

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.011

# 玉米收获机聚氨酯橡胶筛筛分性能仿真与试验

王立军 彭博 宋慧强

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为降低玉米贯流式风筛加工成本、加工难度以及提高筛面物料的分散程度,采用新型聚氨酯橡胶筛代替金属筛,试验测得筛面上各颗粒相与聚氨酯橡胶间的静摩擦因数、碰撞恢复系数等物理参数,并推导出聚氨酯橡胶的剪切模量。利用 EDEM 建立筛板上的各颗粒相模型,通过 CFD-DEM 耦合方式对聚氨酯橡胶筛上不同区域的颗粒相数量进行数值模拟分析。聚氨酯橡胶筛的仿真结果表明,相同时间聚氨酯橡胶筛上颗粒相的分散度大于金属筛上颗粒相的分散度,证明聚氨酯橡胶筛更有利于物料的分散,进而提高筛面的使用效率。当喂入量为 5 kg/s,玉米清选装置入口风速为 12 m/s 时,清选装置清选损失率为 1.93%,达到玉米收获机国家标准和行业标准要求,聚氨酯橡胶筛使籽粒清洁率达到 95.3%,相对于金属筛提高了 16.33 个百分点。

**关键词:** 玉米收获机;清选装置;聚氨酯橡胶筛;性能分析

**中图分类号:** S225.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0090-07

## Cleaning of Maize Mixture Based on Polyurethane Rubber Sieve

WANG Lijun PENG Bo SONG Huiqiang

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

**Abstract:** In order to reduce the cost and difficulty of manufacturing, and increase the degree of dispersion of sieve particles on the maize air-and-screen metal sieve, a new polyurethane rubber sieve was used to replace the metal sieve, the density of polyurethane rubber and the physical parameter between particles on the sieve and the polyurethane rubber were obtained through experiment, including coefficient of static friction and coefficient of restitution, the shear modulus of the polyurethane rubber was deduced. EDEM was used to establish models of particles on the sieve. The number of particles on different regions of the polyurethane rubber sieve was analyzed through computational fluid dynamics and discrete element method. The simulation results showed that the dispersion of the particles on the polyurethane rubber sieve was greater than that of the metal sieve at the same range of time, which proved that polyurethane rubber sieve was more conducive to particles dispersion which improved the efficiency of sieve. The tests were performed based on the experimental system to verify whether the urethane rubber sieve was met the operational requirements. The loss rate of maize of cleaning device was 1.93%, when the normal feed quantity of maize mixture was 5 kg/s, the inlet wind speed of cleaning device was 12 m/s, which met the national standard and the technical specification for quality evaluation of maize harvester. Cleaning rate of maize of polyurethane rubber sieve, which was increased by 16.33 percentage points through the comparison with metal sieve, was up to 95.3%.

**Key words:** maize harvester; clearing device; polyurethane rubber sieve; performance analysis

## 0 引言

清选装置是玉米联合收获机重要的作业部分,通过风场对杂余的携带作用和振动筛的筛分作用,

分离得到玉米籽粒,其筛分过程属于复杂的气固两相流问题,当前,针对此类问题国内外学者大多采用仿真试验方法研究。李洪昌等<sup>[1-2]</sup>运用 EDEM 对振动筛内部颗粒相进行数值模拟与分析,研究振动筛

收稿日期:2017-09-11 修回日期:2018-03-02

**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)、黑龙江省科学基金项目(E2017004)和东北农业大学学术骨干项目

**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

不同参数对筛面颗粒相速度的影响;基于 CFD-DEM(离散单元法)耦合模拟风筛式清选装置中物料在筛面上的运动,并对振动筛筛面上的物料运动进行研究;MA等<sup>[3]</sup>通过 DEM 分析振幅对筛面颗粒运动的影响,运用 EDEM 模拟农业物料在变幅度筛网上的运动形态;黄震宇等<sup>[4]</sup>通过 Fluent 模拟种子在分离室中的运动过程,分析出分离室的最优工作参数。LI等<sup>[5]</sup>通过 CFD-DEM 仿真研究了不同入口风速对籽粒损失的影响。因此,贯流式风筛中筛上颗粒相的运动状态对清选装置的筛分具有重要影响。ELSKAMP等<sup>[6]</sup>在 EDEM 模拟中考虑不同的粒子特性(尺寸、形状和尺寸分布),EDEM 仿真结果表明振动筛筛选对操作参数和颗粒形状具有强依赖性。

在农业方面,清选装置普遍采用金属筛,加工成本高,且增加整机重量。由于聚氨酯橡胶筛本身材质具有弹性模量大、强度高、高耐磨和承载能力大等优点,其使用寿命与普通金属筛相比提高 8~10 倍,是天然橡胶的 3.9 倍<sup>[7]</sup>。矿业上早已使用聚氨酯橡胶筛代替金属筛,由于具有良好的实用性,因此得到了广泛应用。

目前尚未有将聚氨酯橡胶筛应用于农业物料清选装置上的相关报道,改变农业振动筛筛板材料对筛面颗粒相运动状态的影响机理不清楚。本文将聚氨酯橡胶筛作为玉米贯流式风筛中的上筛及尾筛。采用 CFD-DEM 耦合的方式,对比聚氨酯橡胶筛与金属筛筛面颗粒相的分散程度,并对聚氨酯橡胶筛的实用性进行验证,为玉米联合收获机中聚氨酯橡胶筛的应用提供理论支持。

## 1 聚氨酯及其与各颗粒相物理参数

### 1.1 聚氨酯橡胶物理参数

由于当前极少有对聚氨酯橡胶剪切模量测定的方法,而聚氨酯橡胶弹性模量可参照轴向荷载作用下钢-聚氨酯复合管力学性能研究<sup>[8]</sup>,所以采用弹性模量推导剪切模量的方法。

橡胶材料普遍为非晶体结构,虽然存在具有晶体的橡胶(如天然橡胶、异戊胶、氯丁胶等),但由于结晶对过低,并且聚氨酯橡胶的刚性链段基本上与硬性区域轴线区域轴线方向相垂直排列,这就促使局部各项异性化,但硬性区域的随机分布使聚合物整体上呈机械和光学的各向同性。因此聚氨酯橡胶为各向同性材料<sup>[9]</sup>。

各向同性材料在线弹性范围内的弹性常数  $E$ 、 $K$ 、 $\nu$  之间的关系为纯剪切应力状态,所以聚氨酯橡胶适用于弹性模量推导剪切模量公式<sup>[10]</sup>

$$K = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1)$$

式中  $E$ ——弹性模量,MPa

$K$ ——剪切模量,MPa

$\nu$ ——泊松比

参照轴向荷载作用下钢-聚氨酯复合管力学性能研究<sup>[8]</sup>及聚氨酯弹性体钢夹层板的力学性能研究<sup>[11]</sup>,得到聚氨酯橡胶弹性模量为 589.49 MPa<sup>[8]</sup>,泊松比为 0.331<sup>[11]</sup>,经计算得聚氨酯橡胶的剪切模量为 221.4 MPa,并采用浸液法测得聚氨酯橡胶的密度为 1 072 kg/m<sup>3</sup>。

### 1.2 聚氨酯与各颗粒相间静摩擦因数

试验使用圆筒式静摩擦因数测试平台,如图 1 所示。根据斜面力学法原理<sup>[12]</sup>,将各颗粒相放在聚氨酯橡胶板上,转动摇动手柄使聚氨酯橡胶板缓慢转动,当颗粒相刚好有滑动趋势时,读取集光笔在刻度尺上的值  $w$ 。静摩擦因数的表达式为

$$f = \frac{w}{L} \quad (2)$$

式中  $f$ ——静摩擦因数

$L$ ——滚筒轴心与刻度尺垂直距离,为 10 cm

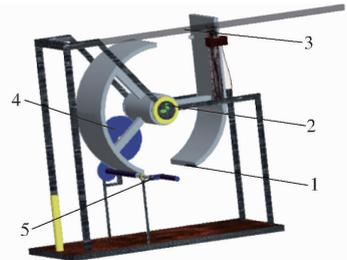


图 1 圆筒式静摩擦因数测试平台

Fig. 1 Cylindrical test platform for testing coefficient of static friction

1. 聚氨酯橡胶板插入位置 2. 集光笔 3. 刻度尺 4. 齿轮驱动系统 5. 摇动手柄

试验分别对 3 种不同形状(矩形、锥形、球形)玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆与聚氨酯橡胶的静摩擦因数进行了测定。试验中所用的玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆含水率分别为 29.8%、61.6%、71.2%。玉米芯与玉米茎秆分别采用长、宽为 20 mm 的物料进行试验。每组试验重复 5 次,共重复 10 组,取其平均数为各颗粒相与聚氨酯橡胶间的静摩擦因数。球形籽粒、锥形籽粒、矩形籽粒、玉米茎秆、玉米芯与聚氨酯橡胶间的静摩擦因数分别为 0.56、0.60、0.58、0.99、1.05。

### 1.3 聚氨酯与各颗粒相间碰撞恢复系数

试验参照玉米籽粒物理力学特性的研究方法<sup>[13]</sup>,对玉米籽粒、玉米茎秆、玉米芯与聚氨酯橡胶

间的碰撞恢复系数进行测定,试验台如图2所示。玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆在固定高度的颗粒相投放孔投放,与水平放置的聚氨酯橡胶板碰撞,通过高速摄像机、竖直壁面上的刻度线和45°镜面获取颗粒相运动时的三维坐标,以及碰撞前后速度,根据已有碰撞恢复系数公式<sup>[13]</sup>计算聚氨酯与各颗粒相间的碰撞恢复系数。

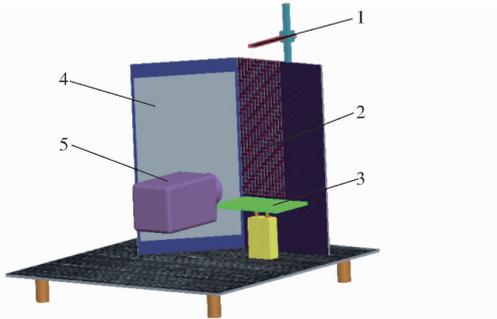


图2 碰撞恢复系数试验平台

Fig.2 Platform for testing coefficient of restitution

1. 颗粒相投放孔
2. 竖直壁面
3. 聚氨酯橡胶
4. 45°镜面
5. 高速摄像机

试验中聚氨酯橡胶厚度为5 mm,下落高度15.15 cm。每组试验重复5次,共10组试验。通过计算得出各颗粒相与聚氨酯橡胶间的碰撞恢复系数,玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆与聚氨酯橡胶间的碰撞恢复系数分别为0.51、0.29、0.25。

## 2 聚氨酯橡胶筛仿真

### 2.1 聚氨酯橡胶筛模型

通过Pro/E进行三维建模,构建与玉米收获机振动筛实体相同的仿真模型,整筛长度1850 mm,宽度1100 mm,高度925 mm,进风口长1100 mm,宽450 mm,出风口长1100 mm,宽400 mm,上筛板长1360 mm,尾筛长300 mm,聚氨酯橡胶板厚度普遍为2、5、8、10 mm,2 mm的聚氨酯橡胶板相对于钢板较为柔软,8 mm和10 mm聚氨酯橡胶板厚度过大,在筛分时会阻碍籽粒的下落,降低聚氨酯橡胶筛的性能,因此上筛及尾筛选用厚度为5 mm的聚氨酯橡胶筛。下筛板长1360 mm,使用厚度为2 mm的金属筛。所有筛面均采用圆孔筛,圆形筛孔直径15 mm,筛孔横向距离17.5 mm,筛孔纵向距离30 mm。筛面安装倾角3.5°。

应用Pro/E与ICEM无缝对接技术,将三维模型导入ICEM中,使用ICEM对三维模型进行符合实际情况的流体域网格划分。ICEM中的三维仿真模型如图3所示。

### 2.2 仿真参数及颗粒相模型设定

本文采用CFD-DEM气固两相流的方法进行

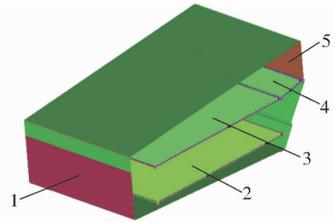


图3 风筛式清选装置简图

Fig.3 Schematic diagram of air-and-sieve cleaning device

1. 进风口
2. 下筛板
3. 上筛板
4. 尾筛
5. 出风口

筛分耦合仿真,Fluent通过有限体积法对ICEM网格进行流体域的拉格朗日差值计算。Fluent与EDEM采用Eulerian-Eulerian模型耦合,此模型通过质量守恒方程与动量守恒方程完成Fluent与EDEM数据传输。

#### 2.2.1 气相守恒方程

由质量守恒定律可以推出清选装置的气体相质量守恒方程

$$\frac{\partial(\alpha\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho\mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

式中  $\alpha$ ——气体所占体积分数

$\rho$ ——气体密度,kg/m<sup>3</sup>

$\mathbf{u}$ ——气体速度,m/s

$t$ ——时间,s

本文空气视为不可压缩流体,且 $\rho$ 为常数,则式(3)可简化为

$$\nabla \cdot (\alpha\mathbf{u}) = 0 \quad (4)$$

流动系统均遵循动量守恒定律,根据动量守恒定律可推出气体的动量守恒方程<sup>[14]</sup>

$$\nabla \cdot (\alpha\mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu\alpha\nabla\mathbf{u}) - \alpha\rho\mathbf{g} - S \quad (5)$$

式中  $p$ ——气体压强,Pa

$\mathbf{g}$ ——重力加速度,m/s<sup>2</sup>

$\mu$ ——气体粘度,Pa·s

$S$ ——阻力动量汇

#### 2.2.2 全局参数设置

Fluent设置为压力基非定长求解器,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型和标准型近壁函数。速度进口风速为12 m/s,湍流强度3.08%,水力直径638.7 mm。求解方法为SIMPLE算法,隐式二阶迎风离散格式,收敛精度均为 $10^{-3}$ ,由于清选装置内气体为不可压缩气体,密度视为常数,因此操作压力保持默认设置即可<sup>[15]</sup>。

EDEM采用Hertz-Mindlin(no-slip)接触模型,上筛的振动方向角为136.6°,下筛的振动方向角为43.4°。设定清选装置筛板振动频率5.16 Hz,振幅16 mm。在黑龙江省赵光农场进行田间试验,测得按玉米平均单产6146 kg/hm<sup>2</sup>计算6行玉米联合收获机以1.5 m/s的常规速度行驶时,清选装置入口

玉米脱出物喂入量约为 5 kg/s, 由于颗粒模型中的空隙, 导致 EDEM 中投料量为 4.5 kg/s。

各材料的力学特性如表 1<sup>[11,16-17]</sup>所示。各颗粒相间的静摩擦因数: 玉米籽粒与玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆分别为 0.79、0.68、0.71, 玉米芯与玉米芯、玉米茎秆分别为 0.78、0.68, 玉米茎秆与玉米茎秆为 0.65。钢与玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆静摩擦因数分别为 0.48、0.7、0.62<sup>[18]</sup>。各颗粒相间的碰撞恢复系数: 玉米籽粒与玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆分别为 0.31、0.25、0.27, 玉米芯与玉米芯、玉米茎秆分别为 0.22、0.33, 玉米茎秆与玉米茎秆为 0.21。钢与玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆碰撞恢复系数分别为 0.54、0.33、0.29<sup>[19]</sup>。

表 1 材料力学特性

Tab. 1 Mechanical properties of materials

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
玉米籽粒	0.4	1.37	1 154
玉米茎秆	0.42	1	112
玉米芯	0.45	1.09	330
聚氨酯橡胶	0.331	221.4	1 072
钢	0.3	700	7 800

### 2.2.3 各颗粒相模型

通过试验和计算得球形、锥形、矩形的玉米籽粒喂入量分别为 0.50、2.46、0.34 kg/s; 长度为 14、20、26 mm 的玉米芯喂入量分别为 0.21、0.46、0.11 kg/s, 其中 1/4、1/2、整体玉米芯喂入量分别为 0.40、0.16、0.23 kg/s; 长度为 28、36、44、52 mm 的玉米茎秆喂入量分别为 0.05、0.13、0.12、0.09 kg/s。玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆和轻杂质喂入量分别为 3.3、0.79、0.39、0.063 kg/s。根据各颗粒相的喂入量在 EDEM 中设置颗粒工厂。EDEM 中的玉米籽粒通过在 Pro/E 中建立锥形玉米籽粒体积外壳模型, 保存为 STP 格式导入到 EDEM 中, 锥形外壳模型体积为 277.6 mm<sup>3</sup>, 采用一定体积的填充颗粒对玉米外壳模型进行密集式排布填充, 通过计算填充颗粒数量, 利用 EDEM 对填充颗粒的位置信息进行采集, 把位置信息改写至 EDEM 二次开发的颗粒文件中, 便于后期的仿真模拟, 得到颗粒相模型如图 4 所示。

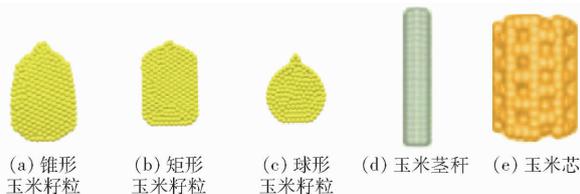


图 4 颗粒相模型

Fig. 4 Models of maize mixtures

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 筛面颗粒相分散程度

为了对比筛面颗粒相分散程度受不同筛板材质的影响, 在 CFD-DEM 仿真中, 清选装置的上筛及尾筛采用 2 种材料: 聚氨酯橡胶材质和金属材质(钢)。所选筛面尺寸相同, 且筛孔均为圆孔。利用 EDEM 进行数据采集, 将上筛和尾筛的上表面纵向均等分为 11 个分区, 每个分区为长度 1 360 mm, 宽度 100 mm, 高度 20 mm。由于筛面颗粒相的分散程度主要受颗粒相体积的影响, 所以对筛面分区的颗粒相数量进行采集与研究。

图 5 为 EDEM 仿真 1.5 s 时, 聚氨酯橡胶筛上的各颗粒相分布状态。由图 5 可知, 玉米籽粒主要受筛板的激振作用分布在上筛板前段, 玉米茎秆与玉米芯由于流场作用分散在上筛板中后段及尾筛上。

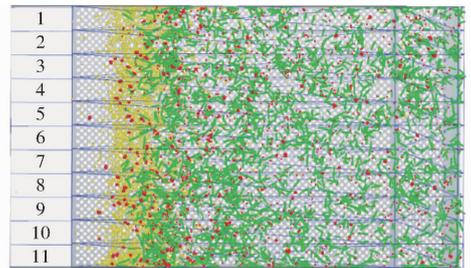


图 5 筛面颗粒相分布

Fig. 5 Distribution of particles on sieve

利用 Fluent 软件进行聚氨酯橡胶筛的风场迭代计算, 达到收敛精度后, 提取数据到 CFD-POST 流体后处理软件。对聚氨酯橡胶筛在 1.12 s 时筛面上的流场速度进行分析。最大风速为 13.33 m/s, 主要集中在尾筛后部, 筛面上的风速呈现由前到后递增的趋势, 有利于密度小的颗粒相向后运动, 中间风速较小, 两边风速较大的对称分布, 颗粒相所受风场作用也呈对称性, 证明聚氨酯橡胶筛符合流场对称性的设计要求。

取 EDEM 中 0~4.61 s, 将玉米脱出物聚氨酯橡胶筛与贯流式风筛的筛分过程均等划为 100 个时间点进行分析, 筛面颗粒相数量变化如图 6 所示。0.16 s 时颗粒相开始接触上筛面, 由于只对上筛及尾筛上表面 20 mm 高度的空间进行颗粒相的数量分析, 因流场速度纵向分布相差不多, 所以风场对筛板近壁面的影响不大, 筛面颗粒相的分布主要还是受筛板对颗粒相的影响。1.29 s 时物料完全与上筛面接触并且投料结束, 在 1.29 s 之前, 各颗粒相运动状态受筛板对其的作用。

从图 6 可以看出, 0~1.29 s 时, 上筛板及尾筛

上表面的颗粒相数量呈波动上升,这是因为筛面为简谐运动,当筛板向上运动时各颗粒相在筛面上运动,当筛面向下运动时,各颗粒相脱离筛面,且筛面上颗粒相数量减少,由于聚氨酯橡胶与各颗粒间的碰撞恢复系数小于钢,所以图6a的颗粒相波动范围大于图6b的范围,证明聚氨酯橡胶筛更有利于玉米芯与玉米茎秆的抛起,便于杂余由风场作用排出,玉米籽粒的抛起也防止了过分堆积的现象。

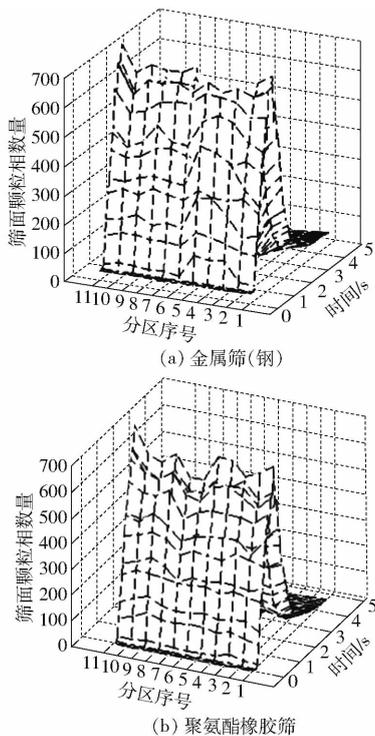


图6 筛面颗粒相数量变化曲线

Fig. 6 Changing curves of number of particles on different areas of sieve

在1.29 s时,金属筛的分区1和11颗粒相数量最大值为691和722,聚氨酯橡胶筛的分区1和11颗粒相数量最大值为720和778,金属筛和聚氨酯橡胶筛上的颗粒相都向两侧分散,但由图5可知,聚氨酯橡胶筛上的颗粒相随时间向两侧平稳运动。

由图6a可以看出,0~0.4 s期间,金属筛的11个分区中的颗粒相数量平稳增加,0.4~1.29 s期间,金属筛上的颗粒相呈现中间聚集的现象,1.13 s时金属筛上的颗粒相堆积现象尤为明显。

图7为金属筛与聚氨酯橡胶筛在不同时间下,11个分区中筛面颗粒相数量的标准偏差比较,0~0.57 s期间,可以看出金属筛上的颗粒相数量偏差始终大于聚氨酯橡胶筛,且当1.29 s时偏差最大相差91。表明在此时间范围内,聚氨酯橡胶筛上的颗粒相分布比金属筛上的颗粒相分布更加均匀。

现有分散度评定标准分为两种:颗粒相沿筛面长度和宽度方向的分散情况;筛面上颗粒相沿高度

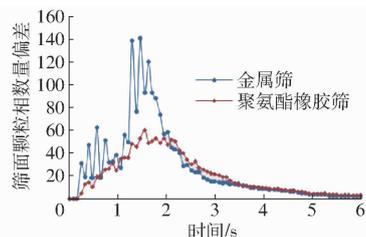


图7 筛面颗粒相数量偏差变化曲线

Fig. 7 Deviations curves of particles' number on sieve

方向的分散情况<sup>[20]</sup>。本文提出基于直线往复简谐振动筛面的二维运动形式的分散度评价指标,用于考察颗粒相在筛面不同纵向分区的分散情况,表示为 $T_k$ 。将筛体运动时间分为6个时区,根据筛面上颗粒相某时区在不同纵向分区的数量,求出任意时区颗粒相数量的样本标准偏差为 $\delta_t$ 。进而得到与筛面上颗粒相在不同分区的分散度评价标准 $T_k$ ( $T_k$ 与总时区标准偏差 $\delta$ 呈倒数关系)。

由表2可知,聚氨酯橡胶筛的分散度为0.064,大于金属筛的分散度0.049。通过以上分析表明聚氨酯橡胶筛对籽粒的推进能力更强,能够更加快速均匀地使颗粒相分散到筛面的有效位置,提高筛分效率,并且聚氨酯橡胶筛对于颗粒相的分散明显优于金属筛,聚氨酯橡胶筛显著提高了筛面的有效利用率,可以更好地完成筛分作业。

表2 筛面颗粒相的分散度

Tab. 2 Dispersion of particles on sieve

时区	$\delta_{St}$	$\delta_{Rt}$
1	25.18	13.50
2	84.48	47.30
3	29.57	34.68
4	11.30	13.83
5	6.60	7.37
6	2.81	3.81
$T_k$	0.049	0.064

注: $\delta_{Rt}$ 和 $\delta_{St}$ 分别为聚氨酯橡胶筛和金属筛上的颗粒相数量在不同时区的偏差。

### 3.2 筛分性能

玉米籽粒收获机清选装置在田间作业的重要评定标准为籽粒清洁率与籽粒清选损失率,根据GB/T 21962—2008《玉米收获机械技术条件》选取籽粒清洁率和清选损失率作为聚氨酯橡胶筛实用性的性能指标。

通过CFD-DEM仿真,在EDEM中提取聚氨酯橡胶筛内部的混合籽粒及其出口脱出物的数据,得到混合物料的质量 $m_1$ 和出口排出杂余中玉米籽粒的质量 $m_3$ ,计算筛内除杂余之外剩下的玉米籽粒质量 $m_2$ 。籽粒清洁率 $\eta_1$ 和籽粒清选损失率 $\eta_2$ 为

$$\eta_1 = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (6)$$

$$\eta_2 = \frac{m_3}{m_2 + m_3} \times 100\% \quad (7)$$

聚氨酯橡胶筛筛分时间为 6.52 s,此时已经完成各颗粒相的清选工作,均等选取 6.52 s 中的 100 个时间点,分析各时间点对应的颗粒相质量。

在 1.12 s 时聚氨酯橡胶筛中的颗粒相总质量最大,为 4.5 kg,此时完成物料的投放,仿真时间为 6.52 s 时筛分过程结束,通过数据提取得到装置内颗粒相总质量  $m_1 = 3.4$  kg,损失的籽粒质量  $m_3 = 0.06$  kg,所以聚氨酯橡胶筛中 3 种锥形、矩形、球形玉米籽粒均没有明显的损失。筛分完成后筛内的玉米籽粒质量:矩形玉米籽粒为 0.34 kg(无籽粒损失)、锥形玉米籽粒为 2.42 kg、球形玉米籽粒为 0.48 kg,总质量  $m_2 = 3.24$  kg。根据籽粒清洁率与籽粒清选损失率公式计算得出  $\eta_1 = 95.4\%$ ,  $\eta_2 = 1.82\%$ 。

#### 4 性能台架试验

对 CFD-DEM 仿真得到的聚氨酯橡胶筛的籽粒清洁率及籽粒清选损失率进行试验验证,试验台架是对原东北农业大学贯流式风筛清选装置试验台架进行改装,上筛和尾筛更换为聚氨酯橡胶筛。试验参照 GB/T 8097—2008《收获机械 联合收割机试验方法》,每组试验进行 5 次筛分试验,并对其数据进行均值化处理,入口气体速度分别取 8.4、10.2、12、13.8、15.6 m/s,聚氨酯橡胶筛振动频率为 5.16 Hz,物料总摄入量 5 kg。

图 8 为聚氨酯橡胶筛试验台架。对不同风速下筛分出的物料进行称量,通过计算得到试验结果,从表 3 中可以看出,聚氨酯橡胶筛在不同风速下籽粒清洁率均高于贯流式风筛金属筛,随着风速的增加聚氨酯橡胶筛籽粒清洁率的增大趋势减缓,但金属筛呈平稳增大趋势,这是由于聚氨酯橡胶筛面对颗粒相的弹射能力强,使得玉米籽粒受风场的作用筛出,导致籽粒清洁率增大趋势减缓,同时也增加了聚氨酯橡胶筛籽粒清选损失率的增大趋势。

当入口气体速度为 12.0 m/s 时,清选装置籽粒清选损失率为 1.93%,清洁率为 95.3%且相对于金属筛提高了 16.33 个百分点,为聚氨酯橡胶筛在不同风速下的最优性能,并与 CFD-DEM 仿真数据相近,清选装置籽粒清选损失率满足国家标准 GB/T



图 8 聚氨酯橡胶筛试验台架

Fig. 8 Experimental devices of polyurethane rubber sieve

1. 聚氨酯橡胶筛 2. 金属筛 3. 台架 4. 计算机 5. 变频器 6. 电动机 7. 贯流风机

表 3 不同风速下聚氨酯橡胶筛和金属筛对玉米脱出物的筛分效果

Tab.3 Performance of polyurethane rubber sieve and metal sieve for screening maize mixtures at different air velocities

风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	聚氨酯橡胶筛		金属筛	
	清洁率	损失率	清洁率	损失率
8.4	90.56	1.39	74.97	1.02
10.2	93.46	1.54	77.05	1.43
12.0	95.30	1.93	78.97	1.79
13.8	96.42	2.50	79.82	2.32
15.6	96.48	3.43	80.94	3.07

21962—2008 和行业标准 NY/T 645—2002《玉米收获机质量评价技术规范》要求,证明聚氨酯橡胶筛满足实用性要求,可广泛应用于玉米联合收获机清选装置。

#### 5 结论

(1) 通过推导得到聚氨酯橡胶的剪切模量为 221.4 MPa,试验测得玉米籽粒、玉米芯、玉米茎秆与聚氨酯橡胶间的静摩擦因数为 0.60、1.05、0.99,碰撞恢复系数 0.51、0.29、0.25,聚氨酯橡胶的密度  $1072 \text{ kg/m}^3$ 。

(2) 通过 CFD-DEM 仿真及 CFD-POST 后处理分析,得出聚氨酯橡胶筛使颗粒相平稳快速的向两侧运动,计算得聚氨酯橡胶筛的分散度 0.064,大于金属筛的分散度。

(3) 根据聚氨酯橡胶筛台架性能试验,当喂入量为  $5 \text{ kg/s}$  时,确定了聚氨酯橡胶筛清选装置入口的最佳风速为 12 m/s,此时清选装置籽粒清选损失率为 1.93%,达到玉米收获机国家标准和行业质量评价技术规范要求。

#### 参 考 文 献

- 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. 农业工程学报,2011,27(5): 117-121.  
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 117-121. (in Chinese)
- 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(2):

- 79-84. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120217&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120217&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.017.
- LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD - DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 79-84. (in Chinese)
- 3 MA Z, LI Y, XU L. Discrete-element method simulation of agricultural particles' motion in variable-amplitude screen box[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 118: 92-99.
- 4 黄震宇,李腾,喻志成,等. 蔬菜种子风力筛选机分离室气固两相流模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5): 70-76. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160510&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160510&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.010.
- HUANG Zhenyu, LI Teng, YU Zhicheng, et al. Simulation and experiment of gas-solid two-phase flows in separation chamber of air-screening machine for vegetable seeds[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 70-76. (in Chinese)
- 5 LI H, LI Y, GAO F, et al. CFD - DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2012, 88(2): 111-119.
- 6 ELSKAMP F, KRUGGEL-EMDEN H, HENNIG M, et al. Benchmarking of process models for continuous screening based on discrete element simulations[J]. Minerals Engineering, 2015, 83: 78-96.
- 7 王皓巍. 张弛振动筛的振动分析及结构优化[D]. 北京:北京化工大学,2013.
- WANG Haowei. Vibration analysis and structural optimization of relaxation screening machine[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013. (in Chinese)
- 8 朱海玲. 轴向荷载作用下钢-聚氨酯复合管力学性能研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2011.
- ZHU Hailing. Study on mechanical properties of steel-polyurethane composite pipe under axial load[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- 9 黄莉. 聚氨酯金属屋面面板力学性能及其对屋盖结构风振影响研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- HUANG Li. Study on mechanical properties of polyurethane metal roof panel and its effects on wind-induced vibration responses of roof structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- 10 刘鸿文. 材料力学:上册[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,1992: 313-320.
- 11 薛启超. 聚氨酯弹性体钢夹层板的力学性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- XUE Qichao. Mechanical properties study for sandwich plate system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
- 12 霍林 J. 摩擦学原理[M]. 北京:机械工业出版社,1981: 166-191.
- 13 周文秀. 玉米籽粒物理力学特性的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.
- ZHOU Wenxiu. Study on physical and mechanical properties of corn grain[D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 14 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/OL]. 农业机械学报,2014, 45(4):118-122. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140418&journal\\_id=jcsam](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.
- 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): 118-122. (in Chinese)
- 15 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160916&journal\\_id=jcsam](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.
- 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. (in Chinese)
- 16 COŞKUN M B, İBRAHİM Y, CENGİZ Özarlan. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata* Sturt.) [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(4): 523-528.
- 17 ASAE S368.4-2000 Compression test of food materials of convex shape[S]. ASAE Standards 2002: Standards Engineering Practices, 2002: 592-599.
- 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150918&journal\\_id=jcsam](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.
- 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. (in Chinese)
- 19 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.
- 20 李菊,曾氢菲,邓嘉鸣,等. 多维并联振动筛筛分过程解析与筛面运动形式优选[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11): 399-407. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161154&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161154&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.054.
- LI Ju, ZENG Qingfei, DENG Jiaming, et al. Screening process analysis for multi-dimensional parallel vibrating screen and optimization of screen surface movement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 399-407. (in Chinese)