一种新型强稳燃低温低氮双涡预热解 燃烧器开发及应用展望

谭厚章¹,王学斌¹,郑海国¹,吕钊敏¹,孙平²,张俊杰²,董琨²,黄军² (1.西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室,陕西西安 710049; 2.神华国华(北京)电力研究院有限公司,北京 100025)

[摘 要]新能源发电的大幅增长对燃煤电厂深度调峰提出了更高要求,针对目前燃煤电厂 20%以下低负荷难稳燃的现状,开发了一种新型强稳燃低温低氮双涡预热解燃烧器,煤粉先进行高温预热解再与卷吸的高温烟气混合着火,达到强稳燃目的。搭建了 25 th 试验台,试验结果表明:配置单台燃烧器整体炉膛火焰温度均匀,低于1000 ℃,呈现低温低氮环境,且在燃烧器设计功率 30%~35%以下火焰十分稳定;中试试验台锅炉效率达到 92.75%,NOx 排放质量浓度为 218 mg/m3 (q(O₂)=6%),采用炉內喷尿素溶液可实现 NO_x排放质量浓度 小于 80 mg/m³。基于此,针对大型燃煤锅炉,无论旋流燃烧系统或直流燃烧系统,通过在中层或上层前后墙改造安装新型燃烧器后,均可实现 10%~20%低负荷稳燃,且无需改造制粉系统,具有良好的推广应用前景。

[关 键 词] 预热解燃烧器; 双涡流场; 深度调峰; 低负荷稳燃; NO_x 排放 [中图分类号] TK221 [文献标识码] A [DOI 编号] 10.19666/j.rlfd.202108170

[引用本文格式] 谭厚章, 王学斌, 郑海国, 等. 一种新型强稳燃低温低氮双涡预热解燃烧器开发及应用展望[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 93-99. TAN Houzhang, WANG Xuebin, ZHENG Haiguo, et al. Development and application prospect of a new type of strongly stable combustion, low temperature and low nitrogen dual-vortex pre-pyrolysis burner[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 93-99.

Development and application prospect of a new type of strongly stable combustion, low temperature and low nitrogen dual-vortex pre-pyrolysis burner

TAN Houzhang¹, WANG Xuebin¹, ZHENG Haiguo¹, LYU Zhaomin¹, SUN Ping², ZHANG Junjie², DONG Kun², HUANG Jun²

MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
 Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co. Ltd., Beijing 100025, China)

Abstract: The substantial growth of new energy power generation puts forward higher requirements for deep peak regulation of coal-fired power plants. However, at present, coal-fired power plants are difficult to maintain stable combustion at load lower than 20%. To solve this problem, a new type of strongly stable combustion, low temperature and low nitrogen dual-vortex pre-pyrolysis burner is developed. Pulverized coal is preheated firstly at high temperature and then mixed with the entrained high temperature flue gas to ignite to achieve the purpose of strong and stable combustion. A 25 t/h test bench is built, and the test results showed that, the flame temperature of the entire furnace with a single burner was uniform, below 1 000 °C, presenting a low temperature and low nitrogen environment, and the flame was very stable when the design power of the burner was below 30%~35%. The boiler efficiency of the pilot test bench reached 92.75%, and the NO_x emission was 218 mg/m³ (6% O₂ volume fraction). Spraying urea solution in the furnace could reduce the NO_x emission to lower than 80 mg/m³. Based on this, for large-scale coal-fired boilers, regardless of the swirling combustion system or the direct-flow combustion system, installing new burners on the front and rear walls on middle or upper layer can both realize stable combustion at 10%~20% low load with no need for modification of pulverizing system. This new burner has a good prospect for promotion and application

Key words: pre-pyrolysis burner; dual vortex field; deep peak shaving; low load stable combustion; NO_x emission

收稿日期: 2021-08-28

第一作者简介:谭厚章(1965),男,博士,教授,主要研究方向为煤粉高效洁净燃烧技术,hzt@mail.xjtu.edu.cn。

基 金 项 目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0603902)

Supported by: National Key Research and Development Program (2017YFB0603902)

根据《能源生产和消费革命战略(2016-2030年)》,我国非化石能源的消费比例 2050年将 达到50%以上,非化石能源发电量占比将达到70%。 可再生能源高速发展的同时其消纳问题日益严重, 部分地区出现较为严重的弃风、弃光现象[1-4]。为提 高新能源利用率,适应电网灵活性调峰的要求,火 力发电厂参与调峰后长期低负荷或超低负荷运行 势在必行[5-6],然而超低负荷稳燃一直是燃煤电厂亟 需解决的问题。目前,主要通过精细化燃烧调整、 燃烧和制粉系统改造以及助燃技术改造[7-9]等措施 实现超低负荷稳燃。切圆和对冲燃烧锅炉一般最低 可以实现 20%~30% 短时间低负荷运行, 在现有稳燃 技术支撑下旋流燃烧器系统具有更好的低负荷稳 燃能力,但随着负荷不断降低,炉膛烟气温度下降, 卷吸的烟气无法满足煤粉着火热,依然可能造成炉 膛灭火,同时燃煤机组低负荷运行时 NO_x 排放不易 控制[10]。因此亟需开发一种兼顾燃煤机组超低负荷 长时间稳定运行和实现 NO_x低排放的稳燃技术。

本文开发一种新型强稳燃低温低氮双涡预热 解燃烧器,通过高温烟气回流预热解室促使煤粉挥 发分集中释放改善着火,同时通过控制煤粉预热解 过程自由基的释放途径抑制 NO_x 生成, 为火电厂满 足深度调峰和快速变负荷要求的高灵活性提供技 术支持和参考。

1 燃烧器设计

1.1 稳燃原理

图 1 分别给出了传统火电厂旋流燃烧器和新型 燃烧器结构示意。为便于安装改造,新型燃烧器最大 限度保留了传统旋流燃烧器的结构型式,同时在内 二次风出口增加可控预热解室。该设计一方面极大 延长了煤粉着火前在预热解室内被回流高温烟气和 炉膛辐射加热的时间,使得风粉混合物在进入炉膛 前成为具有一定潜热的高温燃料:另一方面挥发分

在预热解室释放集中, 变相提高了气相燃料浓度。这 二者作用下新型燃烧器可在更低负荷下实现稳燃。





1.2 降氮原理

一次风携带煤粉进入预热解室发生热解, 预热 解热量主要来自炉内辐射, 部分来自煤粉挥发分的 着火。采取径向深度空气分级措施使得预热解室过 量空气系数极低,热解产生的碳烟(soot)和碳氢化 合物 (CH_i) 会与 NO 发生还原反应, 因此预热解室 内燃料氮主要以含氮化合物 HCN、NH₃、N₂和焦炭 氮形式存在;同时预热解室温度较低,当风粉混合 物进入炉膛着火时火焰温度得以控制在不太高的 水平,避免了含氮化合物在预热解室出口与外二次 风混合时迅速被氧化成 NO_x,最后结合锅炉深度空 气分级、燃料分级等常规措施可进一步减排 NO_x。 本文在前人研究[11-12]基础上,结合实测试验数据重 新提出了预热解和燃烧过程中煤粉的转化过程,其 过程示意如图2所示。





1.3 系统参数

新型燃烧器总体采用径向深度空气分级,分别 设置中心风、一次风及内、外二次风。为确保预热 解室处于低过量空气系数的强还原性气氛下,新型 燃烧器较常规燃烧器设计了更大的外二次风比例, 同时环形外二次风管角度可随入炉煤质优劣在 0~30 选取。可控预热解室由腔体和绝热层组成,绝 热层外扩角度可随入炉煤质优劣在 90 ~150 °选取, 当煤质较差时通过增大扩展角增加回流烟气量和 煤粉在预热解室的停留时间达到稳定着火的目的。

2 燃烧器性能试验

图 3 为新型燃烧器试验平台示意。该 25 t/h 小型锅炉试验平台安装单台新型燃烧器,设计功率为 21~22 MW,设计煤量 2.8~3.0 t/h,无助燃系统。锅炉炉膛呈 L 型结构(图 3a),卧式的水平段为火焰燃烧的主要区域,深入炉膛左侧 1/4 位置布置 9 个 温度测点(图 3b))^[13]。一次风由罗茨风机提供,经 由粉仓携带煤粉送入炉膛;二次风由鼓风机提供, 可分为内二次风、外二次风送入炉膛。试验用煤为烟 煤,其工业分析和元素分析见表 1。试验选取 12.5 MW 和 7.2 MW 2 个负荷,分别对应新型燃烧器额定负 荷的 57%~60%、32%~34%。

对该试验平台进行 1:1 物理建模,采用数值模 拟软件 CFD 对试验工况进行计算。湍流模型选用 Realizable k-ε 模型,离散相模型遵循欧拉-拉格朗日 方法,在煤粉颗粒运动过程中,选用拉格朗日随机 轨道模型进行模拟,辐射模型采用 DO 模型;煤粉 燃烧模型包括了挥发分析出模型、挥发分气相燃烧 模型以及焦炭燃烧模型 3 部分。本文采用两步竞争 反应模型模拟挥发分析出过程,认为挥发分的挥发 速率受挥发分含量的影响;挥发分气相燃烧过程使 用涡耗散模型进行模拟;焦炭燃烧过程选用扩散-动力反应模型进行模拟。



a) 实物



b) 结构示意

图 3 新型燃烧器试验平台 Fig.3 The new type burner test platform

表 1 试验用煤煤质参数 w/% Tab.1 Quality parameters of the test coal

项目	数值	项目	数值
M _{ar}	5.17	H _{ad}	4.31
A _{ar}	12.53	O_{ad}	14.12
V _{ar}	31.16	N _{ad}	0.97
FCar	51.14	\mathbf{S}_{ad}	0.95
\mathbf{C}_{ad}	61.95		

2.1 温度场分布

燃烧器负荷 12.5 MW 时炉膛温度测点测量结 果与模拟结果的对比及炉膛中心界面温度分布分 别如图 4 和图 5 所示。由图 4 可以看出,试验测量温 度与数值模拟计算结果的最大误差范围为±4.5%,可 认为本文所选取的模型能够较为准确地预测炉膛 内的温度分布^[13]。由图 5 可以看出:炉膛火焰充满 度较好,高温区域集中在预热解室内及火焰主燃 区,预热解室内温度可达 700~1 200 ℃,保证煤粉 的稳定着火;主燃区内的高温区主要存在于外二次 风与主燃区火焰混合的界面上;主燃区因内部大回 流区的存在,氧体积分数得以控制,主燃区整体温 度分布较为均匀,且大部分区域温度低于 1 000 ℃, 较低的炉膛温度水平有利于控制 NO_x 的生成,也有 利于尿素分解脱氮。







图 5 典型工况下炉膛中心截面温度分布 Fig.5 The temperature distribution in furnace center section under typical working conditions

2.2 速度场分布

图 6 为 57%~60%燃烧器负荷工况下炉膛中心 截面速度分布的模拟结果。由图 6a)可以看出,内二 次风射流具有较大的旋转惯性和较高的速度,能够 形成较大的回流区^[14]。该回流区深入炉膛内部,能 卷吸高温烟气并使主燃区处于一个低氧的还原性 气氛,有利于降低 NO_x的排放。外二次风从预热解 室端面送入,增大对主燃区的扰动,同时对火焰有 一定的收束作用,也使得在炉膛上布风更加均匀。



具有较大的旋转惯性和较高的速度,能够形成较大

的回流区。回流区可以分成2部分,一部分是预热 解室内的环形回流区,另一部分是炉膛中心位置的 大回流区。前者的主要作用是保证煤粉稳定燃烧, 后者的主要作用是抑制 NO_x生成,因此双回流区的 形成是新型燃烧器能够实现稳燃和降氮的重要条 件。值得注意的是,在本文模拟过程中发现,双涡 的形成需具备一定条件,内二次风比例超过50%时 将会直接卷吸一次风导致预热解室无法形成回流 区,无法实现稳定着火,而当内二次风旋流叶片角 度过小(<30°),旋流强度较低时,内二次风的旋转 惯性小,导致内二次风在离开喷口后不会向外扩 散,而是直接向内收束,压迫一次风射流,导致预 热解室内一二次风之间的环形回流区消失,在温度 为室温的内二次风的包裹下煤粉难以着火燃烧。不 同工况预热解室流场分布示意如图7所示。



b) 内二次风旋流叶片角度为 30 时中心截面速度分布

图 7 不同工况预热解室内流场示意 Fig.7 Schematic diagram of indoor flow field in prepyrolysis room under different working conditions 2.3 组分分布

图 8 为炉膛中心截面组分分布。由图 8 可见, 预热解室的环形回流区内,煤粉挥发分部分燃烧, 使得预热解室内的氧体积分数迅速降低,远小于 1 的过量空气系数使得该区域燃烧不完全,CO 体积 分数升高。在预热解室内燃烧过后的高温烟气部分 与一次风射流混合,迅速消耗一次风内的氧并加热 煤粉,促使煤粉在低氧的还原性气氛中热解燃烧生 成大量 CO,并随着外二次风的混入进一步燃烧。 NO 主要分布于预热解室内的高温回流区、主燃区 的火焰高温区及立式炉膛的燃尽区内,通过创造较 大的还原性区域能够有效控制 NO 的生成。



c) NO体积分数分布 图 8 炉膛中心截面组分分布 Fig.8 Distribution of components in furnace center section

表 2 为 57%~60%燃烧器负荷工况下炉膛出口 参数的模拟值与试验值对比。由表 2 可见:模拟炉 膛出口截面 NO_x质量浓度为 227 mg/m³,实际测量 值为 218 mg/m³(q(O₂)=6%),误差 3.6%;模拟焦 炭转化率 95.10%,折算锅炉效率 92.14%,接近实 验测量炉膛出口锅炉效率 92.75%,可见模拟结果能 够较好地与实际燃烧情况吻合。

表 2 锅炉效率及 NO_x模拟结果与试验结果对比 Tab.2 The simulated and experimental results of boiler efficiency and NO_x mass concentration

排放	试验值	模拟值
锅炉效率/%	92.75	92.14
NO _x 质量浓度/(mg m ⁻³)	218	227

2.4 燃烧器负荷和出口氧体积分数对 NOx 排放影响

图9为燃烧器负荷对NO_x排放和炉膛温度的影响。 由图9a)可以看出,NO_x排放随燃烧器负荷略有降低, 12.5、10.5、7.2 MW 燃烧器负荷下的 NO_x排放质量浓 度分别为218.88、217.54、216.75 mg/m³,变化不明显。





由图 9b)可以看出,整个炉膛温度水平较低, NO_x生成速率较为缓慢,同时双涡流场形成巨大还 原区进一步降低了 NO_x的排放,整个炉膛呈现低温 低氮的趋势,而燃烧器负荷的降低并未明显降低炉 膛温度,因此也并未使得 NO_x有较大降低,表明新 型燃烧器在 30%左右负荷煤粉燃烧特性变化不大, 具有较好的稳燃能力。

电站锅炉低负荷运行中,为保证稳燃和煤粉正 常输送,通常会辅助以增加过量空气系数的手段, 但这势必会导致炉内还原性气氛减弱,引起 NO_x 排 放升高,因此有必要对新型燃烧器的 NO_x 随炉膛出 口氧体积分数的排放进行监测。在 12.5 MW 负荷 下,调整炉膛出口氧量,NO_x 排放随炉膛出口氧体 积分数的变化如图 10 所示。由图 10 可以看出,随 着氧体积分数升高,NO_x 排放质量浓度逐渐升高, 氧体积分数由 3.2%增加至 4.8%,NO_x 质量浓度从

218 mg/m³ 增加至 245 mg/m³,增幅 12.4%。可见, 实际运行过程中,在保证锅炉效率的情况下,应该 适当降低炉膛出口氧量,以保证较低的 NO_x 排放。



图 10 炉膛出口氧体积分数对 NO_x 排放的影响 Fig.10 Influence of oxygen volume fraction at the furnace outlet on NO_x emissions

2.5 炉内喷氨影响

由图 5 温度分布云图可知,炉内整体温度处于 800~1000 ℃,是喷氨还原的最佳温度窗口,因此在 7.2 MW 燃烧器负荷下喷入质量浓度 7.5%的尿素溶 液,控制氨氮摩尔比为 1.2~1.4,尾部烟道出口 NO_x 质量浓度降到 80 mg/m³ (*q*(O₂)=6%),降幅 63%。

3 大型燃煤机组应用展望

单台新型燃烧器可在 30%额定负荷下、炉膛温 度低于 1000 ℃时稳定运行,同时不喷氨条件下保 持 NO_x 排放质量浓度为 216 mg/m³,基于此,提出 了新型燃烧器在大型燃煤机组的改造方案。

3.1 燃烧器改造方案

开发的新型燃烧器今后可先在旋流燃烧器锅 炉上应用,取得经验后再向直流燃烧器锅炉推广。 原因在于新型燃烧器基本结构型式与旋流燃烧器 相当,在进行锅炉改造时可直接更换而不影响原燃 烧系统及炉内烟气动力场。图 11a)为某 660 MW 机 组更换中间层大风箱内10个旋流燃烧器改造示意, 上下二层燃烧器不改动。直流燃烧器系统由于采 用切圆燃烧方式,在应用新型燃烧器改造时应尽 量减少对切圆的扰动,可在前后墙安装4个对冲新 型 燃烧器,低负荷时可将同一层的4根送粉管道 直接热态切换到新型燃烧器。为避免蒸汽温度较 低,应选取中上层直流燃烧器所在前后墙进行布置 (图 11b))。新型燃烧器的供粉供风系统均通过转 换阀与原直流燃烧器系统相连,在进行深度调峰 时,通过阀门切换关闭一层或几层切圆燃烧器,开 启新型燃烧器达到低负荷稳燃目的。



 1—磨煤机; 2—风箱; 3——给粉管道 I; 4—直流燃烧器; 5—给粉管 道换向阀; 6—二次风调节阀; 7—新型燃烧器; 8—锅炉炉膛; 9—二 次风管道; 10—给粉管道 II; 11—切圆耦合新型燃烧器; 12—主燃烧 器; 13—燃尽风喷口; 14—分离风喷口。

图 11 燃煤机组燃烧器系统改造示意 Fig.11 Schematic diagram of reformation of burner system in coal-fired unit

3.2 深度调峰设计

以 660 MW 机组旋流燃烧器系统为例,假定满 负荷运行条件下,3层共30只燃烧器投入运行,其 中中间层 10 只燃烧器更换为新型燃烧器,低负荷 下只投运中间层的10只新型燃烧器完全可以稳燃, 相当于可实现锅炉负荷为额定负荷的 33.3%可以稳 燃,加上新型燃烧器可以在本身 30%燃烧器负荷下 稳定运行,所以,最终可实现锅炉负荷为额定负荷 的33.3%×30%≈10%下稳燃运行。若此时只保留半 层新型燃烧器在 30%燃烧器负荷下运行,则可实现 稳燃负荷为 5%。同理, 切圆燃烧锅炉 5 层带满负 荷,切换到一层新型燃烧器,可实现 20% ×30%=6% 负荷稳燃。考虑到超低负荷下实际锅炉水循环安全 性、全负荷脱销、气温壁温以及煤质等[15-16],本文认 为在现有电站锅炉加装新型燃烧器,改造时选择中 层或中上层进行改造和更换后,应该可以实现10%~ 20%的最低负荷运行,无需等离子或微油助燃。

4 结论与展望

为解决燃煤机组深度调峰稳燃难的问题,本文 开发了一种新型强稳燃低温低氮双涡预热解燃烧

器,并搭建25 t/h 试验平台对单台新型燃烧器的稳燃和降氮能力进行测试,结合测试结果提出现役电厂燃烧器系统的改造方案,具体结论如下:

1) 试验结果表明: 配置单台燃烧器后整体炉膛 火焰温度均匀, 低于 1000 ℃, 呈现低温低氮环境, 且在燃烧器设计功率 30%~35%火焰燃烧稳定, 锅炉 效率达到 92.75%, NO_x 排放质量浓度为 218 mg/m³, 采用炉内喷尿素溶液可实现 NO_x 排放质量浓度小 于 80 mg/m³。

2)基于单台新型燃烧器性能试验结果,完全可 以将所设计燃烧器应用于大型燃煤电厂实现超低 负荷稳燃,同时控制 NO_x排放。

3)无论旋流燃烧系统或直流燃烧系统,通过在 中层或上层前后墙改造安装新型燃烧器后,均可实 现 10%~20%低负荷稳燃,不需要等离子或微油助 燃,无需改造制粉系统。对旋流燃烧系统只需更换 燃烧器就可,对切圆燃烧系统只需风粉切换管道。

4)为避免蒸汽参数偏低,SCR 装置入口烟温 不够,新型燃烧器应布置在原旋流燃烧器系统中层 或切圆燃烧器系统中上层位置。改造工程中仍需对 三大风机失速特性、水动力循环、锅炉热力计算、 气温壁温和环保装置适应性进行相应核算。

[参考文献]

- [1] OLAUSON J, AYOB M N, BERGKVIST M, et al. Net load variability in Nordic countries with a highly or fully renewable power system[J]. Nature Energy, 2016, 1: 16175.
- [2] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
 SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1):1-9.
- [3] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新 能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154.
 ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [4] 周强, 汪宁渤, 冉亮, 等. 中国新能源弃风弃光原因分析及前景探究[J]. 中国电力, 2016, 49(9): 7-12.
 ZHOU Qiang, WANG Ningbo, RAN Liang, et al. Cause analysis on wind and photovoltaic energy curtailment and prospect research in China[J]. Electric Power, 2016, 49(9): 7-12.
- [5] SCHILL W P, PAHLE M, GAMBARDELLA C. Start-up costs of thermal power plants in markets with increasing shares of variable renewable generation[J]. Nature Energy, 2017, 2: 17050.
- [6] 谢天,梁凌,张婷,等.火电机组瞬态特性研究现状综述[J].中国电机工程学报,2020,40(19): 6238-6246.
 XIE Tian, LIANG Ling, ZHANG Ting, et al. Status quo in

research on transient characteristics of thermal power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6238-6246.

- [7] 焦庆丰, 雷霖, 李明, 等. 国产 600 MW 超临界机组宽 度调峰试验研究[J]. 中国电力, 2013, 46(10): 1-4.
 JIAO Qingfeng, LEI Lin, LI Ming, et al. Testing on domestically-made 600 MW supercritical units in broad peak-regulation of power grids[J]. Electric Power, 2013, 46(10): 1-4.
- [8] 鲁鹏飞,薛宁. 超临界锅炉超低负荷调峰运行稳燃改造 方案研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 87-92.
 LU Pengfei, XUE Ning. Study on the stable combustion modification plan of supercritical boiler ultra-low load peaking operation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 87-92.
- [9] 周科,成汭珅,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. ZHOU Ke, CHENG Ruishen, XIE Bing, et al. Experimental study on combustion stability characte-ristics of typical swirl burners at low load[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(9): 121-126.
- [10] 蒋宏利, 丁海波, 魏铜生. 切圆燃烧锅炉低负荷 NO_x 生成 浓度偏高的原因及措施[J]. 中国电力, 2014, 47(12): 13-16. JIANG Hongli, DING Haibo, WEI Tongsheng. Cause analysis and prevention plans on high concentration NO_x production at low load in tangentially-firing utility boilers[J]. Electric Power, 2014, 47(12): 13-16.
- [11] LIU C, HUI S, ZHANG X, et al. Influence of type of burner on NO emissions for pulverized coal preheating method[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 85: 278-286.
- [12] 吕钊敏, 熊小鹤, 于世林, 等. 预热燃烧模式下半焦 NO 排放和燃尽特性实验研究[J]. 燃料化学学报, 2020, 48(5): 543-550.
 LYU Zhaomin, XIONG Xiaohe, YU Shilin, et al. Experimental study on NO emission and burnout characteristics during semi-coke preheating combustion[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2020, 48(5): 543-550.
- [13] 许鑫玮, 谭厚章, 王学斌, 等. 煤粉工业锅炉预燃式低氮 燃烧器试验研究与开发[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(5): 36-41. XU Xinwei, TAN Houzhang, WANG Xuebin, et al. Experimental study and development on a pre-burning low-NO_x burner for pulverized coal industry boiler[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(5): 36-41
- [14] 王小龙,张飞龙,王里,等.一次风速对高浓度煤粉预 燃式低氮燃烧器性能影响的数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(4): 132-138.
 WANG Xiaolong, ZHANG Feilong, WANG Li, et al. Numerical simulation of the effect of primary wind speed on the performance of high-concentration pulverized coal pre-combustion low-nitrogen burner[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(4): 132-138.
- [15] 高林, 王林, 刘畅, 等. 火电机组深度调峰热工控制系统改造[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 95-100.
 GAO Lin, WANG Lin, LIU Chang, et al. Thermal power plant deep peak shaving thermal control system transformation[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 95-100.
- [16] 虞国平,张新胜,屠海彪,等.火电机组深度调峰工况辅机安全控制技术研究[J].浙江电力,2021,40(2):85-90. YU Guoping, ZHANG Xinsheng, TU Haibiao, et al. Research on the safety control technology of auxiliary equipment in deep peak shaving conditions of thermal power units[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(2):85-90.

(责任编辑 马昕红)