

脱皮对油莎豆压缩特性的影响

贾会杰, 李晓丹, 张振山

(河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001)

摘要:为探究脱皮对油莎豆压缩特性影响的内在机制,为油莎豆压榨制油工艺条件的制订和收获、运输、加工机械的改进提供数据支持,考察了油莎豆皮和仁在主要成分和微观结构上的异同,以及脱皮和未脱皮油莎豆在不同水分含量、压缩速率、压缩方位和颗粒大小下的压缩特性参数(位移、压缩力、破坏能和硬度)。结果表明:油莎豆仁和皮在主要成分和微观结构上存在很大差异,油莎豆仁的粗蛋白质、粗脂肪和淀粉含量分别为油莎豆皮的1.8、3.3倍和17.9倍;油莎豆仁的细胞呈蜂窝状,而油莎豆皮则呈片状;物性分析发现,与脱皮油莎豆相比,未脱皮油莎豆除具有破裂点还具有明显的屈服点;脱皮和未脱皮油莎豆压缩力范围分别为93.94~197.62 N和103.45~245.14 N,硬度范围分别为23.45~43.70 N/mm和24.27~53.02 N/mm;水分含量、压缩速率、压缩方位和颗粒大小等因素均对油莎豆的压缩特性参数具有显著影响,油莎豆压缩速率和颗粒大小与其压缩力和破坏能之间呈正向关系。脱皮后的油莎豆更容易发生压缩损伤,水分含量为15%的大颗粒未脱皮油莎豆不容易破裂,沿y轴方向低速率压缩更容易导致油莎豆受压损伤。

关键词:油莎豆;脱皮;压缩特性;压缩力;破坏能;硬度

中图分类号:TS222+.1;TS224.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2022)10-0137-06

Effect of peeling on the compression characteristics of *Cyperus esculentus*

JIA Huijie, LI Xiaodan, ZHANG Zhenshan

(College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to explore the internal mechanism of the influence of peeling on the compression characteristics of *Cyperus esculentus*, and provide data support for the formulation of oil production process conditions and the improvement of harvesting, transportation and processing machinery, the compression characteristics (breaking force, distance, breaking energy and hardness) of the peeled and unpeeled *Cyperus esculentus* under different moisture content, loading rates, loading positions and particle sizes, as well as the similarities and differences of the skin and kernel of *Cyperus esculentus* in main components and microstructure were investigated. The results showed that there were great differences in main components and microstructure of the kernel and skin of *Cyperus esculentus*. The contents of crude protein, crude fat, and starch in kernel were 1.8, 3.3 times and 17.9 times as high as that in skin, respectively. The kernel cells were honeycomb-like, while the skin cells were lamellar. As revealed by texture analyzer, compared with peeled samples, unpeeled samples also showed conspicuous yield point in addition to the ruptured point. The ranges of breaking force and hardness of peeled and unpeeled *Cyperus esculentus* were 93.94-197.62 N, 103.45-245.14 N and 23.45-43.70 N/mm, 24.27-

53.02 N/mm, respectively. Additionally, the compression characteristic parameters of *Cyperus esculentus* were significantly affected by moisture content, loading rates, loading positions and particle sizes. Moreover, there was a positive relationship between loading rates, particle sizes of *Cyperus esculentus* and its breaking force and breaking energy. Peeled samples are more prone to

收稿日期:2021-08-26;修回日期:2021-09-29

基金项目:国家重点研发计划资助(2019YFD1002605);国家自然科学基金资助(32172261);河南省重大科技专项课题(211100110100-3)

作者简介:贾会杰(1996),女,硕士研究生,研究方向为油脂加工理论与技术(E-mail)122095028@qq.com。

通信作者:张振山,副教授(E-mail)zsan010@126.com。

compressing damage, the unpeeled bigger *Cyperus esculentus* with 15% moisture content is not easy to crack, and the compression in the y -axis direction at low rate is more likely to cause the compression damage.

Key words: *Cyperus esculentus*; peeling; compression characteristics; breaking force; breaking energy; hardness

油莎豆(*Cyperus esculentus* L.),又名油莎草、铁荸荠、地杏仁、地下板栗、地下核桃、人参果和人参豆等,属莎草目莎草科,原产于非洲北部及地中海沿岸,现广泛分布于非洲、亚洲、欧洲和美洲的热带、亚热带及温带地区^[1-2]。我国油莎豆种植面积达1.33万 hm^2 以上,主要分布于东北、西北、黄淮和长江流域等地区。油莎豆为块茎、穴生,每穴结果200~300粒,亩产干豆500~600 kg,为花生产量的2倍,油菜籽产量的3~4倍^[3]。油莎豆所含营养物质十分丰富,其中脂肪含量占20%~30%,淀粉含量占25%~40%,蛋白质含量占5%~10%,此外还含有少量矿物质元素及多种维生素等^[4]。油莎豆可以生吃炒食,也可以榨油;油莎豆油含油酸64.9%、亚油酸15.5%、亚麻酸0.9%,其营养价值与花生油相似;油莎豆脱脂饼粕含有大量淀粉和糖,可用于酿酒、制饴糖,产生的酒糟和糖渣还可用于养猪和肥田^[5]。因此,油莎豆具有潜在的开发价值和广阔的市场前景。

油莎豆通常呈圆形、椭圆形和新月形,表皮厚实且有节和凹眼^[1],收获、运输、加工过程极易造成油莎豆内外部损伤。油莎豆外部损伤造成油莎豆易霉变,严重影响油莎豆的品质。内部损伤的油莎豆如作为种子,会造成发芽率低,严重影响油莎豆的产量。此外,油莎豆作为食用豆或者榨油原料,往往需要进行脱皮加工。脱皮前后的油莎豆在质构特性方面发生了明显变化,这些变化对加工设备构件结构、材质选择、加工工艺制订等均具有重要影响。因此,对脱皮和未脱皮油莎豆的力学特性分析,有利于油莎豆收获、运输、加工机械的改进,油莎豆加工工艺制订和油莎豆产品品质的提升。目前,国内外学者已对玉米^[6]、核桃^[7-8]等农产品的力学特性进行了研究,而有关油莎豆力学特性方面的研究尚未见报道。

本文对油莎豆仁和油莎豆皮的主要成分和微观结构进行分析,利用物性分析仪在不同条件下对未脱皮和脱皮油莎豆进行压缩试验,以获取压缩力-位移曲线,分析水分含量、压缩速率、压缩方位和颗粒大小等对未脱皮和脱皮油莎豆压缩特性参数(位移、压缩力、破坏能和硬度等)的影响,以揭示油莎

豆皮影响油莎豆压缩特性的内在机制,为油莎豆收获、加工机械改进和压榨制油工艺参数的确定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

当年产油莎豆,产地为河南商丘,水分含量9.80%。

TA.XT.Plus型物性分析仪,英国Stable Micro Systems公司;202-2AB型电热恒温干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;AL-204型分析天平,上海梅特勒-托利多仪器有限公司;FW-100型高速万能粉碎机,北京市永光明医疗仪器有限公司;新型豆类整粒脱皮机,菏泽工科机械制造有限公司;MNT-150型游标卡尺,上海美奈特实业有限公司;Quanta-250型扫描电子显微镜,美国FEI公司。

1.2 试验方法

1.2.1 油莎豆脱皮

选取大小相似、颗粒完整且无霉变的油莎豆进行脱皮处理。油莎豆在脱皮机中揉搓脱皮12 min,脱皮后油莎豆籽粒表面含皮面积不大于脱皮前的5%。油莎豆籽粒表面含皮面积按参考文献[9]第二种方法进行测定。

1.2.2 油莎豆水分调整

油莎豆水分调整参照Ezeh等^[10]的方法。首先称取一定质量的油莎豆(W_i),根据油莎豆初始水分含量(m_i)和目标水分含量(m_f),由公式(1)算出加水量(Q)。将喷雾加水样品密封到双层聚乙烯袋中,在 $(5 \pm 2)^\circ\text{C}$ 条件下平衡7 d,以保证水分在油莎豆中的均匀分布。每次测试前,把所测样品升温至室温。

$$Q = W_i (m_f - m_i) / (100 - m_f) \quad (1)$$

1.2.3 油莎豆皮、仁主要成分的测定

粗蛋白质含量的测定参照GB 5009.5—2010,水分含量的测定参照GB 5009.3—2003,粗脂肪含量的测定参照GB/T 5512—2008,灰分含量的测定参照GB/T 5505—2008,淀粉含量的测定参照GB/T 5514—2008。

1.2.4 油莎豆几何尺寸测定

利用游标卡尺(精度0.01 mm)测量油莎豆颗粒长(L)、宽(W)、高(H)三维尺寸,如图1所示。根据文献[11],分别利用公式(2)、公式(3)和公式(4)计算油莎豆几何平均直径(D_g)、算术平均直径(D_a)和球度(S_p)。

$$D_g = (LWH)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$D_a = (L + W + H)/3 \quad (3)$$

$$S_p = (LWH)^{\frac{1}{3}}/L \times 100\% \quad (4)$$

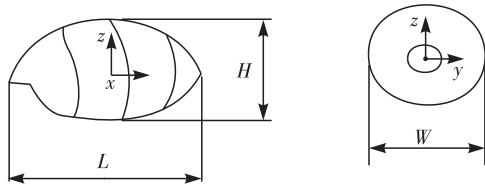


图1 油莎豆特征尺寸示意图

1.2.5 扫描电镜(SEM)分析

取完整的油莎豆,将皮和仁分离后分别切片,将切片固定于SEM载物台,用离子溅射仪对样品进行喷金处理,用SEM观察样品的表面形貌。

1.2.6 油莎豆压缩特性测定

利用物性分析仪对油莎豆的压缩特性进行测定。设定测试参数:测试前速度2.00 mm/s,测试后速度5.00 mm/s,压缩探头为P/36R,压缩平台为HDP/90,触发模式为Auto,触发力5.00 g。将油莎豆颗粒固定到平台中心进行单次压缩,获取压缩力-位移曲线。利用物性分析软件(Exponent version 6.1.16.0)对油莎豆压缩力-位移曲线进行分析,并获取位移、压缩力、破坏能和硬度等参数^[12-13]。每组试验选用30粒油莎豆进行测定。

1.2.7 数据统计分析

采用Origin 2019软件绘图;所有试验至少重复3次,结果以“平均值±标准差”表示;采用SPSS Statistics 24.0软件,用 t 检验对数据进行显著性分析($p < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 油莎豆皮、仁主要成分(见表1)

项目	油莎豆仁	油莎豆皮
水分含量	9.39 ± 0.27 ^a	9.96 ± 0.19 ^a
粗蛋白质含量 (N系数6.25)	5.24 ± 0.01 ^a	2.97 ± 0.24 ^b
粗脂肪含量	26.56 ± 0.41 ^a	8.11 ± 0.01 ^b
灰分含量	1.68 ± 0.01 ^b	3.15 ± 0.02 ^a
淀粉含量	41.45 ± 0.56 ^a	2.31 ± 0.26 ^b

注:同行不同字母表示差异显著($p < 0.05$)

由表1可知,油莎豆仁和油莎豆皮在粗蛋白质、灰分、粗脂肪和淀粉含量上具有显著差异($p < 0.05$)。油莎豆仁中的粗蛋白质、粗脂肪和淀粉含量分别为油莎豆皮中粗蛋白质、粗脂肪和淀粉含量的1.8、3.3倍和17.9倍,这表明油莎豆中的营养物质主要富集于油莎豆仁中。此外,油莎豆皮约占油莎豆总质量的14.37%。因此,对油莎豆进行脱皮处理不仅可以提升油莎豆产品品质,如淀粉纯度,而且有利于提高油莎豆加工效率,降低生产能耗和机械磨损^[14]。

2.2 油莎豆的几何尺寸

油莎豆根据粒度不同可分为大、中、小三个等级,对不同等级油莎豆的几何尺寸进行测定,结果见表2。

表2 不同等级油莎豆的几何尺寸

等级	样品	L /mm	W /mm	H /mm	D_g /mm	D_a /mm	S_p /%
大	未脱皮	13.87 ± 0.82	13.25 ± 0.34	11.67 ± 0.57	12.88 ± 0.36	12.93 ± 0.37	93.13 ± 4.20
	脱皮	11.32 ± 0.68	10.40 ± 0.40	9.48 ± 0.26	10.36 ± 0.26	10.40 ± 0.27	91.75 ± 3.88
中	未脱皮	12.24 ± 0.57	11.97 ± 0.67	10.29 ± 0.34	11.45 ± 0.30	11.50 ± 0.30	93.74 ± 4.28
	脱皮	9.98 ± 0.43	9.21 ± 0.55	8.54 ± 0.18	9.21 ± 0.15	9.24 ± 0.16	92.50 ± 4.03
小	未脱皮	10.56 ± 0.70	10.39 ± 0.46	8.67 ± 0.45	9.82 ± 0.32	9.87 ± 0.32	93.37 ± 5.56
	脱皮	8.84 ± 0.24	7.71 ± 0.36	7.20 ± 0.28	7.88 ± 0.17	7.91 ± 0.17	89.02 ± 2.17

由表2可知:未脱皮油莎豆三维尺寸大小范围为长10.56~13.87 mm,宽10.39~13.25 mm,高8.67~11.67 mm,几何平均直径9.82~12.88 mm,算术平均直径9.87~12.93 mm;脱皮油莎豆的三维尺寸范围为长8.84~11.32 mm,宽7.71~10.40 mm,高7.20~9.48 mm,几何平均直径7.88~10.36 mm,算术平均

直径7.91~10.40 mm。可以看出,脱皮显著改变了油莎豆的外观尺寸。此外,未脱皮和脱皮油莎豆的球度分别为93.13%~93.74%和89.02%~92.50%,未脱皮油莎豆具有更高的球度。

2.3 扫描电镜分析

油莎豆仁层和皮层微观结构扫描电镜图见图2。

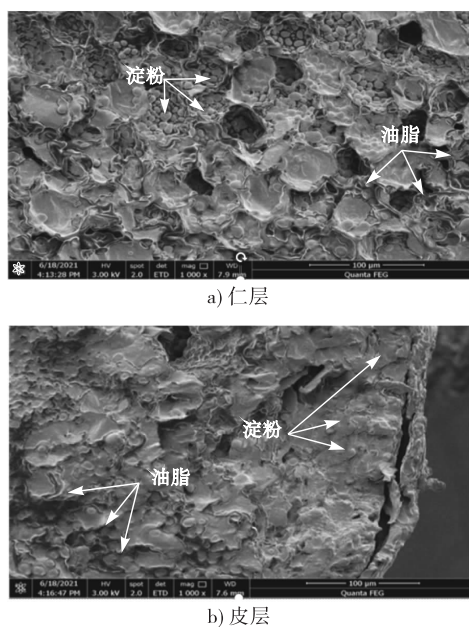


图2 油莎豆仁层和皮层微观结构扫描电镜图

由图2可知,油莎豆的仁层和皮层在微观结构上具有明显差异。油莎豆仁层呈蜂窝状,内含大量淀粉颗粒和油脂,淀粉聚集于细胞体内,淀粉颗粒大小相似,呈卵圆形,在部分细胞体中淀粉被油脂包裹。油莎豆皮层呈片状,淀粉颗粒分散镶嵌于细胞内,且无明显油脂聚集。上述现象表明,与皮层相比,油莎豆仁层中含有更多的淀粉和油脂,这与主要成分测定结果(见表1)一致。蜂窝状的结构使得仁层相对于皮层具有更好的弹塑性,而皮层中更多的纤维成分也使得其具有更好的抗压缩性能^[15]。

2.4 油莎豆压缩特性分析

2.4.1 脱皮对油莎豆压缩特性影响

未脱皮和脱皮油莎豆典型压缩变形曲线见图3。

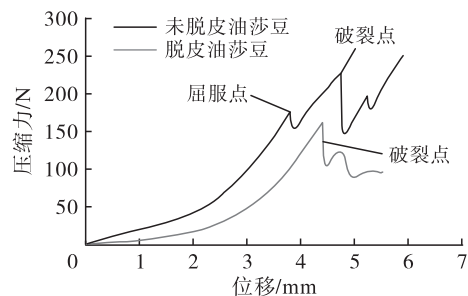


图3 未脱皮和脱皮油莎豆典型压缩变形曲线

由图3可知,未脱皮和脱皮油莎豆的压缩力-位移曲线具有明显差异。未脱皮油莎豆的压缩力-位移曲线上除具有明显的破裂点外,还在破裂点之前出现了屈服点^[16],而脱皮油莎豆的压缩力-位移曲线则较为平滑,且没有屈服点出现。与脱皮油莎豆相比,未脱皮油莎豆破裂时所能承受的压缩力更大。此外,未脱皮油莎豆在被压裂之后,压缩力随位移的增加而进一步增加,而脱皮油莎豆在破裂后,随着探头的进一步下压,压缩力虽有波动,但未超过破裂点所对应的压力值,且呈下降趋势。上述现象可能源于油莎豆仁和皮在成分、结构等方面的不同。未脱皮油莎豆表面被坚硬厚实的皮层覆盖,因此在承受压力时表现出更强的抗变形性,但压缩位移达到一定值后,皮层由于弹塑性较差,先于仁层发生破裂,进而对外表现出一个或多个屈服点。

2.4.2 水分含量对油莎豆压缩特性影响

分别选取中颗粒未脱皮和脱皮油莎豆,在压缩速率0.10 mm/s、压缩方位z轴的条件下进行压缩试验,测定不同水分含量下油莎豆压缩力学性能参数,结果见表3。

表3 不同水分含量下油莎豆压缩力学性能参数

油莎豆	水分含量/%	位移/mm	压缩力/N	破坏能/mJ	硬度/(N/mm)
未脱皮油莎豆	10	2.88 ± 0.12	148.82 ± 8.59	204.08 ± 3.56	51.58 ± 4.88
	15	4.93 ± 0.37	245.14 ± 32.10	347.01 ± 70.45	49.74 ± 5.53
	20	4.27 ± 0.17	186.68 ± 10.27	240.41 ± 19.22	43.70 ± 1.81
	25	4.38 ± 0.53	186.20 ± 30.63	235.77 ± 57.55	42.43 ± 4.40
脱皮油莎豆	10	3.40 ± 0.15	102.95 ± 4.85	88.58 ± 3.30	30.93 ± 2.55
	15	3.62 ± 0.14	117.09 ± 1.20	95.70 ± 2.35	31.74 ± 2.28
	20	4.34 ± 0.14	149.95 ± 35.13	154.50 ± 54.06	33.86 ± 7.15
	25	4.62 ± 0.20	150.51 ± 4.19	213.88 ± 14.94	34.44 ± 2.71

由表3可知,水分含量在10%~25%范围内,未脱皮油莎豆破裂时所能承受的压缩力为148.82~245.14 N,而脱皮油莎豆破裂时所能承受的压缩力为102.95~150.51 N。未脱皮油莎豆发生破裂时对应的压缩力、破坏能随着水分含量的降低呈先

增大后减小的趋势。这可能是由于水分含量较高时,油莎豆表面和内部组织结构较软,在受压时较易破裂^[17];随着水分含量的降低,油莎豆表面和内部组织结构变硬,抵抗破裂的能力提高;当水分含量继续降低时,油莎豆内部连接力降低,脆性增大,在受

压时易损伤。未脱皮油莎豆的硬度随水分含量的增加呈降低趋势,这可能是由于水分含量较高时,未脱皮油莎豆变软导致^[18]。脱皮油莎豆发生破裂时所对应的位移、压缩力、破坏能和硬度均随水分含量的增大而增大。这可能由于随着水分含量的增加,脱皮油莎豆内部组织黏弹性较大,在压缩时不易损伤。未脱皮和脱皮油莎豆压缩特性参数随着水分含量的

增大表现规律不一致,这可能是由于皮层的多样性和复杂性造成的。

2.4.3 压缩速率对油莎豆压缩特性影响

分别选取中颗粒未脱皮和脱皮油莎豆,在水分含量10%、压缩方位z轴的条件下进行压缩试验,测定不同压缩速率下油莎豆压缩力学性能参数,结果见表4。

表4 不同压缩速率下油莎豆压缩力学性能参数

油莎豆	压缩速率/(mm/s)	位移/mm	压缩力/N	破坏能/mJ	硬度/(N/mm)
未脱皮油莎豆	0.10	2.88 ± 0.12	148.82 ± 8.59	204.08 ± 3.56	51.58 ± 4.88
	0.30	3.60 ± 0.07	156.00 ± 12.42	209.41 ± 7.43	44.07 ± 3.60
	0.50	3.82 ± 0.31	185.66 ± 38.09	241.09 ± 41.26	48.13 ± 3.94
脱皮油莎豆	0.10	3.39 ± 0.15	102.95 ± 4.85	88.58 ± 3.30	30.93 ± 2.55
	0.30	3.45 ± 0.21	111.67 ± 4.00	116.10 ± 7.15	32.97 ± 1.93
	0.50	3.51 ± 0.11	120.58 ± 14.61	117.47 ± 10.53	33.84 ± 5.31

由表4可知,不同的压缩速率下(0.10~0.50 mm/s),未脱皮油莎豆破裂时所能承受的压缩力为148.82~185.66 N,而脱皮油莎豆破裂时所能承受的压缩力为102.95~120.58 N,两种油莎豆发生破裂时所对应的位移、压缩力和破坏能均随压缩速率的增大而增大。这是由于压缩速率越大,动能越大,在较短时间内对受压的籽粒做功较多,在宏观上表现出抵抗压力的能力提高^[19]。此外,未脱皮油莎豆

的硬度随压缩速率的增加呈先降低后增加的趋势,而脱皮油莎豆的硬度则随压缩速率的增加而逐渐增加。

2.4.4 压缩方位对油莎豆压缩特性影响

分别选取中颗粒未脱皮和脱皮油莎豆,在水分含量10%、压缩速率0.10 mm/s的条件下进行压缩试验,测定不同压缩方位下油莎豆压缩力学性能参数,结果见表5。

表5 不同压缩方位下油莎豆压缩力学性能参数

油莎豆	压缩方位	位移/mm	压缩力/N	破坏能/mJ	硬度/(N/mm)
未脱皮油莎豆	x轴	4.78 ± 0.62	118.80 ± 25.86	206.08 ± 69.69	24.27 ± 4.11
	y轴	4.15 ± 0.56	103.45 ± 21.76	167.39 ± 44.49	24.66 ± 2.63
	z轴	2.88 ± 0.12	148.82 ± 8.59	204.08 ± 3.56	51.58 ± 4.88
	x轴	4.71 ± 0.07	111.65 ± 5.62	119.07 ± 4.26	23.45 ± 0.47
脱皮油莎豆	y轴	4.01 ± 0.25	93.94 ± 6.72	82.09 ± 6.70	23.83 ± 2.86
	z轴	3.40 ± 0.15	102.95 ± 4.85	88.58 ± 3.30	30.93 ± 2.55

由表5可知,不同的压缩方位下,未脱皮油莎豆破裂时所能承受的压缩力为103.45~148.82 N,而脱皮油莎豆破裂时所能承受的压缩力为93.94~111.65 N。两种油莎豆发生破裂时的破坏能均为x轴最大,z轴次之,y轴最小,这与孙静鑫等^[20]所研究的谷子在同一水分含量不同压缩方位破裂时所需的破坏能变化规律一致,可能是由于油莎豆内部组织结构和细胞的排列松紧不同所造成的。未脱皮油莎豆破裂时所能承受的压缩力z轴最大,x轴次之,y轴最小;脱皮油莎豆破裂时的压缩力x轴最大,z轴次之,y轴最小。由此可知,y轴放置是油莎豆抵抗压力最薄弱的位置。未脱皮和脱皮油莎豆的硬度均为z轴最大,y轴次之,x轴最小。此外,未脱皮和脱皮油莎豆破裂时所对应的位移均为x轴最大,y轴次之,z轴最小。

2.4.5 颗粒大小对油莎豆压缩特性影响

分别选取不同颗粒大小的未脱皮和脱皮油莎豆,在水分含量10%、压缩速率0.10 mm/s、压缩方位z轴的条件下进行压缩试验,测定不同颗粒大小下油莎豆压缩力学性能参数,结果见表6。

由表6可知,颗粒大小对油莎豆的压缩力学性能有显著影响。未脱皮和脱皮油莎豆的压缩力、破坏能和硬度均随油莎豆颗粒增大而增大。在所考察颗粒范围内,未脱皮油莎豆破裂时所能承受的压缩力为130.05~210.18 N,而脱皮油莎豆破裂时所能承受的压缩力为95.14~197.62 N。结果表明,颗粒小的油莎豆硬度较低,更容易发生压损。这可能是由于体积较小的油莎豆通常发育不太成熟,因此仁层和皮层的细胞结构都更为疏松,但具体原因还有待进一步研究。

表6 不同颗粒大小下油莎豆压缩力学性能参数

油莎豆	颗粒等级	位移/mm	压缩力/N	破坏能/mJ	硬度/(N/mm)
未脱皮油莎豆	大	4.00 ± 0.63	210.18 ± 15.48	388.91 ± 93.64	53.02 ± 6.76
	中	2.88 ± 0.12	148.82 ± 8.59	204.08 ± 3.56	51.58 ± 4.88
	小	2.83 ± 0.11	130.05 ± 11.49	173.42 ± 19.41	44.17 ± 4.46
脱皮油莎豆	大	4.35 ± 0.13	197.62 ± 12.72	234.73 ± 19.86	43.70 ± 1.05
	中	3.39 ± 0.15	102.95 ± 4.85	88.58 ± 3.30	30.93 ± 2.55
	小	3.15 ± 0.17	95.14 ± 7.00	68.48 ± 6.55	30.25 ± 2.02

3 结论

油莎豆的皮和仁在成分和组织结构上有显著差异。油莎豆皮的粗脂肪、淀粉和粗蛋白质含量显著低于油莎豆仁,同时油莎豆皮的细胞组织结构也更为紧实。脱皮对油莎豆的几何尺寸和力学性能影响显著,脱皮油莎豆颗粒尺寸、压缩力、破坏能和硬度显著降低,这为脱皮油莎豆压榨制油相比于未脱皮油莎豆需要较低的压力提供了理论数据参考,以达到节能环保的目的。此外,油莎豆的压缩力学特性受到油莎豆水分含量、压缩速率、压缩方位和颗粒大小等因素影响,水分含量为15%的大颗粒未脱皮油莎豆不容易破裂,而沿y轴方向低速率压缩更容易导致油莎豆受压损伤,这为脱皮和未脱皮油莎豆运输和加工机械的优化提供了参考。

参考文献:

- [1] DEFELICE M S. Yellow nutsedge (*Cyperus esculentus* L.): snack food of the gods [J]. Weed Technol, 2002, 16(4): 901-907.
- [2] 王瑞元, 王晓松, 相海. 一种多用途的新兴油料作物: 油莎豆 [J]. 中国油脂, 2019, 44(1): 1-4.
- [3] 厉广辉, 王兴军, 张斌, 等. 不同油莎豆品种在山东种植的产量与品质研究 [J]. 山东农业科学, 2021, 53(3): 61-64.
- [4] SÁNCHEZ-ZAPATA E, FERNÁNDEZ - LÓPEZ J, ANGEL PÉREZ - ALVAREZ J. Tiger nut (*Cyperus esculentus*) commercialization: health aspects, composition, properties, and food applications [J]. Compr Rev Food Sci F, 2012, 11(4): 366-377.
- [5] 瞿萍梅, 程治英, 龙春林, 等. 油莎豆资源的综合开发利用 [J]. 中国油脂, 2007, 32(9): 61-63.
- [6] TARIGHI J, MAHMOUD A, ALAVI N. Some mechanical and physical properties of corn seed [J]. Afr J Agric Res, 2011, 6(16): 3691-3699.
- [7] 孙偲, 曹成茂, 姜帅帅, 等. 山核桃破壳力学性能试验 [J]. 安徽农业大学学报, 2016, 43(2): 331-336.
- [8] ALTUNTAS E, ERKOL M. The effects of moisture content, compression speeds, and axes on mechanical properties of walnut cultivars [J]. Food Bioproc Tech, 2009, 4(7): 1288-1295.
- [9] GALBREATH R A, 吴金珠. 果实表面积的估算 [J]. 亚热带植物通讯, 1981(2): 55-56.
- [10] EZEH O, GORDON M H, NIRANJAN K. Enhancing the recovery of tiger nut (*Cyperus esculentus*) oil by mechanical pressing: moisture content, particle size, high pressure and enzymatic pre-treatment effects [J]. Food Chem, 2016, 194: 354-361.
- [11] SOYOYE B O, ADEMOSUN O C, AGBETOYE L A S. Determination of some physical and mechanical properties of soybean and maize in relation to planter design [J]. CIGR J, 2018, 20(1): 81-89.
- [12] 程绪铎, 严晓娟, 黄之斌. 储藏条件对大豆籽粒力学特性的影响 [J]. 中国粮油学报, 2014, 29(2): 67-71.
- [13] ZHAO N, FU N, LI D, et al. Study on mechanical properties for shearing breakage of oat kernel [J/OL]. Int J Food Eng, 2018, 14(2): 1-9 [2021-08-26]. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0097>.
- [14] 程园园, 刘大川, 刘晔, 等. 紫苏籽、花生仁压榨特性的研究 [J]. 中国粮油学报, 2016, 31(5): 100-105.
- [15] 张海静, 杨哲, 曹燕飞, 等. 挤压参数对酱油渣粗纤维含量影响研究 [J]. 中国酿造, 2021, 40(1): 123-127.
- [16] 杨作梅, 郭玉明, 崔清亮, 等. 黍子籽粒压缩力学特性试验研究 [J]. 农产品加工, 2016(10): 1-4, 8.
- [17] 邓享, 阚江明. 文冠果种子力学性能分析 [J]. 中国油脂, 2017, 42(8): 149-152.
- [18] 滕悦江, 金诚谦, 印祥, 等. 大豆脱粒过程籽粒力学特性试验研究 [J]. 农机化研究, 2020, 42(12): 121-128.
- [19] 姬江涛, 陶满, 张志红, 等. 油用牡丹籽粒破壳力学特性试验研究 [J]. 农机化研究, 2018, 40(6): 183-188.
- [20] 孙静鑫, 杨作梅, 郭玉明, 等. 谷子籽粒压缩力学性质及损伤裂纹形成机理 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 306-314.