

气吸式蛋壳膜多级清选装置研究

迟媛¹ 王明久¹ 陈博超¹ 林萌萌¹ 迟玉杰²

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

摘要: 针对目前研究的蛋壳膜清选装置存在蛋膜清洁率低、功耗大、结构复杂等问题, 设计了气吸式蛋壳膜多级清选装置。在分析颗粒碰撞对蛋壳、膜颗粒运动影响的基础上, 采用 CFD-DEM 耦合仿真研究在清选室进口挡板数量不同的情况下, 蛋壳、膜的运动轨迹和清选装置内部流场特性, 仿真结果表明: 随着进气口挡板数量的增多, 清选室内错流风区的气流速度增大、蛋膜损失率下降, 清选室下出口无涡流产生, 避免了因气流阻碍蛋壳下落而导致蛋膜清洁率下降。以喂入量和吸风机连接接口风速为试验因素、以蛋膜损失率和清洁率为评价指标进行了两因素三水平正交试验, 并进行了参数优化和试验验证。试验得到: 当喂入量为 200 g/s、吸风机连接接口风速为 5.5 m/s 时, 蛋膜损失率为 9.4%, 蛋膜清洁率为 96.3%, 吸风机功率为 330 W。

关键词: 蛋壳膜; 气吸式; 多级清选; 数值模拟

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)06-0396-10 OSID: 

Multi-aspirator Device for Collecting Eggshells and Eggshell Membranes Separately from Eggshells Mixture

CHI Yuan¹ WANG Mingjiu¹ CHEN Bochao¹ LIN Mengmeng¹ CHI Yujie²

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

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

Abstract: Aiming at the problems of low cleaning rate of eggshell membranes, high energy loss and complex structure of device for collecting the eggshell membranes and eggshells in the current research, multi-aspirator device was designed. The influence of particle collision on the movement of eggshells and eggshell membranes particles was analyzed. Under the condition of different number of inlet baffles in the cleaning chamber, the motion trajectories of eggshells and eggshell membranes and the characteristics of flow field inside the multi-aspirator device were analyzed by using the method of CFD-DEM coupling. The analysis results showed that with the increase of air inlet baffles' numbers, the airflow velocity of cross flow area in the cleaning chamber was increased, and the loss rate of eggshell membranes was decreased. There was no vortex in the outlet of the cleaning chamber, so as that the cleaning rate of eggshell membranes decreases caused by airflow hindering the falling eggshells was avoided. The orthogonal test method of two factors and three levels was applied, feeding flow rate and airflow velocity at the interface of the sucking fan were taken as test factors, and the loss rate and the cleaning rate of eggshell membranes were taken as evaluation indexes. The parameters of influencing factors were optimized and verified by tests. The results of tests were that when the feeding flow rate was 200 g/s, the airflow velocity at the interface of the sucking fan was 5.5 m/s, the loss rate of eggshell membranes was 9.4%, the cleaning rate of eggshell membranes was 96.3%, and the power of sucking fan was 330 W. The results could provide foundations for the application of multi-aspirator device for collecting eggshells and eggshell membranes.

Key words: eggshell membranes; aspirator; multiple collecting separately; numerical simulation

收稿日期: 2022-03-04 修回日期: 2022-04-15
基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2019E011)、黑龙江省博士后科研启动基金二等项目(LBH-Q18012)和国家蛋鸡产业技术体系项目(CARS-40-K25)
作者简介: 迟媛(1974—),女,副教授,主要从事流体机械研究,E-mail: cy207@126.com
通信作者: 迟玉杰(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事蛋品科学与技术研究,E-mail: yjchi323@126.com

0 引言

2021 年我国禽蛋产量为 3 409 万 t,按照蛋壳质量占禽蛋质量的 11% 换算^[1],将会产生 375 万 t 废弃的蛋壳,而蛋壳和蛋膜在食品、医药、轻化工业、饲养业等领域有很大的利用价值^[2-5]。清选是将分离后的蛋壳和蛋膜混合物分开并实现分别收集。文献[6]设计了之字形重力空气分级机,在气流和重力的共同作用下,葵花籽壳较轻向上运动,葵花籽粒较重沿锯齿形通道壁下落,最终使葵花籽壳与籽粒分开并分别被收集。文献[7]对水平流型分级机进行分析,粗、细颗粒混合物在分级装置内受到了水平气流的作用,使其在重力和曳力的共同作用下呈弧线下落,最后粗、细颗粒分别落在不同位置上并被收集。文献[8]利用振动筛振动蛋壳、膜混合物,轻的、大的蛋膜留在上部皮带上,重的、小的蛋壳落到底部皮带上,再通过皮带传送到各自的收集袋里。文献[9]设计了旋风式气流清选装置,利用旋风分离器的流场特性,使漂浮速度大的蛋壳沿着筒壁螺旋向下运动,漂浮速度小的蛋膜沿中间柱状区域向上运动,实现了蛋壳和蛋膜的清选。目前研究的蛋壳膜清选装置存在蛋膜清洁率低、功耗大、结构复杂等问题。

本文设计气吸式蛋壳膜多级清选装置,通过计算流体力学-数字高程模型(CFD-DEM)耦合的方法对气吸式多级清选装置进行仿真,研究清选室进口挡板的位置、数量等结构参数对清选室流场特性、蛋壳膜轨迹的影响,并采用正交试验和综合评价相结合的方法,探究喂入量和吸风机接口风速对蛋膜损失率和清洁率的影响,以期对蛋壳膜清选提供理论依据和技术参考。

1 气吸式多级清选装置结构与原理

1.1 结构

气吸式蛋壳膜多级清选装置的结构示意图如图 1 所示,其主要由清选室、负压室、进口挡板、内壁挡板、内壁、入料口、进气口、下出口、吸风机接口组成,入料口与负压室相邻可减小涡流对下落的蛋壳、膜混合物的阻碍作用,下出口与空气相通,可消除出口的涡流,有利于蛋壳的下落。

1.2 工作原理

蛋壳、膜混合物从入料口下落到气吸式多级清选装置的倾斜挡板上并沿挡板向下滑落,最终会滑落到挡板的下边缘,在蛋壳、膜向下滑落的过程中蛋膜颗粒会被错流风携带到负压室。但在清选过程中蛋壳、膜颗粒间存在相互作用,导致蛋壳、膜在第 1

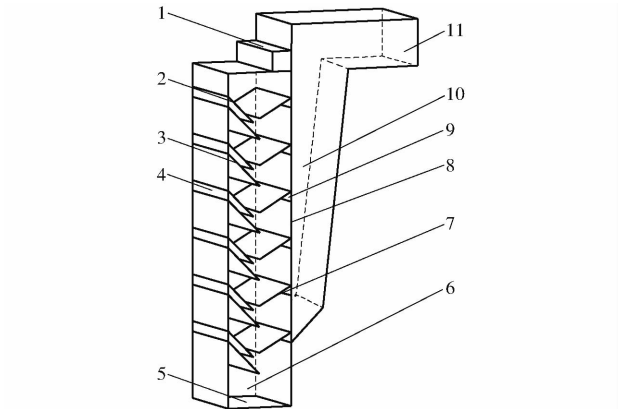


图 1 气吸式多级清选装置结构示意图

Fig. 1 Structure sketches of multi-aspirator device

1. 入料口 2. 进气口上挡板 3. 进气口下挡板 4. 进气口 5. 下出口 6. 清选室 7. 内壁挡板 8. 内壁 9. 内壁出气口 10. 负压室 11. 吸风机连接口

次经过错流风区后不能完全分开,即部分蛋膜会随着蛋壳继续向下运动。由于清选装置内的挡板形成了 6 个错流风区域,所以继续向下运动的蛋壳、膜混合物会受到错流风的多次作用,进而使蛋膜从清选室运动到负压室并随气流一同经过清选装置与吸风机接口后进入吸风机,最后蛋膜从吸风机的排气口排出并被收集,蛋壳在清选装置下出口被收集。

1.3 结构参数

清选装置进气口和内壁出气口尺寸会对清选装置内气流流场分布产生影响,是清选装置的关键结构参数。吸风机接口处气流流量 Q 计算公式为^[10]

$$Q = \frac{s\phi}{\delta\rho} \tag{1}$$

式中 s ——蛋壳、膜混合物的喂入量,取 0.05 ~ 0.50 kg/s

ϕ ——蛋膜颗粒占混合物质量分数,取 3.043%^[11]

δ ——携带蛋膜颗粒气流中蛋膜颗粒质量分数,取 20%

ρ ——空气密度,取 1.2 kg/m³

由式(1)得 0.006 4 m³/s < Q < 0.064 0 m³/s,因为清选装置有 6 个内壁出气口,则内壁出气口处气流流量 $Q_1 = \frac{Q}{6}$,内壁出气口处气流速度 v_0 为

$$v_0 = \frac{Q_1}{lb} \tag{2}$$

式中 l ——内壁出气口长度,mm

b ——内壁出气口宽度,mm

通过试验测得蛋壳、膜混合物中蛋壳颗粒粒径为 0.4 ~ 2.4 mm,蛋膜颗粒粒径为 1.7 ~ 4.0 mm,此

粒径范围内蛋壳漂浮速度为 3.7 ~ 4.3 m/s, 蛋膜漂浮速度为 1.1 ~ 1.8 m/s。内壁出气口处气流速度应大于蛋膜颗粒漂浮速度, 小于蛋壳颗粒漂浮速度, 即 $1.8\text{ m/s} < v_0 < 3.7\text{ m/s}$ 。内壁出气口长度 l 与清选装置宽度相同, 为 150.0 mm, 则 $1.9\text{ mm} < b < 3.9\text{ mm}$ 。除第一和第六错流风区外, 进气口流量与内壁出气口流量相同, 为保证错流风区气流速度的均匀性, 应使进气口尺寸与内壁出气口尺寸相同。气吸式蛋壳膜多级清选装置主要参数如表 1 所示。

表 1 气吸式蛋壳膜多级清选装置主要参数
Tab.1 Main parameters of multi-aspirator device for collecting eggshells and eggshell membranes

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	300.0×150.0×570.0
进气口上挡板尺寸(长×宽)/(mm×mm)	150.0×56.0
进气口下挡板尺寸(长×宽)/(mm×mm)	150.0×70.7
内壁挡板尺寸(长×宽)/(mm×mm)	150.0×58.3
进气口上、下挡板倾斜角/(°)	30
内壁挡板倾斜角/(°)	45
进气口尺寸(长×宽)/(mm×mm)	150.0×15.0
吸风机连接口尺寸(长×宽)/(mm×mm)	150.0×70.0
内壁出气口尺寸(长×宽)/(mm×mm)	150.0×15.0
下出口尺寸(长×宽)/(mm×mm)	150.0×100.0

1.4 蛋壳、膜颗粒碰撞分析

采用速度矢量分解的方法对三维颗粒碰撞进行建模, 蛋壳膜颗粒碰撞示意图如图 2 所示, 图中 v_1 为蛋膜颗粒碰撞时速度, v_2 为蛋壳颗粒碰撞时速度。颗粒碰撞时碰撞方向具有不确定性, 因此以碰撞时的切平面为基础建立局部坐标系 $ouvw$, 便于碰撞时颗粒的速度分析, 但分析碰撞后颗粒速度对清选效果的影响是在全局坐标系 $oxyz$ 中进行的, 所以利用欧拉角将局部坐标系中的速度转化为全局坐标系中的速度, 转换矩阵为

$$\begin{bmatrix} v_{1,x0} \\ v_{1,y0} \\ v_{1,z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \\ \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\beta & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{1,u0} \\ v_{1,v0} \\ v_{1,w0} \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix} v_{2,x0} \\ v_{2,y0} \\ v_{2,z0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma \\ \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\beta & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{2,u0} \\ v_{2,v0} \\ v_{2,w0} \end{bmatrix} \tag{4}$$

- 式中 α —— xy 平面与 uv 平面的交线与 x 轴的夹角, (°)
 β —— z 轴与 w 轴的夹角, (°)
 γ —— xy 平面与 uv 平面的交线与 v 轴的夹角, (°)
 θ ——两颗粒在 uv 平面上相对速度与 v 轴夹角, (°)
 $v_{1,x0}, v_{2,x0}$ ——碰撞时蛋膜、蛋壳颗粒在 x 轴上的速度, m/s
 $v_{1,y0}, v_{2,y0}$ ——碰撞时蛋膜、蛋壳颗粒在 y 轴上的速度, m/s
 $v_{1,z0}, v_{2,z0}$ ——碰撞时蛋膜、蛋壳颗粒在 z 轴上的速度, m/s
 $v_{1,u0}, v_{2,u0}$ ——碰撞时蛋膜、蛋壳颗粒在 u 轴上的速度, m/s
 $v_{1,v0}, v_{2,v0}$ ——碰撞时蛋膜、蛋壳颗粒在 v 轴上的速度, m/s
 $v_{1,w0}, v_{2,w0}$ ——碰撞时蛋膜、蛋壳颗粒在 w 轴上的速度, m/s

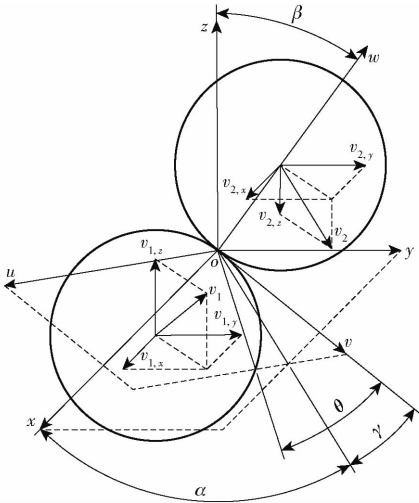


图 2 蛋壳膜颗粒碰撞示意图
Fig. 2 Diagram of collision between eggshells and eggshell membranes particles

根据动量守恒和角动量守恒定律可获得碰撞后蛋膜、蛋壳颗粒在全局坐标系中 z 轴上的速度为

$$v_{1,z} = v_{1,z0} - \frac{1 + e_1}{1 + \frac{m_1}{m_2}} v_3 \tag{5}$$

$$v_{2,z} = v_{2,z0} + \frac{(1 + e_2) \frac{m_1}{m_2}}{1 + \frac{m_1}{m_2}} v_3 \tag{6}$$

- 式中 m_1 ——蛋膜颗粒质量, g
 m_2 ——蛋壳颗粒质量, g
 v_3 ——两颗粒碰撞时在 z 轴上蛋膜颗粒相对

于蛋壳颗粒的速度, m/s

e_1 ——蛋膜碰撞恢复系数

e_2 ——蛋壳碰撞恢复系数

由于蛋壳、蛋膜颗粒的碰撞恢复系数为定值, 故根据式(5)、(6)可知, 影响蛋壳、蛋膜颗粒碰撞后速度的因素主要为 $\frac{m_1}{m_2}$ 和 v_3 。由于 $v_{1,z}$ 越大蛋膜颗粒越易向上运动, 越有利于蛋膜颗粒运动到负压室, 根据式(5)可知应增大蛋膜颗粒与蛋壳颗粒的质量比; 蛋壳颗粒碰撞后在 z 轴上的速度越小, 越有利于蛋壳颗粒向下运动, 对式(6)求导可知 $v_{2,z}$ 是自变量 $\frac{m_1}{m_2}$ 的增函数, 故应减小蛋膜颗粒与蛋壳颗粒的质量比。由于 $\frac{m_1}{m_2}$ 对 $v_{1,z}$ 和 $v_{2,z}$ 的影响规律不同, 所以对 $v_{1,z}$ 、 $v_{2,z}$

中含有 $\frac{m_1}{m_2}$ 的项进行比较, 由项系数比较可知^[12], $\frac{m_1}{m_2}$ 对 $v_{2,z}$ 的影响更大, 故应适当减小蛋膜颗粒与蛋壳颗粒的质量比。由式(5)、(6)可知 v_3 对 $v_{1,z}$ 和 $v_{2,z}$ 的影响规律相同, v_3 越小越有利于清选。综上所述, 适当减小蛋膜颗粒与蛋壳颗粒的质量比, 减小蛋壳、膜颗粒碰撞时在 z 轴上的相对速度, 有利于蛋膜颗粒向负压室运动、蛋壳颗粒向下运动, 提高清选效果。

2 清选过程数值模拟

2.1 清选装置网格划分

使用 CATIAV5R21 软件对气吸式多级清选装置进行三维建模, 然后将模型导入到 ICEM 19.2 软件中进行网格划分, 采用六面体结构网格并划分边界层, 网格总数为 5 万, 网格质量在 0.55 以上, 内角角度在 32° 以上, 网格质量满足要求。

2.2 仿真模型及参数设定

气吸式多级清选装置涉及气体-固体颗粒两相流动, 因此使用 CFD-DEM 耦合方法进行仿真, 其中气相由 Fluent 19.2 求解, 颗粒相由 EDEM 2018 求解, 耦合模型包括 Lagrangian 模型和 Eulerian 模型, 为提高计算精度采用 Fluent 19.2 中的 Eulerian 多相流模型^[13-16]。因为在清选过程中蛋壳、膜颗粒之间会发生相互作用, 且蛋壳、膜颗粒间相互作用具有随机性, 所以选择基于 Eulerian-Lagrangian 模型的离散元方法 (CFD-DEM)。通过预试验仿真提取多次数值模拟后蛋膜损失率和清洁率数据, 最终确定吸风机连接口风速为 4.5、5.5、6.5 m/s , 3 种吸风机连接口风速时颗粒运动规律相同, 故下文取速度平均值 5.5 m/s 作为清选装置数值模拟时的吸风机连接口风速。

Fluent 采用 Pressure-Based 求解器, 湍流模型设置为 RNG $k-\varepsilon$ 模型并选择标准近壁面函数。Fluent 软件中边界条件设置: 入料口、下出口和进气口设置为压力进口, 表压为 0 Pa; 吸风机连接口设置为速度出口, 风速为 5.5 m/s ; 进气口水力直径为 27.0 mm, 入料口水力直径为 50.0 mm, 下出口水力直径为 120.0 mm, 吸风机连接口水力直径为 96.0 mm。EDEM 软件中接触模型选用 Hertz-Mindlin 模型, 入料口类型设置为 virtual, 进气口和吸风机连接口类型设置为 physical, 蛋膜密度为 409.0 kg/m^3 , 蛋壳密度为 2300.0 kg/m^3 , 蛋膜弹性模量为 328.95 MPa, 蛋壳弹性模量为 40.12 GPa^[17], 重力加速度设置为 9.81 m/s^2 , 仿真步长为 Rayleigh time step 的 23%。

2.3 模型无关性论证

由于本试验中粉碎后的蛋壳、膜呈不规则片状且其厚度很小, 所以用 EDEM 软件对蛋壳、膜进行填充建模时, 一个蛋壳、膜颗粒需要由几百个小直径的球体颗粒填充组成^[9], 导致耦合仿真时计算速度大大降低、颗粒工厂产生的颗粒数量较少, 进而使蛋壳、膜颗粒与蛋壳、蛋膜、壁面之间的相互作用减少, 导致蛋膜损失率的数值模拟结果低于实际值。文献[18-21]利用斯托克斯直径公式将不规则颗粒转化为球形颗粒。本文拟采用斯托克斯直径公式将不规则颗粒转化成与颗粒密度相同、沉降速度相同的球体, 则可以增加颗粒工厂产生的颗粒数量, 进而增加蛋壳、膜颗粒与蛋壳、蛋膜、壁面之间的相互作用, 减小数值模拟误差, 斯托克斯直径公式为^[22]

$$d_p = \sqrt{\frac{18v_{st}\mu}{(\rho_p - \rho)g}}$$

(7)

式中 d_p ——斯托克斯直径, mm
 v_{st} ——颗粒漂浮速度, m/s
 μ ——空气动力粘度, 取 $1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 g ——重力加速度, 取 9.81 m/s^2
 ρ_p ——颗粒密度

将上文蛋壳、膜颗粒的粒径及其漂浮速度代入式(7)可得到转化成球体的蛋壳、膜颗粒直径, 蛋壳颗粒直径为 0.2 mm, 蛋膜颗粒直径为 0.3 ~ 0.4 mm。在相同初始条件下采用蛋壳、膜填充模型和斯托克斯球体模型进行数值模拟, 获得两种模型的蛋壳、膜运动规律, 如图 3 所示, 两种模型的速度、运动轨迹变化趋势十分相近。如图 4 所示, 采用高速摄像提取颗粒的实际运动轨迹与用斯托克斯模型仿真获得的颗粒运动轨迹变化趋势相似。由以上分析可知斯托克斯球体模型能更加真实地模拟

蛋壳、膜的颗粒运动,所以选用斯托克斯球体模型进行数值模拟。

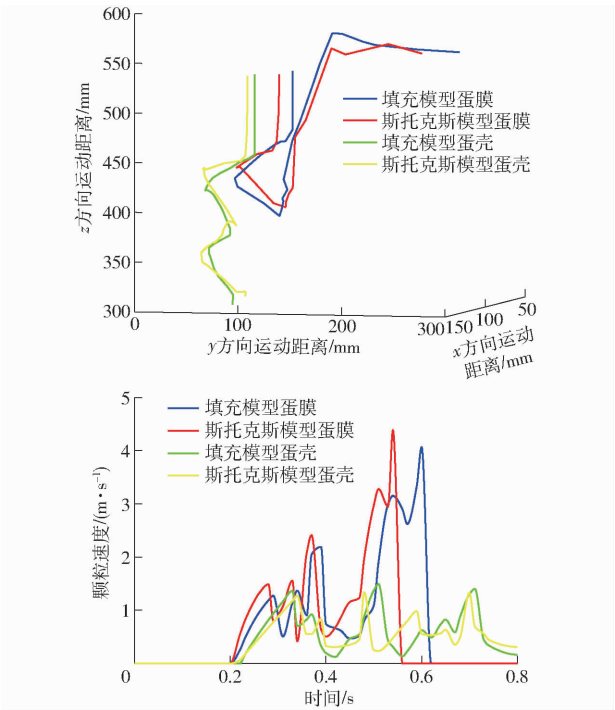


图3 两种模型的蛋壳、膜运动规律

Fig.3 Eggshells and eggshell membranes movement diagrams of two models

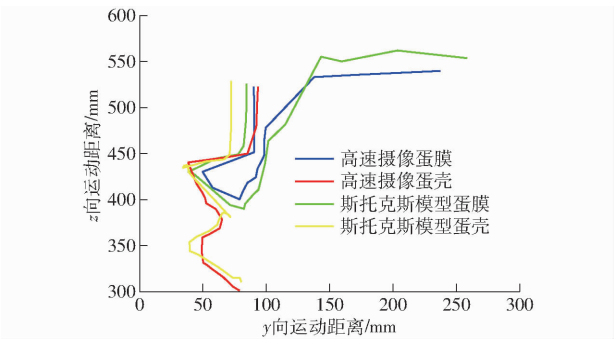


图4 高速摄像提取的颗粒轨迹与用斯托克斯模型仿真颗粒轨迹对比

Fig.4 Particle trajectories extracted by high-speed camera compared with those simulated by Stokes model

2.4 仿真结果与分析

2.4.1 进气口有无挡板对清选性能的影响

图5为进气口没有挡板时蛋壳、膜的运动轨迹,在清选过程中蛋壳、膜主要受到重力、曳力和支持力的作用,重力起到使蛋壳、膜向下运动的作用,曳力起到推动蛋壳、膜沿气流方向运动的作用,支持力是蛋壳、膜落在挡板上时受到挡板的作用力。蛋壳下落时与内壁挡板无接触,则蛋壳在清选过程中只受到重力和曳力的作用且重力起主要作用,所以大部分蛋壳以弧形轨迹直接运动到清选室下出口,少量的蛋壳与清选室的壁面碰撞后落在内壁挡板上,然后再向下滑动,最后在清选装置的下出口被收集;直

径为0.3 mm的蛋膜下落时与内壁挡板无接触且蛋膜密度较小,则蛋膜在清选过程中只受到重力和曳力的作用且曳力起主要作用,所以蛋膜随气流从清选室运动到负压室并进入吸风机而被收集,但直径为0.4 mm的蛋膜下落时受到的曳力较小,导致蛋膜落在内壁挡板和内壁的交接处,蛋膜在重力、曳力、支持力的作用下达到平衡状态,蛋膜不能从清选室运动到负压室,因此蛋膜损失严重。

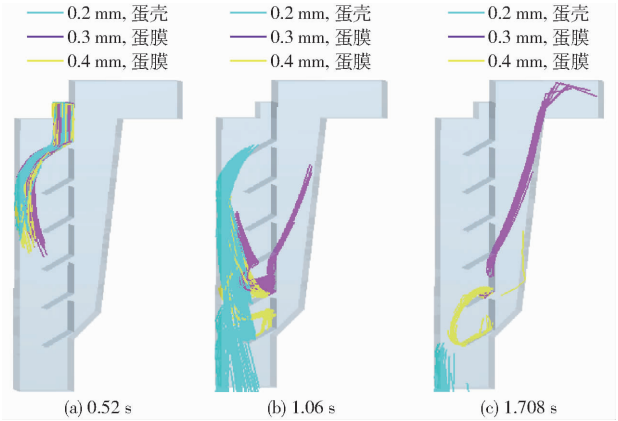


图5 进气口无挡板时蛋壳、膜随时间变化的轨迹

Fig.5 Trajectories of eggshells and eggshell membranes with time when air inlet without baffles

图6为进气口双挡板时蛋壳、膜的运动轨迹,通过进气口挡板和内壁挡板对蛋壳、膜的交替作用,使蛋壳、膜在清选室的运动时间变长,每个错流风区的气流对蛋壳、膜的作用时间也相应延长,从而减小了蛋膜的损失率。由于蛋壳在竖直向上方向的速度分量小于蛋壳的漂浮速度,故蛋壳在整个过程中曲折下落;在错流风区气流的作用下,蛋膜具有水平向右和竖直向上的速度分量且竖直向上的速度分量大于蛋膜的漂浮速度,故蛋膜可在错流风区从清选室运动到负压室,但由于颗粒间存在相互作用,向下运动的蛋壳对蛋膜的向上运动产生一定的阻碍作用,导致少部分直径为0.3 mm和0.4 mm的蛋膜不能

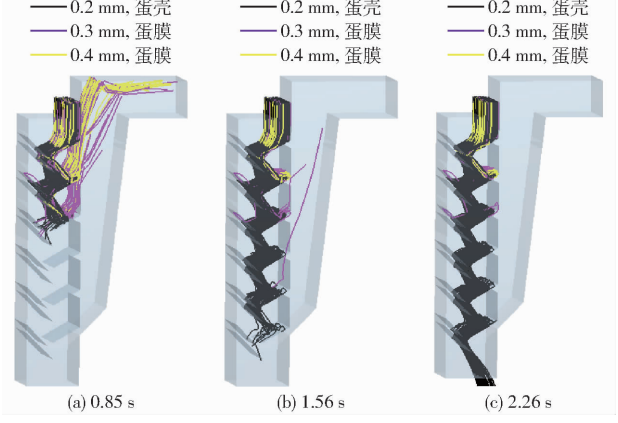


图6 进气口双挡板时蛋壳、膜随时间变化的轨迹

Fig.6 Trajectories of eggshells and eggshell membranes with time when air inlet with double baffles

在第 1 次经过错流风区时从清选室运动到负压室，即少部分蛋膜随蛋壳一起向下运动，由于气吸式多级清选装置具有 6 个错流风区，未进入负压室的部分蛋膜可进行多次清选，从而降低蛋膜损失率。

2.4.2 进气口挡板位置对清选性能的影响

进气口单挡板时，空气也会从进气口进入清选室并起到清选作用，且清选装置结构相对简单一些，为探究进口挡板数量与挡板位置对清选装置内流场特性与蛋膜损失率和清洁率的影响，对采用进气口下挡板、进气口上挡板和进气口双挡板的清选室的流场进行数值模拟。

图 7 为 3 种情况下清选装置内蛋壳和蛋膜的运动轨迹，图 8 为 3 种情况下清选装置的对称面（由图 1 可知）的速度云图，从图 7、8 可知，清选室下出口均无涡流产生，避免了因气流阻碍蛋壳下落而导致蛋膜清洁率下降，当采用进气口下挡板和双挡板时，在错流风区的气流速度分布较有层次，当采用进气口上挡板时，在错流风区的气流速度分布较为混乱。结合图 7、8 分析如下：当采用进气口下挡板时，如图 7a 和图 8a 所示，空气进入清选室没有受到上挡板的阻碍作用，导致气流扩散，但气流仍沿着进气口挡板向下运动，当气流运动到内壁挡板下边缘处时，由于进气口挡板与内壁挡板倾斜角度不同，气流运动方向改变，即气流沿内壁挡板向上运动，但气流速度较小无法使蛋膜从清选室运动到负压室。当采用进气口上挡板时，如图 7b 和图 8b 所示，空气进入清选室时受到上挡板的阻碍作用，增加了气流沿上挡板向下运动的速度。由于相邻进气口上挡板之间的空气会与沿进气口上挡板向下运动的气流相互作用，在进气口上挡板的下边缘处形成较强的涡流，进而使沿内壁挡板向上运动的气流速度下降，即气流无法使部分直径为 0.4 mm 的蛋膜从清选室运动到

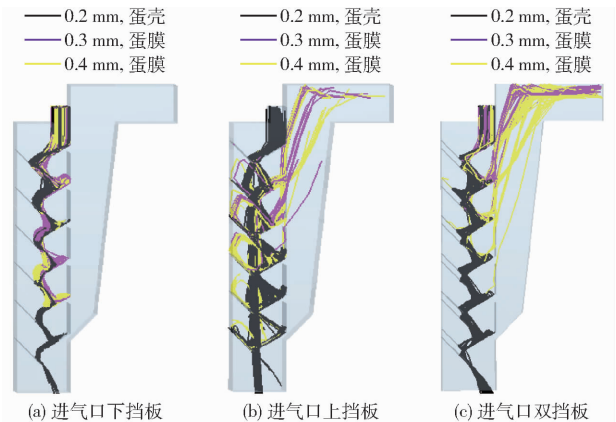


图 7 进气口采用下挡板、上挡板和双挡板的蛋壳、膜轨迹
Fig. 7 Trajectories of eggshells and eggshell membranes when under baffle, upper baffle and double baffles were used for air inlet respectively

负压室。当采用进气口双挡板时，如图 7c 和图 8c 所示，空气沿着进气口上下挡板之间的空隙进入清选室，当气流运动到进气口挡板下边缘处时，因为进入清选室的气流速度与进口挡板周围空气的流速差值较小，所以在进气口挡板下边缘处形成的涡流较弱，进而使沿内壁挡板向上运动的气流速度较大且大于直径为 0.4 mm 的蛋膜的漂浮速度，有利于使蛋膜从清选室运动到负压室。

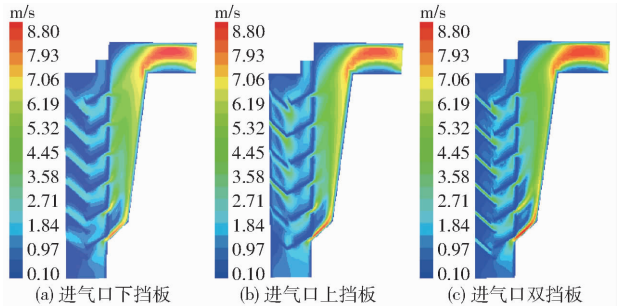


图 8 进气口采用下挡板、上挡板和双挡板时清选装置在对称面的速度云图
Fig. 8 Velocity diagrams of multi-aspirator device in symmetry plane when under baffle, upper baffle and double baffles were used for air inlet respectively

3 清选试验

3.1 试验条件

试验使用东北农业大学提供的海兰褐鸡蛋壳。试验仪器包括：自行研制的气吸式蛋壳膜多级清选装置、雷诺 LR-ZJB 型手持式风速仪、台达 VFD-M 型变频器、JFSD-100-II 型粉碎机、沐美 M600TB-B 型电子天平、筛网、自行研制的旋风式气流清选装置^[9]。气吸式蛋壳膜多级清选装置如图 9 所示。



图 9 试验装置
Fig. 9 Test device

3.2 试验方法

试验材料制备：先将海兰褐鸡蛋壳进行清洗、干

燥、粉碎处理,得到分离的蛋壳和蛋膜混合物,然后使用课题组研制的旋风式气流清选装置对其进行清选,调节分选速度使其在蛋膜的漂浮速度范围内,以获得纯净蛋膜,调节分选速度使其在蛋壳的漂浮速度范围内,以获得纯净蛋壳,蛋膜与蛋壳按质量比1:31.86进行混合^[11],作为试验材料。

气吸式蛋壳膜多级清选装置试验步骤:使用变频器调节风机转速,进而调节吸风机连接口处的风速,然后将按质量比配好的蛋壳、膜混合物从气吸式多级清选装置的入料口喂入,在吸风机排气口收集蛋膜,在清选室下出口收集蛋壳。收集到的蛋膜中含有极少量的蛋壳,将蛋膜倒入含有浓度为3 mol/L盐酸的烧杯中,使盐酸与蛋壳充分反应,反应后烧杯中只留下蛋膜,蛋膜干燥后称量,得到蛋膜的质量,而蛋壳的质量即为反应前后的蛋膜的质量差。蛋膜的损失率 Y_1 和清洁率 Y_2 计算公式分别为^[23]

$$Y_1 = \frac{m_4 - m_3}{m_4} \times 100\%$$

(8)

$$Y_2 = \frac{m_3}{m_3 + m_5} \times 100\%$$

(9)

式中 m_3 ——反应后的蛋膜质量,g
 m_4 ——喂入混合物中的蛋膜质量,g
 m_5 ——收集的蛋膜中含有的蛋壳质量,g

3.3 单因素试验

根据前期仿真得到的清选装置吸风机连接口风速范围,为寻找喂入量的较优范围,在吸风机连接口风速为4.5 m/s和5.5 m/s的情况下,进行喂入量的单因素试验,喂入量分别设置为50、100、200、300、400、500 g/s。通过试验和计算得到蛋膜损失率和清洁率随喂入量变化的曲线,如图10所示。

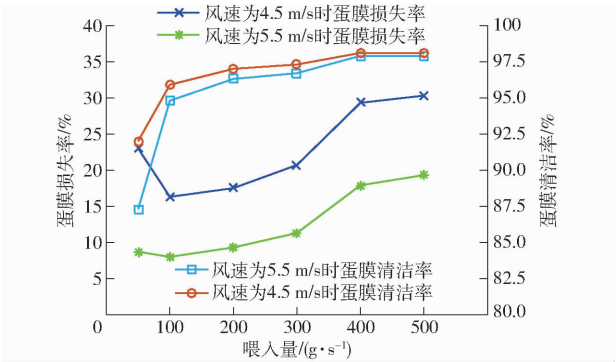


图10 喂入量与蛋膜清洁率、损失率的关系曲线
Fig. 10 Relation curves between feeding flow rate and cleaning rate and loss rate of eggshell membranes

由图10可知喂入量与吸风机连接口风速之间存在交互作用。随喂入量的增加蛋膜损失率先降低后升高,蛋膜清洁率随喂入量的增加而增大。喂入量为50~100 g/s时,蛋膜损失率和清洁率较低。喂

入量为100~300 g/s时,蛋膜损失率低、清洁率高;喂入量大于300 g/s时,蛋膜损失率和清洁率都较大且蛋膜损失率上升幅度很大、清洁率上升幅度很小。因此选取喂入量100~300 g/s作为正交试验范围。

3.4 正交试验

为进一步分析喂入量和吸风机连接口风速对蛋膜损失率和清洁率的综合影响,应用两因素三水平正交试验方法^[24],选取喂入量、吸风机连接口风速为试验因素,蛋膜损失率、蛋膜清洁率为评价指标。对影响气吸式多级清选装置的工作参数进行优化分析。结合前期数值模拟与单因素试验结果,取喂入量为100~300 g/s,吸风机连接口风速为4.5~6.5 m/s,最终确定各因素水平如表2所示。

表2 正交试验因素水平
Tab. 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素	
	喂入量/(g·s ⁻¹)	吸风机连接口风速/(m·s ⁻¹)
1	100	4.5
2	200	5.5
3	300	6.5

试验结果与极差分析如表3所示,A、B分别为喂入量、吸风机连接口风速水平值。试验因素对蛋膜损失率 Y_1 影响主次顺序为B、A,较优因素水平组合为 A_1B_3 ,即喂入量为100 g/s、吸风机连接口风速为6.5 m/s;试验因素对蛋膜清洁率 Y_2 影响主次顺序为A、B,较优因素水平组合为 A_3B_1 ,即喂入量300 g/s、吸风机连接口风速为4.5 m/s。

表3 试验结果与极差分析
Tab. 3 Test results and range analysis

试验序号	A	B	蛋膜损失率 Y_1 /%	蛋膜清洁率 Y_2 /%
1	1	1	16.3	95.9
2	1	2	8.0	94.8
3	1	3	5.7	93.1
4	2	1	17.5	97.0
5	2	2	9.3	96.3
6	2	3	8.8	95.1
7	3	1	20.7	97.4
8	3	2	11.3	96.7
9	3	3	10.2	95.8
Y_1	k_{11}	10.0	18.2	
	k_{12}	11.9	9.5	
	k_{13}	14.1	8.2	
	R	4.1	10.0	
Y_2	k_{21}	94.6	96.8	
	k_{22}	96.1	95.9	
	k_{23}	96.6	94.7	
	R	2.0	2.1	

应用 Design-Expert 8.0.6 对试验结果进行方差分析,结果如表 4 所示。喂入量和吸风机连接口风速对蛋膜损失率 Y_1 、清洁率 Y_2 影响极显著 ($P < 0.01$),这是因为蛋壳、膜的运动轨迹由错流风风速和蛋壳、膜颗粒间的相互作用强度决定。装置内蛋壳、膜的相互作用强度大时,向负压室运动的蛋壳、膜受到向下运动蛋壳的阻碍作用强,装置内蛋壳、膜的相互作用强度小时,向负压室运动的蛋壳、膜受到向下运动的蛋壳的阻碍作用弱;错流风风速大时,气流推动蛋壳、膜运动的能力强,错流风风速小时,气流推动蛋壳、膜运动的能力弱。因此高错流风风速与低强度的相互作用易使蛋膜运动到负压室,进而降低蛋膜损失率,低错流风风速与高强度的相互作用可以减少蛋壳运动到负压室的数量,进而提高蛋膜清洁率。而蛋壳、膜颗粒间的相互作用强度与喂入量正相关,错流风风速与吸风机连接口风速正相关,所以喂入量和吸风机连接口风速对蛋膜损失率、清洁率影响极显著。

表 4 方差分析结果
Tab.4 Results of variance analysis

性能指标	方差来源	平方和	自由度	均方差	<i>F</i>	<i>P</i>
蛋膜损失率	<i>A</i>	24.86	2	12.43	30.74	0.003 7
	<i>B</i>	174.90	2	87.45	216.22	<0.001
	残差	1.62	4	0.40		
	总和	201.38	8			
蛋膜清洁率	<i>A</i>	6.74	2	3.37	33.31	0.003 2
	<i>B</i>	6.71	2	3.35	33.18	0.003 2
	残差	0.40	4	0.10		
	总和	13.85	8			

由于各试验因素对蛋膜损失率和清洁率的较优水平组合不一致,需采用综合评分法^[25-26]对试验结果进行加权分析,损失率隶属度 W_1 、清洁率隶属度 W_2 、综合分数 H 的计算公式为

$$W = \frac{U - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \tag{10}$$

$$H = 0.5W_1 - 0.5W_2 \tag{11}$$

式中 W ——指标隶属度
 U ——指标值
 $U_{\min}$ ——指标最小值
 $U_{\max}$ ——指标最大值

综合分数越高清选性能越好,由表 5 可知,各个试验因素对综合分数的影响由大到小为:吸风机连接口风速、喂入量,较优因素水平组合为 A_2B_2 ,即喂入量为 200 g/s、吸风机连接口风速为 5.5 m/s。在吸风机排气口收集到的蛋膜如图 11 所示。

表 5 综合分数分析结果
Tab.5 Analysis results of comprehensive scores

试验序号	<i>A</i>	<i>B</i>	W_1	W_2	<i>H</i>
1	1	1	0.67	0.71	-0.02
2	1	2	0.41	0.15	0.13
3	1	3	0	0	0
4	2	1	0.93	0.79	0.07
5	2	2	0.76	0.24	0.26
6	2	3	0.48	0.21	0.14
7	3	1	1.00	1.00	0
8	3	2	0.86	0.37	0.25
9	3	3	0.64	0.30	0.17
综合分数	k_1	0.04	0.02		
	k_2	0.16	0.21		
	k_3	0.13	0.10		
	<i>R</i>	0.12	0.19		

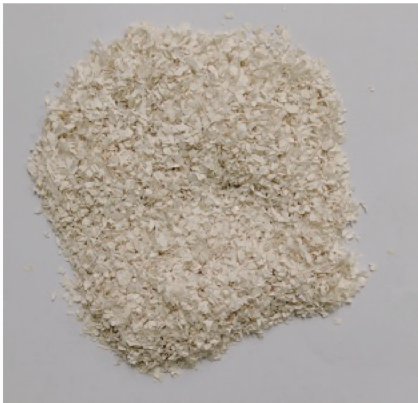


图 11 收集到的蛋膜
Fig.11 Collected eggshell membranes

试验通过变频器调节吸风机转速进而调节吸风机连接口风速,当吸风机转速小于额定转速时为恒转矩调速,可通过计算获得清选时吸风机功率,吸风机功率计算公式为

$$P = 9\,550 \frac{T}{n} \tag{12}$$

式中 P ——吸风机功率, W
 T ——转矩, $N \cdot m$
 n ——吸风机转速, r/min

由于吸风机转矩恒定,由式(12)可得

$$\frac{P_1}{n_1} = \frac{P_2}{n_2} \tag{13}$$

式中 P_1 ——吸风机额定功率, W
 P_2 ——清选时吸风机功率, W
 n_1 ——吸风机额定转速, r/min
 n_2 ——清选时吸风机转速, r/min

吸风机额定功率为 1 500 W,额定转速为 2 850 r/min,清选时吸风机转速为 627 r/min,将上述数据代入式(13)得到清选时吸风机功率为 330 W。

3.5 试验验证

试验验证的试验条件和测试方法与正交试验完全相同,按照较优因素水平组合 A_2B_2 进行试验,即喂入量为 200 g/s、吸风机连接口风速为 5.5 m/s,重复做 3 次试验取平均值,试验结果如表 6 所示,蛋膜损失率为 9.4%,蛋膜清洁率为 96.3%,证明了较优组合选取的合理性,满足了蛋壳膜清选的要求。

表 6 试验验证结果
Tab.6 Test results of verification %

试验序号	蛋膜损失率	蛋膜清洁率
1	9.2	96.3
2	9.7	96.4
3	9.3	96.1
平均值	9.4	96.3

4 结论

(1)对蛋壳膜颗粒碰撞模型进行建模,分析颗粒碰撞对蛋壳、膜颗粒运动的影响可得:适当减小蛋膜颗粒与蛋壳颗粒的质量比,减小蛋壳、膜颗粒碰撞时在 z 轴上的相对速度,有利于蛋膜颗粒向负压室

运动、蛋壳颗粒向下运动,进而提高清选效果。
(2)气吸式蛋壳膜多级清选装置的流场数值模拟结果表明,清选室进气口有挡板比无挡板时的蛋膜损失率小;清选室采用进气口下挡板时,错流风区气流速度分布较有层次但气流速度较小,无法使蛋膜从清选室运动到负压室;清选室采用进气口上挡板时,在进气口挡板下边缘处形成较强的涡流,导致部分蛋膜不能从清选室运动到负压室;清选室采用进气口双挡板时,沿内壁挡板向上运动的气流速度分布较有层次且气流速度较大,有利于使蛋膜从清选室运动到负压室。
(3)气吸式蛋壳膜多级清选装置功耗较低、蛋膜清洁率较高,影响蛋膜损失率的因素由大到小依次为:吸风机连接口风速、喂入量;影响蛋膜清洁率的因素由大到小依次为:喂入量、吸风机连接口风速。
(4)设计的气吸式多级清选装置,在蛋壳颗粒粒径为 0.4~2.4 mm、蛋膜颗粒粒径为 1.7~4.0 mm 的情况下,当工作参数为喂入量 200 g/s、吸风机连接口风速为 5.5 m/s 时,蛋膜损失率为 9.4%,蛋膜清洁率为 96.3%,吸风机功率为 330 W。

参 考 文 献

[1] 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,2008,15(5):27-31.
LI Yanpo, MA Meihu. Investigation and exploiture of eggshell and eggshell membrane[J]. Cereal and Food Industry, 2008, 15(5):27-31. (in Chinese)

[2] 李逢振,张雯亭. 蛋壳综合利用研究进展[J]. 农产品加工,2015,10(20):51-52,55.
LI Fengzhen, ZHANG Wenting. Review on complex utilization of eggshell[J]. Farm Products Processing, 2015, 10(20):51-52, 55. (in Chinese)

[3] 刘元,姚骏,王玥玮,等. 蛋壳深加工产业现状[J]. 食品研究与开发,2020,41(23):220-224.
LIU Yuan, YAO Jun, WANG Yuewei, et al. Present situation of eggshell deep processing industry[J]. Food Research and Development, 2020, 41(23):220-224. (in Chinese)

[4] 吕雯秀,吴红梅,王艳会,等. 以蛋壳为原料直接法制备食品防腐剂丙酸钙的研究[J]. 天津化工,2015,29(2):11-13.
LÜ Wenxiu, WU Hongmei, WANG Yanhui, et al. Preparation of calcium propionate by using eggshell as raw material with direct method[J]. Tianjin Chemical Industry, 2015, 29(2):11-13. (in Chinese)

[5] 邱磊,丁珣,韩非. 蛋壳粉对铅镉废水的强化吸附研究[J]. 工业水处理,2021,41(5):53-57.
QIU Lei, DING Xun, HAN Fei. Enhanced adsorption of lead and cadmium wastewater by eggshell powder[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(5):53-57. (in Chinese)

[6] BANJAC V, PEZO L, PEZO Z, et al. Optimization of the classification process in the zigzag air classifier for obtaining a high protein sunflower meal—chemometric and CFD approach[J]. Advanced Powder Technology, 2017, 28(10):1069-1078.

[7] 卢道铭,范怡平,卢春喜. 颗粒空气分级技术研究进展[J]. 中国粉体技术,2020,26(6):11-24.
LU Daoming, FAN Yiping, LU Chunxi. Advances in research on granular air classification[J]. China Powder Science and Technology, 2020, 26(6):11-24. (in Chinese)

[8] JOSEPH H M. Eggshell waste processing method and device:20030209617[P]. 2003-11-13.

[9] 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 Mengfu, YANG Yuebin, 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. (in Chinese)

[10] 戴飞,赵武云,刘国春,等. 胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(8):140-147.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, LIU Guochun, et al. Design and experiment of separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8):140-147. (in Chinese)

[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.
CHI Yuan, WANG Yong, LI Mengfu, 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. (in Chinese)
- [12] 牛银菊, 朱策, 邵明珠, 等. Seeger 方程及其位错对超晶格光电性质的影响[J]. 半导体光电, 2013, 34(4): 612 – 615.
NIU Yinju, ZHU Ce, SHAO Mingzhu, et al. Effects of Seeger equation and its dislocation on superlattice optoelectronic properties[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(4): 612 – 615. (in Chinese)
- [13] 温翔宇, 贾洪雷, 张胜伟, 等. 基于 EDEM – Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 69 – 77.
WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM – Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 69 – 77. (in Chinese)
- [14] CHI Y, WANG Y, LI M F, et al. Numerical simulation and experimental study on eggshell membrane separation device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(2): 173 – 183.
- [15] KUANG S B, ZHOU M M, YU A B. CFD – DEM modelling and simulation of pneumatic conveying: a review[J]. Powder Technology, 2020, 365: 186 – 207.
- [16] PETIT H A, IRASSAR E F, BARBOSA M R. Evaluation of the performance of the cross-flow air classifier in manufactured sand processing via CFD – DEM simulations[J]. Computational Particle Mechanics, 2018, 5: 87 – 102.
- [17] 李想. 基于纳米压痕技术的蛋壳膜力学性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
LI Xiang. Investigation on mechanical properties of eggshell membranes based on nanoindentation [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] DASTAN A, ABOUALI O, AHMADI G. CFD simulation of total and regional fiber deposition in human nasal cavities[J]. Journal of Aerosol Science, 2014, 69: 132 – 149.
- [19] GHAHRAMANI E, ABOUALI O, ENDAN M, et al. Numerical analysis of stochastic dispersion of micro-particles in turbulent flows in a realistic model of human nasal/upper airway[J]. Journal of Aerosol Science, 2014, 67: 188 – 206.
- [20] ROSAL R. Morphological description of microplastic particles for environmental fate studies[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 171: 112716.
- [21] WANG Z C, HOPKE P K, AHMADI G, et al. Fibrous particle deposition in human nasal passage: the influence of particle length, flow rate, and geometry of nasal airway[J]. Aerosol Science, 2008, 39(12): 1040 – 1054.
- [22] 王家德, 成卓韦. 大气污染控制工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [23] 万星宇, 廖宜涛, 袁佳诚, 等. 油菜联合收获机组合式旋风分离清选参数分析与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 202 – 211.
WAN Xingyu, LIAO Yitao, YUAN Jiacheng, et al. Parameters analysis and experiment of cyclone separation cleaning system with replaceable parts for rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 202 – 211. (in Chinese)
- [24] 樊晨龙, 崔涛, 张东兴, 等. 纵轴流联合收获机双层异向清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 239 – 248.
FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of double-layered reverse cleaning device for axial flow combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 239 – 248. (in Chinese)
- [25] 王升升, 陈盼, 卢梦晴, 等. 大白菜种子收获分离清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 181 – 190.
WANG Shengsheng, CHEN Pan, LU Mengqing, et al. Design and experiment of separation and cleaning device for Chinese cabbage seeds harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 181 – 190. (in Chinese)
- [26] 李心平, 赵高源, 姬江涛, 等. 燕麦弧形栅格筛复清选式圆筒筛清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 124 – 133.
LI Xinping, ZHAO Gaoyuan, JI Jiangtao, et al. Design and test of cylinder screen oat cleaning device with arc grid sieves and re-cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 124 – 133. (in Chinese)