

# 固气比对超浓相煤粉气力输送流型影响的模拟

彭小敏 朱立平 袁竹林

(东南大学 能源与环境学院 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 针对目前密相气力输送数值模拟过程中所存在的关键问题,提出了一种描述固相内部相互作用对颗粒运动影响的数学模型。该模型建立在离散颗粒模型的基础上,使其既能够模拟悬浮流动的稀相颗粒运动,又能模拟管内出现堆积情况的超浓相气固两相流。利用所建立的数学模型对高压超浓相煤粉气力输送的颗粒流动过程进行了数值模拟。模拟结果揭示了典型的栓塞流、沙丘流等流型特征及其流型随固气比的演变规律,并结合实验进行了验证。管道输送栓塞流波动性较为明显,波动频率向高频转化;平均栓塞长度随着进料固气比增大而增大。

**关 键 词:** 超浓相气固两相流;流型;固气比;颗粒运动;输送  
中图分类号: TQ022; O242 文献标识码: A

## 引 言

当前,气固两相流数值模拟领域内应用最为广泛和具有代表性描述颗粒相运动的数学模型可归纳为以下三种模型:双流体模型、软球模型和硬球模型。顾正萌和郭烈锦应用颗粒动力学双流体模型模拟了水平管内颗粒栓塞的流动<sup>[1]</sup>,得到了栓塞运动过程中流场参数的变化规律,但是他们的模型中没有考虑颗粒之间的摩擦应力,且对于水平密相气力输送,颗粒相在空间已不再满足连续性条件,同时随着固相浓度的增加,固相非牛顿流体特征逐步增强,其模型内部的力学表征尚不完善,描述固相间所发生的相互作用(碰撞、摩擦)存在不足。Jiansheng Xiang 等运用软球模型对浓相气力输送的颗粒运动进行了数值模拟研究<sup>[2]</sup>,模拟对象为长 8 m 的水平管,颗粒粒径为 3 mm,颗粒数达到 40 000,虽然计算颗粒数规模较前期研究有所扩大,但是由于该模型的计算量大,所模拟颗粒数量、颗粒大小等参数受到严重限制,难以进行工程规模的数值模拟计算。因

此,目前软球模型的应用成果仍局限于大尺寸颗粒、小规模颗粒数以及短时间的模拟,尚不能用于工程意义上的密相气力输送问题。欧阳洁等用硬球模型对水平气力输送系统进行了模拟研究<sup>[3]</sup>,得到了颗粒波状流型,该方法同样存在搜索碰撞计算过大的问题。模拟计算的颗粒数、颗粒尺寸等受到严重限制,无法进行工程尺度问题模拟研究。若结合蒙特卡罗方法(DSMC),可对大规模颗粒构成的气固两相流动进行数值模拟,然而,当根据概率判别颗粒间是否发生碰撞时,就使得颗粒碰撞过程的模拟欠缺真实性,并且随着固相浓度增大到一定程度,如发生堆积的情况下,颗粒间每时每刻都发生接触,碰撞概率小于 1 的条件将不能满足。因此,硬球模型较适用于低浓度、快速颗粒流的稀相气力输送模拟。

针对目前稠密气固两相流动数值模拟所存在的关键问题,本研究提出了一种描述固相内部相互作用对颗粒运动影响的数学模型,新模型通过颗粒所在局部空间的固相浓度以及颗粒群运动特征来表征颗粒间的相互作用。使用该模型,对不同煤粉进料固气比下加压超浓相煤粉气力输送的颗粒流动过程进行了数值模拟,模拟结果呈现了水平气力输送系统中与实验特征吻合的栓塞流、沙丘流等流型以及流型演变规律。

## 1 描述固相颗粒间相互作用的新模型

### 1.1 新模型的要求

(1) 对“ $\mu\text{m}$ ”级粉体既能进行悬浮颗粒(稀相)气力输送的数值模拟,同时能够对管内沉积层(超浓相)气力输送进行模拟研究,并且能够揭示水平管超浓相气力输送过程中所出现的一些典型的流态特征,如沉积层流、沙丘流以及栓塞流等流型。

收稿日期:2011-04-18; 修订日期:2011-05-17

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)基金资助项目(2010CB227002-05)

作者简介:彭小敏(1985-),男,江西高安人,东南大学硕士研究生。

(2) 计算效率高,能够按工艺实际尺度进行大规模数值模拟计算。

### 1.2 模型的构建

与传统的离散颗粒模型(如软球模型、硬球模型)处理颗粒间作用力通过计算颗粒间碰撞力或者搜索碰撞不同,本模型不是做传统的通过力的计算,而是在力的作用下求解运动或者通过搜索颗粒碰撞后基于冲量定理得到离散颗粒信息,再通过设定一个运动约束系数 $\alpha$ 来表征颗粒相互作用前后速度变化的函数关系。运动约束系数 $\alpha$ 与局部固相容积份额和颗粒群运动特征有关。构建思路与方法如下:

(1) 气流与颗粒相对运动所产生的力,气体对颗粒的作用力很复杂,包括曳力、Magnus力、Saffman力、虚假质量力、压力梯度力和Basset力等,但大多数情况下,除曳力 $f_d$ 外的其它各力都不是很重要<sup>[4]</sup>。

(2) 场力,如重力、电场力、磁场力、惯性力等均属场力,但在多数情况下,模拟中仅考虑重力的作用。

(3) 颗粒与边壁碰撞所产生的力,可将壁面看作无限大的球体,并采用颗粒间碰撞模型来处理颗粒与边壁的碰撞。

(4) 颗粒与颗粒相互作用所产生的力,对于固相力,运用现有的Euler-Lagrange方法进行数值计算,搜索碰撞将占据很大一部分时间;而采用Euler-Euler方法,固相为拟流体的连续性假设,又使得对碰撞过程的模拟欠缺真实性。

为确保模型准确性的同时减少计算量。不妨先观察两种极端的状况:将计算区域划分成各个网格,在时间步长足够小的情况下,若网格中只含一个颗粒,如图1(a)所示,颗粒间的相互作用将不存在,颗粒的运动也不会因固相间的相互作用而受到约束;当网格中颗粒达到堆积饱和状态时,颗粒间的相互作用将会变得非常频繁,颗粒的运动也将因此受到较强的约束,可以认为颗粒的速度由于颗粒间频繁的碰撞、接触和摩擦而损失殆尽,如图1(b)所示。

根据上述固相浓度的两种极端状况,本研究设定了一个运动约束系数 $\alpha$ ,来表征颗粒相互作用前后速度变化的函数关系,即:

$$V_i = \alpha \cdot V_i^{(0)} \quad (1)$$

式中: $V_i$ —各个颗粒相互作用后的速度, m/s;  $V_i^{(0)}$ —各个颗粒相互作用前的速度, m/s。

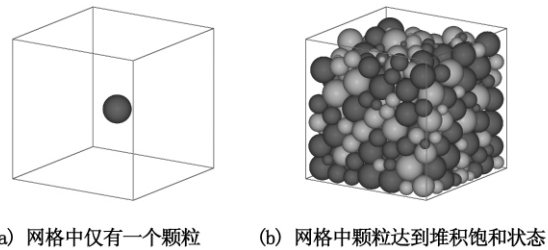


图 1 固相浓度的两种极端状态

Fig. 1 Two extreme states of solid-phase concentration

当网格中的固相浓度 $f$ 为 $f_{min}$ (仅存在1个颗粒)时,可以认为 $\alpha = 1$ ;当固相浓度 $f$ 达到堆积饱和状态即最大值 $f_{max}$ 时(三维数值模拟可取0.52)<sup>[5]</sup>,则 $\alpha = 0$ ;而当 $f$ 处于以上两种状态之间时,设定运动约束系数 $\alpha$ 与 $f$ 成线性关系,并且 $\alpha \in [0, 1]$ 。

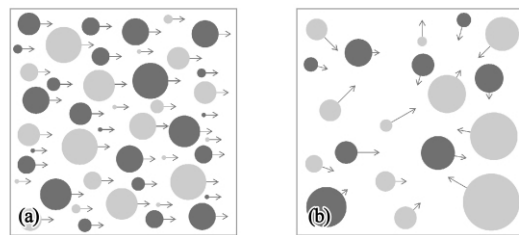


图 2 网格中颗粒的运动

Fig. 2 Movement of particles in a grid

除此之外,网格中颗粒群运动速度的大小及方向,也会对 $\alpha$ 产生影响。以二维模拟的情形为例,当网格中所有颗粒的速度具有相同的大小和方向,即使固相浓度 $f$ 很大时,颗粒之间也不会发生接触、碰撞,因此可以认为约束系数 $\alpha = 1$ ,如图2(a)所示;而当网格中的固相浓度 $f$ 即使较小,但是各颗粒的速度大小及方向杂乱无章,导致颗粒间相互作用加剧,此时的运动约束系数 $\alpha$ 将会是随着固相浓度 $f$ 增大而逐渐趋向于零的一个较小值,如图2(b)所示。

通过以上分析可以得出,颗粒运动约束系数 $\alpha$ 不仅是关于固相浓度的标量,而且是一个关于当地网格中颗粒群运动特征(速度大小及方向)的矢量。因此, $\alpha$ 的函数关系可表示为:

$$\alpha = F(V_0, V_1, \dots, V_n, f) \quad (2)$$

式中: $f$ —当地网格的固相体积浓度;  $V_n$ —当地网格中各个颗粒的速度, m/s。

综合考虑固相浓度以及颗粒群运动特征对颗粒

运动的影响, 从而推导出了所计算稠密气固两相流动过程中描述颗粒间相互作用的新模型, 其函数方程为:

$$\alpha_u = 1 - \left\{ \left( \frac{f}{f_{\max}} \right) \cdot \left[ 1 - \frac{\left| \sum_{i=1}^n m_i V_{iu}^{(0)} \right|}{\sum_{i=1}^n |m_i V_{iu}^{(0)}|} \right] \right\} \quad (3)$$

式中:  $u$ — $x, y, z$  方向;  $n$ —当地网格中的颗粒数;  $\alpha_u$ — $x, y, z$  方向的运动约束系数;  $m_i$ —当地网格中各个颗粒的质量, kg;  $V_{iu}^{(0)}$ —当地网格中各个颗粒相互作用前在  $x, y, z$  方向的速度, m/s。

综上, 约束系数  $\alpha$  随着网格颗粒体积浓度  $f$  的增大而减小; 而在相同的颗粒体积浓度  $f$  下, 约束系数  $\alpha$  与颗粒速度的方向性也存在着关系: 颗粒速度的一致性越差, 那么颗粒的约束系数  $\alpha$  就越小, 例如当  $\left| \sum m_i V_{iu}^{(0)} \right| = 0$  时,

$$\alpha = 1 - (f/f_{\max})$$

当颗粒速度的一致性越好, 颗粒的约束系数  $\alpha$  就越大, 例如当  $\left| \sum m_i V_{iu}^{(0)} \right| = \sum |m_i V_{iu}^{(0)}|$  时, 约束系数  $\alpha = 1$ 。因此, 约束系数  $\alpha$  受网格颗粒体积浓度  $f$  和颗粒速度大小、方向等综合因素的影响。

## 2 数值计算工况

目前, 对水平管气力输送过程的流型, 已有实验较好地揭示了其特征。其流型大致可分为: 悬浮流、分层流、沙丘流以及栓塞流<sup>[6-8]</sup>等。



图 3 典型气力输送流型图

Fig. 3 Chart showing a typical pneumatic transmission flow pattern

影响超浓相气力输送流型的因素众多, 如表观气速、输送压力、进料速率、输送介质、颗粒密度、粒径等, 其中, 不同进料固气比下煤粉的输送特性有显著的差异。本研究将采用所提出的新模型针对二维水平管中高压超浓相气力输送过程, 不同进料固气

比对煤粉输送流型的影响展开数值模拟研究, 模拟对象为内径 10 mm, 长为 4 m 的水平管道。颗粒与壁面之间的碰撞恢复系数为 0.9, 管中最大的固相容积份额达到 0.7854。模拟计算所涉及的主要参数如表 1 所示。本研究中的固气比为固体质量/气体体积, 因此单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 1 数值计算参数

Tab. 1 Numerical calculation parameters

模拟计算输送参数	数值
输送压力/MPa	1
表观气速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	10
进料固气比( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) / 加料浓度(%)	170/15.7、210/19.63、 230/21.55、250/23.55、 280/25.52、300/27.48
颗粒密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1350
颗粒粒径/ $\mu\text{m}$	200
气体动力粘度/ $\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$	0.0000186
气体密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	11.888
计算处理颗粒数	5 000 000

### 2.1 输送流型图及实验结果比对

为清楚地观察气力输送过程中气固两相之间的分离、沉积及流型演变的过程, 选取位于长度方向  $x = 3.20 \sim 3.40 \text{ m}$  处的管段进行观察研究。图 4 给出了进料固气比为  $230 \text{ kg}/\text{m}^3$  下, 在气力输送达到稳定的动态平衡后, 不同时刻管段内颗粒分布的流型图, 煤粉颗粒自左向右向前运动。由图可以看出, 颗粒输送流型整体呈现出以沙丘流为主的特征, 即以周期性颗粒波的形式向前运动, 沉积层不断的被铲起形成颗粒波, 颗粒波又不断破碎、滑落补充沉积层, 最终形成了动态平衡的输送过程。此外, 在沉积层的上方还存在一定量的悬浮颗粒。

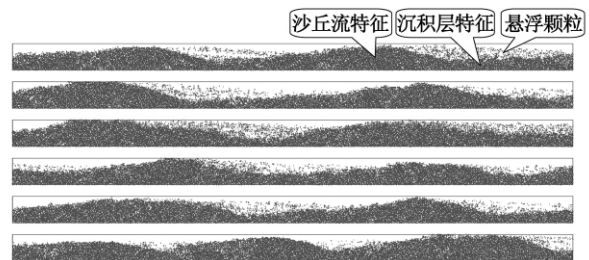


图 4 沙丘流输送流型图

Fig. 4 Chart showing a sand hill flow transmission flow pattern

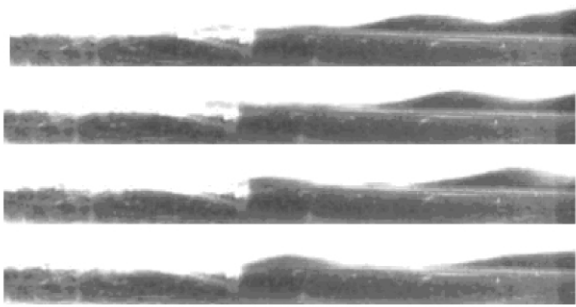


图 5 拍摄的煤粉输送流型图<sup>[9]</sup>

Fig. 5 Picture of a transmission flow pattern of pulverized coal photographed

为验证模拟结果的准确性,本研究采用蒲文灏等人对煤粉在水平管中高压超浓相气力输送过程所得的实验结果作为参照对象<sup>[9]</sup>,图 5 为该实验中所拍摄的煤粉输送流型图,由图可以看出,模拟得到的超浓相气力输送过程中的颗粒输送的沙丘流型与实验图片较为相似,这也在一定程度上反映了本研究建立的新模型是合理的。

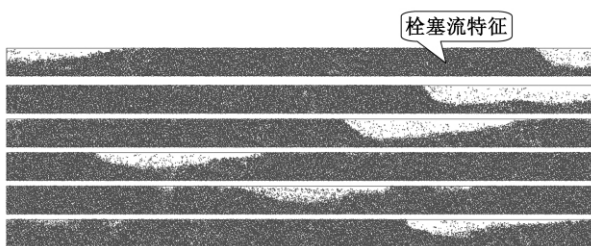


图 6 柱塞流输送流型图

Fig. 6 Chart showing a slug flow transmission flow pattern

图 6 为煤粉进料固气比为  $280 \text{ kg/m}^3$  的情况下,管道颗粒输送流型图。由图可以看出,管道颗粒输送流型整体上呈现柱塞流特征,其中包含有柱塞流、沙丘流、沉积层流以及悬浮颗粒,并且不同时刻各流型之间不断发生转化,柱塞、沙丘、沉积层以及悬浮颗粒之间不断进行着质量交换,最后达到动态平衡状态。图 7 为 Jaworski 等实验所拍摄的柱塞流流型图<sup>[8]</sup>。从图 6 和图 7 可以看出,柱塞中颗粒完全充满管道并且显示了非常明确的前边界和尾部边界,并且展现出柱塞前部边界斜坡比尾部斜坡要平缓些,这些与典型的柱塞特征完全相符,因此模拟所得超浓相气力输送柱塞流与实验结果较为一致。综合

所述,随着煤粉加料固气比的增大,水平管气力输送流型整体是从沉积层流变化到沙丘流,随着煤粉加料固气比的进一步增大,流型从沙丘流演变为柱塞流。

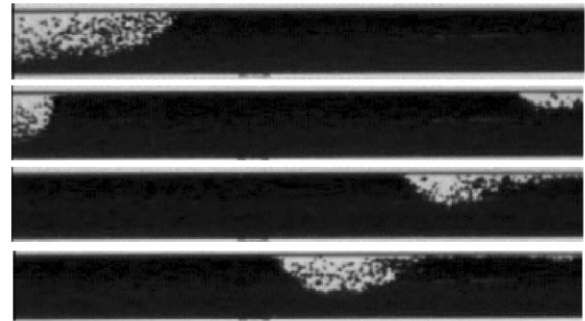


图 7 实验拍摄的煤粉柱塞流流型图<sup>[8]</sup>

Fig. 7 Picture of a slug flow pattern of pulverized coal photographed in the test

### 2.2 截面颗粒波幅信号特征

在不同工况下,截面颗粒波幅随时间的变化曲线(3.3 m 处)如图 8 所示。从图中可以看出,波幅随时间的变化幅度较大,说明颗粒输送过程中波动性较强。但是,不同进料固气比下颗粒波幅波动范围不尽相同,因此导致颗粒输送过程中出现不同的流型。当为进料固气比为  $170 \text{ kg/m}^3$  下的颗粒波幅曲线,从该图可以看出颗粒波幅主要在  $3.5 \sim 6 \text{ mm}$  之间变化,波幅变化范围较小,颗粒输送较为平缓,波动性较小,此时颗粒输送流型为沉积层流,输送颗粒基本以一层颗粒沉积层的形式铺在管道底部,由输送气体将颗粒沉积层整体向前输送。加大颗粒进料浓度,即增大进料固气比后,颗粒波幅变化范围变大。如进料固气比为  $210 \text{ kg/m}^3$  时,颗粒波幅变化范围为  $4.5 \sim 9 \text{ mm}$ ,波幅变化范围增大,颗粒输送的波动性增大,气力输送过程中产生了较大的颗粒团或者堆积沙丘,沙丘或颗粒团增大了颗粒波幅变化幅度,从而导致颗粒输送的波动性显著增强,此时颗粒输送流型为沙丘流。进一步增大进料固气比,颗粒波幅变化范围进一步增大,如进料固气比为  $250 \text{ kg/m}^3$  时,颗粒波幅变化范围为  $3.5 \sim 10 \text{ mm}$ ,管道中颗粒输送出现柱塞流,颗粒柱塞进一步增大了气力输送的波动性。

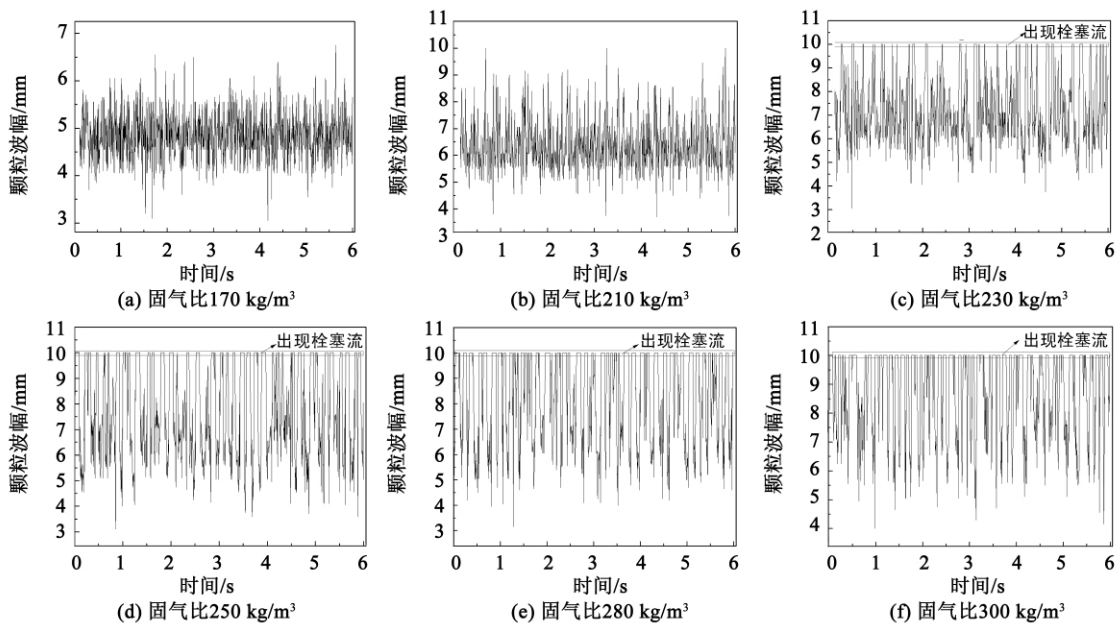


图 8 水平管截面颗粒波幅时间系列

Fig. 8 Particle wave amplitude time series in a section of a horizontal tube

为了输送颗粒波动性有一个量化的比较,采用了颗粒波幅信号求“均方差/平均值(Std/Mean)”的方法计算整个颗粒输送过程中的波动情况。结果如图 9 所示,Std/Mean 值越大,气力输送过程中颗粒输送的波动性越强。

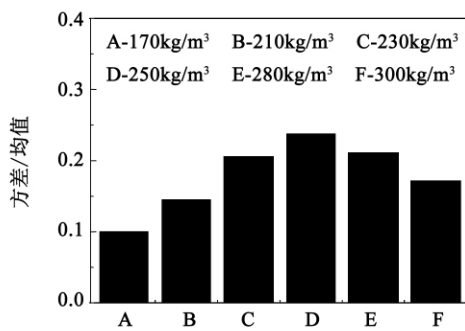


图 9 颗粒波幅 Std/Mean 值

Fig. 9 Std/Mean values of particle wave amplitudes

由图 9 可以看出,随着进料固气比的增加,Std/Mean 值呈先是增大然后减小的趋势。气力输送过程中输送颗粒出现沙丘流的 Std/Mean 值比沉积层流的 Std/Mean 值大,出现堵塞流的 Std/Mean 值比沙丘流的 Std/Mean 值要大,因此堵塞流颗粒输送的波动性要比沙丘流的波动性要大,而沙丘流的波动性要比沉积层流的波动性大;此外,在出现堵塞流的情况下,加大进料固气比,Std/Mean 值却出现减小

的情况,这是因为出现堵塞流之后,加大固气比导致颗粒量增多,使得连接两个堵塞之间的颗粒沉积层变厚,从而减小颗粒波幅数据的方差,增大了颗粒波幅的平均值,因此使得 Std/Mean 值减小。

### 2.3 颗粒波幅信号功率谱分析

对不同进料固气比下即不同输送状态下的管道输送上颗粒波幅信号进行功率谱分析,结果如图 10 所示。由图可以看出,在加料固气比为 210 kg/m³ 时,颗粒输送流型主要为沉积层流、沙丘流,颗粒输送波动性无明显的主频,颗粒波动幅值较小,此时颗粒输送较为平缓。当流型变化到以沙丘流、堵塞流为主时,如加料固气比为 230 kg/m³ 时,出现明显的波动主频,并且颗粒波动振幅增大。继续增大加料固气比后,波动主频率向高频转化,颗粒波动振幅继续增大,管道中颗粒输送堵塞流更为明显。例如加料固气比由 230 kg/m³ 增大到 250 kg/m³ 时,颗粒波动振幅由 320 变化到 380,波动主频由 4.5 Hz 变化为 6.2 Hz,出现堵塞的频率变大。

针对以上模拟计算结果中出现的堵塞特征进行了统计分析,并且发现不同工况的堵塞分布表现出一定规律性。在输送达到稳定后,采集了 6 s 内的数据,采集数据时间间隔 0.005 s。选取水平管  $x = 3.30$  处管道截面出现的堵塞及其分布情况进行统计分析,统计结果如表 2 所示。

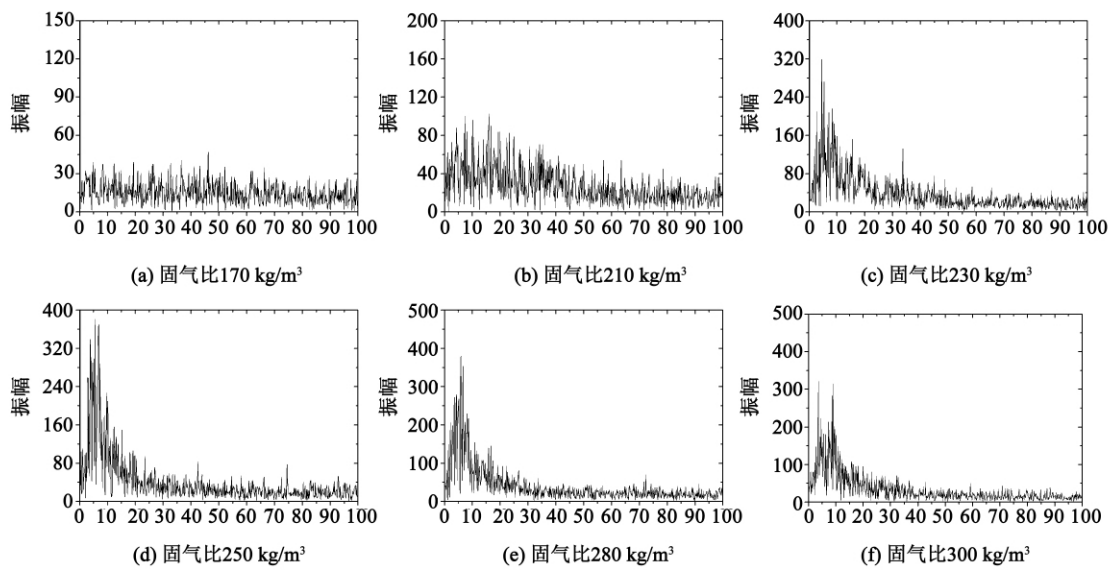


图 10 颗粒波幅信号功率谱分析

Fig. 10 Analysis of a particle amplitude signal power spectrum

表 2 柱塞流统计结果

Tab. 2 Statistical results of a slug flow

固气比 /kg · m <sup>-3</sup>	柱塞数 /个	柱塞长 度/mm	出现 概率	柱塞平均 长度/mm
230	27	< 100	0.593	76.5
		100 ~ 200	0.370	
		> 200	0.037	
250	37	< 100	0.108	167.5
		100 ~ 200	0.405	
		> 200	0.487	
280	46	< 100	0.087	183.3
		100 ~ 200	0.261	
		> 200	0.652	
300	59	< 100	0.119	179.2
		100 ~ 200	0.322	
		> 200	0.559	

从模拟结果来看,煤粉进料固气比为 230 ~ 300 kg/m<sup>3</sup> 工况下,颗粒输送出现了柱塞流特征,将出现的柱塞按照长度分为 3 类:长度小于 100 mm 的柱塞为短柱塞;长度大于 100 mm,而小于 200 mm 为中等长度柱塞;长度为 200 mm 以上归为长柱塞。进料固气比为 230 kg/m<sup>3</sup> 时,出现的柱塞主要为短柱塞和中等长度柱塞,概率分别为 0.593、0.370,此时柱塞的平均长度为 76.5 mm;随着颗粒加料固气比增大,管道中的柱塞长度整体上呈增大的趋势,中等长度柱塞和长柱塞逐渐占主导地位,加料固气比为 250 kg/m<sup>3</sup> 时,其中等柱塞及长柱塞出现的概率分别为 0.4055、0.487;颗粒进料固气比进一步增

大,长柱塞成为主要柱塞,中等长度柱塞次之,短柱塞逐渐消失,如加料固气比为 280 kg/m<sup>3</sup> 时,其长栓、中等长度柱塞和短柱塞的概率分别为 0.652、0.261和 0.087。

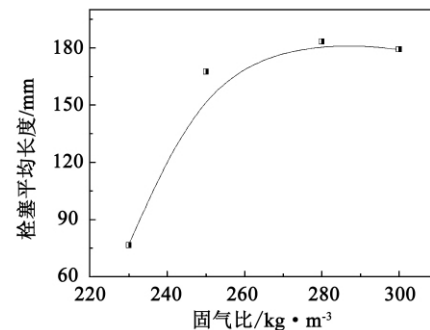


图 11 柱塞长度随固气比变化曲线

Fig. 11 Curves showing a change of the slug length with solid-gas ratios

总体来说,在较小的进料固气比下短柱塞和中等长度栓出现的概率较大,增大煤粉加料固气比使得长柱塞和中等长度柱塞出现的概率增大,进一步增大煤粉加料固气比,长柱塞出现的概率显著增大,逐渐占据主导地位。图 11 为不同固气比下的柱塞平均长度曲线。从图中可以看出,柱塞平均长度随着煤粉加料固气比的增加而增大,反映出柱塞长度随着煤粉加料固气比的增大整体上呈现增大的趋势。

### 3 结 论

(1) 采用本研究建立的新模型对煤粉的高压超浓相气力输送过程进行了数值模拟,获得了输送过程中管道内所发生的气固两相间的分离、沉积、波浪状运动、栓塞流等流型演变现象,与实验取得了较为一致的结果,因此可将该模型可作为大规模稠密气固两相流动数值模拟研究之用;

(2) 加料固气比是影响超浓相气力输送流型的重要因素之一,随着煤粉加料固气比的增大,水平管内的主要流型特征将由沉积层流变化为沙丘流,再由沙丘流进而演变为栓塞流;

(3) 对不同进料固气比下栓塞流的栓塞长度统计表明,这些栓塞呈现出一定分布规律,不同工况下不同长度的栓塞占据主导,并且随着进料固气比的增大,栓塞长度整体上呈增大趋势;

(4) 输送状态为栓塞流时,颗粒输送波动性显著增强,对颗粒波幅进行 Std/Mean 量化处理,得出颗粒波动最强在栓塞流;通过对颗粒波幅进行功率谱分析可以看出,随着输送状态向栓塞流转化,颗粒波幅信号的振幅增大,波动频率向高频转化。

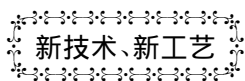
#### 参考文献:

- [1] 顾正萌,郭烈锦.水平管内栓塞流气力输送的动力学模拟[J].工程热物理学报,2006,27(1):75-80.  
GU Zheng-meng, GUO Lie-jin. Kinetic simulation of a slug-flow pneumatic transmission in a horizontal tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(1): 75-80.
- [2] Jiansheng Xiang, Don McGlinchey. Numerical simulation of particle

motion in dense phase pneumatic conveying [J]. Granular Matter, 2004, 6: 167-172.

- [3] 欧阳洁,孙国刚, Yu Aibing. 水平气力输送系统中颗粒波状流的模拟[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(6): 671-674.  
OUYANG Jie, SUN Guo-gang, YU Ai-bing. Simulation of a wave-shaped particle flow in a horizontal pneumatic transmission system [J]. Journal of Northwestern Polytechnic University, 2003, 21(6): 671-674.
- [4] Tsuji Y, Tanaka T, Yonemura S. Cluster patterns in circulating fluidized beds predicted by numerical simulation (discrete particle model versus two-fluid model) [J]. Power Technology, 1998, 95(3): 254-264.
- [5] 樊建人,姚军,张新育,等.气固两相流中颗粒-颗粒随机碰撞新模型[J].工程热物理学报,2001,22(5):629-632.  
FAN Jian-ren, YAO Jun, ZHANG Xin-yu, et al. New Model for particle-to-particle random collisions in a gas-solid two-phase flow [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(5): 629-632.
- [6] Xingliang Cong, Xiaolei Guo, Xin Gong, et al. Experimental research of flow patterns and pressure signals in horizontal dense phase pneumatic conveying of pulverized coal [J]. Powder Technology, 2011, 208: 600-609.
- [7] 马胜,郭晓镭,龚欣等.粉煤密相气力输送流型[J].化工学报,2010,61(6):1415-1422.  
MA Sheng, GUO Xiao-lei, GONG Xin, et al. Dense-phase pneumatic transmission flow pattern of pulverized coal [J]. Journal of chemical industry, 2010, 61(6): 1415-1422.
- [8] Artur J Jaworski, Tomaz Dyakowski. Investigations of flow instabilities within the dense pneumatic conveying system [J]. Powder Technology, 2002, 125: 279-291.
- [9] 蒲文灏.高压超浓相煤粉气力输送过程及其数值模拟研究[D].南京:东南大学,2009.  
PU Wen-hao. High pressure super dense-phase pneumatic transmission process of pulverized coal and its numerical simulation study [D]. Nanjing: Southeast University, 2009.

(陈滨 编辑)



## 锅炉水冷壁管的强度计算

据《Электрические станции》2011年5月号报道,对各种锅炉水冷壁管热力破坏的分析表明,这些破坏的原因是由于管子周边单侧加热在金属内产生过度的轴向热应力。

分析了在管内形成积垢的条件下,锅炉水冷壁管工作的温度条件。给出了有关水冷壁管强度计算的建议。

根据建议,水冷壁管的强度计算应该满足下列两种条件:

(1) 热力条件,该条件在于热应力不应该超过在沿管子迎面母线的管壁外表面温度时允许的极限值。

(2) 根据内部压力的强度条件,在按照这个压力计算管壁厚度时应该取使用寿命为100 000 h的持久强度极限作为许用应力。

(吉桂明 摘译)

基于床层下降的链条炉数值模型与计算 = **Numerical Model and Calculation of a Chain-grate Stoker Based on a Descending of the Bed** [刊 汉]ZHANG Pin ,DU Hai-liang ,WANG Yuan ,LUO Yong-hao ( Thermal Energy Engineering Research Institute ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 3) . - 324 ~ 328

A grate-firing model for chain grate stokers is an effective means for studying the mechanism governing the grate combustion. On this basis ,established was a two-dimensional steady-state grate-firing numerical model for chain grate stokers with a descending of the bed being considered. By seeking a solution to the bed height control equation ,obtained was the distribution of the bed heights varied along the going-forward direction of the chain grate. By utilizing the moving grid technology ,the descending of the bed was realized. Through a comparison of the results obtained by using the grate-firing model and those obtained from a test of a unit body boiler ,the bed height measured during the test after the combustion was 30 mm while the predicted value by using the model in question after an improvement was 26.9 mm ,indicating that the improved model can predict more accurately the bed height ,bed combustion temperature and distribution of the gas product ,thus ,enhancing the calculation precision by using the grate-firing numerical model. **Key words:** chain grate stoker ,grate firing ,numerical simulation ,bed descending

固气比对超浓相煤粉气力输送流型影响的模拟 = **Simulation of the Influence of the Solid/gas Ratio on the Super-dense Phase Pulverized Coal Pneumatic Transmission Flow Pattern** [刊 汉]PENG Xiao-min ,ZHU Li-ping ,YUAN Zhu-lin ( College of Energy Source and Environment ,Southeast University ,Nanjing ,China ,Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 3) . - 329 ~ 335

In the light of the critical problems existing in the current dense phase pneumatic transmission numerical simulation process ,presented was a mathematical model depicting the influence of the interaction inside the solid phase on the movement of the particles. The model in question was based on the discretion particle model ,enabling it to simulate both sparse phase particle movement of a suspended flow and the super-dense phase gas-solid two phase flow when a build-up takes place inside tubes. By utilizing the mathematical model thus established ,the high pressure super-dense phase pulverized coal pneumatic transmission particle flow process was numerically simulated and the simulated results revealed the typical flow pattern characteristics of a slug flow and sand hill flow etc. and the evolution law of their flow patterns with the solid/gas ratio. Moreover ,the simulated results were verified in combination with the test. The fluctuation nature of the slug flow during a transmission process in pipelines is relatively conspicuous and the fluctuation frequency tends to be converted to a high frequency. The average slug flow length will increase with an increase of the solid/gas ratio of the feed. **Key words:** super dense gas-solid two-phase flow ,flow pattern ,solid/gas ratio ,particle movement ,transmission