

# 大型燃煤锅炉深度调峰关键问题探讨

张少强<sup>1</sup>, 陈露<sup>2</sup>, 刘子易<sup>2</sup>, 张鹏<sup>2</sup>, 王智博<sup>2</sup>, 宋民航<sup>3,✉</sup>

(1. 新疆天池能源有限责任公司, 新疆昌吉 831100; 2. 河北师范大学中燃工学院, 河北石家庄 050024;

3. 中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190)

**摘要:** [目的] 随着我国“双碳”目标的制定及构建清洁低碳、安全高效现代能源体系的迫切需求, 可再生能源在电网中的发电比例将逐年提高。但因其自身的随机性及间歇性特点, 可再生能源对电网调峰的贡献极其有限。为了提高对可再生能源的消纳能力, 具有良好调峰潜力的煤电机组正担负着电网中基础调节能源的重要角色。其中, 燃煤锅炉作为煤电机组的前端核心系统, 其低(变)负荷运行性能直接影响着煤电机组的整体调峰能力。[方法] 为此, 文章从燃煤锅炉低(变)负荷运行过程中的燃烧稳定性、运行可靠性、环保性及经济性需求出发, 首先总结了大型燃煤锅炉深度调峰所面临的关键问题, 并分别从低(变)负荷运行下的燃烧稳定性、机组运行环保性和经济性、主要辅机适应性和安全性及热电机组的热电解耦四个方面, 对目前的主要研究内容及进展进行分析总结。[结果] 在此基础上, 提出对燃煤锅炉调峰能力深度提升技术的研究及发展展望。[结论] 通过文章分析得出, 为了发挥燃煤锅炉在提升电网调峰能力方面的先发优势, 应从燃煤锅炉的整体系统出发, 综合开展主要辅机运行状态监测及评估、燃烧性能关键影响因素研究、过程智能优化控制及预测, 从而提升燃煤锅炉在低负荷运行、快速启停及升降负荷过程中的综合性能。

**关键词:** 电网灵活调峰; 燃煤锅炉; 燃烧稳燃性; 运行可靠性; 环保性及经济性

中图分类号: TK16; TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)03-0016-13

开放科学(资源服务)二维码:



## Discussion on Key Problems of Depth Peak Adjustment for Large Coal-Fired Boilers

ZHANG Shaoqiang<sup>1</sup>, CHEN Lu<sup>2</sup>, LIU Ziyi<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>, WANG Zhibo<sup>2</sup>, SONG Minhang<sup>3,✉</sup>

(1. Xinjiang Tianchi Energy Co., Ltd., Changji 831100, Xinjiang, China; 2. College of Zhongran, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, Hebei, China; 3. State Key Laboratory of Multiphase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** [Introduction] With the establishment of China's "carbon peak and neutrality" goal and the urgent need to build a clean, low-carbon, safe, and efficient modern energy system, the proportion of renewable energy in the power grid will increase year by year. However, due to its randomness and intermittent characteristics, the contribution of renewable energy to power peak shaving is extremely limited. To improve its ability to absorb renewable energy, coal-fired power units with good peak-shaving potential are playing an important role in the basic regulation energy. Among them, the coal-fired boiler is the front-end core system of the coal-fired power unit, and its low (variable) load operation performance directly affects the overall peak-shaving capacity of the coal-fired power unit. [Method] Therefore, starting from the combustion stability, operating reliability, environmental protection, and economic requirements during low (variable) load operation of coal-fired boilers, this paper analyzed and summarized the current main research content and progress from four aspects, including combustion stability under low (variable) load operation, environmental protection and economy, adaptability and safety of main auxiliary equipment, and thermo-electrolytic coupling of the thermal power unit. [Result] On this basis, the research and development prospects of the technologies for deepening the peak shaving capacity of coal-fired boilers are put forward. [Conclusion] Through the analysis, it is concluded that to give full play to the first-mover advantage of coal-fired boilers in improving

收稿日期: 2021-12-29 修回日期: 2022-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“变负荷运行下旋流煤粉燃烧稳定性及NO<sub>x</sub>生成特性研究”(52006120)

the power peak-shaving capacity, we should focus on the overall system of coal-fired boilers, comprehensively carry out monitoring and evaluation of the operation status of main auxiliary machinery, research on key influencing factors of combustion performance, conduct process intelligent optimization control and prediction. Thereby improving the overall performance of coal-fired boilers in low-load operation, rapid start-stop, and load-lifting.

**Key words:** flexible peak shaving of power grid; coal-fired boiler; combustion stability; operational reliability; environmental protection and economy

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/>).

## 0 引言

由于石油、煤炭等化石能源的日趋枯竭以及环境问题的日益突出,国家中长期科技发展规划纲要明确指出构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系。国家能源结构调整及智能电网的飞速发展使得包括风电、光伏、水电等在内的可再生能源发电比例逐年提高。“十四五”期间,将持续推动可再生能源作为能源消费增量主体,为实现2030年非化石能源消费占比20%的战略目标奠定基础<sup>[1]</sup>。可再生能源发电量预测如图1所示。如按照当前水电、风电、光伏和生物质能发电装机容量的发展规模增长预测,到2025年可再生能源理论发电量可达到4亿kWh左右<sup>[2]</sup>。在该形势下,火电正面临着前所未有的困境。

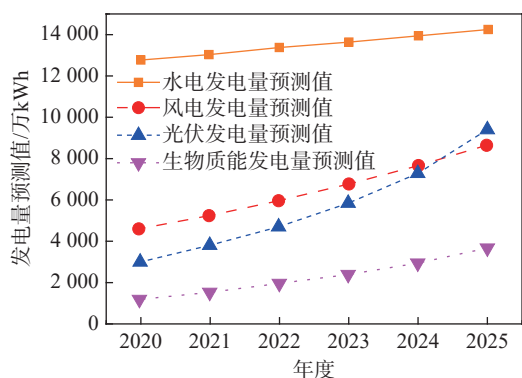


图1 可再生能源发电量预测

Fig. 1 Renewable energy generation forecast

可再生能源的大规模接入使电网中各类电力的数量、比例和时空分布等发生了较大变化,对调峰电源的需求也逐渐升高,但各类水电机组、太阳能发电、抽水蓄能机组等受环境及自然条件影响,调峰能力有限,显现出快速高效调峰资源不足的问题<sup>[3]</sup>。因此,调峰困难已成为目前限制风电等可再生能源并网发

电的主要原因之一,造成了弃风、弃光等能源浪费现象<sup>[4]</sup>。

在燃煤机组产能过剩和电网对可再生能源大量吸纳的双重压力下,煤电机组自身特点及良好的调峰性能,使其成为了电网灵活调峰的基础调节能源,承担着电网调峰的艰巨任务。目前,受电网负荷峰谷差较大的影响,各燃煤机组降出力及超基本调峰范围运行已成为常态,形成了深度调峰的运行方式。深度调峰能力取决于机组的最小负荷及最大负荷之比,以及变负荷运行下的快速适应能力,并直接决定着电网调峰容量的大小<sup>[5]</sup>。

由于中国电力供需仍呈现出总体富余、部分地区明显过剩的格局,在电力消费增速换挡及煤电机组投产过多的情况下,煤电机组正承担着高速增长的新能源发电深度调峰和备用电源的功能,火电机组尤其是煤电机组在未来相当长一段时间内将持续低负荷运行。因此,积极推动燃煤机组灵活性改造,充分挖掘火电机组深度调峰潜力,对缓解我国当前调峰压力,接纳更多可再生能源,促进能源结构转型具有不可替代的作用<sup>[4]</sup>。《关于提升电力系统调节能力的指导意见》明确提出“开展火电机组灵活性改造,提升电力系统调节能力”以及“优先提升30万千瓦级煤电机组的深度调峰能力。改造后的纯凝机组最小技术出力达到30%~40%额定容量,热电联产机组最小技术出力达到40%~50%额定容量;部分电厂达到国际先进水平,机组不投油稳燃时纯凝工况最小技术出力达到20%~30%”。

挖掘燃煤机组调峰性能是提升电网调峰能力的必由之路<sup>[6-7]</sup>。针对大型燃煤锅炉深度调峰关键问题,需要在提升锅炉低负荷稳燃、快速启停和快速升降负荷的同时<sup>[8]</sup>,兼顾低负荷运行中可能出现的NO<sub>x</sub>

生成量偏高、炉温不均、主再热汽温偏低、壁温超温、煤粉燃尽差等问题,从而实现灵活调峰过程中的稳定、清洁及高效燃烧。

本文在总结已有的针对煤电机组燃烧侧的深度调峰技术及研究成果基础上,从燃煤锅炉低(变)负荷过程中的燃烧稳定性、运行可靠性、环保性及经济性需求出发,首先总结了大型燃煤锅炉深度调峰所面临的关键问题,并分别从低(变)负荷运行下燃烧稳定性、环保性和经济性、主要辅机适应性和安全性及热机组的热电解耦四个方面,对目前主要技术内容及进展进行分析总结,在此基础上,对燃煤锅炉深度调峰技术进行研究及发展展望,为促进大型燃煤锅炉深度调峰提供一定理论支撑。

## 1 燃煤锅炉深度调峰关键问题

### 1.1 燃烧稳定性

燃煤锅炉的运行安全性是火电厂所关心的首要问题,而燃烧稳定性是运行安全性的重要体现。其中,煤粉燃烧器是决定着锅炉稳燃能力的关键核心设备。常用的煤粉燃烧方式包括直流燃烧及旋流燃烧两种<sup>[9-11]</sup>,经过多年技术升级,在满负荷运行工况下能够维持良好的煤粉着火和稳定燃烧,但在低负荷和变负荷运行时,由于整体燃烧特性的改变,低(变)负荷运行特性大幅偏离满负荷运行,从而引起着火推迟、燃烧不稳定、火焰检测信号弱、尾部烟道二次燃烧等一系列影响锅炉运行安全性的问题,严重时将造成锅炉熄火等重大事故。为了应对燃煤锅炉调峰过程中的燃烧不稳定问题,常采用投油助燃的辅助稳燃措施<sup>[12-13]</sup>,但从相关政策来看,投油助燃仅能作为特殊情况下避免锅炉熄火等非停事故的一项紧急手段,开展火电机组深度调峰仍然需要从燃烧设备方面着手<sup>[14]</sup>。以上问题严重影响着燃煤锅炉灵活调峰过程中的运行安全性及可靠性<sup>[15]</sup>。

### 1.2 环保性及经济性

在低(变)负荷运行下,燃煤机组为了满足燃烧稳定性等需求,通常在较大煤粉燃烧化学当量比下运行,使 $\text{NO}_x$ 排放浓度不降反升。同时,为了维持稳燃进行投油的方式也将产生煤油混烧条件下的 $\text{NO}_x$

和 $\text{SO}_x$ 生成量增多等问题<sup>[16]</sup>。以上问题使机组灵活调峰过程中面临着更加严峻的污染物减排需求,需要开展全负荷脱硫脱硝相关研究工作。同时,这部分与锅炉负荷不匹配的污染物排放也将增加调峰过程中的经济成本。

此外,由于深度调峰下锅炉运行工况偏离设计工况较大,锅炉系统运行效率远低于设计效率。并且,随着机组负荷率的下降,风机、水泵等辅机由于自身容量较大,低负荷下功率又不易调节,机组供电煤耗率大幅度上升。测试表明,深度调峰将提高综合厂用电率及发电煤耗,直接影响着机组的经济性运行。因此,在调峰机组低负荷运行时,还需要注重经济性分析及提升。

### 1.3 主要辅机间的适应性

燃煤锅炉调峰过程中带来的主要辅机运行特性的改变,也是需要关注的重点问题。燃煤发电机组在低负荷下长时间运行时,各辅机设备(包括送引风机、给水泵、磨煤机等)均偏离于设计参数运行,将直接影响到辅机系统的运行状态和做功效率。如对风机而言,可能引发风机的抢风和失速,进而导致喘振、跳闸等一系列安全问题。因此,应基于各负荷段下的主要辅机运行特性,加强对设备运行状态的监测、分析和管理工作,提高辅机设备的可靠性,开展自身运行特性及辅机间运行协同性的系统研究,从而保证深度调峰运行下,包括磨煤机、三大风机、脱硝、脱硫、除尘设备、锅炉本体受热面、汽水系统等在内的锅炉本体及主要辅机设备的稳定运行,提高燃煤锅炉主要辅机间的适应性及安全性。

### 1.4 热机组的热电解耦问题

在燃煤机组整体调峰能力不足情况下,处于供暖季的热电机组无疑又限制了燃煤机组的调峰能力。因此,需解耦其“以热定电”的约束,开展针对热机组的热电解耦技术研究开发及示范应用,从而缓解热机组深度调峰与供暖季供热之间的矛盾。在热电解耦技术中,核心是就近吸收供热产生的电负荷,或通过电加热及电能替代等方式将电能直接转化为热能或化学能储存起来,待需要时送出。目前代表性的技术有储热罐及热泵供热、储热电锅炉、

汽轮机旁路补偿供热、切除低压缸供热等。然而, 尽管以上热电解耦技术已不同程度上应用于供热调节及灵活调峰上, 但仍存在部分问题需要完善, 主要体现在, 已有研究多集中于对热电解耦前后促进新能源消纳效果的对比分析, 对改造前后机组运行所带来的经济效益变化还有待进一步深入分析<sup>[17]</sup>。同时, 采用不同类型技术对热电联产机组进行热电解耦所带来的电源侧灵活性提升规模, 仍有待系统评估。

基于以上问题, 图 2 给出了燃煤锅炉深度调峰下的关键问题及对应的重点关注内容。下文将结合图中所述内容开展详细分析。

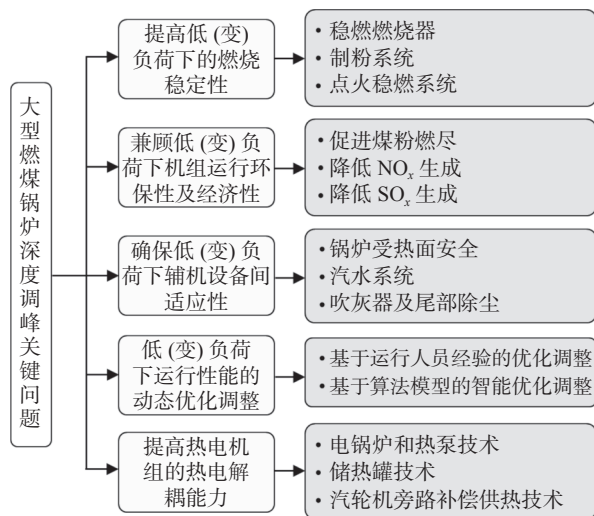


图 2 燃煤锅炉深度调峰关键问题

Fig. 2 Key issues of depth peak adjustment of coal-fired boiler

## 2 燃煤锅炉深度调峰研究现状

### 2.1 燃煤锅炉的燃烧稳定性

#### 1) 稳燃燃烧器

在挖掘煤粉燃烧器的低负荷稳燃性能方面, 目前形成了几类主流的技术措施, 包括强化煤粉高效浓缩及高温烟气回流<sup>[18-19]</sup>、优化燃烧器结构及运行参数<sup>[20]</sup>、构建各负荷段下接近的燃烧特性<sup>[21]</sup>, 以及研究低(变)负荷下的煤粉燃烧机理<sup>[21]</sup>等。图 3 给出了几种典型电站锅炉旋流燃烧器的结构示意图。针对采用外层淡煤粉气流包裹中心浓煤粉气流的中心给

粉旋流燃烧器(如图 3(a)所示), 在燃用难燃低挥发分煤种时, 降低负荷将推迟煤粉气流的着火, 但仍能在 40% 负荷附近维持稳定燃烧, 并伴随着较小的炉内负压波动<sup>[22]</sup>。在强化高温回流区促进稳燃方面, 通过设置钝体及利用高速旋转气流可构建低压区卷吸高温烟气形成回流。具体可根据实际需求, 构建单一高温回流区, 或以上几种方式的多级组合回流区, 用以强化高温烟气回流的稳燃效果。此外, 针对煤粉燃烧器的运行参数优化也是一种常见的促进稳燃措施<sup>[21]</sup>。

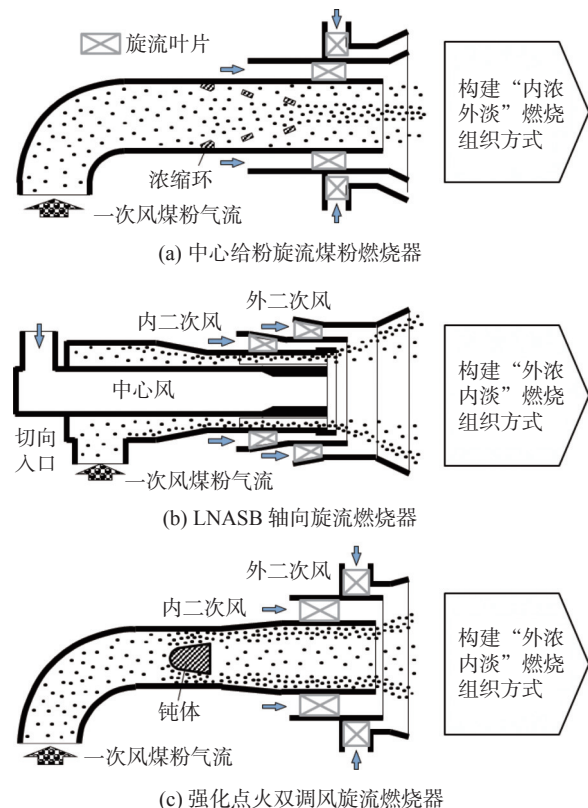


图 3 典型电站锅炉旋流煤粉燃烧器类型

Fig. 3 Typical swirl pulverized-coal burner for utility boiler

以上研究工作从燃煤锅炉的源头开展燃烧器稳燃能力的提升, 对提高燃煤锅炉灵活调峰能力具有先发优势。

#### 2) 制粉系统

锅炉低负荷运行时对于制粉系统, 尤其是煤粉细度及均匀性指数的要求更高, 构建适应于不同负荷需求的煤粉细度及均匀性, 有利于促进煤粉及时着火稳燃、降低飞灰可燃物含量、增强煤种适应性,

从而增强机组的调峰能力。因此,需要根据锅炉不同负荷需求,通过对磨煤机及制粉系统的特性研究及优化改造,实现连续、均匀、有调节地供应质量合格的煤粉。

在提高煤粉浓度促进稳燃方面,通过对各根一次风管风速的调平及适当降低一次风速提高煤粉浓度,可以有效提高锅炉的低负荷稳燃能力<sup>[14]</sup>。但实际过程中,为了实现对煤粉的气力输送,决定了一次风速不能低于煤粉的临界输送速度,因此通过该种方式对煤粉浓度的提升幅度有限。通过调整动态分离器转速,可以对煤粉细度及均匀性进行有效调节,是促进低负荷下不同煤种及时着火稳燃的一项重要措施<sup>[23]</sup>。结合燃用烟煤的低负荷稳燃试验表明,通过增大动态分离器转速降低煤粉细度( $R_{90}$ 由23%降至10%),能够降低锅炉最低稳燃负荷至30%<sup>[24]</sup>。通过增加350 MW机组的磨煤机运行数量(2台增加至3台),可以促进锅炉30%负荷下的稳定运行,有效避免了由于燃烧不稳定造成的非停事故<sup>[25]</sup>。但无论是增加动态分离器转速还是增加磨煤机运行数量,都将使设备用电量增加,提高了机组低负荷运行能耗。

### 3) 点火稳燃系统

为了缓解常规投油稳燃所产生的高额费用问题,研究人员设计开发了等离子体点火稳燃<sup>[26-27]</sup>、小油枪微油助燃<sup>[28-29]</sup>及电加热点火稳燃等方式<sup>[30-31]</sup>。等离子体稳燃的主要特点是采用等离子体枪(如图4(a)所示),通过高温电弧的瞬间放热,促进煤粉快速着火及稳燃,相对来说,安全、环保,运行费用较低,缺点是初期投资费用较高、电极寿命较短且煤质适应性较差,常用于燃烧高挥发分烟煤的锅炉。微油稳燃是使用少量油率先点燃浓煤粉气流,而后通过自身的燃烧放热加热并点燃与其相邻的煤粉气流,如将小油枪穿过旋风筒煤粉浓缩器并伸入浓煤粉气流的中心,用以强化煤粉着火并引燃周围煤粉气流(如图4(b)所示)。该方法具有节油及煤种适应性强的优势,但长期运行中仍然会对尾部电除尘及脱硫设备产生一定的负面效果。中频电加热点火稳燃是利用中频电加热技术实现煤粉气流的快速升温着火<sup>[30-31]</sup>。

目前,该技术已应用于实验室规模的直流煤粉燃烧器(如图4(c)所示),实验结果表明可以在燃烧神华煤条件下实现13.6%~100%宽负荷下的稳定燃烧,该技术有待进一步在实际锅炉进行应用验证<sup>[32]</sup>。

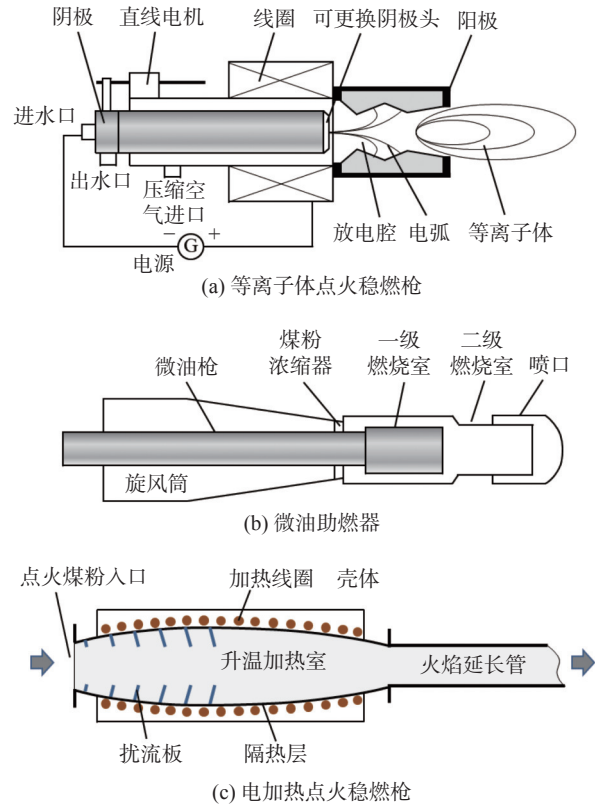


图4 典型点火稳燃器类型

Fig. 4 Typical ignition stabilizers

## 2.2 燃煤锅炉运行环保性及经济性

### 1) 降低污染物排放

当前,针对调峰过程中的污染物排放问题,主要聚焦于 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_x$ 减排方面。在锅炉低负荷运行下,由于风煤比增大,使锅炉运行氧量偏高,容易造成 $\text{NO}_x$ 生成量偏高的问题<sup>[33]</sup>。通过对比前后墙对冲锅炉和四角切圆锅炉的运行结果得到,随着锅炉负荷的降低,过量空气系数增加,燃料型 $\text{NO}_x$ 的增加量要远高于热力型 $\text{NO}_x$ 的减少量,使 $\text{NO}_x$ 生成量总体上与锅炉负荷变化趋势相反<sup>[34]</sup>。目前,聚焦于深度调峰对脱硫影响的研究报道较少。在常规低负荷运行情况下一般不采用投油稳燃措施,对脱硫的影响主要体现在由于过量空气系数增大,使 $\text{SO}_3$ 生成量有所增加,将一定程度上加剧对尾部烟道的腐蚀效果。

但在极低负荷运行时,深度调峰机组还需采取投油稳燃措施。研究表明未完全燃尽的燃油及其产物将与脱硫浆液产生一系列物化反应,严重时将导致脱硫浆液“中毒”,影响脱硫系统的正常运行并降低脱硫效率<sup>[35]</sup>。

污染物的减排路径可分为两方面,一方面为抑制炉内的生成,另一方面为生成后的尾部脱除。针对炉内抑制 $\text{NO}_x$ 生成方面,常采用具有强稳燃能力的低氮燃烧器、优化炉内分级配风、烟气再循环等技术手段控制炉内的 $\text{NO}_x$ 生成。在尾部脱硝方面,面临的主要问题是低负荷下SCR入口烟温常低于催化剂的正常工作温度窗口(通常为 $300\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$ ),容易造成SCR反应器无法正常投入,影响 $\text{NO}_x$ 的达标排放。为缓解这一问题,可结合对分级省煤器、省煤器烟气旁路、省煤器水旁路、热水再循环等的改造以提高SCR入口烟温<sup>[36]</sup>。研究表明,通过采用锅炉启动技术和省煤器分级技术组合方案,可实现600 MW亚临界机组的超低负荷脱硝<sup>[37]</sup>。此外,对喷氨管路进行优化布置也是降低 $\text{NO}_x$ 排放的一项重要措施。在降低 $\text{SO}_x$ 排放及缓解尾部脱硫设备负担方面,需要在低负荷运行下避免投油稳燃的运行方式,采用新型稳燃技术及优化尾部脱硫工艺来降低 $\text{SO}_x$ 排放。除了 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_x$ 污染物外,颗粒物及重金属减排也是需要关注的重要方面,需要在未来进行持续深入的研究。

## 2) 提高机组运行经济性

一般情况下,采用中储式制粉系统的机组,80%~90%额定负荷以上为经济负荷区,此时锅炉效率最高,而配直吹式制粉系统的机组,经济负荷区可能略高于满负荷时<sup>[38]</sup>。而随着负荷的降低,锅炉效率降低,机组运行经济性逐渐变差。以某330 MW机组低负荷运行为例,由于偏离额定工况,会引起经济性的下降,当负荷降到60%时,装置效率相对降低1.3%,煤耗增加约 $10\text{ g/kWh}$ ,并随着负荷的降低,运行煤耗将进一步增加<sup>[38]</sup>。因此,需要从包括提高煤粉燃尽率、降低主要辅机厂用电率等在内的多方面整体考虑。

炉内氧量是影响煤粉燃尽程度的重要因素:一

方面,若燃烧氧量低,虽有利于着火稳燃,但燃烧后期风粉混合性差,将增加燃烧不完全损失;另一方面,若提高氧量,将使炉温降低影响燃烧稳定性,并增加排烟损失。为缓解以上矛盾,在保证挥发分完全燃烧及煤粉气力输送的前提下,可适当减小一次风量(风压)及降低煤粉细度、深化炉内空气分级燃烧、提高燃烧器入口风粉温度等,从而提高煤粉燃尽率。针对某机组65% MCR运行下,减小一次风压由100 Mbar至75 Mbar,能够降低飞灰可燃物含量至2.7%,锅炉效率达到87.71%<sup>[39]</sup>。在发电厂厂用电量方面,厂用电量约占机组容量的5%,其中主要辅机设备消耗的电能约占厂用电的70%~80%,因此,优化组合主要辅机运行方式,充分挖掘低负荷运行过程时辅机的节能潜力,是非常必要的<sup>[40]</sup>。具体可通过减少磨煤机投运台数、风机单侧运行、降低风机能耗、受热面定期吹灰等方面降低厂用电率<sup>[38]</sup>。其中,采用合理的轮换方式对受热面定期吹灰,不仅可以提高受热面吸热能力,还可以减少烟道阻力及风机电耗、降低尾部空预器堵灰可能性<sup>[39]</sup>。此外,采用汽轮机滑压运行<sup>[41]</sup>,降低机组调峰过程中污染物生成及相应处理费用,以及进行热电解耦<sup>[42]</sup>,也是提高机组运行经济性的重要措施。

## 2.3 燃煤锅炉主要辅机协同配合

### 1) 锅炉受热面

在燃煤锅炉深度调峰运行时,负荷的变化将加剧壁温波动,加上给水流量偏低,使锅炉单根水冷壁管进水均匀性下降及分配不均,容易造成局部过热现象,增加了水冷壁爆管的可能性。同时,由于产汽量小,也将出现工质偏差增大的问题,易产生氧化皮并加速材料老化。为缓解该问题,可通过壁温核算、增加壁温测点、优化报警值、升级受热面等措施,更加有效的监控水冷壁超温点,并有针对性地进行燃烧区域调整和受热面吹灰,从而增强受热面运行安全。

### 2) 汽水系统

在快速升降负荷过程中,由于压力的大幅变化,将使汽包工质汽化现象加剧,水位波动幅度增加,难以控制。通过对汽包内汽水工质循环过程的简化分

析,建立了汽包水位动态模型,采用该模型计算得到燃料量与汽包压力变化是引起汽包“虚假水位”、波动剧烈的主要原因,且在超低负荷下该问题更为严重<sup>[43]</sup>。可以通过给水控制系统调节给水量,使其适应不同负荷下的蒸发量变化,维持汽包水位在合理的范围内,保证安全运行。针对水循环安全,基于350 MW 机组亚临界自然循环锅炉建立的水冷壁流量和壁温计算模型,计算得到深度调峰工况的水动力结果,表明深度调峰 25% THA 负荷下的循环倍率均大于界限循环倍率,可以满足锅炉安全运行,且流量和循环流速较为合理,四面墙各墙回路流量分配均匀,金属温度能够满足材料强度和抗氧化要求,但应确保炉内燃烧稳定、火焰充满度好且热负荷分布均匀,以避免个别受热较弱的上升管发生停滞爆管<sup>[44]</sup>。

### 3) 吹灰器及尾部除尘

基于低(变)负荷下的受热面及主要辅机积灰形成机制,并结合实际燃煤锅炉运行情况,评估制定锅炉各负荷段下的吹灰策略,包括吹灰频率、压力、吹灰器布置位置等工作运行参数。通过监控烟温、壁温、汽温、负压等锅炉运行参数,以及优化吹灰器布置及数量,确保吹灰可靠性及有效性,最大限度上降低吹灰扰动和风险,避免塌灰等问题。

燃煤机组尾部除尘技术主要有低低温静电除尘技术、湿式电除尘技术、电袋负荷除尘技术等,其中,低低温静电除尘技术将受深度调峰过程的影响较大,这是由于深度调峰时的烟气温度降低,使烟气中飞灰比电阻降低,有利于捕捉飞灰颗粒及提高除尘效率,但负荷的降低使得低温省煤器出口温度更低,酸性腐蚀性气体物质易粘结于除尘设备上,影响设备正常运行<sup>[35]</sup>。因此,需要根据实际运行需求,开展除尘设备选型及优化改造。

## 2.4 燃煤锅炉运行性能优化调整

### 1) 基于运行人员经验的优化调整

针对燃煤锅炉调峰性能进行优化调整是电厂运行人员采用的常规措施<sup>[45]</sup>。具体是通过机组运行数据分析、现场实验测试等方式,结合设备改造等技术升级,对机组性能进行优化提升,挖掘机组的调峰能力<sup>[14]</sup>。表 1 给出了几类常用的燃煤锅炉优化调整措施。

表 1 燃煤锅炉优化调整常用措施

Tab. 1 Commonly used optimization and adjustment measures of coal-fired boilers

类型	项目
燃料方面	掺烧多煤种
	掺烧天然气等
制粉系统	降低煤粉细度及提高煤粉均匀性
	优化一次风速及风温
煤粉燃烧器	一次风调平及优化磨煤机运行
	优化燃烧器配风特性
炉内配风	优化燃烧器运行数量及位置
	优化炉膛配风位置及风量
其他	优化气流入射角度
	优化炉内高温区分布、控制减温水量、优化出口烟温、辅机启停优化、煤水比调节等

对于采用燃烧器对冲布置的锅炉而言,低负荷运行下容易出现炉内火焰不对称分布现象,造成炉膛出口烟温偏差及热负荷分布不均等问题,通过优化燃烧器运行位置及数量,可有效缓解该问题<sup>[46]</sup>。针对应用某种旋流煤粉燃烧器锅炉的研究表明,增大旋流叶片角度能够强化回流区卷吸高温烟气的效果,使燃烧器出口区域温度达到 1 200 °C 以上,火检信号稳定,炉内负压波动降低( $\pm 100$  Pa 内),有利于提升机组的低负荷稳燃性能<sup>[47]</sup>。在挖掘机组调峰性能方面,结合减小一次风速、增大旋流强度、提高二次风速及降低煤粉细度,能够实现 30% 负荷下的稳定燃烧<sup>[48]</sup>。此外,燃煤掺烧比例优化、制粉系统优化、炉内氧量调整、磨煤机运行方式调整、尾部烟气挡板开度调整、辅机启停优化、煤水比调节也是优化机组深度调峰运行的常见措施<sup>[49]</sup>。以上调整中的一个重要核心内容是对风煤比的调节,适当的风煤比,不仅可以促进煤粉燃尽提高锅炉效率,还可以降低  $\text{NO}_x$  生成,以及根据负荷情况,调整炉内火焰中心位置、着火点远近等。

以上所述的优化调整,其弊端主要体现在两方面,一方面因受限于实际锅炉的巨大空间尺寸,只能进行宏观调节,另一方面该类优化严重依赖于运行人员的经验,为了避免非停事故发生,常采用较保守的优化调整策略,产生运行能耗增加等问题。

### 2) 基于算法模型的智能优化调整

随着信息技术的飞速发展, 燃煤锅炉逐渐走向数字化和智能化, 成为火电机组灵活调峰发展的一个重要趋势。张振宇等<sup>[50]</sup>针对一台 330 MW 机组, 综合开展现场设备治理、优化负荷指令前馈函数和最小流量再循环阀控制逻辑, 对机组 AGC 及协调控制系统进行分析优化, 在不投油助燃情况下, 实现了 30% 额定负荷的深度调峰, 并能够适应负荷的频繁、快速、深度调整需求。鲍铁军等<sup>[51]</sup>在机组燃烧优化与机炉协调控制方面, 采用先进控制技术建立数学模型, 对 440 t/h 的 CFB 锅炉进行燃烧参数优化, 实现了深度调峰时的 CCS 控制, 使锅炉煤耗降低 1%, 同时减轻了运行人员劳动强度。王立等<sup>[52]</sup>通过在控制器中加入入口烟温低于 300 °C 时闭锁减锅炉负荷的逻辑, 并结合脱硝系统入口 NO<sub>x</sub> 排放浓度调节, 用于实现最优负荷运行。

图 5 给出了一种根据核函数及寻优得到的模型参数结果建立的 NO<sub>x</sub> 排放量预测模型, 能够对低(变)负荷运行下的 NO<sub>x</sub> 排放浓度进行预测, 从而有针对性地进行优化调控<sup>[53]</sup>。目前基于算法模型的智能优化, 往往多基于数据和算法模型, 能够一定程度上预测并指导机组运行, 但由于缺乏炉内多相流动、燃烧及传热机理的理论模型支撑, 实际应用过程中存在预测精度不足的问题, 而基于机理模型的智能优化将有助于提高优化调控精度及可靠性。因此, 应以

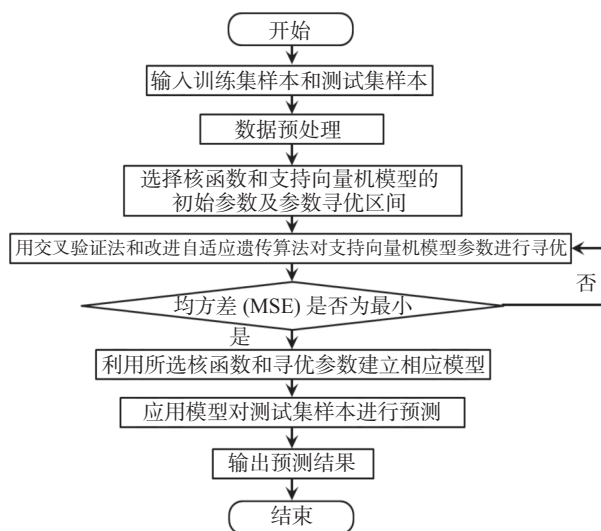


图 5 参数优化和模型建立流程图

Fig. 5 Flow chart of parameter optimization and model establishment

相关机理模型为基础, 耦合人工智能优化方法来指导机组的调峰运行, 从而提高智能优化的准确度。目前, 基于机理模型的智能优化已成为能源及控制交叉领域的研究热点, 但相关研究及报道较少<sup>[54]</sup>, 有待后续的持续深入研究。

## 2.5 热电联产机组的热电解耦

### 1) 储热罐技术

储热罐技术是利用水或者熔盐的显热将热量存储到储热罐内。对于供热量大的热电机组, 可考虑安装大型储热装置, 当热电机组降低出力时, 输出热量补齐热力缺额, 当热电机组增加出力时, 储存富裕热量, 实现“热电解耦”运行。图 6 给出了一种典型储热罐进行调峰的布置工艺图。在该技术中, 储热的供热功率、储热的热容量、机组供热能力与热负荷的比值是影响其调峰幅度的重要因素<sup>[42]</sup>。目前, 储热罐技术已在国内外一些企业得到了成功应用, 如丹麦的 Fyn 电站, 配置的热水箱可存储 13 500 GJ 的热能, 占电站满负荷供热功率的 70% 以上。

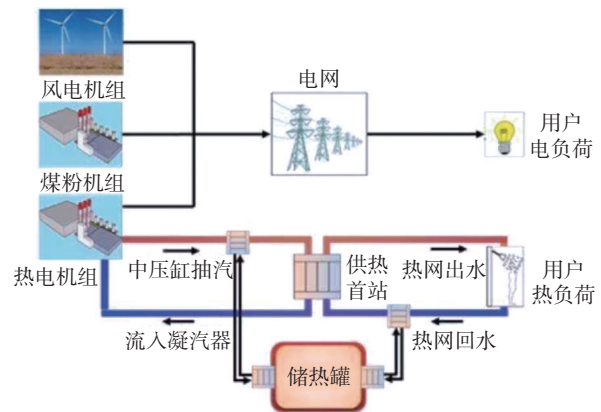


图 6 采用储热罐进行调峰的布置工艺图

Fig. 6 Process drawing of heat storage tank system

此外, 也可以将储热罐技术与电锅炉技术进行结合, 形成储热电锅炉, 使设备更加集成化, 拓宽其应用场景。针对某热电厂热网的研究表明, 通过经济性分析和储热电锅炉装机容量优化, 可以满足采暖期供热需求, 并实现经济收益最大化<sup>[55]</sup>。目前, 储热罐及储热电锅炉技术的热经济性较好, 但投资改造成本相对较高, 占地面积也较大, 是限制其大范围推广的主要因素。



## 2) 汽轮机旁路补偿供热技术

旁路供热技术是在机组调峰时,将锅炉产生的高温高压蒸汽经由旁路系统减温减压后直接向用户供热,也就是减少输入到汽轮机中的供汽量以降低发电功率接纳新能源。针对热电机组通过旁路运行进行灵活调峰的理论研究表明,对于大型机组而言,采用旁路供暖运行方式接纳风电具有一定的经济可行性<sup>[56]</sup>。

就投资成本而言,热电机组一般都安装有旁路系统,因此,该方案可就地利用现有旁路系统或对现有系统进行改造,整体成本低。不足之处在于使用旁路供热必然造成一定的热效率损失,包括减温减压热损失等,同时,频繁使用旁路补偿供热,也可能对管路寿命造成影响。此外,同类型的切除低压缸供热技术能够实现较好的热经济性,但目前的应用业绩较少,安全性还有待进一步验证。

## 3 燃煤锅炉深度调峰技术展望

### 3.1 持续挖掘燃煤锅炉深度调峰潜能

目前,针对燃煤锅炉的深度调峰需求,在低负荷稳燃、机组运行效率提升、污染物减排及安全稳定运行等方面,均取得了较为丰富的研究成果及运行经验,但尚存在较大提升空间,仍需进一步挖掘燃煤机组在最低稳燃负荷、快速启停、提高变负荷速率及降低 $\text{NO}_x$ 排放等方面的潜力。

对于今后的研究重点,燃烧系统、辅机设备<sup>[23]</sup>、运行系统<sup>[57]</sup>、耐高温腐蚀的优质材料仍然是需要持续关注的主要内容,并同时结合精细化优化控制技术,提升机组的调峰能力。此外,除了聚焦于燃煤锅炉自身外,可积极探索燃煤锅炉与其他类型技术间的耦合效果,如结合固体燃料气化技术与燃煤锅炉提升低负荷稳燃能力、热电解耦技术促进电力调峰、储热技术进行能源消纳等。

### 3.2 深化机组智能调峰及电力调度

在确保电力系统安全稳定的前提下,基于算法预测模型,对燃煤机组的调峰过程进行演算和预测,是深化燃煤机组智能调峰的一项重要研发形式<sup>[58]</sup>。同时,需要以节能环保低碳为目标,制定科学可行的

电力系统调度原则和具体措施,确定各类机组的发电优先序位、机组调峰及轮停序位等。在推进节能低碳电力调度的同时,加强对新能源发电功率的预测,发挥电网联络线调剂作用,在提高可再生能源消纳的同时,减少能源、资源消耗及污染物排放。

### 3.3 建立健全国家及地方政策激励

由于燃煤锅炉深度调峰的整体经济效益并不恒定,呈波动性变化,因此,合理的燃煤机组调峰价格和价格补偿是推动燃煤锅炉灵活调峰的重要基础<sup>[59]</sup>。为了激励燃煤机组积极参与调峰,提升系统调峰能力,需要在燃煤机组分段调峰成本模型和市场参考定价模型的基础上,国家及各地区不断建立健全灵活调峰下的污染物排放政策、调峰辅助补偿机制,优化推广发电侧和用户侧峰谷电价方案,整合系统运行、市场交易和用户数据,提高负荷侧大数据分析及响应能力,引导用户错峰用电。

## 4 结论

本文分别从低(变)负荷运行下的燃烧稳定性、环保性和经济性、主要辅机适应性和安全性及热电机组的热电解耦四个方面出发,对目前的主要研究内容及进展进行分析总结。得出结论如下:

1)煤粉锅炉低(变)负荷下所关心的环保性、经济性及主要辅机适应性,都必须建立在机组安全稳定运行的基础上。因此,燃烧不稳定性及受热面安全是机组调峰过程中的首要问题;

2)灵活调峰需要从燃煤锅炉的全系统流程出发,进行主要辅机运行状态评估、系统运行性能优化、系统智慧运行及优化控制能力提升,从而提高燃煤锅炉在低负荷运行、快速启停及升降负荷过程中运行的稳定性、环保性及经济性;

3)燃煤锅炉调峰过程中的诸多因素对机组运行稳定性、环保性及经济性的影响并非各自独立的,而是存在各因素间的相互关联及耦合。因此,需要从全局考虑,进行综合评估,首先抓住主要影响因素开展研究,如煤粉燃烧器、水动力系统、尾部出口烟温等,并同时辅助其他方面的优化改进。

### 参考文献:

[1] 国家能源局. 国家能源局综合司关于做好可再生能源发展“十

- 四五”规划编制工作有关事项的通知 [EB/OL]. (2020-04-09) [2021-11-29].  
[http://zfxgk.nea.gov.cn/2020-04/09/c\\_138978661.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/2020-04/09/c_138978661.htm).
- National Energy Administration. Notice of the comprehensive department of the national energy administration on doing a good job in the preparation of the “14th Five-Year Plan” for the Development of Renewable Energy [EB/OL]. (2020-04-09) [2021-11-29].  
[http://zfxgk.nea.gov.cn/2020-04/09/c\\_138978661.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/2020-04/09/c_138978661.htm).
- [2] 王风云,张爽.我国可再生能源发电趋势与市场空间研究——兼析“十四五”期间可再生能源发展潜力 [J]. *价格理论与实践*, 2020(4): 36-40. DOI: 10.19851/j.cnki.cn11-1010/f.2020.04.108.  
WANG F Y, ZHANG S. Research on the trend and market capacity of renewable energy power generation in China——And predictive analysis of the renewable energy development during the 14th five-year Plan period [J]. *Price: Theory & Practice*, 2020(4): 36-40. DOI: 10.19851/j.cnki.cn11-1010/f.2020.04.108.
- [3] 邹兰青.规模风电并网条件下火电机组深度调峰多角度经济性分析 [D].北京:华北电力大学(北京),2017.  
ZOU L Q. Multi-angle analysis for deep peak regulation of thermal units with large scale wind power connected power system [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2016.
- [4] 周子程.火电机组深度调峰补偿模型的研究 [D].大连:大连理工大学,2017.  
ZHOU Z C. Research on deep peak shaving compensation model of thermal power unit [D]. Dalian: Dalian University of technology, 2017.
- [5] 2016年风电并网运行情况 [J]. *中国能源*, 2017, 39(2): 47.  
Grid connected operation of wind power in 2016 [J]. *Energy of China*, 2017, 39(2): 47.
- [6] 杨倩鹏,林伟杰,王月明,等.火力发电产业发展与前沿技术路线 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(13): 3787-3794. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.170187.  
YANG Q P, LIN W J, WANG Y M, et al. Industry development and frontier technology roadmap of thermal power generation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(13): 3787-3794. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.170187.
- [7] 周子程,王海霞,吕泉,等.计及主客体因素的火电机组深度调峰补偿模型 [J]. *南方电网技术*, 2017, 11(5): 47-55. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2017.05.008.  
ZHOU Z C, WANG H X, LV Q, et al. Deep peak load regulation compensation model of thermal power units considering subjective and objective factors [J]. *Southern Power System Technology*, 2017, 11(5): 47-55. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2017.05.008.
- [8] 王金星,卓建坤,李菁,等.适应燃煤电厂灵活调峰的安全改造技术探讨 [C]//国家火力发电工程技术研究中心.2017热电联产高效与灵活性改造技术研讨会,丹东,2017-08-16.北京:国家火力发电工程技术研究中心,2017: 80-86.  
WANG J X, ZHUO J K, LI J, et al. Discussion on safety transformation technology suitable for flexible peak shaving of coal-fired power plant [C]//National Thermal Power Engineering Technology Research Center. Proceedings of 2017 Cogeneration of Heat and Power Technical Workshop on Flexibility and Flexibility, Dandong, August 16, 2017. National Thermal Power Engineering Technology Research Center, 2017: 80-86.
- [9] 周俊虎,赵玉晓,刘建忠,等.低NO<sub>x</sub>煤粉燃烧器技术的研究进展与前景展望 [J]. *热力发电*, 2005, 34(8): 1-6. DOI: 10.19666/j.rlfid.2005.08.001.  
ZHOU J H, ZHAO Y X, LIU J Z, et al. Research advancement and future prospect of low NO<sub>x</sub> burners for pulverized coal [J]. *Thermal Power Generation*, 2005, 34(8): 1-6. DOI: 10.19666/j.rlfid.2005.08.001.
- [10] 关新河,李彦,朱群志,等.1000 MW超超临界锅炉低NO<sub>x</sub>燃烧器改造的数值模拟研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(8): 2376-2383. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.181513.  
GUAN X H, LI Y, ZHU Q Z, et al. Numerical simulation study on retrofit of low NO<sub>x</sub> burner for 1000 MW ultra-supercritical boiler [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(8): 2376-2383. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.181513.
- [11] 刘福国,郭新根,王守恩,等.一种空气分级切向燃烧烟煤锅炉的燃尽特性 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(7): 2113-2124. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.180653.  
LIU F G, GUO X G, WANG S E, et al. Burnout characteristics of bituminous coal in tangentially fired furnace with air staging [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(7): 2113-2124. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.180653.
- [12] GLUSHKOV D O, KUZNETSOV G V, CHEBOCHAKOVA D A, et al. Experimental study of coal dust ignition characteristics at oil-free start-up of coal-fired boilers [J]. *Applied Thermal Engineering: Design, processes, equipment, economics*, 2018, 142: 371-379. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.010.
- [13] 胡胜林,刘要强.锅炉低负荷稳燃措施 [J]. *决策探索*, 2017(9): 9-10.  
HU S L, LIU Y Q. Boiler low-load stable combustion measures [J]. *Policy Research & Exploration*, 2017(9): 9-10.
- [14] 张广才,周科,鲁芬,等.燃煤机组深度调峰技术探讨 [J]. *热力发电*, 2017, 46(9): 17-23.  
ZHANG G C, ZHOU K, LU F, et al. Discussions on deep peaking technology of coal-fired power plants [J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(9): 17-23.
- [15] 万燕成,毛志慧.变负荷条件下降低火电机组厂用电的运行优

- 化措施 [J]. *湖北电力*, 2017, 41(9): 39-42. DOI: [10.19308/j.hep.2017.09.009](https://doi.org/10.19308/j.hep.2017.09.009).
- WAN Y C, MAO Z H. The operating optimization for decreasing the plant service power of coal-fire power plant under varied power load [J]. *Hubei Electric Power*, 2017, 41(9): 39-42. DOI: [10.19308/j.hep.2017.09.009](https://doi.org/10.19308/j.hep.2017.09.009).
- [16] HAN Y, SHEN B, ZHANG T. A techno-economic assessment of fuel switching options of addressing environmental challenges of coal-fired industrial boilers: an analytical work for China [J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 3083-3087. DOI: [10.1016/j.egypro.2017.12.448](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.448).
- [17] 申融容, 玄婉玥, 张健, 等. 面向电源侧灵活性提升的热电解耦技术综述 [J]. *中国能源*, 2021, 43(5): 51-59.
- SHEN R R, XUAN W Y, ZHANG J, et al. A review of thermo-decoupling technology for improving flexibility of power supply side [J]. *Energy of China*, 2021, 43(5): 51-59.
- [18] 龚彦豪, 许鑫玮, 王登辉, 等. 新型低氮旋流燃烧器NO<sub>x</sub>排放特性 [J]. *洁净煤技术*, 2019, 25(6): 118-125. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.19060601](https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.19060601).
- GONG Y H, XU X W, WANG D H, et al. NO<sub>x</sub> emissions characteristics of a novel low-NO<sub>x</sub> swirl burner [J]. *Clean Coal Technology*, 2019, 25(6): 118-125. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.19060601](https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.19060601).
- [19] 牛艳青, 薛旭峰, 张浩, 等. 多级调风预燃式旋流燃烧器冷态试验研究 [J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(5): 196-203. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.20051203](https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.20051203).
- NIU Y Q, XUE X F, ZHANG H, et al. Cold experiment research of multi-stage air-regulating pre-combustion cyclone burner [J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(5): 196-203. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.20051203](https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.20051203).
- [20] 陈迪训, 邱纪华. 双回流稳燃腔的实验研究 [J]. *华中理工大学学报*, 1990(6): 119-123. DOI: [10.13245/j.hust.1990.06.019](https://doi.org/10.13245/j.hust.1990.06.019).
- CHEN D X, QIU J H. An experimental investigation of a stabilizing combustion cavity with twin reflow zones [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1990(6): 119-123. DOI: [10.13245/j.hust.1990.06.019](https://doi.org/10.13245/j.hust.1990.06.019).
- [21] 宋民航, 黄云, 黄骞, 等. 旋流煤粉燃烧器低负荷稳燃技术探讨 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(13): 4552-4565. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.210311](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210311).
- SONG M H, HUANG Y, HUANG Q, et al. Discussion on low-load stable combustion technology of swirl pulverized-coal burner [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(13): 4552-4565. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.210311](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210311).
- [22] LI S, CHEN Z C, HE E, et al. Combustion characteristics and NO<sub>x</sub> formation of a retrofitted low-volatile coal-fired 330 MW utility boiler under various loads with deep-air-staging [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 223-233. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2016.08.159](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.159).
- [23] 李伟, 蔡勇, 张晓磊, 等. 深度调峰工况锅炉主要辅机运行安全性分析 [J]. *广东电力*, 2019, 32(11): 63-69.
- LI W, CAY Y, ZHANG X L, et al. Analysis of operation safety of main auxiliaries of boilers under deep peak shaving [J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(11): 63-69.
- [24] 陈辉, 王爱英, 戴维葆, 等. 高灰分烟煤煤粉细度对燃烧特性及低负荷稳燃影响研究 [J]. *电站系统工程*, 2020, 36(5): 13-15.
- CHEN H, WANG A Y, DAI W B, et al. Study on effect of pulverized coal fineness on combustion characteristics and low load stable combustion of high ash bituminous coal [J]. *Power System Engineering*, 2020, 36(5): 13-15.
- [25] 昂永波. 350 MW超临界机组深度调峰运行优化调整技术分析 [J]. *内蒙古电力技术*, 2018, 36(1): 32-36.
- ANG Y B. Adjustment technology analysis of deep cyclic operation optimization of 350 MW supercritical unit [J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2018, 36(1): 32-36.
- [26] MESSERLE V E, KARPENKO E I, USTIMENKO A B. Plasma assisted power coal combustion in the furnace of utility boiler: numerical modeling and full-scale test [J]. *Fuel*, 2014, 126(Jun.15): 294-300. DOI: [10.1016/j.fuel.2014.02.047](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.047).
- [27] SUGIMOTO M, MARUTA K, TAKEDA K, et al. Stabilization of pulverized coal combustion by plasma assist [J]. *Thin Solid Films*, 2002, 407(1-2): 186-191. DOI: [10.1016/S0040-6090\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00035-4).
- [28] LIU C, LI Z, KONG W, et al. Bituminous coal combustion in a full-scale start-up ignition burner: influence of the excess air ratio [J]. *Energy*, 2010, 35(10): 4102-4106. DOI: [10.1016/j.energy.2010.06.023](https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.023).
- [29] 宋继坤, 蔡巍, 蔡飞, 等. 微气点火技术在某热电厂的应用与研究 [J]. *机电信息*, 2019(32): 103-104. DOI: [10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2019.32.059](https://doi.org/10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2019.32.059).
- SONG J K, CAI W, CAI F, et al. Application and research of micro-gas ignition technology in a thermal power plant [J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2019(32): 103-104. DOI: [10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2019.32.059](https://doi.org/10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2019.32.059).
- [30] 李文蛟. 感应式加热煤粉锅炉无油直接点火燃烧器的基础与试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- LI W J. Research on the induction-heating burner for the pulverized coal fired boilers [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2000.
- [31] LI W J, CEN K F, ZHENG C G, et al. Induction-heating ignition of pulverized coal stream [J]. *Fuel*, 2004, 83(16): 2103-2107. DOI: [10.1016/j.fuel.2004.06.011](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.06.011).
- [32] SHEN T, SONG M H, HUANG Y, et al. The effectiveness of a novel coal-igniting-fuel technology and application in a direct current burner [J]. *Fuel*, 2021, 306(11): 121503. DOI: [10.1016/j.fuel.2021.121503](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121503).

- [/j.fuel.2021.121503](#).
- [33] 刘维岐,汪山入,吴炬. 350 MW超临界机组低负荷运行优化试验研究 [J]. 东北电力技术, 2021, 42(7): 5-8.  
LIU W Q, WANG S R, WU J, et al. Experimental study on low load operation optimization of 350 MW supercritical unit [J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(7): 5-8.
- [34] 周俊波,刘茜,张华,等. 典型燃煤锅炉低负荷及变负荷运行控制特性分析 [J]. 热力发电, 2018, 47(9): 34-40. DOI: [10.19666/j.rlfid.201803071](#).  
ZHOU J B, LIU X, ZHANG H, et al. Control characteristic analysis of typical coal-fired boilers during low load or variable load running [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(9): 34-40. DOI: [10.19666/j.rlfid.201803071](#).
- [35] 王桂林,甘智勇,周义刚,等. 深度调峰燃煤锅炉超净排放关键因素分析 [J]. 资源节约与环保, 2017(10): 12-14. DOI: [10.16317/j.cnki.12-1377/x.2017.10.007](#).  
WANG G L, GAN Z Y, ZHOU Y G, et al. Analysis on key factors of ultra-clean emission of deep peak shaving coal-fired boiler [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2017(10): 12-14. DOI: [10.16317/j.cnki.12-1377/x.2017.10.007](#).
- [36] 王憧北. 应用热水再循环技术实现宽负荷脱硝 [J]. 锅炉技术, 2018, 49(4): 71-75.  
WANG C B. Application of hot water recirculation technology to realize wide load de-NO<sub>x</sub> [J]. Boiler Technology, 2018, 49(4): 71-75.
- [37] 王凤池,靖长财,王晨. 600 MW亚临界机组超低负荷脱硝技术研究与应用 [J]. 锅炉技术, 2018, 49(4): 16-19.  
WANG F C, JING C C, WANG C. Denitration technology research and application at super low loads of 600 MW subcritical unit [J]. Boiler Technology, 2018, 49(4): 16-19.
- [38] 王鹏. 低负荷运行方式对机组经济性的影响 [J]. 城市建设理论(电子版), 2013(35): 1-6.  
WANG P. The influence of low-load operation mode on unit economy [J]. ChengShi Jianshe LiLun Yan Jiu (Electronic Edition), 2013(35): 1-6.
- [39] 周文胜. 提高机组低负荷运行经济性的讨论 [J]. 湖南电力, 2003, 23(3): 56-57.  
ZHOU W S. Discussion on improvement of economical operation of light-loaded units [J]. Hunan Electric Power, 2003, 23(3): 56-57.
- [40] 沈建龙,李晓东. 机组在低负荷运行下的节能控制方式探讨 [J]. 宁夏电力, 2007(6): 53-55.  
SHEN J L, LI X D. Discussion on energy saving control mode under low load operation of power units [J]. Ningxia Electric Power, 2007(6): 53-55.
- [41] 朱光明,焦庆丰,李明,等. 大型火电机组低负荷运行经济性研究 [J]. 湖南电力, 2008, 28(1): 24-26+34.  
ZHU G M, JIAO Q F, LI M, et al. Research on economic efficiency of low load operation in large thermal power units [J]. Hunan Electric Power, 2008, 28(1): 24-26+34.
- [42] 吕泉,陈天佑,王海霞,等. 热电厂参与风电调峰的方法评述及展望 [J]. 中国电力, 2013, 46(11): 129-136+141.  
LV Q, CHEN T Y, WANG H X, et al. Review and perspective of integrating wind power into CHP power system for peak regulation [J]. Electric Power, 2013, 46(11): 129-136+141.
- [43] 陈翠琴,田亮. 深度调峰工况下锅炉汽包虚假水位分析 [J]. 电力科学与工程, 2019, 35(5): 48-53.  
CHEN C Q, TIAN L. Analysis of false water level of drum boiler under deep peak regulation conditions [J]. Electric Power Science & Engineering, 2019, 35(5): 48-53.
- [44] 马玉华,邢长清,徐君诏,等. 深度调峰负荷时亚临界自然循环锅炉水循环安全计算与分析 [J]. 热力发电, 2018, 47(10): 108-114. DOI: [10.19666/j.rlfid.201712172](#).  
MA Y H, XING C Q, XU J Z, et al. Safety calculation and analysis for thermal-hydraulic circulation of a subcritical natural circulation boiler at severe peak load regulation [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(10): 108-114. DOI: [10.19666/j.rlfid.201712172](#).
- [45] 马军,王福平. 300 MW锅炉深度调峰运行调整的探索和实践 [J]. 黑龙江科学, 2018, 9(18): 1-5.  
MA J, WANG F P. Exploration and practice of 300 MW boiler deep peak load adjustment [J]. Heilongjiang Science, 2018, 9(18): 1-5.
- [46] 王斌,马涛. 低负荷时炉膛出口烟温偏差大的原因分析及运行调整 [J]. 河北电力技术, 2019, 38(4): 44-46.  
WANG B, MA T. Cause analysis and operation adjustment of large temperature deviation of furnace outlet at low load [J]. Hebei Electric Power, 2019, 38(4): 44-46.
- [47] 周科,成沛坤,解冰,等. 典型旋流燃烧器低负荷稳燃特性试验 [J]. 热力发电, 2020, 49(9): 121-126. DOI: [10.19666/j.rlfid.201912206](#).  
ZHOU K, CHEN R S, XIE B, et al. Experimental study on combustion stability characteristics of typical swirl burners at low load [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 121-126. DOI: [10.19666/j.rlfid.201912206](#).
- [48] 刘辉. 新型低NO<sub>x</sub>旋流燃烧器关键参数对稳燃特性的影响研究 [D]. 西安: 西安热工研究院有限公司, 2019.  
LIU H. Investigation on the influence of key parameters of a new type low NO<sub>x</sub> swirl burner on combustion stability [D]. Xi'an: Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., 2019.
- [49] 鲁学斌,姚力. 600 MW超临界四墙切圆燃烧机组深度调峰技术研究 [J]. 电力学报, 2021, 36(3): 283-290. DOI: [10.13357/j.dlx.2021.035](#).

- LU X B, YAO L. Research on deep peak shaving technology of a 600 MW supercritical four-wall tangentially fired unit [J]. *Journal of Electric Power*, 2021, 36(3): 283-290. DOI: [10.13357/j.dlx.2021.035](https://doi.org/10.13357/j.dlx.2021.035).
- [50] 张振宇, 王刚, 刘宗奎, 等. 330 MW机组深度调峰控制系统问题分析及优化 [J]. *能源研究与管理*, 2021(2): 119-123. DOI: [10.16056/j.2096-7705.2021.02.023](https://doi.org/10.16056/j.2096-7705.2021.02.023).
- ZHANG Z Y, WANG G, LIU Z K, et al. Analysis and optimization of deep peak load regulation control system for 330 MW power unit [J]. *Jiangxi Energy*, 2021(2): 119-123. DOI: [10.16056/j.2096-7705.2021.02.023](https://doi.org/10.16056/j.2096-7705.2021.02.023).
- [51] 鲍铁军, 刘建平, 侯志, 等. 440 t/h循环流化床机组深度调峰工况下燃烧优化与机炉协调控制的实现 [J]. *锅炉制造*, 2021(4): 25-27+30.
- BAO T J, LIU J P, HOU Z, et al. Realization of combustion optimization and boiler-turbine coordinated control for 440 t/h CFB unit under deep peak shaving condition [J]. *Boiler Manufacturing*, 2021(4): 25-27+30.
- [52] 王立, 王燕晋, 李战国, 等. 火力发电机组深度调峰试验及优化 [J]. *发电设备*, 2019, 33(2): 133-137.
- WANG L, WANG Y J, LI Z G, et al. Deep peak shaving tests and optimization for thermal power units [J]. *Power Equipment*, 2019, 33(2): 133-137.
- [53] 张振星. 基于智能优化算法的电站锅炉燃烧优化 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2015.
- ZHANG Z X. Utility boiler combustion optimization based on intelligent optimization algorithm [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2015.
- [54] 高明明, 于浩洋, 吕俊复, 等. 循环流化床氮氧化物排放预测模型及优化控制研究 [J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(3): 46-51. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.20030501](https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.20030501).
- GAO M M, YU H Y, LV J F, et al. Study on prediction model and optimal control of nitrogen oxides emission of circulating fluidized bed [J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(3): 46-51. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.20030501](https://doi.org/10.13226/j.issn.1006-6772.20030501).
- [55] 孙萌萌, 王雷. 采用电极锅炉蓄能的调峰方法经济性分析 [J]. *沈阳工程学院学报(自然科学版)*, 2019, 15(4): 327-331. DOI: [10.13888/j.cnki.jsie\(ns\).2019.04.008](https://doi.org/10.13888/j.cnki.jsie(ns).2019.04.008).
- SUN M M, WANG L. Economic analysis of peak regulation method in heat grid with electrode boiler for energy storage [J]. *Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science Edition)*, 2019, 15(4): 327-331. DOI: [10.13888/j.cnki.jsie\(ns\).2019.04.008](https://doi.org/10.13888/j.cnki.jsie(ns).2019.04.008).
- [56] ANDERSEN T V. Integration of 50% wind power in a CHP based power system: a model-based analysis of the impacts of increasing wind power and the potentials of flexible power generation [D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2009.
- [57] 孙海峰, 王兆辉, 王建峰, 等. 600 MW超临界机组深度调峰安全可靠运行解析 [J]. *华电技术*, 2020, 42(12): 94-100.
- SUN H F, WANG Z H, WANG J F, et al. Analysis on safety and reliability of 600 MW supercritical units' deep peak regulation [J]. *Huadian Technology*, 2020, 42(12): 94-100.
- [58] 李军徽, 张嘉辉, 穆钢, 等. 储能辅助火电机组深度调峰的分层优化调度 [J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 3961-3969. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1368](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1368).
- LI J H, ZHANG J H, MU G, et al. Hierarchical optimization scheduling of deep peak shaving for energy-storage auxiliary thermal power generating units [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 3961-3969. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1368](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1368).
- [59] 杨韵, 蔡秋娜, 闫斌杰, 等. 燃煤机组调峰特性分析及优化运行 [J]. *电气应用*, 2018, 37(12): 89-92.
- YANG Y, CAI Q N, YAN B J, et al. Peak shaving characteristic analysis and optimal operation of coal-fired units [J]. *Electrotechnical Application*, 2018, 37(12): 89-92.

---

作者简介:



张少强

张少强(第一作者)

1998-, 男, 新疆克拉玛依人, 学士, 初级工程师, 主要从事火电机组灵活性改造(e-mail) 1596204086@qq.com。



宋民航

宋民航(通信作者)

1986-, 男, 黑龙江绥化人, 博士, 中国科学院过程工程研究所副研究员, 主要研究方向为燃料低碳清洁高效燃烧及储热系统优化集成(e-mail)songminhang@126.com。

(编辑 叶筠英)