

# 超高压对鸡肉肌原纤维蛋白-MgCl<sub>2</sub>凝胶特性的影响

潘 杰, 周 颖, 王 昱, 代显卓, 李沛军, 陈从贵\*  
(合肥工业大学食品科学与工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:** 在低盐条件下 (2.3% NaCl), 以含有质量分数0.3% MgCl<sub>2</sub>的鸡肉肌原纤维蛋白 (myofibrillar protein, MP) 混合体系 (MP-MgCl<sub>2</sub>) 为研究对象, 室温下 (20~25 °C) 考察超高压处理 (high pressure processing, HPP) (100~400 MPa, 10 min) 对混合体系凝胶硬度和保水性 (water holding capacity, WHC) 的影响, 并通过对该混合体系流变特性、横向弛豫时间及凝胶微结构分析, 探讨其凝胶特性的变化机制。结果表明: 100~400 MPa的HPP可显著提高凝胶的硬度和WHC ( $P < 0.05$ ), 且300 MPa是改善其凝胶硬度的合适压力; HPP通过增加MP-MgCl<sub>2</sub>混合体系的储能模量 ( $G'$ ), 缩短自旋-自旋弛豫时间 $T_{22}$ 和 $T_{23}$ , 促进凝胶形成交联、密实的多孔网络结构, 进而改善混合体系凝胶的特性。

**关键词:** 超高压; 肌原纤维蛋白; 氯化镁; 凝胶特性

Effect of High Pressure Processing on Gel Properties of Chicken Breast Myofibrillar Protein Containing Magnesium Chloride

PAN Jie, ZHOU Ying, WANG Yu, DAI Xianzhuo, LI Peijun, CHEN Conggui\*  
(School of Food Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** This research aimed to investigate the effect of high pressure processing (HPP) (at 100–400 MPa and 20–25 °C for 10 min) on the hardness and water-holding capacity (WHC) of chicken breast myofibrillar protein (MP) gel with 0.3% (m/m) magnesium chloride under low salt (2.3% NaCl) condition. The underlying mechanism was explored by rheological analysis, transverse relaxation time determination and microstructure observation. The results showed that the gel hardness and WHC were significantly ( $P < 0.05$ ) increased with elevated pressure levels, and the appropriate pressure was 300 MPa. HPP could promote the formation of compact, porous and cross-linking gel network structures and consequently improve gel properties of chicken breast myofibrillar protein by increasing the storage modulus ( $G'$ ) and shortening the water relaxation time ( $T_{22}$  and  $T_{23}$ ).

**Keywords:** high pressure processing; myofibrillar protein; magnesium chloride; gel properties

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201811014

中图分类号: TS251.51

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2018) 11-0089-06

引文格式:

潘杰, 周颖, 王昱, 等. 超高压对鸡肉肌原纤维蛋白-MgCl<sub>2</sub>凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 89-94.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201811014. <http://www.spkx.net.cn>

PAN Jie, ZHOU Ying, WANG Yu, et al. Effect of high pressure processing on gel properties of chicken breast myofibrillar protein containing magnesium chloride[J]. Food Science, 2018, 39(11): 89-94. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201811014. <http://www.spkx.net.cn>

肌原纤维蛋白 (myofibrillar protein, MP) 是肌肉中重要的结构蛋白质群, 包括肌球蛋白、肌动蛋白、肌球蛋白、肌钙蛋白等; 是形成肉凝胶的主要成分, 与肉制品的质构、保水、流变等特性密切相关<sup>[1-2]</sup>。众所周

知, 高盐 (钠盐) 饮食危害人体健康; 有数据显示, 肉和肉制品贡献了食物中16%~25%的钠盐摄入量<sup>[3]</sup>。因此实现肉制品的低盐化, 对推动健康饮食具有重要的作用。

收稿日期: 2017-02-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31271893); 安徽省家禽产业技术体系项目 (AHCYJSTX-06)

第一作者简介: 潘杰 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为肉制品加工。E-mail: panjie\_0708@163.com

\*通信作者简介: 陈从贵 (1963—), 男, 教授, 硕士, 研究方向为肉制品加工及副产物综合利用。E-mail: ccg1629@163.com

在低盐肉制品开发研究中, 钠盐替代盐、超高压处理 (high pressure processing, HPP) 及两者的结合已受到关注<sup>[4-5]</sup>。MgCl<sub>2</sub>作为典型的二价盐, 当其浓度低于5 mmol/L时, 可提高鸡胸肉MP的热凝胶强度; 而高于10 mmol/L时, 则会减弱凝胶强度<sup>[6]</sup>。MgCl<sub>2</sub>部分替代钠盐, 能增加猪肉MP的溶解度, 提高MP乳化凝胶的黏弹性, 并降低汁液流失<sup>[7]</sup>。HPP作为一种非热加工技术, 可在保留肉制品营养成分的前提下, 有效杀灭微生物, 延长货架期<sup>[8]</sup>; 可提高肉蛋白凝胶的功能特性, 改善肉制品的品质<sup>[9]</sup>; HPP后的肌动球蛋白, 在高、低离子强度的溶液中都有较强的热凝胶能力<sup>[10]</sup>; 300 MPa的HPP可使低盐 (质量分数0.3% NaCl) 鱼糜凝胶的机械性能和感官性能达到与高盐 (3% NaCl) 凝胶相当的水平<sup>[11]</sup>。此外, 食盐与HPP之间还具有一定的互补效应<sup>[12]</sup>。可见, HPP在肉制品减盐加工中具有应用潜力。但HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>混合体系凝胶特性的影响如何, 尚鲜见文献报道。

本研究考察了MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶硬度和保水性 (water holding capacity, WHC) 对HPP的响应规律, 并通过混合溶胶流变特性分析及凝胶横向弛豫时间与微结构分析, 探讨HPP混合体系凝胶特性的变化机制, 以期低盐肉制品的开发提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

鸡胸肉购于合肥家乐福, 冰箱中冷藏 (约4℃)。

无水氯化镁 (MgCl<sub>2</sub>纯度≥99.9%) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 其他试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

HPP600 MPa/0.6 L超高压处理装置 包头科发高压科技有限责任公司; BC/BD-241GS冷藏柜 青岛Haier集团公司; Kertone labmini4 UV超纯水机 湖南科尔顿水务有限公司; DS-1组织捣碎机 上海越磁电子科技有限公司; RCT Basic磁力搅拌器 德国IKA公司; FA25高剪切乳化机 上海弗鲁克流体机械制造有限公司; CT-14RD冷冻离心机 上海天美生化仪器设备有限公司; GL-21M高速离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; TA.XT Plus质构仪 英国Stable Micro Systems公司; HR-3 Discovery流变仪 美国TA公司; NMI20-015V-I核磁共振成像分析仪 苏州纽迈分析仪器股份有限公司; JSM 6490LV扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM)、JFC-1600喷金仪 日本JEOL公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 MP的提取

剔除新鲜鸡胸肉中的可见脂肪和结缔组织, 切碎、

称质量。参考Park<sup>[13]</sup>和Westphalen<sup>[14]</sup>等方法提取MP, 提取过程在0~4℃低温环境下进行; 经离心所得的最终MP沉淀, 用0.4 mol/L NaCl磷酸盐缓冲溶液 (pH 7.0) 将MP质量浓度调整至40 mg/mL。

#### 1.3.2 MP-MgCl<sub>2</sub>溶胶制备

取上述MP溶液900 g, 向其中添加质量分数0.3%的MgCl<sub>2</sub>; 将所得混合溶液在冰浴中缓慢搅拌20 min, 使MP与MgCl<sub>2</sub>充分混匀, 即得MP-MgCl<sub>2</sub>混合溶胶。

#### 1.3.3 超高压处理

参照Ma Fei等<sup>[15]</sup>的方法。将上述MP-MgCl<sub>2</sub>混合溶胶沿袋壁注入聚乙烯袋内, 真空包装; 在室温下 (20~25℃), 水作为传压介质, 压力水平设为100、200、300、400 MPa, 保压时间10 min。样品加压前后均保存在冰浴中, 受压后的样品在5 h内完成随后的热凝胶化处理及流变学分析。

#### 1.3.4 MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶制备

将受压MP-MgCl<sub>2</sub>样品倒入规格为Φ 27 mm×35 mm (供凝胶硬度测定) 和Φ 23 mm×37 mm (供凝胶WHC测定) 的10 mL小烧杯中, 放入20℃水浴锅中平衡10 min; 20℃升温至80℃后 (约30 min), 于80℃保温30 min; 然后取出, 冰水浴冷却10 min, 4℃静置12 h, 供检测。非受压样品作为对照。

#### 1.3.5 凝胶硬度测定

参照Zhou Yanzi等<sup>[16]</sup>的方法。利用TA.XT Plus质构仪GMIA程序测定。参数为: P/0.5探头, 探头下降速率1.50 mm/s, 测试速率1.00 mm/s, 测试距离4 mm, 探头回升速率1.00 mm/s, 感应力5 g。检测的平行实验7次。

#### 1.3.6 WHC测定

参照Zhou Yanzi等<sup>[16]</sup>的离心方法。在4℃、1 000×g条件下离心10 min。WHC为离心后样品质量占离心前样品质量的百分比。平行实验5次。

#### 1.3.7 溶胶流变特性测定

参照Verbeken等<sup>[17]</sup>的方法。选用流变仪的振荡模式, 具体参数为: 平板直径40 mm, 狭缝550 μm, 应变2%, 频率0.1 Hz。测定分为升温 and 降温两个过程, 升温速率2℃/min, 温度变化范围20~80℃; 降温速率4℃/min, 温度变化范围80~20℃。

#### 1.3.8 横向弛豫时间

参照Han Minkyi等<sup>[18]</sup>的低场核磁共振 (low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 方法。将2~4 g凝胶样品放入直径25 mm核磁管中, 采用Carr-Purcell-Mebiboom-Gill (CPMG) 序列进行测量。测量参数: 共振频率21 MHz, 回波时间 $T_E$  0.6 ms, 等待时间 $T_w$  6 000 ms, 重复扫描32次, 得到指数衰减图形, 使用SIRT算法反演拟合得到 $T_2$ 谱图。平行实验3次, 每个平行试样重复检测2次。

### 1.3.9 SEM观察

参照Ma Fei等<sup>[15]</sup>的方法。将混合体系凝胶切片,用体积分数4%甲醛和2.5%戊二醛混合溶液(1:1, V/V)固定,0.1 mol/L磷酸盐缓冲液(pH 7.2)漂洗,不同浓度梯度乙醇脱水、丙酮脱水,冷风除去易挥发的有机溶剂,真空冷冻干燥15 h,喷金,观察。

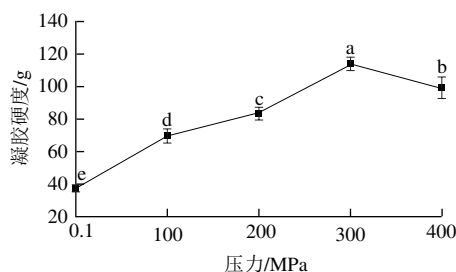
### 1.4 数据分析

实验数据利用Excel 2007软件计算,结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示,用Statistix 8软件和 $t$ -检验进行显著性分析,差异显著性水平取 $P < 0.05$ ;采用Origin 8.5绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>混合体系凝胶品质特性的影响

#### 2.1.1 HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶硬度的影响



不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

图1 HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶硬度的影响

Fig. 1 Effect of HPP on gel hardness of MP-MgCl<sub>2</sub> gels

如图1所示,HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶硬度的影响呈先升后降的趋势。与未受压组(0.1 MPa)相比,压力从100 MPa升至300 MPa,受压凝胶的硬度依次显著提高( $P < 0.05$ );而压力增至400 MPa时,凝胶硬度反而显著下降( $P < 0.05$ )。提高MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶硬度的合适压力约为300 MPa。

HPP影响蛋白凝胶硬度的原因有很多。Sikes等<sup>[19]</sup>研究发现,HPP可以促进蛋白质的伸展,使受压过程的蛋白质暴露出更多的可与盐离子作用的基团,增加含盐聚合物的数量,进而改善低盐混合体系凝胶的硬度。Zheng Haibo等<sup>[20]</sup>观察到,与单纯加热所形成的粗糙凝胶网络结构相比,HPP能够促进鸡肉糜加热前的凝胶化过程,使得加热后形成的凝胶呈现细致光滑的结构,且凝胶硬度显著提高。还有研究指出,在温和的压力水平下(100~400 MPa),HPP可增强鱼糜蛋白质之间的交联作用,利于凝胶三维网络结构的形成,进而提高凝胶的弹性和强度<sup>[21]</sup>;但较高的压力会加剧蛋白质的变性速率,减小蛋白质分子间的相互作用,导致MP交联度降低而不利于凝胶网络结构的形成,从而形成弱凝胶。这些结果都可能影响受压MP-MgCl<sub>2</sub>的凝胶硬度。

#### 2.1.2 HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶WHC的影响

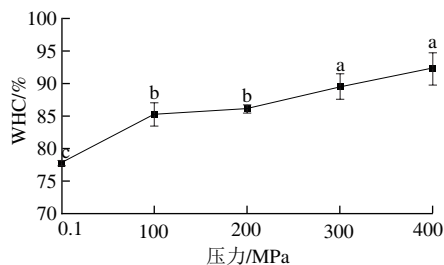


图2 HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶WHC的影响

Fig. 2 Effect of HPP on WHC of MP-MgCl<sub>2</sub> gels

从图2可以看出,HPP(100~400 MPa)可显著提高MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶的WHC( $P < 0.05$ ),而100 MPa与200 MPa之间、300 MPa与400 MPa之间,MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶的WHC没有显著差异( $P > 0.05$ )。

Tabilo等<sup>[22]</sup>指出,适当的压力可以促进蛋白质的解聚,提高蛋白质的溶解性,增强自由水与蛋白质之间的水化作用,进而提高蛋白质凝胶的保水性。HPP通过静电相互作用破坏了二价阳离子与蛋白质分子之间的作用力,并在卸压期间降低了蛋白复合体中盐桥重新形成的概率,从而影响了凝胶的保水性<sup>[23]</sup>。曹莹莹等<sup>[24]</sup>研究发现,HPP能改变蛋白质的二级结构,当蛋白质分子折叠或者无规卷曲时,分子有更多的空隙,能够容纳更多的水分。同时,蛋白凝胶的持水性还与凝胶的微观结构、水分分布及流动性等密切相关。Ma Xingsheng等<sup>[21]</sup>报道,适当的压力水平(100~400 MPa)可以促进鱼糜蛋白的伸展和交联,有利于高保水性网状凝胶结构(致密均匀、多层次化)的形成。本研究中,HPP也可能通过改变MP混合体系凝胶中水分的流动性,进而改善凝胶的保水性。

#### 2.2 HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>溶胶流变特性的影响

储能模量( $G'$ )代表流体中的弹性部分,反映凝胶形成过程中储存的能量及凝胶强度<sup>[25]</sup>。如图3A所示,未受压的MP-MgCl<sub>2</sub>体系在45~60℃温度范围内出现一个明显的热变性峰。45~50℃为“凝胶形成”阶段, $G'$ 线性增大,与蛋白凝胶网络结构的初步形成有关;而50~58℃为“凝胶减弱”阶段, $G'$ 急剧降低,这是由于加热诱导部分氢键断裂,进而促使蛋白凝胶网络结构的形成<sup>[26-27]</sup>。温度大于60℃时为“凝胶增强”阶段, $G'$ 持续增加,表明更多的蛋白质通过交联形成良好的三维网络结构<sup>[27]</sup>。与未加压组相比,HPP后的样品 $G'$ 在未加热(20℃)时都有所增加,表明HPP可促进MP凝胶化,并提高了混合体系的强度;且在20~45℃范围内 $G'$ 呈现出下降趋势,类似的结果也出现在Cando等<sup>[11]</sup>的报道中。在加热终点(80℃),随着压力的增加(100~300 MPa), $G'$ 也逐渐增加,但压力为400 MPa



时,  $G'$ 降低, 这与图1中MP-MgCl<sub>2</sub>混合体系凝胶硬度的变化结果一致。100~200 MPa并未改变MP-MgCl<sub>2</sub>的变性温度峰; 而300~400 MPa时, 较高的压力促使蛋白质充分展开且伴随着聚集现象, 从而导致MP-MgCl<sub>2</sub>在随后加热过程中 $G'$ 曲线特征峰的消失。400 MPa导致 $G'$ 的明显下降, 可能是因为HPP抑制了蛋白质在随后加热过程中的变性和聚集, 且不利于密实凝胶网络结构的形成, 最终引起凝胶强度的下降。由图3B可知, 受压MP-MgCl<sub>2</sub>体系 $G'$ 的变化趋势与未受压组相同, 均随温度的降低而增加, 表明在冷却过程中凝胶弹性增加, 形成稳定的蛋白凝胶结构。

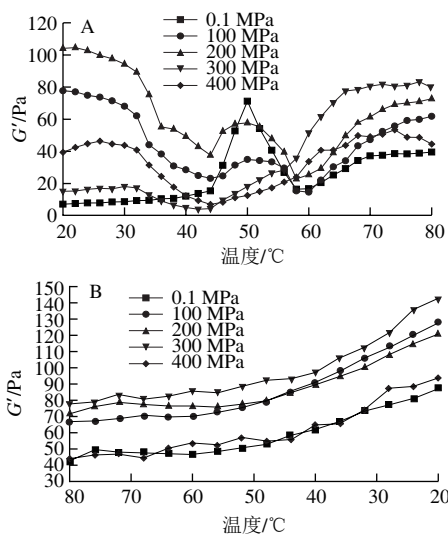


图3 HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>混合体系升温(A)和降温(B)过程中储能模量( $G'$ )的影响

Fig. 3 Effect of HPP on storage modulus ( $G'$ ) of MP-MgCl<sub>2</sub> gels during heating (A) and cooling (B)

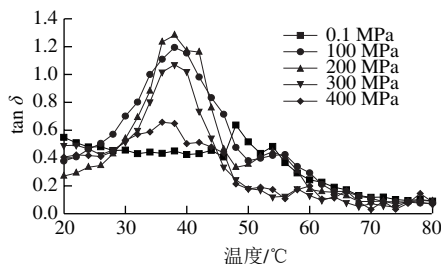


图4 HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>混合体系升温过程中 $\tan \delta$ 的影响

Fig. 4 Effect of HPP on  $\tan \delta$  of MP-MgCl<sub>2</sub> gels during heating

如图4所示, HPP显著改变了升温过程中MP-MgCl<sub>2</sub>体系的 $\tan \delta$ 。在加热初期, 与未受压组(0.1 MPa)相比, 各水平HPP均能不同程度地降低样品的黏性特征; 且受压组的曲线特征基本一致。在38~48 °C范围内 $\tan \delta$ 值急剧下降, 表明蛋白体系的弹性增强, 这也说明, 蛋白质的构象发生了变化以及蛋白之间产生了相互作用<sup>[28]</sup>。较小的 $\tan \delta$ 值表明MP-MgCl<sub>2</sub>形成了具有弹性的凝胶结构。

### 2.3 横向弛豫时间的结果与分析

LF-NMR技术是一种快速、无损、非侵入式的检测手段, 多用于测定样品中水质子的移动性和水分分布状态<sup>[29]</sup>。而自旋-自旋弛豫时间( $T_2$ )常用来预测肉及肉制品的保水性;  $T_2$ 值越小表明这部分水分的流动性越差, 产品的保水性越好。

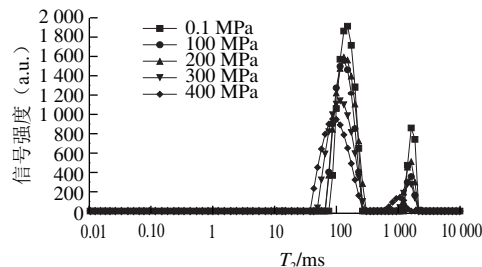


图5 HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶自旋-自旋弛豫时间( $T_2$ )分布的影响

Fig. 5 Effect of HPP on  $T_2$  relaxation time distribution of MP-MgCl<sub>2</sub> gels

表1 HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶自旋-自旋弛豫时间( $T_{22}$ 和 $T_{23}$ )的影响

Table 1 Effect of HPP on spin-spin relaxation time ( $T_{22}$  and  $T_{23}$ ) of MP-MgCl<sub>2</sub> gels

压力/MPa	$T_{22}$ /ms	$T_{23}$ /ms
0.1	145.39 ± 10.22 <sup>a</sup>	1 629.75 ± 0.00 <sup>a</sup>
100	123.59 ± 9.43 <sup>bc</sup>	1 629.75 ± 0.00 <sup>a</sup>
200	126.46 ± 8.89 <sup>b</sup>	1 629.75 ± 0.00 <sup>a</sup>
300	112.48 ± 6.11 <sup>c</sup>	1 360.54 ± 159.92 <sup>b</sup>
400	97.83 ± 5.32 <sup>d</sup>	1 244.87 ± 189.07 <sup>b</sup>

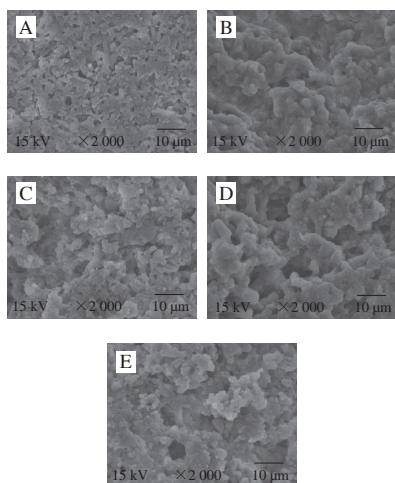
注: 同列肩标小写字母不同表示有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

由图5可见, MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶的 $T_2$ 在0~10 000 ms的弛豫时间分布上出现3个峰, 分别对应于结合水 $T_{21}$ (0~20 ms)、不易流动水 $T_{22}$ (30~400 ms)和自由水 $T_{23}$ (400~3 000 ms)。从不同状态的水对应的峰面积来看, 凝胶中不易流动水和自由水相比于结合水含量较高, 因此可以选择弛豫时间 $T_{22}$ 、 $T_{23}$ 来分析MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶中水分的流动特性。随着压力(100~400 MPa)的升高,  $T_{22}$ 和 $T_{23}$ 对应的峰值位置均向低弛豫时间偏移。 $T_{22}$ 和 $T_{23}$ 的数据分析(表1)发现, 压力升高,  $T_{22}$ 显著减小( $P < 0.05$ ); 虽然在0.1~200 MPa范围内,  $T_{23}$ 无显著变化( $P > 0.05$ ), 但压力为300 MPa时,  $T_{23}$ 也显著降低( $P < 0.05$ )。可见, HPP可缩短MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶的横向弛豫时间。

Grossi等<sup>[30]</sup>发现, 较低的压力水平( $\leq 400$  MPa)利于提高MP的水合作用, 从而影响蛋白质与水之间的相互作用。Zhang Ziye等<sup>[31]</sup>指出, HPP改变了 $T_2$ 弛豫时间, 且随着压力的上升(0.1~500 MPa), 更多的自由水附着在蛋白质周围或被束缚在凝胶结构中, 转变为结合水或不易流动水。Chen Xing等<sup>[32]</sup>研究发现, HPP可显著降低 $T_{22}$ , 减弱了凝胶内部水分的移动性, 从而提高了肌球蛋白体系的WHC。HPP同样也可以显著缩短MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶

的横向弛豫时间 $T_{22}$ 和 $T_{23}$ ,表明凝胶体系中水分子的流动性减弱,从而提高了凝胶WHC(图2)。

## 2.4 HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶微观结构的影响



A. MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶(0.1 MPa); B. MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶(100 MPa); C. MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶(200 MPa); D. MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶(300 MPa); E. MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶(400 MPa)。

图6 HPP对MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶微观结构影响的SEM图

Fig. 6 SEM images showing the effect of HPP on microstructure of MP-MgCl<sub>2</sub> gels

如图6A所示,未受压(0.1 MPa)的MP-MgCl<sub>2</sub>凝胶微观结构,呈现内部孔隙小而多、质地相对均匀的特点;而HPP(100~400 MPa)可以促进蛋白质间的聚集,形成局部更为致密、相互交联的多孔结构(图6B~E),尤其以300 MPa处理组最为明显(图6D)。

蛋白凝胶微观结构的变化与其质构和持水性密切相关。凝胶呈多孔状的微观结构有利于提高其WHC,这一现象也与自旋弛豫时间 $T_2$ 的降低有关<sup>[18]</sup>。而蛋白质变性和聚集的相对速率决定着蛋白质凝胶微结构的变化<sup>[33]</sup>。从上述流变特性的结果中发现,HPP(100~300 MPa)可以提高MP-MgCl<sub>2</sub>的热凝胶能力,利于MP-MgCl<sub>2</sub>混合溶胶在热凝胶化过程中的变性和聚集,从而形成致密、相互交联的多孔微结构,最终导致体系凝胶硬度的增强和WHC的提高(图1~2)。

## 3 结论

HPP(100~400 MPa)能够通过改变MP-MgCl<sub>2</sub>混合体系的储能模量( $G'$ ),缩短凝胶内部水分的自旋-自旋弛豫时间 $T_{22}$ 和 $T_{23}$ ,促进交联、密实凝胶多孔网络结构的形成,进而显著提高MP-MgCl<sub>2</sub>混合体系的凝胶硬度和WHC( $P<0.05$ ),且300 MPa是改善其凝胶硬度的合适压力。研究结果可为肉制品的低盐化加工提供理论支持。

## 参考文献:

- [1] 夏秀芳,孔保华,张宏伟.肌原纤维蛋白凝胶形成机理及影响因素的研究进展[J].食品科学,2009,30(9):264-268. DOI:10.7506/spkx1002-6630-200909062.
- [2] COLMENERO F J. Muscle protein gelation by combined use of high pressure/temperature[J]. Trends in Food Science & Technology, 2002, 13(1): 22-30. DOI:10.1016/S0924-2244(02)00024-9.
- [3] World Health Organization. Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases: report of a Joint WHO/FAO Expert Consultation[R]. Geneva: WHO, 2003.
- [4] 谢婷婷,姚静,李月双,等. MgCl<sub>2</sub>对低钠盐κ-卡拉胶-肌球蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 35-40. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201701006.
- [5] TAMM A, BOLUMAR T, BAJOVIC B, et al. Salt (NaCl) reduction in cooked ham by a combined approach of high pressure treatment and the salt replacer KCl[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 36: 294-302. DOI:10.1016/j.ifset.2016.07.010.
- [6] XIONG Youling L., BREKKE C J. Gelation properties of chicken myofibrils treated with calcium and magnesium chlorides[J]. Journal of Muscle Foods, 1991, 2(1): 21-36. DOI:10.1111/j.1745-4573.1991.tb00438.x.
- [7] 魏朝贵,吴菊清,邵俊花,等. KCl和MgCl<sub>2</sub>部分替代NaCl对猪肉肌原纤维蛋白乳化凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 89-95. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201405018.
- [8] FONBERGBROCZEK M, WINDYGA B, SZCZAWIŃSKI J, et al. High pressure processing for food safety[J]. Acta Biochimica Polonica, 2005, 52(3): 721-724.
- [9] SUN X D, HOLLEY R A. Factors influencing gel formation by myofibrillar proteins in muscle foods[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2011, 10(1): 33-51. DOI:10.1111/j.1541-4337.2010.00137.x.
- [10] IKEUCHI Y, TANJI H, KIM K, et al. Mechanism of heat-induced gelation of pressurized actomyosin: pressure-induced changes in actin and myosin in actomyosin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1992, 40(10): 1756-1761. DOI:10.1021/jf00022a006.
- [11] CANDO D, HERRANZ B, BORDERÍAS A J, et al. Effect of high pressure on reduced sodium chloride surimi gels[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 176-187. DOI:10.1016/j.foodhyd.2015.05.016.
- [12] VILLAMONTE G, SIMONIN H, DURANTON F, et al. Functionality of pork meat proteins: impact of sodium chloride and phosphates under high-pressure processing[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 18(2): 15-23. DOI:10.1016/j.ifset.2012.12.001.
- [13] PARK D, XIONG Y L. Oxidative modification of amino acids in porcine myofibrillar protein isolates exposed to three oxidizing systems[J]. Food Chemistry, 2007, 103(2): 607-616. DOI:10.1016/j.foodchem.2006.09.004.
- [14] WESTPHALEN A, BRIGGS J, LONERGAN S. Influence of pH on rheological properties of porcine myofibrillar protein during heat induced gelation[J]. Meat Science, 2005, 70(2): 293-299. DOI:10.1016/j.meatsci.2005.01.015.
- [15] MA Fei, CHEN Conggui, SUN Gaojun, et al. Effects of high pressure and CaCl<sub>2</sub> on properties of salt-soluble meat protein gels containing locust bean gum[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 14(2): 31-37. DOI:10.1016/j.ifset.2011.12.001.
- [16] ZHOU Yanzi, CHEN Conggui, CHEN Xing, et al. Contribution of three ionic types of polysaccharides to the thermal gelling properties of chicken breast myosin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(12): 2655-2662. DOI:10.1021/jf405381z.

- [17] VERBEKEN D, NEIRINCK N, VAN DER MEEREN P, et al. Influence of  $\kappa$ -carrageenan on the thermal gelation of salt-soluble meat proteins[J]. Meat Science, 2005, 70(1): 161-166. DOI:10.1016/j.meatsci.2004.12.007.
- [18] HAN Minyi, ZHANG Yingjun, FEI Ying, et al. Effect of microbial transglutaminase on NMR relaxometry and microstructure of pork myofibrillar protein gel[J]. European Food Research and Technology, 2009, 228(4): 665-670. DOI:10.1007/s00217-008-0976-x.
- [19] SIKES A L, TOBIN A B, TUME R K. Use of high pressure to reduce cook loss and improve texture of low-salt beef sausage batters[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2009, 10(4): 405-412. DOI:10.1016/j.ifset.2009.02.007.
- [20] ZHENG Haibo, XIONG Guoyuan, HAN Minyi, et al. High pressure/thermal combinations on texture and water holding capacity of chicken batters[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 30: 8-14. DOI:10.1016/j.ifset.2015.06.002.
- [21] MA Xingsheng, YI Shumin, YU Yongming, et al. Changes in gel properties and water properties of *Nemipterus virgatus* surimi gel induced by high-pressure processing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 61(2): 377-384. DOI:10.1016/j.lwt.2014.12.041.
- [22] TABILO M G, BARBOSA C G V. Pressurized and heat-treated surimi gels as affected by potato starch and egg white: microstructure and water-holding capacity[J]. LWT - Food Science and Technology, 2005, 38(1): 47-57. DOI:10.1016/j.lwt.2004.04.013.
- [23] MA Fei, CHEN Conggui, ZHENG Lei, et al. Effect of high pressure processing on the gel properties of salt-soluble meat protein containing  $\text{CaCl}_2$  and  $\kappa$ -carrageenan[J]. Meat Science, 2013, 95(1): 22-26. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.04.025.
- [24] 曹莹莹, 张亮, 王鹏, 等. 超高压结合热处理对肌球蛋白凝胶特性及蛋白二级结构的影响[J]. 肉类研究, 2013, 27(1): 1-7.
- [25] CAO Yingying, XIA Tianlan, ZHOU Guanghong, et al. The mechanism of high pressure-induced gels of rabbit myosin[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 16(39): 41-46. DOI:10.1016/j.ifset.2012.04.005.
- [26] LIU R, ZHAO S M, XIONG S B, et al. Studies on fish and pork paste gelation by dynamic rheology and circular dichroism[J]. Journal of Food Science, 2007, 72(7): E399-E403. DOI:10.1111/j.1750-3841.2007.00470.x.
- [27] QIU Chunjiang, XIA Wenshui, JIANG Qixing, et al. Effect of high hydrostatic pressure (HHP) on myofibril-bound serine proteinases and myofibrillar protein in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*)[J]. Food Research International, 2013, 52(1): 199-205. DOI:10.1016/j.foodres.2013.03.014.
- [28] SANO T, NOGUCHI S F, TSUCHIYA T, et al. Dynamic viscoelastic behavior of natural actomyosin and myosin during thermal gelation[J]. Journal of Food Science, 1988, 53(3): 924-928. DOI:10.1111/j.1365-2621.1988.tb08987.x.
- [29] BERTRAM H C, ERSEN H J. Applications of NMR in meat science[J]. Annual Reports on NMR Spectroscopy, 2004, 53: 157-202. DOI:10.1016/S0066-4103(04)53003-X.
- [30] GROSSI A, OLSEN K, BOLUMAR T, et al. The effect of high pressure on the functional properties of pork myofibrillar proteins[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 1005-1015. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.10.062.
- [31] ZHANG Ziyue, YANG Yuling, TANG Xiaozhi, et al. Chemical forces and water holding capacity study of heat-induced myofibrillar protein gel as affected by high pressure[J]. Food Chemistry, 2015, 188: 111-118. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.04.129.
- [32] CHEN Xing, CHEN Conggui, ZHOU Yanzi, et al. Effects of high pressure processing on the thermal gelling properties of chicken breast myosin containing  $\kappa$ -carrageenan[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 262-272. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.03.018.
- [33] LIU R, ZHAO S M, XIONG S B, et al. Role of secondary structures in the gelation of porcine myosin at different pH values[J]. Meat Science, 2008, 80(3): 632-639. DOI:10.1016/j.meatsci.2008.02.014.