

车前子壳粉-未漂洗鱼糜模拟主食面团的流变及凝胶性质

杨菁¹, 励建荣¹, 李学鹏¹, 仪淑敏¹, 孟玉琼², 马睿², 密更^{3*}

(1. 渤海大学 食品科学与工程学院, 生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 辽宁 锦州 121013; 2. 青海大学 农牧学院, 青海 西宁 810016; 3. 广西民族师范学院 化学与生物工程学院, 广西 崇左 532200)

摘要: 研究和开发高膳食纤维、高蛋白、低升糖指数的面团和对应主食在适应当前人们的饮食结构需求和维持健康方面有重要的意义。在本研究中, 使用车前子壳粉 (psyllium husk powder, PHP) 和未漂洗鱼糜代替传统面团中的淀粉和蛋白组分, 混合后制备为新型模拟面团, 对其流变特性进行了系统的评估。静态流变结果显示, 随着 PHP 添加量的增加, 所有面团的触变性增加, 流动性和刚度以及回复性均呈现逐渐减弱的趋势。相互作用分析结果表明, 鱼糜蛋白和 PHP 中多糖分子间只存在氢键等弱键连接, 6% (w/w) 的 PHP 添加量时蛋白质和多糖的相互作用最弱。面团在加热过程中, 所有面团均可形成良好的凝胶体且蛋白质的存在显著提高了 PHP 的溶解温度。进一步的凝胶特性分析结果显示, PHP 的添加量为 6% (w/w) 时, 面团的凝胶强度达到最大, 为 4305.74 g-mm, 拉伸性能最佳, 微观结构的观察结果显示此时结构最为均一, 孔洞细密, 推测形成了蛋白-多糖的互穿型微相分离凝胶网络。总体来看, PHP 和未漂洗鱼糜可以制备品质较好的面团, 在 PHP 添加量为 6% 时较好, 基于 PHP-未漂洗鱼糜面团制备的凝胶主食品质也最佳。

关键词: 车前子壳粉; 未漂洗鱼糜; 面团; 流变特性; 凝胶特性;

中图分类号: TS254.1

Rheology and gel properties of psyllium husk powder-unrinsed surimi imitation staple dough

YANG Jing¹, LI Jiangrong¹, LI Xuepeng¹, YI Shumin¹, MENG Yuqiong², MA Rui², MI Geng^{3*}

(1. College of Food Science and Technology, Bohai University, National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Jinzhou 121013, China; 2. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 8100166, China; 3. College of Chemistry and Biological Engineering, Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo 532200, China)

Abstract: Researching and developing dough with high dietary fiber, high protein, and low glycemic index, along with corresponding staple foods, is of significant importance in meeting dietary requirements and maintaining good health. This study utilized psyllium husk powder and unrinsed surimi to replace starch and protein in traditional doughs, resulting in a novel imitation dough. The static rheological test showed that the thixotropy of all samples increased with the additional level of psyllium husk powder, and the fluidity, stiffness, and resilience of all samples gradually weakened. Interaction analysis confirmed weak bonds, such as hydrogen bonds, between surimi and polysaccharide molecules in psyllium husk powder. The addition of 6% (w/w) psyllium husk powder resulted in the

收稿日期: 2023-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31972107); 国家自然科学基金重点项目 (U20A2067)。

Foundation: National Natural Science Foundation of China(31972107); Key Projects of the National Natural Science Foundation of China (U20A2067).

第一作者: 杨菁, 女, 硕士研究生, 研究方向为水产品加工与贮藏。

*通信作者: 密更, 男, 博士, 讲师, 研究方向为水产品加工与贮藏。

weakest interaction between protein and polysaccharide. During the heating process of the dough, all samples formed a good gel, and the presence of protein significantly increased the dissolution temperature of psyllium husk powder. Further gel analysis revealed that the addition of 6% (w/w) psyllium husk powder resulted in the best gel strength, reaching 4305.74 g/mm, and the tensile property was also the best. Microstructure analysis showed that the sample had a regular structure and fine pores, indicating the formation of a protein/polysaccharide interpenetrating gel network. Overall, psyllium husk powder and unrinsed mackerel surimi can be used to prepare high-quality dough, with the best quality achieved at a psyllium husk powder addition of 6% (w/w), making it highly applicable.

Keywords: Psyllium husk powder; Unrinsed sumiri; Dough; Rheological properties; Gel properties

传统面团是面粉吸水溶胀后经过混揉形成的主食半成品，其主要成分是淀粉，其次是蛋白，是典型的蛋白-多糖复合体系。当前主食工业的快速发展对面团尤其是预制面团和冷冻面团的需求非常旺盛，而传统面团制成的主食多为高碳水食品，长期大量食用此类主食易诱发糖尿病及肥胖症^[1-2]。因此，开发高膳食纤维的新型蛋白复合面团及对应主食是当前消费市场的一大需求。

车前子壳粉 (psyllium husk powder, PHP) 是一种新兴的食品辅料，具有良好的食用安全性和功能性^[3-4]，无添加上限^[5]，在食用后有良好的饱腹感和极低的升糖指数 (glycemic index, GI)^[6]。从化学成分上来看，PHP 含有大量的膳食纤维，这些物质均由高度分支的且在支链上含有鼠李糖、葡萄糖和半乳糖的阿拉伯木聚糖组成^[7]。从物理性质来看，PHP 溶于水后会迅速膨胀至原体积的 300% 左右^[错误: 未定义书签]，其冷水性组分 (cold water fraction, CWF) 在常温下会形成弱凝胶，热水性组分 (hot water fraction, HWF) 在热处理后也形成弱凝胶^[8]。前期的研究发现，低浓度的 PHP 水溶液加热后可形成浓稠流体，稍高浓度的样品经过热处理后可以制备成类似饼和面条等的主食，且这些食品均具有良好的口感、延展性和拉伸性能^[9]。这些特性为开发模拟主食类食品奠定了基础。近年来，未漂洗鱼糜的相关研究呈不断增加的趋势，其省去了漂洗步骤，体系内不但有盐溶性蛋白，还保留了大量的水溶性蛋白且总体凝胶性尚可^[10-11]。有关 PHP 在未漂洗鱼糜中的应用目前还鲜见报道。

流变特性是传统面团最基本的也是最值得探究的特性之一，本研究尝试用 PHP 和未漂洗鱼糜代替传统面团中的淀粉和蛋白组分，将其混合后制备为一种新型的模拟面团，重点探讨面团的流变特性，并对由面团制备成的模拟主食的质构特性做初步的表征，以为后续新型主食的开发和研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冰鲜鲷鱼 (*Scomber japonicus*)，购于锦州市凌西大街农贸市场，运回实验室后立即背部采肉，分装后置于 -80℃ 冰箱内备用；PHP (蛋白质、脂肪含量均为 0；多糖分子量 $3.5 \times 10^4 \sim 3.8 \times 10^6$ Da)，购于美国 Now Foods 公司；实验所用试剂均为分析纯，购于国药集团化学试剂有限公司；实验用水均为去离子水 (电阻率 $\approx 10 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$)。

1.2 仪器与设备

UMC5 型低温真空斩拌机，德国 Stephan 机械有限公司；TA.XT Plus 型质构仪，英国 Stable Micro System 公司；Discovery DHR-1 型流变仪，美国 TA 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 模拟面团的制备

取鲷鱼肉隔水解冻 2 min 后切小块放入斩拌机中，水分含量调节至 80%，添加鱼糜质量的 2% 的 NaCl 后进行斩拌，4℃ 下 150 r/min 斩拌 1min 后加入 PHP 粉，以 PHP 粉与未漂洗鱼糜质量比例分别为 0:100、2:98、4:96、6:94、8:92、10:90 和 12:88 进行混合 (该比例经过前期的预实验验证，PHP 添加量过多时，面团会出现干裂且不能混合均匀的情况)，即 PHP 的添加量分别为 0%、2%、4%、6%、8%、10% 和 12%，依次标记为 SP0、SP2、SP4、SP6、SP8、SP10、SP12 组，其中不添加 PHP 的 SP0 组为对照组。斩拌 5 min 后取出部分置于针筒内密封，用于流变测试，剩余部分用于制备薄饼样品。

1.3.2 流变特性测试

流变仪夹具为 $\Phi=40$ mm 的平行板，间隙 1000 μm 。面团在室温（25 $^{\circ}\text{C}$ ）下平衡 2 min 后，加热扫描，在平行板间隙周围涂硅油以防蒸发。其他流变测试采用相同设置。

1.3.2.1 稳态测试

稳态测试参考了 Chen 等^[12]的方法并略有改动。温度设定为 40 $^{\circ}\text{C}$ ，剪切速率从 0.01 s^{-1} 增加至 150 s^{-1} （上行曲线），之后立即从 150 s^{-1} 下降至 0.01 s^{-1} （下行曲线）。扫描过程中采集剪切应力 τ （Pa）和剪切速率 $\dot{\gamma}$ （ s^{-1} ）。面团的屈服应力 τ_0 （Pa）、流动行为指数 n 和稳定性系数 K （ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ）使用 Herschel-Bulkley 模型（式 1）进行拟合计算。

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

1.3.2.2 动态应变扫描

在应变范围为 0.1~100.0% 内进行扫描测试，温度设置为 25 $^{\circ}\text{C}$ ，角频率设置为 10 s^{-1} 。扫描期间采集储能模量（ G' ）和损耗模量（ G'' ）的相应数据。

1.3.2.3 动态频率扫描

参考了 Feng 等^[13]的方法并略有改动。在应变为 1% 和 25 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下，从 0.1 rad/s 到 100.0 rad/s 进行频率扫描，采集 G' 和 G'' 随角频率 ω 的变化曲线。采用 Power-law 模型（式 2）进行曲线拟合计算。

$$G' = K\omega^n \quad (2)$$

式（2）中， n 代表分子间相互作用力类型， K 代表面团强度。

1.3.2.4 蠕变-回复实验

参考 Fu 等^[14]的方法并略有改动。温度设置为 25 $^{\circ}\text{C}$ ，剪切应力 10 Pa，蠕变时间 240 s，之后撤去应力回复 240 s。将蠕变回复曲线使用 Burgers 模型进行拟合，式 3 用于蠕变阶段拟合计算，式 4 用于回复阶段拟合计算。

$$J(t) = J_0 + J_m \cdot (1 - \exp(-t/\lambda)) + t/\eta_0 \quad (3)$$

$$J(t) = J_{\max} - J_0 - J_m \cdot (1 - \exp(-t/\lambda)) \quad (4)$$

式（3）、式（4）中， $J(t)$ 表示蠕变柔量， Pa^{-1} ； J_0 表示瞬时柔量， Pa^{-1} ； J_m 表示延迟柔量， Pa^{-1} ； J_{\max} 表示最大蠕变柔量， Pa^{-1} ； η_0 表示零剪切黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； λ 表示迟滞时间，s。

1.3.2.5 温度扫描

温度扫描中，频率设定为 1 Hz，应变 1%，从 25 $^{\circ}\text{C}$ 到 90 $^{\circ}\text{C}$ 以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的加热速率进行，测试过程中记录 G' 、 G'' 和损耗正切值（ $\tan\delta$ ）随温度变化（25~90 $^{\circ}\text{C}$ ）的曲线。

1.3.3 凝胶强度及咀嚼特性测定

按照 1.3.1 节的方法制备面团，添加车前子壳粉后将面团置于凝胶小瓶中蒸汽处理 10 min，取出后切为高度约 25 mm 的柱状样品。用质构仪测定凝胶强度。测定条件：选用 P/5S 型号探头，穿刺距离为 15 mm，触发力为 5 g（0.049 N），测前速度为 1 mm/s，测试速度为 0.5 mm/s。

咀嚼特性的测定参考了米红波等^[15]的方法。使用质构仪的 TPA（textural profile analysis）分析程序来模拟人牙齿对面团的二次咀嚼并采集数据，使用仪器自带分析程序得出样品的硬度、弹性、黏性、咀嚼性。测试时，切取 1 cm \times 1 cm 的表面平整的样品，平行放置于样品台上，在室温（25 $^{\circ}\text{C}$ ）下平衡 15 min 后开始采集数据。探头型号 P50。测试参数设置：测前速度 1 mm/s，测试速度 5 mm/s，测后速度 5 mm/s，目标模式为 35% 应变，触发模式为自动，触发力为 5 g（0.049 N），2 次下压测试间隔时间为 5 s。

1.3.4 拉伸特性的测定

拉伸强度测试参考了 Chen 等^[16]的方法并略有改动。按照 1.3.1 节的方法制备面团，切分为约 30 g 的面剂，置于手动压饼机将其压成厚度为 5 mm 左右的薄饼。将薄饼置于（100 \pm 5） $^{\circ}\text{C}$ 的蒸锅内加热 10 min，取出后于常温放凉，切取长度 5 cm 且表面无伤的凝胶薄饼饼丝一根夹在探头上（A/SPR），

平衡 5 min 后开始测试。测试模式为拉伸，测试参数设置：测试前速度 3 mm/s，测试速度 0.5 mm/s，测试后速度 5 mm/s，初始距离 10 mm，最终距离 100 mm。拉伸模量 (E) 和相对拉伸率 (r_e) 分别由式 5 和式 6 计算得出。

$$E = \left(\frac{F}{\Delta L}\right) \left(\frac{L}{A}\right) \quad (5)$$

$$r_e = \frac{\Delta L}{L} \quad (6)$$

式 (5) 和式 (6) 中, F 为拉伸力, g; A 为薄饼的平均横截面积, mm^2 ; ΔL 为伸长后的长度, mm; L 为原始长度, mm。

1.3.5 微观结构

参考 Cao 等^[17]的方法进行测定并稍加修改, 将凝胶薄饼切成约 5 mm^3 小块, 并在 4°C 下浸入 2.5% (v/v) 戊二醛中固定 12 h。然后用磷酸盐缓冲液 (0.2 mol/L, pH 值为 7.0) 冲洗 3 次, 然后依次在浓度 50%、60%、70%、80%、90% 和 100% (v/v) 的乙醇中脱水 (每次 15 min)。脱水的凝胶薄饼冻干后喷射镀金, 之后在 2.0 kV 的加速电压下用扫描电镜进行观察。

1.4 数据处理

所有实验至少独立进行 3 次, 数据以平均值 \pm 标准偏差表示。采用 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析, 使用 Origin 2018 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 模拟面团的剪切稳定性及流动特性分析

稳态测试可以较好地了解剪切对模拟面团稳定性的影响, 结果见图 1。从图 1 可以看出, 随着剪切速率的增加, 对照组在剪切速率由低到高再变低的过程中, 其应力变化较小, 这说明未漂洗鲑鱼鱼糜的剪切稳定性较好, 也间接表明其内部网络结构较强, 不易被破坏。添加了 PHP 的模拟面团, 随着剪切速率的增加, 应力在 $0 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 范围内增加, 且 PHP 添加越多, 增加的程度越大。当剪切速率超过 10 s^{-1} 后, 应力急剧下降。在剪切速率由高向低变化的过程中, 模拟面团的应力变化都比较稳定且在最后均趋向于 0, 这说明模拟面团的网络结构是较脆弱的, 在高剪切速率下会受到较大的破坏。

为了进一步探究不同 PHP 添加量对模拟面团流动性的影响, 对图 1 上行曲线中应力上升区的数值采用 Herschel-Bulkley 模型进行拟合计算, 结果见表 1。由表 1 可知, 模拟面团的拟合度都较好 ($R^2 > 0.99$), 说明模拟面团具有类似普通淀粉面团的性质, 而对照组由于函数没有收敛, 未获取到数值。 τ_0 为屈服应力, 表示打破结构让流体开始流动所需要的机械能, 值越高表示越难流动^[18]。从拟合结果来看, τ_0 随着 PHP 添加量的增加而增加, SP12 达到了 297.77 Pa, 表明模拟面团的流动性变得越来越弱。PHP 添加到鱼糜中后未经过加热, 推测此时其中的溶解性组分多数为 CWF, 形成的弱凝胶比例变大, 因此流动性变弱。 K 值代表模拟面团的刚度且与刚度正相关。从结果来看, K 值随着 PHP 添加量的增加出现明显的增加趋势 ($P < 0.05$), SP12 的 K 值是 SP2 的 13 倍, 表明添加 PHP 会使模拟面团抵抗弹性形变的能力明显增加。 n 为流动特性指数, 模拟面团的 n 值均小于 1, 说明模拟面团均为假塑性流体, 会发生剪切稀化的情况。随着 PHP 的添加, n 值出现先增加后降低的趋势, 推测和不同 PHP 添加量时模拟面团的微相分离凝胶网络结构有较大关系。

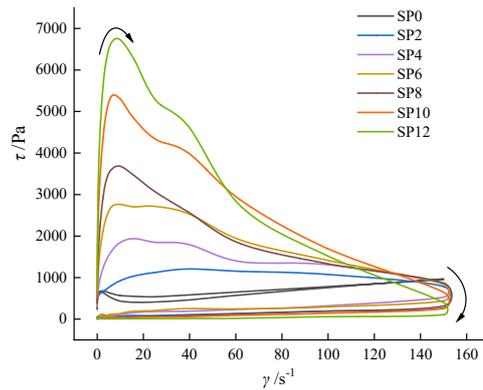


图 1 模拟面团的稳态剪切流动曲线
Fig.1 Steady shear curve of the imitation doughs

表 1 模拟面团的 Herschel - Bulkley 拟合参数和触变性

Tab. 1 Herschel - Bulkley fitting parameters and thixotropy values of the imitation doughs

模拟面团	τ_0 (Pa)	K (Pa·s ⁿ)	n	R^2	D_t (s ⁻¹ ·Pa·s)
SP0	—	—	—	—	28.11±2.76 ^g
SP2	160.26±12.09 ^d	305.37±25.36 ^f	0.33±0.05 ^c	0.991	1927.26±154.47 ^f
SP4	218.72±8.74 ^c	648.43±14.79 ^e	0.49±0.08 ^{ab}	0.997	3466.49±251.43 ^c
SP6	222.73±6.56 ^c	1288.70±6.13 ^d	0.51±0.05 ^a	0.999	4614.70±308.25 ^d
SP8	230.51±6.31 ^c	1838.19±2.83 ^c	0.48±0.04 ^{ab}	0.998	5575.96±360.22 ^c
SP10	255.45±7.70 ^b	2975.39±4.63 ^b	0.45±0.03 ^{ab}	0.998	8199.15±190.90 ^b
SP12	297.77±10.31 ^a	4065.90±11.19 ^a	0.39±0.01 ^{bc}	0.997	10091.08±685.23 ^a

—表示未获取到数值。同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

2.2 模拟面团的触变性分析

触变是凝胶体在振荡、压迫等机械力的作用下发生的可逆溶胶现象。触变性表现为受到剪切时黏度改变,停止剪切时黏度又开始逐渐恢复,其大小可以用黏度随剪切速率变化曲线的滞后环面积表示,环面积越大表示触变性越大^[19]。计算结果如图 2 所示,从图 2 可以看出,在剪切速率上升过程中,剪切速率 0~20 s⁻¹ 时所有模拟面团的黏度均快速下降,后逐渐稳定。在剪切速率逐步回落的过程中,所有模拟面团的黏度变化开始较为平稳,在回落至 20 s⁻¹ 附近时快速上升,在剪切速率降低至 0 附近时,黏度最高值比上行曲线初始值明显下降,且随 PHP 添加量的增加而逐步降低。这些结果表明,在较低的剪切范围 (0~20 s⁻¹),模拟面团的内部结构有一定的恢复能力,但 PHP 的添加对这种恢复能力有一定的破坏作用。

为了便于比较触变性大小,选取图 2 中各滞后环的非震荡区间 (剪切范围 10 s⁻¹~60 s⁻¹) 进行滞后环面积的积分计算 (D_t),结果见表 1。从结果可知,对照组的 D_t 为 28.11 s⁻¹·Pa·s,随着 PHP 添加量的增加,模拟面团的触变性有明显增加 ($P<0.05$) 的趋势,SP12 达到了 10091.08 s⁻¹·Pa·s。这一结果和已有的鱼源盐溶性蛋白-淀粉体系的触变性规律相似^[20],其机理可能与蛋白和多糖在体系中形成了质壁滑移有关。推测在低 PHP 添加的模拟面团中,鱼糜蛋白主导质壁滑移且作为连续相;在高 PHP 添加的模拟面团中,PHP 主导质壁滑移且作为连续相。这一结果也表明,PHP 添加后的未漂洗鱼糜可以采用传统的类似淀粉粉丝的滴漏法 (dropping),辅以轻微震荡引发流动而进行生产。

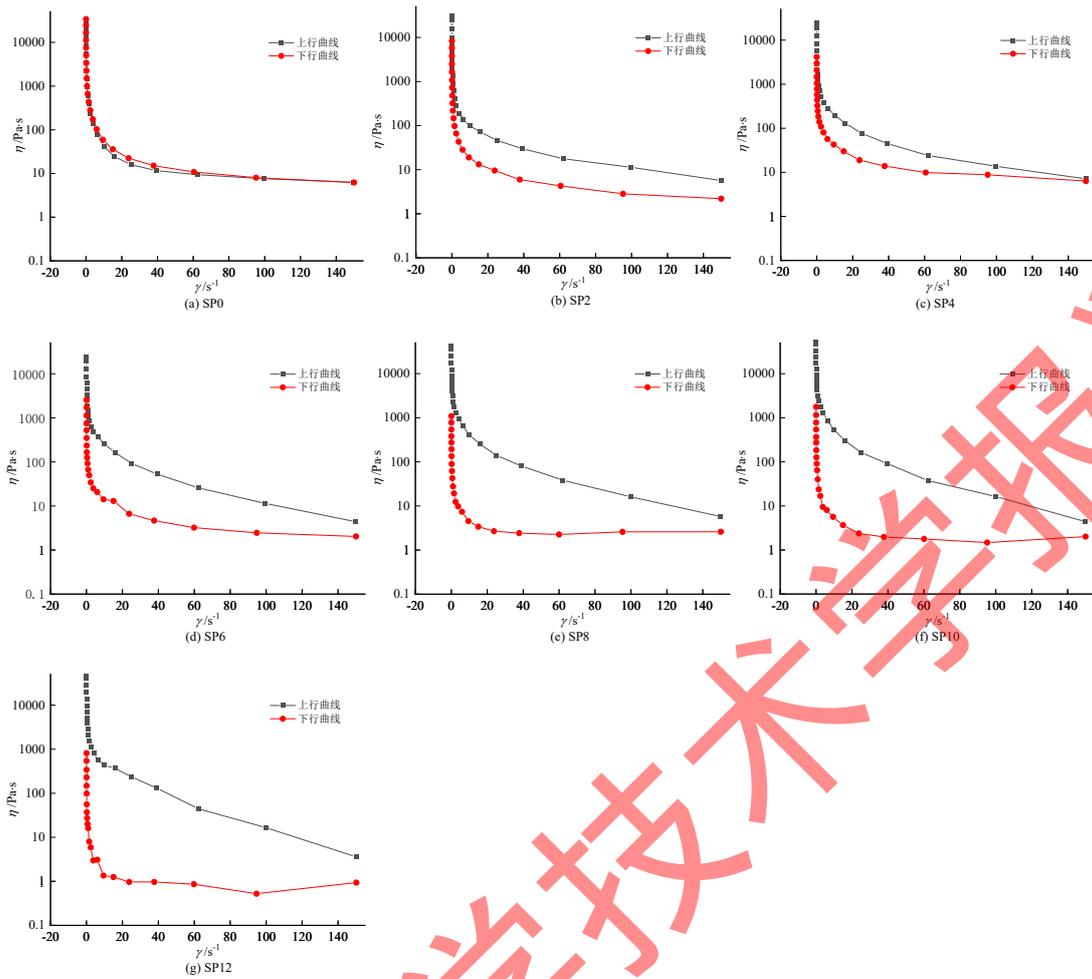


图 2 模拟面团的滞后环

Fig.2 Hysteresis loops of the imitation doughs

2.3 模拟面团的黏弹性分析

模拟面团的动态应变扫描曲线如图 3。从图 3 可以看出，所有样品的线性黏弹区间（linear viscoelastic range, LVR）值的上限均在 5%附近，超出此区间即开始有明显地下降，说明所有模拟面团在发生 5%形变范围内能保持其结构的完整性。其他蛋白-多糖体系，例如小麦面团、淀粉基面团，其 LVR 上限一般都介于 0.10%~0.25%^[21-22]，要远低于本研究制备的 PHP-未漂洗鱼糜体系，推测可能和 PHP 较强的水分子结合能力有关。

为了进一步研究模拟面团的粘弹性变化特征，绘制了损耗正切值（ $\tan\delta$ ）随应变变化的曲线如图 3（c）。从结果来看，随着 PHP 添加量的增加，所有模拟面团的 $\tan\delta$ 均有明显的增加趋势。另外，在 LVR 范围内，所有样品均和对照组有类似的黏弹特性，表现出一定的固体特性，而且随着 PHP 添加量的增加，固体特征有减弱的趋势，这和 2.1 节的研究结果一致。

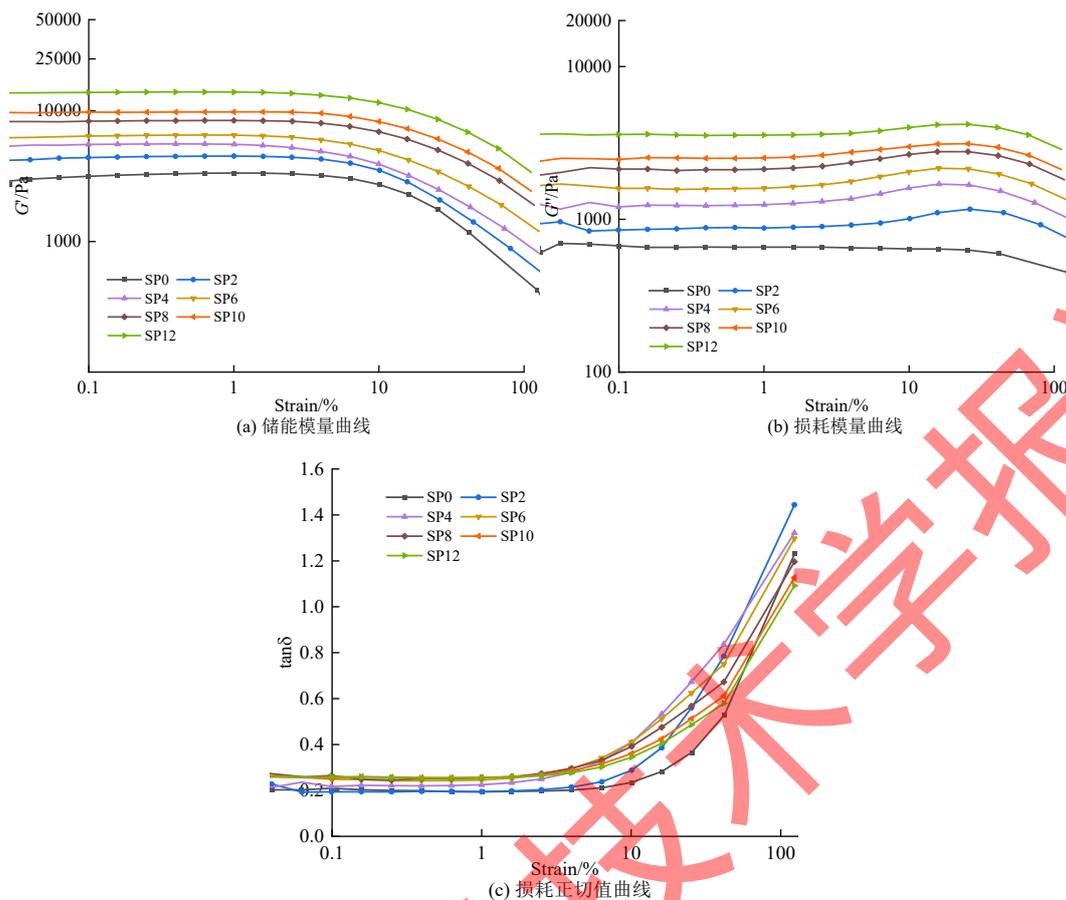


图3 模拟面团的动态应变曲线

Fig.3 Dynamic strain curves of the imitation doughs

2.4 模拟面团中分子相互作用强度分析

在 LVR 范围内进行了动态频率扫描，扫描时使频率改变但应变不变，此时扫描不干扰或破坏模拟面团的固有结构。一般来说，蛋白-多糖体系的动态频率扫描曲线符合 Power-law 模型，可以在拟合后间接研究模拟面团中 PHP 和鱼糜蛋白之间的相互作用^[23]。对所有模拟面团进行动态频率扫描并拟合计算，结果如表 2。从结果来看，所有模拟面团的拟合度都相对较好 ($R^2 \geq 0.95$)，这说明 PHP-未漂洗鱼糜体系符合一般蛋白-多糖体系的流变规律，结果是可靠的。

n 值表示 G' 和 G'' 对频率的依赖程度，可以用于表征面团中分子间相互作用的类型， n 值越接近于 0，则表示相互作用越强，反之则表示作用力越弱。 $n=0$ 表示可能存在共价键等强键，而 $n>0$ 则表示可能存在其他弱的化学键^[24]。从结果来看，所有模拟面团的 n 值均为正值，这说明体系中的蛋白质和 PHP 中的多糖没有生成新的共价键，只存在一些弱的连接（氢键等），这和已有类似体系的研究结果一致^[25]。 G' 和 G'' 的 n 值均出现了先上升后下降的趋势，且均在 SP6 出现了最大值，分别是 0.71 和 0.31，这说明在此添加量时，蛋白质和多糖的相互作用是最弱的。推测可能和此时因相分离形成的鱼糜互穿型微相分离凝胶网络结构有较大关系。

K 值表示模拟面团的物理强度且 K 值越大表明物理强度越大。结果表明，随着 PHP 添加量的增加， G' 和 G'' 的 K 值均出现了明显的增加。此时蛋白质未加热没有形成凝胶，只有 PHP 中 CWF 组分形成的弱凝胶，推测物理强度的上升主要与这部分弱凝胶的形成有关。

表 2 模拟面团的动态频率扫描中 Power-law 模型拟合参数

Tab.2 Power-law model fitting parameters in dynamic frequency scan of the imitation doughs

模拟 面团	G'			G''		
	K (Pa·s ⁿ)	n	R^2	K (Pa·s ⁿ)	n	R^2
SP0	363.74±65.86 ^d	0.23±0.01 ^{cd}	0.989	319.51±12.19 ^d	0.12±0.00 ^{bc}	0.955
SP2	8.68±1.97 ^c	0.55±0.06 ^b	0.989	19.50±10.29 ^d	0.25±0.01 ^{ab}	0.972
SP4	16.51±3.05 ^c	0.59±0.03 ^b	0.989	91.20±3.68 ^d	0.26±0.02 ^{ab}	0.992
SP6	37.25±3.88 ^c	0.71±0.07 ^a	0.985	125.76±2.60 ^d	0.31±0.15 ^a	0.996
SP8	865.91±106.69 ^c	0.26±0.01 ^c	0.997	973.60±23.85 ^c	0.16±0.01 ^{abc}	0.967
SP10	1201.1±180.83 ^b	0.21±0.00 ^{cd}	0.994	1469.7±196.60 ^b	0.12±0.00 ^{bc}	0.990
SP12	1751.65±221.76 ^a	0.16±0.01 ^d	0.994	2280.9±321.00 ^a	0.10±0.04 ^c	0.991

同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)

2.5 模拟面团的蠕变回复性分析

蠕变及回复性可以反面团在实际加工过程中的宏观性质,特别是在受到外力作用后的形变抵抗力和回复性。模拟面团的蠕变回复曲线如图4。从图4可以看出,所有样品都和对照组一样,表现出了典型的类似普通淀粉面团的黏弹流体特性^[26],这表明其可以采用制备传统面条、粉丝以及面饼等以面粉及淀粉为原料的主食的制备工艺。

为了进一步探究蠕变回复特征,对图4中的曲线使用 Burgers 模型进行拟合,得到的流变学参数见表3。 J_0 和 J_m 分别代表蠕变阶段的瞬时柔量和延迟柔量,它们分别与蠕变回复期间模拟面团内部分子的键长键角形变和分子的链段运动有关^[27]。随着 PHP 添加量的增加, J_0 和 J_m 逐渐降低,说明模拟面团分子的链段运动和分子内键长键角的形变越来越受到限制,这也侧面解释了稳态剪切中模拟面团流动性越来越弱的原因。最大柔量(J_{max})是反映结构之间强度的指标,其与模拟面团的刚度呈反比关系^[27]。随着 PHP 添加量的增加, J_{max} 值呈现明显的下降趋势,表明模拟面团的抗形变能力和结构得到了较好的增强。迟滞时间(λ)表征了黏弹性材料对恒定应力瞬时施加的响应, λ 值越大,弹性反应越慢^[28]。从结果来看,添加 PHP 对模拟面团的 λ 值影响并不显著($P>0.05$)。

回复阶段可以用来模拟并表征面团在用手或机械施加压力后回复原有形状的能力,回复能力越强,说明面团的结构越稳定。 J_e 称为弹性柔量,可归因于模拟面团的弹性成分,而模拟面团回复阶段在曲线末端区域达到平衡的柔量由模拟面团的黏性成分引起,称为黏性柔量(J_v)。 J_{max} 中黏性部分 J_v 和弹性部分 J_e 的占比分析结果如图5。结果表明,随着 PHP 添加量的增大,模拟面团中的弹性部分出现了先降低后增加的趋势,其中 SP4 和 SP6 的 J_e 值较低,均在 56%附近,表明其弹性回复性能较其他面团差。

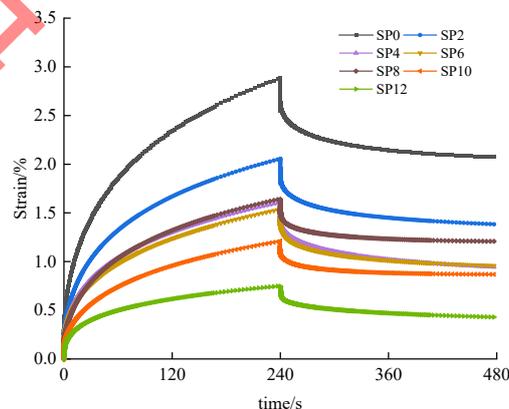


图4 模拟面团的蠕变回复曲线

Fig.4 Creep response curve of the imitation doughs

表3 模拟面团蠕变回复测试拟合参数

Table 3 Creep response test fitting parameters of the imitation doughs

模拟 面团	蠕变阶段					回复阶段		
	$J_0 \times 10^{-4}$	$J_m \times 10^{-4}$	λ	$\eta_0 \times 10^4$	$J_{max} \times 10^{-2}$	$J_0 \times 10^{-4}$	$J_m \times 10^{-4}$	λ
SP0	3.53±0.11 ^a	11.5±0.42 ^a	16.80±1.20 ^a	14.41±1.21 ^b	28.87±0.70 ^a	2.04±0.03 ^a	6.18±0.14 ^a	11.64±0.29 ^{ab}
SP2	2.38±0.09 ^b	6.42±0.44 ^b	13.25±3.94 ^a	26.15±6.55 ^{ab}	20.52±0.15 ^b	1.56±0.03 ^b	5.26±0.22 ^{ab}	12.70±0.89 ^a
SP4	2.29±0.35 ^b	6.64±0.18 ^b	9.96±4.41 ^a	29.32±4.09 ^{ab}	16.39±0.21 ^c	1.61±0.23 ^b	5.71±1.10 ^a	12.83±0.67 ^a
SP6	1.77±0.16 ^c	6.65±0.22 ^b	9.56±5.03 ^a	36.30±13.11 ^{ab}	16.16±0.22 ^c	1.19±0.03 ^c	4.55±0.23 ^{bc}	12.75±1.22 ^a
SP8	1.6±0.08 ^{cd}	5.27±0.40 ^c	16.50±0.07 ^a	25.86±0.33 ^{ab}	15.33±0.30 ^d	1.04±0.03 ^{cd}	3.61±0.07 ^{cd}	10.92±0.06 ^{ab}
SP10	1.2±0.02 ^{de}	4.38±0.75 ^c	18.71±4.17 ^a	29.42±6.45 ^{ab}	12.10±0.25 ^e	0.84±0.046 ^d	2.76±0.18 ^{de}	9.95±0.80 ^b
SP12	0.99±0.07 ^e	3.86±0.34 ^d	15.30±4.69 ^a	46.48±15.76 ^a	9.46±0.15 ^f	0.61±0.05 ^e	2.21±0.08 ^e	11.16±1.93 ^{ab}

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

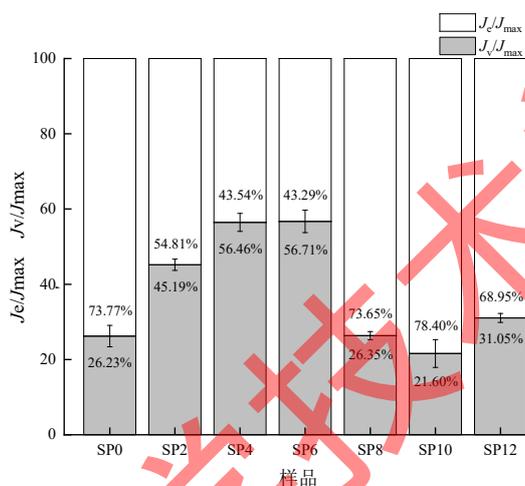


图 5 模拟面团在回复阶段的最大蠕变柔量的相对弹性和黏性部分占比

Fig.5 Relative elastic and sticky portion of maximum creep flexibility of the imitation doughs during the recovery phase

2.6 加热过程中模拟面团的黏弹性变化

由于鱼糜蛋白和 HWF 组分均会在加热后形成凝胶, 故进一步探究了加热过程中模拟面团的黏弹性变化, 结果如图 6 所示。整体来看, $\tan\delta$ 的值始终小于 1, 这表明模拟面团在加热后可以形成较好的凝胶体。与对照组相比, 其值均有较大幅度的提高, 说明其形成的凝胶较对照组要差一些。

在图 6 (c) 中可以看出纯鱼糜表现出了 2 个特征峰, 分别出现在 40°C 和 70°C 附近, 已有研究证明这是由于鱼糜中肌球蛋白重链和肌动球蛋白的变性伸展导致的^[29]。随着 PHP 的加入, 这 2 个特征峰逐步消失, 转变为 1 个并出现在 57°C 附近。Farahnaky 等^[29]进行了纯 PHP 的相似实验, 结果发现其在 40°C 附近开始发生溶解, 其损耗正切值曲线中出现了 1 个峰, 可能是 PHP 发生了类似的淀粉凝胶行为, 组分分子中的氢键发生了断裂和重组并推断 PHP 凝胶主要是由氢键主导的。由此来看, 鱼糜蛋白的存在明显提高了模拟面团中 PHP 的溶解温度, 这可能和蛋白质对 PHP 的包裹作用以及蛋白质与 PHP 对水分子的竞争有较大关系。其次, 添加了 PHP 的模拟面团, 其损耗正切值曲线中存在 2 个明显的峰谷, 1 个在 32°C 附近, 另外 1 个在 84°C 附近。推测这 2 个点是 CWF 和 HWF 分别发生了凝胶化所致。比较同一模拟面团 2 个峰谷值, 发现差值较小, 这说明 2 个组分形成的凝胶均为弱凝胶且凝胶品质相差不大。

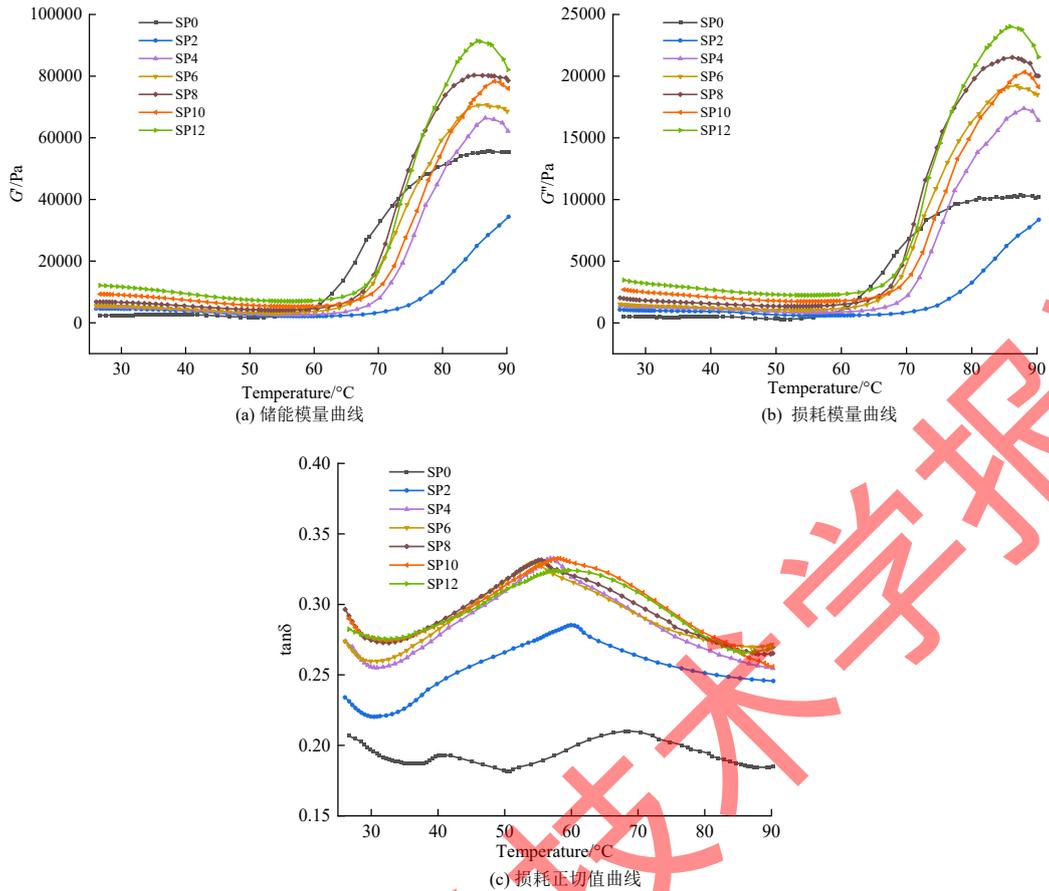


图6 模拟面团的动态温度扫描曲线

Fig. 6 Dynamic temperature scanning curve of the imitation doughs

2.7 模拟面团的凝胶强度和拉伸特性分析

凝胶强度是衡量鱼糜制品品质的重要指标之一，对加热后的模拟面团进行了凝胶强度测试，结果如图7(a)。从结果可知，添加PHP后，模拟面团的凝胶强度出现了先上升后下降的趋势，SP6的凝胶强度达到最大值4305.74 g·mm。推测原因如下：由于鱼糜蛋白和PHP均可以单独形成凝胶，之前分子相互作用强度分析的结果显示鱼糜蛋白与PHP多糖分子之间存在弱键连接，且这2种物质属于生物大分子，它们之间极有可能因热力学不相容发生相分离^[30]。推测在低PHP添加量的模拟面团中，蛋白质凝胶为连续相，而PHP作为填充相存在于蛋白质三维凝胶网络结构中；在高PHP添加量的模拟面团中，PHP中HWF组分发生了凝胶化形成了凝胶网络，而占比较小的鱼糜蛋白则作为填充相分散在弱凝胶中。当添加量在6% (w/w)附近时，PHP和蛋白质比例适当，形成了一定程度的互穿凝胶网络结构，因此其凝胶强度较强。

为了进一步探究模拟面团制备传统主食的可行性，将其制备为凝胶薄饼后切成饼丝测定其拉伸特性，结果如图7(b)。从拉伸模量(E)的结果来看，随着PHP的添加，SP4出现了最低值，之后明显增加，这说明PHP的添加量小于4% (w/w)时，凝胶薄饼的拉伸强度有一定的减弱；而超过这一添加量时，凝胶薄饼变得越来越有韧性。相对拉伸率(r_e)是饼丝受外力作用至拉断时，拉伸后的长度与拉伸前的比值，比值越高，说明延展性越高。从结果可以看出，添加PHP后，凝胶薄饼的延展性呈现先增加后降低的趋势，在添加量为6% (w/w)时，相对拉伸率达到了最大值，此时饼丝能够拉伸至原有长度的1.74倍，证明了凝胶薄饼的延展特性良好。

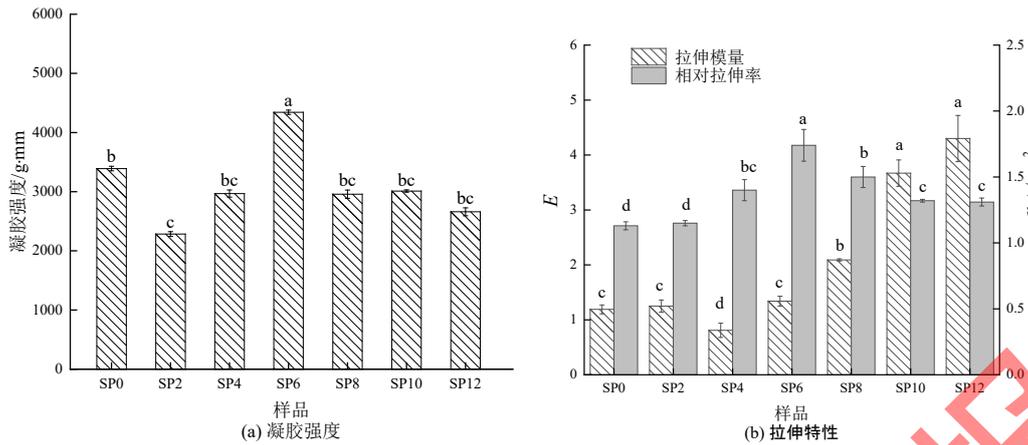
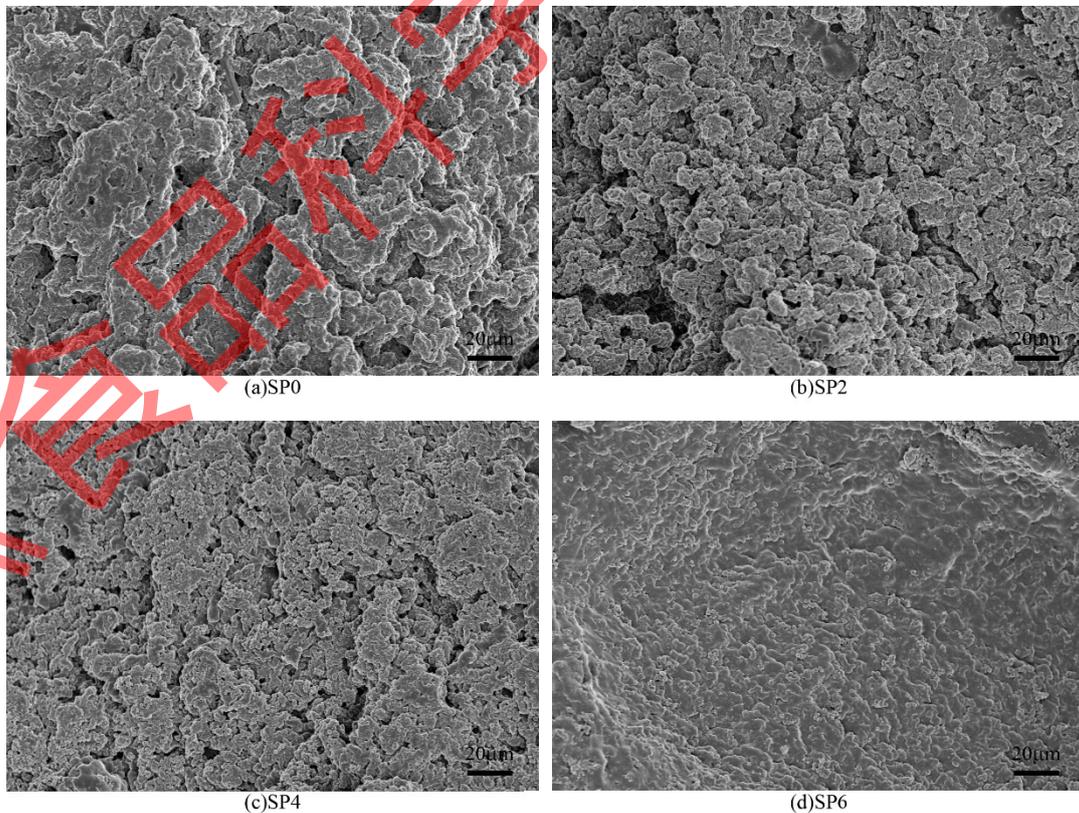


图 7 模拟面团的凝胶强度及拉伸特性

Fig.7 Gel strength and tensile properties of the imitation doughs

2.8 模拟面团的微观结构观察

为了验证之前关于相分离决定相结构，而相结构决定凝胶性质的推测，进一步观察了凝胶薄饼的微观结构，结果如图 8。从图 8 可以看出，对照组的结构为较粗糙的条状凝胶网络结构，孔洞大而多。添加 PHP 后，凝胶薄饼的孔洞明显减小，除了大的条状结构外还出现了细碎的结构，推测这些细碎结构即是分散在鱼糜蛋白中的车前子多糖水凝胶。当 PHP 添加量增大至 6% (w/w) 时，可以看到凝胶薄饼微观结构最为规则，结构均一、孔洞分布散而细密，推测此时形成了蛋白质和多糖的双连续相互穿网络凝胶结构。在此结构的双重支撑下，凝胶薄饼展现出了较强的对抗外界形变的能力，这也解释了添加量 6% (w/w) 的凝胶薄饼具有较强拉伸性能和凝胶强度的原因。随着 PHP 添加量的继续增加，原来条状的凝胶网络逐渐消失，凝胶表面变得越来越平整，推测此时蛋白质凝胶网络已经被破坏，而多糖的凝胶网络占据了主体优势，其强大的水合能力使得表面看起来较为光滑。



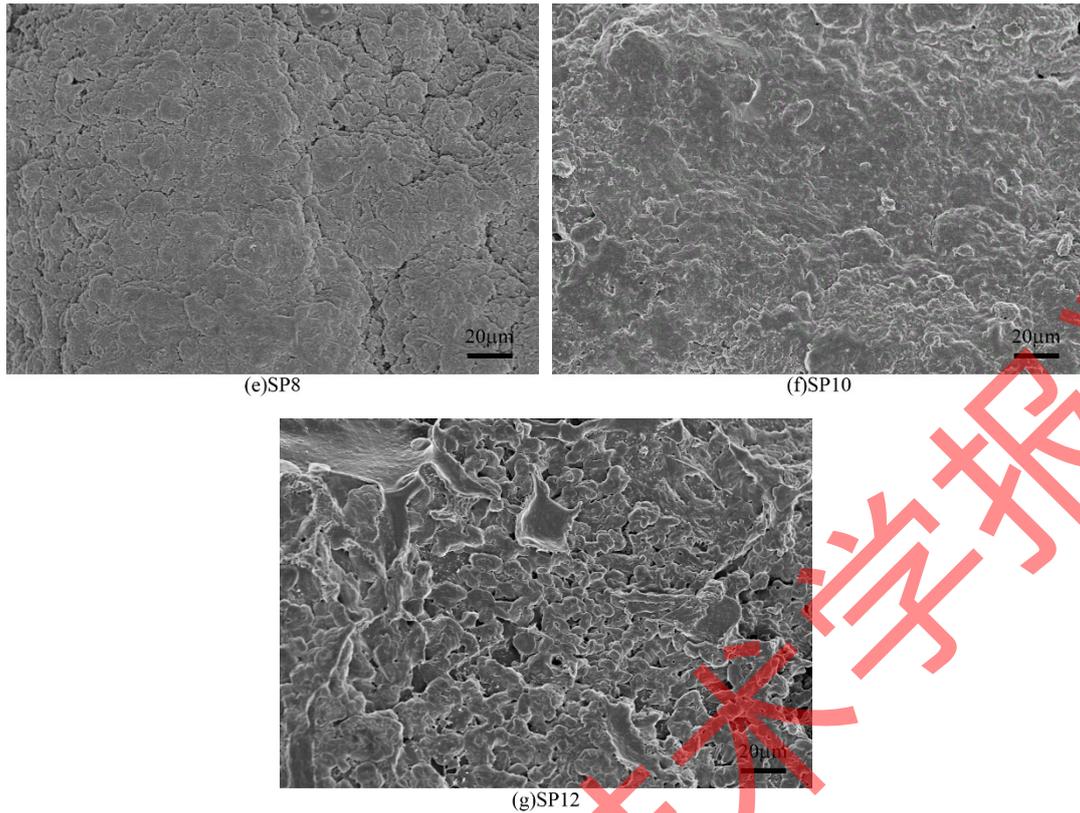


图 8 模拟面团的微观结构
Fig.8 SEM micrograph of the imitation doughs

3 结论

本研究系统地评估了 PHP 与未漂洗鲑鱼鱼糜混合后形成的模拟面团的流变性质。研究发现模拟面团在常温下为弱凝胶体系，在剪切速率超过 10 s^{-1} 后其结构即被破坏。模拟面团为假塑性流体，随着 PHP 添加量的增加流动性减弱，触变性和刚度增强。面团内蛋白质和 PHP 中的多糖之间只存在一些弱的连接，例如氢键，PHP 添加量 6% (w/w) 时蛋白质和多糖的相互作用最弱。随着 PHP 添加量的增加， J_0 和 J_m 逐渐降低，且 4% 和 6% (w/w) 面团的弹性回复性最低。面团在加热后均可以形成较好的凝胶体，且蛋白质的存在明显提高了 PHP 的溶解温度。微观结构观察结果表明，PHP 添加量 6% (w/w) 时，相结构最为均一，孔洞分布细密。研究结果表明：PHP 添加量 6% (w/w) 时，鱼糜蛋白和 PHP 多糖因相分离形成了互穿型凝胶网络；低于 6% (w/w) 时，鱼糜蛋白为连续相而 PHP 多糖为分散相；高于 6% (w/w) 时，PHP 多糖为连续相而鱼糜蛋白为分散相。从实际应用来看，PHP 添加量 6% (w/w) 时制备的主食食品品质较佳。

后续的研究还可以在以下几个方面继续深入探讨：①鱼糜蛋白和 PHP 多分子层面的相互作用分析，进一步在机理上验证流变特性推理。②PHP-未漂洗鱼糜模拟主食消化特性的深入探讨和研究。③模拟面团中鱼糜蛋白和 PHP 多糖在热诱导过程中的相行为及其形成机理。

参考文献：

- [1] 陆彦妤, 郭惠兰, 沈放, 等. 低碳水化合物饮食控制超重肥胖的研究进展[J]. 预防医学, 2021, 33(12): 1231-1235.
- LU Y Y, GUO H L, SHEN F, et al. Research progress of low-carbohydrate diet in controlling overweight obesity[J]. Preventive Medicine, 2021, 33(12): 1231-1235.
- [2] SAINSBURY E, KIZIRIAN N V, PARTRIDGE S R, et al. Effect of dietary carbohydrate restriction

on glycemic control in adults with diabetes: a systematic review and meta-analysis[J]. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 2018, 139(5): 239-252.

[3] ZHANG J X, WEN C T, ZHANG H H, et al. Review of isolation, structural properties, chain conformation, and bioactivities of psyllium polysaccharides[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 139: 409-420.

[4] BELORIO M, GÓMEZ M. *Psyllium*: a useful functional ingredient in food systems[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(2): 527-538.

[5] ZIEMICHÓD A, WÓJCIK M, RÓŻYŁO R. Seeds of *Plantago psyllium* and *Plantago ovata*: mineral composition, grinding, and use for gluten-free bread as substitutes for hydrocolloids[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(1): e12931.

[6] FARBO M G, FADDA C, MARCEDDU S, et al. Improving the quality of dough obtained with old durum wheat using hydrocolloids[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105467.

[7] KARAKUS S, ILGAR M, KAHYAOGU I M, et al. Influence of ultrasound irradiation on the intrinsic viscosity of guar gum-PEG/rosin glycerol ester nanoparticles[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 141: 1118-1127.

[8] ZHOU P Y, EID M, XIONG W F, et al. Comparative study between cold and hot water extracted polysaccharides from *Plantago ovata* seed husk by using rheological methods[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105465.

[9] 杨菁, 励建荣, 李学鹏等. 车前子壳粉-秘鲁鱿鱼鱼糜复合凝胶仿制面条的品质特性[J/OL]. *食品工业科技*:1-12[2023-11-15].

YANG J, LI J R, LI X P, et al. Quality Properties of Psyllium Husk Powder/ *Dosidicus Gigas* Surimi Composite Gel Imitation Noodles[J/OL]. *Science and Technology of Food Industry*: 1-12[2023-11-15].

[10] 熊泽语. 冷冻未漂洗大黄鱼鱼糜品质特性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021:2-3.

XIONG Z Y. Study on the Quality Characteristics of Frozen and Unrinsed Large Yellow Croaker Surimi[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021:2-3.

[11] 陈瑶, 江彩艳, 郑杰, 等. 非漂洗鱼糜即食食品的加工工艺[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(9): 215-227.

CHEN Y, JIANG C Y, ZHENG J, et al. Processing technology of non-rinsed surimi instant food[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(9): 215-227.

[12] CHEN L, TIAN Y Q, BAI Y X, et al. Effect of frying on the pasting and rheological properties of normal maize starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 85-95.

[13] FENG Y Y, MU T H, ZHANG M, et al. Effects of different polysaccharides and proteins on dough rheological properties, texture, structure and *in vitro* starch digestibility of wet sweet potato vermicelli[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 148: 1-10.

[14] FU Z Q, CHE L M, LI D, et al. Effect of partially gelatinized corn starch on the rheological properties of wheat dough[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2016, 66: 324-331.

[15] 米红波, 王聪, 赵博, 等. 大豆油、亚麻籽油和紫苏籽油对草鱼鱼糜品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(18): 60-64.

MI H B, WANG C, ZHAO B, et al. Effects of soybean, flaxseed and perilla seed oils on the quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) surimi gels[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(18): 60-64.

[16] CHEN Z, SAGIS L, LEGGER A, et al. Evaluation of starch noodles made from three typical Chinese sweet-potato starches[J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(9): 3342-3347.

- [17] CAO H W, FAN D M, JIAO X D, et al. Importance of thickness in electromagnetic properties and gel characteristics of surimi during microwave heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 248: 80-88.
- [18] CRAWFORD N C, POPP L B, JOHNS K E, et al. Shear thickening of corn starch suspensions: does concentration matter? [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 396: 83-89.
- [19] WANG Y, YE F Y, LIU J, et al. Rheological nature and dropping performance of sweet potato starch dough as influenced by the binder pastes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 85: 39-50.
- [20] MI G, WANG T, LI J R, et al. Phase separation affects the rheological properties of starch dough fortified with fish actomyosin[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(16): 9303-9314.
- [21] PHAN-THIEN N, SAFARI-ARDI M. Linear viscoelastic properties of flour-water doughs at different water concentrations[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1998, 74(1/2/3): 137-150.
- [22] GUADARRAMA-LEZAMA A Y, CARRILLO-NAVAS H, VERNON-CARTER E J, et al. Rheological and thermal properties of dough and textural and microstructural features of bread obtained from nixtamalized corn/wheat flour blends[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 69: 158-165.
- [23] ZHANG D Q, MU T H, SUN H N. Comparative study of the effect of starches from five different sources on the rheological properties of gluten-free model doughs[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 176: 345-355.
- [24] KIM W W, YOO B. Rheological behaviour of acorn starch dispersions: effects of concentration and temperature[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2009, 44(3): 503-509.
- [25] ANVARI M, JOYNER (MELITO) H S. Effect of formulation on structure-function relationships of concentrated emulsions: Rheological, tribological, and microstructural characterization[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 72: 11-26.
- [26] ROUILLÉ J, DELLA VALLE G, LEFEBVRE J, et al. Shear and extensional properties of bread doughs affected by their minor components[J]. *Journal of Cereal Science*, 2005, 42(1): 45-57.
- [27] ONYANGO C, MUTUNGI C, UNBEHEND G, et al. Rheological and baking characteristics of batter and bread prepared from pregelatinised cassava starch and sorghum and modified using microbial transglutaminase[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 97(4): 465-470.
- [28] RONDA F, PÉREZ-QUIRCE S, ANGIOLONI A, et al. Impact of viscous dietary fibers on the viscoelastic behaviour of gluten-free formulated rice doughs: a fundamental and empirical rheological approach[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 32(2): 252-262.
- [29] FARAHNAKY A, ASKARI H, MAJZOBI M, et al. The impact of concentration, temperature and pH on dynamic rheology of psyllium gels[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 100(2): 294-301.
- [30] ZHUANG X B, WANG L J, JIANG X P, et al. Insight into the mechanism of myofibrillar protein gel influenced by konjac glucomannan: moisture stability and phase separation behavior[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 127941.