

# 等径变距螺旋结构与仿真

## Pitch design and simulation analysis of variable pitch spiral structure

李飞翔<sup>1</sup> 宗向东<sup>2</sup> 李永祥<sup>1</sup> 付俊辉<sup>2</sup>

LI Fei-xiang<sup>1</sup> ZONG Xiang-dong<sup>2</sup> LI Yong-xiang<sup>1</sup> FU Jun-hui<sup>2</sup>

(1. 河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 登封市轩程控设备有限公司, 河南 登封 452470)

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Dengfeng Qimingxuan Program Control Equipment Co., Ltd., Dengfeng, Henan 452470, China)

**摘要:**提出了一种新的等径变距螺旋结构设计法以提高小麦粉螺旋给料精度,采用 Solidworks 软件建立三维模型并以小麦粉物料对其进行离散元仿真,观察螺旋进料段下料量及料口流量的稳定性,并与常规等径变距螺旋结构进行对比分析。试验表明,相比现有等距螺旋结构,在相同转速及外径下,试验设计的变距螺旋进料段下料均匀,其螺旋给料流量为 0.224 kg/s,流量波动范围为 0.207~0.239 kg/s,波动百分比为  $\pm 6.69\%$  以内,在满足设计要求的前提下,其精度较常规等距螺旋高。

**关键词:**等径变距;螺距设计;离散元;质量流量;稳定性

**Abstract:** A new design method of spiral structure with equal diameter and variable pitch is proposed to improve the spiral feeding accuracy of wheat flour. Solidworks software is used to establish a three-dimensional model and the wheat flour material is used for discrete element simulation to observe the feeding amount and feed opening of the spiral feed section. The stability of the flow rate is compared with the conventional equal-diameter variable pitch spiral structure. The tests shows that, compared with the existing equidistant spiral structure, the experimental design of the variable pitch spiral feed section is uniformly fed at the same speed and outer diameter, with the spiral feed flow rate of 0.224 kg/s, the flow fluctuation ranging from 0.207 to 0.239 kg/s, and the fluctuation percentage within  $\pm 6.69\%$ . Under the premise of meeting the design requirements, its accuracy is higher than that of the conventional equidistant spiral.

**Keywords:** spiral structure variable; pitch design; parameter calibration; discrete element; mass flow

**基金项目:**国家重点研发计划项目(编号:2018YFD0400704);河南省科技厅自然科学基金项目(编号:182102110163)

**作者简介:**李飞翔,男,河南工业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**李永祥(1960—),男,河南工业大学教授,博士生导师,博士。E-mail:liyongxiang@haut.edu.cn

**收稿日期:**2020-04-07

螺旋给料装置常常被用于粉体物料的定量给料中,为解决小麦粉螺旋进料段下料不均匀问题,国内外学者在螺旋结构上进行了大量研究。郝友莉等<sup>[1]</sup>针对粉体夹气输送效率低的问题,基于变距螺旋结构设计方法设计了四段式变螺距螺杆,提高了系统的包装效率。Orifice 等<sup>[2]</sup>基于离散单元法对螺旋输送机中物料颗粒的体积流量与螺旋轴尺寸及物料颗粒与壁面摩擦系数间的关系进行了研究,确定了螺旋输送机的最佳结构参数,最大限度地提高了输送效率。Pezo 等<sup>[3]</sup>基于离散元法对 5 种不同长度的改进型水平单螺距螺旋输送机进行了研究,针对输送中的辅助混合进行了优化设计,并以透明外筒进行试验分析,建立了预测混合质量的数学模型。

常规的等径等距螺旋装置,其粉体在料斗内会出现死区现象<sup>[4-5]</sup>。赵冬梅等<sup>[6]</sup>针对螺旋输送机出料口方向物料不均的问题,采用变距设计并提出了一种指数型拟合法,通过离散单元法对变距螺旋结构性能指标进行了分析,并对输送性能较佳的指数型方法设计了变距参数界面。Bates 等<sup>[7]</sup>针对螺旋进料段下料不均的问题,对不同螺距形式物料下料的流动特性进行了分析,概述了物料在料斗中的运动规律并对其进行了理论研究,为不同结构螺距的选取设计提供了理论依据。Fernandez 等<sup>[8]</sup>针对螺距设计大多基于分析模型而无法实现料斗内物料流型预测的问题,采用离散元法(DEM)对水平螺旋给料机系统中的颗粒输送进行了预测,研究了不同螺距对料斗颗粒流量、下料均匀度、螺距磨损及壁摩擦变化的影响。

试验拟提出一种新的等径变距螺旋结构设计法以提高小麦粉螺旋给料的精度,对螺距与螺旋轴向距离间关系进行假设分析,根据所得螺距设计方程及设计要求,采用 Solidworks 软件建立三维模型并以小麦粉物料对其进行离散元仿真,观察螺旋进料段下料量及料口流量的稳定性,并与等距螺旋结构进行对比分析,旨在为解决小麦

粉螺旋进料段下料不均匀的问题。

## 1 变螺距设计

### 1.1 基本理论

等径变距螺旋结构工作时,其物料在料筒内的运动状态非常复杂,为分析料筒内物料运动变化规律,在建立变距螺旋轴参数化模型前需进行合理假设<sup>[9]</sup>:

- (1) 不考虑物料压实现象。
- (2) 螺旋物料的轴向速度同螺旋叶片的轴向速度相同。

将螺旋轴向定为  $x$  坐标轴方向(见图1),  $x$  轴上一点相当于垂直于螺旋轴的一个截面,其原点定于螺旋始端,螺旋叶片转角  $\alpha$  为  $x$  的函数  $\alpha = f(x)$ 。

设  $v$  为物料轴向速度,则在  $x$  截面任一点  $P$  的物料轴向速度表示为  $v_p$ , 根据流量定义有:

$$Q = \iint_D v d\sigma, \quad (1)$$

式中:

- $Q$  —— 螺旋产量, t/h;
- $v$  —— 物料轴向速度, m/s;
- $D$  ——  $x$  截面的整个区域;
- $\sigma$  —— 面积元素。

对于不同的  $x$  截面,物料流量  $Q$  不同。流量差值  $\Delta Q = Q_{x+\Delta x} - Q_x$ , 即在  $x$  轴向范围内料仓中物料进入螺旋的料流。根据上述所提要求,在整个  $x$  轴区间内,不论  $dx$  为何值,单位长度的物料需均匀一致。用数学方程表达为:

$$\lim_{\Delta x} \frac{Q_{x+\Delta x} - Q_x}{\Delta x} = A. \quad (2)$$

其中  $A$  为常数,将其表达成导数形式:

$$\frac{dQ}{dx} = A, \quad (3)$$

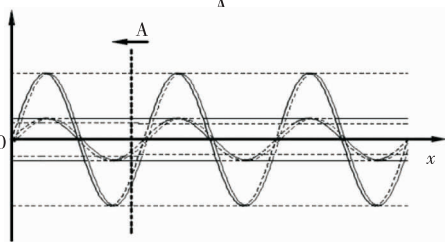
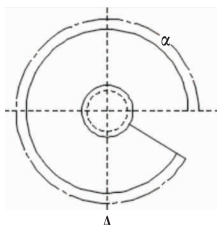


图1  $x$  轴的螺旋叶片转角示意图

Figure 1  $x$  schematic diagram of the rotation angle of the spiral blade

解得:

$$Q = Ax + Q_0, \quad (4)$$

式中:

$Q_0$  —— 螺旋始段的物料流量, t/h。

如果螺旋的螺距变化不太大,在  $x$  截面的螺旋叶片能达到的整个圆形区域上,物料的轴向速度相同,即

$$v = \frac{\omega S}{2\pi}, \quad (5)$$

式中:

$\omega$  —— 角速度, r/s;

$S$  —— 螺距, m。

则物料流量为

$$Q = \iint_D v d\sigma = \frac{\omega}{2\pi} S \cdot \pi(R^2 - r^2), \quad (6)$$

式中:

$R$  —— 螺旋叶片外径, m;

$r$  —— 螺旋轴半径, m。

由式(4)、(6)可知:

$$\frac{\omega}{2\pi} S \cdot \pi(R^2 - r^2) = Ax + Q_0. \quad (7)$$

当螺旋为等直径变螺距时,式(7)可改写为:

$$S = \frac{2A}{(R^2 - r^2)\omega} x + \frac{2Q_0}{(R^2 - r^2)\omega}, \quad (8)$$

$$S = Bx + S_0, \quad (9)$$

$$B = \frac{2A}{(R^2 - r^2)\omega}, \quad (10)$$

$$S_0 = \frac{2Q_0}{(R^2 - r^2)\omega}. \quad (11)$$

因此,对于等径变距螺旋结构,为保证下料的均匀稳定,螺距随  $x$  线性增加。

### 1.2 螺距设计

由螺距随  $x$  的线性变化进行分析,设螺距与  $x$  的线性方程为:

$$S = kx + b. \quad (12)$$

由图2可知:

$$x = x_1 = S_1 \text{ 时, } S = S_1;$$

$$x = x_2 = S_1 + S_2 \text{ 时, } S = S_2;$$

$$x = x_3 = S_1 + S_2 + S_3 \text{ 时, } S = S_3;$$

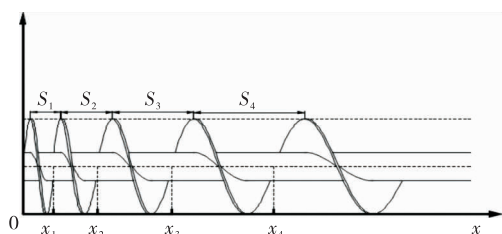


图2 等径变距螺旋图

Figure 2 Equal diameter variable pitch spiral diagram

...

$x = x_n = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n$  时,  $S = S_n$ 。

线性方程斜率  $k$  为:

$$k = \frac{S_n - S_{n-1}}{S_n} \quad (13)$$

根据斜率及设定坐标点可知,

$$S_n = \frac{S_n - S_{n-1}}{S_n} (S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n) + b \quad (14)$$

解得系数  $b$  为:

$$b = S_{n-1} - \frac{S_n - S_{n-1}}{S_n} (S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_{n-1}) \quad (15)$$

则变距螺旋结构螺距与轴向  $x$  的线性方程为:

$$S_n = \frac{S_n - S_{n-1}}{S_n} x + S_{n-1} - \frac{S_n - S_{n-1}}{S_n} (S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_{n-1}) \quad (16)$$

式(16)为理想假设条件下,考虑粉体物料进料段下料均匀性所推导的螺距随轴向  $x$  变化的函数,可对螺旋结构优化设计的参数进行分析验证。根据斜率可知:

$$S_1 = S_1; S_2 = \frac{S_1}{1-k}; S_3 = \frac{S_2}{1-k}; \dots; S_n = \frac{S_{n-1}}{1-k} \quad (17)$$

各螺距与首圈螺距值之间的关系为:

$$S_n = \frac{S_{n-1}}{1-k} = \frac{S_1}{(1-k)^{n-1}} \quad (18)$$

由式(18)可知首圈螺距值、末端螺距值、斜率和进料段圈数间的关系,首圈螺距及末端螺距的选取可根据设计要求确定,进料段圈数的确定与进料段的总长度  $L$  密切相关。由进料段各圈螺距的总和为  $L$  可知:

$$L = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n = S_1 + \frac{S_1}{1-k} + \frac{S_2}{1-k} + \dots + \frac{S_{n-1}}{1-k} = S_1 + \frac{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_{n-1}}{1-k} = S_1 + \frac{L - S_n}{1-k} \quad (19)$$

斜率  $k$  为:

$$k = 1 - \frac{L - S_n}{L - S_1} \quad (20)$$

若将  $S_n$  代入式(20)可得:

$$(1-k)(L - S_1) - L + \frac{S_1}{(1-k)^{n-1}} = 0 \quad (21)$$

实际上,螺旋进料段的设计需根据设计要求、机构尺

寸等约束条件来确定螺距值,由式(21)即可根据进料段的长度、首圈螺距值和设计要求得斜率,也可根据斜率和首圈螺距值求得段数。然而,假设理想条件下,仅当斜率  $k$  趋于 0 时,等式成立,因此,采用此方法进行设计需先确定首圈螺距值及末端螺距值,首圈螺距值一般取  $S_1 \geq 0.25D$ 。为保证螺旋内物料输送均匀,进料段的末端螺距值一般取  $S_n = 0.8D \sim 1.0D$ 。根据首圈及末圈螺距值计算出斜率后,从首圈螺距值开始向末端进行推导计算其他各螺距值。

## 2 设计实例与仿真分析

### 2.1 设计实例

已知试验物料为小麦粉,容重  $r = 0.52 \text{ t/m}^3$ , 综合性系数  $A = 75$ , 填充率  $\varphi = 0.4$ , 螺旋给料装置生产率  $Q = 0.8 \text{ t/h}$ , 螺旋总长度  $L = 800 \text{ mm}$ , 进料段长度  $l = 300 \text{ mm}$ , 螺旋转速  $n = 80 \text{ r/min}$ , 螺旋轴径  $d = 30 \text{ mm}$ , 输送段螺距  $S_n = 80 \text{ mm}$ , 进料段首圈螺距值  $S_1 = 25 \text{ mm}$ 。

将已知数据代入式(20)可得斜率  $k = 0.2$ , 根据式(17)从首圈螺距值开始向末端进行推导计算其他各螺距值:

$$S_1 = 25 \text{ mm}; S_2 = 32 \text{ mm}; S_3 = 40 \text{ mm}; S_4 = 50 \text{ mm}; S_5 = 65 \text{ mm}; S_6 = 77 \text{ mm}。$$

### 2.2 仿真分析

2.2.1 仿真参数 采用前期小麦粉标定结果进行仿真试验<sup>[10]</sup>, 小麦粉仿真参数如表 1 所示。

2.2.2 仿真过程 采用 Solidworks 软件建立螺旋结构三维模型,然后将模型导入至离散元软件进行模拟分析。结合相关文献<sup>[11-12]</sup>, 颗粒生成方式为 Dynamic, 首先在螺旋进料段料斗部分设立颗粒工厂, 设定较大的颗粒生成速度, 使粉体物料颗粒能快速充满料斗, 然后停止生产颗粒, 待物料处于静止时, 暂停仿真, 对仿真环境进行重新设定, 使料斗中的物料最顶端处于水平状态, 距料筒中心线距离为  $300 \text{ mm}$ , 为后续进料段下料均匀性的对比分析作铺垫。然后开始设定螺旋转速, 根据要求设定为  $100 \text{ r/min}$ , 为便于后处理观察, 步长设定为  $0.05 \text{ s}$ , 仿真时间设为  $10 \text{ s}$ 。

2.2.3 常规等距螺旋下料均匀性分析 等径等距螺旋是最常规的螺旋结构, 参照文献<sup>[13]</sup>的方法对螺旋进料段的下料均匀性进行分析。采用后处理中的 Geometry Bin 工具建立色带区域, 在物料输送前分别对其进行上色处

表 1 小麦粉放大颗粒离散元仿真参数表

Table 1 Discrete element simulation parameter table of wheat flour enlarged particles

小麦粉密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	小麦粉 粉泊 松比	小麦粉 剪切模 量/Pa	不锈钢密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	不锈 钢泊 松比	不锈 钢 剪切模 量/Pa	小麦粉— 小麦粉恢 复系数	小麦粉— 小麦粉静 摩擦系数	小麦粉— 小麦粉动 摩擦系数	小麦粉— 不锈钢恢 复系数	小麦粉— 不锈钢静 摩擦系数	小麦粉— 不锈钢动 摩擦系数	JKR
1 960	0.2	$6 \times 10^7$	7 800	0.3	$7 \times 10^{10}$	0.2	0.58	0.25	0.2	0.60	0.25	0.157

理,如图3所示,依次为红紫黄绿青,料筒中的色带上为白色。仿真时间设定为10 s,分别取5,10 s两个时间节点处物料的运动状态图进行分析对比。

由图3可知,当仿真时间为5 s时,料斗中的青色色带和绿色色带基本处于垂直状态,黄色色带有向第一圈螺距倾斜的趋势,料斗中形成轻微的漏斗状。此时,螺旋料筒中基本没有黄绿青色带的物料颗粒,螺旋的进料段主要有红色和紫色的颗粒,料斗中的红色色带明显变细,并有轻微的死区现象,死区部分主要为黄绿青色带区域。当仿真时间为10 s时,料斗中红紫色带基本已消失,物料形成明显的漏斗状,白色物料已完全被输送,黄色物料大部分进入进料段,此时可明显观察到等距螺旋结构的死区现象,整个进料段中,料斗中物料均逐渐从第一圈螺距开始输送,其他螺距段料斗中的物料形成明显的死区现象。

2.2.4 等径等距螺旋速度分析 同样采用两个时间节点分析等距螺旋速度,采用三色模式,暗红、红、蓝速度大小依次递减,其速度分布如图4所示。由图4可知,当仿真时间为5 s时,物料处于轻微的死区现象,料斗中物料流动较小,速度分布较为均匀;料筒中,在螺旋体附近及料筒内壁处的物料颗粒显红色,速度相对较大。当仿真时间为10 s时,物料处于明显的死区现象,料斗中物料出现明显的漏斗状,沿着物料的滑移面,物料表面颗粒处于向第一圈螺距移动的趋势,速度相对较大。

2.2.5 等距螺旋流量分析 采用给料稳定段6~8 s对螺旋流量进行分析。采用后处理中的流量传感器,设定位置为料筒末端口,对稳定时间段中给料流量进行实时检测,结果如图5所示。由图5可知,等径等距螺旋给料的平均流量为0.67 kg/s,流量波动范围为0.56~0.75 kg/s,

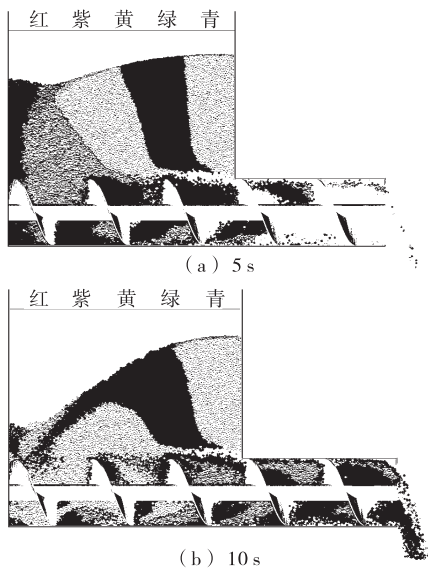


图3 等螺距仿真图

Figure 3 Equal pitch simulation diagram

流量波动较大,波动范围为11.94%~16.42%,螺旋给料精度较小。

2.2.6 变距螺旋流动状态分析 根据变距螺旋设计结果,将采用Solidworks建立的模型导入EDEM软件进行仿真,结果如图6所示。

由图6可知,当仿真时间为5 s时,料斗中的色带下料相对平稳,5个色带相对较为垂直,其顶端形成轻微的倾斜滑移面,螺旋结构采用螺距逐渐增大及后段螺距与前段螺距差值逐步增加的原则,此时进料段中留有大量的白色物料,各色带的物料沿螺旋料筒的外力边缘被推进。当仿真时间为10 s时,料斗中的色带下料相对等距结构而言较为平稳,料斗中的红紫色带较为垂直,而黄绿青3个色带有向左下倾斜的趋势,5个色带的顶端形成轻微的倾斜滑移面,此时进料段中的白色物料还未完全推出,出口物料可观察到明显的无色带混合状态。

2.2.7 变距螺旋结构速度分析 与常规等距螺旋设定相同,采用三色模式,暗红、红、蓝速度大小依次递减,其速

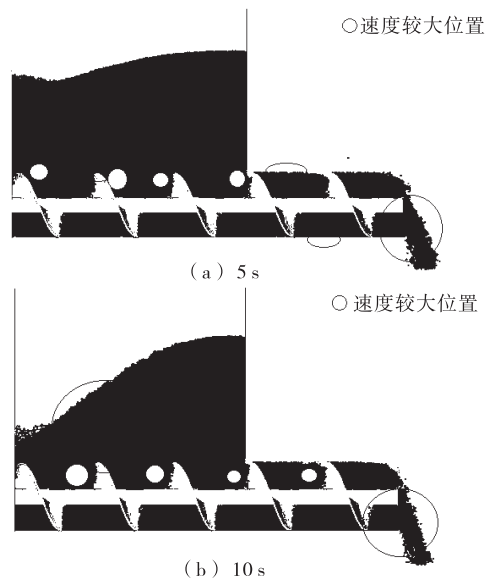


图4 等距螺旋速度分布图

Figure 4 Isometric spiral velocity distribution

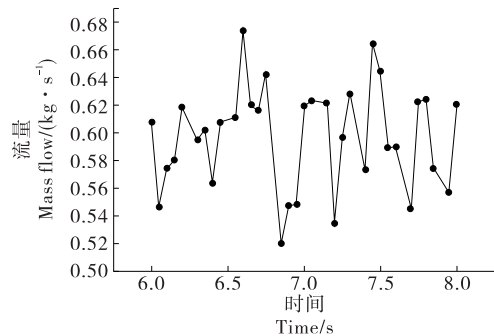


图5 质量流量检测图 I

Figure 5 Mass flow detection diagram I

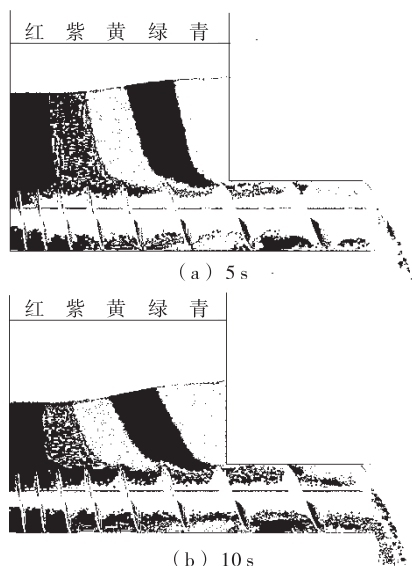


图 6 变螺距仿真图

Figure 6 Variable pitch simulation diagram

度分布如图 7 所示。由图 7 可知,当仿真时间为 5 s 时,第一圈螺距处有明显的红色物料,料斗顶端形成轻微滑移面,料斗中物料均逐渐向第一圈螺距滑动。当仿真时间为 10 s 时,其速度分布情况与 5 s 时的基本相似,料斗中物料速度下料均匀,进料段红色区域均匀分布。

2.2.8 变距螺旋给料流量分析 仿真后对变距流量进行检测,观察设计的变距螺旋结构给料流量波动情况,结果如图 8 所示。由图 8 可知,相对常规的等径等距螺旋结构,变距螺杆的平均给料流量为 0.224 kg/s,流量值相对等距螺旋结构有所降低,主要是由于常规等距螺旋下料

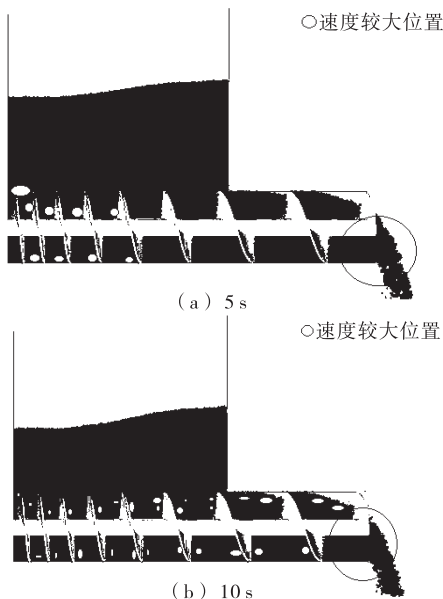


图 7 变螺距速度分析图

Figure 7 Analysis chart of constant pitch speed

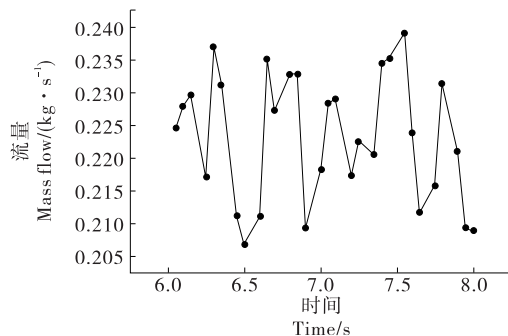


图 8 质量流量检测图 II

Figure 8 Mass flow detection diagram II

中,料斗物料形成明显的死区现象,物料均趋向于首圈螺距,在料斗中形成明显的滑移面,加之粉体形成坍塌现象,因粉体物料的较强压缩性,输送中粉体物料被压实导致填充率增大,流量增加;但输送不稳定,给料精度大大减小。变距螺杆的给料流量在时间段内同样呈波浪状,但波动相对较小,流量波动范围为 0.207~0.239 kg/s,波动百分比在±6.69%以内。变距螺旋结构的设计方案在相同转速、管径等参数下,流量相对常规等距螺旋会有所降低,但实际中可通过提高转速、管径等方法,在满足给料流量的前提下,使得给料精度大大提高。

### 3 结论

针对变距螺旋螺距随轴向  $x$  轴呈线性变化,建立了二次函数方程;根据坐标点选取,求得螺距与  $x$  的线性理论方程;根据设计要求,求得变距螺旋进料段各圈螺距值,为变距螺旋结构的设计计算提供了参考。变距螺旋结构离散元仿真结果表明,试验设计的变距螺旋结构相对等距螺旋下料均匀;变距螺旋螺杆的平均给料流量为 0.224 kg/s,流量波动范围为 0.207~0.239 kg/s,波动百分比在±6.69%以内,相比常规等距螺旋结构,其给料精度较高,说明等径变距螺旋设计具有合理性。后续可搭建透明的螺旋料筒装置试验平台,验证离散元仿真结果的精确性。

### 参考文献

[1] 郝友莉,唐正宁,季婷婷. 粉体包装机密封输送螺杆的设计[J]. 轻工机械, 2017, 35(5): 12-15.  
 [2] OREFICE L, KHINAST J G. DEM study of granular transport in partially filled horizontal screw conveyors [J]. Powder Technology, 2017, 305: 347-356.  
 [3] PEZO M, PEZO L, JOVANOVIC A P, et al. Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors[J]. Powder Technology, 2018, 336: 255-264.  
 [4] 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.

(下转第 169 页)

- al. Using survival analysis to investigate the effect of UV-C and heat treatment on storage rot of strawberry and sweet cherry[J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 73(2/3): 187-196.
- [13] GAILLARD S, LEGUERINEL I, MAFART P. Modelling combined effects of temperature and pH on the heat resistance of spores of *Bacillus cereus*[J]. Food Microbiology, 1998, 15(6): 625-630.
- [14] GRAY J I. Measurement of lipid oxidation: A review[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1978, 55(6): 539-546.
- [15] BATIFOULIER F, MERCIER Y, GATELLIER P. Influence of vitamin E on lipid and protein oxidation induced by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-activated MetMb in microsomal membranes from turkey muscle[J]. Meat Science, 2002, 61(4): 389-395.
- [16] HAN Y, GUENTERT A M, SMITH R S, et al. Efficacy of chlorine dioxide gas as a sanitizer for tanks used for aseptic juice storage[J]. Food Microbiology, 1999, 16(1): 53-61.
- [17] REINA L D, FLEMING H P, HUMPHRIES E G. Microbiological control of cucumber hydrocooling water with chlorine dioxide[J]. Journal of Food Protection, 1995, 58(5): 541-546.
- [18] 诸爱士, 蒋家新, 苏晓霞. 亚氯酸钠制备二氧化氯及其杀菌效果研究[J]. 食品工业科技, 2006(1): 174-177.
- [19] 田卫, 李军, 李新华. 二氧化氯(ClO<sub>2</sub>)对苹果表面金黄色葡萄球菌杀菌规律的研究[J]. 食品研究与开发, 2006(1): 145-149.
- [20] 安丽娜, 廖春. 二氧化氯发生器对饮用水的消毒效果的试验观察[J]. 医学动物防制, 2011, 27(2): 162-163.
- [21] 张仲阳, 张向超, 俞龙泉, 等. 超声波协同 ClO<sub>2</sub> 对西瓜汁灭菌效果的影响[J]. 食品工业科技, 2014(7): 172-177.
- [22] 曹凡, 高贵田, 王铎, 等. ClO<sub>2</sub> 对猕猴桃表面溃疡病菌的杀菌作用及果实货架期品质的影响[J]. 核农学报, 2017, 33(1): 88-95.
- [23] 李志富, 邵伟, 任少红, 等. ClO<sub>2</sub> 消毒粉剂杀菌效果及毒性试验研究[J]. 泰山医学院学报, 2005(4): 77-80.
- [24] OGATA N. Denaturation of protein by chlorine dioxide: Oxidative modification of tryptophan and tyrosine residues[J]. Biochemistry, 2007, 46(16): 4 898-4 911.

(上接第 62 页)

- [8] 杨晓雯. 布鲁氏菌等三种兼性胞内寄生菌比较基因组分析及应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2018: 12-24.
- [9] 厚华艳. 肠炎沙门氏菌菌毛编码基因 *sefA* 和 *fimA* 的功能探析[D]. 扬州: 扬州大学, 2013: 2-6.
- [10] 何华, 斐洁, 吴斌, 等. 猪支气管败血波氏杆菌菌毛 *fimD* 基因的克隆表达及间接 ELISA 检测方法的建立[J]. 畜牧兽医学报, 2009, 40(1): 98-102.
- [11] 曹恬雪, 蒋文灿, 何文成, 等. 沙门氏菌毒力因子的研究进展[J]. 中国预防兽医学报, 2014, 36(4): 331-334.
- [12] 黄冠军, 刘天强, 杨晓玲, 等. 沙门氏菌入侵基因研究进展[J]. 亚太传统医药, 2013, 9(11): 65-67.
- [13] 王小元, 宋鸿军. 细菌内毒素的生物合成途径及分子结构多样性[J]. 食品与生物技术学报, 2013, 32(10): 1 009-1 015.
- [14] 董方. 沙门氏菌外膜蛋白的研究[D]. 北京: 中国食品药品检定研究院, 2013: 8-11.
- [15] 汤佩佩. 肠炎沙门菌 *sopE2* 与 *sptP* 基因缺失株的构建及其免疫生物学研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016: 9-21.
- [16] 李隽. 系统性红斑狼疮生物标志物的筛选及致病机制的研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2017: 42-72.
- [17] 徐婷, 金顺鑫, 王潇, 等. 细菌外排泵系统 *acrAB-tolC* 的研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2016(9): 92-95.
- [18] 钊慧芬. 三种菌 *ampG* 基因的结构及遗传互补功能研究[D]. 温州: 温州医学院, 2013: 1-8.
- [19] 许泽仰. 甲型副伤寒沙门氏菌 *norRVW* 操纵子的功能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016: 15-22.
- [20] 朱培, 李鑫强, 李振轮. 磷酸酶在病原菌感染宿主中的作用[J]. 生物工程学报, 2012, 28(2): 154-163.
- [21] 程序. 万古霉素耐药靶酶 VanX 抑制剂及金属-β-内酰胺酶检测试剂 Nitrocefin 的合成与表征[D]. 西安: 西北大学, 2011: 7-22.

(上接第 126 页)

- [5] LI T, SCICOLONE J V, SANCHEZ E, et al. Identifying a loss-in-weight feeder design space based on performance and material properties [J]. Journal of Pharmaceutical Innovation, 2019(8): 1-14.
- [6] 赵冬梅, 余书豪. 变螺距螺旋输送机的螺距设计与性能分析[J]. 机械设计与制造, 2018(6): 52-55.
- [7] BATES L. Entrainment patterns of screw hopper dischargers[J]. Journal of Engineering for Industry, 1969, 91(2): 295-302.
- [8] FERNANDEZ J W, CLEARY P W, MCBRIDE W. Effect of screw design on hopper drawdown of spherical particles in a horizontal screw feeder[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(22): 5 585-5 601.
- [9] 龚志明. 螺旋式配料器取料螺旋结构参数初探[J]. 粮油加工与食品机械, 1984(7): 5-7.
- [10] 李永祥, 李飞翔, 徐雪萌, 等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 320-327.
- [11] MOYSEY P A, THOMPSON M R. Modelling the solids inflow and solids conveying of single-screw extruders using the discrete element method [J]. Powder Technology, 2005, 153: 95-107.
- [12] 刘威, 唐倩, 刘宗敏, 等. 水平式螺旋输送机运动模型搭建和参数化设计[J]. 食品与机械, 2019, 35(6): 96-99.
- [13] GAN J Q, ZHOU Z Y, YU A B. A GPU-based DEM approach for modelling of particulate systems[J]. Powder Technology, 2016, 301: 1 172-1 182.