

研究简报

稠密气固两相同轴射流颗粒弥散特性

周华辉, 许建良, 李伟锋, 刘海峰

(华东理工大学煤气化教育部重点实验室, 上海 200237)

关键词: 稠密气固两相流; 未弥散长度; 颗粒弥散; 同轴射流

中图分类号: TQ 021.1; O 358

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2009) 02-0332-06

Particle dispersion characteristics of dense
gas-solids two-phase coaxial jets

ZHOU Huahui, XU Jianliang, LI Weifeng, LIU Haifeng

(Key Laboratory of Coal Gasification, Ministry of Education, East China University
of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The particle dispersion characteristics of the dense gas-solids two-phase coaxial jets were investigated with high-speed camera. The results showed that with increasing gas velocity, three particle dispersion modes were observed: shear dispersion, wave dispersion and oscillating dispersion, after the particle flow passed through the intact length. The normalized intact length decreased with increasing gas velocity. For the wave dispersion, the unstable wavelength increased linearly with axial distance at different gas velocities. For the oscillating dispersion, oscillating frequency decreased at first and then increased with increasing gas velocity, so the oscillating frequency had a minimum when the gas velocity was about $65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Key words: dense gas-solids two-phase flow; intact length; particle dispersion; coaxial jets

引 言

气固两相同轴射流因可促进相间的传质传热性能而广泛应用于能源、化工、航天、环保等领域^[1], 如煤气化过程中常伴随气固两相同轴射流。由于气固两相同轴射流应用的广泛性, 众多学者对其进行了研究。如 Park 等^[2]采用 LDA 对玻璃微珠粒径为 $40 \mu\text{m}$ 的气固两相同轴射流进行了研究, 分析了不同颗粒质量分数对气相流场的影响, 认为

颗粒的加入增大了回流区的长度, 增大了射流近场脉动速度, 而对于远场脉动速度起降低作用。Fan 等^[3-4]采用 LDA 研究了不同气速比、不同颗粒流量和直径下气固两相同轴射流的情况, 认为外通道气速的增大强化了颗粒相的弥散, 颗粒的质量分数、粒径、速度比对两相流场都有很大的影响。Albagli 等^[5-6]采用实验与数值模拟的方法研究了气固两相受限射流相间混合性能、压力分布及其气体浓度分布。陈永斌等^[7]采用消光法测量了颗粒处于环形

2008-09-01 收到初稿, 2008-11-11 收到修改稿。

联系人: 刘海峰。第一作者: 周华辉 (1985—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2004CB217703); 教育部长江学者与创新团队发展计划项目 (IRT0620)。

Received date: 2008-09-01.

Corresponding author: Prof. LIU Haifeng. E-mail: hliu@ecust.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2004CB217703) and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT0620).

射流中时气固受限同轴射流初始段的颗粒弥散情况,研究了气流速比、颗粒粒径对颗粒弥散的影响,发现颗粒的弥散速率高于气相的混合速率,小颗粒的弥散速率高于大颗粒的弥散速率,颗粒弥散受气流速比的影响较弱。王兵等^[8]采用数值模拟的方法对颗粒在大涡结构中的弥散进行了研究,研究结果表明,三维流动中,小颗粒的分布受大涡结构的控制,其空间的弥散过程与流体大涡结构的空问发展相一致,而高速释放到流场中的大颗粒受惯性影响最大,保持在其原有动量方向上运动。

到目前为止,对气固两相同轴射流的研究主要集中在内通道颗粒体积分数较低的稀相气固两相同轴射流,对内通道颗粒体积分数较高($>10\%$)的稠密气固两相同轴射流的研究工作开展相对较少。而在实际的气化过程中,常伴随着稠密气固两相同轴射流,例如在粉煤气化炉内,内通道出口粉煤颗粒的体积分数很高,颗粒速度较低,因此对稠密气固两相同轴射流研究既有重要的学术价值,又对气化炉运行有指导意义。在稠密气固两相流中,由于中心通道喷出的颗粒浓度很高,而速度相对较低,因此喷嘴内通道出口附近的颗粒弥散与稀相气固两相同轴射流有很大的差别。本文以粉煤加压气化技术^[9-11]为背景,研究了稠密气固两相同轴射流中颗粒弥散特性,其中内通道颗粒的体积分数高达 35% 。

1 实验部分

实验喷嘴结构与文献[12]采用的喷嘴相近,结构如图1所示,其中心通道内径 $d=4.95\text{ mm}$,环隙通道内径 $D_i=7.28\text{ mm}$,环隙通道外径 $D_o=15.55\text{ mm}$ 。固体颗粒为玻璃微珠,其密度为 $2490\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,采用Beckman激光测粒仪测量颗粒粒径,用Rosin-Rammler分布计算平均粒径为 $75\text{ }\mu\text{m}$,颗粒流量为 $0.0133\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,采用PV-4a^[13]测量颗粒出口速度 $u_p=0.903\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。实验流程如图2所示:高压钢瓶空气经减压阀后压迫加料罐内的玻璃微珠从内通道喷出,鼓风机产生的空气经流量计计量后从外通道喷出。颗粒喷射后的弥散状态采用Photron公司生产的FASTCAM APX-RS型高速摄像机进行连续拍摄,拍摄速度为 1000 帧/秒 ,曝光时间为 $1/25000\text{ s}$ 。

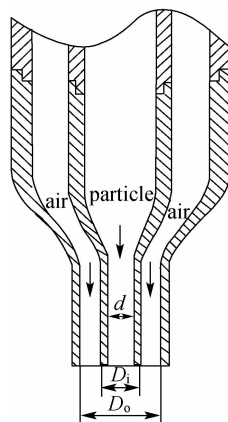


图1 同轴双通道实验喷嘴结构

Fig. 1 Configuration of coaxial two-channel nozzle

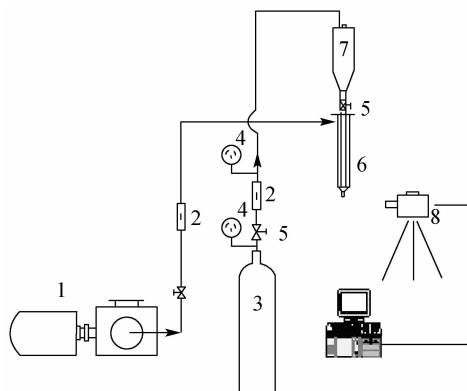


图2 实验流程图

Fig. 2 Flow chart of experiment

1—air compressor; 2—flow meter; 3—steel cylinder;

4—pressure gauge; 5—valve; 6—nozzle;

7—feed tank; 8—high-speed camera

2 实验结果与讨论

2.1 实验现象与分析

图3为稠密气固两相同轴射流颗粒群分布,从图中可以看出,颗粒流在离开喷嘴的一段距离内并没有弥散开来,还是保持颗粒流柱的形状;随着运动的发展,颗粒流柱产生不稳定波,在产生波的同时,固体颗粒开始弥散。定义喷嘴出口平面到颗粒流柱产生明显扰动的这段距离为未弥散长度 L ,颗粒流柱中产生两个扰动波间的距离为不稳定波长 λ ,不稳定波距喷嘴出口距离为 x 。为了研究不同操作条件下颗粒弥散特性,采用图像处理软件ImageJ对高速摄像机拍摄得到的大量图片进行处理,每隔20幅照片选取一张进行测量,将测量得到的 L 、 λ 、 A 进行平均化处理。

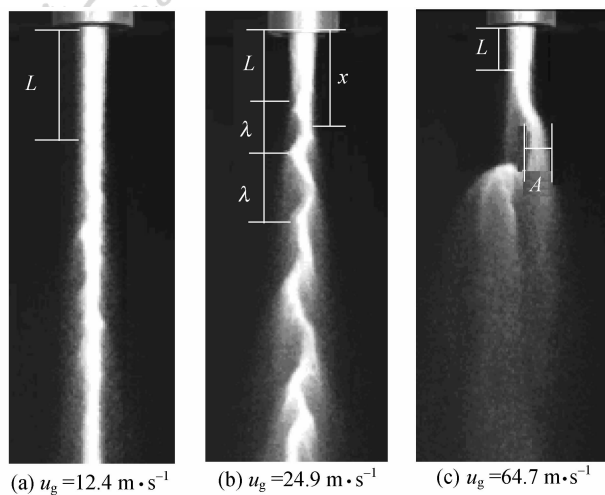


图 3 气固两相同轴射流弥散特性

Fig. 3 Characteristics of dense gas-solids coaxial jets

2.2 未弥散长度

颗粒流未弥散长度指喷嘴出口平面到颗粒流柱产生明显扰动的距离,反映了颗粒受外通道气体扰动的强度。因此研究不同外通道气速下颗粒流未弥散长度对指导喷嘴设计有重要意义。为了更好地说明未弥散长度 L 的存在,将不同气速下拍摄得到的所有图片进行叠加,如图 4 所示,从图中可以看出,颗粒流柱离开喷嘴一段距离后,颗粒流保持圆柱状,验证了颗粒流未弥散长度的存在。

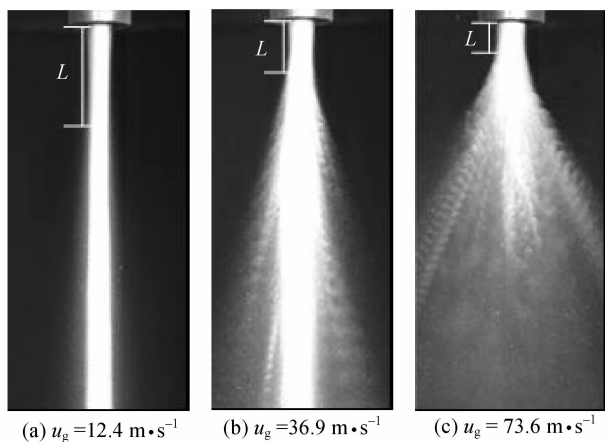


图 4 不同气体射流速度下拍摄图片叠加

Fig. 4 Stack images at different u_g

图 5 给出了未弥散长度随气体射流速度的变化,从图中可以看出,随外通道气速的增大,颗粒流与外通道气流界面附近的速度梯度增大,气相扰动增强,未弥散长度减小。当气速小于 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,未弥散长度随气速的增大而迅速减小;随着气速再增大,未弥散长度减小较为平稳,这与气液两相同轴射流中的结论一致^[14-15]。未弥散长度与气

体射流速度的关系式为

$$L/d = 828.9 Re^{-0.5798} \quad (1)$$

式中 Re 为气体 Reynolds 数 ($6958 \leq Re \leq 55878$); d 为喷嘴内通道直径, mm。式 (1) 相关系数为 0.9886。

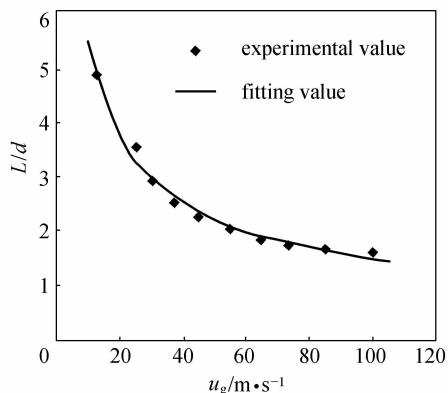


图 5 气体射流速度对未弥散长度的影响

Fig. 5 Influence of u_g on L

2.3 不同弥散方式下颗粒弥散特性

通过对不同气体射流速度下颗粒的弥散进行实验观察和研究发现,随气流速度的增加,颗粒流存在 3 种弥散模式:剪切弥散、波状弥散和振荡弥散。

2.3.1 剪切弥散 当外通道气体速度较低时,颗粒流离开未弥散长度后,气固两相界面附近的颗粒在气流的曳力作用下均匀地弥散开,而颗粒流主体基本保持圆柱形运动,如图 6 (a) 所示。随着外通道气体速度的增大,气体的剪切作用加强,颗粒弥散的角度增大,同时,气固两相界面附近的扰动增大,颗粒流发生失稳,如图 6 (b) 所示。在气

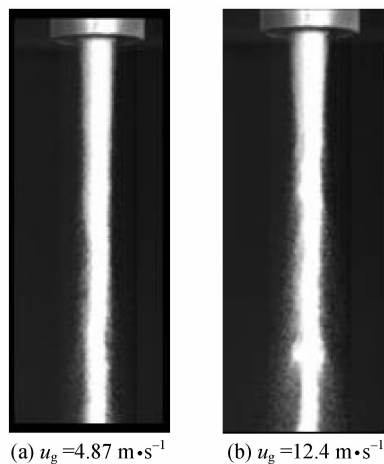


图 6 剪切弥散

Fig. 6 Shear dispersion

速较低时 ($u_g < 24.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时), 颗粒流表现出剪切弥散的特性。

2.3.2 波状弥散 随着外通道气体速度的增大 ($u_g > 24.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时), 气固两相界面附近的扰动增大, 颗粒流发生失稳, 产生不稳定波; 随着运动的发展, 扰动增大, 不稳定波得到发展, 最终形成非轴对称的波状结构, 在这些波状结构的波峰和波谷, 颗粒流在气流强剪切的作用下逐渐脱落弥散, 如图 7 所示。

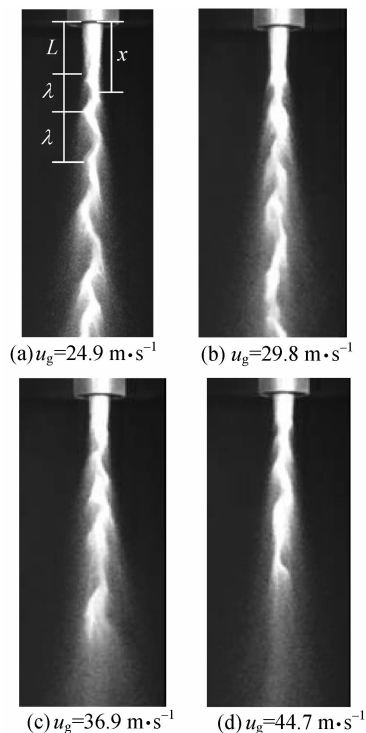


图7 波状弥散

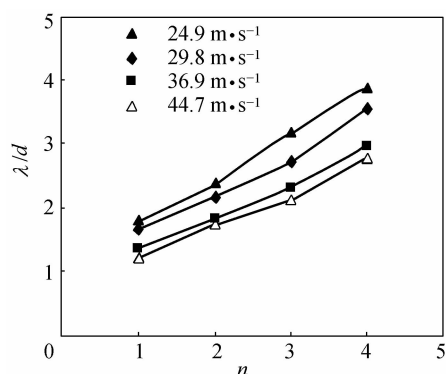
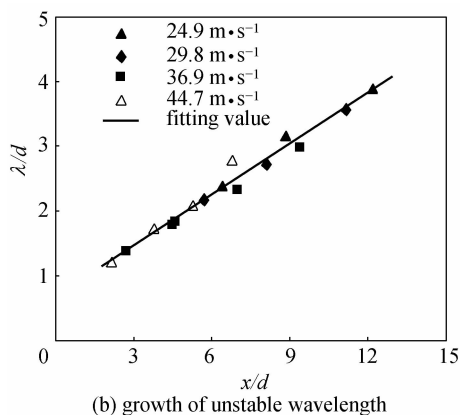
Fig. 7 Wave dispersion

图 8 给出了不同气体射流速度下不稳定波长及其沿射流轴线的发展情况。从图 8 (a) 可以看出, 随着射流的发展, 不稳定波长基本呈增长趋势; 随着气速的增大, 不稳定波的波长减小。而从图 8 (b) 中可以看出, 相同的轴线位置不稳定波长大致相等, 不同气体射流速度下不稳定波长沿射流轴线的发展关系式为

$$\lambda/d = 0.2606(x/d) + 0.6938 \quad (24.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq u_g < 48.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2)$$

式中 x 为不稳定波距喷嘴出口的距离, mm。式 (2) 的相关系数为 0.9726。

2.3.3 振荡弥散 颗粒流离开未弥散长度后, 当气体射流速度足够大时 (约 $> 45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 颗粒流主体在外通道气流的作用下不再表现波状弥散的特

(a) unstable wavelength magnitude λ/d 

(b) growth of unstable wavelength

图8 气体射流速度对不稳定波长的影响

Fig. 8 Influence of u_g on λ/d

性。通过对拍摄得到的大量图片进行处理, 发现颗粒流振幅发生周期性的变化, 表现出振荡弥散的特性, 如图 9 所示。

振荡弥散下的振荡频率可以通过图像处理的方法得到。 $t=t_0$ 时取点 A (图 9), 提取该位置拍摄得到的所有图片的灰度值, 将该像素点提取得到的灰度值进行频谱分析, 即可得出振荡弥散的振荡频率。

图 10 给出了振荡弥散不同外通道气速下的频谱图, 从图中可以得出不同外通道气速下颗粒流振荡的频率, 从图 11 中可以看出, 随着外通道气速的增大, 颗粒流振荡的频率先减小后增大, 在气体速度约 $65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时振荡频率最小。

3 结 论

(1) 采用高速摄像仪研究了稠密气固两相同轴射流颗粒弥散特性, 基于本文给定的喷嘴结构, 在实验气体射流速度范围以内, 颗粒流离开喷嘴口后均存在一段未弥散长度。未弥散长度与外通道气速有关, 未弥散长度随气速的增大而减小。未弥散长度

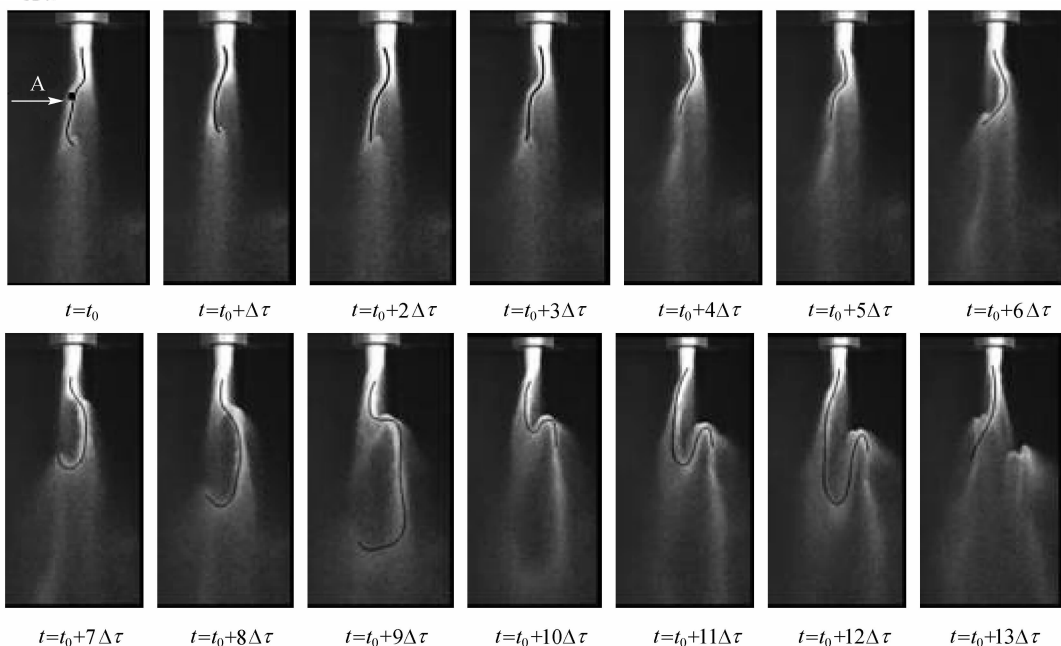


图 9 振荡弥散

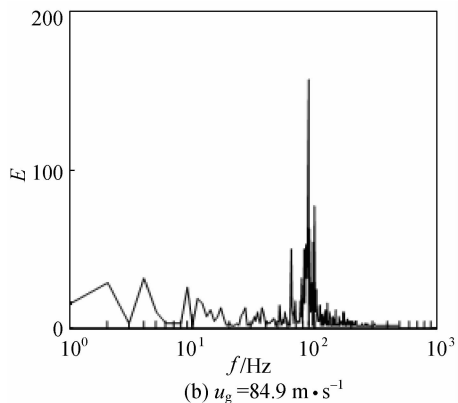
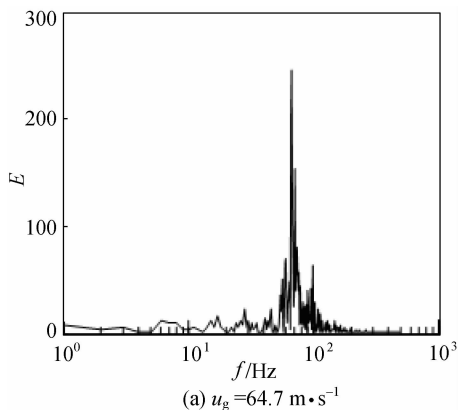
Fig. 9 Oscillating dispersion ($u_g = 64.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

图 10 振荡弥散下的频谱图

Fig. 10 Spectrum at oscillating dispersion

与气体射流速度 (Reynolds 数) 的关系式为:
 $L/d = 828.9 Re^{-0.5798}$ 。

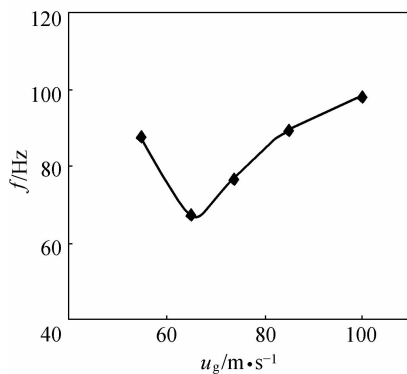


图 11 不同气体射流速度下的振荡频率

Fig. 11 Oscillating frequency at different u_g

(2) 通过对不同外通道气速下颗粒的弥散进行实验观察和研究发现, 颗粒流存在 3 种弥散方式: 剪切弥散、波状弥散和振荡弥散。

(3) 颗粒流在波状弥散中, 不稳定波长基本呈增长趋势; 随着气速的增大, 不稳定波的波长减小, 而在相同的轴线位置不稳定波长大致相等; 不同外通道气体射流速度下不稳定波长沿射流轴线的发展关系式为: $\lambda/d = 0.2606 (x/d) + 0.6938$ ($24.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq u_g < 48.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

(4) 颗粒流在振荡弥散过程中, 随着气体射流速度的增大颗粒流振荡的频率先减小后增大, 在气体速度约 $65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时振荡频率最小。

符 号 说 明

A ——颗粒流柱的振幅, mm

L ——未弥散长度, mm

n ——波数

λ ——不稳定波长, mm

References

- [1] Park C J, Chen L D. LDA measurements of confined turbulent coaxial jets//Chemical and Physical Processes in Combustion, Fall Technical Meeting. Pittsburgh, 1984: 191-194
- [2] Park C J, Chen L D. Experimental investigation of confined turbulent jets (II): Particle-laden flow data. *AIAA Journal*, 1989, **27** (11): 1511-1516
- [3] Fan J, Zhao H, Jin J. Two-phase velocity measurements in particle-laden coaxial jets. *The Chemical Engineering Journal*, 1996, **63** (1): 11-17
- [4] Fan J, Zhao H, Cen K. An experimental study of two-phase turbulent coaxial jets. *Experiments in Fluids*, 1992, **13** (4): 279-287
- [5] Albagli D, Levy Y. Two-phase flow measurements in confined coaxial jets. *International Journal of Multiphase Flow*, 1990, **16** (5): 929-932
- [6] Albagli D, Levy Y. Experimental study on confined two-phase jets. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1991, **5** (3): 387-393
- [7] Chen Yongbin (陈永斌), Xu Yiqian (徐益谦). Experimental investigation of particle dispersion in confined coaxial jets. *Journal of Thermophysics* (工程热物理学报), 1993, **14** (1): 102-105
- [8] Wang Bing (王兵), Zhang Huiqiang (张会强), Wang Xilin (王希麟). Particle dispersion in large eddy structures. *Acta Mechanica Sinica* (力学学报), 2005, **37** (1): 105-109
- [9] Gong Xin (龚欣), Guo Xiaolei (郭晓镭), Dai Zhenghua (代正华), Yu Zunhong (于遵宏), Han Fei (韩飞), Zhao Ruitong (赵瑞同), Lü Chuanlei (吕传磊), Lu Wenxue (路文学). New-type gasification technology of pressurized entrained-flow for pulverized coal. *Modern Chemical Industry* (现代化工), 2005, **25** (3): 51-54
- [10] Gong Xin (龚欣), Guo Xiaolei (郭晓镭), Dai Zhenghua (代正华), Feng Jinhua (封金花), Chen Jinfeng (陈金峰), Zheng Yaohui (郑耀辉), Chen Feng (陈锋), Xiong Lang (熊浪), Yu Zunhong (于遵宏). High solids loading pneumatic conveying of pulverized coal. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2006, **57** (3): 640-644
- [11] Xiao Weiguo (肖卫国), Guo Xiaolei (郭晓镭), Dai Zhenghua (代正华), Gong Xin (龚欣), Guo Yunzhou (郭云舟), Zheng Lijiao (郑利娇). Dense phase flow properties of pulverized coal in industrial scale tube. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2007, **58** (11): 640-644
- [12] Villiermaux E, Rehab H. Mixing in coaxial jets. *J. Fluid Mech.*, 2000, **425**: 161-185
- [13] Qin Jun (秦军), Li Weifeng (李伟锋), Dai Zhenghua (代正华), Chen Mouzhi (陈谋志), Liu Haifeng (刘海峰), Gong Xin (龚欣), Yu Zunhong (于遵宏). Experimental study and numerical simulation of confined gas-solid two-phase jet. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities* (高校化学工程学报), 2005, **15** (9): 619-624
- [14] Eroglu H, Chigier N. Coaxial atomizer liquid intact lengths. *Physical Fluids A*, 1991, **3** (2): 303-308
- [15] Mayer W O H, Branam R. Atomization characteristics on the surface of a round liquid jet. *Experiments in Fluids*, 2004, **36** (4): 528-539