

高压浓相变水分煤粉输送特性及香农信息熵分析

梁 财, 赵长遂, 陈晓平, 蒲文灏, 鹿 鹏, 范春雷

(东南大学洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏省 南京市 210096)

Flow Characteristics and Shannon Entropy Analysis of Dense-phase Pneumatic Conveying of Pulverized Coal With Variable Moisture Content at High Pressure

LIANG Cai, ZHAO Chang-sui, CHEN Xiao-ping, PU Wen-hao, LU Peng, FAN Chun-lei

(Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology of Ministry of Education, 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 4MPa and the solid-gas ratio up to 450kg/m³. The influences of the total conveying differential pressure, the moisture content, the superficial velocity and the pressure on the mass flow rate and the solid-gas ratio were investigated. Shannon entropy analysis of pressure fluctuation time series was developed to reveal the flow characteristics. Based on the distribution of the Shannon entropy in the different conditions, the flow stability and the evolutionary tendency of Shannon entropy in different regimes and the regime transition processes were obtained. The relationship between Shannon entropy and flow regimes was also established. The results indicate that the solid gas ratio and Shannon entropy rise with increase in the total conveying differential pressure. Phase diagram and Shannon entropy reveal preferable regularity with superficial velocity. Shannon entropy is different for the different flow regimes, and it can be used to identify the flow regimes. As the moisture content increases, the mass flow rate, the pressure drop and Shannon entropy decrease. Shannon entropy analysis is a feasible approach to research the characteristics of flow regimes, stability and flow regime transitions in Dense-phase pneumatic conveying at high pressure.

KEY WORDS: pneumatic conveying; high pressure; solid-gas ratio; Shannon entropy

摘要: 在输送压力可达 4.0MPa, 固气比高达 450kg/m³ 的高压气力输送试验台上, 用氮气进行煤粉高压浓相气力输送试

验研究。分别在不同的总输送差压、煤粉含水率、压力和表观速度等条件下进行了输送试验, 考察操作参数对煤粉质量流量和固气比等气力输送特征参数的影响, 用信息熵分析试验过程中采集到的压力波动时间序列, 探讨流动稳定性和流型变迁过程中信息化趋势, 建立信息熵和流型之间的关系。结果表明, 在总输送差压增大的过程中, 固气比和香农(Shannon)信息熵均增大; 流动相图与 Shannon 信息熵之间呈现较好的规律性; 不同流动形态的 Shannon 熵差异较大, 不同流型之间的 Shannon 熵区分度较好。随着煤粉含水率的增大, 煤粉的质量流量和压损减小, Shannon 信息熵值下降。Shannon 信息熵分析为研究高压浓相气力输送流型、稳定性及其转变特性提供了一种行之有效的方法。

关键词: 气力输送; 高压; 固气比; 香农信息熵

0 引言

气力输送在能源、化工、冶金、医药和食品加工等领域得到广泛的应用。关于粉体的密相输送, 有了许多有价值的研究成果^[1-17], 一般来说, 这些系统主要在低压下工作, 高压浓相及变水分气力输送很少见到相关报道。目前, 大规模高效煤气化在洁净煤利用技术领域日益得到重视和发展, 粉煤的浓相气力输送技术是煤气化过程的关键技术之一^[1-2]。由于高压浓相输送中速度较低, 固相浓度过高, 流动形态复杂, 流动稳定性下降, 系统的输送技术要求和条件与一般输送系统相差较大。煤粉中的水分可导致煤粉颗粒之间形成液桥, 颗粒表面粘结力增强, 摩擦力、黏性及粘度均增大, 出现造粒现象, 造成流动的不稳定以及堵管, 降低煤粉中的含水率则需要消耗大量的能量。高压浓相及变水分气力输送的可借鉴资料和经验很少, 尚无成熟理论依据可以参照, 只能依赖对真实系统进行试验研

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2004CB217702-01); 东南大学优秀博士学位论文基金资助项目。

Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2004CB217702-01).

究, 获取其流动规律, 探究煤粉输送过程中含水率的极值点。所以对高压浓相输送过程中流动特性的研究, 无论在试验方面还是理论方面都有待于深入。

压力信号载有大量的动态信息, 是流动特性、输送形态、输送管道几何特性和能量交换等流动特性的综合体现。许多先进的信号处理方法已经用于两相流动特性的分析, 如功率谱密度^[4-6]、小波分析^[7-8]及混沌^[9]等。近年来, 信息熵逐渐应用到两相流信号的分析之中, Yong Jun Cho^[10]利用信息熵分析研究了三相流中的温度脉动特性; Zhong^[11]采用信息熵研究了喷动床中香农(Shannon)熵和流型之间的关系; 王晓萍^[12]等对两相流的信息熵进行了研究; 清华大学的石磊^[13]等应用 Shannon 熵研究气液两相流输送流型及其稳定性, 得到了不同流动形态下 Shannon 熵的分布规律。Shannon 熵是对信号所携带系统的信息量大小的度量, 不同的流动过程所包含的信息量是有差别的。不同输送条件下的压力信号, 携带了其特有的流动特征信息。通过分析压力脉动时间序列的信息熵, 获取 Shannon 熵与输送差压、含水率、风量及表观速度等之间的关系, 则有可能建立信息熵与高压浓相输送过程中两相流流动特性之间的联系, 进行输送形态的辨别及稳定性分析。

1 Shannon 信息熵定义及其计算

1948 年, 美国学者 C.E.Shannon^[18]首次给出了信息量度量的数学公式, 奠定了信息论的基础, 提出了 Shannon 信息熵的概念。于是“信息熵”这个词进入了科学的领地, 它在定量化的进程中又与物理学中的“熵”概念联系起来。信息熵是信息源紊乱程度的测度, 表征了系统运动状态的不确定性(无序性)。这种对信息的理解完全排除了获得信息的载体是什么的影响, 也排除了信息本身对信息值大小是否重要之类的干扰, 从而使 Shannon 信息熵在极为广泛的领域中都能应用。可以证明, 信息熵与热力学熵二者之间成正比关系。从某种意义上讲, 完全可以这样看, 熵概念在热力学中即为热力学熵, 应用到信息论中则是信息熵。信息论的发展使人们开始把统计物理看成是信息论的特例。这使人们看到熵概念的强大生命力, 也看到了熵概念和熵原理的重大意义。20 世纪以来, 信息熵已被广泛应用到众多科学领域, 取得了丰硕的成果。

对于高压浓相输送过程中的任意一组离散压力信号 $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 称之为状态空间, 其值

称为信息符号; 信息符号 x_i 出现的概率为 P_i , $i = 1, 2, \dots, n$, 即 \mathbf{X} 的概率向量 $\mathbf{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 。附有信息符号出现概率的状态空间, 称之为信源。信源一般表示为

$$[\mathbf{X} : \mathbf{P}] \text{ 或 } \mathbf{X} : \begin{bmatrix} x_1, x_2, \dots, x_n \\ p_1, p_2, \dots, p_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $p_i \geq 0, \sum_{i=1}^n p_i = 1$ 。

x_i 的信息量 $f(p_i)$ 是 p_i 的单调递减函数, 在可加、连续且可导的条件下, 其形式是唯一的, 即

$$f(p_i) = -\log_b p_i \quad (2)$$

其中 b 决定信息量的单位。当 $b=2, e, 10$ 时, 信息量的单位分别为 bit(比特), nat(奈特)和 hart(哈特)。

对于信源(1)的信息量, Shannon 定义为各信息符号信息量的平均信息量(信息熵), 用 $S(\mathbf{X})$ 表示:

$$S(\mathbf{X}) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_b p_i \quad (3)$$

本文中 Shannon 熵的单位均为 nat, 即

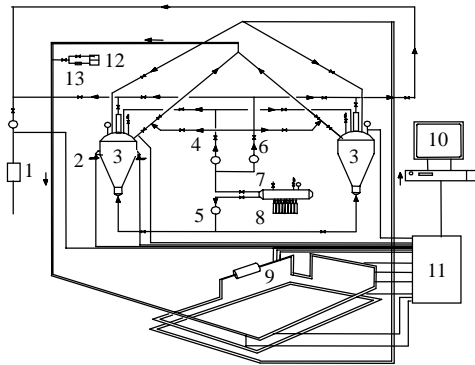
$$S(\mathbf{X}) = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i = \sum_{i=1}^n p_i \ln \frac{1}{p_i} \quad (4)$$

从信息量计算式(1)~(4)中可以看出, Shannon 信息熵仅与信息源概率向量 $\mathbf{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 有关, 而与信息符号的具体状态和取值无关。

从信息熵的定义可以看出, 输送系统越不稳定, 压力变化频率越快, 熵值就越大。输送过程的 Shannon 信息熵反映了管内两相流的流动形态和稳定性, 两相流运动越剧烈, 压力变化频率越大, 则系统的不确定性越高, Shannon 熵值就越大。

2 试验系统

高压超浓相气力输送试验系统如图 1 所示, 高压氮气经过缓冲罐分成充压风、流化风和补充风 3 路。煤粉发料罐采用底部流化上部出料, 其结构如图 2 所示, 流化风流经布风板后对发料罐中的煤粉进行流化, 经提升段进入输送管道, 在发料罐出口引入补充风增强输送能力, 充压风则维持发料罐的压力不变。通过加湿系统, 水在输送过程中按一定的比例被均匀的喷入煤粉中。收料罐压力由排气管道上的电动调节阀根据设定值自动控制。发料罐和收料罐体积均为 0.648 m^3 , 输送管为 $16 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 输送距离为 45 m , 煤粉实时质量由 3 个高精度箔式电子秤称量。压力传感器及差压传感器分别采用瑞士 Keller 公司生产的 PA-21SR 和 PD-23 型, 精度为 0.3%; 充压风、流化风和补充风流量采用 AM-



1—电动调节阀；2—荷重传感器；3—料罐；4—充压风；5—流化风；
6—补充风；7—缓冲罐；8—氮气瓶；9—可视窗；10—计算机；
11—传感器及 A/D 转换；12—水；13—真空泵

图 1 高压超浓相气力输送试验台系统图

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

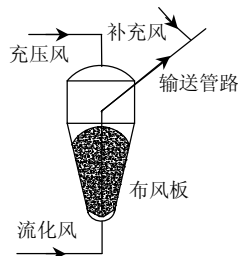


图 2 发料罐示意图

Fig. 2 Diagram of the feed hopper

1521Q 型金属管转子流量计测量。压力、差压、重量和流量信号经过数据采集 A/D 转换板进入计算机存储和处理。被输送物料平均粒径为 $36 \mu\text{m}$ ， $\rho_s=1350\text{kg/m}^3$ 的煤粉，输送风为压缩氮气。缓冲罐气源最高压力为 4.8MPa。

3 结果和讨论

3.1 流动相图与 Shannon 信息熵

通常，相图(或称状态图)是以物料质量流量 G_s (或 μ) 为参数的压力损失与输送气体表观速度的关系曲线图。每幅图仅用于一种特定物料，且在同一种管径，水平和垂直输送要分别制图。相图能较准确地描述气力输送的流动特征^[19-20]，直观地给出压损与表观速度之间的关系，可用于流动形态的划分。试验以 1m 长的水平管输送管路作为研究对象，试验过程中总输送差压、含水率和流化风流量保持不变，即相图中每条曲线的煤粉的质量流量保持不变。总输送压力 ΔP 和表观速度对输送相图的影响如图 3 所示，随着表观速度的增大，输送压损 $\Delta P/\Delta L$ 先降低最后略有升高。在相同表观速度下，输送压力越高，输送压损越大。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，

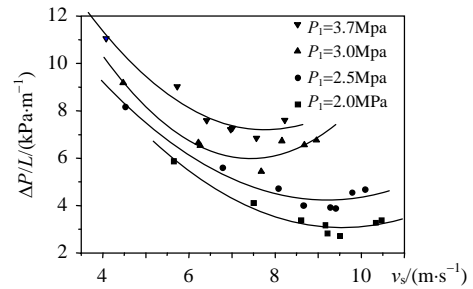


图 3 水平管相图

Fig. 3 Phase diagram of horizontal pipeline

呈均匀分布地被氮气流动输送，空隙率很大，压力损失主要是两相流高速运动造成的；随着气速的降低，气相压力损失将减小，处在气流中的煤粉颗粒的速度减慢而浓度增加，固相使压力损失增加，当压损的固相增加和气相减小平衡时，输送相图上出现压力损失的最小值，这时候的气流速度谓之经济气流速度。当气流速度大于这一点时，煤粉颗粒大多能悬浮在输送管内，呈悬浮流态；当速度小于经济气流速度时，煤粉便开始沉积在管底，流动变得异常复杂，压损再次开始增大，呈现分层流；继续减小流动速度，煤粉颗粒在管底大量沉积，压力损失因为煤粉浓度的增加而增大，呈现沙丘流或柱塞流，压损继续增大。相同表观速度下，输送压力越高，煤粉的质量流量越大，输送固气比越大，所以压损越大。

相图与流型之间的关联关系已经得到认可和 应用，但只能在获得大量的试验数据的基础上才能得到输送相图，相图上只能大概地划分流型区域，而无法考察流动稳定性及流型转变区域的动态特性。将先进的 Shannon 信息熵理论应用于气力输送中的压力信号的分析，通过分析不同流动条件下的压力 Shannon 信息熵 S ，以建立流型、流动稳定性及其转变特性与 Shannon 信息熵之间的对应关系，有可能进一步提出用 Shannon 信息熵作为定量特征参数去研究流动形态和流动的稳定性。图 4 为表观速度与 Shannon 信息熵之间的关系。从图中可以看出，Shannon 信息熵随着表观速度的增大呈先减小后略有增大的变化趋势，与图 3 中的相图变化规律相同，不同流型的 Shannon 信息熵值分度较好，对输送压力时间序列的 Shannon 信息分析，则有可能建立流型与 Shannon 信息熵之间的联系。当输送速度很大时，粉煤颗粒悬浮在管内，呈悬浮流，气体输送速度较快，颗粒碰撞非常剧烈，压力变化频率较高，管内紊流度较高，不确定性较大，Shannon 信息熵值较大。随着输送速度地降低，压力损失减

小，压力变化幅度及频率均有一定程度的降低，流动混乱程度有所降低，Shannon 信息熵值减小；当到达经济气流速度时，气相压损和固相压损之和达到最小值，此时是紊流度最低的悬浮流动，流动的混乱程度最低，Shannon 信息熵值最小。当输送速度低于经济气流速度后，粉煤颗粒开始沉积在管底，占据一定的管道截面，流动情况变得异常复杂，气流的运动变得不稳定，粉煤浓度增大，压力损失上升，Shannon 信息熵开始增大。当继续降低流动速度时，煤粉大量沉积在管底，呈多沙丘状在管底滑动，输送气体在剩余管道截面的实际速度并不降低，当输送气体流过煤粉沙丘时，相当于经过很多拉阀尔喷管，气体速度时而增大时而降低，且煤粉沙丘不稳定，经常会出现坍塌和迁移，只需要少量的煤粉就足以造成堵塞，内部流动变得及其复杂，混乱程度开始加剧，稳定性大大降低，Shannon 信息熵增大。输送压力越高，质量流量越大，相同表观速度的 Shannon 信息熵值就越大。这主要因为输送压力越高，煤粉的质量流量越大，煤粉占据的截面积越大，流动过程中颗粒碰撞频率升高及剧烈程度均较大，混乱程度增强，Shannon 熵值就越大。

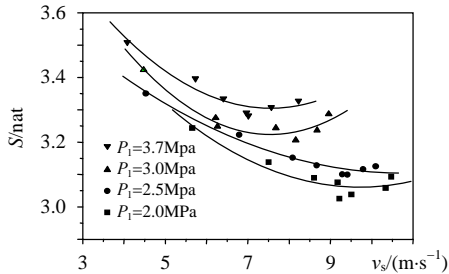


图 4 表观速度与 Shannon 熵之间的关系

Fig. 4 Superficial velocity vs. Shannon entropy

3.2 总输送差压与固气比及 Shannon 信息熵

气力输送中，总输送差压是提供输送动力的来源，总差压的大小直接决定输送气体可转化势能的大小。保持流化风量、补充风量和发料罐压力 P_1 不变，通过调节收料罐的压力 P_2 来改变总输送差压。输送固气比 μ 和 Shannon 信息熵随总输送差压的变化如图 5~6 所示。

如图 5 所示，在 3 路风量不变的情况下，随着输送差压的增大，固气比逐渐升高。在保持发料罐压力不变，逐渐增大总输送差压的过程中，输送动力增强，有足够的差压将煤粉压入输送管路，煤粉的质量流量增大，虽然输送气体体积也因为收料罐压力降低而膨胀变大，但其增大幅度远远小于煤粉质量流量增大的幅度，故固气比升高。所以，风量

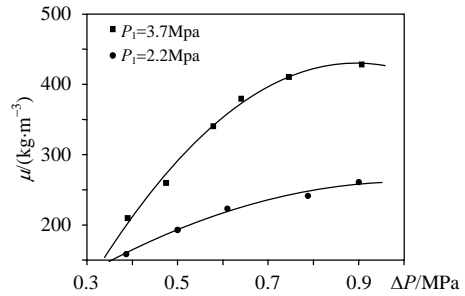


图 5 总输送差压与固气比之间的关系

Fig. 5 Total conveying differential pressure vs. solid-gas ratio

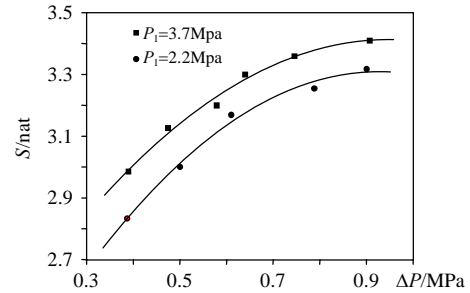


图 6 总输送差压与 Shannon 信息熵之间的关系

Fig. 6 Shannon entropy vs. conveying differential pressure

不变的情况下，总输送差压越大，煤粉的质量流量越大，固气比越高。从图 5 中还可以看出，总输送差压较小时，输送差压的变化对固气比影响较大；随着输送差压的增大，差压的变化对固气比的影响有所减缓。

如图 6 所示，随着总输送差压的增大，Shannon 信息熵值逐渐增大；随着差压的增大，Shannon 信息熵值的增大速率减缓。在总输送差压增大的过程中，煤粉质量流量增大，输送固气比升高，则两相流中的煤粉颗粒浓度升高，煤粉所占截面积增大，风速增大；同时因为收料罐压力降低，管内平均压力下降，输送气体体积增大，输送速度升高。输送固气比升高，速度增大，必然导致管内流动加剧，颗粒脉动频率及幅度增大，内部流动变得更为无序，Shannon 信息熵必然增大。总输送差压较低时，总输送差压增大对固气比值的影响较大，Shannon 信息熵值增幅较大；总输送差压较高时，总输送差压的变化对固气比的影响有所减缓，Shannon 信息熵变化幅度也有所减小。

3.3 煤粉含水率与质量流量

含水率 M 是影响物料流动特性的重要参数，对粉体的摩擦特性、流动性、分散性能和压制性能起着重要的作用。当煤粉中水分较高时，煤粉颗粒之间的自由水主要以黏附液、楔形液和毛细管上升液等方式存在。水的表面张力的收缩将引起对 2 个颗

粒之间的牵引力, 形成液桥, 造成颗粒的团聚, 出现造粒现象, 同时引起摩擦系数和粘度的增大。降低煤粉中的含水率需消耗较多的能量, 因此研究含水率对输送特性的影响是十分必要的。通过加湿系统调节输送煤粉的含水率, 在输送压力为 3.7 MPa, 总差压分别为 0.3 和 0.7 MPa 进行变水分输送, 煤粉质量流量与含水率之间的关系如图 7 中所示, 随着煤粉含水率的增大, 煤粉的质量流量逐渐降低。当煤粉的含水率增加时, 料罐内的煤粉摩擦力和罐壁的附着力增大, 颗粒之间形成液桥, 颗粒粘在一起形成较大的煤粉颗粒, 煤粉的流动性减弱, 布风板上部的流化效果变差, 造成煤粉进入出料罐的能量损失增大, 煤粉的质量流量减小。从图 7 中还可以发现, 当含水率较低时, 水分的增大对煤粉质量流量的影响较大; 随着煤粉含水率的升高, 水分的增加对煤粉质量流量的影响有所减缓。当煤粉含水率增加到 6% 时, 输送非常困难, 经常出现堵管现象。

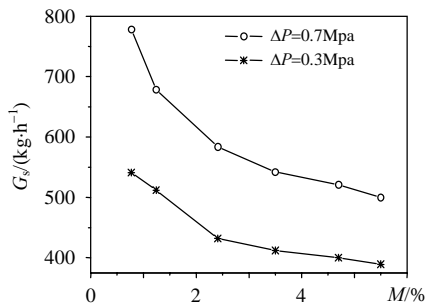


图 7 含水率与煤粉质量流量之间的关系

Fig. 7 Mass flow rate vs. moisture content

3.4 含水率与流动相图及 Shannon 信息熵

在试验过程中, 保证其它输送参数相同, 不同煤粉含水率下的流动相图如图 8 所示, 相同含水率下, 输送压损随表观速度的增大先减小后略有升高。相同表观速度下, 煤粉含水率越低, 压力损失越大。当煤粉的含水率较低时, 煤粉之间的黏性力及摩擦因数较小, 煤粉的质量流量较大, 两相流的浓度较大, 压损较大; 当煤粉的含水率升高时, 由于颗粒之间液桥的形成及其黏性力、摩擦力的增大引起煤粉质量流量降低, 虽然输送管路中的两相流的粘度和摩擦系数也增大, 但是含水率的变化幅度较小, 两相流的浓度变化对输送压损的影响更大, 所以随着含水率的升高, 压力损失减小。

图 9 为不同水分下表观速度与 Shannon 信息熵之间的关系。可以看出, 相同的表观速度下, 煤粉含水率越低, Shannon 信息熵越大。当煤粉中的外水较小时, 煤粉的质量流量较大, 一部分煤粉沉积

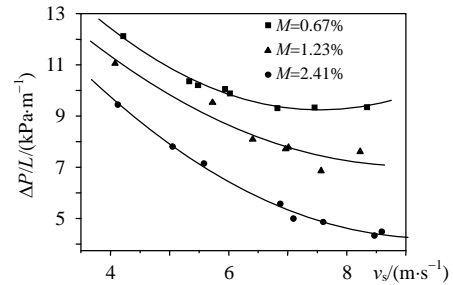


图 8 不同含水率下水平管输送相图

Fig. 8 Phase diagram of horizontal pipeline in variable moisture content

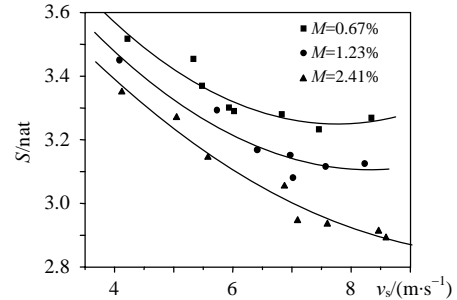


图 9 不同含水率下表观速度与 Shannon 熵之间的关系

Fig. 9 Shannon entropy vs. superficial velocity in variable moisture content

在管底占据较多的管路截面, 增大了管路上部两相流流动的实际速度; 颗粒之间黏性力和摩擦系数较小, 颗粒在管内纵横跳跃, 颗粒之间以及颗粒与管壁之间的碰撞频率较大, 压力波动幅度增大且无周期规律, 数值不可预测, 压力波动变得更为复杂和无序, Shannon 信息熵较大。当煤粉含水率升高时, 颗粒之间有自由水存在而形成液桥, 由于自由水的表面张力引起造粒运动, 煤粉的黏性力和摩擦系数均增大, 较小的煤粉颗粒团聚成较大尺寸的煤颗粒。在发料罐内煤粉流动性能下降, 煤粉之间黏性力和与管壁的附着力增大; 同时, 因为颗粒尺寸的增大造成流化效果变差, 煤粉的质量流量降低。在输送管路中, 因为煤粉质量流量的减小, 两相流的颗粒浓度降低, 沉积在管路底部的煤粉层相对较薄, 管路上部的实际两相流速度较低; 因为液桥的形成, 出现造粒现象, 黏性力增大, 颗粒在管路中的运动剧烈程度减弱, 碰撞频率降低, 两相流湍流度降低, 流动的稳定性和有序性增大, 压力波动的无序度降低, Shannon 信息熵减小。所以在相同表观速度下, 随着煤粉含水率的增大, Shannon 信息熵值减小。

4 结论

(1) 在煤粉质量流量不变的情况下, 随着表观速度的增大, 单位长度上的压损先降低最后略有升高, Shannon 信息熵随着表观速度的增大呈先减

小后略有增大的变化趋势，与相图变化规律相同，不同流型形态的 Shannon 信息熵值分度较好，对输送压力时间序列的 Shannon 信息分析，则有可能建立流型与 Shannon 信息熵之间的联系。

(2) 在其它输送条件不变的情况下，随着总输送差压的增大，固气比和 Shannon 信息熵逐渐增大；随着总输送差压的升高，总差压变化对固气比和 Shannon 信息熵影响有所减缓。

(3) 随着煤粉含水率的增大，煤粉的质量流量逐渐降低；当含水率较低时，水分的增大对煤粉质量流量的影响较大；随着煤粉含水率的升高，水分的增加对煤粉质量流量的影响有所减缓。当煤粉含水率增加到 6% 时，输送非常困难，经常出现堵管现象。

(4) 相同表观速度下，煤粉含水率越低，压力损失越大，Shannon 信息熵值越高。

通过改变输送风量、煤粉含水率、总差压和压力等输送条件，掌握了该系统的输送特性和规律，找到此煤粉含水率输送的极值点。采用 Shannon 信息熵分析有助于认识高压浓相输送过程中的流型及其转变和管内气固两相流的动力学特性，分析流动稳定性。不同操作条件下的 Shannon 信息熵值存在较大的差异，规律性较强；不同流型的 Shannon 信息熵区分度较好。

参考文献

- [1] 沈湘林, 熊源泉. 煤粉加压密相输送试验研究[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 pressure [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 103-107(in Chinese).
- [2] Singer T. Dense-phase pneumatic conveying: Applications, system design, and troubleshooting[J]. Powder and Bulk Engineering, 2003, 17(3): 27-33.
- [3] 龚欣, 郭晓镭, 代正华, 等. 高固气比状态下的粉煤气力输送[J]. 化工学报, 2006, 57(3): 640-644.
Gong Xin, Guo Xiaolei, Dai Zhenghua, et al. High solids loading pneumatic conveying of pulverized coal[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(3): 640-644(in Chinese).
- [4] 白博峰, 郭烈锦, 赵亮. 垂直上升管汽液两相流型的压差波动特征识别[J]. 化工学报, 1999, 50(6): 799-805.
Bai Bofeng, Guo Liejin, Zhao Liang. Identification of flow regimes vertical upward steam-water two-phase flow using differential pressure fluctuations[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1999, 50(6): 799-805(in Chinese).
- [5] Shawkat M E, Ching C Y, Shoukri M. On the liquid turbulence energy spectra in two-phase bubbly flow in a large diameter vertical pipe[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(3): 300-316.
- [6] Zhong Wenqi, Zhang Mingyao. Pressure fluctuation frequency characteristics in a spout-fluid bed by modern ARM power spectrum analysis[J]. Powder Technology, 2005, 152(3): 52-61.
- [7] Li Hui. Application of wavelet multi-resolution analysis to pressure fluctuations of gas-solid two-phase flow in a horizontal pipe [J]. Powder Technology, 2002, 125(1): 61-73.
- [8] Lu Xuesong, Li Hongzhong. Wavelet analysis of pressure fluctuation signals in a bubbling fluidized bed[J]. Chemical Engineering Journal, 1999, 75(2): 113-119.
- [9] 赵艳艳, 李留仁, 刘海峰, 等. 水平管中气固两相流的混沌特性分析[J]. 华东理工大学学报, 2004, 30(5): 510-513.
Zhao Yanyan, Li Liuren, Liu Haifeng, et al. Chaotic characteristics of gas-solid flow in horizontal pipe[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2004, 30(5): 510-513(in Chinese).
- [10] Cho Y J, Kim S J, Nam S H, et al. Heat transfer and bubble properties in three-phase circulating fluidized beds [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(21-22): 6107-6115.
- [11] Zhong W, Zhang M. Characterization of dynamic behavior of a spout-fluid bed with Shannon entropy analysis[J]. Powder Technology, 2005, 159(3): 121-126.
- [12] 王晓萍, 甄玲, 黄海, 等. 压力脉动时间序列的混沌特性与信息熵研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(6), 596-599.
Wang Xiaoping, Zhen Ling, Huang Hai, et al. Research on pressure fluctuations time series by deterministic chaos theory and information entropy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(6): 596-599(in Chinese).
- [13] 石磊, 张作义, 杨瑞昌. 垂直管空气-水两相流型的 Shannon 信息熵特性研究[J]. 核动力工程, 2000, 21(5): 411-415.
Shi Lei, Zhang Zuoyi, Yang Ruichang. Shannon entropy characteristics of air-water two phase flow regimes in vertical pipes [J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(5): 411-415(in Chinese).
- [14] Wypych P W, Jianglin Yi. Minimum transport boundary for horizontal dense-phase pneumatic conveying of granular materials[J]. Powder Technology, 2003, 129(1-3): 111-121.
- [15] Jama Gregory A, Klinzing George E, Rizk Farid. Investigation of the prevailing flow patterns and pressure fluctuation near the pressure minimum and unstable conveying zone of pneumatic transport systems[J]. Powder Technology, 2000, 112(1): 87-93.
- [16] 熊源泉, 赵兵, 沈湘林. 高压煤粉密相气力输送垂直管阻力特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 248-251.
Xiong Yuanquan, Zhao Bing, Shen Xianglin. Study on the resistance properties for vertical pipe in dense phase pneumatic conveying of pulverized coal under high pressures[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 248-251(in Chinese).
- [17] 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).
- [18] Hillborn R C. Chaos and nonlinear dynamics[M]. New York: Oxford University Press, 1994.
- [19] Hong J, Shen Y, Tomita Y. Phase diagrams in dense phase pneumatic transport[J]. Powder Technology, 1995, 84(3): 213-219.
- [20] Klinzing G E, Rohatgi N D, Zaltash A, et al. Pneumatic transport — a review (generalized phase diagram approach to pneumatic transport) [J]. Powder Technology, 1987, 51(2): 135-149.

收稿日期: 2007-04-20.

作者简介:

梁 财(1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为气固两相流、洁净煤发电等, wyldlc@163.com;

赵长遂(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为洁净煤发电、气固两相流及大气污染控制等。

(编辑 车德竞)