

生物质物料热压成型工艺参数的探讨

康德孚^① 孟庆兰

(东北农业大学)

提 要 通过对挤压部件的试验研究,论述了压力、温度和成型过程的滞留时间对螺杆式挤压成型机工作性能和制品质量的影响。在 Darnell 和 Mol 公式的基础上,分析了物料塞与螺杆槽壁间的滑动对压力建立的影响。研究指出,压力随滑动量的增加而减少。滑动的存在将减少最大的质量流率,如果已知滑动时的质量流率,则可估算出压力。在螺杆的输送—压缩段对最大轴向压力的测试结果表明,理论估算值与实测值间具有良好的一致性。文中引入了 5 元素 Maxwell 模型,阐述了农业废弃物在加热的机筒内压缩时的流变行为及压力分布。借助应力松弛曲线,确定了物料在机筒内的滞留时间。

关键词 农业废弃物 热压 压力分布 温度 滞留时间 生物质

1 引 言

生物质物料挤压成型技术是我国近年来在农业废弃物综合利用方面一个重要的研究课题。深入探讨成型的工艺参数与部件结构等有关问题,不仅对降低机械的单位能耗、提高生产能力和改善部件磨损等方面具有工程实用价值,而且对开发研制新的机型也有指导意义。

松散的生物质物料,在不添加粘合剂的情况下通过热压加工制成固体燃料,是在一定的工艺条件下实现的^[1,2]。实验表明,物料热压成型的主要工艺参数是压力、温度和成型过程的滞留时间。对螺杆式成型机,这些工艺参数不仅取决于螺杆的几何参数和操作条件,而且与物料的类型、性质密切相关。所以,热压过程使物料发生“相”的迁移,是一个较为复杂的力学和物料流变学过程。

2 压缩段压力的形成及其影响因素

实验表明,生物质物料进入成型机(图 1)的给料体后,由于螺杆的工作长度较短(通常只有 6~7 个螺距的长度),螺杆全长绝大部分用于对物料的输送和压缩,而物料中木素的软化出现在成型筒的压缩腔内、处在螺杆端部的推进面上。

2.1 压力的建立及其基本公式

收稿日期:1993-11-15

① 康德孚,教授,哈尔滨市香坊区 东北农业大学,130030

生物质物料在旋转着的螺杆作用下,通过机体内壁和螺杆表面的摩擦作用不断输送和压实,此阶段物料呈固态被向前推进。在工程计算中主要借助于 Darnell 和 Mol 的固体输送理论^[3]。压力的基本公式是:

$$p = p_1 e^{Az} \quad (1)$$

式中 p_1 是在 $Z=0$ 时的初始压力, p 为沿螺杆沟槽任意一点 Z 处的压力, A 是一个决定于螺杆几何尺寸、物料性质和流率的常数, Z 是所计算点处螺槽的平均长度。

(1)式给出了压力沿螺槽长度的变化规律,其最大压力发生在该段的末端。由于(1)式是在“各向等压”的假定下导出的,忽略了物料塞相对槽壁的滑动,因而用(1)式计算出的最大压力比实际值偏高,误差较大。

2.2 轴向压力与转矩的测试

为了准确地获得在一定操作条件下的成型压力,并分析(1)式的计算误差,我们对成型部件最大轴向压力和转矩进行了实测。

测试装置与仪器:测试装置由 YD-15 动态应变仪、BY-2317 电屏记录仪,力与转矩传感器等组成。

试验条件与工况:物料为锯末,含水率 14%(d. b)。螺杆的转速 310 r/min,机筒温度 288℃(表面),稳定运转。螺杆的结构参数为等距等深矩形螺纹,外径 $D_0=57$ mm,根径 $D_1=35$ mm,导程 $L=36$ mm。摩擦特性, $\mu_s=0.43$, $\mu_b=0.25$ 。

测试结果分析:在正常工作情况下力与转矩的输出表现出良好的稳定性。图 2 为轴向力的输出,台架试验标定灵敏度 $K_f=113.33$ N/ $\mu\epsilon$ 。测得轴向力 $P_z=40798.88$ N。图 3 为转矩的输出,灵敏度 $K_T=0.694$ Nm/ $\mu\epsilon$ 。从而得到转矩 $T=313$ Nm。由螺杆在物料的输送与压缩段的最大轴向力 P_z ,可算出轴向压力的最大值 $p=26.73$ MPa。

测试结果表明:

- 1) 在相同的条件下,实测的最大压力值 p 远小于(1)式的计算值。
- 2) 在上述的工况和操作条件下,当压力 $p=26.73$ MPa 或略大于此值时,挤出的制品品质良好,密度可达 1.18 g/cm³,强度较高。若压力低于这个值则物料不能顺利成型。因此 $p=$

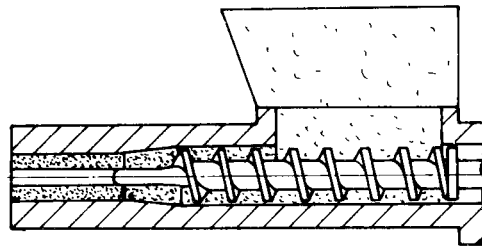


图 1 成型机结构简图

Fig. 1 The schematic diagram of the extruder construction

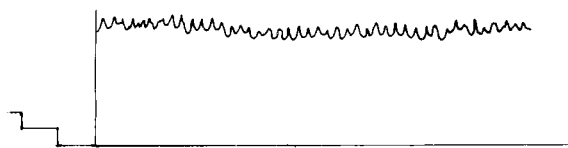


图 2 轴向力变化曲线

Fig. 2 Variation of axial forces

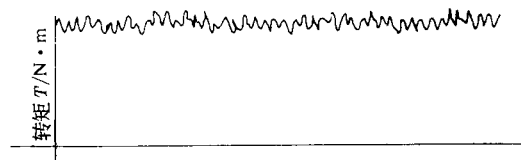


图 3 转矩变化曲线

Fig. 3 Variation of torque

26.73MPa 就是给定条件下的成型压力。此外，压力与温度在小范围内可以互相补偿。

3) 在保证具有足够成型压力的前提下，为了减少螺杆的磨损，降低单位能耗，提高质量流率通常采用较低的转速(250~270 r/min)，较大的螺杆直径和导程。

4) 在相同的操作条件下，成型压力的大小取决于物料的种类和性质。例如稻壳的成型压力较锯末高，一般需要 32~33MPa。

2.3 物料塞相对滑动对压力建立的影响

假定螺杆固定，机筒对螺杆作相对运动来进行运动分析(图 4a)。在机筒内表面上，将料塞沿螺槽方向运动的速度 V_{pz} 分解为轴向分速度 V_{pl} 和沿圆周切向分速度 V_{pr} (图 4b)，由图得

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{V_{pl}}{V_b - V_{pr}/\operatorname{tg}\theta_b}$$

式中 V_b 为机筒内表面的切线速度， $V_b = \pi D_b n$ ， n 为螺杆转速； θ_b 机筒内表面处的螺纹升角； α 为运动方向角。化简得

$$V_{pl} = V_b \frac{\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\theta_b}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\theta_b} = \pi D_b n \frac{\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\theta_b}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\theta_b}$$

由此得到体积流率的理论值^[3,4]

$$Q_{vt} = \pi^2 n H D_b (D_b - H) \frac{\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\theta_b}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\theta_b}$$

其中 H 为螺槽深。事实上，由于在物料塞与螺槽壁间总是存在某些滑动，滑动速度 V_s 平行于 V_{pz} ，且方向与之相反。由图 4c 可见，由于滑动速度 V_s 的影响，使固体塞沿螺槽方向的速度 V_{pz} 和轴向分速度 V_{pl} 都相应减小。设引入一滑动系数 F_0 表示滑动的程度 $0 < F_0 < 1$ ，那么物料塞沿螺槽方向的速度减为 V_{pz}' ， $V_{pz}' = V_{pz} - V_s = F_0 V_{pz}$ 则物料塞沿轴向分速度减小为

$$V_{pl}' = F_0 \pi D_b n \frac{\operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\theta_b}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\theta_b} \quad (2)$$

由图 4c 可见，运动方向角 α 也随之减小为 α' 。受滑动的影响，实际体积流率 Q_v 为：

$$Q_v = F_0 \cdot Q_{vt} \quad (3)$$

滑动系数 F_0 可通过实验进行估计。从以上分析得出：

- 1) 滑动的影响减小了体积流率，使物料在螺槽中滞留的时间增加。
- 2) 随着滑动量的增加(F_0 减小)，使在螺杆排出端的压力急剧下降，当 F_0 达到 70% 时，压力很难建立，甚至使螺杆失去了挤出功能。
- 3) 若体积流率已知，则用螺杆的几何参数和物料的特性，应用(1)式就能将计及滑动影响的压力较准确地估算出来。

2.4 摩擦系数对压力建立的影响

物料在筒壁和螺杆上的摩擦特性对压力的建立有很大影响。实验表明，在螺杆的全长上，压力的建立始于 3~4 个螺槽处(压缩段开始)；而压力随着物料与机筒内壁摩擦系数 μ_0 的增加而加大，随物料与螺杆间摩擦系数的增加而减小。因此，为了尽早地形成较高的压力，应增加机筒内表面的摩擦系数(例如开纵向槽)，减少物料与螺杆间的摩擦(采用表面光滑的

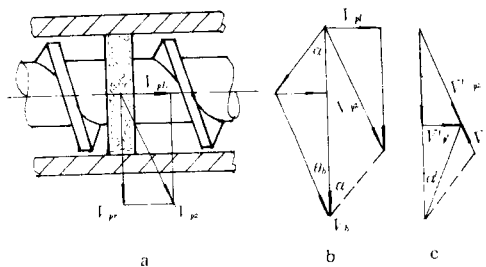


图 4 料塞运动的速度分析

Fig. 4 Velocity analysis of the plug movement

螺杆)。

3 成型段压力的变化及物料的流变行为

物料在输送和压缩段受到转动螺杆强烈地剪切、摩擦和混合搅拌的作用,因而积聚了大量的内热,使物料中的木质素开始软化。当经过口模,由旋转运动变成直线进入成型筒后,吸收了外加热能,使物料温度继续升高。木质素熔融,在压力的作用下,物料粘结成型。在机筒内,成型的物料既有变形固体性质,也有粘弹性流体性质。

3.1 成型筒内压力的变化规律

物料从机筒经过口模时将发生形状的变化。物料变形吸收了一部分变形能,所以使在机筒内建立起来的最大压力 P 产生一个压力损失 ΔP , 进入成型筒后的压力 P_0 为

$$P_0 = P - \Delta P$$

P 为压缩段的最大压力; ΔP 为物料通过口模时由于弹性变形引起的压力损失。

成型物料在筒内压力的变化由下式给出^[2]:

$$P' = P_0 e^{-Rx} \quad (4)$$

(4)式是在忽略成型物料内摩擦(粘性阻力),只计入了与成型筒壁处摩擦的条件下按平衡关系导出的。其中 P' 为在成型筒长度内任意一点 x 处的压力, R 是只与几何参数,摩擦特性有关的常数, $R = 4K\mu D / (D^2 - d^2)$ 。 D 与 d 分别为成型筒内径和芯棒直径, μ 为筒壁与成型物料的摩擦系数, K 为径向与轴向压力比,一般 $K = 0.4 \sim 0.6$ 。

(4)式表明,在成型筒内物料所受的压力按负指数的规律减小,由于成型筒的长度有限(即 $0 \leq x \leq L$),故成型物料的内应力不可能为零。当外力解除后弹性变形的部分尚可以恢复。

3.2 成型物料的流变行为及应力松弛模型

为了消除或减缓成型物料挤压后的变形,有必要讨论物料在成型筒内的流变行为。物料在筒内被视为难于流动的粘弹性流体,它的流变行为可以引用 Maxwell 5 元素粘弹性系统模型加以描述^[5]。这个系统是由二个不同参数的 Maxwell 体与一个弹性体并联而成。其中 E_1, E_2, E_3 分别表示系统中三个弹簧(弹性固体)的弹性模量; η_1, η_2 为粘壶(表示粘性流体)的粘度,系统的微分方程(略)。

图 6^[5]给出了应力松弛曲线。表明筒内成型物料所受的压应力随时间而逐渐减小,而且当机筒温度升高时松弛现象更为显著。

据上述分析可知,物料在成型筒内必需有一定的滞留时间以保证成型物料中的应力充分松弛;提高机筒温度不仅能使木素塑化的更好,而且也加速应力的松弛,使应力消退更快。试验表明,在通常的成型压力下,当机筒温度在 $230 \sim 250 \text{C}$ 时,滞留时间不少于 $40 \sim 45 \text{s}$ 。

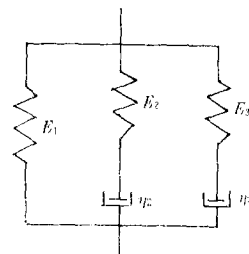


图 5 Maxwell 5 元素模型
Fig. 5 The 5-elements Maxwell model

3.3 补偿热能的估算

生物质物料在挤压过程中所需要的热能来自两方面,一是转动螺杆和机筒对物料的摩擦、剪切和挤压等作用,使机械功转化为热能,使物料升温,但此热能有限,二是为了使木素塑化达到工艺操作所需要温度,必须外加热能进行补充。在工程中常采用经验公式作加热功率的估算,按机筒内表面估算式为

$$N = \frac{1}{1000\eta} \pi D_0^2 \left(\frac{L}{D_s}\right) A \quad (5)$$

式中 N 为成型筒的加热功率, kW; A 为单位面积的加热功率, 它的值取决于物料的性质, 一般取 $A = 3 \sim 4 \text{ W/cm}^2$; η 为加热效率, $\eta = 0.5 \sim 0.6$; L 为螺杆的工作长度; D_0 为成型筒的内径。根据生物质物料种类、含水率等不同, 要求加热温度可控。

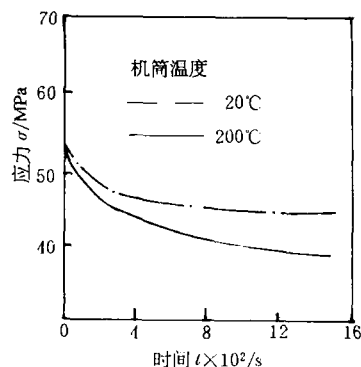


图6 应力松弛曲线

Fig. 6 Curve of stress-relaxation

4 结论

生物质物料热压成型是在合理的工艺条件下实现的, 这就是成型所必需的压力、温度和滞留时间及其最佳组合。

1) 在螺杆的输送—压缩段压力的建立按指数规律增长, 压缩段始于第三个螺距处; 最大压力发生在螺杆排出端的推进面上。最大压力的计算必须计入滑动的影响, 当物料塞的相对滑动速度 V_s 达到或超过 $0.3V_{pz}$ 时, 压力就难以建立。

2) 在成型筒内, 物料所受的压力按负指数规律减小。为了消除或减小其内应力, 避免挤出物弹性部分恢复, 根据材料的流变性质和应力松弛曲线, 确定合理的滞留时间, 使成型物料中的内应力在该时间内充分松弛。

3) 转动的螺杆对物料作功所产生的内热有限。为了使物料中的木素软化熔融, 必须外加热能进行补偿。提高机筒温度不仅使成型物料在筒内充分地进行热交换, 也有利于应力松弛和减少粘滞阻力。

参考文献

- 1 程序, 陈恩举等. 一种新能源—固体燃料再生技术. 节能, 1990, 11
- 2 王民等. 秸秆制作成型燃料的试验研究. 农业工程学报, 1993, (1): 98~102
- 3 Darnell W H, Mol E A J. Solids conveying in extruders. Society of Plastics Engineering Journal, 1956, 12: 20~29
- 4 北京化工学院, 华南工学院编. 塑料机械设计. 北京: 轻工出版社, 1990, 27~30
- 5 Zhuon Zhong, J R O' callaghan. A theoretical analysis of the extrusion pressure in a tapered screw Convey-

or. Journal of Agricultural Engineering Research, 1992, 52(4): 263~265

6 郭康权等. 2, 3 种农业废弃物的颗粒成型. (日)粉体工学会志, 1988, 25(12): 798~803

Exploration on the Technological Parameters of Hot Extruding of Biomass Materials

Kang Defu Meng Qinglan

(*Northeast Agricultural University*)

Abstract

The influences of three main parameters, i. e., the forming pressure, the heating temperature and the residence time of materials within the barrel on the working performance of the screw extruder and the quality of product, were studied.

Based on Darnell and Mol's equation, the effect of the slippage between the plug and the screw channel wall on the forming pressure build up was analysed. The study indicated that the pressure decreases with the increase of slip. The presence of slippage would reduce the maximum mass flow rate. If mass flow rate taking into account the slip is known, the pressure build up may be evaluated. The maximum axial pressure at the conveying-compacting section of the screw was measured with results very much consistent with the theoretical evaluations. To introduce the 5-element Maxwell model, the rheological properties of agricultural waste materials compressed in a heated barrel and the pressure distribution were clarified. The residence time was determined by means of the curve of stress-relaxation. Besides, a simple method to evaluate the required quantity of thermal energy in the hot extruding process was given.

Key words Agricultural waste material Hot extruding Pressure distribution Residence time