

油茶果分级破壳加工生产线的设计与试验

刘明勇 靳子轩 湛全帅 陈子豪 王焱清

(湖北工业大学农机工程研究设计院, 湖北 武汉 430068)

摘要: [目的] 解决当前油茶果破壳设备普遍存在的易损伤茶籽、茶壳完整性不佳以及油茶鲜果加工效果不佳的问题。[方法] 设计一种集上料机、圆盘分级机和 3 台揉搓破壳机为一体的圆盘分级揉搓式油茶果生产线。以上料速度、分级准确率和分级半径误差为指标, 对上料机和圆盘分级机进行离散元仿真分析; 以破壳率和破籽率为指标, 对揉搓破壳机进行离散元和 RecurDyn 软件的联合仿真, 将仿真结果和样机试验结果进行对比分析。[结果] 当上料机的输送带速度 $< 0.14 \text{ m/s}$, 圆盘分级机的喂入量 $< 40 \text{ s}^{-1}$, 揉搓破壳机的揉搓间隙 $< 3 \text{ mm}$, 揉搓速度为 35 rad/min 时, 综合破壳效率最佳, 平均脱壳率 $> 97\%$, 破损率 $< 3\%$ 。[结论] 该油茶果生产线机器具有较高的脱壳率和较低的破损率。
关键词: 农业机械; 油茶果; 揉搓破壳; 试验; 脱壳率

Design and experiment of *Camellia oleifera* fruit grading and shelling processing line

LIU Mingyong JIN Zixuan ZHAN Quanshuai CHEN Zihao WANG Yanqing

(Hubei University of Technology, Hubei Agricultural Machinery Engineering Research and Design Institute,
Wuhan, Hubei 430068, China)

Abstract: [Objective] To address the common problems existing in current *Camellia oleifera* fruit shelling equipment, such as easy damage to seeds, poor integrity of shells, and unsatisfactory processing effect of fresh fruits. [Methods] A disc grading and rubbing type *Camellia oleifera* fruit production line is designed by integrating a feeding machine, a disc grader and three rubbing shelling machines. Taking the feeding speed, classification accuracy rate and classification radius error as indicators, the discrete element simulation analysis is conducted on the feeding machine and the disc grader. With the shell-breaking rate and seed-breaking rate as indicators, a joint simulation of the rubbing shelling machine is conducted using discrete element and RecurDyn software. The simulation results are compared and analyzed with the prototype test results. [Results] When the conveyor belt speed of the feeding machine is less than 0.14 m/s , the feeding amount of the disc grader is less than 40 s^{-1} , the rubbing gap of the rubbing shelling machine is less than 3 mm , and the rubbing speed is 35 rad/min , the comprehensive shell-breaking efficiency is the best, with an average shell-breaking rate $> 97\%$ and seed-breaking rate $< 3\%$. [Conclusion] The *Camellia oleifera* fruit production line machine has a high shelling rate and a low damage rate.

Keywords: agricultural machinery; *Camellia oleifera* fruit; rubbing shelling; experiment; shelling rate

油茶 (*Camellia oleifera* Abel), 又名茶树油、茶籽油, 是中国特有的一种木本油料树种^[1-3], 主要分布于湖南、江西、湖北、浙江等省份。国家林草局发布的《加快油茶产业发展三年行动方案(2023—2025 年)》指出, 到 2025 年全国油茶种植面积应达到 600 万 hm^2 以上, 茶油产能达到

200 万 $\text{t}^{[4]}$ 。油茶果个体直径一般为 $20 \sim 40 \text{ mm}$, 个别果实直径可以达到 50 mm 以上, 成熟阶段集中在每年的 9—11 月份, 其茶籽经过压榨可以得到高品质的食用油, 榨油所得的茶饼可以做农药、肥料^[5-6]。目前, 传统的油茶果破壳环节仍面临效率低、能耗高、损伤率大等问题。现有

基金项目: 湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目(编号: HBSNYT202208)

通信作者: 刘明勇(1985—), 男, 湖北工业大学副教授, 博士。E-mail: lmy8508@hbut.edu.cn

收稿日期: 2025-04-12 改回日期: 2025-08-23

引用格式: 刘明勇, 靳子轩, 湛全帅, 等. 油茶果分级破壳加工生产线的设计与试验[J]. 食品与机械, 2026, 42(4): 111-120.

Citation: LIU Mingyong, JIN Zixuan, ZHAN Quanshuai, et al. Design and experiment of *Camellia oleifera* fruit grading and shelling processing line[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 111-120.

油茶果破壳技术多借鉴坚果、谷物等作物的处理经验,难以满足油茶果独特的壳厚不均、仁壳粘连等特性需求^[7-8]。

目前,工厂内处理油茶果的方法大致可分为分级、破壳、烘干、清选和烘干、破壳、清选两条路线。肖本贵等^[9-10]设计了划线破壳装置,通过运用弹簧刀片对单个油茶果划线后,使用碾轮碾压方式对油茶果进行破壳处理,实现了较高的破壳率,同时提供了一种利用锥形针对油茶果进行定点破壳的思路。王焱清等^[11]设计了多通道气动刨削式油茶果破壳机,通过压力装置对钩爪施力并配合通道内的刀片对油茶果进行破壳处理。陈礼东等^[12]设计了切割式油茶果脱薄机,对多个油茶果表面进行切割,再由柔性板对其表面进行击打实现了破壳。汤晶宇等^[13]设计了四通道全自动成熟油茶鲜果脱壳机,对油茶果进行导轨分级,并通过滚筒装置实现了油茶果间的相对挤压以达到脱壳的效果。唐湘等^[14]设计了离心甩盘油茶果破壳机,通过离心力将油茶果甩到齿圈上,经油茶果自身的惯性与齿圈之间进行撞击摩擦,以达到破壳目的。王毅等^[15]改进了唐湘等^[14]的设计,在撞击部下方增加了浮选部,对油茶果进行了初步的壳籽分离。祝兆帅等^[16]利用斜齿对辊挤压的方法设计了一种杏核破壳装置,分析了杏仁是否分级对破壳效果的影响。杨柳君^[17]设计了双辊多次挤压油茶果脱壳设备,利用对向旋转辊轴对油茶果进行破壳,并将未完全破壳的油茶果提升至辊轴上方进行多次脱壳。张风等^[18]设计了三棱锥轴旋转挤压破壳装置,利用三棱锥轴和腔壁的相互挤压揉搓力将油茶果进行破壳处理。李文林等^[19]在锥型加工轴上加装了螺旋筋,可避免油茶果原料堆积,减少碎籽风险。熊平原等^[20]设计了多滚刀撞击切割脱壳装置,利用圆盘上均匀分布刀片的刀轴旋转打击切割油茶果,实现了油茶果的脱壳处理。孙小永等^[21]采用表面带有螺纹的辊轴与弧形栅板配合挤压的方式,研制了一种辊板式油茶果脱壳机。Worn 等^[22]设计了坚果破壳装置,通过旋转滚筒及连杆带

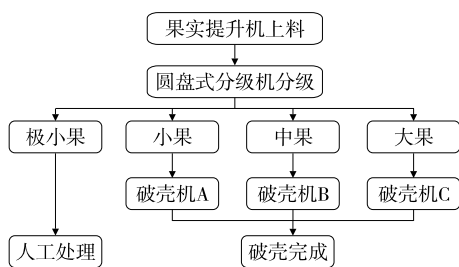
动夹杆与另一夹杆间的相互挤压与揉搓作用实现各类坚果的破壳。Fakayoude 等^[23-25]设计了坚果破壳装置,利用脱壳板在脱壳室内旋转击打坚果的方式进行坚果脱壳。Bernik 等^[26]设计了核桃破壳机,采用离心甩盘的方式,利用弹出装置对核桃的加速作用,将核桃撞在筒壁上以完成破壳。Dixit 等^[27]设计了花生破壳机,利用双辊对向挤压作用破壳,分析了不同辊速和不同含水率下花生的破壳率及碎籽率。Zhang 等^[28]设计了核桃脱壳装置,利用分级辊使核桃分级,然后落入旋转的裂解辊和挤压板之间的间隙中完成破壳。

目前,中国研发的油茶果机器大多仍针对于晾晒或烘干后破壳的流水线方法,该流水线花费时间成本过大,难以在油茶果变质期间完成指定的工作。同时,由于油茶果分级机器的匮乏,油茶果本身大小不均的特性也会导致大多油茶鲜果破壳机脱壳率低、碎籽率高等问题。试验拟基于油茶果本身的大小和力学特征,设计一条小型高效的油茶果分级脱壳生产线。首先,设计生产线各机器的基本构造,以上料速率、分级准确率、破壳率及碎籽率为指标,在仿真软件中进行单因素模拟分析。通过实际样机的单因素试验分析,得到油茶果分级脱壳生产线中各机器的合理参数范围,最后通过试验验证分析装置的有效性及其实用性,旨在为当前油茶果破壳设备的研发提供依据。

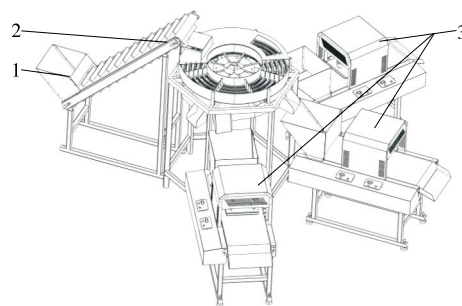
1 分级与破壳生产线工艺设计及结构设计

1.1 生产线工艺设计

分级与破壳生产线及其原理如图 1 所示。首先,提升机将原料送入圆盘分级机中,按照其果实大小分为 4 级。分级后的油茶果落入指定间隙的揉搓破壳机中进行破壳,最后得到茶壳及茶籽混合产物,完成破壳。该生产线结构紧凑,各机器占地面积较小,同时考虑到了油茶果的大小差异,3 台揉搓破壳机在保证生产效率的前提下,也保证了果实的脱壳效率。以市面上现有的油茶果脱壳生



(a) 生产线工艺图



1. 上料机 2. 圆盘分级机 3. 揉搓破壳机组

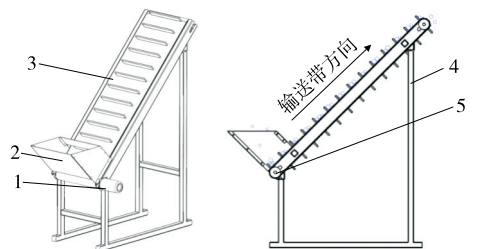
(b) 生产线模型

图 1 分级与破壳工艺及生产线图

Figure 1 Grading and shelling process and production line

产线为参考,要保证整套分级与破壳生产线的脱壳率 $>97\%$,破损率 $<3.5\%$ 。

(1) 上料机:上料机由入料斗、输送带、电动机和机架组成,如图2所示。上料机由入料斗旁的电机提供动力,带动输送带将料斗箱内的油茶果提升至圆盘分级机高度。传送带上有数个隔板将输送带划分为数个大小相等的区间,有利于将料斗箱内的原料匀速输送至分级机内。通过对输送带转速的调节,可以有效控制后续机器油茶果的处理效率,防止机器内部出现原料过多导致的机器卡顿堵塞。



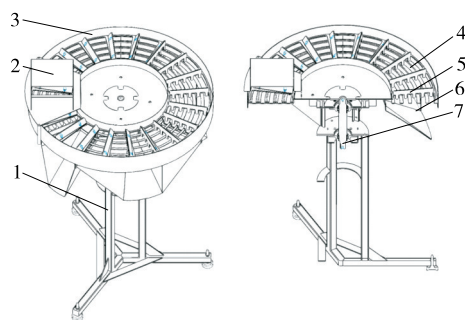
1. 电动机 2. 入料斗 3. 输送带 4. 机架 5. 输送带轴

图2 上料机结构图

Figure 2 Structure of feeding machine

(2) 圆盘分级机:圆盘分级机由推进拨片、分级导轨、机架、进料口、出料口和分级机主轴组成,如图3所示,其中电机安装在分级机主轴上,负责给机器提供动力。整个圆盘分级机靠安装在主轴上的电机提供动力,电机轴通过卡盘与分级盘相连。分级盘上安装有推进拨片,可以深入分级轨道之间的间隙中,产生推进力推动油茶果沿着分级导轨前进。分级导轨由6段不同直径的圆形导轨组成,导轨之间具有不同间隙,油茶果可以根据直径大小的不同从相对应的间隙落下,从而掉落到相应的出料口中。

(3) 揉搓破壳机:揉搓破壳机主要由机架、入料斗、输

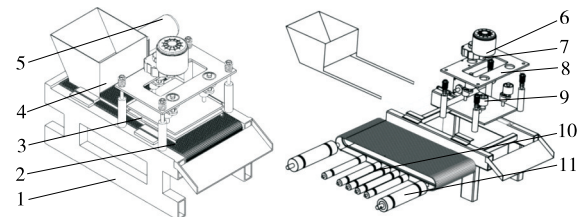


1. 机架 2. 进料口 3. 挡板 4. 分级导轨 5. 推进拨片 6. 出料口 7. 分级机主轴

图3 圆盘式分级机结构图

Figure 3 Structure of disc grader

送带、揉搓板和双曲柄机构等组成,如图4所示,其中两台电机分别安装在输送装置的传送带主动轮和揉搓装置的主动曲柄上。由于果壳存在裂纹以及抗剪力较弱的特性,基于揉搓方法设计的油茶果破壳机可以极大地降低机器对油茶果的挤压力,从而减少茶籽的破损。揉搓电机开始工作时,主动曲柄带动从动曲柄协同进行旋转运动,确保揉搓板始终在与输送带平行的平面上进行纵横向移动。工作时,直径在一定范围内的油茶果能够均匀地进入料斗并自动落至输送带上,随输送带一同移动至揉搓间隙内部,利用揉搓板与输送带之间的摩擦力实现油茶果破裂。



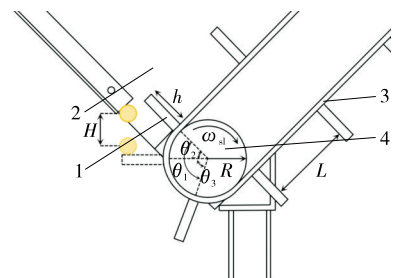
1. 机架 2. 输送带 3. 揉搓板 4. 入料斗 5. 输送带电机 6. 揉搓电机 7. 减速器 8. 支撑板 9. 双曲柄机构 10. 支撑辊轴 11. 输送带轴

图4 揉搓破壳机结构图

Figure 4 Structure of rubbing shelling machine

1.2 关键部件设计

1.2.1 上料机 如图5所示,影响上料机上料效率的主要参数有隔板高度 h 、隔板间距 L 、输送带轴角速度 ω_{s1} 和输送带倾角 θ_2 等。为防止油茶果从料斗下方和输送带的空隙中漏出,隔板高度与入料斗下方间隙应尽量减小,根据测量统计,油茶果半径 r 一般为10~20 mm,故将隔板高度 h 设为50 mm。



1. 隔板 2. 进料斗 3. 输送带 4. 输送带轴

图5 上料机局部受力图

Figure 5 Local force of feeding machine

在前一隔板离开间隙后,料斗内的油茶果受自身重力 $G=mg$ 作用垂直向下运动。为防止油茶果落出上料机之外,下一隔板要在油茶果下落高度超过 H 前回转至水平位置。

由隔板间距的弧长 L 和输送带轴半径 R 可以算出两隔板之间的夹角 θ_1 为:

$$\theta_1 = \frac{L}{R} \quad (1)$$

再由输送带倾角 θ_2 可得出隔板转动角度 θ_3 为:

$$\theta_3 = \theta_1 - \theta_2 \quad (2)$$

设输送带轴角速度为 ω_{sl} , 则隔板的运动时间 t_1 为:

$$t_1 = \frac{\theta_3}{\omega_{sl}} \quad (3)$$

设油茶果的下落高度为 H :

$$H = (h + R) \sin \theta_2 \quad (4)$$

由自由落体 $H = \frac{1}{2} g t_2^2$ 可知, 油茶果的下落时间 t_2 为:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (5)$$

根据下一隔板要在油茶果下落高度超过 H 前移动到水平位置, 可知 $t_1 \leq t_2$ 。结合式(1)~式(5)可知, 输送带轴角速度 ω_{sl} 和隔板间隔弧长 L 的关系应该为

$$\frac{L - R\theta_2}{R \sqrt{\frac{2 \sin \theta_2 (h + R)}{g}}} \leq \omega_{sl} \quad (6)$$

根据整机结构设计和布局, 考虑分级机、揉搓机的高度, 确定输送带倾角 θ_2 为 45° , 输送带轴半径 R 为 50 mm, 可以得到 $L \leq 5.94\omega_{sl} + 38.25$ 。

1.2.2 圆盘分级机 分级导轨由 6 条环形轨道及三角形的支承架构成(见图 6), 拨片可以伸入分级槽内, 推动油茶果沿着分级槽前进。分级导轨有进料区和 4 个分级区, 分别对应 4 个出料口, 依次对应极小果、小果、中果和大果。由于极小果果径太小且一般只有一粒茶籽, 揉搓破壳机不易加工, 采用人工破壳的方式, 2、3、4 3 个区分级的油茶果分别进入 3 台揉搓间隙依次增大的破壳机中。为防止外圈油茶果速度过快, 设分级导轨外圈直径为 1 020 mm, 其中 1 区间隙 25 mm; 2 区间隙 30 mm; 3 区间隙 35 mm; 4 区不设导轨, 直径 > 35 mm 的油茶果直接落入料斗。各分级区对应的油茶果直径等级分布见表 1。

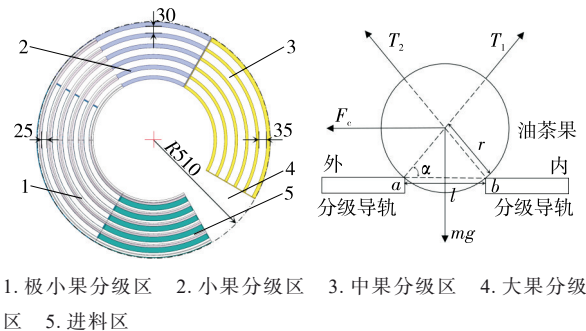


图 6 分级导轨结构图

Figure 6 Grading guideway structure

表 1 油茶果直径等级分布

Table 1 Diameter grade distribution of *Camellia oleifera*

fruit	
分级区域	油茶果直径/mm
1	< 25
2	25~30
3	30~35
4	> 35

分级过程中, 油茶果受到来自分级导轨的支撑力 T_1 、 T_2 , 自身的重力 $G = mg$ 和分级导轨转动时的离心力 F_c , 由于油茶果与推进拨片间的摩擦力较小, 可忽略不计, 为防止油茶果在分级过程中被甩出轨道, 油茶果的受力应满足以下关系:

在水平方向:

$$F_c + T_2 \cos \alpha = T_1 \cos \alpha \quad (7)$$

在垂直方向:

$$(T_1 + T_2) \sin \alpha = mg \quad (8)$$

结合离心力公式 $F_c = MR_{\bar{r}} \omega_{\bar{r}}^2$ 和转速—角速度公式 $\omega_{\bar{r}} = 2\pi n_{\bar{r}}$ 可得:

$$F_c = 4\pi^2 R_{\bar{r}} m n_{\bar{r}}^2 \quad (9)$$

当油茶果处于脱离轨道的临界状态时, $T_2 = 0$, 结合式(7)~式(9)则可求出圆盘分级机的转速 $n_{\bar{r}}$:

$$n_{\bar{r}} \leq \sqrt{\frac{g \cot \alpha}{4\pi^2 R}} \quad (10)$$

根据几何关系可知

$$\cot \alpha = \frac{l}{2 \sqrt{r^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2}} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)可得

$$n_{\bar{r}} \leq \sqrt{\frac{gl}{8\pi^2 R \sqrt{r^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2}}} \quad (12)$$

经测量, 油茶果半径 r 为 10~20 mm, 分级导轨间隙 l 分别为 25, 30, 35 mm, 油茶果中心到分级机主轴的距离 $R_{\bar{r}}$ 为 292~477 mm。代入式(12)可得最小范围 $n_{\bar{r}} \leq 1.33$ r/s。若要使分级盘在转动时最外层导轨的油茶果不在离心力的作用下脱轨, 分级盘转速应满足 $n_{\bar{r}} \leq 1.33$ r/s。

1.2.3 揉搓破壳机 经测量, 油茶果最大尺寸可以达到 45 mm, 所以揉搓间隙的调节范围必须大于油茶果最大直径, 故初步设计支撑杆长度为 500 mm, 螺纹长度为 100 mm, 揉搓间隙为 0~70 mm 可调, 以适应不同直径大小的油茶果。

揉搓板及油茶果运动轨迹如图 7(a)所示。由于电机转动时主动曲柄做匀速旋转, 通过连杆带动从动曲柄连

接的揉搓板,在旋转半径内做匀速逆时针圆周运动,在揉搓板做圆周运动的一个完整圆周内,将其划分成与输送带同向运动和对向运动两种状态。当输送带速度 V_2 远大于揉搓板速度 V_1 时,油茶果在揉搓区域的运动轨迹可类比为一条直线;当输送带速度 V_2 与揉搓板速度 V_1 具有可比性时,油茶果会在揉搓区域内螺旋前进,其轨迹长度会有一定的增长;当输送带速度 V_2 远小于揉搓板速度 V_1 时,油茶果的轨迹会随着揉搓板的运动而原地旋转。

(1) 喂入过程:假设油茶果为理想球体,在接触揉搓板的临界状态时,其受力状态如图 7(b) 所示。油茶果受到来自揉搓板法向的挤压力与切向的摩擦力,进入挤压受力阶段。接触瞬间,油茶果会受到 5 个力的作用,分别为油茶果自身的重力 $G=mg$ 、输送带对油茶果的支撑力 F_{n1} 、揉搓板对油茶果的挤压力 F_{n2} 、输送带对油茶果的摩擦力 $\mu_1 F_{n1}$ 和揉搓板对油茶果的摩擦力 $\mu_2 F_{n2}$ 。

在同向运动且揉搓板在水平方向上的速度大于输送带速度的状态下,油茶果会受到来自揉搓板和输送带的向右的摩擦力和挤压力。若要使油茶果能够顺利进入挤压间隙,在水平方向必须满足

$$\mu_1 F_{n1} + \mu_2 F_{n2} \cos \alpha \geq F_{n2} \sin \alpha \quad (13)$$

竖直方向上的力

$$F_{n1} = F_{n2} \cos \alpha + \mu_2 F_{n2} \sin \alpha + mg \quad (14)$$

由于油茶果的重力远小于所受挤压与摩擦力,故可忽略不计,即

$$F_{n1} = F_{n2} \cos \alpha + \mu_2 F_{n2} \sin \alpha \quad (15)$$

将式(15)代入式(12)得

$$\tan \alpha \leq \frac{\mu_1 + \mu_2}{1 - \mu_1 \mu_2} \quad (16)$$

查阅文献[29]可知,油茶果与输送带之间的摩擦系数 $\mu_1 = 0.42$,油茶果与揉搓板之间的摩擦系数可用木材与钢之间的摩擦系数^[30]计算,即 $\mu_2 = 0.2$,可计算得 $\alpha \leq 33^\circ$,即当揉搓板挤压角最大角度 $< 33^\circ$ 时,油茶果可顺利进入揉搓间隙。

在反向运动且同向运动揉搓板在水平方向上的速度小于输送带速度的状态下,油茶果会受到来自揉搓板的挤压力和向左的摩擦力,受到来自输送带的挤压力与向右的摩擦力。若要使油茶果能够顺利进入挤压间隙,在水平方向必须满足

$$\mu_1 F_{n2} \geq F_{n2} \sin \alpha + \mu_2 F_{n2} \cos \alpha \quad (17)$$

竖直方向上的力

$$F_{n1} = F_{n2} \cos \alpha - \mu_2 F_{n2} \sin \alpha + mg \quad (18)$$

油茶果的质量忽略不计,即

$$F_{n1} = F_{n2} \cos \alpha - \mu_2 F_{n2} \sin \alpha \quad (19)$$

将式(19)代入式(17)得

$$\tan \alpha \leq \frac{\mu_1 - \mu_2}{1 - \mu_1 \mu_2} \quad (20)$$

将 $\mu_1 = 0.42, \mu_2 = 0.2$ 代入式(19),计算得 $\alpha \leq 12^\circ$,即当揉搓板挤压角最大角度 $< 12^\circ$ 时,油茶果可顺利进入揉搓间隙,完成破壳过程。

综上,当揉搓板挤压角最大角度 $< 12^\circ$ 时,在同向与对向运动过程中,油茶果均可顺利进入揉搓间隙中,故设计其夹角为 11° 。

(2) 揉搓过程:油茶果在挤入揉搓板与输送带间的间隙后,由于揉搓板与输送带之间的间距小于油茶果直径,油茶果会在揉搓间隙内受到挤压。由于输送带采用柔性材料制造,在接触点 b 处输送带会在挤压力的作用下产生一定的挠度。此时,输送带的张紧力会以挤压力和剪切力的形式作用于油茶果外壳上,油茶果在揉搓区间内的受力分析如图 7(c) 所示。

由图 7(c) 可知,挠度的输送带与水平方向呈一定角度 δ ,其最高点与未发生输送带的水平距离为 x ,垂直距离为 h ,因此角度 δ 与垂直水平距离 y, x 以及油茶果直径 d 、揉搓间隙 e 之间的关系为:

$$\tan \delta = \frac{y}{x} \quad (21)$$

$$y = e - d \quad (22)$$

设沿输送带带宽度方向上油茶果个数为 n ,输送带的张紧力为 F ,每个油茶果在 a, b 点受到的挤压力和剪切力分别为:

$$F_{n1} = F_{n2} = \frac{2F \sin \delta}{n} \quad (23)$$

$$F_{t1} = \frac{F \cos \delta}{n} \quad (24)$$

$$F_{t2} = \mu_1 F_{n2} \quad (25)$$

由油茶果的破壳需要的挤压量分析得知, h 取 5~8 mm 合适,经测量和计算, x 为 16~18 mm,则 δ 取值为 $26.6^\circ \sim 32.0^\circ$,输送带与油茶果之间的摩擦系数为 0.41,则输送带对油茶果的剪切力为 $F_{t1} = \frac{F}{n}$ (0.84~0.89),揉搓板对油茶果的剪切力为 $F_{t2} = \frac{F}{n}$ (0.84~0.89)。

在同向运动且揉搓板在水平方向上的速度大于输送带速度的状态下,油茶果分别受到输送带的挤压力 F_{n1} 和向右的剪切力 F_{t1} ,揉搓板的挤压力 F_{n2} 和向右的剪切力 F_{t2} ,此时油茶果所受到的力矩为

$$M_x = rF_{t2} - rF_{t1} \quad (26)$$

由于 $F_{t1} > F_{t2}, M_x < 0$,油茶果会逆时针旋转前进。

在反向运动和同向运动揉搓板在水平方向上的速度小于输送带速度的状态下,油茶果分别受到输送带的挤压力 F_{n1} 和向右的剪切力 F_{t1} ,揉搓板的挤压力 F_{n2} 和向左的剪切力 F_{t2} ,此时油茶果所受到的力矩为

$$M_{tx} = -rF_{n2} - rF_{t1} \quad (27)$$

$M_{tx} < 0$, 此时油茶果仍会逆时针旋转, 但有一定后退的趋势, 延长油茶果在揉搓区域内的时间及其揉搓轨迹。

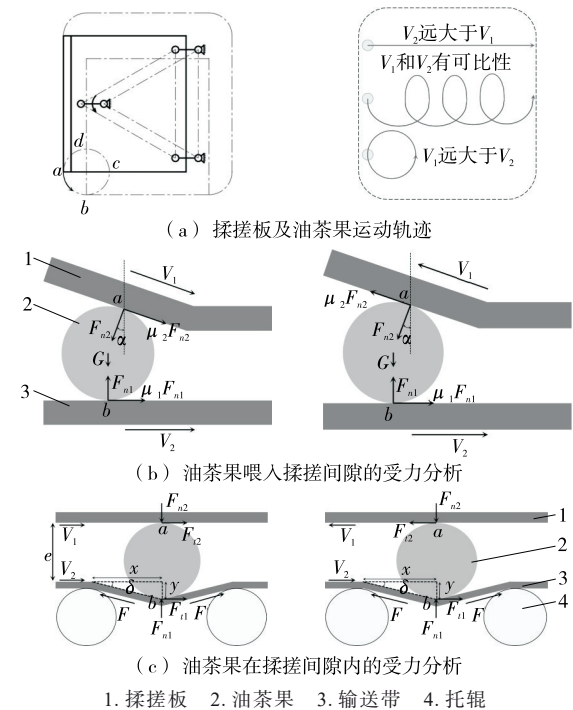
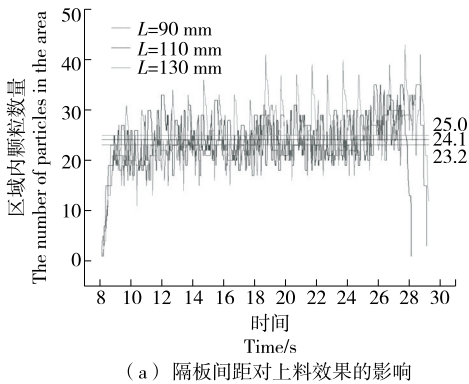


图 7 *Camellia oleifera* fruit movement state

2 仿真分析

2.1 上料机

考虑到上料机在工作过程中, 入料斗始终处于堆满状态, 在入料斗处生成直径为 20~40 mm 大小随机的球形颗粒。对每秒通过指定区域的颗粒数量进行分析, 计算出上料效果最佳时的隔板间距与输送带速度, 仿真过程如图 8 所示。



(a) 隔板间距对上料效果的影响



图 8 上料机仿真模拟图
Figure 8 Feeding machine simulation

根据仿真得到的后处理反馈, 得到上料机的上料效果如图 9 所示。

仿真过程中, 输送带及隔板间距满足式(6)的前提下, 无颗粒从入料斗间隙掉落。由图 9 可知, 隔板间距决定了通过上料区域内的颗粒数量幅值, 但对上料机的上料速度影响不大, 而输送带的速度则决定了上料的速度。

2.2 圆盘分级机

根据式(11)可得圆盘分级机的最大转速不得超过 1.33 r/s, 为保证圆盘分级机的最大使用效率, 设置分级盘的转速为 1.3 r/s。在分级入口处生成 1 000 个大小分布在 20~40 mm 的球形颗粒, 观察其在不同喂入量的情况下圆盘分级机的准确率 η_j 和超出所在区域半径限制颗粒的平均半径误差 r_c , 分析过程如图 10 所示。

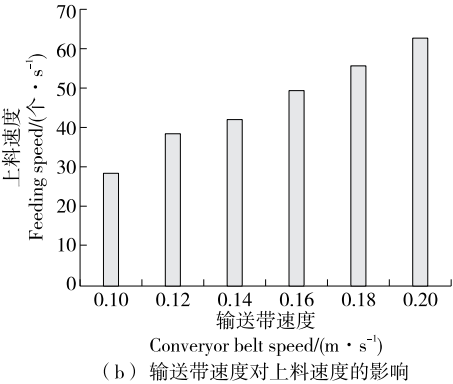
设输入颗粒数量为 j_1 , 超出区域限制直径的颗粒数量为 j_2 , 则圆盘分级机的准确率为

$$\eta_j = \frac{j_1 - j_2}{j_1} \quad (28)$$

设超出区域限制直径的颗粒半径为 r_{j2} , 区域半径限制为 r_n , 平均半径误差

$$r_c = \frac{\sum_{j=1}^{j_2} (r_{j2} - r_n)}{j_2} \quad (29)$$

根据仿真结果可以得到圆盘分级机的分级效果如



(b) 输送带速度对上料速度的影响

图 9 上料效果图

Figure 9 Feeding effect

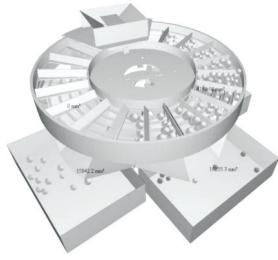


图 10 圆盘分级机仿真模拟图

Figure 10 Disc grader simulation

图 11 所示。

由图 11 可知,随着喂入量的增加,由于颗粒堆叠等因素的影响,圆盘分级机的准确率下降、平均半径误差提高。

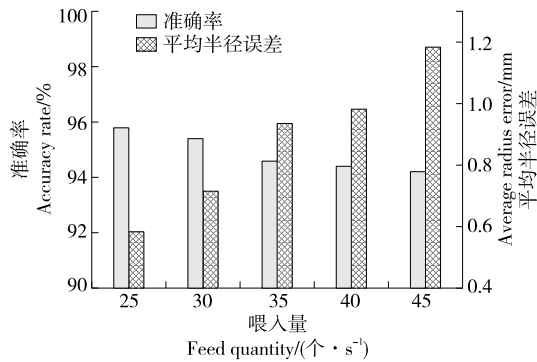


图 11 分级效果图

Figure 11 Grading effect

2.3 揉搓破壳机

为测量揉搓破壳机中果级的破壳效率,输入个体为直径 30~35 mm 的球形粘合颗粒 10 kg 倒入机器进料口,使颗粒在破壳机中完成破壳。试验完成后,未脱壳的茶籽颗粒质量 W_1 ,已脱壳的完整茶籽颗粒质量 W_2 ,已脱壳的破损茶籽颗粒质量 W_3 。

油茶果样机性能试验参考某公司的油茶果剥壳分选机企业标准,指标为脱壳率 η_1 、破损率 η_2 ,其计算式为

$$\eta_1 = \frac{W_2 + W_3}{W_1 + W_2 + W_3}, \quad (30)$$

$$\eta_2 = \frac{W_3}{W_2 + W_3} \circ \quad (31)$$

对破壳机的揉搓间隙、揉搓速度及输送带速度在 EDEM 和 RecurDyn 软件上进行联合单因素仿真试验,仿真过程如图 12 所示。

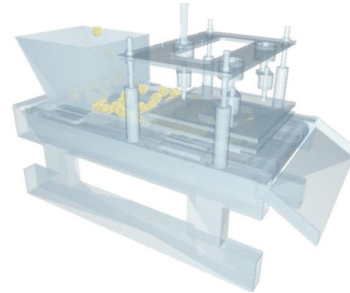


图 12 揉搓破壳机仿真分析图

Figure 12 Rubbing shelling machine simulation analysis

取揉搓速度 35 r/min,输送带速度 0.3 m/s,在 25~30 mm 之间调节揉搓间隙。由图 13(a)可知,随着揉搓间隙的增大,脱壳率和破损率逐渐降低。揉搓间隙大小对作用在油茶果上的挤压力和摩擦力有较大影响,揉搓间隙过小,作用在油茶果上的挤压力过大容易造成茶籽破损;揉搓间隙过大,作用在油茶果上的摩擦力不足以将油茶果外壳撕裂,造成油茶果不能破壳,当揉搓间隙为 27~28 mm 时,脱壳率及破损率较为理想。

取揉搓间隙 27 mm,输送带速度 0.3 m/s,不同揉搓速度对破壳效果影响的变化曲线如图 13(b)所示,随着揉搓速度的增大,上下表面给予油茶果的剪切力上升,油茶果的运动轨迹增长,脱壳率和破损率增大。综合可得,揉搓速度为 35 r/min 时,破壳效果最佳,此时油茶果脱壳率为 99.13%,破损率为 3.44%。

取揉搓间隙 27 mm,揉搓速度 35 r/min,在 0.1~0.4 m/s 之间调节输送带速度。由图 13(c)可知,随着输送带速度

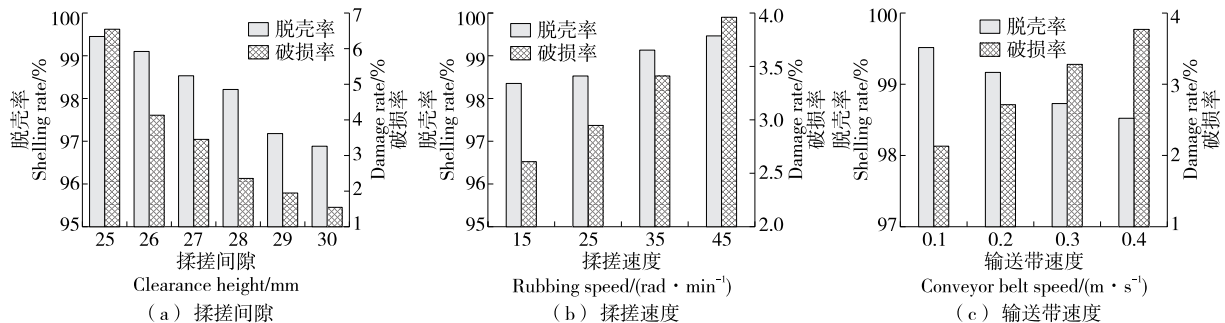


图 13 不同参数对破壳效果的影响

Figure 13 Effect of different parameters on shelling effect

的上升,油茶果在间隙内停留时间减少,轨迹也随之减短,油茶果的脱壳率逐渐减小,破损率增大。在保持工作效率的前提下,输送带速度为 0.2~0.3 m/s 时,综合破壳效果较好。

3 样机试制与试验

3.1 样机参数

样机参数见表 2。

表 2 样机参数表

Table 2 Prototype parameter table

主要参数	单位	数值
上料机(长×宽×高)	mm	1 300×490×1 620
揉搓破壳机(长×宽×高)	mm	1 850×760×1 200
圆盘分级机(长×宽×高)	mm	1 025×1 025×1 460
主机电压	V	380
总功率	kW	4.5
总质量	kg	500

3.2 样机试验与结果

取油茶果圆盘分级机大果出口处的油茶果 10 kg(直径 30~35 mm)倒入机器进料口,使油茶果在破壳机中完成破壳。试验完成后,收集试验样本并称重,脱壳和未完全脱壳的茶籽质量 W_1 ,已脱壳的完整籽粒质量 W_2 ,已脱壳的破损籽粒质量 W_3 ,代入式(27)、式(28)中计算脱壳率和破损率。

3.2.1 单因素试验

(1) 揉搓间隙对破壳效果的影响:取揉搓速度 35 r/min,输送带速度 0.3 m/s,揉搓间隙范围 25~30 mm。由图 14 可知,随着揉搓间隙的增大,脱壳率和破籽率逐渐降低,与仿真趋势一致,但脱壳率和破损率略低于仿真过程,这是因为联合仿真试验中无法将输送带柔性化。当揉搓间隙为 27 mm 时,破壳效果最好,脱壳率为 98.1%,破籽率为 2.9%。

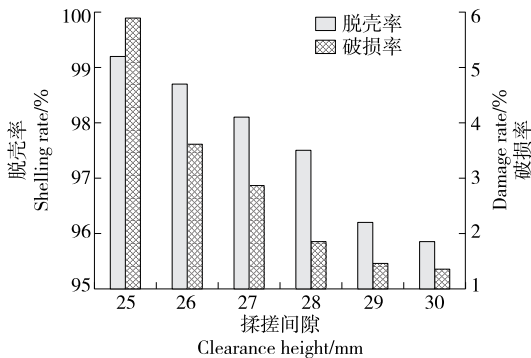


图 14 揉搓间隙对脱壳率和破损率的影响

Figure 14 Effect of rubbing gaps on shelling rate and damage rate

(2) 揉搓速度对破壳效果的影响:取揉搓间隙 27 mm,输送带速度 0.3 m/s,不同揉搓速度对脱壳率和破损率的影响如图 15 所示,随着揉搓速度的增大,脱壳率和破损率逐渐增大,与仿真趋势一致。这是由于揉搓速度的快慢对揉搓板施加在油茶果表面的作用力有较大影响。当揉搓速度为 35 r/min 时,脱壳效果最佳,此时油茶果脱壳率为 98.5%,破损率为 2.8%。

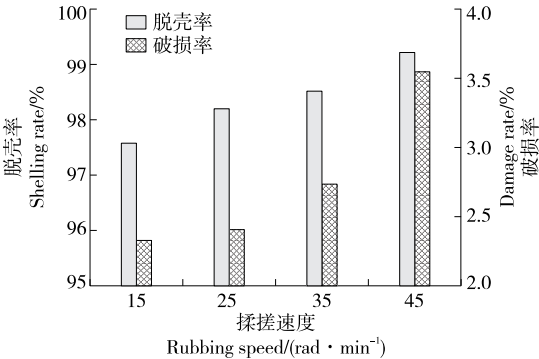


图 15 揉搓速度对脱壳率和破损率的影响

Figure 15 Effect of rubbing speeds on shelling rate and damage rate

(3) 输送带速度对破壳效果的影响:取揉搓间隙 27 mm,揉搓速度 35 r/min。由图 16 可知,揉搓速度对油茶果的脱壳率和破损率存在一定的相关性,当输送带速度为 0.1~0.4 m/s 时,油茶果的脱壳率从 99.5% 降至 97.3%,破损率从 1.8% 提升至 3.3%。为保证工作效率,当输送带速度为 0.2~0.3 m/s 时,综合脱壳效果较好。

3.2.2 验证实验 根据单因素试验结果,将 3 台揉搓破壳机的揉搓间隙分别设置为 22, 27, 32 mm,揉搓速度为 35 r/min,输送带速度为 0.25 m/s,以此参数组合进行整机工作性能试验,结果见表 3。

由表 3 可知,由于油茶果个体之间的差异性等原因,圆盘分级揉搓式油茶果破壳生产线的平均脱壳率为

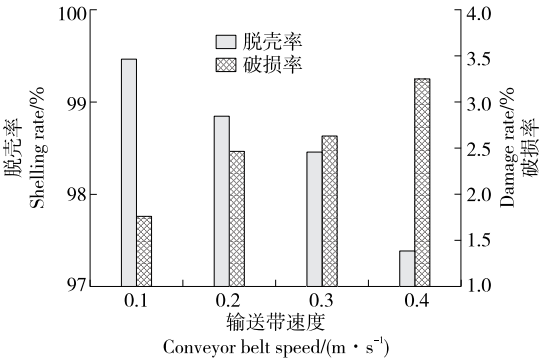


图 16 输送带速度对脱壳率和破损率的影响

Figure 16 Effect of conveyor belt speeds on shelling rate and damage rate

表3 整机破壳性能试验结果

Table 3 Whole machine shelling performance test results

试验号	物料			脱壳率/%	破损率/%
	W ₁ /g	W ₂ /g	W ₃ /g		
1	59.9	2 637.7	82.9	97.8	3.1
2	82.1	2 671.6	77.5	97.1	2.9
3	88.0	2 589.5	72.5	96.8	2.8
均值				97.2	2.9

97.2%,平均破损率为2.9%,整机性能试验表明该设备的破壳率和破籽率均可达到设计要求。

4 结论

(1) 以揉搓和直径分级原理为基础,设计了一种适用于不同直径鲜油茶果加工工序的分级破壳机,该揉搓破壳机大大降低了揉搓过程对油茶果的挤压力,降低了油茶鲜果加工时的破损率,能够满足茶籽加工企业的作业需求。

(2) 该油茶果破壳机集果实提升机、圆盘分级机和3台揉搓破壳机为一体,脱壳率高、结构简单紧凑、一体化程度高、价格成本低、工作效率高,适用广泛。

(3) 以生产效率、脱壳率和碎籽率为试验指标,分别将揉搓间隙和揉搓速度作为试验因素进行试验,结果表明3台揉搓破壳机的揉搓间隙分别为22,27,32 mm,揉搓速度为35 r/min,综合脱壳效率最佳,平均脱壳率>97%,平均破籽率<3%。

参考文献

- [1] 方学智,杜孟浩.我国油茶加工的现状及发展建议[J].中国农村科技,2022(11): 51-53.
FANG X Z, DU M H. Current situation and development suggestions of *Camellia oleifera* processing in China[J]. China Rural Science & Technology, 2022(11): 51-53.
- [2] 原姣姣,王成章,陈虹霞,等.不同品种油茶籽的含油率和脂肪酸组成分析研究[J].中国油脂,2012,37(1): 75-79.
YUAN J J, WANG C Z, CHEN H X, et al. Oil content and fatty acid composition analysis of different varieties of *Camellia oleifera* seeds[J]. China Oils and Fats, 2012, 37(1): 75-79.
- [3] 王彦花,张云,王容,等.基于主成分分析的茶油品质综合评价研究[J].中南林业科技大学学报,2019,39(6): 45-51.
WANG Y H, ZHANG Y, WANG R, et al. Research on comprehensive evaluation of *Camellia* oil quality based on principal component analysis[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(6): 45-51.
- [4] 江泽鹏,蔡娅,张幸,等.油茶产量与果实主要经济性状相关性分析[J].中国农学通报,2023,39(25): 16-20.
JIANG Z P, CAI Y, ZHANG X, et al. Correlation analysis of *Camellia oleifera* yield and main fruit economic character[J].

Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(25): 16-20.

- [5] 伍冠一,唐宗湘.止痒中药手绘图谱[M].南京:东南大学出版社,2021: 274.
WU G Y, TANG Z X. Illustrated handbook of anti-itch Chinese medicines[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2021: 274.
- [6] “中国地理百科”丛书编委会编著.罗霄山脉[M].北京/西安:世界图书出版公司,2017: 105.
"China Geography Encyclopedia" Editorial Committee. Luoxiao mountains[M]. Beijing/Xi'an: World Publishing Corporation, 2017: 105.
- [7] 黄登昇,饶洪辉.我国油茶果机械化采摘设备研究现状及思考[J].林业机械与木工设备,2019,47(7): 11-13.
HUANG D S, RAO H H. Research status and consideration on mechanized picking equipment of camellia fruit in China[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2019, 47(7): 11-13.
- [8] 宋兴国.一种油茶鲜果预处理加工系统: CN201922452842.1 [P]. 2019-12-31.
SONG X G. A preprocessing system for fresh *Camellia oleifera* fruits: CN201922452842.1[P]. 2019-12-31.
- [9] 肖本贵,胡淑芬,邓勇杰,等.油茶果划线破壳装置设计[J].南方农机,2021,52(16): 17-19.
XIAO B G, HU S F, DENG Y J, et al. Design of marking and breaking shell device for *Camellia oleifera* fruit[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(16): 17-19.
- [10] 肖本贵,赖曲芳,胡淑芬,等.基于锥形针的油茶果破壳性能试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2021,47(6): 720-726.
XIAO B G, LAI Q F, HU S F, et al. Experimental of expanding shell breaking property of *Camellia oleifera* fruits[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2021, 47(6): 720-726.
- [11] 王焱清,马君,熊韧.多通道气动刨削式油茶果破壳机设计[J].湖北农业科学,2018,57(12): 100-105.
WANG Y Q, MA J, XIONG R. Design on multi-channel pneumatic planer for *Camellia oleifera* shelling[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2018, 57(12): 100-105.
- [12] 陈礼东,胡淑珍,姚占斌,等.切割式油茶果脱蒲机设计与试验[J].农业工程,2021,11(5): 80-85.
CHEN L D, HU S Z, YAO Z B, et al. Design and experiment of cutting type *Camellia oleifera* fruit shelling machine[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(5): 80-85.
- [13] 汤晶宇,王东,寇欣,等.四通道全自动油茶成熟鲜果脱壳机设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(4): 109-116, 229.
TANG J Y, WANG D, KOU X, et al. Design and experiment of four-channel fully automatic shelling machine for ripe fresh *Camellia oleifera* fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 109-116, 229.
- [14] 唐湘,谢方平,李旭,等.油茶果脱壳装置设计及试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2014,40(6): 665-668.
TANG X, XIE F P, LI X, et al. Design and test of dehulling

- machine for *Camellia oleifera* fruit[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2014, 40(6): 665-668.
- [15] 仲恺农业工程学院. 一种油茶果的壳、籽分离装置及其方法: 201911222903.3[P]. 2020-02-25.
- Zhongkai University of Agriculture and Engineering. A shell and seed separation device and method for *Camellia oleifera* fruits: 201911222903.3[P]. 2020-02-25.
- [16] 祝兆帅, 张佳喜, 杨莉玲, 等. 斜齿对辊挤压式杏核破壳装置设计及压辊强度分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 115-119, 202.
- ZHU Z S, ZHANG J X, YANG L L, et al. Design of apricot core-breaking device with squeeze-tooth-to-roller and analysis of the strength of pressing roller[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 115-119, 202.
- [17] 杨柳君. 一种油茶果脱壳机: CN210726628U[P]. 2020-06-12.
- YANG L J. *Camellia oleifera* fruit huller: CN210726628U[P]. 2020-06-12.
- [18] 张风, 杨志斌, 张劲夫. 油茶鲜果剥壳机机械设计原理[J]. 湖北林业科技, 2013(3): 21-23.
- ZHANG F, YANG Z B, ZHANG J F. Mechanical design principles of *Camellia oleifera* fresh fruit hulling machine[J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2013(3): 21-23.
- [19] 李文林, 彭宣炎, 杨博, 等. 油茶果脱壳技术与设备研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(4): 151-153, 156.
- LI W L, PENG X Y, YANG B, et al. Dehulling technology and device for oil-tea camellia fruit[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(4): 151-153, 156.
- [20] 熊平原, 王毅, 吴卓葵, 等. 油茶青果脱壳装置研究与设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(5): 126-129.
- XIONG P Y, WANG Y, WU Z K, et al. Research and design on shelling machine of green camellia fruit[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(5): 126-129.
- [21] 孙小永, 李滨, 潘荣晴, 等. 油茶果脱壳分选一体机设计研究[J]. 科技创新与生产力, 2021(7): 102-104.
- SUN X Y, LI B, PAN R Q, et al. Design and research on the integrated machine of *Camellia oleifera* fruit shelling and sorting[J]. Sci-Tech Innovation and Productivity, 2021(7): 102-104.
- [22] WORN J J, MITCHELL J. Nut-cracking apparatus: US2021401026[P]. 2021-12-30.
- [23] FAKAYODE O A, AKPAN J F. Development, testing and optimization of a moringa (*Moringa oleifera*) seed dehuller[J]. Agricultural Research, 2020, 9(2): 249-261.
- [24] IBIKUNLE R A, IKUBANNI P P, AGBOOLA O O, et al. Development and performance evaluation of palm nut cracker [J]. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2018(33): 219-234.
- [25] AVIARA N, IYILADE I J, OYENIYI S K, et al. Performance evaluation of a bush mango (*Irvingia gabonensis*) nut cracking machine[J]. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal, 2011, 21(1): 156-162.
- [26] BERNIK R, STAJNKO D, DEMŠAR I. Comparison of the kernel quality of different walnuts (*Juglans regia* L.) varieties shelled with modified centrifugal sheller[J]. Erwerbs-Obstbau, 2020, 62(2): 213-220.
- [27] DIXIT J, RAVINDRA K. Design, development and evaluation of walnut cracking machine[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2022, 24(4): 143-152.
- [28] ZHANG H, LIU H L, ZENG Y, et al. Design and performance evaluation of a multi-point extrusion walnut cracking device [J]. Agriculture, 2022, 12(9): 1 494.
- [29] 张禹鑫. 差速对搓式油茶果脱壳机脱壳受力分析与参数优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022: 16-18.
- ZHANG Y X. Stress analysis and parameter optimization of different-speed-pair-rubbing *Camellia oleifera* fruit sheller[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022: 16-18.
- [30] 李伟光, 张占宽. 微坑型微织构硬质合金表面对木材摩擦特性的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(4): 136-143.
- LI W G, ZHANG Z K. The effect of micro-pits texture on the coefficient of friction between wood and cemented carbide[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(4): 136-143.