

# 螺旋喂料装置密实段参数优化设计及耦合仿真

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2021.02.004

李永祥 王震民  
徐雪萌

河南工业大学  
机电工程学院  
河南 郑州 450001

**摘要:** 针对粉体物料螺旋输送过程中存在粉尘污染、输送效率较低的问题,为实现粉体物料脱气密实输送的效果,以粉体输送密实螺杆结合微负压真空仓的方式,对螺旋喂料装置的密实段进行结构设计及参数优化。建立螺旋喂料装置的三维模型,并选用遗传算法进行参数优化,结合 EDEM-Fluent 耦合仿真对所设计装置密实效果进行分析。结果表明,物料的平均质量流量约为 0.831 kg/s,输送最大密度为 889.299 kg/m<sup>3</sup>,最大密实百分比为 20.51%,质量流量在 0.783~0.883 kg/s 的范围内波动,波动百分比在 ±6.26% 以内,本装置具有较好的密实脱气效果,且在保证物料质量流量增加的同时,流量波动降低,喂料精度提高。

**关键词:** 螺旋喂料; 密实; 参数设计; 遗传算法

**中图分类号:** TB486<sup>+</sup>.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2021)02-0030-07

**引文格式:** 李永祥,王震民,徐雪萌.螺旋喂料装置密实段参数优化设计及耦合仿真[J].包装学报,2021,13(2):30-36.

淀粉由于粒径、密度较小且淀粉物料中含气量较多,在包装过程中会产生较大的扬尘,降低了包装及仓储效率<sup>[1]</sup>。目前国内外对粉体包装脱气的研究较少,对粉体螺旋喂料密实主要在料仓位置和充填工位进行脱气处理,对喂料过程中进行脱气的研究较少<sup>[2]</sup>。

为提高包装工作效率、降低粉尘污染,本研究提出一种变螺距螺杆与微负压真空装置结合的方法,通过物理挤压与微负压环境相结合,使淀粉物料气体排出达到密实的效果,最终物料经过密实段后,整体密度达到较高的程度。通过对螺旋喂料装置的改进,

可以实现淀粉等粉体物料的高效包装。

## 1 基于等差设计原则的变螺距螺杆设计

### 1.1 小麦淀粉压实密度的测定

选用 TMS-Pro 型质构仪、2500N 量程的传感器单元、透明亚克力桶、等尺寸的不锈钢桶、筛网、滤网等实验器材,基于气体容积法<sup>[3]</sup>多次实验测定淀粉最大可压实密度,最大程度上降低由于外界因素导致的实验误差。实验过程如图 1 所示。

收稿日期: 2021-02-14

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2018YFD0400704)

作者简介: 李永祥(1960-),男,河南工业大学教授,博士生导师,主要从事粮食机械理论与装备方面的教学与研究,  
E-mail: liyongxiang@163.com

通信作者: 徐雪萌(1972-),女,河南工业大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为包装机械理论与装备,  
E-mail: xuxuemeng7439@163.com



a) 注入法平整物料



b) 不锈钢桶粉体压缩试验



c) 亚克力桶粉体压缩试验

图1 压实密度测定实验过程图

Fig. 1 Experimental process diagram of compacted density determination

采用注入法<sup>[4]</sup>使淀粉均匀地落入桶内直至溢出,用刮板将溢出部分刮出,使淀粉与桶表面保持水平,如图1a所示。在控制软件操作界面,调取预先调试完毕的粉体压缩测试相关程序,设置零点、量程、初

始压力、最大压力、压缩时间、最大变形比等基本参数后,使压缩传感器回到零点位置,将装满淀粉的桶放在压缩传感器正下方,如图1b所示。在传感器达到最大压实形变量时,接触传感器停留1s后返回零点位置测量结束;在控制面板上读取传感器达到最大形变量时的位置与零点位置之间的差值,计算求得淀粉物料的最大压实密度。经实验测定物料中气体的最大体积分数为45.86%。

## 1.2 密实段变螺距的设计

经实验测定粉体的压实密度后,以压实密度为设计目标,以螺旋喂料的流量公式<sup>[5]</sup>为求解方程,对密实段螺距进行求解计算。

$$Q=47D^2\varphi n\rho SCK, \quad (1)$$

式中:  $Q$  为螺旋喂料流量, t/h;

$D$  为螺旋叶片直径, m;

$\varphi$  为粉体物料填充率;

$n$  为螺旋轴转速, r/min;

$\rho$  为粉体物料密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$S$  为螺距, m;

$C$  为倾斜修正系数;

$K$  为螺旋叶片影响系数。

由1.1节的实验测得粉体的压实密度为  $0.77 \text{ g/cm}^3$ , 将计算得到的转速及压实密度等数据代入式(1)可得,所需要的最小螺距为  $63.96 \text{ mm}$ , 圆整后取最小螺距为  $65 \text{ mm}$ 。螺旋输送总长度为  $1300 \text{ mm}$ , 进料段采用常规螺距为  $100 \text{ mm}$ , 总长度为  $400 \text{ mm}$ 。密实段总长度为  $660 \text{ mm}$ , 最大螺距为  $100 \text{ mm}$ , 最小螺距由计算得出, 为  $65 \text{ mm}$ 。对密实段螺杆变螺距采用等差数列设计原则<sup>[6]</sup>, 等差数列求和公式为<sup>[7]</sup>:

$$S_n = \frac{(a_1 + a_n)}{2} n, \quad (2)$$

$$S_n = a_1 n + \frac{n(n-1)}{2} d. \quad (3)$$

由求和公式计算得出密实段各螺距: 将最小螺距  $65 \text{ mm}$  为等差数列的首项  $a_1$ , 最大螺距  $100 \text{ mm}$  为等差数列最后一项  $a_n$ , 密实段总长度  $660 \text{ mm}$  为等差数列前  $n$  项和  $S_n$ , 代入式(2)求得等差数列共8项 ( $n=8$ ); 再由式(3)得出公差  $d=5$ , 因此计算出密实段共8段, 每段螺距递减  $5 \text{ mm}$ 。螺旋整体为三段式, 分别为进料段、密实段及卸料段。其中进料段总长  $L_1=400 \text{ mm}$ , 为保证均匀进料, 采用等距螺旋; 密实段总长  $L_2=660 \text{ mm}$ , 最大螺距为  $100 \text{ mm}$ , 最小螺

距为 65 mm, 呈等差数列递减, 公差  $d=5$  mm; 卸料段总长  $L_3=240$  mm, 为保证落料均匀, 也采用等螺距螺旋, 螺距为 60 mm。为了使螺旋的脉动现象降低, 在末端选择无叶片结构, 故卸料段圈数设定为 3.5 圈。

### 1.3 微负压真空仓设计

通过上述变螺距螺旋对物料进行挤压脱气后, 并不能达到完全密实, 因此在密实段设计微负压真空仓。这样一方面可以使得挤压排出的气体顺利排到外界, 另一方面负压真空环境可以使物理挤压未脱除的残余气体从淀粉物料中抽出, 密实段的负压环境使得物料内部气体进一步排出, 进一步加强了密实效果。

真空仓由滤网、滤布、真空泵和压力表等构成。将真空仓起始位置设置在进料段后两个螺距的位置, 这样可以更好地保证负压环境的密闭性。为保证更充分地物料中的气体进行脱除, 真空仓长度设计为其末端在距离密实段结束前两个螺距的位置。真空仓上方设置 3 个预留孔, 便于安装真空泵和负压表等配件。中间采用微孔材料可以在保证气体排出的同时, 将物料阻隔在螺旋喂料机内。螺旋密实输送结构示意图如图 2 所示。

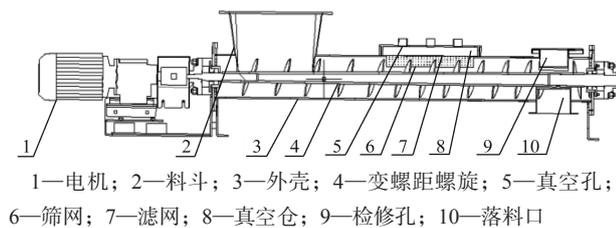


图 2 螺旋密实输送结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spiral dense conveying structure

## 2 基于遗传算法的变螺距螺杆参数优化

由于理论计算与实际情况并不能完全相符, 因此所设计的装置参数须通过进一步的优化设计才能达到最优的效果。故本文在遗传算法多目标优化<sup>[8-11]</sup>的基础上, 以物料输送密度最大、流量最大以及螺旋喂料装置质量最小为优化目标, 参照相关参考文献的螺旋流量计算公式, 对所设计的密实输送装置进行参数优化, 得到最佳的参数组合, 为后续的仿真研究打下基础。

### 2.1 目标函数设定

螺旋喂料装置流量计算公式<sup>[12]</sup>为

$$Q=47(D^2-d^2)n\phi\rho S+0.046412n+6.738S+366.577d+1.585nd-0.000504n^2-6.608d^2-9.25763, \quad (4)$$

式中  $d$  为螺旋体的轴径。

螺旋喂料装置螺旋体质量

$$M=(V_1+V_2)\rho_{\text{钢}}, \quad (5)$$

式中:  $V_1$  为螺旋体内轴体积,  $\text{m}^3$ ;

$V_2$  为螺旋体叶片体积,  $\text{m}^3$ ;

$\rho_{\text{钢}}$  为不锈钢密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

螺旋体内轴体积

$$V_1 = \frac{\pi(d_{\text{外}}-d_{\text{内}})^2 L}{4}; \quad (6)$$

对于等距螺旋, 螺旋体叶片体积

$$V_2 = \frac{(D-d_{\text{外}})\tau L}{4S} \left( \sqrt{(\pi D)^2 + S^2} + \sqrt{(\pi d_{\text{外}})^2 + S^2} \right); \quad (7)$$

对于按等差数列原则设计的变螺距螺旋, 密实段有  $n$  段螺距时, 螺旋体叶片体积为

$$V_2 = \frac{(D-d_{\text{外}}) \left( L - \sum_{i=1}^n S_i \right) \tau}{4S} \sum_{i=1}^n \left( \sqrt{(\pi D)^2 + S_i^2} + \sqrt{(\pi d_{\text{外}})^2 + S_i^2} \right). \quad (8)$$

式(6)~(8)中:  $d_{\text{内}}$ 、 $d_{\text{外}}$  分别为螺旋体空心内轴的内、外径, m;

$L$  为螺旋长度, m;

$\tau$  为螺旋叶片厚度, m;

$S_n$  为变距为  $n$  段时, 螺距总长度, m。

### 2.2 变量设计

以影响螺旋喂料装置主要性能的几个关键因素为设计变量, 假设基础变量如转速、填充率等不变, 通过目标函数<sup>[13-14]</sup>可得出, 对螺旋喂料装置影响较大的几个参数为螺旋叶片外径  $D$ 、内轴外径  $d_{\text{外}}$ 、螺距  $S$  以及内轴内径  $d_{\text{内}}$ , 故设计变量为

$$X=[x_1, x_2, x_3, x_4]=[D, d_{\text{外}}, S, d_{\text{内}}],$$

其中目标函数中各变量的取值范围如下:

螺旋体叶片外径  $D \in [120, 135]$ , mm;

螺距  $S \in [0.8D, 1.0D]$ ;

内轴外径  $d_{\text{外}} \in [0.35D, 0.4D]$ ;

内轴内径  $d_{\text{内}} \in [0, 0.35D]$ 。

### 2.3 算法优化

选用遗传算法, 以螺旋体质量最小且螺旋喂料流量最大为优化目标进行求解。为尽可能求得最优解, 取最优个体系数为 0.2, 算法种群大小为 600, 终止

进化的迭代次数为 500, 交叉概率为 0.68, 变异概率为 0.01<sup>[15]</sup>。遗传算法的程序迭代图如图 3 所示。

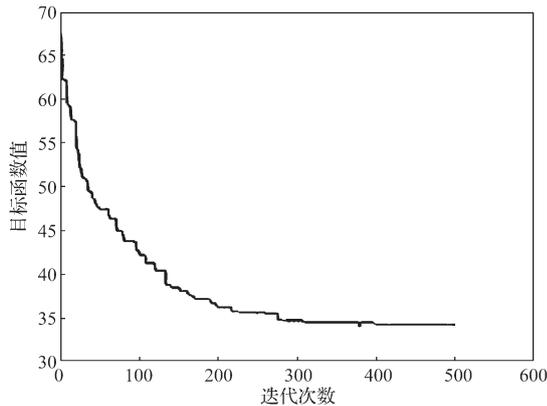


图 3 程序迭代图

Fig. 3 Program iteration diagram

由遗传算法对目标函数进行优化求解, 各参数变量的寻优结果为:  $M=11.634$  kg,  $Q=3.05$  t/h,  $D=0.137$  m,  $d_{外}=0.0363$  m,  $d_{内}=0.0316$  m, 变距段初始最大螺距  $S_{始}=0.0974$  m, 变距段末端最小螺距  $S_{末}=0.0586$  m。对优化所得结果进行圆整取值得:  $D=0.135$  m,  $d_{外}=0.035$  m,  $d_{内}=0.030$  m,  $S_{始}=0.10$  m,  $S_{末}=0.06$  m。以圆整后得到的参数对螺旋装置进行二次优化设计, 为后续研究打好基础。

### 3 EDEM-Fluent 耦合仿真

在上述参数优化的基础上, 对所设计装置进行基于 EDEM-Fluent 耦合的仿真分析, 由分析结果对设计参数进行反馈, 在仿真结果的基础上对参数进行二次优化。最后在优化与仿真分析相结合的基础上, 得到优化效果最佳的设计参数。

#### 3.1 耦合方法

将螺旋喂料装置内部空气视为连续相的理想气体, 淀粉颗粒为离散相固体颗粒。分别在 EDEM 和 Fluent 中设置各自的仿真参数, 各自的物理模型保持一致, 以便双向耦合时可以获得相同的边界条件。

在进行耦合仿真之前, 本文根据不同软件版本编译所对应的耦合文件, 选用 EDEM 2020 版本以及 Fluent 19.0 版本。耦合文件基于 Fluent 中的 Dense Discrete Phase Model (DDPM) 模型进行编译。

耦合仿真前需要对仿真模型进行预处理, 在 EDEM 中设置仿真参数、颗粒模型、颗粒工厂以及仿真时长等参数, 待料仓内落满淀粉颗粒时结束仿真, 将仿真文件导出为零时刻文件, 预处理完成。

打开经预处理的 EDEM 文件, 设置螺旋转速以及仿真时间步长, 打开仿真界面的耦合服务器, 使其处于监听状态。随后打开 Fluent 读入耦合文件, 将物理模型导入 Fluent 中, 将划分好的网格信息导入, 选择湍流模型。求解模型选择  $k-\epsilon$  模型, 在模型界面选择 EDEM 耦合信息进行耦合, 返回 EDEM 检查耦合监听处于已经连接的状态, 表明耦合求解器已经设置完毕。

在 Fluent 中设置边界条件等参数信息, 仿真时间与 EDEM 设置为 10 s, 时间步长设置为  $5e-04$  s, 总步数为 20 000; EDEM 的时间步长设置为  $5e-06$  s, Fluent 时间步长设置为 EDEM 的 100 倍。对模型进行初始化之后, 在 Fluent 中开始仿真, EDEM 自动开始耦合仿真求解, 可实时监测耦合过程中淀粉颗粒的运动状态。耦合求解流程如图 4 所示。

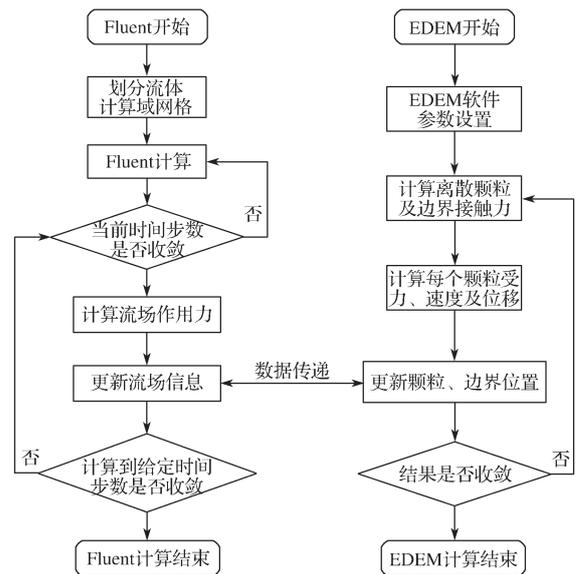
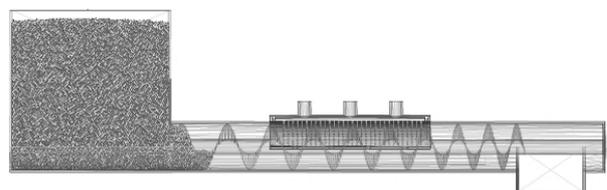


图 4 EDEM-Fluent 耦合仿真流程图

Fig. 4 EDEM-Fluent coupling simulation flow chart

在 EDEM 中对耦合后的淀粉颗粒运动状态进行讨论分析。主要检测与流场耦合后颗粒的质量流量以及喂料过程中的物料密实程度等信息, 分析气体流场对螺旋输送效率的影响, 以及对喂料稳定性的影响, 仿真过程如图 5 所示。



a) 落料过程

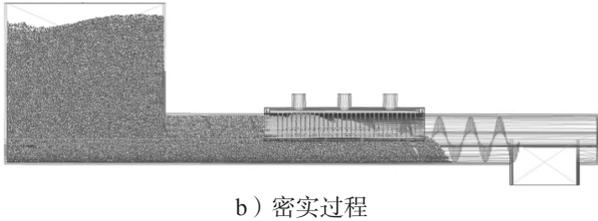


图5 螺旋输送仿真过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of screw conveying simulation process

### 3.2 耦合结果与分析

#### 3.2.1 物料的质量流量

耦合仿真结束后,检测物料质量流量的大小以及其波动情况,并将数据导出,在origin中绘制质量流量曲线。同样转速下分析等距螺旋与本文设计变距螺旋的输送效果,如图6~8所示。

由图6~8可知,随着转速的增加,等距螺旋与变距螺旋的物料质量流量均有明显提升,但经过微负压真空仓脱气及变螺距螺杆挤压脱气后,物料质量流量的波动程度明显降低,喂料稳定性显著增加。通过对比可知,转速为120 r/min时,物料平均质量流量增大的同时,其波动范围也较小。由检测数据可知,转速为120 r/min时,等距螺旋下,淀粉的平均质量流量约为0.896 kg/s,质量流量在0.815~0.987 kg/s的范围内波动,波动百分比在 $\pm 10.16\%$ 以内;变距螺下,淀粉的平均质量流量约为0.831 kg/s,质量流量在0.783~0.883 kg/s的范围内波动,波动百分比在 $\pm 6.26\%$ 以内。由数据对比可知,等、变距螺旋输送物料的平均质量流量相对于耦合之前均得到提升。等距螺旋波动情况随着转速的提高有所加重;对于变距螺旋,随着转速增加平均质量流量提高而波动情况保持稳定。

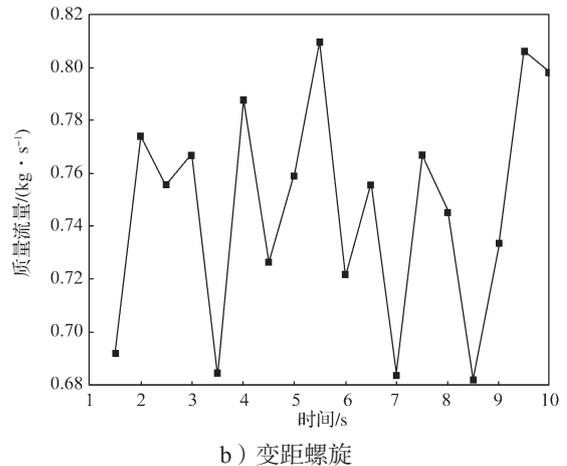
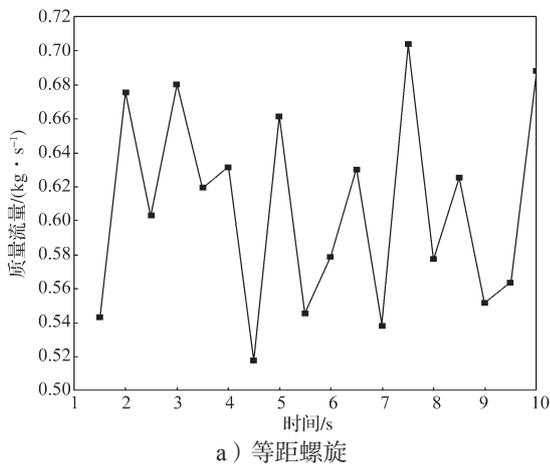


图6 80 r/min时物料质量流量变化曲线

Fig. 6 Material mass flow rate change curve at 80 r/min

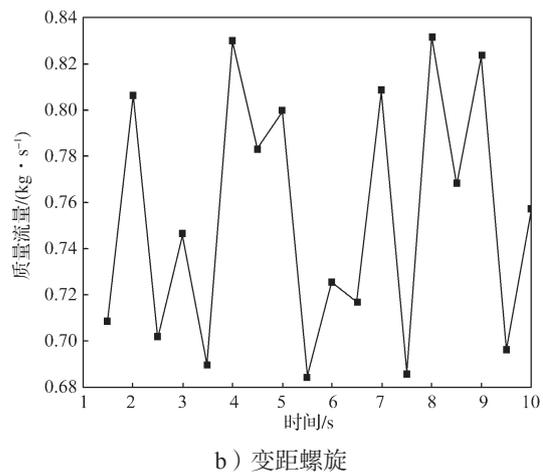
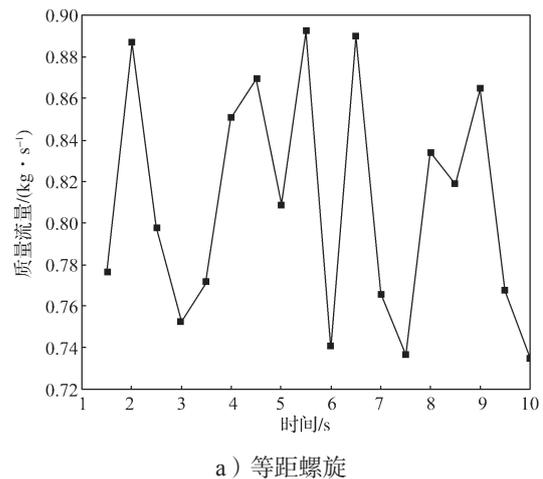


图7 100 r/min时物料质量流量变化曲线

Fig. 7 Material mass flow rate change curve at 100 r/min

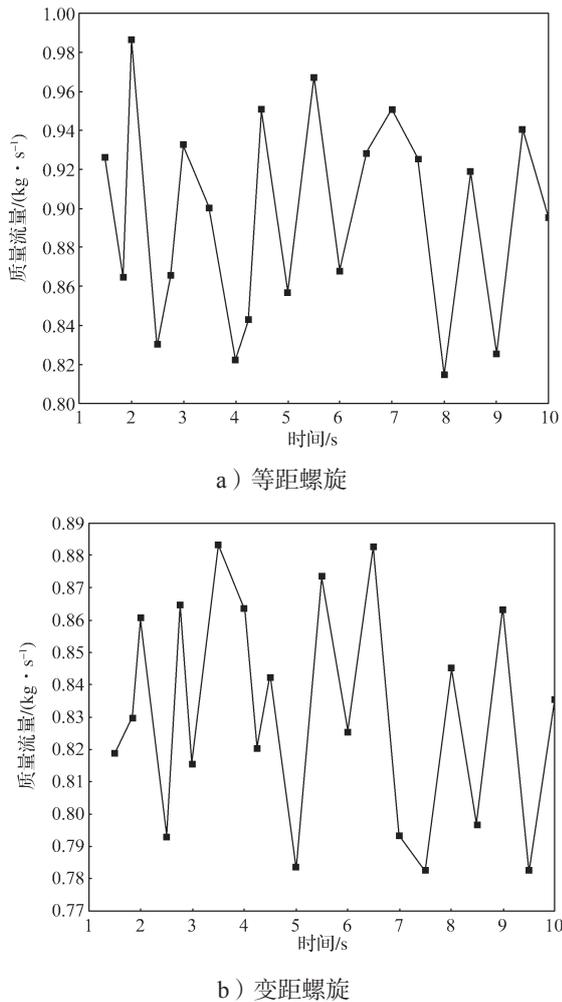


图 8 120 r/min 时物料质量流量变化曲线

Fig. 8 Material mass flow rate change curve at 120 r/min

### 3.2.2 物料的密度

在后处理模块中导出物料的密度数据, 检测其在微负压真空状态下淀粉螺旋输送过程中的密实度问题, 观察在螺旋挤压脱气以及微负压真空脱气状态下的淀粉物料密实脱气情况, 分析所设计密实脱气装置的脱气效果, 如图 9 所示。

由图 9 可知, 在螺旋输送喂料段, 物料中含有的气体较多, 微负压真空装置抽真空一定时间后, 淀粉未进入螺旋输送密实段, 因此在螺旋输送初期淀粉物料的密实度相对较低, 但有逐渐升高的趋势。物料在经过料斗后, 失去料斗上方物料的重力作用, 物料密度稍有降低。在淀粉颗粒进入密实段后, 等、变距螺旋物料在脱气段的密度均得到了明显提升。其中等距螺旋最大物料密度达到  $810.633 \text{ kg/m}^3$ , 最大密实百分比为 15.27%; 变距螺旋最大物料密度达到  $889.299 \text{ kg/m}^3$

$\text{kg/m}^3$ , 最大密实百分比为 20.51%。变距螺旋的物料密度提升效果更明显, 表明脱气装置有效增加了淀粉物料输送过程中的物料密度。

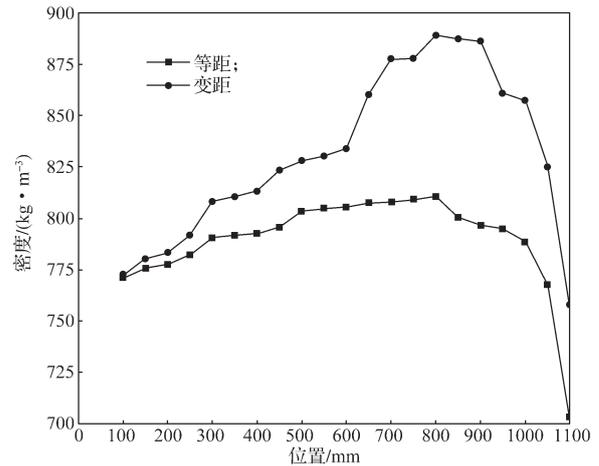


图 9 EDEM-Fluent 耦合仿真物料密度变化曲线

Fig. 9 EDEM-Fluent coupling simulation material density change curve

## 4 结论

本文基于等差设计原则对粉体密实输送螺杆进行优化设计, 采用变螺距与微负压真空仓结合的结构, 对粉体起到了较好的密实效果。由 EDEM-Fluent 耦合仿真结果对比可得如下结论:

1) 在转速为 120 r/min 时, 等距螺旋物料平均质量流量为  $0.896 \text{ kg/s}$ , 波动范围为  $0.815\sim 0.987 \text{ kg/s}$ ; 本文设计装置物料质量流量为  $0.831 \text{ kg/s}$ , 波动范围在  $0.783\sim 0.883 \text{ kg/s}$ , 较常规等距螺旋流量波动范围降低了 3.9%。

2) 等距螺旋最大物料密度达到  $810.633 \text{ kg/m}^3$ , 最大密实百分比为 15.27%; 变距螺旋最大物料密度达到  $889.299 \text{ kg/m}^3$ , 最大密实百分比为 20.51%。物料输送过程中密度较传统等距螺旋提高了 5.24%。

### 参考文献:

- [1] 闫慧丽, 陆啟玉. 小麦淀粉粒径分布对面条模型品质的影响 [C]// 中国食品科学技术学会第十七届年会论文集. 西安: 中国食品科学技术学会, 2020: 120-121.
- YAN Huili, LU Qiyu. The Effect of Wheat Starch Particle Size Distribution on the Quality of Noodle

- Models[C]// Proceedings of the 17th Annual Conference of Chinese Society for Food Science and Technology. Xi'an: Chinese Society for Food Science and Technology, 2020: 120-121.
- [2] 吴奋敬. 螺旋卸船机相对旋转式取料装置取料机理及仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.  
WU Fenjing. Research of Reclaiming Mechanism and Simulation of Relatively-Rotating Inlet Device of Screw Unloader[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [3] 李斌, 金永亮. 容积法中排气过程模拟计算的若干修正[J]. 内燃机车, 1999(1): 27-29, 35.  
LI Bin, JIN Yongliang. Some Modifications to Exhaust Simulation Calculation Using Volume Method[J]. Diesel Locomotives, 1999(1): 27-29, 35.
- [4] 王宪良, 胡红, 王庆杰, 等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 78-85.  
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration Method of Soil Contact Characteristic Parameters Based on DEM Theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78-85.
- [5] 林苑, 徐长斌, 周祥明, 等. 基于离散元法的螺旋喂料器流量计算修正[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 117-121.  
LIN Yuan, XU Changbin, ZHOU Xiangming, et al. Research on Modification of Flow Calculation of Screw Feeder[J]. Food & Machinery, 2020, 36(7): 117-121.
- [6] 于文江. 等差变径变螺距螺旋输送器的设计与计算[J]. 现代化农业, 1982(2): 21-22.  
YU Wenjiang. Design and Calculation of Equal-Difference Variable-Diameter Variable-Pitch Screw Conveyor[J]. Modernizing Agriculture, 1982(2): 21-22.
- [7] 刘巍. 等差数列前 $n$ 项和教学设计[J]. 昭通师范高等专科学校学报, 2011, 33(增1): 63-65.  
LIU Wei. The First  $n$  Items of Arithmetic Sequence and Teaching Design[J]. Journal of Zhaotong Teachers College, 2011, 33(S1): 63-65.
- [8] 刘博, 袁欣, 明新国. 基于遗传算法和变邻域搜索的柔性作业车间同步调度方法[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(1): 177-182, 189.  
LIU Bo, YUAN Xin, MING Xinguo. A Novel Method for Flexible Job Shop Scheduling Based on Genetic Algorithm and Variable Neighborhood Search[J]. Machine Design & Research, 2021, 37(1): 177-182, 189.
- [9] 钟育彬, 邓文杰. 基于复杂适应度函数的因素遗传算法[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2020, 19(5): 47-50.  
ZHONG Yubin, DENG Wenjie. Factor Genetic Algorithm Based on Complex Fitness Function[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2020, 19(5): 47-50.
- [10] 刘长吉, 黄宴委. 基于适应度函数的无人船遗传算法航径规划[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(5): 151-155.  
LIU Changji, HUANG Yanwei. Navigation Path Planning of Unmanned Surface Vehicles Genetic Algorithm Based on Fitness Function[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(5): 151-155.
- [11] WANG S M, JIAN G P, XIAO J, et al. Optimization Investigation on Configuration Parameters of Spiral-Wound Heat Exchanger Using Genetic Aggregation Response Surface and Multi-Objective Genetic Algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 119: 603-609.
- [12] 徐雪萌, 李飞翔, 李永祥, 等. 定量变距螺旋结构设计及试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 89-97.  
XU Xuemeng, LI Feixiang, LI Yongxiang, et al. Design and Experiment of Quantitative Variable Pitch Screw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 89-97.
- [13] LI R, YANG J B, TUO X G, et al. Research on Fitness Function of Two Evolution Algorithms Used for Neutron Spectrum Unfolding[J]. Journal-Korean Physical Society, 2021, 78(2): 109-115.
- [14] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 116-123.  
ZHOU Ming, SUN Shudong. Genetic Algorithms: Theory and Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 116-123.
- [15] 闫春, 厉美璇, 周潇. 基于改进的遗传算法在函数优化中的应用[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(10): 2982-2985.  
YAN Chun, LI Meixuan, ZHOU Xiao. Application of Improved Genetic Algorithm in Function Optimization[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(10): 2982-2985.

(责任编辑: 邓光辉)

(下转第53页)