

燃煤电厂全过程低碳节能技术路径探讨

李建山^{1,2}, 王淼^{3,✉}, 刘加根³

(1. 三河发电有限责任公司, 河北 廊坊 065201; 2. 河北省燃煤电站污染防治技术创新中心, 河北 廊坊 065201;
3. 清华大学建筑设计研究院有限公司, 北京 100084)

摘要: [目的] 燃煤电厂的低碳节能路径是缓解我国能源危机与环境污染的重要策略。[方法] 文章评述了当前燃煤电厂在燃料供应设计阶段和节能运行维护阶段的低碳节能技术以及低碳技术潜在的发展方向。[结果] 对于电厂燃料供应设计阶段的低碳技术应优化生物质/氨与煤的掺烧比例, 良好的掺烧比例有利于炉内充分燃烧, 降低碳排; 电厂节能运行维护阶段吸收技术、吸附技术和气体分离技术是碳颗粒捕集的常用手段, 同时储能技术、深度调峰技术、柔性直流供电技术对于CO₂减排具有重要作用。[结论] 对电厂低碳技术发展进行展望, 认为采用综合互补低碳协同方式, 并结合电厂运行过程中的监管反馈调控措施, 将是促进电厂可持续能源发展的重要发展方向。

关键词: 燃煤电厂; 低碳节能技术; 混燃掺烧; CO₂减排路径; 监管反馈调控

中图分类号: TK01; TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)03-0029-12

开放科学(资源服务)二维码:



Discussion on the Whole Process Low-Carbon Energy Saving Technology Path of Coal-Fired Power Plants

LI Jianshan^{1,2}, WANG Miao^{3,✉}, LIU Jiagen³

(1. SanHe Power Plant Ltd., CHN Energy, LangFang 065201, Hebei, China;

2. Hebei Innovation Center for Coal-fired power station Pollution Control, LangFang 065201, Hebei, China;

3. Tsinghua University Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: [Introduction] Low carbon emission technology of coal-fired power plant is an important strategy to alleviate energy crisis and environmental pollution in China. [Method] The low-carbon emission reduction path and potential development direction of low-carbon technology in fuel supply design stage and energy-saving operation and maintenance stage of current coal-fired power plants were reviewed. [Result] For the low-carbon technology in the design stage of power plant fuel supply, the ratio of biomass/ammonia and coal mixing should be optimized. A good ratio of biomass/ammonia mixing and burning should be fully burned in the furnace to reduce carbon emissions. Absorption technology, adsorption technology, and gas separation technology are common means of carbon particle capture in the energy-saving operation and maintenance stage of the power plant. At the same time, the important role of energy storage technology, deep peak regulating technology, and flexible DC power supply technology on the CO₂ emission reduction path is expounded. [Conclusion] Finally, the development of low carbon technology in power plants is prospected. It is considered that the adoption of a comprehensive complementary and low carbon collaborative way, combined with the regulatory feedback control measures in the operation process of power plants. It will be an important development direction to promote the sustainable energy development of power plants.

Key words: coal-fired power plant; low-carbon energy saving technology; mixing and burning; CO₂ emission reduction path; regulatory feedback regulation

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-06-19 修回日期: 2022-08-11

基金项目: 国家重点研发计划课题“太子城小镇绿色能源能耗管理应用系统开发与应用”(2020YFF0305604)

0 引言

能源是人类赖以生存和发展的重要物质基础,而能源中的电能是目前世界上最便捷的二次能源,同时是实现一次能源转化为多种能源方式的高效路径^[1],但电能的消耗也给能源危机和环境污染带来巨大压力。2020 年我国提出中央企业实现“2030 年碳达峰、2060 年碳中和”的“双碳”目标。2021 年我国又提出构建以新能源为主的新型电力系统,标志着电力行业开启低碳排放需求的高速赛道。

2015 年国家推出《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》提出加快能源技术创新,建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系^[2]。有学者从煤炭转换效率角度出发,利用超临界汽轮机,提高锅炉效率,降低用电率及供电煤耗^[3]。有专家提出针对循环水泵、辅机设备引风机、送风机等采取变频调节方式,达到电厂节能降耗的效果^[4-5]。同时,部分电厂也更加关注机组运行监测和优化系统的应用^[6],然而对燃煤电厂低碳排放技术方法亟待加强。另外,水力发电、风电、太阳能发电等可再生能源在发电中占比增加,但可再生能源具有波动性大、随机性强等特点,导致发电的可控性较差,继而增加了电力系统的不确定性^[4]。

基于此,本文对新建/既有燃煤电厂从燃料供应设计到节能运行维护的全过程阶段阐述低碳技术路径并进行分析汇总,期望为后续的燃煤电厂实现“双碳”目标提供低碳技术参考。

1 燃料供应设计阶段

1.1 生物质掺烧技术

我国的秸秆、木质颗粒、生活垃圾、动物粪便、污泥等生物质原料数量巨大,年产量达 34.94 亿 t。与煤炭燃烧过程相比,生物质原料具有 N、S 含量低,SO_x、NO_x 排量少等特点,是一种可再生能源^[7-9]。将秸秆等可再生能源与不同品质煤种按照一定比例掺烧,产生的蒸汽带动蒸汽轮机及发电机发电,可大幅度降低机组 CO₂ 的排放。该生物质掺烧技术在我国电厂已得到大力发展,尤其在在我国农村地区。我国首座利用棉花秸秆发电 2.5 万 kW 机组的生物质电厂已在山东菏泽单县正式投产发电。该电厂预计每年消纳生物质 15 万 ~ 20 万 t,发电量约 1.6 亿 kWh,

产生约 8 000 t 灰粉用于钾肥还田,与相同装机容量的火电机组相比碳排量减少约 10 万 t^[10]。

有研究表明掺烧不同生物质对燃煤电厂 CO₂ 排放值有重要影响,当耦合生物质比例增加,则机组 CO₂ 排放量大幅度减低。以电厂 300 MW 机组为研究对象,耦合生物质掺烧比例从 20% 增加到 100% 时,每年可减排 CO₂ 约达 102.8 万 t^[11]。然而,生物质原料碱金属含量高,燃煤后炉内易结渣,同时我国生物质资源分布不均,原料运输成本高,这些也限制了生物质直燃电厂的发展。

1.2 混氨掺烧技术

氨是一种无碳富氢的化合物,氨完全燃烧氧化后产物是氮气和水,无 CO₂ 排放^[12-14],有效促进燃煤电厂低碳发展,但氨在燃煤电站中的应用仍处于初级阶段。世界上首次在工程应用中采用氨煤混燃发电是 2017 年日本 Chugoku 电力水岛燃煤发电厂(装机容量 156 MW),其中氨掺烧比例为 0.6% ~ 0.8%^[15]。为了解决纯氨层流燃烧速度慢、热值低、点火能量要求高、可燃极限范围窄等问题,通常先将氨与氧气进行预混,再注入锅炉中与煤混燃,氨的氧化路径详见图 1。此外,根据氨氧化的氮化学反应动力学当量比不同,可分为贫燃反应与富燃反应,其主要过程均包括: NH₃ 的脱氢反应、NH_i(i = 0,1,2) 的氧化反应、NH_i+NH_j(i, j = 0,1,2) 的聚合反应^[16-17]。有学者研究不同氧浓度(60% ~ 100%)、不同温度(303 ~ 393 K)对氨燃烧反应的影响,得到高氧浓度、高温均能提高层流火焰速度^[18]。

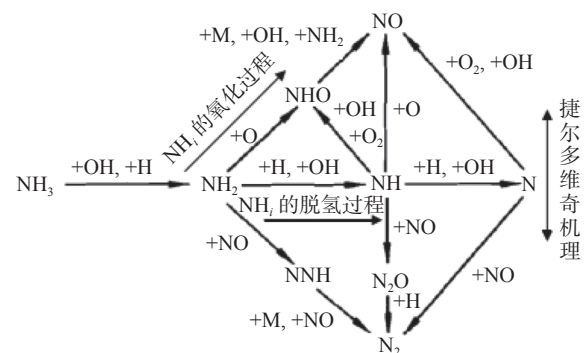


图 1 基于 Miller 模型的氨氧化路径^[19]

Fig. 1 Ammonia oxidation path based on Miller model^[19]

另外,氨煤掺烧燃尽程度不同,碳含量变化不同,而氨掺混比例和注入位置对氨煤掺烧燃尽程度有重

要影响。国外有学者发现当氨低当量比时, 氨煤混燃对火焰传播产生的促进作用大于煤粉颗粒局部温度降低的抑制作用, 进而促进火焰的传播; 当氨高当量比时, 氨煤混燃对火焰传播产生的促进作用受挥发分影响而受限, 导致混燃时火焰速度小于纯氨燃烧时火焰速度^[20-21]。也有学者基于模拟方法, 研究氨掺烧比例范围在 0~80% 时炉膛内换热行为, 得到氨掺烧比例达到 60% 的炉内换热量最小(比煤单烧降低了 3%), 当氨掺烧比例继续增加至 80% 时, 掺氨提升了烟气量和烟气流速, 使得炉内换热量升高^[22]。此外, 有研究表明在燃烧器内、火焰区域和燃尽风(OFA)区域分别喷入氨, 得到火焰区域喷入炉膛时 NO 的排放最低^[23-24]。因此, 氨与煤混燃过程中, 合理优化氨的掺烧比例与掺混位置, 对锅炉燃烧, 低碳排放有重要作用。

1.3 CO₂ 地下封存技术

CO₂ 地下封存技术是将集中排放源分离得到的 CO₂ 注入到地下埋深约 1 000 m 且具有合适封闭条件的地层中予以隔离封存^[25-26]。封存载体和良好的地质盖层是实现 CO₂ 地下封存/利用技术的必备条件^[27], 目前主要的封存载体有三类, 即: 地下深部咸水层封存、油气田封存、地下深部煤层封存。美国

主要利用油气田 CO₂ 封存技术的实施工程已有 70 余项, 其年均充注 CO₂ 可达约 25×106 t^[28], 而根据各国地下资源与地质空间分布的差异, 我国探索了地下煤层封存 CO₂ 技术的研究, 例如我国学者以山西沁水盆地地下深部煤层为封存载体开展相关技术探索, 得到 CO₂ 潜在封存量可达 4.5×108 t。同时发现 CO₂ 注入深部煤层可驱替内部的 CH₄ 形成游离态, 促进提升深部煤层气的采出率, 使得采收量增加 1 696×108 m³^[29]。

利用开采煤炭的空间封存 CO₂, 打造“煤炭取出来, 煤炭产生的 CO₂ 填回去”的理念。然而, 地质盖层密封性直接影响 CO₂ 地下封存效果。当煤矿开采深度在 500~1 000 m 时, 地质盖层需具有良好封盖能力; 当埋深大于 1 000 m 的深部地层, 需通过压力控制实现大规模封存。针对煤层开采过程中采用的 CO₂ 封存技术有 3 类, 即: 煤层采空区破裂岩体 CO₂ 封存技术(利用覆岩垮落形成的采空区提供 CO₂ 封存空间)、煤地下汽化空气 CO₂ 封存技术(利用煤炭可控燃烧释放气体提供 CO₂ 封存空间)、煤原位热解半焦 CO₂ 封存技术(利用热解方式最大限度提取煤中油气资源, 取氢留碳并注入碳源)^[30]。煤层空间的 CO₂ 封存技术详见图 2。

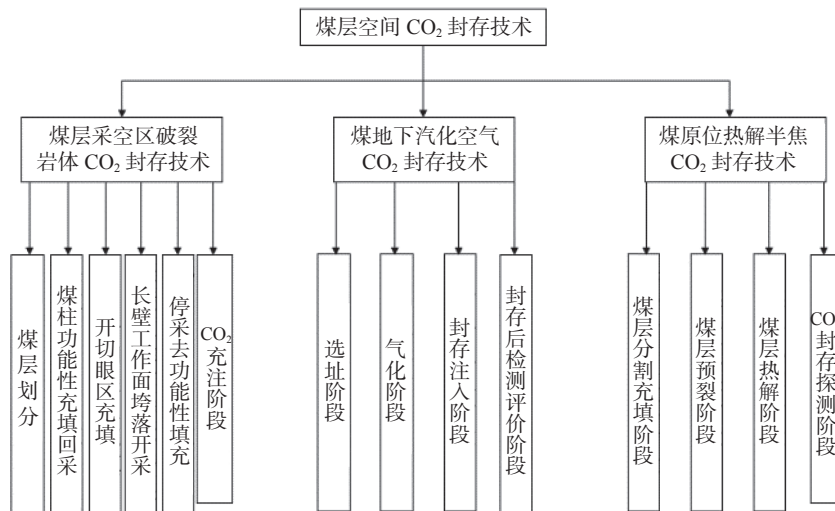


图 2 煤层空间的 CO₂ 封存技术

Fig. 2 CO₂ storage technology in coal seam space

2 运行维护阶段

燃煤电厂运行维护阶段低碳技术分为两类, 即

颗粒物的减排路径和温室气体的减排路径。其中颗粒物的减排路径包括化学吸收技术、物理吸收技术、膜分离技术; 温室气体减排路径包括储能技术、光电

调峰技术、直流供电技术。

2.1 颗粒物减排路径

燃煤电厂运营过程中会产生大量颗粒物(烟尘、 SO_2 、 NO_x 等)。现行的《火电厂大气污染物排放标准》GB13223—2011中对燃煤锅炉颗粒物排放浓度提出更高限值要求:燃煤电厂在基准氧含量6%以下,烟尘浓度限制为 5 mg/m^3 、 SO_2 浓度限制为 35 mg/m^3 、 NO_x 浓度限制为 50 mg/m^3 ^[31]。电厂利用电除尘器、袋式除尘器、复合除尘器等设备对有害颗粒物进行捕集。按燃烧后的颗粒物碳捕集方式主要有吸收技术、吸附技术、气体分离技术等^[32]。

2.1.1 碳捕集吸收技术

碳捕集吸收技术可分为化学吸收和物理吸收两部分。化学吸收技术原理是利用有机胺、氨水、碳酸盐离子液体等弱碱性吸收剂在低温(约 $40\text{ }^\circ\text{C}$)环境发生化学反应,当温度加热到 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时,发生可逆反应,释放 CO_2 ^[33]。物理吸收技术原理是利用低温、高压条件下 CO_2 在吸收剂中物理溶解度较高的特性,在高温、低压下 CO_2 溶解度降低,进而 CO_2 吸收分离过程^[34]。物理吸收技术捕集 CO_2 过程主要通过物理溶解作用,其具有溶剂可再生利用且性能稳定无腐蚀等优点^[35]。该技术的工艺流程图详见图3。

此外有学者研究发现,利用化学吸收技术捕集 CO_2 的关键是吸收过程的传热传质效率^[37],而影响传热传质效率的两个重要因素是气液有效接触面积和吸收前后的粘度变化。另有学者基于ASPEN PLUS模拟手段,建立乙醇胺(MEA)吸收剂捕集 CO_2 的解析能耗数学模型,边界条件依据实际工程参数:电厂装机容量600 MW,热效率45%,烟气 CO_2 摩尔分数13.3%^[38],得到 CO_2 100%分离时,富液负载为 $0.484\text{ mol CO}_2/\text{mol MEA}$ ^[39]。进一步得到乙醇胺在质量分数为20%、30%、40%时,系统最小解析能耗分别为 4.2 GJ/t CO_2 、 3.5 GJ/t CO_2 、 3.1 GJ/t CO_2 ^[40]。此外,也有学者采用氨水溶液捕集 CO_2 ,其反应原理如式(1)~式(4)^[41]所示。

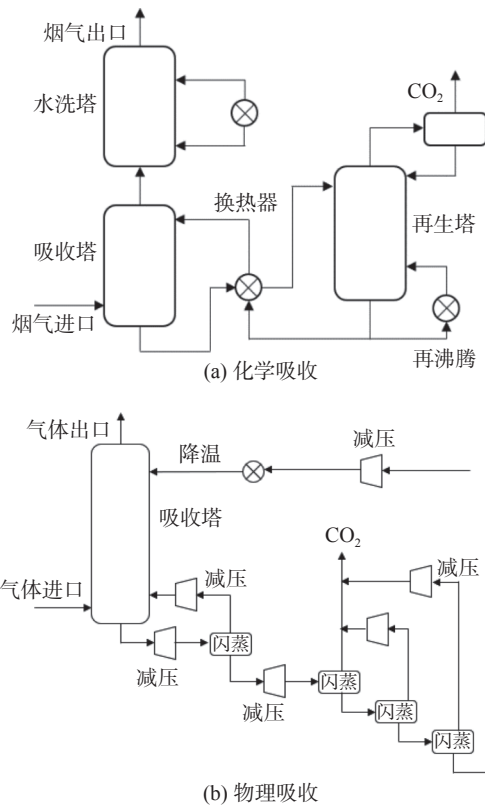
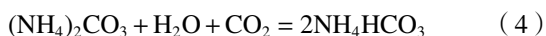


图3 碳捕集吸收技术工艺流程^[36]

Fig. 3 Process flow of carbon capture and absorption technology^[36]

2.1.2 碳捕集吸附技术

碳捕集吸附技术原理是利用活性炭、沸石、硅胶、分子筛等组成的固体吸附剂,基于吸附剂表面上活性点之间化学键或范德华力吸附烟气中 CO_2 ^[42-43]。该技术常用的两种调节措施是变压调节和变温调节。变压调节措施是根据燃煤电厂烟道中烟气组分的沸点差异,通过改变压力,达到分离 CO_2 的目的。与变温调节措施相比,变压调节措施能耗小,且回收 CO_2 效率高,达85%以上。吸附法工艺流程相对简单,如变压吸附过程包括升压、吸附、顺放、逆放、冲洗五个步骤,但固体吸收剂的研发速度相对缓慢,继而对该技术的发展略有制约。

日本是最早在东京、Kansai等电厂行业利用吸附技术分离 CO_2 的国家。加拿大能源公司利用我国在变压吸附技术分离燃气化厂排除的 CO_2 ,将永久封存2000万 t CO_2 ^[44]。我国中石化在胜利油田拥有一套采用吸附分离法100 t/d示范项目,预计每年可减少 CO_2 达3万 t ^[45]。

2.1.3 碳捕集气体分离技术

碳捕集气体分离技术中最常用膜分离技术,其原理是利用 CO_2 在膜内溶解、扩散速率不同,与其他气体在膜两侧形成分压差的作用下,实现 CO_2 分离^[46]。通常燃煤电厂烟道中利用膜分离技术捕集 CO_2 应先进行脱除酸性杂质,但该过程易增加系统能耗,因此需根据实际工程烟道气体成分,确定工艺流程。该技术的常用工艺流程详见图 4。

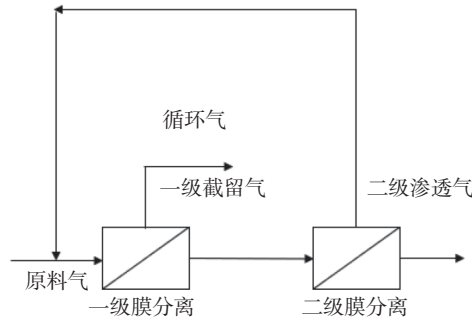


图 4 碳捕集膜分离技术工艺流程^[37]

Fig. 4 Process flow of carbon capture membrane separation technology^[37]

美国俄亥俄州立大学 Ho 课题组研制了一种螺旋形膜组件,在 1 000 mL/min 的进气速率下测试,得到 800 GPU 的 CO_2 渗透速率, CO_2/N_2 分离因子达到了 140,同时控制了压降约在 10 342 Pa/m^[47-48]。挪威科技大学选用巴斯夫 (BASF) 公司生产的聚乙烯醇膜,制得平板膜,在 0.1 MPa 操作压力下, CO_2 渗透速率约为 70 ~ 220 GPU, CO_2/N_2 分离因子约 80 ~ 300,并利用聚乙烯醇平板膜组件及中空纤维膜组件在燃煤电厂进行了真实烟道气试验^[49]。相对于国外,我国应用该技术相对较晚,国内首套具有独立自主知识产权的 30 m³/h 电厂烟气脱碳的中试装置于 2018 年年底完成设计,并于 2019 年 6 月在南京化工所完成调试并开始运行^[50]。

根据《全球碳捕集与封存现状 2020》统计,目前美国是工程应用利用碳捕集技术最广泛的国家,美国已建成投产的碳捕集设施数量约占全球的 50%^[51]。同时,我国近十年碳捕集技术也取得了一定成果。我国胜利油田燃煤电厂采用化学吸收技术,2010 年碳捕集规模约 4 万 t;华润海风电厂燃煤烟气采用膜分离技术,2019 年碳捕集规模约 0.6 万 t^[36]。

2.2 CO_2 减排路径

2.2.1 储能技术

目前电厂实施减排措施,能源动力体系正由煤

炭向多元化转变,充分利用可再生能源已是必然,同时可再生能源并网给电力系统也带来巨大挑战^[52-54]。储能技术是缓解可再生能源并网压力的有效技术手段。储能技术按用能的形式可分为物理储能、化学储能、电磁储能、相变储能^[55]。

物理储能技术包括飞轮储能、抽水蓄能和压缩空气储能。飞轮储能技术原理是利用电动-发电机实现电能与飞轮的机械能之间相互转换的一种储能技术^[56],其具有功与无功相对独立、负荷响应迅速、无污染等特点^[57]。但该技术储能容量有限,因此不适用于长期大规模储能。抽水蓄能技术原理是利用河流高差产生的势能转化为水泵-水轮机的机械能,再通过电机将机械能转化为电能^[58-58],该技术应用较为广泛,但抽水蓄能技术对地理条件要求较高,该技术扩大储能容量也受到制约^[59]。与前两种储能技术(飞轮储能、抽水蓄能)相比,压缩空气储能技术是最具有发展潜力的储能技术,其原理是利用压力缸排汽作为汽轮机驱动力带动空气机,通过增减低压缸的进汽量,实现火电机组与压缩空气储能的能量传递。世界上首座压缩空气储能电站是机组容量 290 MW 的德国 Huntorf 电站,其中从冷态启动到满负荷仅需 6 min^[60]。我国首个配套 60 MW 的压缩空气储能项目建于 2017 年,该项目运行后在规模与效率上均为国内压缩空气储能系统的典范^[55]。

基于氢气的化学储能是一种清洁的储能技术,其原理是技术通过电能与氢气的化学能之间的相互转化实现电能的储存与释放。当电能过剩时,利用电解槽电解水产生氢气,将电能储存为氢气的化学能,产生的氢气可以进入管道直接利用或者储存在储氢设备中,当电力短缺时直接被燃料电池利用产生电能^[61]。此外,碱性燃料电池、质子交换膜燃料电池、固体氧化物燃料电池均属于化学储能范畴。然而,碱性燃料电池通常以空气为氧化剂,电池寿命受空气中二氧化碳毒害寿命下降明显;质子交换膜燃料电池效率较低,且由于使用昂贵的铂催化剂在成本方面不具有优势;与上述两种电池相比,固体氧化物燃料电池高温运行能够提高能量转化效率,同时能够通过热量的输入减少电力的消耗,进一步提高电-化学转化效率,循环效率能够达到 60% ~ 80%^[62],因此,固体氧化物燃料电池是一种有应用前景的燃料电池技术。

电磁储能包括超级电容储能和超导磁储能,两种储能技术均为新兴的储能方式,目前还未有大规模应用。超级电容技术与电池相似,其原理是由电极、电解质以及允许离子通过的多孔膜组成,其响应速度较快,寿命长,但超级电容成本很高,约为 8 000 美元/kWh^[63]。超导磁储能技术原理是通过电磁感应实现电能与电磁能的转化。超导磁储能的优势是快速响应,一个 1 MW/kWh 的超导电磁储能功率可以在 20 ms 内增加到 200 kW,电容成本高达

1 000 ~ 10 000 美元/kWh^[64]。

电池是电化学储能技术的主要储存装置,其原理是利用正极、负极、隔膜、电解液等组件,将电能储存为化学能。常见的电化学储能电池有铅酸电池、镍镉电池、钠硫电池、锂电池、液流电池等。钠硫电池比能量大(100 ~ 175 Wh/kg)^[65],能够达到铅酸蓄电池的 5 倍以上,同时钠硫电池效率高达 70% ~ 92%^[66],是一种具有潜力的储能方式。储能技术的技术参数详见表 1。

表 1 储能技术参数^[60-61]

Tab. 1 Technical parameters of energy storage^[60-61]

储能技术	技术参数				
	循环效率/%	容量/MWh	功率/MW	自放电率/%	
物理储能	抽水蓄能	65 ~ 85	500 ~ 8 000	100 ~ 5 000	—
	压缩空气储能	70 ~ 89	<1 000	1 ~ 400	—
	飞轮储能	90 ~ 95	0.1 ~ 5	0.1 ~ 10	100
电化学储能	铅酸电池	63 ~ 90	0.001 ~ 40	0.05 ~ 10	<0.2
	镍镉电池	60 ~ 90	6.75	3 ~ 20	0.02 ~ 0.6
	钠硫电池	70 ~ 92	0.4 ~ 244.8	<34	—
电化学储能	锂电池	>90	0.004 ~ 50	0.005 ~ 100	0.03
	液流电池	65 ~ 85	—	1 ~ 25	—
电磁储能	超导磁储能	95 ~ 98	—	1 ~ 100	10 ~ 15
	超级电容	90 ~ 95	<0.01	<0.01	5 ~ 20
化学储能	碱性燃料电池	32 ~ 50	—	<0.1	—
	超导磁储能质子交换膜燃料电池	40 ~ 50	—	<0.25	—
	固体氧化物燃烧电池	60 ~ 80	—	<2	—

2.2.2 深度调峰技术

深度调峰技术是电厂发展低碳与无碳清洁能源结构改革的必然选择,也是电厂日常调峰的常用手段。该技术能够缓解新能源供电不稳定情况下调节火电辅助新能源稳定供电。

然而,燃煤机组常存在低负荷运行时燃油燃烧不充分严重污染燃油。基于深度调峰技术对火电厂燃烧点火方式进行改造,采用等离子点火或富氧微油点火措施代替过去的投油点火方式,实现电厂低负荷稳燃^[67]。改进措施主要利用燃煤代替大燃油助燃并形成稳定火源,具有节能环保效益突出等特点^[68]。以某电厂 200 MW 机组为研究对象,采用稳燃调峰

技术改造后,锅炉能够实现 30 MW 出力水平下的低负荷稳定燃烧,日常调峰深度达到 70%^[68]。

另外,频繁启动参与调峰过程会加重机组金属部件疲劳损伤,影响机组运行的安全性与经济性。同时燃烧过程的风煤配比和二次配风也是维持炉内燃烧优化稳定的核心问题。采用深度调峰改造的前馈反馈调节措施对燃烧器提供的燃料量、一二次风量、燃尽风量、风煤比、过量空气系数、风粉混合物温度等与燃烧相关的参数进行全局的、精确的优化控制,缓解低负荷阶段中炉内燃烧不稳定性问题,也有利于及时发现金属部件发生故障问题。图 5 为前馈反馈调节的逻辑控制流程示意图。由图可知逻辑

控制主要步骤包括: 划分锅炉运行工况、提取前馈控制信号、提取反馈控制信号、计算外回路反馈值、计算反馈控制规则、计算反馈控制规则、计算反馈定值信号、获取深度调峰工况下锅炉燃烧优化控制信号等^[69]。此外, 有学者基于时间延迟输入和输出的前馈反馈神经网络, 建立了机组负荷和主蒸汽压力

的逆模型, 并结合模型设计了协调系统的控制器, 最终得到, 神经网络逆向控制器具有更好的控制性能和控制精度^[70]。

基于此, 为了提高深度调峰技术的调峰能力, 首先需确定机组允许的最低稳定运行负荷点; 其次, 应考虑优化匹配区域峰谷电价政策和机组运行时长。

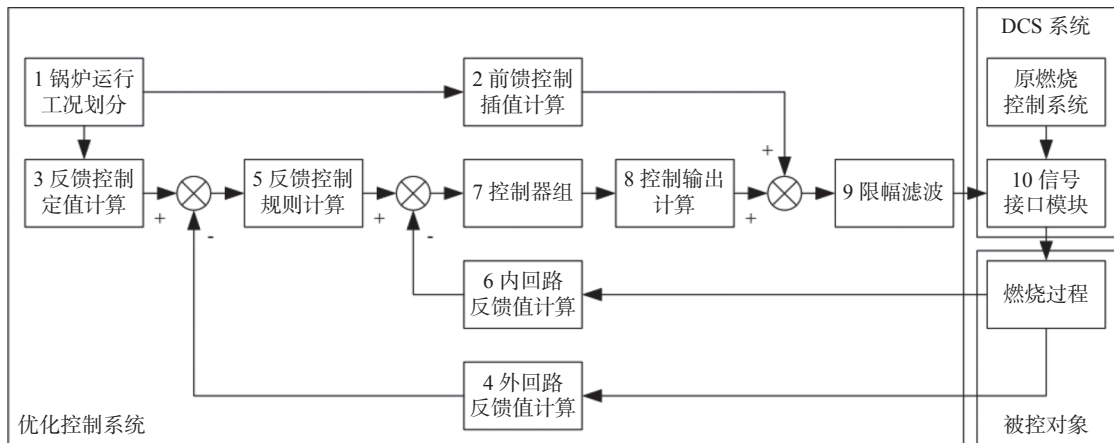


图5 前馈反馈调节系统逻辑控制示意图^[69,71]

Fig. 5 Schematic diagram of logic control of feedforward feedback regulation system^[69,71]

2.2.3 柔性直流供电技术

柔性直流供电技术具有分布式能源、直流负载接纳能力好、控制灵活等特点^[72]。随着可再生能源供电比例的提升, 为了匹配零碳电力系统, 对用电侧的储能和调节能力要求也会越来越高。而柔性直流供电技术与风电、光电、储能措施相结合, 直流供电允许电压波动范围更大, 继而提升了电网瞬时供电能力, 可以帮助系统更好地调节末端用电策略以应

对市电的消纳要求, 也是今后配电网发展的新趋势。

图6为柔性直流供电技术与光电、储能措施相结合的系统示意图。用户等承担能源消费角色, 外部输入能源满足用户能源利用需求, 通过可再生能源利用及储能措施, 结合柔性直流供电技术, 满足节能需求, 促进低碳目标。

直流配电系统包括中压配电网和用户侧配电网^[73]。几种供电系统特性如表2所示。

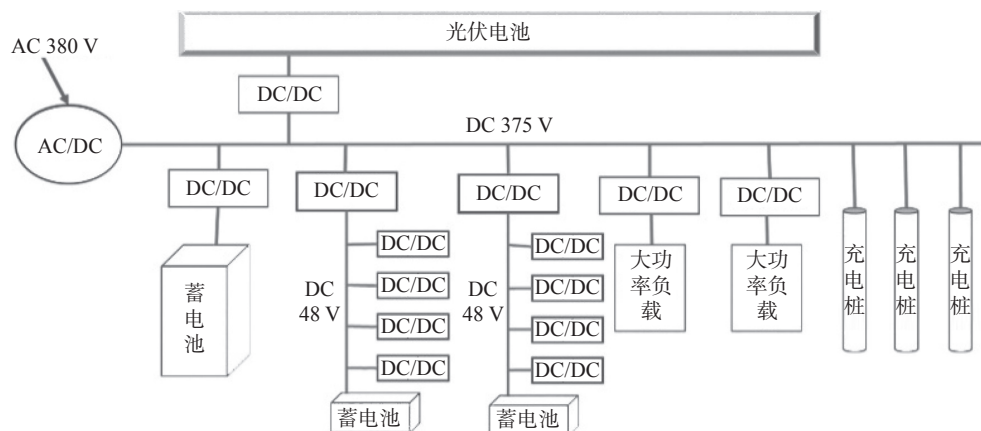


图6 柔性直供电技术示意图^[71]

Fig. 6 Schematic diagram of flexible direct supply technology^[71]

表2 几种供电系统特性^[74]Tab. 2 Features of several power supply systems^[74]

供电系统	特性
220 V交流	现行供电模式
310 V直流(高电压)	空调、冰箱、洗衣机等大型家用电器
48 V直流(低电压)	电视、电脑、手机、照明等数码电器
310 V直流+48 V直流	住宅供电的理想方式(修建成本高)
220 V交流+310 V直流	现行供电系统可用,适用于大型家用电器
220 V交流+48 V直流	现行供电系统可用,适用于数码电器

此外,交直流转换过程中的功率调节是直流供电技术重点。当实际交流功率与外电网进入的交流电功率不一致时,需通过两者的差值修正直流母线电压。实际交流功率高,则降低直流母线电压;外电网进入的交流功率高,则提高直流母线电压^[71]。

3 结论

在我国“双碳”政策背景下,电厂如何实现CO₂的有效减排是当前电力行业面临的突出问题。尽管我国电厂已在烟尘、SO₂、NO_x等大气污染物方面取得了一定成果,达到近零排放要求,但实现电厂CO₂近零排放仍存在巨大挑战。因此,本文从全过程分阶段阐述电厂低碳技术路径。利用CO₂地下封存技术、生物质掺烧技术、混氨掺烧技术实现电厂供能原料开采与使用阶段的低碳排放,同时采取碳捕集利用技术、储能技术、深度调峰技术、直流供电技术等实现运行维护阶段的低碳排放。总之,传统火电厂进行低碳措施改造是势在必行的。对新建电厂应从设计阶段就采用低碳技术理念,继而真正有效地减少电力行业的碳排放。此外,在电厂运行阶段提倡采用综合互补低碳协同方式,结合电厂运行过程中的监管调控措施,促进电厂可持续能源发展。

参考文献:

- [1] 王树民. 燃煤电厂近零排放综合控制技术及工程应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
WANG S M. Research on coal-fired power plants near-zero emission technologies and applications [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017.
- [2] 环境保护部, 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案 [R]. 北京: 环境保护部办公厅, 2015.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission, National

Energy Administration. Fully implement the ultra-low emission and energy-saving renovation work plan for coal-fired power plants [R]. Beijing: General Office of the Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2015. .

- [3] 郭小龙. 煤电厂超临界汽轮机的节能改造 [J]. 机械管理开发, 2021, 36(12): 192-194. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2021.12.079.
GUO X L. Energy saving retrofit of supercritical turbine in coal power plant [J]. *Mechanical Management and Development*, 2021, 36(12): 192-194. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2021.12.079.
- [4] 李发林. 制度管理与高压变频在电厂节能改造中应用 [J]. 中国建材科技, 2019, 28(6): 26-27.
LI F L. Application of system management and high voltage frequency conversion in energy saving reform of power plant [J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2019, 28(6): 26-27.
- [5] 冯征超, 李成刚, 区真理. 变频调速技术在电厂节能改造中的应用 [J]. 广东电力, 2006, 19(10): 50-53, 72. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2006.10.016.
FENG Z C, LI C G, OU Z L. Frequency control technique applied to energy conservation transformation of power plants [J]. *Guangdong Electric Power*, 2006, 19(10): 50-53, 72. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2006.10.016.
- [6] 王双童. 低碳经济形势下提升燃煤发电企业节能降耗对策 [J]. 江苏电机工程, 2011, 30(2): 66-69. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0665.2011.02.019.
WANG S T. Measures for enhancing energy saving of the coal-fired power plants at low-carbon economic situation [J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2011, 30(2): 66-69. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0665.2011.02.019.
- [7] SAHU S G, CHAKRABORTY N, SARKAR P. Coal-biomass co-combustion: An overview [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 575-586. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.106.
- [8] WIELGOSIŃSKI G, LECHTAŃSKA P, NAMIECIŃSKA O. Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2017, 90(5): 787-796. DOI: 10.1016/j.joei.2016.06.005.
- [9] 国家能源局, 环境保护部. 国家能源局环境保护部关于开展燃煤耦合生物质发电技改试点工作的通知(国能发电力[2017]75号) [EB/OL]. (2017-11-27) [2022-06-10].
http://zfxgk.nea.gov.cn/auto84/201712/t20171204_3065.htm.
National Energy Administration, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice of the Environmental Protection Department of the National Energy Administration on the pilot project of technological upgrading of coal-fired coupled biomass power generation [EB/OL]. (2017-11-27) [2022-06-10].
http://zfxgk.nea.gov.cn/auto84/201712/t20171204_3065.htm.
- [10] 高金锴, 佟瑶, 王树才, 等. 生物质燃煤耦合发电技术应用现状

- 及未来趋势 [J]. *可再生能源*, 2019, 37(4): 501-506. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.04.005.
- GAO J K, TONG Y, WANG S C, et al. The current situation and future development tendency of biomass-coal coupling power generation system [J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(4): 501-506. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.04.005.
- [11] 王一坤, 邓磊, 贾兆鹏, 等. 燃煤机组大比例直接耦合生物质发电对机组影响研究 [J]. *热力发电*, 2021, 50(12): 80-91. WANG Y K, DENG L, JIA Z P, et al. Influence of large-scale direct coupled biomass power generation on coal-fired units [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(12): 80-91.
- [12] ZHANG J W, ITO T, ISHII H, et al. Numerical investigation on ammonia co-firing in a pulverized coal combustion facility: effect of ammonia co-firing ratio [J]. *Fuel*, 2020, 267: 117166. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117166.
- [13] YOSHIKAZI T. Test of the Co-firing of ammonia and coal at mizushima power station [J]. *Journal of the Combustion Society of Japan*, 2019, 61(198): 309-312. DOI: 10.20619/jcombsj.61.198_309.
- [14] KOBAYASHI H, HAYAKAWA A, SOMARATHNE K D K A, et al. Science and technology of ammonia combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(1): 109-133. DOI: 10.1016/j.proci.2018.09.029.
- [15] ISHIHARA S, ZHANG J W, ITO T. Numerical calculation with detailed chemistry on ammonia co-firing in a coal-fired boiler: effect of ammonia co-firing ratio on NO emissions [J]. *Fuel*, 2020, 274: 117742. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117742.
- [16] 周上坤, 杨文俊, 谭厚章, 等. 氨燃烧研究进展 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4164-4182. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.201476. ZHOU S K, YANG W J, TAN H Z, et al. Research progress of ammonia combustion [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(12): 4164-4182. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.201476.
- [17] HADI K, ICHIMURA R, HASHIMOTO G, et al. Effect of fuel ratio of coal on the turbulent flame speed of ammonia/coal particle cloud co-combustion at atmospheric pressure [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 4131-4139. DOI: 10.1016/j.proci.2020.06.358.
- [18] WANG D, JI C W, WANG Z, et al. Measurement of oxy-ammonia laminar burning velocity at normal and elevated temperatures [J]. *Fuel*, 2020, 279: 118425.
- [19] MILLER J A, SMOOKE M D, GREEN R M, et al. Kinetic modeling of the oxidation of ammonia in flames [J]. *Combustion Science and Technology*, 1983, 34: 149-176.
- [20] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 69: 63-102. DOI: 10.1016/j.peccs.2018.07.001.
- [21] SHIH C F, ZHANG T, LI J H, et al. Powering the future with liquid sunshine [J]. *Joule*, 2018, 2(10): 1925-1949. DOI: 10.1016/j.joule.2018.08.016.
- [22] Service R F. Liquid sunshine [J]. *Science*, 2018, 361(6398): 120-123. DOI: 10.1126/science.361.6398.120.
- [23] ISHIHARA S, ZHANG J W, ITO T. Numerical calculation with detailed chemistry of effect of ammonia co-firing on NO emissions in a coal-fired boiler [J]. *Fuel*, 2020, 266: 116924. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116924.
- [24] 国家环境保护局. 燃煤电厂大气污染物排放标准: GB 13223—1991 [S]. 北京: 国家技术监督局, 国家环境保护局, 1992. National Environmental Protection Agency. Emission standards of air pollutants for coal-fired power plants: GB 13223—1991 [S]. Beijing: The State Bureau of Quality and Technical Supervision, National Environmental Protection Agency, 1992.
- [25] 王建秀, 吴远斌, 于海鹏. 二氧化碳封存技术研究进展 [J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9(1): 81-90. WANG J X, WU Y B, YU H P. Review of the technology for sequestration of carbon dioxide [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(1): 81-90.
- [26] 骆仲泐, 方梦祥, 李明远, 等. 二氧化碳捕集、封存和利用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 261-279. LUO Z Y, FANG M X, LI M Y, et al. Carbon dioxide capture, storage and utilization technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 261-279.
- [27] 黄定国, 杨小林, 余永强, 等. CO₂地质封存技术进展与废弃矿井采空区封存CO₂ [J]. *洁净煤技术*, 2011, 17(5): 93-96. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2011.05.034. HUANG D G, YANG X L, YU Y Q, et al. Technical progress of CO₂ geological sequestration and CO₂ sequestration by antiquated mine goaf [J]. *Clean Coal Technology*, 2011, 17(5): 93-96. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2011.05.034.
- [28] 姜凯, 李治平, 窦宏恩, 等. 沁水盆地二氧化碳埋存潜力评价模型 [J]. *特种油气藏*, 2016, 23(2): 112-114. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6535.2016.02.027. JIANG K, LI Z P, DOU H E, et al. Evaluation model of CO₂ storage potential in Qinshui Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(2): 112-114. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6535.2016.02.027.
- [29] 王双明, 申艳军, 孙强, 等. “双碳”目标下煤炭开采扰动空间CO₂地下封存途径与技术难题探索 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 45-60. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.yg21.1872. WANG S M, SHEN Y J, SUN Q, et al. Underground CO₂ storage and technical problems in coal mining area under the "dual carbon" target [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 45-60. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.yg21.1872.
- [30] AGBOR E, ZHANG X L, KUMAR A. A review of biomass co-firing in North America [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40: 930-943. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.195.
- [31] 秦阿宁, 吴晓燕, 李娜娜, 等. 国际碳捕集、利用与封存(CCS)技术发展战略与技术布局分析 [J]. *科学观察*, 2022, 17(4):

- 29-32. DOI: [10.15978/j.cnki.1673-5668.202204008](https://doi.org/10.15978/j.cnki.1673-5668.202204008).
- QIN A N, WU X Y, LI N N, et al. Analysis on international strategy and technology development of carbon capture [J]. *Science Focus*, 2022, 17(4): 29-32. DOI: [10.15978/j.cnki.1673-5668.202204008](https://doi.org/10.15978/j.cnki.1673-5668.202204008).
- [32] 方梦祥,周旭萍,王涛,等. CO₂化学吸收剂 [J]. *化学进展*, 2015, 27(12): 1808-1814. DOI: [10.7536/PC150638](https://doi.org/10.7536/PC150638).
- FANG M X, ZHOU X P, WANG T, et al. Solvent development in CO₂ chemical absorption [J]. *Progress in Chemistry*, 2015, 27(12): 1808-1814. DOI: [10.7536/PC150638](https://doi.org/10.7536/PC150638).
- [33] 汪世清, 郜时旺, 王绍民, 等. 低温洗涤法烟气脱硫脱碳工艺模拟研究 [J]. *热力发电*, 2021, 50(1): 68-73. DOI: [10.19666/j.rfld.202007202](https://doi.org/10.19666/j.rfld.202007202).
- WANG S Q, GAO S W, WANG S M, et al. Simulation study on removing SO₂ and CO₂ from flue gas by cryogenic scrubbing [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(1): 68-73. DOI: [10.19666/j.rfld.202007202](https://doi.org/10.19666/j.rfld.202007202).
- [34] HE X Z, HÄGG M B. Hollow fiber carbon membranes: Investigations for CO₂ capture [J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, 378(1/2): 1-9. DOI: [10.1016/j.memsci.2010.10.070](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.10.070).
- [35] 李新春, 孙永斌. 二氧化碳捕集现状和展望 [J]. *能源技术经济*, 2010, 22(4): 21-26. DOI: [10.3969/j.issn.1674-8441.2010.04.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8441.2010.04.004).
- LI X C, SUN Y B. Status quo and prospect of the carbon dioxide capture [J]. *Energy Technology and Economics*, 2010, 22(4): 21-26. DOI: [10.3969/j.issn.1674-8441.2010.04.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8441.2010.04.004).
- [36] 全球碳捕集与封存研究院. 全球碳捕集与封存现状报告2020 [R/OL]. (2021-01-22) [2022-06-10]. <https://cn.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/global-status-of-ccs-2020/>.
- Global CCS Institute. Global Status of CCS 2020 [R/OL]. (2021-01-22) [2022-06-10]. <https://cn.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/global-status-of-ccs-2020/>.
- [37] WANG M H, JOEL A S, RAMSHAW C, et al. Process intensification for post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: a critical review [J]. *Applied Energy*, 2015, 158: 275-291. DOI: [10.1016/j.apenergy.2015.08.083](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.083).
- [38] ABU-ZAHRA M R M, SCHNEIDERS L H J, NIEDERER J P M, et al. CO₂ capture from power plants: part I. A parametric study of the technical performance based on monoethanolamine [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1(1): 37-46. DOI: [10.1016/s1750-5836\(06\)00007-7](https://doi.org/10.1016/s1750-5836(06)00007-7).
- [39] 李青, 余云松, 姜钧, 等. 一种改进的二氧化碳吸收减排法 [J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(11): 1413-1417. DOI: [10.3321/j.issn:0253-987X.2008.11.021](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-987X.2008.11.021).
- LI Q, YU Y S, JIANG J, et al. Improved CO₂ capture method by absorption [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(11): 1413-1417. DOI: [10.3321/j.issn:0253-987X.2008.11.021](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-987X.2008.11.021).
- [40] 李青, 余云松, 姜钧, 等. 基于热泵技术的化学吸收法二氧化碳捕集系统 [J]. *高校化学工程学报*, 2010, 24(1): 29-34. DOI: [10.3969/j.issn.1003-9015.2010.01.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-9015.2010.01.006).
- LI Q, YU Y S, JIANG J, et al. CO₂ capture by chemical absorption method based on heat pump technology [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2010, 24(1): 29-34. DOI: [10.3969/j.issn.1003-9015.2010.01.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-9015.2010.01.006).
- [41] 高书宝, 张文燕, 王泽江, 等. 二氧化碳的捕集分离与烟气脱钙技术的应用现状 [J]. *盐科学与化工*, 2019, 48(8): 1-6. DOI: [10.16570/j.cnki.issn1673-6850.2019.08.001](https://doi.org/10.16570/j.cnki.issn1673-6850.2019.08.001).
- GAO S B, ZHANG W Y, WANG Z J, et al. Application status of carbon dioxide capture-separation and decalcification by flue gas technology [J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2019, 48(8): 1-6. DOI: [10.16570/j.cnki.issn1673-6850.2019.08.001](https://doi.org/10.16570/j.cnki.issn1673-6850.2019.08.001).
- [42] 赵雪, 芮久后, 王宇, 等. 探讨适合中国的CO₂捕集技术 [J]. *科技导报*, 2010, 28(4): 97-100.
- ZHAO X, RUI J H, WANG Y, et al. A study on CO₂ capture technology in China [J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28(4): 97-100.
- [43] 徐冬, 张军, 翟玉春, 等. 变压吸附分离工业废气中二氧化碳的研究进展 [J]. *化工进展*, 2010, 29(1): 150-156. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2010.01.028](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2010.01.028).
- XU D, ZHANG J, ZHAI Y C, et al. Progress in carbon dioxide capture from flue gas by pressure swing adsorption [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2010, 29(1): 150-156. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2010.01.028](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2010.01.028).
- [44] LANGSTON M V, HOADLEY S F, YOUNG D N. Definitive CO₂ flooding response in the SACROC unit [C]//SPE. Proceedings of SPE Enhanced Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, April 16-21, 1988. Tulsa: SPE, 2007: 1-16.
- [45] 龚蔚, 蒲万芬, 曹建. 就地生成二氧化碳提高采收率研究 [J]. *特种油气藏*, 2008, 15(6): 76-78. DOI: [10.3969/j.issn.1006-6535.2008.06.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6535.2008.06.022).
- GONG W, PU W F, CAO J. Enhance oil recovery by in-situ carbon dioxide generation [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2008, 15(6): 76-78. DOI: [10.3969/j.issn.1006-6535.2008.06.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6535.2008.06.022).
- [46] 刘飞, 关键, 祁志福, 等. 燃煤电厂碳捕集、利用与封存技术路线选择 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(7): 1-13. DOI: [10.13245/j.hust.220701](https://doi.org/10.13245/j.hust.220701).
- LIU F, GUAN J, QI Z F, et al. Technology route selection for carbon capture utilization and storage in coal-fired power plants [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(7): 1-13. DOI: [10.13245/j.hust.220701](https://doi.org/10.13245/j.hust.220701).
- [47] CHEN K K, HAN Y, ZHANG Z E, et al. Enhancing membrane performance for CO₂ capture from flue gas with ultrahigh MW

- polyvinylamine [J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 628: 119215. DOI: [10.1016/J.MEMSCI.2021.119215](https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2021.119215).
- [48] WU D Z, SUN C H, DUTTA P K, et al. SO₂ interference on separation performance of amine-containing facilitated transport membranes for CO₂ capture from flue gas [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 534: 33-45. DOI: [10.1016/j.memsci.2017.04.003](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.04.003).
- [49] DENG L Y, KIM T J, HÄGG M B. Facilitated transport of CO₂ in novel PVAm/PVA blend membrane [J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, 340: 154-163. DOI: [10.1016/j.memsci.2009.05.019](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.05.019).
- [50] QIAN Z H, WANG Z, ZHANG C X, et al. PVAm-PIP/PS Composite membrane with high performance for CO₂/N₂ separation [J]. *AIChE Journal*, 2013, 59(1): 215-228. DOI: [10.1002/aic.13781](https://doi.org/10.1002/aic.13781).
- [51] 胡建根, 童家麟, 茅建波, 等. 典型燃煤锅炉深度调峰能力比较研究 [J]. *锅炉技术*, 2019, 50(6): 59-64. DOI: [10.3969/j.issn.1672-4763.2019.06.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4763.2019.06.012).
- HU J G, TONG J L, MAO J B, et al. The research of the comparison of deep peak regulation capacity for typical coal-fired boilers [J]. *Boiler Technology*, 2019, 50(6): 59-64. DOI: [10.3969/j.issn.1672-4763.2019.06.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4763.2019.06.012).
- [52] 丛星亮, 谢红, 苏阳, 等. 660 MW 超超临界二次再热机组深度调峰试验研究 [J]. *华电技术*, 2021, 43(5): 64-69. DOI: [10.3969/j.issn.1674-1951.2021.05.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1951.2021.05.010).
- CONG X L, XIE H, SU Y, et al. Experimental study on deep peak-load shaving of a 660 MW ultra-supercritical secondary reheating unit [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(5): 64-69. DOI: [10.3969/j.issn.1674-1951.2021.05.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1951.2021.05.010).
- [53] 孙立本, 张少成, 许冰, 等. 66 kV 固体电蓄热装置在火电机组深度调峰中的应用 [J]. *华电技术*, 2018, 40(7): 38-39, 42. DOI: [10.3969/j.issn.1674-1951.2018.07.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1951.2018.07.011).
- SUN L B, ZHANG S C, XU B, et al. Application of 66 kV solid electric heat storage device in vigorous peak-load regulation of thermal power units [J]. *Huadian Technology*, 2018, 40(7): 38-39, 42. DOI: [10.3969/j.issn.1674-1951.2018.07.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1951.2018.07.011).
- [54] 童家麟, 洪庆, 吕洪坤, 等. 电源侧储能技术发展现状及应用前景综述 [J]. *华电技术*, 2021, 43(7): 17-23. DOI: [10.3969/j.issn.1674-1951.2021.07.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1951.2021.07.003).
- TONG J L, HONG Q, LÜ H K, et al. Review on development status and application prospect of power side energy storage technology [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(7): 17-23. DOI: [10.3969/j.issn.1674-1951.2021.07.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1951.2021.07.003).
- [55] MAHMOUD M, RAMADAN M, OLABI A G, et al. A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 210: 112670. DOI: [10.1016/j.enconman.2020.112670](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112670).
- [56] 薛飞宇, 梁双印. 飞轮储能核心技术发展现状与展望 [J]. *节能*, 2020, 39(11): 119-122. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7948.2020.11.037](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7948.2020.11.037).
- XUE F Y, LIANG S Y. Development status and prospect of core technology of flywheel energy storage system [J]. *Energy Conservation*, 2020, 39(11): 119-122. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7948.2020.11.037](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7948.2020.11.037).
- [57] KALDELLIS J K, ZAFIRAKIS D. Optimum energy storage techniques for the improvement of renewable energy sources-based electricity generation economic efficiency [J]. *Energy*, 2007, 32(12): 2295-2305. DOI: [10.1016/j.energy.2007.07.009](https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.07.009).
- [58] 陈利平. 电力生产安全事故统计与分析 [J]. *电力设备管理*, 2021(4): 106-108.
- CHEN L P. Statistics and analysis of safety accidents in electric power production [J]. *Electric Power Equipment Management*, 2021(4): 106-108.
- [59] 刘文毅, 杨勇平, 张昔国, 等. 压缩空气蓄能(CAES)电站及其现状和发展趋势 [J]. *山东电力技术*, 2007(2): 10-14. DOI: [10.3969/j.issn.1007-9904.2007.02.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9904.2007.02.003).
- LIU W Y, YANG Y P, ZHANG X G, et al. Present situation and development trend of compressed air energy storage (CAES) power plant [J]. *Shandong Electric Power*, 2007(2): 10-14. DOI: [10.3969/j.issn.1007-9904.2007.02.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9904.2007.02.003).
- [60] 张雨檬. 可逆固体氧化物燃料电池-储能系统概念设计与应用场景区别 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.000032](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.000032).
- ZHANG Y M. Conceptual design and applications identification of reversible solid oxide cell stack based energy storage system [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.000032](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.000032).
- [61] 朱冕, 赵加佩, 李欣珂, 等. 可逆固体氧化物燃料电池(rSOFC) 技术的研究进展 [J]. *电源技术*, 2020, 44(3): 469-474. DOI: [10.3969/j.issn.1002-087X.2020.03.040](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-087X.2020.03.040).
- ZHU M, ZHAO J P, LI X K, et al. Research status and prospects of reversible solid oxide fuel cell (rSOFC) technology [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2020, 44(3): 469-474. DOI: [10.3969/j.issn.1002-087X.2020.03.040](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-087X.2020.03.040).
- [62] KUSKO A, DEDAD J. Stored energy short-term and long-term energy storage methods [J]. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2007, 13(4): 66-72. DOI: [10.1109/MIA.2007.4283511](https://doi.org/10.1109/MIA.2007.4283511).
- [63] NAGAYA S, HIRANO N, ADACHI E, et al. Development of cost-reduction SMES for load fluctuation compensation and frequency control [J]. *Journal of the Cryogenic Society of Japan*, 2005, 40(5): 159-166. DOI: [10.2221/jcsj.40.159](https://doi.org/10.2221/jcsj.40.159).
- [64] ZHU J H, CHEN P P, GU C H, et al. Techno-economic analysis of MJ class high temperature Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) systems applied to renewable power grids [J]. *Global Energy Interconnection*, 2018, 1(2): 172-178. DOI: [10.14171/j.2096-5117.gei.2018.02.011](https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.02.011).
- [65] BECK F, RÜETSCHI P. Rechargeable batteries with aqueous electrolytes [J]. *Electrochimica Acta*, 2000, 45: 2467-2482. DOI: [10.1016/S0013-4686\(00\)00344-3](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(00)00344-3).

- [66] LUO X, WANG J H, DOONER M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation [J]. *Applied Energy*, 2015, 137: 511-536. DOI: [10.1016/j.apenergy.2014.09.081](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081).
- [67] 姚少勇, 王宝良, 李英. 锅炉等离子点火与气化微油点火技术的安全性分析 [J]. *河北电力技术*, 2008(4): 28-30. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9898.2008.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9898.2008.04.011).
YAO S Y, WANG B L, LI Y. Safety analysis on plasma and gasification micro-diesel ignition technology of the boiler [J]. *Hebei Electric Power*, 2008(4): 28-30. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9898.2008.04.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9898.2008.04.011).
- [68] 王鑫明, 王庆, 寻志伟, 等. 应用富氧燃烧技术提高火电机组调峰能力 [J]. *上海电气技术*, 2019, 12(2): 19-22. DOI: [10.3969/j.issn.1674-540X.2019.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-540X.2019.02.006).
WANG X M, WANG Q, XUN Z W, et al. Application of oxygen-enriched combustion technology for enhancement of peaking capability of thermal power sets [J]. *Journal of Shanghai Electric Technology*, 2019, 12(2): 19-22. DOI: [10.3969/j.issn.1674-540X.2019.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-540X.2019.02.006).
- [69] 罗聪. 深度调峰工况下锅炉燃烧优化控制 [D]. 北京: 华北电力大学, 2020. DOI: [10.27139/d.cnki.ghbdu.2020.000491](https://doi.org/10.27139/d.cnki.ghbdu.2020.000491).
LUO C. Optimal control of boiler combustion under deep peak load regulation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020. DOI: [10.27139/d.cnki.ghbdu.2020.000491](https://doi.org/10.27139/d.cnki.ghbdu.2020.000491).
- [70] WU X, SHEN J, LI Y G, et al. Fuzzy modeling and stable model predictive tracking control of large-scale power plants [J]. *Journal of Process Control*, 2014, 24(10): 1609-1626. DOI: [10.1016/j.jprocont.2014.08.007](https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2014.08.007).
- [71] 江忆. 光储直柔——助力实现零碳电力的新型建筑配电系统 [J]. *暖通空调*, 2021, 51(10): 1-12.
JIANG Y. PSDF (Photovoltaic, Storage, DC, Flexible)-A new type of building power distribution system for zero carbon power system [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2021, 51(10): 1-12.
- [72] 李永刚, 韩冰. 低压直流配电系统保护研究综述 [J]. *华北电力大学学报*, 2020, 47(1): 17-23+41. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2691.2020.01.03](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2691.2020.01.03).
LI Y G, HAN B. Review on protection of LVDC distribution system research [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2020, 47(1): 17-23+41. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2691.2020.01.03](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2691.2020.01.03).
- [73] 马钊, 安婷, 尚宇炜. 国内外配电前沿技术动态及发展 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 33(6): 1552-1567+1768. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2016.06.011](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2016.06.011).
MA Z, AN T, SHANG Y W. State of the art and development trends of power distribution technologies [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 33(6): 1552-1567+1768. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2016.06.011](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2016.06.011).
- [74] 杜彦缤, 杜兆文, 吕恒琪. 直流配电系统可行性研究 [J]. *电子技术与软件工程*, 2015(9): 119.
DU Y B, DU Z W, LÜ H Q. Feasibility study of DC power distribution system [J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2015(9): 119.

作者简介:



李建山

李建山 (第一作者)

1974-, 男, 河北廊坊人, 学士, 副高, 主要从事火电厂技术管理工作(e-mail)lijianshan25@126.com。



王森

王森 (通信作者)

1988-, 女, 北京人, 工学博士, 副高, 主要从事电厂换热设备传热传质机理研究及参数优化设计工作(e-mail)wangmiao1050@163.com。

(编辑 叶筠英)