

陆荣, 刘志侠, 高连兴, 等. 美国花生脱壳机研究现状及发展分析[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(2): 170-180.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.02.021

美国花生脱壳机研究现状及发展分析

陆荣^{1,2}, 刘志侠¹, 高连兴¹, CHEN Charles³, BUTTS Christopher Lloyd⁴

1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866; 2. 辽宁生态工程职业学院, 沈阳 110122;

3. 奥本大学农学院, 奥本 AL 36849; 4. 美国农业部农业研究局国家花生研究实验室, 道森 GA 31742

摘要 脱壳是花生利用前必经环节, 脱壳机是花生产后加工的核心设备, 在很大程度上决定了花生的果仁质量和脱壳效率。中国虽然花生产量位居世界第一, 且花生脱壳机得到广泛应用, 但花生脱壳技术远不及美国, 严重制约花生产后加工业的发展。为借鉴美国花生脱壳技术及发展经验, 在实地考察基础上, 运用社会调查法、文献研究法和经验总结等方法, 本文分析了美国花生脱壳机的发展历史、最新进展和技术衍变过程, 剖析了美国现代花生脱壳机的脱壳原理、总体构成、脱壳部件结构型式和特点, 总结了美国花生脱壳技术研究的基本方法和成功经验。结果显示, 美国花生脱壳机研究密切结合生产需要, 起步早且不断创新; 多滚筒大型脱壳机既可用于榨油和食品加工的花生脱壳, 也可用于种子花生脱壳, 各滚筒之间独立驱动, 转速 200~300 r/min; 脱壳机构由带有刮板的脱壳打杆和钢制栅片凹板筛构成, 对花生荚果进行刮搓脱壳; 复式清选装置首先进行气吸除壳、然后进行筛选和二次气吸清选。美国花生脱壳机技术是机械与农艺等多方面融合研究的结果, 对中国花生脱壳技术研究及进展具有重要借鉴意义。

关键词 花生; 花生脱壳机; 产后加工; 手动脱壳; 机械脱壳; 关键部件; 脱壳质量; 脱壳效率

中图分类号 S 565.2; S 226.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2020)02-0170-11

花生是重要油料作物之一。由于其生物学性状独特, 田间花生只能收获荚果, 脱壳后的果仁方可用于榨油、食品加工和种用。目前, 代替手工剥壳的花生脱壳机在中国普遍应用, 但脱壳机在脱壳过程中产生的果仁破碎、两瓣、缺损、破皮和内部损伤等问题比较严重。花生果仁损伤不仅导致售价降低, 也容易引起污染、霉变和黄曲霉毒素侵染等不良后果, 造成花生食用安全问题, 进而影响花生及其制品的国际竞争力和花生食品加工业的发展。内部损伤的种子因衣皮完好而难以发现和剔除, 对花生再生产构成严重的潜在危害^[1-4]。

中国是世界花生生产大国, 2018 年花生产量达 1.7×10^7 t, 占世界花生总产量的 40.70%, 位居世界第一, 约为同期美国产量的 6.9 倍。中国用于榨油的花生占总产量的 50.3% 以上, 用于食品加工仅占总产量的 15%, 以果仁为主的花生及其制品出口量为 6.85×10^5 t, 仅为美国的 1.2 倍。美国花生主要用于食品加工, 占花生产量 58.5% 以上, 仅有 12%

用于榨油^[5-8]。综合分析中美两国花生食品加工和出口差异, 花生果仁质量差异是主要原因之一, 而花生脱壳机技术则是影响果仁质量的关键。脱壳作为花生产后加工的关键环节, 是花生产业化及其技术水平的重要标志, 更是花生食品安全的重要保障。

美国花生脱壳机发展已有百年历史。20 世纪初就发明了手动花生脱壳装置^[9-12], 经过系统研究与实践, 已在花生脱壳原理、整机与关键部件、脱壳影响因素等多方面获得突破^[13-14]。20 世纪 40 年代后期, 随着花生脱壳技术不断发展和广泛应用, 研究人员发现花生脱壳质量、脱壳效率和使用经济性, 不仅仅取决于脱壳机自身的结构原理, 也与脱壳性能指标权重的选择、花生的物料特性、脱壳部件参数合理的选择等有关。为解决上述问题, 从 20 世纪 50 年代初至 70 年代末, 美国花生产地所在公立大学农学院、美国花生研究实验室及农业相关研究单位, 进行了系统深入和大量持久的研究与实践, 取得了一系列突破性的基础和应用性研究成果, 对当时花生

收稿日期: 2019-07-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0702102); 国家自然科学基金项目(51575367; 50775151)

陆荣, 博士, 讲师. 研究方向: 农产品收获与加工机械. E-mail: lurong1025@126.com

通信作者: 高连兴, 教授. 研究方向: 农产品收获与加工机械. E-mail: lianxing_gao@126.com

脱壳机研究和应用发挥了关键的基础作用^[15-17]。美国花生脱壳技术一直处于世界领先水平,研究美国花生脱壳机应用现状、技术特点和发展历程,对我国花生脱壳技术发展有重要借鉴意义。

1 花生脱壳及脱壳机早期发展

1.1 花生脱壳基本概况

脱壳是使花生外壳碎裂并分离出花生果仁的操作过程。美国的花生脱壳有 2 种分类方式:按花生脱壳加工目的不同,分为商用花生脱壳(commercial peanut shelling)和专用花生脱壳(special peanut shelling);按脱壳后花生果仁用途不同,分为榨油用花生脱壳(shelling peanut for oil processing)、种用花生脱壳(shellingpeanut for seeds)、食品加工用花生脱壳(shelling peanut for edible markets)、检验用花生脱壳(shelling peanut samples for inspec-

tion)和科研用花生脱壳(shelling peanut sample for researches)(表 1)^[18-21]。商用花生脱壳是一种生产行为,包括榨油用、种用、食品加工用和出口花生果仁用,花生脱壳加工量约占美国花生产量的 95%以上^[22-24]。因花生脱壳加工量大,特别是种用花生脱壳季节非常集中,需要高效率的大型脱壳机(commercial peanut sheller)。专用花生脱壳也称样本花生脱壳,是指花生检验或科研等特殊需要花生脱壳,一般脱壳量不大,但通常有特殊要求,如花生科研涉及的花生品种或处理多、样本多和批次多,每次脱壳物料不能混杂,脱壳后要求快速方便地清种,需要具有特殊功能的小型专用花生脱壳机(sample peanut sheller)。美国商用花生脱壳机也称为通用型脱壳机(简称花生脱壳机),通过选择不同规格的脱壳部件,既可用于榨油花生、也可用于种用和食品加工用花生脱壳。

表 1 美国花生脱壳及脱壳机的分类

Table 1 Main types of peanut shelling and shellers in USA

花生脱壳分类 Peanut shelling types		主要特点与要求 Requirements and features	脱壳机类型 Types of shellers
商用花生脱壳	榨油用花生脱壳	用于榨油的花生脱壳量约占 12%,果仁质量要求不高,一般与食品加工、种用花生脱壳结合起来进行,质量不高的果仁用于榨油,采用大型商用花生脱壳加工设备	通用型花生脱壳机
	种用花生脱壳	种用花生的脱壳量约占 10%,要求损伤率低、进行分级并提出特大粒形果仁,以满足精量播种,需要进行种子包衣处理,保证种子发芽率。播种前集中脱壳,采用大型商用花生脱壳加工设备	
	加工用花生脱壳	用于食品加工的脱壳量约占花生 56%~57%,果仁作食品加工原料质量要求非常严格,规定进行黄曲霉含量检测,脱壳厂全年均衡脱壳加工和供应,采用大型商用脱壳加工设备	专用型花生脱壳机
专用花生脱壳	检验用花生脱壳	主要用于收购过程的花生质量检验,脱壳抽取的花生样本,每次花生脱壳量不大,一般分几个级别同时脱壳,要求果仁损伤少,操作方便,通常与小型分级、清选等设备配套使用。	
	科研用花生脱壳	主要用于花生科研试验中的小区脱壳和脱壳厂脱壳研究用,每次脱壳量不大但小区处理、品种多等批次多,要求损伤小且便于清种避免混杂,一般分级后进行多级脱壳。	

美国商用花生脱壳加工在专门的花生脱壳厂(peanut shelling plant)集中进行,主要包括脱壳前花生荚果处理和脱壳后花生果仁处理、黄曲霉抽检(用于食品加工果仁)和计量包装等环节。因果仁是花生食品加工的主要原材料,美国联邦政府将花生脱壳加工确定为产生物理危害、影响花生食品安全的关键环节^[25-28],对花生脱壳加工质量提出了更高要求。特别在 2013 年美国花生酱的沙门氏菌暴发以来,美国联邦政府规定,所有花生脱壳加工产业必须严格实行全球食品认证制度(global food safety Initiative certification)^[29-32],花生脱壳厂每年进行 1

次食品安全评估。

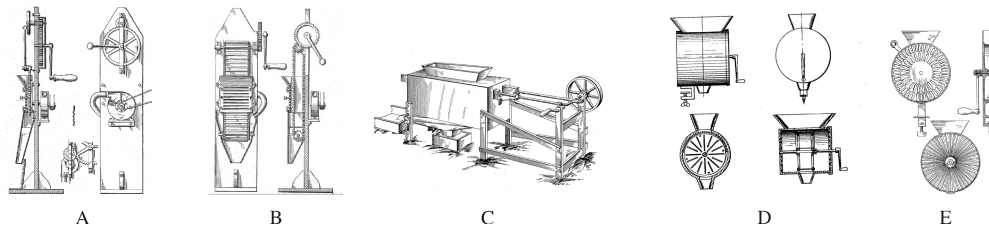
1.2 早期花生脱壳机的发明

美国花生脱壳机研究与应用远早于花生收获机械。从 20 世纪初期开始,随着人们逐渐认识花生食用价值和控制棉花病虫害的轮作效果,花生种植面积迅速扩大,人工进行花生脱壳劳动强度大、效率低,逐渐成为花生发展的瓶颈问题。然而,当时拖拉机等农业动力尚未应用,且花生脱壳所需动力不大,人力花生脱壳机应运而生。最早的人力花生脱壳机是 1907 年弗吉尼亚州的 Raby M. Emmett 发明的直立移动式手摇花生脱壳机^[9],分往复移动式

(图 1A)和直线移动式(图 1B)2 种类型,通过往复或直线运动的脱壳栅和固定冲孔筛的相对运动,使花生荚果受到挤搓和摩擦而脱壳。截至到 20 世纪 20 年代末,人力花生脱壳机发明达 10 项以上^[9-12],其典型结构原理如图 1 所示。

美国早期的人力式花生脱壳机有多种类型,按脱壳部件布置方式不同,花生脱壳机分为立式和卧式;按脱壳部件相对运动规律分为往复移动(图 1A 和图 1C)、单向移动(图 1B)和回转式(图 1D 和图

1E);按脱壳部件主要结构分为平面式(筛式、栅板)、转盘式(突爪盘、波纹盘和棱盘等)和滚筒式(开式和闭式);按脱壳凹板筛结构型式分为冲孔筛(圆孔、长孔)式、栅条筛式和编织筛式。虽然人力花生脱壳机一般没有清选功能,脱壳质量不高、效率有限,但其结构简单、操作简便、质量轻、价格便宜,脱壳效率可达手工的 10 倍以上,因而得以广泛使用,实现了花生脱壳的历史性变革,各种脱壳机结构和原理也为后来的花生脱壳机发展奠定了重要基础。



A.直立往复花生脱壳机 Vertical reciprocating peanut sheller; B.直立平移式花生脱壳机 Vertical translational peanut sheller; C.往复卧式花生脱壳机 Horizontal reciprocating peanut sheller; D.卧式滚筒脱壳机 Horizontal peanut sheller with rotary roller; E.直立转盘式花生脱壳机 Vertical peanut sheller with rotary plate.

图 1 美国早期人力花生脱壳机典型结构原理

Fig.1 Structure principles of the typical manual peanut shellers in the past in USA

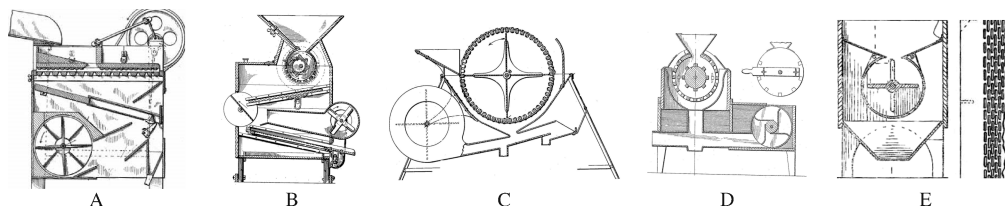
随着拖拉机和电动机等农用动力的逐渐应用,美国花生种植面积和产量进一步增加,受体力和运动速度限制的人力花生脱壳机已不能满足美国大规模花生生产需要,各种动力式花生脱壳机(简称:花生脱壳机)开始发明和应用(图 2)。脱壳部件运动方式有往复式(图 2A)和旋转式(图 2B~E),脱壳滚筒结构有闭式(图 2B~D)和开式(图 2E),清选原理有风筛式(图 2A、图 2B)和气力式(图 2C、图 2D),凹板筛普遍采用窄长孔栅格筛。

美国早期动力式花生脱壳机的显著特点:均为卧式,具有一定清选功能;除少数采用往复式外,多数为回转式;脱壳滚筒有闭式齿滚式和开式打杆式

2 种,凹板筛为长孔冲孔筛或栅格筛;多数采用风筛组合式清选原理。

1.3 早期花生脱壳机的应用

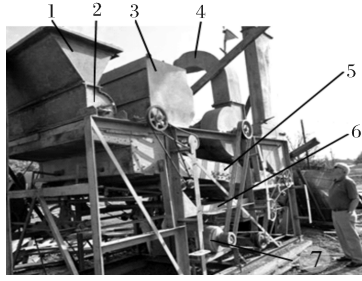
1945 年,美国花生种植面积达到 1.64×10^6 hm^2 (相当于 1910 年 2.42×10^5 hm^2 的 6.8 倍和 2018 年 5.54×10^5 hm^2 的 2.96 倍),产量 9.26×10^5 t^[5-7]。每个农场种植花生规模大、脱壳作业集中,花生脱壳机开始向大型高效方向发展,逐步出现了带有上料装置、双滚筒循环脱壳(气力式或机械输送)的大型脱壳机(图 3),典型的花生脱壳机如图 4 所示,由美国著名的机械制造公司 Lewis M. Carter Manufacturing Company (LMC)制造^[33]。



A.水平往复花生脱壳机 Horizontal reciprocating peanut sheller; B.风筛清选式花生脱壳机 Peanut sheller with wind and screen cleaning; C.闭式齿滚花生脱壳机 Solid type peanut sheller with dentiform roller; D.栅格凹板筛脱壳机 Peanut sheller with grid screen; E.开式滚筒花生脱壳机 Open type peanut sheller with roller.

图 2 美国早期动力式花生脱壳机典型结构原理

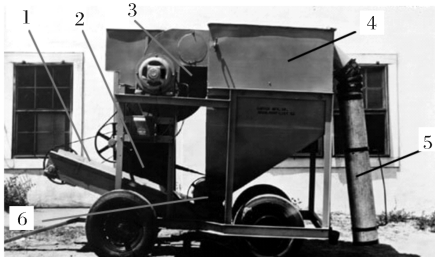
Fig.2 Structure principles of typical mobile peanut shellers in the past in the USA



1.喂料斗 Surge hopper; 2.一次脱壳装置 First sheller; 3.集料仓 Aggregate bin; 4.输送管 Delivery pipe; 5.一级振动筛 First vibrating screen; 6.二级振动筛 Second vibrating screen; 7.电机 Motor.

图3 美国20世纪50年代花生脱壳机

Fig.3 American peanut sheller in 1950s



1.清选筛 Screen; 2.吸风口 Suction outlet; 3.风机 Fan; 4.喂料斗 Surge hopper; 5.排杂管 Trash pipe; 6.脱壳滚筒 Shelling roller.

图4 LMC在20世纪50年代制造的花生脱壳机

Fig.4 LMC peanut sheller in 1950s

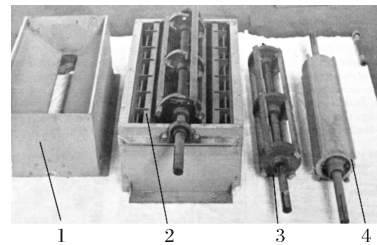
20世纪60年代,随着大中型花生脱壳机的广泛应用,花生种植相对集中的佐治亚州和亚拉巴马州等地区农场为解决自产花生储藏和脱壳加工问题,陆续投资兴建花生储藏设施和脱壳厂,大、中、小3种类型花生脱壳厂的年脱壳能力分别达到15 000、8 000、2 000 t,最大脱壳效率分别为12、8、4 t/h,而花生脱壳机单机最大脱壳效率达4 t/h,花生脱壳质量和效率显著提高^[34-37]。随着花生脱壳厂规模逐步扩大,20世纪70年代出现了脱壳效率为10 t/h的花生脱壳机^[38-39]。

2 现代花生脱壳机研究进展

2.1 花生脱壳原理及其关键部件

脱壳原理是指脱壳过程中花生所受主要作用力的性质和作用方式,其通过脱壳机构的相对运动部件实现。脱壳原理很大程度上决定了花生脱壳质量和效率。美国经过长期试验研究和大量花生脱壳实践,于20世纪80年代初期,最终确定了“刮搓脱壳”原理及相应的脱壳机构基本类型(图5),即主要由

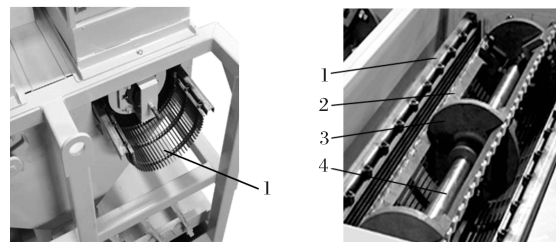
开式或闭式打杆滚筒和栅格式凹板筛构成脱壳构型。脱壳滚筒由4个打杆构成,外端直径25.4~27.9 cm,滚筒转速160~300 r/min;凹板筛为长栅格式,内径为30.5~35.6 cm、包角180°~270°;喂料槽与脱壳滚筒等长,底部有窄长喂入口,可控制脱壳喂入量及其轴向分布。采用气吸和振动筛组合清选方式将花生碎壳和果仁分离,花生壳被流速为5.08~7.62 m/s的气流吸出^[36]。脱壳装置工作时,随滚筒转动的脱壳打杆与栅格凹板筛相对运动,对花生荚果形成刮、剪、搓和摩擦等机械作用,花生外壳逐渐开裂、破碎,花生果仁离开果壳并随之一起通过凹板筛间隙而离开脱壳室,花生壳等被联通到凹板筛下方的负压空气系统吸走,果仁及未脱壳荚果落入清选筛。随着花生脱壳机刮搓脱壳原理的开发应用,LMC公司进行了多种型式打杆滚筒(矩形、方形、“T”打杆和铸铁滚筒)和脱壳凹板筛(冲孔钢板筛、铸铁栅格筛、圆钢筋栅条筛等)对比试验,最终选择了由3个标准热处理矩形钢且外端焊有刮板的“T”打杆构成脱壳滚筒,凹板筛则统一改进为栅条式(图6)。改进后的花生脱壳机构增强了脱壳的刮、搓和摩擦作用,提高了花生脱壳效率和质量^[40]。



1.喂料斗 Surge hopper; 2.凹板筛 Screen; 3.开式滚筒 Open-type cylinder; 4.闭式滚筒 Solid-type cylinder.

图5 20世纪80年代花生脱壳机构

Fig.5 Peanut shelling mechanism in 1980s



1.凹板筛 Screen; 2.波纹刃打杆 Bar with curved edge; 3.滚筒连接盘 Cylinder bracket; 4.滚筒轴 Axle.

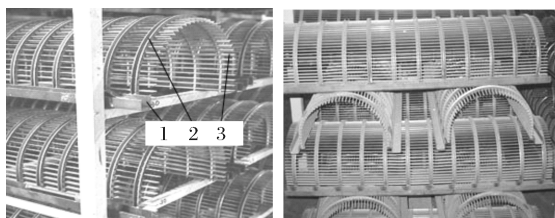
图6 美国LMC最新花生脱壳机构

Fig.6 LMC peanut shelling mechanism

2.2 花生脱壳关键部件研究

花生脱壳机构由脱壳滚筒和凹板筛构成,两者均为花生脱壳机的关键部件,既要使花生果壳破碎,又要保证花生壳和果仁尽快分离出去,对花生脱壳损伤和脱壳效率影响至关重要。

1)最新结构的脱壳凹板筛。美国 LMC 公司针对美国目前花生主要品种,根据荚果大小分布和脱壳用途等情况,通过对比试验,最终研制出一种组合式栅条凹板筛(图 7)。凹板筛栅隙变化范围为 5.6~12.7 mm,在该栅隙范围内,加工成至少 9~12 种栅隙规格的系列凹板筛以供选用^[41],其提高了筛面利用系数,进一步增强了刮、搓等机械作用,脱壳效率和质量均有显著提高。

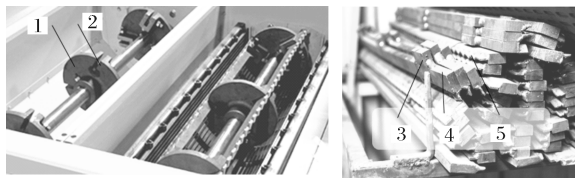


1.筛框 Screen frame; 2.筛箍 Screen hoop; 3.筛条 Screen sheet.

图 7 薄钢片栅格凹板筛

Fig.7 Peanut shellergrate screen with thin steel sheet

2)新型三打杆脱壳滚筒。脱壳滚筒是脱壳机构的主动部件,通过打杆使脱壳间隙中的花生荚果受到刮、剪和摩擦等作用而果壳碎裂。最新脱壳滚筒及其打杆如图 8 所示,由滚筒端部和中间法兰板、滚筒轴等固联而成。目前,LMC 脱壳机已将打杆外端的直刃刮板改进为波纹刃刮板,因波纹刃对花生荚果具有一定滑切刮削作用,使打杆的刮削、剪切和磨削性能增强,同时进一步提高了刮削能力和刮板强度。



1.滚筒盘 Plate; 2.定位槽 Slot; 3.打杆凸耳 Ridge of the rods; 4.刮板打杆 Rod; 5.打杆波纹刃 Rippled edge of the rod.

图 8 三打杆的脱壳滚筒及波纹刃刮板打杆

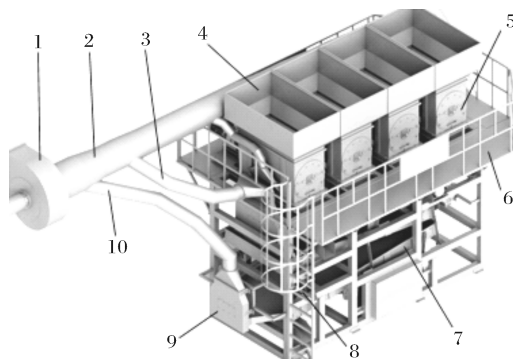
Fig.8 Shelling cylinder with 3 rods and the rods with rippled edge

3)低的脱壳滚筒转速。滚筒转速对脱壳质量影响很大,为减小打杆对花生荚果的冲击力,LMC 通过增大钢制打杆质量方式以增大滚筒的转动惯量,同时将转速降低至 160~200 r/min,以保证脱壳速度稳定、负荷均匀。转速降低后可使喂入脱壳间隙的花生荚果沿纵向均匀分布,实现“薄层”脱壳。LMC 大型花生脱壳机脱壳滚筒有效长度已增加至 1.2~1.5 m、滚筒外径一般为 36~40 cm,滚筒转速一般为 260~300 r/min,脱壳机配备回转半径具有细微差异的脱壳打杆和微小栅隙变化的栅格凹板筛系列,可根据花生品种及荚果厚度分布进行精准组配。

4)花生脱壳间隙。根据花生品种和荚果外形尺寸分布情况,美国商用花生脱壳机的脱壳间隙一般为 1.90~3.49 cm,脱壳间隙随凹板筛栅隙不同而进行相应地调整,主要通过更换打杆实现脱壳间隙的调整。

2.3 花生脱壳机整体结构

目前,美国商用花生脱壳主要应用 4~5 个滚筒大型脱壳机(图 9、图 10)。从理论上讲,每个滚筒均可配备不同规格的打杆、凹板筛及其脱壳间隙,从而实现花生分级脱壳,但因美国花生荚果均齐度很高,一般可分 2~3 级且中间级别的花生荚果数量最大,因此,通常由几个滚筒同时进行同一中间级别的花生荚果脱壳,而一级(特大)和三级(特小)尺寸荚果脱壳各仅需 1 个滚筒^[41-44]。



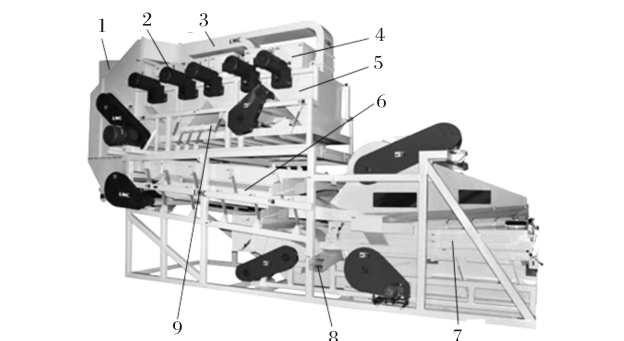
1.风机 Fan; 2.主风管 Main pipe; 3.上筛吸风管 Pipe for upper screens; 4.喂料槽 Surge hopper; 5.脱壳装置 Shelling device; 6.维护平台 Maintenance platform; 7.下筛 Lower screen; 8.人行梯 Step ladder; 9.下吸风口 Lower suction outlet; 10.下筛吸风管 Pipe for lower screens.

图 9 四滚筒花生脱壳机

Fig.9 Four cylinder sheller

美国商用花生脱壳机除具有整机大型化、可实现循环分级或并列同级脱壳等特点外,还在滚筒驱动与传动、清洗等方面具有独特结构。

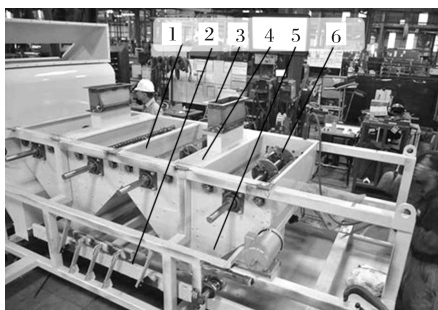
1)多滚筒及独立驱动结构。多滚筒花生脱壳机的每个滚筒均单独配置驱动电机和减速器(图10),这种滚筒独立驱动方式既简化了整机结构,又节省了传动功率损失,也可根据需要进行每个滚筒的独立运行。花生脱壳机的多个滚筒水平排列,每个滚筒相当于1个独立的脱壳装置,均由脱壳滚筒、凹板筛、脱壳室隔壁、吸风口、吸风室、出料槽和喂料槽等构成(图11)。



1.旋风分离器 Cyclone separators; 2.电机及减速器 Power units; 3.吸风管 Suction pipe; 4.喂料槽 Surge hopper; 5.脱壳装置 Shelling device; 6.下筛 Lower screen; 7.比重分选装置 Gravity table; 8.排杂口 Outlet for hulls and skins; 9.上筛 Upper screens.

图10 五滚筒花生脱壳机

Fig.10 Five cylinder sheller



1.隔板 Clapboard; 2.振动筛 Vibrating screen; 3.吸气口 Suction outlet; 4.吸风室 Suction bin; 5.出料槽 Discharge chute; 6.滚筒 Cylinder.

图11 多滚筒的脱壳机构

Fig.11 Shelling device with multi-drum

2)分置式气吸清壳结构。为了减轻大型花生脱壳机整机集中清选负荷,采用了分置气吸清壳结构(图12),即每个凹板筛下方对应设有1个端部封闭的出料槽,出料槽与脱壳室隔壁构成吸气室,吸气室

上部连接吸气管、下部是出料槽的窄长出料口。当花生脱出物(花生壳、果仁和未脱花生荚果)透过凹板筛时,花生壳及轻杂质即被吸入气吸系统,花生果仁从出料口落到清选筛,达到初次清选目的。为了简化结构,每个滚筒对应的出料口非对称设置,相邻出料槽合为一体形成共用的吸气室。



1.吸气管 Suction pipe; 2.喂料管 Surge pipe; 3.喂料槽 Surge hopper; 4.吸风室 Suction bin; 5.滚筒轴 Cylinder rod; 6.出料槽 Discharge chute.

图12 多滚筒分置的吸壳结构

Fig.12 Multi-drum separation suction shell structure

3)复式清选方式。多滚筒花生脱壳机一般采用3级复式清选原理:每个独立脱壳滚筒的脱出物首先进行分置气吸清壳,即一次清选;一次清壳后的花生果仁汇集到整机风筛式清选装置,进行二次清选;二次清选后的果仁进入密度分选或分上筛和下筛进行清选(图10)。复式清选既减轻了整体清选负荷、使系统简化,又可提高清选效果。

3 花生脱壳综合影响因素研究

3.1 花生物料特性对脱壳性能的影响

花生物料特性主要包括花生类型与品种、花生荚果与果仁及花生壳的物理机械特性、花生干燥速度、脱壳时的湿度和温度、荚果均匀性与含杂状况等。美国研究人员经过长时间实际调查和试验研究发现,花生自身物理性质、干燥处理、花生含水率和温度等,对花生脱壳损伤和效率均存在不同程度的影响;每个品种的花生都有其自己特有的脱壳特性,如有些品种花生果仁的子叶更容易开裂、红衣更容易破损;花生的起收日期、捡拾摘果日期、收获方式和田间花生条铺朝向等对花生脱壳损伤有影响;第一次脱壳未脱花生荚果进行第二次脱壳时的损伤增加情况^[42]。

1)花生荚果与果仁形状的影响。研究结果表

明,花生荚果与果仁厚度(荚果外形最大直径处)差别越大,花生脱壳效率越高、损伤率越低;合适的脱壳间隙和凹板筛栅隙(孔隙)应该使绝大部分的大尺寸花生荚果脱壳、花生果仁分离出来。在研究基础上建立了主要花生品种(包括 Florunner、Florigaint 和 Tamnut 等)的花生荚果外形、厚度、单个荚果果仁数和果仁类型与厚度等数据库,分析了花生荚果和果仁的几何分布规律^[41-42]。根据这些研究成果,每种育成的花生新品种投放生产之前,美国农业部均进行一系列的物理机械性状评价;美国花生研究实验室对所有品种的花生荚果和果仁几何分布情况进行详细评价,每年将评价结果向社会发布。

2)花生果形及饱满程度对脱壳性能的影响。研究表明^[43-44],单粒型花生荚果比双粒和三粒型的强度大,脱壳难度也相应增大;单粒型、锥形、未成熟和中间断裂成单粒的花生荚果,不但脱壳难度较大而且分离效率较低。难以脱壳的花生荚果容易卡在筛孔或筛缝中,或者混入分离后的花生果仁中;花生荚果成熟度、饱满程度(饱满度)、果壳的厚度、果仁大小和形状等均影响花生脱壳效率和损伤率。一般情况下,花生越饱满、果仁越大和果皮越薄,花生脱壳效率越高但容易出现脱壳损伤。相反,花生果仁与果壳之间的一定空隙以及厚果壳具有一定缓冲弹性使脱壳更加容易,脱壳损伤率下降。这些研究为合理设计花生脱壳机构,特别凹板筛类型与作业参数以及制定脱壳质量指标提供了重要依据。

3)花生温度对脱壳性能的影响。当花生荚果温度分别为 2、18℃时,前者花生脱壳损伤高于后者;2~18℃温度的高低与脱壳损伤正好相反,即花生荚果温度越高脱壳损伤越小^[45]。花生荚果温度为 2℃时脱壳的冲击损伤率总体高于 18℃,其影响机理在于花生果仁和果壳低温时变得更脆^[46]。

4)含水率及人工增湿对花生脱壳损伤的影响。有关花生含水率、收获情况和干燥参数对脱壳损伤的影响研究结果表明,当花生果仁含水率低于 7%(湿基)时,脱壳损伤与损失开始严重,而当花生果仁含水率高于 7%(湿基)时,花生在收获和运输等环节所受的冲击程度、干燥速度快慢,对花生脱壳损伤有不同的影响:冲击越大、干燥越快,花生损伤率有一定增大趋势,正常干燥的花生荚果脱壳损伤率最低^[47-50]。研究人员还进行了人工增湿的花生脱壳试验,虽未取得预期研究结果,但探明了人工增湿对花

生脱壳损伤的影响,即增湿后脱壳的花生果仁开裂有所减少,但果仁脱皮率增加;增湿加速了细菌的生长与繁殖,容易引起黄曲霉污染;最好方法是减轻机械收获对花生荚果的冲击,防止快速干燥并控制储藏过程中花生含水率,避免花生含水率过低^[51-54]。

3.2 脱壳机构结构参数对脱壳性能的影响

1)凹板筛对脱壳性能的影响。研究结果表明,在最大完整果仁能通过凹板筛栅隙的情况下,当凹板筛包角和有效面积在一定范围内变化时,果仁损伤率影响范围为 0~1.4%,但对花生脱壳效率影响达到 11%~25%^[55]。因此,提高脱壳效率必须保证足够的凹板筛面积。凹板筛栅隙对花生脱壳影响极其显著,栅隙越窄脱壳效率越高,但果仁损伤率也会增加。因此,通常情况下设计和选择凹板筛时,凹板筛栅隙比大部分花生荚果厚度(荚果外径)小 0.8 mm。相比正常脱壳间隙,脱壳间隙每减小 0.32~0.95 cm,脱壳效率增加 1%~6%,但果仁损伤率增加 2.5%~11.2%^[55]。经热处理的长孔(长槽)冲孔钢板筛或薄钢板栅格筛(钢板宽 3.81 cm,厚 0.64 cm),筛面包角大于 180°脱壳凹板筛,筛面利用系数大于 50%;根据外形尺寸将花生分为大、中、小 3 类品种,再将每类品种花生至少分 3 个级别,因此,适应所有花生脱壳的凹板筛至少需要 9 种栅隙规格^[53-54]。

2)脱壳滚筒结构及转速对脱壳性能的影响。研究表明^[56-59],脱壳滚筒转速与脱壳质量之间总体上显著相关,相关性介于线性关系和二次方关系之间。脱壳滚筒转速为 190~300 r/min 时,转速每增加 1 r/min 时,脱壳效率增加 0.1%,而脱壳损伤率增加 0.14%;脱壳性能不仅受滚筒、凹板筛和喂入斗结构参数、滚筒转速等单因素影响,也受这些因素之间交互作用影响。有关开式滚筒和闭式滚筒的对比研究^[57-59]表明,在同样条件下,闭式滚筒比开式滚筒脱壳率平均提高 8%,但果仁损伤率也相应增大 0.23%;以三打杆开式滚筒为对象的喂入量试验表明,通过增加喂入口宽度而增大花生喂入量,其宽度平均每增加 1 cm,果仁开裂等损伤增加 1.7%、脱壳效率降低 0.3%。研究建议采用开式脱壳滚筒,3 个经过热处理的宽 3.81 cm,厚为 2.54 cm 矩形钢制打杆,可拆卸以便于更换和修复。

3)脱壳间隙对脱壳性能的影响。为保证更好地适应大、中、小 3 类花生品种、9 个级别的花生脱壳,

除凹板筛外,需要保证合适的脱壳间隙,即通过调整脱壳滚筒外径实现相应的9种花生脱壳间隙。

3.3 脱壳部件材质对脱壳性能的影响

为探明脱壳部件材质对脱壳性能的影响,研究人员将传统的标准热处理钢与几种典型材料加工成脱壳打杆和凹板筛进行对比,其中典型材料包括聚氨酯、高密度聚合物、碳化钨、镍合金和铬合金等^[55-56]。试验结果表明,试验材料与标准热处理钢制成的脱壳部件,在花生脱壳性能方面没有显著差异,但在使用性能上存在显著差异:(1)标准热处理钢不但比聚氨酯、高密度聚合物具有更好的摩擦阻力,而且更容易通过磨削加工等恢复到原始工作状态;碳化钨、铬合金和钼合金钢等材料制成的部件,虽然比标准热处理钢更耐磨,但不易通过磨削方式加以修复。(2)钢板冲孔凹板筛表面容易很快磨损且不容易修复,因而在花生实际脱壳生产中不受欢迎,建议采用可拆卸的组合式钢板栅筛作为凹板筛。(3)标准热处理钢的脱壳打杆和可拆卸的组合式钢板栅筛,不仅耐磨耐用,而且可以对磨损部位通过磨削修复后多次使用,从而保持脱壳打杆和凹板筛脱壳表面锋利,提高花生脱壳机脱壳性能。

3.4 花生预处理对脱壳性能的影响

1)花生荚果清选对脱壳的影响。有关花生荚果中石子、土块和粗秸秆等硬质异物含量对脱壳的影响研究结果表明,石子和土块等外来杂质不仅会损坏凹板筛,加剧打杆和凹板筛磨损,也会加剧脱壳过程的果仁损伤和污染。同时,在花生收获、干燥、入仓、出仓和运输等处理环节中,会有部分花生荚果开裂而果仁流出(LSK),若不将这些果仁从花生荚果中分选出来,脱壳过程受到机械作用而容易使其发生破碎^[54-57]。

2)花生荚果分级对脱壳的影响。研究表明,花生荚果分级一般可使脱壳效率提高25%~50%、花生脱壳机脱壳率和分离效率提高5%~10%、花生果仁损伤率降低1%~2%。针对不同级别的花生荚果,需要考虑脱壳滚筒和凹板筛选择与匹配是否合理,脱壳间隙是否最佳以及部件磨损程度,喂入装置是否保持最佳进料分布和喂入量,凹板筛的开孔率(筛面利用系数)高低等。

研究结果表明,根据花生荚果尺寸选择适当的脱壳间隙和凹板筛栅隙是关键,特别第一级脱壳机构尤为重要,一般应保证70%~93%的花生在第一

级脱壳机构中一次完成。不适当的选择或增加了未脱净率或增加了损伤率。针对Runner和Spanish品种的花生,由于饱满程度差异,仅通过荚果外壳直径分级尚不能安全代表果仁的尺寸级别,提出通过尺寸分级与重力分级相结合的复合分级法,可收到增大脱壳生产效率和减少脱壳损伤的双重效果^[58-64]。

4 结束语

通过对美国花生脱壳机早期发展、最新进展和发展历程回顾及现代花生脱壳机主要技术特点的归纳,可清楚地了解到美国花生脱壳机及其脱壳原理、关键部件等技术特点及其形成过程,特别是花生脱壳性能影响因素的研究对脱壳机产品设计制造具有指导意义,二者之间密切结合关系。美国花生脱壳机从刮搓式花生脱壳原理、三打杆开式滚筒、钢片栅筛凹板的结构研究,到关键部件结构系列化参数制定,再到独具特色的整机结构和性能研究进展,无处不体现着系统、深入、持久和联系实践的科学研究方法、合理的技术路线和务实的研究目标。相比美国花生脱壳技术及其发展过程,中国在花生脱壳技术研究方面尚有很长的路要走,建议从脱壳原理、脱壳装置结构和脱壳机性能等多方面借鉴美国的经验,尽早从脱壳原理和脱壳机构类型等基础性问题方面取得突破,研发出高质量、高性能的花生脱壳机,解决花生脱壳技术落后的问题,以增强中国花生国际竞争力,促进中国花生产业持续发展。

参考文献 References

- [1] 那雪姣,刘明国,张文,等.机械脱壳时花生仁损伤特征及规律[J].农业工程学报,2010,26(5):117-121.NA X J,LIU M G,ZHANG W,et al. Damage characteristics and regularity of peanut kernels under mechanical shelling[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2010, 26(5): 117-121 (in Chinese with English abstract).
- [2] 刘明国,杜鑫,张文,等.花生疲劳脱壳试验研究[J].沈阳农业大学学报,2010,41(3):317-320. LIU M G, DU X, ZHANG W, et al. Experimental study on fatigue shelling of peanuts [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41(3): 317-320 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘明国.花生脱壳与损伤机理及立锥式脱壳机研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2011. LIU M G. Study on peanut damage mechanism and development of the vertical cone type shelling machine[D]. She-

- nyang: Shenyang Agricultural University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [4] 高连兴, 杜鑫, 张文, 等. 双滚筒气力循环式花生脱壳机设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 68-73. GAO L X, DU X, ZHANG W, et al. Double-roller peanut sheller with pneumatic circulating [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 68-73 (in Chinese with English abstract).
 - [5] National Agricultural Statistics Service. Crop production[R]. Washington: United States Department of Agriculture, 2018.
 - [6] International Nut & Dried Fruit. Global statistical review 2017-2018[EB/OL]. (2018-05-26) [2019-07-01]. <https://www.nut-fruit.org/industry/statistics>.
 - [7] Foreign Agricultural Service. Oilseeds: world markets and trade-Feb 2019[R]. Washington: United States Department of Agriculture, 2019.
 - [8] Foreign Agricultural Service. World agricultural production Dec-2018[R]. Washington: United States Department of Agriculture, 2018.
 - [9] RABY M E. Peanut-sheller; United States Patent, US1907394506A [P]. 1907-09-25.
 - [10] NEWLAND R M. Peanut-shelling machine; United States Patent, US1908413662A [P]. 1908-01-31.
 - [11] HUDSON J T. Peanut-shelling machine; United States Patent, US1913804005A [P]. 1913-12-01.
 - [12] JERNIGAN H R (US). Peanut sheller or huller; United States Patent, US10845316A [P]. 1916-07-10.
 - [13] HAROLD E P, CLYDE T Y. Peanut science and technology [M]. Texas: American Peanut Research and Education Society, Inc., 1982: 608-613.
 - [14] HAROLD E P, STALKER H T. Advances in peanut science [M]. Stillwater: American Peanut Research and Education Society, Inc., 1995: 521-525.
 - [15] TULLAYA B, FLETCHER S M. The impact of U.S. Non-price export promotion program on export demand for U.S. peanuts in North America[J]. Peanut science, 2010, 37(1): 70-77.
 - [16] CHEN C, FLETCHER S M, ZHANG P, et al. The competitive position of peanuts: a comparison between the U.S. and China [J]. Peanut science, 1996, 23(2): 104-110.
 - [17] BUTTS C L, FAIRCLOTH W H, LAMB M C, et al. Effect of bulk handling on runner peanut seed quality[J]. Peanut science, 2007, 34(1): 22-26.
 - [18] MODER J J, PENNY N M. Industrial engineering and economic studies of peanut marketing [M]. Texas: American Peanut Research and Education Society, Inc., 1954: 96-105.
 - [19] ANGELO A J S, KROMER G W, ARANT F S, et al. Peanuts-culture and use [M]. Virginia: Stone Printing Company, 1973.
 - [20] UTLEY P, HELFWING R E, BUTLER J L, et al. Comparison of unground and pelleted peanut hulls as roughage sources in steer finishing diets[J]. Animal science, 1973, 37(2): 608-611.
 - [21] SHEWFELT A L, YOUNG C T. Storage stability of peanut-based foods: a review[J]. Food science, 1977, 42(5): 1148-1152.
 - [22] PHIPPS C J, BRANCH J. New peanut processing plant coming to flotation[EB/OL]. (2017-02-10) [2019-07-01]. <http://www.northescambia.com/2017/02/new-peanut-processing-plant-coming-to-flotation>.
 - [23] Birdsong Peanuts Company. Birdsong peanuts: the final stop [EB/OL]. (2015-09-01) [2019-07-01]. <http://www.birdsong-peanuts.com>.
 - [24] JENNIFER M. Golden peanut plans to close shelling facility in Anadarko[EB/OL]. (2005-04-15) [2019-07-01]. <https://news-ok.com/article/2892260/golden-peanut-plans-to-close-shelling-facility-in-anadarko>.
 - [25] BEATTIE J H, KUSHMAN L G. Effect of moisture contents of peanuts on shelling damage[J]. Peanut and nut world, 1947 (11): 35-36.
 - [26] REED I F, COPPOCK G E. Effects of some factors on the operation of peanut shellers and quality of seed produced[J]. Peanut and nut world, 1952(12): 40-52.
 - [27] CLARK L E. Effects of storage environments on germination and emergence of Starr Spanish peanuts: progress report-3110 [R]. [S.l.]: Tex Agric. Exp. Stn., 1972: 82-88.
 - [28] DAVIDSON J I. Some effects of commercial-type peanut sheller design and operation on seed germination[J]. Peanut science, 1974, 1(2): 78-81.
 - [29] BUTTS C L, SORESENSEN R B, LAMB M C. Evaluation of a small-scale peanut sheller[J]. Peanut science, 2016, 43(2): 67-73.
 - [30] DAVIDSON J I, BLANKENSHIP P D, HUTCHISON R S. Shelling and storage of partially dried (cured) peanuts[J]. American peanut research and educational association, 1970, 2: 57-64.
 - [31] DAVIDSON J I, HAMMONS R O, DILLARD W. Selected physical, shelling, and germination properties of the new Spanish peanut varieties "Spancross" and "Tifspan" [R]. U. S. Department of Agriculture, ARS-S-24, 1973: 11.
 - [32] LAMB M C, BLANKENSHIP P D. The capacity and efficiency of official grade shellers[J]. Peanut science, 2005, 32(2): 132-135.
 - [33] LEWIS M C. Manufacturing Co. (LMC): a family tradition built by world class machinery[Z/OL]. (2015-09-16) [2019-07-01]. <http://lewismcarter.com/about/history>.
 - [34] NATHAN S, CHRISTOPHER F, KENT W, et al. The feasibility of a grower-owned peanut shelling plant in the tilt area of Georgia[R]. [S.l.]: [s.n.], 2002: 6.
 - [35] PATTEE H E, STALKER H T. Advances in peanut science [M]. Texas: American Peanut Research and Education Society, Inc., 1995: 500-526.
 - [36] PATTEE H E, YOUNG C T. Peanut science and technology

- [M].Texas;American Peanut Research and Education Society, Inc.,1982;571-623.
- [37] DAVIDSON J I.Maintaining peanut seed quality and obtaining maximum whole kernel out turns at the processing plant[C]//Annual Seed Short Course and Annual Plant Seed Short Course,Agronomy. [S.l.]:[s.n.],1976;49-52.
- [38] BUTTS C L,WILLIAMS E J.Measuring airflow distribution in peanut drying trailers[J].Applied engineering in agriculture,2004,20(3):335-339.
- [39] JESSIE B.A family tradition built by world class machinery[Z/OL].(2015-09-16)[2019-07-01]. <http://georgiapeanuttour.com/?p=1330>.2015-09-16.
- [40] LEWIS M.Carter Manufacturing Co.(LMC).Peanut shelling system [Z/OL].(2019-03-12)[2019-07-01]. <https://lewismcarter.com/product-lines>.
- [41] BEATTIE J H. Factors affecting the splitting, breakage, and skinning of peanuts during shelling[J].Peanut and nut world,1949(5):27,50.
- [42] DAVIDSON J I,BLANKENSHIP P D,CHEW V,et al. Probability distributions of peanut seed size[J].Peanut science,1976,5(2):91-96.
- [43] DAVIDSON J I. An objective method of evaluating size and shape characteristics of peanut seed[J]. Proceeding of American peanut research and education association,1976,8:27-43.
- [44] WILLIAMS E J,DREXLER J S.A non-destructive method for determining peanut pod maturity[J].Peanut science,1981,8(2):134-141.
- [45] DAVIS N D.Peanut storage studies:effect of storage moisture on three varieties of runner peanuts[J]. American oil chemists society,1961(38):516-517.
- [46] BUTTS C L,FAIRCLOTH W H,LAMB M C,et al. Effect of bulk handling on runner peanut seed quality[J].Peanut science,2007,34(1):22-26.
- [47] MCINTOSH F P,DAVIDSON J I. Effect of temperature on shelling runner-and Spanish-type peanuts[R]. [S.l.]:ARS-52-65,1971,4.
- [48] DAVIDSON J I,WILLIAMS E J,TROEGER J M,et al.Effects of some harvesting enduring practices on the milling quality of Florunner' peanuts[J].Proceeding American peanut research and educational association,1978,10:80.
- [49] MCINTOSH F P,DAVIDSON J I. Some methods of determining milling quality of farmers stock peanuts[J]. Proceeding of American peanut research and educational association,1971,3:43-51.
- [50] BLANKENSHIP P D. Pearson. Effects of restoring peanut moisture with aeration before shelling [J]. Peanut science,1975,2(1):6-10.
- [51] SLAY W O,FERGUSON W G,POMPLIN J A. Some effects of conventional and low-oxygen atmosphere storage and processing methods on Florunner peanut seed[J].Peanut science,1978,12(1):8-11.
- [52] SLAY W O,PEARSON J L,HOLADAY C E.Low-oxygen atmospheres as a practical means of preserving the quality of shelled peanuts[C]//AAT-S.Advances in agricultural technology.Washington DC:USDA,1980;260-278.
- [53] DAVIDSON J I,MCINTOSH F P. Development of a small laboratory sheller for determining peanut milling quality[J]. American peanut research and educational association,1973,5:95-108.
- [54] SLAY W O,HUTCHISON R S.Handling peanuts with bucket elevators: rates of conveying and mechanical damage [M]. Washington DC:U.S.Govt.Print,1973;26-59.
- [55] ELLIOTT T A,CARMICHAEL B W.Efficient picking, transporting, handling, sorting, and shelling of famers' stock peanuts[R].Georgia;Georgia institute of technology,1955.
- [56] BUTTS C L,SORENSEN R B,LAMB M C.Evaluation of a small-scale peanut sheller[J].Peanut science,2016,43(2):67-73.
- [57] BUTTS C L,FAIRCLOTH W H,LAMB M C,et al.Effect of bulk handling on runner peanut seed quality[J].Peanut science,2007,34(1):22-26.
- [58] WILLHAMS E J,DAVIDSON J I.The effect of digging time on seed-size distribution of Florunner peanuts[J].Proceeding of American peanut research and educational association,1978,10:55.
- [59] LAMB M C,BLANKENSHIP P D.The capacity and efficiency of official grade shellers[J].Peanut science.2005,32:132-135.
- [60] WOODWARD J D.The relationship of peanut milling quality to kernel tensile strength[J].American peanut research & educational association,1974,5:169-174.
- [61] 陈中玉,高连兴,CHEN C Y,等.中美花生收获机械化技术现状与发展分析[J].农业机械学报,2017,48(4):1-23.CHEN Z Y,GAO L X,CHEN C Y,et al. Analysis on technology status and development of peanut harvest mechanization of China and United States[J].Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2017,48(4):1-23(in Chinese with English abstract).
- [62] 李建东,尚书旗,李西振,等.我国花生脱壳机械研究应用现状及进展[J].花生学报,2006,35(4):23-27.LI J D,SHANG S Q,LI X Z,et al. Application situation and developing analysis on peanut shelling machinery[J]. Journal of peanut science,2006,35(4):23-27(in Chinese with English abstract).
- [63] 陆荣,杨德旭,高连兴,等.直立锥滚筒式小区花生脱壳机设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(5):114-123. LU R,YANG D X,GAO L X,et al. Design and test on plot peanut sheller with vertical tapered drum[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery,2019,50(5):114-123(in Chinese with English abstract).

[64] 高连兴,陈中玉,CHEN C.等.美国花生收获机械化技术衍变历程及对中国的启示[J].农业工程学报,2017,33(12):1-9.GAO L X,CHEN Z Y,CHEN C Y,et al. Development course of pea-

nut harvest mechanization technology of the United States and enlightenment to China[J].Transactions of the CSAE,2017,33(12):1-9(in Chinese with English abstract).

Technology status and development analyses of American peanut shellers

LU Rong^{1,2}, LIU Zhixia¹, GAO Lianxing¹, CHEN Charles³, BUTTS Christopher Lloyd⁴

1.College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2.Liaoning Ecological Engineering Vocational College, Shenyang 110866, China;

3.College of Agriculture, Auburn University, Auburn, AL 36849, USA;

4.USDA-ARS National Peanut Research Laboratory, Dawson GA 31742, USA

Abstract Shelling is the only important processing step from production to utilization of peanuts. The shelling machine is the most important core equipment of peanut shelling processing operation, which both mainly determines the peanut shelling efficiency and the processing quality such as the degree of loss and damage of peanut kernels. Even though the peanut production ranks first in the world and shelling technology is widely used, China's peanut shelling technology is far poorer than the United States, which has been seriously restricting the development of peanut food processing industry and the export of peanuts as well as their products in China. In order to explore, analyze and use the experience of the American peanut shelling technology and development for reference, based on onsite observation, public survey of documents and the systematical analysis, the classification and review of the peanut shelling technology of the USA significantly different from China in aspects including the industrialization, and the characteristics of the large scale were conducted. The advanced equipment and well-equipped assembling were summarized. The development history and research status of American peanut shellers were analyzed deeply. The scraping shelling principle and relevant sheller structural type and development of shelling parts were dissected. The technical characteristics of low-speed, multi-roller independent driving and double cleaning device of the latest peanut shelling machine in the United States were pointed out. The studies on shelling factors and the experience in promoting the development of peanut shelling technology of the USA were summed up. It will provide important reference for studying and developing peanut shelling technology in China.

Keywords peanut; peanut sheller; post-harvest processing; hand shelling; mechanical shelling; key parts; shelling quality; shelling efficiency

(责任编辑:陆文昌)