提高，但工业锅炉和窑炉的能源利用具有相当大的节能减排潜力。

(7) 数据中心及公共机构节能

国外现状及发展趋势

随着云计算、云存储、虚拟化等 IT 技术应用的迅猛发展，数据中心建设快速增长，数据中心能耗随之飞速增长。数据中心节能技术也因此得到高度重视，改进 IT 设备以提高其利用率、优化数据中心供电系统、研发并应用新型冷却技术等都在发达国家数据中心节能中都有所应用。

雅虎在纽约州北部建设新的绿色数据中心，利用寒冷的空气帮助服务器冷却，极大的提升了能源利用率，降低了冷却能耗，可以不使用空调系统而达到自然散热。其鸡舍式的设计也充分利用了周围的空气温度和自然的气流来进行冷却。

Google 公司通过使用装有嵌入式电池的定制服务器，可以消除使用不间断电源 (UPS) 系统带来的能力损失，这种做法已经成为运营绿色数据中心的虚拟蓝图。Google 还使用“集装箱式”的数据中心。集装箱式数据中心将数据中心内的所有设备布置在集装箱内，具有低能耗、高建设速度、专业化的特点，发展前景广阔。

挪威近几年建设的绿山数据中心位于一处峡湾附近的山洞中，数据中心采用集装箱解决方案，利用海湾 8℃ 左右的海水冷却 IT 设备，节约大量冷却能耗，对外宣传完全没有碳排放。

PUE 是指数据中心用电量与其 IT 设备用电量的比值，是衡量数据中心用能水平的指标。欧美数据中心 PUE 一般可达到 2.0 以下水平。谷歌公布其 2010 年数据中心的电力效率 PUE 均值低至 1.16，并且其中一些地区数据中心 PUE 值仅为 1.09。

降低 IT 设备耗能、研发新型供电系统、研发新型冷却技术是数据中心节能技术发展的主要趋势。

美国联邦政府能耗占美国公共机构能耗总量的 20% 左右，州及地方公共机构能耗占 80% 左右。在联邦层面，从 1988 年《国家节能政策法令 (NECPA)》修正案颁布开始，已颁布了国家能源法和许多行政令要求开展联邦政府机构节能工作，规定联邦政府节能目标，包括强制使用可再生能源、节水以及其它可持续性等相关方面的内容。13514 号行政令 (2009) 是规定可持续能源目标的一项行政令，要求联邦政府部门加强能源计量、管理并降低温室气体排放 (GHG)，实现各单位自行制定的节

能目标。2014年，能源效率和可再生能源办公室(EERE)规定，新建和改造的联邦建筑需要进行绿色建筑认证。美国总统奥巴马2015年签署行政命令，要求美国联邦政府机构到2025年在2008年基础上减少40%的温室气体排放。除了联邦政府设定了节能目标外，几乎所有州和地方政府也单独设立了政府部门强制性的温室气体减排目标和能耗降低目标。同时，政府在公共设施购置中将优先选用带有“能源之星”标识的高效节能产品。

目前，美国政府在高效保温隔热技术、绿色照明技术、先进暖通空调技术、按需调节能源技术、建筑设备智能控制技术、可再生能源技术等方面都有比较成熟的技术和应用，如美国已安装60万台地源热泵空调系统，占空调系统的40%。自1975年至2014年联邦设施的能源强度已经下降了约45%。

欧盟2011年初颁布新的节能计划要求：公共机构建筑应当在全社会树立示范表率，确保能效水平普遍达到最佳。欧盟委员会还鼓励节能服务公司在公共机构节能改造中发挥重要作用，通过实施合同能源管理来节能。德国政府部门为每个楼宇安装各种能源监测的读数表，通过对这些数据的收集整理，不仅可以随时掌握能源使用的情况，发现潜在浪费的问题，通过分析数据制定出适合社会情况的合理的能源消耗标准基数。

可以看出，节能目标逐步提升、全面的技术标准体系、政府主导与市场化结合，是公共机构节能的发展趋势。

国内情况及已取得成果

国内数据中心规模持续、稳步增长，2011年至2014年的四年中，除了2012年销售额增长率近7%，其他年份销售额增长率都在9%以上。数据中心能耗随之快速上升。

国内数据中心冷却设备、供电系统核心设备以进口产品或进口品牌为主，国内自主品牌产品应用为数不多，数据中心节能尚未形成产业。我国数据中心节能技术与开发以大专院校和科研院所为主，企业参与较少。为落实《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》，满足社会信息化水平不断提高的要求，促进我国数据中心健康发展，2013年1月工业和信息化部等五部委联合发布《关于数据中心建设布局的指导意见》，提出推进绿色数据中心建设，鼓励已建数据中心进行绿色节能升级改造。十二五期间已经在数据中心冷却技术研发等方面取得一定成果，开发了小型冷却机架和风冷自然冷却机组等核心设备。

目前我国数据中心能耗高，大多数数据中心 PUE 值在 2~3 之间，冷却是数据中心除 IT 设备耗能之外的用能大户，UPS 等附属设备也对数据中心耗能有较大影响。

近几年来国内数据中心建设重视利用自然条件。2011 年~2013 年我国共规划建设 255 个数据中心，其中半数以上位于或靠近能源供应充足、气候严寒的地区，目的就是利用严寒地区有利气候条件，降低数据中心冷却能耗。

国内在新型冷却技术、高压直流供电技术、无变压器 UPS 供电技术、无 UPS 供电技术等方面开展了研究，并已取得了一定的成果，开发成功了高发热密度冷却机柜、自然冷却风冷机组等具有自主知识产权的核心设备。为了推动数据中心的节能减排，工业和信息化部在《工业节能“十二五”规划》提出了“到 2015 年，数据中心 PUE 值需下降 8%”的目标。国家能源发改委等组织的“云计算示范工程”也要求示范工程建设的数据中心 PUE 要达到 1.5 以下，并在 2012 年《中国云科技发展“十二五”专项规划》明确绿色数据中心成为未来数据中心建设的主要方向，并提出“绿色、节能、低碳、可持续发展”的战略要求。

建筑节能产业涉及建筑材料与部品制造、建筑设备制造、建筑规划设计、建筑能源服务等方面。我国建筑节能产业比较全面，节能产品性能与世界先进水平尚有差距，规划设计、能源服务方面的水平与发达国家差距不大，我国自主研发的温湿度独立控制空调系统领先于世界水平。产学研一体的技术创新模式发挥了比较显著的效益，如温湿度独立控制空调系统技术研发涵盖了基础理论研究、工程应用技术研究、核心设备研发、检验与评价标准研究等，研究成果迅速实现产业化、规模化应用。

我国已建立公共机构能源资源消耗统计制度，并纳入国家统计体系，已完成了对 2005 年至 2010 年全国公共机构能源资源消耗情况的汇总分析，纳入统计范围的公共机构达 62 万家。从统计数据看，我国公共机构节能成效显著，2005 年至 2010 年，全国公共机构节能 3391 万吨标准煤，减排二氧化碳 8477.5 万吨，2011 年单位面积能耗较 2005 年下降 16.8%。2008 年 8 月，国务院颁布《公共机构节能条例》，以法律手段推进公共机构提升能源利用效率。2011 年 8 月出台的《公共机构节能“十二五”规划》明确，将用能系统作为工作的重点领域。目前，全国 26 个省级地区出台了公共机构节能管理办法，29 个省级地区出台了“十二五”公共机构节能专项规划，各地区出台能源审计、能耗定额、合理用能指南等标准及节水、节电、节油管理办法逾 3000 件。“十二五”期间，国家科技支撑计划首次在公共机构节能方面

开展了“公共机构节能关键技术研发及示范”项目，重点研发暖通空调设备、辅助设施节能技术等，为公共机构节能做好了技术储备，研究成果在公共机构中应用示范取得了一定节能效果。

国内外比较分析

根据国内外各大权威机构对数据中心的能耗结构与组成进行比较，我国数据中心节能在国际上处于并跑和跟跑阶段。国内对新型冷却技术、新型供电技术研究及核心设备研发方面取得了一定的进展，高发热密度冷却机柜、自然冷却风冷机组等新型设备在工程中有一定应用，但设备性能和综合能效还需要进一步提升与完善。我国数据中心能效水平、节能技术、核心设备研发和系统技术集成等方面与国外先进水平还有差距。

我国公共机构节能已经制定了相关的节能制度及措施，正在逐步推动公共机构能耗下降，且进步速度较快，在国际上目前处于并跑阶段。但据美国能源情报机构2005国际能源展望预测，到2025年美国商业建筑能源消耗将比2002年增长51%，西欧增长15%，而中国将增长114%。与美国和欧盟国家相比，中国公共机构及建筑能耗总量正在高速增长，需要研究借助自然环境的被动式节能技术体系，遏制能源高速增长的趋势。由于我国公共机构数量庞大、从中央到地方、地区差异等多重原因，适宜的公共机构节能技术体系仍需进一步研究，并将有很大的节能潜力。

(二) 本专项拟解决的重大科学问题和重大技术瓶颈

煤炭高效发电方向，重点解决“超高参数、超高效率、超低排放”燃煤发电的系统中能量释放、传递、转换、利用及污染物超净排放的重大科学问题，突破现役电厂进一步提高效率及下一代先进超超临界发电关键技术瓶颈。

煤炭清洁转化方向，重点解决煤炭/合成气直接转化制燃料与化学品的催化反应机理，形成新型反应理论等重大科学问题，突破大型新型煤气化、液化、分级利用等重大技术瓶颈。

燃煤污染控制方向，重点突破常规污染物超低排放和一体化控制、PM_{2.5}及重金属和有机污染物等特殊污染物控制的关键技术瓶颈。

二氧化碳捕集利用与封存方向，重点解决燃烧源头减排的新理论，CO₂驱油、驱气新型强化手段及其利用新途径等重大科学问题，突破大规模CO₂捕获、利用、封存技术难题。

工业余能回收利用方向，解决颗粒、熔渣与流体之间的非线性热质迁移规律的重大科学问题，突破工业高温高含尘废气的净化与换热一体化技术瓶颈。

工业流程及装备节能方向，解决复杂流程体系集成与节能优化的热科学基础问题及化工过程低温温和转化难题，突破流程工业系统节能和工序界面协同控制的技术瓶颈。

数据中心及公共机构节能方向，解决高集成度、高发热密度数据中心机房冷却问题，突破提高冷却能力并提高冷却能效的技术瓶颈；在多源互补高效利用、暖通空调系统优化调适等技术方面取得突破，提高建筑实际运行能源使用效率。

三、目标及主要任务

（一）总体目标

按照控制煤炭消费总量，实施煤炭消费减量替代，降低煤炭消费比重的要求，突破我国资源保障以及生态、环境、安全等约束瓶颈。专项设置煤炭高效发电、煤炭清洁转化、燃煤污染控制、二氧化碳捕获利用与封存(CCUS)、工业余能回收利用、工业流程及装备节能、数据中心及公共机构节能七个主要方向，根据技术成熟程度，分别按照基础研究、重大共性关键技术和典型应用示范全链条进行部署。

煤炭高效发电：超高参数燃煤发电机组实现规模化产业化运行，火电机组平均供电煤耗在役机组下降至 300g/千瓦时左右，新建机组供电煤耗低于 285g/千瓦时。

煤炭清洁转化：新一代高效煤制清洁液体燃料和煤制天然气技术形成规模化产业，推动形成煤制油 1500 万吨，煤制天然气 500 亿方的产业规模，综合能效提高 3%-5%，水耗降低 20%。

燃煤污染控制：SO₂、NO_x、汞、重金属和粉尘等高效污染物减排和一体化控制技术，形成规模化产业；先进燃煤电厂排放达到：SO₂≤20mg/m³、NO_x≤30mg/m³、PM≤5mg/m³。

二氧化碳捕集利用与封存：新一代燃煤电厂烟气中 CO₂ 的高性能吸收工艺和捕集材料产业化应用，综合能耗降低 25-50%；富氧燃烧工业示范装置运行；百万吨级 CO₂ 分离和驱油利用工业运行，CO₂ 驱水利用实现示范。

工业余能回收利用：工业生产过程中的高含尘 1000℃ 以上废气余能、低品位余

能、高温固体物料余能的高效回收技术和装备实现规模化产业示范，工业余能回收利用率达到 70%。

工业流程及装备节能：冶金、建材和化工等高耗能行业高效节能流程及工艺装备大规模应用，综合节能>10%；通用机电装备实现多工况和多目标综合优化技术应用，泵/风机组能效比提高 5~8%，制冷空调系统能效比提高 4~10%。

数据中心及公共机构节能：建立新一代高效冷却、供电和系统最优化的绿色数据中心，并实现大规模的推广应用，机房 PUE 值降低 15%；形成公共机构能源管理和重点用能设备的节约型整体技术解决方案，建立统一的设计和评价标准及规范，规模化应用。

（二）主要任务与具体目标

煤炭高效清洁利用和新型节能技术重点专项的总体研发布局按七个方向，每个方向根据技术的成熟程度分别从基础研究、重大共性关键技术、典型应用示范进行全链条的任务设计。基于国家重大需求、已经形成的技术和产业化基础，以及国际发展的现状趋势，确立“十三五”期间的重点内容、具体目标和预期成果。

在煤炭高效发电方向上，设置了一个基础研究任务，即先进燃煤发电技术的基础研究，两个重大共性关键技术任务：煤基燃料的燃烧发电共性关键技术开发示范和 700℃ 等级超超临界发电技术，并设置了一个典型应用示范任务，即先进燃烧发电技术示范与运行优化。

在煤炭清洁转化方向上，设置了一个基础研究任务，即煤炭/合成气直接转化制燃料与化学品反应和催化基础研究，两个重大共性关键技术任务：煤制清洁燃气关键技术研究及煤制液体燃料及大宗化学品关键技术研究，并设置了一个典型应用示范任务，即煤气化和煤分级转化多联产工业示范。

在燃煤污染控制方向，考虑到基础研究方面已经相当成熟，拟投置两个重大共性关键技术任务：燃煤污染物资源化利用技术关键技术和燃煤 PM_{2.5}、重金属及有机污染物控制技术，并设置一个典型应用示范任务：燃煤常规污染物超低排放技术及一体化控制技术；

在二氧化碳捕集利用与封存方向，设置一个基础研究任务，即基于 CO₂ 减排和利用的关键基础科学问题，并设置了两个重大共性关键技术任务：基于 CO₂ 减排的燃烧及 CO₂ 分离捕获关键技术、CO₂ 利用和地质封存关键技术。考虑到技术尚不成熟，暂不考虑进行典型应用示范。

在新型节能方面主要考虑了重大共性关键技术的开发和典型应用示范,而没有考虑这方面的基础研究设置。

在工业余能回收利用方向,设置了两个重大共性关键技术任务:高温散料与液态熔渣高效热回收技术和工业含尘废气余热回收技术,并设置了一个典型应用示范任务,即低品位余热能回收技术与装备研发;

在工业流程及装备节能技术方向,设置了三个重大共性关键技术任务:流程工业系统优化协同节能技术、气体制备与全氧/富氧冶金技术、通用机电装备节能技术,同时设置了一个典型应用示范任务,即工业锅炉及窑炉节能减排技术;

在数据中心及公共机构节能技术方向,设置了两个重大共性关键技术任务:数据中心节能技术、公共机构设备及系统节能。

总体上本专项按照基础研究、重大共性关键技术、典型应用示范全链条组织实施要求,设置7个方向,23个主要任务。其中3个基础研究任务、15个重大共性关键技术任务和5个典型应用示范任务。

每个任务的重点内容、具体目标、预期成果如下:

方向一 煤炭高效发电

煤炭高效发电方向围绕超高参数和燃烧转化方式两大内容分解为4个任务,其关系如下:

煤炭高效发电		
基础研究	任务 1	先进燃煤发电技术的基础研究
重大共性关键技术	任务 2	煤基燃料的燃烧发电共性关键技术开发示范
	任务 3	700℃等级超超临界发电技术
典型应用示范	任务 4	先进燃烧发电技术示范与运行优化

任务 1 先进燃煤发电技术的基础研究

该项研究属于基础研究。

计划实施时间:2016年-2020年。

(1) 重点内容

研究“超高参数、超高效率、超低排放”燃煤发电的新理论、新概念、新型热力循环和新系统,燃煤发电系统中能量释放、传递、转换、利用及污染物超净排放

的规律；研究大型发电关键设备内部和关键设备之间流动、燃烧与传质传热等现象；燃料化学能释放与蒸汽做功之间的物流和能量的互补优化；新型 CO₂/水蒸汽复合工质循环的燃烧、换热和气动特性机理。

(2) 具体目标

突破燃烧与水动力深度耦合技术和流动换热均匀性技术，形成多相燃烧与多相流耦合高效热能转换基础理论，建立超高参数条件下清洁燃烧与水动力耦合能量传递体系；支撑超高参数燃煤发电技术的发展；建立氧/水蒸气燃烧条件下高压燃烧器及燃烧室、复合工质透平及循环系统集成、控制、运行及优化机制，获得复合工质动力循环系统能量利用理论；为煤基燃料高效燃烧零排放动力循环系统的开发提供必要的理论储备。

(3) 预期成果

获得 1-2 项燃煤发电的新方法，实现发电效率超过 50%和二氧化碳近零排放；所优化的煤基复合工质循环零排放动力循环系统的理论发电效率不低于 50%（基于煤气化）和 53%（基于超净煤）。

任务 2 煤基燃料的燃烧发电共性关键技术开发示范

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2020 年。

(1) 重点内容

研究 600 兆瓦等级亚临界机组改造超超临界机组的集成优化技术，研究汽轮机采用二次再热改造技术，开展机组的优化运行研究；研究高碱煤的碱金属原始赋存特性、燃烧释放特性、高温熔融和成渣特性；开展新型高碱煤液态排渣锅炉关键技术和优化集成研究；研究超低挥发分碳燃料燃烧器技术，研究超低挥发分燃料炉膛燃烧组织、排放控制技术；研究燃煤发电机组排烟水分按质回收的成套技术和装备，开展末端废水利用和处理技术研究。

(2) 具体目标

突破在役机组升级改造关键技术，实现改造升级为超超临界机组；突破适合高碱煤的新型大容量液态熔融燃烧关键及集成技术，建成 300 兆瓦等级超临界机组示范工程；突破超低挥发分燃料的着火和稳燃技术，形成纯烧热解半焦和气化细粉残炭燃烧技术及示范；突破大型燃煤发电厂排烟水分按质回收利用的关键和成套技

术，实现大型燃煤发电机组综合废水资源化利用；提高燃煤电厂的灵活性技术。技术达到国际领先水平。

(3) 预期成果

完成 600 兆瓦等级亚临界机组改造升级为超(超超)临界机组的技术示范，实现厂用电率<4%，供电煤耗<290g/千瓦时；完成 300 兆瓦燃高碱煤超临界机组新型液态排渣锅炉技术示范，锅炉效率>93%，碱金属盐捕获率>50%；完成 150 吨/日等级气化细粉残炭燃烧技术示范，完成 100 兆瓦等级热解半焦燃烧锅炉机组的技术示范，燃烧效率不低于 95%；建成燃煤发电厂深度节水及废水零排放样机一套，烟气水分回收率达到 30%-50%，废水排放率为零。

任务 3 700℃等级超超临界发电技术

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2020 年。

(1) 重点内容

建立实验室规模全尺寸镍基 700℃(含 650℃)等级高温部件和 700℃等级机组关键部件的验证实验台，研究水冷壁结构、过热器/再热器结构、蒸汽管道/集箱结构、镍基合金汽轮机转子等部件和单元的长周期性能试验研究；研究基于 700℃水冷壁/过热器/再热器的壁温安全特性、燃烧侧结渣积灰特性、热力均匀性与工质侧大比热区特性；开展 700℃等级发电机组的锅炉技术方案、汽轮机方案和热力系统优化与集成研究，确定最经济合理的技术方案和系统。

(2) 具体目标

掌握基于 700℃超超临界发电技术的水冷壁/过热器/集箱/管道/阀门等高温试验件和单元设计技术；突破基于 700℃超超临界发电技术的燃烧技术和水动力安全技术，形成 700℃等级发电机组的锅炉/汽轮机技术方案和系统集成方案，完成建立 600 兆瓦 700℃等级发电机组示范工程的前期准备工作。技术处于国际领先地位。

(3) 预期成果

在实验室和实际锅炉尺度上，完成对高温热部件等 30000 小时长周期验证考核，考核各种材料、制造工艺、运行特性，完成高温关键单元的性能试验；完成基于 600 兆瓦 700℃等级发电机组的性能设计，发电净效率不低于 50%；为下一步示范工程的建设提供技术支撑。

任务 4 先进燃烧发电技术示范与运行优化

该项研究属于典型应用示范。

计划实施时间：2016 年-2020 年。

(1) 重点内容

研究二次再热煤粉燃烧发电机组的锅炉安全运行和动态响应特性、锅炉/汽轮机参数匹配和系统优化；研究超超临界循环流化床锅炉关键技术和炉型方案，研究超超临界循环流化床锅炉调试及优化运行技术；研究循环流化床燃烧过程中 NO_x 超低排放关键技术与系统集成研究；研究整体煤气化联合循环发电安全优化运行技术，研究空分、气化、余热利用、燃气轮机全工况优化运行特性，研究整个系统全工况优化运行调节规律和控制策略。

(2) 具体目标

形成优化的二次再热 660-1000 兆瓦级超超临界煤粉燃烧机组技术，实现安全经济运行；突破 660 兆瓦超超临界循环流化床锅炉关键技术和系统集成技术，完成技术示范运行；掌握 250 兆瓦级 IGCC 发电系统的全工况优化运行技术以及运行调节规律。技术达到国际先进水平。

(3) 预期成果

600/1000 兆瓦等级的超超临界二次再热机组的发电煤耗 < 260g/千瓦时；研制出 660 兆瓦超超临界循环流化床锅炉机组并实现工程示范，锅炉效率 92%，供电煤耗 300g/千瓦时；形成 NO_x 原始排放直接达标的循环流化床锅炉技术与装备；250 兆瓦等级 IGCC 机组的系统净效率在现有运行基础上提高 5 个百分点，运行维护成本降低 20%，全厂可用率达到 90%。

方向二 煤炭清洁转化

在“十二五”技术开发和示范的基础上，煤炭清洁转化利用领域，围绕煤气化、液化、热解和煤基合成等现代煤转化技术，进一步突出研发重点，突破关键技术瓶颈和示范，凝练为 4 项主要任务，包含了一项基础研究、两项关键基础、一项工程应用。

煤炭清洁转化		
基础研究	任务 1	煤炭/合成气直接转化制燃料与化学品反应和催化基础研究

重大共性关键技术	任务 2	煤制清洁燃气关键技术研究
	任务 3	煤制液体燃料及大宗化学品关键技术研究
典型应用示范	任务 4	煤气化和煤分级转化技术工业示范

任务 1 煤炭/合成气直接转化制燃料与化学品反应和催化基础研究

该项研究属于基础研究。

计划实施时间：2016 年-2020 年。

(1) 重点内容

研究煤炭热解、液化等直接转化过程自由基生成与反应规律，直接转化液体及气体产物与煤组成及分子结构的关系，液体产物生成的化学途径与产物定向调控方法机制，煤炭转化过程中污染元素迁移规律及液固污染物形成途径，固相产物大规模燃烧、气化等利用技术过程与核心装备放大基础；研究煤基合成气直接合成烯烃、芳烃、特殊含氧化合物等的新原理、催化基础、化学反应途径、反应定向调控方法与机制等；创新过程工艺、催化剂和反应器，开展流动-传递-反应联合数值模拟与过程预测，实施新技术方法验证。

(2) 具体目标

阐明煤炭热解、液化等直接转化制备高品质液体燃料及化学品、煤基合成气直接催化合成烯烃、芳烃等化学品及清洁燃料的生成机理和反应途径，建立产物定向调控的技术方法，形成新型催化剂、反应器、过程工艺，奠定煤炭/合成气直接转化煤转化制燃料和化学品新技术基础。

(3) 预期成果

煤炭低温热解、加氢液化高收率生产低尘、低重质组分含量液体燃料及化学品，以及煤及合成气直接合成烯烃、芳烃、特殊含氧化合物的新方法、新工艺、新催化剂，完成新方法与新工艺技术验证，煤直接转化目标产物选择性 70%以上。

任务 2 煤制清洁燃气关键技术研究

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2018 年。

(1) 重点内容

开发两段式中低压固定床气化、碎煤液态排渣气化工工艺及装备；低劣/低阶煤大规模流化床气化技术，催化气化、加氢气化、地下煤气化、超临界水气化等技术；煤定向热解、高压加氢热解技术；循环流化床气化及热解耦合技术；高温煤气净化技术；低阶煤直接转化和焦化新工艺；煤焦化过程烟气脱硫、脱硝技术；合成气甲烷化等关键技术；煤转化废水处理、回用和资源化关键技术。

(2) 具体目标

形成两种以上新型加压固定床气化成套技术，掌握低劣/低阶煤大规模流化床气化、热解耦合双床气化产业化技术，突破催化气化、加氢气化、地下煤气化、超临界水气化等工程化技术瓶颈；建立煤定向热解、高压加氢热解示范平台；建立高温煤气净化技术中试；建立低阶煤直接转化和焦化新工艺中试装置；建立合成气、热解气高效甲烷化工业示范装置；形成焦化过程烟气脱硫、脱硝新技术；形成煤转化废水处理和回用、盐资源化和熔融固化等成套产业化技术。

(3) 预期成果

建成 300~500 吨/日碎煤两段中低压固定床气化装置、千吨级块煤及粉煤联合进料液态排渣气化示范，碳转化率 98%以上，50 吨/日多功能颗粒循环催化气化装置、3~4 套 300-1000 吨/日不同工艺流态化煤气化装置、百吨/日超临界水气化示范、50 万吨/年低阶煤定向热解示范，焦油收率达到葛金分析收率的 80%以上，含尘 1.0(wt) %以下，高压加氢热解及新型焦化工业试验、1~3 亿 Nm³/年合成气和热解气高效甲烷化示范、焦化过程烟气脱硫、脱硝工程示范、2~3 套 100 m³/h 以上煤转化高酚、高盐废水净化回用示范。

任务 3 煤制液体燃料及大宗化学品关键技术研究

该项任务属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2018 年。

(1) 重点内容

开发温和煤直接液化新工艺和催化剂，煤与重油或煤焦油的共加氢液化技术，高选择性钴基、铁基费托合成工艺、催化剂、产品深加工和系统技术，合成气高效合成乙醇、低碳醇、乙二醇等工艺、催化剂和反应器等关键技术，新一代甲醇制燃料、烯烃、芳烃、聚甲氧基二甲醚等联产技术。

(2) 具体目标

实现煤直接液化、煤与重油或煤焦油的共加氢液化新工艺示范，突破钴基、铁基费托合成特种产品加工技术瓶颈，掌握合成气高效合成醇类化合物的工业化技术，掌握新一代甲醇基燃料及煤基替代石油化学品关键技术和系统集成。

(3) 预期成果

建立新型煤直接液化 20~50 万吨油品/年工业示范，建成 10~50 万吨/年煤与重油或煤焦油的共加氢液化示范装置，建成单系列 10~30 万吨/年钴基费托合成工业装置，建立百万吨级流化床费托合成工业装置，新型费托合成催化剂在百万吨级装置上应用，建成 10~30 万吨/年单系列煤制乙醇、低碳醇、乙二醇示范装置，建成 50~100 万吨/年新一代甲醇制烯烃、芳烃工业示范装置，形成单套 10~30 万吨/年以上聚甲氧基二甲醚等清洁油品添加剂绿色新工艺工业示范。煤综合能效提高 3%~5%，水耗降低 20%。

任务 4 煤气化和煤分级转化技术工业示范

该项研究属于典型应用示范。

计划实施时间：2016 年-2018 年。

(1) 重点内容

研究大规模适应多种原料的水煤浆、干煤粉气化工程放大和长周期运行技术，开展基于煤气化的多联产工程技术研究；研究大型热解、燃烧分级转化的工程化技术，研究固体热载体热解反应器、循环流化床半焦燃烧反应器及相互之间的物理化学过程匹配、耦合技术及系统集成；开发基于发电的分级利用多联产技术；开发焦化-气化一体化制清洁燃料和化学品技术。

(2) 具体目标

新一代大规模气流床气化技术工业应用；完成适用于典型烟煤和褐煤的热解燃烧分级转化工程示范，建立大型高参数以发电为主的煤热解燃烧分级转化、焦载体热解气化分级转化的设计体系，突破碎煤固体热载体热解高温煤气除尘、油气分离等难题；实现大规模焦化-气化制液体燃料和化学品商业化示范。

(3) 预期成果

建成 4000 吨/日水煤浆气化、3000 吨/日粉煤气化、1500-2000 吨/日激冷-废锅组合气流床气化、新型千吨级多原料气流床气化技术等示范装置；建成 100MWe~300MWe 级煤热解燃烧分级转化多联产工程，煤转化率大于 98%，系统热效

率大于 90%；建成 100 万吨/年焦载体热解的煤气-焦油-半焦联产示范工程；建立百万吨级焦化装置改造升级制气化原料生产 20~30 万吨/年液体燃料及化学品多联产工业示范装置，综合能效提高 3~5%。

方向三 燃煤污染控制

在“十二五”技术开发和示范的基础上，燃煤污染控制领域，围绕主要污染物排放控制和资源化利用技术，进一步突出研发重点，突破关键技术瓶颈和示范，凝练为 3 项主要任务，包含了两项重大共性关键技术、一项典型应用示范。

燃煤污染控制		
重大共性关键技术	任务 1	燃煤污染物资源化利用技术关键技术
	任务 2	燃煤 PM2.5、重金属及有机污染物控制技术
典型应用示范	任务 3	燃煤常规污染物超低排放技术（SO ₂ , NO _x , 颗粒物）和一体化控制技术

任务 1 燃煤污染物资源化利用关键技术

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2020 年。

（1）重点内容

研发利用过程副产物的碳基吸附剂和镁基吸收剂；研究氨/胺基吸收剂的强化吸收技术，开发多污染物联合脱除资源化利用工艺；研究资源化半干法烟气脱硫技术、均相/异相催化深度还原 NO_x 技术；研究脱硫灰/脱硫石膏等脱硫副产品处理、加工利用技术；开发粉煤灰高值化、资源化利用新技术。

（2）具体目标

突破大宗煤污染物脱除副产物资源化利用的关键技术，发展基于脱硫剂及副产物多元化利用的技术体系，探索与煤灰性质变迁相对应的资源化利用新技术，掌握系列燃煤污染物资源化利用技术。

（3）预期成果

300MW 等级机组烟气脱硫副产物资源化利用工程示范，脱硫副产物利用率不低于 80%；开发氨/胺基吸收剂的强化吸收的技术示范；均相/异相催化深度还原 NO_x

技术完成中试。

任务 2 燃煤 PM_{2.5}、重金属及有机污染物控制技术

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2020 年。

(1) 重点内容

燃烧前、燃烧中、燃烧后 PM_{2.5} 控制技术及应用；汞 (Hg) 的催化氧化、吸附及与其它污染物的协同脱除技术与应用；砷 (As)、硒 (Se)、铅 (Pb) 等重金属的控制技术开发与示范；有机污染物 (VOCs 等) 的高效吸附、催化氧化及其与其它污染物的协同脱除技术开发与示范。

(2) 具体目标

掌握燃煤 PM_{2.5}、Hg 的深度控制技术；形成重金属及有机污染物的关键控制技术。

(3) 预期成果

实现燃煤 PM_{2.5}、Hg 的深度控制，600MW 等级及以上燃煤发电机组实现示范应用，粉尘排放浓度 $PM \leq 5mg/m^3$ ；Hg 及其化合物的总脱除效率不低于 90%；重金属及有机污染物的控制技术实现在 300 兆瓦等级燃煤发电机组的示范和应用。

任务 3 燃煤常规污染物超低排放技术 (SO₂, NO_x, 颗粒物) 和一体化控制技术

该项研究属于典型应用示范。

计划实施时间：2016 年-2019 年。

(1) 重点内容

燃煤烟气中 SO₂ 深度脱除技术，深度脱除低挥发分煤 NO_x 的燃烧技术，宽温度窗口、全负荷条件、高效 SCR 催化剂脱除 NO_x 技术，新型高效除尘技术 (湿式电除尘、电袋耦合除尘、炉内添加吸附剂等)，复杂烟气条件下细颗粒物 PM_{2.5} 的在线测量技术，燃煤发电机组协同生产兼顾节能节水的超低排放与一体化控制技术。

(2) 具体目标

掌握低挥发分煤 NO_x 的燃烧技术，掌握燃煤烟气污染物超低排放控制技术和污染物一体化控制技术及相关装备，实现脱硝、脱硫、除尘等关键设备的产业升级，大幅减轻燃煤发电机组对我国环境的污染。

(3) 预期成果

在多个 600 兆瓦等级或以上燃煤发电机组上进行常规污染物超低排放和一体化控制工程示范，烟尘、SO₂、NO_x 排放浓度分别不高于 5、35、50mg/m³，并大幅度节约系统的能耗和水耗；实现细颗粒物 PM_{2.5} 的在线准确测量。

方向四 二氧化碳捕集利用与封存

在“十二五”技术开发和示范的基础上，CCUS 领域，围绕 CO₂ 减排的燃烧、离、捕获、封存、利用等方面，进一步突出基础科学问题，突破关键技术瓶颈，凝练为 3 项主要任务，包含了一项基础研究、两项共性关键技术。

二氧化碳捕集利用与封存		
基础研究	任务 1	基于 CO ₂ 减排和利用的关键基础科学问题
重大共性关键技术	任务 2	基于 CO ₂ 减排的燃烧及 CO ₂ 分离捕获关键技术
	任务 3	CO ₂ 利用和地质封存关键技术

任务 1 基于 CO₂ 减排和利用的关键基础科学问题

该项研究属于基础研究。

计划实施时间：2016 年至 2020 年。

(1) 重点内容

研究富氧燃烧、加压富氧燃烧、化学链燃烧的反应过程特性及机理。研究 CO₂ 封存条件下基础物性、传质和传热特性，CO₂ 与 H₂O、烷烃等多相组分特殊环境下的界面吸附平衡及交互影响；研究可大规模利用 CO₂ 的新方法、新概念及其理论；研究 CO₂ 转化制备液体燃料与化学品的高效催化反应机理与原子经济反应路径设计；研究 CO₂ 碳酸化矿化过程强化机制与产物特性演变规律。

(2) 具体目标

获得富氧燃烧、加压富氧燃烧、化学链燃烧过程基础理论，形成 CO₂ 不同条件下物性变化规律，获得 CO₂ 等多相组分在固体界面的交互作用规律，形成 CO₂ 驱油、驱气的理论与方法，建立 CO₂ 矿化过程中体系的物化特性及演变规律，获得 CO₂ 制液体燃料和化学品的新工艺、新方法。

(3) 预期成果

建立以获得高浓度 CO₂ 为目标的加压富氧燃烧、化学链燃烧等新型燃烧方法的创新理论，建立 CO₂ 在不同封存条件下的基础物性数据库，形成 CO₂ 驱油、驱气强化技术基础，获得多种 CO₂ 转化制液体燃料和化学品的新途径。

任务 2 基于 CO₂ 减排的燃烧及 CO₂ 分离捕获关键技术

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016年-2018年。

(1) 重点内容

研究 O₂-CO₂ 气氛下燃烧和火焰传播特性，开发富氧燃烧控制、模型预测与系统集成技术，研究化学链燃烧和气化的载氧体的结构与性能、与各种燃料的作用和再生规律及系统循环技术，开发 CO₂ 捕获的高性能材料及工业制备技术，研究 CO₂ 大型分离设备强化途径和低能耗分离工艺，开展烟道气 CO₂ 捕获工程化技术研究和系统集成。

(2) 具体目标

形成新型燃烧锅炉的设计技术，实现煤富氧燃烧工程示范。突破化学链燃烧和气化关键技术，建立中试平台。形成适用于大规模 CO₂ 分离和捕获的高性能吸收剂、吸附剂和分离膜及其工业规模生产。实现系列工艺的烟道气捕获 CO₂ 工程示范。

(3) 预期成果

建立 25 兆瓦级富氧燃烧工业示范装置，形成富氧燃烧锅炉设计标准。建立化学链燃烧和气化中试平台。建立高性能吸收剂、吸附剂与分离膜的工业规模生产线，分离膜生产能力 50000 平方米/年，建立用于烟道气捕获 CO₂ 的示范装置，处理量为 50000 立方米/日，CO₂ 的回收率为 90%，CO₂ 的纯度为 95%。

任务 3 CO₂ 利用和地质封存关键技术

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016年-2018年。

(1) 重点内容

开发驱油气、煤层气关键技术和装备、监测技术，研究 CO₂ 矿化技术；研究微藻固碳关键工艺与反应器，研究 CO₂ 为原料制备化合物新工艺与装备；研究 CO₂ 地质封

存性能、封存能力、数值模拟和安全监测技术等。

(2) 具体目标

在CO₂封存、驱油气、驱煤层气、微藻固碳等方面形成规模化示范，建立安全性、可行性、经济性评估的方法体系；获得CO₂制备化合物新技术、新方法。

(3) 预期成果

建立30~50万吨/年二氧化碳地质封存示范；建立百万吨/年CO₂驱油利用、2亿立方米/年以上驱煤层气工业示范工程；建立微藻年固碳能力万吨级示范工程；建立万吨/年CO₂制备化合物示范工程。

方向五 工业余能回收利用

本方向针对工业领域内的各类高、中、低温度范围和气、固、熔体、液等物态的工业余能回收利用，包括余能回收利用的技术与装备的共性关键技术研究 and 典型应用示范。本方向分为如下三个任务：

工业余能回收利用		
重大共性关键技术	任务 1	高温散料与液态熔渣高效热回收技术
	任务 2	工业含尘废气余热回收技术
典型应用示范	任务 3	低品位余能回收技术与装备研发

任务 1 高温散料与液态熔渣高效热回收技术

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2018 年。

(1) 重点内容

研发适用于不同相态（固体、熔融流体）、粒度范围广、排放量变化范围大、间歇性和连续性的高温散料中不同介质（水冷、风冷、水冷与风冷结合）的系列余热回收技术；研究熔渣粒化品质调控、流-固耦合强化传热、中低温余热能传递中品位提升的技术；开发热回收率高、工艺流程简单、安全可靠、投入产出比低的余热回收装置。

(2) 具体目标

突破回收烧结散料余热、炉渣颗粒化、强化流固传热、提高余热回收效率等关键技术，形成高温散料余热回收的原型技术，发展系列余热回收装置；在热回收的

同时，优化调控散料性能，满足工艺要求。

(3) 预期成果

开发出适用于工业炉渣、铁/钢渣、烧结/球团矿的高温散料和液态熔渣余热回收技术，年处理量达到百万吨级，热回收效率达到 70~80%；流程工业系统的余热回收率大于 55%，系统热效率达到 70%~80%，单位产品的能耗降低 10%以上。

任务 2 工业含尘废气余热回收技术

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2018 年。

(1) 重点内容

研发结合蓄热和换热技术各自优势及针对高温烟气的高效连续热回收技术；开发含尘烟气的高温净化和净化换热一体化技术；研究高温复杂工况下的气固分离、耦合换热等规律；提出在多组分复杂烟气环境中受热面磨损、积灰、低温腐蚀、传热及流动阻力一体化解决方案，发展新型受热面结构及材料等关键技术；开发具有防治磨损、积灰、低温腐蚀并具有优良的传热特性的新型换热装置。

(2) 具体目标

突破提高蓄热材料比表面积的瓶颈，形成超大比表面积的超级蓄热体，掌握蓄热与换热耦合的近极限余热回收技术，突破工业高温高含尘废气的净化技术瓶颈，形成除尘与换热协同强化的技术方法，开发处理含尘废气的近极限余热回收与净化一体化设备。

(3) 预期成果

开发出比表面积达到 1500m²/m³ 的超级蓄热体；蓄热与换热耦合的近极限余热回收技术，与传统的蓄热技术相比，余热回收效率提高 10%；形成体系完备的高含尘废气的净化、余热和余压回收利用技术系列、标准和配套装备。

任务 3 低品位余能回收技术与装备研发

该项研究属于典型应用示范。

计划实施时间：2016 年-2020 年。

(1) 重点内容

研究超级热泵和高效热管技术，研究 Kalina 循环和有机朗肯循环（ORC）发电在低品位余能回收利用方面的技术，研究低温余热吸收式制冷、废水余热回收等技

术，研究利用低品位余能进行石化蒸馏的技术，研究利用低温余热进行低温多效海水淡化的技术，研究低品位余能的网络化利用。

(2) 具体目标

突破热泵技术的能效瓶颈，大幅提高热泵技术的 COP 值；提高中低温热能的有效利用率，形成超级热泵系列装备；形成低品位余能回收的高效热管系列装备；掌握中低温余热应用于发电、海水淡化、除湿助燃等方面的技术，获得将低能级的余热转换成高能级能源的最佳技术途径。

(3) 预期成果

建立利用超级热泵、高效热管的低温烟气余热回收示范工程，余能回收率 26%~30%；热泵技术 COP 值大于 6；中低温余热发电技术规模化推广，综合能耗降低 5%；在沿海工业区建成利用工业余热的低温多效海水淡化系统，规模达到日产 5 万吨。

方向六 工业流程及装备节能

冶金、建材、化工等行业均是高耗能的流程工业，本方向针对流程工业的节能减排开展研究，以创新流程和提升工艺装备能效为抓手，大幅降低高耗能行业的单位产品能耗，并探索流程工业的共线并产和系统节能；装备节能还包括各类通用机电装备（电动机械、流体机械、动力机械等），以期显著降低我国终端用能行业的能源消耗。本方向分为如下四个任务：

工业流程及装备节能		
重大共性关键技术	任务 1	流程工业系统优化协同节能技术
	任务 2	气体制备与全氧/富氧冶金技术
	任务 3	通用机电装备节能技术
典型应用示范	任务 4	工业锅炉及窑炉的节能减排技术

任务 1 流程工业系统优化协同节能技术

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2018 年。

(1) 重点内容

研究流程工业系统节能和工序界面协同控制，研究高耗能行业工序间的非均衡用能和能质强化传递规律；研发流程工业的大系统共线联产、互联网+与流程工业的融合等节能技术，以及各类流程中的工艺用能装备；研发以寻求热力过程的性能极限为目标的高效能量传递与转换单元设备；研究流程工业中连续工序、半连续工序和非连续工序之间的合理衔接及匹配。

(2) 具体目标

推进资源/能源/环境一体化流程工业系统，获得煤气化直接还原炼铁、合成燃料、尾气发电一体化生产系统，实现荒煤气显热、焦炉余热、干熄焦显热一体化回收发电系统，进行产业化示范。

(3) 预期成果

所开发的节能型工艺在冶金、化工、建材等高耗能行业中广泛应用，较传统系统节能约 10%，新型工业用能装备（如加热炉、煅烧窑等）能量利用率提高约 10%，推动典型高耗能流程行业实现综合能耗降低 10%~15%。

任务 2 气体制备与全氧/富氧冶金技术

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2018 年。

(1) 重点内容

研究进一步高效提高空分流程中氧氮分离效率的技术方案，构建最优化氧、氮、氩等气体产品的变比例生产控制模式；开发最小化气体发生能耗和输送能耗为目标的优化气体分离工艺；优化分子筛低温解析余热极限利用流程；研究全氧/富氧高炉和有色冶金技术，研究炉顶煤气脱除 CO₂ 且加热后返回冶炼炉内循环利用技术。

(2) 具体目标

针对工业企业生产过程中氧气、氮气等气体放散率高的问题，构建跟踪气体使用量比例变化的主动变负荷空分系统节能操作策略，并建立含不凝气体的高效热管及分子筛空分余热回收系统；针对炼铁高炉和有色冶金炉中利用空气助燃不易达到理想还原温度和炉气量大、耗能高的问题，形成全氧/富氧冶金的高温还原系统的节能型新工艺。

(3) 预期成果

高效空分流程节能技术方案氧气放散率降低 1-2%，综合制氧单耗降低 3%；分子筛低温解析余热极限利用流程，低温余能回收率大于 30%，在钢铁领域规模化应用，节电约 30%；全氧/富氧冶金还原工艺节能 30%，CO₂ 及 NOX 排放降低 25%。

任务 3 通用机电装备节能技术

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2018 年。

(1) 重点内容

优化电机、电机系统及配电变压器的电、磁、机械和通风运行策略，研究新型高速高效电机技术；研究基于全参数可控的高效流体设计、高压比气液两相增压输送、低能耗传动技术，开展泵/风机多工况、多目标综合优化研究；研发高效叶轮机械、兼备泵和压缩机功能的高效装备，开发通用装备的汽蚀性能预测技术。

(2) 具体目标

突破通用机电装备和机电系统在启动和变工况过程中的电、磁负荷变化技术瓶颈，形成动态运行过程中的高效节能技术，在冶金、化工、建材、电力等行业实现普及应用，建立通用机电装备的回收更新机制和节能标准。

(3) 预期成果

形成效率高、成本低、功率因数高、谐波分量小的先进电动机械设备，泵/风机组能效比提高 5-8%；研发出新型环保制冷剂压缩机、微通道等高效换热器技术、参数优化与匹配技术和系统智能调控技术，制冷空调系统能效比提高 4-10%；形成高效节能的通用机电装备的市场准入制度。

任务 4 工业锅炉及窑炉节能减排技术

该项研究属于典型应用示范。

计划实施时间：2016 年-2018 年。

(1) 重点内容

研究工业锅炉和窑炉燃料替代节能技术、低成本高效运行和监测技术、锅炉岛系统节能优化技术，网络化远程监控技术；工业锅炉和窑炉低 NO_x 燃烧、脱除氮氧化物和脱硫除尘一体化技术；开发工业过程排放气综合利用的新工艺和技术。

(2) 具体目标

掌握锅炉优化和监控技术，提出满足工业锅炉和窑炉节能减排技术要求的多种

方案：突破工业锅炉和窑炉燃烧过程中低 NO_x 控制、低温脱 NO_x 技术，建立适应性强的工业锅炉和窑炉的污染物达标排放技术的产业化示范；形成典型工业过程排放气净化分离及综合利用技术。

(3) 预期成果

完成 5 座以上 20-65t/h 锅炉岛及工业窑炉节能减排集成技术示范，节能 15% 以上，常规污染物排放达标；研制 NO_x 原始排放低于 200mg/Nm³ 的工业煤粉锅炉，实现工程示范，锅炉热效率在 85% 以上；建成工业排放气综合利用工业示范装置。

方向七 数据中心及公共机构节能

面向绿色数据中心和节约型公共机构建设需求，深入开展绿色数据中心及公共机构节能领域的关键技术研发，显著提升我国相关技术的自主创新能力，提高相关产品的技术水平和产业化能力，为全国范围的数据中心绿色化转型以及全覆盖的公共机构节能减排提供技术支撑。本方向分为如下两个任务：

数据中心及公共机构节能		
重大共性关键技术	任务 1	数据中心节能技术
	任务 2	公共机构设备及系统节能

任务 1 数据中心节能技术

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2018 年。

(1) 重点内容

针对高集成度、高发热密度数据中心设备特性和工作温度与湿度要求，研究高效、可靠的新型冷却技术，研发新型高效冷却设备，进行应用示范；以降低数据中心供电转换环节耗能为目标，研究高效、高可靠性数据中心直流供电与分布式蓄能技术，开发核心设备，进行技术应用示范；研究数据中心节能标准及评价准则。

(2) 具体目标

突破数据中心冷却技术，研发出适用于高发热密度 IT 设备的新型高效冷却设备，进行工程示范并逐步实现产业化。形成具有自主知识产权的新型数据中心供电技术，提出新型数据中心供电系统设计方法，实现核心产品产业化，提高供电系统效率，并实现规模化应用。

(3) 预期成果

建立数据中心节能减排标准体系及评价准则；获得建设绿色数据中心合理的运行参数；将全国 30% 以上的数据中心改造为绿色数据中心；开展数据中心及机房节能产品的评价和认证；PUE 值较“十二五”期间降低 15%。

任务 2 公共机构设备及系统节能

该项研究属于重大共性关键技术。

计划实施时间：2016 年-2020 年。

(1) 重点内容

研究公共机构主动式/被动式多能源协调高效利用系统、低品位能量高效回收利用系统、建筑暖通空调系统高效调适、新型采光与高效照明、高效围护结构产品应用、能耗监管与智能测控等共性关键技术；研发公共机构超低能耗建筑技术标准，开发公共机构节能评价体系；开展公共机构节能的集成技术研究。

(2) 具体目标

形成公共机构新型高效节能设备及系统技术群，所开发的关键技术、系统技术、能耗监管机制及超低能耗建筑技术标准广泛应用，建立公共机构“领跑者”评价制度，提升公共机构用能系统的效率。展示公共机构节能的示范效应，带动全社会能源效率的提升。

(3) 预期成果

完成公共机构节能技术集成应用示范，能源利用效率达到国际先进水平；完成绿色数据中心技术集成应用示范，综合能耗降低 20%~30%。

四、资金需求

- (一) 总资金需求（略）
- (二) 分研发阶段资金需求（略）

五、组织实施方式与保障措施

- (一) 组织实施机制

1. 项目层次与类型

煤炭高效清洁利用和新型节能技术重点专项按照重点专项、重点方向、重点任务、项目、课题五个层次逐级分解。

2. 组织管理

（略）

3. 项目和课题的征集

(略)

4. 项目启动进度

煤炭高效清洁利用和新型节能技术重点专项将根据专项中项目的轻重缓急程度安排项目的启动进度，前三年项目启动率约 90%，前三年年度启动比例为 30%，40%，20%。项目执行期分为 3 年和 5 年。5 年项目可以分两期进行，根据一期项目进行实施滚动支持

(二) 保障措施

1. 充分发挥地方、行业的积极性

煤炭从开采、转化和利用是高度集成的技术链，由于其资源分布特征，具有很强的地方特征和行业特征。在基础研究方面要强化国家的投入支持，在关键核心技术的研发方面要加强地方、行业和企业共同投入和共同研发，在示范应用方面要加强行业管理部门如能源局、企业的资金配套，多方投入。

2. 创新管理体制、提升管理水平

对专项年度目标开展第三方评估与检测。按照质量管理体系的规范要求，建立目标明确、管理节点规范的管理流程，对照专项的年度目标，对整车及关键零部件的指标，适时开展采用有国家资质的第三方进行检测的考核方式，确保年度目标的实现。

3. 推动国际合作，促进资源整合

以中美清洁能源中心先进煤技术联盟和建筑节能技术联盟、中欧、中澳清洁煤和节能技术合作为主要平台，形成基础研究、工程开发、应用示范等多层次多维度的合作，提升对国外煤炭清洁高效利用和新型节能技术研发资源的利用、消化、吸收水平，整合全球煤炭清洁高效利用和新型节能技术产业链优质资源，提升自身综合优势，广泛开展研发指标对标、政策体系对标、市场化水平对标等，缩小国内外技术水平差距。

4. 加强研发与产业互动

加强对于煤炭清洁高效利用和新型节能技术产业的政策支持，持续支持煤炭清洁利用，坚持煤炭的集中发电和大型转化，减少散煤的使用。不断提升洁净煤技术

和新型节能技术的市场竞争力，通过市场需求驱动创新链水平提升。节能作为一项利国利民的政策，应当予以大力的普及和推广，但由于目前节能技术所带来的经济效益往往低于其使用成本，使得节能技术在企业中的推广常常少不了政府补贴等形式。而通过对技术团队和平台的建设以及研发的投入，从技术上提升节能的根本优势，降低现有节能技术的应用成本，实现节能技术的自盈利，将吸引社会各界主动引入和采用，并形成技术提高与经济快速发展的良性循环。

5. 加强信息公开，完善监督机制

建立“煤炭清洁高效利用和新型节能技术”重点专项信息公开制度。建立完善的专项项目管理流程，将立项、评审、节点检查、验收等工作规范及实施过程中的信息对外公开。并将项目进展及成果以科技报告的形式向全社会公开，接受社会监督。建立严格的专项管理监督机制。一是完善内部监督体系，二是建立外部监督体系，接受政府部门和社会监督。在专项组织实施过程中，对管理团队及专家进行监督检查。建立廉政风险防控机制，梳理专项管理各环节廉政风险点，进行重点监督。

六、效益与风险分析

实施“煤炭清洁高效利用和新型节能技术”重点专项，将有力推进燃煤发电局部领先向整体节能环保转变，推进传统煤化工向现代煤化工转变，推进长距离输煤输电独立发展向协同发展优化输配转变，推进节能由单一技术向系统统筹科学发展，推进节能减排向技术节能、结构节能、管理节能等综合协调方式转变，推进煤炭和节能产业发展由资金和资源推动向以技术创新驱动为主的方式转变。逐步实现煤炭开发利用方式的清洁化、高效化，实现新型节能技术的全面推广，全面提高煤炭和能源系统可持续发展能力，实现能源与社会、经济、资源、环境协调发展。

实施科技专项的技术、经济和社会效果显著。首先，科技专项的实施将大幅提升我国煤炭高效燃烧、清洁转化、污染物控制、碳捕集利用封存、以及新型节能技术水平，形成一批水平较高、效果显著的创新技术群，促进我国高碳能源低碳化利用，将全面提升我国煤炭高效清洁利用和节能技术国际竞争力，并将全面带动能源技术革命，引领煤炭开发利用和节能技术发展的世界潮流；其次，科技专项的实施将有力推进我国煤炭及能源产业的产业升级，培育与发展一批煤基绿色能源和新型节能产业，促进我国工业转型升级，打造我国经济新的增长点，实现经济的可持续发展；最后，科技专项的实施及新技术的推广应用将大幅改善我国大气环境质量，全面提高我国经济社会发展质量，提升能源与环境协调发展水平，将较大幅度降低

我国一次能源消费总量，并为我国应对气候变化、保障能源安全提供有力支撑，实现我国社会可持续发展。

通过该科技专项的实施，将建设和改造一批高效燃煤发电机组，建设一批煤炭清洁转化示范基地，推广建设一批污染物超低排放工程，建设一批碳捕集利用封存示范工程，推广建设一批新型节能工程，建设和改造一批高能耗工业节能工程。到2030年，将实现累计节煤达20亿吨，形成5000万吨石油和500亿方天然气的替代能力，减少污染物排放80%以上，解决煤化工废水排放问题，碳捕集利用封存实现大规模工业示范，具备商业化条件，从而根本改变我国环境质量。到2030年，实现全国平均火电厂供电煤耗、钢铁可比能耗、水泥综合能耗、乙烯综合能耗、造纸综合能耗持续下降，基本达到国际先进水平，个别能耗指标达到国际领先水平，将使我国能源系统效率比目前约40%上升到50%，实现累计节能30亿吨标煤。煤炭利用和节能技术的科技贡献率从目前的40%提高到2030年的60%以上。科技专项成果的应用将促进每年数千亿元的燃煤发电、煤化工、燃煤污染物控制、CO₂捕集利用和封存、新型节能、高耗能工业节能改造等产业的发展，推动传统产业升级，保障和带动就业。同时还将带动环保、材料、先进制造等产业发展。

煤炭利用和节能技术推广是能源领域的传统方向，以往两个方向的各种科技项目较多，已经产出很多科技成果和取得较好的经济社会效益，本科技专项实施的主要风险在于煤炭清洁高效利用和新型节能技术得不到创新和发展，而是以往科技成果的重复或换个包装复现。基于规避这种风险，本科技专项应突出技术的创新和发展，重点关注于新型煤炭清洁高效利用技术和节能技术的创新、传统煤炭清洁高效利用技术和节能技术的改进和推广、煤炭利用和节能技术推广过程中一致未解决问题和新出现问题的解决等。本科技专项的实施，必须严格按照国际相关标准、国内现有政策和技术发展水平进行煤炭清洁高效利用和新型节能技术研究，需要加强技术研发的创新型、规范性和安全性，从各方面降低技术风险，促进行业的规范发展。此外，本科技专项将成立专门的专家咨询委员会，全面参与科技专项重点技术的遴选、评审、实施方案论证、任务书签订、中期检查、调整和验收，以期最大程度上规避上述风险。

在效益方面，新型节能技术的开发和实施将大幅度降低我国高耗能产业的能源消耗，单位产能的能耗降低10%，提高能源利用效率，有利于突破突破我国能源资源瓶颈、改善生态环境、推动实现能源革命、促进经济社会可持续发展。实现新兴节能环保产业的规模化，广泛创造新兴战略产业的就业机会，加快经济结构转型升级

级。显著减少污染物的排放，保护生态环境，为美丽中国的建设提供保障。通过实施新型节能技术重点专项，突破核心节能技术，解除能源和环境对我国经济社会发展的制约，促进我国经济和社会的健康可持续发展。

在风险方面，由于可以借鉴国外的相关技术，并且还有国内在“十一五”和“十二五”方面的众多技术积累，基本可以认为本重点专项的技术风险很小；另一方面，节能技术的推广应用可以取得用能成本减低和环境保护补偿的双重效益，同时通过推进节能环保新型战略产业的商业化发展，引进第三方资源和银企合作，使节能环保成为一个高回报的产业，有效规避了经济风险；此外，通过联合国内知名高校、科研院所和企业单位，对节能领域的共性关键技术进行联合攻关，构建跨领域跨行业的节能技术研发平台，完善并推行相关行业的节能法规、政策和技术标准，为该专项的实施构建了长效的保障机制。

七、其他说明和附件

（与专项相关的“十二五”以来开展相关科技计划及支持的资金规模一览表，围绕专项开展的专题研究报告、出台的相关政策、产业规划、科技规划、专项规划等，以及其他需要说明的材料）

（一）相关科技计划

1. 国家重点基础研究发展规划
2. 国家高技术研究发展计划
3. 国际科技支撑计划
4. 国家国际科技合作专项
5. 中国工程院重点咨询项目
6. 国家自然科学基金项目

（二）出台的相关产业政策与产业规划

1. 科技部《洁净煤技术科技发展“十二五”专项规划》
2. 北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划
3. 工信部、财政部《工业领域煤炭清洁高效利用行动计划（2015-2020）》
4. 能源局《煤炭清洁 高效利用行动计划(2015-2020 年)》
5. 三部委《能源行业加强大气污染防治工作方案》
6. “十二五”国家战略性新兴产业发展规划
7. 环保部“清洁空气研究计划”
8. 京津冀协同发展规划纲要

9. 节能中长期专项规划

10.“十二五”节能减排综合性工作方案

11.住房和城乡建设部《“十二五”建筑节能专项规划》

12.国务院机关事务管理局《公共机构节能“十二五”规划》