

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.03.006

基于离散元法的玉米颗粒振动筛分过程模拟研究

刘瑞, 闫俊霞*, 陈国强, 何雪明

(江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要:为了探究玉米颗粒在直线振动筛面上的运动情况,课题组以散体力学为基础,依据离散单元法分析玉米颗粒振动筛分机理。通过建立直线振动筛三维模型,分析玉米颗粒在振动筛面上的运动,应用可视化离散元模拟软件 EDEM 分析振动筛面在上下直线运动的情况下,玉米颗粒速度变化情况得出以玉米圆颗粒为基础模型,直线振动筛相关的一些参数的变化对筛分过程中颗粒速度和位置的影响。仿真结果表明:不同形状的筛孔、不同下落高度和不同形状颗粒都对筛分效果产生影响。课题组的研究为设计和优化直线振动筛提供了参考。

关键词:振动筛;玉米颗粒;离散元法;可视化离散元模拟软件 EDEM

中图分类号:O321;TS210.3 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)03-0031-05

Simulation Study of Corn Particle Vibration Screening Process Based on Discrete Element Method

LIU Rui, YAN Junxia*, CHEN Guoqiang, HE Xueming

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to explore the movement of corn particles on the linear vibrating screen, the vibration screening mechanism of corn granules was analyzed based on granule mechanics and the discrete element method EDEM was used. A three-dimensional model of a linear vibrating screen was established to investigate the movement of corn particles on the vibrating screen. The visual discrete element simulation software EDEM was used to analyze the up-and-down motion of the vibrating screen and the speed change of the corn particles. A model based on corn particles was established to study the influence of the parameters related to linear vibrating screen on particle velocity and position during the screening process. Simulation results show that different shapes of sieve holes, falling height and particles have an impact on the screening effect. The results provide a reference for the design and optimization of linear vibrating screen.

Keywords: vibrating screen; corn particle; discrete element method; visual discrete element simulation software EDEM

我国作为农业大国,对玉米等农作物的筛分需求极大,筛分工序对于玉米的加工尤其关键,筛分机械的设计制造的差异会带来不同的筛分效果,在筛分理论方面国内专家学者做过不少探究和试验^[1-3]。但由于机械筛分的过程中,颗粒的运动极其复杂,做实验耗时,且成本高,至今还未形成一种标识化的筛分农作物的知识体系。长期的生产实践和学术探究证明,筛分过程中玉米颗粒的运动速度是影响筛分效果的主要参考对象,也是探究筛分知识系统的本质^[4-5]。课题组以直线振动筛为研究对象,玉米圆颗粒为基础模型,借助

仿真软件 EDEM 对直线振动筛上玉米圆颗粒的运动进行数值模拟分析,探寻筛孔的形状及圆颗粒的下落高度对玉米圆颗粒运动速度的影响,为农作物筛分理论提供参考依据和理论支持。

1 直线振动筛基本工作原理

直线振动筛的筛分运动模型如图 1 所示,筛面沿振动方向作简谐运动,其位移

$$S = A \sin(\omega t), \omega t = \lambda。$$

式中: A 为筛面沿振动方向的单振幅; ω 为振动频率; t 为时间; λ 为振动相角。

收稿日期:2018-11-11;修回日期:2019-01-10

基金项目:国家自然科学基金(51505188)。

第一作者简介:刘瑞(1993),男,江苏盱眙人,硕士,主要研究方向为离散元振动仿真。E-mail:wdysrl@163.com

假设颗粒仅在重力作用下从初始位置自由下落,与振动筛面发生碰撞后做连续的抛掷运动。设颗粒与直线振动筛面第 i 次碰撞的时间为 t_i ,并忽略碰撞过程中时间和筛面碰撞前后的速度变化,则由动量守恒定律可求得颗粒在碰撞后沿筛面法线方向上的速度为:

$$v_{i+} = |v_{i-} - v_{i-} \cdot \sin \delta| \cdot e。$$

式中: δ 为筛面振动方向角; v_{i-} 为第 i 次碰撞前颗粒在 y 方向的速度; v_{i-} 为第 i 次碰撞 t_i 时刻的筛面速度; e 为颗粒弹性碰撞恢复系数。

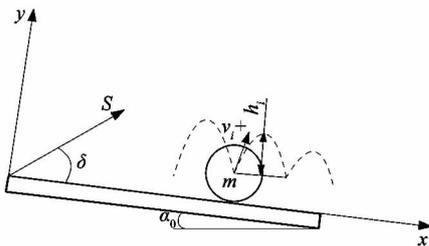


图 1 直线振动筛分过程运动学模型
Figure 1 Kinematics model of linear vibrating screening process

2 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型

Hertz-Mindlin(no slip) 接触模型是 EDEM 中的基础模型,它旨在描述像未固结砂这样的颗粒状物质的微观和宏观力学行为。此外,该模型是大多数离散粒子方法设计的核心,以数字方式解决这些异质材料对外界干扰的响应,如声学 and 应力应变实验。赫兹和 Mindlin 的开创性工作提供了一种联系理论,以对两个固体球体之间的正常和切向痕迹的严格推导,为连续体中的粒间力建模。利用这个模型,我们可以计算颗粒运动碰撞的动力学行为。

3 仿真实验模型及参数设置

利用 Creo 三维制图工具绘制直线振动筛的几何模型,将其导入到离散元软件 EDEM 的 Creator 模块中。图 2 所示为方孔型筛面,图 3 所示为圆孔型筛面。

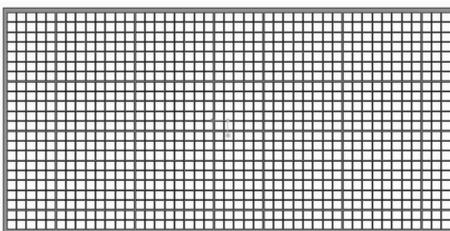


图 2 直线振动筛方孔筛面几何模型
Figure 2 Geometric model of square hole screen surface of linear vibrating screen

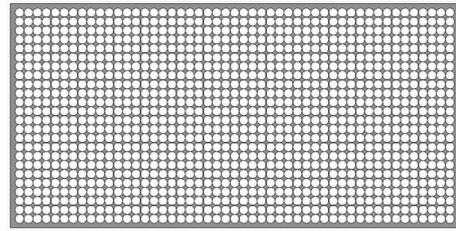


图 3 直线振动筛圆孔筛面几何模型
Figure 3 Geometric model of circular hole screen surface of linear vibrating screen

方形筛孔直线振动筛的几何参数如下:筛面长 500 mm,宽 250 mm,正方形筛孔,筛孔边长 10 mm,间隙 1 mm。圆形筛孔直线振动筛的几何参数如下:筛面长 500 mm,宽 250 mm,圆形筛孔,筛孔直径 10 mm,间隙无。

玉米颗粒形状具有多样性和复杂性,CLEARYPW 三维分析了筛面上固定数量的颗粒,提出了不同的颗粒形状对筛分效率的影响^[6],课题组从圆形单颗粒入手,在 EDEM 的 Particles 面板中,直接输入半径为 5 mm 的圆颗粒。

根据玉米颗粒筛分运行接触特性,课题组采用 Hertz-Mindlin(no slip) 接触模型用于计算颗粒间接触作用^[7],仿真时参数取值如表 1 和表 2 所示。其中,玉米颗粒(以郑单 985 为例)的密度、静摩擦因数(玉米-钢材)、碰撞恢复系数(玉米颗粒间、玉米与钢材间)由前人试验得知^[8],泊松比参考美国农业工程协会标准^[9],剪切模量 G 参考文献^[10]得到。定义筛网、筛面上壳、筛面下壳为钢材(以 Q235 低碳钢为例)。玉米颗粒、钢材的材料特性参数,如表 1 所示。

表 1 材料特性参数

Table 1 Material characteristic parameter

材料	泊松比	剪切模量/GPa	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
郑单 958 玉米颗粒	0.4	0.137	1 256
Q235	0.3	79.000	7 850

设置玉米颗粒间、玉米颗粒与钢材之间的碰撞接触参数^{[1]25}如表 2 所示。

表 2 材料间的碰撞接触参数

Table 2 Collision contact parameters between materials

碰撞物体	碰撞恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
玉米颗粒间	0.256	0.621	0.054 5
玉米颗粒与钢材间	0.600	0.340	0.052 0

完成颗粒模型建立和接触参数设定后,在 EDEM 的 Geometry 面板中导入 igs 格式的直线振动筛三维模

型,设置材料为钢材,设置面为实面,选中筛面,在 Dynamics 中添加筛面运动方式为 Sinusoidal Translation,直线振动筛的振动方向角一般采用 45° ,通过单颗粒物料在圆柱筛杆式直线振动筛面上的运动仿真系统,选取最佳的振动频率 $f=13\text{ Hz}$,最佳的振动幅度 $A=6.5\text{ mm}$,最佳的筛面倾角 $\alpha=4.5^\circ$ 作为探究筛面筛孔形状是否对筛分效率具有影响的振动参数设计。在 EDEM 的 Geometry 面板中创建一个颗粒工厂平面,并设置该面为虚拟面。课题组采用的颗粒工厂的形状为方形薄片,尺寸为 $100\text{ mm}\times 250\text{ mm}$,在未判定最佳高度时,采用颗粒下落高度为 200 mm 。颗粒工厂平面生成的颗粒要从筛面上方的前端下落,保证其全部能落到筛面上运动。进入 EDEM 的 Factories 面板,颗粒工厂采用动态生成方式生成玉米颗粒,总数为 $1\ 000$,每秒生成 200 个,耗时 5 s 。无初始速度,受重力加速度为 9.81 m/s^2 。进入 EDEM 的 Simulator 模块,设定时间步长是 Rayleigh 时间步长的 15% ,即 $7.574\ 75\text{E}-6\text{ s}$ 。总仿真时间设为 5 s ,每 0.1 s 写入一个结果。仿真区域的网格尺寸设置为颗粒半径的 5 倍,即 25 mm 。仿真区域被划分为 $2\ 079$ 个网格。

4 仿真模拟结果与分析

4.1 方孔与圆孔筛面对筛分效率的影响

该仿真试验模拟玉米圆颗粒从颗粒工厂生成面下落到筛面的运动过程中,玉米圆颗粒的纵向速度变化及纵向的位置变化。方孔筛面筛分模拟过程中的 0 和 5 s 时的静态图如图 4 所示,圆孔筛面也是如此仿真模拟。模拟完成后,进入 EDEM 的分析模块,导出玉米圆颗粒纵向速度及纵向位置随时间的变化数据。

EDEM 模拟仿真结果通过数据分析软件 Origin 分析得到,如图 5 所示。

由图 5 可知,玉米圆颗粒在圆孔筛面和方孔筛面上振动筛分的纵向速度和纵向位置区别不大,两者的模拟过程轨迹趋势几乎一样;但是从细微处可以发现,圆孔筛面上的颗粒相比较于方孔筛面平均速度较高,且圆孔筛面上的颗粒纵向跳动高度相比较于方孔筛面较低,说明跳动平稳,更有利于筛分颗粒。

4.2 玉米圆颗粒下落高度对筛分效率的影响

在振动参数不变的情况下,改变玉米圆颗粒的下落高度,设置下落高度为 $100, 150, 200$ 和 300 mm ,比较不同高度落下的玉米圆颗粒是否会影响筛分效率,结果如图 6 所示。

图 6 所示为 4 种不同高度下落时筛面上的玉米圆颗粒的纵向速度和纵向位置变化情况。图 6(a)中,下

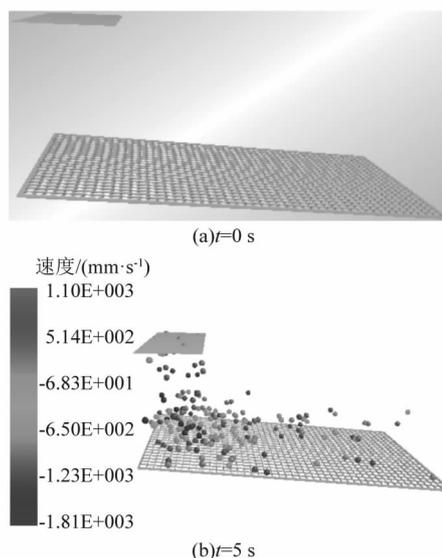


图 4 玉米圆颗粒直线振动筛分过程模拟
Figure 4 Simulation of linear vibrating sieving process of corn particles

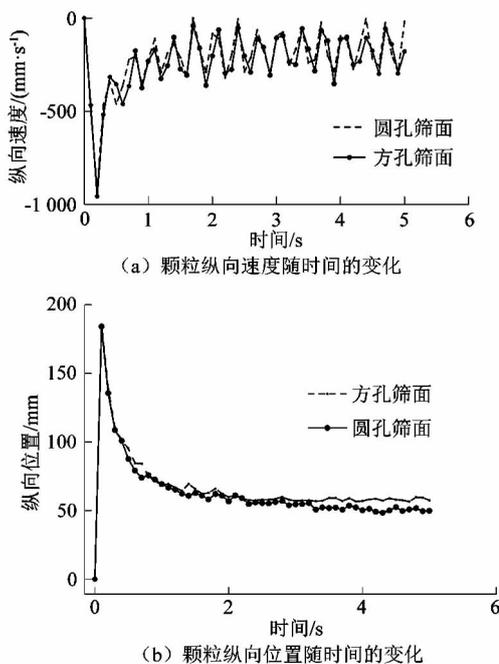


图 5 方孔和圆孔筛面仿真数据对比
Figure 5 Comparison of simulation data of square hole screen surface and circular hole screen surface

落高度越小纵向速度的变化量越大,表明运动越剧烈;图 6(b)中得知玉米圆颗粒下落高度越小,颗粒在筛面上的跳动次数越少且运动更缓和,说明下落高度越小,颗粒筛分效率越高,但是 150 mm 的下落高度相对于 100 mm 的下落高度与 200 mm 的下落高度相对于 150

mm 的下落高度是有区别的,越往下颗粒在筛面上的跳动的次数越接近。

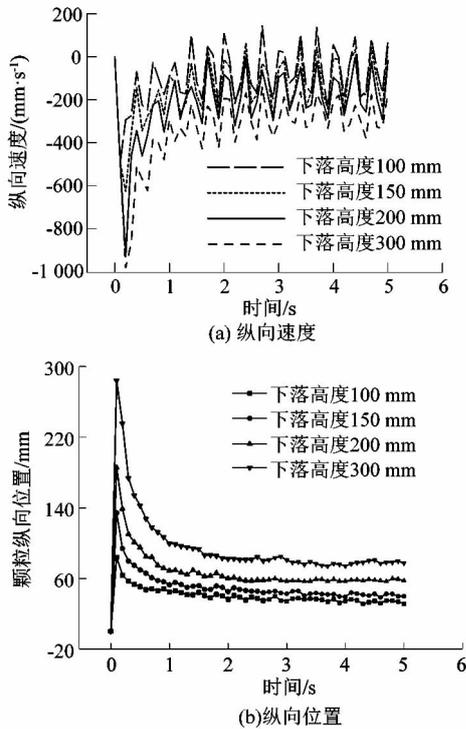


图 6 不同高度下的玉米圆颗粒的纵向速度和纵向位置变化

Figure 6 Changes of longitudinal velocity and position of corn particles at different heights

4.3 不同形状玉米颗粒对筛分效率的影响

在振动参数和下落高度不变的情况下,用方孔筛面作为模拟的振动筛面,再选定一种不规则的最长半径为 5 mm 的颗粒,不规则颗粒如图 7 所示。

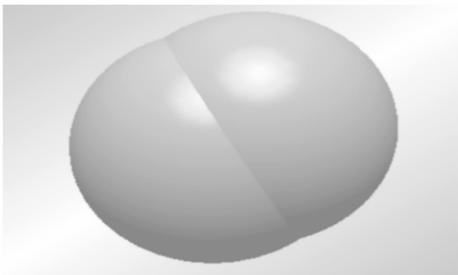


图 7 不规则颗粒

Figure 7 Irregular particle

圆颗粒和不规则颗粒 2 种不同形状的玉米颗粒在振动筛分的过程中存在不同的纵向速度和纵向位置。由图 8 可知,不规则状的颗粒的纵向速度低于圆颗粒,说明圆颗粒的筛分效率较高;由图 9 可知,不规则状颗粒的纵向位置跳动高度大于圆颗粒,说明圆颗粒运动

较平稳,更有利于筛分。

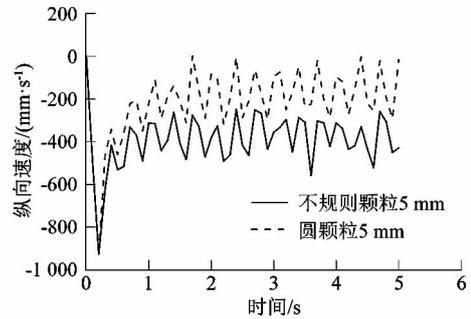


图 8 不同形状玉米颗粒随时间变化的纵向速度
Figure 8 Longitudinal velocity diagram of corn particles with different shapes changing with time

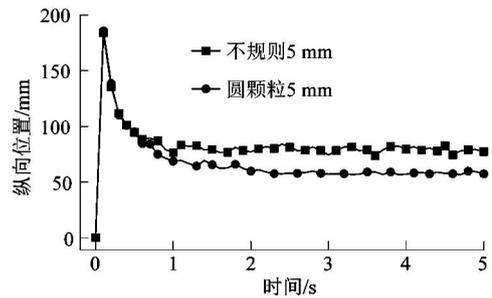


图 9 不同形状玉米颗粒随时间变化的纵向位置
Figure 9 Vertical plot of changes of corn particles with different shapes over time

5 结论

课题组利用 EDEM 对玉米颗粒的筛分过程进行了模拟仿真,直观的再现颗粒在直线振动筛面上的筛分运动过程。仿真结果表明,在现有的建模条件下,能大致地再现玉米颗粒的筛分过程。可以在不制造物理样机前提下进行模拟筛分,迅速了解筛分效果。该方法可以用在直线振动筛的结构优化设计中,对于农业筛分机构的研究具有重要意义。通过数据分析软件 Origin 对导出的仿真实验数据进行处理,得出颗粒速度的变化情况,可以得出以下结论:

1) 对于相同大小的圆颗粒来说,方孔和圆孔筛面在振动参数一致的情况下的区别不大,但从细微处可知圆孔筛更具优势。

2) 对于同种圆颗粒,在振动参数一致的情况下比较 4 个不同高度落下的颗粒纵向速度和纵向位置情况可知,高度越小筛分效率较高,但有一高度界限值。

3) 在振动参数和下落高度一致时,方孔筛面情况下,不同形状的颗粒的振动情况不同,圆颗粒较不规则

(下转第 40 页)