

油菜茎秆的粘弹性特性及本构关系的研究

任述光, 吴明亮, 谢方平, 官春云 (湖南农业大学工学院, 湖南长沙 410128)

摘要 割刀切割茎秆产生的冲击应力波传播到荚果, 当应力幅值超过荚果的抗裂极限时, 籽粒脱落引起收获损失。油菜茎秆的粘弹性质对应力波的传播具有很大的影响。通过测定油菜茎秆的粘性系数与弹性模量, 采用三元件固体模型建立了油菜茎秆的粘弹性本构关系, 并分析了其应力、应变对时间的响应, 从而得到了蠕变曲线及应力松弛曲线。为进一步研究茎秆中的应力波的传播规律, 设计优化切割器参数以便减小收获损失, 提供了重要数据。

关键词 茎秆; 弹性模量; 粘性系数; 本构关系

中图分类号 S222.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)35-12749-03

Study on Viscoelastic Properties of Rapeseed Stem and the Constitutive Relationship

REN Shu-guang, WU Ming-liang, XIE Fang-ping et al (College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128)

Abstract While stem being cut, the impact of stress wave transmission to the pod, if the stress amplitude exceeds the anti-cracking limits, loss of grain fall off. Rapeseed stalks of viscoelastic characters have great effect on the spread of stress wave. By measuring the viscosity coefficient of rapeseed stalks and modulus of elasticity, three components of solid model were adopted to establish the rapeseed stalks of viscoelastic constitutive relation. By analyzing the stress and strain response to the time, the stress relaxation curves and creep curve have been gotten which provides an important data for the further study of the propagation law of stress wave in the stem and reducing the loss of the harvest to design optimization of cutter parameters.

Key words Stem; Modulus of elasticity; Coefficient of viscosity; Constitutive relationship

目前所有的油菜收割机都存在着一个共同缺陷, 即成熟时收获易造成炸荚落粒损失。油菜在收割过程中的损失主要来自两个方面, 即收割机本身的技术因素和油菜植株本身的物性因素。以前对油菜收获损失的研究主要集中在收割机本身的技术因素上^[1-4]。相对而言, 物性方面的因素引起的收获损失研究极少^[5-7], 对油菜炸荚的力学机理及影响因素研究不够深入。笔者认为, 油菜收获时炸荚的力学本质是割刀切割茎秆的冲击产生的应力波传播到荚果, 当应力幅值超过荚果的抗裂极限时, 籽粒脱落产生损失。另外, 切割器的切割冲击力直接影响到茎秆的振动。茎秆固有振动频率取决于其粘弹性参数, 通过激励频率和固有振动频率的比较分析, 避免切割器的振动频率经过“油菜植株自身的共振周期带”, 可以为切割器的设计提供理论依据。

油菜茎秆生物力学特性对应力波的传播有着重要影响, 因此油菜茎秆的力学特性与油菜收获损失有重要的联系。国内外一些学者也进行过油菜茎秆生物力学特性的研究^[8-9], 但这方面的工作还不够全面深入。该文旨在对油菜茎秆生物力学特性及本构关系进行探讨, 为掌握切割冲击应力波的频率、振幅及其在茎秆中的传播速度等规律, 为减小收获损失提供理论基础。与一般弹性固体不同的是, 油菜茎秆作为一种生物材料还具有粘性, 即其具有粘弹性。

1 两个最简单的粘弹性模型

粘性即在外力作用下变形随时间发展, 产生不可逆的流动。对于粘性材料, 应力除与应变有关外, 还与应变的速率

相关, 即粘性材料的本构关系是率相关的。应力对应变速率的比值称为粘性系数, 它反映材料粘性大小。表示粘性的力学模型常用的是粘壶, 两个最简单的粘弹性模型分别为 Maxwell 模型和 Kelvin 模型。为了方便地研究和应用粘弹性材料, 人们提出了许多的数学模型, 除 Maxwell 模型、Kelvin 模型外还有三参量固体模型、Burgers 模型等。应用这些模型的关键是确定其中的弹性模量、切变模量和阻尼系数。目前, 测定弹性模量的方法主要有三点弯曲法和等厚干涉法等^[10-14]。测定切变模量的方法主要有弯曲振动试验法、表面波传播试验法和压剪法^[15]。确定粘性系数的方法较少, 邓科涛研究了 Maxwell 模型的粘性系数的测定^[16]; 李魁彬等利用悬臂梁的振动试验测定了 Kelvin 模型中的剪切模量和粘性系数^[17]; 李江华等研究了用光声技术测量生物组织粘弹特性^[18]。

1.1 Maxwell 模型 一个弹簧和一个粘壶串联组成的最简单的粘弹性模型称为 Maxwell 模型, 如图 1 所示, 其本构方程为

$$\sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\varepsilon}$$

式中: σ - 应力, MPa; ε - 应变, 用“g”表示对时间的导数; E - 弹性模量, MPa; η - 粘性系数 MPa · s。

在恒应力 σ_0 作用下, 对上式积分并利用初始条件, 可得其应变响应为

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta} t + \frac{\sigma_0}{E}$$



图1 Maxwell 模型

Maxwell 模型的瞬时响应呈现弹性体的特征, 而蠕变曲

基金项目 湖南省科技计划重点项目 (2013FJ2008); 湖南省教育厅科学研究一般项目 (2013FJ2008)。

作者简介 任述光 (1970 -), 男, 湖南岳阳人, 副教授, 博士, 从事结构与材料研究。

收稿日期 2014-11-03

线随时间无限增长,呈现粘性流体的特征。

1.2 Kelvin 模型 一个弹簧和一个粘壶并联组成的最简单的粘弹性模型称为 Kelvin 模型,如图 2 所示,其本构方程为

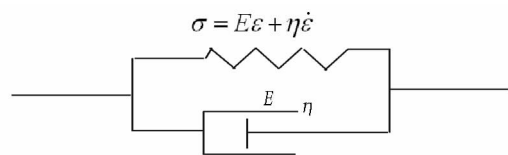


图 2 Kelvin 模型

在恒应力 σ_0 作用下,对上式积分并利用初始条件,可得其应变响应为

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} (1 - e^{-t/\tau_d})$$

式中: $\tau_d = \frac{\eta}{E}$ 。可见其蠕变曲线趋近一条渐近线 $\varepsilon =$

$\frac{\sigma_0}{E}$,这是粘性固体稳定蠕变时的特征。Kelvin 模型中由于粘壶的存在,不可能施加瞬时应变,不能表示固体的瞬时弹性,也不能描述松弛过程,但可以表示固体的蠕变。

2 油菜茎秆的粘弹性性质

2.1 油菜茎秆的弹性性质 任何真实固体材料都同时具有粘弹性。静载作用下变形与时间无关,载荷消除后变形能完全恢复的性质称为弹性。反映各向同性材料弹性性质的重要参数是弹性模量 E 和切变模量 G 。弹性模量定义为弹性限度内,单向应力状态下应力对应变的变化率,即 $E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ 。

弹性模量为常数的材料称为线弹性材料。描述理想线弹性体行为的是胡克定律,即 $\sigma = E\varepsilon$ 。简单剪切变形时切应力 τ 对切应变 γ 的变化率为切变模量,即 $G = \frac{d\tau}{d\gamma}$ 。笔者利用霍尔位置传感器弹性模量测定仪,对油菜茎秆的弹性模量进行了测量,得到了油菜茎秆的弹性模量和含水率之间的关系。

2.2 油菜茎秆的粘性性质 材料的粘弹性分为线性和非线性两大类。若材料性能表现为线弹性和理想粘性特性的组合,则称为线性粘弹性。如果以胡克体(线弹性)和牛顿流体(理想粘性)为两端来构成材料谱系,则介于这两者之间的均属线性粘弹性材料。

作为一种生物材料,油菜茎秆的力学性质具有流变性,故常用粘性系数来描述它的力学行为。收割过程中茎秆受到割刀的剪切冲击作用。茎秆在强脉冲荷载作用下的特征之一,与本构方程的应变率相关,其应力除取决于应变力外,还取决于应变率,这也是茎秆粘性效应的一种表现。

在交变载荷作用下,粘弹性材料的变形不能完全恢复,一部分能量象位能那样储存起来。另一方面,由于材料产生永久变形,使得材料的应力、应变之间形成一迟滞曲线,从而导致另一部分能量被转化为热能耗散掉^[16]。油菜茎秆在变形过程中有能量损耗,这也是它与弹性材料的区别之一,根据油菜茎秆的这一性质,可以测定其粘性系数的值。

2.3 粘性系数的测量 试验的主要设备为岛津电子拉力机,试验在等拉伸率条件下进行,控制应变在 10^{-1} 数量级以

下。试验控制应变率 $\dot{\varepsilon} = 0.003 \text{ s}^{-1}$ 。采用三角波周期加载(图 3),周期为 $T = 30 \text{ s}$,荷载峰值为 $P_m = 2 \text{ kg}$,试验有效时间为 120 s ,在此 120 s 时间内,每隔 15 s 由试验机自动打印一个荷载值,共进行了 4 个周期的加载。由试验机自动打印的 4 条能耗曲线(图 4)及能耗值(每个闭环的面积),分别为

$$s_1 = 2.357 \times 10^3 \text{ Pa}; s_2 = 2.345 \times 10^3 \text{ Pa}; s_3 = 2.369 \times 10^3 \text{ Pa}; s_4 = 2.348 \times 10^3 \text{ Pa}$$

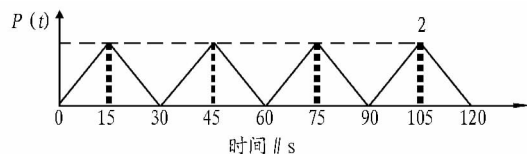


图 3 三角波周期荷载

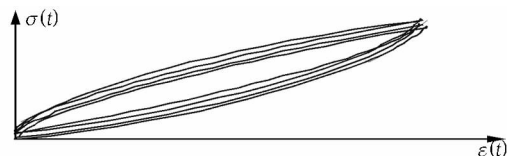


图 4 能量耗散曲线

可取 4 个循环能耗的平均值作为循环稳定后一个循环的能耗,即

$$U = \frac{1}{4} (s_1 + s_2 + s_3 + s_4) = 2.355 \times 10^3 \text{ Pa}$$

加载过程中,单位体积的能量为

$$W = \int \sigma d\varepsilon = \int (E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}) d\varepsilon = \frac{E\varepsilon^2}{2} + \eta \int \dot{\varepsilon}^2 dt$$

上式右边中的第 1 项是弹性势能,第 2 项是耗散能,由于试验在等应变率条件下进行,在一个周期内单位体积的能耗为

$$W_1 = \eta \int_0^T \dot{\varepsilon}^2 dt = \eta \dot{\varepsilon}^2 T$$

因此,粘性系数

$$\eta = \frac{W_1}{\dot{\varepsilon}^2 T} = 7.662 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

3 油菜茎秆的本构模型

油菜茎秆视为均匀各向同性环形等截面圆杆,收割过程中受到割刀的剪切与冲击作用。固体在强脉冲荷载作用下的特征之一,是与本构方程的应变率相关,其应力除取决于应变外,还取决于应变率,也就是存在粘性效应。单独一个 Maxwell 模型或 Kelvin 模型都不能表示油菜茎秆的基本特征:瞬时弹性、蠕变和松弛。将 Kelvin 模型和另一个弹簧串联构成三元件固体模型,它是一个能反映茎秆上述 3 个粘弹特征的最简单的模型。各元件参数如图 5 所示,其本构方程为

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} = q_0 \varepsilon + q_1 \dot{\varepsilon}$$

$$\text{式中: } p_1 = \frac{\eta_1}{E_1 + E_2}, q_0 = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2}, q_1 = \frac{\eta_1 E_2}{E_1 + E_2}; E_1 \text{ 是与}$$

Kelvin 模型并联的弹簧的弹性模量; E_2 是与 Maxwell 模型串联的弹簧的弹性模量。

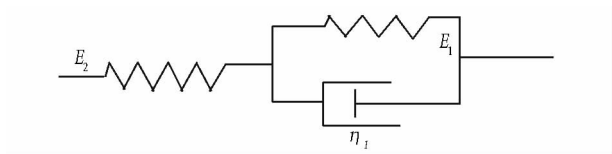


图5 三元件固体模型

其蠕变曲线

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma_0}{E_1}(1 - e^{-E_1 t / \eta_1})$$

其瞬态弹性响应为 $\frac{\sigma_0}{E_2}$,蠕变渐近值是 $\frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma_0}{E_1}$ 。其松弛

曲线

$$\sigma(t) = E_2 \varepsilon_0 - \frac{E_2^2 \varepsilon_0}{E_1 + E_2}(1 - e^{-t/\rho_1})$$

其瞬态应力响应 $E_2 \sigma_0$,应力松弛极限为 $\frac{E_1 E_2 \varepsilon_0}{E_1 + E_2}$ 。给出

初始冲击应力

$$\sigma_0 = \begin{cases} \frac{P}{A} & t = 0 \\ 0 & t > 0 \end{cases}$$

式中: P —冲击载荷; A —茎秆横截面积。可得茎秆的蠕变与松弛曲线分别如图 6、7 所示。

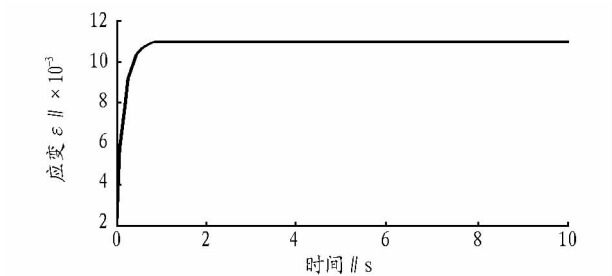


图6 蠕变曲线

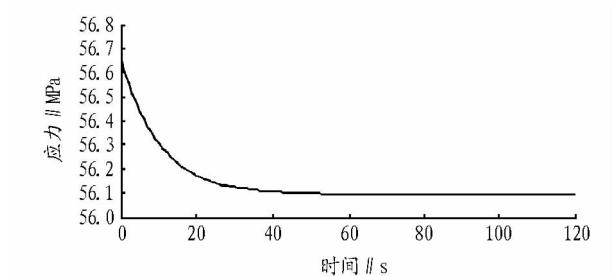


图7 应力松弛曲线

4 结论

(1)由试验测定了油菜茎秆的粘性系数和弹性模量,得到了其蠕变及松弛曲线;(2)试验过程中的能耗曲线表明,油菜茎秆既具有弹性固体的性质,又具有粘性流体的性质,无论是 Maxwell 模型还是 Kelvin 模型都不能完全描述其本构关系;(3)利用三元件固体模型,能较为准确的描述茎秆的粘弹特性,反映其瞬时弹性、蠕变和松弛的特点。

参考文献

[1] 白西平,马喜林. 如何减少油菜机收作业的损失[J]. 山东农业,2003(3):17-18.

[2] 兰心敏,李民. 油菜联合收获机割台损失率测定方法的研究[J]. 中国农机,2011(4):70-74.

[3] 王淑华. 减少油菜机收损失的措施[J]. 农业机械,1998(12):34.

[4] 迟聘,王岩,刘玉峰. 油菜机收中存在的问题及解决方法[J]. 农业使用与维修,2007(2):64.

[5] 袁葵洲,官春云. 影响油菜收获指数的几个生理因子[J]. 作物学报,1997,23(5):580-586.

[6] 方才能. 油菜机收配套栽培技术探讨[J]. 安徽农学通报,2008,14(19):247,237.

[7] 夏清,刘秀清,石华娟. 两种不同栽培模式下油菜农艺性状及品质性状分析—栽培方式对油菜机收影响因子的作用初探[J]. 西南农业学报,2011,24(2):451-454.

[8] 刘兆朋,谢方平,吴明亮. 成熟期油菜茎秆力学特性试验研究[J]. 农机化研究,2009(2):147-149.

[9] WU X Q, YAN P, WANG X, et al. Biomechanical characteristics of rape Stalks[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 30(5):972-978.

[10] 樊新民,袁肖华. 特种模型材料弹性模量的测量[J]. 物理测试,2005,23(2):37-38.

[11] 吴加权,马琨,李燕. 数字散斑相关方法用于 PMMA 弹性模量的测量[J]. 力学与实践,2007,29(5):35-37.

[12] 吴凯,王海林,谭伟石. 利用等厚干涉法测量玻璃弹性模量[J]. 大学物理实验,2014,27(1):55-58.

[13] 张莲洁,李东升,白帆. 植物叶片弹性模量的测量[J]. 林业机械与木工设备,2004,32(5):1-3.

[14] 邹红玉,郑红平. 木材弹性模量的测量与材料力学性能[J]. 实验室研究与探索,2009,28(7):33-35,164.

[15] 宋扬. 中高频率粘弹性材料声学参数测量[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.

[16] 邓科涛,吴晓. 粘弹性材料的几个材料函数的测定[J]. 强度与环境,2002,29(3):58-63.

[17] 李魁彬,王安稳,胡明勇,等. 确定 Kelvin 模型粘弹性材料参数的一种实验方法[J]. 海军工程大学学报,2007,19(6):26-29.

[18] 李江华,唐志列,郑楚君,等. 用光声技术测量生物组织粘弹特性的研究[J]. 生物物理学报,2005,21(5):355-358.

(上接第 12748 页)

[17] 罗昕,胡斌,王维新,等. 3MDZK-12 型组控式单行仿形棉花打顶机[J]. 农机化研究,2008(11):136-138.

[18] 唐军,罗昕,胡斌,等. 3MDZK-12 型单行仿形棉花打顶机的结构设计

与性能试验研究[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2008(8):511-514.

[19] 胡斌,罗昕,王维新,等. 3MDZK-12 型组控式单行仿形棉花打顶机的研制[J]. 农机化研究,2008(5):73-78.

[20] 周海燕,尹素珍,朱立成,等. 3WDZ-6 型自走式棉花打顶机的研制[C]//2010 年国际农业工程大会论文集. 上海,2010.

[21] 周桂鹏,张晓辉,范国强,等. 棉花打顶机械化的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究,2014(4):242-245.