

# 内循环流化床锅炉稀相区中试性实验研究

(哈尔滨工业大学) 王怀彬 全文涛 杜军 董勇  
(哈尔滨锅炉有限责任公司) 李桂萍

**[摘要]** 对一台 1.4 MW 的内循环流化床进行了中试性实验研究,给出了二次风率对颗粒浓度的影响以及传热实验关联式。

**关键词** 流化床 内循环 二次风率 颗粒浓度  
传热系数

**中图分类号** TK229.66

## 1 引言

流化床燃烧技术在节约能源、减少环境污染方面起到了积极作用。内循环流化床燃烧技术是流化床燃烧技术的一种发展和突破<sup>[1~4]</sup>。它集中了鼓泡床和循环床的诸多优点,在设备投资及运行维护方面具有较大优势。作者对一台 1.4 MW 的内循环流化床进行了中试性实验研究,对内循环流化床的工程设计和应用具有理论和实践指导意义。

## 2 实验原理及测试装置

实验锅炉及测试系统如图 1 所示。炉膛上部装有带一定立面角(30°)和切面角(50°)的喷嘴,二次风( $W = 30 \text{ m/s}$ )由此喷射进入炉膛形成强烈的下旋转流场,使物料进行炉内分离循环。由于炉膛为圆形,传热和浓度测试元件中心对称布置,可认为均处

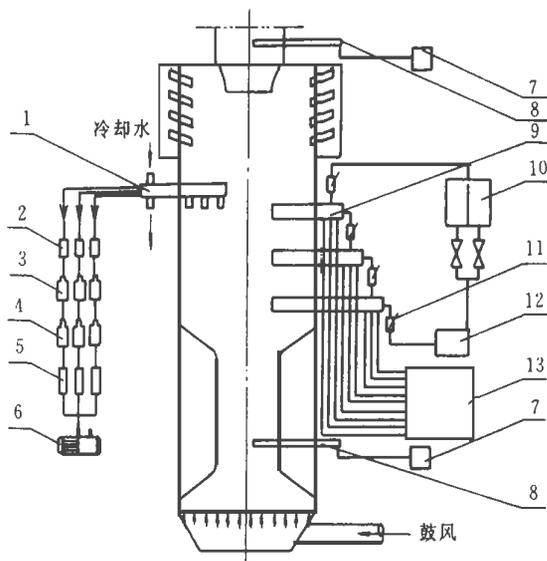


图 1 热态实验台测试系统图

1-浓度测量探头 2-取样器 3-过滤器 4-干燥瓶 5-转子流量计  
6-真空泵 7-电位差计 8-热电偶 9-壁温测量探头  
10-标准水箱 11-玻璃温度计 12-循环水泵 13-巡回检测仪

于相同工况下。

### 2.1 飞灰浓度测试

稀相区飞灰浓度的分布不仅对含尘气流与管束间的换热规律有重要的影响,而且也是衡量内循环流化床粒子分离效率的重要指标。实验中沿炉膛轴

## 脉动

(3) 方形里克燃烧器脉动强度比等长度、相同截面积圆形里克燃烧器的低,表现为排烟量较大。

(4) 方形里克燃烧器的脉动频率略低于等长度圆形里克燃烧器的脉动频率。

## 参考文献

- 1 Chen F L, Shi Z L, Zhong Y J. Rijke-ZT pulse combustion technology for coal. Proceedings of the Int. Conf. on Energy and Enviro., Shang Hai, 1995.
- 2 Shi Z L, Tu J H, Zhong Y J. Investigation of a square Rijke-type pulse combustor for coal. The Third Asian Pacific

Int. Symp. On Comb. and Eng., HongKong, 1996.

- 3 钟英杰. 热声转换和脉动燃烧技术研究现状及其应用. 浙江工业大学学报, 1998, 26(1).
- 4 June R R, Bakre M J. Journal of Heat Transfer., 1963 279.
- 5 Znn B T, Danniell B R, Shani S et al. Investigation of the characteristics of liquid fuel burning, Rijke type, pulse combustors. Final Report for DOE Contract No. DE-AS04-85 A131881(1989).
- 6 Gerald Parkinsin. Pulse combustion sounds off. Chemical Engineering, 1990 28~ 35.
- 7 Keller J O, Hongo I. Pulse combustion the mechanisms of  $\text{NO}_x$  production. Combustion and Flame, 1990, 80 219~ 237.
- 8 杜功焕,朱哲民,龚秀芬. 声学基础. 上海科学技术出版社, (上下册), 1981.

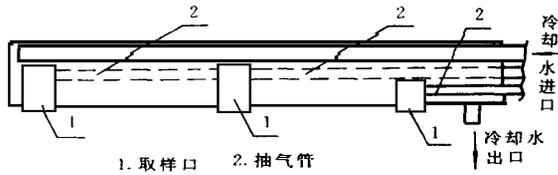


图 2 烟气取样管结构图

向和径向不同位置进行了飞灰浓度分布规律的测试。

浓度测试系统如图 1 左半部所示。两根取样管沿轴向水平布置,间距 700 mm 每根取样管接有一套测量仪器,含灰气流由真空泵从取样口吸入,先通过滤灰器和过滤瓶吸收灰分,剩余气流通过干燥瓶、流量计、真空泵排向大气

取样管为 H5× 3.5 钢管,结构如图 2 所示。按等截面原则设置三个取样口,可同时测得炉膛同一截面径向不同位置的飞灰浓度。取样管内有水冷结构,以避免被高温烟气烧坏,烟气按等速取样原则抽取

### 2.2 气固悬浮物传热测试

传热测试系统如图 1 右半部所示,沿轴向水平布置四根传热元件,间距 700 mm 两个水箱 (580× 710× 1000) 中的水由循环水泵推动依次流过四个传热元件。水吸收炉膛热量,因而温度升高,进出口水温由玻璃温度计测得,前一根元件的出口水温即下一个元件的进口水温。在炉膛出口和密相床层各有一只热电偶测定床料温度。

传热元件为 H51× 3.5 钢管,结构如图 3 所示 每根管有 12 个测点,同浓度探头一样采用等截面原则,在三处布置,每处环向有等距 4 个测点 每个测点处有一只热电偶测定壁温

## 3 实验结果及分析

### 3.1 飞灰浓度实验结果及分析

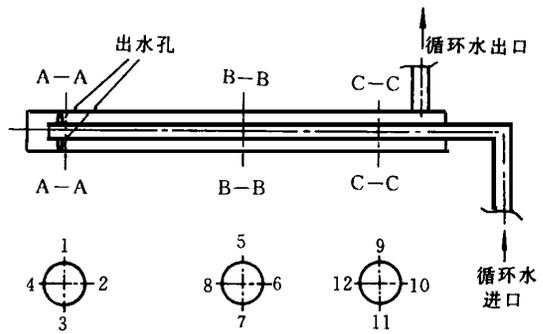


图 3 传热元件结构及壁温测点 布置图

本文采用平均浓度的概念,即假设在相同实验条件下进行多次重复实验所得出的统计平均值

#### 3.1.1 未加二次风的浓度分布

炉膛上部未喷入二次风时,床内情况类似鼓泡床,浓度分布规律如图 4 所示, $Q$  表示总风量 下排

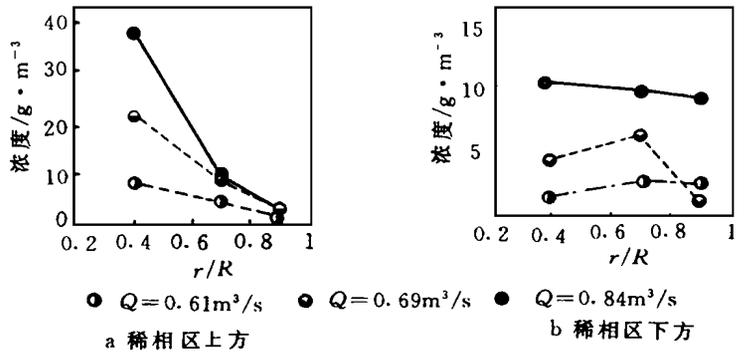


图 4 无二次风时颗粒浓度径向分布图

( $r/R$  距炉膛中心线无量纲距离)

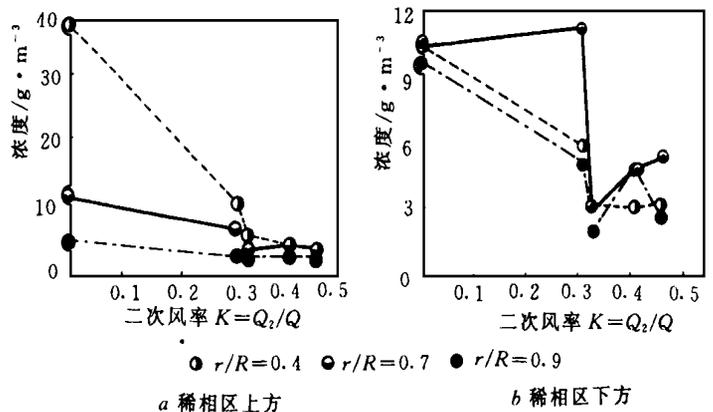


图 5 颗粒浓度随二次风率变化图

测点在同样的一次风量下,截面浓度分布均匀。随着一次风量增大,密相区中更粗的颗粒被上升气流夹带参与物料循环,使浓度增加。在上排测点,由于出口为收缩结构,干扰此处的气固流动,使固体颗粒减速,再加上烟道抽吸作用,则中心浓度值明显偏高。

### 3.1.2 二次风率对浓度分布的影响

由图 5可知,二次风率增大,浓度值呈下降趋势,气固分离效果明显。但二次风率过大时,下方测点浓度值反而有所上升,这是由于过高的二次风波及到密相床层表面,使颗粒返卷所致。

二次风加入后,稀相区上方的浓度峰值由炉膛

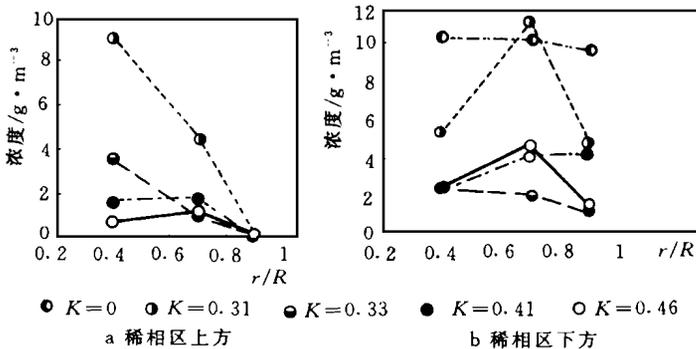


图 6 颗粒浓度峰值径向移动图

中心线附近向壁面移动,在近壁面处形成高浓度颗粒层,结果如图 6(a)可以看出,二次风逐渐加大后曲线趋于平缓,炉膛中心浓度大大降低,浓度分布趋于均匀。由图 6(b)可见,稀相区下方在壁面附近明显地出现了高浓度颗粒层,中心区浓度同样非常低。这充分证明了二次风具有分离作用,使大部分上升的颗粒在炉膛上方被离心分离至壁面,沿壁面滑落至密相床层。

### 3.2 传热实验结果及分析

传热实验主要测量循环水量,传热元件进出口水温、管壁温度、床层温度等。实验在两种工况下,采用不同的流化风速进行。

#### 3.2.1 测量元件管平均传热系数

测量元件在炉膛的传热过程,可认为管内水吸热量与烟气放热量相等,由此可得换热系数:

$$h = \frac{mC_p(t_i - t_o)}{F\Delta T} \quad (1)$$

$h$  - 某个传热元件平均传热系数  $W/(m^2 \cdot K)$

$F$  - 传热元件管壁外表面积,  $m^2$

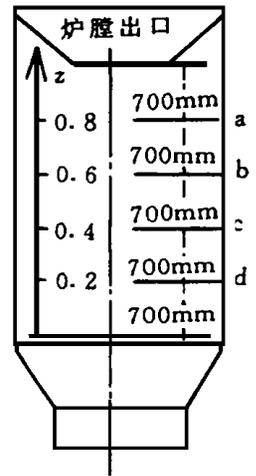
$\Delta T$  - 传热温压,  $K$

$C_p$  - 循环水定压比热,  $J/(kg \cdot K)$

$m$  - 传热元件循环水流量,  $kg/s$

$t_o, t_i$  - 某一元件进、出口循环水温,  $K$

实验中,风速由毕托管测得。流量为测试时间内循环水箱的水流总量的时间平均值。床层温度由热电偶测得,管进出口水温在记录间隔内认为均匀不变,管与烟气的传热温压取对数平均温压。



沿炉膛高度, 图 7 炉膛管束布置

传热元件的布置如图 7所示,传热系数的结果如图 8所示。随着管位置高度上升,传热系数下降。从接近密相区埋管传热系数值降到炉膛出口传热系数数值。

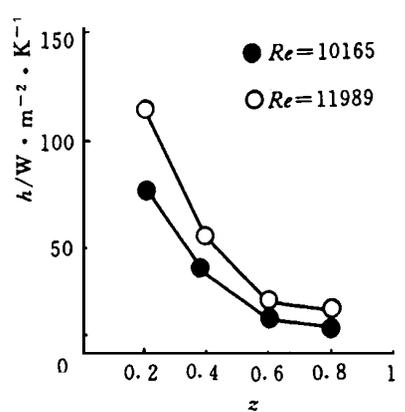


图 8 传热系数随管高度变化

#### 3.2.2 传热实验关联式

传热系数与管高度及流速有关,所以关联式应有如下形式,

$$Nu = a \cdot Re^{n1} \cdot Z^{n2} \quad (2)$$

其中  $Z$  是以稀相区下部某一高度为起始点的无量纲高度。 $Nu$  数和  $Re$  数定义如下:

$$Nu = hd/\lambda \quad (3)$$

$$Re = ud \rho \quad (4)$$

$d$  - 管外径 m  
 $\lambda$  - 烟气导热系数 w/(m·K)  
 $u$  - 悬浮段截面风速 m/s  
 $\nu$  - 烟气运动粘度 m<sup>2</sup>/s

式中烟气导热系数  $\lambda$ , 粘度  $\nu$  均按床温 800℃、压力 0.1 MPa 查得, 定性尺寸取传热元件管外径。

根据实验数据, (列于表 1), 整理回归得关联式如下:

$$Nu = 1.525 \times 10^{-8} Re^{2.156} Z^{-1.2} \quad (5)$$

表 1 实验数据表

Z	0.2	0.4	0.6	0.8	
Re = 11 989	h(W/m <sup>2</sup> ·k)	114.1	54.5	24.9	21.2
	Nu	70.36	33.61	15.35	13.07
Re = 10 165	h(W/(m <sup>2</sup> ·k))	78.0	37.9	16.5	13.2
	Nu	30.40	23.37	10.17	8.14

### 3.2.3 管壁温度分布

壁温的大小反映了传热的强弱程度, 由壁温的分布可大致得出局部传热系数的分布趋势。实验中

颗粒浓度高, 因此管子背风面比迎风面传热强烈, 壁温也较高。另一方面, 颗粒浓度随管子高度增加而降低, 因此对靠近炉膛出口的管子, 其壁温环向最大值发生在管子迎风面。

图 9(b) 表示靠近壁面处温度分布, 与靠近中心处有明显区别。随着管高度增加, 环向各处壁温都减少, 这是由于近壁处为高浓度颗粒下降流, 管子底部气泡不易形成, 环向壁温变化趋势较为一致。

## 4 结论

(1) 内循环流化床从炉膛上部喷入具有某一角度的二次风, 使炉膛中心区浓度降低, 随二次风率增大效果更明显, 且浓度峰值由中心向壁面附近移动。

(2) 内循环流化床的水平插管传热系数随管子在炉膛内位置升高而降低。

(3) 内循环流化床实现了颗粒炉内分离循环, 既具备普通循环床优点, 又省去循环床复杂的炉外分离装置。

### 参考文献

- 1 王怀彬, 董勇. 内循环流化床锅炉技术及其发展前景. 热能动力工程. 1996, 11(2): 95~ 100.
- 2 王怀彬等. 内循环流化床下旋流场中气固多相流动的研究. 哈尔滨工业大学学报, 1996, 28(2): 70~ 74.

- 3 王怀彬等. 内循环流化床下旋流喷嘴角度的优化及其布置方式. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(2): 4~ 7.

- 4 王怀彬等. 内循环流化床中燃料颗粒的燃烧机理. 哈尔滨工业大学学报, 1996, 28(1): 30~ 36. (复编)

收稿日期 1997 - 10 - 28 收修改稿 1998 - 03 - 06

作者简介 王怀彬 男 45岁 副教授 150001 哈尔滨工业大学动力系

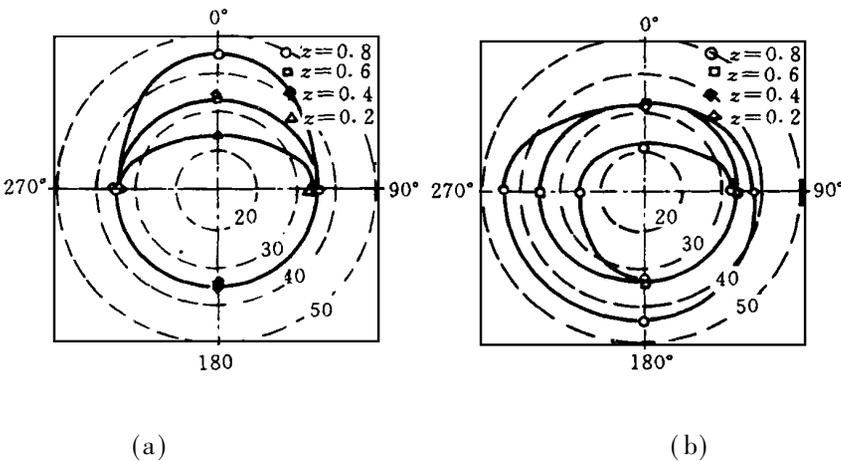


图 9 不同高度管壁温度环向分布图

每个传热元件有 12 个壁温测点, 如图 3 所示。由实验得出不同高度下管壁温度环向分布图 (图 9), 图中 0° 为管子顶部背风面, 180° 为管子底部迎风面。

图 9(a) 表明管壁靠近炉膛中心处, 其壁温在背风面变化显著, 且随管高增加而降低。环向壁温最大值对靠近密相区管子发生在管子背风面, 这是由于管子迎风面被气泡覆盖, 颗粒浓度低, 而管子背风面

circular combustor. A basically same pulsation mechanism is involved in both cases. An acoustic analysis and test has shown that one-dimensional plane waves are propagated. Key words pulsating combustion, square-shaped model Rijke ZT pulsating combustor, square-shaped model Rijke ZT pulsating combustor, test

内循环流化床锅炉稀相区中试性实验研究 = The Pilot-plant Test Study of an Internal Circulation Fluidized Bed Boiler Rarefied-phase Region [刊, 中] /Wang Huaibin, Quan Wentao, Du Jun (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 336~339

A pilot-plant test study is conducted of a 1.4 MW internal circulating fluidized bed. Presented are the effect of a secondary air feeding rate on particle concentration and also a heat transfer experimental correlation. **Key words** fluidized bed, internal circulation, secondary air feeding rate, particle concentration, heat transfer factor

回流区分级着火旋流煤粉燃烧器的试验研究 = An Experimental Study of Recirculation Zone Staged-ignition Swirl-flow Pulverized Coal Burners [刊, 中] /Chen Changdong, Jin Shiping, Ai Yuanfang, et al //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 340~342

A cold-state model experimental study is conducted on the basis of an analysis of the working principle of recirculation zone staged-ignition swirl-flow pulverized coal burners. A modification of swirl-flow pulverized coal burners of No. 5 boiler installed at Huangshi Power Plant was undertaken based on the study results. The operational test results show that these novel burners exhibit relatively good stabilized combustion characteristics when burning low-volatile coals. **Key words** swirl-flow pulverized coal burner, recirculation zone staged-ignition, test, development

下降液膜受热流动与换热的实验研究 = An Experimental Study of Falling Liquid Film Heated Flow and Heat Exchange [刊, 中] /Shi Jinsheng, Shi Mingheng (Southeastern University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 343~344

An experimental study is conducted of flow and heat exchange characteristics of the film of a liquid falling from a vertical wall when the liquid film is being heated. The phenomenon of the film break-up was brought under observation. A fitting correlation for film break-up and heat exchange was obtained from the experimental results. **Key words** falling liquid film, break-up, heat exchange

一种新的热力循环性能的估算方法和 HAT 循环的性能估算方式 = A Method for the Evaluation of a New Thermodynamic Cycle Performance and a Formula for HAT Cycle Performance Evaluation [刊, 中] /Wang Yongqing, Yan Jialu (Harbin Institute of Technology), Wen Xueyou (Harbin No. 703 Research Institute) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 345~347

Based on the fundamental principles of thermodynamics, the authors have come up with a new method for evaluating complicated thermodynamic cycle performance, i. e. a factor correction method. Furthermore, on this basis recommended is a formula for evaluating the performance of a humid air gas turbine cycle. **Key words** thermodynamic cycle, factor correction method, humid air gas turbine, HAT cycle, performance evaluation formula