

文章编号: 1673-1689(2007)01-0010-06

# 应用均匀设计和响应面分析优化谷物早餐的挤压工艺

王亮, 周惠明, 钱海峰

(江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214036)

**摘要:**以小麦、燕麦和玉米粉为主要原料,以脆性和保脆性为主要指标,通过均匀设计得到挤压工艺中对品质影响较大的3个因素及其取值范围。再通过响应面分析对谷物早餐的挤压工艺进行优化,得出最佳的挤压工艺为:螺杆螺旋速度为334 r/min;I区温度为40℃;II区温度为150℃;III区温度为123.50℃;水分质量分数22.60%,蛋白质质量分数7.3%,脂肪质量分数8%。

**关键词:**谷物早餐;挤压;均匀设计;响应面分析

中图分类号: S37

文献标识码: A

## Optimization of the Extruding Process for Breakfast Cereal by Uniform Design and Response Surface Analysis

WANG liang, ZHOU Hui-ming, QIAN Hai-feng

(School of Food Science and Technology, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China)

**Abstract:** Wheat, oat and corn meal were used as the main material, and crispness and bowl life were applied as the main indexes to optimize the extruding process. It was found that three factors play key role on the extruding process, and the range of these factors was determined by uniform design. Then, the extruding process for breakfast cereal was optimized by response surface analysis, and the best extruding process was listed as follows: screw speed was 334 r/min, temperature I was 40℃, temperature II was 150℃, temperature III was 123.50℃, moisture content was 22.60%, protein content was 7.3%, and lipid content was 8%.

**Key words:** breakfast cereal; extrude; uniform design; response surface analysis

谷物早餐(Breakfast Cereals)是以谷物——玉米、大米、小麦、燕麦等为主要原料加工,加入牛奶(冷食)或稍煮沸片刻(热食)就可食用的早餐食品。其味道有原味,有加砂糖、蜂蜜、巧克力、肉桂等调味品口味,还可添加葡萄干、坚果、椰丝、杏仁、干

果、蔬菜等<sup>[1]</sup>。另外,有的产品可强化多种维生素、无机盐等成分,使之达到营养平衡;有的特意添加燕麦麸皮增加食物纤维含量,增强保健作用。

挤压加工技术作为一种经济实用且连续的新型加工方法广泛应用于食品生产中,并得到迅速发展。

收稿日期: 2006-04-28.

基金项目: 国家“十五”重大科技专项基金项目(编号2001BA501A04B).

作者简介: 王亮(1977-),男,新疆乌鲁木齐人,粮食、油脂与植物蛋白工程博士研究生。

通讯作者: 周惠明(1957-),男,江苏无锡人,教授,博导,主要从事粮食、油脂与植物蛋白工程研究。Email: hmzhou@

与传统生产工艺相比,挤压加工极大地改善了谷物食品的加工工艺,缩短了工艺过程,丰富了谷物食品的花色品种,大大降低了劳动强度<sup>[2,3]</sup>,同时也改善了产品的组织状态和口感,提高了产品的质量<sup>[4]</sup>。

针对谷物早餐的营养性研究已经深入开展,但是针对谷物早餐质构的研究却很少。质构特性是食品最重要的品质之一。目前,在国内外的研究当中食品的营养和风味是一个热点并且已经进行了很多的研究工作,但对于食品质构特性的研究却很少。在保证营养的前提下,适当地改善食品的质构特性,提高产品的感官品质,将会在很大程度上提高产品的质量和价值。

在挤压工艺操作中有很多因素制约着产品的品质,如螺杆的螺旋速度,挤压机不同区域的温度,原料的水分、脂肪和蛋白质含量等。Vamshidhar Puppala 探讨了挤压机螺旋速度对于产品在挤压机内受热情况的影响<sup>[5]</sup>;J. Owusu- Ansah 和 M. H. Gomez 探讨了在挤压过程中物料受热后,淀粉颗粒的变化<sup>[6-7]</sup>;M. G. Osman 等人研究了在挤压过程中原料中蛋白质结构的变化<sup>[8]</sup>;P. Chapoutot 与 V. D. Miladinov 等人探讨了在挤压过程中,原料中脂肪对于产品结构的影响<sup>[9-10]</sup>。

作者以挤出产品的脆性和保脆性作为主要指标进行研究。采用均匀设计来选取明显影响产品品质的因素,并缩小此因素的取值范围,然后通过响应面分析确定最佳的挤压工艺。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与试剂

小麦、燕麦、玉米粉:购于无锡三里桥农贸市场;大豆色拉油:市售;硫代巴比妥酸、醋酸钠、十二烷基磺酸钠、冰醋酸 均为分析纯。

### 1.2 主要仪器

TA-XT2i 物性测定仪:英国 Stable Micro System 公司制造;UV-2800 型紫外可见分光光度计:UNICO 产品。

DS32-II 型双螺杆挤压机:济南赛信膨化机械有限公司产品。

### 1.3 分析测定方法

**1.3.1 脆性的测定** 采用 TA-XT2i 物性测定仪,距离 20 mm,前进速度为 5 mm/s,破碎速度为 5 mm/s,后进速度为 10 mm/s,破碎峰值即为脆性<sup>[11]</sup>。

**1.3.2 保脆性的测定** 取 25 g 样品,放入 100 mL 室温的水中,5 min 后取出测定其脆性,以最大破碎

应力代表保脆性的大小<sup>[12]</sup>。

**1.3.3 碘价的测定** 根据 GB/T 5532-1995 测定<sup>[13]</sup>。

**1.3.4 过氧化值的测定** 样品中脂质过氧化物 (nmol/g) =  $6410.26 A_{532} D/c A_{532}$  为 532 nm 下的吸光度,  $D$  为稀释因子,  $c$  为样品浓度<sup>[14-15]</sup>。

### 1.4 均匀设计

选取螺杆螺旋速度、I 区温度、II 区温度、III 区温度、水分质量分数、蛋白质质量分数、脂肪质量分数为影响因素,指标为脆性和保脆性。通过七因素十一水平的均匀设计,分析不同因素对指标的影响,找出影响最大的因素并适当地缩小其取值范围。其他影响不明显的因素可以按照试验结果固定于某一合适水平。均匀设计因素水平如表 1 所示。

表 1 均匀设计各因素水平

Tab.1 The factors and levels of uniform design

| 水平 | $X_1$<br>螺旋速度/<br>(r/min) | $X_2$<br>I 区<br>温度/<br>℃ | $X_3$<br>II 区<br>温度/<br>℃ | $X_4$<br>III 区<br>温度/<br>℃ | $X_5$<br>水分<br>质量<br>分数/<br>% | $X_6$<br>蛋白质<br>质量/<br>分数/<br>% | $X_7$<br>脂肪<br>质量<br>分数/<br>% |
|----|---------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1  | 196                       | 35                       | 110                       | 115                        | 23                            | 9.1                             | 15                            |
| 2  | 210                       | 45                       | 125                       | 135                        | 18                            | 7.9                             | 14                            |
| 3  | 224                       | 55                       | 140                       | 100                        | 24                            | 10.0                            | 13                            |
| 4  | 238                       | 65                       | 100                       | 120                        | 19                            | 8.8                             | 12                            |
| 5  | 252                       | 75                       | 115                       | 140                        | 25                            | 7.6                             | 11                            |
| 6  | 266                       | 30                       | 130                       | 105                        | 20                            | 9.7                             | 10                            |
| 7  | 280                       | 40                       | 145                       | 125                        | 26                            | 8.5                             | 9                             |
| 8  | 294                       | 50                       | 105                       | 145                        | 21                            | 7.3                             | 8                             |
| 9  | 308                       | 60                       | 120                       | 110                        | 27                            | 9.4                             | 7                             |
| 10 | 322                       | 70                       | 135                       | 130                        | 22                            | 8.2                             | 6                             |
| 11 | 336                       | 80                       | 150                       | 150                        | 17                            | 10.3                            | 16                            |

### 1.5 响应面分析

通过上述均匀设计,挑选影响最大的因素及其适当的取值范围,进行响应面分析得出最佳的挤压工艺。选取脆性、保脆性、碘价和过氧化值为指标。脆性和保脆性反映产品感官质构方面的品质;碘价代表产品中不饱和脂肪酸的含量,反映产品营养方面的品质;过氧化值代表油脂氧化的程度,从侧面反映产品货架期。对以上 4 个指标进行加权分析,见表 2。

表 2 各指标权重

Tab.2 The weights of the levels

| 指标                  | 权重    |
|---------------------|-------|
| $Y_1$ (脆性 g)        | 0.347 |
| $Y_2$ (保脆性 g)       | 0.260 |
| $Y_3$ (碘价)          | 0.147 |
| $Y_4$ (过氧化值 nmol/g) | 0.247 |

## 2 结果与讨论

### 2.1 均匀设计

采用  $U_{11}(11^7)$  均匀设计表安排实验,并测定脆性和保脆性,采用回归方程  $Y = a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 + a_7X_7 + a_{11}X_1^2 + a_{44}X_4^2 + a_{55}X_5^2 + a_{66}X_6^2 + a_{77}X_7^2$ ,其结果如表3所示。应用数理统计软件 SAS 对数据进行逐步回归分析,得出回归方程系数,如表4所示。应用数据分析软件 Matlab 进行方程求解。

表3  $U_{11}(11^7)$  均匀设计结果

Tab.3 The result of uniform design ( $U_{11}(11^7)$ )

|    | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $Y_1$ (脆性/g) | $Y_2$ (保脆性/g) |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|---------------|
| 1  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 7     | 10    | 11 830.2     | 3 975         |
| 2  | 2     | 4     | 6     | 8     | 10    | 3     | 9     | 5 489.4      | 1 540         |
| 3  | 3     | 6     | 9     | 1     | 4     | 10    | 8     | 10 383       | 2 200         |
| 4  | 4     | 8     | 1     | 5     | 9     | 6     | 7     | 8 941.47     | 303           |
| 5  | 5     | 10    | 4     | 9     | 3     | 2     | 6     | 12 267.7     | 4 211         |
| 6  | 6     | 1     | 7     | 2     | 8     | 9     | 5     | 11 076.4     | 1 809         |
| 7  | 7     | 3     | 10    | 6     | 2     | 5     | 4     | 16 981.9     | 5 657         |
| 8  | 8     | 5     | 2     | 10    | 7     | 1     | 3     | 13 607.7     | 3 050         |
| 9  | 9     | 7     | 5     | 3     | 1     | 8     | 2     | 17 218.4     | 4 249         |
| 10 | 10    | 9     | 8     | 7     | 6     | 4     | 1     | 25 215.4     | 14 800        |
| 11 | 11    | 11    | 11    | 11    | 11    | 11    | 11    | 4 410.97     | 213           |

表4 均匀设计回归系数取值

Tab.4 The coefficient of regression of uniform design

| 系数       | $Y_1$                     | $Y_2$                     |
|----------|---------------------------|---------------------------|
| $a_3$    | 236.357 63                | 417.016 75                |
| $a_4$    | 3 041.970 91 <sup>b</sup> | -                         |
| $a_5$    | 2 977.764 92 <sup>b</sup> | 1 749.726 98 <sup>b</sup> |
| $a_7$    | -378.679 48               | -                         |
| $a_{11}$ | 82.444 01 <sup>b</sup>    | 111.753 89 <sup>c</sup>   |
| $a_{44}$ | -271.663 74 <sup>b</sup>  | -81.204 69 <sup>c</sup>   |
| $a_{55}$ | -306.142 54 <sup>a</sup>  | -171.816 63 <sup>c</sup>  |
| $a_{66}$ | -                         | -112.051 74 <sup>c</sup>  |
| $a_{77}$ | -                         | 55.762 22                 |
| $R^2$    | 0.997 6                   | 0.965 8                   |

注 a 表示  $P \leq 0.001$ , b 表示  $P \leq 0.01$ , c 表示  $P \leq 0.05$

由表3中可以看出,对于指标  $Y_1$ (脆性)和  $Y_2$ (保脆性), $R^2$ 达到了0.997 6和0.965 8,说明方程的因变量与全体自变量之间的回归效果显著,可用于对试验进行分析和预测。

在指标  $Y_1$ (脆性)和  $Y_2$ (保脆性)之间,指标  $Y_1$ (脆性)更为重要,这是因为在一定程度上可以通过  $Y_1$ 来预测  $Y_2$ ,所以先对  $Y_1$ 的方程进行求解,然后通过

$Y_1$ 和  $Y_2$ 的方程来确定影响不显著的其他因素的取值。

用数据处理软件 Matlab 进行  $Y_1$ 的方程求解,得到在  $Y_1$ 取最大值时: $X_1$ 取336 r/min,  $X_3$ 取150 °C,  $X_4$ 取125 °C,  $X_5$ 取23%。在  $Y_2$ 的方程中,  $X_6$ 取值越小越好,所以选取  $X_6$ 为7.3%。在  $Y_1$ 的方程中,  $X_7$ 取值越小越好,但其影响不显著;而在  $Y_2$ 的方程中,  $X_7$ 取值越大越好,所以综合考虑两个方程以及实际情况,选取  $X_7$ 为8%。 $X_2$ 在两个方程中都不显著,说明  $X_2$ 对产品质量没有明显影响;在实际挤压过程中,  $X_2$ 增大,进料会出现阻塞现象,所以选取  $X_2$ 为40 °C。

综合以上,通过均匀设计挑选的工艺参数为:螺杆螺旋速度为336 r/min; I区温度40 °C; II区温度150 °C; III区温度125 °C;水分质量分数23%;蛋白质质量分数7.3%;脂肪质量分数8%。对  $Y_1$ 和  $Y_2$ 两个方程都有显著性影响的是螺杆螺旋速度、III区温度和水分含量,所以将其他因素都固定在由均匀设计得出的最优水平上。而对螺杆螺旋速度、III区温度和水分含量进行响应面分析以得出更为准确的最佳工艺参数,而这3个因素在响应面分析中的取值范围就固定在由均匀设计得出的最优水平左右。

### 2.2 响应面分析

对均匀设计中显著影响产品品质的螺杆螺旋速度、III区温度和水分含量进行三因素五水平的响应面分析,3个指标的取值范围都在由均匀设计得出的最优水平左右。指标定为  $Y_1$ (脆性/g)、 $Y_2$ (保脆性/g)、 $Y_3$ (碘价)、 $Y_4$ (过氧化值, nmol/g),以及由这4个指标和权重得出的综合指标  $Y$ 。响应面分析的因素水平见表5,试验结果见表6。

表5 响应面分析的因素水平表

Tab.5 The factors and levels of response surface analysis

| 水平    | $X_1$ (螺旋速度/(r/min)) | $X_2$ (III区温度/°C) | $X_3$ (水分质量分数/%) |
|-------|----------------------|-------------------|------------------|
| -1.68 | 324                  | 116.96            | 21.32            |
| -1    | 329                  | 122               | 22               |
| 0     | 336                  | 125               | 23               |
| 1     | 343                  | 128               | 24               |
| 1.68  | 348                  | 133.04            | 24.68            |

采用回归方程  $Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3$ ,以及 SAS 'RSREG 程序对表6数据进行处理,回归系数及方差分析结果见表7。

表 6 响应面分析实验结果  
Tab. 6 The result of response surface analysis

| 序号 | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $Y_1$ (脆性 g) | $Y_2$ (保脆性 g) | $Y_3$ (碘价) | $Y_4$ (过氧化值, nmol/g) | $Y$ (综合) |
|----|-------|-------|-------|--------------|---------------|------------|----------------------|----------|
| 1  | -1    | -1    | -1    | 20 426       | 8 976         | 11.49      | 245.0                | 1.119    |
| 2  | -1    | -1    | 1     | 15 364       | 2 601         | 11.66      | 236.0                | 0.754 46 |
| 3  | -1    | 1     | -1    | 13 468       | 3 392         | 11.76      | 238.3                | 0.760 95 |
| 4  | -1    | 1     | 1     | 7 938        | 1 393         | 11.99      | 370.7                | 0.490 58 |
| 5  | 1     | -1    | -1    | 17 508       | 8 095         | 11.58      | 191.9                | 1.075 42 |
| 6  | 1     | -1    | 1     | 13 904       | 1 198         | 12.10      | 185.1                | 0.724 17 |
| 7  | 1     | 1     | -1    | 8 663        | 2 807         | 11.35      | 223.0                | 0.638 71 |
| 8  | 1     | 1     | 1     | 12 592       | 1 623         | 11.97      | 330.5                | 0.606 65 |
| 9  | -1.68 | 0     | 0     | 18 685       | 6 910         | 11.60      | 117.1                | 1.1999 8 |
| 10 | 1.68  | 0     | 0     | 17 813       | 8 047         | 11.40      | 207.7                | 1.059 12 |
| 11 | 0     | -1.68 | 0     | 11 604       | 7 356         | 11.20      | 140.3                | 1.010 14 |
| 12 | 0     | 1.68  | 0     | 17 277       | 8 100         | 11.73      | 163.6                | 1.114 12 |
| 13 | 0     | 0     | -1.68 | 13 413       | 8 083         | 11.30      | 205.6                | 0.975 12 |
| 14 | 0     | 0     | 1.68  | 9 145        | 885           | 11.80      | 300.5                | 0.518 63 |
| 15 | 0     | 0     | 0     | 23 012       | 7 762         | 11.56      | 160.2                | 1.216 18 |
| 16 | 0     | 0     | 0     | 22 973       | 7 830         | 11.52      | 159.7                | 1.219    |
| 17 | 0     | 0     | 0     | 22 928       | 7 812         | 11.56      | 158.9                | 1.219 26 |
| 18 | 0     | 0     | 0     | 23 256       | 7 760         | 11.55      | 161.0                | 1.219 48 |
| 19 | 0     | 0     | 0     | 22 987       | 7 723         | 11.58      | 158.9                | 1.216 68 |
| 20 | 0     | 0     | 0     | 22 910       | 7 713         | 11.58      | 160.0                | 1.212 66 |
| 21 | 0     | 0     | 0     | 23 231       | 7 782         | 11.53      | 161.2                | 1.219 46 |
| 22 | 0     | 0     | 0     | 23 189       | 7 753         | 11.56      | 159.3                | 1.220 9  |
| 23 | 0     | 0     | 0     | 22 980       | 7 821         | 11.54      | 159.5                | 1.219 26 |

表 7 响应面回归系数取值  
Tab. 7 The coefficient of regression of response surface analysis

| 系数       | $Y_1$ (脆性 g)            | $Y_2$ (保脆性 g)           | $Y_3$ (碘价)             | $Y_4$ (过氧化值, nmol/g)   | $Y$ (综合)                |
|----------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| $a_0$    | 23 060.69               | 7 831.683               | 11.548 26              | 158.527 5              | 1.222 272               |
| $a_1$    | -439.01                 | -53.217 79              | -0.017 307             | -0.522 084             | -0.023 207              |
| $a_2$    | -1 098.361              | -761.796 2              | 0.082 841 <sup>c</sup> | 25.165 8 <sup>c</sup>  | -0.073 317              |
| $a_3$    | -1 277.368              | -2 091.296 <sup>a</sup> | 0.174 337 <sup>a</sup> | 28.095 88 <sup>c</sup> | -0.130 772 <sup>b</sup> |
| $a_{11}$ | -1 783.885 <sup>b</sup> | -670.059                | 0.029 962              | 13.683 69              | -0.071 492              |
| $a_{22}$ | -3 130.392 <sup>a</sup> | -581.8463               | 0.017 587              | 9.988 993              | -0.095 329 <sup>c</sup> |
| $a_{33}$ | -4 248.156 <sup>a</sup> | -1 728.776 <sup>b</sup> | 0.047 639              | 45.733 31 <sup>a</sup> | -0.206 789 <sup>a</sup> |
| $a_{12}$ | 528.375                 | 241.125                 | -0.12 <sup>c</sup>     | 6.062 5                | 0.008 463               |
| $a_{13}$ | 1 364.625               | 36.625                  | 0.092 5                | -2.837 5               | 0.031 45                |
| $a_{23}$ | 883.125                 | 1 261.125 <sup>c</sup>  | 0.02                   | 31.962 5 <sup>c</sup>  | 0.051 67                |
| $R^2$    | 0.868 1                 | 0.800 9                 | 0.745 0                | 0.742 3                | 0.840 8                 |

注 <sup>a</sup>表示  $P \leq 0.001$  <sup>b</sup>表示  $P \leq 0.01$  <sup>c</sup>表示  $P \leq 0.05$ 。

由表 7 可以看出,方程  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ 、 $Y_4$  以及  $Y$  的相关系数  $R^2$  值分别达到 0.868 1、0.800 9、0.745 0、0.742 3、0.840 8,说明方程的因变量与全体自变量之间的回归效果显著,可用于对试验进行分析。

0.742 3、0.840 8,说明方程的因变量与全体自变量之间的回归效果显著,可用于对试验进行分析。

**2.2.1  $Y_1$ (脆性)** 由表7可以看出  $X_1^2$ 、 $X_2^2$  以及  $X_3^2$  显著地影响  $Y_1$ (脆性) ( $P \leq 0.05$ )。  $Y_1$ (脆性)随  $X_1$ (螺旋速度)、 $X_2$ (Ⅲ区温度)和  $X_3$ (水分质量分数)的升高而升高;但到达一定值后,  $Y_1$ (脆性)随  $X_1$ (螺旋速度)、 $X_2$ (Ⅲ区温度)和  $X_3$ (水分质量分数)的升高反而降低,说明在  $X_1$ (螺旋速度)、 $X_2$ (Ⅲ区温度)和  $X_3$ (水分质量分数)的取值范围内,  $Y_1$ (脆性)有极大值存在。

**2.2.2  $Y_2$ (保脆性)** 由表7可以看出  $X_3$ 、 $X_3^2$  以及  $X_2 X_3$  显著地影响  $Y_2$ (保脆性) ( $P \leq 0.05$ )。在  $X_3$ 、 $X_2$  分别固定在  $1.5E-6$  的水平上时,  $Y_2$ (保脆性)随  $X_1$ (螺旋速度)、 $X_2$ (Ⅲ区温度),以及随  $X_1$ (螺旋速度)、 $X_3$ (水分质量分数)的升高而升高;但到达一定值后,  $Y_2$ (保脆性)随它们的升高反而降低,说明在  $X_3$ 、 $X_2$  分别固定在  $1.5E-6$  的水平上时,在  $X_1$ (螺旋速度)和  $X_2$ (Ⅲ区温度),以及和  $X_1$ (螺旋速度)和  $X_3$ (水分质量分数)的取值范围内,  $Y_2$ (保脆性)有极大值存在。而将  $X_1$  固定在  $1.5E-6$  的水平上时,  $Y_2$ (保脆性)随  $X_2$ (Ⅲ区温度)、 $X_3$ (水分质量分数)的降低而升高。

**2.2.3  $Y_3$ (碘价)** 由表7可以看出  $X_2$ 、 $X_3$  以及  $X_1 X_2$  显著地影响  $Y_3$ (碘价) ( $P \leq 0.05$ )。在  $X_3$  固定在  $1.5E-6$  的水平上时,  $Y_3$ (碘价)随  $X_1$ (螺旋速度)和  $X_2$ (Ⅲ区温度)的降低、 $X_1$ (螺旋速度)上升而  $X_2$ (Ⅲ区温度)降低,以及  $X_1$ (螺旋速度)降低而  $X_2$ (Ⅲ区

温度)上升而降低;在  $X_2$  固定在  $1.5E-6$  的水平上时,  $Y_3$ (碘价)随  $X_1$ (螺旋速度)降低而  $X_3$ (水分质量分数)上升而降低;在  $X_1$  固定在  $1.5E-6$  的水平上时,  $Y_3$ (碘价)随  $X_2$ (Ⅲ区温度)和  $X_3$ (水分质量分数)的降低而降低。

**2.2.4  $Y_4$ (过氧化值)** 由表7可以看出  $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_3^2$  和  $X_2 X_3$  显著地影响  $Y_4$ (过氧化值) ( $P \leq 0.05$ )。  $Y_4$ (过氧化值)随  $X_1$ (螺旋速度)、 $X_2$ (Ⅲ区温度)和  $X_3$ (水分质量分数)的升高而升高;但到达一定值后,  $Y_4$ (过氧化值)随  $X_1$ (螺旋速度)、 $X_2$ (Ⅲ区温度)和  $X_3$ (水分质量分数)的升高反而降低。说明在  $X_1$ (螺旋速度)、 $X_2$ (Ⅲ区温度)和  $X_3$ (水分质量分数)的取值范围内,  $Y_4$ (过氧化值)有极大值存在。

**2.2.5  $Y$ (综合)** 由表7可以看出  $X_3$ 、 $X_{22}$  和  $X_{32}$  显著地影响  $Y$ (综合) ( $P \leq 0.05$ )。  $Y$ (综合)随  $X_1$ (螺旋速度)、 $X_2$ (Ⅲ区温度)和  $X_3$ (水分质量分数)的升高而升高;但到达一定值后,  $Y$ (综合)随  $X_1$ (螺旋速度)、 $X_2$ (Ⅲ区温度)和  $X_3$ (水分质量分数)的升高反而降低。说明在  $X_1$ (螺旋速度)、 $X_2$ (Ⅲ区温度)和  $X_3$ (水分质量分数)的取值范围内,  $Y$ (综合)有极大值存在 [见图1(a, b, c, d, e, f)]。

用数据处理软件 Matlab 进行  $Y$  的方程求解,得到在  $Y$  取最大值时:  $X_1$  取 334 r/min,  $X_2$  取 123.50 °C,  $X_3$  取 22.60%。

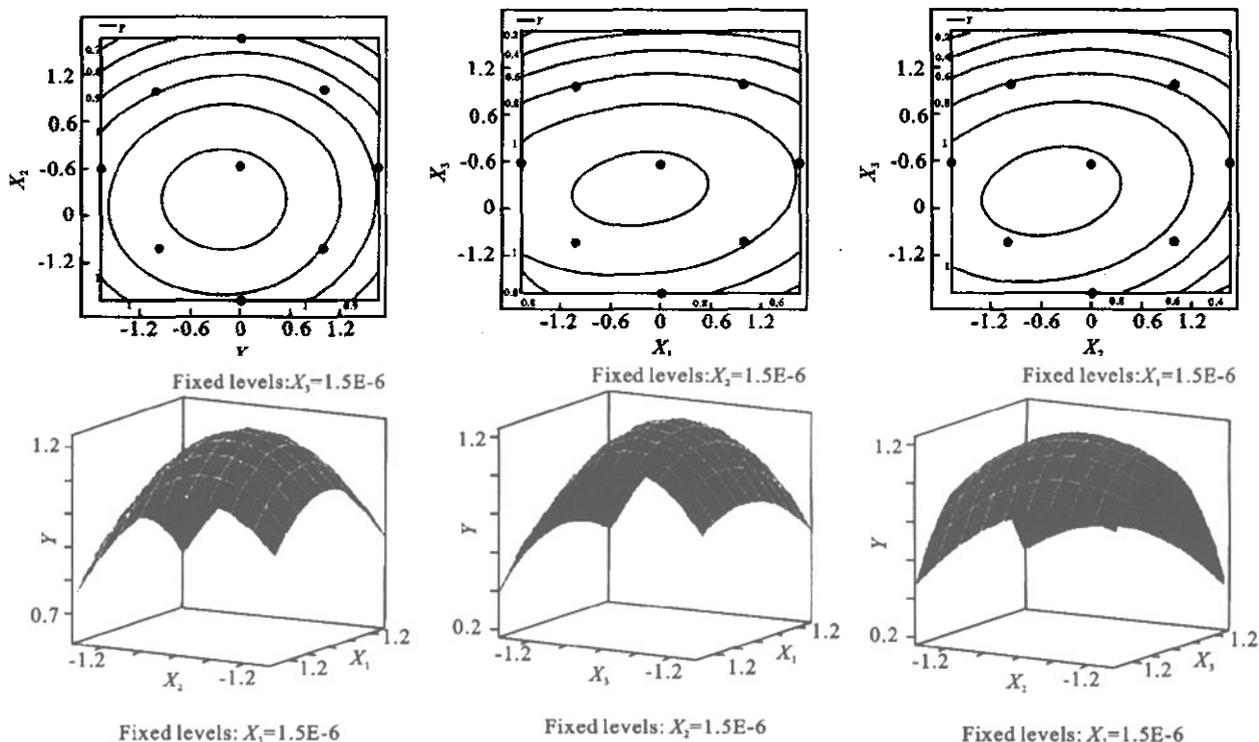


图1 谷物早餐综合指标  $Y$  随  $X_1$ (螺旋速度)、 $X_2$ (Ⅲ区温度)和  $X_3$ (水分质量分数)变化的等高线和响应面

Fig.1 The contour plots and the composite index of breakfast cereal as affected by  $X_1$ (screw speed),  $X_2$ (temperature III) and  $X_3$ (moisture content)

### 3 结 论

通过均匀设计确定影响谷物早餐质量不显著的因素及其水平为 :I 区温度 40 ℃ ;II 区温度 150 ℃ ;蛋白质质量分数 7.3% 脂肪质量分数 8%。

在挤压过程中 ,螺杆的螺旋速度、挤压腔体 III

区温度和进料的水分含量能够明显地影响产品的质量。响应面分析表明 :螺杆的螺旋速度、挤压腔体 III 区温度和进料的水分含量能够显著地影响谷物早餐的脆性、保脆性、碘价和过氧化值(  $P \leq 0.05$  ) ,以综合指标进行方程求解 ,得出最佳的挤压工艺为 :螺杆螺旋速度为 334 r/min ;III 区温度 123.50 ℃ 水分质量分数 22.60%。

### 参考文献( References ) :

- [ 1 ] Main N Riaz. Extruders in Food Applications [ M ]. London :Technomic Publishing Company , Inc 2000 :81 - 115.
- [ 2 ] Robin Guy. Extrusion Cooking [ M ]. London : Woodhead Publishing Limited 2001 :3 - 29.
- [ 3 ] Robert B. Breakfast cereals : processed grains for human consumption [ J ]. **Cereal Food World** , 1987 32( 3 ) :241 - 243.
- [ 4 ] Faller J Y , Klein B P , Faller J F. Characterization of corn- soy breakfast cereals by generalized procrustes analyses [ J ]. **Cereal Chemistry** , 1998 75( 6 ) :904 - 908.
- [ 5 ] Vamshidhar Puppala. Texture comparison of traditional and extruded cornflakes [ J ]. **Cereal Foods World** , 1998 43( 8 ) :650 - 652.
- [ 6 ] Owusu- Ansah J , Can de Voort F R , Stanley D W. Physicochemical changes in cornstarch as a function of extrusion variable [ J ]. **Cereal Chemistry** , 1983 , 60( 4 ) :319 - 324.
- [ 7 ] Gomez M H , Aguilera J M. Changes in the starch fraction during extrusion-cooking of corn [ J ]. **Journal of Food Science** , 1983 48 :378 - 381.
- [ 8 ] Osman M G , Sahai D , Jackson D S. Oil absorption characteristics of a multigrain extrudate during frying : Effect of extrusion temperature and screw speed [ J ]. **Cereal Chemistry** , 2000 , 77( 2 ) :101 - 104.
- [ 9 ] Chapoutot P , Sauvant D. Nutritive value of raw and extruded pea- rapeseed blends for ruminants [ J ]. **Animal Feed Science Technology** , 1997 , 65 :59 - 77.
- [ 10 ] Miladinov V D , Hanna M H. Starch esterification by reactive extrusion [ J ]. **Industrial Crops and Products** , 2000 ( 11 ) :51 - 57.
- [ 11 ] Cheewapramong P , Riaz M N , Rooney L W , et al. Use of partially defatted peanut flour in breakfast cereal flakes [ J ]. **Cereal Chemistry** , 2002 , 79( 4 ) :586 - 592.
- [ 12 ] Vamshidhar Puppala , Texture comparison of traditional and extruded cornflakes [ J ]. **Cereal Foods World** , 1998 ;43( 8 ) :650 - 652.
- [ 13 ] 李建武 ,肖能庚 ,余瑞元 等. 生物化学实验原理和方法 [ M ]. 北京 :北京大学出版社 ,1994 :139 - 141.
- [ 14 ] Jer- Hour Liang , Fluorescence due to interactions of oxidizing soybean oil and soy protein [ J ]. **Food Chemistry** , 1999 66 :103 - 108.
- [ 15 ] 方允中 ,郑荣梁. 自由基生物学的理论与应用 [ M ]. 北京 :科学出版社 2002 :898.

( 责任编辑 杨 萌 )