

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.032

# 挤压超声联用提取米糠多糖工艺优化\*

李杰<sup>1</sup> 罗志刚<sup>2</sup> 肖志刚<sup>1</sup> 王利民<sup>1</sup> 朱秀清<sup>1</sup> 孙树坤<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030; 2. 华南理工大学轻工与食品学院, 广州 510006)

**摘要:** 为了提高米糠多糖得率, 将挤压与超声方法联用, 在单因素试验基础上采取二次正交旋转组合试验, 研究了酶法提取米糠多糖的挤压工艺条件和超声波处理条件, 并构建了超声波处理的数学模型。试验结果表明: 在物料含水率 20%、挤压温度 115℃、螺杆转速 120 r/min 的挤压条件下, 获取的米糠经酶解后, 在处理时间 21 min、超声波功率 117 W、处理温度 72℃、液料比为 8.7 mL/g 的优化条件下, 米糠多糖得率可达 7.18%。

**关键词:** 米糠多糖 挤压 超声波 工艺优化

**中图分类号:** TS210.9; TS201.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0174-06

## Optimization of Extraction Technology of Rice Bran Polysaccharide by Extrusion in Conjunction with Ultrasound

Li Jie<sup>1</sup> Luo Zhigang<sup>2</sup> Xiao Zhigang<sup>1</sup> Wang Limin<sup>1</sup> Zhu Xiuqing<sup>1</sup> Sun Shukun<sup>1</sup>

(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. School of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** With the aim to improve the yield of rice bran polysaccharide, the method of extrusion in conjunction with ultrasound was used. On the basis of single factor experimental results, the combination design of quadratic orthogonal rotation was adopted to analyze the conditions of extrusion process and ultrasonic treatment condition, and then the mathematical model of ultrasonic treatment was constructed. The test results show that the rice bran is acquired under the condition of moisture content 20%, extrusion temperature 115℃ and screw speed 120 r/min, the yield of rice bran polysaccharide can reach to 7.18% under the optimized conditions of ultrasonic time 21 min, ultrasonic power 117 W, ultrasonic temperature 72℃ and liquid-solid ratio 8.7 mL/g.

**Key words:** Rice bran polysaccharide Extrusion Ultrasound Technology optimization

### 引言

米糠是稻谷加工中的主要副产品, 占稻谷质量的 5% ~ 7%, 我国米糠产量每年超过 1 000 万吨<sup>[1-2]</sup>。米糠中含有丰富和优质的生理功能活性物质<sup>[3]</sup>, 是一种亟待深入开发研究的高附加值资源。

米糠多糖具有广泛的生理活性, 在抗肿瘤、增强免疫力等方面有显著的功效, 而影响其大规模生产和产业化的根本原因是这些种类的多糖得率太低, 成本过高。因此, 寻求一种符合大规模生产的量大

面广、价格低廉的原料, 较高得率的米糠多糖提取工艺是亟需解决的问题。本研究所需原料是提取米糠油后的米糠粕, 所以量大且价格低廉。国内外均有运用热水浸提法、微波、超声波和纤维素酶等方法提取米糠多糖的文献报道, 但目前大多围绕某种单一方法进行研究, 且存在多糖得率较低(3%左右)、提取时间较长(2~3 h)的问题<sup>[4]</sup>。

为了提高米糠多糖得率并且节省提取时间, 本文采用挤压膨化与超声联用方法, 对酶法提取米糠多糖的工艺条件进行研究。

收稿日期: 2012-04-01 修回日期: 2012-08-04

\*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD34B02)和黑龙江省教育厅科学技术资助项目(12511z006)

作者简介: 李杰, 博士生, 主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究, E-mail: lijieyu001@126.com

通讯作者: 肖志刚, 教授, 博士生导师, 主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究, E-mail: zhigangx@sina.com

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料、试剂与仪器

米糠粕(黑龙江米糠油厂,含水率11%,蛋白质质量分数15.6%,脂肪质量分数0.5%)。

98%浓硫酸、95%乙醇、柠檬酸、苯酚均为国产分析纯;糖化酶( $10^5$  U/g)、果胶酶(酶活力 $10^6$  U/g),湖州米纯生物科技有限公司;纤维素酶(酶活力15 U/mg),天津市诺奥科技发展有限公司;复合酶(纤维素酶与果胶酶质量比例为1:1)、 $\alpha$ -淀粉酶(酶活力3 000~5 000 U/g),北京双旋微生物培养基制品厂;JY92-II型超声波细胞粉碎机,宁波新芝生物科技股份有限公司;722型可见光分光光度计,上海青华科技仪器有限公司;DS56-III型双螺杆挤压膨化机,济南赛信膨化机械有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 提取工艺

工艺流程:米糠粕粉碎、过20目筛→挤压膨化→加热干燥、粉碎、40目过筛→复合酶酶解→超声波处理→离心取上清液→淀粉酶酶解→冷冻离心取上清液→醇沉→离心取沉淀→溶解→透析→冷冻干燥→测定多糖得率。

#### 1.2.2 多糖含量测定

采用苯酚-硫酸比色法<sup>[5]</sup>对多糖含量进行测定。

#### 1.2.3 多糖得率计算公式

多糖得率计算公式为

$$Y = \frac{m}{M} \times 100\%$$

式中  $m$ ——冻干品中多糖质量,g

$M$ ——米糠质量,g

#### 1.2.4 挤压膨化处理条件

经预试验确定酶解条件为:复合酶添加量为0.8%,酶解时间40 min,溶液pH值为4.0;超声波处理条件为:处理时间20 min、超声波功率100 W、处理温度50℃、液料比10 mL/g。挤压条件优化试验均在此条件下进行。针对物料含水率、挤压温度、螺杆转速,固定其他因素进行单因素挤压试验,考察各因素对米糠多糖得率的影响:在螺杆转速为100 r/min、挤压温度100℃条件下,物料含水率设为20%、25%、30%、35%、40%;在物料含水率25%、挤压温度100℃条件下,螺杆转速设为80、100、120、140、160 r/min;在物料含水率25%、螺杆转速为100 r/min条件下,挤压温度设为80、90、100、110、120℃。

在单因素的基础上,进行 $L_9(3^4)$ 正交试验,确

定这3个因素对米糠多糖提取的最佳工艺参数。

### 1.2.5 超声波处理条件

把上述最佳挤压参数下获取的原料酶解破壁后进行超声波试验。针对处理时间、超声波功率、处理温度、液料比,分别在保持其他因素相同,并采用前步试验确定的最佳值的条件下进行单因素试验。处理时间分别采用:10、15、20、25、30 min;超声波功率分别采用:60、80、100、120、140 W;处理温度分别采用:40、50、60、70、80℃;液料比分别采用:6、8、10、12、14 mL/g。

在单因素的基础上,采用四因素五水平二次正交通用旋转组合设计。以处理时间、超声波功率、处理温度、液料比为自变量,米糠多糖得率为响应值进行试验。

### 1.3 数据分析

试验数据采用SAS 9.1进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 挤压膨化处理条件优化

#### 2.1.1 物料含水率对多糖得率的影响

如图1所示,多糖得率随物料含水率增加而降低,在低含水率时(20%),多糖得率达到较大值,但物料水分过低会造成机器堵塞。适当的含水率可以使纤维充分润湿、膨松,有助于纤维束在外力作用下的打开、断裂并进行分子重组<sup>[6]</sup>。物料含水率过高,挤出时温度降低幅度较大,操作温度不易控制,多糖得率较低。

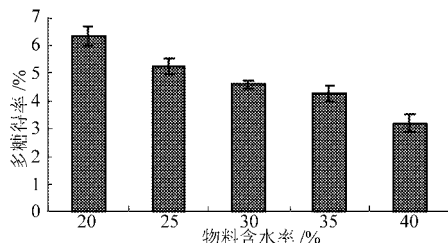


图1 物料含水率对多糖得率的影响

Fig. 1 Effect of water content on polysaccharide yield

#### 2.1.2 螺杆转速对多糖得率的影响

如图2所示,随着螺杆转速的增加,多糖得率逐渐提高,当转速为120 r/min时达到最大,然后多糖得率开始下降。这是由于螺杆转速较低时,物料所承受的剪切作用低,随着螺杆转速的增加,物料与螺杆以及机筒之间的摩擦和剪切作用增大,加速了物料颗粒的分解和糊化;但是螺杆转速过大,物料在机筒内停留时间变短,物料生化反应不彻底<sup>[7]</sup>。

#### 2.1.3 挤压温度对多糖得率的影响

如图3所示,随着温度的升高,多糖得率增大,在100℃时达到最大,然后多糖得率开始下降。因

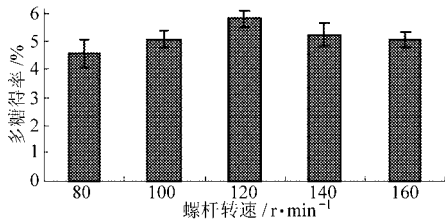


图2 螺杆转速对多糖得率的影响

Fig. 2 Effect of screw speed on polysaccharide yield

为适当的高温可以促进不溶性大分子物质熔融、断裂,使立体微孔网状结构的亲水基团暴露数量增多,纤维素、木聚糖等不溶性纤维裂解为可溶性小分子的速度加快,可溶性成分增加。但太高的挤压温度会严重破坏物料的组织结构,同时易使物料在机腔内焦糊并结成硬块,使多糖得率降低<sup>[8-9]</sup>。

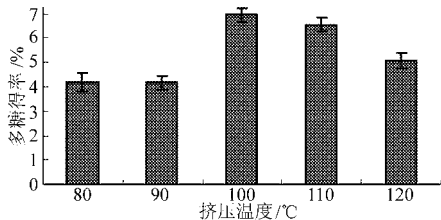


图3 挤压温度对多糖得率的影响

Fig. 3 Effect of extrusion temperature on polysaccharide yield

与没有进行挤压处理,单纯的超声-酶法提取多糖相比,多糖得率提高较大,提取时间缩短,这是因为原料米糠粕首先经过挤压膨化处理,挤压机中米糠粕在高温高压下受到强烈的剪切作用,使米糠中的一些纤维素降解成半纤维素,进而提高了多糖的得率<sup>[9]</sup>。

#### 2.1.4 挤压处理正交试验

在单因素的基础上,采用正交表  $L_9(3^4)$  对影响提取的因素:物料含水率、挤压温度、螺杆转速进行条件优化。正交试验因素和水平见表1,正交试验结果见表2。其中A、B、C表示物料含水率、挤压温度、螺杆转速的编码值。

表1 正交试验因素和水平设计

Tab.1 Factors and levels of orthogonal experiment

| 水平 | 因素      |         |                          |
|----|---------|---------|--------------------------|
|    | 物料含水率/% | 挤压温度/°C | 螺杆转速/r·min <sup>-1</sup> |
| 1  | 20      | 95      | 100                      |
| 2  | 25      | 105     | 120                      |
| 3  | 30      | 115     | 140                      |

正交试验结果见表2,极差R和表3方差分析表明,影响多糖得率的主次顺序依次为:物料含水率、螺杆转速、挤压温度。工程技术中结合具体研究,机械性能状况显著检验参照值可选低些<sup>[10]</sup>,可将显著水平 $\alpha$ 值定在0.25,因此本研究3个因素可以接受。最佳水平因素组合是  $A_1B_3C_2$ ,即物料含水

率为20%,挤压温度115°C,螺杆转速120 r/min,在此条件下多糖得率为6.56%。为了获得更好的提取效果,在此优化条件的基础上,进行超声处理的条件优化。

表2 正交试验安排与结果

Tab.2 Arrangement and results of orthogonal experiment

| 试验序号  | A     | B     | C     | Y/%  |
|-------|-------|-------|-------|------|
| 1     | 1     | 1     | 1     | 4.43 |
| 2     | 2     | 1     | 2     | 5.24 |
| 3     | 3     | 1     | 3     | 4.13 |
| 4     | 1     | 2     | 2     | 6.33 |
| 5     | 2     | 2     | 3     | 4.49 |
| 6     | 3     | 2     | 1     | 3.35 |
| 7     | 1     | 3     | 3     | 6.00 |
| 8     | 2     | 3     | 1     | 5.73 |
| 9     | 3     | 3     | 2     | 5.25 |
| $K_1$ | 16.76 | 13.80 | 13.51 |      |
| $K_2$ | 15.46 | 14.17 | 16.82 |      |
| $K_3$ | 12.73 | 16.98 | 14.62 |      |
| $k_1$ | 5.59  | 4.60  | 4.50  |      |
| $k_2$ | 5.15  | 4.72  | 5.61  |      |
| $k_3$ | 4.24  | 5.66  | 4.87  |      |
| R     | 1.35  | 1.06  | 1.11  |      |

表3 正交试验方差分析

Tab.3 Variance analysis of orthogonal experiment

| 方差来源 | 自由度 | 离均差平方和 | 均方    | F    | $P_r > F$ |
|------|-----|--------|-------|------|-----------|
| A    | 2   | 2.820  | 1.410 | 3.72 | 0.2117    |
| B    | 2   | 2.016  | 1.008 | 2.66 | 0.2431    |
| C    | 2   | 1.892  | 0.946 | 2.50 | 0.2259    |
| 误差   | 2   | 0.757  | 0.379 |      |           |
| 总和   | 8   | 7.486  |       |      |           |

## 2.2 超声波处理条件优化

### 2.2.1 处理时间对多糖得率的影响

如图4所示,多糖得率随着时间的延长而增加,在25 min时达到最大值,时间继续延长,多糖得率开始下降。原因是随着超声波处理时间延长,细胞破碎程度增大,内部的多糖物质开始溶出,所以多糖得率增加,但处理时间过长,空化效应的作用力减小,使得米糠颗粒表面对提取物质的吸附力增强,多糖得率有所下降。另外,多糖结构可能被破坏,也是造成多糖含量下降的原因<sup>[11]</sup>。

### 2.2.2 处理温度对多糖得率的影响

如图5所示,多糖得率随着温度的升高而增加,温度达到80°C时有显著性增加,由于设备原因最高温度选取80°C。可能原因是,温度越高对物料细胞破坏作用越大,越有利于物料中的有效成分浸出<sup>[12]</sup>。

### 2.2.3 超声波功率对多糖得率的影响

预试验中功率范围是100~500 W,试验结果显

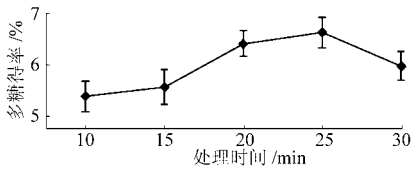


图4 处理时间对多糖得率的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic treatment time on polysaccharide yield

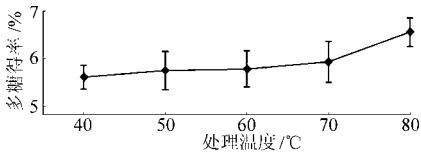


图5 处理温度对多糖得率的影响

Fig.5 Effect of ultrasonic treatment temperature on polysaccharide yield

示在 100 W 时取得最大值,所以功率范围选在 60 ~ 140 W。由图 6 所示,在功率 100 W 时多糖得率达到最大值,然后下降。原因可能是随着功率的增大,产生的冲击波、剪切力迫使细胞壁破碎,多糖得率增加,但随着功率的进一步提高,多糖结构被破坏的可能性也大大增加,导致多糖得率下降<sup>[13]</sup>。

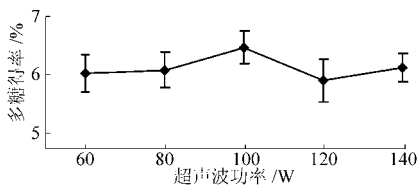


图6 超声波功率对多糖得率的影响

Fig.6 Effect of ultrasonic treatment power on polysaccharide yield

2.2.4 液料比对多糖得率的影响

如图 7 所示,在液料比 6 ~ 10 mL/g 之间时,多糖提取率随溶剂比例的增大而提高,溶剂比例继续增大而提取率变化不大。一方面因为溶剂的溶解动力增加,导致提取得率上升,另一方面,因提取液黏度降低,导致超声空化阻力下降,超声空化阈降低,有助于超声波辅助提取效果的改善;随着液料比的进一步提高米糠多糖得率逐步趋于稳定<sup>[14]</sup>。

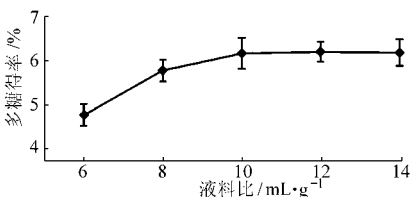


图7 液料比对多糖得率的影响

Fig.7 Effect of liquid-solid ratio on polysaccharide yield

2.2.5 超声波处理二次正交旋转组合设计试验

试验因素与编码如表 4 所示,试验安排与结果如表 5 所示。其中  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  表示处理时间、超声波功率、处理温度、液料比的真实值; $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$

表示相对应的编码值。

表 4 试验因素水平

Tab.4 Factors and code levels of orthogonal rotatable central composite design

| 水平 | 处理时间<br>$x_1$ /min | 超声波功率<br>$x_2$ /W | 处理温度<br>$x_3$ /℃ | 液料比<br>$x_4$ /mL·g <sup>-1</sup> |
|----|--------------------|-------------------|------------------|----------------------------------|
| 2  | 28                 | 130               | 80               | 11                               |
| 1  | 25                 | 120               | 70               | 10                               |
| 0  | 22                 | 110               | 60               | 9                                |
| -1 | 19                 | 100               | 50               | 8                                |
| -2 | 16                 | 90                | 40               | 7                                |

表 5 二次正交旋转通用组合设计与结果

Tab.5 Arrangements and results of orthogonal rotatable central composite design

| 试验序号 | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | Y/%  |
|------|-------|-------|-------|-------|------|
| 1    | 1     | 1     | 1     | 1     | 5.89 |
| 2    | 1     | 1     | 1     | -1    | 6.42 |
| 3    | 1     | 1     | -1    | 1     | 5.99 |
| 4    | 1     | 1     | -1    | -1    | 6.10 |
| 5    | 1     | -1    | 1     | 1     | 5.76 |
| 6    | 1     | -1    | 1     | -1    | 5.60 |
| 7    | 1     | -1    | -1    | 1     | 5.82 |
| 8    | 1     | -1    | -1    | -1    | 5.54 |
| 9    | -1    | 1     | 1     | 1     | 6.42 |
| 10   | -1    | 1     | 1     | -1    | 6.74 |
| 11   | -1    | 1     | -1    | 1     | 6.22 |
| 12   | -1    | 1     | -1    | -1    | 6.77 |
| 13   | -1    | -1    | 1     | 1     | 5.92 |
| 14   | -1    | -1    | 1     | -1    | 6.53 |
| 15   | -1    | -1    | -1    | 1     | 5.96 |
| 16   | -1    | -1    | -1    | -1    | 6.93 |
| 17   | 2     | 0     | 0     | 0     | 5.76 |
| 18   | -2    | 0     | 0     | 0     | 5.60 |
| 19   | 0     | 2     | 0     | 0     | 7.11 |
| 20   | 0     | -2    | 0     | 0     | 6.01 |
| 21   | 0     | 0     | 2     | 0     | 7.46 |
| 22   | 0     | 0     | -2    | 0     | 5.88 |
| 23   | 0     | 0     | 0     | 2     | 5.47 |
| 24   | 0     | 0     | 0     | -2    | 6.05 |
| 25   | 0     | 0     | 0     | 0     | 7.31 |
| 26   | 0     | 0     | 0     | 0     | 7.24 |
| 27   | 0     | 0     | 0     | 0     | 7.10 |
| 28   | 0     | 0     | 0     | 0     | 6.94 |
| 29   | 0     | 0     | 0     | 0     | 7.05 |
| 30   | 0     | 0     | 0     | 0     | 7.13 |
| 31   | 0     | 0     | 0     | 0     | 7.15 |

用 SAS 9.1 统计软件对表 5 的数据进行处理分析,得到了米糠多糖提取效果与处理时间、超声波功率、处理温度、液料比因素在编码空间的多元线性回归模型,方程为

$$Y = 6.47849910 - 0.168750000X_1 + 0.195416667X_2 + 0.129583333X_3 - 0.158750000X_4 + 0.140625000X_1X_4 - 0.357336310X_1^2 - 0.137336310X_2^2 - 0.147336310X_3^2 - 0.337336310X_4^2$$

利用  $F$  检验和  $t$  检验分别对回归模型和回归系数进行显著检验,结果见表 6 和表 7。

表 6 方差分析结果

Tab.6 Variance analysis of orthogonal experiment

| 方差来源 | 自由度 | 平方和         | 均方差        | $F$ 值 | $P_r >  t $ |
|------|-----|-------------|------------|-------|-------------|
| 回归   | 9   | 9.33428546  | 1.03714283 | 13.05 | <0.0001     |
| 误差   | 21  | 1.66919196  | 0.07948533 |       |             |
| 总离差  | 30  | 11.00347742 |            |       |             |

表 7 二次多项式非线性回归参数

Tab.7 Quadratic non-linear regression parameters

| 参数       | 回归系数         | 标准系数       | $t$ 值  | $P_r >  t $ |
|----------|--------------|------------|--------|-------------|
| 截距       | 6.478499101  | 0.05228305 | 123.91 | <0.0001     |
| $X_1$    | -0.168750000 | 0.05754901 | -2.93  | 0.0080      |
| $X_2$    | 0.195416667  | 0.05754901 | 3.40   | 0.0027      |
| $X_3$    | 0.104583333  | 0.05754901 | 1.82   | 0.0835      |
| $X_4$    | -0.158750000 | 0.05754901 | -2.76  | 0.0118      |
| $X_1X_4$ | 0.140625000  | 0.07048286 | 2.00   | 0.0592      |
| $X_1^2$  | -0.357336310 | 0.05272211 | -6.78  | <0.0001     |
| $X_2^2$  | -0.137336310 | 0.05272211 | -2.60  | 0.0165      |
| $X_3^2$  | -0.147336310 | 0.05272211 | -2.79  | 0.0109      |
| $X_4^2$  | -0.337336310 | 0.05272211 | -6.40  | <0.0001     |

表 6、表 7 数据均为剔除不显著项所得。由表 7 所示,剔除项为  $X_1X_2$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_2X_4$ 、 $X_3X_4$ ,即为各因素间的交互作用不显著。单个因素的影响顺序从大到小依次为:超声波功率、处理时间、液料比、处理温度,二次项达到极显著水平。从表 6 方差分析可知, $P_r < 0.0001$ ,多糖得率回归方程达到极显著水平,即试验数据与所采用的二次数学模型符合,拟合情况良好。方程回归结果可靠,可用于米糠多糖提取试验的理论预测。

对回归方程求偏导得

$$\frac{\partial Y}{\partial X_1} = -0.168750000 + 0.14062500X_4 - 0.674612620X_1$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X_2} = 0.195416667 - 0.174672620X_2$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X_3} = 0.129583333 - 0.294372620X_3$$

$$\frac{\partial Y}{\partial X_4} = -0.158750000 + 0.14062500X_1 - 0.674612620X_4$$

求以上方程得多糖提取的最佳条件为:处理时间 21 min、超声波功率 117 W、处理温度 72℃、液料比 8.7 mL/g,此条件下,由模型得多糖的理论得率为 7.32%。在此工艺条件下实施试验,重复 3 次,平均得到验证值为 7.18%,在试验条件范围内,任取 5 个因子点平行做 5 次试验,并用预测模型方程求出预测值,与试验实测值进行比较,结果见表 8。由表 8 可知,模型预测相对误差小于 2.0%,说明此回归模型方程在本试验点范围内可用来预测米糠多糖的提取效果。

表 8 实测值与预测值比较

Tab.8 Comparison of actual value and predictive value

| 试验序号 | 实测值  | 预测值  | 相对误差 % |
|------|------|------|--------|
| 1    | 6.80 | 6.92 | 1.7    |
| 2    | 7.01 | 7.13 | 1.7    |
| 3    | 7.21 | 7.10 | 1.5    |
| 4    | 6.95 | 6.84 | 1.6    |
| 5    | 6.34 | 6.45 | 1.7    |

### 3 结束语

通过单因素和正交试验,确定挤压辅助超声酶法提取多糖的最佳工艺条件:物料含水率为 20%,挤压温度 115℃,螺杆转速 120 r/min,在此基础上超声条件为:处理时间 21 min、超声波功率 117 W、处理温度 72℃、液料比 8.7 mL/g,此时米糠多糖得率为 7.18%,与传统热水浸提米糠多糖得率 2.02%和微波辅助提取米糠多糖得率 2.76%<sup>[15]</sup>相比有很大提高。

### 参 考 文 献

- 曹蕊. 米糠营养成分分析及其应用研究[D]. 无锡:江南大学,2008.  
Cao Rui. Analysis of nutrient component in rice bran and studies on its application[D]. Wuxi:Jiangnan University,2008. (in Chinese)
- 蔡东联. 对米糠营养价值的再认识[J]. 中国食物与营养,2000(2):31~32.
- 王树林. 米糠综合利用的价值与技术[J]. 中国农学通报,1995(6):49~50.
- 俞兰苓,刘友明. 几种米糠多糖提取工艺的比较[J]. 粮油食品科技,2006(6):18~23.
- NY/T 1676—2008 食用菌中粗多糖含量测定[S].
- 焦艳丽,温升南,杜冰,等. 挤压处理灵芝孢子粉提取灵芝多糖[J]. 食品科学,2011,32(16):67~70.  
Jiao Yanli, Wen Shengnan, Du Bing, et al. Effect of twin-screw extrusion conditions on polysaccharide extraction from ganoderma

- lucidum sore powder[J]. Food Science, 2011,32(16):67~70. (in Chinese)
- 7 Zhang Huina, He Jinghua, Yuan Lan, et al. In vitro and in vivoprotective effect of *Ganoderma lucidum* polysaccharides on alloxan-induced pancreatic islets damage[J]. Life Sciences,2003,73(18):2307~2319.
- 8 张裕中,王景. 食品挤出加工技术与应用[M]. 北京:中国轻工业出版社,1998:4~65.
- 9 孙兰萍,许晖. 挤出法制备米糠膳食纤维的研究[J]. 食品工业科技,2005,26(4):98~100.
- 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,2003:69.
- 11 迟海霞,涂宗财,陈刚,等. 米糠多糖的超声波辅助纤维素酶-柠檬酸联合提取及结构分析[J]. 食品科学,2010,31(24):168~171.  
Chi Haixia, Tu Zongcai, Chen Gang, et al. Combinatorial extraction and structure analysis of rice bran polysaccharide[J]. Food Science, 2010,31(24):168~171. (in Chinese)
- 12 邹强. 米糠多糖分离提取工艺的研究[D]. 成都:西华大学,2007.  
Zou Qiang. Study on the isolate on and extraction of polysaccharide from rice bran[D]. Chengdu: Xihua University, 2007. (in Chinese)
- 13 谢丽源,王富伟,李宏军,等. 超声波复合酶法提取黄桑多糖研究[J]. 食品科学,2010,31(10):81~85.  
Xie Liyuan, Wang Fuwei, Li Hongjun, et al. Ultrasonic pretreatment followed by enzymatic hydrolysis for extraction of polysaccharides from fermented mycelia of *phellinus linteus*[J]. Food Science,2010,31(10):81~85. (in Chinese)
- 14 Chen Yeyuan, Luo Haiyan, Gao Aiping, et al. Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from litchi seed by response surface methodology and their structural characteristics[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2011(12):305~309.
- 15 张潇艳. 米糠多糖的提取、纯化及结构研究[D]. 无锡:江南大学,2008.  
Zhang Xiaoyan. Study on extraction, purification and structure of polysaccharide from rice bran[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008. (in Chinese)
- 16 郑广钊,肖志刚,孙树坤,等. 挤压加工参数对重组米崩解值的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(2):121~127,169.  
Zheng Guangzhao, Xiao Zhigang, Sun Shukun, et al. Effect of extrusion processing parameters on breakdown value of restructuring rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):121~127,169. (in Chinese)
- 17 马海乐,李前进,李树君,等. 脱脂米糠中脉冲超声辅助提取蛋白和多糖动力学模型[J]. 农业机械学报,2011,42(11):135~138.  
Ma Haile, Li Qianjin, Li Shujun, et al. Kinetics study on pulsed ultrasound-assisted extraction of protein and polysaccharide from defatted rice bran[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(11):135~138. (in Chinese)

~~~~~

(上接第157页)

- 16 肖钢铭,陈立耀. 神经网络结构与训练参数选取[J]. 武汉工业大学学报,1997,19(2):108~110.  
Xiao Gangluo, Chen Liyao. Discussion about BP neural network structure and choice of training parameter[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1997,19(2):108~110. (in Chinese)
- 17 阎威武,邵惠鹤. 支持向量机和最小二乘支持向量机的比较及应用研究[J]. 控制与决策,2003,18(3):358~360.  
Yan Weiwu, Shao Huihe. Application of support vector machines and least squares support vector machines to heart disease diagnoses[J]. Control and Decision, 2003,18(3):358~360. (in Chinese)
- 18 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机[J]. 自动化学报,2000,26(1):32~42.  
Zhang Xuegong. Introduction to statistical learning theory and support vector machines[J]. Acta Automatic Sinica, 2000,26(1):32~42. (in Chinese)
- 19 金航峰,黄凌霞,谢琳,等. 桑蚕鲜茧干壳量的可见/近红外光谱无损检测[J]. 农业机械学报,2013,44(1):147~151.  
Jin Hangfeng, Huang Lingxia, Xie Lin, et al. Nondestructive detection of dry weight of cocoons layer of mulberry silkworm fresh cocoons using visible/near infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):147~151. (in Chinese)