

# 低流量煤粉稳燃燃烧器的研究与应用

严祯荣,罗晓明,韩军,曹锋,王化南

(上海市特种设备监督检验技术研究院,上海 200062)

**摘要:**结合煤粉工业锅炉煤粉流量低和炉膛容积小的特点,运用内二次旋转风、锥形钝体和有限预燃室空间相结合的稳燃技术,开发出一种低流量煤粉稳燃燃烧器。运用 CFD 技术研究了一次风速、内二次风速、内二次风旋流强度和钝体阻塞率等参量变化对回流区大小和回流速度的影响。提高内二次风速,回流区长度和平均回流速度皆呈现缓慢增加趋势;增加内二次风旋流强度,回流区长度和平均回流速度能较快增加,能明显提高回流区卷吸高温烟气热量;钝体阻塞率为 1.070 是比较合适的。该燃烧器应用到蒸发量 4 t/h 煤粉工业锅炉上,能够稳定燃烧,提高锅炉热效率 10%~18%。

**关键词:**煤粉工业锅炉;低流量燃烧器;稳燃技术;CFD 技术;锥形钝体;回流区

中图分类号:TQ529;TD849

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2011)06-0061-05

燃煤工业锅炉(窑炉)改造工程是国家十大重点节能工程之一。为了缓解当前能源紧张、环境污染之间日益突出的矛盾,2011年3月发布的《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》也明确要求大力推进节能降耗,推广先进节能技术和产品。这为洁净煤技术在燃煤工业锅炉上的研究和应用带来新的发展机遇。与其它燃煤工业锅炉的洁净煤技术相比较,燃煤粉工业锅炉在高效率、环保、运行成本、小容量适应性、煤种适应性等方面,都具有较大的绝对优势,具有广阔的发展前景<sup>[1]</sup>。文献[2]阐述了高效燃煤粉工业锅炉技术现状及应用情况。然而,对于燃煤工业锅炉而言,由于燃煤流量小,炉膛容积也较小,实现燃烧器的稳燃,合理组织炉内流动和燃烧工况是十分困难的,这正是制约燃煤粉工业锅炉全面推广应用的主要原因。尽快研究开发工业锅炉煤粉燃烧器,是决定燃煤粉工业锅炉发展前景的最关键工作<sup>[1]</sup>。岑可法等<sup>[3]</sup>也指出,

实现煤粉在工业锅炉中的燃烧,燃烧器的设计是关键。为此,本文研究了一种低流量煤粉稳燃燃烧器,并成功应用到蒸发量 4 t/h 的小型燃煤工业锅炉。

## 1 低流量煤粉稳燃技术

低流量煤粉稳燃技术主要解决 3 方面的问题。首先,工业锅炉单位时间内耗煤量小,经过一次风粉管喷入炉膛的风粉浓度比较小。要提高煤粉的着火性能,就要降低煤粉的着火温度,为此,就要提高点火区域的煤粉浓度。第二,若一次风粉混合物直接喷入炉膛,进入炉膛的煤粉浓度会变得极低,很容易熄火,因此必须在一次风粉管喷口设置一个容积比较小的煤粉预燃室,使煤粉在预燃室内获得足够的热量迅速着火并稳定燃烧。第三,一次风煤粉混合物离开喷口到达着火区域处的时间很短,来不及吸收炉内大量的辐射热以确保煤粉着火和稳

收稿日期:2011-07-01 责任编辑:孙淑君

基金项目:国家质量监督检验检疫总局科技计划项目(2009QK112)

作者简介:严祯荣(1972—),男,四川岳池人,博士,高级工程师,检验师,一级安全评价师,主要从事锅炉检验技术和节能技术研究。

燃,可以考虑依靠炉内高温烟气的回流来加热一次风粉混合物。这种一次风粉混合物与高温烟气直接接触时混合产生的对流传热效果比辐射传热更为强烈。实现炉内高温烟气的回流来加热一次风粉混合物可以采用钝体回燃的方式。钝体一般有锥型、楔型和抛物线型3种。钝体形状是影响流场特性的关键因素,决定了回燃效果。研究表明,非流线型钝体比流线型钝体具有更大的中心回流区尺寸和回流量;与楔型钝体和抛物线型钝体相比,锥型钝体具有更好的稳燃效果<sup>[4]</sup>。基于上述3个方面的问题,设计出一种低流量煤粉稳燃燃烧器,结构如图1所示。当一次风粉混合物进入一次风粉道,在内二次风旋流器的作用下,到达喷口处遇到钝体,一次风粉混合物绕过钝体时,在钝体后形成一个稳定的回流区,在回流区内充满炉膛中心回流来的高温烟气,使回流区成为巨大的蓄热体。在回流区外侧与主流之间的区域,在外二次风道的热空气作用下,形成可燃烧气粉混合物和热回流烟气湍流混合区。由于在边界上有较大的径向速度梯度,可燃混合物和高温烟气之间发生强烈的质量、动量和能量交换,可燃混合物不断被加热升温,达到着火温度开始着火。火焰由内向外传播,将热量传给回流的烟气,使烟气将热能带往上游,再把热量传给新鲜的可燃混合物,在预燃室内形成稳定燃烧。

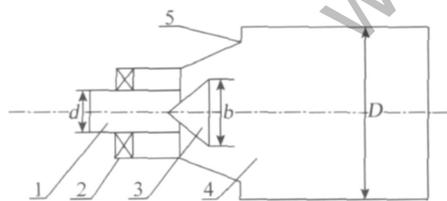


图1 低流量煤粉稳燃燃烧器结构

1—一次风粉道;2—内二次风旋流器;3—钝体;  
4—预燃室;5—外二次风道

## 2 参量对煤粉稳燃效果的影响

合理组织燃烧器内空气动力场是获得良好稳燃效果的关键。由图1可知,影响燃烧器内空气动力场的参量有一次风速 $v_1$ 、内二次风速 $v_2$ 、内二次风旋流强度 $\Omega$ 、钝体阻塞率 $B \cdot R$ (定义 $(b/d)^2$ 为钝体阻塞率,一般记作 $B \cdot R$ )。由于参量的变化多,依

靠实验手段来获得各种情况下的燃烧器内空气动力场具有工作周期长、成本高、测量难度大等问题<sup>[5]</sup>,为研究工作带来了巨大困难。近几年,数值模拟(CFD)技术的准确性和可靠性已经得到工程界和理论界共同认可,其省时省力、灵活改变运行条件的特点受到了众多国内外学者的青睐<sup>[6-8]</sup>。因此,运用CFD技术研究参量变化对回流区域空气动力场的影响规律,考察回流区域对流换热强弱效果,以优化出适合燃烧更低流量煤粉的稳燃燃烧器。

### 2.1 模拟对象及网格划分

以图1作为物理模型。其中一次风为直流风;二次风采用内、外分级送风方式,实现空气的分级供给。其中内二次风经过旋流叶片后以旋流形式进入预燃室内,外二次风采用直流风。图2所示为计算区域的网格划分,网格总数约为50万。燃烧器一次风和内二次风出口附近区域采用非结构化四面体网格并进行了加密,其余部分均采用规则六面体网格,另外在预燃室后方增加了一段计算空间,以便能得到完整的回流区尺寸。

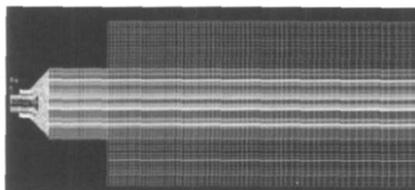


图2 计算区域的网格划分

### 2.2 数学模型和计算方法

考虑到计算物理模型的结构特点,选用RNGk- $\epsilon$ 模型来模拟旋转流动的湍流流场,其计算精度比标准k- $\epsilon$ 模型的计算结果高。其表达式如下:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \rho \epsilon + G_k \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] - C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - G_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R \quad (2)$$

式中: $k$ 为湍流脉动动能, $\epsilon$ 为湍流动能的耗散率; $\mu_{eff} = \mu + \mu_r$ , $\mu$ 为气体的粘性系数, $\mu_r$ 为湍流粘性系数; $G_k$ 为由于平均速度分量引起的湍能; $C_{1\epsilon} = 1.42$ , $C_{2\epsilon} = 1.68$ , $\sigma_k = 0.07179$ , $\sigma_\epsilon = 0.07179$ 。

计算中的边界条件:一次风,内、外二次风进口

设置为速度进口,预燃室出口设置为压力出口,其余壁面均为无滑移壁面,表面粗糙度为0.5。收敛条件:连续性方程残差小于 $1 \times 10^{-4}$ ,流场速度残差小于 $1 \times 10^{-3}$ ,湍流模型中的残差小于 $1 \times 10^{-3}$ 。

### 2.3 结果分析

在模拟计算时,燃烧器的外二次风保持不变,通过改变一次风速 $v_1$ 、内二次风速 $v_2$ 、内二次风旋流强度 $\Omega$ 、钝体阻塞率 $B \cdot R$ 等参量来获得该燃烧器流场特性的变化规律。

#### 2.3.1 参量变化对回流区域大小的影响

回流区域大小可以用轴向长度和径向宽度来衡量。图3表示参量变化对回流区域轴向长度的影响。图3a)为不同一次风速的回流区域大小情况,当一次风速由18 m/s提高到26 m/s时,回流区轴向长度由0.935 m增至0.939 m,可见回流区轴向

长度随一次风速的增加变化缓慢。图3b)为不同内二次风速回流区域大小情况,当内二次风速分别为18、21、25 m/s时,对应的回流区长度为0.896、0.915、0.933 m,长度增加较为明显。图3c)为不同内二次风旋流强度 $\Omega$ 的回流区域大小情况,当内二次风旋流强度 $\Omega$ 由1.23增至3.70时,回流区长度由0.905 m增大为1.007 m,即相对增大了10.2%,变化十分明显。图3d)为不同的钝体阻塞率 $B \cdot R$ 的回流区域大小情况,3种不同钝体阻塞率下的回流区长度分别为0.946、0.930、0.945,呈先减后增的趋势。

在回流区的径向宽度方面,由于工业锅炉燃烧器中的预燃室空间较小,气流流动被空间约束而在径向方向上得不到充分发展,故各工况下所得回流区宽度均随轴向距离的增大在0.4 m左右波动。

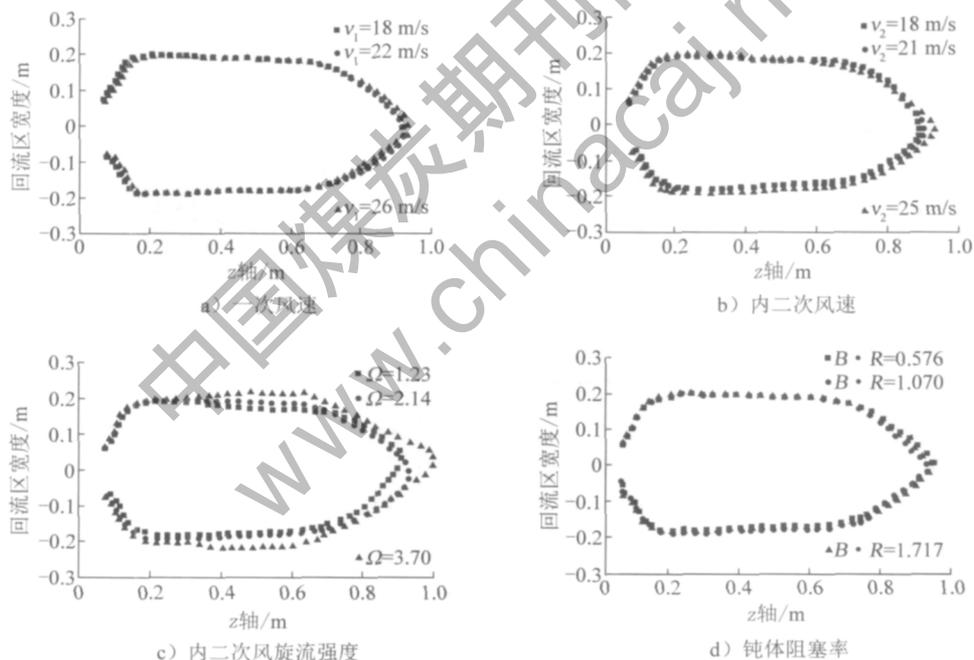


图3 参量变化对回流区域大小的影响

#### 2.3.2 参量变化对回流区域轴向速度的影响

回流区域的对流换热强弱效果不但与回流区域大小有关,还与回流区域速度有关。根据计算结果,对轴向距离为0.2~0.6 m若干截面上的流场轴向速度进行了统计,得到各参量下的预燃室径向坐标上平均轴向速度的分布曲线,如图4所示。由图4可以看出,轴向速度分布均呈开口向上的抛物线分布。

图4中曲线与横坐标两交点的距离则可以反映

流场回流区的直径大小,因为在靠近预燃室内壁处,由于有直流外二次风作用使得该处附近的轴向速度方向为正,而旋转内二次风和钝体的共同作用使得预燃室内流场中心区域存在负压,产生回流,因此在流场中心位置轴向速度为负值。图4a)所示,当一次风速为18、22、26 m/s时,所得的最大回流速度分别为8.1、8.0、7.6 m/s,截面平均回流速度分别为6.3、6.2、5.9 m/s,表明一次风风速增大时流场中心回流速度略有降低。图4b)所示,内

二次风风速变化的3个工况下所得的最大回流速度分别为8.1、8.1、8.0 m/s,速度分布情况也较为相似,表明内二次风速的变化对轴向回流速度影响较小。图4c)所示,内二次风旋流强度变化时,在3种工况下所测得的最大回流速度呈现递减趋势,平均回流速度依次为6.1、6.2、5.7 m/s,但 $\Omega$ 为3.70工况下的回流面积也明显大于前面2个空况,3种工况下的回流区直径分别为0.34、0.36、0.44 m,则回

流区回流量分别为2.2、2.5、3.5 m<sup>3</sup>/s,表明提高内二次风旋流强度能使流场具有更高的卷吸高温烟气的的能力,有助于煤粉的换热和燃烧。图4c)所示,钝体阻塞率 $B \cdot R$ 分别为0.576、1.070、1.717的3种工况中所测得的最大回流速度依次为6.2、6.2、6 m/s,平均回流速度为5.4、6.2、5.0 m/s,说明随着钝体阻塞率的增加,回流速度总体上呈先增后减的趋势。

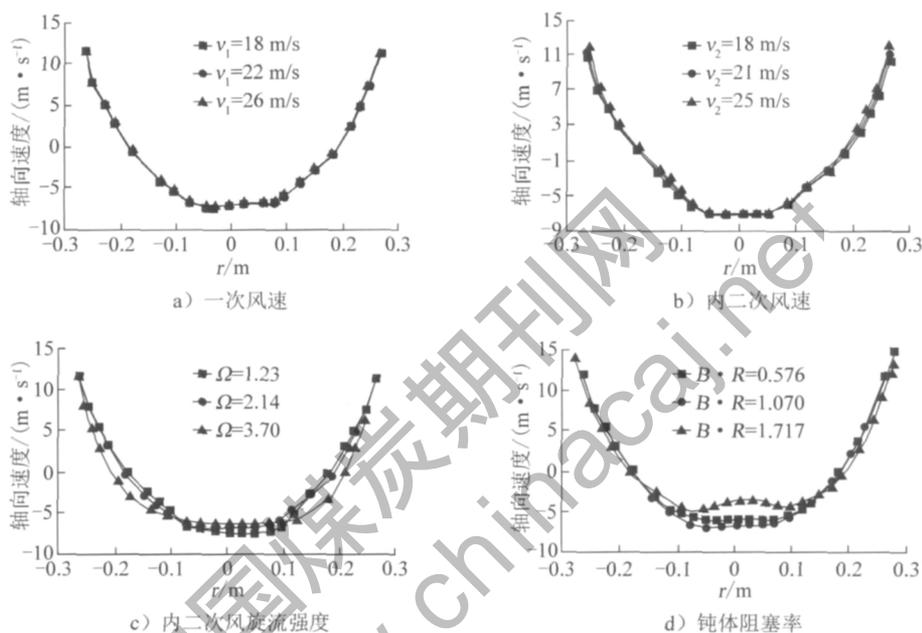


图4 参量变化对回流区轴向速度的影响

### 2.4 合理的参量选择

由2.3的分析可知,一次风速的变化对燃烧器内空气动力场没有明显的有益影响。随一次风速由18 m/s增加至26 m/s的过程中,流场平均回流速度下降了1.2%。分析其原因为直流一次风进入燃烧器预燃室后会对回流产生冲击,一定程度上减缓了回流区内气流速度,因而随一次风速的增加流场中的平均回流速度有所降低。内二次风旋流强度的增加能够较明显提高燃烧器流场卷吸高温烟气的的能力,其值由1.23提高至3.70时,回流区轴向长度增加了10.2%,而截面上的平均回流量上升了37%,而随内二次风速的增加,回流

区长度和平均回流速度皆呈现缓慢增加趋势。钝体阻塞率变化对燃烧器的空气动力场影响也不明显,比较而言钝体阻塞率为1.070时燃烧器内平均回流速度偏大,有利于强化回流区域内对流换热。因此低流量煤粉稳燃燃烧器的参量宜选择较大的内二次风旋流强度,钝体阻塞率为1.070时比较合适。

### 3 低流量煤粉稳燃燃烧器的应用

将燃烧器运用到SZS4-1.25-M燃煤蒸汽锅炉上进行运行试验<sup>[9]</sup>,试验采用Ⅲ类烟煤,该煤种的元素分析和工业分析见表1。

表1 煤种的工业分析和元素分析

元素分析/%					工业分析/%			发热量 $Q_{net, v, ar} /$ (MJ · kg <sup>-1</sup> )
$\omega(C_{ar})$	$\omega(H_{ar})$	$\omega(O_{ar})$	$\omega(S_{ar})$	$\omega(N_{ar})$	$M_{ar}$	$A_{ar}$	$V_{daf}$	
64.70	4.32	12.33	0.32	0.24	9.44	8.64	37.73	24902

试验时测试了2个工况,每个工况稳定燃烧4 h。主要实验结果为:①煤粉流量可在300~560 kg/h的低流量下稳定着火燃烧;②煤粉离开喷口后立即着火,燃烧稳定充分,火焰充满程度好,呈金黄色;③飞灰可燃物含量 $C_{in}$ 为22.06%~24.95%,锅炉正反平衡的平均效率为88.98%,比一般燃煤工业锅炉热效率提高10%~18%。

## 4 结 论

(1) 燃煤粉工业锅炉煤流量低,炉膛容积小,要实现稳燃,就要提高着火区域煤粉浓度、着火区域热量和设置有限空间的煤粉预燃室。

(2) 一次风速度、内二次风速度、内二次风旋流强度以及锥形钝体阻塞率等参量对预燃室内回流区的轴向长度、轴向速度产生影响,进而影响回流区的热量和稳燃性能。低流量煤粉稳燃燃烧器的参量宜选择较大的内二次风旋流强度,钝体阻塞率为1.070时比较合适。

(3) 本文开发低流量煤粉稳燃燃烧器运用到蒸发量4 t/h的小型燃煤工业锅炉上,热效率提高10%~18%。这为更新型的低流量煤粉稳燃燃烧器开发和燃煤粉工业锅炉的广泛推广奠定了设计和工程应用基础。

## 参考文献:

- [1] 严祯荣,罗晓明,时贵玉,等. 燃煤粉工业锅炉的发展前景及节能减排技术创新[J]. 节能技术, 2010, 28(159): 65-69, 71.
- [2] 纪任山,王乃继,肖翠微,等. 高效煤粉工业锅炉技术现状及应用[J]. 洁净煤技术, 2009, 15(5): 52-55.
- [3] 岑可法,姚强,骆仲泱,等. 高等燃烧学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002: 415-473.
- [4] 曾东和,易超,熊立红. 钝体形状对旋流燃烧器出口流场影响的数值研究[J]. 动力工程, 2006, 26(3): 375-378, 442.
- [5] Special A., Cui J.. CFD studies on burner secondary air-flow[J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(2): 1126-1140.
- [6] 唐强,罗渝东,张力,等. 低热值煤层气燃烧器的影响因素及优化的数值模拟[J]. 动力工程, 2007, 27(3): 344-348.
- [7] 徐岩. 新型煤粉燃烧器燃烧过程数值模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [8] 安恩科,于娟,朱基木,等. 低 $NO_x$ 燃烧器与常规直燃煤粉燃烧器的 $NO_x$ 生产特性的研究[J]. 动力工程, 2006, 26(6): 784-789.
- [9] 热工测试报告(报告编号:SH2010R00024) [R]. 杭州: 杭州市特种设备检测研究院, 2010.

## Study and application of low flow mass pulverized coal steady burner

YAN Zhen-rong, LUO Xiao-ming, HAN Jun, CAO Feng, WANG Hua-nan

(Shanghai Institute of Supervision & Inspection Techniques for Special Equipment, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** The defects of pulverized-coal industrial boiler are low flow and small stove volume. In order to remedy the defects, a new kind of low flow mass pulverized coal steady burner has been explored which utilizes steady combustion technology, including inner twice rotating wind, cone-shape bluff-body as well as limited space of pre-burning. The influences of velocity of primary wind, velocity of inner twice wind, whirl intensity of inner twice wind as well as block rate of bluff-body on dimensions of backflow area and velocity of backflow have been studied using CFD technology. By increasing the velocity of inner twice wind, the length of backflow area and the average velocity of backflow both increase slowly. On the other hand, both of them increase rapidly while improving the whirl intensity of inner twice wind. This obviously improves heat of high temperature smoke which was rolled up in the backflow area. It would be more appropriate that the block rate of bluff-body is 1.070. Applied to a 4 t/h pulverized-coal industrial boiler, this burner has improved thermodynamics efficiency of boiler by 10%~18%.

**Key words:** pulverized-coal industrial boiler; low flow mass burner; steady combustion technology; CFD technology; cone-shape bluff-body; backflow area