

响应面分析法优化马铃薯变温压差膨化干燥工艺研究

毕金峰

(中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100094)

摘 要: 采用三因子二次回归正交旋转组合设计, 对马铃薯变温压差膨化干燥工艺进行了优化研究。分析膨化温度(X_1)、抽空温度(X_2)和抽空时间(X_3)三个变量对产品含水量(Y_1)、脆度(Y_2)、色泽(Y_3)的影响, 在此基础上由试验数据推导出描述三个指标的二次回归模型, 并对变量进行响应面分析, 得出最佳膨化干燥工艺条件为: 膨化温度为135℃, 抽空温度为125℃, 抽空时间为60min。

关键词: 响应面法; 马铃薯; 变温压差; 工艺; 优化

Optimization of Explosion Puffing Drying at Modified Temperature and Pressure for Potatoes by Response Surface Methodology

BI Jin-feng

(Institute of Agro-food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: A central composite rotatable design (CCRD) was adopted to optimize the technology of explosion puffing drying at modified temperature and pressure for potatoes and the effect of water content after puffing temperature (X_1), vacuum drying temperature (X_2) and vacuum drying time (X_3) on the water content after puffing (Y_1), crispness (Y_2), and color (Y_3) were analyzed. Based on the experimental data, the quadratic regression model of three indexes were deduced, then variables were analyzed with response surface methodology (RSM). The optimal technical conditions were obtained as follows: puffing temperature was 135 °C, vacuum drying temperature was 125 °C and vacuum drying time was 60 min.

Key words: RSM; potato; modified temperature and pressure; technology; optimization

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2007)11-0236-05

马铃薯营养丰富, 实用价值高, 除了粮菜兼用外, 还可加工制成各种产品。在欧美发达国家, 马铃薯加工数量约占马铃薯总产量的70%~80%。中国是马铃薯生产大国, 但由于受多种因素制约, 马铃薯加工业总体水平比较落后, 在马铃薯生产总量中约有50%用作鲜食、饲用和留种, 而加工淀粉、粉丝粉条、全粉、薯条、薯片等约占总产量的14%, 出口约占5%, 还有30%鲜薯有待利用。变温压差膨化干燥是近几年刚刚兴起的一种新型果蔬干燥技术, 其膨化干燥的产品绿色天然、口感酥脆。应用该技术生产的马铃薯脆片, 在解决了真空油炸果蔬脆片含油量高、不易贮存等问题的同时, 仍保留了原马铃薯绝大部分风味、色泽和营养成分, 产品绿色天然^[1-4]。变温压差膨化干燥设备环保节能, 价格便宜, 易于操作^[5], 有利于该项技术在

我国的推广和应用。一些机构和学者对果蔬变温压差膨化干燥进行了研究^[6-13]。目前, 对马铃薯进行变温压差膨化干燥生产食品的研究, 国内外均未见报道。本研究旨在以马铃薯为原料, 采用三因子二次回归正交旋转组合设计, 对马铃薯变温压差膨化干燥工艺进行优化研究。通过确定最佳的膨化干燥马铃薯工艺, 生产高品质果蔬膨化干燥产品, 为该技术的推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料、仪器与设备

1.1.1 材料

马铃薯: 产地河北。

1.1.2 仪器设备

收稿日期: 2007-08-12

基金项目: 2006年科研院所技术研究开发专项(NCSTE-2006-JKZX-291)

作者简介: 毕金峰(1970-), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为果蔬精深加工与现代储运。

FA-200德丰牌切肉切片机 广东省南海市德丰电热设备厂; DHG-9123A 电热恒温鼓风箱 上海精宏实-设备有限公司; 变温压差果蔬膨化机组 天津; CR-400/410 色差计 日本美能达公司; 物性分析仪: (texture analyzer): Ta. XT 2i/50 英国; Foss FIBERTEC System 2010 丹麦福斯公司; S-570扫描电镜 日本日立公司。

1.2 方法

1.2.1 变温压差膨化干燥工艺

原料→清洗→去除不可食部分→切分→预处理→变温压差膨化干燥→冷却→分级→包装→成品

1.2.2 指标分析测定方法

1.2.2.1 水分测定方法

采用直接干燥法^[14]。

1.2.2.2 色泽测定方法

利用色彩色差计, 以仪器白板色泽为标准, 依 CIELAB 表色系统测量马铃薯的明度指数 $L^{[15]}$ 。L* 称为明度指数。L*=0 表示黑色, L*=100 表示白色。产品评价以 L* 值越大, 产品颜色鲜亮, 色泽越好。

1.2.2.3 膨化度的测定

采用比容法。

用超细石英砂填埋的方法测定膨化产品的体积。测量仪器自制, 误差小于 0.2 ml, 取平均值。

$$\text{膨化度} = \frac{V - V_0}{V_0}$$

式中, V 为膨化后的体积, ml; V_0 为膨化前的体积, ml。

1.2.2.4 脆度测定方法和条件

采用质构仪测定^[16], 测定条件如下。

Mode: Measure Force in Compression; Option: Reture To Start; Pre-Speed: 2mm/s; Test Speed: 1mm/s; Post-Speed: 2mm/s; Distance: 5mm; Trigger Type: Auto; Data Acquisition Rate: 500pps; Trigger value: 5g; Probe: P/100。

脆度结果用测试产生峰数的多少来表示, 单位为“个”。峰数越多, 产品酥脆度越好, 反之, 产品酥脆度越差。

1.2.3 优化试验设计

变温压差膨化干燥马铃薯是一个多因素作用的复杂过程, 故采用二次正交旋转组合设计方法, 以影响产品质量的主要参数作为输入变量, 以评估产品质量指标作为输出变量, 通过统计分析得出变温压差膨化干燥过程中工艺参数对膨化效果的影响。实验中膨化温度、抽空温度与抽空时间作为实验因素, 将产品水分含量、脆度、色泽作为输出指标。将单因素试验中选出的最佳

值的编码定为 0 水平, 三因子二次正交旋转组合试验设计的因素水平编码见表 1, 试验结果见表 2。

表 1 因素水平编码
Table 1 Coding of factors and levels

水平	X_1 膨化温度(℃)	X_2 抽空温度(℃)	X_3 抽空时间(min)
-1.682	115	105	30
-1	121	111	42
0	130	120	60
1	139	129	78
1.682	145	135	90

1.2.4 统计分析

采用 DPS V7.55 对实验数据进行处理分析, 应用 STATISTICA 6.0 进行响应面分析。

2 结果与分析

单因素试验结果表明, 马铃薯片膨化的最佳厚度为 2mm; 马铃薯片可不经预干燥阶段直接膨化干燥; 膨化温度、抽空温度和抽空时间是影响膨化产品质量的关键因素; 停滞时间、压力差不是影响产品质量的关键因素, 可选择停滞时间为 10min、压力差为 0.3MPa。二次正交旋转组合试验结果表明, 膨化温度、抽空温度和抽空时间对产品含水量、脆度、色泽有着显著影响。试验设计及结果见表 2。

表 2 试验设计及结果
Table 2 Test designs and results

序号	X_1	X_2	X_3	Y_1 (%)	Y_2	Y_3
1	1	1	1	3.28	246.03	18.92
2	1	1	-1	11.66	395.17	16.80
3	1	-1	1	4.69	265.26	16.96
4	1	-1	-1	18.97	419.96	25.25
5	-1	1	1	3.94	338.62	18.60
6	-1	1	-1	9.29	481.42	17.03
7	-1	-1	1	5.82	388.28	21.02
8	-1	-1	-1	33.51	42.13	24.82
9	-1.68	0	0	7.88	305.95	17.66
10	1.68	0	0	4.53	357.10	17.38
11	0	-1.68	0	10.23	398.69	20.46
12	0	1.68	0	2.31	188.55	18.68
13	0	0	-1.68	37.45	57.23	23.88
14	0	0	1.68	3.71	268.27	18.03
15	0	0	0	5.27	223.55	16.85
16	0	0	0	4.91	216.12	16.50
17	0	0	0	5.27	220.00	16.85
18	0	0	0	4.91	217.00	16.50
19	0	0	0	5.27	218.00	16.85
20	0	0	0	4.91	219.00	16.50
21	0	0	0	5.27	221.00	16.85
22	0	0	0	4.91	222.00	16.50
23	0	0	0	5.00	219.50	16.80

注: X_1 为膨化温度(℃); X_2 为抽空温度(℃); X_3 为抽空时间(min); Y_1 为产品水分含量(%); Y_2 为产品脆度; Y_3 为彩度指数 b^* 。

2.1 回归方程及其参数分析

对表2中的实验数据进行分析,得到各个因素与产品水分含量、脆度、膨化度、色泽指标之间的多元二次回归方程式。

$$Y_1 = 5.07966 - 1.43406X_1 - 3.52435X_2 - 8.23327X_3 + 0.40167X_1^2 + 0.42456X_2^2 + 5.48362X_3^2 + 2.17139X_1X_2 + 1.29906X_1X_3 + 3.53098X_2X_3$$

$$Y_2 = 218.34957 + 11.86171X_1 - 0.57128X_2 + 18.63061X_3 + 51.37174X_1^2 + 37.97030X_2^2 - 8.29923X_3^2 - 54.20625X_1X_2 - 63.3988X_1X_3 - 60.42375X_2X_3$$

$$Y_3 = 16.68139 - 0.29214X_1 - 1.44227X_2 - 1.33442X_3 + 0.37979X_1^2 + 1.10340X_2^2 + 1.59425X_3^2 + 0.46375X_1X_2 - 0.49292X_1X_3 + 1.97375X_2X_3$$

表3 回归系数及变量分析

Table 3 Regression coefficient and variable analysis

Model Form	$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3$		
	Y_1	Y_2	Y_3
Intercept	5.07966	218.34957	16.68139
X_1	-1.43406*	11.86171	-0.29214
X_2	-3.52435***	-0.57128*	-1.44227***
X_3	-8.23327***	18.6306***	-1.33442***
X_1X_1	0.40167	51.3717***	0.37979
X_2X_2	0.42456	37.97030**	1.10340**
X_3X_3	5.48362***	-8.29923***	1.59425***
X_1X_2	2.17139*	-54.20625	0.46375
X_1X_3	1.29906	-63.39875	-0.49292
X_2X_3	3.53098**	-60.42375	1.97375***
R^2	0.95339	0.837461	0.91455

注: * $-p < 0.05$, ** $-p < 0.01$, *** $-p < 0.001$ 。

各方程的决定系数 R^2 值 > 0.8 ,说明此方程在本实验中有意义。通过对回归系数的检验可知,影响产品水分含量的主次顺序是 X_3 、 X_2 、 X_1 , X_2 、 X_3 均极显著, X_1 显著;影响产品脆度的主次顺序依次是 X_3 、 X_2 , X_3 极显著、 X_2 显著, X_1 不显著;影响产品彩度指数 b^* 的主次顺序依次是 X_2 、 X_3 , X_2 、 X_3 均极显著。

2.2 交互作用分析

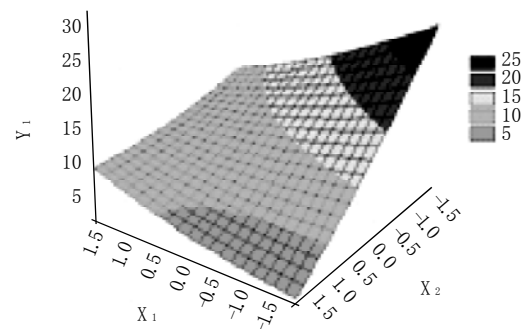
2.2.1 三因素对膨化产品含水量的影响

从图1可以看出,随着各因子编码值及组合编码值的升高,含水量 Y_1 值下降。

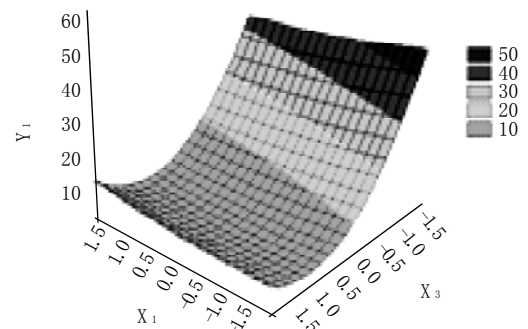
2.2.2 三因素对膨化产品脆度的影响

从图2可以看出随着各个交互因子编码值的升高,脆度 Y_2 呈下降趋势,但是当编码值达到一定组合后,脆度 Y_2 呈现上升趋势,说明各交互因子均有一个最佳编码组合使脆度 Y_2 达到最低。

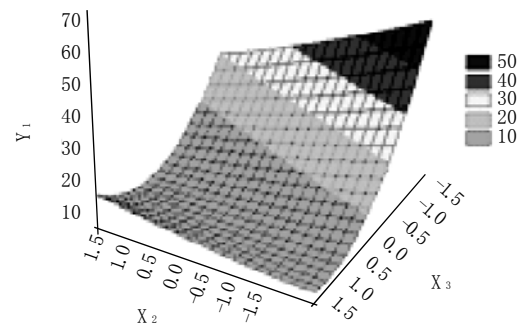
2.2.3 三因素对膨化产品色泽的影响



X_1 、 X_2 对 Y_1 的影响

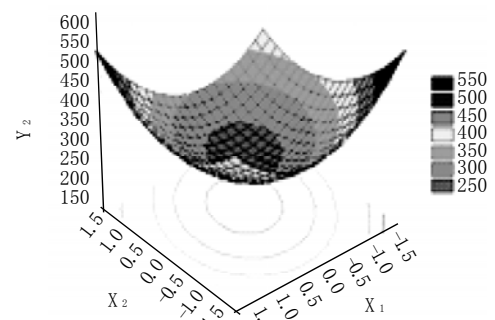


X_1 、 X_3 对 Y_1 的影响



X_2 、 X_3 对 Y_1 的影响

图1 三因素对膨化产品含水量的影响
Fig.1 Effects of three factors on water content of explosion puffed products



X_1 、 X_2 对 Y_2 的影响

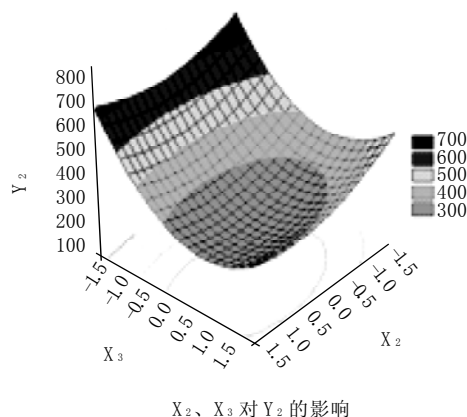
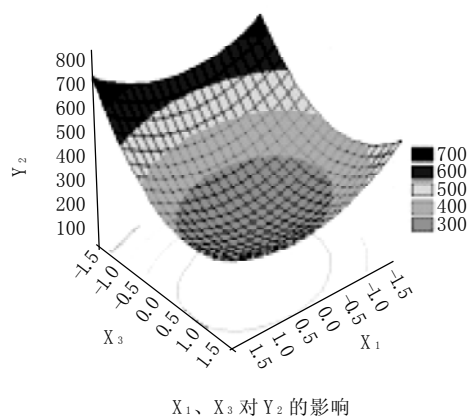


图2 三因素对膨化产品脆度的影响

Fig.2 Effects of three factors on the crisp degree of explosion puffed products

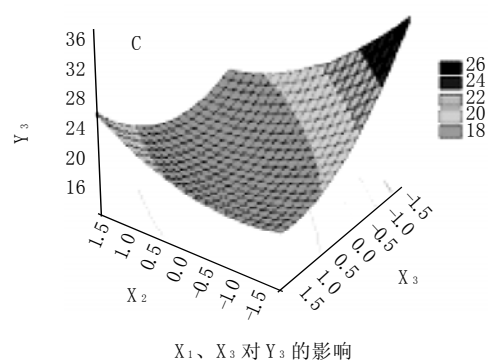
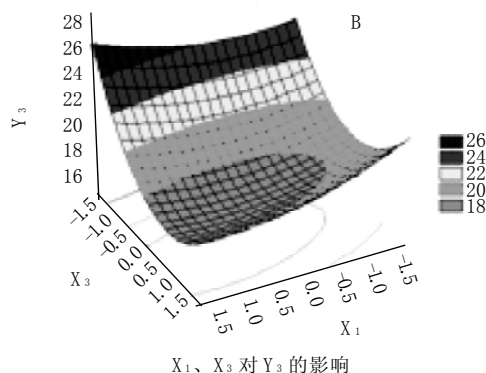
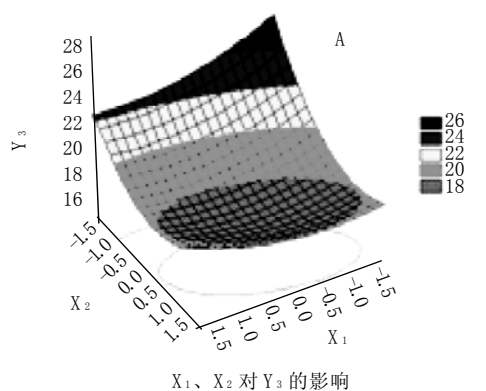


图3 三因素对膨化产品色泽的影响

Fig.3 Effects of three factors on color of explosion puffed products

从图3A可以看出,随着X₁、X₂因子编码值的升高,彩度指数b*值下降;随着X₁、X₂因子组合编码值的下降,彩度指数b*值也升高。从图3B可以看出,随着X₃因子编码值的升高,彩度指数b*值下降;彩度指数b*值随着X₂因子编码值的升高变化不明显。从图3C可以看出,随着X₂、X₃因子组合编码值的升高,彩度指数b*值降低;在X₃因子编码值水平低的时候,彩度指数b*值随着X₂因子编码值的升高而下降,在X₃因子编码值水平高的时候,彩度指数b*值随着X₂因子编码值的升高而升高;在X₂因子编码值水平低的时候,彩度指数b*值随着X₃因子编码值的升高而下降。

2.3 变温压差膨化干燥工艺的优化

通过分析可知,随着产品含水量的降低,脆度值先升高后降低,高水分(>30%)产品的脆度值很低(<100),产品湿而软,无酥脆性可言;产品含水量20%左右,脆度值达到最大,产品仍然湿而软;产品含水量20%以下,随着含水量的降低,脆度值降低,产品含水量高于5%时,硬而不酥,5%以下时,脆度值低,酥脆感好。随着产品含水量的升高,彩度指数b*值升高,色泽逐渐明亮鲜艳。通过计算机对Y₃、Y₁、Y₂的优化,确定彩度指数b*(Y₃)>16.00、水分含量(Y₁)<7%、脆度范围(Y₂)为200~300,综合考虑四个指标的回归模型,确定最优的工艺参数为,膨化温度为135℃,抽空温度为125℃,抽空时间为60min。

3 讨论

3.1 预干燥产品含水量对膨化产品品质的影响

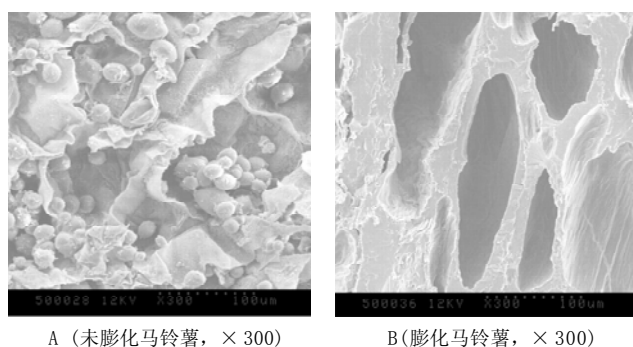
果蔬变温压差膨化过程实际是个干燥过程。干燥过程是物料中的水分变成蒸汽状态,蒸汽再扩散到周围的环境中。从理论上讲,物料含水量越大,可能产生的蒸汽量越大,对膨化效果影响也越大,但是物料含水量过高时,会影响膨化的正常实现。究其原因,一是过量的水往往是自由态和表面吸附态的水,在加热过程

中由于水分的梯度扩散以及较慢的辐射传热,水分主要在物料的表面汽化。因此水分很难在较短的时间内完全迅速汽化,而剩余的那部分未汽化的液态的水有较大的表面张力,在细胞之间起粘联作用,一定程度上阻碍了膨化的进行;二是过量的水与物料其他组分间结合力较弱,较易优先汽化,占有有效能量,影响膨化效果;三是过量的水可能会导致定型物质如蛋白质在增压阶段提前变性,从而影响膨化。四是过量水的物料,即使经历了膨化过程,物料仍然剩余过多的水分,难以使最终水分达到安全含水量以下。过多水分的存在使晶格难以定型,产品回软,失去膨化制品应有的风味和口感。当水分含量过低,则不能产生足够的蒸汽,也就不能形成足够的膨化动力,因而产品的膨化度较低,甚至不能膨化,发生干燥过程的收缩现象^[17]。

原料的含水量是影响膨化成败的一个重要因素。当水分含量超过95%时,干物质较少,在预干燥阶段原料大量失水收缩,体积缩小数倍,细胞之间彼此黏连,缺少了膨化的基质,因而很难生产出理想的膨化产品。如胡萝卜,水分含量在90%左右,在预干燥之后体积严重收缩,膨化的产品因为缺少基质,出现内部空心的圆壳状,严重影响了产品的感官品质。但是若在预干燥前渗入10%的糖,增加其内容物,使膨化前的原料显得饱满,则可以取得比较理想的效果。

3.2 膨化前后细胞结构变化对产品酥脆度和体积的影响

果蔬变温压差膨化产品的膨化效果与膨化原料的细胞结构有关。图4是马铃薯新鲜原料和膨化产品细胞结构扫描电镜图片。



A (未膨化马铃薯, ×300)

B(膨化马铃薯, ×300)

图4 马铃薯膨化前后细胞结构变化

Fig.4 Cell structure on explosion puffed potatoes and non-explosion puffed potatoes

从图4看出,马铃薯鲜样中明显看出细胞内含有很多淀粉粒,细胞大小均匀。膨化产品的淀粉粒消失,说明淀粉粒已经糊化;形成的膨化空腔大小不均,腔壁厚薄不一,导致膨化产品酥脆度不如其他果蔬那样好,质地略坚硬。

4 结 论

二次正交旋转组合试验结果表明,膨化温度、抽空温度和抽空时间对膨化产品含水量、脆度、色泽有着显著的影响。通过数据处理软件对 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 的优化,选择含水量(Y_1)<7%、脆度(Y_2)范围200~300个、彩度指数 $b^*(Y_3)$ >16,得到一系列符合要求的编码组合,确定最优的工艺参数范围为,膨化温度为135℃,抽空温度为125℃,抽空时间为60min。

参考文献:

- [1] ZMAMER C M. Gun-puffed vegetable snacks:A new way to eat your veggies[J]. Food Technology, 1995, 49(10): 64-65.
- [2] SULLIVAN J F, CRAIG J C, KONSTANCE R P. The development of explosion puffing[J]. Food Technology, 1984: 52-55.
- [3] SULLIVAN J F, EGOVILLE M J, KONSTANCE R P, et al. Storage stability of continuous explosion puffed potatoes[J]. Lebensmittelwiss u, Technol, 1983, 16(2): 76.
- [4] VARNALIS A I, BRENNAN J G, MACDOUGALL D B. A proposed mechanism of high-temperature puffing of puffing. Part. The influence of blanching and drying condition on the volume of puffed cubes[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48: 361-367.
- [5] HEILAND W K, ESKEW R K. A new gun for explosion puffing of fruits and vegetables[J]. Agric Res Service, US Dept of Agriculture, Philadelphia, 1965, Rept, 73-74.
- [6] SULLIVAN J F, CRAIG J C, KONSTANCE R P, et al. Continuous explosion-puffing of apples [J]. Journal of Food Science, 1980, 45: 1550-1555.
- [7] HEILAN W K, SULLIVAN J F, KONSTANCE R P, et al. A continuous explosion-puffing system[J]. Food Technol, 1977, 31(11): 32.
- [8] TORREGGIANI D, TOLEDO D T, BERTOLO G. Optimization of vapor induced puffing in apple dehydration[J]. Journal of Food Science, 1995, 60(1): 181-185, 194.
- [9] SULLIVAN J F, KONSTANCE R P, DELLAMONICA E S, et al. Carrot dehydration-optimization process studies on the explosion-puffing process[J]. Food Sci, 1981, 46: 1537.
- [10] SULLIVAN J F, KONSTANCE R P, ACETO N C, et al. Continuous explosion of potatoes[J]. Food Sci, 1977, 42: 1462.
- [11] NATH A, CHATTOPADHYAY P K, MAJUMDAR G C. High temperature short time air puffed ready-to-eat potato snakes: Process parameter optimization[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80: 770-780.
- [12] PIOTR Z, MARKE M, KATARZYNA M. Effect of temperature on the physical, functional, and mechanical characteristics of hot-air-puffed amaranth seeds[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76: 469-476.
- [13] KOZEMPEL M F, SULLIVAN J F, CRAIG J C, et al. Explosion puffing of fruits and vegetables[J]. Journal of Food Science, 1989, 154(3): 772-773.
- [14] RODRIGUES S, FABIANA A, FERNANDES N. Dehydration of melons in a ternary system followed by air-drying[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80: 678-687.
- [15] NATH A, CHATTOPADHYAY P K. Optimization of oven toasting for improving crispness and other quality attributes of ready to eat potato-soy snack using response surface methodology[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80: 1282-1292.
- [16] HAWLADER M N A, PERERA C O, TIAN M. Properties of modified atmosphere heat pump dried foods[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74: 392-401.
- [17] 刘自强. 食品膨化机理的理论探析[J]. 食品工业科技, 1997(6): 52-53; 59.