

低频脉冲流化床压力波动的模拟计算*

聂永生 刘大有

(中国科学院力学研究所 北京 100030)

摘 要 当脉冲频率较低时, 将脉冲流化床的通气阶段视为平稳流化, 将停气阶段视为床层塌落过程, 提出了一个用于计算脉冲流化床压力波动的数学模型。利用压力传感器测量了不同操作条件下的脉冲流化床壁面上几个点的压力变化 $p(t)$, 当脉冲频率较低时 (对于本文所用物料, 频率 $f \leq 10$ Hz), 模型计算结果和实验结果相当吻合。

关键词 脉冲流化床, 压力波动, 模拟, 床层塌落

中图分类号 TQ 051.1

1 前 言

气固流化床中, 往往由于存在气流短路而造成气固接触效率低, 流化质量差, 因此, 流化床中的气固接触效率多年来一直是人们关注和研究的热点问题。人们采取了各种措施来强化流化床中的气固接触, 例如特殊设计的分布板、多段床、加入挡板或填料以及引入强制扰动和振荡等。其中, 引入强制扰动和振荡的方式主要包括振动流化床和脉冲流化床^[1]。

振动流化床是利用机械装置振动整个床体或分布板, 从而带动床内颗粒跳动; 脉冲流化床则是将传统流化床流量稳定的进气改为流量周期性波动的脉冲气流。

振动流化床设备复杂, 而且对于某些工艺上不允许或不便于振动的流化装置, 它的应用受到了限制, 因此将脉冲流化床应用于工业生产具有重要的实际意义。

据文献报道^[2-4], 在引入气流强制振荡的脉冲流化床中, 沟流和短路减少, 气泡变小, 气泡发生频率降低, 气体和固体颗粒及构件表面间的传热、传质效率大为提高, 而且可以处理的颗粒粒径范围变宽, 在通常条件下难以流化的体系也变得较易流化。

近年来, 人们对于振动流化床进行了广泛的研究^[5], 而对于脉冲流化床的研究报道却相对较少, 对于脉冲流化床的流体力学特性还知之甚少。

本文提出一个用于计算脉冲流化床中瞬时压力分布的数学模型, 并与实验测量结果比较。

2 数学模型

脉冲流化床的进气方式有两种: 一种是只有一股脉冲气流进入床层, 另一种是将一股流量稳定的气流和一股脉冲气流叠加作为流化床的进气 (对于后一种操作方式, 本文的讨论仅限于稳定气流流量小于起始流化风速的情况)。

就脉冲气流而言, 脉冲流化床的每个脉动周期包括通气和停气两个阶段, 参见图 1。

* 中国科学院化工冶金研究所多相反应开放实验室资助课题

收稿日期: 1997-08-25, 修回日期: 1998-02-23

聂永生: 男, 28 岁, 博士研究生, 化学工程及流体力学专业

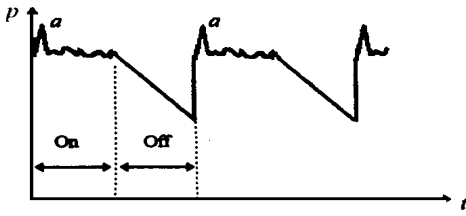


图 1 脉冲流化床床层压力波动示意图

Fig. 1 Illustration of the pressure variation in the pulsed fluidized bed

在通气阶段,开始时床层处于加速运动状态,此时床层压力会很快升高,而且大于平稳流化时的床层压力,压力升高到一个极值后(图1中的a点),又会降低,此后不久床层基本上处于平稳流化状态。由于气泡的存在,床层压力会有波动,但床层压降的平均值等于单位床层截面积上的颗粒质量。加速运动过程时间的长短与颗粒和气体的物性以及流化床结构等因素有关。当脉冲频率较低,即通气阶段的时间较长时,加速运动过程的时间相对较短,作为一种近似,我们把

通气阶段看成是平稳流化状态。脉冲流化床的停气阶段实质上是一个突然停气后的流化床的床层塌落过程(如果是上述后一种操作方式,它与塌落过程的差别在于停气后气体流量不为零,而是有一股稳定气流存在)。在停气阶段,床层高度和床层压力都逐渐降低,如果停气阶段时间很长,床层高度可以降低到静止床高,床层压力也会降低到零。但一般情况下,在床层压力降低到零之前,就又进入了下一个通气阶段,床层压力又会迅速升高,并重复上述过程。图1中给出的是分布板附近的床层压力变化情况,对于床层其它位置,停气阶段压力变化曲线的形状有所不同。

下面对停气阶段和通气阶段分别进行讨论

2.1 停气阶段

脉冲流化床的停气阶段相当于一个床层塌落过程,当 $t=0$ 时突然切断流化床的气源,床层高度将呈现如图2所示的随时间的变化。首先是由于气泡迅速上升通过床层,引起床层高度迅速降低的气泡逸出阶段($0 < t < t_{cr}$),在这一阶段,床层上部含有气泡,其下部是无气泡的均匀流化状态,其中的参数与鼓泡前乳化相的参数基本相同,床层底部是沉积下来的颗粒形成的密实相。在 $t=t_{cr}$ 时,气泡全部逸出,然后乳化相中的气体进一步逸出,使得床层高度继续降低,颗粒的继续沉积使床层底部的密实相升高($t_{cr} < t < t_{end}$)。在 $t=t_{end}$ 时,气体全部逸出,塌落过程完成(严格地讲,由于密实相的进一步压实,床层高度还会稍有降低,直到在 $t=t_{\infty}$ 时达到最终高度)。

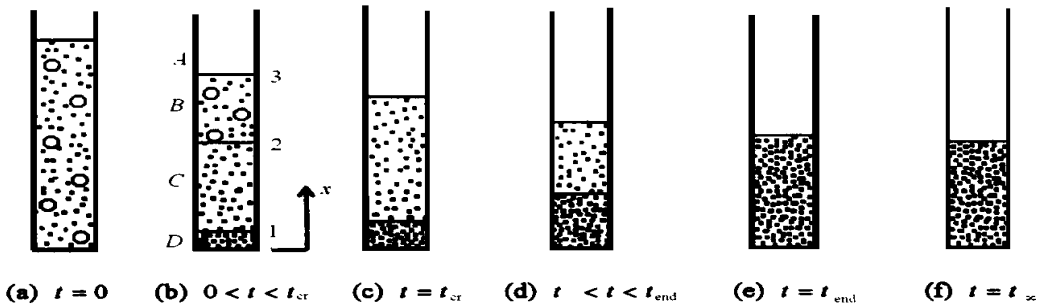


图 2 流化床塌落过程示意图

Fig. 2 The collapsing process of a bubbling fluidized bed

将塌落过程中的流化床划分成如图2(b)所示的4个区域:

- A 区: 床层料面以上的区域;
- B 区: 包含有气泡的区域, 气泡以外是乳化相和气泡尾部的尾迹;
- C 区: 不包含气泡的乳化相;
- D 区: 沉积下来的颗粒形成的密实相

将相邻两区的界面分别称为界面 1, 2 和 3, 其位置分别为 x_{s1} , x_{s2} 和 x_{s3} 假设:

- (1) 处于流化状态的床层由气泡相、乳化相和尾迹构成, 气泡中不包含颗粒;
- (2) 颗粒粒径均匀;
- (3) 在任意时刻, B 区中气泡所占分率为 α_b , 尾迹所占分率为 α_w ; 尾迹中的颗粒速度等于气泡上升速度; 在气泡尾迹及乳化相中, 颗粒所占分率均为 α_f ;
- (4) 气泡分率 α_b 和气泡平均速度 u_b 为常数 (不沿床高变化);
- (5) 不考虑密实相的进一步压实过程, 密实相中颗粒分率为 α ;
- (6) 对只有脉冲气流存在的脉冲流化床停气阶段, 不考虑停气后气室中气体进一步逸出;
- (7) 气体的密度取为常数

2.1.1 界面位置变化

利用 3 个界面上的固相连续性关系, 可以得到停气阶段床层塌落过程中 3 个界面的位置随时间的变化

当 $t < t_{cr}$ 时
$$x_{s1} = \frac{[(1 - \alpha_f) u_t - u_{g,s}] \alpha_f t}{\alpha - \alpha_f} \quad (1)$$

$$x_{s2} = u_b t - (1 - \alpha_f) \left(1 + \frac{\alpha_w}{\alpha_b} \right) u_t t \quad (2)$$

$$x_{s3} = H_0 - \frac{[\alpha_b u_b - u_{g,s} + (1 - \alpha_b - \alpha_w) (1 - \alpha_f) u_t] t}{1 - \alpha_b} \quad (3)$$

当 $t > t_{cr}$ 时
$$x_{s2} = H_0 (1 - \alpha_b) - (1 - \alpha_f) u_t t + u_{g,s} t \quad (4)$$

$$x_{s3} = H_0 - \frac{[\alpha_b u_b - u_{g,s} + (1 - \alpha_b - \alpha_w) (1 - \alpha_f) u_t] t}{1 - \alpha_b} \quad (5)$$

式 (1) ~ (5) 中, $u_{g,s}$ 为稳定气流的速度, 若只有脉冲气流存在, 则 $u_{g,s} = 0$

图 3 是塌落过程中 3 个界面位置随时间变化的典型曲线, 其中, $mpqs$ 是界面 3 的位置变化, $opqs$ 是界面 2 的位置变化, oqs 是界面 1 的位置变化

2.1.2 压力分布

下面推导塌落过程中距床底高度为 x 处的水平截面上的压力随时间 t 的变化, 由气固两相的运动方程可以得到

对于密实相以上处于流化状态的区域 (B 区和 C 区)

$$\frac{dp}{dx} = - (1 - \epsilon) \rho_p g \quad (6)$$

其中, ϵ 为床层平均空隙率 (如果有气泡存在, 则是包括气泡和乳化相在内的平均值).

对于处于密实相中的区域 (D 区)

$$\frac{dp}{dx} = - K u_{g,s} \quad (7)$$

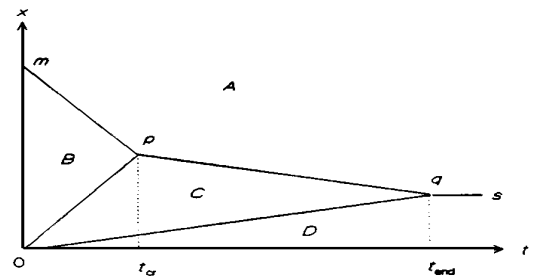


图 3 3 个界面位置随时间变化的典型曲线
Fig. 3 Typical plot of variation of the location of the three interfaces with time

其中 $K = \frac{180\mu_g\alpha^2}{d_p^2(1-\alpha)^3}$, μ_g 为气体黏性系数

将式 (6), (7) 从位置 x 到床面积分, 就可以计算出距床底高度为 x 处的水平截面上的压力 (文中以相对压力表示).

当 $t < t_{cr}$ 时

$$\frac{p(t,x)}{\alpha_p \rho_p g} = \begin{cases} 0 & (x > x_{s3}) \\ (H_0 - x)(1 - \alpha_b) + (u_{g,s} - \alpha_b u_b)t - (1 - \alpha_b - \alpha_w)(1 - \alpha_p)u_t t & (x_{s2} < x \leq x_{s3}) \\ H_0(1 - \alpha_b) - (1 - \alpha_p)u_t t + u_{g,s}t - x & (x_{s1} < x \leq x_{s2}) \\ H_0(1 - \alpha_b) - \frac{[(1 - \alpha_p)u_t - u_{g,s}](\alpha_p \rho_p g - K u_{g,s})\alpha_p t + K u_{g,s} x (\alpha - \alpha_p)}{(\alpha - \alpha_p)\alpha_p \rho_p g} & (0 \leq x \leq x_{s1}) \end{cases} \quad (8)$$

当 $t \geq t_{cr}$ 时

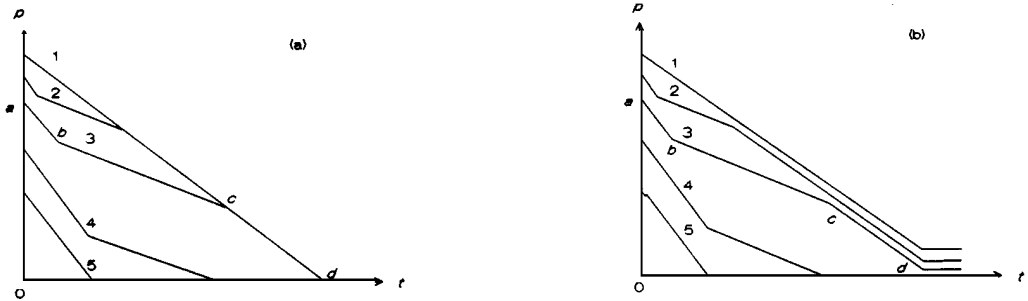
$$\frac{p(t,x)}{\alpha_p \rho_p g} = \begin{cases} 0 & (x > x_{s2}) \\ H_0(1 - \alpha_b) - (1 - \alpha_p)u_t t + u_{g,s}t - x & (x_{s1} < x \leq x_{s2}) \\ H_0(1 - \alpha_b) - \frac{[(1 - \alpha_p)u_t - u_{g,s}](\alpha_p \rho_p g - K u_{g,s})\alpha_p t + K u_{g,s} x (\alpha - \alpha_p)}{(\alpha - \alpha_p)\alpha_p \rho_p g} & (0 \leq x \leq x_{s1}) \end{cases} \quad (9)$$

模型中的 α 可通过测量静床高 H_s 和称重的方法求得, H_0 可在塌落前测得. 所以模型中有 $\alpha_b, \alpha_w, u_b, \alpha_p, u_t$ 共 5 个未知参数, 其中只有 4 个是独立的, 因为

$$H_0(1 - \alpha_b)\alpha_p = H_s\alpha \quad (10)$$

若已知这些参数, 利用式 (8) 和 (9) 便可以计算塌落过程中床层内的压力分布 $p(t, x)$.

图 4 是按式 (8) 和 (9) 绘制的塌落过程中床层不同位置的压力随时间变化的典型曲线. 可以看到, 在压力变化曲线上出现了 3 种不同斜率的直线段 (图中的 ab, bc, cd 段), 不同位置的压力变化曲线之间, 对应的直线段分别互相平行. 当 $u_{g,s} = 0$ 时, 各变化曲线中的 cd 段互相重合 [见图 4 (a)]; 当 $u_{g,s} \neq 0$ 时, 各变化曲线中的 cd 段不重合 [见图 4 (b)].



1. $x = 0$ 2. $x = x_1$ 3. $x = x_2$ 4. $x = x_3$ 5. $x = x_4$, $x_4 > x_3 > x_2 > x_1 > 0$

图 4 塌落过程中床层不同位置压力随时间变化的典型曲线

Fig. 4 Plot of $p(t)$ at different location during collapse

上述模型应用于流化床塌落过程的计算, 已得到了与实验测量相当吻合的结果^[6]. 本文将它应用于脉冲流化床, 利用式 (8) 和 (9) 计算脉冲流化床停气阶段的压力变化 (计算时把停气的瞬时取为 $t = 0$).

2.2 通气阶段

如前所述, 在脉冲流化床的通气阶段, 要经历一个平稳流化状态的建立过程. 当脉冲频率降低时, 这个过程所需时间相对较短, 可以忽略平稳流化状态的建立过程, 近似认为在通

气阶段床层始终处于平稳流化状态, 床层高度始终为 H_0 , 并且忽略由于气泡存在造成的床层压力的随机波动, 认为床层压力是平稳的, 并用下式计算距床底 x 处的压力

$$p(x) = (H_0 - x)(1 - \alpha_b) \alpha_b \rho_p g \quad (11)$$

式 (8), (9), (11) 便是计算脉冲流化床压力波动的数学模型。通气阶段的压力分布由式 (11) 计算, 停气阶段的压力分布和变化由式 (8), (9) 计算

3 实验

图 5 是进行脉冲流化实验的装置图。有机玻璃流化床的内径为 70mm, 高 870mm, 分布板孔径为 0.5mm, 开孔率为 1.8%, 分布板上覆盖一层 300 目的筛网, 下部气室中装填细玻璃珠, 以使气体分布均匀

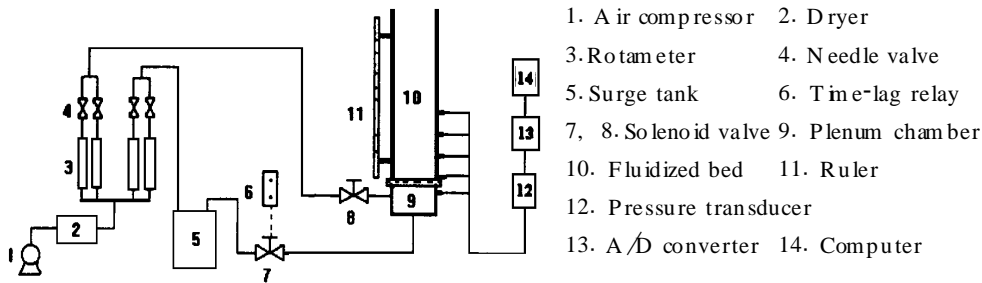


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 The schematic diagram of the experimental apparatus

用转子流量计来控制脉冲气流的平均流量, 通过电磁阀的开闭使其脉动, 用时间继电器调整脉冲气流的频率和脉宽。采用 5 个微压传感器同时测量流化床气室及床层不同位置处的压力, 测得的压力信号经放大和 A/D 转换, 由计算机采集处理。采样频率为 100 Hz。

实验所用气体为空气, 固体物料为 FCC 颗粒, $\rho_p = 1.598 \text{ kg/m}^3$, $d_p = 70 \mu\text{m}$ 。

4 结果与讨论

对于一定操作条件下的流化床, 通过测量塌落过程中的压力变化^[6]或通过其它实验手段得到 α_b , α_s , u_b , u_t , α_w 等参数后, 利用式 (8), (9), (11) 便可以对脉冲流化床的瞬时床层压力进行模拟计算。

实验测量了不同频率和脉宽的脉冲气流作用下的脉冲流化床的床层压力分布和变化, 并考察了有稳定气流和无稳定气流两种情况。图 6 是对不同操作条件的脉冲流化床进行模拟计算的结果以及与实验测量结果所作的比较。可以看出, 当脉冲频率较低时, 不论是否有稳定气流存在, 计算结果与测量结果都相当吻合。

从图 6 (a) 和 6 (b) 可以看出, 正如图 4 所示, 在停气阶段, 分布板附近的压力变化曲线为一直线, 在分布板上 10cm 处的压力变化曲线上有分别与图 4 中的 bc 和 cd 相对应的两段直线, 因为塌落过程中气泡逸出阶段时间很短, 所以与图 4 中 ab 段对应的直线很不明显。

对于不同的脉宽, 模型计算结果与实验测量结果都较为符合 [见图 6 (b), 6 (c), 6 (d)], 直到脉冲频率 $f = 1.0 \text{ Hz}$, 模型计算结果都是令人满意的 [见图 6 (e)], 但当频率较

高时, 模型计算的结果存在较大的偏差 [见图 6 (f)] 所以, 对于本实验所用颗粒来说, 模型的适用范围为脉冲频率 $f < 1.0\text{Hz}$ 这个适用范围与颗粒和气体物性以及流化床结构等因素都有关

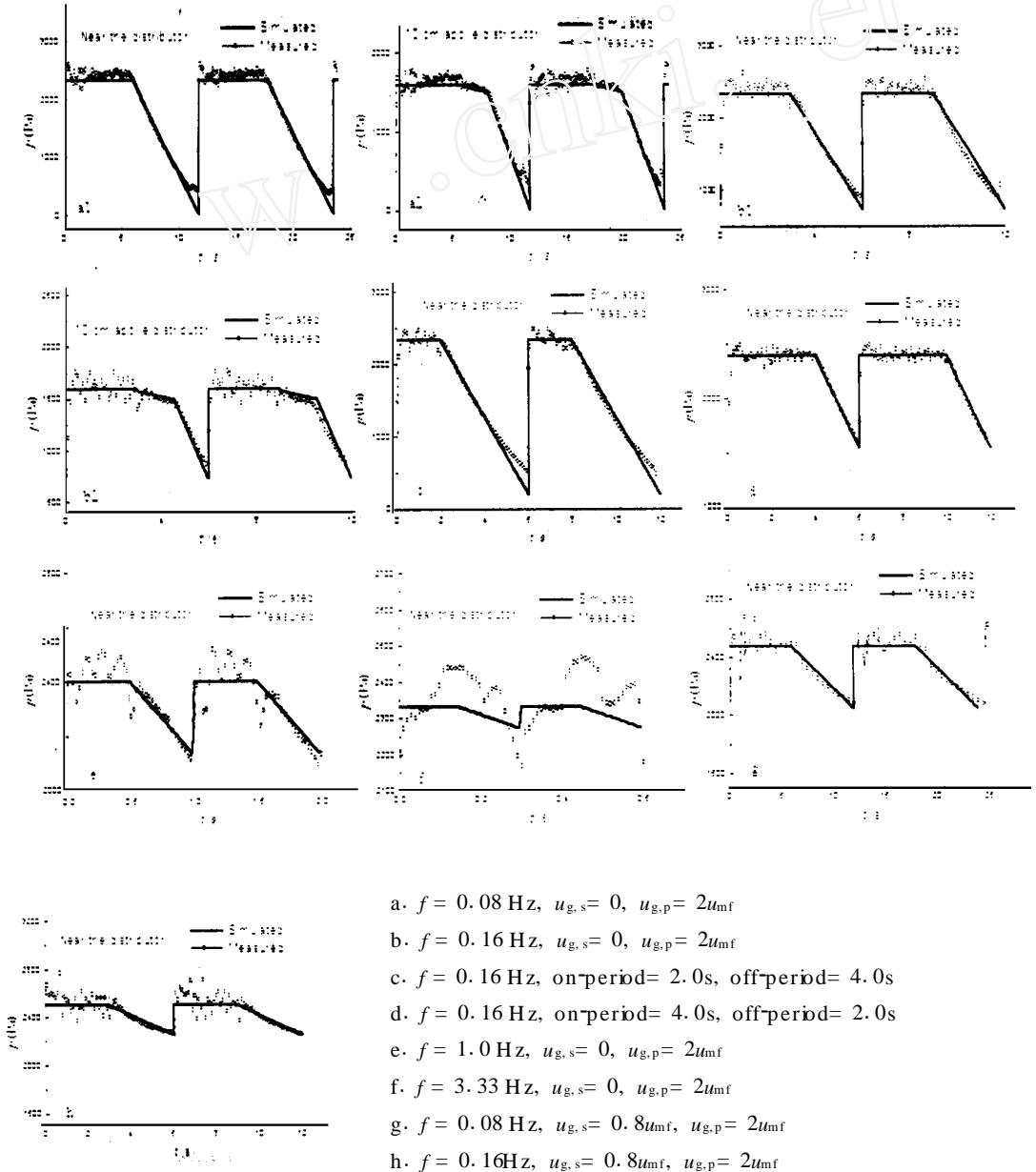


图 6 不同操作条件下脉动流化床的压力波动

Fig. 6 The pressure variation of the pulsed fluidized bed under different conditions

从图 6 还可以看出, 当有稳定气流存在时, 停气阶段的压力降低要慢得多 [见图 6 (g), 6 (h)] 由此可见, 对于频率较低的脉动流化床, 可将通气阶段视为平稳流化, 将停气阶段视为塌落过程, 利用式 (8), (9), (11) 计算其压力波动 当脉冲频率较高时, 平稳流化状

态建立过程的影响变得显著, 本文中“忽略平稳流化状态的建立过程, 认为在通气阶段床层始终处于平稳流化状态”的假设不再成立, 所以本文模型也不再适用

5 结 论

当脉冲频率较低时, 将脉冲流化床的通气阶段视为平稳流化, 将停气阶段视为床层塌落过程, 通过对床层塌落过程的动力学分析, 提出了一个计算塌落过程中床层压力变化的数学模型, 得到了塌落过程中压力的时空分布, 并将其应用于脉冲流化床压力波动的模拟计算。当脉冲频率较低时, 对不同操作条件下脉冲流化床床层压力变化和分布的计算结果和实验结果都相当吻合。

符 号 表

f	脉冲频率(Hz)	H_0	起始床高(m)	H_s	静床高(m)	p	压力(Pa)
t_{cr}	气泡全部逸出的临界时间(s)	t_{end}	塌落完成的时间(s)	u_b	气泡上升速度(m/s)	u_{g0}	表观气速(m/s)
$u_{g,p}$	脉冲气流速度(m/s)	$u_{g,s}$	稳定气流速度(m/s)	u_{mf}	起始流化速度(m/s)	u_p	颗粒绝对速度(m/s)
u_t	颗粒沉降速度(m/s)	x	位置坐标(m)	α_b	气泡分率	α_p	密相中的颗粒分率
α	尾迹分率	α	密实相中的颗粒分率	β_p	颗粒密度(kg/m ³)	μ_g	气体黏度系数(Pa·s)

参 考 文 献

- 1 Baird M. H. I. Vibrations and Pulsations. British Chem. Eng., 1966, 11 (1): 20
- 2 Wong H. W., Baird M. H. I. Fluidisation in a Pulsed Gas Flow. Chem. Eng. J., 1971, (2): 104
- 3 Kobayashi M., Ramaswami D., Brazelton W. T. Heat Transfer from an Internal Surface to a Pulsed Bed. Chem. Eng. Prog. Sym. Ser., 1970, 66 (105): 58
- 4 严建华, 岑可法等. 脉冲流化床的机理及燃烧试验研究. 浙江大学学报, 1986, 20 (6): 123
- 5 Gupta R., Mujumdar A. S. Aerodynamic and Thermal Characteristics of Vibrated Fluid Beds—A Review, Drying'80 Vol. 1. Mujumdar A. S. Ed. N. Y.: Hemisphere Pub. Co., 1980. 141-150
- 6 Nie Yongsheng, Liu Dayou. Dynamics of Collapsing Fluidized Beds, Multiphase Fluid, Non-Newtonian Fluid and Physico-chemical Fluid Flows. Zhou L. X., Li X. F. Eds. Beijing: International Academic Publishers, 1997. 2-35

SIMULATION OF THE PRESSURE VARIATION IN PULSED FLUIDIZED BEDS

NIE Yongsheng LIU Dayou

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

ABSTRACT When the pulse frequency is low, a pulsed fluidized bed may be regarded as a combination of a period of steady fluidization (on-period) and a collapsing process (off-period). A model was proposed to describe the pressure variation in pulsed beds based on dynamic analysis of the collapsing process. The pressure variations at different locations of the pulsed fluidized bed operated at different conditions were measured with pressure transducers and simulated by the proposed model. The simulated results were in good agreement with the measurements when the pulse frequency was low.

KEY WORDS Pulsed fluidized bed, Pressure variation, Model, Bed collapse