

双螺杆挤压机操作参数变化 对谷物产品特性的影响

张裕中 戴 宁 王 治
(无锡轻工大学生化与食品机械研究所,无锡 214036)

摘要 对食品双螺杆挤压机的操作参数与挤出过程及谷物产品特性之间的关系作了试验研究。通过改变螺杆转速、进料速率这两个变化因素,研究模头压力、模头处物料温度、主机电流、产品膨化度、产品水溶性指数、产品吸水性指数等指标的变化规律,建立有关数学模型并进行分析。
关键词 双螺杆挤压;操作参数;食品特性
分类号 TS201.55

0 前 言

20 世纪 70 年代食品挤压技术进入中国以来,一些高等院校和科研单位均投入人力专门从事挤压技术的研究,并着重于对单螺杆挤压机的研究。单螺杆挤压机已形成一套较成熟的理论,但在挤压机理和应用上存在着一定的问题,原料适用性差,难以同高性能、高品质、适用性广的双螺杆挤压机相媲美。作者预测,今后的挤压食品所用设备将是高性能的双螺杆挤压机占主导地位。中国从 20 世纪 80 年代开始接触食品双螺杆挤压机,已自行研制了一些类型的双螺杆挤压机,在理论上也有了一定的研究,但双螺杆挤压机的机理相当复杂,目前还无法用一套完整、成熟的理论来解释它的挤压过程^[1]。为探索双螺杆挤压机操作参数与谷物产品特性之间的关系,我们专门组织人员进行了一系列的试验研究,针对挤压机螺杆转速、进料速率、机筒加热温度这些操作参数的变化对模头处物料压力与温度,以及对产品膨化度、水溶性指数、吸水性指数等因素的影响等问题开展研究,初步取得了一些研究成果。

1 试验方法

1.1 配料情况

见表 1。

1.2 挤压设备条件

表 1 谷物产品配方表 %

配料名称	质量分数	配料名称	质量分数
玉米粉	49	精 盐	1.7
大米粉	49	甜蜜素	0.3

采用法国 Cleextral BC45 同向旋转型双螺杆挤压机为实验设备。其主要参数见表 2,机

筒、螺杆部件结构示意图 1,螺杆的配置见表 3.

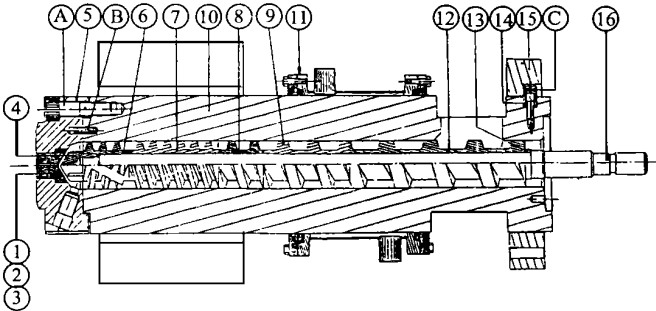


图 1 机筒和螺杆的结构示意图

1, 2, 3 内模, $\varnothing 2 \varnothing 4$ 或 $\varnothing 6$; 4 螺杆头; 5 模板; 6 第六段螺杆;
7 第四、第五段螺杆; 8 第三段螺杆; 9 第二段螺杆; 10 机筒;
11 冷却水夹套; 12 第一段螺杆; 13 调整垫片; 14 压板; 15 法兰;
16 螺杆心轴; A 连接模头和机筒的螺栓, M16 $\times$ 60/35; B 定位销,
 $\varnothing 8 \times 25$; C 连接法兰和机筒的螺栓, M 6 $\times$ 30/17

1.3 试验设计

实验目的是研究挤压机操作参数对挤出过程及挤出物特性的影响,初步探索它们之间的关系. 螺杆转速、进料速率和机筒加热温度这 3 个量是一台挤压机最基本的操作参数,但考虑到机筒热惯性的影响,故本次试验把机筒温度作为定值,将机筒中间段的温度定为 180 $^{\circ}$ C. 所以,此实验是二因素三水平的试验,见表 4.

表 4 二因素、三水平试验安排表

			r/min		
试验次序	螺杆转速	进料速率	试验次序	螺杆转速	进料速率
1	90	16	6	120	14
2	90	14	7	150	14
3	90	18	8	150	16
4	120	18	9	150	18
5	120	16	10	120	16

1.4 统计分析模型

采用非线性回归,测量值与挤压变量的关系模型为:

$$Y = B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + B_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + B_{11} \cdot X_1^2 + B_{22} \cdot X_2^2$$

其中, X_1 为螺杆转速 n , X_2 为进料速率 v , B_0 B_1 B_2 B_{12} B_{11} B_{22} 为系数.

数据处理、回归方程的推导以及三维曲面图的生成均采用 STATISTICA 分析软件.

1.5 指标的测量

1.5.1 挤压过程量

1) 模头压力 (p)

模头压力作为一个系统参数,对于挤出物特性、生产能力、挤压机功耗等各方面都有很大影响. 实验中采用美国 Dynisco 公司的 TPT493 型熔体压力传感器,压力量程为 0~ 20 MPa,综合误差 $\leq \pm 1.0\%$.

2) 模头处物料的温度 (t)

模头处物料的温度对最终挤出物的特性有很大影响,可作为一重要的控制因素. 实验中

表 2 实验所用双螺杆挤压机的
主要参数

部件参数	规格参数
螺杆头数	1
螺杆外径	$\varnothing 55.5 \text{ mm}$
螺杆总长	600 mm
两螺杆中心距	45 mm
部件参数	规格参数
模孔直径	$\varnothing 4 \text{ mm}$
模孔长度	30 mm
喂料螺杆的直径	$\varnothing 48 \text{ mm}$
电机功率	147 kW

表 3 螺杆的构型配置 mm

	第一段	第二段	第三段
螺距	50	35	25
长度	200	100	50
	第四段	第五段	第六段
螺距	15	15	- 15
长度	100	100	50

注: 第六段是反螺旋元件

同样采用 Dynisco TPT493 型传感器,在同一测量点上同时测量压力和温度,传感器膜片最高可耐 400℃ 的温度,温度每变化 1℃ 其测量值在± 0.04% 满量程的范围内改变

3) 主机电流 (I)

主机电流值反映了挤压机功耗大小、生产稳定性,可通过在电机上安装电流表测得。

1.5.2 挤出物特性

1) 产品膨化度 (E)在样品的平直段用游标卡尺在分别呈 90° 的两方向上测 10 次,取平均值算得该样品的直径,再用下列公式计算样品的膨化度:

膨化度 = 产品直径 / 模孔直径

2) 水溶性指数 (WSI)和吸水性指数 (WAI)

这 2 个指标可反映淀粉的降解程度。以下列实验测得:

称取 0.75 g (干计)的挤压产品悬浮于 15 mL 水中,于 30℃ 下恒温搅拌 30 min,然后用离心机在 3 000 r/min 下离心 15 min,离心后分上清液和沉淀物,上清液倾于恒重的铝盒中在 120℃ 的烘箱中蒸发至干并恒重。 WSI 和 WAI 按下式计算:

WSI = 上清液蒸发至干后残余物称重 ÷ 称取的产品质量

WAI = 倾出上清液后沉淀物称重 ÷ 称取的产品质量

2 试验结果与分析

2.1 模头压力与螺杆转速、进料速率的关系

将试验数据回归得到方程:

$$p = 1.857 - 3.255 * n + 32.357 * v + 0.012 * n^2 - 0.033 * n * v - 0.714 * v^2$$
,复相关系数为 0.998。

所得三维曲面图和三维等值图见图 2 和图 3。

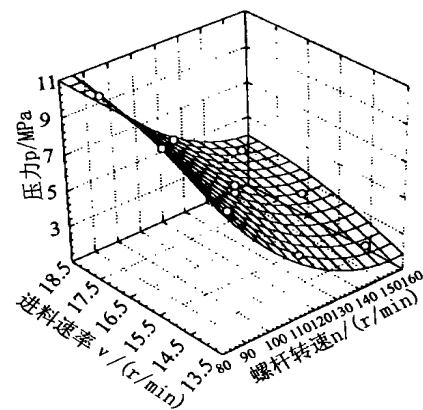


图 2 模头压力曲面图

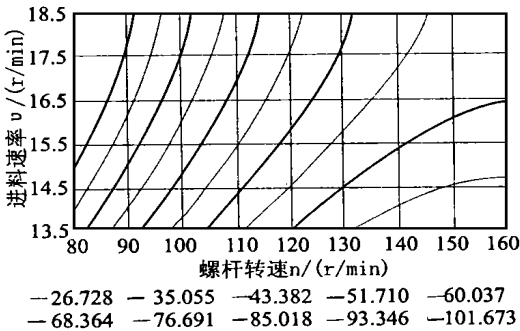


图 3 模头压力等值图

从图中可以看出,模头压力随转速的增大而减小、随进料速率的增大而增大。在低的进料速率下模头压力随螺杆转速减小的程度比在高的进料速率下小,在低转速下模头压力随进料速率增大的程度比在高转速下大。压力最小值在 (160, 13.5) 处,压力最大值在 (80, 18.5) 处。这说明,在低螺杆转速、高进料速率下,机筒内物料的填充程度大,易形成较大的压力梯度,并且靠近机头处熔体输送段内完全充满的 C 型腔室的数目增多,导致了高的机头

压力,这与 Janssen^[2]得出的结论相同。

2.2 模头处物料温度与螺杆转速、进料速率的关系

将数据回归,得到方程:

$t = 93.048 + 1.374n - 8.619v - 0.004n^2 - 0.013n^*v + 0.321v^2$,复相关系数为 0.947。

所得三维曲面图和三维等值图见图 4和图 5。

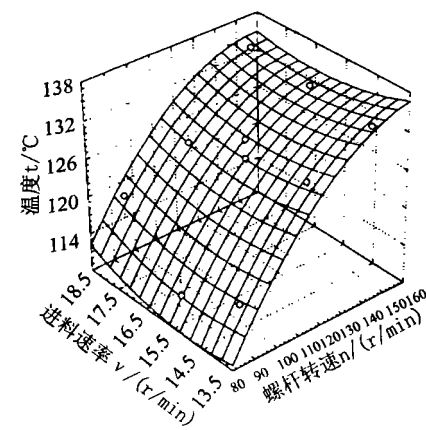


图 4 模头处物料温度曲面图

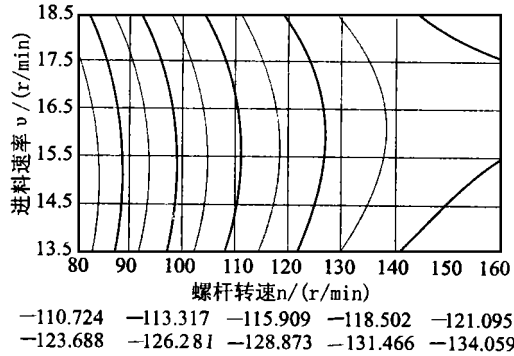


图 5 模头处物料温度等值图

从图中看出,模头处的物料温度随螺杆转速的增大而增高,变化非常显著,在低的进料速率下其随转速的变化程度大。随着进料速率的增大,模头处物料温度变化不明显,趋势是先降低后升高。温度最小值在 (80, 14)处,最大值在 (180, 13.5)处。这说明,螺杆转速对挤压过程中物料的温度影响非常大。螺杆转速提高了,螺杆对物料的剪切程度增大,即剪切速率变大,由于面团类食品是胀塑性流体,其粘度随剪切速率的增大而增大,故挤压机内的粘滞耗散增大,粘性热增多,导致温度上升。若在相同转速下,进料速率小就意味着机筒内物料少,吸收相同的粘性热,故温度要比物料多时的高;但物料少,充填程度就小,影响了热传递系数,所以当物料少时其温度又会略有下降。当进料速率达到一定量再增大时,机筒内充填率高,有充分的表面与机筒接触,热传递增大,故物料温度会上升,但总的来说幅度不大。

2.3 主机电流与螺杆转速、进料速率的关系

将数据回归,得到方程:

$I = 1.333 - 0.417n + 6.083v + 0.002n^2 - 0.008n^*v - 0.125v^2$,复相关系数为 0.999。

所得三维曲面图和三维等值图见图 6和图 7。

从图中可以看出,主机电流随着螺杆转速的增大而减小,随着进料速率的增大而增大,在高的进料速率和低的转速下其变化程度大,主机电流最小值在 (160, 13.5)处,最大值在 (80, 18.5)处。主机电流值反映了挤压机功耗大小,它与挤压机内的压力有很大关系。当挤压机内的压力梯度大,模头压力大时,其阻力也大,功耗变大,电流值就大。故如上所述,当螺杆转速低,进料速率高时,机筒内物料的填充率高,形成大的压力梯度并且模头压力高,所以功耗增大,主机电流大。

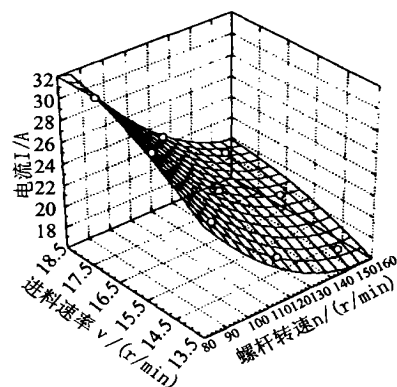


图 6 主机电流曲面图

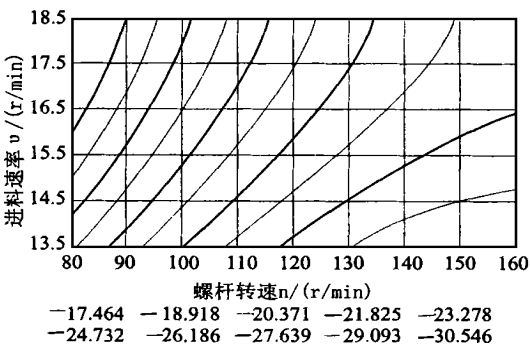


图 7 主机电流等值图

2.4 产品膨化度与螺杆转速 进料速率的关系
将数据回归,得到方程:

$$E = 4.9139 + 0.0024 * n - 0.1602 * v + 0.00033 * n^2 * v - 0.00003 * n^2 + 0.0042 * v^2$$
, 复相关系数为 0.941.

所得三维曲面图和三维等值图见图 8 和图 9.

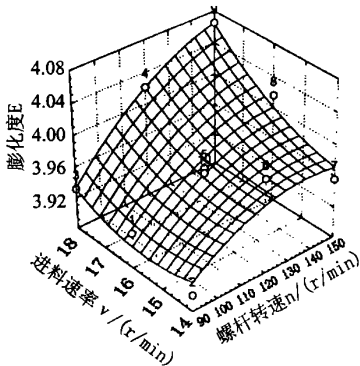


图 8 产品膨化度曲面图

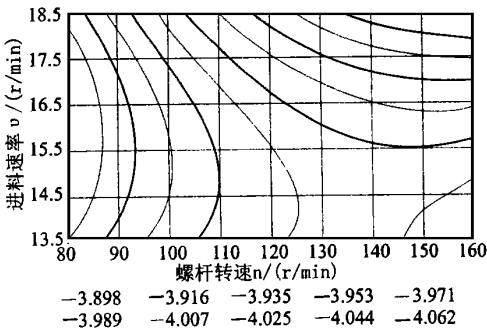


图 9 产品膨化度等值图

从图中可以看出,膨化度随螺杆转速的增加而增加,也随进料速率的增大而增加,在高的进料速率下其随转速变化的程度大,在高的转速下其随进料速率变化的程度也大。膨化度最小值在 (80, 16.5) 处,最大值在 (150, 18) 处。这说明,螺杆转速增加使得物料所受的剪切力增大,部分大的直链淀粉变成小分子,支链淀粉的部分侧链小分子也被游离出来,淀粉分子间的氢键作用被削弱,分子骨架的自由空间加大,使得物料中的水分更容易“渗入”而使其发生溶胀;同时,这也有利于水分在淀粉面团中的均匀分散,产生更为疏松的组织,因而产品膨化度高。当进料速率增加时,机筒内物料的填充率高,并导致较高的模头压力出现,使得机筒内的混合程度加大,热传递也加大,从而使得水分在物料中分散均匀,产生较高的膨化度。

2.5 产品的水溶性指数与螺杆转速、进料速率的关系

将数据回归,得到方程:

$WSI = -53.08 + 1.297n + 4.037v - 0.005n^2 - 0.154v^2$, 复相关系数为 0.978

所得三维曲面图和三维等值图见图 10和图 11.

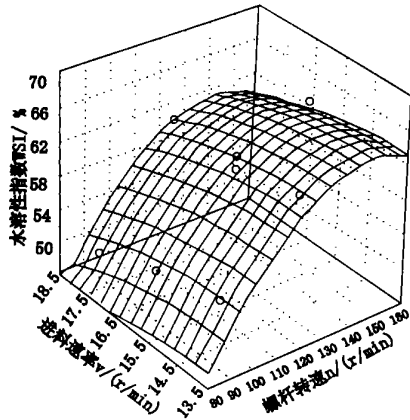


图 10 产品水溶性指数曲面图

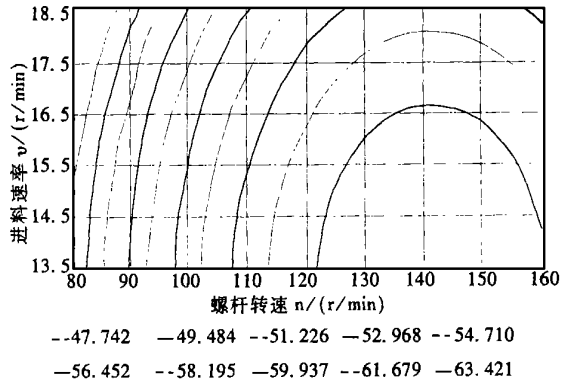


图 11 产品水溶性指数等值图

从图中可以看出, WSI随螺杆转速的增加而增大并且变化明显, 随进料速率的增加而减小但变化程度小. WSI最小值在 (80, 18.5)处, 最大值在 (150, 13.5)处. 这说明, 当转速提高时, 螺杆对物料的剪切作用增大, 使得部分大分子变为小分子, 淀粉分子中部分支链被剪断, 分子间的作用力被削弱, 从而可溶物增多; 并且可使得水分容易“渗入”, 使其发生溶胀, 可溶性提高. 当进料速率增大时, 刚开始在一定程度上使得机筒内的单位机械能的输入值减小, 故产品的溶解性降低. 产品的水溶性指数反映了淀粉的降解程度.

2.6 产品的吸水性指数与螺杆转速、进料速率的关系

将数据回归, 得到方程:

$WAI = 10.402 - 0.103n - 0.255v - 0.004n^2 + 0.001n^2 + 0.027v^2$, 复相关系数为 0.991.

所得三维曲面图和三维等值图见图 12和图 13.

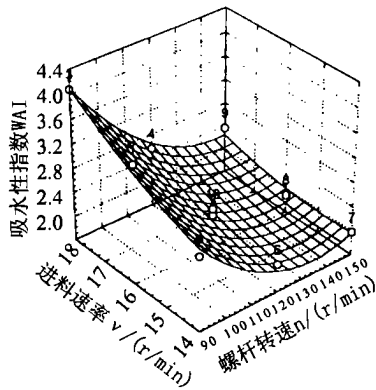


图 12 产品吸水性指数曲面图

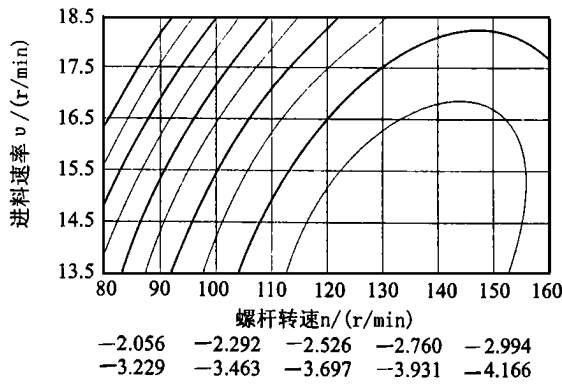


图 13 产品吸水性指数等值图

从图中可以看出, WAI 随着螺杆转速的增大先下降后略有回升, 随着进料速率的增大而增大。 WAI 最小值在 (135, 14) 处, 最大值在 (80, 18) 处。 WAI 和 WSI 是相对的, 所以其观察到的变化规律正好相反。

2.7 模头压力与主机电流的关系

观察模头压力与电流的曲面图, 发现两图的变化规律极为相似, 这说明两者之间存在着一定的关系。单独考虑模头压力与电流的试验数据, 发现其点的分布基本成一直线, 所以假设分析模型为 $I = a_0 + a_1 \cdot p$, 得到回归方程 $I = 13.351674 + 0.169672 \cdot p$, 复相关系数为 0.995。所得关系图见图 14。

这说明, 主机电流与模头压力之间存在着线性关系, 模头压力的大小直接影响着挤压机的功耗。

2.8 模头压力与产品品质的关系

模头处的压力和温度对熔融体有很大影响, 最终影响挤出产品的一些品质, 在此作者作了研究。由于在模头处测得的物料温度一直随着实验的进行而缓慢上升, 看不出有何规律, 所以在此不考虑温度的变化, 仅考虑模头压力的变化对产品的影响。假设其分析模型为多项式模型, 得出的回归方程为:

$E = 3.61391 + 0.023358 \cdot p - 0.0004192 \cdot p^2 + 0.0000022 \cdot p^3, R = 0.787$

$WSI = 65.025923 + 0.0130598 \cdot p - 0.0017429 \cdot p^2, R = 0.958$

$WAI = 2.2775855 - 0.0200772 \cdot p + 0.0003726 \cdot p^2, R = 0.985$

所得关系图见图 15 图 16 和图 17。

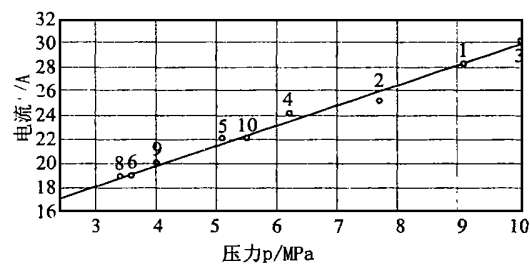


图 14 主机电流与模头压力的关系图

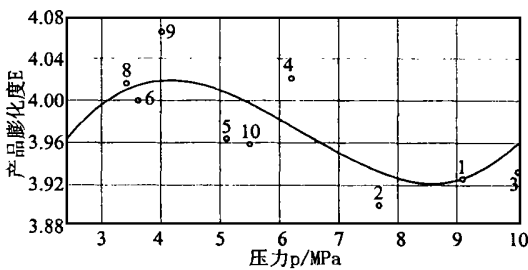


图 15 产品膨化度与模头压力的关系图

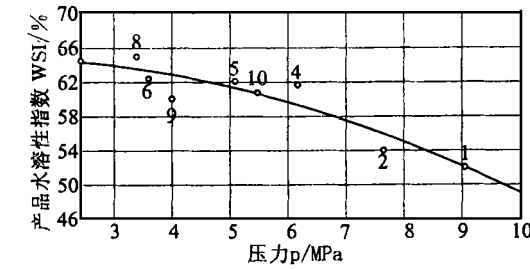


图 16 产品水溶性指数与模头压力的关系图

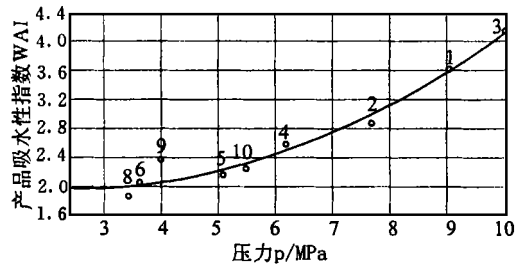
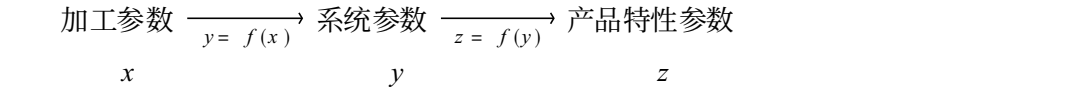


图 17 产品吸水性指数与模头压力的关系图

由此可见,模头压力与产品膨化度的关系不甚明了,需进一步探索。模头压力与产品水溶性指数、吸水性指数的关系基本符合假设的分析模型,说明模头压力对淀粉的降解程度有很大影响。但这些关系图是在二因素三水平试验所得数据的基础上得出的,需进一步证实。

3 结 语

本实验通过改变挤压操作参量——螺杆转速和进料速率,研究其对挤压过程和挤出物特性的影响,获得了初期的效果,但由于实验条件的限制,需要进一步研究。按照 Friedrich Meuser 等人^[3]提出的系统分析,可分为三大类:加工参数、系统参数和产品特性参数。加工参数指的是螺杆转速、进料速率、机筒温度、螺杆结构配置、模孔直径、加水量、配方、原料特性等因素;系统参数指的是单位输入机械能、单位输入热能、停留时间分布等量,实际反映的是压力、温度、功率、产量这些参数;产品特性参数指的是产品的溶解性、粘度、糊化度、质地、口感、颜色等评价指标。这三大类参数的关系是:



在挤压加工中,可以通过控制加工参数获得所需的系统参数,并控制系统参数获得所需的产品特性参数。本实验的实验模型是 $y = f(x)$ 和 $z = f(y)$,由于实验设备和条件的影响,所以获得的 $z = f(y)$ 模型有局限性。在此,作者提出今后实验的方向是研究挤压系统参数和产品特性之间的关系,这样就可以独立于设备和操作条件而具有普遍的适用性。但本实验得出的操作参数和模头压力、物料温度、主机电流之间的规律,即 $y = f(x)$ 模型,是研究 $z = f(y)$ 模型的基础,为今后的研究提供了参考。

参 考 文 献

1 张裕中,王景编著. 食品挤压加工技术与应用. 北京: 中国轻工业出版社, 1998, 1~ 23
2 Janssen L P B M. Twin Screw Extrusion. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 66~ 75
3 kokini J L. Food Extrusion Science and Technology. New York: Marcel Inc, 1992. 619~ 630

Effect of Operation Parameters on Corn Product Characteristics in Twin-Screw Extruder

Zhang Yuzhong Dai Ning Wang Zhi

(the Biochemistry and Food Machinery Research Institute, Wuxi University Of Light Industry, Wuxi, 214036)

Abstract This paper reports the study into the relationship between operation parameters and extrusion process as well as corn product characteristics in the twin screw extruder. We changed two variables— screw speed and feed rate to study die pressure, product temperature in the die, motor electric current, product expansion ratio, product water solution index and product water absorption index. After analysing experiment datas, we got some formulas and attempt to explain these regulations.

Key words twin screw extrusion; operation parameters; food characteristics

(责任编辑: 秦和平)