

外二维系统中当颗粒堆积时流体将被阻断,而在三维的实际系统中流体仍能从颗粒的缝隙中穿过,为此让颗粒在与其他颗粒及壁面碰撞时具有较大的直径 D_{pp} ,而与流体粒子相碰时具有较小的直径 D_{pf} ,两者之差至少大于流体粒子的直径 D_f 。模拟开始时颗粒静止于分布板上面的下部床层中;流体静止,而其粒子处于平衡态。然后颗粒和流体粒子均受竖直向下的重力作用,并控制处于底部整流区的流体粒子的平均速度竖直向上且恒为 U_f 。离开上下边界的流体粒子被重新引入对面的相应位置,即采用周期边界,以维持流动。

模拟采用时间驱动算法^[6],它只允许碟间碰撞发生在等间距(Δt)的离散时刻。一旦两碟中心距小于其半径之和且速度相向(相互靠近),则碰撞发生,两碟位置不变而速度按下式更新:

$$\mathbf{V}_i' = \mathbf{V}_i + (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j) \cdot (\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1) (\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2) / (\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1)^2 \cdot (1 + \epsilon) m_j / (m_i + m_j),$$

其中 $\mathbf{P}_i, \mathbf{V}_i$ 分别表示圆碟的位置和速度矢量, m 为其质量,脚标 1, 2 分别标识两碟,上标'表示“碰撞后”。在相邻时刻间各碟运动不相干。与精确的事件驱动算法^[7]相比,它能简化编程,方便结果动态显示,在流体粒子较稠密和总数较大时还能提高效率。为保证算法的精度,流体粒子每步走过的距离远小于其直径。

3 模拟结果与讨论

模拟的有关参数见表1,模拟结果如图2~4。图2为典型的聚式系统,两相密度比相当于常压气固系统,其最显著的特征是床层的节涌和颗粒内循环,即颗粒从较稀一侧迅速上升并抬高

表 1 模拟参数汇总表

参数	图 2	图 3	图 4	参数	图 2	图 3	图 4
流体粒子数, N	15 000			床层平均空隙率 [*] ϵ	0.561	0.632	0.577
颗粒数, N_p	90			颗粒-颗粒碰撞的恢复系数, ϵ	0.6		
流体粒子直径, D_f/mm	0.255 2			颗粒-流体密度比, ρ_p/ρ_f	3 150	100	2
颗粒直径, $D_{pp}, D_{pf}/\text{mm}$	3.062, 2.042			时间步长, $\Delta t/\mu\text{s}$	0.510 2		
床宽, W/mm	36.75			流体表面流速, $U_f/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1	0.125	0.005
床高, H/mm	73.50			重力加速度, $g/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	9.8		
分布板标高, H_d	15.31						

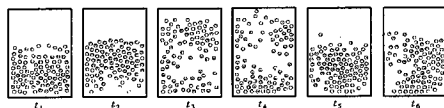


图 2 聚式流化模拟中若干时刻的颗粒分布

($\rho_p/\rho_f = 3\ 150$, $t_1 - t_{i-1} = 0.071\ 44\ \text{s}$)

床层,再从较密一侧缓慢下降,床层回落。在图 3, 4 中,两相密度比逐渐减小,分别相当于加压气固系统和液固系统。从中可观察到系统从聚式到散式流化的过渡,这是流态化系统中一个

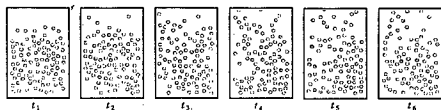


图 3 过渡流型模拟中若干时刻的颗粒分布

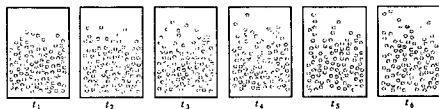
 $(\rho_p/\rho_f=100, t_i-t_{i-1}=0.061\ 22\ s)$


图 4 散式流化模拟中若干时刻的颗粒分布

 $(\rho_p/\rho_f=2, t_i-t_{i-1}=0.025\ 52\ s)$

非常重要的现象,蕴涵着此类系统的一些深刻机理。这表明离散粒子模拟反映了颗粒流体相互作用的内在机制,是一种值得探讨和深入研究的方法。

致谢 本工作为国家杰出青年基金(批准号:29425006)资助项目。

参 考 文 献

- 1 李静海,葛 蔚,郭有良,等. 颗粒流体系统的非线性行为及其计算机图形仿真. 科学通报,1996,41(增刊):10-21
- 2 Gidaspow D. Hydrodynamics of fluidization and heat transfer: supercomputer modeling. Appl Mech Rev, 1986, 39(1): 1
- 3 Tsuji Y, Kawaguchi T, Tanaka T. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed. Powder Technol, 1993, 77(1): 79
- 4 Rapaport D C. Microscale hydrodynamics, discrete-particle simulation of evolving flow patterns. Phys Rev A, 1987, 36(7): 3 288
- 5 Ge W, Li J. Pseudo-particle approach to hydrodynamics of particle-fluid systems. In: Kwauk M, Li J eds. Proceedings of the 5th International Conference on Circulating Fluidized Bed, Beijing, 1996. Beijing: Science Press, 1997. 260-266
- 6 Alder B J, Ailey W E. Generalized hydrodynamics. Physics Today, 1984: 56
- 7 Haile J M. Molecular Dynamics Simulation. New York: Wiley, 1992

(1997-05-05 收稿,1997-08-21 收修改稿)