

流化床锅炉燃烧室的流体动力学模拟

阎维平 (华北电力学院)

〔摘要〕 流化床的放大效应十分显著,使得流化床的试验研究在大型工业流化床设计中的应用发生问题。近年来在国外发展起来的流化床模拟放大技术是从流态化现象的基本控制方程出发,根据相似原理导出一组无量纲相似准则数。这些准则数建立了不同条件下(结构尺寸、温度、压力和床料特性等)的流化性能间相似的内在关系,对流化床的试验研究及设计实践有重要的指导意义及应用前景。

关键词 流化床 模拟放大 流体动力学 沸腾锅炉

人注目的应用前景。

一、概述

成功地设计流化床锅炉的关键是对在设计条件下流化床的流体力学特性的全面了解,从而选择可靠的设计数据。但目前对大型高温或高压的操作条件方面的资料还相当缺乏,在实验室中所能进行的多为常温常压的小型装置,因而存在着工程放大问题。其主要是由于流态化现象比较复杂,流化床的直径放大后,床内气泡动力特性、传质传热规律都将发生很大的变化,从而影响到床内传热及反应的结果。由于大型床与操作条件相同的小型床相比,气固接触恶化,传热率及反应速度明显下降(这种现象称为放大效应),因此,迄今为止人们尚不敢直接应用实验室得到的数据来建立工业装置。

为了实现可靠的工程放大,往往要建立一系列不同规模的试验装置,因而耗资费时。故有必要寻求一种技术,将小规模常温常压下所得的详细研究结果,可靠地推广到大型的高温高压的工业流化装置的设计上。此即近十几年来发展起来的流化床模拟放大技术,它正在受到日益广泛的重视,呈现出引

二、模拟放大的基本原理

模拟放大,又分为数学模拟及物理模拟。前者是从原理上建立数学模型,采用小型试验的结果,通过数学模型的计算,获得大型装置的参数。但因为对复杂的流化现象的了解还相当肤浅,不可能对简化的数学模型的可靠性寄予多大的期望,而且在许多情况下尚无法求解,所以,全凭数学模型放大目前尚不可能。物理模拟是从流化的两相控制方程出发,导出控制流化床气固动力特性的无量纲准则数。根据基本相似定律,要使同一微分方程组描述的不同状态下的流化现象彼此相似,则必定具有数值相同的准则数。尽管这一方法还不足以完善到工程应用的程度,但它能够对实践起到指导作用,且已远远超过数学模拟的能力。

三、控制方程及相似准则数

在流态化下,可对颗粒及气体分别建立各自的运动方程,以描述颗粒及气体在运动

中所受的力和动量与流动参数之间的关系^[1]。假定气体不可压缩, 不计颗粒的作用力(包括碰撞力及静电力), 且认为床层空隙率 ε 仅是床内位置的函数, 对气体用向量表示的运动方程可写为:

$$\rho\varepsilon\left[\frac{\partial\vec{u}}{\partial t} + \vec{u}\cdot\text{grad}\vec{u}\right] + \vec{i}\rho g\varepsilon + \text{grad}p + \beta(\vec{u} - \vec{v}) = 0,$$

式中, \vec{u} , \vec{v} 分别为气体及颗粒的速度向量, \vec{i} 是垂直方向上的单位向量。

可见, 与单相流体运动方程相比, 一个主要的区别是左侧最后一项, 此项考虑了气体与颗粒间的粘性阻力, 其值与相对速度成比例, β 不为常数, 以体现流动状态对阻力的影响。

颗粒的运动方程可写为:

$$\rho_s(1-\varepsilon)\left[\frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + \vec{v}\cdot\text{grad}\vec{v}\right] + \vec{i}\rho_s g(1-\varepsilon) - \beta(\vec{u} - \vec{v}) = 0.$$

这里假定了颗粒质量的连续性, 且不计压力梯度, 阻力方向与气体受力方向相反。

在鼓泡流化态下, 由于 ε 在床内各处均不相同, 尚不可能得到 ε 随位置变化的函数关系式, 所以上述方程无法求解。但是, 通过对控制方程的无量纲化处理, 则可以得到一组有用的相似准则数^[2]。

首先定义下列无量纲量:

$$\text{无量纲速度} \quad \vec{v} = \frac{\vec{v}}{U}, \quad \vec{u}' = \frac{\vec{u}}{U}$$

$$\text{无量纲梯度} \quad \nabla' = d_p \nabla,$$

$$\text{无量纲时间} \quad t' = \frac{U}{d_p} t,$$

其中, U 为空截面流化速度; d_p 为颗粒平均直径。带入以上控制方程中可得到以下一组相似准则数:

$$\frac{\beta d_p}{\rho_s U}, \quad \frac{U^2}{g d_p}, \quad \frac{\rho}{\rho_s}.$$

第一个准则数中的 β 不能独立确定, 它与床内颗粒间气流流动状态有关^[3]。在层流情况下气体的粘性起主要作用, 因而 $\frac{\beta d_p}{\rho_s U}$

仅为 $\frac{\rho_s U d_p}{\mu}$ 的函数; 而在湍流情况下, 惯性

力占主导作用, 因此 $\frac{\beta d_p}{\rho_s U}$ 为 $\frac{\rho}{\rho_s}$ 的函数; 但

在大多数情况下, 气流流动则处于过渡区,

应同时考虑 $\frac{\rho_s U d_p}{\mu}$ 及 $\frac{\rho}{\rho_s}$ 。所以大多数研究者

导出的相似准则数为:

$$\frac{\rho_s U d_p}{\mu}, \quad \frac{U^2}{g d_p}, \quad \frac{\rho}{\rho_s}.$$

将前两个准则重新组合还可得到一个不包括 U 的准则, 因而也有人将相似准则写为:

$$\frac{\rho_s^2 d_p^3 g}{\mu^2}, \quad \frac{U^2}{g d_p}, \quad \frac{\rho}{\rho_s}.$$

另外包括几何相似准则:

$$H/d_p, \quad D/d_p, \quad \text{内部构件}.$$

当床料性质不同时, 还应考虑形状系数及无量纲粒度分布的相似。

四、基本模拟放大策略

1. 首先对待设计的工业流化床设备的主要特征有一粗略的估计, 如: 操作温度、压力、颗粒特性、结构特征及内部构件。

2. 小型冷态试验的基本条件, 主要是确定拟采用的流化介质及系统的压力变化范围。

3. 由两装置必须具有相同数准则数的相似原理出发, 首先确定小型床中所用颗粒的密度, 其值应满足下式:

$$\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)_t = \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)_i$$

式中, t 与 i 分别表示小型试验台及大型工业装置。

一般情况下,为了得到试验室可资利用的颗粒密度,往往需要变化系统压力,甚至流化介质。然后可确定流化床几何尺寸的放大系数,由下列准则关系式:

$$\left(\frac{\rho_s U d_p}{\mu}\right)_t = \left(\frac{\rho_s U d_p}{\mu}\right)_i,$$

$$\left(\frac{U^2}{g d_p}\right)_t = \left(\frac{U^2}{g d_p}\right)_i \text{ 及}$$

$$\left(\frac{D}{d_p}\right)_t = \left(\frac{D}{d_p}\right)_i,$$

可得: $D_t = D_i \left(\frac{\rho_i \mu_t}{\rho_t \mu_i}\right)^{2/3} = D_i / N$,

式中, $N = D_i / D_t$ 为放大系数。

由放大系数 N 可确定试验台的其它参数:

流化速度 $U_t = U_i / \sqrt{N}$,

颗粒粒径 $d_{p,t} = d_{p,i} / N$,

床层深度 $H_t = H_i / N$ 。

可见,所有的几何尺寸都应相似,满足放大系数的要求,包括接管直径,布风板的各个尺寸。

五、模拟放大的实验验证

为证明这些相似准则对流化床的放大是正确可靠的,许多研究者从流化的气固动力特性的角度对模拟放大原理进行了大量的实验验证。理论上,满足相似准则的两床应当在无量纲位置上及在无量纲时间下具有相同的无量纲气体速度场、颗粒运动速度场以及无量纲压力场。但由于流化现象的复杂性,因而无法做详细的测量,一般只能对气泡动力特性及床压力波动性态加以实验比较,内容包括:床表面处的无量纲气泡尺寸、无量纲气泡频率及无量纲压力波动幅度。

Newby^[1]对放大系数为2的两个满足相似准则的床进行了比较。大床(360×150mm)为常温常压,床料为 $d_p = 200\mu\text{m}$ 的玻璃珠,

小床(180×75mm)为常温,但维持3个大气压,床料为 $d_p = 100\mu\text{m}$ 的铜粉,测定结果发现上述内容吻合良好。

Fitzgerald^[5]还进行了放大系数高达10的实验,大床为空气流化的膨化聚乙稀颗粒,小床为水流化的钨颗粒流化床,也得到相吻合的结果。

Glicksman^[6]做了更详细的实验研究。他将一燃煤流化床(0.61×0.61m)与1/4尺寸的冷态床做了实验比较,热态床料为 $d_p = 677\mu\text{m}$ 的石英砂,床温为1050K,冷床采用 $d_p = 170\mu\text{m}$ 的铁砂,同时还对另一几何相似但采用与热床相同床料的1/4冷态床做了对照。结果表明,同时满足全部相似准则的两床的流化性能,而且吻合得很好,而与满足几何相似的两床的性质则相差甚远。

实验研究表明,流化床的操作参数(温度、压力)对放大效应的影响最为显著。用几何相似的小型冷态床及高密度小粒度的颗粒完全可以模拟大尺寸热床,而在几何相似的冷态床中采用相同特性的颗粒则完全不能模拟高温状态下的流化特性。目前大多数冷态试验结果均是采用与热态装置相同的颗粒得到的。因此直接应用这些结果是有疑问的,实践也证明了这一点。

六、存在的问题

模拟放大还存在许多有待解决的问题。例如,控制方程的建立中还无法考虑颗粒间的作用力,所以在模拟大型床时,冷态床的尺寸要足够地大,以使得所要求的颗粒尺寸及密度不至很小,同时必须考虑颗粒间的作用力。另外,粒度分布及颗粒形状的影响作用还不清楚。目前将模拟放大技术应用于设计工业装置,特别是流化床燃烧,还有相当大的差距,但已积累了一定的经验,对试验研究工作有重要的指导意义。今后应加强基础研究,进一步查明其规律,并用大装置的

数据加以验证,流化床的放大技术终将为人
们所切实掌握。

参 考 文 献

- (1) Jackson R. Fluidization. New York, 1971
 (2) Glicksman L R. Scaling relationships for
 fluidized beds. Chemical engineering
 science, 1984, 39(9)
 (3) 阎维平, Botterill J S M. 温度对最小流化速
 度影响的试验研究. 华北电力学院学报, 1989, (1)

- (4) Newby R A, Keairns D L. Test of scaling
 relationships for fluid-bed dynamics.
 Fluidization V, 1986
 (5) Fitzgerald T J. Fluidization. 2nd ed.
 London, 1985
 (6) Nicastr M T, Glicksman L R. Experim-
 ental verification of scaling relationships
 for fluidized bed. Chemical engineering
 science, 1984, 39(9)

(孙显辉 编辑)

Hydrodynamic Simulation of Fluidized bed Boiler Furnaces

Yan Weiping

(North China Electrical Engineering Institute)

Abstract

The significant amplification effect of a fluidized bed leads to some problems during the application of experimental study results of fluidized beds to the design of large-sized industrial fluidized beds. Based on the basic control equation of fluidization phenomenon, the fluidized bed simulation amplification techniques currently developed in some foreign countries have deduced a group of non-dimensional analog criteria functions by way of analog theory. These criteria functions have established the inner analog relationship between fluidization properties under various conditions (structural dimensions, temperature, pressure and bed medium characteristics, etc.) which may play a significant guiding role during the experimental study and design of fluidized beds and have created good prospects for practical applications.

Key words: fluidized bed, simulation amplification, hydrodynamics