

单螺杆食品挤压蒸煮机生产率 计算的仿真研究

马海乐 杨林青

(西北农业大学农业工程系, 陕西杨陵·712100)

摘要 以美乐福牌人造肉机——MWPZ10型单螺杆食品挤压蒸煮机为研究对象, 采用粘性剪切流动理论建立了机内物料动量能量的传递模型, 以该模型的仿真解为依据建立了生产率计算的数学模型, 并对生产率模型进行了验证与分析。

关键词 单螺杆挤压煮机, 食品挤压蒸煮机, 动量能量传递, 生产率, 计算机仿真, 仿真

中图分类号 TS203

近年来, 食品挤压蒸煮技术已得到国内外食品加工业的普遍重视^[1,2]。该技术是在塑料挤压技术的基础上发展起来的, 目前尚缺乏属于自己的设计依据。为此, 本文仅就生产率的计算予以探讨。

1 物料流动过程数学模型的建立与求解

1.1 动量能量传递数学模型的建立

研究对象为美乐福牌人造蛋白肉的生产机——MWPZ10型单螺杆挤压蒸煮机。该机沿螺杆分为喂入段、压缩段和均化段。加热采用四组感应圈, 见图1。

均化段的物料受到强烈的剪切作用, 同时温度达到最高, 所以蛋白质在该段发生一系列生化反应。该段物料质地均匀, 流动稳定, 能使物料定量定压挤出, 且对挤压机的模头压力有着重要的影响。因此, 本文着重分析均化段的动量能量传递规律。

为了分析问题方便, 设螺杆静止、机筒转动, 同时将螺杆的螺槽与机筒分别展开, 形成两个平面, 这样就成为机筒平面以某一速度在螺杆平面上移动, 如图2所示。

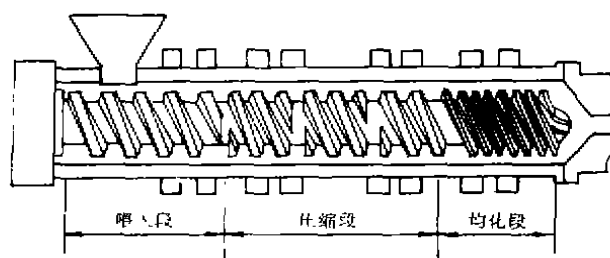


图1 螺杆结构示意图

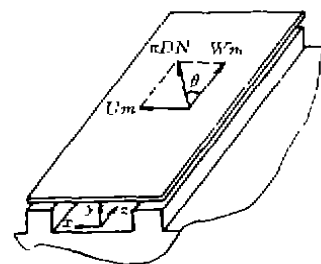


图2 螺杆挤压熟点机分析模型及计算坐标图

为了简化建模,还须做如下假定:

(1)食品面团的流动呈稳定连续流动,属不可压缩的牛顿流体;(2)面团相对螺杆的速度在机筒内表面为 πDN ,在螺杆根径表面为零,无滑动;(3)物料重力和离心力忽略不计;(4)物料沿 X 方向的运动,只能使面团做翻转,所以只考虑沿 YZ 平面的二维问题;(5) Z 方向的热对流远大于相应的热传导,所以,只考虑热对流。

有了上述假定,该定常流动的速度场、温度场可结合粘性剪切驱动理论用以下的控制方程和单值条件确定:

控制方程^[3]

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1)$$

$$w \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{1}{\rho C_p} \left[k \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中 w ——物料沿 Z 方向的速度分量, m/s ; ρ ——物料密度, kg/m^3 ; μ ——物料粘度, $kg/(m \cdot s)$; t ——物料温度, $^{\circ}C$; C_p ——物料比热, $J/(kg \cdot K)$; k ——传热系数, $W/(m \cdot K)$; p ——压力, Pa

单值条件

(1)几何条件 $\theta = 25^{\circ}$ (螺旋角), $H_1 = 0.01 m$ (槽高), $D = 0.072 m$ (螺杆槽顶直径), $L = 1 m$ (均化段螺槽展开长度), $W_1 = 0.015 m$ (槽宽)

(2)物理条件

$$C_p = 1.474 + 2.713M \quad J/(kg \cdot K)^{1.47}$$

$$k = 0.128 + 0.517M \quad W/(m \cdot K)^{1.4}$$

$$\mu = 80.719 \left[\frac{\pi DN}{60H_1} \right]^{-0.838} \cdot \exp \left[\frac{3516.667}{t + 273} \right] \exp(-6.383M)^{1.51}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 3.655 \times 10^{19} \left[\frac{\pi DN}{60H_1} \right]^{-1.367} \cdot \exp \left[\frac{2046.58}{T_w + 273} \right] \exp(-85.3M)^{1.54}$$

$$\rho = 1200 kg/m^3$$

其中 M ——物料湿含量(湿基); N ——螺杆转速, r/m ; T_w ——机筒壁温, $^{\circ}C$

(3)速度的边界条件 Q 在 $y = H_1$ 处, $w = W_m = \pi DN \cos \theta$; 在 $y = 0$ 处, $w = 0$

(4)温度的边界条件 在 $y = H_1, 0$ 处, $t = T_m$; 在 $z = 0$ 处, $t = 90^{\circ}C$

1.2 模型的仿真运行结果

该控制方程描述的是一个静态的耦合问题,对它们进行无量纲化,动态化和离散化之后,经编程并在我校计算机中心的 M340 中型计算机上运行,得到物料流动仿真模型的解为^[5]:

$$W = Y \left[1 - \frac{Re}{2} (1 - Y) \frac{\partial P}{\partial Z} \right] \quad (3)$$

$$T = E[(Y - Y^2) / 2 + Re \cdot \frac{\partial P}{\partial Z} \cdot Y(1/6 - Y/2 + Y^2/3) + Re^2 \left(\frac{\partial P}{\partial Z} \right)^2 \cdot Y(1/6 - 2Y^2/3 + Y^3/3) / 4] + 1 \quad (4)$$

其中 $T = t / T_n$, $Y = y / H_1$, $Z = z / H_1$, $W = w / W_m$, $P = p / (\rho W_m^2)$,

$$Re = W_m H_1 / \nu, \quad \nu = \mu / \rho, \quad E = \mu W_m^2 / (k \cdot T_n)$$

2 生产率的仿真计算、实验验证和结果分析

2.1 生产率的仿真计算

2.1.1 计算模型的建立 式(3)回复其量纲形式后为:

$$w = \frac{W_m}{H_1} y - \frac{y(H_1 - y)}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5)$$

所以, 生产率表达式为:

$$Q = \int_0^{H_1} \int_0^{H_1} w dy dz = \frac{W_m W_1 H_1}{2} - \frac{W_1 H_1^3}{12\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \quad (6)$$

上式中 μ 是物料温度 t 的函数, t 可通过式 (4) 求得, 式 (4) 右边的 Re 和 E 中都含有温度变量, 所以必须引入隐函数的概念, 以确定温度场。在求得温度场以后, 为了最终计算生产率方便, 以下式所示的平均温度为计算温度。

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^9 w_i t_i / \sum_{i=1}^9 w_i \quad (7)$$

式中 $i=1, 2, \dots, 9$, 为离散处理时相应的离散点。

2.1.2 生产率模型的仿真求解 生产率的仿真求解运行过程如框图所示。仿真试验(运行)安排按 $L_4(2^3)$ 正交表进行, 所给试验条件及运行结果如表 1 所示。

表 1 生产率仿真运行和实验验证的条件与结果

试验号	条 件			结 果 (kg/h)		误差(%)	平均误差 (%)
	$T_s(^{\circ}\text{C})$	$N(r/m)$	$M(w.B.)$	仿真结果	实测值		
1	155	100	0.36	85.475	75.659	12.975	8.755
2	155	140	0.40	156.338	148.199	5.492	
3	125	100	0.40	112.006	105.586	6.080	
4	125	140	0.36	131.851	119.221	10.594	
5	140	120	0.38	131.475	121.023	8.636	

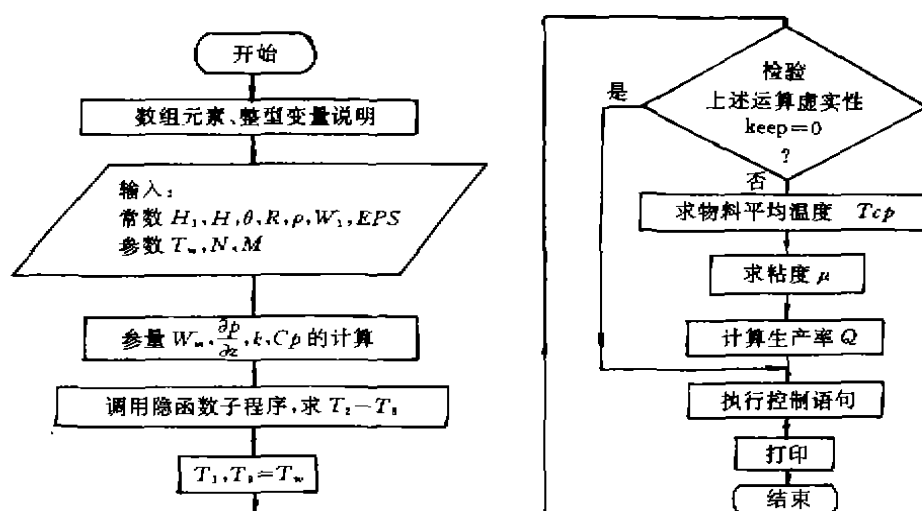


图3 生产率仿真程序框图

2.2 实验验证

试验所用样品组份: 脱脂大豆蛋白粉 85%、盐 10%、碱 5%, 样品初始含水量 11.49%(湿基)。

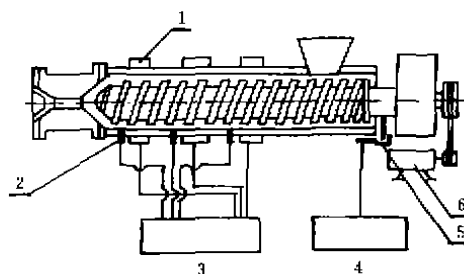


图4 实验测定系统

1. 加热感应圈; 2. 温度传感器(与1配合);
3. WMZK01型温度指示控制仪; 4. VAFN多用数学测试仪; 5. 计数传感器(与4配合、用于转速测定); 6. 无级变速电机

本试验测试分4项: 温度、湿含量、转速和生产率。测试系统如图4所示。为了使实验结果具有代表性, 且易于与仿真结果对比, 实验仍然按正交表 $L_4(2^3)$ 安排。结果见表1。

2.3 仿真结果与实验结果的对比分析

从实验结果与仿真结果对比来看, 误差的变化是比较稳定的, 而且实验结果均小于仿真运行结果。尽管构成误差的因素非常复杂, 但大致可以分为两个方面: 一是实验时所产生的误差, 二是仿真模型简化及参数确定时所造成的误差。更进一步的考察发现该误差主要来源于压力测定和物料喂入。由于

测定这种半流动状态的非牛顿流体的压力时, 蛋白质面团进入测孔, 会因物料与孔壁的阻力造成压力传递的损失, 使得测量值恒小于实际压力值。减小了的压力值会在计算生产率的式子中减小逆向流作用, 即减小式(6)中 $\frac{W_1 H_1^3}{12\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}$ 项, 从而使生产率计算值增加。在机器操作方面, 由于该机没有喂入器, 无法使物料得到强制性的喂入, 加上机筒

内壁的粗糙度不够, 从而影响机器生产能力的发挥。另外, 手工喂入的不连续现象, 使得没有足够长的“物料塞”防止压力从喂入口卸漏, 致使逆向流加大, 同时该现象又是导致作业出现不稳态或亚稳态的重要原因之一^[6], 从而也使生产率下降。以上分析表明, 仿真值与实验值之间的误差, 在一定程度上可以认为是由于测试手段和机器设计与制造所引起的。这个分析也为改进测试手段, 改进机器参数与结构的设计, 从而实现高速稳态生产提供了新思路。从表 1 可以看出, 平均相对误差仅为 8.75%, 而且如前所述, 该误差有相当大的成份并非计算不合理所为。因此, 作为满足设计计算或机器性能改良分析之需要, 作者认为这一计算模型是可行的。

2.4 结果分析

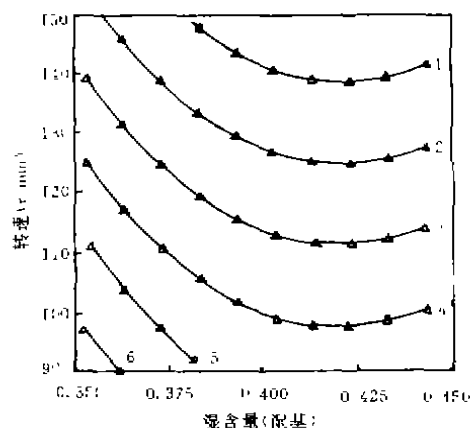
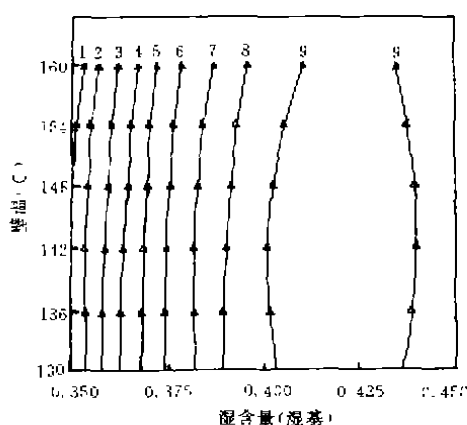


图 5 生产率受壁温和湿含量影响的等高线图 图 6 生产率受湿含量和转速影响的等高线图

1. $Q = 100 \text{ kg/h}$; 2. $Q = 104 \text{ kg/h}$; 3. $Q = 108 \text{ kg/h}$; 4. $Q = 112 \text{ kg/h}$; 5. $Q = 116 \text{ kg/h}$; 6. $Q = 120 \text{ kg/h}$; 7. $Q = 124 \text{ kg/h}$; 8. $Q = 128 \text{ kg/h}$; 9. $Q = 132 \text{ kg/h}$
1. $Q = 150 \text{ kg/h}$; 2. $Q = 135 \text{ kg/h}$; 3. $Q = 120 \text{ kg/h}$; 4. $Q = 105 \text{ kg/h}$; 5. $Q = 90 \text{ kg/h}$; 6. $Q = 75 \text{ kg/h}$

从图 5 可以看出, 生产率受壁温的影响不大。其原因在式(6)中是易见的。因为随着温度的增加, 压力降 $\frac{\partial p}{\partial z}$ 下降, 物料的逆流量减小, 所以生产率增高。然而随着温度的增高, 物料的粘度却减小, 流动性变差, 生产率随之下降, 这两方面的影响效果相互补偿, 使得生产率受壁温的影响不明显。尽管如此, 但因上述两方面的影响效果并不完全抵消, 我们仍可以利用图 5 找到在一定的转速和湿含量下生产率较高的壁温范围。需要说明的是这个结论是在物料性质不发生较大变化的情况下计算得到的。从实验测试过程中发现在物料积温(不仅仅受壁温的影响)过高而焦化后, 流速大为降低, 甚至堵塞, 这主要是物料物性变化已超出了仿真范围。

生产率受物料湿含量的影响很大。当湿含量较小时, 随着湿含量的增加, 物料的流动性大为改善, 生产率随之迅速增加。然而, 湿含量增加到一定程度时, 物料的温度开始明显下降, 随之粘度值增高, 粘性变差, 这时尽管湿含量较高, 流速却开始出现下降的趋势。图 5 和图 6 显示同样结果。

转速对生产率的影响最显著。除了由于本文研究的问题是典型的切应力驱动流问题之外, 另一个显著的因素是研究的物料属于剪切变稀型的^[7], 即转速愈高, 物料愈稀, 流动性愈好。另外, 随着转速的增高, 物料的温度也在升高, 温度升高会导致物料粘度下降, 流动性得到改善。同时, 温度愈高, 压降愈低, 逆流量将减小。所以, 生产率受转速的影响是单调递增的。仿真结果也正说明了这一点。

3 结 论

- 1) 建立了单螺杆食品挤压蒸煮机内物料动量能量的传递模型。
- 2) 建立了该机型生产率的计算模型, 通过实验进行了验证。
- 3) 转速对生产率的影响是单调增加的; 湿含量有一个使生产率最高的最优值; 壁温不是改变生产率的主要因素, 但也不排除在一定范围的优选, 它主要作为产品质量的控制指标。
- 4) 手工喂料, 机筒内壁的粗糙度不够等是影响生产率发挥的重要因素, 同时手工喂料的不连续现象是造成该机型作业出现不稳态或亚稳态的主要原因之一。

参 考 文 献

- 1 高维道. 食品挤压蒸煮系统的应用与进展. 无锡轻工业学院学报, 1986, (1): 101~108
- 2 Harper J M. Extrusion of Foods. Boca Raton, Florida: CRC Press Inc. 1981
- 3 施天漠(美)著, 陈越南等译. 计算传热学. 北京: 科学出版社, 1987
- 4 Bouvier J M, Fayard G, Clayton J T. Flow Rate and Heat Transfer Modelling in Extrusion Cooking of Soy Protein. *J. Food Engng.* 1987; (6): 123~141
- 5 马海乐. 单螺杆食品挤压蒸煮机理的仿真研究. 西北农业大学硕士学位论文. 1990
- 6 Roberts S A, Guy R C E. Instabilities in an Extrusion-Cooker: a simple model. *J Food Engng.* 1986, (5): 7~30
- 7 陈文芳. 非牛顿流体力学. 北京: 科学出版社, 1984

Simulation Research on Productivity Calculation of Single-Screw Food Extrusion Cooker

Ma Haile Yang Linqing

(Agroengineering Department, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract With MWPZ 10 type of Single-screw food extrusion cooker as the research objective, a simulation of model of the momentum and energy transfer of materials within the cooker was established using the theory a mathematical model of calculating productivity was set up. And the productivity model was tested and analysed.

Key words single-screw food extrusion cooker, momentum and energy transfer, productivity, computer simulation