

响应面法优化酒糟微波间歇干燥工艺

张黎骅^{1,2}, 张 文², 吕珍珍³, 王之盛^{4*}

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 610044; 2. 四川农业大学信息与工程技术学院, 雅安 625014;
3. 四川农业大学食品学院, 雅安 625014; 4. 四川农业大学动物营养研究所, 雅安 625014)

摘 要: 为了优化酒糟干燥工艺, 保证酒糟干燥后品质, 选择微波间歇干燥方法进行试验研究。以干燥速率、能耗、品质为目标, 利用隶属度的综合评分法对 3 个目标综合评分。根据响应面中心组合设计理论, 用响应面法探讨了微波功率、糟层厚度、脉冲比对酒糟微波间歇干燥工艺的影响, 建立了二次多项式回归模型, 并对干燥工艺参数进行了优化。结果表明, 3 个因素对综合分的影响大小依次为: 脉冲比>糟层厚度>微波功率; 酒糟微波间歇干燥的最佳工艺参数为: 微波功率为 480 W、糟层厚度为 2.78 cm、脉冲比为 6.625, 此时得到最大综合分为 0.723。为进一步研究酒糟微波干燥设备及工艺提供了理论依据。

关键词: 干燥, 优化, 参数提取, 响应面法, 酒糟, 微波间歇

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.067

中图分类号: S375

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0369-06

张黎骅, 张 文, 吕珍珍, 等. 响应面法优化酒糟微波间歇干燥工艺[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 369—374.

Zhang Lihua, Zhang Wen, Lü Zhenzhen, et al. Optimization of intermittent microwave drying technology for lees by response surface methodology[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 369—374. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

酒糟, 是酿酒的副产物。它以粮食为原料, 富含大量粗蛋白、维生素、粗纤维等营养成分, 尤其是粗蛋白的含量在 12% 以上, 几乎高于所有的非豆类粮食^[1], 经干燥后便是良好的饲料资源。但是, 鲜酒糟中含有大量水分, 久置容易发生霉变^[2]。变质后倾倒不仅浪费了宝贵的饲料资源, 还造成了环境污染。随着畜禽养殖业的发展, 饲料需求越来越大, 因此有效利用酒糟资源, 将鲜酒糟干燥处理加工成粉, 对缓解饲料粮食的紧张, 解决环境污染, 具有十分重要的意义。

近几年来, 微波干燥技术在农产品生产和加工过程中得到广泛应用, 其加热时间短、加热均匀、热效率高、杀菌、干燥品质好^[3]。但单纯使用微波进行农产品干燥, 容易产生由于过热引起的烧伤现象和食品边缘焦化、结壳和硬化等现象^[4], 上述现象多半是由于温度过高或干燥过快引起的。对于酒糟, 则会出现焦糊、营养物质破坏等现象, 因而为限制温度过高则要选择微波间歇干燥。

目前夏萍、冯殿义^[2,5-6]等人研究了压榨干燥、气流换向干燥、旋转闪蒸干燥等酒糟热风干燥工艺。这些方法均能提高热能的利用率, 缩短干燥时间。但是其设备投资较大, 干燥成本较高。为了探索高效节能的农产品干燥方法, 国内外很多学者对农业物料的微波干燥进行了

相关研究, 如刘志军、赵超^[7-8]等人对微波间歇干燥马尾松、花椒进行过相关研究。I. Alibas Ozkan, Y. Soysal, Ilknur Alibas^[9-13]等人对南瓜、菠菜、甘蓝叶等进行了微波干燥特性的研究。实践表明, 微波间歇干燥与传统的干燥方法相比, 不仅加热时间短、干燥成本较低、而且能有效避免因过热而烧坏农产品, 保证干燥品质。采用微波间歇干燥方法对于提高酒糟的干燥品质和干燥效率是非常有效的^[14]。至今为止, 很少见到对酒糟微波间歇干燥进行研究的报道。由于对酒糟的微波间歇干燥特性还不十分清楚, 所以有必要进行深入研究。

本文就酒糟的微波间歇干燥进行了以微波功率、糟层厚度、脉冲比为影响因素、以干燥速率、能耗、以及干燥品质为目标值的响应面中心组合试验, 根据试验结果, 建立微波功率、糟层厚度、脉冲比与干燥工艺综合评分的关系模型, 基于此模型对干燥中各因素进行了分析并得出干燥过程的最佳工艺参数。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用酒糟购于雅安市大兴酒厂, 为粮食、玉米和稻壳混合发酵酿酒后的副产物, 呈散粒状, 经初步脱水后含水率为 65% (湿基)。根据酒糟干燥的生产要求, 酒糟干燥后含水率小于 13% (湿基) 可安全贮存而不会发霉变质^[2]。

1.2 仪器设备

200×0.01 mm 数显游标卡尺 (美国邦克, 精度为 0.01 mm); GZX2DH 型电热恒温干燥烘箱 (上海跃进医疗器械厂); PW700A 型 Galanz 微波炉 (广东格兰仕微波炉电器有限公司); ARRW60 电子精密天平 (上海奥豪斯公司); Pt100 温度传感器 (锦州精微仪表有限公司);

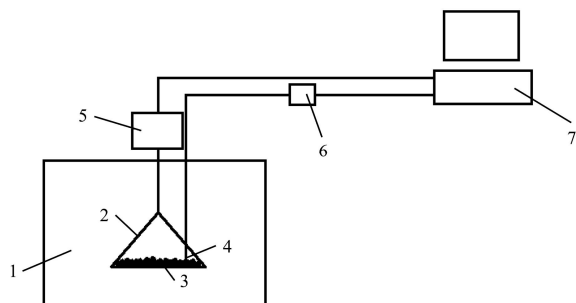
收稿日期: 2010-08-16 修订日期: 2011-03-02

基金项目: 现代农业 (肉牛牦牛) 产业技术体系专项经费资助 (CARS-38)

作者简介: 张黎骅 (1969—), 男, 四川芦山人, 副教授, 博士生, 研究方向为农产品加工机械与装备。雅安 四川农业大学信息与工程技术学院, 625014. Email: zhanglihua69@126.com

*通信作者: 王之盛 (1967—), 男, 四川蓬溪人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事动物营养及饲料科学研究。雅安 四川农业大学动物营养研究所, 625014. Email: wangzs@sicau.edu.cn

PCI-9112 数据采集卡 (北京安迈泽成科技有限公司); 计算机等。仪器设备组成如图 1 所示的试验系统, 微波炉经过改进可自动控制微波接通与关闭时间; 电子天平和温度传感器均与计算机连接, 通过自编的 VB 应用程序在计算机上实时显示目前质量和温度并记录。



1.微波炉 2.托盘 3.酒糟 4.温度传感器 5.电子天平 6.数据采集卡
7.计算机

图 1 测试装置及测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the testing device and system

1.3 微波间歇干燥工艺指标

1) 初始含水率测定: 按照 GB3543—1995 方法测定, 130℃ 定时烘干法, 在 GZX2DH 型电热恒温干燥烘箱内进行。

2) 脉冲比 (pulse ratio) [4]: 按式 (1) 进行计算。

$$PR = \frac{\text{微波接通时间} + \text{微波间歇时间}}{\text{微波接通时间}} \quad (1)$$

根据相关经验 [15] 和预试验, 单次干燥过程中微波接通时间定为 8 s, 间歇时间为 35~50 s 较为适宜, 此时脉冲比即为 5.375~7.250。

3) 干燥平均速率 v (g/min): 干燥平均速率是反映干燥快慢的指标, 其值越大则干燥一定量酒糟所需的时间越短。干燥平均速率 v 按式 (2) 计算

$$v = \Delta M / \Delta T \quad (2)$$

式中, ΔM 为干燥至安全含水率时酒糟减少的质量, g; ΔT 为酒糟干燥至安全含水率所用的总时间, 其值等于微波接通总时间与间歇总时间之和, min。

4) 单位质量能耗 e (J/g): 单位质量能耗是指脱去每克水的耗能量, 它反映干燥过程的能量损耗, 其值应越小越好。单位质量能耗 e 按式 (3) 计算

$$e = \frac{P \times \Delta T_2}{\Delta M} \quad (3)$$

式中, P 为微波功率, W; ΔT_2 为微波接通的总时间, s。

5) 品质质量 Q : 粗蛋白是酒糟干物质中含量最高的 [1], 所以选择粗蛋白作为酒糟品质质量的评价指标。粗蛋白含量采用凯氏定氮法测量 [16]。粗蛋白保存率 Q 按式 (4) 进行计算

$$Q = m_{d2} / m_{d1} \times 100\% \quad (4)$$

式中, m_{d2} 为干燥后粗蛋白质量, g; m_{d1} 为干燥前粗蛋白质量, g。

6) 综合指标: 运用隶属度的综合评分法 [17] 将干燥平均速率、单位质量能耗和粗蛋白保存率 3 项指标对酒糟干燥工艺进行综合评分。干燥平均速率和粗蛋白保存率

隶属度按式 (5) 计算

$$l = \frac{c_i - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}} \quad (5)$$

式中, c_i 为指标值; c_{\min} 为指标最小值; c_{\max} 为指标最大值。

而单位质量能耗越小越好, 因此按式 (6) 计算

$$l = \frac{c_{\max} - c_i}{c_{\max} - c_{\min}} \quad (6)$$

按式 (7) 进行加权得干燥工艺的综合分 S [18]。

$$S = al_v + bl_e + cl_Q \quad (7)$$

式中, l_v 为干燥速率隶属度; l_e 为能耗隶属度; l_Q 为干燥品质隶属度; a 、 b 、 c 为各指标权重。

本文考虑以蛋白质保存率为主要指标, 干燥平均速率和单位质量能耗为次要指标, 于是取 $a=0.25$, $b=0.25$, $c=0.5$ 。在具体应用中可根据不同要求取相应的权重, 只需满足 $a+b+c=1$ 即可。

考虑到酒糟取样的差异性, 以上指标的试验重复 3 次, 测量结果取平均值。

1.4 试验方法与设计

试验设计运用响应面中心组合设计理论 (central composite experimental design principle) [19]。响应面中心组合设计分析模型能用较少的试验次数进行全面的分析研究。根据相关文献和单因素试验, 选取微波功率、糟层厚度、脉冲比进行响应面的分析试验。

微波功率 (W), 糟层厚度 (cm), 脉冲比的实际值分别用 x_1 , x_2 , x_3 表示, 按照公式 (8) 进行编码。

$$z_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta_j} \quad (8)$$

式中, z_j 为自然变量 (编码值); x_j 为规范变量 (实际值); x_{j0} 为因素的零水平; Δ_j 为因素的变化间距。

对于 3 个试验因素 (自变量), 试验指标为综合分 S , 其二次回归方程的一般形式为

$$\hat{S} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (9)$$

式中, \hat{S} 为综合分响应值; b_0 为截距项; b_1 , b_2 , b_3 为线性系数; b_{12} , b_{13} , b_{23} 为交互项系数; b_{11} , b_{22} , b_{33} 为二次项系数; x_1 为干燥功率; x_2 为糟层厚度; x_3 为脉冲比。

以干燥功率 x_1 、糟层厚度 x_2 和脉冲比 x_3 为试验因素, 以干燥平均速率 v 、单位质量能耗 e 和粗蛋白保存率 Q 为考核指标进行响应面中心组合设计。根据前期单因素试验的结果, 确定干燥功率 x_1 、糟层厚度 x_2 及脉冲比 x_3 的水平及编码见表 1。

表 1 试验因子水平
Table 1 Levels of experimental factors

因素	水平				
	-1.525	-1	0	+1	+1.525
微波功率 x_1 /W	120	220	410	600	700
糟层厚度 x_2 /cm	1	1.34	2	2.66	3
脉冲比 x_3	5.375	5.688	6.313	6.938	7.250

2 结果与分析

2.1 试验设计方案及结果

根据中心组合试验设计原理，用微波功率 x_1 、糟层

厚度 x_2 和脉冲比 x_3 3 个因素水平，采用综合评分的方法对酒糟微波间歇干燥的工艺进行响应面分析^[20-21]。表 2 为响应面试验设计与试验结果。

表 2 试验设计及其结果
Table 2 Experimental design and results

试验号	因素水平编码			响 应 值						
	微波功率 x_1	糟层厚度 x_2	脉冲比 x_3	干燥速率/ ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$)	能耗/ ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)	蛋白质 保存率/%	干燥速率 隶属度	能耗 隶属度	蛋白质保存率 隶属度	综合分 S
1	+1	+1	+1	0.670	9 519.3	74.8	0.666	0.410	0.737	0.683
2	+1	+1	-1	0.921	8 442.2	63.7	1.000	0.201	0.267	0.583
3	+1	-1	+1	0.578	11 946.2	73.9	0.545	0.881	0.699	0.515
4	+1	-1	-1	0.679	11 076.9	57.4	0.678	0.713	0	0.241
5	-1	+1	+1	0.279	9 334.1	77.3	0.148	0.374	0.843	0.615
6	-1	+1	-1	0.341	9 178.2	71.2	0.230	0.344	0.585	0.514
7	-1	-1	+1	0.267	12 012.4	77.5	0.132	0.894	0.852	0.485
8	-1	-1	-1	0.296	11 346.7	71.7	0.171	0.765	0.606	0.404
9	+1.525	0	0	0.663	9 123.5	64.5	0.656	0.333	0.301	0.481
10	-1.525	0	0	0.168	8 217.8	68.0	0	0.157	0.449	0.435
11	0	+1.525	0	0.567	7 874.5	73.9	0.530	0.091	0.699	0.709
12	0	-1.525	0	0.392	12 556.2	73.0	0.298	1.000	0.661	0.405
13	0	0	+1.525	0.341	11 133.3	81.0	0.230	0.724	1.000	0.627
14	0	0	-1.525	0.535	7 407.1	62.0	0.488	0	0.195	0.469
15	0	0	0	0.418	8 334.2	74.1	0.332	0.180	0.708	0.642
16	0	0	0	0.433	8 352.6	74.9	0.352	0.184	0.742	0.663
17	0	0	0	0.437	8 244.3	76.0	0.357	0.163	0.788	0.693
18	0	0	0	0.412	8 367.6	74.1	0.325	0.187	0.708	0.638
19	0	0	0	0.405	8 078.9	75.6	0.314	0.189	0.771	0.682
20	0	0	0	0.432	8 247.0	77.0	0.351	0.163	0.831	0.712

利用 SAS 软件对表 2 数据进行多元回归拟合，得到综合分 S 对其影响的关键因子（微波功率 x_1 、糟层厚度 x_2 、脉冲比 x_3 ）的二次多项式回归模型

$$S = -5.6293 + 1.20 \times 10^{-4} x_1 + 0.7128 x_2 + 1.6120 x_3 + 2.69 \times 10^{-4} x_1 x_2 + 2.01 \times 10^{-4} x_1 x_3 - 0.0468 x_2 x_3 - 2.32 \times 10^{-6} x_1^2 - 0.0956 x_2^2 - 0.1188 x_3^2 \quad (10)$$

对模型（式（10））进行方差分析和回归系数显著性检验，结果见表 3 和表 4。

表 3 回归模型方差分析
Table 3 Variance analysis for the regression model

差异源	自由度	平方和	均方	F 值
回归分析	9	0.3012	0.0335	26.34
残差	10	0.0127	0.0013	
失拟项	5	8.44×10^{-3}	1.69×10^{-3}	1.98
误差	5	4.27×10^{-3}	8.54×10^{-4}	
总和	19	0.3011		

由表 3 方差分析可知， $F_{\text{回归}}=26.34>F_{0.05}(9,5)=4.77$ ，表明模型（式 10）极显著；失拟项 $F_{L_f}=1.98<F_{0.05}(5,5)=5.05$ ，失拟不显著，回归模型与实际情况拟合得很好； R^2 的值为 0.9595，拟合度高，说明模型（式 10）能够描述响应值的变化，试验误差小，因此可以用该模型对酒

糟微波间歇干燥的综合评价指标 S 进行分析和预测。

表 4 回归模型系数的显著性检验
Table 4 Regression coefficients and their significance

模型系数	自由度	回归系数	标准差	F 值	P 值
常数项	1	-5.6293	1.2316	20.89**	0.0010
x_1	1	1.20×10^{-4}	0.0007	0.03	0.8748
x_2	1	0.7128	0.2219	10.32**	0.0093
x_3	1	1.6120	0.3669	19.30**	0.0013
$x_1 x_2$	1	2.69×10^{-4}	0.0001	7.16*	0.0232
$x_1 x_3$	1	2.01×10^{-4}	0.0001	3.60	0.0870
$x_2 x_3$	1	-0.0468	0.0306	2.34	0.1570
$x_1 x_1$	1	-2.32×10^{-6}	3.00×10^{-7}	59.60**	0
$x_2 x_2$	1	-0.0956	0.0251	14.48**	0.0035
$x_3 x_3$	1	-0.1188	0.0284	17.47**	0.0019

由表 4 可知，模型（式 10）的一次项 x_2 （糟层厚度）和 x_3 （脉冲比）影响极显著，而 x_1 （微波功率）影响不显著；二次项 $x_1 x_1$ 、 $x_2 x_2$ 和 $x_3 x_3$ 都影响极显著；交互项 $x_1 x_2$ 影响显著，而其余两项交互项均不显著。根据模型（式 10）各因素的回归系数绝对值大小^[20]，可以得到各因素的影响主次顺序为： $x_3>x_2>x_1$ ，即脉冲比>糟层厚度>微波功率。

2.2 酒糟微波间歇干燥工艺最优条件的确定及模型验证

用 SAS 软件通过对回归方程模型 (式 10) 进行优化求解, 得到酒糟微波间歇干燥最优工艺参数: 微波功率为 479 W, 糟层厚度为 2.78 cm, 脉冲比为 6.644, 此时得到最大综合分为 0.745。

为验证模型的可靠性, 采用上述最优工艺参数 (微波功率为 480 W, 糟层厚度为 2.78 cm, 脉冲比为 6.625) 进行 3 次试验, 3 次试验的综合分平均值为 0.723, 相对误差为 2.9%, 和理论预测值基本吻合。因此, 利用响应面法得到的酒糟微波间歇干燥最优工艺参数真实可靠,

具有实际应用的参考价值。

2.3 模型交互项的解析

根据回归方程 (式 10) 作出响应面图和等高线图, 考察响应面图的形状, 分析微波功率 x_1 、糟层厚度 x_2 和脉冲比 x_3 对酒糟微波间歇干燥工艺综合分 S 的影响。等高线的形状可反映出交互效应的强弱, 椭圆形表示两因素交互作用显著, 而圆形则与之相反^[22]。由此从图 2~4 可以看出, 微波功率和糟层厚度的交互作用显著, 而其他因素交互作用不显著, 这与前面的计算分析结果是一致的。

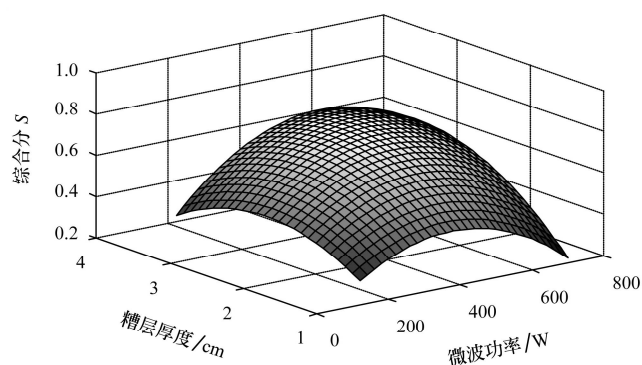


图 2 脉冲比为 6.644 时微波功率和糟层厚度对酒糟微波间歇干燥综合分 S 的影响
Fig.2 Effects of microwave power and lees thickness on drying lees with pulse ratio of 6.644

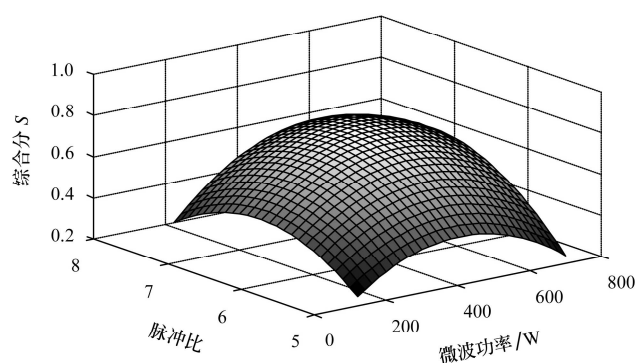
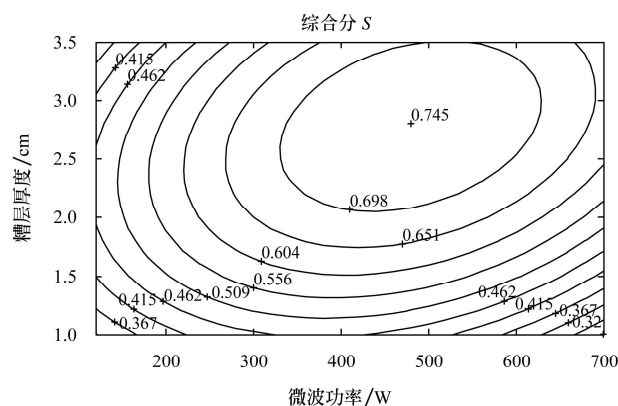


图 3 糟层厚度为 2.78 cm 时微波功率和脉冲比对酒糟微波间歇干燥综合分 S 的影响
Fig.3 Effects of microwave power and pulse ratio on drying lees with lees thickness of 2.78 cm

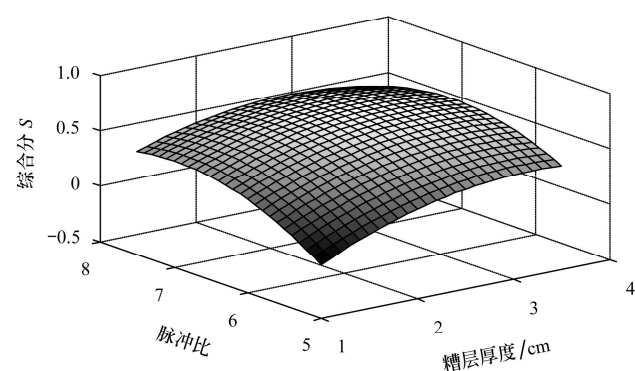
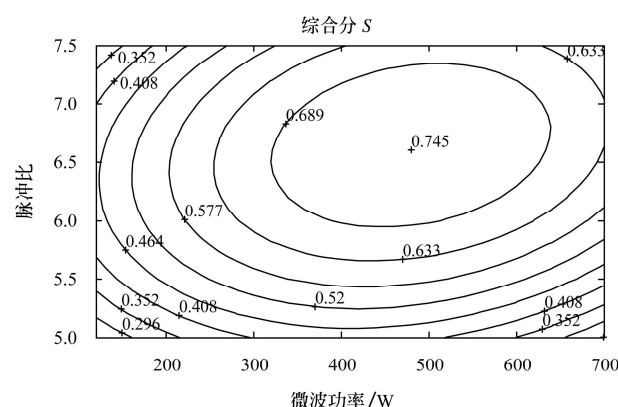
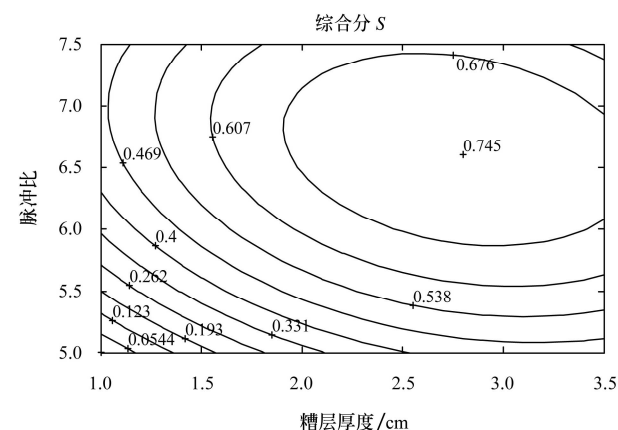


图 4 微波功率为 479 W 时糟层厚度和脉冲比对酒糟微波间歇干燥综合分 S 的影响
Fig.4 Effects of lees thickness and pulse ratio on drying lees with microwave power of 479 W



由图2可知,当糟层厚度为2.5 cm以上某一固定值,微波功率在120~480 W范围内时,综合分随着微波功率的增大而增大;当糟层厚度为2.5 cm以下某一固定值,微波功率在400~500 W以下范围时,综合分随着微波功率的增大而增大,而当微波功率在400~500 W以上范围时,综合分随着微波功率的增大而减小。原因可能有:功率过高使干燥过程过于激烈,导致品质不高且能耗过大;功率过低则使干燥平均速率过慢;糟层厚度较薄会使单位质量能耗增大;过厚则会使干燥平均速率过慢等。由此可以看出,微波功率、糟层厚度及其交互作用对综合分有较大的影响。

由图3可知,微波功率在450~500 W,脉冲比为6.5~7时,综合分值最大。延长和缩短脉冲比均不能增大综合分,原因可能是脉冲比过长会使干燥速率降低,而缩短脉冲比可能使干燥品质不够理想。

由图4可知,脉冲比在低水平时,需增加糟层厚度才能提高综合分;脉冲比在高水平时,过大的糟层厚度反而使综合分降低。从等高线图看出,糟层厚度在2.5~3 cm,脉冲比为6~6.5时,综合分存在最大值。当二者水平过高或过低都将使综合分值降低,所以糟层厚度和脉冲比都有各自适宜的水平。

3 结 论

1) 根据响应面中心组合设计理论进行酒糟微波间歇干燥的试验结果得出:脉冲比对酒糟微波间歇干燥工艺综合分的影响最大,糟层厚度次之,微波功率最小。

2) 建立了酒糟微波间歇干燥工艺的综合分与微波功率、糟层厚度、脉冲比的二次多项式回归模型,得到最佳工艺参数。经试验验证,微波功率为480 W,糟层厚度为2.78 cm,脉冲比为6.625,此时得到最大综合分为0.723,相对误差为2.9%。实验值与理论值是吻合的,证明了该模型的合理可靠性。

3) 响应面法直观地分析了因素交互项的影响,得出了微波功率和糟层厚度的交互作用对综合分指标影响显著,而其他因素交互作用不显著。

[参 考 文 献]

- [1] 叶京生, 鲁林平. 啤酒糟干燥技术研究[J]. 干燥技术与设备, 2004(1): 38—39.
Ye Jingsheng, Lu Linping. The study on technique of brewex's grains drying[J]. Drying Technology and Equipment, 2004(1): 38—39. (in Chinese with English abstract)
- [2] 夏萍. 气流换向干燥酒糟的试验研究[J]. 安徽农业大学学报, 2005, 32(1): 101—104.
Xia Ping. Experimental research on the drying characteristics of distiller's grains by direction-change air-flow drier[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2005, 32(1): 101—104. (in Chinese with English abstract)
- [3] 朱德泉, 王继先, 朱德文, 等. 香菜微波干燥的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 242—246.
Zhu Dequan, Wang Jixian, Zhu Dewen, et al. Experimental

- study on microwave drying of coriander[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12): 242—246. (in Chinese with English abstract)
- [4] 曹崇文. 微波真空干燥技术现状[J]. 干燥技术与设备, 2004, 2(3): 5—9.
Cao Chongwen. The situation of microwave vacuum drying technology[J]. Drying Technology and Equipment, 2004, 2(3): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [5] 夏萍. 不同干燥工艺对酒糟干燥过程热效率的影响[J]. 中国酿造, 2005(6): 38—40.
Xia Ping. Effects of different technology on heat efficiency in the drying process of distillers' grains[J]. China brewing, 2005(6): 38—40. (in Chinese with English abstract)
- [6] 冯殿义, 孙彤. 旋转闪蒸干燥器干燥酒糟过程的实验研究[J]. 化学工程, 2006, 34(2): 13—15.
Feng Dianyi, Sun Tong. Experimental study on the process of the drying deer lees in the spin flash dryer[J]. Chemical Engineering, 2006, 34(2): 13—15. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘志军, 张璧光, 李延军. 马尾松微波间歇干燥对干燥效率与速率的影响[J]. 木材工业, 2006, 20(4): 13—15.
Liu Zhijun, Zhang Biguang, Li Yanjun. Drying efficiency and rate for masson pine using an intermittent microwave drying method[J]. China Wood Industry, 2006, 20(4): 13—15. (in Chinese with English abstract)
- [8] 赵超, 陈建, 邱兵, 等. 花椒微波干燥特性试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 99—101.
Zhao Chao, Chen Jian, Qiu Bing, et al. Experimental study on microwave drying characteristics of chinese prickly ash[J]. Transactions of the CSAM, 2007, 38(3): 99—101. (in Chinese with English abstract)
- [9] Alibas Ozkan I, Akbudak B, Akbudak N. Microwave drying characteristics of spinach[J]. Journal of Food Engineering, 2007(78): 577—583.
- [10] Ilknur Alibas. Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices[J]. Swiss Society of Food Science and Technology, 2007(40): 1445—1451.
- [11] Ilknur Alibas. Microwave, vacuum, and air drying characteristics of collard leaves[J]. Drying Technology, 2009, 27(11): 1266—1273.
- [12] Soysal Y, Arslan M, KeskinIntermittent M. Intermittent microwave-convective air drying of oregano[J]. Food Science and Technology International, 2009, 15(4): 397—406.
- [13] Soysal Y. Microwave drying characteristics of parsley[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(2): 167—173.
- [14] 张黎骅, 张芳, 赵超. 花椒微波干燥数学模型的试验研究[J]. 农机化研究, 2008(12): 105—109.
Zhang Lihua, Zhang Fang, Zhao Chao. Experimental study on microwave drying mathematical model of chinese prickly ash[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(12): 105—109. (in Chinese with English abstract)
- [15] 赵超. 花椒间歇式微波干燥理论及工艺优化研究[D]. 重庆: 西南大学工程技术学院, 2006.
Zhao Chao. Experimental Research on Intermittent Microwave Drying Theory and Technology Optimization of

- Chinese Prickly Ash[D]. Chong Qing: Engineering and Technology College, Southwest University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张水华. 食品分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 156—160.
- [17] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 134—136.
- [18] 熊永森, 王俊, 王金双. 微波干燥胡萝卜片工艺试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 291—294.
Xiong Yongsan, Wang Jun, Wang Jinshuang. Experimental study on the technology for microwave drying of carrot slice[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 291—294. (in Chinese with English abstract)
- [19] Montgomery D C. Design and Analysis of Experiments[M]. New York: John Wiley and Sons, 2001: 427—450.
- [20] 张军伟, 傅大放, 彭奇均, 等. 响应面法优化酸水解稻秆制木糖的工艺参数[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 253—257.
- Zhang Junwei, Fu Dafang, Peng Qijun, et al. Optimized conditions for production of xylose by acid-hydrolysis of rice straw based on response surface methodology[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 253—257. (in Chinese with English abstract)
- [21] Funda Kahraman. The use of response surface methodology for prediction and analysis of surface roughness of AISI 4140 steel[J]. Materials and Technology, 2009, 43(5): 267—270.
- [22] 易军鹏, 朱文学, 马海乐, 等. 牡丹籽油超声波辅助提取工艺的响应面法优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 103—110.
- Yi Junpeng, Zhu Wenxue, Ma Haile, et al. Optimization on ultrasonic-assisted extraction technology of oil from paeonia suffruticosa andr. seeds with response surface analysis[J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(6): 103—110. (in Chinese with English abstract)

Optimization of intermittent microwave drying technology for lees by response surface methodology

Zhang Lihua^{1,2}, Zhang Wen², Lü Zhenzhen³, Wang Zhisheng^{4*}

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 610044, China;

2. College of Information and Engineering Technology, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;

3. College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;

4. Research Institute of Animal Nutrition, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: The intermittent microwave drying experiments were conducted to optimize the lees drying process and improve its quality after drying. Taking drying rate, energy consumption and quality as target parameters, the three factors were scored by using the comprehensive evaluation of the membership-degree method. According to the central composite experimental design principle, the response surface methodology was adopted to discuss the influence caused by microwave power, lees thickness and pulse ratio. In addition, the quadratic polynomial regression model was established to optimize the drying techniques. The results showed that effects order of three factors on lees drying were as follows: pulse ratio first, lees thickness second, and then microwave power. The optimal parameters of intermittent microwave drying method for lees were microwave power of 480 W, lees thickness of 2.78 cm and pulse ratio of 6.625, then the largest comprehensive score of 0.723 was obtained. The study provides a theoretical basis for further study on microwave drying equipment and technology for lees.

Key words: drying, optimization, parameters extraction, response surface methodology, lees, intermittent microwave