

基于 EDEM 的核桃壳仁混合物振动筛分级工艺优化

胡国玉, 陈旭东, 赵腾飞, 董娅兰, 刘广, 周建平

(新疆大学机械工程学院, 乌鲁木齐 830017)

摘要:为提高核桃壳仁混合物的分级效果,对现有核桃壳仁混合物分级设备进行三维实体建模,利用 EDEM 软件模拟核桃壳仁混合物的分级过程,以筛面上物料的运动速度、质量以及各等级颗粒在统计区域的数量为指标,以振幅、振动频率、振动方向角、筛面倾角为考察因素,对振动筛分级工艺进行优化。结果表明:在振动频率 12 Hz、振幅 5 mm、振动方向角 45°、筛面倾角 4°的工艺参数组合下,各等级核桃壳仁的透筛率最高,分级效果最好。

关键词:振动筛;核桃壳仁混合物;分级;EDEM

中图分类号:TS210.3;TP391.9 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)02-0095-06

Optimization of grading process of walnut shell and kernel mixture by vibrating screen based on EDEM

HU Guoyu, CHEN Xudong, ZHAO Tengfei, DONG Yalan,
LIU Guang, ZHOU Jianping

(College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: In order to improve the grading effect of walnut shell and kernel mixture, the existing classification equipment of walnut shell and kernel mixture was modeled by 3D entity, and the grading process of the walnut shell and kernel mixture was simulated by EDEM. Based on the movement speed, mass of the material on the sieve surface and quantity of particles of each grade material in the statistical area as indicators, the grading process by vibrating screen was optimized with the amplitude, vibration frequency, vibrating direction angle and the sieve surface inclination as factors. The results showed that the screening rate of each grade of walnut shell and kernel was the highest and the grading effect was the best under the conditions of vibration frequency 12 Hz, amplitude 5 mm, vibrating direction angle 45°, and sieve surface inclination 4°.

Key words: vibrating screen; walnut shell and kernel mixture; grading; EDEM

随着我国核桃产业的快速发展,市场对核桃仁精深加工产品的需求增加^[1]。核桃仁的获取主要包括破壳、分级、风选和色选等工序。将核桃破壳后,利用壳仁分级设备将核桃壳仁混合物按尺寸分成不同等级的物料,然后在风选工序中利用壳与仁悬浮速度的差异实现二者的分离,再经过核桃仁的色选工序得到干净的核桃仁^[2]。在实际工作中,如

果对壳仁混合物未进行分级,在风选过程中就很难用气流法完成壳与仁的分离,造成仁中含壳率较高的现象,因此破壳后壳仁混合物的分级工序是核桃精深加工的关键。

核桃破壳后的壳仁混合物为非球形颗粒,常采用直线振动筛完成分级,为提高分级的精度,需要根据壳仁的形状、尺寸设计出容易透筛的筛孔,且核桃仁属于易碎物料,为保证核桃仁的外观与质量,避免核桃仁在筛面上运动时造成破损,需要优化筛分工艺。

离散元法(Discrete Element Method, DEM)主要用于研究颗粒离散运动过程,模拟研究不连续介质问题,近年来 DEM 在农业机械领域的应用逐渐成熟,解决了诸多工程问题^[3],如:张西良等^[4]利用离

收稿日期:2022-06-15;修回日期:2023-10-17

基金项目:新疆维吾尔自治区级创新团队项目“机器人及智能装备技术科技创新团队”(2022D14002)

作者简介:胡国玉(1977),女,副教授,硕士生导师,研究方向为农牧高端装备与特种机器人(E-mail) xjhuguoyu@xju.edu.cn。

散元软件 EDEM 对枸杞在直线振动筛的筛分过程进行了模拟研究,得到椭球型颗粒筛分离粒度在一定的区间内变化;李永祥等^[5]利用 EDEM 模拟了大产量原粮振动清理筛的筛分过程,分析了振动筛工艺参数对筛分效果的影响;王豪东等^[6]利用 EDEM 模拟了小麦在回转组合多层筛的筛选过程,分析了筛体的运动参数对物料推进速度、杂质去除率和小麦提取率的影响;Elskamp 等^[7-8]利用 DEM 研究了不同颗粒特性和不同振动参数对振动筛筛分效率的影响。但目前国内学者运用 EDEM 在核桃壳仁混合物筛分方面研究甚少,需要通过实物设备做大量的试验总结出最优的筛分工艺,设备制作成本高,且耗时耗力,因此运用 EDEM 对核桃壳仁混合物的筛分过程进行研究具有非常重要的意义。

本研究对核桃壳仁混合物非球形颗粒的筛分分级工艺进行了模拟研究,基于 EDEM 对核桃壳仁颗粒直线振动筛的筛分分级过程进行分析,研究筛面倾角、振幅、振动频率和振动方向角对筛分分级效率的影响,并揭示不同工艺参数下物料在筛面上的运动规律,以期对核桃壳仁混合物分级效果分析和工作参数设定提供理论依据。

1 振动筛模型的原理与创建

1.1 振动筛模型的原理

图 1 为核桃壳仁混合物振动筛筛面实体图^[9]。

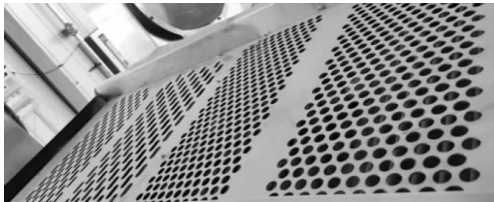


图 1 核桃壳仁混合物振动筛筛面实体图

如图 1 所示,核桃壳仁混合物振动筛为直线振动筛,筛面上设置有不同尺寸的筛孔,筛孔尺寸从小到大依次排列。振动筛的分级原理为破壳后的壳仁混合物经过振动筛平铺在筛面上作抛掷运动,然后经过不同的筛孔,被分级为碎渣与 1/16 壳仁、1/8 壳仁、1/4 壳仁、1/2 壳仁混合物以及未完全破壳的物料。

1.2 振动筛模型的创建

核桃壳仁混合物振动筛的筛面模型如图 2 所示,筛面尺寸按实际模型等比例缩小,尺寸采用 1 440 mm × 300 mm,筛面总体孔隙率为 78.4%。根据破壳后核桃壳仁混合物的形状与筛分等级,以及后续核桃壳仁风选的加工要求,碎渣与 1/16 壳仁一般用途是压榨食用油,故将其分为一个等级,根据物料在水平方向的投影,1/16 壳仁与 1/8 壳仁投影近

似圆形,且球形系数大,因此筛孔设计为圆形,直径分别为 12 mm 与 16 mm,1/4 壳仁与 1/2 壳仁形状近似片状,筛孔设计为椭圆形,尺寸分别为 35 mm × 18 mm 和 40 mm × 22 mm。

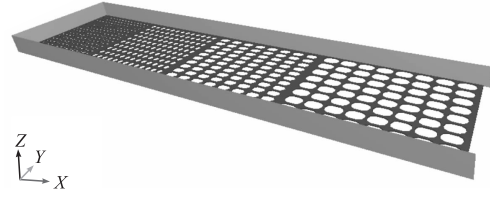
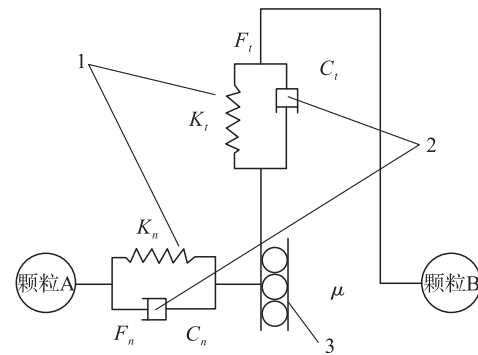


图 2 核桃壳仁混合物振动筛筛面模型

2 颗粒接触模型的建立及数值模拟参数设置

2.1 颗粒接触模型的建立

在振动筛分过程中,颗粒间的运动应考虑颗粒与颗粒,颗粒与分级筛面(钢)之间相互接触过程。本文采用 Hertz - Mindless 无滑动接触模型^[10],碰撞接触模型如图 3 所示。



注:1. 弹簧;2. 阻尼器;3. 摩擦器

图 3 碰撞接触模型

图 3 中颗粒间的法向力 F_n 、法向阻尼力 F_n^d 、切向力 F_t 、切向阻尼力 F_t^d ^[11] 分别按公式(1)~公式(4)计算。

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \alpha^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \sqrt{K_n m^*} u_n^{rel} \quad (2)$$

$$F_t = -K_t \delta \quad (3)$$

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \sqrt{K_t m^*} u_t^{rel} \quad (4)$$

式中: E^* 为等效弹性模量, Pa; R^* 为等效颗粒半径, m; α 为法向重叠量, m; e 为恢复系数; K_n 为法向刚度, N/m; m^* 为等效质量, kg; u_n^{rel} 为相对速度的法向速度, m/s; K_t 为切向刚度, N/m; δ 为切向重叠量, m; u_t^{rel} 为相对速度的切向速度, m/s。

2.2 数值模拟参数设置

本文采用叶城主产核桃‘温 185’为原料,破壳

后的壳仁物料如图4所示。将核桃壳、核桃仁从棱径、长径、厚度3个方向进行测量(见图5),然后根据测量数据(见表1),利用EDEM进行建模,得到不同规格的核桃壳仁混合物模型,如图6所示。核桃壳、核桃仁和筛面(钢)的材料物理参数和材料接触系数分别见表2、表3。

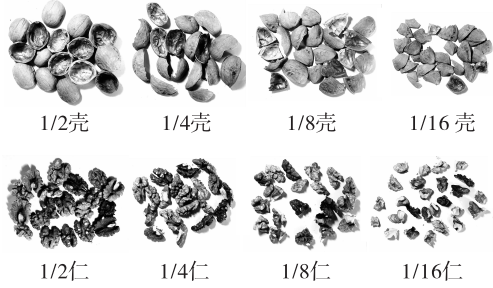


图4 核桃破壳后的物料组成

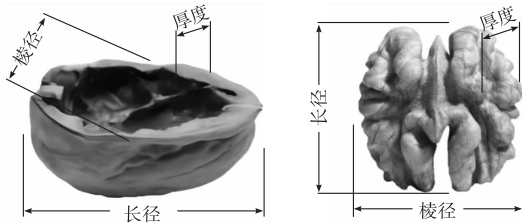


图5 核桃壳、核桃仁物料

表1 不同等级核桃壳、核桃仁平均尺寸 mm

规格	棱径	长径	厚度
1/2 核桃壳	28.52	40.24	1.28
1/2 核桃仁	26.62	35.40	9.58
1/4 核桃壳	20.50	34.36	1.15
1/4 核桃仁	14.28	32.53	7.84
1/8 核桃壳	15.25	16.66	1.22
1/8 核桃仁	14.34	15.80	7.69
1/16 核桃壳	10.23	9.84	1.18
1/16 核桃仁	9.96	9.55	7.29

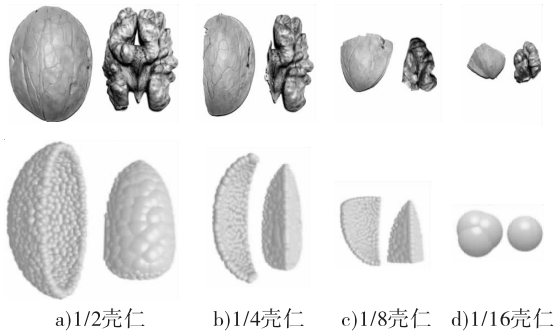


图6 不同规格核桃壳仁混合物模型

表2 材料物理参数(参照文献[12]整理)

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg/m ³)
核桃壳	0.3	1.7e+06	750
核桃仁	0.3	1e+06	980
筛面(钢)	0.3	7e+10	7800

表3 材料接触系数(参照文献[12]整理)

碰撞特性	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
壳-仁	0.20	0.80	0.01
壳-钢	0.55	0.42	0.05
仁-钢	0.75	0.32	0.15

3 结果与分析

3.1 EDEM 模拟筛分过程

根据破壳后核桃壳仁的物料组分,设置每种颗粒的体积随机分布,范围是模型尺寸的0.7~1.0倍,其中1/16壳仁在颗粒工厂生成速率为600个/min,其他等级颗粒生成速率为900个/min,颗粒下落高度为250 mm,模拟时间为10 s。在振动频率10 Hz、筛面倾角4°、振动方向角45°、振幅6 mm条件下核桃壳仁振动筛筛分效果如图7所示。颗粒在筛面运动达到稳定状态时,不同等级的颗粒从对应筛孔掉落收集,图7中I区为筛面上物料统计区域,统计筛面上物料的运行速度与质量,II、III、IV区和V区分别为碎渣与1/16壳仁、1/8壳仁、1/4壳仁和1/2壳仁数量统计区域。

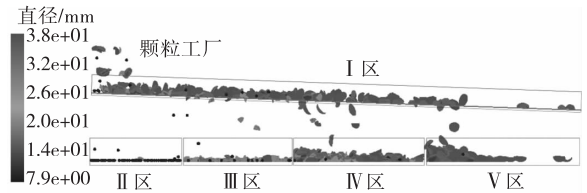


图7 核桃壳仁振动筛筛分效果

在不同的工艺参数下,物料在筛面上的运动速度、到达稳定状态的时间、筛面上物料质量的变化以及筛分效果等有明显的差异。在振动频率10 Hz、筛面倾角4°、振动方向角45°、振幅6 mm条件下模拟振动筛筛分过程,如图8所示。

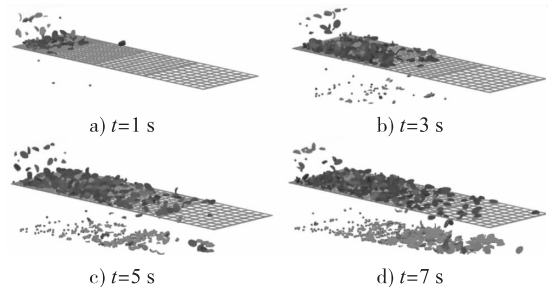


图8 EDEM 软件模拟筛分过程

由图8可知,t=1 s时,颗粒从颗粒工厂落下到达筛面并开始运动,t=3 s时,壳仁颗粒到达1/4物料筛孔处,1/16与1/8壳仁开始从对应筛孔掉落,t=5 s时,颗粒到达1/2物料筛孔处,1/4与1/2壳仁开始从对应的筛孔掉落,t=7 s时,各级颗粒稳定

地从对应的筛孔掉落收集。

3.2 工艺参数对分级效果的影响

从筛分理论分析,筛分物料的颗粒粒径应小于分级筛孔尺寸的 $3/4$,颗粒粒径大于筛孔尺寸 $3/4$ 的颗粒将继续在筛面上运动,直到运动到对应的筛孔完成筛分^[13]。由于筛分工艺与物料性质等原因,分级过程中会出现物料混级的情况,主要表现为颗粒部分通过筛孔,其余夹在较大的筛分颗粒上,使得同等级的壳仁物料混级度高,影响壳仁风选精度。影响振动筛筛分效果的因素主要有物料特性、振动筛的结构与工艺参数、筛孔结构以及筛分面积等^[14]。在现有筛分设备的基础上,研究物料特性,优化工艺参数,可使物料分级效率更高。因此,本文主要对振动筛的工艺参数,如筛面倾角、振动方向角、振动频率和振幅4个参数进行模拟分析。

3.2.1 振动频率对筛分分级的影响

以筛面倾角 4° 、振动方向角 45° 、振幅 6 mm 为基准参数不变,振动频率分别设定为 10 、 12 、 14 、 16 Hz 进行模拟分析。图9为不同振动频率下筛面上颗粒的运动速度变化曲线。

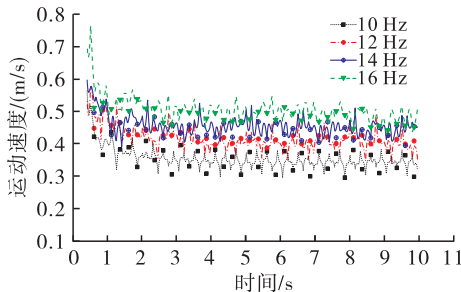


图9 不同振动频率下筛面上颗粒运动速度变化曲线

从图9可以看出,随着振动频率的增加,物料在筛面上的运动速度增大,振动频率为 10 、 12 、 14 、 16 Hz 时物料在筛面上运动稳定时的平均速度分别为 0.36 、 0.42 、 0.48 、 0.53 m/s 。

图10为不同振动频率下筛面上物料质量变化曲线。

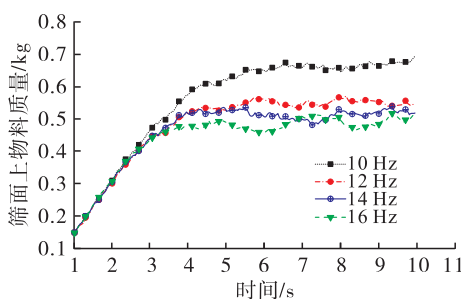


图10 不同振动频率下筛面上物料质量变化曲线

由图10可知,随着振动频率的增加,物料质量达到稳定状态的时间随之缩短,筛面上物料质量也

随之减小。振动频率为 10 、 12 、 14 、 16 Hz 时,筛面上物料质量达到稳定状态的时间分别为 6.5 、 5.7 、 5.0 s 和 4.5 s ,筛面上物料达到稳定状态时的质量分别为 0.66 、 0.54 、 0.50 kg 和 0.46 kg 。

不同振动频率下各等级颗粒在统计区域的数量分布如图11所示。

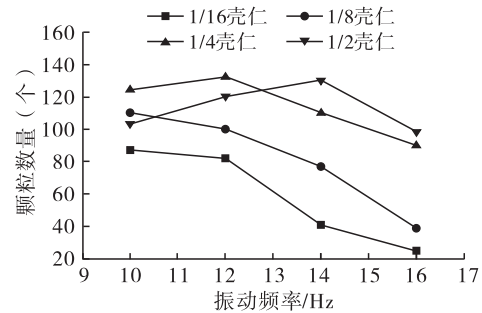


图11 不同振动频率下各等级颗粒在统计区域的数量分布

由图11可知,在不同的振动频率下,各等级颗粒在统计区域的数量(透筛率)有明显的差异。随着振动频率的增加,较小等级的壳仁透筛率呈下降趋势,1/16壳仁数量从 87 个减少到 25 个,减少趋势明显;1/8壳仁数量从 110 个减少到 39 个,呈直线下下降趋势;振动频率为 10 Hz 时,1/4壳仁数量为 123 个,随着振动频率增加到 12 Hz ,对应的壳仁数量增加到 135 个,随着振动频率的继续增加,壳仁数量开始减少,到 16 Hz 时,减少至 90 个;随着振动频率的增加,1/2壳仁数量呈先增加后减少的趋势,在 10 Hz 时为 103 个,在 14 Hz 时为 130 个,在 16 Hz 时减少到 98 个。综合考虑,当振动频率为 12 Hz 时壳仁数量稳定,分级效果最佳。

3.2.2 振幅对筛分分级的影响

以振动频率 12 Hz 、筛面倾角 4° 、振动方向角 45° 为基准参数不变,振幅分别设定为 3 、 4 、 5 、 6 mm 进行模拟分析。不同振幅下筛面上颗粒运动速度变化曲线如图12所示。

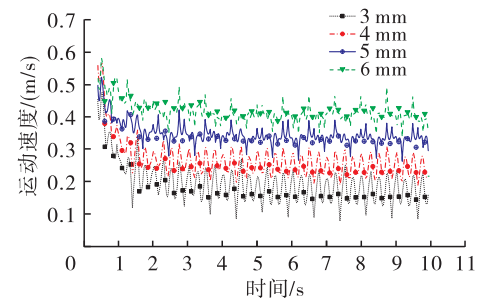


图12 不同振幅下筛面上颗粒运动速度变化曲线

由图12可以看出,在不同的振幅下,物料在筛面上的运动速度差异明显,随着振幅的增加,壳仁颗

粒的运动速度增加。在0~2 s内,随着颗粒在筛面上的堆积,物料层变厚,不同振幅下物料的运动速度逐渐减小,2 s以后,随着筛分作用,物料层变薄,运动速度逐渐达到稳定状态。振幅为3、4、5 mm和6 mm时对应的壳仁颗粒运动稳定时的平均运动速度分别为0.18、0.26、0.34 m/s和0.42 m/s。

图13为不同振幅下筛面上物料质量变化曲线。

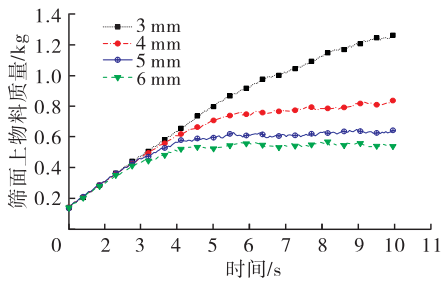


图13 不同振幅下筛面上物料质量变化曲线

由图13可以看出:不同振幅下筛面上物料质量变化差异明显,当振幅为3 mm时,在 $t=0\sim 10$ s的时间内,筛面上物料质量一直处于增加状态,在 $t=10$ s时,筛面上物料质量为1.28 kg,未达到稳定状态,此时物料运动速度仅为0.18 m/s(见图12),物料未起到筛分效果;当振幅为4、5 mm和6 mm时,筛面上物料质量达到稳定状态的时间分别为6、5 s和4.5 s,筛面上物料达到稳定状态时的质量分别为0.78、0.62 kg和0.54 kg。综合考虑,选择振幅为5 mm。

3.2.3 振动方向角对筛分分级的影响

以振动频率12 Hz、振幅5 mm、筛面倾角 4° 为基准参数不变,振动方向角分别设定为 30° 、 45° 、 60° 进行模拟分析。不同振动方向角下筛面上颗粒运动速度变化曲线如图14所示。

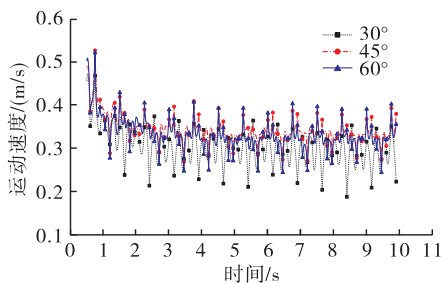


图14 不同振动方向角下筛面上颗粒运动速度变化曲线

由图14可知,振动方向角对物料在筛面上的运动速度影响较小,总体来说,随着振动方向角的增加,物料的运动速度有小幅度的增加然后减小。振动方向角为 30° 、 45° 和 60° 时,壳仁的平均运动速度分别为0.31、0.35 m/s和0.34 m/s。在 $t=0\sim 2$ s的时间内物料运动速度逐渐减小, $t=3$ s时,不同振动方向角下物料在筛面上的运动均已达到稳定状态。

不同振动方向角下筛面上物料质量变化曲线见图15。

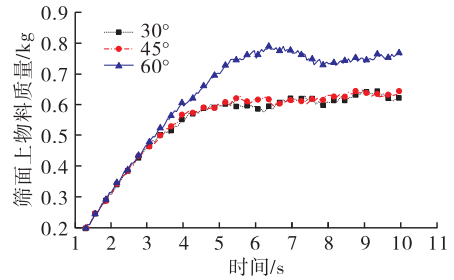


图15 不同振动方向角下筛面上物料质量变化曲线

由图15可知,振动方向角为 30° 、 45° 和 60° 时,随着振动方向角的增加,筛面上物料达到稳定状态时的质量有小幅的增加,分别是0.61、0.62 kg和0.75 kg,筛面上物料质量达到稳定状态的时间随着振动方向角的增加而延长,分别是5.5、6.7 s和7.4 s。综合考虑,选择振动方向角为 45° 。

3.2.4 筛面倾角对筛分分级的影响

以振动频率12 Hz、振幅5 mm、振动方向角 45° 为基准参数不变,筛面倾角分别设定为 2° 、 4° 、 6° 、 8° 进行模拟分析。不同筛面倾角下筛面上颗粒运动速度变化曲线见图16。

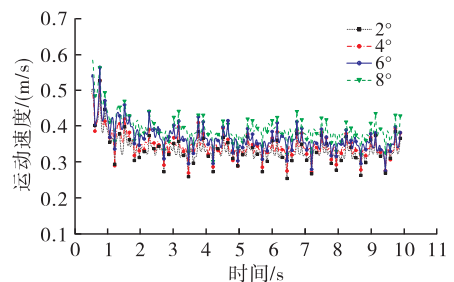


图16 不同筛面倾角下筛面上颗粒运动速度变化曲线

由图16可知,随着筛面倾角的增加,筛面上颗粒的运动速度增加,但增幅较小,筛面倾角对物料的运动速度影响总体较小。当筛面倾角为 2° 、 4° 、 6° 和 8° 时,筛面上壳仁达到稳定状态时的运动速度分别为0.34、0.36、0.37 m/s和0.40 m/s。

不同筛面倾角下筛面上物料质量变化曲线见图17。

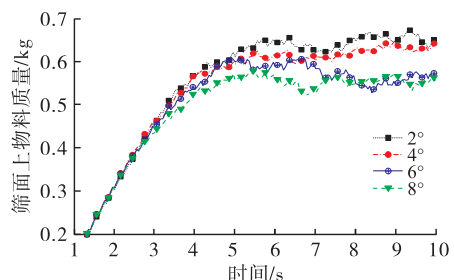


图17 不同筛面倾角下筛面上物料质量变化曲线

由图 17 可以看出,随着筛面倾角的增加,筛面上物料达到稳定状态时的质量减少,当筛面倾角为 2° 、 4° 、 6° 和 8° 时,筛面上物料达到稳定状态时的质量分别为 0.65、0.62、0.58 kg 和 0.56 kg,这主要是因为随着筛面倾角的增大,物料在筛面上的运动速度增大,使大颗粒的壳仁到达对应筛分区的时间缩短,避免了物料在筛面上的堆积。

不同筛面倾角下各等级颗粒在统计区域的数量分布如图 18 所示。

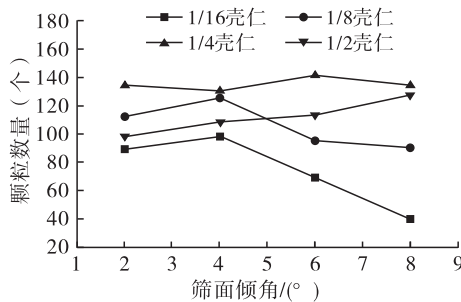


图 18 不同筛面倾角下各等级颗粒在统计区域的数量分布

由图 18 可知:筛面倾角对不同等级壳仁的透筛率有显著影响,在筛面倾角为 2° ~ 4° 时,1/16 壳仁与 1/8 壳仁筛分数量呈增长趋势,4°时分别达到 98 个和 125 个,然后在 4° ~ 8° 的范围内呈减少趋势,筛面倾角为 8° 时数量分别为 40 个和 90 个;1/4 壳仁数量在筛面倾角为 6° 时达到峰值,为 141 个,然后在筛面倾角为 8° 时降到 134 个;1/2 壳仁数量在筛面倾角为 2° ~ 8° 的范围内呈增长趋势,从 98 个增长到 127 个,增幅相对平稳。总体分析可以看出,当筛面倾角为 4° 时各等级壳仁数量较多且更加平稳,壳仁透筛率最高。

从模拟效果综合分析,在振动频率为 12 Hz,振幅为 5 mm,振动方向角为 45° ,筛面倾角为 4° 的工艺参数组合下,各等级壳仁的透筛率最高,且分级效果最好。

在最优工艺参数组合下分别统计 II、III、IV、V 区内分级后的核桃壳仁混合物占比,结果如图 19 所示。

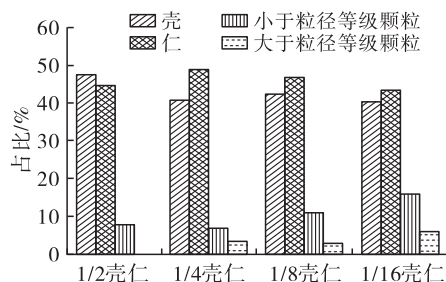


图 19 分级后各等级物料占比

由图 19 可知,分级后的 1/2 壳仁物料组中

混级物料占 7.8%,1/4 壳仁物料中混级物料占 10.3%,1/8 壳仁物料中混级物料占 10.8%,1/16 壳仁物料中混级物料占 16.3%,分级效果较好。

4 结论

本文利用离散元法模拟核桃壳仁混合物料在不同工艺参数下的筛分分级效果。从模拟效果综合分析,在振动频率 12 Hz、振幅 5 mm、振动方向角 45° 、筛面倾角 4° 的工艺参数组合下,各等级壳仁的透筛率最高,分级效果最好。

参考文献:

- [1] 胡东宇,高健,黄力平,等. 新疆四地州核桃产业现状与发展思路[J]. 北方园艺, 2021(13): 148-154.
- [2] 田智辉,王亚妮,王维,等. 核桃破壳-壳仁分离生产线的研究开发[J]. 农业技术与装备, 2016(4): 79-81, 84.
- [3] 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 117-121.
- [4] 张西良,柯于仁,孙鹏飞,等. 基于 EDEM 的椭球形颗粒直线振动筛分分离粒度研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(14): 188-191.
- [5] 李永祥,李阳,王明旭,等. 基于 EDEM 的大产量原粮振动清理筛分效果分析[J]. 中国油脂, 2018, 43(5): 157-160.
- [6] 王豪东,阮竞兰,原富林. 基于 EDEM 的回转组合多层筛筛选过程的离散元分析[J]. 中国油脂, 2019, 44(6): 151-157.
- [7] ELSKAMP F, KRUGGEL - EMDEN H. Review and benchmarking of process models for batch screening based on discrete element simulations[J]. Adv Powder Technol, 2015, 26(3): 679-697.
- [8] ELSKAMP F, KRUGGEL - EMDEN H, HENNIG M, et al. Discrete element investigation of process models for batch screening under altered operational conditions[J]. Powder Technol, 2016, 301: 78-95.
- [9] 刘奎. 核桃工厂化破壳加工工艺与生产线设计研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [10] 孙其诚,王光谦. 颗粒物质力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [11] 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [12] 曹成茂,罗坤,彭美乐,等. 山核桃物料风选机理与风选性能试验研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 105-112.
- [13] 夏欢. 直线振动筛的工作原理与运动学参数选择[J]. 机械设计与自动化, 2012(6): 164-165.
- [14] 张路霞,李云峰. 振动筛筛分效率的影响因素分析[J]. 煤矿机械, 2008, 29(11): 74-76.