

气固两相流中颗粒时均速度的测量新方法

鄂承林, 卢春喜, 高金森, 徐春明, 时铭显

[石油大学(北京)重质油加工国家重点实验室, 北京 102200]

摘要: 根据互相关测速技术提出了一种测量颗粒时均速度的新方法, 与 Aguillon 和 Nieuwland 提出的方法相比, 本方法不仅考虑了采样时间内向上及向下运动颗粒微元体的速度和数量变化, 而且还考虑了所测颗粒微元体的浓度变化. 为了比较几种测量方法间的差别, 采用 PV4A 型光纤测量仪, 在循环流化床冷态实验装置上测量了不同操作条件下的颗粒速度, 并对 3 种方法的计算结果进行了对比. 结果表明, 在高气速、低颗粒浓度条件下, 3 种方法计算的颗粒时均速度相差较小, 而在低气速、高颗粒浓度条件下, 3 种方法计算的颗粒时均速度相差较大, 并且本文方法所计算的颗粒质量流率与实际测量值最接近.

关键词: 气固两相流; 颗粒时均速度; 测量; 互相关; 光纤测定仪

中图分类号: TQ051.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2003)06-0505-07

1 前言

颗粒速度是影响循环流化床内气固间传质、传热及其流动行为的重要参数, 对其进行准确、可靠的测量一直是气固两相流研究者们所关心的问题.

针对目前颗粒速度测量方法^[1-3]存在的不足, 本文提出一种测量颗粒时均速度的新方法, 既考虑了向上与向下运动颗粒微元体的速度和数量变化, 又考虑了所测颗粒微元体间的浓度差别, 并在一个循环流化床冷态实验装置上, 根据互相关测速技术, 采用中国科学院过程工程研究所开发的 PV4A 型光纤测量仪测量了不同操作条件下的颗粒速度分布.

2 测量方法

光纤对颗粒速度的测量是根据互相关测速原理设计而成. 当两束光纤的排列方向与颗粒的运动方向相同时, 颗粒在经过两束光纤时将产生形状相似、而在时间上有一定延迟的两路反射光感应信号 $X(t)$, $Y(t+\tau)$, 其相应的相关函数为

$$R_{XY} = \frac{1}{T} \int_0^T X(t)Y(t+\tau)dt, \quad (1)$$

其中 T 是接收信号的时间段, 由此相关函数对两路信号进行互相关运算, 得到 R_{XY} 达到最大值时的时间 τ_0 , τ_0 即为两路信号间的延迟时间, 也就是颗粒在两束光纤间的渡越时间, 由两束光纤间的距离 L 除以延迟时间 τ_0 便可得到颗粒的运动速度.

目前主要有两种测量颗粒时均速度的方法. 一种是由 Aguillon 等^[2]提出的方法, 先对两路光纤输出信号进行互相关运算并得出 N_u , U_{ui} , N_d 和 U_{di} , 然后由下式确定颗粒时均速度 U_m :

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^{N_u} U_{ui} - \sum_{i=1}^{N_d} U_{di}}{N_u + N_d}. \quad (2)$$

该测量方法没有考虑不同颗粒微元体间的浓度差别. 由于气固流动中既存在弥散颗粒又存在颗粒聚集体, 浓度较大的颗粒聚集体运动速度较慢而浓度较小的弥散颗粒运动速度较快^[4-6], 因此该方法与气固两相的实际流动行为存在一些差别.

另一种测量颗粒时均速度的方法是由 Nieuwland 等^[3]提出的, 首先对两路光纤输出信号进行互相关运算, 得出每个颗粒微元体的速度 U_i 和浓度信号 V_i , 然后再采用 Hartge 等^[7]推荐的关系式(3)将颗粒浓度信号转变为颗粒微元体的浓度 C_i , 最后根据式(5)计算颗粒时均速度 U_m :

$$V_i - V_0 = aC_i^b, \quad (3) \quad C_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i, \quad (4) \quad U_m = \frac{G_{sm}}{C_m} = \frac{\sum_{i=1}^m C_i U_i}{\sum_{i=1}^m C_i}, \quad (5)$$

式中 V_i 是气固两相系统的光纤输出信号, V_0 是单气相系统光纤输出信号, a, b 是常数, a 依赖于气固性质及测量系统特性, b 仅与颗粒相性质有关, N 是采样时间内总采样数量.

Nieuwland 等提出的方法考虑了不同颗粒微元体间的浓度差别, 但却将所测颗粒微元体均看作向上运动. 已有的研究表明^[8,9], 在气固两相流中, 径向任何位置均存在向上及向下的运动颗粒, 向下运动颗粒的数量和速度与测量位置及操作条件有着密切的关系.

针对目前颗粒时均速度测量方法存在的不足, 本文提出一种测量颗粒时均速度的新方法. 本方法借鉴 Hartge 等^[7]推荐的关系式将两路光纤输出信号转变为颗粒浓度, 再通过对两路光纤输出信号进行互相关运算确定采样时间内向上和向下运动颗粒微元体的数量、速度和浓度, 最后根据这些参数由以下几式确定不同测量位置的颗粒时均循环强度 G_{sm} 、颗粒时均浓度 C_m 和颗粒时均速度 U_m .

$$G_{sm} = G_{su} - G_{sd} = \frac{\sum_{i=1}^{N_u} U_{ui} C_{ui} - \sum_{i=1}^{N_d} U_{di} C_{di}}{N_u + N_d}, \quad (6) \quad C_m = \frac{\sum_{i=1}^{N_u} C_{ui} + \sum_{i=1}^{N_d} C_{di}}{N_u + N_d}, \quad (7) \quad U_m = \frac{G_{sm}}{C_m} = \frac{\sum_{i=1}^{N_u} U_{ui} C_{ui} - \sum_{i=1}^{N_d} U_{di} C_{di}}{\sum_{i=1}^{N_u} C_{ui} + \sum_{i=1}^{N_d} C_{di}}. \quad (8)$$

由上式可见, 本文方法在确定颗粒时均速度时既考虑了向上与向下运动颗粒微元体的速度和数量变化, 又考虑了所测不同颗粒微元体间的浓度差别.

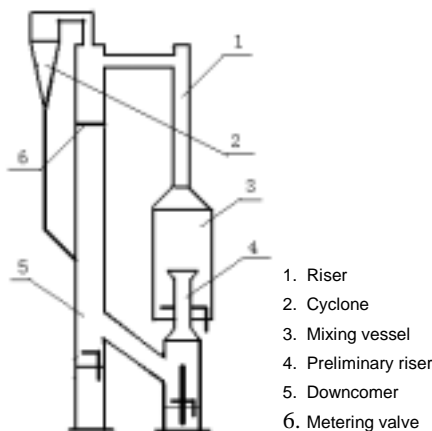


图 1 实验装置结构简图

图 1 The circulating fluidized bed pilot unit

3 实验结果

3.1 实验装置

图 1 为实验装置结构简图, 装置主要由提升段、混合段、预提升段、伴床、计量阀及旋风分离器等几部分组成.

沿混合段轴向开有 2 个测量孔, 距预提升段出口的距离分别为 $H=0.85, 1.1$ m, 沿径向布置的 9 个测量点为 $r/R=0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, 0.983$. 沿提升段轴向开有 2 个测量孔, 距预提升段出口的距离分别为 $H=3.8, 6.8$ m, 沿径向布置的 6 个测量点为 $r/R=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.943$. 实验用固体颗粒密度 1500 kg/m^3 、堆积密度 1000 kg/m^3 、平均粒径 $100 \mu\text{m}$.

在对装置内某一位置的实际测量中,首先确定一定采样时间内的采样次数 m ,然后再将每次采样的数据划分为一定的采样组数 n ,因此某一位置的总采样数量为 $m \times n$.当总采样数量较多而采样时间不是很长时,则每组采样时间很短,因此可把所测的各组数据作为所测颗粒微元体的瞬时速度.本研究中所选的采样次数为 10 次,每次采样的组数为 128 组,总采样数量 1280,总采样时间 10.5 s,单组采样时间 8.2 ms.在对两路光纤输出信号进行互相关计算时,只有那些相关系数较大的数据被认为是由同一颗粒微元体产生的两路信号,是颗粒微元体的有效速度,而一些相关系数较小的数据被认为是由不同颗粒微元体产生的两路信号,是颗粒微元体的无效速度,需将这些无效速度删除.

3.2 结果与讨论

图 2 为在不同轴向位置及操作条件下,采用本文方法测量的颗粒向上、向下及时均速度分布曲线.由图可以看到,无论是在低气速、大浓度,还是在高气速、低浓度条件下,沿径向由中心到边壁,颗粒时均速度及颗粒向上运动速度均呈降低趋势,而颗粒向下运动速度则呈增加趋势,并且在径向任一位置均存在向下运动颗粒.沿径向由中心到边壁,向上运动颗粒速度逐渐减小,向下运动颗粒速度逐渐增大.在低气速、大浓度条件下,边壁处的向下运动颗粒量比向上运动颗粒量大,因而边壁处的颗粒时均速度为负值,这与文献[8, 9]采用五光纤探头在气固两相流中的测量结果相一致.

图 3 是在高气速、低浓度条件下,分别采用式(2)、(5)及本文方法在提升段内不同轴向位置测

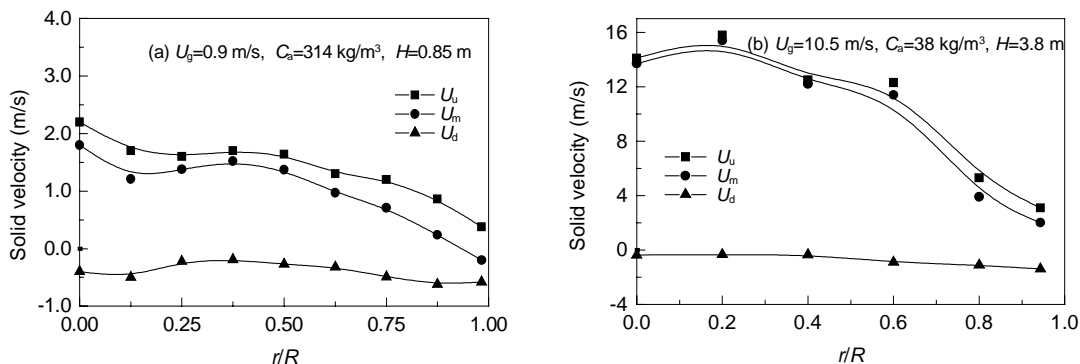


图 2 向上、向下及时均颗粒速度径向分布

Fig.2 The upward, downward and mean solid velocity as a function of dimensionless radial position

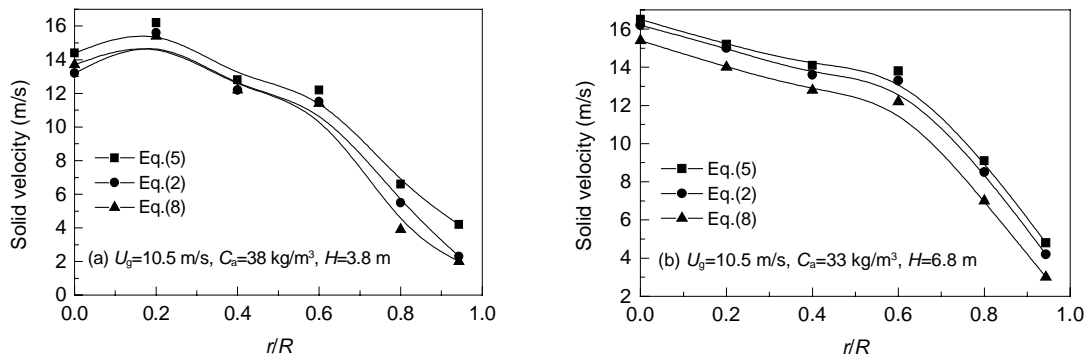


图 3 不同计算方法间的颗粒时均速度分布对比

Fig.3 The comparison of mean solid velocity between different calculating methods

量的颗粒时均速度分布对比. 由图可以看到, 采用 3 种方法测量的颗粒时均速度径向分布曲线形状相似, 均呈中心区速度较高、边壁区速度较低的抛物线形分布, 测量的颗粒时均速度相差较小.

图 4 是在上述相同条件下, 式(2)、(5)与本文方法所测的颗粒时均速度间的相对偏差径向分布对比, 颗粒时均速度间的相对偏差由以下两式计算:

$$E_1 = \left| \frac{U_{P2} - U_{P1}}{U_{P2}} \right|, \quad (9)$$

$$E_2 = \left| \frac{U_{P3} - U_{P1}}{U_{P3}} \right|. \quad (10)$$

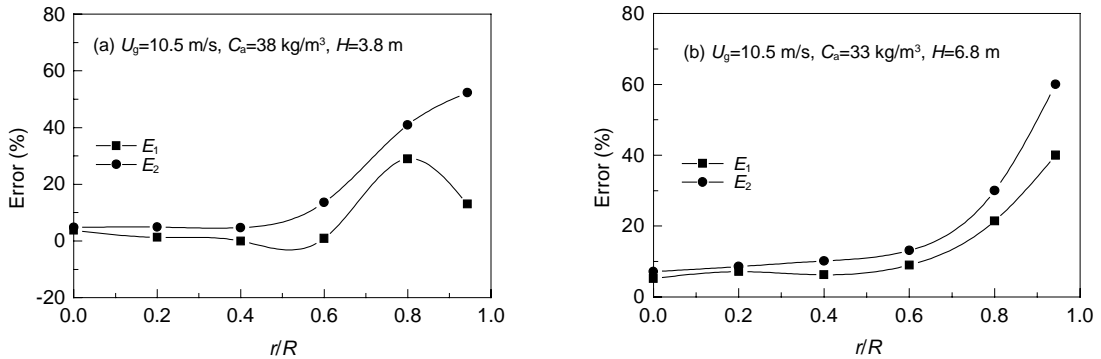


图 4 不同计算方法间的颗粒时均速度相对偏差分布对比

Fig.4 The comparison of mean solid velocity error between different calculating methods

由图 4 可以看到, 在颗粒浓度较小、气体及颗粒速度较大的中心区域($r/R=0\sim 0.8$), 3 种方法所测的颗粒时均速度间的相对偏差较小, 而在颗粒浓度较大、气体及颗粒速度较小的边壁区域($r/R=0.8\sim 0.943$), 3 种方法所测的颗粒时均速度间的相对偏差较大. 可见在高气速、低浓度条件下, 测量方法对中心处的颗粒时均速度影响较小, 对边壁处的颗粒时均速度影响较大.

图 5 是在低气速、高浓度条件下, 采用 3 种方法在混合段内两个轴向位置所测的颗粒时均速度分布对比, 图 6 为 3 种方法所测颗粒时均速度间的相对偏差径向分布对比. 由图 5 和 6 可以看到, 在低气速、高浓度条件下, 3 种方法所测的颗粒时均速度径向分布曲线形状相似, 中心区速度较高, 边壁区速度较低, 速度梯度较小, 但与高气速、低浓度条件相比, 3 种方法所测的颗粒时均速度及颗粒时均速度间的相对偏差均存在较大的差别, 式(2)及本文所测的颗粒时均速度在边壁处为负值, 而式(5)所测的颗粒时均速度在边壁处则为正值. 在 3 种测量方法中, 本文所测的颗

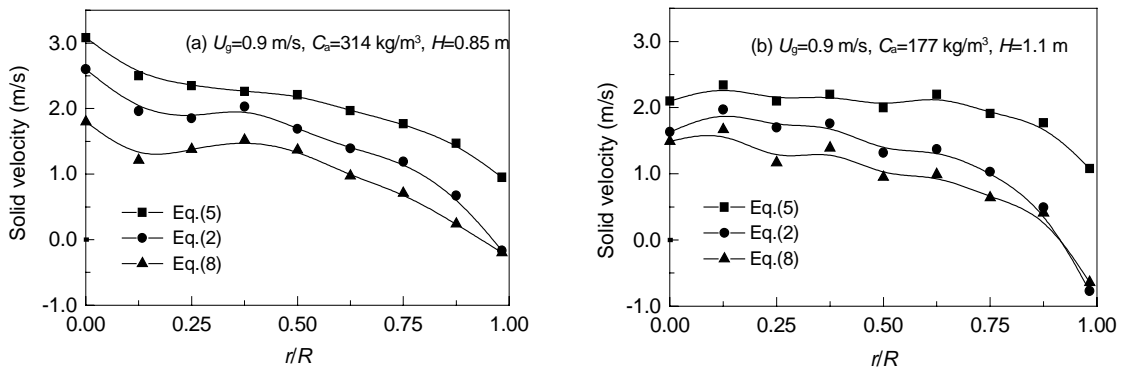


图 5 不同计算方法间的颗粒时均速度分布对比

Fig.5 The comparison of mean solid velocity between different calculating methods

粒时均速度最小,式(5)所测的颗粒时均速度及与本文的偏差均最大,式(2)的测量结果居中.在低气速、高浓度条件下,测量方法将对颗粒时均速度的测量结果产生很大影响.

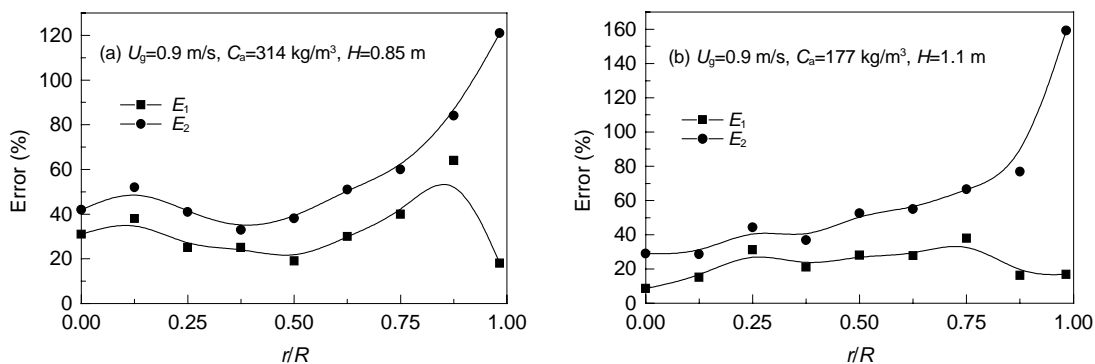


图 6 不同计算方法间的颗粒时均速度相对偏差分布对比

Fig.6 The comparison of mean solid velocity error between different calculating methods

为了比较 3 种测量方法的准确性,根据 3 种方法的测量结果分别计算了不同条件下的截面平均颗粒质量流率,并与颗粒质量流率的实际测量值 G_s^* 进行了比较,表 1 为颗粒质量流率测量值与计算值的对比,其中颗粒质量流率的计算值由下式确定:

$$G_s = \frac{2}{R^2} \int_0^R G_{sm}(r) r dr. \quad (11)$$

表 1 颗粒质量流率的计算值与实际测量值的对比

Table 1 Comparison between the average solids mass flux calculated from Eq.(11) and the imposed solids mass flux

Gas velocity (m/s)	G_s^* [kg/(m ² ·s)]	This paper		Eq.(2)		Eq.(5)	
		G_s [kg/(m ² ·s)]	Error (%)	G_s [kg/(m ² ·s)]	Error (%)	G_s [kg/(m ² ·s)]	Error (%)
6.1	60	65.0	8.3	68	13.3	78	30
7.6	73	79.7	9.2	85	16.4	100	37
10.5	166	163.5	1.5	175	5.4	208	25
10.5	210	203.0	3.3	233	11.0	269	28

由表 1 可见,由本文测量结果所计算的颗粒质量流率与实际测量值最接近,偏差在 9.2% 以内.此外 3 种方法所计算的高气速下的颗粒质量流率偏差值均小于低气速下的偏差值.

已有的研究表明^[4-6],颗粒团聚物是造成气固两相流中颗粒返混的主要原因.运动速度较慢、浓度较大、返混较大的颗粒团聚物所占比例随气速的降低及径向位置的增加而增加,而运动速度较快、浓度较小、返混较小的弥散颗粒所占的比例则随气速的降低及径向位置的增加而逐渐减少.

在高气速、低浓度条件下,床中所形成的颗粒团聚物较少,而且大部分集中在边壁区域,由中心区通过的主要是速度较快、浓度较小、返混较小的弥散颗粒,因此在采样时间内,中心区域向下运动颗粒微元体的数量较小,边壁区域向下运动颗粒微元体的数量较大,并且两区内不同颗粒微元体间的浓度差别也较小.可见在对高气速、低浓度条件下的颗粒时均速度进行测量时,在中心区域,可不考虑颗粒的向下运动及不同颗粒微元体间的浓度差别,在边壁区域,则需考虑颗粒的向下运动及不同颗粒微元体间的浓度差别.而在对低气速、高浓度条件下的颗粒时均速度进行测量时,无论是在中心区域还是在边壁区域,都要考虑颗粒的向下运动及不同颗粒微元体间的浓度差别.

4 结论

(1) 根据光纤测量原理及互相关测速技术提出了一种测量气固两相流中局部颗粒时均速度 U_m 的方法, 该方法考虑了不同运动方向颗粒微元体的数量差别和不同颗粒微元体的浓度差别。

$$U_m = \frac{G_{sm}}{C_m} = \frac{\sum_{i=1}^{N_u} U_{ui} C_{ui} - \sum_{i=1}^{N_d} U_{di} C_{di}}{\sum_{i=1}^{N_u} C_{ui} + \sum_{i=1}^{N_d} C_{di}}$$

(2) 在高气速、低浓度条件下, 3 种方法对中心区内颗粒时均速度的测量结果影响较小, 对边壁区内颗粒时均速度的测量结果影响较大; 在低气速、高浓度条件下, 3 种方法对中心区及边壁区内颗粒时均速度的测量结果均有较大的影响。

(3) 与其它两种测量方法相比, 根据本文测量结果所计算的截面平均颗粒质量流率与实际测量值间的偏差最小, 偏差在 9.2% 以内。

符号表:

a	依赖于气固性质及测量系统特性的常数	n	采样组数
b	与颗粒相性质有关的常数	N	总采样数量
C_a	截面颗粒平均浓度 (kg/m^3)	N_d	向下运动颗粒微元体数量
C_m	颗粒时均浓度 (kg/m^3)	N_u	向上运动颗粒微元体数量
C_i	颗粒瞬时浓度 (kg/m^3)	r	径向位置 (mm)
C_{di}	向下运动颗粒瞬时浓度 (kg/m^3)	R	床层半径 (mm)
C_{ui}	向上运动颗粒瞬时浓度 (kg/m^3)	U_g	表观气速 (m/s)
E_1	U_{P2} 与 U_{P1} 间的相对偏差	U_i	颗粒瞬时速度 (m/s)
E_2	U_{P3} 与 U_{P1} 间的相对偏差	U_m	颗粒时均速度 (m/s)
G_s	颗粒质量流率计算值 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	U_{di}	向下运动颗粒瞬时速度 (m/s)
G_s^*	颗粒质量流率实测值 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	U_{ui}	向上运动颗粒瞬时速度 (m/s)
G_{sd}	局部向下运动颗粒质量流率 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	U_{P1}	本文方法计算的颗粒时均速度 (m/s)
G_{sm}	局部颗粒质量流率 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	U_{P2}	方程 2 计算的颗粒时均速度 (m/s)
G_{su}	局部向上运动颗粒质量流率 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	U_{P3}	方程 5 计算的颗粒时均速度 (m/s)
H	预提升段出口的距离 (m)	V_i	气固两相系统的光纤输出信号
m	采样次数	V_0	单气相系统光纤输出信号

参考文献:

- [1] Otzar M, San Jose M J, Llamosas R. Study of Local Properties in Conical Spouted Beds Using an Optical Fiber Probe [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1995, 34: 4033–4039.
- [2] Aguilon J, Shakourzadeh K, Guigon P. A New Method for Local Solid Concentration Measurement in Circulating Fluidized Bed [J]. Powder Technol., 1996, 86: 251–255.
- [3] Nieuwland J J, Meijer R, Kuipers J A M. Measurements of Solids Concentration and Axial Solids Velocity in Gas–Solid Two-phase Flows [J]. Powder Technol., 1996, 87: 127–139.
- [4] 魏飞, 陈卫, 金涌, 等. 循环流化床提升管中固体颗粒停留时间的分布 [J]. 高校化学工程学报, 1996, 10(3): 264–270.
- [5] Lin Q, Wei F, Jin Y. Transient Density Signal Analysis and Two-phase Micro-structure Flow in Gas–Solids Fluidization [J]. Chem. Eng. Sci., 2001, 56: 1–11.
- [6] 刘会娥. 不同结构循环流化床流动、混合研究及其反应器数学模拟 [D]. 北京: 清华大学, 2000. 79–82.
- [7] Hatge E U, Rensner D, Werther J. Fiber Optical Measuring System for the Determination of Local Solid Concentrations and Velocities in Higher Concentrated Gas–Solid Flows [J]. Chemie-Ingenieur-Technik(German), 1989, 61(9): 744–745.

- [8] 范怡平, 晁忠喜, 卢春喜, 等. 催化裂化提升管预提升段气固两相流动特性的研究 [J]. 石油炼制与化工, 1999, 30(9): 43-47.
- [9] Zhu J X, Li G Z, Qin S Z. Direct Measurement of Particle Velocities in Gas-Solids Suspension Flow Using a Novel Five-fiber Optical Probe [J]. Powder Technol., 2001, 115: 184-192.

A New Method for the Measurement of Solids Time-averaged Velocity in Gas-Solid Two-phase Flow

E Cheng-lin, LU Chun-xi, GAO Jin-sen, XU Chun-ming, SHI Ming-xian

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, University of Petroleum, Beijing 102200, China)

Abstract: A new method for calculating time-averaged particle velocity was presented based on the cross-correlation technique. Compared with the other two calculating methods presented by Aguilon and Nieuwland, the new method considers not only the differences between the upward and downward particle element velocities and numbers, but also the differences of particle element concentrations. The measurement of particle time-averaged velocity was completed by using a PV4A optical fiber probe in a cold model set-up of circulating fluidized bed for the sake of ascertaining the differences between the new one and the others. The results show that the differences between them were negligible under higher superficial gas velocity and lower cross-sectional average particle concentration, while the differences were remarkable under lower superficial gas velocity and higher cross-sectional average particle concentration.

Key words: gas-solids two-phase flow; particle time-averaged velocity; measurement; cross-correlation; optical fiber probe