

小型鲜莲子剥壳机的设计与试验

朱亨银, 何金成, 方文熙, 叶大鹏, 梁诗华

(福建农林大学机电工程学院, 福州 350002)

摘要: 由于现有鲜莲子剥壳机的机型结构复杂、价格和维护成本较高, 故未能在普通莲农中推广, 大多数莲农仍采用手工加工。为了减轻广大莲农劳动负担, 实现新鲜莲子机械化剥壳的普及, 该文研制了一种结构简单、操作方便、适合普通莲农需求的低价位鲜莲子剥壳机, 其整机长×高×宽为 756 mm×878 mm×412 mm, 质量为 37 kg, 制造成本约 1 500 元。测试了鲜莲子外壳的切透力、仁坚实度等机械特性, 切透力平均值 19.63 N、最大值 25.8 N, 莲仁坚实度平均值 19.02 N、最大值 23.27 N, 此数据可为莲子剥壳机结构参数和工作参数的确定提供参考依据。该机采用内充式空穴分离排料、二步滚动正位、振动切割、滚压脱壳的工作原理实现莲子剥壳。通过对 4 种不同切割方案的剥壳试验对比, 结果表明: 配置齿面防滑压板、具有滑切作用的悬挂式振动剥壳机构的剥壳率和剥壳质量均优于其他方案, 其剥壳率为 92%, 整仁率 100%, 有轻微压痕的小于 10%, 能满足鲜莲子的剥壳要求。

关键词: 剥壳; 设计; 机械化; 莲子; 机械特性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.004

中图分类号: S226.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0028-08

朱亨银, 何金成, 方文熙, 叶大鹏, 梁诗华. 小型鲜莲子剥壳机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 28—35. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.004 <http://www.tcsae.org>
Zhu Hengyin, He Jincheng, Fang Wenxi, Ye Dapeng, Liang Shihua. Design and test of small fresh lotus seed sheller[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 28—35. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.004 <http://www.tcsae.org>

0 引言

莲子是营养保健佳品, 经济价值高^[1]。但莲子生产的人工成本很高, 在福建莲子产区每千克干莲仁人工成本超过 80 元, 所以目前种植莲子经济效益低, 莲农生产积极性不高。采收后莲子的剥壳、去膜、去芯等工序比较费时, 而且通常是当天完成, 否则会加大剥壳和去膜的难度, 此外储存时间过长也影响莲子的品质, 因此机械化加工势在必行。

莲子剥壳机有鲜莲子剥壳机和干壳莲子剥壳机 2 类, 前者主要在江西、浙江、福建的白莲产区使用, 后者主要用于湘莲的红莲加工。鲜莲子剥壳机的研究主要有郑传祥^[2]设计的一种用高速转刀对莲子外壳切割、挤压进行脱壳的莲子脱壳机, 其切割通道入口端不能随莲子大小自动调节, 因此需对莲子大小分级。曹志强^[3]发明的莲子剥壳去膜一体机, 能一次性完成剥壳去膜, 效果良好, 且近年来仍在不断改进, 日渐完善, 已在广昌县东盛机械厂生产, 开始应用于莲子生产加工, 但其结构复杂, 质量大, 调整维修困难, 且传送带易损, 需要经常更换, 价格高。徐谐庆等^[4]在曹志强剥壳去膜一体机的基础上, 通过优化设计了一种采用单边机结构的剥壳去皮一体

机, 简化了结构, 提高了机器的稳定性。文献[3-4]莲子均采用皮带输送、挡板间歇拦截分离、直线往复切割, 传动系统复杂, 特点是集剥壳去膜于一体, 整机结构复杂庞大, 造价高; 黄兴元等^[5-6]设计了滚切式鲜莲子剥壳机, 采用槽轮机构的间歇运动形式, 莲子由搓辊转动正位, 当莲子输送到切割机构位置时停歇, 用高速旋转的转刀切割, 然后输送至脱壳辊再次停歇脱壳, 割壳与脱壳分步进行。此外还有王旺平也设计了新鲜莲子剥皮去衣机^[7], 吴传宇等研究了挤压式莲子脱壳机理^[8], 赖明全设计了全自动莲子切壳剥壳机^[9-10], 以及谭小年的挤振式莲子脱壳机^[11]等。余群等^[12]、万伟红等^[13]、邹晓丹^[14]综述了莲子剥壳技术的研究进展。干壳莲子剥壳机的工作机构、剥壳原理均与鲜莲子剥壳机有显著差异, 研究者主要有张永林等^[15]设计的多联辊刀式干莲子剥壳机, 采用由双托辊和螺旋辊刀构成的剥壳通道经过多次旋切实现剥壳; 杨振和^[16]设计的采用尖齿破壳的多通道行星运动剥壳机, 提出点、线、面三步破壳剥壳工艺; 王旺平等^[17]设计了结构较简单的 BK25 型干莲子剥壳机, 也采用双托辊和滚切刀构成的剥壳通道; 马秋成等^[18-19]设计了自适应莲子剥壳机。由于莲子产区分布在亚洲少数国家, 故莲子剥壳机主要是国内学者在研究, 目前未见国外的研究报导, 但国外对坚果类剥壳的研究成果对壳莲的加工有一定的参考价值^[20-22]。本研究机型^[23]与上述机型区别在于: 采用内充式喂料, 排料轮空穴分离排料, 强迫滚动衔接重力作用下自由滚动进行二步莲子正位, 悬挂摆式振动切割, 以主动轮带动莲子通过弧形切割通

收稿日期: 2016-07-14 修订日期: 2017-04-10

基金项目: 国家科技部科技支撑计划子项目(2007BAD07B04); 福建省自然科学基金项目(2016J0101)

作者简介: 朱亨银, 副教授, 主要从事农业机械、农产品产后加工机械的设计与改进研究。福州 福建农林大学机电工程学院, 350002。

Email: zhyli503@sina.com

道并进行碾压脱壳，其优点是整机结构简单，成本低，工作可靠，使用维护方便。

在武夷山产区五夫镇，种植面积达 500 多 hm^2 。由于当地目前使用的东盛机械厂生产的机型价格昂贵，售价 2 万多元，故只有莲子加工专业户和合作社两家购买。因其剥壳去膜一体，采用水枪去膜，而输送带是橡胶与纤维材质，泡水后容易膨胀损坏，需要经常更换，而且切割刀设计成一次性的，也需经常更换，运行和维护费用高，因此未能在普通莲农中推广使用。五夫镇绝大部分莲农仍然靠妇女、老人日夜手工剥莲子，莲子手工加工是当前莲子扩大生产与提高效益的制约因素。为了能在广大莲农中推广使用，普及机械化加工，本机设计定位在低价位的鲜莲子剥壳机，旨在满足广大莲农的需求。

1 整机结构与工作原理

1.1 主要参数与性能指标

本机设计主要性能指标如下：

处理量>40 kg/h；1 次剥壳率>90%；莲仁破损率<3%；动力配备 0.25 kW；机型小，整机质量不超过 50 kg。

1.2 整机结构与工作原理

鲜莲子形状近似椭球体，壳与仁之间存在微小空隙，一种有效的剥壳方法是：从莲子赤道部位环切外壳一周，稍加滚压即可脱壳^[1,5]。根据上述的剥壳原理，必须完成 3 个工序：莲子的逐粒排料、莲子正位、切割去壳。本机主要包括内充式排料器、滚槽、剥壳机构、传动机构、机架等几个部分，如图 1 所示。工作时莲子通过料斗下部的侧向出口从排料轮盖的端面开口进入排料器，在排料轮空穴作用下被逐粒分离后按照一定的时间间隔从排料器出口排出。进入一倾斜设置的导向滚槽，在重力作用下，莲子向下滚动并形成所需的水平状态进入剥壳机构的切割通道，切割刀片在莲子赤道处形成环切，经滚压脱壳排出。

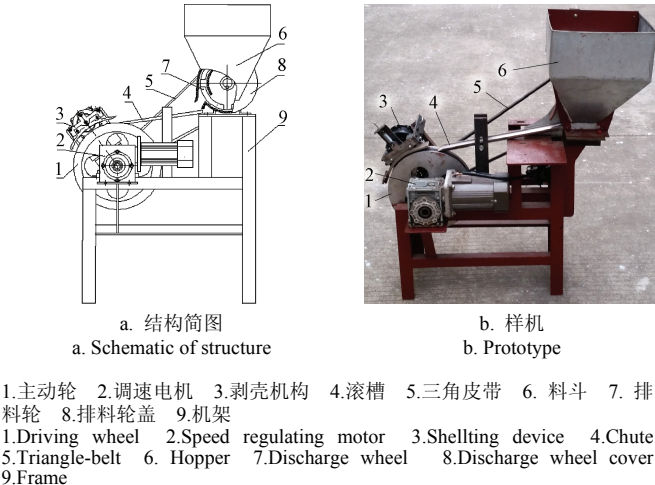


图 1 莲子剥壳机结构简图和样机
Fig.1 Schematic and prototype of lotus seed sheller

传动机构主驱动力由自带涡轮蜗杆减速器的调速电机提供，经减速后传动至主动轴，驱动主动轴上的主动轮及小皮带轮，经皮带传动带动排料轮旋转。鉴于切割

机构的往复振动频率远大于主动轮转速，故采用价格便宜的风扇电机独立驱动，由电机轴末端的螺纹与偏心销轴连接，偏心销轴通过刀座长槽带动割刀振动切割。

本设计整机结构简单，机型小，整机长×高×宽为 756 mm×878 mm×412 mm，整机质量为 37 kg，整机成本约在 1 500 元以内，不到现有剥壳去膜一体机的 1/15。有利于在普通莲农中推广应用。

1.3 鲜莲子的机械特性及几何尺寸测试

了解鲜莲子物理机械特性可避免在剥壳机设计中参数确定的盲目性。莲子品种繁多，国内已有学者对部分品种莲子的物理机械特性进行了试验研究，包括鲜莲子几何尺寸、密度、壳厚^[24]，干莲子密度、破壳力等^[25-28]。国外虽有学者对其他坚果类进行物性研究^[20,29-31]，但对莲子物性的研究未见报道。

为了更好地适应建莲加工，以福建建宁和武夷山地区（中国莲子主产区之一）的主要品种太空 36 号莲子为样本，针对与本设计密切相关的特性进行测试：鲜莲子的几何尺寸、外壳的切透力、莲仁坚实度等，其中后 2 项的测试尚未见报导。

试验用鲜莲子外壳切透力和莲仁坚实度测试设备均采用英斯特朗万能试验机(INSTRON, USA, Model 5543)，试验控制方式为压缩载荷，测头进给速度为 20 mm/min，试验中止准则为载荷掉落 15%时返回，载荷开始掉落表示切破莲子壳瞬间，莲子切透力即最大载荷值。

1) 外壳的切透力试验。试验采用莲子剥壳机样机使用的刀片。

2) 莲仁坚实度试验。坚实度值为冲头加压的最大载荷。因为莲仁较小，表 1 坚实度测试采用直径为 2.2 mm 冲头。由于坚实度常用直径为 5 mm 冲头测试，而不同直径的冲头结果不同，故表 1 中另给出了莲仁单位面积承压能力（最大载荷与冲头面积之比）。

3) 几何尺寸测量。测量了莲子的长径，赤道直径、赤道处壳厚，莲子赤道直径取 2 个相互垂直方向直径的平均值，采用游标卡尺测量。

样本随机选取太空 36 号莲子 100 粒并进行编号，先测量几何尺寸，再做外壳的切透力试验，全部测完后，利用相同样本剥壳进行莲仁坚实度试验，剥一粒测一粒，以免莲仁水分蒸发。实测结果统计数据如表 1。

表 1 鲜莲子结构尺寸及机械特性

Table 1 Structural dimensions and mechanical properties of fresh lotus seeds				
项目 Item	平均值 Average	方差 Variance	最大值 Maximum	最小值 Minimum
样机刀片切透力				
Cutting force of prototype blade/N	19.63	0.07	25.8	15.4
仁坚实度 Kernel firmness/N				
Kernel pressure capacity per unit area/(N·mm ²)	5	0.32	6.12	3.94
赤道直径 Equatorial diameter/mm	18.12	0.605	20	16.2
长径 Long diameter/mm	23.61	0.02	24.7	22.2
赤道处壳厚 Equatorial shell thickness/mm	0.905	0.002	1	0.8

表 1 统计结果可作为鲜莲子剥壳机设计时参数选择的参考依据。

表中莲仁坚实度平均值为 19.02 N, 莲子最大切透力为 25.80 N, 若给予适当的切透可靠性安全系数, 同时考虑到万能机上莲子是静态加压切割, 而剥壳机上莲子是在滚动中加压切割, 切割点所受刃口压力作用的时间极短, 应适当加大压力, 因此取切割刀压力安全系数为 1.1~1.4。设计中样机刃口切割压力取 28~35 N 较为合适。

莲仁单位面积承压能力与整仁率和剥壳质量有关。切割后的莲子受压板与主动轮槽的碾压力作用而脱壳, 在本机设置的切割压力为 28~35 N 的试验条件下, 莲仁未出现破裂现象, 因此压板压力 (也是切割压力) 是在莲仁承压能力的安全范围内, 即压板压应力小于莲仁单位面积承压能力。由于建莲一般加工成白莲子 (去壳去膜), 加工要求高, 剥壳过程莲仁要避免过度挤压而出现明显压痕或损伤, 否则烘干后会出现起皱、变形、变色, 影响干莲仁的品相和价格, 因此压板压力若过大, 容易使莲仁表面产生塑性变形而产生压痕。

椭球状莲子的长径和赤道直径与滚槽及主动轮槽的断面的曲率半径有关。设计时滚槽及主动轮槽的断面曲率半径应大于莲子长轴方向的表面曲率半径, 使莲子赤道可与槽底接触, 有利于滚动正位。莲子的赤道直径还与切割通道开度及其入口角度有关, 入口角度应小于莲子在入口处的最大滑动静摩擦角, 以便于莲子顺利进入切割通道。

2 关键零部件设计及其工作原理

2.1 传动机构设计

为了保证莲子外壳被有效地环切, 主动轮的设计转速不宜过快, 同时考虑到剥壳机所需功率较小, 故采用 250 W 蜗轮蜗杆减速器调速电机, 其速比为 15, 输出转速 10~200 r/min 可调, 主动轮较为合适的速度是 100 r/min 左右。

莲子由主动轮转动推进切割通道, 切割通道的长度与剥壳速度、下料频率相关。假设莲子在切割通道内沿压板作匀速纯滚动, 根据运动学原理可知, 其速度瞬心在莲子与压板的接触点, 主动轮的轮槽底部的线速度是莲子质心前进速度的 2 倍, 由于一个行程 (等于压板弧长) 切割通道内只允许通过一粒莲子, 因此一个行程主动轮至少要转过压板弧长的 2 倍, 才能避免通道中同时出现 2 粒莲子的情况。故理论上主动轮每转所能剥莲子的数量为

$$k \leq \pi R_c / L = \pi R_c / \theta R \quad (1)$$

设计中必须根据 k 值确定主动轮与排料轮之间皮带传动的速比 i 以及排料轮上分离莲子的缺口数量 m 。则皮带传动比为

$$i \geq m/k = m\theta R_y / \pi R_c \quad (2)$$

式中 $L = \theta R$ 为压板弧长, θ 为压板圆心角, rad; R_y 为压板曲率半径, mm; R_c 为主动轮轮槽底部半径, mm。本机设计 $R_c = 120$ mm, $R_y = 139$ mm, $\theta = 76^\circ = 1.33$ rad, $n = 100$ r/min,

$m = 4$ 。计算得 $i \geq 1.96$, 考虑到莲子在切割通道存在打滑的可能, 以及莲子赤道圆度差异等因素, 皮带传动比 i 应大于此值, 本机设计取 $i = 2.3$ 。则排料轮每小时排出莲子的数量

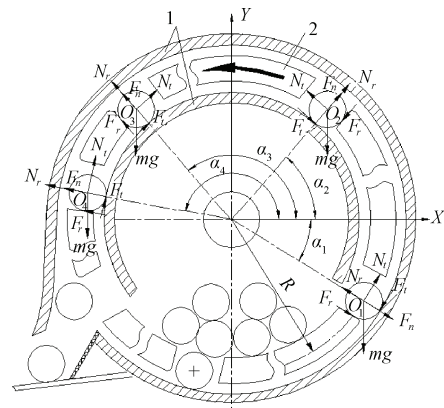
$$N = 60 \times 4 \times n / i = 10435$$

本机试验用太空 36 号莲子的单粒平均质量为 4.2 g, 因此本机理论处理量为 43.8 kg/h, 达到设计指标。

2.2 排料器组成及其工作原理

2.2.1 排料器组成

采用内充式送料、空穴分离的排料器 (如图 2)。排料器由排料轮和排料轮盖组成, 排料轮盖固定于机架上, 排料轮沿周向均布有若干个缺口, 与排料轮盖组成只能容纳一个莲子的容腔。排料轮直径的大小影响莲子的分离和滚动正位效果, 本机取排料轮中径为 144 mm。工作时在排料轮旋转过程中容腔内莲子沿圆周上升, 容腔外的其余莲子受重力作用限制了爬升高度, 并被排料轮盖内环 (内环下方约 1/3 是开口) 的右端挡住, 不能进入环形通道, 从而实现单粒莲子分离。



1. 排料轮盖 2. 排料轮
1. Discharge wheel cover 2. Discharge wheel

注: F_t 、 F_r 为莲子所受接触面的切向和径向滑动摩擦力, N_t 、 N_r 为莲子所受接触面的切向和径向支承力, N ; mg 为莲子所受重力, N ; F_n 为莲子所受的离心力, N ; R 为莲子质心公转半径, m ; O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 分别为莲子第 1、第 2、第 3、第 4 运动状态转换点。X 为水平坐标轴; Y 为垂直坐标轴; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 分别为 O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 各位置相对 X 轴的角度。
Note: F_t and F_r are the tangential and radial sliding friction forces on the contact surface of lotus seed, N_t and N_r are the tangential and radial support forces on the contact surface of lotus seed, N ; mg is gravity of lotus seed, N ; F_n is the centrifugal force of lotus seed, N ; R is mass center orbit radius of lotus seed, m ; O_1 , O_2 , O_3 , O_4 are the first, second, third and fourth motion state transition points; X is the horizontal coordinate axis; Y is the vertical coordinate axis; α_1 , α_2 , α_3 and α_4 are the angles relative to the X-axis of the positions O_1 , O_2 , O_3 and O_4 .

图 2 排料器内莲子在不同位置受力图

Fig.2 Free-body diagram of lotus seed in discharge process

2.2.2 莲子正位原理

实现莲子正位的机构涉及滚槽和排料器内腔的环形通道。正位目的是使莲子在进入剥壳通道时保持长轴处于水平位置并垂直于切割刃口, 以保证刃口切割在莲子赤道位置。

1) 正位原理

正位是通过滚动莲子实现的, 分 2 个阶段进行。第一阶段是强迫滚动: 莲子个体分离后在排料轮推动下沿环形通道作公转和自转, 促使莲子长轴趋向水平摆正位

置, 到出口处经缓冲后落入滚槽上端, 这一过程莲子在重力、摩擦力和离心力作用下被迫作滚动和滑动, 2 种运动形式在不同区段互为转换。第二阶段是自由滚动: 莲子进入滚槽后在重力作用下自由向下滚动, 由于莲子外形近似椭球, 在外力作用下沿着赤道 (短径方向) 滚动最省力, 即避免因重心波动而消耗动能。无论莲子初始状态如何, 只要有足够长的滚道, 莲子最终都会趋向沿着赤道滚动, 从而使其长轴处在水平状态, 然后进入压板与槽轮组成的切割通道, 经过刀片在莲子赤道位置环切和压板滚压, 实现莲子剥壳。

2) 莲子正位的运动学分析

莲子在进入剥壳机构前的姿态是影响剥壳率和破碎率的重要因素之一。莲子个体分离后进入排料器的环形通道, 在外力作用下做公转、自转、滑移的混合运动。自转可获得正位, 自转方向取决于莲子与容腔内壁 2 个接触点的滑动摩擦力 F_t 和 F_r 对莲子中心轴的合力矩方向。莲子在各个运动方式转换点的受力如图 2 所示。莲子的滚动摩擦力可忽略不计。根据平面力系平衡原理, 在 O_1 点莲子的法向、切向的合力均为 0。

法向合力:

$$F_r + F_n + mg \cdot \sin \alpha_1 - N_r = 0 \quad (3)$$

切向合力:

$$N_t - F_t - mg \cdot \cos \alpha_1 = 0 \quad (4)$$

式中 F_t 、 F_r 为莲子所受接触面的切向和径向滑动摩擦力, N; N_t 、 N_r 为莲子所受接触面的切向和径向支承力, N; mg 为莲子所受重力, N; $F_n = m\omega^2 R$ 为莲子所受离心力, N; R 为莲子质心公转半径, m; ω 为排料轮角速度, rad/s。

由于受上方莲子的压力, 落入排料轮下方缺口的莲子不转动, 在脱离上方莲子后向 O_1 点滚动时 $F_t > F_r$, 做顺时针自转, 当莲子上升到一定高度 (第一转换点 O_1) 时, 二力对莲子轴心的转矩大小相等方向相反, 此时开始不自转而沿外侧柱面滑动, 即 $F_t = F_r$, 假设各壁面与莲子的摩擦系数相等, 则有 $N_t = N_r$, 代入 (3)、(4) 式并整理得

$$\cos \alpha_1 - \sin \alpha_1 = \frac{\omega^2 R}{g}$$

考虑到 $\frac{\omega^2 R}{g} > 0$, 则 $\alpha_1 < 45^\circ$, 经三角变换后解得

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(1 - \frac{\omega^4 R^2}{g^2} \right) \quad (5)$$

莲子沿环形通道向上滑移到第二个转换点 O_2 开始沿着通道内侧滚动。假设莲子沿内、外侧滚动的质心公转半径近似都等于 R , 则 O_2 点的受力平衡方程为

法向合力

$$F_n + N_r - F_r - mg \cdot \sin \alpha_2 = 0 \quad (6)$$

切向合力

$$N_t - F_t - mg \cdot \cos \alpha_2 = 0 \quad (7)$$

同理, 联立 (4)、(5) 得

$$\alpha_2 = 90^\circ - \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(1 - \frac{\omega^4 R^2}{g^2} \right) \quad (8)$$

在 O_2 到第 3 个转换点 O_3 区间内, 莲子沿环形通道内侧滚动。根据受力平衡求得 O_3 点位置角

$$\alpha_3 = 90^\circ + \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(1 - \frac{\omega^4 R^2}{g^2} \right) \quad (9)$$

过了 O_3 点后莲子又做滑移到 O_4 点, 在离心力的作用下与滚道内侧脱离接触, 滚到外壁, 根据受力平衡求得 O_4 点位置角

$$\alpha_4 = \sin^{-1} \left(\frac{\omega^2 R}{g} \right) \quad (10)$$

式 (3) ~ (10) 中 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 分别为莲子运动状态转换点 O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 相对 X 轴的角度。

过了 O_4 以后轻贴外壁滑落至出口排出, 经橡胶片缓冲进入滚槽。

通过上述计算分析, 表明莲子在环形通道内存在滚动和滑动 2 种运动形式, 由于莲子运动过程与容腔壁面有 2 个接触点, 因此滑动摩擦力始终存在, 而滑动摩擦力对莲子质心的力矩是莲子运动的阻力矩, 根据能量最小原则 (与上述正位原理相同), 滑动摩擦力 F_t 和 F_r 作用在莲子赤道位置时阻力矩最小 (阻力臂最短), 因此滑动也有促使莲子趋向水平状态的作用。但滚动比滑动的正位效果好。

由式 (8)、(9) 可知, 在一定转速范围内排料轮转速 n 越高, 滚动区间 O_2O_3 越小, 正位效果就越差。当 n 增大到一定数值后, 莲子在离心力作用下将始终沿着外壁运动, 但考虑到莲子排出时掉落速度不能太快, 因此宜选择较低转速 n 来增大 O_2O_3 区间。

本机的排料轮莲子质心公转半径 $R=0.067$ m, 转速 $n=40$ r/min, 计算得

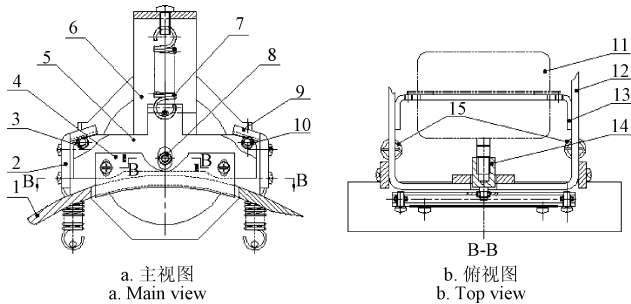
$$\alpha_1 = -40.13^\circ, \alpha_2 = 49.87^\circ, \alpha_3 = 130.13^\circ, \alpha_4 = 173.11^\circ, O_2O_3 \text{ 区间圆弧为 } 80.26^\circ.$$

经排料器初步正位的莲子在出口处滑落, 由缓冲橡胶片承接后, 姿态可能发生一定的改变, 进入滚槽后还需要经过自由滚动进一步正位, 滚槽长度与斜度的选取十分重要, 从莲子滚动效果来看, 滚槽斜度取 8° 、长度大于 35 cm 为宜。此外, 莲子分离过程要避免出现碎粒, 否则会影响自由滚动甚至拥堵, 但只要及时取走碎粒便可恢复正常作业。本设计的排料器一般不出现碎粒现象。

2.3 悬挂式振动剥壳机构

剥壳机构由电机、U 形支架、压板、悬挂式振动切割机构等组成, 如图 3 所示。工作时主动轮将莲子推进由压板与主动轮组成的切割通道, 经刀片环切和主动轮滚压实现脱壳。为保证环切的有效割痕达到一圈以上, 取刀片刃口长度大于莲子的赤道长度 15% 左右。剥壳机构是莲子剥壳机的核心部件, 根据 4 种方案剥壳机构的试验对比结果, 悬挂式振动剥壳机构比较理想, 其特点是刃口可相对于压板作往复振动、形成滑切作用。假定莲子在压板上做单纯滚动, 其切割点正好是速度瞬心, 刀片相对于压板作往复振动时, 就相当于刀片对静态的莲子进行有支撑的往复滑切, 切割比较省力。莲子环切

效果与刀片滑切速度相关,滑切速度取决于刀片往复振动的频率和振幅。由于风扇电机驱动刀片往复振动的频率固定,因此滑切速度就取决于振幅。振幅过小滑切速度太低,环切效果差,剥壳率低;振幅过大则切割机构振动大,影响切割机构乃至整机的工作状况。本机取 8 mm 的振幅能够较好地满足要求。

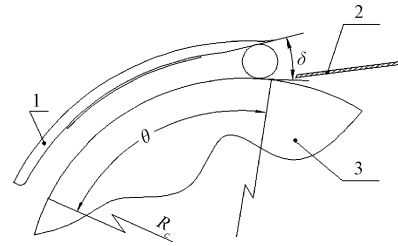


1.压板 2.左导轨 3、8、10.微型轴承 4.刀片 5.刀座 6.弹簧固定板 7、15.弹簧 9.右导轨 11.电机 12.U 形支架 13.电机固定板 14.偏心销轴
1.Pressing plate 2.Left guide rail 3,8,10.Miniature bearings 4.Blade 5.Blade holder 6.Spring fixing plate 7,15.Spring 9.Right guide rail 11.Motor 12.U-shaped bracket 13.Motor mounting plate 14.Eccentric pin

图 3 剥壳机构简图
Fig.3 Schematic of shelling device

电机与切割机构均安装在 U 形支架上, U 形支架的后端用销轴铰接于机架,并可绕销轴上下摆动。U 形支架前端下方焊有压板,左右肩部分别固定有弧形导轨。U 形支架靠近前端的左右两侧各有一个拉力弹簧与机架连接,以控制压板的压力。振动刀座左右肩部对应装有微型轴承与弧形导轨配合,刀座中线处开有一个长孔,长孔内的微型轴承的内孔套在由电机轴直接驱动的偏心销轴上,形成偏心滑块机构,刀座中部上方的凸耳通过螺钉挂在拉力弹簧上,弹簧另一端与焊合在 U 形支架上的弹簧固定板连接,则刀座由左右导轨和弹簧拉力获得定位。工作时电机通过偏心销轴驱动刀座沿弧形导轨左右摆动。刀座上固定有弧形刃口的刀片,刃口穿过压板之间长缝并凸出压板下表面适当高度(约 0.7 mm),由于弧形导轨的限位作用,在跟随压板上下运动时刃口凸出高度可保持改变,同时由于导轨弧线与压板弧线同圆心,刀片作往复弧线运动过程中刃口的凸出高度也始终保持不变。由于摆动中心与弧线圆心异侧,因此摆长在往复振动过程是变化的,由弹簧的伸缩来实现。

切割通道的大小取决于压板位置(如图 4),切割通道内无莲子时,由限位撑杆限制压板的静态开度,入口处开度及入口角 δ 的大小均对莲子粒径的适应性和喂入的可靠性产生影响。 δ 应小于莲子在入口处的最大滑动静摩擦角,否则莲子会在入口处反弹回去,特别是遇到大粒莲子时无法喂入而导致堵塞。所以适当大小的静态开度和入口角,可提高对不同粒径莲子的适应性。此外还可以对主动轮的轮槽和压板进行增大摩擦系数的处理,使其最大滑动静摩擦角增大,则入口角 δ 允许值增大,莲子粒径适应范围即可提高。



1.压板 2.滚槽 3.主动轮
1. Pressing plate 2. Chute 3. Driving wheel

注: R_c 为主动轮轮槽底部半径, m; δ 为入口角, ($^\circ$); θ 为弧形压板的圆心角, rad.
Note: R_c is the driving wheel groove bottom radius, m; δ is the inlet angle, ($^\circ$); θ is the central angle of the curved pressing plate, rad.

图 4 剥壳机构入口的莲子状态
Fig.4 Lotus seed state at inlet of shelling device

压板全长可分为入口引导段、刃口段和碾压段 3 个部分,其作用分别为引导喂入、环切外壳和碾压脱壳。为了防止刃口往复滑切时莲子与压板打滑,导致无法有效滑切,把压板下表面的入口引导段和刃口段加工成齿条状表面,以增加其摩擦力。

3 多种方案剥壳机构性能对比试验

共有 4 种方案进行对比试验,试验条件为:主动轮转速 100 r/min,压板弹性压力 35 N,同一样机刀片,每种剥壳方案试验 4 次,每次取 50 粒刚从莲蓬上剥下来的鲜莲子。4 种方案都是以上述 U 形支架为基本结构,不同之处如下:

方案 A:刀片与压板相对固定,莲子沿压板和刃口做纯滚动,受稳定的刃口压力滚切。

方案 B:在方案 A 基础上加一电机驱动的偏心块振动装置,以 10 Hz 的频率迫使整个切割机构随 U 形支架作上下微幅振动,压板与刀片固接无相对运动。

方案 C:悬挂式振动剥壳机构,刀片沿弧形切割通道相对于压板作往复运动,频率 8 Hz,压板表面为光滑的不锈钢板表面。

方案 D:在方案 C 基础上,压板下表面用线切割加工成齿条状以增大摩擦力,防止刃口往复滑切时莲子与压板打滑。

试验结果如表 2 所示,表中数据为 4 次试验平均值。方案 B 由于刀座振动产生波动切割,其压力的波动影响了连贯割破能力,因此不如方案 A 的剥壳率,并且对莲仁的压痕更明显(上下振动惯性力作用)。方案 C 由于压板摩擦力不够,在刃口往复振动过程莲子相对压板存在来回滑移,形成不完全支撑切割,使滑切作用减弱,剥壳率明显下降。方案 D 由于增加了压板的摩擦力,莲子与压板不打滑,能够有效夹持莲子,使压板接触点处(纯滚动的速度瞬心)莲子质点速度为 0,形成有支撑往复滑切,因此剥壳率高,是其中最有效的切割方案。

表 2 中数据为每次试验一次性加工的剥壳数。本机采用方案 D 设计,剥壳率为 92%,整仁率为 100%,达到设计指标。切割后莲壳与仁的分离另行处理,不在此赘述。

表 2 不同方案莲子剥壳试验结果

Table 2 Shelling results for different shelling methods

剥壳方案 Shelling methods	剥壳率均值 Average shelling rate/%	整仁率 Whole kernel rate/%	受伤程度 Injury degree	受伤率 Injury rate/%
方案 A Method A	87.5	94	较轻微压痕	<20
方案 B Method B	83	90	较明显压痕	<30
方案 C Method C	72.5	98	轻微压痕	<15
方案 D Method D	92	100	轻微压痕	<10

注：方案 A 为刀片与压板固定，方案 B 为刀片与压板固定且上下振动，方案 C 为刀片往复运动且压板表面光滑，方案 D 为刀片往复运动且压板表面防滑。

Notes: Method A: the cutting blade fixed with the pressing plate; Method B: the cutting blade fixed with the pressing plate but vibrated; Method C: the cutting blade reciprocated and the pressing plate had a smooth surface; Method D: the cutting blade reciprocated and the pressing plate surface was non-slip.

压板与刃口对莲子的压力是影响剥壳质量和剥壳率的重要因素。压力过大莲仁出现压痕，压力过小则剥壳率下降。莲仁出现压痕的原因之一是刃口太钝，切入之前壳受刃口挤压发生变形，其压应力透过外壳作用在仁上时，等效应变区域对称分布在切割线的两侧^[28]，应力超过仁表面的坚实度而产生压痕。其二是在碾压阶段，壳与仁分离过程中壳的切口边缘对仁挤压造成的压痕，试验表明当压板压力过大时莲仁会产生约 1~2 mm 宽的凹痕，故在碾压阶段接触表面加一层柔性材料对减轻压痕有一定的效果。剥壳质量和剥壳率是一对矛盾，因此要适当选取切割压力，压应力应小于莲仁单位面积承压能力（参见表 1）。对于往复振动的切割装置，由于刃口滑切作用，可适当降低刃口压力，以减轻莲仁的压痕，提高剥壳质量。莲子剥壳质量如图 5 所示。



图 5 莲子剥壳质量

Fig.5 Shelling quality of slight injury lotus seeds

4 结 论

1) 采用样机刀片测试莲子壳的切透力平均值为 19.63 N，最大值为 25.80 N。考虑到滚切时间短，实际切割压力取 28~35 N 为宜。刃口锋利时取小值，较钝时取大值。

2) 采用本设计内充式排料机构可以逐粒分离而不损伤莲子，并有正位作用，且结构简单，对不同粒径的鲜莲子有较好的适应性。

3) 采用悬挂式振动剥壳机构的设计，实现了刀片对莲子的往复滑切和刃口高度的限制，剥壳率达 92%，整仁率 100%，有轻微压痕的小于 10%。

4) 通过 4 种切割方案性能试验对比，刀片相对压板作弧线往复振动、且压板下表面有防滑条纹的悬挂式振动切割的剥壳机构剥壳率最高。

[参 考 文 献]

- [1] 郑宝东, 郑金贵, 曾绍校. 我国主要莲子品种营养成分的分析[J]. 营养学报, 2003, 25(2): 153—156.
Zheng Baodong, Zheng Jingui, Zeng Shaoxiao. Analysis of the nutritional composition in Chinese main lotus seed varieties[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2003, 25(2): 153—156. (in Chinese with English abstract)
- [2] 郑传祥. 莲子脱壳机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 106—108.
Zheng Chuanxiang. Experimental research of a lotus seed sheller[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 106—108. (in Chinese with English abstract)
- [3] 曹志强. 一种莲子剥壳脱皮一体机[P]. 中国: 201110241904.X, 2011-08-23.
- [4] 徐谐庆, 饶洪辉, 李涛, 等. 全自动莲子剥壳去皮机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 28—34.
Xu Xieqing, Rao Honghui, Li Tao, et al. Design and experiment on automatic husking and peeling machine for lotus seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(13): 28—34. (in Chinese with English abstract)
- [5] 黄兴元, 熊伟明, 京玉海, 等. 滚切式莲子剥壳机及其试验研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 139—142.
Huang Xingyuan, Xiong Weming, Jing Yuhai, et al. Design and experiment research of rolling-cut shears lotus seed shelling[J]. Food & Machinery, 2012, 28(4): 139—142. (in Chinese with English abstract)
- [6] 黄兴元, 熊伟明, 京玉海, 等. 滚切式莲子剥壳机设计[J]. 南昌大学学报: 工科版, 2012, 34(2): 172—175.
Huang Xingyuan, Xiong Weiming, Jing Yuhai, et al. Design of rolling-cut lotus seed sheller[J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology, 2012, 34(2): 172—175. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王旺平, 谈易腾. 新鲜莲子剥皮去衣机的研制[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 118—122.
Wang Wangping, Tan Yiteng. Design and development of a multifunctional peeler for fresh lotus seed[J]. Food & Machinery, 2014, 30(1): 118—122. (in Chinese with English abstract)
- [8] 吴传宇, 陈琼英, 张德晖. 挤压式莲子机械脱壳机理试验研究[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2009, 38(4): 436—438.
Wu Chuanyu, Chen Qiongying, Zhang Dehui. Mechanism of machinery-shelling of lotus seed by extrusion[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2009, 38(4): 436—438. (in Chinese with English abstract)
- [9] 赖明全. 全自动莲子切壳剥壳机[P]. 2922492, 2007-07-18.
- [10] 赖明全. 莲子脱衣装置及脱衣机[P]. 922493, 2007-07-18.

- [11] 谭小年. 挤振式莲子脱壳机[P]. 482808Y, 2002-03-27.
- [12] 余群, 易启伟. 鲜莲子自动化剥壳技术及设备[J]. 农机化研究, 2010(6): 140—141.
Yu Qun, Yi Qiwei. The automatic lotus seeds decladding technology and equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(6): 140—141. (in Chinese with English abstract)
- [13] 万伟红, 吴鹏辉, 苏志伟, 等. 莲子分级剥壳技术与设备研究进展[J]. 农机化研究, 2014(11): 42—45.
Wan Weihong, Wu Penghui, Su Zhiwei, et al. Investigation progress of process and equipment in lotus seed grading, shelling and dislodge core[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(11): 42—45. (in Chinese with English abstract)
- [14] 邹晓丹. 莲子剥壳机研究现状[J]. 机电技术, 2013(2): 158—160.
- [15] 张永林, 易启伟, 余群, 等. 多联辊刀式莲子剥壳机的结构与工作原理[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 76—79.
Zhang Yonglin, Yi Qiwei, Yu Qun, et al. Structure and working principle of de-huller with multiple cutter units for lotus seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 76—79. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杨振和. 多通道尖齿破壳莲子行星运动剥壳机[J]. 食品与机械, 2014, 30(4): 92—95.
Yang Zenghe. Multichannel edgetone blade breaking lotus seeds decladding machine with planetary motion[J]. Food & Machinery, 2014, 30(4): 92—95. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王旺平, 杜先锋, 周均生. BK25 型莲子剥壳机的研制[J]. 食品与机械, 2009, 25(2): 103—105.
Wang Wangping, Du Xianfeng, Zhou Junsheng. Design and development of model BK25 lotus seed De-huller[J]. Food & Machinery, 2009, 25(2): 103—105. (in Chinese with English abstract)
- [18] 马秋成, 赵扶民, 张惊, 等. 自适应莲子剥壳机[P]. 201410110652.0, 2011-08-23.
- [19] 马秋成, 卢安舸, 陈锴, 等. 莲子机械自动去芯自适应定心技术与样机试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 17—24.
Ma Qiucheng, Lu Ange, Chen Kai, et al. Study on self-adaptive centering method of removing core of lotus seed and prototype test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(21): 17—24. (in Chinese with English abstract)
- [20] Ojolo S J, Damisa O, Orisaleye J I, et al. Design and development of cashew nut shelling machine[J]. Journal of Engineering, Design and Technology, 2010, 8(2): 146—157.
- [21] Balsubramanian D. Design development and performance evaluation of radial arm type cashew nut sheller[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa, and Latin America, 2011, 42(2): 49—55.
- [22] Enis Cetin A, Tom C Pearson, Akin Sevimli R. System for removing shell pieces from hazelnut kernels using impact vibration analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 101: 11—16.
- [23] 朱亨银, 周文华, 何金成. 一种鲜莲子剥壳机及其控制方法[P]. 201510129584.7, 2016-09-05.
- [24] 刘木华, 吴彦红, 夏忠义. 莲子物理机械特性试验研究(1)[J]. 江西农业大学学报, 1999, 21(3): 425—427.
Liu Muhua, Wu Yanhong, Xia Zhongyi. Experimental studies (1) on physical and mechanical properties of lotus seed[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 1999, 21(3): 425—427. (in Chinese with English abstract)
- [25] 赵小广, 宗力, 谢丽娟. 干壳莲子物理参数试验研究[J]. 食品与机械, 2006, 22(2): 53—55.
Zhao Xiaoguang, Zong Li, Xie Lijuan. Testing and analyzing of physical parameters of dry white and red lotus seed[J]. Food & Machinery, 2006, 22(2): 53—55. (in Chinese with English abstract)
- [26] Xie Lijuan, Zong Li, Li Xiaoyu. Experimental study on mechanical properties of lotus seed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(7): 11—15.
- [27] 滕绍民, 王泽群, 李洋, 等. 切割方式与切割阻力的理论研究[J]. 农机化研究, 2009(5): 89—90.
Teng Shaomin, Wang Zequn, Li Yang, et al. The theory study of the cutting ways and cutting resistance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(5): 89—90. (in Chinese with English abstract)
- [28] 谢丽娟, 宗力. 莲子受力有限元分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 94—97.
Xie Lijuan, Zong Li. Analysis of finite element method for loaded lotus seed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 94—97. (in Chinese with English abstract)
- [29] Hassan-Beygi S R, Ghaebi S M, Arabhosseini A. Some physico-mechanical properties of apricot fruit, pit and kernel of ordubad variety[J]. Agricultural Engineering International: the CIGRE journal, 2009(6): 1—16.
- [30] Faruk Özgüven, Kubilay Vursavus. Some physical, mechanical and aerodynamic properties of pine (*Pinus pinea*) nuts[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 68: 191—196.
- [31] Gallegos R K B, Suministrado D C, Amongo R M C, et al. Some physical and mechanical properties of pili (*Canarium ovatum* Engl.cv. Katutubo) nut as a funtion of nut moisture content[J]. Phillipp Agric Scientist, 2013, 96(1): 66—74.

Design and test of small fresh lotus seed sheller

Zhu Hengyin, He Jincheng, Fang Wenxi, Ye Dapeng, Liang Shihua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Lotus seeds have been manually shelled mostly, because conventional shelling equipment is complexly structured and high pieced, and generally it has a high operating cost and a low reliability, as well as is difficult to be popularized. In this study, a new lotus seed sheller with simple structure and easy operation was developed to improve the reliability, to popularize the shelling mechanization of fresh lotus seed, and to reduce the burden of the farmers. When the newly designed sheller is running, the lotus seeds in the hopper fall into the evenly distributed grooves of the discharge wheel and are discharged singly into the feeding chute. As rolling down from the chute under the action of gravity, the lotus seeds are then normally positioned and fed into the cutting channel at a position where the long axis of the seed is perpendicular to the cutting edge. An annulus cut is made at the equator of the seed with the use of a reciprocating cutting blade. Thereafter, the shell and the kernel of each seed are separated by rubbing the seed surface with the pressing plate and discharged. The cutting device is the primary working device in lotus seed shelling. A comparison study on the effects of shelling methods was conducted. The 4 shelling methods used were: 1) The cutting blade was fixed with the pressing plate; 2) The cutting blade was fixed with the pressing plate but vibrated; 3) The cutting blade reciprocated and the pressing plate had a smooth surface; 4) The cutting blade reciprocated and the pressing plate surface was non-slip. The testing results indicated that the shelling method using a reciprocating cutting blade and a non-slip pressing plate was superior to the others in both shelling rate and shelling quality, which resulted in a shelling rate of 92%, a whole kernel rate of 100%, and a percentage of kernels with slight injury of less than 10%. The shelling method with reciprocating cutting blade and non-slip pressing plate could meet the shelling requirements of fresh lotus seeds with an equatorial diameter ranging from 14 to 23 mm. In order to get a better understanding of the factors closely related to the lotus seed processing quality, the mechanical properties of fresh lotus seed were measured using a universal testing machine (Model 5543, INSTRON, United States of America) in College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, China. The test head moved at a speed of 20 mm/min and stopped when the pressing force dropped by 15%. The samples of 100 seeds from the variety TAIKONG36 were randomly selected and numbered. The cutting force was tested firstly using the prototype blade. Then the same samples were shelled and subjected to the kernel firmness measurement using a 2.2 mm test head. The kernel firmness of each seed was measured right after shelling to minimize the effect of seed moisture loss. The results showed that the average cutting force of the shell was 19.63 N with a maximum value of 25.80 N. The average kernel firmness was 19.02 N with a maximum value of 23.27 N. The average kernel firmness per unit area was 5.00 N/mm² with a maximum value of 6.12 N/mm². Accordingly, the structure parameters and working parameters of the sheller were determined.

Keywords: peeling; design; mechanization; lotus seed; mechanical properties