

刘道奇,孙千涛,刘 龙,等. 气吸式花生壳仁清选装置仿真分析与试验[J]. 江苏农业科学,2022,50(6):162-167.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.06.027

气吸式花生壳仁清选装置仿真分析与试验

刘道奇^{1,2}, 孙千涛^{1,2}, 刘 龙^{1,2}, 钱 凯^{1,2}, 靳昱昱^{1,2}, 王东伟^{1,2,3}, 李秀杰^{1,2}

(1. 河南省农业科学院长垣分院,河南长垣 453400; 2. 河南省花生耕种收加工智能设备工程研究中心,河南长垣 453400;
3. 青岛农业大学机电工程学院,山东青岛 266109)

摘要:针对花生脱壳后花生仁与花生壳分离不彻底的问题,设计出一款负压风机-筛网组合清选装置。对影响清选效果的因素进行全面分析,排除了影响其作业效果的不可控因素,同时对重复影响清选效果的因素进行了梳理和分析,确定了影响清选的主要因素:含水率、辊筒转速、风机转速,并根据样机设计了花生脱壳试验。为分析气流在清选室内的分布特性及对仁-壳分离的影响,优化负压风机工作参数,以 Fluent 为工具,建立清选室内流场仿真模型,对花生仁壳的运动状态进行模拟仿真分析。结果表明,花生仁、壳在流场里有高速吸出、悬停、下落 3 种状态;破碎后体积较小的碎壳在流场中的停留较为随机,停留时间较长;负压风机转速为 1 150 r/min 时,碎壳被吸出效果最好,花生仁不易被吸出,部分大壳被吸出。样机试验表明:花生壳吸出率随负压风机转速上升而增大,当转速为 1 150 r/min 时分选效果最好,花生仁干净度达 98%。通过仿真分析及试验,得到了各因素对清选干净度影响的显著性与相关性,并得到了清选干净度最大的作业参数,为今后花生种子脱壳作业参数的确定提供参考。

关键词:农业机械;清选装置;参数优化;流体模型;样机试验

中图分类号:S226.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)06-0162-06

花生是世界四大油料作物之一^[1]。花生果实为荚果,主要由花生壳、花生种皮、花生仁 3 个部分组成^[2]。花生壳的主要成分为粗纤维,其他成分有粗蛋白、粗脂肪、可溶性碳水化合物、淀粉、还原糖、戊糖等^[3-4]。2008 年国家质量监督检验检疫总局发布了国家标准(GB/T 1532—2008 国家花生标准),确定了花生的分类、质量要求和检验方法。花生脱壳是花生取油、制种前的一道重要工序,花生果机械化脱壳后形成花生仁、花生壳、碎屑等混合物,气力清选装置能够有效清除物料中的杂质^[5-6]。国外学者对物料在气流中的运动做了大量理论分析和试验研究:Yuu 等通过数值模拟和试验得出了气流场中颗粒物的位置规律和流动特性^[7];Casarsa 等对贯流风机的风场特性进行研究,试验表明涡流对流场速度分布有影响,涡流能降低风选损失^[8]。

国内学者主要对物料清选特性及结构进行研究:邓春香等通过公式估算和试验测量验证的方法,测出了谷物脱出物各物料的悬浮速度并建立了运动学和动力学方程^[9];廖庆喜等自行研制气流清选和筛选组合式的清选试验台,探明影响油菜清选性能的因素主次顺序及最佳性能参数^[10];伊文静等自制旋风清选试验台,探索清选系统的结构参数和运动参数对谷物清选性能的影响^[11]。学者们主要对物料风选模型及物料筛式分离装置进行研究,而对花生果破碎后的清选方法和装备设计研究较少。目前荚果类物料清选多采用筛选与风选相结合模式,利用壳仁在风场中的悬浮速度差异实现分离。由于花生壳较脆且机械脱壳力不均匀,果壳被分裂成大壳和小壳,少量花生仁也会破裂成碎仁。小壳和碎仁可归类为碎屑,单纯采用筛网分离,清选率极低,若增加风机,组成分筛混合式分离机构,清选率有所提高。由于传统风机气流进口方向与筛网出口方向一致,导致筛分效果下降,有部分小果混入花生仁中,清选效果较差。为解决上述问题,笔者所在课题组研制出一台花生脱壳机,设计出气吸式花生壳仁清选装置,该装置能将混合物中的碎屑提前吸出并收集,提高整机清选率。本试验重点研究气吸式清选装置中气流对花生果混合物的吸出特性,

收稿日期:2021-01-02

基金项目:国家花生产业技术体系项目(编号:CARS-14);河南省科技攻关项目(编号:212102110225);河南省农业科学院“四优四化”科技支撑行动计划(编号:SYSH2018-09-04)。

作者简介:刘道奇(1992—),男,河南信阳人,硕士,助理研究员,主要从事农业机械化研究。E-mail:15704485800@163.com。

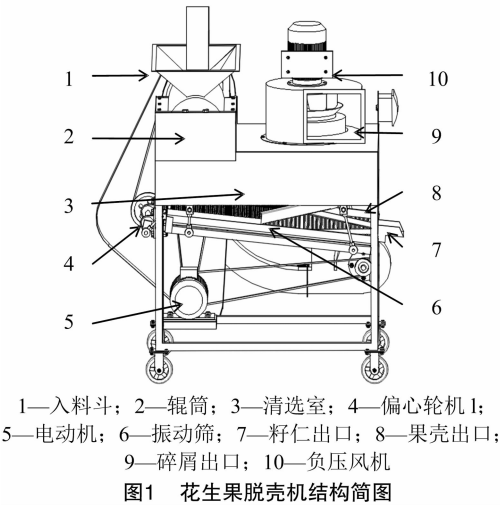
通信作者:李秀杰,博士,副研究员,主要从事作物保护研究。E-mail:lixu jie@126.com。

应用 ANSYS/Fluent 软件构建气流场模型,模拟出混合物中各颗粒的运动轨迹,优化负压风机转速,并采用样机试验以验证设计方案的可靠性,希望能为相关研究和应用提供参考和借鉴。

1 整机结构及气吸式清选原理

1.1 花生果脱壳机整体结构

花生果脱壳机主要由脱壳装置、气吸式壳仁清选装置和风筛式壳仁清选装置组成,其结构如图 1 所示。



花生果通过入料斗进入脱壳机构,电动机通过皮带驱动脱壳辊筒,挤压揉搓花生果以实现持续脱壳;花生壳仁混合物落入清选室中,负压风机在清选室和脱壳辊筒出料口产生气流,吸出质量较轻的果壳及碎屑,并在碎屑出口处收集,实现壳仁一次分离;电动机将动力传递至偏心轮机构,驱动振动筛做往复抖动,负压风机由单独电机驱动,在筛孔处产生冲击气流,果壳和仁在振动筛和负压风机双重作用下实现二次分离,分别从花生壳出口和花生

仁出口排出。

1.2 气吸式清选装置

气吸式壳仁清选装置主要由清选室、脱壳辊筒出料口及负压风机等部件组成。其工作原理为负压风机在电动机驱动下高速旋转,使清选装置内部产生气压差,进而形成从脱壳辊筒出料口到清选室的气流;辊筒挤压揉搓后的花生仁、壳混合物由出料口进入清选室,初始下落速度较大,当撞击到辊筒外侧板时,成股混合物料被分散开,下落速度随之降低;在吸风口位置,悬浮速度较小的果壳及碎屑受低气压吸附作用和气流推动作用运动到清选室上部,经负压风机从碎屑出口排出,体积较大的壳和仁则在重力作用下,由出料口下落,进行后续分离(图 2)。该壳仁清选装置的清选效果受出料口面积、出风口面积、负压风机结构尺寸、风机转速等因素影响。由于风机是采购件,其结构和尺寸相对固定。本试验旨在研究负压风机转速对清选效果的影响,依据前期研制的花生脱壳机结构尺寸,定义吸风口面积为 $12.56 \times 10^{-2} \text{ m}^2$,出风口面积为 $8.94 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 。选用单面进风、低压离心式风机^[12-13]。叶片采用径向叶片,叶片数为 6 张^[14](图 3)。

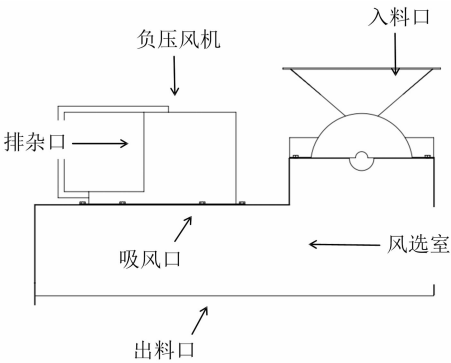


图2 气吸式清选装置结构示意图

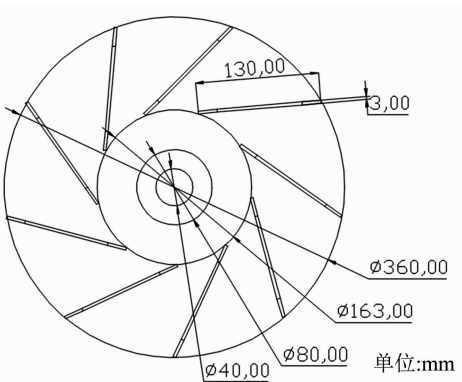
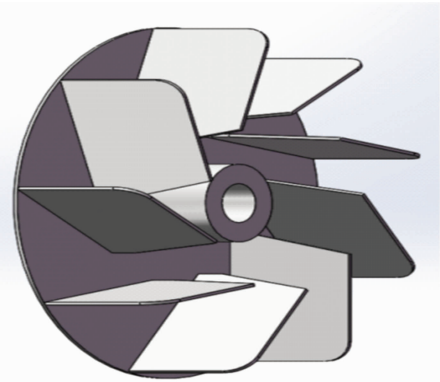


图3 叶轮外形尺寸图

1.3 理论分析

在花生果壳、仁混合物与气流场组成的气固两相流体系统中,由于花生果仁、壳对气流影响较小,故可忽略气流场与物料之间的相互耦合作用^[15]。壳、仁混合物在流场中受到的力有绕流阻力 R 、浮力 F 和重力 G ,假设壳、仁均简化为球体,则各力的表达式为^[16-17]:

$$\begin{cases} R = C \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \rho \cdot \frac{v_l^2}{2} \\ F = \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot \rho \cdot g \\ G = \frac{\pi}{6} \cdot d^3 \cdot \rho_s \cdot g \end{cases} \quad (1)$$

式中: C 为阻尼系数,与物料形状、表面状态及雷诺系数等有关; d 为物料的直径(mm); ρ 为空气密度(kg/m^3); v_l 为作用在物料上的气流速度(m/s); ρ_s 为物料密度(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2)。壳、仁混合物在流场中的受力分析如图 4 所示。 R_x 、 R_y 分别为绕流阻力在 X 方向和 Y 方向上的分力; F_x 、 F_y 分别为浮力在 X 方向和 Y 方向上的分力。绕流阻力和浮力方向均与气流方向相同,重力方向竖直向下。由受力平衡可得,物料被气流吸出的临界条件为:

$$F_y + R_y = G, \text{ 即: } F \cdot \sin\theta + R \cdot \sin\theta = G. \quad (2)$$

式中: θ 为气流方向与 X 轴正向之间的夹角($^\circ$)。综

合分析式(1)(2)可知:理想状态下,当物料尺寸、密度一定时,物料在流场中的运动状态只受气流速度影响。而当清选装置的结构和尺寸都固定时,气流速度主要由负压风机转速确定。因此,负压风机转速是影响壳、仁混合物运动状态的关键因素。

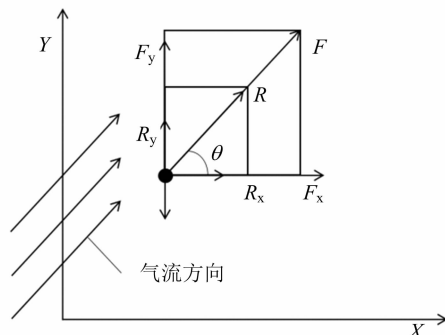


图4 壳、仁混合物在流场中的受力分析

2 模拟仿真分析

2.1 模型建立与网格划分

在 Solid Works 2018 中根据样机尺寸建立模型并导入 ANSYS Workbench 17.0 中进行网格划分。将对试验结果影响不大的倒角、观察口等结构进行简化处理,并进行布尔减操作,得到流道模型。根据模型结构特点,设置进风口为 inlet,出风口为 outlet,风机外壳为 wall,生成网格单元共有 3.89×10^5 个。网格划分结果如图 5 所示。

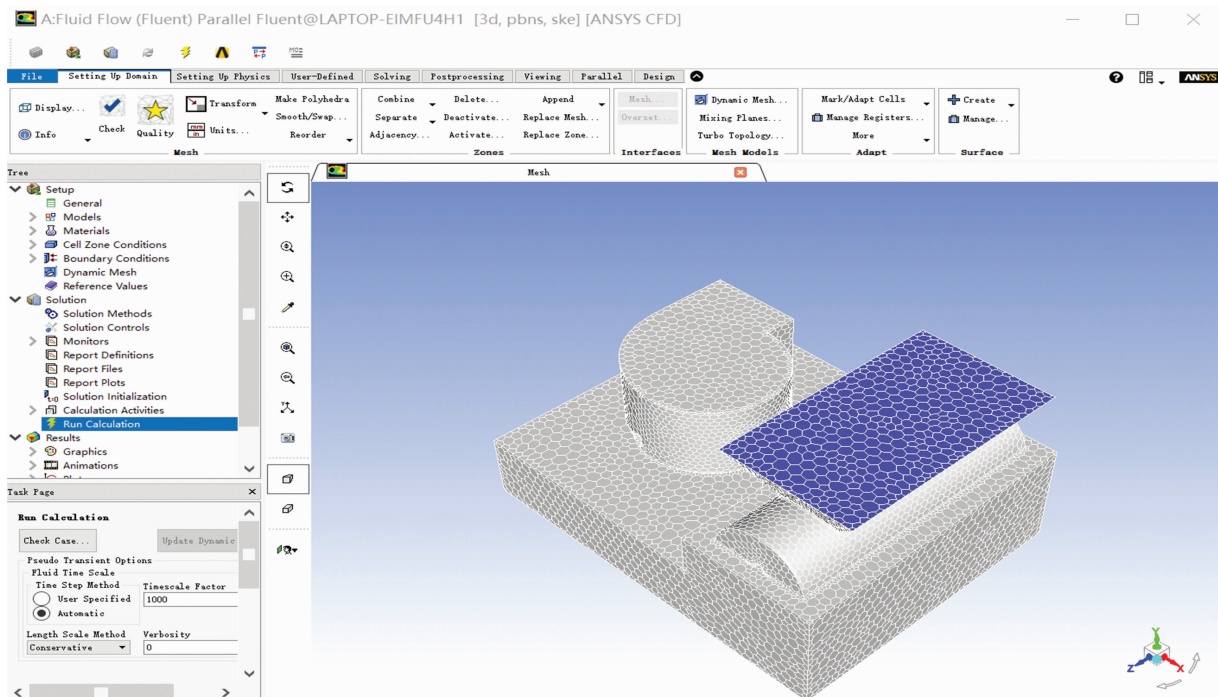


图5 网格划分

2.2 边界条件

仿真分析时,对模型进行如下假设:(1)空气为不可压缩理想空气;(2)室温为恒定 25 ℃,大气压为恒定 1.01×10^5 Pa;(3)气流运动过程中没有热交换^[18-19]。将进风口流道、蜗壳流道设置为静止区域^[20],将叶轮流道设置为转动区域,采用多重参考系(MRF)法进行仿真^[21-22]。将入风口设置为压力入口,出风口设置为压力出口。气流入口与出口直接与大气相通,故设置入口总压、出口静压为大气压。除内部面、入口、出口,其余表面设置为固定壁面^[23]。采用当量球形模拟脱壳后物料^[24]。试验测得果壳密度为 330 kg/m^3 ,大壳的当量直径为 12 mm,小壳的当量直径为 8 mm;果仁密度为 $1\,000 \text{ kg/m}^3$,完整籽仁的当量直径为 9 mm,碎仁的当量直径为 4.5 mm;定义最大步数 8 000,步长因子 1。

2.3 控制方程

清选装置工作时,气流运动方向较为一致,流体包含平壁边界层流动和管道流动,不存在强旋现象,仅在部分区域产生弱旋流动,导致流速变化,产

生湍流。故控制方程可采用标准 K- ε 模型^[25],其通用形式描述为:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \text{div}(\rho \mu \varphi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \varphi) + S. \quad (3)$$

式中: ρ 为空气密度(kg/m^3); φ 为通用传输量; t 为时间(s); μ 为流体速度矢量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。

2.4 动态仿真分析

初设负压风机转速为 1 450 r/min,清选装置内部产生的气流场如图 6 所示。由速度云图可知,气流由清选室运行至负压风机,方向基本保持一致;负压风机旋转区域附近气流产生局部气旋现象,但气流方向大致指向出风口;吸风口处气流速度为 4.50 ~ 8.60 m/s。由压力云图可知,负压风机转动使风选箱内部形成低压区域,物料吸风口处气压值最低,为 100.90 ~ 100.99 kPa。由流场分析可以推断:物料运动至吸风口处时,受低气压吸附作用和气流推动作用,质量较小的物料经清选室运动至吸风口,最后从出料口排出。

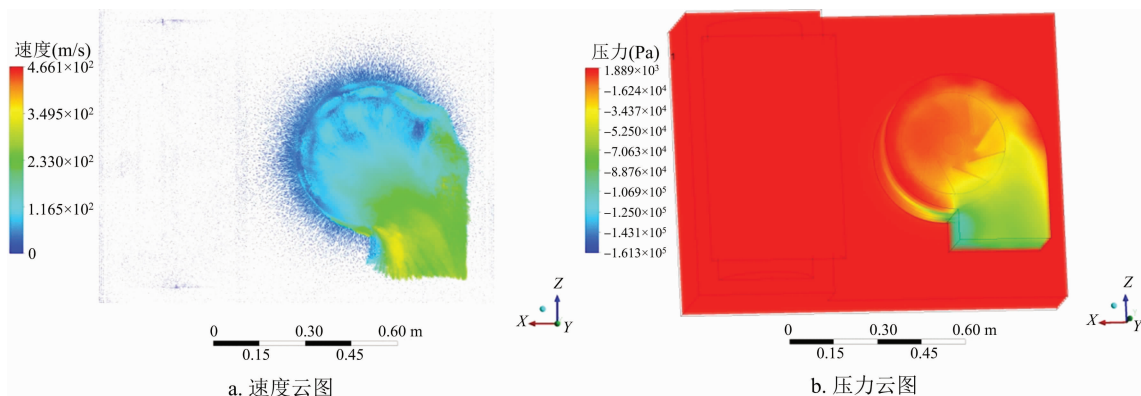


图6 流场分析

2.5 转速对物料吸出特性的影响

设置不同的负压风机转速,分析不同转速下物料在清选装置中的运动状态可知,物料在清选装置中有被完全吸出、在通风管中滞留、直接掉落 3 种运动状态。同时有以下结论:当转速达到 850 r/min 时,小壳开始被吸出;当转速达到 1 000 r/min 时,碎仁在通风管中滞留;转速达到 1 150 r/min 时,大壳开始被吸出;转速达到 1 450 r/min 时,碎仁开始被吸出。如图 7 所示,小壳在气流作用下经清选室运动到吸风口,由出料口排出;碎仁被吸出清选室后,无法运动至负压风机,在吸风口中滞留;大壳和籽仁不被吸出,由落料口掉落下来。

图 8 为负压风机转速为 1 150 r/min 时,脱壳后

小壳、大壳、碎仁及完整仁在清选装置中的运动轨迹。小壳在清选室到出料口运动过程较为复杂,在转速为 1 150 r/min 时,小壳在清选室中停留的时间和运动轨迹长度都较短,此时清选效率高。风选目的是在不吸出碎仁和完整仁的工况下,更高效地吸除小壳,结合最低吸出转速和清选效率。当转速为 1 150 r/min 时,完整仁和碎仁不被吸出,小壳可被有效吸出,同时部分大壳被吸出,满足清选目的;故 1 150 r/min 为负压风机最佳转速。

3 样机试验

3.1 试验装置与方法

选用河南省新乡市原阳县产花生果,放置 15 d,

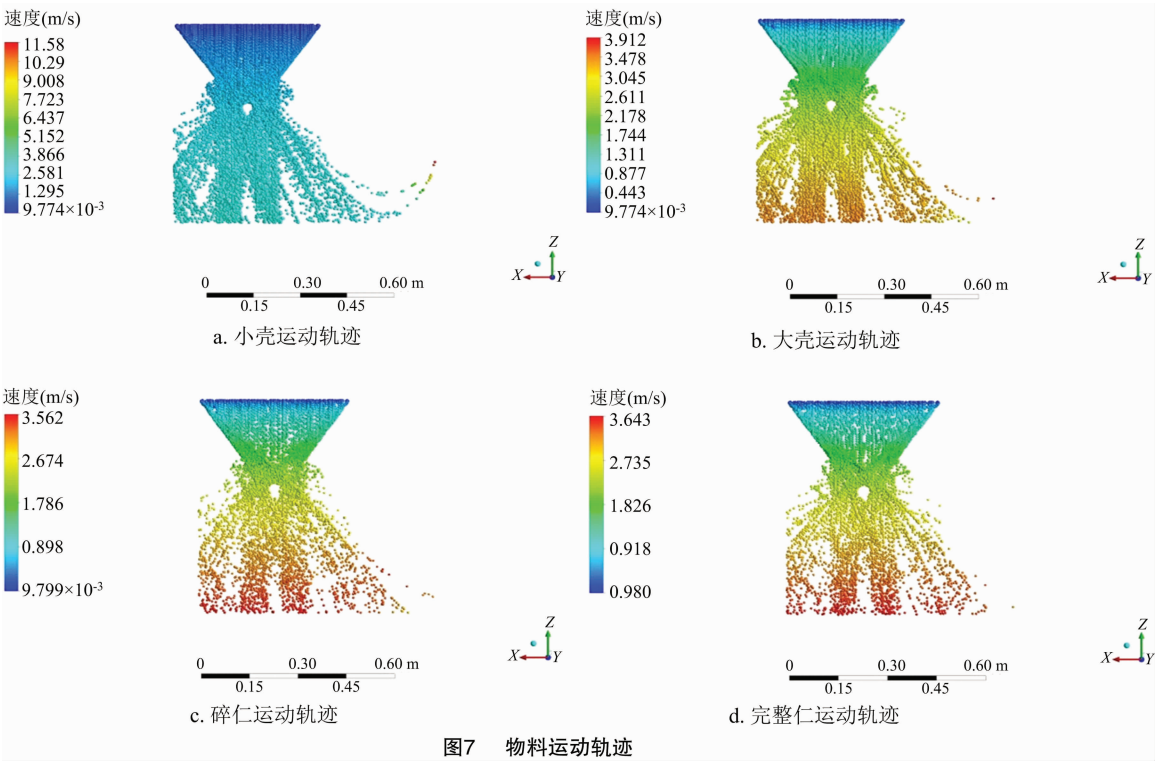


图7 物料运动轨迹

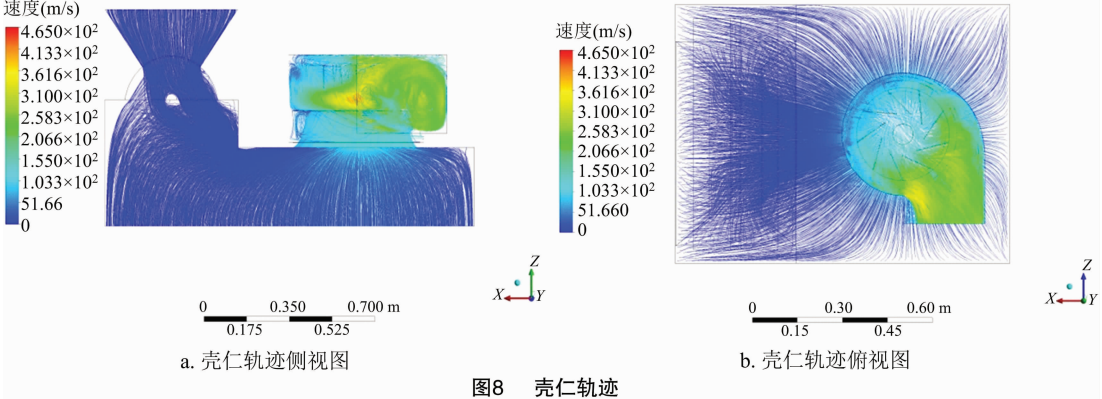


图8 壳仁轨迹

通风日晒,果壳平均含水率为 12%。通过单一变量法对壳仁清选装置样机(图 9)进行清选效果验证试验。以负压风机转速为自变量,以清选装置清选干净率为因变量,进行 4 组试验。每组试验通过变频器调节负压风机转速,取花生果脱壳后壳仁混合物 50 kg,由入料口进入清选装置,经不同负压风机转速条件清选装置清选后,收集由落料口掉落的物料,并人工分拣出籽仁,称量籽仁质量并计算各组试验干净率^[26]。干净率计算公式如下:

$$Y = \frac{m_0}{m} \times 100\% \quad (4)$$

式中: Y 为干净率(%); m_0 为人工分拣出的籽仁质量(kg); m 为籽仁出口物料总质量(kg)。



图9 试验样机

3.2 试验结果

随着负压风机转速增大,被吸出的果壳逐渐增

加,干净率逐渐增大。当转速为 1 150 r/min 时,清选干净率达 98%;而当转速达到 1 450 r/min 时,出料口开始有碎仁被吸出;故 1 150 r/min 为负压风机的最佳转速(图 10)。

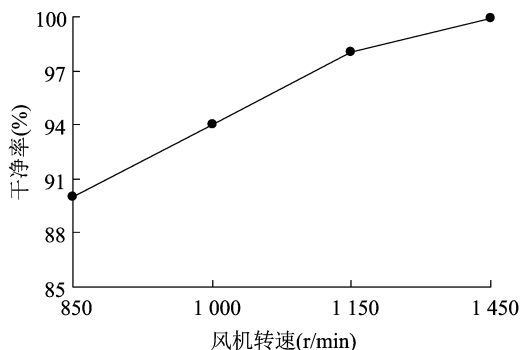


图10 干净率随转速变化曲线

4 结论与讨论

与已有花生脱壳清选机^[27-28]相比,本试验独立设计出一种气吸式花生果壳仁清选装置,将脱壳后壳仁混合物中的碎屑提前吸出并收集,以提高整机清选率。为分析吸出效果,运用 ANSYS/Fluent 软件构建了气流场模型,模拟出混合物中各颗粒的运动轨迹。仿真分析表明,花生果脱壳后混合物料在流场中有被吸出、滞留、直接掉落 3 种运动情况;小壳在清选装置中停留时间较为随机,运动轨迹长度随转速增大而总体增大。负压风机最佳转速为 1 150 r/min,此时小壳在清选装置中停留时间和运动轨迹长度较短,清选效率高;果仁和碎仁不被吸出,部分大壳被吸出。样机试验表明,当负压风机转速调至 1 150 r/min 时,干净率高达 98%。由于负压风机转速高,碎屑被吸出时具有较大抛离速度,导致扬程较远,给碎屑收集带来困难,且影响环境质量。因此,设计合理的碎屑收集器成为后续完善气吸式花生果壳仁清选装置的研究方向之一。

参考文献:

- [1] 胡志超. 花生生产机械化关键技术[M]. 镇江:江苏大学出版社,2017.
- [2] 林 茂. 花生品质特性及加工技术[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2019.
- [3] 董文召,韩锁义,徐 静,等. 花生壳研究现状与应用前景分析[J]. 中国农学通报,2019,35(32):14-19.
- [4] 靳昙县,刘 龙,刘道奇,等. 激光切割花生荚果挤压断裂力学特性试验与分析[J]. 农机化研究,2022,44(4):147-152.
- [5] 杨 猛,胡志超,张延化,等. 农业颗粒物料气力清选装置研究现状与展望[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):121-127.

- [6] 孙千涛,钱 凯,刘道奇,等. 锯片式花生去柄清选试验台的设计与试验[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2021,41(3):121-128.
- [7] Yuu S, Nishikawa H, Umekage T. Numerical simulation of air and particle motions in group-B particle turbulent fluidized bed[J]. Powder Technology, 2001, 118(1/2):32-44.
- [8] Casarsa L, Giannattasio P. Experimental study of the three-dimensional flow field in cross-flow fans[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(6):948-959.
- [9] 邓春香,陶栋材,高静萍. 气流清选风车中谷物的动力学特性和影响因素的研究[J]. 农业工程学报,2006,22(4):121-125.
- [10] 廖庆喜,陈 立,李海同,等. 油菜联合收获机脱出物清选试验台[J]. 农业机械学报,2013,44(10):80-85,79.
- [11] 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] 吴英思. 荞麦脱壳后分离装置的试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [13] 刘艳艳. 风筛式清选装置中离心风机的试验研究及仿真分析[D]. 镇江:江苏大学,2009.
- [14] 于静梅,李 颂,郝俊忠. 离心式风机流动特性的数值分析[J]. 流体机械,2011,39(9):34-37.
- [15] 张 敏,吴崇友,张文毅. 吸盘式水稻育秧播种器吸孔气流场仿真分析[J]. 农业工程学报,2011,27(7):162-167,393.
- [16] 孔 珑. 两相流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [17] 董 钢. 风筛式清选装置虚拟样机的建模与性能仿真[D]. 镇江:江苏大学,2006.
- [18] 王永维,曹 林,王 俊,等. 气吸式水稻育秧整盘播种机吸孔流场模拟与播种试验[J]. 农业机械学报,2014,45(4):96-102.
- [19] 赵学观,徐丽明,王应彪,等. 基于 Fluent 与高速摄影的玉米种子定向吸附研究[J]. 农业机械学报,2014,45(10):103-109,28.
- [20] 刘道奇,范传辉,董慧锋,等. 基于 Fluent 的负压式电加热干燥器内部流场分析与机构参数优化[J]. 食品与机械,2017,33(9):94-98,191.
- [21] 王企鲲. 导流型垂直轴风力机内部流场数值模拟中若干问题的探讨[J]. 机械工程学报,2011,47(4):147-154.
- [22] 何 炜,马 静,王 东,等. 多参考坐标系法和滑移网格法在汽车前端进气数值模拟中的比较[J]. 计算机辅助工程,2007,16(3):96-100.
- [23] 楼建忠,李建平,朱盘安,等. 斜插式蔬菜嫁接机穗木气吸吸头优化设计[J]. 农业机械学报,2013,44(2):63-68.
- [24] 杜小强,肖梦华,胡小钦,等. 贯流式谷物清选装置气固两相流数值模拟与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(3):27-34.
- [25] 江 帆,黄 鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [26] 高连兴,李献奇,关 萌,等. 双吸风口振动式花生荚果清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(3):110-117.
- [27] 聂庆亮. 花生种子分级脱壳一体机优化设计与试验[D]. 保定:河北农业大学,2021.
- [28] 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.