

## 添加蛋白质对外裹糊鱼块深度油炸过程油脂渗透的影响

崔璐璐<sup>1</sup>, 陈季旺<sup>1,2\*</sup>, 王玉环<sup>1</sup>, 廖鄂<sup>1,2</sup>, 王琦<sup>1,2</sup>, 夏文水<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 武汉轻工大学食品科学与工程学院 武汉 430023

<sup>2</sup> 大宗粮油精深加工教育部重点实验室(武汉轻工大学) 武汉 430023

<sup>3</sup> 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小麦面筋蛋白)中分别添加 6% 的大豆蛋白、蛋清蛋白、乳清蛋白和大米蛋白,于 170 °C 初炸 40 s 后 190 °C 复炸 30 s 制作油炸外裹糊鱼块。分析外壳中蛋白质的表面疏水性( $H_0$ )、巯基和二硫键含量、荧光强度和二级结构,小麦淀粉的晶体结构,油炸外裹糊鱼块的表面油脂、表面渗透油脂含量及油脂的渗透与分布规律,探讨添加蛋白质对外裹糊鱼块深度油炸过程油脂渗透的影响,为低脂油炸外裹糊鱼块的规模化生产提供科学指导。结果显示,大豆蛋白组、蛋清蛋白组和乳清蛋白组的  $H_0$  大于对照(未添加蛋白质),而大米蛋白组的  $H_0$  小于对照;大豆蛋白组和蛋清蛋白组的荧光发射峰的最大吸收波长 ( $\lambda_{\max}$ ) 从 349 nm 增至 351 nm,而乳清蛋白组和大米蛋白组的  $\lambda_{\max}$  从 349 nm 减至 341 nm;乳清蛋白组的二硫键含量高于大豆蛋白组、蛋清蛋白组和大米蛋白组,且均高于对照。大豆蛋白组的  $\beta$ -折叠向  $\beta$ -转角转化较多,且荧光强度、相对结晶度以及表面油脂(除大米蛋白组外)和表面渗透油脂含量均最低,其次是蛋清蛋白组、乳清蛋白组、大米蛋白组和对照。结果表明:在外裹糊中添加的蛋白质影响了蛋白质疏水基团的暴露和小麦淀粉的糊化,最终改变了外裹糊鱼块深度油炸过程的油脂渗透。

**关键词** 外裹糊鱼块; 深度油炸; 蛋白质; 小麦淀粉; 油脂渗透

**文章编号** 1009-7848(2022)04-0151-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.04.015

油炸外裹糊食品是在食品原料表面裹上由小麦粉、盐、水等复配的糊,再裹上一层面包糠,经深度油炸后制得的一类风味食品,例如:油炸肉制品、果蔬制品和海鲜制品等<sup>[1-2]</sup>。外裹糊作为外层屏障,在油炸过程中发生一系列的物理和化学变化,包括水分蒸发、淀粉糊化和蛋白质变性等,形成一层金黄色保护层,使食品原料不直接与高温油接触,可以保持食品原料内的水分和鲜味,减少营养成分的流失,赋予油炸外裹糊食品酥脆外壳,具有色泽诱人、浓郁香味等特点。同时,深度油炸也可以杀灭食品中的细菌,延长食品保质期,改善食品风味,增强食品营养成分的消化性,其加工时间比一般的烹调方法短,深受国内外消费者的喜爱。

然而,油炸外裹糊食品的油脂含量过高,占食品质量的三分之一,有的甚至高达 50%,长期食用高油脂含量的油炸外裹糊食品容易造成肥胖,导致各种心血管疾病<sup>[3-5]</sup>。这使低脂油炸外裹糊食品

成为油炸食品的研究热点。目前,降低油炸外裹糊食品油脂含量的方法主要有:添加可食性成分,采用预处理工序(例如:热风干燥、微波干燥、热水浸泡处理等),改变油炸介质,物理法脱油(例如:过热蒸汽脱油和真空高速离心脱油等)<sup>[4]</sup>。其中,添加可食性成分是一种常用的减脂方法,向基础外裹糊中添加蛋白质和多糖等可有效降低油炸食品的油脂含量<sup>[5-9]</sup>。

蛋白质具有营养价值高,易消化,功能性强(例如:保水性、乳化性、凝胶性等)的特点,将蛋白质作为可食性成分,以降低油炸食品油脂含量的研究,近年来受到很多学者的关注<sup>[2-3,5,10]</sup>。在外裹糊中添加蛋白质能够改善外壳的致密性和切面的平整度;形成的蛋白质凝胶为立体网状结构,既能束缚水分又可作为风味物质的载体<sup>[11]</sup>。同时,蛋白质良好的持水能力在深度油炸过程中可以减少油脂的吸收,从而抑制油脂的渗透<sup>[12]</sup>。Chen 等<sup>[13]</sup>在含玉米和小麦粉的外裹糊中分别加入 1% 小麦蛋白、1% 大豆蛋白、1% 羟丙基甲基纤维素(HPMC)制备油炸外裹糊鱼块,结果发现含 1% 小麦蛋白和 1% 大豆蛋白的外壳硬度和脆度均高于对照(未添加

收稿日期: 2021-08-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32072249,31471612)

作者简介: 崔璐璐(1995—),女,硕士生

通信作者: 陈季旺 E-mail: jiwangchen1970@126.com

成分),且色泽金黄。Susanne等<sup>[14]</sup>通过将大豆分离蛋白、酪蛋白酸钠、乳清蛋白、甲基纤维素等11种可食性成分对谷物制品进行涂膜,比较这些成分对油炸谷物制品的品质、水分和油脂含量等的影响,结果显示,大豆分离蛋白、乳清蛋白和甲基纤维素显著降低了油炸制品的油脂含量,尤其是10%的大豆分离蛋白涂膜使产品的吸油率降低80%。Dogan等<sup>[15]</sup>将大豆分离蛋白、乳清分离蛋白及蛋清蛋白添加到外裹糊中,研究蛋白质种类对油炸外裹糊鸡肉块品质的影响,结果发现3种蛋白质均能抑制油炸过程油脂的渗透,其中乳清分离蛋白和蛋清蛋白能显著降低油脂含量。

本课题组前期研究表明:在外裹糊中分别添加大豆蛋白、乳清蛋白、蛋清蛋白、大米蛋白,能够明显抑制外裹糊鱼块深度油炸过程的油脂吸收<sup>[16]</sup>。然而,在模式外裹糊体系(高纯度的小麦淀粉和小麦面筋蛋白)中添加蛋白质,研究蛋白质抑制外裹糊鱼块在深度油炸过程中油脂渗透的机制未见报道。添加的蛋白质与小麦淀粉、小麦面筋蛋白相互作用抑制油脂渗透的机制尚不清楚。本试验在模式外裹糊中分别添加大豆蛋白、蛋清蛋白、乳清蛋白和大米蛋白(添加量均为质量分数6%),经170℃初炸40s后190℃复炸30s,制作油炸外裹糊鱼块,通过分析外壳中蛋白质的表面疏水性、巯基和二硫键含量、荧光强度和二级结构,小麦淀粉晶体结构,油炸外裹糊鱼块的表面油脂和表面渗透油脂含量及油脂的渗透与分布规律,从蛋白质之间及蛋白质与小麦淀粉相互作用的角度,探讨添加蛋白质抑制油脂渗透的机制,为低脂油炸外裹糊鱼制品的规模化生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

鲢鱼鱼糜,洪湖市新宏业食品有限公司;金龙鱼大豆油,益海嘉里(武汉)粮油工业有限公司;小麦淀粉(水分含量10.9%,淀粉含量87.2%)、小麦面筋蛋白(水分含量7.5%,蛋白质含量81.9%),北京瑞麦嘉禾商贸有限公司;面包糠(粒径<2mm),无锡圣伦特国际贸易有限公司;大豆蛋白(水分含量6.3%,蛋白质含量87.4%),山东御馨生物技术有限公司;蛋清蛋白(水分含量5.2%,蛋白质含量

81.6%),大连绿雪蛋品发展有限公司;乳清蛋白(水分含量5.3%,蛋白质含量81.8%),河南盛之德商贸有限公司;大米蛋白(水分含量5.5%,蛋白质含量77.4%),无锡金农生物科技有限公司。

考马斯亮蓝G250,天津大茂化学试剂厂;巯基乙醇(分析纯),山东西亚化学工业有限公司;1-苯胺基-8-萘磺酸(1-Anilino-8-naphthalisene sulfonate,ANS)、磷酸盐缓冲溶液(0.01 mol/L, pH 7.0),上海源叶生物科技有限公司;Ellman's试剂,北京科展生物科技有限公司;抗荧光猝灭剂,武汉谷歌生物科技有限公司;Nile Red染料,Sigma公司(圣路易斯)。

### 1.2 仪器与设备

F-4600型荧光光谱仪,日本Hitachi公司;FD-1-50真空冷冻干燥机,北京博医康实验仪器有限公司;7200型可见分光光度计,上海尤尼柯仪器有限公司;Bruker D8 Venture X-射线衍射仪,荷兰帕纳科公司;傅里叶红外光谱仪,美国尼高力仪器公司;SZF-06C脂肪测定仪,浙江托普仪器有限公司;XSP-BM-4C光学显微镜,上海彼爱姆(BM)光学仪器制造公司;Cryotome E冷冻切片机,美国Thermo公司;LYMPUS FV1200激光共聚焦扫描显微镜,日本奥林巴斯公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 油炸外裹糊鱼块的制作

鱼糜→解冻→空斩→盐斩→灌肠→冷冻成型→解冻→切块→挂糊粘糠→油炸→自然冷却

↑

调粉混合→加水匀浆

1) 制备鱼糜肠 参考Weng等<sup>[17]</sup>的方法并稍作修改。将大块冷冻鱼糜切成小块(约500g)室温(25℃)解冻,1200 r/min空斩5 min,再添加1%的食盐,2000 r/min盐斩7 min。取出鱼糜,放入灌肠机进行灌肠封口,置于-18℃冰箱冷冻成型备用。

2) 调制外裹糊 将小麦淀粉(91.67g)、小麦面筋蛋白(8.33g)和添加蛋白质(6%,以小麦淀粉和小麦面筋蛋白为基准)依次加入不锈钢盆中,用筷子搅拌混合均匀后缓慢加入98g的水,边加边搅拌至充分混合,用保鲜膜封住盆口防止水分损失,精密搅拌机以1000 r/min搅拌10 min,调制成均匀的外裹糊。

3) 裹糊、油炸 将冷冻鱼糜肠室温(25℃)解冻,切成质量约为5g的圆柱形鱼块(直径2.5cm,长约1.5cm),浸没在配制好的外裹糊中,约10s后缓慢取出,待鱼块上的外裹糊不成股滴下时进行二次裹糊。将裹好外裹糊的鱼块放入盛有面包糠的不锈钢盆中,抖动面包糠,使面包糠均匀黏附在鱼块表面制成外裹糊鱼块。将3L新鲜大豆油倒入油炸锅,待油温升至170℃放入外裹糊鱼块,每次投入量为4块,初炸40s后捞出放在滤网中,使油温升至190℃复炸30s,且油炸过程中不断用筷子翻动鱼块,使其受热均匀。油炸完成后用笊篱捞出鱼块,放入不锈钢滤网中室温(25℃)冷却1h,自然沥去表面多余的油脂。

### 1.3.2 荧光强度

1) 蛋白质溶液的制备 用不锈钢手术刀将外壳剥下,在-80℃的超低温冰箱中冷冻4h,放入冷冻干燥机内冷冻干燥48h,再用高速粉碎机粉碎。取2.5g粉碎的外壳放入100mL离心管中,加入25mL磷酸盐缓冲液(0.01mol/L,pH 7.0),冰水浴条件下均质机以20000r/min匀浆1min,再在4℃,8000r/min离心15min,取上清液,重复离心至上清液澄清。采用考马斯亮蓝法测定上清液的蛋白质浓度后,通过稀释使得上清液中蛋白质质量浓度达到0.1mg/mL。

2) 测定方法 采用F-4600型荧光光谱仪测定,参数设置:激发波长280nm;发射光谱300~450nm;狭缝宽度2.5nm;扫描速度240nm/min;电压700V。以磷酸盐缓冲液(0.01mol/L,pH 7.0)为空白对照<sup>[18]</sup>。

1.3.3 表面疏水性 参照Tang等<sup>[9]</sup>的方法并稍作修改,采用ANS作为荧光探针测定外壳中蛋白质的表面疏水性。按照1.3.2节步骤(1)的方法制备蛋白质溶液,并用考马斯亮蓝法测定蛋白质浓度。分别取0.4,1.2,2,2.8,3.6mL上清液,加入磷酸盐缓冲液混合至4.0mL,再加入40μL ANS溶液(8mmol/L),漩涡振荡混匀后静置5min,在激发波长390nm和发射波长490nm下测其荧光强度(FI)。以蛋白质浓度为横坐标,荧光强度为纵坐标作图,初始段的斜率即为外壳中蛋白质的表面疏水性指数( $H_0$ )。

1.3.4 巯基和二硫键 参照Tang等<sup>[9]</sup>的方法并

稍作修改,采用Ellman's试剂比色法测定外壳中蛋白质的-SH和S-S含量。

1) 配制溶液 Tris-Gly缓冲液:精确称量5.2085g Tris、3.3781g Gly、0.5855g 乙二胺四乙酸(EDTA),用0.1mol/L HCl调节pH值至8.0,加蒸馏水定容至500mL。

含8mol/L尿素的Tris-Gly溶液:在200mL Tris-Gly溶液中加入96.096g尿素。

12%三氯乙酸(TCA)溶液:称量12g三氯乙酸,加蒸馏水定容至100mL。

2) 蛋白质溶液的制备 按照1.3.2节步骤(1)的方法制备蛋白质溶液,并用考马斯亮蓝法测定蛋白质质量浓度( $C$ )。

3) 巯基含量的测定 在1mL蛋白质溶液中加入4mL Tris-Gly缓冲液和0.05mL Ellman's试剂(4mg/mL,用Tris-Gly缓冲液配制),漩涡振荡混匀后在25℃下保温反应10min,用分光光度计测定波长为412nm处的吸光值( $A_{412nm}$ )。根据公式(1)计算游离巯基的含量。

$$\mu_{SH} = \frac{73.53 \times A_{412nm} \times D_2}{C} \quad (1)$$

式中, $\mu_{SH}$ ——游离巯基含量( $\mu\text{mol/g}$ ); $C$ ——蛋白质溶液质量浓度(mg/mL); $D_2$ ——稀释系数。

4) 二硫键含量的测定 在1mL蛋白质溶液中加入4mL Tris-Gly缓冲液和0.05mL巯基乙醇,漩涡振荡混匀后在室温(25℃)下保温1h,再加入10mL 12%的TCA溶液,漩涡振荡混匀后继续保温1h,8000r/min离心10min,弃去上清液,沉淀加5mL 12%TCA溶液洗涤,磁力搅拌后再离心,重复2次除去巯基乙醇。取沉淀物加10mL Tris-Gly缓冲液溶解,混合均匀后取4mL,加0.04mL Ellman's试剂,漩涡振荡混匀后在25℃下保温反应10min,用分光光度计测定在412nm下吸光度值( $A_{412nm}$ )。按照公式(2)计算总巯基含量,按公式(3)计算二硫键含量。

$$\mu'_{SH} = \frac{73.53 \times A_{412nm} \times D_2}{C} \quad (2)$$

$$\mu_{SS} = \frac{\mu'_{SH} - \mu_{SH}}{2} \quad (3)$$

式中, $\mu'_{SH}$ ——总巯基含量( $\mu\text{mol/g}$ ); $\mu_{SS}$ ——二硫键含量( $\mu\text{mol/g}$ ); $C$ ——蛋白质溶液质量浓度



(mg/mL);  $D_2$ ——稀释系数。

1.3.5 蛋白质的二级结构 取 30 g 左右的外壳,用正己烷脱油。将脱油后的外壳冷冻干燥 48 h,再用高速粉碎机粉碎,过 100 目筛,备用。取适量外壳粉末与溴化钾(光谱纯)按 1:100 质量比于玛瑙研钵中混合研磨至粉末状,装样并压制成透明薄片,放入傅里叶红外光谱仪,做全波段扫描测定,纯溴化钾为空白对照。参数设置:扫描波数范围 4 000~400  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数 16 次,分辨率 4.0  $\text{cm}^{-1}$ ,主要测量 1 700~1 600  $\text{cm}^{-1}$  内酰胺 I 谱带,采用 Peakfit 软件对酰胺 I 带进行拟合( $R^2>0.99$ )<sup>[20]</sup>。

1.3.6 小麦淀粉的晶体结构 取 30 g 左右的外壳,用正己烷脱油,用研钵研磨后过 100 目筛,备用。取适量外壳粉末置于带矩形凹槽的专用玻璃片中,放入 Bruker D8 X-射线衍射仪中测定,特征射线选择 Cu 靶,参数设置:电压 40 kV,电流 40 mA,测量角度范围  $2\theta$  为  $3^\circ\sim 60^\circ$ ,步长 0.02°,发散和防发散狭缝均为 1 mm,接受狭缝 0.1 mm,扫描速度为 4°/min。每个样品约扫描 15 min,利用 MDI Jade 6 软件计算淀粉的相对结晶度,见公式(4)<sup>[21]</sup>。

$$\text{相对结晶度}(\%) = \frac{S_0}{S_0 + S_1} \times 100 \quad (4)$$

式中, $S_0$ ——XRD 衍射图中结晶区面积; $S_1$ ——XRD 衍射图中无定形区面积。

### 1.3.7 表面油脂和表面渗透油脂

1) 标准曲线的绘制 在大豆油中添加苏丹红 B 配制成不同质量浓度(0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 g/L)的苏丹红油液,在 30 °C 磁力加热搅拌器上加热搅拌 24 h,使苏丹红 B 完全溶解。用石油醚以体积比将每个浓度的苏丹红油液稀释 40 倍,然后用可见分光光度计在波长 510 nm 处测其吸光值( $A_{510\text{nm}}$ )。以吸光值为横坐标,苏丹红油溶液浓度为纵坐标做标准曲线。

2) 表面油脂含量的测定 采用质量浓度为 0.4 g/L 苏丹红油液制作油炸外裹糊鱼块,炸制后质量为  $m_0$ 。在 250 mL 的干净烧杯中加入 100 mL 的石油醚,将油炸外裹糊鱼块放入石油醚中浸泡 10 s 立即取出,再将石油醚转移到恒重的抽提瓶中(恒重质量: $m_1$ ),采用脂肪测定仪回收石油醚,然后将抽提瓶放入 105 °C 的烘箱中干燥至恒重

( $m_2$ ),表面油脂的质量  $m = m_2 - m_1$ 。根据公式(5)计算表面油脂含量。

$$\text{表面油脂含量}(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (5)$$

3) 表面渗透油脂含量的测定 将已经除去表面油脂的油炸外裹糊鱼块粉碎至直径不超过 3 mm 的颗粒,用脂肪测定仪提取油脂,得到除去表面油脂的油炸外裹糊鱼块所含的油脂质量  $m_3$ 。将提取的油脂用石油醚以体积比稀释 40 倍(V/V),在波长 510 nm 处测吸光值( $A_{510\text{nm}}$ )。由标准曲线计算出对应的苏丹红油液的质量浓度  $C_1$ ,根据公式(6)计算表面渗透油脂的含量<sup>[22]</sup>。

$$\text{表面油脂含量}(\%) = \frac{m_3 \times C_1}{m_0 \times C_0} \times 100 \quad (6)$$

式中, $C_0$ ——油炸外裹糊鱼块时苏丹红 B 油溶液的质量浓度(g/L)。

1.3.8 油脂分布 采用共聚焦激光扫描显微镜(CLSM)定性分析油炸外裹糊鱼块中油脂的分布<sup>[23]</sup>。首先将 1 mg 尼罗红溶解在 10 mL 丙酮中,配制成 0.01% 的丙酮染液。在 -20 °C 下,用冷冻切片从油炸外裹糊鱼块表面切下完整的薄片(1 cm×1 cm×8  $\mu\text{m}$ ),固定在显微镜载玻片上,取适量染液滴在试样薄片上,并放入 4 °C 冰箱里避光染色 3 h。染色结束后立即在试样薄片上滴 1 滴抗荧光猝灭剂封片,盖上盖玻片,将载玻片倒放在 CLSM 的载物台上观察。参数设置:扫描模式像素 800×800,拍照模式像素 1 024×1 024;扫描速度为 400 Hz;线频为 0.14 Hz;尼罗红激发波长 543 nm;发射波长 638~768 nm,放大倍数 10×。

## 1.4 数据处理

应用 Excel、Origin 和 SPSS 软件对所有数据进行处理和分析,结果用“平均值±标准差”表示。其中方差分析采用 ANOVA,显著性分析采用 Duncan 检验, $P>0.05$  判定为差异不显著, $P<0.05$  判定为差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 表面疏水性和荧光强度

天然蛋白质分子结构紧密,疏水氨基酸侧链位于分子内部, $H_0$  的大小取决于疏水性基团暴露程度<sup>[24]</sup>。荧光强度主要是色氨酸(Trp)残基的荧光

发射光谱,反映蛋白质的三级结构变化,即蛋白质之间以及其它成分与蛋白质相互作用的构象变化<sup>[25]</sup>。蛋白质的荧光发射峰的最大吸收波长( $\lambda_{\max}$ )增大或减小表示最大吸收波长红移或蓝移,红移

表明蛋白质结构变得松散,蓝移表明蛋白质结构变得紧凑<sup>[26]</sup>。外壳中蛋白质的  $H_0$  和荧光强度见图 1。

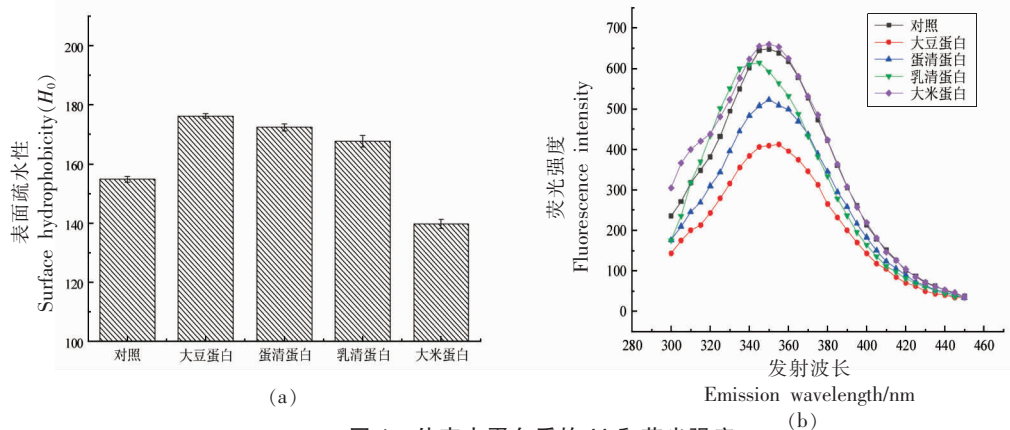


图 1 外壳中蛋白质的  $H_0$  和荧光强度

Fig.1  $H_0$  and tryptophan fluorescence emission spectra of protein in the crust

与对照相比,大豆蛋白组、蛋清蛋白组和乳清蛋白组的  $H_0$  较高,而大米蛋白组的  $H_0$  较低。大豆蛋白的结合水能力较强,外裹糊鱼块在深度油炸过程中抑制了淀粉的吸水膨胀,使大豆蛋白与小麦面筋蛋白接触几率增加。由于外壳中蛋白质受热变性展开,内部疏水性基团暴露,使得  $H_0$  增加<sup>[27]</sup>。蛋清蛋白、乳清蛋白结合水的能力弱于大豆蛋白,蛋白质之间接触几率减小,蛋白质展开程度较低;大米蛋白结合水的能力最差,蛋白质展开程度最低, $H_0$  最小。小麦淀粉与 5 种蛋白质的水分吸附等温线见图 2。

对照的  $\lambda_{\max}$  为 349 nm,大豆蛋白组和蛋清蛋白组的  $\lambda_{\max}$  从 349 nm 增至 351 nm,发生了红移;乳清蛋白组和大米蛋白组的  $\lambda_{\max}$  从 349 nm 减至 341 nm,发生了蓝移,说明添加大豆蛋白和蛋清蛋白,使外壳中蛋白质的结构变得松散,而乳清蛋白和大米蛋白使结构紧凑。乳清蛋白组、蛋清蛋白组、大豆蛋白组的荧光强度小于对照,而大米蛋白组的荧光强度大于对照,这是由于大米蛋白结合水的能力最差,降低了蛋白质分子之间接触几率,使得蛋白质分子聚集较少,色氨酸被包埋的程度减小,因此荧光发射增强。

## 2.2 巯基和二硫键

巯基和二硫键是蛋白质中重要的功能基团,两者含量的变化影响蛋白质分子间的相互作用。

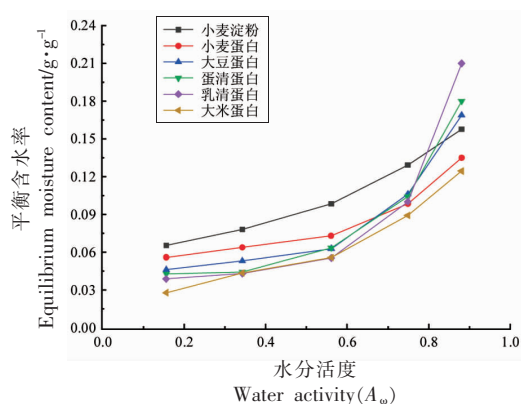


图 2 小麦淀粉和 5 种蛋白质的水分吸附等温线

Fig.2 Moisture adsorption isotherms for wheat starch and five proteins

巯基和二硫键之间的相互转化及疏水相互作用,可以使蛋白质聚集形成凝胶网状结构<sup>[27]</sup>。外壳中蛋白质的巯基和二硫键含量见表 1。

5 种天然蛋白质的巯基和二硫键含量依次为:大豆蛋白>乳清蛋白>小麦面筋蛋白>蛋清蛋白>大米蛋白;小麦面筋蛋白>乳清蛋白>蛋清蛋白>大米蛋白>大豆蛋白。而外壳中蛋白质的巯基和二硫键含量依次为:大米蛋白组>大豆蛋白组>对照>乳清蛋白组>蛋清蛋白组;乳清蛋白组>大豆蛋白组>蛋清蛋白组>大米蛋白组>对照。天然大豆蛋白的巯基含量最高,二硫键含量最低,而外壳中蛋白质的巯基含量增加幅度较小,二硫键含量增

表1 外壳中蛋白质的巯基和二硫键含量( $\mu\text{mol/g}$ )Table 1 Free-SH and S-S contents of protein in the crust ( $\mu\text{mol/g}$ )

组别	巯基含量	二硫键含量
外壳中的蛋白质		
对照	$1.69 \pm 0.01^e$	$3.62 \pm 0.01^a$
大豆蛋白组	$1.83 \pm 0.01^d$	$4.95 \pm 0.01^d$
蛋清蛋白组	$1.45 \pm 0.01^a$	$4.22 \pm 0.05^c$
乳清蛋白组	$1.65 \pm 0.00^b$	$7.07 \pm 0.03^e$
大米蛋白组	$2.35 \pm 0.00^c$	$3.74 \pm 0.02^b$
天然蛋白质		
小麦面筋蛋白	$12.80 \pm 0.04^e$	$56.01 \pm 1.10^e$
大豆蛋白	$16.22 \pm 0.01^e$	$22.61 \pm 0.46^a$
蛋清蛋白	$10.64 \pm 0.06^b$	$48.69 \pm 0.80^c$
乳清蛋白	$14.52 \pm 0.22^d$	$50.63 \pm 0.20^d$
大米蛋白	$7.76 \pm 0.17^a$	$34.26 \pm 0.02^b$

注:每个数值均为3次重复试验的平均值和标准差。同一列不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

加幅度较大;与大豆蛋白相比,天然蛋清蛋白的巯基含量较低,二硫键含量较高,而蛋清蛋白组外壳中二硫键含量低于大豆蛋白组,说明外裹糊鱼块在油炸过程中,添加蛋白质与小麦面筋蛋白相互

交联,促进了蛋白质中的巯基向二硫键转化,且添加蛋白质的结合水的能力越强,巯基向二硫键转化程度越高。这与表面疏水性和荧光强度的结果一致。在4种添加蛋白质中,天然乳清蛋白和外壳中蛋白质的二硫键含量均最高,说明添加蛋白质自身的凝胶性能也影响了外壳中蛋白质的凝胶强度。大米蛋白组外壳中蛋白质的巯基含量高于对照,且二硫键含量增加幅度较小,说明大米蛋白与小麦淀粉、小麦面筋蛋白相互作用对巯基和二硫键的影响小于大米蛋白自身。

### 2.3 蛋白质的二级结构

傅里叶红外光谱普遍用于分析蛋白质的二级结构。由于酰胺 I ( $1700 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ )带有强烈的吸收,因此酰胺 I 带常被用来分析蛋白质的二级结构。在酰胺 I 带中, $1615 \sim 1637 \text{ cm}^{-1}$ 、 $1700 \sim 1682 \text{ cm}^{-1}$  范围内为 $\beta$ -折叠, $1637 \sim 1645 \text{ cm}^{-1}$  范围内为无规卷曲, $1646 \sim 1664 \text{ cm}^{-1}$  范围内为 $\alpha$ -螺旋, $1664 \sim 1681 \text{ cm}^{-1}$  范围内为 $\beta$ -转角<sup>[28]</sup>。 $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -折叠比 $\beta$ -转角和无规卷曲的排列更有序,因此可以用 $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -折叠的相对含量来判断蛋白质的稳定性<sup>[29]</sup>。外壳中蛋白质的二级结构的相对含量见表2。

表2 外壳中蛋白质的二级结构的相对含量

Table 2 The relative content of secondary structure of protein in the crust

组别	$\alpha$ -螺旋/%	$\beta$ -折叠/%	$\beta$ -转角/%	无规卷曲/%
外壳中的蛋白质				
对照	25.79	37.59	21.95	14.67
大豆蛋白组	24.37	36.74	26.30	12.59
蛋清蛋白组	24.54	35.73	26.59	13.14
乳清蛋白组	26.07	34.99	26.12	12.82
大米蛋白组	24.61	38.96	24.26	12.17
天然蛋白质				
小麦面筋蛋白	22.96	37.86	30.34	8.84
大豆蛋白	18.22	42.21	23.33	16.24
蛋清蛋白	21.98	30.96	35.30	11.76
乳清蛋白	35.24	31.89	19.89	12.98
大米蛋白	30.75	36.26	19.34	13.65

与对照相比,添加蛋白质的外壳中蛋白质的 $\beta$ -折叠的相对含量明显降低, $\beta$ -转角的相对含量明显增加, $\alpha$ -螺旋和无规卷曲的相对含量轻微降低,其中大米蛋白组的 $\beta$ -折叠的相对含量和乳清蛋白组的 $\alpha$ -螺旋的相对含量高于对照。这可能是

添加蛋白质后,蛋白质结合一部分水分,抑制了淀粉的吸水膨胀,增加了蛋白质与小麦面筋蛋白的相互交联,促使蛋白质发生热聚集反应,蛋白质的二级结构之间相互转化。孙佳悦等<sup>[30]</sup>研究发现,热处理使乳清蛋白变性、展开并发生相互作用, $\alpha$ -螺

旋的相对含量降低,  $\beta$ -转角的相对含量升高, 促进了乳清蛋白热聚集体的形成, 且  $\beta$ -转角在热聚集体的形成过程中具有重要作用。Bock 等<sup>[31]</sup>研究麦麸对模式谷蛋白面团中水分状态和谷蛋白构象的影响时, 发现添加麦麸引起了谷蛋白面团中结合水和单分子层水数量的变化, 面团中水的重新分布使谷蛋白的二级结构由  $\beta$ -转角转变成  $\beta$ -折叠和无规卷曲, 破坏了谷蛋白的凝胶网状结构, 导致添加麦麸的面包品质劣化。

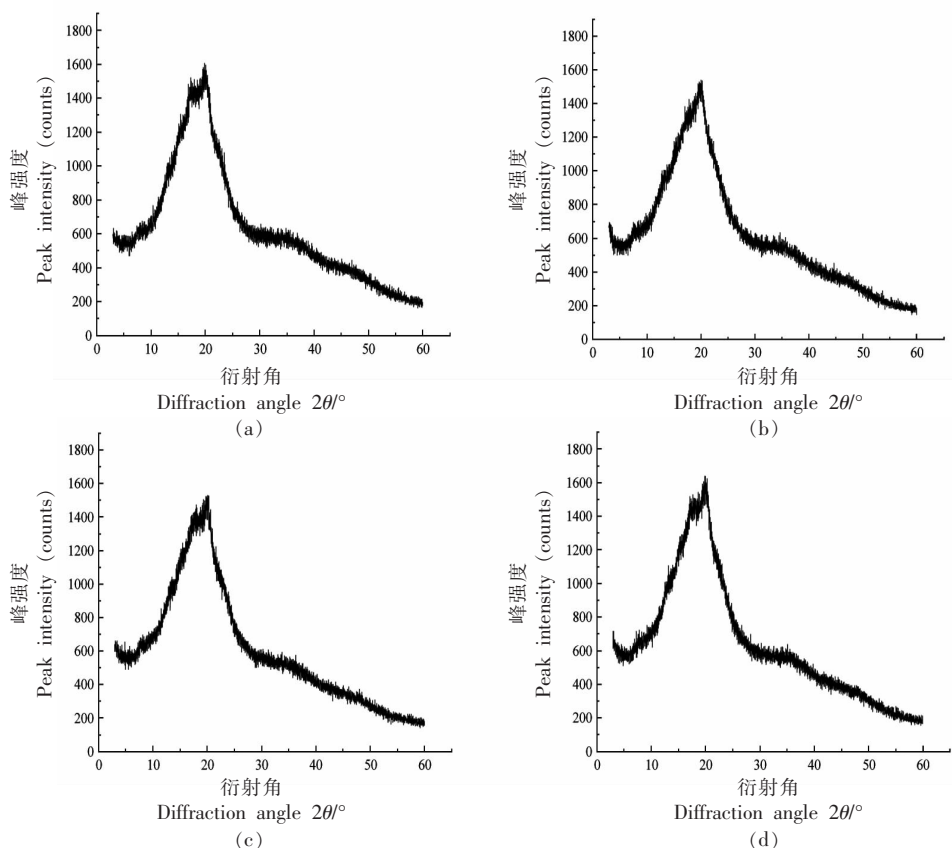
在 5 种蛋白质中, 大豆蛋白的  $\beta$ -折叠相对含量最高, 其次是小麦面筋蛋白、大米蛋白和乳清蛋白, 蛋清蛋白的  $\beta$ -折叠相对含量最低 (轻微低于乳清蛋白); 而蛋清蛋白的  $\beta$ -转角相对含量最高, 其次是小麦面筋蛋白、大豆蛋白和乳清蛋白, 大米蛋白的  $\beta$ -转角相对含量最低 (轻微低于乳清蛋白)。添加蛋白质后, 大豆蛋白组、蛋清蛋白组和乳清蛋白组的  $\beta$ -折叠的相对含量均低于对照, 而  $\beta$ -转角含量高于对照; 而大米蛋白组的  $\beta$ -折叠的相对含量高于对照, 且  $\beta$ -转角含量明显增加, 进一步说明添加蛋白质的结合水能力和自身凝胶性能

影响了外壳中蛋白质的凝胶强度, 且添加蛋白质的结合水的能力越弱, 稳定结构向不稳定结构转化越多, 生成的凝胶结构越不稳定。

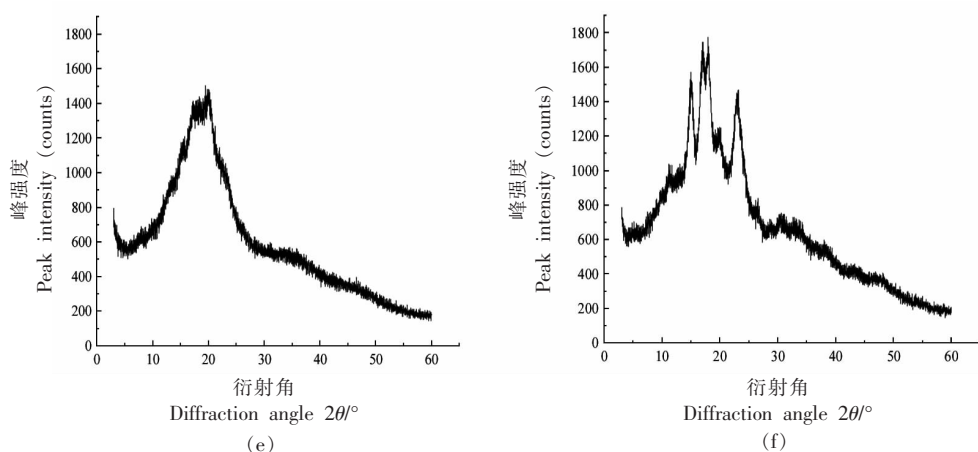
## 2.4 小麦淀粉晶体结构

外壳中小麦淀粉的 X-射线衍射图谱见图 3。小麦淀粉的 X-射线衍射图谱中  $2\theta$  为  $15.22^\circ$ ,  $17.02^\circ$ ,  $18.06^\circ$ ,  $23.05^\circ$  处有较强衍射峰, 且在  $17.02^\circ$  和  $18.06^\circ$  处的衍射峰为相连双峰, 呈现典型的 A 型晶体结构特征, 与 Lopez-rubio 等<sup>[32]</sup>的结果一致。5 组外壳的 X-射线衍射图谱中, 小麦淀粉原有的部分衍射峰消失, 在  $2\theta$  为  $7^\circ$ ,  $13^\circ$ ,  $20^\circ$  附近出现了新的衍射峰, 呈现 V 型晶体结构的特征, 与 Garcia 等<sup>[33]</sup>的结果一致。这是因为小麦原淀粉经高温油炸后糊化, A 型晶体的天然双螺旋结构部分支链淀粉发生降解形成部分直链淀粉, 直链淀粉相对浓度增加, 易与煎炸油中脂肪酸的疏水性碳链发生疏水相互作用, 使 A 型晶体更多的转变为 V 型晶体的淀粉-脂质络合物, 相对结晶度降低<sup>[34]</sup>。

5 组外壳中小麦淀粉的相对结晶度分别为 45.22% (对照)、34.56% (大豆蛋白)、36.08% (蛋清







注:a-f 分别代表对照、大豆蛋白组、蛋清蛋白组、乳清蛋白组、大米蛋白组和小麦淀粉。

图3 外壳的X-射线衍射图谱

Fig.3 X-ray diffractogram of the crust

蛋白)、37.08%(乳清蛋白)和 40.66%(大米蛋白)。添加蛋白质的外壳中淀粉-脂质络合物的相对结晶度均小于对照,且大豆蛋白组的相对结晶度最小。在  $2\theta$  为  $15^\circ$  和  $17^\circ$  附近,对照和大米蛋白组仍然保留有 A 型晶体结构的特征峰,且衍射峰强度明显减弱。这可能由于大米蛋白组中蛋白质的热变性展开程度较轻,表面疏水性基团和巯基暴露较少,外壳中蛋白质形成的凝胶的强度较低,且大米蛋白结合水的能力较弱,外裹糊鱼块深度油炸过程中水分迅速蒸发,部分淀粉未能充分糊化<sup>[1-2]</sup>。大豆蛋白组的 3 个衍射峰  $7.63^\circ$ ,  $13.03^\circ$ ,  $20.18^\circ$ ; 蛋清蛋白组的 2 个衍射峰  $7.66^\circ$  与  $20.05^\circ$  和乳清蛋白组的一个衍射峰  $20.08^\circ$  均是 V 型晶体结构特征峰,说明添加这 3 种蛋白质后,外壳中小麦淀粉的晶体结构从 A 型晶体完全转变为 V 型晶体。大豆蛋白组的淀粉-脂质络合物的相对结晶度最低,可能是外裹糊鱼块经油炸,大豆蛋白充分变性展开,支链淀粉的双螺旋结构解螺旋,与蛋白质相互作用形成较多的淀粉-蛋白质复合物,且淀粉糊化后较均匀地填充在蛋白质网状结构中形成致密的淀粉蛋白质凝胶,阻碍了油脂渗入(油脂渗透与分布分析验证了该假设)。

## 2.5 表面油脂和表面渗透油脂

表面油脂是油炸后的外裹糊鱼块在冷却过程中吸附在鱼块表面的油脂;表面渗透油脂是在冷却过程中由于温度降低引起外壳表面孔洞的内外

压差,使部分表面油脂渗入外壳内部的油脂<sup>[35]</sup>。油炸外裹糊鱼块的表面油脂和表面渗透油脂含量见表 3。

表面油脂和表面渗透油脂的含量依次为:大米蛋白组>大豆蛋白组>蛋清蛋白组>乳清蛋白组>对照,对照>大米蛋白组>乳清蛋白组>蛋清蛋白组>大豆蛋白组,说明添加的 4 种蛋白质均抑制了外裹糊鱼块在油炸过程中的油脂渗透。大豆蛋白结合水的能力较强、自身凝胶性能较好。同时,大豆蛋白组外壳中蛋白质的  $H_0$  和二硫键含量较高,形成淀粉蛋白质复合凝胶致密,外壳表面孔隙细小且外壳结构完整,有效抑制了油脂的渗透(CSLM 分析验证了该假设)。蛋清蛋白和乳清蛋白结合水的能力弱于大豆蛋白, $H_0$  较低,外裹糊

表3 油炸外裹糊鱼块的表面油脂和表面渗透油脂含量(% ,湿基)

Table 3 Surface oil and penetrated surface oil contents of fried BBFNs (% , wet basis)

组别	表面油脂	表面渗透油脂
对照	$1.95 \pm 0.05^a$	$12.17 \pm 0.09^e$
大豆蛋白	$4.04 \pm 0.72^{bc}$	$6.55 \pm 0.09^a$
蛋清蛋白	$3.66 \pm 0.65^{bc}$	$7.49 \pm 0.16^b$
乳清蛋白	$3.01 \pm 0.19^{ab}$	$8.31 \pm 0.16^c$
大米蛋白	$4.68 \pm 0.08^c$	$8.97 \pm 0.21^d$

注:每个数值都是 3 次重复试验的平均值和标准差。同一列不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

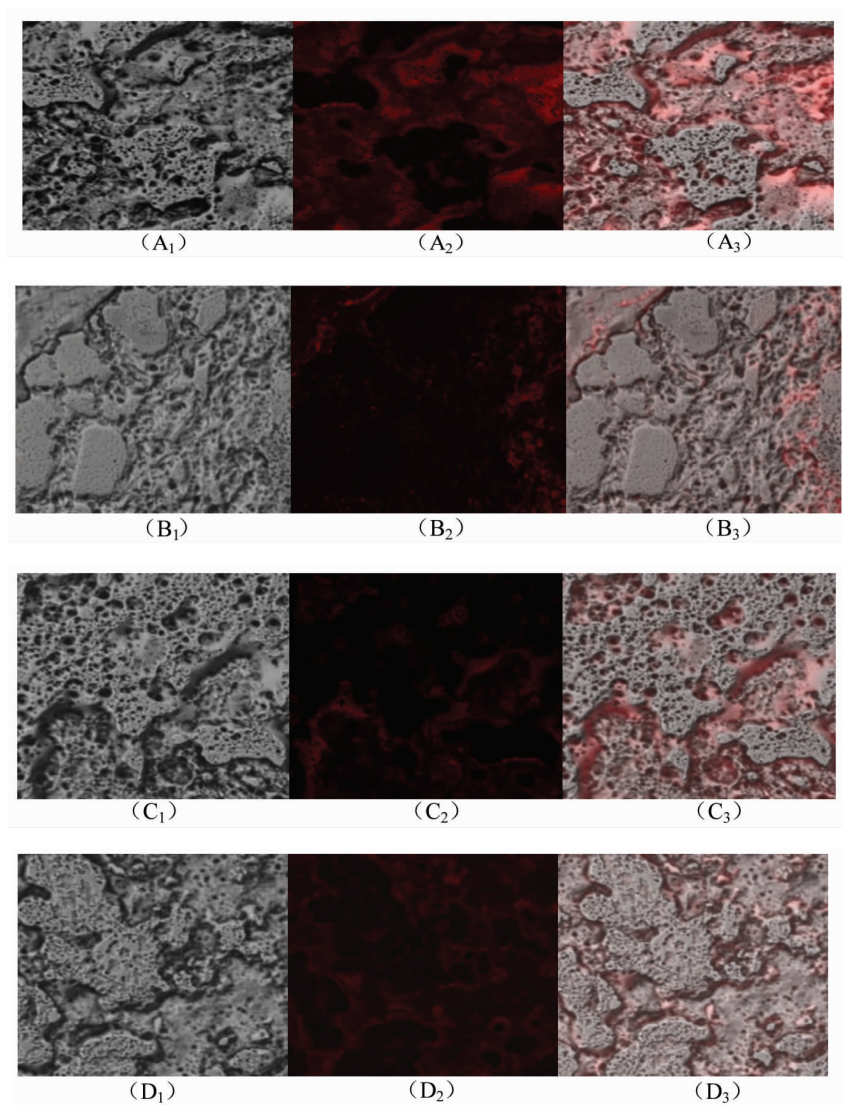


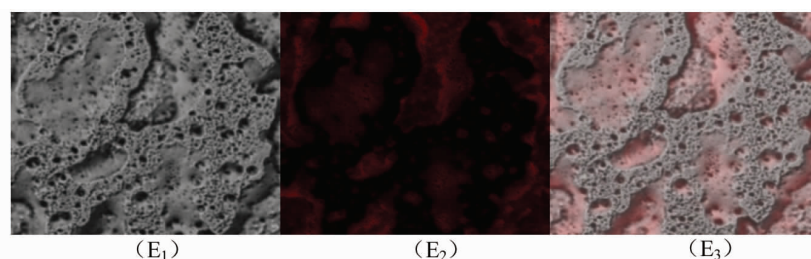
中形成的淀粉蛋白凝胶层致密性和强度弱于大豆蛋白,导致较多的表面油脂渗透到外壳中。大米蛋白结合水能力最差,且自身凝胶性能弱,大米蛋白组的  $H_0$  和二硫键含量最低,蛋白质二级结构向更稳定构象转化最少,形成的凝胶网状结构疏松,水分蒸发较多使外壳上形成的孔隙较大,外裹糊鱼块在油炸过程中表面黏附较多的油脂,且在冷却时由于负压作用渗入鱼块,导致在 4 种添加蛋白质组中表面渗透油脂和表面油脂的含量最高。

## 2.6 油脂分布

油炸外裹糊鱼块外壳的油脂分布见图 4。对照外壳的孔隙和裂纹最多,且裂纹最宽,红色荧光强度最强,最多的油脂分布在裂纹和孔隙中。大豆

蛋白组的外壳结构最致密,孔隙最少,裂痕最浅,红色荧光强度最弱,油脂分布最少。蛋清蛋白组外壳的孔隙细小且较多,裂纹较少,油脂分布在孔隙的周围,红色荧光强度较弱,油脂分布较少。乳清蛋白组外壳孔隙较小且少,裂纹较多,大部分油脂分布在裂纹中。大米蛋白组外壳孔隙大小不均,裂纹多且深,大量油脂大量分布在裂纹中,荧光强度较强。这与油炸外裹糊鱼块的外壳油脂和表面渗透油脂含量分析的结果一致,进一步证明了添加 4 种蛋白质使外裹糊在油炸过程中形成不同强度的凝胶保护层,阻碍了水分的蒸发,抑制了油脂的渗透,从而降低了油炸外裹糊鱼块的油脂含量。





注:A~E 分别代表对照、大豆蛋白组、蛋清蛋白组、乳清蛋白组和大米蛋白组。图中下标 1 表示在显微镜下观察到的结构图;下标 2 表示在荧光模式下扫描的油脂分布图;下标 3 表示油脂分布的直观表象图;放大倍数为 10 $\times$ 。参数相同时,2 中红色荧光强度越大说明外壳油脂含量越高。

图 4 油炸外裹糊鱼块外壳的激光共聚焦图

Fig.4 Images of confocal laser scanning microscopy of fried BBFNs

### 3 结论

添加蛋白质的结合水能力和自身的凝胶性能显著影响了油炸外裹糊鱼块外壳中蛋白质的表面疏水性、巯基和二硫键含量、荧光强度和二级结构,以及小麦淀粉的晶体结构,最终影响了外裹糊鱼块深度油炸过程中油脂的渗透。添加蛋白质的结合水能力和自身凝胶性能较强,蛋白质的热变性展开程度较大,表面疏水性基团和巯基暴露较多,促使蛋白质之间、蛋白质与淀粉之间相互作用增强,形成较致密的淀粉蛋白质复合凝胶,较好的抑制了外裹糊鱼块油炸过程中的油脂渗透。该试验可为低脂油炸外裹糊鱼制品的规模化生产提供理论依据。

### 参 考 文 献

- [1] LIBERTY J T, DEHGANNYA J, NGADI O M. Effective strategies for reduction of oil content in deep-fat fried foods: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 92: 172-183.
- [2] BRANNAN R G, MAH E, SCHOTT M, et al. Influence of ingredients that reduce oil absorption during immersion frying of battered and breaded foods[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2014, 116(3): 240-254.
- [3] ANANEY-OBIRI D, MATTHEWS L, AZAHRANI M H, et al. Application of protein-based edible coatings for fat uptake reduction in deep-fat fried foods with an emphasis on muscle food proteins[J]. Trends in Food Science and Technology, 2018, 80: 167-174.
- [4] MELLEN M. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods[J]. Food Science and Technology, 2003, 14(9): 364-373.
- [5] KUREK M, ŠČETAR M, DALIĆ K. Edible coatings minimize fat uptake in deep fat fried products: A review[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 71(1): 225-235.
- [6] 王玉环, 陈季旺, 翟金玲, 等. 添加成分对外裹糊流变性能及外裹糊鱼块油炸过程油脂渗透的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(20): 34-40.  
WANG Y H, CHEN J W, ZHAI J L, et al. Effect of ingredients on rheological properties of batter and oil penetration of breaded and battered fish nuggets during deep-fat frying[J]. Food Science, 2019, 40(20): 34-40.
- [7] 解丹, 陈季旺, 曾恒, 等. 亲水胶体对油炸外裹糊鱼块油脂含量及品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 45-50.  
XIE D, CHEN J W, ZENG H, et al. Effect of hydrophilic colloid on the fat content and quality of fried battered and breaded fish nuggets[J]. Food Science, 2016, 37(23): 45-50.
- [8] 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.
- [9] SHAN J H, CHEN J W, XIE D, et al. Effect of xanthan gum/soybean fiber ration the batter on oil absorption and quality attributes of fried breaded fish nuggets[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(7): 1832-1838.
- [10] SALVADOR A, SANZ T, FISZMAN M S. Effect of the addition of different ingredients on the charac-

- teristics of a batter coating for fried seafood prepared without a pre-frying step[J]. *Food Hydrocolloids*, 2005, 19(4): 703-708.
- [11] PEREZ-GAGO M B, SERRA M, ALONSO M, et al. Effect of whey protein and hydroxypropyl methylcellulose-based edible composite coatings on color change of fresh-cut apples[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 36(1): 77-85.
- [12] 韩晓银, 张莉莉, 张金昂, 等. 南极磷虾分离蛋白对降低预油炸裹面鳕鱼含油量的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(11): 100-104.
- HAN X Y, ZHANG L L, ZHANG J A, et al. Effect of proteins isolated from antarctic krill on the reduction of oil content in pre-fried coated cod[J]. *Food Science*, 2013, 34(11): 100-104.
- [13] CHEN S D, CHEN H H, CHAO Y C, et al. Effect of batter formula on quality of deep-fat and microwave fried fish nuggets[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 95(2): 359-364.
- [14] SUSANNE A, MITTAL G S. Comparative evaluation of edible coatings to reduce fat uptake in a deep-fried cereal product[J]. *Food Research International*, 2002, 35(5): 445-458.
- [15] DOGAN S F, SAHIN S, SUMNU G. Effects of batters containing different protein types on the quality of deep-fat fried chicken nuggets[J]. *European Food Research and Technology*, 2005, 220(5/6): 502-508.
- [16] 崔璐璐, 陈季旺, 王玉环, 等. 添加蛋白质对油炸外裹糊鱼块品质的影响[J]. *武汉轻工大学学报*, 2020, 39(4): 1-8, 14.
- CUI L L, CHEN J W, WANG Y H, et al. Effect of protein adding in the batter on quality attributes of fried battered and breaded fish nuggets[J]. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2020, 39(4): 1-8, 14.
- [17] WENG W Y, ZHENG W X. Effect of setting temperature on glucono- $\delta$ -lactone-induced gelation of silver carp surimi[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(7): 1528-1534.
- [18] BONOMI F, MORA G, PAGANI M A, et al. Probing structural features of water-insoluble proteins by front-face fluorescence[J]. *Analytical Biochemistry*, 2004, 329(1): 104-111.
- [19] TANG C H, WANG X Y, LIU F, et al. Physicochemical and conformational properties of buckwheat protein isolates: Influence of polyphenol removal with cold organic solvents from buckwheat seed flours[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(22): 10740-10748.
- [20] CHEN X, CHEN C G, ZHOU Y Z, et al. Effects of high pressure processing on the thermal gelling properties of chicken breast myosin containing  $\kappa$ -carrageenan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 40(10): 262-272.
- [21] ZHANG Y, ZHANG Y, XU F, et al. Molecular structure of starch isolated from jackfruit and its relationship with physicochemical properties[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-12.
- [22] OUCHON P B, AGUILERA J M, PYLE D L. Structure oil absorption relationships during deep-fat frying[J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68(9): 2711-2716.
- [23] AKINBODE A, ADEDEJI, LIU L, et al. Microstructural evaluation of deep-fat fried chicken nugget batter coating using confocal laser scanning microscopy[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 102(1): 49-57.
- [24] GU X, CAMPBELL L J, EUSTON S R. Influence of sugars on the characteristics of glucono- $\delta$ -lactone-induced soy protein isolate gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(2): 314-326.
- [25] PALLARÈS I, VENDRELL J, AVILÈS F X, et al. Amyloid fibril formation by a partially structured intermediate state of  $\alpha$ -chymotrypsin[J]. *Journal of Molecular Biology*, 2004, 342(1): 321-331.
- [26] MIRIANI M, IAMETTI S, BONOMI F, et al. Structural changes of soy proteins at the oil-water interface studied by fluorescence spectroscopy[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2012, 93: 41-48.
- [27] 邵俊花, 吴菊清, 周光宏, 等. 巯基和疏水性对蛋白质乳化及凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(23): 155-159.
- SHAO J H, WU J Q, ZHOU G H, et al. Effects of sulfhydryl content and hydrophobicity on gel and emulsifying properties of pork proteins[J]. *Food Science*, 2013, 34(23): 155-159.
- [28] KONG J L, YU S N. Fourier transform infrared spectroscopic analysis of protein secondary structures[J]. *Acta Biochimica et Biophysica Sinica*, 2007, 39(8): 549-559.



- [29] DAMODARAN S, PARKIN K L, FENNEMA O R. Fennema's Food Chemistry (Fourth Edition)[M]. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2007: 253–257.
- [30] 孙佳悦, 钱方, 牟光庆. 基于红外光谱分析热处理对牛乳蛋白质二级结构变化研究[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 82–86.
- SUN J Y, QIAN F, MOU G Q. Effect of heat treatments on the secondary structure of milk proteins analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Food Science, 2017, 38(23): 82–86.
- [31] 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.
- [32] LOPEZ-RUBIO A, FLANAGAN B M, SHRESTHA A K. Molecular rearrangement of starch during *in vitro* digestion: Toward a better understanding of enzyme resistant starch formation in processed starches[J]. Biomacromolecules, 2008, 9(7): 1951–1958.
- [33] GARCIA M C, PEREIRA -DA -SILVA M A, TABOGA S, et al. Structural characterization of complexes prepared with glycerol monostearate and maize starches with different amylose contents[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 148: 371–379.
- [34] VASILIOU E, RAPHAELIDES S N, PASTERGIADIS E. Effect of heating time and temperature on partially gelatinized starch-fatty acid interactions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(2): 698–707.
- [35] ZHANG T, LI J, DING Z, et al. Effects of initial moisture content on the oil absorption behavior of potato chips during frying process[J]. Food and Bio-process Technology, 2016, 9(2): 1–10.

### Effect of the Protein Added to the Batter on Oil Penetration of Battered and Breaded Fish Nuggets during Deep-fat Frying

Cui Lulu<sup>1</sup>, Chen Jiwang<sup>1,2\*</sup>, Wang Yuhuan<sup>1</sup>, Liao E<sup>1,2</sup>, Wang Qi<sup>1,2</sup>, Xia Wenshui<sup>1,3</sup>  
<sup>1</sup>College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023

<sup>2</sup>Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil, Ministry of Education  
 (Wuhan Polytechnic University), Wuhan 430023

<sup>3</sup>School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu

**Abstract** To provide a scientific guideline for the scale-up manufacture of low-fat fried breaded and battered fish nuggets (BBFNs), four proteins (soybean protein, egg white protein, whey protein, and rice protein) with 6% were separately added to a batter composed of wheat starch and wheat gluten blends. BBFNs were prepared by treating fish with the batter, frying at 170 °C (40 s) followed by 190 °C (30 s). Fried BBFNs were evaluated for the surface hydrophobicity, free -SH and S-S contents, fluorescence intensity, and secondary structure of the proteins, the crystal structure of wheat starch, as well as the surface oil and penetrated surface oil contents and the oil penetration and distribution, to investigate the effect of protein added on oil penetration of BBFNs during deep-fat frying. The results showed that the  $H_0$  of soy protein group, egg white protein group, and whey protein group was greater than the control (without protein added), while the  $H_0$  of rice protein group was smaller than the control; the maximum absorption wavelength of tryptophan fluorescence emission spectra ( $\lambda_{\max}$ ) with soy protein and egg white protein groups increased from 349 nm to 351 nm, while  $\lambda_{\max}$  of whey protein and rice protein groups decreased from 349 nm to 341 nm; the content of S-S converted by -SH of whey protein group was higher than that of soy protein group, egg white protein group, and the rice protein group. Furthermore, the S-S content of four protein groups were higher than the control. In addition, soy protein group had the highest amount of  $\beta$ -turn, which was transformed by  $\beta$ -sheet, and the lowest fluorescence intensity, relative crystallinity, surface oil (except rice protein group) and penetrated surface oil contents, followed egg white protein group, whey protein group, rice protein group, and the control. The results indicated that the addition of protein in the batter significantly influenced the exposure of hydrophobic group in the protein and the gelatinization of wheat starch, leading to the changes in oil penetration of BBFNs deep-fat frying.

**Keywords** battered and breaded fish nuggets; deep-fat frying; protein; wheat starch; oil penetration