

文章编号: 1000-0887(2000) 08-0771-06

二维气固两相混合层中固粒对流场 影响的研究*

林建忠^{1,2}, 石 兴¹, 余钊圣¹

(1. 浙江大学 力学系, 杭州 310027; 2. 杭州应用工程技术学院, 杭州 310012)

(我刊编委林建忠来稿)

摘要: 采用双向耦合模型对含有固粒的二维气固两相混合层流场进行了研究。流场采用拟谱方法直接数值模拟, 固粒采用颗粒_轨道模型, 在考虑流场对固粒作用的同时, 考虑固粒对流场的反作用。结果发现固粒的浓度和 Stokes 数对流场影响明显。固粒的作用使涡量扩散加快, 并阻碍流场的变化, 减弱了流场中拟序结构的强度, 缩短涡的生存期; 固粒在流场中的分布规律与单相耦合所得结果相似。

关键词: 气固两相流; 混合层; 拟序结构; 双向耦合

中图分类号: O359 文献标识码: A

引 言

自然界和工业部门中, 两相流动是非常普遍的。在气固两相混合层流场中固粒在流场中的混合程度对于工程应用具有实际意义。现有研究表明, 混合层流场中存在着拟序结构, 以往研究考虑拟序结构的较少。Crowe 等^[1]研究了固粒在具有 Stuart 常直径涡形成的二维混合层中的扩散过程, 说明当固粒 Stokes 数在 0.01 和 1 之间时, 其扩散速率远比流体固粒大, 该研究没有反映固粒在随时间发展的混合层中扩散的情况。Gore^[2]研究了随时间发展的混合层拟序结构对固粒运动影响, 说明 St 数是影响固粒扩散的重要参数。Maucu 等^[3]研究了固粒在随时间变化三维混合层的扩散, 结果表明流向涡瓣以及流场发生的强拉伸和折叠将导致固粒浓度分布的变化。林建忠等^[4]研究了二维混合层中拟序结构发展的多种过程对固粒运动的影响, 以及 Basset 力和固粒的重力对固粒运动的影响。

以上研究只是考虑流场对固粒运动的影响, 没有考虑固粒对流场的作用, 实际上固粒对流场具有反作用, 尤其当固粒的体积比或固粒的 Stokes 数较大时更是如此, 而固粒对流场的反作用直接影响着整个流场的发展性态, 具有很强的应用背景, 所以本文的目的是通过双向耦合的方法, 研究固粒对流场拟序结构的影响, 同时也给出在具有拟序结构的混合层流场中固粒的分布特性。

* 收稿日期: 1999_04_07; 修订日期: 2000_03_01

基金项目: 教育部跨世纪优秀人才培养计划基金资助项目

作者简介: 林建忠(1958—), 男, 教授, 博士, 博导, 院长, 已发表专著 4 部, 论文 130 篇, 获科技、论著奖 23 项。

1 数值计算方法

1.1 流场的数值模拟

本文采用拟谱方法对 N-S 方程直接数值模拟。对于图 1 所示随时间发展的混合层流场,不失一般性,假设上下两层的流体速度大小相等、方向相反,该流场与随空间发展的流场有相同的物理机制。

用上下两层的速度差 ΔU 作为特征速度,特征长度 δ 为动量厚度的两倍。量纲为平均速度 $U = U/\Delta U$,量纲为一化的连续性方程和运动方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot P + \frac{1}{2} \nabla \cdot \mathbf{V}^2 = \mathbf{V} \times \boldsymbol{\omega} + \frac{\nabla^2 \mathbf{V}}{Re} + \mathbf{F}_p, \quad (2)$$

其中,雷诺数 $Re = \Delta U \delta / \nu$, \mathbf{F}_p 为固粒对流场的作用力。本文主要考虑粘性力的影响,采用 Y. Tsuji et al.^[5] 的公式

$$\mathbf{f}_p = \beta (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f) / \rho_f,$$

其中 $\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{|\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f| \rho_f \varepsilon}{d_p} (1 - \varepsilon)^{-2.7}$, $C_D = 24(1 + 0.15 Re_p^{0.67}) / Re_p$,

Re_p 为固粒的颗粒雷诺数, $Re_p = |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p| d_p / \nu$, \mathbf{u}_p 为固粒速度, \mathbf{u}_f 为流体速度, d_p 为固粒直径, ε 为固粒的体积分。量纲为一化后为

$$\mathbf{F}_p = \rho^* (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f) \varepsilon (1 - \varepsilon)^{-2.7} / St, \quad (3)$$

ρ^* 为固粒与流体的密度比, $St = \rho_p d_p^2 \Delta U / 18 \mu \delta$ 。初始条件由平均速度场, $U = 0.5 \text{th} y$ 和扰动波产生的速度场组成:

$$\Psi(x, y) = A_1 \Re(\phi_1(y) e^{i\alpha x}) + A_2 \Re(\phi_2(y) e^{i\alpha/2 x}),$$

式中 \Re 为复数的实部, A_1, A_2 分别为基波和次谐波初始强度, α 为基波波数, $\phi_1(y)$ 和 $\phi_2(y)$ 分别为基波和次谐波的特征函数,可以通过高雷诺数下的无粘线性稳定性理论近似得到。本文中 α 取 0.444 6, 对应于 Michalke 给出的最不稳定的扰动波数。此外文中 $A_1 = 0.1$ 和 $A_2 = 0.06$, 不计涡配对时, $A_2 = 0$ 。

对于随时间发展的混合层,流向作周期性处理。根据平均速度剖面的特性以及 $y \rightarrow \infty$ 时,各扰动波特征模态均趋于零的特征,横向也可近似作周期处理,在离平均速度拐点足够远的地方,作镜像开拓,使之具有周期性,这相当于引入了镜像流动,这样在两个方向上都可以采用快速富里叶变换。计算时间流向长度 L_1 取 $2\pi/\alpha$, 涡卷起时 L_2 取 20, 当涡配对时两者都加倍。为方便起见,令

$$p + \frac{V^2}{2} = \Pi, \quad \mathbf{V} \times \boldsymbol{\omega} + \mathbf{F}_p = \mathbf{F}.$$

利用 Fourier 变换,将方程(1)、(2)变换到谱空间为

$$\alpha \cdot \mathbf{u}^* = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_j^*}{\partial t} + \frac{|\alpha|^2}{Re} u_j^* = f_j - i\alpha \pi^*, \quad (5)$$

方程(4)、(5)联立,消去 π^* 并整理得:

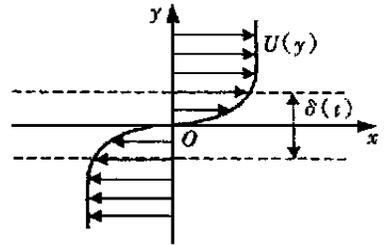


图 1 二维混合层流场

$$\left. \begin{aligned} k_1 = k_2 = 0: \frac{\partial u_j^*}{\partial t} &= f_j, \\ \frac{\partial u_j^*}{\partial t} + \frac{|\alpha|^2}{Re} u_j^* &= f_j - \frac{g(\alpha \cdot f)}{|\alpha|^2} \quad k = 1, 2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

非线性项用 Adams_Bashforth 格式, 其余项用隐式 Crank_Nicolson 格式。

为了使拟谱方法顺利实施, f_p 被光滑化, 即将其谱的高频部分略去。

1.2 固粒轨迹的计算

本文中主要讨论重固粒 $\rho_p/\rho_f \approx 10^3$ 拟序结构中的运动, 并主要考虑粘性力的影响, 故将固粒的运动方程^[6] 简化和量纲一化后得

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \frac{f}{St} (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p), \quad (7)$$

其中 f 是 Stokes 区域外的阻力系数修正因子, 一般取

$$f = 1 + 0.15 Re_p^{0.67}, \quad (Re \leq 1000). \quad (8)$$

再由方程

$$d\mathbf{X}^*/dt = \mathbf{u}^* \quad (9)$$

计算出固粒运动的轨迹。

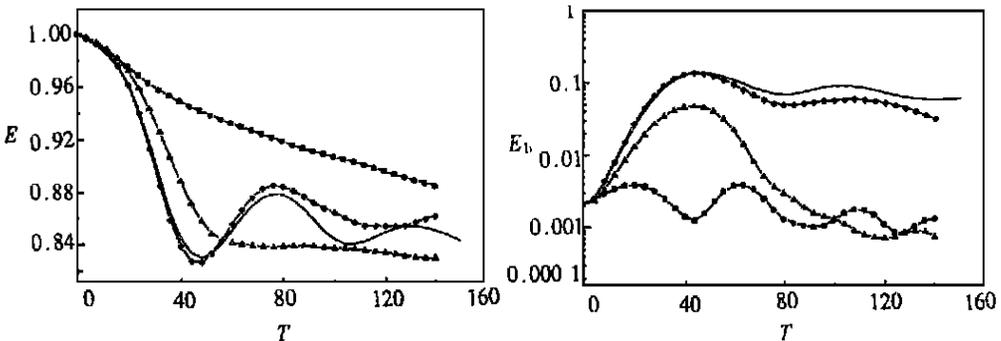
计算过程如下: 在流场的速度得到后, 计算每个固粒的速度和位置, 再根据以网格点为中心与网格大小相同的单元的固粒数计算固粒的体积分数 ε , 从而求出固粒对流场的作用力。然后计算下一时间步的流场参数。固粒在流场平均分布, 计算固粒数由公式(10) 确定。

$$N = \left[\frac{6}{\pi \varepsilon} \right]^{2/3} \frac{l_1 l_2 \rho^* Re}{18 St}, \quad (10)$$

l_1, l_2 分别为流场的长度和宽度, 时间间隔为 0.02。

2 计算结果讨论及分析

如图 2, 固粒的 St 数和体积浓度强烈影响流场的能量分布, 体积浓度相同时, 在涡的卷起过程中, 固粒阻碍平均流场和基波的能量交换, 随 St 数的增大, 由于固粒的跟随性变差, 这种影响随 St 数的增大而增大, 而对基波, 随着 St 数的增大, 基波能量的发展受到越来越强的抑制, 使得拟序涡结构的强度变得越来越弱。同时, 从能量图可以看出, 在 St 数相同的情况下,



— 不加固粒 ◆ $St = 0.1$ ▲ $St = 1$ ● $St = 10$

$\varepsilon = 0.729\%$ 平均流场的能量

$\varepsilon = 0.729\%$ 基波的能量

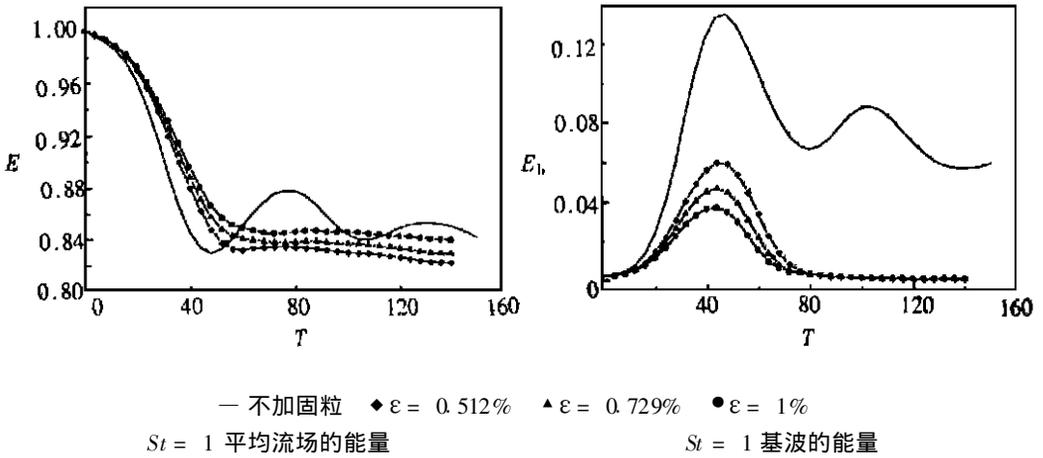
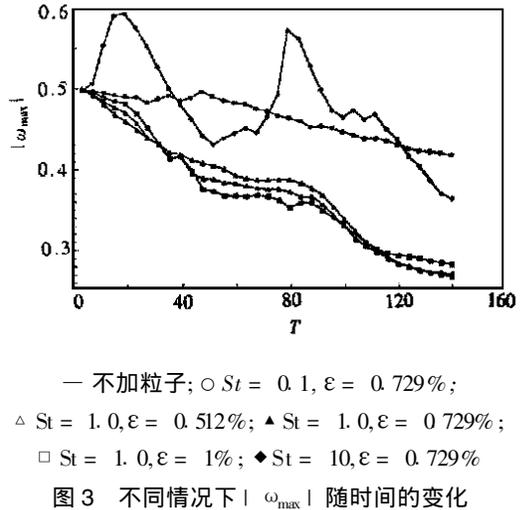


图2 流场能量图

浓度的增大减缓了平均流场能量减少的速度,而对于基波,则是减少基波从平均流场获得的能量。在卷起过程结束后,涡就一直减弱,而不象没有固粒时,流场进入一振荡过程。可见,固粒加入后,由于固粒运动的滞后性,对流场的变化起迟滞作用,减弱了流场中拟序结构的强度,缩短了拟序结构的生存期,并且大 St 数固粒的影响比小 St 数大。

从图3、图4上可以看到由于固粒的存在,涡量的扩散过程明显加快。没有固粒时较集中的涡量变得分散了,图中随涡量值绝对值的增大,颜色加深。由于流场流向速度在涡辨区变化大,横向的速度在涡的上下两端变化大,设固粒对流场的作用力在流向上的分量为 F_x , 横向分量为 F_y , 因此在涡两端的涡辨区, F_x 绝对值较大,而方向相反,在涡的上下两端, F_y 绝对值较大,方向相反。由于主流方向是流向,故 F_x 对流场的影响也较 F_y 大得多。因此拟序涡结构沿流向被不断拉长拉扁,中部变细,涡量由中心向两端转移,中心区涡量减少。在 St 数为10时,此进程明显加快,在 $T = 20$ 时,涡核区移到边上,如图5。



如图6~图8,固粒的分布与在不考虑固粒对流场的作用力时的结果相似:小 St 数的固粒随流场一起运动;在 St 数为1的量级时,固粒由于离心力的作用而分布在涡的边缘;大 St 数的固粒受流动的影响较小。

3 结 论

由以上的分析可以得出,固粒对流场有明显的影响。固粒加快了涡量的扩散,阻碍流场的变化,减弱了流场中拟序结构的强度,缩短了涡的生存期。而固粒的分布与在不考虑固粒对流场的作用力时的结果相似:小 St 数的固粒随流场一起运动;在 St 数为1的量级时分布在涡的边缘;大 St 数的固粒受流场的影响较小。

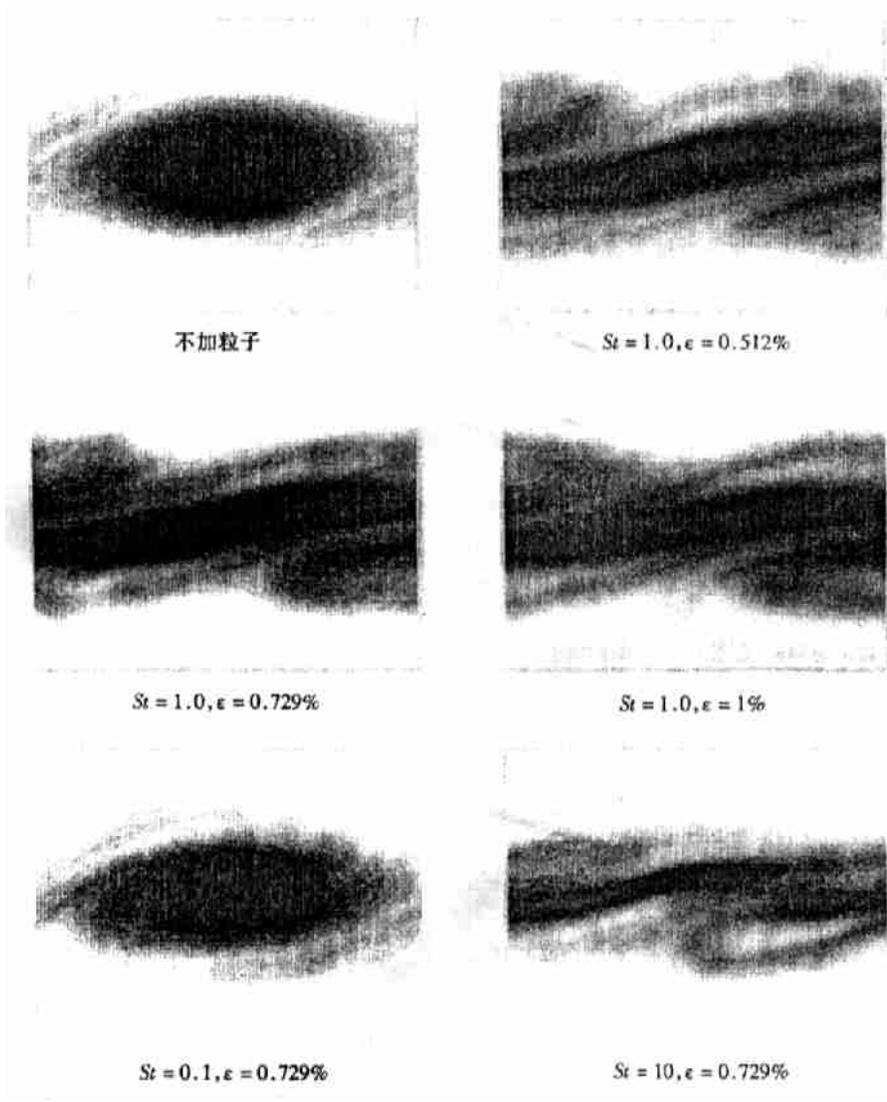


图4 $T = 80$ 时的涡量图



图5 $T = 20, St = 10$ 的涡量图

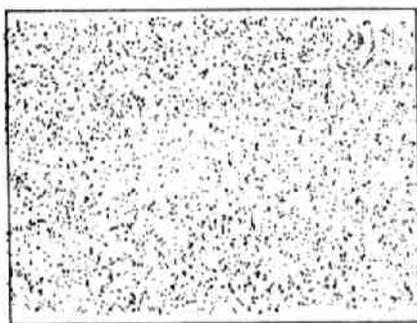
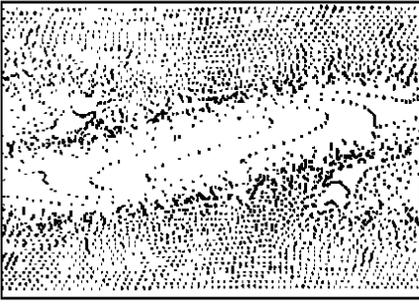
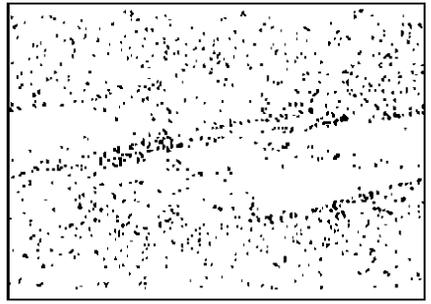


图6 $St = 0.1$ 固粒分布图

图7 $St = 1$ 固粒分布图图8 $St = 10$ 固粒分布图

[参 考 文 献]

- [1] Crowe C T, Gore R A, Troutt T R. Particle dispersion by coherent structures in free shear flows[J]. Particle Science and Technology, 1985, 3(3.4): 149—158.
- [2] Gore R A. Particle dispersion by large scale vortex structures[J]. Particle Science and Technology, 1989, 7(3): 201—207.
- [3] Marcu B, Meiburg E. Three dimensional features of particle dispersion in a nominally plane mixing layer[J]. Phys Fluids, 1996, 8(9): 2266—2268.
- [4] 林建忠, 石兴, 余钊圣. 二维气固混合层中拟序结构对固粒运动影响的研究[J]. 空气动力学学报, 1999, 17(2): 155—162.
- [5] Tsuji Y, Kawaguchi T, Tanaka T. Discrete particle simulation of two dimensional fluidized bed[J]. Powder Technology, 1993, 77(1): 79—87.
- [6] Maxey M R, Riley J J. Equation of motion for a small rigid sphere in a uniform flow[J]. Phys Fluids, 1983, 26(40): 883—889.

Research on the Effect of Particle of Two Dimensional Shear Flow

LIN Jian_zhong^{1, 2}, SHI Xing¹, YU Zhao_sheng¹

(1. Department of Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P R China;

2. Hangzhou Institute of Applied Engineering, Hangzhou 310012, P R China)

Abstract: The two-way coupling model was adopted to study the two dimensional gas solid mixing layer. The flow was simulated by pseudo_spectral method and particles were traced with Lagrangian method. It is found that the concentration and the Stokes number of the particles have distinct effect on the flow not only accounting for the influence of the flow on the particles, but also the particles' counteraction on the flow. The particles accelerate the dispersion of the vorticity and inhibit the variance of the flow and diminish the intensity of the coherent structure. The lifetime of the vortex is shortened. The pattern of particles' distribution is similar to the results from one_way coupling model.

Key words: gas_solid flow; shear layer; coherent structures; two_way coupling