

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.012

玉米清选组合孔筛体设计与试验

王立军 冯鑫 郑招辉 于泳涛 刘天华 马杨

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要:为增强玉米清选筛体对高喂入量脱出物的筛分能力,以适应玉米联合收获机快速发展要求,以玉米籽粒为研究对象,对贝壳筛体作业机理进行分析,探究筛分过程中籽粒在贝壳筛体上运动状态,得到贝壳筛对籽粒的筛分特性和籽粒的透筛模型。为增大籽粒透筛概率,基于贝壳筛和圆孔筛的筛分特性,设计了贝壳-圆孔组合孔筛体。在玉米脱出物不同喂入量条件下进行仿真试验,对组合孔筛、圆孔筛、贝壳筛作业效果进行对比,结果表明:在喂入量为6 kg/s情况下,组合孔筛作业后的籽粒损失率、清洁率和筛分时间分别为1.15%、97.53%和5.50 s,均满足国家标准要求,且组合孔筛的籽粒损失率比圆孔筛和贝壳筛分别减少了5.79个百分点和7.84个百分点,通过台架试验验证了仿真结果准确性。在喂入量分别为5 kg/s和6 kg/s条件下对组合孔筛与阶梯筛筛分效果进行对比,在喂入量为6 kg/s、气流速度为12.8 m/s、气流方向角30°、振动频率为5.15 Hz时,组合孔筛相对阶梯筛籽粒损失率降低5.60个百分点,筛分时间缩短0.93 s,清选效果提高。

关键词:玉米籽粒收获机; 振动筛; 贝壳筛; 透筛模型; 组合孔筛

中图分类号: S225.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)05-0104-10

Design and Test of Combined Sieve of Maize Screening

WANG Lijun FENG Xin ZHENG Zhaohui YU Yongtao LIU Tianhua MA Yang

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming to increase the carrying capacity of maize cleaning sieve to high feed quantity to meet the requirement of rapid development of maize grain harvester. Through the analysis of mechanism of shellfish screening, the screening performance and the model of maize screening were obtained. In order to increase the probability of grain permeation, based on the screening characteristics of shell sieve and round sieve, the maize combined sieve which consisted of the shapes of shellfish and round hole was designed. Under the conditions of different feeding quantities of maize extractives, the simulation tests which included combined sieve, single round hole sieve and single shellfish screening test separately were carried out, then their screening performances were compared and analyzed. The results showed that compared with the single round hole sieve and the shellfish sieve respectively, the loss rates of maize of combined sieve was decreased by 4.79 percentage points and 7.85 percentage points when the feeding quantity was 5 kg/s, the loss rates of maize of combined sieve was decreased by 5.79 percentage points and 7.84 percentage points when the feeding quantity was 6 kg/s. Under the condition of feeding quantity was 2~6 kg/s, the cleaning rate and sieving time were 99.22% to 97.53% and 4.87 s to 5.50 s partly, thus all indicators met the national standards. The performance of the combined sieve was verified by bench test. The loss rate of maize, cleaning rate of maize and screening time of the combined sieve were 1.09%, 95.94% and 6.48 s, when feeding quantity was 6 kg/s, respectively. Compared with the stepped sieve, the combined sieve grain loss rate was reduced by 5.60 percentage points, the screening time was shortened by 0.93 s, and the performance of the cleaning device was further improved.

Key words: maize grain harvester; vibration sieve; shellfish sieve; model of maize sieving; combined sieve

0 引言

现有谷物联合收获机应在常规喂入量下使用,

超过此范围,单位谷物体积占有空间减小,影响各部件功能的正常发挥,清选损失将迅速增加^[1],无法满足农业作物种植面积不断扩大的需求^[2]。清选

收稿日期: 2018-09-05 修回日期: 2018-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475090)、黑龙江省自然科学基金项目(E2017004)和国家重点研发计划项目(2018YFD0300103)

作者简介: 王立军(1978—),女,教授,博士生导师,主要从事收获机械研究,E-mail: wljszf@163.com

装置作为联合收获机关键部件之一,是处理谷物的最后一道工序,其性能直接影响籽粒损失率和清洁率等多项指标^[3]。

研究者针对筛孔的尺寸、类型、排布和优化配置等方面进行了大量研究。焦红光等^[4]对筛孔孔径与筛面倾角的优化配置进行研究,揭示筛孔孔径与筛面倾角对筛分分离粒度的交互效应;钟挺等^[5]针对稻麦联合收获进行脱粒清选部件试验,探究了凹板筛筛孔大小与其他清选作业参数对脱粒与筛分效果的影响;王立军等^[6]通过仿真试验探究贝壳筛筛孔排布与形状对风筛式清选装置的筛分效果影响,并对其进行优化,得到最优贝壳筛筛孔尺寸与排布最佳参数组合;江海深等^[7]通过 DEM 仿真研究在不同筛面长度下,圆孔筛与方孔筛对煤炭直线振动筛筛分效率的影响;LI 等^[8]基于 DEM 离散元软件对大豆和芥末种子混合物振动筛分过程,进行了二维仿真试验,探究在不同喂入量下,物料的透筛效率和筛面长度与筛面物料运动规律的关系,以及筛面物料层的厚度对筛分效率的影响;焦红光等^[9]通过试验探究了概率筛筛孔直径对煤用筛分机筛分效率的影响;CLEARY 等^[10]采用离散元法模拟了工业双层香蕉筛作业过程,探索粒子间能量传递与吸收对筛面筛分效率的影响。FERNANDEZ 等^[11]利用 SPH 单向耦合 DEM 模拟高速、高分散的颗粒流通过双层香蕉筛的流动特性。目前,国内外学者的研究主要集中于单一的筛孔类型对筛分效果的影响,对于不同筛孔组合孔筛体结构鲜有报道。

本文基于传统平面往复振动筛,通过理论分析判定籽粒在贝壳筛上运动状态,建立籽粒在贝壳筛孔斜面透筛模型,得到籽粒透筛概率。设计等距圆孔均布于贝壳筛孔四周,得到贝壳-圆孔组合孔筛体。为探究组合孔筛体对高喂入量脱出物的筛分能力,利用 CFD-DEM 耦合方法^[12-14],在玉米脱出物不同喂入量下对组合孔筛、圆孔筛和贝壳筛清选效果进行对比。通过台架试验验证组合孔筛筛分性能,并与课题组前期研究的阶梯筛清选效果进行对比。

1 理论分析

1.1 籽粒在贝壳筛上部受力分析

振动筛以简谐方式进行筛分作业,籽粒加速度方向角随着筛面加速度改变而改变,将籽粒所受惯性力分为 4 个象限进行分析^[15]。以籽粒惯性力在第 3 象限时为例,籽粒与筛体接触点 O 为坐标原点,沿籽粒所受支持力和摩擦力反方向建立坐标轴 x, y ,垂直于平面 Oxy 建立坐标轴 z ,并对籽粒进行受力分析,如图 1 所示。

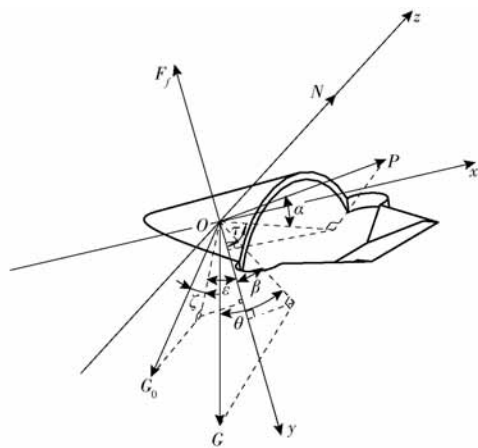


图 1 籽粒在贝壳筛上部受力分析

Fig. 1 Stress analysis of maize in upper part of shellfish sieve

由力平衡方程得

$$\begin{cases} N = G \sin \theta + G_0 \sin \zeta - P \sin \alpha \\ F_y = P \cos \alpha \cos \tau + G_0 \cos \zeta \cos \varepsilon - F_f + \\ G \cos \theta \cos \beta \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$G = mg \quad (2)$$

$$G_0 = ma_0 \quad (3)$$

$$P = km u^2 \quad (4)$$

$$F_f = N \tan \delta \quad (5)$$

式中

N ——籽粒所受筛面支持力, N

P ——籽粒所受风力, N

G ——籽粒所受重力, N

G_0 ——籽粒所受惯性力, N

a_0 ——籽粒加速度, m/s^2

F_f ——籽粒所受摩擦力, N

F_y ——籽粒沿 y 轴正方向的合力, N

m ——籽粒质量, kg

θ ——重力在 xy 平面上投影夹角, ($^\circ$)

β ——重力在 yz 平面上投影夹角, ($^\circ$)

α ——风力在 xy 平面上投影夹角, ($^\circ$)

τ ——风力在 yz 平面上投影夹角, ($^\circ$)

ζ ——惯性力在 xy 平面上投影夹角, ($^\circ$)

ε ——惯性力在 yz 平面上投影夹角, ($^\circ$)

δ ——籽粒与筛面摩擦角, 取 24.4°

u ——风速, m/s

k ——籽粒漂浮系数, m^{-1}

整理公式(1)~(5)得

$$\begin{cases} N = m(g \sin \theta + a_0 \sin \zeta - k u^2 \sin \alpha) \\ \eta = g \sin \theta + a_0 \sin \zeta - k u^2 \sin \alpha \\ F_y = mg(\cos \theta \cos \beta - \sin \theta) + m a_0(\cos \zeta \cos \varepsilon + \\ \sin \zeta \tan \delta) + k m u^2(\cos \alpha \cos \tau - \sin \alpha \tan \delta) \end{cases} \quad (6)$$

式中 η ——籽粒抛起系数

当 $\eta < 0$ 时籽粒被筛面抛起, $\eta > 0$ 则沿筛面滑动。当 $\eta > 0$ 时, $F_y > 0$ 籽粒沿筛面向后滑动; $F_y < 0$ 时, 籽粒沿筛面向前滑动。在筛分过程中由于气流场速度与筛面加速度的不断变化导致 η 的正负变化, 因此在筛面加速度为第3象限时, 籽粒具有被贝壳筛上部抛出或滑动两种状态。同理由其余3个象限内籽粒所受惯性力的情况可得, 由于其贝壳筛孔上部特殊的外形, 在贝壳筛上不同位置会使籽粒呈不同角度滑动或抛起状态, 表明贝壳筛外形会使籽粒向其四周发散。

1.2 籽粒在贝壳筛孔斜面处受力分析

由于筛面加速度方向不同, 籽粒惯性力分为4个象限进行受力分析, 如图2所示。

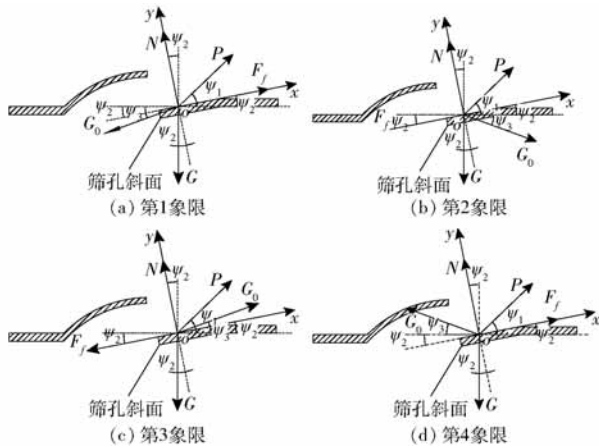


图2 筛面加速度在不同象限时籽粒在筛孔斜面处受力分析

Fig.2 Stress situation of maize on slope of sieve hole under different quadrants of acceleration of screen surface

以筛面加速度在第1象限为例, 对籽粒的受力情况进行分析。以籽粒与筛面接触位置为坐标原点 o , 沿贝壳筛孔斜面方向为坐标 x 轴, 垂直于贝壳筛孔处斜面方向为坐标 y 轴, 根据籽粒受力平衡得出

$$\begin{cases} N = G \cos \psi_2 - P \sin(\psi_1 - \psi_2) + G_0 \sin(\psi_3 - \psi_2) \\ F = F_f + P \cos(\psi_1 - \psi_2) - G_0 \cos(\psi_3 - \psi_2) - G \sin \psi_2 \\ F_f = \begin{cases} N \tan \delta & (N \geq 0) \\ 0 & (N < 0) \end{cases} \\ G_0 = -m A \omega^2 \sin(\omega t) \end{cases} \quad (7)$$

式中 A ——筛面振幅, m

ψ_1 ——风力与筛孔斜面夹角, ($^\circ$)

ψ_2 ——筛孔斜面与水平方向夹角, ($^\circ$)

ψ_3 ——筛子加速度方向角, ($^\circ$)

t ——筛面运动时间, s

ω ——筛面振动角速度, rad/s

F ——籽粒沿筛孔斜面所受合力, N

整理公式(7)得

$$\begin{cases} N = m(g \cos \psi_2 - k u^2 \sin(\psi_1 - \psi_2) - A \omega^2 \sin(\omega t) \sin(\psi_3 - \psi_2)) \\ F = mg(\tan \delta \cos \psi_2 - \sin \psi_2) + k m u^2 (\cos(\psi_1 - \psi_2) - \tan \delta \sin(\psi_1 - \psi_2)) - m A \omega^2 \sin(\omega t) (\tan \delta \sin(\psi_3 - \psi_2) - \cos(\psi_3 - \psi_2)) \\ a_1 = g(\tan \delta \cos \psi_2 - \sin \psi_2) + k u^2 (\cos(\psi_1 - \psi_2) - \tan \delta \sin(\psi_1 - \psi_2)) - A \omega^2 \sin(\omega t) (\tan \delta \sin(\psi_3 - \psi_2) - \cos(\psi_3 - \psi_2)) \\ a_2 = -A \omega^2 \sin(\omega t) \end{cases} \quad (8)$$

式中 a_1 ——籽粒沿筛孔斜面加速度, m/s^2

a_2 ——筛孔斜面加速度, m/s^2

当 $N \leq 0$ 时籽粒被筛面抛起; 当 $N > 0$ 时籽粒沿筛孔斜面滑动, 其中 $F > 0$ 籽粒向筛后滑动, $F < 0$ 籽粒向筛前滑动, $F = 0$ 时籽粒相对筛面静止。在入口气流速度为 12.8 m/s 、气流方向角为 30° 时, 通过 CFD-DEM 耦合仿真提取贝壳筛孔斜面处气流速度为 $5.51 \sim 14.17 \text{ m/s}$, 气流倾角为 $14.8^\circ \sim 20.2^\circ$, 本文取 17.5° 进行研究。以6行玉米联合收获机田间作业状态为参考, 筛体振动频率范围为 $4.45 \sim 5.85 \text{ Hz}$, 选取其中心值 5.15 Hz 为基准值进行研究, 计算得到筛子振动角速度为 32.36 rad/s , 实测贝壳筛孔斜面与水平方向夹角为 14.5° , 摇杆摆动极限位置连线与水平方向夹角为 43.5° , 曲柄(即筛面振幅)半径为 0.019 m ; 确定玉米籽粒漂浮系数为 0.063 m^{-1} [16], 选取德美亚一号玉米籽粒为研究对象, 随机称取 1000 粒, 重复 5 次取平均值, 得到单玉米籽粒质量为 0.49 g , 各参数如表1所示。

表1 筛面运动和籽粒物理特性参数

Tab.1 Parameters of motion of screen and physical characteristics of grains

参数	数值
筛面振动角速度 $\omega / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	32.36
筛孔斜面与水平方向夹角 $\psi_2 / (^\circ)$	14.5
筛子加速度方向角 $\psi_3 / (^\circ)$	43.5
玉米籽粒漂浮系数 k / m^{-1}	0.063
筛面振幅 A / m	0.0191
玉米籽粒质量 m / g	0.49

将各个参数代入公式(8)中, 筛上籽粒被筛分时依次经过筛面加速度的第4、1、2、3象限, 考察筛面运动一个周期内籽粒在贝壳筛孔中受力情况, 运用 Matlab 软件进行数值模拟, 得到筛面运动时间 t 、气流速度 u 和籽粒所受支持力之间的关系, 如图3所示。

由图3分析可知, 气流速度对籽粒所受支持力

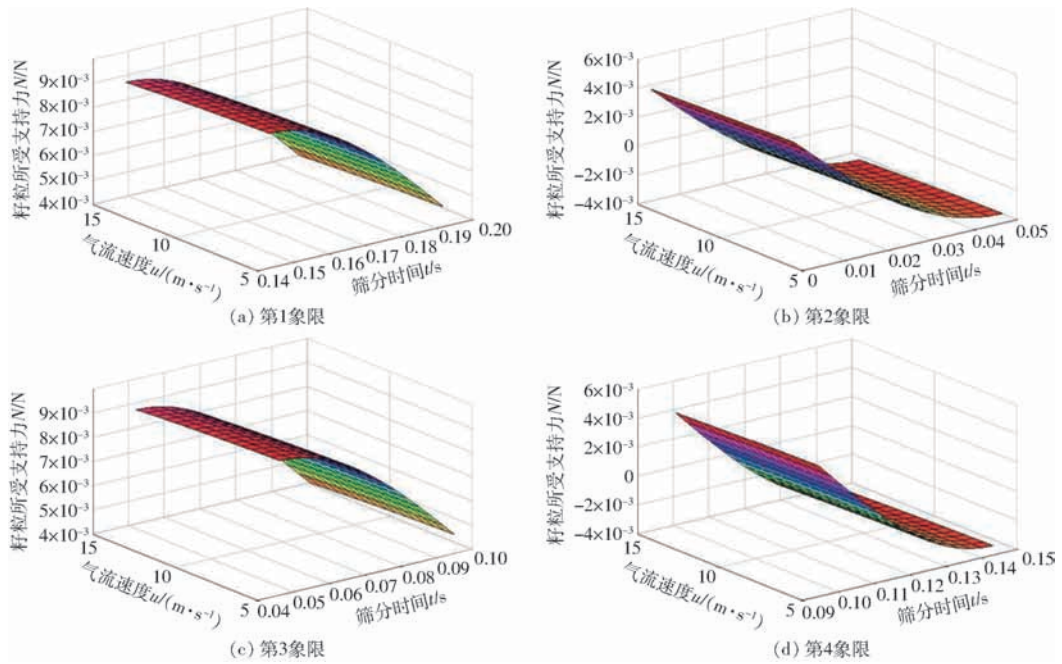


图3 筛面加速度在不同象限时籽粒所受支持力

Fig. 3 Support of maize under different quadrants of acceleration of screen surface

影响不明显,籽粒在筛孔斜面处是否抛起主要受筛面运动状态影响。提取筛面加速度不同象限中籽粒未被筛面抛起(即 $N > 0$)时筛面运动时间,将其代入公式(8)中,得到筛面运动时间 t 、气流速度 u 和籽粒沿筛孔斜面所受合力之间的关系,如图4所示。

如图4可知,筛面加速度在4个不同象限时,籽粒沿斜面合力 $F > 0$ 或 $F < 0$,籽粒具有沿筛孔斜面上滑和下滑两种运动状态。

结合筛面运动确定籽粒滑动透筛条件,以筛面加速度在第1象限为例,筛面沿第1象限方向加速

运动,筛孔斜面处籽粒上滑时,将籽粒与筛面加速度对比,若籽粒加速度小于筛面加速度,单位时间内籽粒相对于筛面向筛孔处运动即为透筛,反之则未透筛,同理得到筛面加速度不同象限滑动籽粒透筛判定条件,如表2所示。

将气流速度范围、筛面加速度不同象限籽粒滑动时的筛分时间和表1中参数代入公式(8)中,运用 Matlab 软件处理得到筛面运动时间 t 和气流速度 u 分别与籽粒沿筛孔斜面方向加速度 a_1 和筛孔斜面加速度 a_2 的关系,如图5所示。

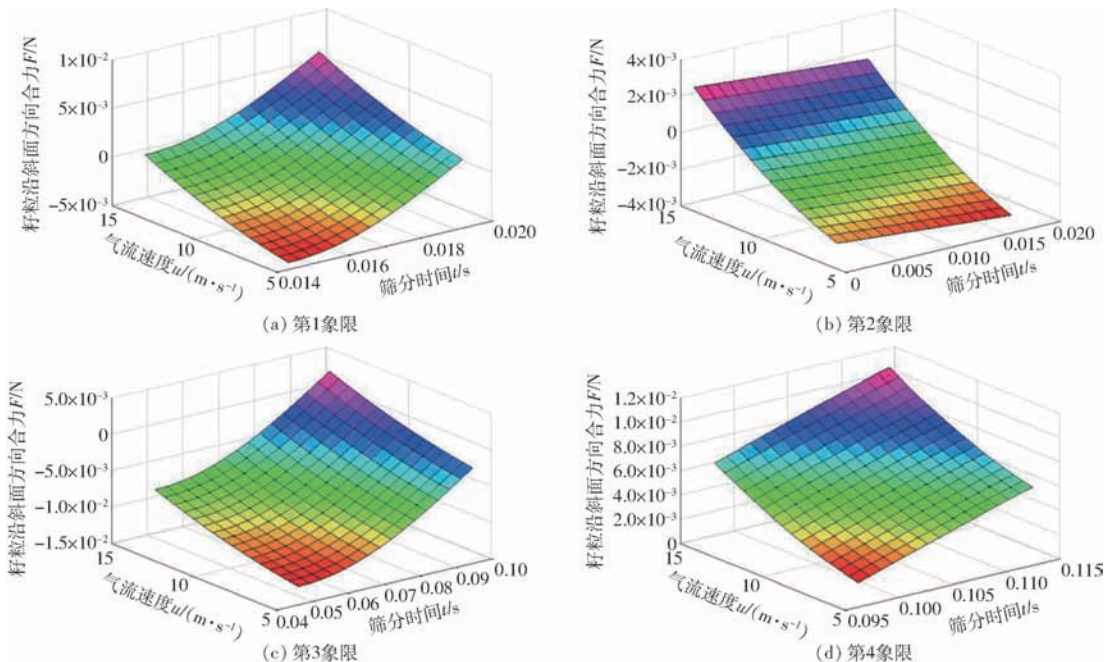


图4 筛面加速度在不同象限时籽粒沿筛孔斜面受力分析

Fig. 4 Stress analysis of maize along slope of sieve hole under different quadrants of screen surface acceleration

表2 滑动籽粒透筛概率

Tab.2 Probability of maize sieving

象限	滑动籽粒透筛判定条件		滑动中籽粒透筛概率/%
	上滑	下滑	
1	$ a_1 < a_2 $	透筛	87.78
2	未透筛	透筛	64.06
3	未透筛	$ a_1 > a_2 $	67.11
4	未透筛	$ a_1 > a_2 $	0

依据滑动籽粒判定条件,运用 Matlab 软件获得籽粒滑动透筛的曲面面积,并计算籽粒滑动透筛时

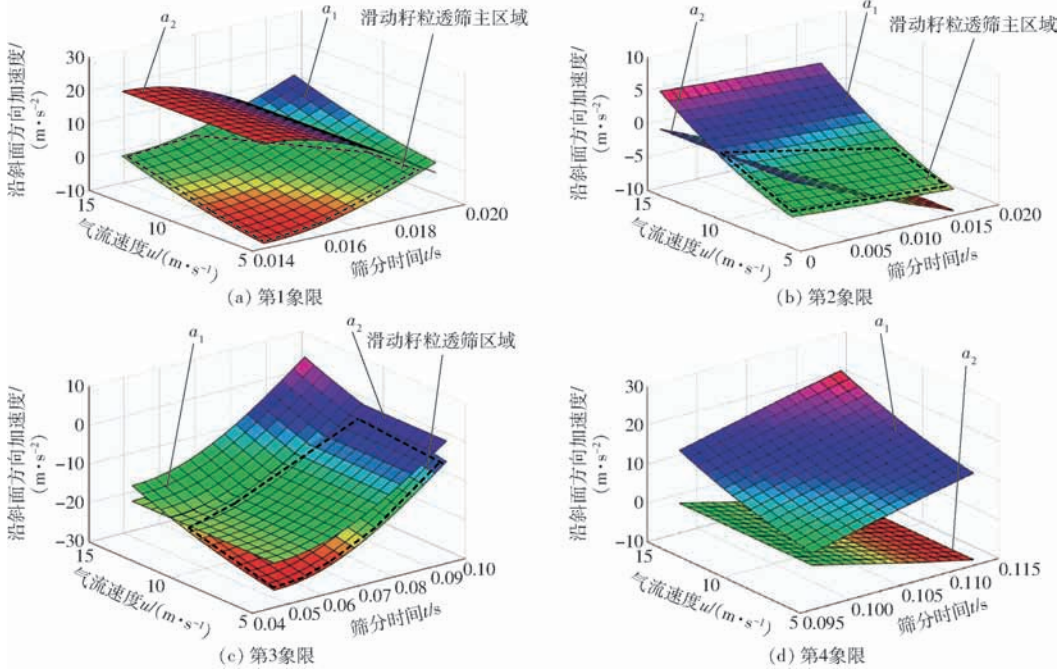


图5 筛面加速度不同象限时籽粒和筛孔斜面的加速度分析

Fig.5 Analysis of accelerations of maize and screen hole under different quadrants of acceleration of screen surface

进行筛孔间距对玉米脱出物水平方向平均速度影响的单因素试验,结果如图6所示,保证贝壳筛对筛上脱出物一定的运移速度,以使贝壳筛孔横、纵间距最大化,确定组合孔筛中贝壳筛筛孔横、纵向距离分别为54 mm和96 mm。

设相邻贝壳筛孔间面积为 S_1 ,圆孔面积为 S_2 ,相邻贝壳筛孔间可容纳圆孔数目为 n ,其关系为

$$\begin{cases} S_2 = \pi R^2 \\ n \leq \frac{S_1}{S_2} \end{cases} \quad (9)$$

整理式(9)得

$$n \leq \frac{S_1}{\pi R^2} \quad (10)$$

设计圆孔半径为7.5 mm,通过二维软件测得贝壳筛孔间面积为 $S_1 = 1840 \text{ mm}^2$,为使籽粒达到最大透筛几率,相邻贝壳筛孔之间设计最多圆孔,并考虑筛孔间尺寸不干涉,综合分析得到每组圆孔数量

曲面面积占籽粒滑动总曲面面积百分比,得到筛面加速度在不同象限时籽粒滑动透筛概率,如表2所示。

1.3 筛孔排布设计

根据上述理论分析,虽然贝壳筛对脱出物具有较高运移能力^[17],但籽粒透筛率较低,尤其当玉米脱出物喂入量较高时,单一的贝壳筛会造成籽粒损失增加。鉴于圆孔筛对籽粒具有较高透筛性能,为使籽粒低损失、筛分高效率,同时保证籽粒一定的清洁率,在贝壳筛孔四周设置圆孔,构成贝壳-圆孔组合孔筛体。

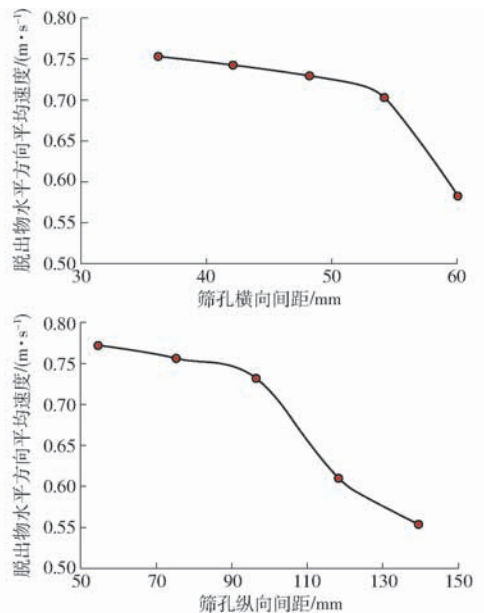


图6 筛孔间距对玉米脱出物水平方向平均速度的影响

Fig.6 Effect of sieve pitch on horizontal average velocity of maize mixture

$n = 5$, 并沿贝壳筛四周均布, 根据现有 6 行玉米联合收获机内清选装置尺寸要求, 设定组合孔筛长度和宽度分别为 1 360 mm 和 1 100 mm, 组合孔筛具体尺寸参数如图 7 所示。

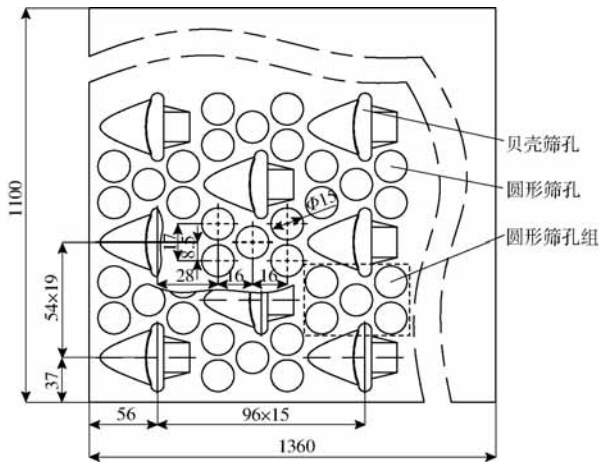


图 7 组合筛筛孔尺寸参数

Fig. 7 Parameters of sieve size distribution

2 仿真

2.1 清选装置仿真模型

以 6 行玉米联合收获机清选装置为参考进行三维建模, 其入风口高度和出风口高度分别为 350 mm 和 412 mm; 清选装置长度为 1 634 mm, 高度为 918 mm; 筛面长度为 1 360 mm, 筛面安装倾角为 3.5° , 筛面前后端与入风口和出风口距离分别为 176 mm 和 96 mm, 考虑到计算机处理能力, 筛面宽度选取 180 mm。选取贝壳筛筛孔长度、高度、横纵间距分别为 21.68、10.86、30、55.04 mm, 圆孔筛直径和横、纵间距分别为 15、17.5、30 mm^[7], 如图 8 所示。

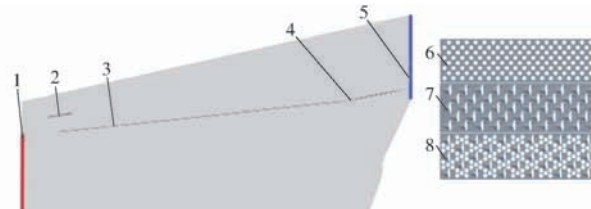


图 8 清选装置三维模型

Fig. 8 Geometric model of cleaning device

1. 进风口 2. 抖动板 3. 筛体 4. 尾筛 5. 出风口 6. 圆孔筛
7. 贝壳筛 8. 组合孔筛

2.2 玉米脱出物颗粒模型

以德美亚一号玉米为参考, 通过 Pro/E 三维软件对玉米脱出物中各成分进行三维建模, 将模型导入 EDEM 软件中, 以各脱出物三维模型轮廓为填充边界, 确定每个小球直径和坐标, 完成小球填充, 其模型如图 9 所示。



图 9 脱出物各成分三维模型图

Fig. 9 Models of each component of maize

将各个成分按照比例进行设定, 如表 3 所示^[18]。

表 3 玉米脱出物各成分百分比

Tab. 3 Percentage parameters of maize mixture

种类	类别	百分比/%	总百分比/%
玉米籽粒	锥形	54.6	73.3
	球形	11.1	
	矩形	7.6	
玉米茎秆	28 mm(圆柱)	2.4	17.6
	36 mm(圆柱)	5.7	
	44 mm(圆柱)	5.3	
	52 mm(圆柱)	4.2	
	1/4(圆柱)	4.4	
玉米芯	1/2(圆柱)	1.8	8.7
	整个圆柱	2.5	
杂质		1.4	1.4

2.3 参数设置

2.3.1 颗粒相参数

对各个材料力学特性和物料间接触属性进行设定, 参数分别如表 4 和表 5 所示^[19]。

表 4 材料力学特性参数

Tab. 4 Parameters of mechanical properties of materials

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
玉米籽粒	0.40	1.27	1 197
玉米茎秆	0.42	1.00	112
玉米芯	0.45	1.09	330
筛面(钢)	0.30	700.00	7 800

EDEM 软件中接触模型设置 Hertz - Mindlin 无滑动模型。设定清选装置振动频率为 5.15 Hz, 振幅为 19.1 mm。为保证选取参数与玉米联合收获机实际作业时的一致性, 设定清选装置入口气流速度为 12.8 m/s, 气流倾角为 30° 。EDEM 软件中时间步长为 Rayleigh 时间步长的 20%, Fluent 时间步长为 EDEM 软件设置的时间步长 100 倍。

2.3.2 颗粒工厂设置

在仿真模型中抖动板处设置颗粒工厂, 依据玉米脱出物类型所占百分比, 设定喂入量为 5 kg/s, 设置颗粒工厂中锥形、球形、矩形玉米颗粒数分别为 1 376、199、239; 28、36、44、52 mm 圆柱茎秆数分别为

表5 材料间接触属性参数

Tab.5 Parameters of interaction properties of materials

接触属性	玉米籽粒-	玉米籽粒-	玉米籽粒-	玉米籽粒-	玉米茎秆-	玉米茎秆-	玉米茎秆-	玉米芯-	玉米芯-
	玉米籽粒	玉米茎秆	玉米芯	筛面(钢)	玉米茎秆	玉米芯	筛面(钢)	玉米芯	筛面(钢)
碰撞恢复系数	0.31	0.27	0.25	0.54	0.21	0.22	0.29	0.22	0.33
静摩擦因数	0.79	0.71	0.68	0.48	0.65	0.68	0.62	0.78	0.70
滚动摩擦因数	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

246、283、340、134;根据玉米芯破碎程度分为四分之一圆柱、二分之一圆柱、整体圆柱体,颗粒数分别为326、230、236,喂入量2~6 kg/s时依据喂入量为5 kg/s时各类脱出物颗粒按比例进行设定。设定各类脱出物1 s内均匀生成,通过仿真试验确定玉米籽粒从抖动板下落时垂直方向速度很小(小于0.1 m/s),可忽略,水平速度为0.1~0.7 m/s,因此设定喂入时物料初速度为0.1~0.7 m/s内的随机值。

2.4 试验设计

在玉米脱出物喂入量为2~6 kg/s、气流速度为12.8 m/s、气流方向角30°、振动频率为5.15 Hz的条件下,探究3种类型筛孔筛分后籽粒清洁率、损失率和筛分效率并进行比较分析。

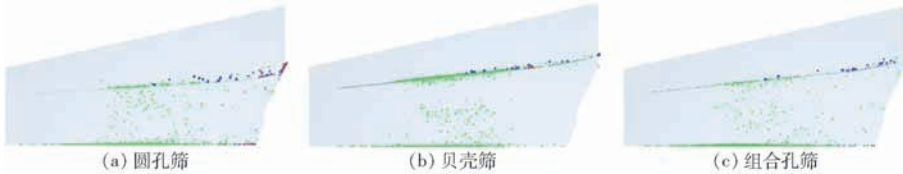


图10 不同筛型脱出物筛分状态

Fig.10 Sieving status of maize mixture for different sieve types

一圆孔筛和贝壳筛的筛分性能有所提高。

3.2 不同筛型对脱出物速度的影响

在筛分过程中设置1 s时颗粒生成结束,根据仿真情况确定在1.2 s时,玉米脱出物在筛上开始稳定筛分,在1.7 s后大部分杂余从清洗装置排出,因此提取筛分过程1.2~1.7 s内,在玉米脱出物喂入量为5 kg/s下,筛上玉米脱出物水平方向平均速度,如图11所示。

在1.2~1.57 s内,玉米脱出物在贝壳筛上水平速度大于其在圆孔筛上的水平速度,这是因为在此时间内,玉米脱出物刚开始筛分堆积较多,贝壳筛对其推移能力较强,脱出物在水平方向平均速度较大;在1.57~1.7 s内,玉米脱出物在圆孔筛上水平速度大于其在贝壳筛上的水平速度,这是因为在此时间内,由于脱出物物料特性不同,大部分杂余与籽粒沿水平方向分层,杂余堆积程度减弱,相比于贝壳筛,圆孔筛对气流场的阻挡作用较弱,气流场对脱出物运移能力变强,因此玉米脱出物在圆孔筛上水平速度

3 结果分析

3.1 玉米脱出物筛分过程

在玉米脱出物喂入量为5 kg/s、筛分时间为2 s时,不同筛型的筛分状态如图10所示,图中玉米秸秆为红色,玉米芯为蓝色,玉米籽粒为绿色。

由图10可见,在仿真时间为2 s时,圆孔筛上剩余籽粒较少,筛上和筛下杂余较多,圆孔利于玉米脱出物透筛,但推送杂余能力较弱;贝壳筛上剩余籽粒较多,筛分籽粒能力较弱,清洗装置内剩余杂余较少,贝壳筛孔推送杂余能力较强致使杂余透筛几率变小;组合孔筛上剩余籽粒和筛分后杂余均较少,证明组合孔筛既保留了圆孔筛对籽粒较高透筛率,同时也具有贝壳筛对杂余较强的推送能力,相比于单

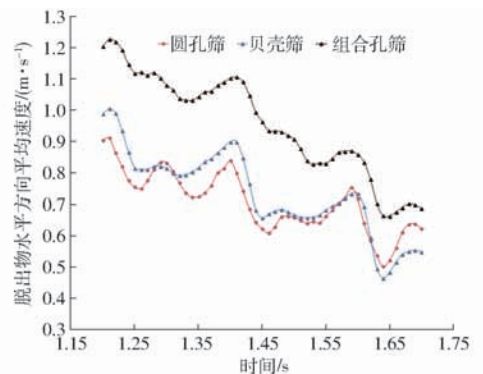


图11 脱出物水平方向平均速度随时间变化曲线

Fig.11 Regular pattern of horizontal velocity of maize mixture change with time

逐渐大于其在贝壳筛上的水平速度。在1.2~1.7 s内,玉米脱出物在组合孔筛上水平方向速度均大于其在圆孔筛和贝壳筛筛上水平速度,组合孔筛体既具有贝壳筛的推送能力,并保证了筛上气流场的流畅度,表明其对脱出物运移能力强,利于脱出物在筛上水平分层,从而缩短了筛分时间,提高了筛分

性能。

3.3 不同筛型对筛下脱出物分布的影响

在玉米脱出物喂入量为 5 kg/s 的条件下,对不同筛型筛分后筛下籽粒分布进行统计分析,将筛下入风口至出风口水平方向依次等距离分为前、中和后 3 部分,分别比对应编号 1、2、3,统计筛分后籽粒在 3 部分所占筛下总籽粒百分比,其结果如图 12 所示。

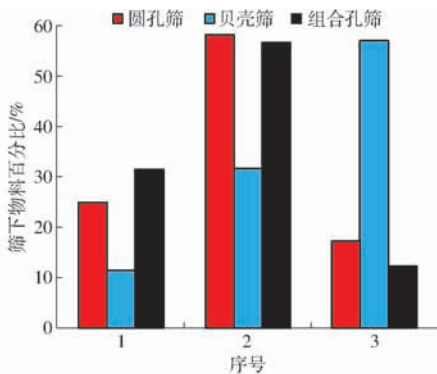


图 12 筛下籽粒分布百分比

Fig. 12 Distribution of maize under sieve

分析图 12 可知,3 组筛型的主要透筛区域集中于前、中两部分。组合孔筛在筛下前、中两部分籽粒总分布相比于圆孔筛和贝壳筛籽粒分布多出 4.98 个百分点和 44.94 个百分点,说明组合孔筛籽粒透筛能力高于单一圆孔筛和贝壳筛;组合孔筛后部筛下籽粒分布较少,表明组合孔筛具有对较高喂入量的筛分能力。

3.4 不同筛型对筛分时间的影响

不同喂入量下 3 种不同筛型的筛分时间如图 13 所示。3 种不同筛型的筛分时间随着喂入量增加而增加,在不同喂入量的工况下,组合孔筛筛分时间均小于圆孔筛和贝壳筛,在喂入量为 5 kg/s 和 6 kg/s 情况下,组合孔筛筛分时间分别为 5.34、5.50 s,相比圆孔筛和贝壳筛分别缩短 1.82、0.59 s 和 1.94、0.61 s,由此可知组合孔筛对喂入量的筛分能力较强,对于喂入量较高(现 6 行玉米联合收获机正常作业状态下玉米脱出物喂入量为 5 kg/s)的情况下能够稳定作业。

3.5 不同筛型对清洁率和损失率的影响

对仿真结果处理,得到 3 种不同筛孔类型筛分后籽粒清洁率和损失率随不同喂入量影响规律,如图 14 所示。3 种筛型作业后籽粒清洁率和损失率随着喂入量的增加分别呈下降和上升趋势,其中组合孔筛在不同喂入量的工况下籽粒损失率均低于 2%,清洁率均高于 97%,在喂入量为 5、6 kg/s 情况下,其籽粒损失率分别为 0.97%、1.15%,相比于圆孔筛和贝壳筛分别减少了 4.79 个百分点、7.85 个百

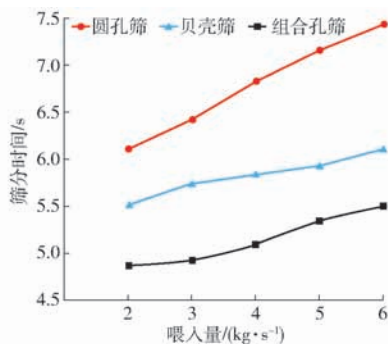


图 13 不同筛型的筛分时间

Fig. 13 Sieving time for different sieve types

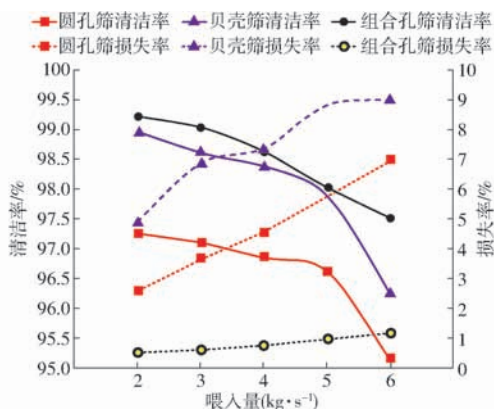


图 14 不同筛型籽粒清洁率和损失率

Fig. 14 Cleaning rate and loss rate of maize for different sieve types

分点和 5.79 个百分点、7.84 个百分点,在喂入量为 6 kg/s 时,组合孔筛籽粒清洁率为 97.53%。

4 性能试验

为验证组合孔筛筛分性能,对东北农业大学原有贯流式风筛清选装置试验台架进行改装,分别通过风机变频器、气流方向角调节板和振动筛驱动变频器,将气流速度、气流方向角、筛面振动频率和筛面倾角分别设定为 12.8 m/s、30°、5.15 Hz 和 3.5°。为尽量减小试验误差,每次试验在 5 s 内喂入 25 kg 和 30 kg 玉米脱出物,以保证喂入量为 5 kg/s 和 6 kg/s,如图 15 所示。



图 15 试验装置

Fig. 15 Experiment device

1. 试验台架 2. 组合孔筛 3. 尾箱

试验参照 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机试验方法》,为探究喂入量为 5 kg/s 和 6 kg/s 时,组合孔筛和阶梯筛筛分后籽粒清洁率、损失率和

筛分时间,每组试验重复5次取平均值,其结果如表6所示^[20]。试验与仿真结果相对误差为1.96%~17.82%,证明了仿真结果的准确性。

在喂入量为6 kg/s时,得到组合孔筛筛分后籽

粒损失率、清洁率和筛分时间分别为1.09%、95.94%和6.48 s。相比于阶梯筛,组合孔筛籽粒损失率降低5.60个百分点,筛分时间缩短0.93 s,清选装置性能获得进一步提高。

表6 台架试验结果

Tab.6 Results of experimental data

喂入量/ (kg·s ⁻¹)	序号	组合孔筛			阶梯筛		
		清洁率/%	损失率/%	筛分时间/s	清洁率/%	损失率/%	筛分时间/s
5	1	96.53	0.81	5.11	97.05	7.03	6.90
	2	95.55	0.71	5.33	96.44	5.99	7.23
	3	96.03	0.73	6.23	97.34	6.44	6.65
	4	96.77	0.78	5.90	96.46	6.28	6.78
	5	96.47	0.82	6.73	97.61	6.21	6.54
	均值	96.27	0.77	5.86	96.98	6.39	6.82
	方差	0.43	0.04	0.59	0.47	0.35	0.24
6	1	96.01	1.21	6.51	95.94	7.11	7.78
	2	95.55	1.22	6.69	96.11	6.87	7.62
	3	95.12	1.05	6.33	96.43	6.54	7.33
	4	96.49	0.88	6.29	96.29	6.44	7.11
	5	96.53	1.09	6.58	96.33	6.49	7.21
	均值	95.94	1.09	6.48	96.22	6.69	7.41
	方差	0.54	0.12	0.15	0.17	0.26	0.25

5 结论

(1)通过籽粒受力分析,证明筛分作业中贝壳筛会对籽粒产生分散效果,建立籽粒在贝壳筛孔处的透筛模型,确定筛分时筛孔处籽粒透筛概率。

(2)通过贝壳筛孔对脱出物推送速度单因素试验确定了贝壳筛孔分布,鉴于圆孔具有较高籽粒透筛概率,故沿贝壳筛四周均布,设计出贝壳-圆孔组合式筛体。

(3)通过CFD-DEM耦合方法,对不同喂入量下3种筛型的筛分性能进行对比仿真试验,通过对比分析得出,组合孔筛可增加籽粒透筛概率,并保证较高的运移脱出物能力,相比于单一的圆孔筛和贝壳筛,其筛分性能得到增强。

(4)通过台架试验,验证了仿真结果的准确性。在喂入量为6 kg/s下进行组合孔筛台架试验,结果表明,组合孔筛筛分后籽粒损失率、清洁率和筛分时间分别为1.09%、95.94%和6.48 s。

参 考 文 献

- [1] 江崎春雄,三浦恭志郎,今园支和,等.自脱コンバインの高性能化に関する研究[M].日本农业机械化研究所,1972:28-30.
- [2] 魏纯才,李耀明,徐立章,等.大喂入量水稻联合收获机脱粒清选装置的设计与试验[J].农机化研究,2018,40(8):70-74. WEI Chuncai, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Design and experimental study of large feed quantity crawler full feeding rice combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8):70-74. (in Chinese)
- [3] 李耀明,赵湛,陈进,等.风筛式清选装置上物料的非线性运动规律[J].农业工程学报,2007,23(11):142-147. LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Nonlinear motion law of material on air-and-screen cleaning mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11):142-147. (in Chinese)
- [4] 焦红光,李靖如,赵跃民.筛孔孔径和筛面倾角优化配置的试验研究[J].选煤技术,2007(2):1-4,72. JIAO Hongguang, LI Jingru, ZHAO Yuemin. Test and research on optimum configuration of diameter of screen aperture and incline of screen deck[J]. Coal Preparation Technology, 2007(2):1-4,72. (in Chinese)
- [5] 钟挺,胡志超,顾峰玮,等.4LZ-1.0Q型稻麦联合收获机脱粒清选部件试验与优化[J/OL].农业机械学报,2012,43(10):76-81. ZHONG Ting, HU Zhichao, GU Fengwei, et al. Optimization and experiment for threshing and cleaning parts of 4LZ-1.0Q cereal combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10):76-81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121014&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.014. (in Chinese)

- [6] 王立军,张传根,丁振军. 玉米收获机清选筛体结构优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):108-114.
WANG Lijun, ZHANG Chuan'gen, DING Zhenjun. Structure optimization of cleaning screen for maize harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):108-114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160916&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.016. (in Chinese)
- [7] 江海深,赵跃民,张博,等. 基于DEM的筛面与物料特性在筛分过程中协同作用的研究[J]. 矿山机械,2014,42(1):83-87.
JIANG Haishen, ZHAO Yuemin, ZHANG Bo, et al. Study on cooperative effects of screening surface and material characteristics during screening process based on DEM [J]. Mining & Processing Equipment,2014,42(1):83-87. (in Chinese)
- [8] LI J, WEBB C, PANDIELLA S S, et al. A numerical simulation of separation of crop seeds by screening—effect of particle bed depth[J]. Food and Bioprocess Technology,2002, 80(2):109-117.
- [9] 焦红光,赵跃民,骆振福,等. 概率筛面的参数优化研究[J]. 中国矿业大学学报,2006,35(3):384-388.
JIAO Hongguang, ZHAO Yuemin, LUO Zhenfu, et al. Parameters optimization of probability screen plane[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2006,35(3):384-388. (in Chinese)
- [10] CLEARY P W, SINNOTT M D, MORRISON R D. Separation performance of double deck banana screens—part 2: quantitative predictions[J]. Miner. Eng., 2009,22(14):1230-1244.
- [11] FERNANDEZ J W, CLEARY P W, SINNOTT M D, et al. Using SPH one-way coupled to DEM to model wet industrial banana screens[J]. Miner. Eng., 2011,24(8):741-753.
- [12] 韩丹丹,张东兴,杨丽,等. 基于EDEM-CFD耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):43-51.
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM-CFD [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):43-51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.006. (in Chinese)
- [13] 马秋成,雷林韬,卢安舫,等. 基于CFD-DEM耦合的莲子壳仁分离装置优化与试验分析[J]. 食品与机械,2016,32(12):87-91.
MA Qiucheng, LEI Lintao, LU Ange, et al. Simulation optimization and test of pneumatic separating device for lotus seed shell and kernel base[J]. Food & Machinery,2016,32(12):87-91. (in Chinese)
- [14] 蒋恩臣,孙占峰,潘志洋,等. 基于CFD-DEM收获机分离室内谷物运动模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(4):117-122.
JIANG Enchen, SUN Zhanfeng, PAN Zhiyang, et al. Numerical simulation based on CFD-DEM and experiment of grain moving laws in inertia separation chamber [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(4):117-122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140418&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.018. (in Chinese)
- [15] 王志华,陈翠英. 基于ADAMS的联合收割机振动筛虚拟设计[J]. 农业机械学报,2003,34(4):53-56.
WANG Zhihua, CHEN Cuiying. Virtual design of vibrating sieve of combine harvester based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2003,34(4):53-56. (in Chinese)
- [16] 刘兴博,叶彤,杨金砖. 籽粒玉米收获机脱出物空气动力学特性分析及清选方法[J]. 农机使用与维修,2014(7):17-18.
- [17] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007:963-966.
- [18] 王立军,李洋,梁昌,等. 贯流风筛清选装置内玉米脱出物运动规律研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):122-127.
WANG Lijun, LI Yang, LIANG Chang, et al. Motion law of maize mixture in cross air-and-screen cleaning device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):122-127. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150918&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.018. (in Chinese)
- [19] WANG Lijun, ZHOU Wenxiu, DING Zhenjun, et al. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions[J]. Powder Technology, 2015, 284:187-194.
- [20] 王立军,冯鑫,武振超,等. 玉米联合收获机贯流风阶梯式振动筛设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):115-123.
WANG Lijun, FENG Xin, WU Zhenchao, et al. Design and test of stepped vibrating screen with cross air for maize harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(9):115-123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181013&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.013. (in Chinese)