

不对称射流——另一种新的煤粉火焰 稳定燃烧的空气动力学原理

孙文超 詹焕青 陈丽芳
(中国科学院力学研究所)

摘 要

本文提出了利用不对称射流稳定和强化燃烧低质煤粉和水煤浆的空气动力学原理。根据这个原理,研制了一种一次风偏置并且稍有倾斜的新型预燃室。在预燃室的上半部不对称射流产生一个大的回流区。煤粉颗粒和水煤浆能够被直接送入该回流区中。特定的三维空气动力场和煤粉浓度的分布对点火、稳燃和消除灰渣是十分有利的。这类偏置射流预燃室已被证明能够燃烧挥发分10%,灰分30%的低质煤粉和挥发分10%,水分30%的难燃水煤浆。在燃烧过程中预燃室内不积灰不结渣。目前它已被成功地用于工业锅炉和电站锅炉的点火启动和低负荷(50%)稳燃,并且收到了大幅度节油的效果。

一、引 言

降低电站燃煤锅炉点火和低负荷稳燃用油是我国的一个重要节油项目。一些单位研制的燃烧器和预燃室在解决这个问题上取得了不同程度的成功。具有典型意义的以大速差同向射流为原理的直流型煤粉预燃室对煤种的适应性强,稳燃性能好,在电站锅炉上得到了应用^[1]。由于大速差型预燃室在原理上必须使用蒸汽或压缩空气等高速射流,运行起来比较复杂。同时,高速射流的强化稳燃与吹灰作用也不能统一起来。

本文提出了另一种空气动力学原理——不对称射流原理,并据此原理研制了偏置射流预燃室。它的稳燃性能与大速差预燃室相近,但不使用高速射流,它首次从气流结构和燃烧组织上解决了吹灰和防止结渣的问题。目前,这种偏置射流预燃室在电站锅炉和工业锅炉上,在无油少油点火、低负荷稳燃和用作主燃烧器方面,正进行推广应用。

二、不对称射流的稳燃原理

几年来,对煤粉预燃室和燃烧器的研究有很大的发展,因而对它的要求也越来越高。任何一种新型预燃室,必须同时满足下列几项要求:能稳定燃烧低质煤种;能有效地吹除积灰并防止沾污和结渣;能十分简便地运行和调整燃烧工况;能兼有点火、助燃及作为主燃烧器等多种功能。对于第一个要求,人们把它看作成功的基本条件。但是,如果要在工业生产上获得实际的长期连续运转,不很好地解决吹灰问题是没有前途的;不具有简便而

本文曾于1988年在上海召开的中国工程热物理学会第六届年会上宣读。

有效的运行调整手段是很难被推广的;不向多功能方向发展前景也是不会乐观的。

在研制煤粉预燃室时,仅仅按照一般的回流区概念建立起一种比较理想的空气动力场是远远不够的,特别是对低挥发分煤粉的稳定燃烧更是如此。因为诸如以往燃烧空气动力学描述的回流区稳燃的概念多是针对气体燃烧或高挥发分的液体燃烧而言的,在那种情况下,空气动力场和燃料的浓度场基本一致。但在煤粉空气两相流中,如果不意识地设法将煤粉直接送入高温回流区,并在高温区中维持一定的煤粉浓度和氧气量,那么再好的空气动力场也达不到稳燃的目的。与气体燃料和液体燃料相比,煤粉燃烧的另一个特点是它含有大量的灰分。在燃烧过程中,绝大部分挥发分被燃尽的时候,焦炭也燃尽了30—50%,因此必须研究如何设置一股吹灰风,不但能吹除可能产生的积灰积粉并防止沾污和结渣,而且不破坏甚至还能加强和控制原已建立起来的空气动力场。

根据上述考虑,利用不对称受限射流的原理研制了偏置射流煤粉预燃室。空气煤粉混合物通过下偏置或上偏置的一次风管,进入圆形或矩形截面的预燃室,一次风出口速度20—25(m/s),在一次风口下方靠近预燃室底部的位置上有一股吹灰的平面射流,速度为一次风的一倍左右。为使煤粉或水煤浆射流能直接进入回流区,通常一次风管需向回流区方向倾斜一个小角度。这样组织的气流结构的原理图如图1所示。当处于下部的射流进入预燃室后,由于它卷吸周围介质,出现一个反向的压力差,在预燃室的上半部产生了很大的回流区,当吹灰风投入后,它又将主射流引射得向下方倾斜,此时的回流区更大更强。可以通过调节吹灰风的速度方便有效地调整燃烧强度和高温区的位置。预燃室和一次风管可做成不同的形状。这样设计的预燃室可根据煤粉锅炉的型式和燃烧器布置的不同而安装在前墙、侧墙、下二次风口或下一次风口等不同位置上。从而在原理上满足以上的要求。

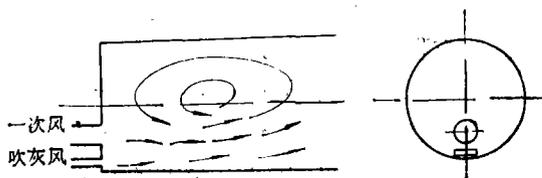


图1 偏置射流预燃室稳燃原理图

三、冷态空气动力场描述

1. 实验测量 为进一步研究不对称受限射流的流场结构从而满足燃烧低挥发分煤种的要求,用 Dantec2-D 激光多普勒系统对下偏置情况下冷态空气动力场的轴向和切向速度分布作了研究测量。实验模型是 $\phi 186 \times 800$ 的有机玻璃圆筒。测量结果见图2。可以看出,在一次风主射流下偏置时,预燃室下半部气流向下游流动,而在上半部有一较长的反流区。由图中给出的比例尺可知,在不同的子午面上,反流速度、反流区的位置和大小都是不同的。在上游附近,切向流动是向下方的,随着气流向下游流动,切向流动逐渐趋向上方。这说明,不对称受限射流的流动图案是一种复杂的扭曲的三维流动,这种流动增强了风粉气流和逆向气流之间的质交换和热交换,对强化稳燃是十分有利的。同时下游处向上方向的切向流动又有助于将可能沉落的积灰翻腾起来而被吹除。在下偏置的一次风上倾一个小角度时,测量得到的结果十分类似于图2的情况。

2. 数值计算 对不对称受限射流的湍流流场进行了数值计算^[2],使用的是定常、不可压、k-s 湍流模型,基本方程为:

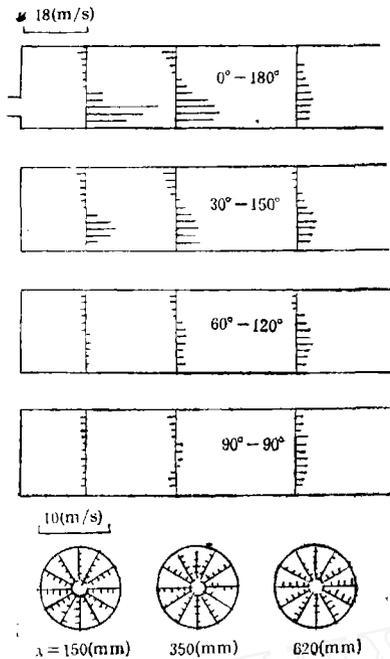


图2 LDV 流场测量值(一次风水平下偏置)

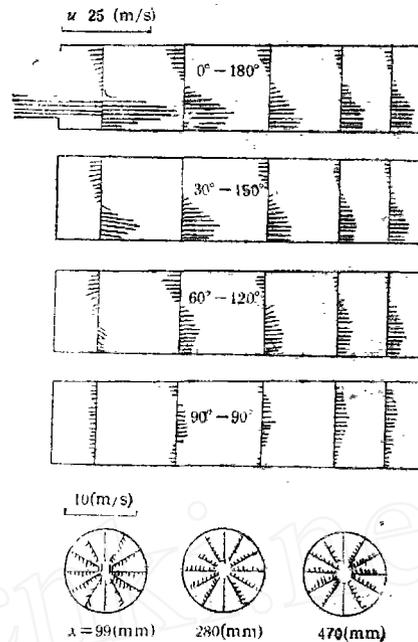


图3 数值计算结果(三剖面为切向与径向合成的速度)

$$\text{连续方程 } \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

$$\text{动量方程 } \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}\mathbf{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{V}) + \nabla \mathbf{V} \cdot \nabla \mu_{eff}$$

$$\text{湍流动能 } \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}K) = \nabla \cdot [(\mu_{eff}/\sigma_k) \nabla K] + G_k - C_3 \rho \varepsilon$$

$$\text{湍流耗散 } \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}\varepsilon) = \nabla \cdot [(\mu_{eff}/\sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon] + C_1(\varepsilon/K)G_k - C_2 \rho(\varepsilon^2/K)$$

其中 $\mu_{eff} = \mu_l + \mu_t$, $\mu_t = C_\mu \rho K^2/\varepsilon$,

$$G_k = \mu_t [(\nabla \mathbf{V}) + (\nabla \mathbf{V})^T] : \nabla \mathbf{V}$$

图3给出了部分典型计算结果,在与测量时所用的几何参数和气流参数基本相同的条件下,三维湍流计算所得到的流动图案与测量结果十分相近。

测试得到的切向速度分量,或计算得到的切向与径向合成的速度分量,随气流向下游流动由上而下而后由下而上这样弯曲运动,可以这样解释:被下偏置的一次风主射流喷入燃烧室的有限空间后,从四周卷吸气体并带着它们向下游流动,射流周围的空间里压力降低。在燃烧室的下部,射流离壁面较近,压力下降较大,在上半部射流离壁面较远,压力下降较小,上下之间有一个压力差,上部气体在这个压力差的作用下向下部运动。当射流到达燃烧室的下游后,由于受限射流中气体的动量沿射流方向逐渐减小,压力逐渐增加,从上游上部来的气体又挤压在下部,致使下游下部的压力高于上部,气体不得不再由下部向上部运动。这种大尺度的湍流流动形态和大而强的回流构成了这种不对称受限射流流场的基本特征。

研究表明,与大速差同向射流相比,它所产生的回流区较长而回流率相近,改变一次风速或偏置距离,回流区长度变化不十分明显,但反流速度和回流率变化较大。当投入吹灰风时,随着吹灰风速和动量的增加,头部附近湍流扰动剧烈增强,一次风主射流被引射得向下偏斜,流场的弯曲变形更加严重,流线沿周向的弯曲更大,回流区长度明显缩短并

向下方扩张,回流速度明显增加,射流与反向流动的混合被强化。所有这些变化对火焰的稳定与强化燃烧是十分有利的,也将强化稳燃、控制燃烧和有效吹灰这三者巧妙地统一起来。

四、燃烧试验结果

燃烧试验装置参见图 4, 该图给出了偏置射流预燃室(燃烧器)燃烧煤粉时的特征尺寸和测点位置。表 1、表 2 是试验成功的部分煤种和水煤浆。图 5 是圆筒形燃烧室燃烧淮北贫煤时的温度分布,图 6 为矩形燃烧室的温度剖面。表 3 是燃烧挥发分 10% 左右的

表 1 偏置射流预燃室部分试验煤种

	$V'\%$	$A'\%$	$W'\%$	$Q_{Dw}(\text{kJ/kg})$	燃烧情况
保定煤粉	15.14	30	0.42	18837	稳燃
淮北煤粉	13.16	33.4	1.0		稳燃
娘子关煤粉	10.18	21	2.17		稳燃

表 2 难燃水煤浆浆质分析

$V'\%$	$A'\%$	$C'\%$	$W'\%$	浓度%	$Q_L(\text{kJ/kg})$
10.96	7.40	52.42	29.22	70.78	21754
Haake 粘度计粘度 $CP\ 100(\text{s})^{-1}$		流型	煤 T_1 ($^{\circ}\text{C}$)	煤 T_2 ($^{\circ}\text{C}$)	煤 T_3 ($^{\circ}\text{C}$)
1352		宾汉	1330	1335	1360

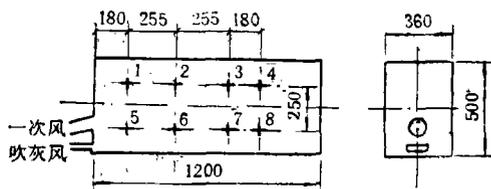
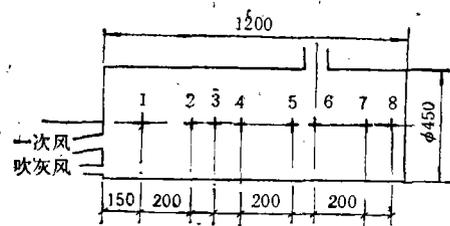


图 4 预燃室及测点分布

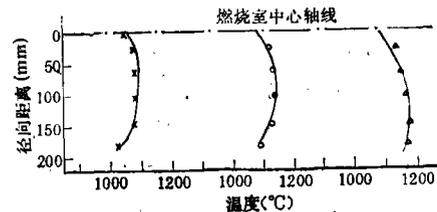


图 5 $\phi 450$ 预燃室燃烧淮北煤温度剖面

娘子关煤时的壁温数据。图 7 是燃烧挥发分 10.96% 的难燃水煤浆时的两次温度分布。

偏置射流预燃室的工业试验也已取得了完满的成功。在 15(T/h) 水煤浆锅炉上已完

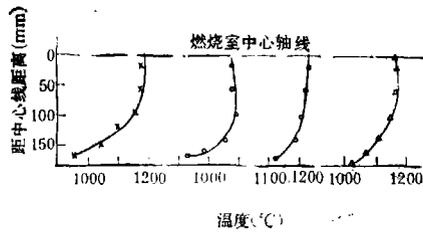
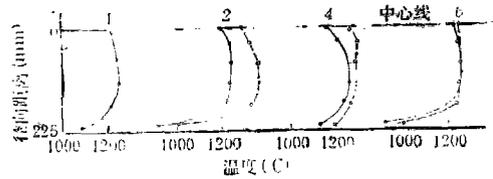


图6 500×360 矩形预燃室燃烧淮北煤温度剖面

图7 $\phi 450$ 预燃室燃烧难燃水煤浆温度分布

—第二次试验值, ---第一次试验值

表3 挥发分 10.18% 的娘子关煤燃烧壁温

工况	壁温(°C)		测点							
	1	2	1	2	3	4	5	6	7	8
1	951	1021	1089	1110	1021	1173	1055	1072		
2	960	1021	1080		1030	1190	1055	1038		

成了连续燃烧试验,在 400(T/h) 煤粉锅炉上用于点火和在 50% 负荷下稳燃已投入运行。

由燃烧试验的结果和数据可以看出,根据不对称受限射流原理研制的偏置射流预燃室能够稳定和强化燃烧 $V_f = 10\%$ 左右的贫煤和难燃水煤浆。燃烧室中燃烧温度分布合理,壁面温度可控制在 1200(°C) 以下。矩形吹灰风的效果极好,它能覆盖底部的大部分面积,既能使灰分在这种氧化性气氛中维持原熔点而不上升,又能被强劲的气流所吹除。加大吹灰风,燃烧强度增大,吹灰也更加有效。还可以看出,无论是燃烧水煤浆还是燃烧煤粉,都可以将高温区调整到燃烧室后半部,这对点燃主燃烧器是十分有利的。总之,偏置射流预燃室长度较短,燃烧组织和气流结构合理,底部煤粉浓度低,燃烧温度也低,又有强劲的吹灰风,因而它不积灰、不积粉、不结渣、不结焦,完全可以保证工业生产中长时间连续运转的要求。

五、应用前景

1. 将不对称受限射流原理用于煤粉燃烧室使火焰稳定和强化燃烧给煤粉燃烧器的设计提供了另一条新途径。利用这一原理研制的多功能燃烧器能够在低质煤种锅炉上达到大幅度节油和强化燃烧的目的。

2. 偏置射流技术与直流式雾化喷嘴结合,不但可以稳定燃烧难燃的劣质水煤浆,也可以高效率地稳燃其它难燃的液体燃料。

3. 将此项新技术与煤粉锅炉的主燃烧器结合起来,既可以使主燃烧器提前着火,改善燃烧效率,又可能发展成一种新型的低污染燃烧器,在采用燃烧的方法降低污染方面走出一条新路子。

参 考 文 献

- [1] 付维标, 詹焕青等: “大速差同向射流——一种新型火焰稳定与强化燃烧的空气动力学原理”, 中国科学, 8, (1987), pp. 837—845.
- [2] Wu Chengkang, Chen Lifang etc.: “The Use of Nonsymmetrical Jets For The Stabilization of Low Grade Coal Flames” Paper Presented at 22nd Symposium (Int.) On Combustion, U. S. A. (1988).

NONSYMMETRICAL JET — A NEW AERODYNAMIC PRINCIPLE OF COAL FLAME STABILIZATION

Sun Wenchao Zhan Huanqing Chen Lifang

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

The aerodynamic principle of using nonsymmetrical jet for flame stabilization and intensification of low grade coal and coal-water-slurry has been put forward. Based on this principle, a new precombustion chamber with an off-axis and slightly tilted primary jet has been developed. This jet produces a large recirculation zone in the upper half of the precombustor. The coal particles can be immediately projected into the high temperature zone. The three dimensional air flowfield and the distribution of coal concentration are very favorable for igniting, stabilizing and intensifying combustion. This precombustor has been demonstrated to be capable of stably burning coal with volatiles 10% and ash 30% and CWS with volatiles 10% and water content higher than 30%, and there are not slagging and depositing ashes in the precombustor in the process of burning. It has already been successfully used in industrial boiler and power plant boiler for startup and part-load (50%) flame stabilization, and has brought about a good result in economizing a large quantity of oil.