

酶解耦合挤压膨化处理改善山药粉冲调性和预消化性的工艺优化

肖家喜^{1,2}, 段映羽^{1,2}, 张瑞芬², 刘磊^{2,3}, 邹晓琴², 马勤^{2*}, 张名位^{1,2*}

(1. 长江大学生命科学学院, 湖北荆州 434001) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

(3. 五邑大学生物科技与大健康学院, 广东江门 529020)

摘要: 为了改善山药粉的冲调性和预消化性, 建立山药粉的酶解耦合挤压膨化加工技术。该研究以广东茂名深薯山药为试验材料, 采用双螺杆挤压膨化机对山药粉进行酶解耦合挤压膨化处理。采用单因素试验和正交试验, 优化了山药粉酶解耦合挤压膨化处理工艺, 确定最佳工艺条件为: 机筒末端温区温度 180 ℃、水分含量 16%、喂料量 24 kg/h、螺杆转速 160 r/min、高温 α -淀粉酶的用量为 100 U/g。在此工艺条件下, 制备的山药粉水溶性指数 (WSI) 为 42.80%, 比相同条件下未添加淀粉酶时挤压膨化 (直接挤压膨化) 提高了 80.82%; 吸水性指数 (WAI) 为 2.60, 结块率为 1.14%, 比直接挤压膨化分别降低了 13.62% 和 94.41%; 还原糖和可溶性蛋白含量分别为 10.76% 和 2.26%, 比直接挤压膨化提高了 10.57 倍和 2.70 倍; 抗性淀粉 (RS) 含量为 38.00%, 比直接挤压膨化降低了 20.07%。这些结果表明, 酶解耦合挤压膨化处理可以改善山药粉的冲调性及其预消化性。该研究可以为山药的深加工利用技术研发提供一定的理论支持。

关键词: 山药粉; 高温 α -淀粉酶; 挤压膨化; 冲调性; 预消化性

文章编号: 1673-9078(2023)04-163-171

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.4.0559

Process Optimization for Enzymatic Hydrolysis Coupled with Extrusion Puffing to Improve Reconstitutability and Predigestibility of Chinese Yam Powder

XIAO Jiayi^{1,2}, DUAN Yingyu^{1,2}, ZHANG Ruifen², LIU Lei^{2,3}, ZOU Xiaoqin², MA Qin^{2*}, ZHANG Mingwei^{1,2*}

(1. College of Life Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434001, China)

(2. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory Processing, Guangzhou 510640, China)

(3. School of Biotechnology and Health Sciences, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

Abstract: In order to improve the reconstitutability and pre-digestibility of Chinese yam powder, the enzymatic hydrolysis coupled with extrusion puffing process of yam powder was established. In this study, Guangdong Maoming Shenshu yam was used as the experimental material, the enzymatic hydrolysis coupled with extrusion puffing of yam powder was carried out using a twin-screw extruder. Through the

引文格式:

肖家喜, 段映羽, 张瑞芬, 等. 酶解耦合挤压膨化处理改善山药粉冲调性和预消化性的工艺优化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(4): 163-171.

XIAO Jiayi, DUAN Yingyu, ZHANG Ruifen, et al. Process optimization for enzymatic hydrolysis coupled with extrusion puffing to improve reconstitutability and predigestibility of Chinese Yam powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(4): 163-171.

收稿日期: 2022-05-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1600103); 广东特支计划本土创新团队项目 (2019BT02N112); 广东省广州市科技计划项目 (202103000061); 广东省农业科学院人才引进项目 (R2019YJ-YB1003; R2020PY-JG011); 广东省财政厅专项 (粤财农[2021]161号; 粤财农[2021]170号)

作者简介: 肖家喜 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 功能食品, E-mail: 1347861804@qq.com

通讯作者: 马勤 (1991-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: qinma_gaas@163.com

共同通讯作者: 张名位 (1966-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 功能食品, E-mail: mwzhh@vip.tom.com

single factor test and orthogonal test, the enzymatic hydrolysis coupled with extrusion puffing process of yam powder was optimized, and the optimal process conditions were determined as follows: the barrel rear zone temperature, 180 °C; moisture content, 16%; feed amount, 24 kg/h; screw speed, 160 r/min; amount of α -amylase, 100 U/g. Under such process conditions, the water solubility index (WSI) of the prepared yam powder was 42.80%, which was 80.82% higher than that of extrusion puffing (direct extrusion). The water absorption index (WAI) was 2.60 and the caking rate was 1.14%, which were 13.62% and 94.41% lower than those of direct extrusion puffing, respectively. The contents of reducing sugar and soluble protein were 10.76% and 2.26%, respectively, which were 10.57 and 2.70 times higher than those of direct extrusion puffing. The content of resistant starch was 38.00%, which were 20.07% lower than that of direct extrusion puffing. These results indicated that the treatment of enzymatic hydrolysis coupled with extrusion puffing could improve the reconstitutability and predigestibility of Chinese yam powder. This study can provide some theoretical support for the research and development of deep processing and utilization technologies for Chinese Yam.

Key words: Chinese yam power; thermostable α -amylase; extrusion; dissolving quality; predigestion

山药 (*Dioscorea opposita* Thunb.) 为薯蓣科植物的根茎, 被列为药食同源食材, 具有健脾益胃助消化、生津益肺等功效。山药营养成分十分丰富, 除了淀粉、蛋白质等主要营养成分外, 还有多糖、尿囊素、多酚、皂苷等其它活性成分^[1]。随着社会的进步和人们生活节奏的加快, 人们对营养、健康、方便类食品越来越青睐。山药因其营养丰富、有益健康的价值, 被广泛的应用于山药饮料、山药酸奶、山药果冻、速食山药粉等深加工产品中^[2]。但由于山药中淀粉含量高, 在后续深加工应用中, 存在冲调性和预消化性差的问题。

挤压膨化是一种集合搅拌、混合、挤压、杀菌等加工过程于一体的加工方式, 因其生产高效、清洁节能、产品营养损失小等优点被广泛的应用于食品加工^[3]。挤压膨化过程中, 物料中淀粉、蛋白质等大分子物质在高温、高压、高剪切力的作用下裂解成小分子物质^[4], 这在一定程度上能够改善物料的冲调性和预消化性。焦昆鹏等^[2]研究发现挤压膨化处理后的山药粉水溶性指数 (WSI) 显著增加, 山药粉快消化淀粉 (RDS) 小幅度增加。刘骏^[5]研究发现挤压膨化能使淮山全粉充分糊化, 并一定程度地提高淮山全粉的 WSI 和吸水性指数 (WAI)。然而直接挤压膨化加工的产品依然存在冲调性差、预消化性不好等问题, 影响了产品的食用品质。戴晓慧等^[6]研究发现蒸汽预酶解调质处理, 可以显著的提高挤压膨化米粉的冲调性和预消化性。刘磊等^[3]研究发现, 挤压膨化前将玉米粉进行预酶解处理, 可以显著改善玉米粉的冲调性。这些研究表明挤压膨化前进行高温 α -淀粉酶预酶解处理可以有效提高产品的冲调性和预消化性, 但是此工艺存在操作复杂、能耗高等缺陷。酶解耦合挤压膨化处理技术是将酶液与物料直接混合均匀后进行挤压膨化, 具有操作简单、耗时短的优点, 且可以同样改善产品的食用品质。马永轩等^[7]研究发现, 与直接挤压膨化处理相比, 高温 α -淀粉酶-挤压膨化耦合处理可以显著改善糙米

粉的冲调性。但是目前酶解耦合挤压膨化处理对山药粉的作用尚不清楚。

因此, 本研究拟以山药粉为原料, 优化确定山药粉酶解耦合挤压膨化处理工艺, 并对比分析酶解耦合挤压膨化处理和直接挤压膨化处理对山药粉的冲调性和预消化性的改善作用差异, 旨在建立改善山药粉冲调性和预消化性的酶解挤压膨化工艺, 为山药的深加工利用提供一定的指导。

1 材料与方法

1.1 原料

山药, 广东茂名深薯; 高温 α -淀粉酶, 食品级, 酶活 150 000 U/mL, 宁夏夏盛实业集团有限公司; 猪胰 α -淀粉酶 BR, 美国 Sigma 公司; 糖化酶 (100 U/mg) BR, 上海瑞永生物科技有限公司; 考马斯亮蓝试剂盒, 碧云天生物技术有限公司; 其他试剂均为国产分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器设备

FMHE36-24 双螺杆挤压膨化机, 湖南富马科食品工程技术有限公司; HWS26 数显恒温水浴锅, 上海一恒科技有限公司; UV-1800 紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; TD6 离心机, 长沙湘智有限公司; 电热恒温鼓风干燥箱, 上海恒科科技有限公司; TECAN infinite 200 酶标仪, 瑞士 TECAN 公司; MV-1000WX 型振荡器, 日本东京理化 EYELA。

1.3 试验方法

1.3.1 山药前处理

山药清洗削皮切 2~3 mm 薄片, 热烫 90 s, 使用 $m=0.5\%$ 柠檬酸、 $m=0.5\%$ 氯化钠、 $m=0.125\%$ 氯化钙配置而成的护色剂护色 90 min, 置于温度 40 °C, 湿

度 5% 的烘箱中烘干 20 h, 烘干至水分含量 10% 左右。后将热风干燥后的山药片粉碎, 过 80 目筛, 供挤压膨化处理用。

1.3.2 山药粉酶解耦合挤压膨化处理工艺流程

量取一定量的高温 α -淀粉酶, 并将其均匀的分散于一定量的蒸馏水中, 以边搅拌边喷洒的方式与定量的山药粉混合均匀待用。将已经混合均匀的山药粉送入挤压膨化机进行挤压膨化处理, 等待挤压膨化机运行稳定后, 收集处理后的样品。样品自然冷却后, 粉碎过 60 目筛, 得到酶解耦合挤压膨化处理山药粉样品, 所制得样品放置于干燥器中密封储存备用。相同条件下, 未添加高温 α -淀粉酶直接进行挤压膨化制备的山药粉样品作为对照组。

1.3.3 山药粉酶解耦合挤压膨化处理工艺单因素试验

1.3.3.1 机筒末端温区温度(六区温度)对山药粉冲调性的影响

固定机筒前 4 个温区温度(二区温度 60 °C、三区温度 100 °C、四区温度 130 °C、五区温度 140 °C), 设置挤压膨化机机筒六区温度, 机筒六区温度梯度设定为 150、160、170、180、190 °C。固定高温 α -淀粉酶的用量为 100 U/g, 水分含量 16%, 喂料量 20 kg/h, 螺杆转速 180 r/min。

1.3.3.2 水分含量对山药粉冲调性的影响

水分含量梯度设定为 8%、12%、16%、20%、24%。固定机筒六区温度 170 °C, 高温 α -淀粉酶的用量为 100 U/g, 喂料量 20 kg/h, 螺杆转速 180 r/min。

1.3.3.3 喂料速度对山药粉冲调性的影响

喂料量梯度设定为 12、16、20、24、28 kg/h。固定机筒六区温度 170 °C, 高温 α -淀粉酶的用量为 100 U/g, 螺杆转速 180 r/min, 水分含量 16%。

1.3.3.4 螺杆转速对山药粉冲调性的影响

螺杆转速梯度设定为 140、160、180、200、220 r/min。固定机筒六区温度 170 °C, 高温 α -淀粉酶的用量为 100 U/g, 喂料量 20 kg/h, 水分含量 16%。

1.3.3.5 高温 α -淀粉酶的用量对山药粉冲调性的影响

高温 α -淀粉酶的用量梯度设定为 75、100、125、150、175 U/g。固定机筒六区温度 170 °C, 水分含量 16%, 喂料量 20 kg/h, 螺杆转速 180 r/min。

1.3.4 山药粉酶解耦合挤压膨化处理工艺优化试验

综合单因素试验的结果, 确定高温 α -淀粉酶的用量为 100 U/g, 选取了机筒末端温区温度(170、180、190 °C)、水分含量(12%、16%、20%)、喂料量(16、20、24 kg/h)、螺杆转速(160、180、200 r/min)的三个较优水平, 以 WSI 为响应值, 采用正交试验的原理设计 $L_9(3^4)$ 正交试验, 以确定最佳的挤压膨化工艺条件。试验因素水平及编码水平见表 1。

表 1 正交试验因素水平编码

Table 1 Orthogonal test factor level coding

| 水平 | 因素 | | | |
|----|-----------------|--------------|------------------|--------------------|
| | A (末端温区温度) / °C | B (水分含量) / % | C (喂料量) / (kg/h) | D (螺杆转速) / (r/min) |
| 1 | 170 | 12 | 16 | 160 |
| 2 | 180 | 16 | 20 | 180 |
| 3 | 190 | 20 | 24 | 200 |

1.3.5 指标测定方法

1.3.5.1 WSI 和 WAI 的测定

参考 Anderson 等^[8]的方法稍加修改, 准确称取 2.50 g 样品于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 去离子水, 充分混匀后以 275 r/min 的速率在室温下振荡 30 min, 然后 4 500 r/min 离心 15 min, 分离上清液和沉淀物质, 上清液倒入预先干燥至恒重的小铝盒中, 105 °C 蒸发至干燥、恒重。WSI 和 WAI 的计算公式:

$$F_{\text{WSI}} = \frac{m_1}{m} \times 100\% \quad (1)$$

$$F_{\text{WAI}} = \frac{m_2}{m} \quad (2)$$

式中:

F_{WSI} ——水溶性指数 WSI, %;

F_{WAI} ——吸水性指数 WAI;

m ——样品干质量, g;

m_1 ——上清液残余物干质量, g;

m_2 ——倾出上清液后凝胶质量, g;

1.3.5.2 结块率的测定

参考刘静波等^[9]的方法稍加修改, 称取 5.00 g 样品置于 250 mL 烧杯中, 加入 70 °C 的去离子水 100 mL, 以 10 r/min 的速率进行轻微搅拌 30 s, 使用预先干燥至恒重的 20 目筛网对其进行过滤, 用蒸馏水漂洗结块物一次, 后放置在 105 °C 干燥箱烘干至恒重。结块率的计算公式:

$$G = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

G ——结块率, %;

m ——样品干质量, g;

m_1 ——筛网及结块物的质量, g;

m_2 ——筛网的质量, g;

1.3.5.3 糊化度的测定

参考赵志浩等^[10]的方法, 准确称取 0.100 0 g 样品, 使之均匀分散在 49 mL 去离子水中, 加入 1 mL 浓度为 10.0 mol/L 的氢氧化钾溶液, 缓慢磁力搅拌 5 min, 6 000 r/min 离心 10 min, 取上清 1.0 mL, 加入 0.4 mL 浓度为 0.5 mol/L 的氯化氢溶液, 用去离子水定容至 10 mL, 再加 0.1 mL 碘液 (0.50 g 碘和 2.00 g 碘化钾定容至 50 mL), 混合均匀后 600 nm 波长下测定吸光值 A_1 ; 在测定过程中, 将去离子水体积替换为 47.5 mL, 氢氧化钾溶液体积替换为 2.5 mL, 氯化氢溶液的体积替换为 1 mL, 其他操作相同, 测得吸光值为 A_2 。糊化度计算公式:

$$H = \frac{A_1}{A_2} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

H ——糊化度, %;

A_1 ——第一次处理吸光值;

A_2 ——第二次处理吸光值。

1.3.5.4 还原糖的测定

参考文伟等^[11]的方法稍加修改, 准确称取 2.00 g 样品, 置于 100 mL 离心管中, 加去离子水 30 mL, 以 275 r/min 的速率在室温下震荡 30 min, 4 000 r/min 离心 10 min, 后取上清液定容至 50 mL, DNS 比色法测定其还原糖含量。

1.3.5.5 可溶性蛋白的测定

参考戴晓慧等^[6]方法, 使用考马斯亮蓝试剂盒进行测定。

1.3.5.6 淀粉体外消化特性的测定

参考 Englyst 等^[12]的方法并稍加修改, 准确称取 0.30 g 样品, 加入 10 mL 浓度为 0.2 mol/L、pH 值为 5.2 的醋酸缓冲液并搅拌均匀, 后加入 10 mL 混合酶液 (猪胰 α -淀粉酶和糖化酶浓度分别为 290 U/mL 和 15 U/mL), 于 37 °C、120 r/min 下水浴振荡, 反应 0、20、120 min 后分别取 1 mL 酶解液, 用 4 mL 去离子水稀释样液, 后至于沸水浴灭酶 5 min, 流水冷却, 6 000 r/min 离心 10 min, 取上清液定容。DNS 法测定定容后样液的还原糖含量。通过测定快消化淀粉 (RDS)、慢消化淀粉 (SDS) 和抗消化淀粉 (RS) 的百分含量表征大米粉的淀粉消化特性, 计算公式如下:

$$RDS = \frac{G_{20} - FG}{TS} \times 0.9 \times 100\% \quad (5)$$

$$SDS = \frac{G_{120} - FG}{TS} \times 0.9 \times 100\% \quad (6)$$

$$RS = 100 - RDS - SDS \quad (7)$$

式中:

RDS——快消化淀粉百分含量, %;

SDS——慢消化淀粉百分含量, %;

RS——抗消化淀粉百分含量, %;

FG——山药粉酶解消化前游离的还原糖含量, mg;

G_{20} ——山药粉酶解消化 20 min 的还原糖含量, mg;

G_{120} ——山药粉酶解消化 120 min 的还原糖含量, mg;

TS——山药粉中总淀粉的含量, mg;

1.3.6 数据统计与分析

所有试验平行测定 3 次, 数据表示为平均值 \pm 标准差; 实验数据采用 SPSS 20.0 统计软件中单因素方差分析 (Duncan 检验、显著性水平为 $P < 0.05$) 和独立样本 t 检验分析; 应用 Origin 对数据进行基本作图。

2 结果与讨论

2.1 山药粉酶解耦合挤压膨化处理工艺单因素试验结果

2.1.1 机筒六区温度对山药粉冲调性的影响

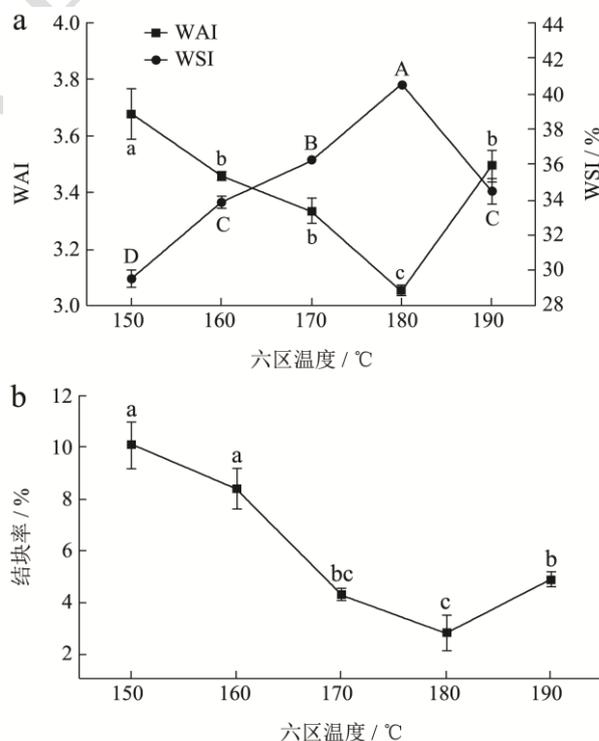


图 1 六区温度对山药粉 WSI、WAI (a) 和结块率 (b) 的影响

Fig.1 Effects of six-zone temperature on WSI, WAI and agglomeration rate

注: 同一指标无相同字母代表显著性差异 ($P < 0.05$), 下同。

由图 1 可知,随着六区温度的升高,山药粉的 WSI 呈现先增加后减少的趋势,WAI 和结块率呈现先减小后增大的趋势。当温度到达 180 °C 时,山药粉的 WSI 达到最大值 40.53%,山药粉的 WAI 和结块率达到最小值,分别为 3.05 和 2.80%。这可能是随着温度升高,淀粉糊化,纤维素、蛋白质等大分子物质发生裂解反应,酶解作用加强,大分子物质降解增加,水溶性物质增多,WSI 逐渐升高,WAI、结块率减小^[13]。当温度超过 180 °C 时,这可能是由于温度过高,高温 α -淀粉酶也会过早失活,酶解淀粉效果降低,而且在高温条件下淀粉易发生焦化反应,阻碍淀粉等大分子物质的降解,故 WSI 下降,WAI 和结块率上升。

2.1.2 水分含量对山药粉冲调性的影响

由图 2 可知,随着物料中水分含量的增加,山药粉的 WSI 逐渐增加,WAI 和结块率逐渐降低,当物料中水分含量达到 16% 时,山药粉的 WSI 达到最大值 35.34%,WAI 和结块率达到最小值,分别为 3.09 和 0.90%。这可能是当物料含水量增加到适应范围内时,淀粉迅速糊化降解,高温 α -淀粉酶作用增强,将淀粉切割成小分子物质。当水分含量超过 16% 时,山药粉的 WSI 逐渐降低,WAI 和结块率逐渐增加。这可能是当水分含量过高时,挤出物水分残留高,膨化率变低,未能使其形成疏松多孔的结构,导致 WSI 降低,WAI、结块率升高^[14]。

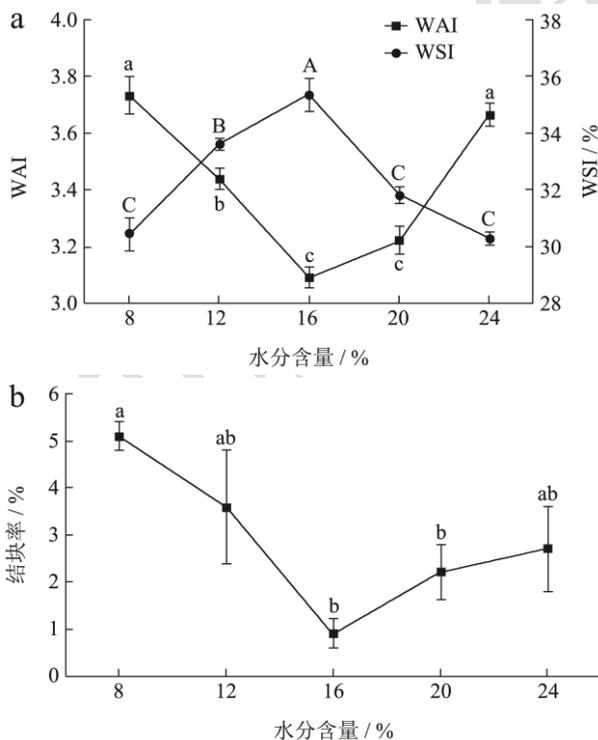


图 2 水分含量对山药粉 WSI、WAI (a) 和结块率 (b) 的影响
Fig.2 Effect of moisture content on WSI, WAI and caking rate

2.1.3 喂料量对山药粉冲调性的影响

由图 3 可知,随着喂料量的增加,山药粉的 WSI 逐渐增加,WAI 和结块率逐渐降低,当喂料量达到 20 kg/h 时,山药粉的 WSI 达到最大值 32.75%,WAI 和结块率达到最小值,分别为 2.86 和 1.40%。这可能是当喂料量过低时,挤压膨化机腔体中物料过少,物料自身及其与腔体之间不能进行充分的挤压和摩擦,导致能量低,淀粉颗粒糊化不完全,故 WSI 较低,WAI、结块率较高。当喂料量超过 20 kg/h 时,喂料量过大使单位物料在机腔内的停留时间减少,酶作用受限,导致山药粉的 WSI 降低,WAI 和结块率增加。

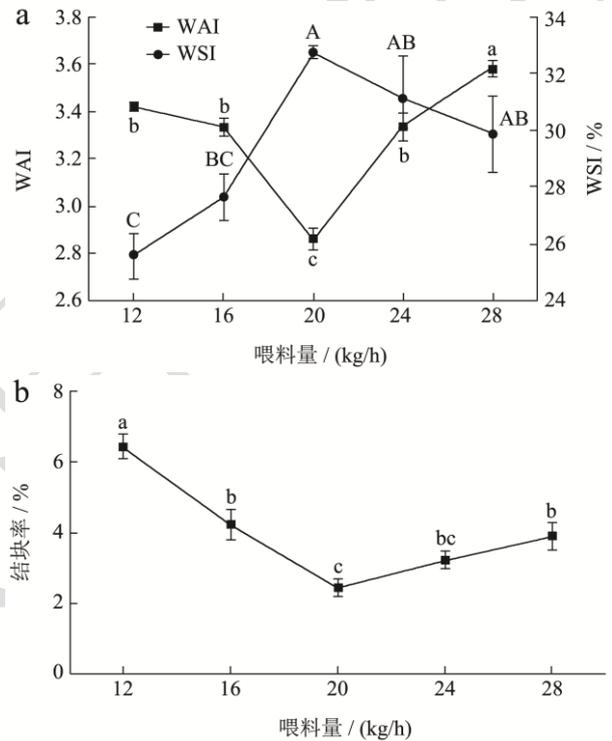


图 3 喂料量对山药粉 WSI、WAI (a) 和结块率 (b) 的影响
Fig.3 Effect of feed amount on WSI, WAI and caking rate

2.1.4 螺杆转速对山药粉冲调性的影响

由图 4 可知,随着螺杆转速的增加,山药粉的 WSI 逐渐增加,WAI 和结块率逐渐降低,当螺杆转速达到 180 r/min 时,山药粉 WSI 达到最大值 34.53%,WAI 和结块率达到最低值,分别为 3.01 和 2.00%。这可能是在螺杆转速较低范围时,螺杆转速的升高,使得物料受螺杆的剪切作用和物料与腔体之间的摩擦产热加强,破坏了淀粉颗粒的紧密结构,使得高温 α -淀粉酶酶解淀粉作用增强,所以 WSI 增大,WAI 和结块率降低。当螺杆转速超过 180 r/min 时,过高的螺杆转速使物料在机筒内滞留时间缩短,并减少酶和淀粉的作用时间^[15],导致 WSI 降低,WAI 和结块率升高。

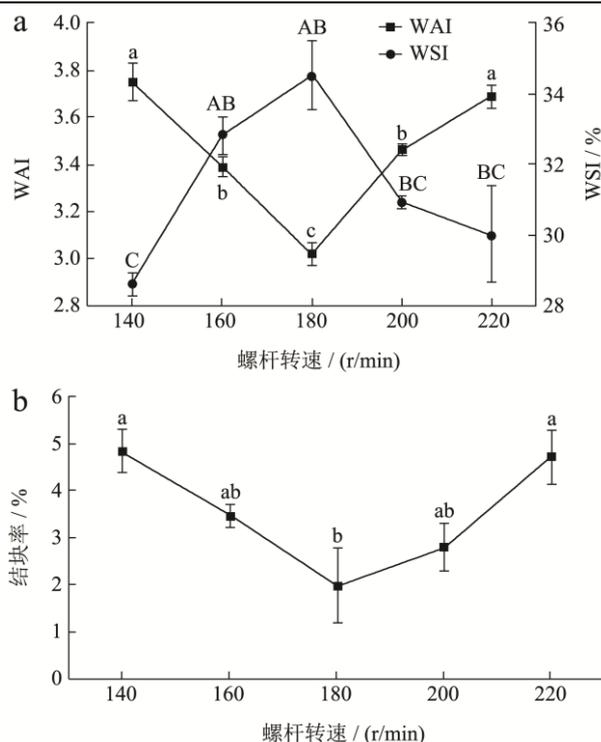


图4 螺杆转速对山药粉 WSI、WAI (a) 和结块率 (b) 的影响

Fig.4 Effect of screw speed on WSI, WAI and caking rate

2.1.5 高温 α -淀粉酶用量对山药粉冲调性的影响

由图 5 可知, 随着高温 α -淀粉酶用量的增加, 淀粉被水解程度增强, 山药粉的 WSI 逐渐增加, WAI 和结块率逐渐减低。当高温 α -淀粉酶用量超过 100 U/g 时, 随着酶用量的加大, 山药粉 WSI 并未显著性增加, 说明在该条件下, 高温 α -淀粉酶酶解淀粉的能力达到了饱和。故从工业生产上节省经济的角度考虑, 确定后续正

交试验的酶用量为 100 U/g, 不再对该因素进行优化。

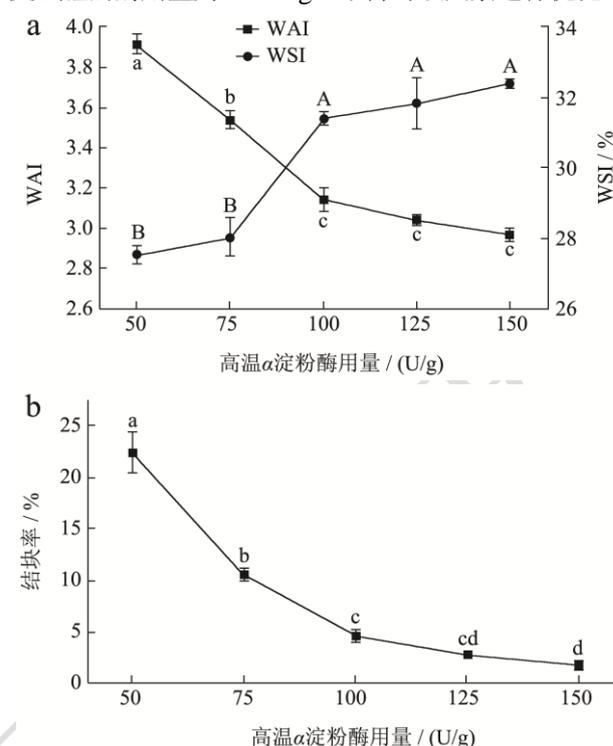


图5 高温 α -淀粉酶用量对山药粉 WSI、WAI (a) 和结块率 (b) 的影响

Fig.5 Effect of high temperature α -amylase addition on WSI, WAI and caking rate

2.2 山药粉酶解耦合挤压膨化处理工艺的优

化试验

表 2 WSI 正交试验结果

Table 2 The results of orthogonal test of WSI

| 实验号 | A 六区温度/°C | B 水分含量/% | C 喂料量/(kg/h) | D 螺杆转速/(r/min) | WSI/% |
|-------|-----------|----------|--------------|----------------|---|
| 1 | 170 | 12 | 16 | 160 | 29.21 |
| 2 | 170 | 16 | 20 | 180 | 30.62 |
| 3 | 170 | 20 | 24 | 200 | 30.40 |
| 4 | 180 | 12 | 20 | 200 | 38.81 |
| 5 | 180 | 16 | 24 | 160 | 41.19 |
| 6 | 180 | 20 | 16 | 180 | 36.80 |
| 7 | 190 | 12 | 24 | 180 | 29.63 |
| 8 | 190 | 16 | 16 | 200 | 29.21 |
| 9 | 190 | 20 | 20 | 160 | 30.20 |
| ----- | | | | | |
| K1 | 30.08 | 32.55 | 31.74 | 33.53 | |
| K2 | 38.93 | 33.67 | 33.21 | 32.35 | |
| K3 | 29.68 | 32.47 | 33.74 | 32.81 | |
| R | 9.25 | 1.21 | 2.00 | 1.18 | |
| ----- | | | | | |
| 因素主次 | | | | | A>C>B>D |
| 最优组合 | | | | | A ₂ B ₂ C ₃ D ₁ |

表3 试验结果方差分析表

Table 3 Analysis of variance table of test results

| 方差来源 | III类平方和 | f | 平均方平方 | F | 显著性 |
|----------|----------------------|----|------------|------------|-------|
| 修正模型 | 539.961 ^a | 8 | 67.495 | 78.935 | 0.000 |
| 截距 | 29 272.465 | 1 | 29 272.465 | 34 233.836 | 0.000 |
| A (六区温度) | 502.307 | 2 | 251.154 | 293.722 | 0.000 |
| B (水分含量) | 9.481 | 2 | 4.741 | 5.544 | 0.013 |
| C (喂料量) | 20.698 | 2 | 10.349 | 12.103 | 0.000 |
| D (螺杆转速) | 7.474 | 2 | 3.737 | 4.371 | 0.028 |
| 误差 | 15.391 | 18 | 0.855 | | |
| 总计 | 29 827.818 | 27 | | | |
| 修正后总计 | 555.353 | 26 | | | |

注: $R^2=0.972$ (调整后 $R^2=0.960$)。

单因素实验中,采用 WSI、WAI、结块率三个指标考察了山药粉的冲调性,通过进一步分析 WSI 与 WAI 和结块率之间的相关性可知,WSI 与 WAI 及结块率均呈显著的负相关关系。因此,为了便于评价正交优化的试验结果,本研究选取 WSI 作为单一评价指标。

2.2.1 正交试验结果

山药粉酶解耦合挤压膨化处理正交优化工艺结果如表 2 所示,以 WSI 为评价指标,通过极差分析可以得到,各因素影响的主次顺序为 $A>C>B>D$,即六区温度>喂料量>水分含量>螺杆转速。酶解耦合挤压膨化处理山药粉的最佳工艺条件为 $A_2B_2C_3D_1$,即高温 α -淀粉酶用量为 100 U/g、六区温度 180 °C、水分含量 16%、喂料量 24 kg/h、螺杆转速 160 r/min。

由表 3 方差分析表可知,因素 A (六区温度)、因素 B (喂料量)、因素 C (水分含量)和因素 D (螺杆转速)均对样品的 WSI 有显著性影响。

2.2.2 验证试验

为进一步研究优化工艺的合理性及可靠性,将正交试验得到的最优工艺 $A_2B_2C_3D_1$,即六区温度 180 °C、水分含量 16%、喂料量 24 kg/h、螺杆转速 160 r/min、高温 α -淀粉酶的用量为 100 U/g,进行验证试验,重复 3 次。在该工艺条件下制备的山药粉的 WSI 为 42.80%,优于正交试验中所有组别;因此确定该条件为酶解耦合挤压膨化处理山药粉的最佳制备工艺条件。

2.3 酶解耦合挤压膨化处理对山药粉冲调性和预消化性的影响

2.3.1 酶解耦合挤压膨化处理对山药粉冲调性的影响

酶解耦合挤压膨化处理对山药粉冲调性的影响如

表 4 所示。由表可知,酶解耦合挤压膨化处理的山药粉 WSI 为 42.80%,WAI 为 2.60,结块率为 1.14%。与直接挤压膨化处理的山药粉相比,添加高温 α -淀粉酶处理的山药粉的 WSI 提高了 80.82%,WAI 和结块率分别降低了 13.62%和 94.41%,说明酶解耦合挤压膨化处理工艺可以有效的改善山药粉的冲调性。Xu 等^[16]研究发现与直接挤压膨化相比,高温 α -淀粉酶辅助挤压膨化后的精米和糙米 WSI 增加,WAI 减小;Myat 等^[17]研究发现高温 α -淀粉酶辅助挤压膨化处理制备的玉米粉相对于未添加高温 α -淀粉酶挤压的样品相比,WSI 和还原糖显著增加,WAI 显著降低,这些都与本研究一致。在挤压膨化过程中,在挤压机的高温、高剪切力以及高温 α -淀粉酶酶解的共同作用下,淀粉的晶体结构被破坏,淀粉分子糊化分解为还原糖、小分子糊精等可溶性糖。上述原因导致山药粉的 WSI 提高,WAI 和结块率降低。

表 4 酶解耦合挤压膨化处理对山药粉冲调性的影响

Table 4 Effects of amylase assisted extrusion treatment on the reconstitution of Chinese yam powder

| 项目 | WSI/% | WAI | 结块率/% |
|----------|--------------------|-------------------|-------------------|
| 直接挤压膨化 | 23.67 \pm 0.80 | 3.01 \pm 0.05 | 20.40 \pm 1.40 |
| 酶解耦合挤压膨化 | 42.80 \pm 0.40** | 2.60 \pm 0.11** | 1.14 \pm 0.50** |

注: **表示与直接挤压膨化制备样品相比差异极显著 ($P<0.01$) 水平,未标*表示与直接挤压膨化制备样品比较差异不显著 ($P>0.05$),下同。

2.3.2 酶解耦合挤压膨化处理对山药粉糊化度、还原糖和可溶性蛋白的影响

酶解耦合挤压膨化处理对山药粉糊化度、还原糖和可溶性蛋白的影响如表 5 所示。由表可知,酶解耦合挤压膨化处理的山药粉糊化度为 82.97%,还原糖含量为 10.76%,可溶性蛋白含量为 2.26%。与直接挤压膨化处理的山药粉相比,添加高温 α -淀粉酶处理的山

药粉还原糖和可溶性蛋白分别提高了 10.57 倍和 2.70 倍,糊化度降低了 12.82%,说明酶解耦合挤压膨化处理工艺可以进一步改善挤压膨化山药粉的预消化性。马永轩等^[7]研究发现,3 种全谷物糙米经高温 α -淀粉酶-挤压膨化耦合处理后,其还原糖和可溶性蛋白质都有显著提高,糊化度均显著降低,与本研究一致。淀粉在高温 α -淀粉酶和挤压膨化的共同作用下,部分淀粉分子水解成小分子糊精和还原糖,导致还原糖含量大幅度增加,蛋白质分子在高温和剪切的作用下,部分蛋白质被降解成多肽和氨基酸,可溶性蛋白含量增加。糊化度的降低可能存在两方面原因,一方面是高温 α -淀粉酶导致山药淀粉水解,山药物料粘度降低,在挤压膨化机腔体中停留时间缩短,导致其糊化度降低;另一方面挤压膨化过程中糊化的淀粉被高温 α -淀粉酶部分水解也是导致其糊化度降低的原因^[18]。

表 5 酶解耦合挤压膨化处理对山药粉糊化度、还原糖和可溶性蛋白的影响

Table 5 Effects of amylase assisted extrusion treatment on gelatinization degree, reducing sugar and soluble protein of yam powder

| 项目 | 糊化度/% | 还原糖/% | 可溶性蛋白/% |
|----------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 直接挤压膨化 | 95.17 \pm 1.30 | 0.93 \pm 0.16 | 0.61 \pm 0.13 |
| 酶解耦合挤压膨化 | 82.97 \pm 0.96** | 10.76 \pm 0.27** | 2.26 \pm 0.27** |

2.3.3 酶解耦合挤压膨化处理对山药粉淀粉体外消化特性的影响

RS 是指在健康人体小肠中不易被消化吸收的淀粉。山药因其高含量的抗性淀粉,导致其预消化性差、不易被人体吸收利用^[2],前人诸多研究表明^[19,20]挤压膨化可以有效改善其消化特性。

酶解耦合挤压膨化处理对山药粉淀粉体外消化特性的影响如表 6 所示。由表可知,酶解耦合挤压膨化处理的山药粉 RDS 含量为 57.88%、SDS 含量为 4.12%、RS 含量为 38.00%,与直接挤压膨化处理的山药粉相比,添加高温 α -淀粉酶处理的山药粉 RDS 含量提高了 18.53%、SDS 含量增加了 13.19%、RS 含量降低了 20.07%,说明酶解耦合挤压膨化处理工艺可以进一步改善挤压膨化山药粉的消化特性。张冬媛等^[20]研究中比较了高温 α -淀粉酶-挤压膨化处理的糙米与直接挤压膨化处理的糙米的消化特性,结果显示高温 α -淀粉酶处理可以提高挤压膨化糙米的 RDS 含量并降低抗性淀粉的含量,与本研究结果一致。这可能是由于在高温 α -淀粉酶的配合下,挤压膨化处理对淀粉颗粒的破坏程度更大,更有利于淀粉酶的水解作用。有研究表明,还原糖的增加有降低糊化淀粉重结晶的作用^[6],经过高温 α -淀粉酶耦合挤压膨化处理,山药

粉中还原糖的含量相对较高,有利于抑制抗性淀粉的形成。

表 6 酶解耦合挤压膨化处理对山药粉淀粉体外消化特性的影响

Table 6 Effects of amylase assisted extrusion treatment on *in vitro* digestion characteristics of yam powder starch

| 项目 | RDS/% | SDS/% | RS/% |
|----------|--------------------|-----------------|--------------------|
| 直接挤压膨化 | 48.83 \pm 0.11 | 3.63 \pm 0.38 | 47.54 \pm 0.73 |
| 酶解耦合挤压膨化 | 57.88 \pm 0.93** | 4.12 \pm 0.40 | 38.00 \pm 0.77** |

3 结论

本文采用酶解耦合挤压膨化处理技术制备山药粉,以山药粉的 WSI、WAI 和结块率为指标,探究机筒末端温区温度、喂料量、水分含量、螺杆转速、高温 α -淀粉酶用量对山药粉的影响,并以 WSI 为指标通过正交实验进行优化确定山药粉制备的最佳工艺,并对该最佳工艺制备的山药粉的冲调性和预消化性进行分析。结果显示酶解耦合挤压膨化处理制备山药粉的最佳工艺条件为:机筒末端温区温度 180 $^{\circ}$ C、水分含量 16%、喂料量 24 kg/h、螺杆转速 160 r/min、高温 α -淀粉酶的用量为 100 U/g。在此工艺条件下,制备的山药粉 WSI 为 42.80%,WAI 为 2.60;糊化度为 82.97%,还原糖含量为 10.76%,可溶性蛋白含量为 2.26%;快消化淀粉含量为 57.88%,慢消化淀粉含量为 4.12%,抗性淀粉含量为 38.00%。与直接挤压膨化处理的山药粉相比,山药粉的 WSI 提高了 80.82%,WAI 和结块率分别降低了 13.62%和 94.41%;糊化度降低了 12.82%,还原糖和可溶性蛋白分别提高了 10.57 倍和 2.70 倍;RDS 含量提高了 18.53%;SDS 含量增加了 13.19%;RS 含量降低了 20.07%。结果表明,酶解耦合挤压膨化处理可以有效改善山药粉的冲调性及预消化性。本研究可以为山药深加工利用提供一定的理论依据和技术支撑。

参考文献

- [1] 舒锐,李晓龙,聂玉杰,等.不同品种山药主要营养成分的比较分析[J].种子科技,2019,37(13):33-34.
- [2] 焦昆鹏,马丽苹,罗磊,等.挤压膨化对山药全粉理化性质、加工特性和淀粉体外消化性的影响[J].食品科技,2022,47(1):159-165.
- [3] 刘磊,邱婷婷,赵志浩,等.预酶解-挤压膨化工艺改善玉米全粉冲调分散性[J].现代食品科技,2018,34(10):141-146.
- [4] DING Qingbo, Ainsworth P, Tucker G, et al. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(3): 283-289.

- [5] 刘骏. 淮山全粉挤压膨化特性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- [6] 戴晓慧, 张名位, 马永轩, 等. 蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺改善速食米粉冲调分散性和预消化性[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 200-209.
- [7] 马永轩, 张名位, 张瑞芬, 等. 高温 α -淀粉酶-挤压膨化耦合处理对全谷物糙米粉品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2020, 38(1): 111-116.
- [8] R A Anderson, H F Conway, A J Peplinski. Gelatinization of corn grits by roll cooking, extrusion cooking and steaming [J]. *Starch - Strke*, 1970, 22: 130-135.
- [9] 刘静波, 马爽, 刘博群, 等. 喷雾干燥条件对高铁蛋粉溶解特性的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 365-371.
- [10] 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.
- [11] 文伟, 张名位, 刘磊, 等. 乳酸菌发酵对脱脂米糠中糖和酚类物质含量的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(2): 137-141.
- [12] Englyst H N, Kingman S M, Cummings J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 46(Suppl 2): S33.
- [13] 蒋长兴, 魏益民, 张波. 小米挤压膨化加工工艺参数研究[J]. 粮食与饲料工业, 2005, 5: 20-22.
- [14] 张冬媛, 张名位, 邓媛元, 等. 发芽-挤压膨化-高温 α -淀粉酶协同处理改善全谷物糙米粉冲调性的工艺优化[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(6): 106-112.
- [15] 吴卫国, 杨伟丽, 唐书泽, 等. 双螺杆挤压机操作参数对早餐谷物产品特性影响的研究[J]. 食品科学, 2005, 4: 150-155.
- [16] Xu E, Wu Z, Long J, et al. Effect of thermostable α -amylase addition on the physicochemical properties, free/bound phenolics and antioxidant capacities of extruded hulled and whole rice [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2015, 8: 1958-1973.
- [17] Lin, Myat, GiHyung, et al. Effect of thermostable α -amylase injection on mechanical and physicochemical properties for saccharification of extruded corn starch [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2014, 94: 288-295.
- [18] 冯秋娟, 肖志刚, 郑广钊, 等. 低温加酶挤压玉米淀粉糊化度的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(8): 287-290, 294.
- [19] 邹建, 许美娟, 李斌. 蒸煮方式对怀山药与普通山药食用品质、预测血糖指数和体外消化性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 200-211.
- [20] 张冬媛, 邓媛元, 张名位, 等. 发芽-挤压-淀粉酶协同处理对速食糙米粉品质特性的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 759-768.