

湿法超细粉碎制备全豆豆浆关键技术研究

Key technology on the preparation of full bean milk by minuteness wet pulverization method

杨新俊^{1,2} 崔政伟^{1,2} 张裕中^{1,2} 戴宁^{1,2}

YANG Xin-jun^{1,2} CUI Zheng-wei^{1,2} ZHANG Yu-zhong^{1,2} DAI Ning^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:采用试验研究结合数值分析的方法,研究湿法超细粉碎技术在制备全豆豆浆中的应用,分析不同工艺参数对粉碎后纤维颗粒尺寸的影响,并通过因次分析获得经验公式。结果表明:纤维颗粒平均体积尺寸随循环次数、静刀片数量以及转速的增加而降低;但是切割深度决定了粉碎后纤维颗粒的尺寸极限,当循环次数达到 3 次以后,继续增加循环次数对粉碎后颗粒尺寸的影响较小。获得的计算粉碎后纤维颗粒尺寸 D_0 以及功耗 W 的经验公式,计算误差 $\leq 15\%$;最终获得的湿法超细粉碎制备全豆豆浆的优化工艺参数为: $n=9\ 000\ \text{rad/min}$, $Z_r=216$, $T=3$ 。

关键词:湿法超细粉碎;全豆豆浆;纤维颗粒;因次分析

Abstract: To investigate the application of minuteness wet pulverization method on the preparation of full bean milk, experimental and numerical analysis were applied in this paper. The influences of different technological parameters on the fiber grain size after the pulverization were also studied, and the empirical formula was obtained by dimensional analysis. The results showed that the average volume size of fiber grain decreased with the increase of cycle number, static blade number and rotating speed. However, the cut depth determined the limitation size of fiber grain. The increase of cycle number would not affect the grain size after the pulverization when the cycle number reached three. The empirical formula could predict the fiber grain size D_0 and power dissipation W within the error $\leq 15\%$. Meanwhile, the optimal technological parameters to prepare the full bean milk using minuteness wet pulverization method were obtained at last which were $n=9\ 000\ \text{rad/min}$, $Z_r=216$, $T=3$.

Keywords: minuteness wet pulverization; full bean milk; fiber grain; dimensional analysis

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YD0400401)

作者简介:杨新俊(1985—),男,江南大学副教授,博士。

E-mail: xinjun_yang@163.com

收稿日期:2017—10—08

豆浆作为一种传统的植物蛋白饮料,因其富含蛋白质、氨基酸、矿物质、维生素和异黄酮等多种营养物质而受到人们的广泛喜爱^[1-3]。传统的豆浆制作工艺过程中,会产生大量的豆渣,这些被废弃的豆渣使得原料的利用率只有 55%^[4]。研究^[5]表明,豆渣中含有丰富的膳食纤维、维生素以及磷脂类化合物等有益成分。其中膳食纤维量约占豆渣干物质总量的 50%,具有预防糖尿病、肥胖症、高血压等功效^[6]。

全豆豆浆是指采用特殊的技术方法实现大豆营养全利用的豆浆^[7]。目前,用于全豆豆浆制作的方法主要有干法制浆、胶体磨制浆、刀片机制浆等。但是这些技术在制备全豆豆浆的过程中存在能耗高,粉尘大以及粉碎效率低、处理量小,粉碎后纤维颗粒粒度大,豆浆口感不细腻等问题^[6]。湿法超细粉碎技术,基于超剪切原理,能够实现纤维物料的高效超细粉碎^[8]。研究表明,该技术能够实现红枣^[9]、黑莓^[10]、玉米^[11-12]等水果谷物的全利用,也能够有效粉碎鱼皮、鱼骨、叶类物料等加工后副产品,实现废物再利用^[13]。

目前对于湿法超细粉碎制备全豆豆浆缺乏系统的研究,也没有工艺参数的选用依据^[14]。针对这一问题,本试验基于湿法超细粉碎技术,研究其在全豆豆浆制备过程中应用。分析不同工艺参数对粉碎后纤维颗粒细度的影响,获取指导工业应用的经验公式以及制备全豆豆浆的最佳工艺参数,旨在为大豆的全利用和全豆豆浆的开发提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 材 料

大豆:含水量为 10.6%,产自黑龙江绥化。

1.2 仪 器 与 设 备

电子天平:C-144 型,上海友声衡器有限公司;

高剪切粗粉碎机:QDW 型,无锡轻大食品装备有限公司;

湿法超细粉碎机:QD GX型,无锡轻大食品装备有限公司;

激光粒度仪:Mastersizer2000型,英国马尔文仪器公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料处理 单次粉碎试验中,使用大豆 500 g。粉碎前先将大豆样品在蒸馏水中浸泡 8 h,然后煮沸,去除豆腥,获得含水量为 62.6%的熟大豆样品。

1.3.2 湿法超细粉碎加工 将熟大豆与水按照 1:4 的质量比混合进行粗粉碎制浆,然后采用湿法超细粉碎机粉碎,采用不同工艺参数对全豆粗浆进行超细粉碎。

1.3.3 纤维粒径测定 通过激光粒度仪来分析粉碎之后豆浆内纤维的粒径尺寸。在分散头转速为 2 200 rad/min、折射率为 1.500、吸收率为 1.000 条件下测定各组样本的纤维颗粒粒度大小,以 $D[4,3]$ (体积平均粒度)作为粒径衡量指标来评价高剪切湿法超细粉碎的制浆效果。

2 湿法超细粉碎技术

2.1 湿法超细粉碎机理

受控剪切头(图 1)是湿法超细粉碎设备(QD GX)的关键部件,由一组环形紧密排列的刀片和高速旋转的叶轮组成。图 2 为湿法超细粉碎制浆的工作原理:物料(全豆粗浆)进入粉碎腔叶轮中央,随着叶轮的高速旋转,在离心力的作用下,运动至叶轮顶端,紧贴静刀片内壁。高速旋转的叶轮与静刀片做相对运动,瞬时产生强剪切力,从而对物料进行切割粉碎。粉碎后的产品在离心力的作用下通过刀片间隙排出,未被粉碎的物料则在后续过程中被持续切割。高剪切湿法粉碎过程中,每个刀片切割深度一定,物料在粉碎腔内停留时间很短,粉碎速度快,产热低,产品粒度均匀。

2.2 湿法超细粉碎关键参数

大量研究^[8,12-13]发现在湿法超细粉碎过程中,物料粉碎细度取决于粉碎腔的结构参数、转速、流场强度以及停留时

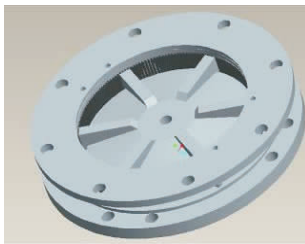
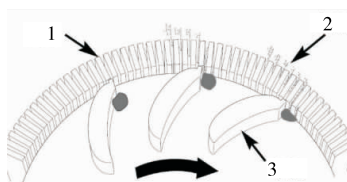


图 1 受控剪切头

Figure 1 Controlled cutting head



1. 刀片 2. 产品 3. 叶轮

图 2 湿法超细粉碎示意图

Figure 2 Diagram of minuteness wet pulverization

间等因素。其中粉碎腔的结构参数主要包括静刀片的数量 Z_r 、静刀片排列半径(粉碎腔半径) R 、静刀片偏转角 α ,静刀片与动刀头间的间隙 δ 。这些结构参数决定了切割过程中的切割深度 h :

$$h = (R + \delta) \frac{2\pi}{Z_r} \sin\left(\frac{\pi}{Z_r} + \alpha\right) \quad (1)$$

粉碎腔内流场的强度决定了粉碎切割物料的强度,可通过雷诺数表示:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2)$$

式中:

Re ——雷诺数;

ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

v ——流速, m/s ;

d ——当量直径, m ;

μ ——黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

而粉碎时间取决于物料给料速度 F 和物料在粉碎机内的停留量 H ,即

$$t_r = \frac{H}{F} \quad (3)$$

随着粉碎时间的延长,物料粉碎后的成品颗粒尺寸以及均匀性有很大的提高。对于高速切割粉碎设备,被切割粉碎后的物料立即排出,因此粉碎时间不能用 t_r 来表示,而是应该用物料循环粉碎的次数 T 来表示。

为了定量分析上述湿法粉碎工艺、结构参数对粉碎后物料颗粒尺寸的影响,基于量纲分析方法,初步建立如下无量纲公式:

$$K = \left(\frac{h}{D_0}\right)^a Re^b T^c = \left[\frac{(R + \delta) \frac{2\pi}{Z_r} \sin\left(\frac{\pi}{Z_r} + \alpha\right)}{D_0}\right]^a \left(\frac{\rho v d}{\mu}\right)^b T^c \quad (4)$$

式中:

K ——无量纲系数;

D_0 ——物料粉碎后的颗粒平均粒度, μm 。

采用的 QD GX 型湿法超细粉碎机,静刀片排列半径 R 为 152 mm,静刀片偏转角 α 为 0° ,静刀片与动刀头间的间隙 δ 为 0.1 mm。选取不同的转速 n (6 000, 75 000, 9 000 rad/min),循环次数 T (1, 2, 3, 4) 与静刀片数量 Z_r (180, 200, 216) 为操作参数,制备全豆豆浆,并测量粉碎后料浆内纤维颗粒的大小。

2.3 湿法超细粉碎能耗

研究^[15]表明,雷廷格表面积假说能够有效描述湿法超细粉碎过程中的颗粒粉碎能耗。制备全豆豆浆过程中,湿法超细粉碎设备的总能耗 W 由三部分组成,分别是物料粉碎能耗 E 、搅拌能耗 P 以及能耗损失 Q ^[16],即

$$W = E + P + Q \quad (5)$$

式(5)中物料粉碎能耗用于细化料浆中的颗粒,可通过式(6)表示:

$$E = MK_R \left(\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D_1}\right) \quad (6)$$

式中:

D_1 ——物料粉碎前的颗粒平均粒度, μm ;

M ——物料质量, kg ;

K_R ——雷廷格常数, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{m})^{[17]}$ 。

搅拌能耗是由设备转子部分对料浆进行剪切所消耗的能量,可表示为:

$$P = \varphi \rho n^3 d^5 \left(\frac{n^2 d}{g} \right)^{\frac{(\alpha - \lg R_e)}{\beta}} t, \quad (7)$$

式中:

φ ——功率准数;

α, β ——系数;

Re ——雷诺数;

d ——粉碎头直径, m ;

n ——转速, rad/min ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

t ——运行时间, $\text{s}^{[18]}$ 。

当 $Re > 10^4$ 时,可简化为:

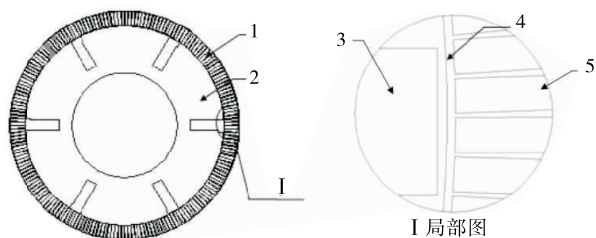
$$P = \varphi \rho n^3 d^5 t. \quad (8)$$

能耗损失由设备结构及连接管路特性决定。湿法超细粉碎过程中,在不连接工艺管道的情况下,相比较前两项可忽略不计,则湿法超细粉碎设备的总能耗 W 可表示为:

$$P = MK_R \left(\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D_1} \right) + \varphi \rho n^3 d^5 \left(\frac{n^2 d}{g} \right)^{\frac{(\alpha - \lg R_e)}{\beta}} t. \quad (9)$$

2.4 计算流体动力学(CFD)模型

由于湿法超细粉碎过程中粉碎腔内流场较为复杂,剪切流速以及雷诺数的理论计算较为困难,所以通过 CFD 的方法来求得。模拟采用的工具为商用软件 Fluent,建立的几何模型见图 3(以 216 静刀片数量为例)。边界条件等模型细节详见文献[19]。



1. 静面域 2. 动面域 3. 动刀头 4. 界面 5. 静刀头

图 3 定、动转子的 CFD 几何结构

Figure 3 Geometrical structure of stator and rotor for CFD simulation

3 结果与分析

图 4 为 $9\,000\text{ rad}/\text{min}$, 216 个静刀片下,粉碎腔内的流场分布图;图 5 为 Re 数随转数的变化(216 静刀片),以及 Re 数随静刀片数量的变化($9\,000\text{ rad}/\text{min}$)。可以发现, Re 数与转速以及静刀片数量呈线性变化的关系,随着转速的增加而增加,但随静刀片数量的增加而减少。这是因为静刀片数量的增加加大了腔内液体流动的摩擦阻力,造成了流场速度的降低,从而降低了粉碎腔内的雷诺数。

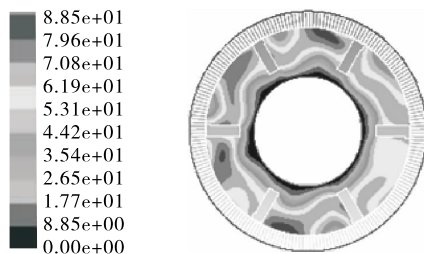


图 4 转速 $9\,000\text{ rad}/\text{min}$, 216 静刀片数量下的速度分布图

Figure 4 Velocity profile at rotating speed of $9\,000\text{ rad}/\text{min}$ and 216 static blades

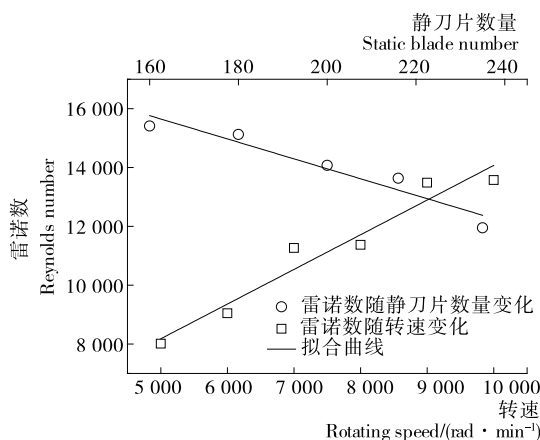


图 5 Re 数随转速以及静刀片数量的变化

Figure 5 Variation of Re number with rotating speed and static blade number

通过拟合可得雷诺数与转速还有静刀片数量的经验公式:

$$Re = 0.589n - 0.148Z_r + 1\,219.2. \quad (10)$$

通过 QDW 型高剪切粗粉碎机制备全豆粗浆,其纤维颗粒平均粒度为 $215\ \mu\text{m}$,粒径分布见图 6。然后采用不同工艺参数对粗浆进行超细粉碎,结果见表 1。可以发现,超细粉碎后,随着循环次数的增加,颗粒平均粒度显著增加,颗粒尺寸分布范围变窄(以 $n=9\,000\text{ rad}/\text{min}$, $Z_r=216$, $T=3$ 为例,其粒度分布见图 7)。但是当循环次数达到 3 次以后,继续增加循环次数纤维颗粒变化很小。这是因为当循环达到一定次数后,超细粉碎达到其结构所决定的细度极限,继续增加循环次数对粉碎结果影响很小,反而额外增加不必要的能耗。

作为重要的结构参数,静刀片数量决定了受控切割头的切割深度,从而影响超细粉碎的细度极限。通过比较 3 次循环次数下不同静刀片数量的粉碎结果(见表 2),可以发现纤维颗粒尺寸随着切割深度的减小而逐渐减小。但切割深度也不是越小越好,因为增加静刀片数量虽然会降低切割深度,细化粉碎后颗粒,但会降低静刀片间距,即切割后颗粒的排出通道会逐渐降低,增加颗粒排出的流动阻力,造成物料堵塞,从而降低制浆效率,并进一步增加能耗。工程实践表明,当静刀片数量达到 216 以上,粉碎过程中物料非常容易堵塞,需要花费大量时间拆卸受控切割头进行清理,大大降低了粉碎效率。所以,选取 $Z_r=216$ 作为操作参数是比较合适的。

转速是决定粉碎腔内流场的重要参数,同时也是决定流

动带来的切割强度的关键因素。高转速下粉碎腔内高的湍流强度带来更大的切割效率以及粉碎效果(见表3)。但是,随着转速的提高,也给设备特别是受控切割头的加工、制造以及安装提出了更高的要求。从而增加了设备的制造成本以及故障发生的概率(主要是振动磨损、静刀片的断裂以及噪声),进一步增加了运行维护费用。所以,根据以往经验,选择9 000 rad/min的转速作为操作参数是比较合适的。

根据式(4)和(9),对试验数据进行拟合;同时考虑到制浆过程中,粉碎腔内的Re数基本 $>10^4$,基于工程应用的方便性,可以得到粉碎后纤维颗粒尺寸(D_0)以及功耗(W)的经验公式:

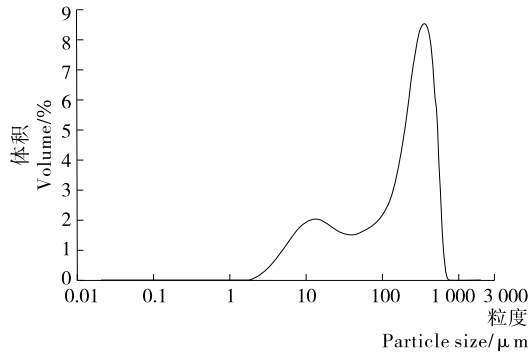
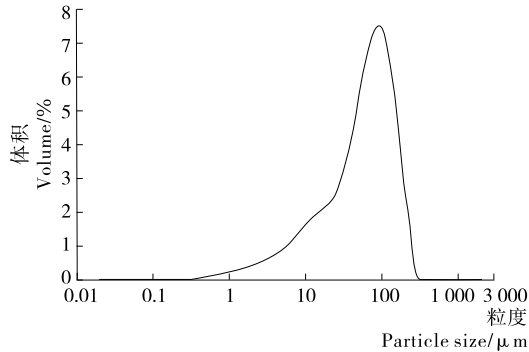


图6 粗粉碎后纤维颗粒粒度分布

Figure 6 Particle size distribution of fiber grain after coarse pulverization



$n=9\ 000\ \text{rad}/\text{min}, Z_r=216, T=3$

图7 超细粉碎后纤维颗粒粒度分布

Figure 7 Particle size distribution of fiber grain after minuteness pulverization

$$D_0 = 1.96 \times 10^6 \left[(R + \delta) \frac{2\pi}{Z_r} \sin\left(\frac{\pi}{Z_r} + \alpha\right) \right]^{0.993} \left(\frac{\rho v d}{\mu}\right)^{-1.376} T^{-0.543}, \quad (11)$$

$$P = 3.7 \times 10^5 M \left(\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D_1}\right) + 6.2 \rho n^3 d^5 t. \quad (12)$$

为了验证公式的预测精度,选取不同工艺参数下的试验结果进行验证,见表4。

进一步分析发现,粉碎后纤维颗粒的尺寸与切割深度呈线性关系,公式的误差 $\leq 15\%$,能够在实际生产过程中有效地预测超细粉碎后料浆中纤维颗粒的尺寸。需要注意的是,能耗公式对于不同静刀片数量下的功耗预测偏差较大,是因

表1 平均粒径和能耗随循环次数的变化[†]

Table 1 Variation of average particle size and energy consumption with cycle number

循环次数(T)	平均粒径 $D[4,3]/\mu\text{m}$	能耗/(kW·h)
1	139.8	0.25
2	91.3	0.49
3	72.0	0.79
4	67.9	1.24

[†] $n=9\ 000\ \text{rad}/\text{min}, Z_r=216$ 。

表2 平均粒径和能耗随转速的变化[†]

Table 2 Variation of average particle size and energy consumption with rotating speed

转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	平均粒径 $D[4,3]/\mu\text{m}$	能耗/(kW·h)
6 000	111.5	0.29
7 500	82.1	0.51
9 000	72.0	0.79

[†] $Z_r=216, T=3$ 。

表3 平均粒径和能耗随静刀片数量的变化[†]

Table 3 Variation of average particle size and energy consumption with static blade number

静刀片数量 Z_r	平均粒径 $D[4,3]/\mu\text{m}$	能耗/(kW·h)
180	121.8	0.51
200	95.6	0.69
216	72.0	0.79

[†] $n=9\ 000\ \text{rad}/\text{min}, T=3$ 。

表4 试验结果与经验公式预测结果比较[†]

Table 4 Comparison of results of experiments and empirical formulas

转速 $n/(\text{rad} \cdot \text{min}^{-1})$	循环次数 T	静刀片数量 Z_r	平均粒径 $D[4,3]/\mu\text{m}$	粒径误差/%	能耗/(kW·h)	能耗误差/%
6 000	1	180	181	13.7	0.15	7.8
6 000	2	200	154	6.4	0.29	10.3
6 000	2	180	132	7.6	0.25	6.7
7 500	1	200	159	8.5	0.15	4.6
7 500	2	180	134	4.2	0.19	5.0
7 500	2	200	113	5.9	0.38	13.4

[†] 误差 = $|\text{预测值} - \text{试验值}| \div \text{试验值} \times 100\%$ 。

为静刀片数量的增加缩小了出料通道,增加了能耗损失。

结合工程实践,综合分析发现, $n=9\ 000\ \text{rad}/\text{min}$, $Z_r=216$, $T=3$ 是较为优化的结构工艺参数。

4 结论

本试验采用试验研究结合数值分析的方法,通过理论研究结合因次分析,研究了湿法超细粉碎技术在制备全豆豆浆中的应用,结论如下:

(1) 超细粉碎后,纤维颗粒平均体积尺寸随循环次数、静刀片数量以及转速的增加而降低。

(2) 切割深度决定了粉碎后纤维颗粒的尺寸极限,当循环次数达到 3 次以后,继续增加循环次数对粉碎后颗粒尺寸的影响较小。

(3) 基于工程应用,获得了用于计算粉碎后纤维颗粒尺寸 D_0 以及功耗 W 的经验公式,计算误差 $\leq 15\%$ 。

(4) 综合考虑,获得了湿法超细粉碎制备全豆豆浆的优化工艺参数: $n=9\ 000\ \text{rad}/\text{min}$, $Z_r=216$, $T=3$ 。选取该工艺参数制得的全豆豆浆,纤维粒度为 $72\ \mu\text{m}$ (约为 200 目)。该粒度下的纤维颗粒,口感柔和,没有粗砺感,能够在满足口感的基础上提高对膳食纤维的吸收。

(5) 湿法超细粉碎纤维物料的微观机理仍不明确,特别是纤维物料的力学特性与粉碎后纤维颗粒尺寸的关系有待深入研究。

参考文献

[1] 李琳,王宸之,赵庚九,等.干法制浆工艺对豆浆品质的影响[J].食品与机械,2017,33(5):188-193.

[2] MESSINA M, HILAKIVI C L. Early intake appears to be the key to the proposed protective effects of soy intake against breast cancer[J]. Nutrition and Cancer, 2009, 61(2): 792-798.

[3] BATT H P, THOMAS R L, RAO A. Characterization of isoflavones in membrane-processed soy protein concentrate [J]. Journal of Food Science, 2003, 68(1): 401-404.

[6] 孙海燕,胡家恕,汪俏梅. 苦瓜的核糖体失活蛋白[J]. 细胞生物学杂志, 2004, 26(3): 247-250.

[7] KHANNA P, JAIN S, PANAGARIYA A, et al. Hypoglycemic activity of polypeptide-p from a plantsource [J]. Journal of Natural Products, 1981, 44(6): 648-655.

[8] 伍曾利. 苦瓜多肽降血糖功能研究[J]. 轻工科技, 2013(7): 13-14.

[9] 王东红,吴雨真,殷军港. 苦瓜多肽对 SD 大鼠降血脂作用研究[J]. 大家健康, 2015, 8(9): 18.

[10] 王贻莲,陈燕平,黄伟,等. 苦瓜活性组分物质抑菌活性测定[J]. 植物保护, 2008, 34(2): 67-71.

[11] 赵声兰,陈朝银. 天然食物中的抗艾滋病有效成分[J]. 食品与机械, 2007, 23(3): 166-170.

[12] 熊术道,尹丽慧,李景荣,等. 苦瓜蛋白抗肿瘤作用及其分子机制[J]. 中草药, 2008, 39(3): 408-411.

[13] 黄贤生,王仁,马小峰,等. 苦瓜蛋白通过阻止核因子 κB 核转位抑制炎症因子生成[J]. 中国动脉硬化杂志, 2013, 21(7):

[4] 张娟,闫瑞霞,孙志洪,等. 全豆豆浆与传统豆浆感官品质和营养成分对比[J]. 大豆科学, 2017, 36(3): 459-462.

[5] 谢怡斐,田少君,马燕,等. 超微粉碎对豆渣功能性质的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 7-11.

[6] 张娟,杨栋梁,周媛,等. 全豆豆浆的加工工艺研究[J]. 大豆科学, 2016, 35(6): 1 013-1 017.

[7] 霍建治,王建光,吴超义,等. 低胰蛋白酶抑制剂全豆豆浆的研制[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(14): 251-253, 288.

[8] 顾笑笑,张茂龙,赵龙,等. 全谷物冲调粉高效加工技术研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 207-210.

[9] 王秀丽,张茂龙,高青令,等. 超细粉碎技术在全枣制浆中的应用研究[J]. 食品科技, 2014, 39(1): 51-55.

[10] 赵龙,卢慧,王秀丽,等. 黑莓浓浆饮品的加工工艺研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(3): 233-240.

[11] 张学建,王立慧,赵龙,等. 超细粉碎技术在现调饮品装置中的应用[J]. 食品与机械, 2013, 29(4): 102-106.

[12] 张茂龙,陈锡春,高青令,等. 高速切割技术及其在鲜湿豆渣超细粉碎中的应用[J]. 食品与机械, 2010, 26(5): 105-108, 154.

[13] 杨满盈,张裕中. 剪切技术在鲮鱼加工副产物超细制浆中的应用研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 302-305.

[14] 戴宁,张茂龙,张裕中. 农产品湿法超细粉碎技术与大豆全利用产品开发[J]. 食品科学, 2011, 32(S1): 91-96.

[15] 张裕中,臧其梅. 食品加工技术装备[M]. 北京:中国轻工业出版社, 1999: 118-120.

[16] 王小龙,张裕中,张茂龙. 不同湿法粉碎装置的粉碎能耗及豆浆特性的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(19): 97-100.

[17] SHARMA P, CHAKKARAVARTHI A, SINGH V, et al. Grinding characteristics and batter quality of rice in different wet grinding systems[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(4): 499-506.

[18] 赵瑞林. 浅谈搅拌设备功率计算公式对推进式搅拌器的适用范围[J]. 铀矿冶, 2000, 19(3): 184-149.

[19] 沈培玉,赵浩,张裕中. 农产品物料高速切割粉碎流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2010(9): 60-65.

(上接第 148 页)

[6] 孙海燕,胡家恕,汪俏梅. 苦瓜的核糖体失活蛋白[J]. 细胞生物学杂志, 2004, 26(3): 247-250.

[7] KHANNA P, JAIN S, PANAGARIYA A, et al. Hypoglycemic activity of polypeptide-p from a plantsource [J]. Journal of Natural Products, 1981, 44(6): 648-655.

[8] 伍曾利. 苦瓜多肽降血糖功能研究[J]. 轻工科技, 2013(7): 13-14.

[9] 王东红,吴雨真,殷军港. 苦瓜多肽对 SD 大鼠降血脂作用研究[J]. 大家健康, 2015, 8(9): 18.

[10] 王贻莲,陈燕平,黄伟,等. 苦瓜活性组分物质抑菌活性测定[J]. 植物保护, 2008, 34(2): 67-71.

[11] 赵声兰,陈朝银. 天然食物中的抗艾滋病有效成分[J]. 食品与机械, 2007, 23(3): 166-170.

[12] 熊术道,尹丽慧,李景荣,等. 苦瓜蛋白抗肿瘤作用及其分子机制[J]. 中草药, 2008, 39(3): 408-411.

[13] 黄贤生,王仁,马小峰,等. 苦瓜蛋白通过阻止核因子 κB 核转位抑制炎症因子生成[J]. 中国动脉硬化杂志, 2013, 21(7):

583-588.

[14] 钟维庚,阮美娟,殷利娟,等. 苦瓜渣酶解制备多肽的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(1): 240-242.

[15] 汪少芸. 蛋白质纯化与分析技术[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2014: 1-109.

[16] 王春霞,蒲彪,蒋燕,等. 藤椒冷榨油饼粕中黄酮类物质的提取及体外抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(1): 137-142.

[17] 杨玉雯,袁美兰,陈丽丽,等. 河蚬中水溶性蛋白的提取及其抗氧化性质[J]. 食品科学, 2015, 36(6): 96-102.

[18] 吴晓红,华美玲,石媛,等. 响应面法优化脱脂松仁水溶性蛋白提取工艺[J]. 油料蛋白, 2010, 35(8): 34-37.

[19] 王晓然. 马胎盘水溶性蛋白提取工艺及其保健功能研究[D]. 乌鲁木齐:新疆医科大学, 2013: 9.

[20] 田庚元,张孝先,沈春镒. 天花粉蛋白溶液构象与稳定性及生物活性的关系[J]. 化学学报, 1992, 50(9): 914-917.

[21] 李小凡. 香菇柄中水溶性蛋白及活性肽的研究[D]. 太原:山西大学, 2015: 10.