

引文格式:徐止恒,李政权,陈慧敏,等.密相栓流湿颗粒气力输送数值模拟[J].中国有色冶金,2024,53(5):132-140.

XU Zhiheng, LI Zhengquan, CHEN Huimin, et al. Numerical simulation of pneumatic conveying of wet particles with dense phase plug flow[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(5):132-140.

密相栓流湿颗粒气力输送数值模拟

徐止恒,李政权,陈慧敏,张博群,石昊宇

(江西理工大学江西省颗粒系统仿真与模拟重点实验室,江西赣州 341000)

[摘要] 鉴于目前对于湿颗粒密相气力输送的研究缺乏成熟的体系与结论,本文探究了湿颗粒密相气力输送的流动机理与流动形态,为气力输送的优化设计提供理论支持。研究采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)和离散元法(discrete element method, DEM)双向耦合的数值模拟方法,对水平管道中干湿颗粒料栓的运动形式和颗粒运动轨迹进行了分析,深入研究了颗粒含水率对输送流型、输送效率以及输送压降的影响。结果表明,同等气速下,湿颗粒可以形成段塞流,而干颗粒先是段塞流,随后料栓被气体击穿演变为沙丘流,最后成为管底流;随着气体速度的增大,单位长度的水平管道压降数值呈现先降低后增长的趋势,在质量流率0.5 kg/s、含水率5%的工况下,输送速度为9 m/s时管道压降数值最低,为最佳经济速度值;湿颗粒的压力曲线一直处于波动较大的不稳定状态,当两个监测点位于段塞外部时,轴向压差几乎为零,而当两个监测点位于段塞内部时,轴向压差可以达到-600 Pa。通过对湿颗粒输送时的压降变化进行分析和监测,可及时发现设备故障的迹象,预警可能的问题并采取预防措施,避免设备损坏和生产中断。

[关键词] 物料输送;密相气力输送;流体力学;离散元法;湿颗粒;段塞流;颗粒含水率

[中图分类号] TF801 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)05-0132-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.05.017

冶金生产过程中,物料输送是保证生产正常运行的一个重要环节。传统的物料输送方式,如机械输送、水力输送、人工输送等,容易产生粉尘扬尘污染,对环境和工作人员的健康造成影响;另外,能耗较高,降低了能源利用效率等。相较而言,气力输送技术是一种高效、灵活的物料输送技术^[1-2],它具有输送能耗低、环保性好等优势,因此在冶金生产中具有广阔的应用前景。但是在实际应用中,气力输送技术在输送过程能耗和输送效率控制等方面仍存在一些挑战^[3],而且含水量多、有黏附性或在高速运

动时易产生静电的物料,都对气力输送装置的设计和使用有很大的影响^[4]。密相气力输送的输送介质是气体和固体颗粒的混合物,相比于稀相输送,密相输送的输送速度较低,可以推动密度较大的物料进行运送并且更加稳定,确保物料不被损坏^[5]。但在很多物料的气力输送过程中,空气中的水分会难以避免地与颗粒混合形成湿颗粒,造成颗粒粘结以及团聚,进而导致管道堵塞^[6-7]。目前对于密相气力输送的研究通常是在干颗粒条件下进行的,针对湿颗粒密相气力输送的系统研究相对较少;湿颗粒的输送方式会呈现出与干颗粒输送完全不同的流动特性,因此湿颗粒密相气力输送的流动机理研究也引起越来越多国内外学者的关注。

随着计算机技术的发展,近年来为解决湿颗粒在密相气力输送中存在的问题,数值模拟已经作为试验的补充手段被广泛应用。计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)与离散元方法(dis-

[收稿日期] 2024-04-26

[第一作者] 徐止恒(1997—),山东临沂人,硕士研究生,研究方向为气力输送仿真模拟。

[通信作者] 李政权(1982—),河南偃师人,博士,副教授,主要从事多相流仿真模拟的研究工作。

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(52276154);江西理工大学高层次人才科研启动项目(205200100606)。

crete element method, DEM) 作为经济高效的多相流体系分析工具,为研究湿颗粒密相气力输送提供新的思路^[8-11]。Kuang 等^[12]采用离散颗粒模拟的方法对水平气力输送段塞流进行了数值研究,分析了不同长度尺度下气固流动的控制力。Zhou 等^[13]在实验验证的基础上,对粗颗粒段塞流的输送过程、形成过程、颗粒的运动以及段塞流的形状特征进行了评价。O. Orozovic 等^[14]研究了测量速度之间的关系,基于段塞流质量守恒的模型提供了段塞流速度项、长度、孔隙度和静止层之间的关系。A. Lavrinec 等^[15]利用惯性测量单元研究了水平段塞流气力输送中各种动态关系的结果。Gong 等^[16]对密集混合器中的湿颗粒流动进行了 DEM 研究。Liu 等^[17]利用 DEM 模型研究了液体表面张力对旋转滚筒中湿颗粒动力学的影响。随后,用相同的模型研究了湿颗粒在旋转鼓中的横向混合^[18]。Zhu 等^[19]采用 CFD-DEM 模型研究了矩形喷流床中干、湿颗粒的混合特性。Chuan Lim 等^[20]和 Wang 等^[21]也使用了类似的模型来研究其他气体流化过程。一般来说,现有的毛细力模型主要集中在凹液桥上。然而,当两个颗粒相互靠近或液体体积足够大时,液体被挤出,颗粒间液桥的抛物线轮廓可能由凹变为凸^[22-23]。因此,Xiao 等^[24]在最近的工作中提出了一个毛细力模型来解决这种情况,用实验数据验证了模型的有效性。

上述文献较少考虑到湿颗粒的密相气力输送问题,而实际应用过程中,湿颗粒的输送不可避免,且易引起堵塞和粘附问题,从而形成栓流影响输送效率,增加能耗,甚至造成设备损坏。本研究围绕湿颗粒密相输送过程中的流动行为和流动机理进行展开论述,介绍湿颗粒在输送过程中的不同流态,入口气速度对于料栓的影响以及颗粒含水率对于料栓的流态、压降以及相互作用力的影响。本研究结果可对进一步优化气力输送系统的设计提供相应的理论支持。

1 理论介绍

此次研究中采用的模型为 CFD(计算流体力学)-DEM(离散元)方法,在此基础上考虑了湿颗粒间液桥力对密相气力输送流态的影响,因此添加了液桥力模型,并且该模型已经得到了验证。为保证对密相湿颗粒气力输送过程研究的完整性,下面对模

型的关键部分进行描述。

1.1 流体相

气体流动被认为是连续相,其模型与传统的双流体模型相似。因此,控制方程是计算单元上的局部平均变量的质量和动量方程,见式(1)~(2)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_f \rho_f) + \nabla \cdot (\varepsilon_f \rho_f u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_f \rho_f u) + \nabla \cdot (\varepsilon_f \rho_f u u) = -\nabla P_g - F_{p-f} + \nabla \cdot (\varepsilon_f \tau) + \varepsilon_f \rho_f g \quad (2)$$

式中: t 为时间,s; ρ_f 为气体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ε_f 为气体体积分数; u 为气体速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; P_g 为气体压力,Pa; τ 为黏性应力张量,Pa。式(2)中颗粒与气体之间的体积力 F_{p-f} 定义为式(3)。

$$F_{p-f} = \sum_{i=1}^{k_c} (f_{drag,i} + f_{pgf,i}) / \Delta V \quad (3)$$

式中: k_c 为所考虑的计算单元中的粒子数; ΔV 为所考虑的计算单元的体积, m^3 ; $f_{drag,i}$ 为流体与颗粒间作用力,N; $f_{pgf,i}$ 为压力梯度力,N。

1.2 颗粒相

固体颗粒被视为由 DEM 描述的离散相,颗粒的平移和旋转运动方程分别见式(4)、(5)。

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = f_{drag,i} + f_{pgf,i} + \sum_{j=1}^{k_i} (f_{c,ij} + f_{d,ij} + f_{l,ij}) + m_i g \quad (4)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (T_{t,ij} + T_{r,ij}) \quad (5)$$

式中: m_i 为颗粒质量, kg ; v_i 为平动速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ω_i 为角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; I_i 为转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。根据 Zhang 等^[19]研究,颗粒-流体流动建模中涉及的主要力有:①压力梯度力, $f_{pgf,i} = -\nabla P V_i$,其中 P 和 V_i 为颗粒的流体压力和体积;②流体与颗粒间作用力, $f_{drag,i}$;③重力, $m_i g$;④颗粒 i 与颗粒(或壁面) j 之间的作用力,包括弹性接触力 $f_{c,ij}$,黏性接触阻尼力 $f_{d,ij}$ 和毛细力 $f_{l,ij}$ 。

1.3 连续相与离散相相互作用

根据式(2)和式(6),连续相与离散相之间通过动量交换实现耦合^[25]。

$$F_f = K_{gs} (v_g - v_s) \quad (6)$$

式中: K_{gs} 为动量交换系数,本文采用 Gidaspow^[26]等给出的式(7)计算。

$$\begin{cases} K_{gs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s|}{d_s} \alpha_g^{-2.65} & \alpha_s \leq 0.2 \\ K_{gs} = \frac{150 \alpha_s (1 - \alpha_g) \mu_g + 1.75 \alpha_g \rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s|}{\alpha_g d_s^2} & \alpha_s > 0.2 \end{cases} \quad (7)$$

式中： d_s 为颗粒当量粒径，m； α_g 是气体体积分数； α_s 是颗粒所占孔隙分数，且 $\alpha_s = 1 - \alpha_g$ ； C_D 为与颗粒雷诺数 R_{e_s} 相关的阻力系数。其中 C_D 表达为式(8)。

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{R_{e_s}} & R_{e_s} \leq 1 \\ \frac{24}{\alpha_g R_{e_s}} [1 + 0.15(\alpha_g R_{e_s})^{0.687}] & 1 < R_{e_s} \leq 1\ 000 \\ 0.44 & R_{e_s} > 1\ 000 \end{cases} \quad (8)$$

颗粒雷诺数定义为式(9)。

$$R_{e_s} = d_s |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s| \alpha_g \frac{\rho_g}{\mu_g} \quad (9)$$

1.4 液桥力模型

液桥力包括静液桥力(毛细力)和动液桥力(黏性力)，毛细力受液桥几何形状控制，黏性力与颗粒运动和液体黏度有关。其中黏性力与毛细力相比并不显著，在本研究中只考虑毛细力，黏性力忽略不计。Xiao 等^[24]通过回归分析得到了颗粒间由凸到凹的液桥力($f_{l,ij}$)模型，表达为式(10)。

$$\frac{2f_{l,ij}}{\pi d_i \gamma} = \begin{cases} 0.629(1 + 2\sin\theta + 1.3\cos\theta)n_{ij} & \hat{D} \leq \hat{D}_{C,P-P} \\ 4\cos\theta n_{ij} & \hat{D} \leq \hat{D}_{C,P-W} \\ [\exp(A\hat{D} + B) + C]n_{ij} & \hat{D} \leq \hat{D}_C \end{cases} \quad (10)$$

式中： γ 和 θ 分别为水的表面张力和接触角； n_{ij} 为粒子 i 到粒子(或壁面) j 的单位向量； \hat{D} 为粒子 i 和粒子(或壁面) j 之间的无量纲距离； \hat{D}_C 为液体桥从凸过渡到凹的临界距离。模型参数 A 、 B 、 C 计算见式(11)~(16)。

颗粒与颗粒之间

$$A = -(0.51 - 0.073\ln V^*) V^{*-0.569} \quad (11)$$

$$B = (1.05\ln V^* + 1.64)(\theta + 3.2V^* + 17.7)^2 + 0.48 \quad (12)$$

$$C = 0.0042\ln V^* + 0.0078 \quad (13)$$

颗粒与壁面之间

$$A = -1.43V^{*-0.556} \quad (14)$$

$$B = (1.23\ln V^* + 0.51)(\theta + 3.6V^* + 19)^2 + 1.2 + 0.1V^{*-0.32} \quad (15)$$

$$C = 0.013\ln V^* + 0.18 \quad (16)$$

当分离距离大于限值时，液桥破裂，这个限值称为临界破裂距离 \hat{D}_r ，表达式见式(17)~(18)。

颗粒与颗粒之间

$$\hat{D}_r = (0.62\theta + 0.99)V^{*0.33} \quad (17)$$

颗粒与壁面之间

$$\hat{D}_r = (0.22\theta + 0.762)V^{*0.205} \quad (18)$$

2 数值模拟设置

2.1 计算模型及网格划分

选取长度为 0.5 m，管道直径为 20 mm 的水平管道进行计算。管道的几何模型通过 Solidworks 软件建模，网格划分使用 ICEM 软件，采用六面体结构化网格，节省计算时间，使计算结果更加精确。

2.2 物性参数与边界条件

表 1、表 2 列出了模拟条件。颗粒以恒定的固体流速和较小的初始速度注入到管道中。对于气体流动模型，在入口处采用固定的均匀速度剖面，在壁面处采用无滑移条件。在 DEM 模拟中，管壁被视为直径无穷大的刚性球体，没有粒子与管壁相互作用引起的位移或运动。考虑到计算资源以及计算速度，对流体和颗粒进行周期性设置，使用周期性边界条件来考虑一个短管道。

表 1 固相物性参数

Table 1 Solid phase physical parameters

材料参数	沙子颗粒	碳钢壁面
泊松比	0.3	0.33
颗粒粒径/mm	1.5	—
密度/(kg·m ⁻³)	2 482	7 850
杨氏模量/Pa	1 × 10 ⁶	7 × 10 ⁷
质量流率/(kg·s ⁻¹)	0.5	—
碰撞恢复系数	0.75	0.8
静摩擦系数	0.34	0.4
滚动摩擦系数	0.001	0.005
接触模型	Hertz - mindlin	Hertz - mindlin
表面张力/(N·m ⁻¹)	0.073	0.073
接触角/(°)	30	30

表2 液相性质

Table 2 Liquid phase properties

参数	数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.183
黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1.843×10^{-5}
入口速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	7、8、9、10、11、13
曳力模型	Gidaspow
升力模型	Saffman、Magnus
湍流模型	$k-\varepsilon$

3 结果与讨论

3.1 气体速度研究

3.1.1 湿颗粒密相气力输送流型的判定

在湿颗粒气力输送中,流型的判定对于设计、运行和优化气力输送系统至关重要,不同的输送流型会影响系统的性能、能耗、物料输送效率等。本研究通过搭建 EDEM-FLUENT 双相耦合平台,利用数值模拟的方法获得输送系统在不同操作条件下的流型信息,主要研究气速对管道内部湿颗粒流型的影响,最终管内流型变化的数据分析结果通过压降的变化呈现出来。

水平管道中湿颗粒气力输送的基本流型大致可分为管底流、悬浮流、沙丘流和栓流。图1为压降随气速变化的流型相图,结果表明,随着气速的变化,湿颗粒的流型发生逐步改变,相应的流型转变会体现为管内压降的不同。当 $5 \text{ m/s} \leq v \leq 13 \text{ m/s}$ 时,湿颗粒在管内的分布有粘结成团的现象,此时管内的流型主要体现为沙丘流和栓流,也就是水平管道的气力输送为密相气力输送;当气体速度 $v > 13 \text{ m/s}$ 时,湿颗粒在管内的分布比较均匀,因此管内的流型主要体现为管底流、悬浮流等状态,即为稀相气力输送。

3.1.2 湿颗粒密相输送的最佳经济速度

湿颗粒在密相输送过程中容易形成栓流,这会使得气力输送效率大大降低,因此本研究考察了形成栓流之后管内压降变化情况,以及输送过程中的经济运输速率。本研究发现,在进行密相气力输送时,气固两相在流动过程中与壁面的作用非常复杂。随着壁面与湿颗粒以及气体的碰撞、摩擦和湿颗粒自身的上升和悬浮等不断消耗能量,管道内部会产生一定的压力损失。图2为含水率(ω)为5%的湿颗粒在气力输送过程中管道内压降随气体速度的变化情况,结果表明,随着气体速度的增大,单位长度

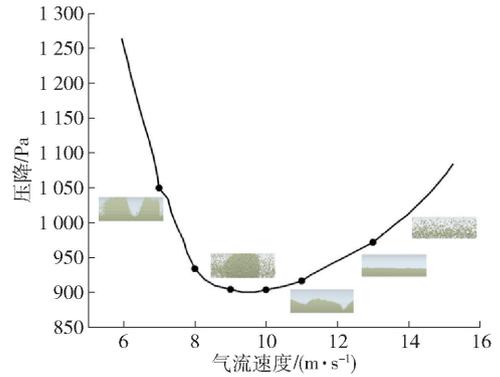
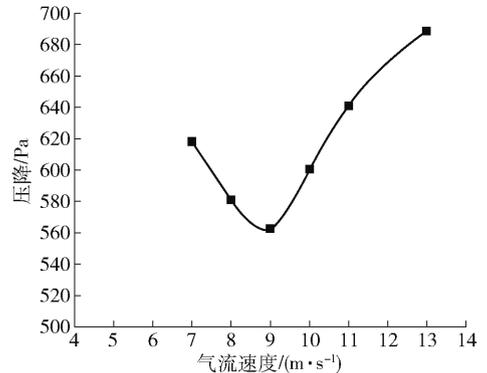


图1 压降随气速变化的流型相图

Fig. 1 Flow pattern phase diagram of pressure drop with gas velocity

的水平管道压降数值呈现先降低后增长的趋势。出现这种压降变化的原因是当气体速度较小时,由于料栓与壁面间的摩擦以及颗粒自身的重力,使得管内压降较大;随着气体速度的增大,料栓的速度增加,这时颗粒与壁面的摩擦压降随之减小;气体速度继续增加,压降会成幂指数增大。所以在压降与气速的关系图中出现了一个最低点(质量流率 0.5 kg/s , 气体流速 9 m/s),该点使得本文研究的输送系统最经济效益,被称为最佳经济速度。

图2 管道内压降随气体速度变化($\omega = 5\%$)Fig. 2 The pressure drop in the pipeline varies with the gas velocity ($\omega = 5\%$)

3.2 颗粒含水率对栓流的影响

在密相气力输送过程中由于湿颗粒的凝聚特性,运输时容易形成栓流,湿颗粒之间存在液桥力,当颗粒的含水率越高时,颗粒之间更紧密,更容易保持栓流的状态。上文结果表明,在质量流率为 0.5 kg/s 的工况下,密相湿颗粒输送的最佳经济速度为

9 m/s,所以在气体流速 9 m/s、质量流率 0.5 kg/s 的工况下,考察不同颗粒含水率对水平管道内栓流的影响。

3.2.1 管道内部输送颗粒流态对比

图 3 所示为水平管道中不同含水率的颗粒形成段塞流的流动行为(图中 w 代表颗粒含水率)。从图中可以看出,颗粒含水率为 0% 即干颗粒时,水平管道内首先呈现段塞流的流态,随后料栓被气体击穿,形成沙丘流,最后稳定状态下演变为管底流。这是由于段塞流属于不稳定流动,在输送过程中,气体速度过快,管内压力不稳定,无法维持料栓稳定的输送,使得料栓被击穿,先演变为沙丘流的流态输送,最后再形成管底流进行后续运输工作。而从图中可以看出颗粒含水率(ω)为 3%、5%、7% 时的湿颗粒一直以栓流的形式运输,且随着含水率的增加,团聚体的体积也在不断扩大,这主要是由于当颗粒含水率增加时,由干颗粒转变为湿颗粒,此时湿颗粒表面形成强液桥力,使得颗粒之间更加紧密,形成团聚体,同样的气速下气体无法击穿料栓。此种工况下,料栓之间存在稳定的静压差,使得物料一直以栓流的形式运输。

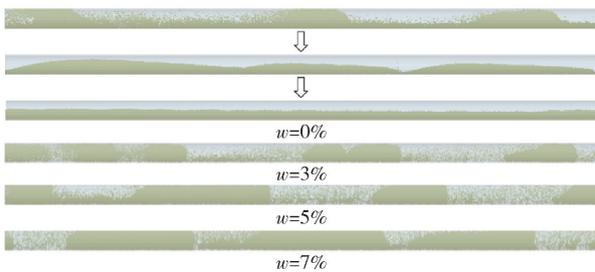


图 3 水平管中不同含水率颗粒段塞流流动状态

Fig. 3 Flow state of dry and wet particle slug flow in horizontal pipe

3.2.2 不同含水率下输送速度对比

研究发现,当颗粒含水率固定为某一个数值时,在不同截面高度下干颗粒和湿颗粒的输送速度也是不同的,即截面高度对于湿颗粒的密相输送过程也是一个重要影响因素。所以选取稳定栓内与栓流动方向垂直的截面,分别考察含水率(ω)为 0%、3%、5%、7% 的颗粒在管道中的输送速度沿不同截面高度的变化规律。图 4 为稳定状态下干、湿颗粒料栓输送速度情况,结果表明,当含水率为 0% 时,颗粒输送速度达到最大。图 5 为稳定栓内截面干、湿颗

粒速度随截面高度的变化情况。对于干颗粒输送,由于位于管道最顶端的颗粒会受到管道摩擦,输送速度稍小于位于管道中上部的颗粒输送速度;而位于管道底部的颗粒速度很小,甚至接近为零。这种现象说明了料栓的上部与下面的堆积层的运动不是一体、同步的,这也与图 3 所示的干颗粒输送流型相对应。对于湿颗粒的输送,位于管道最顶端的颗粒不仅要受到管道的摩擦力作用,还要受到颗粒-壁面间的液桥阻力作用,所以速度明显小于位于管道中上部的颗粒速度,与图 3 所示的湿颗粒流型对应,不存在与干颗粒类似的移动床层,而且料栓长度随着颗粒含水率的增加而增加。同样,管道底部的湿颗粒速度小于管道底部干颗粒的速度,这也是因为湿颗粒与壁面的液桥力作用产生的影响。

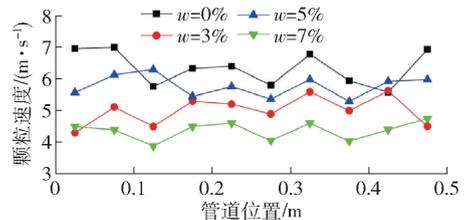


图 4 稳定状态下干湿颗粒料栓输送速度

Fig. 4 Conveying speed of dry and wet particles under steady state

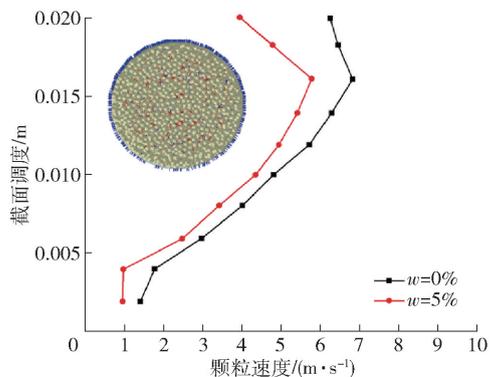


图 5 稳定栓内截面干湿颗粒速度随截面高度的变化曲线

Fig. 5 The velocity curve of dry and wet particles in the section of the stabilizer with the section height

3.2.3 管内压降的影响

为了实时监测湿颗粒在密相输送过程中设备是否正常运行,本研究选取水平管道长度 $L = 0.25$ m 处的截面为研究对象,可得到压力随时间变化的曲

线,从而分析密相输送中流态的变化来判断设备是否能够正常使用。图6为管道 $L=0.25\text{ m}$ 处的干、湿颗粒截面压力随时间变化情况。对于干颗粒的流动,曲线前部分处于波动较大的不稳定状态,这说明在密相输送过程中已经有大部分的颗粒沉积在了管道底部,从而进行不稳定输送;同时曲线前部分压力明显高于中间与后半部分,证明此时的气力输送流型为段塞流;曲线的中间部分一直在下降,表明气体不足以使颗粒处于悬浮状态,段塞流的料栓被气体击穿形成了沙丘流;最后曲线基本保持在一个水平值上下小幅度浮动,这表明颗粒经过该点时的压力基本保持不变,流动较为稳定,流型已经形成了稳定的管底流。相比于干颗粒,湿颗粒的压力曲线一直处于波动较大的不稳定状态,这是由于湿颗粒在液桥力的作用下流型一直为段塞流,从未发生变化,而段塞流是一种不稳定的流动状态,因此压力曲线全程波动较大,同时该压力曲线也与图3所观察的现象相对应。

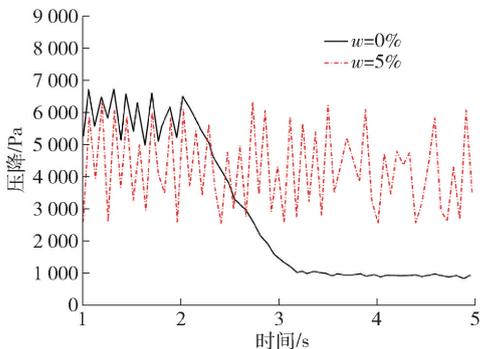


图6 管道 $L=0.25\text{ m}$ 处的干湿颗粒截面压力随时间变化曲线

Fig. 6 Curve of cross section pressure of dry and wet particles at $L=0.25\text{ m}$ of pipeline with time

图7为不同含水率工况下的颗粒在管道内部轴向压降随时间的变化图示。从图中可以看出当颗粒的含水率(ω)分别为0%、3%、5%、7%时,管内轴向压降在逐渐降低。这是因为当含水率上升时,湿颗粒往往会形成一定的团聚结块,使得颗粒之间的间隙减小,从而减小了气流通过颗粒层的阻力,降低了轴向压降。固定某一含水率值不变时,压降下降的原因是在密相输送过程中,由于湿颗粒的运动过程中不断团聚结块而逐步形成了稳定的料栓,因此逐渐产生了相对稳定的压差。

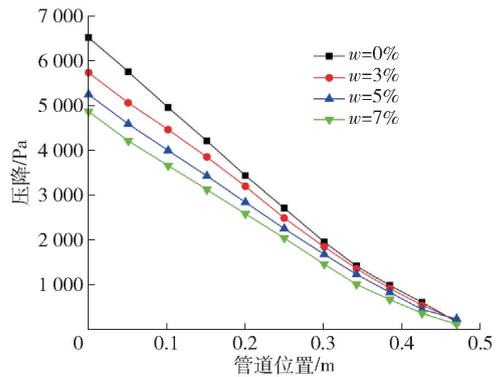


图7 压降沿管道的轴向变化

Fig. 7 The pressure drop varies along the axial direction of the pipe

图8和图9分别为干、湿颗粒在管道0.2 m和0.3 m之间轴向压降随时间的变化图示。由于气体流动对局部孔隙度或者固体浓度非常敏感,随着颗粒的运动而变化,因此从图中可以看出压降曲线的变化特征与固体浓度(固体占据管道空间的比值)的变化特征相一致,其中干颗粒的变化曲线与上述截面压力的变化曲线相似,湿颗粒的变化曲线呈梯形,这与Li等^[27]的观察定性一致。如图9所示,当两个监测点位于段塞外部时,轴向压差几乎为零,而当两个监测点位于段塞内部时,轴向压差可以达到 -600 Pa ,这是由于料栓外部存在静压差,料栓内部存在液桥力,颗粒与颗粒之间(或颗粒与壁面之间)的碰撞次数与摩擦阻力不断变化,使得段塞之间压力不同。

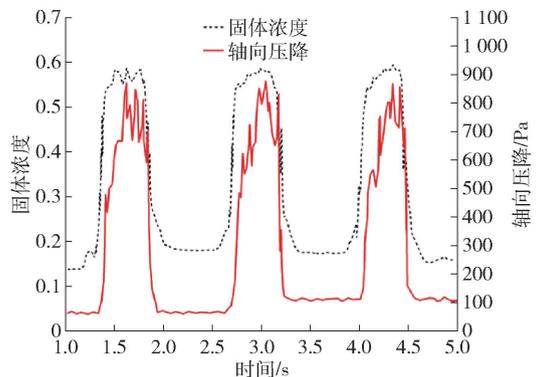


图8 干颗粒轴向压降在管道0.2 m和0.3 m之间随时间的变化

Fig. 8 The axial pressure drop of dry particles varies with time between 0.2 m and 0.3 m in the pipe

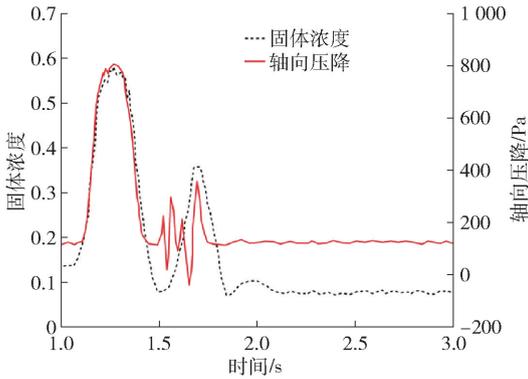


图9 湿颗粒轴向压降在管道0.2 m和0.3 m之间随时间的变化

Fig. 9 The axial pressure drop of wet particles varies with time between 0.2 m and 0.3 m in the pipe

3.2.4 料栓内部接触力的影响

湿颗粒在密相输送中的受力分析是很复杂的,包括湿颗粒与流体的作用力以及湿颗粒与壁面间作用力。图10为湿颗粒密相输送中含水率为5%时颗粒-壁面的平均作用力曲线,该作用力的大小是轴向与径向颗粒-流体力平均值。图11为湿颗粒密相输送中含水率为5%时的颗粒-流体的平均作用力曲线。两个图中的曲线都处于波动状态,这是由于料栓内部颗粒的主要作用力为液桥力,而料栓外部的颗粒处于悬浮状态,其自身的重力占主导作用,因此不同位置的颗粒所受力大小的情况也不相同。从图11中可以看出,颗粒-流体作用力全部为正值,表明料栓内部颗粒所受力方向与颗粒运动速度相同,料栓内部的颗粒的运动主要依靠颗粒-流体间作用力为颗粒提供主要动力。图10中颗粒-壁面作用力基本为负值,其中起主要作用的是液桥力、摩擦力与切向作用力,这表明对于颗粒与壁面间的平均作用力,在料栓运动过程中起到阻力作用。对比图10和11,形成栓流的运动过程中颗粒-流体之间作用力大于颗粒-壁面作用力,正因为这两种力随时间大小不断变化且方向相反,所以当二者绝对值之差稳定时,就会使整个料栓处于平衡状态,也就形成了稳定运输的段塞流。

4 结论

湿颗粒在密相气力输送过程中容易造成颗粒的团聚粘结从而形成栓流,妨碍正常的气力输送工作,

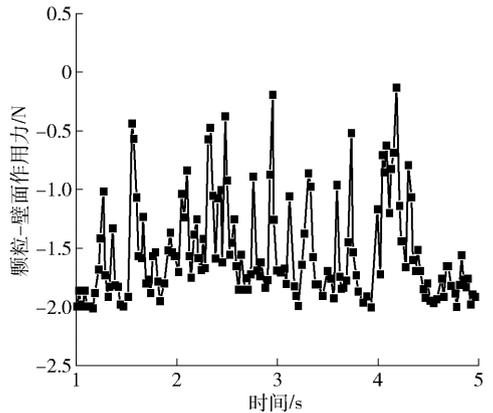


图10 颗粒-壁面作用力示意图
Fig. 10 Schematic diagram of particle-wall forces

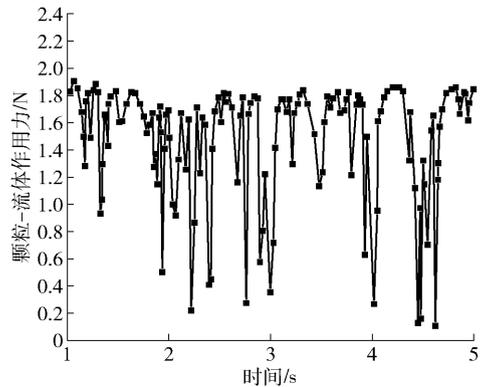


图11 颗粒-流体作用力示意图
Fig. 11 Schematic diagram of particle-fluid forces

本文主要从管道内气体速度和颗粒含水率两个方面对密相栓流气力输送系统的输送参数进行优化探索,为湿颗粒密相输送在冶金工业的实际应用中提供一定的理论支持。

1)管道内部气体速度的大小选取是影响栓流形成的一个重要因素,存在一个适合在栓流条件下运输效率最高的最佳经济速度。本研究发现,随着气体速度的增大,单位长度的水平管道压降数值呈现先降低后增长的趋势,压降最小时的速度为最佳经济速度。在质量流率0.5 kg/s、含水率5%的工况下,密相湿颗粒输送的最佳经济速度为9 m/s。

2)在相同的条件下,湿颗粒在密相输送中可以形成稳定的段塞流,而干颗粒流态最终表现为管底流。在湿颗粒段塞流中,不存在底部的移动床层,仅存在料栓和单个湿颗粒的运动,并且随着含水率的增加,料栓长度随之增加,且颗粒的平均输送速度呈

下降趋势,表明颗粒的输送效率随着含水率的增加而降低,因此密相气力输送难度也随之增加。

3)通过对比0.2 m与0.3 m处管道内部压降发现,当两个监测点位于段塞外部时,轴向压差几乎为零,而当两个监测点位于段塞内部时,轴向压差可以达到-600 Pa,即通过对湿颗粒输送时的压降变化进行分析和监测,可及时发现设备故障的迹象,预警可能的问题并采取预防措施,避免设备损坏和生产中断。

[参考文献]

- [1] LIU Z, LI Q, ZHANG J S. Effect of moisture content on flow behavior and resistance characteristics of dense-phase pneumatic conveying[J]. *Powder Technology*, 2021, 387: 1-8.
- [2] LECREPS L, OROZOVIC O, ERDEN T, et al. Physical mechanisms involved in slug transport and pipeblockage during horizontal pneumatic conveying[J]. *Powder Technology*, 2014, 262: 82-95.
- [3] 邢婷,张妍,王晓宁.气固两相流在水平管道中的数值模拟[J]. *当代化工*, 2014, 10: 2175-2177.
XING Ting, ZHANG Yan, WANG Xiaoning. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in horizontal pipelines[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2014, 10: 2175-2177.
- [4] BANOONI S, HAJIDAVALLOO E, DORFESHAN M. A comprehensive review on modeling of pneumatic and flash drying[J]. *Drying Technology*, 2018, 36(1): 33-51.
- [5] 李志华,刘凯,李州,等.炭黑在水平管道中气力输送的数值模拟[J]. *起重运输机械*, 2012, 1: 46-50.
LI Zhihua, LIU Kai, LI Zhou, et al. Numerical simulation of pneumatic transport of carbon black in horizontal pipeline[J]. *Lifting and Transporting Machinery*, 2012, 1: 46-50.
- [6] PAN X, CHEN X, LIANG C, et al. Effect of moisture content on dense-phase conveying of pulverized coal at high pressure[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2011, 28(10): 2086-2093.
- [7] ZHOU H, XIONG Y, PEI Y. Effect of moisture content on dense-phase pneumatic conveying of pulverized lignite under high pressure[J]. *Powder Technology*, 2016, 287: 355-363.
- [8] 陈伟,张佩,孙永昌,等.基于CFD-DEM的非球形颗粒水力输送数值模拟[J]. *中国粉体技术*, 2022, 28(5): 82-91.
CHEN W, ZHANG P, SUN Y C, et al. Numerical simulation of hydraulic transport of non-spherical particles based on CFD-DEM[J]. *China Powder Science and Technology*, 2022, 28(5): 82-91.
- [9] LI Z Q, CHEN H M, WU Y K, et al. CFD-DEM analysis of hydraulic conveying of non-spherical particles through a vertical-bend-horizontal pipeline[J]. *Powder Technology*, 2024, 434: 119361.
- [10] LI Z Q, WU Y K, WANG Y D. Simulation of non-spherical particles stirring process in stirred tanks[J]. *Powder Technology*, 2024, 434: 119345.
- [11] LI Z, ZHANG P, SUN Y, et al. Discrete particle simulation of gas-solid flow in air-blowing seed metering device[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2021, 127(3): 1119-1132.
- [12] KUANG S B, CHU K W, YU A B, et al. Computational investigation of horizontal slug flow in pneumatic conveying[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47: 470-480.
- [13] ZHOU J W, SHUANGGUAN L J, GAO K D, et al. Numerical study of slug characteristics for coarse particle dense phase pneumatic conveying[J]. *Powder Technology*, 2021, 392: 438-447.
- [14] OROZOVIC O, LAVRICEC A, ALKASSAR Y, et al. On the kinematics of horizontal slug flow pneumatic conveying and the relationship between slug length, porosity, velocities and stationary layers[J]. *Powder Technology*, 2019, 351: 84-91.
- [15] LAVRICNEC A, RAJABNIA O, WILLIAMS H, et al. Inertial measurement unit as a tool within dense phase pneumatic conveying. Investigation into velocity measurement accuracy, pressure and velocity relationships in slug flow[J]. *Powder Technology*, 2021, 382: 454-466.
- [16] GONG S, ZUO Z, XIE G, et al. Numerical simulation of wet particle flows in an intensive mixer[J]. *Powder Technology*, 2019, 346: 301-315.
- [17] LIU P Y, YANG P Y, YU A B. Dynamics of wet particles in rotating drums; effect of liquid surface tension[J]. *Physics Of Fluids*, 2011, 23: 3723.
- [18] LIU P Y, YANG P Y, YU A B. DEM study of the transverse mixing of wet particles in rotating drums[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 86: 99-107.
- [19] ZHU R R, ZHU W B, XING L C, et al. DEM simulation on particle mixing in dry and wet particles spouted bed[J]. *Powder Technology*, 2011, 210: 73-81.
- [20] LIM E W C, TAN R B H, XIAO Z. Mixing behaviors of wet granular materials in gas fluidized bed systems[J]. *Aiche Journal*, 2013, 59: 4058-4067.
- [21] WANG M, ZHU W, SUN Q, et al. A DEM simulation of dry and wet particle flow behaviors in riser[J]. *Powder Technology*, 2014, 267: 221-233.
- [22] MEGIAS D, GAUCKLER L J. Accuracy of the toroidal approximation for the calculus of concave and convex liquid bridges between particles[J]. *Granular Matter*, 2011, 13: 487-492.
- [23] MEGIAS D, GAUCKLER L J. Analysis of the capillary forces between two small solid spheres binded by a convex liquid bridge[J]. *Powder Technology*, 2010, 198: 211-218.
- [24] XIAO F, JING J, KUANG S B, et al. Capillary forces on wet particles with a liquid bridge transition from convex to concave

- [J]. Powder Technology, 2020, 363, 59 – 73.
- [25] 崔益华. 水平管道负压气力输送 CFD-DEM 数值模拟[J]. 港口装卸, 2021, 256: 63 – 67.
- CUI Y H. CFD-DEM numerical simulation of negative pressure pneumatic conveying in horizontal pipeline[J]. Port Handling, 2021, 256: 63 – 67.
- [26] GIDASPOW D, JUNG J, KSINGH R. Hydrodynamics of fluidization using kinetic theory: an emerging paradigm: 2002 flour-daniel lecture [J]. Powder Technology, 2004, 148: 123 – 141.
- [27] LI J, WEBB C, PANDIELLA S S. Solids deposition in low-velocity slug flow pneumatic conveying [J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44: 167 – 173.

Numerical simulation of pneumatic conveying of wet particles with dense phase plug flow

XU Zhiheng, LI Zhengquan, CHEN Huimin, ZHANG Boqun, SHI Haoyu
(Jiangxi Provincial Key Laboratory for Simulation and Modelling of Particulate Systems,
Jiangxi University of Science & Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Given the current lack of a mature system and conclusions regarding the pneumatic conveying of wet granular materials in dense phase, this paper explores the flow mechanisms and flow patterns of wet granular dense phase pneumatic conveying, providing theoretical support for the optimization design of pneumatic conveying systems. The study employs a bidirectional coupling numerical simulation method using computational fluid dynamics (CFD) and discrete element method (DEM) to analyze the motion forms of dry and wet granular plugs in horizontal pipelines and the trajectories of particle movement. It further investigates the impact of moisture content on the conveying flow pattern, conveying efficiency, and pressure drop during conveying. The results indicate that under the same gas velocity, wet particles can form plug flow, while dry particles initially exhibit plug flow, which then evolves into dune flow as the plug is penetrated by the gas, ultimately becoming bottom flow. As the gas velocity increases, the pressure drop per unit length of the horizontal pipeline shows a trend of first decreasing and then increasing. Under the condition of mass flow rate of 0.5 kg/s and water content of 5%, the pipeline pressure drop is the lowest when the conveying speed is 9 m/s, which is the best economic speed value. The pressure curve of wet particles remains in a highly fluctuating unstable state; when two monitoring points are located outside the plug, the axial pressure difference is nearly zero, while when the monitoring points are inside the plug, the axial pressure difference can reach -600 Pa. By analyzing and monitoring the pressure drop changes during the conveying of wet particles, signs of equipment failure can be detected in a timely manner, allowing for early warnings of potential issues and the implementation of preventive measures to avoid equipment damage and production interruptions.

Key words: material transportation; dense phase pneumatic conveying; computational fluid dynamics; discrete element method; wet particle; slug flow; grain moisture content