

膳食纤维对外裹糊特性及油炸外裹糊鲢鱼鱼糜块油脂渗透的影响

冯佳奇¹, 陈季旺^{1,2,*}, 廖鄂^{1,2}, 彭利娟^{1,2}, 夏文水^{1,3}

(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 农产品加工与转化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430023; 3.江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 在模式外裹糊(高纯度的小麦淀粉和谷蛋白)中分别添加8%苹果纤维、6%大豆纤维和12%小麦麸纤维, 制作油炸外裹糊鲢鱼鱼糜块, 测定膳食纤维、小麦淀粉和谷蛋白的水分吸附等温线, 外裹糊鱼糜块的裹糊率, 外裹糊的黏度、流变性能、热力学特性, 以及外壳的热重特性、油炸外裹糊鱼糜块的水分状态并观测其油脂渗透, 探讨膳食纤维对外裹糊特性及油炸外裹糊鱼糜块油脂渗透的影响。结果显示, 小麦淀粉的水分结合能力最强, 其次是大豆纤维、苹果纤维、小麦麸纤维和谷蛋白; 与对照相比, 添加8%苹果纤维、6%大豆纤维和12%小麦麸纤维均能显著增加外裹糊的黏度和鱼糜块的裹糊率($P < 0.05$); 随着温度的升高, 外裹糊的储能模量(G')和损耗模量(G'')均先降低后迅速升高并趋于稳定, 且大豆纤维组的 G' 和 G'' 最高, 凝胶形成速度最快, 油炸后形成的外壳热稳定性最高; 添加3种膳食纤维均能促进外壳的自由水向结合水转化, 并提高外壳的总含水量; 大豆纤维组油炸外裹糊鱼糜块的油脂渗透幅度最窄, 其次是苹果纤维组、小麦麸纤维组和对照。这些结果表明, 向模式外裹糊中添加3种膳食纤维能加速外裹糊产生凝胶, 并显著提高凝胶的强度, 最终抑制了油炸外裹糊鱼糜块中油脂的渗透。

关键词: 膳食纤维; 外裹糊鲢鱼鱼糜块; 外裹糊特性; 深度油炸; 油脂渗透

Effect of Dietary Fiber on Batter Characteristics and Oil Penetration in Deep-Fried Battered and Breaded Fish Nuggets from Silver Carp Surimi

FENG Jiaqi¹, CHEN Jiawang^{1,2,*}, LIAO E^{1,2}, PENG Lijuan^{1,2}, XIA Wenshui^{1,3}

(1. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2. Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To investigate the effect of dietary fiber on batter characteristics and oil penetration in deep-fried battered and breaded fish nuggets (BBFNs) from silver carp surimi, deep-fried BBFNs were prepared with model batters (composed of wheat starch and gluten) added with 8% apple fiber, 6% soybean fiber or 12% wheat bran fiber. The moisture adsorption isotherms of dietary fiber, wheat starch and gluten, and the pick-up of BBFNs were evaluated, the viscosity, rheological behavior and calorimetric properties of batters were measured, and the thermogravimetric properties of the crust, the water state and oil penetration of deep-fried BBFNs were also evaluated. The results showed that the moisture absorption capacity of wheat starch was the largest, followed by soybean fiber, apple fiber, wheat bran fiber, and gluten. Compared to that the control group (without dietary fiber), the addition of 8% apple fiber, 6% soybean fiber or 12% wheat bran fiber significantly increased the viscosity of batters and the pick-up of BBFNs ($P < 0.05$). The loss modulus (G') and storage modulus (G'') of batters were decreased firstly, then increased rapidly and ultimately remained stable with an increase in oil temperature, and soybean fiber resulted in the highest G' and G'' , which contributed to the fastest formation of gels and the highest thermal stability of the crust after frying. The addition of each of the dietary fibers resulted in transformation of free water into bound water and increased the total moisture content of the crust. Soybean fiber resulted in the lowest oil penetration in deep-fried

收稿日期: 2022-10-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32072249; 31471612)

第一作者简介: 冯佳奇(1997—)(ORCID: 0000-0002-5164-651X), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产品加工及贮藏工程。

E-mail: fengjiaqi1337@163.com

*通信作者简介: 陈季旺(1970—)(ORCID: 0000-0003-4522-4262), 男, 教授, 博士, 研究方向为水产品加工及贮藏工程。

E-mail: jiwangchen1970@126.com

BBFNs, followed by apple fiber, wheat bran fiber and the control group. This study indicated that the addition of the three dietary fibers in model batter systems can accelerate the formation of gels, significantly improve the strength of the gels formed, and ultimately inhibit oil penetration in deep-fried BBFNs.

Keywords: dietary fiber; deep-fried battered breaded fish nuggets from silver carp surimi; batter characteristics; deep-frying; oil penetration

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221006-040

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)16-0034-08

引文格式:

冯佳奇, 陈季旺, 廖鄂, 等. 膳食纤维对外裹糊特性及油炸外裹糊鲢鱼鱼糜块油脂渗透的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(16): 34-41. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221006-040. <http://www.spkx.net.cn>

FENG Jiaqi, CHEN Jiwang, LIAO E, et al. Effect of dietary fiber on batter characteristics and oil penetration in deep-fried battered and breaded fish nuggets from silver carp surimi[J]. Food Science, 2023, 44(16): 34-41. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221006-040. <http://www.spkx.net.cn>

油炸外裹糊食品是在肉类、蔬菜和海鲜等食物表面涂覆一层外裹糊并裹上面包糠油炸形成的一类风味食品, 因具有风味宜人、口感酥脆的特点而风靡海内外。外裹糊由淀粉、蛋白质和其他功能性成分加水搅拌而成, 经深度油炸形成外壳^[1]。传统油炸外裹糊食品的油脂含量高, 约占产品总质量的30%, 且油脂主要集中于外壳, 这是因为在高温油炸过程中, 食物内部水蒸气逸出表面并破坏外壳结构, 使外壳形成孔隙, 导致较多油脂渗入外壳。经常食用高油脂含量的油炸外裹糊食品会严重损害人体健康^[2]。向外裹糊中添加蛋白质、非蛋白亲水胶体和膳食纤维等功能性成分, 能促进油炸过程中淀粉糊化和蛋白质变性, 产生凝胶障碍层, 减少外壳孔隙的数量和大小, 阻碍油炸外裹糊食品中水分的损失和油脂的吸收^[3-4]。

以淀粉和蛋白质为主要成分的外裹糊体系中, 外裹糊的黏度、流变性能和热力学特性等直接影响淀粉和蛋白质凝胶形成的时间及强度。Yildiz等^[5]向面糊中加入2.5%~20%的燕麦和豌豆纤维(不溶性成分为主), 观测淀粉的糊化特性、面糊的流变学行为和应力剪切特性。结果显示, 随着膳食纤维添加量的增加, 小麦淀粉的峰值黏度升高, 糊化温度和峰值时间降低, 面糊的热稳定性增强, 具有更好的加工特性。Kim等^[6]研究发现, 随着米糠纤维(可溶性成分为主)添加量的增加, 面团的初始糊化温度、峰值黏度、终值黏度、吸水率和生面团的稳定性也随之增加, 面筋蛋白凝胶的强度增强。韩晓银等^[7]向外裹糊中分别加入高酶大豆蛋白粉和3种亲水胶体, 测定外裹糊的流变性能, 探究4种外裹糊对裹面虾产品品质的影响。结果显示, 4种外裹糊均是假塑性流体, 添加4种成分可以提高外裹糊的热稳定性和黏附特性, 改善产品的品质并降低油脂含量。以上研究表明, 向外裹糊中添加膳食纤维、蛋白质和非蛋白亲水胶体等功能性成分, 能改善外裹糊的特性, 从而改进油炸外裹糊食品的品质。

本课题组已经研究并报道了模式外裹糊中的2种主要成分(小麦淀粉和谷蛋白)较佳工艺配比, 并探索了其相互作用对油炸外裹糊鱼糜块油脂分布的影响^[8-9]。前期研究也发现, 向模式外裹糊中添加8%苹果纤维、6%大豆纤维和12%小麦麸纤维均能显著减少油炸外裹糊鱼糜块的油脂含量, 且大豆纤维的减脂效果最佳。然而, 添加膳食纤维到外裹糊中, 膳食纤维分别与小麦淀粉和谷蛋白相互作用影响外裹糊特性并抑制油脂渗透的机制尚不清楚。本研究在模式外裹糊中分别添加8%苹果纤维、6%大豆纤维和12%小麦麸纤维, 制作油炸外裹糊鲢鱼鱼糜块, 测定膳食纤维、小麦淀粉和谷蛋白的水分吸附等温线, 外裹糊鱼糜块的裹糊率, 外裹糊的黏度、流变性能、热力学特性, 以及外壳的热重(thermal gravity, TG)特性、油炸外裹糊鱼糜块的水分状态并观测其油脂渗透, 探讨膳食纤维对外裹糊特性及油炸外裹糊鱼糜块油脂渗透的影响, 旨在为低脂油炸外裹糊食品的规模化生产提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冷冻鲢鱼鱼糜(AAA级, 水分含量 $\leq 76\%$, 凝胶强度 ≥ 400 , 添加3%三聚磷酸钠) 洪湖市新宏业食品有限公司; 金龙鱼大豆油 武汉市中百仓储金银潭店; 面包糠(粒径 $< 2\text{ mm}$) 江苏无锡金皇花食品有限公司; 小麦淀粉(淀粉87.2%, 水分10.9%, 破损淀粉10.8%)、谷蛋白(蛋白质83.1%, 水分7.6%) 北京瑞麦嘉禾商贸有限公司; 苹果纤维(食品级, 不溶性膳食纤维67.4%)、大豆纤维(食品级, 不溶性膳食纤维62.4%)、小麦麸纤维(食品级, 不溶性膳食纤维51.7%) 陕西扶风慈缘生物科技有限公司。

浓硫酸(分析纯) 国药集团化学试剂有限公司;
苏丹红B 天津大茂化学试剂厂。

1.2 仪器与设备

SZF-06C脂肪测定仪 浙江托普仪器有限公司;
NDJ-79A数字旋转黏度计 上海昌吉地质仪器有限公司;
LRHS-150-2恒温恒湿培养箱 上海跃进医疗器械有限公司;
Kinexus lab+旋转流变仪 英国Malvern仪器有限公司;
Q-2000差式扫描量热仪(differential scanning calorimeter, DSC) 美国TA公司;
TGA/DSC1100SF TG分析仪 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;
PQ-001核磁共振分析仪 上海纽迈电子科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 鲢鱼鱼糜块的制备

参照Cui Lulu等^[10]制备鱼糜块的方法。将-50℃冻藏的成品鲢鱼鱼糜流水解冻至能切成小块,小块鱼糜在25℃下自然解冻。将解冻后的鱼糜称质量,放入斩拌机以1200 r/min斩拌5 min,再添加1%食盐,继续以2000 r/min盐斩7 min。取出斩成糜状的鱼糜,放入灌肠机灌肠,灌肠机出口管道直径和肠衣直径均选择2.5 cm,每段鱼肠长度达到20 cm左右封口,放入-20℃冰箱冷冻成型。取用时将成型的鱼肠放在25℃下解冻,切成直径2.5 cm、长度1.5 cm的圆柱体小块。

1.3.2 外裹糊的制备

表1 外裹糊配方

Table 1 Formulations of batter

膳食纤维添加量/%	质量/g			
	小麦淀粉	谷蛋白	膳食纤维	水
0	91.7	8.3	0.0	98.0
4	91.7	8.3	4.2	98.0
6	91.7	8.3	6.4	98.0
8	91.7	8.3	8.7	98.0
10	91.7	8.3	11.1	98.0
12	91.7	8.3	13.6	98.0
14	91.7	8.3	16.3	98.0

外裹糊配方见表1。依据本课题组前期优化制备基础模式外裹糊的配方和方法^[8-10],在不锈钢盆中加入小麦淀粉(91.7 g)和谷蛋白(8.3 g),并分别加入不同添加量(干基)的3种膳食纤维,混合均匀后加入98.0 g去离子水,搅拌成糊状,然后用精密搅拌机以1000 r/min搅拌10 min,调制均匀的外裹糊,备用。

1.3.3 油炸外裹糊鲢鱼鱼糜块的制备

将切好的鱼糜块放入外裹糊中,确保鱼糜块完全浸没,鱼糜块的表面与外裹糊充分接触,浸没10 s后缓慢取出,悬空自然稍淋15 s再放入糊中二次裹糊。将二次裹糊的鱼糜块取出,当糊不汇聚成滴或成股流下时,将鱼糜块放入面包糠中裹糠,来回摇动使面包糠均匀覆盖在外裹糊鱼糜块的表面,测定裹糊率并备用。

油炸:将外裹糊鱼糜块放入油锅,在170℃油炸40 s(初炸)、190℃油炸30 s(复炸)后,将油炸外裹糊鱼糜块放入不锈钢滤网中自然沥去多余的油脂。炸制时每次鱼糜块投入量为6块,以保证油温不会变化太大,鱼糜块均能熟透上浮至表面。油炸过程中不断翻动鱼糜块,使其受热均匀,炸好后取出,在25℃下冷却1 h。

剥壳:将油炸外裹糊鱼糜块的外壳剥下(剥壳过程中避免鱼肉组织黏附在外壳上),用手术刀切碎外壳使其直径小于2 mm,将外壳粉碎后,过100目筛备用。另将内部鱼肉组织切碎混匀备用。

1.3.4 小麦淀粉、谷蛋白和膳食纤维的水分吸附等温线

参照Wlodarczyk-Stasiak等^[11]的方法测定水分吸附等温线。用不同浓度的硫酸溶液控制6个干燥器内的水分活度(a_w)分别为0.042、0.156、0.343、0.561、0.749和0.881,将小麦淀粉、谷蛋白和3种膳食纤维分别放入干燥皿,干燥皿密封后置于温度为(20±0.5)℃的恒温恒湿箱中。恒质量后根据小麦淀粉、谷蛋白和3种膳食纤维的平衡含水率对 a_w 作折线图,得到水分吸附等温线。

1.3.5 外裹糊鱼糜块的裹糊率

外裹糊食品中,裹糊率表示黏附在食物表面的面糊和面包糠的质量与外裹糊食品总质量的比值,参考Cui Lulu等^[10]使用的方法。按下式计算外裹糊鱼糜块的裹糊率:

$$Y = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

式中:Y为鱼糜块的裹糊率%; m_1 为裹糊挂糠后外裹糊鱼糜块总质量/g; m_2 为裹糊挂糠前鱼糜块的质量/g。

1.3.6 外裹糊的黏度

参照游曼洁等^[12]的方法。选择100#转筒,用第II单元进行测定。启动电机后,将15 mL外裹糊倒入NDJ-79A数字旋转黏度计的测试容器中,再将转筒插入外裹糊中直到完全浸没,待数据稳定15 s后开始读数。

1.3.7 外裹糊的流变性能

参照Cui Lulu等^[10]的方法测定外裹糊的流变性能。采用旋转流变仪振荡模式下的温度扫描,测定外裹糊的流变特性。取2.5 mL左右外裹糊放在流变仪样品槽中,选择40 mm的平板夹具,测量间隙1 mm,用防气逸散罩密封减少水分蒸发。在应力振幅1%、振荡频率1 Hz、温度变化范围0~90℃条件下,以2℃/min的升温速率进行扫描,记录温度扫描过程中的储能模量(G')、损耗模量(G'')及损耗角正切值($\tan\delta=G''/G'$)。

1.3.8 外裹糊的热特性

采用DSC测定外裹糊的热力学特性。参考Yang Yi等^[13]的方法并稍作修改。取15 mg左右外裹糊置于铝制坩埚中,放入DSC的炉体中,在20℃下平衡5 min后开始测定。扫描速率为10℃/min,温度范围为20~140℃,得

到DSC热效应曲线,其特征参数包括淀粉糊化及谷蛋白变性时的起始温度(T_o)、峰值温度(T_p)、终结温度(T_c)及热焓(ΔH)变化。

1.3.9 外壳的TG特性

参考Li Shuyi等^[14]的方法并稍作修改,使用TG分析仪进行分析。条件参数设置:起始温度20℃,终止温度700℃,升温速率20℃/min,达到700℃后自然降温,保护气氛为氮气,气氛流量为15 mL/min。空氧化铝坩埚为对照,核减坩埚本身的影响后,根据1.3.3节的方法取5 mg左右外壳放入坩埚中,然后将装有外壳的坩埚放置在样品架上合上炉体。仪器生成TG曲线后,用Origin软件对TG曲线求一阶导,得到微商热重(derivative thermogravimetry, DTG)曲线。

1.3.10 外壳和鱼肉的水分状态

分别称取5 g左右1.3.3节中的外壳和鱼肉置于低场核磁共振仪的40 mm探头内,在32℃,磁体强度为0.5 T,磁场为23.3 MHz条件下进行横向弛豫时间(T_2)反演^[15]。测试参数:采样频率200 kHz,90°脉宽 $P_1=20 \mu s$,180°脉宽 $P_2=36 \mu s$,重复采样等待时间4 000 ms,回波时间0.100 ms,回波个数8 000,扫描次数4。

1.3.11 油炸外裹糊鲢鱼鱼糜块的油脂渗透

在油炸锅中加入1.5 L大豆油,向油中加入0.75 g苏丹红B后将大豆油加热至60℃,维持4 h,使苏丹红B和大豆油充分混合均匀。将外裹糊鱼糜块放入染色后的大豆油中油炸,25℃下冷却1 h后将油炸外裹糊鱼糜块剖开,切成2 mm×2 mm×1 mm大小的薄片,用光学显微镜观察染色结果,放大倍数为4。

1.4 数据统计分析

实验做3次平行,取平均值,结果用 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用SPSS分析差异显著性($P < 0.05$),Origin Pro 2019进行非线性拟合。

2 结果与分析

2.1 水分吸附等温线、外裹糊的黏度及外裹糊鱼糜块的裹糊率

水分吸附等温线表示在一定的温度下,物料的平衡含水率随 a_w 变化的曲线,能反映物料的水分结合能力。如图1所示,在20℃下,5种物料的平衡含水率在低 a_w 区间(0.04~0.15)增加较快,等温线斜率较大,在中 a_w 区间(0.15~0.56)增加速率减缓,等温线较平坦,而在高 a_w 区间(0.56~0.88)增加速率又变快,且高 a_w 区间平衡含水率的增长速率随 a_w 的增加不断增大,等温线斜率最大。这表明这些物料的吸附等温线具有II型等温线的特征,形状为反“S”型,与王明洁等^[16]的研究结果类

似。等温线区间II(a_w 为0.15~0.75)的水为多分子层结合水,能与蛋白质分子中的酰氨基、巯基和淀粉、纤维素分子中的羟基以氢键结合^[17]。温度和 a_w 一定时,物料在等温线区间II的平衡含水率反映其水分结合能力。因此,5种物料的水分结合能力大小关系为小麦淀粉>大豆纤维>苹果纤维>小麦麸纤维>谷蛋白。

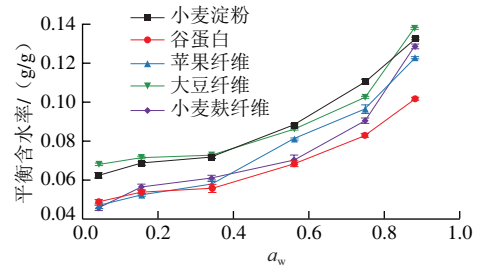


图1 小麦淀粉、谷蛋白和3种膳食纤维的水分吸附等温线
Fig.1 Moisture adsorption isotherms of wheat starch, gluten, and three dietary fibers

如表2所示,功能性成分的种类和添加量会影响外裹糊的黏度,从而改变外裹糊鱼糜块的裹糊率,裹糊率是影响油炸外裹糊食品品质的重要因素^[7]。相同添加量下,黏度和裹糊率依次为大豆纤维>苹果纤维>小麦麸纤维,与水分吸附等温线趋势相同。随着添加量的增加,3种外裹糊的黏度均显著升高($P < 0.05$),裹糊率呈现先升高后降低的趋势,当添加8%苹果纤维、6%大豆纤维和12%小麦麸纤维时,裹糊率均达到最大。韩晓银等^[7]研究发现,添加功能性成分能增加外裹糊的黏度和弹性,黏性的增加提高了外裹糊的热稳定性,有利于改善产品的品质。随着添加量增加,尽管外裹糊的黏度不断升高,但3种膳食纤维组的裹糊率均在达到最大后开始降低,这可能与外裹糊的流变性能改变有关,外裹糊从牛顿流体转变为非牛顿流体,鱼糜块裹上糊后,外层的糊失去流动性并只保留流体的静态黏度,裹糊较少且分布不均匀,外裹糊对面包糠的黏附能力减小,从而导致裹糊率降低^[18]。

表2 外裹糊的黏度和外裹糊鱼糜块的裹糊率

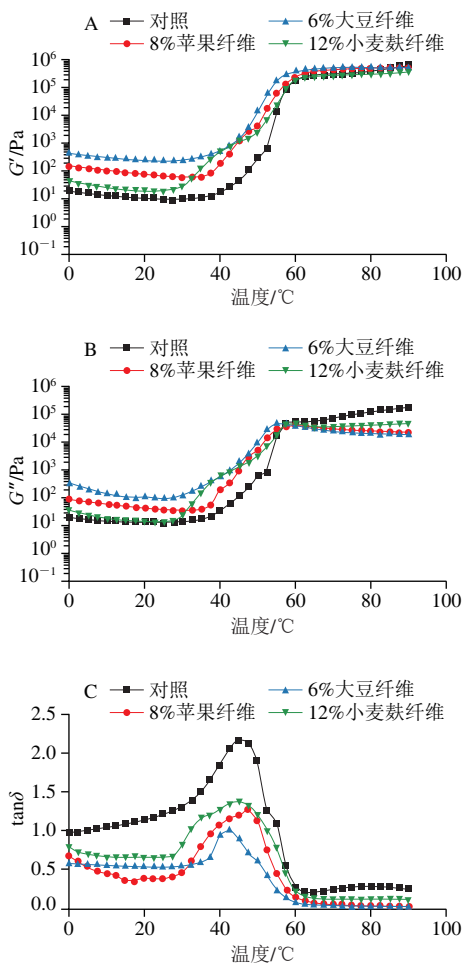
Table 2 Viscosity of batter and pick-up of BBFNs

膳食纤维添加量/%	苹果纤维		大豆纤维		小麦麸纤维	
	裹糊率/%	黏度/(mPa·s)	裹糊率/%	黏度/(mPa·s)	裹糊率/%	黏度/(mPa·s)
0	14.1±0.24 ^a	224±5 ^e	13.8±0.16 ^c	221±7 ^e	13.9±0.35 ^e	229±13 ^f
4	20.1±0.05 ^d	630±12 ^d	21.0±0.34 ^d	880±16 ^d	17.1±0.57 ^f	260±8 ^{ef}
6	23.1±0.36 ^e	951±7 ^e	36.6±0.30 ^a	1 140±23 ^e	19.2±0.20 ^e	318±13 ^e
8	35.9±0.23 ^a	1 075±19 ^b	30.2±0.90 ^b	1 270±17 ^b	22.6±0.59 ^d	388±15 ^d
10	27.7±1.06 ^b	1 297±15 ^a	27.8±0.26 ^c	1 369±31 ^a	28.7±0.20 ^b	776±10 ^e
12					31.7±0.43 ^a	1 065±39 ^a
14					26.5±0.32 ^c	1 296±21 ^a

注:同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。表3同。

2.2 外裹糊的流变性能

外裹糊是典型的半固体黏弹性流体，流变仪中的 G' 代表黏弹性行为的弹性部分，描述的是外裹糊的固态特性， G'' 描述的是黏弹性行为的黏性部分，体现了外裹糊的液态特性， $\tan\delta < 1$ 时外裹糊表现为弹性特征，反之则表现为黏性特征^[19]。



A、B和C分别表示外裹糊的 G' 、 G'' 和 $\tan\delta$ 。

图2 外裹糊的流变性能

Fig. 2 Rheological behavior of batters

从图2A、B可知，4种外裹糊的黏弹性特征曲线变化趋势基本相同。在0~29 °C， G' 和 G'' 均缓慢降低，29~60 °C， G' 和 G'' 快速升高，当扫描温度超过60 °C， G' 和 G'' 基本保持不变。在0~60 °C，大豆纤维组外裹糊的 G' 和 G'' 最高，其次为苹果纤维组、小麦麸纤维组和对，这与2.1节中外裹糊黏度的讨论结果一致。本模式外裹糊黏性特征的增强源于小麦淀粉的溶胀和破裂，Lai等^[20]的研究表明，不溶性膳食纤维能与淀粉颗粒的基质结合，使淀粉内部水分分布不均并溶胀破裂，淀粉糊化的峰值黏度提高。随着温度升高，溶胀的淀粉颗粒能以填充物的形式填充在谷蛋白的网状结构中，促进分子之间

的交联反应并形成弹性凝胶，这进一步导致 G' 和 G'' 持续升高，外裹糊的 G' 与形成凝胶的强度呈正相关^[21-22]。本研究中添加膳食纤维能显著增加外裹糊的 G' ，则外裹糊的稳定性及凝胶的强度得到增强，能够有效抑制油炸过程中水分的损失和油脂的渗透。大豆纤维组的 G' 值始终最高，这与本研究预实验中大豆纤维组较佳的减油结果一致（数据未显示）。

从图2A、B可以看出，对照外裹糊的 G' 和 G'' 在40 °C左右开始显著上升，这表明淀粉颗粒开始大规模溶胀，而苹果纤维、大豆纤维和小麦麸纤维将此温度分别降低至34、30 °C和29 °C，表明添加膳食纤维能够促进淀粉的溶胀和糊化，使溶胀的淀粉更快填充入谷蛋白网络结构中，增强形成凝胶的强度。这与Aravind等^[23]的研究结果一致：向淀粉面糊中添加柠檬纤维和燕麦纤维（主要为不溶性纤维）能够促进淀粉颗粒破裂，显著降低淀粉的糊化温度，且所得的面糊产品具有更强的抗热剪切和抗机械剪切能力，稳定性得到增强。

当温度超过60 °C时，添加膳食纤维组的 G' 均保持不变且高于对照， G'' 略微下降，这表明加热过程中形成的弹性凝胶已经趋于稳定且凝胶强度增强，在油炸过程中不易受到破坏，能够有效抑制油脂的渗透。而对照的 G'' 继续显著增加，表明淀粉的溶胀和糊化仍在继续，外裹糊没有形成稳定的凝胶。对照的弹性特征趋于稳定而黏性特征持续增加，更不利于后续弹性凝胶的生成。

图2C中 $\tan\delta$ 的变化印证了上述讨论。对照的 $\tan\delta$ 在0~52 °C始终大于1，外裹糊的黏性特征占主导，并未形成凝胶。当温度继续升高至55 °C附近， $\tan\delta$ 接近于1，之后减小，逐渐形成淀粉-蛋白质凝胶。而添加膳食纤维的3组外裹糊在起始加热阶段即达到 $\tan\delta < 1$ ，弹性特征占主导，呈现出软凝胶的性质^[24]。在30~45 °C范围内小麦淀粉大量溶胀，外裹糊整体的黏性出现明显的上升，之后 $\tan\delta$ 迅速下降，弹性特征远大于黏性特征，外裹糊形成结构稳定的弹性凝胶层。从图2C可以看出，在温度高于45 °C， $\tan\delta$ 迅速下降阶段，大豆纤维组最先达到 $\tan\delta < 1$ 的状态，其次是苹果纤维、小麦麸纤维组和对。这说明大豆纤维组的外裹糊能最早形成淀粉-蛋白质凝胶保护层，有效抑制水分的蒸发和油脂的渗透。当温度大于60 °C，添加膳食纤维的3组外裹糊的 $\tan\delta$ 已保持不变，形成了稳定的凝胶，而对照的 $\tan\delta$ 又进一步上升，这说明对照形成的弹性凝胶不如膳食纤维组稳定，对照的弹性特征减弱，可能由于对照形成的弱凝胶被破坏。图2对照曲线的斜率始终最大，受温度的影响剧烈，外裹糊不稳定且容易发生性质突变，也可能由上述原因导致。

2.3 外裹糊的热力学特性

如表3所示, 淀粉峰的 ΔH 代表淀粉氢键破坏, 使其从结晶态转化为可溶态吸收的能量; 蛋白质峰的 ΔH 表示蛋白质结构展开, 分子间聚集形成新键吸收的能量^[25]。与对照的淀粉峰 (T_o 57.8 °C、 T_p 63.1 °C、 T_c 85.4 °C, ΔH 1.92 J/g) 相比, 添加3种膳食纤维均降低了小麦淀粉糊化的温度, 缩短了小麦淀粉糊化的过程, 降低了小麦淀粉从结晶态转化为熔融态所吸收的能量, 其中添加大豆纤维的效果最显著, 其次为苹果纤维、小麦麸纤维。这是因为不溶性膳食纤维在模式外裹糊中竞争结合水, 导致水分在淀粉基质内分布不均匀, 淀粉颗粒在加热过程中破裂, 从而释放更多数量的支链淀粉, 促进了淀粉由结晶态向熔融态的转变, 因此在加热过程中只需要吸收少量的能量即可达到糊化后的熔融态^[26]。同时由于该过程吸收的能量减少, 淀粉的稳定性得到提高。Yildiz等^[5]向面糊体系中加入豌豆膳食纤维, 发现淀粉的分解黏度显著降低, 淀粉具有更高的抗退化性, 能形成更稳定的面糊。此外, 不溶性膳食纤维可以与浸出的直链淀粉在疏水区域相互作用, 并通过氢键和范德华力与支链淀粉侧链结合, 形成不溶性膳食纤维-淀粉复合物, 提高外裹糊的热稳定性和抗物理剪切能力^[27]。小麦麸纤维组的 T_o 出现了高于对照 T_o 的现象, 这可能是小麦麸纤维中不溶性成分的比例(51.7%)明显低于大豆纤维(62.4%)和苹果纤维(67.4%), 其中不溶性成分破坏淀粉基质的作用较弱, 相对较多的可溶性成分抑制了淀粉的溶胀^[28]。

表3 外裹糊的DSC热力学参数

Table 3 Thermal parameters of batters measured by DSC

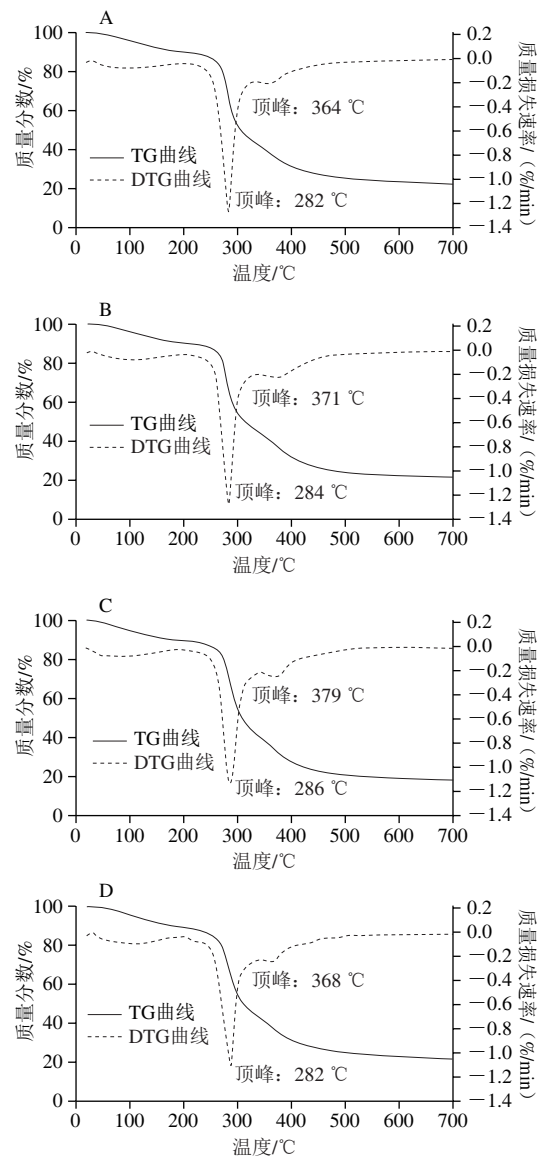
组别	淀粉峰				蛋白质峰			
	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	ΔH (J/g)	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	ΔH (J/g)
对照	57.8±0.3 ^a	63.1±0.2 ^a	85.4±0.3 ^a	1.92±0.1 ^a	97.9±0.9 ^b	100.8±1.2 ^b	109.6±1.5 ^b	0.35±0.09 ^a
8%苹果纤维	56.1±0.5 ^b	61.2±0.1 ^b	82.7±0.2 ^b	1.56±0.0 ^f	103.0±1.1 ^b	108.9±1.4 ^b	116.5±0.8 ^b	0.13±0.04 ^f
6%大豆纤维	55.1±0.2 ^b	61.1±0.1 ^b	81.3±0.3 ^b	1.49±0.1 ^d	105.4±1.3 ^b	111.3±1.7 ^b	115.5±0.3 ^b	0.17±0.03 ^b
12%小麦麸纤维	58.2±0.5 ^c	62.8±0.1 ^b	82.1±0.4 ^c	1.67±0.1 ^b	101.8±2.1 ^b	104.6±0.9 ^b	115.9±1.2 ^b	0.26±0.04 ^b

与对照相比, 3种膳食纤维组蛋白质峰的 T_o 、 T_p 和 T_c 均显著升高, ΔH 降低。其中大豆纤维组谷蛋白的变性温度最高, ΔH 最低, 其次是苹果纤维组和小麦麸纤维组。这是因为加入膳食纤维后, 膳食纤维与谷蛋白竞争水分, 谷蛋白未能达到充分的水合状态, 延缓了谷蛋白的热变性^[29]。此外, 溶胀的淀粉颗粒及膳食纤维可以与谷蛋白形成复合物, 提高谷蛋白凝胶稳定性^[30]。这些结果论证了前面对外裹糊流变性能的探讨, 证明了添加膳食纤维能促进淀粉糊化, 加快淀粉和谷蛋白凝胶的形成, 增强凝胶的强度及外裹糊体系的稳定性。

2.4 外壳的TG特性

TG曲线和DTG曲线分别表示质量变化与温度的关系及质量变化率与温度的关系, DTG曲线的峰值温度代表

最大质量损失速率的温度, 外壳热稳定性可以用DTG和TG曲线描述^[14]。外壳质量的损失分为2个阶段, 第1阶段是水分和油脂的损失; 第2阶段是小麦淀粉-谷蛋白凝胶的损失。



A~D分别表示对照、8%苹果纤维组、6%大豆纤维组和12%小麦麸纤维组。图5同。

图3 外壳的TG及DTG曲线

Fig. 3 TG and DTG curves of the crust

如图3所示, 4组外壳的DTG曲线都在100 °C左右出现了一个小峰, 说明外壳开始失水, 之后质量损失速率迅速增加。在第1阶段, 苹果纤维组(284 °C)和大豆纤维组(286 °C)外壳的最大质量损失速率对应的温度均高于对照(282 °C), 这是因为苹果纤维和大豆纤维增强外裹糊对水分的束缚, 提高了外壳的热稳定性。在4种类型的外壳中, 大豆纤维组外壳水分损失速度最慢, 这是由于大豆纤维的水分结合能力最强。随着加热的进行, 第2阶

段发生谷蛋白的解聚和淀粉降解,导致淀粉-谷蛋白凝胶质量的损失。第2阶段大豆纤维组最大质量损失速率对应的温度最高(379℃),其次是苹果纤维组(371℃)、小麦麸纤维组(368℃)和对照(364℃),这表明添加膳食纤维增加了外壳的热稳定性,外壳的热稳定顺序为大豆纤维组>苹果纤维组>小麦麸纤维组>对照。外壳的热稳定性受分子内部基团化学键能的影响,与形成外壳的各分子间相互作用有关^[31]。说明大豆纤维与小麦淀粉、谷蛋白的相互作用最强,在油炸过程中形成的凝胶强度最高,不易分解,抑制了水分的蒸发和油脂的渗透。这进一步论证了上述对外裹糊特性的讨论。

2.5 外壳和鱼肉的水分状态

核磁共振 T_2 反演谱可以区分外壳和鱼肉内部水分的状态, T_2 与水的自由度成正比,即 T_2 越短,水自由度越低^[32]。如图4所示,峰面积代表不同状态的水分含量,3个峰的峰面积从左到右分别表示为 S_{21} 、 S_{22} 和 S_{23} ,不同状态水从左到右分别表示为 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 。其中第1个峰 T_{21} (0.01~1ms)表示深层结合水,主要是与小麦淀粉或谷蛋白紧密结合的水;第2个峰 T_{22} (1~10ms)是直接与强结合水以氢键结合、间接与大分子结合的弱结合水层,比 T_{21} 流动性大,这部分水结合于小麦淀粉、蛋白质等大分子之间,为多分子层水; T_{23} (100~1000ms)表示自由水,分子流动性较强^[33]。图中3个峰的面积反映了不同状态水分的含量及变化。

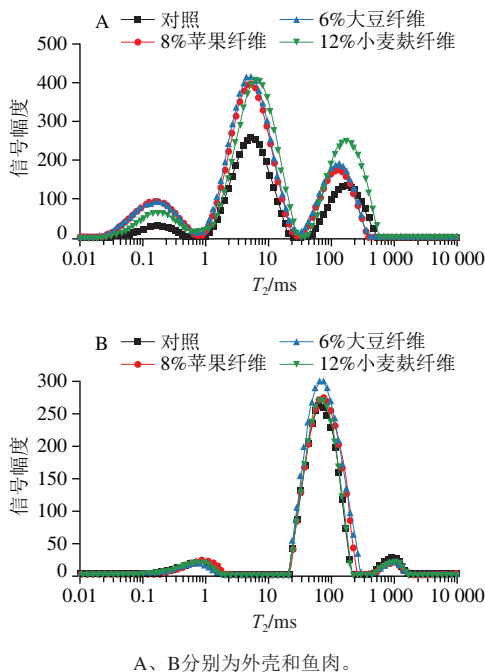


图4 油炸外裹糊鱼糜块的横向弛豫时间反演谱
Fig. 4 Inversion spectra of transverse relaxation time of deep-fried BBFNs

由图4A可知,3种膳食纤维组外壳的 S_{21} 、 S_{22} 和 S_{23} 均比对照有显著增加,其中大豆纤维组和苹果纤维组的 S_{21}

含量接近且都大于小麦麸纤维组和对照。这表明大豆纤维和苹果纤维能显著促进深层结合水的生成。3种膳食纤维组外壳的 S_{22} 接近且均显著大于对照,小麦麸纤维组的 S_{23} 最大,且大豆纤维组和苹果纤维组的弛豫时间小于小麦麸纤维组,则小麦麸纤维组的自由水含量较高。这些结果表明,添加膳食纤维能降低外壳中水分的自由度,减少水分的蒸发,大豆纤维组的深层结合水最多,油炸过程中产生的凝胶最致密,最有效地抑制水分的蒸发和油脂的渗透。由图4B可知,除大豆纤维组的 S_{22} 略高,其他鱼肉峰的弛豫时间和峰面积无显著差异($P>0.05$)。这表明添加膳食纤维对鱼肉的水分含量和状态均无显著影响,进一步说明油炸外裹糊鱼糜块的油脂含量变化主要集中在外壳。

2.6 油炸外裹糊鱼糜块的油脂渗透

苏丹红B呈红色,能均匀地分散在油脂中,通过观察染色图可以直观判断油炸外裹糊鱼糜块的油脂渗透情况^[34]。从图5可以看出,油炸外裹糊鱼糜块的红色部分主要分布于外壳及外壳与鱼肉的交界处,说明油炸过程中,油脂主要渗透到外壳及内部鱼肉的表面,较少油脂渗入鱼肉。

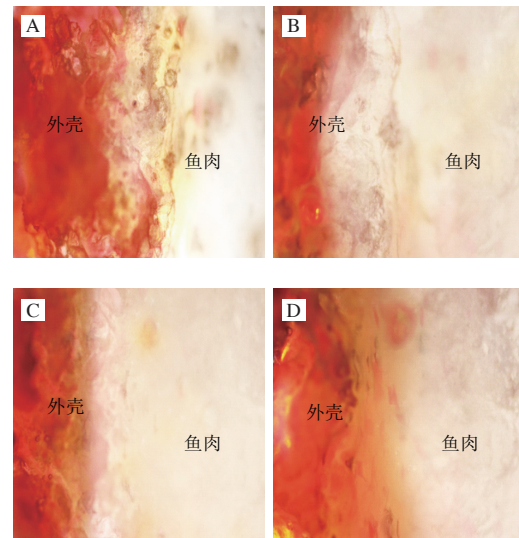


图5 油炸外裹糊鱼糜块的苏丹红染色图
Fig. 5 Sudan red-dyed images of deep-fried BBFNs

对照的外壳与鱼肉边界较模糊,染色油渗入的幅度较宽,颜色较深,外壳结构散乱。这是因为小麦淀粉和谷蛋白组成的模式外裹糊形成的凝胶层较弱,油炸过程中水分蒸发,导致外壳形成散乱的孔隙,油脂大量渗入。与对照相比,3种膳食纤维组的油脂渗入幅度变窄,外壳与鱼肉边界更清晰。其中大豆纤维组的油脂渗入幅度最窄,外壳结构整齐,外壳与鱼肉间形成了明显的凝胶层,凝胶层清晰地将红色的外壳和白色的鱼肉阻隔。大豆纤维组形成了最致密的凝胶层,减小了外壳形成的

孔隙, 有效地抑制了水分的蒸发和油脂的渗透。4组油炸外裹糊鱼糜块的油脂渗透程度为大豆纤维组<苹果纤维组<小麦麸纤维组<对照, 该结果进一步验证了膳食纤维通过改善外裹糊特性抑制油脂的渗透。

3 结论

添加3种膳食纤维均增强了外裹糊的水分结合能力, 促进外裹糊中溶胀的小麦淀粉填充谷蛋白网络结构并形成凝胶层, 提高了外裹糊的热稳定性, 增强了深度油炸过程形成的淀粉和谷蛋白凝胶的强度, 最终抑制了油炸外裹糊鲢鱼鱼糜块的油脂渗透。

大豆纤维组的水分结合能力最强, 凝胶形成速度最快, 外裹糊的 G' 、 G'' 、热稳定性及油炸后形成外壳的稳定性最高。大豆纤维最大程度促进了外壳的自由水向结合水转化, 通过生成纤维-小麦淀粉复合物和纤维-谷蛋白复合物, 形成最紧密的凝胶层, 使油炸外裹糊鲢鱼鱼糜块外壳的结构完整, 外壳与鱼肉界限清晰, 油脂渗透减少。该研究结果可为低脂油炸外裹糊食品的规模化生产提供科学指导。

参考文献:

- [1] PARK S Y, KIM H Y. Effect of lyophilized chive (*Allium wakegi* Araki) supplementation to the frying batter mixture on quality attributes of fried chicken breast and tenderloin[J]. Food Chemistry: X, 2022, 13: 100216. DOI:10.1016/j.fochx.2022.100216.
- [2] ZENG H, CHEN J W, ZHAI J L, et al. Reduction of the fat content of battered and breaded fish balls during deep-fat frying using fermented bamboo shoot dietary fiber[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 73: 425-431. DOI:10.1016/j.lwt.2016.06.052.
- [3] 翟金玲, 陈季旺, 肖佳妍, 等. 低脂油炸外裹糊鱼块的制备工艺优化[J]. 食品科学, 2015, 36(20): 1-6. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201520001.
- [4] MAH E, BRANNAN R G. Reduction of oil absorption in deep-fried, battered, and breaded chicken patties using whey protein isolate as a postbreading dip: effect on flavor, color, and texture[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(1): 9-16. DOI:10.1111/j.1750-3841.2008.00973.x.
- [5] YILDIZ Ö, YURT B, BASTÜRK A, et al. Pasting properties, texture profile and stress-relaxation behavior of wheat starch/dietary fiber systems[J]. Food Research International, 2013, 53(1): 278-290. DOI:10.1016/j.foodres.2013.04.018.
- [6] KIM Y S, HA T Y, LEE S H, et al. Effect of rice bran dietary fiber on flour rheology and quality of wet noodles[J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 1997, 29(1): 90-95.
- [7] 韩晓银, 张莉莉, 田鑫, 等. 不同成分裹浆的流变学特性及其对裹面虾品质的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(18): 135-142. DOI:CNKI:SUN:SPKJ.0.2012-18-028.
- [8] 冯佳奇, 陈季旺, 袁子珺, 等. 小麦淀粉和谷蛋白互作对油炸外裹糊鲢鱼鱼糜块油脂分布的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 24-31. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220328-349.
- [9] CHEN C F, CHEN J W, YUAN Z J, et al. Effect of the wheat starch/wheat protein ratio in a batter on fat absorption and quality attributes of fried battered and breaded fish nuggets[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(7): 2098-2104. DOI:10.1111/1750-3841.15303.
- [10] CUI L L, CHEN J W, WANG Y H, et al. The effect of batter characteristics on protein-aided control of fat absorption in deep-fried breaded fish nuggets[J]. Foods, 2022, 11(2): 147. DOI:10.3390/foods11020147.
- [11] WŁODARCZYK-STASIAK M, MAZUREK A, JAMROZ J, et al. Physicochemical properties and structure of hydrothermally modified starches[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 88-97. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.04.024.
- [12] 游曼洁, 赵力超, 张茜, 等. 荸荠淀粉糊黏度特性研究[J]. 食品科学, 2009, 30(9): 99-102. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2009.09.023.
- [13] YANG Y, WANG L, LI Y, et al. Investigation the molecular degradation, starch-lipid complexes formation and pasting properties of wheat starch in instant noodles during deep-frying treatment[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 287-293. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.01.034.
- [14] LI S Y, LI J S, ZHU Z Z, et al. Soluble dietary fiber and polyphenol complex in lotus root: preparation, interaction and identification[J]. Food Chemistry, 2020, 314: 126219. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126219.
- [15] ZHANG J, YU P B, FAN L P, et al. Effects of ultrasound treatment on the starch properties and oil absorption of potato chips[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105347. DOI:10.1016/j.ultrsonch.2020.105347.
- [16] 王明洁, 吴小丽, 袁建. 小麦粉水分的吸附与解吸特性[J]. 食品科学, 2012, 33(19): 45-51.
- [17] 谢笔钧. 食品化学[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2011: 22-31.
- [18] 陈思好, 焦叶, 崔波, 等. 膳食纤维理化特性及其改性方法研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 234-240. DOI:10.13652/j.spix.1003.5788.2022.60025.
- [19] 汪名春, 韦冷云, 朱培蕾, 等. 菊糖对小麦淀粉糊热力学及流变学特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(2): 24-29. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2017.02.005.
- [20] LAI P, LI K Y, LU S, et al. Physicochemical characteristics of rice starch supplemented with dietary fibre[J]. Food Chemistry, 2011, 127(1): 153-158. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.12.116.
- [21] SHIAU S Y, YEH A I. Effects of alkali and acid on dough rheological properties and characteristics of extruded noodles[J]. Journal of Cereal Science, 2001, 33(1): 27-37. DOI:10.1006/jcrs.2000.0344.
- [22] 王立博, 陈复生, 殷丽君, 等. 小麦阿拉伯木聚糖水凝胶结构及流变特性[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 41-46. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201713007.
- [23] ARAVIND N, SISSONS M, EGAN N, et al. Effect of insoluble dietary fibre addition on technological, sensory, and structural properties of durum wheat spaghetti[J]. Food Chemistry, 2012, 130(2): 299-309. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.07.042.
- [24] WANG K Q, LUO S Z, ZHONG X Y, et al. Changes in chemical interactions and protein conformation during heat-induced wheat gluten gel formation[J]. Food Chemistry, 2017, 214: 393-399. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.07.037.
- [25] PARNIAKOV O, BALS O, BARBA F J, et al. Application of differential scanning calorimetry to estimate quality and nutritional properties of food products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(3): 362-385. DOI:10.1080/10408398.2016.1180502.
- [26] TUDORICA C M, KURI V, BRENNAN C S. Nutritional and physicochemical characteristics of dietary fiber enriched pasta[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(2): 347-356. DOI:10.1021/jf0106953.
- [27] ZHU F, CAI Y Z, SUN M, et al. Effect of phytochemical extracts on the pasting, thermal, and gelling properties of wheat starch[J]. Food Chemistry, 2009, 112(4): 919-923. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.06.079.
- [28] RAGUZZONI J C, DELGADILLO I, DASILVA J A L. Influence of a cationic polysaccharide on starch functionality[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 150: 369-377. DOI:10.1016/j.carbpol.2016.05.024.
- [29] BOCK J E, DAMODARAN S. Bran-induced changes in water structure and gluten conformation in model gluten dough studied by fourier transform infrared spectroscopy[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(2): 146-155. DOI:10.1016/j.foodhyd.2012.10.014.
- [30] NAWROCKA A, SZYMAŃSKA-CHARGOT M, MIŚ A, et al. Dietary fiber-induced changes in the structure and thermal properties of gluten proteins studied by Fourier transform-Raman spectroscopy and thermogravimetry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(10): 2094-2104. DOI:10.1021/acs.jafc.5b05712.
- [31] SIN L T, RAHMAN W, RAHMAT A R, et al. Determination of thermal stability and activation energy of polyvinyl alcohol-cassava starch blends[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(1): 303-305. DOI:10.1016/j.carbpol.2010.07.049.
- [32] 彭宇飞. 基于核磁共振技术玉米种子萌发过程水分分布与变化研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [33] 卫志娇, 朱文学, 白喜婷, 等. 基于低场核磁和电镜扫描法对热风干燥花生仁的水分状态研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(11): 213-220.
- [34] SHAN J H, CHEN J W, XIE D, et al. Effect of xanthan gum/soybean fiber ratio in the batter on oil absorption and quality attributes of fried breaded fish nuggets[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(7): 1832-1838. DOI:10.1111/1750-3841.14199.