# 基于离散元的粉末燃料输送弯管两相流特性研究\*

陈浩田1,卓长飞1,蒋显松2,蔡雨娇2,马艳艳2

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094;2. 重庆长安工业(集团)有限公司 精密装备研究所, 重庆 401120)

摘 要: 弯管是粉末燃料冲压发动机燃料输送系统的重要组成部分,为了研究弯管内气固两相流的 流场结构、颗粒碰撞以及压力损失的变化规律,基于连续相-离散元 (CFD-DEM) 耦合模型,考虑颗粒 的碰撞受力和弹塑性形变,对铝粉在弯管内的流动状况进行数值仿真。研究结果表明: CFD-DEM 算法 相对于传统的双流体模型和轨道法,能更为准确地描述颗粒流的碰撞信息和两相流的流动状况。弯管内 的总压损失随流化气流量的增加,呈先减小再增大的趋势,在本文研究的条件下,优选的流化气流量为 6~7g/s (流化气速度为3.0~3.5m/s);在低流速下,颗粒间的碰撞次数远大于颗粒-壁面间的碰撞,随着 流速的增高,颗粒与外侧壁面间的碰撞次数迅速增高,并导致颗粒-壁面间的碰撞次数超过颗粒间的碰 撞。弯管的弯径越大,弯管内的总压损失越大,但颗粒-颗粒、颗粒-壁面的碰撞次数均下降。

关键词:粉末输送;弯管;气固两相流;颗粒碰撞;铝粉;压力损失
中图分类号:V314 文献标识码:A 文章编号:1001-4055 (2021) 03-0701-10
DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190620

# Tow-Phase Flow in Bending Pipe of a Powder Fuel Conveying System Based on Discrete Element Method

CHEN Hao-tian<sup>1</sup>, ZHUO Chang-fei<sup>1</sup>, JIANG Xian-song<sup>2</sup>, CAI Yu-jiao<sup>2</sup>, MA Yan-yan<sup>2</sup>

(1. Aerospace Department School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,

Nanjing 210094, China;

2. Institute of Precision Equipment, Chongqing Changan Industries Group Co., Ltd, Chongqing 401120, China)

**Abstract**: The bending pipe is an important part of the fuel delivery system of powder fuel ramjet. In order to study the flow field structure, collision effect and the variation rules of total pressure loss for gas-solid two-phase flow in bending pipe, with the collision force and elastoplastic deformation of particles were considered, the numerical simulation was carried out to investigate the flow status of aluminum powder in bending pipe by the CFD-DEM coupling method. The results show that, compared with the traditional two-fluid model and orbit method, the CFD-DEM algorithm can more accurately describe the collision information of particle flow and the change of two-phase flow field. With the increase of fluidizing gas flow rate, the trend of total pressure loss in the bending pipe decreases first and then increases. Under the conditions studied in this paper, the best mass flow rate of fluidizing gas is 6~7g/s(fluidizing gas velocity is 3.0~3.5m/s). Under the low flow rate, the particle-particle collisions are much larger than particles-wall. With the increases of fluidizing gas velocity, particle-outer wall collisions increase rapidly, which causes that the particle-wall collisions exceed particle-particle collisions.

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-09-11;修订日期: 2020-01-13。

作者简介:陈浩田,硕士生,研究领域为金属粉末燃料冲压发动机。E-mail: 916024757@qq.com

通讯作者:卓长飞,博士,副教授,研究领域为火箭、冲压发动机。E-mail: njust203zcf@126.com

引用格式:陈浩田,卓长飞,蒋显松,等.基于离散元的粉末燃料输送弯管两相流特性研究[J].推进技术,2021,42(3):701-710. (CHEN Hao-tian, ZHUO Chang-fei, JIANG Xian-song, et al. Tow-Phase Flow in Bending Pipe of a Powder Fuel Conveying System Based on Discrete Element Method[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(3):701-710.)

It also shows that the larger the bending radius is, the greater the total pressure loss in the bending pipe is, but the collision numbers of particle-particle and particle-wall are reduced.

Key words: Powder conveying; Bending pipe; Gas-solid two-phase flow; Particle collision; Aluminum powder; Pressure loss

## 1 引 言

粉末燃料供应系统是粉末燃料冲压发动机的重 要组成部分,关系到燃烧室乃至整个冲压发动机的 工作性能,随着粉末燃料发动机的研究深入,燃料供 给系统的设计和优化已成为各国学者的研究热点<sup>[1]</sup>。 输送系统中,弯管和弯头作为粉末供应系统中的重 要零部件,为输送系统的灵活布置提供了实现的条 件,却同时导致较高的功耗、壁面磨损和颗粒沉积。 尤其是弯头,内部流动特性较为复杂,在能耗中占很 大比例,并容易造成堵塞,导致颗粒的破损和弯头腐 蚀[2]。为了克服这些问题,气动输送通常以尽可能低 的空气速度进行操作,但输送的颗粒在重力作用下 容易沉积在管道的底部或弯头处,这会造成较大的 压力损失,间隔性的压力波动以及输送管线的堵塞。 由于测量手段的局限和计算方法精确性的不足,一 直以来,输送系统的效率预估与实际相比误差较大, 特别是对流场中颗粒相的流动特性及两相交互作用 机理缺乏关键有效的研究,因此,深入地研究弯管内 两相流的流动特性对输送系统的效率提高具有重要 意义[3]。

数值模拟很早就被用于两相流的研究中, Triesch 等[4]使用双流体模型,针对循环流化床的立管,进行 了气固两相流流体力学的数值研究。张安峰等[5]应 用Fluent软件中的离散相模型计算了粉末的流场浓 度分布规律及汇聚特性。早期的数值模拟集中于颗 粒随机轨道模型和双流体模型,这些方法在颗粒的 处理方式上,多采用单向耦合(只考虑流体对颗粒的 相互作用)或双向耦合(考虑流体和颗粒的相互作 用)的方式,未能考虑颗粒碰撞对流场的影响。随着 研究的深入,研究者发现即使在颗粒体积分数很低 的情况下,颗粒碰撞作用也会对整个体系的演化过 程有所影响,即使颗粒体积分数为10-4量级,考虑颗 粒间碰撞作用和不考虑时得到的颗粒分散情况相差 较大<sup>[6]</sup>,这些结果实质上揭示了颗粒碰撞对体系演化 的重要影响。近年来,由于离散单元法与计算流体 力学方法相耦合的方式,能够在考虑颗粒碰撞的条 件下准确描述两相流的流场,因此被越来越多地用 于气固两相流的研究。杨文婧等<sup>[7]</sup>基于 Computational fluid dynamics (CFD)和 Discrete element method (DEM)耦合模型,对固体发动机中气-固两相流进行 了数值模拟研究,结果表明,相比于传统的双流体模 型及轨道法,这种相互耦合的方式能够更为精确地 得到发动机内两相流的流场。孙晓霞等<sup>[8]</sup>分析了喂 料头的工作机理后,利用EDEM和Fluent软件对颗粒 在喂料头中运动进行了动力学分析,推导出不同摩 擦因数下喂料曲面的曲线方程。Liu等<sup>[9]</sup>利用DEM 与N-S方程耦合求解的方式,对含间隙流的湿颗粒的 流体动力学进行了数值研究,比较了不同模型下间 隙流体对大小颗粒压力的作用规律。彭丽等<sup>[10]</sup>在对 流化床内颗粒团聚和碰撞研究中,利用DEM与CFD 耦合的方式,探究了颗粒弹性系数和恢复系数对颗 粒速度、平均床高、平坦因子等的影响。

综上所述,气力输送中气固两相流的研究涉及 流化床、含金属推进剂、矿物输运等领域,研究内容 主要涉及颗粒的流化、流态稳定性等方面,部分也侧 重于大颗粒的破碎、局部沉积与壁面侵蚀的问题研 究。对象多为横直管道,颗粒粒径较大,而对微米、 纳米级的颗粒研究较少,对弯管结构的作用规律缺 乏分析,对管中颗粒-颗粒、颗粒-壁面间的碰撞作用 及其影响因素缺乏关键的探究。

由于离散相和计算流体力学相耦合的方法可以 同时模拟研究流场和颗粒的动力学行为,包括流场 和颗粒本身的动力学特性以及流场与颗粒相互作用 的动力学特性,研究结果更具可靠性和真实性[11]。 本文基于 CFD-DEM 算法,采用四向耦合(考虑流体 和颗粒相互作用及颗粒的碰撞作用)的方式,选择 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型来模拟颗粒间的碰撞, 考虑粒子之间的受力和弹塑性形变,以微米级的铝 粉为固相,氮气为流化气,在15mm 直径的水平弯管 内,对气固两相流的流态进行了数值仿真,研究了弯 管内颗粒-颗粒、颗粒-壁面间的碰撞规律。对气力 输送系统中的主要工作参数气固比、弯径进行了仿 真研究,系统分析了其对弯管内气固两相流流动特 性以及压力损失的影响,并与横直管内压力损失研 究的相关试验结果进行了对比。结果有助于粉末发 动机试验中流化气流量的选取,避免管道堵塞,也能 为弯管壁面磨损、颗粒团聚、湍流波动等机理研究提

703

供依据。

## 2 数学模型

## 2.1 气相控制方程

耦合过程中,气相遵循 Navier-Stokes 方程,利用 连续方程和动量守恒方程进行求解。

气相连续方程为

$$\frac{\partial \varepsilon p}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \varepsilon u = 0 \tag{1}$$

式中 $\rho$ 为流体密度;t为时间;u为流体流速; $\varepsilon$ 为体积分数项。

动量守恒方程为

$$\frac{\partial \varepsilon \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \varepsilon \mu v = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \varepsilon \nabla v) + \rho \varepsilon g - S(2)$$

式中g为重力加速度;µ为粘性;S为动量汇。气相与颗粒相发生相对运动后产生动量传递,颗粒受 到流体的曳力作用,动量汇的引入实现了两相流之 间的耦合。动量汇计算式如下

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N} F_{\rm D}}{v} \tag{3}$$

动量汇 S 表征各网格单元内颗粒相的曳力和, v 为计算单元的体积。

#### 2.2 颗粒相控制模型

基于离散元法求解颗粒相,求解过程为通过颗粒接触模型计算出颗粒间的作用力,利用牛顿第二运动定律求解颗粒的运动学参数,再沿时间项推进计算,得到颗粒在不同时刻的轨迹<sup>[12]</sup>。

2.2.1 颗粒模型的接触方程

通过振动方程来模拟颗粒-颗粒(边界)之间的 接触,图1为将接触模型表示成振动模型示意图。将 接触方程分解为切向与法向,计算颗粒在各矢量方 向上的运动变量。

颗粒的法向振动方程为



Fig. 1 Contact model is expressed as vibration model

$$\frac{m_{1,2}d^{2}u_{n}}{dt^{2}} + \frac{c_{n}du_{n}}{dt} + K_{n}u_{n} = F_{n}$$
(4)

颗粒的切向振动方程为

$$\frac{m_{1,2}\mathrm{d}^2 u_{\tau}}{\mathrm{d}t^2} + \frac{c_{\tau}\mathrm{d}u_{\tau}}{\mathrm{d}t} + K_{\tau}u_{\tau} = F_{\tau}$$
(5)

$$\frac{I_{1,2}\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} + \left(\frac{c_{\mathrm{t}}\mathrm{d}u_{\mathrm{t}}}{\mathrm{d}t} + K_{\mathrm{t}}u_{\mathrm{t}}\right)r = M \tag{6}$$

式中 $m_{1,2}$ 为颗粒i,j的等效质量; $I_{1,2}$ 为颗粒的等效转动惯量;r为旋转半径; $u_n, u_t$ 分别为颗粒的法向和切向的相对位移; $\theta$ 为颗粒自身的旋转角度; $F_n, F_t$ 分别为颗粒所受法向分力与切向分力;M为颗粒所受外力距; $K_n, K_t$ 分别为法向及切向弹性系数; $c_n, c_t$ 分别为法向和切向阻尼系数。

2.2.2 颗粒模型的位移方程

利用牛顿第二定律及转动定律计算颗粒相的运 动学参数,颗粒运动方程为

$$\begin{cases} m_i \ddot{u}_i = \sum F \\ I_i \ddot{\theta}_i = \sum M \end{cases}$$
(7)

式中 $u_i$ , $\ddot{\theta}_i$ 分别为颗粒i的加速度和角加速度; $m_i$ ,  $I_i$ 分别为颗粒i的质量和转动惯量; $\Sigma F$ 为在质心处颗 粒所受合外力, $\Sigma M$ 为合外力距。

采用中心差分法求解微分方程,得到颗粒速度 与角速度的递推表达式

$$\begin{cases} \left(\dot{u}_{i}\right)_{N+\frac{1}{2}} = \left(\dot{u}_{i}\right)_{N-\frac{1}{2}} + \left[\sum F/m_{i}\right]_{N}\Delta t \\ \left(\dot{\theta}_{i}\right)_{N+\frac{1}{2}} = \left(\dot{\theta}_{i}\right)_{N-\frac{1}{2}} + \left[\sum F/I_{i}\right]_{N}\Delta t \end{cases}$$
(8)

式中Δ*t*为时间步长;*N*对应时间*t*。 对递推式积分,得到位移方程为

$$\begin{cases} (u_i)_{N+1} = (u_i)_N + (\dot{u}_i)_{N+\frac{1}{2}} \Delta t \\ (\theta_i)_{N+1} = (\theta_i)_N + (\dot{\theta}_i)_{N+\frac{1}{2}} \Delta t \end{cases}$$
(9)

将计算结果代入力-位移关系式求出颗粒的作 用力,迭代计算,就能得到不同时刻下颗粒的运动 参数<sup>[13]</sup>。

#### 2.3 CFD-DEM 耦合格式

文中 CFD 由软件 Fluent17.0进行求解, DEM 由软件 EDEM2018进行求解。两者耦合过程为: Fluent进行初步的气流流场计算,将流场信息交给 EDEM 进而计算颗粒的运动。在 DEM 的时间步长内,离散元法基于 Lagrangian 或 Eulerian 模型计算出颗粒的速度、位置以及碰撞信息,根据流场数据及颗粒信息计算颗粒受力,并更新颗粒位置及运动参数。颗粒信息更新完成后,将仿真控制权交还给 Fluent,在气相时间步长内,根据 EDEM 提供的动量交换量重新计算气

流流场数据,从而完成一次耦合计算<sup>[14]</sup>,具体流程 见图2。



Fig. 2 CFD-DEM coupling flow chart

## 2.4 物理模型

弯管按照用途分为加料区、弯管区和弯管后突 变区。图3为弯管的尺寸图,弯管直径为15mm,弯径 为100mm。考虑到在入口处直接添加颗粒生成区会 导致颗粒因碰撞从入口逃逸,造成仿真结果失真,因 此,将颗粒生成区设置在距入口20mm处,设置颗粒 生成区长度为30mm,可避免颗粒生成时反复重叠影 响填充速度。颗粒粒径为微米级,当颗粒相流量为 1g/s时,颗粒数约为327万,若增大颗粒相流量,同时 考虑颗粒的碰撞作用,将消耗庞大的计算资源。因 此,本文仅进行颗粒相在1g/s条件下的数值仿真,根 据文献[15]中实验可知,可以用此方法定性研究管 内两相流的变化规律,更好地探究两相流的流场结 构和碰撞信息。

利用 Fluent 软件求解气相控制方程,基于 Eulerian 坐标体系的 k-ε 湍流模型,用 RANS 方程对管内气



Fig. 3 Geometric dimensions of bending pipe model

流流场进行求解,压力速度耦合采用Simple算法,控制方程、湍流方程的离散采用二阶迎风格式。流体的时间项采用龙格-库塔法推进,EDEM中颗粒相的时间项使用Euler法。出口与入口分别设置压力出入口,选用 30μm 粒度的铝粉颗粒,根据实验研究表明<sup>[16]</sup>,在该型粒度范围内的颗粒压力梯度力、Magnus力、Saffman升力等值相对较小,只考虑气流的曳引阻力和 Basset力,以及颗粒之间、颗粒管道之间的碰撞作用力。表1为数值模拟中两相流的相关参数。

Table 1         Numerical simulation param	eters
--	-------

Item	Parameter	Value
Gas	Density/(kg·m <sup>3</sup> )	1.225
	$Viscosity/(kg/(m \cdot s))$	$1.8 \times 10^{-5}$
	Mass flow rate/(g/s)	5
	Time step/s	$1 \times 10^{-2}$
Solid	Particle size/µm	30
	Mass flow rate/(g/s)	1
	$Density/(kg/m^3)$	2700
	Poisson's ratio	0.33
	Shear modulus/Pa	2×10 <sup>7</sup>
	Recovery factor	0.6
	Static friction coefficient	0.4
	Rolling friction coefficient	0.01
	Time step/µs	0.4
	Entrance speed/( $m/s$ )	0.1

#### 2.5 网格无关性验证

为排除网格数对仿真结果造成的影响,对模型 进行网格无关性验证,选取20万、40万、60万的网格 进行对比,利用CFD-DEM耦合的方式,得到了网格 无关性结果,图4为三种网格数下弯管内侧壁面沿流 线方向的气流速度变化曲线。曲线表明:沿着流向, 气流速度整体呈先降低再升高的趋势,三种情况下 的计算结果基本相同,最大误差为8%,故采用的网格 数符合计算模型的要求。



## 2.6 计算方法验证

Yan等<sup>[17]</sup>利用 PIV 和图像处理技术得到了水平横 直管内的两相流的速度、浓度分布以及压力损失。为 验证计算方法的准确性,利用 CFD-DEM 耦合的方式对 上述文中横直管内两相流流场进行数值仿真。表2为 在 non-fin结构下,试验和仿真所用的主要参数。

试验分别在进料口 0.3m 和 3.5m 处设置了 Location A和 Location C监控点,并对试验数据处理,得到 了两个截面沿径向的颗粒浓度分布情况。图 5为仿 真和试验的对比曲线,由图可知,在管道上层,试验 结果和耦合算法结果较为相近,而在管道底部,仿真 结果得到的浓度要高于试验结果,这可能是重力对 颗粒相密集区作用复杂的缘故,尽管实验结果与耦 合算法的结果存在一定差别,但两者具有一致的变 化规律且非常接近,表明了该计算方法的合理性和 准确性。



Fig. 5 Comparison of test and numerical simulation

 Table 2
 Numerical simulation parameter of validation

process			
Parameter	Value		
Pipe diameter D/mm	80		
Gas velocity $U_{a}/(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s})$	13.1		
Particle mass flow rate $m_{\rm s}/(\rm kg/s)$	0.4		
Particle diameter $d_{\rm p}/\mu{ m m}$	2.3		
Particle density $\rho/(\text{kg/m}^3)$	978		

## 3 仿真结果及分析

### 3.1 颗粒流流动特性分析

图 6 显示了颗粒在弯管内的速度及分布情况,图 中右下侧为框选区域放大后的颗粒速度云图。由图 可知,颗粒在两相流加速区和出口位置的速度较高, 在入口处,颗粒流受到的阻力较小,随流性较好。在 弯管段出现了明显的颗粒聚集现象,弯管内侧壁面 沉积,颗粒平均速度较低,在颗粒的沉积面上悬浮一 层高速的颗粒流,这种现象称之为颗粒绳,颗粒绳是 气固两相流的典型特征,离心力和碰撞作用是产生 的关键。



steady state at *m*\_=5g/s

三种流化气流量下,弯管内中心截面、弯管出 口、直管出口处颗粒的浓度分布云图如图7所示。由 图可知,颗粒在弯管外壁面出现聚集,其它区域较为 稀疏。随着流化气流量的减少,颗粒在外壁面的堆 积量逐渐升高,同时,外侧高浓度区逐渐向底部移 动,这是由于在水平管道中,颗粒的运动并不完全是 横向的,会在重力的作用下,于弯管外壁面沉积。随 着流化气流量的减少,颗粒在弯管内受重力影响越 来越明显,颗粒不断沉降到管道的底部,沿壁滑动或 撞击管壁。对比图 7(a),(b),(c)的 Downstream 2 截 面云图可知,弯管出口的颗粒沉积浓度逐渐增高,当 流化气流量减少至3g/s时,弯管底部形成高密度的颗 粒沉积区,这将显著影响颗粒的运动。对比图7(a), (b),(c)的出口截面云图可知,随着流化气流量的减 少,出口截面的颗粒分布均匀度也逐渐降低,图7(c) 出口截面颗粒底部浓度明显高于顶部,掺混性能 较差。

#### 3.2 颗粒碰撞对流场结构的影响

图 8 为不同耦合方式下的颗粒浓度分布云图,由 图可知,两种方式下管内的颗粒浓度差异较大,双向 耦合方式下外壁面的颗粒显得较为分散,浓度分布 较为均衡,并直接延续到弯管出口。四向耦合方式 下,弯管外壁面颗粒浓度更高,形成狭长的颗粒富集 区,富集区的颗粒受到碰撞作用中会粘在一起,形成 尺寸不断增长的聚合物。另外,颗粒与管道外壁面 的碰撞频率的增大,也会导致壁面的磨损与腐蚀,对 管道的结构产生不利的影响。

碰撞能够引起颗粒运动状态的改变,尤其是角



Fig. 7 Distribution of particle concentration at different sections under different flow rates



速度的改变。图9为不同耦合方式下管道出口截面 位置颗粒角速度变化曲线,由图可知,双向耦合方式 下颗粒拥有较高的角速度,四向耦合条件下颗粒的 角速度值较低且趋于集中,而出口颗粒角速度的变 化,会改变发动机燃烧室内颗粒的掺混和燃烧。这 实际上表明了碰撞作用对颗粒运动状态的明显改 变,并能在两相流的相互作用下影响两相流流场特 性,采用CFD-DEM四向耦合模型能够在粒子尺度上 更为准确地模拟颗粒的受力、运动特性。

弯管内颗粒的碰撞将会影响管道内的能量损 失,图10为颗粒碰撞作用下的能量损失分布图。由 图可知,多数颗粒间的碰撞程度较为剧烈,在能量损 失中占比较大。颗粒碰撞对体系内能量损失影响较 大,颗粒-壁面间碰撞的能量损失相对较低,管道内 由颗粒造成的能量损失主要由颗粒间的碰撞产生。

#### 3.3 流化气对颗粒碰撞和压力损失的影响

颗粒的碰撞频率是管道压损研究过程中重要的







Fig. 10 Energy loss in particle collision under stable conditions

量化参数。图 11 为 100mm 弯径的弯管,在不同流化 气流量下,沿轴线方向颗粒-颗粒间的碰撞次数曲 线。由图可知,当流化气流量<7g/s,颗粒在进入弯管 后碰撞次数急剧上升,当流化气流量>7g/s时,颗粒之 间的碰撞次数趋于平稳,几乎不变。这是因为随着 气固比的增大,颗粒的流速加快,颗粒之间的碰撞较 少,在弯管处不易堆积。当流化气流量较低时,颗 粒-颗粒之间的碰撞次数快速增多,尤其在弯管处, 幅值相差较大,变化较为明显。由图可知颗粒碰撞 主要发生在弯管区域,从物理意义上分析,颗粒局部 浓度的变化和相对速度的变化是导致颗粒轨迹交叉 引起颗粒之间发生碰撞的两个最根本原因。当流化 气为5g/s时,颗粒碰撞的峰值出现在弯管的中心截面 处(即0.21m处),当流化气流量为3g/s时,碰撞曲线 出现多次峰值,分别在直管与弯管的交界的前后两 个位置(0.14m和0.25m),在弯管中心截面处的颗粒 碰撞次数相对较少。由此可知,随着流化气流量的 减少,颗粒之间的碰撞将剧烈增加,颗粒沉积的主要 发生位置也将会随之变化,并由弯管中心向两侧 迁移。

图 12 为颗粒-壁面间的碰撞次数,在低流量下颗 粒-壁面碰撞曲线和颗粒-颗粒的碰撞具有相似的趋



Fig. 11 Number of particle-particle collisions under steady state

Particle-wall collision 1×10 0 0.00

Fig. 12 Number of particle-wall collisions under steady state



Fig. 13 Number of particles-wall collisions on both sides in the central section of bending pipe

势,颗粒-壁面之间的碰撞主要发生在弯管处,并在 一定范围内随流化气流量的增大而减少。当流化气 流量较小时,颗粒-壁面间的碰撞次数远不及颗粒-颗粒间的碰撞,低流速下,管内两相流流场中由碰撞 造成的能量损失主要来自于颗粒间的碰撞。当气流 流速进一步增大,可见颗粒与壁面之间碰撞次数迅 速提高,在15g/s的条件下,可以看到颗粒-壁面间的 碰撞次数几乎与3g/s条件下颗粒间碰撞次数持平。 这是由于流化气流量的增大,颗粒受到的曳力增大, 平均速度提高,重力作用的效果不再明显,颗粒壁面 之间的碰撞次数增多。

以弯管 Central 截面为中心取 60mm 长的截面体, 统计颗粒与弯管内外侧壁面间的碰撞次数,统计结 果如图13所示。颗粒与内壁面的碰撞次数随流化气 流量的增大呈先减少后持平的趋势,而颗粒与外壁 面的碰撞次数先减少后增多。这与流化气流速有 关,当气流量<7g/s时,管道外侧形成较为明显的颗粒 流,导致内壁面颗粒数量较少,碰撞较少。而外壁面 因弯管结构的变化,颗粒碰撞频率上升导致速度降 低,因而出现局部沉积,加剧了颗粒与外壁面间的碰 撞。当气流量>7g/s时,颗粒的速度提高,颗粒逐渐 克服离心力和惯性的作用,与内壁面的碰撞逐渐激



烈,并出现少部分聚集的现象,与此同时,弯管流动 中特有的颗粒绳现象不再明显。弯管内壁面颗粒 碰撞次数逐渐超过外侧,从而出现图12中气流量 为15g/s时颗粒-壁面碰撞次数的整体跃迁。

图 14 为仿真条件下弯管内的总压损失曲线。管 道内两相流的总压损失随着流化气流量的增大呈现 出先减少再增加的趋势,最小压降点出现在6~7g/s之 间(流速为3.0m/s~3.5m/s),当流化气流量小于最小压 降点时,颗粒受到的曳力大幅降低,颗粒碰撞频率快 速增大,沉降速度增大,因而出现沉积。当流化气流 量大于最小压降点时,管道内的总压损失随流化气 流量的增加而增大。当处于最小压降点时,气固两 相流的总压损失与纯气相的值较为相近,但并未出 现某些实验操作件下阻力变小的现象,即同等条件 气固两相流的总压损失小于纯气相的值。图15为试 验条件下 25µm 飞灰在 D=100mm 横直管内压力损失 梯度曲线<sup>[18]</sup>,试验对比了 0kg/h, 400kg/h, 500kg/h, 600kg/h四种颗粒流量下,流化气流速对管内压力损 失梯度的影响规律。由图可知,当颗粒流量恒定时, 随着流化气流速的增大,管道内的压力损失梯度呈 现出先减少再增加的趋势。对比图 14 和图 15 可知, 弯管结构的出现,一定程度上会影响管道最小压降 点的变化,并不会影响总体的变化趋势,数值仿真结 果与试验结果具有一致性。



Fig. 14 Total pressure loss curve under different fluidizing gas flow

各部位的压力损失决定着管道的总压变化,对 各部位的分析有利于对管道压力损失的研究。根据 仿真结果,计算出不同流化气流量下管道各区域的 压力损失。图16为管道内加料区、弯管区和弯管后 突变区的压力损失梯度柱状图。由图可知,各部位 的压力损失变化规律不尽相同,随着流化气流量的 增大,加料区的压力损失梯度逐渐增加。这是由于 固体颗粒在运动中具有较大惯性,在气流曳力作用 下运动,加速度长度往往比气体的更长,能耗也就更 大。而弯管区和突变区的压力损失呈现出先减少后 增加的趋势,在低流速下,两部位的压损占比较大。 当流化气流量小于最小压降点时,弯管内的压力损 失主要来自与弯管后突变区,加料区的压力损失较 小,当流化气流量大于最小压降点,管内各部位的压 力损失均提高,加料区占据主导地位。



Fig. 15 Pressure loss gradient curve of fly ash in a horizontal straight tube<sup>[18]</sup>



Fig. 16 Gradient cylindrical diagram of total pressure loss in the areas of the bend

### 3.4 弯径对颗粒碰撞和压力损失的影响

气力输送中,弯径对两相流的流动具有重要的 影响。在管径为15mm,来流空气流量为5g/s,颗粒相 流量为1g/s的条件下,分别选取50,100,150mm弯径 的弯管,研究弯径对气固两相流的作用规律。

当流场稳定后,选取相同截面结构的流场进行 对比,颗粒速度分布如图17所示,图中管径自左至右 依次为50,100,150mm。由图可知,当弯径<100mm 时,管内颗粒平均速度相对较低,速度分布较为均 匀,并能形成稳定的颗粒流,弯径越大,弯管内侧壁 面处的空腔越明显,且空腔面积随管道半径的增加 而增加,而外壁面形成的富集区的厚度却逐渐变薄。 当弯径为150mm时,颗粒整体速度较高且分布不均, 弯管内外边界层均附着一层颗粒,近弯管外壁面处, 中心截面两侧的区域颗粒速度较高,内侧壁面颗粒 速度较低,颗粒流现象不明显。



表3为颗粒部分运动参数的仿真结果。对比不同弯径下颗粒密度、速度结果可知,出口截面颗粒密度随弯径的增加而降低。当弯径<100mm,出口截面颗粒的速度和密度受弯径的影响较小,当弯径继续增加,管内颗粒流的运动变化较为剧烈。由仿真结果可知,随着弯管弯径的增加,弯管内压力损失梯度也逐渐增大,当<100mm时,压力损失却急剧加大,当弯径为150mm时,压损可达小弯径下压损的数十倍。

 
 Table 3 Simulation results of bending parameters under different bending radius

Bending radius/mm	50	100	150
Average velocity of the out section particles/(m/s)	2.90	2.58	13.82
Average particle density of the out section/(kg/m <sup>3</sup> )	2.79	2.39	0.18
Total pressure loss of two-phase flow/Pa	41.8	159.7	621.4

图 18~图 19 分别为三种弯径下颗粒-颗粒和颗粒-壁面碰撞曲线。对比两图可知,弯管内颗粒-颗粒的碰撞频率要远高于颗粒-壁面间的碰撞。发生碰撞的主要位置在弯管的中心截面处,随着弯径变小,弯管区域内颗粒-颗粒的碰撞次数也大幅增多, 且范围逐渐趋于集中。对比颗粒-壁面的碰撞曲线



Fig. 18 Number of particle-particle collisions under different bending radius

可知,弯径为50mm时颗粒-壁面的碰撞次数最高,当 弯径继续增大,颗粒-壁面碰撞的峰值会逐渐较少, 且范围趋于发散。当弯径>100mm时,管道内颗粒的 整体碰撞次数要高于 *R*=100mm,且碰撞剧烈的位置 会逐渐扩大,弯管结构的作用不再明显。



Fig. 19 Number of particle-wall collisions under different bending radius

## 4 结 论

本文基于 CFD-DEM 算法,对微米级铝粉在输送 弯管内的两相流流场进行研究,通过改变工作参数, 分析弯管内流场流动特性及压力损失变化规律,得 到以下结论:

(1)弯管内总压损失随着流化气流量的增大呈现出先减少再增加的趋势,最小压降点在6~7g/s(气流速度3.0~3.5m/s),据此可在粉末发动机点火试验中初步选定合适的流化气流速。

(2)管内各部分的总压损失规律随流化气流量 的变化不尽相同。当颗粒流速较小时,管内的总压 损失主要来自于弯管和弯管后突变区,加料区占比 较小,当流速增大时,管内各部分总压损失整体上 升,加料区总压损失迅速增加,且占比最大,后续可 对加料区进行结构和加料混合方式的研究,以降低 该区的压力损失。

(3)当流化气流量小于最小压降点时,由碰撞造成的能量损失主要来源于颗粒间的碰撞,颗粒-壁面的碰撞次数相对较少;当其大于最小压降点时,颗粒间的碰撞次数迅速下降继而持平,由碰撞造成的能量损失来源于颗粒-壁面间的碰撞,与此同时,随着流化气流量的持续增长,颗粒与弯管内侧壁面的碰撞逐渐增多,从而导致管内颗粒-壁面的碰撞次数的跃迁。同一弯径下,弯管内颗粒间的碰撞与颗粒-壁面的碰撞具有相似的变化规律,当弯径增大,颗粒间、颗粒-壁面的碰撞次数均减少。

(4)来流条件相同时,弯径越大,颗粒间、颗粒-壁面的碰撞次数越少。同时,弯管内的压力损失会 增大,当弯径<100mm时,管径增长对总压损失的影 响不再明显,变化趋势较为平稳,管内各参数变化较 小,当弯径继续增大,管内的总压损失剧烈增大。建 议选取弯径<100mm的弯管,以降低管道的压力损 失,提高粉末颗粒在发动机内的掺混度。

## 参考文献

- [1] 韩 超.粉末冲压发动机燃料供应系统研究[D].长
   沙:国防科学技术大学,2006.
- [2] Akilli H, Levy E K, Sahin B. Gas-Solid Flow Behavior in a Horizontal Pipe after a 90° Vertical-to-Horizontal-Elbow[J]. Powder Technology, 2001, 116(1): 43-52.
- [3] Fan L S. 气固两相流原理[M]. 张学旭译. 北京:科学出版社, 2018.
- [4] Triesch O, Bohnet M. Measurement and CFD Prediction of Velocity and Concentration Profiles in a Decelerated Gas-Solid Flow [J]. *Powder Technology*, 2001, 115 (2): 101-113.
- [5] 张安峰,周志敏,李涤尘,等.同轴送粉喷嘴气固两相流流场的数值模拟[J].西安交通大学学报,2008, 28(9):1169-1173.
- [6] Souza F J, Silva A L, Utzig J, et al. Four-way Coupled Simulations of the Gas-Particle Flow in a Diffuser [J]. *Powder Technology*, 2014, 253(2): 496-508.
- [7] 杨文婧, 匡亮, 褚开维, 等. 基于 CFD-DEM 算法的 固体火箭发动机气-固两相流模拟[J]. 推进技术, 2019, 40(7): 1546-1553. (YANG Wen-jing, KUANG Liang, CHU Kai-wei, et al. Study of Gas Particle Flow in Solid Rocket Motor Based on Computational Fluid

Method-Discrete Element Method[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(7): 1546-1553.)

- [8] 孙晓霞,孟文俊,牛雪梅,等.基于气固两相DEM模型的相对旋转式喂料头的研究[J].北京理工大学学报,2019,39(7):661-668.
- [9] Liu G, Yu F, Lu H, et al. CFD-DEM Simulation of Liquid-Solid Fluidized Bed with Dynamic Restitution Coefficient[J]. Powder Technology, 2016, 304: 186-197.
- [10] 彭 丽,吴迎亚,李佳瑶.基于DEM模拟气固鼓泡床
   中颗粒碰撞参数对流场间歇性的影响[J].化工学报,
   2015,66(6):44-51.
- [11] 胡国明.离散元素法的工业应用与EDEM软件简介[M].武汉:武汉理工大学出版社,2010.
- [12] 杜 俊,胡国明,方自强,等.弯管稀相气力输送 CFD-DEM 法数值模拟[J].国防科技大学学报, 2014,36(4):134-139.
- [13] 柳 波,吴中鼎,尹高冲,等.供料器内颗粒碰撞条件下的两相流压力特性仿真分析[J].现代制造工程,2018,(3):93-98.
- [14] 胡国明.颗粒系统的离散元素法分析仿真[M].武 汉:武汉理工大学出版社,2010.
- [15] 胡红利,周屈兰,徐通模,等.电容式气固两相流浓度测量系统[J].仪器仪表学报,2007,28(11):1947-1950.
- [16] Marcus R D. Pneumatic Conveying of Solids [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2010.
- [17] Yan F, Rinoshika A. Characteristics of Particle Velocity and Concentration in a Horizontal Self-Excited Gas-Solid Two-Phase Pipe Flow of Using Soft Fins[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 41: 68-76.
- [18] Woodcock C R, MasonBulk J S. Bulk Solids Handling [M]. UK: Blackwell Publishing Ltd, 2008.

(编辑:梅 瑛)