

液固脉冲流化床数值模拟和实验研究¹⁾

晋国栋 聂永生 刘大有

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 对液固脉冲流化过程进行了数值模拟和实验研究。采用双流体模型和推广的 Slis 模型模拟了脉冲流化过程。比较了两种模型的联系与差异, 得到脉冲流化过程中颗粒速度和浓度分布、压强分布和床高, 以及它们随时间的变化, 同时得到了脉冲流化过程中 Slis 波的传播规律。使用压力传感器测量了不同床高处压力随时间的变化, 用数字摄像机记录了床面及颗粒浓度分布随时间的变化过程, 与计算结果具有较好的一致性。

关键词 脉冲流化床, 数值模拟, 实验对比

引言

流态化是固体颗粒在垂直向上流动的流体作用下的流动过程。流态化具有许多优点: 固体物料混合良好; 液固之间的相对速度较大, 传质、传热效率高; 固体物料易于处理等^[1, 2]。流态化技术已经渗透到物质转化、能源利用、环境保护等众多领域。但长期以来, 影响流化床性能的主要因素是由于气泡存在引起气固接触效率降低。人们采用各种方法, 如使用特殊的分布板和挡板等, 来降低气泡影响。许多研究表明引入振动或脉冲送气的方法可以大大提高流态化质量^[3-6]。目前已有了许多关于脉冲流化床的实验研究, 但人们对其理论上的理解还远不够深入。

近年来, 我们开展了脉冲流化床研究, 主要兴趣在于动力学过程与物理机理。如果脉冲频率很低, 可以把整个脉冲流化过程分解为简单膨胀与简单塌落两个独立的、互不影响的过程, 采用两个数学模型分别模拟它们。模拟结果与实验结果有较好的一致性^[7, 8]。但是, 当脉冲频率不太低时, 床层尚未充分膨胀就开始塌落, 尚未充分塌落就开始膨胀, 床内颗粒分布很不均匀, 以前的模型就不适用了。本文采用双流体模型和推广的 Slis 模型来模拟任何频率的脉冲流化过程。

Gera^[9]等用双流体模型(TFM)模拟了大颗粒流化床中的气泡。Tsuo^[10]用双流体模型计算了循环流化床(CFB)中的流型。Felice & Renzo^[11]用双流体模型模拟气、液、固三相系统, 他们把气、液两相作为单一、均匀的流体处理。双流体模型基于把颗粒与流体作为相互渗透的广义连续介质, 已由许多的学者进行了推导^[12-14]。但还没有见到有关用双流体模型模拟脉冲流化过程的文献。

Slis^[15]提出了计算床层简单膨胀与简单塌落过程中床面变化的简化模型, 计算结果与实验符合较好, 但不能用于计算脉冲流化过程。本文通过补充脉冲流化过程中颗粒浓度和颗粒速度的间断关系式来推广 Slis 模型, 可用于脉冲流化过程的计算。

1 双流体模型

我们的数学模型基于以下假设:

- (1) 一维流动;
- (2) 两相都是不可压缩的;
- (3) 所有的颗粒有相同的尺寸;
- (4) 忽略颗粒的无规则运动与碰撞;

1) 中国科学院化工冶金研究所多相反应开放实验室与西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室资助项目

(5) 忽略壁面阻力。

这时，固相与液相的连续性方程与动量方程分别是^[16]

$$\frac{\partial \alpha_p}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_p u_p)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_f u_f)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\rho_p \left(\frac{\partial (\alpha_p u_p)}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_p u_p^2)}{\partial x} \right) = -\alpha_p \frac{\partial p}{\partial x} - \alpha_p \rho_p g + F_p \quad (3)$$

$$\rho_f \left(\frac{\partial (\alpha_f u_f)}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha_f u_f^2)}{\partial x} \right) = -\alpha_f \frac{\partial p}{\partial x} - \alpha_f \rho_f g - F_p \quad (4)$$

$$\alpha_p + \alpha_f = 1 \quad (5)$$

$$F_p = \frac{k \mu_f}{d_p^2} \alpha_p (1 - \alpha_p)^{(1-n)} (u_f - u_p)^{[17]} \quad (6)$$

其中 α_p 和 α_f 分别是固相与液相的体积分率， u_p ， u_f 分别是颗粒与流体的速度， ρ_p ， ρ_f 分别是颗粒与流体的密度， p 是压力， F_p 是单位体积中固相与液相间的相互作用力， μ_f 为流体粘度， d_p 为颗粒直径， k 与 n 为与颗粒雷诺数有关的常数。

边界条件和初始条件表示如下，其中 $h(t)$ 是床层高度， H_{bed} 是液固流化床装置的高度 (1150mm)。

$$x = 0: \quad u_p(t, 0) = 0, \quad \alpha_p(t, 0) = 1 - (U/u_T)^{1/(n+1)} \quad (7)$$

$$x = H: \quad u_p = dh/dt \quad (8)$$

$$x = H_{\text{bed}}: \quad p(t, H_{\text{bed}}) = 0 \quad (9)$$

$$t = 0: \quad \alpha_p(0, x) = \alpha_p^0, \quad u_p(0, x) = 0, \quad h(0) = h^0 \quad (10)$$

求解由方程(1)~(10)组成的方程组可以得到颗粒浓度 $\alpha_p(t, x)$ ，速度 $u_p(t, x)$ 和 $u_f(t, x)$ ，压力 $p(t, x)$ 和床高 $h(t)$ 。

采用有限差分法解方程组。由于液-固两相流区域有一个不断移动的上边界，其上的差分节点使用拉格朗日坐标，内部差分节点使用欧拉坐标。

2 Slis 模型的推广

上节中的双流体模型在数学上是一个非经典的双曲型方程，即方程(1)~(4)组成的方程组的特征根中有两个虚部很小的复根。复特征根的出现，不仅意味着特征方法不适用，一般认为它意味着微分方程的初值问题变得不稳定了。不管用什么方法都会遇到计算不稳定的问题^[16]。我们的计算实践表明，增加空间步长有利于计算的稳定，这是由于随着空间步长的增加，差分格式的数值耗散效应在起稳定作用。但这也给计算带来的误差较大，特别是入口流量变化幅度较大，脉冲频率较高时，数值误差变大。这表现为：(1)脉冲流化过程中形成的间断较实际变厚；(2)脉冲流化过程中颗粒浓度变化幅度沿床高的衰减较实际的为快。为此我们进一步简化双流体模型，即推广 Slis 模型，来求解脉冲流化过程。同时对两种模型的结果进行比较。

首先引入颗粒弛豫时间 τ 和沉降速度 u_T 的定义

$$\tau = \frac{d_p^2 \rho_p}{k \mu_f}, \quad u_T = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) g \tau = \frac{(\rho_p - \rho_f) g d_p^2}{k \mu_f} \quad (11)$$

忽略方程 (3), (4) 中右边的惯性项, 由方程 (6) 得

$$U(t) - u_p(t, x) = u_T [1 - \alpha_p(t, x)]^{(n+1)} \quad (12)$$

把 (12) 代入 (1) 消去 u_p , 得

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \{[(n+1)\alpha_f^n - (n+2)\alpha_f^{n+1}]u_T + U\} \frac{\partial \alpha_f}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

得到与 Slis^[15] 一样的结果。

由于脉冲流化过程中床层中有间断存在, 补充如下的间断速度关系式

$$V_{dis} = \frac{(1 - a_{f,f})u_{p,f} - (1 - a_{f,b})u_{p,b}}{a_{f,b} - a_{f,f}} \quad (14)$$

其中 $a_{f,f}$, $a_{f,b}$ 为间断前、后的流体相体积分率, $u_{p,f}$, $u_{p,b}$ 为间断前、后的颗粒的速度。

由方程 (12), (13), (14) 和边界条件 (7) 就可以求解脉冲流化过程。首先有 (14) 确定某时刻间断的位置, 用特征线法由 (13) 求间断前、后和其他点的颗粒浓度, 由 (12) 确定颗粒速度。

3 实验

图 1 是试验装置示意图。流化床由一个内径 29mm, 高 1150mm 的有机玻璃管组成, 下端有一个多孔的分布板。使用四个压力传感器同时测量了不同高度的压力, 压力信号经放大与 A/D 转换后由计算机采集并处理。使用数字摄像机记录床层表面的变化过程以及床内颗粒浓度的分布。用水做实验介质, 所用颗粒及其性质如表 1 所示。

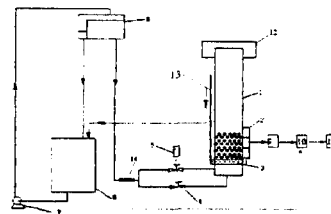


图1 实验装置图

1 流化床; 2 压力传感器; 3 分布板; 4 球形阀;
5 时间继电器与电磁阀; 6 下部水箱; 7 离心泵; 8
上部水箱; 9 放大器; 10 A/D 转换器; 11 计算机;
12 集水器; 13 标尺; 14 流量计

表 1 颗粒的物理性质

颗粒	d_p (mm)	ρ_p (kg/m ³)	u_T (m/s)	n
玻璃珠	1.8	2500	0.20	1.7165

颗粒被脉动的流体流化。进入流化床的流体有两路, 一路为稳定流, 另一路为脉冲流。流量随时间的变化由涡轮流量计计量, 通过 A/D 转换后由计算机采集。脉冲周期、开启半周期与关闭半周期由时间继电器控制电磁阀来实现。

4 结果分析与实验对比

4.1 双流体模型模拟结果与实验对比

当来流速度发生周期性的变化, 而变化的周期小于流化床充分膨胀和塌落的时间时, 即床层尚未充分膨胀就开始塌落, 尚未充分塌落就开始膨胀, 床内颗粒分布很不均匀, 就会发生脉冲流化过程。模拟结果表明, 床层较矮, 脉冲频率较低, 脉冲流化床中高浓度区与低浓度区交替出现, 具体的动力学过程分析, 请参阅[18]。

为了检验数值模拟结果的有效性与否,在图(1)所示的小型流化床模型上进行脉冲流化实验,采用数字摄像机记录了床内颗粒浓度及床面的变化过程(图2,图3),用压力传感器记录了脉冲流化过程中床层内某些点的压力变化过程(图4)。

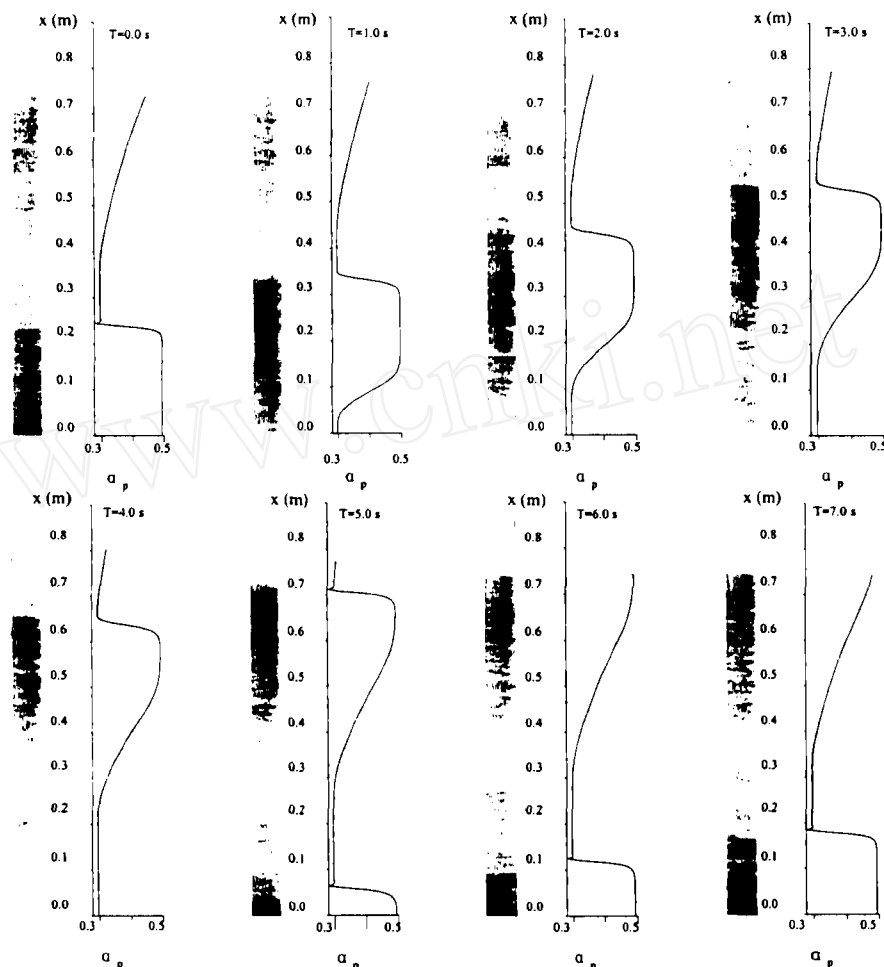


图2 TFM 模拟床内颗粒浓度分布与实验对比图

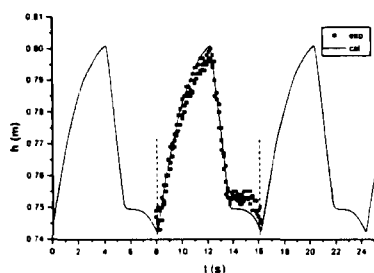


图3 TFM 模拟床高与实验对比图

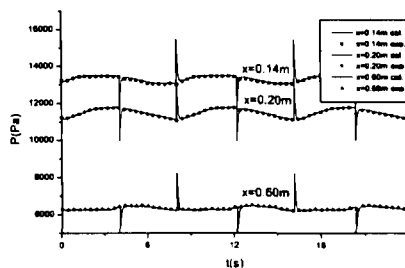


图4 TFM 模拟压力与实验对比图

4.2 双流体模型与推广的 Slis 模型计算结果的比较

双流体模型与推广的 Slis 模型计算结果的比较见图(5),可以看出,用双流体模型算出的结果由于数值耗散作用,衰减明显变快,二者差异显著(图 5(a)).但在床层较矮,波系还没

有相交时，二者的结果还是相近的(图 5(b))。在本算例中， $n=1.3$ ，流量 $U(t)$ 是在 U_1 与 U_2 之间周期变化的方波， $U_1=0.034\text{m/s}$ ， $U_2=0.073\text{s}^{-1}$ ， $u_T=0.172\text{m/s}$ 。由 $\alpha_{p,i}=(U_i/u_T)^{1/(n+1)}$ ($i=1,2$) 求得的 $\alpha_{p,1}=0.493$ ， $\alpha_{p,2}=0.30$ 。采用的周期是开半周期与闭半周期分别为 2s 。

4.3 脉冲流化过程中颗粒浓度变化幅度的衰减规律

当床层较高，频率较高时，由于床内波系的相互作用，沿高度方向二、三个周期以后，颗粒浓度变化的幅度呈二阶负指数方式的衰减(图 5，图 6)

$$A_{\alpha_p} = (0.9A_{\alpha_{p,0}}) \exp\left(-\frac{x-x_0}{a1}\right) + (0.1A_{\alpha_{p,0}}) \exp\left(-\frac{x-x_0}{a2}\right) \quad (15)$$

其中 x_0 是间断与膨胀波开始相交的高度， $A_{\alpha_{p,0}}$ 是颗粒浓度变化的最大幅度， $a1$ ， $a2$ 为衰减系数，其随频率的变化以负指数规律衰减如图(7)所示。其中开半周期为整个周期的50%。

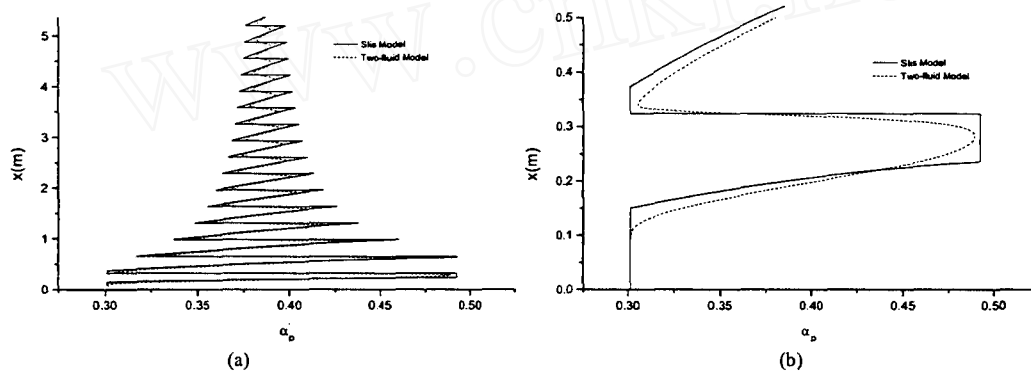


图 5 脉冲流化过程中 Slis 波沿床高衰减

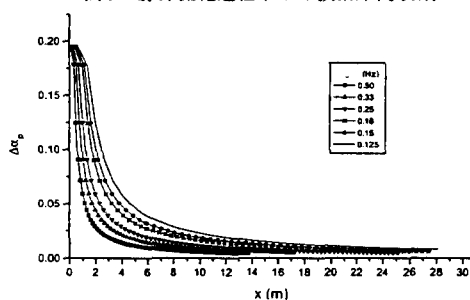


图 6 颗粒浓度变化幅度随床高的变化关系

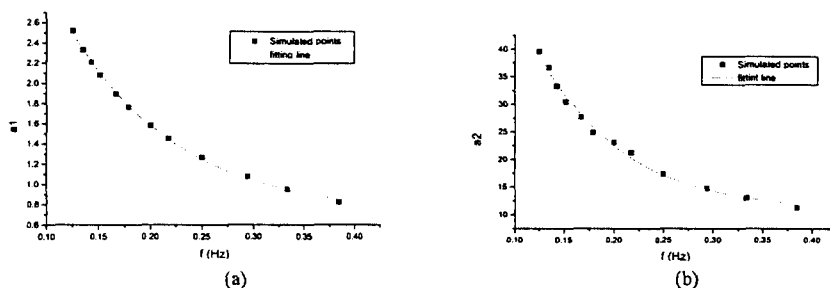


图 7 颗粒浓度变化幅度的衰减系数随频率的变化关系

可以看到, 初始振幅的 90% 以较快的速度衰减, 初始振幅的 10% 以较慢的速度衰减, 振荡可以维持很高的床高。在频率为 0.1~0.4Hz 的范围内, 衰减系数与频率的关系可表示为

$$a_1 = 0.6937 + 5.8586 \exp(-f/0.10597) \quad (16)$$

$$a_2 = 10.5287 + 122.5798 \exp(-f/0.0859) \quad (17)$$

4.4 Slis 波的传播速度

理论分析与数值计算表明, Slis 波以与平均入口流速及其对应的颗粒浓度在床层内传播。

$$\bar{U} = (U_1 T_1 + U_2 T_2) / (T_1 + T_2) \quad (18)$$

$$\bar{\alpha}_p = 1 - (\bar{U} / u_T)^{1/(n+1)} \quad (19)$$

$$\bar{V}_{Slis} = [(n+1)(1-\bar{\alpha}_p)^n - (n+2)(1-\bar{\alpha}_p)^{n+1}] u_T + \bar{U} \quad (20)$$

5 结论

(1) 本文采用双流体模型和推广的 Slis 模型模拟了脉冲流化过程, 并说明了二者的联系与差异。在床层较矮, 频率较高时, 二者的差异不明显, 双流体模型与实验结果有较好的一致性。但床层较高, 频率较高时, 双流体模型的计算结果与实际差异较大。这主要是由于数值粘性引起的, 而推广的 Slis 模型可以克服这一缺点, 由此所引入的误差相对于数值粘性的误差要小得多。这表明推广的 Slis 模型能在更广的范围模拟脉冲流化过程。

(2) 当床层较矮, 频率较低时, 脉冲流化床中高浓度区与低浓度区交替出现, 当床层较高, 频率较高时, 由于床内存在波系的相互作用, 颗粒浓度变化幅度呈二阶负指数方式沿床高衰减, 且衰减系数随频率增加以一阶负指数方式的衰减。

(3) Slis 波以与平均流速相对应的速度传播。

参 考 文 献

- 1 RENZO DI FELICE. *Chemical Engineering Science*, 1995, 50(8): 1213
- 2 Needham DJ & Merkin JH. *J Fluid Mech*, 1983, 131: 427-454
- 3 Wong HW, Baird MHI. *Chem Eng J*, 1971, 2: 104
- 4 Kobayashi M, Ramaswami D, Brazelton WT. *Chem Eng Prog Sym Ser*, 1970, 66(105): 58
- 5 Bhattacharya SC, Harrison D. *Instn Chem Engrs*, 1976, 54: 281
- 6 Baird MHI. *British Chem Eng*, 1966, 11(1): 20
- 7 聂永生. 博士论文, 中国科学院力学研究所, 1998
- 8 Nie Y, Liu D. *Powder Technology*, 1998, 99: 132
- 9 Gera D et al. *Powder Technology*, 1998, 98: 38
- 10 Tsuo YP and Gidaspow D. *AIChE J*, 1990, 36(6): 885
- 11 Felice D, Renzo. *Chemical Engineering Science*, 2000, 55(18): 3899
- 12 Murry JD. *J Fluid Mech*, 1965, 21: 465
- 13 Garg SK, Pritchrtt JW. *J Appl Phys*, 1975, 46: 4493
- 14 Homsy GM et al. *Int J Multiphase Flow*, 1980, 6: 305
- 15 Slis PL, et al. *Appl Sci Res*, Section A, 1959, 8: 209
- 16 刘大有. 二相流体动力学. 北京: 高等教育出版社, 1993
- 17 Tsinontides SC, Jackson R. *J Fluid Mech*, 1993, 255: 237
- 18 普国栋, 聂永生, 刘大有. 第五届全国多相流、非牛顿流、物理化学流学术会议, 2000. 1~7