

DOI: 10.19666/j.rlf.202207145

具有周界风的煤粉燃烧器气流 特性及结构研究

张学泽¹, 张维蔚¹, 袁东辉², 任旭¹, 马林¹, 杨晓艳³

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司, 内蒙古 呼和浩特 010020;

3. 内蒙古自治区计量测试研究院, 内蒙古 呼和浩特 010030)

[摘要] 为实现锅炉稳定燃烧和精细化燃烧调整, 深入了解直流煤粉燃烧器射流特性, 以四角切圆燃烧煤粉锅炉具有周界风的煤粉燃烧器及其二次风水平支管为研究对象, 采用数值模拟方法模拟并分析了热态条件下节流柱高度、二次风门开度和风向挡板角度对气流特性的影响。结果表明: 对于周界风喷嘴面积较小、二次风水平支管较粗的煤粉燃烧器, 在二次风门位置增加节流柱, 可有效提高周界风喷嘴的速度分布均匀性; 二次风门开度对周界风喷嘴附近的气流速度分布无明显影响; 燃烧器喷口增设风向挡板, 可提高一次风刚性和周界风对一次风的保护。

[关键词] 切向燃烧; 直流煤粉燃烧器; 周界风; 一次风; 精细化燃烧调整

[引用本文格式] 张学泽, 张维蔚, 袁东辉, 等. 具有周界风的煤粉燃烧器气流特性及结构研究[J]. 热力发电, 2023, 52(4): 151-158. ZHANG Xueze, ZHANG Weiwei, YUAN Donghui, et al. Study on flow characteristic and structure of pulverized coal burner with surrounding air[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(4): 151-158.

Study on flow characteristic and structure of pulverized coal burner with surrounding air

ZHANG Xueze¹, ZHANG Weiwei¹, YUAN Donghui², REN Xu¹, MA Lin¹, YANG Xiaoyan³

(1. School of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Inner Mongolia Electric Power (Group) Co. Ltd. Inner Mongolia Electric Power Research Institute Branch, Hohhot 010020, China;

3. Inner Mongolia Institute of Metrology and Testing, Hohhot 010030, China)

Abstract: To realize stable combustion and refined combustion adjustment of boilers and to gain an in-depth understanding of the jet characteristics of direct flow pulverized coal burners, by taking the pulverized coal burner with surrounding air and its horizontal branch of the secondary air of a quadrangular tangentially pulverized coal boiler as research objects, the effects of throttle column height, secondary air door opening, and wind baffle angle on airflow characteristics are analyzed by numerical simulation under thermal condition. The calculation results show that, for the pulverized coal burner with a small nozzle area of the surrounding air and a thicker horizontal branch of secondary air, adding a throttle column at the position of a secondary air door can effectively improve the uniformity of velocity distribution of the nozzle area of the surrounding air. The opening degree of the secondary air door poses no noticeable effect on the airflow velocity distribution near the nozzle area of the surrounding air, and adding a wind baffle at the burner nozzle can improve the rigidity of primary air and the protection of surrounding air to primary air.

Key words: tangential combustion; direct flow pulverized coal burner; surrounding air; primary air; refined combustion adjustment

收稿日期: 2022-07-03 网络首发日期: 2022-08-30

基金项目: 内蒙古科技重大专项(2021ZD0030); 内蒙古电力科学研究院项目(510241210023); 内蒙古工业大学 2022 年大学生科技创新基金项目(2022)

Supported by: Inner Mongolia Science and Technology Major Special Project (2021ZD0030); Project of Inner Mongolia Electric Power Research Institute (510241210023); 2022 College Students' Science and Technology Innovation Fund Project of Inner Mongolia University of Technology (2022)

第一作者简介: 张学泽(2000), 男, 本科生, 主要研究方向为锅炉设备强化换热及节能技术, zxz_imut@163.com.

通信作者简介: 袁东辉(1976), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为锅炉燃烧优化和超低排放, ydhlzy@msn.com.

近年来,随着新能源发电规模迅速发展^[1],电网对新能源的消纳压力大幅增加,火力发电机组的备用电源及其调峰调频作用将成为未来主要发展方向^[2]。火电机组参与宽负荷深度调峰,锅炉经常处于较低负荷和较大的负荷变化率条件下,因此对锅炉燃烧稳定性提出了较高的要求,包括低负荷下锅炉稳定燃烧和精细化燃烧调整^[3-4]。

目前,很多学者针对变负荷运行对锅炉燃烧的影响进行了研究。Chang 等人^[5]以 630 MW 机组切向燃烧煤粉锅炉为研究对象,采用数值模拟方法研究了低负荷运行时锅炉的燃烧稳定性。计算结果表明,不同的燃烧器喷嘴组合方式,炉膛内的燃烧情况不同,ABDE 层燃烧器布置方式是最佳选择,既能保证燃烧稳定,又能降低 NO_x 排放。付旭晨等^[6]以 300 MW 机组四角切圆煤粉锅炉为研究对象,采用数值模拟方法研究了 25% 负荷时的燃烧情况。计算结果发现,降负荷时调平一次风速偏差、适当降低一次风速、减小周界风量和二次风量有利于提高燃烧稳定性。Jiang 等人^[7]采用数值模拟方法对 550 MW 机组四角切圆燃烧煤粉锅炉 50% 负荷下的运行情况进行了研究。计算结果表明,50% 负荷下部分燃烧器喷嘴投入运行,采用中间燃烧器喷嘴 BCDE 时炉膛内具有良好的流场分布,且比上燃烧器喷嘴 CDEF 投入运行时的 NO_x 排放量小,比下燃烧器喷嘴 ABCD 投入运行时的燃尽率更高。Chang 等人^[8]采用数值模拟的方法对不同负荷下四角切圆燃烧煤粉锅炉的燃烧性能进行了研究。结果表明,锅炉负荷降低时,一次风速和二次风速减小,减弱了气流旋转,切圆尺寸增大,使得高温区和火焰向四周壁面移动,对炉膛内的空气与燃料混合、传热和稳定燃烧造成不利影响。

锅炉变负荷运行时,锅炉燃烧稳定性也会受到燃烧器及一、二次风管道结构的影响。房云龙等^[9]以某电厂中速磨煤机前一次风道为研究对象,针对动压、静压和温度分布不均造成风量测量不准的问题,提出在冷一次风道加装混流器和混合段弯头加装导流叶片。采用数值模拟方法,对结构优化前后、变负荷条件下的一次风道流场进行了模拟分析。周亚星等^[10]以某电厂一次风矩形管道为研究对象,针对温度和一次风量分配不均问题,提出在管道内增设栅格结构。Yang 等人^[11]以单只直流煤粉燃烧器为研究对象,采用数值模拟方法对其结构进行了研究。计算结果表明,在燃烧器入口管道弯头富煤粉

侧增加偏压块、改进弯管结构,可使出口煤粉分布更均匀。关新河等^[12]对 1 000 MW 机组四角切圆燃烧煤粉锅炉具有周界风的煤粉燃烧器一次风入口管道进行结构优化,不改变周界风管道,而是将矩形一次风管道改为收缩-扩张型矩形管道,以达到煤粉浓淡分离的效果。计算结果表明,结构优化后,NO_x 的生成量和燃烧器结焦的概率明显降低。陈念喆等^[13]对某 1 000 MW 机组旋流燃烧煤粉锅炉热二次风管道结构进行了模拟计算及优化。结果表明,可采用流线型热二次风管道、合理的弯头、增设导流板及局部圆角改进,能降低管道阻力、解决速度分布不均问题。

目前,切向燃烧煤粉锅炉低负荷稳定燃烧的研究多集中在燃烧器投运方式选择和一次风管道结构改进等方面。针对二次风管道,尤其是与煤粉燃烧器连接的周界风管道的结构,对煤粉气流影响的研究还非常少。带周界风的直流煤粉燃烧器是四角切圆燃烧煤粉锅炉的常见燃烧器,周界风除了可以冷却一次风喷口外,还可以增强煤粉气流的刚性,防止煤粉气流偏斜^[14],有利于锅炉低负荷稳定燃烧。

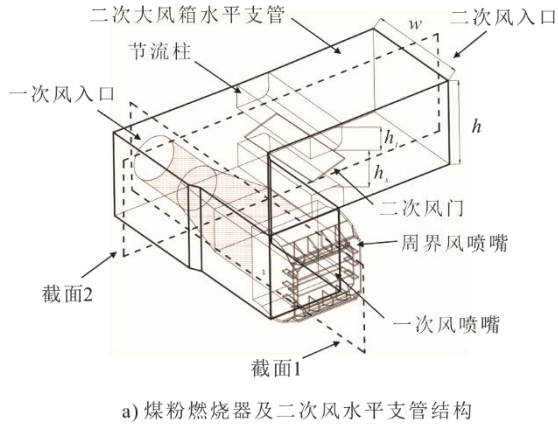
本文以某超临界 350 MW 机组四角切圆燃烧煤粉锅炉具有周界风的直流煤粉燃烧器以及与其连接的二次风水平支管为研究对象,利用 ANSYS 软件对二次风水平支管内气流特性和燃烧器喷嘴的一、二次风射流特性进行模拟计算,分析二次风水平支管内节流柱结构、二次风门开度和燃烧器喷嘴处的风向挡板角度等对气流特性的影响,从而优化煤粉燃烧器及其连接管道结构,调整一二次风射流特性,为四角切圆燃烧煤粉锅炉低负荷精细化燃烧调整提供理论参考。

1 模型的建立

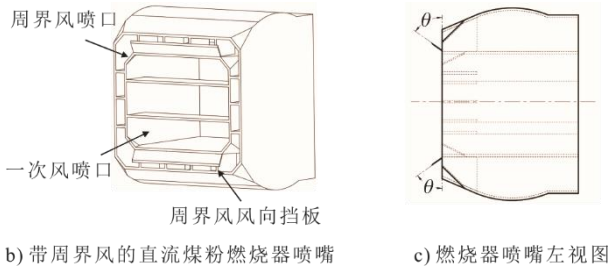
1.1 几何模型和网格划分

本文以西北地区某超临界 350 MW 机组四角切圆煤粉锅炉具有周界风的煤粉燃烧器喷嘴及其二次大风箱水平支管为研究对象,其结构如图 1 所示。由图 1 可见,煤粉燃烧器的一次风喷嘴与一次风管道相连,一次风喷嘴四周为周界风喷嘴,周界风喷嘴与具有 90° 直角弯头的水平支管相连,水平支管是二次风大风箱的一部分。水平支管的高度 h 为 0.77 m,宽度 w 为 1.0 m,进入水平支管的二次风量由二次风门开度调节,二次风门高度 h_s 由水平支管高度 h 和节流柱高度 h_t 确定 ($h_s = h - 2h_t$)。

具有周界风的煤粉燃烧器三维结构图如图1所示。为使喷嘴出口气流分布更均匀，一次风和周界风喷嘴布置了一定数量的格栅。煤粉燃烧器喷嘴出口布置了与垂直方向夹角为 θ 的周界风风向挡板。



a) 煤粉燃烧器及二次风水平支管结构



b) 带周界风的直流煤粉燃烧器喷嘴 c) 燃烧器喷嘴左视图

图1 燃烧器喷嘴及二次风水平支管结构

Fig.1 Structural diagram of the burner nozzle and the secondary air horizontal branch pipe

利用 SOLIDWORKS 软件对煤粉燃烧器和水平支管进行几何建模，利用 ANSYS Mesh 软件进行网格划分。考虑到计算域结构不规则，采用非结构四面体网格。

为保证计算结果精度，确定最佳网格数量，进行了网格无关性验证。图2给出了二次风入口与周界风喷嘴截面间压差随网格数量的变化曲线。

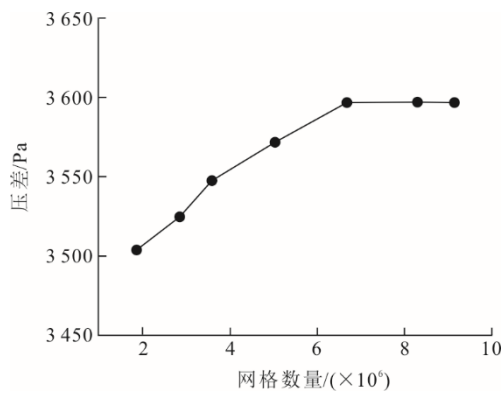


图2 网格无关性验证

Fig.2 The grid independence verification

由图2可以看出，当网格数量大于6683230时，压差的变化趋于平缓。因此，从精度和计算速度方面

考虑，本文计算中采用的网格数量取为8296478，网格划分效果如图3所示。

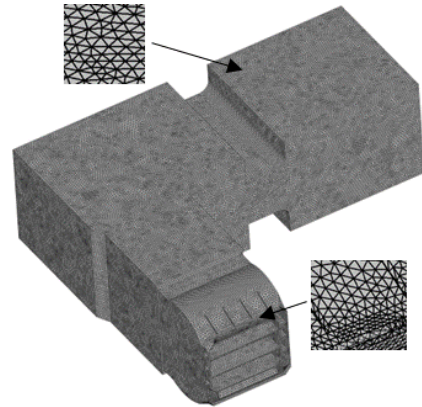


图3 网格划分及局部放大

Fig.3 Mesh generation and partially enlarged view

1.2 数学模型

气体在一、二次风管道和煤粉燃烧器中的流动属于管道内三维湍流流动，因此湍流模型采用 Realizable $k-\epsilon$ 双方程模型，壁面采用标准壁面函数^[15]。

连续性方程为：

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

能量方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

湍动能 k 方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (4)$$

湍动能耗散率 ϵ 方程为：

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中： p 为压力，Pa； u 为速度，m/s； T 为温度，K； ρ 为气体密度， kg/m^3 ； μ 为气体动力黏度， $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$ ； G_k 表示由于平均速度梯度产生的湍动能； G_b 是由于

浮力影响产生的湍动能; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; σ_k 、 σ_ϵ 为湍动能和耗散率的湍流 Pr 数; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为常数。

1.3 求解方法和边界条件

由于气体在一、二次风管道和煤粉燃烧器中的流动属于管道内三维湍流流动, 压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法, 压力插补格式选用二阶格式, 动量、能量、湍动能和湍动耗散率方程选用二阶迎风格式。

根据锅炉设计条件, 一、二次风入口设置为速度入口。一次风入口速度 u_1 为 43.34 m/s (出口速度 24.50 m/s), 温度为 343 K; 二次风入口速度 u_2 为 10.38 m/s (出口速度为 48.00 m/s), 温度为 628 K。出口边界设置为压力出口, $p=0$ 。壁面设置为无滑移边界。

计算中, 为更接近一、二次风在高温炉膛内的射流情况, 设置炉膛初始温度为 1 873 K。

1.4 模拟结果验证

为验证本文选用模型和计算方法的准确性, 将图 1a) 的燃烧器喷嘴去掉, 计算节流柱高度 0.22 m、二次风门开度 100% 时, 具有 90° 直角弯的矩形管道内的流动阻力, 并与文献[16]中的经验公式计算结果进行对比。

矩形管道内流体流动阻力的计算公式^[16]为:

$$p = \frac{\xi \rho u^2}{2} \quad (6)$$

式中: ξ 为阻力系数。其中, 节流柱的局部阻力系数为 1.9, 90° 直角弯的局部阻力系数为 1.25。矩形管道内沿程阻力系数的计算公式为:

$$\xi = 0.02L \left/ \left(\frac{2wh}{w+h} \right) \right. \quad (7)$$

式中: L 为矩形管道总长度, m。计算可得, 矩形管道沿程阻力系数为 0.17。

在入口气体速度为 10.38 m/s 条件下, 对管道内流体流动进行了计算: 本文模型计算出的阻力为 212.2 Pa; 文献经验公式计算出的结果为 214.6 Pa。模拟结果与文献计算结果的相对误差为 1.2%, 因此可认为本文计算结果的准确性较高。

2 计算结果分析

2.1 节流柱分析

图 4 给出了图 1 中截面 1 处一次风、周界风进入炉膛内形成射流的速度和温度云图。由图 4 可以

看出, 一次风和周界风进入炉膛后, 形成明显射流。由于炉膛内的速度低、温度高, 射流进入炉膛后与周围静止气体进行质量、能量交换, 射流边缘速度明显较低, 温度较高。

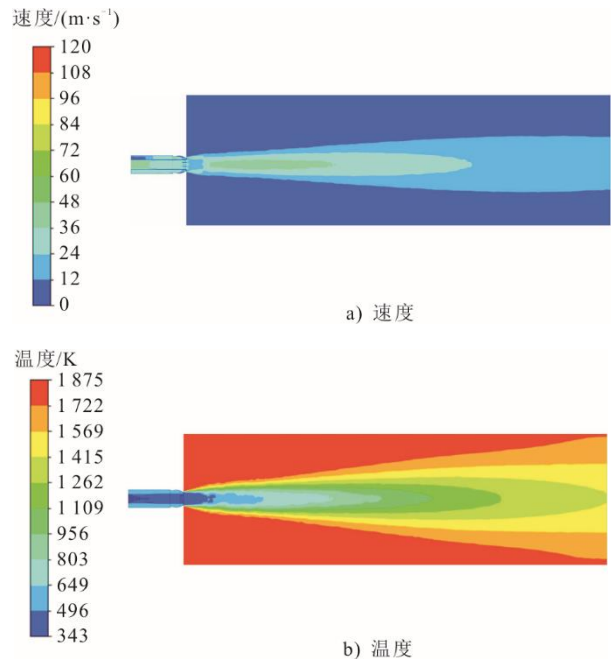


图 4 截面 1 的速度和温度云图

Fig.4 Velocity and temperature nephogram of cross section 1

图 5 给出了二次风水平支管内无节流柱和有节流柱 ($h_t=0.22$ m) 时的速度云图和流线图。2 种情况下, 气体流过二次风门的流通面积相同 (均为 0.24 m^2)。无节流柱时, 二次风门开度为 45%; 有节流柱时, 开度为 80%。

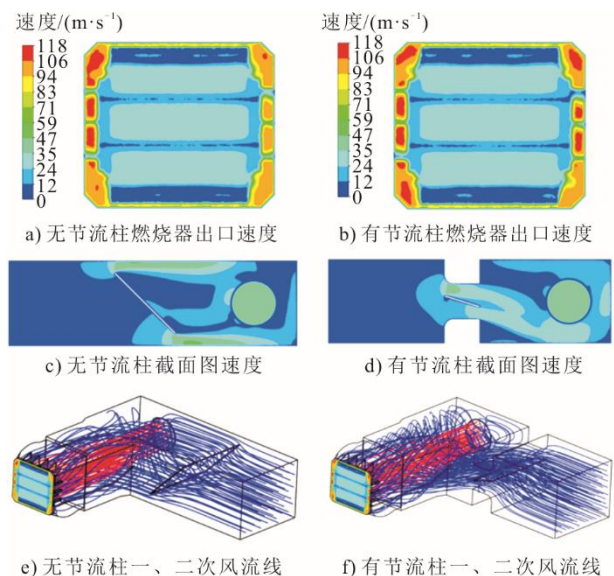


图 5 无节流柱和有节流柱的流场对比

Fig.5 The flow field without and with throttle column

从图 5a)可以看出,无节流柱时,燃烧器喷嘴周界风的速度分布并不均匀。由于离心力作用,靠近 90°弯头外侧的速度偏高、内侧偏低。从图 5b)可以看出,在水平支管二次风门位置增加节流柱后,燃烧器喷嘴周界风的速度分布明显变得更均匀。从图 1 中截面 2 的速度云图和流线的对比可知,增加节流柱后,二次风在节流柱位置被汇集,绕流二次风门后,气体在一次风管外侧形成明显的旋转流动。气流的旋转流动对气流起到整流作用,因此使气流到周界风喷嘴截面时分布更均匀。

图 6 给出了节流柱高度分别为 0.27、0.22、0.17、0.12 m,且二次风通过二次风门的流通面积相等(均为 0.24 m²)时的燃烧器喷嘴速度分布云图。由图 6 可见,4 个节流柱高度条件得到的周界风速度分布都要比没有节流柱时均匀。

为说明节流柱适用范围,图 7 给出了流通面积为 0.14 m²条件下,燃烧器喷嘴速度分布云图。由图 7 可以看出,流通面积变小,即二次风门开度减小对周界风喷嘴截面的速度分布情况影响不大,因此可充分说明节流柱的适应范围较广。

为更清晰地对比节流柱高度对周界风出口速度均匀性和气体流动阻力的影响,表 1 给出了节流柱高度对应的燃烧器喷嘴截面左右两侧周界风的平均速度偏差、峰值速度偏差和进出口压差。其中,速度平均偏差和速度峰值偏差的计算公式^[17]见式(8)及式(9)。

速度平均偏差为:

$$M_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_i - \bar{u}| \quad (8)$$

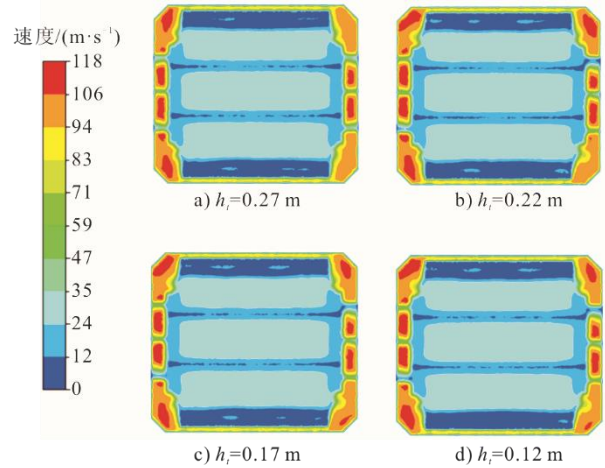


图 6 燃烧器喷嘴速度分布 (流通面积 0.24 m²)
Fig.6 Velocity distribution nephogram of the burner nozzle (flow area 0.24 m²)

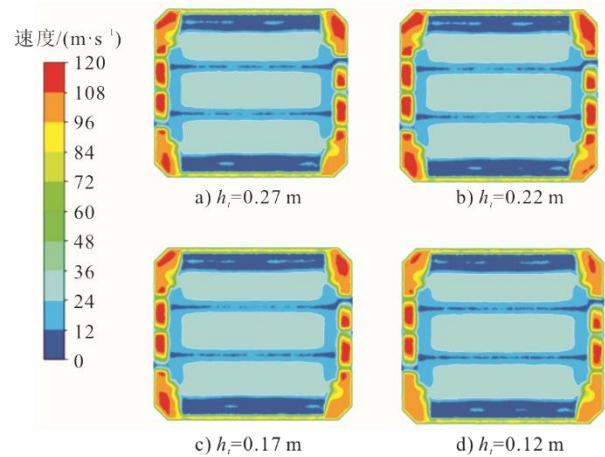


图 7 燃烧器喷嘴速度分布 (流通面积 0.14 m²)
Fig.7 Velocity distribution nephogram of the burner nozzle (flow area 0.14 m²)

表 1 平均偏差、峰值偏差和进、出口压差对比

Tab.1 Comparison of the average deviation, peak deviation, inlet and outlet pressure difference

流通面积/m ²	项目	节流柱高度/m				
		0	0.12	0.17	0.22	0.27
0.24	速度平均值/(m·s ⁻¹)	91.9				
	左侧速度平均值及偏差/(m·s ⁻¹)	94.2/2.3	93.2/1.3	93.2/1.3	93.0/1.1	93.2/1.3
	右侧速度平均值及偏差/(m·s ⁻¹)	89.7/2.2	90.7/1.2	90.7/1.2	90.9/1.0	90.5/1.4
	左侧速度峰值及偏差/(m·s ⁻¹)	111.6/19.7	120.4/28.5	119.9/28.0	119.8/27.9	119.1/27.2
	右侧速度峰值及偏差/(m·s ⁻¹)	119.5/27.6	119.3/27.4	116.4/24.5	119.0/27.1	112.7/20.8
	进出口压差/Pa	3 766	3 661	3 535	3 597	3 566
0.14	速度平均值/(m·s ⁻¹)	91.9				
	左侧速度平均值及偏差/(m·s ⁻¹)	95.2/3.3	93.1/1.2	93.1/1.2	93.0/1.1	93.2/1.3
	右侧速度平均值及偏差/(m·s ⁻¹)	88.7/3.2	90.9/1.0	90.8/1.1	90.9/1.0	90.7/1.2
	左侧速度峰值及偏差/(m·s ⁻¹)	113.9/22.0	121.5/29.6	118.0/26.1	121.9/30.0	122.8/30.9
	右侧速度峰值及偏差/(m·s ⁻¹)	120.8/28.9	123.0/31.1	118.1/26.2	117.7/25.8	119.1/27.2
	进出口压差/Pa	4 893	4 418	4 417	4 422	4 421

速度峰值偏差为:

$$M_p = |u_{ip} - \bar{u}_i| \quad (9)$$

式中: n 为燃烧器喷嘴截面周界风的网格数量; u_i 为每个网格节点的速度值, m/s; \bar{u}_i 为所有网格节点速度值的平均值, m/s; u_{ip} 为截面处的速度最高值, m/s。

从表 1 可知, 流通面积为 0.24 m² 和 0.14 m² 下, 节流柱高度为 0.22 m 时的速度平均偏差值最小, 而节流柱高度为 0.17 m 时的进出口压差最小。虽然节流柱高度为 0 时没有节流损失, 但由于二次风门开度较小, 因此进出口压差仍然比较大。

由计算结果可知, 应该根据速度平均偏差来选择节流柱高度, 即最佳节流柱高度为 0.22 m。因为锅炉实际运行时, 二次风门开度大小主要用来调节进入二次风水平支管的二次风量。当水平支管内的阻力较小时, 进入的二次风量就会增大。如果要减小二次风量, 就要减小二次风门开度。因此, 不能用进出口压差来衡量节流柱高度的选择。

对于图 1 所示的周界风喷嘴面积较小、二次风水平支管较大的情况, 可以在二次风门位置增加节流柱, 这样既可减小二次风门高度、提高调节灵活性, 又可使气流在一次风管外侧形成旋转流动, 削弱 90°弯头产生的离心力影响, 使周界风喷嘴的速度分布更均匀。

2.2 二次风门开度分析

图 8 给出了节流柱高度为 0.22 m, 二次风门开度分别为 100%、80%、60%和 40%时, 燃烧器喷嘴速度分布云图。由图 8 可以看出, 二次风门开度对喷嘴截面周界风速度分布影响较小, 速度分布趋势基本相同。

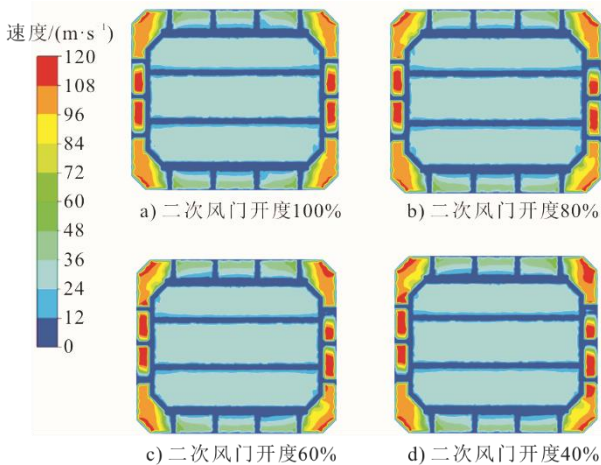


图 8 燃烧器喷嘴速度分布 (不同二次风门开度)
Fig.8 Velocity distribution nephogram of the burner nozzle (different openings of the secondary air door)

图 9 给出了二次风门开度为 100%和 40%时, 计算域内各截面的速度分布。由图 9 可以看出, 二次风门开度对下游气体流动方式的影响非常明显。二次风门开度为 40%时, 围绕一次风管外侧形成的旋转流动更明显, 速度更高; 二次风门开度为 100%时, 对下游气体流动的影响区域非常小。流过 90°弯头后, 由于水平支管和一次风管之间的环形区域空间较小, 气体被迅速重新整流。到达喷嘴附近时 (截面 5), 二次风门开度的影响基本已经消除。

2.3 风向挡板分析

图 10 给出了节流柱高度为 0.22 m、二次风门开度为 80%时, 周界风风向挡板角度 θ 分别为 90°、60°、30°和 0°的燃烧器喷嘴速度分布。由图 10 可以看出: 风向挡板角度越大, 周界风速度分布越均匀; 风向挡板角度为 0°时, 上下两侧的周界风速度为零, 两侧速度最大。

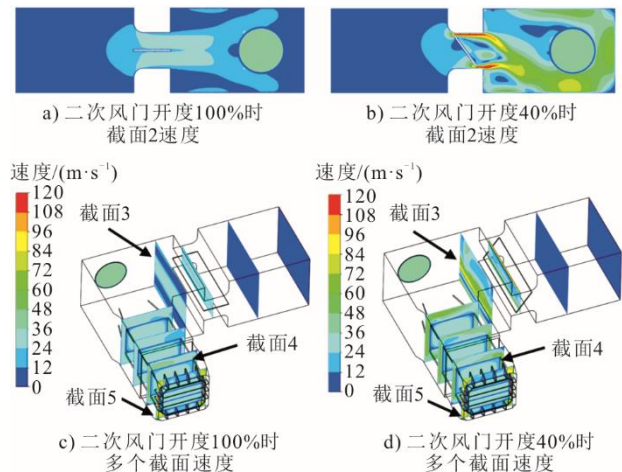


图 9 二次风门不同开度的流场对比
Fig.9 The flow field with different openings of the secondary airdoor

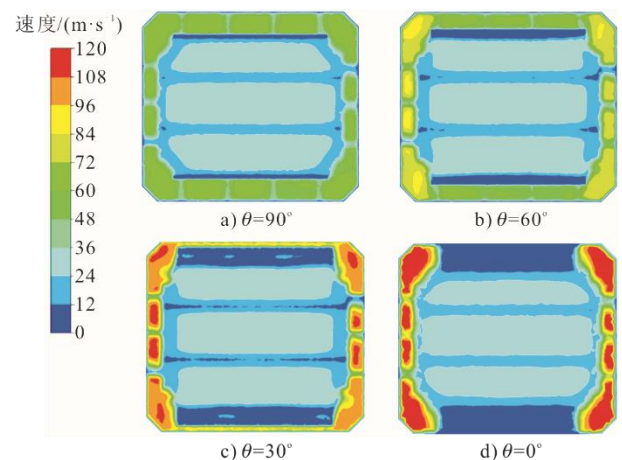


图 10 燃烧器喷嘴速度分布 (不同风向挡板角度)
Fig.10 Velocity nephogram of the burner nozzle with different wind baffle angles

图 11 给出了风向挡板角度为 90° 和 30° 时一、二次风的三维气体流线。由图 11 可以看出：风向挡板开度不同，从燃烧器喷嘴进入炉膛的气流结构是有差别的；风向挡板角度为 30° 时的气流成收缩状态，一次风处于气流的中心。

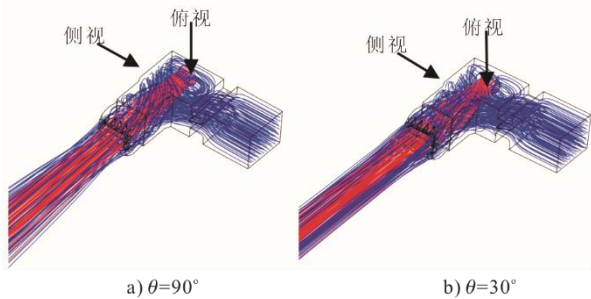


图 11 射流三维流线

Fig.11 Streamlines of three dimensional jet flow

为了更清晰地对比图 11a)和图 11b)的差别，图 12 给出了风向挡板角度分别为 90° 、 60° 、 30° 和 0° 时的气体射流俯视图和侧视图。从图 12 的俯视图可以看出，风向挡板角度为 90° 时，一次风和周界风的流线是向外扩散的，一次风穿插在周界风中。这种情况下，周界风对一次风的保护较弱，无法有效提高一次风气流的刚性。风向挡板角度为 60° 、 30° 和 0° 时，一次风在周界风内部，可以起到提高一次风气流刚性的效果。

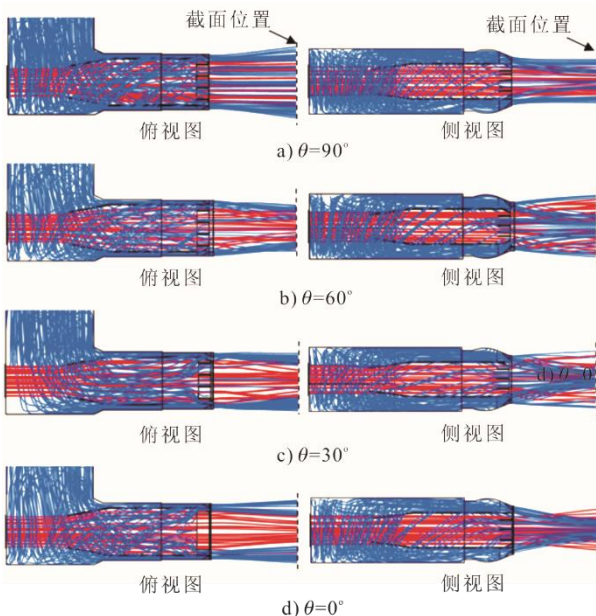


图 12 射流二维流线

Fig.12 Streamlines of two dimensional jet flow

从图 12 的侧视图可以看出，风向挡板角度为 0° 时，周界风气流收缩到了中间、排挤了一次风

流，没有起到提高一次风气流刚性的效果。风向挡板角度为 60° 时，一次风和周界风气流的收缩效果较差，穿插效果明显。

通过测量距离燃烧器喷嘴 1 m 处截面一次风射流的直径，可知风向挡板角度为 90° 、 60° 、 30° 和 0° 时，一次风气流直径分别为 0.54、0.41、0.36、0.31 m。再结合图 12 俯视图和侧视图一次风、周界风流线情况可得出，风向挡板角度为 30° 时，一次风和周界风气流的收缩程度最好，一次风基本位于周界风内侧。因此，周界风可以用来提高一次风的刚性，防止气流偏斜。

3 结 论

本文以某超临界 350 MW 机组四角切圆煤粉锅炉具有周界风的煤粉燃烧器及其二次风水平支管为研究对象，采用数值模拟方法模拟并分析了节流柱高度、二次风门开度和风向挡板角度对气流特性的影响，结论如下。

1) 对于周界风喷嘴面积较小、二次风水平支管较粗的煤粉燃烧器，在二次风门位置增加节流柱，可有效提高周界风喷嘴的速度分布均匀性。本文二次大风箱水平支管尺寸条件下，节流柱高度为 0.22 m 时效果最明显。

2) 二次风门开度能够改变二次大风箱水平支管内气流结构，但影响区域非常有限，对周界风喷嘴附近的气流速度分布基本没有影响。

3) 在煤粉燃烧器喷嘴处增加风向挡板可有效提高周界风对一次风的保护、提高一次风的刚性，但存在最佳角度。本文燃烧器喷嘴结构条件下，风向挡板角度为 30° 时效果最佳。

[参 考 文 献]

- [1] PAN E S, LIU S W, LIU J Q, et al. The state grid corporation of China's practice and outlook for promoting new energy development[J]. Energy Conversion and Economics, 2020, 1(2): 71-80.
- [2] 施应玲, 左艺, 孟雅儒. 中国火电产业的历史轨迹与发展展望[J]. 科技管理研究, 2017, 37(16): 136-145. SHI Yingling, ZUO Yi, MENG Yaru. Historical track and prospect of China's thermal power industry[J]. Science and Technology Management Research, 2017, 37(16): 136-145.
- [3] 刘刚. 火电机组灵活性改造技术路线研究[J]. 电站系统工程, 2018, 34(1): 12-15. LIU Gang. Analysis on technical route of flexible transformation of thermal power units[J]. Power System Engineering, 2018, 34(1): 12-15.
- [4] 侯玉婷, 李晓博, 刘畅, 等. 火电机组灵活性改造形势及技术应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 8-13.

- HOU Yuting, LI Xiaobo, LIU Chang, et al. Flexibility reform situation and technical application of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 8-13.
- [5] CHANG J, WANG X, ZHOU Z J, et al. CFD modeling of hydrodynamics, combustion and NO_x emission in a tangentially fired pulverized-coal boiler at low load operating conditions[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 32(2): 290-303.
- [6] 付旭晨, 郭洋, 于英利, 等. 300 MW 等级锅炉变工况低负荷稳燃能力数值模拟与预测[J]. 热能动力工程, 2020, 35(5): 112-118.
FU Xuchen, GUO Yang, YU Yingli, et al. Numerical simulation and prediction on low load stable combustion of 300 MW grad unit boiler at off-design condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(5): 112-118.
- [7] JIANG Y, LEE B H, OH D H, et al. Optimization of operating conditions to achieve combustion stability and reduce NO_x emission at half-load for a 550 MW tangentially fired pulverized coal boiler[J]. Fuel, 2021, 306: 121727.
- [8] CHANG J, ZHOU Z J, MA X R, et al. Computational investigation of hydrodynamics, coal combustion and NO_x emissions in a tangentially fired pulverized coal boiler at various loads[J]. Particuology, 2022, 6: 105-116.
- [9] 房云龙, 赵军, 张小林. 电站锅炉冷热一次风道改进及一次风流场均匀性分析[J]. 热能动力工程, 2019, 34(11): 59-68.
FANG Yunlong, ZHAO Jun, ZHANG Xiaolin. Improvement of primary air duct and uniformity analysis of primary air flow field for a power plant boiler[J]. Journal of thermal energy and power engineering, 2019, 34(11): 59-68.
- [10] 周亚星, 胡劲逸, 杨建国, 等. 中速磨煤机一次风格栅式冷热风均匀混合技术[J]. 动力工程学报, 2022, 42(4): 309-315.
ZHOU Yaxing, HU Jinyi, YANG Jianguo, et al. Uniform mixing technology of grille style cold and hot primary air for medium speed mill[J]. Journal of Power Engineering, 2022, 42(4): 309-315.
- [11] YANG M, GUO C S, ZHANG Y W, et al. Concentration distribution research of a special DC pulverized coal burner and resistance analysis[C]. ASME Heat Transfer Summer Conference Collocated with the Asme Fluids Engineering Division Summer Meeting & the ASME International Conference on Nanochannels. 2012.
- [12] 关新河, 李彦, 朱群志, 等. 1 000 MW 超超临界锅炉低 NO_x 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, 20.
GUAN Xinhe, LI Yan, ZHU Qunzhi, et al. Numerical simulation of low NO_x burner retrofitting for 1 000 MW ultra-supercritical boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2376-2383.
- [13] 陈念喆, 朱全利, 胡国明, 等. 1 000 MW 机组锅炉热二次风管道阻力研究[J]. 热力发电, 2017, 46(1): 36-41.
CHEN Nianzhe, ZHU Quanli, HU Guoming, et al. Resistance in hot secondary air duct in a 1 000 MW unit boiler manufactured in Dongfang Boiler Group[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(1): 36-41.
- [14] 叶江明, 潘效军, 陈广利. 电厂锅炉原理及设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 105.
YE Jiangming, PAN Xiaojun, CHEN Guangli. Principle and equipment of power plant boiler[M]. Beijing: China electric power press, 2010: 105.
- [15] 温正, 石良辰, 任毅如. FLUENT 流体计算应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 1.
WEN Zheng, SHI Liangchen, REN Yiru. FLUENT fluid computing application tutorial[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 1.
- [16] 续魁昌, 王洪强, 盖京方. 风机手册[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 15-18.
XU Kuichang, WANG Hongqiang, GAI Jingfang. Fan manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2011: 15-18.
- [17] 贾俊平, 何晓群, 金勇进. 统计学[M]. 6 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2014: 84.
JIA Junping, HE Xiaogun, JIN Yongjin. Statistics[M]. 6th ed. Beijing: Renmin University of China Press, 2014: 84.

(责任编辑 邓玲惠)