

# 超声波解冻对猪肉品质的影响

蒋奕, 程天赋, 王吉人, 俞龙浩\*  
(黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江 大庆 163319)

**摘要:** 以20 °C静水解冻为对照组, 5种不同超声波功率(100、200、300、400、500 W)解冻为处理组, 研究超声波解冻对猪肉品质及加工特性的影响。结果表明: 与对照组相比, 超声波处理可以缩短猪肉的解冻时间, 但汁液损失较大, 随着超声波功率的增大, 猪肉的蒸煮损失率增大, 200 W超声波处理组猪肉的压榨保水性高于其他处理组; 与对照组相比, 除100 W超声波处理组外, 不同超声波功率解冻处理均能显著降低猪肉的pH值和亮度值( $L^*$ ) ( $P < 0.05$ ), 且随着超声波功率的增大, 各处理组样品的pH值和 $L^*$ 均呈降低趋势; 500 W处理组猪肉的剪切力值显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ), 且随着超声波功率的增大, 各处理组样品的剪切力逐渐降低; 对照组样品的横向弛豫时间 $T_{23}$ 峰面积显著低于500 W超声波处理组 ( $P < 0.05$ ), 各超声波处理组样品的 $T_{23}$ 峰面积比随着超声波功率的增大而增加; 样品中水溶性蛋白质和盐溶性蛋白质的含量随着超声波功率的增大均呈下降趋势。200 W的超声波解冻功率是既能缩短解冻时间, 又能减少猪肉品质降低的最佳功率。

**关键词:** 超声波解冻; 静水解冻; 超声波功率; 猪肉品质

## Effect of Ultrasonic Thawing on the Quality Characteristics of Frozen Pork

JIANG Yi, CHENG Tianfu, WANG Jiren, YU Longhao\*  
(College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

**Abstract:** The aim of this study was to investigate the effect of ultrasonic thawing on pork quality and processing characteristics. Still water thawing (20 °C) was used as control group, while ultrasonic thawing at five different powers (100, 200, 300, 400 and 500 W) were used as treatment group. The results showed that ultrasonic treatment shortened thawing time but increased thawing loss compared with the control group. Cooking loss increased with ultrasonic power, and the water-holding capacity of 200 W ultrasonic treatment was higher than the other treatment groups. But pH value and  $L^*$  value were significantly lower in all treatment groups except the 100 W group than the control group ( $P < 0.05$ ), and they were inversely correlated with ultrasonic power. Ultrasonic treatment at 500 W caused a significant increase in shear force in comparison with the control group ( $P < 0.05$ ), and the shear force decreased with increasing ultrasonic power. Moreover, the transverse relaxation  $T_{23}$  peak area ratio in the control group was significantly lower than in the 500 W ultrasonic treatment group ( $P < 0.05$ ), and this parameter increased with ultrasonic power. Water-soluble and salt-soluble protein contents both decreased with the increase in ultrasonic power. The above results demonstrated that an ultrasonic power of 200 W was the optimal thawing condition to not only shorten thawing time but also lessen the deterioration of pork quality.

**Key words:** ultrasonic thawing; still water thawing; ultrasonic power; pork quality

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201711003

中图分类号: TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2017) 11-0014-06

引文格式:

蒋奕, 程天赋, 王吉人, 等. 超声波解冻对猪肉品质的影响[J]. 肉类研究, 2017, 31(11): 14-19. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201711003. <http://www.rlyj.pub>

JIANG Yi, CHENG Tianfu, WANG Jiren, et al. Effect of ultrasonic thawing on the quality characteristics of frozen pork[J]. Meat Research, 2017, 31(11): 14-19. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201711003. <http://www.rlyj.pu>

冷冻贮藏是保存肉类及肉类产品广泛使用的方法, 然而, 由于肌球蛋白变性、机械损伤以及肌原纤维蛋白的交

联和聚集, 肉品在冷冻、冷冻贮藏和解冻过程中仍然会发生质量恶化, 特别是质地、风味和色泽的变化<sup>[1]</sup>。冻结过

收稿日期: 2017-07-12

基金项目: 黑龙江八一农垦大学学成、引进人才科研启动计划项目 (B200816)

作者简介: 蒋奕 (1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为肉品科学与技术。E-mail: 18346663158@163.com

\*通信作者: 俞龙浩 (1962—), 男, 教授, 博士, 研究方向为肉品科学与技术。E-mail: meat2011@126.com



程中冰晶的形成会破坏肉品的超微结构,并浓缩溶质,导致在细胞水平上发生的生物化学反应影响肉的物理质量参数。冷冻肉质量损失的程取决于多种因素,包括冻融速率、解冻方法、贮藏温度和温度波动<sup>[2]</sup>。解冻肉的品质也由多种因素决定,包括相对空气湿度、有效解冻时间和超声波等不同解冻方法的选择<sup>[3]</sup>。超声波是在20 kHz~1 MHz频率范围内超过人类听觉范围的声波<sup>[4]</sup>,超声波可以加快热量和质量传递,中断聚集并破坏大分子链。彭登峰等<sup>[5]</sup>发现超声波能够提高芥面碗托的解冻速率。Kissam等<sup>[6]</sup>的研究表明,1.5 kHz的超声频率可以使冷冻鱼的解冻时间比单独温水解冻缩短71%,这可能是由于低频、可听见的声音接近冰晶的共振频率,能够引发冰晶振动,从而起到解冻的作用。余力等<sup>[7]</sup>发现超声波解冻不仅能缩短解冻时间,还可以增加伊拉兔肉中挥发性风味物质的种类。马超锋等<sup>[8]</sup>将采用7种超声波功率的解冻处理与传统的流水解冻方法相比,发现450 W的超声波能较好地保持罗非鱼片的品质。

大多数关于冷冻和解冻对肌肉蛋白质物理化学变化的研究都集中在鱼类和贝类,也有一些关于冷冻对红肉影响的研究<sup>[9]</sup>。采用不同解冻方式处理样品方面的研究较多,然而对于超声波解冻,目前,不同超声波功率对猪肉品质的影响以及解冻过程中温度的变化情况研究在国内外均少有报道。本研究以-20℃冷冻的猪后臀肉为原料,20℃的静水解冻为对照组,5个不同超声波功率解冻为处理组,探究不同超声波功率对猪肉品质的影响,为超声波解冻方式在冷冻肉产品中的应用提供参考。

## 1 材料与方

### 1.1 材料与试剂

猪后臀肉(俗名猪后丘)购自黑龙江省大庆市当地超市,为确保实验原料的一致性,所选猪后臀肉取自同一头猪,且均选用纯瘦肉,并在15 min内运回实验室。

牛血清清蛋白 武汉市盖云天生物技术有限公司;实验所用试剂均为国产分析纯。

### 1.2 仪器与设备

BCD-439WKK1FYM电冰箱 海信容声冰箱有限公司;SB25-12DTD超声波清洗机 宁波新芝生物科技股份有限公司;NMI20-Analyst核磁共振成像分析仪苏州纽迈电子科技有限公司;CR-400色差仪 日本柯尼卡美能达控股公司;SPECORD 210 Plus紫外-可见分光光度计 德国耶拿分析仪器有限公司;HI 99163便携式肉用pH计 意大利Hanna公司;TA-XT plus质构仪 英国Stable Micro Systems公司;5417R离心机德国Eppendorf公司;TR-52插入式温度计 日本Thermo Recorder公司;AR223CN电子天平 美国奥豪斯仪器

有限公司;KP-21C求积仪 深圳市英飞铭科技有限公司;VORTEX-5漩涡混合器 海门市其林贝尔仪器有限公司;DK-450B电热恒温水槽 上海森信实验仪器有限公司;FA25乳化均质机 上海弗鲁克流体机械制造有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 猪肉冻结处理

取新鲜猪后臀肉,剔除筋膜,切成形状相似(7 cm×8 cm×2 cm)、质量相近(150±5)g的肉块,随机分成6组,每组3份肉样。将插入式温度计探头插入肉样中心,放入聚乙烯真空包装袋中密封,将肉样置于-20℃冰箱中冷冻48 h。

#### 1.3.2 猪肉解冻处理

猪肉冷冻结束后,以20℃静水解冻作为对照组,将其他5组肉样在室温下置于超声波清洗仪中解冻,超声波频率40 kHz,功率分别为100、200、300、400、500 W,猪肉中心温度达到0℃时为解冻终点,解冻结束后进行各项指标的测定。

#### 1.3.3 指标测定

##### 1.3.3.1 解冻时间与肉样中心温度之间的关系

记录解冻过程中解冻时间和肉样中心温度的变化,绘制肉样中心温度随解冻时间变化的曲线。

##### 1.3.3.2 汁液损失率

解冻前将肉样从真空包装袋中取出,称质量;完全解冻之后,用Whatman 2号滤纸将肉样表面的汁液擦干,再次称质量。按照公式(1)计算汁液损失率。

$$\text{汁液损失率}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

式中: $m_1$ 为样品解冻前的质量/g; $m_2$ 为样品解冻后的质量/g。

##### 1.3.3.3 蒸煮损失率

参照Yu等<sup>[10]</sup>的方法,顺着肌原纤维方向从已经解冻好的肉样中取样80 g左右,称质量;将肉样放入透明蒸煮袋中,80℃水浴加热至中心温度为75℃,保持30 min,取出后冷却至室温,4℃冷藏过夜,用滤纸将肉样表面的水分擦干,再次称质量。按照公式(2)计算蒸煮损失率。

$$\text{蒸煮损失率}/\% = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100 \quad (2)$$

式中: $m_3$ 为样品蒸煮前的质量/g; $m_4$ 为样品蒸煮后的质量/g。

##### 1.3.3.4 压榨保水性

准确称取300 mg肉样,置于Whatman 2号滤纸上,放置于2块有机玻璃之间,对其加压3 min,有部分水分被排出,用黑色记号笔将挤压的肉样面积和压榨出的水分面积画出,使用求积仪测定挤压的肉样面积和压榨出的水分面积。按照公式(3)计算保水性。

$$\text{保水性}/\% = \frac{S_1}{S_2} \times 100 \quad (3)$$

式中： $S_1$ 为挤压肉样的面积/ $\text{mm}^2$ ； $S_2$ 为压榨后的水分面积/ $\text{mm}^2$ 。

### 1.3.3.5 pH值

采用经过电极校正液校正的手持便携式pH计，将电极插入肉样中心，待读数稳定后记录数值。

### 1.3.3.6 色泽

在完全解冻的肉样中切出一个横截面，使用经过白板校正的色差仪对肉样进行亮度值 ( $L^*$ )、红度值 ( $a^*$ ) 和黄度值 ( $b^*$ ) 测定。

### 1.3.3.7 剪切力

参照Hope-Jones等<sup>[11]</sup>的方法，用直径1 cm的中空取样器沿蒸煮后肉样的肌原纤维方向取样（注意避开筋膜），利用质构仪的HDP/BS探头沿垂直肌原纤维方向测定每个肉柱的剪切力。参数设定为：测试速率5 mm/s，触发力5 g，载重物30 kg。

### 1.3.3.8 水分分布

参照Gao Tian等<sup>[12]</sup>的方法，准确称取2 g剔除筋膜的解冻猪肉，置于直径1.5 cm的核磁管中进行测定。采用低场核磁共振（low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR）成像分析仪的Q-CPMG队列进行横向弛豫时间 ( $T_2$ ) 测定，测定参数：测试温度32 °C，共振频率22 MHz，时间常数 ( $\tau$ ) 0.15 ms，重复间隔时间3 000 ms，模拟增益20。

### 1.3.3.9 水溶性蛋白含量

准确称取3 g肉样，置于50 mL离心管中，加入18 mL蒸馏水，14 000 r/min条件下均质2 min，1 500×g条件下离心10 min；取上清液，用双缩脲方法测定水溶性蛋白含量。

### 1.3.3.10 盐溶性蛋白含量

将1.3.3.9节中的上清液弃去，向离心管中的沉淀中加入18 mL 3%的NaCl，14 000 r/min条件下均质2 min，1500×g条件下离心10 min；重复离心3次后取上清液，用双缩脲方法测定盐溶性蛋白含量。

## 1.4 数据处理

采用SPSS 20.0软件中的单因素方差分析法对数据进行分析，显著性水平设为 $P=0.05$ ；采用Origin 2016软件进行绘图。各项指标均重复测定3次，实验结果用平均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同超声波功率解冻对猪肉解冻时间及持水能力的影响

在肉类加工中，缩短原料肉的解冻时间不仅可以提

高解冻设备的使用率，还可以提高工作效率，从而影响经济效益，因此在实际生产中具有重要意义。

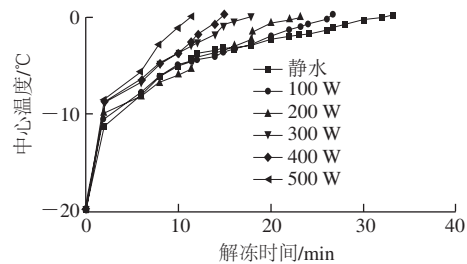


图1 不同超声波功率解冻对猪肉解冻时间的影响

Fig. 1 Effect of ultrasonic power on thawing time of frozen pork

由图1可知，无论是静水解冻还是不同超声波功率解冻处理，样品在前5 min内的温度上升较快，中心温度越接近0 °C，其温度上升速率越慢；超声波解冻所用时间显著少于静水解冻，随着超声波功率的不断增大，所用解冻时间也逐渐缩短。

表1 不同超声波功率解冻对猪肉持水能力的影响

Table 1 Effect of ultrasonic power on water holding capacity of thawed pork

| 测定指标     | 静水解冻                    | 超声波功率/W                 |                         |                         |                         |                         |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|          |                         | 100                     | 200                     | 300                     | 400                     | 500                     |
| 解冻时间/min | 33.10±0.82 <sup>a</sup> | 26.65±0.38 <sup>b</sup> | 23.09±0.44 <sup>c</sup> | 17.83±0.29 <sup>d</sup> | 14.90±0.09 <sup>e</sup> | 11.43±0.41 <sup>f</sup> |
| 汁液损失率/%  | 4.14±0.56 <sup>b</sup>  | 5.11±0.26 <sup>a</sup>  | 5.39±0.07 <sup>b</sup>  | 5.60±0.20 <sup>a</sup>  | 5.62±0.80 <sup>a</sup>  | 5.80±0.27 <sup>a</sup>  |
| 蒸煮损失率/%  | 24.46±0.37 <sup>b</sup> | 22.27±0.65 <sup>b</sup> | 23.79±0.95 <sup>b</sup> | 29.49±0.95 <sup>a</sup> | 27.90±0.46 <sup>a</sup> | 24.97±1.67 <sup>b</sup> |
| 压榨保水性/%  | 33.85±6.29 <sup>a</sup> | 36.68±1.62 <sup>b</sup> | 45.94±0.58 <sup>a</sup> | 36.91±1.46 <sup>b</sup> | 32.23±2.76 <sup>b</sup> | 33.17±3.67 <sup>b</sup> |

注：同行小写字母不同，表示同一指标、不同处理组间差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

由表1可知，超声波解冻处理肉样的汁液损失率与静水解冻有显著差异 ( $P<0.05$ )，并且随着超声波功率的增大，解冻后的汁液损失增多，与Lagerstedt<sup>[13]</sup>、Jeong<sup>[14]</sup>、Hergenreder<sup>[15]</sup>等的研究结果一致。这可能是由于当超声波作用于固液系统时，空化气泡崩溃不同于纯液体体系，由于邻近固体表面，气泡通常不对称折叠，这会使流体涌入气泡，当边界层被破坏时，这种效应使固体表面热量快速传递，导致介质温度升高，减少其解冻时间。在任何用于延长肉类保质期的包装系统中，特别是在真空系统中，汁液损失是不可避免的<sup>[16]</sup>。然而，超声处理使解冻肉的pH值较低，较低的pH值也可能导致更多的汁液损失<sup>[17]</sup>。

肌肉的蒸煮损失增加可能导致较低的消费者可接受性。随着超声波功率的增大，肉样的蒸煮损失率增大，这可能是肌球蛋白变性增加的结果<sup>[18]</sup>，超声波导致的蛋白质的其他氧化情况变化也降低了样品的持水能力，使蒸煮损失变大<sup>[19]</sup>。

保水性是猪肉非常重要的品质和加工特性。保水性越好，肉的持水量越大，具有较高的经济价值。200 W超声波处理组样品的压榨保水性显著高于静水处理组和400、500 W超声波处理组 ( $P<0.05$ )，但与100、300 W

超声波处理组没有显著差异，且除了200 W超声波处理组外，其他各处理组间没有显著差异。冻融过程中肌肉细胞内外形成冰晶的数量和大小不同，导致细胞的结构完整性受到损伤，从而降低肉的保水性。超声解冻也可能引起蛋白质变性，导致肉的结构改变，降低其保水能力<sup>[20]</sup>。采用较低功率超声波解冻的样品比静水解冻和大功率超声波解冻有较高的压榨保水性，因此对于保水性而言，低功率超声波解冻可能更为有利。

## 2.2 不同超声波功率解冻对猪肉pH值的影响

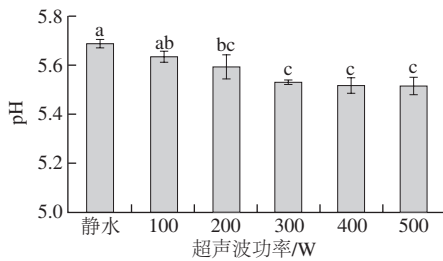


图2 不同超声波功率解冻对猪肉pH值的影响

Fig. 2 Effect of ultrasonic power on pH value of thawed pork

由图2可知，除100 W超声波处理组外，不同超声波功率解冻处理组猪肉样品的pH值与静水解冻组相比均显著降低 ( $P < 0.05$ )；随着超声波功率的增加，样品的pH值降低，但100 W和200 W超声波处理组间没有显著差异，200、300、400、500 W超声波处理组间也没有显著差异 ( $P > 0.05$ )，这可能是由于pH值是衡量溶液中游离氢离子 ( $H^+$ ) 浓度的量度，随着超声波功率的增大，肌肉中肌原纤维被破坏的程度增大，汁液渗出量的增加使  $H^+$  释放，导致pH值降低。也可能是由于超声波处理造成肌肉组织的汁液损失，使溶质浓度增加，从而导致pH值降低<sup>[21]</sup>。

## 2.3 不同超声波功率解冻对猪肉色泽的影响

表2 不同超声波功率解冻对猪肉色泽的影响

Table 2 Effect of ultrasonic power on color of thawed pork

| 测定指标  | 静水解冻                 | 超声波功率/W               |                       |                       |                       |                    |
|-------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
|       |                      | 100                   | 200                   | 300                   | 400                   | 500                |
| $L^*$ | $50.62 \pm 1.69^a$   | $48.35 \pm 0.15^{ab}$ | $45.04 \pm 0.15^{bc}$ | $43.59 \pm 0.29^{bc}$ | $43.19 \pm 1.01^{bc}$ | $42.75 \pm 2.77^c$ |
| $a^*$ | $12.20 \pm 0.03^a$   | $11.46 \pm 1.23^a$    | $10.62 \pm 0.25^{ab}$ | $9.25 \pm 0.20^b$     | $9.24 \pm 0.20^b$     | $9.21 \pm 0.61^b$  |
| $b^*$ | $6.25 \pm 0.21^{ab}$ | $5.72 \pm 0.35^{ab}$  | $5.18 \pm 0.07^b$     | $5.51 \pm 0.38^{ab}$  | $6.13 \pm 0.35^{ab}$  | $6.45 \pm 0.53^b$  |

猪肉的色泽对于其外观和消费者可接受性起着重要作用。由表2可知，静水解冻组猪肉样品的  $L^*$  显著大于除100 W超声波处理组外的其他超声波处理组 ( $P < 0.05$ )，而随着超声波功率的增加，各超声波处理组样品的  $L^*$  呈降低趋势。静水解冻组样品的  $a^*$  显著大于除100、200 W超声波处理组外的其他超声波处理组 ( $P < 0.05$ )，各超声波处理组间  $a^*$  的变化趋势与  $L^*$  相同。这可能是由于超声处理改变了肉的微观结构，使其

$L^*$  降低；解冻期间，随着超声波功率的增大，肌红蛋白分子的部分球蛋白变性，导致色素降解，使  $a^*$  降低。但本研究所得  $a^*$  的变化趋势与 Huff-Lonergan 等<sup>[17]</sup> 的研究结果不一致，这可能是由于所用禽肉不同。刘雪梅等<sup>[22]</sup> 研究不同解冻方法对速冻草莓品质的影响，发现超声波处理也能够使其  $a^*$  降低。

除200 W超声波处理组外，其他各处理组样品间的  $b^*$  没有显著差异，200 W超声波处理组样品只与500 W处理组间有显著差异，没有显示出规律性的变化。一般来说，与鲜肉相比，肉品的色泽变化可能发生在冷冻贮藏和解冻期间的脂质氧化和色素降解过程<sup>[23]</sup>。

## 2.4 不同超声波功率解冻对猪肉嫩度的影响

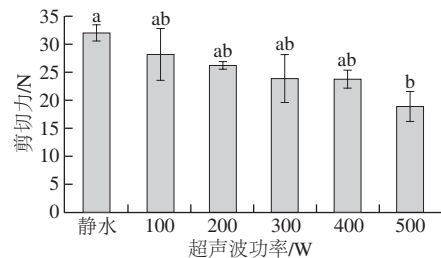


图3 不同超声波功率解冻对猪肉剪切力的影响

Fig. 3 Effect of ultrasonic power on shear force of thawed pork

从消费者决策重复购买来说，肌肉嫩度被认为是最重要的品质属性。由图3可知，静水解冻组样品的剪切力显著高于500 W超声波处理组 ( $P < 0.05$ )，而随着超声波功率的增加，各超声波处理组样品的剪切力逐渐降低。这可能是由于超声波功率增大时，其声能转化为更大的机械能，增大了冰晶对膜的损坏程度，从而减少了剪切肉所需的力<sup>[24]</sup>。由于猪肉细胞和亚细胞结构的损伤，溶酶体和蛋白酶的释放以及升高的温度导致肌肉蛋白变性也可以解释硬度的降低<sup>[25]</sup>。短时间超声波处理可以使细胞破碎，从而释放溶酶体，它们可能参与了蛋白质的分解，导致小肽的增多，从而使肉的嫩化程度增加。钟赛意等<sup>[26]</sup> 用超声波处理牛肉，发现其能够较好地改善肌肉组织的质构，与本研究结果一致，证实了超声波能够增加猪肉嫩度这一结论。

## 2.5 不同超声波功率解冻对猪肉水分分布的影响

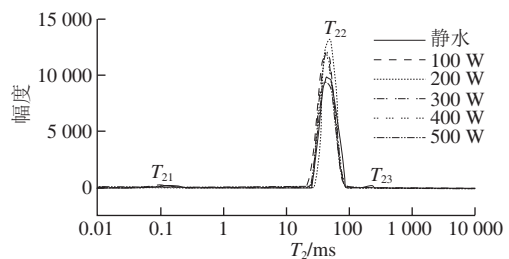


图4 不同超声波功率解冻对猪肉T<sub>2</sub>的影响

Fig. 4 Effect of ultrasonic power on  $T_2$  of thawed pork

水在肉中主要以结合水、不易流动水和自由水3种形式存在,传统方法无法对水分的流动性以及其在肉中的分布状态进行检测,LF-NMR能够检测出水的上述3种存在形式。由图4可知, $T_2$ 弛豫时间曲线上出现了3个峰,其中与蛋白质结合紧密的是 $T_{21}$ ,表示结合水,弛豫时间0~10 ms,在解冻的肉样品中占总水分的1%~4%。位于肌原纤维蛋白质基质上的是 $T_{22}$ ,表示不易流动水,弛豫时间在10~100 ms之间,是肉类中水分的主要存在形式,占总含水量的90%以上。第3个峰为 $T_{23}$ ,表示自由水,弛豫时间最长(100~400 ms),并且是肉中流动性最大的一部分水<sup>[27]</sup>。

表3 不同超声波功率解冻对猪肉 $T_2$ 峰面积比的影响

**Table 3 Effect of ultrasonic power on  $T_2$  peak area ratio in thawed pork**

| $T_2$ 指标 | 静水解冻                    | 超声波功率/W                 |                         |                         |                         |                         |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|          |                         | 100                     | 200                     | 300                     | 400                     | 500                     |
| $T_{21}$ | 3.16±0.28 <sup>a</sup>  | 3.28±0.26 <sup>a</sup>  | 3.46±0.27 <sup>a</sup>  | 3.48±0.19 <sup>a</sup>  | 3.02±0.27 <sup>a</sup>  | 3.20±0.41 <sup>a</sup>  |
| $T_{22}$ | 96.29±0.48 <sup>a</sup> | 95.86±0.18 <sup>a</sup> | 95.89±0.47 <sup>a</sup> | 95.79±0.50 <sup>a</sup> | 95.73±0.54 <sup>a</sup> | 95.72±0.55 <sup>a</sup> |
| $T_{23}$ | 0.75±0.05 <sup>b</sup>  | 0.76±0.04 <sup>b</sup>  | 0.78±0.03 <sup>b</sup>  | 0.88±0.03 <sup>b</sup>  | 0.93±0.12 <sup>b</sup>  | 1.01±0.08 <sup>b</sup>  |

由表3可知,静水解冻处理组样品的 $T_{21}$ 、 $T_{22}$ 峰面积比与超声波处理组相比均没有显著差异( $P>0.05$ );静水解冻处理组 $T_{23}$ 的峰面积比显著低于500 W超声波处理组,各超声波处理组样品的 $T_{23}$ 峰面积比随着超声波功率的增大而增加。这表明解冻猪肉中自由水的含量随着超声波功率的增大而升高,从而导致其保水性降低,这与本研究中样品的压榨保水性和汁液损失率的变化趋势相对应。自由水含量随超声波功率的增大而增加可能是由于超声波功率增大时,其产生的声空化作用增强,破坏了肉中的肌原纤维结构,使不易流动水转化为自由水,导致汁液损失增加,肉的保水性下降。

### 2.6 不同超声波功率解冻对猪肉蛋白质溶解性的影响

表4 不同超声波功率解冻对猪肉蛋白质溶解性的影响

**Table 4 Effect of ultrasonic power on water-soluble and salt-soluble protein contents of thawed pork**

| 测定指标   | 静水解冻                      | 超声波功率/W                  |                          |                          |                          |                          |
|--------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|        |                           | 100                      | 200                      | 300                      | 400                      | 500                      |
| 水溶性蛋白质 | 59.95±2.40 <sup>a</sup>   | 56.03±6.75 <sup>a</sup>  | 50.61±4.66 <sup>b</sup>  | 50.30±2.30 <sup>b</sup>  | 49.81±4.78 <sup>b</sup>  | 41.04±3.42 <sup>b</sup>  |
| 盐溶性蛋白质 | 204.73±21.47 <sup>a</sup> | 198.17±9.64 <sup>b</sup> | 177.56±9.39 <sup>b</sup> | 172.39±7.05 <sup>b</sup> | 159.54±8.47 <sup>b</sup> | 123.34±8.27 <sup>b</sup> |

水溶蛋白和盐溶蛋白对肉的加工品质有很大影响,特别是在保水性和凝聚性方面有重要贡献<sup>[28]</sup>。由表4可知,静水解冻处理组样品的水溶性蛋白质含量除显著高于500 W超声波处理组( $P<0.05$ )以外,与其他超声波处理组没有显著差异;而随着超声波功率的增大,各超声波处理组样品的水溶性蛋白质含量呈下降趋势。盐溶性蛋白质含量的变化趋势与水溶性蛋白质一致,其原因可能是随着超声波功率的增大,其产生的机械作用增强,热效应增加,导致蛋白质发生变性,从而使其含量

降低。Vieira等<sup>[29]</sup>的研究表明,冷冻能够导致钙泵活性的显著降低和 $Mg^{2+}$ -乙二醇双(2-氨基乙基醚)四乙酸(glycol-bis-(2-aminoethylether)-*N,N,N',N'*-tetraacetic acid, EGTA)-ATP酶活性的显著增加,从而导致肌球蛋白和肌钙蛋白-原肌球蛋白复合物变性,解冻后其含量降低。杨波等<sup>[30]</sup>研究发现,通过增大超声波功率能够使水溶蛋白含量下降,与本研究的结果一致。本研究结果表明,随着超声波功率的增加,解冻后猪肉的pH值呈下降趋势,pH值降低导致蛋白质的溶解度降低,使其形成沉淀也可以解释其蛋白质含量的下降。

### 3 结论

与静水解冻相比,超声波解冻处理可以缩短冷冻猪肉的解冻时间,且随着超声波功率的增大,猪肉的剪切力值降低,有利于提高肉的嫩度,猪肉的pH值随着超声波功率的增大而下降,有利于抑菌作用;然而猪肉样品的解冻汁液损失率、蒸煮损失率、压榨保水性、 $L^*$ 、 $a^*$ 、水溶性蛋白质和盐溶性蛋白质含量均随着超声波功率的增加而呈下降趋势;超声波处理组样品的 $T_{23}$ 峰面积比随着超声波功率的增大而增大,肉的品质特性降低。200 W超声波解冻是既能缩短解冻时间,又能减少猪肉品质降低的最佳功率。

### 参考文献:

- [1] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, THONGKAEW C, et al. Comparative study on physicochemical changes of muscle proteins from some tropical fish during frozen storage[J]. Food Research International, 2003, 36(8): 787-795. DOI:10.1016/S0963-9969(03)00073-5.
- [2] CHANDIRASEKARAN V, THULAS G. Effect of different thawing methods on physico-chemical characteristics of frozen buffalo meat[J]. Journal of Food Technology, 2010, 8(6): 239-242. DOI:10.3923/jftech.2010.239.242.
- [3] KONDRATOWICZ J, CHWASTOWSKA I, MATUSEVIČIUS P. Sensory quality of pork and total microbial count depending on deep-freeze storage time and thawing method[J]. Veterinarija ir Zootechnika, 2006, 33(55): 43-46.
- [4] 闫坤, 吕加平, 谢跃杰, 等. 超声波技术在乳品加工中的应用[J]. 中国乳品工业, 2009, 37(11): 29-32. DOI:10.3969/j.issn.1001-2230.2009.11.008.
- [5] 彭登峰, 柴春祥, 张坤生, 等. 不同解冻方式对速冻荞面碗托品质的影响[J]. 现代食品科技, 2014(8): 187-193.
- [6] KISSAM A D, NELSON R W, NGAO J, et al. Water-thawing of fish using low frequency acoustics[J]. Journal of Food Science, 1982, 47(1): 71-75. DOI:10.1111/j.1365-2621.1982.tb11029.x.
- [7] 余力, 贺稚非, 王兆明, 等. 不同解冻方式对伊拉兔肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 95-101. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201522017.
- [8] 马超锋, 关志强, 李敏, 等. 超声波解冻对壳聚糖涂膜罗非鱼片的水分分布及品质相关性研究[J]. 食品工业科技, 2017(2): 332-336.
- [9] FERNÁNDEZ P P, SANZ P D, MOLINA-GARCÍA A D, et al. Conventional freezing plus high pressure-low temperature treatment:



- physical properties, microbial quality and storage stability of beef meat[J]. *Meat Science*, 2007, 77(4): 616-625. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.05.014.
- [10] YU L H, LIM D G, JEONG S G, et al. Effects of temperature conditioning on postmortem changes in physico-chemical properties in Korean native cattle (Hanwoo)[J]. *Meat Science*, 2008, 79(3): 64-70. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.07.033.
- [11] HOPE-JONES M, STRYDOM P E, FRYLINCK L, et al. The efficiency of electrical stimulation to counteract the negative effects of  $\beta$ -agonists on meat tenderness of feedlot cattle[J]. *Meat Science*, 2010, 86(3): 699-705. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.06.008.
- [12] GAO Tian, LI Jiaolong, ZHANG Lin, et al. Effect of different tumbling marinade treatments on the water status and protein properties of prepared pork chops[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(12): 2494-2500. DOI:10.1002/jfsa.6980.
- [13] LAGERSTEDT Å, ENFÄLT L, JOHANSSON L, et al. Effect of freezing on sensory quality, shear force and water loss in beef *M. longissimus dorsi*[J]. *Meat Science*, 2008, 80(2): 457-461. DOI:10.1016/j.meatsci.2008.01.009.
- [14] JEONG J Y, KIM G D, YANG H S, et al. Effect of freeze-thaw cycles on physicochemical properties and color stability of beef semimembranosus muscle[J]. *Food Research International*, 2011, 44(10): 3222-3228. DOI:10.1016/j.foodres.2011.08.023.
- [15] HERGENREDER J E, HOSCH J J, VARNOLD K A, et al. The effects of freezing and thawing rates on tenderness, sensory quality, and retail display of beef subprimals[J]. *Journal of Animal Science*, 2013, 91(1): 483-490. DOI:10.2527/jas2012-5223.
- [16] TROY D J, KERRY J P. Consumer perception and the role of science in the meat industry[J]. *Meat Science*, 2010, 86(1): 214-226. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.05.009.
- [17] HUFF-LONERGAN E, LONERGAN S M. Mechanisms of water-holding capacity of meat: the role of postmortem biochemical and structural changes[J]. *Meat Science*, 2005, 71(1): 194-204. DOI:10.1016/j.meatsci.2005.04.022.
- [18] XIA Xiufang, KONG Baohua, XIONG YoulingL., et al. Decreased gelling and emulsifying properties of myofibrillar protein from repeatedly frozen-thawed porcine *longissimus* muscle are due to protein denaturation and susceptibility to aggregation[J]. *Meat Science*, 2010, 85(3): 481-486. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.02.019.
- [19] LIU G, XIONG Y L, BUTTERFIELD D A. Chemical, physical, and gel-forming properties of oxidized myofibrils and whey- and soy-protein isolates[J]. *Journal of Food Science*, 2000, 65(5): 811-818. DOI:10.1111/j.1365-2621.2000.tb13592.x.
- [20] FAROUK M M, WIELICZKO K J, MERTS I. Ultra-fast freezing and low storage temperatures are not necessary to maintain the functional properties of manufacturing beef[J]. *Meat Science*, 2004, 66(1): 171-179. DOI:10.1016/S0309-1740(03)00081-0.
- [21] LEYGONIE C, BRITZ T J, HOFFMAN L C. Oxidative stability of previous frozen ostrich *Muscularis iliofibularis* packaged under different modified atmospheric conditions[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2011, 46(6): 1171-1178. DOI:10.1111/j.1365-2621.2011.02603.x.
- [22] 刘雪梅, 孟宪军, 李斌, 等. 不同解冻方法对速冻草莓品质的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(22): 276-281. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201422054.
- [23] DIAS J, NUNES M L, MENDES R. Effect of frozen storage on the chemical and physical properties of black and silver scabbard fish[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1994, 66(3): 327-335. DOI:10.1002/jfsa.2740660310.
- [24] LIU Zelong, XIONG YoulingL., CHEN Jie. Protein oxidation enhances hydration but suppresses water-holding capacity in porcine *longissimus* muscle[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(19): 10697-10704. DOI:10.1021/jf102043k.
- [25] JAYASOORIYA S D, TORLEY P J, D'ARCY B R, et al. Effect of high power ultrasound and ageing on the physical properties of bovine *semitendinosus* and *longissimus* muscles[J]. *Meat Science*, 2007, 75(4): 628-639. DOI:10.1016/j.meatsci.2006.09.010.
- [26] 钟赛意, 姜梅, 王善荣, 等. 超声波与氯化钙结合处理对牛肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2007, 28(11): 142-146. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2007.11.029.
- [27] LI Chunbao, LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, et al. Meat quality and cooking attributes of thawed pork with different low field NMR  $T_{21}$ [J]. *Meat Science*, 2012, 92(2): 79-83. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.11.015.
- [28] CHAPLEAUL N, MANGAVEL C, COMPOINT J, et al. Effect of high-pressure processing on myofibrillar protein structure[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2004, 84(1): 66-74. DOI:10.1002/jfsa.1613.
- [29] VIEIRA C, DIAZ M Y, MARTÍNEZ B, et al. Effect of frozen storage conditions (temperature and length of storage) on microbiological and sensory quality of rustic crossbred beef at different stages of aging[J]. *Meat Science*, 2009, 83(3): 398-404. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.06.013.
- [30] 杨波, 杨光, 秦娴. 超声波和微波对花生粕水溶蛋白浸出率影响[J]. *应用化工*, 2012, 41(6): 980-983. DOI:10.3969/j.issn.1671-3206.2012.06.015.