

玉米热风与微波联合干燥工艺优化研究

贾洪雷¹, 蔡森森¹, 徐艳阳^{1*}, 吴海成¹, 刘春喜², 赵文罡²

(1. 吉林大学 生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 吉林省农业机械研究院, 吉林 长春 130028)

摘 要 对玉米进行热风与微波联合干燥实验研究, 目的是缩短单独热风干燥玉米时间, 节约能耗, 同时利用微波干燥对环境无污染的优势。通过单因素试验和正交试验优化设计, 得到玉米联合干燥的较佳工艺条件。结果表明联合干燥玉米的较佳工艺条件为: 转换水分点为20%, 微波功率为119 W, 微波时间为8 min。此条件下干燥玉米, 其裂纹率为0%, 颜色和气味基本正常。

关键词 联合干燥; 微波辅助; 玉米; 正交试验

Studies on Process Optimization of Maize Dehydrated by a Combination of Hot-air and Microwave Drying

JIA Hong-lei¹, CAI Sen-sen¹, XU Yan-yang^{1*}, WU Hai-cheng¹, LIU Chun-xi², ZHAO Wen-gang²

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, Jilin, China; 2. Jilin Academy of Agricultural Machinery Science, Changchun 130028, Jilin, China)

Abstract In order to reduce hot-air drying time and save drying energy consumption, as well as take advantage of eco-friendly microwave drying, maizes were dehydrated by a combination of hot-air and microwave drying, the optimum conditions were obtained by orthogonal test design: a transferred moisture content of 20%, a microwave power of 119 W, and a microwave time of 8 min. Meanwhile, it shows that corn crack rates were 0% without a difference of corn colour and smell under the combination drying conditions.

Key words: combination drying; microwave-assisted; maize; orthogonal experiment

基金项目: 吉林大学基本科研业务费项目(200903263); 吉林省科技厅发展计划项目(20090403); 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA100802)

作者简介: 贾洪雷(1957—), 男(汉), 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事农业机械化研究。

* 通信作者

- sors for direct detection of organophosphates[J]. Biosensors & Bioelectronics, 1999, 14(8/9): 703-713
- [3] Till T Bachmann, Betrice Leca, Francois Vilatte, et al. Improved multianalyte detection of organophosphates and carbamates with disposable multielectrode biosensors using recombinant mutants of *Drosophila* acetylcholinesterase and artificial neural networks [J]. Biosensors and Bioelectronics, 1999, 15(3/4): 193-201
- [4] 许学琴, 徐斐, 吴燕雯, 等. 固定化对动植物酯酶性质的影响[J]. 食品发酵工业, 2004, 30(7): 38-42
- [5] 何国庆, 丁立孝. 食品酶学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006(3): 69-70
- [6] Aziz Amine, Hasna Mohammadi, Ilhame Bourais, et al. Enzyme inhibition-based biosensors for food safety and environmental monitoring[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2006, 21(8): 1405-1423
- [7] 林素英, 林少琴. 豆类酯酶的提取及其在有机磷农药检测中的应用[J]. 现代农业科学, 2008, 15(9): 14-15
- [8] 黄保宏, 姚垠. 用于检测农药残留的植物酯酶的选择[J]. 安徽技术师范学院学报, 2004, 18(2): 15-17
- [9] 翁霞, 李建科. 有机磷农药检测用植物酯酶的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(4): 123-126
- [10] 徐斐, 张慧君, 许学琴, 等. 用于有机磷农药残留检测的植物酯酶筛选[J]. 上海理工大学学报, 2003, 25(2): 109-111
- [11] 李建科, 温艳霞, 牛乐, 等. 一种大豆酯酶的制备方法: 中国 200510096207.4[P]. 2007-04-25
- [12] 许学勤, 徐斐, 华泽钊. 用于有机磷农药残留快速检测的固定化小麦酯酶研究[J]. 食品科学, 2003, 24(5): 122-126
- [13] 温艳霞, 兰文礼, 李建科. 大豆酯酶的分离、纯化及性质研究[J]. 食品科学, 2008, 29(5): 292-294
- [14] 温艳霞, 李建科, 张晓敏, 等. 植物酯酶检测有机磷农药的敏感性和检测限的研究[J]. 食品科学, 2006, 27(9): 186-188
- [15] 任露露. 试验优化设计与分析[M]. 吉林: 吉林科学技术出版社, 2001: 79-86

收稿日期 2010-07-23

微波干燥法具有干燥速率快、生产效率高、对环境无污染等优点,近年来得到了迅速发展^[1-4]。然而单独使用微波干燥的成本也较高,其从电能到电磁场的转化率只在50%左右^[5]。热风干燥法是玉米干燥加工中的一种常规方法,具有设备简单、易于操作、成本低等优点,但由于干燥后期玉米水分的去除困难,导致干燥时间长、生产率低、品质下降^[6-8]。各种方式的联合干燥是目前国际干燥技术研究的热点之一^[9]。因此,本文进行了热风与微波联合干燥的工艺优化实验研究,对玉米的干燥储藏具有一定的理论和现实意义。

1 材料、仪器设备和方法

1.1 材料

2010年秋季新收获玉米购于吉林省长春市农贸市场,其含水率为34.66%,无霉变粒,颜色气味正常。

1.2 仪器与设备

PH070A干燥箱:上海一恒科学仪器有限公司;MM721AAU-PW美的微波炉:美的微波炉电器有限公司;JA3003A电子精密天平:上海精天电子仪器有限公司;FW177型中草药粉碎机:天津市泰斯特仪器有限公司;TDL-4A型台式低速离心机:上海菲恰尔分析仪器有限公司;T22N紫外可见分光光度计:上海精密科学仪器有限公司;PHS-25数字酸度计:杭州东星仪器设备厂;BCD-L45冰箱:合肥荣事达电冰箱有限公司;W4万用电炉:北京科伟永兴仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 热风和微波联合干燥的单因素试验

称取玉米约100 g,将其铺成薄层,放进热风干燥箱和微波炉中进行干燥。前期干燥是在60℃的热风干燥温度下干燥到一定的转换水分点(16%、18%、20%、22%、24%),然后进行微波干燥,设定不同的微波功率(119、231、385、539、700 W)和微波时间(5、6、7、8、9、10 min)。干燥后的样品用塑料袋封好置于玻璃干燥器中保存备用。

干燥时玉米含水率的计算公式如下:

$$\omega_t = (m_t - m_{\text{干基}}) / m_{\text{干基}} \times 100\% \quad (1)$$

$$m_{\text{干基}} = m_{\text{初}} - m_{\text{初}} \times \omega_{\text{初}} \quad (2)$$

式1、2中 ω_t 为t时刻玉米的含水率, %; m_t 为t时刻玉米的质量, g; $m_{\text{初}}$ 为玉米的初始质量, g; $\omega_{\text{初}}$ 为玉米的初始含水率, %。

转换水分点根据质量判定:

$$m_d = \frac{m_{\text{初}}(1 - \omega_{\text{初}})}{1 - \omega_d} \quad (3)$$

式3中 m_d 为玉米含水率为 ω_d 的质量, g; ω_d 为转换

水分点, %。

1.3.2 检测项目及方法

含水率:参照文献[10]直接干燥法;裂纹率:参照文献[11]的放大镜观测法;过氧化物酶(POD)活性:参照文献[12]测定;丙二醛(MDA)含量:参照文献[12]测定;颜色、气味:感官评定法。评分标准^[13]见表1。

表1 感官评分标准

项目	0.0分~0.9分	1.0分~1.9分	2分	3分	4分
颜色	正常	基本正常	明显发暗	变色	其他不能接受的非正常色
气味	正常	基本正常	有辛辣味、酒味	有哈味	其他不能接受的非正常气味

1.3.3 综合评定法^[14]

将各项指标转化为“综合评分”的公式为:

$$y_i = \alpha_1 CR_i + \alpha_2 C_i + \alpha_3 S_i \quad (4)$$

式4中 y_i 为第i号实验的综合评分; CR_i 为第i号实验的裂纹率; C_i 为第i号实验的颜色值; S_i 为第i号实验的气味值; α_k 为第k项指标转化为综合评分的系数($k=1, 2, 3$); $\alpha_k = c_k \omega_k / r_k$, 其中 c_k 为第k项指标的缩减(扩大)系数; ω_k 为第k项指标的权值; r_k 为第k项指标的极差。在本次实验中,分别给予 CR 、 C 和 S 3个指标的权值为4、3和2。由于各项指标值量级相同,故取 $c_1 = c_2 = c_3 = 1$ 。

2 结果与分析

2.1 影响玉米联合干燥品质的单因素试验

2.1.1 转换水分点对玉米联合干燥品质的影响

转换水分点是影响玉米联合干燥品质的重要因素。称取约100 g玉米于干燥箱中,采用60℃热风干燥至某转换水分点(16%、18%、20%、22%、24%),然后以119 W的微波功率干燥6 min,干燥后的样品检测POD和MDA。转换水分点对玉米联合干燥品质的影响见图1。

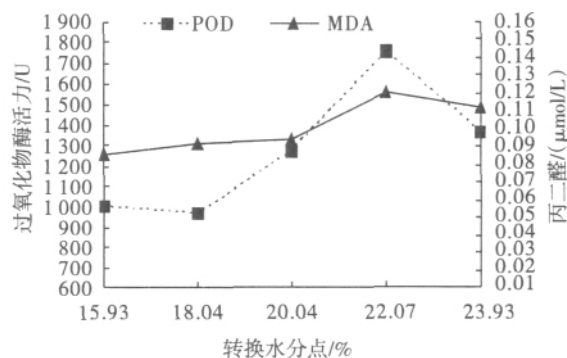


图1 转换水分点对玉米联合干燥品质的影响

Fig.1 Effects of transform drying base on the quality of maize dehydrated by a combination drying

由图1可知,随着转换水分点的下降,POD和MDA

逐渐减少。当转换水分点为18%时,POD和MDA较小,玉米联合干燥质量较好。

2.1.2 微波功率对玉米联合干燥品质的影响

玉米联合干燥品质对微波功率的变化非常敏感。称取约100 g玉米于干燥箱中,采用60℃热风干燥至转换水分点为20%,然后以不同的微波功率(119、231、385、539、700 W)干燥1 min,干燥后的样品检测POD和MDA。微波功率对玉米联合干燥品质的影响见图2。

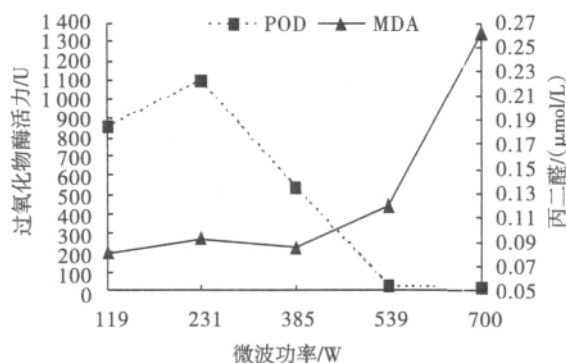


图2 微波功率对玉米联合干燥品质的影响

Fig.2 Effects of microwave power on the quality of maize dehydrated by a combination drying

由图2可知,当微波功率高于539 W时,随着功率的增加,干燥温度升高。过高温度对蛋白质的空间结构产生破坏作用,从而使酶变性失活,故POD活性低;同时使得MDA含量增加。因而对玉米进行联合干燥时不宜使用539、700 W的微波功率。

2.1.3 微波时间对玉米联合干燥品质的影响

微波时间是影响玉米联合干燥品质的另一个重要因素。称取约100 g玉米于干燥箱中,采用60℃热风干燥至转换水分点为20%,然后以119 W的微波功率分别干燥不同时间(5、6、7、8、9、10 min),干燥完的样品检测POD和MDA。微波时间对玉米联合干燥品质的影响见图3。

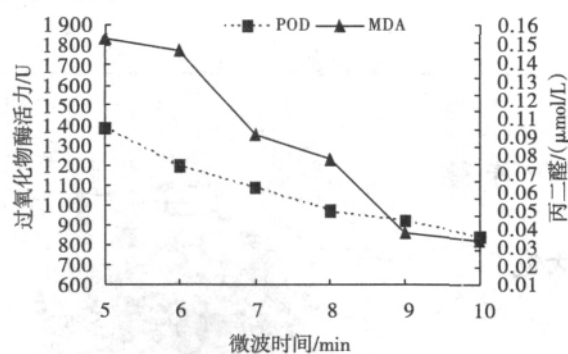


图3 微波时间对玉米联合干燥品质的影响

Fig.3 Effects of microwave time on the quality of maize dehydrated by a combination drying

由图3可知,随着微波时间的增加,玉米POD活力

下降,且MDA含量减少。当微波时间超过8 min时,MDA含量减少地缓慢。由此可见,延长微波时间不一定能够提高玉米干燥后的品质。

2.2 玉米联合干燥的正交试验结果

根据单因素试验结果,选择转换水分点、微波功率、微波时间作为试验因素进行考察,各取3个水平(见表2),进行 $L_9(3^4)$ 正交试验。因为玉米裂纹不仅使玉米粒的机械强度下降,而且还使玉米的储藏稳定性降低^[1],所以玉米的裂纹率越低越好;另一方面,由表1可知,颜色和气味这两个指标随着值的增大,评价员对玉米颜色和气味的可接受性逐渐降低。因此,根据式4得到的综合指标值越小越好。正交试验结果及方差分析^[14]见表3、表4。

表2 $L_9(3^4)$ 因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment $L_9(3^4)$

水平	因素		
	A 转换水分点/%	B 微波功率/w	D 微波时间/min
1	16	119	8
2	18	231	9
3	20	385	10

表3 $L_9(3^4)$ 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal experiment $L_9(3^4)$

试验号	因素				试验指标			
	A 转换水分点	B 微波功率	C 空列	D 微波时间	裂纹率/%	颜色	气味	综合值
1	1	1	1	1	0.00	1.2	1.1	1.77
2	1	2	2	2	11.50	2.0	2.2	4.70
3	1	3	3	3	33.83	4.0	4.0	10.61
4	2	1	2	3	0.00	1.0	1.0	1.53
5	2	2	3	1	2.45	1.7	1.4	2.74
6	2	3	1	2	21.94	3.8	3.8	8.72
7	3	1	3	2	0.00	0.8	0.6	1.10
8	3	2	1	3	4.04	1.9	1.4	3.14
9	3	3	2	1	17.62	3.7	3.7	7.99
\bar{y}_{j1}	5.69	1.47	4.54	4.17	$r_1=0.33$ $\sum_{i=1}^9 y_i=2.11$			
\bar{y}_{j2}	4.33	3.53	4.74	4.84				
\bar{y}_{j3}	4.08	9.11	4.82	5.09				
R_j	1.62	7.64	0.27	0.93				
优水平	A_3	B_1		D_1				
主次因素	$B>A>D$							
优势组合	$A_3B_1D_1$							

由表3可知,影响玉米联合干燥品质的主次因素排列次序为:微波功率>转换水分点>微波时间。而由表4可知,因素B高度显著,因素A显著,因素D较显著,即微波功率对玉米联合干燥的品质有高度显著的影响,转换水分点有显著的影响,微波时间则有较显著的影响,这与上述极差分析的结果是一致的。另外,由表3还可以知道,玉米联合干燥的较优条件为:转换水分点为

表4 方差分析结果
Table 4 Results of ANOVA

方差来源	偏差平方和	自由度	均方和	F 比	显著性水平
A(转换水分点)	$S_A=4.54$	2	2.27	38.04	$\alpha=0.05^*$
B(微波功率)	$S_B=93.75$	2	46.87	786.05	$\alpha=0.005^{**}$
D(微波时间)	$S_D=1.38$	2	0.69	11.54	$\alpha=0.10(^*)$
误差	$S_e=0.12$	2	0.06	--	--
总和	$S=99.78$	8	$F_{0.01}(2,2)=9.00$	$F_{0.05}(2,2)=19.00$; $F_{0.10}(2,2)=199.0$	

注:当 $\alpha=0.01$ 称因素在 $\alpha=0.01$ 上高度显著,记为 ** ;当 $\alpha=0.05$ 称因素在 $\alpha=0.05$ 上显著,记为 * ;当 $\alpha=0.10$ 称因素在 $\alpha=0.10$ 上较显著,记为 $(^*)$,“--”此处计算省略。

20% 微波功率为119 W,微波时间为8 min。在此条件下,玉米联合干燥的裂纹率为0%,颜色和气味基本正常。

2.3 正交试验的优势组合与单独热风干燥玉米样品的对比

根据正交试验的较优工艺结果,以转换水分点为20%,微波功率为119 W,微波时间为8 min进行联合干燥玉米。在此条件下,玉米联合干燥的裂纹率为0%,颜色和气味基本正常,最终水分含量为18.24%,所需干燥时间为148 min。另一方面,玉米直接在60℃下进行热风干燥,180 min后玉米含水率达到18%。热风和微波联合干燥与单独热风干燥相比,整个干燥时间缩短了17.78%。上述2种干燥方式继续进行,直至玉米含水率为14%时停止,联合干燥方式共需168 min,而单独热风干燥方式则需252 min,联合干燥与单独热风干燥相比,整个干燥时间缩短了33.33%。

3 结论

1)通过三因素三水平的正交试验来寻找玉米联合干燥的较优工艺条件,得出热风和微波联合干燥玉米的优势组合为:转换水分点为20%,微波功率为119 W,微波时间为8 min,在此条件下玉米的裂纹率为0%,颜色和气味基本正常。

2)与单独热风干燥相比,联合干燥时间缩短了33.33%。并且,微波干燥对环境无污染,利于环保,但微波加热的均匀性问题仍有待深入研究。

参考文献:

- [1] Duan X, Zhang M, Mujumdar S, et al. Trends in microwave-assisted freeze drying of foods[J]. Drying technology, 2010, 28(4): 444-453
- [2] 段续, 张愨, 朱文学. 食品微波冷冻干燥技术的研究进展[J]. 化工机械, 2009, 36(3): 178-184
- [3] Wu Gang-Cheng, Zhang Min, Mujumdar Arum S, et al. Effect of calcium ion and microwave power on structural and quality changes in drying of apple slices[J]. Drying technology, 2010, 28(4): 517-522
- [4] Alibas Ilknur. Microwave, air and combined microwave-air-drying parameters of pumpkin slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(8): 1445-1451
- [5] 刘春泉, 江宁, 李大婧, 等. 微波联合热风干制苏渝303甘薯干工艺研究[J]. 核农学报, 2009, 23(6): 1008-1013
- [6] 王丽丽, 靳鹏, 戴志鹏, 等. 微波技术在节能减排方面的应用[J]. 广州化工, 2010, 38(8): 17-18
- [7] 朱德泉, 王继先, 朱德文. 玉米微波干燥特性及其对品质的影响[J]. 农业机械报, 2006, 37(2): 72-75
- [8] 张玉荣, 成军虎, 周显青, 等. 高水分玉米微波干燥特性及对加工品质的影响[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2009, 30(6): 1-4
- [9] 张愨, 徐艳阳, 孙金才. 国内外果蔬联合干燥技术的研究进展[J]. 无锡轻工大学学报, 2003(6): 103-106
- [10] 张水华. 食品分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 52-53
- [11] 白岩, 赵思孟. 玉米裂纹及其检测[J]. 粮食储藏, 2006, 35(4): 43-45
- [12] 张玉荣, 周显青, 张勇. 储存玉米膜脂过氧化与生理指标的研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3410-3414
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20570-2006 玉米储存品质判定规则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 6
- [14] 任露泉. 试验设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 7-48

收稿日期: 2010-11-05

《食品研究与开发》编辑部常年办理订阅手续

地址: 天津市静海经济开发区(天宇园)科技大道9号

邮编: 301609

邮汇收款人: 《食品研究与开发》编辑部

电话: 022-59525671

