

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90108

# 禽蛋壳膜回收分选装置参数优化

Optimization on parameters of collecting and sorting device for discarded poultry eggshells and eggshell membranes

杨月斌<sup>1</sup> 陈博超<sup>1</sup> 王明久<sup>1</sup> 迟玉杰<sup>2</sup> 迟媛<sup>1</sup>

YANG Yue-bin<sup>1</sup> CHEN Bo-chao<sup>1</sup> WANG Ming-jiu<sup>1</sup> CHI Yu-jie<sup>2</sup> CHI Yuan<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China;

2. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

**摘要:**目的:有效利用废弃蛋壳和蛋壳膜。方法:对废弃蛋壳进行分离和分选,利用 Fluent 和 EDEM 耦合仿真研究了分选筒上、下出口直径等结构参数对流场特性、颗粒轨迹的影响,分析了流场特性和壳膜的捕捉率,优化了分选筒的气流出口尺寸。以筒顶角度、吸风机负压、送料口风速和固体负荷率作为试验因素,蛋膜和蛋壳的回收率作为评价指标,进行分选蛋壳膜试验,并进行优化设计。结果:减少分选筒上、下出口直径会增大筒内压降损失和近壁切向速度,当上出口直径为  $0.4D$  ( $D$  为直筒段直径)、下出口直径为  $0.5D$  时,蛋壳和蛋膜的捕捉率最高。筒顶角度为  $45^\circ$ , 固体负荷率为  $1\ 000\ \text{g/s}$ , 送料口速度为  $4.64\ \text{m/s}$ , 吸风机负压为  $336.61\ \text{Pa}$ , 此时蛋膜回收率为  $92.94\%$ , 蛋壳回收率为  $97.90\%$ 。结论:上出口负压与送料口风速主要影响分选筒内部流场分布, 固体负荷率会使物料之间产生不同的相互作用。在优化后的工艺组合下,该分选设备具有良好的分选效果。

**关键词:**禽蛋;蛋壳;蛋膜;旋风分选

**Abstract: Objective:** To efficiently exploited the discarded eggshells and eggshell membranes. **Methods:** The discarded eggshells was separated and collected. Used Fluent and EDEM coupling simulation to study the flow field characteristic and particles trajectory, which affected by structure parameters such as upper outlet diameter and lower outlet diameter of the collecting barrel. By analyzing flow field characteristic and capture rate of eggshells as well as eggshell membranes, the size of collecting barrel was

optimized. The top angle, the vacuum of suction machine, the feeding inlet air velocity, the solid load of feeding inlet were used as the test factors. The recovery rates of eggshells and eggshell membranes were used as the two evaluation indexes. The experiments of collecting eggshells and eggshell membranes were performed and optimized. **Results:** The simulation showed that an appropriate decrease of the diameter of the upper and lower outlets will lead to more loss pressure drop in the cylinder, and increase the tangential velocity in the cylinder. When the upper outlet diameter was  $0.4D$  ( $D$  is the diameter of the cylinder) and the lower outlet diameter was  $0.5D$ , the capture rate of eggshells and eggshell membranes was the highest. The test results showed when the cyclone top angle was  $45^\circ$ , the solid load rate was  $1\ 000\ \text{g/s}$ , the feeding inlet air velocity was  $4.64\ \text{m/s}$ , the vacuum of suction machine was  $336.61\ \text{Pa}$ , the eggshell membranes recovery rate was  $92.94\%$ , and the eggshells recovery rate was  $97.90\%$ . **Conclusion:** The vacuum of suction machine and the feeding inlet air velocity mainly affect the flow field in the collecting barrel, and the solid load will cause different interactions between materials. After the experiment and simulation analysis of the factors that affect the collecting effects, the optimal level combination of factors is obtained. With the combination of these factors, the recovery rates of eggshell and eggshell membrane are higher, and the collecting device has a good effect.

**Keywords:** poultry egg; eggshell; eggshell membrane; cyclone collection

**基金项目:**黑龙江省自然科学基金项目(编号:LH2019E011);黑龙江省博士后科研启动金二等项目(编号:LBH-Q18012);国家蛋鸡产业技术体系项目(编号:CARS-40-K25)

**作者简介:**杨月斌,男,东北农业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**迟媛(1974—),女,东北农业大学副教授,博士。

E-mail: cy207@126.com

**收稿日期:**2021-06-05

2020 年中国禽蛋产量达  $3\ 468\ \text{万}\ \text{t}$ <sup>[1]</sup>,按照蛋壳质量占禽蛋质量的  $11\%$  换算<sup>[2]</sup>,产生的废弃蛋壳近  $381\ \text{万}\ \text{t}$ 。废弃蛋壳会造成环境污染,但如果将蛋壳和蛋壳内层的膜分离开来,将会变废为宝。蛋壳既可以用作生产食品用钙,也可以作为优良的矿物质饲料,蛋膜可用于医药、轻工业、环境工程和制作生物传感器等多个领域<sup>[3-6]</sup>。

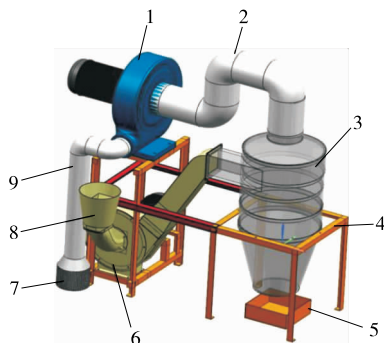
Joseph<sup>[7]</sup>通过循环的水流冲击分离容器中的废弃蛋壳来分离蛋壳和蛋膜,利用蛋壳密度大,会下沉到容器底部,蛋膜密度小,能够上浮到水面,实现分选。Levi<sup>[8]</sup>设计了类似文丘里管的分离装置,在气流的冲击下,使脆性的壳从具有韧性的膜上脱离,再通过振动筛进行蛋壳和蛋膜分选。Michael 等<sup>[9]</sup>用锤式粉碎的方法处理废弃蛋壳,分离后的蛋壳与蛋膜利用气流直接作用实现分选。为了减少粉碎蛋壳产生的粉尘污染环境,迟媛等<sup>[10-11]</sup>采用初步粉碎和水中机械搅拌的方法实现壳膜分离,并提出采用旋风式气流分选蛋壳和蛋膜。水中浮选蛋壳和蛋膜存在不易分别收集和分选不彻底的缺点,振动筛分选出的蛋壳中易于混入粒径大的蛋膜,旋风式气流分选方式相比于气流直接作用,具有蛋壳和蛋膜在分选筒中运动路程长和停留时间长的优点,可以使蛋壳和蛋膜充分分选。

分选筒内具有复杂的强旋三维气固两相流<sup>[12]</sup>,为了提高旋风式分选筒的分选效率,研究拟采用 Fluent 17.0 和 EDEM 2.7 进行耦合仿真,对废弃蛋壳进行分离和分选,针对分离后的蛋壳和蛋壳膜混合物,优化设计旋风式气流分选禽蛋壳膜装置以实现蛋壳和蛋壳膜的分别收集。

## 1 旋风式气流分选禽蛋壳膜装置

### 1.1 旋风式气流分选禽蛋壳膜装置原理

旋风式气流分选禽蛋壳膜装置如图 1 所示,主要包括负压风机 1、输膜管道 2、壳膜分选筒 3、送料装置 6 等部件。壳膜分选筒主要分上锥筒段、直筒段和下锥筒段三段,上锥筒段出口为蛋膜出口,与输膜管道连接,下锥筒段出口为蛋壳出口。壳膜分选筒的工作原理是:送料装置 6 将分离的蛋壳和蛋膜混合物从入料口 8 输送至壳膜分选筒 3,在负压风机的作用下分选筒中心区域的气体流速较快,近壁区域的气流速度较低,负压风机的吸力迫



1. 负压风机 2. 输膜管道 3. 壳膜分选筒 4. 试验台架 5. 蛋壳收集容器 6. 送料装置 7. 蛋膜收集器 8. 入料口 9. 蛋膜收集管

图 1 旋风式气流分选禽蛋壳膜试验台

Figure 1 Cyclone device to collect eggshell membranes and eggshells

使大部分蛋膜运动至蛋膜出口,由输膜管道 2 至蛋膜收集管 9 直至收集,蛋壳和小部分大粒径蛋膜则在离心力作用下沿近壁区域旋转下落至下锥筒段,随着截面变窄,会逐渐靠近气流较快的中心区域,蛋膜被高速气流携带至蛋膜出口,蛋壳则由蛋壳出口落下,实现蛋壳与蛋膜的分选和收集。

### 1.2 旋风式气流分选禽蛋壳膜装置关键参数设计

送料装置抛送壳膜分为两步:第一步为极速旋转叶轮抛送蛋壳膜,蛋壳膜靠极速旋转的叶轮来获取能量;第二步蛋壳膜离开叶轮后进入送料管道,极速旋转的叶片带动气流进而作用于壳膜。送料装置单位时间生产量计算式<sup>[13]</sup>为

$$E_y = \frac{30a_y^2 \alpha \delta b_y i_y n_y \tan \beta}{3600} \quad (1)$$

式中:

$E_y$ ——送料装置单位时间生产量,kg/s;

$a_y$ ——送料装置叶片高度,取 50 mm;

$b_y$ ——送料装置叶片宽度,取 100 mm;

$i_y$ ——送料装置叶片数量,取 6 个;

$\delta$ ——能量转换系数,取 0.3;

$n_y$ ——送料装置转速,r/min;

$\alpha$ ——蛋壳密度,取 2 310 kg/m<sup>3</sup>;

$\beta$ ——物料(蛋壳膜)的斜面休止角,取 19°。

送料装置设计时考虑到满足(后文正交试验最高固体负荷率 1.2 kg/s)要求,因此,送料装置将蛋壳膜混合物抛出时,需应满足送料装置单位时间生产量等于单位时间蛋壳膜固体负荷量 1.2 kg。得送料装置转速  $n_y$  为 402.31 r/min,且  $n_y$  满足

$$n_y = \frac{60v_y}{\pi D_y} \quad (2)$$

式中:

$D_y$ ——送料装置外径,取 320 mm。

求得叶轮的线速度  $v_y = 6.74$  m/s。

蛋壳膜混合物被抛送到管道出口时,需满足蛋壳膜以一定的初始速度切向抛入壳膜分选筒内。依据动能定理可得极速旋转的叶轮线速度<sup>[13]</sup>为

$$v_y = (1 + \lambda_1) \cos \theta \sqrt{2gH_s(1 + \lambda_2) + v_t^2} \quad (3)$$

式中:

$H_s$ ——送料高度,取 0.6 m;

$v_y$ ——叶轮的线速度,m/s;

$v_t$ ——送料装置管道出口末速度,m/s;

$\theta$ ——送料管道与地面水平线间夹角,取 60°;

$\lambda_1$ ——叶轮线速度换算成蛋壳膜初速度的差异损失系数,取 0.54;

$\lambda_2$ ——物料(蛋壳膜)在输送过程中能量损失系数,取 0.21;

$g$ ——重力加速度,取  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

由式(3)得送料装置管道出口末速度  $v_t = 7.90 \text{ m/s}$ ,即旋风分选筒的入口速度为  $7.90 \text{ m/s}$ 。

因为试验的固体负荷率最大为  $1.2 \text{ kg/s}$ ,所以旋风分选筒的入口气流速度最大为  $7.90 \text{ m/s}$ ,以此计算结果来设定模拟仿真的边界条件。

## 2 壳膜旋风分选影响因素与参数分析

旋风分选影响因素主要有上出口负压、进料口风速和固体负荷率,上出口负压与进料口风速主要影响分选筒内部流场分布,即能否形成双层旋流流场。在该流场中,蛋壳在外层旋转向下运动并在下出口收集、蛋膜在内层旋流中旋转向上运动并从上出口被顺利吸出收集。若进料口风速或上出口负压过大,双层旋流最低点远高于分选筒下出口,蛋壳无法从下出口排出,在锥筒处形成灰环堆积现象,粒径较小的蛋壳也会随蛋膜从上出口吸出,降低蛋膜清洁率。若进料口风速或上出口负压过小,双层旋流最低点低于下出口,随蛋壳在外层下旋运动的蛋膜无法进入到内层上升旋流中,不能进行二次分选,降低了蛋膜回收率。不同的固体负荷率会在喂料机的作用下使物料之间产生不同的相互作用,直接影响喂料机能否均匀充分加速进入分选筒的物料及能否使物料在分选筒喂料口处均匀分布,能够充分加速的物料颗粒越多,物料在分选筒喂料口分布越均匀,分选效果越好。

前期研究对分选筒的直径、平筒顶和锥筒顶、直筒段高度进行了仿真和试验研究,得出了当分选筒筒径为  $D$  时,直筒段高度为  $1.05D$ ,且锥筒顶优于平筒顶。试验通过进一步研究发现分选筒的上、下出口直径、锥筒顶角度对蛋壳、膜的运动轨迹有直接的影响,直接影响了蛋壳和蛋膜的分选效果。因此在前期研究的基础上,主要研究上出口直径为  $0.5D, 0.4D, 0.3D$ ,下出口直径为  $0.75D, 0.50D, 0.25D$ ,筒顶角度为  $30^\circ$  与  $45^\circ$  等筒体结构参数对分选筒内的流场特性、蛋壳蛋膜捕捉率、颗粒轨迹的影响,以探究更适合壳膜分选的结构参数。

## 3 壳膜分选筒关键结构参数的数值模拟

### 3.1 分选筒网格的划分及仿真参数的设定

利用 ProE 建立分选筒的物理模型,分选筒结构尺寸如表 1 所示,将物理模型导入 ICEM-CFD 软件中进行三维网格的划分,为了提高计算精度和准确性,采用六面体结构网格<sup>[14-17]</sup>,同时划分计算域和边界层。划分网格中,模型共分为四部分进行划分,即直筒段、锥筒段、升气管和喂料口,对前三部分需进行 O-block 划分,而喂料口与直筒段切口处采用“Y”型划分,网格的最大单元为  $3 \text{ mm}$ 。考虑到分选筒近壁区域流体运动复杂,所以对内壁网格进行加密处理。网格模型如图 2(b)所示。

旋风式壳膜分选筒内涉及到气固两相流的运动,所

表 1 分选筒结构尺寸参数

Table 1 Collecting cylinder structure parameters

结构参数	尺寸/mm
直筒段高度 $H_z$	$1.05D$
送料口高度 $a$	$0.29D$
送料口宽度 $b$	$0.24D$
分选筒总高 $H$	$1.93D$
下出口直径 $D_x$	$0.25D, 0.50D, 0.75D$
直筒段筒径 $D$	$380$
上出口直径 $D_s$	$0.3D, 0.4D, 0.5D$

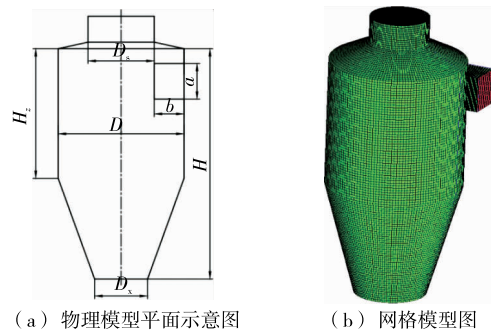


图 2 分选筒模型

Figure 2 The cylinder model

以选择 CFD-DEM 进行离散元与连续相的耦合仿真,能更准确地反映实际状况。其中 EDEM 2.7 求解固体颗粒相,Fluent 17.0 求解气态流体相,并运用欧拉多相流模型进行流场计算<sup>[18]</sup>。旋风式壳膜分选筒内部压力呈梯度排列,考虑到内部气体为旋流,因此压力插补选择 PRESTO 格式,湍流模型采用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[19-21]</sup>。为了提高计算的精度,离散格式采用对流项二阶迎风差值即 QUICK 格式<sup>[22]</sup>,同时速度和压力的耦合算法采用 SIM-PLEC 进行运算<sup>[23]</sup>。

边界条件:边界条件根据前期研究及预试验结果进行设定,设置分选筒送料口为速度进口,设置速度大小为  $6 \text{ m/s}$ (计算中最高速度为  $7.9 \text{ m/s}$ ),上出口与输膜管道相连,设置为压力出口,上出口压力设置为  $-300 \text{ Pa}$ ,设置下出口为压力入口,压力设置为  $0 \text{ Pa}$ 。

仿真颗粒模型设置:蛋膜颗粒模型由  $1\ 836$  个直径为  $0.1 \text{ mm}$  刚性小球构成,其模型厚度为  $0.1 \text{ mm}$ 、长和宽均为  $5 \text{ mm}$ 。蛋壳颗粒模型则由  $195$  个直径为  $0.3 \text{ mm}$  刚性小球构成,其模型厚度为  $0.3 \text{ mm}$ ,长和宽均为  $1.5 \text{ mm}$ 。以粉末形式存在的蛋壳与蛋膜,粒径均在  $0.1 \text{ mm}$  以下且漂浮速度极小,对颗粒间的相互作用可以忽略,运动方式则是会随气流由上出口排出并收集,因此不在仿真中加入粉尘颗粒。蛋壳与蛋膜模型如图 3 所示。

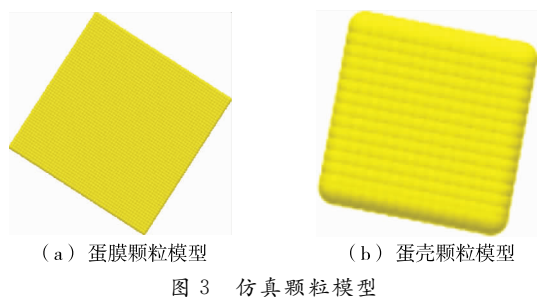


Figure 3 Particle model in simulation

### 3.2 壳膜分选筒不同上出口直径的仿真

3.2.1 不同上出口直径的流体域的压力分析 由图 4 可知,分选筒的压力从边壁向中心呈梯度变化,静压云图大致呈中心对称。分选筒中间形成了柱状的负压区域,随着上出口直径从  $0.5D$  减少到  $0.3D$  时,中间负压区域和边壁压力随上出口直径的减小而减小。但是压降却随上出口直径的减少而增加。原因是气流切向进入分选筒时,随上出口直径的减少,分选筒内部的旋流增强,使得气流在筒体边壁的压力耗散增加且出口小会导致更多的压力损失,进而使分选筒内的压降增加。

3.2.2 不同上出口直径的流体域的速度分析 图 5 为分选筒上出口直径分别为  $0.5D, 0.4D, 0.3D$  时,在  $Z = -200, Z = 0, Z = 200, Z = 400$  ( $Z = 0$  为直筒段底面所在平面)时的横截面切向速度云图。由图 5 可以看出,对于同一分选筒,切向速度分内外两层,内层气体流速较快形成了高速气流区,外层气体流速较慢形成了低速气流区。当上出口直径由  $0.5D$  逐渐减少到  $0.3D$  时,切向速度增加,并且上出口直径为  $0.4D$  时,  $Z = 0$  截面高速气流区的范围最明显。

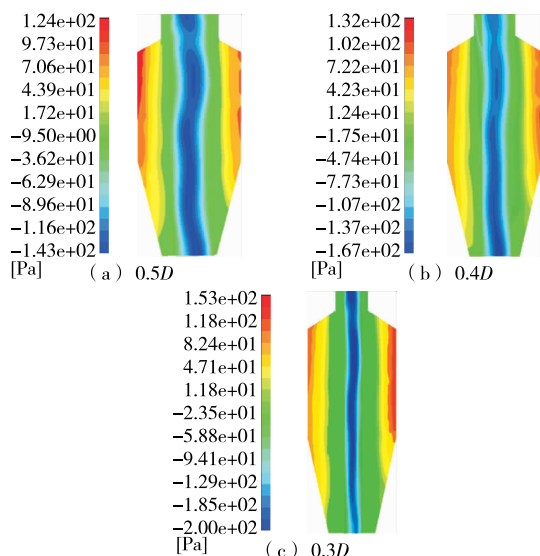


Figure 4 The static pressure distribution cloud diagram of the axial section in the collecting cylinder

Figure 4 The static pressure distribution cloud diagram of the axial section in the collecting cylinder

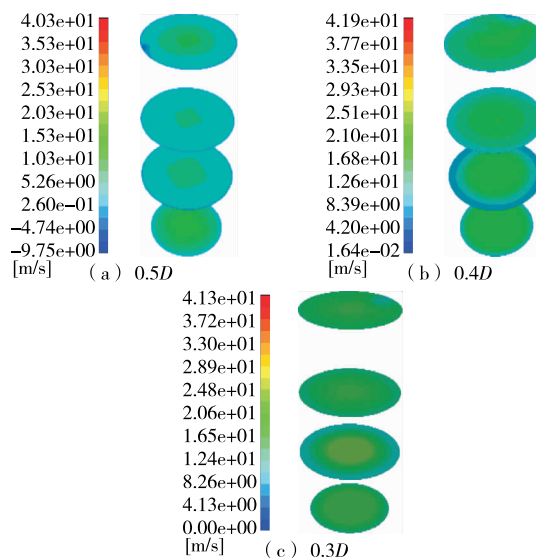


Figure 5 Contour of tangential velocity distribution of the horizontal section in the collecting cylinder

Figure 5 Contour of tangential velocity distribution of the horizontal section in the collecting cylinder

3.2.3 不同上出口直径的蛋壳膜的捕捉率分析 在上出口和下出口分别建立监视面,统计蛋膜与蛋壳数量,并计算蛋膜和蛋壳的捕捉率。如图 6 所示,不同上出口直径的蛋壳、蛋膜,上出口直径为  $0.4D$  时蛋膜捕捉率最高,上出口直径为  $0.3D$  时蛋壳捕捉率最高,从上出口直径由  $0.5D$  逐渐减少到  $0.3D$  时,壁面附近的切向速度也随着上出口直径的减少而逐渐增大,蛋壳所受到的离心力也随之变大。此时,气固两相流中的蛋壳更容易从气体中分选出来,被下监视面捕捉。其原因是上出口直径越小,分选筒内旋流越强烈,湍流强度越强。细碎的蛋壳随着上旋的气流与蛋膜一起被收集,导致蛋膜的含杂率过高。从蛋壳与蛋膜捕捉率综合来看,上出口直径为  $0.4D$  时蛋壳、膜的捕捉效果最好。

### 3.3 壳膜分选筒的不同下出口直径的仿真

3.3.1 不同下出口直径的流体域的压力分析 图 7 中静

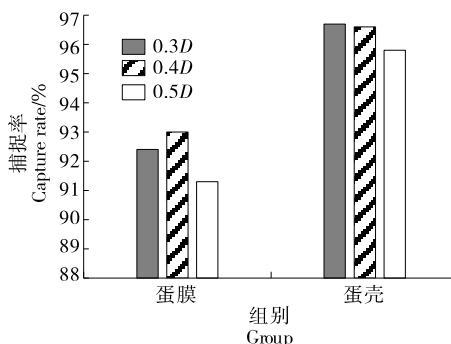


Figure 6 Different upper outlet diameter eggshell membrane capture rate

Figure 6 The capture rate of eggshells and eggshell membranes with different upper outlet diameters

压从近壁面到中心逐渐减小,中间柱状负压区域变化不明显。压力梯度沿径向变化明显,而轴向梯度几乎无变化。当下出口直径由  $0.75D$  逐渐减少到  $0.25D$  时,分选筒压降随着下出口直径的减少而增加。原因是锥筒高度不变,减少下出口直径,锥体部分的空间体积减少,气流与壁面的接触面积减少,涡流强度增加,气流的切向速度增加,筒内能量耗散增加,因此压降随着下出口直径的减少而增加。

3.3.2 不同下出口直径的流体域的速度分析 图 8 为分选筒下出口直径为  $0.75D, 0.50D, 0.25D$  时,在  $Z = -200, Z = 0, Z = 200, Z = 400$  ( $Z = 0$  为直筒段底面所在平面)时的横截面切向速度云图。由图 8 可以看出,分选筒内气流速度不对称,当下出口直径由  $0.75D$  逐渐减少到  $0.25D$  时,切向速度逐渐增大。同一个分选筒内,速度沿上有增加趋势。且当下出口直径为  $0.50D$  时,近壁区出现环状速度带,形成的气体旋流更明显。

3.3.3 不同下出口直径的蛋壳膜的捕捉率分析 由图 9 可知,分选筒下出口直径为  $0.50D$  时,蛋壳的捕捉率和蛋壳膜的捕捉率最高,且当下出口直径为  $0.50D$  时,近壁区出现环状速度带,形成的气体旋流更明显,更适合分选蛋壳与蛋壳膜。

#### 3.4 壳膜分选筒的不同筒顶角度的仿真

在 Fluent 和 EDEM 中运用 DPM 轨迹追踪的方法探究不同筒顶角度蛋壳的运动轨迹和蛋壳的运动轨迹,从而分析获得不同筒顶角度对分选筒分选效果的影响。

在前期研究确定了分选筒直径和直筒段高度、以及文中仿真研究确定了最佳上出口直径为  $0.4D$ 、最佳下出口直径为  $0.5D$  的基础上建模进行仿真。由图 10 可知,

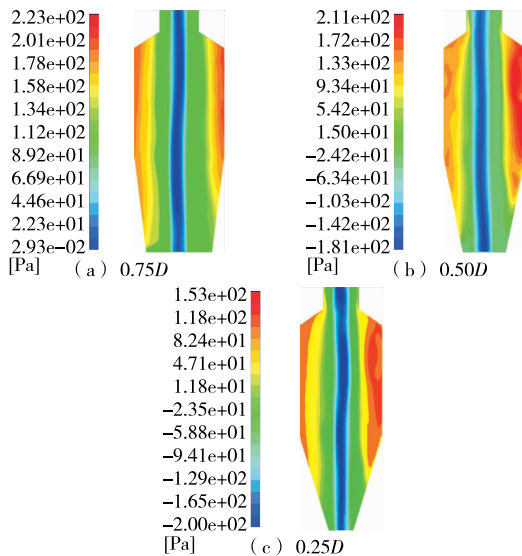


图 7 分选筒内轴向截面静压力分布云图

Figure 7 The static pressure distribution cloud diagram of the axial section in the collecting cylinder

蛋壳的运动轨迹总体比较相似,但筒顶角度为  $30^\circ$  时,蛋壳的轨迹在筒底的旋转圈数更多,因此蛋壳的能量损失更多。由图 11 可知,蛋壳的运动轨迹也比较相近,说明筒顶角度对蛋壳与蛋壳运动轨迹的影响并不明显,因此后文将通过试验的方法去探究筒顶角度对分选筒分选效果的影响。

## 4 试验研究

通过前期仿真研究,发现分选筒上出口直径为  $0.4D$ ,下出口直径为  $0.5D$  ( $D = 380 \text{ mm}$ ) 时,轴向截面压强分布较均匀,近似呈中心对称,各横截面有较明显的环状速度带且中心高速带范围较明显,能形成较好的双层旋流流场。对于蛋壳膜捕捉率,上出口直径为  $0.4D$  时,蛋壳膜颗粒捕捉率远高于另两组,同时也有较高的蛋壳颗粒捕捉率;下出口直径为  $0.5D$  时,蛋壳膜颗粒捕捉率均优于另两组。而筒顶角度在仿真中无较明显差异,需在试验中

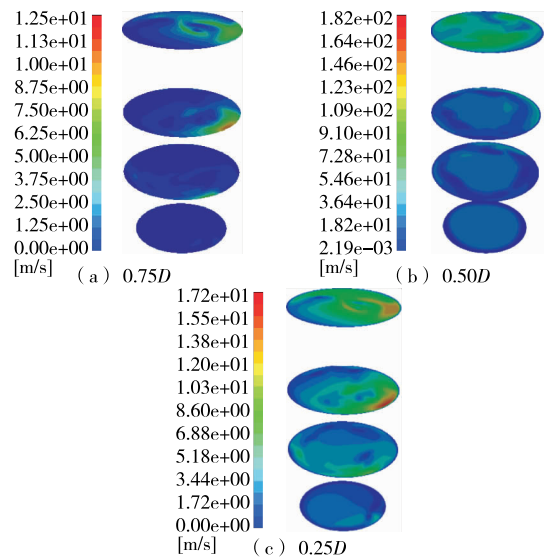


图 8 分选筒横截面切向速度分布云图

Figure 8 Contour of tangential velocity distribution of the horizontal section in the collecting cylinder

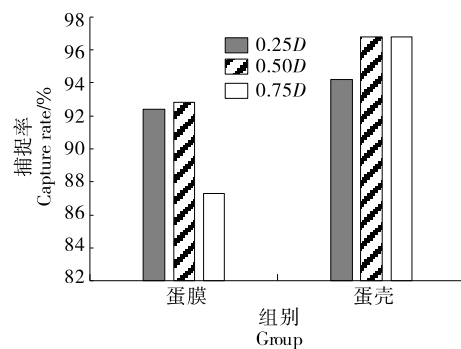
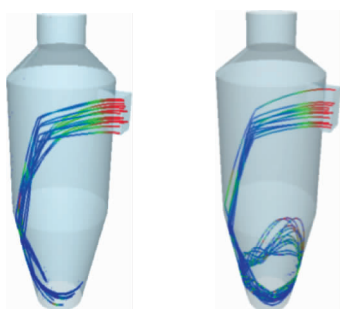


图 9 不同下出口直径蛋壳膜的捕捉率

Figure 9 The capture rate of eggshell membranes with different lower outlet diameters



(a) 筒顶角度45° (b) 筒顶角度30°

图 10 不同筒顶角度蛋壳的运动轨迹

Figure 10 The trajectories of eggshells with different top angles of collecting cylinder



(a) 筒顶角度45° (b) 筒顶角度30°

图 11 不同筒顶角度蛋膜的运动轨迹

Figure 11 The trajectories of eggshell membranes with different top angles of collecting cylinder

进行研究。根据研究的结构参数进行加工和试验台搭建,研究影响分选效果的工作参数(进料口风速、上出口负压及固体负荷率)。

#### 4.1 试验仪器与试验方法

##### 4.1.1 试验仪器与材料

旋风式气流分选禽蛋壳膜装置(如图 12 所示):实验室自制;

风速仪(可测风速与风压):LR-ZJB 手持型,上海雷若仪表科技有限公司;

鼓风机:TB-202 型,上海阜风机电设备有限公司;

三相异步电动机:Y80M2-4 型,上海瑞达电机有限公司;

变频器:VFD-M 型,深圳台达电子有限公司;

电子天平秤:M600TB-B 型,深圳市美孚电子有限公司;

生鸡蛋蛋壳:海兰褐,东北农业大学食堂。

4.1.2 试验方法 新鲜的鸡蛋壳经过清洗、晒干后,用粉碎机初步粉碎后放入自行研制的水中机械搅拌壳膜分离装置中进一步分离,得到分离的蛋壳和蛋膜。评价旋风分选筒的分选效果需要计算蛋膜与蛋壳回收率,为了使回收率的计算不受壳、膜分离率的影响,需要100%分离

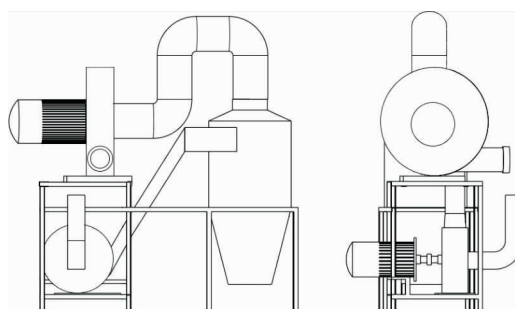


图 12 试验台示意图

Figure 12 Experiment device

的蛋壳与蛋膜,因此将分离的蛋壳和蛋膜纯化处理。将水中机械搅拌分离的蛋壳和蛋膜分别收集干燥后喂入旋风式气流分选禽蛋壳膜装置中,调节上出口风速小于正常分选的风速(正常分选的风速应大于蛋膜的悬浮速度小于蛋壳的悬浮速度),上出口收集的全部是蛋膜,保证蛋膜的纯度。同理调节上出口的风速大于正常分选的风速,以确保在下出口收集蛋壳的纯度。收集的蛋膜碎片粒径分布 3.0~7.0 mm、厚度约为 0.10 mm、密度为 409 kg/m<sup>3</sup>;收集的蛋壳颗粒粒径分布 0.5~2.5 mm,厚度 0.28~0.33 mm,密度 2 300 kg/m<sup>3</sup>。将纯净的蛋膜与蛋壳按照鸡蛋中蛋壳与蛋膜的混合质量比 96.657 : 3.043 进行均匀混合,然后将混合物喂入旋风式气流分选筒进行分选,从分选筒上出口收集蛋膜,下出口收集蛋壳,称取收集的蛋膜与蛋壳的质量,求出蛋膜与蛋壳的回收率。经测定:蛋壳颗粒,粒径范围为 0.5~2.5 mm,悬浮速度为 8.2~9.3 m/s;蛋膜颗粒,粒径范围为 3.0~7.0 mm,悬浮速度为 1.8~2.3 m/s。

#### 4.2 试验评价指标

##### 4.2.1 蛋膜回收率的计算 根据蛋壳膜分离率<sup>[24]</sup>公式:

$$Y = \frac{m}{0.03043M} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

$M$ ——蛋壳膜混合物的总质量,g;

$m$ ——从蛋壳膜清选出蛋膜的质量,g。

蛋膜分选的纯净率<sup>[25]</sup>和回收率为

$$Y_c = \frac{m_b}{m_a} \times 100\%, \quad (5)$$

$$\eta_m = \frac{m_a}{m_c} \times 100\%, \quad (6)$$

式中:

$m_a$ ——清选出的蛋膜质量,g;

$m_b$ —— $m_a$ 经 1 mol/L 盐酸处理后蛋膜质量,g;

$m_c$ ——蛋壳膜理论分离的蛋膜质量( $m_c = 0.03043M$ ),g。

4.2.2 蛋壳回收率的计算 进入分选筒的蛋壳可以分为三部分,第一部分是分选筒下落收集的蛋壳质量为  $m_{k1}$ ,

第二部分为收集的蛋膜中含有蛋壳的质量为  $m_{k_2}$ , 第三部分为分选后无法收集以粉尘形式存在的蛋壳质量为  $m_{k_3}$ 。蛋壳的回收率可以表示为:

$$\eta_k = \frac{M_k - m_{k_2} - m_{k_3}}{M_k} \times 100\%, \quad (7)$$

式中:

$M_k$ ——进入分选筒的蛋壳总质量,g;

$\eta_k$ ——下落回收的蛋壳回收率,%。

由式(6)可得

$$m_{k_2} = (1 - Y_c) \times m_a \quad (8)$$

因此,蛋壳的回收率可表示为:

$$\eta_k = 1 - \frac{(1 - Y_c) \times m_a}{M_k} - \frac{m_{k_3}}{M_k} \quad (9)$$

式中:

$m_{k_3}/M_k$ ——以粉尘形式存在的蛋壳与分选蛋壳的总质量比,取 0.011~0.034。

### 4.3 试验方案

4.3.1 正交试验 以蛋膜和蛋壳的回收率作为试验指标,以分选筒筒顶角度、送料口风速、吸风机负压、固体负荷率作为试验因素,探究各试验因素对旋风分选装置壳膜分选效果的影响。根据仿真试验及前期预试验确定试验因素水平取值见表 2。通过变频器调节送料装置与吸风机的转速大小,进而实现试验中送料口风速和吸风机负压的控制。

由表 3 可知,影响蛋壳回收率的最优水平组合为  $A_2B_1C_2D_2$ , 影响蛋膜回收率的最优水平组合为  $A_2B_3C_2D_2$ , 且两试验指标的主次因素排序都为 B、C、D、A。对试验进行加权综合分析,影响壳回收率指标的权重取 0.30,影响膜回收率指标的权重取 0.70,则影响总指标的主次因素排序为 B、C、D、A。由此可见,吸风机负压和送料口风速对蛋壳与蛋膜的回收率影响较为显著。

4.3.2 二次通用旋转组合试验 正交试验结果显示:吸风机负压 B 和送料口风速 C 对试验指标蛋壳回收率和蛋膜回收率的影响较为显著,因此取因素 A 和 D 的最优水平,即在壳膜分选筒锥顶角度为  $45^\circ$ , 固体负荷率为 1 000 g/s 的条件下,考虑主要影响因素吸风机负压和送料口风速对试验指标壳回收率和膜回收率的影响,构建二次通用旋转组合试验。

表 2 试验因素水平

Table 2 Level of experimental factors

水平	A 筒顶角度/ $(^\circ)$	B 吸风机负压/Pa	C 送料口风速/ $(m \cdot s^{-1})$	D 固体负荷率/ $(g \cdot s^{-2})$
1	30	100	4	800
2	45	300	6	1 000
3		500	8	1 200

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对表 4 的试验数据进行分析,获得了各个因素对蛋膜回收率和蛋壳回收率的影响。各自的回归方程分别为

$$\eta_m = 90.372\ 355 - 0.017\ 524X_1 + 3.946\ 33X_2 - 0.000\ 021\ 125\ 7X_1^2 - 0.343\ 29X_2^2, \quad (10)$$

$$\eta_k = 91.230\ 139 - 0.005\ 026\ 05X_1 + 3.523\ 43X_2 - 0.001\ 911\ 37X_1X_2 + 0.000\ 002\ 049\ 7X_1^2 - 0.243\ 57X_2^2, \quad (11)$$

式中:

$\eta_m$ ——蛋膜回收率,%;

$\eta_k$ ——蛋壳回收率,%;

$X_1$ ——吸风机负压,Pa;

$X_2$ ——送料口风速,m/s。

对上述二次回归方程进行方差分析和回归系数显著性检验,结果见表 5 和表 6。

表 3 正交试验方案与结果

Table 3 Orthogonal test plan and result analysis

试验号	A	B	C	D	壳回收率/%	膜回收率/%
1	1	1	1	1	98.35	89.76
2	1	1	2	2	98.63	89.99
3	1	1	3	3	98.51	88.87
4	1	2	1	1	97.11	91.14
5	1	2	2	2	97.24	91.64
6	1	2	3	3	96.94	89.43
7	1	3	1	2	96.66	91.96
8	1	3	2	3	96.67	92.48
9	1	3	3	1	96.44	91.58
10	2	1	1	3	98.27	89.50
11	2	1	2	1	98.56	90.94
12	2	1	3	2	98.54	89.05
13	2	2	1	2	97.13	90.92
14	2	2	2	3	97.72	91.36
15	2	2	3	1	97.48	90.33
16	2	3	1	3	96.24	91.67
17	2	3	2	1	96.43	92.16
18	2	3	3	2	96.51	92.87
<hr/>						
	$k_1$	97.39	98.48	97.29	97.40	
壳回收率	$k_2$	97.43	97.27	97.54	97.45	
	$k_3$		96.49	97.40	97.39	
	R	0.04	1.99	0.25	0.06	
	$k_1$	90.72	89.69	90.83	90.99	
膜回收率	$k_2$	90.98	90.80	91.43	91.07	
	$k_3$		92.12	90.36	90.55	
	R	0.26	2.43	1.07	0.52	

表 4 二次通用旋转组合试验安排及结果

Table 4 Arrangement and results of quadratic universal rotary assembly experiment

试验号	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	蛋膜回收率/%	蛋壳回收率/%
1	1	1	1	1	1	1	93.15	96.44
2	1	1	-1	-1	1	1	92.96	96.75
3	1	-1	1	-1	1	1	91.08	97.36
4	1	-1	-1	1	1	1	91.88	98.57
5	1	1.414	0	0	2	0	92.89	96.62
6	1	-1.414	0	0	2	0	91.25	98.84
7	1	0	1.414	0	0	2	91.07	96.47
8	1	0	-1.414	0	0	2	92.02	96.89
9	1	0	0	0	0	0	93.26	97.76
10	1	0	0	0	0	0	92.79	98.03
11	1	0	0	0	0	0	93.43	97.84
12	1	0	0	0	0	0	92.98	97.43
13	1	0	0	0	0	0	93.24	97.37

表 5 蛋膜回收率方差分析<sup>†</sup>

Table 5 Analysis of variance of membrane collecting rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	8.48	5	1.70	14.24	0.001 5***
X <sub>1</sub>	3.74	1	3.74	31.41	0.000 8***
X <sub>2</sub>	0.48	1	0.48	4.01	0.085 4**
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	0.25	1	0.25	2.06	0.194 5
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	1.23	1	1.23	10.31	0.014 8**
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	3.24	1	3.24	27.22	0.001 2***
残差	0.83	7	0.12		
失拟	0.58	3	0.19	3.00	0.158 3
误差	0.26	4	0.06		
总和	9.31	12			

† \*\*\*表示极显著(P<0.01); \*\*表示显著(0.01<P<0.05); \*表示较显著(0.05<P<0.10)。

通过表 5 和表 6 的显著性检验可知,蛋膜和蛋壳的回收率模型都满足 P<0.01,表示模型的因素影响极显著,两个模型的失拟项均不显著(P>0.05),说明模型所拟合的二次回归方程能准确反映吸风机负压和送料口风速与蛋壳回收率和蛋膜回收率之间的关系。

由图 13(a)可知,当送料口风速一定时,吸风机负压越高,蛋膜的回收率越大,当吸风机负压一定时,随着送料口风速的增加,蛋膜回收率先增大后减小。蛋膜回收率减少是由于送料风速过快,会导致较大的蛋膜跟随蛋壳一起绕筒壁螺旋下落,进而影响蛋膜回收率。

由图 13(b)可知,当吸风机负压一定时,随着送料口风速由低到高,蛋壳回收率缓慢减小。送料口风速一定时,随着吸风机负压由低到高,蛋壳的回收率先快速减少

表 6 蛋壳回收率方差分析<sup>†</sup>

Table 6 Analysis of variance of eggshell collecting rate

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	6.62	5	1.32	14.87	0.001 3***
X <sub>1</sub>	4.32	1	4.32	48.54	0.000 2***
X <sub>2</sub>	0.01	1	0.01	0.13	0.727 6
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	0.58	1	0.58	6.49	0.038 3**
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	0.01	1	0.01	0.13	0.729 3
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	1.63	1	1.63	18.33	0.003 7***
残差	0.62	7	0.09		
失拟	0.31	3	0.10	1.32	0.384 2
误差	0.31	4	0.08		
总和	7.24	12			

† \*\*\*表示极显著(P<0.01); \*\*表示显著(0.01<P<0.05); \*表示较显著(0.05<P<0.10)。

后缓慢减少。蛋壳回收率快速减少是由于负压增大到一定数值,会使粒径小的蛋壳被吸入输膜管道,导致壳的回收率快速降低。

4.3.3 参数优化 为了提高蛋膜和蛋壳的回收率,借助 Design-Expert 8.0.6 来优化响应曲面模型。采用主要目标法和惩罚函数法对拟合的回归方程进行参数优化,得出最优的壳回收率与膜回收率的参数组合。

目标函数:  $F(X) = -\eta_k$ ;

性能约束条件:  $G(X) = \eta_m \geq 93$ ;

压力约束条件:  $100 < X_1 < 500$ ;

送料口速度约束条件:  $4 < X_2 < 8$ ;

最优参数组合为:  $X_1 = 336.61, X_2 = 4.64$ ,即吸风机负压 336.61 Pa 和送料口风速 4.64 m/s。最优参数组合



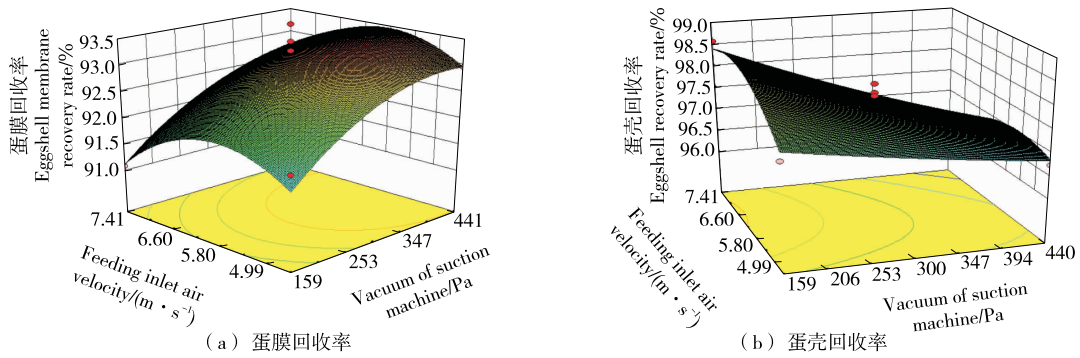


图 13 交互作用影响下的响应曲面

Figure 13 Response surfaces under interaction influence

对应的回收率为  $\eta_m = 93.00\%$ ,  $\eta_k = 97.89\%$ 。

4.3.4 试验与优化验证 依据优化结果,选取正交试验确定的锥筒顶角  $45^\circ$ 、固体负荷率为  $1\ 000\ \text{g/s}$ 、优化后的吸风机负压和送料口风速作为试验条件,做 5 次重复验证实验,壳膜回收率与壳膜回收率分别为  $92.94\%$ 、 $97.90\%$ ,与回归分析优化结果相近,表明优化可信。

## 5 结论

为实现废弃禽蛋壳膜的回收再利用,研究将分离后的蛋壳和蛋膜混合物分选出来,从而实现各自的应用价值。采用旋风分选装置分选获得蛋壳和蛋膜,通过流固耦合仿真和试验研究发现采用优化后的分选装置分选的效果很好。当分选筒直径为  $D$ ,上出口直径为  $0.4D$ ,下出口直径为  $0.5D$  时,蛋壳膜捕捉率更优。筒顶角度、吸风机负压、送料口风速、固体负荷率是影响蛋壳和蛋膜回收率的主要因素,锥形筒顶角度为  $45^\circ$ ,固体负荷率为  $1\ 000\ \text{g/s}$ ,送料口速度为  $4.64\ \text{m/s}$ 、吸风机负压为  $336.61\ \text{Pa}$  时,蛋膜回收率为  $92.94\%$ ,蛋壳回收率可达  $97.90\%$ ,分选效果最好。由于设计的分选装置存在消耗功率较大的缺点,所以拟通过改变送料方式降低功率损耗,从而降低分选成本。

## 参考文献

- [1] 李锁强. 粮食生产再获丰收生猪生产较快恢复[N]. 中国信息报, 2021-01-20(2).
- [2] LI Suo-qiang. Grain production reaped a bumper harvest and pig production recovered quickly[N]. China Information News, 2021-01-20(2).
- [2] 李彦坡, 马美湖. 蛋壳及蛋壳膜的研究和利用[J]. 粮食与食品工业, 2008(5): 27-31.
- [3] LI Yan-po, MA Mei-hu. Investigation and exploitation of eggshell and eggshell membrane[J]. Cereal & Food Industry, 2008(5): 27-31.
- [3] 司伟达, 王旭清, 韩兆鹏, 等. 鸡蛋壳资源的再开发及研究进展[J]. 农产品加工, 2014(1): 36-37.
- [4] SI Wei-da, WANG Xu-qing, HAN Zhao-peng, et al. Redevelopment and research progress of eggshell resources[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014(1): 36-37.
- [4] MATEJ B. Eggshell membrane biomaterial as a platform for applications in materials science[J]. Acta Biomaterialia, 2014, 10(9): 3 827-3 835.
- [5] 王胜娥, 何洁, 袁红雁, 等. 酶生物传感器固定化酶载体的研究[J]. 化学传感器, 2004, 24(4): 30-35.
- [5] WANG Sheng-e, HE Jie, YUAN Hong-yan, et al. Carrier material of enzyme immobilization for biosensor[J]. Chemical Sensors, 2004, 24(4): 30-35.
- [6] 王淑珍, 萧炜, 陈亮, 等. 蛋壳膜美容保健奶研制及其营养分析[J]. 食品工业, 2004(6): 41-42.
- [6] WANG Sshu-zhen, XIAO Wei, CHEN Liang, et al. Development and nutritional analysis of eggshell membrane beauty and health care milk[J]. The Food Industry, 2004(6): 41-42.
- [7] JOSEPH H Macneil. Method and apparatus for separating a protein membrane and shell material in waste eggshells: US6176376B1[P]. 2001-01-23.
- [8] LEVI N. Eggshell membrane separation process: US00844884B.2[P]. 2013-05-28.
- [9] MICHAEL D, VLADIMIR V. Eggshell membrane separation: US008418943B.2[P]. 2013-04-16.
- [10] 迟媛, 王勇, 任洁, 等. 鸡蛋壳膜分离装置设计及试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(8): 90-99.
- [10] CHI Yuan, WANG Yong, REN Jie, et al. Design and experimental study on eggshell membrane separation device [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(8): 90-99.
- [11] 迟媛, 王勇, 李蒙福, 等. 鸡蛋壳膜机械搅拌分离影响因素研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 359-368.
- [11] CHI Yuan, WANG Yong, LI Meng-fu, et al. Influence factors of separating egg membrane from eggshell by mechanical stirring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 359-368.
- [12] 伊文静, 刘师多, 师清翔, 等. 旋风分离清选系统结构及工况对清选性能的影响[J]. 农机化研究, 2013, 35(5): 170-174.
- [12] YI W J, LIU S D, SHI Q X, et al. Influence of cleaning performance affected by the structure of cyclone separating cleaning system and working condition[J]. Journal of Agricultural Mechan-

- zation Research, 2013, 35(5): 170-174.
- [13] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 541.  
Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences. Agricultural machinery design manual[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007: 541.
- [14] 万星宇, 舒彩霞, 徐阳, 等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 27-35.  
WAN Xing-yu, SHU Cai-xia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(14): 27-35.
- [15] 赵学观, 徐丽明, 高连兴, 等. 基于 Fluent 的大豆脱粒机旋风分离器模拟与优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 80-87.  
XU Xue-guan, XU Li-ming, GAO Lian-xing. Simulation of soybean thresher cyclone separating and cleaning system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(S1): 80-87.
- [16] 张建平, 徐达成, 车鹏, 等. 锥度对旋风除尘器主要性能的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2 507-2 512.  
ZHANG Jian-ping, XU Da-cheng, CHE Peng, et al. Influences of taper on main performances of cyclone separator [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(5): 2 507-2 512.
- [17] 刘正怀, 郑一平, 王志明, 等. 微型稻麦联合收获机气流式清选装置研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 102-108.  
LIU Zheng-huai, ZHENG Yi-ping, WANG Zhi-ming, et al. Design on air-flowing cleaning unit of micro rice-wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 102-108.
- [18] 刘霞, 杨先海, 李倩. 基于 Fluent 废塑料薄膜旋风分离过程的研究[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(1): 38-41.  
LIU Xia, YANG Xian-hai, LI Qian. Research on waste plastic membrane separation in the cyclone based on fluent[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2016, 42(1): 38-41.
- [19] 马秋成, 雷林韬, 卢安舸, 等. 基于 CFD-DEM 耦合法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 Qiu-cheng, LEI Lin-ao, LU An-ke, et al. Simulation optimization and test of pneumatic separating device for lotus seed shell and kernel based on CFD-DEM coupling method[J]. Food & Machinery, 2016, 32(12): 87-91.
- [20] SAFIKHANI H, ZAMANI J, MUSA M. Numerical study of flow field in new design cyclone separators with one, two and three tangential inlets [J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(3): 611-622.
- [21] GYUN Mok J, JONG Chun P. CFD simulation of air-particle flow for predicting the collection efficiency of a cyclone separator in mud handling system[J]. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2019, 33(1): 42-49.
- [22] BALESTRIN E, DECKER R K, NORILER D, et al. An alternative for the collection of small particles in cyclones: Experimental analysis and CFD modeling[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 184: 54-65.
- [23] 高雪琦, 金有海, 许伟伟, 等. 结构参数对小型旋风分离器分离性能的影响[J]. 中国粉体技术, 2017, 23(2): 1-5.  
GAO Xue-qi, JIN You-hai, XU Wei-wei, et al. Numerical study on separation performance of small cyclone separator with different structure parameters[J]. China Powder Science and Technology, 2017, 23(2): 1-5.
- [24] 迟媛, 李蒙福, 杨月斌, 等. 禽蛋壳膜旋风式气流清选装置研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 339-350.  
CHI Yuan, LI Meng-fu, YANG Yue-bin, et al. Cyclone device collecting eggshell membranes and eggshells separately from eggshells mixture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 339-350.
- [25] 李蒙福. 车载移动式禽蛋壳膜旋风气流清选装置研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019: 57.  
LI Meng-fu. Study on vehicle-mounted mobile eggshell membrane cyclone airflow separation device [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019: 57.

(上接第 84 页)

- [12] 陈梦, 范蕾, 蒋凯亚, 等. 高效液相色谱法测定牛奶中四环素类兽药残留量的不确定度评定[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(15): 5 088-5 093.  
CHENG Meng, FAN Lei, JIANG Kai-ya, et al. Uncertainty evaluation for the determination of tetracycline drug residues in milk by high performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2020, 11(15): 5 088-5 093.
- [13] 国家市场监督管理总局总局. 食用油脂中辣椒素的测定: BJS 201801[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 1-4.  
State Administration of Market Supervision. Determination of capsaicin in edible oils and fats: BJS 201801[S]. Beijing: China Standards Press, 2018: 1-4.
- [14] 韩德娟, 高艾英, 高大山. 液相色谱串联质谱内标法测定猪肉中沙丁胺醇及莱克多巴胺残留量的不确定度分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(1): 223-230.  
HAN De-juan, GAO Ai-ying, GAO Da-shan. Uncertainty evaluation for the determination of salbutamol and ractopamine residues in pork by liquid chromatography with tandem-mass spectrometric internal standard method[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(1): 223-230.
- [15] 袁河, 肖晓义, 康志娇, 等. 槟榔中槟榔碱含量的不确定度评定[J]. 农产品加工, 2019(2): 62-65.  
YUAN He, XIAO Xiao-yi, KANG Zhi-jiao, et al. The evaluation of uncertainty of arecoline content in areca catechu L.[J]. Farm Products Processing, 2019(2): 62-65.