

# 生物质常温开模压缩成型直筒参数的研究

宋晓文,俞国胜,姜晨龙,杜珂,郭晓霞

(北京林业大学 工学院,北京 100083)

**摘要:**生物质常温开模压缩成型块状燃料技术是制造生物质成型燃料的技术之一,比加热成型技术和常温闭模成型技术工艺更加简化,生产过程更加节能。开模成型套筒的直径长度比参数为设计过程中的关键因素。通过对生物质的常温开模压缩试验,推导了物料与成型筒之间摩擦力分布规律、直径长度比值参数。对致密成型的侧压力、摩擦力分析结果表明,试验结果与理论分析结果一致。

**关键词:**生物质;开模成型;直筒参数

**中图分类号:**S776

**文献标识码:**A

**文章编号:**1002-2767(2011)11-0036-03

面对传统三大能源资源的日益枯竭,世界各国目前都致力于研究开发新的能源来代替或减缓不可再生能源的消耗。生物质能是仅次于石油、天然气和煤炭居世界能源消费总量的第四位能源,被认为是能源开发的热门领域。在生物质能源的利用中,生物质致密研究对生物质原料成为商品真正进入流通领域有重要意义<sup>[1]</sup>。生物质常温开式压缩成型按成型筒的形状分为锥筒和直筒两种。对于成型直筒,原料在活塞顶杆的作用下进入成型筒,并利用原料与成型筒之间的摩擦阻力和动摩擦力对松散物料进行挤压,当原料密度达到预期效果时被挤出成型直筒。生物质开模式压缩成型工艺具有生产连续、排出方便等优点,在一定程度上其应用性比闭模式更强。

## 1 生物质直筒开式成型的成型理论

生物质开模直筒压缩成型过程中,其物理模型属于轴对称问题,其应力应变关系从加载开始就表现为非线性的特性,没有明显的弹性阶段和初始屈服点,可用塑性成型理论描述,整个成型过程都是在简单加载条件下进行的,属于轴对称全量塑性压缩问题<sup>[2]</sup>。生物质与成型筒内壁之间存在两种力:挤压力与摩擦力,挤压力沿成型孔的径向分布,摩擦力沿成型孔的轴向分布,称为成型阻力。摩擦力会以两种方式存在:当物料与成型筒壁之间没有相对运动时为静摩擦反力;当物料与成型筒壁之间有相对运动时为动摩擦力。同时生物质物料成型过程中要受到液压缸提供的挤压

力。刚开始的几次压缩,物料不断填充入成型筒,密度不断增大,当建立起合适的成型阻力继续进行压缩时,活塞推动物料向前移动进入压变区,当物料接触到上一次压缩物料端面时,迅速靠紧,推力逐渐增大,过程中物料整体只发生轴向变形,随着活塞的前移,活塞压力急剧增大到最大,随着活塞的往复运动,不断被后来压入的物料往前推送,在成型筒径向力、筒壁和成型块之间轴向摩擦力、相邻成型块轴向相互作用力共同作用下,保持形状,同时伴随弹性恢复和应力松弛。被推出压模筒之后,还要进行轴向和径向变形恢复,经过一定时间后,才能保持恒定的变形,具有最终密度。其受力状况见图1。

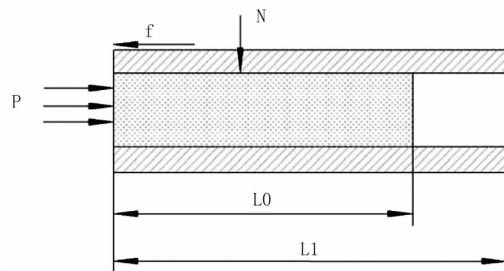


图1 生物质压缩过程的受力示意图

在挤压过程中,对物料做假设:(1)材料为各向同性的可压缩连续体;(2)作用于材料的惯性力和体积力不计;(3)塑性应变相比于弹性应变小很多;(4)物料在成型过程中遵循质量不变规律。

生物质可以看作是压缩的多孔体材料。公式(1)~(4)为众多对多孔体可压缩材料成型研究中表示的多孔体塑性理论:

$$\rho^2 \bar{\sigma}_{eq}^2 = \frac{3}{2} (\sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}) (\sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}) + \left[ \frac{\sigma_m}{f} \right]^2 \quad (1)$$

$$\bar{\epsilon}_{eq}^2 = \frac{2}{3} (d\epsilon_{ij} - d\epsilon_m \delta_{ij}) (d\epsilon_{ij} - d\epsilon_m \delta_{ij}) + [3d\epsilon_m]^2 \quad (2)$$

收稿日期:2011-07-10

基金项目:林业公益性行业科研专项(200904007)

第一作者简介:宋晓文(1986-),男,河北省保定市人,在读硕士,从事林业与园林机械设计研究。E-mail: fengmutou@hotmail.com。

通讯作者:俞国胜(1956-),男,浙江省宁波市人,博士,教授,从事林业与园林机械研究。E-mail:sgyzh@bjfu.edu.cn。

$$d\epsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{d\epsilon_{eq}}{\rho \sigma_{eq}} \left\{ \sigma_{ij} - \left[ 1 - \frac{2}{9f^2} \right] \sigma_m \delta_{ij} \right\} \quad (3)$$

$$d\epsilon_v = \frac{3}{2} \frac{d\epsilon_{eq}}{\rho \sigma_{eq}} \frac{2}{3f^2} \sigma_m \quad (4)$$

式中:  $\delta_{ij}$  是 Kronecker 符号, 当  $i = j$  时,  $\delta_{ij} = 1$ , 当  $i \neq j$  时,  $\delta_{ij} = 0$ ;  $\sigma_{ij}$  为应力张量、 $\epsilon_{ij}$  为应变张量, 其中  $i, j = x, y, z$  或  $1, 2, 3$ ;  $\rho$  是相对密度,  $d\epsilon_v$  是体积应变增量,  $\sigma_{eq}$  为等效应力、 $\epsilon_{eq}$  为等效应变;  $f = 1/a[(1-\rho)^m]$ ;  $\sigma_m = \frac{\sigma_{ij}}{3}$  表示静水压力,  $d\epsilon_m \approx \frac{d\epsilon_{ij}}{3}$ 。主应力为  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , 且有  $\sigma_2 = \sigma_3$ , 塑性主应变变量  $|d\epsilon_1^p| \gg |d\epsilon_2^p| = |d\epsilon_3^p|$  [3]。

挤压初始阶段, 原料处于松散状, 随着物料的不断填入, 成型筒内的物料密度不断增加, 一直达到预期需要的数值。物料与筒壁之间的接触压力  $N$  逐渐上升, 进而筒壁对物料的摩擦阻力  $f$  上升。当活塞提供的最大压力  $P$  一定时, 筒壁对成型生物质摩擦力的大小由筒壁长度  $L_1$  决定。对于特定的物料及成型筒直径, 其成型所需要的最佳长度  $L_0$  是确定的, 成型直筒长度  $L_1$  与  $L_0$  的关系决定了成型效果: (1) 当  $L_0 > L_1$  时, 成型筒内物料不能被压实, 很小的压缩力就将物料推出成型筒, 物料被挤出成型筒后松散分开, 将这种情况称为“不成型”, 代表被挤出物料的密度非常小; (2) 当  $L_0 < L_1$  时, 随着压缩循环次数的增多成型筒中物料逐渐增多, 物料与成型筒的摩擦力及物料之间的内摩擦力不断升高, 当物料的成型阻力大于液压系统的卸荷压力时, 活塞的最大推力也无法将其推出成型筒, 液压系统卸荷, 活塞停止压缩前进, 这种情况为“挤不出”, 代表成型筒内物料的密度非常高; (3) 当  $L_0 = L_1$  时, 介于“挤不出”和“不成型”之间的压缩情况是成型筒内物料建立了合适的成型阻力, 其值小于卸荷压力, 却又能将物料压缩达到一定密度, 使得挤出后的成型块不松散, 其压实程度用成型块密度值的大小反映。

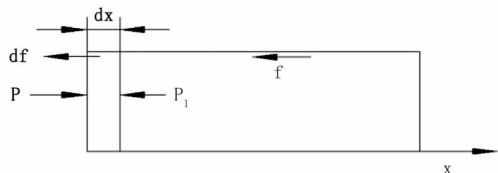


图2 生物质成型受力分析

根据多空塑性理论以及数学积分的方法, 从理论上推导生物质在成型过程中的受力情况, 由图2看出: 沿  $x$  轴方向取微段  $d_x$ , 对此微段进行受力分析, 则有  $P \times S = P_1 \times S + D_f$  (式中  $S$  为成型筒内径, 即生物质成型直径,  $D_f$  为微段  $d_x$  产

生的摩擦力,  $P$  为液压缸提供的挤压力), 假设压缩过程中生物质的长度为  $L$ , 则在  $L$  上对  $D_f$  积分。则在挤压过程中物料轴向受力平衡关系为:

$$P \times S = \int_L f \cdot d_x \quad (5)$$

对于微段  $d_x$  产生的摩擦力  $D_f$  可以根据数学推导得出:

$$D_f = 2 \times \pi \times r \times p(i) \times k \times f \times dx \quad (6)$$

式中  $r$  为成型筒半径,  $k$  为侧压系数,  $f$  为摩擦系数。同时可以推导出任意微段  $d_x$  两侧压强的迭代关系:

$$p(i+1) = p(i) - \frac{2 \times p(i) \times k \times f \times dx}{r} \quad (7)$$

由此, 式(5)可以表示为:

$$p \times S = 2 \times \pi \times r \times f \times k \int_L p(x) dx \quad (8)$$

将试验中各参数代入式(8),  $r = 0.03$  m, 摩擦系数  $f = 0.51$ , 系统压强  $P = 85$  MPa, 侧压系数  $K = 0.725$ 。根据数学理论推导可以得出所需要的  $L = 357$  mm。

## 2 生物质直筒开式成型试验

2005年北京林业大学俞国胜教授主持的《生物质成型燃料高压致密成型技术引进》项目, 对生物质常温高压致密成型方式进行了研究。在研究生物质常温成型机理的基础上, 研制、开发了一种生物质常温开模成型实验台, 实验台选用林业与园林实验室现有的液压成套系统和液压缸, 液压系统是山东液压机械制造总公司生产, 型号 BLD-

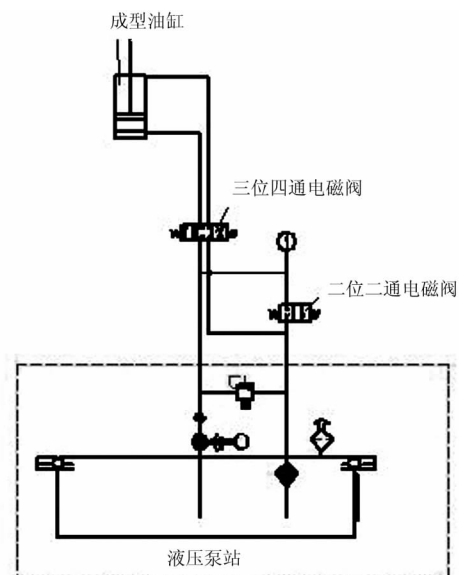


图3 液压传动示意图

32,总功率 11 kW,公称压力 25 MPa,总流量  $45 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 。固结在液压缸活塞杆前端的活塞杆与物料直接接触压缩,该活塞杆径 60 mm。电机带动齿轮泵给液压缸供油,驱动活塞进行往复运动,对物料进行间歇挤压<sup>[3]</sup>。

压缩试验材料选用木材加工剩余的小木屑,其含水率经测试在 7%~9%,采用 SC69-02 型水分快速测定仪和 DT300A 电子天平等实验仪器配合进行原料的水分测定。压缩成型筒直径为 60 mm,长度分别为 450、425、415、400、385、370、360、350 和 335 mm。用游标卡尺测量成型块的直径与高度,计算出体积,电子天平测量成型块质量,换算出成型块密度。成型试验图 4,成型物料块见图 5,成型生物质块的密度见表 1。

小木屑成型密度在  $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  左右最佳,成型块成型效果好,不易松散,且需要的成型压力比较适中,为 85 MPa 左右,从表 1 中可以看出,在成型筒直径为 60 mm 的情况下,成型筒长度高于 425 mm 时物料没有被挤出,在 350~425 mm 时,其可以成型,但是在成型过程中会出现“放炮”现象,长度低于 335 mm 的情况下物料被挤出,但没有完好的成型,物料块成松散状。可以得出对于小木屑生物质,在成型筒直径为 60 mm 的情况下,成型筒长度为 350 mm,其成型效果最佳。此时长度直径比为 5.83。

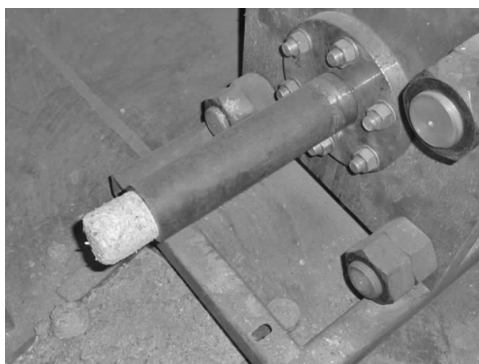


图 4 生物质成型试验



图 5 生物质成型物料块

表 1 成型生物质块密度

成型筒直径 /mm	成型筒长度 /mm	是否挤出	密度均值 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
60	450	否	1.34
60	425	否	1.26
60	415	否	1.22
60	400	是	1.20
60	385	是	1.15
60	370	是	1.11
60	360	是	1.08
60	350	是	1.04
60	335	是(未)	

### 3 结论

生物质常温开式压缩成型是生物质致密成型技术的重要途径之一,而直筒成型具有模具加工方便、损耗低和使用寿命长的优点,将成为生物质致密成型的一种新型成型工艺。该文中的数学模型建立对生物质进行了简化,其所得出的结论与试验数据进行对比,结果相近,误差控制在了 8% 以内。所阐述的研究生物质成型直筒的长度直径比对今后的直筒致密技术有一定的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 俞国胜,肖江,袁湘月,等. 发展中国林木生物质成型燃料[J]. 生物质化学工程,2006,40(B12):45-50.
- [2] 闫文刚. 生物质常温开模致密成型研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.
- [3] 赵东,黄文彬,郭康权. 玉米秆粉粒体压制成型模型的研究[J]. 西北农业大学学报,1998,26(5):44-45.

## Parameter Research of Biomass Shaping with Open Lineal Mold in Natural Temperature

SONG Xiao-wen, YU Guo-sheng, JIANG Chen-long, DU Ke, GUO Xiao-xia  
(Technology School of Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** The technology of room-temperature opening-mold extrusion forming is one of the forming technologies of biomass. Compared with heat forming and room-temperature closed-mold forming, craft of opening-mold forming is simpler and production processes are more energy-efficient. The ratio of the diameter and length parameters of open molding sleeve is the key factor in the design process. The distribution of friction between the material and forming tube, the ratio of diameter and length parameters were derived by the experiment. The results of the analysis of lateral pressure and friction of compaction process showed that the theoretical results agreed with the experimental ones.

**Key words:** biomass; shaping with open mold; parameter of open lineal mold