

中心提升管内循环流化床颗粒循环流率预测研究

陈鸿伟,史洋,刘焕志,尹萍

(华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室 河北 保定 071003)

摘 要: 中心提升管内循环流化床生物质气化装置的关键是合理控制物料循环量。自行设计并搭建了中心提升管内循环流化床冷态试验台,在小型试验台上就运行参数对颗粒循环流率的影响进行了试验。试验结果表明:颗粒循环流率随着提升管风速或鼓泡床风速的增加而增加,并且当提升管风速或鼓泡床风速分别增加到一定程度时,颗粒循环流率增加趋于缓慢。在试验基础上,建立了颗粒循环流率预测模型,得到的模型预测值与试验值吻合良好,预测相对误差小于 $\pm 10\%$,即在一定操作条件下,验证了该模型的正确性。

关 键 词: 内循环流化床;提升管;颗粒循环流率;预测

中图分类号:TK229 文献标识码:A

引 言

生物质气化技术是近年来利用生物质能源的一种主要技术,至今已有了很大的发展^[1~2]。目前,常规循环流化床生物质气化系统应用较广,但由于存在产出气中带出物多、显热损失大、碳回流难以控制等问题^[3],使其气化效率和碳转化率降低。

近年来出现了各种内循环流化床气化炉,这种气化炉可将燃烧和气化过程分开,在延长颗粒炉内停留时间、减少飞灰损失、提高气化效率等方面取得了较大进展^[4]。浙江大学方梦祥等人对一种并列双流化床结构煤气化炉的内循环流动进行了研究,提出了合理的结构尺寸及运行工况^[5]。中科院广州能源研究所黄立成等人研究了一种隔板式内循环流化床,从大量实验中得到了隔板式内循环流化床装置的优化操作条件^[6]。

与其它内循环流化床相比,中心提升管内循环流化床(DT-ICFB)的结构更加紧凑、简单^[7],由于其燃烧室散出的热量完全被气化室吸收,所以热损失更小。物料循环量是DT-ICFB设计的一个重要参数^[8],它直接影响物料在床中的停留时间和床空隙率。

本研究自行设计并搭建了DT-ICFB冷态试验台,就运行参数对颗粒循环流率的影响进行了研究,提出了一种预测颗粒循环流率的理论模型,并通过冷态试验验证了模型的正确性。

1 中心提升管内循环流化床工作原理

流化床的中心提升管将内循环流化床分为环形鼓泡床和提升管快速床,并在提升管底部开有进料孔。鼓泡床为气化室,用蒸汽鼓风;提升管快速床为燃烧室,用空气鼓风。由于两个流化床的鼓风风速不同,提升管进料孔两侧产生压差,使颗粒通过进料孔从鼓泡床进入提升管,颗粒在提升管迅速向上运动,在锥形分料器的作用下落回鼓泡床,从而形成物料在炉内的内循环流动。生物质在气化室中气化,产生中热值燃气,气化后半焦经进料孔进入燃烧室燃烧,产生的热量用于加热循环物料以提供气化室气化吸热。两床间有足够稳定的物料循环量以保证有足够连续的热量供气化吸热是本方案设计的关键。

2 试验装置、方法及结果

2.1 试验装置及方法

试验装置如图1所示,试验台包括提升管、鼓泡床、锥形分料器、环形L阀、布风板等。提升管内径90 mm,高度为1.2 m,鼓泡床内径290 mm,高度为2 m。在生物质气化方案中,环形L阀的作用是防止气化室产生的可燃气体和燃烧室生成的废气串气。为便于观察物料的运动情况并测量颗粒循环量,试验台主体部分由有机玻璃制成。提升管和鼓泡床的流化风由鼓风机提供,风量由蝶阀控制并由空气转子流量计测量。

收稿日期:2010-05-06; 修订日期:2010-06-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50876030)

作者简介:陈鸿伟(1965-),男,重庆人,华北电力大学教授,博士。

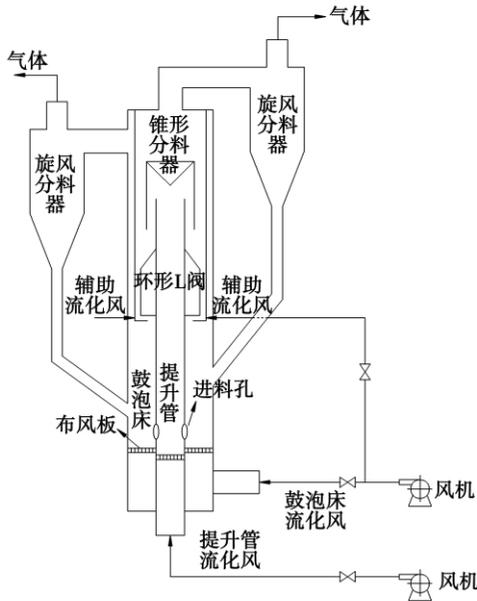


图 1 试验装置

采用容积测量法测量颗粒循环量。在环形 L 阀下方有一个测量容器, 观察一定时间内物料的堆积高度, 根据物料的堆积密度进而计算出颗粒的循环流率。

试验物料为普通河沙, 粒径范围为 0.247 ~ 0.493 mm, 球形度为 0.58, 颗粒真实密度 ρ_s 为 2620 kg/m³。颗粒平均粒径 d_p 为 0.347 mm; 静床高 H 为 100 mm。

2.2 试验结果及分析

2.2.1 提升管风速对颗粒循环流率的影响

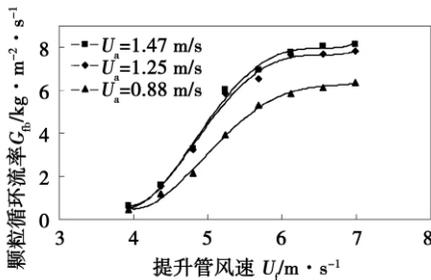


图 2 提升管风速对颗粒循环流率的影响

对于一定量的床料, 固定鼓泡床风速 U_a , 调节提升管风速 U_r , 测得颗粒通过鼓泡床的循环流率 G_b 随提升管风速 U_r 的变化情况, 如图 2 所示。由图可知, 颗粒循环流率随提升管风速的增加而增加, 当提升管风速达到一定程度时, 颗粒循环流率增加趋于缓慢。在 $U_a = 1.25U_{mf}$ 和 $U_a = 1.47U_{mf}$ 时 (U_{mf} : 固体颗粒临界流化风速), 颗粒循环流率增加趋势

比 $U_a = 0.88U_{mf}$ 时剧烈。当提升管风速低于 3.9 m/s 时, 无论鼓泡床风速多大都没有颗粒循环。

颗粒循环流率随着提升管风速增加而增加是提升管底部进料孔两侧压差增加造成的。当鼓泡床中物料通过进料孔进入提升管后, 在提升管风速较低时, 大颗粒相的速度达不到其终端速度, 提升管中只有较小的颗粒参与循环, 随着提升管风速的增大, 提升管中较大颗粒相将逐渐达到其终端速度, 这时颗粒循环流率增加剧烈。提升管风速继续增加, 当提升管中最大颗粒达到其终端速度时, 这时所有进入提升管的物料都参与循环, 颗粒循环流率增加趋于缓慢。

2.2.2 鼓泡床风速对颗粒循环流率的影响

对于给定的床料, 保持提升管风速 U_r 不变, 调节鼓泡床风速 U_a , 得到颗粒循环流率 G_b 随鼓泡床风速 U_a 的变化情况, 如图 3 所示。从图中的 3 条曲线可以看出, 颗粒循环流率随鼓泡床风速的增加而增加, 当鼓泡床风速增加到一定程度时, 颗粒循环流率增加趋于缓慢。

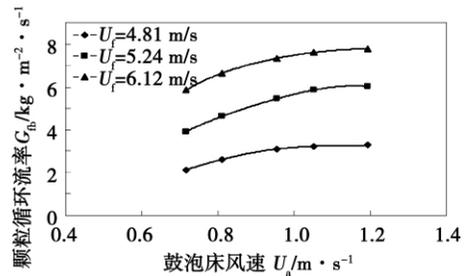


图 3 鼓泡床风速对颗粒循环流率的影响

分析原因可知, 鼓泡床风一方面影响鼓泡床物料的流动性, 另一方面影响两床的压差。随着鼓泡床风速增加, 提升管进料孔两侧压差增大但流动性变化不大, 颗粒循环流率增加。当鼓泡床风速增大到某一值后, 这时鼓泡床鼓泡剧烈, 虽然两床间的推动力增大, 但床料的流动性变差, 鼓泡床的高速气流对颗粒孔口流动产生一定的堵塞作用, 两方面综合结果造成颗粒循环流率增大趋于缓慢。

3 颗粒循环流率预测模型建立

在稳定运行状况下, 固体颗粒处于流化状态, 在许多方面表现出类似液体性质, 根据伯努利方程可得到颗粒通过孔口速度为:

$$V_o = \sqrt{\frac{2\Delta P_o}{\rho_a [1 - (S_o/S_a)^2]}} \tag{1}$$

式中: ΔP_o —进料孔两侧压差, Pa; ρ_a —鼓泡床物料密度, kg/m^3 ; S_o —进料孔面积, m^2 ; S_a —环形鼓泡床截面积, m^2 。

实际床层中颗粒间有相互干扰, 两床操作气的变化也会影响颗粒通过孔口的速度, 因而在实际应用中, 还必须对孔口速度 V_o 作出相应的修正^[9], 修正后的孔口速度为:

$$V_o = C_s \sqrt{\frac{2\Delta P_o}{\rho_a [1 - (S_o/S_a)^2]}} \quad (2)$$

式中: C_s —颗粒流量系数, 由试验确定。

根据鼓泡床、进料孔和提升管中物料的质量平衡关系, 可得:

$$G_{fb} S_a = G_{pt} S_{pt} = G_o S_o = \rho_a V_o S_o \quad (3)$$

式中: G_{fb} —颗粒通过鼓泡床的循环流率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; G_o —颗粒通过进料孔的循环流率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; G_{pt} —颗粒通过提升管的循环流率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; S_{pt} —提升管截面积, m^2 。

将式(2)代入式(3), 可得:

$$G_{fb} = C_s \frac{S_o}{S_a} \sqrt{\frac{2\Delta P_o \rho_a}{1 - (S_o/S_a)^2}} \quad (4)$$

鼓泡床物料处于流化状态, 可得鼓泡床物料密度:

$$\rho_a = \rho_s (1 - \varepsilon_a) \quad (5)$$

式中: ρ_s —颗粒的真实密度, kg/m^3 ; ε_a —鼓泡床物料在流化状态下空隙率。

孔口两侧压差 ΔP_o 计算为:

$$\Delta P_o = \Delta P_{fb} - \Delta P_{pt} \quad (6)$$

式中: ΔP_{fb} —鼓泡床的床层压降, Pa; ΔP_{pt} —气固两相在中心提升管的压降, Pa。

鼓泡床物料在流化状态下的床层压降为:

$$\Delta P_{fb} \approx H_{fb} (1 - \varepsilon_a) \rho_s g \quad (7)$$

式中: H_{fb} —鼓泡床物料在流化状态下的床层高度, m 。

试验测得气固两相在锥形分料器产生的压降很小, 可忽略不计。对于提升管压降 ΔP_{pt} , 考虑了与其相关的6个因素^[10], 即:

$$\Delta P_{pt} = L_{pt} (1 - \varepsilon) \rho_s g + L_{pt} \varepsilon \rho_f g + 0.5 (1 - \varepsilon) \rho_s (U_p)^2 + 0.5 \varepsilon \rho_f U_f^2 + L_{pt} F_{fw} + L_{pt} F_{pw} \quad (8)$$

式中: U_p —提升管中颗粒相速度, m/s ; L_{pt} —提升管的长度, m ; ρ_f —空气密度, kg/m^3 ; ε —提升管内物料空隙率; U_f —提升管中气体相速度, m/s ; F_{fw} —单位体积气体和提升管壁面摩擦力, N ; F_{pw} —单位体积颗粒和提升管壁面的摩擦力, N 。由于提升管壁面

光滑, F_{fw} 可忽略不计。

F_{pw} 可计算为^[10]:

$$F_{pw} = 0.057 G_{pt} (g/D_{pt})^{0.5} \quad (9)$$

式中: D_{pt} —提升管内径, m 。

提升管中物料空隙率可计算为:

$$\varepsilon = 1 - G_{pt} / (\rho_s U_p) \quad (10)$$

提升管中颗粒相速度 U_p 可根据滑移因子 ψ 计算^[11]:

$$U_p = U_f / (\psi \varepsilon) \quad (11)$$

对式(6)~式(10)进行整合, 可得:

$$\Delta P_o = H_{fb} (1 - \varepsilon_a) \rho_s g - \{ L_{pt} G_{pt} g / U_p + L_{pt} \rho_f g [1 - G_{pt} / (\rho_s U_p)] + 0.5 G_{pt} U_p + 0.5 \rho_f U_f^2 [1 - G_{pt} / (\rho_s U_p)] + 0.057 L_{pt} G_{pt} (g/D_{pt})^{0.5} \} \quad (12)$$

对式(10)~式(11)进行整合, 可得:

$$U_p = G_{pt} / \rho_s + U_f / \psi \quad (13)$$

式中: ψ —滑移因子。

ψ 计算为^[11]:

$$\psi = 1 + 5.6 (g D_{pt})^{0.5} / U_f + 0.47 [U_f / (g D_{pt})^{0.5}]^{0.41} \quad (14)$$

式中: U_f —颗粒相终端速度, m/s 。

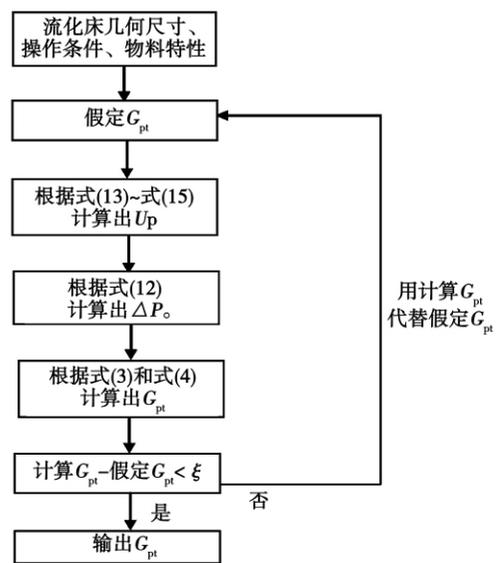


图4 颗粒循环流率预测模型流程

提升管中气固两相流动处于湍流状态, U_f 可由湍流区颗粒相终端速度计算^[12]:

$$U_f = 1.74 \left[\frac{g(\rho_s - \rho_f) d_p}{5.31 \phi_s \rho_f} \right]^{0.5} \quad (15)$$

式中: d_p —颗粒相平均直径, m ; ϕ_s —颗粒球形度。

在确定流化床的几何尺寸、操作条件、及床料特性后, 便可利用本研究建立的颗粒循环流率预测模型进

行迭代计算 图4为颗粒循环流率预测模型流程图。

Sang Done Kim 和 Jin Hee Jeon 等人对中心提升管内循环流化床颗粒循环流率计算模型进行了研究,由于采用实验数据拟合的方法计算料孔两侧压差 ΔP ,使模型的适用范围受到一定的限制^[8-9];本研究利用气固两相流的基本理论推导出进料孔两侧压差计算式,从理论上证明了该计算式的合理性。

4 颗粒循环流率计算值与试验值比较

在鼓泡床风速 $U_a = 1.47U_{mf}$ (U_{mf} 为临界流化速度)时,鼓泡床物料在流化状态下床层高度 $H_{FB} = 0.17$ m,空隙率 $\varepsilon = 0.69$;在鼓泡床风速 $U_a = 1.25U_{mf}$ 时,床层高度 $H_{fb} = 0.15$ m,空隙率 $\varepsilon = 0.678$ 。在上述两种工况下,颗粒流量系数 C_s 与提升管风速 U_f 的关联式为:

$$C_s = 0.0075392U_f^4 - 0.16781U_f^3 + 1.3732U_f^2 - 4.8553U_f + 6.2679 \quad (16)$$

在鼓泡床风速 $U_a = 0.88U_{mf}$ 时,床层高度 $H_{fb} = 0.12$ m,鼓泡床空隙率 $\varepsilon = 0.617$,颗粒流量系数 C_s 与提升管风速的关联式为:

$$C_s = 0.0018059U_f^4 - 0.046534U_f^3 + 0.42714U_f^2 - 1.642U_f + 2.2555 \quad (17)$$

受试验条件限制,提升管操作风速 U_f 变化范围为 $3.9 \sim 6.9$ m/s。所以提出的颗粒流量系数 C_s 与提升管风速 U_f 关联式的适用条件为 $3.9 \text{ m/s} < U_f < 6.9 \text{ m/s}$ 。

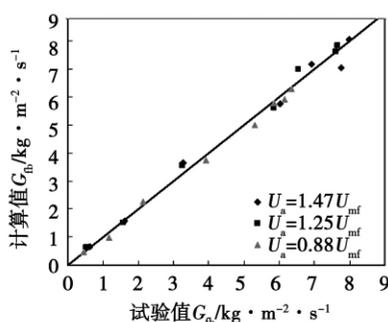


图5 颗粒循环流率试验值与计算值比较

图5为颗粒循环流率试验值和模型计算值的比较,计算值与试验值差异很小,预测误差小于 $\pm 10\%$,可见本模型可以很好的预测内循环流化床颗粒循环流率。

5 结论

试验工作是在中心提升管内循环流化床冷态试

验装置中完成的,基于内循环流化床工作原理建立了颗粒循环流率的预测模型。通过研究得到如下结论:

(1) 对于一定的物料,在 $U_a/U_{mf} > 1$ 时颗粒循环流率增加趋势比 $U_a/U_{mf} < 1$ 时剧烈,并且当提升管风速 $U_f < 3.9$ m/s 时,无论鼓泡床风速多大,都没有颗粒循环。

(2) 提升管风速和鼓泡床风速对颗粒循环流率有较大影响,颗粒循环流率随提升管风速或鼓泡床风速的增加而增加,并且当提升管风速或鼓泡床风速分别增加到一定程度时,颗粒循环流率增加趋于缓慢。

(3) 基于气固两相流基本理论,建立了颗粒循环流率动力学预测模型,所得预测值与试验值吻合良好,预测误差小于 $\pm 10\%$ 。

参考文献:

- [1] 吴家桦,沈来宏,肖军,等. 串行流化床生物质气化制取合成气试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(11): 111-117.
- [2] CORELLA JOSE, TOLEDO JOSE M, GREGORIO MOLINA. A review on dual fluidized-bed biomass gasifiers [J]. Ind Eng Chem Res, 2007, 46(21): 6831-6839.
- [3] CUMMER KEITH R, BROOVM ROBERT C. Ancillary equipment for biomass gasification [J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 23(2): 113-128.
- [4] 原晓华, 马德龙, 陈平, 等. 生物质在隔板式内循环流化床中的气化[J]. 太阳能学报, 2005, 26(6): 743-746.
- [5] 方梦祥, 施正展, 王树荣. 双流化床物料循环系统的试验研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 54-57.
- [6] 黄立成, 马隆龙, 周肇秋, 等. 隔板式内循环流化床的流动特性研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(7): 900-904.
- [7] SONG BYUNG HO, KIM YOUNG TAK, KIM SANG DONE, et al. Circulation of solids and gas bypassing in an internally circulating fluidized bed with a draft tube [J]. Chemical Engineering, 1997, 68(2): 115-122.
- [8] KIM SANG DONE, KIM YO HAN, ROH SEON AH. Solid circulation characteristics in an internally circulating fluidized bed with orifice-type draft tube [J]. Korean J Chem Eng, 2002, 19(5): 911-916.
- [9] JEON JIN HEE, KIM SANG DONE, KIM SEUNG JAE. Solid circulation and gas bypassing characteristics in a square internally circulating fluidized bed with draft tube [J]. Chemical Engineering and Processing, 2008, 47(12): 2351-2360.
- [10] KIMBERLY HERTHORN H, KIMAM PARK, CURTIS JENNIFER S. Measurement and prediction of pressure drop in pneumatic conveying: effect of particle characteristics, mass loading and reynolds number [J]. Ind Eng Chem Res, 2005, 44(14): 5090-5098.
- [11] SEMEEL K, BERRUTI GUPTA FRANCO. Evaluation of the gas-solid suspension density in CFB risers with exit effects [J]. Powder Technology, 2000, 108(1): 21-31.
- [12] 岑可发, 倪明江, 骆仲泱. 循环流化床锅炉理论设计与运行 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

water levels were 63 , 163 and 263 mm respectively , the pressure characteristics of the air chamber when a water leakage came from the air buttons were studied. When a water leakage from the air buttons occurs , the air chamber with a water leakage will drastically fluctuate. A critical relationship exists between the normal pressure in the air chamber and its minimum pressure during the water leakage. The critical pressure difference will increase with an increase of the drag in the air buttons. At a same fluidized air quantity , the critical pressure difference will decrease with an increase of the bed pressure. Through the tests , the mechanism controlling the slag leakage from the air buttons on the air distributor of the circulating fluidized bed boiler was analyzed , thus providing reference for improving the leakage prevention performance of air buttons. **Key words:** circulating fluidized bed boiler , built-in counterflow cylindrically-shaped air button , drag characteristics , leakage prevention characteristics

中心提升管内循环流化床颗粒循环流率预测研究 = **Investigation on the Prediction of the Particle Circulating Flow Rate of a Circulating Fluidized Bed Inside a Central Elevating Tube** [刊 , 汉] CHEN Hong-wei , SHI Yang , LIU Huan-zhi et al (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control , College of Power and Mechanical Engineering , North China University of Electric Power , Baoding , China , Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26(2) . - 216 ~ 219

To rationally control the circulating flow rate of the bed material is the key to a biomass gasification device with a circulating fluidized bed inside a central elevating tube. A cold-state circulating fluidized bed test stand inside a central elevating tube was independently designed and set up. On this small-sized test stand , tested was the influence of the operating parameters on the particle circulating flow rate. The test results show that the particle circulating flow rate increases with an increase of the air speed in the elevating tube or the bubbling air speed on the bubbling bed. Furthermore , when the air speed in the elevating tube and that on the bubbling bed increase respectively to a certain degree , the increase of the particle circulating flow rate will tend to slow down. On the basis of the tests , a model for predicting the particle circulating flow rate was established. The prediction values obtained by using the model in question are in good agreement with the test ones. The relative error of the prediction is less than $\pm 10\%$, proving that the correctness of the model in question is verified under certain operating conditions. **Key words:** inner circulating fluidized bed , elevating tube , particle circulating flow rate , prediction

一种煤气自动放散减压稳压设备试验装置及特性分析 = **A Test Device for a Coal-gas Automatic Bleeding Pressure Reducing and Stabilizing Equipment Item and Its Characteristic Analysis** [刊 , 汉] YU Xiao-ming , FENG Xi (College of Energy Source and Power Engineering , Shanghai University of Science and Technology , Shanghai , China , Post Code: 200093) , KONG Biao-long (Shanghai General-purpose Machine Technology Research Institute Co. Ltd. , Shanghai , China , Post Code: 200431) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26(2) . - 220 ~ 223

To provide a test and research platform in coordination with the localization , development and improvement of Baogang No. 2 steel-making coal-gas bleeding pressure reducing and stabilizing equipment items and meet the requirements of a series of products in various specifications for multiple operating conditions and various tests , a test device for coal-gas automatic bleeding pressure reducing and stabilizing equipment items was developed and properly designed. With such specific features as a novel design , a high automation level , a full spectrum of functions and a wide testing range , it can perform an inspection and testing of products in nearly 60 specifications at a diameter from DN15 to 300. A variety of product performance and life tests proven that the testing precision invariably meets