

流化床中射流机制和双射流相互作用

洪若瑜¹, 郭庆杰², 张济宇³

(1. 苏州大学化学化工学院, 江苏省有机合成重点实验室, 江苏 苏州 215006; 2. Dept. Solids Proc., Tech. Univ. Hamburg-Harburg, Verfahrenstechnik I, Germany; 3. 福州大学化学化工学院, 福建 福州 350002)

摘要: 在文献的基础上, 通过实验和模拟的方法研究了射流机制和双射流的相互作用. 采用一个 300 mm×51 mm 的两维气固流化床, 内置两个垂直射流, 使用多路毕托管系统测量射流穿透深度. 使用描述气固流态化的双流体模型进行模拟, 用改进的 IPSA 求解模型方程, 通过数值模拟, 讨论了射流产生的机理, 再现了双射流, 并发现双射流的相互作用可分为三类: 孤立射流、过渡射流和相互作用射流, 提出了相应的射流间距判据. 发现影响双射流穿透深度最主要的因素是射流动量、两相间曳力、射流间距和床层表观气速, 建议使用 Froude 数、Reynolds 数、床层表观气速、射流间距和喷口直径来关联不同区域的射流穿透深度. 得到了一个关联式并与文献中的关联式或实验数据做了比较.

关键词: 双流体模型; 流态化; 射流; 射流穿透深度

中图分类号: TQ016 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2003)06-0486-07

1 前言

射流流化床在能源、化工、冶金、超细粉处理等工业中应用广泛. 近年来多射流技术发展迅速, 特别是在灰熔聚煤气化等领域具有较好的应用前景^[1]. 对于单个垂直或水平射流的研究已有报道^[2-7], 但只有少量的工作^[1,5-7]研究气固流态化中的多个射流, 而且大多数研究是建立在实验研究的基础上. 为了进一步理解射流现象, 本研究使用双流体模型^[4], 模拟两维床中单射流和双射流, 并在一个两维流化床中进行实验, 以测量多射流穿透深度.

2 实验

实验流程和两维流化床已有报道^[4-7]. 流化床厚度为 51 mm, 宽 300 mm, 高 2050 mm. 实验采用多路毕托管系统采集压力, 通过分析得到射流穿透深度^[5-7]. 实验中射流速度在 10~30 m/s 之间, 这是大部分粉煤气化器的操作范围. 通过改变气体在分离柱和 V 形气体分布板中的流量, 来维持床层表观气速(U_f/U_{mf}) 在 2~2.2 之间.

3 流体力学模型

3.1 模型方程

采用气固双流体模型^[4,8], 气固两相的质量和动量守恒方程以及部分模型参数如附录所示. 其它模型参数和边界条件详见文献^[4]. 在以前的研究中^[4]采用了对称性假设, 只模拟流化床的一半. 本研究模拟了整个流化床, 并使用表观密度和粘度, 使求解过程和相应计算机程序大大简化.

收稿日期: 2003-04-02, 修回日期: 2003-07-08

基金项目: 中国科学院过程工程研究所多相反应开放实验室基金资助

作者简介: 洪若瑜(1966-), 男, 江苏省苏州市人, 博士, 研究员, 化学工程专业, E-mail: rhong@suda.edu.cn;

感谢郭慕孙院士、李洪钟研究员、李静海院士及 Blake T R, Fan S L, Yang W C 和 Zhu J 教授.

3.2 数值方法和计算机程序

模型方程是强烈耦合的非线性偏微分方程组, 只能用适当的数值方法加以求解. IMF(implicit multi-field)法^[9]是第一种解决两相流的算法, 当网格较密时比较耗时. IPSA(Inter Phase Slip Algorithm)法^[10]强调方程的隐式和计算机程序的通用性. 本研究采用改进的 IPSA 法, 有关计算方法和步骤已有报道^[4], 不同的是本研究使用 PDC(Partial Donor Cell)法^[9]求解颗粒体积分方程, 以减少数值扩散. 对于动量方程, 使用一种组合格式^[11]: 当 $Pe < 10$ 使用 PLD(Power Law Difference), 反之使用一阶上风格式.

4 结果与讨论

实验中采用 8 种不同床料, 其物理性质如表 1 所示. 实验中射流穿透深度的定义见文献^[4]. 计算中将空隙率为 0.85 的面定义为气泡表面^[4].

表 1 实验中床料的物性
Table 1 Physical properties of experimental materials

No.	Particle type	Particle diameter, d_p (mm)	Particle density, ρ_s (kg/m ³)	Min. fluidization velocity, U_{mf} (m/s)	Geldart type
1	Resin	0.744	1474	0.220	B
2	Millet	1.640	1335	0.580	D
3	Silica sand	0.347	2550	0.110	B
4	Glass bead 1	1.134	2673	0.624	D
5	Glass bead 2	1.640	2673	1.160	D
6	20% millet+80% resin	0.840	1444	0.311	B
7	30% millet+70% resin	0.898	1430	0.342	D
8	40% millet+60% resin	0.964	1415	0.275	D

4.1 单射流的机制

首先模拟一个二维流化床, 床宽 40 cm, 高 60 cm, 内装一半硅砂. 气体分布器的气速为 0.3 m/s, 以维持最小流化速度. 中心喷嘴宽 1 cm, 射流速度为 10.0 m/s, 用以改善颗粒循环. 气体使用 20°C 时的物性, 硅砂的直径为 50 μm , 密度 2600 kg/m³, 球形度为 1. 模拟时使用 81×101 网格.

模拟计算能直接得到的数据有: 两相的速度矢量和空隙率分布、气相的压力分布. 通过处理数据还能得到更多的宏观信息. 图 1 显示了具有单射流的二维流化床, 通过模拟计算再现了气体射流的生成、长大、与喷管脱离而形成气泡、气泡上升和在床表面破裂的情况: (1) 当 $t=0$ s, 开始

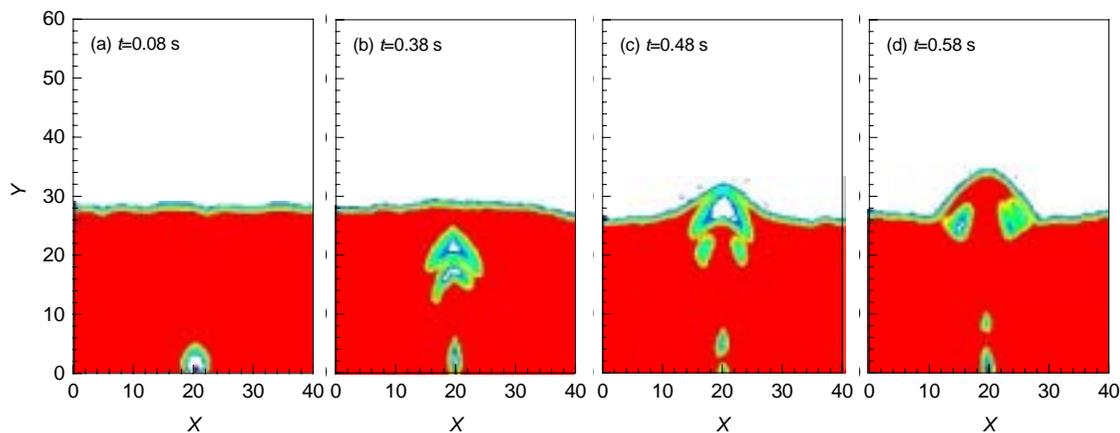


图 1 流化床中单射流的流动图像

Fig.1 Flow patterns of a single jet in a fluidized bed ($d_p=50 \mu\text{m}$, $\rho_p=2600 \text{ kg/m}^3$, $U_j=10 \text{ m/s}$)

引入中心射流; (2) 喷嘴上方的颗粒受到气相的曳力作用而上升, 逐渐形成一个火炬般的空穴. 当 $t=0.08\text{ s}$, 第一个气泡形成并且开始与喷嘴分离[图 1(a)]; (3) 当 $t=0.38\text{ s}$, 第一个气泡上升到床的表面, 并与后续气泡合并, 同时喷嘴上方还在形成其它气泡[图 1(b)]; (4) 当 $t=0.48\text{ s}$, 第一个气泡在床层的表面破裂[图 1(c)]; (5) 当 $t=0.58\text{ s}$, 气泡冲破床层, 床表面的颗粒向上喷射[图 1(d)].

图 2(a)和(b)分别表示在 $t=0.06\text{ s}$ 和 $t=0.10\text{ s}$ 时射流底部的气体速度矢量. 从图中可以看到射流底部的两个过程. 一个是颗粒受高速气体的曳力作用向上运动, 形成一个火炬般的空穴—射流, 见图 2(a). 另一个是气体和颗粒被卷吸进入射流, 见图 2(b). 刚开始, 射流还没有形成, 第一个过程占主导地位, 气体推动颗粒向上向外运动, 逐渐形成一个射流结构. 射流形成后, 在射流底部的气体速度相当大, 第二个过程占主导, 射流底部被卷吸过程压缩, 当进一步压缩时射流将与喷嘴分离. 因此, 在喷嘴上方的射流不断形成并从喷嘴分离. 可以看出, 射流的动量和耗散起着重要的作用, 决定射流穿透深度.

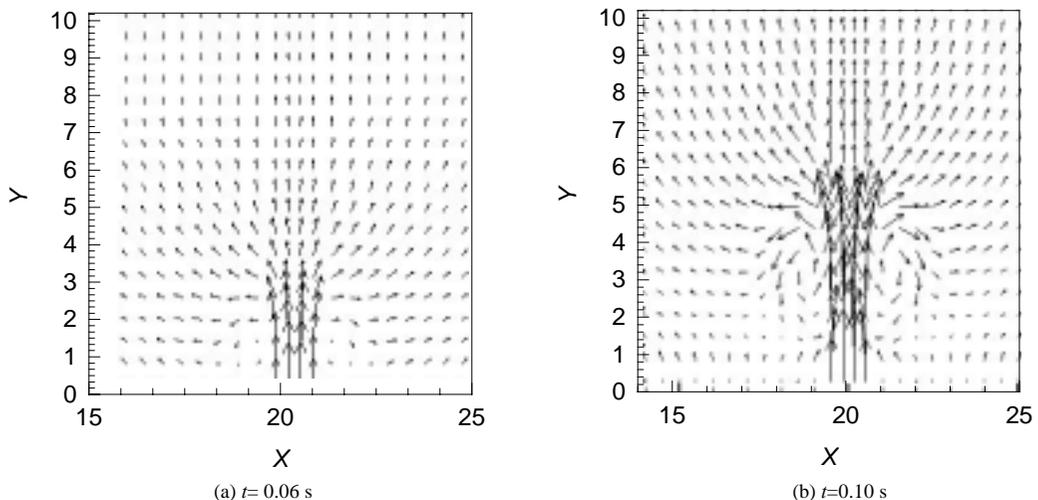


图 2 流化床中射流附近气速的向量
Fig.2 Velocity vectors around a central jet in a fluidized bed

4.2 双射流的相互作用

模拟结果发现: (1) 当射流间距远远大于喷嘴的直径, 并且气体速度和床层表观气速都相对较低时, 两个射流互不影响, 如图 3 所示, 称为互不作用射流. (2) 当两个射流进一步接近, 射流开始相互作用, 但并不合并, 如图 4 所示, 称为过渡射流. (3) 当气体速度足够大并且两个射流非常接近时, 两个射流将合并, 如图 5 所示, 称为相互作用射流.

4.3 射流间距对射流穿透深度的影响因素

文献[10]系统地研究了影响射流穿透深度的因素, 考察了有关射流性质、颗粒特性、流化气体特性、床层特性对流化床中双垂直射流穿透深度的影响, 特别是初步考察了射流间距的影响.

实验在二维流化床^[4-7]中进行, 床内有双垂直射流喷嘴, 喷嘴直径是 11 mm, V 型气体分布板上的两个喷嘴的间距可调, 实验中使用树脂颗粒作为床料, 通过调节 V 型气体分布板的气体流量而维持初始流态化. 实验中由于技术上的问题, 射流中心间距 $(L-d_j)/d_j$ 只能大于 3.0, 通过实验发现, 此时射流穿透深度基本不受射流间距的影响.

为了更好地研究射流间距的影响, 数值模拟时采用射流间距为 0.0, 0.5, 0.8, 0.9, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0,

6.0, 7.0, 10.0, 20.5 和 30.0. 计算中发现, 双射流的相互作用可分为三类: (1) 当射流间距很大时 (>10), 射流不相互作用, 称为孤立射流, 如图 3 所示. (2) 当射流间距中等时(3.5~10.0), 射流表现

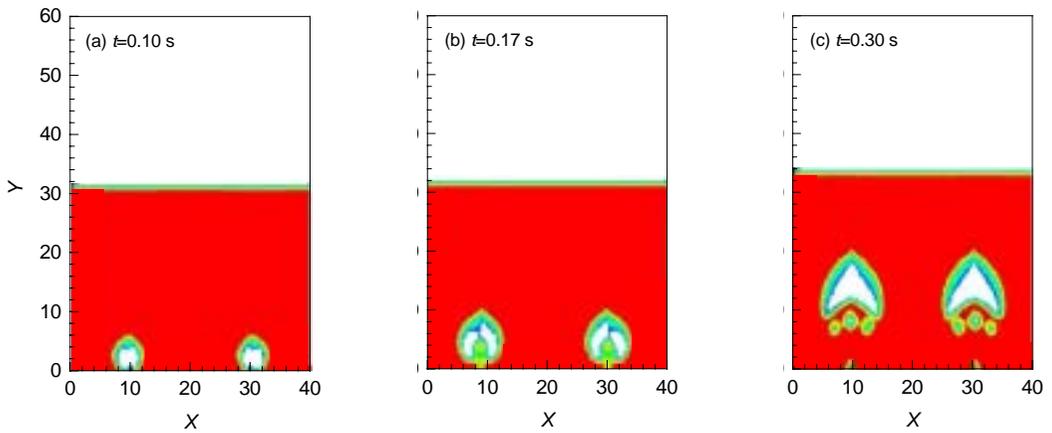


图 3 孤立射流的流动图像

Fig.3 Flow patterns of isolated jets $[(L-d_j)/d_j > 10]$

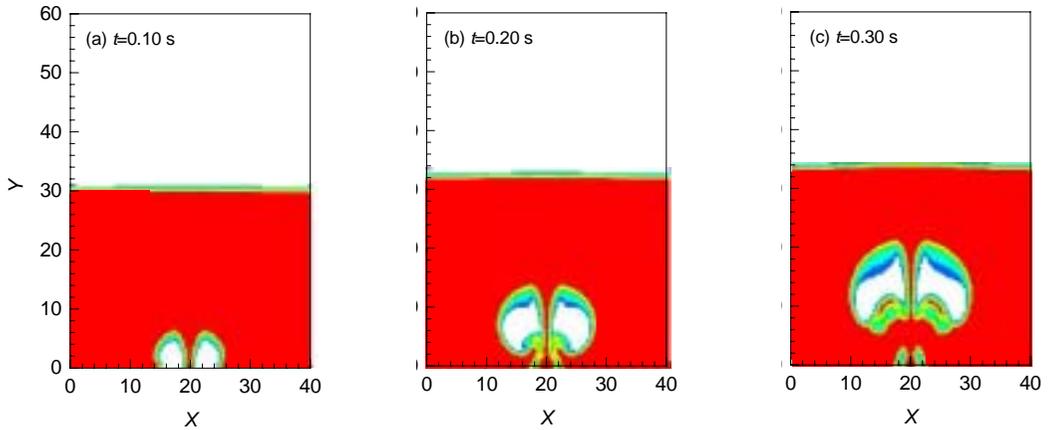


图 4 过渡射流的流动图像

Fig.4 Flow patterns of transient jets $[3.5 \leq (L-d_j)/d_j \leq 10]$

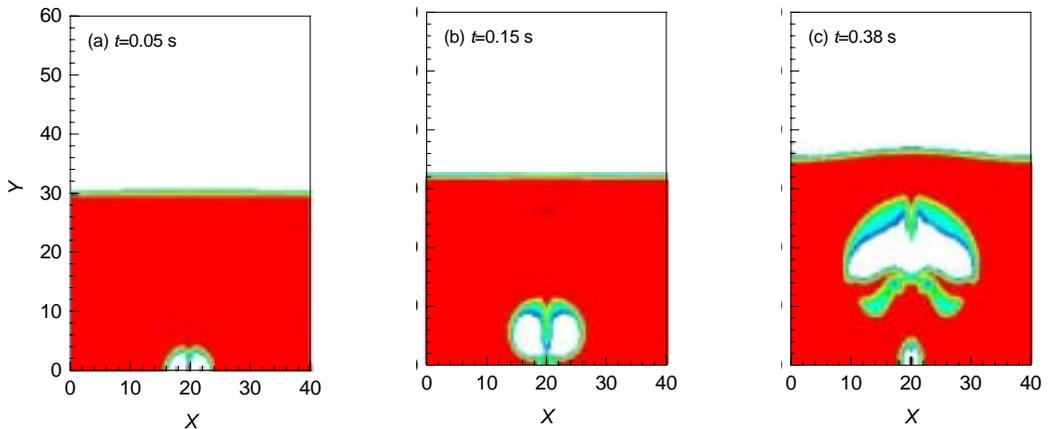


图 5 相互作用射流的流动图像

Fig.5 Flow patterns of interacting jets $[(L-d_j)/d_j < 3.5]$

出较弱的相互作用,称为过渡射流,如图4所示.这时射流会有较大的变形但不会合并.(3)当射流间距很小时(0~3.5),两个射流很容易在喷嘴上方合并,形成一个更大的射流,称相互作用射流,如图5所示.此时射流穿透深度将随射流间距的增加而增加(图略),原因是气体和颗粒在射流颈部的卷吸过程在很大程度上决定双射流穿透深度,该过程切断了射流的颈部.当间距<3.5时,一个大的射流形成,如果射流间距增加,大射流的颈部也增加,此时切断射流颈部将需要更多时间.同时,更多的气体和颗粒将卷吸进入这个空腔,射流因此会更高.因此得到如下判据: $(L-d_j)/d_j > 10$ 时为孤立射流; $3.5 \leq (L-d_j)/d_j \leq 10$ 时为过渡射流; $(L-d_j)/d_j < 3.5$ 时为互作用射流.

4.4 孤立射流和过渡射流穿透深度的关联式

影响多射流穿透深度的因素有射流气速、喷嘴直径、颗粒密度和直径、流化气体的粘度和密度、射流间距等.由于表观气速为常数($U_f/U_{mf}=2\sim 2.2$),故不在下面的关联式中出现.

射流的动量、两相间的曳力和卷吸作用决定无因次射流的穿透深度.因此选取无因次数 Fr 和 Re , $Fr = \rho_g U_j^2 / (\rho_s g d_j)$ 是 Froude 数,描述气体射流的惯性. $Re = \rho_g U_j d_j / \mu_g$ 是 Reynolds 数,是惯性力和粘性力之比,也可以用来估算曳力和卷吸的大小.这里不选取气体和固体的密度之比,因为密度的影响已包括在 Re 和 Fr 中.通过关联本文和文献中有关单射流的实验数据^[1,3,12],得到如下用于计算射流穿透深度的关联式:

$$H_j/d_j = 26.47 Fr^{0.293} Re^{-0.1138} \tag{1}$$

式(1)忽略了射流间距,能用来预测射流流化床中 Geldart A, B, C 和 D 类颗粒流化时,单射流或间距较大的多射流(孤立或过渡射流)的射流穿透深度.式(1)与实验数据的最大偏差为 30%,平均偏差约为 12%.图6显示了式(1)与文献实验数据^[5]和文献关联式^[11,3,12]的对比.式(1)在这些曲线的中间.

4.5 相互作用射流的穿透深度

很难在互作用射流区得到有关多射流穿透深度的关联式.下式可用来进行粗略估计:

$$H_j/d_j = 26.47 Fr^{0.293} Re^{-0.1138} a, \tag{2}$$

其中, $a \approx \begin{cases} 1.4 \sim 1.6, & 0.0 \leq L \leq L_c \\ 1.0, & L > L_c \end{cases}$

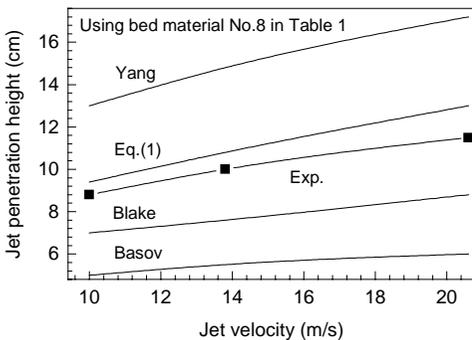


图6 关联式(1)与实验值和文献值的比较
Fig.6 Comparison of Eq.(1) with our experimental data and referential correlations

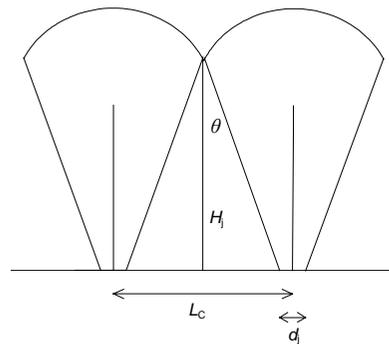


图7 射流半角的定义
Fig.7 Definition of jet half angle, θ

4.6 相互作用射流区域的预测

Merry^[2]仔细研究了射流气速、床径、喷嘴直径和物料特性对单射流穿透深度的影响,发展了

一个简单的模型用以解释射流的发展过程, 并获得如下公式计算射流半角(如图 7 定义):

$$\tan \theta = \frac{1}{10.4} \left(\frac{\rho_s d_p}{\rho_g d_j} \right)^{0.3} \quad (3)$$

两射流能发生合并时的最远间距是

$$L_c = d_j + 2H_j \tan \theta, \quad (4)$$

其中, 多射流穿透深度 H_j 可以通过式(1)求得.

以 4.1 节中的物料为例, 通过数值模拟计算发现, $(L-d_j)/d_j$ 大约是 3.5, 即 $L_c \approx 4.50d_j$, 计算中床层的表观气速 U_j/U_{mf} 大约是 1.57 ($< 1/2U_{mf}$, 偏低). 从式(1)中得出 $H_j = 8.82d_j$, 从式(3)得出 $\tan \theta = 0.383$. 因此, 运用方程(4)得出 $L_c = 4.45d_j$. 本预测方法与数值模拟计算值相吻合.

5 结论

使用双流体模型模拟了射流流化床, 得到如下结论:

- (1) 模拟再现了单射流及气泡的形成和发展过程.
- (2) 射流是在高速气体作用下颗粒向上运动而形成的, 由于气体卷吸颗粒形成射流底部被截断而脱离, 从而形成气泡.
- (3) 建议使用 Froude 数和 Reynolds 数来关联射流穿透深度.
- (4) 图像化显示了双射流的相互作用, 根据射流间距可分为 3 个射流作用区域, 得到了其判据.
- (5) 得到了两个预测射流穿透深度的关联式, 可用于不同的射流作用区域.

附录: 气固两相流的控制方程

1. k 相的连续方程($k=g, s$)

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \mathbf{V}_k) = 0, \quad (5)$$

这里使用表观密度和粘度, 如: $\rho_k' = \rho_k \alpha$.

2. k 相的动量方程($k=g, s; l=g, s; l \neq k$)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_k \mathbf{V}_k) + \nabla \cdot (\rho_k \mathbf{V}_k \mathbf{V}_k) = -\varepsilon_k \nabla p_g + \beta (\mathbf{U}_1 - \mathbf{V}_k) + \nabla \cdot \overline{\tau}_k + \rho_k \mathbf{g}. \quad (6)$$

3. K 方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g K) + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{V}_g K) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{eg}}{\sigma_k} \nabla K \right) + (G_k - \rho_g \varepsilon) \alpha_g. \quad (7)$$

4. ε 方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{V}_g \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{eg}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{K} (C_1 G_k - C_2 \rho_g \varepsilon) \alpha_g. \quad (8)$$

$K-\varepsilon$ 模型中的有关模型参数(如 $C_1, C_2, G_k, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 等)可以查看文献[10].

5. 气固两相间的曳力系数

当 $\alpha_g \leq 0.8$, 气固两相间的曳力系数可以从 Ergun 公式导出^[8]. 当 $\alpha_g > 0.8$, 曳力系数可以从 Wen 等^[8]的公式导出.

符号表：

a	式(2)中的系数	L_c	临界射流间距 (m)	X, Y	水平和垂直方向 (m)
C_d	阻力系数	p_g	气体压力 (Pa)	α_k	相 k 的体积分数
d_j	射流喷嘴直径 (m)	Re_p	广义颗粒 Reynolds 数	β	气固曳力系数 (kg/m^3)
d_p	颗粒直径 (m)	S	形变速率张量 (s^{-1})	θ	射流半角
Fr	Froude 数	t	时间 (s)	ε	湍流脉动动能耗散速率 (m^2/m^3)
g	重力加速度 (m/s^2)	\vec{v}_k	相 k 的速度向量 (m/s)	μ_{eg}, μ_{es}	气体或颗粒相有效粘度 [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$]
H_j	射流穿透深度 (m)	U_f	床层表观气速(m/s)	μ_g	气体分子粘度 [$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$]
K	湍流脉动动能 (m^2/m^2)	U_j	射流气速 (m/s)	ρ_k	相 k 的密度 (kg/m^3)
L	射流间距 (m)	U_{mf}	初试流化气速 (m/s)	τ_k	相 k 的应力张量 (Pa)
下标		g	气相	s	液相

参考文献：

- [1] Blake T R, Webb H, Sunderland P B. The Nondimensionalization of Equations Describing Fluidization with Application to the Correlation of Jet Penetration Height [J]. Chem. Eng. Sci., 1990, 45(2): 365–371.
- [2] Merry J M D. Penetration of a Horizontal Gas Jet into a Fluidized Bed [J]. Trans. Inst. Chem. Engrs., 1971, 49: 189–197.
- [3] Yang W C, Keairns D. Estimating the Jet Penetration Depth of Multiple Vertical Grid Jets [J]. Ind. Eng. Chem. Fundam., 1979, 18(4): 317–320.
- [4] Hong R Y, Li H Z, Cheng M Y, et al. Numerical Simulation and Verification of a Gas–Solid Jet Fluidized Bed [J]. Powder Technol., 1996, 87(1): 73–81.
- [5] Luo G H, Zhang J Y, Zhang B J. The Behavior of Gas Flow Ejected from Two Vertical Nozzles in a Fluidized Bed [J]. Chinese J. Chem. Eng., 1997, 3: 280–286.
- [6] Guo Q J, Liu Z Y, Zhang J Y. Flow Characteristics in a Large Jetting Fluidized Bed with Two Nozzles [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2000, 39: 746–751.
- [7] Guo Q J, Tang Z, Yue G X, et al. Flow Pattern Transition in a Large Jetting Fluidized Bed with Double Nozzles [J]. AIChE J., 2001, 47(6): 1309–1317.
- [8] Gidaspow D. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions [M]. New York: Academic Press, 1994. 57–65.
- [9] Harlow H F, Amsden A A. Numerical Calculation of Multiphase Flow [J]. J. Comput. Physics, 1975, 17: 19–57.
- [10] Spalding D B. Computer Simulation of Two-phase Flows with Special Reference to Nuclear Reactor Systems [A]. Morgan K, Johnson J A, Smith R. Computational Techniques in Heat Transfer [C]. Swansea: Pineridge Press, 1985. 1–12.
- [11] Leonard B P, Taylor C, Morgan K. Computational Techniques in Transient and Turbulent Flow [J]. Swansea: Pineridge Press, 1981. 1–11.
- [12] Basov V A, Markheva V I, Melik-Akhazarov T Kh, et al. Investigation of the Structure of a Nonuniform Fluidized Bed [J]. Int. Chem. Eng., 1969, 9(2): 263–269.

Jet Regime and Double Jet Interaction in Gas–Solid Fluidized Beds

HONG Ruo-yu¹, GUO Qing-jie², ZHANG Ji-yu³

(1. Dept. Chem. Chem. Eng., Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

2. Dept. Solids Processing, Tech. Univ. Hamburg-Harburg, Verfahrenstechnik I, Germany;

3. Dept. Chem. Chem. Eng., Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: Experimental investigation and numerical simulation were conducted for a gas–solid fluidized bed with a single jet or double jets. The jet penetration heights in a 300 mm×51 mm two-dimensional fluidized bed were measured with pressure transducers. Numerical modeling and simulation was based on a two-fluid model with $K-\varepsilon$ model for gas turbulence. Jet formation and detachment above jet nozzle, bubble ascending and coalescence in bed, and bubble burst on bed surface were visualized by computer simulation. It was found that the behavior of the double jet system could be classified into three categories: isolated jets, transitional jets, and interacting jets. The criterions of jet separation for those categories were proposed. Jet penetration correlations were also recommended for those categories

Key words: two-fluid model; fluidization; jet; jet penetration height