

基于离散单元法的螺旋输送装置 工作过程数值模拟

张克平^{1,2}, 王国华², 柴 强¹

(1. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为了验证组合螺旋输送装置应用于小型收获机的可行性和研究籽粒在其中的流动规律, 本文以散体力学为基础, 依据离散单元法 (DEM) 分析螺旋输送器的输送机理。通过建立输送机三维模型, 以豌豆为例分析其在螺旋内的运动, 应用可视化离散元模拟软件 EDEM 分析等螺距、变螺距输送过程中豌豆颗粒接触数目、豌豆速度、豌豆受力及输送能耗等变化情况, 初步探讨了颗粒破碎原因, 并对输送速度及破碎率进行了试验验证。研究结果显示: 相对于等螺距输送, 变螺距输送在提高输送速度的同时降低了能耗, 且籽粒受力、接触数目较大处主要集中在输送初期, 变螺距输送不仅可以通过提高豌豆颗粒输送速度提高输送效率, 而且能降低颗粒间及颗粒与叶片间挤压与摩擦, 进而改善输送过程中颗粒破碎现象; 颗粒受力最大处主要集中在螺旋叶片外径和箱体内壁之间及两输送器的结合处。

关键词: 收获机; 螺旋输送机; 离散元法; EDEM; 破碎率

中图分类号: S225.6 **文献标志码:** A

Numerical simulation of working process of screw conveyer based on discrete element method

ZHANG Ke-ping^{1,2}, WANG Guo-hua², CHAI Qiang¹

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to verify the feasibility of applying combined conveyor device into small harvester and research the flow rule of grain, this paper based on the granular mechanics, according to the discrete element method (DEM) analyzed the conveying mechanism of screw conveyor. Through established the three-dimensional model of conveyor, analyzed its movement in conveyor taken pea as an example. applying the visual discrete element simulated software EDEM analyzed the change situation of pea grain contact numbers, pea velocity, pea pressure and total energy consumption during conveying process by equal and variable pitch of screw, preliminarily discussed the cause of grain broken, and experimental verification has been conducted for the convey speed and broken rate. The results showed that: Relative to the equal pitch transportation, by variable pitch transportation the conveying velocity can be increased, while the energy consumption can be reduced, also the grain pressure and large contact numbers were mainly concentrated in the early conveying period. So the variable pitch transportation was not only increased the conveying efficiency by raising the conveying grain speed, but also reduced the squeeze and friction between particles and grain with blades, and then improved the grains broken phenomenon in conveying process. The maximal grain pressure force position was mainly concentrated between the external diameter of screw blade and case inner wall and the junction of two conveyers.

Keywords: harvester; screw conveyor; discrete element method; EDEM; broken rate

收稿日期: 2015-12-29

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAD14B10); 国家公益性行业计划课题(20110301); 国家自然科学基金项目(51265001); 甘肃省自然科学基金(1506RJZA021); 甘肃农业大学伏羲青年英才培养计划项目(FXYC20130103); 甘肃农业大学青年导师基金(GAU-QNDS-201405)

作者简介: 张克平(1981—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为农产品加工机械及摩擦磨损。E-mail: zhangkp@gsau.edu.cn。

通信作者: 柴 强(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事多熟种植及循环农业研究。E-mail: chaiq@gsau.edu.cn。

螺旋输送机(搅龙)是一种不具有挠性牵引构件的旋转类型的物料输送装置,广泛应用于农业物料的输送、收获、加工等生产作业机械,主要用来输送粮食、油料及其它物料,并可以完成物料混合、压缩、揉搓等作用,具有结构简单、制造容易、操作维护简单方便、系统密闭性好等特点^[1-3]。螺旋输送机是小型和微型粮食作物联合收获机重要部件之一,主要由螺旋轴、螺旋叶片、机壳、轴承等组成,在一系列的收获作业中,螺旋输送器的输送效率决定着后续工序(如筛分、清选等)的作业质量。因此,开展螺旋输送技术研究,优化设计其结构,提高其工作性能,对促进螺旋输送技术应用推广具有重要的意义。

目前,螺旋输送装置设计主要采用传统的设计方法,如经验试算法、类比法、制图法等,在理论研究方面,有学者对饲料、矿用螺旋输送机设计参数的选择进行了论证^[5-6],通过运动学与动力学分析,对开式螺旋输送机和螺旋给料机的设计参数、工作原理进行了阐述和推导^[7-8],也有学者针对煤粒螺旋输送系统、粒子冲击钻井技术中钢球螺旋输送器的输送特性进行了实验研究,得出的试验结论为装置的后续应用设计和设备制造提供了指导^[9-10]。

离散单元法(DEM)是计算散体系统力学行为的数值方法,它把整个散体系统分解为有限数量的离散单元,每个颗粒/块体为一个单元,根据全过程中的每一时刻各颗粒间的相互作用和牛顿运动定律的交替反复运用预测散体群的行为。早在 1998 年, Groger 首次利用离散单元法(DEM)分析了管道输送装置的输送性能^[11],从微观角度系统分析了管道输送特性。张西良、罗胜等人为提高螺旋加料机定量加料性能,解决其输送效率和解决加料量不稳定、能耗高等问题,进行了颗粒尺寸对螺旋加料机定量加料性能影响的 DEM 模拟试验研究,其研究结果为螺旋加料机的设计提供了重要参考^[12-13]。而应用 DEM 模拟联合收获机螺旋输送装置工作过程并优化性能参数以提高其输送效率的研究尚未见报道。

本文以课题组研制的小型豌豆收获机为研究对象,基于散体力学 DEM,对所设计的豌豆组合螺旋输送装置进行输送过程的 EDEM(extended distinct element method)动态模拟,通过可视化的输送过程分析工作性能,得出不同输送形式输送过程中相关参数的变化曲线,并对模拟结果进行试验验证。

1 总体结构及模型参数的选择与建立

1.1 总体结构

豌豆组合螺旋输送装置由两根有一定夹角的输

送搅龙及箱体组成,其作用是将脱粒装置筛分出的豌豆输送至装料箱中。参考一般大型谷物联合收获机械及工业输送装置的经验设计^[14-15],结合本课题组研制豌豆收获机的技术要求,设定螺旋输送装置结构参数如表 1 所示。

表 1 螺旋输送装置结构参数			
Table 1 The structure parameters of screw convey device			
参数 Parameter	计算依据 Calculation basis	单位 Unit	数值 Value
总体长度 L Overall length	总体结构 Overall structure	mm	600
轴径 d Axial diameter	$d = (0.04 - 0.06) L$	mm	30
螺旋外径 D Outside diameter of screw	标准系列 Standard series	mm	120
螺距 p Pitch	$p = (0.75 - 1.2) D$	mm	90
两搅龙夹角 α Angle between two screw conveyers	总体结构 Overall structure	($^{\circ}$)	50

基于上述参数计算输送装置的输送效率 $Q(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$,其推算公式如下:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot K \cdot \psi \cdot \gamma \cdot \frac{p \cdot n}{60} (D^2 - d^2) \quad (1)$$

式中, K 表示考虑螺旋输送装置倾斜时输送效率的降低系数,取 $K = 0.48$; D 表示螺旋输送器的外径; d 为螺旋输送器的轴径; p 为螺距; ψ 为填充系数,当输送谷粒时 $\psi = 0.3 - 0.8$; γ 表示输送物料的密度(考虑到豌豆收获时含水率不同,取平均密度 $\gamma_{\text{豌豆}} = 780.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[16])。

根据动力机的功率,确定收获机的喂入量为 $0.28 \sim 0.4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$;螺旋输送器的转速 n 在满足输送要求的前提下尽量小,取 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。通过上述参数代入公式计算得到 Q 约为 $2.14 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,其值远远大于收获机喂入量,因此以上参数取值满足输送要求。

1.2 模型参数的选择与建立

本文采用多用途离散单元法软件 EDEM 进行模拟,在三维绘图软件 Solidworks 中建立螺旋输送装置的三维造型,另存为 IGS 格式,再导入到 EDEM 中,通过相应的结构和操作参数设置,进行数值模拟;最后再利用 EDEM 数据分析工具和三维可视化工具进行数据后处理,对结果进行比较分析^[17]。

豌豆品种‘绿豌豆 1 号’由甘肃省农科院提供,颗粒饱满,无损伤与虫害,各豌豆籽粒大小差异不大。取 100 粒形状大小相似的豌豆籽粒进行尺寸统计分析,平均半径为 3.02 mm ,豌豆密度 $\gamma = 780.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,其三维模型如图 1 所示。

为了导入 EDEM 中减少不必要的网格划分、减少模拟运行时间,对螺旋输送装置的模拟模型进行了简化,略去实际情况中的脱粒滚筒、传动链轮及轴的倒角,导入模型如图 2 所示。

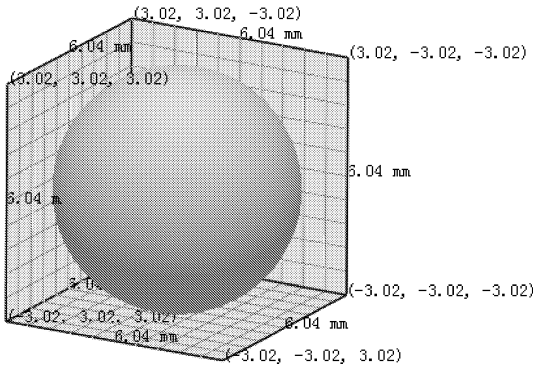
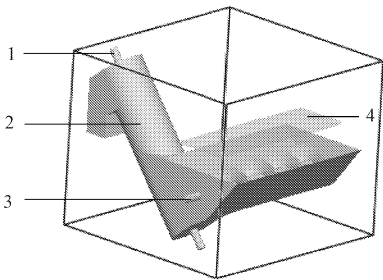


图 1 豌豆籽粒模型
Fig.1 The model of pea grain



1. 倾斜螺旋;2. 输送器外壳;3. 水平螺旋;4. 颗粒模型生成平面
1. Oblique screw; 2. Conveyor shell; 3. Horizontal screw; 4. Plane of grain model

图 2 组合螺旋输送机模拟模型

Fig.2 The simulation model of combined screw conveyor

2 模拟方法及参数设置

2.1 模拟方法

小型豌豆收获机中螺旋输送机工作性能的主要考核指标是输送效率、能耗及籽粒破碎率。根据固体输送理论,影响这些指标的因素有很多,如转速、螺距、螺旋叶片的内径和外径、填充系数等,而根据喂入量、收获机的具体尺寸及动力机功率分配情况,转速、螺旋叶片尺寸和填充系数均可以确定。本研究针对输送装置具体情况和输送性能影响因素,首先对所设计的组合螺旋输送装置进行模拟,通过 EDEM 的后处理功能,生成可视化的输送模拟过程,考察分析其是否满足输送需求;其次,针对在小型豌豆收获机工作过程中因滚筒脱粒沿轴向不均匀(脱粒滚筒长度约 40%~70% 位置处脱粒较多,脱粒彻

底,粒流量大的特点)导致等螺距输送搅龙中段输送量较大的实际工况,选取螺距为变量,采用变螺距设计,优化螺旋输送器结构,完成等螺距、变螺距两种形式输送过程模拟;最后,结合模拟过程处理结果,对两种输送形式下的豌豆籽粒接触数目、输送速度、受力及能耗进行对比分析。

2.2 参数设置

模拟模型导入 EDEM 后需要进行模拟参数的设置。豌豆籽粒和输送装置的材料参数和接触参数设置见表 2 和表 3,鉴于采用滚筒栅板组合脱粒筛分,其特殊性在于豌豆颗粒通过过滤栅板自由下落到水平输送器上,本文采用 EDEM 中特有的颗粒工厂作为栅板,生成颗粒自由下落,喂入量取 $0.4\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$;设置籽粒生成速率为 $0.4\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,模拟时间为 11.5 s,总共产生物料 3.5 kg,籽粒个数约为 43 000~45 000 个。为了更为接近实际情况,模拟时让籽粒晚于输送装置运转 0.05 s 生成。

表 2 材料参数设置
Table 2 The material parameter settings

材料 Material	泊松比 Poisson's ratio	剪切模量 Shear modulus /Pa	密度 Density $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
豌豆 Pea	0.3	3.0×10^7	780.6
钢 Steel	0.3	7×10^{10}	7800

表 3 输送机仿真模型的材料接触参数
Table 3 Material contact parameters of simulation model of conveyor

接触形式 Contact form	恢复系数 Coefficient of restitution	静摩擦系数 Coefficient of static friction	动摩擦系数 Coefficient of kinetic friction
豌豆—豌豆 Pea—pea	0.6	0.5	0.01
豌豆—壁面 Pea—steel	0.6	0.3	0.01

3 模拟结果及分析

3.1 可视化输送过程分析

水平螺旋输送装置的工作原理是当物料进入该装置时,由于物料本身的重力以及与机槽之间的摩擦力作用,使堆积在料槽底部的物料不随螺旋体旋转,而在螺旋叶片的推动下沿料槽底向前移动,从而达到输送物料的目的。对本研究所设计的组合输送装置进行模拟时,为了减少颗粒在输送结合处的堆积,倾斜螺旋搅龙转速设置比水平搅龙略高^[3],其它参数相同。

为了清晰观察籽粒的输送过程,设置组合螺旋输送器的模型以 Mesh 形式显示。为力求数据准确,模型网格划分取颗粒半径的 2 倍,时步经瑞利公式

折算后为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{[18-19]}$,组合输送器的模拟输送过程如图 3 所示。

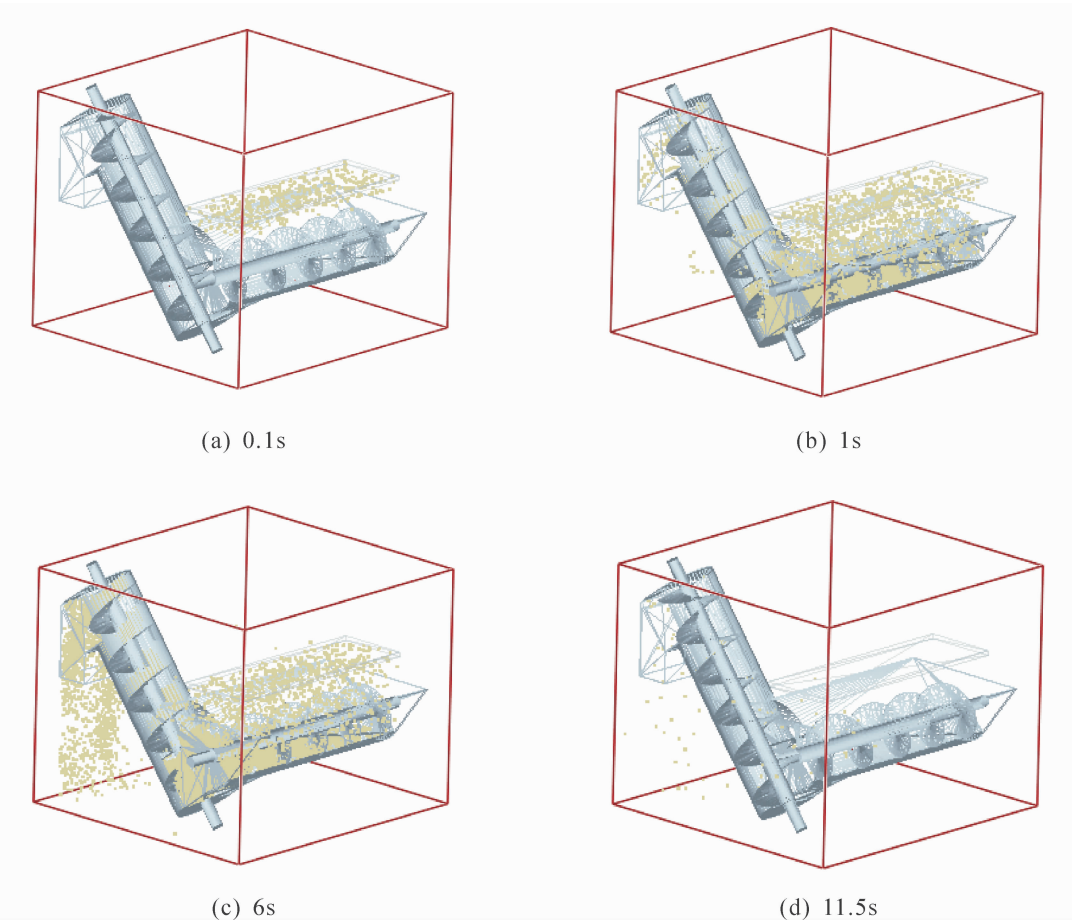


图 3 输送过程模拟
Fig.3 Simulation of conveying process

由图 3 可以看出,在 0.1 s 时(图 3a 所示),由颗粒工厂生成的自由下落颗粒开始到达水平螺旋输送装置;在 1 s 时(图 3b 所示),下落颗粒随水平输送机转动做轴向运动,部分颗粒被输送至倾斜螺旋搅龙,个别颗粒从出料口排出;在 6 s 时(图 3c 所示),模拟输送达到稳定状态,出料口稳定卸料;在 11.5 s 时(图 3d 所示),模拟结束,所生成的颗粒基本输送完毕。从模拟过程直观分析,该装置设计完全满足豌豆颗粒输送要求。但从图 3c 可以看出,水平输送机螺旋从右至左造成颗粒堆积现象,在两根搅龙的结合处堆积现象尤为显著。

3.2 变螺距输送模拟

螺距不仅决定着螺旋的升角,而且对物料轴向速度、圆周速度、螺旋面与物料的摩擦力及在一定填充系数下颗粒运行的滑移面起决定性作用,所以螺距的大小直接影响着物料输送过程。当输送量和直

径一定时,改变螺距,颗粒运动的滑移面随之改变,从而改变颗粒运动速度和输送率。为了缓解图 3c 所示颗粒堆积现象以及在小型豌豆收获机工作过程中因滚筒脱粒沿轴向不均匀导致搅龙中段输送量较大的实际工况,本研究进行了另一种方案的模拟,即倾斜搅龙参数不变,水平搅龙采取变螺距设计,在可行的取值区间内通过沿靠近倾斜搅龙方向逐渐增加螺距来增大输送器的轴向输送速度。经过多次试模拟,确定其结构如图 4 所示。

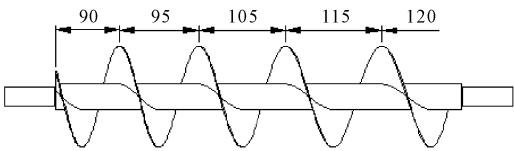


图 4 变螺距输送机尺寸/mm
Fig.4 The size of chang screw pitch conveyor

3.2.1 豌豆颗粒接触数目分析 颗粒的总接触数目代表输送器内物料的填充量,接触数目的变化能够反映输送速度及效率。利用 EDEM 划分网格的方法记录颗粒间的接触,设置网格单元的边长为 $2R$ (R 为颗粒半径),数据的输出间隔为 0.01 s ,记录输送过程中颗粒的接触数目变化,将数据转换为 csv 格式,导入 Origin 生成两种螺距形式下豌豆接触数目曲线如图 5 所示。

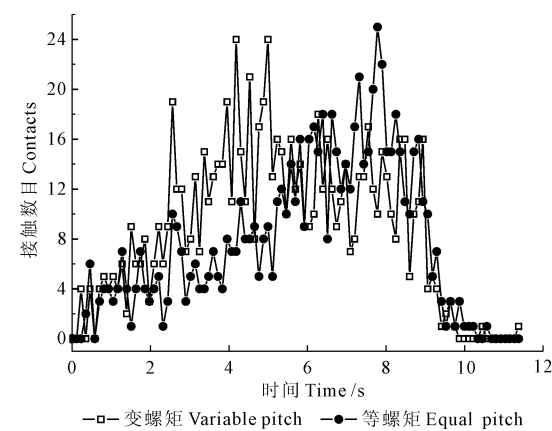


图 5 豌豆接触数目变化
Fig.5 Change of pea's contact number

由图 5 可以看出,两种输送形式下颗粒接触数目变化曲线可以划分为两个阶段,在模拟过程的 $0\sim 5\text{ s}$ 之间,变螺距接触数目变化大于等螺距;在 5 s 以后,等螺距输送中颗粒接触数目明显增加,而变螺距输送中后期接触数目降低,这是由于在变螺距输送器中,螺旋叶片间的容积变大,使得较多的颗粒堆积在同一螺槽间,随着颗粒的继续掉落,增大了颗粒间的接触, 5 s 左右时,螺槽间的颗粒填充容量趋于饱和;在输送的中后期,变螺距颗粒接触数目相对于等螺距的减小,证明变螺距输送器能更有效地输送颗粒,从而提高输送效率,减低后期水平螺旋的输送压力,降低此过程中颗粒间的挤压与摩擦,有利于对籽粒的保护,降低破损率。

3.2.2 豌豆颗粒输送速度分析 通过 EDEM 的后处理功能对两种形式的水平输送器工作过程中豌豆颗粒轴向速度进行模拟分析,设置模拟过程数据的输出间隔为 0.01 s ,将数据转换为 csv 格式,导入 Origin 生成两种螺距形式下豌豆速度曲线如图 6 所示。

由图 6 轴向速度曲线可以看出,在两种形式输送中,豌豆颗粒速度在极短的时间内上升至 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,然后稳定保持在 $1.0\sim 1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,模拟输送至约 10 s 左右时,颗粒速度开始增大,直至输送结束。 10 s 后颗粒速度的增大是由于模拟后期,输送器内的颗粒数目减少,颗粒间的阻力减小所

致。另一方面,在输送过程中,变螺距输送颗粒运动速度均高于等螺距输送,说明变螺距设计方案可以有效提高颗粒输送效率。

3.2.3 豌豆颗粒受力分析 豌豆籽粒在输送过程中的受力主要包括颗粒之间相互作用及螺旋叶片对颗粒的推动作用。通过 EDEM 的后处理功能对两种形式的水平输送器工作过程中豌豆颗粒受力状况进行模拟分析,设置模拟过程数据的输出间隔为 0.01 s ,将数据转换为 csv 格式,导入 Origin 生成两种螺距形式下豌豆受力曲线如图 7 所示。

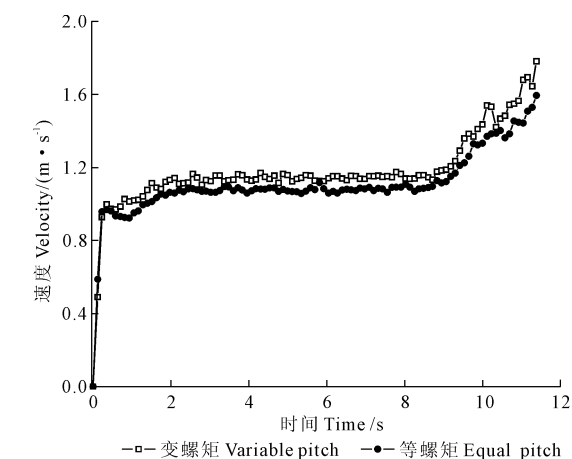


图 6 豌豆速度变化
Fig.6 Change of pea velocity

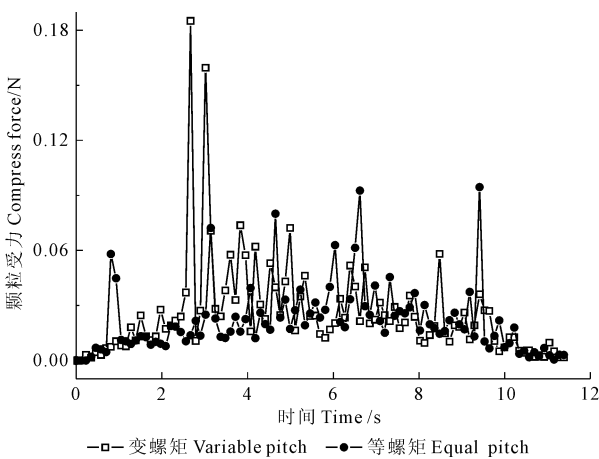


图 7 豌豆受力变化
Fig.7 Force change on pea

由图 7 可以看出,在两种形式螺距输送过程中,颗粒受力在多处出现显著局部波峰,这是由于螺旋叶片在将垂直下落至螺距间的颗粒沿水平方向推动时,需要施加较大的作用力,同时也包括此过程中颗粒之间的相互作用力。局部波峰在变螺距输送过程的 3 s 左右尤其显著,是由于叶片间的容积随螺距的变大而增大,使得较多的颗粒堆积在同一螺槽间,进而增大了推动这些颗粒水平运动所需的作用力。

总体来看,在变螺距输送的中后期,豌豆颗粒的受力趋于平缓,而等螺距曲线输送中后期豌豆颗粒受力趋于增强,且所受力大于变螺距,说明变螺距输送器具有较稳定的输送能力,而且有利于减少输送过程中颗粒的破碎和破皮损伤,降低破碎率。

3.2.4 豌豆输送能耗分析 能耗是评价机械设备的重要指标。螺旋输送机工作过程中,降低能耗可以确保颗粒输送平稳,减少颗粒擦碰,进而降低颗粒破碎率。通过 EDEM 的后处理功能对两种形式的水平输送机工作过程中豌豆颗粒的能耗状况进行模拟分析,设置模拟过程数据的输出间隔为 0.01 s,记录豌豆颗粒在输送过程中的能量变化如图 8 所示。

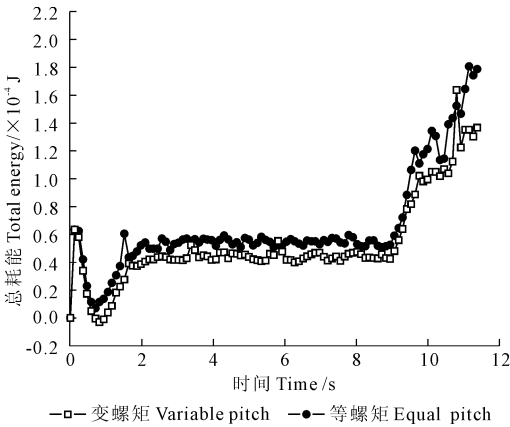


图 8 总能量变化
Fig.8 Change of total energy

由图 8 可以看出,在输送的 0~1 s 内,能量曲线表现为低-高-低的波动趋势,这是由于颗粒自由下落后,部分堆积在箱体底部,随后受螺旋叶片的摩擦与推运进行轴向运动并获得稳定的速度;随着颗粒的增多并获得稳定轴向速度,输送过程趋于稳定,颗粒的总能量变化增大到稳定值后趋于平缓;到输送后期,随着颗粒数目的逐渐减少,颗粒间及颗粒与螺旋叶片间的摩擦和挤压减少,颗粒速度也随之增大(见图 6),总能量也出现上升趋势。在输送过程中,变螺距输送中颗粒所具有的总能量明显低于等螺距输送,说明变螺距输送能耗较低。

3.2.5 豌豆破碎现象分析 为了研究螺旋输送机工作过程中物料破碎状况,在模拟过程中对受力不同的颗粒进行了颜色标记,红色代表受力最大,蓝色代表受力最小,两种输送形式下水平输送机、水平与倾斜输送机结合处的可视化输送如图 9 所示。

由图 9 可以看出,在两种形式的输送过程中,颗粒受力最大处均主要集中在螺旋叶片外径和箱体内壁之间及两输送器的结合处,而其它正常输送区域内的豌豆颗粒受力较小且分布均匀,因此,两种形式正常输送过程中的颗粒均不会因受力增大而造成破碎,部分豌豆颗粒落入螺旋叶片外径与箱体内壁之间以及两输送机旋转叶片结合处,受到摩擦、挤压甚至切割作用,是造成颗粒破碎的主要原因。

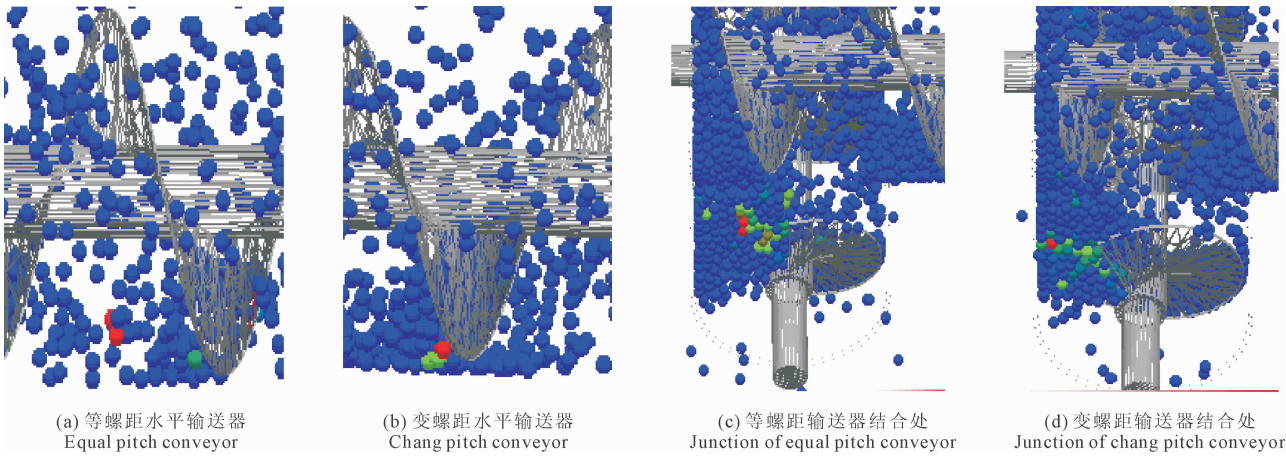


图 9 颗粒受力
Fig.9 The force on grain

4 试验验证

试验平台为本课题组研制的豌豆联合收获机,其螺旋输送装置与模拟模型具有相同的结构,为降低收割、脱粒等环节对试验考核指标的影响,试验时拆除脱粒滚筒、拨禾轮等部件,仅利用动力机通过传

动装置驱动螺旋输送装置工作,每次试验开始时将 3.5 kg 定量豌豆颗粒均匀输送至过滤栅板,实现自由下落到水平输送机,与模拟过程中颗粒工厂作为栅板生成颗粒自由下落的喂料方式尽量吻合。通过豌豆籽粒输送试验,验证等螺距、变螺距两种形式输送过程并比较分析输送效率及破碎率。通过预实验

及可视化模拟过程观察,在输送 3.5 kg 物料过程中,输送开始至 9 s 左右,出料口卸料开始不连续,因此输送效率的考核指标选择前 9 s 的出料量,取 3

次试验的平均值作为最终试验值。试验结果如表 4 所示。

表 4 试验结果
Table 4 The test results

试验指标 Test index	前 9 s 输出量 Volume of output in 9 s/kg				破碎率 Broken rate/%			
	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 1	平均值 Average	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 1	平均值 Average
等螺距输 Equal pitch	3.02	3.10	3.07	3.06	0.08	0.07	0.07	0.07
变螺距输 Variable pitch	3.33	3.42	3.31	3.35	0.06	0.06	0.04	0.05

由表 4 试验结果可知,变螺距输送形式的前 9 s 输出量占总喂料量(3.5 kg)的 95.71%,相对于等螺距形式提高了 9.48%,有效提高了输送效率,且颗粒破碎率小于等螺距输送形式,从而部分验证了模拟结果。

5 结 论

1) 对小型豌豆收获机的等螺距螺旋输送装置进行了 DEM 模拟,从模拟过程直观分析,该装置设计满足豌豆颗粒输送要求,但水平输送器螺旋从左至右造成颗粒堆积现象,尤其在两根搅龙的结合处尤为显著。

2) 从微观角度对等螺距、变螺距两种形式螺旋输送器模拟过程的颗粒接触数目、豌豆速度、豌豆受力及输送能耗等相关参数进行了记录输出,并进行了比较分析。相对于等螺距输送,变螺距输送在提高输送速度的同时降低了能耗,且籽粒受力、接触数目较大处主要集中在输送初期,表明变螺距输送不仅可以通过提高豌豆颗粒输送速度提高输送效率,而且能降低能耗、降低颗粒间及颗粒与叶片间挤压与摩擦,进而改善输送过程中颗粒破碎现象。并通过输送试验对输送效率及破碎率进行了验证。

3) 结合模拟过程中颗粒受力状况对颗粒破碎原因进行分析,颗粒受力最大处主要集中在螺旋叶片外径和箱体内壁之间及两输送器的结合处。该区域颗粒受到摩擦、挤压甚至切割作用,是造成颗粒破碎的主要原因。

参 考 文 献:

[1] 胡勇克.螺旋输送器的原理与设计[J].南昌大学学报(工学版),2000,22(4):30-34.

[2] 武文斌,王 新,兰延坤.谷物颗粒在输送过程的质量控制[J].粮食与食品工业,2006,13(3):17-19.

[3] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007:970-980.

[4] 崔再兴,李 玲.豌豆的特征特性及开发利用价值[J].杂粮作物,2010,30(2):154-155.

[5] 陈广富,徐余伟.饲料螺旋输送机设计参数的选择和确定[J].饲料工业,2008,29(15):1-5.

[6] 崔西海,任建鹏,邓齐齐,等.矿用螺旋输送机设计参数的选择和确定[J].煤矿机械,2013,34(5):24-25.

[7] 孙 杰,尹忠俊,陈 兵.开式螺旋输送原理分析与参数设计[J].起重运输机械,2010,(5):11-16.

[8] 李振亮,付长江,李 亚.定量螺旋给料机的结构研究[J].盐业与化工,2010,39(1):27-29.

[9] 陈汝超,陈晓平,蔡佳莹.粒煤螺旋输送特性实验研究[J].煤炭学报,2012,37(1):154-157.

[10] 崔海博,赵惠清,张 杨,等.球形物料螺旋输送能力影响因素的试验分析[J].起重运输机械,2012,(11):87-90.

[11] 乌兰雅图,王春光.螺旋输送装置的研究现状及未来发展[J].农机化研究,2014,(11):244-248.

[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):19-27.

[13] 罗 胜,张西良,许 俊,等.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.

[14] 中华人民共和国机械工业部.螺旋输送机[S].北京:中国标准出版社,1996.

[15] 徐福生,万 霖,衣淑娟.钉齿滚筒轴流脱粒与分离的试验研究[J].现代化农业,2005,(9):33-34.

[16] 潘光杰,孙传祝,张志杉,等.揉搓式豌豆脱皮机研究与设计[J].食品与机械,2012,28(4):146-148.

[17] 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.

[18] 王国强,郝万军,王 继.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.

[19] Ferellec J F, Mcdowell G R. A method to model realistic particle shape and inertia in DEM[J]. Granular Matter, 2010,12:459-467.