

# 低场核磁共振研究高压处理对乳化肠特性的影响

杨慧娟, 韩敏义, 邹玉峰, 徐幸莲, 周光宏\*

(南京农业大学 肉品加工与质量控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 以低温乳化肠为材料, 对 0.1 ~ 400 MPa 压力处理组肉糜进行扫描电镜观察和低场核磁共振检测, 评估加热后的感官特性, 并进行相关性分析, 从显微结构和水分子弛豫特性变化角度揭示高压处理对乳化肠感官特性改善的原因。结果表明: 与对照组相比, 压力从 100 MPa 增大到 200 MPa, 感官特性得分增加, 而 200 MPa 到 400 MPa 得分减小 ( $P < 0.05$ ); 扫描电镜结果显示各组肉糜显微结构存在明显差异;  $T_2$  弛豫结果显示, 实验组  $T_{21}$  峰面积大于对照组而  $T_{22}$  峰面积小于对照组 ( $P < 0.05$ ),  $T_{21}$  弛豫时间在压力从 100 MPa 增大到 200 MPa 过程中升高, 而在 200 MPa 到 400 MPa 降低 ( $P < 0.05$ ); 相关性分析表明, 感官特性各指标与  $T_{21}$  弛豫时间及其峰面积正相关, 与  $T_{22}$  峰面积负相关 ( $P < 0.05$ )。因此, 高压处理使自由水部分转化为不易流动水, 并影响不易流动水与肉糜蛋白的结合程度, 而转化比例和结合程度的强弱又会显著影响肉糜显微结构及其加热后的感官特性。

**关键词:** 高压处理; 低场核磁; 横向弛豫; 显微结构

## A Low-Field Nuclear Magnetic Resonance (LF-NMR) Study of Effect of High Pressure Processing on the Characteristics of Emulsion Type Sausages

YANG Hui-juan, HAN Min-yi, ZOU Yu-feng, XU Xing-lian, ZHOU Guang-hong\*

(Key Laboratory of Meat Processing and Quality Control, Ministry of Education, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** The present study investigated the effect of high pressure processing (HPP) (0.1, 100, 200, 300 and 400 MPa, 10 °C, 2 min) on water distribution and microstructure of meat batters and sensory characteristics of sausages using sensory evaluation, low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and scanning electron microscopy (SEM). The results revealed that the scores of sensory properties were significantly increased with increasing pressure from 100 to 200 MPa, but decreased as the pressure further rose to 400 MPa ( $P < 0.05$ ). In addition, HPP significantly changed the microstructure of meat batters. HPP resulted in a larger peak area of fast-relaxation time ( $T_{21}$ ), but a smaller peak area slow-relaxation time ( $T_{22}$ ) with increasing pressure level in meat batters when compared with the control samples. Moreover, the  $T_{21}$  tended to first increase and then decrease with increasing pressure from 100 to 200 and further to 400 MPa ( $P < 0.05$ ). Furthermore, a significant positive correlation was observed between sensory evaluation scores and  $T_2$ , as well as and  $T_2$  peak area ( $P < 0.05$ ). In conclusion, the higher level of immobilized water in the myofibrillar matrix caused by HPP can contribute to modify the microstructure of meat batters and improve sensory characteristics of cooked sausages.

**Key words:** high pressure processing; low-field nuclear magnetic resonance;  $T_2$  relaxation time; microstructure

中图分类号: TS201.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2014) 17-0053-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201417011

乳化肠由于营养美味、食用方便等特点深受消费者喜爱, 但是加工过程中容易因操作不当、生产条件控制不严等导致产品出现保油保水性差、质构不理想等问题, 直接表现为感官特性不佳<sup>[1-2]</sup>。除采用传统工艺解决这些问题外, 还可以采用高压等新技术<sup>[3]</sup>。高压处理 (high pressure processing, HPP) 是一种新型非热杀菌技术, 有着杀菌、灭酶、延长货架期及改善产品质构等特点而被广泛应用在多个研究领域<sup>[4]</sup>。

作为主要成分 (约占 75%), 水分以一定数量定位、定向地存在于肉及肉制品中。水分子存在状态及其流动性能不仅影响肌肉蛋白对油脂的乳化结合能力, 也会对加热后肉制品的产品外观<sup>[5]</sup>、微生物腐败敏感性<sup>[6]</sup>、保油保水和黏弹性<sup>[7]</sup>产生很大影响。从水分子的角度开展肌肉蛋白凝胶和乳化形成机制的研究逐渐成为国际肉品科研领域的一个主流趋势。

收稿日期: 2013-09-03

基金项目: “十二五” 国家科技支撑计划项目 (2012BAD28B03); 江苏省农业三新工程项目 (SX (2011) 146)

作者简介: 杨慧娟 (1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为肉品质量安全控制。E-mail: huijuanyang2012@gmail.com

\*通信作者: 周光宏 (1960—), 男, 教授, 博士, 研究方向为畜产品加工与质量控制。E-mail: ghzhou@njau.edu.cn

低场核磁共振技术 (low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 因其无破坏性、制样方便、测定快速、精度高、重现性好而在食品科学研究中得到广泛应用, 近几年来国内外在通过利用 LF-NMR 鉴定食品中的水分、碳水化合物、蛋白质、油脂及品质等而鉴别食品中的掺杂掺假问题有较多的报道<sup>[8]</sup>。目前, LF-NMR 在肉品科学研究中的应用主要集中在肉和肉制品中的水分含量和保水性, 肌原纤维蛋白凝胶性和变性, 脂肪和质构特性测定等方面<sup>[9-11]</sup>, 但不同超高压压力处理对乳化肠水分分布影响的研究尚待深入研究。因此本实验利用 LF-NMR 对 HPP 处理后的乳化肠水分分布进行初步探究, 试从肉糜体系中的水分分布角度和微观结构揭示高压处理改善乳化肠感官特性的原因, 为今后该技术用于低温乳化肠新产品研发过程中的品质形成机理研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

宰后 24 h 的猪后腿精瘦肉和猪肉肥膘均购于苏食集团; 食盐、白胡椒粉等食用级添加剂 市售。

聚酰胺/聚乙烯真空包装袋 (20 °C 透氧率为  $1 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) 北京华盾塑料有限公司; 胶原蛋白肠衣 梧州神冠蛋白肠衣有限公司。

### 1.2 仪器与设备

S-IL-100-850-9-W 高压设备 英国 Stansted Fluid Power 公司; AUY120 万分之一电子天平 北京赛多利斯仪器系统有限公司; SANYO SIM-F124 制冰机 日本三洋公司; ASC-30 电子秤 沈阳朝阳衡器厂; DHG-90385-III 电热恒温鼓风干燥箱 上海新苗医疗器械公司; BZBJ-15 斩拌机 嘉兴艾博不锈钢机械工程有限公司; Niumag PQ001 型核磁共振成像分析仪 上海纽迈电子科技有限公司; TC12E 绞肉机 意大利 Sirman 公司; VF608 灌肠机 德国 Handtman 公司; DC-800 真空包装机 美国希悦尔公司; HH-42 快速恒温数显水浴箱 常州国华电器有限公司; S-3000N 扫描电镜 日本 Hitachi 公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 肉糜制备

##### 1.3.1.1 工艺配方及流程

参照 Sikes 等<sup>[12]</sup>的方法, 稍加改动。瘦肉 1 500 g、肥肉 480 g, 其他添加为冰水 408 g、食盐 24 g、白胡椒粉 15.6 g 等。先进行原料肉整理 (瘦肉和肥肉分别用绞肉机绞碎); 将瘦肉在 1 500 r/min 斩拌 0.5 min; 加盐和总量的 2/3 冰水, 继续在 3 000 r/min 斩拌 1 min; 停 2 min, 便于盐溶性蛋白的溶出; 再加入脂肪和白胡椒粉等香辛料及剩余总量的 1/3 冰水, 在 1 500 r/min 斩拌 1 min; 继续在 3 000 r/min 斩拌 1~1.5 min; 将斩拌得黏弹性较好的肉糜

装入肠衣中 (整个斩拌温度控制在 10 °C 左右); 在不超过 20 °C 的室温条件下选用不同压力对肉糜进行处理即得到样品, 超高压处理的时间和温度分别为 2 min 和 10 °C。

#### 1.3.1.2 实验设计

根据压力不同将样品分为 5 组: 0.1 MPa (大气压强) 对照组和 100、200、300、400 MPa 高压处理组。样品在 10 °C 左右的高压腔体内处理 2 min, 对照组则置于 10 °C 水浴中浸泡 2 min。处理后再将样品分成两部分, 一部分真空包装后 4 °C 冷藏进行低场核磁共振测定、扫描电镜指标分析用, 其余进行蒸煮 (水温为 80 °C, 当样品中心温度达到 72 °C 保持 15 min), 冷却用于感官指标评定。实验完全重复 3 次, 每次实验都需重新采集宰后 24 h 的原料肉 (共使用 4.5 kg)。感官评定和低场核磁共振等指标每次测定都需要有 3 个以上的平行样。

#### 1.3.2 感官评定

参照 Zamri 等<sup>[13]</sup>的方法, 稍加改动。由 10 名感官评定人员对经蒸煮的肉糜的质构、外观和整体可接受度进行评分。评分标准见表 1。

表 1 感官评定评分标准  
Table 1 Standards for sensory evaluation

感官特性指标	评分标准 (满分 10 分)		
	7~10 分	4~6 分	0~3 分
质构	软硬适中, 有弹性	稍硬或稍软	硬或软
外观	肥瘦均匀, 外观完整	肥瘦稍均匀, 有少许汁液流出	肥瘦不均匀, 大量汁液流出
整体可接受度	满意	中等	待完善

#### 1.3.3 NMR 自旋-自旋弛豫时间 ( $T_2$ ) 测定

NMR 弛豫测量在核磁共振成像分析仪上进行。测试条件为: 质子共振频率为 22 MHz, 测量温度为 32 °C。大约 2 g 样品放入直径 15 mm 核磁管中, 而后放入分析仪中。90° 脉冲和 180° 脉冲之间的时间为 250 μs。重复扫描 32 次, 重复间隔时间为 6.5 s 得到 12 000 个回波, 得到的图为指数衰减图形, 每个测试有 4 个重复。自旋-自旋弛豫时间  $T_2$  用 CPMG 脉冲序列进行测量, 弛豫图每个组分峰值对应的时间作为  $T_2$ 。

#### 1.3.4 扫描电镜观察微观结构

将肉糜样品切片后用 2.5% 戊二醛溶液固定, 取片成  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$  大小后并用 0.1 mol/L 磷酸缓冲液 (pH 7.2) 漂洗数次, 用 1% 的四氧化锇固定, 再用同样的缓冲液漂洗, 然后用乙醇梯度脱水, 冷冻干燥, 喷金镀膜后于扫描电镜 (scanning electron micrograph, SEM) 观察微观结构, 加速电压为 15 kV。

#### 1.4 数据处理

将数据输入到 SPSS 18.0 统计软件中, 先进行一般描述性统计, 然后再进行方差分析 (用邓肯新复极差法进行多重比较) 和双变量相关分析, 并得到相关系数矩阵。  $P < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同压力处理对乳化肠感官评定的影响

**表2 10℃不同压力作用2 min的乳化肠感官评分 ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n=3$ )**  
**Table 2 Sensory evaluation of sausages treated with various HPP for 2 min at 10℃ ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n=3$ )**

感官特性指标	感官评分				
	对照组	100 MPa	200 MPa	300 MPa	400 MPa
质地	2.30±0.10 <sup>e</sup>	4.17±0.12 <sup>d</sup>	9.73±0.12 <sup>a</sup>	8.70±0.10 <sup>b</sup>	5.40±0.10 <sup>c</sup>
外观	2.20±0.17 <sup>e</sup>	4.30±0.10 <sup>d</sup>	9.33±0.12 <sup>a</sup>	9.07±0.06 <sup>b</sup>	5.33±0.12 <sup>c</sup>
整体可接受度	2.43±0.12 <sup>e</sup>	4.43±0.17 <sup>d</sup>	9.57±0.11 <sup>a</sup>	8.67±0.08 <sup>b</sup>	5.47±0.10 <sup>c</sup>

注：同行小写字母不同，表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

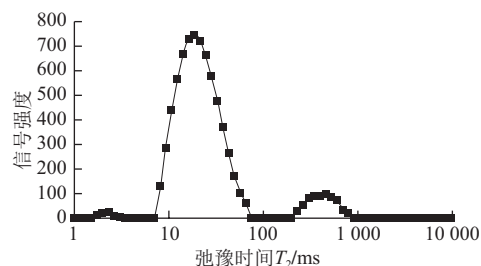
由表2可知，乳化肠质地、外观及整体可接受度随作用压力增大呈现先增高后降低的趋势。与对照组相比，高压组的质地、外观及整体可接受度的得分都显著提高。200 MPa处理的样品各得分均达到最大值，质地、外观及整体可接受度的得分均高于9.50。超过200 MPa后随压力增大，感官特性各指标得分均显著下降 ( $P < 0.05$ )。

肌肉的各种食用品质尤其是感官品质特性（嫩度、风味、多汁性等）受肌纤维组织化学特性的影响<sup>[14]</sup>。Tintchev等<sup>[15]</sup>研究表明200 MPa是高压改善原料肉食用品质的临界值，低于200 MPa处理时肉的外观和组织结构变化不大，这可能是由于200 MPa以上的压力处理容易引起肌纤维结构中蛋白质分子低聚物的解聚，导致伸缩及在疏水残基周围形成笼状物，该结构有利于水分子的吸附。该原理可以解释大于200 MPa处理时样品的蒸煮损失能显著降低，而100 MPa处理组却观察不到该现象<sup>[16-17]</sup>。本实验结果与该文献的结论一致。但如果作用压力过大，反而不利于乳化肉糜复合凝胶的保油保水性。Lindahl等<sup>[18]</sup>的研究表明，高压作用时间相同情况下分别以400~600 MPa高压处理，猪肉糜蛋白凝胶的汁液损失随压力升高显著增加，这可能是由于肉糜体系复合溶胶网络结构中的自由态水分子与肌肉蛋白分子的结合程度会随着高压作用压力增大而减弱，因为压力增大会使肌纤维结构更紧实从而导致该部分自由水流失增加，该结果也证实了本研究中高压作用压力过高情况下可能会因汁液损失增加流失而降低影响感官评价中的口感特性。

### 2.2 弛豫特性

弛豫时间 $T_2$ 可以反映水分的自由度，弛豫时间的变化表征经不同压力处理后肉糜中存在的多种状态水分群的分布情况，即各状态下水分的结合状态和自由移动程度；而弛豫峰面积百分数可以估算氢质子的相对含量，从而反映各种状态水分群的含量，其变化可以表征经不同压力处理后肉糜中各种状态水分子的含量变化情况，即各种状态水分子群的流动转移情况。由图1可知，弛豫时间 $T_2$ 分布呈现3个峰：0~10、10~100、100~1 000 ms。根据出峰时

间及各峰所占总面积的百分比，认为3个峰分别对应于水的3个组分，即结合水 ( $T_{2b}$ )、不易流动水 ( $T_{21}$ ) 和自由水 ( $T_{22}$ )<sup>[19]</sup>。表3为不同超高压压力处理下肉糜中水分子 $T_2$ 弛豫时间的变化。



**图1 200 MPa高压处理后肉糜横向弛豫时间 $T_2$ 分布**

**Fig.1 Distribution of transverse relaxation time in meat batters treated at 200 MPa**

**表3 10℃不同压力处理2 min肉糜的低场核磁共振弛豫时间变化 ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n=3$ )**

**Table 3 Effect of HPP treatment for 2 min at 10℃ on  $T_2$  of water from meat batters ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n=3$ )**

压力/MPa	$T_{2b}/ms$	$T_{21}/ms$	$T_{22}/ms$
对照组	1.37±0.30 <sup>a</sup>	82.54±1.75 <sup>b</sup>	278.87±22.97 <sup>b</sup>
100	1.56±0.43 <sup>a</sup>	89.17±1.46 <sup>a</sup>	298.76±11.48 <sup>ab</sup>
200	1.76±0.24 <sup>a</sup>	91.27±1.03 <sup>a</sup>	306.68±21.39 <sup>ab</sup>
300	1.53±0.21 <sup>a</sup>	84.34±2.52 <sup>b</sup>	321.77±28.38 <sup>ab</sup>
400	1.46±0.41 <sup>a</sup>	82.68±1.03 <sup>b</sup>	353.40±49.20 <sup>a</sup>

由表3可知，肉糜中自由水受高压作用影响较大，与对照组相比，第1个峰对应的 $T_2$ 弛豫时间 ( $T_{2b}$ ) 和第2个峰对应的 $T_2$ 弛豫时间 ( $T_{21}$ ) 均先向慢弛豫方向移动，再向快弛豫方向移动，其中 $T_{2b}$ 差异不显著 ( $P > 0.05$ )，而 $T_{21}$ 差异显著 ( $P < 0.05$ )。随着压力增加，第3个峰对应的 $T_2$ 弛豫时间 ( $T_{22}$ ) 向慢弛豫方向移动， $T_{22}$ 从对照组的278.87 ms下降到400 MPa组的353.40 ms，表明高压处理可以使肉糜中自由水与肌肉蛋白质分子的结合度减弱，该部分水分子的自由度增加 ( $P < 0.05$ )。如果随着压力增大肉糜体系中自由态水分子的弛豫速率持续降低， $T_2$ 弛豫时间显著增大，会一直增强该部分水的移动性，可能会导致肉糜体系的稳定性下降，引起加热后样品的汁液损失增加并最终影响到产品的口感等食用品质。

由表4可知，与对照组相比，不同压力处理使第1个和第2个峰面积百分数显著增加 ( $P < 0.05$ )。而随着作用压力增大，第3个峰的峰面积百分数显著下降 ( $P < 0.05$ )，从对照组的4.03%下降到400 MPa作用压力下的0.35%。由上述3个峰的峰面积百分数变化可知，高压处理显著影响各状态下水分子的分布情况，且随着压力的增加，代表自由水的峰面积百分数降低，而代表结合水和不易流动水的峰面积百分数升高。说明高压作用能使肉糜中的自由水向结合水和不易流动水转化。

表4 10℃不同压力处理2 min肉糜的低场核磁 $T_2$ 弛豫峰面积百分数变化 ( $\bar{x} \pm s, n=7$ )

Table 4 Effect of HPP treatment for 2 min at 10℃ on  $T_2$  peak area fraction of water from meat batters ( $\bar{x} \pm s, n=7$ )

压力/MPa	峰面积百分数/%		
	$T_{2b}$	$T_{21}$	$T_{22}$
对照组	3.61±0.20 <sup>b</sup>	92.36±0.32 <sup>c</sup>	4.03±0.13 <sup>a</sup>
100	4.28±0.18 <sup>a</sup>	93.99±0.43 <sup>b</sup>	1.73±0.25 <sup>b</sup>
200	4.33±0.34 <sup>a</sup>	94.61±0.13 <sup>a</sup>	1.06±0.21 <sup>c</sup>
300	4.39±0.14 <sup>a</sup>	95.02±0.16 <sup>a</sup>	0.59±0.28 <sup>d</sup>
400	4.53±0.39 <sup>a</sup>	95.12±0.18 <sup>a</sup>	0.35±0.23 <sup>d</sup>

研究<sup>[20-23]</sup>表明, 合适参数的高压处理能提高猪肉乳化肉糜复合凝胶的保水性, 这可能与高压作用后的水分子团会使肉糜中的肌原纤维蛋白质发生局部变性并改变肌肉蛋白质分子交联的盐桥有关。一方面, 超高压能使水分子发生聚合, 缩短彼此间的距离, 而蛋白质大分子对压力有一定的抵抗能力, 仍可以使分子保持天然球状结构, 这便于水分子等小分子发挥渗透和填充作用, 让自由水填补到蛋白质氨基酸侧链周围而变成结合水, 同时蛋白质等生物大分子链在降压过程中被拉长, 分子的部分立体结构发生破坏而致使蛋白质发生局部变性, 也会利于极性亲水基团与水分子的结合<sup>[24]</sup>; 另一方面, 超高压作用会破坏二价阳离子与蛋白质分子间的键合作用, 导致添加食盐肉糜体系中的肌肉蛋白质分子构象发生变化, 不利于蛋白质分子和阳离子间的盐桥形成, 也会使经高压处理后肌肉蛋白凝胶的保水性提高, 从而改善口感等感官特性<sup>[25]</sup>。

2.3 水分分布特性与感官评定指标间的相关性分析

表5 水分分布特性与感官评定指标间的相关性分析

Table 5 Correlation between water distribution and sensory evaluation of meat batters

指标	$T_{2b}$	$T_{21}$	$T_{22}$	$T_{2b}$ 峰面积百分数	$T_{21}$ 峰面积百分数	$T_{22}$ 峰面积百分数	质构	外观
整体可接受度	0.267	0.863**	0.251	0.555*	0.742**	-0.722**	0.799**	0.795**
外观	0.241	0.835**	0.259	0.552*	0.755**	-0.731**	0.694**	
质构	0.258	0.860**	0.243	0.542*	0.734**	-0.711**		
$T_{22}$ 峰面积百分数	-0.094	-0.659**	-0.597*	-0.865**	-0.988**			
$T_{21}$ 峰面积百分数	0.071	0.675**	0.542*	0.800**				
$T_{2b}$ 峰面积百分数	0.085	0.512	0.624*					
$T_{22}$	0.098	0.050						
$T_{21}$	0.190							

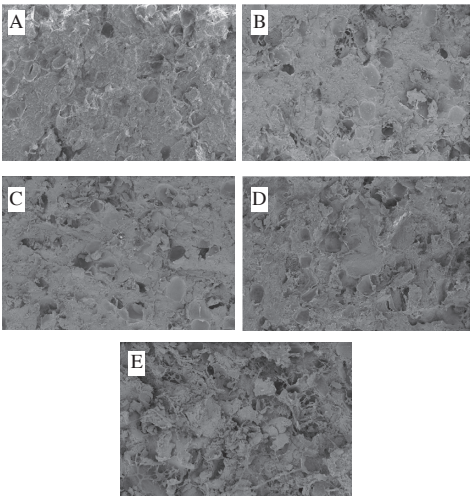
注: \*\*, 极显著相关 ( $P < 0.01$ ); \*, 显著相关 ( $P < 0.05$ )。

高压处理可以改善乳化肠的感官特性可能与肉糜中水分分布情况有关。由表5可知, 乳化肠的整体可接受度、外观及质构与 $T_{21}$ 弛豫时间呈显著正相关, 相关系数分别为0.863、0.835和0.860, 且整体可接受度、外观及质构与 $T_{21}$ 弛豫峰面积百分数也显著正相关, 相关系数分别为0.742、0.755和0.734; 整体可接受度、外观及质构和

弛豫峰面积百分数 $T_{22}$ 呈现极显著负相关, 相关系数分别为-0.722、-0.731和-0.711。由相关性分析可得, 感官特性各指标与 $T_{21}$ 弛豫时间和 $T_{21}$ 峰面积正相关, 而与 $T_{22}$ 峰面积负相关 ( $P < 0.05$ )。

高压处理可以显著影响乳化肠的感官评定指标得分及水分与蛋白的结合程度, 促使自由水向结合水和不易流动水转化, 而转化比例和结合程度的强弱又会显著影响乳化肠肉糜微结构及其加热后的感官特性。由相关性分析的结果可以明显发现, 感官评定指标与水分子弛豫特性变化指标间存在着显著相关性, 不易流动水与蛋白的结合程度越高, 不易流动水的比例增加, 即自由水与蛋白的结合程度越弱, 则感官评定指标得分就越高。

2.4 扫描电镜观察不同压力处理肉糜的微观结构



A. 对照组 (0.1 MPa); B. 100 MPa; C. 200 MPa; D. 300 MPa; E. 400 MPa。

图2 扫描电镜观察高压处理的肉糜超微结构 (×100)

Fig.2 Microstructure of meat batters subjected to high pressure treatment observed under SEM (×100)

由图2可知, 与对照组相比, 经高压处理的肉糜结构比较紧凑, 残留的蛋白膜较少, 当作用压力为400 MPa时, 几乎看不到明显的蛋白膜残留, 而此时肉糜结构的致密性较差。200 MPa压力处理组的肉糜结构比较紧凑及致密, 体系中脂肪微粒分布和残留的蛋白膜数量都较少, 体现出良好的乳化性能, 而且肉糜中的肌肉蛋白也呈现典型的均匀细腻、孔洞较少的三维立体溶胶结构。

Trepalacios等<sup>[26]</sup>研究发现, 合适压力大小的高压处理可以增大肌纤维的间隙, 还能部分剥离肌纤维内外周膜, 认为这可能是高压解聚肌动蛋白和肌球蛋白, 提高肌原纤维蛋白质的溶解性, 这样对肉的组织结构、保水性等都有改善作用, 从而改善乳化肠的口感。而高压处理对蛋白质分子的4种结构类型影响不同, 对蛋白质一级结构没有影响, 对二级结构有一定的稳定作用, 对蛋白质的三级和四级结构却有破坏和修饰作用<sup>[27]</sup>。与热处理是通过破坏氢键并形成大量的二硫键和疏水交联等导

致蛋白质变性不同, 高压处理是通过破坏疏水键和离子键而促使蛋白质分子天然结构的解折叠, 引起蛋白质分子体积的变化从而导致蛋白质变性<sup>[28]</sup>。而本实验扫描电镜显微结构的结果表明, 不同作用压力会引起对蛋白质分子发生不同程度或不同种类的变性, 该现象对肌肉蛋白的凝胶乳化形成能力以及对最终肉糜体系物理化学特性的影响值得深入研究。

### 3 结 论

经超高压处理的肉糜体系中水分子的状态分布发生显著变化。随着作用压力从0.1 MPa (大气压强) 增加到400 MPa, 肉糜体系中自由水与肌肉蛋白的结合程度增减弱, 自由水向不易流动水和结合水转化, 提高了乳化肠的感官特性评分结果; 经超高压处理的肉糜体系, 其微观结构会发生改变, 这可能是使体系中水分分布发生变化的原因之一。

### 参考文献:

- [1] LUCORE L A, SHELLHAMMER T H, YOUSEF A E. Inactivation of *Listeria monocytogenes* Scott A on artificially contaminated frankfurters by high-pressure processing[J]. Journal of Food Protein, 2000, 63(5): 662-664.
- [2] COLMENERO F J, CARBALLO J, FEMANDEZ P, et al. High-pressure-induced changes in the characteristics of low-fat and high-fat sausages[J]. Journal of Science and Agriculture, 1997, 75(1): 61-66.
- [3] HEINZ V, BUCKOW R. Food preservation by high pressure[J]. Journal of Consumer Protection and Food Safety, 2009, 8(5): 73-81.
- [4] SIMONIN H, DURANTON F, LAMBALLERIE M D. New Insights into the high-pressure processing of meat and meat products[J]. Food Science and Food Safety, 2012, 11(3): 285-306.
- [5] TOKIFUJI A, MATSUSHIMA Y, HACHISUKA K, et al. Texture, sensory and swallowing characteristics of high-pressure-heat-treated pork meat gel as a dysphagia diet[J]. Meat Science, 2013, 93(4): 843-848.
- [6] MENENDEZ O, RABEI H, SCHWARZENBOLZ U, et al. Structural changes of microbial transglutaminase during thermal and high-pressure treatment[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(5): 1716-1721.
- [7] JIMENEZ C F, FEMANDEZ P, CARBALLO J, et al. High-pressure-cooked low-fat pork and chicken batters as affected by salt levels and cooking temperature[J]. Journal of Food Science, 1998, 63(4): 656-659.
- [8] AHMAD M U, TASHIRO Y, MATSUKAWA S, et al. Comparison of horse mackerel and tilapia surimi gel based on rheological and <sup>1</sup>H-NMR relaxation properties[J]. Fisheries Science, 2005, 71(3): 655-661.
- [9] 邵俊花. 猪肉蛋白质构象变化与保油保水性关系研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [10] BERTRAM H C, WHITTAKER A K, SHORTHORSE W R, et al. Water characteristics in cooked beef as influenced by ageing and high-pressure treatment: an NMR micro imaging study[J]. Meat Science, 2004, 66(2): 301-306.
- [11] AHMAD M U, TASHIRO Y, MATSUKAWA S, et al. Comparison of gelation mechanism of surimi between heat and pressure treatment by using rheological and NMR relaxation measurements[J]. Journal of Food Science, 2004, 69(9): E497-E501.
- [12] 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 & Emerging Technologies, 2009, 10(4): 405-412.
- [13] ZAMRI A I, LEDWARD D A, FRAZIER R A. Effect of combined heat and high-pressure treatments on the texture of chicken breast muscle (pectoralis fundus)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(8): 2992-2996.
- [14] MARIO E. Protein carbonyls in meat system: a review[J]. Meat Science, 2011, 89: 259-279.
- [15] TINTCHEV F, BINDRICH U, TOEPFL S, et al. High hydrostatic pressure/temperature modeling of frankfurter batters[J]. Meat Science, 2013, 94(3): 376-387.
- [16] SORAPUKDEE S, KONGTASORN C, BENJAKAUL S, et al. Influences of muscle composition and structure of pork from different breeds on stability and textural properties of cooked meat emulsion[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2/3): 1892-1901.
- [17] REALINI C E, GUARDIA M D, GARRIGA M, et al. High pressure and freezing temperature effect on quality and microbial inactivation of cured pork carpaccio[J]. Meat Science, 2011, 88(3): 542-547.
- [18] LINDAHL, BAK K H, GUNILLA, et al. Effect of high pressure, temperature, and storage on the color of porcine *longissimus dorsi*[J]. Meat Science, 2012, 92(4): 374-381.
- [19] AHMAD M U, TASHIRO Y, MATSUKAWA S, et al. Comparison of horse mackerel and tilapia surimi gel based on rheological and <sup>1</sup>H-NMR relaxation properties[J]. Fisheries Science, 2005, 71(3): 655-661.
- [20] FEMANDEZ M F, FERNANDEZ P, CAEBALLO J, et al. Pressure/heat combinations on pork meat batters: protein thermal behavior and product rheological properties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(11): 4440-4445.
- [21] TREPALACIOS P, PLA R. Development of low-fat chicken meat and dried egg white gels by high pressure[J]. High Pressure Research, 2009, 29(1): 150-161.
- [22] SERRA X, SARRAGA C, GREBOL N, et al. High pressure applied to frozen ham at different process stages. 1. Effect on the final physicochemical parameters and on the antioxidant and proteolytic enzyme activities of dry-cured ham[J]. Meat Science, 2007, 75(1): 12-20.
- [23] CHATTONG U A, BELLA E, ALAN E, et al. Effects of hydrocolloid addition and high pressure processing on the rheological properties and microstructure of a commercial ostrich meat product "Yor" (Thai sausage)[J]. Meat Science, 2007, 76(3): 548-554.
- [24] 李珂昕. 超高压与微生物多糖对猪肉凝胶品质的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [25] TOKIFUJI A, MATSUSHIMA Y, HACHISUKA K, et al. Texture, sensory and swallowing characteristics of high-pressure-heat-treated pork meat gel as a dysphagia diet[J]. Meat Science, 2013, 93(4): 843-848.
- [26] TREPALACIOS P, PLA R. Simultaneous application of transglutaminase and high pressure to improve functional properties of chicken meat gels[J]. Food Chemistry, 2007, 100(1): 264-272.
- [27] MARIUTTI L R B, ORLIEN V, BRAGAGNOLO N, et al. Effect of sage and garlic on lipid oxidation in high-pressure processed chick meat[J]. European Food Research and Technology, 2008, 227(2): 337-344.
- [28] VAUDAGNA S R, GONZALEZ C B, GUIGNON B, et al. The effects of high hydrostatic pressure at subzero temperature on the quality of ready-to-eat cured beef carpaccio[J]. Meat Science, 2012, 92(4): 575-581.