

# 330 MW 机组燃用贫煤锅炉配煤掺烧 数值模拟研究

王小龙<sup>1</sup>, 张飞龙<sup>1</sup>, 王里<sup>1</sup>, 刘兴<sup>2,3</sup>, 谭厚章<sup>2</sup>

(1.神华神东煤炭集团有限责任公司, 陕西 神木 719315;

2.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;

3.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

**[摘 要]** 本文建立了贫煤锅炉配煤掺烧数值模型, 对 330 MW 机组锅炉不同配煤掺烧方案进行计算, 分析低氮燃烧模式下焦炭燃尽率的关键影响因素。结果表明: 掺烧位置对燃尽率有显著影响, 送入 4 层烟煤和 2 层贫煤时, 随着贫煤送入高度上移, 炉膛出口焦炭燃尽率由 98.9% 降低至 98.2%; 随着送入贫煤层数由 1 层增加至 5 层时, 焦炭燃尽率由 99.1% 降低至 97.2%, 焦炭燃尽率随着贫煤掺烧比例增加而降低; 送入小粒径贫煤层数由 0 层增加至 5 层时, 焦炭燃尽率由 97.6% 增加至 99.2%, 而仅通过顶部 2 层一次风喷口送入小粒径贫煤, 炉膛出口焦炭燃尽率即可达到 98.9%。配煤掺烧数值模型能够模拟炉内配煤掺烧过程, 获得煤粉锅炉炉内温度分布及飞灰含碳量的定量数据, 为确定最优配煤掺烧方案提供指导。

**[关键词]** 贫煤; 低氮燃烧; 配煤掺烧; 焦炭燃尽率; 粒径; 数值模拟

**[中图分类号]** TK16; TK221 **[文献标识码]** A **[DOI 编号]** 10.19666/j.rlfid.202106088

## Numerical simulation on coal blending in a 330 MW meagre coal boiler

WANG Xiaolong<sup>1</sup>, ZHANG Feilong<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, LIU Xing<sup>2,3</sup>, TAN Houzhang<sup>2</sup>

(1. Shenhua Shendong Coal Group Co. Ltd., Shenmu 719315, China; 2. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Xi'an Thermal Power Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710054, China;))

**Abstract:** A numerical model of coal blending for lean coal boilers is established to calculate different coal blending pattern on a 330 MW boiler. The key parameters to influence the char burnout ratio in low NO<sub>x</sub> combustion mode were analyzed. The simulation results show that the feeding height of meagre coal has a significant impact on the burnout ratio. When two layers of meagre coal were burned with the other four layers of bituminous coal, the burnout ratio at the furnace outlet is reduced from 98.9% to 98.2% as the height of blended layer increase. The burnout ratio decreases as the number of blended layer increases. As the meagre coal changes from one-layer blending to five-layer blending, the char burnout ratio decreases from 99.1% to 97.2%. When the meagre coal is burned in the upper 5 layers, the meagre coal with bigger particle size is substituted by the finer particles. The number of blended layers of small-particle coal increases from 0 to 5, the char burnout ratio increases from 97.6% to 99.2%. However, only the upper two layers of primary air fed with small particle size coal leads to 98.9% char burnout ratio. The coal blending numerical model can be used to calculate the in-furnace coal blending process. The quantitative data of furnace temperature distribution and carbon burnout can be obtained to provide guidance for the optimum coal blending strategy.

**Key words:** meagre coal, low NO<sub>x</sub> combustion, blended combustion, char burnout ratio, particle size, numerical simulation

由于低挥发分煤储量巨大<sup>[1]</sup>、具有成本优势, 我国有 50 多台 300 MW 及以上容量的四角切圆锅

收稿日期: 2021-06-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0603902)

Supported by: National Key Research and Development Plan of China(2017YFB0603902)

第一作者简介: 王小龙(1988), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电厂热力系统优化技术, 20017147@chnenergy.com.cn。

通信作者简介: 刘兴(1991), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为煤粉高效洁净燃烧技术, liuxingcn@163.com。

炉燃用低挥发分煤<sup>[2]</sup>。然而，低挥发分煤因挥发分能够提供的加热作用有限，送入炉膛后稳定燃烧较难，燃尽特性较差，这一问题在低氮燃烧模式下主燃烧区缺氧运行时更为突出<sup>[3-5]</sup>。采用特别设计的炉膛结构能够对低挥发分煤的稳定燃烧起到促进作用，例如 W 型炉或铺设卫燃带可以通过提高主燃区温度改善着火燃尽状况<sup>[6-8]</sup>，但氮氧化物排放较高<sup>[9]</sup>。煤粉预燃技术在实验室层面被证实能够同时实现高燃尽率和低氮氧化物排放<sup>[10-11]</sup>，但对于正在运行的锅炉，改造难度较大。

在已有电站锅炉对低挥发分煤进行高效洁净利用的可行途径是与高挥发分煤进行掺烧利用。研究结果<sup>[12]</sup>表明，与炉外掺烧方式相比，进行炉内掺烧能够减少高挥发分煤在燃烧初期“抢风”的不利影响。但是，对于实际电站锅炉中低挥发分煤掺烧比例、掺烧位置影响的研究，仍然存在争议<sup>[13-14]</sup>。低挥发分煤采用更小的煤粉细度是获得良好燃烧稳定性的关键<sup>[15]</sup>，但需要研究煤粉细度在空间位置分布对燃尽率的影响，以避免磨煤成本的浪费。

本文针对燃用低挥发分贫煤的 300 MW 机组四角切圆锅炉，通过数值模拟的方法研究低挥发分贫煤掺烧位置、掺烧比例及煤粉粒径对炉内燃烧过程及焦炭燃尽率的影响，为低氮燃烧模式下低挥发分煤掺烧应用提供理论指导。

## 1 研究对象与数值模型

某 300 MW 机组四角切圆锅炉采用中间一次再热、自然循环、单炉膛 II 型布置。炉膛高度为 64 m，截面为正方形，主燃烧区截面积为 163 m<sup>2</sup>。24 只燃烧器分 6 层布置，其中 B—F 层燃烧器为百叶窗水平浓淡燃烧器，喷口中心布置水平钝体结构强化稳燃。A 层燃烧器中心布置点火油枪，内部不布置百叶窗结构及稳燃钝体。燃烧器假想切圆直径为 790 mm，逆时针旋转（俯视）。考虑到 A 层结构的特殊性，本文低挥发分煤掺烧计算仅针对 B—F 层展开。同时，基于该锅炉实际结构按照 1:1 的比例建立几何模型，采用 ICEM 网格划分软件进行分区网格划分。冷灰斗区域及炉膛顶部区域网格较为稀疏，对主燃烧区及燃尽区网格进行局部加密，经网格无关性验证后，最终选取 200 万网格进行计算。炉膛结构示意及网格划分如图 1 所示。

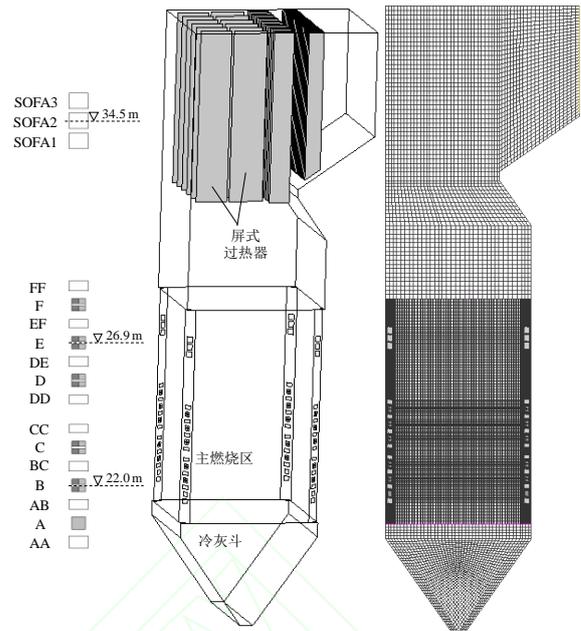


图 1 炉膛结构示意及网格划分

Fig.1 Diagram of the geometry and mesh of the furnace

炉内燃烧是湍流流动与剧烈燃烧反应耦合过程，本文建立配煤掺烧数值模型，对贫煤炉内掺烧过程进行模拟。其中，气相湍流流动采用可实现  $k-\varepsilon$  模型；气相组分之间的反应采用组分输运消耗模型；固体颗粒跟踪采用拉格朗日随机轨道模型；颗粒粒径分布采用 Rosin-rommler 分布，平均粒径 40  $\mu\text{m}$ ；辐射传热采用 DO 模型；挥发分释放采用双竞争速率模型；焦炭燃烧采用动力/扩散控制模型。输入煤质为该锅炉运行煤质，其工业分析及元素分析见表 1。由表 1 可见，低挥发分煤与高挥发分煤的挥发分、氢及氧质量分数差异明显。

表 1 煤质工业分析与元素分析  
Tab.1 Coal properties

项目	低挥发分煤	高挥发分煤
$w_{\text{ar}}(\text{M})/\%$	3.6	5.8
$w_{\text{ar}}(\text{A})/\%$	25.6	23.4
$w_{\text{ar}}(\text{V})/\%$	9.0	26.4
$w_{\text{ar}}(\text{FC})/\%$	61.8	44.5
$w_{\text{ar}}(\text{C})/\%$	61.4	54.2
$w_{\text{ar}}(\text{H})/\%$	1.48	3.10
$w_{\text{ar}}(\text{O})/\%$	6.02	11.82
$w_{\text{ar}}(\text{N})/\%$	0.95	0.97
$w_{\text{ar}}(\text{S})/\%$	1.00	0.75
$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ kg}^{-1})$	22.23	21.00

## 2 结果与讨论

### 2.1 掺烧位置对燃尽率的影响

为了研究炉内掺烧时低挥发分煤送入位置的影响，仅从 2 层一次风喷口送入低挥发分煤，其余 4 层一次风喷口送入烟煤，通过改变低挥发分煤的送入位置，低挥发分煤分别从 BC 层、CD 层、DE 层及 EF 层一次风送入炉内进行掺烧，以研究掺烧位置的影响。

图 2 为不同掺烧位置下炉膛中心截面的温度分布。由图 2 可以看出，分离燃尽风至屏式过热器之间的区域，烟气温度随着低挥发分煤掺烧层高度的增加而上移。这说明低挥发分煤在较高位置掺入后，火焰中心上移，着火燃烧过程推迟。在炉膛出口位置统计所有送入煤粉颗粒的焦炭燃尽率，结果如图 3 所示。

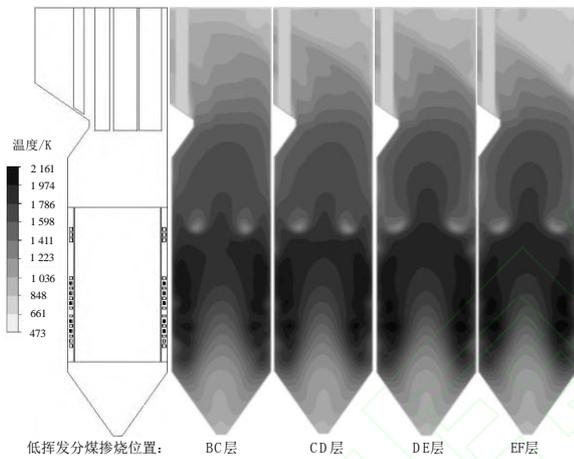


图 2 掺烧位置对炉膛温度分布的影响  
Fig.2 Effect of co-firing position on temperature

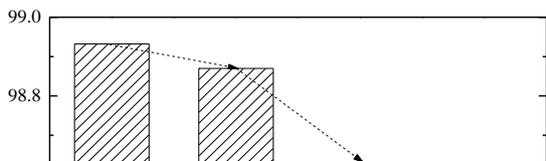


图 3 掺烧位置对燃尽率的影响  
Fig.3 Effect of blended position on burnout ratio

由图 3 可以看出：随着低挥发分煤的掺烧位置逐渐由 B、C 层上移至 E、F 层，焦炭燃尽率由 98.9% 降低至 98.2%。造成这一现象的主要原因有：送入

高度增加后，焦炭在炉内停留时间降低；同时，下层燃烧器送入的燃料能够在初始阶段及燃烧过程中，与相邻二次风供给的氧气进行接触，而 E、F 层送入的煤粉仅能在燃烧初始阶段与相邻二次风进行反应，且需要与下层送入后上行煤粉争夺新补入的氧气，不利于 E、F 层送入煤粉着火燃尽。

对每一工况下通过每层喷口送入的煤粉颗粒进行追踪，能够统计到每层喷口送入低挥发分煤至炉膛出口位置的焦炭燃尽率，其结果如图 4 所示。

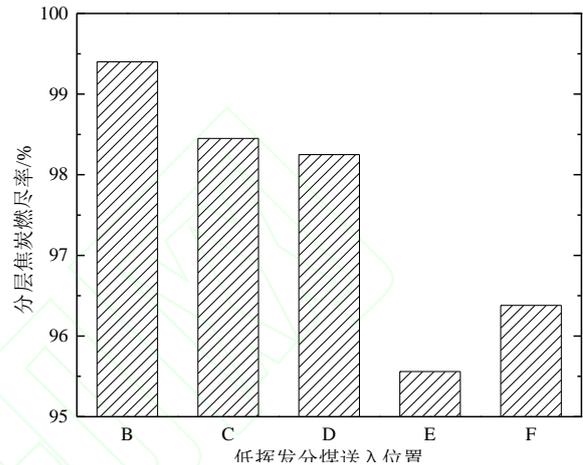


图 4 不同送入位置煤粉的焦炭燃尽率  
Fig.4 Coal char burnout ratio from different nozzle

由图 4 可以看出，通过 E、F 层一次风喷口送入的煤粉其焦炭燃尽率明显低于通过其他层一次风喷口送入的煤粉。这也是导致煤粉从较高位置送入后总体焦炭燃尽率显著降低的原因。与 E 层相比，尽管 F 层送入的煤粉其停留时间较短，但是由于 F 层与顶置 FF 层二次风相邻，在燃烧初期具备优于 E 层的补氧条件，F 层煤粉的燃尽率高于 E 层。

### 2.2 掺烧比例对燃尽率的影响

分别对低挥发分煤掺烧比例为 17% (B 层)、33% (B、C 层)、50% (B、C、D 层)、67% (B、C、D、E 层) 及 83% (B、C、D、E、F 层) 的燃烧过程进行计算，结果如图 5 所示。从图 5 可以看出：焦炭燃尽率随着掺烧比例增加而降低，随着低挥发分煤掺烧比例由 17% 变为 83%，炉膛出口焦炭燃尽率由 99.1% 降低至 97.2%；同时，掺烧层数由 3 层增加至 4 层时焦炭燃尽率显著减小，4—5 层掺烧的燃尽率显著低于 1—3 层。这与图 3 和图 4 不同位置掺烧的结果一致，即从上两层一次风 (E 及 F 层) 送入的低挥发分煤，其燃尽率显著低于从其他层送入的煤粉，进一步增加低挥发分煤掺烧比例受到 E 层和 F 层送入煤粉的燃尽率限制。因此，提高

低挥发分煤在这两层的焦炭燃尽率有利于进一步增加低挥发分煤的利用率。

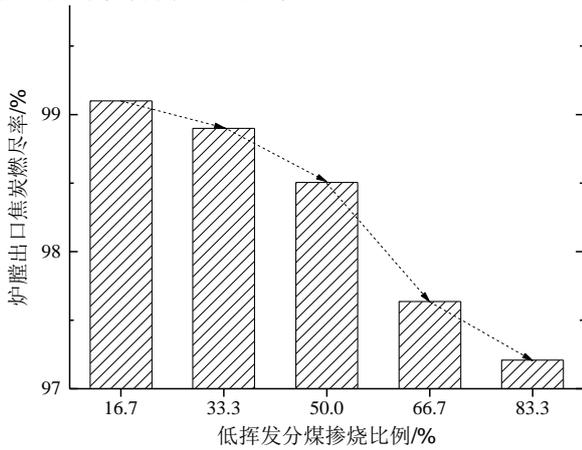


图5 炉膛出口位置焦炭燃尽率  
Fig.5 Coal char burnout ratio at furnace exit

### 2.3 小粒径煤粉分层掺烧对燃尽率的影响

低挥发分煤从高位送入燃尽率较低这一特性，限制了低挥发分煤掺烧比例的进一步增加。而通过更小粒径煤粉燃烧的方式来提高焦炭燃尽率会导致磨煤成本的增加。本节将探讨如何通过较低的煤粉磨制成本实现低挥发分煤的变粒径分层掺烧以获得较高的焦炭燃尽率。

计算基础工况为83%低挥发分煤掺烧比例，所有低挥发分煤(B\C\D\E\F层)粒径均为70 μm。在此基础上，分别对不同比例的低挥发分煤粒径减小至40 μm进行掺烧，考虑到E层和F层的焦炭燃尽率较低，因此掺烧顺序为从高层开始、逐渐向低层扩展。掺烧比例分别为：17%(F层为40 μm, C\D\E\F层为70 μm)、33%(E\F层)、50%(D\E\F层)、67%(C\D\E\F层)及83%(B\C\D\E\F层为40 μm)。

对不同小粒径低挥发分煤掺烧时，沿着炉膛高度横截面的平均温度进行统计，结果如图6所示。由图6可以看出：在从E\F层送入小粒径低挥发分煤工况下，炉膛温度在下4层燃烧器对应区域并无显著差别，而在E、F层炉膛温度显著增大，这说明炉膛温度的上升是更小粒径颗粒送入后所致；随着小粒径低挥发分煤的送入，主燃区的整体温度水平相应提高，这说明小粒径煤粉着火及燃烧反应提前发生，所释放的热量提升了炉膛温度。

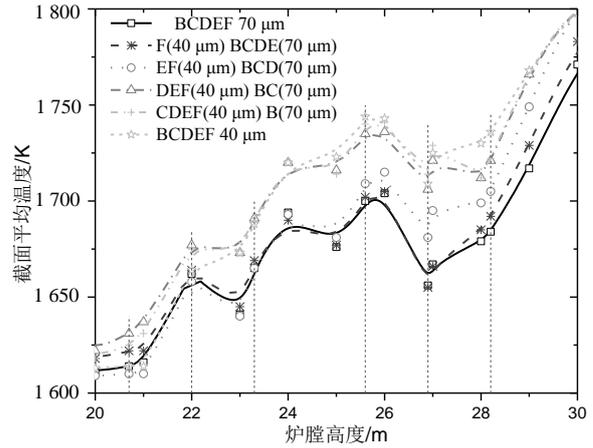


图6 炉膛截面平均温度  
Fig.6 Temperature at furnace cross sections

图7为不同比例的小粒径低挥发分煤掺烧时炉膛出口的焦炭燃尽率。从图7可以看出：焦炭燃尽率随着小粒径低挥发分煤掺烧比例增加，先迅速上升，高于2层后增长率趋缓；小粒径煤掺烧比例由0层增加至5层时，焦炭燃尽率由97.6%增加至99.2%；但仅通过从E、F这2层一次风喷口送入小粒径煤粉，炉膛出口焦炭燃尽率即可达到98.9%；将E、F层替换为小粒径煤时焦炭燃尽率提升1.33%，进一步将B、C、D3层低挥发分煤替换为小粒径煤，仅仅能使焦炭燃尽率提升0.26%。因此，从最上2层送入小粒径低挥发分煤能够在较少磨煤成本投入的前提下，获得较高的燃尽率。而进一步增加小粒径煤层数获得的燃尽率提升较小。

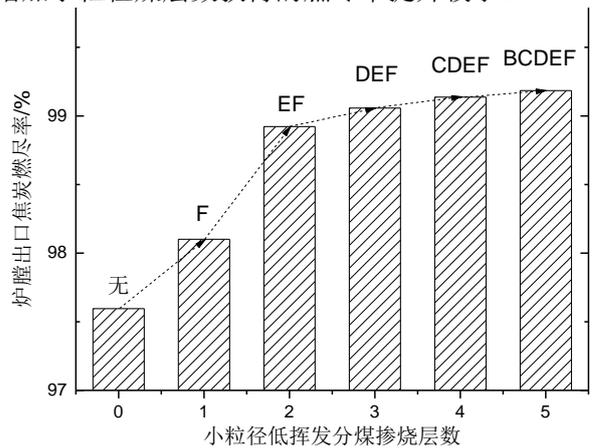


图7 小粒径不同掺烧层的影响  
Fig.7 Effect of particle size and injection layers

## 3 结论

1) 低挥发分煤掺烧位置对燃尽率有显著影响，

低挥发分煤经最上二层（E、F 层）燃烧器送入后其焦炭燃尽率显著低于中下层燃烧器（B、C、D）送入的低挥发分煤。这是由于煤粉停留时间与局部氧扩散效应在不同高度送入的差异所致。

2) 焦炭燃尽率随着低挥发分煤掺烧比例的增加而降低。随着低挥发分煤掺烧比例由 17% 增加至 83%，焦炭燃尽率由 99.1% 降低至 97.2%。

3) 采用较小粒径低挥发分煤替代大粒径煤粉进行掺烧时，当其掺烧比例由 0 层增加至 5 层时，焦炭燃尽率由 97.6% 增加至 99.2%。但仅通过最上 2 层一次风喷口送入小粒径煤粉，炉膛出口焦炭燃尽率即可达到 98.9%。因此，合理选择低挥发分煤掺烧位置和粒径，对低挥发分煤高效掺烧具有指导意义。

4) 本文建立的配煤掺烧数值模型能够模拟同类煤粉锅炉炉内配煤掺烧过程，获得炉内温度分布及飞灰含碳量的定量数据，替代大量现场试验，提前获得最优配煤掺烧方案。

#### [参考文献]

- [1] 安巍, 赵智慧. 焦炭含氮率对低挥发分煤粉燃烧模拟 NO<sub>x</sub> 计算的影响分析[J]. 锅炉技术, 2013, 44(2): 29-32.  
AN Wei, ZHAO Zhihui. The influence of nitrogen in char to the prediction of NO<sub>x</sub> in the numerical simulation for pulverized coal combustion with low volatile[J]. Boiler Technology, 2013, 44(2): 29-32.
- [2] MA L, FANG Q, YIN C, et al. A novel corner-fired boiler system of improved efficiency and coal flexibility and reduced NO<sub>x</sub> emissions [J]. Applied Energy, 2019, 238: 453-465.
- [3] ADEOSUN A, XIAO Z, YANG Z, et al. The effects of particle size and reducing-to-oxidizing environment on coal stream ignition[J]. Combustion and Flame, 2018, 195: 282-291.
- [4] SONG M, ZENG L, ZHAO Y, et al. Secondary air distribution in a 600 MWe multi-injection multi-staging down-fired boiler: A comprehensive study[J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93: 1250-1260.
- [5] XIONG X, LIU X, TAN H, et al. Investigation on high temperature corrosion of water-cooled wall tubes at a 300 MW boiler[J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93: 377-386.
- [6] 刘庆鑫, 湛志钢, 宋景慧. 600 MW “W” 火焰锅炉存在问题及探讨[J]. 锅炉技术, 2009, 40(6): 59-63.  
LIU Qingxin, ZHAN Zhigang, SONG Jinghui. Discussion of Problems Existing on 600 MW “W” Flame Boiler[J]. Boiler Technology, 2009, 40(6): 59-63.
- [7] WEI X, XU T, HUI S. Burning low volatile fuel in tangentially fired furnaces with fuel rich/lean burners[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45: 725-35.
- [8] KUANG M, LI Z, LIU C, et al. Experimental study on combustion and NO<sub>x</sub> emissions for a down-fired supercritical boiler with multiple-injection multiple-staging technology without overfire air[J]. Applied Energy, 2013, 106: 254-261.

- [9] LI S, CHEN Z, HE E, et al. Combustion characteristics and NO<sub>x</sub> formation of a retrofitted low-volatile coal-fired 330MW utility boiler under various loads with deep-air-staging[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 223-233.
- [10] SONG Wenhao, OUYANG Ziqu, WANG Minghao, et al. The combustion and NO<sub>x</sub> emission characteristics of the ultra-low volatile fuel using the novel pulverized coal self-sustained preheating combustion technology[J]. Fuel, 2020, 271: 117592.
- [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: 278-86.
- [12] 马仑, 方庆艳, 汪涂维, 等. 混煤燃烧过程中的交互作用: 煤种对混煤燃烧与 NO<sub>x</sub> 排放特性的影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2440-2446.  
MA Lun, FANG Qingyan, WANG Tuwei, et al. Interaction of blended-coal combustion process: Experimental study and numerical simulation of mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2440-2446.
- [13] MUTO M, WATANABE H, KUROSE R. Large eddy simulation of pulverized coal combustion in multi-burner system—effect of in-furnace blending method on NO emission[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30: 3153-3162.
- [14] BAEK SH, PARK HY, KO SH. The effect of the coal blending method in a coal fired boiler on carbon in ash and NO<sub>x</sub> emission[J]. Fuel, 2014, 128: 62-70.
- [15] 许传凯. 低挥发分煤的燃烧与 “W” 型火焰锅炉若干问题研究 [J]. 中国电力, 2004, 37(7): 37-40.  
XU Chuankai. Several problems with the combustion of low-volatile coal and W-flame boiler[J]. Electric Power, 2004, 37(7): 37-40.

(责任编辑 马昕红)