

螺旋推进式油茶籽壳低损清选机设计及试验

王 东,寇 欣,汤晶宇,曲振兴,范志远,吴 昊,张瑞阳

(国家林业和草原局哈尔滨林业机械研究所,哈尔滨 150086)

摘要:针对现有齿光辊式油茶籽壳清选机存在“磕籽”现象,造成油茶籽损失率较高的问题,利用油茶青果脱壳后的籽、壳物理特性的差异,设计了螺旋推进式油茶籽壳低损清选机,对该清选机螺旋辊直径与长度、螺旋辊转速、螺纹形式、螺距和螺旋升角等关键参数进行设计,建立油茶籽受力模型。以清选率和油茶籽损失率为评价指标,采用单因素试验和响应面试验对清洗机工作参数喂入量、螺旋辊转速和对辊间隙进行优化。结果表明:设计的螺旋推进式油茶籽壳低损清选机螺旋辊的直径为 50 mm,长度为 1 000 mm,转速不超过 200 r/min,螺距为 50 mm;螺纹采用双螺旋形式布置,螺纹横截面形式为直角梯形,工作倾角为 120°,螺纹高为 4 mm;螺旋升角为 30°;优化的工作参数为喂入量 1.1 t/h、螺旋辊转速 170 r/min、对辊间隙 12 mm,并在该清选机的上平面设计毛刷以增大清选过程中油茶壳姿态调整的概率,在此优化条件下该清选机的清选率为 90.39%,油茶籽损失率为 0.54%。综上,设计的螺旋推进式油茶籽壳低损清选机达到了预期设计目标,可以较好地完成油茶籽壳混合物的清选作业,同时大幅降低油茶籽损失率。

关键词:油茶籽壳混合物;低损率;清选;清选机设计

中图分类号:S226.5;TS223.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)03-0095-07

Design and test of spiral – propelled type *Camellia oleifera* seed shell low – loss sorting machine

WANG Dong, KOU Xin, TANG Jingyu, QU Zhenxing,
FAN Zhiyuan, WU Hao, ZHANG Ruiyang

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

Abstract: In order to solve the problem of high loss rate of *Camellia oleifera* seed shell toothed – smooth roller sorting machine, using the physical properties differences of the seeds and shells after hulling of *Camellia oleifera* green fruit, the spiral – propelled type *Camellia oleifera* seed shell low – loss sorting machine was designed, the key parameters such as screw roller diameter, length and speed, thread form, screw pitch and helix angle were designed to establish a force model for *Camellia oleifera* seed. Taking the sorting rate and the loss rate of *Camellia oleifera* seed as the evaluation indexes, single – factor test and response surface methodology were used to optimize the operating parameters such as feeding rate, screw roller speed and roller spacing. The results showed that the sorting machine designed had a screw roller with diameter of 50 mm, length of 1 000 mm, speed not exceeding 200 r/min and pitch of 50 mm, and the thread were arranged in the form of a double helix, the cross – section of the thread was in the form of a right – angled trapezoid, with a working inclination angle of 120°, and the height of the thread was 4 mm; the helix angle was 30°. The optimized operating parameters were the feeding rate 1.1 t/h, the screw roller

收稿日期:2023-11-16;修回日期:2024-11-20

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2020SY041)

作者简介:王 东(1990),男,工程师,硕士,主要从事营林技术装备的研究(E-mail)hljswangd@126.com。

通信作者:汤晶宇,研究员,硕士生导师(E-mail)hljtjy@163.com。

speed 170 r/min, and the roller spacing 12 mm, in addition designing brushes on the upper plane of the sorting machine to increase the probability of adjusting the posture of the *Camellia oleifera* shells during the sorting process. Under the optimal conditions, the sorting rate and the loss rate of

Camellia oleifera seed were 90.39% and 0.54%, respectively. In conclusion, the designed spiral-propelled type *Camellia oleifera* seed shell low-loss sorting machine reaches the expected design goal, which can better complete the sorting operation of *Camellia oleifera* seed shell mixture, and at the same time significantly reduce the loss rate of *Camellia oleifera* seed.

Key words: *Camellia oleifera* seed shell mixture; low-loss rate; sorting; sorting machine design

油茶是我国特有的经济效益、生态效益和社会效益俱佳的木本油料作物,具有不与农争地、不与人争粮的独特优势,发展油茶产业对促进农民增收、缓解耕地压力、保护生态环境、保障国家粮油安全和推进社会主义新农村建设具有重要意义^[1-2]。截至2023年底,全国油茶种植面积已达到486.67万hm²(7300万亩)左右,油茶籽油年产量80多万t,约占国内食用植物油产量的7%^[3]。油茶籽油含有多种活性成分,具有降胆固醇、预防肿瘤等保健作用,被广泛应用于食品、化工、医药、保健等领域^[4]。在油茶籽油的加工过程中,油茶籽壳清选是一个必不可少的环节。目前,油茶籽壳清选仍以人工清选为主^[5],辅以机械清选。机械脱壳处理的油茶果,一般选配籽壳清选设备,但目前籽壳清选设备存在清选效果不佳的问题,因此使用率不高。

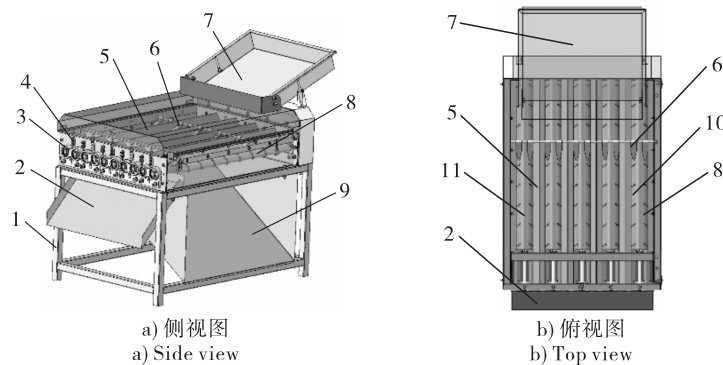
近年来,国内油茶籽壳清选技术发展迅速,清选原理主要有筛选、风选、色选、摩擦清选、浮选、齿光辊清选、图像识别清选等^[6-11]。其中,筛选、风选、色选、摩擦清选、浮选是根据油茶籽壳尺寸、质量、颜色、形状、密度的差异分离籽壳,其清选效果不佳。图像识别清选精确度高,但技术复杂、成本较高,在清选作业中的应用还不广泛。目前,齿光辊清选效果较佳,兰峰等^[12]采用齿光辊清选原理设计了一种

平面床式油茶籽壳清选机,破籽率不大于1.21%,损失率不大于1.05%。我所研制的与四通道全自动油茶鲜果脱壳机^[13]配套的籽壳清选机,基本能实现油茶籽壳的清选,但在推广应用中发现其存在“磕籽”现象。针对此问题,本文提出一种螺旋推进式油茶籽壳低损清选技术,对螺旋辊的尺寸、螺线形式、螺旋升角、螺距等参数进行设计,通过单因素试验和响应面试验对清选机作业参数螺旋辊转速、喂入量和对辊间隙进行优化,通过与已报道的油茶籽壳清选设备进行比较,提出改进方案,为清选机清选作业提供参数指导。

1 螺旋推进式油茶籽壳低损清选机整体结构与工作原理

1.1 整体结构

螺旋推进式油茶籽壳低损清选机整体结构如图1所示。清选电机安装在机架上,传动方式为带传动,螺旋辊间采用齿轮传动,定辊轴头两侧设计有通孔,螺柱贯穿通孔,配合压簧和双联轴承座固定定辊。设计正旋螺旋辊和反旋螺旋辊,以提升清选效率和处理量。清选作业面顶部设计有挡片,用于调整油茶籽壳的姿态。两组籽壳清选单元之间设计有阻隔板,防止籽壳混合物进入两组清选单元之间的间隙。



注:1. 机架;2. 油茶籽出料口;3. 双联轴承座;4. 压簧;5. 阻隔板;6. 挡片;7. 籽壳混合物进料口;8. 反旋螺旋辊;9. 油茶壳出料口;10. 正旋螺旋辊;11. 定辊

Note:1. Frame; 2. *Camellia oleifera* seed discharge outlet; 3. Double bearing seat; 4. Compression spring; 5. Barrier plate; 6. Baffle plate; 7. Feed inlet; 8. Counter-rotating spiral roller; 9. *Camellia oleifera* shell discharge outlet; 10. Co-rotating spiral roller; 11. Fixed roller

图1 螺旋推进式油茶籽壳低损清选机结构图

Fig. 1 Structure chart of spiral-propelled type *Camellia oleifera* seed shell low-loss sorting machine

1.2 工作原理

油茶青果机械脱壳后产生的籽壳混合物,经进料口进入到清选机内,靠自身重力掉落至螺旋辊上,经螺旋辊上螺纹的强制推动向油茶籽出料口运动,其中:油茶果壳柔软且薄,在运动中易被螺纹与定辊间的间隙“咬住”,在螺纹的挤压、剪切作用下被拽离清选作业平面经油茶壳出料口排出;而油茶籽浑厚、圆而硬,会一直向油茶籽出料口运动,最终经油茶籽出料口排出,从而实现油茶籽壳清选的目的。

2 螺旋推进式油茶籽壳低损清选机关键部件设计及油茶籽受力模型

2.1 螺旋辊设计

螺旋辊是螺旋推进式油茶籽壳低损清选机的核心部件,实际作业中,螺旋辊除具有拽离油茶果壳的作用外,还具有强制输出油茶籽的作用。因此,螺旋辊直径、螺纹形式和螺距等对清选机的清选质量和效果具有直接影响。

2.1.1 螺旋辊直径及长度设计

螺旋辊由心轴以及轴表面上的螺纹凸棱两部分组成,心轴的直径即为螺旋辊直径。在设计螺旋辊直径时,参考《非标准机械设备设计手册》^[14],根据所输送物料的类型、输送结构、布置形式与生产能力来确定螺旋辊直径。螺旋辊直径计算公式^[15]见式(1)。

$$D = K \cdot \left(\frac{Q}{\varphi \lambda \varepsilon} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (1)$$

式中: D 为螺旋辊直径,m; K 为物料特性参数; Q 为单根螺旋辊的输送能力,t/h; φ 为填充系数; λ 为物料堆积密度,t/m³; ε 为倾斜输送系数。

油茶籽壳混合物属于粒状,无磨琢性,取 K 值为0.049;设计螺旋推进式油茶籽壳低损清选机最高输送能力为1.5 t/h,清选机排列5组共计10根螺旋辊,取每根螺旋辊最高输送能力为0.15 t/h;查JB/T 7679—2008《螺旋输送机》得,对于少量磨损且为颗粒状至小块状的散料,取 φ 值为0.33;根据物料相似^[14]取 λ 为0.64 t/m³;螺旋辊水平布置,取 ε 值为1。将上述取值代入式(1)求得螺旋辊直径为42.7 mm,进行圆整,选取螺旋辊直径为50 mm。

为提高清选机的清选效果,适当增加油茶籽壳混合物的清选行程,结合多次清选试验效果,螺旋辊长度设计为1 000 mm。

2.1.2 螺纹形式、螺距设计

螺纹形式对清选机的清选效果起着决定性影响,对多种横截面形式的螺纹进行设计试验,并对清选效果做了详细分析。为降低清选过程中因螺纹形式对油茶籽造成破碎的概率,最终确定将螺旋辊螺纹横截面设计为直角梯形的形式,如图2所示,其顶

部长(l)取3 mm。通过对尺寸在20~27 mm的油茶籽壳混合物进行取样测量统计,得到取样油茶籽横、纵、径向尺寸均大于11 mm,且油茶壳最大厚度为5~7 mm,参考多次清选试验结果设计螺纹高(h)为4 mm。另外,分析发现,螺旋辊螺纹横截面形式为直角梯形时,减小工作倾角(θ)可以增大清选能力,但考虑到清选机的设计初衷,在确保油茶籽损失率低的前提下,完成油茶籽壳的清选,清选率可适当减小,综合考虑 θ 取120°。

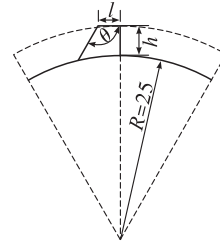


图2 直角梯形横截面螺纹示意图

Fig. 2 Schematic diagram of right-angled trapezoidal cross-section thread

参考螺旋输送机螺距设计,螺旋推进式油茶籽壳低损清选机螺旋辊螺距(S)计算公式^[16]见式(2)。

$$S = K_1 D \quad (2)$$

式中: K_1 为物料综合特性系数。

螺旋辊水平布置时 K_1 通常取0.8~1.0,此处取1.0,将其代入式(2)求得螺旋辊螺距为50 mm。为提高清选效率,螺旋推进式油茶籽壳低损清选机设计采用双螺旋形式,单根螺旋螺距设计为100 mm。

2.1.3 螺旋升角(α)设计

α 是螺旋辊设计中一个关键参数。清选过程中,既需保证油茶籽壳混合物沿轴运动,还需保证其可以沿法线方向运动,以增大混合物姿态调整的概率,获得较高清选率,为此必须确定合理的 α 。反旋螺旋辊近似展开图如图3所示。

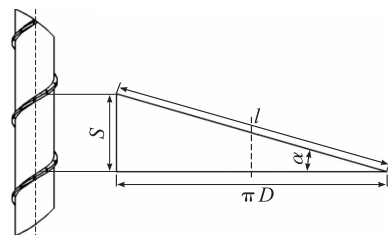


图3 反旋螺旋辊近似展开图

Fig. 3 Approximate development diagram of counter-rotating spiral roller

由图3可知, α 计算公式见式(3)。

$$\tan \alpha = \frac{S_1}{\pi D} \quad (3)$$

式中: S_1 为螺旋辊单根螺旋的螺距,mm。

由前文计算知 $S_1 = 100$ mm, $D = 50$ mm,螺纹高为4 mm,代入式(3)求得螺纹上任意一点的螺旋升

角必须满足 $28.76^\circ \leq \alpha \leq 32.48^\circ$, 考虑到加工性, 结合试验效果取 $\alpha = 30^\circ$ 。

2.1.4 螺旋辊转速设计

螺旋辊转速越快, 输送能力则越大, 但当转速过快时, 会使油茶籽壳混合物沿离心力方向抛射, 导致作业效果不佳。因此, 要求螺旋辊的工作转速 (n) 不能超过极限转速 (n_j), 根据油茶籽自身重力能够平衡旋转引起的离心力, n_j 计算公式^[17] 见式(4)。

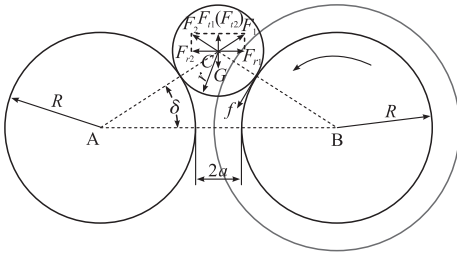
$$n \leq n_j = \frac{A}{\sqrt{D}} \quad (4)$$

式中: A 为物料综合特性系数, 查文献[17]中表 15-1, 得 A 取值为 50。

将 $D = 50$ mm 代入式(4), 求得 $n_j = 223$ r/min, 取 $n \leq 200$ r/min。

2.2 油茶籽受力模型

油茶籽壳混合物的清选主要是在定辊、螺旋辊以及两者之间间隙的共同作用下完成的, 清选过程中油茶籽受力十分复杂, 因此研究油茶籽在清选状态下的受力十分必要。油茶籽受力模型简化如图 4 所示, 将油茶籽近似简化为圆形, 定辊(A)与螺旋辊(B)中心线处在同一水平面上。



注: F_1 、 F_2 分别为定辊与螺旋辊对油茶籽提供的支撑力, N; δ 为水平中心线与定辊支撑力夹角; G 为油茶籽重力, N; f 为油茶籽与螺旋辊之间的摩擦力, N; R 为定辊与螺旋辊(不含螺纹)半径, mm; r 为油茶籽半径, mm; $2a$ 为定辊与螺旋辊(不含螺纹)间隙, mm; F_{n1} 、 F_{n2} 分别为 F_1 、 F_2 在水平面上的分力, F_{v1} 、 F_{v2} 分别为 F_1 、 F_2 在垂直面上的分力, $F_1 = F_2$, $F_{n1} = F_{n2} = G/2$

Note: F_1 , F_2 . The supporting force provided by fixed roller and spiral roller to *Camellia oleifera* seed respectively, N; δ . Angle between centerline and supporting force provided by fixed roller; G . *Camellia oleifera* seed gravity, N; f . Friction force between the *Camellia oleifera* seed and the spiral roller, N; R . Radius of the fixed roller and the spiral roller (excluding threads), mm; r . Radius of *Camellia oleifera* seed, mm; $2a$. Spacing between the fixed roller and the spiral roller (excluding threads), mm; F_{n1} , F_{n2} . Components of F_1 and F_2 on the horizontal plane; F_{v1} , F_{v2} . Components of F_1 and F_2 on the vertical plane. $F_1 = F_2$, $F_{n1} = F_{n2} = G/2$

图 4 油茶籽受力简化示意图

Fig. 4 Simplified schematic diagram of the force exerted on *Camellia oleifera* seed

由图 4 分析可知:

$$\cos \delta = \frac{R+a}{R+r} \quad (5)$$

$$G = 2F_1 \sin \delta \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可得定辊与螺旋辊对油茶籽的支撑力, 见式(7)。

$$F_1 = F_2 = \frac{G(R+r)}{2\sqrt{2R(r-a)+r^2-a^2}} \quad (7)$$

可得油茶籽与螺旋辊之间的摩擦力, 见式(8)。

$$f = \mu F_2 = \frac{\mu G(R+r)}{2\sqrt{2R(r-a)+r^2-a^2}} \quad (8)$$

式中: μ 为油茶籽与螺旋辊之间的摩擦因数。

3 螺旋推进式油茶籽壳低损清选机清选试验

3.1 油茶籽壳混合物的清选及清选效果评价参数计算

前期试验发现, 直径在 20 ~ 27 mm 之间的油茶籽壳混合物的清选难度相较于直径小于 20 mm 的油茶籽壳混合物的清选难度更大, 且直径大于 27 mm 的混合物中除未充分脱壳的油茶果外基本不含油茶籽, 因此本文试验部分仅列出直径在 20 ~ 27 mm 的油茶籽壳混合物的试验过程。

将堆沤 7 d 后的油茶青果经机械脱壳后产生的油茶籽、壳经 $\Phi 27$ mm 的圆孔筛筛分, 筛下物再经 $\Phi 20$ mm 的圆孔筛筛分后, 取筛上物进螺旋推进式油茶籽壳低损清选机, 设定对辊间隙(螺旋辊与定辊间隙), 在一定喂入量、螺旋辊转速下进行油茶籽壳的清选, 分别得到油茶籽和油茶壳, 按公式(9)和公式(10)计算清选率(y_1)和油茶籽损失率(y_2)。

$$y_1 = m_1 / (m_1 + m_2) \times 100\% \quad (9)$$

$$y_2 = (1 - m_3 / m_4) \times 100\% \quad (10)$$

式中: m_1 为清选后油茶籽总质量(包含破损的油茶籽), kg; m_2 为清选后油茶壳总质量, kg; m_3 为清选后油茶籽的总质量; m_4 为清选前油茶籽的总质量, kg。本文油茶籽损失包含两部分: 一部分为油茶籽从螺旋辊与定辊间的间隙中漏出; 另一部分为清选后破损的油茶籽, 在统计 m_3 时, 清选后破损的油茶籽的质量不计入其中。

3.2 工作参数单因素试验

对螺旋推进式油茶籽壳低损清选机作业时的 3 个关键因素喂入量、螺旋辊转速和对辊间隙进行单因素试验, 考察各因素对清选率和油茶籽损失率的影响。单因素试验时基础条件为螺旋辊转速 160 r/min, 对辊间隙 10 mm, 喂入量 1.3 t/h。每次试验重复 3 次, 试验结果取平均值, 结果如图 5 所示。

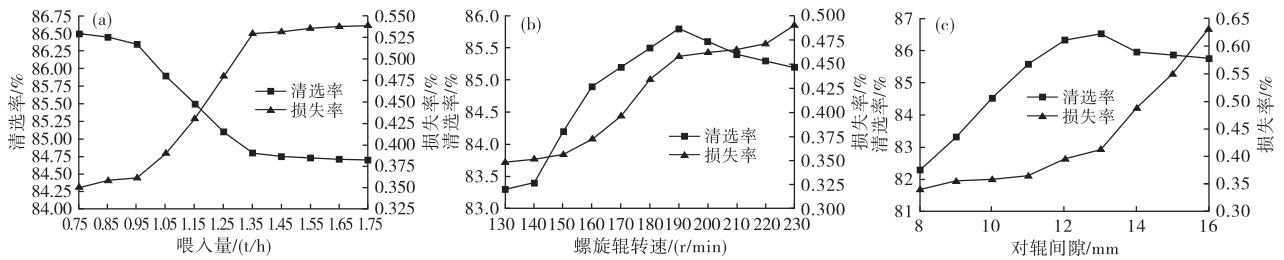


图5 喂入量、螺旋辊转速和对辊间隙对清选率和油茶籽损失率的影响

Fig. 5 Influence of feeding rate, screw roller speed, and roller spacing between the two rollers on sorting rate and *Camellia oleifera* seed loss rate

喂入量直接反映清选机的生产能力,喂入量过大,会使清选机中油茶籽壳混合物堆积,导致清选率降低;喂入量过小,导致清选机的性能得不到充分发挥。由图 5a 可知,喂入量在 0.95 ~ 1.35 t/h 时,清选率降幅较大,同时油茶籽损失率大幅增长,可见喂入量在此阶段内对清选机的性能影响较大,因此选取喂入量为 0.95 ~ 1.35 t/h 进行优化试验。

一般来说,螺旋辊转速越大,清选机的处理量越大,但油茶籽损失率越大,因此合理的螺旋辊转速是获得较佳清选效果的前提。由图 5b 可知,螺旋辊转速在 150 ~ 190 r/min 时,清选率和油茶籽损失率均增长明显,可见螺旋辊转速在此阶段对清选机的性能影响较大,因此选取螺旋辊转速为 150 ~ 190 r/min 进行优化试验。

在实际清选作业中,为了获得较佳的清选效果,可适当放宽对辊间隙的取值。由图 5c 可知,对辊间隙为 8 ~ 13 mm 时清选率持续升高,并在对辊间隙为 13 mm 时达到最大。油茶籽损失率在 8 ~ 13 mm 时增长缓慢,在对辊间隙大于 13 mm 时大幅增加。综合考虑,选取对辊间隙为 11 ~ 13 mm 进行优化试验。

3.3 工作参数响应面优化试验

3.3.1 试验方案与结果

选取喂入量(A)、螺旋辊转速(B)和对辊间隙(C)为试验因素,清选率(y_1)和油茶籽损失率(y_2)为考察指标,设计三因素三水平响应面试验对清选机工作参数进行优化,试验因素与水平如表 1 所示,试验方案与结果如表 2 所示。

表 1 试验因素与水平

水平编码	A 喂入量/(t/h)	B 螺旋辊转速/(r/min)	C 对辊间隙/mm
-1	0.95	150	11
0	1.15	170	12
1	1.35	190	13

表 2 试验方案与结果

Table 2 Test plan and results

试验号	A	B	C	y_1 /%	y_2 /%
1	-1	-1	0	82.2	0.48
2	1	-1	0	81.7	0.49
3	-1	1	0	83.6	0.54
4	1	1	0	80.3	0.59
5	-1	0	-1	81.2	0.50
6	1	0	-1	81.8	0.52
7	-1	0	1	84.1	0.71
8	1	0	1	82.4	0.79
9	0	-1	-1	82.8	0.57
10	0	1	-1	83.4	0.59
11	0	-1	1	83.8	0.68
12	0	1	1	84.8	0.82
13	0	0	0	83.5	0.51
14	0	0	0	82.8	0.47
15	0	0	0	84.1	0.48
16	0	0	0	83.7	0.51
17	0	0	0	84.2	0.49

3.3.2 试验因素对清选率影响分析

运用 Design - Expert 8.05 软件对试验数据进行二次多项式回归拟合,得到清选率的回归方程为 $y_1 = 83.66 - 0.61A + 0.20B + 0.74C - 0.70AB - 0.57AC + 0.1BC - 1.52A^2 - 0.19B^2 + 0.23C^2$ 。

表 3 为清选率方差分析。由表 3 可知,模型 p 值大于 0.01 小于 0.05,说明清选率模型显著,失拟项 p 值大于 0.05,不显著,说明回归模型在试验范围内拟合程度高。模型的决定系数 (R^2) 为 0.888 9,表明该模型具有较高的可靠性,能解释 88% 以上的响应值变化。因此,该模型可以用于清选率优化。比较各因素 F 值可知,对清选率影响最大的因素是对辊间隙,其次为喂入量,螺旋辊转速的影响最小。二次项 A^2 对回归模型影响极显著 ($p < 0.01$),一次项 A 、 C 影响显著 ($p < 0.05$),交互项 AB 影响较显著 ($p < 0.1$),其余项影响不显著。剔除影响不显著的回归项对回归模型进行优化,得到简化

后的回归方程为 $y_1 = 83.66 - 0.61A + 0.74C - 0.70AB - 1.52A^2$ 。

表3 清选率方差分析

Table 3 Analysis of variance of sorting rate

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	21.08	9	2.34	6.22	0.012 4**
A	3.00	1	3.00	7.97	0.025 6**
B	0.32	1	0.32	0.85	0.387 2
C	4.35	1	4.35	11.56	0.011 4**
AB	1.96	1	1.96	5.21	0.056 5*
AC	1.32	1	1.32	3.51	0.103 0
BC	0.04	1	0.04	0.11	0.753 9
A ²	9.70	1	9.70	25.76	0.001 4***
B ²	0.16	1	0.16	0.41	0.540 2
C ²	0.23	1	0.23	0.60	0.462 2
残差	2.63	7	0.38		
失拟项	1.38	3	0.46	1.47	0.348 9
误差	1.25	4	0.03		
总和	23.72	16			

注: ***表示极显著($p < 0.01$); **表示显著($p < 0.05$); *表示较显著($p < 0.1$)。下同

Note: *** $p < 0.01$; ** $p < 0.05$; * $p < 0.1$. The same below

3.3.3 试验因素对油茶籽损失率影响分析

对试验数据进行二次多项式回归拟合,得到油茶籽损失率的回归方程为 $y_2 = 4.92 + 0.20A + 0.40B + 1.02C + 0.10AB + 0.15AC + 0.30BC - 0.01A^2 + 0.36B^2 + 1.39C^2$ 。

表4为油茶籽损失率方差分析。

表4 油茶籽损失率方差分析

Table 4 Analysis of variance of *Camellia oleifera* seed loss rate

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p
模型	19.38	9	2.15	38.36	<0.000 1***
A	0.32	1	0.32	5.70	0.048 4**
B	1.28	1	1.28	22.80	0.002 0***
C	8.40	1	8.40	149.71	<0.000 1***
AB	0.04	1	0.04	0.71	0.426 5
AC	0.09	1	0.09	1.60	0.246 0
BC	0.36	1	0.36	6.41	0.039 1**
A ²	0.000 4	1	0.000 4	0.01	0.933 4
B ²	0.49	1	0.49	8.67	0.021 6**
C ²	8.14	1	8.14	144.90	<0.000 1***
残差	0.39	7	0.06		
失拟项	0.26	3	0.09	2.76	0.175 8
误差	0.13	4	0.03		
总和	19.78	16			

由表4可知,模型p值小于0.01,说明油茶籽损失率回归模型极显著,失拟项的p值大于0.05,

不显著,说明回归模型在试验范围内拟合程度高。模型的决定系数(R^2)为0.980 1,表明该模型具有较高的可靠性,能解释98%以上的响应值变化。因此,该模型可以用于油茶籽损失率的优化。比较各因素F值可知,对油茶籽损失率影响最大的因素是对辊间隙,其次为螺旋辊转速,喂入量的影响最小。一次项B、C和二次项C²对回归模型影响极显著($p < 0.01$),一次项A、交互项BC、二次项B²影响显著($p < 0.05$),其余项影响不显著。剔除影响不显著的回归项对回归模型进行优化,得到简化后的回归方程为 $y_2 = 4.92 + 0.20A + 0.40B + 1.02C + 0.30BC + 0.34B^2 + 1.39C^2$ 。

3.3.4 参数优化

使用 Design - Expert 8.05 软件优化求解功能,得到喂入量 1.1 t/h、螺旋辊转速 170.34 r/min、对辊间隙 11.96 mm 时,螺旋推进式油茶籽壳低损清选机获得最佳清选效果,此时,模型预测清选率为 83.68%,油茶籽损失率为 0.483%。

3.3.5 试验验证

考虑到实际应用,将最优条件调整为喂入量 1.1 t/h、螺旋辊转速 170 r/min、对辊间隙 12 mm,在此条件下进行 3 次验证试验,得到平均清选率为 83.56%,油茶籽损失率为 0.48%,与模型预测值相差较小。

对螺旋推进式油茶籽壳低损清选机清选结果的分析发现:分离的油茶籽中主要残存的是一些弧度较大的油茶壳、带有隔膜的油茶壳和油茶梗;损失的油茶籽主要是一些比较扁的油茶籽。

3.4 与其他清选机技术对比分析及设计改进

对比几种油茶籽壳清选机与螺旋推进式油茶籽壳低损清选机的清选效果,结果见表5。

表5 不同油茶籽壳清选机清选效果对比

Table 5 Comparison of sorting effect of different *Camellia oleifera* seed shell sorting machines

设备名称	清选原理	清选效果	
		清选率/%	油茶籽损失率/%
油茶果壳籽分选机 ^[8]	摩擦清选、色选	97.55	3.27
6SXZ-03型履带式色选机 ^[18]	色选	98	-
平面床式齿光辊油茶蒲籽清选机 ^[12]	齿光辊清选	≥95.14	≤1.05
油茶果蒲籽浮选机 ^[11]	浮选	95	-

注: - . 未检测

Note: - . Undetected

由表5可知,螺旋推进式油茶籽壳低损清选机的油茶籽损失率远低于已报道的几种油茶籽壳清选机的,但其清选率仅有83.56%,清选效果相较于其他几种油茶籽壳清选机不佳。

对经螺旋推进式油茶籽壳低损清选机清选后的油茶籽进行分析,发现油茶籽中弧度较大的油茶壳、带有隔膜的油茶壳占大多数。针对此种现象,通过在螺旋推进式油茶籽壳低损清选机上平面设计毛刷以增大清选过程中油茶壳姿态调整的概率,提高清选率,优化改进设计方案如图6所示。

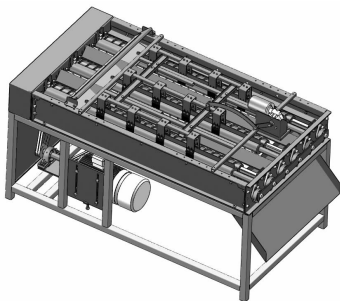


图6 螺旋推进式油茶籽壳低损清选机优化改进方案

Fig. 6 Optimization and improvement plan for spiral-propelled type *Camellia oleifera* seed shell low-loss sorting machine

对优化后的螺旋推进式油茶籽壳低损清选机进行油茶籽壳混合物清选试验,试验重复3次,3次清选率和油茶籽损失率分别为90.48%、89.77%、90.93%和0.54%、0.49%、0.58%,平均值分别为90.39%和0.54%,清选效果较好。

4 结论

(1)设计了螺旋推进式油茶籽壳低损清选机,解决了齿光辊式油茶籽壳清选机存在的油茶籽破碎率高的问题;确定了螺旋辊的螺距为50 mm,直径为50 mm,长度为1 000 mm,螺纹采用双螺旋形式布置;螺纹横截面形式为直角梯形,工作倾角为120°,螺纹高为4 mm;螺旋升角为30°。

(2)采用单因素试验和响应面试验对螺旋推进式油茶籽壳低损清选机工作参数进行优化,确定最优条件为喂入量1.1 t/h、螺旋辊转速170 r/min、对辊间隙12 mm,在此条件下清选率为83.56%,油茶籽损失率为0.48%。

(3)通过与4种不同清选原理的油茶籽壳清选机的清选效果作比较,提出在螺旋推进式油茶籽壳低损清选机上平面设计毛刷增加油茶壳姿态调整的概率以提高清选率的方案。对优化后的螺旋推进式

油茶籽壳低损清选机进行油茶籽壳混合物清选试验,清选率为90.39%,油茶籽损失率为0.54%。

参考文献:

- [1] 刘娟. 乡村振兴背景下光山县油茶产业发展方式研究[J]. 南方农机, 2021, 52(20): 110-112.
- [2] 王金凤, 谭新建, 吴喜昌, 等. 我国油茶产业发展现状与对策建议[J]. 世界林业研究, 2020, 33(6): 80-85.
- [3] 国家林业和草原局. 我国森林食物发展取得阶段性成效为粮食安全打足底气[EB/OL]. [2024-11-16]. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/lcdt/590298.jhtml>.
- [4] 袁超哲, 黄旭波, 王洪艳, 等. 油茶鲜果采收与初加工机械装备研究现状与发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50(5): 4-8, 13.
- [5] 汤晶宇, 吴昊, 徐克生, 等. 油茶果壳籽清选技术装备研究分析[J]. 林业机械与木工设备, 2019, 47(7): 4-10.
- [6] 曲振兴, 樊涛, 张世才, 等. 油茶果脱壳分选设备研究现状分析[J]. 林业机械与木工设备, 2017, 45(11): 4-7.
- [7] 陈礼东. 油茶果脱蒲与分离结构设计及试验研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2021.
- [8] 鹿瑶, 王伟, 钟斌, 等. 融合光电色选的皮带筛式油茶果壳籽分选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 429-439.
- [9] 胡一飞. 多通道油茶果分级破壳机设计及分级清选自动化研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- [10] 熊平原, 薛森杰, 王毅, 等. 气吸式油茶籽壳仁清选装置仿真分析与试验[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2019, 32(1): 35-40, 45.
- [11] 彭润絮. 新型浮选分离油茶果蒲籽工艺及其工程化应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [12] 兰峰, 苏子昊, 戴亿政. 平面床式齿光辊油茶蒲籽清选机研制与试验[J]. 农业工程, 2020, 10(10): 66-73.
- [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.
- [14] 胡宗武. 非标准机械设备设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [15] 贾朝斌. 螺旋输送机参数设计及其优化方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [16] 程韦武, 庞莲香, 蓝同平. 螺旋输送机设计[J]. 现代制造技术与装备, 2018(4): 1-3.
- [17] 黄学群. 运输机械选型设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 333-398.
- [18] 胡一飞, 王焱清, 马君, 等. 色选机在油茶果脱壳清选中的应用[J]. 湖北工业大学学报, 2018, 33(5): 62-64.