

高压均质处理对肌球蛋白-抗性玉米淀粉混合体系凝胶功能特性的影响

曾宪明, 黄 婧, 赵玉琪, 魏芷茜, 蔡佳慧, 王瑛瑶, 于小波*

(南京农业大学食品科技学院, 国家肉品质量安全控制工程技术研究中心, 南京 210095)

摘 要: 目的 研究高压均质(high-pressure homogenization, HPH)处理对肌球蛋白-抗性玉米淀粉混合体系凝胶功能特性的影响。**方法** 以添加质量分数 1%抗性玉米淀粉(resistant corn starch, RCS)的鸡胸肉肌球蛋白(myosin, M)混合体系(M-RCS)为研究对象, 考察 10000、15000、20000 psi 的高压均质单次处理对 M-RCS 凝胶保水性和硬度的影响; 并通过分析 M-RCS 流变特性及凝胶水分子横向弛豫时间、粒度的变化, 探讨其凝胶特性的变化机制。**结果** HPH 处理的压力为 10000 psi 时, M-RCS 的凝胶保水性以及硬度与未处理前相比均显著提高($P<0.5$)。流变结果显示, HPH 处理通过改变 M-RCS 体系加热过程相转变程度来影响其凝胶形成过程, 具体表现为: 适当的 HPH 处理减小了 M-RCS 样品升温过程中的储能模量, 与此同时也提高了整个体系在升温的过程中的粘性; 低场核磁结果表明 M-RCS 凝胶内部不易流动水弛豫时间较对照组明显缩短, 说明该体系内形成了聚集结构更紧密的凝胶, 使水分的流动性减弱, 表现为其凝胶保水性提高; 粒径结果表明 10000 psi 的高压均质处理可通过影响体系内分子之间的聚集程度来改善凝胶结构。**结论** 添加 RCS 可改善 M-RCS 凝胶体系的硬度和保水性; M-RCS 体系经适当压力(10000 psi)的 HPH 处理后, 其凝胶的保水性及硬度进一步提高。本研究为低脂、高膳食纤维肉制品的开发提供理论依据。

关键词: 高压均质; 抗性玉米淀粉; 肌球蛋白; 凝胶品质特性

Effect of high-pressure homogenization treatment on the functional properties of myosin-resistant corn starch hybrid system gel

ZENG Xian-Ming, HUANG Jing, ZHAO Yu-Qi, WEI Zhi-Xi, CAI Jia-Hui,
WANG Ying-Yao, YU Xiao-Bo*

(National Center of Meat Quality and Safety Control, College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effect of high-pressure homogenization (HPH) treatment on the functional properties of myosin-resistant corn starch mixture gel. **Methods** Taking chicken breast myosin (M) mixed system (M-RCS) added with 1% resistant corn starch (RCS) as the research object, the effects of single treatment of HPH at 10000, 15000 and 20000 psi on the water retention and hardness of M-RCS gel were investigated. The rheological properties of M-RCS and the change of transverse relaxation time and particle size of M-RCS were analyzed to explore the change mechanism of hydrogel properties. **Results** HPH pressure was increased to 10000 psi, the gel water retention and hardness of M-RCS increased significantly ($P<0.5$). The rheological

*通讯作者: 于小波, 高级实验师, 主要研究方向为肉品质量安全控制。E-mail: yuxiaobo_xlxu@njau.edu.cn

*Corresponding author: YU Xiao-Bo, Senior Experimenter, Key Laboratory of Meat Processing, Quality and Safety Control, College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China. E-mail: yuxiaobo@njau.edu.cn

results showed that properly HPH treatment improved the phase transition changing during heating to affect the gel formation process: Reduce the storage modulus of the M-RCS sample during heating and change the elasticity results during heating. The low-field NMR results showed that the relaxation time of the non-flowing water inside the M-RCS gel was less than that of the control group, indicating that the fluidity of the water in the gel was weakened, and it reflected the improved water retention of the gel, particle size results showed molecular aggregation state was improved during HPH treatment. **Conclusion** The hardness and water retention of m-RCS gel system can be improved by adding RCS. After the M-RCS system is treated with HPH at an appropriate pressure (10000 psi), the water retention and hardness of the gel are further improved. This paper provides a theoretical basis for the development of low-fat and high-fiber meat products.

KEY WORDS: high-pressure homogenization; resistant corn starch; myosin; gel properties

1 引言

抗性淀粉是一类低热量、类似膳食纤维的变性淀粉,可促进人体健康,具有降低血清胆固醇、调节血糖、预防结肠癌等生理功能。抗性淀粉应用于肉与肉制品,可改善质构、保水、色泽等品质特性,并可提高其冻融稳定性^[1]。吴满刚等^[2,3]研究表明淀粉与鸡肉中提取的肌原纤维蛋白复合物在胶流变性和持水性方面得以显著改善。肉中的重要成分—肌球蛋白(myosin, M)是肌肉中唯一能形成热凝胶的蛋白质,其凝胶保水性(water holding capacity, WHC)和硬度直接影响肉制品的品质。

高压均质(high-pressure homogenization, HPH)因其操作简便,通过物理方法便可改善蛋白功能性质而扩大了其在食品等领域的应用^[4-9]。唐晓婷等^[10]发现经 80 MPa 高压均质处理 2 次,不仅大豆分离蛋白的凝胶硬度和持水性均增大,而且分别添加了 15%、20%和 25%(质量分数)的淀粉对蛋白凝胶的硬度和持水性也显著增强,其中淀粉添加量为 20%时硬度和持水性最佳。Augustin 等^[11]研究结果显示,HPH 可提高抗性淀粉的持水力。然而关于高压均质处理 M-抗性淀粉混合体系,对其凝胶性质、持水性及微观结构的变化研究却鲜有报道。

本研究以添加抗性玉米淀粉(resistant cornstarch, RCS)的鸡胸肉肌球蛋白构成的 M-RCS 混合体系为研究对象,研究 HPH 对该体系凝胶特性(保水性和硬度)的影响,并初步探讨其变化机制,以期 HPH 技术在低脂、功能肉制品中的开发应用提供理论指导。

2 材料与方法

2.1 材料与试剂

原料:市售活鸡;抗性玉米淀粉(南通云峰淀粉有限公司)。

氯化钾、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾、焦磷酸钠、乙二胺四乙酸二钠(ethylenediaminetetraacetic acid disodium salt,

EDTA-2Na)、氯化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、双缩脲、硫酸铜(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

2.2 仪器与设备

HYC-890F 医用冷藏箱(青岛海尔特种电器有限公司); GL-21M 高速离心机(湖南湘仪离心仪器有限公司); GM200 组织绞肉机(德国莱驰公司); BLENDER HGB55 组织捣碎机(美国 Waring 公司); BSA1245 电子天平(德国赛多利斯公司); C-MAG HS7 磁力搅拌器(美国 IKA 公司); FE28 pH 计(瑞士梅特勒托利多公司); D-3L 高压均质机(美国 PhD-Tech 公司); TA-XT Plus 质构仪(英国 Stable Micro System 公司); HH-2 数显水浴锅(江苏金坛市环宇科学仪器厂); Avanti J-265 XP 高速冷冻离心机、Microfuge 22R Centerifuge 台式冷冻离心机(美国贝克曼公司); Physica MRC 301 型流变仪(奥地利安东帕公司); PQ001 纽迈台式脉冲核磁共振仪(上海纽迈电子有限公司); SpectraMax M2e 全波长扫描酶标仪(美国 Molecular Devices 公司); ZS90 激光粒度仪(美国马尔文公司); Labram HR Evolution 拉曼光谱仪(法国 HORIBA 公司)。

2.3 实验方法

2.3.1 肌球蛋白提取

肌球蛋白提取根据 Zhou 等^[12]的方法,并做相应的修改。市售活鸡迅速宰杀,立取鸡胸肉至于碎冰中,剔除鸡胸肉中可见脂肪与结缔组织,切碎,快速切小块,利用绞肉机搅成肉糜。碎肉糜加入 3 倍体积的谷氨酰胺合成酶(glutamine synthetase, GS)提取液(0.5 mol/LKCl、100 mmol/L KH₂PO₄、50 mmol/L K₂HPO₄、5 mmol/L EDTA-2Na、4 mmol/L 焦磷酸钠、冷蒸馏水溶解, pH 6.5),大约 15 min 后,在 5000 g 条件下离心 10 min。收集上清并用 3 层纱布过滤,然后加 10 倍体积冷蒸馏水稀释,存放在冷库(0~4℃)中过夜,虹吸去掉上清。下层溶液在 8000 g 条件下离心 10 min (4℃),得沉淀。沉淀溶于 0.3 mol/L 氯化钾磷酸盐缓冲液(pH 7.0),然后在 10000 g 条件下离心 20 min,去掉沉淀获得上清液。上清利用 10 倍体积的冷的超纯水进

行稀释, 过夜沉降, 虹吸去上清, 沉淀在 8000 g 条件下, 离心 10 min 得到沉淀, 并用 0.6 mol/L 氯化钾磷酸盐缓冲液(pH 6.5)将肌球蛋白质量浓度标准化到 10 mg/mL。所有操作在 0~4 °C 环境下进行。

2.3.2 溶胶制备

向上述已制备的肌球蛋白溶液(10 mg/mL)中加入 1% 玉米抗性淀粉(w/w), 在 4 °C 条件下缓慢搅拌 20 min, 至完全溶解, 在冰箱中(约 4 °C)静置过夜(约 12 h), 形成混合溶胶。

2.3.3 HPH 处理条件

将上述混合溶胶快速经过高压均质处理: 压力水平设为 10000、15000、20000 psi, 经 1 次高压均质处理, 各处理组每次处理量为 50 mL。样品加压前后均需置于冰浴中保存, 受压溶胶冰浴保存约 12 h 后, 供热凝胶处理或检测。所有实验重复 3 次($n=3$)。

2.3.4 M-RCS 凝胶制备

称取受压后 M-RCS 混合溶液(10 ± 0.3) g, 置于 10 mL 小烧杯内, 用保鲜膜封口; 放入 20 °C 水浴中恒温 10 min, 然后以平均 2 °C/min 的升温速率, 加热至 80 °C 后保温 30 min; 取出小烧杯, 自然冷却至室温后, 转移到 4 °C 条件下冷藏 12 h, 得到 M-RCS 凝胶, 供检测。

2.3.5 WHC 测定

参照 Zhou 等^[12]的方法, 并稍微修改。称量样品及试管总重 m_1 , g。在 4 °C、1000 g 条件下离心 10 min, 离心后用吸水纸除去管内与凝胶表面的水分, 称质量 m_2 , g。称量管重 m_0 , g; 每个处理样品进行 6 次测定。WHC 按式(1)计算。

$$\text{WHC}(\%) = (m_2 - m_0) / (m_1 - m_0) \times 100 \quad (1)$$

2.3.6 凝胶强度测定

利用 TA-XT Plus 质构仪 GMIA 程序对 M-RCS 凝胶强度进行测定, 单位 g。测定参数为: 探头选用 P/0.5, 测前速率为 1.50 mm/s, 测中盒测后速率均为 1.00 mm/s, 穿刺距离 4 mm, 触发力 5 g。检测重复 6 次。

2.3.7 流变性质测定

参照 Verbeke 等^[13]的方法并作修改。流变仪采用振荡模式, 检测参数为: 平行板直径 40 mm, 狭缝 1 mm, 应变 2%, 振动频率 0.1 Hz。测试过程包括升温 and 降温 2 个阶段, 升温速率 2 °C/min, 温度变化范围为 20~80 °C; 降温速率 4 °C/min, 温度变化范围为 80~20 °C。分别记录升温、降温过程中的储能模量(G')、相位角正切值($\tan\delta$)的变化。每个处理测定 3 次。

2.3.8 低场核磁自旋弛豫时间测定

参照 Han 等^[14]的方法并作修改。采用低场核磁共振技术检测, 在微型核磁共振成像仪上进行, 约 2 g 样品放入直径 25 mm 核磁管中, 质子共振频率为 18.169 MHz, 磁体强度 0.43 T, 自旋-自旋弛豫时间 T2 用 Carr

-Purcell-Mebiboom-Gill(CPMG)序列进行测量, 其中回波时间(echo time, TE)为 400 μ s, 15000 个回波, 重复扫描 4 次, 重复等待时间 8000 ms, 得到指数衰减图形使用 SIRT 算法拟合得到 T2 谱图。

2.3.9 粒径测定

肌球蛋白在溶液中的粒径分布通过动态光散射技术来测定。测定过程利用配备 4 mW 氦-氖激光的 Zetasizer Nano ZS 90 监测粒径变化, 监测角度设定为 90°。样品稀释到 0.5 mg/mL 后, 放置到 1 cm 步长的测试皿中进行检测。整个测试过程都在室温进行, 测定结果采用颗粒的相对体积比与其平均尺寸的关系曲线表示。

2.3.10 数据处理

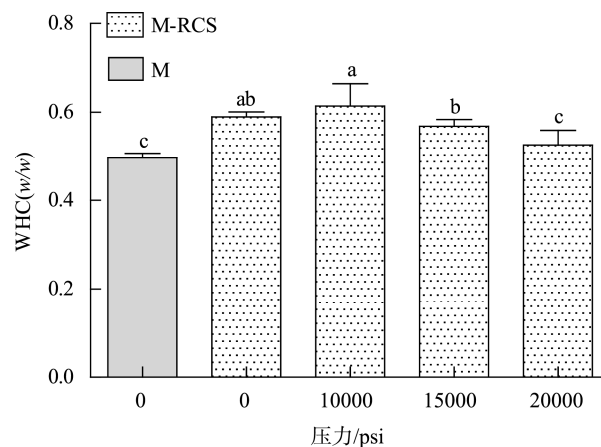
数据采用 SPSS 20.0 软件进行数据分析; 采用 ANOVA 分析, 数据用正态分布检验, 多重比较采用 Duncan 多重比较法, 显著性水平取 0.05; 采用 Origin 8.5 软件作图。

3 结果与分析

3.1 HPH 对 M-RCS 凝胶品质特性的影响

3.1.1 HPH 对 M-RCS 凝胶 WHC 的影响

如图 1 所示, 未受压时, 添加 RCS 与未添加 RCS 相比, 可提高 M 凝胶的 WHC($P < 0.05$); 而 HPH 处理可进一步提高 M-RCS 凝胶的 WHC($P < 0.05$), 且处理压力为 10000 psi 时, 凝胶 WHC 达到最大值, 随着压力进一步增加, WHC 开始降低, 达到 15000 psi 时, 凝胶 WHC 开始下降, 达到 20000 psi 时, 凝胶 WHC 进一步下降, 与未受压组 WHC 已无显著差异($P > 0.05$)。根据文献报道^[7,8,15], 添加 RCS 可提高 M 凝胶的 WHC, 唐晓婷等^[10]通过高压均质处理淀粉及大豆分离蛋白实验, 发现适当压力的 HPH 处理使蛋白凝胶网状结构中产生孔洞, 暴露出更多的蛋白结构表面活性基团, 改善蛋白质功能特性, 促进了变性淀粉与蛋白的结合, 进而提高了 WHC。



注: 不同小写字母表示差异显著性($P < 0.05$), 下同。

图 1 HPH 对 M-RCS 凝胶 WHC 的影响($n=3$)

Fig.1 Effect of HPH on WHC of M-RCS gels($n=3$)

3.1.2 HPH 对 M-RCS 凝胶硬度的影响

由图 2 可见, 添加 RCS 可显著增强 M 凝胶的硬度($P < 0.05$)。此外与未受压的 M-RCS 凝胶相比, HPH(10000 psi)能够显著提高凝胶的硬度($P < 0.05$), 但随着压力水平提高至 15000 psi, 硬度开始逐渐降低, 当压力超过 15000 psi 时, 增压对硬度的影响不显著($P > 0.05$), 压力达到 20000 psi 时, 硬度会显著降低($P > 0.05$)。由此说明, 适当高压均质处理与 RCS 的添加对 M 凝胶硬度均有影响增强作用。吴满刚等^[3]证实了淀粉对于肌纤维蛋白-淀粉复合凝胶的充填效应可提高形成的复合凝胶的强度。关于进一步受压后凝胶体系的硬度降低的原因, 后续的实验结果表明: 过度受压使 M 发生团聚, 分子间距增大、与 RCS 膨胀引起的位阻作用增强, 导致 M-RCS 热诱导凝胶结构的交联程度降低、凝胶能力下降、黏弹性减弱, 从而降低了 HPH 混合凝胶的硬度。

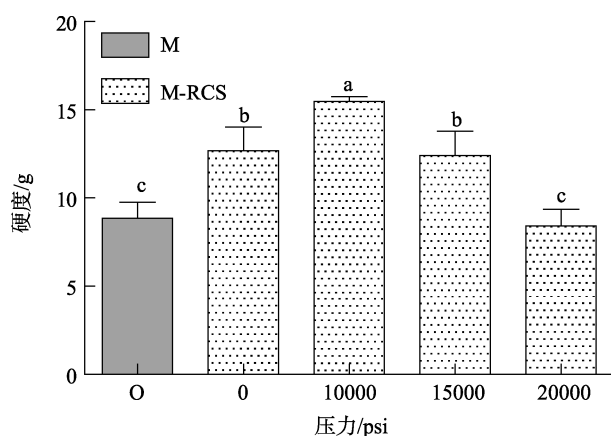


图 2 HPH 对 M-RCS 凝胶硬度的影响($n=3$)

Fig.2 Effect of HPH on gel strength of M-RCS gels($n=3$)

3.1.3 HPH 对 M-RCS 混合溶胶流变特性的影响

储能模量 G' 值反映黏弹性体系中弹性部分, 数值越大, 弹性部分越强。如图 3 所示, 在 20~80 °C 的热诱导凝胶过程中, 出现 2 个峰, 一个为 50 °C 左右的凝胶“形成”阶段, 该阶段是由于 M 分子的头部和铰链部分变性、聚合引起, 随后 M 分子尾部发生变性而进入凝胶“减弱”阶段; 另一个为 66 °C 左右的凝胶“增强”阶段^[1]。经 0~15000 psi 压力范围内 HPH 处理, 导致 M-RCS 溶胶在热诱导凝胶过程中凝胶体系 G' 值的逐渐减小。Chen 等^[15]研究表明, 经 HPH 处理的肌球蛋白与未处理肌球蛋白相比, 在 20~80 °C 的热诱导凝胶形成过程中, HPH 处理可能阻碍蛋白质在随后热诱导凝胶过程中的进一步变性和聚集, 对蛋白质起到一定的保护作用, 从而使 G' 值的显著减小。

$\tan\delta$ 值反映了蛋白质由黏性溶胶向弹性凝胶的转变, 反映了凝胶的形成过程。如图 4 所示, HPH 改变了升温过程中 M-RCS 体系的 $\tan\delta$ 。受压 10000 psi 的 M-RCS 体系, 在 20 °C 时表现出更强的黏性特征, 这是由于受压导致

M-RCS 体系中 M 分子的变性、展开和 RCS 分子的变性, 增强了 M-RCS 体系内部的相互作用, 使得 M-RCS 体系变得更加黏稠^[16]。但压力的进一步增大, 可能使 M 分子变性程度增大, 分子发生聚集, M-RCS 体系相互作用减弱, 弹性特征更明显。RCS 的添加使 G' 值减小, $\tan\delta$ 值增加, 表明 RCS 增加了 M-RCS 体系的粘性。

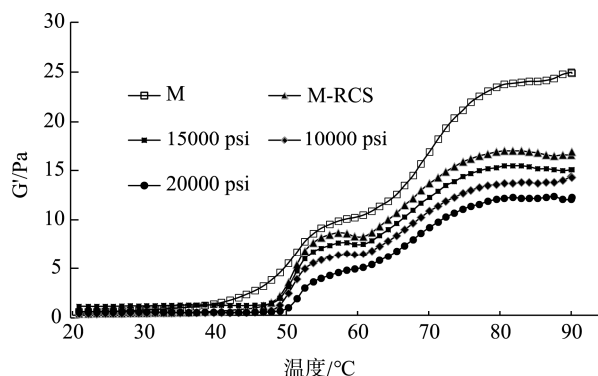


图 3 HPH 对 M-RCS 体系升温过程中储能模量(G')的影响

Fig.3 Effect of HPH on storage modulus (G') of M-RCS gels during heating

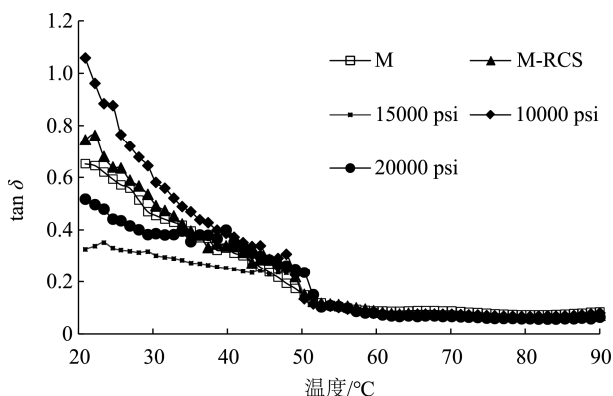


图 4 HPH 对 M-RCS 体系升温过程中 $\tan\delta$ 的影响

Fig.4 Effect of HPH on $\tan\delta$ of M-RCS during heating

3.1.4 HPH 对 M-RCS 凝胶弛豫时间的影响

低场核磁共振中的弛豫时间 T_2 反映了体系中水分子自由度。表 1 和图 5 显示了添加抗性淀粉及 HPH 对 M-RCS 体系热诱导凝胶 T_2 弛豫时间的影响。对 CPMG 脉冲序列得到的衰减曲线进行多指数拟合后, 各凝胶在 0.1~2000 ms 的 T_2 分布上均出现了 3 种峰, 分别用 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 表示, 分别对应于样品中水分的 3 种状态结合水 T_{21} 、不易流动水 T_{22} 和自由水 T_{23} 。结果表明, 添加 RCS 对 M 凝胶的 T_2 弛豫时间分布具有显著的影响($P < 0.05$)。

由图 5 可知, 在 0~10000 ms 的 T_2 分布上, T_2 出现 3 个峰, 分别对应于结合水 T_{21} (0~3 ms)、不易流动水 T_{22} (3~20 ms) 和自由水 T_{23} (20~3000 ms)。这类似于前期在 M-RCS 混合凝胶体系中所观察到的水分分布结果^[1], 其

差异可能与选择的磁体强度及核磁共振参数不同有关。与未添加 RCS 的凝胶相比, 0~15000 psi 压力范围内 M-RCS 凝胶体系不易流动水和自由水峰均发生了左移现象($P < 0.05$), T_{22} 和 T_{23} 峰值变小, 均发生了左移现象($P < 0.05$), T_{22} 值变小受压 20000 psi 的 M-RCS 凝胶体系无显著变化($P > 0.05$), 表明 RCS 能增强 M-RCS 凝胶体系对水分子的束缚能力; M-RCS 体系在 0~15000 psi 范围内, T_{21} 和 T_{22} 峰值变大, 均发生了左移现象($P < 0.05$), 随着 HPH 压力的进一步增加至 20000psi 时, M-RCS 凝胶体系中对应的不易流动水分子峰 T_{22} 值及自由水分子峰 T_{23} 值先与未受压 M-RCS 凝胶体系无显著变化($P > 0.05$), 结果见表 1。HPH 增强了 M-RCS 凝胶体系对水分子的束缚能力, 由此提高了 WHC。很多研究表明, 凝胶体系中水分子 T_{22} 与其 WHC 有直接关系^[17,18], M-RCS 体系凝胶的水分子 T_{22} 的减小, 表明体系中水分子的流动性变弱, M-RCS 体系凝胶三维结构截留水的能力增强, 最终导致 WHC 的增加。

3.1.5 HPH 对 M-RCS 粒径的影响

粒径结果体现了高压均质处理前后凝胶体系粒径分布的变化。由图 6 可见, M-RCS 体系粒径分布主要有 3 个范围, 分别是 Peak 1(30~300 nm), Peak 2(400~1200 nm)和 Peak 3(4000~5500 nm)。由表 2 可知, 整体上, 随着 HPH 压力增大, M-RCS 体系小粒径颗粒 Peak 1($P > 0.05$)、Peak 2($P < 0.05$)的粒径均增大, 大粒径颗粒 Peak 3 的粒径逐渐减小($P > 0.05$), 随着压力水平的进一步提高, 达到 15000 psi 以后, 增压对所有粒径的影响不显著($P > 0.05$)。Kasemwong 等^[19]、Wang 等^[20]和陈玲等^[21]等分别报道了玉米淀粉、木薯淀粉经高压均质和高压微射流处理后颗粒尺寸增大的结论。对于大颗粒, 涂宗财等^[22]分别报道了大豆蛋白和抗性淀粉经一定压力范围的 HPH 作用后, 其机械力产生微细化作用, 使粒径减小。但当压力超过一定值后, 由于 HPH 使部分破坏的颗粒表面处于激活状态, 颗粒表面的静电引力和范德华力增大, 高表面活性和表面能的颗粒相互吸引

发生团聚, 形成二次颗粒, 使颗粒的粒径增大, 越细的颗粒团聚趋势越大^[20,23]。此外, 未加压时, 添加的 RCS 对 M 的粒径无显著影响($P > 0.05$), 推断 HPH 通过分别影响 M-RCS 体系中 M 和 RCS 的聚集程度从而发生作用。影响凝胶孔径及其与 RCS 膨胀填充相互作用从而对改变 M-RCS 体系凝胶特性。

4 结论与讨论

本研究从微观角度研究了添加 RCS 及高压均质处理对 M-RCS 体系凝胶特性的改善作用。实验结果表明 M-RCS 体系压力为 10000 psi 的 HPH 处理, 凝胶的硬度和 WHC 达到最佳, 这是由于适当压力的高压均质处理, 使溶胶体系内部 M 和 RCS 分子的变性和展开, 增强了 M-RCS 体系内部的相互作用, 与随后热凝胶化过程中形成了聚集程度更大的凝胶结构, 与 RCS 的膨胀填充作用相互促进, 增强 M-RCS 体系凝胶对水分子的束缚能力, 流动性变弱, 进而提高了 M-RCS 体系凝胶的硬度和 WHC。该研究可为低脂、高膳食纤维以及功能性肉制品的开发应用提供理论指导。

表 1 HPH 对 M-RCS 凝胶弛豫时间的影响
Table 1 Effect of HPH on spin-spin relaxation times of M-RCS gels

压力/psi	T_{21}^*/ms	T_{22}/ms	T_{23}/ms
M	4.82±0.00	16.83±0.00 ^a	880.49±0.00 ^a
0	-	7.20±0.87 ^b	860.80±27.84 ^{ab}
10000	0.53±0.21	7.73±0.96 ^b	821.43±0.00 ^b
15000	2.22±0.74	7.68±1.68 ^b	821.43±0.00 ^b
20000	2.90±1.92	11.69±4.96 ^{ab}	841.12±27.84 ^{ab}

注: *因部分样品无 T_{21} 峰, 因此无法进行差异显著性分析。

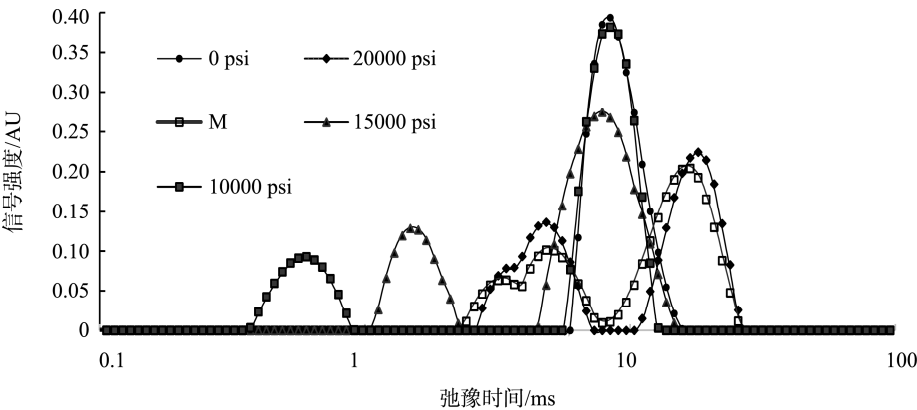


图 5 HPH 对 M-RCS 凝胶弛豫时间分布的影响
Fig.5 Effect of UHP on relaxation time distribution of M-RCS gels

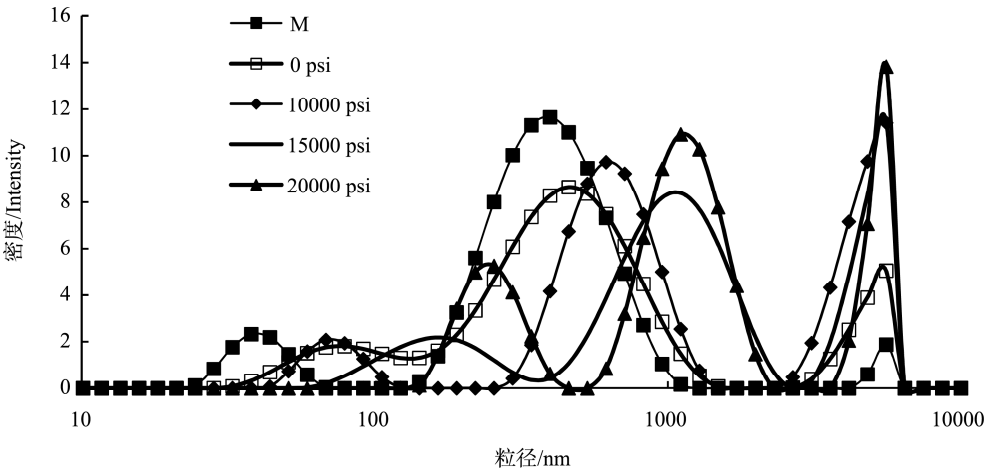


图 6 HPH 对 M-RCS 粒度分布的影响

Fig.6 Effect of HPH on distribution of size of M-RCS

表 2 HPH 对 M-RCS 粒度分布的影响(nm, n=3)

Table 2 Effect of HPH on distribution of size of M-RCS(nm, n=3)

压力/psi	Peak 1	Peak 2	Peak 3
M	51.62±14.38 ^b	450.57±91.86 ^c	5448.00±218.78 ^a
0	101.94±44.23 ^b	578.42±72.08 ^c	4933.33±542.87 ^{ab}
10000	113.79±39.42 ^b	739.58±156.13 ^b	4134.50±1337.49 ^b
15000	194.23±65.22 ^a	1035.35±74.14 ^a	4986.67±323.78 ^{ab}
20000	223.63±65.40 ^a	1101.12±173.25 ^a	5269.00±149.17 ^a

参考文献

[1] 李月双, 姚静, 谢婷婷, 等. 超高压对肌球蛋白-抗性玉米淀粉混合凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(3): 1-6.
Li YS, Yao J, Xie TT, *et al.* Effect of ultra pressure processing on gel properties of chicken breast myosin containing resistant corn starch [J]. Food Sci, 2017, 38(3): 1-6.

[2] 吴满刚, 熊幼翎, 陈洁. 不同淀粉对肌纤维蛋白流变学性质和凝胶持水性的影响[J]. 食品工业科技, 2010, 31(10): 92-94, 97.
Wu MG, Xiong YL, Chen J. Effects of starch characteristics on the rheology and water holding capacity of maofibrillar protein gels [J]. Sci Technol Food Ind, 2010, 31(10): 92-94, 97.

[3] 吴满刚, 熊幼翎, 陈洁. 不同淀粉对肌纤维蛋白凝胶强度和微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 2010, 31(9): 95-98.
Wu MG, Xiong YL, Chen J. Effects of different starches on the strength and microstructure of fibroin gel [J]. Sci Technol Food Ind, 2010, 31(9): 95-98.

[4] Guyon C, Meynier A, De-Lamballerie M. Protein and lipid oxidation in meat: A review with emphasis on high-pressure treatments [J]. Trends Food Sci Tech, 2016, 50: 131-143.

[5] Qian C, McClements DJ. Formation of nanoemulsions stabilized by model food-grade emulsifiers using high-pressure homogenization: Factors affecting particle size [J]. Food Hydrocoll, 2011, 25(5): 1000-1008.

[6] Saricaoglu FT, Gul O, Tural S, *et al.* Potential application of high pressure

homogenization (HPH) for improving functional and rheological properties of mechanically deboned chicken meat (MDCM) proteins [J]. J Food Eng, 2017, 215: 161-171.

[7] Serra M, Trujillo AJ, Pereda J, *et al.* Quantification of lipolysis and lipid oxidation during cold storage of yogurts produced from milk treated by ultra-high pressure homogenization [J]. J Food Eng, 2008, 89(1): 99-104.

[8] Serra M, Trujillo AJ, Quevedo JM, *et al.* Acid coagulation properties and suitability for yogurt production of cows' milk treated by high-pressure homogenization [J]. Int Dairy J, 2007, 17(7): 782-790.

[9] Dumay E, Chevalier-Lucia D, Picart-Palmade L, *et al.* Technological aspects and potential applications of (ultra) high-pressure homogenisation [J]. Trends Food Sci Tech, 2013, 31(1): 13-26.

[10] 唐晓婷, 孔保华, 刘骞, 等. 高压均质处理淀粉及大豆分离蛋白凝胶性质研究[J]. 中国食品学报, 2016, 16(9): 68-76.
Tang XT, Kong BH, Liu Q, *et al.* Studies on properties of soybean protein Isolate mixed gelation with starches by high-pressure homogenization [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2016, 16(9): 68-76.

[11] Augustin MA, Sanguansri P, Htoon A. Functional performance of a resistant starch ingredient modified using a microfluidiser [J]. Innov Food Sci Emerg, 2008, 9(2): 224-231.

[12] Zhou YZ, Chen CG, Chen X, *et al.* Contribution of three ionic types of polysaccharides to the thermal gelling properties of chicken breast myosin [J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(12): 2655-2662.

[13] Verbeke D, Neirinck N, Van-Dermeeren P, *et al.* Influence of κ-carrageenan on the thermal gelation of salt-soluble meat proteins [J]. Meat Sci, 2005, 70(1): 161-166.

[14] Han M, Wang P, Xu X, *et al.* Low-field NMR study of heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with microstructural characteristics [J]. Food Res Int, 2014, 62:1175-1182.

[15] Chen X, Xu X, Liu D, *et al.* Rheological behavior, conformational changes and interactions of water-soluble myofibrillar protein during heating [J]. Food Hydrocoll, 2018, 77: 524-533.

[16] Youling LX. Hydroxyl radical and ferryl-generating systems promote gel network formation of myofibrillar protein [J]. J Food Sci, 2010, 2(75): 215-221.

[17] Bertram HC, Andersen HJ, Karlsson AH. Comparative study of low-field

- NMR relaxation measurements and two traditional methods in the determination of water holding capacity of pork [J]. *Meat Sci*, 2001, 57(2): 125–132.
- [18] 杨慧娟, 于小波, 胡忠良, 等. 低场核磁共振技术研究超高压处理对乳化和肠质构和水分分布的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(4): 96–100, 104.
- Yang HJ, Yu XJ, Hu ZL, *et al.* Texture properties and water distribution analysis in emulsion type sausages by different high pressure processing supported by low-field NMR technology [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(4): 96–100, 104.
- [19] Kasemwong K, Ruktanonchai UR, Srinuanchai W, *et al.* Effect of high-pressure microfluidization on the structure of cassava starch granule [J]. *Starch Starke*, 2011, 63(3): 160–170.
- [20] Wang B, Li D, Wang LJ, *et al.* Effect of high-pressure homogenization on the structure and thermal properties of maize starch [J]. *J Food Eng*, 2008, 87(3): 436–444.
- [21] 陈玲, 胡飞, 李晓玺. 马铃薯淀粉的球磨破碎方式和微细化效果研究 [J]. *中国粉体技术*, 2000, (S1): 57–60.
- Chen L, Hu F, Li XX. Study on comminution process and micronization efficiency of potato starch by ball milling [J]. *China Powder Sci Technol*, 2000, (S1): 57–60.
- [22] 涂宗财, 余莉, 尹月斌, 等. 动态高压微射流对马铃薯直链淀粉性质和结构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(3): 46–51.
- Tu ZC, Yu L, Yin YB, *et al.* Effect of dynamic high pressure microfluidization on the properties and structure of potato amylase [J]. *Food Ferment Ind*, 2014, 40(3): 46–51.
- [23] Che L, Li D, Wang L, *et al.* Effect of high-pressure homogenization on the structure of cassava starch [Z]. 2007.
- (责任编辑: 韩晓红)

作者简介

曾宪明, 主要研究方向为肉品加工及质量安全控制。
E-mail: zxm@njau.edu.cn

于小波, 高级实验师, 主要研究方向为肉品质量安全控制。
E-mail: yuxiaobo@njau.edu.cn

“生物毒素研究”专题征稿函

随着社会经济的发展, 人民越来越关注食品的安全问题。在日常生活中, 食物中毒事件时有发生。在食品安全事件中, 生物毒素中毒事件占一定比例。生物毒素是生物体内所产生的有毒代谢产物, 包括微生物毒素、植物毒素、动物毒素和海洋毒素。生物毒素不仅对消费者的健康造成危害, 还会对养殖业、种植业、畜牧水产等行业造成巨大的经济损失。因此, 关注食品中生物毒素的安全, 是一项具有重大经济意义和科学意义的事情。

鉴于此, 本刊特别策划“生物毒素研究”专题。专题将围绕生物毒素的产生与调控机制、生物毒素的快速检测与筛查技术、生物毒素的脱毒方法与机制、生物毒素的毒理研究与风险评估、生物毒素的标准物质研发、生物毒素型药物的开发研究等问题展开讨论, 计划在 2021 年 1~2 月出版。

鉴于您在该领域的成就, 学报主编国家食品安全风险评估中心吴永宁研究员及编辑部全体成员特别邀请有关食品领域研究人员为本专题撰写稿件, 以期进一步提升该专题的学术质量和影响力。综述及研究论文均可, 请在 2020 年 12 月 30 日前通过网站或 E-mail 投稿。我们将快速处理并经审稿合格后优先发表。

同时烦请您帮忙在同事之间转发一下, 希望您能够推荐该领域的相关专家并提供电话和 E-mail。再次感谢您的关怀与支持!

投稿方式(注明专题生物毒素研究):

网站: www.chinafoodj.com(备注投稿请登录食品安全质量检测学报主页-作者登录-注册投稿-投稿选择“专题: 生物毒素研究”)

邮箱投稿: E-mail: jfoodsq@126.com(备注: 生物毒素研究专题投稿)

《食品安全质量检测学报》编辑部