

玉米收获机清选筛体结构优化

王立军 张传根 丁振军

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为提高玉米籽粒收获机风筛式清选装置的清选效果,通过对比编织筛和贝壳筛的筛分性能,以贝壳筛筛体结构为主要研究对象,采用CFD-DEM耦合的方法,选取振动筛筛分效率和籽粒清洁率为性能指标,筛孔长度、筛孔高度和筛孔纵向间距为试验因素,设计二次正交旋转组合试验。通过响应曲面方法对试验结果分析,并利用Design-Expert软件对回归数学模型进行多目标优化。结果表明,各因素对试验指标影响由强到弱顺序为:筛孔高度、筛孔纵向间距、筛孔长度。筛体结构参数优化为:筛孔长度21.68 mm,筛孔高度10.86 mm,筛孔纵向间距55.04 mm。通过试验验证此因素条件下振动筛筛分效率由81.79%提高到89.91%,籽粒清洁率增加到97.28%,清选装置的性能得到提高。

关键词: 玉米收获机;清选装置;筛体结构;贝壳筛;结构优化

中图分类号: S225.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0108-07

Structure Optimization of Cleaning Screen for Maize Harvester

Wang Lijun Zhang Chuan'gen Ding Zhenjun

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

Abstract: In order to improve cleaning performance of cross air-and-screen cleaning device in maize harvester, through comparing the screening performance of woven screen and shell screen, the structure of shell screen was selected as the main object of study. In order to obtain the optimal parameters of the shell screen, computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM) were coupled in the quadratic orthogonal rotational-combinational simulation tests. Objective indexes were screening efficiency of shell screen and cleaning rate of grain. The factors were the length and height of screen hole and the space between screen holes. The test data were analyzed by the response surface method and the regression mathematical models were multi-objective optimized by using Design-Expert software. Simulation results showed that height of screen holes had the most significant effect on the indexes, followed by the space between screen holes, then the length of screen holes. The optimized parameters were the length of screen hole of 21.68 mm, height of screen hole of 10.86 mm and space between screen holes of 55.04 mm. The results of verified test showed that screening efficiency was increased from 81.79% to 89.91% and the cleaning rate of grain was increased to 97.28%, which were consistent with the simulated results. The performance of the cleaning device was enhanced.

Key words: maize harvester; cleaning device; screen structure; shell screen; structure optimization

引言

清选装置是玉米籽粒收获机械的重要组成部分

分,一般分为纯气流清选装置和风筛式清选装置两种。风筛式清选装置具有清洁度高、清选损失小、适应性强等优点,在玉米收获机械中应用较为广泛。

收稿日期:2016-01-14 修回日期:2016-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475090)、黑龙江省高校新世纪优秀人才支持计划项目(1254-NCET-003)、哈尔滨市青年科技创新人才研究专项资金项目(2014RFQXJ142)、东北农业大学学术骨干计划项目和“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD06B02)

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

CRAESSAERTS 等^[1]采用非线性回归分析方法分析了小麦联合收获机清选装置喂入量与风速对清选性能的影响;李耀明等^[2-3]通过空间布点的方法测量了风筛式清选装置筛面不同位置的气流速度,并对颗粒物料的运动规律进行了分析与研究;田伟等^[4]研究了水稻联合收获机清选装置中鱼鳞筛开度对清选性能的影响;李骅^[5]通过仿真试验研究了谷物联合收获机清选装置振动筛频率、振幅及筛面倾角对筛分效率的影响;DONG 等^[6]采用离散元法研究了振动筛振动频率、筛面倾角及长度对煤炭颗粒筛分效率的影响;江海深等^[7]通过 DEM 仿真研究了不同筛面长度的圆孔筛和方孔筛对煤炭直线振动筛筛分效率的影响;焦红光等^[8]试验研究了概率筛筛孔直径对煤用筛分机筛分效率的影响。由文献可知风筛式清选装置风速、振动筛结构参数和运动参数等对装置的清选性能具有重要影响。目前,关于玉米清选筛体结构对筛分效果影响的研究尚未见报道,振动筛筛体结构对玉米收获机清选装置清选效果的影响尚不清楚。

振动筛筛体结构是影响风筛式清选装置清选效果的主要因素之一^[9]。鉴于玉米籽粒收获机田间作业时风速可调、筛体可以更换,本文通过田间试验对比玉米籽粒收获机中广泛采用的编织筛和贝壳筛的筛分性能,选取贝壳筛作为清选装置上筛,利用 CFD-DEM 耦合的方法,设计二次正交旋转组合试验,对贝壳筛筛体结构进行优化。

1 清选装置及振动筛模型

1.1 清选装置模型

风筛式清选装置模型结构如图 1 所示,长度为 1 850 mm,高度为 925 mm,宽度为 1 200 mm,为提高计算机仿真速度,基于结构的对称及筛面宽度范围内气固两相运动规律基本相同,仿真模型的宽度选定为 100 mm。装置内振动筛分为上筛、下筛和尾筛,上筛、下筛长度 1 360 mm,尾筛长度 520 mm,筛体厚度 2 mm,筛面安装倾角为 3.5°,上筛的振动方向角为 136.6°,下筛的振动方向角为 43.4°。

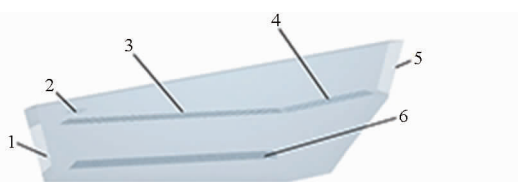


图 1 清选装置结构简图

Fig. 1 Schematic of cleaning device

1. 气体入口
2. 物料喂入口
3. 上筛
4. 尾筛
5. 杂余出口
6. 下筛

1.2 振动筛模型

玉米籽粒收获机中常采用的 3 种筛体为编织筛、贝壳筛和圆孔筛,其模型如图 2 所示。编织筛一般由铁丝编制而成,结构简单,颗粒透筛能力强,但筛孔容易变形,常作为清选装置的上筛配合风机进行粗选;贝壳筛的筛孔位于筛面凸起的垂直面上,这种筛孔可以减少玉米芯、玉米茎秆等杂余通过筛孔的机率,向后推送混杂物的能力好,且不易堵孔,筛体质量小,结构简单,可用作粗选和精选;圆孔筛是冲孔筛,分选能力好,一般用作下筛精选^[10-11]。

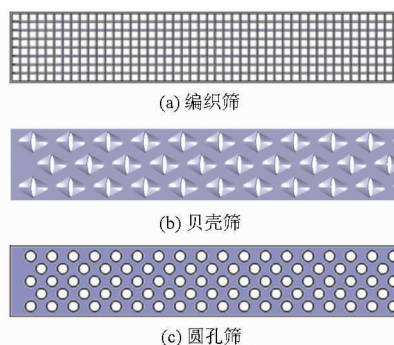


图 2 振动筛筛体模型

Fig. 2 Models of vibrating screens

2 田间试验

2.1 不同筛体对筛分效果的影响

风筛式清选装置中,圆孔筛一般用于豆类等圆形籽粒的上筛,在玉米收获机械的清选装置中一般作为下筛精选,因此田间试验上筛分别选用编织筛和贝壳筛,下筛为圆孔筛。依据玉米籽粒收获机清选装置中筛体结构尺寸,确定田间试验与仿真试验的参数,编织筛筛孔边长 11 mm,筛丝直径 2 mm;贝壳筛筛孔长度 20 mm,高度 10 mm,筛孔纵向间距 50 mm,宽度和横向间距 30 mm;圆孔筛筛孔直径 15 mm,筛孔纵向间距 30 mm,横向间距 17.5 mm。2014 年 10 月 11 日在黑龙江省北安市赵光镇北胜合作社进行田间试验(见图 3)。试验测得玉米脱出物成分主要有玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆和轻杂质,其所占的质量百分比分别为 73%、9%、17% 和 1%。玉米籽粒收获机作业幅宽 4 m(按玉米平均产量 6 146 kg/hm²换算,机器以常规速度 1.5 m/s 和最



图 3 田间试验

Fig. 3 Field test

大速度 2.0 m/s 作业时玉米脱出物在清选装置入口的喂入量分别约为 5.05 kg/s 和 6.74 kg/s), 通过收集清选装置内部及其出口排出的物料, 测得籽粒清洁率和损失率, 如表 1 所示。

表 1 田间试验结果

Tab. 1 Results of field tests

作业速度/ (m·s ⁻¹)	损失率/%		清洁率/%	
	编织筛	贝壳筛	编织筛	贝壳筛
1.5	1.08	3.71	86.65	95.34
2.0	1.55	4.37	80.14	91.22

试验结果表明, 编织筛的透筛性能好, 收获时籽粒损失率低, 但清洁率很低, 且筛孔容易变形, 杂余易堵孔, 筛分性能不稳定; 贝壳筛可以相对减少杂余的透筛, 筛体结构稳定, 收获籽粒清洁率高, 但筛分效率低, 容易造成籽粒损失。玉米收获机质量评价技术规范 and 国家标准 GB/T 21962—2008 规定玉米籽粒收获机籽粒含杂率小于等于 3%, 清选损失率小于等于 2%。由试验结果可知, 玉米籽粒收获机以常规速度作业时, 清选效果较好; 以最大速度作业时, 籽粒含杂率与国家标准有较大差距。综合比较, 在玉米籽粒收获作业中, 选择贝壳筛作为清选装置上筛更优。

2.2 不同风速对贝壳筛清选效果的影响

机器田间作业时可以通过风量调节旋柄调整风机的转速, 从而改变清选装置内的风速。为考察不同风速对清选效果的影响, 田间试验机器以 1.5 m/s 的速度作业时, 将风速分别设置在最大值、中间值和最小值, 试验结果如表 2 所示。由结果可知, 当风速减小时, 玉米籽粒损失率减小, 但籽粒清洁率过低; 当风速增大时, 玉米籽粒清洁率增大, 但籽粒损失率过大。当风速达到最大值 16.1 m/s 时, 清选效果相对较好, 但籽粒损失率和含杂率不能满足国家标准要求。因此, 本文针对贝壳筛筛体结构进行优化研究, 以提高其性能。

表 2 不同风速下贝壳筛的清选效果

Tab. 2 Performance of shell screen under different air velocities

风速/(m·s ⁻¹)	损失率/%	清洁率/%
9.5	0.87	86.83
12.8	2.15	90.15
16.1	3.71	95.34

3 振动筛筛分效果仿真与结构优化

3.1 气固耦合模型

CFD-DEM 耦合模型考虑了颗粒相与流体相

之间的速度滑移, 可跟踪单个颗粒的复杂运动信息, 易于描述颗粒的运动状态^[12]。且该模型可以同时模拟气流程和振动筛对物料的影响, 适用于清选装置的仿真研究。

根据质量守恒定律和动量守恒定律, 可推出气体相连续性方程和动量方程^[13]为

$$\frac{\partial(\alpha\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho\mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho\mathbf{u}) =$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot (\eta\alpha\nabla\mathbf{u}) - \alpha\rho\mathbf{g} - S \quad (2)$$

式中 α ——气体所占体积分数

t ——时间, s

ρ ——气体密度, kg/m³

\mathbf{u} ——气体速度, m/s

p ——气体压强, Pa

\mathbf{g} ——重力加速度, m/s²

η ——气体的粘度, Pa·s

S ——动量汇

动量汇是由两相运动产生的阻力形成的, 气固两相之间的耦合通过计算动量汇实现。动量汇 S 表达式^[13]为

$$S = \frac{\sum_i^n F_D}{V} \quad (3)$$

式中 F_D ——颗粒所受流体阻力, N

V ——网格单元体积, m³

物料颗粒在清选装置中的运动方式包含移动和转动, 任意 t 时刻内物料 i 的运动方式^[14-15]可表示为

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{f}_{p-f,i} + m_i \mathbf{g} + \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{f}_{c,ij} + \mathbf{f}_{d,ij}) \quad (4)$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{M}_{ij}) \quad (5)$$

式中 m_i ——颗粒质量, kg

\mathbf{v}_i ——颗粒速度, m/s

$\mathbf{f}_{p-f,i}$ ——流体-颗粒相互作用力, N

$\mathbf{f}_{c,ij}$ ——第 j 个颗粒对颗粒 i 的接触力, N

$\mathbf{f}_{d,ij}$ ——第 j 个颗粒对颗粒 i 的黏滞阻力, N

I_i ——转动惯量, kg·m²

$\boldsymbol{\omega}_i$ ——角速度, rad/s

\mathbf{T}_{ij} ——切向力矩, N·m

\mathbf{M}_{ij} ——滚动摩擦力矩, N·m

在耦合计算的每个时间步长中, Fluent 首先迭代至收敛, 然后 EDEM 根据颗粒所在的气流条件求解颗粒受力, 并进行一次或多次迭代计算。

EDEM 计算结束后,将更新后的颗粒信息导入 Fluent,并将仿真控制权交还给 Fluent,进行下一步耦合计算。

3.2 玉米脱出物颗粒模型

依据玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆的主要长度进行建模。玉米籽粒长度分为 10、12、14 mm,质量百分比分别为 12.9%、54.9%、32.2%;玉米芯长度分为 14、20、26 mm,质量百分比分别为 27.1%、58.6%、14.3%,每种长度的玉米芯根据破碎程度分为四分之一、二分之一及整个圆柱体,其所占各长度玉米芯的质量百分比均为 50%、20.7%和 29.3%;玉米茎秆长度分为 28、36、44、52 mm,质量百分比分别为 13.9%、32.2%、30%、23.9%,每种长度的玉米茎秆主要分为半个和整个小圆柱体,其所占各长度玉米茎秆的质量百分比均为 56.6%和 43.4%。根据玉米脱出物的尺寸在 CATIA 中建模,然后在 EDEM 中用小球颗粒填充的方法建立脱出物颗粒模型。玉米脱出物及其模型如图 4 所示。

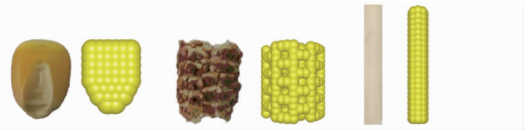


图 4 玉米籽粒、芯、茎秆实体及模型

Fig. 4 Maize grain, cob, stalk and their models

3.3 仿真参数设置

采用 CFD-DEM 耦合的方法,各材料的力学特性参数如表 3 所示,材料间的接触属性如表 4 所

示^[16-17]。EDEM 中接触模型选用 Hertz-Mindlin 无滑动模型。设定清选装置振动筛频率 5.15 Hz,振幅 19 mm。玉米脱出物喂入量 5.05 kg/s,通过仿真试验确定玉米籽粒从抖动板下落时竖直方向的速度很小(小于 0.1 m/s)可忽略不计,水平方向速度 0.1~0.7 m/s,因此物料喂入的初速度设定为水平方向 0.1~0.7 m/s 内的随机值。Fluent 中风速 16.1 m/s, EDEM 中时间步长是雷利时间步长的 20%,Fluent 时间步长为 EDEM 时间步长的 100 倍。

表 3 材料力学特性

Tab. 3 Mechanical properties of materials

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg·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	7 800

表 4 材料间的接触属性

Tab. 4 Interaction properties of materials

接触属性	玉米籽粒-玉米籽粒	玉米籽粒-玉米茎秆	玉米籽粒-玉米芯	玉米籽粒-筛面(钢)	玉米茎秆-玉米茎秆	玉米茎秆-玉米芯	玉米茎秆-筛面(钢)	玉米芯-玉米芯	玉米芯-筛面(钢)
碰撞恢复因数	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

3.4 贝壳筛仿真优化

3.4.1 玉米脱出物筛分过程仿真

由仿真过程可知,玉米茎秆几乎不透筛,透筛的脱出物杂余主要为玉米芯,且其大多在筛体前部透筛,这是因为玉米芯受风力影响较大,在筛体后部区域的平均速度增大而不容易透筛。仿真 1.5 s 时玉米脱出物在筛面上的分布情况如图 5 所示,图中蓝色颗粒为玉米籽粒,绿色颗粒为玉米芯,红色颗粒为玉米茎秆。

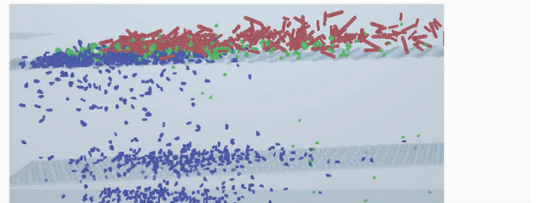


图 5 仿真 1.5 s 时脱出物在筛面上的分布

Fig. 5 Distribution of maize on the screen at 1.5 s

3.4.2 试验设计

贝壳筛筛孔结构如图 6 所示。选取田间试验所用贝壳筛的尺寸作为零水平值,根据单因素试验的结果确定各因素其他水平及范围。由于籽粒损失率很小,无法获得各因素对其影响的明显规律,为考察贝壳筛的筛分效果,参考《振动筛设计规范》选取筛分效率 y_1 和籽粒清洁率 y_2 为性能评价指标。采用三因素五水平二次正交旋转组合设计安排试验,试

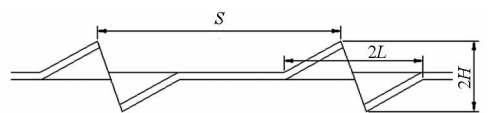


图 6 贝壳筛筛孔结构示意图

Fig. 6 Schematic structure of shell screen

验的因素编码如表 5 所示。

3.4.3 振动筛筛分效率回归模型与响应曲面分析

利用 CFD-DEM 耦合方法进行仿真试验,使用 Design-Expert 6.0.10 软件对试验结果处理,获得振动筛筛分效率 y_1 的回归数学模型。

表5 试验因素编码

Tab.5 Codes of experimental factors

编码	因素		
	筛孔长度	筛孔高度	筛孔纵向间距
	L/mm	H/mm	S/mm
-1.682	18.32	8.32	44.95
-1	19	9	47
0	20	10	50
1	21	11	53
1.682	21.68	11.68	55.05

$$y_1 = 921.93 - 28.15L - 19.67H - 18.85S - 1.22H^2 + 0.18S^2 + 2.73LH \quad (R^2 = 0.993) \quad (6)$$

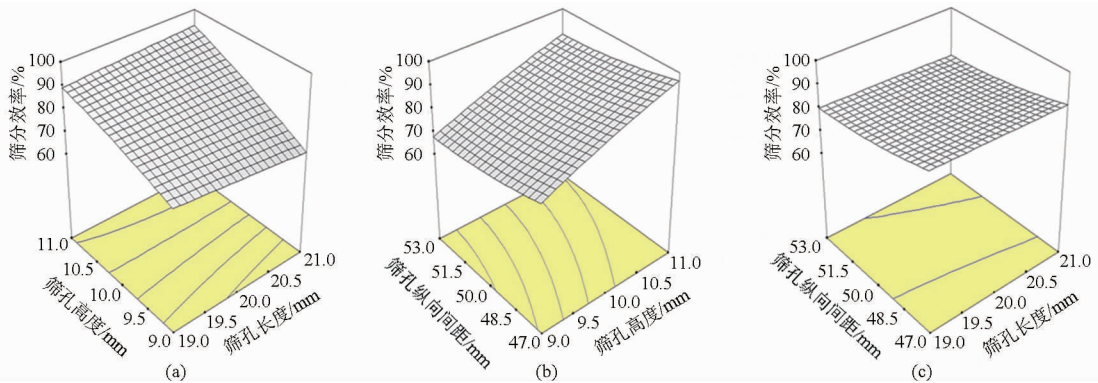


图7 各因素对振动筛筛分效率的响应曲面

Fig.7 Response surfaces of all factors on screening efficiency of shell screen

由图7a可知,筛孔的长度与高度因素存在交互作用,在筛孔纵向间距处于零水平的情况下,筛孔高度处于较高水平时,振动筛筛分效率随筛孔长度的增大而增大。当筛孔高度处于低水平时,振动筛筛分效率随筛孔长度的增大而减小。这是因为当筛孔高度较大时,籽粒在筛孔区域容易透筛,增大筛孔长度会增大筛面上筛孔区域,从而提高筛分效率;当筛孔高度较小时,籽粒很难透过筛孔,此时减小筛孔长度,可以增大筛孔区域的凹面与筛面的夹角,使碰撞在筛孔凹面上的籽粒更容易透过筛孔,从而提高筛分效率。

由图7b可知,当筛孔长度处于零水平时,振动筛筛分效率随筛孔高度的增大而增大,随筛孔纵向间距的增大而减小。这是因为筛孔高度增大有利于籽粒在筛孔处透筛,从而提高筛分效率;筛孔纵向间距增大导致筛面上开孔率减小,从而降低振动筛筛分效率。

由图7c可知,当筛孔高度处于零水平时,振动筛筛分效率随筛孔长度和纵向间距的增大而减小,这与图7a和图7b中规律相对应。

3.4.4 籽粒清洁率的回归模型与响应曲面分析

籽粒清洁率 y_2 的回归数学模型为

对筛分效率进行方差分析,在置信度 $\alpha = 0.05$ 下采用 F 检验,剔除模型中不显著项,所得筛分效率的方差分析结果为:模型显著性检验 F 为 380.50, p 小于 0.0001,说明模型极显著;失拟项 $p = 0.2236 > 0.05$,残差项不显著,说明所得的回归数学模型与实际结果拟合良好。经分析计算,各因素对振动筛筛分效率的贡献率分别为: $\Delta_L = 1.39$, $\Delta_H = 2.45$, $\Delta_S = 1.97$ 。由此可知,各因素对振动筛筛分效率的影响由强到弱为:筛孔高度、筛孔纵向间距、筛孔长度。

根据试验结果,所得各因素对振动筛筛分效率的响应曲面如图7所示。

$$y_2 = 88.10 - 6.48L - 1.09H + 2.60S - 0.38H^2 + 0.80LH - 0.21HS \quad (R^2 = 0.976) \quad (7)$$

对籽粒清洁率进行方差分析,在置信度 $\alpha = 0.05$ 下采用 F 检验,剔除模型中不显著项,所得籽粒清洁率的方差分析为:模型显著性检验 F 为 84.48, p 小于 0.0001,说明模型极显著;失拟项 $p = 0.1467 > 0.05$,残差项不显著,说明所得的回归数学模型与实际结果拟合良好。经分析计算,各因素对籽粒清洁率的贡献率分别为: $\Delta_L = 1.45$, $\Delta_H = 2.72$, $\Delta_S = 2.09$ 。由此可知,各因素对籽粒清洁率的影响由强到弱为:筛孔高度、筛孔纵向间距、筛孔长度。

根据试验结果,所得各因素对籽粒清洁率的响应曲面如图8所示。

由图8a可知,在筛孔纵向间距处于零水平的情况下,筛孔高度处于较低水平时,籽粒清洁率随筛孔长度的增大而基本不变。当筛孔高度处于高水平时,籽粒清洁率随筛孔长度的增大而增大。这是因为当筛孔高度较小时,脱出物杂余透筛数量处于较小值,受筛孔长度的影响较小;当筛孔高度较大时,增大筛孔长度会增大筛孔处的风量,有利于向后推送脱出物杂余,从而提高籽粒清洁率。

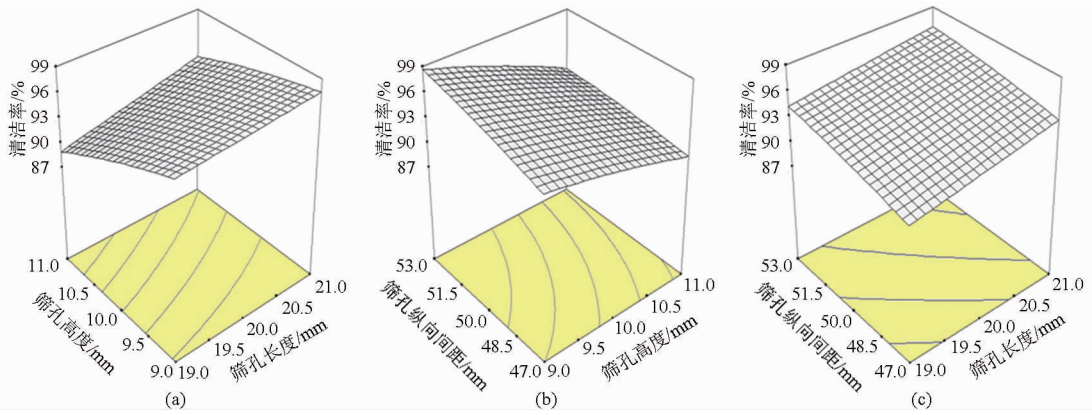


图8 各因素对籽粒清洁率的响应曲面

Fig. 8 Response surfaces of all factors on cleaning rate of grain

由图8b可知,当筛孔长度处于零水平时,籽粒清洁率随筛孔高度的增大而减小,随筛孔纵向间距的增大而增大。这是因为随着筛孔纵向间距减小,筛孔的数量增多,透筛的杂余增多;且筛孔的增多使筛孔凸面对脱出物杂余的阻碍增多,不利于向后推送脱出物杂余,导致籽粒清洁率下降。

由图8c可知,当筛孔高度处于零水平时,籽粒清洁率随筛孔纵向间距增大和筛孔长度的增大而增大,这与图8a和图8b中规律相对应。

3.4.5 参数优化及试验验证

为提高振动筛的筛分性能,在各因素满足试验条件的条件下,利用 Design - Expert 软件对试验参数进行优化,限定籽粒清洁率不低于国家标准要求,振动筛筛分效率取最大,建立参数化数学模型为

$$\begin{cases} \max y_1 \\ 97\% \leq y_2 \leq 100\% \\ \text{s. t. } 18.32 \text{ mm} \leq L \leq 21.68 \text{ mm} \\ \quad 8.32 \text{ mm} \leq H \leq 11.68 \text{ mm} \\ \quad 44.95 \text{ mm} \leq S \leq 55.05 \text{ mm} \end{cases} \quad (8)$$

优化结果为:筛孔长度 21.68 mm,筛孔高度 10.86 mm,筛孔纵向间距 55.04 mm。获得的振动筛

筛分效率为 90.20%,籽粒清洁率为 97%。

根据优化结果加工振动筛进行室内验证试验。根据田间试验6行玉米籽粒联合收获机的设置,确定室内试验振动筛的频率为 5.15 Hz,振幅为 19 mm。通过田间调研获得清选室内部及其出口排出的物料,并根据脱出物各成分的质量百分比获得室内的清选物料,喂入量取常规喂入量 5.05 kg/s。试验结果为振动筛筛分效率 89.91%,籽粒清洁率 97.28%,籽粒损失率 1.88%。

4 结论

(1)玉米脱粒收获机田间试验结果表明,贝壳筛较适合于玉米脱出物的清选。

(2)通过 CFD - DEM 耦合的仿真试验获得振动筛结构参数与清选性能指标间的回归数学模型,并确定不同结构参数对玉米风筛式清选装置筛分性能的影响规律,筛孔高度是主要影响因素,筛孔纵向间距次之。

(3)通过优化确定各因素的最优组合为:筛孔长度 21.68 mm,筛孔高度 10.86 mm,筛孔纵向间距 55.04 mm。室内试验表明振动筛的性能得到了提高。

参 考 文 献

- 1 CRAESSAERTS G, SAEYS W, MISSOTTEN B, et al. A genetic input selection methodology for identification of the cleaning process on a combine harvester, Part II: selection of relevant input variables for identification of material other than grain (MOG) content in the grain bin[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 98(3): 297 - 303.
- 2 李耀明,唐忠,李洪昌,等. 风筛式清选装置筛面气流场试验[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(12): 80 - 83.
LI Yaoming, TANG Zhong, LI Hongchang, et al. Experiment on the flow field of the air-and-screen cleaning device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(12): 80 - 83. (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 - 146.
LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Nonlinear motion law of material on air-and-screen cleaning mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11): 142 - 146. (in Chinese)
- 4 田伟,衣淑娟,张丽. 风筛式清选装置参数的试验研究[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2010, 22(4): 77 - 79.
TIAN Wei, YI Shujuan, ZHANG Li. Experimental research on the air-and-screen cleaning device parameters[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2010, 22(4): 77 - 79. (in Chinese)
- 5 李骅. 风筛式清选装置设计理论与方法研究[D]. 南京:南京农业大学, 2012.

- LI Hua. Research of modern design method for air-and-screen cleaning device[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 6 DONG K J, YU A B. Numerical simulation of the particle flow and sieving behaviour on sieve bend/low head screen combination[J]. Minerals Engineering, 2012, 31: 2-9.
- 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 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)
- 9 汤庆, 吴崇友, 王素珍, 等. 谷物清选装置研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2013(12): 225-228. TANG Qing, WU Chongyou, WANG Suzhen, et al. Research advances and prospects in cleaning device of grain[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(12): 225-228. (in Chinese)
- 10 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.
- 11 王高斌, 曹洪国, 韩增德, 等. 玉米收获机籽粒回收装置的现状分析与展望[J]. 农机化研究, 2014(1): 65-68. WANG Gaobin, CAO Hongguo, HAN Zengde, et al. Analysis and prospects of the corn kernel recovery unit of corn harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(1): 65-68. (in Chinese)
- 12 任立波, 尚立宝, 闫日雄, 等. 脉冲鼓泡床内鼓泡和颗粒混合特性的 CFD-DEM 数值模拟[J]. 山东大学学报:工学版, 2015, 45(2): 62-65. REN Libo, SHANG Libao, YAN Rixiong, et al. CFD-DEM simulation of bubbling and particle mixing properties in pulsed jet fluidized bed[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2015, 45(2): 62-65. (in Chinese)
- 13 蒋恩臣, 孙占峰, 潘志洋, 等. 基于 CFD-DEM 的收获机分离室内谷物运动模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 118-122. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 118-122. (in Chinese)
- 14 CHU K W, WANG B, XU D L, et al. CFD-DEM simulation of the gas-solid flow in a cyclone separator[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(5): 834-847.
- 15 蒋明镜, 张望城. 一种考虑流体状态方程的土体 CFD-DEM 耦合数值方法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 793-800. JIANG Mingjing, ZHANG Wangcheng. Coupled CFD-DEM method for soils incorporating equation of state for liquid[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 793-800. (in Chinese)
- 16 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 122-127. (in Chinese)
- 17 WANG L, ZHOU W, DING Z, 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.