第 23 卷 第 4 期
2017 年 8 月

中国粉体技术
CHINA POWDER SCIENCE AND TECHNOLOGY

Vol. 23 No. 4
Aug. 2017

doi:10.13732/j.issn.1008-5548.2017.04.002

# 供料方式对垂直螺旋输送机性能的影响

余书豪[a]，李永桥[a]，谌永祥[a]，李 翔[b]

(西南科技大学 a 制造科学与工程学院；b 应用技术学院，四川 绵阳 621010)

**摘要**：为了研究供料口处物料呈现的不均匀现象，分别建立了重力型和水平型 2 种供料方式下的垂直螺旋输送机计算模型，采用离散元法，借助 EDEM 软件，通过试验和标定的方式对模拟参数，如进口速度、时间步长和颗粒属性参数进行确定，进而确保模型和参数选取的可行性；分别对 2 种供料方式进行模拟，以颗粒数标准偏差为评价指标。结果表明：与重力型供料相比，在相同的操作条件下，水平型供料方式在供料口取样区域的物料不均匀度更高，物料输送的均匀性更低，螺旋转速的改变对 2 种供料方式下取样区域颗粒质量分布的均匀性影响较大，针对重力型和水平型供料方式给出了结构改进建议。

**关键词**：垂直螺旋输送机；供料方式；离散元法；力链网络；颗粒不均匀度

**中图分类号**：TB44；TQ022.3 **文献标志码**：A

**文章编号**：1008-5548(2017)04-0006-07

## Influence of feeding mode on performance of vertical screw conveyor

YU Shuhao[a], LI Yongqiao[a],
CHEN Yongxiang[a], LI Xiang[b]

(a.School of Manufacturing Science and Engineering; b Applied Technology School, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: In order to research the phenomeno of uneven conveying, two calculation models with different feeding mode of vertical screw conveyor were built, those were gravity type and horizontal type. The discrete element method and the software of EDEM were used. The simulation parameters, such as inlet velocity, time step and granule attribute parameters, were identified, thus the feasibility of model and parameters were ensured. The two models were simulated respectively. Standard deviation of number of granules was selected as the evaluation index. The results show that compared with the gravity type, granules of sampling region in the feeding rim of the horizontal feeding mode have higher evenness and lower transporting uniformity. This two feeding modes are significantly affected by screw rotation. Some advice is given for the improvement of the two feeding types. The study results have a certain preference for the structure design of feeding rim in the screw conveyor.

Keywords: vertical screw conveyor; feeding mode; discrete element method; force chain; granules unevenness

螺旋输送机的数值模拟方法具有成本低、效率高的特点，便于分析物料颗粒的运动特征。近年来，Shimizu 等[1]最早通过离散元方法模拟水平和垂直螺旋输送机，对不同模型下的力矩、功耗进行分析。Owen 等[2]利用离散元方法预测了螺旋输送机的性能，讨论了操作参数对其性能的影响。Cleary[3]对物料颗粒的形状进行研究，分析不同物料颗粒对质量流量、颗粒流态及能量消耗等的影响。Hou 等[4]对螺旋喂料器颗粒之间的团聚力进行研究，指出颗粒质量流量是团聚力和螺旋转速的函数关系。史嵩等[5]利用离散元方法模拟了孔式排种器，选取不同型孔结构的排种器，分析各个排种器在不同转速条件下，种群内摩擦力的变化情况。孟文俊等[6]对周期边界条件和全尺寸模型 2 种计算模型对垂直螺旋输送机中颗粒流动进行了模拟分析。刁雄等[7]对超细分级机的进料方式进行研究，并对上进料方式采用机械散料盘来提高速度分布的均匀性。上述关于螺旋输送机的研究主要体现在颗粒的输送段，进料段的物料流动特征的研究很少，而进料端对输送机性能影响较大，因此，螺旋输送机供料结构的研究具有重要的现实意义。

本文中以垂直螺旋输送机为研究对象，选取大米为输送物料，首先建立垂直螺旋输送机的几何模型，并分析水平型和垂直型 2 种常见的供料方式，利用离散元方法对物料在垂直螺旋输送机中的输送过程[8-9]进行数值模拟，对进料口的物料质量浓度、分布的不均匀度等进行定量分析，对物料颗粒的特性进行定性分析。

收稿日期：2016-05-13，修回日期：2017-03-13。
基金项目：四川省教育厅资助科研项目，编号：17ZB0444。
第一作者简介：余书豪(1991—)，男，硕士研究生，研究方向为垂直螺旋输送机的仿真与优化、先进制造技术。E-mail：1538733737@qq.com。
通信作者简介：谌永祥(1958—)，男，硕士，教授，硕士生导师，研究方向为先进制造技术。E-mail：cyx@swust.edu.cn。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 1　数值计算方法

### 1.1　控制方程及其求解

颗粒流中单个颗粒的运动是由移动和转动 2 种运动合成的结果。颗粒运动中不考虑扰动波传播对颗粒的影响，可用牛顿第二定律描述单个颗粒的运动。对于单个颗粒，记作 $i$，其相邻作用的颗粒或几何体边界为 $j$、$k$，其控制方程[10]为

$$m_i\frac{\mathrm{d}\vec{v}_i}{\mathrm{d}t}=\sum_j\overrightarrow{F^{c}_{ij}}+\sum_k\overrightarrow{F^{nc}_{ij}}+\overrightarrow{F^{f}_{i}}+\overrightarrow{F^{g}_{i}}, \tag{1}$$

$$I_i\frac{\mathrm{d}\omega_i}{\mathrm{d}t}=\sum_j M_{ij}。 \tag{2}$$

式中：$m_i$ 为颗粒 $i$ 的质量，kg；$v_i$ 为颗粒 $i$ 的移动速度，m/s；$I_i$ 为颗粒 $i$ 的转动惯量，kg·m²；$\omega_i$ 为颗粒 $i$ 的角速度，rad/s；$t$ 为颗粒运动时间，s；$F^{c}_{ij}$ 为颗粒 $i$ 与颗粒 $j$ 或壁面的接触力，N；$M_{ij}$ 为颗粒 $i$ 与颗粒 $j$ 或壁面作用的转矩，N·m；$F^{nc}_{ij}$ 为颗粒 $i$ 与 $j$ 颗粒或其他颗粒作用的非接触力，N；$F^{f}_{i}$ 为颗粒 $i$ 与流体的相互作用力，N；$F^{g}_{i}$ 为颗粒 $i$ 的重力，N。

### 1.2　求解参数的确定

#### 1.2.1　时间步长的设定

离散元仿真所需实际时间并不是固定的，而是随着计算机的计算能力和所用的仿真模型[11]有关。瑞利（Rayleigh）时步是 EDEM 仿真中的一个关键参数，它是表示剪切波在固体粒子中传播所占用的时间。瑞利时间步长 $T_R$ 的计算为

$$T_R=\pi R\left(\frac{\rho}{G}\right)^{\frac{1}{2}}/(0.1631\upsilon+0.8766), \tag{3}$$

式中：$R$ 为颗粒半径，mm；$\rho$ 为密度，kg/m³；$G$ 为剪切模量，Pa；$\upsilon$ 为泊松比。

为了选取合适的步长，采用试验模拟的方法。根据研究经验，选取平均颗粒速度和平均质量流量作为时间步长的评价指标。根据时间步长的推荐区间，选取 20%$T_R$、25%$T_R$、30%$T_R$、35%$T_R$、40%$T_R$ 5 组数据进行模拟试验，设定螺旋转速为 600 r/min，填充率为 50%，进口速度为 1 m/s，EDEM 软件内部按照式（1）、（2）进行仿真计算。时间步长对输送机性能的影响如表 1 所示。从 20% $T_R$ 至 40% $T_R$ 的变化区间内，平均颗粒速度的最大变化率是 0.32%；而对于平均质量流量，则是 0.32%。因此，时间步长对平均颗粒速度的影响较小。为了研究的方便，在保证较大的质量流量的同时，选择瑞利时间步长的 20%作为模拟求解时间步长。

表 1　时间步长对输送机性能的影响

Tab. 1　Influence of time-step on performance of conveyor

| 时间步长 | 颗粒速度/（m·s⁻¹） | 质量流量/（kg·s⁻¹） |
|---|---|---|
| 20% $T_R$ | 0.751 9 | 0.039 63 |
| 25% $T_R$ | 0.752 4 | 0.039 61 |
| 30% $T_R$ | 0.752 4 | 0.039 26 |
| 35% $T_R$ | 0.754 3 | 0.039 26 |
| 40% $T_R$ | 0.752 8 | 0.394 9 |

#### 1.2.2　供料进口速度的设定

为了考察进口速度对输送过程的影响程度，根据经验，优选进口速度参数分别为 0.3、1、1.5、3 m/s，选用平均颗粒速度、平均质量流量 2 个性能参数作为评价指标。设定时间步长为 20% $T_R$，螺旋转速为 600 r/min，填充系数为 50%，为了排除不同量纲之间的影响，对进口速度进行无量纲处理，进口速度对输送性能的影响如表 2 所示。对比质量流量、颗粒速度的大小，表明进口速度对输送流量、平均速度相对偏差远远小于 10%，故认为进口速度对输送性能影响可忽略不计。考虑输送中较大的质量流量，选取进口速度无量纲数值为 0.3，即取进口速度的数值为 1 m/s。

表 2　进口速度对输送性能的影响

Tab. 2　Influence of input velocity on performance of conveyor

| 无量纲进口速度 | 质量流量/（kg·s⁻¹） | 质量流量/（kg·s⁻¹） |
|---|---|---|
| 0.1 | 0.039 0 | 0.751 1 |
| 0.3 | 0.03 6 | 0.752 |
| 0.5 | 0.039 4 | 0.750 9 |
| 1 | 0.036 3 | 0.752 0 |

#### 1.2.3　物料特性参数的标定

对于物料的特性参数，通过测量其在实际下落时形成的自然堆积角获取。试验中选取 0.5 kg 大米颗粒，利用硬纸折成一个立方体容器，容器的上方为进料口，侧边是可以打开的。试验开始将侧边粘好，再将物料倒入立方体容器，倾倒完成后将侧边打开，可以看到物料在其重力和摩擦力的作用下滑落。当落料完成后，通过测定倾斜面对应的竖直和水平高度，得出物料颗粒的自然堆积角为 26.5°。通过对比经验数据，发现这一个参数的取值是可行的。

通过 EDEM 软件建立上述容器模型，并对物料颗粒[12]设定参数：大米的泊松比为 0.3，杨氏模量为 $2.3\times10^7$ Pa，物料滚动摩擦系数为 0.01；物料与输送机

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的恢复系数为 0.5，静摩擦系数为 0.5，滚动摩擦系数为 0.01，输送机所用材料为钢材，密度为 7 850 kg/m$^3$，泊松比为 0.3，杨氏模量为 $1.0\times10^{10}$ Pa。需要标定的参数是物料颗粒的恢复系数、堆积密度和静摩擦系数，根据机械设计手册，堆积密度选用 700、750 kg/m$^3$；恢复系数选取 0.1、0.2、0.3；静摩擦系数选取 0.5、0.6、0.7。待仿真计算完成，通过 EDEM 的后处理器中的量角器测量物料颗粒的自然堆积角，找到与实验得出的堆积误差最小的试验组。初始下落时颗粒状态如图 1 所示，下落完成时颗粒状态如图 2 所示，即得到了与真实颗粒对应物料属性，即恢复系数为 0.2，静摩擦系数为 0.7，堆积密度为 700 kg/m$^3$。

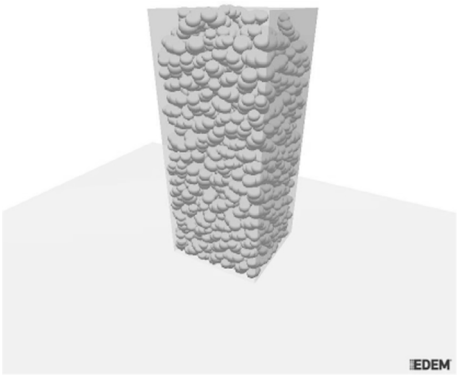



图 1 初始下落时颗粒状态

Fig. 1 Initial state of granules

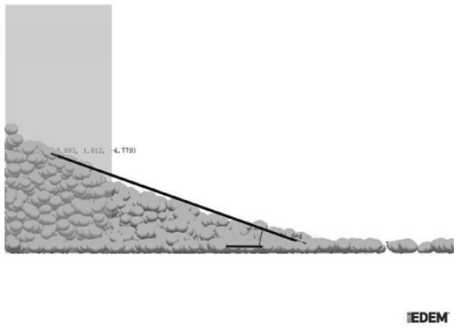



图 2 下落完成时颗粒状态

Fig. 2 Final state of granules

## 2 算例验证

为了验证所建立模型的正确性，选取与文献[2]相同的参数和模型。选取螺旋转速为 1 000 r/min，填充系数为 30%，时间步长为 20%$T_R$，进行模拟分析，得出颗粒的平均输送速度和平均输送流量。不同转速下平均质量流量对比如表 3，不同转速下颗粒平均速度对比如表 4 所示。质量流量和颗粒平均速度相对于 Roberts 实验数据的平均误差分别为 6.93%和 9.43%，误差存在的原因主要是由于选择物料颗粒的大小、形状与实际物料是一致的，但在建立物料的几何模型时只是建立一个颗粒，在颗粒生成中实际与这个颗粒完全相同的颗粒，而在实际试验中的颗粒之间是存在差异的，因此会有误差出现。虽然存在这样大的计算偏差，但这个精度可以足够达到工程应用的要求，因此模型建立和参数选取是可行的。

表 3 不同转速下平均质量流量对比

Tab. 3 Comparison of mass flow rate under different velocity

| 算例 | 转速/(r·min$^{-1}$) | | |
|---|---|---|---|
| | 600 | 1 000 | 1 400 |
| DEM 模拟 | 0.021 6 | 0.047 2 | 0.069 1 |
| 文献[13] | 0.023 1 | 0.050 7 | 0.074 6 |
| 文献[2] | 0.024 1 | 0.051 7 | 0.075 3 |
| 文献[14] | 0.028 3 | 0.058 8 | 0.079 7 |

表 4 不同转速下颗粒平均速度对比

Tab. 4 Comparison of average velocity under different velocity

| 算例 | 转速/(r·min$^{-1}$) | | |
|---|---|---|---|
| | 600 | 1 000 | 1 400 |
| DEM 模拟 | 0.531 | 0.753 | 1.047 |
| 文献[13] | 0.493 | 0.706 | 0.919 |
| 文献[2] | 0.501 | 0.728 | 0.931 |
| 文献[14] | 0.508 | 0.713 | 0.935 |

## 3 试验物理模型和边界条件

### 3.1 试验物理模型

所研究的供料方式分别是重力型和水平型。重力型供料即物料颗粒通过沿着重力方向下落的方式喂入，通过导流装置将物料输送到螺旋输送机的供料口，等待输送；水平型供料即通过一定的方式(气力、水平螺旋等)使物料颗粒获得水平速度，通过水平导流装置将物料输送到供料口，等待输送。重力型供料的螺旋输送机的螺旋叶片外径为 100 mm，机筒的外径是 104 mm，叶片与筒壁间隙 1 mm，机筒壁厚 1 mm，螺旋轴直径 30 mm，螺距 75 mm，螺旋叶片厚 2 mm，螺旋长度 300 mm，螺旋头数 1，喂料漏斗上部开口直径 100 mm，下部开口直径 40 mm，高度 40 mm，导管的内径 40 mm，接口处距机壳的底端

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

距离 20 mm，倾角 40°，出口处长度 30 mm，直径 40 mm，壁厚 1 mm。水平型供料的螺旋输送机的进口处导管长度 75 mm，进口直径 40 mm，其余尺寸与重力型供料的尺寸一致。重力型供料方式的结构如图 3 所示，三维模型如图 4 所示，水平型供料方式的三维模型如图 5 所示。

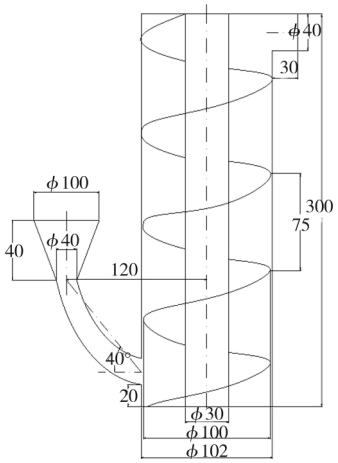



图 3　重力型供料结构

Fig. 3　Configuration of gravity feeding type

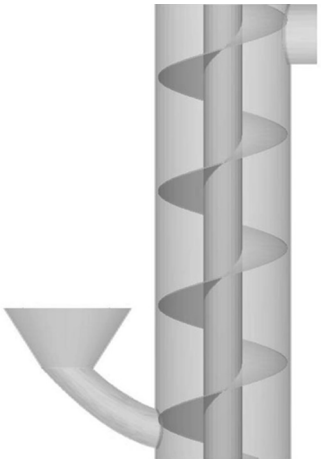


图 4　重力型三维模型

Fig. 4　Geometry of gravity feeding type

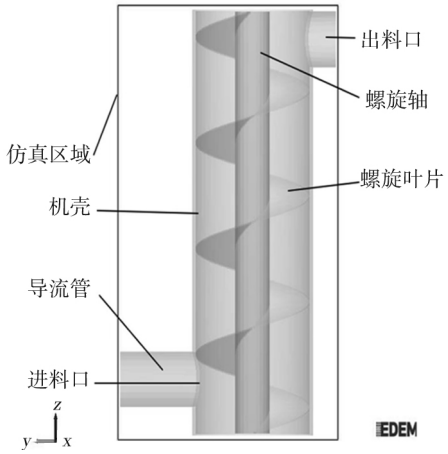



图 5　水平型三维模型

Fig. 5　Geometry of horizontal feeding type

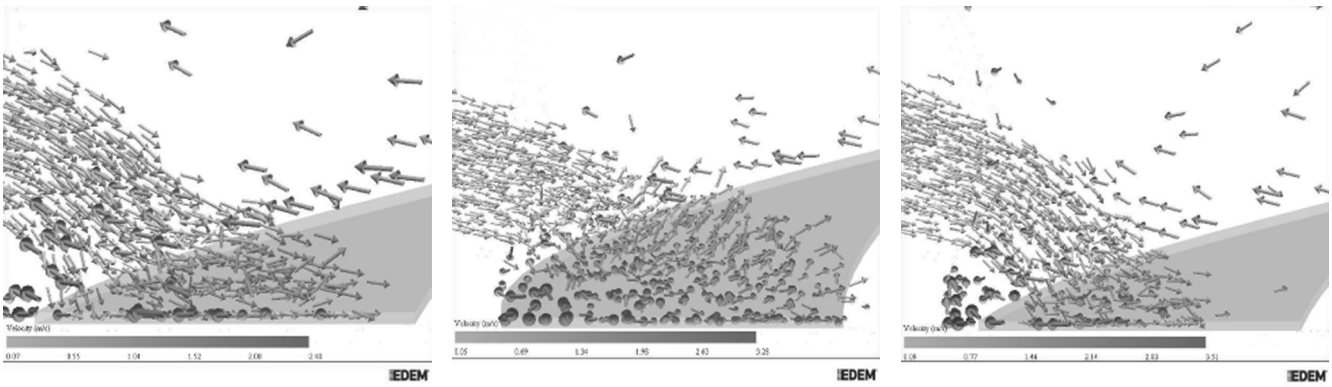
### 3.2　边界条件

导入三维模型后，需要设置边界条件：对输送机的螺旋轴、螺旋叶片和筒壁设为壁面条件，对颗粒盘设为虚拟壁面条件。入口的颗粒粒径分布为正态分布，颗粒平均半径为 1 mm，标准差为 0.05，颗粒产生的位置是在颗粒盘上随机的，颗粒产生的速率为每秒 $10^4$ 个，螺旋叶片的转速按照试验设计工况进行。由于 EDEM 求解效率与仿真区域的大小直接相关，因此为了使网格单元数小于 $10^5$ 个，通过不断尝试，在保证单元大小是 24 倍的颗粒平均半径基础上，最终确定对重力型供料输送机划分为 96 600 个网格单元。对水平型供料输送机划分为 99 792 个网格单元，从而保证求解的可行性和准确性。

## 4　供料口物料模拟分析

### 4.1　供料口物料速度的变化分析

2 种供料方式下物料运动轨迹如图 6、图 7 所示。对于重力型，随着转速的增加，颗粒的平均速度增加，且单位时间内颗粒与螺旋叶片的接触点数增加。同时，由于螺旋体作用，因此颗粒的运动方向和位置改变，这种现象在颗粒靠近筒壁的堆积集中区比较明显，原因是靠近筒壁颗粒的受力以离心力为主，颗粒速度较大，当与颗粒发生法向或切向接触时，引起颗粒的速度方向和大小发生变化。

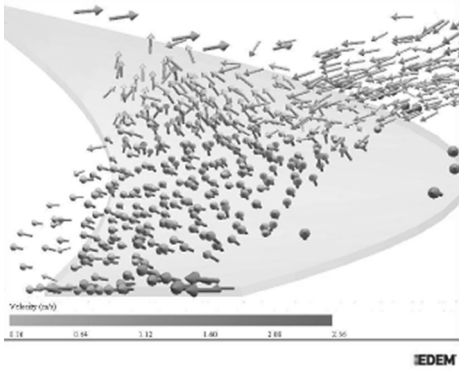



a 500 r/min　　b 550 r/min　　c 600 r/min

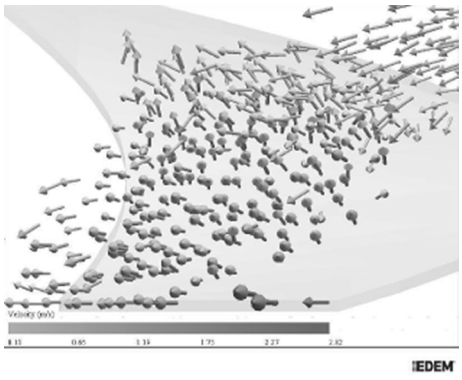
图 6　重力型供料方式下的物料运动轨迹

Fig. 6　Trajectory of particles under gravity feeding type

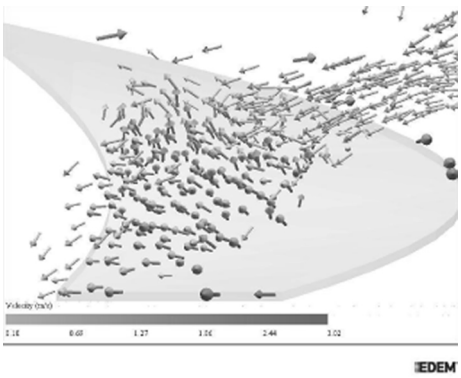
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



a 500 r/min



b 550 r/min



c 600 r/min

**图 7 水平型供料方式下的物料运动轨迹**

**Fig. 7 Trajectory of particles under horizontal feeding type**

对于水平型供料方式，同样存在上述现象。从力链网络[15]的角度分析，当颗粒流进入供料口与螺旋叶片交汇之前，颗粒流中存在着强力链和弱力链（通过法向接触力的显示方式可以看出），强力链个数不多，却很好地分布在弱力链之间，对整个力链网络起支撑作用，因此，随着转速的增加，颗粒与螺旋叶片作用载荷的变化频率增加，导致颗粒的体积分率发生变化，从而影响力链的稳定性。这也印证了力链网络的稳定性主要受颗粒表面摩擦系数和颗粒体积分率影响，当颗粒的材料选定之后，颗粒表面的摩擦系数是一固定值，因此，颗粒体积分率是影响力链网络稳定的关键因素。

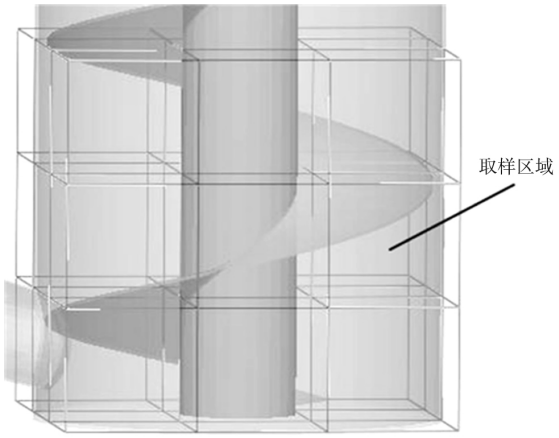



**图 8 取样区域**

**Fig. 8 Sampling region**

### 4.2 供料口物料质量分布

#### 4.2.1 取样区域选取方法

螺旋输送机的主要目标是为了保证输送消耗较低的同时拥有较大的输送量。在输送消耗一定的情况下，输送单位时间内具有较大且稳定的质量流量是理想的效果，因此，对供料口的物料来说，稳定的颗粒流对输送机的整体输送是前提条件。为了定量分析供料口物料和输送均匀程度，选取距离输送机底端的高度为 100 mm，长度和宽度分别为 100 mm 的立方体区域为研究对象。将此区域平均划分为 3×3×3，即 27 个小区域作为 27 个样本点，如图 8 所示。

#### 4.2.2 供料口物料均匀性分析

采用颗粒数标准偏差来表征颗粒质量或浓度分布的均匀性，不均匀度公式为

$$E=\frac{1}{n-1}\left[\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i-\bar{x}}{\bar{x}}\right)^2\right], \quad (4)$$

式中：$E$ 为不均匀度；$x_i$ 为样本点 $i$ 的颗粒数；$\bar{x}$ 为样本点平均颗粒数；$n$ 为样本的数目。其中，$E$ 越大，表示颗粒浓度分布越不均匀；$E$ 越小，表示颗粒浓度分布越均匀。以螺旋输送机供料口物料质量分布的不均匀度为分析对象，分析 2 种供料方式达到稳定后取样区域的物料，讨论颗粒质量分布的均匀性，转速对不均匀度的影响结果如图 9 所示。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

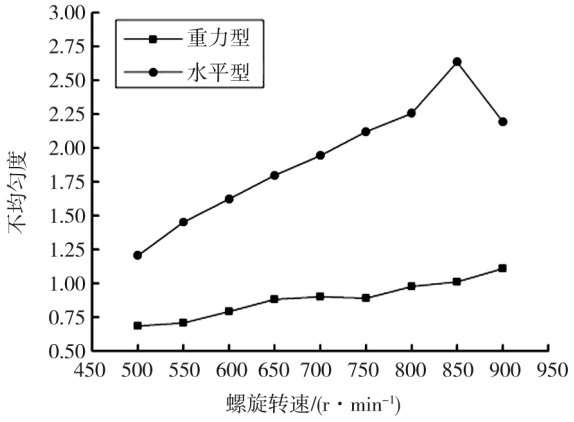



图 9　转速对不均匀度的影响

Fig. 9　Influence of screw velocity on unevenness

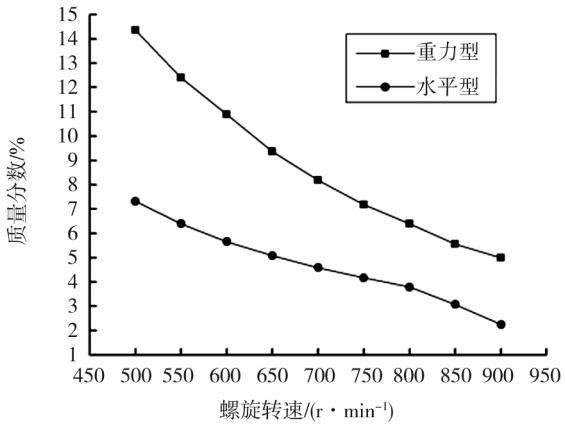



图 10　转速对质量分数的影响

Fig. 10　Influence of screw velocity on mass fraction

当进口速度为 1 m/s，填充系数为 70%，时间步长为 20%$T_R$，从图中拟合曲线的趋势可知：相比于重力型，水平型供料方式在供料口取样区域的不均匀度值偏高，当转速在 500~900 r/min 范围时，水平型供料方式的不均匀度有增加的趋势，而重力型的不均匀度保持平稳。由上述对不均匀度的定义可知，不均匀度数值越大，颗粒的浓度分布越均匀，因此，重力型供料方式的浓度分布较之水平型供料方式更加均匀。从颗粒速度方向分析，对于重力型颗粒随导流装置进入供料口时速度方向与水平方向有一定的角度，在与螺旋叶片接触时，颗粒受到重力和摩擦力、离心力综合作用，颗粒的速度分量损失较少，转而进行轴向运动和沿螺旋轴中心线的圆周运动。

对于水平型颗粒随导流装置进入供料口时，大部分物料在与螺旋叶片接触时，速度矢量是水平的，而螺旋叶片和重力的作用需要颗粒速度矢量产生轴向的速度，因此颗粒的速度损失较大，且速度的取向发生明显的改变。随着螺旋转速的增加，颗粒与螺旋叶片的接触更加频繁，导致整个供料口取样区域的质量分布发生质的改变。

转速对质量分数的影响如图 10 所示，其中，质量分数是指在样本点处的颗粒质量占整个样本质量的比值。当进口速度为 1 m/s，填充系数为 70%，时间步长为 20%$T_R$，从图中拟合曲线趋势可知，随着螺旋转速的增加，供料口取样区域的质量分数是减小的，这是因为转速的增加，螺旋叶片与颗粒的作用频率加快，颗粒获得脱离取样区域的概率增加。

综上分析，对于重力型供料，选定出导管的最佳倾角能够增加输送均匀性。对于水平型供料，可适当增加导流装置的直径，进而增加输送量，从而提高供料口处的输送均匀性，但会增加输送能耗。

## 5　结论

1) 考察了时间步长、进口速度对螺旋输送机输送性能的影响，确定时间步长为 20%瑞利时间步长，进口速度为 1 m/s。

2) 提出利用不均匀度来表征物料输送的稳定性和均匀性。在同等条件下，与重力型相比，水平型供料方式在供料口取样区域的物料不均匀度更高，物料输送的均匀性更低。

3) 螺旋转速的改变对 2 种供料方式下取样区域颗粒质量分布的均匀性影响较大，并针对重力型、水平型供料方式分别给出的建议是选出导管的最佳倾角，适当增加导流装置的直径。

## 参考文献 (References)：

[1] SHIMIZU Y, CUNDALL P A. Three-dimensional DEM simulation of bulk handling screw conveyors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(9):864–672.

[2] 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.

[3] CLEARY P W. DEM modeling of particulate flow in a screw feeder[J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, 2007, 7(2/3/4):128–138.

[4] HOU Q F, DONG K J, YU A B. DEM study of the cohesive particles in a screw feeder[J]. Powder Technology, 2014, 256:529–539.

[5] 史嵩，张东兴，杨丽，等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报，2015，31(3)：62–69.

[6] 孟文俊，赵占一，郭宇航，等. 周期性边界条件下垂直螺旋输送机颗粒流数值模拟[J]. 中国粉体技术，2016，22(1)：28–32.

[7] 刁雄，李双跃，黄鹏. 进料方式对超细分级机性能的影响[J]. 化工学报，2012，63(12)：3818–3825.

(下转第 16 页)



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

试验过程中，采取人工的方法将末页岩颗粒投放到料斗中，观察样机料斗内物料变化，发现人工给料速度不足以满足输送机最大输送量要求，人工给料速度约为 6 t/h，估计样机最大输送量为 8~9 t/h。样机输送量的仿真数据和试验数据差别较大，分析原因是：仿真采用的模型颗粒为半径 3 mm 的圆球体，物料流动性更好，试验采用的末页岩颗粒外形复杂、粒度分布广，输送过程阻力更大。从实际运行看，在没有强迫给料装置和中间轴承的情况下，外筒旋转型垂直螺旋输送机的输送效果良好。

## 5 结论

本文中设计了一款外筒旋转型垂直螺旋输送机，通过仿真分析和试验研究的方法得到以下结论：

1）通过改变外筒转速，可以调节外筒旋转型垂直螺旋输送机的填充率、输送量、驱动功率和能耗效率。外筒转速越大，填充率越小；仿真模型的外筒转速低于 160 r/min 时，输送量随外筒转速增大而增大，当外筒转速大于 160 r/min 时，进料效率下降，输送量呈减小趋势；驱动功率随外筒转速增大而增大；能耗效率随外筒转速增大而降低。

2）相对于传统垂直螺旋输送机，外筒旋转型垂直螺旋输送机不需要强迫式给料装置，在一定输送高度内不需要中间轴承，结构更加简单。

3）外筒旋转型垂直螺旋输送机能够做到低转速输送物料，低速输送情况下设备磨损量小，设备寿命增加；低速输送情况下外筒旋转型垂直螺旋输送机能耗效率更高、更加节能。

## 参考文献（References）：


[1] 王鹰. 连续输送机械设计手册[M]. 北京：中国铁道出版社，2001：734–783.

[2] 乌兰图雅. 螺旋输送装置的研究现状及未来发展[J]. 农机化研究，2014，36（11）：244–248.

[3] 陈敏. 垂直螺旋输送槽内物料颗粒群力学特性研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2013.

[4] 涂德浴，许爱华，陈欣，等. 生物质螺旋输送过程静力学分析及数值模拟[J]. 机械设计，2015，32（4）：81–86.

[5] 程敬爱，孟文俊，张启胤. 散体在垂直螺旋输送机内流动性研究[J]. 机械工程与自动化，2012，41（6）：1–3.

[6] 孟文俊，王晓竑. 垂直螺旋输送机内物料的运动密度研究[J]. 硫磷设计与粉体工程，2009（3）：24–28.

[7] 高健. 螺旋输送机理及设计方法的研究[D]. 太原：太原科技大学，2014.

[8] 余书豪，谌永祥. 螺旋叶片对垂直螺旋输送机性能的影响[J]. 中国粉体技术，2016，22（3）：99–102.

[9] 李整民. 垂直螺旋输送机参数的分析[J]. 机械设计，1986，3（5）：22–28.

[10] 张陈，郭维城，张凯，等. 垂直螺旋输送机设计参数确定与优化[J]. 机械设计与制造，2010，48（10）：56–58.

[11] 乌兰图雅，王春光，赵圆圆. 螺旋输送装置转速和喂入量对输送性能的影响试验研究[J]. 农机化研究，2015，37（7）：206–212.

[12] 陈汝超，陈晓平，蔡佳莹，等. 粒煤螺旋输送特性试验研究[J]. 煤炭学报，2012，37（1）：154–157.

[13] 李晓阳，王春光. 玉米秸秆在 LS 型螺旋输送机上的性能试验研究[J]. 农机化研究，2015，37（2）：161–165.

[14] 李海燕. 基于 EDEM 的垂直螺旋输送机性能参数仿真研究 [D]. 太原：太原科技大学，2011.

[15] 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.


（上接第 11 页）


[8] 魏群. 垂直螺旋输送过程中物料动力学分析 [J]. 能源技术与管理，2016，41（1）：14–16.

[9] 赵占一，孟文俊，孙晓霞，等. 垂直螺旋输送机中颗粒速度的分布[J]. 过程工程学报，2015，15（6）：909–915.

[10] 王国强，郝万军，王继新. 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.

[11] 邱爱红，龚曙光，谢桂兰，等. 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.

[12] 张西良，马奎，王辉，等. 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）：19–25.

[13] ROBERTS A. W，WILLIS A H. Performance of grain augers[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，1962，176（8）:165–194.

[14] 李海燕. 基于 EDEM 的垂直螺旋输送机性能参数仿真研究[D]. 太原：太原科技大学，2011.

[15] 孙其诚，王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京：科学出版社，2009：59–120.


(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net