

莲子淀粉重组米制备工艺优化

郭雅卿, 贾健辉, 王绪昆, 高 帅, 窦博鑫, 张 智, 张 娜, 刘 颖

Optimization of Preparation Technology of Lotus Seed Starch Reconstituted Rice

GUO Yaqing, JIA Jianhui, WANG Xukun, GAO Shuai, DOU Boxin, ZHANG Zhi, ZHANG Na, and LIU Ying

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040034>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

马铃薯全粉-碎米混合粉的糊化特性及其挤压重组米品质

Pasting Properties of Rice Powders Blending with Potato Granule and the Quality of Restructured Potato Rice

食品工业科技. 2018, 39(17): 94-98,111

挤压重组紫薯米工艺优化 及其抗氧化活性研究

Optimization of Process Parameters and Antioxidant Activity of Extrusion Recombinant Purple Sweet Potato Rice

食品工业科技. 2020, 41(8): 137-142,150

响应面法优化莲子红衣肉丸加工工艺

Optimization of Processing Technology of Lotus Seed Red-skin Meatballs by Response Surface Methodology

食品工业科技. 2019, 40(19): 170-174

二次挤压制备重组米的响应面优化及品质研究

Response Surface Optimization and Quality Research during the Preparation of Recombinant Rice by Two Times of Extrusion Shaped

食品工业科技. 2019, 40(16): 133-139

模糊数学感官评价法结合响应面法优化即食莲子片的工艺研究

Study on Optimization of Instant Lotus Seed Slices Processing by Fuzzy Mathematical Evaluation Method and Response Surface Methodology

食品工业科技. 2020, 41(1): 158-164

藜麦酸奶混菌发酵工艺优化及品质与风味评价

Optimization of Fermentation Process and Evaluation of Quality and Flavor of Quinoa Yogurt Produced by Mixed Lactic Acid Bacteria

食品工业科技. 2021, 42(18): 197-208



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郭雅卿, 贾健辉, 王绪昆, 等. 莲子淀粉重组米制备工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 172–179. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040034

GUO Yaqing, JIA Jianhui, WANG Xukun, et al. Optimization of Preparation Technology of Lotus Seed Starch Reconstituted Rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(1): 172–179. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040034

莲子淀粉重组米制备工艺优化

郭雅卿¹, 贾健辉^{1,2}, 王绪昆¹, 高 帅¹, 窦博鑫¹, 张 智³, 张 娜^{1,*}, 刘 颖^{1,*}

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028;

2. 牡丹江师范学院生命科学与技术学院, 黑龙江牡丹江 157011;

3. 黑龙江省北大荒米业集团有限公司, 黑龙江哈尔滨 150090)

摘 要: 以不同比例莲子淀粉与碎米粉进行混合后挤压制备重组米, 通过对混合粉的糊化特性和重组米的感官品质、质构特性及蒸煮损失率的分析, 确定了莲子淀粉重组米的配比。以物料含水量、模头温度、螺杆转速为影响因素, 采用响应面试验优化了莲子淀粉重组米挤压的最佳工艺条件。结果表明: 随着莲子淀粉添加量的增加, 混合粉的峰值黏度、谷值黏度、崩解值、最终黏度及回生值等均逐渐增加; 感官评分先增大后减小, 在莲子淀粉添加量为 30% 时较高; 质构特性中硬度逐渐增大, 弹性、咀嚼性、黏聚性先增大后减小, 在莲子淀粉添加量为 30% 时最大; 蒸煮损失率逐渐增大。综合分析, 重组米品质在莲子淀粉添加量为 30% 时达到最佳。重组米的最佳挤压条件为: 物料含水量 40%、螺杆转速 210 r/min、模头温度 95 ℃ 时, 重组米评分为 69.13 分。

关键词: 莲子淀粉, 碎米, 挤压重组米, 品质, 工艺优化

中图分类号: TS210.4

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)01-0172-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040034

本文网刊:



Optimization of Preparation Technology of Lotus Seed Starch Reconstituted Rice

GUO Yaqing¹, JIA Jianhui^{1,2}, WANG Xukun¹, GAO Shuai¹, DOU Boxin¹,
ZHANG Zhi³, ZHANG Na^{1,*}, LIU Ying^{1,*}

(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. College of Life Science and Technology, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157011, China;

3. Heilongjiang Beidahuang Rice Group Co., Ltd., Harbin 150090, China)

Abstract: Mixing different ratios of lotus seed starch and broken rice flour to prepare extruding the recombinant rice, the proportion of reconstituted rice with lotus seed starch was determined by analyzing the gelatinization characteristics of the mixed powders and the sensory quality, textural properties, and cooking loss rates of the reconstituted rice. The optimum extrusion conditions of lotus seed starch reconstituted rice were optimized by response surface methodology with water content, die temperature and screw speed as factors. The results showed that with the increasing content of lotus seed starch, peak viscosity, valley viscosity, disintegration value, final viscosity and retrogradation value of the mixed powders increased. The sensory score increased and then decreased, and the sensory score was higher when lotus seed starch content was 30%. In texture characteristics, hardness increased gradually, while elasticity, chewiness and cohesiveness increased at first and then decreased, and reached the maximum when lotus seed starch content was 30%. The cooking loss rate increased gradually. In a comprehensive analysis, the reconstituted rice quality reached its best at 30% lotus seed starch addition. The results showed that the optimum extrusion conditions were as follows: The moisture content of the material was 40%, the screw speed was 210 r/min, and the die temperature was 95 ℃, the score of the recombinant rice was 69.13.

Key words: lotus seed starch; broken rice; extruded reconstituted rice; quality; process optimization

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项 (2020ZX08B02); 哈尔滨商业大学青年后备项目 (2019CX32); 黑龙江省国家级大学生创新训练计划项目 (202010240008)。

作者简介: 郭雅卿 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: gyaqing1998@163.com。

* 通信作者: 张娜 (1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品安全, E-mail: foodzhangna@vip.163.com。

刘颖 (1968-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 植物蛋白工程与营养功能因子研究, E-mail: 154057693@qq.com。

莲子是我国的特产经济作物,南北各省均有种植,既可食用又可入药^[1-2]。莲子作为一种滋补食品,含有多酚、蛋白质和多糖等多种功能性物质,还具有抗氧化、降血脂、降血糖等功效^[3-4]。淀粉在莲子组成中约占 50%,其中直链淀粉含量约为 42%,是高直链淀粉含量的淀粉^[5-6]。目前市面上多为干莲、莲心、莲蓉馅料等莲子制品,但将莲子淀粉应用于生产重组米的相关研究还较少^[7]。稻谷在经过碾磨加工时,由于干燥过度、过快等原因会使整米产生裂纹,产生破损后得到碎米^[8]。与完整米粒相比,碎米与其含有相似的化学组成与营养成分,但价格仅为普通大米的 1/3~1/2,多用作饲料或制造酒、醋、糖醇、淀粉等的原料^[9-10]。碎米的不完全利用造成了良好谷物资源的浪费,因此,提高碎米的综合利用,对提高其利用率及附加值有着重要的作用。

重组米是一种与大米形状相似,原料多为富含淀粉的材料,经过挤压、干燥后加工而成的颗粒状产品^[11]。原料中的部分成分会在高温、高压及高剪切力的条件下发生不同程度的变化,其结构变化的情况与挤压条件有关,如机筒温度、水分含量、进料速度、螺杆转速等^[12-13]。目前关于重组米的生产工艺研究中,多是以大米和杂粮为原料,而少见以莲子或莲子淀粉为原料。何忠源等^[14]以杂粮为原料,采用正交试验方法优化重组米的生产工艺,研究机筒温度、螺杆转速及原料水分对感官品质的影响。MORETTI 等^[15]以大米为原料,添加硫酸亚铁及焦磷酸盐,再利用挤压膨化技术制备得到营养重组米。将莲子淀粉与碎米粉按一定比例进行混合后,通过挤压工艺制成重组米,不仅可以提高碎米的附加值,还增加了对莲子产品的开发及利用^[16]。

本试验将莲子淀粉与碎米粉以不同配比进行混合后再挤压制备重组米,通过对混合粉的糊化特性和莲子淀粉重组米的感官品质、质构特性及蒸煮损失率等的分析,确定了莲子淀粉的最佳添加量;利用单因素实验探究物料含水量、模头温度、螺杆转速对莲子淀粉重组米品质的影响,并在此结果下通过响应面试验得到莲子淀粉重组米的最佳挤压条件。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

莲子 湖南梧柏塘生态农业有限公司;碎米 五常市宝鑫水稻种植专业合作社。

DSE-25 双螺杆挤压膨化机 德国布拉本德公司;DHP-9162 电热鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司;FW100 高速万能粉碎机 苏州江东精密仪器有限公司;TX3202L 电子天平 日本岛津制作所;TA-XT2i 质构仪 上海瑞盼智能科技有限公司;TecMaster instrumen 快速粘度分析仪 波通瑞华科学仪器(北京)有限公司;EZ26BS05 苏泊尔蒸锅 浙江苏泊尔股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 莲子淀粉的提取 参考赵蓓蓓^[3]的方法并进行修改。将适量去芯莲子浸泡 6 h 于 3 倍体积的蒸馏水中。过滤后,放入食品级高速粉碎机后倒入 3 倍体积的蒸馏水进行破碎,浆液过 120 目尼龙滤布,将滤液静置沉淀 8 h。将沉淀用蒸馏水冲洗两次,后用 95% 乙醇溶液清洗一次,进一步洗除残留物质。最终将其平铺在托盘中,45 ℃ 下烘干 24 h,磨粉并过 100 目筛。

1.2.2 混合粉的制备 将碎米粉过 100 目筛后与莲子淀粉混合,按莲子淀粉比例分别为 20%、25%、30%、35%、40% 的比例分别与碎米混合,得到不同莲子淀粉含量的混合粉,备用。

1.2.3 重组米的制备 将莲子淀粉与碎米粉混合均匀后,利用双螺杆挤压膨化机在固定挤压模具、喂料速度下进行挤压重组,固定物料含水量 30%、模头温度 90 ℃、螺杆转速 180 r/min,所得到的重组米在 45 ℃ 下烘干后备用。

1.2.4 糊化特性的测定 使用快速黏度分析仪(RVA)对混合粉进行糊化特性的测定,称取莲子淀粉-碎米混合粉 3.00 g,调节水分含量至 14%,倒入专用铝筒内,添加 25 mL 蒸馏水,放置在仪器上测定。所有程序参考 GB/T24852-2010 标准及文献执行^[17]。

1.2.5 感官品质评价 莲子淀粉重组米的感官评价表根据参考文献^[18]及 GB/T 15682-2008 进行制定,评价组由 10 名食品专业的学生组成。将 10 g 重组米米粒放于瓷盘中,进行米粒的感官评分;再将 10 g 米粒放于蒸饭铝锅内,倒入 7 mL 蒸馏水,在锅中蒸 30 min 后,关火等待 10 min 后取出,进行米饭的感官评分。

感官评分 = 米粒感官评分 × 30% + 米饭感官评分 × 70%

表 1、表 2 分别为重组米米粒和米饭的感官评分标准。

表 1 重组米米粒感官评分标准
Table 1 Sensory scoring criteria for reconstituted rice grains

评定项目(分)	评分标准	分数(分)
颜色(30)	颜色均匀,有光泽	21~30
	颜色不均匀,稍有光泽	11~20
	颜色很不均匀,无光泽	0~10
外形(40)	形状规则,光滑无裂痕	31~40
	形状较规则,有少量裂痕	16~30
	形状不规则,裂痕较多	0~15
透明度(30)	透明	21~30
	较透明	11~20
	不透明	0~10

1.2.6 质构特性的测定 将重组米煮熟冷却后,每组样品每次取 3 粒置于质构仪上进行测定,平行测定 9 次,分别将两个最大值和最小值舍弃,最终的指标值为剩余 5 次测试数值的平均值^[19]。具体参数设置如

表 2 重组米米饭感官评分标准

Table 2 Sensory scoring criteria for reconstituted rice

评定项目(分)	评分标准	分数(分)
外观(30)	颜色正常, 洁白	8~10
	颜色较正常, 发黄	4~7
	颜色不正常, 发黑	0~3
	有光泽	8~10
	稍有光泽	4~7
气味(20)	无光泽	0~3
	结构紧密, 饭粒完整	8~10
	部分结构紧密, 饭粒较完整	4~7
	饭粒破损严重	0~3
	有浓郁的莲子香气	15~20
滋味(20)	有淡淡的莲子香气	8~14
	无莲子香气, 且有异味	0~7
	有浓郁的香气和甜味	15~20
	有淡淡的香气和甜味	8~14
	无香气和甜味	0~7
口感(30)	滑爽, 不粘牙	8~10
	有黏性, 较不粘牙	4~7
	有黏性, 粘牙	0~3
	有嚼劲	8~10
	稍有嚼劲	4~7
	无嚼劲, 疏松	0~3
	软硬适中	8~10
	稍硬或稍软	4~7
	很硬或很软	0~3

下: 模式为 TPA 模式; 探头为 P/36R; 测试前、中、后速度均为 2.00 mm/s; 形变量: 50%; 两次压缩间隔时间: 5.00 s; 触发力值: 5.0 g。

1.2.7 蒸煮损失率的测定 在干燥烧杯中放置 3.00 g(m_0) 莲子淀粉重组米, 倒入 50 mL 蒸馏水, 在 100 ℃ 水浴里蒸煮 10 min, 将全部米汤转移至另一干燥烧杯(m_1) 内, 置于 105 ℃ 烘箱中至烧杯恒重(m_2)^[9]。计算公式如下:

$$\text{蒸煮损失率}(\%) = [(m_2 - m_1)/m_0] \times 100$$

1.2.8 重组米品质评价体系的建立 莲子淀粉重组米综合评分由感官评价、质构特性及蒸煮损失 3 部分评分构成(表 3)^[20]。具体方法如下:

$$\text{综合评分} = \text{感官评分} \times 40\% + \text{质构评分} \times 30\% + \text{蒸煮损失评分} \times 30\%$$

质构评分计算方法为:

$$\text{质构评分}(100\text{分}) = \text{硬度}(25\text{分}) + \text{弹性}(25\text{分}) + \text{黏聚性}(25\text{分}) + \text{咀嚼性}(25\text{分})$$

弹性、黏聚性、咀嚼性与口感呈正相关, 与硬度呈负相关, 评分算法为:

$$\begin{aligned} \text{弹性、黏聚性、咀嚼性评分} &= 25 \times (A/B); \\ \text{硬度评分} &= 25 - 25 \times (A/B) \end{aligned}$$

式中: A 为各指标平均值与最小值之差; B 为各指标最大值与最小值之差。

其中, 蒸煮损失评分标准如下:

表 3 蒸煮损失评分标准

Table 3 Standard of cooking loss score

等级	评分标准(分)
1	蒸煮损失率 < 3%; 90~100
2	蒸煮损失率 3%~6%; 80~90
3	蒸煮损失率 6%~9%; 60~80
4	蒸煮损失率 > 9%; 40~60

1.2.9 单因素实验 在莲子淀粉添加量为 30% 的条件下, 固定挤压模具及喂料速度, 以物料含水量为 40%、螺杆转速为 180 r/min、模头温度为 90 ℃ 为基础, 相应改变各因素的水平: 物料含水量设定为 30%、35%、40%、45%、50%; 螺杆转速设定为 120、150、180、210、240 r/min; 模头温度设定为 70、80、90、100、110 ℃, 进行单因素实验。根据建立的重组米评价体系, 分析各组重组米的得分情况, 从而得到挤压重组米较为适宜的物料含水量、螺杆转速和模头温度。

1.2.10 响应面试验 利用响应曲面的中心组合试验的设计原理及单因素实验结果, 3 个因子设为物料含水量、螺杆转速及模头温度, 并各取 3 个水平进行 17 个试验点的响应面试验(表 4)。由此探究 3 个因素对重组米评分的影响和各因素间的相关性。

表 4 响应面试验因素和水平

Table 4 Factors and level of response surface test

因素	水平		
	-1	0	1
A 物料含水量(%)	35	40	45
B 螺杆转速(r/min)	150	180	210
C 模头温度(℃)	80	90	100

1.3 数据处理

采用 SPSS19.0、EXCEL 软件进行数据处理分析; 采用 ORIGIN 8.5 软件进行制图; 采用 Design Expert 软件处理响应面数据。

2 结果与分析

2.1 莲子淀粉添加量对混合粉糊化特性的影响

表 5 为混合粉糊化特性结果, 莲子淀粉与碎米粉混合后的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、崩解值、回生值等均随莲子淀粉添加比例的增大而增大。峰值黏度的上升可能是因为莲子淀粉中直链淀粉含量较高, 限制性膨胀且淀粉颗粒较小, 更易发生吸水膨胀, 使得混合粉的黏度值上升^[21]。回生值反映的是淀粉老化的情况, 是淀粉糊中的直链淀粉之间进行重新聚合的过程^[22]。崩解值代表在糊化过程中淀粉糊的热稳定性及淀粉颗粒的破损程度^[23-24]。随着混合粉中莲子淀粉添加比例的增大, 崩解值与回生值也逐渐增大, 因为较高含量的直链淀粉会降低淀粉糊的稳定性, 使其糊化后易发生老化。因此, 混合粉的糊化特性受到莲子淀粉添加量的影响, 较高或较低可能都会影响重组米的感官。

表 5 莲子淀粉添加量对混合粉糊化特性影响

Table 5 Effect of lotus seed starch addition on the pasting characteristics of mixed flour

莲子淀粉添加量(%)	峰值黏度(cP)	谷值黏度(cP)	崩解值(cP)	最终黏度(cP)	回生值(cP)
20	2376.67±43.46 ^a	1722.35±29.14 ^a	654.32±18.33 ^a	3098.05±71.97 ^a	1421.54±43.66 ^a
25	2425.33±35.10 ^b	1735.33±40.07 ^a	708.67±22.55 ^b	3156.72±76.74 ^b	1438.77±61.60 ^a
30	2515.33±27.51 ^c	1789.67±32.91 ^b	715.94±15.39 ^b	3237.69±59.94 ^c	1453.65±21.22 ^b
35	2557.67±25.51 ^c	1818.33±30.61 ^b	739.87±13.11 ^c	3311.67±34.95 ^d	1460.35±30.44 ^b
40	2610.67±35.91 ^d	1855.46±14.52 ^c	750.42±14.72 ^d	3364.23±38.31 ^d	1483.67±24.02 ^c

注: 同列不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$; 表6同。

2.2 莲子淀粉添加量对挤压重组米感官品质的影响

图 1 为莲子淀粉重组米的感官评分, 重组米的感官评分随着莲子淀粉添加量的增大而呈现先上升后下降的趋势, 最优莲子淀粉添加量为 30%。重组米中添加莲子淀粉可赋予重组米以莲子的香气和滋味。在重组米中添加适当的莲子淀粉有助于提高米饭的口感和米粒的颜色外观, 同时也提高了莲子淀粉重组米的感官评分。重组米中莲子淀粉添加量的增大, 导致蒸煮后米饭黏性增大, 影响了口感, 且不易被接受, 因此添加量超过 30% 后, 感官评分有所降低。

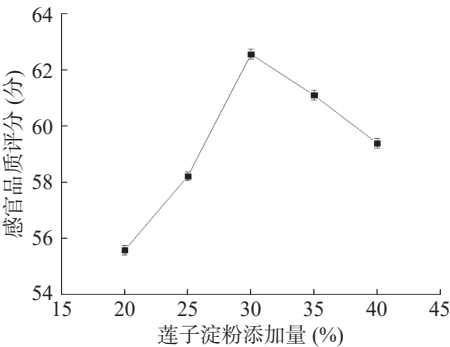


图 1 莲子淀粉添加量对重组米感官品质的影响

Fig.1 Effect of lotus seed starch addition on the sensory quality of reconstituted rice

2.3 莲子淀粉添加量对挤压重组米质构品质的影响

莲子淀粉重组米质构特性结果如表 6 所示。随着莲子淀粉添加比例的增大, 硬度逐渐增大, 弹性、黏聚性、咀嚼性则先增大后减小, 在莲子淀粉添加量为 30% 时达到峰值。莲子淀粉和碎米粉在成分含量及结构上有所不同, 混合后形成的粉质体系不太稳定, 会影响重组米的质构^[7]。随着莲子淀粉添加量的增大, 经过蒸煮的重组米颗粒性较差且互相粘连。硬度与重组米的口感存在着负相关性, 与弹性、黏聚

表 6 莲子淀粉添加量对挤压重组米质构特性的影响

Table 6 Effect of lotus seed starch addition on the textural properties of extruded reconstituted rice

莲子淀粉添加量(%)	硬度(g)	弹性(g·s)	咀嚼性(g)	黏聚性
20	1246.28±80.19 ^a	0.852±0.003 ^b	1.271±0.003 ^a	267.97±18.48 ^a
25	1304.87±73.14 ^a	0.861±0.002 ^b	1.313±0.006 ^b	295.45±25.04 ^b
30	1410.31±76.83 ^b	0.879±0.003 ^c	1.414±0.005 ^d	333.97±23.75 ^b
35	1556.45±92.92 ^c	0.843±0.002 ^a	1.356±0.003 ^c	289.63±24.62 ^b
40	1722.64±80.17 ^d	0.830±0.003 ^a	1.322±0.003 ^b	275.45±21.44 ^a

性、咀嚼性则为正相关性^[25-26]。依据莲子淀粉重组米的质构特性结果, 推断在莲子淀粉添加量为 30% 的条件下挤压得到的重组米口感最好。

2.4 莲子淀粉添加量对挤压重组米蒸煮损失率的影响

图 2 所示为重组米的蒸煮损失率随莲子淀粉添加量变化的结果。当重组米中莲子淀粉含量增加时, 其蒸煮损失率也在不断增加。物料中的淀粉经过挤压后开始发生糊化, 结构展开, 发生降解, 使得重组米经过高温蒸煮后淀粉更易溶于水。此外, 莲子淀粉和碎米粉混合后的粉质体系不稳定, 导致重组米的蒸煮损失率逐渐上升。

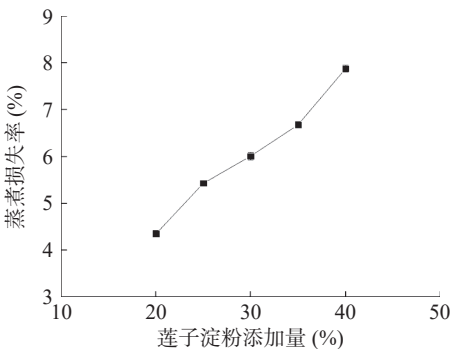


图 2 莲子淀粉添加量对挤压重组米蒸煮损失率的影响

Fig.2 Effect of lotus seed starch addition on the cooking loss rate of extruded reconstituted rice

综合混合粉的糊化特性及重组米的感官品质、质构品质、蒸煮损失率的实验结果分析可知, 当莲子淀粉添加比例为 30% 时, 加工出的重组米品质较好。

2.5 挤压工艺参数优化

2.5.1 物料含水量对挤压重组米品质的影响 图 3 所示为莲子淀粉重组米的品质在不同物料含水量下的结果。莲子淀粉重组米的综合评分随着物料含水量的增加而先增大后减小, 在物料含水量为 40% 的条件下, 综合评分达到最高。重组米的挤出质受物料含水量的影响, 当含水量过低时, 使得物料间的摩擦增大, 挤出时较为困难且易堵塞模孔, 淀粉糊化不完全, 产品表面粗糙, 形态不佳; 含水量过高时, 物料的流动性增强, 在机筒内滞留时间较短, 挤出时阻力降低且样品不易成型, 干燥时间变长, 影响品质。若要得到品质最佳的重组米, 物料中需含有适宜的含水量, 且降低了物料与筒壁之间的摩擦系数, 达到一定温度后即可完成糊化。

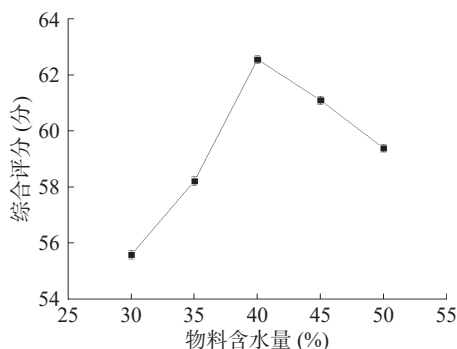


图3 物料含水量对挤压重组米品质的影响

Fig.3 Effect of material moisture on the quality of extruded reconstituted rice

2.5.2 螺杆转速对挤压重组米品质的影响 图4所示为螺杆转速对重组米品质的影响结果。当增大螺杆转速时, 莲子淀粉重组米的综合评分先增大后减小, 综合评分在螺杆转速为 180 r/min 时最高。物料在机筒内的滞留时间和受剪切力与螺杆转速的大小有关^[27], 当降低螺杆转速时, 物料在机筒内的滞留时间延长, 且作用在物料上的剪切力变小, 降低了淀粉的糊化度, 影响品质。螺杆转速在一定区间范围内增大时, 物料受到的剪切力就越大, 模头处的压力也越大, 提高了淀粉的糊化能力, 使得重组米的品质接近最佳状态。但螺杆转速过高时, 缩短了物料在机筒中的滞留时间, 不能在筒壁上吸收充足的热量, 淀粉内部的水合作用不完全, 导致了淀粉的不完全糊化^[28]。若继续增加螺杆转速, 会因为挤出前后存在较大的压力差使产品发生膨化, 产生气泡, 进而影响重组米的品质^[29]。

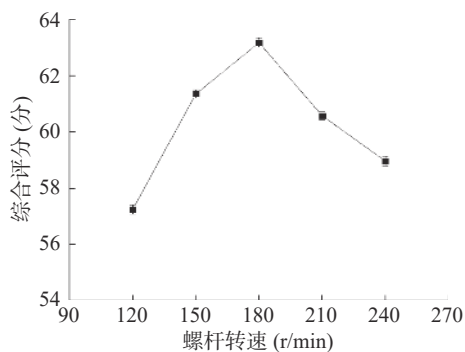


图4 螺杆转速对挤压重组米品质的影响

Fig.4 Effect of screw speed on the quality of extruded reconstituted rice

2.5.3 模头温度对挤压重组米品质的影响 图5所示为模头温度对莲子淀粉重组米品质的影响。莲子淀粉重组米的综合评分随着模头温度的升高先增大后减小, 综合评分在模头温度为 90 °C 时最高。挤压重组米品质对模头温度的变化较为敏感。较低的模头温度会降低淀粉的糊化度, 导致挤出的产品结构疏松, 品质及咀嚼性较差, 粘性低, 蒸煮损失增大^[30-31]。高温条件可以提高淀粉的糊化程度, 但在过高温下挤压出的重组米蒸煮时会产生较多的溶出物, 发生粘

黏, 这是因为高温能使大分子物质降解出可溶性物质^[32]。同时较高温度还会使挤出的产品外观变差, 发生膨化并有气泡产生, 产品表面粗糙。

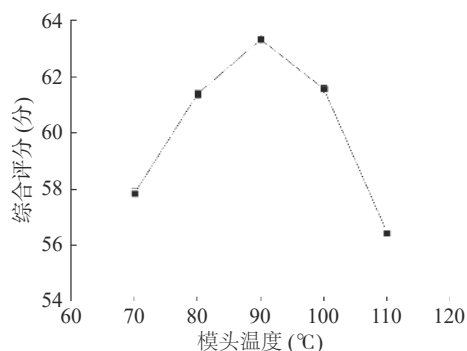


图5 模头温度对挤压重组米品质的影响

Fig.5 Effect of die head temperature on the quality of extruded reconstituted rice

2.5.4 响应面试验优化 在单因素实验的基础上, 以物料含水量(A)、螺杆转速(B)和模头温度(C)为影响因素, 挤压重组米的综合评分为响应指标, 采用响应面法优化莲子淀粉重组米挤压参数, 其设计与结果见表7。

表7 响应面试验设计与结果

Table 7 Response surface test design and results

序号	A 物料含水量	B 螺杆转速	C 模头温度	Y 综合评分(分)
1	0	0	0	68.25
2	0	0	0	68.71
3	0	0	0	68.04
4	-1	1	0	65.62
5	0	1	1	66.42
6	1	1	0	63.94
7	1	0	-1	41.37
8	-1	-1	0	64.97
9	-1	0	-1	52.51
10	0	0	0	67.88
11	1	0	1	66.48
12	0	1	-1	47.80
13	1	-1	0	63.72
14	0	-1	-1	50.74
15	0	0	0	67.28
16	0	-1	1	66.89
17	-1	0	1	60.11

根据软件分析得出相关回归系数的二次回归方程:

$$Y = 68.03 - 1.02A - 0.37B + 8.44C - 0.11AB + 4.38AC + 0.62BC - 3.16A^2 - 0.31B^2 - 9.76C^2$$

对该模型进行回归分析, 结果如下表8。

由表8中数据可知, 回归模型 $P < 0.0001$ (极显著), 失拟项 $P = 0.1092 > 0.05$ (不显著), 说明方案设计可行, 可有效预测回归方程中相应的回归值。模型回归系数 $R^2 = 0.9912$, 说明拟合程度较为良好。通过分析得到 C(模头温度)、AC、 A^2 和 C^2 为极显著 ($P < 0.0001$), A(物料含水量)为显著 ($P < 0.05$)。

为进一步了解两个因素的协同作用对重组米品

表 8 回归模型及方差分析

Table 8 Regression model and analysis of variance

回归项	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	1117.88	9	124.21	200.37	<0.0001	***
A	7.41	1	7.41	11.96	0.0106	*
B	0.81	1	0.81	1.3	0.2916	
C	569.19	1	569.19	918.2	<0.0001	***
AB	0.046	1	0.046	0.075	0.7927	
AC	76.65	1	76.65	123.65	<0.0001	***
BC	1.53	1	1.53	2.46	0.1607	
A ²	41.97	1	41.97	67.71	<0.0001	***
B ²	0.41	1	0.41	0.66	0.4426	
C ²	400.86	1	400.86	646.65	<0.0001	***
残差	4.34	7	0.62			
失拟项	3.24	3	1.08	3.95	0.1092	
纯误差	1.1	4	0.27			
总变异	1122.21	16				

注: *表示显著性差异($P<0.05$); ***表示极显著差异($P<0.0001$)。

质的影响,依据响应面曲面分析法,绘制两个因素间交互影响的响应面图与等高线图。由图 6 可知,当物料含水量及螺杆转速不断增加时,莲子淀粉重组米的品质先上升后下降,两个因素之间存在着一定的交互作用,重组米的品质变化受物料含水量的影响较明显。由图 7 可知,在螺杆转速一定时,随着物料含水量的增大及模头温度的升高莲子淀粉重组米的品质而增加,到达最高点后下降,且两个因素存在显著的交互作用,模头温度对重组米品质的影响比物料含水量大。由图 8 可知,莲子淀粉重组米的品质随物料

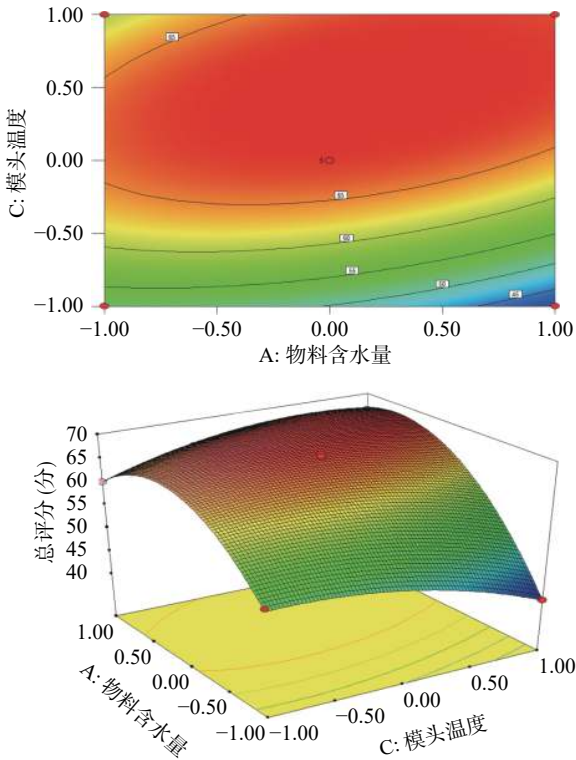


图 7 物料含水量与模头温度交互作用对挤压重组米品质影响的响应面和等高线

Fig.7 Response surface and contours of the interaction between material moisture content and die head temperature on the quality of extruded reconstituted rice

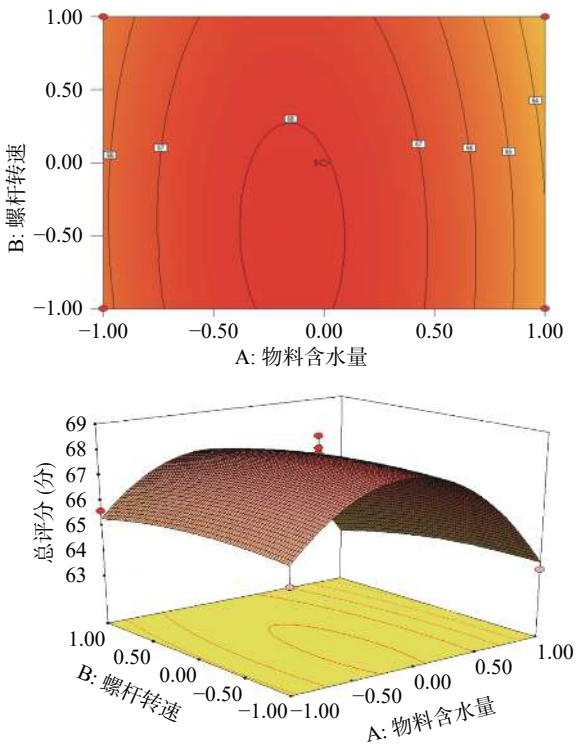


图 6 物料含水量与螺杆转速交互作用对挤压重组米品质影响的响应面和等高线

Fig.6 Response surface and contours of the effect of interaction between material moisture content and screw speed on the quality of extruded reconstituted rice

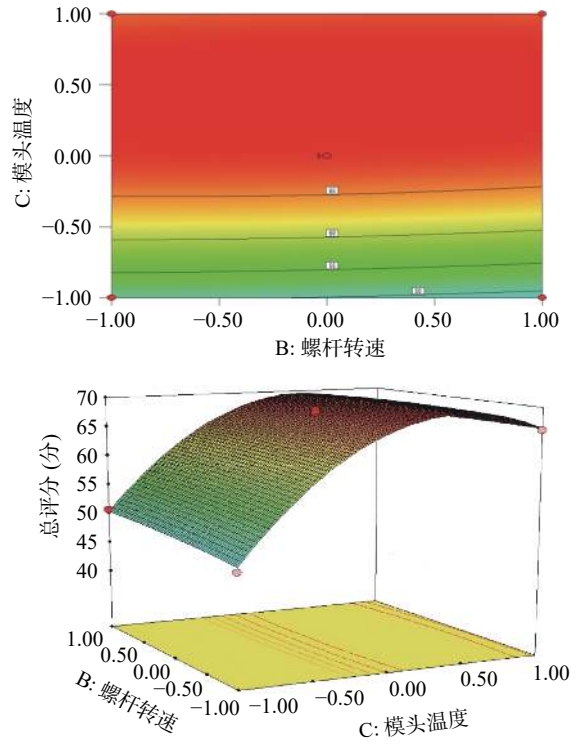


图 8 螺杆转速与模头温度交互作用对挤压重组米品质影响的响应面和等高线

Fig.8 Response surface and contours of the interaction between screw speed and die head temperature on the quality of extruded reconstituted rice

含水量的增大及模头温度的升高而先上升后下降,且两个因素虽存在一定的交互作用,但作用并不显著,模头温度对重组米影响较大。

响应面优化出的结果为:物料含水量 39.8%、螺杆转速 209.7 r/min、模头温度 94.4 °C,所得到的最佳重组米产品综合评分为 69.49 分。考虑到实际生产需求,将条件修正为物料含水量 40%、螺杆转速 210 r/min、模头温度 95 °C,该条件下生产的重组米评分为 69.13 分,与理论值误差为 0.52%,证明该优化方案较为合理可行。

3 结论

随着莲子淀粉添加量的增加,混合粉糊化特性中的各参数值均显著增加($P<0.05$),蒸煮损失率也随莲子淀粉添加量的增加而增加。当莲子淀粉添加量在 30% 时,重组米的总感官评分较高,且质构中的弹性、黏聚性、咀嚼性也达到峰值。综合考虑,重组米中莲子淀粉的添加量应为 30%。以莲子淀粉重组米的综合评分为指标,根据单因素实验和响应面试验结果并结合生产实际得到的最佳工艺条件为:物料含水量 40%、螺杆转速 210 r/min、模头温度 95 °C,在该条件下生产的重组米的综合评分为 69.13 分,与理论值误差为 0.52%,说明该优化方案较为合理。

参考文献

- [1] ZENG H L, CHEN P L, CHEN C J, et al. Structural properties and prebiotic activities of fractionated lotus seed resistant starches[J]. *Food Chemistry*, 2018, 251: 33-40.
- [2] 陈悦宇, 欧雨嘉, 曾红亮, 等. 单糖对莲子淀粉回生特性的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(3): 7-13. [CHEN Y Y, OU Y J, ZENG H L, et al. Effect of monosaccharide on the retrogradation of lotus seed starch[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(3): 7-13.]
- [3] 赵蓓蓓. 莲子淀粉-茶多酚复合物的制备及理化特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019. [ZHAO B B. Research on the preparation and physicochemical properties of the lotus seed starch-green tea polyphenol complexes[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.]
- [4] 陈政. pH 对莲子淀粉理化和结构特性影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2020. [CHEN Z. Study on the effect of pH on the physicochemical and structural properties of lotus seed starch[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2020.]
- [5] LIN X, SUN S W, WANG B L, et al. Structural and physicochemical properties of lotus seed starch nanoparticles[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 157: 240-246.
- [6] GUO Z B, ZENG S X, ZHANG Y, et al. The effects of ultrahigh pressure on the structural, rheological and retrogradation properties of lotus seed starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 44: 285-291.
- [7] 江洪波, 梅晓芸. 莲子淀粉加工特性的研究[J]. *食品研究与开发*, 2014, 35(22): 21-23. [JIANG H B, MEI X Y. Study on processing properties of lotus starch[J]. *Food Research and Development*, 2014, 35(22): 21-23.]
- [8] UDACHAN I, SAHOO A K. Quality evaluation of gluten free protein rich broken rice pasta[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2017, 11(3): 1378-1385.
- [9] 雷婉莹, 曾希珂, 章丽琳, 等. 马铃薯全粉-碎米混合粉的糊化特性及其挤压重组米品质[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(17): 94-98, 111. [LEI W Y, ZENG X K, ZHANG L L, et al. Pasting properties of rice powders blending with potato granule and the quality of restructured potato rice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(17): 94-98, 111.]
- [10] 吴书洁, 陈凤莲, 张欣悦, 等. 碎米及其产品的研究进展[J]. *现代食品*, 2020(22): 36-39, 42. [WU S J, CHEN F L, ZHANG X Y, et al. Research and development of broken rice and its products[J]. *Modern Food*, 2020(22): 36-39, 42.]
- [11] 沈宇光, 肖志刚, 柴媛, 等. 工程重组米的研究进展[J]. *农产品加工*, 2019(2): 63-65. [SHEN Y G, XIAO Z G, CHAI Y, et al. Research advance of restructuring rice[J]. *Farm Products Processing*, 2019(2): 63-65.]
- [12] 章丽琳. 马铃薯挤压重组米制备及其品质研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017. [ZHANG L L. Preparation and properties study of potato rice by extrusion cooking technology[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017.]
- [13] HUANG S Q, ROMAN L, MARTINEZ M M, et al. Modification of physicochemical properties of breadfruit flour using different twin-screw extrusion conditions and its application in soy protein gels[J]. *Foods*, 2020, 9(8): 1071.
- [14] 何忠源, 马天文, 王庆峰, 等. 双螺杆挤压工艺对杂粮重组米感官品质影响研究[J]. *农业科技与装备*, 2017(9): 63-68. [HE Z Y, MA T W, WANG Q F, et al. Study on the effect of twin-screw extrusion process on the sensory quality of extruded composite grain rice[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2017(9): 63-68.]
- [15] MORETTI D, LEE T, ZIMMERMANN M B, et al. Development and evaluation of iron-fortified extruded rice grains[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 70(5): 330-336.
- [16] 王洁洁, 邵子晗, 韩晶, 等. 挤压重组紫薯米工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(8): 137-142, 150. [WANG J J, SHAO Z H, HAN J, et al. Optimization of process parameters and antioxidant activity of extrusion recombinant purple sweet potato rice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(8): 137-142, 150.]
- [17] 白晓蓉. 不同品种糙米的挤压膨化特性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019. [BAI X R. Study on extrusion characteristics of different brown rice varieties[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.]
- [18] 张辉. 马铃薯复配米配方及工艺优化[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016. [ZHANG H. The formulation and process optimization of potato extrusion rice[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.]
- [19] 祝东品. 青稞挤压膨化米制品加工工艺及品质研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019. [ZHU D P. Study on processing technology and quality of extruded rice products from highland barley[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019.]
- [20] 王霞, 郭世龙, 鹿保鑫, 等. 富硒芋艿头重组米的制备及其消化特性研究[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(8): 142-152.

- [WANG X, GUO S L, LU B X, et al. Preparation and digestive characteristics of artificial rice supplemented by selenium-rich taro[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2019, 35(8): 142–152.]
- [21] 吴小丽. 不同储藏条件对小麦粉糊化特性的影响[J]. *粮食与食品工业*, 2020, 27(4): 7–9, 13. [WU X L. Effects of different storage conditions on gelatinization characteristics of wheat flour[J]. *Cereal & Food Industry*, 2020, 27(4): 7–9, 13.]
- [22] SANDRIN R, CAON T, ZIBETTI A W, et al. Effect of extrusion temperature and screw speed on properties of oat and rice flour extrudates[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(9): 3427–3436.
- [23] TANGSRIANUGUL N, WONGSAGONSUP R, SUPHANTHARIKA M. Physicochemical and rheological properties of flour and starch from Thai pigmented rice cultivars[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 137: 666–675.
- [24] 陈龙. 普鲁兰多糖对大米淀粉性质的影响及机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [CHEN L. Effects and mechanism investigation of pullulan on the properties of rice starch[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.]
- [25] NOOSUK P, HILL S E, PRADIPASENA P, et al. Structure-viscosity relationships for that rice starches[J]. *Starch*, 2003, 55(8): 337–344.
- [26] 马欣, 莉瑾瑜, 古丽娜孜, 等. 方便抓饭熟制工艺的优化[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(7): 123–129. [MA X, LI J Y, GU L N Z, et al. Optimization of cooked convenient pilaf processing technology[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(7): 123–129.]
- [27] ÖZLEM AKTÜRK GÜMÜŞAY, ŞEKER M, SADIKOĞLU H. Response surface methodology for evaluation of the effects of screw speed, feed moisture and xanthan gum level on functional and physical properties of corn half products[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 111: 622–631.
- [28] 管弋铤. 超高压结合热处理对大米粉理化特性及蛋白质的影响[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017. [GUAN Y X. Effects of combined ultra-high pressure and thermal treatment on physicochemical properties and proteins of rice flour[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.]
- [29] 张琪. 肉苕蓉-马铃薯复配米挤压工艺的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2019. [ZHANG Q. Study on extrusion technology of cistanche deserticola-potato composite rice[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2019.]
- [30] GIMENEZ M A, GONZALEZ R J, WAGNER J, et al. Effect of extrusion conditions on physicochemical and sensorial properties of corn-broad beans(*Vicia faba*) spaghetti type pasta[J]. *Food Chemistry*, 2013, 136(2): 538–545.
- [31] LIU C, ZHANG Y, WEI L, et al. Preparation, physicochemical and texture properties of texturized rice produce by improved extrusion cooking technology[J]. *Journal of Cereal Science*, 2011, 54(3): 473–480.
- [32] 吴春艳, 张琪, 李想, 等. 挤压复配红薯米工艺参数对压力的影响[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(1): 40–45. [WU C Y, ZHANG Q, LI X, et al. The effect of process parameters of extruding sweet potato rice on pressure[J]. *Journal of Shandong University of Technology(Natural Science Edition)*, 2020, 34(1): 40–45.]