

玉米秸秆芯结构建模与径向压缩过程模拟*

廖娜 黄光群 陈龙健 贺城 韩鲁佳

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 为了深入研究实芯作物秸秆的压缩特性,以农大 108 玉米秸秆芯为研究对象,基于秸秆各向异性、非均质、非线性特点,先通过径向压缩试验获取其粘弹性参数,然后应用 ANSYS 软件建立了玉米秸秆芯横截面圆柱有限元结构模型,并进行径向压缩过程和应力松弛过程的数值模拟。研究表明,五参量广义麦克斯韦模型能较好地描述玉米秸秆芯应力松弛特性,模型拟合参数的试验值与有限元模拟值误差均小于 10%。试验验证了玉米秸秆芯模拟结果的可行性和计算模型的有效性。

关键词: 玉米秸秆 秸秆芯 径向压缩 数值模拟

中图分类号: S216.2; S183 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)06-0117-05

Structure Modeling and Radial Compression Simulation of Corn Stalk Cores

Liao Na Huang Guangqun Chen Longjian He Cheng Han Lujia

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

In order to further understand compression characteristics of the crop straws with core, taking Nongda108 corn stalk cores as object, the viscoelastic parameters were obtained through radial compression test for the crop straws with core was anisotropic, non-homogeneous and non-linear. The finite element model of the corn stalk core was established with ANSYS. Radial compression and relaxation of corn stalk cores were preceded and simulated. The results showed stress relaxation characteristics of corn stalk cores were depicted by five parameters generalized Maxwell model, and errors between experimental values and finite element simulation values about fitting model parameters were less than 10%. The test approved that the radial compression change curves between test and simulation were accordant, and verified the validity of the simulation results and the feasibility of the calculation model.

Key words Corn stalks, Stalk cores, Radial compression, Numerical simulation

引言

在生物质秸秆各项利用技术中,都需要对其进行预处理,如秸秆的收获、打捆和压缩成型等,这些生产环节均需以植物秸秆生物力学特性为理论基础。目前,研究较多的是关于秸秆弯曲特性、剪切特性等对农作物的抗倒伏现象和收获等生产环节的影响^[1~10]。

目前各种秸秆模型的相关研究均是针对空心作物秸秆,对于实芯作物秸秆如玉米秸秆等加工应用

有一定的局限性,考虑到玉米秸秆是具有各向异性特征的复合材料,由外层表皮、柱状内芯及节组成,且各部分材料特性差异很大,本文以玉米秸秆的主要组成部分内芯为研究对象,针对玉米秸秆芯具有各向异性、非均质和非线性特点,利用万能材料试验机测定玉米秸秆芯的粘弹性参数,并在分析玉米秸秆芯微观结构的基础上,运用 ANSYS 有限元分析软件建立玉米秸秆芯圆柱有限元结构模型,同时进行其径向压缩过程的数值模拟,为实芯秸秆压缩特性的研究提供理论依据。

收稿日期: 2010-07-16 修回日期: 2010-07-29

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA043603)和公益性行业(农业)科研专项资助项目

作者简介: 廖娜,博士生,主要从事生物质资源与利用研究, E-mail: liaona187@yahoo.com.cn

通讯作者: 韩鲁佳,教授,博士生导师,主要从事生物质资源与利用研究, E-mail: hanlj@cau.edu.cn

1 玉米秸秆芯径向静态压缩试验

1.1 试验设备

使用美国 INSTRON 3367 型双立柱万能材料试验机,进行玉米秸秆芯径向静态压缩性能试验。该机运用全数字化闭环控制技术,可实现位移、应力、应变全数字化测量,适合试验载荷小于 30 kN 的材料拉伸、弯曲和压缩试验。

1.2 试验材料与方法

供试成熟期农大 108 玉米秸秆采自中国农业大学上庄实验站,株高 $(2\,200\pm1.8)$ mm,风干至含水率约 10%,节间数均为 12 个。自茎秆底部向上选取第 6 节作为试验材料。

将玉米秸秆去叶、去毛根,用干净毛巾将外表擦拭干净,并将其切成 (30 ± 3) mm 长无节小段,并去掉茎秆表皮,得到玉米秸秆芯。试验开始前,用分析天平量取玉米秸秆芯质量;视玉米秸秆芯为圆柱体,分别测算其横截面等效直径和玉米芯密度。

如图 1 所示,将试样置于材料试验机两平行压盘间,施加径向位移载荷 u_y 。为保证玉米秸秆芯与压盘充分接触,考虑玉米秸秆芯较软,设置 0.1 N 预载荷,加载速度为 4 mm/min^[11]。压缩 2 min 后保持压缩位移不变,保持 120 s,试验重复 5 次,计算机自动记录时间、位移、应力和应变等数据,分别得到玉米秸秆芯应力-应变和应力松弛曲线。

1.3 数据处理

通过 INSTRON 公司 Bluehill 2.0 数据采集和处理软件获取试验数据;数据用 Matlab 7.0 和 Microsoft Excel 进行计算和曲线拟合;有限元软件建模和有限元分析选用 ANSYS 11.0。

2 玉米秸秆芯径向压缩有限元模型

2.1 玉米秸秆芯结构模型

玉米秸秆芯由生于基本组织中的维管束组成。维管束的分布状况是外多而小、内渐少而大,因此材料在径向微观尺度具有明显的不连续性,且空间排列方向性明显,导致材料各向异性^[12~13]。为了建模可行性,假设玉米秸秆芯结构对称,横观各向同性;各部分纤维均沿轴向整齐排列;径向压缩时,秸秆轴向变形较小,视为轴对称平面应变问题。

试验过程中玉米秸秆芯置于两平行压盘间,因此压盘和秸秆芯的接触视为刚-柔接触,刚性面当作“目标面”,选择“Targe169”作为目标面来模拟,柔性体表面当作“接触面”,选择“Conta172”来模拟^[14~15]。玉米秸秆芯横截面有限元模型单元类型选择具有粘弹性、能作为平面应变的 8 节点二维单

元 Visco88,单元特性为平面应变。根据秸秆芯的轴对称性,选取其四分之一建立有限元计算模型,然后通过轴对称扩展得到如图 2 所示划分单元后模型。

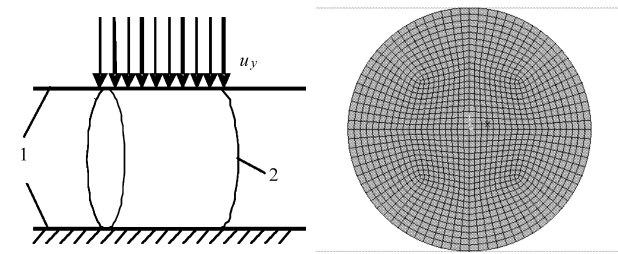


图 1 压缩试验示意图

Fig. 1 Schematic of compression test

图 2 单元划分结果

Fig. 2 Meshing of elements

1. 压盘 2. 玉米秸秆芯

2.2 玉米秸秆芯径向压缩理论分析

根据玉米秸秆芯结构特点及其压缩特性,视玉米秸秆芯为线粘弹性材料,根据粘弹性理论,粘弹性力学问题应满足:几何方程(应变和位移关系)、运动方程(应力条件)和本构方程(应力和应变关系)^[16],分别为:

几何方程

$$\varepsilon_{ij}(t) = \frac{1}{2}(u_{i,j}(t) + u_{j,i}(t)) \tag{1}$$

运动方程

$$\sigma_{ij,j} + F_i = \rho \ddot{u}_i \tag{2}$$

本构方程

$$S_{ij}(t) = 2G(t)de_{ij}(t) \tag{3}$$

$$\sigma_{ii}(t) = 3K(t)d\varepsilon_{kk}(t) \tag{4}$$

式中 ε_{ij} ——应变分量 u_i ——位移分量
 σ_{ij} ——应力分量 F_i ——体力分量
 ρ ——密度 $G(t)$ ——应力松弛模量函数
 $K(t)$ ——体积模量函数

下角 i, j, k 表示 x, y, z , 表示 Einstein 求和约定。

根据玉米秸秆芯的结构特点和压缩受力分析,体积力忽略不计,其几何方程和本构方程在直角坐标系中表示为

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \\ \gamma_{xz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \end{aligned} \right. \tag{5}$$

平衡方程

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

多数粘弹性材料的松弛模量为广义麦克斯韦模型^[17~18],设该结构材料对静水压呈弹性,根据各向同性弹性力学理论,体积弹性模量 K 和抗压弹性模量 E 、泊松比 μ 存在一定的数量关系^[16],所以玉米秸秆芯本构方程为

$$\begin{cases} G(t) = g_0 + \sum_{i=1}^n g_i e^{-t/\tau_i} = g_0 + \sum_{i=1}^n g_i e^{-t/(\eta_i/g_i)} \\ K(t) = K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \end{cases} \quad (7)$$

式中 g_0 ——平衡弹性模量
 g_i ——第 i 个麦克斯韦元件弹性模量
 η_i ——第 i 个麦克斯韦元件粘性系数
 τ_i ——第 i 个麦克斯韦元件松弛时间
 μ ——泊松比 E ——抗压弹性模量

3 试验结果与分析

3.1 玉米秸秆芯压缩性能试验结果

5 根玉米秸秆芯经过 8 mm 的压缩变形和 120 s 的应力松弛,其应力-应变曲线和应力松弛曲线分别如图 3 和图 4 所示。从图 3 中可以看出,5 个试样应力-应变曲线基本规律一致:初始压缩阶段,即压缩应变从 0 到 0.1 时,应力变化较快,且应力、应变近似为线性关系;压缩应变大于 0.15 后,应力变化率逐渐减小,呈屈服状态。这是因为初始压缩主要是玉米秸秆芯表层组织占主导地位,而玉米秸秆芯表层与秸秆表皮相连接,维管束小而密,排列紧凑,纤维密度大,随着玉米秸秆芯变形的增加,玉米秸秆芯逐渐被压实,压缩应力增加速度较快。当变形增

加到一定程度,压缩以靠近玉米秸秆芯中心组织为主,这一部分维管束大而散,纤维密度小,压缩应力增加速率慢,直至变化率趋于零。

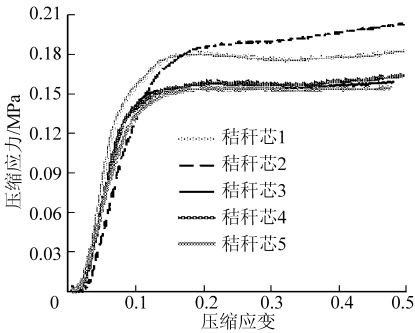


图 3 压缩应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of compression

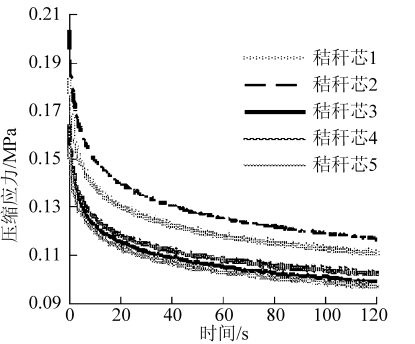


图 4 压缩应力松弛曲线

Fig. 4 Stress relaxation curves of compression

3.2 玉米秸秆芯结构参数和粘弹性参数确定

选取图 3 的线性部分,用弹性模量即线性部分的最大斜率来描述玉米秸秆芯的抗压弹性模量^[11],根据各向同性材料特性,泊松比取 0.3^[13],由式(7)计算出玉米秸秆芯的体积弹性模量。图 4 的曲线用 Matlab 7.0 cftool 工具箱进行拟合,结合式(7)得到拟合参数,如表 1 所示。

从图 4 中可以看出,5 根试样应力松弛曲线基本规律一致,在 40 s 左右应力下降到 0.1 MPa 左右后趋于稳定,最后稳定应力差异由初始应力造成。

从表 1 中可以看出,玉米秸秆芯流变模型为五参量广义麦克斯韦模型,两麦克斯韦元件的应力松

表 1 玉米秸秆芯结构参数和粘弹性参数

Tab. 1 Parameters about structure and viscoelastic of corn stalk cores

试验编号	长轴/mm	短轴/mm	高/mm	等效半径/mm	密度/kg·m ⁻³	g_0 /MPa	g_1 /MPa	g_2 /MPa	τ_1 /s	τ_2 /s	K /MPa
1	8.14	8.01	27.54	8.07	54.5	0.221	0.067 9	0.068 4	3.33	43.2	1.30
2	8.12	8.07	28.04	8.09	61.1	0.234	0.080 6	0.080 8	3.24	41.8	1.01
3	8.52	8.10	29.54	8.30	46.7	0.203	0.059 1	0.058 8	3.55	45.0	1.06
4	8.14	8.05	29.39	8.09	50.9	0.205	0.062 5	0.056 6	3.35	41.6	1.11
5	8.59	8.22	30.87	8.40	47.0	0.201	0.056 8	0.057 1	3.59	44.9	0.86
均值	8.30	8.09	29.08	8.19	52.0	0.213	0.065 4	0.064 3	3.41	43.3	1.07

弛时间分别为 3.41 s 和 43.3 s,其弹性模量近似相等,这是因为玉米秸秆芯基体组织相同,且接近表皮的部分较致密,粘性较小;远离表皮的部分较稀疏,粘性较大。根据式(7)可知,应力松弛时间与粘度呈正比,因此两个应力松弛时间差异较大。

3.3 有限元分析

将表 1 中的玉米秸秆芯结构参数和粘弹性参数均值作为玉米秸秆芯模型的材料属性输入 ANSYS 软件中,在玉米秸秆芯顶部节点施加位移载荷 -8 mm,计算模式设置为大变形静态位移,历程时间 120 s,计算步长 1 s,然后求解,得到各单元、节点在直角坐标系中各主方向的应力、应变。玉米秸秆芯单元变形结果以及变形后玉米秸秆芯位移、应变和应力等值图分别如图 5~8 所示。

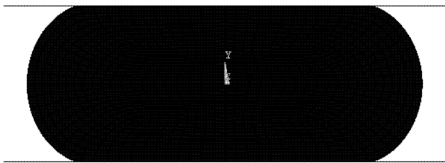


图 5 单元变形图
Fig.5 Element deformation

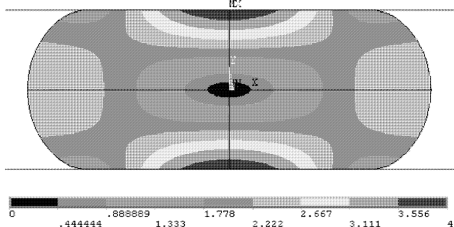


图 6 位移等值图
Fig.6 Contour plot of displacement

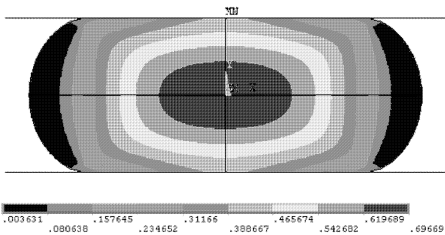


图 7 应变等值图
Fig.7 Contour plot of strain

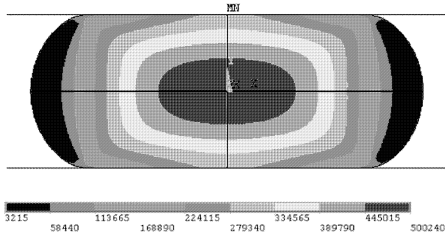


图 8 应力等值图
Fig.8 Contour plot of stress

从图 5 中可看出压缩过程中,压盘与玉米秸秆芯横截面由最初点接触变为线接触,经压缩变形后,

由原来的圆形变为上、下两端面平整,左、右两端面突出的鼓形,与试验中观察到的玉米秸秆芯变形规律一致,说明该玉米秸秆芯有限元结构较合理。

从图 6 中可以看出,上、下两端面靠近对称轴位置位移最大,而靠近玉米秸秆芯中心位置位移最小,这是因为玉米秸秆芯上、下端单元直接与压盘接触,且靠近对称轴的部位接触时间最长,而靠近玉米秸秆芯中心部位与压盘距离最小。图 7 和图 8 表明玉米秸秆芯压缩应变和压缩应力分布区域一致,均是靠近对称中心的部位最大,以对称中心为原点,沿径向逐渐减小,这是因为玉米秸秆芯越靠近中心部位,受到周边挤压越剧烈,压缩时靠近中心部位变形程度最大,压缩应力也最大。

3.4 应力松弛特性模拟与试验比较分析

为了模拟玉米秸秆芯的应力松弛特性,将表 1 中的玉米秸秆芯结构参数和粘弹性参数作为玉米秸秆芯模型的材料属性输入 ANSYS 中,在玉米秸秆芯顶部节点施加位移载荷 -0.01 mm,计算模式设置为小变形瞬态位移,历程时间 120 s,计算步长 1 s,然后求解,计算结束后,利用 ANSYS 历程时间处理器,选取玉米秸秆芯横截面模型与压盘初始接触点的应力、应变和时间数据。

由于应变均在 0.004 附近,因此假设应变保持不变,将应力-时间曲线转换为松弛模量-时间曲线,如图 9 所示,曲线拟合方程系数如表 2 所示。

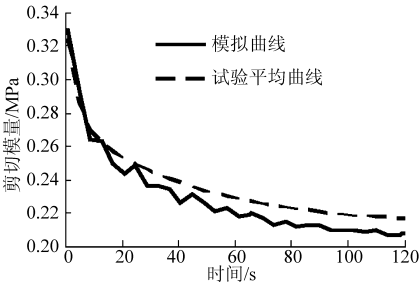


图 9 压缩应力松弛特性曲线

Fig.9 Stress relaxation curves about corn stalk compression

表 2 压缩应力松弛模型系数试验值和模拟值

Tab.2 Comparison of stress relaxation model between testing and simulating					
	g_0/MPa	g_1/MPa	g_2/MPa	τ_1/s	τ_2/s
试验值	0.213 0	0.065 4	0.064 3	3.41	43.30
模拟值	0.202 0	0.070 8	0.070 4	3.75	44.40
误差/%	5.07	8.26	9.55	9.97	2.46

图 9 中松弛模量试验平均曲线是由表 1 粘弹性参数均值绘制而成。有限元模拟所得松弛模量曲线在 10 s 以后有震荡现象,这可能是在求解运算中选用瞬态模块所致,但对整体变化趋势无影响。从图

中可以看出,压缩试验的松弛模量随时间变化规律与有限元模拟得到的松弛模量随时间变化的规律一致,且吻合程度较高。从表 2 可以看出,拟合参数的试验值与模拟值误差均小于 10%,说明该计算方法具有良好的可行性。

4 结论

(1)初始压缩阶段,即压缩变形程度为 10% 左右时,应力变化较快,且应力、应变呈线性关系,随着变形程度的增大,应力变化速度逐渐减小,且逐渐趋于平缓。

(2)玉米秸秆芯应力松弛模型是二维广义麦克斯韦模型,两麦克斯韦模型的应力松弛时间分别为 3.41 s 和 43.3 s。

(3)玉米秸秆芯横截面经压缩变形后,由原来的圆形变为上、下两端面平整,左、右两端面突出的鼓形,与试验中玉米秸秆芯变形规律保持一致。有限元模拟分析中得到的松弛模量曲线参数与试验获得的松弛模量平均曲线参数的相对误差均小于 10%,说明玉米秸秆芯有限元模型及其计算方法具有良好的可行性。

参 考 文 献

- 袁红梅,郭玉明,李洪波. 小麦茎秆弯折力学性能的试验研究[J]. 山西农业大学学报,2005,25(2):173~176.
Yuan Hongmei, Guo Yuming, Li Hongbo. Studies on bending mechanical properties of wheat stalk [J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2005, 25(2): 173~176. (in Chinese)
- 侯振东,田潇瑜,徐杨. 秸秆固化成型工艺对成型块品质的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(5):86~89.
Hou Zhendong, Tian Xiaoyu, Xu Yang. Effect of densification processing on physical quality and mechanical properties of corn stover[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 86~89. (in Chinese)
- 廖宜涛,廖庆喜,田波平,等. 收割期芦竹底部茎秆机械物理特性参数的试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(4):124~129.
Liao Yitao, Liao Qingxi, Tian Boping, et al. Experimental research on the mechanical physical parameters of bottom stalk of the *Arundo donax* L. in harvesting period[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 124~129. (in Chinese)
- Nazari Galedara M, Jafaria A, Mohtasebia S S, et al. Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems [J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(2): 199~208.
- Ince A, Ugurluay S, Guzel E, et al. Bending and shearing characteristics of sunflower stalk residue [J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(2): 175~181.
- Ma J F, Chen W Y, Zhao L, et al. Elastic buckling of bionic cylindrical shells based on bamboo [J]. Journal of Bionic Engineering, 2008, 5(3): 231~238.
- 胡婷,焦群英,付志一,等. 小麦茎秆的抗弯复合材料力学模型[J]. 应用力学学报,2007,24(2):279~283.
Hu Ting, Jiao Qunying, Fu Zhiyi. Composite mechanics model of wheat stalk under bending[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(2): 279~283. (in Chinese)
- Spagnoli A. Different buckling modes in axially stiffened conical shells[J]. Engineering Structures, 2001, 23(8): 957~965.
- Dawson M A, Gibson L J. Optimization of cylindrical shells with compliant cores [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(3~4): 1145~1160.
- Xu X S, Ma J Q, Lim C W, et al. Dynamic local and global buckling of cylindrical shells under axial impact [J]. Engineering Structures, 2009, 31(5): 1132~1140.
- Wright C T, Pryfogle P A, Stevens N A, et al. Biomechanics of wheat/barley straw and corn stover [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2005, 121~124: 5~19.
- 孟海波. 秸秆切割破碎与揉切机刀片耐用性试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
Meng Haibo. Experimental study on straw cutting process and wear resistance and strength toughness of cutters[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 崔英. 实芯植物秸秆的力学模型及受压缩状态应力分析研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
Cui Ying. On the mechanical model and stress analysis for plant stem with core [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 邓凡平. ANSYS10.0 有限元分析自学手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.
- 张朝晖,李树奎. ANSYS11.0 有限元分析理论与工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- 杨挺青,罗文波,徐平,等. 粘弹性理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2004.
- 王春光,杨明韶,高焕文,等. 牧草在高密度压捆时的应力松弛研究[J]. 农业工程学报,1997,13(3):48~52.
Wang Chunguang, Yang Mingshao, Gao Huanwen, et al. Study on stress-relaxation of hay during baling under high density [J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(3): 48~52. (in Chinese)
- Watts K C, Bilanski W K. Stress relaxation of alfalfa under constant displacement[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(6): 2491~2498.