

# 空气冷却式煤粉燃烧室数值模拟研究

王永英<sup>1,2,3</sup>, 杨石<sup>1,2,3</sup>, 张深<sup>4</sup>

(1. 煤科院节能技术有限公司, 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; 4. 山东济南热力集团有限公司, 山东 济南 250011)

**摘要:**双锥煤粉燃烧室在小容量工业锅炉中广泛采用水冷却方式,但随着市场对大容量锅炉需求的增加,双锥燃烧室体积增大、数量增多,如仍采用水冷却的方式将导致安装困难、水系统复杂等问题,亟需开发新的冷却方式。空气冷却形式具有结构简单、预热后的空气可以增加煤粉的着火稳定性等优点,需要考察其首次应用于双锥煤粉燃烧室中的效果。为了确定空气冷却式燃烧室燃烧和壁面冷却情况,采用数值模拟技术对 14 MW 工业锅炉燃烧室和炉膛进行三维建模,得到 50% 和 100% 两种负荷下不同内外二次风配风比例下燃烧室内燃烧情况、金属壁面温度、出口火焰形状和炉膛充满度。结果表明:控制总空气过量系数不变,随着内二次风比例的逐渐增加,燃烧室内的平均温度逐渐降低;50% 负荷下金属壁面温度随二次风比例的增加逐渐降低,100% 负荷下金属壁面温度先降低后升高,这是内二次风助燃燃烧和外二次风的冷却共同作用的结果。随着内二次风比例的增加,金属壁面的高温区域逐渐后移,集中于后锥出口区域;在 50% 负荷下内二次风量占总空气量比例为 0.4 时,金属壁面具有最高温度 930 K,100% 负荷下内二次风量占总空气量比例为 0.2 时,壁面金属最高温度 835 K,2 个最高温度均出现在后锥收缩段,据最高温度推荐壁面材料选取 0Cr18Ni9,2 种负荷下最高温度出现时燃烧室内的内二次风配风量为 2 600 Nm<sup>3</sup>/h,应尽量使内二次风远离此配风量;50% 负荷下燃烧室平均温度、金属壁面平均温度及最高温度均高于 100% 负荷,是空气冷却结构需要重点考察的工况。随着内二次风比例的逐渐增加,火焰长度先增加后减小,当内二次风过小时,出口气速较小,外二次风具有向中心的速度分量,火焰主要集中在炉膛前部。随着内二次风比例的增加,出口速度增大,火焰变长变细。但随着比例的继续增加,外二次风的轴向速度变小,出口火焰的旋流强度完全由二次风决定,出口旋流强度的增大导致了火焰的变短变粗,在 2 种负荷下,火焰长度较长时,内二次风比例为 0.4~0.5。内外二次风比例为 0.5:0.5 时,燃烧室内燃烧情况和壁面温度均匀稳定,火焰在炉膛内的充满度最好,是 2 个考察负荷下均较适合的运行参数。

**关键词:**空气冷却;煤粉燃烧室;火焰分布;壁面温度;数值模拟

**中图分类号:**TK16 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2020)02-0050-08

## Numerical simulation on pulverized coal combustion chamber with air cooling

WANG Yongying<sup>1,2,3</sup>, YANG Shi<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shen<sup>4</sup>

(1. China Coal Research Institute Company of Energy Conservation, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of High Efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 10013, China; 4. Jinan Heating Group Co., Ltd., Jinan 250011, China)

**Abstract:** Possessing the advantages of burning stability and low burn-out rate, the double-cone combustion chamber with independent space is suitable for industrial boilers which start-stop frequently. With the increase of market demand for high-capacity boilers, the combustion chamber volume and number increase, and the adoption of water cooling method will lead to problems such as difficult installation and complex water system. Therefore, it is urgent to develop new cooling methods. Air cooling technology has the advantages of simple struc-

收稿日期:2020-01-20;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20012002

基金项目:中国煤炭科工集团科技创新创业资金资助项目(2018-TD-ZD001)

作者简介:王永英(1986—),女,河北石家庄人,助理研究员,从事高效清洁燃烧和大气污染物脱除研究。E-mail: yongying2006@163.com

引用格式:王永英,杨石,张深.空气冷却式煤粉燃烧室数值模拟研究[J].洁净煤技术,2020,26(2):50-57.

WANG Yongying, YANG Shi, ZHANG Shen. Numerical simulation on pulverized coal combustion chamber with air cooling [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(2): 50-57.



移动阅读

ture and combustion stability. Whether this technology can be used in the combustion chamber with independent space needs to be explored. In order to determine the combustion and wall cooling of the air-cooled combustion chamber, the three-dimensional modeling of the combustion chamber and furnace of 14 MW industrial boiler was carried out by using numerical simulation technology. The internal combustion, metal wall temperature, exit flame shape and furnace fullness were obtained under the different ratio of internal and external secondary air distribution under 50% and 100% load. The results show that: at the conditions of constant excess air coefficient, the temperature of the inner region decreases gradually with the increasing of inner secondary air ratio, the average temperature of metal wall also shows a decreasing trend with the increase of the ratio of internal secondary air at 50% load, while first decreased and then increased at 100% load, which is the result of the combined effect of combustion supporting by internal secondary air and cooling by external secondary air; With the increase of the proportion of the internal secondary air, the high temperature area of the metal wall gradually moves backward and focuses on the exit area of the back cone; when the inner secondary air ratio is 0.4, the temperature of metal wall is maximum (930 K) at 50% load, and when the inner secondary air ratio is 0.2, the temperature of metal wall is maximum (835 K) at 100% load. The two temperatures all appear in the behind cone, at this time, the air volume of secondary air distribution is  $2\ 600\ \text{Nm}^3/\text{h}$ , which should be avoided. According to the maximum temperature, the wall material is selected as 0Cr18Ni9; The average temperature of the combustion chamber, the average temperature and maximum temperature of the metal wall under 50% load are all higher than that under 100% load, which is the working condition that air cooling structure needs to focus on. As the inner secondary air ratio increases, the length of flame increases at first and then decreases. When the internal secondary air is too small, the outlet gas velocity is small, and the external secondary air has a velocity component toward the center, and the flame is mainly concentrated in the front of the furnace. With the increase of the ratio of internal secondary air, the exit velocity increases and the flame becomes longer and thinner. However, as the proportion continues to increase, the axial speed of the external secondary air becomes smaller, and the swirl strength of the exit flame is completely determined by the secondary air. The increase of the swirl strength of the exit leads to the flame becoming shorter and thicker. Under two loads, the flame is longer when the ratio of internal secondary air is 0.4-0.5. The ratio internal and external secondary air is 0.5 : 0.5, the flame's fullness in furnace is the best, the combustion situation and wall temperature in the combustion chamber are also uniform and stable, and the fullness of the flame in the furnace is the best, which is the most suitable working parameter for both loads.

**Key words:** air cooling; pulverized coal combustion chamber; flame shape; temperature of metal wall; numerical simulation

## 0 引言

有一定独立燃烧空间的双锥煤粉燃烧室<sup>[1-4]</sup>能适应工业锅炉启停频繁、负荷多变的特点,具有着火迅速、燃烧稳定、燃尽率低等优点。双锥燃烧室在小容量工业锅炉上的冷却方式多采用水冷却,燃烧室壁面采用锅壳或水冷壁布置,温度较低的锅炉软化水进入冷却结构吸收金属壁面热量后并入锅炉水循环系统<sup>[5]</sup>。随着锅炉容量的提高,燃烧室单体容积增大、数量增多,如仍采用水冷却方式将导致安装困难、水系统复杂等问题。而空气冷却技术具有多重优势,其将常温下的一部分助燃风从燃烧室金属壁面外侧通过,冷却金属壁面的同时温度升高可促进煤粉在炉膛内的燃烧和燃尽。采用空气冷却形式既可以减小燃烧室的体积和质量,又简化了燃烧室水系统设计,应用在煤粉工业锅炉双锥燃烧室上有望解决水冷却形式面临的诸多问题。

电站锅炉中常用的煤粉燃烧器大多在炉膛内组织燃烧,燃烧器内主要保证不回火即可,不用特别考虑壁面冷却问题<sup>[6-7]</sup>。作为点火燃烧器和具有低负荷稳燃作用的预燃室式燃烧器多采用内衬耐火绝热材料来防止壁面过热,也有部分预燃室采用腰部风

等空气冷却结构。

已有预燃室内燃烧和应用的相关研究多集中于20世纪八九十年代,近年来的研究偏少。徐旭常等<sup>[8-9]</sup>建立了预燃室内火焰稳定的相关理论,认为在预燃室内形成局部的高煤粉浓度、高温和合适氧浓度的区域是保持火焰稳定的原则。魏心正<sup>[10]</sup>、李建生等<sup>[11]</sup>、闫顺林等<sup>[12]</sup>研究预燃室的设计开发和应用情况,指出电站锅炉采用预燃室时,节油和低负荷稳燃效果好,缺点是布置困难、煤种适应范围窄、耐水材料和空气冷却结构均存在壁面烧毁、结焦和结渣问题。董小林<sup>[13]</sup>、池俊杰<sup>[14]</sup>设计优化了新的预燃室结构,并进行了数值模拟和试验研究,重点考查燃烧器内温度、流程和结构等参数。

由于预燃室应用于电站锅炉时不是主燃烧器,研究多集中在预燃室的设计工况,不同负荷及配风参数变化和空气冷却形式的影响规律研究较少。而双锥燃烧室作为主燃烧器,负荷多变,首次应用空气冷却形式,在典型的高、低负荷下能否保证金属壁面的冷却效果,冷却风占助燃风的合适比例,燃烧室和炉膛温度分布是否合理等研究显得尤为重要和迫切。

本文采用数值模拟技术<sup>[15-17]</sup>对14 MW工业锅

炉燃烧室和炉膛采用进行三维建模,模拟得到空气冷却形式下,不同内外二次风配风比例的燃烧室内壁及壁面的温度分布、出口火焰形状,以期为空气冷却式燃烧室的设计和运行提供参考。

## 1 模型及设置

### 1.1 空气冷却式燃烧器结构

14 MW 空气冷却式燃烧室结构示意图如图 1 所示。一次风携带煤粉颗粒从一次风管进入燃烧室,经过一次风管内长距离的运输,充分预热后在回流帽阻挡作用下折返运动方向逆喷回来。燃烧室内的助燃风分为内二次风和外二次风两部分。内二次风经过具有对数螺旋形式的切向旋流叶片旋转进入燃烧室,在旋流和燃烧室扩散段的共同作用下形成高温回流区。逆喷的煤粉在回流区内与回流高温气流充分混合继续加热,在叶片根部遇到内二次风中的新鲜氧气迅速着火燃烧,同时跟随内二次风向燃烧室出口旋转,经过燃烧室收缩段,截面积不断缩小,最后高速喷出燃烧室形成炉膛火焰。喷出的火焰仍具有一定旋流强度。外二次风为壁面冷却风,冷却燃烧室金属壁面的同时温度升高,在燃烧室收缩段通道的引流作用下,在炉膛内火焰接触,参与煤粉火焰的燃烧与燃尽,外二次风温度的升高有利于提高煤粉的燃尽率。

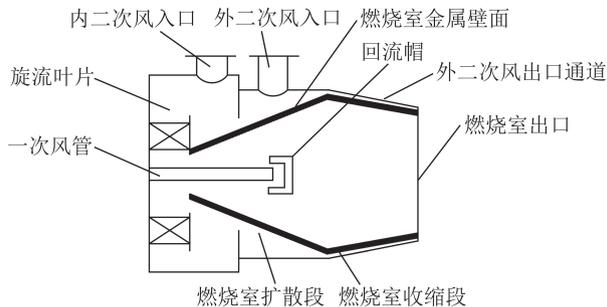


图1 空气冷却式燃烧器结构示意图

Fig.1 Structure of combustion chamber with air cooling

### 1.2 模拟对象和模拟工况

本文选取 14 MW 煤粉工业锅炉配套的空气冷却燃烧室和对应的炉膛为模拟对象。根据现场运行情况,14 MW 煤粉工业锅炉的运行负荷根据用户需求常有变动,分为冬季采暖期的高负荷和夏季生活用热期的较低负荷为主,高负荷以 100%、低负荷以 50% 负荷较为常见。所以本文选取煤粉工业锅炉 50% 和 100% 两种负荷,空气过量系数控制在 1.2,内二次风和外二次风之总量保持不变,研究不同内/外二次风比例下金属壁面温度变化及燃烧室和炉膛的燃烧情况,工况汇总见表 1。

表 1 模拟工况汇总

Table 1 Simulation working conditions

工况	内二次风占总空气量比例/%	外二次风占总空气量比例/%
1	0.2	0.8
2	0.3	0.7
3	0.4	0.6
4	0.5	0.5
5	0.6	0.4
6	0.7	0.3
7	0.8	0.2

### 1.3 计算方法和模型设置

煤粉燃烧过程涉及的控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程等。

#### 1) 质量守恒方程

任何流动都要满足质量守恒定律。该定律可表示为单位时间内流体微元中质量的增加,等于同一时间间隔内流入该流体微元的净质量。按照这一定律可得出质量守恒方程,也称为连续性方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + S = 0 \quad (1)$$

式中, $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为速度矢量在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的分量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $S$  为质量源项,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

#### 2) 动量守恒方程

动量守恒定律可表述为:微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和,该定律实际上是牛顿第二定律。

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + F \quad (2)$$

式中, $p$  为微元体上的压力,  $\text{Pa}$ ;  $F$  为流体微元体上的体积力,  $\text{N}$ ;  $\mu$  为动力黏度,  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ;  $\mathbf{u}$  为速度矢量。

#### 3) 能量守恒方程

能量守恒定律是包含有热交换的流动系统必须满足的基本定律。该定律可表述为:微元体中能量的增加等于进入微元体的净热流量加上体力与面力对微元体做的功,该定律实际上是热力学第一定律。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho T \mathbf{u} + p \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{c_p} \nabla T \right) + q \quad (3)$$

式中, $c_p$  为比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $k$  为流体的传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $q$  为流体内热源及由于黏性作用流体机械能转换为热能的部分,  $\text{J}$ 。

控制方程的求解采用基于有限体积法的CFD商业软件求解器,求解过程使用SIMPLE算法求解压力速度耦合,采二阶迎风格式计算输运方程,温度相关的流体性质使用理想气体混合率计算。

1.3.1 湍流模型

可实现性  $k-\epsilon$  模型可以有效模拟旋转流、自由流动、管道内流动、边界层流动以及带有分离的流动等,适合燃烧器及流场中的旋转流动,近壁面处理采用标准壁面函数。

1.3.2 辐射换热模型

辐射模型采用 Discrete Ordinates 模型。该模型考虑散射的影响,考虑气体和颗粒间的辐射换热,精度高,是计算煤粉燃烧常用的辐射换热模型。

1.3.3 燃烧模型

燃烧模型分为挥发分析出、气相燃烧和焦炭燃烧3部分。挥发分析出模型采用双竞争模型;气相燃烧采用 eddy dissipation Model;焦炭燃烧采用 kinetic/diffusion 表面反应速率模型,由反应动力学和表面扩散速率共同决定。

1.3.4 离散相模型

煤粉颗粒采用离散项模型注入,使用拉格朗日坐标下的随机轨道模型。煤粉颗粒从过一次风入口面内喷入,连续项每迭代100次更新一次离散项。

1.4 网格划分和边界条件

双锥燃烧器和炉膛组成的燃烧系统的模型采用结构化网格来划分网格。计算过程中进行了网格的独立性验证,对整个计算区域的网格数分别为8万、18万、34万、43万和62万的模型进行了计算,结果发现34万、43万和62万的网格计算出来的结果无明显变化,最终选取网格总数为34万。网格的最小雅可比矩阵与最大雅可比矩阵之比大于0.625,网格划分如图2所示。

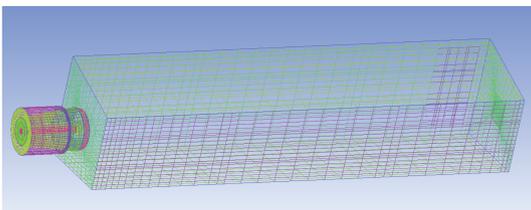


图2 燃烧系统的网格划分

Fig.2 Mesh division of combustion system

模拟所用边界条件见表2。模拟采用的煤种为神府煤,其煤质分析见表3。燃烧室金属壁面的材质设置为304不锈钢(0Cr18Ni9)。

表2 模拟边界条件

**Table 2 Boundary conditions of simulation working**

边界条件	一次风入口	内二次风入口	外二次风入口	炉膛出口
类型	Velocity-inlet	Mass-flow-inlet	Mass-flow-inlet	Pressure-outlet

表3 神府煤煤质分析

**Table 3 Proximate analysis and ultimate analysis of Shenfu coal**

工业分析/%				元素分析/%					$Q_{net,ar}/$
$M_{ar}$	$A_{ar}$	$V_{ar}$	$FC_{ar}$	$C_{ar}$	$H_{ar}$	$N_{ar}$	$O_{ar}$	$S_{ar}$	$(MJ \cdot kg^{-1})$
5.00	8.62	30.97	55.41	69.43	2.81	0.85	13.02	0.27	27.81

1.5 数值模拟验证

煤粉燃烧数值模拟的准确性需与试验或现场采集数据对比来验证<sup>[18-19]</sup>,本文采用的模拟方法已在工业锅炉燃烧室的研究和工程中进行了验证和应用<sup>[3,20-21]</sup>。为准确模拟燃烧室内燃烧情况,曾搭建相似燃烧室试验台架<sup>[3]</sup>,对燃烧室内沿长度分布温度点进行实测,并与模拟结果进行对比,如图3所示。模拟结果和实测结果互有高低,总体误差不超5%。本文物理模型与试验装置相比,仅燃烧器和炉膛的几何尺寸发生了改变,煤粉物性参数和组织燃烧形式相似,因此可认为本文数值模拟结果合理可靠。

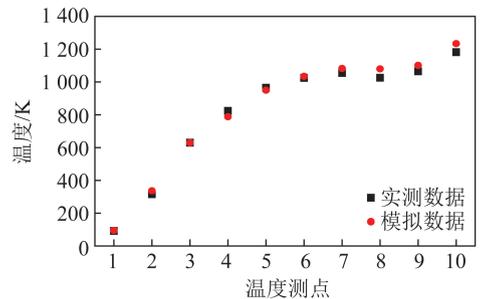


图3 模拟结果与实测结果的对比

Fig.3 Comparison between simulated results and experimental results

2 模拟结果与分析

2.1 燃烧室内燃烧情况及壁面温度变化

控制总空气过量系数不变,50%和100%负荷下燃烧室内温度分布情况和空气冷却结构的金属壁面平均温度、最高温度如图4所示。低负荷下的上述3种温度均高于高负荷,说明在较低负荷下,燃烧室内煤粉燃烧进程多、温度高,是空气冷却式结构重点考察的工作。

2.1.1 燃烧室内的燃烧情况

内二次风提供了煤粉在燃烧室内着火和燃烧所

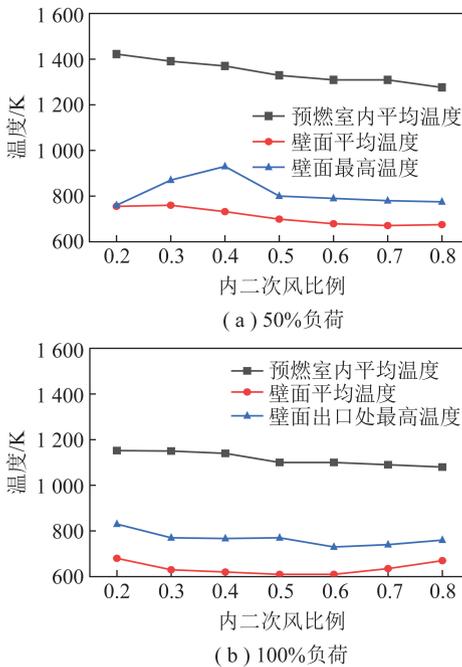


图4 2种负荷下内二次风变化对温度的影响

Fig.4 Effect of inner secondary air on temperature at two loads

需氧气,一方面内二次风量越大,提供的氧气量越多,燃烧室内燃烧越充分、温度越高,具有增强燃烧作用;另一方面内二次风量又可决定煤粉火焰在燃烧室内和出口处的火焰喷射速度,从而决定煤粉火焰的停留时间,内二次风量越大,停留时间越短,对流和辐射换热少,具有冷却燃烧室的作用。从模拟结果看,在50%负荷和100%负荷下燃烧室内平均温度随着内二次风比例的增加而逐渐降低。说明在内二次风比例从0.2增加到0.8的过程中,内二次风提供了足量煤粉在燃烧室内燃烧所需的空气量,内二次风增强燃烧和冷却燃烧室正反两方面作用下,内二次风量增加导致煤粉在燃烧室内停留时间减少,从而降低燃烧室内温度的作用占据主导。

### 2.1.2 燃烧室金属壁面的平均温度

金属壁面温度是内二次风和外二次风共同作用的结果。内二次风支撑煤粉在燃烧室内的燃烧,金属壁面接受火焰辐射和高温烟气对流作用,温度随着燃烧室内温度高低而相应变化,二次风通道中的空气带走金属壁面的热量,冷却壁面,外二次风风量越大,通道里面的速度越快,冷却作用越好。50%负荷下,燃烧室金属壁面的平均温度随着内二次风比例的增加呈降低趋势,内二次风比例增加即外二次风比例减小,使得金属壁面平均温度降低,可见在该负荷下内二次风所决定的燃烧室内燃烧情况对金属壁面平均温度起主要影响作用,外二次风冷却为次要影响。而在100%负荷下,内二次风比例为0.2~

0.5时,随着燃烧室内的温度降低,金属壁面的平均温度亦降低,但内二次风比例为0.6~0.8时,燃烧室内温度降低相对平缓,外二次风量逐渐减少,冷却作用降低,金属壁面又呈现增高的趋势。

### 2.1.3 金属壁面的最高温度

50%负荷下,内二次风量占总空气量比例为0.3~0.4时,金属壁面温度较高;二次风比例为0.4,温度最高为930 K(657 °C)。100%负荷时,金属壁面的最高温度总体先降低后升高,内二次风比例为0.2时,温度最高为835 K(562 °C)。金属壁面的最高温度均出现在内二次风比例较小的工况。当二次风量较小且和燃烧室结构配比合适时,燃烧室内出现燃烧强烈的局部火焰,由于较小的燃烧室内气速,火焰不能被冷却或拉长至炉膛,火焰局部炙烤金属壁面导致最高温度的出现。从模拟结果看,14 MW风冷燃烧室结构下,燃烧强烈的局部火焰在50%负荷内二次风比例0.4和100%负荷内二次风比例0.2(2种工况下内二次风的绝对风量相等)时出现。在50%负荷内二次风比例小于0.4,内二次风量供氧量不足,局部剧烈火焰无法形成,高于此比例,火焰被高速气流冷却拉长至炉膛;100%负荷,由于供料量多,内二次风考核最小的工况即出现局部火焰,高于这个工况金属壁面的最高温度就会降低。经核算,高低负荷下最高壁面温度出现时内二次风配风量为2 600 Nm<sup>3</sup>/h,在其他负荷下应尽量使内二次风远离此配风量。2种负荷最高温度的位置如图5所示,说明剧烈燃烧火焰位置均位于后锥出口。

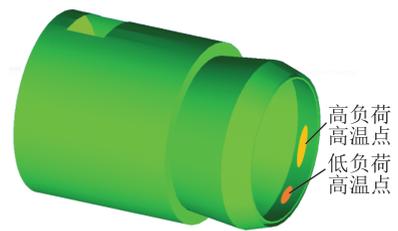


图5 最高温度位置示意

Fig.5 Maximum temperature position diagram

50%和100%负荷时金属壁面的高温区域分布情况相似,50%负荷不同内/外二次风比例燃烧室壁面温度分布如图6所示。二次风比例为0.2时,最高温度出现在固体壁面的中间位置。而比例为0.3时,固体壁面的高温区布满固体区域的后部,随着内二次风比例的继续增加,固体壁面出现最高温度区域逐渐后移,集中于燃烧室的后锥出口处。

固体壁面的最高温度决定所用固体壁面材料是否合适,为制造燃烧室壁面材料的选择提供依据。普通碳素钢的适用最高温度为425 °C,虽造价便宜

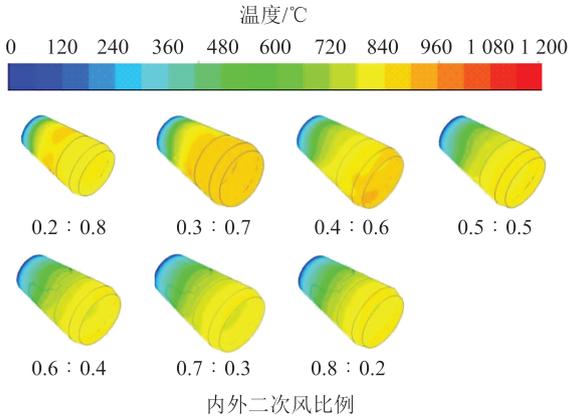


图6 50%负荷不同内/外二次风比例燃烧室壁面温度分布  
Fig.6 Wall temperature distribution with different internal/external secondary air ratios at 50% load

但使用温度相比模拟结果中金属壁面最高温度(657 °C)低232 °C,不适合在目前空气冷却结构的燃烧室中使用。模拟所采用的304不锈钢(0Cr18Ni9)所耐最高温度为800 °C,高于模拟工况的最高温度,同时控制内外二次风的运行比例,还可以进一步降低最高温度,是较合适的材料。考虑到工业锅炉频繁启停及根据用户需求负荷多变的特点,在内二次风比例较大时,固体壁面高温区集中在收缩口附近,可进一步提高收缩口处材料的耐温性能,采用能承受1000 °C以下反复加热的抗氧化316S不锈钢(06Cr25Ni20)制作燃烧室后部收口区域是较为理想的选择。

综合从燃烧室内温度、金属壁面温度平均温度和最高温度的结果来看,低负荷下是需要考察风冷结构效果的重点,当内二次风比例小于0.5时,燃烧室内温度、金属壁面的平均温度均较高,且金属壁面最高温度存在峰值。而当二次风比例不小于0.5时,以上3种温度变化较为平稳。

### 2.2 炉膛内火焰形状分布规律

内外二次风的比例影响燃烧室内温度和固体壁面温度的同时,也会对离开燃烧室进入炉膛的火焰形状产生影响,2种负荷下炉膛内的温度分布如图7所示。

在2种负荷下,随着内二次风比例的逐渐增加,火焰长度先增加后减小,火焰直径也发生变化。燃烧室出口火焰仍带有弱旋流,而外二次风设计为直流风,两者相互作用决定了火焰在炉膛内的分布情况。当内二次风比例为0.2时,内二次风火焰出口速度较小,大量外二次风在收缩口的作用下具有向火焰轴中心的速度分量,火焰主要集中在炉膛前部,形状近似三角形。当内二次风比例为0.3时,内二次风速度增加,外二次风速度减小,火焰宽度增

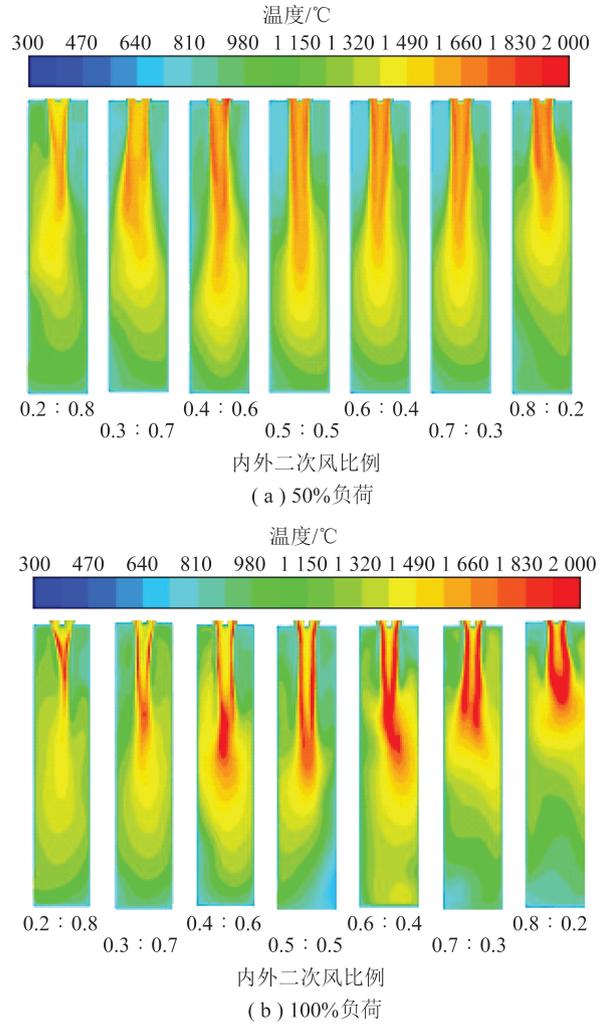


图7 2种负荷不同内/外二次风比例炉膛内温度分布  
Fig.7 Temperature distribution in furnace with different internal/external secondary air ratio at two loads

加。随着内二次风比例的进一步增加,火焰出口速度增大,刚性增强,同时外二次风量减小,向火焰轴中心的速度风量减小,在两方面共同作用下,燃烧室火焰在炉膛内部被拉长变细。内二次风比例为0.4~0.5,火焰长度较长,在炉膛内的充满度较好。随着内二次风比例的继续增加,外二次风的轴向速度变小,在大量内二次风作用下,燃烧室出口总气流旋流强度的增大导致了火焰的变短变粗。

2种负荷工况下煤粉的燃尽率保持在99%以上。从炉膛传热角度,应提高火焰在炉膛内部的充满度,以提高锅炉效率。结合前文燃烧室温度分布结果,在50%负荷和100%负荷下内外二次风比例均为0.5:0.5时,燃烧室内温度水平适中,金属壁面的平均温度较低、最高温度也较低且处在工程材料可接受的范围内,同时炉膛内火焰充满度好,为空气冷却结构应用于双锥燃烧室相对合适的运行工况。

### 3 结 论

1) 控制总空气过量系数不变, 由于内二次风助燃燃烧和外二次风冷却的共同作用, 在 50% 和 100% 工况下, 随着内二次风比例的增加, 燃烧室内平均温度均逐渐降低。50% 负荷下金属壁面平均温度呈现降低趋势, 而在 100% 负荷时金属壁面平均温度先降低后升高。

2) 金属壁面具有所有工况下的最高温度 930 K。根据此温度可选择 304 不锈钢作为燃烧室金属壁面材料, 同时可选择更具有反复加热性能的 310S 不锈钢作为后锥收缩段的材料。

3) 在 2 种负荷下, 随着内二次风比例的增加, 火焰长度先增加后减小。这是因为当内二次风较小时, 出口流速较小, 外二次风具有向中心的速度分量, 火焰主要集中在炉膛前部。随着内二次风比例的增加, 出口速度增大, 火焰变长变细, 内二次风比例为 0.4~0.5 时, 火焰长度达到最长。随着比例的继续增加, 外二次风的轴向速度变小, 出口火焰的旋流强度增加, 导致火焰变短变粗。

4) 综合考虑燃烧室内燃烧情况、金属壁面平均温度和最高温度、炉膛火焰充满情况, 内外二次风比例为 0.5 : 0.5 为所有负荷下适合空气冷却式双锥燃烧室的运行工况。

### 参考文献 (References) :

[1] 王永英, 周建明, 杨晋芳. 双锥燃烧室冷态流场的实验研究[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(2) : 81-84.  
WANG Yongying, ZHOU Jianming, YANG Jinfang. Experiment study on cold-condition flow field in double cones fine coal combustion chamber[J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(2) : 81-84.

[2] 王乃继, 尚庆雨, 张鑫, 等. 德国煤粉工业锅炉实践及我国研发、推广的现状与发展[J]. 工业锅炉, 2016(2) : 1-10.  
WANG Naiji, SHANG Qingyu, ZHANG Xin, et al. Practice of pulverized-coal fired industrial boilers in Germany and status of its research, promotion in China[J]. Industrial boiler, 2016(2) : 1-10.

[3] 王永英, 杨石, 梁兴. 双锥燃烧室燃用半焦的试验研究[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(3) : 93-97.  
WANG Yongying, YANG Shi, LIANG Xing. Experiment study of double-cone pulverized coal combustion chamber burning char [J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(3) : 93-97.

[4] 王金华, 王乃继. 散煤资源清洁利用工程示范-现代煤粉工业锅炉[J]. 煤炭工程, 2016, 48(9) : 1-5, 10.  
WANG Jinhua, WANG Naiji. Demonstration project of high efficiency pulverized coal fired industrial boiler for bulk coal clean utilization[J]. Coal Engineering, 2016, 48(9) : 1-5, 10.

[5] 李美军, 程晓磊, 杨石, 等. 两类锅炉中兰炭粉和生物质混燃特性数值模拟[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(4) : 72-79.

LI Meijun, CHENG Xiaolei, YANG Shi, et al. Numerical simulation of co-firing characteristics of pulverized semi-coke and biomass in the two different boilers[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4) : 72-79.

[6] 白月娟, 王永英. 低 NO<sub>x</sub> 煤粉燃烧器技术研究进展[J]. 煤质技术, 2018(2) : 42-47.  
BAI Yuejuan, WANG Yongying. Research development of typical low NO<sub>x</sub> burners for pulverized coal[J]. Coal Quality Technology, 2018(2) : 42-47.

[7] 周勤, 佟振霞. 基于国外申请人的专利统计分析低 NO<sub>x</sub> 煤粉燃烧器的研究进展[J]. 工业锅炉, 2013(5) : 45-50.  
ZHOU Qin, TONG Zhenxia. Research & Development of low NO<sub>x</sub> pulverized coal burners based on foreign patent applicant statistics. Industrial Boiler, 2013(5) : 45-50.

[8] 徐旭常, 王云山, 金茂庐, 等. 关于煤粉火焰稳定性和煤粉预燃室及火焰稳定船的作用[J]. 工程热物理学报, 1988, 9(4) : 384-389.  
XU Xuchang, WANG Yunshan, JIN Maolu, et al. On pulverized coal flame stabilization and functions of pc pre-combustion chamber and flame stabilization boat [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1988, 9(4) : 384-389.

[9] 徐旭常, 施学贵, 陈昌和, 等. 煤粉火焰稳定原理-"三高区"原理的实验验证和数值模拟分析[J]. 锅炉技术, 1994(1) : 1-7.  
XU Xuchang, SHI Xuegui, CHEN Changhe, et al. Pulverized coal flame stabilization principle-"three high zone" principle experiment and simulation analysis[J]. Boiler Technology, 1994(1) : 1-7.

[10] 魏心正. 煤粉预燃室旋流燃烧器的试验与研究[J]. 内蒙古电力, 1983(1) : 1-13  
WEI Xinzheng. Experiment and research on swirl burner of pulverized coal pre-combustion chamber[J]. Inner Mongolia Electric Power, 1983(1) : 1-13.

[11] 李建生, 牛蔚然. 预燃室型煤粉燃烧器的开发和应用[J]. 中国电力, 2008, 41(4) : 44-47.  
LI Jiansheng, NIU Weiran. Development and application pre-combustion chamber burners [J]. Electric Power, 2008, 41(4) : 44-47.

[12] 闫顺林, 陈华刚, 魏杰儒, 等. 煤粉预燃室燃烧器的设计[J]. 应用能源技术, 2012(8) : 21-23.  
YAN Shunlin, CHEN Huagang, WEI Jieru, et al. Design of pulverized coal burner with a pre-combustion chamber[J]. Applied Energy Technology, 2012(8) : 21-23.

[13] 董小林. 撞击预燃室煤粉燃烧器的结构优化研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.  
DONG Xiaolin. Study on optimization of Impact pre-combustion chamber pulverized coal burner [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.

[14] 池俊杰. 高效煤粉工业锅炉可调炉温和低 NO<sub>x</sub> 燃烧研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.  
CHI Junjie. Research of adjustable furnace temperature and low NO<sub>x</sub> combustion on high efficiency pulverized coal industrial boiler [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014.

[15] 刘健全, 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.
- [16] 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.
- [17] VASCELLARI M, CAU G. Influence of turbulence-chemical interaction on CFD pulverized coal MILD combustion modeling[J]. Fuel, 2012, 101:90-101.
- [18] WEBER R, ORSINO S, LALLEMANT N, et al. Combustion of natural gas with high-temperature air and large quantities of flue gas [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28(1):1315-1321.
- [19] WEBER R, SMART J P, KAMP W V. On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2):2623-2629.
- [20] 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.
- [21] 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.
- 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.