

籽棉压缩与应力松弛力学特性及模型构建

孔凡婷, 吴 腾, 陈长林, 孙勇飞, 谢 庆, 石 磊*

(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘 要: 为深入研究籽棉压缩及应力松弛过程的力学特性并构建其本构模型, 该研究以籽棉为研究对象开展试验, 分别利用改进西原模型和五元件广义 Maxwell 模型对压缩和应力松弛的应力应变曲线进行描述。通过定义的本构模型对不同含水率及喂入量的籽棉力学特性试验数据结果进行参数辨识, 得到相关模型参数, 并探究不同因素对压缩及松弛过程应力的影响规律。研究结果表明: 曲线拟合法求解籽棉压缩及应力松弛过程本构模型参数的决定系数均大于 0.9, 改进西原模型、五元件广义 Maxwell 模型可以较好地描述籽棉压缩力学特性和应力松弛特性。对籽棉压缩及应力松弛力学特性解析显示, 模型参数表现出明显的应力规律: 通过 Duncan 均值比较结果可知: 籽棉压缩本构模型参数中不同含水率组间弹性模量差异均显著 ($P<0.05$), 不同喂入量组间串联虎克体弹性模量差异显著 ($P<0.05$), 压缩应力值与含水率、喂入量呈正相关关系; 籽棉应力松弛模型参数中不同含水率及喂入量组间弹性模量及粘性模量差异均显著 ($P<0.05$), 弹性模量、粘性模量与含水率及喂入量均呈正相关关系。籽棉压缩与应力松弛力学特性的研究可为籽棉压缩过程机理研究、模拟仿真提供理论依据, 缩短机具研发过程。

关键词: 压缩; 应力松弛; 本构模型; 试验研究; 籽棉

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.007

中图分类号: S222.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-07-0053-07

孔凡婷, 吴腾, 陈长林, 等. 籽棉压缩与应力松弛力学特性及模型构建[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 53-60. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.007 <http://www.tcsae.org>

Kong Fanting, Wu Teng, Chen Changlin, et al. Mechanical properties and construction of constitutive model for compression and stress relaxation of seed cotton[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(7): 53-60. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.07.007 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

棉花是世界上重要的经济作物和纺织工业原料, 在经济发展中占据重要地位^[1]。中国棉花种植面积超 300 万 hm^2 , 无论是种植面积还是产量, 都位于世界前列^[2]。在当前城市化进程不断加快、大量农村劳动力向城市转移的背景下, 自 2007 年以来, 机采棉的发展速度逐年加快。随着机采棉面积的不断增加, 传统、落后的籽棉储运技术暴露出来的问题愈发明显。

目前, 籽棉储运主要有散装、打垛和打包 3 种方式。散装储运耗费劳力多、运输效率低、占用场地大、存放期间易造成棉花霉烂。打垛可提高籽棉运输效率, 但需专用的打垛设备和拉垛车辆, 工序繁琐, 不便于移动。籽棉打包随着美国迪尔 CP690 型摘棉打包机的引进率先在新疆地区应用, 其技术能显著提高储运效率, 降低籽棉运输成本; 棉花品质不因天气变化影响, 也可杜绝火灾发生, 还有效防止异性纤维混入; 圆形包捆移动和堆放方便, 占用场地空间小并无特殊储运要求^[3]。籽棉打包

储运技术优势突出, 先进性和实用性已得到生产实践认可, 是籽棉储运方式发展的一个重要方向。在中美贸易战的大背景下, 研发具有自主知识产权的打包装备, 可解决中国棉花储运难的问题。

籽棉压缩过程的力学特性是籽棉收获、打包等装备优化设计的基础, 尤其是打包机研发过程中, 籽棉压缩力学特性对打包机预压过程中预压辊的结构及工艺参数、打包过程中喂入量与打包带转速优化匹配、打包辊结构、布置与工作参数及包装过程中包膜机构的结构与工艺参数、打包膜物理特性要求等影响较大。但目前关于农业物料压缩力学特性的研究多集中于玉米、小麦或牧草秸秆等物料。Sun 等^[4]、邢献军等^[5]、马彦华等^[6]、Huang 等^[7]分别对玉米秸秆进行了不同的力学特性试验研究; 马瑞峻等^[8]、Nona 等^[9]、Zhang 等^[10]、吴敏等^[11]、房佳佳等^[12]学者分别对小麦、水稻秸秆及苜蓿类牧草等物料进行了压缩力学试验及分析; 朱凯等^[13]进行了粉体棉花秸秆应力松弛特性试验并将所得数据拟合分析; Yang 等^[14]、刘庆庭等^[15]学者对竹子、甘蔗等硬质秸秆物料的压缩力学特性展开研究与分析; 部分学者对去籽皮棉压缩特性^[16-18]进行研究, Hardin 等^[19-20]对籽棉压缩和蠕变开展研究, 其主要研究打垛过程中籽棉力学特性, 压缩密度范围较小 ($64\sim 128\text{ kg/m}^3$), 不能为打包装备研发提供理论参考。目前, 各种物料压缩或成型的建模以及对成型块质量的影响因素分析已取得一定进展, 霍丽丽等^[21]、陈啸等^[22]、马方等^[23]、Kaliyan 等^[24]进行了生

收稿日期: 2021-01-04 修订日期: 2021-03-19

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX(18)3046); 中央级公益性科学研究所基本科研业务费专项 (S202014); 中央级公益性科学研究所重点任务-粮棉油收获 (15 创新-2002)

作者简介: 孔凡婷, 助理研究员, 主要研究方向为大田作物机械化收获。

Email: kongfanting1989@163.com

*通信作者: 石磊, 研究员, 主要研究方向为大田作物机械化收获。

Email: shileijsnj@126.com

物质物料的本构模型构建研究及分析, 并为生产实践提供了良好的理论支撑。

基于此, 本文以籽棉为研究对象开展压缩力学特性试验, 以含水率及喂入量为试验因素利用万能试验机进行压缩及应力松弛试验, 将得到的应力应变数据结果进行曲线拟合, 并对定义的本构模型进行参数辨识, 进而进行籽棉压缩力学特性研究。拟为籽棉的压缩过程机理研究、模拟仿真及籽棉打包机构的优化设计提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

1.1.1 试验材料

试验籽棉种植于农业农村部南京农业机械化研究所白马基地, 品种为中 6913。试验样品为于 2019 年 10 月 28 日农业农村部南京农业机械化研究所研制的 4MZ-3 型刷辊式采棉机收获籽棉, 收获时籽棉含水率为 10.8%。

1.1.2 试验设备

试验使用的主要设备为 WDW-10 微机控制电子万能试验机及自制压缩模具, 如图 1 所示。万能试验机试验力示值精度在 $\pm 1\%$ 内, 最大试验力为 10 kN; 压缩模具主要包括压缩腔及压缩杆: 压缩腔由 PVC 管制作与底板螺纹连接, 便于拆卸; 压缩杆与压缩端销轴连接。其他辅助仪器包括南京试验仪器厂生产的 DGH30-1A 型电热鼓风干燥箱; 中国上海立晨仪器技术有限公司生产的 YP300001D 电子秤(量程 0~30 kg, 精度 0.1 g); 游标卡尺、直尺和秒表等。

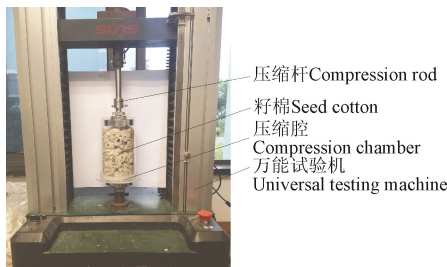
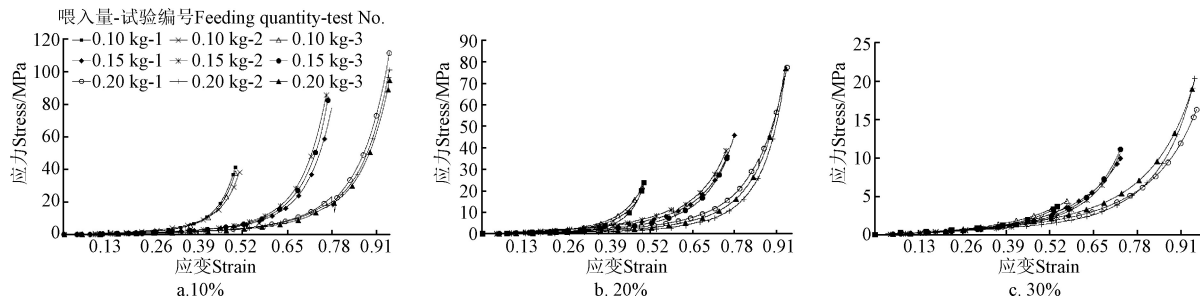


图 1 压缩试验装置

Fig.1 Compression test device



注: 图中 0.1 kg-*i*、0.15 kg-*i*、0.2 kg-*i* (*i*=1,2,3) 分别代表 0.1 kg、0.15 kg、0.2 kg 喂入量的 3 组重复试验编号, 下同。

Note: The 0.1 kg-*i*, 0.15 kg-*i*, 0.2 kg-*i* (*i*=1,2,3) stand for test No. were repeated in three groups of 0.1 kg, 0.15 kg, 0.2 kg feeding quantity. The same below.

图 2 不同含水率籽棉压缩应力应变曲线

Fig.2 Compression stress-strain curve of seed cotton with different moisture content

1.2 试验方法

本文对籽棉进行单向施力挤压, 以籽棉在受压状态下的应力应变变化作为表征籽棉压缩性能的重点指标。预试验结果显示, 籽棉的棉纤维属于应变敏感材料, 静态压缩条件下加载速度对籽棉压缩应力无明显影响; 而喂入量及含水率对压缩及应力松弛力学特性值具有较大影响, 因此选择喂入量及含水率作为籽棉压缩及应力松弛力学特性试验的因素。收获时因采棉机采摘原理不同及季节气候影响, 收获籽棉含水率范围在 10%~30%, 因此将试样进行预调湿处理, 将每组试样放置在温度为 50 °C、湿度为 10% 的环境下预调湿 2 h, 然后在温度 20 °C、相对湿度 6% 的恒温恒湿条件下调湿 24 h 后进行测试^[25]。

籽棉压缩及应力松弛试验均在万能试验机上进行, 为减少误差, 基于试验条件将 0.1、0.15、0.2 kg 不同喂入量籽棉自由堆放至压缩腔, 为保证籽棉压缩效果并兼顾效率, 以 30 mm/min 压缩速度分别对 10%、20%、30% 含水率的籽棉进行试验。每组试验重复 3 次。对不同含水率的籽棉试验数据, 分别以喂入量-序号进行重复性试验编号。

1.2.1 压缩试验

约翰迪尔打包采棉一体机打包密度为 220 kg/m³, 预试验将不同含水率的籽棉压缩至约 400 kg/m³时棉籽产生破坏。因此, 设定压缩杆从籽棉自由堆积密度 87.73 kg/m³ 压缩至指定密度 250 kg/m³ 后停止加载, 由万能试验机记录加载过程的负荷值, 由此表征籽棉在整个压缩过程中的受力情况。压缩过程中将籽棉视为一个集合体, 在万能试验机输入压缩截面积及压缩位移量, 试验软件将测得负荷值及形变量自动将坐标变换可得到应力及应变值。

1.2.2 应力松弛试验

每组压缩试验停止加载后, 压缩杆不动保持籽棉变形, 由万能试验机记录其应力变化值, 90 s 后结束试验, 得到籽棉压缩后应力松弛曲线。

1.3 试验结果

1.3.1 压缩试验数值

以 30 mm/min 压缩速度分别对 10%、20%、30% 含水率下 0.1、0.15、0.2 kg 喂入量的籽棉进行压缩, 每组试验重复 3 次。由图 2 可知, 各组重复试验得到的应力应变曲线特征基本一致, 且离散性不大。

棉籽上均布棉纤维的籽棉与其他农业物料相比，压缩过程中的力学变化比较复杂，主要表现为粘弹特性。刚开始压缩时，籽棉纤维间的间隙逐渐减小，主要为棉纤维内部纤维束发生弯折弹性变形及纤维间内摩擦的粘性，此阶段应力近似线性缓慢增加以排除纤维间空隙为主，定义为排空阶段；该阶段曲线表现为近似线性，此过程物料松散变形虽大，但应力变化很小。随着压缩空间减小，单向压力从纤维传递至棉籽，棉籽在力的作用下产生滑移及变形，因棉籽排列方式的随机性，此阶段应力变化加速且可能有阶跃式变化，内部纤维体受压穿插、滑移，进行内部调整，定义为滑移变形阶段，应力应变曲线呈逐渐上升趋势。当籽棉压缩密度达到约 150 kg/m^3 后继续压缩，此阶段内部应力随应变增加而急

剧上升，集合体内部纤维排列紧密，主要以棉纤维自身受压发生部分塑性变形、物料间内摩擦的粘性及棉籽受压的弹性变形为主，该阶段定义为非线性粘弹塑性变形阶段；此阶段曲线表现为快速上升，即压缩应变较小时应力快速上升。

1.3.2 应力松弛试验数值

以 30 mm/min 压缩速度分别对 10%、20%、30% 含水率；0.1、0.15、0.2 kg 不同喂入量的籽棉压缩停止加载后，压缩杆保持 90 s 变形得到的应力松弛曲线，每组试验重复 3 次。由图 3 可知，各组重复试验得到的曲线特征基本一致，即应力随时间呈先快后慢的非线性减少，最后曲线趋于恒定值，这与秸秆、草料等农业物料应力松弛取得结果一致^[8,12]。

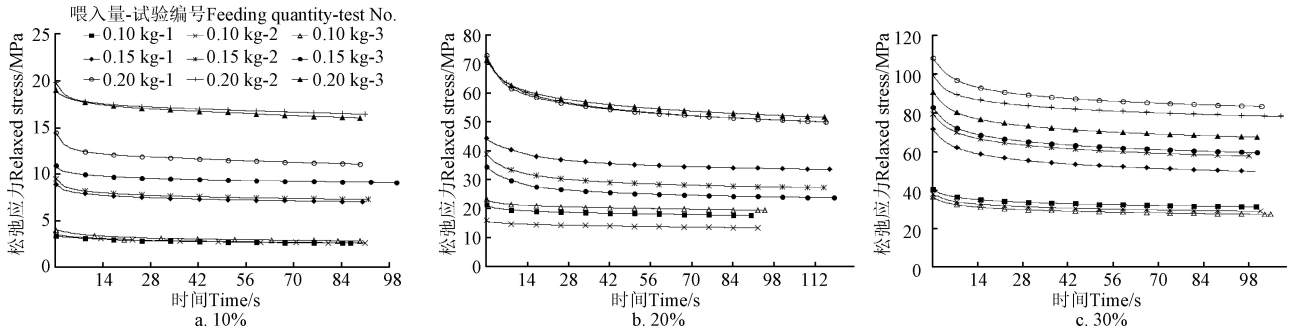


图 3 不同含水率籽棉应力松弛曲线

Fig.3 Stress relaxation curve of seed cotton with different moisture content

2 模型构建

研究借鉴相关生物质压缩成型及秸秆物料压缩建模方法进行籽棉压缩本构模型构建。

2.1 压缩本构模型

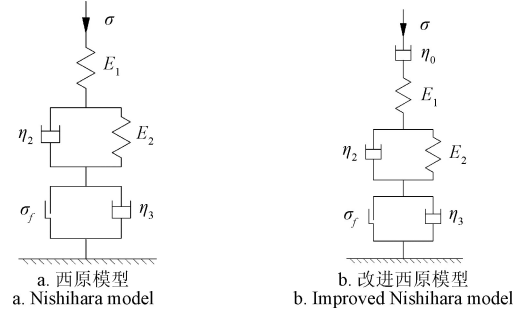
西原体模型^[26]是由虎克体、开尔文体和粘塑性体串联组成，适合反映软材料的力学特性，其力学模型如图 4a 所示。西原模型的本构方程为

$$\begin{cases} \frac{\eta_2}{E_1} \dot{\sigma} + \left(1 + \frac{E_2}{E_1}\right) \sigma = \eta_2 \dot{\varepsilon} + E_2 \varepsilon & (\sigma < \sigma_f) \\ \ddot{\sigma} + \left(\frac{E_2}{\eta_2} + \frac{E_2}{\eta_3} + \frac{E_1}{\eta_2}\right) \dot{\sigma} + \frac{E_1 E_2}{\eta_2 \eta_3} (\sigma - \sigma_f) = E_2 \ddot{\varepsilon} + \frac{E_1 E_2}{\eta_2} \dot{\varepsilon} & (\sigma \geq \sigma_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中 σ 为总应力，MPa； ε 为总应变； $\dot{\sigma}$ 、 $\ddot{\sigma}$ 分别为总应力对时间求一阶、二阶导； $\dot{\varepsilon}$ 、 $\ddot{\varepsilon}$ 分别为总应变对时间求一阶、二阶导； E_1 、 E_2 分别为虎克体元件和开尔文元件中虎克体的弹性模量，MPa； η_2 、 η_3 分别为开尔文元件和粘塑性体中牛顿体的粘性模量，MPa·s； σ_f 为粘塑性体中库伦体的初始应力，MPa。

但西原体模型在描述压缩第 1 阶段仅为弹性，无法真实地反映出籽棉压缩过程中的粘弹特性。为更好的与实际材料曲线相吻合，建立统一反映籽棉压缩 3 个阶段的模型，本文添加一个牛顿体与原西原体模型进行串

联，来替代传统西原模型中理想粘-弹-塑性体，得到改进西原模型来反映籽棉应力的加速特征，其力学模型如图 4b 所示。



注： σ 为总应力，MPa； η_0 为串联牛顿体的粘性模量，MPa·s； E_1 为串联虎克体的弹性模量，MPa； E_2 为开尔文体中虎克体的弹性模量，MPa； η_2 为开尔文体中牛顿体的粘性模量，MPa·s； σ_f 为库伦体的初始应力，MPa； η_3 为粘塑性体中牛顿体的粘性模量，MPa·s。

Note: σ is total stress, MPa; η_0 is viscosity modulus of tandem Newtonian body, MPa·s; E_1 is elasticity modulus of tandem Hookean body, MPa; E_2 is elasticity modulus of Hookean body in Kelvin body, MPa; η_2 is viscosity modulus of Newtonian body in Kelvin body, MPa·s; σ_f is initial stress of Cullen body, MPa; η_3 is viscosity modulus of Newtonian body in Viscoplastic body, MPa·s.

图 4 压缩力学模型

Fig.4 Compression mechanical model

在推导籽棉压缩本构方程时，可将牛顿体、虎克体、开尔文体和粘塑性体看成单个元件，然后应用串联运算规则^[26]，即可求得改进西原模型体的本构方程。

当 $\sigma < \sigma_f$ 时，

$$\sigma = \sigma_0 = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3)$$

将式 (3) 对时间求一阶导、二阶导分别为 (以下公式求导均为对时间求导)

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 + \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 \quad (4)$$

$$\ddot{\varepsilon} = \ddot{\varepsilon}_0 + \ddot{\varepsilon}_1 + \ddot{\varepsilon}_2 \quad (5)$$

式中 σ 为总应力, MPa; ε 为总应变; σ_0 、 σ_1 、 σ_2 分别为串联元件牛顿体、虎克体和开尔文体的应力, MPa; ε_0 、 ε_1 、 ε_2 分别为串联元件牛顿体、虎克体和开尔文体的应变。

对于牛顿体有

$$\sigma = \sigma_0 = \eta_0 \dot{\varepsilon}_0 \quad (6)$$

求一阶导为

$$\dot{\sigma} = \dot{\sigma}_0 = \eta_0 \ddot{\varepsilon}_0 \quad (7)$$

对于虎克体有

$$\sigma = \sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \quad (8)$$

求一阶导、二阶导分别为

$$\dot{\sigma} = \dot{\sigma}_1 = E_1 \dot{\varepsilon}_1 \quad (9)$$

$$\ddot{\sigma} = \ddot{\sigma}_1 = E_1 \ddot{\varepsilon}_1 \quad (10)$$

对于开尔文体有

$$\sigma = \sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 + \eta_2 \dot{\varepsilon}_2 \quad (11)$$

求一阶导为

$$\dot{\sigma} = \dot{\sigma}_2 = E_2 \dot{\varepsilon}_2 + \eta_2 \ddot{\varepsilon}_2 \quad (12)$$

将公式 (6)、(9) 代入式 (4) 解得:

$$\dot{\varepsilon}_2 = \dot{\varepsilon} - \frac{\sigma}{\eta_0} - \frac{\dot{\sigma}}{E_1} \quad (13)$$

将公式 (7)、(10)、(12)、(13) 代入式 (5) 解得:

$$\frac{\eta_2}{E_2} \ddot{\sigma} + \left(1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{\eta_2}{\eta_0}\right) \dot{\sigma} + \frac{E_2}{\eta_0} \sigma = \eta_2 \ddot{\varepsilon} + E_2 \dot{\varepsilon}$$

当 $\sigma > \sigma_f$ 时,

$$\sigma = \sigma_0 = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \quad (14)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (15)$$

式中 σ_3 为串联粘塑体的应力, MPa; ε_3 为串联元件粘塑体的应变。

将式 (15) 求一阶导、二阶导分别为

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 + \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3 \quad (16)$$

$$\ddot{\varepsilon} = \ddot{\varepsilon}_0 + \ddot{\varepsilon}_1 + \ddot{\varepsilon}_2 + \ddot{\varepsilon}_3 \quad (17)$$

对于粘塑性体有:

$$\sigma = \sigma_3 = \eta_3 \dot{\varepsilon}_3 + \sigma_f \quad (18)$$

求一阶导为

$$\dot{\sigma} = \dot{\sigma}_3 = \eta_3 \ddot{\varepsilon}_3 \quad (19)$$

式中, η_3 为开尔文元件中牛顿体的粘性模量, MPa·s。

将公式 (6)、(9)、(18) 代入式 (16) 解得:

$$\dot{\varepsilon}_3 = \dot{\varepsilon} - \frac{\sigma}{\eta_0} - \frac{\dot{\sigma}}{E_1} - \frac{\sigma - \sigma_f}{\eta_3} \quad (20)$$

将公式 (7)、(10)、(12)、(19)、(20) 代入式 (17) 解得:

$$\frac{\eta_2}{E_1} \ddot{\sigma} + \left(1 + \frac{\eta_2}{\eta_0} + \frac{E_2}{E_1} + \frac{\eta_2}{\eta_3}\right) \dot{\sigma} + \left(\frac{E_2}{\eta_0} + \frac{E_2}{\eta_3}\right) \sigma - \frac{E_2}{\eta_3} \sigma_f = \eta_2 \ddot{\varepsilon} + E_2 \dot{\varepsilon} \quad (21)$$

因籽棉压缩过程中速度恒定, 即 $\dot{\varepsilon} = \text{常数}$, 则 $\ddot{\varepsilon} = 0$ 。整理得到改进的籽棉粘-弹-塑性模型的本构方程为

$$\begin{cases} \frac{\eta_2}{E_2} \ddot{\sigma} + \left(1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{\eta_2}{\eta_0}\right) \dot{\sigma} + \frac{E_2}{\eta_0} \sigma = C_1 & (\sigma < \sigma_f) \\ \frac{\eta_2}{E_1} \ddot{\sigma} + \left(1 + \frac{\eta_2}{\eta_0} + \frac{E_2}{E_1} + \frac{\eta_2}{\eta_3}\right) \dot{\sigma} + \left(\frac{E_2}{\eta_0} + \frac{E_2}{\eta_3}\right) \sigma - \frac{E_2}{\eta_3} \sigma_f = C_2 & (\sigma \geq \sigma_f) \end{cases} \quad (22)$$

以含水率 20%、喂入量 0.15 kg 第 2 次重复试验数据进行拟合, 拟合效果如图 5 所示。由拟合曲线观察到, 西原模型无法拟合出籽棉压缩曲线加速阶段特征, 其决定系数 R^2 小于 0.85; 改进西原模型决定系数 R^2 大于 0.98, 与西原模型相比, 在应力水平超过某一应变值后应力由缓慢增加变为非线性快速增加, 表现出明显的粘弹性。因此, 选择改进西原模型可较全面地表征籽棉的压缩特性, 可选用该模型来构建籽棉压缩阶段本构模型。

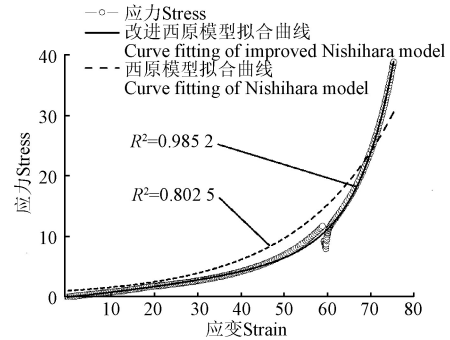


图 5 压缩模型曲线拟合
Fig.5 Curve fitting of compression model

2.2 应力松弛本构模型

籽棉压缩的应力松弛阶段应变不变, 应力逐渐减小, 由于籽棉内部存在弹性恢复力, 使弹性变形逐渐变成非弹性变形。应力松弛阶段一般采用广义 Maxwell 模型描述^[27-29], 从图 3 知不同压缩条件下的籽棉应力松弛曲线的变化规律基本一致, 且曲线的形状相似, 所以应力松弛曲线可以用同一种模型进行描述。

三元件广义 Maxwell 力学模型主要由 1 个弹簧和 1 个 Maxwell 元件并联组成图 6a, 三元件广义 Maxwell 模型应力松弛阶段方程为^[30]

$$\sigma(t) = \varepsilon_i (E_a e^{-t/T_s} + E_e) \quad (23)$$

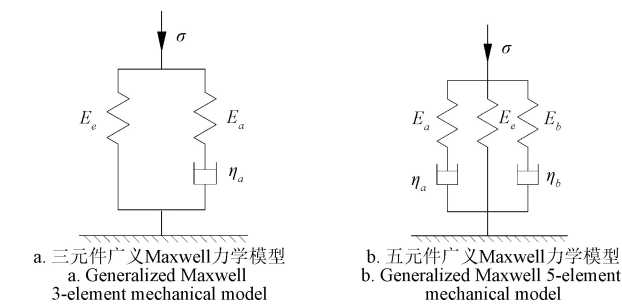
式中 $\sigma(t)$ 为时间在 t 时刻的应力, MPa; ε_i 为初始应变; t 为时间 s, T_s 为 Maxwell 元件的应力松弛时间 $T_s = \eta_a / E_a$, s; η_a 为牛顿体的粘性模量, MPa·s。

五元件广义 Maxwell 力学模型主要由 1 个弹簧和 2 个 Maxwell 元件并联组成, 见图 6b, 五元件广义 Maxwell 模型应力松弛方程为^[30]

$$\sigma(t) = \varepsilon_i (E_a e^{-t/T_a} + E_b e^{-t/T_b} + E_e) \quad (24)$$

式中 T_a 、 T_b 分别为 Maxwell 元件的应力松弛时间,

$T_a=\eta_a/E_a$, $T_b=\eta_b/E_b$, s; η_a 、 η_b 分别为牛顿体的粘性模量, MPa·s。 选用五元件来构建松弛阶段本构模型。



注: E_e 为虎克体的弹性模量, MPa; η_a 为 Maxwell 体中牛顿体的粘性模量, MPa·s; E_a 为 Maxwell 体中虎克体的弹性模量, MPa; η_b 为并联 Maxwell 体中牛顿体的粘性模量, MPa·s; E_b 为并联 Maxwell 体中虎克体的弹性模量, MPa。
Note: E_e is elasticity modulus of Hookean body, MPa; η_a is viscosity modulus of Newtonian body in Maxwell body, MPa·s; E_a is elasticity modulus of Hookean body in Maxwell body, MPa; η_b is viscosity modulus of Newtonian body in parallel Maxwell body, MPa·s; E_b is elasticity modulus of Hookean body in parallel Maxwell body, MPa.

图 6 应力松弛力学模型
Fig.6 Stress relaxation mechanical model

公式(23)和公式(24)可以看出五元件广义 Maxwell 模型中既包含第 1 应力松弛时间,又包含第 2 应力松弛时间;而三元件广义 Maxwell 模型中仅包含一个应力松弛时间 T_s 。因此,选择五元件广义 Maxwell 模型可较全面地表征籽棉的应力松弛特性。以含水率 20%、喂入量为 0.15 kg 第 2 次重复试验数据进行拟合,拟合效果如图 7 所示。五元件广义 Maxwell 模型拟合决定系数 R^2 大于 0.99, 因此

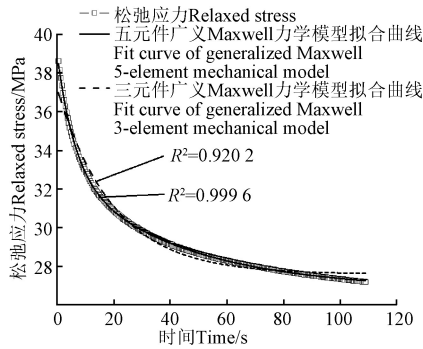


图 7 应力松弛模型曲线拟合 (含水率 20%, 0.15 kg-2)
Fig.7 Curve fitting of stress relaxation model (moisture content 20%, 0.15 kg-2)

3 参数确定与分析

3.1 参数确定

基于籽棉在压缩过程中经历的弹性变形和塑性变形及籽棉纤维间固有的粘阻性和受压后表现出的粘结性,将籽棉压缩应力应变曲线分为近似线性、逐渐上升和快速上升 3 个阶段。为较好的拟合籽棉压缩力学特性曲线采用改进西原模型进行建模,将应力应变试验数据导入 Origin Pro 8 软件并输入籽棉本构模型,以曲线拟合法求解压缩本构模型的参数值;将求解的模型参数值输入 SPSS 22 软件进行数据处理得到不同因素水平下籽棉压缩的模型参数,利用 Duncan 均值多重比较法对结果进行对比分析,结果如表 1 所示。

表 1 含水率和喂入量对籽棉压缩本构模型参数的影响
Table 1 Effect of moisture content and feeding quantity on compression constitutive model parameters of seed cotton

含水率 Moisture content/ %	喂入量 Feeding quantity/kg	串联虎克体弹性 模量 Elasticity modulus of tandem Hookean body E_1 /MPa	开尔文体中虎克 体弹性模量 Elasticity modulus of Hookean body in Kelvin body E_2 /MPa	串联牛顿体粘 性模量 Viscosity modulus of tandem Newtonian body η_0 / (MPa·s)	开尔文体中牛 顿体粘性模量 Viscosity coefficient of Newtonian body in Kelvin body η_2 / (MPa·s)	粘塑体中牛 顿体粘性模量 Viscosity coefficient of Newtonian body in viscoplastic body η_3 / (MPa·s)	粘塑体中库伦 体初始应力 Initial stress of Cullen body σ_f / MPa	决定系数 Coefficient of determination R^2
10	0.10	3.83±0.09 ^{aA}	141.31±17.33 ^{aA}	1.92±0.02 ^{aA}	2.14±0.35 ^{aA}	9.29±1.16 ^{aA}	1.70±0.17 ^{aA}	0.971 5
	0.15	5.65±0.85 ^{aB}	166.65±22.57 ^{aA}	2.00±0.18 ^{aA}	2.30±0.62 ^{aA}	10.41±1.86 ^{aA}	1.86±0.18 ^{aA}	0.927 3
	0.20	5.80±0.02 ^{aB}	183.81±4.28 ^{aA}	2.12±0.09 ^{aA}	3.95±0.33 ^{aB}	13.49±1.72 ^{aA}	2.64±0.3 ^{aB}	0.906 7
20	0.10	6.57±0.85 ^{bA}	225.63±13.27 ^{bA}	3.25±0.07 ^{bA}	3.92±0.25 ^{bA}	9.76±1.01 ^{aA}	3.97±0.37 ^{aA}	0.909 6
	0.15	6.67±0.47 ^{aB}	229.68±18.38 ^{aA}	4.03±0.57 ^{bA}	4.32±0.3 ^{bA}	11.09±0.68 ^{aA}	4.39±0.29 ^{bA}	0.985 2
	0.20	12.41±1.23 ^{bB}	241.72±4.95 ^{bA}	5.08±0.87 ^{aA}	4.56±0.55 ^{aA}	12.65±2 ^{aA}	5.16±0.96 ^{bA}	0.926 4
30	0.10	6.80±0.32 ^{bA}	253.04±21.11 ^{bA}	5.95±0.45 ^{cA}	3.40±0.31 ^{bA}	9.53±1.06 ^{aA}	2.28±0.44 ^{bA}	0.985 9
	0.15	10.21±0.93 ^{bB}	271.11±32.83 ^{aA}	7.63±1.27 ^{cA}	6.03±0.62 ^{bB}	13.30±1.85 ^{aAB}	4.46±0.82 ^{bB}	0.999 6
	0.20	15.79±0.54 ^{cC}	272.32±14.13 ^{bA}	12.67±1.62 ^{bB}	9.67±0.54 ^{bC}	15.62±1.55 ^{aB}	5.89±0.06 ^{bB}	0.999 3

注: 采用 Duncan 均值多重比较法进行比较, 同列肩标上字母表示不同含水率(小写字母)及不同喂入量(大写字母)组间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: The results are compared by Duncan's multiple comparisons, different letters on shoulder indicate significant difference among difference moisture content groups (lowercase letters) and difference feeding quantity groups (uppercase letter) ($P<0.05$). The same below.

从表 1 可知采用改进西原模型拟合籽棉压缩曲线其决定系数 R^2 均大于 0.9, 结果表明改进西原模型可以很好的描述籽棉压缩过程力学特性。

以曲线拟合法分别求解 10%、20%、30%含水率及 0.10、0.15、0.20 kg 喂入量的试验条件下籽棉应力松弛模

型参数值,再利用 Duncan 均值多重比较法进行对比分析,分析结果见表 2。

从表 2 可知采用五元件广义 Maxwell 模型拟合籽棉应力松弛曲线其决定系数 R^2 均大于 0.99, 结果表明五元件广义 Maxwell 模型可以很好的描述籽棉压缩松弛力学特性。

改进西原模型、应力松弛模型及其对应参数值, 利用通过 ANSYS/LS-DYNA 或 ABAQUS 等仿真软件二次

开发, 可进行籽棉压缩与相关机构间的仿真模拟, 以缩短机具研发过程。

表 2 含水率和喂入量对籽棉应力松弛模型参数的影响

Table 2 Effect of moisture content and feeding quantity on stress relaxation model parameters of seed cotton

含水率 Moisture content/%	喂入量 Feeding quantity/kg	初始应变 Initial strain ε_i	Maxwell 体中虎克并联 Maxwell 体中	Maxwell 体中虎克 并联 Maxwell 体中虎	Maxwell 体中虎克 并联 Maxwell 体中虎	Maxwell 体中虎克 并联 Maxwell 体中虎	Maxwell 体中虎克 并联 Maxwell 体中虎	决定系数 Coefficient of determination R^2
			体弹性模量 Elasticity modulus of Hookean body E_a /MPa	虎克体弹性模量 Elasticity modulus of Hookean body in parallel Maxwell body E_b /MPa	体粘性模量 Viscosity modulus of Hookean body in Maxwell body η_a (MPa·s)	克体粘性模量 Viscosity modulus of Hookean body in parallel Maxwell body η_b (MPa·s)	虎克体弹性模量 Elasticity modulus of Hookean body E_c /MPa	
10	0.10	3.70±0.22 ^{aA}	1.17±0.03 ^{aA}	1.88±0.18 ^{aA}	4.86±1.27 ^{aA}	78.20±61.51 ^{aA}	6.56±0.15 ^{aA}	0.997 6
	0.15	5.75±0.19 ^{aB}	1.58±0.45 ^{aA}	1.91±0.09 ^{aA}	8.50±0.83 ^{aB}	188.87±4.09 ^{aA}	13.37±0.68 ^{aB}	0.998 3
	0.20	7.40±0.4aC	2.53±0.49 ^{aB}	3.08±0.36 ^{aA}	11.77±0.4 ^{aC}	254.63±69.55 ^{aA}	18.44±1.23 ^{aC}	0.999 1
20	0.10	6.49±0.07 ^{bA}	1.97±0.4 ^{abA}	4.75±0.49 ^{bA}	12.80±3.35 ^{aA}	238.66±93.37 ^{aA}	23.48±2.56 ^{bA}	0.999 4
	0.15	9.52±0.24 ^{bA}	6.35±0.7 ^{bB}	6.18±0.55 ^{bA}	44.82±9.22 ^{bB}	517.75±81.17 ^{bB}	28.65±2.84 ^{bA}	0.999 6
	0.20	14.91±2.53 ^{bB}	8.54±1.2 ^{bB}	10.06±0.71 ^{abB}	48.94±4.34 ^{bB}	574.54±25.64 ^{abB}	38.42±2.35 ^{bB}	0.999 7
30	0.10	8.97±0.42 ^{cA}	2.41±0.06 ^{bA}	5.54±0.19 ^{bA}	15.22±1.66 ^{aA}	295.59±21.04 ^{bA}	31.83±2.46 ^{cA}	0.999 8
	0.15	10.85±1.06 ^{baB}	5.21±0.47 ^{baB}	5.99±1.13 ^{cA}	35.48±4.1 ^{bB}	304.39±71.97 ^{bA}	49.20±2.31 ^{cB}	0.999 9
	0.20	15.59±2.38 ^{bB}	9.59±2.67 ^{bB}	11.36±1.57 ^{bB}	38.05±7.43 ^{bB}	613.58±69.77 ^{bB}	49.75±5.16 ^{bB}	0.999 8

3.2 各因素对压缩力学特性影响

3.2.1 含水率

表 1 中结果显示, Duncan 均值比较法不同含水率组间弹性模量差异均显著 ($P<0.05$), 随着含水率的升高, 弹性模量尤其是开尔文体中虎克体的弹性模量 E_2 明显增大, 主要由于棉纤维为多孔性物质, 其纤维素大分子上的亲水性基团吸收水分后, 纤维胞壁更加强韧, 且纤维吸水后截面呈近圆形, 可以保持较好的弹性^[31]。不同含水率组间串联牛顿体粘性模量 η_0 及开尔文体中牛顿体粘性模量 η_1 差异显著, 随着含水率的增加粘性模量缓慢增大, 原因或为压缩时籽棉纤维间的相对运动受内摩擦的影响, 含水率越高籽棉压缩所受内摩擦越大, 故粘性模量显著增大; 而粘塑体中牛顿体粘性模量 η_3 影响不显著, 或因棉纤维转曲多、弹性好, 在密度小于 250 kg/m³ 时塑性变形发生较少, 含水率的增加并不影响塑性变形情况的发生。

3.2.2 喂入量

由表 1 拟合参数结果可知, 弹性模量随喂入量的增加而增加, Duncan 均值比较结果显示不同喂入量组间串联虎克体弹性模量 E_1 差异显著 ($P<0.05$), 可能由于棉纤维的卷曲使纤维在压缩过程中纵向收缩并具有弹性伸长, 从而增加籽棉整体纵向可变形性, 提高其弹性模量。喂入量对三组粘性模量及粘塑性初始应力的正相关影响规律表明, 在相同的压缩腔内自然堆积的籽棉, 喂入量越大籽棉堆积高度越高, 压力传输路径越长, 籽棉压缩过程中纤维体弯曲变形, 纤维体内部越密实, 纤维体之间相互接触、挤压产生的局部应力越大, 即粘性模量增加。

3.3 各因素对应力松弛力学特性影响

3.3.1 含水率

表 2 中结果显示, Duncan 均值比较结果显示不同含水率组间弹性模量及粘性模量差异均显著 ($P<0.05$), 含水率与籽棉弹性模量、粘性模量均呈正相关关系。主要

原因为棉的天然转曲使纤维相互纠缠、挂钩和粘着, 使得籽棉应力松弛过程中不易分散, 而随含水率加大, 水分子渗透到棉纤维间, 棉纤维发生膨润现象, 弹性模量增大^[32]。且水分使纤维间的抱合力大大增加, 增大了运动阻力, 粘性模量值随之快速增长。

3.3.2 喂入量

由表 2 拟合参数结果可知, 模型系数表现出明显的应力规律, Duncan 均值比较结果显示不同喂入量组间弹性模量及粘性模量差异均显著 ($P<0.05$)。随着喂入量的增加, 弹性模量数值增大, 其原因主要为籽棉应力松弛过程中压力的衰减速率并非均匀, 喂入量越大籽棉内部卷曲接触点较多, 籽棉间自下而上传递松弛压力, 弹性模量越大; 随着喂入量的增加, 粘性模量明显增大, 说明随棉纤维的体积质量和纤维间相互接触点数的增加, 纤维间抱合力变大, 运动阻力增加从而粘性模量增大。

4 结 论

1) 采用改进西原模型描述籽棉压缩过程的粘弹塑性, 以曲线拟合法求解籽棉压缩过程中非线性粘弹塑性本构模型的参数值, 其决定系数 R^2 均大于 0.9, 结果表明模型可以很好的描述籽棉压缩过程; 采用五元件广义 Maxwell 模型拟合籽棉应力松弛曲线, 其决定系数 R^2 均大于 0.99, 结果表明五元件广义 Maxwell 模型可以全面地表征籽棉的应力松弛特性。

2) 籽棉压缩试验拟合参数结果显示, 压缩应力及应力松弛与含水率、喂入量均呈正相关关系。通过 Duncan 均值比较结果可知: 不同含水率组间弹性模量差异均显著 ($P<0.05$), 而粘塑体中牛顿体粘性模量 η_3 影响不显著, 不同喂入量组间串联虎克体弹性模量 E_1 差异显著。

3) 籽棉应力松弛拟合参数结果显示, 含水率对籽棉应力松弛弹性模量、粘性模量均呈正相关影响。Duncan 均值比较结果表明: 不同含水率及喂入量组间的弹性模量及粘性模量差异均显著 ($P<0.05$)。

通过研究籽棉压缩各阶段的力学模型和本构模型, 将籽棉压缩本构模型通过软件二次开发进行仿真模拟, 可缩短机具研发过程; 也可为籽棉压缩相关装备的设计及技术参数的确定提供理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] 武建设, 陈学庚. 新疆兵团棉花生产机械化发展现状问题及对策[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 5-10.
Wu Jianshe, Chen Xuegeng. Present situation, problems and countermeasures of cotton production mechanization development in Xinjiang production and construction corps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 5-10. (in Chinese with English abstract)
- [2] 喻树迅. 中国棉花产业百年发展历程[J]. 农学学报, 2018, 8(1): 85-91.
Yu Shuxun. The development of cotton production in the recent hundred years of China[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 85-91. (in Chinese with English abstract)
- [3] Bennett J, Woodhouse N, Keller T, et al. Advances in cotton harvesting technology: A review and implications for the John Deere round baler cotton picker[J]. The Journal of Cotton Science, 2015, 19: 225-249.
- [4] Sun Z Z, Jiang H X, Cai H P, et al. The viscoelasticity model of corn straw under the different moisture contents[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 1-5
- [5] 邢献军, 李涛, 马培勇, 等. 生物质固体成型燃料热压成型实验研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(10): 2660-2667.
Xing Xianjun, Li Tao, Ma Peiyong, et al. The typical biomass cold-pressing constitutive model and the influence factors analysis of viscous-elastic-plasticity[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(10): 2660-2667.
- [6] 马彦华, 宣传忠, 武佩, 等. 玉米秸秆振动压缩过程的应力松弛试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 88-94.
Ma Yanhua, Xuan Chuangzhong, Wu Pei, et al. Experiment on stress relaxation of corn stover during compression with assisted vibration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(19): 88-94. (in Chinese with English abstract)
- [7] Huang J L, Liu W Y, Zhou F, et al. Mechanical properties of maize fibre bundles and their contribution to lodging resistance[J]. Biosystems Engineering, 2016, 151: 298-307.
- [8] 马瑞峻, 萧金庆, 郑普峰, 等. 穴盘水稻秧苗茎秆蠕变与应力松弛特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 43-53.
Ma Ruijun, Xiao Jinqing, Zheng Pufeng, et al. Experimental study on characteristics of creep and stress relaxation for rice seedling stem raised in cell tray[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(13): 43-53. (in Chinese with English abstract)
- [9] Nona K, Lenaerts B, Kayacan E, et al. Bulk compression characteristics of straw and hay[J]. Biosystems Engineering, 2014, 118: 194-202.
- [10] Zhang X, Peng W, Han L, et al. Effects of different pretreatments on compression molding of wheat straw and mechanism analysis[J]. Bioresource Technology, 2018, 251: 210-217.
- [11] 吴敏, 潘虹宇, 赵东林, 等. 燕麦茎秆理化组分分析与动态力学特性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 447-455.
Wu Min, Pan Hongyu, Zhao Donglin, et al. Analysis of physicochemical composition and dynamic mechanical properties of avenasativa stalk[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 447-455. (in Chinese with English abstract)
- [12] 房佳佳, 张永, 杨明韶, 等. 紫花苜蓿圆捆机卷压过程的应力松弛特性与模型建立[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 50-56.
Fang Jiajia, Zhang Yong, Yang Mingshao, et al. Stress relaxation behavior and modeling of alfalfa during rotary compression[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(16): 50-56. (in Chinese with English abstract)
- [13] 朱凯, 牛智有. 粉体棉花秸秆的应力松弛特性与模型建立[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(5): 130-134.
Zhu Kai, Niu Zhiyou. Compression stress relaxation characteristic of cotton stalk particles and its model building of cot[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(5): 130-134. (in Chinese with English abstract)
- [14] Yang D, Li H T, Xiong Z H, et al. Mechanical properties of laminated bamboo under off-axis compression[J]. Composites Part A, 2020, 138: 106042.
- [15] 刘庆庭, 区颖刚, 王万章, 等. 甘蔗茎秆的材料模型与本构方程[C]//中国农业工程学会. 中国农业工程学会 2007 年学术年会论文汇编, 2007.
- [16] 李勇, 李健, 吴蓓, 等. 棉纤维集合体压缩力传递规律分析与研究[J]. 上海纺织科技, 2019, 47(10): 8-11, 14.
- [17] 李勇, 张宏, 张有强, 等. 棉纤维集合体压缩力传递与密度关系[J]. 纺织学报, 2016, 37(11): 19-25.
- [18] Privas E, Gawrysiak G, Lapeyre M, et al. Influence of cotton variety on compression and destructuration abilities under elevated pressure[J]. Cellulose, 2013, 20(3): 1013-1022.
- [19] Hardin R, Searcy S. Viscoelastic properties of seed cotton[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(3): 803-810.
- [20] Hardin R, Searcy S. Modeling of seed cotton viscoelastic properties[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(3): 707-714.
- [21] 霍丽丽, 赵立欣, 田宜水, 等. 生物质颗粒燃料成型的黏弹性本构模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 200-206.
Huo Lili, Zhao Lixin, Tian Yishui, et al. Viscoelastic constitutive model of biomass pellet[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(9): 200-206. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈啸, 孔丹丹, 王红英, 等. 基于本构模型的颗粒饲料成型特性研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 267-275.
Chen Xiao, Kong Dandan, Wang Hongying, et al. Analysis of forming properties based on pellet feed forming constitutive model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(23): 267-275. (in Chinese with English abstract)

- [23] 马方, 白雪卫, 刘德军, 等. 典型生物质冷压本构模型及黏弹塑性影响因素[J]. 太阳能学报, 2017, 38(1): 98-105.
Ma Fang, Bai Xuewei, Liu Dejun, et al. The typical biomass cold pressing constitutive model and the influence factors analysis of viscous-elastic-plasticity[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(1): 98-105. (in Chinese with English abstract)
- [24] Kaliyan N, Morey R V. Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 47-63.
- [25] 中国纤维检验局, 江苏省纤维检验所, 农业部棉花纤维品质监督检验测试中心. HVI 棉纤维物理性能试验方法: GB/T 20392-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [26] 朱兆祥. 材料本构关系理论讲义[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 56-72.
- [27] Ozturk O K, Takhar P S. Stress relaxation behavior of oat flakes[J]. Cereal Science, 2017, 77: 84-89.
- [28] Hernandez Z, Figueroa J, Rayas-Duarte P, et al. Influence of high and low molecular weight glutenins on stress relaxation of wheat kernels and the relation to sedimentation and rheological properties[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 55(3): 344-350.
- [29] 闫翠珍, 武国峰, 王效华, 等. 稻秸高密度压缩过程中应力松弛的试验研究[J]. 农机化研究, 2015, (11): 181-187.
Yan Cuizhen, Wu Guofeng, Wang Xiaohua, et al. The study of rice straws' stress-relaxation in high density compression[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, (11): 181-187.
- [30] 周祖钊. 农业物料学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 25-48.
- [31] Long R, Bange M, Gordon S, et al. Fiber quality and textile performance of some Australian cotton genotypes[J]. Crop Science, 2010, 50(4): 1509-1518.
- [32] Hearle J. Cotton-science and technology[M]. England: Woodhead Publishing Limited, 2007: 35-67.

Mechanical properties and construction of constitutive model for compression and stress relaxation of seed cotton

Kong Fanting, Wu Teng, Chen Changlin, Sun Yongfei, Xie Qing, Shi Lei*

(Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: Cotton is one of the most important cash crops and textile materials in the world. The cotton production of China is also ranked at the top of the world, in terms of planting area and total yield. Specifically, the growing area of cotton is annually more than 3 million hectares. Packing storage and transportation of seed cotton have become two main determinants of production capacity in the cotton industry. However, the traditional storage and transportation of seed cotton cannot meet the high demand for the machine-picked cotton area in recent years. The packing facilities inevitably need to fit into the specific producing conditions in China, such as local topography, climate, and vegetation. Mechanical properties of seed cotton are thus fundamental, including compression and stress relaxation, to the optimal design of equipment for harvesting, stacking, and packing. Most previous researches were focused mainly on the mechanical properties of corn, wheat, and herbage straw in agricultural materials. Few studies were reported on the mechanical properties of seed cotton, particularly on compression and stress relaxation. Taking the seed cotton as the research object in this study, a systematic test of mechanical properties was performed on the compression and stress relaxation of seed cotton. An improved Nishihara model and a generalized Maxwell 5-element mechanical model were selected to represent the stress-strain curves of compression and stress relaxation. Various level factors were utilized to verify the constitutive models for the compression and stress relaxation of seed cotton. Relevant model parameters were obtained to determine the influence rules with different factors. The results showed that the determination coefficients of parameters in the constitutive model were beyond 0.9 using the curve-fitting in the compression and stress relaxation of seed cotton. An obvious regularity of coefficients indicated that two models were better suitable for the compression and stress relaxation of seed cotton. There was also a significant influence of water content and feeding quantity on the mechanical properties of seed cotton. Furthermore, the compression stress was positively correlated to the water content and feeding quantity. In addition, the viscosity coefficient and elastic modulus increased significantly at a higher level of water content, due mainly to the porosity of cotton fiber. The cell wall of fiber became stronger and tougher, because the hydrophilic groups on the cellulose macromolecule absorbed water from the external environment. The curl of cotton fiber also made the fiber shrink longitudinally and elastic elongation during the compression under the larger amount of feeding quantity, where there was a significant increase in the overall longitudinal deformability of seed cotton and the elastic modulus. The viscosity coefficient and packing height both rose up significantly, while the pressure transmission path was longer for the naturally stacked seed cotton in the same compression chamber, as the feeding quantity was larger. The main reason was that the bending deformation, contact and extrusion were induced to generate the greater local stress between the fiber bodies during the compressing process of seed cotton. Moreover, the water content was positively correlated to the elastic modulus and viscosity coefficient of seed cotton. This positive correlation was possible because the natural twist of cotton made the fibers entangled, linked, and adhered, difficult to disperse during the stress relaxation of seed cotton. Correspondingly, the elastic modulus and viscosity coefficient increased significantly, as the feeding quantity increased. This improvement was due mainly to a non-uniform attenuation rate of pressure during the stress relaxation of seed cotton. There were much more contact points of fiber curl subjected to the greater feeding amount of seed cotton. The elastic modulus increased, while the relaxation pressure was transferred from the bottom to the top of seed cotton. The adhesion force between fibers and the viscosity coefficient rapidly rose with the motion resistance increased. This finding can provide an insightful theoretical basis to simulate the compression of seed cotton in most machine-picked cotton areas.

Keywords: compression; stress relaxation; constitutive model; experimental study; seed cotton