

# 基于 DEM 仿真与试验验证的双轴螺旋输送机结构优化分析

张恒宇<sup>1</sup> 李艳洁<sup>1\*</sup> 刘春飞<sup>1</sup> 徐泳<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学 工学院,北京 100083;

2. 中国农业大学 理学院,北京 100083)

**摘要** 针对螺旋输送机的输送效率问题,对双轴螺旋输送机输送颗粒物料的过程进行离散元法数值计算,并与单轴螺旋输送机输送物料的试验和模拟结果进行对比。在试验验证了仿真模型和参数正确的基础上,对双轴螺旋输送机的轴距和螺距 2 个参数与质量流速率( $\dot{M}$ )间的定量关系进行二元二次多项式拟合,得到拟合优度  $R^2 = 0.9646$  的回归方程。研究表明:1)双轴的相对转动方向对  $\dot{M}$  没有影响;2)螺距和轴距对  $\dot{M}$  均有明显影响。 $\dot{M}$  随着轴距的增大显著增大,大螺距时会在达到极值后趋于稳定或略有下降; $\dot{M}$  随着螺距的增大先增大至峰值后下降;3)双轴的螺距和轴距对颗粒运动影响显著。两轴中间位置颗粒的最小轴向平动速度与轴距呈现近似线性的递减关系,且螺距越大,其减小趋势越明显。

**关键词** 螺旋输送机; 双轴; 质量流速率; 离散单元法; 优化分析

**中图分类号** O347.7;TU411

**文章编号** 1007-4333(2019)04-0148-09

**文献标志码** A

## Structure optimization and analysis of twin-shaft screw conveyor based on DEM simulations and experimental validation

ZHANG Hengyu<sup>1</sup>, LI Yanjie<sup>1\*</sup>, LIU Chunfei<sup>1</sup>, XU Yong<sup>2</sup>

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** In this study, the process of transporting granular materials by double-shaft screw conveyor was simulated with discrete element method and compared the results of experiments and simulations of single-shaft screw conveyor. Based on the accuracy validation of numerical model and parameters with experiments, the quantitative relationship between shaft distance, screw pitch and mass flow rate ( $\dot{M}$ ) was fitted with a binary quadratic polynomial function of the fit goodness of  $R^2 = 0.9646$ . The results showed that: 1) Rotating directions of two shafts did not affect the  $\dot{M}$ ; 2)  $\dot{M}$  was evidently influenced by shaft distance and screw pitch.  $\dot{M}$  increased with the increasing of shaft distance obviously, and it decreased after reaching the maximum value under the larger pitch.  $\dot{M}$  increased with the increasing of pitch and decreased after the maximum value. 3) The behavior of the particles was influenced by the shaft distance and screw pitch. And the minimum velocities of particles at the central position of the double-shaft decreased linearly as the shaft distance increased, and the decrease tendency was more obvious with larger screw pitch.

**Keywords** screw conveyor; twin-shaft; mass flow rate; discrete element method; optimization analysis

螺旋输送机是一种常见的密闭式输送设备,广泛应用于农业、工业等领域颗粒及粉体等疏松物料的运输。农业中粮食收获和大型粮仓的粮食储运,经常需要使用螺旋输送机进行粮食的密闭输送。螺

旋输送机结构简单、组装方便,在安装使用过程中不会占用过多空间。在颗粒或粉体物料封闭式输送过程中,输送效率是首要考虑的因素,因此对螺旋输送机输送效率影响因素及其机理的分析十分重要。

收稿日期: 2018-06-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2017ZY37,2016ZCQ08);国家自然科学基金项目(11202031)

第一作者: 张恒宇,硕士研究生,E-mail:zhanghengyumail@163.com

通讯作者: 李艳洁,副教授,主要从事散体材料力学仿真及试验研究,E-mail:liyanjie@bjfu.edu.cn

目前,对螺旋输送机的研究主要包括单轴螺旋输送机<sup>[1-4]</sup>的试验和仿真,大量研究结果表明<sup>[5-8]</sup>,螺旋叶片轴的转速对输送效率有显著影响。关于双轴结构的螺旋输送机研究相对较少。在工程应用中,双轴结构的挤压机和搅拌机已有相关应用案例<sup>[9-12]</sup>,但其主要实现的功能是物料挤压和搅拌,并不是输送物料。姜奉新等<sup>[13]</sup>对比碳素生产过程中用于冷却的单、双轴螺旋输送机的结构特点并对其改进,改进后的设备可以提高生产的连续性,但并未对比单、双轴的输送效率。在盾构机方面也有相关应用双轴螺旋输送机的研究,但是盾构机上应用所谓双轴螺旋输送机是2个单轴螺旋输送机对接或者搭接在一起<sup>[14-15]</sup>,即2个单轴螺旋输送机首尾相连完成输送任务,并非双轴并列布置。目前关于双轴螺旋输送机的输送效率相对于单轴是高是低、双轴结构参数对效率的影响规律如何的研究非常匮乏。

本研究旨在将双轴螺旋输送机仿真的单位面积质量流速率与单轴螺旋输送机仿真和试验的单位面积质量流速率进行对比,讨论双轴转向、轴距和螺距对双轴螺旋输送机效率的影响规律,以期为双轴螺旋输送机的结构设计和参数优化提供理论依据。

## 1 试验与数值方法

### 1.1 试验方法

本研究所采用的单轴、双轴螺旋输送机整体结构见文献<sup>[16]</sup>和<sup>[17]</sup>,具体横截面形状及尺寸见图1。试验中采用单轴螺旋输送机输送实心亚克力材料(PMMA)圆球颗粒物料,颗粒直径10 mm,颗粒总质量4.5 kg,总数量约7 400个。单轴螺旋叶片材质为不锈钢,套筒为有机玻璃,螺旋叶片轴直径20 mm,叶片外径58 mm。输送试验过程采用压力传感器测量得到输出颗粒物料的动态质量,每1 s记录1次输出颗粒的质量。前期的单轴螺旋输送试验研究表明:输出的颗粒质量与输送时间成线性关系<sup>[16]</sup>。故本研究以输出颗粒质量随时间变化的直线斜率为输送颗粒的质量流速率 $\dot{M}$ ,公式如下:

$$\dot{M} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: $\Delta m$ 为输出颗粒质量,kg; $\Delta t$ 为输送时间,s。本研究单轴螺旋输送机的水平输送转速 $n$ 为100 r/min,螺距 $P$ 分别为60、100 mm,测量这2组

试验的质量流速率,后续将采用这2组数据验证数值计算结果的准确性。

### 1.2 数值模型理论及建模方法

本研究采用离散单元法进行仿真计算,所使用的程序基于Granule计算程序框架,可实现螺旋曲面的几何壁面的定义以及对壁面定轴转动的运动控制。颗粒的法向接触力计算采用Hertz接触理论,切向力模型基于Mindlin-Deresiewicz理论<sup>[18]</sup>,法向力模型和切向力模型都具有阻尼分量。颗粒间法向力 $F_n$ 和切向力 $F_t$ 由式(2)确定:

$$\begin{cases} F_n = \frac{4}{3} E^* (R^*)^{1/2} \delta_n^{3/2} \\ F_t = -S_t \delta_t \end{cases} \quad (2)$$

式中: $E^*$ 为等效弹性模量, $1/E^* = (1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2$ , $E_1$ 、 $E_2$ 分别为接触颗粒的弹性模量, $\nu_1$ 、 $\nu_2$ 分别为接触颗粒的泊松比; $R^*$ 为等效颗粒半径, $1/R^* = 1/R_1 + 1/R_2$ , $R_1$ 、 $R_2$ 分别为接触颗粒的半径; $\delta_n$ 、 $\delta_t$ 分别为接触颗粒在接触点处法向重叠量、切向重叠量; $S_t$ 为切向刚度, $S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n}$ ; $G^*$ 为等效剪切模量, $G^* = (2 - \nu_1^2)/G_1 + (2 - \nu_2^2)/G_2$ , $G_1$ 、 $G_2$ 分别为接触颗粒的剪切模量。

法向和切向阻尼力 $F_{n,t}^d$ 由式(3)确定:

$$F_{n,t}^d = -1.83\beta \sqrt{S_{n,t} \cdot m^* \cdot \mathbf{u}_{n,t}^{rel}} \quad (3)$$

式中: $\beta$ 为系数, $\beta = \ln e / \sqrt{\ln^2 e + \pi^2}$ , $e$ 为接触颗粒碰撞的恢复系数; $S_n$ 为法向刚度, $S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n}$ ; $m^*$ 为等效质量, $m^* = m_1 \times m_2 / (m_1 + m_2)$ , $m_1$ 、 $m_2$ 分别为接触颗粒的半径; $\mathbf{u}_{n,t}^{rel}$ 为相对速度的法向或切向分量。

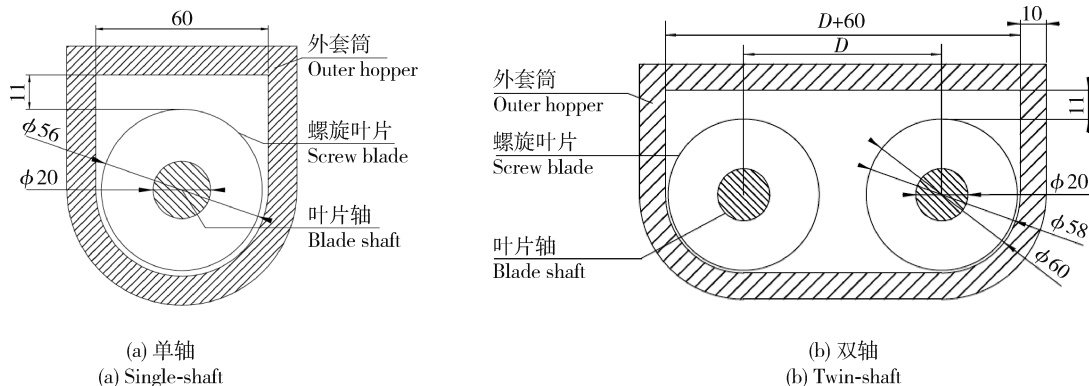
本研究双轴螺旋输送机两轴的螺距相等,套筒和螺旋叶片与单轴螺旋输送机的物性参数相同(图1(b))。螺旋输送机试验和所有数值算例的螺旋叶片输送方式均为水平输送,且叶片轴转速为100 r/min,数值模拟所用的物性参数和仿真参数见表1,其中,材料密度、恢复系数、最大静摩擦因数和滚动摩擦因数来源于试验的真实测量,杨氏模量、泊松比来源于相关文献查阅<sup>[19-20]</sup>。

数值仿真需要在输送机进料斗范围内持续生成颗粒物料并待颗粒堆积稳定后,开始赋予螺旋叶片轴恒定的转动角速度,实时记录出口处输出颗粒的质量,当输出颗粒的质量与时间为线性关系时,计算该直线斜率,即作为该工况输送的颗粒质量流速率。

涉及的单轴输送仿真和试验,以及双轴的输送

仿真,均是满载输送,即输送效率达到最大值的稳定输送状态,即填充率最大。根据本课题组前期的研究结果表明<sup>[17]</sup>,不同转速的满载输送的颗粒系统的

填充率随转速的增大而降低;相同转速的单轴和双轴的满载输送的填充率几乎相等,分别为 52.5%和 52.3%。



$D$  为轴距,mm,下图同。

$D$  is the shaft distance,mm. The same in Fig. 2.

图 1 单轴和双轴螺旋输送机横截面形状及尺寸

Fig. 1 Shapes and sizes of cross sections of single-shaft and twin-shaft conveyors

表 1 螺旋输送机数值模拟所用的材料参数

Table 1 Physical properties parameters and simulation parameters of screw conveyor numerical simulation

参数名称 Parameter name	颗粒 Particles	套筒 Hopper	螺旋叶片 Screw blade
材料 Materials	亚克力	有机玻璃	不锈钢
泊松比 Poisson's ratio	0.2	0.393	0.3
剪切模量/GPa Shear modulus	1.04	1.47	79.4
密度/(kg/m <sup>3</sup> ) Density	1 180	1 200	7 800
恢复系数 Coefficient of restitution	0.731	0.731	0.843
最大静摩擦因数 Maximum coefficient of static friction	0.32	0.32	0.3
滚动摩擦因数 Coefficient of rolling friction	0.01	0.01	0.01
时间步长/s Time step		$5 \times 10^{-6}$	
重力加速度/(m/s <sup>2</sup> ) Gravity acceleration		9.81	

注:恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数是指颗粒与颗粒、颗粒与壁面之间的系数。

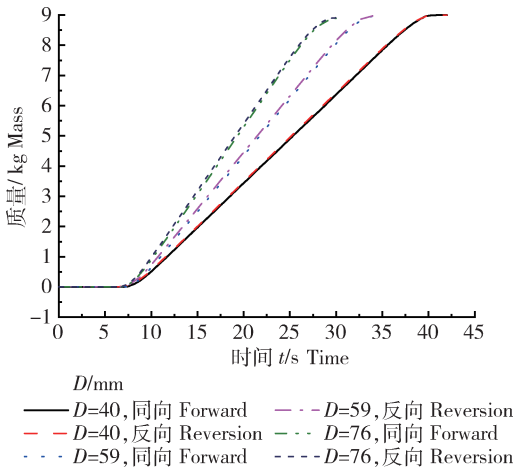
Note:Coefficient of restitution, coefficient of static friction and coefficient of rolling friction are the coefficients for particles to particles and particles to walls, respectively.

## 2 输送效率的影响因素

### 2.1 叶片轴相对转向对输送效率的影响

为探讨双轴输送机两叶片轴的相对转向对输送效率的影响,本研究选用 3 种轴距( $D = 40$ 、 $59$ 、 $76$  mm)的双轴输送机作为研究对象进行输送物料

试验,工况条件为:转速  $n = 100$  r/min、螺距  $P = 60$  mm,分别设置两叶片轴的相对转向为同向和反向,得到输出质量随时间变化的累积曲线(图 2)。可见,两叶片轴的相对转向对质量流速率没有影响。在讨论其他因素对质量流速率的影响时,均采用两轴相对反向转动方式。



D 为轴距,同 5 和图 7 同。

D is the shaft distance, The same in Fig. 5 and Fig. 7.

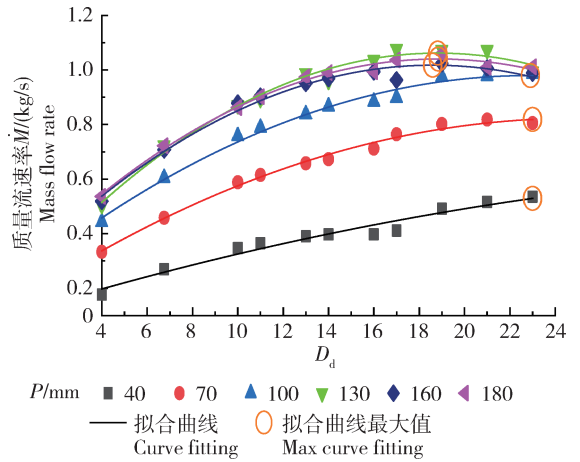
图 2 两叶片轴同向、反向时输出颗粒质量的对比

Fig. 2 Comparisons of output mass for forward and reversion of two shafts

### 2.2 轴距对输送效率的影响

对满载输送时不同螺距双轴螺旋输送机的质量流速率与轴距的关系曲线进行分析,结果见图 3。为了消除颗粒粒径的影响,对轴距做量纲 1 处理,即采用轴距与颗粒粒径的比值 ( $D_a$ ) 作为自变量。对比发现:在较小螺距 ( $P < 100$  mm) 时,双轴的质量流速率随着轴距的增大而一直增大;而在较大螺距 ( $P > 100$  mm) 时,质量流速率先增大至最大值,而后缓慢下降。通过对比不同螺距的质量流速率可发现:随螺距的增大,质量流速率的值越大;但是当螺距超过 130 mm 后,根据  $P=130、160、180$  mm 时质量流速率与  $D_a$  的关系曲线(图 3)发现,质量流速率对螺距的变化不再敏感。

考虑到螺旋输送机筒的有效输送横截面积对输送效率的影响,筒的横截面积越大,输送的效率越高,因此无法直接将单轴和双轴螺旋输送机的质量流速率进行对比。本研究采用的双轴和单轴螺旋输送机的叶片直径和轴径均相等,但筒的横截面积不相等,为了比较单轴和双轴螺旋输送机的输送效率,且采用输送试验的结果来验证仿真结果的精确度,本研究采用转速  $n=100$  r/min,螺距  $P$  分别为 60、100 mm 的单轴仿真和试验的单位横截面积质量流速率  $\dot{M}/A$  ( $\dot{M}$  为质量流速率,  $A$  为输送机外筒的有效输送横截面积),与双轴的  $\dot{M}/A$  最大值进行了对比(图 4)。本研究中单轴的试验和仿真的工况完全相同,而单轴仿真所用的所有物性参数和颗粒接触



$D_a$  为轴距与颗粒粒径比,  $P$  为螺距,图 4 同。

$D_a$  is shaft distance divide particle size,  $P$  is screw pitch. The same in Fig. 4.

图 3 双轴螺旋输送机质量流速率在不同轴距输送时的对比

Fig. 3 Comparisons of shaft distance on the mass flow rate of the screw conveyor

模型和算法,与双轴的仿真完全相同。对比单轴输送的试验与仿真结果发现:螺距 60 和 100 mm 的仿真结果相对于试验结果的误差分别为 3.9% 和 4.7%,说明在完全相同工况的单轴输送仿真和试验结果比较吻合,因此,这证明采用的所有仿真物性参数、数值算法和接触模型均是合理的。因此,在此吻合度较好基础上进行的双轴输送仿真分析,会有较好的可信度。而由图 4 对比还发现:双轴输送拟合曲线的  $\dot{M}/A$  极大值超过单轴输送试验 5.5% 和 7.7%,说明可以通过调整双轴的轴距,使双轴的

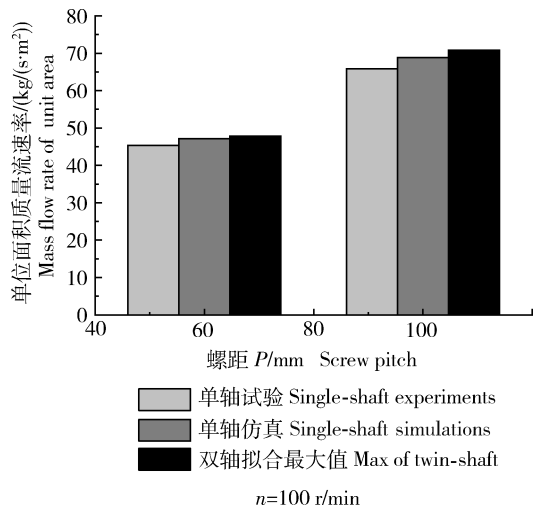


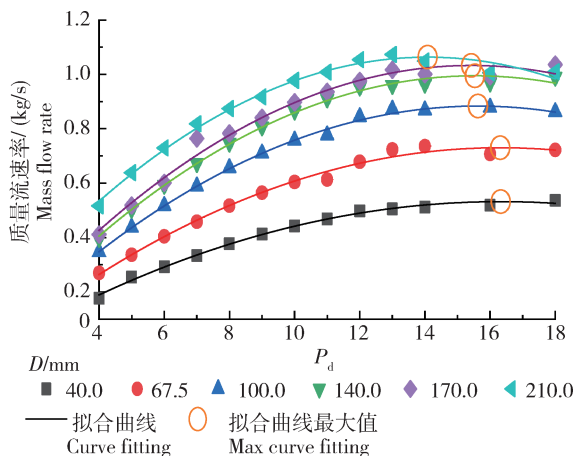
图 4 单轴输送试验、仿真与双轴输送仿真对比

Fig. 4 Comparisons between single-shaft experiments, simulations and twin-shaft simulations

$\dot{M}/A$  即输送效率高于单轴。

### 2.3 螺距对输送效率的影响

为定量分析螺距对输送效率的影响规律,本研究对比不同轴距的双轴螺旋输送机质量流速率  $\dot{M}$  随螺距增加的变化曲线(图 5)。为了消除颗粒粒径的影响,对螺距做量纲 1 处理,即采用螺距与颗粒粒径的比值( $P_d$ )作为自变量。发现:在较小轴距( $D <$



$P_d$  为螺距与颗粒粒径比,图 6 同。

$P_d$  is screw pitch divide particle size. The same in Fig. 6.

图 5 螺距对双轴螺旋输送机质量流速率的影响

Fig. 5 The influence of screw pitch on the mass flow rate of the screw conveyor

120 mm)时,双轴的质量流速率  $\dot{M}$  都是随着螺距的增加而增大;而在较大轴距( $D > 120$  mm)时,不同轴距的  $\dot{M}$  开始陆续出现极值,之后  $\dot{M}$  随着螺距的增大开始逐渐减小。所以,双轴螺旋输送机的质量流速率  $\dot{M}$  不是随着螺距的增加而一直增大,而是先增后降。这说明双轴螺旋输送机的螺距选择要合理,过大的螺距不仅不会增加螺旋输送机的效率,反而会降低螺旋输送机的效率。

### 2.4 轴距和螺距的优化分析

轴距和螺距的改变都会对双轴螺旋输送机的效率产生影响,但是这 2 个主要结构参数对输送效率的耦合影响规律仍需深入研究。因此在完成单因素影响规律分析之后,本研究进一步分析了轴距和螺距双因素共同对质量流速率的影响,完成了双因素正交仿真计算,仿真结果见表 2。本研究采用二元二次多项式函数对轴距和螺距变化时的质量流速率仿真结果进行了回归分析。根据仿真结果(表 2)得到  $D_d$  和  $P_d$  对质量流速率共同影响规律的回归方程:

$$\dot{M} = -0.001443D_d^2 - 0.00427P_d^2 +$$

$$0.0001558D_d \cdot P_d + 0.1271P_d - 0.5865 \quad (4)$$

拟合结果表明,和方差为 0.2594,均方根为 0.04352,拟合优度  $R^2$  为 0.9646 非常接近 1,说明

表 2 轴距和螺距共同作用对质量流速率的影响

Table 2 The statistical results of the mass flow rate by screw pitch and shaft distance

$P_d$	$D_d$										
	4	6.75	10	11	13	14	16	17	19	21	23
4	0.177	0.270	0.347	0.365	0.390	0.398	0.397	0.411	0.492	0.516	0.535
5	0.255	0.337	0.437	0.461	0.497	0.504	0.497	0.518	0.616	0.639	0.662
6	0.293	0.404	0.517	0.534	0.574	0.593	0.606	0.601	0.722	0.73	0.765
7	0.333	0.458	0.589	0.615	0.658	0.673	0.672	0.694	0.802	0.769	0.835
8	0.377	0.517	0.656	0.684	0.733	0.747	0.748	0.783	0.89	0.874	0.901
9	0.412	0.565	0.710	0.737	0.780	0.807	0.840	0.841	0.966	0.917	0.986
10	0.443	0.604	0.757	0.788	0.838	0.866	0.883	0.897	0.975	0.978	1.059
11	0.468	0.613	0.776	0.822	0.884	0.910	0.925	0.936	1.010	1.008	1.077
12	0.498	0.679	0.844	0.876	0.925	0.954	0.971	0.976	1.040	1.054	0.918
13	0.505	0.724	0.871	0.894	0.988	0.960	1.037	1.077	1.074	1.073	0.934
14	0.512	0.736	0.868	0.918	0.961	0.965	0.992	1.001	1.082	0.966	0.959
16	0.519	0.707	0.878	0.903	0.951	0.969	0.994	0.963	1.023	1.006	0.989
18	0.537	0.722	0.862	0.902	0.974	0.990	0.993	1.036	1.060	1.009	1.011

注: $D_d$  为轴距与颗粒粒径比, $P_d$  为螺距与颗粒粒径比。

Note: $D_d$  is shaft distance divide particle size, $P_d$  is screw pitch divide particle size.

此方程拟合精度较高。

在三维坐标系中,绘制出二元二次回归方程的函数曲面,并将 DEM 数值仿真的数据点也标在同一坐标系里进行比较(图 6)。由此图的函数曲面可直观发现质量流速率并非随着轴距和螺距的增加而增加,而是轴距和螺距的双因素耦合影响存在因变量最大的极值点,当轴距和螺距到达极值点时,双轴螺旋输送机的质量流速率最大。采用数学极值求解,偏微分方程如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{M}(D_d, P_d)}{\partial D_d} = 0 \\ \frac{\partial \dot{M}(D_d, P_d)}{\partial P_d} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)求出回归方程的驻点  $D_0 = 22.2, P_0 = 15.3$ 。对式(5)求导得回归方程的连续二阶偏导数:

$$\begin{cases} A = \left. \frac{\partial^2 \dot{M}(D_d, P_d)}{\partial D_d^2} \right|_{D_d=D_0, P_d=P_0} \\ B = \left. \frac{\partial^2 \dot{M}(D_d, P_d)}{\partial D_d \partial P_d} \right|_{D_d=D_0, P_d=P_0} \\ C = \left. \frac{\partial^2 \dot{M}(D_d, P_d)}{\partial P_d^2} \right|_{D_d=D_0, P_d=P_0} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)求出  $A = -0.0029, B = 1.55 \times 10^{-4}, C = -0.0085$ 。则  $A \cdot C - B^2 = 2.46 \times 10^{-5} > 0$ ,所以回归方程存在极值点,因  $A < 0$ ,所以回归方程存在极大值,即质量流速率最大值  $\dot{M}_{\max} = 1.073 \text{ kg/s}$ 。将得到的质量流速率极值与对应的仿真结果  $1.011 \text{ kg/s}$  进行了对比,相对误差为  $6.133\%$ 。

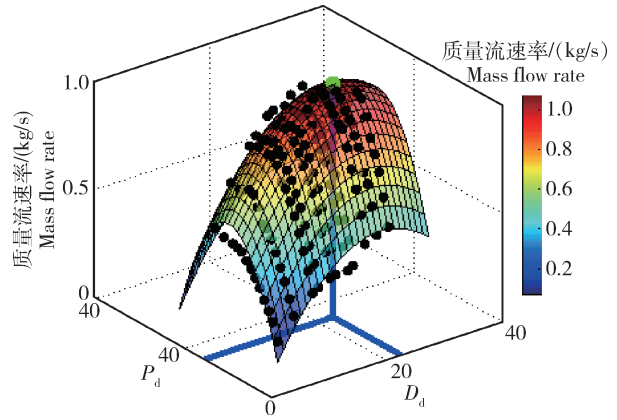


图 6 轴距和螺距对质量流速率影响的优化

Fig. 6 Optimization of influence of shaft distance and screw pitch to mass flow rate

### 3 颗粒运动分析

因双轴的螺旋叶片在工作时不能与轴产生运动干涉,因此双轴的轴距最小取值为  $40 \text{ mm}$ ,此时两轴的叶片是相互交错的,叶片外缘与轴外缘间隙  $1 \text{ mm}$ ,此时并不是  $\dot{M}$  最大的状态。随着轴距增加,  $\dot{M}$  也在增加。这是因为考虑的是水平输送方式,因此轴距越大,有效的输送横截面积越大,两轴中间位置的颗粒会被其他向前运动的颗粒“胁迫”前进,导致  $\dot{M}$  随轴距增大而增大。为了定量的显示螺旋叶片轴对颗粒的扰动影响区域,将 3 种轴距下的双轴稳定输送时,中间段某横截面内颗粒的平动合成速度彩色云图进行了对比分析(图 7)。直观观察发现:不管轴距如何变化,双轴附近的颗粒运动速度很

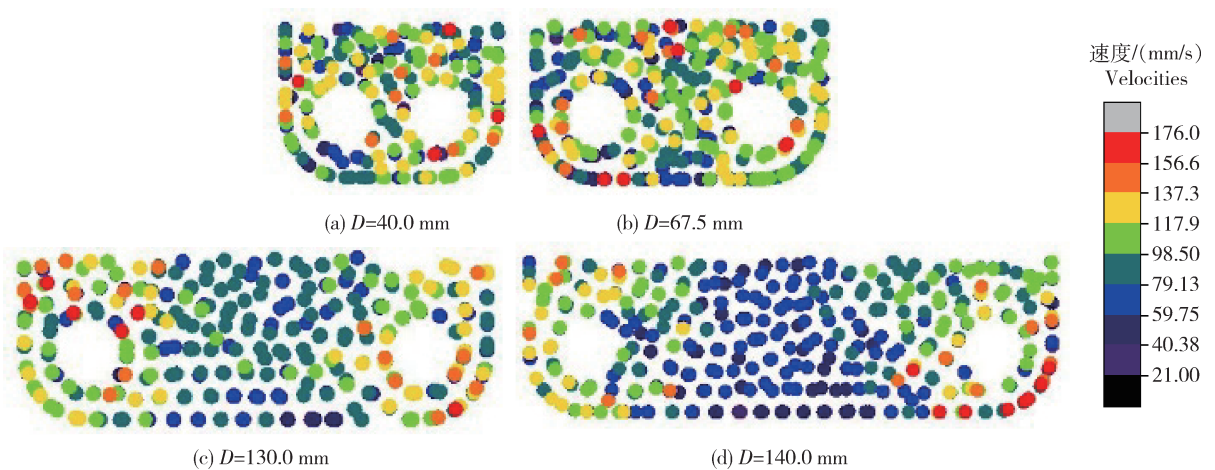


图 7 颗粒平动合成速度对比

Fig. 7 Comparison of translational resultant velocities of particles

明显,颗粒会在螺旋叶片的推动下被向前输送,而在2轴中间位置的颗粒,则当轴距较大时速度明显低于两轴周围位置的颗粒,但是仍会有运动速度。因此,本研究针对颗粒的运动速度与轴距间的定量关系进行分析。

随着双轴轴距的增大,双轴转动对双轴间中心部位的颗粒速度影响减小,为了深入分析颗粒在双轴螺旋输送机筒内的运动特性,揭示颗粒运动与输送效率间的关系,本研究选取螺距 120 mm、4 个不同轴距的双轴螺旋输送机在稳定运输过程中矩形方框(图 8,方框的厚度为 15 mm)区域内的颗粒为研究对象,分析颗粒在 3 个不同时刻下的轴向(X 向)平均速度在横向(Y 轴)位置坐标的分布,并进行了二次多项式拟合(图 9)。对比颗粒轴向速度在 4 种轴距的散点分布图发现:两轴附近位置的颗粒轴向速度较大,而靠近中心位置(两轴中间)的颗粒轴向速度最小。从颗粒轴向速度分布可看出,中间位置颗粒的流动其实是剪切流动的,速度梯度程抛物线形式分布。这种现象随着轴距的增加变得愈加明

显。二次函数拟合曲线获得 4 种轴距双轴输送机筒内,颗粒的最小轴向速度分别为 0.134、0.107、0.087 和 0.042 m/s,可以发现最小轴向速度随着轴距的增加逐渐减小,这证明了随着轴距增加,双轴转动对中间无轴部位的颗粒轴向速度的影响逐渐减小。为进一步探讨拟合所得到的颗粒轴向速度最小

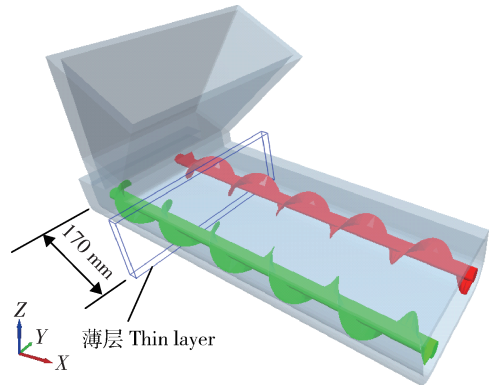


图 8 双轴螺旋输送机切取薄层位置

Fig. 8 Location of thin layer cut on twin-shaft screw conveyor

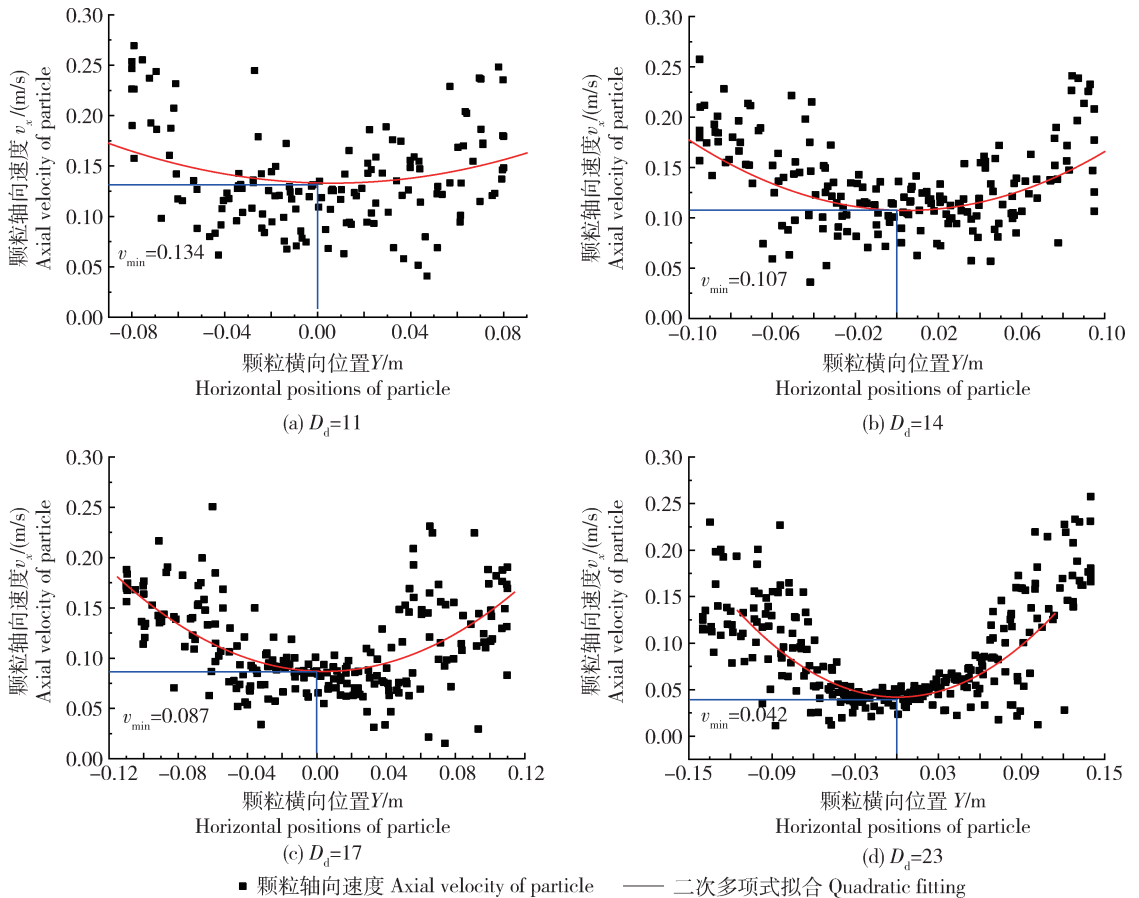


图 9 颗粒轴向速度分布图

Fig. 9 Axial velocity distribution of particles

值与轴距的定量关系,增大螺距取值范围(60、120、180 mm),再次进行上述拟合,将拟合得到的颗粒轴向最小速度与双轴轴距的关系表示于图10。可见在3种螺距工况下的双轴螺旋输送机中间位置颗粒的最小速度值与轴距呈现近似线性的递减关系,随着轴距的增加双轴中心位置颗粒的最小速度也越来越小。通过轴距与最小速度的线性拟合结果发现:随着螺距的增加,双轴中间位置颗粒最小速度的下降趋势越明显。产生这种现象的原因是:在两轴中心位置的颗粒运动的主导因素并非螺旋叶片直接推动,而是由颗粒表面的摩擦作用产生的间接作用。螺距小的叶片轴对与之直接接触的颗粒扰动为连续推进,这种连续推进的速度在相同转速下随着中心距的增大,对中间位置颗粒的速度减小影响并不显著;而当螺距增大,螺旋叶片对与之接触的颗粒作用是间断式的,在螺旋叶片中间存在大量颗粒并非直接受叶片推动前进,而也是靠颗粒间的接触摩擦产生的剪切流动而向前移动,因此这种大螺距的双轴当增大轴距时,中间位置的颗粒速度减小的最为显著。

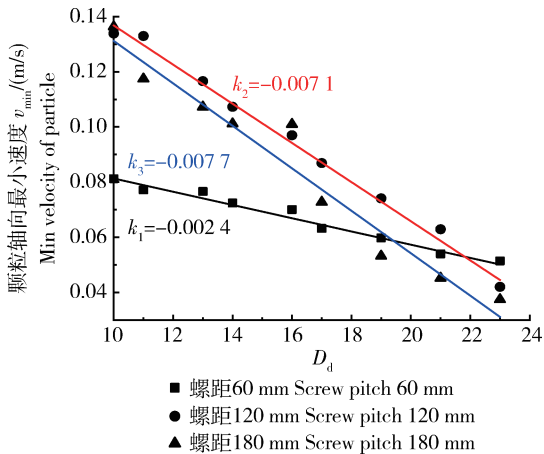


图10 轴距与颗粒轴向最小速度的关系

Fig. 10 Relationship between the shaft distance and the minimum axial velocity of the particles

## 4 结论

本研究利用DEM建立了双轴螺旋输送机模型,从双轴轴距和螺距2个方面进行数值计算,并与单轴试验和仿真结果进行对比,得到轴距和螺距对输送效率,即质量流速率 $\dot{M}$ 的影响规律,并进行了优化分析。得到如下结论:

1) 双轴螺旋输送机2轴的相对转向对输送效率

没有影响。

2) 螺距较小时( $P < 100$  mm),质量流速率 $\dot{M}$ 随着轴距的增加而增加;螺距较大时( $P > 130$  mm), $\dot{M}$ 随轴距增加先增大,然后保持稳定,或略有下降; $\dot{M}$ 随螺距的增加先增大至极大值而后下降,这说明螺距和轴距的选择对于输送效率影响显著,要取值合理,否则会降低效率。

3) 经过拟合得到轴距和螺距与 $\dot{M}$ 之间的二元二次回归方程,并得到回归方程拟合优度 $R^2$ 的值为0.9646;通过轴距和螺距对质量流速率的影响曲面可以看到曲面存在极大值点,计算得到质量流速率最大值与仿真结果相差6.133%。

4) 随着轴距的增大双轴中间位置颗粒的速度近似线性减小,随着螺距的增大双轴中间位置颗粒的最小轴向速度随轴距增加而下降的趋势越明显。

## 参考文献 References

- [1] 罗胜,张西良,许俊,马奎.螺旋不连续加料装置结构优化与性能仿真[J].农业工程学报,2013,29(3):250-257  
Luo S, Zhang X L, Xu J, Ma K. Structure optimization and performance simulation of screw discontinuous feeding device [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3): 250-257 (in Chinese)
- [2] 张西良,马奎,王辉,崔守娟,石云飞.颗粒尺寸对螺旋加料机定量加料性能的影响[J].农业工程学报,2014,30(5):19-27  
Zhang X L, Ma K, Wang H, Cui S J, Shi Y F. Effect of particle size on precision dosing of screw feeder [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(5): 19-27 (in Chinese)
- [3] 邱爱红,龚曙光.变径变螺距螺旋轴参数化模型及性能仿真[J].机械工程学报,2008,44(5):131-136  
Qiu A H, Gong S G. Parametric model and performance simulation on the screw conveyor of variable diameters and variable pitches [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(5): 131-136 (in Chinese)
- [4] 高长银,虞正平,吴晓铃.沥青混合料保温车螺旋输送机结构设计和仿真[J].机械传动,2013,37(7):79-81  
Gao C Y, Yu Z P, Wu X L. Design and simulation of the screw conveyor for asphalt mixing material insulation vehicle [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2013, 37(7): 79-81 (in Chinese)
- [5] Owen P J, Cleary P W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM) [J]. *Powder Technology*, 2009, 193(3): 274-288
- [6] McBride W, Cleary P W. An investigation and optimization of the 'OLDS' elevator using discrete element modeling [J]. *Powder Technology*, 2009, 193(3): 216-234



- [7] 彭飞,李腾飞,康宏彬,张国栋,孔丹丹,王红英.小型制粒机喂料器参数优化与试验[J].农业机械学报,2016,47(2):51-58  
Peng F, Li T F, Kang H B, Zhang G D, Kong D D, Wang H Y. Optimization and experiment on feeder for small-scale pellet mill[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 51-58 (in Chinese)
- [8] 姚艳萍,孟文俊,廖志诚,牛帅帅.平底仓系统水平螺旋输送机效率 EDEM 仿真研究[J].现代制造工程,2015(2):6-11  
Yao Y P, Meng W J, Liao Z C, Niu S S. Study on horizontal screw conveyors efficiency of flat bottomed bins based on EDEM simulation[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2015(2): 6-11 (in Chinese)
- [9] 尹小琴,赵守明,谢俊,吕晓凤.双卧轴搅拌机搅拌臂数目的理论分析[J].武汉理工大学学报,2010,32(23):95-98  
Yin X Q, Zhao S M, Xie J, Lv X F. Theoretical analysis on the number of mixing arms of twin-shaft mixer[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(23): 95-98 (in Chinese)
- [10] 赵利军,冯忠绪.双卧轴搅拌机叶片排列的试验[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(2):94-96  
Zhao L J, Feng Z X. Test of blades arrangement for twin shaft mixer[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2004, 24(2): 94-96 (in Chinese)
- [11] 刘俊荣,朱赞清,俞微微,谢智芬,佟长青,薛长湖.双轴挤出机在低湿挤压过程中操作参数对系统运行稳定性的影响[J].大连水产学院学报,2005,20(2):122-127  
Liu J R, Zhu Z Q, Yu W W, Xie Z F, Tong C Q, Xue C H. The effects of operating parameters on running stability of a twin screw extruder[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2005, 20(2): 122-127 (in Chinese)
- [12] 汪永强.新型断开螺旋双轴搅拌机优化设计方法[J].煤矿机械,2006,27(3):382-383  
Wang Y Q. Optimal design method of new open spiral double-axles mixer[J]. *Coal Mine Machinery*, 2006, 27(3): 382-383 (in Chinese)
- [13] 姜奉新,尹刚.新旧冷却螺旋输送机研制的分析与对比[J].重庆工学院学报:自然科学,2003,17(5):41-42  
Jiang F X, Yin G. Analysis and contrast on the development of the new and old cooling conveying screws[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science*, 2003, 17(5): 41-42 (in Chinese)
- [14] 陈乔松.土压平衡盾构穿越富水砂层双螺旋输送机控制喷涌技术探讨[J].广东土木与建筑,2015,22(1):44-46  
Chen Q S. Discussion of double screw conveyor control spewing technology in the case of earth pressure balance shield through water rich sand[J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2015, 22(1): 44-46 (in Chinese)
- [15] 江玉生,陈冬,王春河,杨志勇,刘品.土压平衡盾构双螺旋输送机力学机理简析[J].隧道建设,2007,27(6):15-18  
Jiang Y S, Chen D, Wang CH, Yang Z Y, Liu P. Mechanical analysis of double screw conveyors in earth pressure balance shield boring[J]. *Tunnel Construction*, 2007, 27(6): 15-18 (in Chinese)
- [16] 刘春飞,李艳洁,王玉.D形截面螺旋输送机输送颗粒物料的实验研究[J].农机化研究,2017,39(8):141-146  
Liu C F, Li Y J, Wang Y. Experimental study on particles conveying in screw conveyor of D-shape cross section[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(8): 141-146 (in Chinese)
- [17] 刘春飞,李艳洁,王玉,徐泳.U形筒螺旋输送机输送颗粒物料的离散元仿真[J].中国农业大学学报,2018,23(6):112-120  
Liu C F, Li Y J, Wang Y, Xu Y. Discrete element simulations on U-shape screw conveyor transporting particle materials[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(6): 112-120 (in Chinese)
- [18] Mindlin D R, Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique force[J]. *Applied Mechanics*, 1953(20): 327-344
- [19] Shackelford J, Alexander W. *Materials Science and Engineering Handbook* [M]. Third Edition. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001: 1567-1708
- [20] 方昆凡.工程材料手册,黑色金属材料卷[M].北京:北京出版社,2002:34-40  
Fang K F. *Engineering Materials Manual, Black Metal Material Volume* [M]. Beijing: Beijing Press, 2002: 34-40

责任编辑:刘迎春