

小麦糊粉层粉的挤压稳定化处理条件优化

靳灿灿, 温纪平*, 朱慧雪

河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001

摘要:采用挤压的高温、高压、高剪切作用对小麦糊粉层粉进行稳定化处理,以期达到降低小麦糊粉层粉中脂肪酸值的效果。研究了挤压温度、物料水分含量、主机频率对小麦糊粉层粉中脂肪酸值的影响,采用正交试验设计优化挤压稳定化处理条件。结果表明:小麦糊粉层粉的最佳处理条件为挤压温度145℃、物料水分含量24%、主机频率18 Hz,此时降低脂肪酸值的效果最好。同时在有效降低小麦糊粉层粉中的脂肪酶活力、脂肪氧化酶活力、植酸含量、微生物菌落总数的情况下,还增加了小麦糊粉层粉的总膳食纤维含量、可溶性膳食纤维含量、总酚含量、总抗氧化能力以及小麦糊粉层粉的持水力、膨胀力。综上所述,挤压稳定化效果显著,优化后的处理条件能耗低、效果好,对小麦糊粉层粉的稳定化处理有一定的参考价值。

关键词:小麦糊粉层粉;挤压;稳定化;膳食纤维;抗氧化

中图分类号:TS211

文献标志码:A

文章编号:1673-2383(2021)01-0015-07

DOI:10.16433/j.1673-2383.2021.01.003

Optimization of extrusion and stabilization treatment conditions for wheat aleurone layer

JIN Cancan, WEN Jiping*, ZHU Huixue

College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

Abstract: Wheat aleurone layer flour is a good source of nutrients, however, it has certain disadvantages due to relatively high levels of lipids and various microorganisms and enzymes, which would make wheat aleurone layer flour prone to oxidative rancidity, this oxidation will result in a poor palatability of wheat aleurone layer flour and a vain consumption of nutritional properties. Therefore, it is necessary to stabilize the wheat aleurone layer flour. Recently, a lot of researches on wheat aleurone layer flour were mainly focused on the separation and extraction of the aleurone layer, the nutritional quality, and the improvement of flavor. However, there are no relevant reports on the stabilization of wheat aleurone layer flour. In this study, the effect of extrusion treatment on stabilization of the wheat aleurone layer flour was investigated. This study aims to explore the effects of high temperature, high pressure and high shear of extrusion treatment on the free fatty acid value of wheat aleurone layer flour. The free fatty acid value in wheat aleurone layer flour was the dependent variable because it is a main indicator of wheat flour quality and a higher fatty acid value will greatly shorten the shelf life of the food. The optimal stabilization process was obtained by an orthogonal optimization experiment, including optimized extrusion temperature, material moisture content and frequency of the main engine. The results showed that the extrusion stabilization effect was significant ($P < 0.05$) and the most important influence factor on the degradation of free fatty acid in wheat aleurone layer flour was moisture content, followed by extrusion temperature and frequency of the main engine. Besides, the optimum conditions were selected during extrusion stabilization treatment, which was

收稿日期: 2020-08-16

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2018YFD0401001)

作者简介: 靳灿灿(1993—),女,河南周口人,硕士研究生,研究方向为谷物加工理论与技术。

* 通信作者: 温纪平,教授, E-mail: wjp1380@163.com。

the extrusion temperature of 145 °C, the material moisture content of 24%, and the host frequency of 18 Hz. Under the optimal condition, the free fatty acid value in wheat aleurone layer flour was the lowest (86 mg/100 g) and the degradation rate was as high as 74.71%. Furthermore, the activities of lipase and lipoxygenase, total number of microbial colonies and phytic acid content were also notably reduced, among which the activities of lipase and lipoxygenase decreased by 91.5% and 84.93%, respectively. Phytate is an anti-nutritional factor and its inactivation facilitate the absorption of desirable nutrients. Nevertheless, compared with the native sample, the content of total dietary fiber, soluble dietary fiber, pentosan, total phenol and antioxidant activity presented a remarkable increase ($P < 0.05$). With the improvement of safety, the nutritional properties of wheat aleurone layer flour also increased. In addition, the water holding capacity and swelling power were also obviously improved, so the commercial value of the end product will be increased when wheat aleurone layer flour is applied to food. Accordingly, extrusion processing could be developed as a novel and effective technology that could stabilize wheat aleurone layer flour and maintain/improve its nutritional functions at the same time, which will provide technical support for the stabilization of wheat aleurone layer flour and the application of wheat aleurone layer flour in food.

Key words: wheat aleurone layer flour; extrusion; stabilization; dietary fiber; antioxidant

随着人们生活水平的提高和对健康的重视,面粉高精度与低营养的矛盾越来越突出,而小麦糊粉层粉可以化解这种矛盾,解决精制面粉膳食纤维和营养物质缺失的问题^[1]。小麦糊粉层粉中的膳食纤维、蛋白质、有益脂类、矿物质、维生素B类等高营养活性成分以及具有抗氧化能力的酚酸类等物质,不仅可以为人体提供营养,而且可以很好地预防高胆固醇症、糖尿病、心血管疾病、结肠癌等慢性疾病^[2]。由于小麦糊粉层粉靠近小麦籽粒的外种皮,与此同时会引入较多的脂类、酶类和微生物等使其极易发生氧化酸败导致脂肪酸值明显增加,从而大大缩短它的货架期^[3]。脂肪酸值体现的是小麦粉中游离脂肪酸的含量,反映了小麦粉的新鲜程度,是衡量小麦粉品质优劣的主要指标^[4]。脂肪酶的酶促反应可以水解小麦糊粉层粉中的脂质并产生游离脂肪酸,而且还影响脂肪酸的氧化和降解,主要通过脂肪氧合酶作用或自氧化降解^[5],自氧化可通过小麦糊粉层粉中的脂质与氧气的非酶促反应发生。因此,有必要对小麦糊粉层粉进行稳定化处理。

挤压技术是集混合、搅拌、破碎、加热、蒸煮、杀菌、膨化及成型等为一体的高新技术,可以有效改善物料稳态化,已经广泛应用于粮油加工行业^[6]。目前国内外学者采用挤压技术主要研究了全麦粉、燕麦、麸皮、胚芽、米糠等的稳定化处理^[7-11],而关于单独对小麦糊粉层粉进行稳定化处理的研究还未见报道。作者旨在探究挤压处理是否可以达到降低小麦糊粉层粉中

的脂肪酸值、酶活性、微生物含量的效果,对分析挤压处理前后小麦糊粉层粉的抗氧化能力及营养品质的差异。挤压机的工作原理是具有一定水分含量的物料进入套筒内的加热区后,协同挤压机螺杆双向剪切的向前推进作用将物料从进料端输送到模口端。在此过程中,物料被加热,并且剧烈摩擦产生足够的热量,利用物料中的水分含量蒸煮物料,使物料在剧烈的挤压力、剪切力以及高温蒸煮条件下发生变化。因此,作者重点研究了不同挤压参数对小麦糊粉层粉中脂肪酸值的降解效果,如螺杆机壳的模口温度、挤压机的主机频率和挤出物料的初始水分含量,确定小麦糊粉层粉的最佳挤出条件,以期对小麦糊粉层粉的稳定化处理奠定理论基础。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;仪器

小麦糊粉层粉:山东知食坊食品科技有限公司。

植酸标准品、没食子酸:北京索莱宝科技有限公司;总抗氧化能力试剂盒:南京建成生物工程研究所。试验所用试剂均为分析纯。

DS 32型双螺杆试验机:济南赛信膨化机械有限公司;THZ-82A振荡器:河南捷隆科技有限公司;SPX-150B-Z生化培养箱:上海博迅实业有限公司医疗设备厂;HJ-6磁力加热搅拌器:金坛区西城新瑞仪器厂;LXJ-IIIB低速大容

量多管离心机:上海安亭科学仪器厂;SW-CJ-1D 单人单面垂直净化工作台:苏州智净净化设备有限公司;Fibertec E 膳食纤维分析仪、TM8400 凯氏定氮仪:FOSS 分析仪器公司;光吸收型单功能酶标仪:上海艾研生物科技有限公司;UV2150/2150 紫外/可见分光光度计:龙尼柯(上海)仪器有限公司;SMY2000 型色差计:北京盛名扬科技发展有限公司。

1.2 方法

1.2.1 小麦糊粉层粉的挤压稳定化处理

挤压前处理:将小麦糊粉层粉分别调到目标水分含量(14%、16%、18%、20%、22%、24%)并均质一段时间后进行挤压稳定化处理。

挤压处理:采用 DS 32 型双螺杆试验机进行单因素及正交试验。

挤压后处理:挤压后的物料立即在 50 ℃ 条件下烘 3 h,使用密封型摇摆式万能粉碎机将其粉碎后过 60 目(<250 μm)筛。

1.2.2 小麦糊粉层粉理化指标的测定

水分的测定参照 GB 5009.3—2016;灰分测定参照 GB 5009.4—2016;粗蛋白的测定参照 GB 5009.5—2016;粗淀粉的测定参照 GB 5009.9—2016;粗脂肪的测定参照 GB 5009.6—2016;脂肪酸值的测定参照 GB/T 5510—2011。

1.2.3 模口温度单因素试验

喂料频率恒定 13 Hz,固定主机频率 15 Hz,物料水分含量 20%,设置挤压区三区(I/II/III)温度分别为 30/100/120 ℃、30/110/130 ℃、30/120/140 ℃、30/130/150 ℃、30/140/160 ℃(以下简称模口温度分别为 120、130、140、150、160 ℃)进行试验,测定样品脂肪酸值的变化,3 次平行试验取均值。

1.2.4 主机频率单因素试验

喂料频率恒定 13 Hz,固定模口温度 140 ℃,物料水分含量 20%,设置主机频率 9、12、15、18、21 Hz 进行试验,测定样品脂肪酸值的变化,3 次平行试验取均值。

1.2.5 物料水分含量单因素试验

喂料频率恒定 13 Hz,固定模口温度 140 ℃,主机频率 15 Hz,设置物料水分含量 16%、18%、20%、22%、24%进行试验,测定样品脂肪酸值的变化,3 次平行试验取均值。

1.2.6 挤压稳定化处理正交优化试验

在单因素试验的基础上进行正交试验,确定小麦糊粉层粉挤压稳定化处理的最优工艺参数。

1.2.7 小麦糊粉层粉相关指标的测定

脂肪酶活力测定参照 GB/T 5523—2008;脂肪氧化酶活力测定参考文献[12]中的方法;植酸含量测定参考 Buddrick 等^[13]的方法;微生物的测定参照 GB 4789.2—2016;总膳食纤维和可溶性膳食纤维的测定参照 GB 5009.88—2014;戊聚糖的测定参照郑学玲等^[14]使用的方法;总酚的测定参考韩雪^[15]使用的方法;总抗氧化能力按照南京建成生物工程研究所提供的总抗氧化能力检测试剂盒说明书测定;持水力和膨胀力的测定参照李梦琴等^[16]使用的方法;处理后小麦糊粉层粉的色泽采用色差计进行测定。

1.3 数据统计与分析

采用 Excel、SPSS 25.0 软件对数据进行处理,使用 Origin 9.5 软件制图。

2 结果与分析

2.1 小麦糊粉层粉的基本组成

小麦糊粉层粉的基本组分测定结果见表 1。

表 1 小麦糊粉层粉的基本组成

Table 1 Basic composition of wheat aleurone layer

样品	水分	灰分	粗蛋白	粗淀粉	脂肪	总膳食纤维	其他
发达集团(枣庄银牛)	8.19±0.04	3.88±0.01	18.633±0.309	33.13±1.08	3.6±0.1	28.10±0.05	4.467

2.2 单因素试验

2.2.1 模口温度对小麦糊粉层粉脂肪酸值的影响

由图 1 可知,模口温度在 120~130 ℃ 时小麦糊粉层粉脂肪酸值下降不显著,随着模口温度的升高,物料吸收的热量逐渐增大,小麦糊粉层粉的脂肪酸值显著降低($P < 0.05$),这主要是因为高

温对游离脂肪酸具有破坏作用^[17]。随着温度的继续升高,物料散发出来的麦香味也越加浓郁,在 150 ℃ 时物料出现轻微焦糊味,当温度达到 160 ℃ 时,物料发生严重焦糊现象。

2.2.2 主机频率对小麦糊粉层粉脂肪酸值的影响

由图 2 可知,小麦糊粉层粉经挤压处理后,

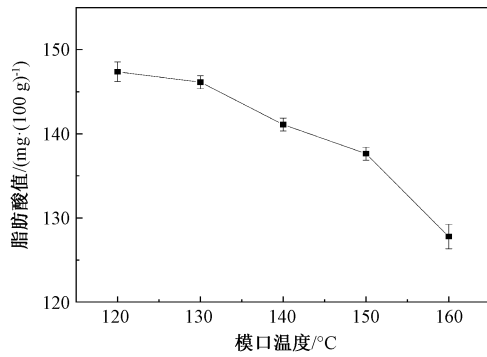


图1 模口温度对脂肪酸值的影响

Fig. 1 Influence of die temperature on fatty acid value

脂肪酸值随主机频率的增高显著降低 ($P < 0.05$),这主要是因为主机频率越高,挤压机双螺杆的转速越快,物料在挤压机内的热作用时间缩短,同时物料受到的挤压加压作用加强^[18],小麦糊粉层粉在螺杆间剧烈摩擦产生足够的热量蒸煮物料,从而达到降低物料脂肪酸值的效果。

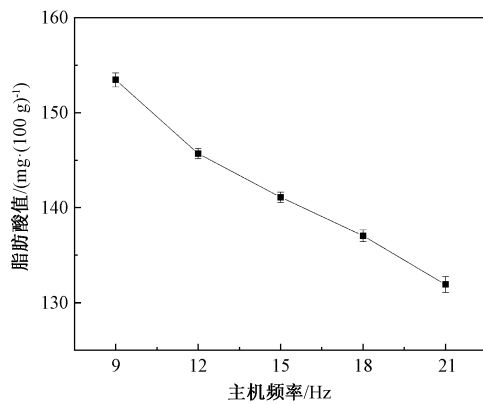


图2 主机频率对脂肪酸值的影响

Fig. 2 Influence of host frequency on fatty acid value

2.2.3 物料水分含量对小麦糊粉层粉脂肪酸值的影响

由图3可以看出,用于挤压处理的小麦糊粉层粉初始水分含量越高其脂肪酸值降低效果越好,这与蔡易辉^[19]的研究结果一致。主要是因为物料中的水分在较高挤压温度下迅速汽化,使挤压机套筒内产生巨大的压强,在相同温度下物料水分含量越高产生的压强越大,因此穿透能力越强,对脂肪酸的降解效果越好。

2.3 正交试验

在单因素试验的基础上进行正交优化试验。

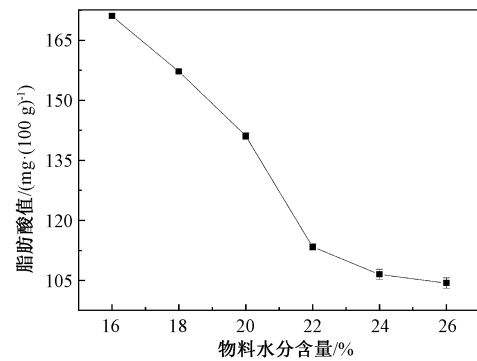


图3 物料水分含量对脂肪酸值的影响

Fig. 3 Influence of material moisture on fatty acid value

以A模口温度、B主机频率、C物料水分含量为因素(挤压机3个区温度设置分别为40/120/145℃、40/125/150℃、40/130/155℃,以下简称145、150、155℃),选用 $L_9(3^4)$ 进行试验,试验设计及结果见表2。

表2 正交试验设计与结果

Table 2 Orthogonal tests and results

试验号	A 模口温度/℃	B 主机频率/Hz	C 物料水分含量/%	脂肪酸值/($\text{mg} \cdot (100 \text{g})^{-1}$)
1	145	16	20	117
2	145	18	22	98
3	145	20	24	95
4	150	16	22	118
5	150	18	24	96
6	150	20	20	116
7	155	16	24	111
8	155	18	20	119
9	155	20	22	115
k_1	103	115	117	
k_2	110	104	110	
k_3	115	109	101	
R	12	11	17	

由表2可知,影响脂肪酸值的因素由主到次为C、A、B,即物料水分含量>模口温度>主机频率。脂肪酸值反映的是样品酸败的程度,因此取最小值,理论的最优方案为 $A_1B_2C_3$,即模口温度145℃、主机频率18 Hz、物料水分含量24%。经验证, $A_1B_2C_3$ 的脂肪酸值为86 mg/100 g,小麦糊粉层粉中初始的脂肪酸值为340 mg/100 g,该条件下的脂肪酸值降低了74.71%。因此,可将 $A_1B_2C_3$ 作为最优方案。

2.4 小麦糊粉层粉稳定化处理前后成分分析

挤压稳定化处理对小麦糊粉层粉中酶活力

和微生物的影响见表 3。

表 3 挤压对小麦糊粉层粉中酶活力和微生物的影响

Table 3 Effect of extrusion on the enzyme activity and number of bacteria in wheat aleurone layer flour

样品	脂肪酶活力/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	脂肪氧化酶活力/ %	lg(菌落总数/ ($\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$))
未处理	435.20±0.42 ^a	100.00±0.00 ^a	4.44±0.04 ^a
挤压处理	37.00±0.92 ^b	15.07±0.39 ^b	3.61±0.01 ^b

注:同列的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。表 4、表 5 同。

由表 3 可知,挤压处理钝酶效果极为显著,小麦糊粉层粉中的脂肪酶活力由原来的 435.20 mg/g 减少到 37.00 mg/g,灭活了 91.50%;脂肪氧化酶的残余酶活力为 15.07%,灭活了 84.93%;挤压处理使微生物菌落总数也显著降低,这主要是因为物料在挤出过程中,要经受水分、高压、高温和机械剪切的综合作用^[20],从而使酶蛋白失活,而微生物在如此剧烈的环境中也难以生存,从而达到灭酶、减菌的效果。

挤压稳定化处理前后小麦糊粉层粉相关成分对比见表 4。植酸是一种抗营养因子,它不仅会影响蛋白质、淀粉和脂肪的利用,而且会严重抑制矿物质元素在肠道中的吸收^[21]。挤压处理显著降低了小麦糊粉层粉中的植酸含量,由初始的 24.76 mg/g 下降到 14.05 mg/g,降低了 43.30%,这是因为植酸盐在高温下不稳定,易被水解成低磷酸肌醇酯和磷酸盐。同时,挤压处理显著增加了小麦糊粉层粉的总膳食纤维(TDF)、可溶性膳食纤维(SDF)含量,分别由 28.10 g、

3.66 g/100 g 增长到 29.50、3.76 g/100 g,增长率分别为 4.98%、2.73%。大量试验结果证明,挤压处理可以增加 TDF 和 SDF 的含量^[15,22-25],这可能是因为小麦糊粉细胞壁中含有较多的低聚半乳糖、 β -葡聚糖、木质素、纤维素和半纤维素等大分子物质,经挤压处理后,一些大分子量物质中部分共价键和非共价键断裂,导致片段更小、更易溶^[24],从而使 TDF、SDF 含量增加。戊聚糖是小麦籽粒中主要的非淀粉多糖,是膳食纤维的主要成分^[26],戊聚糖含量的增加可能与小麦糊粉层粉中 TDF、SDF 含量增加有关,这与 Teresa 等^[27]的结论一致。小麦糊粉层粉经挤压后,总酚含量和总抗氧化能力分别增加了 100.65%、124.13%。挤压是一种结合机械剪切和温度影响破坏细胞壁结构的加工方法^[28],因此总酚含量的增加可能与挤压处理后糊粉细胞的破裂有关,这会导致阿魏酸(FA)的释放^[29],阿魏酸是最常见的酚酸之一,它大量存在于谷物的糊粉层中。酚酸主要通过酯键和细胞壁中的其他物质共价结合^[30],而挤压的高剪切力可能切断酯键从而使结合态的酚酸游离出来使总酚含量增加。FA 被认为是小麦糊粉层具有抗氧化能力的主要贡献者^[31]。Rosa 等^[32]指出,当糊粉层细胞破裂后,随着颗粒比表面积和开口率的增加,与细胞壁相连的 FA 暴露量更高,细胞内的共轭游离 FA、维生素 E 等被释放出来使总抗氧化能力增加。也有文献表明,总酚含量与抗氧化能力呈正相关^[33],从试验结果可以看出,总抗氧化能力的增长与总酚含量的增长具有一致性。

表 4 挤压对小麦糊粉层粉相关成分的影响

Table 4 Effect of extrusion on the components of wheat aleurone layer flour

样品	植酸含量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	TDF 含量/ ($\text{g}\cdot(100\text{g})^{-1}$)	SDF 含量/ ($\text{g}\cdot(100\text{g})^{-1}$)	戊聚糖含量/ ($\text{g}\cdot(100\text{g})^{-1}$)	总酚含量/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	总抗氧化能力/ ($\text{mmol}\cdot(100\text{g})^{-1}$)
未处理	24.76±0.34 ^a	28.10±0.05 ^a	3.66±0.01 ^a	10.23±0.01 ^a	1.53±0.00 ^a	0.229 2±0.003 0 ^a
挤压处理	14.05±0.34 ^b	29.50±0.03 ^b	3.76±0.01 ^b	10.42±0.01 ^b	3.07±0.02 ^b	0.513 7±0.001 5 ^b

2.5 挤压稳定化处理对小麦糊粉层粉的持水力、膨胀力以及色泽的影响

由表 5 可知,经挤压处理后的小麦糊粉层粉的持水力、膨胀力显著增大,分别由挤压前的 2.21 g/g、1.20 mL/g 增长到 3.77 g/g、4.09 mL/g,增长率分别为 41.40%、70.70%,这与韩雪^[15]的研究结果一致,这主要是因为经挤压处理后的小麦糊粉层粉具有较多疏松多孔的结

构、凹凸不平的表面和较大的裸露表面积^[25,34],也可能是小麦糊粉层粉中纤维的降解造成持水力和膨胀力的增加。挤压处理后的小麦糊粉层粉 L^* 减小, a^* 和 b^* 增大,即色泽变暗,红值和黄值增加,这可能是在挤出的过程中小麦糊粉层粉的蛋白质和还原糖在热作用下发生了美拉德反应,同时伴随着焦糖化反应造成的。

表5 挤压对小麦糊粉层粉的持水力、膨胀力、色泽的影响

Table 5 Influence of extrusion on the water holding capacity, swelling force and color of wheat aleurone layer flour

样品	持水力/(g·g ⁻¹)	膨胀力/(mL·g ⁻¹)	L*	a*	b*
未处理	2.21±0.03 ^a	1.20±0.14 ^a	77.43±0.12 ^a	0.56±0.04 ^a	14.98±0.13 ^a
挤压处理	3.77±0.07 ^b	4.09±0.07 ^b	67.93±0.06 ^b	2.58±0.04 ^b	21.09±0.11 ^b

3 结论

通过对不同挤压条件处理后的小麦糊粉层粉中脂肪酸值的测定和分析,并结合正交试验优化了挤压稳定化的处理参数,得出最佳处理条件:挤压温度 145 ℃、物料水分含量 24%、主机频率 18 Hz,该条件下脂肪酸值含量仅为 86 mg/100 g,脂肪酶活力为 37.00 mg/g,脂肪氧化酶活力为 15.07%,植酸含量降低了 43.30%,挤压稳定化效果显著。同时,经挤压处理后小麦糊粉层粉的总膳食纤维含量增加了 4.98%,可溶性膳食纤维含量增加了 2.73%,戊聚糖含量增加了 1.86%,总酚含量增加了 100.65%,总抗氧化能力增加了 124.13%,以及小麦糊粉层粉的持水力增加了 41.40%,膨胀力增加了 70.70%。挤压处理在提高小麦糊粉层粉的安全性的同时还增加了小麦糊粉层粉的营养品质和功能特性,为小麦糊粉层粉的加工利用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 邓亚敏,张泓,胡宏海,等.小麦糊粉层及其产品的开发应用研究进展[J].食品科技,2019,44(4):157-161.
- [2] ANDERSON J W, HANNA T J, PENG X, et al. Whole grain foods and heart disease risk[J]. Journal of the American college of nutrition,2000,19(3):291-299.
- [3] 谭斌,乔聪聪.中国全谷物食品产业的困境、机遇与发展思考[J].生物产业技术,2019(6):64-74.
- [4] 李维香,尹艳梅,曲良冉.小麦粉脂肪酸值测定方法的比较与优化[J].中国粮油学报,2020,35(9):163-167.
- [5] DOBLADO-MALDONADO A F, PIKE O A, SWELEY J C, et al. Key issues and challenges in whole wheat flour milling and storage [J]. Journal of cereal science, 2012, 56: 119-126.
- [6] OLIVEIRA L C, SCHMIELE M, STEEL C. Development of whole grain wheat flour extruded cereal and process impacts on color, expansion, and dry and bowl-life texture [J]. LWT-Food science and technology, 2017, 75: 261-270.
- [7] ORTOLAN F, BRITES L T G, MONTENEGRO F M, et al. Effect of extruded wheat flour and pre-gelatinized cassava starch on process and quality parameters of French-type bread elaborated from frozen dough [J]. Food research international, 2015, 76(3):402-409.
- [8] MOISIO T, FORSELL P, PARTANEN R, et al. Reorganisation of starch, proteins and lipids in extrusion of oats [J]. Journal of cereal science, 2015, 64:48-55.
- [9] AKTAS-AKYILDIZ E, MASATCIOGLU M, KÖKSEL H. Effect of extrusion treatment on enzymatic hydrolysis of wheat bran [J]. Journal of cereal science, 2020, 93:102941.
- [10] MANUEL G, JESUS G, BONASTRE O. Effect of extruded wheat germ on dough rheology and bread quality [J]. Food and bioprocess technology, 2012(5):2409-2418.
- [11] 吴晓娟,吴伟.挤压稳定化对不同贮藏时间米糠制备米糠毛油品质的影响[J].中国油脂,2018,43(6):7-10,15.
- [12] 石彦国.大豆制品工艺学[M].北京:中国轻工业出版社,2005.
- [13] BUDDRICK O, JONES O A H, CORNELL H J, et al. The influence of fermentation processes and cereal grains in wholegrain bread on reducing phytate content [J]. Journal of cereal science, 2014, 59:3-8.
- [14] 郑学玲,李利民,朱永义,等.戊聚糖在小麦

- 中的分布规律及其与灰分、白度相关性的研究[J]. 中国粮油学报, 2002, 17(6): 19-22.
- [15] 韩雪. 挤压处理麸片回添粉的储藏及品质研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017.
- [16] 李梦琴, 王跃, 赵杨, 等. 小麦麸皮超高压处理条件优化及其微观结构观察[J]. 食品与机械, 2011, 27(4): 10-14.
- [17] 汪丽萍, 刘宏, 田晓红, 等. 挤压处理对麸皮、胚芽及全麦粉品质的影响研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 141-144.
- [18] 陈建宝. 麦麸的挤压膨化加工及其对麦麸主要成分的影响研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008.
- [19] 蔡易辉. 富胚小麦粉稳定化应用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015.
- [20] MANUEL G, SARA J, ELENA R, et al. Effect of extruded wheat bran on dough rheology and bread quality [J]. LWT-Food science and technology, 2011, 44: 2231-2237.
- [21] 郭嘉. 降低麦麸中植酸盐含量的途径及机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- [22] GAJULA H, ALAVI S, ADHIKARI K, et al. Precooked bran-enriched wheat flour using extrusion: dietary fiber profile and sensory characteristics [J]. Journal of food science, 2008, 73(4): 173-179.
- [23] GUALBERTO D G, BERGMAN C J, KAZEMZADEH M, et al. Effect of extrusion processing on the soluble and insoluble fiber, and phytic acid contents of cereal brans [J]. Plant foods for human nutrition, 1997, 51(3): 187-198.
- [24] RASHID S, RAKHA A, ANJUM F M, et al. Effects of extrusion cooking on the dietary fibre content and water solubility index of wheat bran extrudates [J]. International journal of food science and technology, 2015, 50(7): 1533-1537.
- [25] ANDERSSON A A M, ANDERSSON R, JONSALL A, et al. Effect of different extrusion parameters on dietary fiber in wheat bran and rye bran [J]. Journal of food science, 2017, 82(6): 1344-1350.
- [26] SAQIB A, MUBARIK A, QASIM C, et al. Effects of water extractable and unextractable pentosans on dough and bread properties of hard wheat cultivars [J]. LWT-Food science and technology, 2018, 97: 736-742.
- [27] TERESA D, JULIAN B, LAURA N. Structural modifications to water-soluble wheat bran arabinoxylan through milling and extrusion [J]. Carbohydrate polymers, 2020, 240: 116328.
- [28] ROBIN F, DUBOIS C, PINEAU N, et al. Expansion mechanism of extruded foams supplemented with wheat bran [J]. Journal of food engineering, 2011, 107(1): 80-89.
- [29] NOORT M W J, HAASTER D V, HEMERY Y, et al. The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality-Evidence for fibre-protein interactions [J]. Journal of cereal science, 2010, 52(1): 59-64.
- [30] LIU R H. Whole grain phytochemicals and health [J]. Journal of cereal science, 2007, 46(3): 732-737.
- [31] NURIA M A, ROBIN V D B, ROB H, et al. Ferulic acid from aleurone determines the antioxidant potency of wheat grain (*Triticum aestivum* L) [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2008, 56(14): 5589-5594.
- [32] ROSA N N, DUFOUR C, LULLIEN-PELLERIN V, et al. Exposure or release of ferulic acid from wheat aleurone: Impact on its antioxidant capacity [J]. Food chemistry, 2013, 141(3): 2355-2362.
- [33] LIYANA-PATHIRANA C M, SHAHIDI F. Importance of insoluble-bound phenolics to antioxidant properties of wheat [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2006, 54(4): 1256-1264.
- [34] 任顺成, 王凤雯, 李丹. 小麦麸皮挤压膨化工艺研究 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 59-63.