

荞麦搓碾剥壳机理分析与剥壳单元织构化改进

范 斌^{1,2}, 阮宏宝¹, 金天顺¹, 杜文亮¹

(1. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特市 010018; 2. 牧草饲料生产全程智能化装备内蒙古自治区工程研究中心, 呼和浩特市 010018)

摘 要: 荞麦剥壳是荞麦米加工工艺的核心环节, 目前上下砂盘式荞麦剥壳机剥壳机理不明, 加之剥壳间隙精准度低, 荞麦剥壳姿态随机性强, 导致单次剥壳效率低、剥壳后碎仁率偏高。为解决上述问题, 该研究以 6QB-150 荞麦剥壳机为研究对象, 开展荞麦搓碾剥壳机理分析与试验研究, 通过对荞麦搓碾剥壳过程的机理进行分析与数学建模, 研究了荞麦在剥壳过程中可能存在的剥壳姿态, 并建立了相应的数学模型; 并使用 EDEM (engineering discrete element method) 软件对改进剥壳单元后荞麦剥壳过程的运动状态进行分析, 探究不同纹理结构对荞麦剥壳过程的影响; 最后选取等效粒径 (近似于荞麦宽、高尺寸) 介于 4.6~4.8 mm 范围的荞麦开展剥壳性能试验。试验结果表明: 当剥壳间隙大于等于荞麦等效粒径且小于荞麦长度尺寸时, 端压撕搓是荞麦搓碾剥壳过程中主导剥壳机制, 且剥壳效率最高; 另外上砂盘工作区域表面纹理以三角形织构化改进后, 当下砂盘转速为 950 r/min, 剥壳间隙为 4.9 mm 时, 单次剥壳整仁率为 44.03%, 碎仁率为 5.59%, 相较于未改进的剥壳单元, 采用规则的三角形凸起结构一定程度降低荞麦剥壳姿态的随机性, 其单次剥壳整仁率提高了约 7%。该研究可为荞麦加工装备优化升级提供理论依据和技术支撑。

关键词: 谷物; 农业机械; 纹理; 荞麦; 剥壳机理; EDEM 仿真

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405159

中图分类号: S226.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-16-0064-11

范斌, 阮宏宝, 金天顺, 等. 荞麦搓碾剥壳机理分析与剥壳单元织构化改进[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 64-74. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405159 <http://www.tcsae.org>

FAN Bin, RUAN Hongbao, JIN Tianshun, et al. Analysis of the hulling mechanism for the buckwheat and improvement of texture of hulling unit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(16): 64-74. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405159 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

荞麦含丰富的营养素和药用成分, 其氨基酸构成平衡, 对预防疾病如糖尿病^[1]、心血管疾病和高血压大有裨益^[2]。它还有助于健胃消化、增强免疫力、促进生长和智力发展等^[3-5]。内蒙古是中国荞麦主产区, 也是优质荞麦产区, 常年播种面积 250~300 万亩, 每年出口荞麦 20 000 t 左右, 居全国首位。其中被誉为“中国荞麦之乡”的库伦旗常年种植面积 30 万亩以上, 占当地耕地面积的 16.67%^[6]。然而, 当地荞麦初加工却面临着设施简陋、方法原始和工艺落后等问题, 导致产后损失严重、品质下降, 这进一步阻碍了内蒙古地区荞麦农产品加工业的发展, 高附加值产品供应不足, 限制了当地农业的发展。

荞麦剥壳技术是粮食加工领域的重点研究之一, 传统上依靠机械力和物理摩擦实现。主要有 4 种物理剥壳方法: 上下砂盘式搓碾法, 通过上下砂盘挤压和摩擦剥壳, 适用于大规模生产; 双辊式端压撕搓法, 通过橡胶

辊筒撕裂荞麦外壳, 结构简单但效率低; 滚筒凹板式揉搓法, 通过滚筒和凹板的揉搓作用剥壳, 效果好但产量低; 离心撞击式剥壳法, 通过高速甩盘撞击剥壳, 效率高但易破损。由于需要处理大量荞麦并确保其剥壳质量, 上下砂盘式剥壳机成为了最广泛应用的设备^[7]。

目前荞麦剥壳机的研究主要可分为两方面: 一方面主要开展不同原理的剥壳机设计与优化工作^[8]。李若瑗^[9]设计了一种小型适用的全自动荞麦剥壳机。陈伟^[10]针对现有的上下砂盘式荞麦剥壳机的剥壳单元进行了优化, 设计了一款双层剥壳单元, 改进后的剥壳单元由两组砂盘上下对置组成, 共有两个剥壳区间, 可以将剥壳效率提高一倍。朱新华等^[11]设计了一台苦荞麦非热剥壳机, 通过“磨削”和“揉搓”两个环节, 实现了 88.11% 剥壳率和 31.84% 整仁率。HE 等^[12]提到一种通用型谷物剥壳机, 采用滚筒凹板式结构, 滚筒和凹板上有齿形槽, 滚筒由多节不等直径的圆柱体组成, 与相适应的凹板配合使用。谷物的剥壳结构除了平面圆盘外还有在砂盘上做锥形腔, 砂盘表面开槽和做凹坑等形式^[13-14]。另一方面则对现有剥壳机进行试验研究以探究机器的最佳剥壳参数。成图雅等^[15]研究了砂盘转速、剥壳间隙、工作面宽度和砂盘粒度对剥壳机的影响, 发现砂盘转速对出米率和相对碎米率的影响最显著, 当砂盘转速达到 950 r/min 时, 荞麦剥壳机的剥壳效率最佳。马宗雨等^[16]通过对不

收稿日期: 2024-05-22 修订日期: 2024-06-29

基金项目: 内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目, 内蒙古特色农产品低损高效精深加工智能化装备关键技术研发与应用 (2022YFHH0037); 农业工程一流学科科研专项项目 (YLXKZX-NND-021)

作者简介: 范斌, 副教授, 研究方向为农牧业智能化装备研发。

Email: binfan@jmau.edu.cn

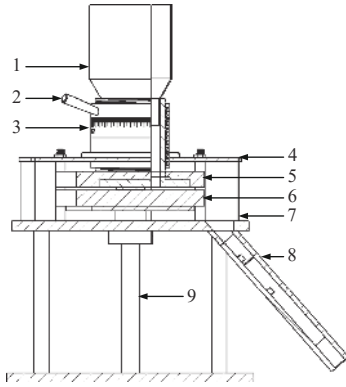
同品种和饱满度的荞麦进行物料特性参数的测定, 确认了品种和饱满度对荞麦剥壳效率的影响。刘艳辉等^[17]开发的新工艺通过汽蒸湿润处理苦荞麦后, 使用橡胶盘式碾搓法剥壳, 实现了 37.6% 的单次剥壳效率。

上述大量学者的研究主要集中不同原理荞麦剥壳机的设计及其最佳剥壳参数探索。对于上下砂盘式荞麦剥壳机, 由于其加工效率高, 剥壳性能优良, 目前是最广泛应用的设备。然而对上下砂盘式荞麦剥壳机的研究主要集中最佳剥壳参数的探究, 对荞麦搓碾剥壳机理研究欠缺, 即使在最佳剥壳参数时, 仍存在单次剥壳效率低、剥壳后碎仁率偏高的问题。陈伟^[10]对上下砂盘式荞麦剥壳的荞麦受力做了简化分析, 初步探究了机器的剥壳机理。但是荞麦等效粒径小、外壳与内部仁结合紧密等, 使得在荞麦剥壳初加工过程中, 仍面临效率低、碎仁率高的问题。本研究旨在探究上下砂盘式荞麦剥壳机的剥壳机理, 分析荞麦在剥壳过程中可能存在的剥壳姿态, 基于此改进上砂盘表面纹理结构, 实现剥壳过程中减损、增效和提质, 促进农产品加工业优化升级, 为乡村振兴和农业现代化发展提供有力支撑^[18]。

1 荞麦搓碾剥壳机理分析与建模

1.1 上下砂盘式剥壳机剥壳原理

课题组前期研制的 6QB-150 荞麦剥壳机剥壳单元, 如图 1 所示。其主要工作部件为一对上下平行放置的金刚砂砂盘, 工作时下砂盘在连接轴带动高速旋转, 而上砂盘静止不动。



1. 入料 2. 上砂盘锁紧环 3. 剥壳间隙调整环 4. 剥壳单元上盖 5. 上砂盘 6. 下砂盘 7. 剥壳单元内壁 8. 出料口 9. 连接轴
1. Feeding port 2. Upper sand plate locking ring 3. Shell gap adjusting ring 4. Shell unit upper cover 5. Upper sand plate 6. Lower sand plate 7. Inner wall of shell unit 8. Discharge port 9. Connecting shaft

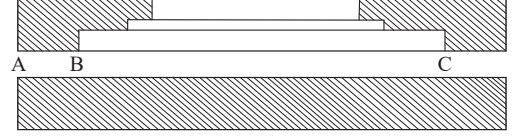
图 1 剥壳单元结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of shell stripping unit structure

6QB-150 荞麦剥壳机中, 剥壳单元的上、下砂盘位置关系, 如图 2 所示。

机器工作时, 荞麦从图 1 中入料口 1 进入上、下砂盘之间的空腔 (BC) 后, 受下砂盘旋转产生的离心力作用, 荞麦做离心运动进入上下砂盘工作区间, 瞬间受到砂盘摩擦和挤压作用。随着下砂盘旋转, 荞麦受到摩擦力、惯性力和挤压力的作用, 导致其外壳发生破裂, 完

成破壳; 然后荞麦脱离砂盘工作区, 并继续做离心运动与剥壳单元内壁撞击, 实现破壳后壳仁分离^[19]。然而, 目前的上下砂盘均为金刚砂材质, 其表面凹凸不平, 表面纹理随机性强, 使得剥壳间隙误差大、精准度难控制, 面临单次剥壳效率低、剥壳后碎仁率偏高问题。



注: AB 为一侧的工作区间长度, mm; BC 为空腔的直径, mm。
Note: AB is the length of the working interval on one side, mm; BC is the diameter of the cavity, mm.

图 2 上下砂盘位置示意图

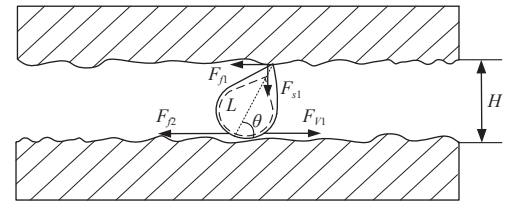
Fig.2 Schematic diagram of the position of the upper and lower sand trays

1.2 不同姿态下荞麦剥壳机理分析与建模

课题组前期研究发现, 6QB-150 荞麦剥壳机最佳的剥壳间隙应稍大于荞麦的高度和宽度, 但小于其长度^[19], 故剥壳过程中荞麦主要以倾斜、水平两种姿态出现在上下砂盘工作区间。为此, 建立不同姿态下荞麦剥壳数学模型, 对探究荞麦剥壳机理至关重要。

1.2.1 倾斜姿态下荞麦剥壳机理分析

当荞麦以倾斜姿态在剥壳单元上砂盘的工作区间时, 由于荞麦几何形状导致其与下砂盘往往是面接触方式, 假设其形成一个夹角为 θ , 该姿态下的受力分析, 如图 3 所示。



注: F_{s1} 为倾斜姿态下上砂盘对荞麦的挤压力, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; F_{f1} 为倾斜姿态下上砂盘对荞麦的摩擦力, N; F_{v1} 为倾斜姿态下荞麦受到的离心力, N; F_{f2} 为倾斜姿态下下砂盘对荞麦的摩擦力, N; L 为荞麦的长度, mm; H 为剥壳间隙大小, mm; θ 为荞麦在剥壳区间中与下砂盘的水平夹角, $(^\circ)$ 。

Note: F_{s1} is the extrusion pressure of the upper sand plate on buckwheat under tilted posture, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; F_{f1} is the friction force of the upper sand tray on buckwheat under tilted posture, N; F_{v1} is the centrifugal force given to buckwheat under the sand tray under tilted posture, N; F_{f2} is the friction force of the lower sand tray on buckwheat under tilted posture, N; L is the length of buckwheat, mm; H is the size of the husking gap, mm; θ is the horizontal angle between buckwheat and the lower sand tray in the shucking interval, $(^\circ)$.

图 3 倾斜姿态下荞麦在剥壳区间中的受力分析图

Fig.3 Force analysis diagram of buckwheat in the shelling interval under inclined posture

上砂盘对荞麦的挤压力:

$$F_{s1} = \sigma_{s1} S_1 \quad (1)$$

倾斜姿态下荞麦与上砂盘接触后的形变量:

$$S_1 = L \sin \theta - H \quad (2)$$

倾斜姿态下上砂盘对荞麦的摩擦力:

$$F_{f1} = \mu \frac{F_{s1}}{\tan \theta} \quad (3)$$

倾斜姿态下荞麦受到的离心力:

$$F_{V1} = m\omega r^2 \quad (4)$$

倾斜姿态下下砂盘对荞麦的摩擦力:

$$F_{f2} = \mu(mg + F_{s1}) \quad (5)$$

将式(2)代入式(1)中得到荞麦在倾斜姿态下剥壳区间中受到上砂盘对荞麦的挤压力计算式:

$$F_{s1} = \sigma_{s1}S_1 = \sigma_{s1}(L\sin\theta - H) \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)中化简可得:

$$F_{f1} = \mu\sigma_{s1}L\cos\theta - \mu\sigma_{s1}H\cot\theta \quad (7)$$

当荞麦与下砂盘平面夹角 $\theta = 90^\circ$ 时, 荞麦在剥壳区间中处于竖直的姿态, 上砂盘挤压作用于荞麦的顶端, 荞麦的受上砂盘的挤压如式(8):

$$F_{s1, \theta=90^\circ} = \sigma_{s1}(L\sin\theta - H) = \sigma_{s1}(L - H) \quad (8)$$

当荞麦因挤压受到的形变量增大时摩擦力会不断增加, 直到达到上砂盘与荞麦摩擦的最大静摩擦力后, 荞麦受到上砂盘的摩擦力不会继续增加, 此时荞麦受到上砂盘的最大摩擦力为:

$$F_{f1, \max} = \mu F_{s1} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)中化简可知:

$$F_{f1, \max} = \mu\sigma_{s1}(L - H) \quad (10)$$

此时荞麦受到下砂盘的离心力 F_{V1} 和摩擦力 F_{f2} 与上述荞麦与下砂盘平面夹角为 θ 时相同, 此状态下便不再分析。

式中 σ_{s1} 为倾斜姿态下荞麦的硬度, 43.8 N/mm^2 ^[20]; S_1 为倾斜姿态下荞麦与上砂盘接触后的形变量, mm; μ 为荞麦与上、下砂盘接触时的静摩擦系数; m 为荞麦的质量, kg; ω 为剥壳单元中下砂盘的角速度矢量, rad/s; r 为荞麦重心距下砂盘旋转中心的距离(当荞麦运动到下砂盘边缘时, 等于下砂盘的半径), m。

1.2.2 水平姿态下荞麦剥壳机理分析

对荞麦外观尺寸进行测量发现, 有一部分荞麦的长度、高度及宽度尺寸相近。这样的荞麦以水平姿态存在于剥壳单元上砂盘的工作区间, 其剥壳时的受力分析图, 如图4所示。

上砂盘对荞麦的挤压力:

$$F_{s2} = \sigma_{s2}S_2 \quad (11)$$

水平姿态下荞麦与上砂盘接触后的形变量:

$$S_2 = H - h \quad (12)$$

水平姿态下上砂盘对荞麦的摩擦力:

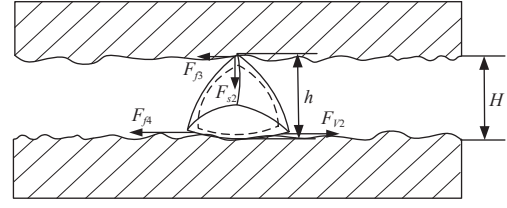
$$F_{f3} = \mu F_{s2} \quad (13)$$

水平姿态下下砂盘给予荞麦的离心力:

$$F_{V2} = m\omega r_1^2 \quad (14)$$

水平姿态下下砂盘对荞麦的摩擦力 F_{f4}

$$F_{f4} = \mu(mg + F_{s2}) \quad (15)$$



注: F_{s2} 为水平姿态下上砂盘对荞麦的挤压力, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; F_{f3} 为水平姿态下上砂盘对荞麦的摩擦力, N; F_{V2} 为荞麦受到的离心力(水平姿态下), N; F_{f4} 为下砂盘对荞麦的摩擦力(水平姿态下), N; h 为荞麦的高度, mm。

Note: F_{s2} is the extrusion pressure of the upper sand plate on buckwheat under horizontal posture, $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$; F_{f3} is the friction force of the upper sand tray on buckwheat under horizontal posture, N; F_{V2} is the centrifugal force given to buckwheat under the sand tray under horizontal posture, N; F_{f4} is the friction force of the lower sand tray on buckwheat under horizontal posture, N; h is the height of buckwheat, mm.

图4 水平姿态下荞麦在剥壳区间中的受力分析图

Fig.4 Force analysis diagram of buckwheat in the shelling interval under horizontal posture

将式(12)代入式(11)中化简可以得到荞麦在水平姿态下剥壳受到上砂盘对荞麦的挤压力:

$$F_{s2} = \sigma_{s2}S_2 = \sigma_{s2}(H - h) \quad (16)$$

将式(16)代入式(13)中化简可得:

$$F_{f3} = \mu\sigma_{s2}(H - h) \quad (17)$$

式中 σ_{s2} 为水平姿态下荞麦的硬度, $\sigma'_s = 69.4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$; S_2 为水平姿态下荞麦与上砂盘接触后的形变量, mm。

目前大多数学者认为上下砂盘式剥壳机在剥壳过程中主要以碾搓法和端压撕搓法两种剥壳机制, 实现荞麦外壳与仁的分离(如图5所示)。

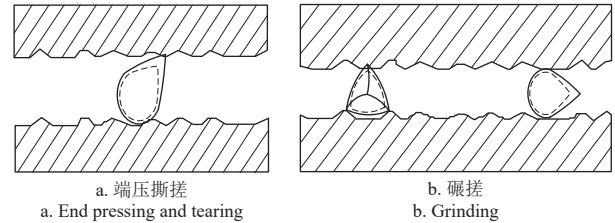


图5 两种剥壳方式示意图

Fig.5 Schematic diagram of two shell breaking methods

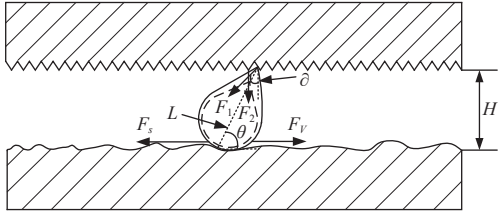
基于上述分析, 对比碾搓法和端压撕搓法的剥壳机理可得: 碾搓法适用于上下砂盘间隙略小于荞麦等效粒径的情况; 而端压撕搓法适用于上下砂盘间隙稍大于荞麦等效粒径且小于荞麦长度的情况。

目前实践生产中, 荞麦剥壳机工作时其最佳剥壳间隙通常设置为稍大于荞麦的高度和宽度, 且小于荞麦长度。实质上, 荞麦在最佳剥壳间隙时其剥壳机理以端压撕搓法主导^[21]。由此可以看出剥壳间隙是制约6QB-150荞麦剥壳机剥壳品效的关键因素。然而目前剥壳单元的上砂盘表面采用金刚砂凸起结构, 该材质表面纹理随机性强, 上下砂盘之间的间隙误差较大, 使得荞麦剥壳姿态难控制, 影响剥壳效率和碎仁率。

1.3 上砂盘结构化改进后荞麦剥壳姿态分析

为解决上述问题, 对剥壳单元上砂盘表面进行结构化改进, 采用规则的凸起结构, 以降低荞麦剥壳过程中

剥壳姿态的随机性。结构化改进后剥壳单元上砂盘，此时荞麦剥壳时受力分析，如图 6 所示。



注：\$F_s\$ 为改进后上砂盘对荞麦的挤压力，N；\$F_1\$ 为前一凸起会对外壳施加力，N；\$F_2\$ 为后一凸起会对外壳施加力，N；\$\theta\$ 为 \$F_2\$ 与竖直方向的夹角，(\$^\circ\$)。

Note: \$F_s\$ is the extrusion pressure of the improved upper sand plate on buckwheat, N; \$F_1\$ is applied to the shell for the previous bump, N; \$F_2\$ is applied force to the shell for the latter bulge, N; \$\theta\$ is the Angle with the vertical direction, (\$^\circ\$).

图 6 改进后荞麦剥壳受力分析图

Fig.6 Analysis diagram of buckwheat breaking force after improvement

荞麦在改进后的剥壳单元中进行剥壳时，荞麦外壳会卡在相邻凸起所形成的缝隙中，此时：

改进后上砂盘对荞麦的挤压力：

$$F_s = F_1 + F_2 \cos \theta \quad (18)$$

改进后上砂盘前一凸起会对外壳施加挤压力：

$$F_1 = \sigma_{s1} S_1 \quad (19)$$

改进后上砂盘对荞麦的摩擦力：

$$F_{f5} = \mu (F_1 + F_2 \sin \theta) \quad (20)$$

改进剥壳单元后下砂盘对荞麦的摩擦力：

$$F_{f6} = \mu F_N = \mu (mg + F_s) \quad (21)$$

上述数学建模分析过程，剥壳间隙 \$H\$ 大小以确定值给定。实质上，\$H\$ 值是个随机变量，其大小受上砂盘表面随机纹理结构影响。原始上砂盘采用金刚砂凸起结构，该表面纹理随机性强，导致剥壳过程出现端压撕搓的情形随机性大。通过对上砂盘进行结构化改进，利用规则的表面凸起结构，可以减少上砂盘表面随机纹理结构影响，降低荞麦剥壳过程中剥壳姿态的随机性。同时结构化改进后，荞麦在剥壳过程中受到上砂盘的摩擦力增加，使得荞麦剥壳更容易，有效提高荞麦剥壳机的单次剥壳效率。

2 剥壳单元改进与剥壳过程 EDEM 仿真

为了探究不同纹理结构对荞麦剥壳过程的影响，使用 EDEM 软件对改进剥壳单元后荞麦剥壳过程的运动状态进行分析^[22]。仿真分析中选取等效粒径介于 4.6~4.8 mm 范围内的荞麦进行建模，建模前需要对该等效粒径范围内的荞麦三维尺寸进行测量。荞麦的三维尺寸包括长度、高度及宽度，荞麦等效粒径的大小近似于荞麦宽、高尺寸，对荞麦进行尺寸测量的位置如图 7 所示。测量步骤为：选取等效粒径介于 4.6~4.8 mm 范围内的荞麦 100 g，并使用四分法进行取样。从中选出 50 颗荞麦，使用游标卡尺（量程 150 mm，精度 0.02 mm）量取荞

麦的三维尺寸，每颗荞麦的测量需要重复 5 次，最终结果取 5 次测量结果的平均值，其最终测量结果如表 1 所示。

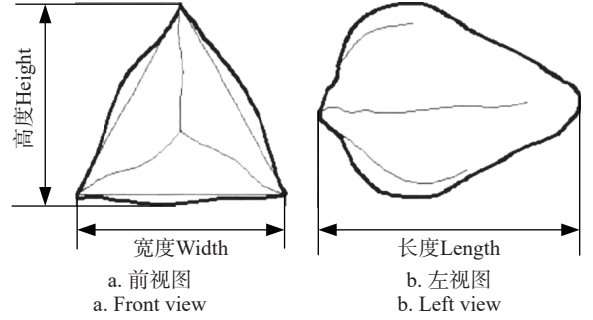


图 7 荞麦三维尺寸测量位置示意图

Fig.7 Schematic diagram of the measurement position for three-dimensional dimensions of buckwheat

表 1 荞麦三维尺寸的测量结果

Table 1 Measurement results of three-dimensional size of buckwheat

名称 Name	几何长度 Three-dimensional dimension		
	高度 Height /mm	长度 Length /mm	宽度 Width /mm
荞麦 Buckwheat	3.81	5.63	3.75

2.1 工作区间表面结构的改进

为了确保大部分的荞麦在剥壳过程中以相同的姿态完成剥壳，在上砂盘工作区域表面添加规则的纹理结构。荞麦外壳质地类似于木质材料、硬度较低。借鉴市面上木工刨刀的表面纹理结构，对剥壳单元上砂盘工作区间的表面进行了改进。提出了两种规则纹理的结构：一种是底×高为 1 mm×1 mm 的三角形表面纹理形状，另一种是半径为 0.5 mm 的半圆形表面纹理形状。

通过在上砂盘工作区间添加这两种规则的纹理结构，可以使得荞麦以同一种姿态完成剥壳过程，提高了机器剥壳效率，降低剥壳时荞麦仁破碎的风险。如图 8 所示。

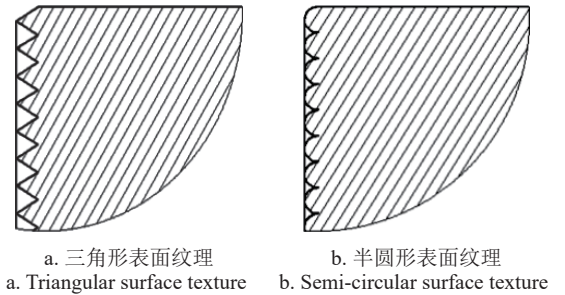


图 8 改进后上砂盘工作区间纹理结构

Fig.8 Texture structure and shape of the working interval of the improved sand tray

2.2 材质的改进

由于金刚砂材质无法加工出规则的纹理结构，因此需要选择新材质对上砂盘进行加工。然而，材质的改进会对荞麦在剥壳过程中受到的摩擦力产生影响。因此，在选择新材质时，有几个要求：

1) 荞麦与新材质接触时的摩擦系数应接近荞麦与原砂盘接触时的摩擦系数。

2) 新材质应具有高硬度和耐磨性。

3) 成本低且易于加工。

因此, 选择了不锈钢、铝合金和 45 号钢这 3 种材料进行静摩擦系数的分析。通过倾斜斜面法测量, 荞麦与各种材料的最大静摩擦系数进行了试验。利用 CNY-1 型斜面仪对荞麦在不同材料表面的摩擦系数和静摩擦休止角进行了分析^[23], 具体结果详见表 2。

表 2 荞麦在不同材料表面摩擦系数比较

Table 2 Comparison of friction coefficients of buckwheat on different material surfaces

材料 Materials	摩擦系数 Friction coefficient	休止角 Angle of repose/(°)
金刚砂 Emery	0.500	26.56
304 不锈钢 304 stainless steel	0.357	19.64
7 075 铝合金 7 075 aluminum alloy	0.385	21.05
45 号钢 45 steel	0.420	22.78

对比荞麦在 3 种材料表面的静摩擦系数可知, 45 号钢的摩擦系数和金刚砂最相近, 故选择 45 号钢作为用来替换金刚砂的新材质。

2.3 不同剥壳单元剥壳过程运动状态 EDEM 仿真分析

仿真时生成荞麦颗粒的总质量为 0.5 kg, 生成速度为 0.2 kg/s。由于荞麦颗粒缺乏粘结性, 因此在进行颗粒与颗粒、颗粒与几何体接触时, 采用了 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型^[24-25]。最后进行求解器设置, 时间步长设置为 10%, 数据保存的时间间隔为 0.01 s, 荞麦剥壳过程仿真总时间为 6.5 s。仿真过程如图 9 所示。

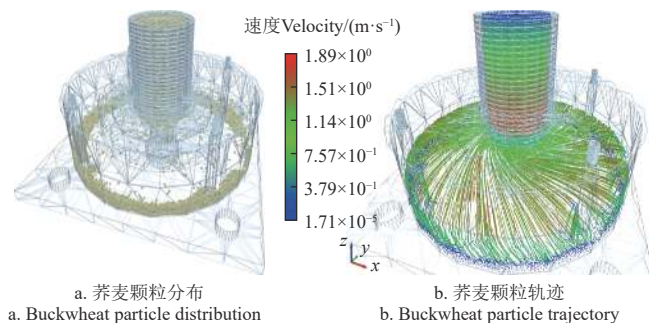


图 9 荞麦剥壳过程仿真示意图

Fig.9 Simulation diagram of buckwheat husking process

基于等效粒径介于 4.6~4.8 mm 范围荞麦的三维尺寸进行建模; 并对 6QB-150 荞麦剥壳机剥壳单元中各部分的结构尺寸进行测量^[26-28]。通过对荞麦在不同纹理结构的剥壳单元中的剥壳过程进行虚拟仿真。在使用 EDEM 软件对荞麦的剥壳过程进行仿真前, 需要在前处理界面完成参数的设置, 具体的参数及数值^[29] 如表 3 所示。

通过 EDEM 后处理功能, 对荞麦剥壳过程进行分析并导出相应的荞麦运动数据。对比相同条件下, 荞麦在原上砂盘和改进后的上砂盘剥壳单元中剥壳时的受力及运动速度图像, 探究荞麦在剥壳过程中上砂盘材质变化对荞麦受力和速度的影响。荞麦在剥壳过程中受力随时间变化曲线, 如图 10 所示, 其速度随时间变化曲线, 如

图 11 所示。

表 3 仿真时所需参数及数值

Table 3 Required parameters and values for simulation

参数 Parameters	数值 Value
荞麦泊松比 Poisson's ratio of buckwheat	0.3
荞麦密度 Buckwheat density/(kg·m ⁻³)	1 034.48
荞麦剪切模量 Buckwheat shear modulus/MPa	8.47
原砂盘泊松比 Poisson's ratio of original sand tray	0.200
原砂盘密度 Density of original sand tray/(kg·m ⁻³)	3 210
原砂盘剪切模量 Shear modulus of original sand tray/MPa	4.5×10 ⁴
荞麦与砂盘间动摩擦系数 Dynamic friction coefficient between buckwheat and sand tray	0.35
荞麦与砂盘间静摩擦系数 Static friction coefficient between buckwheat and sand tray	0.50
荞麦与砂盘间碰撞恢复系数 Collision recovery coefficient between buckwheat and sand tray	0.20
改进后上砂盘泊松比 Poisson's ratio of the improved upper sand tray	0.3
改进后上砂盘密度 Density of the improved upper sand tray/(kg·m ⁻³)	7 800
改进后上砂盘剪切模量 Shear modulus of the improved upper sand tray/MPa	7×10 ⁴
荞麦与荞麦静摩擦系数 Static friction coefficient between buckwheat and buckwheat	0.610
荞麦与荞麦动摩擦系数 Dynamic friction coefficient between buckwheat and buckwheat	0.150
荞麦与荞麦碰撞恢复系数 Collision recovery coefficient between buckwheat and buckwheat	0.200
荞麦与改进后上砂盘的动摩擦系数 Dynamic friction coefficient between buckwheat and improved upper sand tray	0.09
荞麦与改进后上砂盘的静摩擦系数 Static friction coefficient between buckwheat and improved upper sand tray	0.21
荞麦与改进后上砂盘碰撞恢复系数 Collision recovery coefficient between buckwheat and improved upper sand tray	0.44
剥壳单元下砂盘转速 Speed of the shell unit under the sand pan/(r·min ⁻¹)	950
剥壳单元间隙 Gap of Shelled unit/(mm)	5.00

通过分析荞麦在 3 种表面纹理结构剥壳单元中进行剥壳时受力随时间变化图, 可知:

1) 如图 10a~10b 所示, 对比分析荞麦在原材质上砂盘和使用 45 号钢替换后剥壳过程中受力, 可以发现上砂盘材质改进后导致荞麦在剥壳过程中所受力减小。其原因在于剥壳间隙不变, 故剥壳过程中荞麦外壳因挤压导致的形变量不变, 但荞麦与不同材质表面接触时摩擦系数不同, 导致荞麦在剥壳过程中所受作用力减小。因此, 在相同的工作条件下, 改进上砂盘材质后机器的剥壳效率将会降低。此外, 由于摩擦力的减小导致荞麦在剥壳过程中受力波动较大, 这可能会增加受力的不确定性。

2) 在上砂盘工作区间添加规则的表面纹理结构后, 可以增加荞麦外壳与上砂盘之间的摩擦系数, 有助于机器顺利完成剥壳过程。但当上砂盘工作区间为三角形纹理结构时, 荞麦剥壳过程中所受平均作用力较大。

仿真分析荞麦在表面纹理形状不同的上砂盘剥壳单元剥壳时,速度随时间的变化图像,如图 11 所示。

从上述 3 种不同表面纹理结构的上砂盘,其剥壳时运动速度随时间变化曲线可知:

1) 对比荞麦在改进上砂盘材质前后剥壳过程中速度随时间的变化图像,可以观察到由于受到的摩擦力减小,导致荞麦剥壳过程中平均速度增加。这种速度的变化会

增加剥壳时因碰撞导致荞麦仁发生破损的风险。

2) 通过在上砂盘工作区间添加规则的表面纹理结构可以使得荞麦在剥壳过程中的速度变化较为均衡。这说明规则的表面纹理结构有助于提高剥壳时荞麦运动的稳定性,从而降低了荞麦仁在剥壳过程中受损的可能性。因此,合适的表面纹理形状可以有效调控荞麦在剥壳过程中的运动速度,提高机器的剥壳效率和剥壳质量。

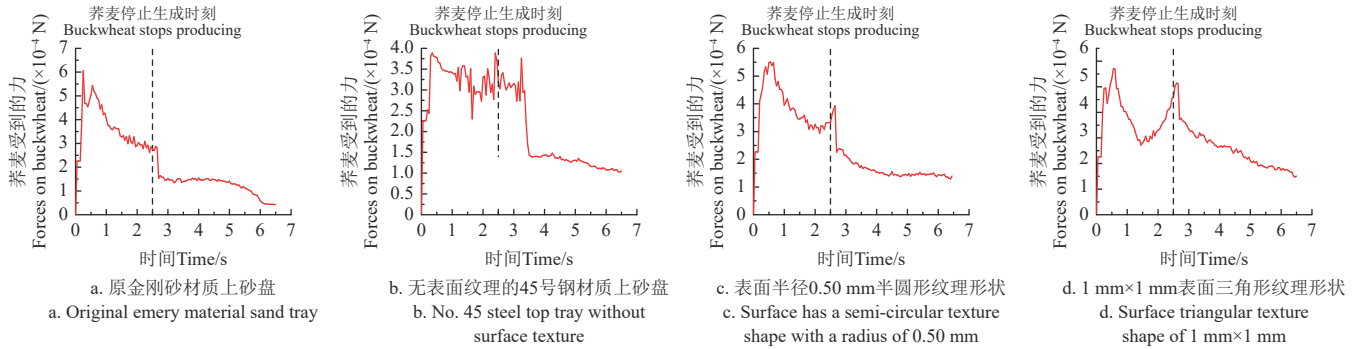


图 10 不同纹理结构对荞麦剥壳中受力的影响

Fig.10 Influence of different texture structure on the forces in buckwheat shucking

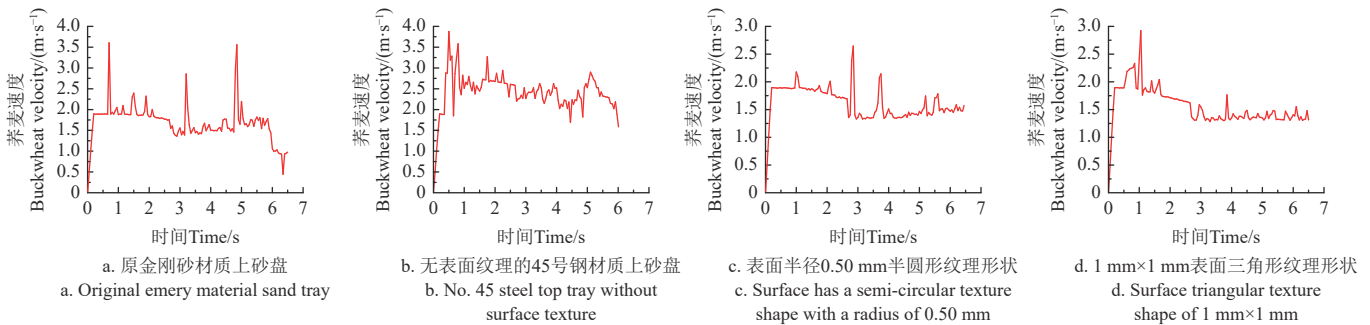


图 11 不同纹理结构对荞麦剥壳中运动速度变化曲线

Fig.11 Change curves of different texture structure on the movement speed in buckwheat shucking

3 不同剥壳单元荞麦剥壳性能试验研究

3.1 试验样品的选择及筛选

在正式开始试验之前,需要对荞麦样品进行精选和分级,以去除荞麦中的杂质、破碎粒和不符合试验等效粒径要求的荞麦,确保所有进入到剥壳单元中的荞麦等效粒径均匀一致,满足试验对尺寸和品质的严格要求^[30]。

为了确保试验的准确性和结果的一致性,本次试验选取的样品为等效粒径介于 4.6~4.8 mm 范围的荞麦。这些荞麦选自 2022 年在内蒙古武川县种植的北早生品种。在水分含量方面,选取的荞麦样品含水率控制在 10%~14% 之间,这一范围既可以保证荞麦的储存和处理安全性,同时满足剥壳的要求。

3.2 试验因素及指标的确定

剥壳单元的关键参数(下砂盘转速、剥壳间隙和上砂盘工作区宽度)显著影响机器工作效率。本研究在不改变下砂盘转速和上砂盘工作区宽度的基础上,深入研究了上砂盘表面纹理结构和剥壳单元间隙对剥壳效率的影响。

在剥壳试验的实际操作中,荞麦剥壳后产物将从剥壳单元的出料口流出,并在旋力吸风器的作用下,剥壳产物中被剥离的荞麦壳将被吸走。在理想情况下,剥出物应仅包含完整的荞麦仁。然而,在实际生产环境中,受多种因素影响,剥出物往往由完整的荞麦仁、破损的荞麦仁以及未剥壳的荞麦混合而成。为了全面评价荞麦剥壳机器的工作效率和剥壳效果,本试验参考 GB1350-2009^[31]《稻谷》中对稻谷加工过程中的稻米的整仁率,定义了荞麦单次剥壳后的加工整仁率 η 。同时,根据 JB/T10267-2013^[32]《胶辊磨谷机》中对磨谷机加工中糙碎率的定义,提出了荞麦单次剥壳后的碎仁率 ε 。评价荞麦剥壳机器剥壳效率的两种参数剥壳加工整仁率 η 和碎仁率 ε 的计算式如下:

$$\eta = \frac{M_Z}{M_A} \times 100\% \quad (22)$$

$$\varepsilon = \frac{M_S}{M_A} \times 100\% \quad (23)$$

式中 M_A 为试验前倒入到料斗中的样品总质量, g; M_Z 为

试验后收集的剥出物中剥壳荞麦的质量, g; M_s 为试验后收集的剥出物中破损荞麦仁的质量, g。

3.3 试验平台的搭建

试验台示意图, 如图 12 所示。分级后的荞麦通过进料口落入到上、下砂盘的空腔后, 受下砂盘旋转产生的离心力作用, 荞麦做离心运动进入上下砂盘工作区, 完成搓碾剥壳, 然后从出料口流出。在旋力吸风器的作用下, 荞麦壳从剥出物中分离开, 最终收集到得到荞麦仁、碎荞麦仁及未剥壳荞麦混合物。



1. 入料口 2. 剥壳单元 3. 旋力吸风器 4. 三相异步电机 5. 出料口 6. 集料板
1. Feeding port 2. Shell unit 3. Rotary air suction 4. Three-phase induction motor 5. Discharge port 6. Aggregate plate

图 12 试验平台示意图

Fig.12 Schematic diagram of test bench

3.4 荞麦剥壳姿态和剥壳机理试验验证

试验选取等效粒径介于 4.6~4.8 mm 范围内的荞麦, 每次试验 500 g。下砂盘转速 950 r/min, 分布在 3 种不同的剥壳间隙 (3.8、4.8、5.8 mm) 下, 开展剥壳姿态验证试验。试验后, 收集已明显破壳但未脱壳的样品, 根据破壳位置的差异对样品进行分类, 如图 13 所示。

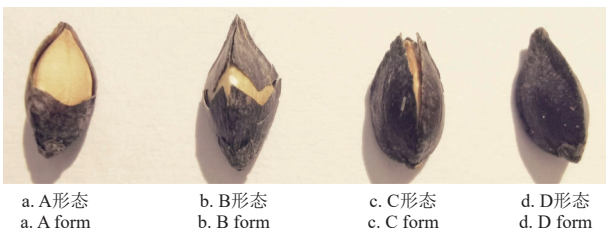


图 13 未剥壳荞麦状态示意图

Fig.13 Diagram of unshelled buckwheat status

结合荞麦剥壳过程中的不同姿态下剥壳时受力情况, 分析出未剥壳的荞麦有以下 3 种原因:

1) 在剥壳过程中荞麦以倾斜姿态进行剥壳时, 由于发生挤压时荞麦发生的形变量过小导致外壳出现部分脱落, 而大部分外壳仍然包裹着荞麦仁, 随后在下砂盘的转动下被甩出 (图 13a)。

2) 荞麦以水平姿态进行剥壳时, 当荞麦与上砂盘工作区接触的瞬間, 外壳会受到上砂盘的挤压并出现形

变。但是由于下砂盘的转动, 上砂盘对荞麦外壳的摩擦力不断增大, 导致外壳的棱边被砂盘磨平从而与上砂盘脱离接触 (图 13b)。

3) 小粒径荞麦进入到剥壳单元中时, 主要依靠与剥壳单元内壁发生碰撞使得外壳发生脱落。但在剥壳过程中还存在荞麦与荞麦之间的碰撞, 使荞麦离开剥壳间隙时的速度降低, 导致荞麦与剥壳单元内壁进行碰撞时无法外壳完全破裂 (图 13c)。

统计分析发现, 3.8 mm 剥壳间隙下, A 形态占比 20.1%, B 形态占比 79.9%; 4.8 mm 剥壳间隙下, A 形态占比 64.9%, B 形态占比 35.1%。比较两种间隙下 A、B 两种剥壳荞麦在样本中的比例, 可以得出以下结论: 剥壳间隙较小时, 剥壳过程中大多数的荞麦以水平姿态完成剥壳过程, 只有小部分荞麦以倾斜姿态完成剥壳过程。而剥壳间隙较大时, 大多数的荞麦以倾斜姿态完成剥壳过程, 小部分荞麦以水平姿态完成剥壳过程。

将机器的剥壳间隙调节至 5.8 mm, 此时对剥出物进行观察可知, 大部分未完全剥壳的荞麦外壳呈现开口现象。因此, 仅通过撞击作用进行剥壳的情况存在于剥壳过程中。

综合以上分析和验证, 荞麦在剥壳间隙最佳情况下 (4.8 mm) 进行剥壳时, 主要以倾斜姿态完成剥壳过程。同时也验证了 6QB-150 荞麦剥壳机的主要剥壳机理为端压撕搓法。

3.5 改进后上砂盘剥壳效率试验验证

对剥壳单元上砂盘进行替换, 在下砂盘转速 950 r/min, 剥壳间隙 4.8 mm。选取等效粒径介于 4.6~4.8 mm 范围内的荞麦, 每次试验 500 g, 为了保证试验数据的准确性, 每种砂盘剥壳过程均进行了 3 次重复试验, 剥壳后的混合物收集和筛分, 并对各部分进行称质量并封装, 如图 14 所示。对 3 次剥壳后的试验数据取平均值作为最终试验结果, 如表 4 所示。

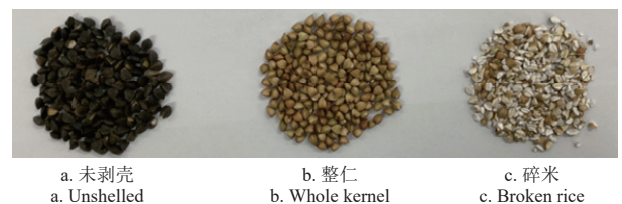


图 14 筛选后的剥出物状态

Fig.14 State of the extracted material after screening

表 4 荞麦在不同上砂盘剥壳单元进行剥壳的试验结果

Table 4 Results of buckwheat husking tests were carried out in different shelled units on sand trays (%)

上砂盘结构 Upper sand tray structure	试验指标 Test index	
	整仁率 Percentage of perfect kernel	碎仁率 Percentage of broken kernel
原上砂盘 Original sand tray	37.64	4.52
半圆形纹理上砂盘 Semicircle textured sand tray	15.61	0.62
三角形纹理上砂盘 Triangular textured sand tray	39.82	4.48

荞麦在相同转速和剥壳间隙条件下，分析其整仁率和碎仁率数值发现：上砂盘材质改为 45 号钢，并在其工作区添加规则的三角形表面纹理，可显著提高剥壳效率，降低破碎率；虽然半圆形纹理的碎仁率较低，但其整仁率也比原砂盘低；与半圆形纹理相比，剥壳单元间隙相同的情况下，三角形纹理结构的整仁率明显优于半圆形纹理，这与虚拟仿真的受力情况一致。

3.6 两种纹理结构最佳剥壳效率对比试验

为了研究不同纹理结构上砂盘的最佳剥壳间隙，在剥壳转速不变的情况下，人工观察剥壳试验后留在上砂盘工作区间内的荞麦姿态发现，三角形纹理结构上砂盘剥壳后部分荞麦以倾斜状态站立，而在半圆形纹理结构时，荞麦更多以水平状态位于剥壳工作区间。因此，针对等效粒径介于 4.6~4.8 mm 范围内的荞麦，探究三角形纹理结构上砂盘时，其剥壳间隙应略大于荞麦的高度；而探究半圆形纹理结构的最佳剥壳间隙时，应选取小于 4.6 mm 的间隙值进行单因素试验。

故选取 3.7、3.8、3.9、4.1、4.3 mm 作为剥壳间隙数值测试，每次置入 500 g 样品于料斗中，每个间隙试验重复 3 次并取平均值。试验结果见表 5。

表 5 半圆形纹理结构在不同剥壳间隙下的剥壳效率
Table 5 Peeling efficiency of semi-circular texture structure under different peeling gaps (%)

间隙 Gap /mm	试验指标 Test index	
	整仁率 Percentage of perfect kernel	碎仁率 Percentage of broken kernel
3.7	49.27	15.36
3.8	32.41	9.16
3.9	32.32	5.96
4.1	18.59	3.53
4.3	9.59	1.40

当剥壳单元工作区间为半圆形纹理结构时，不同间隙下，荞麦剥壳试验统计指标可知，当剥壳间隙越小，整仁率增加但碎仁率也随之增加。结合图 15a 可知，当剥壳间隙在 3.9 mm 时，剥壳过程其整仁率可达 32.32%，碎仁率 5.96%，相对于其他剥壳间隙较优。

由于荞麦在三角形纹理中以倾斜的状态停留在上下砂盘之间，此时大部分的荞麦通过端压撕搓法完成剥壳。因此，为了探究最佳剥壳间隙，选择比荞麦长度较大的剥壳间隙作为单因素试验水平。试验中选择了 4.6、4.8、4.9、5.0、5.2 mm 不同的间隙值，开展试验研究，剥出物统计分析结果，如表 6 所示。

表 6 三角形纹理结构在不同剥壳间隙下的剥壳效率
Table 6 Peeling efficiency of triangular texture structure under different peeling gaps (%)

间隙 Gap /mm	试验指标 Test index	
	整仁率 Percentage of perfect kernel	碎仁率 Percentage of broken kernel
4.6	54.38	18.95
4.8	45.57	8.49
4.9	44.03	5.59
5.0	41.09	3.75
5.2	18.53	1.36

当剥壳单元工作区间为三角形纹理结构时，在不同

间隙下对荞麦进行剥壳的试验，试验结果发现荞麦剥壳整仁率和碎仁率随着间隙的增加逐渐减少。具体而言，当剥壳间隙小于荞麦长度尺寸（4.8 mm）时，剥壳整仁率表现最佳，但碎仁率也会达到最高值。相反地，当剥壳间隙大于荞麦长度时，剥壳整仁率相对降低，但荞麦仁破损的概率较小，如图 15b 所示。

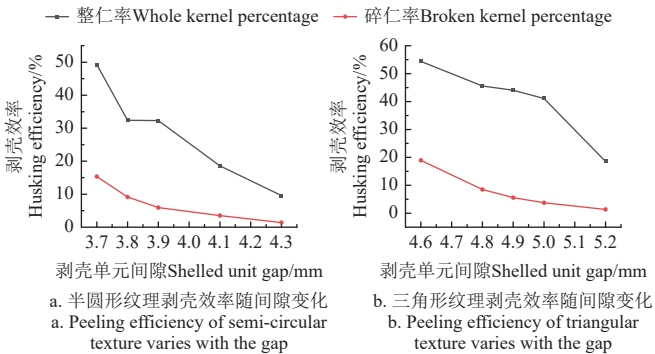


图 15 试验结果对比图
Fig.15 Experimental results comparison chart

从上述试验结果可知，整仁率和碎仁率指标之间存在矛盾，在生产过程中，通常折中考虑这两个指标，以实现剥壳品效最佳。因此，采用三角形纹理结构化改进的上砂盘，最佳间隙选择 4.9 mm，其单次剥壳整仁率为 44.03%，碎仁率为 5.59%；相较于未改进的剥壳单元（表 4），三角形纹理结构的单次剥壳整仁率提高约 7%。

根据荞麦在不同纹理形状的剥壳单元的试验结果可知，在最佳工作状态下，两种方法的剥壳碎仁率相近，而其整仁率存在显著差异，表明纹理结构对剥壳效率影响较大。从剥壳机理角度分析表明碾搓法的效率要低于端压撕搓法。因此，在实际生产中，应选择合适的剥壳间隙，使得绝大多数荞麦剥壳时处于端压撕搓状态。

4 结 论

1) 结合 6QB-150 荞麦剥壳机的砂盘间隙参数，对荞麦搓碾剥壳过程的机理进行分析与数学建模，研究了荞麦在剥壳过程中可能存在的剥壳姿态。当剥壳间隙大于等于荞麦宽、高尺寸且小于荞麦长度尺寸时，端压撕搓是荞麦搓碾剥壳过程中主导剥壳机制，且剥壳效率最高。

2) EDEM 仿真分析表明相同剥壳间隙条件下，通过在上砂盘的工作区间添加规则的表面纹理结构，可增加荞麦外壳与上砂盘之间的摩擦系数，有效调控荞麦在剥壳过程中的运动速度，有助于提高剥壳时荞麦运动的稳定性，提高机器的剥壳效率和剥壳质量，降低荞麦仁在剥壳过程中受损的可能性。

3) 开展不同剥壳单元荞麦剥壳性能试验研究，试验结果表明：三角形纹理结构化改进的上砂盘，在下砂盘转速相同情况下，剥壳间隙为 4.9 mm 时，单次剥壳整仁率为 44.03%，碎仁率为 5.59%，相较于未改进的剥壳单元，其单次剥壳整仁率提高了约 7%；而半圆形纹理结构，其剥壳以碾搓法为主，对剥壳效率提升不明显，该剥壳机制的效率要低于端压撕搓法。

[参 考 文 献]

- [1] 毛丙永, 郭伟灵, 钱平, 等. 低血糖生成指数食品的研究[J]. 现代食品, 2024, 30(5): 114-117, 124.
MAO Bingyong, GUO Weiling, QIAN Ping, et al. Study on the foods with low Glycemic index[J]. Modern Food, 2024, 30(5): 114-117, 124. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王迪, 杨汉梅, 李阳倩, 等. 苦荞麦“品、质、效、用”的多维评价及其活性成分高值化利用的研究进展[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(8): 1960-1974.
WANG Di, YANG Hanmei, LI Yangqian, et al. Multidimensional evaluation of “variety, quality, efficiency and application” of Tartary buckwheat and research progress of high-value utilization of active ingredients[J]. Zhejiang Agricultural journal, 2023, 35(8): 1960-1974. (in Chinese with English abstract)
- [3] 罗婷, 李国瑞, 由佳庆, 等. 药食同源作物荞麦的营养成分及保健作用[J]. 特种经济动植物, 2024, 27(2): 178-181.
- [4] 任长忠, 陕方, 王敏, 等. 荞麦营养与功能性研究及其产品开发[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(11): 261-269.
REN Changzhong, SHAN Fang, WANG Min, et al. Review on nutrition and functionality and food product development of buckwheat[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2022, 37(11): 261-269. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王立博, 陈静, 任艳娟, 等. 荞麦麸皮蛋白的制备及功能特性研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(12): 16-24.
WANG Libo, CHEN Jing, REN Yanjuan, et al. Preparation and functional properties of buckwheat bran protein[J]. China Condiment, 2023, 48(12): 16-24. (in Chinese with English abstract)
- [6] 苏日他拉图. 库伦旗荞麦文化资源产业开发研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.
SU Ritalatu. The Research on Development of Buckwheat Cultural Resources Industry in KulunPrefecture[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘广硕, 姜永法, 杜文亮. 我国荞麦剥壳设备发展现状及展望[J]. 南方农业, 2020, 14(5): 145-146.
- [8] 吴英思, 杜文亮, 刘飞, 等. 荞麦剥壳机分离装置的改进试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 127-131.
WU Yingsi, DU Wenliang, LIU Fei, et al. Improvement experiments on the separating device of buckwheat shucker[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(5): 127-131. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李若瑗. 6FY-22 系列荞麦脱壳机的研究[J]. 农业技术与装备, 2021(2): 18-19.
LI Ruoyuan. Study of 6FY-22 series buckwheat huller[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2021(2): 18-19. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈伟. 基于低损高效的荞麦籽粒剥壳机理及剥壳机性能试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
CHEN Wei. Experimental Study on the Mechanism of Buckwheat Kernel Shelling and the Performance of Sheller Based on Low Loss and High Efficiency[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [11] 朱新华, 范维果, 李泽, 等. 苦荞麦非热脱壳机试验研制[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(12): 146-155.
ZHU Xinhua, FAN Weiguo, LI Ze, et al. Test and development of an non-thermal tartary buckwheat huller[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(12): 146-155. (in Chinese with English abstract)
- [12] HE T, ZHANG R, et al. Structure, working principle and application of mechanical shell breaker[J]. Food and Machinery, 2023, 39(7): 215-222.
- [13] 郝建军, 聂庆亮, 马璐萍, 等. 锥盘式花生种子脱壳装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 27-34.
HAO Jianjun, NIE Qingliang, MA Luping, et al. Development of cone disc type shelling mechanism for peanut seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(17): 27-34. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陆荣, 刘志侠, 高连兴, 等. 立锥式小区花生脱壳机气吸清选装置研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 23-30.
LU Rong, LIU Zhixia, GAO Lianxing, et al. Development of air suction cleaning device of vertical conical peanut sheller for plot planting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(21): 23-30. (in Chinese with English abstract)
- [15] 成图雅, 陈伟, 杜文亮. 荞麦剥壳机流量控制对剥壳效果的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(1): 174-179.
CHENG Tuyu, CHEN Wei, DU Wenliang. The influence of flow control of buckwheat shelling machine on the shelling effect[J]. Henan Agricultural Science, 2020, 49(1): 174-179. (in Chinese with English abstract)
- [16] 马宗雨, 张志强, 陈文星, 等. 荞麦物料特性及剥壳过程试验研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(8): 109-114.
MA Zongyu, ZHANG Zhiqiang, CHEN Wenxing, et al. Experimental study on material characteristics and husking process of buckwheat[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2021, 42(8): 109-114. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘艳辉, 杜文亮, 吴英思. 苦荞麦脱壳工艺及主要参数的优化[J]. 农机化研究, 2008(12): 131-133.
LIU Yanhui, DU Wenliang, WU Yingsi. Experimental study on the optimization of the huling method and main parameters of tartarian buckwheat[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(12): 131-133. (in Chinese with English abstract)
- [18] 高树琴, 胡兆民, 王竑晟, 等. 智慧农业助力粮食生产节本增产增效的“九步法”[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(1): 198-209.

- GAO Shuqin, HU Zhaomin, WANG Hongcheng, et al. Nine-step approach of smart agricultural helps grain production reduce costs, increase yield and efficiency[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(1): 198-209. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈震, 金晓蕾, 杜文亮, 等. 不同品种荞麦的物理特性参数测试研究[J]. *内蒙古农业大学学报 (自然科学版)*, 2020, 41(03): 56-61.
- Chen Zhen, JIN Xiaolei, DU Wenliang, et al. Studies on the influencing factors and evaluation method of stripping buckwheat varieties[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2020, 41(03): 56-61. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孙静鑫, 郭玉明, 杨作梅, 等. 荞麦籽粒生物力学性质及内芯黏弹性试验研究[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(23): 287-298.
- SUN Jingxin, GUO Yuming, YANG Zuomei, et al. Experimental study on the biomechanical properties and inner core viscoelasticity of buckwheat grains[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(23): 287-298. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈伟, 杜文亮, 政东红, 等. 荞麦剥壳机性能参数试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(7): 107-114.
- CHEN Wei, DU Wenliang, ZHENG Donghong, et al. Experimental study and parameter analysis on buckwheat huller[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(7): 107-114. (in Chinese with English abstract)
- [22] XU Yunfeng, ZHANG Xiliang, WU Shuo, et al. Numerical simulation of particle motion at cucumber straw grinding process based on EDEM[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2020, 13(6): 227-235.
- [23] 陈硕, 江礼坚, 林谢昭, 等. 基于离散元法的面粉颗粒接触参数标定试验[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(11): 69-76.
- CHEN Shuo, JIANG Lijian, LIN Xiezhao, et al. Calibration tests for the contact parameters of flour particle using discrete element method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(11): 69-76. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李晓冉, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 稻麦油兼用高速气送集排器螺旋斜置式搅种装置研制[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(4): 51-61.
- LI Xiaoran, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Development of the spiral-inclined seed stirring equipment in high-speed air-assisted centralized metering for rice, wheat, and rapeseed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(4): 51-61. (in Chinese with English abstract)
- [25] 崔涛, 荆茂盛, 张东兴, 等. 玉米果穗离散元模型构建与脱粒仿真验证[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(24): 33-46.
- CUI Tao, JING Maosheng, ZHANG Dongxing, et al. Construction of the discrete element model for maize ears and verification of threshing simulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(24): 33-46. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张春, 杜文亮, 陈震, 等. 荞麦米筛分物料接触参数测量与离散元仿真标定[J]. *农机化研究*, 2019, 41(1): 46-51.
- ZHANG Chun, DU Wenliang, CHEN Zhen, et al. The measurement of contact parameters of buckwheat rice screening material and discrete element simulation calibration[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(1): 46-51. (in Chinese with English abstract)
- [27] 徐兵, 郑德聪, 崔清亮. 基于 EDEM 的荞麦籽粒建模及振动筛分数值模拟[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(5): 121-126.
- XU Bing, ZHANG Decong, CUI Qingliang, et al. Modeling of buckwheat grains based on EDEM and numerical simulation of vibratory screening[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(5): 121-126. (in Chinese with English abstract)
- [28] 郝建军, 魏文波, 黄鹏程, 等. 油菜籽粒离散元参数标定与试验验证[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12): 36-44.
- HAO Jianjun, WEI Wenbo, HUANG Pengcheng, et al. Calibration and experimental verification of discrete element parameters of oil sunflower seeds[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(12): 36-44. (in Chinese with English abstract)
- [29] 孙静鑫, 司海涛, 李晓斌, 等. 杂粮籽粒恢复系数测定试验与分析[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(6): 88-93.
- SUN Jingxin, SI Haitao, LI Xiaobin, et al. Measurement test and analysis on the restitution coefficient of the coarse cereals grain[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(6): 88-93. (in Chinese with English abstract)
- [30] DEVAKUMAR L, RANGANATHAN R, RAJASEKAR R, et al. Review on parameters influencing the rice breakage and rubber roll wear in sheller[J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, 62(3): 1875-1880.
- [31] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 稻谷: GB1350-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [32] 中华人民共和国工业和信息化部. 胶辊砻谷机: JB/T10267-2013[S]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

Analysis of the hulling mechanism for the buckwheat and improvement of texture of hulling unit

FAN Bin^{1,2}, RUAN Hongbao¹, JIN Tianshun¹, DU Wenliang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Engineering Research Center of Intelligent equipment for the entire process of forage and feed production, Hohhot 010018, China)

Abstract: Buckwheat shucking has been one of the important technologies during processing. At the same time, a large number of efforts have been focused mainly on the design of buckwheat shucking machines, in order to explore the best shucking parameters. Among them, the upper and lower sand tray-type buckwheat sheller has been widely used in recent years, because of the high processing efficiency and excellent sheller performance. The optimal sheller parameters have also been explored on the upper and lower tray-type buckwheat sheller. However, it is unclear on the mechanism of the buckwheat rolling sheller. The low accuracy of the sheller gap and the strong random posture of buckwheat sheller have led to the low efficiency of a single sheller and the high rate of broken kernel after the sheller. This study aims to carry out the analysis and experimental investigation of the buckwheat hulling mechanism. The 6QB-150 buckwheat sheller was taken as the research object. The specific mechanism of the buckwheat hulling and mathematical modeling was proposed to determine the possible hulling posture of buckwheat during hulling. The mathematical model was established to compare the husking mechanism of the grinding and the end pressing and tearing. The grinding was suitable for the case, where the gap between the upper and lower sand pans was slightly smaller than the equivalent particle size of the material; The end pressing, tearing, and rolling were suitable for the case, where the gap between the upper and lower sand pans was slightly larger than the equivalent particle size of the material and smaller than the length of the material. Engineering discrete element method (EDEM) software was used to analyze the motion state of the buckwheat husking. After that, the husking unit was improved to explore the influence of different texture structures on the husking. EDEM simulation analysis showed that the regular structure of surface texture was added into the working interval of the upper sand plate under the same shucking gap condition. There was an increased friction coefficient between the buckwheat shell and the upper sand plate. The movement speed of buckwheat was effectively regulated in the process of shucking. The stability of buckwheat movement was improved for the high efficiency and quality of the machine during shucking. The damage of buckwheat kernel was also reduced during shucking. Finally, the husking performance test was carried out on the buckwheat with the equivalent particle size (similar to the width and height of buckwheat) from 4.6 to 4.8 mm. The results showed that there were similar kernel breaking rates and significant differences in the kernel whole rates, indicating that the texture structure had a great influence on the husking efficiency. The angle of the shucking mechanism showed that the efficiency of the grinding and rolling was lower than that of end pressing and tearing. Therefore, the appropriate shucking gap should be selected for the most buckwheat at the end pressing and rolling state in actual production. When the shucking gap was greater than or equal to the equivalent diameter of buckwheat and less than the length of buckwheat, the end pressing and tearing were the dominant mechanisms with the highest shucking efficiency. In addition, the triangular texture was used to improve the surface texture in the working area of the upper sand pan, when the rotating speed of the upper sand pan was 950 r/min and the shucking gap was 4.9 mm, the kernel integrity rate of a single shucking was 44.03% and the kernel breaking rate was 5.59%. Compared with the unimproved shucking unit, the regular structure of the triangular convex significantly reduced the randomness of the buckwheat shucking attitude. The single peeling rate of the kernel also increased by about 7%.

Keywords: grain; agricultural machinery; texture; buckwheat; shelling mechanism; EDEM simulation