

姜思源,王永英,周建明,等.中等挥发分烟煤回燃逆喷式燃烧数值模拟[J].煤炭学报,2014,39(6):1147-1153. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0055

Jiang Siyuan, Wang Yongying, Zhou Jianming, et al. Numerical simulation on middle volatile coal combustion in reversed injection burner [J]. Journal of China Coal Society 2014, 39(6): 1147-1153. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2014.0055

中等挥发分烟煤回燃逆喷式燃烧数值模拟

姜思源^{1,2,3}, 王永英^{1,2,3}, 周建明^{1,2,3}, 张鑫^{1,2,3}, 宋春燕^{1,2,3}

(1. 煤炭科学研究总院 节能工程技术研究院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室, 北京 100013)

摘 要: 为扩展逆喷室燃煤粉工业锅炉对中等挥发分烟煤的适用性, 以大同烟煤为研究对象, 利用数值模拟技术, 对 14 MW 旋流逆喷式燃烧器三维建模, 模拟了燃烧器内的燃烧组织过程。通过对挥发分较高的神华煤模拟结果发现: 着火位置、供料量和燃烧室温度均是影响中挥发分烟煤燃烧稳定的关键因素, 延长高温区域、增加回流区域面积、强化燃烧器燃烧过程组织可有效提高燃烧器对中等挥发分煤种的燃烧效果。根据煤质特性, 选择相应的运行条件可起到良好的稳定燃烧作用。结合现场运行, 同时对现有燃烧器进行了优化研究, 最终确定了 14 MW 燃烧器燃用大同煤的最佳运行工况, 即一次风速为 24 m/s、二次风速为 10 m/s 和进料量为 0.35 kg/s 的优化运行条件。经对运行过程检测, 燃烧器出口和炉膛温度由原来的 926.5 °C 和 856.7 °C 分别升高至 1 055.6 °C 和 938.8 °C, 燃烧效率达到 98% 以上, 燃烧更加稳定。

关键词: 中等挥发分烟煤; 燃烧特性; 煤粉燃烧

中图分类号: TQ534

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2014)06-1147-07

Numerical simulation on middle volatile coal combustion in reversed injection burner

JIANG Si-yuan^{1,2,3}, WANG Yong-ying^{1,2,3}, ZHOU Jian-ming^{1,2,3}, ZHANG Xin^{1,2,3}, SONG Chun-yan^{1,2,3}

(1. Energy Conservation and Engineering Technology Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of High Efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China)

Abstract: In order to broaden middle volatile coal adaptability on the pulverized-coal industrial boiler system, the three-dimension model of the 14 MW reversed injection burner was built by using the Datong coal and the simulation technology. Compared the simulation results of Datong coal and Shenhua coal, the position of ignition, feed flow, temperature of combustor are the pivotal conditions of stable combustion, extending high-temperature area, increasing the area of recirculation zone and improving combustion performance, which could efficiently improve the combustion capability of the middle volatile coal. The optimum operating conditions which determined by characteristics of coal were also researched, the optimized operation conditions of the Datong coal were fix on at last, that is, the primary air speed 24 m/s, the secondary air speed 10 m/s, the feed flow 0.35 kg/s. By the industry testes, the outlet temperature of burner changes from 926.5 °C to 1 055.6 °C; the temperature of boiler changes from 856.7 °C to 938.8 °C and combustion efficiency is up to 98%; the coal burning process are more steadily.

收稿日期: 2014-01-16 责任编辑: 张晓宁

基金项目: 国家国际科技合作资助项目(2012DFA60860); 煤炭科学研究总院基础研究基金资助项目(2012JC04)

作者简介: 姜思源(1988—), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生。Tel: 010-84264902, E-mail: erlejsy@163.com

Key words: middle volatile coal; combustion characteristic; pulverized-coal combustion

由煤炭科学研究总院自主研发的高效煤粉工业锅炉系统自 2006 年推广示范以来,已在国内大量推广应用,取得了良好的节能减排示范效果,得到了市场的广泛认可^[1]。但因其燃烧器现有的回燃逆喷式结构,目前仅限于使用神木府谷及鄂尔多斯地区 $V_{daf} \geq 30\%$ 的优质长焰煤作为燃料,制约了其今后的迅速发展^[2]。因此,深入研究该类型燃烧器结构对燃烧过程影响,改进其结构,拓宽其煤种使用范围,将对煤粉工业锅炉系统的完善和发展具有重大意义。

国内外研究机构为拓展燃烧器对低挥发煤种的适应性,均进行了相应的燃烧器结构研究。日本三菱和日立公司利用浓淡分离技术,针对低挥发分煤开发了 PM 燃烧器和 NR 燃烧器;美国 B&G 公司设计的 DRB 燃烧器,利用分级配风技术,实现了低挥发分煤的低氮燃烧;清华大学和中国科学院力学研究所等单位开发了大速差射流燃烧器,在电站锅炉内实现了对各种低挥发分煤的燃烧^[3]。燃烧器结构设计主要通过理论分析和综合试验研究结果而提出来。随着计算流体力学的发展和数值模拟技术在电站锅炉、循环流化床锅炉的成功应用,数值模拟技术已成为燃烧器研究的重要手段。刘建全等利用数值模拟技术对 1 000 MW 超临界锅炉进行了研究,比较了 3 种燃烧器改进方案,选定二次风扩口减少为最佳改进方案^[4],同时研究了燃烧器稳燃特性对氮氧化物排放

特性的影响^[5]。陈冬林等通过计算流体力学方法研究了一种多段式自预热燃烧器及其 4 种典型的预热室结构^[6],并利用数值模拟设计了一种新型的多段式自预热燃烧器^[7]。被认为是燃烧学基础研究实现了历史性突破的大涡模拟和直接模拟在煤粉燃烧领域的应用,更是让数值模拟技术逐渐脱离实验研究,而成为独立的研究手段^[8]。Akitoshi Fujita 等利用直接模拟研究了喷射火焰,分析了燃烧过程中气液固三相相间传热与火焰传播速度,确定了燃料液滴尺寸对火焰喷射的影响^[9]。正是数值模拟技术在燃烧领域这些具有典型性的成功案例,使其已经成为一种被广泛接受的燃烧器结构研究手段^[10]。

笔者选用 20 t/h 煤粉锅炉使用的 14 MW 回燃逆喷式燃烧器为模拟对象,对煤粉在燃烧器内的燃烧过程进行三维模拟。针对影响煤粉稳定燃烧的关键因素,对其运行工况进行优化,通过工程应用对优化结果进行验证。

1 煤质分析

选用大同煤粉锅炉系统实际燃用烟煤作为中等挥发分烟煤代表,煤样的工业分析和元素分析见表 1。其热重分析采用德国 STA 449 F3 热重分析仪,实验条件为:升温速率 20 °C/min,气氛流量 100 mL/min 空气,样品用量 30 mg。

表 1 煤样工业分析与元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal sample

%

工业分析				元素分析					
M_{ad}	A_{ad}	FC_{ad}	V_{daf}	C_{ad}	H_{ad}	O_{ad}	N_{ad}	S_{ad}	
5.82	29.40	44.68	25.41	55.03	3.44	8.81	0.79	0.71	

利用热重曲线(图 1)计算煤燃烧反应参数指前因子和反应活化能^[11],经计算指前因子 A 为 6.7,反应活化能 E 为 113.8 MJ/mol。依据煤的工业分析、元素分析和煤燃烧反应参数,设置 Fluent 中的物性参数:固定碳质量分数为 44.84%;燃烬率为 10.6%;着火点为 445.2 °C;燃烧反应指前因子为 6.7;燃烧反应活化能为 113.8 MJ/mol。

2 计算方法和数学模型

模拟计算在计算流体力学商业软件 ANSYS Fluent 14.5 上完成。求解过程使用隐式线性分离计算方法,利用 SIMPLE 算法求解压力速度耦合。采用二阶

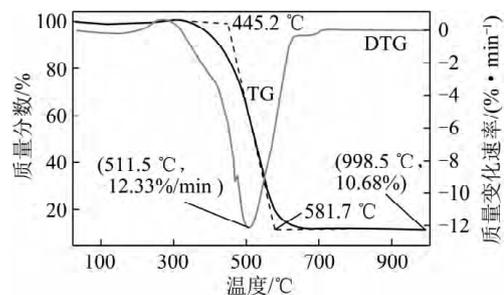


图 1 热重分析曲线

Fig. 1 Thermography curves of coal

迎风格式计算所有输运方程,以提高计算精度。计算过程考虑重力加速度。温度相关的流体性质使用理想气体混合率进行计算^[12]。

2.1 连续相方程

流体流动过程在欧拉坐标系下进行求解。连续相方程为质量、动量、能量的连续性方程和时间均值的纳维斯托克斯方程。同时,在连续相方程中添加组分输运方程以求解反应流。

2.2 湍流模型

湍流模型使用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,以准确模拟燃烧器中存在的中等强度旋流,并使用标准壁面函数对湍流近壁处进行模拟^[13]。

2.3 辐射模型

辐射模型使用离散坐标辐射模型,并采用灰气加权模型(the weighted-sum-of-gray-gases model)计算气体的辐射吸收系数。

2.4 离散相模型

煤粉颗粒使用拉格朗日坐标系下的随机颗粒轨道模型进行模拟。每 15 步计算更新一次相间的热量、质量和动量交换。煤粉颗粒从一次风入口进入,入射速度与一次风相同^[14]。

2.5 化学反应模拟

为提高计算效率,采用总包反应机理对煤燃烧过程进行简化,机理见表 2,将煤粉燃烧过程分为挥发分析出、挥发分燃烧和固定碳燃烧 3 个部分,其中挥发分析出和燃烧过程被等价为挥发分产物的氧化过程^[15],燃烧各过程所使用的反应模型见表 3。

表 2 简化的煤燃烧反应

Table 2 Simplified coal combustion mechanism

反应	反应方程	反应类型
挥发分氧化	$\text{Volatile} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	体积反应
CO 氧化	$\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	体积反应
H ₂ 氧化	$\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	体积反应
固态碳氧化	$\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	表面反应
固态碳气化	$\text{C}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$	表面反应
固态碳气化	$\text{C}(\text{s}) + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$	表面反应

表 3 反应模型

Table 3 Chemical processes models

反应过程	反应模型
挥发分析出	双反应竞争模型
挥发分燃烧	涡消散模型(the eddy dissipation model)
固定碳燃烧	异相反应模型(the kinetic/diffusion-limited model)

3 燃烧器网格划分

煤粉燃烧器由一次风管、回流帽、双锥燃烧室、导流叶片和二次风壳组成,其结构如图 2 所示。燃烧过

程为:一次风携带煤粉由一次风管进入燃烧器,经回流帽反射后进入双锥燃烧室;二次风由二次风口进入燃烧器,经导流叶片导流后进入双锥燃烧室;一次风和二次风在双锥燃烧室内相遇,并由油枪点燃煤粉,使煤粉着火燃烧,在旋流二次风的作用下气流逆向旋转至燃烧器出口,进入炉膛煤粉继续完成燃烧过程。表 4 列出了模拟边界条件。

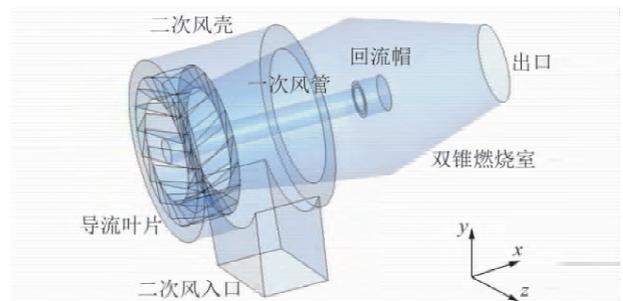


图 2 燃烧器结构

Fig. 2 Burner structure

表 4 模拟边界条件

Table 4 Boundary conditions of simulation

边界条件	一次风入口	二次风入口	燃烧器出口	煤粉流量
条件类型	Velocity-inlet	Velocity-inlet	Press-outlet	Total flow rate

为满足热态模拟的网格质量要求,利用 ICEM 网格划分软件对物理模型进行网格划分。燃烧器采用全六面体网格划分,网格总数 5 664 032,最小与最大雅克比矩阵行列式比值大于 0.73(图 3)。

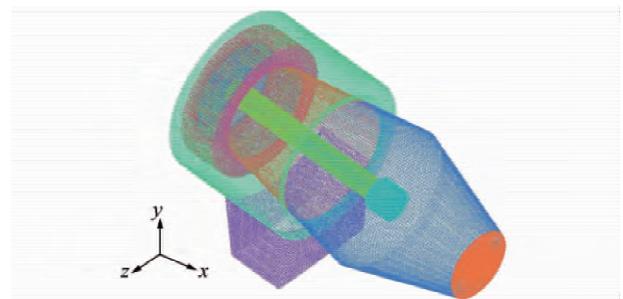


图 3 燃烧器网格

Fig. 3 Grid of burner

为满足边界层条件对一次风管两侧双锥燃烧器内部进行网格加密;为模拟回流帽处流场转向和满足回流帽的边界层条件,使用 o-block 技术对回流帽内部进行网格加密;一、二次风相互作用处因速度梯度大进行局部网格加密,火焰内部和边缘由于温度梯度大而进行局部网格加密^[16](图 4~6)。

4 额定工况模拟

额定工况为:一次风速为 16 m/s;二次风速为

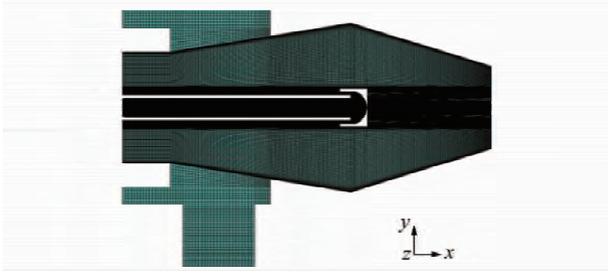


图 4 燃烧器内部网格

Fig. 4 Grid of interior burner

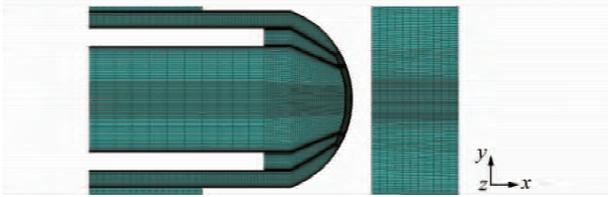


图 5 回流帽边界层网格加密

Fig. 5 Grid of reflux cap

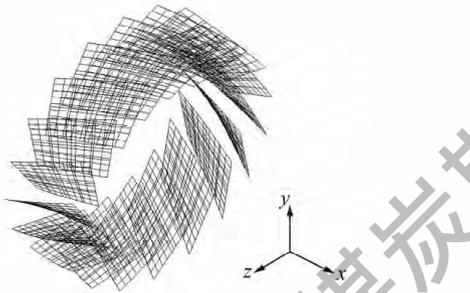


图 6 导流叶片网格

Fig. 6 Grid of guide vane

8 m/s; 进料量为 0.18 kg/s。

4.1 温度场分析

图 7 为燃烧器 $y=0$ 切面和 $x=1.5$ 切面的温度分布云图。可知, 燃烧室内部温度分布近似为轴对称

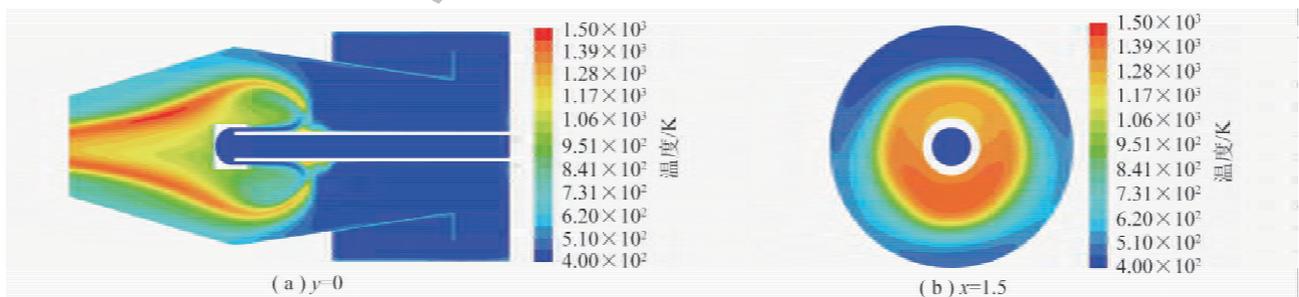


图 7 燃烧器切面温度场分布

Fig. 7 The temperature distribution of longitudinal-section in the chamber

图 10 为内侧和外侧颗粒物轨迹。可知, 燃烧器内颗粒物轨迹可分为两种, 均由回流帽射入燃烧室, 在一、二次风接触的低速区发生转向, 转向后距锥面更近的外层煤粉颗粒, 在二次风作用下, 轨迹变为螺旋线型, 旋转进入炉膛; 靠近回流帽的内层煤粉颗粒

分布, 对称轴为 x 轴。图中火焰右侧的高温区是煤粉着火区, 煤粉运动至着火区处着火燃烧。回流帽出口至着火区前的低温区为煤粉加热区, 一次风和煤粉在加热区内通过火焰的辐射和对流加热达到着火温度。火焰左侧的高温区是煤粉聚集区, 二次风的旋流作用使风、粉向燃烧器中轴聚集, 聚集区内煤粉浓度高, 反应剧烈, 产生高温区。

4.2 速度场分析

图 8 为 $y=0$ 平面的速度分布和速度矢量分布。可知, 二次风进入燃烧室后, 经前锥扩角扩散, 产生一个中速区; 一次风通过回流帽进入燃烧室, 在回流帽出口形成一个高速区; 一次风和二次风在燃烧室前锥中部相遇, 产生一个低速区; 二次风与一次风汇合后, 在回流帽外部形成半弧形低速区, 弧内部为高温烟气回流区; 一、二次风经后锥加速后, 在燃烧器出口形成一股高速射流进入炉膛。分析速度场可知, 逆喷式燃烧实现了煤粉输运段和反应段的速度转换: 输运段煤粉为高速, 保证了供料的稳定性; 反应段煤粉为低速, 保证了着火稳定性。

4.3 连续相和离散相分析

图 9 为一次风和二次风的轨迹流线。可知, 二次风经导流叶片进入燃烧室后, 运动轨迹成螺旋线型, 沿 x 轴旋转进入炉膛; 一次风经回流帽转向, 逆喷进入燃烧室, 遇二次风后再次转向, 并在二次风的旋流作用下, 运动轨迹也变成螺旋型, 旋转进入炉膛。叶片对二次风的导流作用, 增强了燃烧室内的旋流强度, 促进了燃烧器内部的传热、传质作用。同时, 燃烧器出口旋流有助于加强燃烧器后锥的聚火作用, 升高了燃烧器后锥火焰温度。

进入涡流区, 围绕涡流旋转后, 进入炉膛。通过离散相颗粒物停留时间分析可得煤粉颗粒的最短停留时间为 0.4 s, 最长为 0.7 s, 平均为 0.5 s。对比直喷式燃烧器, 逆喷式进料延长了煤粉颗粒的停留时间, 提高了燃烧器内平均温度, 使燃烧更加稳定。

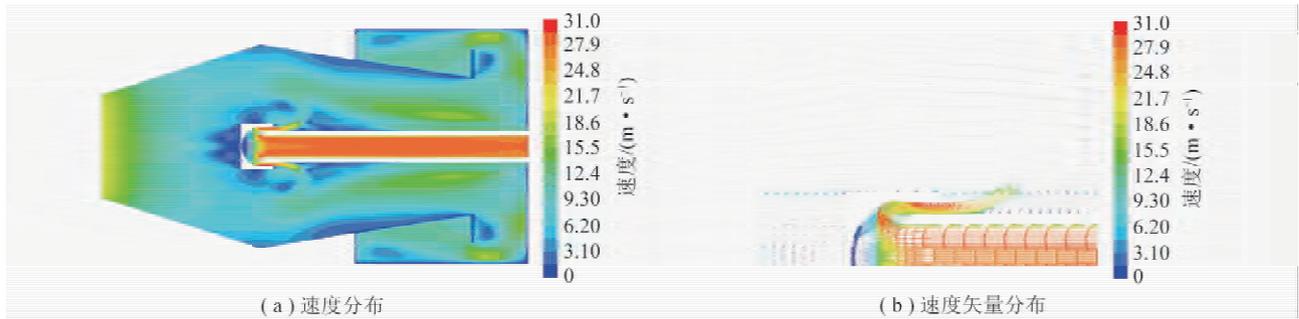


图 8 燃烧器切面($y=0$) 速度分布与速度矢量分布

Fig. 8 The velocity distribution and velocity vector distribution of longitudinal-section($y=0$) in the chamber

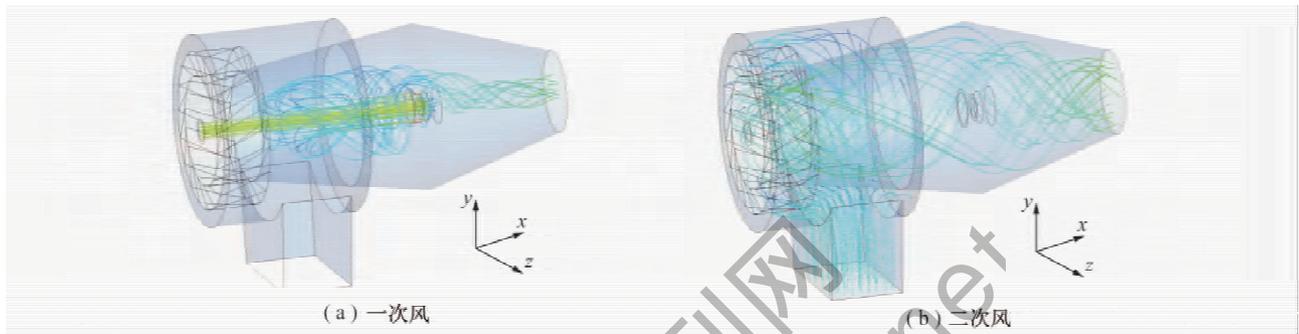


图 9 一次风和二次风轨迹流线

Fig. 9 The pathline of primary air and secondary air

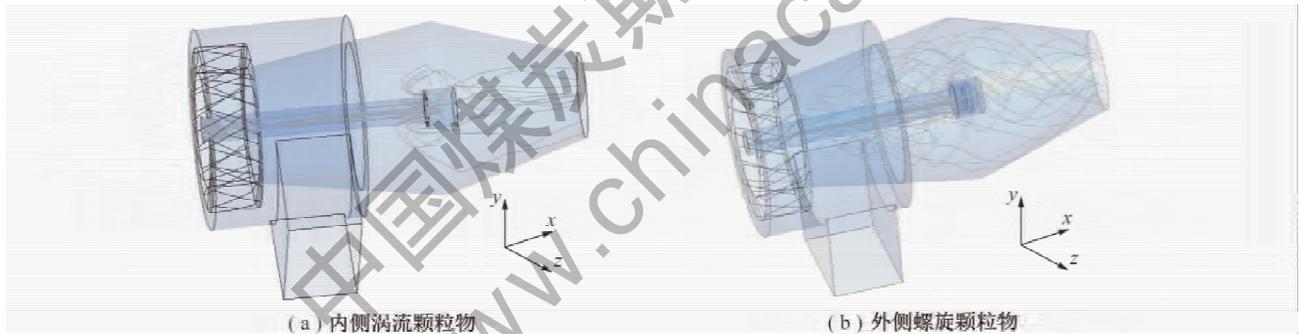


图 10 内侧涡流颗粒物和外侧螺旋颗粒物轨迹线

Fig. 10 The inside whirlpool particle and outside spiral particle trajectory

4.4 燃烧的组织合理性

由模拟结果分析可知,旋流逆喷燃烧的组织过程合理,为中等挥发分烟煤的快速着火和稳定燃烧提供了有利条件:①煤粉着火区为温度场中的高温区和速度场中的低速区。着火区内煤粉的流动速度最低、浓度大,与新鲜二次风接触氧含量高,有益于煤粉的迅速点燃和稳定燃烧,符合煤粉火焰稳定燃烧原理中的“三高区”原理^[17];②一次风在燃烧器中的逆喷使煤粉在点燃前经过一段减速加热区,且加热区上方存在高温烟气回流,加热过程中一次风的减速和高温烟气回流保证了煤粉的着火燃烧;③煤粉着火后,旋流作用使煤粉向燃烧器中轴运动,在燃烧室后锥产生高浓度煤粉区,从而产生了燃烧反应强烈的高温区,保证了后锥处煤粉的充分燃烧。

4.5 中等挥发分烟煤稳燃因素

因煤质特性差异,中等挥发分大同烟煤燃烧温度场与神华煤温度场相比^[18]存在以下不足:①大同煤挥发分低、煤粉着火热高,导致火焰内部存在明显低温区;②大同煤反应性差、热值低,造成燃烧器出口温度低,仅为 1 127 K;③大同煤着火位置靠前,火焰长度过短,导致燃烧室内存在大量低温区。

中等变质烟煤温度场总体温度低,难以保证其在低负荷下的稳定燃烧;而温度场总体温度低,归结于着火点靠前。综上,中等挥发分烟煤稳定燃烧的关键因素为着火位置、供料量和燃烧室温度。

5 工况优化

为调整着火位置、确定供料量、提高燃烧室内温

度,对运行工况进行优化(表 5)。

表 5 模拟工况

Table 5 The operating conditions of simulation

工况	一次风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	二次风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	进料量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	28	8	0.18
2	16	11	0.18
3	16	9	0.35
4	28	10	0.40
优化	24	10	0.35

5.1 一次风速

一次风速影响着火位置。高一次风速(28 m/s)

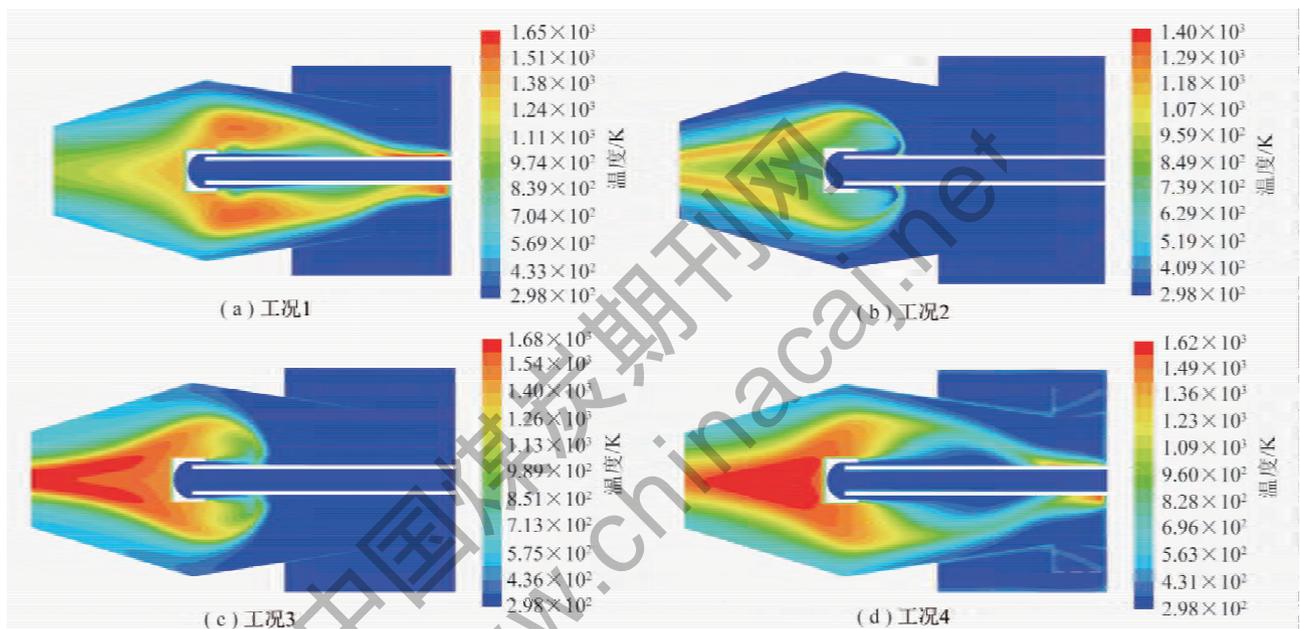


图 11 温度场分布

Fig. 11 The temperature distribution

5.3 进料量

进料量影响燃烧室内温度和火焰内低温区面积。增大进料量可以提升燃烧室内温度,如图 11(c)所示。同时,增大进料量也会增加火焰内低温区面积,因此过大的进料量可能导致断火,如图 11(d)所示。

5.4 工况的优化

根据工况对燃烧稳定性的影响,最终确定优化工况如下:增加一次风速至 24 m/s,二次风速至 10 m/s,使着火点位置后移,火焰长度增加;控制合理低温区面积,并增加进料量至 0.35 kg/s,使燃烧器内总体温度升高。

优化工况后,温度场得到明显改善:双锥燃烧室内火焰面积增加,燃烧器内温度升高,增强了燃烧器内辐射传热;低温区向燃烧器轴向延伸距离增加,着火区面积增加,进一步加强了煤粉在燃烧器内的辐射

下,着火位置靠近燃烧器前盖(图 11(a)),会导致燃烧器过热;低一次风速(16 m/s)下,着火位置靠前(图 7),火焰过短,且不利于点火枪点燃煤粉。合理的着火点位置应位于燃烧室后锥中部,既能避免燃烧器前盖过热,又能扩大燃烧器内煤粉燃烧区域。

5.2 二次风速

二次风速影响火焰厚。高速二次风(11 m/s)压缩火焰厚度,减少燃烧器内煤粉燃烧区域,降低燃烧器内整体温度,不利于煤粉在燃烧器内的燃烧,影响燃烧的稳定性的,如图 11(b)所示;低二次(5 m/s)风不能提供煤粉燃烧所需氧气,无法保持燃烧强度和燃烧稳定性。

和对流传热,提高了燃烧器组织中等挥发分烟煤的着火和稳燃能力(图 12)。

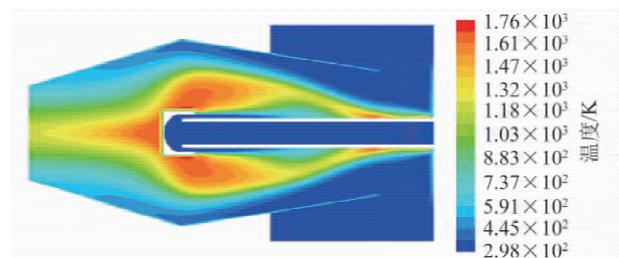


图 12 优化后的温度场分布

Fig. 12 The temperature distribution after optimizing

5.5 工程实试验证

为验证模拟结果的正确性,在同煤集团 20 t/h 煤粉锅炉进行燃烧器优化后工况验证。结果显示,优化后燃烧器出口温度由原额定工况的平均 926.5 °C(运行 24 h 的平均值)提升到平均 1 055.6 °C;燃烧

效率由原来 94% 提升到 98%; 炉膛内部温度由平均 856.7 °C 提升到 938.8 °C; 炉膛负压和燃烧稳定性均得到提高, 显著改善了燃烧器对大同烟煤适应性。

6 结 论

(1) 逆喷双锥燃烧室燃烧器为煤粉燃烧提供了有利条件。但由于中等挥发分烟煤煤质反应性差, 从而显著影响了燃烧室内温度场分布, 造成其难以稳定燃烧。

(2) 优化运行参数, 延长高温区域, 增加回流区域面积, 强化燃烧器燃烧过程组织, 可有效提高燃烧器对中等挥发分烟煤的组织燃烧能力。

(3) 通过模拟和应用研究, 示范锅炉使用的中等挥发分大同烟煤的燃烧效果得到显著改善, 燃烧器出口温度和炉膛内部温度由原来 926.5 °C 和 856.7 °C 分别升高至 1 055.6 °C 和 938.8 °C, 燃烧效率达到 98% 以上, 燃烧更加稳定。

参考文献:

- [1] 李绪国. 我国煤炭资源安全高效绿色开发现状与思路[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(8): 53-57.
Li Xuguo. Status and idea on safety and high efficient and green development of China coal resource[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(8): 53-57.
- [2] 冯现河. 高效煤粉工业锅炉技术开发机示范推广[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(4): 62-66.
Feng Xianhe. Development and popularization of efficient pulverized coal fired industrial boiler technology[J]. Clean Coal Technology, 2011, 17(4): 62-66.
- [3] 周建明. 低挥发分煤粉燃烧新技术发展与应用[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(4): 54-57, 81.
Zhou Jianming. Development and application of low volatile pulverized coal combustion technique[J]. Clean Coal Technology, 2011, 17(4): 54-57, 81.
- [4] 刘建全, 孙保民, 张广才, 等. 1 000 MW 超超临界旋流燃烧锅炉稳燃特性数值模拟与优化[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(8): 19-27, 144.
Liu Jianquan, Sun Baomin, Zhang Guangcai, et al. Numerical simulation and optimization on stable combustion of a 1 000 MW ultra supercritical unit swirl combustion boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(8): 19-27, 144.
- [5] 刘建全, 孙保民, 白涛, 等. 稳燃特性对 1 000 MW 超超临界锅炉 NO_x 排放特性影响的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 132-139.
Liu Jianquan, Sun Baomin, Bai Tao, et al. Numerical simulation of NO_x emission of 1 000 MW ultra supercritical swirl combustion boiler on different combustion stability conditions[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 132-139.
- [6] 陈冬林, 成珊, 负英, 等. 预热室结构对多段式自预热燃烧器内燃烧及 NO_x 排放特性的影响[J]. 动力工程学报, 2012, 32(10): 765-769, 785.
Chen Donglin, Cheng Shan, Yun Ying, et al. Effects of the structure of preheating chamber on combustion and NO_x emission of a multi-stage self-preheating burner[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32(10): 765-769, 785.
- [7] 陈冬林, 成珊, 负英, 等. 新型多段式自预热燃烧器设计与数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(2): 811-816.
Chen Donglin, Cheng Shan, Yun Ying, et al. Design and numerical simulation of new multi-stage self-preheating burner[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 44(2): 811-816.
- [8] 徐旭常, 周力行. 燃烧技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 265-266.
- [9] Akitoshi Fujita, Hiroaki Watanabe, Ryoichi Kurose, et al. Two-dimensional direct numerical simulation of spray flames-Part 1: Effects of equivalence ratio, fuel droplet size and radiation, and validity of flamelet model[J]. Fuel, 2013, 104: 515-525.
- [10] 张瑞卿, 杨海瑞, 吕俊复. 应用于循环流化床锅炉气固流动和燃烧的 CPFD 数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(23): 75-83, 6.
Zhang Ruiqing, Yang Hairui, Lü Junfu. Application of CPFD approach on gas-solid flow and combustion in industrial CFB Boilers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(23): 75-83, 6.
- [11] Jovanovic Rastko, Milewska Aleksandra, Swiatkowski Bartosz, et al. Sensitivity analysis of different devolatilisation models on predicting ignition point position during pulverized coal combustion in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres[J]. Fuel, 2012, 101: 23-37.
- [12] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 86-192.
- [13] 徐旭常, 吕俊复, 张海. 燃烧理论与燃烧设备[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 527-531.
- [14] 丁历威, 李凤瑞. Fluent 软件模拟计算煤粉燃烧的机理及其模型实现的方式[J]. 浙江电力, 2010(11): 31-34.
Ding Liwei, Li Fengrui. Mechanism and model realization of pulverized coal combustion simulation and calculation with Fluent[J]. Zhejiang Electric Power, 2010(11): 31-34.
- [15] Choi Choeng Ryul, Kim Chang Nyung. Numerical investigation on the flow combustion and NO_x emission characteristics in a 500 MW tangentially fired pulverized-coal boiler[J]. Fuel, 2009, 88(9): 1720-1731.
- [16] Al-Abbas Audai Hussein, Naser Jamal. Computational fluid dynamic modeling of a 550 MW tangentially-fired furnace under different operating conditions[J]. Procedia Engineering, 2013, 56: 387-392.
- [17] Silva Rodrigo Corrêa Da, Kangwanpongpan Tanin, Krautz Hans Joachim. Flame pattern, temperatures and stability limits of pulverized oxy-coal combustion[J]. Fuel, 2014, 115: 507-520.
- [18] 纪任山. 煤粉工业锅炉燃烧的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12): 1703-1706.
Ji Renshan. Numerical simulation of combustion in the industrial pulverized-coal boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12): 1703-1706.