

预处理-低温挤压对留胚米粉理化性质的影响

刘颖, 王子妍, 贾健辉, 窦博鑫, 张煜, 张娜

Effect of Pretreatment and Low-temperature Extrusion on the Physicochemical Properties of Embryonic Rice Flour

LIU Ying, WANG Ziyan, JIA Jianhui, DOU Boxin, ZHANG Yu, and ZHANG Na

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022080319>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低温挤压对粳糙米营养特性及理化性质的影响

Effect of Lower-temperature Extrusion on the Nutritious and Physicochemical Properties of Japonica Brown Rice

食品工业科技. 2019, 40(12): 12-17,25 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.12.003>

挤压膨化对大米粉糊化度及蛋白质体外消化率的影响

Effect of extrusion on gelatinization degree and protein digestibility of rice flour

食品工业科技. 2017(07): 230-234 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.07.037>

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 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.16.022>

挤压对淀粉微观结构和理化性质影响的研究进展

Research Progress of the Effects of Extrusion on Microstructure and Physicochemical Properties of Starch

食品工业科技. 2020, 41(5): 305-310 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.05.050>

挤压膨化对大麦全粉理化特性的影响

Effect of Extrusion on Physicochemical Properties of Whole Barley Flour

食品工业科技. 2020, 41(20): 41-45 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.20.007>

挤压膨化对紫糙米粉营养品质及理化性质的影响

Effect of Extrusion Process on the Nutritious and Physicochemical Properties of Purple Brown Rice Flour

食品工业科技. 2021, 42(19): 70-77 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010205>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘颖, 王子妍, 贾健辉, 等. 预处理-低温挤压对留胚米粉理化性质的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 201-206. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080319

LIU Ying, WANG Ziyang, JIA Jianhui, et al. Effect of Pretreatment and Low-temperature Extrusion on the Physicochemical Properties of Embryonic Rice Flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 201-206. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080319

· 工艺技术 ·

预处理-低温挤压对留胚米粉理化性质的影响

刘颖¹, 王子妍¹, 贾健辉^{1,2}, 窦博鑫¹, 张煜^{1,3,*}, 张娜^{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. 黑龙江东方学院食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150076)

摘要:以留胚米为原料, 焙炒预糊化粉碎后, 在挤压机螺杆转速 100 r/min, 水分含量 30%, 挤压温度 50~90 °C 的条件下对留胚米粉进行挤压。研究在预糊化-低温挤压过程中不同的挤压温度对留胚米粉理化性质的影响。结果表明: 随着挤压温度的升高, 留胚米粉的糊化度逐步提高; 淀粉、脂肪、蛋白质、 γ -氨基丁酸 (GABA) 含量均有所下降, 而当温度超过 70 °C 后, 可溶性膳食纤维含量显著 ($P<0.05$) 升高; 留胚米粉的吸水性指数显著下降 ($P<0.05$), 水溶性指数、膨胀势有所上升; 总色差 ΔE 增大; 粒径显著增大 ($P<0.05$); 差示扫描量热仪分析发现留胚米粉的起始温度 (T_0)、峰值温度 (T_p) 和终止温度 (T_c) 逐渐升高, 吸热焓由 1.14 J/g 下降至 0.82 J/g, 糊化程度逐步增加; 傅里叶红外光谱分析表明, 在所有挤压温度下留胚米粉的淀粉结构中并未产生新的基团或化学键。上述结果显示, 预糊化-低温挤压对留胚米粉的理化特征具有显著影响, 适宜的挤压温度减少了营养成分的损失。

关键词:留胚米, 预糊化, 低温挤压, 糊化度, 理化性质, 红外光谱

中图分类号: TS210.4

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)12-0201-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080319



本文网刊:

Effect of Pretreatment and Low-temperature Extrusion on the Physicochemical Properties of Embryonic Rice Flour

LIU Ying¹, WANG Ziyang¹, JIA Jianhui^{1,2}, DOU Boxin¹, ZHANG Yu^{1,3,*}, ZHANG Na^{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. College of Food Engineering, East University of Heilongjiang, Harbin 150076, China)

Abstract: The embryonic rice flour was roasted, pre-gelatinized, and extruded at a screw speed of 100 r/min, a moisture content of 30%, and an extrusion temperature of 50~90 °C. The effects of different extrusion temperatures on the physicochemical properties of embryonic rice flour were investigated in the pre-gelatinization-low temperature extrusion process. The results showed that with the increase of extrusion temperature, the pasting degree of embryonic rice flour gradually increased. The contents of starch, fat, protein, and GABA decreased, while the contents of soluble dietary fiber increased significantly after the temperature exceeded 70 °C. The water absorption index of embryonic rice flour decreased significantly ($P<0.05$), the water solubility index and swelling potential increased. The total color difference increased first and then decreased. The particle size increased significantly ($P<0.05$). The analysis of differential scanning calorimetry showed that the enthalpy of heat absorption decreased from 1.14 to 0.82 J/g, and the degree of pasting increased gradually at the starting temperature (T_0), peak temperature (T_p), and termination temperature (T_c) of embryonic rice flour. Fourier

收稿日期: 2022-08-31

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项 (2020ZX08B02); 国家自然科学基金面上项目 (32072258); 国家重点研发计划 (2021YFD2100902-3); 中央财政支持地方高校发展专项资金优秀青年人才支持计划项目。

作者简介: 刘颖 (1968-) (ORCID: 0000-0002-9011-2465), 女, 博士, 教授, 研究方向: 植物蛋白工程与营养功能因子, E-mail: 154057693@qq.com。

* 通信作者: 张煜 (1983-), 男, 博士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 8113855@qq.com。

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

infrared spectroscopy showed that no new groups or chemical bonds were formed in the starch structure of rice flour at all extrusion temperatures. The above results showed that pre-gelatinization-low temperature extrusion had a significant effect on the physicochemical characteristics of embryonic rice flour, and the appropriate extrusion temperature reduced the loss of nutrients.

Key words: embryonic rice; pre-gelatinization; low temperature extrusion; paste degree; physicochemical properties; infrared spectrum

近年以来,伴随中国社会、经济的迅速发展,人们对生活水平的要求也悄然发生了一系列变化。我国居民家庭也由过去的“温饱型”向“发展型”和“享受型”转变,人们也由吃饱到更注重营养健康。正是在这样的消费观念下,留胚米越来越受到追捧,日渐成为居民餐桌上的新宠。留胚米顾名思义即保留了胚芽和部分糠层,其胚芽保留率在80%以上的稻米^[1]。与日常的精制大米相比留胚米保留了更多的维生素、不饱和脂肪酸和微量元素,可以降低心血管疾病、II型糖尿病和癌症等慢性疾病的发生率。米胚中的蛋白质属于全价蛋白质^[2],该蛋白质氨基酸结构与大量实验分析出的对人类身体有益的理想蛋白质氨基酸结构十分相似。贾贞等^[3]研究发现,米胚中含有的一种长寿因子谷胱甘肽,因其极强的抗氧化能力,在食用时具有抗癌,抗衰老等作用,在医药和食品领域被广泛应用。所以,从多个层面入手系统研究留胚米的加工与应用对于提高居民生活水平,丰富留胚米加工利用的理论依据具有一定的现实意义。

焙炒作为一种预糊化的工艺可以显著增加留胚米的香气,改变淀粉和蛋白质的形态、结构和功能特性。刘颖等^[4]以糙米与粳米复配经焙炒后制成的复配糙米粉拥有更好的冲调性和适口性。王子妍等^[5]使用GC-IMS和PCA来建立风味指纹图谱,成功表征了来自不同焙炒阶段留胚米中的挥发性有机化合物,并得出结论中度焙炒下的留胚米样品香气浓郁香醇,能较全面的反映其特点。挤压膨化技术以其诸多优势在食品加工领域中得以广泛应用,使其成为一种常见的方便食品加工技术,也是提高食品配料功能性和消化性的一种极具吸引力的方式^[6],例如方便食品、素肉、代餐食品、婴儿食品、零食等日常食品均可使用挤压膨化技术。然而,在挤压膨化过程中由于美拉德反应的发生,会不可避免的减少原料中蛋白质的营养价值^[7];同时,由于在加工过程中受到了高温、高压、高剪切力影响,维生素A、B₁以及维生素C和E等维生素耐温性差,遇到高温容易分解。同时受高温破坏的还有酚类化合物结构,高温的加工过程会令其活性减弱^[8]。张珺^[9]研究了不同加工处理方式对糙米中 γ -氨基丁酸(GABA)含量的影响,得出结论糙米在120℃下挤压膨化GABA的损失率为56.92%。与此同时,目前市面上的大多数挤压膨化食品,因其高温高压的处理条件使得食品的膨化程度及糊化程度较高,这样虽然增加了消化性,但维生素、GABA等营养成分损失较多,降低了食品的营养

价值^[10]。而采用低温挤压的加工方式,可以更好地保留食品原有的营养,适度提高食品的消化时间。使得留胚米粉可作为原料制备代餐粉、婴幼儿辅食等产品。

本研究以留胚米为原料,采用预糊化-低温挤压的加工方式,分析比较不同挤压程度对留胚米粉营养成分、水合特性、热特性以及红外光谱分析等理化性质的影响。旨在为留胚米加工利用拓宽思路,丰富留胚米加工利用的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

留胚米 哈尔滨工程北米科技有限公司;葡萄糖、盐酸、硫酸铜、亚甲蓝、亚铁氰化钾、酒石酸钾钠、乙酸锌、碘、碘化钾等试剂 均为分析纯,天津市大茂化学试剂厂。

DSE-25 双螺杆挤压膨化机 德国本布拉德公司;T-500 型精密天平 常熟双杰测试仪器厂;LBCS-41 色差仪 青岛路博建业环保科技有限公司;DF-101S 集热式恒温油浴锅 河南胜博仪器有限公司;Tec-Master 型快速黏度分析仪(RVA) 瑞典 Perten 仪器公司;IS10 傅里叶红外光谱仪 美国 Nicolet 公司;Mastersizer 2000 激光粒度仪 德国布鲁克公司

1.2 实验方法

1.2.1 预处理-低温挤压留胚米粉的制备 根据前期实验结果,取200g留胚米于恒温油浴锅中200℃焙炒18min,待彻底冷却后将其粉碎,过50目筛,选取筛过的留胚米粉作为样品F1,将未处理的留胚米粉样品记为F作为对比。

将米粉倒入料筒进行加工。设备工艺参数如下:螺杆转速:100r/min,留胚米粉水分含量:30%。设置模头温度分别为50、70、90℃。待加工好的留胚米粉被挤出后,干燥、粉碎并过50目筛,将最终得到的留胚米粉分别根据相对应的挤压温度记为样品F2~F4。

1.2.2 糊化度的测定 参考关桦楠等^[11]的方法进行测定。

1.2.3 总淀粉的测定 参照GB/T 5009.9-2016食品中淀粉的测定。

1.2.4 可溶性膳食纤维的测定 参照GB/T 37492-2019食品中可溶性膳食纤维的测定。

1.2.5 脂肪的测定 参照国标法GB/T 5009.6-2016

食品中脂肪的测定。

1.2.6 蛋白质的测定 以考马斯亮蓝法^[12]测定食品中蛋白质含量。

1.2.7 γ -氨基丁酸(GABA)的测定 参考陈恩成等^[13]的方法。取样品 5 g 粉碎, 15 mL 60% 乙醇溶液 70 °C 水浴中回流提取 2 h, 将提取液放入高速离心机中以 3000 r/min 的速度离心, 收集上清液。

在锥形瓶中加入 300 μ L 上清液, 0.1 mol/L 四硼酸钠缓冲液以及 6% 重蒸苯酚溶液 400 μ L, 然后混匀, 之后将 600 μ L 77.5% NaClO 溶液倒入到锥形瓶中, 再次混匀。完成以上操作后, 将其放入沸水中加热 10 min, 后冷却 5 min。观察锥形瓶中溶液颜色变化, 当其颜色转为蓝绿色时, 吸取 60% 乙醇溶液 2.0 mL, 加入到锥形瓶中, 645 nm 下比色。

1.2.8 水合特性分析 按照刘淑一等^[14]的操作方法, 称取 2.50 g 米粉加入到装有 30 mL 去离子水的离心管中, 震动器转速设为 230 r/min, 震荡时间 30 min 后, 4000 r/min 离心 15 min。取上清液, 在 105 °C 恒温烘箱对上清液进行蒸发处理, 直至恒重。以公式来计算样品吸水性指数(WAI)、水溶性指数(WSI)和膨胀势(SP):

$$WAI(\%) = \frac{m_2}{m}$$

$$WSI(\%) = \frac{m_1}{m}$$

$$SP(\%) = \frac{m_4 - m_3}{m}$$

式中: m 表示留胚米粉样品的质量, g ; m_1 表示上清液质量(干燥后), g ; m_2 表示标有号的离心管中沉淀的质量, g ; m_3 表示离心管质量, g ; m_4 表示毛重, g

1.2.9 色度的测定 取适量样品于比色皿中, 放入色差计中开始测量色差, 记录 L^* 、 a^* 、 b^* , 可使用以下公式来计算总色差 ΔE :

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

式中: ΔE 表示色差; ΔL 、 Δa 、 Δb 表示原留胚米粉的 L^* 、 a^* 、 b^* 值与预糊化-低温加压处理后留胚米粉的 L^* 、 a^* 、 b^* 值之间的差。

1.2.10 粒径的测定 称取 0.5 g 样品, 将其放入到装有 10 mL 去离子水的锥形瓶中, 超声处理 30 min, 以激光粒度分析仪在(0.1~5000 nm)测量范围扫描。

1.2.11 热特性测定 参照张永兰^[15]的方法进行测定, 将 2 mg 样品直接在铝 DSC 坩埚中称重, 然后加入 7.5 μ L 的超纯水形成悬浮液, 用压片机对坩埚进行压片密封, 室温下平衡 2 h。样品的升温速率为 10 °C/min, 以空密封坩埚为参照。记录了四个热参数: 起始温度(T_0)、峰值温度(T_p)和终止温度(T_c), 以及热焓值的变化(ΔH)。每个样品做 3 个平行。

1.2.12 傅里叶红外光谱分析 对于挤压所造成留胚米粉的分子水平变化, 可通过傅里叶红外光谱(FTIR)

进行研究分析。主要步骤如下: 先将留胚米粉样品放入烘箱干燥; 取样品粉适量放入研钵中, 溴化钾与样品按 1:100 的比例加入, 进行充分研磨并压片; 之后对其开展全波段扫描分析; 扫描时波长分辨率设为 4 cm^{-1} , 扫描范围为 4000~400 cm^{-1} , 测量在干燥环境中进行; 设置横坐标为波长, 纵坐标为透过率, 得到样品的红外光谱图。采用 Omnic 软件对光谱图进行分析处理。

1.3 数据处理

所有实验均重复三次, 分析数据并以平均值 \pm 标准偏差表示。其中曲线图使用 Origin 2021 和 Microsoft Office Excel 进行绘制, 统计学分析使用 SPSS 25 进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同挤压温度对留胚米粉糊化度的影响

糊化度是衡量谷物糊化程度的一个指标, 由淀粉结构的变化引起^[16]。由表 1 可看出, 随着挤压温度的升高, 留胚米粉的糊化度逐步提高, 最高为 82.27%, 说明低温挤压后的留胚米粉也可基本达到熟化的程度。原因在于留胚米粉在挤压过程中高压和高剪切力的作用下, 淀粉分子间的氢键断裂、降解并产生糊化作用, 产生小分子量的物质^[17]。在这个过程中, 淀粉分子的状态随着能量的变化而变化。不同的温度使淀粉发生不同程度的糊化, 70 °C 挤压膨化的糊化度适中。

表 1 不同挤压温度留胚米粉的糊化度

Table 1 Gelatinization degree of preserved embryo rice flour at different extrusion temperatures

样品	组别	糊化度(%)
F	未处理的留胚米粉	-
F1	焙炒后的留胚米粉	54.92 \pm 0.26 ^d
F2	焙炒后 50 °C 挤压膨化的留胚米粉	63.36 \pm 0.15 ^e
F3	焙炒后 70 °C 挤压膨化的留胚米粉	73.15 \pm 0.18 ^b
F4	焙炒后 90 °C 挤压膨化的留胚米粉	82.27 \pm 0.21 ^a

注: 同列字母不同表示样品之间差异显著($P < 0.05$); 表 2~表 5 同。

2.2 不同挤压温度留胚米粉营养成分的分析

通过分析表 2 数据发现, 预糊化-低温挤压留胚米粉淀粉含量降低, 主要是因为经过加工的淀粉其支链被破坏了。在高温以及高剪切力的作用下, 大分子的支链淀粉降解成小分子寡糖或葡萄糖^[18], 最终使得预糊化-低温挤压后留胚米粉的淀粉含量显著降低($P < 0.05$)。同时经过预糊化-低温挤压后的留胚米粉的脂肪与蛋白质含量也显著下降($P < 0.05$)。原因可能是, 在挤压过程时, 处于高温高压的环境中, 水分受热蒸发减少, 脂肪发生部分分解, 蛋白质产生变性, 使原料中的脂肪与淀粉或蛋白质形成脂肪复合物, 进而降低了留胚米粉中脂肪及蛋白质含量^[19]。甘油三酯在挤压膨化过程中会被水解, 形成能够与淀粉相结合的游离脂肪酸^[20]。 γ -氨基丁酸的含量在挤压温度低

于 70 °C 时仅有轻微降低,当温度高于 70 °C 后下降明显。原因可能是, GABA 是一种非蛋白质氨基酸, 它会在挤压过程中与其它物质反应, 高温也会破坏 GABA 的结构, 使 GABA 发生降解^[21]。可溶性膳食纤维含量增加, 而其含量在挤压温度大于 70 °C 时, 增加量更为突出, 主要原因是温度升高破坏了不溶性膳食纤维的糖苷键, 将其变为了可溶性膳食纤维^[22]。

表 2 不同挤压温度留胚米粉营养成分

Table 2 Nutrients of preserved embryo rice flour at different extrusion temperatures

样品	淀粉含量 (%)	脂肪含量 (%)	蛋白质含量 (%)	可溶性膳食纤维 (%)	GABA 含量 (mg/100 g)
F	80.38±0.34 ^a	4.02±0.11 ^a	8.83±0.18 ^a	0.96±0.17 ^e	50.19±0.43 ^a
F1	78.86±0.22 ^b	2.59±0.18 ^b	7.39±0.16 ^b	1.29±0.05 ^d	43.16±0.23 ^b
F2	73.78±0.18 ^c	2.22±0.26 ^c	6.34±0.23 ^c	1.54±0.19 ^c	40.16±0.35 ^c
F3	71.65±0.21 ^d	1.33±0.14 ^d	4.31±0.34 ^d	1.86±0.21 ^b	24.16±0.61 ^d
F4	69.51±0.11 ^e	1.19±0.09 ^e	3.23±0.21 ^e	2.31±0.14 ^a	18.14±0.52 ^e

2.3 不同挤压温度留胚米粉水和特性的分析

水溶性指数(WSI)主要反映原料中淀粉的降解程度, 水溶性指数增大, 也表明其消化性增强^[23]。吸水指数(WAI)可以表示淀粉的吸水能力, 与淀粉糊化程度有关。膨胀势(SP)反映了淀粉的吸水力和在离心后淀粉糊的持水力, 反映了淀粉颗粒内键的结合程度^[24]。由表 3 可知, 与未经挤压膨化的留胚米粉相比, 随着糊化度的增大, 经挤压膨化后的留胚米粉的 WSI 和 SP 显著升高。挤压温度增加使得物料吸收热量增加, 进而增加了分子动能, 淀粉蛋白质分解会加强, 糊化程度也会提高^[25], 所以会增加更多的水溶性物质, 从而导致留胚米粉的吸水性指数和膨胀势升高。留胚米粉在挤压的过程中, 淀粉颗粒的完整性和结晶区被破坏, 从而增加了与水的结合能力, 导致其膨胀势增大。

表 3 不同温度挤压膨化留胚米粉水合特性

Table 3 Hydration characteristics of extruded rice flour at different temperatures

样品	WAI (%)	WSI (%)	SP (%)
F	4.96±0.21 ^a	7.07±0.06 ^e	3.81±0.22 ^e
F1	4.57±0.23 ^b	8.14±0.15 ^d	4.35±0.18 ^d
F2	4.51±0.14 ^c	8.33±0.18 ^c	4.72±0.17 ^c
F3	4.48±0.21 ^d	8.56±0.21 ^b	4.97±0.13 ^b
F4	4.39±0.16 ^e	8.73±0.13 ^a	5.34±0.15 ^a

2.4 不同挤压温度留胚米粉色度的分析

由表 4 可以看出, 相较于未挤压膨化的留胚米粉, 挤压后的米粉, L^* 先增大后降低, 说明颜色先变白后变暗; a^* 都普遍较大, 说明颜色偏红, 同时随着挤压温度的提高, 红色逐渐加深; b^* 也都较大, 说明挤压膨化后物料颜色偏黄, 同时随着挤压温度升高, ΔE 不断增大。这可能与物料发生的美拉德反应与焦糖化反应等非酶褐变和碳化反应有关^[26]。

表 4 不同挤压温度留胚米粉的色度

Table 4 Chromaticity of preserved embryo rice flour at different extrusion temperatures

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE
F	50.24±0.31 ^a	0.71±0.18 ^e	9.55±0.14 ^e	—
F1	49.00±0.21 ^b	1.02±0.11 ^d	11.18±0.11 ^a	1.51±0.43 ^d
F2	48.61±0.30 ^c	1.25±0.14 ^c	10.76±0.15 ^d	1.69±0.33 ^c
F3	46.63±0.16 ^d	1.35±0.12 ^b	10.98±0.09 ^b	1.77±0.29 ^b
F4	44.26±0.41 ^e	1.44±0.15 ^a	10.79±0.11 ^c	1.83±0.28 ^a

2.5 不同挤压温度留胚米粉粒径的分析

从图 1 可以看出, 挤压后留胚米粉的粒径显著增大($P<0.05$), 并且随着挤压温度的升高, 留胚米粉的糊化度不断增大, 留胚米粉的粒径也随之增大。当挤压温度达到 90 °C 时, 平均粒径最大为 182.3 μm , 相较于 50 °C 时, 粒径增大显著($P<0.05$)。低温挤压后的留胚米粉淀粉颗粒破损并挤压结团, 大颗粒比例显著增加($P<0.05$), 形状更不规则^[27]。

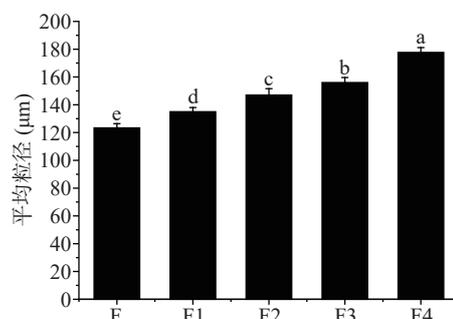


图 1 不同挤压温度留胚米粉的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of preserved embryo rice flour at different extrusion temperatures

注: 字母不同表示样品之间差异显著($P<0.05$)。

2.6 不同挤压温度留胚米粉热特性的分析

不同挤压温度对留胚米粉热特性的影响如表 5 所示。由于在淀粉糊化或熟化过程中, 淀粉分子的晶体结构被破坏而吸收能量, 属于吸热过程, 所以会有吸热峰, 一般来讲, 糊化程度与吸热峰有较为紧密的关联, 前者越高, 后者就会越高^[28]。随着挤压温度的升高, T_0 、 T_p 、 T_c 均逐渐升高, 可能是由于在挤压过程中淀粉与脂肪和蛋白质所形成的复合物有关, 淀粉通过形成复合物减少了其无定形区分子链的移动, 导致改性淀粉颗粒膨胀所需的温度升高^[29]。

表 5 不同挤压温度留胚米粉的热特性

Table 5 Thermal characteristics of preserved embryo rice flour at different extrusion temperatures

样品	T_0 (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔH (J·g ⁻¹)
F	64.77±0.92 ^a	78.87±0.78 ^e	84.03±0.28 ^a	4.02±0.49 ^e
F1	92.51±1.84 ^b	104.66±0.21 ^b	117.35±0.85 ^b	1.14±0.07 ^d
F2	93.54±0.64 ^c	105.75±0.07 ^c	118.75±1.06 ^c	1.04±0.21 ^c
F3	94.94±0.28 ^d	106.68±0.29 ^d	119.31±0.07 ^d	0.91±0.07 ^b
F4	96.06±0.35 ^e	107.68±0.14 ^e	120.54±0.64 ^e	0.82±0.40 ^a

与此同时, 随着挤压温度升高, ΔH 会不断降

低。主要是因为高温破坏了淀粉结晶结构双螺旋间的氢键^[30],或者部分直链和支链淀粉出现凝胶化现象所引起的^[31]。随着温度的升高挤压后糊化度增加,淀粉颗粒发生了形变,导致淀粉颗粒内部结构变得疏松,颗粒越容易解体,因此在 DSC 中糊化所需的能量降低。于双双等^[32]用 DSC 方法研究挤压参数对脱胚玉米热性能影响,结果说明不同挤压参数改变脱胚玉米粉的热性能,与本研究结果类似。

2.7 不同挤压温度留胚米粉红外光谱分析

在 $3000\sim 2800\text{ cm}^{-1}$ 附近属于饱和烃基($-\text{CH}_2$ 或 $-\text{CH}_3$)的 C-H 伸缩振动峰; 1540 cm^{-1} 附近属于 CONH 基团 C=O 键伸缩振动峰,也可以称作肽键的特征峰^[33];在 1640 cm^{-1} 附近属于 C=O(羧基或酰胺羰基)伸缩振动与 N-H 变角振动峰; 1157 cm^{-1} 附近吸收峰归属为 C-O 键以及 C-C 键的伸缩振动; 1022 cm^{-1} 附近吸收峰为 C-O 键伸缩振动和 C-OH 键弯曲振动; 1080 cm^{-1} 附近吸收峰归属为 C-H 键的弯曲振动^[31]。从图 2 可知,经过挤压处理后,留胚米淀粉主要吸收峰的形状、峰位是基本相同的,仅部分吸收峰的强度略有差异,未出现新的吸收峰,未产生新的基团或化学键。任静等^[34]研究表明,淀粉典型共同特征吸收峰主要为: $3650\sim 3200\text{ cm}^{-1}$ 附近极强且较宽的吸收峰是 O-H 键的伸缩振动,因为分子中-OH 之间具有 H 键,能够让吸收峰加宽^[35]。

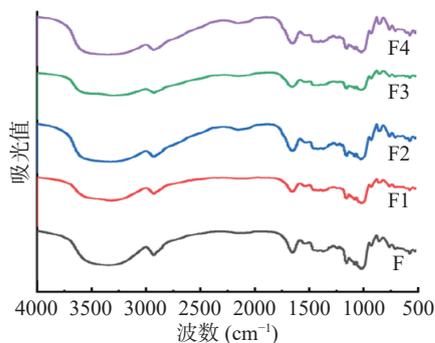


图 2 不同挤压温度留胚米粉的傅里叶红外光谱图

Fig.2 Fourier infrared spectra of preserved embryo rice flour at different extrusion temperatures

3 结论

本实验以经过焙炒后的留胚米粉为原料,研究在低温挤压过程中不同的挤压温度对留胚米粉理化性质所产生的影响。通过对挤压前后留胚米粉的糊化度、营养成分、色度、热特性、红外特性、水合特性及粒径的对比结论如下:随着挤压温度的升高,留胚米粉糊化度会逐渐提高,最高为 82.27%,说明已基本熟化。与未糊化的留胚米粉相比,通过预糊化-低温挤压使得留胚米粉中的淀粉、脂肪、蛋白质和 GBGA 含量均有所下降,但在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后 GABA 含量下降显著($P<0.05$);可溶性膳食纤维含量升高;色度、粒径显著增大;留胚米粉的糊化温度逐渐提高,吸热焓逐渐降低,糊化程度逐步增加;淀粉结构基本保持不变,

未产生新的基团或化学键;吸水性指数显著降低,水溶性指数显著升高($P<0.05$)。综上所述,在不同的低温挤压阶段,留胚米粉的理化性质变化较大,预糊化-低温挤压留胚米全粉的最适挤压温度为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时留胚米全粉的糊化度适中,营养成分损失较少。

参考文献

- [1] 王汝华,高雪燕,严娜,等.留胚米的研究进展[J].农产品加工,2017(10):65-67. [WANG R H, GAO X Y, YAN N, et al. Research progress of embryo rice[J]. Agricultural Product Processing, 2017(10): 65-67.]
- [2] 朱一帆,冯亚斌,林轩,等.胚芽米营养成分研究[J].科技通报,2013,29(9):51-54,60. [ZHU Y F, FENG Y B, LIN X, et al. Embryo rice nutrition research[J]. Science and Technology, 2013, 29(9): 51-54,60.]
- [3] 贾贞,王丹,游松.谷胱甘肽的研究进展[J].沈阳药科大学学报,2019(3):238-242. [JIA Z, WANG D, YOU S. Research progress of glutathione[J]. Journal of Shenyang Pharmaceutical University, 2019(3): 238-242.]
- [4] 刘颖,徐晨冉,高嫚,等.不同焙炒程度对复配糙米粉的品质影响[J].食品安全质量检测学报,2022,13(7):2144-2150. [LIU Y, XU C R, GAO M, et al. Effects of different roasting degrees on the quality of mixed brown rice flour[J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(7): 2144-2150.]
- [5] 王子妍,窦博鑫,贾健辉,等.GC-IMS 结合 PCA 分析不同焙炒程度留胚米挥发性化合物指纹差异[J/OL].食品科学:1-12 [2023-04-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220622.0937.031.html>. [WANG Z Y, DOU B X, JIA J H, et al. Analysis of volatile compounds fingerprint of rice with different roasting degree by GC-IMS combined with PCA[J/OL]. Food Science: 1-12 [2023-04-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220622.0937.031.html>]
- [6] YE J, HU X, LUO S, et al. Properties of starch after extrusion: A review[J]. Starch-Strke, 2017: 1700110.
- [7] ALONSO R, AGUIRRE A, MARZO F. Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and *in vitro* digestibility of protein and starch in faba and kidney beans[J]. Food Chemistry, 2010, 68(2): 159-165.
- [8] NIKMARAM N, KAMANI M H, GHALAVAND R. The effects of extrusion cooking on antinutritional factors, chemical properties and contaminating microorganisms of food[J]. Materials Science, 2015, 4(4): 352-354.
- [9] 张珺.不同加工中糙米主要活性物质变化及富含 γ -氨基丁酸糙米米线研究[D].长沙:湖南农业大学,2015. [ZHANG J. Changes of main active substances in brown rice in different processing and study on gamma-aminobutyric acid rich brown rice noodles[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015.]
- [10] BRENNAN C, BRENNAN M, DERBYSHIRE E, et al. Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(10): 570-575.
- [11] 关桦楠,吴永存,孙冰玉,等.高压蒸煮及微波预熟工艺改良糙米品质的研究[J].食品工业科技,2022,43(8):204-211. [GUAN H N, WU Y C, SUN B Y, et al. Study on improving the quality of brown rice by high pressure cooking and microwave pre-mature technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 204-211.]
- [12] BRADFORD MARION M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976,

- 72(1-2): 248-254.
- [13] 陈恩成, 张名位, 彭超英, 等. 比色法快速测定糙米中 γ -氨基丁酸含量研究[J]. 中国粮油学报, 2006(1): 125-128. [CHEN E C, ZHANG M W, PENG C Y, et al. Rapid determination of γ -aminobutyric acid in brown rice by colorimetric method[J]. Journal of China Cereals and Oils, 2006(1): 125-128.]
- [14] 刘淑一, 赵芳芳, 周小玲, 等. 预糊化对燕麦全粉理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 56-61. [LIU S Y, ZHAO F F, ZHOU X L, et al. Effects of pregelatinization on physicochemical properties of oat flour[J]. Journal of Grain and Oils of China, 2017, 32(9): 56-61.]
- [15] 张永兰. 乳酸菌发酵及酶处理对辐超标大米淀粉及其制品品质影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021. [ZHANG Y L. Effects of lactic acid bacteria fermentation and enzyme treatment on the quality of rice starch and its products containing cadmium[D]. Changsha: Central South Forestry University of Science and Technology, 2021.]
- [16] 徐清荣, 姚惠源. 焙炒糙米理化性质的研究[J]. 食品科技, 2005(2): 8-11. [XU Q R, YAO H Y. Study on physicochemical properties of roasted brown rice[J]. Food Science and Technology, 2005(2): 8-11.]
- [17] 王丹洋. 两段式单螺杆挤压黑米黑豆杂粮面条及其品质特性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018. [WANG D Y. Study on the quality and characteristics of multigrain noodles with black rice and black beans squeezed by two-stage single screw[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018.]
- [18] ENGLYST H N. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46: S33-S50.
- [19] SOOJUNG HEO, SOYOUNG JEON, SUYONG LEE. Utilization of lentinusedodes mushroom-glucan to enhance the functional properties of gluten-free rice noodles[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 55: 627-631.
- [20] 方浩标, 郑经绍, 余宏达, 等. 挤压膨化对紫糙米粉营养品质及理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 70-77. [FANG H B, ZHENG J S, YU H D, et al. Effects of extrusion on the nutritional quality and physicochemical properties of purple brown rice noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(19): 70-77.]
- [21] 韩璐, 卢小卓, 朱力杰, 等. 膨化方式对发芽糙米主要生理活性物质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 18-22, 29. [HAN L, LU X Z, ZHU L I J, et al. Puffing way the physiologically active substance of germinated brown rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(5): 18-22, 29.]
- [22] 张光, 吕铭守, 石彦国, 等. 挤压膨化工艺对米糠可溶性膳食纤维结构及功能性的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(19): 45-53. [ZHANG G, LÜ M S, SHI Y G, et al. Extrusion process on structure and functional effects of soluble dietary fiber from rice bran[J]. Journal of Packaging Engineering, 2020, 41(19): 45-53.]
- [23] 王丽娟. 杂粮粉的挤压膨化制备及贮藏稳定性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012. [WANG L J. Study on extrusion-expansion preparation and storage stability of coarse grain powder[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.]
- [24] 王盼. 挤压改性对苦荞挂面品质的影响及机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016. [WANG P. Study on the effect of extrusion modification on the quality of buckwheat hanging noodles and the mechanism[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016.]
- [25] 齐杨杨, 汪楠, 汤云龙, 等. 不同水稻品种(系)的米粉和淀粉的理化性质比较研究[J]. 食品科技, 2019, 44(5): 162-165. [QI Y Y, WANG N, TANG Y L, et al. Comparative study on the physicochemical properties of rice flour and starch from different rice varieties (lines)[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(5): 162-165.]
- [26] 杨勇, 任健. 速溶婴幼儿营养米粉的挤压膨化工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 24(12): 129-132. [YANG Y, REN J. Study on extrusion and expansion technology of instant nutritional rice flour for infants[J]. Journal of the Chinese Journal of Cereals and Oils, 2019, 24(12): 129-132.]
- [27] 王庆, 张光, 杨春华, 等. 挤压膨化对大米粉糊化度及蛋白质体外消化率的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 230-234. [WANG Q, ZHANG G, YANG C H, et al. Effects of extruding on gelatinization degree and protein digestibility of rice flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7): 230-234.]
- [28] 李琪, 吕珍珍, 张娟. 差示扫描量热法在食品中的应用[J]. 食品安全导刊, 2019(12): 35. [LI Q, LÜ Z Z, ZHANG X. Application of differential scanning calorimetry in food[J]. Food Safety Tribune, 2019(12): 35.]
- [29] 马岁祥, 李涛, 宋洪波, 等. 过热蒸汽改性典型晶型淀粉的理化性质研究[J]. 中国食品学报, 2018, 18(8): 99-106. [MA S X, LI T, SONG H B, et al. Physicochemical properties of superheated steam modified typical crystalline starch[J]. Journal of China Food Science and Technology, 2018, 18(8): 99-106.]
- [30] 孙沛然, 姜斌, 沈群. 高静压对籼米淀粉和糯米淀粉糊化及老化性质的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(6): 51-58. [SUN P R, JIANG B, SHEN Q. Effects of high static pressure on gelatinization and aging properties of indica rice and glutinous rice starch[J]. Chinese Journal of Food Science, 2015, 15(6): 51-58.]
- [31] ISMAILOGLU S O, BASMAN A. Effects of infrared heat-moisture treatment on physicochemical properties of corn starch[J]. Starch-Stärke, 2015, 67(5-6): 528-539.
- [32] 于双双, 马成业. 用 DSC 方法研究挤压参数对脱胚玉米热性能影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(16): 1-4. [YU S S, MA C Y. Study on the effect of extrusion parameters on thermal properties of degermed maize by DSC method[J]. Food Research and Development, 2017, 38(16): 1-4.]
- [33] 付玲玲. 挤出加工对米粉制品结构与品质的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. [FU L L. Study on the effect of extrusion processing on the structure and quality of rice flour products[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.]
- [34] 任静, 刘刚, 欧全宏, 等. 淀粉的红外光谱及其二维相关红外光谱的分析鉴定[J]. 中国农学通报, 2015, 31(17): 58-64. [REN J, LIU G, OU Q H, et al. Analysis and identification of starch by infrared spectrum and its two-dimensional correlation infrared spectrum[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(17): 58-64.]
- [35] 方晨璐. 三种形状无定形淀粉的制备、特征性质及分子结构研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2020. [FANG C L. Study on preparation, properties and molecular structure of three amorphous starches[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2020.]