

内循环流化床分离效率影响因素的试验研究*

王永武 王怀彬 陈崇枢

(哈尔滨工业大学)

[摘要]在冷态试验模型上对内循环流化床分离效率的影响因素进行了试验研究。在分析试验结果的基础上给出了二次风率的最佳范围,并对喷嘴角度及布置方式进行了研究与探讨。

关键词 内循环 流化床锅炉 分离效率 二次风率

分类号 TK 229

1 前言

流化床燃烧技术可以经济地解决能源利用和环境保护问题,受到世界各工业发达国家的普遍重视。但目前常用的鼓泡流化床锅炉(FBC)尚存在飞灰量大、飞灰含碳量高、燃烧和脱硫效率低以及床层负荷调节受到限制等问题。为了解决鼓泡床锅炉的上述问题,多采用循环流化床锅炉(CFBC),它不仅解决了鼓泡床锅炉存在的问题,而且还可适用更为广泛的燃料。通常的循环床锅炉的特点是以高速气流和高的循环倍率使固体粒子作炉外循环。因为受热面的磨损大约与气流速度的三次方成比例,这就使得受热面难于采用埋管形式,而只限于布置在炉膛上部的壁面处;另外,它还需装设复杂的炉外分离、循环系统,如高温旋风分离器、回料阀等,不仅增加了设备造价,还存在有电耗大、运行维护费用高等问题。

基于上述,为避免 FBC、CFBC 锅炉的缺

点,又充分发挥它们的长处,开发研制一种新型的内循环流化床锅炉就具有很大的意义。内循环床锅炉是在鼓泡床锅炉的基础上,在悬浮段部分装设若干具有一定空间角度的二次风喷嘴,使二次风形成强烈的下旋流场,当床内逸出的粒子进入此下旋流场时,细颗粒在悬浮段即可燃尽,大颗粒被迅速甩向壁面,卷入旋涡运动,在重力作用和下旋气流的带动下返回床内^[1,2],实现了粒子的炉内循环燃烧,从而可以简化复杂的炉外循环系统。内循环流化床锅炉既保留了流化床燃烧的特点,还兼有旋风燃烧和悬浮燃烧的优点,在炉内除尘,提高燃烧和脱硫效率方面显示了优越性。

本文是在上述内循环流化床锅炉构思的基础上,建立冷态模拟试验台,并在冷态试验台上对影响内循环流化床分离效率的因素进行了试验研究与分析,得出的结论对内循环流化床锅炉的工程设计具有实际意义。

* 黑龙江省自然科学基金资助项目

收稿日期 1992 11 17 收修改稿 1993 02 05

本文联系人 王怀彬 男 40 副教授 150001 哈尔滨工业大学热能工程教研室

2 试验装置及方法

图 1 为内循环流化床试验台系统。床径 $\phi = 200 \text{ mm}$, 床高 $H = 1250 \text{ mm}$ 。为观察床内气固流动及分离情况, 床身有一 520 mm 高的有机玻璃段, 布风板上方 840 mm 处装有钢制

匀气风箱, 风箱内沿圆周相对 180° 处布置两列空间角度可调的喷嘴, 每列 4 个, 其内径为 12 mm , 长为 40 mm , 纵向节距为 90 mm 。床顶部接有出口短管, 直径 $\phi = 100 \text{ mm}$, 出口短管伸进床内 100 mm 。本文采用优化的空间角度(立面角 30° , 切面角 20°) 整理试验数据。以罗茨风机作风源, 用标准毕托管测量风量。

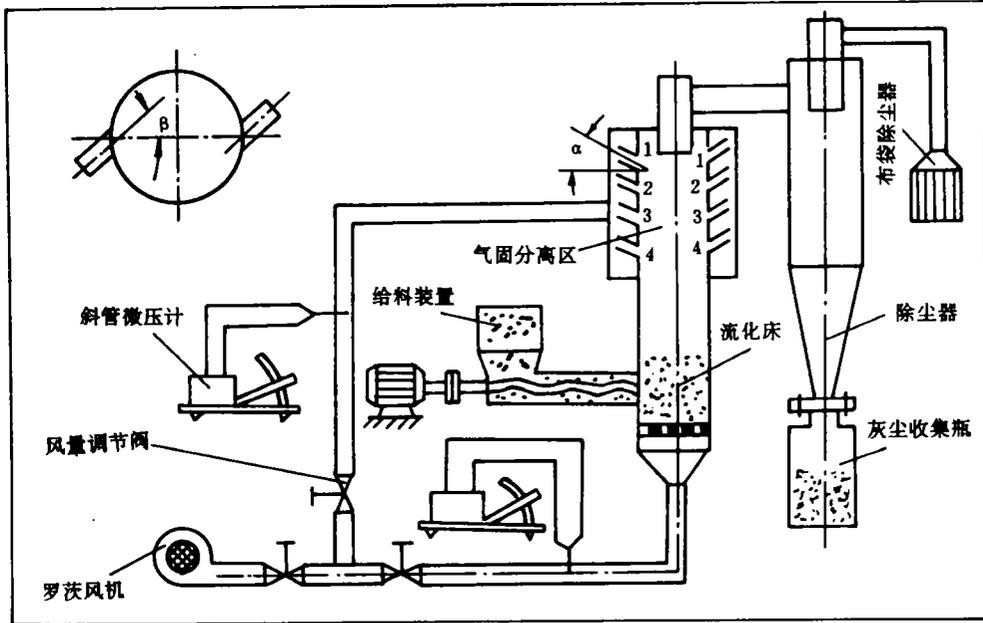


图 1 试验台系统

试验以石英砂作为物料, 其颗粒组成特性, 如图 2 所示。物料由可控硅无级调速电机带动的螺旋给料机连续送入床内, 亦可由固定给料口一次投入床内。分别用装在床出口处的高效旋风除尘器和装在除尘器出口处的布袋除尘器收集床内逸出的粒子。

灰捕集能力的重要指标, 它直接影响内循环流化床的燃烧效率和脱硫率的高低。

3 内循环流化床分离效率的定义

3.1 表观分离效率 η

$$\eta = (1 - G_i/G) \times 100\% \quad (1)$$

式中 G_i ——加二次风时收集粒子的重量, kg;

G ——试验时间内进入床内粒子的总重量, kg。

表观分离效率仅反映颗粒带出率的大小, 不能真实反映出加切向二次风对颗粒的实际分离效果。

内循环流化床分离效率是衡量床内飞

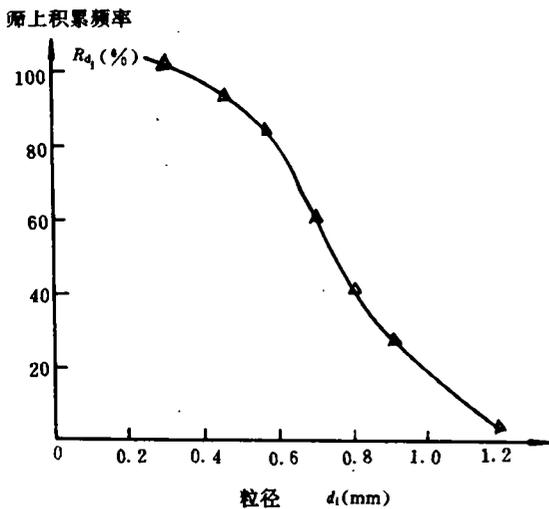


图2 颗粒组成特性

3.2 净分离效率 η'

$$\eta' = \Delta G / G \quad (2)$$

式中 ΔG ——不加二次风与加二次风时收集粒子的重量差, kg。

净分离效率代表切向二次风单独作用对颗粒的分离效果, 是表征内循环流化床对控制颗粒带出有效性的指标。

当然, 在不涉及流量参数的情况下, 表观分离效率和净分离效率可不用区分。

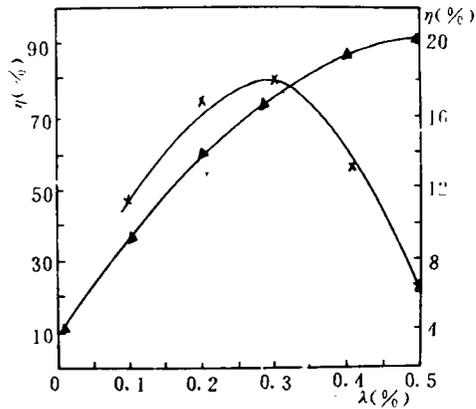
4 试验结果及分析

4.1 二次风率 λ 对分离效率的影响

二次风率 $\lambda = Q_2 / (Q_1 + Q_2)$ 变化时, 对内循环流化床分离效率影响很大, 如图3所示。由图看出, 随着 λ 增加, 表观分离效率值随之增加。当 $\lambda > 0.4$ 时, 表观分离效率近似等于常数, 此时的 η 值很大 ($\eta > 85\%$), 这是强烈的下旋流场所起的作用。但净分离效率 η' 的变化与表观分离效率 η 有所不同, 随 λ 增加 η' 先增后减, 有一最佳 λ 值, 约为 0.3。

λ 对表观分离效率及净分离效率的影响

所以不同, 原因有二: 第一, 因为在总风量不变的情况下随 λ 增加, 一次风量 Q_1 相应减少, 床内颗粒夹带量随之减少; 第二, 由于 λ 增加, 二次风量随之增加 (射流速度升高), 所产生的强烈下旋流场播及床底并将床内粒子返卷带出^[3]。在综合考虑上面两因素后, 推荐最佳二次风率 $\lambda = 0.3 \sim 0.4$ 。

图3 η 、 η' 与 λ 的关系

4.2 分离效率与粒径的关系

典型的试验结果如图4所示。可以看出, 在相同的 λ 值下, 大颗粒的分离效率远远大于小颗粒的分离效率。这是因为大颗粒所受到的离心力和重力均显著大于小颗粒之故。

从图4还可看出, 对细粒 ($d < 0.5$ mm), 其分离效率不高。这是因为在图4的试验条件下, 流化床的操作风速很高, 如 $\lambda = 0.3$ 时, 空床风速 $u = 3.4$ m/s, 远大于临界流比速度 ($u_{mf} = 0.93$ m/s), 在这种情况下应采用文献[1]中的结构形式, 辅以炉外循环系统。而在较低风量和较低操作风速下, 如 $Q_{总} = 385$ m³/h, 空床风速 $u = 2$ m/s, 粒径 $d > 0.37$ mm 颗粒的粒级效率 $\eta_d > 96\%$, 可以省去复杂的炉外循环系统。

4.3 分离效率与床高的关系

对4个不同床高下的分离效率试验表明, 当床高增加时, 其分离效率有所增加, 如

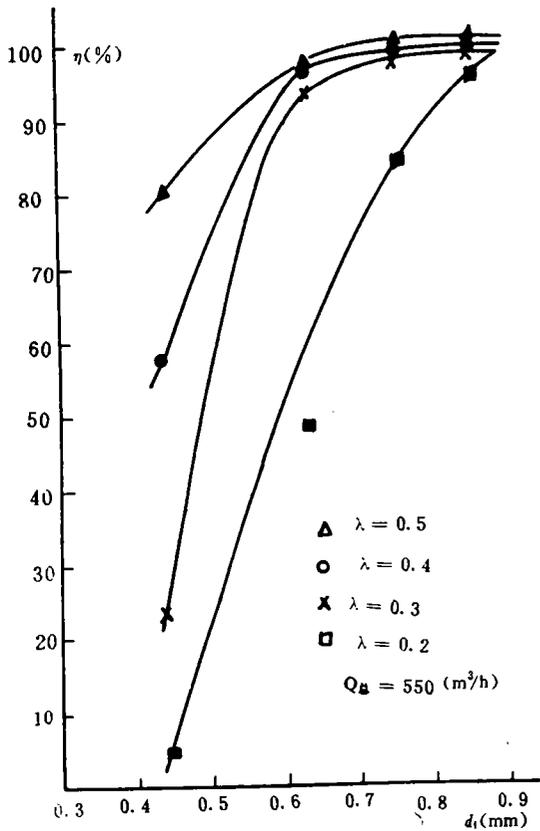


图4 分离效率与粒径的关系

图5所示。因为一方面，床高增加使颗粒分离行程增加，易于分离；另一方面，随床高增加，颗粒上升消耗的动能亦增加，当上升的动能不足以克服重力时，颗粒便会回落。因此，在内循环流化床锅炉设计时，对炉膛高度有一定的要求，炉膛空间的最小高度应能保证分离器无法分离下来的细颗粒在燃烧室内燃尽，同时还应考虑脱硫剂在炉内停留时间等因素。但过高的炉膛亦无必要，因为较高的炉膛意味着比较高的结构成本和较高的风机功率。

4.4 射流速度对分离效率的影响

在一次风量不变的情况下，增加二次风量，考察射流速度 u_2 对分离效率的影响，试

验结果如图6所示。由图看出，随射流速度增加，表观分离效率和净分离效率均增加，但当 u_2 增至约 51 m/s 时净分离效率开始下降，表

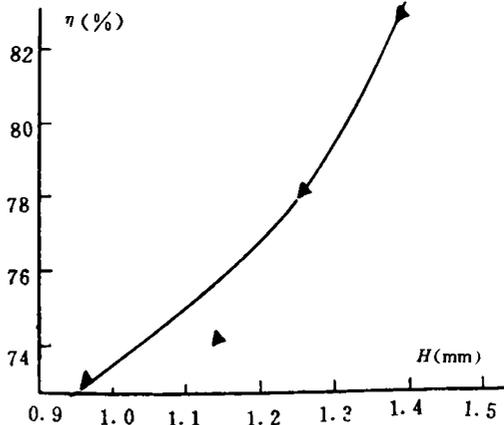


图5 分离效率与床高的关系

观分离效率的增加变得很缓慢。这是由于射流速度过高时，旋转气流的旋流强度过大，使中心回流区和回流区内气流速度均增加。一方面，中心强回流区卷吸了大量颗粒；另一方面，中心回流速度的增加进一步加强了中心向上的轴向速度，从而使净分离效率下降。表

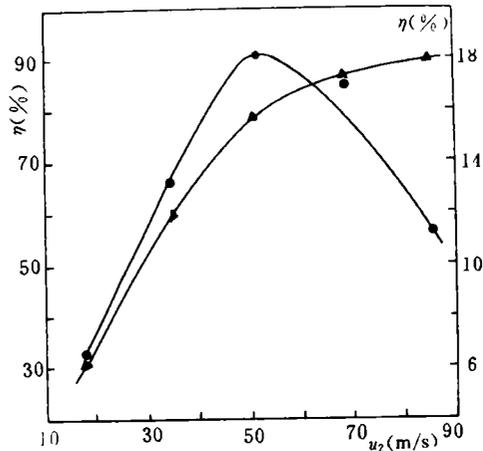


图6 分离效率与射流速度的关系

观分离效率的渐增是因为一次风量减小的结

果。由于净分离效率下降的幅度比表观分离效率上升的幅度大,因而为提高分离效率而采用过高的射流速度是不合理的。

4.5 喷嘴角度对分离效率的影响

试验结果表明,喷嘴空间角度对分离效率的影响较大,表1列出了不同空间角度下内循环流化床分离效率的试验数据。这是因

为空间角度不同,对颗粒分离起主要作用的切向速度和切圆半径亦不同,切向速度和切圆半径决定颗粒所受离心力的大小,同时切圆半径还应和炉内浓度分布相适应。因此,合理设计喷嘴空间角度,使之取得最佳值,可收到良好的分离效果。

表1 不同喷嘴空间角度下的分离效率

角度(°) λ (%)	$\alpha = 30$ $\beta = 10$	$\alpha = 30$ $\beta = 20$	$\alpha = 30$ $\beta = 45$	$\alpha = 30$ $\beta = 50$	$\alpha = 30$ $\beta = 60$	$\alpha = 70$ $\beta = 30$	$\alpha = 70$ $\beta = 40$	$\alpha = 70$ $\beta = 50$
0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
10	20.3	36.6	30.5	26.6	30.3	25.4	33.3	33.1
20	49.2	59.6	54.6	54.6	49.3	53.6	60.6	57.1
30	67.2	73.1	67.5	68.5	67.0	69.1	72.5	73.5
40	79.6	85.5	88.0	77.0	77.5	81.5	84.6	83.8
50	85.8	89.0	84.0	78.6	82.0	88.2	88.0	87.5

注 表中数据仅为喷嘴角度优化数据的一部分

4.6 喷嘴布置方式对分离效率的影响

喷嘴布置方式不同时会产生不同的分离效果,本文在模型试验台上对6种喷嘴不同布置方式进行试验,结果见表2。在实际锅炉设计中,喷嘴的布置一般采取两种形式:(1)在同一水平面上设置互成 120° 的三个喷嘴,纵剖面上设置2~3排喷嘴,炉膛为圆形;(2)在同一水平面上设置互成 90° 的4个喷嘴,纵剖面上设置2~3排喷嘴,炉膛可是圆形^[4],如考虑锅炉结构及受热面布置等因素,炉膛亦可是方形(四角布置)。哈尔滨工业大学在某厂建成了一台蒸发量为2 t/h的内循环流化床锅炉热态试验台,现已完成热工测试和炉内传热试验,效果良好,该试验锅炉炉膛形状及喷嘴布置属上述第一种形式,而对容量较大的锅炉在喷嘴布置上宜采用上述第二种形式。每个喷嘴的空间角度及纵向节距均应相等,同时还应考虑喷嘴直径及节距等因素。

表2 喷嘴布置方式不同时的分离效率

序号	喷嘴布置方式	分离效率(%)
1	每列4个喷嘴均保留	85.5
2	每列留第1、3号喷嘴	79.9
3	每列留第1、4号喷嘴	79.1
4	每列仅留第1号喷嘴	76.0
5	每列仅留第4号喷嘴	76.6
6	—列留1、3号喷嘴,另 —列留2、4号喷嘴	75.5

表注 $\lambda = 0.4$

5 结论

1. 内循环流化床分离效率随二次风率及射流速度的增加而增加,但当二次风率超过一定值后分离效率反而下降,二次风率存在一最佳范围 $\lambda = 0.3 \sim 0.4$ 。因此,为提高分离

效率而采用过高的二次风率及射流速度是不合理的。

2. 颗粒粒径对内循环流化床的分离效率具有显著影响,为保证内循环流化床的分离效果,不应采用过高的操作风速,否则需辅以外循环系统。

3. 内循环流化床分离效率随床高的增加而增加。床高应综合考虑细粒燃尽,脱硫剂在炉内停留时间,受热面布置,锅炉成本和运行费用等因素,进行合理的设计。

4. 喷嘴空间角度的选择是提高内循环流化床分离效率的重要措施,应对空间角度进行优化设计。

5. 喷嘴布置方式对内循环流化床分离效率及炉内空气动力工况均有较大影响,应据

锅炉容量和炉膛结构合理选择喷嘴布置方式。每个喷嘴的空间角度和纵向节距均应相等。

参 考 文 献

- 1 Nice S, Yang G. Particle flow pattern in a freeboard of vortexing fluidized bed. Powder Technology, 1987, 50(2): 122
- 2 Reznikov M I, Lipov Yu M. Steam boilers of thermal power stations. Moscow, Mir publishers, 1985
- 3 王怀彬,陈崇枢等. 内循环流化床及其粒子带出率的试验研究. 热能动力工程, 1991, 6(6): 341-345
- 4 Nieh S, Yang G, Zhu A Q and Zhao C S. Measurements of gas-particle flows and elutriation of an 18 inch i. d. cold vortexing fluidized-bed Combustion model. Powder Technology, 1992, 69(2): 139-146

研 制 动 态

ABB 的新一代燃机

据“Gas Turbine World”1993年9~10月号报导,瑞士ABB(Asea Brown Boveri)公司正在研制新一代再热式燃气轮机,即额定功率为165 MW(60 Hz)、简单循环效率为37.5%的GT24型燃机,额定功率为240 MW(50 Hz)、简单循环效率为37.8%的GT26型燃机。在构成联合循环时,KA24的功率为251 MW(三压),效率为58%;KA26的功率为365 MW(三压),效率为58.5%。

该系列燃机的特点是连续燃烧系统和空气冷却的涡轮。三分之二的燃料在上游燃烧室(EV)中与空气预混并点火燃烧,驱动空气冷却的第一级涡轮。剩余三分之一的燃料在第二个燃烧室(SEV)中与空气预混并点火燃烧,联合的热燃气驱动后面4个涡轮级。

整个涡轮部分利用了先进的空气动力学设计和冷却技术。涡轮进口温度高达1235℃,压比为30:1。第1到第4级涡轮是空气冷却的,第2和第3级涡轮转子叶片应用了弥散强化(DS)超耐热合金。该燃机的价格约为500美元/kW。

(学牛 供稿)

verized anthracite coal burner. Such burners feature combustion stability, relatively high combustion efficiency and a desirable tendency of slagging prevention and low NO_x emissions. **Key words:** *pulverized anthracite coal, high concentration, burner*

- (79) **An Experimental Study of Factors Exercising An Influence on the Separation Efficiency of Internal Circulation Fluidized Bed** Wang Yongwu, Wang Huaibin, Chen Chongsu (*Harbin Institute of Technology*)

An experimental investigation was undertaken on a cold-state test model of the factors liable to have an effect on the separation efficiency of internal circulation fluidized bed. On the basis of an analysis of the test results an optimum range of secondary air feeding rate is given with the nozzle angle and layout mode being studied and discussed. **Key words:** *internal circulation, fluidized bed boiler, separation effectiveness, secondary air feeding rate*

- (85) **The Influence of Elevation above Sea Level on the Heat Transfer in Boilers** Che Defu, Hui Shi'en, et al (*Energy & Power Engineering Dept. of Xi'an Jiaotong University*)

Based on the currently available thermal calculation method for boilers analysed and discussed in this paper is the influence of elevation above sea level on the following: boiler furnace heat exchange, convection heat transfer coefficient, radiation heat transfer coefficient, flue gas physical properties and the heat transfer rate of the boiler as a whole. The general tendency of the above influence is also given. **Key words:** *elevation above sea level, heat transfer, boiler*

- (89) **A study on the Structure Optimization of Intensified-Heat-Transfer Elements** Li Weizhong, Mang Gang, Hu Lianxi (*Department of Mechanical Engineering of Fushun Petroleum Institute*)

From the viewpoint of energy comprehensive applications the structure size optimization of intensified-heat-transfer elements has been studied through the use of multi-objective mathematical programming. A suitable optimization method has been developed with the effect of weighted factor on optimization results also being analysed. As a result, the authors provide a major and highly scientific approach for the study, design and utilization of intensified-heat-transfer elements. **Key words:** *intensified-heat-transfer element, optimization, weighted factor, mathematical model*

- (93) **Two-dimensional Temperature Field Calculation of Electric Heating Tubes** Xu Jinliang, Chen Tingkuan (*Xi'an Jiaotong University*)

Taking account of the fact that due to the effect of natural convection the single-phase flow and two-phase flow in horizontal and inclined tubes will lead to a non-uniformity of tube wall heat transfer factor along the peripheral direction the authors have proposed a numerical calculation model for the electric heating tube two-dimensional temperature field by employing the technique of "radial node internal contraction" and solved the problem of inadequacy of inner wall surface boundary conditions by utilizing the two boundaries of the outer wall surface. In addition, the conception of parallel network resistance heat generation has been applied to deal with the non-uniform internal heat source item. With the help of the above-cited model pro