

# 基于细胞水平上的温 185 核桃壳脆裂机理分析

张宏<sup>1,2</sup> 马岩<sup>1</sup> 郭文松<sup>2</sup> 张锐<sup>3</sup> 李勇<sup>2</sup>

1. 东北林业大学机电工程学院, 哈尔滨 150040; 2. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300;

3. 塔里木大学生命科学学院, 阿拉尔 843300

**摘要** 为提高核桃机械化破壳效果, 通过机械法破碎温 185 核桃的核桃壳, 采用环境扫描显微镜(SEM)对裂纹断面进行观察, 并根据材料脆性断裂原理对核桃脆裂断面进行分析。结果表明: 根据核桃壳体细胞断裂形貌的差异可以分为内外两层, 外层细胞尺寸小、密度大, 内层细胞尺寸大、密度小, 且外层区域的厚度是内层区域厚度的 2 倍左右; 核桃壳不同部位的断面组织形态相似, 存在天然的壳沟刻纹、缝隙、杂质、孔洞等裂纹形核特征, 这些特征是导致核桃壳体受载荷后裂纹萌生的原因; 对核桃的端部和横向腹部施加冲击载荷作用, 可以增强核桃破壳局部破碎率, 在核桃破壳时容易实现壳仁分离。

**关键词** 温 185 核桃; 机械破壳; 脆裂; 机理

**中图分类号** S 226; S 664.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2014)03-0128-05

核桃种植具有林业绿化和经济的双重优势, 而温 185 核桃的品种因皮薄(壳厚约 1~2 mm)、仁饱满、经济效益好受到广大林果种植农户的欢迎。新疆阿克苏地区是温 185 核桃的主产区, 在核桃加工中, 对核桃进行破壳取仁一直是核桃生产企业需要解决的难题。核桃外壳坚硬且内部结构复杂, 核桃仁与壳体之间有一定厚度的隔膜支撑, 破壳取仁难度较大。

近年来, 各种坚果加工的破壳工艺均有许多研究与突破, 特别是在宏观上对果实力学与物理特性进行的研究较多<sup>[1-16]</sup>。吴子岳<sup>[1]</sup>利用薄壳理论进行内力和变形分析对核桃壳的物理机械特性进行了研究, 结果表明两对法向集中力作用较有利于壳的完全均匀破裂; 史建新等<sup>[2]</sup>利用有限元法对核桃脱壳技术进行研究, 寻求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力方式。吴斌芳等<sup>[3]</sup>应用薄壳理论和断裂理论对绵核桃进行力学分析, 通过试验检验得到了绵核桃机械剥壳取仁的重要参数。另外, 在坚果破壳方面也有较多研究。谢丽娟等<sup>[4]</sup>采用压缩试验, 分析了莲子破壳力与等级大小的关系; 杨雪银<sup>[5]</sup>通过对板栗的压缩力学特性的观察, 指出板栗外形大小是影响破壳力的重要因素; 周祖愕等<sup>[6]</sup>对杏核物理特性进行研究, 探讨了

破壳间距对坚果破壳效果的影响; 袁巧霞等<sup>[7]</sup>通过对辊板式银杏脱壳装置的试验研究, 得到了轧距的最佳临界距离。

对核桃机械方式破壳的研究通常是在核桃壳体含水率、载荷加载速度、加载方式、破壳间距、坚果大小等方面, 而针对其组织结构与脆裂机理的研究报道较少。笔者利用环境扫描显微镜从细胞水平上对核桃壳体脆裂断面进行观察与分析, 旨在探讨核桃机械破壳脆裂的机理, 为提高核桃机械化破壳效果提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与设备

供试主要仪器与设备: FEI Quanta 200 型扫描电子显微镜(荷兰 FEI 公司); CTHI-150(A)B 型恒温恒湿箱(美国 STIK 公司); FA2004 型电子天平(上海方瑞公司生产); WD-P4 型万能非金属材料试验机(上海卓技仪器设备有限公司); Troubleshooter 1000 型高速成像仪(美国)等。

### 1.2 取样和样品处理

供试核桃品种为新疆阿克苏温宿县木本粮油林场, 品种为温 185。从核桃树体外围和内膛随机取样, 并剔除畸形和有病虫害的核桃果实, 在自然干燥

收稿日期: 2013-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31160196, 31260469)和兵团工业科技攻关计划项目(2014BA014)

张宏, 在职博士研究生, 副教授。研究方向: 农业机械化。E-mail: zhghog@163.com

通信作者: 马岩, 博士, 教授。研究方向: 林业与木工机械。E-mail: mayan@vip163.com

状态下储存半年以上入库备用。采用湿法测定核桃果实原始质量含水率为 6.22%。测试前从样品库取出核桃果实,利用机械法破碎后针对缝合线部位的纵横位置、顶部以及垂直于缝合处的横腹部进行选样,依照脆裂的裂纹断面分别处取样,并对样品观察部位进行编码(图 1)。

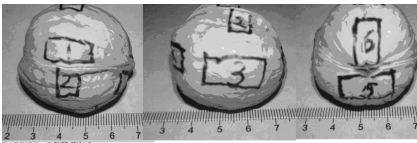


图 1 SEM 观察取样部位

Fig.1 The section of sample observed by SEM

1.3 测试方法

测试时取已标记编码的核桃壳样品若干,用双面胶将待测样品粘于观测基座上(图 2)。将测试核桃壳的断面部位露于上端,利用扫描电子显微镜对喷金后样品的断口处进行观察并拍摄电子图片,同时分别记录各样品观察时的分辨率、放大倍数、当前尺度等信息(图 3)。



图 2 已标记的样品

Fig.2 The labeled samples

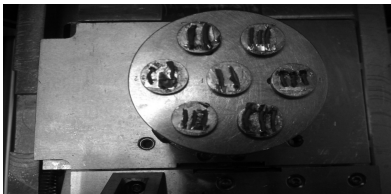


图 3 工作台上的样品

Fig.3 The samples had been dropted on the workbench

2 结果与分析

2.1 核桃壳断口的形貌

核桃壳体的微观组织由石细胞组成。石细胞是由多层薄壁细胞在内果皮硬核期木质素大量沉积在细胞壁形成的,并使细胞“石化”构成核桃坚硬的内果皮。利用扫描电子显微镜(SEM)在相同放大倍数(400 μm)下,对温 185 核桃壳断面进行观察,结果表明所有断面依据细胞的大小可以划分内外两层,外层细胞小而致密且多数为完整的球状,内层细

胞大而疏松且呈多孔状,并主要是由于石细胞的细胞壁自身断开而形成(图 4)。

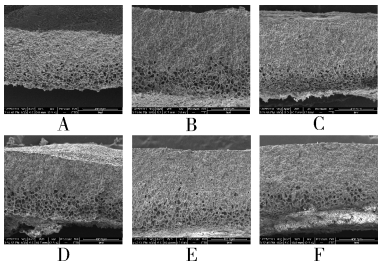


图 4 温 185 核桃断面各部位的形貌

Fig.4 Different regional patterns on endocarp of Wen 185 walnuts

2.2 核桃壳体细胞组织的结构

将核桃壳断面放大到 20 μm 后进行扫描电子显微镜观察,可以看出多数球状或椭球状细胞发生联粘成为异形结构,部分细胞呈球形或椭球形(图 5,图 6)。在细胞壁上有密集分布的单纹孔(直径 0.4~4.6 μm),单纹孔间距离为 2~8 μm。单纹孔具有核桃种子与外界的气体交换以及机械支持和保护作用。细胞之间存在着类似“管”状的器官称管胞(图 6)。管胞是核桃壳细胞相互联系的纽带。

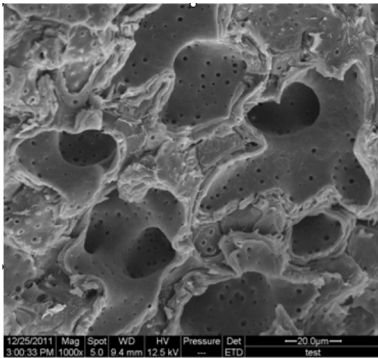


图 5 核桃壳内层区域断裂形貌

Fig.5 Inner regional disrupt patterns of walnut shells

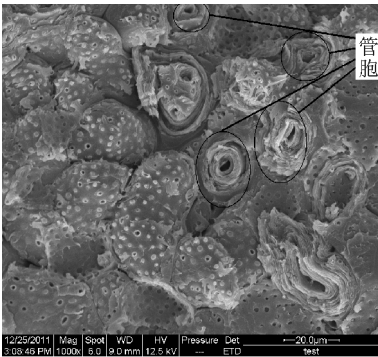


图 6 核桃壳外层区域断裂形貌

Fig.6 Outer regional disrupt patterns of walnut shells

2.3 细胞的排列规律和脆裂形态

由图 4 可知,核桃各个部位的断面形貌相似,由外层向内部逐步观察时,细胞径级逐渐变大。通过测量,断口处表层的细胞径级在 16~43  $\mu\text{m}$  之间。细胞断裂时裂纹是沿着细胞的界面开始的,该区域细胞的尺寸较小、密度较大。内层区域的细胞径级在 27~53  $\mu\text{m}$  之间,断裂时裂纹是沿着细胞的内部开裂的,该区域细胞的尺寸较大、密度较小。测量结果表明,外层区域的厚度是内层区域厚度的 2 倍左右(图 7)。

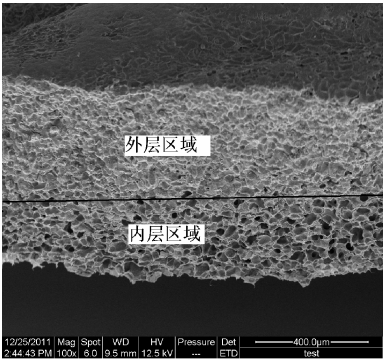


图 7 核桃壳体细胞的排列规律

Fig. 7 Arrangent rules of walnut shell cells

2.4 核桃壳的脆裂机理

通过观察发现核桃壳断裂时存在两种断裂形貌,外层区域是核桃壳体沿细胞壁界面断裂,定义为界面断裂;内层区域是核桃壳体穿透细胞壁断裂,定义为穿透断裂。

当外层区域受到外加载荷的作用时,表层区域的细胞受力均匀,此时细胞在感受到外界载荷时细胞壁界面的强度小于细胞壁本身的强度,由于裂纹扩展时是沿着受力最弱的方向进行的。表现为细胞壁的力学性能强于细胞界面,因而导致沿着细胞界面断裂。这些细胞界面将直接承受载荷,很易于使细胞沿细胞壁分离形成裂纹,并使裂纹沿着细胞壁的边界扩展,最后造成核桃壳中的细胞沿着细胞边界断裂,它是完全脆性的判断特征。此时可以判定细胞壁的力学性能强于细胞界面,形成界面断裂。

当内层区域受到同样外加载荷的作用时,由于这个区域的细胞个体较大,因而会出现载荷分布不均匀的现象,同时单个细胞承受的载荷相对较大,超过了单个细胞壁的断裂强度,此时的外力并没有达到细胞与细胞之间的界面强度,而且细胞的破坏还释放了部分应力,使界面受力减小,裂纹穿过细胞发

生断裂,进而穿过细胞内部扩展。穿过细胞断裂可以是宏观塑性断裂,也可以是宏观脆性断裂。由于核桃壳内层区域的含水率高于外层区域,因而此处相对于表层的强脆性而呈现韧性特性,导致其为穿过细胞的断裂形貌,形成穿透断裂。

2.5 核桃壳的脆断特性

利用扫描电镜直接观测核桃任意脆裂断面,可以发现如下特征:

A. 核桃壳表皮上(未施加载荷前)存在一些狭长的凹陷,在表面呈现脉络状,称之为壳沟刻纹<sup>[16]</sup>。断裂时壳沟刻纹会沿着纹路发生脆裂形核,进而沿着细胞壁发生断裂,在破壳试验过程中,此种断裂形态贡献率最大。

B. 断面细胞壁上存在着形状各异的单纹孔。在整个断面上,细胞断裂时这些单纹孔影响细胞的断裂形态。由图 5 和图 6 可以发现,断面的外层区域圆孔向外凸起,形态完整,而在内层区域细胞壁的孔洞向内凹陷。在外载荷作用下发生裂纹时当延展到单纹孔时就会消除应力集中的状态,因此,单纹孔增强了核桃壳的机械强度。

C. 断面边缘处存在一些由杂质形成的颗粒,这些颗粒是发生裂纹形核的另一主要原因。由于杂质与其相邻的细胞间存在天然缝隙,裂纹形核可能会因杂质的存在而形成,引起断裂的发生。

根据断裂力学理论可知,材料的断裂过程为裂纹萌生→裂纹扩展→断裂,然而裂纹的萌生是由形核开始的。图 8 中的缝隙和杂质正是裂纹形核的关键部位,核桃的断裂源就发生在这些地方,具体在何处成为裂纹的萌生点是这些缺陷形核竞争后的结果,即在消耗能量最少的地方开始萌生裂纹。

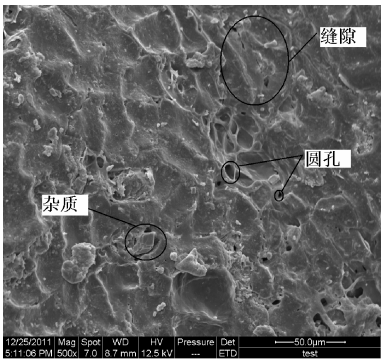


图 8 核桃壳表层上原生裂纹的部位

Fig. 8 Surface locations in protosomal flaws of walnut shells



通过在扫描电镜下进行观察和分析可知,核桃壳体存在“原生”裂纹形核,当受外载荷时因变形可能会在这些地方导致局部的高应力,并通过裂纹加以释放。另外,核桃壳体总体呈脆性特征,当局部冲击施加载荷时,裂纹进而扩展引起局部破碎。如果对核桃多处施加冲击载荷,即可提高核桃壳体在小变形下的局部破碎率,保证核桃壳的充分碎裂和核桃仁的完整性,将更有利于核桃的壳仁分离。

2.6 验证试验与分析

利用气动元件和钢架结构组成的核桃破壳装置,对核桃进行冲击性破壳试验,并继续利用扫描电子显微镜观察断口处,发现在断面边缘存在壳沟刻纹、杂质等缺陷(图 9),而单纹孔位置则不易成为断口位置。这是因为缝隙、杂质等缺陷成为外力加载时应力集中的位置,并使得这些有缺陷的位置形成脆裂的萌生点。

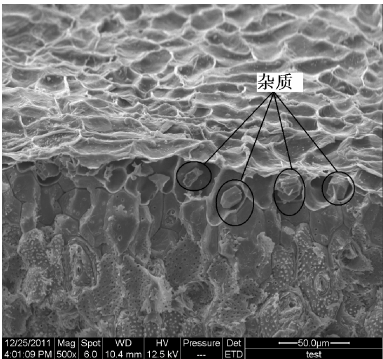


图 9 核桃壳断面边缘处的杂质

Fig.9 Impurity at section edge of walnut shells

对核桃壳断面进行观察发现,根据细胞断裂形貌的差异可分为内外两层,外层细胞尺寸小、密度大,内层细胞尺寸大、密度小,且外层区域的厚度是内层区域厚度的 2 倍左右。由此可见,核桃壳外层结构决定了核桃的主要物理特征并表现为脆性。而外壳明显的天然缺陷是壳沟刻纹,在脆断时贡献最大,最大断裂处就是在壳沟刻纹处发生的(图 10)。

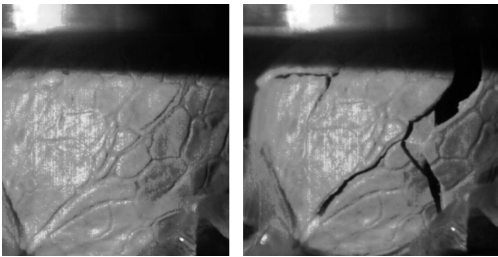


图 10 核桃壳沟刻纹脆断的特性对比

Fig.10 Comparison with brittle fracture characteristics of walnut shells groove

另外,观察结果还表明,核桃壳不同部位的断口组织形态相似,存在天然的除壳沟刻纹之外的缝隙、杂质等裂纹形核特征,这些特征是导致核桃壳体受载荷后裂纹萌生的原因。因此,在破壳过程中总不是沿着核桃壳沟刻纹处断裂,而是在随机部位发生断裂(图 11),这些位置的脆断原因就是其他缺陷造成的。

根据核桃的主要物理性状,在机械加工核桃果实时,对核桃多处施加冲击载荷,提高核桃壳体在小变形下的局部破碎率,可以保证核桃壳的充分碎裂和核桃仁的完整。

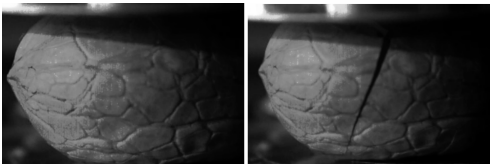


图 11 核桃壳随机脆断的特性对比

Fig.11 Comparison with random brittle fracture characteristics of walnut shells

3 讨 论

本试验通过机械法破碎温 185 核桃的核桃壳,采用环境扫描显微镜(SEM)对裂纹断面进行观察与分析。结果表明:根据细胞断裂形貌的差异,温 185 核桃的核桃壳可以分为内外两层,外层细胞尺寸小、密度大,内层细胞尺寸大、密度小,且外层区域的厚度是内层区域厚度的 2 倍左右,可见核桃壳外层结构决定了核桃的主要物理性状;核桃壳不同部位的断口组织形态相似,存在天然的壳沟刻纹、缝隙、杂质、孔洞等裂纹形核特征,这些特征是导致核桃壳体受载荷后裂纹萌生的原因;对核桃多处施加冲击载荷,提高核桃壳体在小变形下的局部破碎率,可以保证核桃壳的充分碎裂和核桃仁的完整。

核桃破壳时壳沟刻纹处发生脆断特性从多次试验中已经验证其正确性,但杂质等裂纹形核特征在壳体脆断中的作用不是单一的影响因素,而是多种因素共同作用的结果。

另外,除了本试验所提到的核桃壳脆断原因外,是否还有其他的影响因素还需进一步深入探讨。对核桃壳进行多点冲击载荷可以提高核桃仁的完整性,因此,为提高核桃机械化破壳效果,应设计一套装夹正确又能对核桃施加多点冲击载荷并可连续工作的核桃破壳机构。

参 考 文 献

[1] 吴子岳. 绵核桃剥壳取仁机械的研究[J]. 农业工程学报, 1995, 11(12): 64-69.

[2] 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(4): 185-188.

[3] 吴斌芳, 周国柱, 张建钢, 等. 绵核桃机械剥壳取仁参数选择及试验分析[J]. 湖北工学院学报, 1997, 12(4): 31-32.

[4] 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.

[5] 杨雪银. 板栗破壳力学特性的影响因素研究[J]. 郑州轻工业学院学报, 2006, 21(3): 61-64.

[6] 周祖懔, 郭其泰. 杏核物理特性的实验研究[J]. 北京农业工程大学学报, 1995, 25(1): 31-34.

[7] 袁巧霞, 陈红, 刘清生. 辊板式银杏脱壳装置的试验研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(3): 181-183.

[8] DEREK H. 断口形貌学[M]. 李晓刚, 董超芳, 杜翠薇, 等译. 北京: 科学出版社出版, 2009: 10.

[9] 林河通, 陈绍军, 席玛芳, 等. 龙眼果皮微细结构的扫描电镜观察及其与果实耐贮性的关系[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 95-98.

[10] 张宏. 新疆核桃生产机械化的思考[J]. 林业机械与木工设备, 2011, 39(2): 13-14.

[11] 王经洲, 郑晓, 宛农, 等. 基于扫描电镜图像分析的菜籽仁饼孔隙结构分形研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 16-20.

[12] 李晓霞, 郭玉明. 带壳物料脱壳方法及脱壳装备现状与分析[J]. 农产品加工学刊, 2007, 4(4): 84-86.

[13] 王新忠, 王敏. 银杏种核力学特性试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 84-88.

[14] 汪文祥, 公伟伟, 高朋召. 源于核桃壳的生物形态多孔碳的制备及其性能研究[J]. 陶瓷学报, 2010, 31(3): 463-467.

[15] LIN H J, CHEN L H. Significance of authigenic microspheroid pyrite by scanning electron microscope [J]. Science in China: Ser B, 1983, 26(9): 971-980.

[16] YUAN H R, LIU R H. Study on pyrolysis kinetics of walnut shell [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2007, 89(3): 983-986.

Analysis on the embrittlement mechanism of Wen-185 walnut shell  
based on the cellular tissue

ZHANG Hong<sup>1,2</sup> MA Yan<sup>1</sup> GUO Wen-song<sup>2</sup> ZHANG Rui<sup>3</sup> LI Yong<sup>2</sup>

1. College of Electromechanical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. College of Mechanic and Electrical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China;
3. College of Life Science, Tarim University, Alar 843300, China

**Abstract** In order to improve the effectiveness of mechanized walnut shell breaking, a mechanical method was adopted to break Wen 185 walnut shell, and the scanning microscopy (SEM) was used to observe the fracture of the walnut shell. The characteristics of the walnut brittle fracture were investigated based on the theory of brittle fracture. The results showed that the walnut shell consists of two layers because its cell fracture revealed different patterns; the cells in the outer layer had small dimension and large density while the cells in the inner layer were just the opposite. The outer region was about 2 times as thick as the inner region. The morphology of the walnut shell fracture in different parts was similar, with natural shell ditch marking, cracks, impurities, holes and other crack features. These features were the cause of the walnut shell crack under load. Exerting shock loads on ends and transverse abdomen of the walnut shell could increase the broken rate of part of walnut shell. Moreover, walnut shell and kernel were separated much more easily.

**Key words** Wen 185 walnu; machinery breaking; embrittlement; mechanism

(责任编辑:陈红叶)