

# Digital Simulation of Inlet Structure of Pneumatic Transport

Yong Zhang, Limin Sun\*

School of Mechanics and Engineering & Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou  
Email: 541318847@qq.com, \*sunlm@zzu.edu.cn

Received: Nov. 13<sup>th</sup>, 2013; revised: Dec. 13<sup>th</sup>, 2013; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Yong Zhang, Limin Sun. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Yong Zhang, Limin Sun. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

**Abstract:** Two steps of simulation of gas-solid concurrent inlet structure of pneumatic transmission are done: 1) the distribution of gas pressure and velocity in the inlet belt by the condition of existing gas power only; 2) the emulation flow of sand near the region of inlet. So we draw a conclusion: 1) The way of adopting gas-solid concurrent structure to transport particles in duct is feasible; 2) The structure of gas inlet being deeper than particle inlet in tunnel could drag particle better; 3) It is stated again by simulation that the initial velocity and acceleration of particle into the tunnel has a weak impact on the terminal velocity of particle.

**Keywords:** Pneumatic Conveying; Fluent Simulation; Inlet Structure; Euler Two-Fluid Model

## 散体相气力输送的入口数值分析

张永, 孙利民\*

力学与工程科学学院, 郑州大学, 郑州  
Email: 541318847@qq.com, sunlm@zzu.edu.cn

收稿日期: 2013年11月13日; 修回日期: 2013年12月13日; 录用日期: 2013年12月20日

**摘要:** 针对气力输送中由于气力入口和散体入口存在夹角所造成的能耗高问题, 提出了一种气力入口和散体入口0度角即平行的入口结构并对其可行性进行仿真得出以下结论: 1) 可以采用气力入口和散体入口平行的入口结构依靠负压将沙粒吸入管道, 进而借助气动力的推力推动散体在管道中输送; 2) 当气动力入口深入管道一定深度可以增大散体入口区域负压面积及数值, 更有利于对散体的吸附; 3) 用仿真的手段说明沙粒进入管道的初速度以及加速度对沙粒在管道中的最终速度影响不大。

**关键词:** 气力输送; 有限元仿真; 入口结构; 欧拉双流体模型

### 1. 引言

当下使用较多的压送式气力输送<sup>[1]</sup>的气动力入口与输送管道在同一轴线上, 而散体入口一般与管道输送轴线呈大于30°的夹角, 一般为直角。由于气固两相在管道中输送时存在速度差, 尤其是在离入口处很近的加速区域。速度差的存在使得气固两相产生曳

力, 由于管道内散体的速度小于气动力的速度, 所以管道内散体对空气施加阻碍其沿着管道运动的力。这使得空气在散体入口处的气压增大, 阻碍散体进入管道。所以必须在散体入口处安装动力装置使散体在克服入口处的空气压强后进入管道进行输送。这就在入口处增加了输送的能耗。吸送式气力输送依靠负压将散体吸入管道, 不需要克服空气的阻力, 相对来说,

\*通讯作者。

能耗降低不少,但其输送距离有限。从降低入口处的能耗着手,综合两种不同的输送方式的优点,设计一种新型气力输送入口结构,具有十分重要的意义。

由于模拟仿真能较精确地研究复杂的管道气固两相流而且能形象地展现出管道流动的状态,有人就在加速度为零的情况下进行了相关的数值研究,比如 Ottjies<sup>[2]</sup>进行了考虑 Magnus 升力和无弹性散体与壁面的碰撞下的水平管道散体运动的数值计算; Saccani<sup>[3]</sup>等人以 3 英寸管径的输送管为对象研究了管内固粒的运动,给出额压将预测的关系式,并与实验结果进行了比较; Huber<sup>[4]</sup>等人通过圆管稀相散体运动的三维数值模拟,预测了不同管道元素下管内横截面的散体浓度分布。林江<sup>[5,6]</sup>对气力输送中不同初始状态固粒在加速区的气固两相流动进行数值模拟,并将解析解与数值模拟进行分析比较,很好地揭示管道气固两相流的运动特性。本文对所设计的气固两相入口结构进行模拟仿真,研究该入口结构在气力输送中的可行性。

## 2. 纯动力下的负压分布

模拟考虑一般情况下的管道结构,即有倾斜角度的输送结构,其二维结构图如图 1 所示,本模拟有两种不同的结构模型:模型 1 气动力入口与散体入口平行同截面,模型 2 气动力入口与散体入口平行但相对散体入口深入输送管道 5 cm,气动力管道的直径为 2 cm。

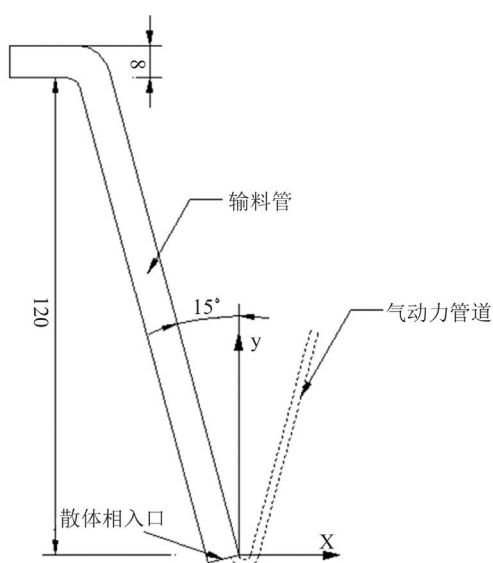


Figure 1. Inlet structure of pneumatic transport  
图 1. 结构图

## 2.1. 结构模型 1 的空气流动情况

设气动力管道内进入输料管道时的压强为 0.5 MPa, 依托 FLUENT 进行模拟。因为散体相入口与盛装散体的大容器连接或者直接暴露在空气中,所以理论上可以选取无限大的区域连接在散体入口处用以模拟纯气动力下散体相入口区域的空气流动情况进而理论计算其是否能够吸附散体进入管道流动。考虑到仿真时模型不能取无限大和无穷远对散体入口的影响不大,故只需将一足够大的区域连接在散体入口处就可得到空气在整个模型区域的流动情况,采用 N-S 公式和标准的  $\kappa-\varepsilon$  模型,不计重力设外界大气压为标准大气压即 101.325 Pa,湍流强度为 5%,气动力入口水利直径为 2 cm,其空气流动情况如下所示。

图 2 给出了由 0.5 MPa 气动力在散体入口区域产生的负压分布情况。选择显示负压分布是为了计算该结构将散体吸入管道的能力。从图 1 可以看出散体入口的大部分区域负压数量级为  $10^4$ ,并且靠近管壁和靠近气动力入口处出现负压集中现象。图 3 给出了散

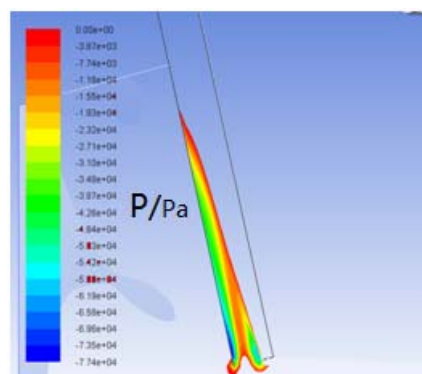


Figure 2. Negative pressure at the sand inlet  
图 2. 散体入口区域负压分布

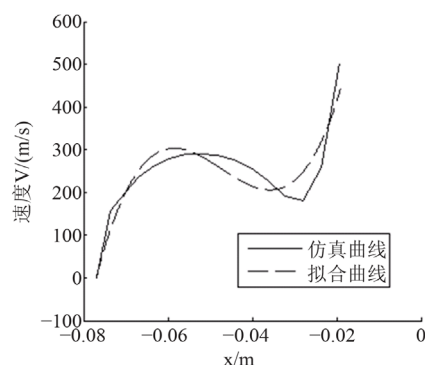


Figure 3. Velocity of air at the sand inlet  
图 3. 散体入口处空气速度

体相入口空气速度曲线，可以看出：越是靠近管壁，空气速度越小；越靠近气动力入口，速度越大。这是因为管道固定，管壁不运动，气动力入口有高速流动的空气。整体看来散体入口截面的空气平均速度为  $v_1 = 260 \text{ m/s}$ 。假设直径为  $2 \text{ mm}$  球形沙粒处于散体入口处，沙粒的重力经计算可得

$$G = mg = 1/6 \pi d^3 \rho_s g = 0.11 \times 10^{-3} \text{ N}$$

那么，克服重力所需要的压强则为

$$P_1 = G/A = G/(\pi d^2/4) = 34.6 \text{ Pa}$$

由伯努力方程可得散体入口处的负压强大小：

$$P_2 = 0.5 \rho_g v^2 = 43703 \text{ Pa} \gg P_1 = 34.6 \text{ Pa}$$

故，一定量的沙粒也可以被克服重力进入到输送管道中然后由气动力推动着在管道中运动。当然实际不仅要考虑重力的作用还要考虑相间曳力，升力等，所以后面还会有存在沙粒时两相的运动情况的仿真。

## 2.2. 结构模型 1 的空气流动情况

仍采用与上述模拟一样的设置，运用 FLUENT 进行模拟气力入口紧贴输料管壁一侧深入管道  $5 \text{ cm}$  时管道中尤其是散体入口区域空气流动情况。该模型下入口区域负压分布以及散体入口处空气速度如图 3 和图 4 所示。

比较图 2 和图 4，模型 2 在散体入口的两侧也存在负压集中，但该模型在数值和面积上都比模型 1 时大。比较图 3 和图 5，模型 2 不论最大速度还是平均速度都要比模型 1 大，如散体相入口空气平均速度为  $v_2 = 300 \text{ m/s}$ 。负压大小和区域越大，散体入口处的空气速度越大，散体越容易被吸入管道。通过比较可知：将气动力入口相对散体入口深入输料管道一定长度将增强负压，有利于散体被“吸”入管道。有了散体相入口的空气速度，我们就可以算出散体入口处平均负压大小：

$$P_3 = 0.5 \rho_g v_2^2 = 58050 \text{ Pa} \gg P_1 = 34.6 \text{ Pa}$$

## 3. 有沙粒时入口区域流场分析

### 3.1. 管道两相流控制方程

采用 Euler 双流体模型模拟空气与散体在二维管

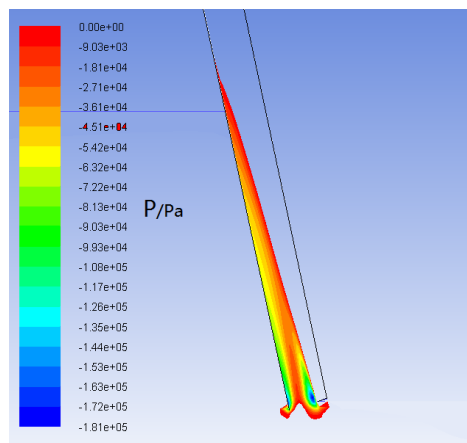


Figure 4. Negative pressure at the sand inlet  
图 4. 散体入口处负压分布

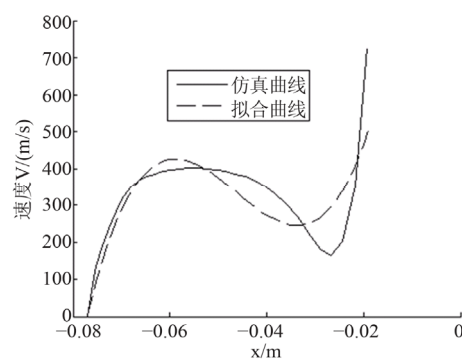


Figure 5. Velocity of air at the sand inlet  
图 5. 散体入口处速度分布

道中的流动，假设流场恒温。在 Euler 双流体模型中，将两相看作两个相互作用的连续相，写成两组结构相同的控制方程组。设散体为第二相，相间无质量交换，不计散体所受的浮力、虚假质量力、热泳力、Basset 力等，考虑散体在流场中的曳力和重力，动力粘度采用 Gidaspow 模型。在此假设下，流场的控制方程<sup>[7]</sup>为：

n 相连续方程：

$$\frac{\partial(\alpha_n \rho_n)}{\partial t} + \nabla(\alpha_n \rho_n v_{nj}) = 0 \quad (1)$$

n 相动量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_n \rho_n v_n)}{\partial t} + \nabla(\alpha_n \rho_n v_n v_n) = \\ -\alpha_n \nabla p_n + \alpha_n \rho_n g \cos 15^\circ + \nabla \tau_n + K(v_n - v_{nj}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中，下标  $n$  相分别表示气相和固相， $nj$  相表示两相中的另一相， $g$  表示空气， $s$  表示散体；式中  $\alpha$  为

体积分数， $\rho$  为密度， $v$  为速度， $g$  为重力加速度。而对于相间动量交换系数  $K$ ，则由 Gidaspow 模型定义给出：

$$K = \begin{cases} \frac{3}{4} C_d \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |v_g - v_s| a^{-2.65}}{d_s}, & \alpha_g > 0.8 \\ 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_g) \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_s \alpha_s \rho_g |v_g - v_s|}{d_s}, & \alpha_g \leq 0.2 \end{cases} \quad (3)$$

曳力系数：

$$C_D = \begin{cases} 0.44, & Re_s > 1000 \\ \frac{24}{Re_s} (1 + 0.15 Re_s^{0.687}), & Re_s \leq 1000 \end{cases} \quad (4)$$

气相压力应变张量：

$$\tau_g = \mu_g \left[ \nabla v_g + (\nabla v_g)^T \right] - \frac{2}{3} \mu_g (\nabla v_g) I \quad (5)$$

剪切粘度：

$$\mu_g = \mu_{gl} + C_\mu \alpha_g \rho_g k^2 / 2 \quad (6)$$

上式右端第一项为层流粘度，第二项为湍流粘度。

散体压力应变张量：

$$\tau_s = \left\{ -p_s + \varepsilon_s \nabla v_s + \mu_s \left[ \nabla v_s + (\nabla v_s)^T \right] - \frac{1}{3} (\nabla v_s) \right\} I \quad (7)$$

其中， $\varepsilon_s$  为散体表现粘度， $\mu_s$  为散体摩擦粘度。

### 3.2. 气固两相流的数值模拟

采用欧拉双流体模型，散体选球形沙粒，沙粒的密度为  $2650 \text{ kg/m}^3$ ，散体直径为  $2 \text{ mm}$ 。模拟考虑重力，重力沿 Y 方向向下。将气动力入口由压力入口改为速度入口，由纯动力下仿真得到空气入口的速度为  $900 \text{ m/s}$ ，散体入口处气固两相的速度如下表 1 所示(沙粒速度是由平均负压带动单散体进入管道的速度，由伯努力方程计算得到)，沙粒和空气混合进入管道，设沙粒的体积分数为  $0.6$ 。采用时序分析，最终显示流动  $4\text{s}$  时的管道各相流动情况。

#### 3.2.1. 结构模型 1 的模拟流动情况

通过仿真给出下列各图。

图 6 和图 7 分别给出了输送管道中不同高度的空

Table 1. Velocity of per phase at the inlet of sand  
表 1. 散体入口处各相速度大小

	沙粒(m/s)	空气(m/s)
气固平齐	5.7	260
气动力入口深入管道	6.6	300

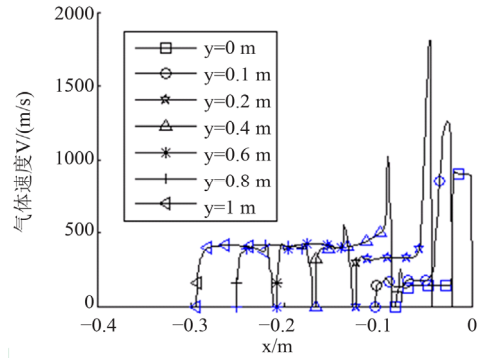


Figure 6. Velocity of air at different height  
图 6. 不同高度截面空气速度

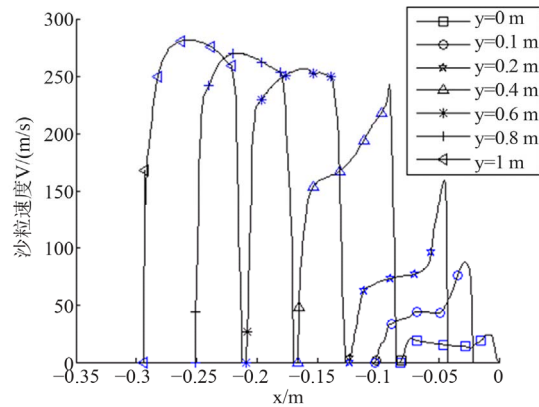


Figure 7. Velocity of sand at different height  
图 7. 不同高度截面沙粒速度

气和沙粒的速度变化。从图 6 可以看出气动力入口附近和散体入口附近的空气速度有很大变化，但随着高度的增加，变化趋于缓和，当到达较高点如  $y = 0.6 \text{ m}$  截面处，速度基本平稳，其值为  $400 \text{ m/s}$ ；图 7 为沙粒的速度分布，在入口附近( $y = 0 \text{ m}$ )，除了壁面处无散体速度外，其余处均有散体速度，气动力入口作为纯空气进入管道，之所以有沙粒速度，是由气动力造成散体入口处出现负压而将散体吸进气动力入口区域，由气动力推动沙粒在管道运动产生的。随着高度递增，散体的速度越来越大，可知散体已被吸入管道中进行运动，并且在管道中的运动越来越趋于平稳。图 8 为不同高度沙粒体积分数变化情况，可以看出越

接近入口, 沙粒体积分数变化越大, 因为气动力入口本没有散体, 后来由于负压的吸力才有沙粒在气动力路径上出现。随着高度升高, 沙粒和空气均匀散布各个截面, 均匀分布的沙粒体积分数高达 0.6 是因为管道上部弯曲造成沙粒在弯壁处反弹引起沙粒堆积。

### 3.2.2. 结构模型 2 的模拟流动情况

边界条件设置和模型 1 一样, 只是入口结构有些不同, 下面给出 4 s 时其流动情况:

将图 9 和图 6 进行比较, 可以看出模型 2 空气速度随着高度增加会比模型 1 较快地趋于平稳。由于沙粒在进入管道一定深度后才开始向气力区域运动, 以及高速空气和负压对沙粒的吸力共同作用下, 所以在  $y = 0.2 \text{ m}$  出现了气速尖锐现象, 该现象延伸到  $y = 0.4 \text{ m}$ , 在  $y = 0.6 \text{ m}$  处消失。比较图 10 和图 7, 在加速剧烈区域, 模型 2 沙粒的速度大于模型 1 的情况, 这是因为模型 2 沙粒入口处空气对沙粒的吸力大于模型 1

的, 所以气动力深入管道一定深度情况下的沙粒速度能较快地达到充分发展状态; 比较两种情况下  $y = 1 \text{ m}$  时, 沙粒速度分布和大小大致相同, 平均速度相差不到  $10 \text{ m/s}$ , 说明沙粒在管道中的最终速度与其初始速度和加速度关系不大。比较图 11 和图 8, 图 11 的管道中沙粒的体积分数是在  $y = 0.4 \text{ m}$  处基本在管道中均匀分布, 而图 8 中沙粒在管道中体积分数均匀分布是在  $y = 0.6 \text{ m}$  处, 说明气力深入管道一定距离比气固平齐更容易使得沙粒在管道中分布均匀。

## 4. 结论

本文通过运用有限元技术对两种不同气力输送二维入口结构的仿真分析, 得出: 使用气固同向结构输送散体具有一定的可行性, 并且如果将气动力入口相对于散体入口深入管道一定深度, 能够增大散体入口处的负压面积及数值, 有利于散体进入管道; 另外

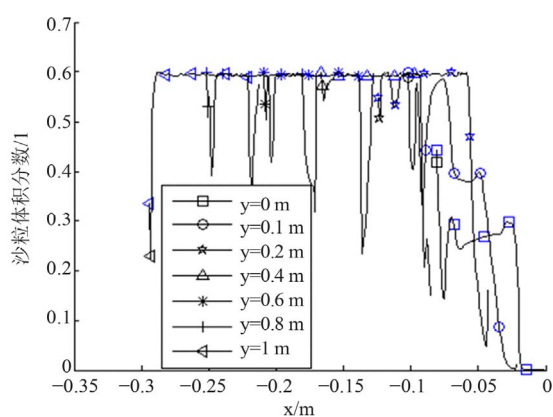


Figure 8. Volume fraction of sand at different height  
图 8. 不同高度截面沙粒体积分数

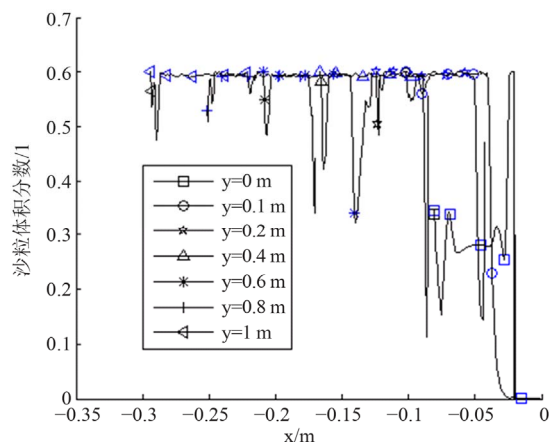


Figure 10. Velocity of sand at different height  
图 10. 不同高度截面沙粒速度

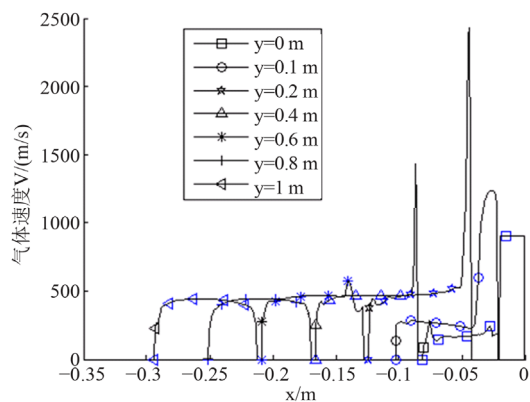


Figure 9. Velocity of air at different height  
图 9. 不同高度截面空气速度

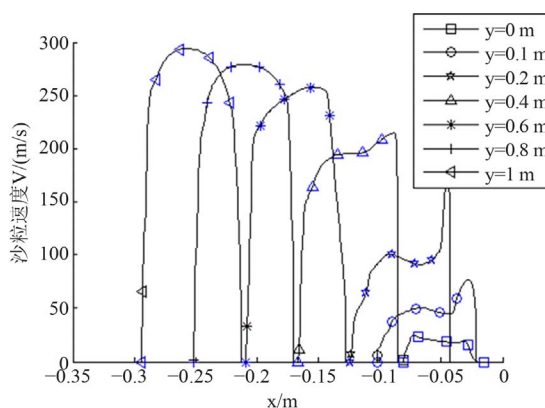


Figure 11. Volume fraction of sand at different height  
图 11. 不同高度截面沙粒体积分数

从仿真角度说明了散体进入管道的初速度以及加速度对散体在管道中的最终速度影响不大

### 参考文献 (References)

- [1] 李诗久, 周晓君 (1992) 气力输送理论与应用. 机械工业出版社理, 北京, 1-4.
- [2] Ottjies, J.A. (1978) Digital simulation of pneumatic transport. *Chemical Engineering Science*, **33**, 783-786.
- [3] Saccanic, C. (1996) Solid speed and pressure loss in pneumatic conveying: Simulation and experimental measurements. *Bulk Solid Handling*, **16**, 383-390.
- [4] Sommerfeld, H.N. (1998) Modeling and numerical calculation of dilute-phase pneumatic conveying in pipe systems. *Powder Technology*, **99**, 90-101.
- [5] 林江 (2004) 气力输送系统中加速区气固两相流动特性的研究. *浙江大学学报(工学版)*, **7**, 893-898.
- [6] 林江 (2004) 气力输送系统流动特性的研究. 浙江大学, 杭州.
- [7] 鲍仲福, 杜群贵, 谢凯 (2010) 基于欧拉双流体对气固喷射机器三维数值仿真. *流体机械*, **5**, 24-28.