

揉碎玉米秸秆可压缩性研究^{*}

范林 王春光 王洪波 赵桂芝 索海霞

【摘要】 揉碎玉米秸秆的可压缩性对压缩工艺的优化、压缩设备的研制、压缩后产品的特性等均有重要影响。通过对揉碎后玉米秸秆进行压缩试验,研究了在不同初始密度下以不同速度压缩时,不同含水率揉碎玉米秸秆不同个体形状的可压缩性,并分析了不同压缩条件下揉碎玉米秸秆体积模量与压缩量、压缩密度之间的关系,获得了体积模量与压缩密度关系的数学模型。研究结果表明:揉碎玉米秸秆的可压缩性受到喂入揉碎玉米秸秆含水率、初始密度和压缩速度的影响,且当压缩密度大于 230 kg/m^3 时,随压缩密度的增加,可压缩性明显降低。

关键词: 生物质能 玉米秸秆 可压缩性 影响因素 试验

中图分类号: S216.2; S313

文献标识码: A

Study on the Compressibility of Maize Straw Rubbed

Fan Lin Wang Chunguang Wang Hongbo Zhao Guizhi Suo Haixia
(Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract

The compressibility of maize straw has great effect on the compressing processing, properties of products compressed, optimizing processing technology and designing compressing equipments of maize straw. The compressibility of maize straw rubbed was experimentally studied under certain initial density, different forms and different moisture contents with different compressing velocities. The relation curves of bulk modulus against compressing displacement and compressing density were analyzed by means of regressive analysis. Finally, the regressive mathematical model of compressibility was obtained. The results show that moisture content, initial densities and compressing velocities have obvious effects on compressibility of maize straw rubbed. Especially, when compressing density is larger than 230 kg/m^3 , the compressibility of maize straw rubbed reduces significantly with increasing of compressing density.

Key words Biomass energy, Maize straw, Compressibility, Influencing factors, Experiment

引言

对农作物秸秆等生物质资源的开发利用已引起国内外的高度重视。然而,农作物秸秆在自然状态下松散且容积密度小,储存和运输过程中占用空间大,储运成本高^[1~7]。工程上一般采用压缩工艺来解决,当利用各种压缩设备对其压缩时,被压缩物料

的产品特性以及压缩设备的功耗等,都取决于压缩设备对物料所施加的压缩力和压缩速度等。许多学者虽然对秸秆物料做了压缩、流变、剪切、拉伸等特性的研究,但对揉碎玉米秸秆物料本身的可压缩性没有进行研究^[1,3~6,8~9]。

本文对揉碎玉米秸秆在不同初始密度和不同含水率下以不同速度压缩时的可压缩性进行试验研

收稿日期: 2007-10-17

^{*} 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(项目编号:20001302)

范林 内蒙古农业大学机电工程学院 硕士生, 010018 呼和浩特市
王春光 内蒙古农业大学机电工程学院 教授 博士生导师 通讯作者
王洪波 内蒙古农业大学机电工程学院 讲师 博士
赵桂芝 内蒙古农业大学机电工程学院 硕士生
索海霞 内蒙古农业大学机电工程学院 硕士生

究,以便为秸秆物料压缩产品最终密度的确定和相应压缩设备功率匹配的问题提供参考^[3]。

1 材料与方 法

供试玉米秸秆采自内蒙古农业大学试验田,经 9R-40 型揉碎机揉碎,长度小于 180 mm,宽度为 2~8 mm,经过筛选,将其按个体形状、大小的不同分为 3 类,分别是: I 类(长度小于 60 mm,宽度小于 3 mm)、II 类(长度居于 60~130 mm 之间,宽度居于 3~6 mm 之间)和 III 类(长度大于 130 mm,宽度大于 6 mm),并分别装入塑料袋内密封保存,以备试验使用。试验在 WSM 计算机控制万能试验机上进行,其软件程序的采样间隔为 0.12 s。

影响揉碎玉米秸秆可压缩性的因素很多,本文主要考察喂入揉碎玉米秸秆含水率、初始密度以及压缩速度对其可压缩性的影响。首先,分别选择 49.33%、40.21%、32.75%、23.87% 和 15.68% 5 种含水率的揉碎玉米秸秆。其次,结合专门的压缩装置(压缩室是底面半径 45 mm、高 150 mm 的圆柱形空腔,活塞和压缩室底面各均匀分布 6 个通气孔,其半径为 3 mm),根据农业纤维物料压缩生产常见喂入初始密度 20~50 kg/m³,选取喂入量为 16.5、20.7、24.8、28.9、33.1 g/次。最后,根据万能试验机所能提供的压缩速度范围选取 5、50、100、150、200、250、300、350、400、450、500 mm/min 11 种压缩速度对揉碎玉米秸秆的可压缩性进行交互试验研究。

试验时,首先测定含水率,并按预选喂入量在 Famous 电子天平上称重,喂入时按随机杂乱的排列方式,均匀地装入压缩装置中,尽量减少均匀度不同引起的试验差异。为了保证初始密度,在压缩室内壁距开口端 20 mm 处作了标记线,每次喂入的揉碎玉米秸秆必须高于此刻线,此时将活塞压入,保证活塞上端面与压缩室开口端面平齐,这样通过活塞本身 20 mm 的高度就能控制每次喂入的初始密度。最后设定试验机的软件程序即可开始试验。相同压缩条件的试验重复 3 次,对结果求平均值。

2 结果处理及分析

根据体积模量 K 的定义可以推出体积模量 K 与压缩力、压缩量之间的关系。由压缩装置 $p = F/(S - S')$, $V = Sl$,所以

$$K = -\frac{dp}{dV}V = -\frac{d\left(\frac{F}{S-S'}\right)}{d(Sl)}Sl = -\frac{10^6 l}{(S-S')} \frac{dF}{dl} = -\frac{10^6(l_0-l')}{(S-S')} \frac{dF}{d(l_0-l')} = \frac{10^6(l_0-l')}{(S-S')} \frac{dF}{dl'} \quad (1)$$

压缩密度与压缩量的关系为

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{Sl} = \frac{m}{S(l_0-l')} \quad (2)$$

式中 p ——压力,MPa F ——压缩力,N
 S ——压缩活塞面积,mm²
 S' ——压缩活塞上气孔面积,mm²
 l ——压缩过程中揉碎玉米秸秆的高度,mm
 l_0 ——揉碎玉米秸秆原始高度,mm
 l' ——压缩量,mm
 V ——揉碎玉米秸秆的体积,mm³
 m ——揉碎玉米秸秆喂入量,g
 ρ ——压缩密度,即压缩过程中揉碎玉米秸秆的密度,kg/m³

由试验测得压缩力 F 随压缩量 l' 变化的试验数据,通过应用软件 Matlab 编程,进行数值微分求得 dF/dl' ,再通过式(1)、(2)得出揉碎玉米秸秆体积模量与压缩量、压缩密度的关系曲线,见图 1、2。

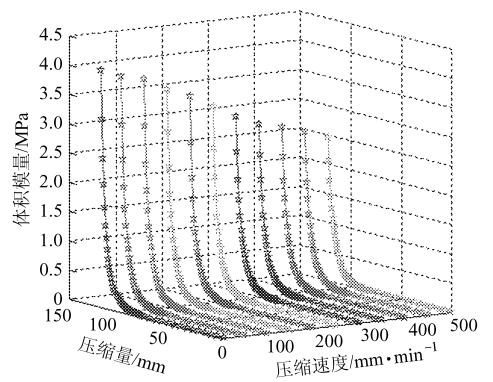


图 1 不同压缩速度下体积模量与压缩量关系曲线
 Fig.1 Bulk modulus with displacement of different compressing velocities

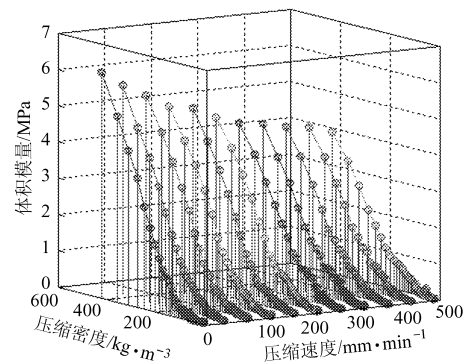


图 2 不同压缩速度下体积模量与压缩密度关系曲线
 Fig.2 Bulk modulus with compressing density of different compressing velocities

由图 1 可得出,当压缩量小于 105 mm 时,不同的压缩速度对揉碎玉米秸秆体积模量的变化虽然有影响,但变化幅度小,规律不明显;而当压缩量大于 105 mm 时(或对应图 2 的压缩密度大于 230 kg/m³ 以后),压缩速度对揉碎玉米秸秆体积模量的影响加

大,压缩量相同时(或对应图2相同压缩密度时),体积模量随压缩速度的增加而显著减小。这说明对同一初始密度揉碎玉米秸秆压缩时,压缩速度越大,揉碎玉米秸秆可压缩性越好,此时揉碎玉米秸秆越容易被压缩。相反,体积模量呈增大的趋势,揉碎玉米秸秆可压缩性呈下降趋势,揉碎玉米秸秆体现出越不易被压缩的特性。

由图1、2可知当压缩密度大于 230 kg/m^3 时,揉碎玉米秸秆物料群体特性发生改变,群体间隙已经很小,已被压得很实,接近固体特性。所以压缩力增加很快,物料群体特性向进一步致密化、均一化、各向同性化方向发展的速度减慢,其体积模量也趋于快速增加,可压缩性明显下降。

2.1 体积模量与压缩密度的数学模型

根据图2中的曲线形状,将试验所得数据用Matlab软件编程,分别用多项式模型、幂函数模型和指数函数模型等进行回归分析,结果发现指数曲线模型 $K = 1.07 \times 10^{-6} e^{16.480(1-30/\rho)}$ 回归平方和为139.164,比残差平方和0.181大得多,同时相关系数 $R^2 = 0.998$ 也较大。因此,揉碎后玉米秸秆的体积模量与压缩密度关系用指数曲线模型 $K = ae^{b(1-\rho_0/\rho)}$ 表示较理想,式中 ρ_0 为初始密度。

2.2 压缩速度对揉碎玉米秸秆可压缩性的影响

图3是喂入含水率15.68%的Ⅱ类揉碎玉米秸秆,初始密度 30 kg/m^3 压缩时,压缩密度200、250、300、350、400 kg/m^3 对应不同压缩速度下的体积模量变化曲线。由图中可以看出当压缩密度相同时,体积模量随压缩速度的增加而减小,这说明当喂入初始密度一定时,在相同的压缩密度下,压缩速度越大,揉碎玉米秸秆的可压缩性也越好;相反,可压缩性越差。且通过回归分析,得到体积模量与压缩速度近似符合线性的函数关系。同时发现其压缩速度越小,拟合直线的斜率越大,表明同样初始密度时,压缩速度越小,体积模量值随压缩密度的增加越快。

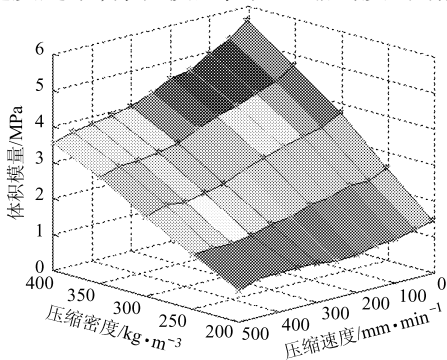


图3 不同压缩速度下体积模量与压缩密度关系曲线
Fig.3 Bulk modulus with compressing density of different compressing velocities

其原因是同一初始密度以不同压缩速度压缩时,压缩揉碎玉米秸秆过程中变形的形式发生了改变。其发生的粘弹变形、塑性变形和惯性变形的比例进行了重新分配,而压缩揉碎玉米秸秆的阻力主要来源于秸秆变形阻力,各种变形需要的压缩力是不同的,进而引起物料表现出不同的可压缩性^[10]。

2.3 初始密度对揉碎玉米秸秆可压缩性的影响

图4是喂入含水率15.68%的Ⅱ类揉碎玉米秸秆,以 5 mm/min 速度压缩时,不同初始密度下体积模量值与压缩量变化曲线。由图4可以看出,当压缩量小于 105 mm 时,不同的喂入初始密度对揉碎玉米秸秆体积模量的变化影响不明显,而当压缩量大于 105 mm 时,喂入初始密度对揉碎玉米秸秆体积模量的影响趋势加快。此种情况下,对应相同的压缩量时,喂入初始密度越大,即压缩密度也越大,由图4可以看出体积模量也越大,揉碎玉米秸秆越不易被压缩。通过数学插值方法,找出了压缩速度 5 mm/min 的条件下,压缩密度从 $200 \sim 400\text{ kg/m}^3$ 时揉碎玉米秸秆体积模量与初始密度的试验数据,绘制了不同压缩密度下揉碎玉米秸秆体积模量与初始密度的关系曲线,如图5所示。这主要是因为不同的喂入初始密度,在压缩容器内形成的均匀性水平不同,喂入秸秆物料之间的间隙不同,它将直接影响压缩过程中的压缩密度;同时,不同的喂入初始密度意味着趋向于均一化的速度不同,同样影响其压缩过程中的压缩密度;其次,不同初始密度在压缩达到相同压缩密度时,所表现出的径向膨胀力不同。因此,影响其可压缩性的大小。

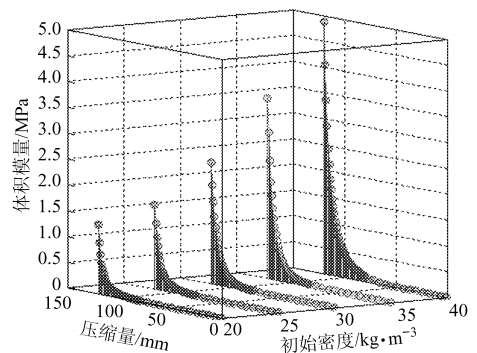


图4 不同初始密度下体积模量与压缩量关系曲线
Fig.4 Bulk modulus with displacement of different initial densities

由图5可以得出,对于相同压缩密度,随着初始密度的增加,揉碎玉米秸秆压缩时的体积模量有增大趋势,其可压缩性变差。而且,压缩密度越大,随着初始密度的增加,体积模量增加越快,揉碎玉米秸秆越不易被压缩。同时,图中每条线的走势也接近线性,其变化的规律性同样可以通过拟合方程的斜

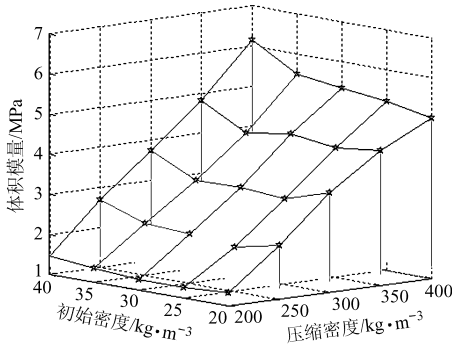


图 5 不同初始密度下体积模量与压缩密度关系曲线
Fig. 5 Bulk modulus with compressing density of different initial densities

率值来分析。结果发现压缩密度为 400 kg/m^3 时, 初始密度与体积模量拟合直线的斜率值最大, 其他密度值对应拟合斜率值随压缩密度的减小而依次减小。这表明初始密度越大, 其体积模量对较大的压缩密度反映越强烈。

2.4 含水率对揉碎玉米秸秆可压缩性的影响

图 6 是喂入 II 类揉碎玉米秸秆, 初始密度为 30 kg/m^3 , 以 200 mm/min 速度压缩时, 不同含水率下体积模量与压缩密度关系曲线。由图中可看出, 当压缩密度大于 200 kg/m^3 时, 随着含水率的降低, 体积模量逐渐增大, 物料抵抗变形的能力逐渐增强。说明含水率越小, 揉碎玉米秸秆的可压缩性越差。相反, 含水率越高体积模量越小, 可压缩性越好, 即较湿的物料可以用较小的压力获得较大的压缩密度。而当压缩密度小于 200 kg/m^3 时, 没有明显的规律性。主要原因在于同样的初始密度, 含水率越高, 木质素等干物质含量越少, 而膨胀阻力主要来源于干物质的变形阻力。另外, 含水率越高润滑性越好, 减小两方面的摩擦: 一方面含水率高使得物料间的内摩擦变小, 压缩时用于克服物料间内摩擦的压缩力变小; 另一方面物料湿度大使物料与压缩室侧壁的摩擦因数变小, 由此产生的摩擦力也有所减小, 而且自然状态下, 湿物料较干物料茎秆间的空隙小,

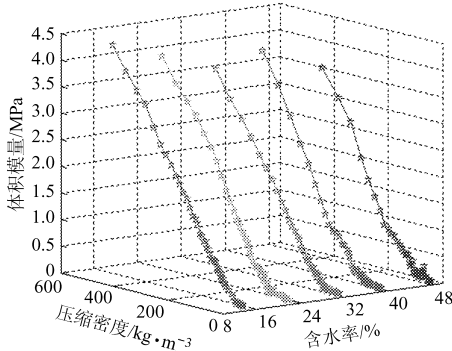


图 6 不同含水率下体积模量与压缩密度关系曲线
Fig. 6 Bulk modulus with compressing density of different moisture contents

所以达到相同的密度, 用于克服物料间空隙的压缩力就相对较小。

2.5 揉碎玉米秸秆不同个体形状对其可压缩性的影响

图 7 是含水率为 15.68% 的揉碎玉米秸秆, 初始密度为 30 kg/m^3 , 以 150 mm/min 速度压缩时, 不同个体形状的揉碎玉米秸秆体积模量与压缩量关系曲线。由图中可看出, 在压缩初期 (压缩量小于 105 mm), 获得相同的压缩量, 体积模量大小无显著差异, 只是 III 类揉碎玉米秸秆的曲线波动较大; 但在压缩后期, 获得相同的压缩量, 体积模量随揉碎玉米秸秆个体形状的不同而稍有区别, 同时, 压缩量达到 123 mm 以后 III 类曲线的体积模量最大, 表明可压缩性相对最差。然而总体来讲, 在压缩密度小于 400 kg/m^3 时, 揉碎玉米秸秆个体形状对其可压缩性的影响很小。其原因是揉碎玉米秸秆压缩过程中的可压缩性与其物料间的孔隙和内摩擦有直接的关系。I 类揉碎玉米秸秆群体的孔隙较少, 相对较均匀, 而 III 类揉碎玉米秸秆相互缠绕且孔隙较多, 均匀性较差, 因此压缩时膨胀力波动较大。

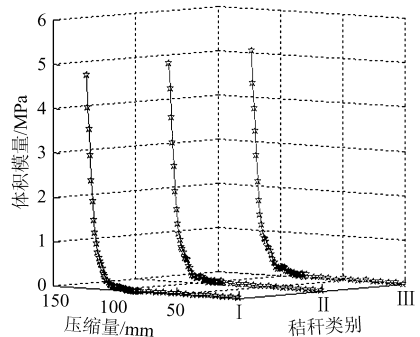


图 7 不同个体形状下体积模量与压缩密度关系曲线
Fig. 7 Bulk modulus with compressing density of different forms

3 结论

(1) 揉碎后玉米秸秆的可压缩性曲线可表示为指数模型 $K = ae^{b(1-\rho_0/\rho)}$ 。

(2) 在玉米秸秆品种、含水率、排列形式和压缩室形状等都确定的前提下, 当达到相同的压缩密度时, 揉碎玉米秸秆的可压缩性随压缩速度的增大而改善。当初始密度不同, 同样的压缩速度且达到相同的压缩密度时, 揉碎玉米秸秆的体积模量随喂入初始密度的增大而增大, 压缩密度越大, 这种变化趋势越明显; 且当压缩密度大于 230 kg/m^3 时, 随压缩密度的继续增加, 可压缩性趋于减小的速度加快。

(3) 含水率对压缩过程有一定影响。在玉米秸秆品种等因素都确定的前提下, 随着含水率的增加,

可压缩性较好。

(4) 在玉米秸秆品种等因素都确定的前提下,当压缩密度小于 400 kg/m^3 时,揉碎玉米秸秆个体形状对其可压缩性影响较小,只是在压缩量达到

120 mm 以后,体积模量值稍有区别,且Ⅲ类的可压缩性最差。

(5) 玉米秸秆的可压缩性表明,揉碎后玉米秸秆的最佳压缩密度为 230 kg/m^3 左右。

参 考 文 献

- 1 O'Dogherty M J. A review of the mechanical behaviour of straw when compressed to high densities[J]. The British Society for Research in Agricultural Engineering, 1989, 44: 241~265.
- 2 Faborode M O, O'Callaghan J R. A rheological model for the compaction of fibrous agricultural materials[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1989, 42(3): 165~178.
- 3 孟海波,韩鲁佳. 秸秆物料的特性及其加工利用研究现状与应用前景[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(6): 38~41.
Meng Haibo, Han Lujia. Analysis of application and prospects and study status of the processing properties of straw materials [J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(6): 38~41. (in Chinese)
- 4 王春光,杨明韶,高焕文. 农业纤维物料压缩流变研究现状[J]. 农业机械学报, 1998, 29(1): 141~144.
Wang Chunguang, Yang Mingshao, Gao Huanwen. Compressing and rheological study on agricultural fibrous materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(1): 141~144. (in Chinese)
- 5 郭康权,杨中平,薛少平,等. 玉米秸秆颗粒燃料成型的试验研究[J]. 西北农业大学学报, 1995, 23(3): 106~108.
Guo Kangquan, Yang Zhongping, Xue Shaoping, et al. Pelletized fuel formation of cornstalk [J]. Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis, 1995, 23(3): 106~108. (in Chinese)
- 6 高梦祥,郭康权,杨中平,等. 玉米秸秆的力学特性测试研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 47~52.
Gao Mengxiang, Guo Kangquan, Yang Zhongping, et al. Study on mechanical properties of cornstalk [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 47~52. (in Chinese)
- 7 高德,刘壮,孙智慧. 秸秆纤维 EPS 缓冲包装材料性能的研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 201~204.
Gao De, Liu Zhuang, Sun Zhihui. Study on the properties of cushioning package material made of corn straw and EPS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8): 201~204. (in Chinese)
- 8 Wang Chunguang, Dai Shaocong, Roger Tanner. On the compressibility of bread dough [J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2006, 18(3): 127~131.
- 9 王洪波,王春光. 不同因素对牧草可压缩性的影响[J]. 农机化研究, 2007, 12(12): 124~127.
Wang Hongbo, Wang Chunguang. Influence of different factors on the compressibility of hay [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 12(12): 124~127. (in Chinese)
- 10 杜健民. 新鲜草物料压缩过程的流变学研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
Du Jianmin. The experimental study on rheology of fresh herbage materials in the process of the compression [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2005. (in Chinese)