

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.02.010

吴娜娜, 王磊鑫, 吕莹果, 等. 挤压蒸煮加工对脱脂米糠可溶膳食纤维增加及膳食纤维结构性质的影响[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(2): 77-84.

WU N N, WANG L X, LV Y G, et al. Effect of extrusion cooking on the enhancement of soluble dietary fiber and structure properties of dietary fiber in defatted rice bran[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(2): 77-84.

# 挤压蒸煮加工对脱脂米糠可溶膳食纤维增加及膳食纤维结构性质的影响

吴娜娜<sup>1</sup>, 王磊鑫<sup>1,2</sup>, 吕莹果<sup>2</sup>, 谭斌<sup>1</sup>✉

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037;

2. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 采用挤压蒸煮加工方法对脱脂米糠进行改性, 研究挤压蒸煮加工米糠对米糠可溶膳食纤维(SDF)增加和膳食纤维结构性质的影响。以SDF含量为指标, 通过单因素实验确定米糠最适挤压条件为: 水分含量为35%、挤压温度为160℃、螺杆转速为250 r/min。经过挤压蒸煮加工后, 米糠SDF含量从4.34%增至14.34%。米糠SDF的微观结构膨胀疏松, 持水力、膨胀力显著增加, 而持油力显著降低, 红外光谱并未产生新的吸收峰, 峰位置整体向长波数方向移动, 吸收强度降低, 结晶衍射峰的位置没有发生明显变化, 相对结晶度有所降低; 米糠不溶膳食纤维(IDF)的微观结构被破坏, 膨胀力显著提高, 持油力显著降低, 持水力无明显变化。红外光谱性质和结晶性质结果均表明挤压蒸煮加工后脱脂米糠IDF中仍存在纤维素和半纤维素, 但其结构受到破坏, 相对结晶度降低。挤压蒸煮加工能改变脱脂米糠膳食纤维的结构性质, 为膳食纤维产品的开发和应用提供了理论基础。

**关键词:** 挤压蒸煮; 脱脂米糠; 可溶膳食纤维; 不溶膳食纤维; 结构性质

中图分类号: TS213.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)02-0077-08

网络首发时间: 2022-02-26 13:02:01

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20220225.1513.004.html>

## Effect of Extrusion Cooking on the Enhancement of Soluble Dietary Fiber and Structure Properties of Dietary Fiber in Defatted Rice Bran

WU Na-na<sup>1</sup>, WANG Lei-xin<sup>1,2</sup>, LV Ying-guo<sup>2</sup>, TAN Bin<sup>1</sup>✉

(1. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China;

2. School of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract:** The defatted rice bran was modified by extrusion cooking, and the effects of extrusion cooking on enhancement of soluble dietary fiber (SDF) and structural properties of dietary fiber in rice bran were studied.

收稿日期: 2021-10-19

基金项目: 北京市自然科学基金面上项目(6192028); 国家自然科学基金面上项目(32072266); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(ZX1912)

**Supported by:** General Project of Natural Science Foundation of Beijing (No.6192028); General Project of National Natural Science Foundation of China (No.32072266); Fundamental Research Funds of non-profit Central Institutes (No.ZX1912)

作者简介: 吴娜娜, 女, 1981年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为粮食资源加工利用。E-mail: wnn@ags.ac.cn.

通讯作者: 谭斌, 男, 1972年出生, 博士, 研究员, 研究方向为粮食资源加工利用。E-mail: tb@ags.ac.cn.

Taking SDF content as an index, the optimum extrusion conditions of rice bran were determined by single factor experiment as follows: water content of 35%, extrusion temperature of 160 °C, and screw speed of 250 r/min. After extrusion cooking treatment, the SDF content of rice bran increased from 4.34% to 14.34%. The microstructure of SDF from extruded rice bran was expanded loosely, the water holding capacity and expansion capacity of SDF significantly increased, while the oil holding capacity of SDF significantly decreased. The infrared spectrum of SDF did not produce a new absorption peak, the peak position moved to the long wavenumber direction, and the absorption intensity decreased. The position of crystal diffraction peak of SDF did not change significantly, and the relative crystallinity decreased. The microstructure of insoluble dietary fiber (IDF) from extruded rice bran was broken, the expansibility of IDF significantly increased, the oil-holding capacity of IDF significantly decreased, and the water-holding capacity had no obvious changes. The results of infrared spectra and crystallization properties both showed that cellulose and hemicellulose still existed in IDF from rice bran after extrusion cooking, but the structure of IDF was destroyed and the relative crystallinity of IDF decreased. The results showed that extrusion cooking treatment could change the structure properties of rice bran dietary fiber, providing a theoretical basis for the development and application of dietary fiber products.

**Key words:** extrusion cooking; defatted rice bran; soluble dietary fiber; insoluble dietary fiber; structure properties

近年来,患有慢性疾病的人数日趋增多。膳食纤维已被证明对预防慢性疾病有积极作用,但市场上富含膳食纤维的产品相对较少,开发富膳食纤维的产品已成为一种趋势<sup>[1]</sup>。传统的米制品是膳食纤维产品的主选载体之一。米糠作为一种潜在的食用资源,具有较高的营养价值和生理功效,是膳食纤维的重要来源<sup>[2-3]</sup>。膳食纤维根据溶解性不同可分为不溶性膳食纤维(IDF)和可溶性膳食纤维(SDF),SDF比IDF具有更好的生理特性<sup>[4]</sup>,IDF含量较高会导致口感粗糙,而米糠膳食纤维中IDF含量高达90%以上<sup>[5]</sup>,因此需要通过改性方法将米糠中的IDF转化为SDF,这有利于改善糙米制品的营养品质和食用品质,也有利于增加米糠作为食品配料的附加值。

目前,膳食纤维改性方法主要分为以下三大类:物理法、化学法和生物法。研究发现,加压蒸煮可使大麦SDF含量增加68.08%而IDF含量减少15.48%<sup>[6]</sup>。挤压蒸煮能显著增加小麦麸皮、燕麦麸皮、米糠、豆渣的SDF含量,且提高了燕麦麸皮、豆渣膳食纤维的持水力和膨胀力<sup>[7-9]</sup>。Zhu等将荞麦皮IDF超微粉碎到微米范围,显著提高了其水化性能,SDF含量增加<sup>[10]</sup>。酸碱处理使大麦、小麦、高粱的SDF含量分别提高了771.46%、768.2%、952.38%<sup>[11-12]</sup>。Feng等使用碱性过氧化

氢来提高黑豆皮中SDF的含量<sup>[13]</sup>。此外,木聚糖酶处理可以使水洗米糠的SDF含量提高50%以上<sup>[7]</sup>。虽然各类改性方法都能将IDF转化为SDF,但生物法需要纯化酶和菌株,成本很高,且发酵条件不易控制<sup>[14]</sup>,而化学法的反应条件有限,耗时长,SDF转化率低,并可能引入有害的化学基团,不利于环境保护<sup>[15]</sup>。与之相比,挤压加工等物理法具有工艺简单、成本低、可持续性强等优点<sup>[16]</sup>。

目前,米糠膳食纤维的改性研究多集中于加工改性方式及其对功能性质的影响,例如,徐树来等研究了挤压加工对脱脂米糠中可溶性膳食纤维增加及膳食纤维持水力和膨胀力的影响<sup>[17]</sup>,而目前的研究关于加工改性方式对膳食纤维结构性质的影响却鲜有报道。笔者前期已经采用挤压蒸煮加工技术处理全脂米糠,研究了米糠可溶性膳食纤维理化和结构性质变化<sup>[18]</sup>,为以全脂米糠挤压加工后膳食纤维的应用奠定了基础。但对挤压蒸煮加工脱脂米糠膳食纤维未有研究,挤压蒸煮加工后脱脂米糠膳食纤维结构性质尚不明确。

本研究以脱脂米糠为实验原料,通过挤压蒸煮加工技术对脱脂米糠进行改性处理,以SDF含量为指标,由单因素实验确定米糠最适挤压蒸煮加工条件,再分别对挤压蒸煮改性后的米糠SDF、IDF的持水力、持油力、膨胀力、红外光谱性质、

结晶性质和微观结构的变化进行分析, 以期为脱脂米糠改性膳食纤维在膳食纤维产品开发和功能性食品中应用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

脱脂米糠 (SDF 含量为 4.34%, 干基): 沈阳万家红饲料有限公司; 食用油: 嘉里粮油 (天津) 有限公司; 膳食纤维检测试剂盒: 爱尔兰 Megazyme 公司;  $\alpha$ -淀粉酶、碱性蛋白酶、糖化酶: Beijing Biotopped Science & Technology CO. Ltd; 氢氧化钠、丙酮、无水磷酸氢二钠、二水合磷酸二氢钠、溴化钾 (光谱纯): 国药集团化学试剂有限公司; 盐酸、无水乙醇、95%乙醇: 北京化工厂。实验所用试剂 (除标注之外) 均为分析纯, 实验所用水均为蒸馏水。

### 1.2 仪器与设备

SYSLG30-IV 实验双螺杆挤压机 (螺杆直径为 30 mm, 螺杆中心距为 26 mm, 螺杆转速范围为 0~500 r/min, 螺杆形式为积木组合式): 济南赛百诺科技开发有限公司; SHJ-6ABS 磁力搅拌水浴锅: 常州金坛良友仪器有限公司; MS 3 basic 漩涡混匀器: 德国 IKA 公司; FOSS 膳食纤维测定仪 Fibertec E: 瑞典 FOSS 分析有限公司; PYRAMID TX 马弗炉: 北京皮尔美特科技有限公司; rapid N cube 氮分析仪: 德国 Elementar Analysensysteme GmbH 公司; JJ-1 大功率电动搅拌机: 常州国华电器有限公司; L 580 卢湘仪离心机: 上海卢湘仪离心机仪器有限公司; S 220 多参数测试仪、ML 204 电子分析天平 (最小称重 10 mg): 梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司; BGZ-140 电热鼓风干燥箱: 上海博讯实业有限公司医疗设备厂; FW80、FW100 高速万能粉碎机: 天津市泰斯特仪器有限公司; HY-12 压片机: 天津天光光学仪器有限公司; Nicolet iN10-iZ10 傅里叶变换显微红外光谱仪: 赛默飞世尔科技公司; D8 advance X-射线衍射仪: 德国 Bruker 公司; S-3000N 扫描电子显微镜: 日本 Hitachi 公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 米糠最适挤压蒸煮加工条件的确定

在米糠挤压蒸煮加工过程中, 分别选择水分含量为 20%、25%、30%、35% (挤压蒸煮温度为

140 °C、螺杆转速为 200 r/min)、挤压蒸煮温度为 120、140、160、180 °C (水分含量为 30%、螺杆转速为 200 r/min)、螺杆转速为 150、200、250、300 r/min (水分含量为 30%、挤压蒸煮温度为 140 °C) 进行单因素实验, 利用 FOSS 膳食纤维测定仪测定米糠中膳食纤维含量, 以米糠中 SDF 含量为指标, 得出最适挤压蒸煮加工条件。SDF 含量计算公式如下 (以干基计)<sup>[17]</sup>:

$$\text{SDF含量} = \frac{\text{SDF}}{\text{未挤压米糠SDF} + \text{未挤压米糠IDF}} \times 100\%$$

#### 1.3.2 挤压蒸煮加工米糠膳食纤维的提取

根据 1.3.1 中得出的米糠最适挤压条件对米糠进行挤压蒸煮处理, 得到挤压蒸煮米糠。提取挤压蒸煮米糠中的 SDF、IDF, 提取方法如下 (未挤压蒸煮米糠 SDF、IDF 提取方法与此法相同)<sup>[19-20]</sup>:

取挤压蒸煮米糠 50 g 于搅拌烧杯中, 加 500 mL 蒸馏水 (料液比为 1:10), 50 °C 水浴 100 min, 搅拌器搅拌, 95 °C 糊化 15 min, 待提取液温度冷却至 60 °C, 加入 1.5 g  $\alpha$ -淀粉酶, 反应 45 min, 加 1 mol/L NaOH 溶液调节 pH 至 9.5 左右, 加 1.2 g 碱性蛋白酶, 45 °C 反应 30 min, 加 1 mol/L HCl 溶液调节 pH 至 4.0 左右, 加 1.5 g 糖化酶, 60 °C 反应 30 min, 95 °C 水浴灭酶 15 min, 静置冷却, 4 000 r/min 离心 30 min。

1.3.2.1 SDF 制备 上清液用 4 倍体积无水乙醇沉淀, 4 000 r/min 离心 15 min, 沉淀物置于烘箱中 45 °C 烘干, 粉碎过 100 目筛, 得 SDF。

1.3.2.2 IDF 制备 沉淀物置于烘箱中 45 °C 烘干, 粉碎过 100 目筛, 得 IDF。

#### 1.3.3 持水力/持油力的测定

取  $M_1$  (0.5 g) 干燥膳食纤维样品与 30 mL 蒸馏水/食用油混合 (离心管重量,  $M_2$ ), 密封, 室温放置 24 h, 随后在 2 000 r/min 下离心 20 min, 弃去上清液, 对沉淀和离心管称重 ( $M_3$ )<sup>[21]</sup>。数据取 3 个平行实验的平均值。

$$\text{持水力(g/g)} = \frac{M_3 - M_2}{M_1}$$

#### 1.3.4 膨胀力的测定

取  $M$  (0.5 g) 干燥膳食纤维样品于 10 mL 量筒中, 读取体积为  $V_1$ , 加 10 mL 蒸馏水, 轻轻搅拌除去泡沫, 密封, 室温下水平放置 24 h, 读取样品体积为  $V_2$ <sup>[21]</sup>。数据取 3 个平行实验的平均值。

$$\text{膨胀力}(\text{mL/g}) = \frac{V_2 - V_1}{M}$$

### 1.3.5 傅里叶变换红外光谱

将 2 mg 膳食纤维样品与 100 mg 干燥 KBr 研磨混匀, 用压片法制得薄片, 利用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 进行红外扫描, 扫描次数为 32 次, 扫描范围  $4\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ , 分辨率为  $4\text{ cm}^{-1}$ [16]。

### 1.3.6 X-射线衍射

采用 Bruker D8 型 X-射线衍射法测定膳食纤维样品的结晶性质。衍射条件: 靶型为 Cu K $\alpha$  ( $\lambda=0.154\,06\text{ nm}$ ), 探测器类型为闪烁计数器, 管电压为 40 KV, 管电流为 40 mA, 扫描范围为  $3.5\sim 60^\circ$  ( $2\theta$ ), 扫描速度为  $2^\circ/\text{min}$ [16]。利用 Jade5.0 软件对数据进行处理, 以结晶区面积与总面积之比计算样品的相对结晶度。

### 1.3.7 扫描电镜

将干燥的膳食纤维样品用导电胶粘在样品台座上, 镀金, 在 15 kV 电压下[19], 使用扫描电子显微镜对样品进行观察拍照。

## 1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2007 对数据进行统计, 采用 SPSS17.0 对数据进行差异显著性分析, 采用 Origin2017 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 挤压蒸煮条件对脱脂米糠 SDF 含量的影响

#### 2.1.1 水分含量对脱脂米糠 SDF 含量的影响

水分含量显著影响挤压蒸煮改性效果, 水分的多少影响物料的受热程度、膨化程度等, 从而影响淀粉糊化、蛋白质的变性等。本实验设计水分含量分别为 20%、25%、30%、35%。当挤压蒸煮温度为  $140^\circ\text{C}$ 、螺杆转速为 200 r/min 时, 研究不同水分含量对米糠 SDF 含量的影响, 其结果如图 1 所示。由图 1 可以看出, 随着水分含量的增加, 挤压蒸煮米糠的 SDF 含量逐渐增大, 在挤压物料水分含量为 35% 时, 挤压蒸煮改性后米糠 SDF 含量达到最大值。在挤压蒸煮过程中, 水分起着运输物料的作用, 也是生物化学反应的介质。水分含量过低, 虽然可以增加物料与物料、物料与管道之间的压力、摩擦力, 但也会堵塞管道, 不利于挤压。高水分则有利于物料的挤出, 也使

淀粉、蛋白质等大分子物质能充分水解, 从而增加了 SDF 含量[22-23]。挤压蒸煮时物料水分含量决定了挤压蒸煮对物料 (米糠) 的剪切、高压、高温程度, 也就决定了膳食纤维中糖苷键的断裂程度, 这样就造成了米糠经挤压蒸煮后, SDF 含量增加, 有利于改善米糠膳食纤维的口感。

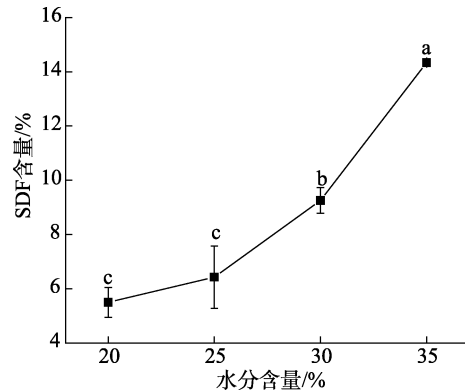


图 1 不同水分含量对脱脂米糠 SDF 含量的影响

Fig.1 Effect of different moisture content on the SDF contents of defatted rice bran

注: 不同字母的数据表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: The data with different letters show significant differences ( $P < 0.05$ ).

#### 2.1.2 挤压蒸煮温度对脱脂米糠 SDF 含量的影响

挤压蒸煮温度也是影响挤压蒸煮改性效果的重要因素之一。本实验设计挤压蒸煮温度分别为  $120$ 、 $140$ 、 $160$ 、 $180^\circ\text{C}$ 。当水分含量为 30%、螺杆转速为 200 r/min 时, 研究不同挤压蒸煮温度对米糠 SDF 含量的影响, 其结果如图 2 所示。由图 2 可知, 挤压蒸煮米糠的 SDF 含量随着温度的增加而呈现先增加后降低的趋势, 在挤压蒸煮温度

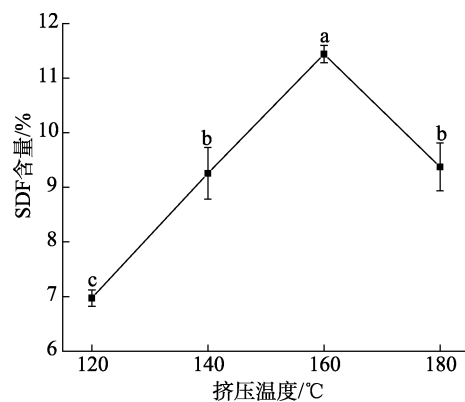


图 2 不同挤压蒸煮温度对脱脂米糠 SDF 含量的影响

Fig.2 Effect of different extrusion cooking temperatures on the SDF content of defatted rice bran

注: 不同字母的数据表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: The data with different letters show significant differences ( $P < 0.05$ ).

为 160 °C 时, SDF 含量达到最大。温度升高, 加速了多糖分子中糖苷键的断裂, 释放寡糖, 从而提高了膳食纤维的溶解度<sup>[24]</sup>, 使 SDF 含量增加。经过高温、高压的挤压蒸煮加工处理, 米糠膳食纤维的 1,4-碳氧糖苷键断裂, 将部分不溶大分子物质转化为 SDF<sup>[5]</sup>。但温度过高, 可能会使物料在挤压机中结块或过度糊化, 破坏物料原有特性, 不利于挤压蒸煮且降低了 SDF 含量。

### 2.1.3 螺杆转速对脱脂米糠 SDF 含量的影响

本实验设计螺杆转速分别为 150、200、250、300 r/min。当水分含量为 30%、挤压蒸煮温度为 140 °C 时, 研究不同螺杆转速对米糠 SDF 含量的影响, 其结果如图 3 所示。由图 3 可知, SDF 含量随着螺杆转速的增大而增加, 但达到 250 r/min 后, 再增大螺杆转速, SDF 含量显著降低。螺杆转速的不断增大, 会使挤压机内的压力持续增加, 同时也增加了物料与物料、物料与管道之间的压力, 这有利于大分子破裂, 加大了纤维分子的分解度, 使其转化为可溶性的小分子物质。但螺杆转速过大时, 物料在管道内停留的时间很短, 糊化程度小, 导致挤出物中仍存在一些小颗粒, 使 SDF 含量显著降低。

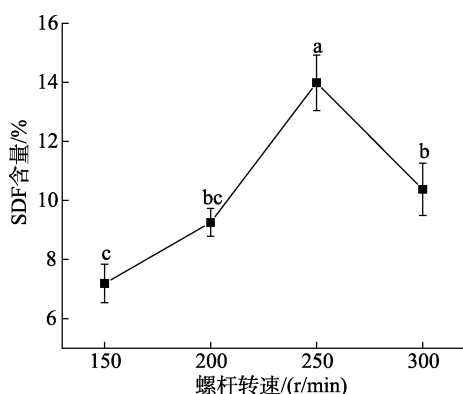


图 3 不同螺杆转速对脱脂米糠 SDF 含量的影响

Fig.3 Effect of different screw speeds on the SDF content of defatted rice bran

注: 不同字母的数据表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: The data with different letters show significant differences ( $P < 0.05$ ).

综合 2.1.1~2.1.3 结果, 确定米糠最适挤压条件为: 水分含量为 35%、挤压温度为 160 °C、螺杆转速为 250 r/min。在此条件下对米糠进行挤压蒸煮, 并提取挤压蒸煮米糠中 SDF、IDF 进行膳食纤维性质研究。

## 2.2 挤压蒸煮加工对脱脂米糠膳食纤维持水力、持油力、膨胀力的影响

挤压蒸煮加工前后, 米糠膳食纤维的持水力、持油力、膨胀力如表 1 所示。由表 1 可以看出, 与未挤压蒸煮加工相比, 挤压蒸煮后米糠 SDF 的持水力、膨胀力显著增加, 而持油力显著降低, 这可能是由于挤压蒸煮加工使得膳食纤维的内部结构遭到破坏, 原有的毛细孔出现裂缝, 从而降低了膳食纤维滞留油的能力<sup>[5]</sup>。而未挤压蒸煮全脂米糠 SDF 的持油力为 1.52 g/g、持水力为 0.75 g/g, 挤压蒸煮全脂米糠 SDF 的持油力为 1.01~1.82 g/g、持水力为 0.57~0.94 g/g<sup>[18]</sup>, 这说明脱脂米糠 SDF 的持油力和持水力均比全脂米糠 SDF 的高。对于米糠 IDF, 挤压蒸煮加工也能显著提高膳食纤维的膨胀力, 而降低其持油力, 对其持水力无明显影响。经过挤压蒸煮加工后, 部分不溶性纤维等不溶性成分发生熔融现象或连接键断裂, 转化为水溶性成分, 因而膳食纤维的膨胀力发生明显变化<sup>[25]</sup>。此外, 在挤压蒸煮加工过程中, 米糠膳食纤维经高剪切作用、挤压膨化作用可能会增加其比表面积, 并可能使更多的亲水基团暴露在水中, 增大了溶胀体积, 从而提高了其膨胀力。

表 1 挤压蒸煮加工对脱脂米糠膳食纤维持水力、持油力、膨胀力的影响

Table 1 Effect of extrusion cooking on water holding capacity, oil holding capacity and swelling capacity of dietary fiber in defatted rice bran

样品	持水力/(g/g)	持油力/(g/g)	膨胀力/(mL/g)
NSDF	1.62±0.09 <sup>c</sup>	4.94±0.17 <sup>a</sup>	-0.94±0.04 <sup>d</sup>
ESDF	2.19±0.15 <sup>b</sup>	3.98±0.21 <sup>b</sup>	0.63±0.04 <sup>c</sup>
NIDF	5.43±0.16 <sup>a</sup>	4.90±0.05 <sup>a</sup>	3.44±0.01 <sup>b</sup>
EIDF	5.35±0.23 <sup>a</sup>	4.36±0.07 <sup>b</sup>	3.93±0.04 <sup>a</sup>

注: (1) NSDF、NIDF: 未挤压蒸煮米糠可溶性、不溶性膳食纤维; ESDF、EIDF: 挤压蒸煮米糠可溶性、不溶性膳食纤维(下同); (2) 数据的形式是均值±标准差, 同列不同字母的数据表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: (1) NSDF and NIDF represent soluble and insoluble dietary fiber from rice bran without extrusion cooking, respectively; ESDF and EIDF represent soluble and insoluble dietary fiber from rice bran with extrusion cooking, respectively; (2) The data are expressed in the form of mean ± standard deviation, and data with different letters in the same column show significant differences ( $P < 0.05$ ).

## 2.3 挤压蒸煮加工对脱脂米糠膳食纤维红外光谱性质的影响

通过 FTIR 分析可以反映膳食纤维的化学结

构特征和官能团的变化情况。挤压蒸煮加工后米糠膳食纤维的 FTIR 图谱如图 4 所示。从图 4 可以看出,所有样品均可在  $3\ 700\sim 3\ 000\ \text{cm}^{-1}$  处观察到一个强且宽的吸收峰,这是由多糖亚甲基中的 O—H 的伸缩振动形成的,而米糠 IDF 样品在  $2\ 927\ \text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰是多糖亚甲基中的 C—H 伸缩振动,这两个峰的出现表明纤维素和半纤维素具有典型的结构<sup>[26]</sup>。在米糠 IDF 样品中,  $1\ 737\ \text{cm}^{-1}$  处观察到的峰是由于半纤维素的乙酰基和糖醛酸酯基的振动,或者是由于木质素或半纤维素的阿魏酸和 *p*-香豆酸的羧酸酯键的振动;  $1\ 650\ \text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰可能是 H—O—H 的弯曲振动;  $1\ 374\ \text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰是 C—H 的弯曲振动;  $1$

$246\ \text{cm}^{-1}$  附近处的吸收峰是羧酸的 C—O 伸缩振动;  $1\ 054\ \text{cm}^{-1}$  附近处的吸收峰可能是木质素或半纤维素的 C—O—C 振动引起的<sup>[26-27]</sup>。经挤压蒸煮加工后,米糠 IDF 样品仍有基本的吸收峰,说明挤压蒸煮加工没有显著破坏 IDF 的化学结构,但吸收强度略有差异。在米糠 SDF 样品中,  $1\ 663\ \text{cm}^{-1}$  和  $1\ 400\ \text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰可能分别是 C—O 键不对称伸缩振动和对称伸缩振动引起的,  $1\ 300\sim 1\ 000\ \text{cm}^{-1}$  处形成的宽峰可能是由于伯醇的混合振动或糖环的 C—O—C 和 C—O—H 振动<sup>[28]</sup>。经挤压蒸煮加工后,米糠 SDF 的吸收峰的位置整体向长波数方向移动,吸收峰的强度也明显降低,这可能是由于挤压蒸煮加工破坏了膳食纤维的分子结构。

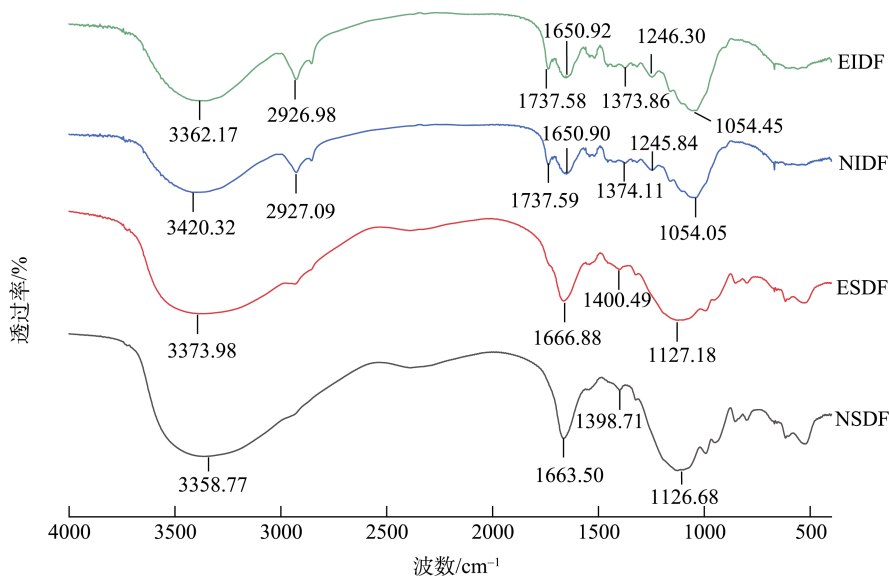


图 4 挤压蒸煮加工脱脂米糠膳食纤维 FTIR 图谱

Fig.4 FTIR spectra of dietary fiber from defatted rice bran with extrusion cooking

## 2.4 挤压蒸煮加工对脱脂米糠膳食纤维结晶性质的影响

利用 X-射线衍射法研究挤压蒸煮加工对米糠膳食纤维结晶性质的影响,结果如图 5 所示。从图中可以看出,挤压蒸煮前后米糠 SDF 的主衍射峰的位置没有发生明显的变化,但相对结晶度由 5.96% 降至 5.56%。未挤压米糠 IDF 在  $21.8^\circ$  处有明显的衍射峰,挤压蒸煮加工后米糠 IDF 的在  $21.8^\circ$  处附近的峰高明显降低,相对结晶度由 10.56% 显著降至 7.60%,说明挤压蒸煮加工也对米糠 IDF 的结晶性质具有显著的影响作用。 $2\theta$  在  $15\sim 25^\circ$  范围为纤维素和半纤维素的衍射峰<sup>[21]</sup>,

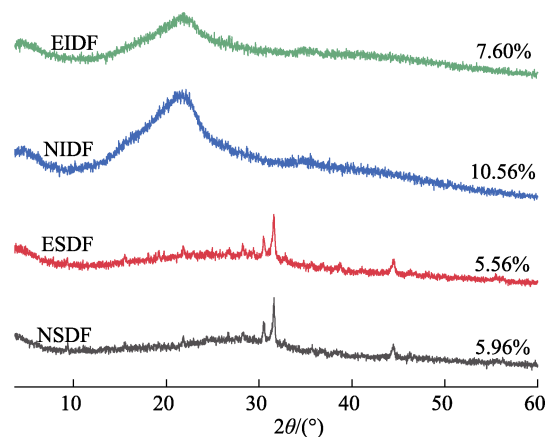


图 5 挤压蒸煮加工脱脂米糠膳食纤维的 X-射线衍射图谱

Fig.5 X-ray diffraction patterns of dietary fiber from defatted rice bran with extrusion cooking

由图可知,无论是未挤压还是挤压蒸煮后,米糠 IDF 中都存在纤维素和半纤维素,而挤压蒸煮后此处的衍射峰的峰面积明显减小,说明该挤压蒸煮加工能够破坏纤维素和半纤维素的结晶结构。由于晶体结构的破坏而降低了米糠 IDF 的相对结晶度<sup>[29]</sup>。

### 2.5 挤压蒸煮加工对脱脂米糠膳食纤维表面微观结构的影响

挤压蒸煮米糠膳食纤维的微观结构如图 6 所示。

从图中可以看到,未挤压蒸煮的 SDF、IDF 成团或成块。而经挤压蒸煮后,米糠 SDF 出现较多的小片段, IDF 也呈现较多的粘连在一起的片段,这种微观结构的变化导致其更大的比表面积。米糠膳食纤维在挤压机内受到高温、高压、高摩擦、高剪切作用,使其结构受到破坏,团块打开,并在挤出时瞬间膨胀,疏松了其表面结构,增加了表面孔隙率,影响米糠膳食纤维的水化性能。

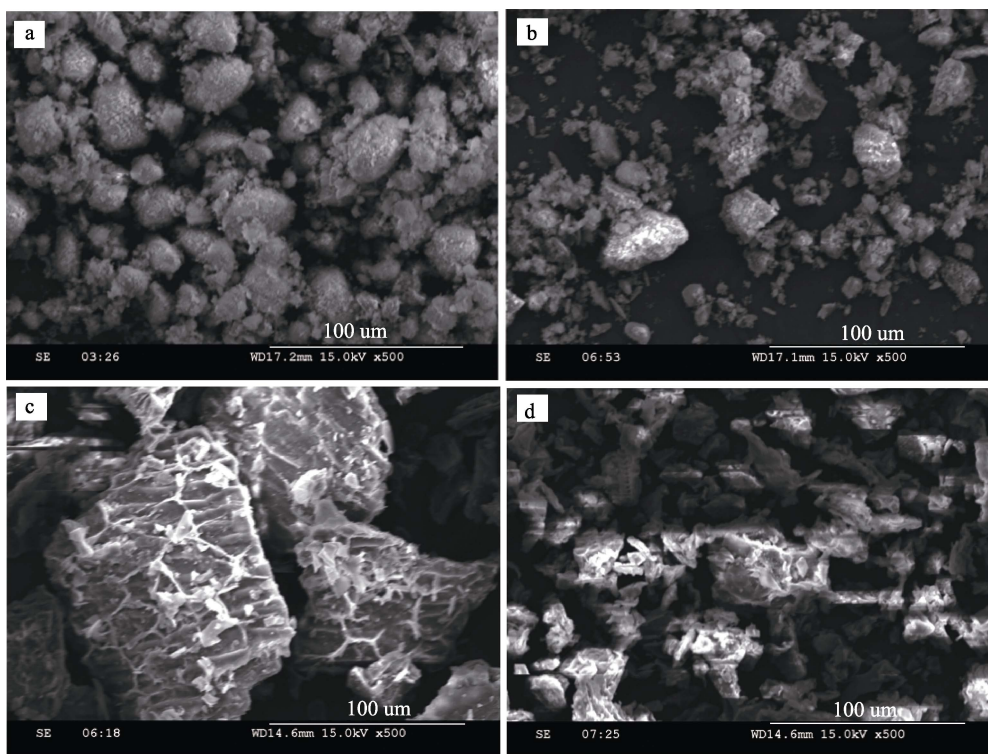


图 6 挤压蒸煮加工对脱脂米糠膳食纤维扫描电镜图微观结构的影响 (×500)

Fig.6 Effect of extrusion cooking on SEM microstructure of dietary fiber in defatted rice bran (×500)

注: a-未挤压蒸煮可溶性膳食纤维 (NSDF); b-挤压蒸煮可溶性膳食纤维 (ESDF); c-未挤压蒸煮不溶性膳食纤维 (NIDF); d-挤压蒸煮不溶性膳食纤维 (EIDF)。

Note: a, soluble dietary fiber from rice bran without extrusion cooking (NSDF); b, soluble dietary fiber from rice bran with extrusion cooking (ESDF); c, insoluble dietary fiber from rice bran without extrusion cooking (NIDF); d, insoluble dietary fiber from rice bran with extrusion cooking (EIDF).

### 3 结论

以 SDF 含量为指标,通过单因素实验确定米糠最适挤压蒸煮条件为:水分含量为 35%、挤压温度为 160 °C、螺杆转速为 250 r/min。挤压蒸煮加工使米糠 SDF 含量从 4.34%增至 14.34%,并使米糠 SDF、IDF 的性质均发生一定的变化,其中米糠 SDF、IDF 的微观结构受到破坏,膨胀力显著增加,而持油力显著降低,相对结晶度有所降低,挤压蒸煮加工后米糠 IDF 中仍存在纤维素和半纤维素。

### 参考文献:

- [1] 杜冰冰. 膳食纤维在食品中的应用现状[J]. 食品安全导刊, 2020(8): 77.  
DU B B. Application status of dietary fiber in food[J]. China Food Safety Magazine, 2020(8): 77.
- [2] PRADEEP P M, JAYADEEP A, GUHA M, et al. Hydrothermal and biotechnological treatments on nutraceutical content and antioxidant activity of rice bran[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(1): 187-192.
- [3] 徐学兵. 米糠: 一种潜在的食用资源[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(5): C5-C8.  
XU X B. Rice bran: a potential resource for human consumption[J].

- Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(5): C5-C8.
- [4] BADER UL AIN H, SAEED F, AHMED A, et al. Improving the physicochemical properties of partially enhanced soluble dietary fiber through innovative techniques: A coherent review[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(4): 1-12.
- [5] 豁银强, 汤尚文, 张璐, 等. 米糠膳食纤维的改性及其对功能特性影响的研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2015(11): 44-47.
- HUO Y Q, TANG S W, ZHANG L, et al. Research advance on modification of rice bran dietary fiber and its properties[J]. Cereal & Feed Industry, 2015(11): 44-47.
- [6] BADER UL AIN H, SAEED F, KHAN M A, et al. Modification of barley dietary fiber through thermal treatments[J]. Food Science and Nutrition, 2019, 7(5): 1-5.
- [7] DANG T, VASANTHAN T. Modification of rice bran dietary fiber concentrates using enzyme and extrusion cooking[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 773-782.
- [8] ZHANG M, BAI X, ZHANG Z. Extrusion process improves the functionality of soluble dietary fiber in oat bran[J]. Journal of Cereal Science, 2011, 54(1): 98-103.
- [9] JING Y, CHI Y. Effects of twin-screw extrusion on soluble dietary fibre and physicochemical properties of soybean residue[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2-3): 884-889.
- [10] ZHU F, DU B, LI R, et al. Effect of micronization technology on physicochemical and antioxidant properties of dietary fiber from buckwheat hulls[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2014, 3(3): 30-34.
- [11] BADER UL AIN H, SAEED F, ARSHAD M U, et al. Modification of barley dietary fiber through chemical treatments in combination with thermal treatment to improve its bioactive properties[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 2491-2499.
- [12] BADER UL AIN H, SAEED F, KHAN M A, et al. Comparative study of chemical treatments in combination with extrusion for the partial conversion of wheat and sorghum insoluble fiber into soluble[J]. Food Science and Nutrition, 2019, 7: 2059-2067.
- [13] FENG Z, DOU W, ALAXI S, et al. Modified soluble dietary fiber from black bean coats with its rheological and bile acid binding properties[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 62: 94-101.
- [14] SANTALA O, KIRAN A, SOZER N, et al. Enzymatic modification and particle size reduction of wheat bran improves the mechanical properties and structure of bran-enriched expanded extrudates[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(2): 448-456.
- [15] SONG Y, SU W, MU Y C. Modification of bamboo shoot dietary fiber by extrusion-cellulase technology and its properties[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 1219-1232.
- [16] ULLAH I, YIN T, XIONG S, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of okara (soybean residue) insoluble dietary fiber modified by high-energy wet media milling[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 15-22.
- [17] 徐树来. 挤压加工对脱脂米糠中膳食纤维影响的研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(2): 134-138.
- XU S L. Influence of extrusion on diet fiber in defatted rice bran[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(2): 134-138.
- [18] QIAO C C, ZENG F K, WU N N, et al. Functional, physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from rice bran with extrusion cooking treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107057.
- [19] ZHU Y, CHU J, LU Z, et al. Physicochemical and functional properties of dietary fiber from foxtail millet (*Setaria italica*) bran[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 456-461.
- [20] NANDI I, GHOSH M. Studies on functional and antioxidant property of dietary fibre extracted from defatted sesame husk, rice bran and flaxseed[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2015, 5(2): 129-136.
- [21] 王大为, 赵鑫, 董欣, 等. 发芽对绿豆皮膳食纤维结构及性质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 111-117.
- WANG D W, ZHAO X, DONG X, et al. Effect of germination on the structure and properties of dietary fiber in mung bean skin[J]. Food Science, 2016, 37(23): 111-117.
- [22] 陈锋亮, 魏益民, 张波, 等. 食品挤压过程中水分的作用及变化研究进展[J]. 食品科学, 2009, 30(21): 416-419.
- CHEN F L, WEI Y M, ZHANG B, et al. A review on action and change of water during food extrusion process[J]. Food Science, 2009, 30(21): 416-419.
- [23] KRISTIawan M, CHAUNIER L, SANDOVAL A J, et al. Extrusion-Cooking and expansion[J]. Cereals & Grains Association, 2020: 141-167.
- [24] LI H, LONG D, PENG J, et al. A novel in-situ enhanced blasting extrusion technique-Extrudate analysis and optimization of processing conditions with okara[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 16: 80-88.
- [25] 薛成锋, 郭玉蓉, 付成程, 等. 挤压蒸煮技术在膳食纤维改性中的应用及研究进展[J]. 农产品加工(学刊), 2012(7): 107-110.
- XUE Z F, GUO Y R, FU C C, et al. Improvement of application and research on the extrusion-cooking in the modification of dietary fiber[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2012(7): 107-110.
- [26] HE Y, LI W, ZHANG X, et al. Physicochemical, functional, and microstructural properties of modified insoluble dietary fiber extracted from rose pomace[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 57(3): 1-9.
- [27] LUO X, WANG Q, FANG D, et al. Modification of insoluble dietary fibers from bamboo shoot shell: Structural characterization and functional properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 1461-1467.
- [28] GAN J, HUANG Z, YU Q, et al. Microwave assisted extraction with three modifications on structural and functional properties of soluble dietary fibers from grapefruit peel[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101.
- [29] WEN Y, NIU M, ZHANG B, et al. Structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 344-351

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。