

文章编号:2095-7386(2022)01-0001-08

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2022.01.001

挤压膨化联合发酵技术对速食米粉食用品质的影响

孙维宇,王章桃¹,伍金娥^{1,2}

(1. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院,湖北 武汉 430023;

2. 武汉轻工大学 大宗粮油精深加工教育部重点实验室,农产品加工与转化湖北省重点实验室,湖北 武汉 430023)

摘要:挤压膨化技术是加工速食米粉的一种重要方法,但存在冲调分散性差、冲调黏度过高、易结块、缺乏风味等问题。针对上述问题,本研究将挤压膨化和发酵联合处理以改善米粉的冲调性和增加自然的香气成分。测定在不同粒度、冲调温度和固液比下米粉的分散性和冲调稳定性,结果显示:米粉粒度在60目、冲调温度在80℃及冲调固水比为1:5时,米粉冲调稳定性和分散性指数较好。通过扫描电子显微镜、差示扫描量热仪、X-射线衍射、气质联用等方法,经分析发现:挤压膨化与发酵联合处理破坏了淀粉结构,降低了米粉的糊化热焓值,明显降低了A-型结晶度,增加了米粉的香气。本研究为促进挤压膨化与益生菌发酵联合技术在谷物加工中的应用提供了一定的技术参考。

关键词:速食米粉;挤压膨化;发酵;冲调性能

中图分类号:Q 965.9

文献标识码:A

Effect of extrusion combined fermentation technology on edible quality of instant rice flour

SUN Wei-yu¹, WANG Zhang-tao¹, WU Jin-e^{1,2*}

(1. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Key Laboratory of Intensive Processing of Staple Grain and Oil,

Ministry of Education, Key Laboratory for Processing and Transformation

of Agricultural Products, Hubei, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: Extrusion is an important method for processing instant rice flour, but some products still have a few problems such as poor dispersion, high viscosity, easy agglomeration, and lack of flavor. In response to the above problems, this study combined extrusion and fermentation to improve the blending of rice flour and increase the natural aroma components. The dispersibility and brewing stability of rice flour were measured at different particle sizes, different brewing temperatures, and different solid-water ratios. The results showed that the rice flour had the highest brewing stability and dispersibility index when the particle size of rice flour was 60 meshes, the brewing temperature was 80℃, and the brewing solid-water ratio was 1:5. In order to further clarify the texture changes inside the rice

收稿日期:2021-12-17.

作者简介:孙维宇(1996-),男,硕士研究生,E-mail:1174940276@qq.com.

通信作者:伍金娥(1977-),女,博士,教授,硕士生导师,E-mail:wujinec@163.com.

基金项目:大宗粮油精深加工教育部重点实验室开放课题(编号:2020JYBQGDKFB02,2020JYBQGDKFB17).

flour, the starch appearance, enthalpy value and crystal form of the rice flour before and after extrusion and fermentation treatment were compared by scanning electron microscopy, differential scanning calorimeter, X-ray diffraction analysis, and gas chromatography/mass spectrometry. It was found that the combined extrusion and fermentation treatment broke the starch structure, reduced the gelatinization enthalpy value of the rice flour, significantly reduced A-type crystallinity, and increased the aroma components of rice flour. This research provided a certain technical reference for promoting the application of combined extrusion and probiotic fermentation technology in grain processing.

Key words: instant rice flour; extrusion and puffing; fermentation treatment; brewing performance

1 引言

由于现代生活节奏的加快,方便营养的大米速食粉、代餐粉等冲调米粉广受消费者的青睐。挤压膨化是一种可以同时实现搅拌、加热、杀菌、膨化等多种操作的技术,该技术能耗低、效率高且卫生环保,是生产速食米粉的重要加工方式^[1,2]。经粉碎后膨化制成的米粉其淀粉糊化率高,在口感、冲调性和方便性方面得到了较大的改善^[3,4]。但是,由于大米中的淀粉含量较高,通过挤压技术得到的米粉存在冲调分散性差、容易结块、缺乏风味等问题^[5,6],这一技术所遇到的瓶颈亟需解决。运用益生菌发酵技术加工的大米食品在中国已有悠久的历史,不仅具有独特的发酵风味、营养丰富^[7-10],而且可产生多种天然抑菌物质抑制大米中有害微生物生长^[11,12]。根霉菌分泌的淀粉酶可将大米中的淀粉降解成单糖,既可以解决大米在挤压过程中存在的技术问题,又能为乳酸菌、酵母生长提供良好的碳源。乳酸菌代谢过程中可产生乳酸和多种有机酸,能抑制杂菌的生长,此外,乳酸菌分泌的蛋白酶可将米粉中的蛋白分解为不同分子量的多肽,为根霉菌、酵母发酵提供良好的氮源。而酵母菌则能为乳酸菌提供维生素、氨基酸等生长因子^[13-17]。

因此,鉴于上述思路,本研究选择东北珍珠米(粳米)为试验原料,用根霉菌、乳酸菌以及酵母菌三种复合菌发酵挤压膨化大米粉得到挤压膨化发酵大米粉。以分散性系数、湿润性指数以及冲调稳定性指数为评价指标,评价不同粒度、冲调温度、冲调固水比条件对大米粉冲调品质的影响。通过扫描电子显微镜、差示扫描量热仪、X-射线衍射分析方法探究米粉冲调性能改变的可能原因,以期改善产品冲调性能与风味,获得一种营养且风味独特的米粉,以促进挤压膨化与益生菌发酵联用技术在谷物加工中的应用。

2 材料与方法

2.1 材料与试剂

粳米碎米为市售商品;根霉菌属(*Rhizopus*)从市售酒糟中分离得到;武汉轻工大学食品微生物实验室;植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum* CCTCC 206133)和酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae* CCTCC 92003);武汉大学微生物菌种保藏中心。

2.2 仪器与设备

扫描电子显微镜(S-3000N),上海上天精密仪器有限公司;X射线衍射仪(Empyrean),帕纳科;差示扫描量热器(Q-2000),TA公司;气相质谱联用仪(7890B/5977B),安捷伦;双螺杆挤压膨化机(FMHE36-24R),长沙市福马科食品工程技术有限公司。

2.3 方法

2.3.1 米粉挤压膨化条件的确定

精选碎米先用磨粉机将其磨成细粉,标记为原料米粉 RF(rice flour),挤压膨化大米粉标记为 ERF(extrusion rice flour)。通过不同温度(105℃、115℃、125℃、135℃、145℃)、不同速度螺杆转速(170 r/min、190 r/min、210 r/min、230 r/min、250 r/min)、不同比例物料含水量(19%、22%、25%、28%、31%),采用膨化度、糊化度来确定米粉挤压膨化条件。挤压为双螺杆,面粉进料量为 5 kg/h。膨化度采用截面膨化度来表示^[18],糊化度引用王章桃^[19]糊化度测定方法。

2.3.2 米粉发酵条件的确定

挤压膨化米粉发酵后标记为 EFRF(extrusion fermented rice flour),发酵菌株为根霉菌、植物乳杆菌与酵母菌,比例为 1:2:1。通过不同发酵温度(28℃、31℃、34℃、37℃、40℃)、不同发酵时间(6 h、12 h、18 h、24 h、30 h)、不同菌种接种量(1 g/100g、3 g/100g、5 g/100g、7 g/100g、9 g/100g),采用还原糖含量(DE)和酸度来确定米粉发酵条件。还

原糖含量按照 GB 5009.7-2016 测定,酸度按 GB 5009.239-2016 中的粮食的酸度进行测定计算。

2.3.3 米粉冲调性的检测

将挤压膨化米粉和挤压膨化发酵米粉分别用 100 目、80 目、60 目、40 目的筛网进行筛分,得到 < 0.150 mm、0.150 ~ 0.180 mm、0.180 ~ 0.250 mm、0.250 ~ 0.425 mm 以及 > 0.425 mm 五个粒度的米粉,测定其冲调性指标。冲调性检测的评判指标用分散性指数、湿润性以及冲调稳定性三种方法。

(1) 分散性测定方法

分散性测定方法参照张岩^[20]和 Anderson^[21]的方法略加修改。准确称取样品 5.00 g,置于 50 mL 烧杯内,加入 30 mL 60 ℃ 蒸馏水,搅拌后静置 5 min,再次加入 30 mL 60 ℃ 蒸馏水,过 20 目筛,收集未过筛的结块物,置于 105 ℃ 烘箱中干燥 6 h,冷却称重。分散性指数如下计算:

$$\text{分散性指数}(\%) = \left(1 - \frac{m}{M(1-w)}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: m 为烘干后结块物的质量,单位为 g; M 为样品总质量,单位为 g; w 为样品含水比例。

(2) 冲调稳定性测定方法

称取 5.00 g 制备好的样品置于 100 mL 量筒内,加入蒸馏水 45 mL,搅拌静置 5 min。观察并记录上清液高度和悬浊液总高度^[22]。冲调稳定性指数如下计算:

$$\text{冲调稳定性指数}(\%) = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: h_1 为上清液高度; h_2 为悬浊液总高度。

2.3.4 米粉的微观结构

利用扫描电镜观察三种大米粉的微观结构。将样品过 80 目筛后粘在铜板上,对其进行喷金 60 s 处理,将喷金过后的样品置于扫描电镜观察微观结构。

2.3.5 米粉的热特性分析

利用 DSC 对三种大米粉的热特性进行分析。准确称量 5 mg 样品,将其装入铝盒,按米粉:水为 1:2 加入蒸馏水,压实后放入冰箱 4 ℃ 冷藏待用。分析条件:升温速率 10 ℃/min,升温区间 20 ℃ ~ 200 ℃。

2.3.6 米粉的 X 射线衍射分析

使用 XRD 对三种大米粉产品进行衍射分析。采用连续扫描的方式测试,参数为衍射角范围 10° 到 80°,扫描速度 5°/min。

2.3.7 固相萃取结合气相质谱法测定其挥发性风味物质

气相色谱的实验条件:色谱柱为 HP-88(30 m × 0.25 mm × 0.20 μm),总流量为 3 mL/min,柱流量为 1 mL/min,不分流;升温程序:初温 50 ℃,恒温 2 min,再以 5 ℃/min 的升温速度升至 230 ℃,保持 18 min。

质谱条件:电子轰击电离源;电子能量为 70 eV;离子源温度为 250 ℃。

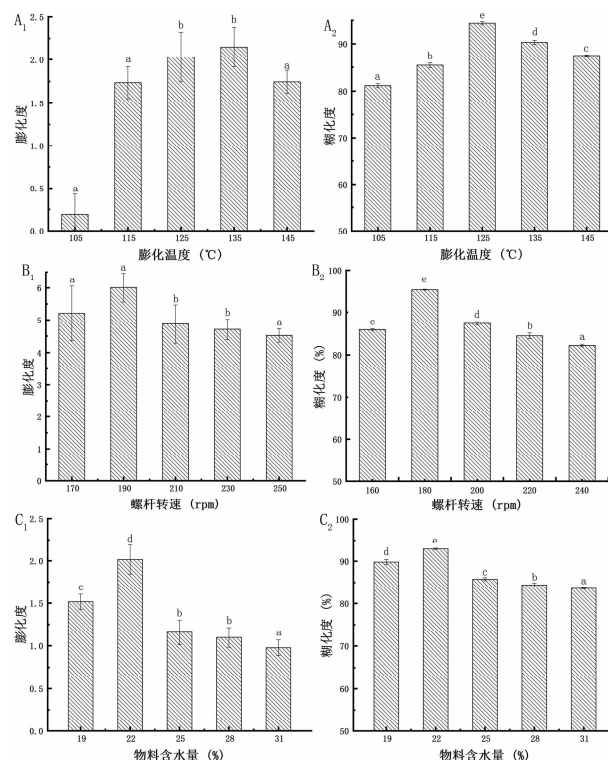
2.4 数据统计与分析

使用 Excel 2013 软件处理数据,实验数据为 3 次平行测定结果,表示为 $\bar{X} \pm SD$,使用 SPSS Statistics 19 软件分析,使用 Origin 95 软件作图。

3 结果与分析

3.1 米粉挤压膨化条件的确定

挤压膨化可以显著增加米粒体积,经过充分热处理的米粒变得酥脆且多孔,膨化度和糊化度越高,膨化米粉口感越好且越易消化^[23]。由图 1 所显示的膨化度和糊化度结果可知,当膨化温度为 125 ℃、螺杆转速为 190 r/min、物料含水量比例为 22% 时,挤压膨化米粉的品质较为理想。



注:图中不同小写字母表示在 0.05

水平上存在显著差异

图 1 不同膨化温度、螺杆转速及物料含水量对 EFRF 膨化度和糊化度的影响

3.2 米粉发酵条件的确定

DE 越高代表酶的活力越强,意味着能发酵产出更多易吸收的小分子糖类。由图 2A 和 2B 结果可知,当发酵时间为 24 h、发酵温度为 28 ℃ 时,DE 值较高,酶的活力较强,酸度较高;从图 2C 结果可知,菌种接种量为 5% 和 7% 时 DE 值相近,但菌种接种量为 5% 时酸度偏低,初步确定米粉发酵条件为发酵时间 24 h、发酵温度 28 ℃ 及菌种接种量 5%。

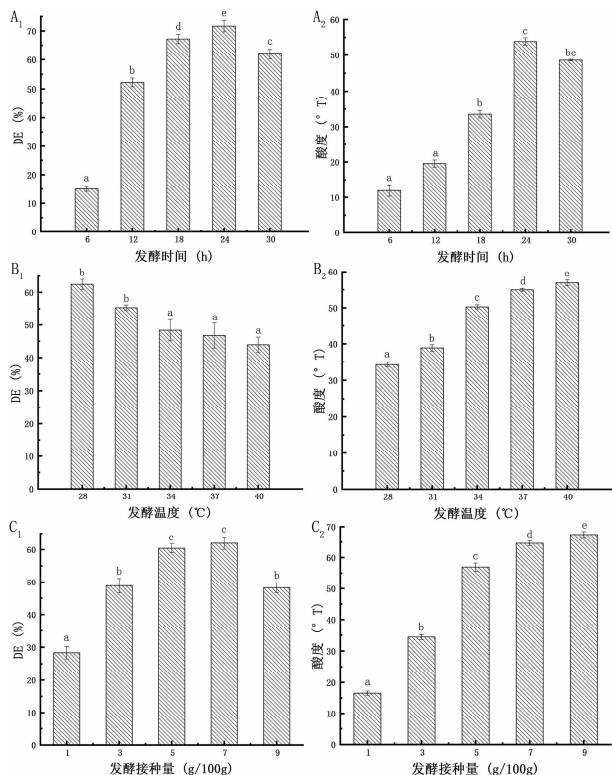
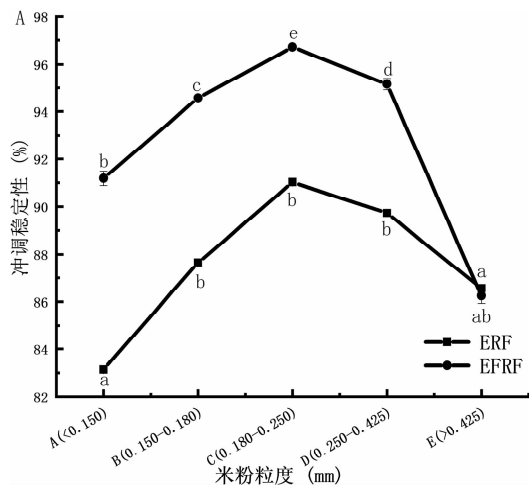


图2 不同发酵时间、发酵温度及发酵接种量对 EFRF 的 DE 和酸度的影响



3.3 米粉的冲调特性

将三种大米粉过 60 目筛,得到如图 3 所示的三种大米粉:RF 色泽偏白,密度大,粉末细腻均匀,无明显杂质。ERF 色泽偏黄,颗粒疏松密度小,有晶体形态。EFRF 色泽偏黄,颗粒疏松程度较 ERF 小,密度小,粉末细腻均匀,无明显杂质。

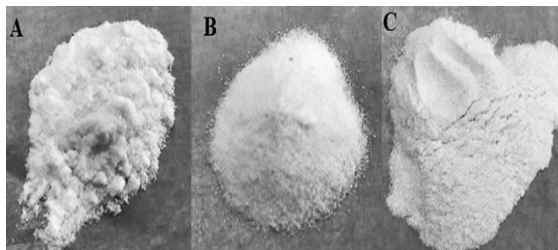
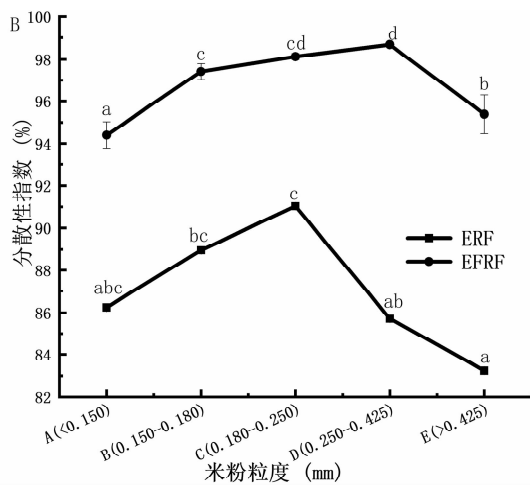


图3 三种不同处理米粉 RF(A)、ERF(B)及 EFRF(C)的图片

(1) 粒度对冲调性的影响

米粉的粒度对冲调性会产生显著影响,冲调稳定性和分散性指数百分比越高表示冲调性越好。由图 4 可知,随着米粉粒度的增加,米粉的冲调性能和分散性指数先上升后下降,在 60 目(0.18 ~ 0.25 mm) 其值达到峰值,同时也发现 EFRF 的冲调性能整体优于 ERF,其原因可能是发酵过程中淀粉大分子降解,使得中等及小分子质量淀粉比例上升,导致分子质量大小趋于均匀,从而使淀粉分子易于接近聚合而增强了淀粉凝胶性能^[24];另一个原因可能是,因为发酵所用的根霉产生的 α -淀粉酶水解了部分淀粉^[25],降低了淀粉分子量,提高了 EFRF 的冲调性。这与赵志浩^[26]用高温 α -淀粉酶预酶解-挤压膨化改善米粉冲调性结果一致。



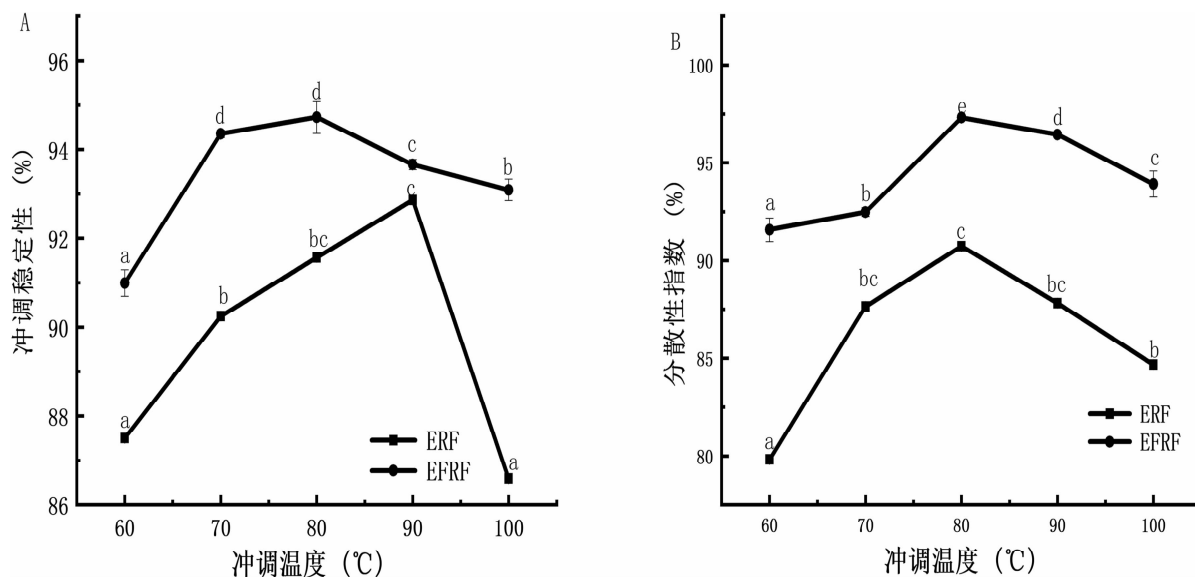
注:图 4A、B 分别为米粒粒度对发酵前后样品的冲调稳定性和分散性指数的影响

图4 米粉粒度对米粉冲调性的影响

(2) 冲调温度对冲调性的影响

原料过 60 目,冲调水温设置为 60 ℃、70 ℃、80 ℃、90 ℃、100 ℃五组温度。由图 5A 可知,随着温度的上升,ERF 和 EFRF 的冲调稳定性和分散性指数呈现先上升后下降的趋势。这可能是由于温度

过高,淀粉糊化和裂解程度加剧,导致挤压膨化物直链淀粉增多,支链淀粉分解,吸水性物质减少,不利于淀粉的糊化作用^[27]。由图 5B 可知,米粉在 80 ℃溶解更快,因此选择 80 ℃为理想冲调温度。



注:图 5 A、B 分别为冲调温度对发酵前后样品的冲调稳定性和分散性指数的影响

图 5 冲调温度对米粉的冲调性的影响

(3) 不同固液比下 ERF、EFRF 的分散性指数

冲调米粉的水量会影响米糊口感,所以需要有合适的冲调固液配比,从图 6 可知,当固液比达到 1:5 时,EFRF 分散性指数能达到 95%,因此冲调 EFRF 米粉的固液比确定为 1:5。

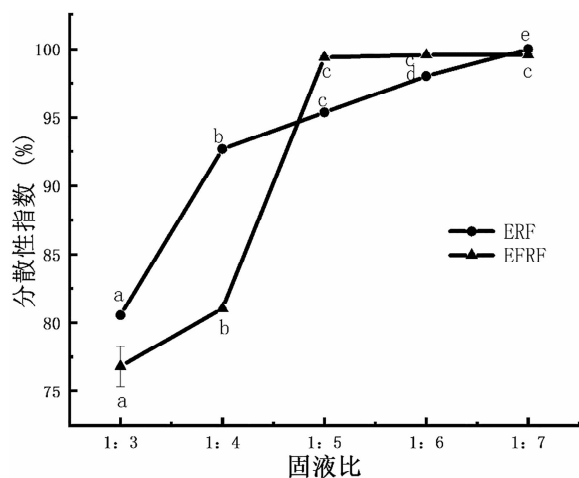


图 6 不同固液比下米粉的分散性指数的影响

3.4 米粉的微观结构形态

三种米粉 SEM 如图 7 显示,RF 淀粉颗粒由于没有被挤压而呈现光滑的多边形状态(图 7a),而米粉挤压后淀粉分子结合在一起形成了较大颗粒(图

7a、7b),这些大颗粒也有可能是直链淀粉和脂质在高温高压下形成了淀粉-脂质复合物^[4]。EFRF 和 ERF 这些大颗粒均棱角分明,可能是挤压膨化的高剪切力破坏了淀粉结构并重新排列^[28]。但 EFRF 与 ERF 相比,淀粉大小变化不大,表明微生物发酵在有挤压条件下对淀粉颗粒影响甚微,也提示挤压对淀粉形态的影响可能强于微生物发酵对淀粉形态的影响。

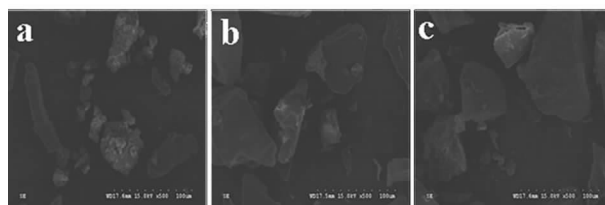


图 7 米粉的扫描电镜图

3.5 米粉的热特性分析

如图 8 所示,RF 变性起始温度为 98.46 ℃,EFRF 为 73.50 ℃,说明 RF 的热稳定性较强,EFRF 热稳定性较弱。与 RF 相比,ERF 的 ΔH 下降了 35.4%,EFRF 的 ΔH 下降了 43.8%,其原因可能是发酵使米粉淀粉分解为小分子物质,并使挤压膨化米粉内部结构更疏松,糊化时更容易吸水。从

米粉的 X 射线衍射分析结果(图 9)可以看出发酵后淀粉结晶度降低,无定形区的淀粉含量增高,然而无定形区的淀粉分子结合力弱,更容易让水分进入淀粉内部,所以挤压膨化发酵米粉相比挤压膨化米粉更容易吸水糊化,从而降低了糊化温度^[29]。

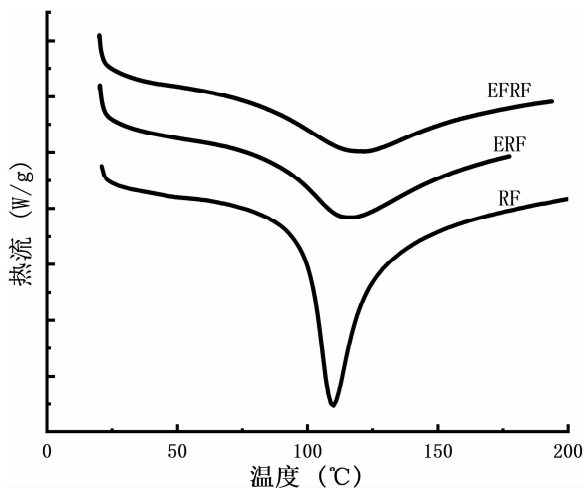


图 8 RF、ERF 和 EFRF 的 DSC 测定结果

3.6 米粉的 X 射线衍射分析

如图 9 中 RF 所示,RF 米粉的衍射图显示出典型 A 型峰,其主要衍射峰在 15.2°、17.2°、18.0°和 23.1°^[30]。ERF 米粉衍射图中 A 型淀粉衍射峰强度明显降低,在 13.0°和 19.8°出现淀粉脂质复合物特征峰,这与 Jongsutjarittam^[31] 和 TANG M C 等人^[32] 结果一致,可能是挤压膨化过程中高剪切力将淀粉分子键破坏,淀粉的结晶度降低。EFRF 米粉衍射图谱显示 A 型峰基本消失,但在 13.0°、13.5°和 18.5°出现较小衍射峰,可能是微生物发酵 ERF 后,将淀粉分解为小分子环糊精和多糖,淀粉脂质复合物被分解成更小分子的淀粉衍射峰。

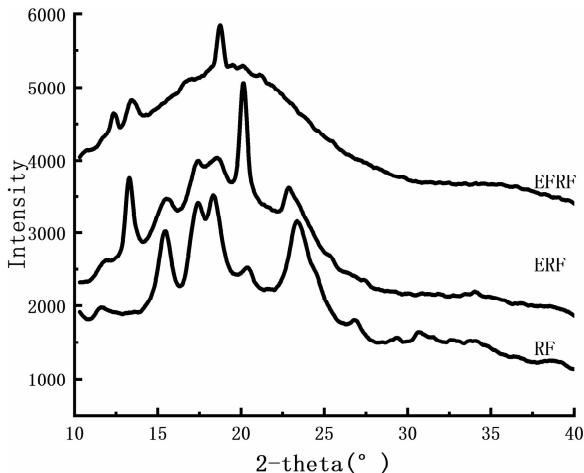


图 9 RF、ERF 和 EFRF 的 XRD 测定结果

3.7 挥发性风味物质的变化

采用气相色谱-质谱联用仪对 RF 和 EFRF 的香气成分进行分析,其中主要成分结果见表 1、表 2。RF 的主要香气成分为脂类、醇类和醛类,经过挤压膨化发酵后的 EFRF 香气成分主要是乙酸乙酯、乙醛和醋酸。混合发酵中优势菌种产生氨基酸,氨基酸在酶、乳酸菌和酵母菌的发酵下产生乙醛和乙醛等物质,其中醇和酸发生酯化反应生成脂类物质,从而使挤压膨化发酵米粉获得了酒香和果香^[33~36]。

表 1 EFRF 的香气成分及相对含量

序号	化合物名称	分子式	百分含量/%
1	乙醛	CH ₃ CHO	14.910
2	醋酸	CH ₃ COOH	13.971
3	仲辛醇	C ₈ H ₁₈ O	0.199
4	乙酸乙酯	C ₄ H ₈ O ₂	68.686
5	2-己醇	C ₆ H ₁₄ O	0.247
6	乙醇	C ₂ H ₅ OH	0.159
7	2-壬基醇	C ₉ H ₂₀ O	0.113
8	十二醛	C ₁₂ H ₂₄ O	0.230
9	2-溴乙醇	C ₂ H ₅ BrO	0.167
10	柠檬烯	C ₁₀ H ₁₆	0.193
11	壬醛	C ₉ H ₁₈ O	0.212

表 2 RF 的香气成分及相对含量

序号	化合物名称	分子式	百分含量/%
1	仲辛醇	C ₈ H ₁₈ O	20.884
2	原二氯乙酸三乙酯	C ₈ H ₁₆ C ₁₂ O ₃	13.043
3	十二醛	C ₁₂ H ₂₄ O	23.843
4	1-甲基-4,5-二氧代-3-吡咯烷羧酸乙酯	C ₈ H ₁₁ NO ₄	2.259
5	2-甲基哌嗪	C ₅ H ₁₂ N ₂	2.598
6	柠檬烯	C ₁₀ H ₁₆	4.7364
7	十三烷基十八烷酸酯	C ₃₁ H ₆₂ O ₂	2.083
8	壬醛	C ₉ H ₁₈ O	10.762
9	pentatriacont-17-ene	C ₃₅ H ₇₀	4.227
10	十八醇	C ₁₈ H ₃₈ O	5.046
11	硫酸单十八烷基酯	C ₁₈ H ₃₈ O ₄ S	6.835
12	1-三十二烷醇	C ₃₂ H ₆₆ O	3.678

4 结论

本研究联合挤压膨化和发酵技术,运用根霉菌、植物乳杆菌与酵母菌等多种微生物共同发酵,获得

了一种营养且风味独特的米粉。挤压膨化技术将大分子淀粉剪切成较小分子,高温高压使淀粉糊化、蛋白变性,有利于米粉冲调。根霉发酵产生的 α -淀粉酶将淀粉分解为小分子环糊精和多糖,使米粉更有利于被人体吸收,酵母菌和乳酸菌的发酵产生的酒香和果香气味使米粉具有独特风味。通过条件优化,该挤压发酵米粉在60目、冲调温度80℃、固液比1:5时冲调性最佳,但挤压膨化和发酵联用技术对米粉性能影响的机理还需进一步研究。

参考文献:

- [1] Ajita T, Jha S K. Extrusion cooking technology: Principal mechanism and effect on direct expanded snacks-An overview [J]. *International Journal of Food Studies*, 2017, 6(1): 113-128.
- [2] Kristina, Kljak, Even, et al. Influence of physico-chemical properties of Croatian maize hybrids on quality of extrusion cooking [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 472-477.
- [3] Hoke K, Houska M. Optimisation of puffing naked barley [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(4): 1016-1022.
- [4] 张亭亭, 邢贝贝, 赵强, 等. 挤压膨化处理对婴幼儿米粉理化和体外消化特性的影响 [J]. *中国食品学报*, 2020, 20(1): 158-165.
- [5] 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, 156.
- [6] 李健, 刘丹, 张若男, 等. 粳米碎米清酒的工艺研究 [J]. *酿酒科技*, 2011(2): 51-54.
- [7] Lu Z H, Cao W. Effect of fermentation metabolites on rheological and sensory properties of fermented rice noodles [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2010, 88(12): 2134-2141.
- [8] 唐维媛, 张义明, 王文平, 等. 复合益生菌发酵剂制备乳酸菌饮料的研究 [J]. *中国酿造*, 2010(11): 53-55.
- [9] Ray M, Ghosh K. Folk to functional: An explorative overview of rice-based fermented foods and beverages in India [J]. *Journal of Ethnic Foods*, 2016, 3(1): 5-18.
- [10] Liehhi Su, Chinen Lin, Chen M J. Development of an Oriental - style dairy product coagulated by microcapsules containing probiotics and filtrates from fermented rice [J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2007, 60(1): 49-54.
- [11] Smit G, Smit B A, Engels W J M. Flavour formation by lactic acid bacteria and biochemical flavour profiling of cheese products [J]. *FEMS microbiology reviews*, 2005, 29(3): 591-610.
- [12] Gulahmadov S G, Abdullaeva N F, Guseinova N F, et al. Isolation and characterization of bacteriocin-like inhibitory substances from lactic acid bacteria isolated from Azerbaijan cheeses [J]. *Applied biochemistry and microbiology*, 2009, 45(3): 266-271.
- [13] 邢珂雪, 靳国杰, 康登昭, 等. 乳酸菌饮料菌类特性、发酵机理和工艺优化研究进展 [J]. *现代食品*, 2020(3): 79-84.
- [14] 黄鑫, 唐红梅, 唐青莲, 等. 大头菜发酵过程中生香酵母的分离、筛选及鉴定 [J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(18): 198-203.
- [15] Zacharof M P, Coss G M, Mandale S J, et al. Separation of lactobacilli bacteriocins from fermented broths using membranes [J]. *Process Biochemistry*, 2013, 48(8): 1252-1261.
- [16] Rebeca Martín, Langella P. Emerging Health Concepts in the Probiotics Field: Streamlining the Definitions [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 1-5.
- [17] Cássia P Barros, Guimares J T, Esmerino E A, et al. Paraprobiotics and postbiotics: concepts and potential applications in dairy products - Science Direct [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2020, 32: 1-8.
- [18] Ding Q B, Ainsworth P, Tucker G, et al. The effect of extrusion conditions on the physico-chemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks [J]. *Journal of Food engineering*, 2005, 66(3): 283-289.
- [19] 王章桃. 挤压膨化与微生物发酵联用技术对改善冲调米糊品质的研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
- [20] 张妍, 高蕾, 王正红, 等. 响应面试验优化喷雾干燥制备核桃分心木速溶粉及其冲调性分析 [J]. *食品科学*, 2016, 37(18): 47-51.
- [21] Anderson R A, Conway H F, Peplinski A J. Ge-

- latinization of corn grits by roll cooking, extrusion cooking and steaming [J]. *Starch - Stärke*, 1970, 22(4):130-135.
- [22] Jinapong N, Supphantharika M, Jamnong P. Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 84(2):194-205.
- [23] Hoke K, Houšová J, Houška M. Optimum conditions of rice puffing [J]. *Czech J. Food Sci.* Vol, 2005, 23(1):1-11.
- [24] 鲁战会, 李里特, 李再贵, 等. 自然发酵对淀粉凝胶的改性机理及发酵菌株的筛选 [J]. *食品与发酵工业*, 2002(4):1-6.
- [25] 周金虎, 陈茂彬, 毛志海, 等. 甜酒曲中一株高产淀粉酶根霉的筛选与鉴定 [J]. *酿酒科技*, 2019(1):37-40.
- [26] 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.
- [27] 沈丹, 孟娇, 曹龙奎. 响应面法优化鹰嘴豆淀粉膨化工艺条件及水溶性与吸水性的研究 [J]. *农产品加工*, 2015(12):1-5, 7.
- [28] González Soto, Rosalia A. Extrusion of banana starch: characterization of the extrudates [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 87(2):348-356.
- [29] 蒋紫妍. 自然发酵对大米理化特性与米粉品质影响的研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- [30] 秦仁炳, 王书军, 项丰娟, 等. 淀粉-脂质复合物在热加工过程中的结构变化及其对体外消化性影响 [J]. *食品科学*, 2021, 12(4):1-8.
- [31] Jongsutjarittam O, Charoenrein S. The effect of moisture content on physicochemical properties of extruded waxy and non-waxy rice flour [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 114:133-140.
- [32] Tang M C, Copeland L. Analysis of complexes between lipids and wheat starch [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 67(1):80-85.
- [33] 席慧婷, 江平屿, 陈星光, 等. 复合菌发酵米粉的制作工艺优化及其香气成分 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(11):204-210, 217.
- [34] 马霞, 李路遥, 何艳, 等. 发酵鲜湿米粉的优良菌种选育及品质研究 [J]. *食品科学*, 2017, 38(2):98-103.
- [35] 梁言. 乳杆菌与酵母发酵粳米粉浆及制备米发糕的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [36] 马媛, 耿伟涛, 王金菊, 等. 乳酸菌代谢与食品风味物质的形成 [J]. *中国调味品*, 2019, 44(1):159-163, 172.