

马铃薯渣可压缩性研究

Study on the Compressibility of Potato Residue

高晶晶¹ 郭文斌² 郁志宏²

GAO Jing-jing¹ GUO Wen-bin² YU Zhi-hong²

(1. 内蒙古商贸职业学院, 内蒙古 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

(1. Inner Mongolia Business & Trade Vocational College, Hohhot, Inner Mongolia 010070, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

摘要:通过对马铃薯渣进行压缩试验, 获取了应力-应变曲线变化规律及回归模型, 发现薯渣压缩过程可以分为松散、过渡、压紧3个阶段, 得到了表征物料可压缩性的体积模量和比能耗等参数。同时分析了压缩密度、压缩速率和喂入量对物料可压缩性及压缩能耗的影响, 结果表明: 压缩至过渡阶段, 薯渣能够保持较好的可压缩性, 避免出现由于压力急增造成的能耗加剧, 有利于生产加工; 此外, 压缩速率越高, 薯渣达到同一应变时产生的压力和比能耗越大, 进入压紧阶段后的可压缩性越差; 而喂入量越大薯渣的可压缩性越好, 比能耗也越小。因此, 实际加工时可将薯渣压至过渡阶段压缩密度范围, 并通过调节喂入量改善其可压缩性, 以兼顾生产效率与能耗, 进而优化薯渣的前处理工艺。

关键词: 马铃薯渣; 可压缩性; 体积模量; 压缩密度; 比能耗

Abstract: A large amount of reusable potato residues were obtained from starch production, and its compressibility had great effect on the production process selection and the design of equipment. The compressibility of potato residue was experimentally studied, and the stress-strain curve was measured and regressed. The results showed that the potato residue experienced three stages of being loose, transitional and tight during the compression, and the parameters, related to the compressibility, were obtained, such as bulk modulus and specific energy consumption. In the study, the compressibility and energy consumption under different compression rates and different feed quantities were also analyzed, and the results indicates that potato residue could have good compressibility until it was compressed to the transition stage (the density is 750~1 150 kg/m³).

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目(编号: 2014BS0319); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(编号: NJZC16402); 内蒙古自治区人才基金项目

作者简介: 高晶晶, 女, 内蒙古商贸职业学院讲师, 硕士。

通信作者: 郭文斌(1981—), 男, 内蒙古农业大学讲师, 博士。

E-mail: wenbingwb2000@sina.com

收稿日期: 2017-12-08

This was due to the low pressure and low specific energy consumption. When potato residue was compressed to the same strain, the compression rate was related to the pressure, specific energy consumption and the feed quantity. Therefore, compressing to the density of transitional stage and adjusting feed quantity could help to improve the compressibility of potato residue, both for increasing production efficiency and reducing energy consumption, and its pre-treatment process would be optimized finally.

Keywords: potato residue; compressibility; bulk modulus; compression density; specific energy consumption

作为中国北方地区主要农作物收获及加工后剩余的残留物, 马铃薯渣每年秋冬季产量巨大, 富含淀粉、纤维素、果胶、蛋白质等有用成分, 具有松散、含水率高、易腐败造成污染等特点^[1-2], 使得马铃薯渣加工处理能耗高、处理技术手段落后、再利用率低。目前薯渣经机械脱水后含水率约为60%, 作为可以二次利用的生物质原料, 国内外对其进行开发利用主要集中在制备饲料及燃料, 用于制作培养基、粘结剂、包装材料, 提取制备果胶、膳食纤维等方面^[3-7], 但由于处理成本高、储运困难、转化收益小, 大部分开发利用方法仍停留在研发阶段, 未发展成为大规模工业化生产。为降低薯渣的处理成本、解决其储运难的问题, 本研究针对马铃薯渣松散的特点, 以冷态下单轴压缩的方法对不同条件下薯渣的可压缩性进行试验研究与分析, 为其前处理及再利用过程中的压缩成型提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

马铃薯废渣: 内蒙古呼和浩特市淀粉加工企业提供, 经前处理脱水后, 含水率为(60±2)%, 为防止物料腐败变质并减少其水分的散失, 试验前将薯渣分装后在2~4℃环境下冷藏保存, 并于1周内完成相关试验。

1.2 试验装置

可压缩性试验主要采用 WAW-200C 微机控制电液伺服万能试验机配以自制的闭式压缩装置^[8] (见图 1) 完成, 压缩装置由活塞与压缩筒组成, 其中压缩筒内径 95 mm, 深 190 mm, 底部开有导流孔以便压缩过程中排出气体与水分; 薯渣含水率的测定通过电子天平与电热恒温鼓风烘箱完成。

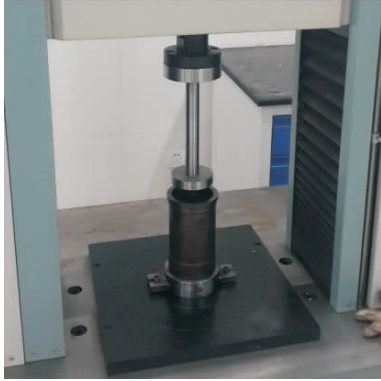


图 1 薯渣闭式压缩试验装置

Figure 1 Compression equipment with closed mold for potato pulp

1.3 试验方法

试验采用单轴压缩的方式完成, 将薯渣按 100, 300, 500 g 3 种不同喂入量喂入压缩筒, 均匀堆积后, 以 10, 20, 30 mm/min 速率压缩, 得到应力-应变曲线, 相同条件下试验重复 3 次。试验过程由提前计算设定好的分段程序控制, 薯渣受压时通过计算机自动采集计算力、位移与时间数据, 对所得数据回归分析建立模型后, 获取相关力学特性参数, 并以此分析压缩过程中薯渣可压缩性变化规律及压缩速率、喂入量对可压缩性、压缩能耗的影响。

1.4 数据处理

为获取压缩薯渣时应力随应变变化的规律, 根据压缩试验所得马铃薯渣应力-应变曲线, 参考相关农业物料压缩曲线回归模型^[9-12], 并应用统计分析软件 SPSS 进行曲线估计 (Curve Estimation) 后, 确定薯渣应力-应变曲线回归模型见式(1), 回归决定系数 $R^2 > 0.99$, 薯渣应力-应变关系曲线 (压缩速率 10 mm/min) 及回归拟合曲线见图 2。

$$\sigma = ae^{b(\epsilon-c)} + d\epsilon + f, \quad (1)$$

式中:

σ ——压应力, MPa;

ϵ ——应变;

a, b, c, d, f ——待定系数。

由图 2 可以看出, 压缩初期随着应变的增加, 物料所受应力增长缓慢且应力值较小, 应力与应变关系接近于线性; 随着薯渣密度进一步增大, 当应变达到一定程度时 (图 2 中应变达到约 0.6 时), 应力随应变增加而增长的速率逐渐加快, 曲线在较短时间内出现转折, 应力与应变的非线性关系显现, 随后应力随应变增加而增长的速率继续加快。为获取应力随应变变化的转折点, 本研究以割线模量 E_g 与切线模

量 E_q ^[13] 的比值 r 为判定参数, 其值随应变增加而变化的规律见图 3。压缩过程中, 由于薯渣所产生的应力与应变间存在非线性关系, 试验所得曲线各点处割线模量均小于切线模量, 模量比 $r < 1$ 。压缩初期主要为物料填充间隙的松散阶段^[14], 应力值、应变值较小, 受机器振动及环境因素等造成的误差影响较大, 模量比 r 值在一定范围内波动; 如图 3 所示, 随着应变的增加, E_g 与 E_q 的值逐渐接近, 二者比值 r 呈稳定上升趋势, 应变达到 0.613 时 r 达到最大值 ($r_{\max} = 0.72$), 此时应力-应变曲线最接近线性, 取模量比 r 最大时应力-应变曲线上的对应点为转折点 1, 此时的应力与应变为 σ_1, ϵ_1 ; 随后曲线进入过渡阶段, 切线模量 E_q 迅速增加, 其增速高于割线模量 E_g 的增速, 模量比 r 下降, 直至过渡阶段结束开始进入应力急速上升的压紧阶段^[14], 当应变达到 0.697, 模量比达到最小值 $r_{\min} = 0.014$ 时, 取对应点为进入压紧阶段的转折点 2, 其应力与应变为 σ_2, ϵ_2 ; 随后切线模量 E_q 趋于稳定, 而割线模量 E_g 的继续增加, 模量比 r 逐渐上升, 直至压缩试验结束。

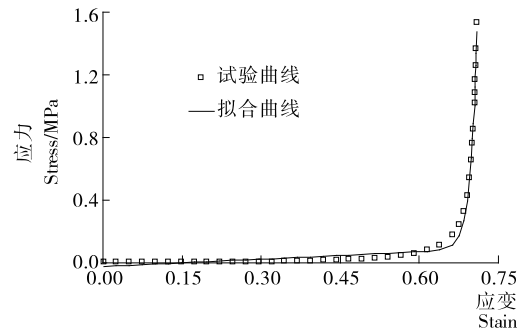


图 2 薯渣压缩应力-应变曲线及拟合曲线

Figure 2 Stress-strain curve and fitted curve of compression test using potato pulp

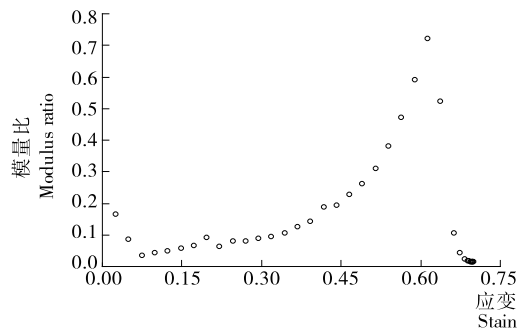


图 3 薯渣压缩过程中模量比的变化规律

Figure 3 The variation of modulus ratio in compression test of potato pulp

2 结果与分析

松散农业物料的可压缩性为外力作用下, 密度增大或体积减小的特性或能力, 常以体积模量来表征^[9-12], 体积模量越大物料越不易被压缩, 可压缩性越差。根据薯渣压缩试验所得应力随应变变化的规律, 可得到体积模量表达式:

$$K = -\frac{d\sigma}{dV/V}, \quad (2)$$

式中:

K ——体积模量,MPa;

σ ——压应力,MPa;

V ——物料体积, mm^3 。

为获取压缩单位质量薯渣时所需能耗^[15-17],根据所得薯渣应力-应变曲线可得比能耗的计算表达式:

$$U = \frac{S_0 l_0}{m} \int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma d\epsilon, \quad (3)$$

式中:

U ——压缩薯渣过程中的比能耗,J/kg;

σ ——压应力,MPa;

ϵ ——应变;

l_0 ——压缩时物料的初始高度,mm;

S_0 ——压缩活塞的面积, mm^2 ;

m ——薯渣质量,kg。

2.1 压缩密度对薯渣可压缩性的影响

薯渣压缩过程中,随着压力增加,物料应变、压缩密度的增长呈先快后慢的规律变化,为分析该变化规律对薯渣可压缩性的影响,本研究通过确定物料压缩过程中体积模量的变化规律,分析不同压缩密度(不同应变)下物料的可压缩性。由图 4 可以发现,随着物料压缩密度 ρ 的增加,体积模量 K 先缓慢增加,进入过渡阶段后增速加快,随后急速上升,其变化与图 2 中应力变化趋势相似。因此,薯渣的可压缩性随着其压缩密度的增加也按照一定规律变化,在物料压缩至过渡

阶段转折点应变 ϵ_1 之前,体积模量较小且增加缓慢,物料较容易被压缩,可压缩性较好;压缩至过渡阶段(应变介于 ϵ_1 与 ϵ_2 之间),体积模量增速加快,物料可压缩性逐渐变差;薯渣压至转折点应变 ϵ_2 之后,进入压紧阶段,物料在较短时间内变得越来越不容易压缩,直至试验结束达到最大应变 $\epsilon_{\max}$,此时体积模量快速增加至最大值。为获取压缩过程中上述转折点处物料体积模量、比能耗等关键参数,给薯渣的压缩成型及加工提供参考,求得以不同速率压缩至密度 $\rho_{\max} = 1\,131.836\text{ kg/m}^3$ (应变 $\epsilon_{\max} = 0.710$)过程中,薯渣应力-应变曲线转折点应变、压缩密度、体积模量及比能耗 U_1 、 U_2 、 $U_{\max}$ 见表 1。

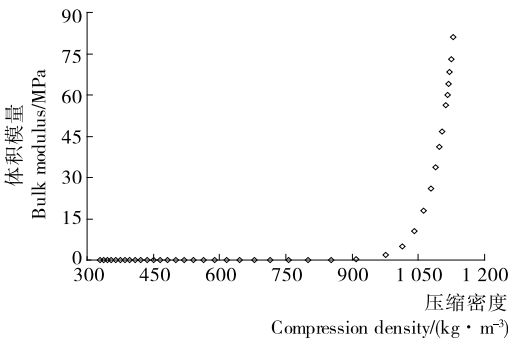


图 4 体积模量与压缩密度的关系曲线

Figure 4 Relationship between bulk modulus and compression density

表 1 不同速率下应力-应变曲线转折点的应变、压缩密度、体积模量及比能耗

Table 1 The strain, compression density, bulk modulus and specific energy consumption of turning points in stress-strain curves at different rates

压缩速率/ (mm · min ⁻¹)	ϵ_1	ϵ_2	ρ_1 / (kg · m ⁻³)	ρ_2 / (kg · m ⁻³)	K_1 / MPa	K_2 / MPa	U_1 / (J · g ⁻¹)	U_2 / (J · g ⁻¹)	$U_{\max}$ / (J · g ⁻¹)
10	0.571	0.700	766.693	1 063.281	0.099	21.573	0.030	0.088	0.131
20	0.589	0.690	801.627	1 060.730	0.064	35.823	0.022	0.058	0.158
30	0.591	0.688	804.579	1 051.437	0.058	36.269	0.021	0.054	0.181

2.2 压缩速率对薯渣可压缩性的影响

图 5 为不同压缩速率(10,20,30 mm/min)下,喂入量为 100 g 时,薯渣压缩过程中应力随应变变化的曲线。由图 5 可知,在压缩初期的物料松散阶段,不同压缩速率下应力-应变变化规律较为接近;而当薯渣压缩至过渡阶段,不同速率下物料应力-应变变化规律开始出现差异;在进入压紧阶段后,压缩速率越高应力随应变增加越快,达到应变 $\epsilon_{\max}$ 时产生的压力越大,压缩至 $\epsilon_{\max}$ 的比能耗 $U_{\max}$ 也越大(表 1)。根据表 1 数据显示,不同压缩速率下,将薯渣压至过渡阶段所需的应变、压缩密度、比能耗比较接近;压缩速率越小,进入过渡阶段的应变 ϵ_1 与压缩密度 ρ_1 越小,而进入压紧阶段的应变 ϵ_2 与压缩密度 ρ_2 越大,同时压至过渡阶段和压紧阶段的比能耗 U_1 、 U_2 也越大。此外,薯渣以 10,20,30 mm/min 速率压至过渡阶段时,速率越高体积模量 K_1 越小,但随后速率越高体积模量增加越快,在进入压紧阶段时压缩速率越高,体积模量 K_2 越大,薯渣可压缩性越差。

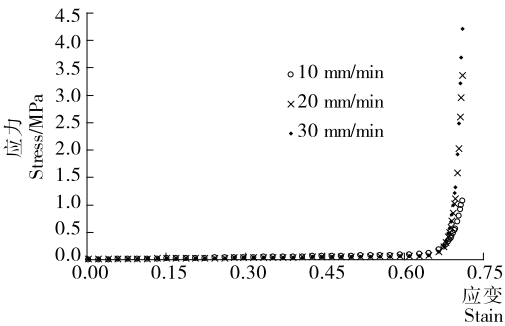


图 5 不同压缩速率下应力-应变关系曲线

Figure 5 Stress-strain curves at different compression rates

2.3 喂入量对薯渣可压缩性的影响

表 2 为不同喂入量(100,300,500 g)下,薯渣以 10 mm/min 的速率压缩至密度 $\rho_{\max} = 1\,168.273\text{ kg/m}^3$ 过程中所获取的应力-应变曲线转折点应变、压缩密度、体积模量及压至不同阶段的比能耗(U_1 、 U_2 、 $U_{\max}$)。由表 2 可知,不同

表 2 不同喂入量下应力-应变曲线转折点应变 ϵ 、压缩密度 ρ 、体积模量 K 及比能耗

Table 2 The strain, compression density, bulk modulus and specific energy consumption of turning points in stress-strain curves at different feed quantities

喂入量/ g	ϵ_1	ϵ_2	$\rho_1 /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\rho_2 /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$K_1 /$ MPa	$K_2 /$ MPa	$U_1 /$ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	$U_2 /$ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	$U_{\max} /$ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)
100	0.521	0.641	853.932	1 140.303	0.070	19.006	0.022	0.056	0.072
300	0.530	0.644	870.936	1 147.527	0.093	17.986	0.009	0.022	0.025
500	0.505	0.644	826.550	1 149.000	0.096	14.326	0.007	0.016	0.018

喂入量下,将薯渣压至过渡阶段和压紧阶段所需的应变(ϵ_1 、 ϵ_2)、压缩密度(ρ_1 、 ρ_2)均比较接近;而喂入量越大,薯渣压至过渡阶段和压紧阶段时的体积模量(K_1 、 K_2)越小,物料的可压缩性越好,因此同等条件下增加薯渣的喂入量可以在一定程度上改善物料整体的可压缩性。此外,不同喂入量下,薯渣压至不同阶段时的比能耗也不同,其中喂入量为 100 g 时薯渣压至过渡阶段和压紧阶段转折点处的比能耗 U_1 、 U_2 以及压至密度 $\rho_{\max}$ 处的比能耗 $U_{\max}$ 均最大,而喂入量为 300 g 和 500 g 时,比能耗 U_1 、 U_2 、 $U_{\max}$ 依次减小,即喂入量越大薯渣压缩至不同阶段所需的比能耗越小。

3 结论

(1) 马铃薯渣受压过程中应力随应变增加而变化的规律呈现非线性,以模量比 r 为判定参数,可以将其压缩过程划分为松散、过渡、压紧 3 个阶段,通过各阶段转折点参数的分析可以确定,薯渣压至过渡阶段压缩密度范围($766 \sim 1\,149\text{ kg/m}^3$)时,可以兼顾生产效率与能耗,既保证了加工过程中薯渣有较好的可压缩性,又能防止由于压缩密度太大导致压力与能耗急增,其结果为薯渣前处理工艺的优化提供了参考。

(2) 不同速率下,薯渣压至压紧阶段的应力-应变曲线差异明显,速率越高应力随应变增加越快,体积模量越大,薯渣可压缩性越差,压缩过程比能耗也越大,因此实际生产时可以对薯渣的不同压缩阶段,考虑采用不同的速率加载,提高加工效率的同时降低能耗。此外,研究结果表明,喂入量的增加一定程度上会影响物料体积模量,改善物料整体的可压缩性,降低比能耗。

马铃薯渣的可压缩性研究为其高效、低成本的生产加工提供了必要的理论与技术参考,但就如何选择合适的加工、保压方式而言,后续还应就薯渣的流变学特性作进一步分析与探讨。

参考文献

[1] 沈群. 薯类加工技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010: 181-193.
[2] 余平, 石彦忠. 淀粉与淀粉制品工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011: 119.
[3] XUE Ling-feng, LI Peng-fei, ZHANG Rong-fei, et al. Use of Fermented Potato Pulp in Diets Fed to Lactating Sows[J]. Journal of Animal and Veterinary Advances, 2011, 10(15): 2 032-2 037.

[4] 负建民, 刘陇生, 安志刚, 等. 马铃薯淀粉渣生料多菌种固态发酵生产蛋白饲料工艺[J]. 农业工程学报. 2010, S2: 399-404.
[5] OBIDZINSKI Slawomir. Utilization of post-production waste of potato pulp and buckwheat hulls in the form of pellets[J]. Pol. J. Environ. Stud., 2014, 23(4): 1 391-1 395.
[6] SAITO Katsuichi, NODA Takahiro, TSUDA Shogo, et al. Effect of the dates of extraction on the quality of potato pulp[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(18): 2 470-2 473.
[7] 吕金顺, 杨声, 王小芳, 等. 马铃薯渣制膳食纤维的工艺研究[J]. 中国马铃薯, 2001, 15(6): 332-334.
[8] 郭文斌, 高晶晶, 德雪红. 薯渣开闭式压缩成型装置的设计研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 59-62.
[9] 王洪波. 羊草可压缩性及其应力松弛特性的虚拟样机分析研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007: 14-43.
[10] 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: 12-32.
[11] 范林, 王春光, 王洪波, 等. 揉碎玉米秸秆可压缩性研究[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 76-80.
[12] 张旭, 王春光. 温度对揉碎柠条可压缩性的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 150-154.
[13] 周祖饬. 农业物料学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 40-50.
[14] 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.
[15] 杨晓清. 河套蜜瓜流变特性及储运损伤控制的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2006: 15-20.
[16] 郑胜, 王佳欣, 张同开. 模拟利用太阳能预处理玉米秸秆压缩成型试验[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(8): 261-264.
[17] SUDHAGAR Mani, LOPE G Tabil, SHAHAB Sokhansanj. Specific energy requirement for compacting corn stover [J]. Bioresource Technology, 2006, 97(12): 1 420-1 426.