doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.012

山核桃物料风选机理与风选性能试验研究

曹成茂^{1,2} 罗 ^{1,2} 彭美乐^{1,2} 吴正敏^{1,2} 刘光宗^{1,2} 李 正^{1,2} (1.安徽农业大学工学院,合肥 230036; 2.安徽省智能农机装备工程实验室,合肥 230036)

摘要:破壳后物料分离是山核桃深加工的关键技术,仿真分析了山核桃破壳后各种形状壳仁的物理特性。研究利用物料的壳与仁的含水率的区分度、物料的力学参数与其形状系数使壳、仁和壳仁嵌合物的悬浮速度重合区间减小,并且研究了风速均匀性和控制风速精度对复杂物料风选的影响。混合物料试验确定了在风速8.2 m/s、仁含水率为23.6%、壳含水率为5%、迎风面容量比为50%左右时,总体清选率为99.2%、误选率为0.8%,剩余物料在含水率均为23.6%、风速为11.7 m/s时使清选率达到100%、误选率2.3%,含水率为23.6%时物料最大碰撞力为0.0031 N。

关键词:山核桃;风选;耦合仿真 中图分类号: S226.5 文献标识码: A 文章编号:1000-1298(2019)09-0105-08

Experiment on Winnowing Mechanism and Winnowing Performance of Hickory Material

CAO Chengmao^{1,2} LUO Kun^{1,2} PENG Meile^{1,2} WU Zhengmin^{1,2} LIU Guangzong^{1,2} LI Zheng^{1,2} (1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Anhui Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering Laboratory, Hefei 230036, China)

Abstract: The research on material air separation mechanism and the obtained relevant parameters is important basis for the design of air separation machine. The "dry shell and wet kernel" material of hickory after breaking was taken as the research object. Through mechanical analysis and coupling simulation of material, the parameters of material recovery coefficient, static friction coefficient, rolling friction system, particle free suspension velocity and instantaneous acceleration during collision were clarified. On this basis, an air separation test platform was designed for the aerodynamic characteristics of hickory for experimental research. According to EDEM and FLUENT coupling simulation, high-speed camera and professional measuring instruments, the required wind speed range, design parameters, motion trajectory and mechanical parameters were determined. The simulation model was verified to be applicable to the design and simulation test of virtual prototype by comparing simulation and test-bed test results. The suspension velocity range of each material of Carya cathayensis obtained by the experimental typhoon selection test was as follows: one dew kernel was 6.8 \sim 10.3 m/s, two dew kernels was 7.5 \sim 10.1 m/s, broken kernels was 6.9 ~ 9.8 m/s, two dew shells was 5.3 ~ 7.9 m/s, broken shells was 4.8 ~7.6 m/s, and shell-kernel chimes was 5.9 ~ 9.4 m/s, respectively. The mixed material test confirmed that the overall cleaning rate was 99.2% and the false selection rate was 0.8% when the wind speed was 8.2 m/s, the water content of kernel was 23.6%, the water content of shell was 5% and the windward face ratio was about 50%. The maximum impact force of the remaining materials was 0.0031 N when the water content was 23.6%, the wind speed was 11.7 m/s, and the cleaning rate was 100%, the false selection rate was 2.3%, and the water content was 23.6%. The research provided reference for the research and development of pecan air separation technology and equipment.

Key words: hickory; air separation; coupling simulation

收稿日期:2019-05-26 修回日期:2019-06-25

作者简介: 曹成茂(1964一),男,教授,博士生导师,主要从事智能检测与控制技术研究, E-mail: caochengmao@ sina. com

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51475002)

0 引言

山核桃的深加工技术是影响山核桃经济发展的 主要因素,且山核桃的壳仁分离是山核桃深加工的 关键环节^[1]。山核桃经过初次破壳与二次破壳,产 生大量灰尘、细小碎渣、八分之一壳、四分之一壳、二 分之一壳、壳仁嵌合体以及碎仁、八分之一仁、四分 之一仁、二分之一仁。在山核桃加工生产线中,先将 仁与壳选出,二次破壳机使壳仁嵌合体破裂,且不会 造成大量的碎壳进一步损伤果仁,壳与仁分离之后 才能进行后续加工。

国内外学者针对坚果类的壳仁筛分机理、分选 机械进行了研究与试验。NAHAL 等^[2]对两种波斯 核桃的研究表明,层次差异的不同粒子末端速度不 同,可以采用流态化分离法进行不同粒度的核桃仁 筛选,每个粒子需要空气速度在 6~11 m/s 范围内, 同时壳与仁的含水率也直接影响不同粒子的末端速 度。RAGAB等^[3]通过研究核桃物理特性和气动特 性发现,核桃含水率对末端速度影响较大,通过干燥 处理可改变其气动特性,增加坚果密度可以提高所 试验品种的最终速度,使用乙烯处理核桃对核桃 末端速度并未产生较大影响,最后确定10 m/s 的 末端速度可以完全分离出没有壳的核桃和有壳的 核桃,但此方法会影响核桃品质。JIN 等^[4]发明了 一种自动分离黑胡桃肉和壳的方法,利用胡桃肉 和胡桃壳透光率的不同使图像呈现出不同的纹理 特征,利用纹理的差别来筛分壳与肉的方法对核 桃仁肉壳分离效果较好,总分离准确率为98.2%, 但此方法成本较高。KRISHNAN 等^[5]利用磁选的 方法进行分离试验。首先将铁粉或者磁流体与无 霉性的食用明胶粉混合,然后使其粘附于果壳表 面再进行破壳处理,再根据壳与仁所受合力不同 实现分离。这种方法的不足之处在于,核桃不仅 需要预处理还需要后处理其上的铁粉或磁流体, 工序繁琐且处理容易污染果仁,对稍大的果壳无 法去除。

通过总结前人研究成果与实地调研,总结出 山核桃空气动力学特性参数可以有效实现壳仁 分离,但是悬浮速度范围重叠大影响山核桃壳仁 的分选效果。本文在基于多点加载力使壳均勾 碎裂的基础上^[6],研究一种特殊破壳工艺使山核 桃壳干仁湿来提高分选效果。通过理论分析、仿 真试验与试验台试验,研究改变各物料悬浮速度 进一步减小各种物料的分选速度重叠区间^[7],得 到山核桃空气动力学特性参数和力学参数,以指 导样机的研制。

1 山核桃破壳物料类型与物理参数

1.1 各物料成分百分比

选取一次破壳机与二次破壳机加工之后的物料,采用特殊破壳工艺使壳的含水率降至5%左右, 仁的含水率保持在设定的含水率范围内。再选取蜂 窝凹心锤头,使破壳率达到99.5%,并且产生的大 量局部裂纹点引导裂纹产生,使碎壳形状大小均 匀^[8]。再次经过低损伤二次破壳机与筛选设备,得 到的混合物料如图1所示,各成分占比如表1所示。



图 1 山核桃破壳混合物料 Fig. 1 Hickory mixtures after shell breaking

表1 山核桃物料成分质量分数

Tab. 1	Percentage	01	hickory	material	types
--------	------------	----	---------	----------	-------

物料类型	质量分数/%	备注
一露仁	13.3	整仁的二分之一左右
二露仁	33.8	整仁的四分之一左右
碎仁	2.9	小于整仁的八分之一
二露壳	1.3	整壳的四分之一左右
碎壳	43.7	小于等于整壳的八分之一
壳仁嵌合物	5.0	壳中嵌入仁

1.2 山核桃破壳物料物理参数

物料颗粒的空气动力学特性与物料的密度、含 水率密切相关,泊松比、剪切模量、动摩擦因数的数 值直接影响仿真结果与实际试验结果的误差^[9]。 本节对物料的各个物理参数进行测定与计算,首先 选取宁国山核桃经过特殊工艺处理之后由一次破壳 机与二次破壳机加工之后的物料,从物料堆随机抽 取一部分,分拣为仁、壳、壳仁嵌合体 3 种样本。

壳、仁的样本密度测定采用 YD-100E 型密度 测定仪,含水率测定采用干燥法,所用器材为数字电 子秤(量程:200g,精度:0.01g)、干燥箱等,样本密 度与含水率均值如表2所示。

表 2 山核桃含水率、密度测试结果

Tab.2 Moisture content and density test results of hickory

物料类型	含水率均值/%	密度/(kg·m ⁻³)
仁	4.73	955
売	4. 53	1 020

107

泊松比v = 0.3,壳弹性模量E = 10 MPa,仁弹性 模量近似为果壳的1/10,取1.1 MPa^[10],又由弹性 模量、剪切模量和泊松比三者之间的关系得到壳、仁 剪切模量

$$K = \frac{2(1+v)}{E} \tag{1}$$

山核桃堆积角试验以及静摩擦试验得出的数据 导入 EDEM 官网数据库分析,得到山核桃的恢复系 数、静摩擦因数及滚动摩擦因数,见表 3。

表 3 山核桃物料仿真参数 Tab. 3 Simulation parameters of hickory material

接触类型	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
仁−铁管壁	0.75	0.32	0.15
壳−铁管壁	0.55	0.42	0.05

2 山核桃破壳物料力学分析

2.1 垂直管道升力与升力系数

山核桃破壳物料的壳仁风选采用垂直管道风压 吹送式,是典型的气固两相流模型,由于破壳物料的 迎风面面积与几何形态复杂多变使风选参数重叠区 间过大,所以首先要计算分析山核桃破壳物料的空 气动力学特性对风选的影响。其中至关重要的是得 到各种物料的升力参数,在核桃破壳物料和流体的 运动速度、各项物理参数共同作用下,使物料产生升 力,升力表示为函数形式^[11]

 $Re = \frac{v_l d_l \rho}{\mu}$

$$F_{l} = \frac{S_{l}}{Re^{k}} \frac{\pi}{4} \rho \frac{v_{l}^{2}}{2} = CS_{l} \rho \frac{v_{l}^{2}}{2}$$
(2)

其中

$$S_l = \frac{\pi}{4} d_l^2 \tag{4}$$

(3)

式中 F₁——物料所受升力,N Re——物料的雷诺数 C——绕流升力系数 k——待定指数

$$S_1$$
——物料迎风面积, m²

在气固两相流体力学中,山核桃物料升力由所 受摩擦力与压差力相互作用而形成,两力主要在流 体速度、物料速度与物料物理参数的作用下分为 3种区域。在室温 20℃、压力 101.325 kPa 的条件 下,所测山核桃破壳物料迎风面最小面积为6 mm², 由雷诺公式得出山核桃物料最小雷诺数为2 139,根 据压差升力区条件:牛顿区 $500 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ 和牛顿区粒径范围条件^[11]

20. 4
$$\left[\frac{\mu^2}{\rho(\rho_l - \rho)}\right]^{\frac{1}{3}} \leq d_l \leq 1 \ 100 \left[\frac{\mu^2}{\rho(\rho_l - \rho)}\right]^{\frac{1}{3}}$$
(5)

式中 ρ_l ——物料密度,kg/m³ 得出升力系数 C = 0.44。

2.2 异形颗粒自由悬浮速度

同粒径球体与异形颗粒的悬浮速度相比,球体的大于异形颗粒。在分析异形山核桃颗粒的悬浮速 度时,将异形颗粒换算为与其迎风面直径、质量相同 的球体,以球体的尺寸计算悬浮速度,之后通过两者 与颗粒形状修正系数之间的关系来确定异形颗粒的 自由悬浮速度。实现风选要建立流体物理参数与力 学参数的关系,通过分析各颗粒空气动力学参数区 域,耦合颗粒、改变颗粒物理参数,使动力学参数区 叉区域减小来达到分选目的。山核桃破壳物料颗粒 换算成当量球体后在管道中的升力与其重力相等时 所需风速即为换算颗粒的悬浮速度,由于其粒径大 小处在牛顿区,所以风速在颗粒表面绕流之后会在 其尾部产生湍流的情况^[11],在垂直管道中受力模型 如图 2 所示。



当山核桃物料的重力与流体产生的升力大致相等时,流体风速即为山核桃物料的悬浮速度。把山核桃破壳物料按照当量球体分析计算单个颗粒时, 在牛顿区其修正表达函数式为^[12]

$$v_{x} = \frac{5.45 \sqrt{\frac{d_{l}(\rho_{l} - \rho)}{\rho}}}{\sqrt{K_{l}}}$$
(6)
式中 K_l——形状修正系数

 v_x ——修正悬浮速度,m/s

3 山核桃破壳物料耦合仿真

EDEM 软件针对颗粒仿真,对离散型物料具有优良的拟合特性,FLUENT 对流体仿真具有深厚的基础,因此利用两个软件进行山核桃动力学特性耦合分析^[13]。在 EDEM 软件中生成山核桃物料仅受

重力作用,FLUENT 软件中改变风道风速使山核桃 物料在风道中悬浮,不断调整风速使物料到达风道 顶端区域。利用 3D 扫描仪提取山核桃精准物理形 态,之后利用微小颗粒进行网格填充,得到高精度的 山核桃物料仿真模型,如图 3 所示。

108



Fig. 3 Simulation model of hickory

由于此次仿真主要研究山核桃各物料在垂直风 道内的悬浮速度、物料与风道碰撞力及其运动轨迹, 为试验台设计提供前期的参数基础,又考虑到耦合 仿真对风道内流体区域网格划分大小要求不高,所 以选取的风选筒几何体网格划分模型见图4。



仿真物料由颗粒工厂产生后顺气流从下端进入,物料在重力与升力共同作用下在气室内向下或向上运动。此次气固耦合仿真采用拉格朗日模型^[14],设置 EDEM 时间步长为9×10⁻⁸ s,FLUENT 时间步长为 EDEM 时间步长为9×10⁻⁶ s,FLUENT 时间步长为 EDEM 时间步长的 100 倍。FLUENT 的仿真步数为200 000 步即 1.8 s,每隔 200 步保存一次数据^[13]。此仿真每种物料均随机产生 5 粒颗粒,依次改变风



速范围为1~15 m/s,使山核桃物料到达风道顶端区 域范围时,风速为其悬浮速度,仿真悬浮速度见 表4。

表 4 仿真悬浮速度 Tab. 4 Simulation suspension speed

物料类型	悬浮速度/(m·s ⁻¹)	长度/mm	宽度/mm
一露仁	9.7	17.8	17.6
二露仁	8.9	17.1	10.1
碎仁	8.7	10.5	9.8
二露壳	7.8	20.5	12.8
碎壳	6.8	14.1	13.8

山核桃破壳物料的悬浮速度仿真中,不同山核 桃破壳物料在不同流速中的运动速度大致相同,其 速度在 0.21~3.96 m/s 之间。物料的迎风面面积 始终变化,当迎风面最大时,其运动速度也最大。由 于迎风面面积的变化使物料与物料、物料与筒面发 生碰撞,碰撞力的最大值为 0.004 2 N,不足以破坏 山核桃仁的完整性,在试验台试验中利用高速摄像 机记录山核桃物料在风道中的运动轨迹与速度并分 析物料的受力,其仿真试验速度轨迹图与试验台实 际轨迹图见图 5。

选取质量最大的仁且风速为15 m/s时的物料, 通过高速摄像机记录核仁碰撞筒壁瞬间的过程,利 用摄像机配备软件先标定图像中风筒实际宽度,之 后慢速播放视频依次确定起始点、第1点和第2点, 得到第1点与第2点的速度与物料的加速度,由此 得到核仁碰撞筒壁时的瞬时力,利用牛顿第二定律 公式得到最大力为0.0031N,摄像机分析界面与各 参数见图6。

4 山核桃破壳物料风选试验台

4.1 试验台与测试系统设计

基于山核桃物料风选机理的研究,设计了山核 桃风选试验台。由于山核桃破壳物料中碎壳形状为 凹窝状且有较多尖角易与仁嵌合,所以采用大功率





图 6 加速度分析界面 Fig. 6 Acceleration analytical interface

的风机产生气流,经稳压装置形成稳定的垂直气流 场气流使纠缠物料分离。再经过上位机的精准控制 得到无级调节风速的效果,同时通过上位机实时采 集并记录风场风速。此试验台为组装式,通过更换 风筒即可模拟样机的风道环境,修改其他参数也可 适用于多种物料的风选测试^[15]。

试验台器材为亚克力风筒(宽1500 mm、长 200 mm、高 800 mm)、风机(型号:EM80B-3,转速: 2 450 r/min, 功率: 280 W, 风量: 910 m³/h)、风速传 感器(量程:0~30 m/s)、稳压罩、上位机采集系统、 采集卡(NI USB-6215)、高速摄像机、调压器(型 号:H3P40YB)、24V 电源等。试验台测试系统由 LabVIEW 软件编写,主要分为风速信息采集、风速 调节和信号滤波处理与储存^[16],试验台见图7。



图 7 风速试验台 Fig. 7 Wind velocity test device

1. 风机 2. 风室 3. 稳压罩 4. 风速传感器 5. 电源开关 6. 电源 7. NI 采集机箱 8. NI 采集卡 9. 调压器 10. 采集系 统 11. 光源 12、13. 辅助光源 14. 信息采集试验台 15. 视频 分析面板 16. 高速摄像机

系统上电之后把待测物料投入风筒,此时通过 虚拟仪器操作界面调节风机转速进而精确控制风 速,使风筒内形成速度可变且垂直的稳定气流场,调 节风速使物料逐渐悬浮于上风筒范围内。单类山核 桃物料在风力逐渐增加的作用下经历轻微起伏、较 大起伏到贴合于上稳压罩的一系列过程,同时上位 机会同步显示实时风速并记录数据。混合类山核桃 物料在此风场中经历轻微起伏、壳仁悬浮区重叠大 到壳仁悬浮区区分明显的一系列过程,同时记录过 程风速变化。

山核桃悬浮速度试验台设计的关键指标是风室 内各处风速的均匀性,本文测量风机出风口与管道 出风口各处的风速,之后依据各处风速的大小采用 多层、多孔径和多形状的沙网格栅对气流进行调整, 使各点风速大小均匀。下稳流罩与上稳流罩面上分 别划分均匀的网格,每面网格数为28个^[17],在恒定 电压下使用风速传感器对每个网格进行测速[17],通 过不断调整格栅层数、类型和各处网眼疏密程度,使 各处气流均匀,采用相对标准偏差来衡量气流均匀 性。

通过测试得到相对标准偏差最优结果为3%左 右,远低于相对标准偏差低于15%的均匀性要求, 说明风室气流具有均匀性,上下稳流罩格栅放置图 见图8。



(a)风机下稳流罩

图 8 稳流罩 Fig. 8 Steady flow hood

4.2 单类物料与混合物料试验

4.2.1 单类物料悬浮速度试验

试验物料为随机选取 100 颗山核桃,经本课题 组研究的新工艺破壳设备使壳干仁湿,先使完整山 核桃产生细微裂缝,浸泡水中使含水率不断上升,取 出使壳表面迅速脱水之后进入生产线进行一次破 壳,再在二次离心破壳机的作用下使壳碎、小、轻,仁 整、大、重^[18],其中壳仁嵌合物为仁与壳未分离的物 料,破壳得到各破壳物料见图9。



每种物料选取5粒样本,样本尺寸均匀分布在 尺寸范围内。因山核桃个体存在大小差异,所以 测试数据为范围。经过分析得到各物料的对应悬 浮速度范围,将其代入式(6)得到形状修正系数见 表 5。

2019年

		Tab. 5	Parameters of hic	kory material			
赤 老 王	悬浮速度范围/	形状的工艺物	尺寸				
初科关型	(m • s ⁻¹)	形状修正系数	长度范围/mm	长度均值/mm	宽度范围/mm	宽度均值/mm	
一露仁	6. 8 ~ 10. 3	1.35	12. 2 ~ 17. 6	14.90	15.4 ~17.2	16.30	
二露仁	7.5 ~10.1	1.22	12. 2 ~ 17. 6	14.90	7.2~8.6	7.90	
碎仁	6.9 ~9.8	1.13	5.8 ~ 9.2	8.70	7.2~8.6	7.90	
二露壳	5.3 ~7.9	3.10	16. 1 ~ 23. 2	19.65	8.2 ~17.1	12.30	
碎壳	4.8 ~7.6	2.30	9.3~17.8	13. 55	7. 2 ~ 16. 1	11.65	
壳仁嵌合物	5.9~9.4	1.60	15.2 ~ 20.5	17.85	9.8~12.9	11.35	

表 5 山核桃物料参数 Tab.5 Parameters of hickory material

对比仿真试验的悬浮速度结果,仿真结果与数 据均符合实际情况,因此可以确定此仿真算法同样 适用于样机的仿真试验。通过对仿真参数反馈修正 虚拟样机参数,最终得到合理设计参数以指导样机 的研制^[7]。分析各物料的最低与最高悬浮速度发 现,壳与仁分离速度重叠区间占比达到 48.6%,且 重叠区间包含 87.6% 的物料,悬浮速度的重叠范围 见图 10。



Fig. 10 Suspension velocity test results of single-factor

4.2.2 混合物料分离试验

通过研究、分析与理论计算,得出影响分离效 果的关键因素为迎风面容量比(物料所占面积与 单位面积比值)、仁质量、风速和颗粒尺寸。颗粒 尺寸前文已经确定,因此选取迎风面容量比、仁质 量和风速作为关键因素进行试验。试验的评价标 准为清选率 A 与误选率 B,表达式为

$$A = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%$$
 (7)

$$B = \frac{m_a}{m_b} \times 100\% \tag{8}$$

式中 A----清选率,%

m2----应除物总质量,g

m_a——误除物质量,g

试验发现混合物料的分离速度与物料的本身质 量密切相关,因此本试验先取定量的迎风面容量比, 通过改变混合核仁的含水率来改变质量之后观察对 应风速的变化^[19],结果见图 11。





基于风选试验台的初步分离试验数据分析,当 仁的含水率达到 23.76%时,分离速度重叠区间降 至 21.5%,且重叠区间包含 1.2%的物料。改变核 桃仁的质量之后,壳仁嵌合物的质量也会发生改变, 其分离风速仍介于壳与壳仁嵌合物之间。因此试验 分为两部分进行,第一部分为壳与仁和壳仁嵌合物 的分离试验,第二部分为仁与壳仁嵌合物的分离试 验。第一部分试验在壳的含水率为 5%的基础上通 过改变核仁的含水率增加其质量,按照前文统计的 各物料百分比得到各个迎风面容量比物料。共设计 12 组试验并每组试验重复 3 次,取其平均值,试验 因素设置与试验结果见表 6。

依次选定迎风面容量比为 50%、75%、100% 时,改变风速得到最优清选率与误选率,得到不同含 水率下的清选率与误选率。根据图表可以分析出在 迎风面容量比一定时,随着含水率的升高仁的质量 增加使清选率趋于 100%、误选率稍有增长。当含 水率一定时,随着迎风面容量比变大清选率会变小、 误选率变大,各迎风面容量比下的试验柱状图见 图 12。

分析试验结果发现,当含水率为23.6%、迎风 面容量比为50%时,壳仁嵌合物的剩余量仅为 0.8%,观察发现其为二露仁与碎壳嵌合物。则在风 速8.2 m/s、含水率为23.6%、迎风面容量比为50% 左右时,总体清选率为99.2%、误选率为0.8%。

第二部分试验采取增加壳仁嵌合物壳的质量,

1	1	1	

表 6 试验因素与结果						
Tab. 6 Test factors and test results						
组号	仁 含水 率/%	迎风面 容量 比/%	风速/ (m·s ⁻¹)	清选率/ %	误选 率/ %	売仁嵌合 物剰余 量/%
		50	6.8 7.3 7.9	87. 1 94. 2 100	0 2.1 12.1	4.3 2.5 1.5
1	5.0	75	7.2 8.4 8.6	84. 2 95. 8 100	0 5.8 23.3	4.5 3.1 2.3
		100	6.4 7.1 8.7	82. 0 93. 0 100	0 6.3 26.1	4.7 3.4 2.6
		50	6.8 7.3 7.6	92. 1 96. 2 100	0 1.1 5.6	5.0 3.6 1.3
2	14.6	75	8.0 8.2 8.6	90. 5 97. 5 100	0 6.2 13.3	5.0 2.7 1.6
		100	8.5 7.1 9.1	85.3 96.3 100	0 5.3 15.1	5.0 3.1 2.2
3	23.6	50 75 100	8.2 8.7 9.6	100 100 98. 6	0.8 2.2 2.92	0.8 1.22 1.31
4	30. 1	50 75 100	8.5 8.6 8.7	100 100 100	0 1.3 0.55	0.85 1.16 1.28

采用方法是将第一部分所有剩余物全部浸入水中, 使壳仁含水率达到一致。此时的壳仁嵌合物为碎壳 与二露仁的嵌合,在所有物料含水率均为23.6% 时,测得壳仁嵌合物最小悬浮速度为11.65 m/s,最 大悬浮速度为12.3 m/s。试验得到在风速为 11.7 m/s时,总体清选率为100%,误选率为2.3%。

5 结论

(1) EDEM - FLUENT 耦合仿真适合风选的要求,其准确度与精度可指导样机研制。试验台系统 无级调节风速可以使风道气流更加稳定和精确,实 时数据保存可以使试验结果更加准确,高速摄像方 法可以实时捕捉物料运动参数,通过高速摄像机得 到物料最大碰撞力为 0.003 1 N。

(2)颗粒形状系数是决定复杂物料风选的关键 因素,物料预加工处理对后续的破壳与分选起到决 定性作用。在山核桃多点加载力使壳均匀碎裂的基 础上,研究利用蒸煮与迅速外壳脱水技术来改变山 核桃破壳后物料的形状系数,其各物料形状修正系 数分别为:一露仁 1.35、二露仁 1.22、碎仁 1.13、二 露壳 3.1、碎壳 2.3、壳仁嵌合物 1.6。

(3)采用壳干仁湿的特殊工艺使山核桃复杂破 壳物料的悬浮速度重叠区间减小,再调节仁质量和 迎风面容量比两个主要因素使分离效果大大提 升,第一部分试验得到风选效果主要由仁质量和





迎风面容量比两个因素决定,在风速 8.2 m/s、仁含 水率为 23.6%、壳含水率为 5%、迎风面容量比为 50% 左右时,总体清选率为 99.2%、误选率为 0.8%,第二部分物料采取改变壳含水率使所有物料 含水率均为 23.6%,可以进一步提高壳的清选率, 风速为 11.7 m/s 时使清选率达到 100%、误选率 2.3%,可以为山核桃等复杂物料的分离技术与装置 的设计提供参考。

参考文献

- [1] 马豪. 核桃壳仁分离机的设计及试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2011.
 MA Hao. Study on design and experiment of separator machine for walnut-material [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [2] NAHAL A M, ARABHOSSEINI A, KIANMEHR M H. Separation of shelled walnut particles using pneumatic method [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2013, 6(3):88-93.

- [3] RAGAB K, PAN Zhongli, ATUNGULU G G. Characterization of physical and aerodynamic properties of walnuts [C]. ASABE 2012 Annual Meeting Papers 121338051,2012.
- [4] JIN Fenghua, QIN Lei, JIANG Lu, et al. Novel separation method of black walnut meat from shell using invariant features and a supervised self-organizing map[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(1):78-85.
- [5] KRISHNAN P, BERLAGE A G. Separation of shells from walnut meats using magnetic methods [J]. Transactions of the ASABE, 1984, 27(6):1990 - 1992.
- [6] CAO Chengmao, SUN Si, DING Ran, et al. Experimental study on mechanical characteristics of nut rupturing under impact loading[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(1): 53-60.
- [7] 沈宇峰.油菜脱出物风力清选装置研究与优化[D].长沙:湖南农业大学,2016.
 SHEN Yufeng. Design of test device of rape extractions of wind[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [8] 曹成茂,蒋兰,吴崇友,等.山核桃破壳机加载锤头设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(10):307-315. CAO Chengmao,JIANG Lan,WU Chongyou, et al. Design and test on hammerhead of pecan shell-breaking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(10):307-315. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/ reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171039&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.039. (in Chinese)
- [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. DENG Chunxiang, TAO Dongcai, GAO Jingping. Dynamic characteristics and factors affecting performance of air-stream cleaning windmill[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(4):121-125. (in Chinese)
- [10] 丁正耀,朱德泉,钱良存,等.山核桃坚果有限元模型建立及受力分析[J].农业装备与车辆工程,2010(6):6-9.
 DING Zhengyao,ZHU Dequan,QIAN Liangcun, et al. Finite element modeling and mechanical analysis of hickory kernel[J].
 Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2010(6):6-9. (in Chinese)
- [11] 杨伦,谢一华.气力输送工程[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [12] 马秋成,卢安舸,高连兴,等. 莲子物料空气动力学特性与壳仁分离装置试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):297-303.
 MA Qiucheng, LU Ange, GAO Lianxing, et al. Aerodynamic characteristics of lotus seed mixtures and test on pneumatic separating device for lotus seed kernel and contaminants [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 297 303. (in Chinese)
- [13] 韩丹丹,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017, 48(11):43-51.

HAN Dandan,ZHANG Dongxing,YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM - CFD[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):43 - 51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171106&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.006. (in Chinese)

- [14] 孙晨,陈凌珊,汤晨旭. 气固两相流模型在流场分析中的研究进展[J]. 上海工程技术大学学报,2011,25(1):49-53.
 SUN Chen, CHEN Lingshan, TANG Chenxu. Study and development of gas-solid two-phase flow model in flow fiel danalysis
 [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2011, 25(1): 49-53. (in Chinese)
- [15] 李洋,徐立章,周蓥,等. 脱出物喂入量对多风道清选装置内部气流场的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(12):48-55.
 LI Yang,XU Lizhang,ZHOU Ying, et al. Effect of extractions feed-quantity on airflow field in multi-ducts cleaning device[J].
 Transactions of the CSAE,2017,33(12):48-55. (in Chinese)
- [16] 曹成茂,吴正敏,梁闪闪,等.茶叶杀青机双模糊控制系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(7):259-265.
 CAO Chengmao, WU Zhengmin, LIANG Shanshan, et al. Design and experiment of double fuzzy control system for tea cylinder water-removing machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):259-265.
 http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160736&journal_id = jcsam. DOI:10.
 6041/j.issn.1000-1298.2016.07.036. (in Chinese)
- [17] 周璇,王志明,陈霓,等. 圆锥形风机清选室气流场数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):91-100.
 ZHOU Xuan, WANG Zhiming, CHEN Ni, et al. Numerical simulation and experiment of airflow field of cleaning room under action of conical fan[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):91-100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190309&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.009. (in Chinese)
- [18] 曹成茂,李正,罗坤,等.山核桃二次破壳取仁机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(3):128-135.
 CAO Chengmao,LI Zheng,LUO Kun, et al. Design and experiment of secondary shell breaking machine for pecan[J/OL].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):128-135. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190313&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.
 O13.(in Chinese)
- [19] PASCOE R D, HOU Y Y. Investigation of the importance of particle shape and surface wettability on the separation of plastics in a LARCODEMS separator[J]. Minerals Engineering, 1999, 12(4):423-431.