

# 切圆燃烧流场中不同高宽比矩形喷嘴射流特性的试验研究

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001) 秦裕琨 张 泽 吴少华 姚 政 丁秀强  
(哈尔滨电站设备集团公司) 李 民

**摘 要:**采用热线风速仪, 首次在四角切圆燃烧的流场中, 对不同高宽比的一次风矩形喷嘴射流在流场中的刚性及湍流特性进行了详细的试验研究, 并分析了在不同高宽比下矩形喷嘴射流在四角切圆复杂流场中的偏转及稳燃机理, 得到了的四角切圆燃烧流场中一次风矩形喷嘴的最佳高宽比, 对工程设计及应用都有较好的参考价值。

**关 键 词:**切圆燃烧流场; 射流特性; 高宽比; 试验研究; 热线风速仪

中图分类号: TK223.23

文献标识码: A

## 1 前言

对于直流煤粉燃烧器喷嘴射流的试验研究, 目前国内外研究都集中在单喷嘴自由射流和简单相交射流的特性方面。我们过去从单喷嘴自由射流和简单相交射流的研究中分析得出了四角切圆燃烧锅炉工程应用的矩形喷嘴高宽比, 重点在于对整组燃烧器高宽比的要求, 这在许多教科书上都有介绍<sup>[1,2]</sup>。但在实际的四角切圆锅炉中应用时, 由于四角煤粉气流相互撞击的复杂性、特别是整组射流两侧补气条件的差异、多重复杂组合射流等因素的影响, 常常由于一次风煤粉射流刚性不足而出现“粉在外, 风在里”的燃烧两相流场, 导致未燃尽煤粉贴壁及引起的炉膛水冷壁结渣及高温腐蚀等问题。近年来的研究工作表明, 由于一、二次风刚性不同, 在受到邻角气流撞击后, 刚性差的一次风偏斜较大, 贴向水冷壁, 而二次风的刚性较强, 偏斜较小, 造成一二次风分离, 使水冷壁附近区域缺氧。如谏壁电厂 300 MW 锅炉出现高温腐蚀, 经分析主要是由于二次风喷口的宽度大于高度, 而一次风喷口则相反, 其高度大于宽度, 一次风刚性小于二次风, 出现一二次风分离。特别是在燃用低挥发份煤粉时, 其一次风速往往远低于二次风速, 因此动量较小, 也易促使一、二次风分离。上海锅炉厂在不同的电厂 300 MW 锅炉的冷态烟火模拟试验中发现, “一次风明显被二次风气流挤向水冷壁侧, 成抛物线冲向水冷壁”。

由于过去对射流的研究与实际的炉内四角切圆流场, 复杂的相交、多重组合射流中的喷嘴射流具有较大的差距, 故分析得出的矩形喷嘴高宽比并不完

善, 同时也没有注意一、二次风射流刚性不同的流场特征, 而目前还没有资料介绍采用较为先进的测量仪器对模拟炉内四角切圆流场中, 复杂组合射流中一次风矩形喷嘴射流特性的试验研究。因此, 对于在实际的四角切圆燃烧流场中一次风射流的偏转即射流的刚性和射流的湍流特性进行深入的研究具有较高的应用价值。

本文就四角切圆流场中, 不同高宽比下的一次风矩形喷嘴射流的刚性和湍流特性进行了试验研究和分析。

## 2 试验测量装置、试验台及试验方法

本文采用 Dantec 公司 Streamline CTA90C10 恒温热线风速仪装置及标定仪, Stream Ware 系统软件, 热线为测量高湍流度的 55P63“X”型曲柄镀金探头。它具有热惯性小、频率响应宽(达 2 MHz)、灵敏度高、对流场影响小, 平均速度及湍流脉动测量精度高(1%误差), 信号连续等优点<sup>[3,4]</sup>, 目前在气相湍流流场的测量中占据了较强的地位并得到了广泛的应用。

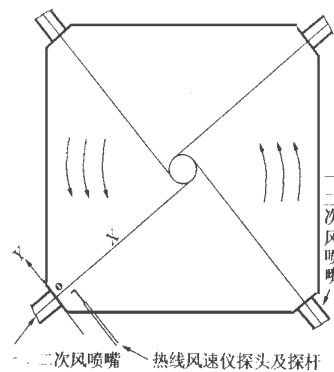


图 1 试验台测量区域平面示意图

该四角组合射流试验台按某电厂 300 MW 锅炉炉膛燃烧器区域、各层燃烧器喷嘴的布置及燃烧器喷嘴形状, 按 1:10 比例模化设计。试验模化原则为: 喷嘴及炉内冷态气流运动进入自模化区, 一、二次风动量比与实际热态运行相同, 模型与实物几何相似。

试验及测量区域平面和试验坐标系见图 1, 以喷嘴中心为基点的射流假想轴线(与炉膛假想切圆相切)为 X 轴, “0”点为喷嘴出口中心, Y 轴正半侧

区域为射流的向火侧,其负半侧区域为射流的背火侧,矩形喷嘴出口的高、宽分别为  $h$ 、 $w$ ,喷嘴出口的当量直径为  $D$ 。为了便于对喷嘴射流特性的研究,尽量减小炉内高度方向(纵向)气流对射流测量的影响,试验炉膛采用了上下敞口,对中间一层一次风及相邻的二次风喷嘴射流进行了测量。测量中热线风速仪的采样频率为 60 kHz,每个测点采集数据 32 768 次,由 Stream Ware 软件进行统计分析。

### 3 测量结果及分析

冷态试验中一、二次风配比按照热态运行锅炉带 300 MW 负荷时的一、二次风动量比相等进行模化。试验仅通过改变中间一层一次风喷嘴出口的高宽比,但保证该喷嘴出口面积相同,出口平均速度相同,从而在各工况下该喷嘴射流出口的动量相同,邻角气流撞击也一样的情况下,实现了在模拟炉内四角切圆的燃烧流场中对不同高宽比的一次风矩形喷嘴的射流刚性及湍流特性的研究。试验分四个工况进行,见表 1。

表 1: 试验工况数据

项 目	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
一次风喷嘴高宽比 $h:w$	0.349	0.736	1.0	1.273
一次风喷嘴当量直径 $D/\text{mm}$	32.61	36.87	37.0	36.96

#### 3.1 射流刚性

图 2 为在四角切圆流场中喷嘴出口轴向速度场的测量结果。图 3 为一、二次风喷嘴射流的最大轴向速度衰减图。由图 3 可见,随着喷嘴的高宽比增加,一次风射流轴向速度衰减速率加快,并且当喷嘴高宽比  $h/w \geq 1.0$  时,射流的轴向速度衰减明显高于高宽比  $h/w < 1.0$  的工况。

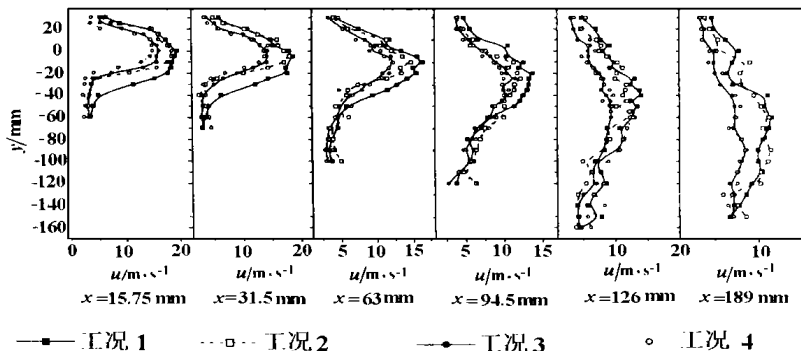


图 2 喷嘴出口射流轴向速度分布

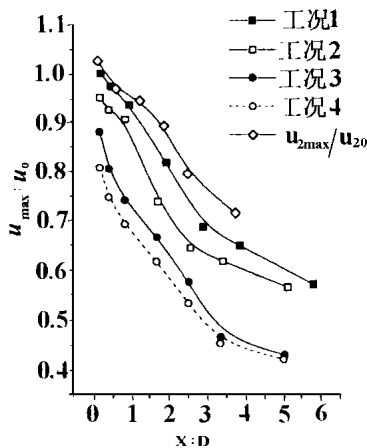


图 3 射流最大轴向速度衰减图

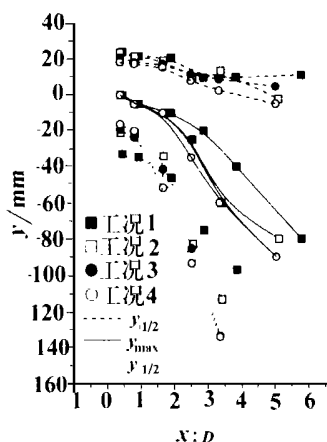


图 4 射流的最大速度点轨迹及半速度点轨迹

对于不同高宽比矩形喷嘴射流在四角切圆流场中的偏转,图 4 为四个工况下射流的最大速度点轨迹 ( $y_{max}$ ) 和射流最外两侧的半速度点轨迹 ( $y_{+1/2}$ 、 $y_{-1/2}$ ),  $y_{max}$  代表在截面上最大轴向速度  $u_{max}$  在  $y$  方向的位置,  $y_{+1/2}$ 、 $y_{-1/2}$  分别代表在截面上射流的两侧(向火侧、背火侧)轴向速度等于  $0.5u_{max}$  的点在  $y$  方向的位置。

从图 4 可见,总体上射流在背火侧的偏转要远大于其在向火侧中的偏转,这是由于喷嘴射流处于一实际炉膛的模化流场之中,射流的向火侧外剪切层受到来自上游旋转气流的冲击,出口不久即偏离其射流轴

线,向下游方向流动,但由于受到整组射流的支撑,故向火侧的偏转较小。而背火侧内剪切层不仅受到外侧气流的挤压,而且由于背火侧补气条件较差,静压较低而形成作用于射流两侧的静压差,在这两方面的作用下,因此背火侧扩展速率大于向火侧扩展速率。对四个工况的喷嘴射流轨迹进行比较可以看出,工况 1 的一次风最大速度线的偏斜均小于其它三个工况,一次风射流的向火侧半速度线轨迹 ( $y_{+1/2}$  曲线) 的偏斜最小,在射流后期,其向火侧半速度线基本持平,其背火侧半速度线的偏斜也最小。随着喷嘴高宽比的减小,射流最大速度线及背火侧

扩展速率大于向火侧扩展速率。对四个工况的喷嘴射流轨迹进行比较可以看出,工况 1 的一次风最大速度线的偏斜均小于其它三个工况,一次风射流的向火侧半速度线轨迹 ( $y_{+1/2}$  曲线) 的偏斜最小,在射流后期,其向火侧半速度线基本持平,其背火侧半速度线的偏斜也最小。随着喷嘴高宽比的减小,射流最大速度线及背火侧

半速度线的偏斜减弱。

从燃烧角度考虑,当高宽比  $h/w \geq 1.0$  时,将会导致一次风向壁面的偏斜过大,这对于防止水冷壁高温腐蚀和结渣都会产生不利影响。但对于工况 1,由于射流高度过小,射流与邻角来流的接触面较小,也不利于提高了煤粉的着火稳定性和提高燃烧效率。

从试验结果的分析可见,要基本满足四角切圆燃烧流场中一次风射流刚性,一次风矩形喷嘴的高宽比应在 0.7 左右(工况 2),这与过去的经验数值(1.0)有较大的差异,其原因在于过去都不是在实际的炉内流场中对喷嘴射流进行研究,未较好考虑炉

正则化后的雷诺切应力分布,它反映了射流在横向上的湍流输运能力。结合图 2 中的各对应截面可见,在射流出口附近,射流与环境气流交界的两侧,其湍流强度、湍流动能都较大,但背火侧的剪切应力要高于向火侧,并且工况 1 背火侧剪切应力、湍流强度较高的位置也更加远离射流中心。在射流后期,随着射流速度的衰减,四个工况的湍流强度、湍流动能分布变缓且分布规律较为一致。射流与环境气流交界的两侧附近的湍流强度仍较高,湍流动能较高处都在射流的向火侧。

从四个工况的湍流特性分布可见,在射流出口初期,射流两侧与环境气流之间的动量、质量交换基本相等,但背火侧的湍流输运能力更强,这说明了要提高矩形煤粉喷嘴射流的着火稳定性,应该增强喷嘴向火侧的湍流交换能力,这可通过改进矩形喷嘴向火侧的结构上而实现。对于工况 1,由于其喷嘴出口的宽度过大,高宽比很小,在射流出口附近背火侧的湍流运输更加偏向壁面,这种剪切应力的分布也易使煤粉射流初期就卷吸过多的背火侧烟气,对煤粉着火不利。

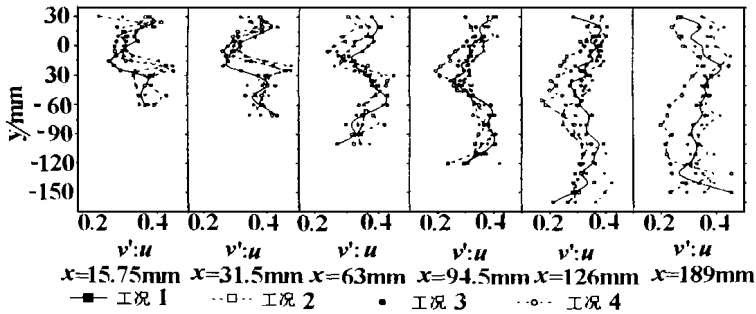


图 5 矩形喷嘴射流的当地横向湍流强度分布

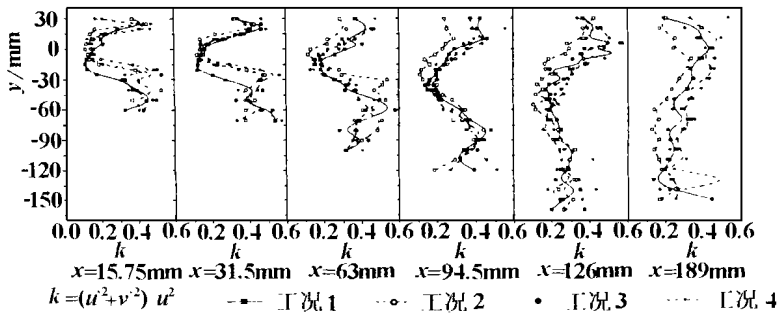


图 6 矩形喷嘴射流的当地湍流动能分布

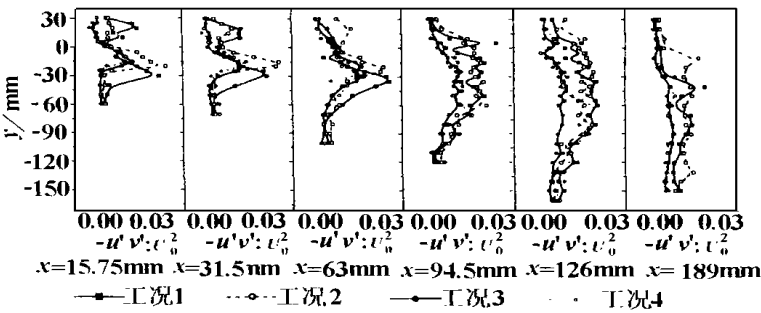


图 7 矩形喷嘴射流的雷诺切应力分布

内角部射流的补气、复杂的相交、多重组合射流等因素对喷嘴射流刚性的影响。

### 3.2 射流湍流特性

图 5、6 为四个工况的矩形一次风喷嘴射流的当地横向湍流强度分布和当地湍流动能分布,图 7 为

## 4 结论

本文通过采用热线风速仪,在模拟实际的四角切圆燃烧、复杂相交组合射流的流场中,针对不同高宽比的矩形煤粉喷嘴射流的刚性及湍流特性的试验研究,可以得出以下结论:

(1)随着矩形喷嘴高宽比的减小,喷嘴射流的刚性增强,可有效地控制射流后期向壁面的偏斜,防止未燃尽煤粉颗粒的贴壁,从而防止了水冷壁高温腐蚀和结渣的出现。

(2)根据在实际四角切圆燃烧流场中一次风矩形煤粉喷嘴射流刚性的研究,综合射流刚性及着火稳定性两方面因素,应保持高宽比在 0.7 左右。

(3)对于矩形煤粉喷嘴射流,要在保证其射流刚性的情况下提高其着火稳燃性能,应该增强喷嘴向火侧的湍流交换能力,这可通过改进矩形喷嘴向火侧的结构而实现。

## 参考文献

- [1] 岑可法,樊建人合编. 燃烧流体力学. 水利电力出版社, 1991.
- [2] 冯俊凯,沈幼庭主编. 锅炉原理及计算. 科学出版社, 1992.
- [3] Dantec Company, StreamLine<sup>®</sup>User's Manual, 1994.
- [4] Jorgensen F E. The computer controlled constant-temperature anemometer. Aspects of set-up, probe calibration, data acquisition and data conversion. *Measurement Science Technology*, 1996(7): 1378 ~ 1387.

(复 编)

反切配风对大容量锅炉内流场特性影响的研究= **The Effect of an Reverse Tangential Air Distribution on the Flow Field Characteristics in a Large-sized Boiler Furnace** [刊, 汉] Zhou Qulan, Dou Wenyu, Zhou Yuegui, et al (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 116 ~ 118

The in-furnace flow-field characteristics of a large-sized boiler were studied by way of experimental measurements and numerical simulation. The results of the experimental measurements fully agree with those of numerical simulation. In addition, in both cases the same conclusions have been reached. They are: 1. There exists at the furnace outlet of a large-sized boiler a speed excursion caused by a residual rotation; 2. There is a wall attachment tendency in the actual tangential circle at the burner zone of the large-sized boiler; and 3. The reverse tangential air-distribution mode can effectively reduce the level of rotating momentum flow rate moment in the furnace, and markedly weaken the residual rotation at the furnace outlet. **Key words:** boiler, secondary-air reverse-tangential circle, model test, numerical simulation

齿轮结构参数和误差对某动力装置主齿轮传动振动的影响= **The effect of Gear Structural Parameters and Errors on the Main Gear Transmission Vibrations of a Marine Propulsion Plant** [刊, 汉] / Shi Huamin (Naval Engineering Academy) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 119 ~ 121

Following the creation of a single-stage helical-gear transmission vibration model set up was a dynamics model for the main-gear transmission vibrations of a marine propulsion plant. A modal analysis method was employed to solve for the model. Analyzed and discussed was the effect of the structural parameters and errors on the main gear transmission vibrations. In addition, some pertinent conclusions were also obtained. **Key words:** gear transmission, vibration

同心反切燃烧方式的气固两相流动特性实验研究= **An Experimental Study of the Gas-solid Dual-phase Flow Characteristics of the Reverse Tangential Firing System (CFS-II)** [刊, 汉] / Wang Chungang, Zhu Qunyi, Li Zhengqi (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2000, 15(2). — 122 ~ 124

Low-quality coal-fired boilers operating in a tangential firing mode often suffer from such problems as a deteriorating flame stabilization and water wall high-temperature corrosion. With respect to the above-cited issues an experimental study was conducted of the gas-solid dual-phase flow characteristics of the Tangential firing system (CFS-I) and the reverse tangential firing system (CFS-II) with the help of PDA (particle dynamic analyzer) system. The study results show that as compared to the CFS-I system the CFS-II system enjoys a better performance as regards the flame stabilization, low NO<sub>x</sub> emissions, heating-surface slagging and high-temperature corrosion. **Key words:** tangential firing system, reverse tangential firing system, gas-solid flow characteristics, particle dynamic analyzer

切圆燃烧流场中不同高宽比矩形喷嘴射流特性的试验研究= **Experimental Study of Jet Characteristics of a Rectangular Nozzle with Different Height-to-width Ratios in a Tangentially-fired Combustion Flow Field** [刊, 汉] / Zhang Ze, Wu Shaohua, Yao Zheng, et al (Harbin Institute of Technology), Li Min (Harbin Power Plant Equipment Group Corp.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(2). — 125 ~ 127

With the help of a hot wire anemometer a detailed experimental study was performed of the rigidity and turbulence characteristics of the jet flow of a primary-air rectangular nozzle with different height-to-width ratios in a tangentially-fired combustion flow field. Furthermore, the deflection and stable combustion mechanism of the rectangular nozzle jet flow under different height-to-width ratios is also analyzed. As a result, obtained was the optimum height-to-width ratio of the rectangular nozzle in the tangentially-fired combustion flow field. The study results may serve as helpful reference data for engineering design and general applications. **Key words:** tangentially-fired furnace, jet characteristics, height-to-width ratio, experimental study, hot wire anemometer