

# 煤电的低碳化发展路径研究

王月明<sup>1,2</sup>, 姚明宇<sup>1,2</sup>, 张一帆<sup>1,2</sup>, 黄嘉骐<sup>1,2</sup>

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.清洁低碳热力发电系统集成及运维国家工程研究中心, 陕西 西安 710054)

**[摘要]** 在我国全面建设社会主义现代化强国和“碳达峰、碳中和”2个远景目标的共同要求下, 煤电不但要起到战略保障作用, 还需要实现低碳化发展。讨论了煤电的定位和合理的发展规模, 提出煤电的低碳化发展首先要考虑存量机组的节能提效, 采用节能改造及机组延寿等技术达到提效目的; 新建机组必须采用先进高效的发电技术, 如超高参数超超临界发电技术以及超临界CO<sub>2</sub>循环发电技术, 通过降低煤耗减少碳排放; 对于全部的煤电机组, 需要采取包括锅炉深度调峰、控制系统调峰适应性改造、热电解耦以及储能在内的各种技术实现灵活调峰, 但是需要政策支持; 由于技术经济性原因, 碳捕集和封存技术目前没有得到推广, 可以作为实现碳中和目标的技术支撑。上述4个方面一起构成了煤电的低碳化发展路径。

**[关键词]** 碳达峰; 碳中和; 低碳; 灵活性; 超超临界; 储能; 碳捕集与封存

**[中图分类号]** TK21 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rlf.202110191

**[引用本文格式]** 王月明, 姚明宇, 张一帆, 等. 煤电的低碳化发展路径研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 11-20. WANG Yueming, YAO Mingyu, ZHANG Yifan, et al. Study on low-carbon development path of coal-fired power generation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 11-20.

## Study on low-carbon development path of coal-fired power generation

WANG Yueming<sup>1,2</sup>, YAO Mingyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Yifan<sup>1,2</sup>, HUANG Jiasi<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. National Engineering Research Center of Integration and Maintenance of Clean and Low-carbon Thermal Power Generation System, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Under the common requirements of comprehensive construction of a socialist modern country and the long-term goals of “carbon peak and carbon neutralization”, coal-fired power generation should not only play a strategic guarantee role, but also need to realize low-carbon development. This paper discusses the positioning and reasonable development scale of coal-fired power generation. It is proposed that energy saving and efficiency improvement of existing units should be considered first in the development of low-carbon coal power, and energy-saving transformation and unit life extension technologies should be adopted. Newly-built units must adopt advanced and efficient power generation technologies, such as ultra-high-parameter ultra-supercritical power generation technology and supercritical carbon dioxide (S-CO<sub>2</sub>) cycle power generation technology, to reduce carbon emissions by consuming less coal. For all coal-fired power units, various technologies including boiler deep peak shaving, adaptive transformation of control system peak shaving, thermal electrolytic coupling and energy storage need to be adopted to realize flexible peak shaving, but policy support is needed. Due to technical and economic reasons, carbon capture and storage technology has not been popularized currently, which can be used as the technical support to achieve the goal of carbon neutralization. These four aspects together constitute the low-carbon development path of coal-fired power generation.

**Key words:** carbon peak; carbon neutralization; low carbon; flexibility; ultra supercritical; energy storage; carbon capture and storage

收稿日期: 2021-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51706181, 51806172); 陕西省青年拔尖人才资助项目(ZD-18-SST04)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51706181, 51806172); Young Talents Supporting Programs of Shaanxi Province (ZD-18-SST04)

第一作者简介: 王月明(1963), 男, 硕士, 正高级工程师, 西安热工研究院有限公司总经理/院长, 主要研究方向为电站锅炉煤清洁燃烧技术等, wangyueming@tpri.com.cn。

当前,我国 300 MW 及以上等级煤电机组平均供电煤耗约为 305 g/(kW h)。按照 2020 年燃煤机组发电量为 4.8 万亿 kW h,则全年消耗标准煤约 14.6 亿 t,CO<sub>2</sub> 排放约为 42 亿 t。根据相关预测,到 2030 年,煤电 CO<sub>2</sub> 排放约为 40 亿 t,与目前水平接近,基本可实现行业碳达峰<sup>[1]</sup>。但是,发电本质上是一个碳排放行业,而且排放量占比很大。发电行业的技术进步,尤其是低碳化技术的突破是实现我国“30·60 碳达峰碳中和”目标的关键支撑。

火力发电,尤其是燃煤发电,是目前综合性最好、技术成熟度最高的发电形式<sup>[2-4]</sup>。理论上讲,相对于核电、水电、风电等,火力发电受资源制约较小,布局更加灵活,装机容量可以根据实际需求决定。

煤电的发展,一方面取决于我国经济发展水平、资源禀赋、环境保护、碳减排等对电力行业的整体需求,另一方面取决于煤电的技术特点、技术成熟度、经济性等。因此,要深入研究煤电的发展趋势,获得“碳达峰、碳中和”背景下的煤电合理占比和结构,就必须从电力需求和发电技术发展两方面综合考量,需要考虑存量机组的节能降耗和新建机组的高效率。同时,煤电机组需要智能灵活,满足新能源电力的大规模接入。因此,应重点研究高效煤电技术、煤电机组灵活调峰技术和碳捕集及利用技术。

## 1 煤电的发展研究

### 1.1 煤电的特点和定位

经过近几十年的发展,燃煤发电污染物排放得到有效控制。截至 2020 年底,我国煤电机组几乎全部达到超低排放水平。但是,火力发电机组在碳排放方面劣势明显。目前,我国燃煤机组单位发电量碳排放(CO<sub>2</sub>)高达 879 g/(kW h),即使最先进的煤电机组单位发电量碳排放也达到 756 g/(kW h)<sup>[4]</sup>,远高于实现碳中和所需的近零排放标准(单位发电量碳排放量低于 100 g/(kW h)<sup>[5]</sup>),所以燃煤发电是我国电力行业减碳的主要领域。

新中国成立 70 年以来,我国电力工业快速发展,实现了从小到大、从弱到强、从追赶到引领的巨大飞跃,为我国经济社会发展作出了突出贡献。在此背景下,煤电快速发展,在国家持续投入和支持下,煤电技术取得了长足进步,单机容量、机组参数、机组数量、能效指标均跃居世界前列。长期

以来,燃煤发电呈现出占比高、体量大的特点,实际承担我国主力电源和基础电源的角色。

近年来我国对能源利用多元化、清洁化、低碳化的需求日益迫切,尤其是习近平总书记提出“30·60 碳达峰碳中和”的目标后,能源行业尤其是电力行业的转型势在必行。未来燃煤发电必将担负新的历史使命。

首先,新能源电力波动大、间歇性强,在大规模、低成本储能技术成熟应用之前,适当比例的燃煤发电可为电力系统的稳定运行提供足够的转动惯量,平抑大比例新能源发电并网带来的波动,保障电网系统的安全<sup>[6-7]</sup>。电力系统需要火力发电尤其是燃煤发电充分发挥“兜底保障”的重要作用。

其次,煤电要积极转变角色,由传统提供电力、电量的主体性电源,向提供可靠电力、调峰调频能力的基础性电源转变,积极参与调峰、调频、调压、备用等辅助服务,提升电力系统对新能源发电的消纳能力,将更多的电量市场让给低碳电力。

最后,热电联产的燃煤发电机组是满足我国居民采暖需求的重要保障。尽管目前热电联产机组已占火电机组比重的 41%,仍不能满足我国日益增长的热力需求。低成本的燃煤发电是全社会低成本用电、用热的基础,是我国保障民生和社会经济活动用能的重要支撑,对促进经济社会发展、提升人民幸福感具有重要意义。

### 1.2 煤电在总装机中的合理占比

我国煤电投资规模逐年下降,“十一五”时期的平均煤电年新增装机规模是 6 862 万 kW,到“十三五”期间已降至 3 538 万 kW。煤电新增装机容量规模在 2016 年被新能源超越,2020 年新能源发电年新增装机是煤电的近 3 倍,煤电装机容量比重历史性降至 50% 以下。随着“双碳”目标的提出,煤电装机比例进一步降低的趋势不可逆转<sup>[8]</sup>。

但是合理的电源结构和发电量组成,要取决于各类发电机组的技术发展水平和经济性,同时也要与经济发展水平、资源禀赋、环保要求等整体需求相适应。

根据我国经济发展和全社会用电需求的预测,2030 年全国电源总装机约 28.74 亿 kW,全年发电总量约 8.94 万亿 kW h。根据碳达峰的需求,发电行业需在 2025 年前后率先达峰<sup>[9]</sup>。发电行业 2030 年全年碳排放总量控制在 38 亿 t 左右,单位发电量碳排放降至 425 g/(kW h)<sup>[10-11]</sup>。

在此条件下进行测算，2030 年，燃煤发电装机 12.13 亿 kW，占总装机的 42.20%。燃煤发电的发电量 4.85 万亿 kW h，占总发电量的 54.27%。燃煤发电的单位发电量碳排放降至 750 g/(kW h)左右。全年燃煤发电碳排放量约为 36.3 亿 t，发电行业碳排放总量约为 38 亿 t。

2060 年，根据我国经济发展和全社会用电需求的预测，全国电源总装机约 70.92 亿 kW，全年发电总量约 16.5 万亿 kW h。单纯考虑碳中和的需求，发电行业需在 2060 年将单位发电量碳排放降低至 50 g/(kW h)的水平，发电行业 2060 年全年碳排放总量控制在 8 亿~9 亿 t。但是，到 2060 年我国仍需维持 7 亿 kW 左右的燃煤发电机组<sup>[5]</sup>，以保障我国能源电力供应安全和调峰、供暖需求，发电行业 2060 年实际碳排放总量存在很大的不确定性<sup>[12-16]</sup>。

可以预见，未来煤电的装机占比及发电量将主要受到碳减排目标、电力供应安全的双重约束。从碳减排目标出发，煤电应不断缩减规模；但从电力供应安全角度出发，则需要煤电在较长时期内继续承担兜底保障、应急备用、调峰调频、消纳新能源、乃至工业供热与采暖供热等作用。因此，煤电将在满足电力供应安全的前提下不断降低发电量，以实现更少的碳排放。而其装机和发电量下调的进度安排除应满足“30-60”目标要求外，还受到供电经济性、环保要求等影响，并与灵活性提升水平、高效技术发展成熟度、碳捕集成本、碳运输及封存的经济性和安全性等因素密切相关。

## 2 煤电的低碳化技术

### 2.1 存量机组节能提效

#### 2.1.1 煤电低碳化节能提效综合技术

影响我国大型煤电机组能耗特性的因素，既有运行负荷、燃料特性及环境温度等外部条件，也有机组本身的性能缺陷及运行管理水平等内部因素。为实现煤电机组全工况运行优化，需要对系统进行节能诊断，查清全工况下各热力设备的性能，获得热力系统的能耗特性。

节能诊断基于全面系统的能耗分析和诊断，针对机组所有的主、辅机系统，从设备选型、运行方式、存在问题等各个方面入手；结合煤质、环境边界条件、运行方式、运行参数等，对机组各项能耗指标进行详细的分析、核算，得出机组的能耗水平及节能潜力；并在此基础上，为发电企业指明节能改造方向，采用针对性强的综合节能提效技术降低机组煤耗。

煤电低碳化节能提效综合改造技术是将煤电机组看做一个整体，在燃煤发电系统中采取技术上可行、经济上合理以及环境和社会可以承受的技术措施，以强化传热传质、热量梯级利用、能量合理利用、辅机提效及调速改造以及其他优化运行手段为技术导向对煤电机组进行整体节能提效改造。

目前，成熟的节能技术如图 1 所示。可以针对具体的电厂，因地制宜，一厂一策，采用不同的技术组合，达到技术经济性最好的效果。

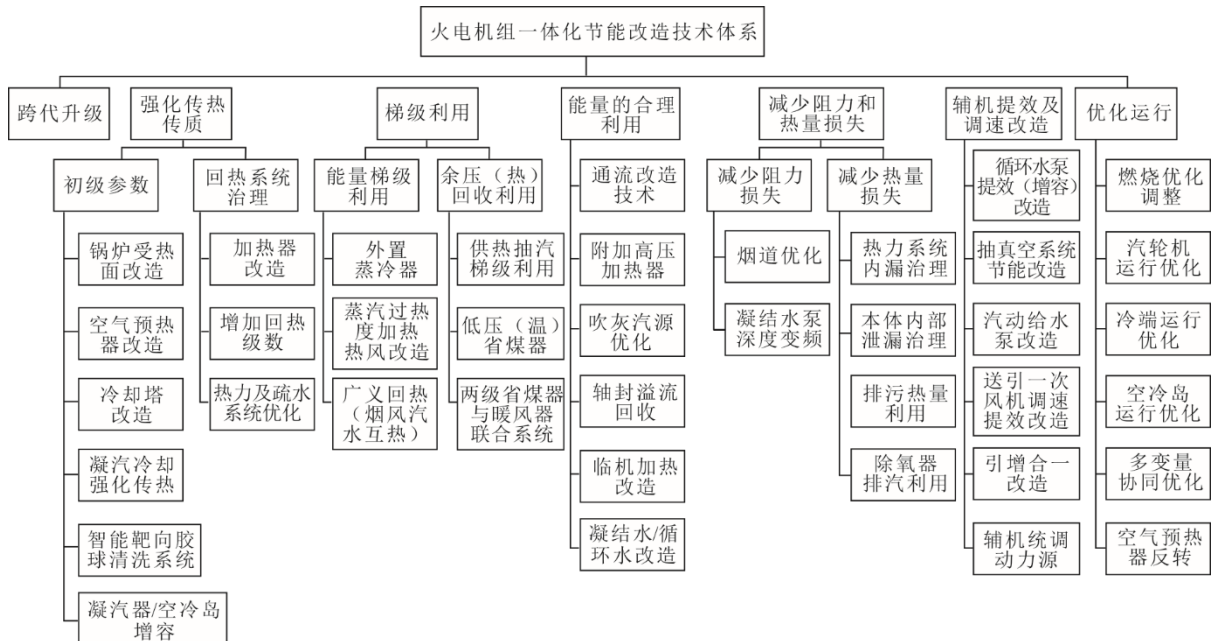


图 1 火电机组一体化节能技术体系

Fig.1 The integrated energy-saving technology system of thermal power units

### 2.1.2 机组延寿综合提效技术

煤电机组提升参数延寿技术是提高煤电机组整体能耗水平、节能减碳的重要手段。

我国“十四五”期间达设计期限的 20 万 kW 及以上煤电机组有 87 台, 合计容量约 0.26 亿 kW。未来 10 年(2021—2030)我国有 252 台容量 20 万 kW 及以上煤电机组陆续达到设计期限, 总容量约为 0.82 亿 kW, 约占目前煤电总容量(按 2020 年底 10.8 亿 kW 计)的 7.6%。其中亚临界 300 MW 及以上机组 205 台, 占 10 年内设计期满机组容量的 88%。

根据国外煤电机组的运行经验, 全球范围内煤电机组平均服役 30 年以上的超过 24%。日本近 50% 的煤电机组服役年限为 30~39 年, 25% 的煤电机组服役年限超过 40 年。美国煤电机组的平均使用年限为 42 年, 有 11% 的机组运行年限超过 60 年。我国煤电机组构成中, 300 MW 等级亚临界机组服役年限在 20 年以内的占比达到 82.8%。

对于达到设计使用寿命的机组, 通过机组延寿改造并同步实施提升参数改造可大幅提升机组的经济性<sup>[17]</sup>。

针对亚临界机组, 仅提升蒸汽温度, 而主蒸汽压力基本保持不变, 既可以降低机组煤耗水平、又可以有效减少改造工程量。蒸汽参数提升的幅度与方案的难易程度和投资规模成比例。

## 2.2 高效燃煤发电技术

### 2.2.1 超高参数超超临界燃煤发电技术

超高参数超超临界燃煤发电是指将燃煤发电机组参数从现在的 600 °C 等级进一步提升至 650 °C 等级乃至 700 °C 等级, 从而达到提升发电效率的目的。

过去的几十年里, 煤电机组一直都在向大容量、高参数发展。目前, 全世界煤电机组的蒸汽参数稳定在 600 °C 等级, 部分机组提高到 620 °C。机组容量基本上以 600 MW 和 1 000 MW 为主。目前, 中国已投产 600 MW 等级超临界和超超临界机组已超过 600 台, 已投产超超临界 1 000 MW 机组达到 137 台。2016 年, 成功投运了最先进的 1 000 MW 等级 600 °C/620 °C/620 °C 超超临界二次再热机组, 净效率已达 47%。在国家持续投入和支持下, 煤炭的先进清洁高效发电技术取得了显著进步, 机组参数、数量、能效指标均跃居世界首位。

在 700 °C 发电技术领域, 尤其是高温镍基合金材料方面, 国外已经开发出了几种适用于 700 °C 机

组的镍基合金材料, 完成了 700 °C 电厂的概念设计, 基本为 700 °C 机组的建设做好了技术储备。我国 700 °C 发电技术的研究也紧跟世界步伐。相关科研单位筛选和开发了一批高温合金材料, 在华能南京电厂建成了 700 °C 部件验证平台, 完成了 25 000 h 关键高温部件的验证, 运行情况良好。同时也正在瑞金电厂二期开展试验性应用。另外, 已开发了主蒸汽大管道、高中压转子合金, 目前正在进行产业化试制和部件性能验证<sup>[18]</sup>。

初步预计: 2025 年, 实现 650 °C 等级超超临界燃煤发电机组的工程示范, 净效率不低于 47%; 2035 年实现 650 °C 等级超超临界燃煤发电机组的大规模商用; 2035 年实现 700 °C 等级超超临界燃煤发电机组的工程示范, 净效率不低于 50%; 2045 年实现 700 °C 等级超超临界燃煤发电机组的大规模商用。

在 700 °C 超超临界蒸汽发电技术的基础上进一步提升温度参数, 发电系统效率提升有限, 即便温度到达 800 °C, 净效率也很难突破 55%, 且随着温度的提升, 高温合金材料的开发成本和制造成本均成倍增加, 材料瓶颈问题突显。因此在实现 700 °C 等级超超临界燃煤发电机组商用后, 不建议向更高参数发展。

### 2.2.2 超临界 CO<sub>2</sub> 循环高效燃煤发电

超临界 CO<sub>2</sub> 循环高效燃煤发电技术是通过采用超临界 CO<sub>2</sub> 代替水作为循环工质, 采用布雷顿循环代替朗肯循环作为动力循环的一种新型燃煤发电技术。在 600 °C 等级, 超临界 CO<sub>2</sub> 循环燃煤发电机组供电效率可比传统水循环发电机组提高 3 百分点~5 百分点; 700 °C 等级, 超临界 CO<sub>2</sub> 循环燃煤发电机组供电效率可比传统水循环发电机组提高 5 百分点~8 百分点。

2004 年, 美国能源部(DOE)开始超临界 CO<sub>2</sub> 循环发电技术的研发, 目标是为核电站、太阳能光热发电、余热利用等研发下一代动力设备。2011 年美国能源部开始实施“Sunshot”计划, 旨在将超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环系统付诸商业化。该研发项目主要进行 10 MW 超临界 CO<sub>2</sub> 发电机组研发和测试, 实验测试在美国 Sandia 国家实验室下属的核能系统实验室(NESL)进行。2014 年起美国能源部实施了化石燃料超临界 CO<sub>2</sub> 循环发电研究计划, 其目标是使超临界 CO<sub>2</sub> 闭式循环比高参数水工质朗肯循环效率高 5 个百分点以上。

2005—2011 年,美国 Sandia 国家实验室在美国能源部的资助下,首先搭建了热功率 1.0 MW 的超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环实验回路装置,设计压力为 15.2 MPa,温度为 538 °C,电功率为 125 kW。

欧洲和日本也在加紧研究超临界 CO<sub>2</sub> 循环。法国电力公司(EDF)开展了燃煤闭式超临界 CO<sub>2</sub> 循环研究,东京工业大学、俄罗斯科学院、比利时列日大学开展了半闭式超临界 CO<sub>2</sub> 循环研究等<sup>[19]</sup>。总体上看,对于煤基超临界 CO<sub>2</sub> 循环的研究,国外仍处于起步阶段。

我国在该领域的研究与国外的研究基本同步。西安热工研究院有限公司(西安热工院)、中国科学院、中国核动力研究院、清华大学、西安交通大学等单位相继开展了超临界 CO<sub>2</sub> 循环的相关研究。国家科技部相继支持了“超临界 CO<sub>2</sub> 太阳能热发电关键基础问题研究”“超高参数高效 CO<sub>2</sub> 燃煤发电基础理论与关键技术研究”“兆瓦级高效紧凑新型海洋核动力装置基础理论及关键技术研究”等重点研发计划项目。经过不懈的努力,国内在超临界 CO<sub>2</sub> 循环构建、超临界 CO<sub>2</sub> 流动传热机理等方向上的部分成果达到了国际先进水平。

西安热工院的 5 MW 超临界 CO<sub>2</sub> 循环发电验证平台(图 2),已于 2020 年 12 月建设完成。该平台最高压力为 21.5 MPa,最高温度为 600 °C,最大流量为 306 t/h,是目前世界上容量最大、参数最高的超临界 CO<sub>2</sub> 循环验证平台。该平台的建成投运将极大地推动新型高效发电技术的发展和工程应用。



图 2 5 MW 超临界 CO<sub>2</sub> 循环发电验证平台  
Fig.2 Verification platform of 5 MW S-CO<sub>2</sub> cycle power generation

目前,随着 5 MW 超临界 CO<sub>2</sub> 发电平台的投运,关键技术和关键设备逐步得到验证和完善,该技术工程应用研究已经全面展开。西安热工院和有关单位正在进行 50 MW 超临界 CO<sub>2</sub> 光热发电可行

性研究和初步设计,预计在 2030 年左右实现 300 MW 超临界 CO<sub>2</sub> 煤电机组工程示范,净效率不低于 50%;2040 年实现 700 °C 等级大型超临界 CO<sub>2</sub> 燃煤发电机组的工程示范,净效率不低于 55%。

### 2.3 煤电机组灵活性技术

为了解决新能源消纳的问题,煤电运行需要更加灵活,调峰能力更加突出可靠。煤电机组调峰技术需要重点研究或突破的地方主要包括 2 方面:一是调峰的深度,二是调峰的速度。火电正由传统的提供电力、电量的主体电源,逐步转变为提供电力、电量的同时,向电力系统提供可靠容量、调峰调频等辅助服务的基础性、调节性电源<sup>[17,20]</sup>。

随着新能源比例的增加,电网对于瞬间大幅甩负荷的响应能力要大幅提升,迫切需要从技术上提高煤电负荷快速升降的能力。

#### 2.3.1 锅炉深度调峰技术

根据炉型、煤质、燃烧设备的不同,目前国内大部分燃煤锅炉低负荷稳燃能力在 40%~50% 额定负荷,通过改造下探至 20%~30% 额定负荷。

锅炉深度调峰主要面临低负荷稳燃和环保达标 2 个问题。

提高锅炉低负荷稳燃能力的主要技术措施有:锅炉精细化运行调整,基于强化燃烧的锅炉燃烧器改造,锅炉制粉系统改造,掺烧高挥发分煤质改造,以及等离子体、微油、富氧等助燃改造等。

目前,绝大部分煤电机组脱硝装置的工作温度为 300~420 °C。当机组深度调峰时,随着锅炉负荷的降低,脱硝装置入口烟温将降至 300 °C 以下。为避免脱硝催化剂失去活性,脱硝装置需要退出运行,导致氮氧化物排放超标,机组调峰中止。因此,针对深度调峰期间,脱硝装置无法投入的机组,需要进行提高脱硝装置入口烟温改造。主要的低负荷选择性催化还原(SCR)脱硝入口烟温提升技术有省煤器烟气旁路、省煤器水侧旁路、省煤器分级布置、回热抽汽补充给水、热水再循环等技术。

上述技术措施都是常规手段,需要针对不同的机组采用不同的组合。

#### 2.3.2 控制系统调峰适应性技术

我国火电机组在 50% 额定负荷以下普遍以启停机过程控制为主,分散控制系统(DCS)控制逻辑未能在 50% 额定负荷以下进行连续运行甚至响应调峰调频的调试。

火电机组深度调峰运行负荷范围一般目标为 30%~100% 额定负荷。这不仅是简单的运行负荷范围变宽，从自动调节和控制角度，汽动给水泵、变频泵、调节阀等大量对象的非线性特性随工况范围的变宽而变得不可忽视。很多控制回路匹配 30%~100% 额定负荷范围工况变得异常困难，导致机组常常表现在某些工况下自动控制运行的异常，

给进一步提高变负荷速率指标给机组的安全稳定运行带来极大的挑战。

机组深度调峰运行时，大量设备接近极限工况运行，辅机跳闸、主燃料跳闸等保护和切除自动等功能回路如有误动或切手动都极易威胁整个系统的安全稳定运行。若要实现更进一步深度调峰，需要针对锅炉燃烧进行控制优化，修改逻辑（图 3）。

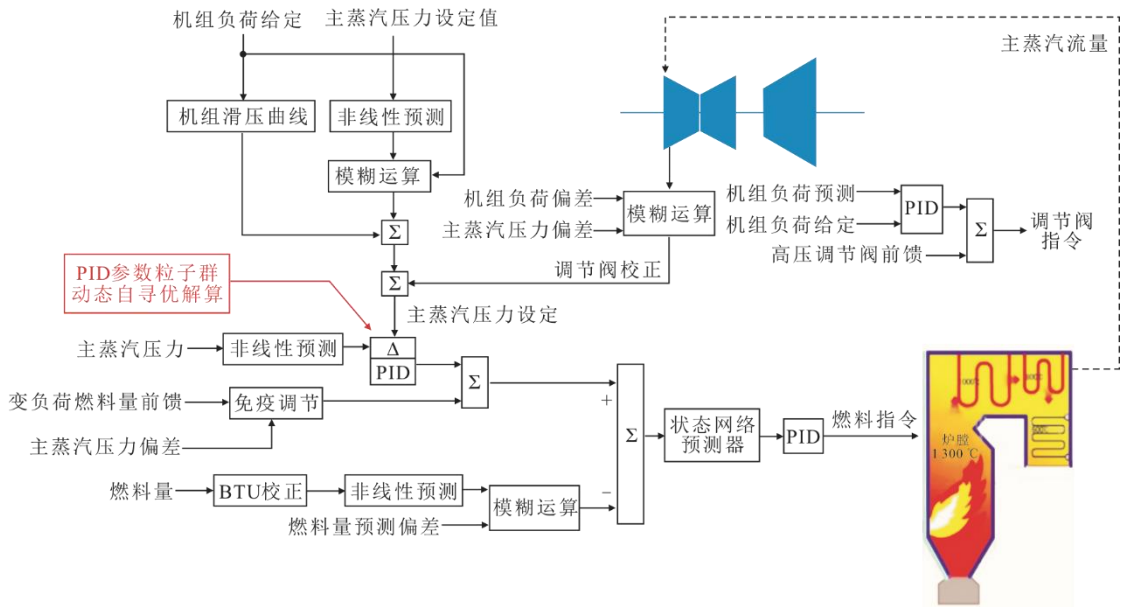


图 3 燃煤锅炉智能协调优化控制  
Fig.3 Intelligent coordinated control of coal-fired boilers

2.3.3 热电解耦技术

1) 汽轮机高低旁路热电解耦技术 汽轮机旁路的设计目的在于协调锅炉产汽量与汽轮机耗汽量之间的不平衡，实现一定程度的热电解耦，提高机组对负荷、供热的适应性以及运行灵活性。利用机组已有的旁路或者新建的旁路可以实现对外供热。汽轮机旁路供热系统如图 4 所示。

汽轮机高低旁路供热按其供热形式可以分为：

- 1) 低压旁路单独对外供热；
- 2) 高压旁路部分主蒸汽对外供热；
- 3) 汽轮机高低旁路联合供热。

目前应用较多的是低压旁路单独对外供热和汽轮机高低旁路联合供热 2 种方式。

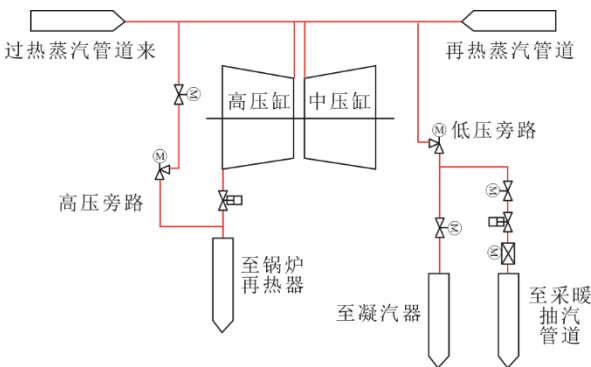


图 4 汽轮机旁路供热系统  
Fig.4 The steam turbine bypass heating system

2) 低压缸零出力热电解耦技术 供热机组一般受低压缸冷却蒸汽流量限值和以热定电运行方式的影响，电调峰能力有限，很难适应电网深度调峰需求，供热能力也受限制。低压缸零出力技术是突破这一难题有效手段。图 5 为低压缸零出力供热技术系统示意。该技术是在低压缸高真空运行条件下，关闭低压缸入口阀门，将原进入低压缸的蒸汽用于供热，实现汽轮机低压缸零出力运行<sup>[21]</sup>。以某机组为例，经低压缸零出力改造后其低压缸进汽量减少，大量蒸汽用于供热，相应冷源损失减少，供热季平均发电煤耗下降约 40 g/(kW h)。低压缸零出力改造技术突破传统供热机组运行理论，实现了机组低压缸零出力运行，从而大幅降低低压缸的冷却

蒸汽消耗量，提高汽轮机电调峰能力和供热抽汽能力，并能够实现抽汽凝汽式运行方式与零出力运行方式的在线灵活切换，使机组同时具备高背压机组供热能力大、抽汽凝汽式供热机组运行方式灵活的特点，显著提升运行灵活性。

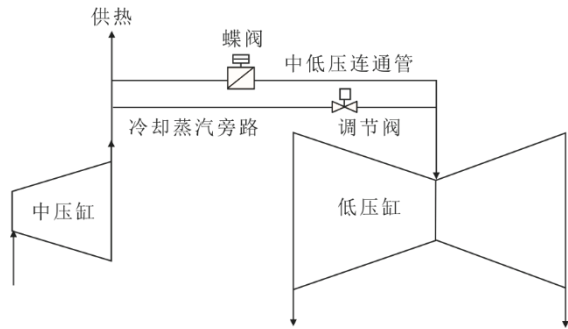


图 5 低压缸零出力供热技术系统

Fig.5 The heating technology with low pressure cylinder no output

2.3.4 储热耦合调峰技术

目前的火电机组灵活性较差，主要是因为机组的锅炉和汽轮机间具有很强的耦合关系，当需要宽负荷运行时，汽轮机具有较好的负荷调节能力，但锅炉受最低稳燃负荷的限制，不能进一步降低负荷率，限制了机组的调峰能力。为提高火电机组的灵

活性，适用于深度调峰，需要采取措施将机组的锅炉和汽轮机进行解耦。

采用储能可以在用电负荷低谷时充电，在用电尖峰时放电，以降低负荷尖峰。利用储能系统的替代效应可以将煤电的容量释放出来，从而提高火电机组的利用率，增加其经济性<sup>[22-24]</sup>。

目前，已经可以实现工程应用的是高温熔盐储热耦合火电机组调峰技术，其系统结构如图 6 所示。

在机组参与电网调峰需要降低出力时，保持锅炉负荷不变，通过抽取部分主蒸汽和再热蒸汽进入储热模块，换热后根据参数匹配返回机组的相应热力系统接口，实现机组出力降低的同时将部分热量存储于储热模块；在机组参与电网调峰需要增加出力时，仍然保持锅炉负荷不变，根据参数匹配从机组的相应热力系统接口抽出部分蒸汽或给水进入储热模块，换热后根据参数与相应的热力系统接口蒸汽或给水混合，返回机组，实现机组出力的升高。

在机组要求低负荷运行时，锅炉燃烧量不变，汽轮机负荷降低，利用储热介质将高品位能量储存，负荷变化不受锅炉最低稳燃负荷影响，增加机组调峰负荷范围和灵活性，可以实现深度调峰的需求，调峰深度降低至 18% 额定负荷。

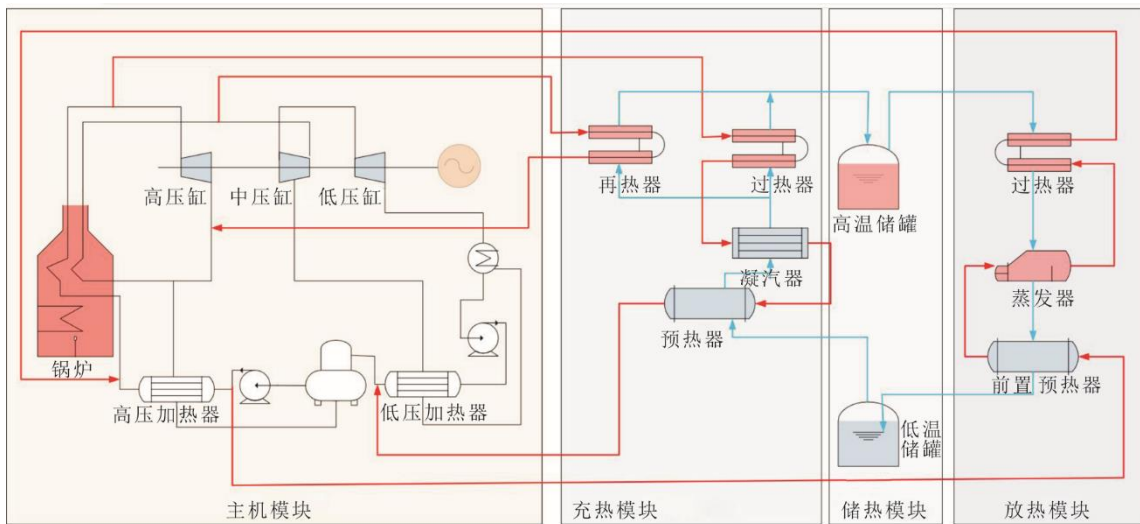


图 6 高温熔盐储热耦合火电机组调峰技术

Fig.6 The peak regulation technology by coupling high temperature molten salt heat storage and thermal power unit

在机组要求高负荷运行时，锅炉燃烧量不变，利用储热介质放热提升汽轮机负荷，提高能量利用效率。汽轮机组不做其他改造情况下可实现机组峰值时间段内持续扩容 5%。

2.4 煤电机组调峰政策建议

2020 年煤电发电量约 4.8 万亿 kW h，占全社

会总发电量的 65%，年利用小时为 4 400 h，负荷率约为 50%。若负荷率降至 30%，年利用小时将为 2 600 h，年发电量将减少至 2.8 万亿 kW h，可为新能源上网腾出空间，且保持煤电的调峰备用功能。

煤电调峰备用后，整个行业的燃煤量减少约为 53 400 万 t/a，合计减排 CO<sub>2</sub> 15.3 亿 t/a。建议用减

排量弥补费用缺口,对腾出上网空间的调峰备用煤电机组,进行碳交易补偿。对于在极端情况下,能及时满足电力系统特殊要求的机组,给予特殊的资金奖励,以保证煤电机组调峰备用功能不被荒废,确保整个电力系统的稳定。

### 3 碳捕集及应用技术

碳捕集、利用与封存(CCUS)是指将CO<sub>2</sub>从工业或其他排放源中分离出来,并运输到特定地点加以利用或封存,以实现被捕集CO<sub>2</sub>与大气的长期隔离(图7)。CCUS技术是我国实现2030碳达峰和2060碳中和目标的重要技术组成部分。

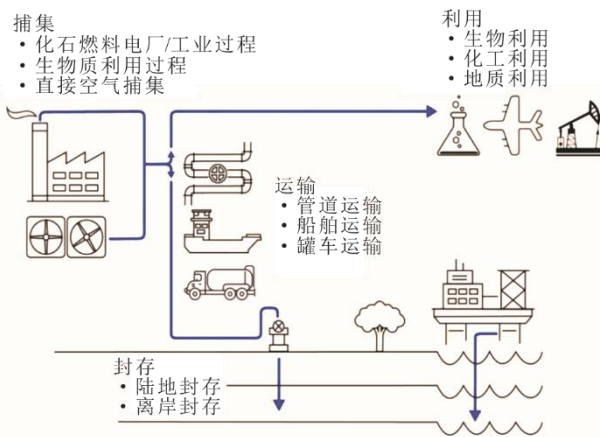


图7 CCUS系统

Fig.7 The carbon capture, utilization and storage system

CO<sub>2</sub>地质封存是指通过工程技术手段将捕集的CO<sub>2</sub>储存于地质构造中,实现与大气长期隔绝的过程。按照不同的封存地质体划分,主要包括陆上咸水层封存、海底咸水层封存、枯竭油气田封存等技术。陆上咸水层封存所需技术要素几乎都存在于油气开采行业,油气行业已有技术要素能够部分满足示范工程的需求<sup>[25-26]</sup>。对中国而言,陆上咸水层封存各技术要素的发展程度很不一致,其中监测与预警、补救技术等还仅处于研发水平。海底咸水层封存与陆上咸水层封存有一定相似性,但工程难度更大。国外已有多年工程实践经验,但在中国尚无示范先例。

#### 3.1 碳捕集技术政策建议

火电加装CCUS可以推动电力系统近零碳排放,提供稳定清洁电力,平衡可再生能源发电的波动性,在避免季节性或长期性的电力短缺方面发挥惯性支撑和频率控制等重要作用。因此,在充分考虑电力系统灵活性、可靠性和碳排放的情况下,CCUS技术在电力系统中的竞争力将持续增强。

火电加装CCUS可以避免已经投产的机组提前退役,降低实现“碳达峰、碳中和”目标的经济成本。碳捕集改造对于一些附近可封存CO<sub>2</sub>或利用CO<sub>2</sub>的火电厂最具吸引力,利用捕集的CO<sub>2</sub>进行驱油可以大幅提高CCUS技术的经济效益。同时,考虑碳市场和碳税等激励政策,CCUS在未来有望实现商业化推广<sup>[27-28]</sup>。

#### 3.2 碳捕集技术经济性分析

电力行业CO<sub>2</sub>排放属于低浓度排放源,捕集成本相对较高。安装碳捕集装置将产生额外的资本投入和运行维护成本等。以火电厂安装为例,第一代燃烧后捕集技术的成本(以CO<sub>2</sub>计,下同)约为300~450元/t,能耗(以CO<sub>2</sub>计,下同)约为3.0GJ/t,发电效率损失10百分点~13百分点;第二代燃烧后捕集技术的能耗约为2.0~2.5GJ/t,发电效率损失5百分点~8百分点。此外,在大部分项目仍以罐车为主要运输方式的现实条件下,引入CO<sub>2</sub>运输也将额外增加约1元/(t·km)的运行成本,在运输距离达100km时,每吨也将增加上百元的运行成本<sup>[25]</sup>。

碳市场交易可以一定程度上弥补CCUS技术的部署成本。中国正在推进全国碳交易市场的建立,发电行业是首先被纳入交易的主体。总体来看,目前碳配额成交量和成交额呈上升趋势,截至2020年8月,试点省市碳市场累计成交量超过4亿t,累计成交额超过90亿元。据预测,到2030年,中国的平均碳价(以CO<sub>2</sub>计,下同)将上升到93元/t,到2050年将超过167元/t。未来碳交易市场的发展和逐步完善以及碳价的提升将抵消一部分CCUS成本。总体来说,短期内还需依靠补贴政策,才能局部获得应用。

#### 3.3 碳捕集技术应用前景

由于技术成熟度和成本原因,我国CCUS技术在2030年前应该还是以研发示范为主,尚不会得到大规模发展。因此,2030年前,我国碳减排主要依靠大力发展节能增效和可再生能源技术,CCUS技术是我国未来减少温室气体排放的重要战略储备技术。2030年后随着技术的进步、碳价的提高以及CO<sub>2</sub>驱油与利用技术的发展,CCUS应用价值的潜力将会大幅度释放,成为我国化石能源为主的能源结构向低碳多元供能体系转变的重要技术保障。

## 4 结 论

1) 煤电是我国电力安全的战略力量,我国建设



社会主义现代化国家和满足人民对美好生活的向往都需要保留一定比例的煤电份额。而煤燃烧是 CO<sub>2</sub> 排放的主要来源。因此, 煤电将在满足电力供应安全的前提下不断降低发电量, 以实现更少的碳排放。据预测: 到 2030 年, 我国需要保留燃煤发电装机 12.13 亿 kW; 到 2060 年仍需维持 7 亿 kW 左右, 以保障我国能源电力供应安全和调峰、供暖需求。

2) 煤电的低碳化发展对我国“双碳”目标的实现至关重要。对于存量的煤电机组, 需要大力进行节能提效改造, 把煤耗降到 300 g/(kW h) 以下。对于达到设计使用寿命的机组, 通过机组延寿改造并同步实施提升参数改造以大幅提升机组的经济性。另外, 需要推进科技创新, 大力发展高参数超超临界技术和超临界 CO<sub>2</sub> 循环等新型高效动力系统, 把新建煤电机组的煤耗降到 250 g/(kW h) 以下。

3) 同时, 全面提升煤电机组的自身灵活性, 大力发展锅炉深度调峰、热电解耦以及储能耦合调峰等技术和提高控制系统调峰适应性, 制定调峰鼓励政策, 为可再生电力大规模接入提供支撑。

4) 另外, 需要储备碳捕集与封存技术, 开发低成本 CCUS 技术, 加强政策引导, 为 2060 年碳中和目标的实现提供保障。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张九天, 张璐. 面向碳中和目标的碳捕集、利用与封存发展初步探讨[J]. 热力发电, 2021, 50(1): 1-6.  
ZHANG Jiutian, ZHANG Lu. Preliminary discussion on development of carbon capture, utilization and storage for carbon neutralization[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(1): 1-6.
- [2] 王月明, 牟春华, 姚明宇, 等. 二次再热技术发展与应用现状[J]. 热力发电, 2017, 46(8): 1-10.  
WANG Yueming, MU Chunhua, YAO Mingyu, et al. Review of the development and application of double-reheat power generation technology[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8): 1-10.
- [3] 邓清华, 胡乐豪, 李军, 等. 大型发电技术发展现状及趋势[J]. 热力透平, 2019, 48(3): 175-81.  
DENG Qinghua, HU Lehao, LI Jun, et al. State-of-art and tendency on technologies of large electric power generation[J]. Thermal Turbine, 2019, 48(3): 175-81.
- [4] 杨勇平. 燃煤发电系统能源高效清洁利用的基础研究综述[J]. 发电技术, 2019, 40(4): 308-315.  
YANG Yongping. Review of basic research on energy clean and efficient utilization in coal-fired power systems[J]. Power Generation Technology, 2019, 40(4): 308-315.
- [5] 郭伟, 唐人虎. 2060 碳中和目标下的电力行业[J]. 能源, 2020(11): 14-21.  
GUO Wei, TANG Renhu. Power industry under 2060 carbon neutralization target[J]. Energy, 2020(11): 14-21.
- [6] 喻小宝, 郑丹丹, 杨康, 等. “双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J]. 华电技术, 2021, 43(6): 21-32.  
YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak[J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 21-32.
- [7] 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.  
SUN Xudong, ZHANG Bo, PENG Suping. Development trend and strategic countermeasures of clean coal technology in China toward 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 132-140.
- [8] 王志轩. 碳达峰、碳中和目标实现路径与政策框架研究[J]. 电力科技与环保, 2021, 37(3): 1-8.  
WANG Zhixuan. Research on the realization path and policy framework of carbon peak and carbon neutralization goals[J]. Power Technology and Environmental Protection, 2021, 37(3): 1-8.
- [9] 巢清尘. 碳达峰和碳中和的科学内涵及我国的政策措施[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(2): 14-19.  
CHAO Qingchen. Scientific connotation of carbon peak and carbon neutralization and China's policies and measures[J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(2): 14-19.
- [10] 何建坤. 碳达峰碳中和目标向下能源和经济的低碳转型[J]. 环境经济研究, 2021(1): 1-9.  
HE Jiankun. Low carbon transformation of energy and economy aiming for the peaking of carbon emission and carbon neutrality[J]. Research on Environmental Economy, 2021(1): 1-9.
- [11] 方琦, 钱立华, 鲁政委. 我国实现碳达峰与碳中和的碳排放量测算[J]. 环境保护, 2021, 49(16): 49-54.  
FANG Qi, QIAN Lihua, LU Zhengwei. Measure carbon emission amount of China in the context of carbon peak and carbon neutrality[J]. Environmental Protection, 2021, 49(16): 49-54.
- [12] 李海奎. 碳中和愿景下森林碳汇评估方法和固碳潜力预估研究进展[J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 79-86.  
LI Haikui. Research advance of forest carbon sink assessment methods and carbon sequestration potential estimation under carbon neutral vision[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(4): 79-86.
- [13] 尹晶萍, 张煜星. 中国碳排放与森林植被碳吸收潜力研究[J]. 期林业资源管理, 2021, 6(3): 52-61.  
YIN Jingping, ZHANG Yuxing. Study on carbon emission and carbon absorption potential of forest vegetation in China[J]. Forestry Resource Management, 2021, 6(3): 52-61.
- [14] 王克, 刘芳名, 尹明健. 1.5 °C 温升目标下中国碳排放路径研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 7-17.  
WANG Ke, LIU Fangming, YIN Mingjian, et al. Research on China's carbon emissions pathway under the 1.5 °C target[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 7-17.
- [15] 唐伟祺. 中国及各省区能源碳排放达峰路径分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 1.  
TANG Yiqi. Analysis on the peak path of energy carbon emission in China and its provinces[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 1.
- [16] 夏学智, 窦真兰, 范正权. 我国碳达峰及碳中和目标估算[J]. 能源与环境, 2021(4): 6-7.  
XIA Xuezhi, DOU Zhenlan, FAN Zhengquan. Estimation of carbon peak and carbon neutralization target in China[J]. Energy and Environment, 2021(4): 6-7.

- [17] 赵兵. “碳达峰、碳中和”目标下火力发电行业的转型与发展[J]. 节能与环保, 2021(5): 32-34  
ZHAO Bing. Transformation and development of thermal power industry under the goal of “carbon peaking and carbon neutralization”[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2021(5): 32-34
- [18] 袁勇, 党莹樱, 杨珍, 等. 700 °C先进超超临界机组末级过热器用新型镍铁基高温合金的组织与性能[J]. 热力发电, 2020, 44(1): 44-50.  
YUAN Yong, DANG Yingying, YANG Zhen, et al. Microstructure and properties of Ni-Fe-base superalloy for 700 °C advanced ultra supercritical unit final superheater[J]. Thermal Power Generation, 2020, 44(1): 44-50.
- [19] 徐进良, 刘超, 孙恩慧, 等. 超临界二氧化碳动力循环研究进展及展望[J]. 热力发电, 2020, 49(10): 1-10.  
XU Jinliang, LIU Chao, SUN Enhui, et al. Review and perspective of supercritical carbon dioxide power cycles[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 1-10.
- [20] 于国强, 刘克天, 胡尊民. 火电机组参与深度调峰对电网频率特性的影响研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(8): 1124-1129.  
YU Guoqiang, LIU Ketian, HU Zunmin. Study on the influence of thermal power units participating in deep peak load regulation on grid frequency characteristics[J]. Renewable Energy, 2021, 39(8): 1124-1129.
- [21] 李强. 火电厂供热机组低压缸零出力技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2019: 1.  
LI Qiang. Research on zero output technology of low pressure cylinder of heating unit in thermal power plant[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2019: 1.
- [22] 张显荣, 徐玉杰, 杨立军, 等. 多类型火电-储热耦合系统性能分析与比较[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1565-1578.  
ZHANG Xianrong, XU Yujie, YANG Lijun, et al. Performance analysis and comparison of multi-type thermalpower-heat storage coupling systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1565-1578.
- [23] 王辉, 李峻, 祝培旺, 等. 应用于火电机组深度调峰的百兆瓦级熔盐储能技术[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1760-1767.  
WANG Hui, LI Jun, ZHU Peiwang, et al. Hundred-megawatt molten salt heat storage system for deeppeak shaving of thermal power plant[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1760-1767.
- [24] 庞力平, 张世刚, 段立强. 高温熔盐储能提高二次再热机组灵活性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2682-2691.  
PANG Liping, ZHANG Shigang, DUAN Liqiang. Flexibility improvement study on the double reheat power generation unit with a high temperature molten salt thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2682-2691.
- [25] 王丹. 二氧化碳捕集、利用与封存技术全链分析与集成优化研究[D]. 北京: 中国科学院, 2020: 1.  
WANG Dan. Full chain analysis, integration and optimization of CO<sub>2</sub> capture, utilization and storage technology[D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 2020: 1.
- [26] 张妍, 池晓彤, 康蓉. 全球 CCS 技术的研究、发展与应用动态[J]. 中外能源, 2020, 25(4): 1-10.  
ZHANG Yan, CHI Xiaotong, KANG Rong. Research, development and application trends of CCS technology worldwide[J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(4): 1-10.
- [27] 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 Yunyun, LIAO Haiyan, WANG Peng, et al. Research on technology directions and roadmap of CCS/CCUS for coal-fired power generation in China[J]. Engineering Science, 2018, 20(3): 80-89.
- [28] 王栋. CO<sub>2</sub>捕集与资源化利用技术研究进展[J]. 化工环保, 2021, 41(4): 481-484.  
WANG Dong. Research progress of CO<sub>2</sub> capture and resource utilization technology[J]. Chemical Environmental Protection, 2021, 41(4): 481-484.

(责任编辑 刘永强)