

高温鼓泡流化床的流化行为

郭庆杰, 吕俊复, 王 昕, 徐 猛

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘 要: 床层温度在 20~1 000 °C 范围内, 以 4 种粒径的煤灰为实验物料, 研究了不同表观气速下最小流化速度、床层平均空隙率、压力波动标准偏差和主频的变化规律, 最小流化速度随床层温度升高而减小; 相同床温下, 平均空隙率随表观气速升高而增大; 不同床温下, 压力波动偏差随流化数增加而增大。相同流化数时, B 类颗粒的压力波动标准偏差受床层温度变化影响较小, 而 D 类颗粒随床层温度升高压力波动标准偏差减小。随着流化数增加, 压力波动主频减小。

关 键 词: 流化床; 高温; 最小流化速度; 压力波动偏差; 主频

中图分类号: TQ021.1 文献标识码: A

1 引 言

流化床广泛应用于固体颗粒干燥、催化裂化、煤的燃烧与气化等工业过程, 这些过程都涉及流化床的中温和高温操作^[1~4]。然而, 高温流化实验装置复杂以及测试困难, 因此, 有关高温下流化床的最小流化速度、床层空隙率、气泡产生频率等流化行为的报道较少^[5]。与此相反, 常温下流化床流化行为的研究很多。应该指出, 高温下气体的密度和粘度都发生了显著变化, 如把常温流化行为规律外推到高温下, 将带来较大偏差。

近年来, 流化床燃烧技术得了长足的发展。但流化床锅炉的设计和操作中产生了一些问题, 如在添加氧化钙作脱硫剂的加压流化床中, 曾发现局部流化不良导致流化床该局部区域床温提高, 由此带来了煤灰颗粒表面变粘, 床内出现颗粒团聚甚至大面积结焦, 造成锅炉停运事故^[6]。本文以煤灰和过量氧化钙的混合物为实验物料, 在圆形不锈钢流化床中研究了高温流化床的最小流化速度、床层空隙率和压力波动行为的变化。

2 实验及测试系统

2.1 实验装置

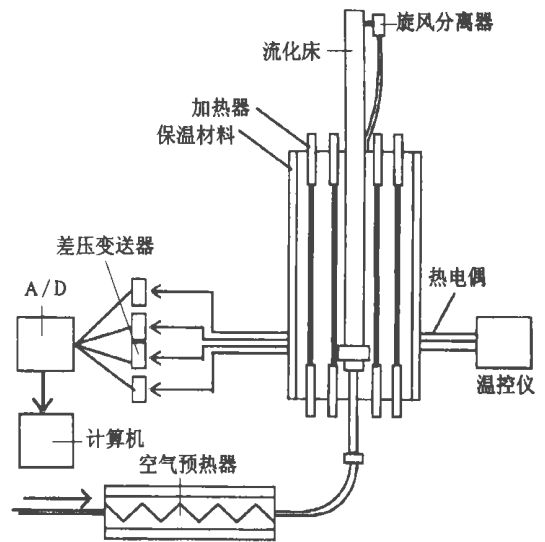


图 1 实验台简图

实验装置包括流化床本体、空气预热器、硅碳棒加热器、保温层、控温装置和测压装置, 流化床为圆形截面, 由 1Cr18Ni9Ti 不锈钢制造, 详细结构见文献[4]。为保证流化介质的温度较高, 空气进口管外侧包裹 $\Phi 87 \times 2.5$ mm 不锈钢圆形电阻片, 构成了空气预热器, 其最大加热功率为 1.41 kW, 见图 1。实验采用多孔式分布板。分布板上覆盖了两层 200 目的不锈钢网, 以保证气体均匀分布和防止固体颗粒进入到气体预分布室中, 不锈钢流化床通过底部连接螺栓固定在保温腔内, 加热器由六根硅碳棒组成, 最大加热功率 6.5 kW。压缩空气经空气预热器可预热到最高温度 300 °C, 预热后的空气进入至不锈钢流化床, 6 根硅碳棒提供高温实验所需的主要热量,

收稿日期: 2001-12-18; 修订日期: 2002-01-24

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(中博基 1(20023)); 日本石川岛播磨重工业株式会社基金资助项目(IHI-TH1999-04)

作者简介: 郭庆杰(1967-)男, 山东聊城人, 清华大学博士后

最高温度可达到 1 100 ℃。

预热器和硅碳棒加热器的温度分别控制, 预热器温控系统采用热电偶、Omron E5CS 控制仪表和电阻片加热器。硅碳棒加热系统包括热电偶、SR71 PID 调节器、PACO3B 三相 SSR 调压器和硅碳棒, PACO3B 三相 SSR 调压器是超大功率固态继电器, 具有恒压、恒流及恒功率的特点, 大功率加热时电流可控制在 60 A。实验物料采用了 4 种粒径的加压流化床煤灰, 物性参数见表 1。

表 1 加压流化床灰的物性参数

颗粒名称	颗粒直径/mm	颗粒密度/kg·m ⁻³	颗粒分类
灰 1	0.85	2 832	D
灰 2	0.68	2 878	B
灰 3	0.59	2 990	B
灰 4	0.41	2 800	B

力探针位于分布板上方 10 mm、25 mm、40 mm、55 mm、70 mm 和 115 mm 处。热电偶通过螺纹连接在另一侧床壁上, 3 支热电偶位于分布板上方 10 mm、25 mm、40 mm 处。

2.2 压力信号采集系统

压力信号采集系统包括取压管, 最大量程为 5.0 kPa 的 Setra 264 小量程差压变送器、AD 1674 模数转换器、计算机。长 400 mm, 内径 4 mm 的不锈钢管借助于螺纹连接在流化床壁上, 不锈钢管的另一端依次同长 400 mm 的异径石英玻璃管及橡胶管连接, 最后橡胶管连接在差压变送器的高压端。差压变送器的低压端暴露在大气中。由于石英的热传导系数较小, 石英管同橡胶管连接端温度稍高于室温, 不锈钢管与石英管连接处通过石棉线密封, 高温下取压管可保持良好的密封状态。

2.3 试验过程

实验温度低于 150 ℃时, 只使用预热器加热; 高于 150 ℃的情况下, 硅碳棒加热器和预热器同时加热。实验时, 首先使流化床处于良好流化状态, 尔后使流化床缓慢加热到实验温度。调节流化气量至需要值, 系统在恒温下稳定 5 min 后, 利用压力信号采集装置采集数据。每个实验条件下采样频率为 200 Hz, 采样时间为 60 s, 数据采集量 12 000 点。最小流化速度由降速法测得。实验按照由低床温到高床温的顺序进行。

3 结果和讨论

3.1 最小流化曲线

床层由固定床阶段进入流化阶段时需克服颗粒之间的作用力, 升速流化曲线上出现一突越点。因此, 颗粒的最小流化速度通常应用降速法测定, 本文也采用了降速法研究颗粒的最小流化速度。室温下直径 0.85 mm 的煤灰在不同温度下床层压降与床层表观气速曲线如图 2 所示。水平段表示床层处于流化状态时, 床层压降等于单位床截面床层颗粒重量。固定床阶段, 床层压降与表观气速在图上表现为通过原点的直线, 其原因在于厄贡方程中床层压降与床层表观气速的一次方成正比。流化曲线上水平段向直线段过渡点对应的床层表观气速为颗粒的最小流化速度。图 2 还可表明, 当床层温度由 600 ℃升高至 1 000 ℃时, 煤灰的最小流化速度减小。

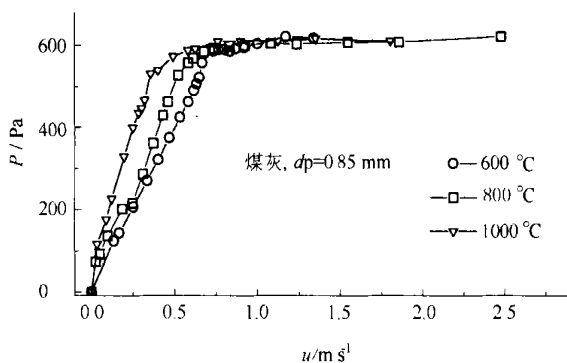


图 2 不同温度下的最小流化速度曲线

3.2 温度对最小流化速度影响

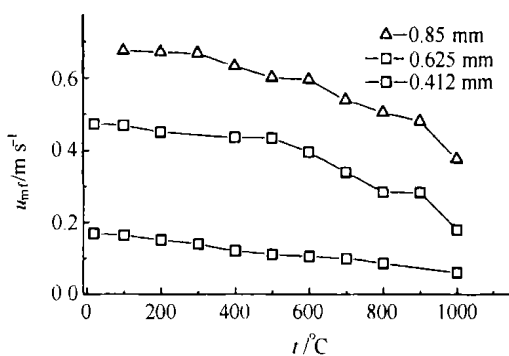


图 3 床层温度对最小流化速度的影响

图 3 给出了三种粒径煤灰的最小流化速度与温度的关系。由图可见, 床温升高, 颗粒的最小流化速度减小。根据 Svoboda 的分析^[7], 床层温度在 20 ~ 820 ℃变化时, 床层空隙率的变化只有 6.5%。不考虑床温对空隙率的影响, 最小流化速度的计算不会带来较大误差。计算表明, 三种粒径煤灰不同床温

下雷诺数都小于 20, 床层处于层流运动区和过渡区, 此时厄贡方程中粘性力项远大于动能项。厄贡方程可简化为 $150 C_2 Re_{mf} = Ar$, 其中 Re_{mf} , Ar 分别为雷诺数和阿基米得数, C_2 常数; 进一步简化为 u_{mf} 等于常数, 因空气粘度随床温升高而增加, 颗粒最小流化速度随温度升高而减小。

气固两相的作用力包括颗粒重力、颗粒浮力、颗粒受到的曳力和颗粒之间的粘性力。高温下, 颗粒表面变粘, 颗粒之间的粘性力明显增大, 利用高温表面非变粘颗粒的三个关系式预测高温表面变粘颗粒的最小流化速度^[8~10], 将带来较大误差。因此, 利用 4 种煤灰在室温至 1 000 °C 下的最小流化速度, 得出了下述最小流化速度关系式。

$$Ar = 57.23 Re_m^2 + 761.8 Re_m \quad (1)$$

上式应用范围 $Re_m \leq 20$ 。

对于相同的颗粒, 其最小流化速度随温度的上升而下降。

3.3 一定温度下床层表观气速对空隙率的影响

图 4 给出床层温度为 500 °C 时, 表观气速对床层空隙率的影响。其它床层温度下床层空隙率的变化也有类似规律。床层表观气速增大, 床层空隙率开始增加较快, 当气速增加到 1.4 m/s 后床层空隙率增加趋缓。床层表观气速较低时, 床层底部区域产生的气泡数量与体积均增大。如表观气速进一步增大, 气泡体积增大到一定尺寸后, 气泡合并占主导地位。合并后气泡体积受到流化床直径的限制, 床层空隙率增加缓慢。

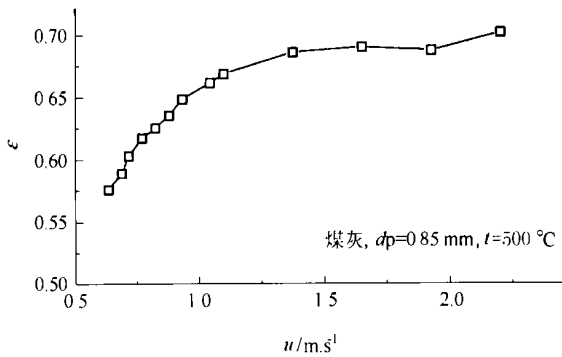


图 4 床层表观气速对床层空隙率的影响

3.4 表观气速与压力波动偏差的关系

流化床压力波动信号包含了气固两相运动的许多信息, 诸如气泡的形成和破裂, 流化颗粒的振动, 预分布气室压力波动, 气泡聚并与破裂。流化床压力

信号具有瞬时性、波动性的特点, 本文采用压力波动偏差 (ΔP) 表示压力波动的统计特性

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (2)$$

$$\Delta P = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \quad (3)$$

其中, p_i , \bar{p} 分别表示压力波动瞬时值和平均值, n 为总采样点数。

以压力波动标准偏差对流化数 (床层表观气速与颗粒最小流化速度的比值) 绘图, 得到图 5。由图可见, 两种粒径煤灰在不同温度下都表现出了流化数增加时压力波动偏差不断增大的规律。值得注意的是, 对于 D 类灰, 当流化数相同时, 床层温度升高使得压力波动标准偏差减小。这是由于温度升高带来了颗粒最小流化速度减小, 在流化数相同时, 低的床温对应的床层表观气速较大, 床层产生的气泡变大。对于 B 类颗粒, 相同流化数时, 床层温度升高对压力波动标准偏差减小不明显。Hillgardt 以 Davidsion 气泡模型为基础^[11~12], 导出了气泡直径变化与温度关系的微分方程, 发现 B 类颗粒流化床气泡直径不随床层温度变化。本研究 B 类颗粒煤灰压力波动与流化数的关系也证实了此结论。

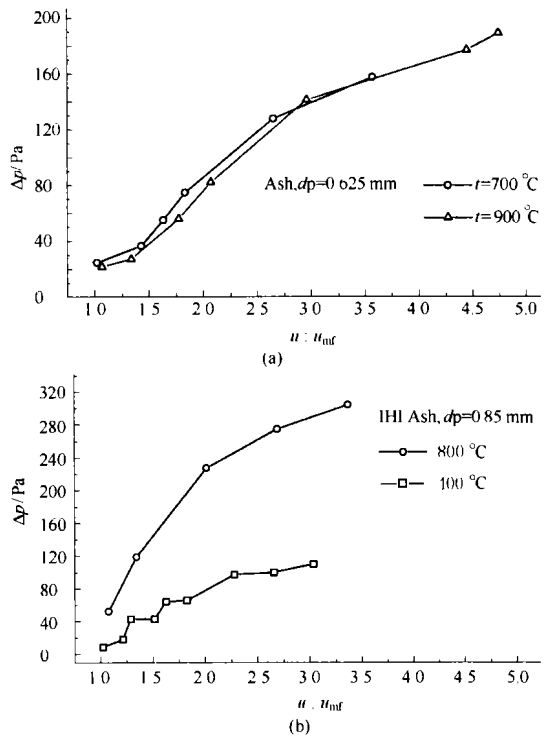


图 5 流化数对压力波动偏差的影响

3.5 流化数对压力波动主频影响

本文应用分段功率谱研究压力信号的主频。分

段功率谱 P_x 定义如下

$$P_x = \frac{1}{kLU} \sum_{i=1}^k \left| \sum_{n=0}^{L-1} x_i(n)w(n)e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \right|^2 \quad (4)$$

长度为 N 的压力波动信号 $x_i(n)$ 分成 k 段, 每段长度为 L ; $w(n)$ 表示窗函数。其中 U 为窗函数 $w(n)$ 的平均能量,

$$U = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-1} [w(n)]^2 \quad (5)$$

图 6 给出了不同温度下流化数对压力波动主频的影响。随着流化数的增加, 主频减小。气泡在床内上升过程中不断发生气泡合并, 位置离分布板越高, 气泡数目减小而体积增大, 因而主频减小。如床表观气速超过颗粒最小流化速度, 多余部分的气量将以气泡的形式通过床层。床层表观气速超过颗粒最小流化速度, 床层表观气速变大产生较多气泡。表观气速愈大, 生成气泡的数量及尺寸愈大, 从而使气泡在床内合并的几率越大, 越易在距分布板较高位置合并成更大气泡, 导致气泡生成频率减小。

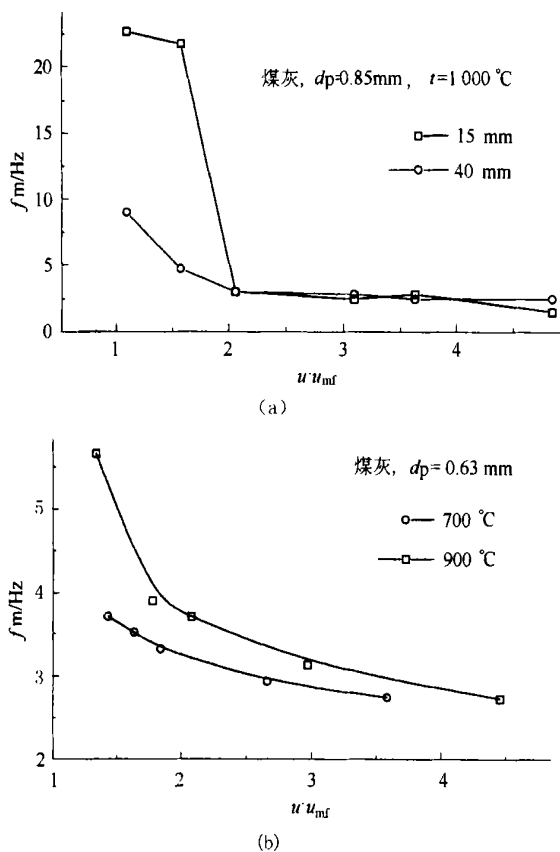


图 6 流化数对主频的影响

4 结论

化时, 在所考察的表观气速范围内, 颗粒的雷诺数都小于 20。煤灰的最小流化速度随床温升高而减小, 并得出了预测煤灰最小流化速度的关系式。

(2) 床层表观气速增大, 床层空隙率开始增加较快; 当气速增加到一定值后, 床层空隙率增加趋缓。

(3) 不同粒径的灰在不同温度下随着流化数增加压力波动偏差增大。B 类颗粒, 相同流化数, 床层温度升高对压力波动标准偏差减小不明显。D 类灰, 当流化数相同时, 床层温度升高使得压力波动标准偏差减小。

(4) 随着流化数的增加, 主频减小。在同样操作条件下, 离分布板越高, 主频也减小。

参考文献:

- [1] GUO Q J, TANG Z, YUE G, *et al.* Flow pattern transition in a large jetting fluidized bed with two vertical nozzles[J]. *AIChE Journal*, 2001, **47**(6): 1309-1317.
- [2] GUO Q J, YUE G X, ZHANG J Y, *et al.* Hydrodynamic behavior of a two-dimensional jetting fluidized bed with binary mixtures[J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, **56**(15): 4685-4694.
- [3] GOU Q J, YUE G X, LIU Z Y. Flow pattern transition in a large jetting fluidized bed with a vertical nozzle[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2001, **40**(16): 3689-3696.
- [4] GUO Q J. Fluidization Characteristics of a bubbling fluidized bed at high temperature and a jetting fluidized bed. postdoctoral research report[D]. Beijing: Tsinghua University, 2001.
- [5] FORMISANI B, GIRIMONTE R, MANCUSO L. Analysis of the fluidization process of particle beds at high temperature[J]. *Chem Eng Sci*, 1998, **53**(6): 951-961.
- [6] 郭庆杰, 王 昕, 吕俊复, 等. 高温流化床的结焦特性[J]. *煤炭转化*, 2000, **23**(1): 11-16.
- [7] SVOBODA K, MILOSLA H. Influence of temperature on incipient fluidization of limestone, lime, coal ash, and corundum[J]. *Ind Eng Chem Process Des Dev*, 1981, **20**: 319-326.
- [8] WEN C Y, YU Y H. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity [J]. *AIChE Journal*, 1996, **42**(3): 610-612.
- [9] ROWE P N, HENWOOD G A. Measurement of minimum fluidization velocities at elevated temperatures [J]. *Trans Inst Chem Engs*, 1961, **39**(1): 43-48.
- [10] RIBA J P, ROUTIE R, COUDERC J P. Conditions minimales de mise en fluidisation per un liquide[J]. *The Can J Chem Eng*, 1978, **56**(1): 26-34.
- [11] HILLIGARDT K, WERTHER J. Influence of temperature and properties of solids on the size and growth of bubbles in gas fluidized beds [J]. *Chem Eng Technol*, 1987, **10**: 272-283.
- [12] CLIT R, GRACE J R. Fluidization[M]. London: Academic Press, 1985.

Intensification Heat-transfer Tube Incorporating an Electric Field and Spiral Coils [刊, 汉] / LIU Zhen-hua, YI Jie (Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 475 ~ 477

An experimental study of combined-intensification heat transfer was conducted by using two intensification techniques to the laminar flow heat transfer of in-tube oil, namely, the installation of internally inserted spiral coils and an externally added high-voltage electric field. The result of the experiment indicates that the intensification tube with the use of internally inserted spiral coils can lead to an enhancement of convection heat transfer of the laminar flow by about 100%. The use of intensified heat exchange with the help of a high-voltage electric field in addition to the above approach can further enhance the heat exchange intensification rate by about four times. Oil temperature and its flow speed do not exert any significant influence on the heat exchange intensification rate. The heat exchange intensification rate basically depends on the externally applied high-voltage electric field. **Key words:** convection heat transfer, combined intensification of heat exchange, electro-hydrodynamics

梯形剖面圆形肋片管温度场的研究 = A Study of the Temperature Field of Annular Finned Tubes with a Trapezoidal Cross-section [刊, 汉] / LU Guo-dong, ZHOU Qiang-tai (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), CHENG Lin, TIAN Mao-cheng (School of Energy & Power Engineering under the Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 478 ~ 480

A new method is proposed for calculating the temperature distribution along the fin height (i.e., along the fin-root to fin-end direction) of an annular finned tube with a trapezoidal cross-section. Measurement results indicate that the proposed calculation method features a fairly high precision. Meanwhile, a non-uniform distribution of temperature was identified along the fin-width direction (namely, along the fin thickness direction), which is of major reference value for the structure optimization of annular fins. **Key words:** finned tube, temperature field, heat transfer characteristics, structure optimization

高温鼓泡流化床的流化行为 = Fluidization Behavior of a High-temperature Bubbling Fluidized Bed [刊, 汉] / GUO Qing-jie, LU Jun-fu, WANG Xin, et al (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 481 ~ 484

With the bed temperature ranging from 20 - 1000 °C and coal ash of four kinds of particle diameter serving as experimental materials the variation relationship of the following parameters is investigated under various apparent gas speeds. The parameters include: the minimum fluidization speed, bed average voidage, pressure fluctuation standard deviation and main frequencies. The minimum fluidization speed will decrease with a rise in bed temperature. Under the same bed temperature the average voidage will increase with a rise in apparent gas speed. Under different temperatures the pressure fluctuation deviation will experience an increase with an increase in fluidization number. Under the same fluidization number the influence exerted by a change in bed temperature on pressure fluctuation standard deviation of B particles is insignificant, while for particles of D category the pressure fluctuation standard deviation will decrease with a rise in bed temperature. An increase in fluidization number will lead to a decrease in the main frequency of pressure fluctuations. **Key words:** fluidized bed, high temperature, minimum fluidization speed, pressure fluctuation deviation

一维管道汽液两相流动的小波数值瞬态计算 = Transient Calculation by a Wavelet Numerical Method for a One-dimensional Piping of Vapor-liquid Two-phase Flows [刊, 汉] / SHANG Zhi, YANG Rui-chang (Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17