

大型锅炉炉膛内的空气动力工况

郭宏生 徐通模 惠世恩 车得福 陈 铁

(西安交通大学)

〔摘要〕文中给出了对WG300 MW 机组锅炉炉膛进行冷态空气动力场模化试验的结果。试验结果表明,不同的二次风与一次风动压比、一次风的投运方式、燃烧器的布置方式等都会影响到炉内的空气动力场。这些结果对我国300 MW 机组锅炉及其它切向燃烧锅炉炉膛的设计和运行均有重要的指导意义。

关键词 锅炉 模型 空气动力试验

分类号 TK212.3

1 前 言

武汉锅炉厂首台300 MW 机组锅炉(额定蒸发量908 t/h,最大连续蒸发量1025 t/h)是为甘肃省靖远电厂二期工程设计的。靖远电厂所用燃料为国内几种典型的强结焦煤之一,因此在锅炉总体设计上应特别注意如何防止炉膛及炉膛出口处的结渣问题,以提高机组运行的安全性。

针对燃料的特征,在锅炉总体设计中采取了如下措施:(1)选用较小的炉膛断面热负荷及容积热负荷。炉膛为正方形布置,断面尺寸为 $14\ 212 \times 14\ 212\ \text{mm}^2$,大于常规烟煤形炉膛断面尺寸;(2)采用切向燃烧直流式燃烧器。燃烧器分为两组布置,一次风为周界风式,防止一次风煤粉气流刷墙结渣;(3)炉内采用直径较小的大小切圆,小切圆直径 $\varnothing_1 = 715\ \text{mm}$,大切圆直径 $\varnothing_2 = 928\ \text{mm}$,力图使高温火焰相对靠近炉膛中心,降低炉壁区域的温度水平。

为了更好地组织炉内燃烧空气动力工况,使该炉投运后能较好地防止燃用低灰熔

点煤时在炉内结渣。受武汉锅炉厂的委托,西安交通大学对该炉进行了炉膛冷态模化试验。模化研究内容有:(1)研究在设计参数下超负荷、100% 负荷和75% 负荷时的炉内空气动力工况;(2)确定在不同的一次风组合方式下炉内空气动力工况的差异;(3)改变燃烧器布置方式时炉内空气动力工况的变化。

2 试验系统及方法

为了更完善地探讨燃烧器区域的空气动力工况,试验过程中采用了纯几何相似模拟方法,以保证燃烧器出口的边界条件相似,使燃烧器区域的气流分布更接近实际。

炉膛及燃烧器模型与原型的比例为1:20。图1给出了试验模型及测点布置示意图。图2是燃烧器喷口及布置方式示意图。

从高压风机来的空气通过输送管道进入稳压风箱,然后分别分配到四角燃烧器各喷口。每个喷口的引入管内均装有控制阀门和测速管,以测定和调节各个喷口的风速。

① 收稿日期 1993-06-07 修改定稿 1993-07-30

② 本文联系人 郭宏生 男 32 讲师 710049 西安市 咸宁西路28号

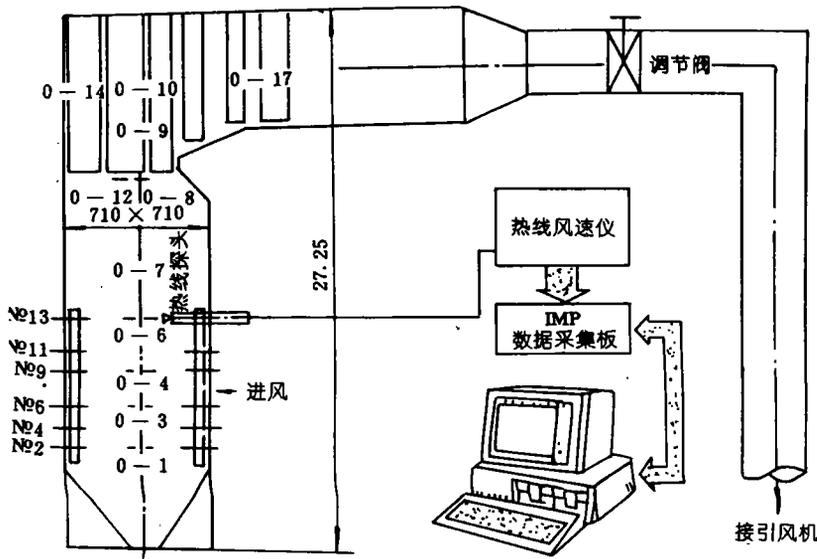


图 1 试验模型及测点布置示意图

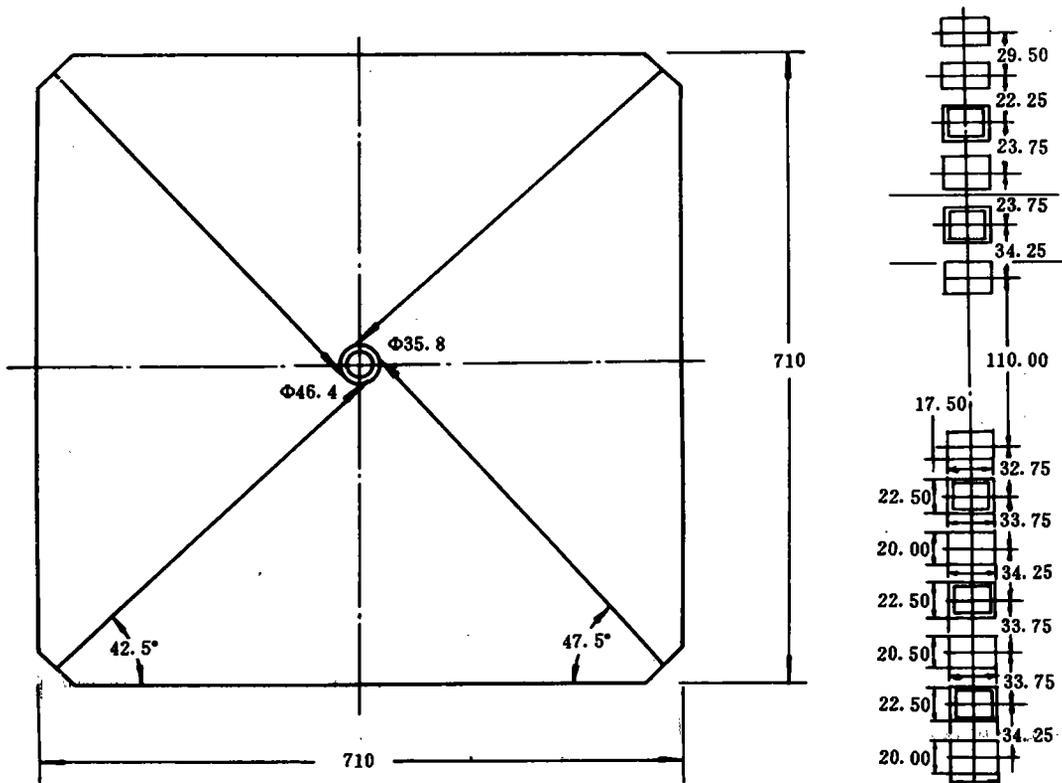


图 2 燃烧器喷嘴及其布置

在燃烧器区域,沿炉膛高度方向进行了四个截面空气动力工况的测定(0-1,0-3,0-4,0-6截面)。在燃烧器上部及屏式受热面的下部区域的0-7截面、0-8截面也布置有测孔,以测量燃烧器上部和折焰角处炉膛横断面上的速度分布。0-1、0-3、0-4、0-6及0-7截面上的测孔开在前墙和左墙的中心线上,测量时沿炉深和炉宽均匀测量 17 个点。其余截面仅在左墙上开测孔,沿炉宽测量 17 个点。

炉膛出口保持 200 ~ 300 Pa 的负压。

炉内气流速度用由美国 TSI 公司进口的 1050A 恒温热线风速仪进行测量。所测信号经 IMP 数据采集板直接送入计算机进行全部测量的存储、处理和打印,最后直接得到炉内速度分布规律及图形。试验中采用一维热线探头旋转 90° 分别测量炉膛横断面水平方向的速度和垂直方向的速度。

炉膛内实际切圆的大小根据切向速度最大值的连线而得。根据实际切圆的大小及炉膛断面当量直径即得相对切圆直径的大小:
 $D_{xd} = d/D, d$ 为实际切圆直径, $D = \frac{2ab}{a+b}$ 是炉膛断面当量直径(对该试验炉膛 $a = b$)。

3 试验结果

试验结果表明,二次风与一次风的动压比、一次风的运行组合方式、燃烧器的布置方式等均会影响到炉内的空气动力工况。

3.1 不同的二次风与一次风动压比时,炉内空气动力场的变化

在确定的一次风速下,保持周界风与一次风的动压比不变(1.034),研究了二次风与一次风动压比分别是 0.6、1.034、1.234 和 1.534 时炉内空气动力场的变化。

图 3 是在二次风与一次风动压比为 1.034 时,炉内 0-4 截面切向速度分布。图 4 是该工况下炉膛内 0-1、0-4、0-6、0-7 及 0-8 截面垂直方向速度分布。可以看

出,气流从燃烧器喷出之后,由于其几何轴线切于炉膛中心的假想切圆,因此在炉膛内四周形成了一个强烈旋转的上升气流,实际切圆直径较假想切圆直径要大。在炉膛中心处,是垂直方向速度很低的微风区,甚至有一定程度的向下回流。这些正是切向燃烧锅炉炉膛内空气动力场的一个特点。其它工况时炉内速度分布在定性上均类似于图 3、4。

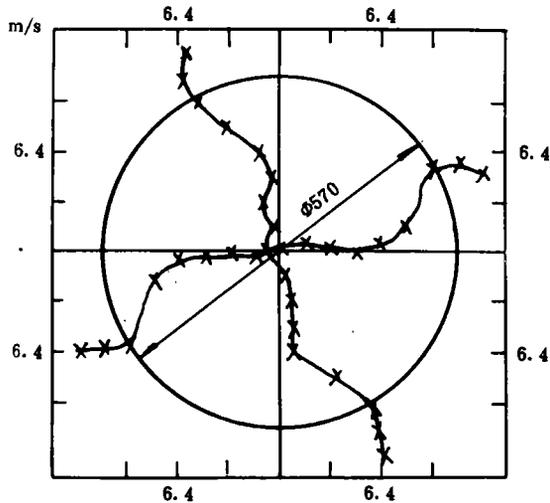


图 3 0-4 截面切向速度分布

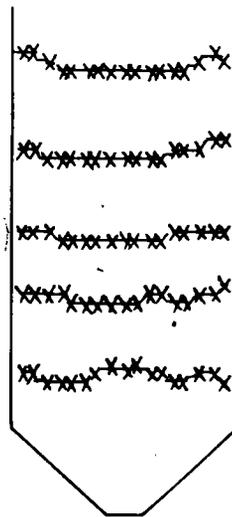


图 4 垂直速度分布

炉膛内实际切圆直径的大小是切向燃烧锅炉炉膛内的一个重要参数,它影响到炉内

的着火、燃烧、结渣等。

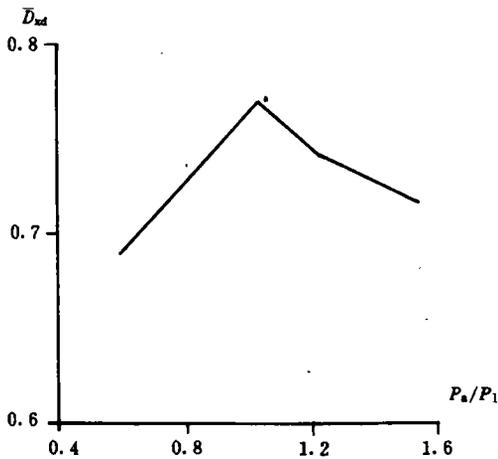


图5 二次风动压对相对切圆直径大小的影响

试验结果表明,随着二次风与一次风动压比的变化,炉内燃烧器区域平均相对切圆直径有所不同。图5是在其它参数相同时,燃烧器区域平均相对切圆直径随着二次风与一次风动压比而变化的情况。可以发现,随着二次风与一次风动压比的变化,相对切圆直径先增加,后减小。当二次风与一次风动压比为1.034时,相对切圆直径具有最大值。

炉内相对切圆直径的大小主要受两方面因素的影响:(1)旋转气流对射流的横向撞击,主要与旋转气流的旋转动量有关;(2)射流两侧补气条件不同形成的压力差。

当二次风与一次风的动压比小于1.0时(0.6),炉内气流旋转动量相对较弱,因而实际切圆直径比较小。

在二次风与一次风的动压比较高(1.534)时,炉内气流旋转动量相对变强,但因为二次风动量较一次风动量高,二次风与一次风射流之间的动量交换加强,从而也提高了一次风射流的刚度。所以,这时炉内实际切圆直径也不大。

当二次风与一次风动压比接近于1时(1.034),炉内气流旋转强度比 $P_2/P_1 = 0.6$

时强,但相对来讲一次风射流的动量值却无变化,因此炉内实际切圆直径比 $P_2/P_1 = 0.6$ 及 $P_2/P_1 = 1.534$ 时均大。

这一试验结果表明,当二次风与一次风动压比为1.0时,炉内实际切圆直径具有最大值。当 $P_2/P_1 < 1.0$ 时,炉内实际切圆直径随着 P_2/P_1 的增加而变大;当 $P_2/P_1 > 1.0$ 时,炉内实际切圆直径随着 P_2/P_1 的增加而变小。

WG300 MW 机组锅炉燃烧器设计中二次风与一次风动压比设计值为1.034,在该设计参数下炉内实际切圆直径具有最大值($\bar{D}_{xd} = 0.77$),烟火示踪也发现此时炉内燃烧器区域有轻微气流刷壁现象。因此,建议改变燃烧器设计参数(使 P_2/P_1 偏离1.0),缩小假想切圆直径或改变燃烧器布置方式。

图6是设计工况下(二次风与一次风动压比及周界风与一次风动压比均为1.034)燃烧器上部区域的0-7截面的切向速度分布。可见该截面气流旋转变弱,最大切向速度位置逐渐靠近炉壁。

设计工况下0-1、0-3、0-4、0-7截面的相对切圆直径 D_{xd} 分别为0.718、0.755、0.803和0.890,即随着离最下层燃烧器喷口距离的增加,相对切圆直径逐渐变大,炉内整

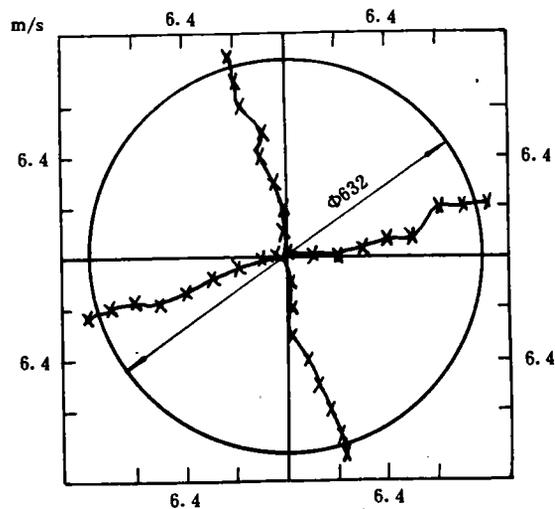


图6 0-7截面切向速度分布
体旋转气流尤如酒杯形状,上大下小。

其它试验工况下,炉内各区域的速度分布及气流结构在定性上类似于设计工况。主

要是炉内气流的旋转强度和实际的切圆直径不同。

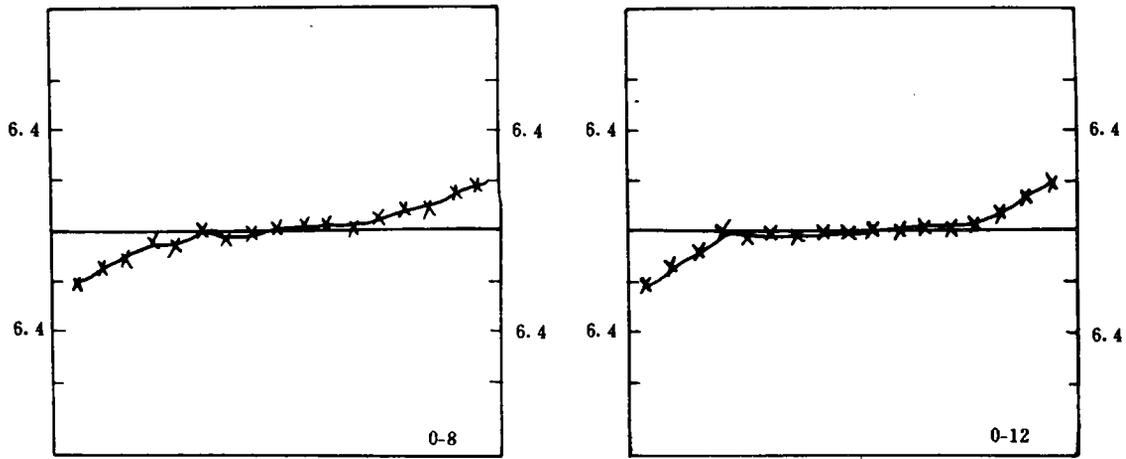


图 7 折焰角处切向速度分布

图 7 是设计工况下 0-8 和 0-12 截面的切向速度分布图。可以发现,此处仍有气流的残余旋转,且最大切向速度位置靠近炉壁。其余工况下该区域气流速度分布也均如此。该区域气流的残余旋转将引起屏区气流速度沿炉膛宽度方向的不均匀,左右两侧产生速度偏差。

锅炉容量及参数的不断发展,有必要对炉膛下部气流的残余旋转对屏区气流速度分布的影响进行深入系统的研究。

3.2 屏区气流速度分布

图 8 是设计工况下 ($P_2/P_1 = 1.034$) 屏区 0-9、0-10、0-14 及水平烟道 0-17 截面沿炉宽方向水平速度分布图。可以看出,由于炉膛下部气流残余旋转的影响,屏区各截面气流速度左右分布出现偏差,右侧近壁区明显偏高(炉内气流逆时针方向旋转)。同时,由于屏的分隔整流作用,0-17 截面左右两侧速度分布明显较其余三个截面处均匀。

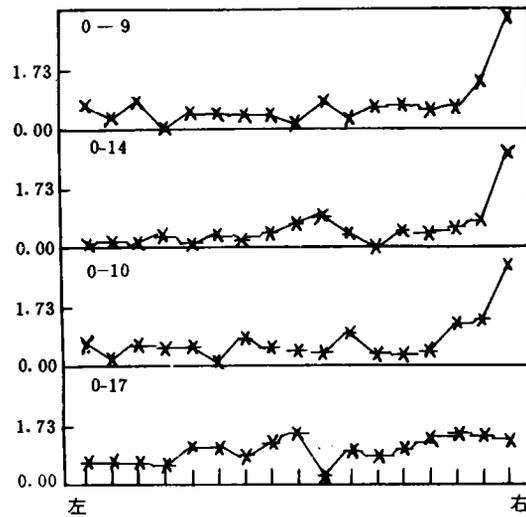


图 8 屏区水平气流速度分布

屏区及水平烟道沿炉膛宽度方向左右两侧烟速大小的不同会引起烟气对屏式受热面及对流受热面沿炉膛宽度方向对流传热系数的不同,导致受热面左右各管对流吸热量的不同,造成热偏差,严重时甚至会引起爆管。安徽平圩电厂 600 MW 机组锅炉屏区再热器多次发生爆管,其位置均在右侧近壁区域,左右烟速的偏差可能就是原因之一。因此,随着

3.3 不同一次风投运方式对炉内空气动力场的影响

在确定的一次风速下,保持相同的二次风与一次风动压比及周界风与一次风动压比,观察了改变一次风投运方式时炉内空气动力场的变化。

试验结果表明,在关掉中间一层一次风

喷嘴时,炉内旋转气流切圆直径相对小些($\bar{D}_{rd} = 0.731$);而当关掉下排一次风或上排一次风时,炉内旋转气流切圆直径相对较大(两种情况下均为 $\bar{D}_{rd} = 0.77$)。

这是由于当关掉中间一层一次风喷嘴及相邻的二次风喷嘴时,整组燃烧器相当于被分成了上下两组,喷口之间距离拉大,改善了燃烧器射流两侧的补气条件,使得射流两侧压差减小,因而切圆直径相对较小。而在关掉上排或下排一次风时,喷口之间距离较小,射流两侧压差相对较高,因而实际切圆直径相对较大。

3.4 周界风对炉内空气动力场的影响

在直流式煤粉燃烧器的四周包有一层速度较高的二次风,称为周界风。周界风可防止煤粉从一次风气流中分离出来及冷却一次风喷口,对防止结焦和高温腐蚀亦有一定的作用。

试验中,在保持二次风与一次风动压比不变的前提下,通过改变周界风与一次风的动压比,考察了炉内空气动力工况的变化。

共进行了两个工况的比较,周界风与一次风的动压比其一为1.034,其二为1.50。结果表明,两个工况下炉内燃烧器区域平均相对切圆直径 \bar{D}_{rd} 分别为0.77和0.76,第二个工况(动压比为1.50)相对切圆直径略偏小,但减小的量非常微弱。这说明周界风动压的变化对炉内气流旋转相对切圆直径的大小无明显影响。

不过,在实际运行过程中周界风的动压不能太高,否则会导致周界风与一次风过早地混合,从而影响煤粉气流的着火。

3.5 MCR 工况下的炉内空气动力场

MCR 工况是设计的锅炉最大连续出力工况,是在投运四层一次风的情况下提高二次风量来实现的(二次风与一次风动压比为1.24)。

试验表明,该工况下炉内燃烧器区域平均相对切圆直径为0.741,介于 $P_2/P_1 = 1.034$ 和 $P_2/P_1 = 1.534$ 两者之间(见图5)。这

也说明,在二次风与一次风动压比大于1的前提下,随着二次风与一次风动压比的增加,炉膛内气流旋转切圆直径逐渐减小。

3.6 低负荷工况下的炉内空气动力场

锅炉在低负荷运行时燃料需求量减少,往往要关掉部分一次风及相邻的二次风喷口。试验中,根据75%机组负荷时锅炉的设计参数组织了两个试验工况进行比较:一个是关掉下面两层一次风喷口及其相邻的二次风;另一个是关掉中间的某两层一次风喷口及其相邻的二次风,使其余一次风喷口间隔开启。 P_2/P_1 保持为1.034。

结果表明,两个低负荷工况下炉内实际切圆直径均比满负荷时小,燃烧器区域平均相对切圆直径 \bar{D}_{rd} 分别为0.58和0.68,而满负荷时燃烧器区域平均相对切圆直径 \bar{D}_{rd} 为0.77。当开启相对集中的上面三层一次风时,炉内实际切圆直径更小($\bar{D}_{rd} = 0.58$)。这是由于在两种工况下炉内气流旋转动量差别不大(因为风量、喷口风速及假想切圆直径完全一样),一次风间隔开启时,各层喷口射流之间相互作用减弱,整组燃烧器射流抗偏转能力降低之故。

在锅炉实际运行时,开启集中的上面三层一次风,火焰相对集中于炉膛中心,提高了炉内局部区域热负荷,这对低负荷时的稳定燃烧和保证汽温、汽压均有益处。而间隔开启一次风使炉膛断面热负荷分布比较分散,燃烧器区域温度水平降低,不利于低负荷的稳定。

因而,笔者认为锅炉在低负荷运行时,最好是开启相对集中的几层一次风喷口为宜。

3.7 改变燃烧器布置方式时炉内空气动力场的变化

试验中,保持燃烧器的投运方式及运行参数均在设计工况下,通过改变燃烧器的布置方式观察了炉内空气动力工况的变化。共进行了三种不同燃烧器布置方式的试验:(1)最上层二次风反切 10° ,其它条件不变;(2)最上层二次风反切 10° ,保持小切圆不变,原

为大切圆的两角整组对冲;(3)整组燃烧器上翘 20° ,仍采用大小不等切圆。所有三个工况中,二次风与一次风动压比为1.034,周界风与一次风动压比亦为1.034。

结果表明,仅采用上层二次风反切 10° 的燃烧器布置方式,燃烧器区域气流工况变化不大,平均相对切圆直径 \bar{D}_{xd} 为0.79,甚至比原布置方式时燃烧器区域平均相对切圆直径($\bar{D}_{xd} = 0.77$)略有增加。这是由于炉内气流整体的流动趋势为向上流动,处于整组燃烧器最上层的二次风反切对其下部的燃烧器区域的流场无明显影响。反切角度过小,加之未反切时实际切圆直径偏大,使得这时在最上层喷口处实际切圆直径更大(未反切与反切后0—6截面相对切圆直径分别为0.803和0.86)。

采用最上层二次风反切 10° ,保持原设计小切圆直径不变,另两角燃烧器整组对冲后,在炉膛内可形成与小的假想切圆旋转方向相同的旋转气流,并且其切圆直径($\bar{D}_{xd} = 0.718$)较原设计工况下($\bar{D}_{xd} = 0.77$)有所减小。这是由于炉内气流旋转动量减小,对射流的横向撞击减弱的缘故。因此,我们认为从改善炉内空气动力工况出发,在原设计运行参数下,采用两角对冲,另两角保持假想切圆直径 $\varnothing 715$ mm,上二次风反切 10° 的布置较为合理。

当仍采用大小不等切圆,而整组燃烧器上翘 20° 时,炉内燃烧器区域平均切圆直径明显变小,相对切圆直径仅为 $\bar{D}_{xd} = 0.521$,小于所有试验工况下的炉内切圆直径。燃烧器上翘 20° 之后,从喷口喷出的射流速度分解成了水平和垂直两个分量,只有水平动量分量才引起炉内气流的旋转,因而炉内气流的旋转动量减弱,使得切圆直径变小。此外,

燃烧器上翘之后,射流的尾部和根部不在同一水平轴线上,发生轴线错动,从而对下邻角射流的作用减弱,使切圆直径变小。所以,整组燃烧器上翘之后,可使炉内燃烧器区域的切圆直径明显变小。

4 结 论

(1)在其它条件不变时,二次风动量值的变化会引起炉内空气动力场的变化。当 $P_2/P_1 > 1$ 时,随着二次风与一次风动压比的增加,燃烧器区域的平均切圆直径逐渐变小;当 $P_2/P_1 < 1$ 时,随着 P_2/P_1 的增加,燃烧器区域的平均切圆直径亦增大;当 $P_2/P_1 = 1$ 时,炉内燃烧器区域具有最大的切圆直径。

(2)一次风投运方式的不同亦会引起炉内空气动力工况的变化。当关掉中间一层一次风时,炉内切圆直径较小;而当关闭上层或下层一次风时,炉内实际切圆直径相对较大。

(3)周界风与一次风的动压比增加时,切圆直径略有减小。

(4)在锅炉低负荷运行时,最好是开启几层相对集中的一次风喷口。

(5)两角燃烧器整组对冲,另两角切于炉内某一切圆时,炉内实际切圆直径较之四角均相切时的实际切圆直径为小。

(6)整组燃烧器上翘时,炉内实际切圆直径明显变小。

参 考 文 献

- 1 岑可法. 锅炉燃烧试验研究方法及测量技术. 水利电力出版社, 1987
- 2 何佩敦等. 煤粉燃烧器设计及运行. 机械工业出版社, 1987

JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

1994 Vol. 9 No. 6

CONTENTS

- (313) **The Numerical Simulation of Two Planar-Intersecting Jets in a Finite Space**.....Zhang Xuan, Xu Tongmu, Guo Hongsheng, Hui Shi'en (*Xi'an Jiaotong University*)

Through the use of a SIMPLE algorithm a numerical simulation has been conducted of the isothermal flow field of two planar-intersecting jets in a finite space. The difference scheme is of an involution one. The authors have calculated and analysed the included angle, the spacing between the two jets and the influence of a section sudden expansion ratio on the flow field and the convergence of the jets. The calculation results have been found to be qualitatively rational.

Key words: *planar-intersecting jets, isothermal flow, flow field simulation, mathematical model*

- (317) **An Experimental Investigation of the Flow Field in a Large-sized Boiler Furnace**.....Guo Hongsheng, Xu Tongmu, Hui Shi'en, Che Defu, Chen Tie (*Xi'an Jiaotong University*)

This paper presents the cold-state aerodynamic field simulation test results for a WG 300 MW boiler furnace. The test results have shown that the different dynamic pressure ratio of the primary air and secondary air, the feeding mode of the primary air and the layout format of the burners will all exercise a certain influence on the in-furnace aerodynamic field. The said results can be employed to guide the furnace design and operation of the home-made 300 MW boiler units and other tangentially fired boilers. **Key words:** *boiler, model, aerodynamic test*

- (324) **The Fatigue Life Analysis of the Drums of Three 65 t/h Boilers Installed in a Factory**.....Jiang Jialing, Lin Xinghua, et al. (*Zhejiang University*)

This paper deals with the low-cycle fatigue life analysis of the drums of three medium-pressure 65t/h boilers. **Key words:** *boiler drum, low-cycle fatigue, service life*

- (329) **A Fuzzy Pore Model for Pulverized Coal Particle Combustion**.....chen Hong, Sun Xuexin, et al. (*National Key Laboratory for Coal Combustion under the Central China Polytechnical University*)

I. W. Smith (*CSIRO Division of coal and Energy Technology, Australia*)

With the help of a mercury injection device the authors have studied the pore structure of 8 types of raw coals and their coking samples with different burn-out rates. It has been found that the pore volume of large holes constitutes the absolute majority of the coal pore volume while the pore area of small holes the absolute majority of coal pore area. Based on the test results and theoretical deduction the authors have come up with a new type of pore structure model, the so-called fuzzy pore model. The fuzzy large pores and fuzzy small pores control respectively the mass transfer and chemical combustion process in the pores. In this paper is given the control equation of coal particle combustion process and a numerical solution of the coal single particle internal combustion process. Also studied is the effect on coal coking reactivity of such