

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

傅维德 卫景彬* 韩洪樵

(清华大学工程力学系,北京)

詹焕青 孙文超 吴永康

(中国科学院力学研究所,北京)

陈以理 黄维胜

(安徽省电力局,合肥)

摘 要

本文介绍了一种稳定火焰和强化燃烧的新型空气动力学原理——大速差同向射流技术。单股或多股高速小射流(空气、蒸汽或其它气体)与低速的主气流(燃料和空气混合物)同方向射入燃烧室,可以产生高速流强度的大回流区,从而可以使可燃混合物与高温回流烟气有效地混合,以维持燃烧室内稳定而强化地燃烧,甚至对于着火性能很差的燃料也是如此。这是继传统的旋流燃烧器和钝体燃烧器之后又一种新型的有效而实用的火焰稳定方法。基于这种原理研制的煤粉燃烧器更具有优良的性能,并且在结构上也很简单。这种类型的煤粉预燃室,已经在电站和工业锅炉上安装使用。目前,使用这种预燃室可以在冷风条件下成功地启动贫煤($V' < 15\%$, $A' > 30\%$)锅炉及低负荷情况下仍能维持燃烧。这项新技术所展示的火焰稳定和强化燃烧原理在燃烧界引起了广泛的关注和兴趣。

一、前 言

对于煤的合理利用,已成为世界各国能源开发和利用的重大研究课题。当前的研究,集中在煤的直接燃烧以及煤的气化和液化上。但关于煤的气化和液化,目前还不能大规模推广应用。当前,煤的直接燃烧仍然是对煤的利用的主要方式^[1]。因此,提高煤的燃烧效率是节约能源的重要途径。我国煤的储量丰富,品种繁多,其中烟煤的点火和燃烧问题解决得比较好,但是,象烧贫煤,劣质烟煤,褐煤以及无烟煤的锅炉在点火,低负荷运行,以及稳定燃烧和燃烧效率方面都还存在不少问题。近几年来,我国燃烧工作者在关于煤的点火,稳燃及提高煤燃烧效率方面取得了多项可喜成果。例如,旋流型预燃室已成功地用于点燃烟煤煤粉锅炉;钝体稳燃器也在烧劣质煤锅炉上也得到了应用。但是,在以上这些劣质煤的煤粉锅炉的点火,低负荷稳

本文 1986 年 1 月 23 日收到, 1986 年 11 月 12 日收到修改稿。

* 现在中国科学院力学研究所工作。

燃以及强化燃烧等方面,所述技术都还不能满足要求。例如,用邻炉热风可以提高点火温度和燃烧的稳定性,但是,这往往由于沿程管路的热损失而达不到设计温度要求。同时,大量抽走热风而又会影响邻炉正常运行。为此,单台炉子的企业就无法实现这种方案。这样,就提出了一个能否用冷风对贫煤实现点火和稳定燃烧的重要问题。在这一研究中,我们应用燃烧空气动力学原理,提出了一项全新型的火焰稳定和强化燃烧技术,这就是“大速差同向射流”火焰稳定和强化燃烧新技术。应用大速差同向射流机理设计成功的煤粉预燃室,可以解决贫煤煤粉锅炉的点火和低负荷运行问题;把大速差同向射流技术应用于锅炉的主喷燃器上,将会大大强化锅炉燃烧和提高燃烧效率。

二、“大速差同向射流”火焰稳定及强化燃烧技术的原理

几十年来在航空和民用工业的燃烧装置中,普遍采用传统的旋流燃烧器和钝体燃烧器来稳定火焰^[2]。在稳定煤粉火焰的研究中,过去有人曾试验过一些其它的火焰稳定方法,如,逆向射流稳定方式^[3],双同心射流稳定方式^[4]。这些对于煤粉火焰稳定都有一定效果,但往往要辅助以其它手段,如,热风送粉,陪油燃烧等等。与这些方式相比,结构简单,效果显著的“大速差同向射流”燃烧技术更适宜于煤粉燃烧的特点。

在介绍大速差射流燃烧技术的机理之前,有必要先回顾一下旋流器和钝体的稳定机理。图 1 和图 2 分别表示旋流器和钝体后方回流区的结构及煤粉的浓度分布。如果回流区的温度高,燃烧就稳定。因此,关于回流区的研究,是关系到一种火焰稳定装置稳定火焰能力大小的关键课题。这在今天仍然一直是一个十分活跃的研究领域。

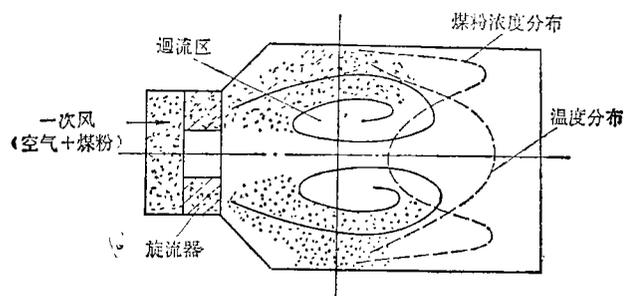


图 1 旋流型燃烧器

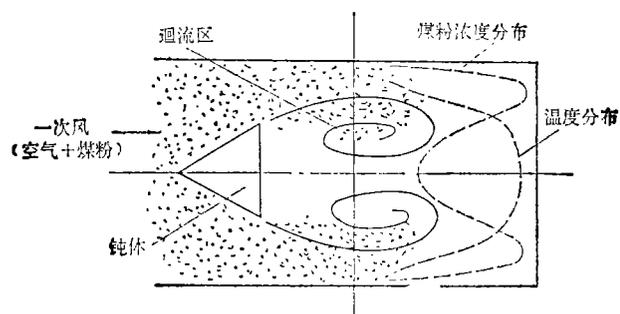


图 2 钝体燃烧器

在图 1 中,煤粉经过旋流器之后,由于离心力作用被甩向燃烧室壁面,因此,大部分煤粉不能进入高温回流区中,只能沿回流区边界层流过。这一方面使得煤粉浓度分布和气流温度分布不相匹配;另一方面,煤粉颗粒的受热只能依赖于边界层内高温气体对煤粉气流的湍流交换,这样的换热,比起煤粉颗粒直接置于高温区中要弱得多,因此,在对煤粉的稳燃中,尤其对于贫煤来说,旋流器稳定方式(在不配合其它辅助手段时)就显得不足,往往出现燃烧不稳定。在钝体稳燃方式中,煤粉浓度分布和钝体后方的温度分布有着与旋流燃烧器相类似情况。

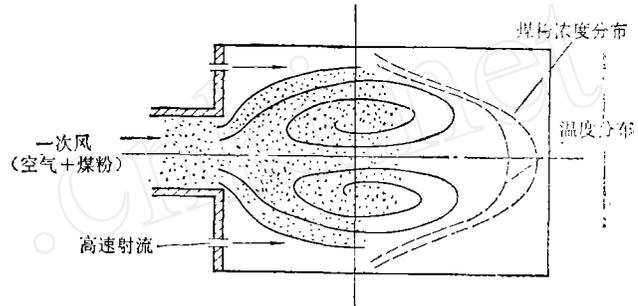


图 3 大速差同向射流技术原理图

本文所提出的大速差同向射流燃烧技术适应煤粉燃烧特点,可以使煤粉进入到高温回流区中,受到高温气流的直接加热,从而达到强化传热,传质,强化燃烧的目的。

在大速差同向射流燃烧器中,如图 3 所示,一次风(煤粉+空气)射流由中心进入燃烧器,其进口速度约为 20m/s 。在离一次风一定距离处,同方向射入两股高速射流,速度近于音速,即约为 300m/s 。这样,低速的一次风射流和高速的小射流就构成了所谓“大速差同向射流”。这种燃烧方式,也即因此而得名。由流体力学可以知道,在受限空间中,由于高速射流的强烈引射作用,会使得中心低速一次风射流中的气体被引射到高速射流的流动区域中去,这样,一次风射流中气流将偏离中心轴线,从而在中心一次风的后方就造成了一个负压区,由于压力梯度的存在,将造成一个很大的回流区。这样产生的高温回流区,将不存在旋流器的磨损问题,也不会出现由于煤粉颗粒碰击钝体迎风壁面而出现沉降问题。

大速差同向射流燃烧器不但可以造成一个很大的回流区,燃烧室内湍流脉动也较大,其所以有如此优良的燃烧性能,主要原因如下。

一次风中的空气、其他气体及部分小颗粒,将被高速射流引射而偏离轴线,但大部分煤粒,在喷入燃烧室后由于其惯性较大,将继续沿原来方向作直线运动,从而进入已经形成的大回流区中,这样,煤粉的浓度分布与高温气流的温度分布匹配良好。在煤粉颗粒进入高温环境之后,受到快速加热,从而使煤粒中挥发份的析出大为加速,不但析出速度快,而且量也增加。析出的挥发份气体与空气强烈混合,从而迅速着火燃烧,这就是煤粉中的第一次着火。燃烧产生的高温烟气又补充和进一步提高了回流区的温度和热量。由于回流区很大,因此,会使得部分煤粒本身也会着火,可以称为煤粒的第二次着火,发生气、固两相燃烧。大速差射流燃烧器中回流区温度大幅度增加,它会使燃料着火提前,从而使燃烧大大强化。它的一个突出的标志是可以用冷风点燃和稳燃贫煤。

大速差同向射流火焰稳定技术有下列特点和优点:

1. 结构比较简单。它仅由燃烧室和同向布置的一次风和小型高速射流喷口组成。阻力小,无叶片等机械磨损。制造简便,易于在生产中推广。

2. 稳燃和强化燃烧作用显著。例如,用大速差同向射流技术设计的预燃室,可以用冷风启

动贫煤稳定燃烧,且回流区温度在加高速射流之后约上升 300°C 左右. 它对于劣质烟煤和无烟煤也表现出显著的强化燃烧作用.

3. 回流区温度可以人为无级调整. 改变高速射流的速度和流量(或动量), 就可以改变回流区的大小和回流强度,从而可以改变回流区的温度. 在实验中,当关闭高速射流时,回流区温度大幅度下降;当开启高速射流时,回流区温度升高;当开启至音速时(高速射流喷嘴用一般收缩喷嘴),回流区温度升高最多. 因此,根据煤种挥发份的多少,煤种结焦温度的高低,可以选用不同的射流速度和流量,从而按煤种要求来确定最优化的稳定燃烧情况. 这样,就大大提高了燃烧器燃用不同煤种的通用性.

4. 基于以上优点,采用大速差同向射流技术设计的燃烧器,还易于实现系列化和标准化.

三、实验研究结果

1. 冷态试验结果

图 4、图 5 是关于大速差同向射流燃烧器的冷态试验结果. 图 4 表示的是在圆型燃烧室中的测量结果;图 5 是在矩型燃烧室中的测量结果. 实验表明,只要高速射流速度足够高,流量达到一定值,就会形成强大的中心回流区域. 当改变高速射流的位置、个数、流速和流量大小时,就可以改变回流区的位置、大小和强度.

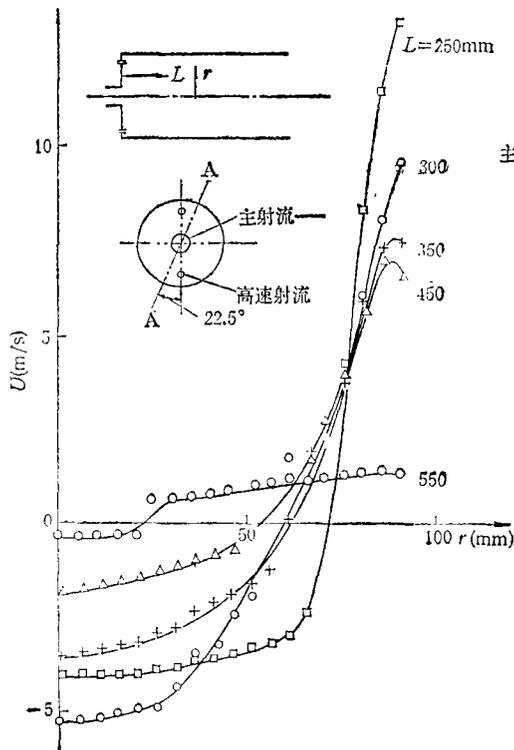


图 4 圆型燃烧器冷试结果

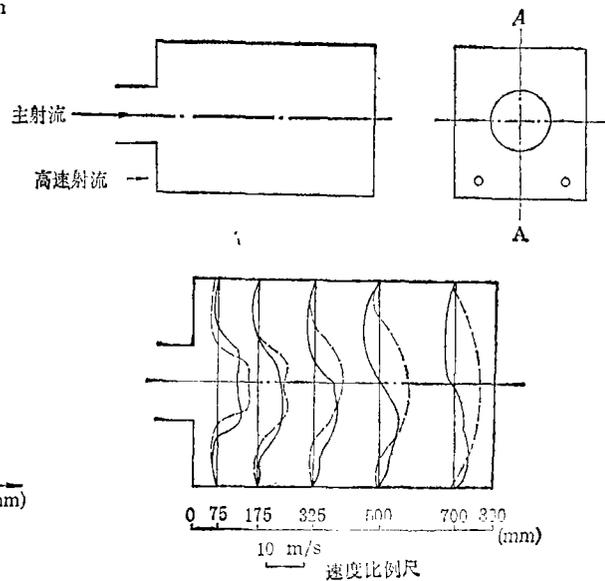


图 5 矩型燃烧器冷试结果

(实线—有高速射流($\frac{u_s}{u_M} = 15, \frac{Q_s}{Q_M} = 0.05$),
虚线---无高速射流)

2. 热态试验结果

由表 1 可以看出,对于不同煤种,燃烧室中加高速射流与不加高速射流,回流区温度与最高温度值变化非常显著。加高速射流之后,回流区温度和最高温度值都大幅度增加,一般说,约平均增加 300℃ 左右,见图 6 和图 7。由实验同时还可得到这样的结论,即高速射流比加少量油陪烧的稳燃作用更有效,更可靠。

应用大速差同向射流技术不但可以用冷风点燃和稳燃烟煤,贫煤燃烧,而且对于含灰量达到 50% 多,热值极低的劣质烟煤,以及挥发份只有 3—4% 的无烟煤也有着显著的强化燃烧作用,见表 2。由表中可知,单纯靠油陪烧,其效果并不理想,但加上高速射流之后,燃烧室温度将大幅度提高。

另外,如前边所述,从热态试验中发现,回流区温度,以至燃烧室内温度可以通过调整高速射流来进行调整。这种调整在记录燃烧室温度的记录仪上可以观察到,它是非常灵敏的。

表 1 加高速射流与不加高速射流时回流区温度和最大温度值变化的比较

煤种	回流区温度(°C)			最大温度值(°C)			其他条件
	不加高速射流 (加小油枪)	加高速射流 (不加油枪)	温升 Δt (°C)	不加高速射流 (加小油枪)	加高速射流 (不加油枪)	温升 Δt (°C)	
马头电厂煤: $V^l = 12.87$, $A^l = 26.97$, $W^l = 1.65$ 冷风	969	1240	271	1174	1407	233	预燃室直径 $\phi 350$ 供粉量约 200kg/h 一次风 255m ³ /h
马鞍山电厂煤: $V^l = 13.07$, $A^l = 21.1$, $W^l = 6.4$, $Q_{低} = 5635$ $\times 4.1868 \text{kJ/kg}$, 冷风	1021 934	1174 1207	158 273	1056 1107	1240 1291	184 184	预燃室 $\phi 470$ 供粉量约 625kg/h 一次风 800m ³ /h
淮北电厂煤: $V^l = 14.7$, $A^l = 30.0$, $W^l = 1.0$, 冷风	519	952	433	1021	1232	211	预燃室 $\phi 350$ 供粉量约 200kg/h 一次风 255m ³ /h
保定煤: $V^l = 15.14$, $A^l = 30$, $W^l = 0.42$, 冷风	771	1290	529	1207	1470	263	预燃室 $\phi 350$ 供粉量约 200kg/h 一次风 250 m ³ /h
马鞍山电厂煤: $V^l = 21$, 冷风	862	1207	345	1207	1357	150	预燃室 $\phi 470$ 供粉量约 625kg/h 一次风 800 m ³ /h

表 2 加高速射流对无烟煤和劣质烟煤稳燃烧效果的影响

煤种	回流区温度(°C)			最大温度值(°C)			其他条件
	不加高速射流	加高速射流	温升(°C)	不加高速射流	加高速射流	温升(°C)	
福建永安电厂煤: $V^l = 3.76$, $A^l = 26.58$, $W^l = 3.91$, $Q_{低} = 5445$, $\times 4.1868 \text{ kJ/kg}$, 冷风	(加 20kg/h 油陪烧) 677	(加 12kg/h 油陪烧) 1123	446	(加 20kg/h 油陪烧) 1095	(加 12kg/h 油陪烧) 1290	195	$\phi 350$ 一次风 $125 \text{ m}^3/\text{h}$ 二次风 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 粉量 200 kg/h
广西合山煤: $V^l = 10.34$, $A^l = 52.23$, $W^l = 25$, 冷风	(加油 15kg/h) 560	(加油 6kg/h) 1065	405	(加油 15 kg/h) 860	(加油 6kg/h) 1274	414	$\phi 350$ 粉量 200 kg/h 一次风 $208 \text{ m}^3/\text{h}$

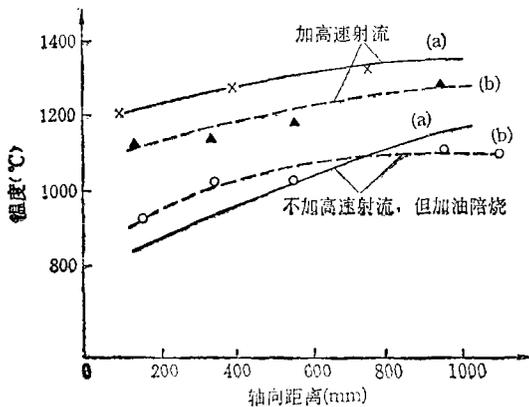


图 6 加高速射流与不加高速射流时燃烧室温度变化

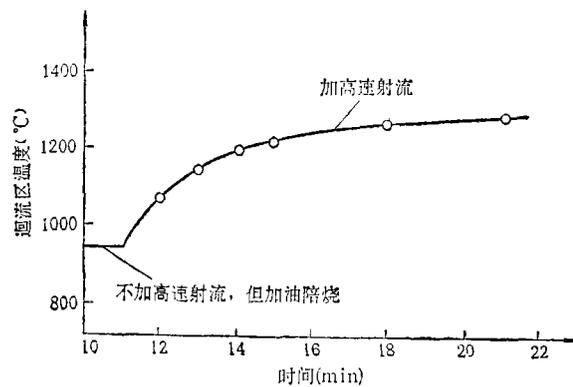


图 7 加高速射流时燃烧室升温过程

四、大速差同向射流技术应用前景

1. 将大速差同向射流技术应用于煤粉预燃室,进而研制了大速差直流煤粉预燃室。在工业上实现了冷风不陪油点燃贫煤锅炉和低负荷稳燃贫煤锅炉。同时,它也有希望用在劣质烟煤和无烟煤的锅炉的预燃室上,达到大幅度节油和高效强化燃烧的目的。

2. 大速差射流技术还可望用于煤粉锅炉的主喷燃器上,以达到预燃室与主喷燃器兼用的目的。不仅可作为点火和调峰用,而且还可以使主喷燃器着火提前,这可望用于改善劣质煤和无烟煤的燃烧效率。

3. 这种新技术也适用于水煤浆及重油的燃烧。在烧气体和轻油燃料时,由于这些燃料易着火且燃烧速率很大,因而,大速差射流技术与旋流器和钝体技术大致相当。

综上所述,大速差同向射流技术在火焰稳定和强化燃烧方面,效果非常显著。这一技术的提出,可能为今后燃烧器的设计,特别是煤粉燃烧器的设计开辟一个新的方向。同时,也带来了许多燃烧理论问题急待研究,因此,它也将为今后燃烧理论的研究开辟一个新的领域。

本项研究工作得到了国家经委和水电部的大力支持;清华大学,中国科学院力学研究所和安徽省电力局(科技处及马鞍山电厂)三个单位的其他一些同志也参加了此项研究,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Penner, S. S. et al., *Prog. Energy and Combustion Science*, 10(1984), 2: 87.
- [2] Beer, J. M. and Chigier, N. A., *Applied Science Publishers*, London, 1972.
- [3] Schaffer, A. and Cambel, A. B., *Jet Propulsion*, 25(1955), 284.
- [4] Chigier, N. A. and Beer, J. M., *Trans. ASME. J. Basic Eng.*, 1964, 4: 797—804.