

双螺杆挤压甘薯膨化圈工艺优化及其品质评价

邓少颖,孙健*,朱红,岳瑞雪,张毅,张文婷,马晨
(江苏徐淮地区徐州农业科学研究所,江苏 徐州 221131)

摘要:以徐紫薯8号为原料,研究物料水分含量、套筒温度、螺杆转速、喂料转速对紫甘薯膨化圈径向膨化率及硬度的影响。在单因素试验基础上,结合Box-Behnken试验设计,优化双螺杆挤压膨化工艺,进一步对膨化产品的水合特性、糊化特性及质构特性进行分析。结果表明:最佳挤压膨化工艺参数为物料水分含量12%、套筒温度149℃、螺杆转速28 Hz、喂料转速10 Hz,在此条件下产品膨化圈的径向膨化率为3.52,硬度为63.85 N,与理论预测值接近。全粉经挤压膨化后,徐紫薯8号膨化圈的水合特性明显提高,热糊稳定性和抗老化性得到改善,口感酥脆,更易剪切。

关键词:甘薯;膨化圈;挤压膨化;径向膨化率;硬度

Process Optimization and Quality Analysis of Purple Sweet Potato Puffed Rings by Twin-Screw Extrusion

DENG Shaoying, SUN Jian*, ZHU Hong, YUE Ruixue, ZHANG Yi, ZHANG Wenting, MA Chen
(Xuzhou Institute of Agricultural Sciences in Xuhuai Region, Xuzhou 221131, Jiangsu, China)

Abstract: The effects of water content, puffing temperature, screw speed, and feed speed on the swelling degree and hardness of purple sweet potato puffed rings prepared with the purple sweet potato cultivar 'Xuzishu 8' were studied. The twin-screw extrusion conditions were optimized by single factor experiments combined with Box-Behnken design. Furthermore, the hydration, gelatinization, and texture characteristics of the puffed rings were analyzed. The results showed that the optimal preparation conditions were water content of 12%, puffing temperature of 149 °C, screw speed of 28 Hz, and feeding speed of 10 Hz. The purple sweet potato puffed rings prepared under these conditions had the swelling degree of 3.52 and hardness of 63.85 N, respectively, which were close to the predicted values. In addition, the puffed rings showed improved hydration property, gelatinization stability, and anti-aging property, with a crisp taste and easiness of cutting.

Key words: sweet potato; puffed rings; extrusion; swelling degree; hardness

引文格式:

邓少颖,孙健,朱红,等.双螺杆挤压甘薯膨化圈工艺优化及其品质评价[J].食品研究与开发,2025,46(2):108-118.

DENG Shaoying, SUN Jian, ZHU Hong, et al. Process Optimization and Quality Analysis of Purple Sweet Potato Puffed Rings by Twin-Screw Extrusion[J]. Food Research and Development, 2025, 46(2): 108-118.

甘薯在中国国民经济中占有重要地位,随着农业产业结构调整、甘薯产业化进程加快推进、人民物质生活水平和健康意识的提高,甘薯不再作为解决温饱的主粮,而是转向为营养、健康、安全、便捷的休闲食品加工原料。2022版中国居民平衡膳食宝塔指出,谷薯类是膳食能量的重要来源,也是多种微量营养素和膳食

纤维的优质来源,建议每人每天摄入薯类50~100 g。徐紫薯8号是一种优质鲜食及加工型高花青素甘薯新品种,被农业农村部列为2023年农业主导品种,富含淀粉、糖类、膳食纤维、维生素、矿物质等,其花青素含量高达110 mg/100 g鲜薯^[1]。由于鲜徐紫薯8号皮薄肉嫩、不耐贮藏、易变质损失,因此开展紫甘薯膨化圈

基金项目:国家甘薯产业技术体系项目(CARS-10-GW22);徐州市农业科学院科研基金项目(XM2023010);徐州市科技项目(KC22088)

作者简介:邓少颖(1992—),女(汉),助理研究员,硕士,研究方向:甘薯加工与利用。

*通信作者:孙健(1979—),男(汉),研究员,博士,研究方向:甘薯产后加工。

产品的开发和利用,不仅能够较大程度减少鲜甘薯损失、提高产品附加值,还可以满足人们对营养、健康、安全、便捷的休闲食品的追求。

挤压膨化技术是集搅拌、破碎、加热、杀菌、膨化、成型等于一体的食品加工技术,被称为21世纪食品加工领域的高新技术之一,广泛地应用于谷类、薯类、豆类、茶类等食品加工行业^[2-3]。物料在膨化机内受到高温、高压、高剪切力的作用,发生淀粉糊化和降解、蛋白质变性和降解、可溶性膳食纤维含量增加、抗营养因子含量降低、风味物质形成、物料密度改变、体积膨大等一系列的变化^[4-6]。而物料组成、水分含量、螺杆转速和温度等对膨化产品的品质有较大影响^[7]。挤压膨化在甘薯上研究较少,Waramboi等^[8]研究发现膨化产品的膨化特性、功能特性和消化特性等与品种特性有关;黄浩庭^[9]研究发现螺杆转速、喂料速度、套筒温度、原料水分含量是影响紫罗兰膨化粉径向膨化率和密度的重要因素;张文刚^[10]研究紫薯藜麦挤压膨化食品加工工艺,确定最佳工艺条件为挤压温度160℃、螺杆转速170 r/min、水分含量16%;徐妹华^[11]以甘薯全粉、豆粕粉、小麦粉作为主要原料,使用单螺杆挤压膨化机进行挤压膨化,对产品开展感官指标与质构特性相关性研究,发现弹性、硬度、咀嚼性是客观评定产品品质的重要指标。目前,关于徐紫薯8号全粉挤压膨化技术的研究鲜见,并且原料成分不同,采用相同工艺,会存在部分制品挤压不成型、品质差异大、中试生产参数不适用等问题,因而有必要对徐紫薯8号膨化圈产品开展挤压膨化工艺技术研究。本试验以徐紫薯8号为原料,对加工过程中的物料水分含量、套筒温度、螺杆转速和喂料转速关键参数及控制方法进行研究,采用响应面优化法确定最佳工艺参数并对产品的品质特性进行分析,以期为提高徐紫薯8号产品附加值,促进紫薯深加工产业的发展和技术水平的提高提供有力的技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

徐紫薯8号:江苏徐淮地区徐州农业科学研究所。甲醇、盐酸、氢氧化钾、碘、碘化钾(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

MT65 双螺杆挤压膨化机(模头出口直径为4.5 mm圆孔):济南美腾机械设备有限公司;SFY-60水分测定仪:深圳冠亚水分仪科技有限公司;JA3003电子分析天平(精度1 mg):上海精密科学仪器有限公司;DKZ-3B振荡水槽:上海一恒科学仪器有限公司;UV-2450紫外分光光度计:日本岛津公司;TMS-Touch质构仪:美国FTC公司;TD5M-WS离心机:上海卢湘仪离心机仪器有限公司;RVA快速黏度仪:Perten

公司;DL3941数显电子游标卡尺:得力工具有限公司;BJ-800A多功能粉碎机:拜杰科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 膨化样品制备

徐紫薯8号全粉制备工艺流程:徐紫薯8号→挑选→清洗→去皮→蒸制→冷却→制泥→滚筒干燥→全粉成品(水分含量≤5%)。

徐紫薯8号膨化圈制备工艺流程:徐紫薯8号全粉→粉碎→筛分(过60目)→调节水分含量→参数设置→双螺杆挤压膨化→冷却→成品。

1.3.2 单因素试验

采用双螺杆挤压膨化机制备紫甘薯膨化圈。在徐紫薯8号全粉水分含量12%、套筒温度150℃、螺杆电机频率25 Hz、喂料电机频率7.5 Hz的基础上进行单因素试验,分别研究物料水分含量(8%、10%、12%、14%、16%)、套筒温度(130、140、150、160、170℃)、螺杆转速(15、20、25、30、35 Hz)、喂料转速(5.0、7.5、10.0、12.5、15.0 Hz)对紫甘薯膨化圈的径向膨化度和硬度的影响。

1.3.3 响应面优化双螺杆挤压膨化紫甘薯工艺条件

根据单因素试验结果,结合Box-Behnken的中心组合试验,设计四因素三水平的响应面试验。以物料水分含量、套筒温度、螺杆转速、喂料转速为自变量,以紫色甘薯膨化圈径向膨化率及硬度为响应值进行响应面优化。响应面试验水平及因素见表1。

表1 响应面试验设计因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface design

水平	X_1 物料 水分含量/%	X_2 套筒 温度/℃	X_3 螺杆 转速/Hz	X_4 喂料 转速/Hz
-1	10	140	25	7.5
0	12	150	30	10.0
1	14	160	35	12.5

1.3.4 模型验证与性质测定

应用响应面分析法优化徐紫薯8号膨化圈挤压膨化的工艺参数,在最优条件下制备紫甘薯膨化圈,比较验证值和预测值的结果以验证模型有效性,并测定紫甘薯膨化圈的水合特性、糊化特性及质构特性。

1.3.4.1 膨化度测定

膨化度(puffing degree)用径向膨化率表示。用数显电子游标卡尺测定样品直径,每个样品随机测试10次,取平均值作为产品的平均直径(d , mm)。模头出口直径 d_1 为4.5 mm圆孔,膨化圈径向膨化率根据公式(1)计算。

$$P_d = \frac{d}{d_1} \quad (1)$$

1.3.4.2 质构特性测定

参考徐妹华^[11]方法并略作修改。随机选取膨化圈

样品水平放在承载平台,设置模式为质构剖面分析(texture profile analysis, TPA)模式,测试速度为 30 mm/min,变形百分量为 80%,进行 2 次压缩,时间间隔为 1.0 s,检测起始力为 0.5 N。测定指标硬度、黏附性、胶黏性和咀嚼性。

1.3.4.3 水溶性指数及吸水性指数的测定

参考 Obadi 等^[12]的方法并稍加修改。取 2.0 g 过 60 目筛的样品,放入质量 m_1 的离心管中,加入 25 mL 蒸馏水,振荡混匀,至样品完全分散形成悬浮液体系。将悬浮液体系置于 30 °C 水浴中振荡,水浴 30 min 后 4 000 r/min 离心 15 min。将上清液缓慢倒入烧杯(质量记为 m_2)中,105 °C 烘干至恒重并称质量记为 m_3 。称取离心管及沉淀的凝胶质量记为 m_4 。按公式(2)计算水溶性指数(water soluble index, WSI)(S, %)和吸水性指数(water absorption index, WAI)(A, %)。

$$S = \frac{m_3 - m_2}{2} \times 100 \quad (2)$$

$$A = \frac{m_4 - m_1}{2} \times 100$$

1.3.4.4 淀粉糊化度测定

将紫甘薯全粉及膨化圈样品用粉碎机粉碎,过 40 目筛,参照赵志浩等^[13]的方法测定糊化度。

1.3.4.5 糊化特性测定

参考李文婷等^[14]方法并略作修改。准确称取过 60 目筛的样品(3.00±0.01) g 于快速黏度仪配套的样品筒中,加入(25.00±0.01) mL 去离子水,搅拌器上下快速搅动使试样均匀分散。样品先 50 °C 加热 1 min,随后在 5 min 内升温至 95 °C,保温 5 min,然后在 5 min 内降温至 50 °C,保温 1 min;搅拌器转速在开始 10 s 内上升到 960 r/min,之后保持在 160 r/min。根据计算机屏幕显示的黏度变化曲线,记录主要参数(包括峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、衰减值和回生值)。

1.4 数据处理

所有试验均重复 3 次,试验结果以平均值±标准差表示,使用 SPSS 18.0 进行方差分析,试验数值间以 One-way ANOVA 法进行显著性检验。采用 Origin 2022 软件作图;采用 Design-Expert V8.0.6 软件进行响应面试验设计和分析。

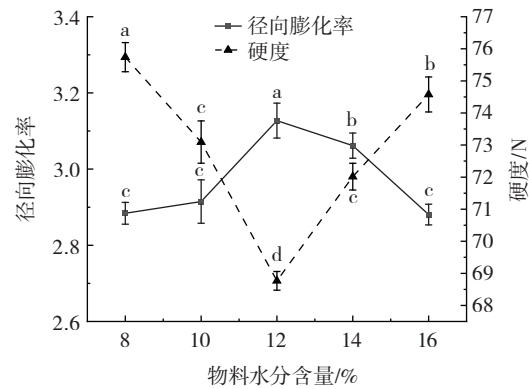
2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 物料水分含量对径向膨化度和硬度的影响

物料水分含量对径向膨化率及硬度的影响见图 1。

由图 1 可以看出,紫甘薯膨化圈的径向膨化率随着物料水分含量增加先升高后降低。当物料水分含量由 8%~10% 升高到 12%~14% 时,径向膨化率显著升高($P<0.05$),但 8%、10%、16% 间无显著性差异。而紫



同一指标不同字母表示存在显著性差异, $P<0.05$ 。

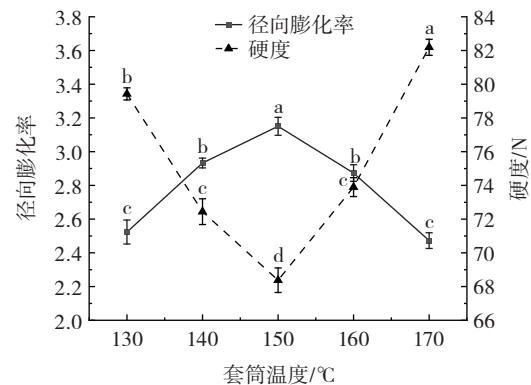
图 1 物料水分含量对径向膨化率及硬度的影响

Fig.1 Effects of water content on swelling degree and hardness

甘薯膨化圈的硬度随着物料水分含量增加先降低后升高,当物料水分含量为 12% 时,其硬度值最低。研究表明,物料的水分含量是影响径向膨化率和产品硬度的重要因素^[15]。徐紫薯 8 号全粉在双螺杆挤压膨化机中受到高温、高压、高剪切力的作用,形成“熔融态”^[16]。物料水分含量过低时,不易流动,挤压不成型且易出现焦糊化;随着物料水分含量的升高,加速了淀粉的糊化和蛋白、糖类等大分子物质降解、变性,使物料变得黏稠并充分熔融,挤压膨化后其结构变得疏松,产品的径向膨化率增加,同时产品的硬度降低^[16];但当水分含量过高时,可能起到了稀释、润滑的作用,物料挤出时受到的阻力减小因而在机筒停留时间缩短,其受到的挤压、剪切等机械力较小,物料来不及充分熔融即被挤出^[17],径向膨化率降低,产品偏硬,这与黄晓燕等^[18]研究的藜麦挤压膨化脆片结果相一致。前期预试验发现产品的硬度和径向膨化率间存在显著负相关。因此,综合物料水分含量对产品径向膨化率和硬度考虑,选取物料水分含量为 10%、12%、14% 进行后续试验。

2.1.2 套筒温度对径向膨化度和硬度的影响

套筒温度对径向膨化率及硬度的影响见图 2。



同一指标不同字母表示存在显著性差异, $P<0.05$ 。

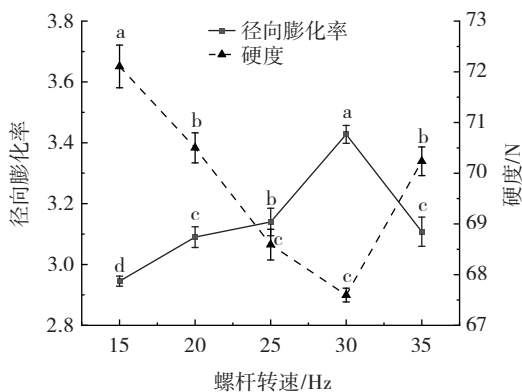
图 2 套筒温度对径向膨化率及硬度的影响

Fig.2 Effects of puffing temperature on swelling degree and hardness

由图2可以看出,紫甘薯膨化圈的径向膨化率随着套筒温度的升高先升高后降低。当套筒温度升高到150℃时,径向膨化率达到最大,为3.15,套筒温度继续升高,径向膨化率显著降低。紫甘薯膨化圈的硬度随着套筒温度的升高先降低后升高,当套筒温度为150℃时,其硬度值最低。徐紫薯8号全粉在挤压膨化的过程中受到套筒传递的热量,当套筒温度较低时,不能为淀粉的糊化提供足够的能量,淀粉的糊化度低,物料的熔融程度低,膨化产品的径向膨化率低^[19];随着套筒温度升高,糖类和蛋白等发生降解、变性并充分形成“熔融态”,产品的膨化度增加,硬度降低^[20];但温度过度升高,物料的黏度大幅度降低,进而对气体的束缚力减弱^[16],物料表面鼓起的气泡过早破裂、塌陷,导致其径向膨化率降低,并在产品表面形成硬壳^[21],其硬度显著增加。因此,综合考虑套筒温度对产品径向膨化率和硬度的影响,选取套筒温度为140、150、160℃进行后续试验。

2.1.3 螺杆转速对径向膨化度和硬度的影响

螺杆转速对径向膨化率及硬度的影响见图3。



同一指标不同字母表示存在显著性差异, $P < 0.05$ 。

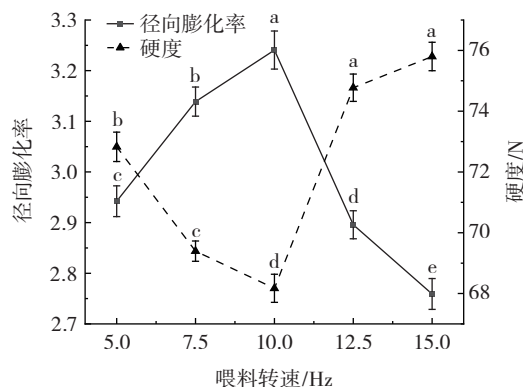
图3 螺杆转速对径向膨化率及硬度的影响

Fig.3 Effects of screw speed on swelling degree and hardness

由图3可以看出,紫甘薯膨化圈的径向膨化率随着螺杆转速的增加先升高后降低。当螺杆转速由15~25 Hz升高到30 Hz时,径向膨化率显著升高($P < 0.05$),当螺杆转速升高到35 Hz时,径向膨化率显著降低($P < 0.05$)。紫甘薯膨化圈的硬度随着螺杆转速的增加先降低后增加。当螺杆转速较低时,由于物料受到的剪切和摩擦作用力小,物料中的淀粉糊化程度低,蛋白、糖类等物质降解程度低^[22];随着螺杆转速的不断增大,物料形成的“熔融态”程度变大,淀粉充分糊化,蛋白、糖类等物质大量降解,形成较为松散的空间结构^[23],产品的径向膨化率增大,硬度降低;当螺杆转速继续增大时,由于转速过快使得物料来不及糊化和降解就被挤出膨化,使其径向膨化率下降,硬度也随之增大。因此,综合考虑螺杆转速对产品径向膨化率和硬度的影响,选取螺杆转速为25、30、35 Hz进行后续试验。

2.1.4 喂料转速对径向膨化度和硬度的影响

喂料转速对径向膨化率及硬度的影响见图4。



同一指标不同字母表示存在显著性差异, $P < 0.05$ 。

图4 喂料转速对径向膨化率及硬度的影响

Fig.4 Effects of feed speed on swelling degree and hardness

由图4可以看出,紫甘薯膨化圈的径向膨化率随着喂料转速的增加呈现先升高后降低的趋势,而产品硬度随着喂料转速的增加先降低后升高。当喂料转速为10.0 Hz时,径向膨化率达到最大,硬度最小。喂料转速较低时,膨化机内的物料不足,物料受到的剪切力和摩擦力较小,随着喂料转速的不断增大,膨化机内的物料逐渐达到饱和,物料整体受到的剪切力和摩擦力不断加大,加速了淀粉的糊化和蛋白、糖类等物质的降解作用,致密的空间结构受到较大程度的破坏,分子内以及分子间的作用力大大减弱^[23],物料被最大程度膨化,硬度达到最小值;当喂料转速过大时,单位时间内的物料进一步增加,膨化机内压力变大,导致物料在膨化机内的停留时间缩短,搅拌不充分,受热不均匀,淀粉糊化不完全而使产品的径向膨化率降低,硬度增加^[24]。因此,综合考虑喂料转速对产品径向膨化率和硬度的影响,选取物料转速为7.5、10.0、12.5 Hz进行后续试验。

2.2 响应面优化试验结果与分析

2.2.1 响应面模型拟合及方差分析

在单因素试验基础上,以产品径向膨化率和硬度为响应值进行响应面优化试验,得到的结果见表2。

利用 Design-Expert V8.0.6 软件对试验结果进行二次多元回归拟合,得到以径向膨化率(Y_1)和硬度(Y_2)为目标函数的二次多元回归方程分别为 $Y_1 = -70.14725 + 2.02850X_1 + 0.57617X_2 + 0.73973X_3 + 1.67053X_4 - 0.003875X_1X_2 - 0.00675X_1X_3 - 0.0005X_1X_4 - 0.0021X_2X_3 - 0.0044X_2X_4 + 0.0022X_3X_4 - 0.053271X_1^2 - 0.00143083X_2^2 - 0.00657333X_3^2 - 0.053893X_4^2$; $Y_2 = 1078.66775 - 37.77987X_1 - 5.72175X_2 - 13.28200X_3 - 36.20145X_4 + 0.099379X_1X_2 + 0.14851X_1X_3 + 0.15531X_1X_4 + 0.034360X_2X_3 + 0.11137X_2X_4 + 0.00269942X_3X_4 + 0.73283X_1^2 + 0.00831408X_2^2 + 0.11248X_3^2 + 0.89668X_4^2$ 。

表2 响应面试验设计与结果

Table 2 Response surface design and experimental results

试验号	因素				响应值	
	$X_1/\%$	$X_2/^\circ\text{C}$	X_3/Hz	X_4/Hz	径向膨化率	硬度/ N
1	10	140	30	10.0	3.22	66.924
2	14	140	30	10.0	3.23	64.956
3	10	160	30	10.0	3.23	65.034
4	14	160	30	10.0	2.93	71.016
5	12	150	25	7.5	3.21	69.816
6	12	150	35	7.5	2.85	72.945
7	12	150	25	12.5	3.11	70.259
8	12	150	35	12.5	2.86	73.523
9	10	150	30	7.5	3.05	70.017
10	14	150	30	7.5	2.91	70.883
11	10	150	30	12.5	2.99	70.960
12	14	150	30	12.5	2.84	74.931
13	12	140	25	10.0	3.32	65.006
14	12	160	25	10.0	3.38	64.837
15	12	140	35	10.0	3.21	65.338
16	12	160	35	10.0	2.85	72.041
17	10	150	25	10.0	3.23	66.366
18	14	150	25	10.0	3.19	67.648
19	10	150	35	10.0	3.13	69.320
20	14	150	35	10.0	2.82	76.543
21	12	140	30	7.5	2.93	71.466
22	12	160	30	7.5	3.05	67.120
23	12	140	30	12.5	3.15	68.635
24	12	160	30	12.5	2.83	75.426
25	12	150	30	10.0	3.47	63.423
26	12	150	30	10.0	3.49	63.280
27	12	150	30	10.0	3.48	64.892
28	12	150	30	10.0	3.51	63.753
29	12	150	30	10.0	3.51	62.332

以径向膨化率为响应值进行方差分析,结果见表3。

表3 回归方程各项方差分析

Table 3 Analysis of variance of the regression equation based on swelling degree

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	1.450	14	0.100	90.34	<0.000 1
X_1	0.072	1	0.072	62.72	<0.000 1
X_2	0.052	1	0.052	45.26	<0.000 1
X_3	0.250	1	0.250	214.53	<0.000 1
X_4	4.03×10^{-3}	1	4.03×10^{-3}	3.51	0.082
X_1X_2	0.024	1	0.024	20.91	0.000 4
X_1X_3	0.018	1	0.018	15.86	0.001 4
X_1X_4	2.50×10^{-5}	1	2.50×10^{-5}	0.02	0.884 8
X_2X_3	0.044	1	0.044	38.38	<0.000 1
X_2X_4	0.048	1	0.048	42.12	<0.000 1
X_3X_4	3.03×10^{-3}	1	3.03×10^{-3}	2.63	0.127
X_1^2	0.290	1	0.290	256.29	<0.000 1
X_2^2	0.130	1	0.130	115.56	<0.000 1
X_3^2	0.180	1	0.180	152.43	<0.000 1
X_4^2	0.740	1	0.740	640.41	<0.000 1
残差	0.016	14	1.15×10^{-3}		
失拟项	0.015	10	1.48×10^{-3}	4.63	0.076 5
纯误差	1.28×10^{-3}	4	3.20×10^{-4}		
总和	1.470	28			

由表3可知,该模型的 $P < 0.000 1$,表明该模型达到极显著水平,失拟项不显著($P = 0.076 5 > 0.05$),表明

该模型与数据得到很好的拟合,未知因素对本试验的结果干扰小,可用该回归方程代替试验真实点对结果进行分析。模型的校正决定系数 $R^2 = 0.989 1$, $R^2_{\text{Adj}} = 0.978 1$,说明该模型只有2.19%的变异不能由该模型解释,进一步说明模型拟合度较好,可用来对双螺杆挤压膨化紫甘薯的工艺参数进行初步分析和预测。采用F检验来判定回归方程中各自变量对产品径向膨化率影响顺序,同时变量概率P值越小,其影响越显著。各因素对膨化圈径向膨化率的影响顺序为 $X_3 > X_1 > X_2 > X_4$,即螺杆转速>物料水分含量>套筒温度>喂料转速。

以硬度为响应值进行方差分析,结果见表4。

表4 回归方程各项方差分析

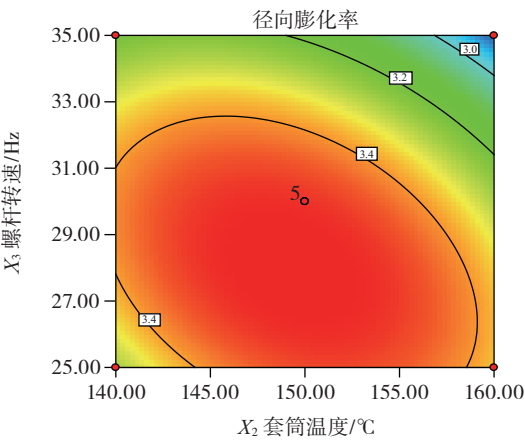
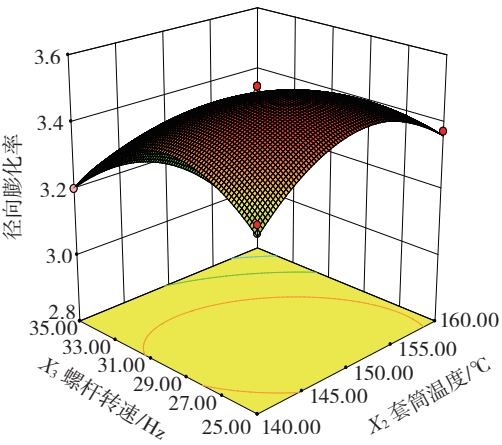
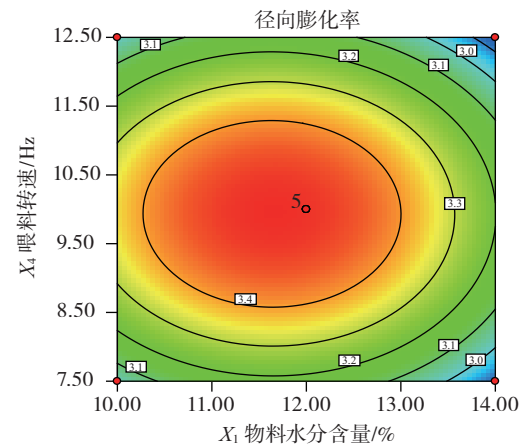
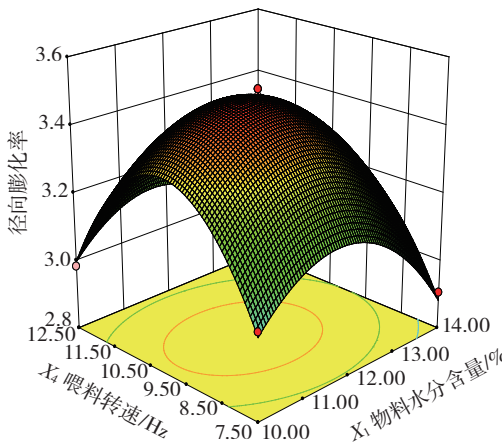
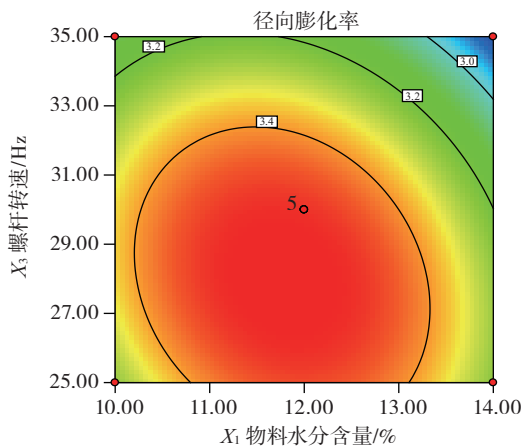
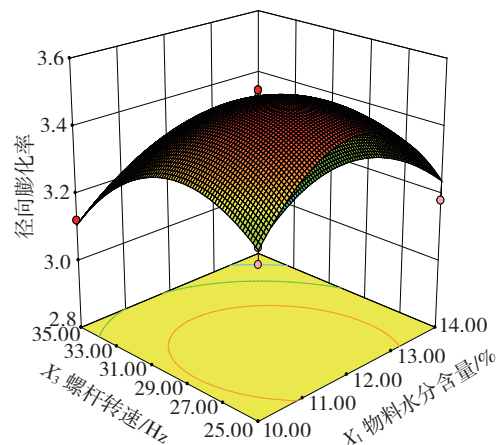
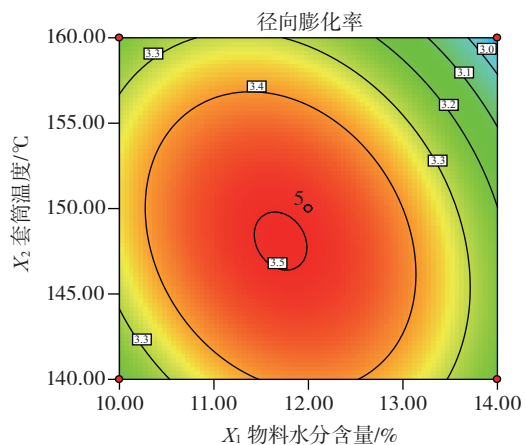
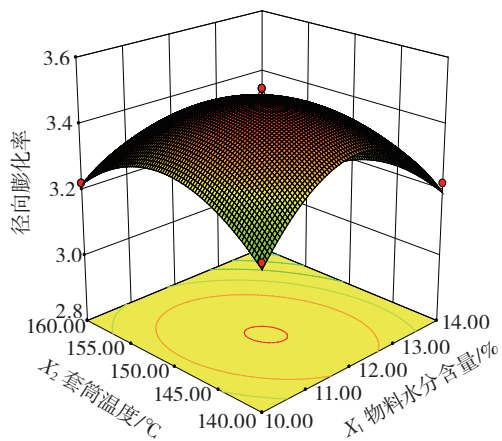
Table 4 Analysis of variance of the regression equation based on hardness

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	421.31	14	30.09	19.84	<0.000 1
X_1	25.10	1	25.10	16.55	0.001 2
X_2	14.41	1	14.41	9.50	0.008 1
X_3	55.37	1	55.37	36.51	<0.000 1
X_4	11.00	1	11.00	7.25	0.017 5
X_1X_2	15.80	1	15.80	10.42	0.006 1
X_1X_3	8.82	1	8.82	5.82	0.030 2
X_1X_4	2.41	1	2.41	1.59	0.227 9
X_2X_3	11.81	1	11.81	7.78	0.014 5
X_2X_4	31.01	1	31.01	20.45	0.000 5
X_3X_4	4.55×10^{-3}	1	4.55×10^{-3}	3.00×10^{-3}	0.957 1
X_1^2	55.74	1	55.74	36.75	<0.000 1
X_2^2	4.48	1	4.48	2.96	0.107 6
X_3^2	51.29	1	51.29	33.81	<0.000 1
X_4^2	203.72	1	203.72	134.32	<0.000 1
残差	21.23	14	1.52		
失拟项	17.82	10	1.78	2.09	0.249 3
纯误差	3.42	4	0.85		
总和	442.54	28			

由表4可知,该模型的 $P < 0.000 1$,表明该模型达到极显著水平,失拟项不显著($P = 0.249 3 > 0.05$),表明该模型与数据得到很好的拟合,未知因素对本试验的结果干扰很小,可用该回归方程代替试验真实点对结果进行分析。模型的校正决定系数 $R^2 = 0.952 0$, $R^2_{\text{Adj}} = 0.904 0$,说明该模型只有9.6%的变异不能由该模型解释,进一步说明模型拟合度较好,可用来对双螺杆挤压膨化紫甘薯的工艺参数进行初步分析和预测。各因素对膨化圈硬度的影响顺序为 $X_3 > X_1 > X_2 > X_4$,即螺杆转速>物料水分含量>套筒温度>喂料转速。

2.2.2 响应面交互作用分析与显著因素最佳值的确定

图5为物料水分含量、套筒温度、螺杆转速、喂料转速之间交互作用对径向膨化率影响的3D响应面和等高线。响应面图中曲面的弯曲程度体现了研究因素之间的交互作用的显著程度,等高线的形状呈椭圆形表明研究因素之间的交互作用影响显著,呈圆形则说明交互作用影响不显著^[25]。



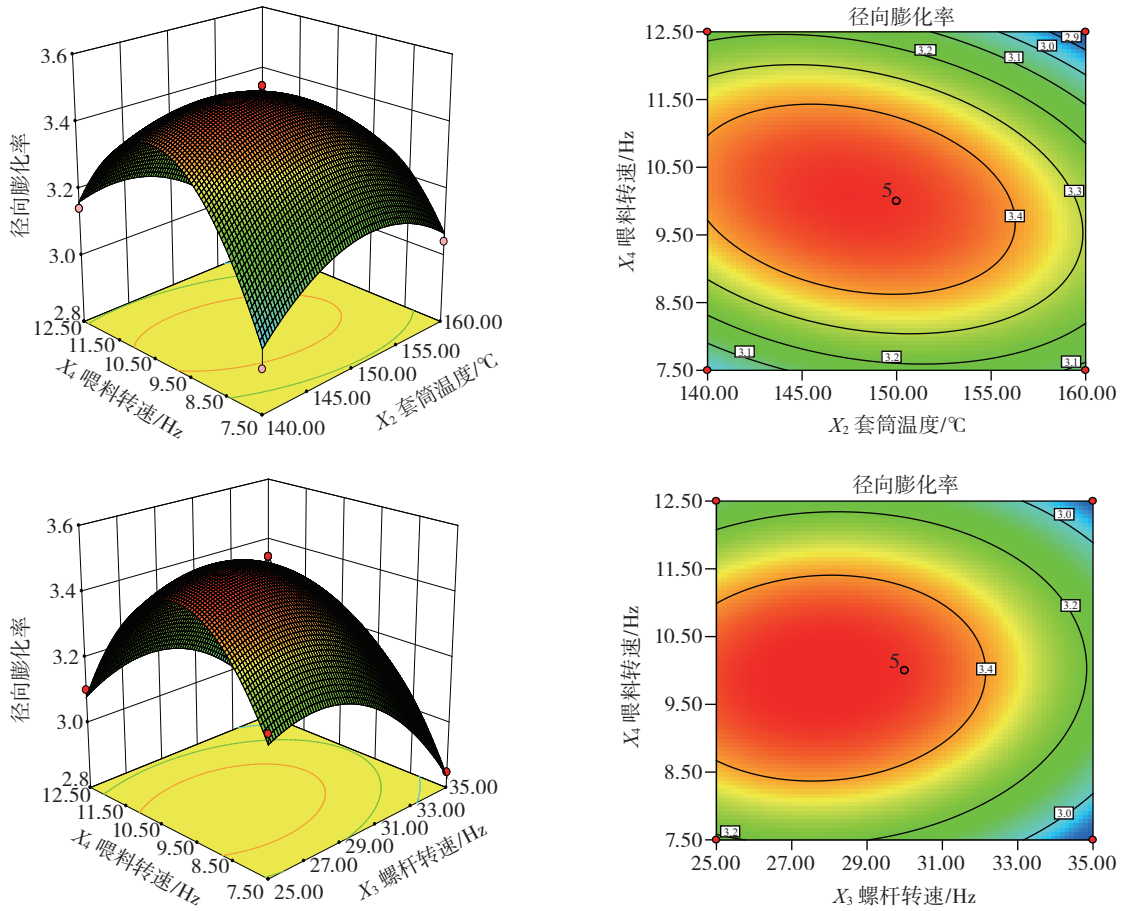


图5 物料水分含量、套筒温度、螺杆转速及喂料转速对径向膨化率影响的响应面与等高线

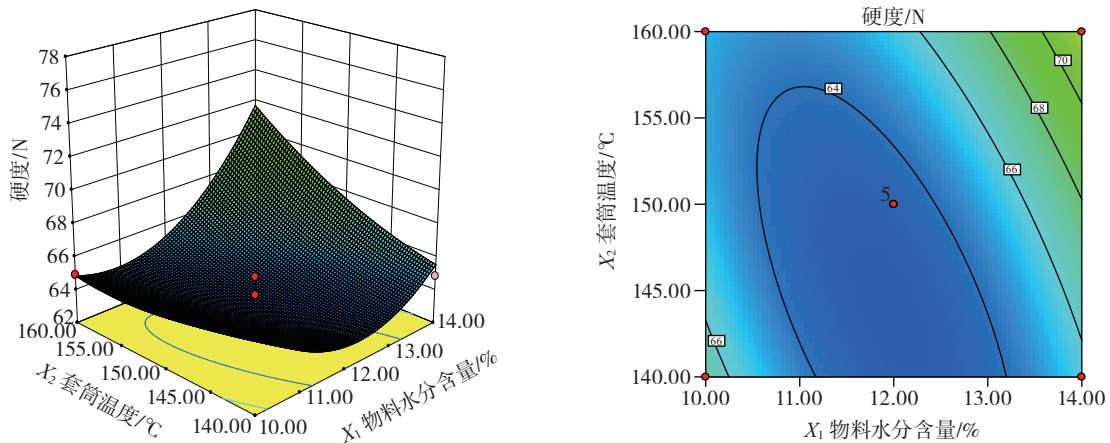
Fig.5 Response surface and contour plots for the effects of interactions between water content, buffering temperature, screw speed, and feed speed on the swelling degree

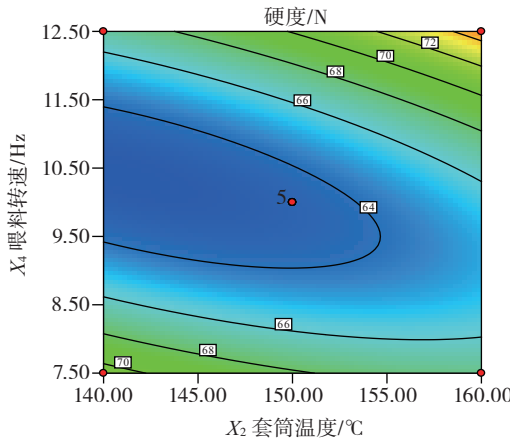
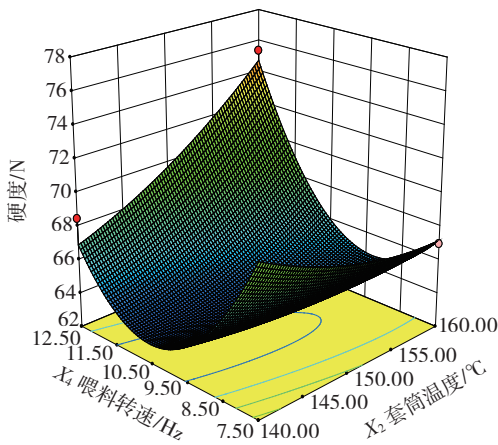
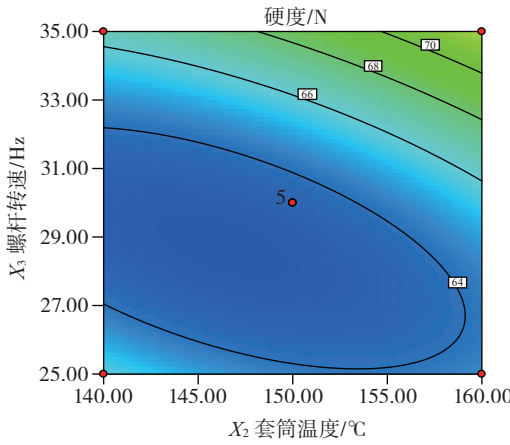
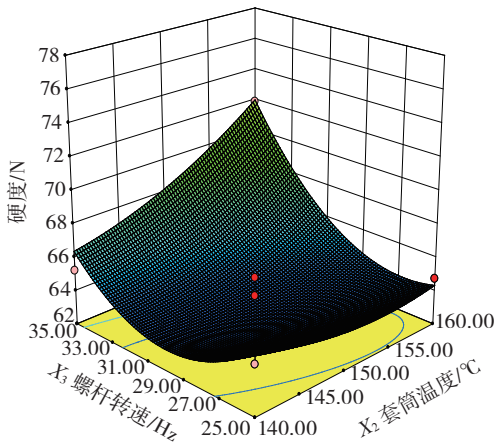
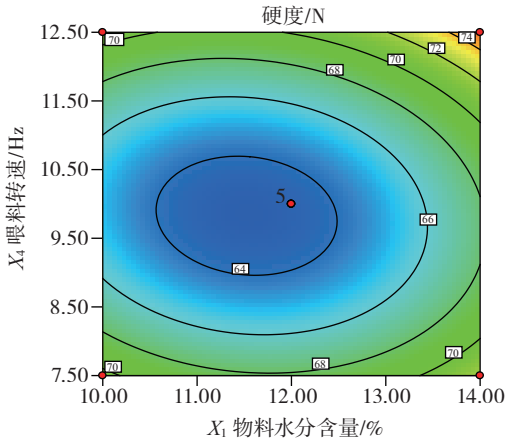
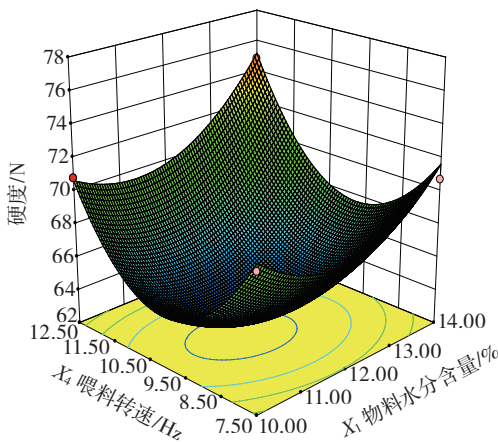
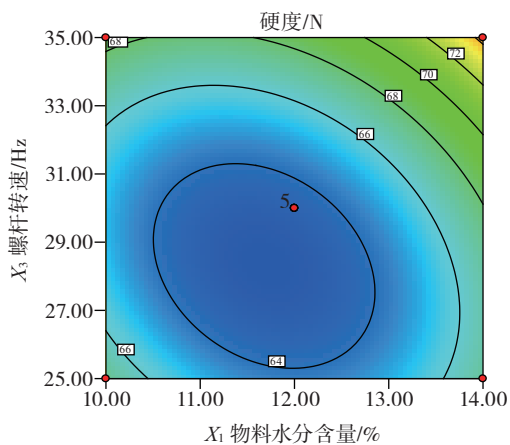
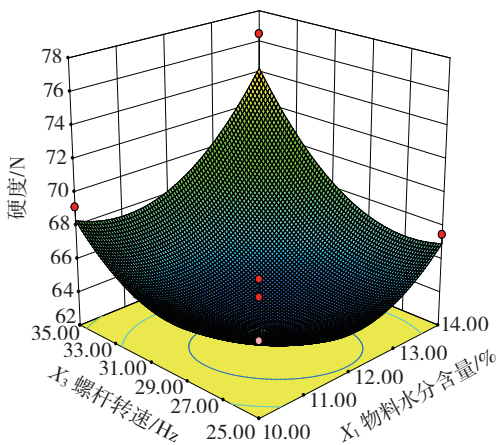
从图5可以看出,在所选的水平范围内存在极值,即为响应面上的最高点,同时也是等高线图的中心点。物料水分含量与套筒温度、物料水分含量与螺杆转速、套筒温度与螺杆转速、套筒温度与喂料转速的响应面曲面具有较为陡峭的坡面,且其等高线图为椭圆形,表明两因素具有显著交互作用,但各因素间的交互作用并不是简单的线性关系。物料水分含量与螺杆转速和喂料转速与螺杆转速的响应面曲面弯曲程度较大

且均向螺杆转速弯曲,说明螺杆转速对产品径向膨化率的影响最为显著;由回归模型分析结果可知径向膨化率相对较高时参数为物料水分含量12%、套筒温度148.25℃、螺杆转速28.04 Hz、喂料转速10.05 Hz,此时径向膨化率可以达到3.52。

图6为物料水分含量、套筒温度、螺杆转速、喂料转速之间交互作用对产品硬度影响的3D响应面和等高线。

从图6可以看出,在所选的水平范围内存在极值,





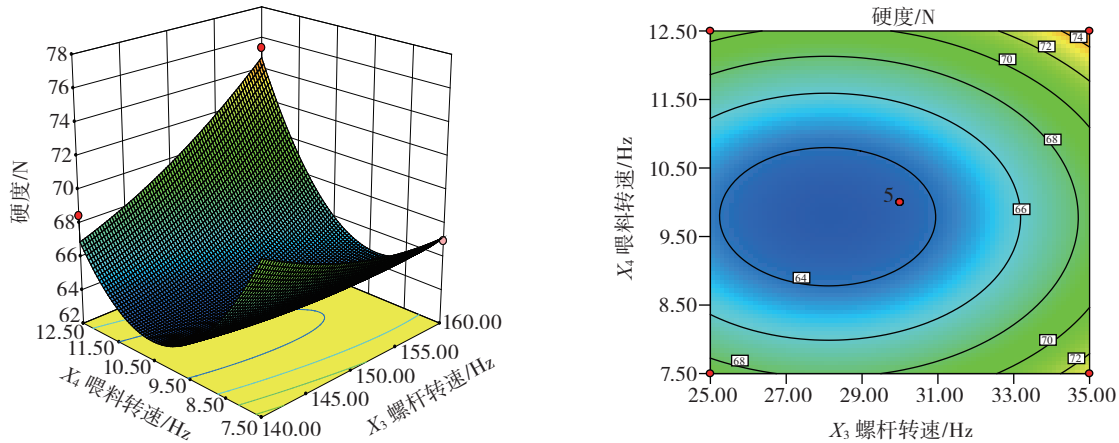


图6 物料水分含量、套筒温度、螺杆转速及喂料转速对硬度影响的响应面与等高线

Fig.6 Response surface and contour plots for the effects of interactions between water content, puffed temperature, screw speed, and feed speed on hardness

即为响应面上的最低点,同时也是等高线图的中心点。物料水分含量与套筒温度、物料水分含量与螺杆转速、套筒温度与螺杆转速、套筒温度与喂料转速的响应面曲面具有较为陡峭的坡面,且其等高线图为椭圆形,表明两因素有显著的交互作用,由方差分析 F 值检验所得,物料水分含量、套筒温度、螺杆转速、喂料转速对产品的硬度具有显著的影响作用。由回归模型分析结果可知硬度相对较低时参数为物料水分含量 11.70%、套筒温度 149.97 °C、螺杆转速 28.29 Hz、喂料转速 9.82 Hz,此时产品硬度为 63.025 N。

2.2.3 验证试验

根据产品径向膨化率和硬度最优化的参数,结合实际操作,选取的参数为物料水分含量 12%、套筒温度 149 °C、螺杆转速 28 Hz、喂料转速 10 Hz。在此基础上进行 3 次验证试验,产品径向膨化率的平均值为 3.52 ± 0.03 ,与理论预测值相一致;硬度的平均值为 (63.85 ± 0.90) N,与理论预测值的相对误差为 1.30%。说明应用响应面法优化双螺杆挤压膨化徐紫薯 8 号工艺参数合理可行,具有实际可操作性。

2.3 徐紫薯 8 号膨化圈品质特性分析

采用最佳工艺条件获得成品,对其进行品质特性测定,结果如表 5 所示。

表 5 徐紫薯 8 号膨化圈品质分析

Table 5 Quality of purple sweet potato puffed rings prepared with 'Xuzishu 8'

项目	水合特性		糊化特性							质构特性			
	WSI/%	WAI/%	糊化度/%	峰值黏度/cp	低谷黏度/cp	衰减值/cp	最终黏度/cp	回生值/cp	回生值/峰值黏度	硬度/N	咀嚼性/mJ	胶黏性/N	黏附性/mJ
膨化前	19.30±0.31	215.52±2.77	56.23±0.61	356.33±2.88	191.00±1.73	165.33±4.04	357.67±0.58	166.67±2.08	0.468±0.000				
	60.40±0.93	301.78±1.23	93.86±0.62	116.67±2.08	83.33±1.53	33.33±1.15	103.67±2.08	20.33±0.58	0.303±0.020	63.85±0.90	4.44±0.19	9.60±0.53	1.37±0.07

2.3.1 膨化圈的水合特性

由表 5 可知,徐紫薯 8 号全粉的 WSI 和 WAI 分别为 19.30% 和 215.52%,经挤压膨化后膨化圈的 WSI 和 WAI 分别为 60.40% 和 301.78%。WSI 主要反映淀粉、蛋白质、纤维等大分子物质的降解程度和结构破坏程度^[26];WAI 主要反映样品中淀粉的糊化和持水能力^[27]。徐紫薯 8 号全粉在双螺杆挤压膨化机内受到高温、高压和高剪切力的作用,物料中的蛋白、淀粉、纤维等大分子物质发生一定程度的降解,原本排列有序且紧密的空间结构遭到破坏,使得小分子可溶性物质的数量增多^[28];同时淀粉颗粒充分形成熔融态,大部分淀粉被糊化,分子作用力断裂、减弱,变得松散,使得淀粉

分子中的大量亲水基团暴露,吸水能力加强^[24,27]。另一方面,由于徐紫薯 8 号全粉被熔融膨化,使产品具有较高的膨化度,而产品的疏松、多孔结构又进一步会提高其吸水能力。产品的水合特性与徐紫薯 8 号中所含的直链淀粉、支链淀粉、蛋白质、纤维等的含量、分子大小、空间构象等有关^[29]。

2.3.2 膨化圈的糊化特性

由表 5 可知,徐紫薯 8 号全粉在挤压膨化机内受到搅拌、摩擦、剪切等作用,使得淀粉发生糊化和降解,糊化度由原来的 56.23% 增加到 93.86%。研究表明挤压膨化后的样品糊化度应在 80%~95%^[9],这与本试验结果相符合。糊化可以使其产生香味,改善产品的口

感,更易于被人体消化和吸收。

徐紫薯8号全粉经挤压膨化后,其峰值黏度、低谷黏度、衰减值、最终黏度、回生值均有不同程度的降低。挤压膨化破坏了淀粉颗粒的完整结构,使得其溶胀程度降低,峰值黏度显著降低^[30];衰减值反映了淀粉糊的热稳定性,衰减值由165.33 cp降低到33.33 cp,表明挤压膨化后产品的热糊稳定性更高^[31];回生值反映了淀粉冷糊的稳定性和老化趋势,挤压膨化后淀粉分子发生降解不易再重新缔合,使其回生值显著性降低,不易老化^[14];挤压膨化后回生值与峰值黏度的比值由0.468降低到0.303,表明挤压膨化后膨化圈的熟化度更高,口感更好^[32]。

2.3.3 膨化圈的质构特性

由表5可知,硬度、咀嚼性、胶黏性和黏附性是影响挤压膨化产品重要的质构特性指标,对产品品质起决定性作用^[33]。膨化产品的质构特性与其径向膨化率、内部分子结构以及水合特性等有关^[34],最佳工艺条件下紫甘薯膨化圈的硬度和咀嚼性分别为63.85 N和4.44 mJ,相比其他条件下硬度和咀嚼性更低。这可能是由于徐紫薯8号全粉经挤压膨化后大分子物质较大程度地发生糊化和降解,空间结构破坏程度大,氢键等作用力被减弱,变得松散,形成蓬松多孔结构,口感酥脆,硬度较低。

3 结论

在单因素试验基础上,采用响应面法对影响徐紫薯8号膨化圈的径向膨化率和硬度的工艺参数进行优化,得到各因素对其影响作用的顺序均为螺杆转速>物料水分含量>套筒温度>喂料转速。得到2个回归模型极显著,对试验拟合程度较高,能够较好地分析和预测各因素对膨化圈径向膨化率和硬度的影响。因此依据模型和实际操作确定最佳挤压膨化参数条件为物料水分含量12%、套筒温度149℃、螺杆转速28 Hz、喂料转速10 Hz,此条件下得到的产品径向膨化率为3.52,硬度为63.85 N,WSI和WAI分别为60.40%和301.78%,水合性能大大提高;糊化度为93.86%,糊化特性结果表明产品的热糊稳定性提高,同时不易老化,熟化度大大提高,口感酥脆,食用口感佳。徐紫薯8号膨化圈具有食用方便、营养丰富、无添加、口感佳等特点,符合当今休闲食品市场发展趋势,为挤压膨化技术在紫甘薯休闲食品加工中的应用和标准化生成提供借鉴与参考。

参考文献:

[1] 后猛,张允刚,刘亚菊,等. 优质鲜食及加工型甘薯新品种徐紫薯8号生产力及特性鉴定[J]. 西南农业学报, 2020, 33(1): 21-25.
KOU Meng, ZHANG Yungang, LIU Yaju, et al. Productivity and characterization of new sweetpotato cultivar xuzishu 8 for table use

and processing[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(1): 21-25.

[2] YU X S, WANG L S, ZHANG J J, et al. Understanding effects of glutelin on physicochemical and structural properties of extruded starch and the underlying mechanism[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 304: 120513.

[3] PATHAK N, KOCHHAR A. Extrusion technology: Solution to develop quality snacks for malnourished generation[J]. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2018, 7(1): 1293-1307.

[4] NIKMARAM N, LEONG S Y, KOUBAA M, et al. Effect of extrusion on the anti-nutritional factors of food products: An overview[J]. Food Control, 2017, 79: 62-73.

[5] AI Y F, CICHY K A, HARTE J B, et al. Effects of extrusion cooking on the chemical composition and functional properties of dry common bean powders[J]. Food Chemistry, 2016, 211: 538-545.

[6] MA Z Q, ZHANG N, ZHAI X T, et al. Structural, physicochemical and functional properties of dietary fiber from brown rice products treated by different processing techniques[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 182: 114789.

[7] 霍瑞,张美莉,张园园,等. 挤压膨化结合微粉碎制备高纤维谷物代餐粉及其品质评价[J]. 中国食品学报, 2022, 22(11): 228-237.
HUO Rui, ZHANG Meili, ZHANG Yuanyuan, et al. Preparation of high fiber cereal meal replacement powder by extrusion and ultra-fine grinding and evaluation of its quality[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(11): 228-237.

[8] WARAMBOI J G, GIDLEY M J, SOPADE P A. Influence of extrusion on expansion, functional and digestibility properties of whole sweetpotato flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59(2): 1136-1145.

[9] 黄浩庭. 挤压膨化对紫薯全粉理化特性影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
HUANG Haoting. Study on the effect of extrusion on the physical and chemical properties of purple sweet potato powder[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.

[10] 张文刚. 藜麦紫薯挤压膨化食品加工工艺优化及品质分析[J]. 农产品加工, 2023, 578(6): 29-33.
ZHANG Wengang. Process optimization and quality analysis of quinoa-purple sweet potato extruded food[J]. Farm Products Processing, 2023, 578(6): 29-33.

[11] 徐妹华. 一种甘薯豆粕营养膨化食品品质与质构特性相关性的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
XU Meihua. Study on the correlation between quality and texture characteristics of a kind of sweet potato soybean meal nutritious puffed food[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014.

[12] OBADI M, CHEN Y, QI Y J, et al. Effects of different pre-gelatinized starch on the processing quality of high value-added Tartary buckwheat noodles[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(6): 3462-3472.

[13] 赵志浩,刘磊,张名位,等. 预酶解-挤压膨化对全谷物糙米粉品质特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 108-116.
ZHAO Zhihao, LIU Lei, ZHANG Mingwei, et al. Combined effect of enzymatic pretreatment and extrusion on quality properties of brown rice flour[J]. Food Science, 2019, 40(1): 108-116.

[14] 李文婷,彭菁,孙旭阳,等. 双螺杆挤压对沙米复合粉理化及糊化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(4): 112-117, 125.
LI Wenting, PENG Jing, SUN Xuyang, et al. Effects of twin-screw extrusion on physicochemical and pasting properties of sand rice composite powder[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Asso-

- ciation, 2019, 34(4): 112-117, 125.
- [15] EKIELSKI A, MAJEWSKI Z, ZELAZINSKI T. Effect of extrusion conditions on physical properties of buckwheat-maize blend extrudate[J]. Polish Journal of Food & Nutrition Sciences, 2007, 57(2): 57-61.
- [16] RANI P, KUMAR A, PUROHIT S R, et al. Impact of fermentation and extrusion processing on physicochemical, sensory and bioactive properties of rice-black gram mixed flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 155-163.
- [17] CHEN B R, DANG L P, ZHANG X, et al. Physicochemical properties and micro-structural characteristics in starch from kudzu root as affected by cross-linking[J]. Food Chemistry, 2017, 219: 93-101.
- [18] 黄晓燕, 方婷, 蔡英瑜, 等. 藜麦挤压膨化脆片加工工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(2): 132-138.
- HUANG Xiaoyan, FANG Ting, CAI Yingyu, et al. Optimization of processing technology for extruded quinoa chips[J]. Food Research and Development, 2022, 43(2): 132-138.
- [19] DING Q B, AINSWORTH P, PLUNKETT A, et al. The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 73(2): 142-148.
- [20] 裴斐, 仲磊, 杨文建, 等. 蛹虫草复合谷物杂粮膨化产品的工艺优化及糊化特性[J]. 食品科学, 2016, 37(24): 47-54.
- PEI Fei, ZHONG Lei, YANG Wenjian, et al. Processing optimization and pasting properties of extruded cereal grains with added *Cordyceps militaris*[J]. Food Science, 2016, 37(24): 47-54.
- [21] 刘霭莎, 白永亮, 李敏, 等. 青稞粉挤压膨化工艺优化、品质研究及产品开发[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(15): 118-123.
- LIU Aisha, BAI Yongliang, LI Min, et al. Process optimization, quality research and product development of extrusion on barley powder[J]. Food Research and Development, 2019, 40(15): 118-123.
- [22] 王霞, 刘永吉, 董莹, 等. 杂粮代餐粉的配方设计和工艺优化[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(2): 75-82.
- WANG Xia, LIU Yongji, DONG Ying, et al. Formulation design and process optimization of meal powder substitute for cereals[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(2): 75-82.
- [23] 方浩标, 郑经绍, 许立益, 等. 紫糙米粉挤压工艺优化及其理化性质分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 195-202.
- FANG Haobiao, ZHENG Jingshao, XU Liyi, et al. Optimization of extrusion process of purple brown rice flour and its physicochemical properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(10): 195-202.
- [24] LIU Y F, CHEN J, LUO S J, et al. Physicochemical and structural properties of pregelatinized starch prepared by improved extrusion cooking technology[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 175: 265-272.
- [25] 孟悦, 刘香英, 孙洪蕊, 等. 玉米粉挤压液化工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(22): 87-92.
- MENG Yue, LIU Xiangying, SUN Hongrui, et al. Optimization of extrusion liquefaction process of corn flour[J]. Food Research and Development, 2023, 44(22): 87-92.
- [26] SAHU C, PATEL S, TRIPATHI A K. Effect of extrusion parameters on physical and functional quality of soy protein enriched maize based extruded snack[J]. Applied Food Research, 2022, 2(1): 100072.
- [27] MENEGASSI B, PILOSOFF A M R, ARÊAS J A G. Comparison of properties of native and extruded amaranth (*Amaranthus cruentus* L.-BRS Alegria) flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(9): 1915-1921.
- [28] 孟如君, 刘静, 沈汪洋, 等. 挤压膨化技术在杂粮加工业的应用研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 189-193.
- MENG Rujun, LIU Jing, SHEN Wangyang, et al. Research on the application of extrusion technology in the processing of multigrain[J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 189-193.
- [29] 肖香, 周玉蓉, 杨华平, 等. 挤压膨化对大麦全粉理化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(20): 41-45.
- XIAO Xiang, ZHOU Yurong, YANG Huaping, et al. Effect of extrusion on physicochemical properties of whole barley flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(20): 41-45.
- [30] 王子妍, 贾健辉, 张煜, 等. 不同糊化度留胚米粉理化性质和体外消化性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6147-6154.
- WANG Ziyang, JIA Jianhui, ZHANG Yu, et al. Study on physicochemical properties and *in vitro* digestibility of embryo rice flour with different degrees of dextrinization[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(19): 6147-6154.
- [31] WANG P, YANG Q Y, ZHENG D M, et al. Physicochemical and antioxidant properties of rice flour based extrudates enriched with stabilized rice bran[J]. Starch-Stärke, 2018, 70(9/10): 1800050.
- [32] 白洁, 彭义交, 刘丽莎, 等. 薯类原料膨化特性及其膨化粉品质特性[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 48-53.
- BAI Jie, PENG Yijiao, LIU Lisha, et al. Extrusion properties and quality properties of different potato materials[J]. Food Science, 2018, 39(15): 48-53.
- [33] 施建斌, 隋勇, 熊添, 等. 葛根全粉挤压膨化棒工艺优化及其品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(16): 250-258.
- SHI Jianbin, SUI Yong, XIONG Tian, et al. Process optimization and quality analysis of *Pueraria* raw puffed stick by extrusion[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(16): 250-258.
- [34] TORBICA A, HADNADEV M, DAPČEVIĆ T. Rheological, textural and sensory properties of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flour[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(6/7): 626-632.

责任编辑:冯娜
收稿日期:2023-12-01