



盛强,王冠,邓勇杰,等.不同含水率条件下油茶籽壳穿刺力试验研究[J].江西农业大学学报,2022,44(6):1478-1487.
SHENG Q,WANG G,DENG Y J,et al.Experimental study on puncture force of *Camellia oleifera* seed shell under different moisture content[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2022,44(6):1478-1487.

不同含水率条件下油茶籽壳穿刺力试验研究

盛强^{1,2},王冠¹,邓勇杰¹,赖曲芳¹,刘木华^{1,2},胡淑芬^{1,2*},
肖本贵^{1,2},曹昕奕^{1,2},廖阳森¹,曾钰峰¹

(1.江西农业大学 工学院,江西 南昌 330045;2.江西省现代农业装备重点实验室,江西 南昌 330045)

摘要:【目的】弹簧针插壳式油茶籽壳清选方法是基于茶籽与茶壳穿刺力的差异,将油茶籽壳混合物通过传送带传送,传送带上方设置有安装了弹簧针的针辊,油茶籽壳混合物经过针辊时,弹簧针会插起茶壳,插起的茶壳会被斜插梳齿板卸下,由此实现对油茶籽壳的清选,该清选方法对茶籽损伤小,清选率高。通过研究不同含水率下茶籽、茶壳穿刺力学性能的差异性,可以为油茶籽、油茶壳的机械化清选提供数据支撑。【方法】以霜降后采摘的“长林4号”油茶鲜果为试验材料,通过自然晾晒获得不同含水率的油茶果。将油茶鲜果按直径大小分为5级,取各级油茶果各3个,对所取油茶果的茶籽(内侧、外侧)、茶壳(茶壳内侧和外侧的头部、腹部、尾部)进行尺寸测量和穿刺力试验,试验共进行9组。【结果】茶壳厚度与茶籽横向尺寸呈正态分布,茶壳各部位穿刺力分布集中在5~10 N,茶籽内侧穿刺力分布集中在12~20 N,茶籽外侧穿刺力分布在15~40 N;在不同含水率条件下,茶籽外侧穿刺力大于茶籽内侧穿刺力;茶壳不同部位的平均穿刺力与油茶果含水率呈负相关,其中茶壳外侧平均穿刺力大于茶壳内侧平均穿刺力;茶籽和茶壳穿刺力差值与油茶果含水率呈正相关。【结论】油茶籽壳混合物清选时,若采用弹簧针插壳式清选方法,其关键工艺参数为:油茶果含水率大于35%,弹簧针的压缩力为10 N;生产中用压缩力为10 N的弹簧针穿刺茶壳,能够快速判断油茶果含水率是否大于45%。结果可为弹簧针插壳式油茶籽壳清选装置研究提供理论和试验依据,为油茶果的全产业机械化加工和副产物高值化应用提供依据。

关键词:油茶果;茶壳;茶籽;穿刺力;差异性分析

中图分类号:S226.5;S776 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2022)06-1478-10

Experimental Study on Puncture Force of *Camellia oleifera* Seed Shell under Different Moisture Content

SHENG Qiang^{1,2}, WANG Guan¹, DENG Yongjie¹, LAI Qufang¹, LIU Muhua^{1,2},
HU Shufen^{1,2*}, XIAO Bengui^{1,2}, CAO Xinyi^{1,2}, LIAO Yangsen¹, ZENG Yufeng¹

(1. College of Engineering Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Modern Agricultural Equipments, Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] Based on the difference of puncture force between tea seed and tea shell, the spring needle inserted shell cleaning method of *Camellia oleifera* seed shell is to realize the cleaning of *Camellia*

收稿日期:2022-08-07 修回日期:2022-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(32060362)和国家重点研发计划项目子课题(2018YFD1000603-3)

Project supported by National Natural Science Foundation of China (32060362) and The Ministry of Science and Technology Focuses on the Sub-project of the R&D Program (2018YFD1000603-3)

作者简介:盛强, orcid.org/0000-0002-4213-1469, 1181129240@qq.com; *通信作者:胡淑芬,副教授,主要从事农业机械装备研究, orcid.org/0000-0003-0509-3130, 812225371@qq.com。

oleifera seed shell by inserting the spring needle into the tea shell. This cleaning method has small damage to tea seeds and high cleaning rate. By studying the difference of puncture force of tea seed and tea shell under different moisture content, we can provide theoretical basis and data support for the mechanized cleaning of *Camellia oleifera* seed and shell. [Methods] Fresh *Camellia oleifera* fruits of “Changlin No.4” picked after frost fall were used as experimental materials, and *Camellia oleifera* fruits with different moisture content were obtained by natural drying. The fresh fruit of *Camellia oleifera* was divided into five grades according to the diameter, and three *Camellia oleifera* fruits of each grade were taken. The size measurement and puncture force experiment were carried out on the tea seeds (inner side and outer side) and tea shells (the head, abdomen and tail of the inner and outer sides of the tea shell). A total of 9 groups were tested. [Results] the thickness of the tea shell and the transverse size of the tea seed were normally distributed. The puncture force distribution of each part of the tea shell was concentrated in 5–10 N, the puncture force distribution of the inner side of the tea seed was concentrated in 12–20 N, and the puncture force distribution of the outer side of the tea seed was 15–40 N; Under the condition of different moisture content, the puncture force on the outside of tea seed is greater than that on the inside of tea seed; The average puncture force of different parts of the tea shell was negatively correlated with the water content of *Camellia oleifera* fruit, and the average puncture force on the outside of the tea shell was greater than that on the inside of the tea shell; There is a positive correlation between the puncture force difference between tea seed and tea shell and the water content of *Camellia oleifera* fruit. [Conclusion] When cleaning the mixture of *Camellia oleifera* seed and shell, if the spring needle inserted shell cleaning method is used, the key process parameters are: the moisture content of *Camellia oleifera* fruit is greater than 35%, and the spring force of the spring needle is 10 N; Using a spring needle with a compressive force of 10 N to puncture the tea shell in production can quickly judge whether the moisture content of *Camellia oleifera* fruit is greater than 45%. The research results can provide theoretical and experimental basis for the research of spring needle shell type oil tea seed shell cleaning device, and provide theoretical basis and data support for the whole industry mechanized processing of oil tea fruit and the high-value application of by-products.

Keywords: *Camellia oleifera*; tea hulls; tea seeds; puncture force; difference analysis

【研究意义】油茶为山茶科山茶属常绿乔木,是我国重要的食用油料作物,与油橄榄、油棕、椰子并列为世界四大木本油料作物^[1]。油茶果由茶壳和茶籽组成^[2],茶籽提炼的茶油含有丰富的不饱和脂肪酸,被称为“东方橄榄油”^[3-4],在日化、药用、食用等方面均有较高应用价值^[5]。但茶壳中不含油脂,对提取茶油不利,需对油茶果进行脱壳、清选处理^[6],而清选后的茶壳在制备碳材料、木质复合材料和转化能源等方面也有较高的利用价值^[7]。因此,茶籽与茶壳的机械化高效分离可以提高油茶果的综合经济价值,为油茶果、壳的机械化加工和高值化应用提供理论依据与数据支撑。【前人研究进展】据调研统计,油茶果脱壳、清选成本约占油茶果采后加工成本的43%^[8]。在油茶产业中,茶籽和茶壳的清选是必须要解决的技术问题。目前油茶籽壳的清选主要采用机器视觉、风选、浮选、齿光辊对辊清选、多级筛分等技术^[9,16]。其中,机器视觉分选技术是将工业相机结合特定的机械结构,利用茶籽、茶壳的颜色、纹理和几何形状特征的不同分选茶壳与茶籽,由于茶籽和茶壳的纹理、几何特征较复杂,该法可以从油茶籽壳混合物中分选出大部分茶壳^[9-10],但清选效率不高。风选是利用物料悬浮速度不同来分离物料^[11],油茶鲜果的茶籽、茶壳密度相近,该法无法高效分离茶籽、茶壳。浮选分离工艺是根据茶籽与茶壳密度的差异来进行分离,既可以分离出壳,也可以分离出有品质偏差、霉变、不饱满的茶籽,在控制好油茶果含水率的前提下,该法能够进行油茶籽壳的清选^[12],但油茶果的含水率难以精准控制,清选效率难以保证。齿光辊对辊清选是利用茶壳和茶籽几何形状差异较大的特征,采用齿辊与光辊对辊式清选结构实现油茶籽壳的分离,该法清选效率高,速度快^[13-14],但该法损籽率较高。多级筛分技术利用多级筛分机构,将大小茶壳依次筛分出来,可以有效分离与茶籽尺寸差异性较大的茶壳,但无法分离出与茶籽大小相近的茶壳^[15-16]。综上所述,油茶籽壳清选技术依然不够成熟,是阻碍油茶产业发展的瓶颈之一,急需有新的技术突破和应用。

【本研究切入点】本研究基于弹簧针插壳式油茶籽壳清选方法,其原理是根据茶籽与茶壳的穿刺力学性能的差异性,设计弹簧针的弹力大于茶壳的穿刺力而小于茶籽的穿刺力,通过弹簧针抽取茶壳来实现油茶籽壳的分离。工作时,给料装置输送油茶籽壳混合物,其上方的针辊最低点切线方向与给料装置运动方向反向转动,针辊上的弹簧针将茶壳扎起,再通过斜插梳齿板将弹簧针上的茶壳卸下。该清选原理简单,清选稳定、可靠。目前该清选方法已取得一些研究成果^[17-18],但油茶果含水率对茶籽、茶壳穿刺力影响的研究仍然较少。【拟解决的关键问题】该文在前期研究基础上,通过研究不同含水率下茶籽、茶壳穿刺力的差异性,确定弹簧针插壳清选的工艺参数,为弹簧针插壳式油茶籽壳清选装置的应用与推广提供翔实的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验材料为江西省南昌市新建区的“长林4号”油茶鲜果,采摘于2021年10月26日。通过三维扫描仪测出油茶果腹部横向尺寸为21.68~44.40 mm,以该尺寸为标准将油茶果分为5个等级,一到五级尺寸范围分别为20~25 mm、25~30 mm、30~35 mm、35~40 mm、40~45 mm,按照以上分级整理油茶果样品,进行相应的预处理后待用。

1.2 主要仪器与设备

TMS-Pro质构仪(美国FTC公司,精度±1%,量程0~1 000 N);手持3D扫描仪(先临三维科技股份有限公司, EinScanPro2X2020型,精度0.045 mm);恒温干燥箱(上虞市上仪仪器制造有限公司, 101-2A型);电子天平(苏州恒锦机电科技有限公司, WT20002型,精度0.01 g)。

1.3 试验方法

1.3.1 试验样品预处理 油茶鲜果采摘后,先将油茶鲜果置于室内阴凉处堆沤5 d。于第6日起,将油茶果摊开晾晒,以获得不同含水率的油茶果。每日09:00开始晾晒,每日晾晒6 h,晾晒后将油茶果装袋存放于室内阴凉处。每日晾晒前取15个油茶果(每级各3个),将油茶果沿天然纹理剥开,天然纹理见图1a,分离出茶籽和茶壳,用于穿刺试验;另取200 g左右油茶果进行粉碎,测量其含水率。经前期预试验发现,第14日后,即油茶果含水率降低到11%,再经晾晒处理,油茶果含水率变化并不大,故样品共晾晒8 d,共进行9组试验。样品预处理时间、具体方式及取样量等内容见表1。

表1 样品预处理

Tab.1 Changes in the moisture content of *Camellia oleifera* fruit

样品处理时间/d Sample processing time	处理方式 Processing methods	取样量 Sampling volume	试样内容 Sample content
1~5	堆沤	0	无
6~14	自然晾晒	每日晾晒前取15个	穿刺试验
		每日晾晒前取200 g	含水率测定试验

1.3.2 油茶果含水率测定 将所取200 g油茶果粉碎,用101-2A恒温干燥箱进行干燥,干燥过程温度设定为105 ℃,干燥时间8 h,按下式计算油茶果的含水率:

$$M = (m_{\text{前}} - m_{\text{后}}) / m_{\text{前}} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: M 为油茶果含水率; $m_{\text{前}}$ 为油茶果干燥前质量; $m_{\text{后}}$ 为油茶果干燥后质量。

1.3.3 茶籽穿刺力测定 经1.3.1预处理后的每日晾晒样品取样15个,在每个样品中随机取一枚茶籽,用3D扫描仪测量茶籽尺寸(茶籽胸径),再利用质构仪对茶籽的穿刺力进行测定,根据邓勇杰等^[17]的结论:穿刺深度为2 mm时,弹簧针插壳式油茶籽壳清选效果最佳,故本穿刺试验设计的穿刺距离(深度)为2 mm。质构仪选用直径2 mm针状探头,设置试验参数为:测试模式为穿刺测试,测试速度、测后速度均为6 mm/min,起始穿刺力为1 N,穿刺距离(深度)为2 mm。茶籽穿刺部位见图1b。茶籽内侧、外侧各测3次,取平均值,获得茶籽尺寸和穿刺力数据270组,利用Crubbs法排除异常值。

1.3.4 茶壳穿刺力测定 在所取的15个样品中,在每个样品中随机取1片茶壳,6个穿刺部位:外侧头

部、外侧腹部、外侧尾部、内侧头部、内侧腹部、内侧尾部(下文分别简称外头部、外腹部、外尾部、内头部、内腹部、内尾部),见图1c。用3D扫描仪测量各部位的厚度,再利用质构仪对茶壳内侧和外侧的3个部位进行穿刺力测定,穿刺距离(深度)2 mm(若茶壳厚度不足2 mm时,穿刺距离设置为茶壳厚度),其余测量方法与1.3.2相同。各位置测3次,取平均值,获得茶壳厚度和茶壳穿刺力810组,利用Crubbs法排除异常值。

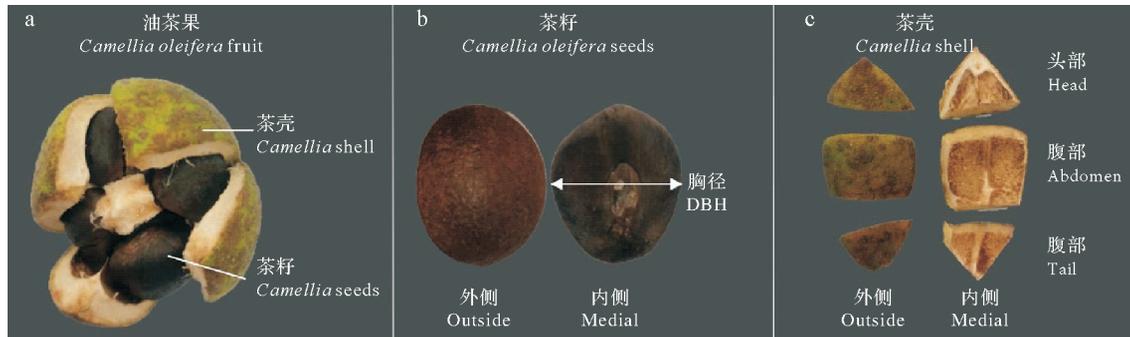


图1 穿刺试验穿刺部位

Fig.1 Puncture test puncture site

2 结果与分析

前人研究发现,油茶果堆沤处理后出油率显著提升,但含水率变化不大,故堆沤期间不进行含水率测定^[19]。试验样品堆沤5 d后,第6日至第14日试验样品含水率分别为64.12%、59.32%、51.34%、47.13%、44.96%、35.36%、31.09%、27.53%、11.24%。分析油茶果含水率的数据可知,自然晾晒后,油茶果含水率逐渐降低,但下降速度并不均匀,应是受自然光强弱和油茶果晾晒爆蒲的影响所致。

2.1 典型的穿刺图谱

试验中测得的茶籽和茶壳穿刺图谱整体呈现一致的趋势,随机取1个茶籽、茶壳的典型穿刺图谱(图2),并对其进行初步分析,穿刺力曲线中,探针运动路程2 mm内为质构仪探针接触测试材料后探针受力曲线,2 mm后为探针返回至起始位置时的受力曲线。茶籽的力-穿刺距离曲线中,针头所受的最大力就是所测得的茶籽穿刺力,曲线呈现双驼峰,对应的2个峰值,分别是探针穿刺茶籽壳和穿刺茶籽肉时的最大穿刺力;茶壳的力-穿刺距离曲线呈单峰状,峰值为针头所受的最大力,即探针穿刺茶壳至2 mm时所测得的茶壳穿刺力。通过对上述穿刺图谱的分析,获得穿刺力试验数据,并在下文对全部试验数据进行整理、统计、分析与讨论。

2.2 不同含水率下油茶果的茶籽穿刺力

整理茶籽尺寸与茶籽外侧、内侧穿刺力数据见图3a,茶籽的横向尺寸大多集中在20 mm左右;茶籽外侧穿刺力范围主要集中于15~40 N;茶籽内侧穿刺力范围较茶籽外侧更为集中,主要集中在12~20 N。由上述数据整理获得图3b,茶籽外侧平均穿刺力始终大于茶籽内侧平均穿刺力;茶籽内侧穿刺力随着油茶果含水率降低而降低;当油茶果含水率高于44.96%时,茶籽外侧穿刺力随油茶果含水率的减小而减小;第10日后,即油茶果含水率低于44.96%时,茶籽外侧平均穿刺力随油茶果含水率的减小而增大。

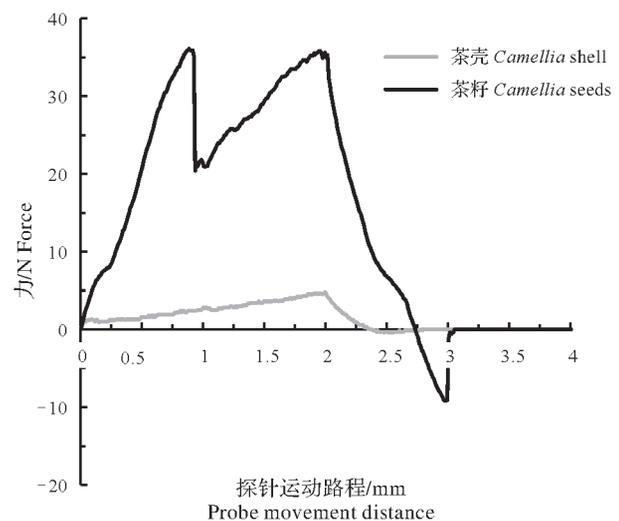


图2 茶籽、茶壳穿刺图谱

Fig.2 Puncture atlas of *Camellia oleifera* seeds and *Camellia oleifera* shells

分析出现该情况的原因,与油茶果爆蒲有关,样品处理第6日,已经有油茶果已经出现裂纹,随着油茶籽含水率的减少,茶籽中的果肉会逐渐缩小,试验中质构仪探针刺破茶籽壳后,由于缺少果肉的内部支撑,且探针穿刺到果肉的距離变短,茶籽穿刺力是逐渐减小的。第11日,油茶果含水率为35.36%时,油茶果完全爆蒲,大多茶籽与茶壳分离,茶籽也会被阳光照射,茶籽壳会变脆,茶籽内侧的茶籽壳比较薄,茶籽内侧穿刺力会略微减小;而由于茶籽外侧的茶籽壳比较厚,且晾晒过程中茶籽壳变致密,即使晾晒导致茶籽壳变脆,茶籽外侧穿刺力也会变大。由此可知:随着油茶果含水率降低,茶籽外侧穿刺力先减小后增大,茶籽内侧穿刺力是逐渐减小的;茶籽外侧穿刺力在第14日(含水率11.24%)时最大,茶籽内侧穿刺力在第6日(含水率64.12%)时最大。

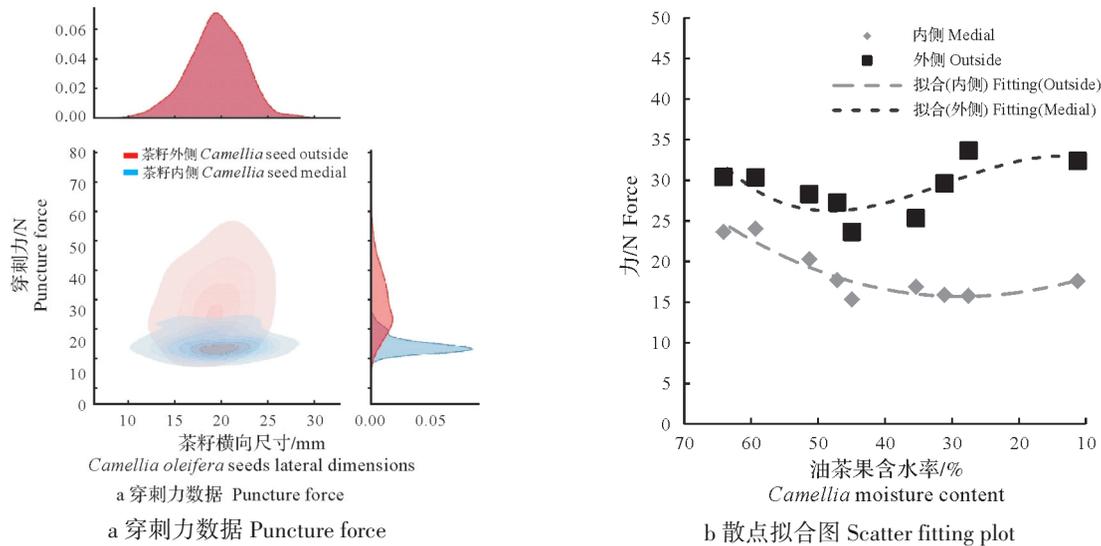


图3 茶籽穿刺力数据

Fig.3 Puncture force and size density of *Camellia oleifera* seeds

2.3 不同含水率下油茶果的茶壳的穿刺力

2.3.1 茶壳内侧 将试验所得数据整理后获得茶壳内侧各部位穿刺力图(图4),相同含水率下,内头部和内腹部穿刺力较大,内尾部穿刺力最小;茶壳内侧各位置穿刺力与油茶果含水率总体呈负相关;第9日前,即油茶果含水率大于47.13%时,茶壳各部位平均穿刺力相近,差距不大;试验第9日后,即油茶果含水率小于47.13%时,随着油茶果含水率的降低,油茶壳内侧各位置平均穿刺力差值距逐渐增加,其中茶壳内腹部穿刺力增加最快,内尾部穿刺力增加最慢。

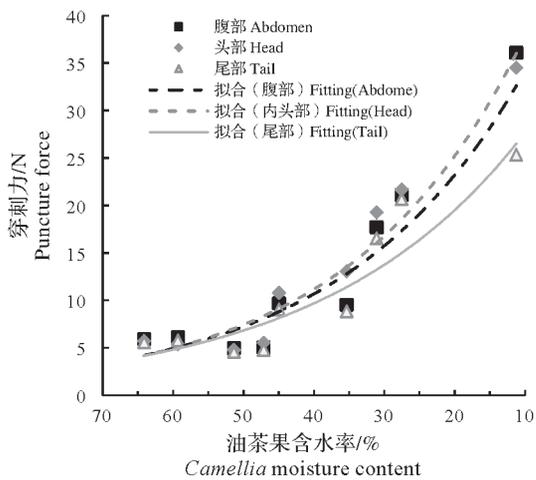


图4 茶壳内侧各部位穿刺力

Fig.4 Puncture of each part of the inside of the tea shell

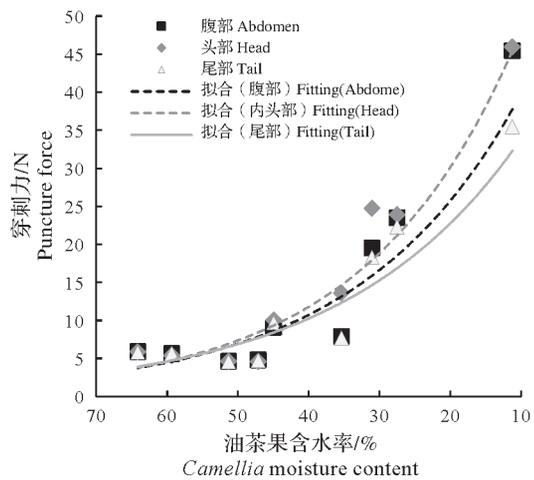


图5 茶壳外侧各部位穿刺力

Fig.5 Puncture force of each part of the outer part of the *Camellia oleifera* shell

该试验结果与茶壳厚度及茶壳干燥程度有关。首先,试验中所测茶壳厚度中头部厚度最大(平均厚度 5.52 mm),腹部次之(平均厚度 2.78 mm),尾部厚度最小(平均厚度 2.56 mm),腹部和尾部有部分厚度小于 2 mm。结合 2.1 可知,茶壳穿刺过程中,穿刺力与穿刺深度呈正相关,在茶壳外侧穿刺力均值的拟合曲线中表现出:头部穿刺力大于腹部穿刺力,腹部穿刺力大于尾部穿刺力。其次,茶壳腹部比头部薄,晾晒过程中干燥更快,结合上述茶壳内侧各位置穿刺力与油茶果含水率总体呈负相关,所以在第 14 日时,穿刺力均值表现出茶壳腹部最大、尾部最小。由此可知,茶壳的穿刺力不仅受油茶果含水率影响,同时,茶壳的厚度也对茶壳穿刺力有影响。

2.3.2 茶壳外侧 将试验所得数据整理后获得茶壳外侧各部位穿刺力图(图 5)。由图 5 可知,茶壳外侧平均穿刺力的变化随着油茶果含水率的降低而升高,整体呈指数趋势。试验第 11 日前,即油茶果含水率高于 35.36% 时,茶壳外侧各位置穿刺力均值低于 10 N,且茶壳内侧各位置平均穿刺力相差较小;与茶壳内侧平均穿刺力规律类似,茶壳外腹部和外头部穿刺力较大,从拟合曲线来看,随着含水率的降低,外腹部穿刺力增长速度最快,外尾部穿刺力增长速度最小。

2.3.3 内外侧穿刺力的比较 整理后茶壳内外侧穿刺力数据作密度图,见图 6a。茶壳厚度主要集中于 2.5 mm 左右,试验中茶壳内外侧同位置穿刺力所对应的茶壳厚度是相同的,上侧边图所示线条重合;茶壳内侧和外侧穿刺力计主要集中于 4~11 N。计算油茶果不同含水率下茶壳内、外侧各位置平均穿刺力,整理后得到散点拟合图,如图 6b。茶壳内外侧穿刺力随油茶果含水率减少而增大;在含水率大于 35% 时,茶壳外侧穿刺力与内侧穿刺力数值相近,且均小于 11 N;当油茶果含水率小于 35% 后,茶壳内侧穿刺力明显小于茶壳外侧穿刺力。

分析其原因,应与油茶果晾晒过程中茶壳形态的变化有关。在晾晒中,茶壳顺着油茶果纹理逐渐分裂打开,每片茶壳形态由内侧凹陷、外侧凸出转变为内外侧均近平整,该现象的出现是因为在晾晒过程中,茶壳外侧干燥速度大于茶壳内侧,致使茶壳外侧收缩速度快于茶壳内侧,即茶壳外侧组织比茶壳内侧组织更致密,从而导致茶壳外侧穿刺力在第 11 日,即油茶果含水率降低到 35.36% 以后,茶壳外侧穿刺力明显大于内侧穿刺力。

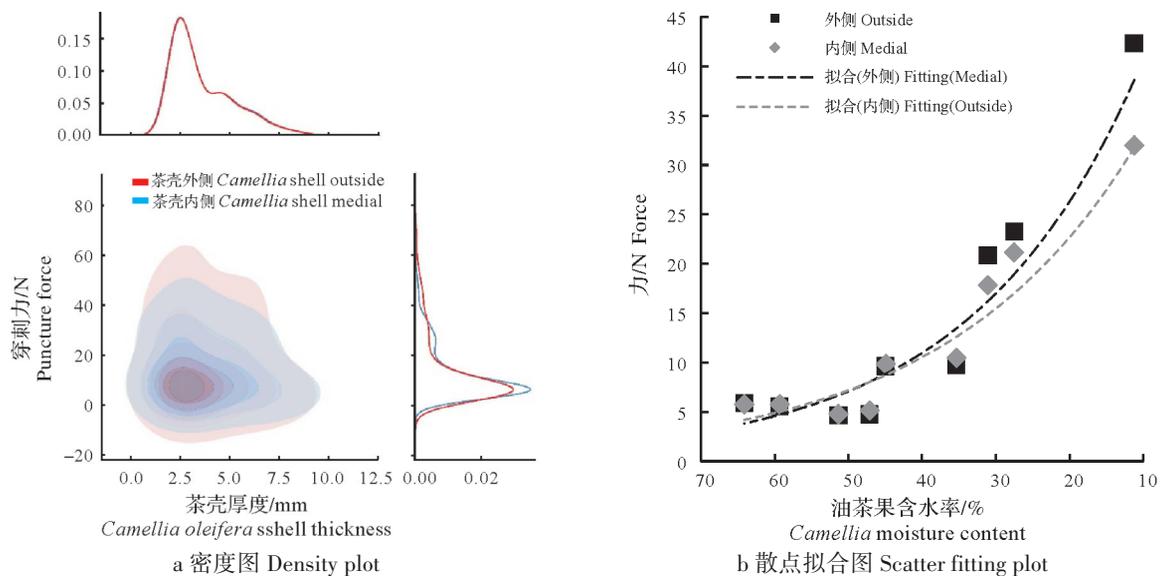


图 6 茶壳穿刺力数据

Fig.6 *Camellia oleifera* hull puncture force data plot

2.4 油茶果含水率对茶籽、茶壳穿刺力学特性差异的影响

根据上述试验数据,按照试验天数即油茶果含水率分组,计算茶籽平均穿刺力和茶壳平均穿刺力,再计算茶籽和茶壳穿刺力的差值,数据情况见图 7a。茶籽、茶壳穿刺力差值与油茶果含水率呈正相关。

结果表明:茶籽的平均穿刺力数值变化幅度较小,趋势为先减小后增大;茶壳的平均穿刺力随着油茶果含水率降低先略微减小,后呈指数趋势增加;当油茶果含水率在 28% 左右时,茶籽与茶壳穿刺力差值接近于 0。综上可得:当油茶果含水率大于 35% 时,茶籽与茶壳平均穿刺力差值大于 9 N。因此,当油茶果含水率大于 35% 时,茶籽与茶壳综合穿刺力差值较为明显。据此试验结果,在油茶籽壳的机械化清选中,当油茶果含水率大于 35% 时,可以采用弹簧针插壳法对油茶籽壳混合物进行清选;在油茶果堆沤后,油茶果含水率越高,该法清选效果越好。

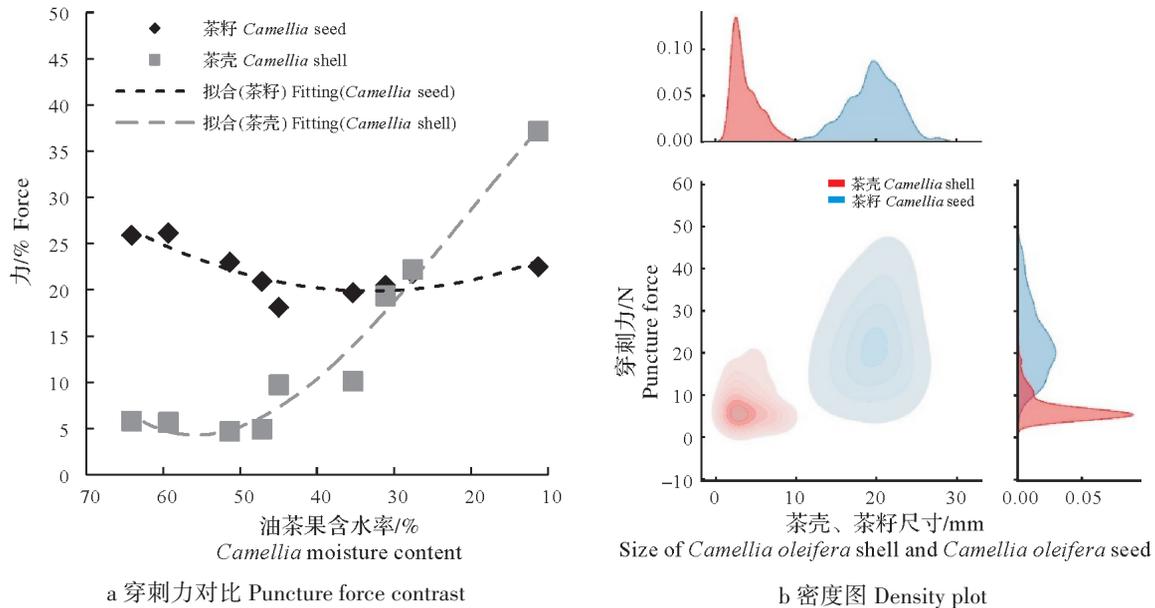


图 7 茶籽、茶壳穿刺力对比
Fig.7 Comparison of puncture forces of tea seeds and tea husks

油茶果含水率大于 35% 时,茶籽、茶壳穿刺力及其尺寸密度图见图 7b,其中茶壳尺寸为茶壳厚度,茶籽尺寸为茶籽的胸径。茶籽与茶壳穿刺力数值密度有明显差异,其中交点大约在 10 N 处,在交点附近,茶籽和茶壳的穿刺力仍然存在小部分重叠。因此,若处理不当,会出现压缩力为 10 N 的弹簧针刺破茶籽的情况,导致清选率降低,清选效果不理想。但是在试验中发现,茶籽明显比茶壳难固定,并且容易和针头产生相对滑动。这是因为茶籽表面较光滑,且相对较硬,在与弹簧针接触时,易被弹簧针滑开,从而减小弹簧针穿刺茶籽的概率。所以在实际生产中,控制好油茶籽壳混合物的平铺效果对提高清选率有较大的作用。

2.5 Pearson 相关性矩阵

通过相关性矩阵进一步探究茶籽、茶壳各位置穿刺力与含水率之间的相关性,将所得穿刺力值和含水率作为 Pearson 相关性分析的变量,通过逐组组合分析,发现油茶果含水率 > 45% 时,部分变量相关度较高,具体见表 2 相关性矩阵。由表 2 可知,含水率与茶壳各位置穿刺力高度相关 ($P < 0.01$),是影响茶壳各位置穿刺力的主要指标;茶籽内外侧穿刺力与各指标之间相关度较低,并且 $P > 0.05$ 。结合 2.1 的内容,茶籽外侧的穿刺力范围分布较广,随着油茶果含水率减小,茶籽外侧穿刺力变化规律与茶籽其他部位的穿刺力变化趋势并不一样,导致茶籽外侧穿刺力与其他变量相关度均较小;茶籽内侧穿刺力与茶籽外侧穿刺力类似,与其他变量间相关度也较小;茶壳各位置穿刺力高度正相关 ($P < 0.01$)。综合 2.1、2.2、2.3,油茶果含水率 > 45% 时,茶壳各位置穿刺力均值都 < 10 N,而当油茶果含水率 < 45% 时,茶壳各位置穿刺力逐渐增大,会大于 10 N,因此,在实际生产时,若无法采用仪器来准确测量出油茶果含水率,则可以采用压缩力为 10 N 的弹簧针刺穿茶壳,结合 2.4,油茶果含水率 > 45% 时,使用弹簧针插壳式清选方法。

表2 各指标Pearson相关性矩阵
Tab.2 Pearson correlation matrix for each indicator

穿刺位置 Puncture position	含水率 Water content	茶籽外侧 Tea seed outside	茶籽内侧 Inside of tea seeds	外头部 Outer head	外腹部 Outer abdomen	外尾部 Outer tail	内头部 Inner head	内腹部 Inner abdomen
茶籽外侧 Tea seed outside	-0.301							
茶籽内侧 Inside of tea seeds	0.720	0.241						
外头部 Outer head	-0.920*	0.509	-0.460					
外腹部 Outer abdomen	-0.880*	0.575	-0.389	0.986*				
外尾部 Outer tail	-0.894*	0.581	-0.448	0.985*	0.993*			
内头部 Outer tail	-0.942*	0.485	-0.526	0.994*	0.977*	0.985*		
内腹部 Inner abdomen	-0.904*	0.553	-0.439	0.992*	0.997*	0.997*	0.990*	
内尾部 Inner tail	-0.908*	0.582	-0.524	0.964*	0.956*	0.982*	0.979*	0.973*

*表示显著性达到 $P<0.01$ 水平。

* indicates extremely significant correlation($P<0.01$).

3 结论与讨论

本文主要应用质构仪对不同含水率下油茶果的茶籽和茶壳各部位进行穿刺力测定,试验结果表明:茶壳厚度和茶籽横向尺寸呈正态分布;茶壳各部位穿刺力集中于5~10 N,茶籽内侧穿刺力分布集中于12~20 N,茶籽外侧穿刺力分布于15~40 N;油茶果含水率相同条件下,茶籽外侧穿刺力均大于茶籽内侧穿刺力,茶壳不同部位的平均穿刺力与油茶果含水率呈负相关,其中茶壳外侧平均穿刺力大于茶壳内侧平均穿刺力;茶籽和茶壳穿刺力差值与油茶果含水率呈正相关。

对油茶籽壳混合物进行机械化清选时,若采用弹簧针插壳式清选方法,其关键工艺参数为:油茶果含水率大于35%,弹簧针的压缩力为10 N。综合分析后,当油茶果含水率>45%时,茶壳穿刺力均值<10 N,且茶壳各部位穿刺力相关性较高。因此,在生产过程中不具备油茶果含水率检测条件时,可以利用压缩力为10 N的弹簧针穿刺茶壳的方式快速判断油茶果含水率是否>45%,结合前面的结论,油茶果含水率>45%时可以使用弹簧针插壳式清选方法进行清选;含水率<45%时,则需要进一步检测油茶果含水率。

油茶籽壳清选一直是油茶果加工的瓶颈,同时也是油茶产品价格居高的主要原因之一,弹簧针插壳式清选方法可以提高清选率、降低损籽率,同时能实现机器小型化,能够有效降低生产成本。

同时,试验研究也存在一些问题:茶籽外侧穿刺力值不集中,分布较广,通过查阅近几年的油茶果发育过程的文献,发现茶壳和茶籽壳的主要成分是木质素。在细胞壁木质化过程中,木质素逐步渗入到细胞壁,填充于纤维素构架内,加大了细胞壁的硬度,增强了细胞的机械支持力或抗压强度^[20]。随着油茶果发育过程木质素的积累,对茶籽、茶壳的硬度(穿刺力)有着重要影响。且随着油茶果的发育,茶籽、茶壳木质素的积累并不同步,其中茶壳木质素积累时间在茶壳发育中期,茶籽壳

木质素积累时间为茶籽发育末期^[21]。所以油茶果的采摘时间,即茶籽成熟度对茶籽、茶壳穿刺力有较大影响,若采摘时间在茶籽壳完全木质素积累后,茶籽、茶壳穿刺力差异性会更大,弹簧针插壳式清选效果更佳。未来研究弹簧针插壳式清选技术,可以结合油茶果成熟度和油茶果木质素的积累对油茶果穿刺力学特性进行研究,同时各个地区油茶果采摘时间对油茶果营养指标的影响和控制油茶籽质量有待进一步研究。

致谢:江西省科学技术厅项目(20192BBF60049)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] 曹瑞兰,李知青,欧阳雯婷,等.油茶NAC基因鉴定及对干旱胁迫响应分析[J].江西农业大学学报,2021,43(6):1357-1370.
CAO R L, LI Z Q, OUYANG W T, et al. Identification of NAC gene in *Camellia oleifera* and analysis of its response to drought stress[J]. *Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43(6): 1357-1370.
- [2] 杨抑.中国油茶起源初探[J].中国农史,1992,(3):74-77.
YANG Y. A Preliminary study on the origin of Chinese *Camellia oleifera* [J]. *Chinese agricultural history*, 1992(3): 74-77.
- [3] 柏爰爱,宋大海,张富强,等.油茶籽油与橄榄油营养价值的比较[J].中国油脂,2008,33(3):39-41.
BAI Y A, SONG D H, ZHANG F Q, et al. Comparison of the nutritional value of *Camellia oleifera* seed oil and olive oil [J]. *China oils and fats*, 2008, 33(3): 39-41.
- [4] ZHANG S, LI X. Hypoglycemic activity in vitro of polysaccharides from *Camellia oleifera* Abel seed cake [J]. *International journal of biological macromolecules*, 2018, 115: 811-819.
- [5] 李丽,吴雪辉,寇巧花.茶油的研究现状及应用前景[J].中国油脂,2010,35(3):10-14.
LI L, WU X H, KOU Q H. Research advance and application prospect of *Camellia* seed oil [J]. *China oils and fats*, 2010, 35(3): 10-14.
- [6] 梅方炜,胡静,欧天山,等.油茶深精加工研究进展[J].粮食与油脂,2021,34(11):6-8.
MEI F W, HU J, OU T S, et al. Research progress on deep processing of *Camellia oleifera* Abel [J]. *Cereals & oils*, 2021, 34(11): 6-8.
- [7] 夏美玲,王允圃,张淑梅,等.油茶壳综合利用研究进展[J].生物质化学工程,2021,55(6):26-38.
XIA M L, WANG Y P, ZHANG S M, et al. Research progress on comprehensive utilization of *Camellia oleifera* Abel shell [J]. *Biomass chemical engineering*, 2021, 55(6): 26-38.
- [8] 洪燕真,洪流浩,戴永务.农户油茶成本收益分析[J].浙江农林大学学报,2013,30(1):107-113.
HONG Y Z, HONG L H, DAI Y W. Cost-benefit analysis of farmer households' *Camellia oleifera* planting [J]. *Journal of Zhejiang A & F university*, 2013, 30(1): 107-113.
- [9] 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.
QU Z X, FAN T, ZHANG S C, et al. Analysis of research status of *Camellia* fruit peeling and separating equipment [J]. *Forestry machinery & woodworking equipment*, 2017, 45(11): 4-7.
- [10] 段宇飞,皇甫思思,王焱清,等.基于机器视觉的油茶果果壳与茶籽分选方法研究[J].中国农机化学报,2020,41(6):171-178.
DUAN Y F, HUANG F S S, Wang Y Q, et al. Sorting method of seed and shells of the *Camellia oleifera* fruit based on machine vision [J]. *Journal of Chinese agricultural mechanization*, 2020, 41(6): 171-178.
- [11] 刘滨凡,战廷文,王怀宇.风吸式多功能坚果脱壳机的研制[J].森林工程,2005(2):10-12.
LIU B F, ZHAN T W, WANG H Y. Development of multifunctional wind-absorbing machine for nuts decladding [J]. *Forest engineering*, 2005(2): 10-12.

- [12] 彭润絮,李冯程,金文闻,等.油茶果蒲籽浮选分离技术的设计与应用[J].湖北农机化,2019(10):4-8.
PENG R X, LI F C, JIN W W, et al. Design and application of flotation separation technology for *Camellia oleifera* pudding seeds[J]. Hubei agricultural mechanization, 2019(10):4-8.
- [13] 兰峰,刘涛,苏子昊,等.油茶果脱壳清选成套设备的研究[J].中国农机化学报,2016,37(11):85-93.
LAN F, LIU T, SU Z H, et al. Research on shelling and sorting complete sets of *Camellia oleifera* fruit[J]. Journal of Chinese agricultural machinery, 2016, 37(11):85-93.
- [14] 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.
LAN F, SU Z H, DAI Y Z. Research and test on sorting machine for *Camellia oleifera* seeds with plane toothed smooth roller [J]. Agricultural engineering, 2020, 10(10):66-73.
- [15] 李明真.油茶果清选机的结构拓扑优化设计研究[D].天津:天津科技大学,2019.
LI M Z. Study on topology optimization design of scalping machine fruit of *Camellia oleifera* [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2019.
- [16] 熊平原,王毅,吴卓葵,等.油茶青果脱壳装置研究与设计[J].中国农机化学报,2016,37(5):126-129.
XIONG P Y, WANG Y, WU Z K, et al. Research and design on shelling machine of green oleifera fruit [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2016, 37(5):126-129.
- [17] 邓勇杰,胡淑芬,赖曲芳,等.油茶鲜果穿刺力学特性试验研究[J].南方农机,2021,52(14):6-3.
DENG Y J, HU S F, LAI Q F, et al. Experimental study on puncture mechanical properties of fresh *Camellia oleifera* fruit [J]. Forum of south China, 2021, 52(14):6+1-3.
- [18] 胡淑芬,邓勇杰,刘木华,等.一种针辊插壳式油茶籽壳清选装置[P].CN211847846U,2020.
HU S F, DENG Y J, LIU M H, et al. Needle roller insert shell type *Camellia oleifera* seed husk sorting device [P]. CN211847846U, 2020.
- [19] 葛永金,曾海勇,程亚平,等.不同仓储后熟处理对油茶鲜果果蒲性状与茶油品质的影响[J].浙江林业科技,2021,41(5):95-98.
GE Y J, ZENG H Y, CHENG Y P, et al. Effect of different storage treatments on character of fresh fruit of *Camellia oleifera* 'Changlin 40' and oil quality [J]. Journal of Zhejiang forestry science and technology, 2021, 41(5):95-98.
- [20] 陈永忠,谭晓风,David Clapham.木质素生物合成及其基因调控研究综述[J].江西农业大学学报,2003(4):613-617.
CHEN Y Z, TAN X F, DAVID C H. Lignin biosynthesis and genetic regulation [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2003(4):613-617.
- [21] 晏巢,姚小华,殷恒福,等.油茶果实生长发育动态和木质素积累规律[J].江西农业大学学报,2020,42(4):788-801.
YAN C, YAO X H, YIN H F, et al. Fruit development dynamics and lignin accumulation law of oil tea [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2020, 42(4):788-801.