

温 185 核桃压缩力学特性研究

Mechanical compression of Wen 185 walnut shell

李勇^{1,2} 张宏^{1,2} 王萍³
LI Yong^{1,2} ZHANG Hong^{1,2} WANG Ping³
沈柳杨¹ 高元舟¹ 吴小伟¹
SHEN Liu-yang¹ GAO Yuan-zhou¹ WU Xiao-wei¹

(1. 塔里木大学机械电气化工程学院, 新疆阿拉尔 843300; 2. 新疆维吾尔自治区普通高等学校现代农业工程重点实验室, 新疆阿拉尔 843300; 3. 塔里木大学生命科学学院, 新疆阿拉尔 843300)

(1. College of Mechanic and Electrical Engineering, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China; 2. Xinjiang Uygur Autonomous Region general Institutes of Higher Education Key Lab of Modern Agriculture Engineering, Alar, Xinjiang 843300, China; 3. College of Life Science, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China)

摘要:为了进一步改进核桃破壳装备的设计与制造,利用万能材料试验机研究核桃压缩破裂的力学过程,分析含水率、加载速度对核桃壳破裂力学参数的影响。沿 3 个加载方向压缩核桃和空核桃壳,对比分析核桃壳体的破裂过程。在 4 种不同加载速度(100,200,300,400 mm/min)下,对 4 种含水率(4%,6%,8%,10%)的空核桃壳进行压缩试验,测定核桃壳的破裂力、破裂功、破裂功率和理论弹性模量,并对各力学参数进行显著性分析。结果表明,核桃壳体破裂属脆性断裂,空壳核桃壳体在线性区间内的破裂力学参数能较好地反映核桃壳体的压缩力学特性。随含水率和加载速度的变化,核桃壳体的各力学参数呈一定规律变化,且含水率、加载速度对核桃壳线性区间的破裂力、破裂功、理论弹性模量的影响显著,对核桃壳线性区间的破裂功率的影响不显著。

关键词:核桃;压缩;力学特性;含水率;压缩速度

Abstract: In order to improve the design and manufacture of walnut processing machinery, mechanical properties for compression of whole solid, hollow walnut were analyzed to learn shell breaking process in different loading direction, and reduce mechanical damage of walnut seed in breaking shell process. Hollow walnut which H₂O contents (4%, 6%, 8% and 10%) were compression tested by microcomputer controlled mechanical through different loading rate (100, 200, 300 and 400 mm/min). Meanwhile, the force-deforma-

tion curves were analyzed and the rupture force, rupture energy, rupture power, and elastic modulus were performed to the basic characteristic quantity in significance. The results showed that: the fracture of walnut shell was ductile-brittle fracture, fracture mechanics parameters of hollow walnut shell in which a linear range relationship hold between compression force and deformation could better reflect compression characteristic changes. Fracture mechanics parameters of hollow walnut shell show some of regularity following the contents of H₂O and loading rate. The contents of H₂O and loading rate has obvious effects on rupture force, rupture energy, elastic modulus of hollow walnut shell. In linear range, rupture power of hollow walnut shell has the tendency of increase, but not significant.
Keywords: walnut shell; compress; mechanical properties; moisture content; compressive rate

核桃仁作为美味可口的坚果广受人们青睐,其由坚硬的外壳包裹,内部结构复杂,核桃仁与壳之间有隔膜支撑^[1-2]。在核桃工业化加工中,核桃破壳取仁仍以人工为主,生产效率低,成本高,且因敲击的力度不易控制,破壳时核桃仁碎裂程度高^[2]。

基于此,国内外诸多研究人员长期致力于核桃壳物理特征与压缩机械性能研究,探讨核桃含水率、加载方式和加载速度等因素对核桃受压破壳过程的影响^[3]。吴子岳^[4]测定了绵核桃壳的物理特性,利用薄壳理论进行内力分析,表明绵核桃壳的抗弯能力远小于抗压能力,核桃壳的破裂首先从集中力处破裂。史建新等^[5]利用有限元法建立了核桃的几何模型和破壳的有限元模型,分析了核桃脱壳的应力分布规律,找出了核桃壳变形量不大且产生局部裂纹点多、裂纹点易扩展的最佳施加方式。何义川等^[6]采用有限元法建立了

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:31160196,31260469);兵团科技攻关计划项目(编号:2014BA014);塔里木大学校长基金硕士项目(编号:TDZKSS201423)

作者简介:李勇,男,塔里木大学讲师,硕士。

通讯作者:张宏(1975—),男,塔里木大学副教授,博士。

E-mail:zhghog@163.com

收稿日期:2015-11-17

新疆薄皮核桃的力学模型,表明核桃受压部位不同产生的应力存在明显差异。李军政等^[7]研究分析了山核桃的结构尺寸、机械压缩式脱壳所需的临界破碎压力、压缩量和压缩速度等物理参数对脱壳性能的影响。结果表明,核桃脱壳性能取决于压缩峰值力和压缩量的大小,压缩比是影响核桃脱壳性能最重要的参数。

大量试验研究表明,核桃机械破壳的损伤特征与核桃自身的特性和施载形式与量值息息相关,其中核桃含水率、外力加载作用点、外力加载速度等因素均对核桃壳体破裂力学参数和壳体破裂起着关键作用^[8-11]。为了提高核桃破壳效率和高露仁率,需深入研究核桃壳的力学特性,分析不同工况下核桃壳体力学指标的变化范围与规律,才可为核桃破壳力学指标的识别、评判提供条件。

温 185 核桃是南疆地区主要种植的核桃品种,因个大、壳薄、果仁饱满、经济效益好广受消费者的青睐。目前为止,国内外迄今未见有关含水率、加载速度等因素对温 185 核桃壳体压缩力学特性的研究报道。本研究拟以南疆地区产温 185 核桃为原料,研究不同加载方向核桃、壳体的压缩破裂过程,从影响核桃破壳机械性能的含水率、加载速度入手,研究不同含水率和加载速度下核桃壳体破裂的破裂力、破裂功、弹性模量和破裂功率,分析其变化规律。为实际生产中,不同工况条件下提高核桃机械破壳的效率和破壳机械力值量化与调控提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材 料

温 185 核桃:购自南疆阿克苏地区阿拉尔市周边农场。

1.2 仪 器

万能材料试验机:WD-D3-7 型,上海卓技仪器设备有限公司;

电热鼓风烘箱:DHG-9623BS-III 型,上海圣科仪器设备有限公司;

电子天平:FA1104 型,上海安亭科学仪器厂。

1.3 试 验 方 法

1.3.1 核桃筛选与调湿 将同批次温 185 青皮核桃剥皮,剔除壳体畸形的核桃,筛选出核桃横径在 36~38 mm 的核桃。经试验测试,剥除青皮的温 185 核桃含水率分别为 42%,以此为基准将剥除青皮的温 185 核桃编号称重,按后期试验要求在核桃壳体迅速开孔挖去壳内仁体并再次计量壳体、仁体碎屑的重量(此过程设置参照样进行对比得出核桃壳损失重量和仁体损失重量),然后将空壳核桃放置于恒温烘箱内 40 °C 烘干并每隔 20 min 测量重量至预定含水率。

1.3.2 核桃压缩 将核桃调湿至预定含水率,由万能材料试验机以预定加载速度下沿纵向压缩核桃 12 mm,并依据万能材料试验机记录的加载压力—变形曲线,见图 1。核桃壳破裂点的破裂功由式(1)计算^[12],核桃壳破裂功率由式(2)计算^[13]。因核桃为非规整形形体,测试核桃破壳过程的应力与应变值较为困难,故引入名义应力和名义应变概念,计算绘制核桃壳破裂的名义弹性模量。名义应力为载荷除以核桃壳横径最大处圆形面积,名义应变为压缩位移除以核桃

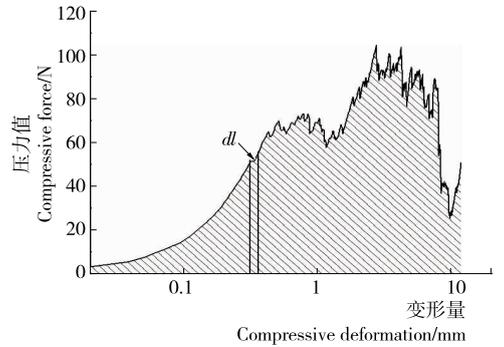


图 1 压力变化曲线

Figure 1 Variation curves of compressive force

横径最大处半径^[14]。

$$E = \int_0^{l_2} Fdl, \tag{1}$$

$$P = \frac{EV}{6 \times 10^4 L}, \tag{2}$$

式中:

E ——破裂功, mJ;

F ——核桃壳受压力, N;

dl ——核桃壳受压变形微量, mm;

P ——核桃壳破裂所需功率, W;

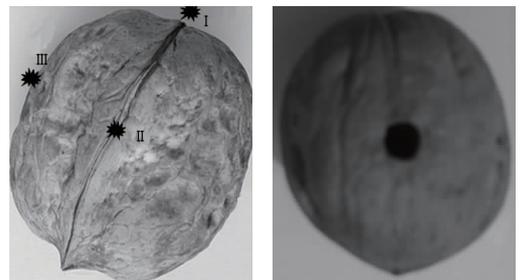
V ——压缩速度, mm/min;

L ——核桃壳破裂点的压缩变形量, mm。

1.3.3 试 验 设 计

(1) 加载方向:图 2 为实心核桃和空壳核桃实体图,在图 2(a)的核桃上点 I、II、III 分别为核桃沿纵向、缝合向和横向受万能材料试验机动压头作用点,图 2(b)的核桃在其中部开孔挖空核桃仁(核桃壳体开孔直径为 4 mm)。沿核桃的纵向、横向和缝合向三方向分别在万能试验机上各压缩实心核桃和空壳核桃,对比分析两类核桃壳体的受力与变形。

(2) 含水率与加载速度:试验中,核桃压力—变形曲线上出现的第一次压力峰值处定义为核桃壳体的破裂点,计算此点处破裂的力值、破裂功和理论弹性模量,分析空心核桃壳体破裂力学参数与核桃含水率、加载速度两参数之间的关系。试验按照表 1 的空心核桃的含水率和加载速度两参数的详细指标依次进行,每试验组测试相近核桃 20 枚,记录与计算各核桃壳破裂点处力值、破裂功和理论弹性模量,并取算术平均值。



(a) 实心核桃

(b) 空壳核桃

图 2 核桃实体图

Figure 2 Walnut physical solid and hollow

表 1 试验参数指标
Table 1 Test parameters index

水平	含水率/%	加载速度/(mm·min ⁻¹)
1	4	100
2	6	200
3	8	300
4	10	400

2 结果与分析

2.1 加载方向对核桃破壳力学性能的影响

实心核桃的纵向、缝合向和横向三方向压缩的加载压力—变形曲线,见图 3。核桃的压缩破裂过程大体描述为核桃壳体受压产生裂纹壳体变形,核桃壳裂纹扩展至破裂,核桃碎壳体与核桃仁共同受压破裂。结合图 3,核桃压缩按其受压破裂过程从力学角度划分为 3 阶段:线性区间、屈服区间、壳体与核桃仁共同承载区间。在线性和屈服区间,核桃的破裂以壳体变形和裂纹扩展为主,纵向和缝合向压缩的压力值要远大于横向压缩的压力值;在壳体与核桃仁共同承载区间,核桃的破裂为碎壳深度碎裂和仁体破裂,核桃沿 3 个方向压缩的压力值基本相近,压力值变化平缓。

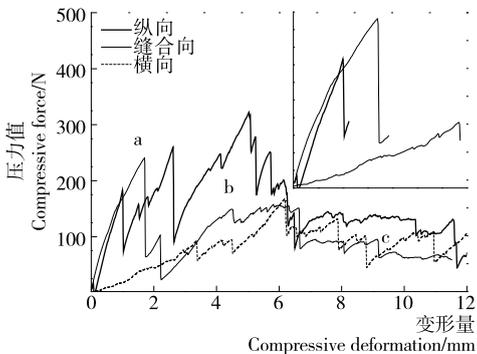


图 3 不同方向压缩实心核桃破壳压力曲线

Figure 3 Pressure curve of solid walnut shell-breaking from different loading directions

核桃壳破裂首先从压头与核桃接触部位作用处开始形成集中力,集中力处就是核桃壳体的破裂源,在集中力处压力不断加大使破裂源裂纹扩展至核桃壳体破裂产生波峰,核桃壳体破裂伴随相应的压力值回落产生波谷,即核桃壳体初破裂^[15-16]。干燥的核桃壳体是木质多孔结构材料,核桃壳体受压力作用发生弹性形变和塑性形变,当核桃壳体受压力达到壳体破裂时,核桃壳体破裂属韧性断裂。从材料韧性断裂角度分析,核桃壳体首次破裂位于线性区间,核桃的压力载荷与壳体变形量成线性关系,线性区间越短越脆,超过线性区间即发生断裂。分析图 3 中线性区间放大图可知,核桃沿不同方向压缩发生首次破裂的变形量依次为纵向<缝合向<横向。核桃壳内表与仁体间留有 2~3 mm 的间隙,当初破裂变形量越小,核桃壳受压变形对核桃仁挤压量越小。沿纵向压缩核桃壳体,壳体变形量最小先破裂。

空心核桃的纵向、缝合向和横向三方向压缩的加载压

力—变形曲线,见图 4。由图 4 可知,核桃壳体沿纵向、缝合向和横向三方向加载压缩,与实心核桃压缩曲线差异明显,核桃的压缩过程分为线性区间和屈服区间。在线性和屈服区间,核桃的破裂以壳体变形和裂纹扩展为主,纵向和缝合向压缩的压力值要远大于横向压缩的压力值。空心核桃完全破裂变形远小于实心核桃,核桃壳体破裂与裂纹扩展到一定程度即瞬间完全破裂。在线性区间,空心核桃沿三方向压缩曲线的压力与变形量间成线性关系,三方向压缩曲线线性区间内曲线斜率几乎一致,表明空心核桃比实心核桃更能准确反映核桃的实际弹性模量。

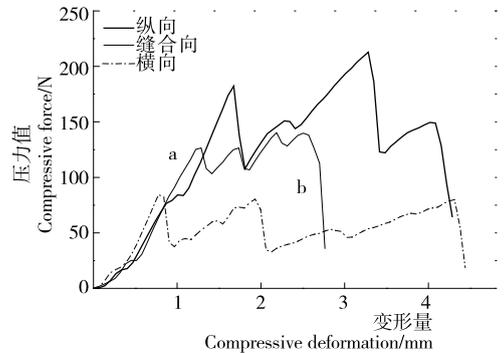


图 4 不同方向压缩空心核桃破壳压力曲线

Figure 4 Pressure curve of hollow walnut shell-breaking from different loading directions

2.2 含水率、压缩速度对线性区间空心核桃力学参数的影响

在研究核桃破壳取仁效果中,对比纵向、缝合向、横向 3 种压缩方向下核桃壳、仁体破碎后的核桃仁体积和碎屑量,发现核桃沿纵向压缩壳仁破裂物体积大,碎仁少,核桃壳仁的破裂程度好^[16]。核桃压缩破裂过程中线性区间为核桃壳体受力破裂初始阶段,分析空心核桃的含水率和压缩速度对核桃壳体破裂的力学性能的影响规律在核桃破壳生产加工中更据实践意义。

由图 5 和 6 可知,当核桃含水率为 4%,6%,8%,10% 时,核桃壳的破裂力和破裂功随加载速度的增加而上升。核桃的破壳力和破裂功随着含水率的增加而增加。核桃干燥时间越长其含水率越低,在干燥过程中核桃壳中的水分蒸发,使得壳体脆性增加,从而破裂力减小。由图 7 可知,当核桃含水率为 4%,6%,8%,10% 时,核桃破壳的功率变化规律不明显,随加载速度的增加大体呈先增后降的趋势。核桃破壳功率随着含水率的增加呈先增后降的趋势。由图 8 可知,当核桃含水率为 4%,6%,8%,10% 时,核桃壳的理论弹性模量随加载速度的增加而下降。核桃壳的理论弹性模量随着含水率的增加呈先增后降的趋势。

采用 Matlab 软件分析试验结果,得到含水率、加载速度与空壳核桃的线性区间力学参数的关系见表 2。统计分析后可知,含水率、加载速度对核桃壳线性区间的破裂力、破裂功、理论弹性模量的影响显著,对核桃壳线性区间的破裂功率的影响不显著,而含水率、加载速度与核桃壳线性区间各力学参数之间均存在二阶非线性的函数关系。

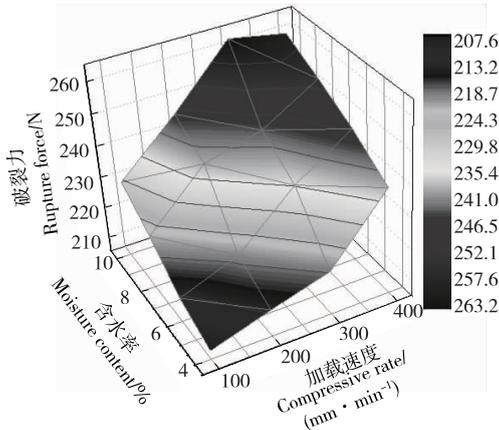


图5 不同含水率和加载速度时核桃壳破裂力

Figure 5 Walnut shell critical fracturing pressure under different moisture content and loading rates

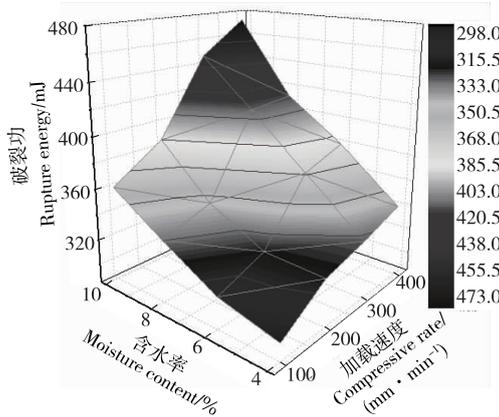


图6 不同含水率和加载速度时核桃壳破裂功

Figure 6 Walnut shell rupture energy under different moisture content and loading rates

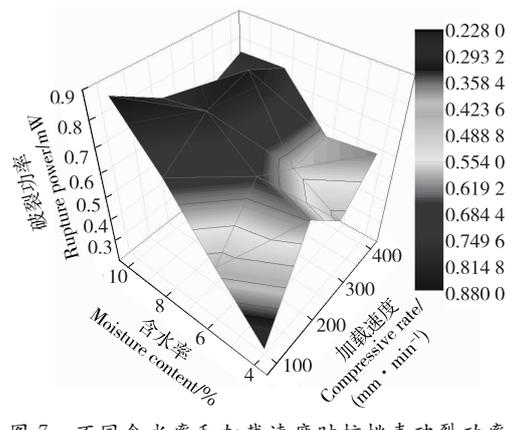


图7 不同含水率和加载速度时核桃壳破裂功率

Figure 7 Walnut shell rupture power under different moisture content and loading rates

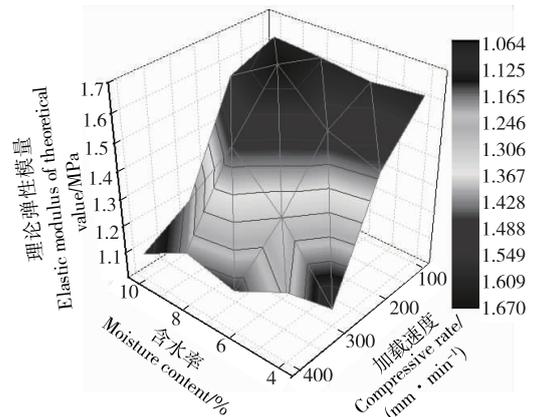


图8 不同含水率和加载速度时核桃壳线性区间理论弹性模量

Figure 8 Walnut shell elastic modulus of theoretical value for linear interval under different moisture content and loading rates

表2 含水率、加载速度对空壳核桃线性区间力学参数影响的分析结果[†]

Table 2 Modeling of the effects of moisture content and loading rates on hollow walnut shell mechanical parameters for linear interval

参数类别	F 检验	回归方程	R ² 值	显著性
破裂力/N	6.649 2	$y = -3.976 1x_2 + 51.330 5x_1^2 - 0.020 6x_2^2$	0.931 7	*
破裂功/mJ	9.234 4	$y = -5.425 8x_2 + 72.175 2x_1^2 - 0.029 0x_2^2$	0.966 7	*
破裂功率/mW	3.634 6	$y = -0.006 8x_2 + 0.107 3x_1^2 - 0.000 1x_2^2$	0.694 2	—
理论弹性模量/MPa	19.697 9	$y = -0.036 8x_2 + 0.443 4x_1^2 - 0.006 2x_2^2$	0.989 2	**

[†] x_1 . 含水率,%; x_2 . 加载速度,mm/min;—. 不显著;* . 差异显著;** . 差异极显著。

3 结论

(1) 核桃、壳体加载压缩初期,加载压力与核桃壳体变形量呈一定的线性变化关系,表明核桃壳体破裂属脆性断裂。因受核桃仁与壳内隔膜影响,不同加载方向下核桃的线性区段内压力与变形曲线差异明显。在不受核桃仁影响下,沿纵向、缝合向和横向加载空壳核桃的线性区段内压力与变形曲线基本一致。由此表明,空壳核桃壳体在线性区段内的破裂力学参数能较好地反映核桃壳体的压缩力学特性。

(2) 当核桃壳体含水率在4%~10%时,随含水率和加载速度的增加,核桃壳体的破裂力和破裂功呈上升趋势,破裂功率大体呈先增后降的趋势。核桃壳的理论弹性模量随含水率的增加呈先增后降,随加载速度的增加而下降。统计分析表明含水率、加载速度对核桃壳线性区段的破裂力、破裂功、理论弹性模量的影响显著,对核桃壳线性区段的破裂功率的影响不显著。

(下转第166页)

参考文献

- [1] 曹涤环, 刘静. 木槿的利用及栽培管理[J]. 绿化与生活, 2013(5): 19.
- [2] 彭毅, 谭金桃. 木槿的生药学研究[J]. 中医药导报, 2006, 12(8): 98-101.
- [3] 胡启山. 木槿[J]. 林业与生态, 2013(5): 33.
- [4] 李秀芬, 张建锋, 朱建军, 等. 木槿开花特性及食用价值[J]. 经济林研究, 2014, 32(1): 175-178.
- [5] 沈琼桃. 药用、食用、观赏兼备的植物——木槿[J]. 中国林副特产, 1999, 50(3): 53-54.
- [6] 韩学俭. 木槿清热利湿润燥[J]. 家庭医学, 2014(9): 53.
- [7] 那晓婷, 刘丹. 药用及观赏植物——木槿[J]. 中国林副特产, 2000(3): 53.
- [8] 苏万楷, 李裕, 黄家灿, 等. 木槿 de 利用及开发[J]. 湖南林业, 2006(3): 17.
- [9] Hou De-xing, Tong Xu-hui, Terahara N, et al. Delphinidin 3-sambubioside, a Hibiscus anthocyanin, induces apoptosis in human leukemia cells through reactive oxygen species-mediated mitochondrial pathway[J]. Arch Biochem Biophys, 2005, 440(1): 101-109.
- [10] Hsu R J, Hsu Y C, Chen Shu-pin, et al. The triterpenoids of Hibiscus syriacus induce apoptosis and inhibit cell migration in breast cancer cells[J]. BMC Complement Altern Med, 2015, 15(1): 65.
- [11] 卫强, 纪小影, 徐飞, 等. 木槿叶化学成分及抑制 α -葡萄糖苷酶活性研究[J]. 中药材, 2015, 38(5): 976-980.
- [12] 蔡定建, 戎敢, 靖青秀, 等. 木槿花挥发油化学成分的 GC/MS 分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(21): 93-96.
- [13] 李松, 吴光斌, 陈发河, 等. 超临界萃取瑯溪蜜柚精油工艺优化及组分分析[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 113-118.
- [14] Daintree L S, Kordikowski A, York P. Separation process for organic molecules using SCF technologies[J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2008, 60: 351-372.
- [15] 梁健钦, 杨焕琪, 熊万娜, 等. 超临界 CO₂ 萃取砂糖桔叶挥发油及其 GC—MS 分析[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 28-30.
- [16] Oussalah M, Caillet S, Lacroix M. Mechanism of action of Spanish oregano, Chinese cinnamon, and savory essential oils against cell membranes and walls of Escherichia coli O157: H7 and Listeria monocytogenes [J]. J. Food Prot, 2006, 69: 1 046-1 055.
- [17] 曾立, 向荣, 傅春燕, 等. 瑶药定心藤挥发油的抗肿瘤活性研究[J]. 现代肿瘤医学, 2013, 21(4): 710-712.
- [18] 卫强, 纪小影. 金边黄杨叶、茎挥发油成分分析及抗肿瘤活性研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(12): 42-48.
- [19] 刘敏洁, 赵琦, 梁娜, 等. 黔产盾叶唐松草叶挥发油 GC—MS 分析及生物活性研究[J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(24): 135-138.
- [20] 阎克里, 朱秀卿, 刘芳芳, 等. 分解前后白术挥发油对细胞凋亡及细胞周期影响的研究[J]. 中国药物与临床, 2012, 11(12): 1 372-1 375.
- [21] 黄超. 类天然杂环化合物的多样性导向合成及其生物活性研究[D]. 昆明: 云南大学, 2011: 1-2.
- [22] 陆敦, 印木泉, 易杨华. 韭黄中抗突变成分的分离与鉴定[J]. 第二军医大学学报, 1991(5): 453-456.
- [23] 李海峰. 苯并[a]比致雄性小鼠肺癌模型建立及雌二醇干预研究[D]. 北京: 军事医学科学院, 2007: 8-51.
- [24] 李水清, 张方蕾, 李洁, 等. 瞿麦石油醚萃取物抗肿瘤活性组分筛选及其成分分析[J]. 武汉大学学报: 医学版, 2014, 35(1): 11-15, 31.
- [25] 高崎. 苯丙醇类及木脂素类的抗诱癌作用及自由基清除活性[J]. 国外医学: 中医中药分册, 2003, 25(4): 249.

(上接第 60 页)

参考文献

- [1] 陆俊, 赵安琪, 成策, 等. 核桃营养成分与生理活性及开发利用[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 238-242.
- [2] 高警, 郑甲红, 安碾粮, 等. 偏心击打式核桃破壳机的设计与试验[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 133-136.
- [3] 李忠新, 杨军, 杨莉玲, 等. 一种核桃破壳取仁设备的研究[J]. 中国农机化, 2011, 30(3): 104-106.
- [4] 吴子岳. 绵核桃剥壳取仁机械的研究[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 164-169.
- [5] 史建新, 赵海军, 辛动军. 基于有限元分析的核桃脱壳技术研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 185-188.
- [6] 何义川, 史建新. 核桃壳力学特性分析与试验[J]. 新疆农业大学学报, 2009, 32(6): 70-75.
- [7] 李军政, 孙松林, 谢方平, 等. 山核桃脱壳试验研究[J]. 农机化研究, 2010, 29(12): 25-28.
- [8] 高警, 郑甲红, 闫茹, 等. 对影响核桃破壳力大小因素的探究[J]. 农机化研究, 2014, 33(9): 186-189.
- [9] 张宏, 马岩, 兰海鹏, 等. 温 185 核桃破壳取仁工艺试验研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(21): 7 187-7 190.
- [10] 刘奎, 李忠新, 杨莉玲, 等. 机械破壳时核桃仁损伤特征研究[J]. 农产品加工: 学刊, 2014, 30(18): 41-44.
- [11] 张宏, 马岩, 李勇, 等. 基于遗传 BP 神经网络的核桃破裂功预测模型[J]. 农业工程学报, 2014, 10(8): 78-84.
- [12] 杨锐, 陈红. 激光与核桃相互作用的力学推导及有限元分析[J]. 农机化研究, 2008, 29(4): 52-54.
- [13] 余为, 李慧剑, 梁希, 等. 金属半球壳压缩力学性能实验和模拟研究[J]. 工程力学, 2013, 30(11): 260-271.
- [14] 庞福振, 姚熊亮, 缪旭弘, 等. 加筋球壳结构稳定性及其优化研究[J]. 机械强度, 2012, 34(3): 342-350.
- [15] 张宏, 马岩, 郭文松, 等. 基于细胞水平上的温 185 核桃壳脆裂机理分析[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(3): 128-132.
- [16] 李勇, 张宏, 郝忠诚. 温 185 薄壳核桃破壳取仁试验研究[J]. 农机化研究, 2014, 35(7): 174-177.