

生物质颗粒燃料成型的黏弹性本构模型

霍丽丽^{1,2}, 赵立欣¹, 田宜水¹, 姚宗路¹, 孟海波¹

(1.农业部规划设计研究院,农业部农业废弃物资源化利用重点实验室,北京100125;2.中国农业大学工学院,北京100083)

摘要:为研究生物质颗粒成型燃料压缩成型机理,该文用玉米秸秆、花生壳、小麦秸秆、大豆秸秆、棉花秸秆、木屑等6种生物质原料,采用生物质颗粒成型机进行压缩成型,研究生物质颗粒燃料压缩成型过程,采用黏弹性理论,建立生物质颗粒成型燃料的本构模型,从力学角度提出生物质颗粒成型燃料的压缩成型机理,并研究对比不同种类生物质原料压缩的最大应力与能耗。结果表明,6种生物质原料中棉秆和木屑的最大应力较高,其余4种原料略低;木屑的压缩能耗最高,其次为棉秆、花生壳和豆秸,小麦秸秆和玉米秸秆较小。该研究结论为解决生物质颗粒成型燃料成型加工能耗高,关键部件受力磨损导致寿命低等问题提供一定参考。

0引言

中国生物质资源十分丰富^[1]

,但因其松散、堆积密度较,导致收集、运输、储藏难度大、成本高,制约了规模化开发利用,利用压缩成型将其制成生物质颗粒燃料,可

提高其运输和贮存能力,降低成本,而且改善燃烧性能,提高利用效率^[2]

。与煤相比,生物质颗粒燃料的温

室气体排放量不到煤的1/9,环境效益非常可观^[3]

,不仅可以用于家庭炊事、取暖,也可作为工业锅炉和电厂燃料,替代煤炭等化石能源。一般地,生物质颗粒燃料的压缩过程是在较高的

外力作用下,利用生物质原料自身所含的

“天然黏结剂”——木质素被激活^[4]

,原料颗粒与颗粒之间重新排列组和在了一起^[5],通过一定形状的颗粒成型模具,形成颗粒成型燃料。

目前,针对生物质颗粒燃料成型过程的相关模型研究可分为两类,一类为黏弹塑性模型,表征压力与变形关系,另一类为压力与压缩密度的数学模型。Nalladurai

Kaliyan等^[6]

利用弹性模量,强度系数,应变硬化指数,黏性系数,摩擦损耗因子5个参数构建秸秆和柳枝稷的一维线性黏弹塑性模型,并得出弹性模量和黏性系数影响

颗粒燃料的抗压强度和耐久性。郑晓等^[7-8]

采用线性与非线性黏塑性模型相结合的方法,研究芝麻、花生、菜籽与菜籽仁散粒体介质的压榨过程。

线性黏塑性本构模型采用Maxwell的理论方法建立,而非线性黏塑性本构模型的建立采用经验模型方法建立。张旭^[9]在柠条压缩过程中的松散和压紧阶段,分别建立了描述柠条压缩的一般力学模型和非线性流变力学模型,获得了柠条在压紧阶段弹性模量和黏性系数随压缩量变化的

规律。王春光等^[10-11]

建立了牧草压缩及应

力松弛模型,研究压捆过程中轴向压缩力

、变形和变形恢复规律。孙启新等^[12]

基于ANS

YS分析软件,针

对柱塞式成型设备,对秸秆类生物

质原料挤压模拟出压力与变形关系曲线。赵东等^[13]

研究密闭容器中用Doraivel

u屈服准则来描述粉碎玉米秸秆的本构方程。Panelli、Faborode等^[14-16]研究了压力与压缩密度关系。

吕江南等^[17]

用红麻料片在闭式容器内的压缩过程可分为松散、过渡和压紧3个阶段,压力与压缩密度关系的数学模型分别可用线性和指数关系来描述。各类原料压缩的力学试验中得出棉秆、小麦、可燃废纸、大麦适宜的最大压缩力分别为34、16

0、70、63.2MPa^[18-21]

。以上研究均提出了各自的流变学理论，黏弹塑性理论大多侧重于物料压缩后的松弛与蠕变过程的研究，而压力与密度的模型参数过于单一，理论适应性不广，对多个种类生物质原料的压缩成型过程的力与变形及时间之间的关系，目前没有通用的理论模型支撑。

生物质颗粒燃料生产设备可分为螺旋挤压式、活塞冲头式、模辊式，其中模辊式成型机具有生产率高、成型好等优点，是生产生物质固体燃料企业优选设备。生物质原料挤压过程中，颗粒在机械力作用下的致密过程受力复杂多变，首先颗粒可能发生弹性变形，随着颗粒越来越靠近，颗粒可能发生黏塑性变形，依靠原料自身的“天然黏结剂”互相连接成型。本文以玉米秸秆、花生壳、小麦秸秆、大豆秸秆、棉花秸秆、木屑等6大类生物质原料为研究对象，研究模辊式生物质颗粒燃料成型机成型机理，通过自制的力学测试装置，模拟生物质颗粒成型燃料的成型过程，建立适于生物质原料压缩的黏弹性模型，并对比不同种类原料压缩的难易程度及能耗，为生物质颗粒燃料成型机具的设计开发提供基础理论依据。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

试验仪器485型模辊式生物质颗粒燃料成型机（农业部规划设计研究院设计设计，北京盛昌绿能科技有限公司生产

。主机功率：90kW

；设备生产率为1t/h；模孔直径8mm；

燃料成型率 > 95%；颗粒密度 > 1.0g/cm³

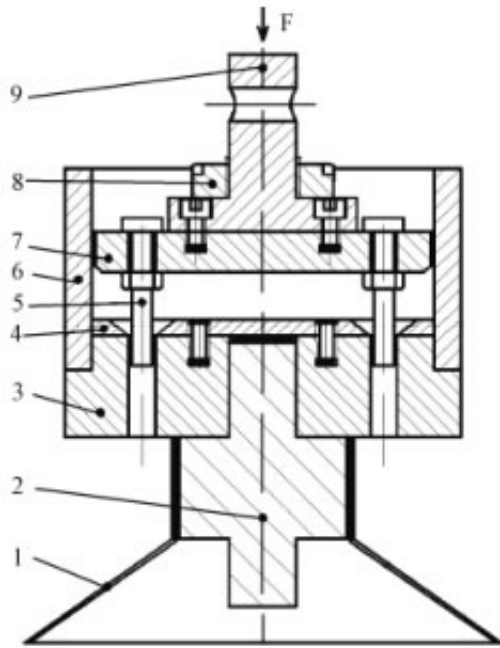
）、OlympusBX41型电子显微镜、Canon550D型显微成像系统、93QS-16.0型铡草机、HLP型粉碎机（筛孔径8mm）、PL2002/01型电子天平（精度0.01g）、BSA223S-CW型分析天平（精度0.1mg）、GZS-1型自动标准振筛机、标准样品分析筛（方

孔，筛孔尺寸分别

为0.2，0.3，0.45，0.6，1.0，3.3，6.0

mm）、MH-200E型电子比重计（精度1kg/m³

）、101-1A型电热鼓风干燥箱、CMT6104型万能试验机、自制压缩试验夹具（如图1所示，上下支撑座分别安装在万能试验机上下夹具孔内，将定量的原料人工喂入成型模具孔内，万能试验机控制压缩头对喂入原料进行压缩并实时记录压缩力、时间、位移等参数；该夹具未考虑原料的喂入过程，主要研究原料在模孔内压缩的受力过程，通过万能试验机控制自制压缩试验夹具的运动，模拟压缩成型过程，可实现压缩过程中力、位移和时间变化的控制和数据存储，为压缩模型的建立提供基础数据）、干燥器、砂纸（粒度600~5000目）、切片刀、载玻片、盖玻片、刷子、镊子、洗耳球、游标卡尺等。



1.挡料板 Striker plate 2.下支承座 Fulcrum bearing NO.1 3.成型模具 Pattern die 4.倒料孔 Chamfer 5.压缩头 Compression rod 6.储料室 Storage compartment 7.压板 Pressure plate 8.圆螺母 Round nut 9.上支承座 Fulcrum bearing NO.2

图1 自制压缩夹具示意图

Fig.1 Schematic diagram of self - made compression fixture

1.2 试验材料

本试验选择河北地区的玉米秸秆、花生壳、小麦秸秆、大豆秸秆、棉花秸秆、木屑等6大类生物质原料作为研究对象。将采集的各类秸秆自然晾晒达到水分平衡后，首先用铡草机粗粉（>2kg），接着用细粉机细粉（粉碎后粒度分布见图2），然后加入适量水，混匀，使原料的全水分达到15%~20%，密封，在5℃下放置24h以上，以便压缩成型，实际测得的全水分数值见表1。

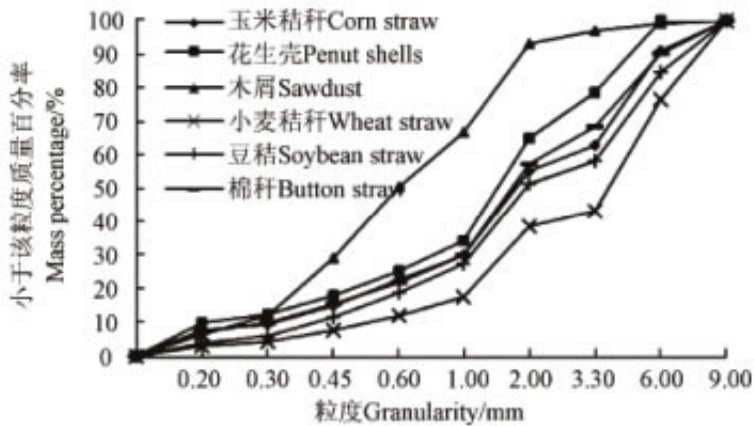


图2 原料粒度分布

Fig.2 Granularity distribution of material

表1 不同种类原料的全水分

Table 1 Total moisture of material

种类 Kind	玉米秸 Corn straw	小麦秸 Wheat straw	豆秸 Soybean straw	棉秆 Button straw	花生壳 Peanut shells	木屑 Sawdust
全水分 Total moisture/%	18.28	17.33	18.21	19.13	18.44	17.96

1.3试验设计

为模拟模辊式生物质颗粒成型燃料成型过程，试验选择6种原料，粉碎后在485型模辊式生物质颗粒燃料成型机进行压缩成型，分析压缩过程中应力的变化规律，通过显微镜观察到层与层间距^[5]，进而测量颗粒燃料的单次进料量。

显微镜观察可测得，生物质颗粒燃料内部存在裂纹，裂纹宽度约为3mm，如图3，这也恰好证明了压缩的间断性，即颗粒燃料的单次压缩间距约3mm，不同种类原料压缩间距略有差别，可通过测量压缩间距与模孔尺寸来计算单次压缩致密后的原料体积，再通过测量颗粒密度，计算出每种原料的单次进料量，见表2，压缩长30mm的生物质颗粒燃料，需要压缩10次左右，平均每次的进料量在155.6 ~ 158.8mg之间，不同种类原料的进料量相差不超过3.2mg。

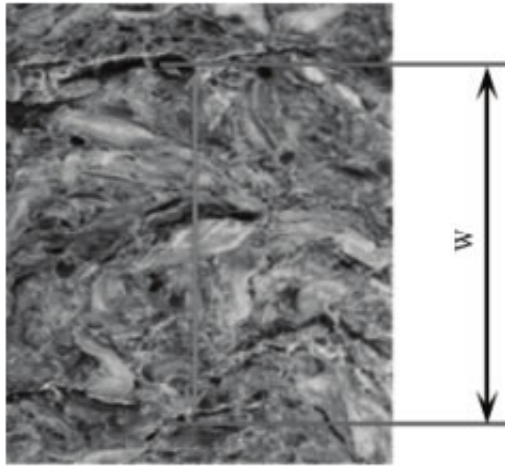


图3 显微镜下测量成型燃料的层与层间距 W (×100)
Fig.3 Crack width of biomass pellet under Microscope

表2 不同种类原料单次进料量

Table 2 Feed rate of the different species of raw material

种类 Kind	玉米秸 Corn straw	小麦秸 Wheat straw	豆秸 Soybean straw	棉秆 Button straw	花生壳 Peanut shells	木屑 Sawdust
模孔直径/mm	8	8	8	8	8	8
平均单次压缩间距/mm	3.0	2.7	3.1	2.7	2.6	2.5
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	1 030	1 170	1 010	1 060	1 185	1 240
颗粒直径/mm	8.00	8.00	8.00	8.02	8.02	8.02
颗粒总长度/mm	29.6	32.2	31.4	32.6	33.8	30.0
一次进料量/mg	155.3	158.8	157.4	158.2	155.6	156.6
压缩次数/次	10	12	10	12	13	12

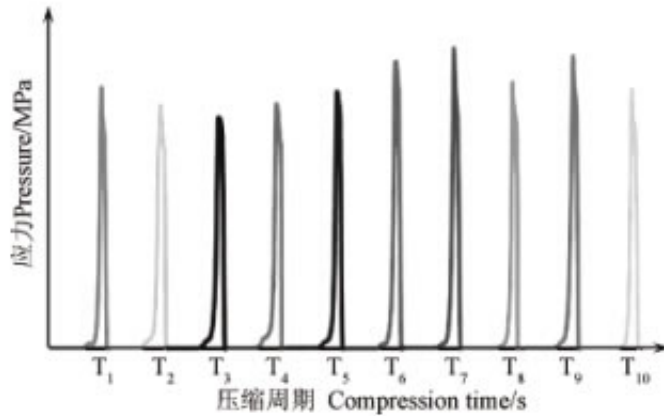
然后利用自制压缩试验夹具，对6种生物质原料依照实际原料的进料量进行压缩成型试验模拟，基于试验压缩过程的应力与应变的变化曲线，建立生物质原料压缩的数学模型，研究生物质颗粒成型燃料的成型机理，得出不同种类原料压缩模型参数，对比6种原料压缩能耗，为生物质颗粒成型燃料成型机具的优化提供力学参考依据，本研究不考虑原料的喂入过程，仅研究原料在成型模具内压缩的应力与应变关系。

2结果与分析

2.1建立模型

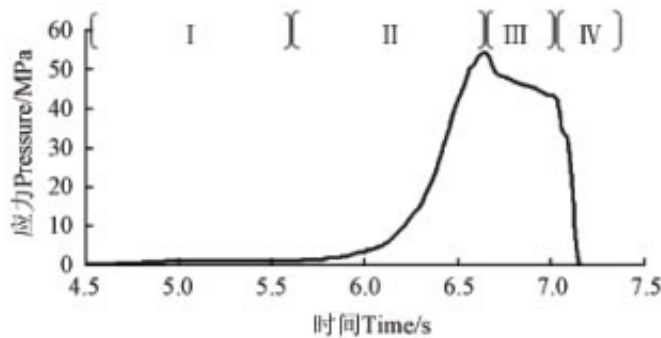
2.1.1力学模型

根据模辊式生物质颗粒燃料的成型机理，研究生物质原料压缩过程应力与时间关系，如图4a所示，成型过程为间断性压缩，压缩为长30mm的生物质颗粒燃料，需要压缩10次左右，其每次压缩过程可分为进料预压、致密成型、保压松弛、颗粒挤出4个阶段，如图4b所示。



注：T1、T2、…、T10 分别为第 1、2、…、10 次压缩

a. 生物质颗粒燃料压缩过程应力变化曲线
a. Multiple compression



注：I 为第一阶段 first phase；II 为第二阶段 second phase；III 为第三阶段 third phase；IV 为第四阶段 fourth phase。

b. 单次压缩应力变化曲线
b. Single compression

图 4 压缩过程应力变化曲线

Fig.4 Stress curve of compressing process

第一阶段为进料预压，原料进料时为松散状态，随着应变的不断增大，原料不断被挤压，所受压力缓慢增大，但增加幅度不大，主要原因是生物质原料极松散，原料粒子与粒子间空隙较大。进入模孔时，储料室中的原料被挤入模孔瞬间，原料所受压力有突增现象，而后下降到正常压缩状态。该阶段原料松散，原料粒子做无规则运动，应力变化较小，且无明显规律，这里不做建模讨论。

第二阶段为致密成型。压紧致密过程，应力逐渐增加到最大值，应变也逐渐增加到最大值。此时，被挤入模孔的原料开始挤压致密，原料颗粒严重变形，颗粒与颗粒互相紧贴或镶嵌，黏在一起成为生物质颗粒燃料的一部分，此阶段原料压缩应力与应变关系可用黏弹性本构模型表述^[22]，参见式(1)。

$$\sigma(\varepsilon) = E\varepsilon + R_1 e^{n_1 \varepsilon} + R_2 e^{n_2 \varepsilon} + \sigma_{f1} \quad (1)$$

式中， $\sigma(\varepsilon)$ 为压缩应力，MPa； ε 为压缩应变，%， E 为弹性模量，MPa； R_1 、 R_2 为黏性系数； n_1 、 n_2 为黏性指数； σ_{f1} 为该状态下原料与模具摩擦的损耗应力，MPa。

第三阶段为保压松弛，应力从最大值略微减小，应变基本保持不变，颗粒燃料逐渐保持稳定状态。该阶段原料颗粒产生应力松弛现象，应力在致密成型过程中达到最大值，而后发生应力突降现象，应力下降速度缓慢。该阶段应力的变化与存留模

具内的时间直接相关，参照

伯格斯（四元件模型：弹簧、开尔文模型和阻尼器串联）模型^[22]中的应力松弛关系，可用模型（2）描述。

$$\sigma(t) = A\varepsilon'(t) + B\varepsilon''(t) + \sigma_{f2} \quad (2)$$

式中， $\sigma(t)$ 为松弛应力，MPa；应力松弛因子 $\varepsilon'(t) = e^{-n_1 t}$ ，应力松弛因子 $\varepsilon''(t) = -e^{-n_2 t}$ ， A 为一阶应力松弛系数， B 为二阶应力松弛系数， σ_{f2} 为该状态下原料与模具摩擦的损耗应力，MPa。

第四阶段为颗粒挤出，致密成型后的颗粒被挤出孔外，所受压力迅速减小，最后降为0。

2.1.2 能耗模型

生物质压缩能耗可通过外力做功得出，压缩力与位移的变化曲线如图5。能耗模型参见式（3），其中压缩力可通过致密成型过程的应力与应变函数式（1）推导得出，位移与应变呈线性函数关系，推导后可得式（4）。

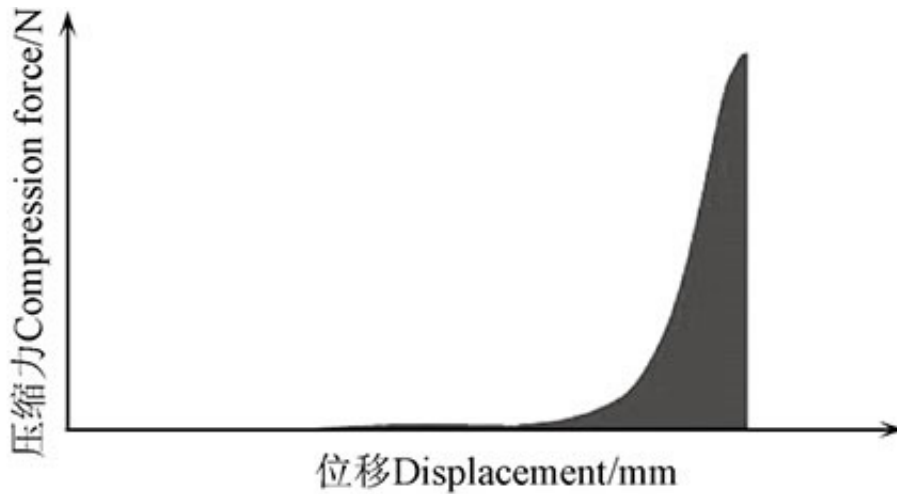


图 5 压缩过程压缩力变化曲线

Fig.5 Compressive curve of compressing process

$$\begin{aligned}
 W &= \sum_{i=1}^n F_i \cdot (L_i - L_{i-1}) \\
 &= S \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) \cdot d[L(\varepsilon)] \\
 &= CS \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) \cdot d\varepsilon
 \end{aligned} \tag{3}$$

式中， W 为能耗，J； F_i 为瞬时压力，N； L_i 为瞬时压缩位移，mm； S 为压缩模孔横截面积，mm； C 为应变与压缩位移的线性系数。

$$W = 1.46 \left[\frac{1}{2} E \varepsilon^2 + \frac{R_1}{n_1} (e^{n_1 \varepsilon} - 1) + \frac{R_2}{n_2} (e^{n_2 \varepsilon} - 1) + \sigma_{f1} \varepsilon \right] \tag{4}$$

2.2 不同种类原料力学模型参数确定

2.2.1 第一阶段进料预压

6种原料压缩致密应力变化如图6，可以看出，应力在进料预压阶段，此时所受应力较小，应变由0增大到50%左右

。大部分原料压缩时应力会有波动，主要由于挤压空间突然缩小，刚进入模孔的瞬间，应力突然增加而后降为正常致密压缩阶段，除木屑外，应力突增的峰值均在5MPa以内，花生壳的应力波动现象最明显。而木屑挤压进入模孔瞬间，没有应力突增现象，原因可能是木屑的粒度较小，较为均匀，流动性好，容易进入模孔，同时由于木屑粒度小，原料粒子与粒子间空隙小，排列较为致密，木屑在进料预压阶段的应力较其他原料大。

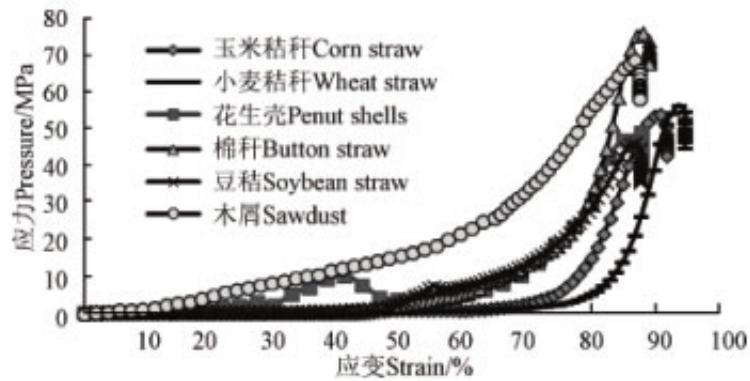


图 6 不同种类原料应力变化曲线

Fig.6 Stress curve of the different species of raw material

2.2.2 第二阶段致密成型

研究主要考虑应变大于50%之后的应力与应变关系，对致密压缩过程采用式（1）建模后，采用Matlab曲线拟合工具进行拟合，得出各个模型参数见表3，可见采用式（1）建模曲线拟合较好，R2均大于0.99。

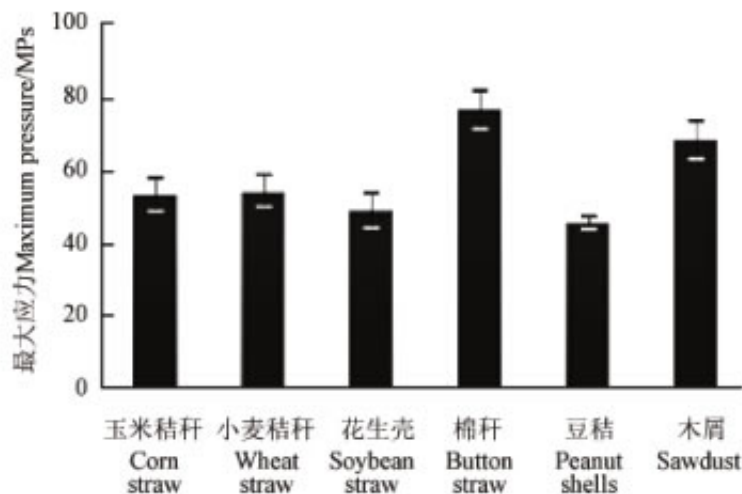


图 7 不同种类原料压缩的最大应力值

Fig.7 Maximum stress value of different species of raw material

6种原料的最大应力比较，如图7，在压缩成型过程中，棉秆所需最大应力最大，为 (76.07 ± 5.28) MPa，其次为木屑 (67.85 ± 5.26) MPa。豆秸所需最大应力最小，为 (45.23 ± 1.71) MPa。若将6种原料按应力的算数平均误差值小于5MPa进行分类，棉秆和木屑为一类，压缩成型的最大应力要求较高，在67~77MPa之间；玉米秸秆、小麦秸秆、花生壳和豆秸为另一类，压缩成型的最大应力要求较低，在45~55MPa之间。

2.2.3 第三阶段保压松弛

保压松弛阶段，应力随时间缓慢下降，应变已达最大值且基本不变，如图8，6种原料压缩后均出现应力松弛现象，参照模型（2）模拟计算模型参数见表4，模型曲线模拟较优，R2均大于0.989。

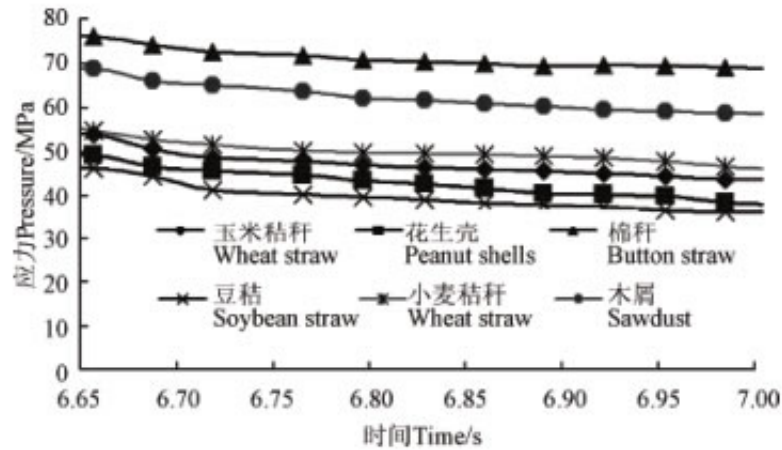


图 8 保压松弛阶段应力与时间关系

Fig.8 Relationship between stress and time of the third stage

2.4不同种类原料能耗对比

单次压缩过程, 能耗模型参数见表3, 能耗变化曲线如图9所示, 不同原料随着压缩应变的增加, 能耗也在不断增加, 致密成型阶段为主要能量消耗阶段, 不同种类原料其能耗有一定差异, 能耗由高到低依次为木屑、棉秆、花生壳、豆秸、玉米秸秆和小麦秸秆, 将能耗换算为压缩单位质量的原料所需平均能耗见表5。

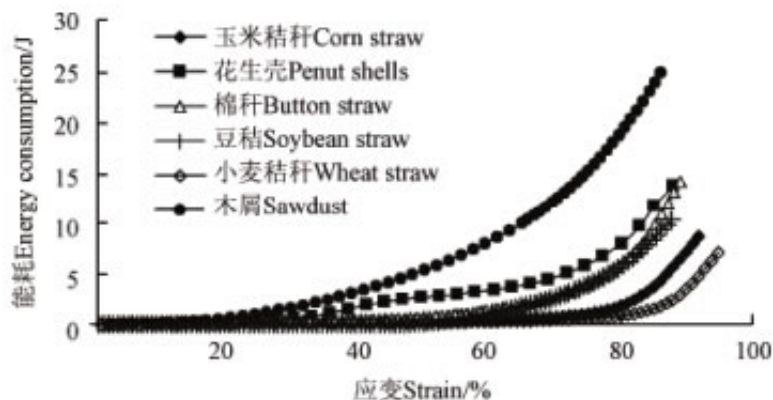


图 9 不同种类原料压缩能耗变化曲线

Fig.9 Energy curve of the different species of raw material

可见, 木屑的压缩能耗分别是棉秆、花生壳、豆秸、玉米秸秆、小麦秸秆的1.7、1.8、2.4、2.8和3.5倍。而成型后的颗粒燃料密度, 木屑颗粒燃料分别是棉秆、花生壳、豆秸、玉米秸秆、小麦秸秆的1.05、1.06、1.17、1.20、1.23倍, 试验得出在一次压缩进料量相同的情况下, 木屑原料在模孔内的滞留时间长, 单次压缩间距为2.5mm, 颗粒密度1240 kg/m³, 玉米秸秆原料在模孔内的滞留时间最短, 单次压缩间距为3.0mm, 颗粒密度1030kg/m³。

可见颗粒燃料的压缩密度高, 压缩能耗高。若要降低压缩能耗, 可采用降低进料量等方法, 降低压缩应力, 压缩后的颗粒燃料的颗粒密度也随之减小, 从而降低能耗。

表3 第二阶段致密成型建模参数
Table 3 Parameters of making model of the second stage

原料种类 Kind	E Elastic modulus/GPa	R_1 Coefficient of viscosity/ mm^{-1}	R_2 Coefficient of viscosity/ mm^{-1}	n_1 Viscosity index	n_2 Viscosity index	σ_0 Loss pressure/MPa	SSE	R^2
玉米秸 corn straw	3.2	-0.2382	0.0248	7.17	10.79	1.6	15.5	0.997
花生壳 peanut shells	2.7	-0.8025	0.0906	3.44	9.29	1.9	22.6	0.992
小麦秸 wheat straw	2.7	-0.1889	0.0001	5.00	11.43	1.5	32.7	0.994
豆秸 soybean straw	5.6	-0.0366	0.0184	4.00	10.40	1.8	0.69	0.999
棉秆 button straw	2.1	-0.1777	0.0553	8.04	10.53	1.8	58.8	0.991
木屑 sawdust	3.7	-0.0058	0.0343	12.85	10.96	1.8	4.15	0.999

注： E 为弹性模量，MPa， R_1 、 R_2 为黏性系数， n_1 、 n_2 为黏性指数， σ_0 为该状态下原料与模具摩擦的损耗应力，MPa，SSE 为误差平方和， R^2 为决定系数。

表4 第三阶段保压松弛建模参数
Table 4 Parameters of making model of the third stage

原料种类 kind	A First-order coefficient of stress relaxation	B Second-order coefficient of stress relaxation	n_1 Stress relaxation index	n_2 Stress relaxation index	σ_0 Loss pressure/ MPa	SSE	R^2
玉米秸 corn straw	0.034	44.69	-3.323	0.328	51.65	0.12	0.999
花生壳 peanut shells	0.003	47.39	-4.406	0.064	89.66	0.93	0.993
小麦秸 wheat straw	0.263	40.59	-1.923	0.342	49.68	0.15	0.998
豆秸 soybean straw	0.339	28.13	-1.863	0.052	66.34	1.22	0.989
棉秆 button straw	0.492	49.39	-1.563	0.072	79.01	0.28	0.995
木屑 sawdust	0.131	37.38	-1.136	0.035	97.37	0.54	0.995

注： A 为一阶应力松弛系数， B 为二阶应力松弛系数， σ_0 为该状态下原料与模具摩擦的损耗应力，MPa。

表5 不同种类原料压缩能耗
Table 5 Energy of the different species of raw material

种类 kind	玉米秸 Corn straw	小麦秸 Wheat straw	豆秸 Soybean straw	棉秆 Button straw	花生壳 Peanut shells	木屑 Sawdust
能耗 Energy consumption/($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)	56.2	45.1	86.9	91.4	65.5	158.8
能耗（单位换算） Unit conversion/($\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$)	15.6	12.5	24.1	25.4	18.2	44.1
颗粒密度 Particle density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 030	1 010	1 170	1 185	1 060	1 240

3结论

生物质颗粒燃料的压缩过程可用黏弹性本构模型描述。致密成型阶段采用应力与应变本构模型描述，模型曲线拟合较好，决定系数大于0.99。保压松弛阶段采用应力与时间本构模型描述，模型曲线拟合较好，决定系数均大于0.989。

不同种类原料，进料量相同情况下，棉秆和木屑的最大压缩应力较高，约为67~77MPa，其他玉米秸秆、花生壳、豆秸和小麦秸的最大应力在45~55MPa之间。生物质颗粒燃料的颗粒密度越高，能耗越高，且能耗增加越快。

[参考文献]

- [1]Longjian Chen, Li Xing, Lujia Han.Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13: 2689 - 2695.
- [2]田宜水.中国生物质固体成型燃料产业发展分析[J].农业工程技术：新能源产业, 2009(2)：13 - 17.
- [3]霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 等.生物质固体成型燃料全生命周期评价[J].太阳能学报, 2011, 32(12)：1875 - 1880.
- [4]Nalladurai Kaliyan, R Vance Morey.Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass[J].Bioresource Technology, 2010(101): 1082 - 1090.
- [5]霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 等.生物质颗粒燃料微观成型机理[J].农业工程学报, 2011, 27(增刊1)：21 - 25.
- [6]Nalladurai Kaliyan, R.Vance Morey.Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass[J].Biosystems Engineering, 2009(5): 47 - 63.

- [7]郑晓, 林国祥, 尹芳, 等. 芝麻、花生在压榨过程中非线性粘弹塑性模型与蠕变模拟[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 29 - 33.
- [8]郑晓, 林国祥, 李智, 等. 菜籽与菜籽仁的非线性粘弹塑性本构模型[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 87 - 101.
- [9]张旭. 柠条可压缩性及应力松弛特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009(12): 36 - 88.
- [10]王春光, 杨明韶, 童淑敏. 高密度压捆时牧草在压缩室内的受力和变形研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(4): 55 - 59.
- [11]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.
- [12]孙启新, 张仁俭, 董玉平. 基于 ANSYS 的秸秆类生物质冷成型仿真分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 130 - 134.
- [13]赵东, 黄文彬, 鹿振友. 密闭容器中玉米籽粉粒体的本构方程[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(5): 65 - 67.
- [14]Panelli R, Filho F A. A study of a new phenomenological compacting equation[J]. Powder Technology, 2001, 114(1/3): 255 - 261.
- [15]Faborode M O, O' Callaghan J R. Theoretical analysis of compression of fibrous agricultural materials[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1986, 35(3): 175 - 191.
- [16]Mani S, Tabil L G, Sokhansanj S. Evaluation of compaction equations applied to four biomass species[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2004, 46(3): 55 - 61.
- [17]吕江南, 龙超海, 何宏彬, 等. 红麻料片的压缩特性及压力与压缩密度的数学模型[J]. 农业机械学报, 1998, 29(2): 83 - 86.
- [18]Ingwald Obernberger, Gerold Thek. Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27: 653 - 669.
- [19]Kronbergs E. Mechanical strength testing of stalk materials and compacting energy evaluation[J]. Industrial Crops and Products, 2000(11): 211 - 216.
- [20]Yadong Li, Henry Liu, Ou Zhang. High-pressure compaction of municipal solid waste to form densified fuel[J]. Fuel Processing Technology, 2001(74): 81 - 91.
- [21]Phani Adapaa, Lope Tabil, Greg Schoenau. Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw[J]. Biosystems engineering. 2009(6): 335 - 344.
- [22]李瀚如, 潘君拯. 农业流变学概论[M]. 北京: 农业出版社, 1990, 10.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/107048.html>