粉体密实变螺距螺杆结构设计与仿真分析

王震民，李永祥，徐雪萌
（河南工业大学 机电工程学院，郑州 450001）

摘要：目的 针对粉体螺旋输送时物料含气导致的物料密实度不足、包装机工作效率低等问题，设计一种变螺距螺旋来达到密实粉体、提高螺旋输送效率的目的。**方法** 首先通过气体容积法，测定粉体物料的压实密度，由粉体螺旋输送过程中密度流量关系式，计算得出在转速、螺旋叶片直径一定时，达到压实密度的最小螺距。然后在输送长度确定的情况下，运用等差设计原则，计算出密实段变螺距螺旋的设计参数。最后进行三维建模及仿真分析，对所设计的螺旋进行优化。**结果** 设计出了三段式变距螺旋，相较于等螺距螺旋，输送过程中物料密度增加了 6.541%，螺旋输送质量流量提高了 2.475%。**结论** 验证了通过变螺距螺旋来达到密实粉体的可行性，提高了螺旋输送效率，为螺旋输送过程中粉体脱气方法提供了参考。

关键词：粉体；螺旋输送；密实；参数设计；仿真分析
中图分类号：TB484.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2020)23-0172-07
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.23.024

Structural Design and Simulation Analysis of Powder Compact Pitch Screw

WANG Zhen-min, *LI Yong-xiang*, *XU Xue-meng*
(School of Electromechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to design a variable pitch screw to achieve the purpose of compacting powder and improving screw conveying efficiency to solve the insufficient material compactness and low packaging machine efficiency caused by the powder material containing gas during the screw conveying of powder. The gas volume method was used to determine the compacted density of the powder material. From the density and flow relationship during the screw conveying of the powder, the minimum pitch to reach the compacted density at a certain speed and the diameter of the screw blade was calculated. When the conveying length was determined, the design parameters of the variable pitch screw of the compact segment were calculated using the principle of equal-difference design. And three-dimensional modeling and simulation analysis were performed to optimize the designed screw. A three-stage variable-pitch screw was designed. Compared with the constant pitch screw, the material density increased by 6.541% and the screw conveying mass flow increased by 2.475%. The feasibility of using variable pitch to achieve compact powder is verified, and the screw conveying efficiency is improved. It provides a reference for the method of powder degassing during screw conveying.

KEY WORDS: powder; screw conveying; compact; parameter design; simulation analysis

收稿日期：2020-02-24
基金项目：国家重点研发计划（2018YFD0400704），河南省科技厅自然科学项目（182102110163）
作者简介：王震民（1996—），男，河南工业大学硕士生，主攻粉体包装。
通信作者：徐雪萌（1972—），女，河南工业大学副教授，主要研究方向为粮油食品包装工艺与设备。

粉体包装多采用螺旋输送设备[1—2]，螺旋设计是否合理，直接影响粉体的包装效率、包装精度、包装效果及后期仓储物流等各方面。由于物料中含有的气体，导致物料在螺旋输送过程中密实度较低，填充率降低，不仅影响物料的填充效率，而且降低了包装精度，增加了包装成本，因此针对粉体包装，设计一种可实现密实粉体、提高包装效率的螺旋装置非常有必要。

目前针对粉体输送过程中粉体夹气现象，日本纽朗公司在粉体高速包装机中，采用滤网脱气的方法将脱气滤芯插入料斗及螺旋输送机内部的粉体物料中，抽出物料中的气体而保存物料。美国加州的 Diamondback Technology 公司和印度的 Jasubhai Engineering 公司针对粉体输送夹气问题研发了螺旋式的密实包装机[3]。国内江苏创新包装科技有限公司针对于粉体夹气现象，采用在充填过程中抽气的方法，将包装袋化为微负压状态，在粉体充填过程中，充填和抽气作业同时进行，达到粉气分离的效果。万立达粉体包装设备有限公司生产的粉体密实包装机用在了造粒机的前端工位，将物料进行密实。目前为止，针对粉体物料螺旋输送过程中粉气分离的相关理论研究还相对较少，李飞翔等[4—5]对于粉体物料螺旋输送过程中，物料下料不均匀的问题，提出了一种在下料段采用变螺距的螺杆的设计方法。郝友莉等[6]针对粉体密实输送问题，采用分段法设计出一种变螺距螺杆，但密实效果未做量化表述。

通过对以上问题的分析，文中拟对螺旋参数进行设计，通过 EDEM 离散元仿真软件，对所设计的螺旋输送机进行离散元仿真，以验证螺杆设计的合理性，为变螺距螺旋的设计提供参考。

1　变螺距设计

1.1　理论计算

在经试验测定面粉的压实密度后，以压实密度为设计目标，为使螺旋输送可达到该压实密度的要求，在螺旋输送过程中将密实段设计为变螺距。螺旋输送过程中流量公式为：

$$Q = 47D^2\phi n\rho SCK \tag{1}$$

式中：Q 为螺旋输送量（t/h）；D 为螺旋叶片直径（mm）；φ 为粉体物料填充系数；n 为螺旋轴转速（r/min）；ρ 为粉体物料密度（kg/m^3）；S 为螺距（mm）；C 为倾斜修正系数；K 为螺旋叶片影响系数。

根据实际生产要求，螺旋输送量 Q 取 2.4 t/h，取螺旋叶片直径 D 为 120 mm，因输送过程中螺旋处于水平放置状态，故螺旋倾斜修正系数 C 取 1，螺旋叶片影响系数 K 取 1。

根据螺旋设计要求得转速公式为：

$$n \leqslant \frac{A}{\sqrt{D}} \tag{2}$$

式中：A 为物料综合特性系数。由表 1 可知，面粉的综合特性系数 A 取 75，填充系数 φ 取 0.4。

由实际情况可知，螺旋叶片直径取 120 mm，由式（2）计算可得最大转速 n_{max}=216.51 r/min，圆整后 n_{max} 取 200 r/min。因转速过大会导致物料所受离心力大于物料本身的重力，导致物料发生飞溅现象，影响传输效率，故结合实验条件及实际情况，取转速 n=120 r/min。由实验测得，面粉的压实密度为 0.77 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，将输送过程中的面粉密实到试验测定的压实密度，所需要的最小螺距为 63.96 mm，圆整后取最小螺距为 65 mm。螺旋输送总长度为 1300 mm，落料段采用常规螺距为 100 mm，总长度为 400 mm。密实段总长度 660 mm，最大螺距为 100 mm，最小螺距由计算得为 65 mm。对密实段变螺距螺杆采用等差数列设计原则[7—9]，等差数列求和公式为：

$$S_n = \frac{(a_1 + a_n)}{2}n \tag{3}$$

$$S_n = na_1 + \frac{n(n-1)}{2}d \tag{4}$$

式中：S_n 为等差数列前 n 项和；n 为等差数列项数；a_1 为等差数列首项；a_n 为等差数列第 n 项；d 为等差数列公差。

由求和公式计算得出密实段各螺距，将最小螺距 65 mm 为等差数列首项，最大螺距 100 mm 为等差数列最后一项，密实段总长度 660 mm 为等差数列前 n

表 1　物料种类与综合特性系数关系

Tab.1 Relationship between material types and comprehensive characteristic coefficients

物料粒度	物料磨琢性	物料种类	推荐填充系数 φ	物料综合特性系数 A
粉状	无磨琢性 半磨琢性	面粉、石墨等	0.35 ~ 0.40	75
粉状	磨琢性	水泥、石膏粉等	0.25 ~ 0.30	35
粒状	无磨琢性 半磨琢性	谷物、颗粒状食盐等	0.25 ~ 0.35	50
粒状	磨琢性	型砂、成粒炉渣等	0.25 ~ 0.30	30

项和，代入式（3）得出等差数列为 8 项；再由式（4）得出公差 d 为 5，因此计算出密实段共 8 段，每段螺距递减 5 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 mm，为保证均匀进料，采用等距螺旋；密实段总长 L_2=660 mm，最大螺距为 S_1=100 mm，最小螺距 S_2=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，末端为了使螺旋脉动现象减小，采用了无叶片结构[10—11]，故卸料段圈数设定为 3.5。

1.2　方法与过程

通过实验测定面粉的可压实密度、输送过程中的气体含量以及在等距螺旋输送过程中的密度。首先选定实验器材，采用规则圆柱体的透明亚克力容器，容器的内壁直径为 9.3 mm，高为 19.5 mm，容器净质量为 263.6 g，见图 1。

在等距螺旋输送完成后，取松散的面粉物料装进容器内，装满后用平板将逸出物料刮去，使粉体表面与容器口保持一致且平整，见图 1a。将装满面粉的容器称量，减去容器质量后得到面粉的质量数据，随后将容器内面粉压实，再次通过称量得到质量数据，见图 1b。

采用实验室标准 200 mL 的烧杯重复上述过程，在经过多次测量后得到实验数据，排除误差点后，处理数据取平均值得到粉体压实密度。

在采用等距螺旋做输送实验时，取螺旋中部输送段的物料，测定其质量与体积，得出等螺距螺旋输送时的密度。将等距螺旋输送后的面粉，用容器取得样本，将其压实后，测定压实前的体积与压实后的体积比值，得到粉体的气体含量，经测定，气体体积分数为 28.21%。等距螺旋以螺旋叶片直径 D=120 mm，螺距 S=100 mm 的螺旋为例。

2　模型建立与仿真分析

2.1　模型建立

已知产量 Q=2.4 t/h，螺旋输送总长度 L=1300 mm。螺旋转速 n=120 r/min，螺旋轴径 d=35 mm。螺旋各项参数进行设计完成后，利用 SolidWorks 三维建模软件对所设计螺旋输送结构建立模型，并进行虚拟装配，验证所设计各构件装配关系合理，见图 2。将模型导入 EDEM 离散元仿真软件，进行仿真模拟。

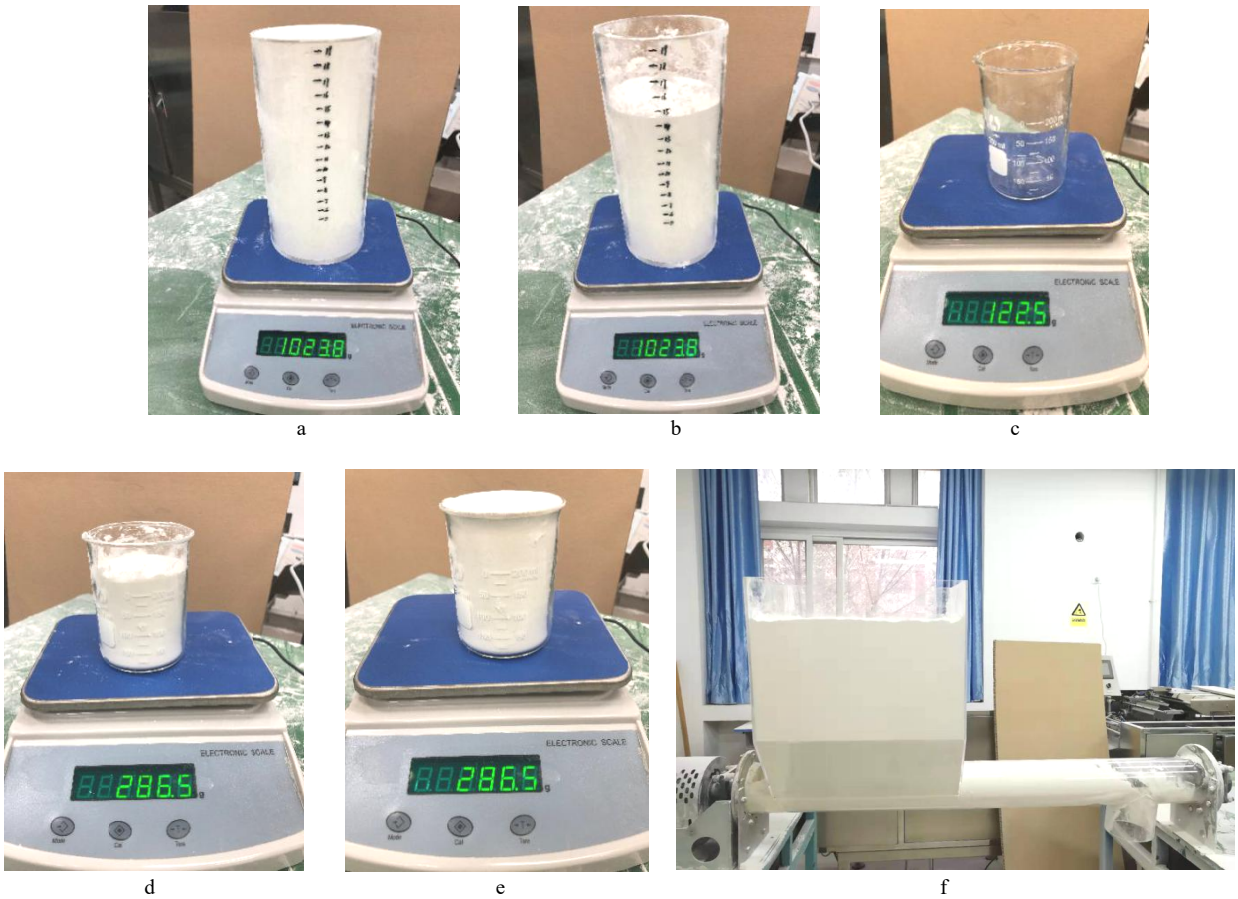
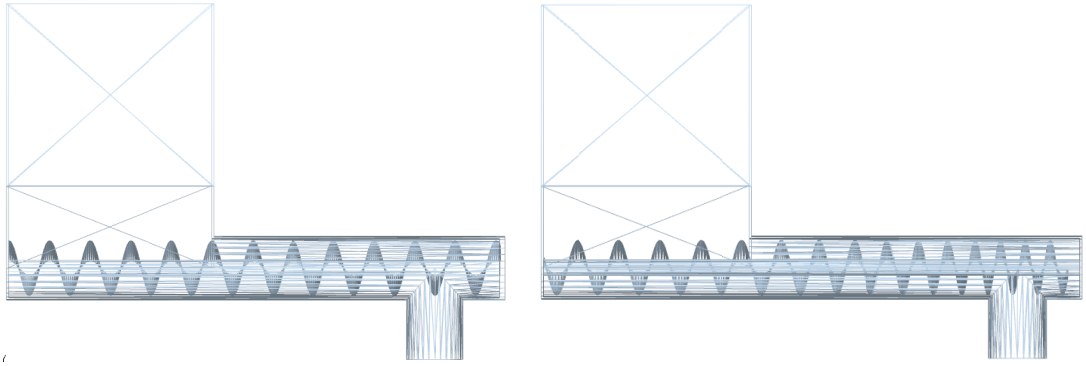


图 1　压实密度测定实验

Fig.1 Compaction density measurement experiment



a 等距螺旋　　b 变距螺旋

图 2　仿真模型
Fig.2 Simulation model

2.2　仿真分析

2.2.1　仿真模型

用三维建模软件分别建立等螺距螺旋与变螺距螺旋的虚拟装配模型，导入 EDEM 离散元软件进行仿真分析。输送总长度为 1300 mm，仿真颗粒采用单颗粒模型，生成方式选择为 Dynamic 生成。为符合实际情况，预设仿真流程为：先调整重力方向与颗粒下落方向一致，重力加速度大小为 9.81 m/s^2；设置颗粒的下降速度，使生成颗粒数量填满料斗；在颗粒生成过程中，螺旋输送装置保持静止状态，待粉体颗粒充满料仓后，对螺旋输送装置转速进行参数设置。设置转速为 120 r/min，仿真步长为 0.05 s，总仿真时间设置为 10 s。

2.2.2　仿真参数设置及过程分析

由于面粉颗粒较小以及离散元软件本身的局限性，结合相关文献[12—14]，在不影响仿真结果的前提下，对面粉颗粒的离散元仿真进行缩放。结合软件内置的 GEMM 数据库[15—16]，各仿真参数的设置情况见表 2。

2.2.3　质量流量分析

对于螺旋输送装置的性能评价，质量流量是重要指标之一。故仿真在后处理时，分别对等螺距与变螺距输送装置的质量流量进行数据采集分析。为保证数据采集合理有效，将传感器设置在输送端末端位置，取输送过程中间的时间段采集数据，对于等螺距螺旋与变螺距螺旋，分别对比观测数据的波动情况，分析质量流量的稳定性程度，结果见图 4。

由仿真结果可知，由于输送过程中螺旋叶片的影响，等距螺旋与变距螺旋在输送时流量都有随着时间起伏的趋势。等距螺旋的波动范围在 0.47 左右，变距螺旋的波动范围在 0.19 左右，相对于等距螺旋而言变距螺旋输送的质量流量波动有明显的降低，表明此变距螺旋的设计有利于提高物料质量流量的稳定性。

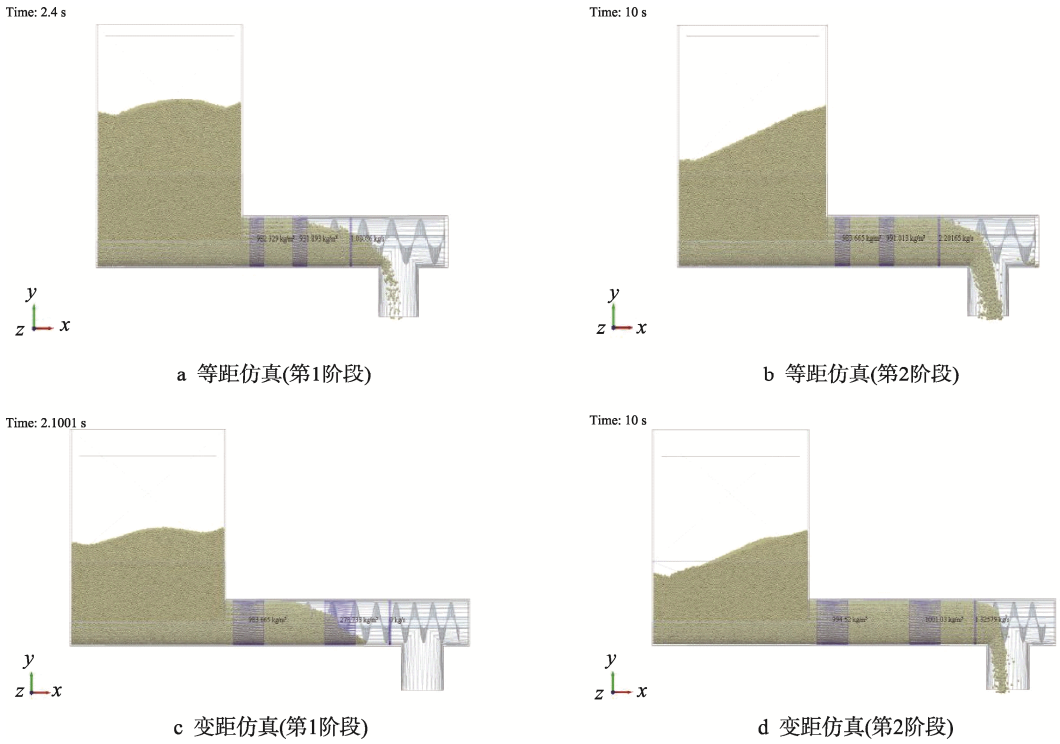
2.2.4　物料密度分析

对输送段各螺距位置，设置密度检测传感器，将传感器设置为圆柱形，直径与螺旋输送的内径一致，可以完全检测到输送过程中的密度数据。利用密度传感器分别检测输送过程中不同位置的密度，提取数据后导入 Excel 表格中，对比等螺距螺旋与变螺距螺旋的密度数据，将数据放入 Origin 软件中进行处理，得到整个输送过程中物料密度数据的变化趋势及等螺距螺旋与变螺距螺旋的密度趋势对比，结果见图 8。

由图 6 可以看出，在等距螺旋中，进料段的物料由于料仓上方物料的重力作用，密度逐渐有增大的趋势，在物料完全输送过下料段部分后，没有料仓内物料的挤压，物料密度减小，随后密度基本保持均匀，在输送至下料段时，由于物料倾泻，密度大幅减小。同样，由图 6 可知，在变螺距螺旋输送过程中，下料段采用同样的等距螺旋，物料密度变化趋势与等距螺

表 2　仿真参数设置
Tab.2 Settings of simulation parameter

仿真参数	数值
面粉密度/(kg·m^{-3})	1960
面粉泊松比	0.25
面粉剪切模量/MPa	60
面粉-面粉恢复系数	0.45
面粉-面粉静摩擦因数	0.5
面粉-面粉滚动摩擦因数	0.1
不锈钢密度/(kg·m^{-3})	7800
不锈钢泊松比	0.3
不锈钢剪切模量/GPa	70
面粉-不锈钢恢复系数	0.4
面粉-不锈钢静摩擦因数	0.5
面粉-不锈钢滚动摩擦因数	0.5

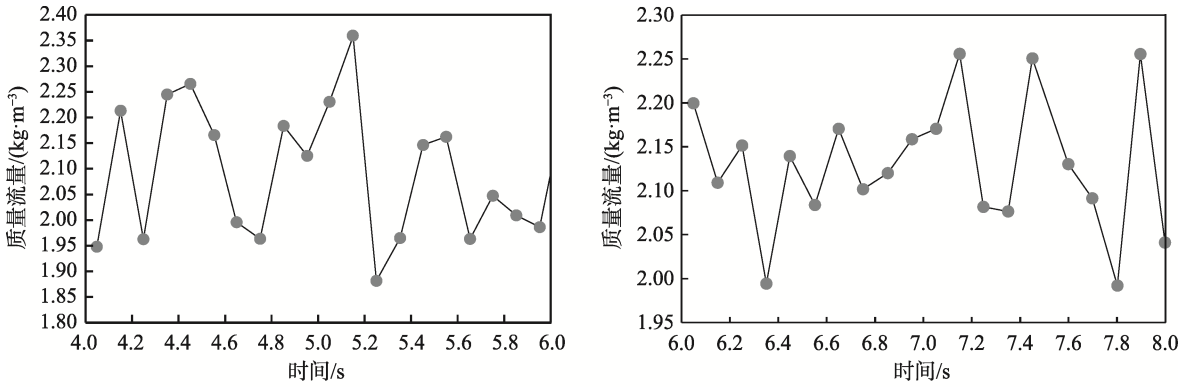


a 等距仿真(第1阶段)　　b 等距仿真(第2阶段)

c 变距仿真(第1阶段)　　d 变距仿真(第2阶段)

图 3　仿真过程

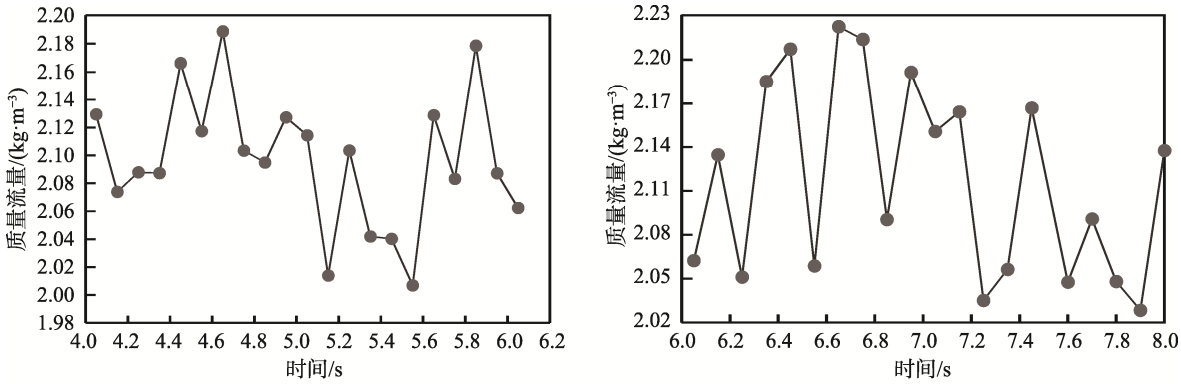
Fig.3 Simulation process



a 第1阶段　　b 第2阶段

图 4　等距螺旋质量流量

Fig.4 Mass flow of constant pitch screw



a 第1阶段　　b 第2阶段

图 5　变距螺旋质量流量

Fig.5 Mass flow of variable pitch screw

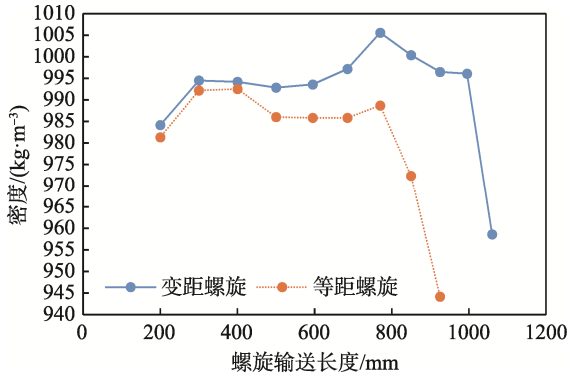


图 6　物料密度
Fig.6 Material density

旋趋势一致，而在物料初进密实段时，物料密度基本保持稳定，并未发生减小的情况，最后进入密实段后物料密度明显有增大的趋势，且与等螺距螺旋输送相比，密度明显增大，密实效果得到了很好的提升。在图 6 中，将等距螺旋与变距螺旋对比明显得出，在螺旋输送密实段，变螺距螺旋的设计，随着密实段螺距的减小，使得物料的密度均匀地增加，密实度得到了很大的提升。将仿真结果处理后可知，物料的密实度提升了约 6.543%，表明密实段变螺距螺旋的设计是合理的。

3　结语

对于在粉体物料螺旋输送过程中，由于物料夹气、密实度不足从而降低包装机输送效率的问题，设计了出一种由下料段、密实段和卸料段组成的三段式变螺距螺旋。采用等差数列设计原则，得出了密实段变螺距的各个螺距数值，密实段总长为 660 mm，共 8 段螺距，最大螺距为 100 mm，每段螺距递减 5 mm，最小螺距为 65 mm。

通过 EDEM 仿真软件对物料进行螺旋输送仿真。由仿真结果可知，所设计变螺距螺旋输送物料密度提高了 6.543%，输送物料的质量流量提高了 2.475%，有效增加了物料密度，提高了螺旋输送的效率。

参考文献：

[1] 张恒宇，李艳洁，刘春飞．基于 DEM 仿真与试验验证的双轴螺旋输送机结构优化分析[J]．中国农业大学学报，2019，24(4)：148—156.
ZHANG Heng-yu, LI Yan-jie, LIU Chun-fei. Structure Optimization Analysis of a Two-axis Screw Conveyor Based on DEM Simulation and Experimental Verification[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(4): 148—156.

[2] 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.
ZHAO Dong-mei, YU Shu-hao. Pitch Design and Performance Analysis of Variable Pitch Screw Conveyor[J]. Mechanical Design & Manufacturing, 2018(6): 52—55.

[3] 郝友莉，唐正宁，季婷婷．粉体包装机密实输送螺杆的设计[J]．轻工机械，2017，35(5)：12—15.
HAO You-li, TANG Zheng-ning, JI Ting-ting. Design of Compact Conveying Screw for Powder Packaging Machine[J]. Light Industry Machinery, 2017, 35(5): 12—15.

[4] 李飞翔，李永祥，徐雪萌，等．变螺距螺旋结构的螺距设计与仿真分析[J]．包装工程，2019，40(13)：214—221.
LI Fei-xiang, LI Yong-xiang, XU Xue-meng et al. Pitch Design and Simulation Analysis of Variable Pitch Helical Structure[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(13): 214—221.

[5] 徐雪萌，李飞翔，李永祥，等．定量变距螺旋结构设计与试验[J]．农业机械学报，2019，50(12)：89—97.
XU Xue-meng, LI Fei-xiang, LI Yong-xiang, et al. Design and Experiment of Quantitative Variable Pitch Spiral Structure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 89—97.

[6] 郝友莉．粉体包装螺旋式密实输送研究[D]．无锡：江南大学，2017：9—23.
HAO You-li. Study on Spiral Packing of Powder Packaging[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017: 9—23.

[7] 薛利．变径变螺距螺旋分料器的设计及抗离析研究[J]．筑路机械与施工机械化，2014，31(11)：96—100.
XUE Li. Research on Design and Anti-segregation of Variable Diameter and Pitch Screw Distributor[J]. Road Construction Machinery and Construction Mechanization, 2014, 31(11): 96—100.

[8] 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 Wen-jiang. Design and Calculation of Constant-diameter Variable-pitch Screw Conveyor[J]. Modern Agriculture, 1982(2): 21—22.

[9] 蔡志恩．等差螺距螺杆的螺旋线设计[J]．机械工艺师，1992(10)：12—13.
CAI Zhi-en. Design of Helix of Equal-pitch Screw[J]. Machinery Technologist, 1992(10): 12—13.

[10] 蒙贺伟，高振江，林海．等径变螺距奶牛精确饲喂给料装置设计与试验[J]．农业工程学报，2011，27(3)：103—107.
MENG He-wei, GAO Zhen-jiang, LIN Hai. Design and Experiment of Precision Feeding and Feeding Device for Equal Diameter Variable Pitch Cows[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 103—107.

[11] BATES L. Entrainment Patterns of Screw Hopper Dischargers[J]. Journal of Manufacturing ence & Engineering, 1969, 91(2): 295.

[12] 张克平，黄建龙，杨敏，等. 冬小麦籽粒受挤压特性的有限元分析及试验验证[J]. 农业工程学报，2010, 26(6): 352—356.
ZHANG Ke-ping, HUANG Jian-long, YANG Min, et al. Finite Element Analysis and Experimental Verification of the Compressed Characteristics of Winter Wheat Grain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 352—356.

[13] 宁廷州，李偎，缑亚楠. 基于EDEM的倾斜螺旋输送机输送能力研究[J]. 牡丹江师范学院学报(自然科学版), 2019(4): 38—41.
NING Ting-zhou, LI Wei, GOU Ya-nan. Research on Conveying Capacity of Inclined Screw Conveyor Based on EDEM[J]. Journal of Mudanjiang Normal University (Natural Science Edition), 2019(4): 38—41.

[14] 周佳妮. 基于离散单元法的垂直螺旋输送机数值模拟及实验研究[D]. 杭州：浙江工业大学，2018: 17—47.
ZHOU Jia-ni. Numerical Simulation and Experimental Research of Vertical Screw Conveyor Based on Discrete Element Method[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018: 17—47.

[15] STOIMENOV N, RUZIC J. Analysis of the Particle Motion During Mechanical Alloying using EDEM Software[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(25): 462—466.

[16] 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(5): 131—136.
QIU Ai-hong, GONG Shu-guang, XIE Gui-lan, et al. Parametric Model and Performance Simulation of Variable Diameter and Pitch Screw Axis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008(5): 131—136.