

# 稳燃腔正交射流燃烧器的设计原则 及稳燃机理探讨\*

徐明厚 胡平凡\*\* 张明春 盛昌栋 韩才元

(华中理工大学)

**【摘要】** 稳燃腔正交射流燃烧器是在稳燃腔钝体燃烧器的基础上提出的一种新型煤粉燃烧器。它利用空气动力学原理产生高温烟气的回流,从而强化煤粉气流的着火与稳定燃烧。本文报道了采用该燃烧器进行冷、热态试验的结果,提出了燃烧器设计的原则,并详细探讨了其稳燃的机理。

**关键词** 煤粉燃烧器 稳燃 正交射流      **分类号** TK223 TK221

## 1 引言

近年来,我国在煤粉燃烧研究方面取得了显著的成绩,许多新型煤粉燃烧器相继推出,对电站锅炉的燃烧,特别是劣质煤的稳定和强化燃烧起了很大的作用。这些燃烧器主要包括:旋流预燃室、钝体燃烧器、船型直流预燃室、大速差同向射流预燃室、夹心风燃烧器、稳燃腔燃烧器、偏置射流预燃室等等。

对于劣质煤的稳定和强化燃烧,国内外有几种不同的观点。文献[1]的作者指出,燃烧器出口若能实现“高温、高煤粉浓度和合适的氧浓度”,则可保证劣质煤的稳定燃烧;文献[2]中提出了煤粉燃烧的新概念——粉气分离。该文作者认为,如果实现了煤粉空气的局部分离,则可强化燃烧过程;文献[3]的作

者指出,在燃烧初期局部狭窄区域内若能扩大速度梯度、压力梯度、浓度梯度和温度梯度的“四大差别”,就有可能实现劣质煤的高强度燃烧。以上几种观点的共同之处在于都强调了高温烟气的回流和高浓度的煤粉颗粒区的作用。而国外的研究者则指出了湍流的重要性。如 Beer<sup>[4]</sup>认为,燃烧器设计应满足“使流场中湍动切应力高的地方正好是燃料浓度高的地方”这一原则;How<sup>[5]</sup>则指出,在挥发物释放和燃烧时期内的湍动有利于整个燃烧时间内的湍流煤粉火焰传播速度的增大;还有研究表明,因为湍动强度正比于平均流速,高强度局部湍动增大了氧对颗粒表面的扩散和增强传热,从而有利于燃烧<sup>[6]</sup>。从强化燃烧的观点来看,在主气流中采用增大局部速度梯度和增大局部湍动度的措施是可取的,例如采用气体射流和局部(二次风)气流,网栅,

\* 本文为国家攀登计划资助项目      \*\* 现在广东沙角A电厂工作

收稿日期 1993-05-05      收修改稿 1993-06-07

本文联系人 徐明厚 男 博士 130074 武汉华中理工大学煤燃烧国家重点实验室

多孔板和各种其他机械方法来产生湍动。

我们认为,燃烧器的设计中若能满足在高温烟气的回流区域恰是高煤粉颗粒浓度的地方,同时又是高湍动度的地方的原则,则能实现劣质煤的稳定和高强度燃烧。

回流区的产生常伴随着某种形式的颗粒沉聚,如何组织好这个颗粒沉聚区使之满足我们提出的上述煤粉燃烧器的设计原则,将直接影响到燃烧器的使用效果,前面提到的一些得到成功应用的新型燃烧器正是符合了这一原则,如大速差同向射流预燃室中颗粒浓度最高之处正好在温度最高的地方,因而获得了很大的成功。

然而,这些燃烧器在使用中也存在着不足之处。如钝体的磨损、烧坏;其他一些预燃室存在着结焦的危险等等。新型燃烧器的开发必须既满足上述设计原则,又要克服类似以上的不足才有前途。

## 2 稳燃腔正交射流燃烧器的工作原理图

稳燃腔正交射流燃烧器是在稳燃腔钝体燃烧器的基础上研制而成的。我们知道,钝体后方的回流区的存在是稳燃的基础。研究表明,在钝体周围加装稳燃腔后,其回流区长度、回流率都有较大的增加,从而大大加强了稳燃效果<sup>[7]</sup>。

所谓正交射流,是指一小股射流(副射流)垂直地射入主流中的交叉射流流动。副射流射入主流后受其冲击要发生变形,并逐渐向下游弯曲,射流的截面也发生了变形。如副射流为圆形,则与主流相互作用后将变成腰子形,并在腰子形凹面出现一对反转旋涡,这对旋涡顺流发展扩大到主流下游消失,类似于钝体后方的回流区<sup>[8]</sup>。

交叉射流能产生一个稳定的回流区,这

一空气动力学现象就成了开发正交射流燃烧器稳燃的基本构思。这样,在原来的稳燃腔钝体燃烧器的基础上,去掉固体钝体,代之以截面形状相同的三角形气体射流柱,即形成了稳燃腔正交射流燃烧器(如图1)。

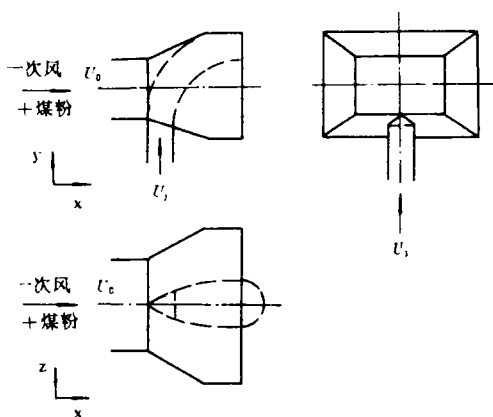


图1 稳燃腔正交射流燃烧器示意图

## 3 新型燃烧器的冷、热态试验

### 3.1 模型燃烧器的冷态试验

冷态两相流试验是在华中理工大学煤燃烧国家重点实验室的环形风洞上进行的。测量工具为 DANTEC 公司生产的三维激光粒子动态分析仪(3D-PDA)。PDA 是 LDV 的扩展,它利用多普勒频移测量流速,多普勒移测量粒径。它所采集的数据经过软件的处理可获得三个方向的平均速度、脉动速度、各分速度的相关、雷诺应力等参数,还能测量出两相流场中的颗粒浓度分布、颗粒的平均直径、粒径的 Rosin-Rammler 分布和 Nukiyama-Tanasawa 分布、粒径与速度的相关等等参数。整台仪器由氩离子激光器、发射器、信号处理器、光学接收系统、20M 光纤、计算机及手控三维坐标架等组成。

试验用的稳燃腔是根据文献[7]的结果选型的。为了测量的方便,将实际的稳燃腔拉

长成长通道式,稳燃腔的两侧为突扩形式,另外两侧则为渐扩形式,其具体尺寸为,进口:  $105 \times 150 \text{ mm}^2$ ,出口:  $180 \times 260 \text{ mm}^2$ ,副射流截面形状为正三角形,边宽为稳燃腔进口边宽的  $1/2$ ,这股射流由一台单独的小型鼓风机提供,风速可调,因而可以方便地改变主、副射流的速度比。

采用光学方法进行两相流试验中还有一个问题就是散射粒子的选择。为了模拟煤粉粒子在燃烧中的运动,需寻找一种既具有良好的光散射特性,又与煤粉性状(冷态时)相似的颗粒。经过大量的试验发现,滑石粉、氧化铝粉、氧化镁粉、甘油等都不合适,而有一种聚氯乙烯塑料粉末基本符合上述条件,其比重为  $1.2-1.4$ 。粒径为  $0-160 \mu\text{m}$  比较接近真实煤粉的物理特性。

测量结果发现,在正交射流尾迹中存在着一个类似于钝体尾迹的回流区(如图2)当副射流与主射流速度之比  $r$  为  $2.5$  时,回流区的长度约为副射流边宽  $2b$  的  $4-5$  倍,宽度约为副射流边宽的  $2-3$  倍,且回流区中反向速度较大。

区里面的颗粒浓度也较高,如图3所示,这是钝体尾迹回流区所没有的。当副射流射入主流中后,由于主、副射流强烈的相互作用,在稳燃腔中产生了强烈的气流脉动,这种脉动比钝体尾迹回流区中的气流脉动强烈得多<sup>[8]</sup>。

正交射流尾迹气流湍流脉动强烈还可以从其粒子尺寸的 Rosin-Rammler 分布(R-R分布)得出。R-R分布实际上是一种概率分布函数,通过它可以了解不同位置处不同粒径的颗粒出现的概率。其表达式为:

$$G(d) = \exp[-(d/D)^n]$$

式中:  $G(d)$  为大于粒径  $d$  的粒子累计容积百分数;  $n$  为粒子尺寸分布函数。 $n$  值越大,粒子尺寸的分布越均匀;  $D$  为特征尺寸( $\mu\text{m}$ )。大于该尺寸的粒子体积占粒子总体积的  $36.8\%$ 。

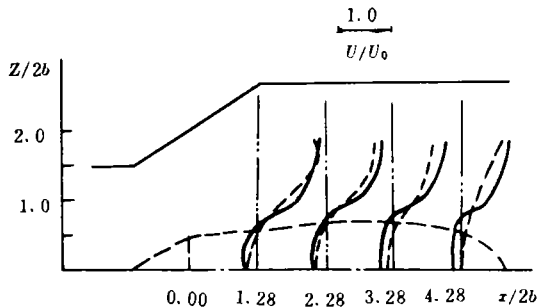


图2 稳燃腔正交射流( $r = 2.5$ )及钝体尾迹平均速度分布  
---  $r = 2.5$ ; — 钝体

实验结果还发现,正交射流尾迹回流区的边界处也存在着一个类似于钝体尾迹回流区的局部高浓度区;此外,正交射流尾迹回流

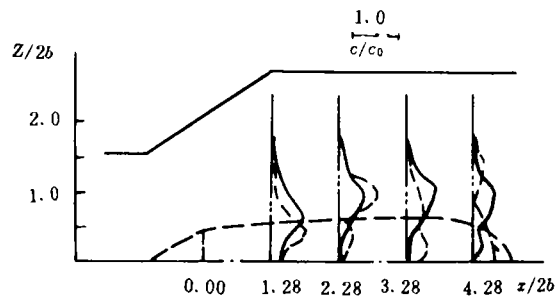


图3 稳燃腔正交射流( $r = 2.5$ )及钝体尾迹颗粒浓度分布  
---  $r = 2.5$ ; — 钝体

表1为钝体及正交射流尾迹不同位置处的粒子尺寸的R-R分布中的  $n$  值和  $D$  值。由表中可以看出:对钝体,在回流区外,粒子尺寸分布比较均匀,且大颗粒出现的概率较高;而在回流区内,粒子尺寸分布很不均匀,且大颗粒出现的概率较小;而对正交射流,无论是在回流区内还是在回流区外,其粒子尺寸分布都不很均匀;而大颗粒在回流区内

的出现概率较高。从粒子尺寸的动态分布说明正交射流尾迹的湍流脉动比钝体尾迹更强烈。

以上冷态试验结果表明,稳燃腔正交射流燃烧器符合了我们前面提出的燃烧器设计原则,即回流区域又是高湍流区,同时还具有高的颗粒浓度,因此这种燃烧器具有较好的空气动力学特性。

表 1 钝体与正交射流尾迹粒子尺寸的 R-R 分布参数

$z/b$ 项目		$z/b$				
		0.4	0.8	1.2	1.6	
1.0	钝体	$n$	2.79	3.08	3.20	3.38
		$D$	96	106	105	109
	$R=2.5$	$n$	2.30	2.38	2.45	2.53
		$D$	108	106	103	103
3.0	钝体	$n$	2.84	2.95	3.11	3.22
		$D$	98	107	109	107
	$R=2.5$	$n$	2.34	2.48	2.75	2.88
		$D$	107	105	100	98

### 3.2 模型燃烧器的热态试验

表 2 试验用煤煤质分析

煤种	$V^y(\%)$	$C^y(\%)$	$A^y(\%)$	$Q_{wv}^y(kJ/kg)$
黄石煤	10.25	64.41	23.55	25 088
青山煤	21.67	43.86	32.31	21402

为了检验稳燃腔正交射流燃烧器的燃烧特性,我们在华中理工大学煤燃烧国家重点实验室的单火嘴煤粉燃烧热态试验台上进行了试验。试验煤种煤质分析如表 2。试验中测量了炉膛中心线上的温度分布(如图 4),它

反映了煤粉气流的着火性能和燃烧强度特性。

从热态试验结果可以看到,对青山煤,当用稳燃腔正交射流燃烧器(即投入副射流)后,炉膛中心线上的温度水平大大上升,特别是燃烧器出口附近的火焰根部温度水平得到提高,十分有利于煤粉气流的初期着火,对黄石煤,在我们所试验的单火嘴燃烧试验台上,若不投副射流,即采用普通的空口直流燃烧器时,煤粉气流很难着火,而且勉强着火后燃烧也很不稳定,炉内温度水平很低且波动大。故我们未给出其温度分布;当采用燃稳腔正交射流燃烧器后,煤粉气流易于着火,炉内燃烧很稳定,图 4 给出了其试验结果。

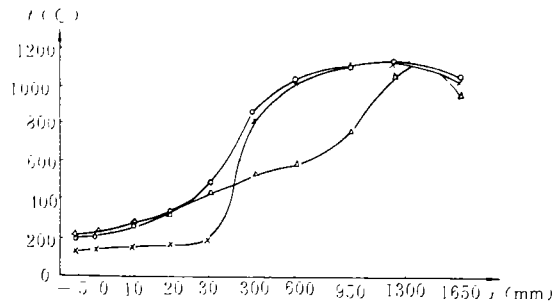


图 4 炉膛中心线上的温度分布

×—未投副射流(青山煤);○—投副射流(青山煤);  
Δ—投副射流(黄石煤)

## 4 结论

多次详尽的实验(冷态、热态;单相、两相)结果表明,稳燃腔正交射流燃烧器具有很好的稳定和强化燃烧效果。经过分析,我们得出正交射流具有以下三个特点:

第一,正交射流能产生一个较大的回流区,它卷吸后面已燃的高温烟气加热新鲜的煤粉气流,使得着火得以提前,该回流区的存在是这种燃烧器稳燃的基础。

第二,正交射流在稳燃腔中脉动强烈,这

种脉动有利于回流区里的热量向来流传播,也有利于来流中的煤粉向高温的回流区扩散,同时还有利于氧向颗粒表面的扩散。

第三,正交射流不仅能在回流区的边界处产生一个局部高浓度区,还能在回流区里面形成较高的浓度。较高浓度的颗粒在高温的回流区里立即燃烧并释放热量去加热点燃新鲜的煤粉气流,而回流区边界的局部高浓度则使得着火更容易。

仅就回流区的长度和体积而言,正交射流产生的回流区不及钝体回流区,但其尾迹回流区中具有较高的颗粒浓度和湍动度,这是钝体尾迹回流区所没有的,而这一点正符合我们提出的燃烧器设计的原则,这是正交射流燃烧器能实现劣质煤的稳定和高强度燃烧的特色所在。

此外,正交射流在锅炉的改装中容易实现,因副射流速度值并不高。针对煤质的好坏,可以调节副射流的速度,以控制回流区的大小;对较好的煤可关停副射流,采用普通直流燃烧方式。因此该燃烧器对煤种具有较好的适应性。

用稳燃腔正交射流燃烧器时,副射流的速度如前所述可根据煤质的好坏选择为一次

风速的2~3.5倍。为了达到这样的风速,这股射流由一台单独的小型鼓风机提供。为了利于煤粉气流的初期着火,这股气流应为热风,其风量约为一次风量的(5~15)%。由于稳燃腔喷口处于高温的区域,故其制造材料应耐高温。稳燃腔具体尺寸选择原则参见文献[7]。

### 参 考 文 献

- 1 徐旭常 等. 关于煤粉火焰稳定性和煤粉预燃室及火焰稳定器的作用. 工程热物理学报, 1988. 9(4): 384-389
- 2 钱壬章 等. 煤粉燃烧的新概念——粉气分离. 工程热物理学报, 1991. 12(3): 320-323
- 3 韩才元, 袁建伟. 劣质煤高强度燃烧的理论研究. 动力工程, 1988, (3)
- 4 Beer J M. J. Inst. Fuel, 1972, 45: 377
- 5 How M E. J. Inst. Fuel, 1966. 39: 303
- 6 Stambuleanu A. Comunicare institutului politehnic bucuresti England, Abacus Press 1968
- 7 袁建伟 等. 稳燃腔煤粉燃烧器的气流结构及燃烧特性研究. 发电设备, (8)1989
- 8 徐明厚. 正交湍流射流及高浓度煤粉燃烧过程的研究. 华中理工大学博士学位论文, 1992

### 诊断技术

## 诊断振动问题的专家系统

据“Mechanical Engineering”1993年4月号报道,加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华市的设计维护系统公司最近研制成对旋转机械进行振动分析的专家系统-VARMINT(旋转机械内的振动分析)。

该系统自动分析振动数据并对机器的状况提供屏幕评定。在发觉问题时,该系统描述其症状,提供诊断,并建议为排除该问题应该采取的行动。

VARMINT分析一台简单机器的时间少于30s,观测1200个数据点的时间少于1h,可使分析的时间节省75%。

该振动分析专家系统另一个重要的优点是:通过使工程师和机修工人能排除机器问题的根本原因,从而有助于节省预测维护计划的费用。例如使用该系统诊断分析Skeena工地一台锅炉引风机轴承的问题,导致节省费用80 000到100 000美元。(学生 供稿)

- (18) **The Design Principle of a Flame-Holding Cavity Burner with Orthogonal Jet Flows and the Exploratory Study of its Flame-Holding Mechanism** ..... Xu Minghou, Hu Pingfan, Sheng Changdong, Zhang Mingchun and Han Caiyuan (*Huazhong University of Science & Technology*)

On the basis of a flame-holding cavity bluff-body burner the authors have proposed a new type of pulverized coal burner with a flame-holding cavity and orthogonal jet flows. By the use of aerodynamic principles the burner features a reverse flow of high-temperature flue gases with a resulting intensified ignition of pulverized-coal gas flows and a stabilized combustion process. The results of cold and hot state test results are reported. Also proposed is the design principle of such burners with a detailed discussion of their flame-holding combustion mechanism being presented. **Key words:** *pulverized-coal burner, flame-holding, orthogonal jet flow*

- (23) **A Preliminary Analysis of the Factors Affecting Solid Material Circulation Ratio** ..... Yan Guizhang (*Institute of Thermo-physical Engineering*)

Based on the experimental test results of a circulating fluidized bed cold state flows, the author has made an analysis of the effect of gas velocity and solid particle distribution on solid material circulation ratio. Proceeding from a balance of solid materials, a quantitative relationship has been identified regarding the effect of flyash separation efficiency and raw coal ash content on circulation ratio with relevant computations and discussion being performed. Also discussed and evaluated in the present paper is the quantitative analysis of a multi-stage circulation system and circulation ratio. **Key words:** *circulating fluidized bed, boiler, solid material circulation ratio*

- (27) **A Steam System Design for Petrochemical Plants** ..... Zhao Shihang (*Tsinghua University*)

The specific features, design principles and heat balance of a steam system for petrochemical plants are described. An off-design performance model for steam turbines, which find wide applications in steam systems, has been introduced, resulting in an enhanced accuracy of the system heat balance calculation. The said model can also be used in heat balance calculations for steam systems with varying production conditions. **Key words:** *steam system, heat balance, design, steam turbine*

- (32) **Determination of Low-Vacuum Heat Supply Parameters for Condensing Steam Turbines** ..... Xie Ming, Zhu Zhenjun, et al (*Harbin Institute of Technology*)

This paper discusses the issues concerning the computation of steam turbine low-vacuum heat supply thermal loads, off-design performance, thermification factors, heat supply network feeding and return water temperatures, etc. The author proposed that the optimum thermification factor should be 0.53-0.55 irrespective of the network feeding and return water temperatures, which can be taken as a reference value for engineering designs. **Key words:** *cogeneration, heat network, heat supply*