

# 基于气固多相耦合小麦旋流输送流场特性研究

宋海豪, 徐永森, 徐雪萌\*, 尚坤, 张汉山  
(河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450001)

**摘要:** **目的** 对比轴流式气力输送小麦与旋流气力输送小麦系统的能效。**方法** 采用 CFD-DEM 对小麦颗粒在水平管道中以轴流式输送和旋流输送的过程进行仿真, 多相流入射速度均为 20 m/s, 旋流输送外加 5 个补气管道, 入射速度为 30 m/s。通过仿真实验, 对比轴流输送和旋流输送中小麦颗粒沉积状态、小麦颗粒速度、输送系统压降、系统能耗等指标。**结果** 仿真结果表明, 采用旋流输送明显优于轴流输送, 颗粒螺旋前进, 输送效果较优。经试验验证, 与仿真结果一致。**结论** 在同一工况下, 旋流输送小麦可以有效抑制颗粒的沉降, 颗粒分布均匀, 可以有效减少与管道的摩擦, 输送距离更远, 系统的输送效率更高, 运输效果良好。

**关键词:** 轴流输送; 旋流输送; 系统能效; CFD-DEM

中图分类号: TB48; TH22

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)17-0162-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.17.020

## Flow Field Characteristics of Wheat Cyclone Pneumatic Conveying System Based on Gas-solid Multi-phase Coupling

SONG Haihao, XU Yongsen, XU Xuemeng\*, SHANG Kun, ZHANG Hanshan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**ABSTRACT:** The work aims to compare the energy efficiency of axial flow pneumatic conveying wheat system and cyclone pneumatic conveying wheat system. CFD-DEM was used to simulate the axial flow and cyclone conveying of wheat grains in the horizontal pipeline, the multi-phase inflow and injection velocity was 20 m/s, and the cyclone transportation plus five make-up air pipelines had an incident velocity of 30 m/s. Through simulation experiments, the deposition state of wheat grains, the velocity of wheat grains, the pressure drop of the conveying system, and the energy consumption of the system in axial flow conveying and cyclone conveying were compared. It was found that the cyclone conveying was significantly better than the axial flow conveying, in which the grains spiraled forward, and the conveying effect was better. The experimental verification showed that the conveying effect was consistent with the simulation results. Under the same working conditions, the cyclone conveying can effectively inhibit the deposition of grains, distribute grains evenly, reduce the friction with the pipeline effectively and realize longer conveying distance, higher conveying efficiency and good conveying effect.

**KEY WORDS:** axial flow conveying; cyclone conveying; system energy efficiency; CFD-DEM

小麦生产后的散粮运输是一个关键环节, 优良的运输方法对小麦的安全起着重要作用<sup>[1]</sup>。目前, 散

粮运输主要依靠公路、铁路、水路 3 种方式。在运输过程中需要转运设备的介入, 如皮带机、吸粮机、

收稿日期: 2024-04-13

基金项目: 国家“十四五”重点研发计划 (2022YFD2100200)

\*通信作者

小麦运转小车等, 这些设备会出现小麦抛洒、小麦污染、虫害鼠害、输送距离短等问题。相比而言, 气力输送能有效解决这些问题, 具有绿色环保、可循环利用、适应性强等特点, 可有效解决环境污染、浪费等问题。将管道气力输送用于小麦运输是未来的发展方向, 可实现小麦颗粒与环境无交互作用的封闭运输<sup>[2]</sup>。

有许多学者致力于气力输送研究领域, 气固两相流是气力输送的本质, 它包含管道内固相与气相的数学描述, 颗粒与壁面的相互作用, 颗粒与气流的速度分布等, 还包括输送流场内数值模拟研究法、气固两相测量技术等<sup>[3-4]</sup>。德国学者 Sommerfeld 等<sup>[5-8]</sup>基于 Lagrangian 方法研究了水平管道流场中球形颗粒的运动特性, 以及不同流量、粒子、壁面粗糙度等边界条件下的粒子行为, 发现粒子的运动受到颗粒间碰撞和壁面粗糙度的影响较大。日本学者 Tsuji<sup>[9]</sup>根据气相和微粒相的不同尺度, 总结了不同尺度下颗粒与流体组合的研究内容, 重点描述了离散粒子模拟, 并从粒子-粒子相互作用的角度来分析, 将气体-粒子流动分为无碰撞流动、碰撞主导流动、接触主导流动这三种情况进行研究。新汶矿业集团的马恒强、邱亮<sup>[10]</sup>对协庄矿原生矸石气力输送充填系统进行了分析, 设计了矸石气力充填系统及其计算方法。目前, 在小麦气力输送领域的相关研究依旧匮乏。

除栓塞流以外的气力输送, 气力需要具备相当的速度, 才能满足颗粒处于悬浮状态的条件, 但是在高速气流作用下会出现能耗高、颗粒破碎、管道堵塞等问题。为了解决高能耗和堵塞等问题, 研究人员提出采用轴向气流与切向气流耦合的方式来干扰颗粒的运动轨迹, 以较小的气流使颗粒高浓度悬浮螺旋前进, 从而解决管道堵塞和颗粒沉降问题, 对多种颗粒的气力输送具有现实意义。美国学者 Escue、Cui<sup>[11]</sup>通过 CFD 代码对直管内部的旋流场进行仿真模拟, 对比了 RNG k-ε 模型和 Reynolds 应力模型 2 种湍流模型的计算能力, 发现 RNG k-ε 模型在低旋流数的情况下与实际试验的速度分布结果更加符合, 随着旋流数的增加, Reynolds 应力模型与实际试验的速度分布吻合情况更好。波兰学者 Saoud 等<sup>[12]</sup>采用双平面电容断层扫描 (ECT) 技术对多相流旋流场内的速度进行预估, 得到了不同固体质量分数情况下的流场气固两相的角速度分量, 提供了一种新方法, 用于测量复杂多相流内的流速。武汉理工大学容琼<sup>[13]</sup>采用 CFX 数值模拟方法, 深入研究了旋流发生器中起旋强度与附壁效应之间的关系, 通过研究管内旋流的形成原因、流动规律和进流状态等, 得到了流场各组分的速度分布。

目前, 在散粮的输送中只有少数学者对轴流气力

输送中小麦的特性进行了研究, 而针对旋流气力输送小麦系统特性的研究在国内尚属空白<sup>[14-15]</sup>。本研究以小麦颗粒在水平管道中旋流输送流场为研究对象, 利用 CFD-DEM 耦合仿真来研究旋流场中小麦颗粒的运动特性。通过数值模拟并结合试验, 揭示旋流场中颗粒分布、速度、流动特性及管道内压降变化情况, 为小麦旋流气力输送研究提供参考。

## 1 材料和装置

材料选用产地为河南郑州市的新麦 26, 用水分检测仪测出其水分含量为 10.25% (湿基)。麦粒属于三轴不等颗粒<sup>[16]</sup>。用游标卡尺测得三轴数据, 如图 1 所示。为了检验小麦颗粒三轴是否符合统计学理论分布, 采用 Origin 绘图软件对测量结果进行绘图 (如图 2 所示), 可以看出三轴均呈正态分布, 因此在模拟中可以按照正态分布生成小麦颗粒。

采用非球形颗粒的当量直径进行简化计算, 以减少时间, 在散粮管道气力旋流运输过程中体积因素占主导地位, 因此选择体积直径为当量直径来进行实验。体积直径的计算见式 (1)<sup>[17]</sup>。

$$d_v = \left( \frac{6V}{\pi} \right)^{1/3} \quad (1)$$

由表 1 可知, 椭球体麦粒长轴长度的均值为 6.2 mm, 短轴和中轴用直径为 3 mm 的圆代替。故小麦颗粒的当量直径为 4 mm, 剪切模量为 0.5 GPa, 泊松比为 0.29, 密度为 1 350 kg/m<sup>3</sup><sup>[18]</sup>。

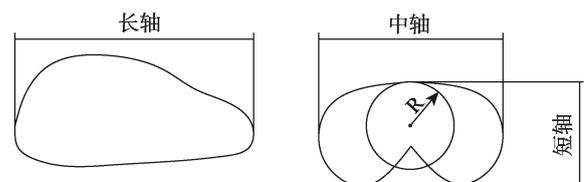


图 1 小麦三轴尺寸  
Fig.1 Triaxial dimensions of wheat

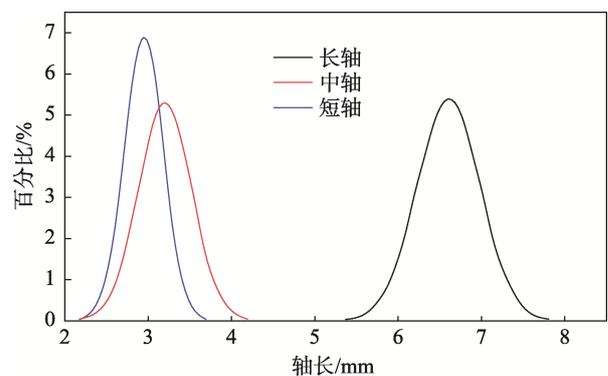


图 2 麦粒轴长分布  
Fig.2 Axial length distribution of wheat grains

表1 小麦三轴统计分析结果  
Tab.1 Results of triaxial statistical analysis of wheat

参数	最大值/mm	最小值/mm	均值/mm	标准差/mm
长轴	7.62	4.02	6.20	0.37
中轴	4.00	2.36	3.10	0.30
短轴	3.72	2.38	2.90	0.22

设计了一套小麦输送实验系统,可实现轴流输送和旋流输送,如图3所示。在轴流输送时,空气经压缩机压缩、经干燥机干燥后进入仓泵,小麦颗粒与空气在仓泵中进行充分流化后,由轴流气力输送经旋风分离器进入料仓,旋流输送则在仓泵流化后进入起旋装置,起旋后的小麦经旋流输送,进入旋风分离器,最终进入料仓。

旋流输送散粮管道如图4所示。该装置由入射稳流段、起旋引导段、旋流输送段等部分组成,总长度为11 m,主管道直径 $D_1$ 为0.1 m,起旋装置侧补气管直径 $D_2$ 为0.02 m。入射稳流段A的距离为0.6 m,其作用是稳定气流。起旋装置与入射稳流段末端相连,长度为0.4 m,此段为起旋引导段B。与起旋引导段相连的部分为旋流输送实验部分,长度为10 m。在轴流输送与旋流输送的同一位置设置5个测量点(C、E、F、G、H),测量轴流输送和旋流输送各指标,并进行比较,分别位于轴流输送和旋流输送段的1、3、5、7、9 m处。

## 2 数学模型

### 2.1 CFD-DEM 建模

采用欧拉-拉格朗日耦合方法模拟小麦的气力输送过程,将气相处理为连续相,将固体颗粒散粮处理为离散相,并计算颗粒与壁面、颗粒与颗粒的碰撞。通过相间的质量和动量来实现耦合。本文通过每个颗粒的速度、位置、线性关系来研究固相,通过定义流场中的速度、压力、轨迹来描述气相。对计算序列进行修改,包括评价两相方程中的相间交换。用气相计算单元中的局部平均变量表示,动量守恒和质量守恒方程的求解见式(2)~(3) [18]。

$$\frac{\partial(\rho\xi)}{\partial t} + \nabla(\partial\xi u) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho\xi u)}{\partial t} + \nabla(\partial\xi uu) = -\xi\nabla p + \nabla(\xi\tau) + (F_D + F_L + F_M) + \xi\rho g \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为气体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $u$ 为气体速度,  $\text{m/s}$ ;  $\tau$ 为气体应力张量,  $\text{N/m}^2$ ;  $\xi$ 为气体的体积分数;  $g$ 为重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  $p$ 为气体压力,  $\text{N/m}^2$ ;  $F_D$ 、 $F_L$ 、 $F_M$ 分别为阻力、升力、马格努斯力,  $\text{N}$ 。

小麦颗粒的平移运动和旋转运动分别用方程来描述,见式(4)~(5)。

$$m_p \frac{du_p}{dt} = G_p + F_D + F_L + F_M + F_C \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_p}{dt} = \frac{T_p}{I_p} \quad (5)$$

式中: $m_p$ 为颗粒质量,  $\text{kg}$ ;  $u_p$ 为颗粒速度,  $\text{m/s}$ ;  $G_p$ 为重力,  $\text{N}$ ;  $I_p$ 为颗粒惯性矩,  $\text{m}^4$ ;  $\omega_p$ 为颗粒角速度,  $\text{rad/s}$ ;  $T_p$ 为颗粒表面旋转转矩,  $\text{N}\cdot\text{m}$ ;  $F_C$ 为接触力,  $\text{N}$ 。

由 Ergun<sup>[19]</sup>和 Wen&Yu 模型给出颗粒上的阻力 $F_D$ , 计算见式(6)。

$$F_D = \frac{\beta V_p |u - u_p| (u - u_p)}{1 - \xi} \quad (6)$$

式中: $V_p$ 为单个粒子的体积,  $\text{m}^3$ ;  $\beta$ 为气-固态阻力系数, 表达见式(7)。

$$\beta = \begin{cases} \frac{150(1-\xi)^2 u}{\xi d_p^2} + \frac{1.75(1-\xi)\rho}{d_p} & \xi < 0.8 \\ \frac{3}{4} C_D \rho \xi^{-1.65} (1-\xi) |u - u_p| & \xi \geq 0.8 \end{cases} \quad (7)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & Re < 0.5 \\ \frac{24(1.0 + 0.25Re^{0.687})}{Re} & 0.5 \leq Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (8)$$

$$Re = \frac{\xi \rho d_p |u - u_p|}{\mu} \quad (9)$$

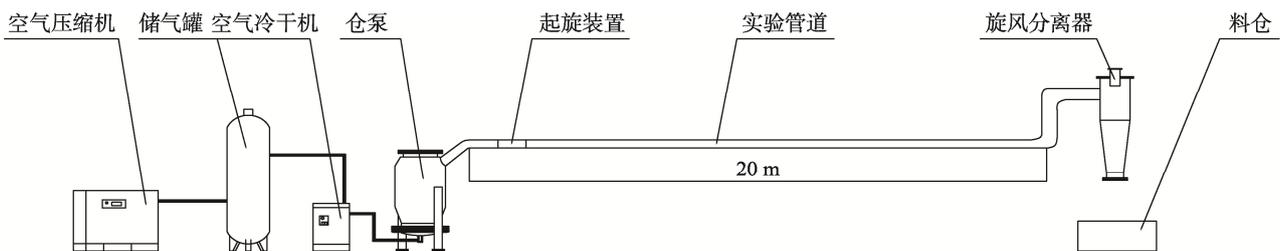


图3 散粮管道气力旋流输送实验系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of the aerocyclone conveying experimental system of bulk grain pipeline

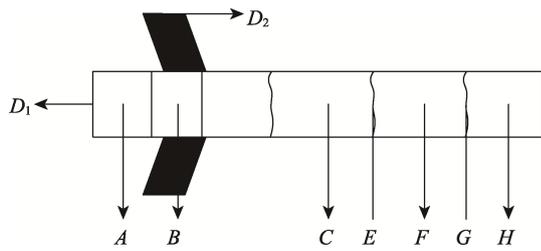


图 4 旋流模拟管道  
Fig.4 Cyclone simulation pipeline

式中:  $d_p$  为粒子的等效直径, m;  $Re$  为雷诺数;  $C_D$  为阻力系数;  $\mu$  为气体的动态黏度, kg/ms。

萨夫曼力  $F_L$  由式 (10) [20-21] 计算。

$$F_L = 1.61 C_L d_p^2 (\mu \rho)^{0.5} (u - u_p) \left| \frac{du}{dy} \right|^{0.5} \quad (10)$$

式中:  $du/dy$  为平均流量的剪切速率;  $C_L$  为萨费曼升力系数, 计算见式 (11) ~ (12)。

$$C_L = \begin{cases} (1 - 0.3314\psi^{0.5}) \exp(1 - 0.1Re_s) + 0.3314\psi^{0.5} & Re \leq 40 \\ 0.0524(\psi Re_s)^{0.5} & Re > 40 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} Re_s = \frac{|u - u_p| d_p}{u_p} \\ Re_G = \frac{\left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| d_p^2}{u_p} \\ \psi = \frac{Re_G}{Re_s} \end{cases} \quad (12)$$

由式 (13) ~ (14) 计算马格努斯力 [22]。

$$F_M = \frac{1}{8} \pi \rho d_p^3 \frac{Re_s}{Re_\Omega} C_M (0.5\omega - \omega_p) (u - u_p) \quad (13)$$

$$\begin{cases} C_M = 0.45 + \left( \frac{Re_\Omega}{Re_s} - 0.45 \right) \exp(-0.05684 Re_\Omega^{0.4} Re_s^{0.3}) \\ Re_\Omega = \frac{|0.5\omega - \omega_p| d_p^2}{u} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\omega$  为气体的角速度, rad/s。

接触力  $F_C$  采用软球模型 [23] 建模, 这是一个公认模型, 已被许多研究详细描述。

## 2.2 边界条件

CFD-DEM 模拟的物理参数和数值参数如表 2 所示。

表 2 仿真模拟参数  
Tab.2 Simulation parameters

项目	内容	指标	参数		
CFD	材料	流体 (空气)	密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) 黏度/(kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	1.225 1.789 4 × 10 <sup>-5</sup>	
		固体 (不锈钢)	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 800	
	边界条件	速度入口	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	20	
		湍流	湍流强度/% 水力直径/mm	5 100	
		压力出口	压力	0	
		壁面	壁面运动		静止壁面
			剪切状态		无滑移
			粗糙度/mm 粗糙度常数		0.001 5 0.5
	DEM	材料	时间步	固定时间步/(10 <sup>-3</sup> s)	1
			小麦颗粒	泊松比 剪切模量/MPa 密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	0.29 500 1 350
壁面		泊松比		0.3	
		剪切模量/GPa		70	
		密度/(kg·m <sup>-3</sup> )		7 800	
接触		颗粒-颗粒	恢复系数		0.5
			静摩擦因数 滚动摩擦因数 交互接触模型		0.58 0.08 Hertz-Mindlin (no)
		颗粒-壁面	恢复系数		0.5
			静摩擦因数 滚动摩擦因数 交互接触模型		0.61 0.05 Hertz-Mindlin(no)
			颗粒工厂	颗粒当量直径/mm 工厂类型	
仿真器	时间步 网格模拟	质量流量/(kg·s <sup>-1</sup> ) 固定时间步/(10 <sup>-5</sup> s) 网格尺寸/mm		0.634 1 10	

### 3 结果与讨论

#### 3.1 颗粒状态

##### 3.1.1 颗粒速度、沉积对比

速度是评价气力输送是否优良的重要指标<sup>[22]</sup>。小麦经仓泵流化后与空气形成二相流拟流体，以 20 m/s 的速度进入输送管道。在风速稳定的情况下分别对轴流输送与旋流输送进行数字仿真。

仿真小麦分别经轴流输送和旋流输送后，每隔 0.1 s 的测量点速度分布如图 5 所示。可以看出，纯轴流场中测量点在 0.1 s 时速度最大，然后逐渐减速，

在 0.6 s 处最小。出现该现象的原因是颗粒与颗粒的碰撞、颗粒与管壁的摩擦、小麦沿输送管道沉积于下方滑动前行。在旋流场中，在旋流的介入下，在 0.1~0.6 s 内颗粒速度整体大于轴流输送，小麦颗粒螺旋前进，颗粒均匀地散布于管道任意位置，可以有效抑制颗粒的沉降堆积，减少颗粒与颗粒的碰撞、颗粒与管壁的摩擦，达到更优的输送效果，从而得出旋流输送优于轴流输送的结论。

##### 3.1.2 颗粒分布

设置 5 个测量点，分别截取轴流输送与旋流输送测量点截面颗粒分布进行对比，截面如图 6 所示。

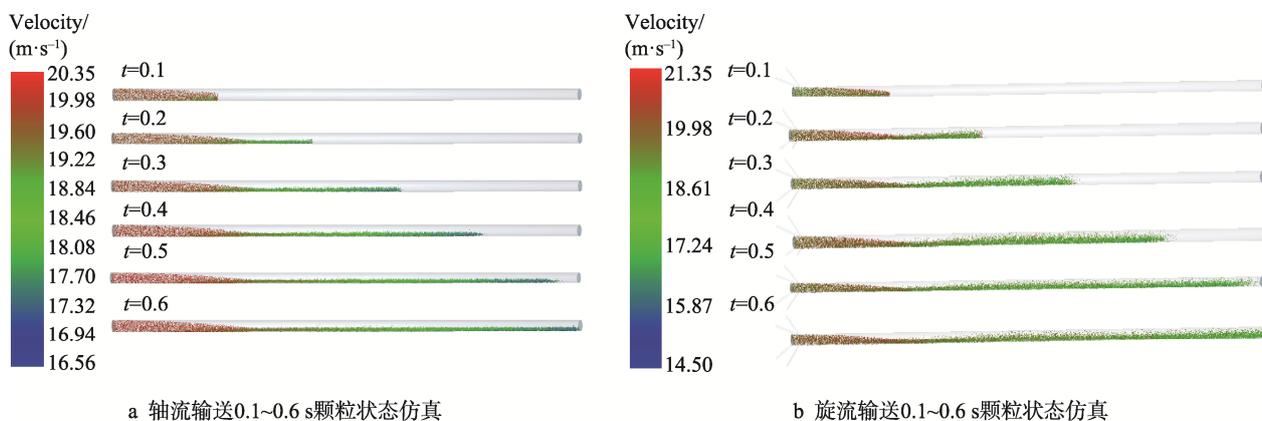


图 5 不同输送方式颗粒状态  
Fig.5 Grain states under different conveying methods

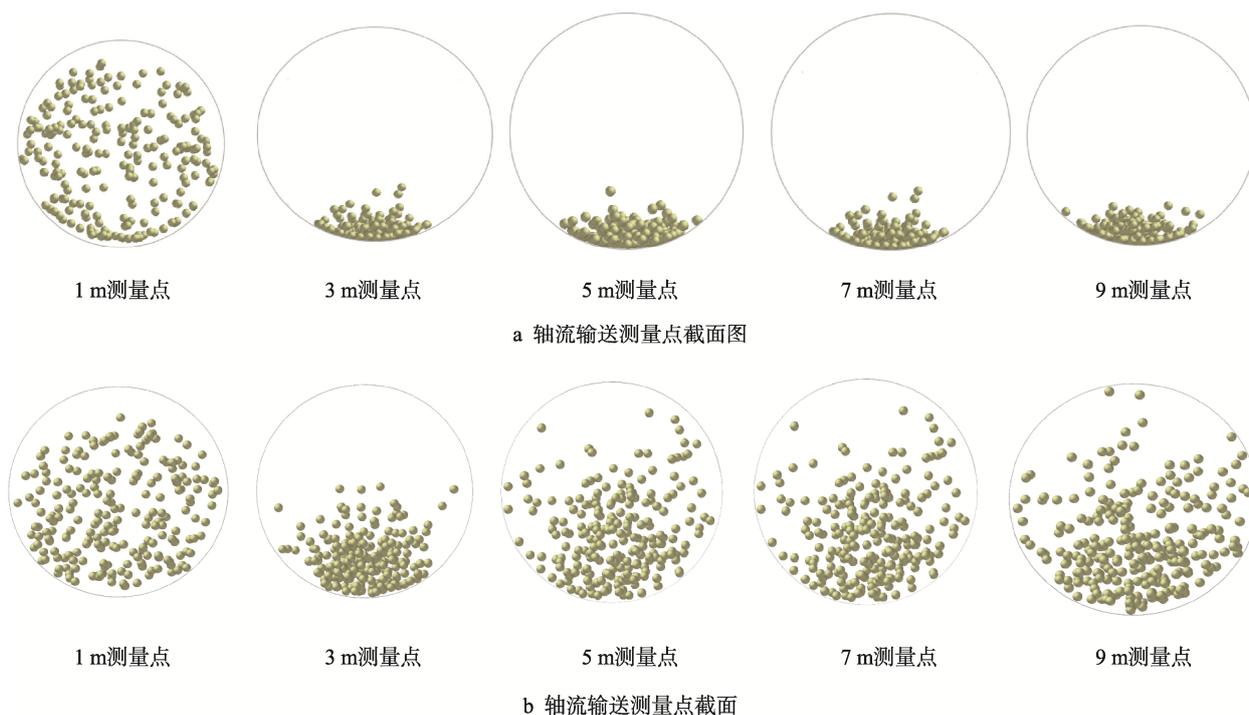


图 6 不同输送方式测量点截面颗粒分布  
Fig.6 Grain distribution of measurement points under different conveying methods

从图 6 中可以清晰看出, 轴流输送只有在刚流化的小麦颗粒进入管道输送时均匀分布, 之后迅速沉降堆积于管道底部; 旋流输送受到旋流的干扰, 螺旋均匀前进, 有效克服了小麦颗粒的沉积, 从而达到了高效稳定输送。

### 3.2 静压

静压指物体在稳态下表面所受的压强, 是评价系统稳定性的重要指标。在设计新的或改进现有的气力输送装置时, 通常需要考虑系统的稳定性。

#### 3.2.1 平均静态压力

对上述轴流输送和旋流输送仿真结果进行拟合 (如图 7 所示), 得到平均静压力与距离之间的函数, 图 7 中纵坐标表示不同输送方式在 1、3、5、7、9 m 处的平均静压, 横坐标表示从测量点 1 到实验装置末端, 拟合直线的斜率表示压降, 斜率越小则压降越大。

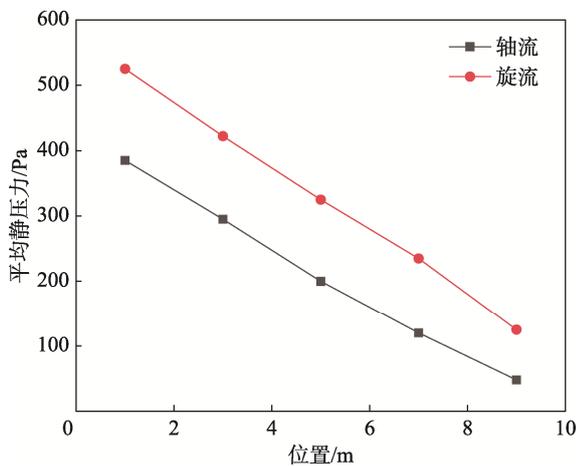


图 7 不同测量点的平均静压力  
Fig.7 Average static pressure at different measurement points

从图 7 可以看出, 旋流输送管道的平均静压明显高于纯轴流输送管道的平均静压, 但两者整体都呈下降趋势。这是因为在输送小麦时气流的动能转化为小麦的动能, 造成平均静压下降。如图 7 所示, 纯轴流场的距离-平均压力函数斜率最大, 说明纯轴流场

中空气对小麦颗粒的扰动性较小, 只有小部分气流动能转化为小麦颗粒动能。由图 7 可以看出, 旋流的输送效果更好。

#### 3.2.2 静压降

静压降是描述系统稳定性的关键参数, 它主要侧面反映输送颗粒的瞬时能耗。轴流与旋流输送的静压降如表 3 所示。

表 3 压降百分比  
Tab.3 Pressure drop percentage

测量位置/m	轴流输送/Pa	旋流输送/Pa
1	385	525
3	295	422
5	200	325
7	120	235
9	48	125
下降百分比/%	87.5	76.2

流场静压降越大, 则输送系统的瞬时能耗越高。流场静压降最大表示系统的瞬时能耗最大、输送时间最短、输送的效果最好, 因此从静压降的角度来看, 旋流的输送效果优于轴流输送。

### 3.3 能耗分析

在气力输送系统中, 能量损失是一项重要指标, 固气质量比是影响管道能量损耗的主要因素之一。分别在轴流输送和旋流输送距离管道出口 1 m 的位置设置一个观测点, 如图 8 所示。

固气质量比指在同一时间内通过某一横截面的固体质量与气体质量之比, 按式 (15) 计算。

$$m_s = G_s / G_g \tag{15}$$

式中:  $m_s$  是固气质量比;  $G_g$  为气体的质量流量,  $G_s$  为固体的质量流量。

由于 2 种输送方式的气体质量相同, 故气固质量比等于流过截面的固体质量。

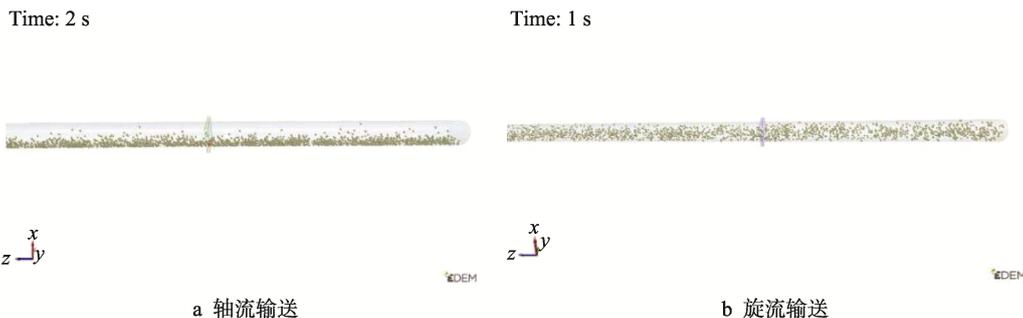


图 8 选取的截面位置  
Fig.8 Selected cross-sectional positions

从图 9 可以看出,在轴流输送中动力源只有一个主流管道,在旋流输送时多了侧补气管,但气固质量比提高了 26%,并且起旋气流大幅度降低了输送过程中颗粒与颗粒之间,颗粒与管壁之间的碰撞、摩擦和撞击,并且大大降低了料栓甚至堵管的现象,从而降低了能量损失,且运输同等质量的小麦时轴流管道输送时间约为旋流管道的 1.1 倍。

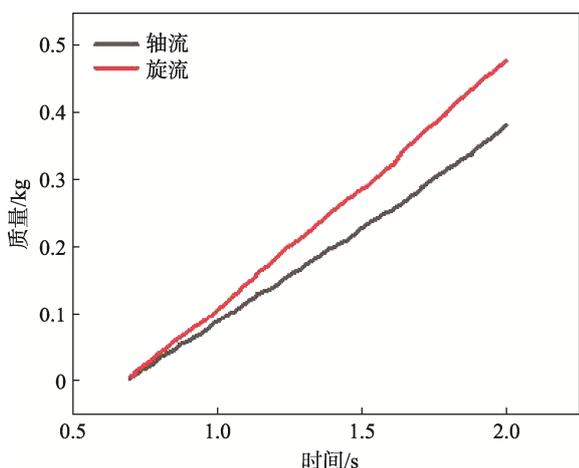


图 9 质量流量  
Fig.9 Mass flow chart

从气固质量比和运输时间两方面考虑,虽然动力源有所增加,但带来了更高的效率。综合比较来看,依然是旋流输送优于轴流输送。

#### 4 实验平台验证

为了验证 CFD-DEM 模型的准确性,搭建实验平台进行验证,分别测试带有起旋装置的输送试验台和普通轴流式输送试验台,并进行对比。起旋装置采用侧向补气装置(如图 10 所示),搭建的实验平台设备如图 11 所示。空气压缩机选用普瑞阿斯螺杆空压机(型号为 BK22-8ZG),储气罐选用安诺能源科技公司 21540300 批次产品,空气干燥机选用浙江开山净

化设备公司 SAD-3SF 产品,仓泵选用山东延续压力容器有限公司 XY202108100 产品。将起旋装置置于仓泵出料口 1 m 处,采用 3D 打印技术制作。工作原理:空气经空压机压缩进入储气罐,储气罐输出的空气经过空气干燥机进入仓泵及起旋装置,并为小麦输出提供动力。通过图 12 所示的数据采集系统得到的测试结果如图 13 所示。



图 10 侧向补气起旋装置  
Fig.10 Lateral air replenishment starting device



图 11 实验装置  
Fig.11 Experimental device



a 高速摄像机



b 传感器



c 数据采集系统

图 12 数据采集系统  
Fig.12 Data acquisition system

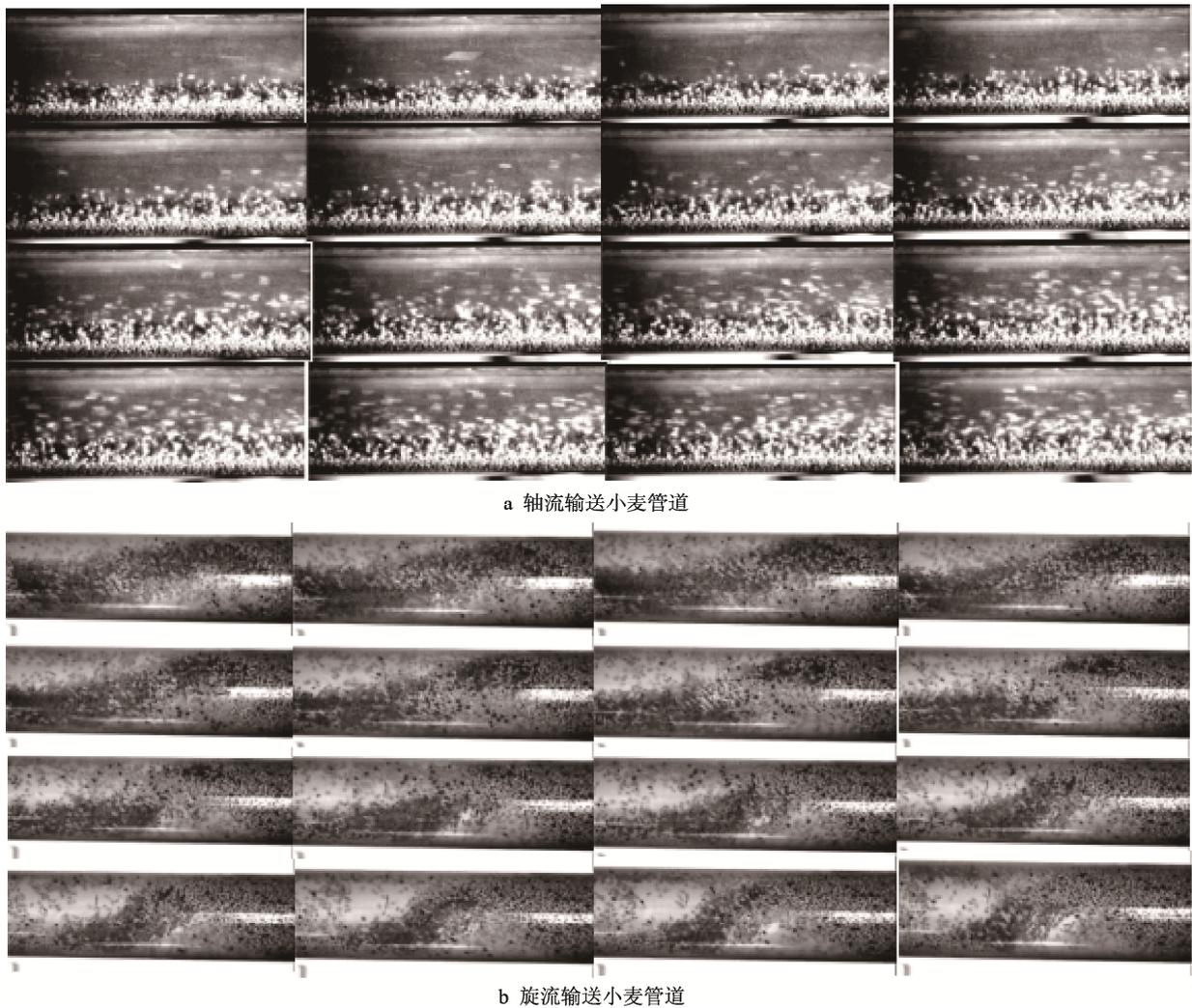


图 13 不同输送方式高速摄像机拍摄对比

Fig.13 Comparison of high-speed camera shots under different conveying methods

在 2 种不同的输送方式下, 测量位置相同的 5 个点的压力如图 14 所示。在 2 种不同输送方式下, 流出相同质量所需要的时间如图 15 所示。

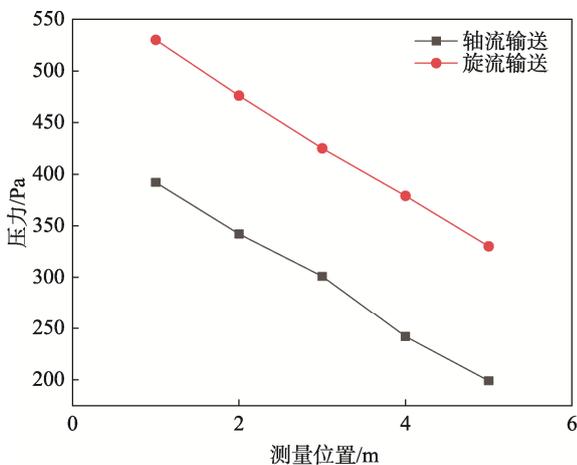


图 14 不同测量点的平均静压力  
Fig.14 Average static pressure at different measurement points

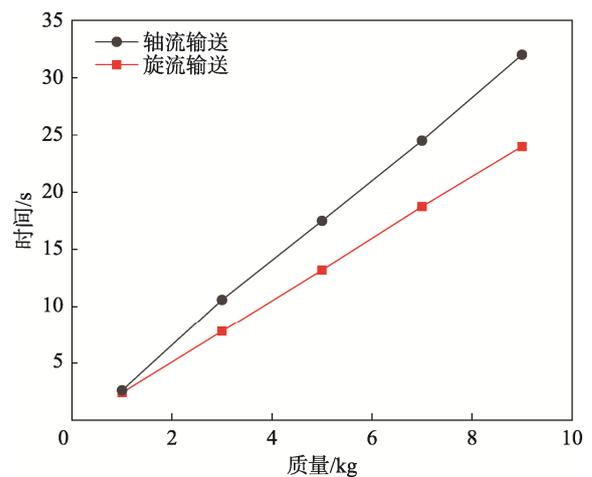


图 15 质量流量  
Fig.15 Mass flow chart

从图 13 可以清楚看出, 当采用轴流方式输送小麦时, 小麦颗粒明显沉积于管底, 并沿管道滑动, 这样会受到较大的摩擦力, 从而造成小麦颗粒逐渐降

速,降低了输送效率;采用旋流输送时,小麦颗粒在旋流的影响下螺旋前进,从而抑制颗粒的沉降,小麦颗粒的分散程度较高,减小了与管壁的摩擦,在输送时整个系统的能耗较小,输送效率较高。无论从压降还是输送时间来看,旋流均明显优于轴流,可见采用旋流输送小麦更优。

## 5 结论

采用 CFD-DEM 数值模拟结合实验验证,通过多方面分析得出以下结论:当输送小麦时,采用旋流式输送的效果优于轴流式输送;旋流式输送能较好地解决小麦沉积于管底的问题,进而减小小麦颗粒与管道的摩擦,在输送时整个系统的能耗较小、小麦颗粒的分散程度较高、输送速度较快,相较于轴流式可以更高效地完成小麦的输送。

### 参考文献:

- [1] 吴存荣. 粮食收储及物流运输环节存在的质量安全问题与对策[J]. 食品科学技术学报, 2014, 32(4): 11-15.  
WU C R. Grain Safety Issues and Countermeasures during Acquisition, Storage and Transport Processes[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 32(4): 11-15.
- [2] 周甲伟. 煤炭颗粒旋流气力输送机理及性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.  
ZHOU J W. Study on Mechanism and Performance of Coal Particle Cyclone Pneumatic Conveyor[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [3] 车得福, 李会雄. 多相流及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.  
CHE D F, LI H X. Multiphase Flow and Its Application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.
- [4] 纪云. 喷浆物料长距离管道气力输送特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
JI Y. Study on Pneumatic Conveying Characteristics of Shotcrete Materials in Long Distance Pipeline[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [5] SOMMERFELD M. Analysis of Collision Effects for Turbulent Gas-Particle Flow in a Horizontal Channel: Part I. Particle Transport [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 29: 675-699.
- [6] SOMMERFELD M, KUSSIN J. Analysis of Collision Effects for Turbulent Gas-Particle Flow in a Horizontal Channel. Part II. Integral Properties and Validation[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29(4): 701-718.
- [7] SOMMERFELD M, KUSSIN J. Wall Roughness Effects on Pneumatic Conveying of Spherical Particles in a Narrow Horizontal Channel[J]. Powder Technology, 2004, 142(2/3): 180-192.
- [8] LAÍN S, SOMMERFELD M. Euler/Lagrange Computations of Pneumatic Conveying in a Horizontal Channel with Different Wall Roughness[J]. Powder Technology, 2008, 184(1): 76-88.
- [9] TSUJI Y. Multi-Scale Modeling of Dense Phase Gas-Particle Flow[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(13): 3410-3418.
- [10] 马恒强, 邱亮. 气力输送原生矸石充填系统的研究[J]. 煤矿安全, 2013, 44(1): 109-111.  
MA H Q, QIU L. Research on Pneumatic Conveying Waste Rock Filling System[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(1): 109-111.
- [11] ESCUE A, CUI J. Comparison of Turbulence Models in Simulating Swirling Pipe Flows[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(10): 2840-2849.
- [12] SAOUD A, MOSOROV V, GRUDZIEN K. Measurement of Velocity of Gas/Solid Swirl Flow Using Electrical Capacitance Tomography and Cross Correlation Technique[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2017, 53: 133-140.
- [13] 容琼. 一种螺旋流发生器的数值试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.  
RONG Q. Numerical Experimental Study on a Spiral Flow Generator[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [14] 李志华, 刘艳青, 焦雷, 等. 基于优化炭黑密相气力输送系统的设计[J]. 流体机械, 2010, 38(2): 41-44.  
LI Z H, LIU Y Q, JIAO L, et al. Design of Optimizing the Dense Pneumatic Conveying System for Carbon Black[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(2): 41-44.
- [15] 王巍, 管清亮, 张建胜. 加压粉煤气力输送试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(2): 277-281.  
WANG W, GUAN Q L, ZHANG J S. Experimental Study of Dense-Phase Pneumatic Conveying of Pulverized Coal at Elevated Pressures[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011, 51(2):

- 277-281.
- [16] FAN L S, CHAO Z. 气固两相流原理 上(美)[M]. 张学旭, 译. 北京: 科学出版社, 2018: 3-4.  
FAN L S, CHAO Z, Principle of Gas-Solid Two-Phase Flow (Upper)[M]. ZHANG X X, Translated. Beijing: Science Press, 2018: 3-4.
- [17] 刘凡一. 清选装置中小麦颗粒和短茎秆离散元建模研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2018.  
LIU F Y. Study on Discrete Element Modeling of Wheat Particles and Short Stalks in Cleaning Device[D]. Xi'an: Northwest A & F University, 2018.
- [18] CHU K W, WANG B, XU D L, et al. CFD-DEM Simulation of the Gas-Solid Flow in a Cyclone Separator[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(5): 834-847.
- [19] ERGUN S. Fluid Flow through Packed Columns[J]. Chem Eng Prog, 1952, 48: 89-94.
- [20] JI Y, LIU S Y, LI J P. Experimental and Numerical Studies on Dense-Phase Pneumatic Conveying of Spraying Material in Venturi[J]. Powder Technology, 2018, 339: 419-433.
- [21] ZHOU J W, SHANGGUAN L J, GAO K D, et al. Pickup Characteristics of Lump Non-Spherical Particles in an Oscillating Airflow[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(31): 14145-14156.
- [22] LI J P, ZHOU F, YANG D L, et al. Effect of Swirling Flow on Large Coal Particle Pneumatic Conveying[J]. Powder Technology, 2020, 362: 745-758.
- [23] CUNDALL P A, STRACK O D L. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.