

弯管稀相气力输送 CFD-DEM 法数值模拟*

杜俊, 胡国明, 方自强, 范召

(武汉大学动力与机械学院, 湖北武汉 430072)

摘要:利用 CFD-DEM 方法对稀相气固两相流在带有弯管的气力输送管道内的流动特性数值模拟。通过 CFD 求解连续气相流场, 使用 DEM 求解离散颗粒相运动及受力, 为提高仿真速度, 模型忽略了空隙度对气相的影响。仿真结果显示了颗粒在弯管内形成颗粒绳及在垂直管道内颗粒绳分散的过程, 并获取了颗粒-颗粒、颗粒-壁面的碰撞信息。对比弯管上下两部分的碰撞情况, 颗粒及壁面在弯管下半部分受到的撞击和磨损更严重。通过对气力输送各类工作参数的研究发现, 其对管道内气固两相流的流动特性和碰撞情况有着不同程度的影响。气流速度对颗粒绳分散影响甚微, 但对弯管内颗粒碰撞强度有明显影响。随着颗粒质量流量的增加, 形成的颗粒绳更紧凑、分散速度更慢, 并在弯管中形成了阻碍颗粒-壁面碰撞的防护层。弯径比的增加也能加强颗粒绳的紧凑度, 减缓颗粒绳的分散速度。

关键词:离散单元法; 计算流体力学; 气力输送; 稀相

中图分类号: TH48 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)04-0134-06

Simulation of dilute pneumatic conveying with bends by CFD-DEM

DU Jun, HU Guoming, FANG Ziqiang, FAN Zhao

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: CFD-DEM model was used to simulate the gas-solid flow in dilute pneumatic conveying with bends. In CFD-DEM, the discrete particle phase was obtained by Discrete Element Method (DEM), and the flow of continuum gas phase was determined by Computational Fluid Dynamics (CFD). In order to consume less simulation time, the effect of the particle solid fraction on the gas phase was not taken into account. The results showed the particle rope formation in the bend and its dispersion in the vertical pipe, and obtained the particle-particle and particle-wall collision information. Comparison of the collision information in the bend, the collision and abrasion seemed more intensive at the bottom of the bend. It was also found that the geometry and parameters have different magnitude effects on the gas-solid flow and collisions in the pipe. The gas velocity was considered to be limited influence on the rope dispersion, but significant effect on the collisions in bend section. With the increase of the solid mass flow, the particle rope seemed stronger and more dispersed at a low rate, and there was a shield formed to impede particle-wall collision at the bend section. The increase of the bend radius ratio also made the particle rope stronger, and the dispersion rate lower.

Key words: discrete element method; computational fluid dynamics; pneumatic conveying; dilute phase

弯管作为气力输送系统中的典型零部件, 对输送管道内气固两相流的流动特性有着显著影响, 研究弯管内气固两相流的流动特性对设计和生产者优化、改善气力输送系统具有重要意义。近年来, 随着计算机技术的发展, 数值模拟被广泛用于气力输送领域的研究。传统拉格朗日颗粒跟踪法在该领域取得了一系列研究成果^[1-2], 但该方法未考虑颗粒碰撞对两相流流动特性的影响。离散单元法 (Discrete Element Method, DEM) 因其在处理颗粒碰撞问题上的优势, 通过与计算流体

力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 方法耦合, 被越来越多的用于气固两相流的研究^[3-6]。

由于 CFD-DEM 需要在每个时步更新计算域内所有颗粒的位置和速度信息, 巨大的计算成本成为限制其应用的主要瓶颈之一。为缩短计算时间, 本文将适用于低颗粒体积分数的 CFD-DEM 计算模型引入对稀相气力输送的数值模拟, 通过与文献[7]中实验结果的对比, 验证该模型的有效性。同时, 对气力输送中主要的工作参数进行了仿真研究, 系统分析了其对管道内气固两相流

* 收稿日期: 2013-12-10

基金项目: 国家高技术发展计划项目 (2007AA04Z128); 武汉市科技计划项目-学科带头人计划项目 (201271130442)

作者简介: 杜俊 (1987—), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, E-mail: dujun@whu.edu.cn;

胡国明 (通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: hu_guoming_cn@163.com

流动特性的影响。

1 数学模型

在 CFD-DEM 中,颗粒相按 DEM 方法进行求解,气相由 CFD 进行求解,并通过气固两相的动量交换实现耦合。常用 CFD-DEM 计算模型中,为精确描述颗粒对气流流场的影响,需要在每个时步计算各网格的空隙度。本文以稀相气力输送为研究对象,认为在绝大部分仿真计算域内,颗粒仅占据网格中较小体积,因而考虑忽略空隙度对气相流场的影响。由于节省了大量用于计算空隙度的时间,数值模拟耗时较常用 CFD-DEM 计算模型明显减少。

1.1 气相控制方程

气相采用 CFD 中的 Navier-Stokes 方程求解,由于忽略了空隙度的影响,气相质量和动量守恒方程分别为:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u}_g) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_g \mathbf{u}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_g \nabla \mathbf{u}_g) + \rho_g \mathbf{g} - \mathbf{S} \quad (2)$$

其中, \mathbf{S} 表示气固两相间的动量交换量。尽管气体对颗粒的作用力很复杂,但本文所模拟的工作条件下,只考虑曳力造成的动量交换。因此, \mathbf{S} 由下式计算得出:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \mathbf{f}_{drag,i} \quad (3)$$

1.2 颗粒相控制方程

颗粒相采用 DEM 求解,DEM 的基本原理可参见文献[8],本文仅作简要介绍。DEM 的基本

思路是利用颗粒接触模型计算相互接触单元间的受力,并利用牛顿第二运动定律求解颗粒的运动参量^[9]。本文中颗粒所受力包括重力,颗粒-颗粒、颗粒-壁面接触力,颗粒-气体相互作用力。因此,颗粒 i 在任意时刻 t 的控制方程为:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{f}_{p-g,i} + m_i \mathbf{g} + \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{f}_{contact,ij} + \mathbf{f}_{damp,ij}) \quad (4)$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} T_{ij} \quad (5)$$

颗粒-颗粒间的作用力包括接触力及阻尼力,分别由下式计算得出:

$$\mathbf{f}_{contact,ij} = \mathbf{f}_{n,ij} + \mathbf{f}_{t,ij} \quad (6)$$

$$\mathbf{f}_{damp,ij} = \mathbf{f}_{n,ij}^d + \mathbf{f}_{t,ij}^d \quad (7)$$

气相和颗粒相控制方程中力和力矩的计算式见表 1^[10],式中, $1/E^* = (1 - \nu_i^2)/E_i + (1 - \nu_j^2)/E_j$, $1/R^* = 1/R_i + 1/R_j$, $1/m^* = 1/m_i + 1/m_j$, $\beta = \ln e / (\ln^2 e + \pi^2)^{1/2}$, $S_n = 2E^* (R^* \delta_n)^{1/2}$, $S_t = 8G^* (R^* \delta_n)^{1/2}$, $1/G^* = (2 - \nu_i)/G_i + (2 - \nu_j)/G_j$, $A = \pi R_i^2$, $Re = \rho_g D_p |v_{p-g}^{rel}| / \eta_g$, $G_i = E_i / 2(1 + \nu_i)$, $C_D = \begin{cases} 24/Re & Re \leq 0.5 \\ 24(1.0 + 0.15Re^{0.687})/Re & 0.5 \leq Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (8)$

δ_n 为法向重叠量, δ_t 为切向重叠量, E^* 为等效杨氏模量, G^* 为等效剪切模量, R^* 为等效半径, m^* 为等效质量, β 为阻尼系数, S_n 为法向刚度, S_t 为切向刚度, v_n^{rel} 为法向相对速度, v_t^{rel} 为切向相对速度, μ_r 为滚动摩擦系数, ω_i 为颗粒角速度, v_{p-g}^{rel} 为颗粒-气体相对速度, i 和 j 分别为颗粒编号, Re 为雷诺数, D_p 为颗粒直径, C_D 为曳力系数。

表 1 力和力矩的计算公式

Tab. 1 The formulation of forces and torques acting in governing equations

力和力矩	符号	表达式
法向接触力	$f_{n,ij}$	$(4/3)E^*R^*{}^{1/2}\delta_n^{3/2}$
法向阻尼力	$f_{n,ij}^d$	$-2(5/6)^{1/2}\beta(S_n m^*)^{1/2}v_n^{rel}$
切向接触力	$f_{t,ij}$	$S_t \delta_t$
切向阻尼力	$f_{t,ij}^d$	$-2(5/6)^{1/2}\beta(S_t m^*)^{1/2}v_t^{rel}$
滚动摩擦力矩	τ_i	$-\mu_r f_n R_i \omega_i$
曳力	f_{drag}	$0.5 C_D \rho_g A v_{p-g}^{rel} v_{p-g}^{rel}$

1.3 两相耦合模型

本文中 CFD 由软件 FLUENT 进行求解,DEM 由软件 EDEM 进行求解,两者通过如下步骤实现耦合:FLUENT 首先计算出计算域内的气流流场

数据,然后将仿真控制权交给 EDEM;EDEM 根据流场数据及颗粒碰撞信息计算颗粒受力,并更新颗粒位置及运动信息;颗粒信息更新完成后,将仿真控制权交还给 FLUENT,其根据 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。

2 数值模拟模型

数值模拟模型由水平管道、弯管、垂直管道组成,为研究模型中气固两相流的流动特性,首先建立仿真对照组 A,其几何模型如图 1(a)所示。在仿真对照组 A 中,弯径比 $R/D = 1.0$,其余参数见表 2。本文使用 ICEM 软件对模型进行网格划分,仿真对照组 A 被划分为 29240 个结构化六面体网格,尺寸从 1.8×10^{-8} 到 $2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ 。为验证本文所用数学模型的有效性,还建立了仿真验证组 B,其弯管为弯径比 $R/D = 0.0$ 的 L 型弯管,如图 1(b)所示,其余参数与实验对照组 A 完全相同。仿真中,使用 SIMPLE 算法、标准 $\kappa - \varepsilon$ 湍流模型及壁面函数来求解气相。

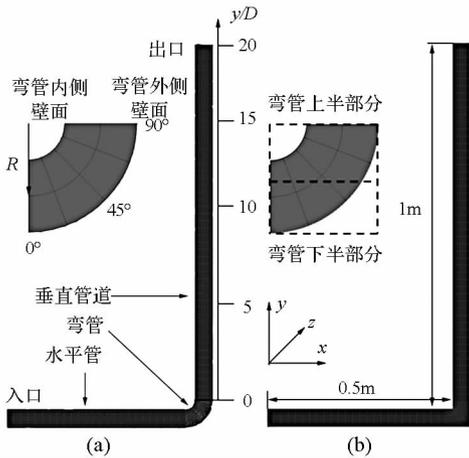


图 1 仿真对照组 A 及仿真验证组 B 的模型几何尺寸
Fig. 1 Schematic representation of the simulation base case A and the verification case B

表 2 数值模拟参数

Tab. 2 Parameters used in the base case A

参数	符号	单位	数值
固相 质量流量	G_s	$\text{kg/m}^2\text{s}$	31.1
密度	ρ	kg/m^3	1123
颗粒半径	R_i	mm	1.4 ± 0.25
泊松比	ν_i	(-)	0.3
剪切模量	G	N/m^2	1×10^7
恢复系数	e	(-)	0.4
静摩擦系数	μ_s	(-)	0.3
滚动摩擦系数	μ_r	(-)	0.005
时间步长		s	1×10^{-6}
入口处速度	v_i	m/s	7
气相 密度	ρ_g	kg/m^3	1.225
粘度	μ_g	$\text{kg/m} \cdot \text{s}$	1.8×10^{-5}
入口处速度	u_g	m/s	11.9
时间步长		s	1×10^{-4}

3 仿真结果及分析

为验证模型的有效性,将仿真验证组 B 的仿真结果与 Lee 等^[7]的实验结果进行对比。仿真结果显示,颗粒在 L 型弯管处的堆积、在垂直管内浓度的变化趋势等重要流动特性均与实验结果相符。对比结果初步验证了文中的 CFD-DEM 计算模型适用于分析弯管内的稀相气固两相流。

3.1 两相流流动特性分析

本文采用双向耦合模型,不仅考虑了气相对颗粒运动轨迹的影响,同时也考虑了颗粒对气流流场的作用。将相同条件下管道内单相气流流场与仿真对照组 A 中气流流场对比发现,颗粒的存在增大了弯管处气流流速,同时,也在垂直管道的轴线附近形成了高速区,这一流场特性将影响颗粒在垂直管道内的分布。

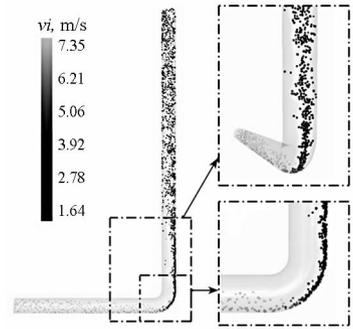


图 2 仿真对照组 A 在 $t = 2\text{s}$ 时的颗粒速度及分布
Fig. 2 The particle velocity and distribution of base case A at $t = 2\text{s}$

图 2 显示了在气流作用下,管道内颗粒速度及分布情况。从图中可知,颗粒在进入弯管后,在其弯管外侧壁面中线附近聚集,形成类似于绳状的结构,通常称之为颗粒绳 (particle rope)^[1-4]。颗粒绳是弯管内气固两相流的典型特征,离心力和碰撞是其形成的主要原因。当颗粒离开弯管后,在湍流和二次流的作用下,聚集的颗粒绳逐渐分散。分散过程中,最初呈现出类似群聚的现象,之后逐渐在管内形成均匀分布。

图 3 统计了一段时间内垂直管道中不同截面处弯管内侧壁面 ($x/D = 0.0$) 至弯管外侧壁面 ($x/D = 1.0$) 的颗粒数量,以此来表征截面内颗粒的分布特性。由图可知,尽管颗粒绳自弯管出口处就开始分散,但在 $y/D = 3$ 处弯管外侧壁面附近颗粒浓度依然显著高于其他区域。颗粒在向管道下游移动过程中逐渐向弯管内侧壁面低浓度区移动。在 $y/D = 15$ 处,颗粒在管道截面内分布趋于均匀,弯管内侧壁面附近颗粒分布稍多,这与垂

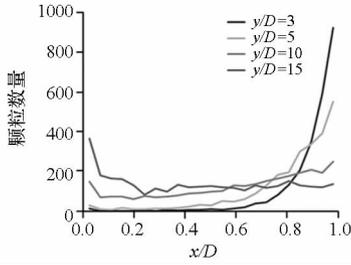


图3 垂直管道中不同截面处从 $t = 1s$ 至 $t = 3s$ 的颗粒数量
Fig. 3 The number of particles at different cross-sections in the vertical pipe from $t = 1s$ to $t = 3s$

直管道内气流流场分布有密切关系,气流低速区内颗粒数量多于气流高速区。

CFD-DEM 计算模型的主要优势在于能获取颗粒详细的运动和接触信息。在本文的数值模拟模型中,弯管处是颗粒集中程度最高的区域,因而也是颗粒-颗粒、颗粒-壁面接触最频繁的区域,图4给出了该部分的颗粒接触次数和总接触力等信息。比较发现,弯管下半部分的颗粒-颗粒、颗粒-壁面接触次数及法向、切向接触力都明显大于弯管上半部分,因此可以认为颗粒及壁面在弯管下半部分受到的撞击和磨损更强。同时发现,颗粒所受法向、切向接触力在弯管上下两部分的变化明显大于其接触次数的变化,这说明接触强度不仅与接触次数有关,还与其他因素有关。

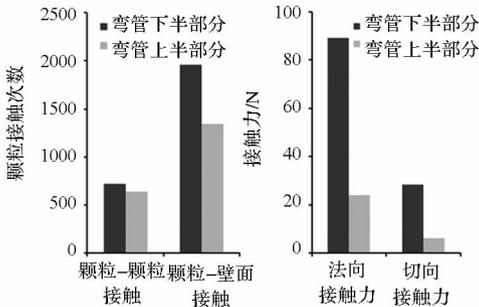


图4 弯管中从 $t = 1s$ 至 $t = 3s$ 的颗粒接触信息
Fig. 4 Contact data at bend section from $t = 1s$ to $t = 3s$

3.2 工作参数的影响

气流速度、颗粒质量流量和管道弯径比是影响弯管中气固两相流流动特性的主要工作参数。其中,气流速度与压降的关系可作为区分稀相和密相两相流的标准^[7]。为研究气流速度对两相流的影响,保持仿真对照组 A 其他参数不变,使气流速度在 $10.6m/s \sim 16m/s$ 变化。图5显示了气流速度与压降的关系,根据压降随气流速度增加而变大可知,该系统在此气流速度区间内均为稀相气力输送系统。

比较 $y/D = 3$ 和 $y/D = 10$ 两处颗粒的分布特

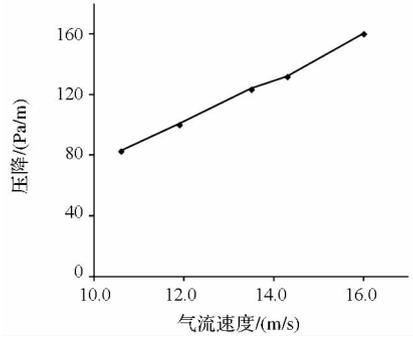
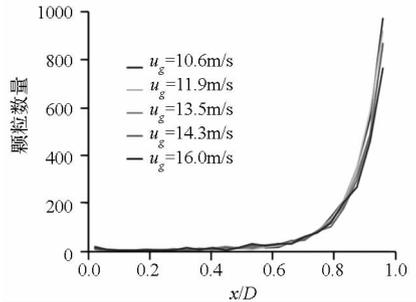
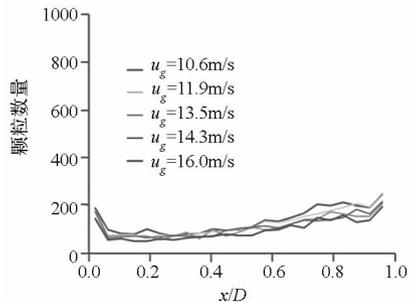


图5 压降随气流速度的变化

Fig. 5 The change of pressure drop with gas velocity varied 性,由图6可知,不同气流速度下颗粒分布特性基本一致,说明改变气流速度对颗粒绳分散速度影响不大。图7显示了弯管下半部分和上半部分的颗粒接触信息。随着气流速度的增加,弯管内颗粒-颗粒、颗粒-壁面接触次数逐渐减小,但接触力却并未保持与之一致的变化趋势,这与气流速度增加造成的颗粒接触前相对速度变大有密切关系。可见,颗粒-颗粒、颗粒-壁面的接触强度不仅与接触次数有关,还与接触前的相对速度相关。



(a) $y/D = 3$



(b) $y/D = 10$

图6 不同气流速度下,垂直管道中不同截面处从 $t = 1s$ 至 $t = 3s$ 的颗粒数量

Fig. 6 The particle distribution at different cross-section for various gas velocities

颗粒质量流量决定了在入口处颗粒产生的速率,从而决定了仿真区域内气流输送的颗粒载荷。本文将仿真对照组 A 与 $G_s = 15.8kg/m^2s$ 、 $G_s = 46.3kg/m^2s$ 两组仿真进行对照,并保持其他参数不变。图8显示了相同时间内,三组仿真弯管出

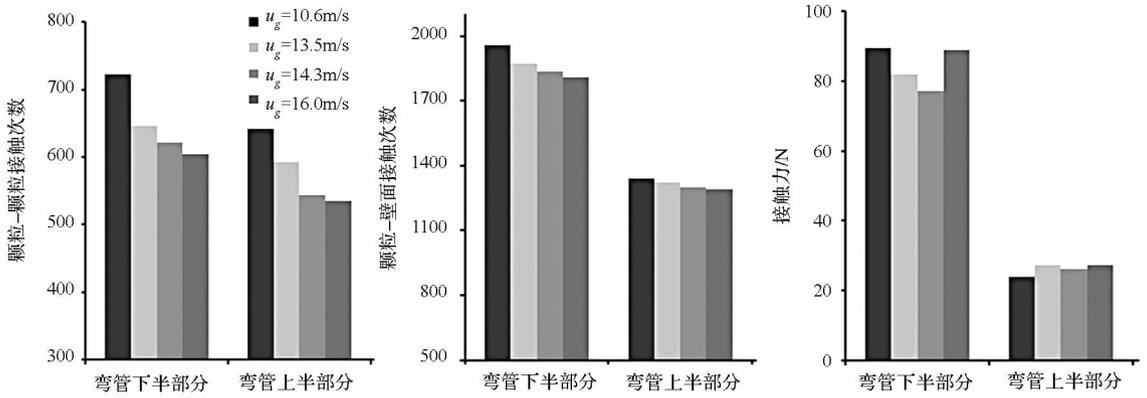


图 7 不同气流速度下,弯管上半部分和下半部分的接触信息

Fig. 7 The contact data at bottom and top of bend for various gas velocities

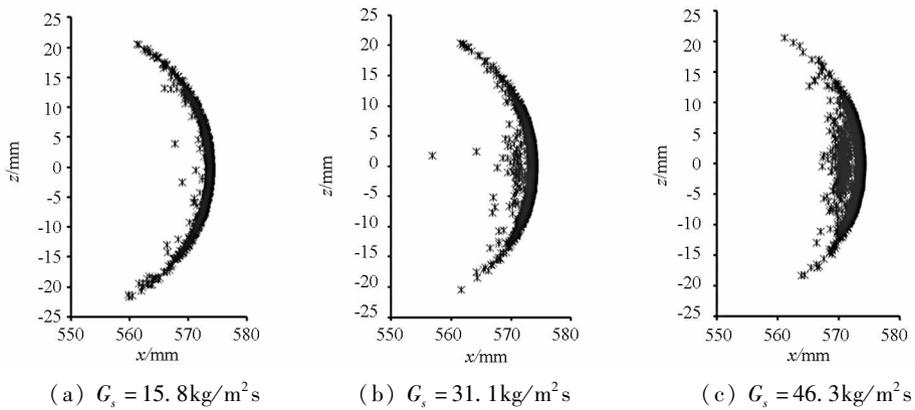


图 8 $t = 1s$ 至 $t = 3s$,弯管出口处颗粒分布

Fig. 8 The particle distribution at exit of the bend from $t = 1s$ to $t = 3s$

口处的颗粒分布情况。由图可知,颗粒在出口处均沿弯管外侧壁面周向分布(z 方向),随着质量流量的增加,颗粒在周向分布逐渐向中线附近收紧,分布区域逐渐变小,加之颗粒数量逐渐增加,在高颗粒质量流量仿真组中,颗粒绳厚度(x 方向)呈增大趋势。对三组仿真中颗粒绳分散速度的研究显示,质量流量越大,颗粒绳分散速度越慢。由此可见,颗粒质量流量越大,形成的颗粒绳越紧凑,分散的速度越慢。

三组仿真中弯管入口处颗粒平均速度的情况基本一致,如图 9 所示,说明颗粒质量流量并未影响水平管道内颗粒-气体间的相互作用。而在弯管出口处,对应 $G_s = 15.8\text{kg/m}^2\text{s}$, $G_s = 31.1\text{kg/m}^2\text{s}$, $G_s = 46.3\text{kg/m}^2\text{s}$ 三组仿真的颗粒平均速度分别为 4.20m/s , 3.90m/s 和 3.73m/s 。可见,弯管内的碰撞对颗粒速度影响显著。研究颗粒接触信息发现,随着颗粒质量流量增大,弯管内颗粒-颗粒接触次数的增加明显快于颗粒-壁面接触次数的增加。这是因为随着颗粒数量的增加,颗粒在弯管中形成的颗粒绳变厚,因而形成了阻碍颗粒-壁面碰撞的防护层。

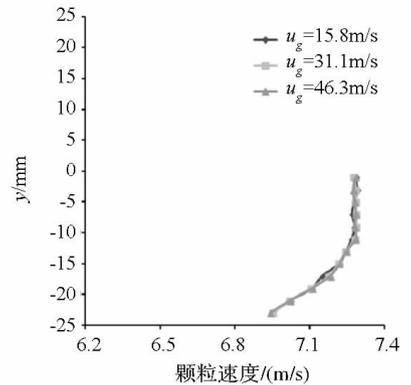
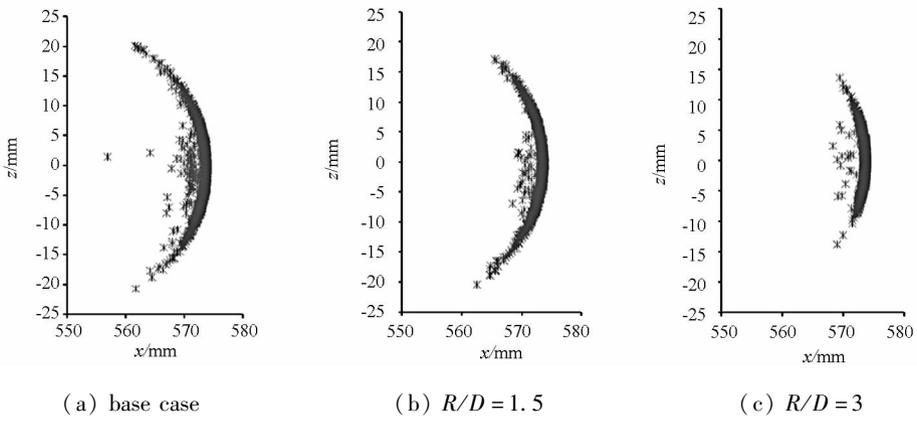


图 9 不同颗粒质量流量下,弯管入口处颗粒平均速度情况

Fig. 9 The particle velocity profiles at entrance of the bend for different solid mass flow rates

弯径比是表征弯管几何形状的重要参数,同时对管道内两相流的流动特性也有显著影响。本文将仿真对照组 A 与弯径比 $R/D = 1.5$ 和 3.0 的仿真案例进行比较,并保持其他参数不变。图 10 显示了一段时间内,三组仿真弯管出口处颗粒分布情况,随着弯径比增大,颗粒在弯管外侧壁面的分布范围逐渐缩小,意味着其形成的颗粒绳结构更加紧凑。

图 10 $t = 1\text{s}$ 至 $t = 3\text{s}$, 弯管出口处颗粒分布Fig. 10 The particle distribution at exit of the bend from $t = 1\text{s}$ to $t = 3\text{s}$

对三组仿真中颗粒绳分散速度的研究表明,弯径比越大,颗粒绳的分散速度越慢。这一结果与实验结果相一致,而在此前使用传统拉格朗日跟踪法进行的 CFD 仿真中,仿真结果显示,弯径比越大,颗粒绳分散得越快^[1-2]。由此可知,即便在稀相气力输送中,碰撞对弯管处两相流流动特性依然有着重要影响,该结果再次说明 CFD-DEM 计算模型在气力输送研究中的重要意义。

4 结论

本文将适用于稀相气固两相流数值模拟的 CFD-DEM 计算模型引入气力输送领域,成功实现了对带有弯管的气力输送系统的仿真研究。与普通 CFD-DEM 计算模型而言,本模型忽略了空隙度对气相的影响,节约了大量用于空隙度计算的时间,提高了仿真效率,通过与实验结果对比,验证了该模型的有效性。文中对带有弯管的气力输送管道内颗粒绳的形成和分散过程进行了研究,发现颗粒及壁面在弯管下半部分收到的撞击和磨损明显大于上半部分。对气力输送领域的主要工作参数的研究,明确了气流速度对颗粒碰撞强度的影响。颗粒质量流量的增加增强了颗粒绳的紧凑度,减缓了其分散速度。弯径比的增大也起到类似作用,仿真的这一结论说明即便在稀相气力输送中,弯管处的碰撞对两相流流动特性依然有明显影响。

参考文献 (References)

[1] Yilmaz A, Levy E K. Formation and dispersion of ropes in

pneumatic conveying [J]. Powder Technology, 2001, 114: 168-185.

- [2] Vashisth S, Grace J R. Simulation of granular transport of Geldart type - A, - B, and - D particle through a 90° Elbow [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2012, 51: 2030-2047.
- [3] Tsuji Y, Tanaka T, Ishida T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe [J]. Powder Technology, 1992, 71: 239-250.
- [4] Chu K W, Yu A B. Numerical simulation of the gas-solid flow in three-dimensional pneumatic conveying bends [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2008, 47: 7059-7017.
- [5] Mezhericher M, Brosh T, Levy A. Modeling of particle pneumatic conveying using DEM and DPM methods [J]. Particulate Science and Technology, 2011, 29: 197-208.
- [6] Zhu H P, Zhou Z Y, Yang R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63: 5728-5770.
- [7] Lee L Y, Quek T Y, Deng R S, et al. Pneumatic transport of granular materials through a 90° bend [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59: 4637-4651.
- [8] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真——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.
- HU Guoming. Analysis and simulation of granular system by discrete element method using EDEM [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [9] 胡励, 胡国明, 万卉, 等. 球磨机工作参数的离散元法分析与改进 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43: 762-769.
- HU Li, HU Guoming, WAN Hui et al. Analysis and optimization of operating parameters of ball mills using discrete element method simulation [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43: 762-769. (in Chinese)
- [10] Teng S, Wang P, Zhang Q, et al. Analysis of fluid energy mill by gas-solid two-phase flow simulation [J]. Powder Technology, 2011, 208: 684-693.