

# 煤粉平均粒径对高压密相气力输送的影响

周云, 陈晓平, 梁财, 孟庆敏, 鹿鹏, 蒲文灏, 许盼

(东南大学能源与环境学院, 江苏省南京市 210096)

## Effect of Mean Particle Size of Pulverized Coal on Dense Phase Pneumatic Conveying at High Pressure

ZHOU Yun, CHEN Xiao-ping, LIANG Cai, MENG Qing-min, LU Peng, PU Wen-hao, XU Pan  
(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** Experiments of dense phase pneumatic conveying of pulverized coal using nitrogen were carried out in an experimental test facility with the conveying pressure up to 4 MPa. The relationship between mass flow rate of pulverized coal with different mean particle size and gas injecting velocity were investigated. Also, the characteristics of pressure drop in the horizontal pipe, vertical pipe and bend with different mean particle size of pulverized coal were analyzed. Test results indicate that, with the increase in total gas flow rate enters into the feeding hopper, the mass flow rate of fine coals reaches the peak value earlier than that of coarse coals, but the optimum injecting velocity is lower than that of coarse coals. In addition, it is showed that the pressure drop for coarse coals is higher than that of fine coals with the same mass flow rate, and when the coal concentration in the pipe is higher enough, the conveying pressure drop for fine coal is close to that of coarse coal. The pressure drop in vertical pipe is higher than that in horizontal pipe, and the pressure drop in horizontal pipe is lower than that in horizontal bend with the same mass flow rate.

**KEY WORDS:** high pressure dense phase pneumatic conveying; mean particle size; pressure drop; pulverized coal

**摘要:** 在输送压力可达 4 MPa 的气力输送实验台上, 进行氮气-煤粉密相输送实验, 研究不同平均粒径煤粉质量流量与注入速度的关系, 分析不同平均粒径煤粉在水平管、垂直管、水平弯管、垂直弯管内输送时的压降变化规律。结果表明: 随着进入发料罐内风量的增加, 平均粒径小的煤粉较之平均粒径大的煤粉质量流量先达到峰值, 其最佳注入速度低

于平均粒径大的煤粉; 在相同质量流量下, 平均粒径大的煤粉, 其压降要高于平均粒径小的煤粉, 但当管道内煤粉浓度较高时, 平均粒径小的煤粉压降有接近于平均粒径大的煤粉的趋势; 相同质量流量下, 垂直管内的压降高于水平管, 水平弯管的压降也高于水平管。

**关键词:** 高压密相气力输送; 平均粒径; 压降; 煤粉

## 0 引言

由于干煤粉加压密相气力输送具有输送固气比高、输送气量少、管路磨损轻等优点, 因此, 干煤粉气流床加压气化装置一般均采用密相加压输送的供煤系统<sup>[1]</sup>。有关粉体的输送已有许多有价值的研究成果<sup>[2-16]</sup>, 但这些研究主要针对低压输送, 而有关高压密相气力输送的研究报道十分有限。东南大学自主研发了一套输送压力可达 4 MPa, 输送固气比可达  $600 \text{ kg/m}^3$  的高压密相气力输送实验装置, 并在煤粉输送特性以及管路阻力特性研究等方面取得了许多重要的研究成果<sup>[17-20]</sup>。但由于高压密相输送的流动形态复杂, 影响流动稳定性的因素较多, 还没有成熟理论可供参考, 研究有待不断深入。

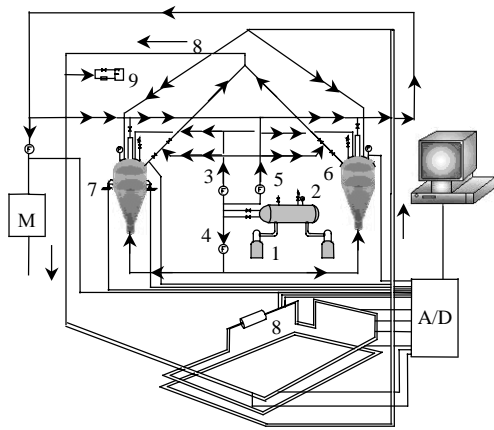
不同平均粒径煤粉的输送特性方面存在显著差异。通过实验研究, 掌握不同平均粒径煤粉的输送特性, 以及其在水平管、水平弯管、垂直管、垂直弯管内压损变化规律, 对大规模高压煤粉密相气力输送系统的设计与运行具有直接的指导意义。

## 1 实验系统及物料性质

高压密相气力输送实验系统如图 1 所示。作为输送介质的高压氮气自缓冲罐, 分成充压风、流化风, 经流量计和调节阀进入发料罐, 驱动煤粉从发料罐经输送管路进入接收罐。在输送过程中,

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004CB217702-01); 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2006AA05A103)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2004CB217702-01); The National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2006AA05A103)。



1—氮气瓶；2—缓冲罐；3—充压风；4—流化风；5—补充风；6—发料罐；7—荷重传感器；8—可视窗；9—计量泵；M—电动调节阀。

图1 高压煤粉密相输送试验系统图

Fig. 1 Schematic diagram of high pressure dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal

充压风主要用于维持料罐的压力，而流化风经布风板后对发料罐中的煤粉进行流化，经提升段进入 $\phi 16\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的管道输送。在发料罐出口处引入补充风可有效调节管道输送固气比，确保输送稳定性。接收罐中的氮气通过布袋除尘器与煤粉分离后，经背压调节阀节流放空。有关试验系统的详细介绍，见文献[17]。

输送实验用煤为不同平均粒径的内蒙烟煤，其真实密度 $\rho_s$ 为 $1\ 400\text{ kg/m}^3$ ，平均粒径 $d_p$ 分别为 $0.52\times 10^{-4}$ （小粒径）、 $1.15\times 10^{-4}$ （中等粒径）和 $3.0\times 10^{-4}\text{ m}$ （大粒径）。

## 2 结果和讨论

### 2.1 质量流量与注入速度

利用煤粉物料的流态化特性是实现密相动压输送的有效措施之一。但是，为了实现煤粉物料稳定输送就必须探寻料罐中最佳的整体流流动形态。如图2所示，氮气穿过布风板，发料罐内A区域的煤粉首先被流化；区域B为物料下降、空气上升的置换区；区域C是流化最差的区域，几乎没有氮气通过，其底部料层不断塌向B区域。不同平均粒径煤粉具有不同的流态化特性。本文通过考察不同平均粒径煤粉的质量流量 $M_S$ 与注入气速 $V_i$ 的关系，来研究进入料罐的风量以及煤粉平均粒径对输送稳定性的影响。

进入发料罐内的氮气，一部分留在罐内置换被输送走的煤粉，维持发料罐内的压力；另一部分作为输送气体进入管路。本文将进入出料管的气体速度称为注入速度。实验时，保持接收罐压力 $p_2$ 不变，

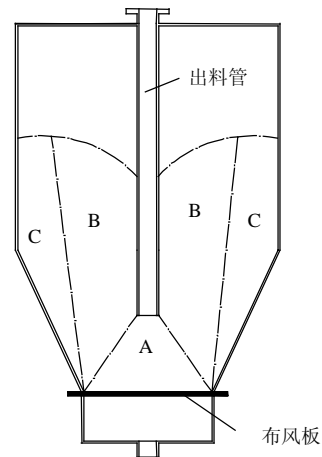


图2 流化罐示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hopper

设定发料罐的初始压力相同。分析图3，随着注入速度，也就是风量的增加，平均粒径小的煤粉开始均匀膨胀，并较早到达流化状态，且煤粉在获得流化后，布风板上煤粉浓度也较高；而平均粒径大的煤粉正常流化对应的风量较大。所以在起始阶段，平均粒径小的煤粉的质量流量要高于平均粒径大的煤粉，且先于平均粒径大的煤粉达到峰值。在达到质量流量峰值后，进一步增加风量，2种平均粒径煤粉的质量流量由于出料口附近煤粉浓度下降而降低。表1中，在流化风流量 $Q_f$ 和充压风流量 $Q_p$ 相同的情况下，平均粒径小的煤粉对应的注入速度高于平均粒径大的煤粉。在相同风量下，注入速度高是因为被置换的煤粉量少，也就是煤粉的质量流量低。进一步说明了平均粒径小的煤粉较平均粒径大的煤粉容易输送，在较低的风量下就可获得较高的质量流量，过多的增加风量，消耗的能量也增多，输送能力却降低。

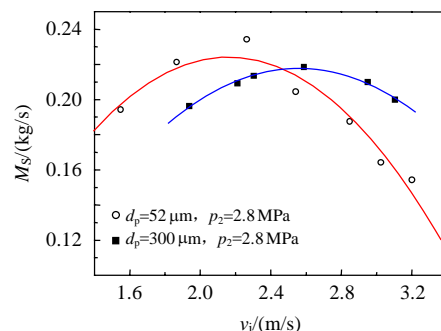


图3 煤粉质量流量与注入速度的关系

Fig. 3 Mass flow rate of solids vs. injecting velocity

表1 实验数据

Tab. 1 Experimental data

$d_p/\mu\text{m}$	$v_i/(\text{m/s})$	$M_S/(\text{kg/s})$	$Q_f/(\text{m}^3/\text{h})$	$Q_p/(\text{m}^3/\text{h})$
52	3.0	0.16	0.4	0.8
300	2.3	0.21	0.4	0.8

## 2.2 高压密相输送相图

### 2.2.1 水平管输送相图

通常相图(或称状态图)是以物料质量流量  $M_s$ (或  $\mu$ )为参数的压力损失  $\Delta p$ 与气体表观速度  $U$ 的关系曲线图。相图能够准确地描述气力输送的流动特征,直观地给出压损与表观气速的关系,可用于流动形态的划分、稳定性分析和优化参数等方面的研究。本文给出不同平均粒径煤粉的高压输送相图,利用相图分析不同平均粒径煤粉的输送特性。

图 4 为平均粒径为 52 和 300  $\mu\text{m}$ 煤粉在水平管内的输送相图。在煤粉质量流量不变的情况下,输送速度很大时,煤粉颗粒悬浮在管道中,呈均匀地被氮气输送,压力损失主要是两相流高速运动中与管壁的摩擦压损;随着气速的降低,气相压损降低,虽然煤粉速度降低,但是煤粉浓度增加,同样使得煤粉与管壁的摩擦压损增加。当固相压损增加和气相压损的降低相平衡时,相图上出现压力损失最小值,这时候的气流速度称为经济速度  $U_s$ 。它是稳定输送与不稳定输送的分界点。进一步降低气速,固相压损增加较多,总压损增加。从图中可以看出,在相同质量流量下平均粒径大的煤粉的压力损失要高于平均粒径小的煤粉。煤粉随气体向前运动时,平均粒径小的煤粉由于跟随性强,易于与气体一起运动,颗粒有向管中心聚集的趋势,而平均粒径大的煤粉由于重力作用,颗粒向管中心的积聚弱于平均粒径小的煤粉,颗粒在管下部浓度呈壁面高中心底的分布,浓度梯度比较大;所以在相同条件下平均粒径大的煤粉的摩擦较大,由此引起的固相摩擦压损较大。

通常认为,在高质量流量下,随着表观气速的降低,管内煤粉浓度越来越高,平均粒径小的煤粉的压降损失增加较快,有接近平均粒径大的煤粉的趋势<sup>[2]</sup>。这是因为平均粒径小的煤粉的沉积趋势受

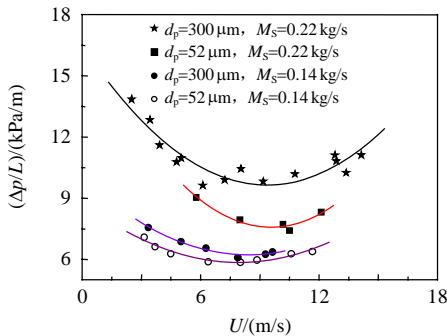


图 4 小粒径煤粉与大粒径煤粉水平管输送相图  
Fig. 4 Phase diagram of horizontal pipe for pulverized coal with mean particle size of  $0.52 \times 10^{-4}$  and  $3.0 \times 10^{-4}$  m

气流速度降低的影响更大。随着表观气速的降低,平均粒径小的煤粉大量向管底沉积,从而使其与管壁的摩擦压损快速增加。同时,因为平均粒径小的煤粉沉积在管底,降低了管道的流通面积,增加了气流流动的速度,气体压损也会增大。从图 4 中可以看出,较高质量流量下(0.22 kg/s),在经济速度的左边,随着表观气速降低,平均粒径小的煤粉的压降确有增加的趋势,限于实验条件,上述结论有待进一步证实。

比较 3 种平均粒径煤粉的水平管相图(图 5),发现曲线均符合同一数学表达式:

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{aU^2 + bU + c}{U} \quad (1)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为方程的系数。令  $\frac{d(\Delta p/L)}{dU} = 0$ , 可

以求出每条曲线的经济速度值。通过对实验数据进行拟合,得到 3 种平均粒径煤粉颗粒的压降经验公式和经济速度如表 2 所示。115  $\mu\text{m}$ 煤粉的经济速度要低于其他 2 种粒径的煤粉。说明 115  $\mu\text{m}$ 煤粉的输送稳定性要好于其他 2 种粒径煤粉。结合图 5,可以这么认为:从输送动力消耗看,小粒径煤粉容易输送;从输送稳定性来看,中等粒径的煤粉容易输送。

表 2 经济速度随粒径变化表  
Tab. 2 Economical velocity vs. particle size

$d_p/\mu\text{m}$	表达式	$U/(\text{m/s})$
52	$\Delta p/L = 17.26 - 2.02U + 0.106U^2$	9.53
115	$\Delta p/L = 16.48 - 1.46U + 0.08U^2$	9.12
300	$\Delta p/L = 16.39 - 1.79U + 0.095U^2$	9.42

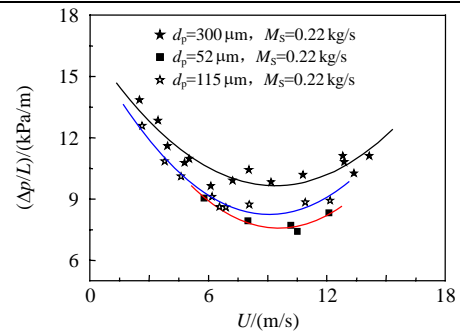


图 5 3 种平均粒径煤粉的水平管输送相图  
Fig. 5 Phase diagram of horizontal pipe for pulverized coal with mean particle size of 52、115 and 300  $\mu\text{m}$

### 2.2.2 水平管与垂直管的输送相图比较

比较水平管与垂直管的输送相图(图 6),在相近质量流量下,垂直管压损要高于水平管压损。根据 Barth 能量理论,管道压降为

$$\Delta p = \Delta p_g + \Delta p_s \quad (2)$$

式中： $\Delta p_g$ 为气相引起的压降损失； $\Delta p_s$ 为固相引起的压降损失。在水平管中 $\Delta p_g$ 和 $\Delta p_s$ 为气相和固相与管壁摩擦引起的压损；而在垂直管中， $\Delta p_g$ 和 $\Delta p_s$ 还包括气相和固相的重力压损。

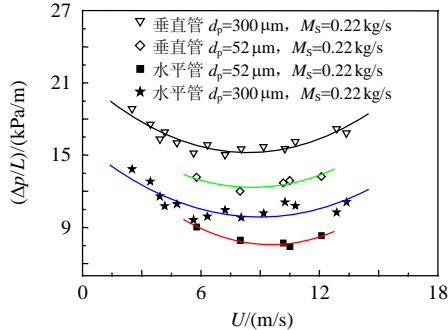


图6 2种平均粒径煤粉垂直管与水平管输送相图

Fig. 6 Phase diagram of vertical pipe and horizontal pipe for pulverized coal with mean particle size of 52 & 300  $\mu\text{m}$

在相同表观风速下，水平和垂直管中由气相引起的摩擦压降损失相近；同时在相同表观风速以及煤粉质量流量下，管道内煤粉浓度相差无几，虽然在水平管中，煤粉有向管底沉积而导致煤粉与管壁摩擦阻力增加的趋势，但由于在垂直管中由固相重力做功而增加的压损相对较大，最终导致垂直管内压损高于水平管内压损。

### 2.2.3 水平管与水平弯管的输送相图比较

煤粉进入弯管后，受到离心力的作用向外侧壁聚集，颗粒与管壁反复冲击，颗粒弹起后可能与后到达的颗粒相撞，造成动能损失，并且立刻被气流加速，形成加速压损，使得弯管总压损要高于直管。

从图7可以看出，对于同一种平均粒径煤粉而言，水平弯管的压损要高于水平管，而且煤粉质量流量越大，这种差别越明显。这是因为，随着煤粉量的增多，颗粒与管壁，颗粒与颗粒之间发生碰撞的机会增加，煤粉能量损失更多，弯管的加速压损增加。

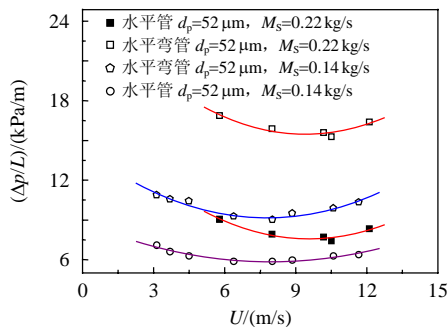


图7 平均粒径为52  $\mu\text{m}$ 煤粉水平管与水平弯管输送相图

Fig. 7 Phase diagram of horizontal pipe and horizontal bend for pulverized coal with mean particle size of 52  $\mu\text{m}$

分析图8可以看出，在相同质量流量下，水平弯管中平均粒径大的煤粉的压损要高于平均粒径小的煤粉。这是因为，平均粒径大的煤粉受到的离心力更大，一方面使得煤粉更容易靠近管外侧壁，煤粉在管壁外侧浓度更高，另一方面，增加了颗粒与颗粒的碰撞机会；由此，煤粉与壁面的摩擦压损以及颗粒间由于碰撞产生的动量损失更大。

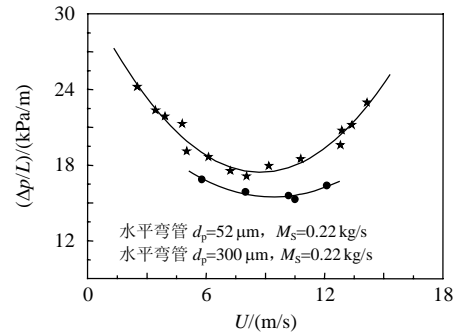


图8 2种平均粒径煤粉的水平弯管输送相图

Fig. 8 Phase diagram of horizontal bend pipe for pulverized coal with mean particle size of 52 & 300  $\mu\text{m}$

### 2.2.4 垂直弯管与水平弯管的输送相图比较

从图9可以看出，对于同一种平均粒径煤粉而言，垂直弯管的压损要高于水平弯管。在2.2.2小节中已经叙述过垂直管的压损要高于水平管，同理垂直弯管的压损要高于水平弯管。同时在水平弯管内，煤粉的流向为水平-水平；在垂直弯管内，煤粉的流向为水平-垂直，煤粉向垂直方向流动时，由于重力作用也会消耗掉一部分动能，煤粉会被重新加速，压损相对于水平弯管也会增加<sup>[3]</sup>。

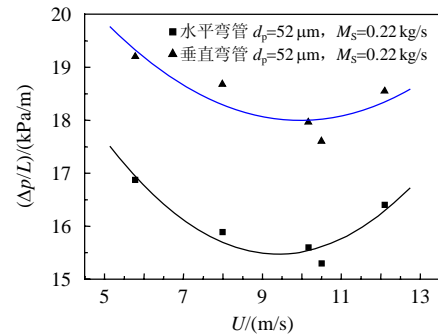


图9 平均粒径为52  $\mu\text{m}$ 垂直弯管与水平弯管输送相图

Fig. 9 Phase diagram of vertical bend and horizontal bend for pulverized coal with mean particle size of 52  $\mu\text{m}$

## 3 结论

本文对不同平均粒径煤粉进行高压密相输送实验，掌握了它们的输送特性；比较分析了水平管、垂直管以及弯管内的压降变化规律。

1) 随着进入发料罐风量的增加，平均粒径小的煤粉的质量流量较之平均粒径大的煤粉先达到



峰值, 其最佳注入速度低于平均粒径大的煤粉。

2) 水平管中, 在相同质量流量下平均粒径大的煤粉的压损要高于平均粒径小的煤粉; 在高质量流量下, 随着表观气速的降低, 平均粒径小的煤粉的压损有接近平均粒径大的煤粉的趋势。

3) 高压密相气力输送时, 在相同质量流量下, 垂直管的压损要高于水平管; 水平弯管的压损要高于水平管; 垂直弯管的压损要高于水平弯管。

## 参考文献

- [1] 徐越, 吴一宁, 危师让. 二段式干煤粉气流床气化技术的模拟研究与分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 187-190.  
Xu Yue, Wu yining, Wei Shirang. Simulation and analysis on gasification technology of a two-stage dry feed entrained flow bed [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 187-190(in Chinese).
- [2] Geldart D, Ling S. J. Dense Phase conveying of fine coal at high total pressure[J]. Powder Technology, 1990, 62(3): 243-252.
- [3] Lee L Y, Quek T Y, Deng R, et al. Pneumatic transport of granular materials through a 90° bends[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(21): 4637-4651.
- [4] Konrad K. Dense-phase pneumatic conveying: a review[J]. Powder Technology, 1986, 49(1): 1-35.
- [5] Pan R. Material properties and flow modes in pneumatic conveying [J]. Powder Technology, 1999, 104(2): 157-163.
- [6] Molerus O. Overview: pneumatic transport of solids[J]. Powder Technology, 1996, 88(3): 309-321.
- [7] Hong J, Shen Y, Tomita Y. Phase diagrams in dense phase pneumatic transport[J]. Powder Technology, 1995, 84(3): 213-219.
- [8] Geldart D, Ling S J. Saltation velocities in high pressure conveying of fine coal[J]. Powder Technology, 1992, 69(2): 157-172.
- [9] Sanchez L, Vasquez N A, Klinzing G E, et al. Evaluation of models and correlations for pressure drop estimation in dense-phase pneumatic conveying and experimental analysis[J]. Powder Technology, 2005, 153(3): 142-147.
- [10] Laouar S, Molodtsov L. Experimental characterization of the pressure drop in dense phase pneumatic transport at very low velocity [J]. Powder Technology, 1998, 95(2): 165-173.
- [11] Hirota M, Sogo Y, Marutani T, et al. Effect of mechanical properties of powder on pneumatic conveying in inclined pipe[J]. Powder Technology, 2002, 112(2): 150-155.
- [12] Gong X, Guo X L, Dai Z H, et al. High solids loading pneumatic conveying of pulverized coal[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(3): 640-644.
- [13] Wypych P W, Yi Jianglin. Minimum transport boundary for horizontal dense-phase pneumatic conveying of granular materials [J]. Powder Technology, 2003, 129(3): 111-121.
- [14] Solt P E. Comparing dilute- and dense-phase conveying[J]. Powder and Bulk Engineering, 2003, 17(3): 64-68.
- [15] Lev A. A model for non-suspension gas-solids flow of fine powders in pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(3): 415-435.
- [16] Herbreteau C, Bouard R. Experimental study of parameters which influence the energy minimum in horizontal gas-solid conveying [J]. Powder Technology, 2000, 112(3): 213-220.
- [17] 沈湘林, 熊源泉. 煤粉加压密相输送实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 103-107.  
Shen Xianglin, Xiong Yuanquan. Experimental study on dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal at high pressures [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 103-107(in Chinese).
- [18] 梁财, 陈晓平, 赵长遂, 等. 高压浓相变水分煤粉输送特性及香农信息熵分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 40-45.  
Liang Cai, Chen Xiaoping, Zhao Changsui, et al. Flow Characteristics and Shannon entropy of dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal with variable moisture content at high pressure [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(26): 40-45(in Chinese).
- [19] 梁财, 陈晓平, 赵长遂, 等. 高压浓相粉煤气力输送特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 31-35.  
Liang Cai, Chen Xiaoping, Zhao Changsui, et al. Investigation on dense-phase pneumatic conveying characteristic of pulverized coal under high pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 31-35(in Chinese).
- [20] Liang Cai, Chen Xiaoping, Zhao Changsui, et al. Flow characteristics and Shannon entropy analysis of dense-phase pneumatic conveying of variable moisture content under high pressure[J]. Chemical Engineering and Technology, 2007, 30(7): 926-931.



周云

收稿日期: 2009-01-11。

作者简介:

周云(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为气固两相流, clearboy9@yahoo.com.cn;

陈晓平(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为气固两相流、洁净煤燃烧等, xpchen@seu.edu.cn。

(责任编辑 车德竞)