

粉体棉花秸秆的应力松弛特性与模型建立

朱 凯 牛智有

华中农业大学工学院, 武汉 430070

摘要 为探讨粉体棉花秸秆应力松弛特性,采集不同生长地域与环境、不同品种棉花秸秆样本22个,通过粉碎研磨使其通过孔径0.35 mm筛制成试验样本,利用RGM-6010型万能材料试验机进行压缩应力松弛测试。利用Matlab软件分别对五元件广义Maxwell模型、三元件广义Maxwell模型和Peleg模型参数与试验测试数据进行拟合分析,以获取的信息量和拟合决定系数 R^2 作为评价指标,建立粉体棉花秸秆应力松弛本构方程。试验结果表明:粉体棉花秸秆应力松弛过程呈指数规律变化并存在平衡应力;五元件广义Maxwell模型信息量大,可以精确地表征粉体棉花秸秆的应力松弛特性,拟合决定系数 R^2 的均值达0.999,本构方程中平衡弹性模量 E_0 均值为4.477 MPa,第1应力松弛时间 T_1 均值为4.39 s,在第2应力松弛时间 T_2 均值为48.65 s;五元件广义Maxwell模型能精确完整地表征粉体棉花秸秆应力松弛特性。

关键词 应力松弛特性;棉花秸秆;模型

中图分类号 S 224.29 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2014)05-0130-05

生物质秸秆压缩成型是生物质秸秆利用的重要手段之一,研究秸秆压缩过程中的流变特性是应用的理论前提^[1-2]。应力松弛是棉花秸秆的一个重要流变特性,对压缩过程中的压缩变形、变形恢复、压缩能耗以及生产效率有很大影响^[3-4]。近年来,国内外许多学者分别研究了农业物料流变学的问题。Mohsenin等^[5]利用广义Maxwell模型分析了木屑和青饲料的流变特性;Peleg认为农业物料压缩到一定程度后可近似为固体,利用描述非线性粘塑性固体流变模型描述农业物料的流变特性^[6];有些学者直接利用单个Maxwell模型描述农业物料压缩过程中的应力松弛流变特性。王春光等^[7]利用玻尔兹曼叠加原理,采用高密度压捆机对牧草进行压缩试验,用广义Maxwell模型表征牧草压缩特性,得到牧草的应力松弛本构方程;廖娜等^[8]以玉米秸秆芯为研究对象,进行压缩试验并对应力松弛曲线进行拟合,结果表明,利用五元件Maxwell能较好地描述玉米秸秆芯的应力松弛特性。

目前,大部分学者只利用单个模型对农业物料流变特性进行分析。笔者以粉体棉花秸秆为研究对象进行压缩应力松弛测试,并利用三元件Maxwell

模型、五元件Maxwell模型以及Peleg模型对应力松弛曲线进行分析与比较,旨在建立最优粉体棉花秸秆应力松弛模型,为棉花秸秆的流变特性研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试秸秆

分别采集不同地区、不同品种棉花秸秆22个。将采集的秸秆样品置于室外摊开晾晒至干燥后用粉碎机初步粉碎,再用孔径0.35mm筛网的锤式旋风磨进行研磨粉碎,并将研磨试样装入封口袋密封,置于常温(25℃)下保存,使水分保持5%(±2%)。

1.2 仪器与设备

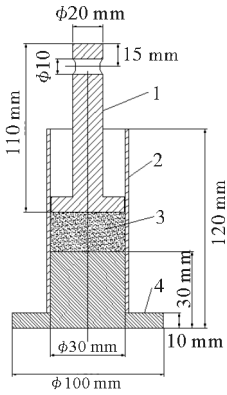
样品制备采用93ZT-0.4微型铡草机(洛阳四达农机有限公司产品)、9FQ-320家用饲料粉碎机(荥阳市农机试验厂生产)和JXFM110锤式旋风磨(上海赛霸精密仪器有限公司产品);应力松弛测试采用RGM-6010电子万能材料试验机(深圳市瑞格尔仪器有限公司产品)、自制压缩装置(如图1所示)和AUY220电子分析天平(SHIMADZU CORPO-RA)。

收稿日期:2013-12-13

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(201003063-04)

朱 凯,硕士研究生,研究方向:现代农业装备工程。E-mail: kaidezhuikai@163.com

通信作者:牛智有,博士,教授,研究方向:农产品加工技术与装备。E-mail: nzhy@mail.hzau.edu.cn



1. 压缩盘 Compression member; 2. 套筒 Bushing; 3. 试验样品 Test sample; 4. 底座 Pedestal.

图 1 粉体棉花秸秆压缩装置示意图

Fig.1 Schematic of compression equipment of cotton straw pellet

1.3 测试方法

试验采用 RGM-6010 电子万能材料试验机。首先,将试验样品缓慢装入压缩装置并振动,以保证原料均匀,初始密度约为 200 kg/m^3 ,对应样品质量约为 13 g 。再将压缩装置安装在电子万能材料试验机上进行压缩试验。压缩过程中压缩速度为 10 mm/min ,变形量为 50 mm 。达到预定变形量(50 mm)后保持不变,采用间隔为 0.1 s 。通过数据采集系统获得松弛应力与时间的测试数据及曲线。每个样品在相同试验条件下测试 3 次,取其平均值作为该样品松弛应力数据。

1.4 应力松弛模型选择与本构方程的建立

Maxwell 模型可以形象地反映生物质材料的应力松弛过程。由于棉花秸秆属于固体生物材料,试验数据分析表明,粉体棉花秸秆在应力松弛过程中存在平衡应力,故可以用广义的 Maxwell 模型来反映粉体棉花秸秆的应力松弛过程。另外,因生物质材料的变形属于非线性的粘弹性,且具有不稳定性等,1980 年 Peleg 采用归一化的应力来计算应力松弛数据,并提出了表征生物质材料应力松弛特性的 Peleg 模型^[6],因此,本试验中采用广义 Maxwell 模型和 Peleg 模型对粉体棉花秸秆的应力松弛特性进行分析与描述。

1) 广义 Maxwell 模型。通过预试验与数据分析,根据生物质秸秆压缩应力松弛特性和广义 Maxwell 模型的特点,选择常用的五元件 Maxwell 模型和三元件 Maxwell 模型进行分析。五元件广义 Maxwell 模型和三元件广义 Maxwell 模型分别如图 2 所示^[9-11]。

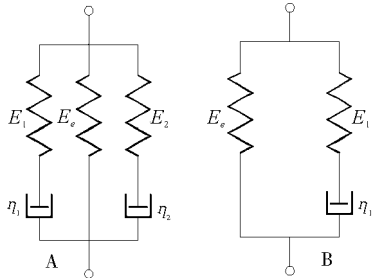


图 2 五元件广义 Maxwell 模型(A)和三元件广义 Maxwell 模型(B)

Fig.2 Five-element Maxwell model (A) and three-element Maxwell model (B)

五元件广义 Maxwell 模型主要由 1 个弹簧和 2 个 Maxwell 元件并联组成(图 2-A)。五元件广义 Maxwell 模型应力松弛方程为

$$\sigma(t) = \epsilon_0 (E_1 e^{-t/T_1} + E_2 e^{-t/T_2} + E_e) \quad (1)$$

式中 $\sigma(t)$ 为时间在 t 时刻的应力,MPa; ϵ_0 为初始应变,MPa; E_1 、 E_2 、 E_e 分别为 Maxwell 元件中 2 个弹簧和并联弹簧的弹性模量,MPa; t 为时间,s; T_1 、 T_2 分别为 Maxwell 元件的应力松弛时间, $T_1 = \eta_1/E_1$, $T_2 = \eta_2/E_2$,s; η_1 、 η_2 分别为 2 个阻尼器的粘性系数,MPa·s。

三元件广义 Maxwell 模型主要由 1 个 Maxwell 元件和 1 个弹簧并联而成(图 2-B)。三元件 Maxwell 模型应力松弛方程为

$$\sigma(t) = \epsilon_0 (E_1 e^{-t/T_s} + E_e) \quad (2)$$

式中 $\sigma(t)$ 为时间在 t 时刻的应力,MPa; ϵ_0 为初始应变,MPa; E_1 、 E_e 分别为 Maxwell 元件中弹簧和并联弹簧的弹性模量,MPa; t 为时间,s; T_s 为 Maxwell 元件的应力松弛时间, $T_s = \eta_1/E_1$,s; η_1 为阻尼器的粘性系数,MPa·s。

2) Peleg 模型。Peleg 模型又称线性模型,是 Peleg 在 1980 年针对生物材料的应力松弛特性提出的^[6],其方程为

$$\frac{\sigma_0 t}{\sigma_0 - \sigma(t)} = a + bt \quad (3)$$

式中 σ_0 为初始应力,MPa; $\sigma(t)$ 为时间在 t 时刻应力,MPa; a 为应力松弛时间,s; b 为固体属性常数。

本试验采用 MATLAB 软件分别对五元件广义 Maxwell 模型、三元件广义 Maxwell 模型和 Peleg 模型拟合应力松弛曲线,即应力—时间进行拟合,建立其本构方程,以决定系数 R^2 评价拟合精度优劣。显然,决定系数 R^2 越大,说明模型对数据拟合的效果越好,以此选择最优的应力松弛特性表述模型。

2 结果与分析

2.1 应力松弛曲线

图 3 为湘杂棉 14 号、湘杂棉 6 号、渝杂棉 2 号、鄂抗棉 10 号、鲁棉研 39 号、国欣棉 2 号、冀杂 1 号、丰杂棉 3 号中棉所 66、中棉所 71、中棉所 53 等品种的棉花秸秆粉体在初始密度约为 200 kg/m^3 ，压缩速度为 10 mm/min ，变形量为 50 mm ，松弛时间为 120 s 时的应力松弛曲线。从图 3 可以看出，在相同

试验条件下，粉体棉花秸秆应力松弛曲线变化规律基本相同，松弛应力在前 20 s 内大幅下降，之后逐步趋于平衡。通过简单判定法松弛过程均呈指数规律变化，并且松弛应力不会衰减为零，即存在平衡应力^[9]。

由于存在平衡应力，所以本试验采用五元件广义 Maxwell 模型和三元件广义 Maxwell 模型对粉体棉花秸秆应力松曲线进行拟合符合其应力松弛特性变化规律。

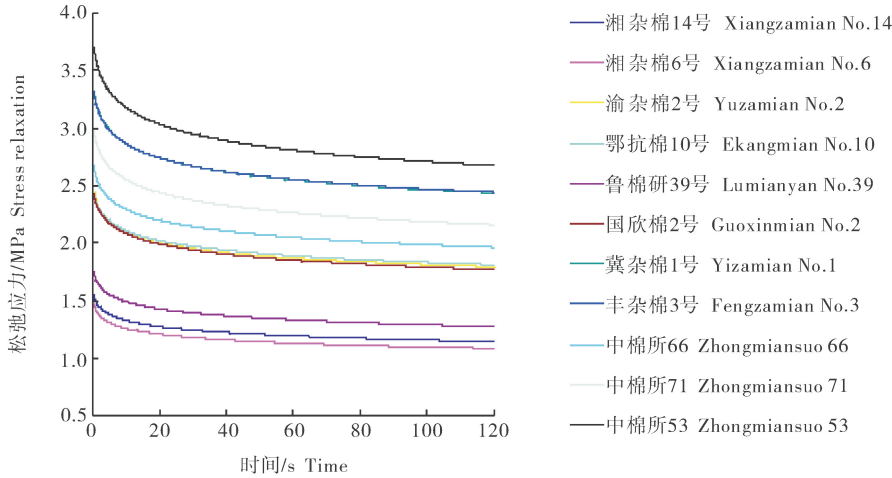


图 3 粉体棉花秸秆应力松弛曲线
Fig. 3 Curve of stress relaxation of cotton stalk pellet

2.2 应力松弛本构方程的建立

从图 3 可知，不同品种粉体棉花秸秆样品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。本试验分别采用广义 Maxwell 模型和 Peleg 模型分别建立粉体棉花秸秆应力松弛本构方程。

1) 广义 Maxwell 模型本构方程。根据公式(1)和公式(2)，利用 Matlab 软件对 22 种粉体棉花秸秆应力松弛曲线进行拟合，五元件广义 Maxwell 模型和三元件广义 Maxwell 模型参数拟合结果见表 1。

从表 1 可知，采用五元件广义 Maxwell 模型拟合粉体棉花秸秆应力松弛曲线，其决定系数 R^2 均大于 0.99，决定系数的均值为 0.999 0，而三元件广义 Maxwell 模型拟合曲线的决定系数 R^2 均大于 0.96，决定系数的均值为 0.971 6。分析结果表明，采用五元件广义 Maxwell 模型和三元件广义 Maxwell 模型对粉体棉花秸秆应力松曲线进行拟合符合其应力松弛特性变化规律，但两者比较而言，三元件广义 Maxwell 模型的 决定系数小于五元件广

义 Maxwell 模型的 决定系数，说明采用五元件广义 Maxwell 模型来表征粉体棉花秸秆的应力松弛特性较之三元件广义 Maxwell 模型更为理想。

另外，从公式(1)和公式(2)可以看出，五元件广义 Maxwell 模型中既包含应力松弛时间 T_1 (第 1 应力松弛时间)，又包含应力松弛时间 T_2 (第 2 应力松弛时间， $T_1 < T_2$)^[12]，而三元件广义 Maxwell 模型中仅包含一个应力松弛时间 T_s ，所以五元件广义 Maxwell 模型信息量更为丰富，可以全面地表征粉体棉花秸秆的应力松弛特性。

从表 1 可知，对于五元件广义 Maxwell 模型而言，平衡弹性模量均值为 4.477 MPa ；第 1 应力松弛时间均值为 4.39 s ，说明样品在压缩后 4.39 s ，其残余应力迅速减小；在第 2 应力松弛时间均值为 48.65 s ，说明在 $4.39\sim48.65\text{ s}$ 之间残余应力显著减小；在 48.65 s 以后，应力减小趋势不明显。

2) Peleg 模型本构方程。根据公式(3)，利用 Matlab 软件对 22 种粉体棉花秸秆应力松弛曲线进行拟合，Peleg 模型参数拟合结果如表 2 所示。

表 1 五元件广义 Maxwell 模型和三元件广义 Maxwell 模型参数拟合结果

Table 1 Parameters for the five element of generalized Maxwell model and the three element of generalized Maxwell model of cotton stalk pellet

样品编号 No. sample	五元件广义 Maxwell 模型 The five element of generalized Maxwell model						三元件广义 Maxwell 模型 The three element of generalized Maxwell model			
	E_1/MPa	T_1/s	E_2/MPa	T_2/s	E_e/MPa	R^2	E_1/MPa	T_s/s	E_e/MPa	R^2
1	0.322	3.97	0.392	47.16	2.034	0.998 7	0.506	25.27	2.081	0.968 1
2	0.310	3.95	0.371	47.37	1.929	0.998 7	0.477	25.12	1.976	0.967 2
3	0.504	4.08	0.610	47.65	3.182	0.998 8	0.788	25.24	3.258	0.968 5
4	0.501	4.33	0.632	49.01	3.209	0.999 0	0.812	25.82	3.290	0.970 6
5	0.382	3.90	0.464	47.01	2.264	0.998 7	0.596	25.25	2.320	0.967 7
6	0.515	4.43	0.669	48.90	3.132	0.999 1	0.857	26.12	3.215	0.972 3
7	0.706	4.50	0.904	49.18	4.313	0.999 2	1.165	25.93	4.428	0.972 1
8	0.695	4.44	0.891	48.98	4.322	0.999 1	1.147	25.9	4.435	0.971 7
9	0.567	4.13	0.706	47.85	3.481	0.998 9	0.907	25.57	3.568	0.969 7
10	0.646	4.44	0.835	48.56	3.823	0.999 1	1.073	25.95	3.926	0.972 4
11	0.803	4.70	1.066	49.51	4.725	0.999 2	1.368	26.31	4.860	0.974 2
12	0.722	4.41	0.914	49.38	4.446	0.999 0	1.175	25.92	4.565	0.971 0
13	0.616	4.53	0.810	48.86	3.731	0.999 1	1.037	26.2	3.832	0.973 3
14	0.673	4.51	0.868	49.28	4.151	0.999 1	1.116	26.03	4.262	0.972 3
15	1.012	4.63	1.307	48.95	5.792	0.999 2	1.690	25.84	5.958	0.973 2
16	1.017	4.54	1.312	48.75	5.922	0.999 1	1.694	25.84	6.088	0.972 7
17	1.156	4.48	1.501	48.60	6.784	0.999 2	1.926	25.98	6.969	0.972 8
18	0.805	4.59	1.067	49.67	5.089	0.999 2	1.361	26.51	5.224	0.973 6
19	1.089	4.47	1.411	48.39	6.586	0.999 1	1.814	25.9	6.761	0.972 7
20	1.066	4.47	1.375	49.08	6.538	0.999 1	1.764	26.04	6.712	0.972 2
21	1.096	4.42	1.411	48.45	6.289	0.999 1	1.813	25.89	6.466	0.972 2
22	1.087	4.70	1.456	49.79	6.748	0.999 2	1.859	26.51	6.935	0.974 3
均值 Mean value	0.741	4.39	0.953	48.65	4.477	0.999 0	1.225	25.87	4.597	0.971 6

表 2 Peleg 模型参数拟合结果

Table 2 Parameters for the peleg model of cotton stalk pellet

样品编号 No. sample	a/s	b	R^2
1	63.99	4.001	0.988 8
2	63.30	4.010	0.988 4
3	60.02	3.896	0.989 1
4	66.26	3.954	0.990 1
5	61.04	3.829	0.988 5
6	64.14	3.726	0.990 8
7	63.94	3.762	0.990 9
8	64.58	3.812	0.990 7
9	63.42	3.861	0.989 6
10	62.28	3.652	0.991 0
11	62.82	3.572	0.991 8
12	64.61	3.821	0.990 3
13	63.98	3.679	0.991 3
14	64.65	3.775	0.991 0
15	60.42	3.551	0.991 6
16	61.21	3.604	0.991 3
17	61.97	3.621	0.991 2
18	67.12	3.789	0.991 3
19	63.07	3.703	0.991 2
20	64.41	3.762	0.990 8
21	60.84	3.583	0.990 9
22	65.94	3.705	0.991 7
均值 Mean value	63.25	3.758	0.990 6

从表 2 可知,采用 Peleg 模型拟合粉体棉花秸秆应力松弛曲线,其决定系数 R^2 均大于 0.98,决定系数的均值为 0.990 6,说明采用 Peleg 模型对粉体棉花秸秆应力松曲线进行拟合符合其应力松弛特性变化规律。但 Peleg 模型中包含的参数较少,即粉体棉花秸秆应力松弛特性信息量较少,很难描述复杂的农业物料应力松弛现象。

Peleg 模型中的参数 a 与广义三元件 Maxwell 中的参数 T_s 的物理意义是相同的,均表示应力松弛时间。为了验证 Peleg 模型与广义三元件 Maxwell 模型是否具有相同的效果,对 Peleg 模型参数 a 与三元件 Maxwell 模型参数 T_s 进行配对 t 检验。结果表明,三元件广义 Maxwell 模型中的应力松弛时间 T_s 与 Peleg 模型中的应力松弛时间 a 在统计学上并非相同 ($P < 0.01$),由此可以说明三元件广义 Maxwell 模型与 Peleg 模型在描述粉体棉花秸秆应力松弛特性是非等效的。

3 讨 论

本试验结果表明,不同品种、不同生长地域和环境的粉体棉花秸秆在压缩应力松弛过程中,应力松弛曲线变化规律基本相同,松弛应力随着时间的延

长逐渐减小,松弛过程呈指数规律变化,并且松弛应力不会衰减到零,即存在平衡应力。通过比较分析五元件广义 Maxwell 模型、三元件广义 Maxwell 模型和 Peleg 模型的拟合效果,五元件广义 Maxwell 模型和 Peleg 模型均可以描述粉体棉花秸秆的应力松弛变化规律,决定系数 R^2 均大于 0.99。相对而言,五元件广义 Maxwell 模型的拟合效果最为理想,其拟合决定系数 R^2 的均值达到 0.999。三元件广义 Maxwell 模型拟合效果最差,并且在统计学意义上与 Peleg 模型不等效。

五元件广义 Maxwell 模型信息量大,可以完全精确地表征粉体棉花秸秆的应力松弛特性,其本构方程中平衡弹性模量 E_0 均值为 4.477 MPa,第 1 应力松弛时间 T_1 均值为 4.39 s,在第 2 应力松弛时间 T_2 均值为 48.65 s。

在本试验中没有对棉花秸秆水分含量、磨碎粒度以及样品木质纤维成分对其应力松弛特性的影响进行试验与分析。如果结合水分和粒度对棉花秸秆应力松弛特性影响,以及其木质纤维含量与应力松弛特性参数关联性进行分析,就能更好地揭示压缩应力松弛特性特性及其变化规律。

Compression stress relaxation characteristic of cotton stalk particles and its model building of cotton stalk particles

ZHU Kai NIU Zhi-you

College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract In order to study the compression stress relaxation characteristics of cotton stalk particles, 22 different varieties of cotton stalk particles have been collected from different growing areas and environments and crushed by 40 mesh sieve, and then stress relaxation test have been implemented on them by RGM-6010 universal material testing machine. The stress relaxation curve of cotton stalk particles is fitted to the three-element generalized Maxwell model, the five-element generalized Maxwell model and the Peleg model. This article uses the obtained information and the fitting coefficient of determination as the evaluation indexes to establish the powder cotton straw stress relaxation constitutive equation. Results show that the stress relaxation curve showed an exponential, and had equilibrium stress. The five-element generalized Maxwell model is best to depict stress relaxation characteristics of cotton stalk particles and the fitting coefficient of determination, balance elastic modulus, the first stress time, and the second stress time are 0.999, 4.477 MPa, 4.39 s and 48.65 s respectively. Therefore, stress relaxation characteristics of cotton stalk particles were depicted best by the five-element generalized Maxwell model.

Key words stress relaxation characteristic; cotton stalk; model

参 考 文 献

- [1] 杨战宏,师惠叶. 农作物秸秆综合利用新技术的现状与建议[J]. 农业工程学报, 2013, 3(2): 38-39.
- [2] 肖宏儒,钟成义,宋卫东,等. 农作物秸秆平压压缩成型技术研究[J]. 中国农机化, 2010, 227(1): 58-65.
- [3] 王春光,杨明韶. 农业纤维物料压缩流变研究现状[J]. 农业机械学报, 1998, 29(1): 141-143.
- [4] 王春光,高焕文,杨明韶,等. 牧草高密度压缩时的变形恢复[J]. 中国农业大学学报, 1997(6): 66-70.
- [5] MOHSENIN N, ZASKE J. Stress relaxation and energy requirements in compaction of unconsolidated materials [J]. Agric Engng Res, 1976, 21(1): 193-205.
- [6] PELEG K. A rheological model of nonlinear viscoplastic solids [J]. Journal of Rheology, 1983, 27(5): 411-431.
- [7] 王春光,杨明韶,高焕文. 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): 48-62.
- [8] 廖娜,黄光群,陈龙健. 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.
- [9] 杨明韶. 农业物流变学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [10] 周祖饬. 农业物科学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- [11] 李瀚茹. 农业流变学概论[M]. 北京: 中国农业出版社, 1987.
- [12] 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.