

四通道全自动油茶成熟鲜果脱壳机设计与试验

汤晶宇^{1,2} 王东^{1,2} 寇欣^{1,2} 曲振兴^{1,2} 徐克生¹

(1. 国家林业和草原局哈尔滨林业机械研究所, 哈尔滨 150086; 2. 中国林业科学研究院林业新技术研究所, 北京 100091)

摘要: 针对油茶成熟鲜果在脱壳过程中存在脱净率低、茶籽破损率高等问题,设计了一种四通道全自动油茶成熟鲜果脱壳机。通过对油茶果进行四通道分级,使不同大小的油茶果进入相应的脱壳滚筒内,通过油茶果与脱壳套筒的相互撞击以及油茶果之间碰撞、挤压、搓擦的综合作用实现脱壳。选取油茶成熟鲜果为研究对象,以茶果脱净率、茶籽破损率为评价指标,以茶果喂入量、脱壳杆扭度和脱壳杆直径为试验因素,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验、方差分析和加权综合评分法对油茶成熟鲜果脱壳机的脱壳效果进行分析。结果表明:当茶果喂入量 1 500 kg/h、脱壳杆扭度 30° 、脱壳杆直径 23 mm 时,该脱壳机脱壳效果最佳。对脱壳机进行 3 次最佳参数组合下的脱壳试验,取 3 次试验结果的平均值作为油茶成熟鲜果脱壳机最终的脱净率和茶籽破损率,计算得出该脱壳机的脱净率为 98.85%、茶籽破损率为 3.24%,研究表明,该四通道全自动油茶成熟鲜果脱壳机达到预期设计目标,能够较好地完成油茶果脱壳作业。

关键词: 四通道; 油茶成熟鲜果; 脱壳机; 正交试验

中图分类号: S226.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)04-0109-08

OSID:



Design and Experiment of Four-channel Fully Automatic Shelling Machine for Ripe Fresh *Camellia oleifera* Fruit

TANG Jingyu^{1,2} WANG Dong^{1,2} KOU Xin^{1,2} QU Zhenxing^{1,2} XU Kesheng¹

(1. Harbin Forestry Machinery Research Institute, National Forestry and Grassland Administration, Harbin 150086, China

2. Research Institute of Forestry New Technology, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Aiming at the problems of low shelling rate and high breakage rate in the process of shelling ripe fresh *Camellia oleifera* fruits, a four-channel fully automatic shelling machine was designed. The shelling machine classified the *Camellia oleifera* fruit through four channels, so that the *Camellia oleifera* fruit within a certain size range entered the corresponding shelling drum. In the shelling drum, *Camellia oleifera* fruit was shelled through the comprehensive action of mutual impact with the shelling sleeve and collision, extrusion and rubbing between *Camellia oleifera* fruit. By selecting the ripe fresh *Camellia oleifera* fruit as the research object, the shelling rate of *Camellia oleifera* fruit and the breakage rate of *Camellia oleifera* seeds were used as the evaluation indicators, and the feed amount of camellia oleifera fruit, the twisting rate of the shelling bar and the diameter of the shelling rod was the experimental factor. The $L_9(3^4)$ orthogonal test, analysis of variance and weighted comprehensive scoring method were used to analyze the shelling effect of the ripe fresh *Camellia oleifera* fruit shelling machine. The test result showed that the feeding amount of *Camellia oleifera* fruit was 1 500 kg/h, the twisting degree of the shelling rod was 30° , and the diameter of the shelling rod was 23 mm, the shelling machine achieved the best shelling effect. The shelling machine was tested three times with the best combination of parameters, and the average value of the three tests was taken as the final shelling rate and breakage rate. After calculation and analysis, the shelling rate of the ripe fresh *Camellia oleifera* fruit shelling machine was 98.85%, and the seed breakage rate was 3.24%, the test results showed that the four-channel fully automatic *Camellia oleifera* ripe fresh fruit shelling machine reached the expected design goal and can well complete the *Camellia oleifera* fruit shelling operation.

Key words: four-channel; ripe fresh fruit of *Camellia oleifera*; shelling machine; orthogonal test

收稿日期: 2020-07-03 修回日期: 2020-07-24

基金项目: 中国林业科学研究院林业新技术研究所基本科研业务费专项(CAFYBB2019SZ011)和浙江省省院合作林业科技项目(2016SY02)

作者简介: 汤晶宇(1980—),男,研究员,主要从事营林机械技术装备及其智能化研究,E-mail: hljtjy@163.com

通信作者: 徐克生(1964—),男,研究员,主要从事森林工程技术装备研究,E-mail: lyldaq@163.com

0 引言

油茶籽是制取茶油的原料,获得油茶籽需对采收后的油茶果进行脱壳处理。目前,油茶果脱壳主要采用人工摊晒的方式,其效率低、用工量大、成本高,且易受天气、场地的限制,制约了茶油的生产,机械脱壳能很好地解决上述问题^[1-3]。油茶果机械脱壳主要包括撞击法、剪切法、挤压法、碾搓法和搓撕法^[4]。黄凤洪等^[5]基于挤压和碾搓原理设计了一台油茶果脱壳机,该机二次分选时采用风选方式进行清选,由于茶壳与茶籽质量相近,清选效果一般。蓝峰等^[6]基于撞击、挤压和揉搓原理设计了一台油茶果脱壳清选机,该机脱壳后半脱及未脱油茶果混入壳籽混合物中,破籽量大,且清选效果不佳。李善森^[7]设计了一台油茶青果脱壳机,该机通过旋转滚刀反复割切与撞击完成油茶果的脱壳,茶籽破损率较高。廖配等^[8]基于撞击原理设计了一种油茶果破壳装置,该装置利用转子和叶轮的高速旋转,使油茶果与转子及外壳发生碰撞,从而实现脱壳,但该装置并未设计脱壳后壳籽混合物的清选装置。熊平原等^[9]设计了一台碾压式油茶籽脱壳装置,油茶果在压筋和筛条的相互挤压作用下脱壳,但该装置未设计油茶果分级机构和壳籽清选机构。以上脱壳机均未设计油茶果分级装置,在脱壳过程中不同大小的油茶果受力相同,导致部分油茶果无法脱壳,同时茶籽破损率较高。马君^[10]设计了一台多通道刨削式油茶果破壳机,该机通过推压手爪和破壳通道的共同作用完成油茶果的脱壳,壳籽清选采取色选方式,但色选法成本高,且随着晾晒或存放时间的延长,清选率也会逐渐降低。文献[11-17]均对油茶果脱壳装置进行了相关研究,但在实际作业中应用较少,其主要原因是机械脱壳时油茶果脱净率和茶籽破损率相互制约,很难取得折中效果。此外,脱壳效率低、清选率低、稳定性差^[18]也是应用较少的原因。

为此,本文设计四通道全自动油茶成熟鲜果脱壳机,针对实际作业过程中油茶果机械脱壳效率低的问题,选取脱净率和破损率为主要评价指标,对全自动油茶成熟鲜果脱壳机样机进行结构优化,以期提高脱壳机的实际作业性能。

1 油茶成熟鲜果物理特性

1.1 形状和含水率

油茶果主要由茶壳、茶籽和隔膜构成^[19],在整个油茶果中质量所占比例分别为 45.83%、52.33%、1.84%^[20]。油茶成熟鲜果颜色基本呈红褐色伴有青绿色,外形主要呈不规则状球形或椭球

形,直径 30~50 mm,木质^[21],晾晒 2~5 d 后,茶壳会以纵轴为中心,多瓣茶壳向底部开裂,瓣数以 2~5 瓣居多,油茶果如图 1 所示。

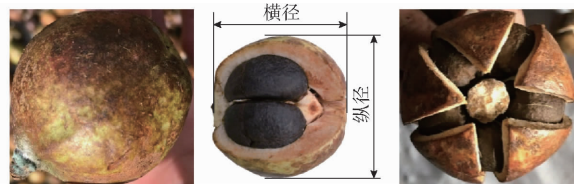


图 1 油茶果实物图

Fig. 1 *Camellia oleifera* fruit

为测得油茶成熟鲜果茶籽、茶壳含水率随晾晒时间变化情况,选取浙江省衢州市常山县油茶种植基地的红花油茶成熟鲜果,将采摘的油茶成熟鲜果放置在库房中晾晒,温度保持在 16~24℃,每日定时测量,测得茶籽、茶壳晾晒过程含水率变化如图 2 所示。

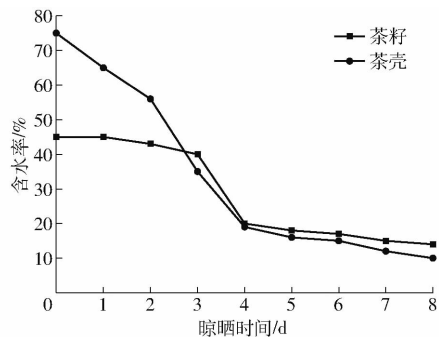


图 2 茶籽、茶壳晾晒过程含水率变化曲线

Fig. 2 Change curves of moisture content of *Camellia oleifera* seeds and shells during drying

由图 2 可知,采摘后的油茶成熟鲜果茶壳、茶籽含水率分别为 75%、45%,茶壳含水率远高于茶籽含水率。晾晒前 2 天,茶壳含水率下降明显,而茶籽含水率却维持不变;晾晒第 3 天时,茶籽含水率开始高于茶壳含水率;第 4 天时,茶籽含水率降幅达到观测期间最大,这是因为晾晒第 3 天和第 4 天大量油茶果茶壳开裂^[22],茶籽暴露于空气中,导致茶籽水分大量散失;晾晒至第 5 天时,茶籽、茶壳含水率基本维持稳定。

1.2 纵径、横径统计结果

选取常山县红花油茶成熟鲜果,随机选取 500 个油茶果,使用游标卡尺分别对纵径、横径进行测量,统计结果如图 3 所示。油茶果纵径、横径如图 1 所示。

由图 3 可以得出:油茶成熟鲜果纵径在 20~25 mm 之间最多,接近 45%;油茶成熟鲜果横径在 25~30 mm 之间最多,达到 45%;油茶成熟鲜果纵径在 20~35 mm 之间的达到 92%;油茶成熟鲜果横径在 20~35 mm 之间的达到 96%;油茶成熟鲜果纵

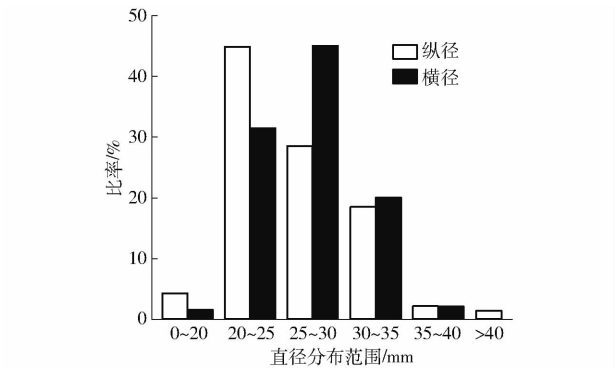


图3 油茶果纵径、横径分布统计

Fig.3 Statistics of longitudinal and transverse diameter distribution of *Camellia oleifera* fruit

径和横径均近似服从正态分布。

2 整机结构与工作原理

2.1 整机结构

油茶果脱壳机主要由分级装置、脱壳装置、壳籽输出装置、传动机构、电控柜和机架等组成,整机结构如图4所示。油茶成熟鲜果脱壳机基于国家林业和草原局哈尔滨林业机械研究所油茶果脱壳研究组提出的多通道精细化油茶果机械脱壳技术方法^[23],该技术方法工艺流程如图5所示。

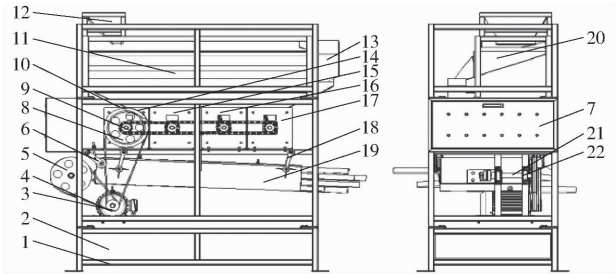


图4 油茶果脱壳机结构图

Fig.4 Structure diagram of *Camellia oleifera* fruit shelling machine

1. 机架 2. 机座 3. 主电机 4. 传动带 5. 振动筛带轮 6. 传动带张紧轮 7. 主机电控柜 8. 脱壳带轮 9. 链轮 10. 链条 11. 分级装置 12. 进料口 13. 导板 14. 一级脱壳滚筒 15. 二级脱壳滚筒 16. 三级脱壳滚筒 17. 四级脱壳滚筒 18. 摇杆 19. 壳籽输出装置 20. 分级底板 21. 振动筛传动轴 22. 轴承座

2.2 工作原理

油茶果的分级主要是在分级装置中完成,分级装置设计有11根橡胶导轨带,橡胶导轨带整体呈扇形分布,相邻的两根橡胶导轨带前窄后宽,待分级的油茶果随导轨带的转动完成分级。分级后的油茶果经分级底板进入对应的脱壳滚筒内脱壳,脱壳轴两端安装有脱壳盘,两侧脱壳盘按左旋30°安装,脱壳圆盘上设计有耳槽孔,可以依据油茶果级别调整两侧脱壳杆高度,电动机带动脱壳芯旋转形成楔形空

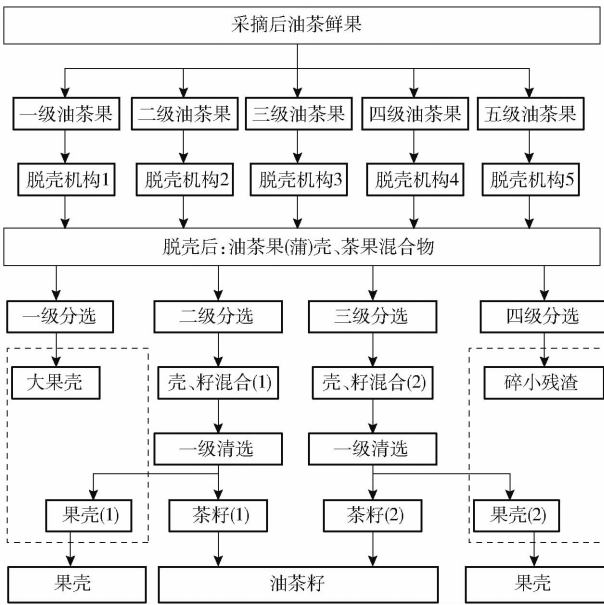


图5 多通道精细化油茶果机械脱壳技术
工艺流程图

Fig.5 Process flow chart of multi-channel streamline *Camellia oleifera* fruit mechanical shelling technology

间,可以将油茶果从大到小渐次脱壳。脱壳杆上套有套筒,可有效减少刚性材料对油茶成熟鲜果的破坏,降低脱壳阶段油茶籽的破损。油茶果在脱壳滚筒内通过与脱壳套筒的相互撞击以及油茶果之间的碰撞、挤压、搓擦的综合作用实现脱壳。油茶果脱壳后产生的壳籽混合物经栅条筛掉落至壳籽输出装置上,通过三层筛网的筛选得到半脱及未脱的油茶果、较大的壳籽混合物、相对较小的壳籽混合物和壳籽碎渣。较大的壳籽混合物和相对较小的壳籽混合物由一、二级清选机实现了油茶果壳籽混合物的分离。脱壳滚筒结构如图6所示。油茶果脱壳机主要技术参数如表1所示。

3 关键部件结构设计

3.1 分级装置

在脱壳前对油茶果进行分级,是获得较高脱净率和较低破籽率的前提条件^[24]。本机分级装置主

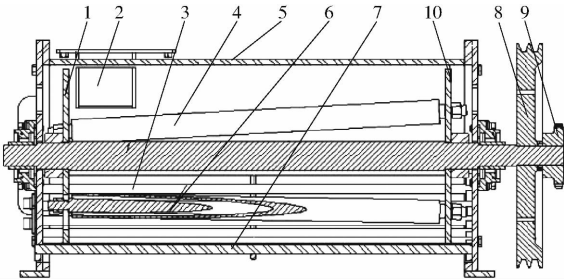


图6 脱壳滚筒结构图

Fig.6 Structure diagram of shelling drum

1、10. 脱壳盘 2. 进料口 3. 脱壳轴 4. 脱壳套筒 5. 滚筒上组件 6. 脱壳杆 7. 栅条筛 8. 滚筒带轮 9. 链轮

表 1 油茶果脱壳机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of *Camellia oleifera* fruit shelling machine

参数	数值
主机长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 050×1 000×2 250
处理量/(t·h ⁻¹)	1.5
主机电压/V	380
主机功率/kW	7.5
主机质量/kg	831

要由进料口、机架、橡胶导轨带和导轨轮等组成,分级装置如图 7 所示。分级装置单独设计有分级电机,可接民用 220 V 电压。分级装置设计有 11 根橡胶导轨带,每根导轨带与 4 个导轨轮配套,导轨带安装于导轨轮上。分级底板上设计有挡板,可按需要利用挡板进行多级分级。橡胶导轨带整体呈扇形渐变分布,相邻的两根橡胶导轨带前窄后宽,油茶果随橡胶导轨带的转动完成分级。对图 3 油茶果纵径、横径统计结果进行分析,结合油茶果脱壳试验效果,确定脱壳机分级装置将油茶果分为 4 级,4 级油茶果对应的直径范围如表 2 所示。

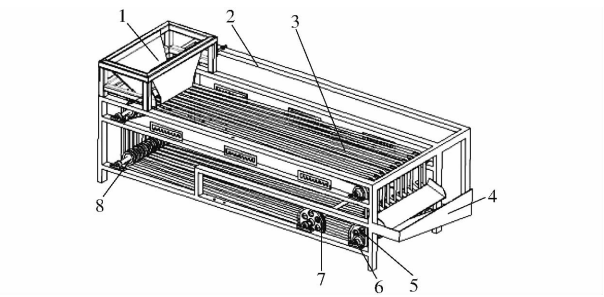


图 7 分级装置结构图

Fig.7 Classification device structure diagram
1. 进料口 2. 机架 3. 橡胶导轨带 4. 挡板 5. 动力带轮 6. 传动轴 7. 传动带轮 8. 导轨轮

表 2 分级装置对应的油茶果直径范围
Tab.2 Diameter of *Camellia oleifera* corresponding to classification device

油茶果级别	油茶果直径范围/mm
一级	0 ~ 25
二级	25 ~ 30
三级	30 ~ 40
四级	> 40

3.2 脱壳装置

本机脱壳装置共设计了 4 级脱壳滚筒,每级脱壳滚筒主要由进料口、滚筒上组件、脱壳盘、脱壳杆、脱壳套筒和可抽式栅条筛等组成,单个脱壳滚筒如图 6 所示。每级滚筒长 700 mm,半径 153 mm,进料形式采取切向进料。脱壳轴两端安装有脱壳盘,两侧脱壳盘按左旋 30°安装,脱壳圆盘上设计有 3 个呈 120°均布的耳槽孔,可以依据油茶果级别调整两

侧脱壳杆高度,电动机带动脱壳芯旋转形成的楔形空间,可以将油茶果从大到小渐次脱壳。脱壳杆上套有套筒,可有效减少刚性材料对新鲜油茶果的破坏作用,降低脱壳阶段油茶籽的破损率。四级脱壳滚筒均设计有可抽式栅条筛,由滚网架、栅条杆和圆弧柱加强筋组成,栅条筛如图 8 所示。两侧对应的滚筒端板上设计有大小、厚度一致的开口,以固定栅条筛。靠近进料口一侧的滚筒端板设计有 2 个压板,防止栅条筛轴向窜动。滚筒端板上设计有长 100 mm、宽 50 mm 的方形调整孔,以便随时调整滚筒内楔形空间大小。分别对 4 级脱壳滚筒内茶籽尺寸进行统计分析,结合脱壳试验效果,考虑到降低脱壳阶段茶籽破损率,栅条筛间隙应略微大于茶籽尺寸,最终确定一级、二级、三级、四级滚筒对应的栅条筛间隙分别为 13、20、26、30 mm。

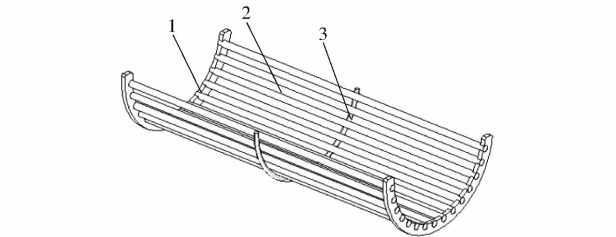


图 8 可抽式栅条筛结构图

Fig.8 Structure diagram of extractable grid screen
1. 滚网架 2. 栅条杆 3. 圆弧柱加强筋

3.3 壳籽输出装置

本机壳籽输出装置主要由振动筛筛体、筛网、振动筛支撑轴和摆杆等组成,壳籽输出装置如图 9 所示。脱壳机作业时,主电机带动小带轮,小带轮带动大带轮,由于偏心轮与大带轮同轴,而振动筛连接于偏心轮的另一端,从而带动振动筛作摇摆运动。振动筛呈 4°倾角,有利于油茶果脱壳后产生的壳籽混合物快速移动,从而实现快速筛选。壳籽混合物经 3 层筛网的筛选后,1 级输出口输出大壳、半脱及未脱油茶果,进而进行二次脱壳;2 级输出口输出较大的壳籽混合物,配合 1 级清选机进行壳籽清选,避免

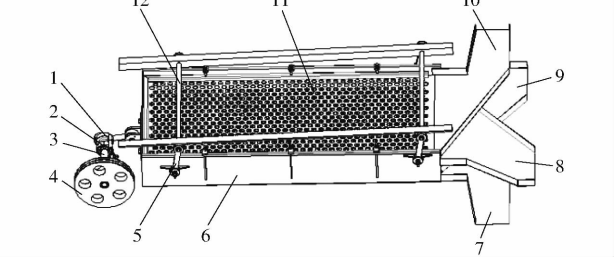


图 9 壳籽输出装置结构图

Fig.9 Structure diagram of shell seed output device
1. 偏心轮 2. 轴承座 3. 振动筛传动轴 4. 带轮 5. 摆杆 6. 筛体 7. 4 级输出口 8. 2 级输出口 9. 3 级输出口 10. 1 级输出口 11. 筛网 12. 支撑轴

1 级清选机对较小茶籽造成破损;3 级输出口输出相对较小的壳籽混合物,配合 2 级清选机实现精细化清选;4 级输出口输出脱壳过程中产生的壳籽碎渣,避免碎渣部分参与清选。对前文随机选取的 500 个油茶果的油茶籽进行统计分析,由分析结果结合筛选效果确定采用 3 层筛网设计,并确定每层筛网直径,3 层筛网直径与输出茶籽直径范围如表 3 所示。

表 3 3 层筛网直径与输出茶籽直径范围
Tab.3 Three-layer screen diameter and output
Camellia oleifera seed diameter range

筛网	筛网直径/mm	输出茶籽直径范围/mm
第 1 层	28	28 ~ 45
第 2 层	18	18 ~ 28
第 3 层	9	9 ~ 18

3.4 脱壳装置带传动设计

脱壳机在工作时消耗的功率主要用于脱壳装置、壳籽输出装置、克服传动阻力。脱壳滚筒有效容积 V 为

$$V = Sh \tag{1}$$

式中 S ——滚筒底面积, m^2
 h ——滚筒长度, m

计算得: $V = 3.14 \times 0.153^2 \times 0.7 = 0.05 \text{ m}^3$ 。

一级脱壳滚筒所需功率 P_1 为

$$P_1 = K \times 4 \times 10^{-4} V \varphi \rho R n / \eta_1 \tag{2}$$

式中 K ——安全系数,取 1.3
 φ ——脱壳滚筒内脱壳芯填充率,取 10%
 ρ ——脱壳芯 Q235 密度,取 $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
 R ——脱壳滚筒半径,取 0.153 m
 n ——脱壳芯转速,取 400 r/min
 η_1 ——带传动传递效率,取 0.97

计算得: $P_1 = 1.31 \text{ kW}$ 。

通过分级装置进入一级脱壳滚筒的油茶果直径小于 25 mm,一般来说油茶果尺寸越大需要脱壳力越大,这是由于尺寸较大的油茶果发育较为成熟,饱满性较好,果壳与油茶籽之间的间隙小,所以抗压强度大,不易破裂。因此,脱壳装置所需最小功率 P 为 5.24 kW。考虑到脱壳装置距主电机较远,且尺寸较大的特点,选取带传动作为主电机与脱壳装置之间的传动方式。

传动带计算功率为

$$P_{ca} = K_A P \tag{3}$$

式中 K_A ——工况系数,取 1.1
代入数据可得: $P_{ca} = 5.76 \text{ kW}$ 。

根据传动带计算功率 P_{ca} 和脱壳机电机转速 n_1 为 1 380 r/min,传动带选取 A 型带。

选取脱壳机电机带轮直径 $d_1 = 132 \text{ mm}$,则带速 v 计算式为

$$v = \pi d_1 n_1 / 60\,000 \tag{4}$$

计算得: $v = 9.53 \text{ m/s}$,大于 5 m/s,小于 v_{max} (25 m/s)。因此,带速 v 符合设计要求。

根据传动比 $i = 3.45$,则脱壳带轮直径 d_2 为

$$d_2 = (1 - \varepsilon) i d_1 \tag{5}$$

式中 ε ——从动轮圆周速度相对降低量,取 1% ~ 2%

可得: $446.29 \text{ mm} \leq d_2 \leq 450.85 \text{ mm}$,取 $d_2 = 450 \text{ mm}$ 。

已知 $d_1 = 132 \text{ mm}$ 、 $d_2 = 450 \text{ mm}$,则带传动中心距 a_0 为

$$0.7(d_1 + d_2) < a_0 < 2(d_1 + d_2) \tag{6}$$

将 d_1 、 d_2 代入式(6),可得: $407.4 \text{ mm} < a_0 < 1\,164 \text{ mm}$,取 $a_0 = 700 \text{ mm}$ 。传动带基准长度 L_{d0} 计算式为

$$L_{d0} = 2a_0 + \frac{\pi}{2}(d_1 + d_2) + \frac{d_2 - d_1}{4a_0} \tag{7}$$

将 a_0 、 d_1 和 d_2 代入式(7),得: $L_{d0} = 2\,313.85 \text{ mm}$,取 A 型带长度 $L_d = 2\,240 \text{ mm}$ 。实际中心距 a 计算式为

$$a = a_0 + \frac{L_d - L_{d0}}{2} \tag{8}$$

代入数据可得: $a = 736.93 \text{ mm}$,因带轮制造误差、带长误差和带张紧力的需要,实际中心距 a 取值范围为 $(a - 0.015L_d) \sim (a + 0.03L_d)$,计算得 a 为 703.33 ~ 804.13 mm。

电机带轮包角 α_1 计算公式为

$$\alpha_1 = 180^\circ - (d_2 - d_1) \frac{57.3^\circ}{a} \tag{9}$$

将 d_1 、 d_2 和 a 代入式(9),得: $\alpha_1 = 155.27^\circ \geq 90^\circ$,满足包角设计要求。V 带数量计算式为

$$Z = \frac{P_{ca}}{(P_0 + \Delta P_0) K_\alpha K_L} \tag{10}$$

式中 Z ——V 带根数
 P_0 ——单根 A 型带所需功率,取 1.92 kW
 ΔP_0 ——单根 A 型带额定功率增量,取 0.17 kW
 K_α ——包角修正系数,取 0.93
 K_L ——带长修正系数,取 1.06
计算得 $Z = 2.80$,即需要 3 根 A 型 V 带。

初拉力 F_0 计算公式为

$$F_0 = 500 \times \frac{(2.5 - K_\alpha) P_{ca}}{Z v K_\alpha} + m v^2 \tag{11}$$

式中 m ——A 型带单位长度质量,取 0.1 kg/m
代入数据求得: $F_0 = 179.07 \text{ N}$ 。

压轴力 F_p 计算公式为

$$F_p=2ZF_0\sin\frac{\alpha_1}{2}$$

(12)

代入数据可得： $F_p=838.05\text{ N}$ 。

4 性能试验

对油茶果脱壳机开展性能试验:评估脱壳机处理量、脱壳效果,检验设计产品的使用效果;验证整机稳定性和可靠性,识别易受损零部件,为下一代脱壳机设计优化提供借鉴;评估三因素组合脱壳效果,得出最优因素组合,为实际生产提供依据。

4.1 试验材料

选取浙江省常山县油茶种植基地采摘的油茶成熟鲜果,每组试验油茶果 100 kg,试验地点就近选择。试验现场如图 10 所示。



图 10 试验现场
Fig. 10 Test site

4.2 试验指标与因素

4.2.1 试验指标

选取试验指标为脱净率和茶籽破损率。每组油茶果进行脱壳试验时,舍弃脱壳机前 5 秒产生的壳籽混合物。统计试验结果记录于油茶果脱壳机开发试验统计表,并分别计算出每组油茶果脱净率和茶籽破损率。

脱净率 T_1 计算公式为

$$T_1=(m_0-m_1)/m_0\times100\%$$

(13)

式中 m_0 ——每组试验油茶果总质量,kg
 m_1 ——每组未脱壳油茶果总质量,kg

茶籽破损率 T_2 计算公式为

$$T_2=m_2/(m_2+m_3)\times100\%$$

(14)

式中 m_2 ——每组破损的油茶籽总质量,kg
 m_3 ——每组未破损的油茶籽总质量,kg

4.2.2 试验因素

选取喂入量、脱壳杆扭度和脱壳杆直径为试验因素,试验因素与水平如表 4 所示。由脱壳中间试验发现,喂入量、脱壳杆扭度对脱净率有较大影响,过大易导致油茶果脱净不充分;脱壳杆直径对茶籽破损率影响较大,直径过大会导致破损率增加,过小脱壳过程中脱壳杆会发生形变,进而影响油茶果脱壳的完成。结合设计意图分别确定了各水平的取

值。试验中通过调节上料电机变频器来调整油茶果喂入量;调整两侧脱壳盘扭转角度来调整脱壳杆扭度。

表 4 试验因素与水平
Tab. 4 Test factors and levels

水平	因素		
	喂入量/(kg·h ⁻¹)	脱壳杆扭度/(°)	脱壳杆直径/mm
1	1 400	20	20
2	1 500	25	23
3	1 600	30	26

4.3 试验结果

4.3.1 正交试验结果

选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验,试验结果如表 5 所示, A 、 B 、 C 为因素水平值。表 6 和表 7 分别为因素 A 、 B 、 C 对脱净率和茶籽破损率影响的方差分析表。由表 5 可知,脱壳杆直径同时对脱净率和茶籽破损率影响较大,而喂入量对脱净率的影响大于对茶籽破损率的影响,脱壳杆扭度对茶籽破损率的影响大于对脱净率的影响。获得高脱净率的因素组合为 $A_2B_2C_1$,获得低茶籽破损率的因素组合为 $A_2B_3C_2$ 。

表 5 正交试验设计与结果
Tab. 5 Orthogonal experimental design and results

序号	试验因素			脱净率/	茶籽破
	A	B	C	%	损率/%
1	1	1	1	96.44	14.73
2	1	2	2	92.69	6.37
3	1	3	3	79.81	5.63
4	2	1	3	86.46	4.39
5	2	2	1	98.97	9.76
6	2	3	2	98.52	3.15
7	3	1	2	93.23	3.66
8	3	2	3	86.39	4.32
9	3	3	1	99.03	9.84
脱净率	k_1	89.65	92.04	98.15	
	k_2	94.65	92.68	94.81	
	k_3	92.88	92.45	84.22	
	R	5.00	0.64	13.93	
	较优水平	A_2	B_2	C_1	
	主次因素	C 、 A 、 B			
茶籽破 损率	k_1	8.91	7.59	11.44	
	k_2	5.77	6.82	4.39	
	k_3	5.94	6.21	4.78	
	R	3.14	1.38	7.05	
	较优水平	A_2	B_3	C_2	
	主次因素	C 、 A 、 B			

由表 6、7 可知,脱壳杆直径对脱净率和茶籽破损率均影响显著,喂入量和脱壳杆扭度对脱净率和茶籽破损率的影响均不显著。脱净率和茶籽破损率的方差分析结果与试验数据极差分析结果一致,即

脱壳杆直径对脱净率和茶籽破损率的影响程度大于喂入量对脱净率和茶籽破损率的影响,而喂入量对脱净率和茶籽破损率的影响大于脱壳杆扭度对脱净率和茶籽破损率的影响。

表 6 脱净率方差分析

Tab.6 Analysis of variance of shelling rate						
方差来源	均方	自由度	平方和	F	F _α	显著性
A	38.63	2	19.32	2.57	19(α=0.05)	
B	0.63	2	0.32	0.04	99(α=0.01)	
C	317.28	2	158.64	21.1		*
误差	15.04	2	7.52			
总计	371.58	8				

表 7 茶籽破损率方差分析

Tab.7 Analysis of variance of <i>Camellia oleifera</i> seed breakage rate						
方差来源	均方	自由度	平方和	F	F _α	显著性
A	18.73	2	9.37	11.29	19(α=0.05)	
B	2.90	2	1.45	1.75	99(α=0.01)	
C	94.25	2	47.13	56.78		*
误差	4.65	2	0.83			
总计	117.53	8				

4.3.2 最佳参数组合

由以上正交试验结果分析得知,获得高脱净率的因素组合和获得低茶籽破损率的因素组合不一致。为使脱壳机在实际工作过程中获得最佳的脱壳效果,采用综合加权法进行分析,计算出喂入量、脱壳杆扭度和脱壳杆直径最优参数组合^[25]。考虑到喂入量、脱壳杆扭度和脱壳杆直径对脱壳效果影响的重要程度,确定脱净率权重为 0.7,茶籽破损率权重为 0.3。脱净率和茶籽破损率综合加权如表 8 所示。综合评分指标如表 9 所示。

表 8 脱净率和茶籽破损率综合加权分析结果

Tab.8 Comprehensive weighted analysis result of shelling rate and seed breakage rate						
序号	试验因素			试验结果		综合加权值
	A	B	C	Y ₁ /%	Y ₂ /%	
1	1	1	1	96.44	14.73	50.35
2	1	2	2	92.69	6.37	55.40
3	1	3	3	79.81	5.63	6.43
4	2	1	3	86.46	4.39	27.07
5	2	2	1	98.97	9.76	87.55
6	2	3	2	98.52	3.15	90.76
7	3	1	2	93.23	3.66	68.36
8	3	2	3	86.39	4.32	27.51
9	3	3	1	99.03	9.84	87.12

由表 9 可以得出,影响综合评分指标因素主次顺序为 C、A、B,最优因素组合为 A₂B₃C₂,即茶果喂

表 9 综合评分指标分析结果

Tab.9 Comprehensive score indicator analysis result			
统计值	A	B	C
k ₁	112.18	145.78	225.02
k ₂	205.38	170.46	233.71
k ₃	182.99	184.31	61.01
R	93.20	38.53	172.70
主次因素	C、A、B		
最优组合	A ₂ B ₃ C ₂		

入量 1 500 kg/h,脱壳杆扭度 30°,脱壳杆直径 23 mm 时,脱壳机达到最佳脱壳效果。

4.3.3 最佳参数组合试验

以脱壳机最佳参数组合进行 3 次试验,取 3 次试验的平均值作为油茶成熟鲜果脱壳机最终的脱净率和茶籽破损率。经计算分析,该油茶成熟鲜果脱壳机的脱净率为 98.85%,茶籽破损率为 3.24%。

4.4 结果分析

通过正交试验、方差分析和加权综合评分法对油茶果脱壳机的性能进行试验,得到喂入量、脱壳杆扭度、脱壳杆直径对脱壳效果的影响。脱壳杆直径对脱壳效果影响最大,且同时对脱净率与茶籽破损率产生影响。茶果喂入量过大时,二、三级脱壳装置容易堵塞,使脱净率降低。能否平稳定量地喂入茶果也对脱壳机脱壳效果产生影响。脱壳杆扭度主要对茶籽破损率影响较大。试验表明,通过对茶果喂入量、脱壳杆扭度、脱壳杆直径进行参数优化,该脱壳机可以在获得高脱净率同时,使茶籽破损率维持在较低水平。

5 结论

(1)对油茶成熟鲜果的形状、含水率与纵径、横径进行分析和统计,设计了一台四通道全自动油茶成熟鲜果脱壳机,该机具有脱壳效率高、脱壳精细化等优点。

(2)设计了整体呈扇形渐变分布的油茶果橡胶导轨分级装置,将油茶果划分为 0 ~ 25 mm、25 ~ 30 mm、30 ~ 40 mm 和大于 40 mm 共 4 个等级,实现了油茶果快速分级;设计了 4 级基于缓冲碾压、助推间隙渐变的复合脱壳装置,每级滚筒长 700 mm、半径 153 mm,底网栅格间隙参数分别为 13、20、26、30 mm;设计了 3 层筛网直径分别为 28、18、9 mm 的壳籽输出装置,将脱壳后的壳籽混合物筛分为未脱及半脱的油茶果、较大壳籽混合物、较小壳籽混合物和壳籽碎渣的粗选,进一步提升了脱净率。

(3)以油茶果喂入量、脱壳杆扭度和脱壳杆直径为试验因素,采用 L₉(3⁴)正交试验、方差分析和

加权综合评分法对油茶果脱壳机的脱壳效果进行分析。结果表明,当茶果喂入量 1 500 kg/h、脱壳杆扭度 30°、脱壳杆直径 23 mm 时,脱壳机脱壳效果最佳。对脱壳机进行了 3 次最佳参数组合下的

脱壳试验,取 3 次试验结果的平均值作为油茶成熟鲜果脱壳机最终的脱净率和茶籽破损率,计算出该脱壳机的脱净率为 98.85%、茶籽破损率为 3.24%。

参 考 文 献

- [1] 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 Wenlin, PENG Xuanyan, YANG Bo, et al. Research on technology and equipment of *Camellia oleifera* fruit shelling[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(4):151-153,156. (in Chinese)
- [2] 汤晶宇,吴昊,徐克生,等.油茶果壳籽精选技术装备研究分析[J].林业机械与木工设备,2019,47(7):4-10.
TANG Jingyu, WU Hao, XU Kesheng, et al. Research and analysis on the cleaning technology and equipment of camellia husk seeds[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2019, 47(7):4-10. (in Chinese)
- [3] 胡文宇.破壳油茶果粗选机设计与试验研究[D].长沙:中南林业科技大学,2016.
HU Wenyu. Design and experimental research of the roughing machine for cracked camellia fruit[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016. (in Chinese)
- [4] 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 Xiang, XIE Fangping, LI Xu, et al. Design and test of shelling device of *Camellia oleifera* fruit[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2014, 40(6):665-668. (in Chinese)
- [5] 黄凤洪,李文林,夏伏建,等.油茶籽脱壳机的研制与应用[J].农业工程学报,2006,22(11):147-151.
HUANG Fenghong, LI Wenlin, XIA Fujian, et al. Development and application of oil tea seed sheller[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11):147-151. (in Chinese)
- [6] 蓝峰,崔勇,苏子昊,等.油茶果脱壳清选机的研制与试验[J].农业工程学报,2012,28(15):33-39.
LAN Feng, CUI Yong, SU Zihao, et al. Development and experiment of the shelling and cleaning machine for *Camellia oleifera* [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15):33-39. (in Chinese)
- [7] 李善淼.油茶青果脱皮机及皮籽分离装置的设计研究[D].武汉:武汉轻工大学,2016.
LI Shanmiao. Design and research of *Camellia oleifera* green fruit peeling machine and skin seed separation device [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2016. (in Chinese)
- [8] 廖欧,全腊珍,肖旭,等.撞击式油茶果破壳装置的设计及试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(1):110-114.
LIAO Pei, QUAN Lazhen, XIAO Xu, et al. Design and test of the impact breaking shell device of *Camellia oleifera* fruit [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2019, 45(1):110-114. (in Chinese)
- [9] 熊平原,王毅,许信任,等.碾压式油茶籽脱壳装置设计及仿真分析[J].农机化研究,2019,41(12):135-139.
XIONG Pingyuan, WANG Yi, XU Xinqian, et al. Design and simulation analysis of roller type camellia seed shelling device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12):135-139. (in Chinese)
- [10] 马君.多通道气动刨削式油茶果破壳机设计及试验研究[D].武汉:湖北工业大学,2018.
MA Jun. Design and experimental study on multi-channel pneumatic planing type shell breaking machine for *Camellia oleifera* [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [11] 李阳,王勇,邓腊云,等.揉搓型油茶果分类脱壳分选机的脱壳和精选效果研究[J].湖南林业科技,2015,42(2):38-42.
LI Yang, WANG Yong, DENG Layun, et al. Study on shelling and cleaning effect of kneading type shelling sorter for *Camellia oleifera* classification [J]. Hunan Forestry Science and Technology, 2015, 42(2):38-42. (in Chinese)
- [12] 郭传真.油茶果皮籽分离装置的设计与试验研究[D].武汉:华中农业大学,2011.
GUO Chuanzhen. Design and experimental research on the separation device of *Camellia oleifera* peel and seeds [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [13] 张风,杨志斌,张劲夫,等.油茶鲜果剥壳机械设计原理[J].湖北林业科技,2013(3):21-23.
ZHANG Feng, YANG Zhibin, ZHANG Jinfu, et al. Mechanical design principle of oil tea fresh fruit sheller [J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2013(3):21-23. (in Chinese)
- [14] 杨树松,李立君,高自成,等.基于挤压揉搓方法的油茶果破壳性能的试验研究[J].农机化研究,2015,37(9):173-175,179.
YANG Shusong, LI Lijun, GAO Zicheng, et al. Experimental study on the shell breaking performance of *Camellia oleifera* fruit based on extrusion and kneading method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(9):173-175,179. (in Chinese)
- [15] 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 Pingyuan, WANG Yi, WU Zhuokui, et al. Research and design of shelling device of *Camellia oleifera* fruits [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(5):126-129. (in Chinese)
- [16] 刘亮亮.压剥式油茶果破壳机的设计与试验[D].武汉:湖北工业大学,2017.
LIU Liangliang. Design and test of pressure peeling type oil tea fruit sheller [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] 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 Yanqing, MA Jun, XIONG Ren. Design of a multi-channel pneumatic slicing shell breaking machine for *Camellia oleifera* fruit [J]. Hubei Agricultural Science, 2018, 57(12):100-105. (in Chinese)

IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018:4510 – 4520.

[27] REDMON J, FARHADI A. Yolov3: an incremental improvement[J]. arXiv Preprint arXiv: 1804.02767, 2018.

[28] 张宏鸣, 谭紫薇, 韩文霆, 等. 基于无人机遥感的玉米株高提取方法[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 241 – 250. ZHANG Hongming, TAN Ziwei, HAN Wenting, et al. Extraction method of maize height based on UAV remote sensing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 241 – 250. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190528&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.028. (in Chinese)

[29] YUN S, HAN D, OH S J, et al. Cutmix: regularization strategy to train strong classifiers with localizable features[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2019:6023 – 6032.

[30] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018:7132 – 7141.

[31] CHEN Y, DAI X, LIU M, et al. Dynamic ReLU[J]. arXiv Preprint arXiv:2003.10027, 2020.

[32] QIN Z, LI Z, ZHANG Z, et al. ThunderNet: towards real-time generic object detection on mobile devices[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2019:6718 – 6727.

[33] LI Y, CHEN Y, WANG N, et al. Scale-aware trident networks for object detection[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2019:6054 – 6063.

[34] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. Cbam: convolutional block attention module[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018:3 – 19.

[35] REZATOFIGHI H, TSOI N, GWAK J, et al. Generalized intersection over union: a metric and a loss for bounding box regression[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019:658 – 666.

[36] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection[J]. arXiv Preprint arXiv:2004.10934, 2020.

[37] ZHENG Z, WANG P, LIU W, et al. Distance-IoU loss: faster and better learning for bounding box regression[C]//AAAI, 2020:12993 – 13000.

[38] SELVARAJU R R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad-cam: visual explanations from deep networks via gradient-based localization[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2017:618 – 626.

[39] SINDAGI V A, PATEL V M. A survey of recent advances in cnn-based single image crowd counting and density estimation[J]. Pattern Recognition Letters, 2018, 107: 3 – 16.

(上接第 116 页)

[18] 刘浩. 油茶果脱壳机设计及优化[D]. 武汉:湖北工业大学, 2015.
LIU Hao. Design and optimization of sheller for *Camellia oleifera* fruit [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2015. (in Chinese)

[19] 罗佳. 红花油茶果主要成分与茶籽壳的利用研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2010.
LUO Jia. Study on the main components of *Camellia oleifera* fruit and the utilization of its seed shell [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010. (in Chinese)

[20] 刘晓敏. 分级式油茶果剥壳机的设计与研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017.
LIU Xiaomin. Design and research on the grading sheller of *Camellia oleifera* fruit [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)

[21] 樊涛, 吴兆迁, 曲振兴, 等. 油茶果脱青皮机的设计[J]. 林业机械与木工设备, 2011, 39(10): 35 – 36.
FAN Tao, WU Zhaoqian, QU Zhenxing, et al. Design of the peeling machine for *Camellia oleifera* fruit [J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2011, 39(10): 35 – 36. (in Chinese)

[22] 马力, 钟海雁, 陈永忠, 等. 油茶果采后处理对油茶籽内在品质的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(12): 73 – 76.
MA Li, ZHONG Haiyan, CHEN Yongzhong, et al. Study on the effect of postharvest treatment of *Camellia oleifera* fruits on the internal quality of *Camellia oleifera* seeds [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(12): 73 – 76. (in Chinese)

[23] 国家林业局哈尔滨林业机械研究所. 基于多通道分级式油茶鲜果脱壳清选的多级脱壳装置:201811185509.2[P]. 2018 – 12 – 18.

[24] 陈超超. 击打式山核桃破壳机的设计与研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2014.
CHEN Chaochao. Design and research on the shell breaking machine of hitting hickory [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[25] 高连兴, 回子健, 董华山, 等. 三滚式小区育种花生脱壳机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 159 – 165.
GAO Lianxing, HUI Zijian, DONG Huashan, et al. Design and experiment of peanut sheller with three drums for plot breeding [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 159 – 165. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160722&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.022. (in Chinese)