

# 杜仲雄花超微粉碎破壁条件优化

魏媛媛, 李伟业, 温 晓, 于华忠\*

(吉首大学林产化学加工工程湖南省重点实验室, 湖南张家界 427000)

**摘要:**采用超微粉碎物理破壁技术对杜仲雄花进行破壁,以杜仲雄花破壁率为指标,研究了粉碎时间、雄花水分含量和投料量对杜仲雄花破壁率的影响,并应用响应面曲线法对超微粉碎破壁杜仲雄花条件进行优化。同时测定破壁前后总黄酮、京尼平苷、桃叶珊瑚苷和绿原酸的浸出率。响应面法优化结果表明,最佳破壁条件为:粉碎时间 8 min,投料量为 100 g,雄花水分含量为 6%,破壁率可达 100%,通过对超微粉碎破壁处理前后花粉液显微镜下观察,表明超微粉碎具有很好的破壁效果,能促进总黄酮、绿原酸等内容物的释放,提高得率。

**关键词:**杜仲雄花,超微粉碎破壁技术,响应面优化

## Optimization of Ultrafine Powder Wall-broken Conditions of *Eucommia ulmoides* Male Flower

WEI Yuan-yuan, LI Wei-ye, WEN Xiao, YU Hua-zhong\*

(Key Laboratory of Hunan Forest Products and Chemical Industry Engineering, Jishou University, Zhangjiajie 427000, China)

**Abstract:** The ultra-fine powder physical wall-breaking technology was used to break the wall of *Eucommia ulmoides* male flowers. Taking the wall-breaking rate of *Eucommia ulmoides* male flowers as an index, the effects of crushing time, water content of *Eucommia ulmoides* male flowers and feeding amount on the wall-breaking rate of *Eucommia ulmoides* male flowers were studied. The response surface curve method was used to optimize the conditions for breaking the wall of *Eucommia ulmoides* male flowers with ultra-fine powder and determine the leaching rate of flavonoids, aucubin, geniposide and chlorogenic acid before and after wall-breaking. Response surface methodology optimization results showed that the optimal wall-breaking conditions were as follows: Crushing time 8 min, feeding amount 100 g, water content of male flower 6%, wall-breaking rate up to 100%. Through microscopic observation of pollen liquid before and after ultra-fine powder wall-breaking treatment, it was shown that ultrafine powder had good wall-breaking effect, could promote the release of total flavonoids, chlorogenic acid and other contents, and improve the yield.

**Key words:** *Eucommia ulmoides* male flower; wall breaking technology of ultrafine powder; response surface optimization

中图分类号: TS255.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2019)22-0207-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.22.036

引文格式: 魏媛媛, 李伟业, 温晓, 等. 杜仲雄花超微粉碎破壁条件优化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 207-212.

杜仲雄花,雌雄双株,杜仲雄蕊的萌发先于杜仲新枝新叶,避免了在营养供给上与枝叶生长的矛盾,因此,杜仲雄花的营养物质丰富且全面。近几十年,国内外学者对杜仲雄花茶中的天然活性物质和功效作用已进行大量研究。杜仲雄花富含次生代谢产物,主要有总黄酮、木质素类、苯丙素类、环烯醚萜类、三萜、甾类等,具有抗肿瘤、镇静催眠、降血压、降血脂、抗疲劳、抑菌、抗氧化及抗衰老等作用<sup>[1-4]</sup>。目前市场上杜仲雄花相关产品主要以杜仲雄花茶为主,对杜仲雄花的活性成分不能最大化利用,因此考虑对杜仲雄花进行破壁,从而提高其活性成分的利用率。目前,破壁技术应用广泛,在食品领域的应用范围较小,在中药加工和制药工业方面研究

和应用较多,主要以中药破壁饮片和花粉破壁为主。

细胞破壁技术是采用一定的技术手段,破坏细胞外壁和内膜囊都,使其内容物在破壁后渗透而出,从而使有效成分易于被提取或吸收。破壁技术可分为物理法、生物法和化学法。超微粉碎是通过机械对物料的物理作用,将物料粉碎至微米级别。超微粉碎能有效减小物料粉体颗粒粒度,增加粉体的表面积和孔隙率,使超微粉末具有良好的吸附性、溶解性和分散性等多方面的理化新特性<sup>[5]</sup>,有利于方便食品和速溶食品的加工,以满足现代食品生产所需,此外,经超微粉生产的产品更容易被人体消化吸收<sup>[6-7]</sup>。因此,本研究采用响应面曲线法,

收稿日期: 2019-03-03

作者简介: 魏媛媛(1994-),女,硕士研究生,研究方向: 功能性食品, E-mail: weiyuanyuan4916@163.com。

\* 通讯作者: 于华忠(1973-),男,博士,副教授,研究方向: 天然产物、功能性食品研究, E-mail: yuhuazhong001@163.com。

基金项目: 湖南省教育厅杜仲资源高效综合利用技术产业化转化(13CY017)。

以杜仲雄花的破壁率为指标,确定超微粉碎破壁杜仲雄花的最优条件,为杜仲雄花的综合利用提供工艺基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

杜仲鲜雄花 2018年3月下旬采自湖南省张家界市慈利县江垭林场,去除鲜叶和枝梗密封袋储存于-10℃冰箱冷藏室,保存备用,湖南张家界慈利江垭茶叶合作社提供;芦丁、桃叶珊瑚苷、绿原酸、京尼平苷等标准品 纯度>99%,中国生物制品鉴定院;无水乙醇、甲醇等试剂 均为国产分析纯。

振动式细胞级超微粉碎机 济南达微机械有限公司;Nikon ECLIPSE E200 光学显微镜 上海楚柏实验室设备有限公司;Thermo Evolution 220 型紫外可见分光光度计 上海辅泽商贸有限公司;Agilent 1260 高效液相色谱仪 美国 Agilent 公司;XD-5200DT 型超声波清洗仪 南京先欧仪器制造有限公司;HH 型数显电热恒温水浴锅 江苏金坛金城国胜实验仪器厂;Hei-VAP value 旋转蒸发仪、SHZ-D (III) 循环水式真空泵 巩义市予华仪表有限责任公司;AL204 型电子分析天平 梅特勒-托利多仪器上海有限公司;AEL-40SM 型微量天平 南京莱步科技实业有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 超微粉碎破壁杜仲雄花工艺 低温储存的鲜雄花→真空干燥→粗粉碎→过筛→超微粉碎破壁。

操作要点:

真空干燥:称取低温储存的杜仲鲜雄花 36 g,薄层且均匀地摊放在半径为 15 cm 的不锈钢圆盘中,将其置于真空干燥箱中,在真空度为-0.1 Mpa,温度为 40℃下,对杜仲雄花鲜花进行干燥<sup>[8]</sup>,间隔搅拌,并测定其水分,控制到实验所需水分含量,备用;

粗粉碎:将真空干燥后的杜仲雄花进行粗粉碎,过 100 目筛,备用;

超微粉碎破壁:开启超微粉碎机降温系统,设置实验温度值,打开主机预热 30 min 至机器达到正常运转。称量过 100 目筛的雄花物料装罐,将物料罐装机后设置粉碎时间,启动粉碎机粉碎系统,粉碎完成后自动停止,取少量破壁后的物料进行破壁率的检测。

#### 1.2.2 单因素实验

1.2.2.1 粉碎时间的筛选 取低温冷冻室储存的鲜雄花,真空干燥至水分 4%,精密称量 100 g,分别粉碎 1、2、4、6、8、10 min。通过显微镜下观察其破壁率,得到在最短时间内达到最高破壁率的粉碎时间范围。

1.2.2.2 投料量的筛选 投料量的筛选可根据超微粉碎仪器物料罐的大小和仪器使用注意事项以及雄花破壁率的高低来设定,取处理后超低温冷冻室储存的鲜雄花,真空干燥至水分 4%,分别称量 100、120、140、160、180、200 g,粉碎 6 min。(本实验所用仪器的储料罐的容量小于等于 200 g),得到达到最高破壁率的投料量。

1.2.2.3 物料水分的筛选 取低温冷冻室储存的鲜雄花,通过真空干燥控制鲜雄花水分含量,分别干燥至水分含量为 2%、4%、6%、8%、10%、12%,精密称取各水分含量的雄花 100 g,粉碎 6 min。通过显微镜观察其破壁率,得到达到最高破壁率的雄花水分范围。

1.2.3 响应面实验设计 为了使超微粉碎破壁杜仲雄花方法更加科学可靠,根据单因素实验结果,选择粉碎时间、投料量和雄花水分含量为影响因素,雄花破壁率为评价标准,利用 Design-Expert 8.0.6 软件,根据 Box-Behnken 中心实验组合设计实验,因素水平设计见表 1。

表 1 实验因素与水平

Table 1 Factors and levels in response surface test

水平	因素		
	A 粉碎时间 (min)	B 投料量 (g)	C 雄花水分含量 (%)
-1	2	100	3
0	5	150	6
1	8	200	9

#### 1.2.4 破壁前后雄花有效成分对比

1.2.4.1 总黄酮含量测定 标准曲线的绘制:称取干燥至恒重的芦丁标准品 12.0 mg 于 100 mL 容量瓶中,加适量甲醇,置于 40℃水浴微热溶解,放冷至室温,加甲醇至刻度,摇匀,即得质量浓度为 12 mg·mL<sup>-1</sup> 的芦丁对照品母液,精密量取芦丁对照品溶液 1、2、3、4、5、6 mL,分别置于 25 mL 容量瓶中,各加水至 6 mL,采用亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠显色法进行显色:先加入 5% 亚硝酸溶液 1 mL,混匀,放置 6 min;后加入 10% 硝酸铝溶液 1 mL,摇匀,放置 6 min;然后加入 4% 氢氧化钠溶液 10 mL,最后加水至刻度,摇匀,放置 15 min,测定<sup>[9]</sup>。以芦丁标准品为横坐标,吸光度值为纵坐标,得芦丁的标准曲线方程为  $C = 0.01185A - 0.00333$ ,  $R^2 = 0.99996$ 。芦丁在 4.8~28.8 μg·mL<sup>-1</sup> 浓度范围内线性关系良好。

1.2.4.2 桃叶珊瑚苷、绿原酸和京尼平苷含量测定 色谱条件:Thermal Hypersil BDS C18 色谱柱 (4.6 mm×250 mm, 5 μm);以 0.3% 磷酸溶液为流动相 A,乙腈为流动相 B,按表 2 中的规定梯度洗脱,体积流量 1.0 mL·min<sup>-1</sup>;柱温 26℃;多波长检测:206、238、327 nm;检测时间为 25 min,进样量为 20 μL。

表 2 梯度洗脱条件

Table 2 Gradient elution conditions

时间(min)	流动相 A (%)	流动相 B (%)
0~9	96	4
9~10	96~89	4~11
10~25	89	11

标准曲线的绘制:分别精密称取桃叶珊瑚苷对照品京尼平苷 8.02 mg,绿原酸对照品 7.88 mg,京尼平苷对照品 4.33 mg,置同一 5 mL 棕色量瓶中,超纯水定容,摇匀,即得。分别精密吸取混合对照品溶液

表3 3种活性成分线性回归方程  
Table 3 Linear regression equation of three active ingredients

成分	回归方程	相关系数 r	线性范围(μg·mL <sup>-1</sup> )
桃叶珊瑚苷	y = 12.484x - 7.5167	0.9996	3.21~160.40
绿原酸	y = 64.443x - 194.16	0.9998	7.88~157.60
京尼平苷	y = 25.736x + 3.5971	0.9998	1.73~69.28

0.02、0.05、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 定容至 10 mL 容量瓶中,再经 0.45 μm 微孔膜滤过,依次进样 20 μL 测定其峰面积。分别以对照品浓度为横坐标,色谱峰面积为纵坐标,进行线性回归,得回归方程。回归方程与线性范围见表 3。结果表明,桃叶珊瑚苷、绿原酸、京尼平苷对照品浓度与色谱峰面积线性关系良好。

1.2.5 破壁率的计算 配制 4% 的花粉液,制作玻片,直接显微镜下观察。

取破壁后的杜仲雄花粉末(超微粉碎破壁和和破壁前相同雄花粉末作为对照)各 0.5 g,加入 12.5 mL 蒸馏水,制作玻片;直接吸取搅拌均匀的破壁处理液,制作玻片;将制作好的玻片置于 10 × 40 目的显微镜下观察。每种破壁处理液观察 3~4 个玻片,每个玻片取 3 个视野,统计计算<sup>[10]</sup>。按下式计算花粉的破壁率:

破壁率(%) = 视野中已破壁雄花粉末粒数 / 视野总雄花粉末颗粒数 × 100

### 1.3 数据处理

每组实验重复三次,试验数据使用 SPSS Statistics 24 软件进行分析,使用 WPS 2018 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素实验结果

2.1.1 粉碎时间对超微粉碎破壁率的影响 由图 1 可见,超微粉碎时间对其破壁率有一定影响,随粉碎时间的加长,破壁率越高,但 2 min 后其破壁率差异不大,到 8 min 破壁率可达 100%,粉碎时间越长,超微粉转子与物料的摩擦几率越大,雄花粉碎越彻底<sup>[11]</sup>。粉碎至 8 min 左右破壁率基本变化不明显,因此最佳粉碎时间为 2~8 min。

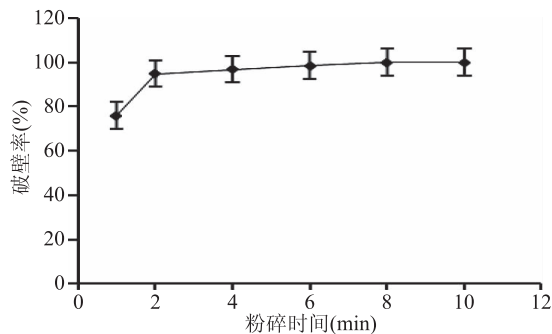


图1 不同粉碎时间对雄花破壁率的影响

Fig.1 Effect of different grinding time on wall breaking rate of *Eucommia ulmoides* male flower

2.1.2 投料量对超微粉碎破壁率的影响 超微粉碎投料量的多少与超微粉碎机的性能密不可分<sup>[12]</sup>。如图 2 所示,随投料量的增加,破壁率先升高后降低。

原料投放量至物料罐的 2/3 (160 g) 处最佳。投料量少于物料罐的 1/3 (100 g) 会对机器转子损伤较大,投料量过多,原料易堆积<sup>[13]</sup>,从而影响雄花粉碎程度,因此超微粉破壁雄花最佳投料量为 100~200 g。

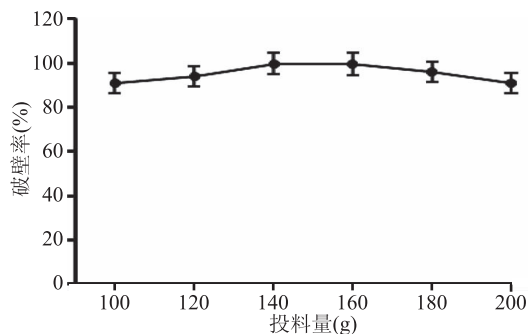


图2 不同投料量对雄花破壁率的影响

Fig.2 Effect of different dosage

on *Eucommia ulmoides* male flower wall breaking rate

2.1.3 雄花水分含量对超微粉碎破壁率的影响 由图 3 可见,雄花水分含量对超微粉碎破壁率有一定影响,随雄花水分含量的升高,破壁率先升高再降低的趋势。水分含量在 3%~9% 之间,破壁率较高。水分过低或过高,超微粉转子与物料的摩擦力减小,破壁率较低。此外,物料水分含量越高,由于物料粉碎仓内温度和物料停留时间的影响,使得物料水分不能完全蒸发,且蒸发的水蒸气不能及时排出,必然造成粘转子、粘壁和减小转子摩擦力等现象,不但降低了粉碎效果,而且破坏了物料在粉碎仓内的平衡状态<sup>[14]</sup>。因此最佳粉碎雄花水分含量为 3%~9%。

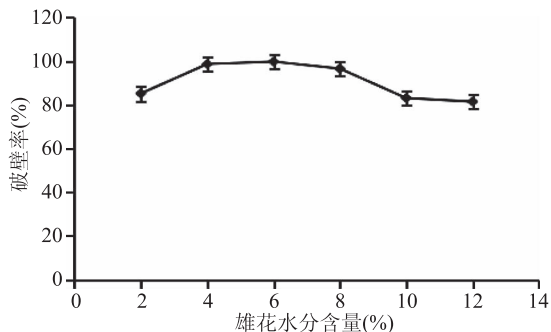


图3 雄花不同水分含量对其破壁率的影响

Fig.3 Effect of different water content

on wall breaking rate of *Eucommia ulmoides* male flower

### 2.2 响应面分析

2.2.1 二次多元回归模型分析 响应面实验设计结果见表 4。对试验所得的数据进行多元化回归拟合分析得到 3 个因素与雄花破壁率之间二次回归拟合方程为:

$$Y = 99.44 + 8.85A - 2.17B - 3.10C + 1.02AB +$$

表5 回归方程方差分析表  
Table 5 Variance analysis of regression equation

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
Model	1066.34	9	118.48	27.26	0.0001	极显著
A	626.58	1	626.58	144.17	<0.0001	极显著
B	37.85	1	37.85	8.71	0.0214	显著
C	76.88	1	76.88	17.69	0.0040	极显著
AB	4.20	1	4.20	0.97	0.3582	不显著
AC	78.32	1	78.32	18.02	0.0038	极显著
BC	1.10	1	1.10	0.25	0.6300	不显著
A <sup>2</sup>	178.31	1	178.31	41.03	0.0004	极显著
B <sup>2</sup>	6.14	1	6.14	1.41	0.2734	不显著
C <sup>2</sup>	40.66	1	40.66	9.36	0.0184	显著
残差	30.42	7	4.35			
失拟项	30.25	3	10.08	234.50	0.0523	不显著
净误差	0.17	4	0.043			
总误差	1096.76	16				

$$4.43AC + 0.53BC - 6.51A^2 - 1.21B^2 - 3.11C^2$$

回归方程显著性检验及方差分析结果见表5。二次回归模拟方程其中一次项和二次项都有显著性影响因素,所以实验各因子对响应值的影响并不是线性关系。

表4 响应面中心组合方案及响应值  
Table 4 Response surface central combination project and response values

序号	A	B	C	破壁率(%)
1	0	-1	1	93.6
2	-1	-1	0	98.7
3	1	1	0	86.8
4	0	0	0	99.6
5	-1	1	0	100
6	-1	0	1	100
7	0	1	1	100
8	1	-1	0	81.4
9	-1	0	-1	99.8
10	0	0	0	99.6
11	1	0	1	88.7
12	0	-1	-1	91.3
13	0	0	0	99.4
14	0	0	0	99.1
15	0	1	-1	95.6
16	1	0	-1	70.8
17	0	0	0	99.5

应用响应面分析法对试验结果和数学模型进行分析,结果显示,回归模型呈现极显著( $P < 0.0001$ ),失拟项不显著,可知回归方程的拟合度和可信度均较高,能够很好预测各条件下超微粉碎破壁杜仲雄花的破壁率。 $R^2 = 0.9723$ 说明模型相关度好。校正决定系数  $R_{adj}^2 = 0.9366$ 说明模型能较好地反映粉碎时间、投料量、雄花水分含量与破壁率之间的关系。从F值的分析结果可以看出,在所选的各因素水平范围内,对雄花破壁率的影响大小的顺序为:粉碎

时间( $F = 144.17$ )、雄花水分含量( $F = 17.69$ )、投料量( $F = 8.17$ )。根据表5中P值可知,一次项A、C,交互项AC与二次项A<sup>2</sup>对雄花破壁率的影响极显著,一次项B与二次项C<sup>2</sup>对雄花破壁率的影响显著。

响应面图可以直观地观察各影响因素之间的相互关系,响应曲面图形越陡峭,即其交互作用越显著,图形平稳则说明交互作用比较微弱。两因素交互作用对超微粉碎破壁杜仲雄花破壁率影响的响应曲面见图4,粉碎时间和雄花水分含量交互作用最强,即对破壁率的影响最为显著;投料量和雄花水分含量交互作用最弱。由图4可见,当粉碎时间为8 min左右,投料量为100 g左右时,超微粉碎破壁杜仲雄花破壁率达到100%;雄花水分含量在3%左右,粉碎时间为8 min左右,超微粉碎破壁杜仲雄花破壁率可达100%;雄花水分在3%左右,投料量为100 g左右时,超微粉碎破壁杜仲雄花破壁率可达100%。

2.2.2 最优条件确定以及验证 通过响应曲面法分析得到最大响应值(Y)时,调整后A、B、C对应的值分别为A=8 min, B=100 g, C=6%。为检测响应曲面法所得结果的可靠性,进行验证试验,破壁率为100%,采用优化条件,实验值与预测值相对误差RSD为1.69%。

### 2.3 超微粉碎破壁杜仲雄花前后显微镜视野对比

不同破壁方法对雄花细胞破壁方式不同,因此显微镜下视野状态不同。由图5中超微粉碎破壁雄花显微镜视野图可见,雄花细胞呈碎末状、碎片状等,由此可见超微粉碎破壁是通过物料与介质的混合振动,并受到强烈的振动、冲击、剪贴、撕扯等作用,从而达到破壁效果。

### 2.4 超微粉碎破壁杜仲雄花前后有效成分含量对比

杜仲雄花破壁前后提取成分含量对比见表6,由表6可见,破壁后杜仲雄花中的总黄酮、桃叶珊瑚苷、绿原酸和京尼平苷溶出率均明显高于破壁前,破

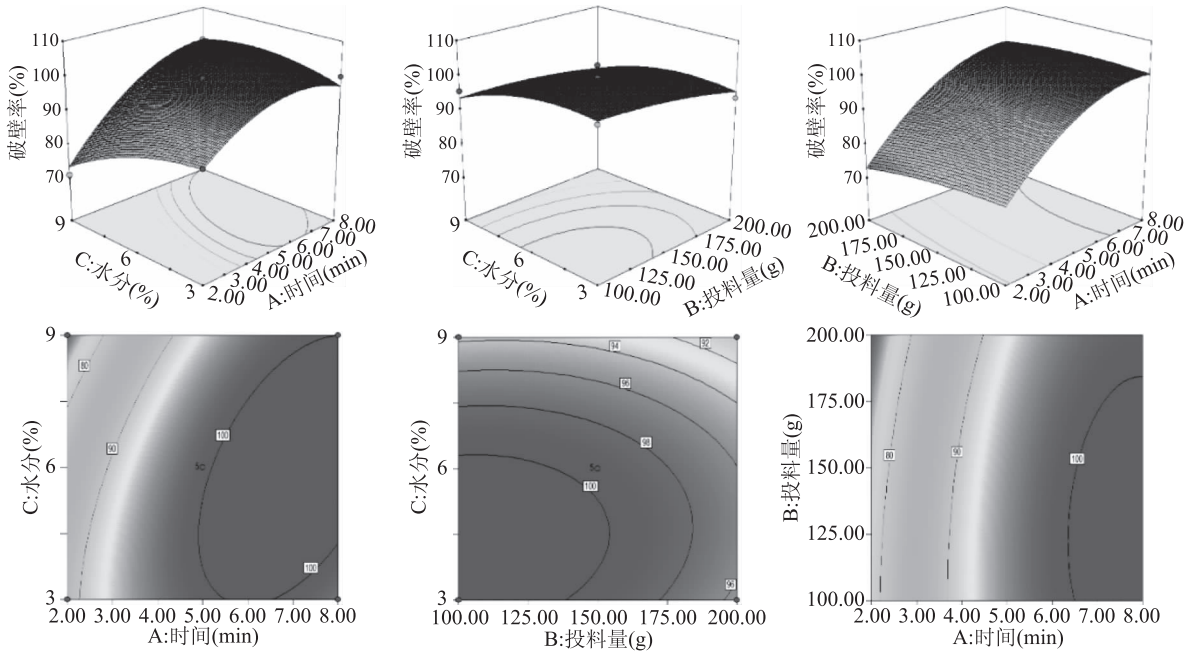
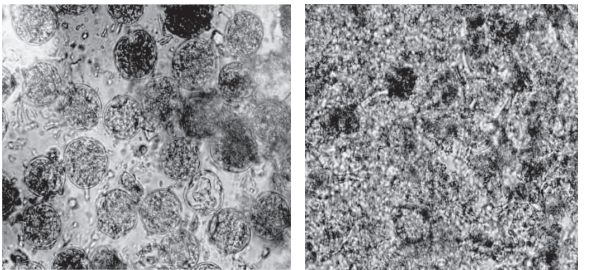


图4 各两因素交互对超微粉破壁杜仲雄花破壁率的影响

Fig.4 Effect of interaction of two factors on the wall-breaking rate of ultrafine powder broken *Eucommia ulmoides* male flowers



破壁前雄花显微镜视野图 超微粉碎破壁雄花显微镜视野图

图5 杜仲雄花破壁前后显微镜视野图

Fig.5 Microscopic field of view of *Eucommia ulmoides* male flowers before and after wall breaking

壁后的杜仲雄花总黄酮含量为 25.9%，比破壁前高出 60% 多。由此可见，应用超微粉碎破壁杜仲雄花细胞壁有利于活性成分的溶出。

表6 雄花破壁前后成分对比

Table 6 Comparison of components of *Eucommia ulmoides* male flowers before and after wall breaking

成分含量	总黄酮含量 (mg/g)	桃叶珊瑚苷含量 (mg/g)	绿原酸含量 (mg/g)	京尼平苷含量 (mg/g)
破壁前	15.6	8.0	3.0	0.8
破壁后	25.9	9.3	4.2	1.6

### 3 结论

应用响应面分析法对试验结果和数学模型进行分析，结果显示，回归模型极显著 ( $P < 0.0001$ )，失拟项不显著，可知回归方程的拟合度和可信度均较高，能够很好预测各条件下超微粉破壁杜仲雄花的破壁率。从  $F$  值的分析结果可以看出，在所选的各因素水平范围内，粉碎时间对雄花破壁率的影响最大；由响应曲面法分析得到最大响应值 ( $Y$ ) 时，破壁条件：

粉碎时间 8 min，投料量为 100 g，雄花水分含量为 6%，其破壁率可达 100%，验证试验可靠。杜仲雄花破壁前后显微镜视野图表明超微粉具有很好的破壁作用，改善了杜仲雄花细胞壁的通透性，有利于其有效成分的溶出，为杜仲雄花的应用提供可靠依据。

### 参考文献

- [1] 张康健, 王蓝, 马柏林. 中国杜仲次生代谢物 [M]. 北京: 科技出版社, 2002.
- [2] 张康健, 赵德义, 董娟娥. 风靡全球的杜仲健康新理念 [M]. 杨陵: 西北农林科技大学出版社, 2005.
- [3] 董娟娥, 马希汉. 反相高效液相色谱法同时分离测定杜仲雄花及其产品中的京尼平苷酸和绿原酸 [J]. 色谱, 2007, 25 (2): 217-220.
- [4] 董娟娥, 梁宗锁, 张康健, 等. 杜仲雄花中次生代谢物合成积累的动态变化 [J]. 植物资源与环境学报, 2005, 14 (4): 7-10.
- [5] 韩雪, 郭祯祥. 超微粉碎技术在谷物加工中的应用 [J]. 粮食与饲料工业, 2016, 12 (3): 13-16.
- [6] Zhao X Y, Ao Q, Yang L W, et al. Application of superfine pulverization technology in biomaterial industry [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2009, 40 (3): 337-343.
- [7] 杨宇迪, 程湛, 满媛, 等. 葡萄籽超微粉添加对曲奇饼干香气的影响 [J]. 食品科学, 2017, 38 (20): 110-118.
- [8] 魏巍. 不同干燥技术对绿茶品质影响的研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- [9] 辛晓明, 郭桂丽, 王浩, 等. 杜仲多糖对环磷酰胺致小鼠毒性的影响 [J]. 时珍国医国药, 2009, 20 (7): 1664.
- [10] 崔宁, 潘家祯, 王春涛, 等. 超高压超临界流体撞击流方法制备破壁灵芝孢子粉的工艺研究 [J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2005 (4): 504-508.
- [11] 吴丽琼, 蔡荣钦, 江秀山, 等. 心宝丸中蟾酥低温粉碎工艺研究 [J]. 今日药学, 2018, 28 (10): 674-677.

# 甜叶菊红外-热风联合干燥工艺优化

刘旺星<sup>1,2</sup>, 陈雄飞<sup>1,2</sup>, 胡淑芬<sup>1,2</sup>, 刘木华<sup>1,2</sup>, 余佳佳<sup>1,2,\*</sup>, 刘俊安<sup>1,2</sup>, 熊祥盛<sup>1</sup>, 张衡<sup>1</sup>

(1. 江西农业大学工学院, 江西南昌 330045;

2. 江西省现代农业装备重点实验室, 江西南昌 330045)

**摘要:**为探究甜叶菊红外-热风干燥特性,以江西甜叶菊守田3号为试验材料,在研制的红外-热风联合干燥样机基础上,通过开展热风温度(90、100、110、120℃)、排湿功率(0、140、240、340W)和辐射距离(140、150、160、170mm)条件下的单因素和正交试验,探究甜叶菊红外-热风干燥特性曲线及干燥速率曲线,优化甜叶菊干燥工艺参数。结果表明,甜叶菊红外-热风联合干燥过程包含预热加速干燥阶段和降速干燥阶段;影响甜叶菊红外-热风联合干燥生产效率的影响因素顺序为:热风温度>辐射距离>排湿速率;最佳干燥工艺参数:热风温度120℃,排湿功率240W、辐射距离140mm,此时甜叶菊干燥时长6.57min,能耗1.25kW·h。本研究可为研制甜叶菊干燥装置和研究甜叶菊干燥特性提供参考。

**关键词:**甜叶菊, 红外-热风, 联合干燥, 干燥装置, 能耗

## Optimization of Infrared-Hot Air Combined Drying Process of *Stevia rebaudiana* Bertoni

LIU Wang-xing<sup>1,2</sup>, CHEN Xiong-fei<sup>1,2</sup>, HU Shu-fen<sup>1,2</sup>, LIU Mu-hua<sup>1,2</sup>,

YU Jia-jia<sup>1,2,\*</sup>, LIU Jun-an<sup>1,2</sup>, XIONG Xiang-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Heng<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Jiangxi Province, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** In order to explore the infrared-hot air drying characteristics of *Stevia rebaudiana* Bertoni, the *Stevia rebaudiana* Bertoni No.3 in Jiangxi province was used as the experimental material, and the hot air temperature(90, 100, 110, 120℃), wet power(0, 140, 240, 340W) and radiation distance(140, 150, 160, 170mm) were developed by single-factor and orthogonal experiments on the basis of the developed infrared-hot air combined drying prototype. The infrared-hot air drying characteristic curve and drying rate curve of *Stevia rebaudiana* Bertoni were explored, and the drying process parameters of *Stevia rebaudiana* Bertoni were optimized. The results showed that the *Stevia rebaudiana* Bertoni infrared-hot air combined drying process included preheating accelerated drying stage and deceleration drying stage. The influencing factors affecting the production efficiency of *Stevia rebaudiana* Bertoni infrared-hot air combined drying were: Hot air temperature > radiation distance > dehumidification rate. The best drying process parameters: Hot air temperature 120℃, moisture discharge power 240W, radiation distance 140mm, at this time *Stevia rebaudiana* Bertoni drying time 6.57min, energy consumption 1.25kW·h. This study could provide a reference for the development of *Stevia rebaudiana* Bertoni drying equipment and the study of the drying characteristics of *Stevia rebaudiana* Bertoni.

**Key words:** *Stevia rebaudiana* Bertoni; infrared-hot air; combined drying; drying device; energy consumption

中图分类号: TS255.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2019)22-0212-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.22.037

引文格式: 刘旺星, 陈雄飞, 胡淑芬, 等. 甜叶菊红外-热风联合干燥工艺优化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 212-216, 233.

甜叶菊别名甜草、甜菊和甜茶等, 含有14种微量元素和32种营养成分, 是优质糖源的原料<sup>[1]</sup>。其

甜味活性物质是甜菊糖, 主要成分为甜菊糖苷和莱鲍迪苷, 甜度是蔗糖的300倍, 热量仅为蔗糖的

收稿日期: 2019-03-07

作者简介: 刘旺星(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品干燥, E-mail: lwx\_cyj@163.com。

\*通讯作者: 余佳佳(1984-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 现代农业装备设计, E-mail: aiyejingling@163.com。

基金项目: 江西省重点研发计划项目(20171BBF60017)。

[12] 佚名. 超微粉碎机[J]. 河北农村科技, 1996.

[13] 张胜来. 鱼香菜超微粉加工工艺[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 71-74.

[14] 邵彩云, 朝乐门, 吴彬彬. 三子散的超微粉碎工艺条件优选[J]. 内蒙古民族大学学报: 自然科学版, 2018, 33(2): 170-173.