

# 泡状流相分布及湍流结构的欧拉-拉格朗日 双向耦合数值研究

庞明军<sup>1,2</sup>, 魏进家<sup>1,2</sup>, 刘海燕<sup>1,2</sup>, 宇波<sup>3</sup>

(1. 西安交通大学苏州研究院, 215021, 江苏苏州; 2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;  
3. 中国石油大学城市油气输配技术北京市重点实验室, 102249, 北京)

**摘要:** 使用欧拉-拉格朗日双向耦合数值模拟方法对泡状流的相分布及气泡对液相湍流产生的影响做了详细的调查. 液相的速度场采用直接数值模拟方法求解, 气泡的运动轨迹由牛顿运动方程计算. 相间的耦合是把相间作用力作为液相动量方程的源相来实现的, 所考虑的相间作用力有阻力、剪切升力、惯性力等. 研究表明: 阻力、浮力、剪切升力和虚拟质量力对气泡的运动具有重要影响, 大量的气泡在剪切升力的作用下聚集在壁面附近; 与单液体相相比, 气泡的加入使液相的平均速度、湍流强度和雷诺应力均有一定幅度的降低, 而且气泡的加入修改了阻力系数公式.

**关键词:** 泡状流; 欧拉-拉格朗日; 双向耦合; 直接数值模拟

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)07-0001-05

## Numerical Investigation on Phase Distribution and Turbulence of Liquid in Bubbly Flow Using Euler-Lagrange Two-Way Method

PANG Mingjun<sup>1,2</sup>, WEI Jinjia<sup>1,2</sup>, LIU Haiyan<sup>1,2</sup>, YU Bo<sup>3</sup>

(1. Xi'an Jiaotong University Suzhou Academy, Suzhou, Jiangsu 215021, China; 2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Tech., China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** The phase distribution and the effect of bubbles on turbulence of liquid were investigated using the Euler-Lagrange two-way method. The liquid-phase velocity field was solved with the direct numerical simulation (DNS) in the Euler frame of reference, and the bubble motion track was calculated by the Newtonian motion equations considering interaction forces including drag force, shear lift force, inertia force, etc., in the Lagrange frame of reference. The coupling between phases was realized by regarding the interphase forces as momentum source terms of the continuous phase. The result indicates that the drag force, the buoyant force, the shear lift force, and the virtual mass force have greater effect on the motion of bubbles, and the majority of bubbles accumulate near the walls. Compared with the single liquid phase, the addition of bubbles reduces the streamwise mean velocity, turbulent intensity, and the Reynolds stress of the liquid phase. In addition, the injection of bubbles modifies the turbulent frictional coefficient model.

**Keywords:** bubbly flow; Euler-Lagrange; two-way; direct numerical simulation

符号表

|          |                                       |                  |                                        |               |                                        |
|----------|---------------------------------------|------------------|----------------------------------------|---------------|----------------------------------------|
| $f_i^*$  | 相间作用力源相, N                            | $u_m$            | 主流平均速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | $\alpha$      | 气泡局部体积分数                               |
| $g$      | 重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ | $u_{\text{rms}}$ | 液相速度时均方根值                              | $\delta_{ij}$ | 克罗内克符号                                 |
| $p^{+*}$ | 脉动压力, Pa                              | $V_b$            | 气泡体积, $\text{m}^3$                     | $\epsilon$    | 置换符号                                   |
| $u_b$    | 气泡速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  | $-x^*$           | 平均压力, Pa                               | $\sigma$      | 液相表面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ |
| $u_i$    | 液相速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  | $y_b$            | 气泡距壁面的距离, m                            | $\tau$        | 剪应力                                    |

由于泡状流具有良好的传质和传热特性,被广泛应用于多种工业过程,如石油炼制、核反应堆、化学工业、冶金以及废水处理等。气泡在反应设备和管道内的体积分数分布以及液相的湍流结构对泡状流的传质传热特性具有强烈的影响,而且气泡的存在会对液相的湍流产生调制,受到调制的液相湍流反过来又会影响气泡的体积分数分布,进一步影响泡状流的传质传热特性,所以对泡状流相分布和湍流特性的研究具有重要意义。目前,国内外针对泡状流的湍流特性虽然已开展了大量研究<sup>[1-7]</sup>,但由于问题的复杂性仍未定论,故还需进一步研究。为此,本文采用欧拉-拉格朗日双向耦合“准”直接数值模拟方法详细调查了气泡的分布情况以及气泡对液相湍流的影响。鉴于气泡的直径很小(韦伯数  $We = \rho_l u_\tau d_b / 2\sigma \approx 0.02 \ll 1$ ),计算时不考虑气泡的变形<sup>[1]</sup>。另外,当气泡平均体积分数  $\alpha_0$  小于  $10^{-3}$  时,气泡间的相互作用力可以忽略<sup>[2]</sup>,因此本文( $\alpha_0 = 1.34 \times 10^{-4} < 10^{-3}$ )也没考虑气泡间的相互作用力。

## 1 计算条件和数值模拟过程

### 1.1 计算条件

求解时连续相采用直接数值模拟方法求解,气泡的运动轨迹采用牛顿运动方程跟踪,相间的耦合是把气液相之间的作用力看作液相动量方程的源相。气液相的具体计算参数见表1。

表1 气液相的计算参数

|                                                          |                                                                         |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 计算区域尺寸<br>(对应 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向)                        | $10h \times 2h \times 5h$<br>( $1\,500 \times 300 \times 750$ , 黏性长度尺度) |
| 网格分辨率                                                    | $64 \times 64 \times 64$                                                |
| 摩擦雷诺数 $Re_\tau = u_\tau h / \nu_l$                       | 150                                                                     |
| 气、液相密度 $\rho_b, \rho_l$                                  | 1.3, 1 000                                                              |
| 气泡直径 $d_b$                                               | 0.02 (3 个黏性长度尺度)                                                        |
| 气泡雷诺数<br>$Re_b =  u_i - u_b  d_b / \nu_l$                | (0, 35]                                                                 |
| 气泡总数 $M$                                                 | 3 200                                                                   |
| 气、液相运动黏度 $\nu_b, \nu_l / \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ | $14.8 \times 10^{-6}, 1.0 \times 10^{-6}$                               |
| Froude 数 $Fr = u_\tau / (gh)^{1/2}$                      | 0.016 9                                                                 |
| 气泡形状                                                     | 球形                                                                      |

计算区域为垂直上升通道,其形状和几何尺寸见图1。 $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向分别对应主流方向、壁面垂直方向和翼展方向。计算时在主流方向和翼展方向设置周期边界条件,在壁面方向设置无滑移边界条件。湍流场是由  $Re_\tau = 150$  发展形成的。

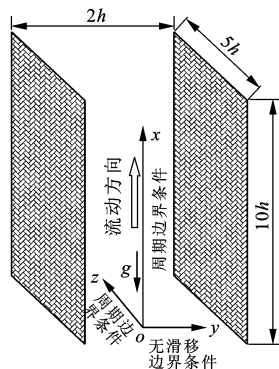


图1 计算区域和坐标系

### 1.2 控制方程

根据上面的假设,下面给出液相和气泡的控制方程,在下面给出的归一化控制方程中,与长度相关的量用半槽道高度  $h$  归一化,与速度相关的量用摩擦速度  $u_\tau$  归一化,与时间相关的量用  $h/u_\tau$  归一化。归一化后的速度、长度、压力、时间和相间作用力可分别表示为

$$u_i^+ = \frac{u_i}{u_\tau} = \frac{1}{u_\tau} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}; x^* = \frac{x_i}{h} = \frac{1}{h} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$p^+ = \frac{p}{\rho_l u_\tau^2} = p^{+*} - x^*; t^* = \frac{t}{h/u_\tau}; f_i^* = \frac{F_i}{u_\tau^2/h}$$

归一化的液相控制方程可表示为

$$\partial u_{li}^+ / \partial x_i^* = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_{li}^+}{\partial t^*} + u_j^+ \frac{\partial u_{li}^+}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p^{+*}}{\partial x_i^*} + \delta_{li} + \frac{1}{Re_\tau} \nabla^2 u_{li}^+ - f_i^* \quad (2)$$

归一化的气泡运动方程为

$$\frac{\rho_b}{\rho_l} \frac{du_{bi}^+}{dt^*} = \frac{Du_{li}^+}{Dt^*} +$$

$$\frac{3}{4} \frac{C_D}{d_b^*} |u_{li}^+ - u_{bi}^+| (u_{li}^+ - u_{bi}^+) + C_V \left( \frac{Du_{li}^+}{Dt^*} - \frac{du_{bi}^+}{dt^*} \right) +$$

$$C_{LF}\epsilon_{ijk}\epsilon_{klm}(u_{fi}^+-u_{bi}^+)\frac{\partial u_{li}^+}{\partial x_m^*}+\delta_{2i}|u_{fi}^+-u_{bi}^+|^2\cdot$$
$$\max\left(0,\frac{-0.0064}{d_b^*}+\frac{0.016}{y_b^*}\right)+\left(1-\frac{\rho_{bi}}{\rho_f}\right)\frac{1}{Fr^2}$$

(3)

方程(3)等号左边为惯性力项,右边分别为压力梯度力、阻力、虚拟质量力、剪切升力、壁面升力和浮力项; $C_D$ 、 $C_V$ 和 $C_{LF}$ 分别为阻力系数、虚拟质量力系数和升力系数.对于球形气泡,虚拟质量力系数和升力系数可取为0.5<sup>[4]</sup>.阻力系数采用下式计算<sup>[5]</sup>

$$C_D=\begin{cases}\frac{16}{Re_b} & Re_b\leqslant 1.5 \\ \frac{14.9}{Re_b^{0.78}} & 1.5\leqslant Re_b<80 \\ \frac{48}{Re_b}\left(1-\frac{2.21}{Re_b^{0.5}}\right)+1.86\times 10^{-15}Re_b^{4.756} & 80\leqslant Re_b<1500 \\ 2.61 & 1500\leqslant Re_b\end{cases}$$

(4)

### 1.3 相间耦合的实现

气泡在液相的运动受相间作用力的控制,所以它们的运动轨迹和体积分数分布取决于相间作用力的合力,而相间作用力的计算与液相的速度有关,正如方程(3)所描述的.气泡在受到液相施加的相间力的同时,也会产生一个反作用力于液相之上,正如液相动量方程(2)等号右端的相间作用力项 $f_i^*$ ,它等于气泡所处单元格内所有气泡所受力的合力除以该单元格所包含液相的质量

$$f_i^*=\frac{\rho_b V_b}{\rho_f \Delta x \Delta y \Delta z} \sum_{j=1}^m (a_i^*)_j$$

(5)

该项代表了气泡对液相的影响.由此可见,液相速度场的改变会引起气泡所受相间作用力的变化,反过来相间作用力的变化又会导致液相速度场的不断更新,这表明气液相之间是相互影响的.

### 1.4 数值方法

液相控制方程采用有限差分离散,空间项的离散采用二阶精度的中心差分格式.时间上的推进,除了压力项外,其余项均采用二阶精度的 Adams-Bashforth 格式推进.速度与压力项采用 MAC 方法耦合.采用交错网格系统来避免压力场的不稳定.在主流方向和翼展方向进行网格均匀划分,在壁面法向上使用双曲拉升函数生成非均匀网格,越靠壁面网格间距越小,具体的网格系统和 DNS 参数设置见文献[8].采用多重网格法求解压力泊松方程.为了计算与气液相相对速度有关的相间作用力,采用三维 8 节点的拉格朗日体插值和二维 4 节点的拉格朗

日面插值法求解气泡同位置液相的速度.气泡的速度和位移采用二阶精度的 Crank-Nicholson 格式对气泡的运动方程积分来获得.

## 2 计算结果分析

### 2.1 体积分数分布

图 2 给出了气泡在壁面坐标系( $y^+=yu_\tau/\nu$ )下的局部体积分数分布,局部体积分数由局部最大体积分数归一化( $\alpha/\alpha_{\max}$ ).本文的局部体积分数分布与文献[7]的实验结果相似,绝大多数气泡聚集在壁面附近,导致壁面附近的局部体积分数远远高于其他位置的.目前,绝大多数研究者认为气泡成群聚集在壁面附近主要是受升力的影响.文献[6]指出,受浮力影响向上运动的气泡在滑移速度和液体速度梯度的联合作用下,不断向壁面移动.

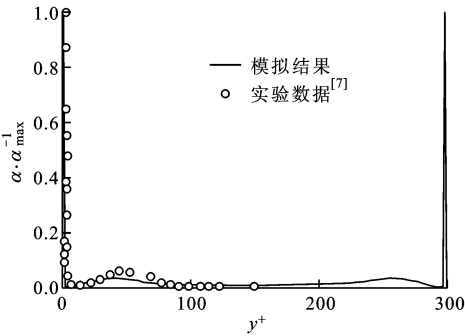


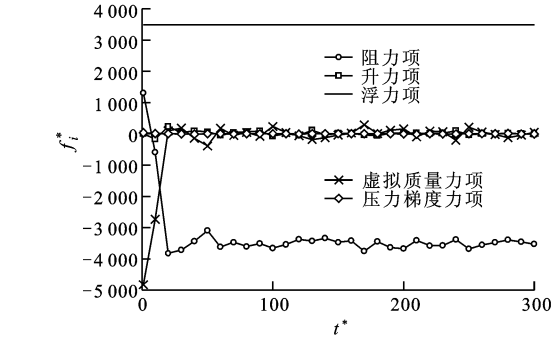
图 2 气泡局部体积分数分布

为了分析各个相间力对气泡运动影响的重要程度,图 3 给出了壁面附近单个气泡所受相间作用力随计算时间的变化情况.图 3 表明:气泡刚加入时,气泡在主流方向和壁面法向上所受的虚拟质量力分量都很大;随着计算时间的推进,主流方向上的虚拟质量力分量逐渐减小,不再起主导作用;随着计算趋于准稳态,阻力分量和浮力在主流方向上相平衡,剪切升力分量和虚拟质量力分量在壁面方向上相平衡.这说明在主流方向上起决定作用的相间作用力是阻力和浮力,在壁面法向上起决定作用的是剪切升力和虚拟质量力.由此可见,阻力、浮力、剪切升力和虚拟质量力在泡状流的数值模拟时是必须考虑的相间作用力.

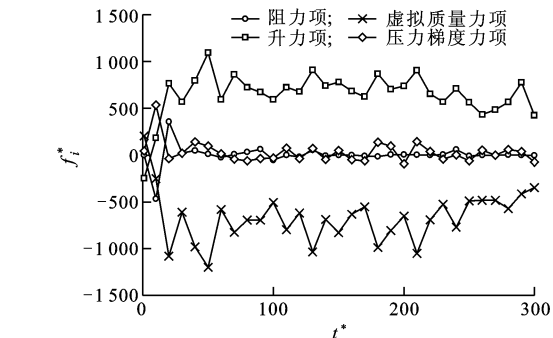
### 2.2 液相湍流统计量分析

图 4 给出了气液相的速度分布,为了便于对比,同时给出了相同条件下单相流的速度分布.图 4a 表明,纯液体的速度分布在黏性底层( $y^+<5$ )与线性率( $u^+=y^+$ )吻合得很好,在外层( $y^+>30$ )与对数率( $u^+=2.5\ln y^++5.0$ )吻合得很好,说明目前的

数值结果是可信的. 与液体的速度相比,受浮力影响的气泡速度远远高于同坐标下液体的速度. 与单相流相比,气泡的加入使液相的速度在槽道中心很宽

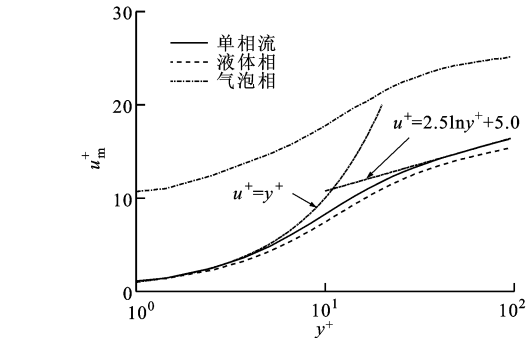


(a)主流方向

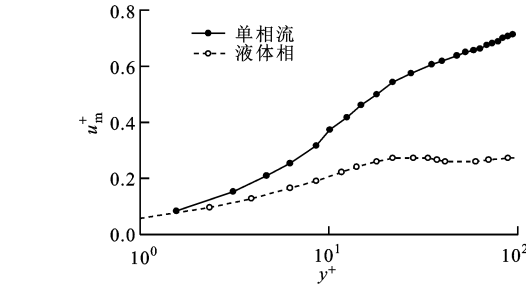


(b)壁面法向

图 3 气泡所受相间力随时间的变化



(a)模拟结果



(b)文献[6]的模拟结果

图 4 气液相主流方向速度分布

为了定性验证泡状流模拟结果的正确性,同时给出文献[6]有无气泡时液相的速度分布,见图 4b. 从文献给出的结果可以看出,气泡(模拟条件:球形气泡,气泡直径为 30 个黏性长度尺度,液相摩擦雷诺数为 128)的加入也大大减小了液相的速度,与目前的模拟结果相似. 液相主流方向上速度的降低意味着气泡的加入增加了输送摩擦阻力,也就是说在相同的输送功率下,液体的输送量减少.

为了理解液相速度下降的原因,图 5 和图 6 分别给出了液相湍流强度和液相剪应力的平衡预算分布. 图 5 表明,与单液体相相比,气泡的加入使 3 个方向上液相的湍流强度均受到了不同程度的抑制,这与文献[6]的模拟结果定性一致. 湍流强度的抑制表明,用于液相脉动消耗的能量减小. 结合图 4 可以看出,泡状流液相湍流脉动消耗的能量减小并没有像表面活性剂减阻溶液一样,使液相主流方向上的平均速度增加[8]. 液相平均动能和脉动动能同时减小意味着液相的能量在相间力的作用下发生了转移,可以推测液相减小的能量或者用于气泡的加速和脉动,或者被气液相之间的相间摩擦耗散掉.

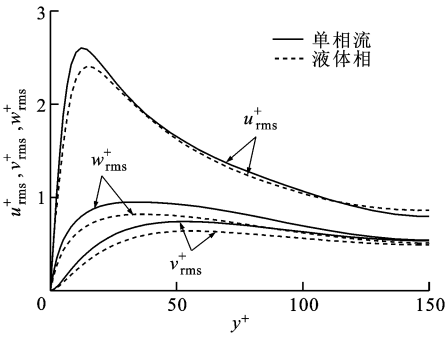


图 5 液相湍流强度分布

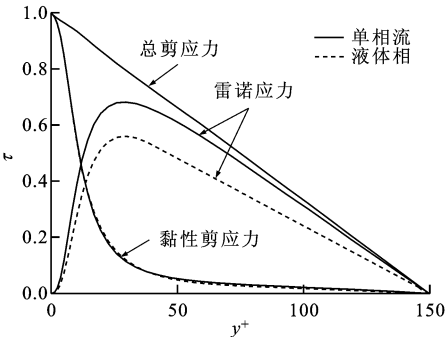


图 6 液相的剪应力平衡预算

3 个方向湍流强度的减小意味着雷诺应力的减小,正如图 6 所示. 对于牛顿单相流体而言,当湍流达到统计稳定时,总剪应力平衡可表示为[8]

$$\tau_{total} = 1 - \frac{y^+}{Re_\tau} = -\overline{u'^+ v'^+} + \frac{1}{Re_\tau} \frac{\partial u^+}{\partial y^*} \tag{6}$$

方程(6)等号右边分别为雷诺应力项和黏性应力项. 对于稀疏两相流总剪应力也遵循线性分布,其应力平衡关系可改写为

$$\tau_{total} = -\overline{u'^+ v'^+} + \frac{1}{Re_\tau} \frac{\partial u^+}{\partial y^*} + \int_{y^*}^1 \overline{f_i^*} dy^* \tag{7}$$

与方程(6)相比,方程(7)的等号右边多了一个相间作用力项. 相间作用力项一方面负责相间动量的传递,另一方面使运动的气泡产生相间摩擦,以减小总能量. 泡状流的摩擦阻力系数公式可以表示为

$$C_f = \frac{12}{Re} + 6 \int_0^1 \frac{(-\overline{u'^+ v'^+})(1-y^*)}{U_b^{+2}} dy^* + 6 \int_0^1 \frac{\overline{f_i^*}(1-y^*)}{U_b^{+2}} dy^* \tag{8}$$

方程(8)表明泡状流的阻力系数由黏性贡献(等号右边第 1 项)、湍流贡献(等号右边第 2 项)和气泡扰动贡献(等号右边第 3 项)3 部分组成. 目前的结果表明(如图 6 所示),气泡的加入对黏性应力几乎没有影响,说明泡状流的摩擦阻力系数主要取决于湍流应力作用项和相间力项. 如果气泡的加入对湍流的抑制大于其自身引入的相间作用力项,那么液相的阻力系数将减小,其输送量随之增加,就会出现气泡减阻现象. 反之,如果气泡的加入对湍流的抑制小于其自身引入的相间作用力项,就会出现目前的现象,即液相的阻力系数增加,输送阻力增加. 究竟在什么样的情况下气泡的加入可以减小输送摩擦阻力,目前仍是学术界研究的一个热点,尚无定论.

3 结 论

本文通过对泡状流的欧拉-拉格朗日准直接数值模拟,得到如下结论.

- (1)气泡在剪切升力的作用下大量聚集在槽道壁面附近,使壁面附近的局部体积分数远远高于槽道中心区域的局部体积分数.
- (2)当气泡运动达到准稳态时,在主流方向上起决定作用的相间力是阻力和浮力,而在壁面方向上起决定作用的是剪切升力和虚拟质量力.
- (3)气泡的加入使液相的平均速度在槽道中心很宽的范围内减小,使液相的脉动强度和雷诺应力减小. 气泡的加入对液相阻力系数的影响取决于雷

诺应力和相间作用力的平衡关系.

参考文献:

[1] XU J, MAXEY M. Numerical simulation of turbulent drag reduction using micro-bubbles [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2002,468(10):271-281.

[2] ELGHOBASHI S. On predicting particle-laden turbulent flows [J]. Applied Scientific Research, 1994,52(4):309-329.

[3] 熊贤鹏,刘卫华,昂海松,等. 竖直上升通道内微气泡湍流流动的数值模拟 [J]. 南京航空航天大学学报, 2007,39(1):51-55.

XIONG Xianpeng, LIU Weihua, ANG Haisong, et al. Numerical simulation of upward micro-bubble-laden turbulent channel flow [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007,39(1):51-55.

[4] TABIB M V, ROY S A, JOSHI J B. CFD simulation of bubble column: an analysis of interphase forces and turbulence models [J]. Chemical Engineering Journal, 2008,139(8):589-614.

[5] LAÍN S, BÖDER D, SOMMERFELD M, et al. Modelling hydrodynamics and turbulence in a bubble column using the Euler-Lagrange procedure [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002,28(8):1381-1407.

[6] LU J C, TRYGGVASON G. Effect of bubble deformability in turbulent bubbly upflow in a vertical channel [J]. Physics of Fluids, 2008,20(4):040701.

[7] FELTON K, LOTH E. Spherical bubble motion in a turbulent boundary layer [J]. Physics of Fluids, 2001,13(9):2564-2577.

[8] YU B, KAWAGUCHI Y. Direct numerical simulation of visco-elastic drag-reducing flow: a faithful finite difference method [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2004,116(2/3):431-466.

[本刊相关文献链接]

气泡堆积法生成曲线多边形区域非结构化网格及其应用. 西安交通大学学报, 2009,43(11):109-113.

沸腾过程的格子 Boltzmann 方法模拟. 西安交通大学学报, 2009,43(7):25-29.

带内嵌固体的不可压缩气液两相界面流数值模拟方法. 西安交通大学学报, 2008,42(9):1151-1155.

(编辑 荆树蓉)