

200 MW 四角切圆锅炉燃烧器浓淡比对 NO_x 排放影响的数值研究

赵有生¹, 刘文华², 杨 荣²

(1. 国核电站运行服务技术公司, 上海 200233; 2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 以某热电厂 200 MW 四角切圆浓淡煤粉燃烧锅炉为对象, 通过数值模拟获得了该炉最大连续出力工况(BMCR)下炉膛内的流场、温度场及炉膛出口的 NO_x 浓度, 并进一步通过数值模拟探讨了改变水平浓淡煤粉燃烧器浓淡比对炉内燃烧及 NO_x 生成情况的影响。数值结果表明: 在 BMCR 工况下, 计算值与实际运行的在线仪表的记录值基本一致; 当浓淡比增大时, NO_x 生成量并不是单调的, 而是先降低后升高; 其中最佳浓淡比为 5 : 1, 且在此基础上采用“缩腰型”配风有助于进一步降低 NO_x 生成量。其计算结果可供同类锅炉实际运行时参考。

关键词: 锅炉; 浓淡比; NO_x; 数值模拟

中图分类号: TK 224

文献标志码: A

Numerical Investigation of Rich-Lean Ratio Effects on NO_x Emission Characteristics in 200 MW Coal-Fired Boiler

ZHAO Yousheng¹, LIU Wenhua², YANG Mo²

(1. National Nuclear Power Station Service Technology Corporation, Shanghai 200233, China;

2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract: Taking a 200 MW tangentially coal-fired boiler as an investigated object, numerical simulation methods were used to study the boiler maximum continuous rating (BMCR) condition and NO_x emissions in different pulverized coal shades, and the furnace flow field, temperature field and the characteristics of NO_x emissions were thus acquired. It turns out that under BMCR condition, the numerical calculating results can meet the design values in a better way. The main cause of the higher concentration of NO_x emissions is that the chamber excess air coefficient is large and the dual-channel burner's high NO_x emission characteristic is obvious. The best shade of pulverized coal in the actual operation is 5 : 1. The calculation results can be used as an operation reference for similar boiler.

Keywords: boiler; rich/lean ratio; NO_x emissions; numerical simulation

收稿日期: 2017-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51736007, 51476103)

第一作者: 赵有生(1966-), 男, 高级工程师。研究方向: E-mail: zhaoy@snpssc.com

通信作者: 杨 荣(1958-), 男, 教授。研究方向: 流动和传热的数值模拟。E-mail: yangm@usst.edu.cn

电站燃煤锅炉氮氧化物(NO_x)的排放是大气的主要污染源之一,近些年受到了越来越多的关注.目前我国的热电厂仍然有一些中小容量的机组在役,而这些中小机组的 NO_x 排放普遍较高,又无法简单移植大容量高参数机组的低 NO_x 燃烧技术^[1-3].因此研究中小机组的 NO_x 减排方案具有重要的实际意义.目前针对采用了浓淡煤粉燃烧技术的 200 MW 四角切圆燃烧锅炉高效低 NO_x 燃烧技术公开发表的研究成果较少.范贤振等^[4]对不同负荷下锅炉炉内的流动、传热及燃烧进行了数值模拟,较为准确地获得了不同负荷下炉内烟气组分的分布.潘维等^[5-6]以镇海电厂一台锅炉为对象,分别对当采用分级燃烧和超细煤粉分再燃技术时炉内燃烧和 NO_x 生成情况进行了数值模拟,结果表明,对于该锅炉超细煤粉再燃技术更有利于降低 NO_x 生成量.邢菲等^[7]对一台低 NO_x 改造后的锅炉炉内燃烧过程进行了研究,模拟结果与实验结果符合良好.

但是在实际四角切圆锅炉的数值计算中不仅要研究燃烧特性的影响,还要考虑到由非线性现象引起的非对称因素.王慧等^[8]以四角切圆锅炉抽象出的二维模型为基础,探究了在这种对称结构中不同

Re 数下出现非对称现象的机理. Yang 等^[9]在二维模型的基础上,进一步分析了三维模型中对称结构出现非对称热偏差的机理,并提出通过改变燃烧器偏转角度来减小热偏差的方法.本文参考上述思想,对国内某热电厂 200 MW 四角切圆浓淡煤粉燃烧锅炉炉膛内燃烧过程及 NO_x 生成情况进行了数值研究,提出通过改变燃烧器浓淡比及主燃区配风方式来降低 NO_x 的技术措施,可为同类型锅炉实际运行时降低 NO_x 排放提供参考.

1 研究对象及网格划分

某热电厂 1# 炉为哈尔滨锅炉厂生产的 HG-670/140-YM14 型超高压大容量锅炉,配 200 MW 汽轮发电机组.该锅炉呈“II”布置,采用单汽包、单段蒸发、大口径集中下降管、自然循环方式,平衡通风、固态排渣,配有 4 套钢球磨煤机中间储仓式制粉系统,采用制粉乏气送粉.锅炉炉膛高度 38.5 m,炉膛横截面尺寸 13.66 m×11.66 m.锅炉设计参数和煤质特性见表 1 和表 2.

表 1 锅炉的设计参数

Tab.1 Design parameters of the boiler

额定蒸发量/ ($\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$)	过热蒸汽出口 压力/MPa	过热蒸汽 温度/℃	再热器蒸汽进 口压力/MPa	再热器蒸汽 进口温度/℃	给水温度/℃	冷风温度/℃	热风温度/℃
670	13.7	540	2.32	311	249.5	30	338

表 2 燃煤元素分析及工业分析

Tab.2 Ultimate and proximate analysis of coal %

工业分析				
A_{ar}	M_{ar}	V_{daf}	M_{ad}	$Q_{\text{net,ar}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
26.39	13.14	39.79	5.38	17 597.8
元素分析				
C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}
47.15	3.36	8.64	0.76	0.06

锅炉每组燃烧器的一、四层采用直流式水平浓淡煤粉燃烧器,二、三层采用双通道燃烧器.每组燃烧器设有四层煤粉喷嘴,一、二次风相间布置,均等配风,按四角布置、双切圆燃烧,B,D角形成直径为 600 mm 的切圆,A,C角形成直径为 1 200 mm 的切圆,如图 1 所示.现燃烧器喷嘴布置如图 2 所示(见下页).

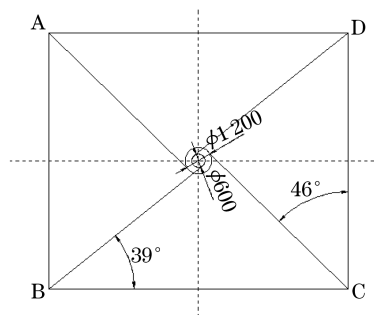


图 1 一次风水平切圆布置图

Fig.1 Primary air of horizontal tangential circle

本文取炉膛冷灰斗底部至锅炉高温过热器前的区域作为计算域进行网格划分.网格划分时,将整个计算域分割为冷灰斗区、主燃区和后燃烧区 3 个区域,每个区域均采用结构化六面体网格划分.此外,考虑到主燃区流场变化比较剧烈,又对主燃区网格

进行了局部加密. 为了获得较为精确的模拟结果并兼顾计算效率, 本文计算前对多套网格进行了网格无关性验证, 最终采用 130 万网格进行计算.



图 2 燃烧器布置图

Fig.2 Burners arrangement

2 数学模型及边界条件

2.1 数学模型

采用商业 CFD 软件作为模拟计算平台, 数值模拟采用三维稳态模型计算. 由于切圆炉内气流旋转上升, 故气相湍流模型采用对旋流有较好修正的 Realizable $k-\epsilon$ 模型, 用混合分数-概率密度函数模拟气相湍流燃烧, 煤粉颗粒的跟踪采用随机轨道模型并考虑气相湍流瞬时波动对颗粒轨迹的影响. 采用 P1 辐射模型计算炉内的辐射传热. 煤粉挥发分的析出采用单步反应模型, 焦炭的燃烧使用动力/扩散控制燃烧模型. 控制方程的求解采用 SIMPLE 算法、QUICK 差分格式.

NO_x 生成的模拟采用后处理的方法, 由于燃煤锅炉快速型 NO_x 生成量非常小, 可忽略不计, 故只考虑热力型 NO_x 和燃料型 NO_x 的生成. 热力型 NO_x 根据广义的 Zeldovich 机理计算, 燃料型 NO_x 的形成可分为挥发分 NO_x 和焦炭 NO_x . 假定挥发分热解中间产物为 90% 的 HCN 与 10% 的 NH_3 , HCN 可被 O_2 氧化成 NO , 也可被 NO 还原成 N_2 , 焦炭中的 N 全部转化为 NO . 整个 NO_x 计算过程中考虑湍流场温度的脉动以及氧原子的脉动对 NO_x 生成的影响.

2.2 边界条件

模拟计算工况均在 200 MW 负荷下, 燃烧器所有一、二次风喷嘴均设置为速度入口, 炉膛出口设为压力出口, 炉膛壁面设为无滑移边界条件, 并根据实验结果给定壁面温度 680 K. 煤粉直径分布遵循 Rosin-Rammler 分布, 最小直径为 30 μm , 最大直径为 300 μm , 平均直径为 70 μm .

位于一、四层的水平浓淡燃烧器利用煤粉弯管的离心力作用将一次风中的煤粉分为浓淡两股. 一次风通道被沿水平方向分割成左右两个浓度不同的通道, 两个通道中煤粉浓度的比例称为浓淡比. 为全面获得不同浓淡比下燃烧和 NO_x 排放的特性, 本文分别对包括设计工况在内的共计 6 个浓淡比工况进行了数值计算, 各工况详细入口参数如表 3 所示, 其中工况 3 为锅炉最大连续出力 (BMCR) 工况的边界条件.

表 3 计算工况表

Tab.3 Calculation conditions

工况	一次风率	二次风率	一次风温 /K	二次风温 /K	浓淡比
1	30 %	66 %	333	603	1 : 1
2	30 %	66 %	333	603	2 : 1
3	30 %	66 %	333	603	3 : 1
4	30 %	66 %	333	603	4 : 1
5	30 %	66 %	333	603	5 : 1
6	30 %	66 %	333	603	6 : 1

3 计算结果分析

3.1 设计工况的模拟

a. 计算结果验证.

为了验证数值计算的正确性, 本节取设计工况 3 的计算结果与锅炉运行记录值进行比较. 表 4 分别给出了炉膛出口各项数值计算结果与实验值的比较, 可得各项误差均在 5% 以内, 基本能够证明本文所用的数值方法与计算结果是可靠的.

表 4 数值计算结果与运行记录值的比较

Tab.4 Comparison between simulation results and operational records

数值类型	炉膛出口温度 /K	炉膛出口 NO_x 浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
数值模拟结果	1 287	647
运行记录值	1 343	674

b. 速度分布.

图 3 显示了炉膛不同高度横截面的速度分布, 由下至上分别为一层一次风截面、四层一次风截面、炉膛出口截面以及水平烟道截面. 观察一、四层一次风截面可知在炉膛中心处是低速旋转区, 气流切圆大小大于设计值, 但未过于贴壁, 没有对炉膛水冷壁进行冲刷. 由于本文所模拟的锅炉并未加装消旋二

次风,因而在炉膛出口截面,气流仍存在残余旋转,至使气流在进入水平烟道后出现速度偏差.

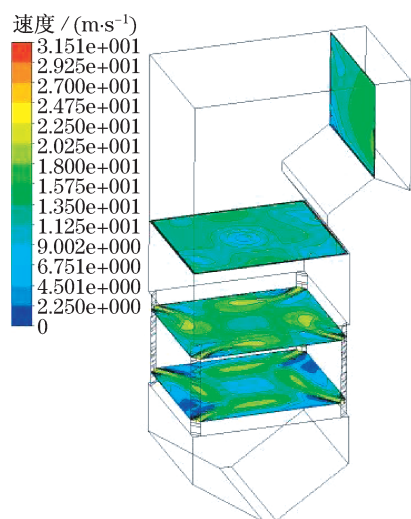


图3 炉膛不同高度截面的速度分布图

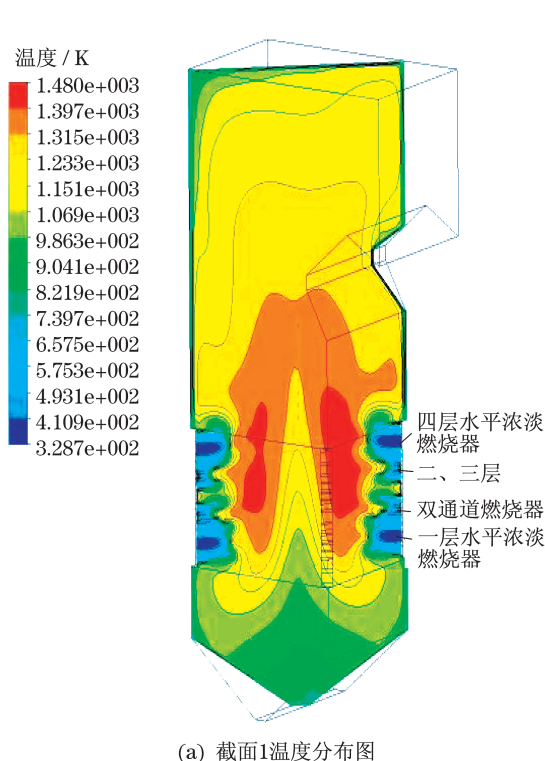
Fig.3 Velocity distribution on cross-section along the height of furnace

c. 温度分布.

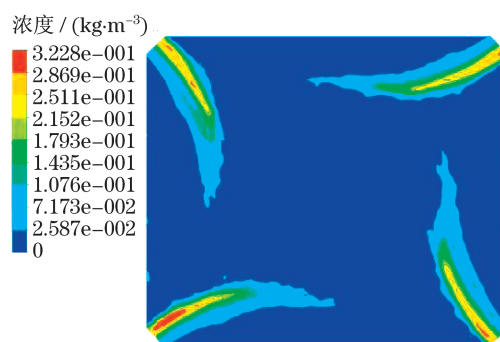
图4给出了锅炉炉膛内的温度分布图与煤粉颗粒浓度图,其中截面1为炉膛对角线截面,截面2为第一层燃烧器横截面.

从图4(a)可看出,炉膛的高温区主要集中在一次风喷嘴附近,火焰中心在炉膛主燃区中上游处.二、三层的双通道燃烧器,由于中间存在较大的突扩空间,能够卷吸大量的炉膛高温烟气,其着火明显提前于一、四层的水平浓淡燃烧器,数值模拟结果与实际运行经验符合,再次证明了本文计算结果的正确性.

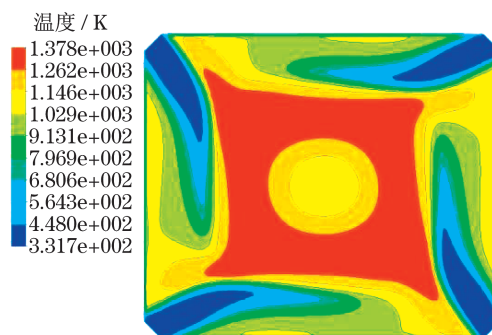
图4(b)显示了第一层煤粉喷嘴截面的颗粒浓度场,从图中可看出向火侧的煤粉浓度明显大于背火侧,燃烧器在水平方向实现了浓淡分离燃烧,结合图4(c)的温度分布,可见向火侧煤粉率先着火燃烧,再引燃背火侧的煤粉,淡煤粉气流在燃烧中心与炉膛壁面间形成一道屏障,能有效减少水冷壁面的高温腐蚀.



(a) 截面1温度分布图



(b) 截面2 煤粉浓度分布图



(c) 截面2 温度分布图

图4 炉膛温度分布图

Fig.4 Temperature field in furnace

d. 烟气组分分布.

图5(见下页)为炉膛对角截面 NO_x 浓度分布,从图中可看出 NO_x 浓度最大处位于炉膛第二、三层双通道燃烧器之间的区域.结合图6的 O_2 浓度分布

图,可以发现在 BMCR 工况下,双通道燃烧器出口一直处于富氧燃烧状态,使得燃烧反应处于氧化性气氛中,降低了 NO_x 减排效果.而一、四层燃烧器由于采用了水平浓淡分离燃烧,其 NO_x 生成量明显低

于双通道燃烧器. 在整个炉膛中, 由于未加装 SOFA 风喷口, 使得整个主燃区的空气过量系数较大, 造成炉膛出口处 NO_x 浓度偏高, 为 647 mg/m^3 .

由以上分析可见, 本文的数值结果与所能获得的电厂实际运行数据基本是吻合的, 验证了本文数值方法与计算结果的可靠性. 同时由流场、温度场、及生成物组分场的分析可见, 浓淡燃烧器的煤粉浓淡比, 会影响锅炉炉膛内 NO_x 的生成和分布特性. 如果浓淡比分配不合理, 使燃烧处于氧化环境中, 不利于抑制 NO_x 的生成.

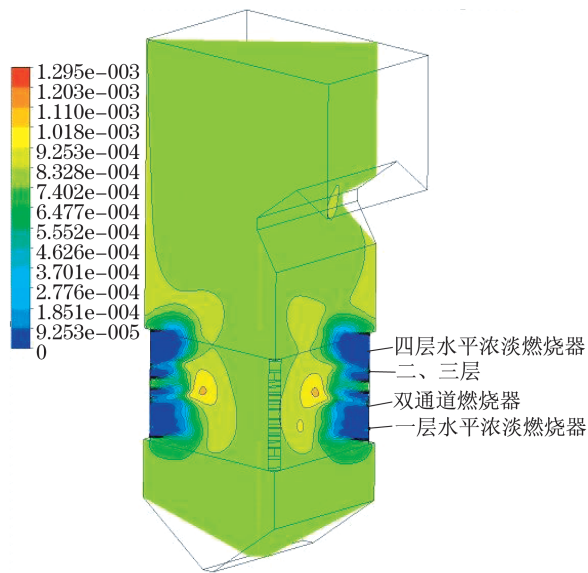


图 5 炉膛 NO_x 分布图

Fig.5 NO_x distribution in furnace

3.2 浓淡比对炉内燃烧及 NO_x 排放的影响

为进一步获得炉膛燃烧及 NO_x 排放规律, 本节在上节基础上进一步针对一、四层的水平浓淡燃烧器研究了不同水平煤粉浓淡比对锅炉炉内燃烧及 NO_x 排放特性的影响.

图 7 所示为不同浓淡比下炉膛出口处 NO_x 浓度(干态, $6\% \text{O}_2$), 从图中可看出随着浓淡比的提高, 出口 NO_x 浓度并非随之线性降低, 而是先减小后增大, 最小值出现在浓淡比为 $5:1$ 的工况, 与设计工况(即浓淡比为 $3:1$ 工况)相比减少了 14 mg/m^3 , 为

633 mg/m^3 . 尽管浓淡比优化后的 NO_x 生成量有所降低, 但结合 3.1 节对炉膛主燃区组分分布的分析可知, 二、三层双通道燃烧器出口附近氧量偏高, 使得燃烧一直处于富氧燃烧状态, 也是 NO_x 生成量过大的主要因素. 因此本文在最优浓淡比的基础上对主燃区的配风进行了进一步的优化, 即在保证总二次风量不变的前提下增加顶部、底部二次风量, 减小炉膛中间双通道燃烧器出口的助燃空气比例, 整体配风形成“缩腰”状态, 如表 5 所示.

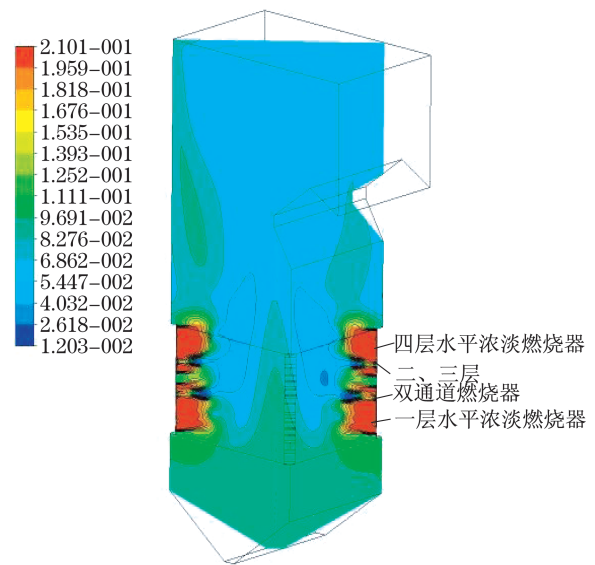


图 6 炉膛 O_2 分布图

Fig.6 O_2 distribution in furnace

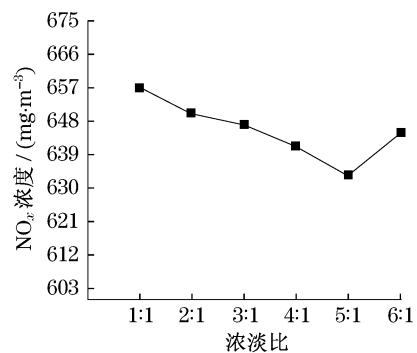


图 7 不同浓淡比下炉膛出口处 NO_x 浓度(干态, $6\% \text{O}_2$)

Fig.7 NO_x concentration at furnace outlet in different rich/lean ratios (dry, $6\% \text{O}_2$)

表 5 优化前后结果对比

Tab.5 Results before and after optimization

工况	顶部二次风/%	上上二次风/%	中上二次风/%	中部冷却风/%	中下二次风/%	下下二次风/%	底部二次风/%	NO_x 排放量/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$
均等配风工况	22.70	14.35	14.35	4.90	14.35	14.35	15.00	633
缩腰配风工况	24	15	10	2	10	15	24	601.3

优化后中间主燃烧区域处于负氧燃烧状态,在一定程度上抑制了 NO_x 的生成,因此最终计算结果中缩腰配风工况的 NO_x 排放量比均等配风工况降低了 32.7 mg/m^3 。虽然总体排放量有所降低,但依旧不能达到环保标准,因此该炉如果短期内不能淘汰,本文建议采用分级燃烧技术进行继续改进^[10]。

4 结 论

通过对某热电厂 200 MW 切圆燃煤锅炉设计工况及不同浓淡比下炉内燃烧和 NO_x 排放情况进行的数值计算可得出结论如下:

a. BMCR 工况下,主燃区处于氧化性反应气氛,锅炉整体 NO_x 排放浓度偏高,达到了 647 mg/m^3 。

b. 改变一、四层水平浓淡燃烧器煤粉浓淡比,能够在一定程度上降低炉膛出口 NO_x 的生成量。随着浓淡比的增加, NO_x 的生成量先减小后增大,其中最小值出现在浓淡比为 5:1 的工况。

c. 数值计算结果表明,在最优浓淡比工况的基础上采用“缩腰型”配风,通过减小炉膛中间双通道燃烧器出口的助燃空气比例,可将炉膛出口 NO_x 的生成量降低至 601.3 mg/m^3 。

参考文献:

- [1] AL-ABBAS A H, NASER J, HUSSEIN E K. Numerical simulation of brown coal combustion in a 550 MW tangentially-fired furnace under different operating conditions[J]. Fuel, 2013, 107: 688 - 698.
- [2] XU M H, YUAN J W, DING S F, et al. Simulation of the gas temperature deviation in large-scale tangential

coal fired utility boilers[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, 155(3/4): 369 - 380.

- [3] YIN C G, CAILLAT S, HARION J L, et al. Investigation of the flow, combustion, heat-transfer and emissions from a 609 MW utility tangentially fired pulverized-coal boiler[J]. Fuel, 2002, 81(8): 997 - 1006.
- [4] 范贤振,郭烈锦,高晖,等. 200 MW 四角切向燃烧煤粉炉炉内过程的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(3): 241 - 245.
- [5] 潘维,池作和,斯东波,等. 200 MW 四角切圆燃烧锅炉改造工况数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 110 - 115.
- [6] 潘维,池作和,李戈,等. 四角切圆燃烧锅炉燃烧和污染物排放数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(6): 761 - 764.
- [7] 邢菲,樊未军,崔金雷,等. 某 200 MW 四角切圆锅炉燃烧器改造降低 NO_x 数值模拟[J]. 热能动力工程, 2007, 22(5): 534 - 538.
- [8] 王慧,杨茉,王治云,等. 对称结构锅炉炉膛内非对称流动机理分析[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(11): 2162 - 2165.
- [9] YANG M, SHEN Y Y, XU H T, et al. Numerical investigation of the nonlinear flow characteristics in an ultra-supercritical utility boiler furnace[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 88: 237 - 247.
- [10] 刘文华,杨茉,李峥,等. 200MW 燃煤炉分级燃烧及 NO_x 减排的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(12): 2590 - 2593.

(编辑:董 伟)