

# 循环流化床锅炉燃烧室边界层的实验研究

吕俊复, 刘青, 张建胜, 岳光溪

(清华大学热能工程系, 北京 100084)

**摘要:** 循环流化床锅炉燃烧室的物料浓度影响传热和燃烧。在75 t/h循环流化床锅炉上对燃烧室物料浓度分布的测量结果发现, 循环流化床锅炉燃烧室的下降流边界层中在接近壁面处存在气体边界层, 气体边界层的厚度与距离布风板高度有关, 据此给出了下降流边界层厚度和气体边界层厚度的计算公式, 并提出了循环流化床燃烧室双环模型。

**关键词:** 循环流化床锅炉; 燃烧室; 边界层; 双环模型

中图分类号: TK223.3 文献标识码: A

## 1 引言

循环流化床锅炉与其它类型的锅炉的根本区别在于其炉内有大量的固体物料在循环。循环物料无论对床内的燃烧还是传热都有极大影响<sup>[1]</sup>。人们发现燃烧室的换热系数是物料浓度的若干次幂成正比<sup>[2]</sup>。

研究表明, 物料对传热的影响主要是近壁区<sup>[3]</sup>, 而近壁区物料浓度是贴壁下降流的表现, 其大小反映了内循环量。因此了解近壁区的物料浓度具有重要的意义。

近壁区浓度很高的物料发生随机的团聚现象, 很难比较合理地进行数学描述, 而通常采用环核模型: 假设中间是上升流, 固体物料浓度较低; 边界的浓度较高, 是下降流<sup>[4]</sup>。下降流形成固体边界层。人们发现物料边界层距离壁面有一层气体边界层, 但气体边界层的厚度较小<sup>[5]</sup>。

李静海等在截面尺寸为100 mm×15 mm的二维循环流化床实验装置上, 利用激光相位多普勒粒子分析仪, 测量比较了平均粒径基本相同的3种(B、W、N)不同粒径分布的玻璃珠颗粒在相同风速下的数量密度的截面分布特性, 发现了最高浓度点距离壁面在5 mm左右<sup>[6]</sup>。Werther先后在床径为50~400 mm之间的冷态实验台上和容量在12~125 MW热态循环流化床锅炉上进行了实验研究并得到一些有益的结论<sup>[4]</sup>, 发现下降流边界层和固体边界层厚度 $s_t$ 与床体当量直径 $D_t$ 、床体为雷诺数 $Re$ 、床高 $H$ 及所在的距离布风板高度 $h$ 有关:

$$\frac{s_t}{D_t} = 0.55Re^{-0.22} \left[ \frac{H}{D_t} \right]^{0.21} \left[ \frac{H-h}{H} \right]^{0.73} \quad (1)$$

本文根据在75 t/h循环流化床锅炉上的物料浓度的测量结果<sup>[7-8]</sup>, 分析气体边界层和固体边界层的厚度的变化规律。

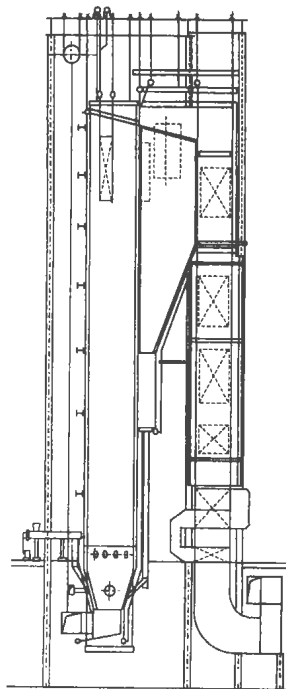


图1 75 t/h循环流化床锅炉简图

## 2 试验方法

### 2.1 锅炉简介

在由四川锅炉厂制造的75 t/h紧凑型循环流化床锅炉上进行测试。锅炉简图见图1。分离器、燃烧室水冷壁、尾部竖井包墙均采用膜式壁, 单汽包自然循环, 前吊后支。炉膛截面为6 m×3 m, 底部渐缩, 水冷风箱布风板, 床下点火, 炉膛上部布置有高温过热器受热面, 二次风置于布风板以上3 m处, 自两侧墙送入炉膛。

75 t/h循环流化床锅炉为中压参数。其设计参数、运行参数及煤种见有关文献<sup>[9]</sup>。

### 2.2 固体颗粒浓度的测量

在热态测试中, 对局部固体颗粒浓度进行了测量。采用的仪器是颗粒取样器。颗粒取样器的结构简图见图2。这是一个抽屉式的装置, 其前、后挡板与左右侧挡板焊接成一体, 滑动挡板与上下两片移动挡片焊接成一体, 其上下两片移动挡片在滑动挡板的带动下可以沿滑槽滑动, 从而关闭或开启取样枪。取样枪的手柄有2.5 m长, 上面标有刻度, 表示到取样枪中挡板前沿的距离, 在把手外面还有一个导向锥以便于取

收稿日期: 2000-04-20; 修订日期: 2001-02-19

基金项目: 国家九五重点科技攻关基金资助项目(96A-19-03-04)

作者简介: 吕俊复(1967-)男, 辽宁大连人, 清华大学讲师

样枪进出炉膛, 并在把手上安装定位盘。

使用时, 先把定位盘滑动到把手上某一刻度处用顶丝固定; 然后将取样枪以开启状态从测孔伸入炉膛, 直到定位盘端面顶在测孔外端面, 保持不动, 等流场稳定之后快速推动推柄, 推动滑动挡板带动上下移动挡片关闭取样枪, 就把取样枪枪盒空间内的颗粒留在取样枪内。若  $m$  为取样得到的颗粒质量,  $V$  为取样枪的有效取样容积, 则可以计算出取样枪所在处的

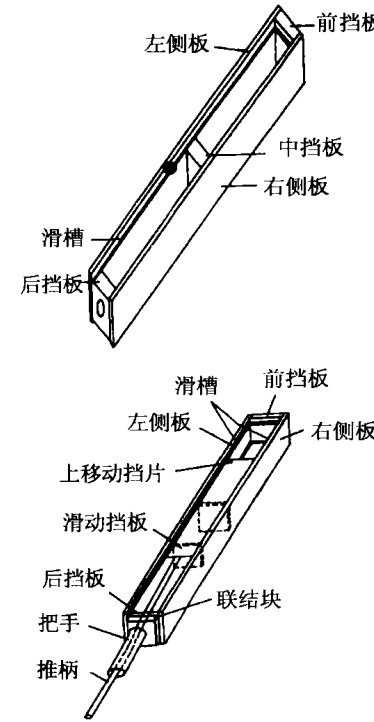


图 2 颗粒取样器示意图

局部颗粒浓度  $\rho_s$ ,  $\rho_s = m/V$ 。继续改变定位盘的位置, 可以测量出测孔处床截面的气固悬浮浓度沿床深度方向上的变化。忽略其中的气体质量, 即可得到此处的沿床截面横向的固体悬浮浓度  $\rho_s$  变化。

### 3 试验结果的分析与讨论

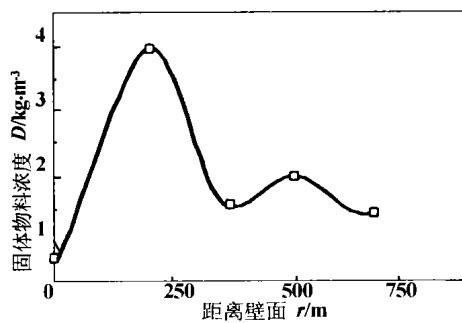


图 3 局部颗粒浓度典型分布

测点位于炉膛左右两侧, 标高为 5.2 m、8.7 m、12.5 m、15.5 m、18.2 m、21.3 m、22.1 m。在 4 个负荷下进行测量。燃烧室不同高度上沿水平方向上的固体物料浓度分布的详细结果见文献 [7 ~ 8], 其中典型的分布见图 3。

由试验结果可以发现, 燃烧室壁面附近区域中的固体悬浮浓度有一个浓度很高的区域。这个浓度很高的区域并不是紧靠壁面, 而是离壁面有一定的距离, 不同高度上最高浓度位置距壁面的距离不同, 在上部约为 0.2 m 左右, 距离布风板的距离越小, 该

距离越小, 当在布风板上 4.5 m 时, 最高浓度点已经达到壁面。

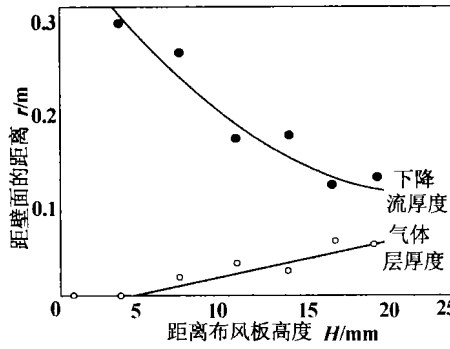


图 4 下降流及气体边界层厚度沿床高变化

定义固体物料浓度高于  $0.5 \text{ kg/m}^3$  的空间位置与壁面之间为下降流边界层, 其距离为边界层, 厚度为  $s_t$ ; 下降流边界层中固体

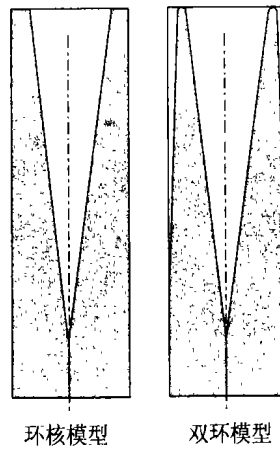


图 5 环核模型及双环模型

物料空间浓度低于  $0.5 \text{ kg/m}^3$  的空间位置与壁面之间为气体边界层, 其距离为气体边界层的厚度  $s_g$ 。则固体物料边界层厚度  $s_t$  为  $s_t - s_g$ 。下降流边界层、气体边界层的测量结果见图 4。则可以发现, 在燃烧室下部, 气体边界层几乎不存在; 随着距离布风板高度的增加, 气体边界层的厚度增加, 气体边界层的厚度远远大于实验室冷态的结果。

根据上述实验结果, 对下降流边界层参照式 (1) 的形式可以拟合成如下形式的经验公式:

$$\frac{s_t}{D_t} = 0.49Re^{-0.23} \left( \frac{H}{D_t} \right)^{0.20} \left( \frac{H-h}{H} \right)^{0.88} \quad (2)$$

$$Re = \frac{U_g D_t}{\nu_g} \quad (3)$$

式中,  $s_t$  为下降流边界层厚度, m;  $D_t$  为床体当量直径, m;  $Re$  为雷诺数;  $U_g$  为空截面气速, m/s;  $\nu_g$  为气体粘度,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $H$  为床高, m;  $h$  为布风板上高度, m。该结果与文献比较接近。而气体边界层的厚度可以写作:

$$s_g = \begin{cases} 0 & h \leq 5 \text{ m} \\ 0.004(h - 5) & h > 5 \text{ m} \end{cases} \quad (4)$$

则目前模型假设中的环核模型可以进一步假定为如图 5 所示的双环模型。

### 4 结论

(1) 循环流化床锅炉燃烧室的下降流边界层中在接近壁面处存在气体边界层, 气体边界层的厚度与距离布风板高度有关。

(2) 根据实验数据给出了下降流边界层厚度和气体边界层厚度的计算公式。

(3) 提出了更接近循环流化床燃烧室物料浓度分布实际情况的双环模型。

参考文献:

[1] 吕俊复, 岳光溪, 刘青, 等. 循环流化床锅炉燃烧室受热面传热系数计算方法[J]. 清华大学学报, 1999, 40(2): 21-24.

[2] WERDERMANN C C, WERTHER J. Heat transfer in large-scale circulating fluidized bed combustors of different sizes[A]. In Avidan A ed. **Circulating Fluidized Bed Technology IV**[C]. New York: AICHE, 1994. 428-435.

[3] ZHONG JINXIAO, LU JUNFU, XING XING, et al. Experimental investigation on heat transfer in industrial-scale circulating fluidized bed boilers[A]. In: Werther J ed. **Proceeding of the sixth international conference of CFB**[C]. Wurzburg: ASME, 1999. 355-360.

[4] HARIGE E U, RENSNER D, WERTHER J. Solid concentration and

velocity patterns in circulating fluidized beds[A]. In Pasu P, Large J F eds. **Circulating Fluidized Bed Technology II**[C]. Pergamon Press: Oxford, 1998. 165-180.

[5] IECKNER B, GOLRIZ M R, ZHANG W, et al. Boundary layer-first measurement in the 12MWth Research Plant and Chalmers University[A]. In E. J. Anthony E J ed. **Proceedings of the 10th International Conference on Fluidized Bed Combustion**[C]. Montreal: ASME, 1991. 771-776.

[6] 李静海, 孙国刚. 粒径分布对循环床内颗粒速度分布的影响[J]. 粉体技术, 1998, 4(1): 1-5.

[7] LU JUNFU, YUE GUANGXI, LIU QING, et al. Solid suspension density distribution in the furnace of 75 t/h circulating fluidized bed boiler with water-cooled square separator[A]. In Chen XueJun, Chen Tingkuan, Lin Zonghu, et al. **Eds. Proceeding of fourth international symposium of multiphase flow and heat transfer**[C]. Xi'an; Xi'an Jiaotong University Press, 1999. 273-279.

[8] 张建胜, 吕俊复, 金晓钟, 等. 75 t/h 水冷异型分离器循环流化床锅炉燃烧室物料浓度分布[J]. 清华大学学报, 1998, 38(5): 11-14.

[9] 吕俊复, 岳光溪, 刘青, 等. 75 t/h 异型水冷分离器循环流化床锅炉的设计运行[J]. 中国电力, 1999, 32(4): 61-64.

(何静芳 编辑)

(上接第 16 页)

表 1 不同流速比下测点处温度波动

	$v_f/v_p$											
	0.01		0.02		0.03		0.04		0.2		0.4	
	$t_f$	$t_w$	$t_f$	$t_w$	$t_f$	$t_w$	$t_f$	$t_w$	$t_f$	$t_w$	$t_f$	$t_w$
D	47.5/44	N	71.4/78	N	66/57	N	89.7/97	N	84.3/95	N	N	N
E	69.2/63	58.6/56	N	N	81.1/88	74.6/77	82.1/91	77.2/81	85.9/93	82.1/85	85.1/93	82.9/85
F	52.6/48	44.8/42	N	N	75.7/69	57.6/55	71.6/78	57.2/61	87.7/96	83.1/87	92.1/95	84.3/86
G	60.8/54	55.6/53	65.8/71	64.8/67	74.8/82	75.4/79	79.3/87	82.2/85	81.1/84	77.9/79	70.1/71	70.1/71
H	75.1/71	67.2/65	79/88	80.8/84	87.9/94	85.4/88	92.7/98	90.8/93	95.4/97	91.2/92	92.8/95	88.7/90
I	66.5/60	N	72.8/78	N	82.5/90	N	89.7/97	N	95.7/97	N	N	N
J	74.8/84	74/77	79.9/92	82.1/87	91.3/95	88.3/91	N	95.2/94	96.8/98	93/94	N	N

N: 无测量数据

4 结论

通过对三通管中存在着横向射流时的流动及传热的研究, 可以得到以下结论:

(1) 射流与主流流速比越大, 射流穿入主流的深度越大。而在流速比很低时, 射流基本上被主流压迫紧贴主管管壁流动。

(2) 流体与壁面间的换热系数在不同区域的规律不同。但是在流速比很低时, 几个区域的换热系数都有一个随流速比增加而降低或者变化缓慢的过程, 沿射流管与主管相交的马鞍形曲线上, 换热系数的变化规律有很大的不同。

(3) 在近壁处, 流体温度是在其平均值上下波动的。波动的幅度在低流速比下比较大, 在射流管与主管相交区的波动幅度最为明显。相应地物体的

壁面温度也会发生波动, 但其幅值已被衰减, 远小于流体温度的波动。

参考文献:

[1] ANDREOPOULOS J. Rodi experimental investigation of jets in cross-flow[J]. **Journal of Fluid Mech.** 1984, 138(1): 93-137.

[2] ANDREOPOULOS J. Heat transfer measurements in a heated jet-pipe flow issuing into a cold cross stream[J]. **Phys Fluids.** 1983 26(11): 3201-3210.

[3] SHERIF S A, PLETCHER R H. Measurements of the thermal characteristics of heated turbulent jets in crossflow [J]. **Journal of Heat Transfer.** 1989, 111(11): 897-903.

[4] WITTING S, SCHERER V. Heat transfer measurements downstream of a two-dimensional jet entering a crossflow[J]. **Journal of Turbomachinery.** ASME, 1987, 109: 572-578.

[5] ECKERT E R. Heat and Mass Transfer[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1959.

[6] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.

(何静芳 编辑)

charged pressure, desulfurization, media

加压导向管喷动流化床气化炉气体扩散规律研究= **A Study of the Gas Diffusion Mechanism in a Spout-fluidized Bed Gasifier with a Pressurized Guide Pipe** [刊, 汉] / XIAO Rui, ZHANG Ming-yao, JIN Bao-sheng, et al (Thermal Energy Engineering Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —27~30

With CO<sub>2</sub> serving as a tracer gas a study was conducted of the gas diffusion characteristics in a full-scale (inner diameter 200 mm, height 5 m) spout-fluidized bed with a pressurized guide pipe. Mainly investigated was the effect of operating parameters (spout gas flow rate, fluidized gas flow rate, operating pressure, particle diameter, physical parameters) on the gas diffusion in the bed. Deduced was an experimental correlation of the variation of spout gas bypass share and fluidized gas bypass share with the change of operating parameters. This can serve as reference data for engineering design calculations and practical operation. **Key words:** spout fluidized bed, guide pipe, pressure, gas diffusion

增压流化床用水煤膏管内流动滑移效应研究= **A Study of In-tube Flow Slip Effect of Coal-water Paste in a Pressurized Fluidized Bed** [刊, 汉] / LU Ping, ZHANG Ming-yao, XU Yue-nian (Education Ministry Key Lab on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —31~33

The rheological behavior of coal-water paste was studied experimentally on a self-made test rig of coal-water paste flow. An analysis was conducted of the effect of wall surface slip phenomenon on the water-paste in-tube flow characteristics. Derived was a true rheological model of water-coal paste after a slip correction. Test results indicate that the water coal paste rheological model conforms to Herschel-Bulkey fluid characteristics. The influence of slip on in-tube flow rate will increase with a decrease in wall-surface shear stress and diminish with an increase in tube diameter. **Key words:** pressurized fluidized bed, water-coal paste, rheological characteristics, wall surface slip

石灰石浆液和石灰浆液三相流态化烟气脱硫比较研究= **Comparative Study of the Three-phase Fluidized Gas Desulfurization by Use of Limestone Slurry and Lime Slurry** [刊, 汉] / ZHONG Zhao-ping, LAN Ji-xiang, JIN Bao-sheng, CHEN Shang-bin (Education Ministry Key Lab on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —34~36

With the help of a hot-state test rig for processing flue gas with a flow rate of 2000 Nm<sup>3</sup>/h a comparative study was performed of fluidized gas desulfurization through numerous tests by using limestone slurry and lime slurry. The results of tests show that in case of the slurry pH value between 5—8, and the insertion depth of a spray tube at 160~200 mm (the corresponding pressure drop of the spray device being 150~190 mm water) the spray speed will be around 10~25 m/s and the circulation rate, 3. With the slurry concentration at below 7% through a stirring and forced oxidation of reaction products a desulfurization efficiency of more than 95% can be attained if lime is used as a desulfurizing agent. With limestone serving as a desulfurizing agent a desulfurization efficiency of in excess of 75% may result, and this efficiency can be increased to above 90% if an additive of organic acid is also utilized in addition to the limestone desulfurizing agent. **Key words:** fluidization, flue gas desulfurization, desulfurization by a wet method, additive

柴—燃联合动力装置中S.S.S.离合器动态特性实验研究= **Experimental Study of the Dynamic Characteristics of a Synchronous-self-shifting (SSS) Clutch for a Combined Diesel or Gas Turbine Power Plant** [刊, 汉] / TIAN