



基于 CFD-DEM 方法的柱状颗粒 在弯管中输送过程的数值模拟

卢 洲, 刘雪东, 潘 兵

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213016)

摘要:针对物料在气力输送过程中特别是弯管部分易破碎的问题,采用计算流体力学(CFD)和离散单元法(DEM)耦合模拟弯管内的柱状颗粒气力输送过程,对弯径比 k 分别为 1、2、3、4、6 的 90° 弯管内柱状颗粒的运动状态、碰撞特性、破碎原因及相关的力学特性进行研究。结果表明:球形颗粒与柱状颗粒在输送过程中遵循基本一致的变化规律,同样外部条件下,柱状颗粒的悬浮速度小于球形颗粒。当 $k=3$ 时气力输送过程颗粒的破碎率最低。同时,颗粒与管壁的碰撞是造成颗粒破碎的主要原因。

关键词: 气力输送; 柱状颗粒; 弯管; 数值模拟

中图分类号: TQ022.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2011)05-0065-05

Numerical Simulation of Cylindrical Particles Conveying in Curved Ducts Using CFD-DEM Coupled Approach

Lu Zhou, Liu Xuedong, Pan Bing

(College of Mechanical Engineering, Changzhou University,
Changzhou 213016, China)

Abstract: For the particle breakage during the pneumatic conveying, the process of cylindrical particles conveying in the curved ducts was simulated using CFD-DEM coupled approach and the particles movement, features of collision, causes of breakage and relevant mechanics features of cylindrical particles in 90° curved duct were studied whose the ratio of curvature and diameter k was separately as 1, 2, 3, 4, 6. The results showed that the spherical particles had the similar law as the cylinder particles during the pneumatic conveying, and the suspended velocity of spherical particles was higher on the same conditions. When k was 3, it could cause the least breakage in the pneumatic conveying. The collision of particles and tube wall contributed the most to the cause of the particle breakage.

Key words: pneumatic conveying; cylindrical particles; curved duct; numerical simulation

收稿日期: 2011-03-15, 修回日期: 2011-04-11。

第一作者简介: 卢洲(1986-), 男, 硕士研究生, 专业方向为化工过程机械、粉体工程技术及应用。E-mail: lzbcc@sina.com。

通信作者: 刘雪东(1965-), 男, 教授, 从事过程装备结构可靠性与完整性、流体技术及应用等方面研究。E-mail: lxd99@126.com。

在工业、农业以及物流运输业中,弯管应用非常广泛。弯管对气-固两相流流动的压降、管壁磨蚀、物料破碎有很大的影响,对于弯管压降、磨损的作用机理及其应对措施,一直是研究、设计的重点之一^[1]。目前对于弯管的研究主要集中在高速输送的数值模拟研究和管壁磨损的实验研究,对于颗粒在弯管中运动的磨损机理研究较少。

多年来,对于弯管部分的气-固两相流的研究都是把颗粒作为球形来处理,原因是非球形颗粒的形状非各向同性,处理起来非常复杂。但是实际应用中,很多被输送物的形状更加接近于圆柱状,如小麦、催化剂颗粒、包装工业中的碳酸钙等^[2],所以有必要对圆柱状颗粒的运动进行研究。

随着计算机技术的发展,数值模拟在处理粉体技术气-固两相流问题方面的作用越来越明显。特别是近年来的离散单元法的发展,在处理气-固两相流其中的固相方面具有其它算法无法比拟的优越性。离散单元法的基本思想是把不连续体分离为刚性元素的集合,使各个刚性元素满足运动方程,用时步迭代的方法求解各刚性元素的运动方程,继而求得不连续体的整体运动形态^[3]。该方法允许单元间的相对运动,不一定要满足位移连续和变形协调条件,计算速度快,所需存储空间小^[4]。

本文中利用计算流体力学和离散单元法耦合模拟计算不同几何尺寸的弯管内颗粒的运动状态,目的是准确描述颗粒的运动细节,扩大离散单元法的应用范畴,为气力输送过程的数值模拟研究提供新的思路。

1 数学模型和模拟说明

1.1 数学模型

离散单元法的颗粒模型是将颗粒与颗粒、颗粒与边界的接触采用振动运动方程进行模拟。将颗粒接触过程的振动运动进行法向和切向分解,颗粒接触过程的法向振动运动方程^[4]为:

$$\frac{m_{1,2}d^2u_n}{dt^2} + \frac{c_n du_n}{dt} + K_n u_n = F_n \quad (1)$$

颗粒接触过程的切向振动运动表现为切向滑动与颗粒的滚动:

$$\frac{m_{1,2}d^2u_s}{dt^2} + \frac{c_s du_s}{dt} + K_s u_s = F_s, \quad (2)$$

$$\frac{I_{1,2}d^2\theta}{dt^2} + \left(\frac{c_s du_s}{dt} + K_s u_s\right)s = M. \quad (3)$$

颗粒切向滑动与颗粒的滚动同时受颗粒之间的摩擦力的影响,由滑动模型可以建立颗粒的切向滑动与滚动的极限判断条件,如式(4):

$$F_s = \mu K_n u_n \operatorname{sgn}\left[K_s \left(u_s + \frac{d\theta}{2}\right)\right], \quad (4)$$

式中 $\operatorname{sgn}[\]$ 为符号函数,且 $\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 (x \geq 0), \\ -1 (x < 0). \end{cases}$

颗粒模型运动方程由力的关系都得到。根据力-位移关系,可以由位移得到颗粒受到的作用力。在整个过程中要用到的位移则可根据牛顿第二定律计算得出。

由牛顿第二定律,得出颗粒 i 的运动方程如下:

$$\left. \begin{aligned} m_i \ddot{u}_i &= \sum F, \\ I_i \ddot{\theta}_i &= \sum M. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

利用中心差分法对式(5)进行数值积分,得到以两次迭代时间步长的中心点表示的更新速度为:

$$\left. \begin{aligned} (\dot{u}_i)_{N+\frac{1}{2}} &= (\dot{u}_i)_{N-\frac{1}{2}} + \left[\frac{\sum F}{m_i}\right]_N \Delta t, \\ (\dot{\theta}_i)_{N+\frac{1}{2}} &= (\dot{\theta}_i)_{N-\frac{1}{2}} + \left[\frac{\sum M}{I_i}\right]_N \Delta t. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

对式(6)进行积分,可得到关于位移的等式:

$$\left. \begin{aligned} (u_i)_{N+1} &= (u_i)_N + (\dot{u}_i)_{N+\frac{1}{2}} \Delta t, \\ (\theta_i)_{N+1} &= (\theta_i)_N + (\dot{\theta}_i)_{N+\frac{1}{2}} \Delta t. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由式(7)可以得到颗粒的新的位移值,将该新位移代入力-位移关系计算新的作用力,如此反复循环,实现跟踪每个颗粒在任意时刻的运动。

1.2 模拟说明

在弯管的设计制造中,弯径比 k (弯管内孔中心线的曲率半径 R 与内孔直径 d 的比值称为弯径比,记作 $k=R/d$,如图 1 所示)是影响弯管流动特征的最重要的几何参数,是弯管设计计算中唯一的几何特征量^[5-7],研究不同弯径比的弯管对气固两相流动的影响具有很强的工程实际意义。

利用计算流体力学(CFD)商业软件 FLUENT 和离散元分析软件 EDEM 对 90°弯管中的气-固两相流进行数值模拟研究。在其它外部条件相同的情况下设计了 5 种不同弯径比的弯管,分别是 $k=1、2、3、4、6$ 。

首先利用 Gambit 建立弯管模型并划分网格,导入 FLUENT 软件进行气相参数设置,然后再与 EDEM

进行耦合计算。为方便研究,定义弯管的主流入口截面处 $\theta=0^\circ$,如图 1 所示。

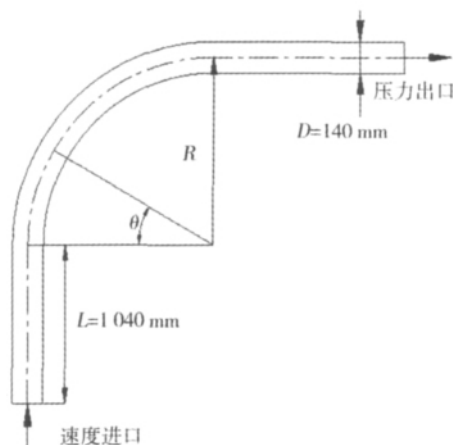


图 1 弯管几何模型示意图

Fig.1 Schematic drawing of curved duct geometric model

圆柱型颗粒几何尺寸为:直径为 3 mm,长度为 7 mm。EDEM 可以导入颗粒,也可以利用 Particle 工具创建颗粒模型,但是颗粒都是由基本球单元组成。本模拟利用 Particle 工具创建颗粒模型,圆柱体由 4 个直径为 3 mm 的基本球单元相互交叉拼接而成,如图 2 所示。在此处设定颗粒的材料、质量、体积转动惯量等基本属性。

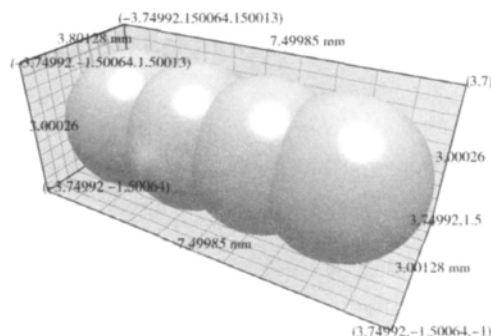


图 2 颗粒模型示意图

Fig.2 Schematic drawing of particle model

为了比较球形颗粒与圆柱型颗粒的区别,根据圆柱型颗粒以体积当量换算成的球形颗粒直径为 4.6 mm,在弯管的弯径比且颗粒属性以及其它外部模拟条件相同情况下进行了模拟。

材料属性以及模拟过程的相关参数如表 1 所示。

采用 FLUENT 与 EDEM 软件耦合求解气-固两相流场,弯管气流流场采用 FLUENT 软件,选择 $k-\varepsilon$ 紊流模型计算;在 EDEM 软件中采用 Eulerian 坐标方法分析颗粒在弯管中的运动和分布规律。首先由 FLUENT 得到原始气流场结果,并将流场参数传递给 EDEM;由 EDEM 中 DEM 模块计算在该流场下颗粒受力的大小,然后通过内部迭代计算颗粒下一时间步长运动参数,同时更新颗粒运动轨迹;最后将 EDEM 计

表 1 模拟过程相关参数
Tab.1 Related parameters of simulation

材料参数			接触参数			模拟参数			
泊松比	剪切模量/MPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	碰撞形式	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数	气流速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	时间步长/ μs	网格尺寸/mm
0.4	1	2 000	颗粒-颗粒	0.5	0.4	0.05	18	5	$10R_{\min}$
			颗粒-管壁	0.5	0.6	0.05			

算结果返回 FLUENT 进行下一时间步长迭代^[3-4]。

气相流场进口给定沿管道流动方向的速度,出口气流和颗粒运动设为压力出口。在固体壁面上,气相流场采用固壁面无滑移边界条件,颗粒与壁面之间采用 Hertz Mindlin(No Slip)碰撞模型。

2 结果与讨论

2.1 弯管处的输送过程

利用 EDEM 软件的后处理功能可以清晰地显示弯管处颗粒的运动状态。利用 EDEM 后处理功能在弯管 0、30、45、60、90°处各取一个矩形截面区域,得到区域内的颗粒的平均速度,得到如图 3 所示的关于

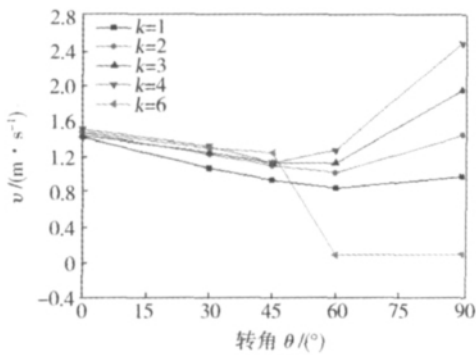


图 3 颗粒的平均速度与弯管转角的关系
Fig.3 Relation curve of average velocity of particles and curved duct angle

颗粒的平均速度与弯管转角的关系曲线。

从输送过程来看,颗粒在经过垂直向上的管道进入弯管后,大约在与水平方向成 30°夹角处开始与管壁发生碰撞,此处颗粒开始发生堆积,速度也随之降低,颗粒堆积到一定的高度后开始抛落。从颗粒在不同弯径比弯管的输送状态(图 4)中可以看出:弯径比对起始抛落位置影响较大,随着弯径比增大,抛落点高度降低。之后颗粒开始在管道底部堆积并不断向前滑动,从图 3 的颗粒平均速度与弯管转角的关系曲线可以看出,当 $k=6$ 情况下颗粒滑动速度最小,之后是 $k=1、2、3、4$ 。

2.2 球形颗粒与柱形颗粒输送过程的比较

从模拟的宏观过程来看,二者大致一致。不同形状颗粒开始碰撞的位置、堆积厚度、抛落点高度等大致相同,如图 5 所示。从压降变化来看,柱状颗粒大致和球形颗粒也基本一致,如图 6 所示。

图 7 为不同颗粒平均速度与弯管转角的关系。可以看出:从颗粒的运动速度变化曲线来看,二者大致遵循相同的变化规律。但是柱状颗粒的速度大于球形颗粒的速度,这主要是因为不规则形状颗粒的阻力系数大于球状颗粒阻力系数,所以在同类等重的物料中,以球形颗粒的悬浮速度最大,其它不规则形状颗粒的悬浮速度则相应较小^[1,8],所以同样外部条件下,



图 4 2 s 时颗粒在不同弯径比弯管的输送状态
Fig.4 States of curved duct conveying of particles under different ratio curvature and diameter at 2 s

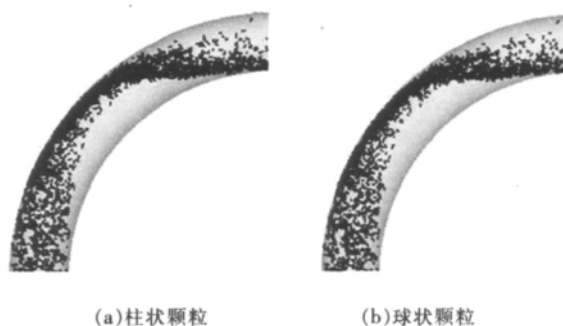


图 5 2 s 时不同形状颗粒的输送状态

Fig.5 State of conveying of particles with different shape at 2 s

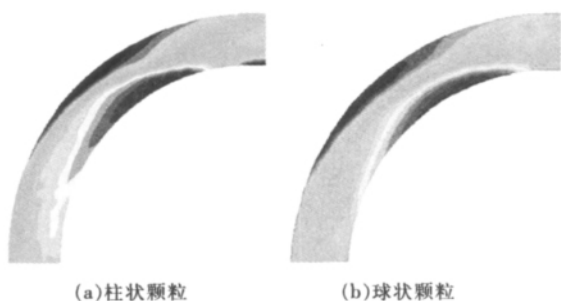


图 6 不同形状颗粒流体的压降变化

Fig.6 Dynamic pressure of fluid of particles with different shape

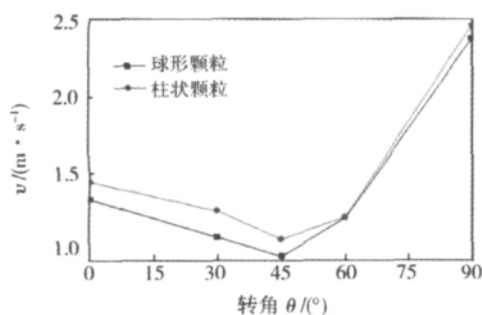


图 7 不同形状颗粒平均速度与弯管转角的关系

Fig.7 Relation curve of average velocity of particles and curved duct angle

柱状颗粒获得的速度更大。

2.3 输送过程中的碰撞分析

在弯管部分,颗粒的碰撞形式主要有两种,分别是颗粒-颗粒以及颗粒-管壁。由于弯管部分特殊的几何形状,颗粒在到达弯管部分会与管壁发生碰撞。颗粒在经过弯管时,不同颗粒之间的速度会发生变化,加上二次流的作用,导致了颗粒与颗粒在弯管处的碰撞^[9-11]。

利用 EDEM 的后处理功能可以得到颗粒-颗粒相对速度以及颗粒-管壁相对速度的碰撞统计数据,经过对两种碰撞在不同弯径比 k 下的比较后可以得到图 8、9 所示的关系曲线。

从颗粒-颗粒相对速度的碰撞次数统计数据可以看出:当 $k=1$ 时颗粒之间碰撞次数最多,其次为 $k=6$ 和 $k=2$ 的情况;当 $k=4$ 和 $k=3$ 时碰撞次数相对最少。

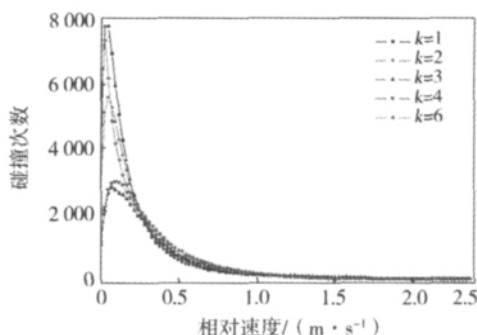


图 8 不同弯径比下颗粒-颗粒相对速度的碰撞次数统计

Fig.8 Collision number of particle-particle relative velocity

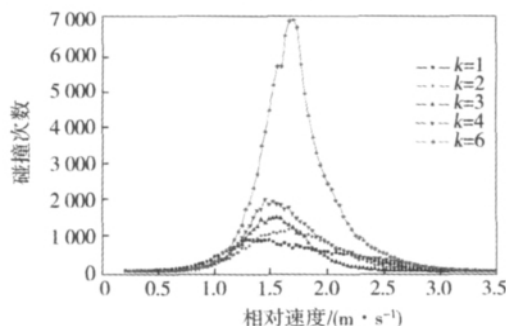


图 9 不同弯径比下颗粒-管壁相对速度的碰撞次数统计

Fig.9 Collision number of particle-tube wall relative velocity

因此,弯径比过大或者过小都会加剧碰撞,从减少颗粒破碎的角度来说存在一个最佳弯径比。

从颗粒-管壁相对速度的碰撞次数统计数据可以看出:当 $k=6$ 时颗粒与管壁的碰撞次数最多; $k=1$ 、2、3、4 时碰撞次数相对较少,其中 $k=1$ 时最少。由于 $k=6$ 时弯管部分较长,颗粒与管壁的接触时间较多,导致了碰撞次数的增加。

从这两个统计数据的纵向比较可以看出:在碰撞中,颗粒与管壁的碰撞时相对速度大约为 2 m/s,而颗粒与颗粒的碰撞时相对速度大约为 0.1~0.2 m/s,颗粒与颗粒的碰撞速度远小于颗粒与管壁的碰撞速度,因此,颗粒的破损一定程度上是由于颗粒与管壁的碰撞造成的。

2.4 管壁在输送过程中的力学特性

由上述分析可知:在输送过程中,颗粒与管壁的碰撞是造成破碎的主要因素,那么,管壁在输送过程中的力学特性则反映了颗粒的受力情况。由不同的弯径比下管壁的受力情况得到图 10 所示曲线。

从弯管部分受力和弯径比的关系曲线可以看出:随着弯径比 k 的增大,弯管在输送过程中的受力呈现先减小后增大的趋势。当 $k=1\sim3$ 时,弯管的受力随着弯径比的增大而减小;当 k 继续增大后,弯管受力随着 k 的增大而增大。这主要是由于当弯径比较小时,颗粒与管壁碰撞较为严重,管道和颗粒破碎严重,但是随着弯径比的增大,尽管碰撞减少,但是弯管部分体积变大,在弯管部分的碰撞时间延长,碰撞次数大

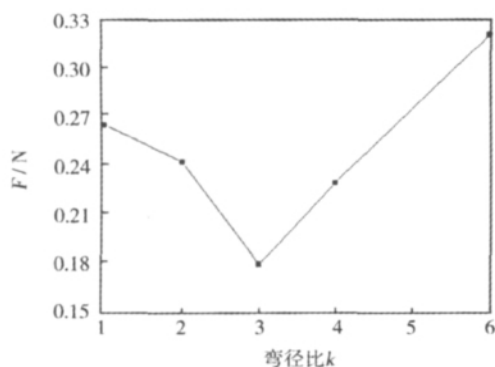


图10 弯管管壁受力与弯径比的关系曲线

Fig.10 Relation curve of force of tube wall and ratio of curvature and diameter

大增加,因此,并不是一味的增大弯径比可以减少颗粒碰撞的。对于本模拟当弯径比 $k=3$ 时弯管受力最小,为最佳弯径比。

3 结论

通过CFD与DEM耦合模拟颗粒在弯管中输送过程,得到了如下结论:

1)在弯管处,颗粒一般在与水平夹角 30° 处的管壁开始碰撞,沿着管壁上升一段距离后抛落,抛落点随着弯径比增大而降低;

2)球形颗粒与柱状颗粒在输送过程中遵循基本一致的变化规律,但是同样外部条件下,柱状颗粒的悬浮速度小于球形颗粒;

3)颗粒在弯管中的破碎主要是由于颗粒与管壁的碰撞造成的,且弯径比过大或者过小都会加剧碰撞,增大破碎;

4)管壁在颗粒碰撞过程中受力大小随着弯径比的增大呈现先减小后增大的变化特征,从工程意义上,存在一个最佳弯径比以减少颗粒的破碎。

符号表:

μ —颗粒的摩擦系数;

$\ddot{\theta}_i$ —颗粒 i 的角加速度;

θ —颗粒自身的旋转角度;

F_n —颗粒所受外力的法向分量;

F_s —颗粒所受外力的切向分量;

ΣF —颗粒在质心处受到的合外力;

$I_{1,2}$ —颗粒的等效转动惯量;

I_i —颗粒 i 的转动惯量;

K_n —接触模型中的法向弹性系数;

K_s —接触模型中的切向弹性系数;

M —颗粒所受外力矩;

ΣM —颗粒在质心处受到的合外力矩;

$R_{\min}$ —颗粒的最小半径;

c_n —接触模型中的法向阻尼系数;

c_s —接触模型中的切向阻尼系数;

m_i —颗粒 i 的质量;

$m_{1,2}$ —颗粒的等效质量;

s —旋转半径;

Δt —时间步长, N 对应时间 t ;

u_n, u_s —颗粒的法向和切向相对位移;

$\ddot{u}_i$ —颗粒 i 的加速度。

参考文献 (References):

- [1] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [2] 陈宜民. 圆柱状粒子气力输送设计计算系统的研究与开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2005
- [3] 王国强, 郝万军. 离散单元法及其在EDEM上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010
- [4] 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
- [5] 江山, 张京伟, 吴崇健, 等. 基于FLUENT的 90° 圆形弯管内部流场分析[J]. 中国舰船研究, 2008, 3(1): 37-41
- [6] 丁珏, 翁培奋. 90° 弯管内流动的理论模型及流动特性的数值研究[J]. 计算力学学报, 2004, 21(3): 314-321
- [7] 柳成文, 毛靖儒, 俞茂铮. 90° 弯管内稀疏气固两相流及固粒对壁面磨损量的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(9): 53-57
- [8] 陈宜民, 林建忠. 气力输送系统中柱状粒子运动的研究[J]. 起重运输机械, 2004(7): 32-35
- [9] 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, 11 (6): 43-52
- [10] EL-BEHERY S M, HAMED M H, EL-KADI M A, et al. CFD prediction of air-solid flow in 180° curved duct[J]. Powder Technology, 2009, 19(1): 130-142
- [11] MOHANARANGAM K, TIAN Z F, TU J Y. Numerical simulation of turbulent gas-particle flow in a 90° bend: Eulerian-Eulerian approach[J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32 (3): 561-571