

文章编号: 1000-0887(2000) 07\_0669\_06

含悬浮固粒射流界面稳定性研究<sup>\*</sup>周泽宣<sup>1,2</sup>, Tan Soon Keat<sup>2</sup>, 林建忠<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 力学系, 中国杭州, 310027; 2. 南洋理工大学, 新加坡, 637898)

(我刊编委林建忠来稿)

摘要: 利用气固两相耦合模型, 理论推导出含悬浮固粒射流的稳定性方程, 通过数值计算得到了两相射流稳定性特征曲线、固气扰动速度比值幅值曲线及固气相位差曲线, 进而得到了关于固粒对流场中扰动增长和传播的影响及失稳过程中固粒扰动特性的结论。这些结论对于两相射流发展的认识和工程实际中实施对两相射流场的人工控制有重要意义。

关键词: 界面稳定性; 悬浮固粒; 固粒扰动特性; 相耦合模型; 射流剪切层

中图分类号: O359 文献标识码: A

## 引 言

含有悬浮固粒的两相射流场大量存在于通风、化工、消防、环卫等部门喷射含固粒流体的操作过程中。这类流场的特性对设备运行过程的安全、效率和效益起着非常重要的作用, 同时对周围的环境有着重大的影响, 因而对其进行人工控制非常必要。而要有效地控制制流场, 就必须掌握流场的特性及固粒对流场的作用规律, 由于流场的失稳过程对流场的后续发展有直接和关键的影响, 所以弄清固粒对射流稳定性的影响非常重要。

Chung 和 Troutt<sup>[1]</sup>, Logmire 和 Eaton<sup>[2]</sup> 等关于具有固粒的湍射流的研究, 说明流场拟序结构对固粒扩散有影响。基于这些研究, Logmire 和 Eaton<sup>[3]</sup> 证明近喷射区固粒的扩散受到大尺度涡结构发展的影响, 因此改变大尺度涡结构的发展可以控制固粒的扩散, 而改变大尺度涡结构的发展可采用声激初始射流剪切层来获得。Peterson 和 Samet<sup>[4]</sup> 研究了中等雷诺数的圆射流在声激条件下不稳定模记的空间演化, 相锁定的速度扰动形成图形和测量的相锁定的剖面与 Orr-Sommerfeld 稳定性分析结果一致。因此, 小固粒的出现对射流湍流的影响可以借助线性稳定性理论来研究。Yang 等<sup>[5]</sup> 研究了气固两相混合层的空间稳定性, 忽略气体粘性和固粒速度扰动, 发现固粒的存在增强了流动的稳定性的。Sykes 和 Lyell<sup>[6]</sup> 考虑了充满固粒的圆射流的空间稳定性, 再次发现了固粒对流场的稳定作用。Ramkumar<sup>[7]</sup> 研究了小扰动下充满固粒的圆射流的稳定性, 得到了固粒属性对小扰动的影响, 但未考虑固粒的扰动属性。作者等<sup>[8]</sup> 研究了固粒的扰动和非扰动属性对混合层稳定性的影响, 但是其中的扰动属性是给定的, 与实际情形有差异。因此, 本文将研究固粒的非扰动属性对两相射流场中扰动的增长和传播的影响, 并揭示

\* 收稿日期: 1999\_02\_02; 修订日期: 2000\_03\_30

基金项目: 教育部跨世纪优秀人才培养计划基金资助

作者简介: 周泽宣(1973~), 博士。

流场失稳过程中固粒的扰动属性

## 1 数学模型和方程

对于图 1 中的射流场, 将柱坐标系建立在喷射装置上, 定义管半径  $R_0$  为流场特征长度, 选取管出口处气流出射速度  $U_0$  为流场特征速度, 则流场特征时间  $T_0$  为  $R_0/U_0$ 。假设固粒足够小, 图 2 为粒径分布曲线, 故斯托克斯阻力为固粒受到的主要作用力。对于不可压气流, 有如下的连续方程和动量方程(气流粘性项忽略):

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

$$\partial \mathbf{u}_g / \partial t + \mathbf{u}_g \cdot \nabla \mathbf{u}_g = - \nabla p + N_l A (\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_g). \quad (2)$$

对于固粒, 有如下的动量方程:

$$d\mathbf{u}_s/dt = B(\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s), \quad (3)$$

其中  $\mathbf{u}_j$  为  $j$  相速度矢量,  $p$  为流场压力,  $\bar{p}$  为流场平均压力,  $A = mT_0\alpha_s/\rho_g$ ,  $B = mT_0/\rho_s$ ,  $\alpha_s$  为固粒容积系数,  $\rho$  为  $j$  相的物质密度,  $m$  为斯托克斯阻力系数, 下标  $g$  和  $s$  分别表示气相和固相,  $N_l$  为固粒存在系数 [ $l = i$ (射流区) 或  $o$ (非射流区)], 取 0(固粒不存在) 或 1(固粒存在)。

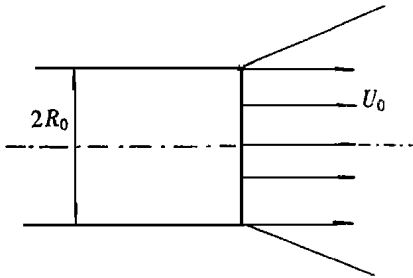


图 1 两相射流

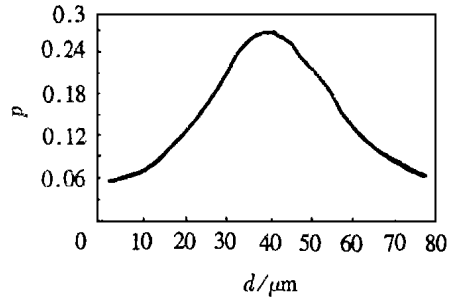


图 2 颗粒粒径分布曲线

图 1 中的射流, 在雷诺数为  $10^5$  左右时, 出口处射流区向非射流区转变迅速, 厚度接近零, 射流速度剖面如帽顶形状, 故其平均速度矢量可为:  $\mathbf{U} = [U_l, 0, 0] = (1, 0, 0)$  ( $r < 1$ ) 或者  $(0, 0, 0)$  ( $r > 1$ )。于是可假定  $r \neq 1$  流场区域无旋, 同时前面已经忽略气体的粘性项, 因此可定义:  $\mathbf{u}_j = \nabla \Phi_j$ 。由速度剖面, 可以知道在  $r = 1$  处平均轴向速度不连续, 于是存在不稳定性, 故假定:  $r = 1 + \xi(x, \phi, t)$ , 其中  $\xi$  为半径扰动小量。假定层流状态固粒跟随气流, 则有:

$$\Phi_{jl} = \Phi_{gl} + \Phi'_{jl}, \quad p_l = p_l + p'_l,$$

式中  $\Phi_g$  为气体瞬时速度势函数;  $\Phi_s$  为固粒瞬时速度势函数;  $\Phi$  为流场平均速度势函数,  $\Phi'_g$  为气体扰动速度势函数;  $\Phi'_s$  为固粒瞬时速度势函数,  $p'$  为流场扰动压力。

由于瞬时速度势和平均速度势均满足式(1) ~ (3), 故分别代入相减, 进行线性化后整理得:

$$\Delta \Phi'_{gl} = 0, \quad (4)$$

$$p'_l = - \left[ \frac{\partial \Phi'_{gl}}{\partial t} + U_l \frac{\partial \Phi'_{gl}}{\partial x} - N_l A (\Phi'_{sl} - \Phi'_{gl}) \right], \quad (5)$$

$$\partial \Phi'_{sl} / \partial t + U_l \partial \Phi'_{sl} / \partial x = B (\Phi'_{gl} - \Phi'_{sl}). \quad (6)$$

式(5) 为两相流场的修正伯努利定理的线性形式。

$r = 1$  处是射流区和非射流区的交界面, 故存在气相连续速度和连续压力条件。

根据流场的边界条件特点, 引入如下的扰动:

$$\dot{\Phi} = \begin{cases} \dot{\Phi}_i = b_j I_n(\alpha r) \xi \\ \dot{\Phi}_o = b_j K_n(\alpha r) \xi \end{cases} \quad \xi = e^{i[\alpha(x-Ct) + n\theta]} \quad (7)$$

其中  $\alpha$  为实波数,  $n$  为非轴对称扰动阶数,  $C$  为复频率, 其虚部  $C_i$  为放大因子, 决定流场稳定性,  $C_i > 0$  对应流场不稳定,  $C_i \leq 0$  对应流场稳定, 其实部  $C_r$  为波速,  $b_j$  为常数。将  $g$  相的扰动速度势代入式(5)知  $I_n$  和  $K_n$  为  $n$  阶修正贝塞尔函数。

将上述的扰动代入前面的扰动方程, 结合流场连续条件, 消去扰动压力和任意系数, 并且代入  $N_i = 1, N_o = 0$  得:

$$\frac{(C-1)^2 / [(C-1) + iD/\alpha] I_n}{(C-1) + iB/\alpha} \frac{I_n}{I_n} = C^2 \frac{K_n}{K_n} \quad (8)$$

其中:  $D = A + B$ 。

这样, 两相射流界面稳定性方程就得到了。

定义反映固粒扰动跟踪性能的参数, 即固气扰动速度比值:  $R_V = R_a e^{i\theta}$ , 其中:  $R_a$  为比值幅值,  $\theta$  为固\_气扰动相位差。从前面的推导过程, 可以得到下面的表达式:

$$R_V = \frac{B}{B - i\alpha(C-1)} \quad (9)$$

## 2 计算数据、方法与结果

### 2.1 计算数据

已假定固粒与气流的平均速度相同, 故阻力系数:  $m = \rho_s \sum_i P f_i / \tau_{s_i}$ , 其中  $P_i$  是直径为  $d_i$  的固粒群的质量含量,  $f_i$  是直径为  $d_i$  的固粒阻力修正系数,  $\tau_{s_i} = \rho_s d_i^2 / 18 \mu_g$  是直径为  $d_i$  的固粒的松弛时间,  $\mu_g$  为气体动力粘度。对于阻力修正系数, 采用如下通用公式:

$$f_i = 1 + 15.8341 \alpha_s P_i / (1 - \alpha_s P_i)^2 - 25.4139 (\alpha_s P_i)^2 / (1 - \alpha_s P_i)^4 \quad (10)$$

对于固粒的质量含量, 见图 2 所示, 选取固粒为煤粉。

基于上述公式, 可定义新的反映固粒与气流的作用的量纲为一的参数——等效斯托克斯数:

$$St_e = \frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{P f_i}{\tau_{s_i}} \quad (11)$$

### 2.2 计算方法及结果

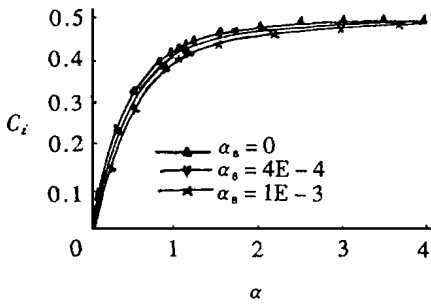
对于稳定性方程(8), 采用修正的解代数多项式方程的牛顿下山法程序, 求出复频率。计算固粒阻力系数时, 利用图 2 所示的粒径分布曲线, 选取 68 种粒径。

图 3~ 图 6 为两相射流的稳定性特征曲线与单相流的稳定性特征曲线, 其中图 3 和图 4 为扰动放大因子, 图 5 和图 6 为扰动波速。图 7~ 图 10 为两相射流场中固气扰动速度比值曲线, 其中图 7 和图 8 为固气扰动速度比值幅值, 图 9 和图 10 为固气扰动相位差。

## 3 讨论与结论

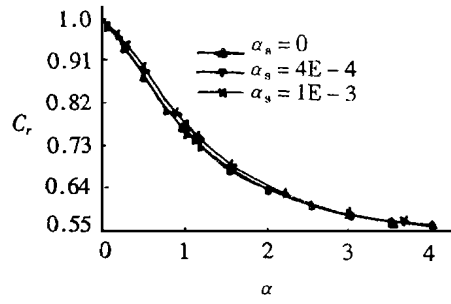
纵观图 3~ 图 6 中的稳定性特性曲线, 可见:

1) 两相射流与单相射流相比, 无论是轴对称扰动, 还是非轴对称扰动, 扰动放大因子减少, 而波速增加。这说明, 存在于流场的固粒, 对流动中扰动增长起抑制作用, 但对流动中扰动传播起加快作用。这一结论与 Ramkumar<sup>[10]</sup> 用截然不同于作者的方法得到的结论一致。



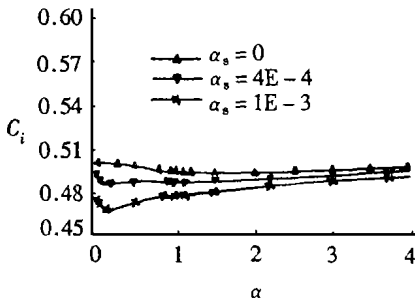
$n = 0, Ste = 10$

图3 放大因子曲线图



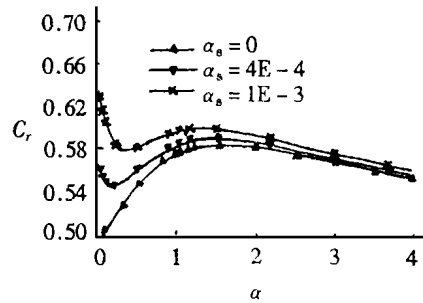
$n = 0, Ste = 10$

图4 波速曲线图



$n = 1, Ste = 1$

图5 放大因子曲线图



$n = 1, Ste = 10$

图6 波速曲线图

2) 两相射流与单相射流相比,轴对称扰动放大因子的减少程度大于非轴对称扰动放大因子的减少程度,而轴对称扰动波速的增加程度小于非轴对称扰动波速的增加速度。这说明,固粒对轴对称扰动增长的抑制程度强于对非轴对称扰动增长的抑制程度,而对轴对称扰动传播的加快程度弱于对非轴对称扰动传播的加快程度。

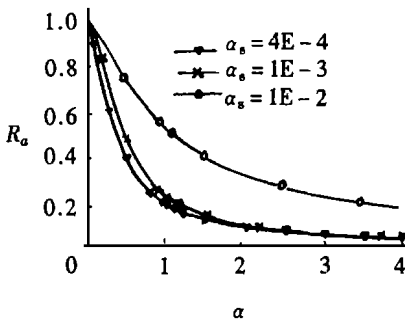
3) 对于两相射流,无论扰动性质如何,随着固粒容积系数的增大,扰动放大因子减少,而扰动波速增加,说明流场中的扰动增长被不断地削弱,而扰动传播不断被加快。其原因是,固粒容积系数的增大,意味着流场中存在的固粒增多,而由(1)知道固粒在流场的存在对扰动增长起抑作用,而对扰动传播起加快作用,所以两相射流场中的扰动增长不断地被削弱而扰动传播不断地被加快。

纵观图7~图10中的固气扰动速度比值曲线,可见:

4) 对于轴对称扰动和非轴对称扰动,在整个波数范围内,固气扰动速度比值幅值不大于1,固气扰动相位差不大于零。这说明,在流场失稳过程中,固粒的扰动速度比气流的小,固粒的相位滞后于气相的相位。

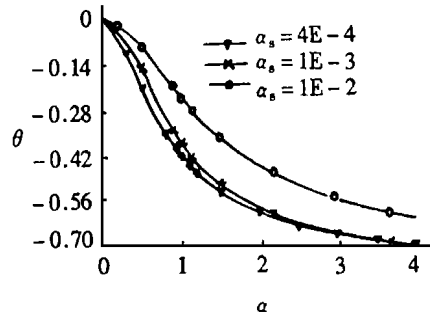
5) 不管扰动是轴对称扰动还是非轴对称扰动,随着扰动波数的增大,固气扰动速度比值幅值减小,固气扰动相位差减小,其绝对值还增大。这说明,在流场失稳过程中,固粒的扰动特性会随着波数的变化而变化。

6) 轴对称扰动情形与非轴对称扰动情形相比,固气扰动速度比值幅值较大,固气扰动相位差较小,其绝对值增大。这说明,在流场失稳过程中,同等条件下,固粒的扰动特性与扰动性质有关,且固粒的轴对称扰动速度大于非轴对称扰动速度,固粒的轴对称扰动相位滞后程度小。



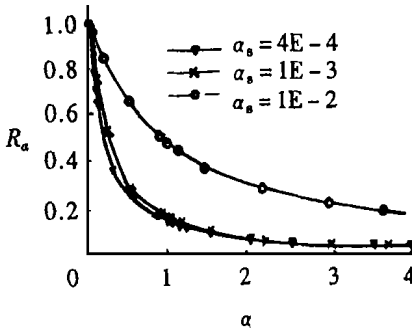
$n = 0, Ste = 10,$

图7 比值幅值曲线图



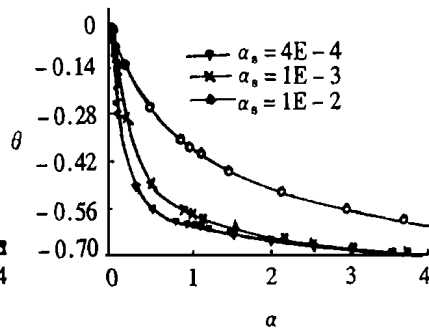
$n = 0, Ste = 10$

图8 相位差曲线图



$n = 1, Ste = 10, 1 - \alpha_s = 10^{-3}$

图9 比值幅值曲线图



$n = 1, Ste = 10, 1 - \alpha_s = 10^{-3}$

图10 相位差曲线图

于非轴对称扰动的滞后程度。

7) 不管扰动性质如何,随着固粒容积系数的增大,固气扰动速度比值幅值增大,固气扰动相位差增大,其绝对值减小;但是,固气轴对称扰动速度比值幅值增加程度大于固气非轴对称扰动速度比值幅值增加程度,固气轴对称扰动相位差增大程度大于固气非轴对称扰动相位差增大程度。这说明,在流场失稳过程中,同等条件下,固粒的扰动特性与扰动性质有关,且固粒的轴对称扰动速度大于非轴对称扰动速度,固粒的轴对称扰动相位滞后程度小于非轴对称扰动的滞后程度。

从上面的讨论可以得出以下结论:存在于射流场的固粒,对流场中扰动的增长起抑制作用,而对扰动传播起加快作用;固粒对轴对称扰动的抑制程度强于对非轴对称扰动的抑制程度,而对轴对称扰动传播加快的程度则弱于对非轴对称扰动传播加快的程度;固粒容积系数越大,越抑制扰动的增长,越加快扰动传播;流场失稳过程中,固粒的扰动速度值小于气流的扰动速度值,固粒的扰动相位滞后气流的扰动相位;固粒的扰动特性是变化的,与流场中扰动的波数及性质有关,也与固粒的非扰动特性有关。这些结论,对于认识和人工控制两个射流的发展有重要意义。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Chung J N, Troutt T R. Simulation of particle dispersion in an axisymmetric jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, **186**(1): 199~ 222.
- [2] Lognire E K, Eaton J K. Structure of a particle\_laden round jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, **236**(1): 217~ 257.
- [3] Lognire E K, Eaton J K. Active open\_loop control of particle dispersion in round jets[J]. AIAA Journal, 1994, **32**(2): 555~ 563.
- [4] Peterson R A, Samet M M. On the preferred Mode of jet instability[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, **186**(2): 511~ 529.
- [5] Yang Y, Chung J N, Trout T R, et al. The influence of particles on the spatial stability of two\_phase mixing layers[J]. Physics of Fluids, 1990, **2**(8): 1839~ 1845.
- [6] Sykes D, Lyell M J. The effect of particle loading on the spatial stability of a circular jet[J]. Physics of Fluids A, 1994, **6**(8): 1937~ 1939.
- [7] Rankumar N, Parthasarathy. Stability of particle\_laden round jets to small disturbances[J]. Gas\_Particle Flow, ASME, 1995, FED **228**(2): 427~ 433.
- [8] 周泽宣, 林建忠. 悬浮固粒对二维混合层流动失稳特性的影响[J]. 应用数学和力学, 1997, **18**(6): 507~ 512.

## Research on Stability of Interface of Jet Containing Suspended Solid Particles

Zhou Zexuan<sup>1</sup>, Tan Soon Keat<sup>2</sup>, Lin Jianzhong<sup>1</sup>

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

2. School of Civil and Structural Engineering, Nanyang Technological University, Singapore, 637898)

**Abstract:** The stability equation of interface of two\_phase jet and the corresponding particle\_gas disturbance velocity ratio equation are derived by means of the phase\_coupled model. The stability curves of interface of two\_phase jet for different particle properties and the corresponding particle\_gas disturbance velocity ratio curves are given out through numerical computation. Further, several important conclusions in effect of particle property on growth and propagation of disturbance of interface of two\_phase jet and particle disturbance property are presented on the basis of analyses of the obtained stability curves and particle\_gas disturbance velocity ratio curves. These important conclusions can play a guiding role in studying development of two\_phase jet and executing artificial controls over it in project practice.

**Key words:** stability of interface; suspended solid particles; particle disturbance property; phase\_coupled model; jet shear layer