

基于响应面法的豆粕挤压系统参数优化

郭树国¹,王丽艳¹,李成华²

(1. 沈阳化工大学 机械工程学院,辽宁 沈阳 110142; 2. 沈阳理工大学 机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:为了考察挤压膨化生产大豆组织蛋白过程中相关参数对系统参数的影响,以豆粕为原料,利用响应面模型,以豆粕含水率、膨化机螺杆转速和机筒温度为输入变量,以扭矩为响应变量,探索豆粕挤压膨化系统的相关参数对扭矩影响规律和挤压膨化系统最佳参数。结果表明:豆粕含水率、膨化机螺杆转速和机筒温度对扭矩具有显著的影响;膨化机转速是影响扭矩的主要因素。采用优化方法对试验参数进行了优化计算,当豆粕含水率为17.2%、膨化机转速为202.5 r·min⁻¹、机筒温度为110℃时,膨化机工作性能指标达到最优。

关键词:豆粕;挤压膨化;参数优化;响应面

中图分类号:TS210 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-9841(2012)02-0295-04

Optimization for System Parameter of Soybean Meal Extrusion using Response Surface Methodology

GUO Shu-guo¹, WANG Li-yan¹, LI Cheng-hua²

(1. College of Machinery Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142; 2. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110142, Liaoning, China)

Abstract: Response surface methodology (RSM) was used to study the effects of feed moisture content, screw rotation speed and extruding cylinder temperature on motor torque. Experiment results indicated that moisture content of soybean meal, screw rotation speed and extruding cylinder temperature had significant influence on motor torque, in which screw rotation speed was main factor affecting extrusion index. Optimal extrusion criteria were achieved with moisture content of soybean meal 17.2%, screw rotation speed 202.5 r·min⁻¹ and extruding cylinder temperature 110℃.

Key words: Soybean meal; Extrusion; Parameter optimization; Response surface analysis

大豆富含高蛋白和脂肪,蛋白含量可达45%~50%。大豆提取豆油后的副产品豆粕含大豆中的所有蛋白,是加工大豆组织蛋白的理想原料^[1]。2010年中国大豆粕产量已超过4350万t,但仅有5%用于食品工业,造成了资源极大浪费。因此,利用豆粕为原料制取大豆蛋白对拓展大豆蛋白资源的用途,提高大豆蛋白的利用率具有重要意义^[2]。

食品挤压技术是集蒸煮、混合和成型于一体,涉及多学科交叉知识的综合技术,它具有低能耗、高产量等优点^[3]。食品挤压蒸煮系统是一个多输入、多输出复杂的系统,由于挤压机的黑箱特性,其挤压机理尚不明确。食品的挤压是复杂的加工过程,目前还没有应用于螺杆食品挤压机的精确数学模型,关于螺杆挤压机加工原料的挤压理论也并不完善,因此无法通过物料特性、挤压机结构参数和加工条件对挤压机的工作情况和加工结果进行预测,试验研究仍是螺杆食品挤压机研究中采用的重

要手段^[4]。

响应面(Response surface methodology, RSM)是一种有效的多变量系统求优的试验策略,与以往采用的正交设计方法不同,响应面分析法通常是利用中心组合试验拟合出一个完整的二次多项式模型,在试验设计与结果表述方面更加优良,因此在研究挤压加工系统中工艺参数对目标参数的影响或优化采用响应面分析方法^[5-6]。在挤压过程中,扭矩的大小直接反映能量消耗的多少,同时也对组织化产品的质量有决定性作用。因此,该试验采用响应面分析法,以扭矩为指标,对豆粕挤压膨化系统进行优化,为大豆组织蛋白工业化生产提供一定的理论参考和依据。

1 材料与方法

1.1 设备与材料

在自行研制的单螺杆挤压膨化机上进行挤压

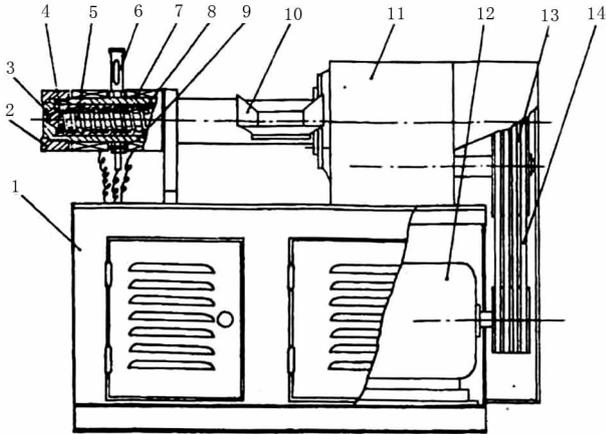
收稿日期:2012-01-30

基金项目:辽宁省教育厅科学研究项目(L2011067)。

第一作者简介:郭树国(1978-),男,副教授,从事农产品加工技术与设备研究。E-mail:guoshuguo@126.com。

通讯作者:李成华(1958-),男,教授,从事机械设计及理论研究。E-mail:chenghuali2000@yahoo.com。

膨化试验,挤压膨化机主要由螺杆、套筒、模头等组成,结构如图1所示。螺杆采用单螺旋等螺距变根径矩形螺纹结构。膨化机的主要技术参数如下:模口直径为2.5 mm、螺杆长度为150 mm、螺杆外径为45 mm、螺纹牙宽为5 mm、螺纹牙高为3 mm。



1. 机架; 2. 锁紧螺母; 3. 模头; 4. 阻力模板; 5. 挤压螺杆; 6. 温度计; 7. 加热元件; 8. 内套筒; 9. 外套筒; 10. 进料口; 11. 减速箱; 12. 电动机; 13. 胶带轮; 14. 三角带
1. Rack; 2. Locknut; 3. Die head; 4. Resistance template; 5. Extruding screw; 6. Thermometer; 7. Heating element heater; 8. Inner sleeve; 9. Outer sleeve; 10. Feed opening; 11. Reducer casing; 12. Electric motors; 13. Belt pulley; 14. Vee belt

图1 单螺杆挤压膨化机结构

Fig. 1 Structure of single-screw extruder

试验材料为低变性豆粕(蛋白质含量45%,粗纤维含量8%,脂肪含量2.7%),80~100目。

1.2 试验仪器

XMT型数显调节仪,AG-204型分析天平,NC-3扭矩测试仪,79725型电热恒温干燥箱,BA7200型连续光谱二级管阵列近红外分析仪。

1.3 试验方案设计

采用可旋转中心组合设计方法进行试验设计,根据单因素试验及分析,在保证产品质量的前提下,选取合适范围的豆粕含水率、螺杆转速和机筒温度为自变量,每个变量取5个水平,如表1所示。

表1 变量设计表

Table 1 Design of variables

X_j	含水率 Z_1	转速 Z_2	温度 Z_3
	Moisture content of soybean meal /%	Screw rotation speed /r·min ⁻¹	Extruding cylinder temperature /°C
+1.682	33	335	135
+1	30	300	130
0	25	250	120
-1	20	200	110
-1.682	17	165	105

对各因素取值作线性变换^[7]:

$$X_1 = (Z_1 - 25)/5, X_2 = (Z_2 - 250)/50, X_3 = (Z_3 - 120)/10。$$

1.4 统计分析

试验数据采用 Design Expert 8.0 统计分析软件分析处理。工艺参数和试验指标关系用二级多项式回归模型表示

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

y 代表试验指标值, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ 为模型的回归系数, X_i 和 X_j 为自变量的编码值。

2 结果和分析

2.1 响应面试验结果

采用 Design Expert 8.0 统计分析软件设计了三因素五水平共 20 个试验点的响应面分析试验,以扭矩为考察指标,响应面试验方案及结果如表 2 所示。试验号 15-20 为中心试验,其余为非中心试验,中心点进行 6 次重复试验,用于估计试验误差。

表2 响应面试验方案及试验结果

Table 2 Design and results of response surface methodology

试验号 Test number	编码水平 Horizontal encoding			扭矩 Motor torque /Nm
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	-1	-1	72.21
2	-1	-1	1	61.24
3	-1	1	-1	59.54
4	-1	1	1	34.18
5	1	-1	-1	55.87
6	1	-1	1	50.64
7	1	1	-1	42.36
8	1	1	1	30.69
9	-1.682	0	0	47.65
10	1.682	0	0	31.47
11	0	-1.682	0	89.45
12	0	1.682	0	28.35
13	0	0	-1.682	47.42
14	0	0	1.682	32.58
15	0	0	0	42.16
16	0	0	0	45.29
17	0	0	0	44.38
18	0	0	0	41.17
19	0	0	0	44.29
20	0	0	0	43.35

2.2 扭矩响应曲面分析

根据表 2 试验结果,用 Design Expert 8.0 统计分析软件进行多元回归分析,可看出各具体试验因

子对响应值的影响不是简单的线性关系。经回归拟合后,得到扭矩的二次多项回归方程为:

$$\begin{aligned} \text{扭矩} = & 43.28 - 5.7X_1 - 13.10X_2 - 5.51X_3 + \\ & 1.16X_1X_2 + 2.05X_1X_3 - 2.98X_2X_3 - 0.34X_1^2 + \\ & 6.5X_2^2 - 0.18X_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

在试验设计范围内,一次项的偏回归系数的绝对值 $X_2 > X_1 > X_3$,说明膨化机螺杆转速对扭矩的影响最大,其次是豆粕含水率,而机筒温度对扭矩的影响最小。

对该模型进行方差分析,结果见表3。

表3 方差分析表

Table 3 Analysis of variance

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Sum of squares	F value	P value
模型 Model	3948.54	9	438.73	11.86	0.0003
X_1	443.45	1	443.45	11.98	0.0061
X_2	2344.77	1	2344.77	63.36	<0.0001
X_3	413.95	1	413.95	11.19	0.0074
X_1X_2	10.74	1	10.74	0.29	0.6018
X_1X_3	33.74	1	33.74	0.91	0.3621
X_2X_3	70.98	1	70.98	1.92	0.1962
X_{12}	1.65	1	1.65	0.045	0.8371
X_{22}	608.80	1	608.80	16.45	0.0023
X_{32}	0.48	1	0.48	0.013	0.9116
残差	370.05	10	37.01		
Residual 失拟项	358.23	5	71.65	30.29	0.0010
Lack of fit 纯误差	11.83	5	2.37		
Pure error 总离差	4318.59	19			
Total deviation					

从表3可知,扭矩模型 $P = 0.0003$,说明模型显著,失拟项 $P = 0.01$,说明失拟不显著,模型拟合程度良好,该模型可用于预测挤压过程中扭矩值。

2.2.1 含水率和螺杆转速的交互作用对扭矩的影响 根据回归方程,把 X_3 固定在零水平,即 $X_3 = 0$,则式(2)简化为:

$$\text{扭矩} = 43.3 - 5.7X_1 - 13.1X_2 + 1.2X_1X_2 - 0.34X_1^2 + 6.5X_2^2 \quad (3)$$

根据式(3),得出 X_1 和 X_2 因子对扭矩的影响。从图2可以看出,随着豆粕含水率的升高,扭矩逐渐变小,这主要是因为扭矩的大小与豆粕的熔体黏度有关。水分是影响食品材料黏度的塑化剂,豆粕的含水率越大,豆粕熔体的黏度越低,同时豆粕与

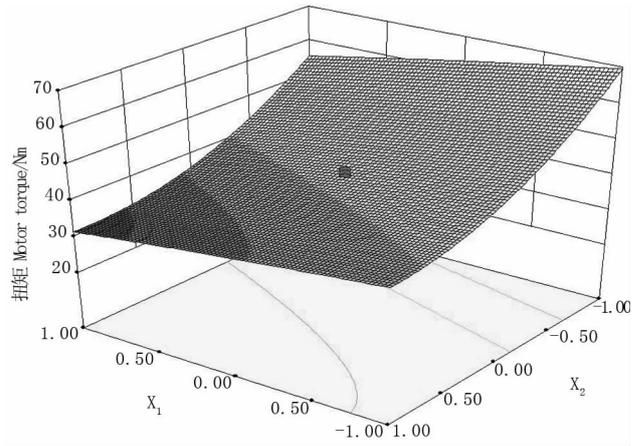


图2 X_1 和 X_2 的交互作用

Fig.2 Impact of X_1 and X_2 on motor torque

螺杆之间的摩擦越小,导致扭矩值降低。

2.2.2 含水率和机筒温度的交互作用对扭矩的影响 根据回归方程,把 X_2 固定在零水平,即 $X_2 = 0$,则式(2)简化为:

$$\text{扭矩} = 43.3 - 5.7X_1 - 5.5X_3 + 2.05X_1X_3 - 0.34X_1^2 - 0.18X_3^2 \quad (4)$$

根据式(4),得出 X_1 和 X_3 因子对扭矩的影响。

从图3可以看出,扭矩随机筒温度的升高逐渐变小,这主要是由于大多数物料在挤压过程中呈现假塑性流体行为,扭矩与机筒内的面团黏度也有一定的函数关系,机筒温度升高也会使熔体黏度下降,从而导致扭矩值的减小。

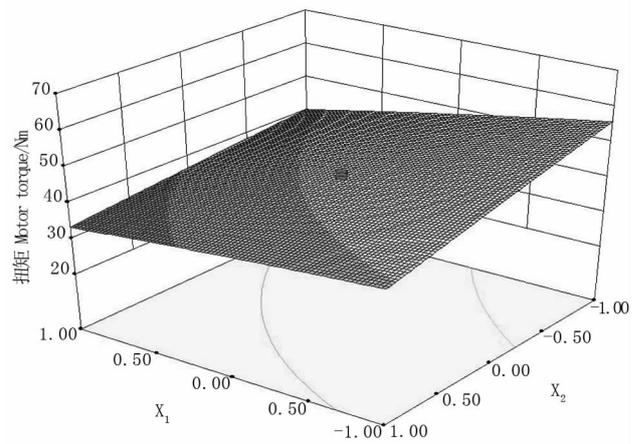


图3 X_1 和 X_3 的交互作用

Fig.3 Impact of X_1 and X_3 on motor torque

2.2.3 螺杆转速和机筒温度的交互作用对扭矩的影响 根据回归方程,把 X_1 固定在零水平,即 $X_1 = 0$,则式(2)简化为:

$$\text{扭矩} = 43.3 - 13.1X_2 - 5.51X_3 - 2.98X_2X_3 + 6.5X_2^2 - 0.18X_3^2 \quad (5)$$

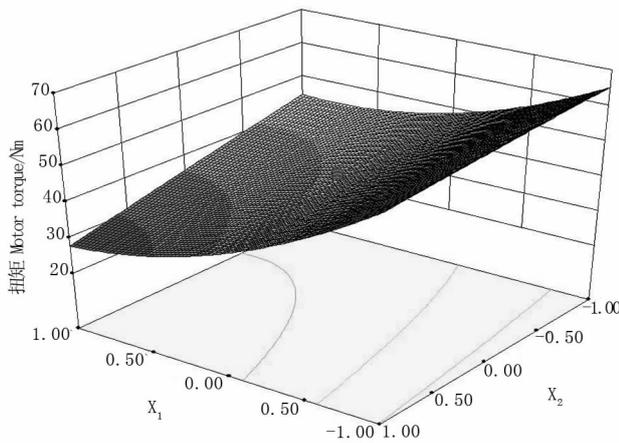


图4 X_2 和 X_3 的交互作用

Fig. 4 Impact of X_2 and X_3 on motor torque

根据式(5),得出 X_2 和 X_3 因子对扭矩的影响。从图4可以看出,扭矩值随螺杆转速的增加而逐渐变小。这主要是由于增大螺杆转速使机筒内豆粕所受到剪切强度升高,豆粕发生剪切变稀、温度升高和分子降解现象^[3],导致豆粕黏度降低,因此降低了螺杆旋转时受到的熔体黏度阻力,从而导致扭矩值减小。

通过统计分析软件 Design Expert 8.0 模拟得到优化编码水平为 $X_1 = -1.56$ 、 $X_2 = -0.95$ 、 $X_3 = -1$,经过转化得出此优化条件为:豆粕含水率17.2%、膨化机螺杆转速 $202.5 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、机筒温度 110°C ,在这一优化条件下扭矩模拟预测值为76.98 Nm。对模拟得到的优化条件进行验证试验,验证值为75.39 Nm,验证值与预测值误差为2.11%,小于5%,从而验证了模型的有效性。

3 结论

在挤压膨化生产大豆组织蛋白过程中,扭矩受到豆粕含水率、螺杆转速和机筒温度的共同影响,其中螺杆转速对扭矩的影响最大。

通过旋转中心组合设计对影响扭矩显著的3个因素进一步优化。采用响应面方法对试验结果

进行分析,得到优化条件为豆粕含水率17.2%、膨化机螺杆转速 $202.5 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、机筒温度 110°C ,在这一优化条件下扭矩模拟预测值与验证值误差小于5%,从而验证了模型的有效性。

参考文献

- [1] 郭树国,王丽艳,刘强. 挤压参数对组织化大豆蛋白糊化度的影响[J]. 中国饲料,2011(11):26-28. (Guo S G, Wang L Y, Liu Q. Effect of extrusion parameters on the gelatinization degree of texturized soy protein[J]. China Feed,2011(11):26-28.)
- [2] 魏益民,康立宁,张波,等. 高水分大豆蛋白组织化生产工艺和机理分析[J]. 农业工程学报,2006,22(10):193-197. (Wei Y M, Kang L N, Zhang B, et al. Processing and mechanism of high moisture textured soy protein[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(10):193-197.)
- [3] 庄海宁,冯涛,金征宇,等. 挤压加工参数对重组米生产过程及产品膨胀度的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(9):349-356. (Zhuang H, Feng T, Jin Z Y, et al. Effect of extrusion parameters on production process and expansion ratio of reformed rice[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(9):349-356.)
- [4] 郭树国,李成华,王丽艳. 正交法优化豆粕挤压膨化系统参数[J]. 粮油加工,2010(5):69-71. (Guo S G, Li C H, Wang L Y, Orthogonal experiment of parameter optimization for soybean meal extrusion[J]. Cereals and Oils Processing,2010(5):69-71.)
- [5] 焦爱权,庄海宁,金征宇,等. 双螺杆二次挤压法制备方便米饭的工艺研究[J]. 农业工程学报,2008,24(7):260-263. (Jiao A Q, Zhuang H N, Jin Z Y, et al. Technology for twice extrusion of instant rice with twin-screw extruder[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(7):260-263.)
- [6] 王文贤,刘学文,谢永洪,等. 鸡肉-大米膨化食品双螺杆挤压工艺参数的优化研究[J]. 农业工程学报,2004,20(6):223-226. (Wang W X, Liu X W, Xie Y H, et al. Optimization of extrusion cooking conditions of extrusion-cooked chicken-rice snack with twin-screw extruder[J]. Transactions of the CSAE,2004,20(6):223-226.)
- [7] 袁志发,周静芊. 试验设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2000. (Yuan Z F, Zhou J Y. Design and analysis of experiments[M]. Beijing: Higher Education Press,2000.)