

文章编号:1000-0615(2007)03-0379-06

## 双螺杆挤压机操作参数对膨化水产饲料物性的影响

俞微微, 刘俊荣, 王 勇, 路红波, 谢智芬

(大连水产学院食品工程系, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**利用 Cletral BC-45 型双螺杆挤压机对豆饼粉、鱼粉和玉米粉的混合原料进行挤压蒸煮生产水产饲料。通过改变螺杆转速、进料速率和进水速率来生产具有不同物性的水产饲料,并对所得到的饲料进行膨化度、堆积密度和水中稳定性指数的测定,同时对挤出物的浮性进行了观察。应用二次回归通用旋转设计进行试验方案设计及试验结果分析,建立回归方程来描述操作参数与膨化度、堆积密度、水中稳定性指数的关系。研究表明,螺杆转速、进料速率和进水速率均与膨化度和堆积密度有显著的相关关系,而与水中稳定性指数的相关关系不显著。应用所建立的回归方程可预测和控制挤压产品的膨化度与堆积密度。操作参数与水中稳定性指数的关系需进一步研究。

**关键词:**双螺杆挤压蒸煮;操作参数;物性;二次回归通用旋转设计

中图分类号:S 958

文献标识码:A

## Effect of twin-screw extruder process parameters on aquatic feed physical attributes

YU Wei-wei, LIU Jun-rong, WANG Yong, LU Hong-bo, XIE Zhi-fen

(Department of Food Engineering, Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Extrusion cooking has been used for processing food for many years. Food products like read-to-eat cereals, some snacks, dry or semimoist pet foods, confectionery products, macaroni products and texturize soy protein products can be made with extrusion cooking. Extrusion operations require a high level of knowledge about the significant input and output process variables. Less national literatures are available on twin-screw extrusion used for processing aquatic feed. Thus, the objective of this study is to investigate effect of twin-screw extruder process parameters on aquatic feed physical attributes. A twin-screw extruder is a complex system with multi-parameters both of input and output. Mechanism about the system is not very clear. Building of a theory model to indicate running system is difficult. Regarding the system as a black box, regression analysis method is used to analyze relations of outputs and inputs. Second-order regression general rotational design is used in experimental design and regression analysis in this study. A mixture of corn meal, deoiled soy flour and fish meal is extruded by a twin screw extruder to produce aquatic feed. Screw speed, solid feed rate and water feed rate are

收稿日期:2006-10-21

资助项目:国家“九四八”引进国际先进农业科学技术项目(993122);农业部海洋水产增养殖学与生物技术重点开放实验室重点科研项目(K2003-3);科技部农业科技成果转化资金项目(05EFN212100065)

作者简介:俞微微(1961-),女,浙江绍兴人 副教授,硕士,从事低值鱼蛋白深加工利用和食品热塑挤压技术研究。Tel: 0411-84763557, E-mail: yww0410@dlfu.edu.cn

通讯作者:刘俊荣, Tel:0411-84763552, E-mail: ljunrong@dlfu.edu.cn

adjusted to make aquatic feed with different physical properties indicated by expansion ration, apparent bulk density and water stability index. In the mean time, buoyancy of the produces is observed. All experiment are carried out using a co-rotating Cleextral twin-screw extruder (Model BC-45) designed with 5 barrel sections, and bored with two 4 mm diameter holes. Screw speed, solid feed rate are electronically controlled from a panel board. These operating parameters and electric current on the drive motor are read directly from digital displays on the control panel. Water feed rate can be manually adjusted. The temperature profile in the 5 barrel sections from the feed end are set at 100, 150, 180, 180, 120 °C for all experiments. Variables include screw speed (316, 350, 400, 450, 484  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ), solid feed rate (3.3%, 5%, 7.5%, 10%, 11.8%), and water feed rate (11.6%, 15%, 20%, 25%, 28.4%). When extrusion operations are under steady state, samples are collected for analyzing. Expansion ration is measured as the ration of the cross-section area of the extrudate to that of the die. The diameter of the extrudate is the average of 10 random measurements at 90° to each other. Apparent bulk density and water stability index are measured following the method of Roile *et al.* (2001). The regression equations of expansion ration, apparent bulk density and water stability index on screw speed, solid feed rate and water feed rate are established respectively. Analyses are carried out based on t-test. Results show the effect of screw speed ( $X_1$ ) and its square ( $X_1^2$ ), and interaction of screw speed ( $X_1$ ) and solid feed rate ( $X_2$ ) on expansion ration is not significant ( $P > 0.05$ ), meanwhile effect of solid feed rate ( $X_2$ ) and its square ( $X_2^2$ ), water feed rate ( $X_3$ ), interaction of screw speed and water feed rate ( $X_1X_3$ ) on expansion ration is highly significant ( $P < 0.01$ ) in experimental range. Similarly effect of screw speed ( $X_1$ ), solid feed rate square ( $X_2^2$ ) and water feed rate square ( $X_3^2$ ) on apparent bulk density is not significant ( $P > 0.05$ ) and effect of screw speed square ( $X_1^2$ ), interaction of screw speed and solid feed rate ( $X_1X_2$ ), that of screw speed and water feed rate ( $X_1X_3$ ) on apparent bulk density is highly significant ( $P < 0.01$ ) in experimental range. The results of the study show that all the chosen parameters influenced the expansion ration and apparent bulk density remarkably. Two regression equations can be used to predict and control the extrudate expansion ration and apparent bulk density. The correlation of the water stability index on process parameters investigated is not significant under the experiment condition. Further research work on it need to be done in detail.

**Key words:** twin-screw extrusion cooking; process parameters; physical properties; second-order regression general rotational design

目前,挤压蒸煮技术广泛应用于食品领域,主要用于生产膨化小吃食品和即食谷物食品。挤压蒸煮技术应用于饲料工业开始于 20 世纪 50 年代的美国,主要用于加工宠物食品<sup>[1]</sup>,由于挤压蒸煮技术提高了饲料的可消化性,钝化了抗营养因子并使饲料在水中稳定性得到提高<sup>[2]</sup>,同时,挤压后的颗粒具有很强的持久性和很高的水溶性<sup>[3]</sup>,并且应用挤压蒸煮技术生产水产饲料时不用添加特殊的粘合剂<sup>[4]</sup>,所以目前已成为世界水产饲料业重点倡导和广泛发展的新技术。到 20 世纪 80 年代,应用挤压蒸煮技术生产水产饲料迅速发展到了商品化规模<sup>[5]</sup>。

双螺杆挤压机是一个多输入多输出的系统,由于挤压过程影响因素较多,而且各个因素之间往往又互相影响,因此目前很难建立一个系统全

面的理论模型来反映整个挤压的全过程。因此在研究双螺杆挤压过程中操作参数对系统运行稳定性的影响基础上<sup>[6-7]</sup>,有必要针对具体的挤压系统及特定的原料,通过试验来研究挤压系统操作参数对挤压产品物性的影响。本研究用 Cleextral BC-45 型双螺杆挤压机对豆饼粉、鱼粉和玉米粉的混合原料进行挤压蒸煮生产水产饲料,通过改变螺杆转速、进料速率和进水速率这三个操作参数来研究其对水产饲料膨化度、堆积密度和水中稳定性指数的影响,为水产饲料的进一步研究奠定基础。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 原料与配方

实验以豆饼粉、鱼粉和玉米面的混合料为原

料,物料成分及配比见表 1。

### 1.2 实验设备

本研究使用的设备为法国 Cletral 公司生产的 BC-45 型同向旋转完全啮合自洁式双螺杆挤压

机,有效工作螺杆长为 1 000 mm,长径比为 18:1。腔体由五个工作腔段构成,其中除第一段无加热功能外,其余四个腔段都有电磁加热和冷却循环系统。模孔直径为 4 mm,共 2 个模孔。

表 1 原料的基本组成及其配比

Tab.1 Proximate composition of materials and ratio

原料(配比) materials(ratio)	水分 moisture	粗蛋白 crude protein	粗脂肪 crude fat	淀粉 starch	灰分 ash
豆饼粉(50%) deoiled soy flour	9.5%	44.3%	1.5%	34.2%	3.7%
鱼粉(30%) fish meal	8.0%	45.0%	10.0%	14.2%	15.3%
玉米粉(20%) corn meal	11.5%	7.1%	3.0%	74.7%	0.7%

### 1.3 操作参数的确定

本实验的目的是研究挤压机操作参数对挤出物物性的影响,实验中可控制的机器操作参数有 4 个,分别是机筒温度、螺杆转速、进料速率和进水速率。根据前一阶段的试验总结,本研究选定机筒温度为恒定量,具体数值见表 2。而选定其它三个参数为研究变量。螺杆转速和进料速率可在控制面板上设定,螺杆转速、进料速率和主机电流等数显在控制面板上。进水速率手动控制。

表 2 机筒各段的温度

Tab.2 Barrel temperatures in different sections of extruder

腔段 section	1	2	3	4	5
温度(℃) temperature	100	150	180	180	120

### 1.4 产品物性的测定

本实验研究的产品物性为产品膨化度、表面堆积密度和水中稳定性指数。

产品膨化度(expansion ration, ER)的测定<sup>[8]</sup>在样品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:

$$\text{膨化度} = \text{产品直径}^2 / \text{模孔直径}^2$$

表面堆积密度(apparent bulk density, ABD)测定 参考 Roile 等<sup>[9]</sup>的测定方法,每个样品重复测定 3 次。

水中稳定性指数(water stability index, WSI)的测定 参考 Roile 等<sup>[9]</sup>的测定方法,每次处理的样品进行 2 次测量。WSI 按下式计算:

$$\text{水中稳定性指数} = 1000 - \text{干物质损失重量} \times 1000 / \text{最初重量(干)}$$

浮性(buoyancy, B)的测定 在塑料桶内放入 25 个大小相似的饲料颗粒,桶内装有海水。经过一段时间后,记录漂浮颗粒的实验号。

### 1.5 实验设计

采用二次回归通用旋转设计方法进行实验设计<sup>[10]</sup>。因素水平和编码见表 3,实验的方案与结果见表 4。实验结果采用二次回归模型进行拟合,二次回归方程为:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j X_j + \sum_{i < j} b_{ij} X_i X_j + \sum_{j=1}^m b_{jj} X_j^2$$

其中, Y 是因变量; X<sub>i</sub> 和 X<sub>j</sub> 是自变量; b<sub>0</sub>, b<sub>j</sub>, b<sub>ij</sub> 和 b<sub>jj</sub> 是回归系数; m 是自变量个数。通过变量转换,二次回归方程可转化为直线回归方程,通过最小二乘法求出 b<sub>0</sub>, b<sub>j</sub>, b<sub>ij</sub> 和 b<sub>jj</sub>。

表 3 因数的实际水平与编码水平表

Tab.3 Actual and coded levels of variables for experimental design

因素名称 factor name	编码 code	编码水平 coded level				
		-1.682	-1	0	1	1.682
螺杆转速/r·min <sup>-1</sup> screw speed	X <sub>1</sub>	316	350	400	450	484
进料速率/% solid feed rate	X <sub>2</sub>	3.3	5	7.5	10	11.8
进水速率/% water feed rate	X <sub>3</sub>	11.6	15	20	25	28.4

## 2 结果与讨论

实验方案和结果见表 4。

采用二次回归通用旋转设计试验结果的统计分析方法进行数据处理,得到以下方程:

(1) 操作参数与挤出物膨化度的回归方程为:

$$Y_1 = 1.047 + 0.016X_1 + 0.133X_2 - 0.123X_3 - 0.017X_1X_2 - 0.070X_1X_3 - 0.084X_2X_3 - 0.019X_1^2 + 0.079X_2^2 + 0.031X_3^2 (R^2 = 0.942; R_{0.05} = 0.855; R_{0.01} = 0.904)$$

(2) 操作参数与挤出物堆积密度的回归方程为:

$$Y_2 = 477.336 - 1.147X_1 - 9.044X_2 + 6.836X_3 + 12.400X_1X_2 + 16.400X_1X_3 + 10.600X_2X_3 + 26.657X_1^2 - 1.833X_2^2 + 2.621X_3^2 (R^2 = 0.924; R_{0.05} = 0.855; R_{0.01} = 0.904)$$

(3) 操作参数与挤出物水中稳定性指数的回归方程为:

$$Y_3 = 775.986 - 7.175X_1 - 24.808X_2 - 7.779X_3 + 3.875X_1X_2 + 13.375X_1X_3 + 6.125X_2X_3 + 0.556X_1^2 - 26.011X_2^2 - 22.244X_3^2 (R^2 = 0.641; R_{0.05} = 0.855; R_{0.01} = 0.904)$$

表 4 实验方案与结果

Tab.4 The scheme and results of the experiments

试验号	experiment no.	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	沉浮性	ups and downs
1	1	1	1	1	0.97	539.2	750	-	-
2	1	1	-1	-1	1.61	467.2	684	+	+
3	1	-1	1	1	0.93	523.2	754	-	-
4	1	-1	-1	-1	1.21	492.0	733	+	+
5	-1	1	1	1	1.08	488.0	739	-	-
6	-1	1	-1	-1	1.42	480.0	747	+	+
7	-1	-1	1	1	0.95	520.0	779	-	-
8	-1	-1	-1	-1	0.97	556.0	791	-	-
9	-1.682	0	0	0	1.01	544.8	740	-	-
10	1.682	0	0	0	0.97	548.8	762	-	-
11	0	-1.682	0	0	1.03	468.0	736	-	-
12	0	1.682	0	0	1.50	464.0	616	+	+
13	0	0	-1.682	0	1.24	473.2	738	-	-
14	0	0	1.682	0	1.02	484.0	635	+	+
15	0	0	0	0	1.04	472.0	777	-	-
16	0	0	0	0	1.05	475.6	786	-	-
17	0	0	0	0	1.04	478.0	776	-	-
18	0	0	0	0	1.06	466.8	770	-	-
19	0	0	0	0	1.05	482.0	781	-	-
20	0	0	0	0	1.05	488.0	775	-	-

注:  $Y_1$  为膨化度;  $Y_2$  为堆积密度;  $Y_3$  为水中稳定性指数; + 为浮性; - 为沉性

Notes:  $Y_1$  means expansion ration;  $Y_2$  means apparent bulk density( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $Y_3$  means water stability index; + means up; - means down

### 2.1 操作参数对产品膨化度的影响

由  $R = 0.971 > R_{0.01}$ , 回归达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 表明膨化度  $Y_1$  与螺杆转速 ( $X_1$ ), 进料速率 ( $X_2$ ) 和进水速率 ( $X_3$ ) 及它们的交互项和二次项存在极显著的线性关系, 表明在实验范围内此回归方程是真实响应函数的一个合适的近似式。

由回归系数的显著性检验 ( $t$  检验) 得出, 在该实验范围内螺杆转速 ( $X_1$ ), 其二次项 ( $X_1^2$ ) 及螺杆转速与进料速率的交互项 ( $X_1X_2$ ) 对膨化度并没

有显著的影响 ( $P > 0.05$ ); 而螺杆转速与进水速率的交互项 ( $X_1X_3$ ) 对膨化度有极显著影响 ( $P < 0.01$ )。螺杆转速除其与进水速率的交互项外, 在该试验范围内螺杆转速的其它相关项对挤出物膨化度并没有显著的影响。分析其原因, 虽然螺杆转速的增加会使得物料所受到的剪切力增大, 使得物料更易吸收水分, 但由于喂料程度已经达到了满负荷, 再增加喂料量主机电流就会超出额定值, 在该条件下增加的螺杆转速就起不到特别明显的作用。

进料速率( $X_2$ ),其二次项( $X_2^2$ )及对膨化度有极显著的影响( $P < 0.01$ )。随着进料速率的增加膨化度也随之增加,在张裕中等<sup>[11]</sup>的研究中也得到了同样的结论。分析其原因,当进料速率增加时,机筒内物料的填充率高,这样就会导致较高的模头压力,导致机筒内物料的混合程度和热传递同时加大,使得物料的生化反应彻底,提高了淀粉的凝胶化程度,从而产生较高的膨化度,在 Botting<sup>[12]</sup>和 Case 等<sup>[13]</sup>的报道中也得到了相同的结论。

进水速率( $X_3$ )对膨化度有极显著的影响( $P < 0.01$ ),其二次项( $X_3^2$ )对膨化度有一定影响,但影响不显著。随着进水速率的增加膨化度随之减小,与文献[14-15]的结论相同。进水速率增加,则物料的水分含量也就随之增加,这样会增加物料在机筒内的流动率,同时降低了物料的剪切程度,使淀粉的凝胶化程度降低,使得膨化度减小。水分含量的增加也同时减小了模头处的压力,使得膨化度减小。在挤压机工作时,挤压腔内的水作为一种润滑剂来减小摩擦<sup>[16]</sup>,水分含量增加时就会导致物料颗粒之间,物料和挤压机筒壁之间的摩擦减小,使得物料所吸收的热量减小反应不彻底,从而使其膨化度减小。

## 2.2 操作参数对产品堆积密度的影响

由  $R = 0.961 > R_{0.01}$ , 回归达到极显著水平( $P < 0.01$ ),表明堆积密度  $Y_2$  与螺杆转速( $X_1$ ),进料速率( $X_2$ )和进水速率( $X_3$ )及它们的交互项和二次项存在极显著的线性关系,表明在实验范围内此回归方程是真实响应函数的一个合适的近似式。

由回归系数的显著性检验( $t$  检验)得出,在该实验范围内螺杆转速( $X_1$ )对堆积密度没有显著的影响( $P > 0.05$ ),其二次项( $X_1^2$ )、螺杆转速与进料速率的交互项( $X_1 X_2$ )和螺杆转速与进水速率的交互项( $X_1 X_3$ )对堆积密度有极显著的影响( $P < 0.01$ )。其对堆积密度的影响是先减小后增大。

进料速率( $X_2$ )、进料速率与进水速率的交互项( $X_2 X_3$ )对堆积密度有显著的影响( $P < 0.05$ ),其二次项( $X_2^2$ )对堆积密度没有显著的影响( $P > 0.05$ )。随着进料速率的增加,产品的堆积密度减小。

进水速率( $X_3$ )对堆积密度有显著的影响

( $P < 0.05$ ),其二次项( $X_3^2$ )对堆积密度无显著影响( $P > 0.05$ )。随着进水速率的增加,堆积密度随之增加。

从理论上来说,堆积密度和膨化度有负相关的关系。从实验结果的分析上也可以看出,使膨化度增大的影响因素一般都会使得堆积密度减小,其中原因和影响膨化度时相同,这里不再赘述。

## 2.3 操作参数对水中稳定性指数的影响

由  $R = 0.800 < R_{0.05}$ , 回归关系不显著( $P > 0.05$ ),表明水中稳定性指数  $Y_3$  与螺杆转速( $X_1$ ),进料速率( $X_2$ )和进水速率( $X_3$ )及它们的交互项和二次项不存在显著的线性相关关系,表明此回归方程不宜应用。造成这种现象的原因可能是模型选择不当,即在实验范围内,二次模型不能很好地近似真实响应函数,需要进行进一步的研究。

淀粉的凝胶化作用和淀粉-蛋白质网状结构的形成,影响着挤出物的水稳定性<sup>[15]</sup>,并且在保持其他条件稳定的情况下,水稳定性随着螺杆转速、长径比和机筒温度的增加和水分含量的减少而增加。凝胶化是在挤压淀粉原料时主要的物理化学变化,它受温度、水分含量、螺杆转速、喂料速度<sup>[17]</sup>和螺杆结构的影响<sup>[18-19]</sup>。同时,这些因素也影响着挤出物的膨化度,从实验所得数据来看膨化度和水稳定性指数有一定程度的负相关关系,但由于误差的存在这种负相关关系并不十分明显,但仍可作为参考。

## 2.4 挤出物稳定性和浮性观察结果讨论

从测定方法可知,所得到的数据越大说明挤出物就越稳定,同时通过对稳定性和浮性进行观察,发现所有的挤出物都很稳定,在水中 12 h 不溃散,24 h 有个别挤出物(第 2, 12, 14 号)发生部分溃散。对于浮性,只有部分的挤出物具有浮性,所以在试验研究中应尽可能地增加挤出物的膨化度,以使挤出物具有一定的浮性,同时也具有一定的稳定性。

## 3 结论

本实验通过改变挤压操作参数来研究其对挤出物物性的影响,获得了初步研究结果。实验结果表明,各操作参数对挤出物特性的影响规律是复杂的,各参数之间相互联系,相互制约,共同影

响着挤出物特性。通过研究挤压系统操作参数(螺杆转速、进料速率和进水速率)与挤出物物性(膨化度、堆积密度和水中稳定性指数)的关系,得出3个回归方程。经过检验,除水中稳定性指数 $Y_3$ 与螺杆转速( $X_1$ ),进料速率( $X_2$ )和进水速率( $X_3$ )相关关系不显著,表明此回归方程不宜应用,需要进行进一步的研究,其余2个回归方程可以应用。利用回归方程,一方面可以针对某具体试验操作,对挤出物的膨化度和堆积密度进行预测。另一方面通过调整操作参数,来控制挤压系统在预期的产品膨化度和堆积密度下进行挤压蒸煮。同时,为了得到具有一定浮性的膨化水产饲料,在该实验基础上还要进一步的研究。

大连水产学院食品工程系2001级张玉鹏、段磊、高海昌、郭健同学参加部分研究工作,谨表谢意!

#### 参考文献:

- [1] 金征宇. 挤压膨化技术及其在饲料工业中的应用[J]. 饲料工业, 2000, 21(6): 1-5.
- [2] Wood J. Selecting equipment for producing farm-made aquafeeds[C]//Farmmade Aquafeeds. New M B, Tacon A J G, Csavas I, eds. FAO Fisheries Technical Paper No. 343, FAO, Rome, 1995: 135-147.
- [3] Hilton J W, Cho C Y, Sliger S J. Effect of extrusion processing and steam pelleting diets on pellet durability, pellet water absorption, and the physiological response of rainbow trout[J]. Aquaculture, 1981, 25, 185-194.
- [4] Cuzon G, Guillaume J, Cahu C. Composition, reparation and utilization of feeds for crustacean[J]. Aquaculture, 1994, 124: 253-267.
- [5] 林仕梅. 挤压膨化工艺在浮性水产饲料中的应用[J]. 粮食与饲料工业, 2001, (3): 15-18.
- [6] 刘俊荣, 朱赞清, 俞微微, 等. 双轴挤压机在低湿挤压过程中操作参数对系统运行稳定性的影响[J]. 大连水产学院学报, 2005, 20(2): 122-127.
- [7] 刘俊荣, 薛长湖, 佟长青, 等. 鱼肉蛋白在双轴湿挤压过程中系统运行稳定性的拟合模型[J]. 水产学报, 2005, 29(2): 258-262.
- [8] Gour S C, Binoy K G, Aaron J O. Twin-screw extrusion pink salmon muscle and rice flour blends: effects of kneading elements [J]. J Aquatic Food Product Technology, 1998, 7(2): 69-91.
- [9] Roile L A, Huff H E, Hsieh F. Effect of particle size and processing variables on the properties of an extruded catfish feed [J]. J Aquatic Food Product Technology, 2001, 10 (2): 21-33.
- [10] 王钦德, 杨坚. 食品试验设计与统计分析[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- [11] 张裕中, 戴宁, 王治. 双螺杆挤压机操作参数变化对谷物产品特性的影响[J]. 无锡轻工大学学报, 1999, 18(1): 39-46.
- [12] Botting C. Extrusion technology in aquaculture feed processing [M]//Proceedings of the Aquaculture Feeds Processing and Nutrition Workshop, September 19-25, Thailand and Indonesia. Akiyama D M, Tan R K H, eds. American Soybean Association, Singapore, 1991: 129-137.
- [13] Case S E, Hamann D D, Schwartz S J. Effect of starch gelatinization on physical properties of extruded wheat-and corn-based products[J]. Cereal Chem, 1992, 69: 401-404.
- [14] 左春桢, 马成林, 张守勤. 双螺杆挤压加工玉米面膨化食品的工艺和配方研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 91-93.
- [15] Sukumar B, Ranjan K R. Aquafeed extrudate flow rate and pellet characteristics from low-cost single-screw extruder[J]. J Aquatic Food Product Technology, 2001, 10(2): 3-15.
- [16] Huang S, Liang M, Lardy G, et al. Extrusion processing of rapeseed meal for reducing glucosinolates[J]. Anim Feed Sci Technol, 1995, 56: 165-175.
- [17] Bhattacharya M, Hanna M A. Kinetics of starch gelatinization during extrusion cooking[J]. J Food Sci, 1987, 53 (3): 764-766.
- [18] Gogoi B K, Oswalt A J, Choudhury G S. Reverse screw element(s) and feed composition effects during twin-screw extrusion of rice flour and fish muscle blends[J]. J Food Sci, 1996, 61(3): 590-595.
- [19] Gogoi B K, Choudhury G S, Oswalt A J. Effects of location and spacing of reverse screw and kneading element combination during twin-screw extrusion of starchy and proteinaceous blend[J]. Food Sci Int, 1996, 29(5/6): 505-512.