

玉米秸秆木质纤维含量与应力松弛特性关联度研究*

廖娜 陈龙健 黄光群 贺城 韩鲁佳

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 应力松弛是玉米秸秆重要的流变特性,直接影响到玉米秸秆打捆的压缩变形、生产率和功耗。利用 INSTRON 3367 材料试验机和自制压缩筒组件进行了玉米秸秆闭式压缩应力松弛试验,并测定了北京、辽宁、山东、湖北、陕西和重庆等地 13 个不同品种的成熟期玉米秸秆纤维素、半纤维素和木质素质量分数。以拟合应力松弛曲线得到的应力松弛时间、平衡弹性模量等作为应力松弛特性考核指标,采用灰色关联法分析玉米秸秆的应力松弛特性与木质纤维组成的相关性。研究表明,不同品种的玉米秸秆纤维素、半纤维素和木质素质量分数差异均显著 ($P < 0.05$),应力松弛时间和平衡弹性模量主要与木质素质量分数相关,半纤维素质量分数主要与应力松弛时间相关,而三参数与纤维素质量分数相关度均较低。从微观角度来看,其关联度主要取决于各成分在细胞壁中的位置和功能。

关键词: 玉米秸秆 压缩 应力松弛 灰色关联分析

中图分类号: S216.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)12-0127-06

Grey Relation Analysis of Lignocellulose Content and Compression Stress Relaxation of Corn Stalk

Liao Na Chen Longjian Huang Guangqun He Cheng Han Lujia

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

Abstract

Stress relaxation is one of important rheological characteristics of corn stalk compression bale, affecting compression deformation, productivity and power consumption. Cellulose, hemicellulose and lignin content of 13 different varieties of corn stalks in matured from Beijing, Liaoning, Shandong, Hubei, Shaanxi and Chongqing were measured. Compression and stress relaxation of corn stalks were implemented in the self-made cylinders by universal testing machine INSTRON3367. The stress relaxation times and balance elastic modulus were gotten by fitting stress relaxation curves of corn stalks, and were treated as assessment indicators of stress relaxation properties. Gray correlation analysis was applied in the relevance between the stress relaxation properties of corn stalks and the lignocellulose ingredients. The results showed that differences among cellulose, hemicellulose and lignin contents of different varieties of corn stalks were highly significant ($P < 0.05$). It was found that hemicellulose and lignin contents were highly correlated with stress relaxation properties of corn stalks, while the cellulose content of corn stalks was little effect on stress relaxation properties. From a microscopic point of view, correlation degrees of cellulose, hemicellulose and lignin content associated with stress relaxation properties depended on their regions and functions in the cell wall.

Key words Corn stalks, Compression, Stress relaxation, Grey relation analysis

收稿日期: 2011-01-21 修回日期: 2011-03-05

* 公益性行业(农业)科研专项资助项目(201003063)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2009AA043603)

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

引言

玉米秸秆分布分散和结构疏松等特点导致运输和储存过程中存在运输体积大、储存密度低及贮藏费用高等问题,因此国内外学者对玉米秸秆的打捆和压缩成型问题作了大量研究,包括玉米秸秆尺寸、含水率和保压时间等对秸秆压缩特性的影响^[1-6]。玉米秸秆流变特性是一项重要的压缩特性,特别是玉米秸秆应力松弛直接影响到秸秆打捆的压缩变形、生产率和功耗等^[7-9]。目前,相关研究学者主要建立了适用于玉米秸秆不同压缩条件下的五元应力松弛模型^[10-11],研究了玉米秸秆整个压缩过程不同压缩阶段的流变特性和不同密度区域应力松弛规律^[12],并获取了不同初始密度、含水率下的应力松弛参数等^[13]。上述主要是从宏观角度研究玉米秸秆的应力松弛规律,而讨论秸秆微观结构、木质纤维组成等对其应力松弛特性影响的研究较少。

本文充分考虑我国秸秆品种复杂和分布地域广泛对其组成成分的影响,旨在从生物力学角度,研究玉米秸秆纤维素、半纤维素和木质素等木质纤维含量与应力松弛特性的相关性,并从细胞壁结构和生物力学角度合理阐释研究结果,探索玉米秸秆应力松弛内在机理,为玉米秸秆压缩打捆研究提供更完善的理论基础。

1 玉米秸秆应力松弛模型

玉米秸秆是固体生物材料,描述复杂生物材料流变特性常用广义麦克斯韦模型^[7],其应力松弛方程为

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left(\sum_{i=1}^n E_i e^{-t/T_{Si}} + E_e \right) = \sum_{i=1}^n \sigma_{0i} e^{-t/(\eta_i/E_i)} + \sigma_e \quad (1)$$

其中

$$T_{Si} = \eta_i / E_i$$

式中 $\sigma(t)$ ——任意 t 时刻的应力, MPa

ε_0 ——初始应变

E_i ——各麦克斯韦元件中弹性模量, MPa

η_i ——各麦克斯韦元件中粘性系数, MPa·s

T_{Si} ——各麦克斯韦元件的应力松弛时间, s

E_e ——平衡弹性模量, MPa

σ_{0i} ——各麦克斯韦元件的初始应力, MPa

σ_e ——平衡应力, MPa

其中,应力松弛时间是描述麦克斯韦模型流变特性的重要参数,是应力减小到初始应力的 $1/e$ 时所需的时间。广义麦克斯韦模型存在多个应力松弛时间,等于各麦克斯韦元件分别减小到各自初始应力

$1/e$ 时所需的时间。

2 试验材料与方法

2.1 供试材料及其木质纤维组成测定

试验材料选自北京、辽宁、山东、湖北、陕西和重庆等 13 个不同品种的成熟期玉米秸秆,它们分别是 2010 年 9 月初至 10 月中旬收获。收集田间玉米秸秆后进行去叶和去毛根处理,各品种各取 100 g 左右机械切至 30 ~ 40 mm 长,然后经干燥箱干燥 (65℃, 48 h) 粉碎过 40 目筛用于实验室各化学组成测定。其余秸秆自然风干至含水率 5% 左右。

含水率的测定采用干燥法^[14];中性洗涤纤维 (NDF)、酸性洗涤纤维 (ADF) 和酸性洗涤木质素 (ADL) 的测定采用范氏纤维测定法^[15];粗灰分的测定采用灼烧法^[16]。

试验设备主要有电热鼓风干燥箱 (中国重庆银河试验仪器有限公司)、梅特勒托利多分析天平 AL204-IC、ANKOM220 型纤维分析仪、F57 型专用滤袋、封口机 (美国 ANKOM 技术公司) 和 INSTRON 3367 型材料试验机 (美国 INSTRON 公司)。

2.2 玉米秸秆压缩和应力松弛试验

以闭式压缩方式进行试验,自制不锈钢圆柱压缩筒 (图 1) 进行玉米秸秆压缩试验,其压缩筒内径 50 mm,外径 75 mm,压缩盘直径 46 mm。根据材料试验机 30 kN 的额定载荷 (精度 0.5%) 和最大 500 mm/min 移动速率,设定压缩速率 50 mm/min,压缩行程为 150 mm,压缩结束后保压 60 s。试验时,首先将混合均匀的待测样品随机均匀装填入压缩筒内,直至填满,考虑到

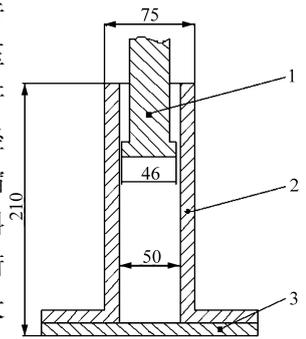


图 1 秸秆压缩系统示意图

Fig. 1 Schematic of compression system of biomass species

1. 压缩盘 2. 压缩筒 3. 封闭式底板

喂入量对玉米秸秆应力松弛特性的影响^[5],每次压缩物料质量控制在 (30 ± 3) g,然后启动程序进行试验。数据采集间隔时间为 1 s,计算机自动记录载荷和变形。

2.3 统计分析和数据处理

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 cftool 工具计算和作图;用 SPSS 16.0 软件的 Univarte 过程进行多因素方差分析,采用最小显著差数法 (least significance difference, 简称 LSD) 进行多重比较等。

3 试验结果与分析

3.1 玉米秸秆木质纤维含量

风干后的玉米秸秆木质纤维组成包括纤维素、半纤维素、木质素等,北京、辽宁、山东、湖北、陕西和重庆等不同地区和不同品种的玉米秸秆木质纤维含量如表 1 所示。从表 1 中可以看出,玉米秸秆纤维素、半纤维素和木质素质量分数依次为 30.9% ~ 47.5%、18.8% ~ 30.7% 和 1.8% ~ 7.2%。统计分析表明,它们的差异性均显著($P < 0.05$)。

表 1 玉米秸秆木质纤维含量

Tab. 1 Lignocellulose contents of corn stalks

品种	产地	纤维素质量分数/%	半纤维素质量分数/%	木质素质量分数/%
上庄 2 号	北京市海淀区上庄镇	33.23 ^h	20.53 ^e	3.96 ^f
上庄 3 号	北京市海淀区上庄镇	27.47 ^j	18.81 ^h	1.85 ^h
辽单 565	辽宁省沈阳市	30.94 ⁱ	20.36 ^e	1.97 ^h
先玉 335	辽宁省抚顺市	38.08 ^f	20.88 ^e	4.90 ^{de}
强盛 1 号	辽宁省抚顺市	47.54 ^a	24.58 ^{ef}	6.69 ^b
鲁玉 4 号	山东省临沂市	46.51 ^b	28.00 ^c	7.34 ^a
秀青 1 号	山东省临沂市	31.53 ⁱ	20.98 ^e	2.93 ^e
浚单 20	山东省枣庄市	41.65 ^d	25.38 ^{de}	5.36 ^{cd}
华甜玉 3 号	湖北省武汉市	43.70 ^c	30.77 ^a	5.54 ^c
登海 9 号	湖北省大冶市	45.82 ^b	26.12 ^d	7.16 ^{ab}
鄂玉 25	湖北省咸宁市	39.84 ^e	30.01 ^{ab}	5.52 ^c
郑单 958	陕西省宝鸡市	37.23 ^g	29.28 ^b	4.49 ^e
蠡王 5 号	重庆市忠县	43.45 ^c	24.26 ^f	5.78 ^c

注:同列数据后面不同字母表示 LSD 试验($P < 0.05$)的显著差异性。

3.2 玉米秸秆应力松弛模型

选取经 150 mm 压缩和 60 s 应力松弛后的蠡王 5 号、华甜玉 3 号、强盛 1 号、浚单 20、郑单 958 和上庄 2 号玉米秸秆作应力松弛曲线,如图 2 所示。

从图 2 可以看出,玉米秸秆应力松弛曲线均呈指数规律变化,其应力均在 1 s 左右有一个大幅度的下降,随着时间的延长,应力逐渐减小,并且减小速率逐渐变低,20 s 后应力减小趋势不明显,且逐渐趋于稳定。因此结合式(1)并利用 Matlab 7.0 软件中 cftool 工具拟合玉米秸秆应力松弛曲线,研究比

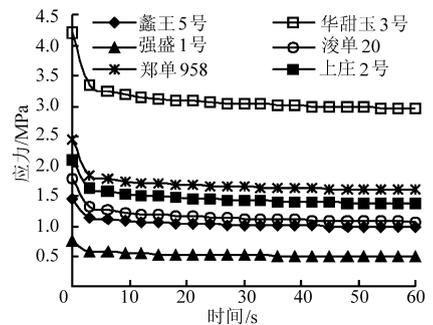


图 2 玉米秸秆应力松弛曲线

Fig. 2 Stress relaxation of corn stalks

较发现,2 个麦克斯韦元件和 1 个弹簧并联组成五元件方程能较好地描述玉米秸秆压缩应力松弛模型。应力松弛模型中各麦克斯韦元件的松弛时间和平衡弹性模量如表 2 所示。

表 2 玉米秸秆应力松弛模型参数

Tab. 2 Parameters for stress relaxation model of corn stalks

品种	T_{s1}/s	T_{s2}/s	E_e/MPa
上庄 2 号	0.671 7	19.277 9	1.568 1
上庄 3 号	0.712 8	17.955 8	2.465 1
辽单 565	0.800 6	17.442 9	1.724 4
先玉 335	0.654 3	18.932 1	0.824 2
强盛 1 号	0.616 7	17.340 2	0.656 7
鲁玉 4 号	0.583 8	16.495 0	1.893 8
秀青 1 号	0.571 7	16.900 5	1.393 2
浚单 20	0.690 2	17.771 6	1.427 2
华甜玉 3 号	0.595 2	17.029 9	4.499 9
登海 9 号	0.499 1	18.222 8	1.385 6
鄂玉 25	0.578 2	16.800 1	1.634 4
郑单 958	0.601 5	17.232 6	1.399 4
蠡王 5 号	0.595 2	17.788 4	1.198 5

表 2 显示 13 个不同品种的玉米秸秆第一应力松弛时间 T_{s1} 均在 0.5 ~ 0.8 s 内,与图 2 中玉米秸秆应力松弛曲线在 1 s 附近应力大幅度下降一致;第二应力松弛时间 T_{s2} 均在 16.5 ~ 19.5 s 内,与图 2 应力松弛曲线中玉米秸秆应力在 20 s 附近趋于稳定一致。

3.3 玉米秸秆应力松弛特性参数与木质纤维含量关联度计算

玉米秸秆应力松弛特性的影响因素有含水率、秸秆形态、温度和秸秆理化性质等^[17],本文从微观角度运用秸秆木质纤维组成对玉米秸秆应力松弛特性进行评价分析,选取了应力松弛时间 T_{s1} 、 T_{s2} 、平衡弹性模量 E_e 作为玉米秸秆应力松弛特性考核指标,纤维素、半纤维素和木质素质量分数作为影响因素。初步预测表明,玉米秸秆应力松弛时间、平衡弹

性模量与木质纤维含量间表现为非线性,因此选用了一种适用多因素、非线性的灰色关联法来计算它们的关联度^[18]。

(1) 参考数列和比较数列

分别将应力松弛时间 T_{s1} 、 T_{s2} 和平衡弹性模量 E_e 作为参考数列 x_0 , 比较数列为 $x_i = [x_1, x_2, x_3]$, 分别表示纤维素质量分数、半纤维素质量分数和木质素质量分数, 由于各比较数列中量纲相同, 因此不必进行无量纲化处理。

(2) 关联系数

以应力松弛时间 T_{s1} 为例, 根据表 2 的数据计算

比较数列和参考数列的差值 $\Delta x_i = |x_0(k) - x_i(k)|$, 其中 k 为 1, 2, ..., 13, 结果见表 3, 发现二级最小差 $\min_i(\min_k |x_0(k) - x_i(k)|)$ 为 1.132 9, 二级最大差 $\max_i(\max_k |x_0(k) - x_i(k)|)$ 为 46.919 7, 各应力松弛时间与组成含量之间的关联系数为

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i(\min_k |x_0(k) - x_i(k)|) + \rho \max_i(\max_k |x_0(k) - x_i(k)|)}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i(\max_k |x_0(k) - x_i(k)|)} \quad (i=1,2,3; k=1,2,\dots,13) \quad (2)$$

式中, ρ 为分辨系数, 取值区间为 $[0, 1]$, 取 0.5。计算结果见表 3。

表 3 应力松弛时间 T_{s1} 与木质纤维含量的关联系数

Tab.3 Correlation coefficients between stress relaxation time T_{s1} and lignocellulose contents

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Δx_1	32.556 4	26.760 3	30.14	37.421 8	46.919 7	45.924 4	30.959	40.958 9	43.103 8	45.325 8	39.261 5	36.630 8	42.854 6
Δx_2	19.860 8	18.096 3	19.562 2	20.222 6	23.958 6	27.417 5	20.409 3	24.694 7	30.170 4	25.621	29.435 9	28.680 0	23.664 1
Δx_3	3.289 6	1.132 9	1.167 4	4.248 3	6.073 4	6.757 0	2.359 7	4.667 8	4.948 9	6.656 4	4.941 5	3.885 9	5.188 2
ξ_1	0.439 0	0.489 7	0.458 8	0.403 9	0.349 4	0.354 4	0.451 9	0.381 8	0.369 5	0.357 5	0.392 1	0.409 3	0.370 9
ξ_2	0.567 7	0.591 8	0.571 6	0.563 0	0.518 6	0.483 4	0.560 6	0.510 7	0.458 6	0.501 1	0.464 9	0.471 7	0.521 9
ξ_3	0.919 4	1.000 0	0.998 6	0.887 6	0.832 7	0.813 9	0.952 5	0.874 3	0.865 7	0.816 6	0.865 9	0.899 3	0.858 4

(3) 求解关联度

纤维素、半纤维素和木质素质量分数与应力松弛时间 T_{s1} 的关联度计算式为

$$r_i = \frac{1}{13} \sum_{k=1}^{13} \xi_i(k) \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

计算得 $r_1 = 0.402 2$, $r_2 = 0.522 0$, $r_3 = 0.891 1$ 。

3.4 相关性分析

按照上述步骤计算出应力松弛时间 T_{s2} 和平衡弹性模量 E_e 与纤维素、半纤维素和木质素质量分数关联度, 分别为 0.453 2、0.752 5 和 0.575 9 以及 0.394 5、0.514 3 和 0.890 9。研究显示应力松弛时间 T_{s1} 和平衡弹性模量 E_e 的关联度由大到小排序相同, 即: 木质素质量分数、半纤维素质量分数、纤维素质量分数; 应力松弛时间 T_{s2} 的关联度由大到小排序为: 半纤维素质量分数、木质素质量分数、纤维素质量分数。

(1) 应力松弛时间 T_{s1} 和平衡弹性模量 E_e

应力松弛时间 T_{s1} 和平衡弹性模量 E_e 与秸秆各成分质量分数的关联度 r_2 和 r_3 均大于 0.5, r_1 均小于 0.5, 说明木质素质量分数和半纤维素质量分数对 T_{s1} 和 E_e 的影响均较大, 纤维素质量分数对 T_{s1} 和 E_e 的影响较小, 且木质素质量分数的影响最显著。一方面, T_{s1} 和 E_e 反映的主要是玉米秸秆表皮的应力松弛特性。由式(1)可知, T_{s1} 主要由粘性系数和弹性

模量决定, 且 E_e 主要体现了秸秆抵抗破坏的能力。另一方面, 木质素存在于硬组织中, 木质化程度越高的茎秆, 木质素质量分数越高^[19], 玉米秸秆的木质素主要存在于表皮中, 因而表皮中木质素质量分数相对较高。木质素填充于纤维素构架中增强植物体的机械强度, 抵抗外力的破坏, 对于茎秆的压缩能起到抗压作用^[20]。木质素质量分数越高, 弹性模量就越大, T_{s1} 就越小; 同时, 表皮抗破坏能力越强, 平衡弹性模量就越大。

(2) 应力松弛时间 T_{s2}

应力松弛时间 T_{s2} 与秸秆各成分质量分数的关联度 r_2 和 r_3 均大于 0.5, r_1 小于 0.5, 说明半纤维素和木质素质量分数对 T_{s2} 的影响较大, 纤维素质量分数对 T_{s2} 的影响较小, 且半纤维素质量分数的影响最显著。一方面, T_{s2} 反映的主要是玉米秸秆芯的应力松弛特性, 并且由式(1)可知, T_{s2} 主要由粘性系数和弹性模量决定。另一方面, 半纤维素是构成秸秆细胞初生壁的主要成分之一, 它结合在纤维素微纤维的表面, 并且相互连接, 这些纤维构成了具有一定硬度和弹性的细胞壁^[21~22]。玉米属于禾本科植物, 在禾本科植物中, 半纤维素主要以聚木糖类形式存在^[23], 研究表明以聚木糖类形式存在的半纤维素具有增强细胞壁延展性, 降低细胞壁刚度的作用^[24], 而木质素是形成交织网来硬化细胞壁, 但相对含量较半纤维素小, 因此在一定纤维素含量的基础上, 半纤

纤维素质量分数影响大于木质素质量分数。

以上分析表明,玉米秸秆纤维素、半纤维素和木质素质量分数对其不同的应力松弛特性参数影响程度不同,主要取决于它们分布的位置和功能。在纤维素质量分数一定的前提下,木质素具有增强细胞壁刚度的作用,最大程度地影响了反映玉米秸秆表皮应力松弛特性的松弛时间 T_{s1} 和平衡弹性模量 E_e ;半纤维素具有增强细胞壁延展性,降低细胞壁刚度的作用,最大程度地影响了反映玉米秸秆芯应力松弛特性的松弛时间 T_{s2} 。

4 结论

(1)本试验采集的北京、辽宁、山东、湖北、陕西和重庆等地 13 个不同品种的成熟期玉米秸秆纤维素、半纤维素和木质素质量分数差异性显著,依次为 30.9% ~ 47.5%、18.8% ~ 30.7% 和 1.8% ~ 7.2%。

(2)不同品种玉米秸秆应力松弛曲线均呈指数规律变化,其应力均在 1 s 左右有大幅度下降,20 s 后应力减小趋势不明显。其应力松弛曲线用五元件广义麦克斯韦模型描述,得到应力松弛时间 T_{s1} 、 T_{s2} 和平衡弹性模量 E_e 等松弛特性参数分别为 0.5 ~ 0.8 s, 16.5 ~ 19.5 s 和 0.6 ~ 4.5 MPa。

(3)应力松弛时间 T_{s1} 和平衡弹性模量 E_e 关联度由大到小排序相同,即木质素质量分数、半纤维素质量分数、纤维素质量分数,应力松弛时间 T_{s2} 的关联度由大到小排序为半纤维素质量分数、木质素质量分数、纤维素质量分数。木质素质量分数最大程度地影响了反映玉米秸秆表皮应力松弛特性的松弛时间 T_{s1} 和平衡弹性模量 E_e ;半纤维素质量分数最大程度地影响了反映玉米秸秆芯应力松弛特性的松弛时间 T_{s2} 。

参 考 文 献

- Mani S, Tabil L G, Sokhansanj S. Evaluation of compaction equations applied to four biomass species [J]. Canadian Biosystems Engineering, 2004, 46(3): 355 ~ 361.
- Mani S, Tabil L G, Sokhansanj S. Specific energy requirement for compacting corn stover [J]. Bioresource Technology, 2006, 97(12): 1 420 ~ 1 426.
- Mani S, Tabil L G, Sokhansanj S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses [J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(7): 648 ~ 654.
- Adapa P, Schoenau G, Tabil L, et al. Compression of fractionated sun-cured and dehydrated alfalfa chops into cubes-specific energy models [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(1): 38 ~ 45.
- Adapa P, Tabil L, Schoenau G. Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw [J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(3): 335 ~ 344.
- 田潇瑜,侯振东,徐杨. 玉米秸秆成型块微观结构研究 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 105 ~ 108.
Tian Xiaoyu, Hou Zhendong, Xu Yang. Microstructure of corn stover briquette [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 105 ~ 108. (in Chinese)
- 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)
- 王春光. 牧草应力松弛时间及其应用 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 65 ~ 67.
Wang Chunguang. Stress relaxation time of hay and its application [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 65 ~ 67. (in Chinese)
- 廖娜,黄光群,陈龙建,等. 玉米秸秆芯结构建模与径向压缩过程模拟 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 117 ~ 121.
Liao Na, Huang Guangqun, Chen Longjian, et al. Structure modeling and radial compression simulation of corn stalk cores [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 117 ~ 121. (in Chinese)
- Kaliyan N, Morey R V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products [J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(3): 337 ~ 359.
- Kaliyan N, Morey R V. Constitutive model for densification of corn stover and switch grass [J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 47 ~ 63.
- 杨明韶,张永,李旭英. 粗纤维物料压缩过程的一般流变规律的探讨 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 135 ~ 138.
Yang Mingshao, Zhang Yong, Li Xuying. Rheological law of the crop stem fibrous material during compression process [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 135 ~ 138. (in Chinese)
- 胡建军. 秸秆颗粒燃料冷态压缩成型实验研究及数值模拟 [D]. 大连:大连理工大学, 2008.
Hu Jianjun. Straw pellet fuel cold molding by compression: experimental study and numerical simulation [D]. Dalian:

- Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- 14 ASAE S358. 2 DEC—2008 Moisture measurement—forages[S]. 2008.
 - 15 杨胜. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 北京:北京农业大学出版社,1999.
 - 16 GB/T 6438—2007 饲料中粗灰分的测定[S]. 2007.
GB/T 6438—2007 Animal feeding stuffs—determination of crude ash [S]. 2007. (in Chinese)
 - 17 周祖镠. 农业物料学[M]. 北京:农业出版社,1994.
 - 18 郭玉明,袁红梅,阴妍,等. 茎秆作物抗倒伏生物力学评价研究及关联分析[J]. 农业工程学报,2007,23(7):14~18.
Guo Yuming, Yuan Hongmei, Yin Yan, et al. Biomechanical evaluation and grey relational analysis of lodging resistance of stalk crops[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 14~18. (in Chinese)
 - 19 郭维俊,王芬娥,黄高宝,等. 小麦茎秆力学性能与化学组分试验[J]. 农业机械学报,2009,40(2):110~114.
Guo Weijun, Wang Fene, Huang Gaobao, et al. Experiment on mechanical properties and chemical compositions of wheat stems [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 110~114. (in Chinese)
 - 20 Pegic B M, Kostic M M, Skundric P D. The effects of hemi-celluloses and lignin removal on water uptake behavior of hemp fibers[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(15): 7 152~7 159.
 - 21 Kha H, Tuble S C, Kalyanasundaram S, et al. WallGen, software to construct layered cellulose-hemicellulose networks and predict their small deformation mechanics [J]. Plant Physical, 2010, 152(2): 774~786.
 - 22 Anja G. Mechanical modeling and structural analysis of the primary plant cell wall[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2010, 13(6): 693~699.
 - 23 高洁,汤烈贵. 纤维素科学[M]. 北京:科学出版社,1999.
 - 24 Whitney S E C, Gothard M G E, Mitchell J T, et al. Roles of cellulose and xyloglucan in determining the mechanical properties of primary plant cell walls[J]. Plant Physiology, 1999, 121(2): 657~663.

(上接第 91 页)

- 4 赵明杰,王再宙,金淑清. 求解变截面梁挠度的新方法[J]. 内蒙古农牧学院学报,1998, 19(2):127~129.
Zhao Mingjie, Wang Zaizhou, Jin Shuqing. Method for solving the deflection of the varying acrossing-section beam [J]. Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture & Animal Husbandry, 1998, 19(2):127~129. (in Chinese)
- 5 廖庆喜,李继波,覃国良. 气力式油菜精量排种器气流场仿真分析[J]. 农业机械学报,2009, 40(7):78~82.
Liao Qingxi, Li Jibo, Qin Guoliang. Simulation analysis on air current field of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 78~82. (in Chinese)
- 6 罗锡文,王在满,蒋恩臣,等. 型孔轮式排种器弹性随动护种带装置设计[J]. 农业机械学报,2008, 39(12):60~63.
Luo Xiwen, Wang Zaiman, Jiang Enchen, et al. Design of disassemble rubber guard device for cell wheel feed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12):60~63. (in Chinese)
- 7 陈进,李耀明,王希强,等. 气吸式排种器吸孔气流场的有限元分析[J]. 农业机械学报,2007, 38(9):59~62.
Chen Jin, Li Yaoming, Wang Xiqiang, et al. Finite element analysis for the sucking nozzle air field of air-suction seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9):59~62. (in Chinese)
- 8 左彦军,马旭,玉大略,等. 水稻芽种窝眼窄缝式气吸滚筒排种器流场模拟与试验[J]. 农业机械学报,2011, 42(2): 58~62.
Zuo Yanjun, Ma Xu, Yu Dalue, et al. Flow field numerical simulation of suction cylinder-seeder for rice bud seed with socket-slot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2):58~62. (in Chinese)
- 9 李成华,高玉芝,张本华. 气吹式倾斜圆盘排种器排种性能试验[J]. 农业机械学报,2008, 39(10):90~94.
Li Chenghua, Gao Yuzhi, Zhang Benhua. Experiment on dispensing performance of air-sweeping inclined plate seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10):90~94. (in Chinese)
- 10 刘晋浩,潘海兵,舒庆. 草方格铺设机器人多体动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报,2009, 40(6):153~157.
Liu Jinhao, Pan Haibing, Shu Qing. Multi-body dynamic simulation and experiments of the straw-checkerboard barriers paving robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6):153~157. (in Chinese)