

研究论文

水平管煤粉密相气力输送堵塞临界状态

熊焱军, 郭晓镭, 龚欣, 黄万杰, 赵锦超, 陆海峰

(华东理工大学煤气化教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: 以煤粉为实验介质, 在输送管内径为 10、15、20 mm 条件下分别研究了以空气和 CO₂ 为载气时的密相气力输送堵塞临界状态。通过逐渐降低输送气量调整输送流态, 获得了不同阶段的固气比、输送速度及压力信号等特征信息, 并对不同阶段的压力信号特征信息进行分析, 提取了不同阶段的特征参数, 采用功率谱对压力信号频域特征进行剖析, 获得了不同流动阶段的特征频率。研究结果表明, 堵塞临界速度与输送管道内径和载气性质有关, 依据实验数据, 建立了堵塞临界速度的量纲 1 经验方程; 接近堵塞临界状态时, 管道内压力波动性显著, 波动频率向低频转化, 对压力信号进行计算, 得出了判定输送发生堵塞的判据式。

关键词: 堵塞临界速度; 密相; 气力输送; 载气; 管径

中图分类号: TQ 536

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2009) 06-0000-0

Blockage critical state of pulverized coal dense-phase pneumatic conveying in horizontal pipe

XIONG Yanjun, GUO Xiaolei, GONG Xin, HUANG Wanjie, ZHAO Jinchao, LU Haifeng

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

Abstract: Taking pulverized coal and dry air or CO₂ as the experimental materials, the blockage critical state of pulverized coal dense-phase pneumatic conveying with pipelines of 10, 15 and 20 mm (ID) were studied respectively. The blockage critical characteristics, such as solids gas ratio, transporting velocity, pressure signal were obtained through reducing gas flow rate. Characteristic parameters and characteristic frequency of different stages were obtained by analysis of pressure signal characteristics and power spectrum analysis. The results showed that the blockage critical velocity was related to pipeline diameter and carrying gas characteristics. A dimensionless equation describing the relationship between blockage critical velocity and aforementioned parameters was finally established. Fluctuation of pressure signal was significant and vibration frequency converted to low frequency near blockage critical state. The criterion for blockage was obtained by mathematical calculation of pressure signal.

Key words: blockage critical velocity; dense-phase; pneumatic conveying; carrying gas; pipeline diameter

2008-12-15 收到初稿, 2009-02-21 收到修改稿。

联系人: 龚欣。第一作者: 熊焱军 (1984—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20576038); 国家重点基础研究发展计划项目 (2004CB217700); 教育部长江学者与创新团队发展计划项目 (PCSIRT-IRT0620)。

Received date: 2008-12-15.

Corresponding author: Prof. GONG Xin. **E-mail:** gongxin@ecust.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20576038), the National Basic Research Program of China (2004CB217700) and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (PCSIRT-IRT0620).

引 言

粉煤密相气力输送技术是粉煤加压气化工艺过程的核心技术之一^[1]。与稀相气力输送相比,密相气力输送具有输送能耗低、输送固气比大、气固分离量小等优点。前期实验工作中,对密相气力输送的研究主要集中在相对稳定输送状况。沈湘林等^[2]在 3.0 MPa 下,研究了高固气比的粉煤稳定输送; Geldart 等^[3]在高压条件下,研究了小管径 (6.25、9.19、12.5 mm) 中不同载气输送煤粉的规律与压降方程; 龚欣等^[4]在不同输送管径 (15、20、32mm) 中进行了高固气比状态下粉煤气力输送研究,考察了操作参数对粉煤质量流量、固气比、表观气速等气力输送特征参数的影响; 肖为国等^[5]在工业级管道上研究了粉煤浓相流动特性,实验过程中对粉煤流动形态进行了观察。

针对密相气力输送系统中易出现不稳定的流动现象,有研究者对稳定输送转化为不稳定输送的临界状态进行了研究。Wirth 等^[6-7]通过实验证实,密相气力输送发生不稳定输送时临界速度与物性参数(如物料真实密度、堆积密度、载气密度、单颗粒终极速度)、输送管径及操作参数(固气比)有关。洪江等^[8]以中等粒径河砂与粉状钝化石灰为实验介质进一步研究了输送过程出现不稳定输送时的临界速度,结果得出在高固气比输送下,临界速度主要依赖于物性参数。但是,对密相气力输送不稳定输送和堵塞之间的临界状态研究还很少。

本文以煤粉为实验介质,在输送管内径为 10、15、20 mm 条件下,分别研究了以空气和 CO₂ 为载气时密相气力输送堵塞临界状态,获得了不同管径下不同载气输送时堵塞临界速度;同时通过在水平管上安装一段石英玻璃管,对管道中煤粉流动过程进行了可视化研究;通过对水平管道上压力信号直接分析和功率谱分析,揭示了堵塞临界状态下的压力信号特征和流动特性。

1 实验部分

1.1 实验装置及实验介质

在粉煤密相气力输送实验装置上^[5],为了研究输送管道尺寸的影响,分别采用内径为 10、15、20mm 的不锈钢管道进行实验;为了研究输送载气的影响,分别采用空气压缩机和 CO₂ 钢瓶气作为

输送气源进行实验。输送气量采用气体质量流量控制器控制测定,固体物料质量由称重传感器进行测定,水平输送管沿程压力由 3 个间隔 1 m、量程为 400 kPa 的压力传感器测定。

输送介质煤粉的相关物性见表 1。

表 1 煤粉的性质

Table 1 Properties of pulverized coal

Median size / μm	Particle density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Bulk density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Angle of repose/ $(^\circ)$
24	1400	540	54

2 结果与讨论

2.1 堵塞临界速度

通过降低输送气量逐渐逼近堵塞临界状态,并获得相关参数。实验过程中通过水平管上石英玻璃管对煤粉流动形态进行了观察。在输送初始阶段,将输送气量适当开大,使系统具有一定的启动速度,此时表观气速相对较大,以悬浮流输送;在输送过程中,通过气体流量控制器逐步降低输送气量,由于重力的作用,一部分煤粉颗粒开始慢慢沉降到管道底部,形成滑动床,而管道上部仍为固气混合的悬浮流或时而出现在类似沙丘形式随着气流向前翻滚推进;当进一步降低输送气量时,滑动床有时会在局部堆积成柱状料栓,以栓状流的形式向前推进,但几秒钟内会被气流吹散,不久又会形成栓状流,周而复始。随着输送气量的继续降低,表观气速进一步减少,气体携带能力减弱,致使管道中的料栓运动速度产生较明显差异,即前方料栓速度降低的程度逐渐大于跟随其后的料栓速度的降低,并当前方料栓被其后的料栓追赶上时,相邻的前后方料栓合并,运动速度明显减慢,管内沉积层迅速增高,很快充满管道,形成了堵塞。

表 2 为在 3 种不同输送管径下,逐渐降低表观气速 (U_g) 直至堵塞时的相关参数。其中阶段 1 的表观气速相对较大,伴随着沙丘流和沉积层流输送;阶段 2 的表观气速相对较小,伴随着栓状流输送,此时压力信号发生大尺度的脉动,当进一步降低输送气量时,管道便发生堵塞。根据堵塞工况总气量 (Q) 和阶段 2 特征参数数值计算出的堵塞表观气速也列于表 2 中,由于阶段 2 的表观气速与堵塞表观气速已十分接近,因此本文将阶段 2 的表观气速定义为堵塞临界速度 (U_r)。

表 2 实验数据记录
Table 2 Experimental data record

Pipe diameter/mm	Operation condition		Q	p_t	W_s	u	U_g
			$/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$/\text{MPa}$	$/\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	$/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
10	air	stage1	1.14	0.052	372	601	2.0
		stage2	0.90	0.058	361	749	1.6
		blockage	0.78				1.4
	CO ₂	stage1	2.40	0.045	445	240	6.2
		stage2	1.74	0.053	271	251	4.5
		blockage	1.62				4.4
15	air	stage1	2.58	0.037	767	451	2.6
		stage2	1.98	0.038	499	590	2.1
		blockage	1.80				1.9
	CO ₂	stage1	5.52	0.035	854	195	6.7
		stage2	3.72	0.036	570	203	4.7
		blockage	3.30				4.5
20	air	stage1	3.36	0.014	1422	626	3.4
		stage2	3.12	0.015	1373	699	3.0
		blockage	2.82				2.8
	CO ₂	stage1	4.74	0.009	362	83	6.8
		stage2	3.72	0.011	355	104	5.3
		blockage	3.24				5.1

洪江等^[8]在研究低速高混合比水平气力输送临界速度时，对影响临界速度的物性参数、装置参数及操作参数进行了量纲 1 化分析，最终得到临界速度经验关联式。本文考虑到输送管径和载气性质对堵塞临界速度的影响，根据表 2 中实验数据，进行量纲 1 化分析，最终得到量纲 1 方程式 ($R^2 = 0.95$)

$$\frac{U_r}{U_t} = 10664 \times \left(\frac{\rho_s}{\rho_g}\right)^{-1.13} \times \left(\frac{D_t}{d_s}\right)^{0.34} \quad (1)$$

其中，终极速度 $U_t = \frac{gd_s^2(\rho_s - \rho_g)}{18\mu_g}$ 。式 (1) 表明，堵塞临界速度与输送管道内径和载气性质有关。

2.2 临界状态压力信号特征

实验过程中采用压力传感器在线测得水平管道上的输送压力，在对临界状态压力信号进行分析时均采用水平管末端的压力传感器测得的压力信号。图 1 为在不同输送管径下分别以空气和 CO₂ 作为载气输送时阶段 1、阶段 2 直至堵塞时的压力信号变化。

由图 1 可以看出，阶段 2 输送波动性比阶段 1 输送波动性明显显著。密相气力输送时，随表观气速的逐渐降低，水平管内将出现沙丘流、沉积层流及栓状流等不同的流型，流型的变化直接导致了管

道上压力信号发生波动。阶段 1 的表观气速相对较大，伴随着沙丘流和沉积层流输送；阶段 2 的表观气速相对较小，伴随着栓状流输送。栓状流动时，管内压力发生很大脉动，固体物料处于间隔运动的不稳定状态。这种现象反映到宏观参数的测量上表现为管道上的压力传感器所测得的数值在某一范围内显著波动。

为了对压力信号的波动性有一个量化的比较，采用了对压力波动信号求“均方根/平均值 (Std/Mean)”的方法计算整个输送过程压力信号波动的情况。结果如图 2 所示。Std/Mean 值越大，表明信号波动程度越大。

由图 2 可以看出，在 3 种输送管径下，不论是以空气为载气，还是以 CO₂ 为载气，阶段 2 压力信号 Std/Mean 值都大于阶段 1 Std/Mean 值，说明阶段 2 压力信号的压力波动性都强于阶段 1 的压力波动性；在堵塞临界状态下（阶段 2），相同载气、不同管径下压力信号 Std/Mean 值基本上处于一定范围之内，相同管径、不同载气下压力信号 Std/Mean 值相差较大，说明管径对堵塞临界状态压力信号波动性影响不大，而载气性质对堵塞临界状态压力信号波动性影响显著。当输送过程中水平

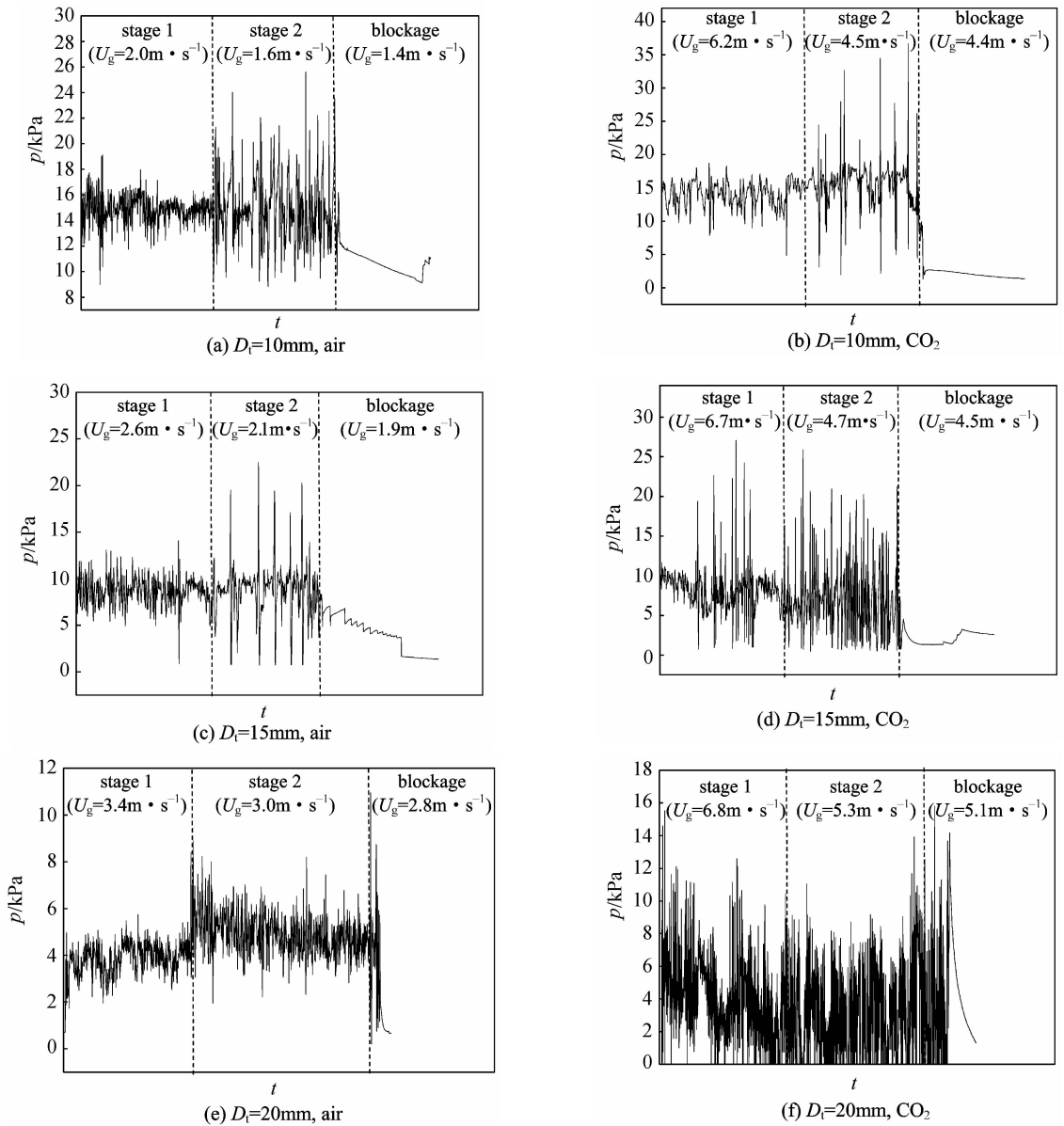


图 1 水平管压力信号

Fig. 1 Pressure signal of horizontal pipe

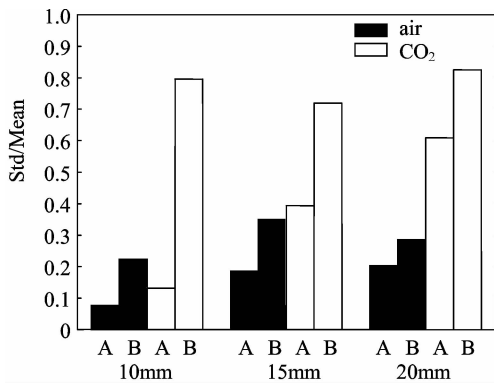


图 2 压力信号 Std/Mean 值

Fig. 2 Std/Mean of pressure signal

A—stage 1; B—stage 2

管上压力信号 $\text{Std}/\text{Mean}=0.2\sim 0.4$ (空气为载气) 或 $\text{Std}/\text{Mean}=0.7\sim 0.9$ (CO_2 为载气), 输送状态即为堵塞临界输送状态, 此时进一步降低输送气量, 便形成了堵塞。

2.3 压力信号功率谱分析

对不同表观气速下即不同输送状态下的水平管道上压力信号进行功率谱分析, 结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 当输送过程由阶段 1 变化到阶段 2 时, 输送状态接近堵塞临界状态, 水平管道上压力波动振幅增大, 波动频率向低频转化, 输送流型由沙丘流、沉积层流逐渐转变为栓状流。例如在 10 mm 输送管径上, 以空气为输送载气, 当输

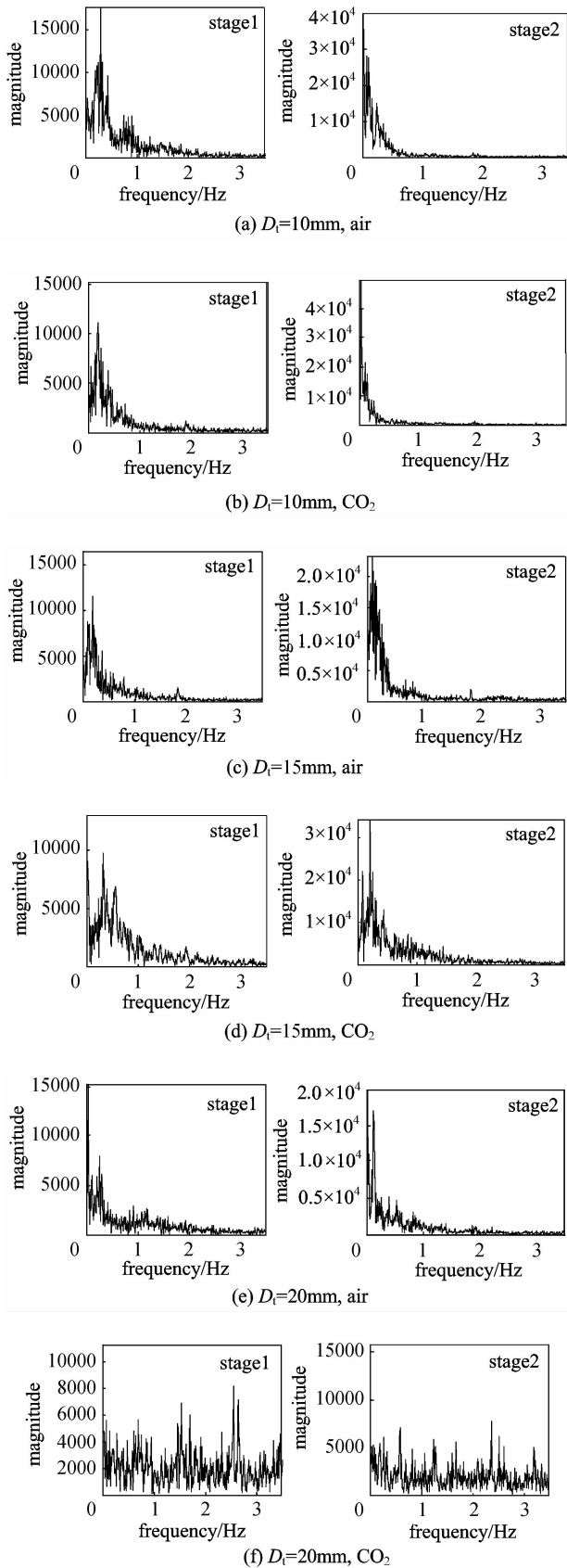


图 3 压力信号功率谱分析

Fig. 3 Power spectrum transformation

送过程由阶段 1 转变到阶段 2 时，水平管上压力波动振幅由约 15000 到约 4×10^4 ，波动主频由约 0.30 Hz 转变为约 0.18 Hz，功率谱密度由大变小，说明了阶段 1 输送时发生的是多尺度的脉动，阶段 2 输送时发生较单一尺度的脉动，原因在于阶段 1 主要以沙丘流输送，管道顶部气固悬浮相中多颗粒的跳跃运动导致了压力信号发生多尺度的脉动，阶段 2 主要以栓状流输送，料栓、气栓交替出现，导致了压力信号发生强烈的较单一尺度脉动。

3 结 论

通过对 3 种不同管径、不同载气下输送煤粉时堵塞临界状态的研究，揭示了压力信号变化特征，获得了重要的相关参数。

(1) 水平管煤粉密相气力输送堵塞临界速度与输送管道内径和载气性质有关，依据实验数据，建立了堵塞临界速度的量纲 1 经验方程式

$$\frac{U_r}{U_t} = 10664 \times \left(\frac{\rho_s}{\rho_g}\right)^{-1.13} \times \left(\frac{D_t}{d_s}\right)^{0.34}$$

(2) 随着输送状态逐渐接近堵塞临界状态，输送过程压力信号波动性逐渐变得显著，对压力信号进行量化计算，得出判定输送发生堵塞的判据式

$$\text{Std/Mean} = \begin{cases} 0.2 \sim 0.4 & \text{空气为载气} \\ 0.7 \sim 0.9 & \text{CO}_2 \text{ 为载气} \end{cases}$$

(3) 通过对压力信号进行功率谱分析可以看出，随着输送状态逐渐接近堵塞临界状态，压力信号波动振幅增大，波动频率向低频转化。

符 号 说 明

- D_t ——输送管内径，mm
- d_s ——煤粉颗粒粒径， μm
- g ——重力加速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
- p ——水平管压力（表压），kPa
- p_t ——输送压力（表压），MPa
- Q ——输送气总体积流量（标准状态下）， $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- R^2 ——相关系数
- U_g, U_r, U_t ——分别为表观气速、堵塞临界速度和单颗粒终极速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- u ——固气比， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- W_s ——煤粉质量流量， $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
- μ_g ——载气黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$
- ρ_g, ρ_s ——分别载气、煤粉颗粒的密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

References

[1] Molerus O. Overview: pneumatic transport of solids.

- Powder Technology*, 1996, **88** (3): 309-321
- [2] Shen Xianglin (沈湘林), Xiong Yuanquan (熊源泉). Experimental study on dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal at high pressure. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2005, **25** (24): 103-107
- [3] Geldart D, Ling S J. Dense phase conveying of fine coal at high total pressure. *Powder Technology*, 1990, **62** (3): 243-252
- [4] Gong Xin (龚欣), Guo Xiaolei (郭晓镭), Dai Zhenghua (代正华), Feng Jinhua (封金花), Chen Jinfeng (陈金锋), Zheng Yuehui (郑跃辉), 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
- [5] Xiao Weiguo (肖为国), 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): 2759-2763
- [6] Wirth K E. Critical velocity of solids transport through horizontal circular pipelines. *German Chemical Engineering*, 1983, **6** (1): 45-52
- [7] Wirth K E, Molerus O. Influence of pipe geometry on the critical velocity of horizontal pneumatic conveying of coarse particles. *Powder Technology*, 1985, **42** (1): 27-34
- [8] Hong Jiang (洪江), Shen Yishen (沈颐身). Critical velocity for horizontal pneumatic conveying with high solids loading at low gas velocities. *Journal of University of Science and Technology Beijing* (北京科技大学学报), 1993, **15** (5): 442-446