

基于离散元法的料仓稻种颗粒沉降特性 与力链演化分析

王敏娜^{1,2} 陈林涛^{1,2} 马旭³ 牟向伟^{1,2} 钟文军⁴ 蒋焕煜⁵

(1. 广西师范大学机械工程系, 广西 桂林 541004; 2. 农林智能装备技术广西高校工程研究中心, 广西 桂林 541004; 3. 华南农业大学工程学院, 广东 广州 510642; 4. 桂林三养胶麦生态食疗产业有限公司, 广西 桂林 541004; 5. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: [目的] 揭示贮存稻种颗粒在料仓内沉降过程中的运动规律与力链特征演化机理。[方法] 以新两优 98 杂交稻种为研究对象, 利用离散元法 (DEM) 建立“稻种—料仓”仿真模型, 模拟不同沉降高度、粮堆组分以及质量流率对稻种沉降运动基本参数的影响; 提出料仓稻种种群的力链特征定量分析方法, 探讨不同质量流率与沉降高度对力链特征的影响规律, 建立稻种沉降特性与力链特征之间联系。[结果] 稻种下落过程中加速度逐渐减小至 0, 下落速度趋近稳定值 11.34 m/s, 达到匀速状态需 4.13 s, 对应沉降高度 28.44 m; 不同粮堆组分在相同起始条件下下落, 最终速度差异显著, 其中石头的最高为 16.8 m/s, 完整稻种的为 11.34 m/s, 而 1/2, 1/4, 1/8 不完整颗粒及细屑依次降至 9.9, 8.3, 6.6, 1.1 m/s, 加剧了种群间相互作用。随着质量流率从 100 kg/s 增至 250 kg/s, 力链数目增多, 力链方向系数从 0.28 降至 0.11, 种群力链承载不均匀度逐渐减小, 表明力链上接触力分布越发平均, 较低质量流率作用导致力链承载出现局部集中情况。[结论] 随着稻种种群质量流率增加, 力链单位屈曲度逐渐降低, 表明质量流率增加会使力链的屈曲情况逐渐得到缓解; 质量流率较沉降高度对力链特征演化具有更显著的影响。

关键词: 料仓; 稻种颗粒; 离散元法; 沉降特性; 力链演化

Analysis of particle settlement characteristics and force chain evolution of rice seeds in silo based on discrete element method

WANG Minna^{1,2} CHEN Lintao^{1,2} MA Xu³ MOU Xiangwei^{1,2} ZHONG Wenjun⁴ JIANG Huanyu⁵

(1. Department of Mechanical Engineering, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. University Engineering Research Center of Agricultural and Forestry Intelligent Equipment Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 4. Guilin Sanyang Dietary Ecological Industry Co., Ltd., Guilin, Guangxi 541004, China; 5. College of Biological Systems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: [Objective] To reveal the movement law and force chain characteristic evolution mechanism of stored rice seed particles during the settlement process in a silo. [Methods] With the Xinliangyou 98 hybrid rice seeds as the research object, a "rice seed-silo" simulation model was established using the discrete element method (DEM) to simulate the effect of different settlement heights, grain pile components, and mass flow rates on the fundamental parameters of rice seed settlement motion. A quantitative analysis method for the force

基金项目: 广西自然科学基金项目 (编号: 2025GXNSFBA069533); 广西青年科技人才托举工程 (编号: GXYES2025138); 国家级大学生创新创业项目 (编号: 2025106020334); 广西人文社会科学发展研究中心“科学研究工程·STEAM 教育创新与实践研究”专项项目 (编号: STEY2025018); 广西师范大学 2025 年度国家自然科学基金联合培育项目 (编号: 2025PY061); 桂林市重大专项计划项目 (编号: 20220102-3)

通信作者: 陈林涛 (1993—), 男, 广西师范大学副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: clt13424050147@163.com

收稿日期: 2025-05-14 **改回日期:** 2025-08-30

引用格式: 王敏娜, 陈林涛, 马旭, 等. 基于离散元法的料仓稻种颗粒沉降特性与力链演化分析[J]. 食品与机械, 2026, 42(4): 43-58.

Citation: WANG Minna, CHEN Lintao, MA Xu, et al. Analysis of particle settlement characteristics and force chain evolution of rice seeds in silo based on discrete element method[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 43-58.

chain characteristics of the rice seed population in the silo was proposed to investigate the influence patterns of different mass flow rates and settlement heights on force chain characteristics, thereby establishing the relationship between the settlement characteristics of rice seeds and the force chain behavior. [Results] During the descent of rice seeds, the acceleration gradually decreased to zero, and the falling velocity approached a stable value of 11.34 m/s. It took 4.13 seconds to reach a uniform velocity state, corresponding to a settlement height of 28.44 m. Under the same initial conditions, different grain pile components exhibited significant differences in their final velocities. Among them, stones reached the highest velocity of 16.8 m/s, and intact rice seeds attained 11.34 m/s. One-half, one-quarter, one-eighth incomplete particles and fine debris decelerated to 9.9 m/s, 8.3 m/s, 6.6 m/s, and 1.1 m/s, respectively, intensifying the interactions between different populations. As the mass flow rate increased from 100 kg/s to 250 kg/s, the number of force chains increased, and the force chain orientation coefficient decreased from 0.28 to 0.11. Meanwhile, the bearing non-uniformity of the force chains within the population gradually diminished, indicating a more even distribution of contact forces along the force chains. Lower mass flow rates result in a localized concentration of force chain bearing. [Conclusion] With the increase in the mass flow rate of the rice seed population, the force chain unit flexure gradually decreases, indicating that the increase in mass flow rate gradually alleviates the flexure of force chains. The mass flow rate has a significant influence on the evolution of force chain characteristics.

Keywords: silo; rice seed particle; discrete element method; settlement characteristics; force chain evolution

在农业和工业等领域,原料通常以颗粒贮藏于料仓^[1-2]。由于料仓存在高度落差,稻种沉降到仓底进行堆积具有一定初速度^[3-4],初速度较高的稻种在堆积时会导致料仓的种群内部孔隙率分布不均^[2-5]。种群分级是稻种在振动、移动或入仓时,同类型、同质量的组分集中在种群堆某一部分,引起种群堆组分重新分布^[6]。入仓稻种一般是由稻种、杂质等组分构成,稻种有完整与破碎之分,物料含水率也不尽相同,杂质有轻重、形状与大小的不同,彼此间摩擦力、重力以及空气动力学特性等不同^[4-6],造成其散落性不同。因此,揭示稻种在料仓内沉降中的运动规律与力链特征演化机理,对料仓及其关键部件的设计具有意义。

陈林涛等^[7]利用离散元法建立了传统料仓、垂直扰动和水平扰动料仓模型与稻种颗粒仿真模型;王学文等^[8]采用离散元法模拟了煤散料在不同倾角锥仓中的流动状态;段君峰等^[9]研制了模型筒仓试验装置;朱广飞等^[10]采用计算流体力学和正交试验相结合的方法对玉米干储一体仓内部气流场分布进行了数值仿真和参数优化;崔宏伟等^[11]提出了基于粮温时空相关性的储粮数量监管方法;施灿璨等^[12]设计了自然冷资源低温贮藏仓。针对料仓的研究集中在种群分级形成机理、不同改流体对稻种在料仓卸料流动影响,以及散料属性与料仓结构对散料与料仓之间接触状态的影响等方面^[13-16],对于贮存稻种在料仓内沉降中的运动规律少有报道。

力链是介于微观颗粒和宏观颗粒体系的桥梁,是研究颗粒体系力学性质的重要手段^[17-18]。崔熙灿等^[19]针对高堆石坝坝体产生较大变形以及不均匀沉降,进而导致面板易受损的问题,开展对筑坝材料细观层面的试验,着重探究了筑坝材料的力学特性以及缩尺所带来的影响。刘克瑾等^[20]采用自主设计的半圆柱形有机玻璃筒仓模型进行了筒仓中心卸料试验和离散元模拟分析。目前针对料仓内颗粒的力链演化研究主要集中在定性层面,鲜有

从不同质量流率与沉降高度对力链特征的影响的报道,难于建立稻种颗粒沉降特性与力链演化特征之间联系。

试验拟在前期研究^[7]的基础上,为明确稻种颗粒沉降特性与力链演化特征之间关系,从颗粒运动的角度揭示贮存稻种颗粒在料仓内的沉降运动规律与力链特征演化机理,以新两优 98 杂交稻种为研究对象,利用离散元法建立稻种模型,探索不同沉降高度、粮堆组分以及质量流率对稻种颗粒沉降运动基本参数的影响规律;同时探讨不同质量流率与沉降高度对力链量化特征的影响,以期为原料仓的设计与优化提供依据。

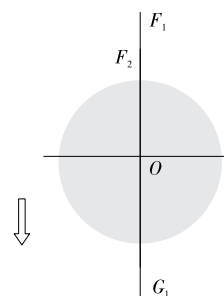
1 稻种颗粒沉降运动理论分析

如图 1 所示,在料仓内无任何辅助部件情况下,稻种进入料仓后沉降。空气所产生的阻力随着稻种下落速度增加不断变大。当达到受力平衡时,稻种速度不再发生改变,进而开始进行等速沉降运动,此时稻种的速度被称作沉降速度^[7-8]。

根据牛顿第二定理,得到稻种运动方程

$$G_1 - F_1 - F_2 = ma, \quad (1)$$

式中:



G_1 , 稻种颗粒重力 F_1 , 浮力 F_2 , 空气阻力

图 1 稻种在料仓沉降中的受力分析

Figure 1 Force analysis of rice seeds during settlement in a silo

m ——稻种质量, kg;

a ——稻种加速度, m/s^2 。

将 $G_1 = \frac{\pi}{6} \rho_1 g D^3$, $F_1 = \frac{\pi}{6} \rho_2 g D^3$, $F_2 = \frac{1}{2} C \rho_2 S v^2$, $m = \frac{\pi}{6} \rho_1 D^3$, $a = \frac{dv}{dt}$ 代入式(1), 可得

$$\frac{\pi}{6} \rho_1 g D^3 - \frac{\pi}{6} \rho_2 g D^3 - \frac{1}{2} C \rho_2 S v^2 = \frac{\pi}{6} \rho_1 g D^3 \frac{dv}{dt}, \quad (2)$$

式中:

ρ_1 ——稻种密度, kg/m^3 ;

ρ_2 ——空气密度, kg/m^3 ;

S ——稻种颗粒迎风面积, m^2 ;

C ——阻力系数;

v ——下降速度, m/s ;

D ——稻种粒径, m 。

在下落运动的初期, 稻种下落速度较小, 颗粒运动状态为层流^[21-23]。随着稻种下落速度逐渐增大, 其运动过程的雷诺数也逐步增大, 雷诺数处于 $500 < Re < 2 \times 10^5$ 的范围时, 颗粒运动状态改变为紊流。对应的颗粒阻力系数 $C = 0.44$, 相应的紊流状态下空气阻力计算公式为 $F_2 = \frac{1}{2} C \rho_2 S v^2$ 。

在层流状态下, 由式(2)得到

$$\frac{\pi}{6} \rho_1 g D^3 - \frac{\pi}{6} \rho_2 g D^3 - 3\pi\mu D v = \frac{\pi}{6} \rho_1 D^3 \frac{dv}{dt}, \quad (3)$$

将式(3)化简并积分, 得到

$$t = \frac{D^2 \rho_1}{8\mu} \ln \left| \frac{g - \frac{\rho_2}{\rho_1} g}{g - \frac{\rho_2}{\rho_1} g - \frac{8\mu}{D^2 \rho_1} v} \right|. \quad (4)$$

在紊流状态下, 可得

$$\frac{\pi}{6} \rho_1 g D^3 - \frac{\pi}{6} \rho_2 g D^3 - \frac{1}{8} \pi C \rho_2 v^2 D^2 = \frac{\pi}{6} \rho_1 D^3 \frac{dv}{dt}, \quad (5)$$

整理后得

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{\rho_2}{\rho_1} g - \frac{3\rho_2 C}{4\rho_1 D} v^2. \quad (6)$$

当稻种沉降运动达到平衡时, 加速度为 0^[23], 稻种颗粒沉降速度在颗粒开始做等速沉降运动时, 得到

$$v = \left[\frac{4D}{3\rho_2 C} (\rho_1 - \rho_2) g \right]^{1/2}. \quad (7)$$

对于式(6), 令 $g - \frac{\rho_2}{\rho_1} g = A$, 则 $\frac{3\rho_2 C}{4\rho_1 D} = B$ 。

$$\frac{dv}{dt} = A - Bv^2. \quad (8)$$

将式(8)积分, 得到

$$v = \frac{\sqrt{A} - \sqrt{A} \times e^{-2t\sqrt{AB}}}{\sqrt{B} + \sqrt{B} \times e^{-2t\sqrt{AB}}}. \quad (9)$$

整理式(9), 得到

$$a = \left(\frac{2\sqrt{A} \times e^{-\sqrt{AB}t}}{1 + e^{-2\sqrt{AB}t}} \right)^2. \quad (10)$$

将进一步整理式(9), 得到沉降高度 h 和下落时间 t 的关系

$$h = \frac{1}{B} \ln \left(\frac{1 + e^{-2\sqrt{AB}t}}{2} \right) + \sqrt{\frac{A}{B}} t. \quad (11)$$

整理式(8), 得到

$$A - Bv^2 = v \frac{dv}{dh}. \quad (12)$$

式(12)经积分得到沉降高度 h 和下落速度 v 关系

$$h = -\frac{1}{2B} \ln \left| \frac{A}{B} - v^2 \right| + \frac{1}{2B} \ln \left| \frac{A}{B} \right|. \quad (13)$$

通过理论分析, 以新两优 98 杂交稻种为研究对象(桂林三养胶麦生态食疗产业有限公司), 稻种密度 ρ_1 为 1350 kg/m^3 , 空气密度 $\rho_2 = 1.2 \text{ kg/m}^3$, 空气动力黏性系数 $\mu = 18.2 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。 $Re = 1$ 时, 通过层流状态下的沉降速度公式求得稻种沉降速度 $v = 1.92 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, 该速度下的下落时间 $t = 1.74 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。稻种下落层流阶段所达到沉降速度非常小且经历时间短, 即认为稻种在下落中以紊流状态下落。进一步, 加速度变为 0 时稻种颗粒的沉降运动达到力平衡状态, 在式(6)中, 左侧一项为 0, 此时稻种颗粒开始进行等速沉降运动, 将相关参数代入式(7), 计算稻种沉降速度为 11.57 m/s 。通过式(6)~式(13)可得稻种沉降运动规律及其下落速度、加速度与沉降高度、稻种物料特性、种群组分有密切关系。后续利用 EDEM 建立稻种一料仓离散元模型, 揭示不同沉降高度、粮堆组分以及质量流率对稻种沉降运动基本参数的规律。

2 离散元模型的建立

2.1 离散元理论

根据力与位移的关系^[24-25], 由位移得到颗粒受到的作用力, 再由牛顿第二定律得出颗粒 i 的运动方程:

$$\begin{cases} m_i \ddot{u}_i = \sum F \\ I_i \ddot{\theta}_i = \sum M \end{cases}, \quad (14)$$

式中:

$\ddot{u}_i$ 、 $\ddot{\theta}_i$ 、 m_i 、 I_i ——颗粒 i 加速度 (m/s^2)、角加速度 (rad/s^2)、质量 (kg) 和转动惯性 ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);

$\sum F$ 、 $\sum M$ ——颗粒在质心处受到的合外力 (N) 和合外力矩 ($\text{N}\cdot\text{m}$)。

利用中心差分法对式(14)积分, 得到

$$\begin{cases} (\dot{u}_i)_{N+\frac{1}{2}} = (\dot{u}_i)_{N-\frac{1}{2}} + \left[\sum F / m_i \right]_N \Delta t \\ (\dot{\theta}_i)_{N+\frac{1}{2}} = (\dot{\theta}_i)_{N-\frac{1}{2}} + \left[\sum M / I_i \right]_N \Delta t \end{cases}, \quad (15)$$

式中:

Δt ——时间步长, s;
 N ——对应时间 t , s。

对式(15)积分, 得到

$$\begin{cases} (\dot{u}_i)_{N+1} = (\dot{u}_i)_N + (\ddot{u}_i)_{N+\frac{1}{2}} \Delta t \\ (\dot{\theta}_i)_{N+1} = (\dot{\theta}_i)_N + (\ddot{\theta}_i)_{N+\frac{1}{2}} \Delta t \end{cases} \quad (16)$$

通过计算得到颗粒单元新的位移值, 并将该新位移代入力与位移关系中求得新的作用力, 循环反复可实时跟踪每个颗粒单元在任意时刻的运动, 如图 2 所示。

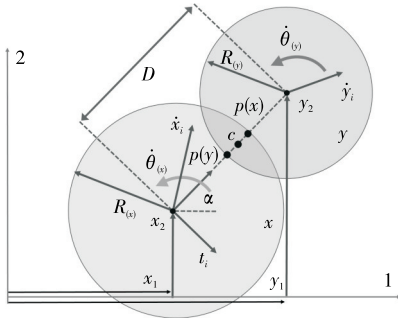


图 2 颗粒计算迭代示意图

Figure 2 Particle calculation iteration

2.2 接触模型

EDEM 模拟关键是选择合理接触模型, 料仓的稻种含水率低, 可视为非黏性体^[24]。选择 Hertz-Mindlin (no slip) 作为接触模型, 如图 3 所示。

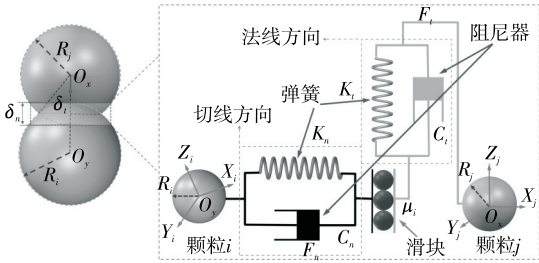


图 3 接触模型

Figure 3 Contact model

2.3 稻种离散元模型

以新两优 98 杂交稻种为研究对象, 随机选取 500 粒, 按图 4(a) 所示测量其三轴尺寸, 平均尺寸为 11.29 mm × 2.66 mm × 1.82 mm, 标准差为 0.17, 0.10, 0.12 mm, 如表 1 所示。基于稻种形状及尺寸, 采用“球元填充法”对稻种建模^[13], 非球形形态通过多球体填充逼近真实轮廓。若填充数目过少在离散元仿真计算过程中会出现失真现象; 若数目过多, 虽提升仿真精度, 但会导致离散元计算量增大^[26], 如图 4(b) 所示, 填充颗粒信息见表 2。由于稻种非球形形态、表面纹理等特性, 其接触作用复杂, 弹性

表 1 稻种三轴尺寸

Table 1 Three-axis dimensions of rice seeds				
尺寸参数	最大值/ mm	最小值/ mm	平均值/ mm	标准差
长度	11.61	10.97	11.29	0.17
高度	2.96	2.36	2.66	0.10
宽度	2.18	1.46	1.82	0.12

表 2 稻种填充颗粒信息

Table 2 Information of rice seed filling particles		
球形序号	坐标	半径/mm
1	(0.00, 0.00, 0.00)	0.91
2	(0.80, 0.00, 0.02)	0.90
3	(1.60, 0.00, 0.06)	0.88
4	(2.40, 0.00, 0.10)	0.87
5	(3.00, 0.00, 0.18)	0.83
6	(-0.80, 0.00, 0.02)	0.90
7	(-1.60, 0.00, 0.06)	0.88
8	(-2.40, 0.00, 0.10)	0.87
9	(-3.00, 0.00, 0.18)	0.83
10	(0.00, 0.00, 0.84)	0.91
11	(0.80, 0.00, 0.82)	0.90
12	(-0.80, 0.00, 0.82)	0.90
13	(1.60, 0.00, 0.78)	0.88
14	(-1.60, 0.00, 0.78)	0.88
15	(-2.40, 0.00, 0.73)	0.87
16	(2.40, 0.00, 0.73)	0.87
17	(3.00, 0.00, 0.67)	0.83
18	(-3.00, 0.00, 0.67)	0.83
19	(-3.60, 0.00, 0.24)	0.75
20	(3.60, 0.00, 0.24)	0.75
21	(4.20, 0.00, 0.30)	0.69
22	(-4.20, 0.00, 0.30)	0.69
23	(3.60, 0.00, 0.60)	0.75
24	(-3.60, 0.00, 0.60)	0.75
25	(4.20, 0.00, 0.54)	0.69
26	(-4.20, 0.00, 0.54)	0.69
27	(-4.50, 0.00, 0.35)	0.62
28	(-4.50, 0.00, 0.49)	0.62
29	(4.50, 0.00, 0.35)	0.62
30	(4.50, 0.00, 0.49)	0.62
31	(5.00, 0.00, 0.42)	0.45
32	(-5.00, 0.00, 0.42)	0.45
33	(-5.345, 0.00, 0.42)	0.30
34	(5.345, 0.00, 0.42)	0.30

模量、摩擦系数、恢复系数等接触参数会影响颗粒间碰撞和摩擦等。离散元仿真中,稻种尺寸分布、形状及边界参数设置与真实物料存在差异,产生仿真误差。因此,接触仿真参数是影响数值模拟结果准确性的重要因素,经前期稻种离散元参数标定试验^[7],离散元仿真参数见表3。

表3 模拟仿真物理参数及其值

Table 3 Physical parameters and their values of simulations

参数	单位	数值
稻种泊松比		0.25
料仓(不锈钢)泊松比		0.3
稻种弹性模量	MPa	375
料仓弹性模量	MPa	75 000
稻种密度	kg/m ³	1 350
料仓密度	kg/m ³	8 000
稻种与稻种恢复系数		0.6
稻种与料仓恢复系数		0.5
稻种与稻种静摩擦系数		0.3
稻种与料仓静摩擦系数		0.5
稻种与稻种滚动摩擦系数		0.01
稻种与料仓滚动摩擦系数		0.015

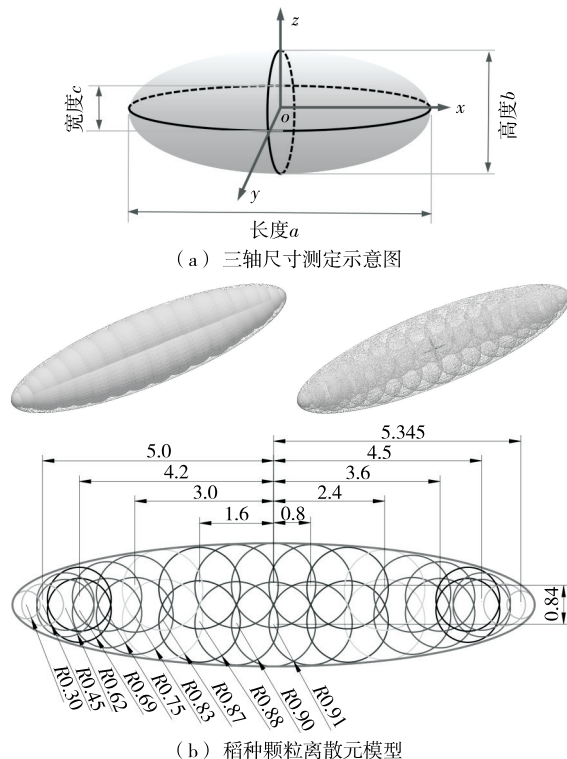


图4 稻种离散元模型建立

Figure 4 Establishment of discrete elemental model of rice seeds

2.4 料仓模型建立与离散元仿真

利用 EDEM 建立料仓模型,如图5所示。将料仓模型进行网格划分(高度与半径方向),仿真模型与试验料仓中设置的内部温度为 26.5℃,送风口从底部进入,料仓仓口温度为 22℃,仿真时步为 1.46×10^{-6} s。对于入仓稻种,除完整稻种外,还包括不完整粒以及碎屑等^[10-12]。混有杂质和不完整粒稻种在仓内沉降,由于不同组分物理特性不同,沉降速度不同,为贴合实际入仓稻种的组分混杂特征,研究取入仓稻种组成为完整颗粒、不完整颗粒、细屑与石子;其中不完整颗粒按照完整颗粒体积的 1/2、1/4、1/8 进行规格划分,以模拟实际存储中不同破损程度的稻种颗粒。

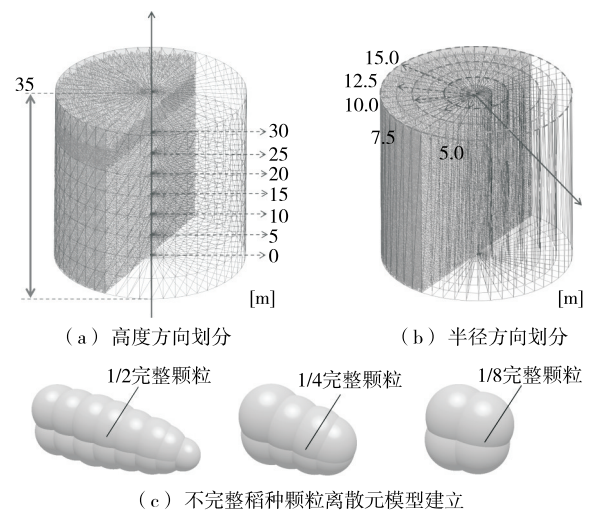


图5 料仓模型建立

Figure 5 Process of establishing a silo model

2.5 离散元模型的准确性验证

为验证所建立稻种与料仓离散元模型的准确性,考虑种群孔隙率通常呈各向异性分布,较难通过试验准确测量。参考文献[27-29]进行通风试验测定温度变化,验证所建立的“稻种—料仓”离散元模型准确性。试验产地为广西桂林市三养胶麦生态食疗产业有限公司,通过在原料仓控制系统加入相应的温度检测与控制模块,安装风机将冷风从仓底送入仓内,测量进风空气速率。料仓分为5层,每层均匀布置20个温度传感器,共100个监测点,试验中每15 min采集温度数据。由图6(a)可知,测量种群温度能间接验证模拟结果准确性,2 h时仓内温度从 26.5℃开始下降,底部因直接接触冷风降温明显,随时间推移冷气流向上扩散,中层温度降低,全仓温度梯度逐渐均匀,云图颜色从高温暖色向低温冷色过渡。由图6(b)和图6(c)可知,通风5,10 h的稻种种群温度差值在 0.5℃以内,5 h时仿真温度约 22.65℃、试验接近

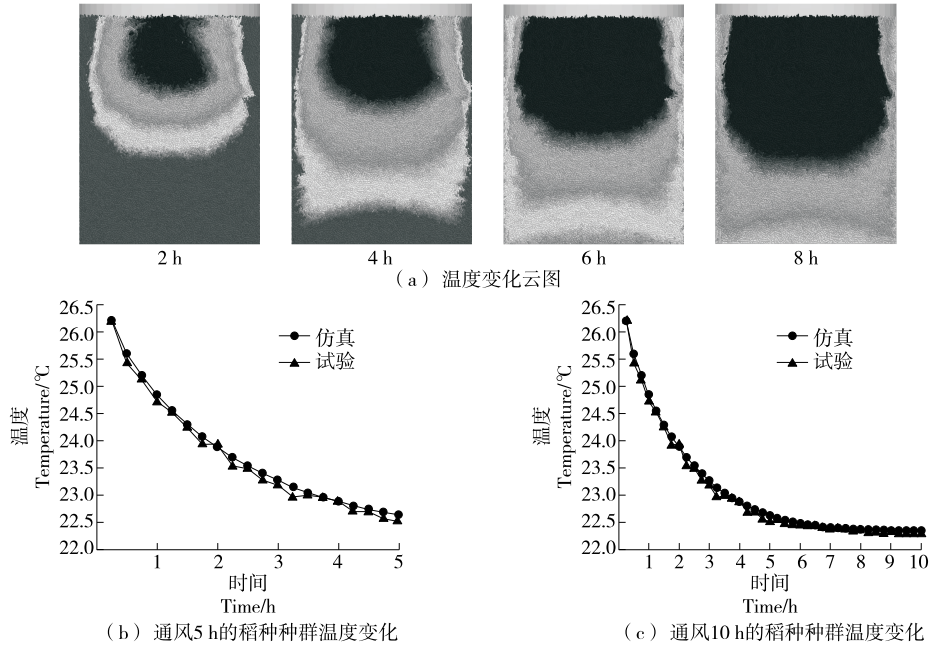


图6 离散元模型准确性验证试验结果

Figure 6 Accuracy verification test results of discrete element model

22.5 °C, 10 h后温度稳定在 22.2 °C左右, 接近仓口预设的 22.3 °C, 曲线趋势表明初期温度下降快、后期趋缓。综合来看, 仿真数值与试验数据各监测层的温度均在 0.5 °C 以内, 误差控制在合理范围, 说明所建立的稻种与料仓离散元模型正确, 可用于后续数据分析。

3 试验方法与结果分析

3.1 试验方法

3.1.1 诱导空气量 入仓的稻种并非以单颗粒形式存在, 而以种群状态进行流动, 这种流动具有特定的质量流率, 其对沉降过程中颗粒间的相互作用有显著影响。当稻种种群在仓内沉降时, 出现柱状颗粒流形态, 且颗粒流会带动其周围空气一同流动, 形成羽流, 定义为诱导空气量^[27-29]。

(1) BURTON 使用诱导空气量的 HEMEON 计算模型^[28], 颗粒流整体诱导空气量是该模型将单颗粒沉降中的诱导空气量叠加起来为

$$Q = \left[\frac{0.66 g m_s (h U_A)^2}{\rho_1 D} \right]^{1/3}, \quad (17)$$

式中:

Q ——诱导空气量, m^3/h ;

m_s ——质量流率, kg/s ;

U_A ——颗粒羽流横断面面积, m^2 。

(2) 在沉降中, 与单个稻种颗粒的自由沉降有一定区别, 且稻种颗粒与周围环境空气具有相互作用, 诱导空气量的另一种计算方法如式(18)所示。

$$Q = K \left(\frac{g m_s}{\rho_1} \right)^{1/3} h^{5/3}, \quad (18)$$

式中:

K ——混合羽流常数。

3.1.2 力链检索算法及参数统计方法 颗粒典型力学特征为力链的近线性链状结构, 采用接触力判据法来达成力链信息的提取。依据力链长度、接触力大小及接触力方向 3 个方面的条件来实现力链的形成^[30-31]。从力链长度方面, 构成力链的颗粒数量不少于 3 个; 从接触力大小方面, 形成力链的颗粒之间的相互接触力要大于体系的平均接触力; 从接触力方向方面, 力链上相邻接触之间所夹的角需要小于一个特定的值, 其通过用 180° 除以体系平均配位数得到。依据以上 3 个成链条件, 针对力链识别设置 3 个判据^[32-33]。

(1) 接触力判据:

$$\bar{F} = \frac{\sum F}{N}, \quad (19)$$

式中:

$\bar{F}$ ——散体介质体系内平均接触力的大小, N ;

N ——颗粒总数;

$\sum F$ ——模型内颗粒接触力的总和, N 。

接触力判据为

$$F \geq \bar{F}. \quad (20)$$

(2) 接触角判据: A、B、C 颗粒之间存在两个接触, A、B 之间的接触为 AB , 其法向量为 (x_{AB}, y_{AB}) , B、C 之间的接

触为 BC ,其法向量为 (x_{BC}, y_{BC}) ,则接触 AB 与接触 BC 之间的夹角为

$$\theta = \arccos \frac{|x_{AB}x_{BC} + y_{AB}y_{BC}|}{\sqrt{x_{AB}^2 + y_{AB}^2} \times \sqrt{x_{BC}^2 + y_{BC}^2}} \quad (21)$$

颗粒成链的角度阈值

$$\theta_c = \frac{180}{\langle Z \rangle}, \quad (22)$$

式中:

$\langle Z \rangle$ ——模型内颗粒的平均配位数。

颗粒成链的接触角判据为

$$\theta \leq \theta_c. \quad (23)$$

(3) 力链长度判据:一条力链上颗粒个数必须 ≥ 3 ,接触个数必须 ≥ 2 ,则判据颗粒成链的长度为

$$L = N + 1 \geq 3, \quad (24)$$

式中:

L ——力链的长度,mm;

N ——接触的个数。

如图7(a),通过力链提取算法获取体系内力链数目为 n 。力链方向系数 θ_d 对力链结构方向性进行评价引入。设力链共有 m 个相邻接触力构成,若相邻接触力成对,则相邻接触力对数目 $m-1$ 。

如图7(b),2个相邻接触力分别为接触力 f_1 与 f_2 ,则有1对相邻接触力,相邻接触力对的数目为1。设力链各段长度 l_i ,各段力链对应与 y 轴正方向夹角为 δ_i ,则力链方向系数为

$$\theta_d = \left(\frac{2}{\sum_{i=1}^m l_i} \sum_{i=1}^m l_i \cos^2 \delta_i \right) - 1, \quad (25)$$

式中:

$\sum_{i=1}^m l_i$ ——对应力链总长度(力链方向系数取值范围为

$-1 \sim 1$),mm。

力链整体越趋近于 y 轴垂直方向,则力链方向系数趋近于 -1 ;若力链方向系数趋于 0 ,则呈现各向同性状态。

对力链弯曲情况进行分析^[30-31],引入力链单位屈曲度:

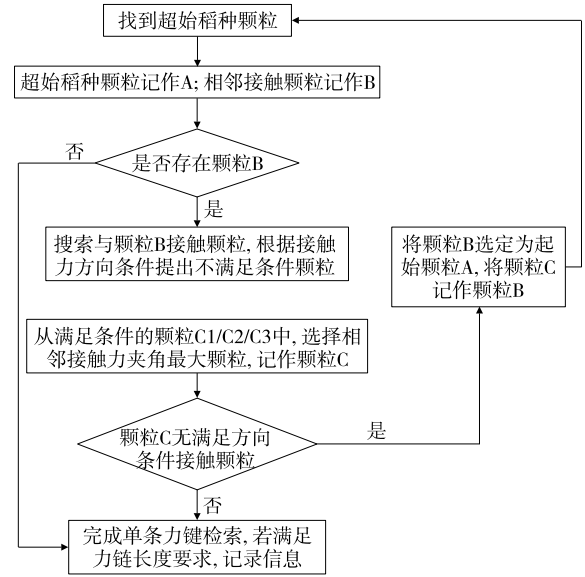
$$\theta_q = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} \beta_i}{\sum_{i=1}^m l_i}, \quad (26)$$

式中:

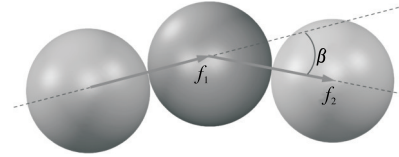
β_i ——力链第 i 个接触对所夹角, $^\circ$ 。

当力链单位屈曲度越大,则单位长度力链弯曲情况越明显。

对力链承载情况进行分析,引入力链承载不均匀度(θ_j):



(a) 力链检索识别算法流程



(b) 颗粒接触夹角示意图

图7 力链检索算法及参数统计方法

Figure 7 Force chain retrieval algorithm and parametric statistical method

$$\theta_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (F_i - \bar{F})^2}{m-1}}, \quad (27)$$

式中:

F_i ——力链上第 i 个接触力值,N;

$\bar{F}$ ——力链上所有接触力均值,N。

由此得知,力链上接触力大小越不均匀,对应力链上接触力标准差越大。

3.2 结果与分析

3.2.1 下落速度和加速度在稻种颗粒沉降中的变化规律 由图8可知,稻种下落速度随下落时间的延长呈增大趋势,加速度呈下降趋势。随着下落时间进一步研究,下落速度不断趋近于沉降速度。当达到沉降速度数值的98%时,下落速度为11.34 m/s,该速度为颗粒的沉降速度。从开始下落到达该速度所经历的时间为4.13 s,即沉降时间,在该沉降时间内,颗粒所沉降的高度为28.44 m。对于落差为30 m料仓,稻种在前28.44 m距离内做加速沉降运动,在后1.56 m内稻种将以11.34 m/s速度落至仓底。从EDEM后处理Analyst提取种群所有的颗粒中每个颗粒运动信息^[7],结果如图9和图10所示。随着下落时间变化,稻种最终形成静态堆积,基于图5的不同区域划分,通

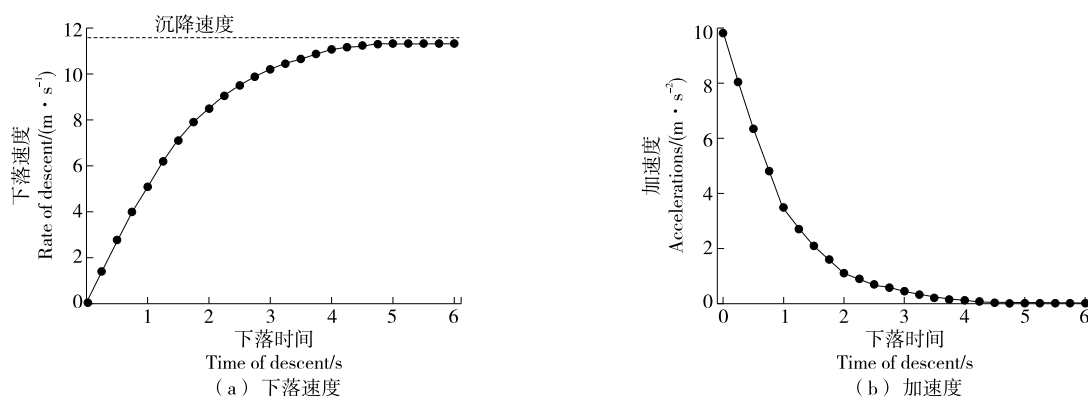


图 8 下落速度、加速度随下落时间的变化规律

Figure 8 Variation law of falling speed and acceleration with falling time

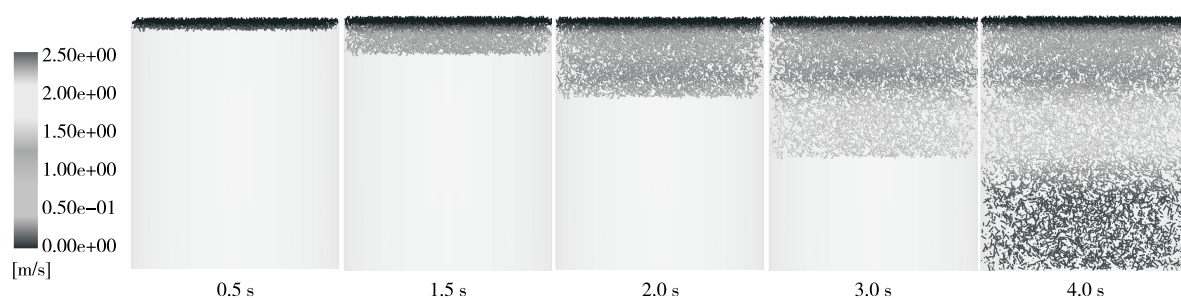


图 9 不同时刻下的稻种平均速度分布

Figure 9 Distribution of average speed of rice seeds at different time

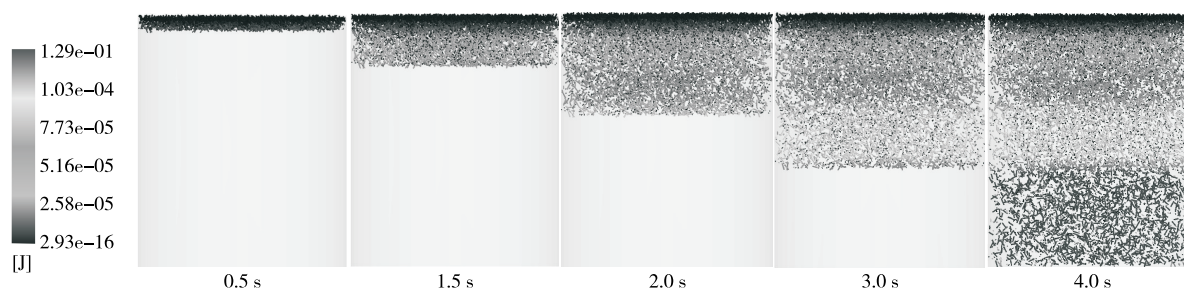


图 10 不同时刻下的稻种动能分布

Figure 10 Distribution of kinetic energy of rice seeds at different time

过 EDEM 内置功能读取各个区域的孔隙率数据,对比不同区域孔隙率^[34]。图 11(a)为粮堆孔隙率变化云图(同一半径下不同高度处、同一高度下不同半径处),粮堆孔隙率变化规律如图 11(b)和图 11(c)所示,粮堆孔隙率由中心向边界逐渐变大,沿半径方向的变化量为 0.0085 m^{-1} ,表明沿半径方向孔隙率分布不均匀。

3.2.2 不同粮堆组分下落速度和沉降速度变化规律

由图 12 可知,不同组分沉降速度不同,石子的沉降速度最大,完整稻种颗粒沉降速度大于不完整粒(1/2, 1/4, 1/8 完整颗粒),细屑沉降速度最小。由图 13 可知,种群堆中某一组分沉降速度越大,加速阶段时间越长,沉降高度也越高。从颗粒运动的内在机理分析,稻种种群的

沉降行为本质上由颗粒移动引起,而颗粒移动由滑动和转动组成。随着颗粒落入料仓,堆积逐渐变得致密,使得颗粒不易滑动,这时颗粒的移动便主要由颗粒转动决定。颗粒在空间中转动用欧拉角表示^[30-33,35],不同组分颗粒旋转变化如图 14 所示,图中虚线框出部分为堆积形成的区域,其中 1/8 完整颗粒的旋转角度最大,颗粒颜色越深;1/4 完整颗粒次之,颜色略浅于前者;完整稻种颗粒的旋转角度最小,其颗粒颜色最浅。

3.2.3 不同质量流率对诱导空气量的影响规律 离散元模拟得到如图 15 所示的诱导空气量与质量流率的关系,基于式(17)和式(18)可知,两种模型(HEMEON 模型与 COOPER 模型)得到诱导空气量均随质量流率的增加而

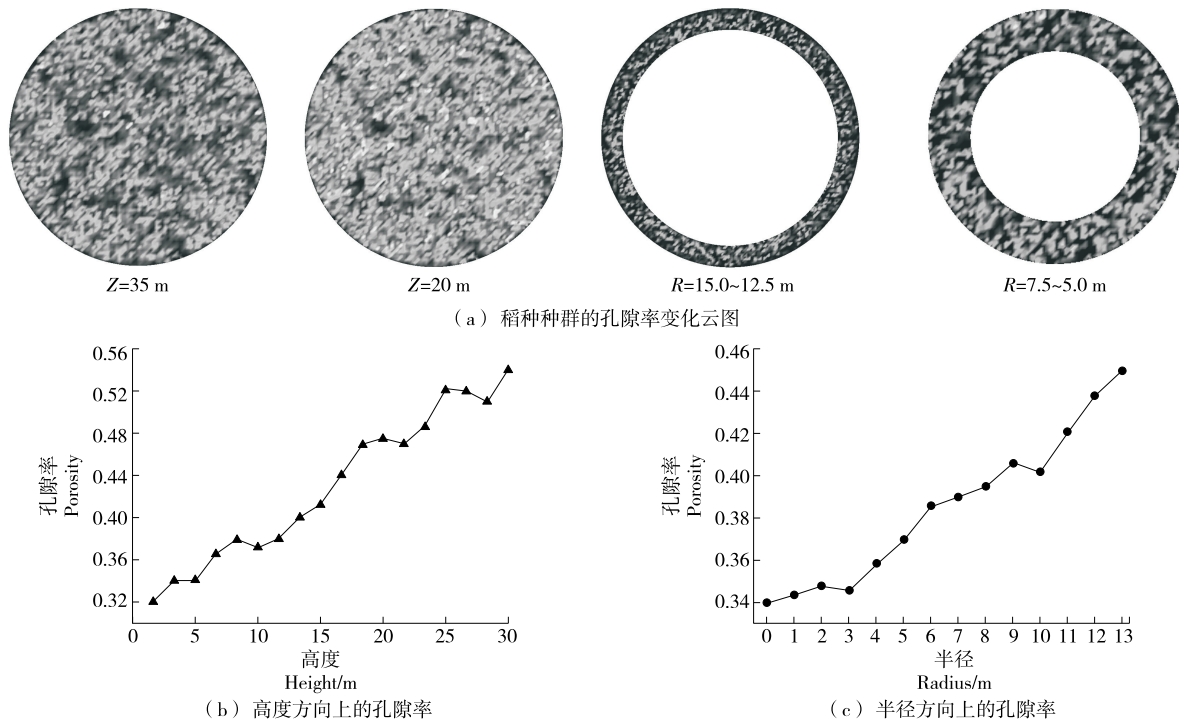


图 11 稻种形成静态堆积时的孔隙率变化规律

Figure 11 Variation law of porosity during static accumulation of rice seeds

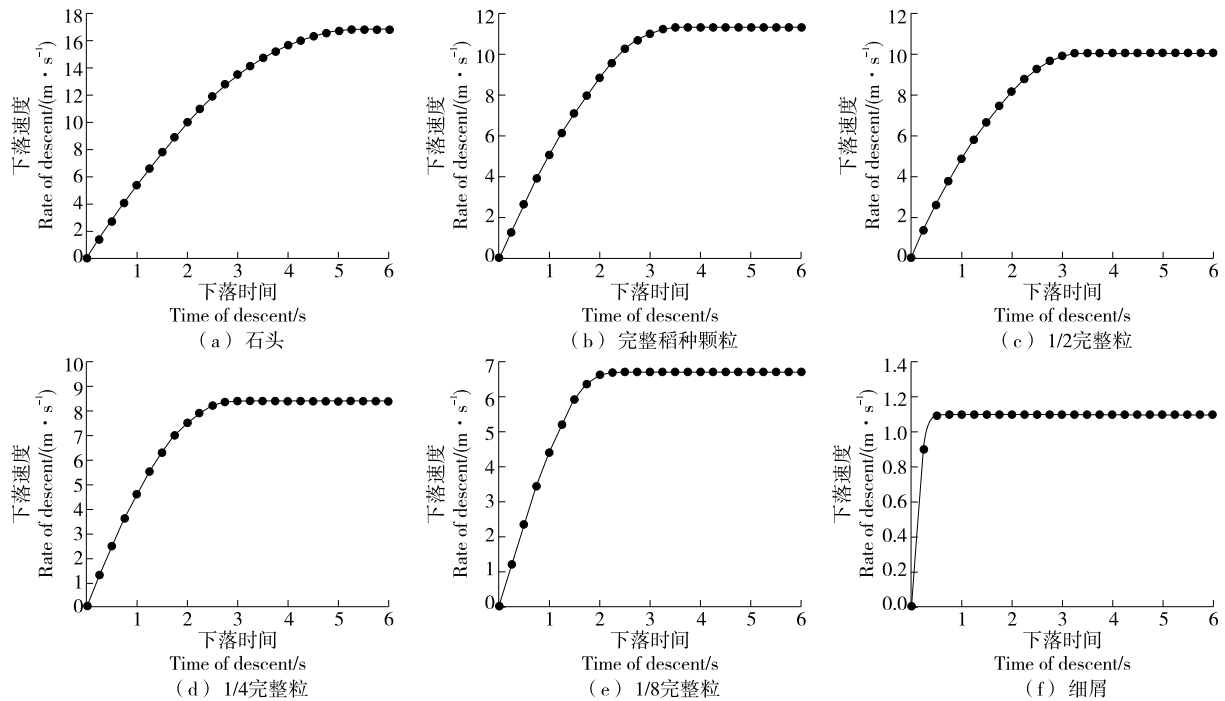


图 12 稻种不同组分下落速度与下落时间变化关系

Figure 12 Relationship between falling speed and falling time of different components in rice seeds

增大;同一质量流率下用 COOPER 模型得到的诱导空气量高于 HEMEON 模型。实际上,降低诱导空气量可以减少稻种群细屑的产生,并改善稻种群中的轻质组分以及

细屑的分布。

3.2.4 质量流率对力链演化的影响规律 利用 EDEM 后处理软件输出力链长度空间分布过程如图 16 所示。根据

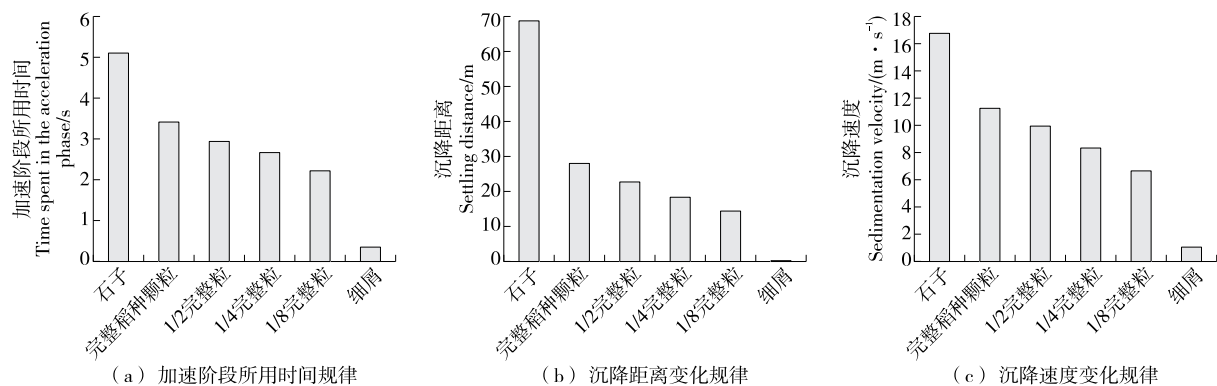


图 13 不同组分对沉降运动参数的影响规律

Figure 13 Influence pattern of different components on settlement motion parameters

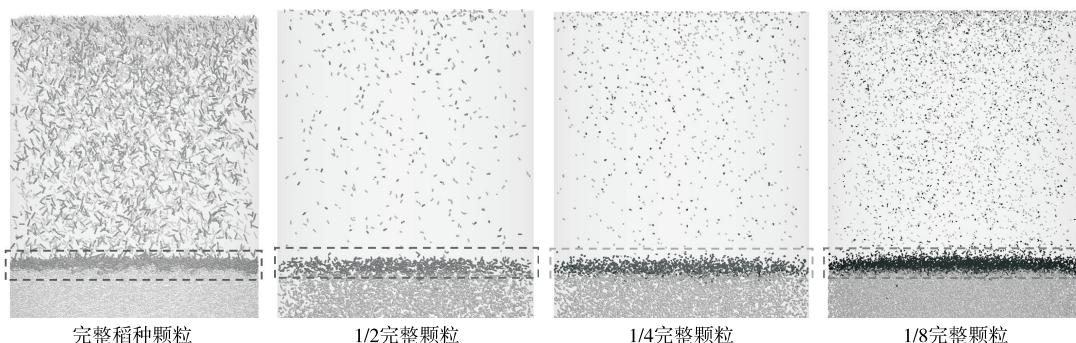


图 14 不同组分颗粒的旋转变化

Figure 14 Rotation changes in particles with different components

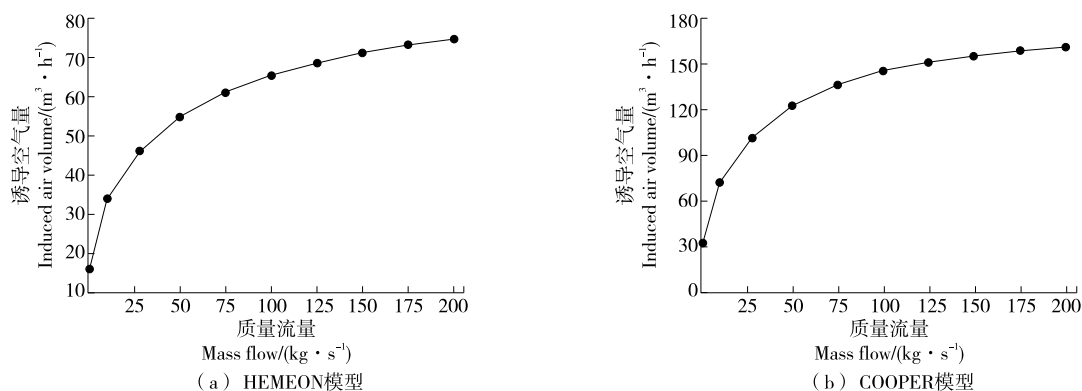


图 15 沉降过程中质量流率对诱导空气量的影响规律

Figure 15 Influence pattern of mass flow rate on induced air volume during settlement process

力链量化定义,先提取力链对应的各量化特征参数,再计算各参数在不同质量流率条件下的平均值,以便分析力链特征的整体变化趋势,其变化规律如图 17 所示。

如图 17(a)所示,力链数目随质量流率的增加呈显著递增趋势,这是由于在一定速度的稻种颗粒冲击下,种群内力链不断生成,因此其数目增加;当稻种质量流率为 250 kg/s 时,种群内部整体力链数目较多,可改善颗粒整体流动性,利于稻种流动。如图 17(b)所示,随着质量流

率的增加,力链方向系数均呈逐渐递减趋势,表明力链逐步呈现出各向异性,方向逐渐趋于落料方向;当稻种质量流率为 250 kg/s 时,整体力链方向系数最低。如图 17(c)所示,随着质量流率的递增,种群力链承载不均匀度呈逐渐递减规律,则力链上接触力分布越发平均,力链承载出现局部集中情况由较低的质量流率作用导致;当稻种种群质量流率为 250 kg/s 时,整体力链承载不均匀最低,则力链承载均匀度由质量流率影响。如图 17(d)所示,随着

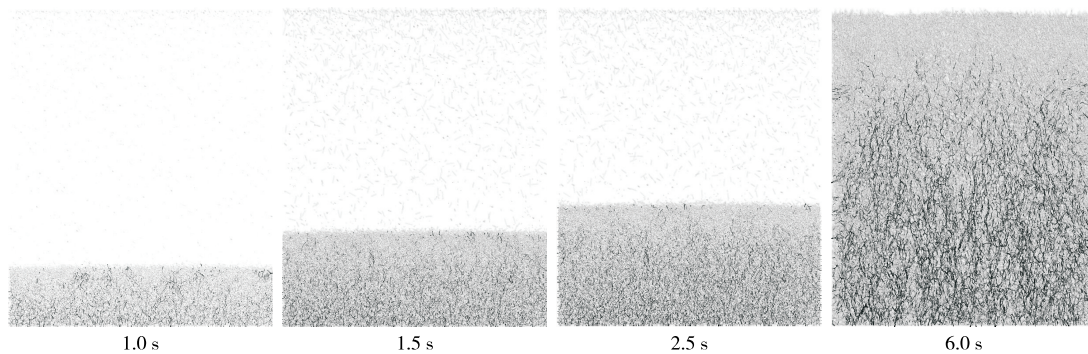


图 16 力链长度空间分布演化的过程

Figure 16 Process of spatial distribution evolution of force chain length

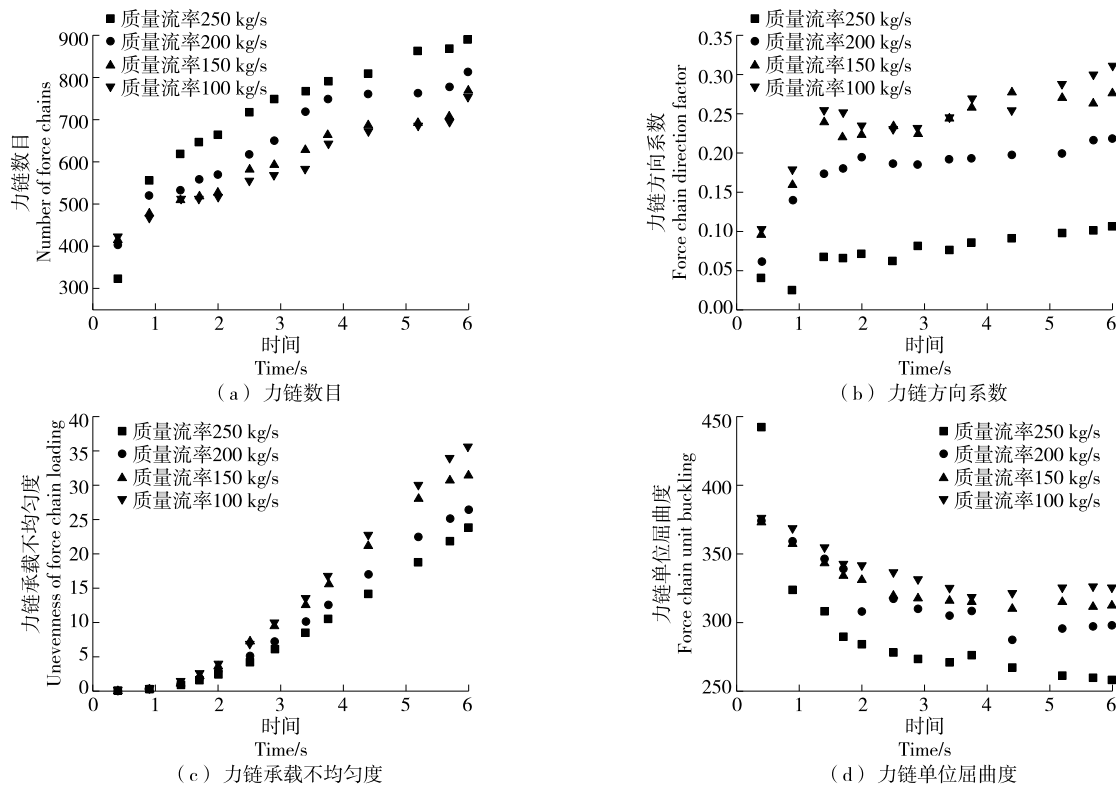


图 17 质量流率对力链演化特征的影响规律

Figure 17 Influence pattern of mass flow rate on evolution characteristics of force chains

稻种种群质量流率的增加,力链单位屈曲度呈显著下降趋势,当稻种质量流率为 250 kg/s 时,力链单位屈曲度明显低于其余 3 个稻种质量流率(100, 150, 200 kg/s),表明质量流率增加进行力链的屈曲情况逐渐得到缓解。综上,稻种颗粒接触力是稻种颗粒在一定质量流率作用下的微观体现。

稻种颗粒间的接触力分为法向接触力和切向接触力(见图 18),图 19 为颗粒间接触力随质量流率的变化规律;稻种颗粒间的法向接触力和切向接触力均随着质量流率的增加逐渐变小;由于随着稻种种群质量流率的增加,力

链数目逐渐增多,则颗粒间接触数增加,在一定质量流率作用下每个颗粒接触力也会更小,其中平均孔隙率与接触力(法向和切向)间均存在较强线性正相关。

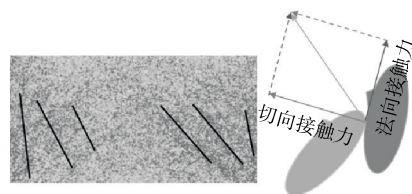
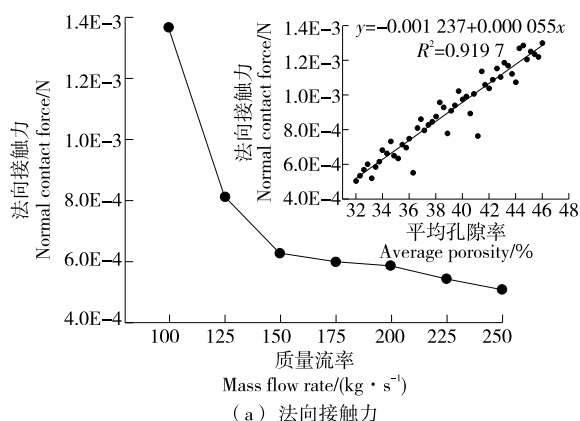
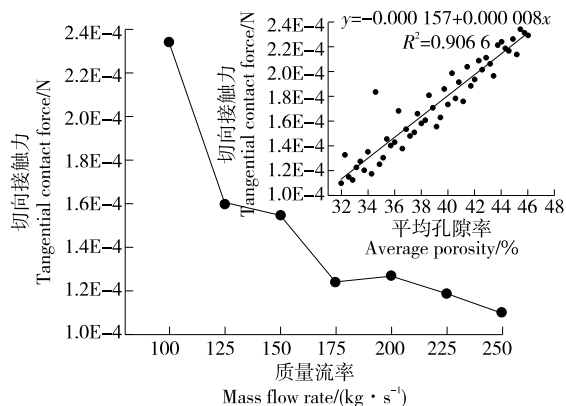


图 18 稻种颗粒间接触示意图

Figure 18 Contact between particles of rice seeds



(a) 法向接触力



(b) 切向接触力

图 19 稻种颗粒接触力随质量流率的变化规律

Figure 19 Variation law of contact force of rice seeds with mass flow rates

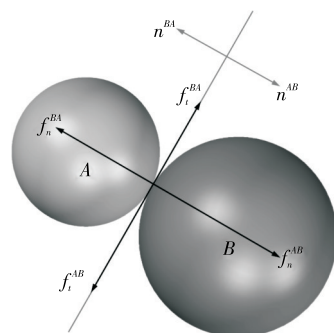


图 20 颗粒细观接触示意图

Figure 20 Fine contact of particles

进一步,针对料仓系统中的微小稻种颗粒,其粒间接触特征表征反映在细观层面,分别为接触间法向组构、法向接触应力组构和切向接触应力组构。因此,绘制颗粒体系接触应力各向异性演化特性,如图 21~图 23 所示,红色实线为根据傅里叶函数进行拟合的曲线。参照 Rothenburg 等^[36]的傅里叶函数表示颗粒体系各向异性:

$$\begin{cases} E(\theta) = 1 + \alpha \cos[2(\theta - \theta_a)]/2\pi \\ f_n(\theta) = f_0[1 + \alpha_n \cos(2\theta - 2\theta_n)] \\ f_t(\theta) = -f_0\alpha_t \sin 2(\theta - \theta_t) \end{cases} \quad (28)$$

式中:

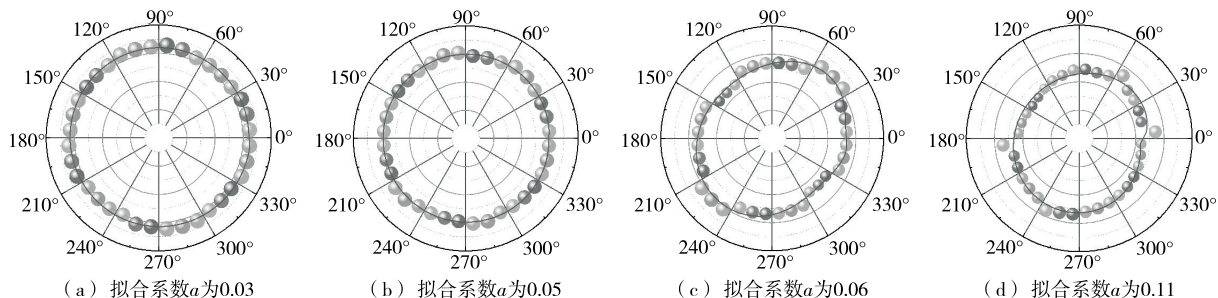


图 21 接触法向分布

Figure 21 Normal direction distribution of contact

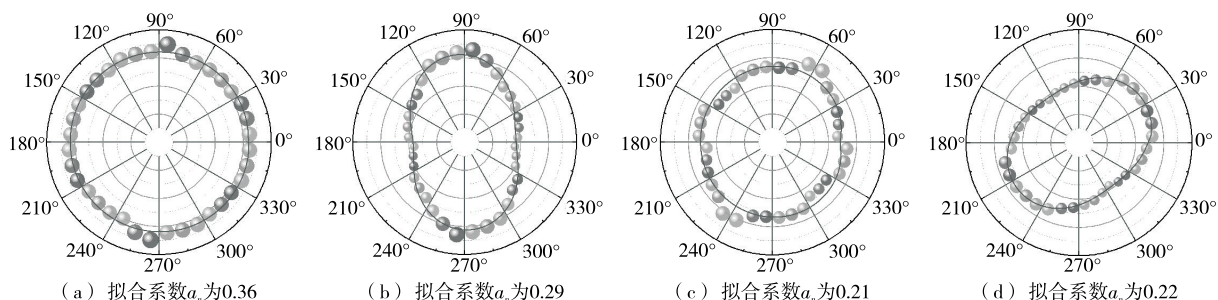


图 22 法向接触力分布

Figure 22 Distribution of normal contact force

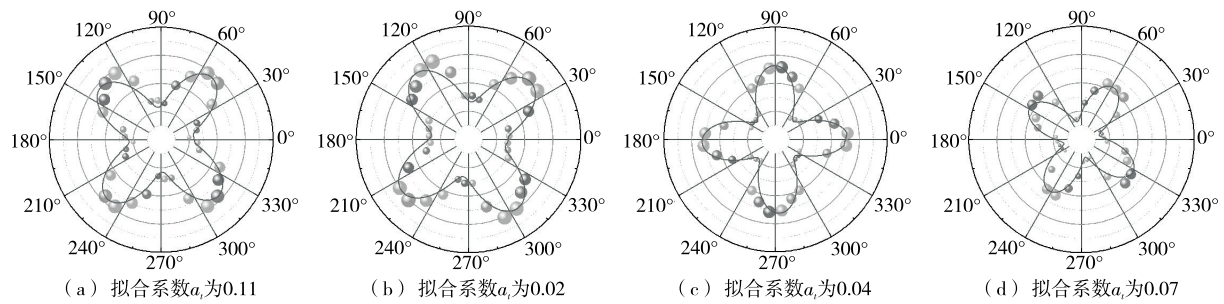


图 23 切向接触力分布

Figure 23 Distribution of shear contact force

θ ——颗粒间接触法向的角度,°;

f_0 ——所有法向接触力的平均值,N;

θ_a 、 θ_n 、 θ_t ——颗粒间接触法向(N)、法向接触力(N)和切向接触力各向异性角度(°);

a 、 a_n 、 a_t ——函数拟合系数(分别对应各变量的各向异性特征)。

图 20 为颗粒细观接触示意图,其中颗粒间的接触数为 n ; f_n 为颗粒间的法向接触力; f_t 为颗粒间的切向接触应力。如图 21,接触法向方向发生微旋转,形状的改变较小。如图 22,初始状态时,法向接触力分布比较均匀,其呈现出类似“椭球形”的形态。在沉降的实际过程中,切

向接触力显著地小于法向接触力,所以两者叠加后的接触力在大小和方向上与法向接触力比较接近。图 23 呈现出“花朵形”的切向接触力的分布形态,其有着明显的对称性。

3.2.5 沉降高度对力链演化的影响 由图 24 可知,不同沉降高度下,力链数目、力链方向系数和力链承载不均匀度均逐渐增加,力链单位屈曲度逐渐降低。力链数目在不同沉降高度下整体保持在较为接近的状态,当时间 < 3 s 时,不同沉降高度下的力链数目随时间的延长而增加,各沉降高度始终趋近,未因沉降高度差异出现明显分化,力链数目增长趋势保持一致;当时间 > 3 s 时,不同沉降高度下的力链数目仍维持在相近水平,力链演化中,

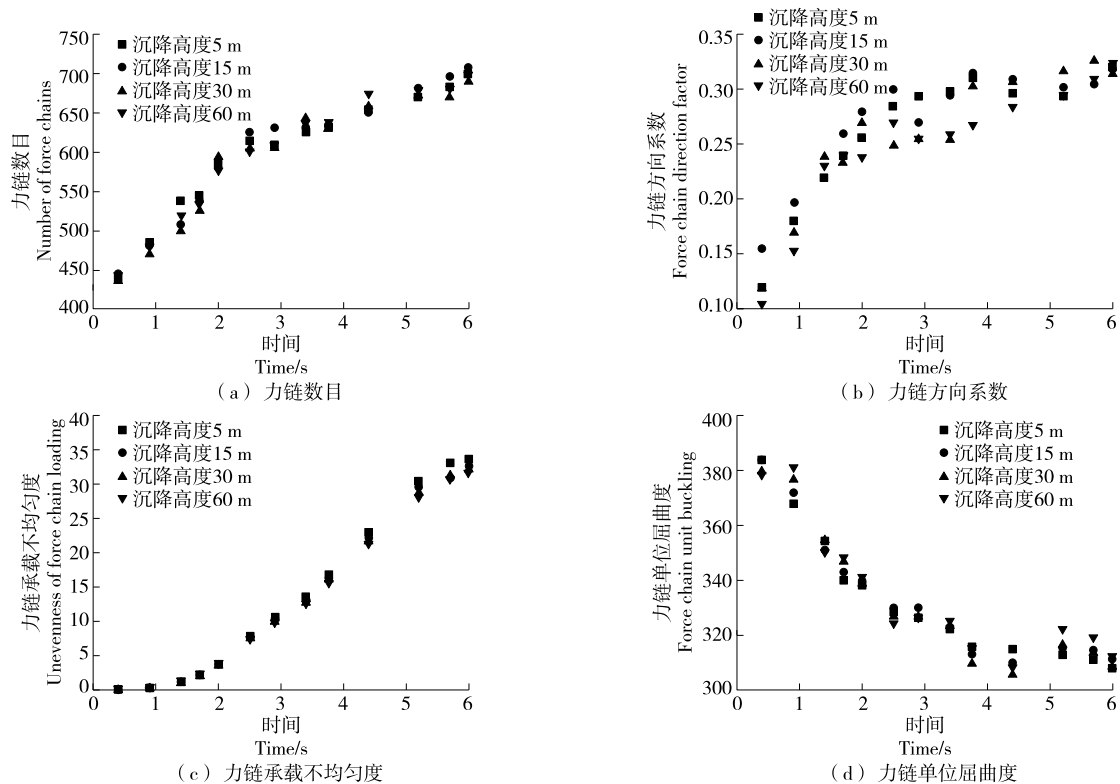


图 24 沉降高度对力链演化特征的影响规律

Figure 24 Influence pattern of settlement height on evolution characteristics of force chains

沉降高度对力链数目无明显影响;力链方向系数在力链演化中呈现出一定程度上下波动的特征,此特征由局部稻种颗粒位移重排造成的,当时间 $<3\text{ s}$ 时,力链方向系数呈现差异化特征。当沉降高度为 15 m 时,力链方向系数相对突出;当沉降高度为 60 m 时,力链方向系数相对偏小,其余沉降高度下的力链方向系数则趋于接近;不同沉降高度下,力链不均匀度差异逐渐显现,即随着沉降高度的增加,力链不均匀度逐渐减小,当时间 $<3\text{ s}$ 时,各沉降高度对应的力链承载不均匀度特征差异趋近;当时间 $>3\text{ s}$ 时,力链承载不均匀度随沉降高度增加呈递减趋势;对于力链单位屈曲度,当时间 $<3\text{ s}$ 时,不同沉降高度对力链单位屈曲度影响显著;当时间 $>3\text{ s}$ 时,力链单位屈曲度在不同沉降高度下较为接近,对此整体上较高的沉降高度有助于局部颗粒位移重排,有利于稻种颗粒的流动。

综上,较高的沉降高度在一定程度上通过改变稻种颗粒局部位移重排等方式对力链特征演化造成影响,并对稻种在料仓流动过程具有积极意义。沉降高度对力链特征的影响程度显著弱于质量流率。该现象是由于质量流率主要影响颗粒接触运动行为,对各稻种接触运动状态造成影响,对力链特征演化影响较大。

4 结论

以新两优 98 杂交稻种为研究对象,利用离散元法建立了“稻种—料仓”的离散元仿真模型,模拟不同沉降高度、粮堆组分以及质量流率对稻种沉降运动基本参数的影响,探讨不同质量流率与沉降高度对力链特征的影响。主要结论如下:

(1) 下落过程中,稻种的下落速度随着时间的延长呈增大趋势,加速度呈下降趋势,后期加速度逐渐减小并趋于 0,下落速度的增长变得缓慢,最后趋于稳定值 11.34 m/s 。达到匀速状态需 4.13 s ,对应沉降高度 28.44 m ;在 30 m 料仓中,前 28.44 m 为加速阶段,后 1.56 m 为匀速阶段。不同粮堆组分在相同时间内同一沉降高度下开始下落,石头的速度最高,完整稻种的次之,细屑的最小。组分之间逐渐拉开差距,加剧了稻种种群之间的相互作用。

(2) 当质量流率从 100 kg/s 增至 250 kg/s 时,力链数目随之增多;力链方向系数表现为逐渐减小,从 0.28 降至 0.11 ;种群力链承载不均匀度逐渐减小,表明力链上接触力分布越发平均,较低质量流率作用导致力链承载出现局部集中情况;随着稻种种群质量流率的增加,力链单位屈曲度逐渐降低,当质量流率为 250 kg/s 时,随时间从力链单位屈曲度 445 下降至 255 ,表明质量流率增加进行力链的屈曲情况逐渐得到缓解;质量流率较沉降高度对力链特征演化具有显著影响。

(3) 不同沉降高度下,力链数目整体保持在较为接近的状态,当时间 $<3\text{ s}$ 时,不同沉降高度下的力链数目随时

间延长而增加,约从 445 增至 625 ,各沉降高度始终趋近,未因沉降高度差异出现明显分化,力链数目增长趋势保持一致;当时间 $>3\text{ s}$ 时,不同沉降高度下的力链数目仍维持在相近水平,力链演化中,沉降高度对力链数目无明显影响。在不同沉降高度下,力链不均匀度差异逐渐显现,即随沉降高度增加,力链不均匀度逐渐减小,当时间 $<3\text{ s}$ 时,各沉降高度对应的力链承载不均匀度特征差异趋近,沉降高度 $5, 60\text{ m}$ 之间的力链承载不均匀度最大值为 1.1 ;当时间 $>3\text{ s}$ 时,力链承载不均匀度随着沉降高度增加呈递减趋势。沉降高度对力链特征的影响程度显著弱于质量流率。

(4) 该研究通过离散元法对料仓中稻种颗粒的沉降特性与力链演化进行了系统分析,但仍存在若干不足之处:① 当前研究主要聚焦于单一品种稻种,未考虑不同品种、含水率及杂质含量对沉降与力链演化的影响;② 稻种模拟略有简化,真实表面纹理颗粒间接触作用的影响未充分还原。后续可扩展研究对象至多品种稻种,结合试验测定不同含水率、杂质条件下的物理参数以优化模型,提升模型对复杂储粮场景的适配性。

参考文献

- [1] 程月峰, 孟兆新, 王孟刚, 等. 三维运动混合机内食品颗粒混合效果数值模拟[J]. 食品与机械, 2024, 40(12): 65-71.
CHENG Y F, MENG Z X, WANG M G, et al. Numerical simulation of food particle mixing effect in three-dimensional motion mixer[J]. Food & Machinery, 2024, 40(12): 65-71.
- [2] 徐永江, 王伟, 谭忆秋. 不同受力模式下的沥青混合料接触力链分布特征[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(7): 1-10.
XU Y J, WANG W, TAN Y Q. Contact force chain distribution characteristics of asphalt mixture under different stress modes [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(7): 1-10.
- [3] CERFONTAINE B, CIANTIA M, BROWN M J, et al. DEM study of particle scale and penetration rate on the installation mechanisms of screw piles in sand[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 139: 104380.
- [4] IRANMANESH A, PASSANDIDEH-FARD M. Two-dimensional modelling of free-surface flows in presence of a spherical object using the Modified Volume of Fluid technique [J]. Marine Systems & Ocean Technology, 2023, 17(3): 123-134.
- [5] Le Thi Huyen Trang, 李向红, 苗金旭, 等. 湿热处理改性小麦粉的热流变特性及其在杂粮饼干中的应用[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 135-142.
Le Thi Huyen Trang, LI X H, MIAO J X, et al. Thermal rheological properties of heat-moisture modified and its application in multigrain cookies[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 135-142.
- [6] 吴兰, 于少博. 基于离散元的盘式磨粉机颗粒研磨仿真及参数优化[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 102-111.

- WU L, YU S B. Particle grinding simulation and parameter optimization of disc mill based on discrete element[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 102-111.
- [7] 陈林涛, 李开文, 牟向伟, 等. 不同改流体对稻种颗粒在料仓卸料流动的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(21): 36-46.
- CHEN L T, LI K W, MOU X W, et al. Effects of different modification fluids on the flow of rice seed particles during unloading in the silo[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(21): 36-46.
- [8] 王学文, QIN Y, 李娟莉, 等. 散料在锥仓中的静压接触状态与影响因素[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 65-70.
- WANG X W, QIN Y, LI J L, et al. Static contact statuses between conical silos and granular materials and its influential factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(16): 65-70.
- [9] 段君峰, 韩阳, 揣君. 静态储粮筒仓内部水平压力试验研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(6): 80-84.
- DUAN J F, HAN Y, CHUAI J. Experimental study on the internal horizontal pressure under static grain storage in silo[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(6): 80-84.
- [10] 朱广飞, 白岩松, 王松林, 等. 玉米干储一体仓气流场仿真分析与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(S1): 381-390.
- ZHU G F, BAI Y S, WANG S L, et al. Simulation analysis and optimization of airflow field in integrated silo for corn drying and storage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S1): 381-390.
- [11] 崔宏伟, 吴文福, 吴子丹, 等. 基于粮温时空相关性的储粮数量监管方法研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 321-330.
- CUI H W, WU W F, WU Z D, et al. Reserves monitoring method for grain storage based on temporal and spatial correlation of grain temperature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 321-330.
- [12] 施灿璨, 周福君, 夏吉庆, 等. 自然冷资源低温储粮仓设计与稻谷储藏试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 375-382.
- SHI C C, ZHOU F J, XIA J Q, et al. Design of cool storage warehouse with natural cold resource and paddy storage experiment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 375-382.
- [13] HÄRTL J, OOI J Y, ROTTER J M, et al. The influence of a cone-in-cone insert on flow pattern and wall pressure in a full-scale silo[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86(4): 370-378.
- [14] WÓJCIK M, TEJCHMAN J, ENSTAD G G. Confined granular flow in silos with inserts: full-scale experiments[J]. Powder Technology, 2012, 222: 15-36.
- [15] 冯永, 刘宇, 潘樊. 基于球单元组合颗粒模型的筒仓卸粮速度场演化机理研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4): 1 559-1 566.
- FENG Y, LIU Y, PAN F. Study on the evolution mechanism of silo unloading velocity field based on ball element composite particle model[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(4): 1 559-1 566.
- [16] ZARE D, NOURMOHAMADI-MOGHADAMI A, PANIGRAHI S S, et al. Dimensionless modeling of fine material distribution in an experimental silo during central spout loading[J]. Journal of Stored Products Research, 2023, 100: 102063.
- [17] 吕都, 唐健波, 姜太玲, 等. 基于近红外光谱技术快速检测稻谷水分含量[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 51-56, 63.
- LYU D, TANG J B, JIANG T L, et al. Research on rapid prediction model of rice moisture content based on near infrared spectroscopy[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 51-56, 63.
- [18] 何颖臻, 王明旭, 王巍, 等. 平房仓仓底余粮清扫装置传送及收集仿真研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 91-96, 220.
- HE Y Z, WANG M X, WANG W, et al. Simulation research on the transfer and collection part of warehouse bottom surplus grain cleaning device[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 91-96, 220.
- [19] 崔熙灿, 张凌凯, 王建祥. 高堆石坝砂砾石料的细观参数反演及三轴试验模拟[J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 113-122.
- CUI X C, ZHANG L K, WANG J X. Inversion of meso parameters and triaxial test simulation of the gravel materials for high rockfill dam[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(4): 113-122.
- [20] 刘克瑾, 姚辉江, 袁铮. 平底筒仓中心卸料流态演化过程及仓壁压力波动性[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 15-24.
- LIU K J, YAO H J, YUAN Z. Evolution process of center discharge flow pattern and pressure fluctuation of silo wall in a flat-bottomed silo[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(15): 15-24.
- [21] 张炜, 萧伟健, 袁传牛, 等. 基于三维离散元模型粉末压制中力链对阻塞行为的影响机制[J]. 粉末冶金技术, 2024, 42(4): 403-410, 417.
- ZHANG W, XIAO W J, YUAN C N, et al. Influence mechanism of force chain on jamming behavior in powder compaction based on 3D discrete element model[J]. Powder Metallurgy Technology, 2024, 42(4): 403-410, 417.
- [22] 原方, 刘海林, 程远浩, 等. 深浅仓卸料压力离散元数值模拟研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 117-123.
- YUAN F, LIU H L, CHENG Y H, et al. Numerical simulation of discharge pressure of deep and shallow silos with discrete element[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 117-123.
- [23] 韦熙, 周甲伟, 徐耀杰. 基于DEM模拟的筒仓卸料过程瞬时拱影响因素分析[J]. 包装与食品机械, 2024, 42(4): 56-66.
- WEI X, ZHOU J W, XU Y J. Analysis of influence factors of instantaneous arch during silo discharging process based on DEM simulation[J]. Packaging and Food Machinery, 2024, 42

- (4): 56-66.
- [24] 张涛, 李修银, 廖敏, 等. 糙米正面破碎特性与裂纹扩展规律[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 88-92, 110.
- ZHANG T, LI X Y, LIAO M, et al. Front fracture characteristics and crack propagation law of brown rice[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 88-92, 110.
- [25] 代峥峥, 吴建章, 朱文学, 等. 基于 MATLAB 的浅圆仓内玉米沉降运动特性分析[J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2023, 44(5): 118-124.
- DAI Z Z, WU J Z, ZHU W X, et al. Analysis of the falling kinematic characteristic of corn in silo based on MATLAB[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(5): 118-124.
- [26] 刘程, 王旺平, 宋少云. 基于离散元 EDEM 的米粒破碎特性分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 88-92.
- LIU C, WANG W P, SONG S Y. Analysis of rice grain breakage characteristics based on discrete element EDEM[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 88-92.
- [27] 张淑媛, 王森, 侯耀龙, 等. 地槽通风高大平房仓仓内温度场研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 152-157.
- ZHANG S Y, WANG S, HOU Y L, et al. Study on temperature field in tall bungalow based on geosynclinal ventilation[J]. Food & Machinery, 2024, 40(6): 152-157.
- [28] 陈正发, 车刚, 王霖, 等. 四向通风混流干燥段内稻谷流动特性研究: 基于 EDEM[J]. 农机化研究, 2023, 45(6): 19-23, 29.
- CHEN Z F, CHE G, WAN L, et al. Study on paddy flow characteristics in four-way ventilation mixed-flow drying section: based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(6): 19-23, 29.
- [29] 张晓文, 温国正, 张建辉, 等. 基于 EDEM 的散体物料运输过程中物料粒径放大倍数对料流的影响研究[J]. 起重运输机械, 2024(5): 43-47.
- ZHANG X W, WEN G Z, ZHANG J H, et al. On the influence of material particle size magnification on material flow during bulk material conveying based on EDEM[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2024(5): 43-47.
- [30] 张炜, 谈健君, 张帅, 等. 基于颗粒物质力学的铁粉末压制中摩擦特性对力链演化影响[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(2): 386-395.
- ZHANG W, TAN J J, ZHANG S, et al. Influence of tribological characteristics on the evolution of force chains in ferrous powder compaction based on granular matter theory[J]. Tribology, 2022, 42(2): 386-395.
- [31] 陈庆发, 刘军, 刘恩江, 等. 多漏斗放矿过程散体介质接触力特性量化研究[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(7): 2 115-2 125.
- CHEN Q F, LIU J, LIU E J, et al. Quantitative study on contact force characteristics of granular medium in multi-funnel ore drawing process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(7): 2 115-2 125.
- [32] 陈庆发, 秦世康, 杨承业. 柔性隔离层下单漏斗散体矿岩力链演化特征模拟[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(6): 1 694-1 705.
- CHEN Q F, QIN S K, YANG C Y. Simulation on evolution characteristics of force chain in granular ore rock with single funnel under flexible isolation layer[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(6): 1 694-1 705.
- [33] 陈庆发, 王少平, 秦世康. 柔性隔离层下多漏斗散体矿岩力链演化特征的离散元模拟[J]. 工程科学学报, 2020, 42(9): 1 119-1 129.
- CHEN Q F, WANG S P, QIN S K. Discrete element simulation for evolution characteristics of multi-funnel mineral-rock force chain under flexible isolation layer[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(9): 1 119-1 129.
- [34] 徐竞, 王峰, 谭振华, 等. 堆垛方式及送风功率对冷库制冷效果的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(12): 133-138, 161.
- XU J, WANG F, TAN Z H, et al. The influence of stacking mode and air supply power on cooling effect of cold storage [J]. Food & Machinery, 2023, 39(12): 133-138, 161.
- [35] 李震, 张冬会, 张鑫宇, 等. 香菇菌渣致密成型过程中颗粒黏结和断裂研究[J]. 锻压技术, 2023, 48(12): 188-195.
- LI Z, ZHANG D H, ZHANG X Y, et al. Study on particle bonding and fracture during dense forming process of mushroom residue[J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(12): 188-195.
- [36] ROTHENBURG L, BATHURST R J. Analytical study of induced anisotropy in idealized granular materials[J]. Géotechnique, 1989, 39(4): 601-614.