

龙眼力学特性的有限元分析^{*}

卿艳梅 李长友 黄汉东 曹玉华

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

【摘要】 根据龙眼的几何尺寸和物理参数,用 ANSYS 软件建立了龙眼的力学模型。采用模型计算和试验测试相结合的方法,确定出龙眼果肉的弹性模量。通过对压缩载荷作用于龙眼蒂部和腰部的有限元分析,得出压缩载荷作用下龙眼内部的应力分布规律,探明了最大拉应力是龙眼宏观破裂的主要原因。

关键词: 龙眼 力学特性 有限元分析 弹性模量 拉应力

中图分类号: S667.2; O242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)06-0143-05

Finite Element Analysis on Mechanical Properties of Longan

Qing Yanmei Li Changyou Huang Handong Cao Yuhua

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract

Based on geometric shape and physics parameters of longan fruit, the mechanical model of single longan was established. The module of elasticity of longan flesh was determined by means of comparing the calculated results on the mechanical model with the experimental results. By finite element analysis on longan under the compressed load with the pedicel and middle, the stress distribution of inner longan was obtained. The results showed the maximal tensile stress was the main factor causing the macroscopic breakage form of longan skin.

Key words Longan, Mechanical properties, Finite element analysis, Modulus of elasticity, Tensile stress

引言

龙眼在采摘、运输及剥壳、去核等各个环节中都有可能受到机械损伤,为减少其损伤的程度,需要探明龙眼受力下的应力特征及其破坏时的最大应力。由于通过试验精确测量这种多重结构并具有假种皮果实的应力特征非常困难,国内外许多学者给出了多种应用有限元分析农业物料力学性质的方法^[1-5]。王荣等对压缩载荷作用下葡萄内部应力进行有限元分析^[1];Cardenas 研究了甜瓜力学特性及利用有限元分析了机器人夹持下甜瓜在压缩载荷下的内部应力规律^[5]。为考察龙眼承压过程中的微观力学性质及其损伤机理,提供龙眼剥壳去核机械

设计时的内应力特征基础参数,本研究用 ANSYS 软件建立龙眼的力学模型,采用有限元分析方法确定龙眼果肉的弹性模量及在承压过程中的内应力分布规律,以探明龙眼宏观破裂的主要原因。

1 龙眼的几何形状和尺寸

龙眼种类繁多,形状各有差异,但整体上可近似地看作球形^[6]。龙眼是由果壳、果肉和果核 3 种不同组织构成的整果,抵抗外力作用的能力应该是三者相互关联综合作用结果,其抗压能力与果壳的强度及果实的内部构造有关。龙眼果壳薄且革质化并具一定韧性,果肉柔软多汁,果核圆形至扁圆形且光滑,果壳、果肉和果核相互间没有连接组织(除蒂部

收稿日期: 2010-10-20 修回日期: 2010-11-08

^{*} 广东省自然科学基金资助项目(9151001002000005)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20094404120002)、广东省人大议案课题(粤农函[2009]1099)和华南农业大学校长基金资助项目(2009K007)

作者简介: 卿艳梅,副教授,博士生,主要从事现代农业装备与设施研究,E-mail: yanmeiq@ scau. edu. cn

通讯作者: 曹玉华,副教授,博士,主要从事现代农业装备与设施研究,E-mail: cyh2808@ sina. com

有粘连外),其几何形状如图 1 所示。试验样品选用广东储良龙眼,取 100 颗进行几何尺寸统计分析,得 X、Y、Z 方向尺寸分别为 28.5、25.2、26.1 mm,果壳的平均厚度为 0.8 mm,蒂部稍厚为 0.95 mm。

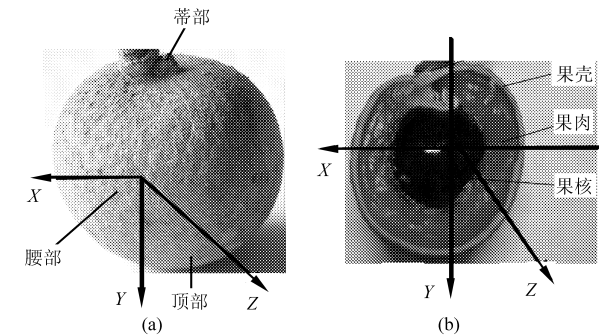


图 1 龙眼果实的几何形状
Fig. 1 Geometric shape of longan fruit
(a) 几何外形 (b) 果实纵切面

2 龙眼力学模型建立

2.1 建立力学模型目的

文献[7]已对龙眼整果和果核进行压缩试验,分析了其刚度等力学参数;对龙眼壳进行拉伸试验,确定了果壳的弹性模量与破坏强度。但是由于不可能将龙眼果肉制成标准试样,因此果肉的弹性模量很难测定,并且在外载作用下也很难直接测定出其内部的应力分布。为进一步了解龙眼在外载作用下其内部应力分布规律以及产生破坏的原因,特建立单颗龙眼的力学模型,对其进行有限元分析。其目的是确定龙眼果肉的力学参数,分析龙眼在压缩载荷作用下产生破坏的原因和破坏方式,同时得到果实内部应力场的分布规律,为进行微观结构损伤的研究打下基础。

2.2 龙眼力学模型建立

建立龙眼的力学模型时,把龙眼的形状简化成球形,取其近似直径为 28 mm,龙眼看作是由果壳、果肉和果核 3 部分组成,并将果壳、果肉和果核简化为各向同性材料。取果壳的平均厚度为 0.8 mm,蒂部为 0.95 mm。

2.2.1 刚度矩阵

在进行有限元计算时,在给定单元上任意未知变量的空间变化可以使用形函数和相应的节点值来表示。单元内部各位置的位移需要用单元节点来表示,故在给定平面上任意取出一个三角形三节点单元,三节点分别为 i,j,m ,三角形单元中 x 和 y 方向的位移变量分别为 μ 和 ν ,三节点处的形函数分别为 S_i, S_j, S_m ,三节点处节点位移量分别为 $U_{ix}, U_{iy}, U_{jx}, U_{jy}, U_{mx}, U_{my}$,则三角形单元中位移变量可表示为

$$\begin{bmatrix} \mu \\ \nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_i & 0 & S_j & 0 & S_m & 0 \\ 0 & S_i & 0 & S_j & 0 & S_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ix} \\ U_{iy} \\ U_{jx} \\ U_{jy} \\ U_{mx} \\ U_{my} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于平面应力问题,物体内任意一点的应变状态可用 3 个独立变量表示^[8],即

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = [\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \gamma_{xy}]^T = \left\{ \frac{\partial \mu}{\partial x} \frac{\partial \nu}{\partial y} \left(\frac{\partial \mu}{\partial y} + \frac{\partial \nu}{\partial x} \right) \right\}^T \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ ——龙眼果内任意一点应变的转置矩阵
 $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}$ ——在 x, y 方向的应变分量和剪应变

对于平面三角形单元,应用最小总势能原理:施加在物体上的外力将使物体产生变形,变形期间外力所作的功以弹性能的方式储存在材料内,即称之为应变能。单元应变能为

$$U_e = \frac{1}{2} \int_e \boldsymbol{\varepsilon}^T D \boldsymbol{\varepsilon} dA \quad (3)$$

只要将求得的单元应变-位移关系式代入式(3)中,即可得单元刚度矩阵为^[8]

$$\mathbf{k}^e = t_e A_e \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} \quad (4)$$

式中 t_e ——单元厚度 A_e ——单元面积
 $\mathbf{D}$ ——材料弹性矩阵
 $\mathbf{B}$ ——单元矩阵

2.2.2 单元类型

由于龙眼在采摘、运输和机械加工等过程中,常常是由压缩载荷作用而产生接触应力造成机械损伤,因而用平板压缩龙眼来模拟压缩载荷对龙眼内部应力分布的影响,利用有限元软件 ANSYS 12.0 进行分析。在龙眼受力分析中,果壳、果肉和果核之间可能存在相互作用,为了模拟这种相互作用,在龙眼几何模型的有限元模型化过程中引入了接触单元。在选择单元类型时把果壳、果肉和果核的单元类型都选为 solid 95,经网格划分的龙眼有限元模型如图 2 所示。对于龙眼,其壳的内表面和果肉的外表面构成接触对,果壳的刚度较果肉的大,因此选壳内表面作为目标面,果肉外表面作为接触面。果肉的内表面和果核的外表面构成接触对,果核的刚度较果肉的大,因此选果肉内表面作为接触面,果核外表面作为目标面。龙眼采用三维实体建模,因此选用三维接触单元 TARGET 170 与 CONTA 174 来建立接触对。其中柔性体的接触面用 CONTA 174 单元来定义,而龙眼果壳的目标面用 TARGET 170 单

元来定义。在 ANSYS 有限元分析软件中,较为柔软的果肉采用 CONTA 174 单元类型来划分,而果壳则采用 TARGE 170 单元类型来划分,CONTA 174 和 TARGE 170 共同构成接触单元。接触单元可以用来计算果壳与果实之间的相互作用和渗透量(相互接触作用力引起的实体变形),计入果肉与果壳的相互挤压力而不是单纯地只分析果壳在外力作用下的应力与变形。接触单元是面单元,它们是覆盖在已划分好的实体单元相互接触部分的表面,由于果实结构的对称性,采用 1/2 对称模型来进行分析。

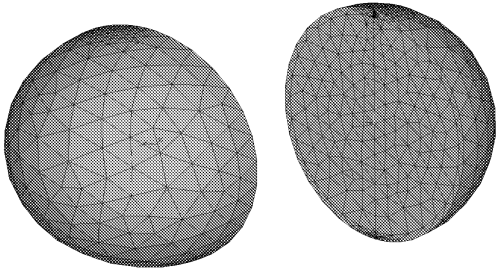


图 2 龙眼的力学模型及网格划分
Fig. 2 Mechanical model and finite element grid of longan

在对称面上加上对称的边界约束,即限制果壳对称面上的法向位移。脱壳力采用集中力,加载力 80 N 由试验得出^[6],在这个加载力作用下,果壳刚好出现裂纹。在此基础上,进行了蒂部(*Y*向)加载和腰部(*X*向)加载的对比分析。

3 龙眼压缩载荷下有限元分析

龙眼机械损伤的形式可以是果壳的破裂,即宏观破坏,也可以是果肉与果壳或果肉与果核之间的分离,或是微观的细胞组织的破坏。本文是以果壳的破裂作为机械损伤的宏观破坏形式,以果壳的破坏强度作为整颗龙眼破坏的判断依据。另外,龙眼压缩部件与龙眼曲面接触面积较小,可以把龙眼所受力简化成集中力。图 3 为龙眼受压缩载荷的加载方式模型图。

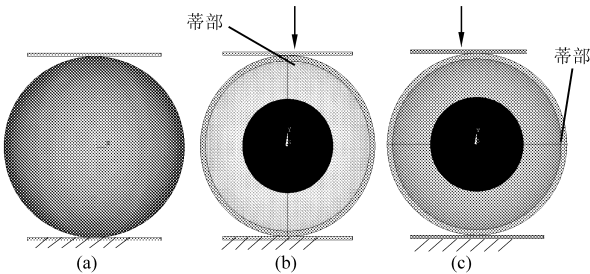


图 3 加载方式模型
Fig. 3 Loading-applied model

(a) 整果模型 (b) 蒂部(*Y*向)加载 (c) 腰部(*X*向)加载

3.1 龙眼果肉力学参数确定

有限元分析的目的之一是确定龙眼果肉力学参数。在进行有限元分析时,除利用试验所获得力学参数外,还测得龙眼的密度为 $1.08 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ^[7]。通常水果与蔬菜的泊松比在 0.2~0.5 之间^[9],计算时取果壳泊松比为 0.30,果肉泊松比为 0.42,果核泊松比为 0.25。果肉的泊松比较大,原因是在简化模型时,把龙眼果肉看作是具有流体特性的固体来代替。将有限元模型计算得到的力-变形曲线与龙眼压缩试验得到的力-变形曲线进行比较,比较结果如图 4 所示^[6]。求得龙眼果肉的弹性模量在横向压缩时和纵向压缩时都近似接近 $E_r = 2.5 \text{ MPa}$ 。

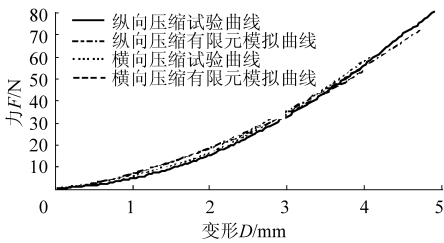


图 4 龙眼整果力-变形的模拟曲线与试验曲线比较
Fig. 4 Comparison between the simulation and experimental curves of force-deformation for longan

图 4 中的模拟曲线与试验曲线之间存在着一定的误差。原因是在进行有限元模型计算时,模型几何形状的简化与果品实际形状之间有差别、粘弹性材料简化为各向同性材料及试验数据的误差等因素造成的。

3.2 *Y*向和*X*向加载的有限元分析

*Y*向(蒂部)施加载荷的有限元分析结果如图 5 所示。从图 5a 可以看出,受压缩载荷作用的龙眼内部组织形态在不同区域显示出不同的变化趋势,接近蒂部的区域应力峰值最大,果壳的应力大于果核和果肉的应力。在施力过程中,龙眼等效应力的峰值出现在果壳上,其值为 5.36 MPa;果核与果肉内产生的应力值近似相等,其值为 2 MPa。从龙眼内部的应力分布可看出,沿压缩载荷施力方向宽约 8 mm 的垂直带应力较大,其两边应力逐渐减小。

*X*向(腰部)施加载荷的有限元分析结果如图 6 所示。从图 6a 可以看出,在受力过程中,龙眼等效应力峰值出现在压载点附近的果壳上,其值为 3.95 MPa,果壳的等效应力大于果肉、果核的等效应力。从图 5b、5d 可以看出,龙眼在 *Y*向压缩载荷作用下,局部较大第一主应力的位置在龙眼施力处和图示受载点附近的果壳上,比较两处果壳应力,其中最大主应力为压载点附近的果壳上。从图 6b、6d 可以看出,龙眼在腰部压缩载荷作用下最大第一主应力的位置是在龙眼图示受载点附近的果壳上。在这

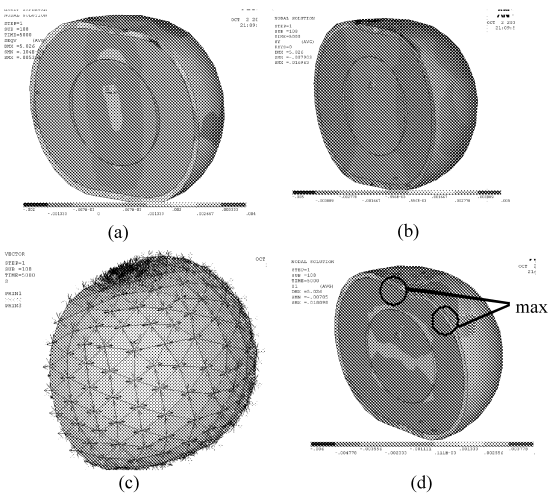


图5 Y向(蒂部)施加载荷的有限元分析结果

Fig.5 Analysis of finite element method for load-applied Y direction

(a) 等效应力 (b) Y向应力
(c) 主应力向量图 (d) 第一主应力

种施力状态下,龙眼内部产生的裂纹是由拉应力造成的,果肉受到上下压板挤压后沿果核球面向各个方向滑移,果壳内壁任意一点都因果肉滑移和变形产生膨压,果壳受到的膨压破坏力越大,果壳受到的拉应力也越大。从图5c和6c主应力向量图可知,第一主应力都是拉应力且方向沿切线方向,裂纹最初在果壳的最大第一主应力处开始形成,慢慢沿施力方向即与第一主应力相垂直的方向扩展,最终导致果壳在拉应力作用下而断裂。这说明最大拉应力是造成龙眼在压缩载荷作用下产生破裂的原因。因此可用最大周向拉应力理论来解释龙眼宏观破坏的机理。

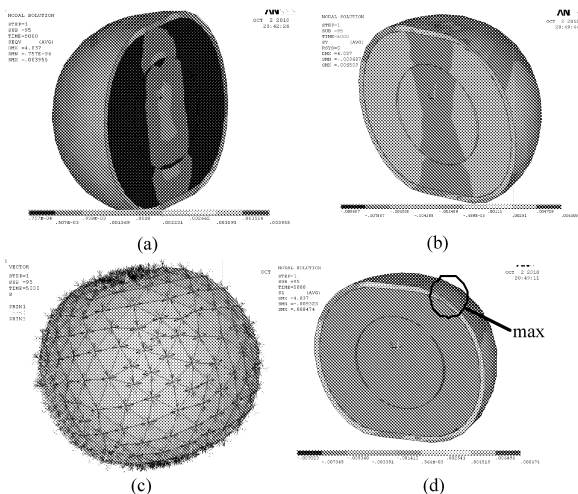


图6 X向(腰部)施加载荷的有限元分析结果

Fig.6 Analysis of finite element method for load-applied X direction

(a) 等效应力 (b) X向应力
(c) 主应力向量图 (d) 第一主应力

由应力分布可以看出,整粒龙眼在压缩载荷作用下,在果壳上外载荷加载位置附近的应力较大,而果肉部分的应力相对较小,说明龙眼在压缩载荷作用下,主要由果壳承担载荷,龙眼的宏观破坏主要是由果壳的破坏强度来决定。龙眼果肉松软,自身承压能力近乎于零。龙眼受外力作用时,果壳承压点处的内表面上即果肉对果壳的作用力,可以近似看成是在各个方向上均匀分布的作用力;果肉对龙眼果壳破裂面施加的是拉应力而对壳破裂面的法面方向施加的是压应力。龙眼破裂的主要原因取决于受压后的果壳外形变化特征。龙眼果壳破裂的直接原因在于果肉施加在果壳破裂面上的拉应力和破裂面法面方向上的压应力,是果肉弯折果壳的结果。

3.3 有限元模型分析与龙眼破裂试验比较

在WD-E系列精密型微控电子式万能试验机上对龙眼整果进行压缩试验,龙眼果壳破裂位置与破裂方向如图7所示。结果表明,龙眼果壳宏观破裂位置和破裂方向与有限元分析是一致的。在龙眼蒂部(Y向)或是龙眼腰部(X向)施加压缩载荷时(图7),龙眼果壳的宏观破裂是一条从受载点附近开始而后沿施力方向向下扩展的裂纹。有限元模型分析和试验结果比较表明,两者在裂纹扩展方向上的结论较为一致。对裂纹初始位置的比较,根据有限元分析,裂纹首先出现在上述应力最大处(图5d和图6d),也与试验裂纹起始位置相吻合。说明使用该力学模型可以分析龙眼的损伤机理、破坏原因及破坏方式,可以用有限元方法获得龙眼在不同施力位置压载作用下的微观力学性质。

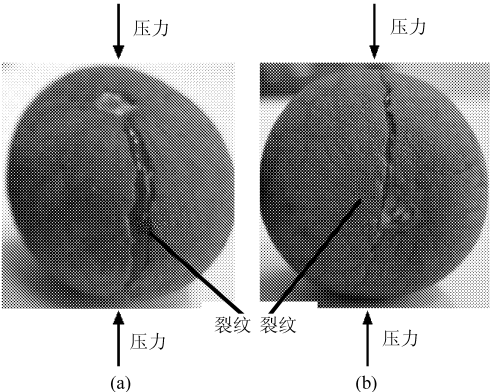


图7 不同加载方向下的龙眼试验裂纹形式

Fig.7 Cracking track of longan under two inflicting force manners

(a) Y向(蒂部)受载 (b) X向(腰部)受载

4 结论

(1) 通过有限元计算与试验数据比较,确定出龙眼果肉的弹性模量在横向压缩时和纵向压缩时都

近似接近 $E_r = 2.5 \text{ MPa}$ 。

(2) 在压缩载荷作用下, 果壳承受着较大的应力值, 果肉则承受着相对小的应力值。最大拉应力位置在施力点附近果壳上。

(3) 龙眼果壳破裂是龙眼宏观破坏的主要形式, 且裂纹从施力点附近开始, 沿施力方向扩展。最大拉应力是造成龙眼机械损伤的主要原因。

(4) 试验结果表明龙眼果壳宏观破裂位置和破裂方向与有限元分析一致。

参 考 文 献

1 王荣, 焦群英, 魏德强, 等. 葡萄的力学特性及有限元模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 7 ~ 10.
Wang Rong, Jiao Qunying, Wei Deqiang, et al. Mechanical characteristics and the finite element analysis of grapes[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 7 ~ 10. (in Chinese)

2 李心平, 高连兴, 马福丽. 玉米种子力学特性的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 64 ~ 67.
Li Xinping, Gao Lianxing, Ma Fuli. Analysis of finite element method on mechanical properties of corn seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 64 ~ 67. (in Chinese)

3 曹玉华, 李长友, 卿艳梅, 等. 蓖麻蒴果力学特性的有限元分析[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2010, 31(4): 383 ~ 387.
Cao Yuhua, Li Changyou, Qing Yanmei, et al. Finite element analysis on mechanical properties of castor-capsule[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2010, 31(4): 383 ~ 387. (in Chinese)

4 张荣荣, 李小昱, 王为, 等. 基于有限元方法的板栗破壳力学特性分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 84 ~ 87.
Zhang Rongrong, Li Xiaoyu, Wang Wei, et al. Analysis of mechanical properties of Chinese chestnut cracking based on the FEM[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 84 ~ 87. (in Chinese)

5 Cardenas M. Weben, Stroshine R L, et al. Melon material properties and finite element analysis of melon compression with application to robot gripping [J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(3): 920 ~ 929.

6 卿艳梅, 曹玉华, 李长友, 等. 龙眼鲜果剥壳力学特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 122 ~ 126.
Qing Yanmei, Cao Yuhua, Li Changyou, et al. Experimental study on mechanical properties of fresh longan hulling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(5): 122 ~ 126. (in Chinese)

7 卿艳梅, 李长友, 曹玉华, 等. 龙眼力学参数测试与分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 131 ~ 134.
Qing Yanmei, Li Changyou, Cao Yuhua, et al. Test and analyse on macromechanic parameters of longan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 131 ~ 134. (in Chinese)

8 Tirupathi R Chandrupatla, Ashok D Belegundu. 工程中的有限元方法[M]. 曾攀, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006: 2 ~ 8, 49, 117 ~ 128.

9 周祖饬. 农业物科学[M]. 北京: 农业出版社, 1994.

(上接第 151 页)

8 郎杰, 崔娜, 张金良, 等. 酸枣果肉多糖的提取工艺和抗氧化研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(12): 259 ~ 261.
Lang Jie, Cui Na, Zhang Jinliang, et al. Study on extracting conditions and antioxidation of polysaccharides in wild jujube [J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 30(12): 259 ~ 261. (in Chinese)

9 Tatsuya M, Akio M, Norimasa I. Carbohydrate analysis by a phenol-sulfuric acid method in microplate format[J]. Analytical Biochemistry, 2005, 339(1): 69 ~ 72.

10 Adriana P O, José A G N, Joaquim A N. Determination of selenium in nutritionally relevant foods by graphite atomic absorption spectrometry using arsenic as internal standard[J]. Food Chemistry, 2005, 93(2): 355 ~ 360.

11 Cai Y Q, Liu J S, Shi Y L, et al. Determination of several sugars in serum by high-performance anion-exchange chromatography with pulsed amperometric detection[J]. Journal of Chromatography A, 2005, 1085(1): 98 ~ 103.

12 Jiang G X, Prasad N K, Jiang Y M. Extraction and structural identification of alkali-soluble polysaccharides of longan fruit pericarp[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2009, 10(4): 638 ~ 642.

13 Maria M C, Cristina D C, Teresa N, et al. ^1H and ^{13}C NMR characterization and secondary structure of the K2 polysaccharide of *Klebsiella pneumoniae* strain 52145[J]. Carbohydrate Research, 2005, 340(26): 2 212 ~ 2 217.

14 石磊, 陈靠山, 董群, 等. 拓树根多糖的分离纯化及结构表征[J]. 高等学校化学学报, 2007, 28(6): 1 088 ~ 1 091.
Shi Lei, Chen Kaoshan, Dong Qun, et al. Separation, purification and structure characterization of polysaccharide from roots of *Cudrania tricuspidata* (carr.) bur. [J]. Chemistry Journal Chinese Universities, 2007, 28(6): 1 088 ~ 1 091. (in Chinese)