

# 超声波及直流磁场对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜理化性质和凝胶特性的影响

何欣莞<sup>1</sup>, 胡力<sup>1</sup>, 李春强<sup>1</sup>, 张燕维<sup>1</sup>, 孙卫青<sup>2</sup>, 邵俊花<sup>1\*</sup>

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866) (2. 长江大学生命科学学院, 湖北荆州 434023)

**摘要:** 该研究以淘汰蛋鸡鸡胸肉糜为研究对象, 应用超声波和直流磁场处理后探究肉糜凝胶在相变温度(76 °C和84 °C)下的理化性质和凝胶特性。研究发现: 超声波及直流磁场能有效改善淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的热加工特性。当加热温度为84 °C时, 超声及磁化处理均使肉糜凝胶的硬度降低, 弹性增强, 保水性得到提高, 其中超声处理使其水分含量发生明显变化, 磁化处理后水分含量则更加接近于对照组; 当加热温度为76 °C时, 超声处理对实验组有所改善, 同时磁化处理15 min时各项指标变化更为明显: 硬度降低至627.00 g, 弹性升高至3.60 mm, 蒸煮损失降低至12.47%, pH值降低至7.39, 不易流动水含量变化为60.02%, 这显著( $P<0.05$ )提高了淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的凝胶特性, 使其性质更加接近于商品化肉糜。结果表明: 与超声处理相比, 磁化15 min能够有效改善淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的热加工特性, 同时其操作时间较短、方便简单, 可以有效利用于淘汰蛋鸡的生产加工, 为淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶的工厂化生产提供技术支持。

**关键词:** 淘汰蛋鸡; 超声波; 直流磁场; 热加工; 凝胶特性

文章编号: 1673-9078(2024)12-178-187

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.12.1445

## Effects of Ultrasonic Treatment and Direct Current Magnetic Field on Physicochemical and Gel Properties of Spent Hen Breast Batter

HE Xinyan<sup>1</sup>, HU Li<sup>1</sup>, LI Chunqiang<sup>1</sup>, ZHANG Yanwei<sup>1</sup>, SUN Weiqing<sup>2</sup>, SHAO Junhua<sup>1\*</sup>

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

(2. College of Life Science, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

**Abstract:** The physicochemical and gel properties of ultrasound- and direct current magnetic field-treated spent laying hen breast batter at phase transition temperatures (76 °C and 84 °C) were analyzed. The results showed that both ultrasound and direct current magnetic field enhanced the thermal processing properties of spent laying hen breast batter. At 84 °C, both ultrasonic treatment and magnetization resulted in reduced firmness, increased elasticity, and improved water retention properties of batter gels. Notably, ultrasonic treatment significantly altered the moisture content of batter gels, whereas magnetization yielded a moisture content closer to that of the control group. At 76 °C, ultrasonic treatment led to

引文格式:

何欣莞, 胡力, 李春强, 等. 超声波及直流磁场对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜理化性质和凝胶特性的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(12): 178-187.

HE Xinyan, HU Li, LI Chunqiang, et al. Effects of ultrasonic treatment and direct current magnetic field on physicochemical and gel properties of spent hen breast batter [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(12): 178-187.

收稿日期: 2023-12-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32272255)

作者简介: 何欣莞(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 动物源食品加工与利用, E-mail: 15104020111@163.com

通讯作者: 邵俊花(1980-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 动物源食品加工与利用, E-mail: shaojh024@syau.edu.cn

improvements in the experimental group, but the measured indices changed more obviously after 15 min magnetization (firmness reduced to 627.00 g, elasticity increased to 3.60 mm, cooking loss decreased to 12.47%, pH value decreased significantly to 7.39, and content of flow-resistant water changed to 60.02%), which significantly ( $P < 0.05$ ) improved the gel properties of spent laying hen breast batter to values closer to those of commercial broilers. These results indicate that compared with ultrasonic treatment, magnetization for 15 min can improve the thermal processing properties of spent laying hen breast batter. As magnetization has a short operation time and is convenient and simple, it can improve the production and processing of spent laying hens. These findings provide technical support for the factory production of spent laying hen breast batter gels.

**Key words:** spent laying hen; ultrasonic treatment; direct current magnetic field; thermal processing; gel property

淘汰蛋鸡肉脂肪和胆固醇含量低, 富含蛋白质、维生素、锌和铁等<sup>[1]</sup>。与商品化肉鸡相比, 淘汰蛋鸡饲养时间长、产蛋期体能消耗大、出肉率低、肉质较老, 加工特性较差。目前, 淘汰蛋鸡一般加工成食品或饲料, 运用熏制等方法整鸡出售, 但由于加工成本高、体型较小、有残留的骨头碎片等, 销售价格一般较低, 经济效益较差<sup>[2]</sup>, 淘汰蛋鸡资源利用率不充分。因此改善淘汰蛋鸡肉热加工后的理化特性及凝胶性质有利于提高蛋鸡的利用率, 促进家禽行业的可持续发展。

肉制品凝胶是一个复杂的体系, 其凝胶的形成受到很多因素的影响。邵俊花<sup>[3]</sup>系统的研究了肉类蛋白质在斩拌过程中的保油保水性以及形成乳化凝胶的作用机理, 发现蛋白在乳化过程中二硫键、氢键和疏水相互作用力是主要发生的化学作用力。李可等<sup>[4]</sup>研究发现: 低频率高强度超声处理能够使鸡胸肉肌原纤维蛋白结构变得更加无序, 同时降低肌原纤维蛋白粒径。杜方丽等<sup>[5]</sup>研究发现: 冷藏期间的生姜提取物能够有效提高淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的蒸煮得率, 改善其质构特性。李宁宁等<sup>[6]</sup>研究发现: 当地皮菜添加含量在 2% 时, 能够降低鸡胸肉糜的蒸煮损失率。

超声波 (Ultrasound, US) 能够通过“空化效应”来改变蛋白质的内部结构, 引起的肉组织的物理性破坏, 进而改进食品中各种蛋白质的功能特性以及肉制品的品质特性, 可以达到显著改善肌原纤维蛋白破裂与溶解的效果, 这已成为食品物理性加工技术领域的研究热点<sup>[7]</sup>。目前多将超声波作用于溶液, 将处理后的溶液与肉糜斩拌混合从而达到嫩化及改良的效果。Ito 等<sup>[8]</sup>发现超声波通过破坏鸡胸肌中肌原纤维蛋白在水中结构, 从而提高肌原纤维的蛋白溶解度, 目前只有少数研究报道了鸡胸肉糜在高功率超声波作用下发生理化性质的变化。

另外, 直流磁场 (Direct Current Magnetic Field, DC) 是一种物理性场, 既能改善蛋白质结构, 同时还可以提高蛋白质的功能特性<sup>[9]</sup>。在很大的范围内 ( $10 \sim 10^4$  Gs), 生物效应都可以通过磁场发生, 且改变磁场强度也会对生物体产生不同的效果。磁场是一种应用在食品中的新型加工技术, 但现阶段将其应用在鸡胸肉制品上的研究相对较少, 多为猪肉制品: Yang 等<sup>[10]</sup>研究发现, 经过磁化改良后的猪肌原纤维蛋白样品在磁场强度为 3.8 mT 时持水能力最强, 且微观结构相对致密均匀; Guo 等<sup>[11]</sup>利用较低频率的磁场处理猪肉肌原纤维蛋白凝胶, 发现在 0.5 mT 强度下其保水能力最强, 分子间疏水相互作用较大, 可以达到改善凝胶质构特性的最佳效果。与化学及生物性处理相比, 物理性处理的超声波及磁化处理操作简单、安全便捷, 同时对原料无污染、损耗较小, 因此, 本文拟研究比较超声波与磁化处理对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜热诱导凝胶特性的影响, 以为淘汰蛋鸡肉热加工特性处理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

冷冻淘汰蛋鸡 (整鸡, 宰后去除内脏冷冻 1 周)、市售商品化肉鸡鸡胸肉, 大成食品有限公司 (均购买于沈阳市大东区八家子农贸市场); 复合磷酸盐 (主要成分为焦磷酸钠、三聚磷酸钠、六偏磷酸钠), 徐州添安食品添加剂有限公司; 食用盐, 中国盐业股份有限公司; 蔗糖, 沈阳北糖糖业有限公司; 以上均为食品添加剂级别。

DHR-1 型流变仪, 美国 TA 公司; SN-QX-20D 型超声处理仪, 上海尚普仪器有限公司; 直流磁场发生器, 湖南派生科技有限公司; CY3 10K 型质构仪, 美国 Brookfield 公司; TW 20 恒温水浴锅, 德国 Julabo 公司; C-LM3B 型数显式肌肉嫩度仪, 东

北农业大学工程学院; CR-400 型色差仪, 日本 Konica Minolta 公司; pH-01 穿刺式 pH 计, 美国艾伯森有限公司; 001 低场核磁共振仪, 上海纽迈电子科技有限公司。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 肉糜配方

肉糜配方: 淘汰蛋鸡鸡胸肉或市售商品化肉鸡鸡胸肉 750 g, 食用盐 20 g, 复合磷酸盐 2.5 g, 蔗糖 10 g, 冰水混合物 217.5 g。

### 1.2.2 肉糜制备

将鸡胸肉在 4 °C 下解冻 12 h, 剔除可见的结缔组织和外皮, 准备 10 份同样的材料, 按如下操作进行, 制备过程中所有材料均在冰水浴 (0~4 °C) 中保存; 先将已经去皮的鸡胸肉经 5 mm 孔径绞肉机绞碎, 然后将粗斩后的肉糜放入真空斩拌机中, 加入食用盐和复合磷酸盐; 将混合物在真空条件下进行低速斩拌, 静置 10 min 后, 再加入冰水混合物及蔗糖, 然后继续进行真空高速斩拌, 每斩拌 1 min, 停 2 min, 共斩拌 4 min, 制成肉糜样品。其中, 市售商品化肉鸡鸡胸肉糜为后续试验空白对照组 (CK)。

### 1.2.3 流变特性的测定

用旋转流变仪测定斩拌后肉糜样品的动态流变学特性。采用 40 mm 平板测试, 首先将约 2 g 样品均匀涂布于测试平台, 赶走肉糜间气泡。参数设置为: 频率 0.1 Hz, 应变 2%, 上下狭缝 0.8 mm, 起始温度为 20 °C, 升温速率 2 °C/min, 终止温度为 90 °C。测定指标分别为储能模量  $G'$  及相位角  $\tan\delta$ 。在测定过程中, 于肉糜凝胶与空气接触处加封一层硅油进行密封。

### 1.2.4 超声波对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的处理

取斩拌好的淘汰蛋鸡鸡胸肉糜 200 g 放入真空包装袋内进行抽真空处理, 真空好的肉糜直接放入超声处理仪器中, 以固定的超声功率 220 W, 通过改变超声时间: 15、30、45 和 60 min, 来达到处理效果, 各试验组记为 US15、US30、US45、US60。每超声处理 5 min 后, 将真空包装袋取出冷却并停止工作 5 min, 控制样品一直处于 0~4 °C 环境中, 直至达到该试验组时间后停止超声。将处理好的肉糜放入冰水浴中进行平衡, 手工揉制成直径 2 cm、质量 12 g 肉丸形状的生肉糜凝胶, 以直接水煮的方式, 分别投入于 76 和 84 °C 的恒温水浴锅中加热,

当中心温度分别达到 74 和 82 °C 时停止加热, 然后将制备好的鸡胸肉糜凝胶取出, 并迅速放入 4 °C 的水中进行降温 2 min。沥干水分后放入 4 °C 冰箱保存 12 h, 再进行后续指标测定。

### 1.2.5 直流磁场对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的处理

取斩拌好的淘汰蛋鸡鸡胸肉糜 200 g 放入磁场发生器中, 控制样品一直处于 0~4 °C 冰水浴环境中, 磁场强度为 30 Gs, 搅拌速度为 250 r/min, 磁化时间分别为 5、10、15、20 min 在切割直流磁场条件下对肉糜进行处理, 控制样品一直处于 0~4 °C 环境中, 各试验组记为 DC05、DC10、DC15、DC20。将处理好的肉糜放入冰水浴中进行平衡, 手工揉制成直径 2 cm、质量 12 g 肉丸形状的生肉糜凝胶, 以直接水煮的方式, 分别投入于 76 和 84 °C 的恒温水浴锅中加热, 当中心温度分别达到 74 和 82 °C 时停止加热, 然后将制备好的鸡胸肉糜凝胶取出, 并迅速放入 4 °C 的水中进行降温 2 min。沥干水分后放入 4 °C 冰箱保存 12 h, 再进行后续指标测定。

### 1.2.6 色差的测定

将在室温下平衡后的肉糜凝胶从中心切开, 以厚度 2 mm、直径 20 mm 切片取样, 用色差仪测量各组样品的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值, 每个样品选取 3 个位置进行色差的测定, 每个位置重复测量三次, 取平均值。

### 1.2.7 质构特性的测定

质构特性的测定: 用取样器从加热后的肉糜凝胶中取直径 5 mm、高 10 mm 样品, 使上下表面平整且表面积、体积均相同, 利用 P50 型号圆柱形不锈钢探头, 参数设置为: 测试前速率 2 mm/s, 测试中速率 1 mm/s, 测试后的速率 2 mm/s, 压缩程度 40%, 停留间隔时间 5 s, 以 Auto-5 g 作为负重探头, 数据收集率设置为 200 pps。其中测定的指标有硬度、回复性、粘性、弹性、咀嚼性。

剪切力的测定: 取冷却至室温的肉糜样品并剔除有明显缺陷的部分样品, 用剪切力仪自带取样器取样, 取样长度约 (1.5±0.1) cm, 取样位置距离边缘不少于 4 mm, 取样后立即测定以防止水分蒸发。以 MORS 刀片作为下压测定探头, 参数设置为: 测试前速度 1.0 mm/s, 测试中速度 1.0 mm/s, 测试后速度 1.0 mm/s, 压缩比例设置为 40%, 停留间隔时间 5 s, 循环次数 2 次。

每组试验重复测定 3 次, 每组样品平行测定 3 次。



### 1.2.8 保水性的测定

蒸煮损失的测定方法参照 Thawatchai 等<sup>[12]</sup>的方法进行,并稍作修改,采用吸水纸吸收法测定。操作过程如下:未煮制肉糜凝胶的质量固定为  $m_1$ ,将达到预设中心温度(分别为 74 和 82 °C)的肉糜凝胶从水浴锅中捞出,放入 4 °C 水中冷却 2 min,捞出沥干,并用 6 张厨房用吸水纸(上下分别 3 张)吸水纸吸干肉糜凝胶表面水分,持续吸水 8 min 后称重肉糜凝胶质量,记为  $m_2$ 。计算公式:

$$A = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$A$ ——蒸煮损失率, %;

$m_1$ ——未煮制的肉糜凝胶质量, g;

$m_2$ ——煮制吸水后的肉糜凝胶质量, g。

离心损失的测定方法参照 Villamonte 等<sup>[13]</sup>的方法进行,并稍作修改。切取 10 mm 高的凝胶切块,记录凝胶质量为  $m_3$ ,用三层滤纸包裹住凝胶切块后置于 50 mL 圆底离心管中。在低温(4 °C)下,以 3 000 g、15 min 为参数对凝胶切块进行离心,离心后的凝胶去掉滤纸后再次称重,将质量计为  $m_4$ 。

$$B = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$B$ ——离心损失率, %;

$m_3$ ——未离心的凝胶质量, g;

$m_4$ ——离心后的凝胶质量, g。

### 1.2.9 pH值的测定

参照郭守立等<sup>[14]</sup>的方法并稍做修改,将穿刺式 pH 计的探头插入处理过后达到各组中心温度的熟肉糜凝胶样品中 10 mm 左右,待数显屏幕上的读数稳定后,记录下样品的具体数值,每个样品随机选取 3 个点进行测试记录,结果取平均值。

### 1.2.10 肉糜 NMR 自旋-自旋弛豫时间的测定 ( $T_2$ )

参考张骏龙等<sup>[15]</sup>的方法并稍作修改,采用核磁共振分析仪采集  $T_2$  弛豫信息。测试条件设置为:质子共振频率 22 MHz,测量温度 32 °C。将约 2 g 熟肉糜凝胶样品放入口径为 15 mm,高为 40 mm 的核磁检测管内,放入仪器中进行测量。参数设置为: $\eta$  值 150  $\mu$ s,重复进行 64 次扫描,间隔时间 3 000 ms,回波个数 5 000 个,每组试验重复 3 次。将得到的指数用仪器自带软件反演出  $T_2$  值,其中  $T_2$  值中每

个组分对应的峰面积与总峰面积比值则为对应试验组的水分分布相对含量 ( $P_2$ )。

### 1.2.11 数据处理与统计分析

试验以市售商品化肉鸡鸡胸肉糜为对照组,超声波及直流磁场处理的淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶为实验组,试验重复 3 次,每次 3 个平行,各组结果均以平均值  $\pm$  标准偏差表示。利用 IBM SPSS 软件进行方差分析,差异显著者应用 Duncan's 方法进行多重检验,以 95% 置信区间表示样本间的统计显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 热诱导凝胶形成过程中两种肉糜体系流变特性的变化

图 1 为淘汰蛋鸡和市售商品化肉鸡鸡胸肉糜储能模量随加热温度的变化。市售商品化肉鸡的储能模量呈现三个阶段,先升高后急剧降低,而后随着温度的升高而升高,直至不再变化;淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的储能模量则先下降,达到最低值后升高,后趋于平稳。加热初期储能模量变化趋势的不同可能是因为较低的温度不足以充分扩展蛋白结构,活性基团未大量暴露而无法促进蛋白分子间的交联<sup>[16]</sup>。Ruiz 等<sup>[17]</sup>研究发现,大颗粒的絮凝和沉淀可能会以不溶性物质形式参与凝胶网络构建,降低凝胶形成趋势。这也印证了淘汰蛋鸡鸡胸肉糜在加热初期  $G'$  值呈下降趋势,这是由于淘汰蛋鸡肌纤维过粗,经斩拌过后依然有部分纤维未被斩断。在第三阶段,84 °C 以后  $G'$  值持续增加到稳定状态,由于共价二硫键和疏水相互作用而形成永久性不可逆交联的肌球蛋白丝,此时样品体系已形成良好的三维凝胶网状结构,后续淘汰蛋鸡鸡胸肉糜略微降低,这是由于加热时蛋白质过度聚集引起的<sup>[18]</sup>。

Xiong 等<sup>[19]</sup>发现,在相同的凝胶形成条件下,淘汰蛋鸡肌原纤维蛋白比普通肉鸡的凝胶性能弱。由于淘汰蛋鸡中总的胶原蛋白含量高于市售商品化肉鸡,致使淘汰蛋鸡与普通肉鸡肌原纤维蛋白凝胶性能有很大的差异,因此淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的储能模量在加热过程中与商品化肉鸡的差异较大。

图 2 为两种鸡胸肉糜损耗角正切值随时间的变化。淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的  $\tan\delta$  一直在降低,而商品化肉鸡呈先升高后降低的趋势,说明商品化肉鸡的凝胶在初期阶段具有更好的黏性。其与商品化鸡胸肉糜不同的储能模量变化表明,淘汰蛋鸡鸡胸肉糜

的凝胶形成能力较差。由图 1 可以看出, 淘汰蛋鸡鸡胸肉糜  $G'$  值的起始与最终点都低于商品化鸡胸肉糜, 这就表明热诱导淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶强度较低。通过观察流变特性可以发现,  $76\text{ }^{\circ}\text{C}$  与  $84\text{ }^{\circ}\text{C}$  为淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的热变性关键温度点, 因此后续实验主要测定在  $76\text{ }^{\circ}\text{C}$  及  $84\text{ }^{\circ}\text{C}$  下各项指标的变化。

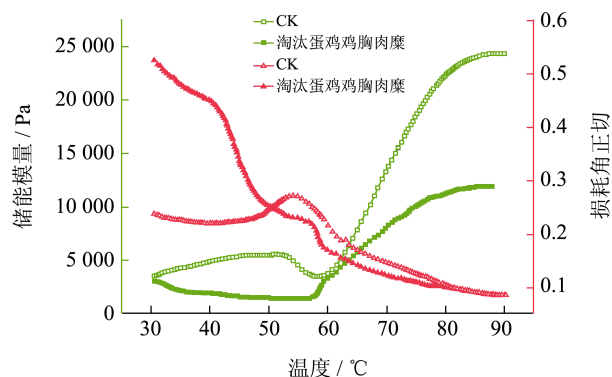


图 1 两种鸡胸肉糜储能模量及损耗角正切随温度的变化

Fig.1 Changes of the storage modulus ( $G'$ ) and  $\tan\delta$  of two kinds of chicken breast meat batters with temperature

## 2.2 超声波及磁化处理对肉糜凝胶外观形态及色差的影响

图 2 反映的是不同超声时间处理对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜表现的影响。可以看出, 随着超声时间由  $15\text{ min}$  延长至  $60\text{ min}$ , 淘汰蛋鸡鸡胸肉糜内部产生白色不溶性蛋白质凝块, 这可能是由于超声处理时, 自身产生的热量与机械效应直接作用于鸡胸肉糜, 致使肉糜中的蛋白质发生变性, 肉色先变浅, 在超声时间达到  $60\text{ min}$  时变得更红。通过热加工后可以看出, 肉糜凝胶表面变得更为细腻, 对半切开发现粗肌纤维变少, 孔洞缩小, 横切面更加平滑。但由于超声处理时间的增长, 肉糜在还未进行热加工时就优先发生变性, 且超声时间越长, 肉糜凝胶收缩得更为明显, 肉糜的剧烈收缩导致表面出现棱角, 通过表面平整度可以发现超声处理  $30\text{ min}$  为宜。

图 3 反映的是不同磁化时间处理对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜表现的影响。可以看出, 随着磁化时间的延长, 肉糜凝胶表面变得平整光滑, 能够保持原有的肉糜凝胶形状。在  $20\text{ min}$  时其外观又出现孔洞, 由于热加工后出现收缩现象, 其体积也略有减少。增加磁化时间能够有效使淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的色泽发生变化, 表面丰盈水嫩, 通过肉糜凝胶表面平滑程度可以发现磁化处理  $15\text{ min}$  为宜。

表 1 反映的是经过超声及磁化处理淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的色差变化情况。由表 1 可以看出, 淘汰蛋

鸡鸡胸肉糜的亮度 ( $L^*$  值) 与红度 ( $a^*$  值) 均产生显著变化, 且具有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其中经磁化处理后  $L^*$  值和  $b^*$  值 (黄度) 明显呈先升高后降低趋势,  $a^*$  值则先降低后升高; 经超声处理后在  $76\text{ }^{\circ}\text{C}$  下色差均呈现先降低后升高的趋势, 而在  $84\text{ }^{\circ}\text{C}$  下则先升高后降低。 $L^*$  值的升高是由于在直流磁场中的搅拌作用下, 肉糜内部与空气大量接触, 部分肉糜被氧化导致颜色加深, 另一方面也可能是因为搅拌处理导致肉糜内部被拉扯, 对肉糜良好质地的形成具有一定的破坏作用, 破坏程度越高则  $b^*$  值越低<sup>[20]</sup>。

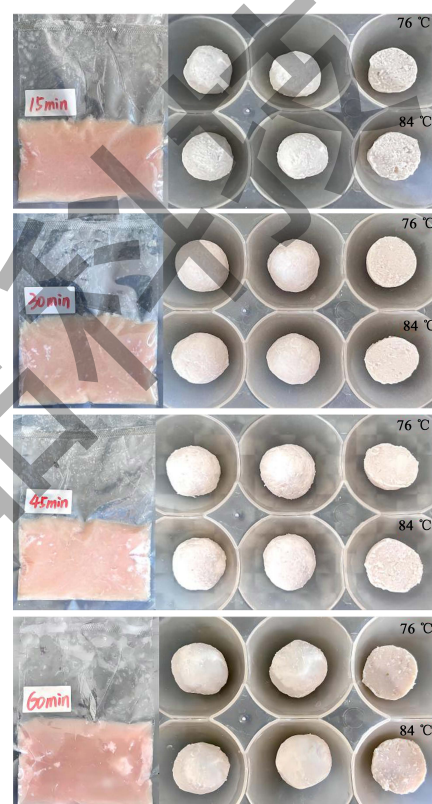


图 2 不同超声时间处理对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶表现的影响

Fig.2 Effect of different time of ultrasonic treatment on the appearance of spent laying hens breast meat batters



图 3 不同磁化时间处理对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶表现的影响

Fig.3 Effects of different time of magnetization on the appearance of spent laying hens breast meat batters

表 1 超声及磁化对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶色泽的影响

Table 1 Effect of ultrasonic and magnetized modification on the color difference of spent laying hens breast meat batters

实验组	$L^*$			$a^*$			$b^*$		
	76 °C	84 °C	84 °C	76 °C	84 °C	84 °C	76 °C	84 °C	84 °C
CK	81.18 ± 0.02 <sup>c</sup>	81.24 ± 0.12 <sup>c</sup>	1.27 ± 0.03 <sup>bc</sup>	1.05 ± 0.02 <sup>a</sup>	18.62 ± 0.06 <sup>a</sup>	17.60 ± 0.23 <sup>a</sup>			
US15	83.31 ± 0.02 <sup>c</sup>	82.32 ± 0.16 <sup>c</sup>	1.42 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.13 ± 0.02 <sup>a</sup>	18.37 ± 0.06 <sup>b</sup>	17.20 ± 0.37 <sup>ab</sup>			
US30	83.29 ± 0.01 <sup>c</sup>	82.33 ± 0.15 <sup>c</sup>	1.32 ± 0.02 <sup>ab</sup>	1.28 ± 0.03 <sup>a</sup>	17.70 ± 0.09 <sup>d</sup>	17.21 ± 0.02 <sup>ab</sup>			
US45	81.95 ± 0.18 <sup>d</sup>	82.27 ± 0.05 <sup>c</sup>	1.26 ± 0.03 <sup>bc</sup>	1.29 ± 0.06 <sup>a</sup>	18.11 ± 0.07 <sup>c</sup>	17.12 ± 0.28 <sup>ab</sup>			
US60	82.01 ± 0.19 <sup>d</sup>	81.89 ± 0.11 <sup>d</sup>	1.30 ± 0.02 <sup>bc</sup>	1.21 ± 0.15 <sup>a</sup>	18.70 ± 0.08 <sup>a</sup>	16.71 ± 0.17 <sup>b</sup>			
DC05	85.05 ± 0.12 <sup>a</sup>	85.26 ± 0.11 <sup>b</sup>	1.41 ± 0.07 <sup>a</sup>	1.16 ± 0.01 <sup>a</sup>	18.06 ± 0.01 <sup>c</sup>	16.83 ± 0.02 <sup>b</sup>			
DC10	85.27 ± 0.07 <sup>a</sup>	85.27 ± 0.16 <sup>b</sup>	1.36 ± 0.02 <sup>ab</sup>	1.14 ± 0.02 <sup>a</sup>	18.12 ± 0.09 <sup>c</sup>	16.86 ± 0.04 <sup>b</sup>			
DC15	85.37 ± 0.09 <sup>a</sup>	85.68 ± 0.09 <sup>a</sup>	1.20 ± 0.01 <sup>c</sup>	1.11 ± 0.02 <sup>a</sup>	18.14 ± 0.11 <sup>c</sup>	16.95 ± 0.00 <sup>b</sup>			
DC20	84.56 ± 0.05 <sup>b</sup>	85.15 ± 0.03 <sup>b</sup>	1.26 ± 0.02 <sup>bc</sup>	1.25 ± 0.14 <sup>a</sup>	17.65 ± 0.04 <sup>d</sup>	16.93 ± 0.05 <sup>b</sup>			

注: 不同的小写字母表示组内显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 下同。

表 2 超声及磁化对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶质构的影响

Table 2 Effect of ultrasonic and magnetized modification on texture elimination of spent laying hens breast meat batters

实验组	硬度/g			回弹性/mm			粘性/mJ			弹性/mm			咀嚼性/mJ		
	76 °C	84 °C	84 °C	76 °C	84 °C	84 °C	76 °C	84 °C	84 °C	76 °C	84 °C	84 °C	76 °C	84 °C	84 °C
CK	785.33 ± 17.29 <sup>a</sup>	806.00 ± 27.32 <sup>b</sup>	2.53 ± 0.04 <sup>a</sup>	2.11 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.33 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.70 ± 0.06 <sup>a</sup>	3.49 ± 0.01 <sup>a</sup>	3.26 ± 0.01 <sup>b</sup>	23.70 ± 0.67 <sup>a</sup>	12.03 ± 1.47 <sup>b</sup>					
US15	1 577.33 ± 11.78 <sup>a</sup>	1 077.00 ± 129.34 <sup>b</sup>	2.17 ± 0.06 <sup>b</sup>	2.36 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.57 ± 0.09 <sup>a</sup>	0.43 ± 0.03 <sup>a</sup>	3.39 ± 0.01 <sup>a</sup>	3.41 ± 0.01 <sup>a</sup>	33.27 ± 0.84 <sup>a</sup>	32.07 ± 2.27 <sup>a</sup>					
US30	993.00 ± 53.72 <sup>a</sup>	717.00 ± 37.23 <sup>b</sup>	2.40 ± 0.05 <sup>a</sup>	2.53 ± 0.06 <sup>a</sup>	0.33 ± 0.13 <sup>a</sup>	0.57 ± 0.09 <sup>a</sup>	3.47 ± 0.00 <sup>a</sup>	3.44 ± 0.01 <sup>b</sup>	21.87 ± 1.34 <sup>b</sup>	28.03 ± 0.55 <sup>a</sup>					
US45	1 391.33 ± 38.83 <sup>a</sup>	1 006.00 ± 38.31 <sup>b</sup>	2.39 ± 0.06 <sup>a</sup>	2.38 ± 0.09 <sup>a</sup>	0.70 ± 0.2 <sup>a</sup>	0.43 ± 0.13 <sup>b</sup>	3.41 ± 0.01 <sup>a</sup>	3.38 ± 0.01 <sup>b</sup>	25.42 ± 1.79 <sup>a</sup>	30.73 ± 1.80 <sup>a</sup>					
US60	1 554.00 ± 20.03 <sup>a</sup>	1 040.00 ± 2.33 <sup>b</sup>	2.16 ± 0.06 <sup>a</sup>	2.16 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.67 ± 0.19 <sup>a</sup>	0.27 ± 0.03 <sup>b</sup>	3.37 ± 0.03 <sup>a</sup>	3.42 ± 0.01 <sup>a</sup>	28.47 ± 1.94 <sup>a</sup>	34.80 ± 1.59 <sup>a</sup>					
DC05	1 181.33 ± 44.33 <sup>a</sup>	1 174.67 ± 58.74 <sup>a</sup>	2.20 ± 0.12 <sup>a</sup>	2.23 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.47 ± 0.23 <sup>b</sup>	0.67 ± 0.03 <sup>a</sup>	3.49 ± 0.05 <sup>a</sup>	3.43 ± 0.02 <sup>a</sup>	23.47 ± 0.30 <sup>a</sup>	24.87 ± 1.27 <sup>a</sup>					
DC10	1 040.33 ± 16.76 <sup>b</sup>	1 122.00 ± 13 <sup>a</sup>	2.13 ± 0.09 <sup>b</sup>	2.43 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.63 ± 0.15 <sup>a</sup>	0.23 ± 0.13 <sup>b</sup>	3.50 ± 0.02 <sup>a</sup>	3.44 ± 0.06 <sup>a</sup>	22.93 ± 0.95 <sup>b</sup>	25.07 ± 0.23 <sup>a</sup>					
DC15	627.00 ± 25.58 <sup>b</sup>	838.00 ± 24.95 <sup>a</sup>	2.41 ± 0.00 <sup>a</sup>	2.36 ± 0.14 <sup>a</sup>	0.27 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.33 ± 0.03 <sup>a</sup>	3.60 ± 0.05 <sup>a</sup>	3.49 ± 0.05 <sup>a</sup>	14.60 ± 0.31 <sup>b</sup>	19.53 ± 0.29 <sup>a</sup>					
DC20	684.33 ± 22.18 <sup>b</sup>	1017 ± 51.93 <sup>a</sup>	2.44 ± 0.06 <sup>a</sup>	2.47 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.30 ± 0.06 <sup>a</sup>	0.30 ± 0.06 <sup>a</sup>	3.48 ± 0.05 <sup>a</sup>	3.41 ± 0.01 <sup>a</sup>	17.53 ± 1.95 <sup>b</sup>	23.50 ± 1.6 <sup>a</sup>					



$a^*$  值的降低可能是因为磁场的搅拌处理, 可以通过先一步氧化活性基团来降低肌红蛋白中中心铁原子的氧化率<sup>[21]</sup>。通过超声处理而产生空化效应影响和机械效应影响, 使得空化泡破裂产生局部的瞬时高温、高压<sup>[22]</sup>, 使肌纤维结构遭到破坏, 可溶性蛋白含量增加。试验组与对照组相比,  $L^*$  值升高 ( $P < 0.05$ ), 肉色更加鲜亮; 但当超声时间过长后, 蛋白质进一步发生变性, 增加了不溶性蛋白的含量,  $a^*$  值呈现先降低后增大, 这是由于随着处理时间的延长氧合肌红蛋白被氧化生成褐色的高铁肌红蛋白, 使其  $a^*$  值降低<sup>[23]</sup>;  $b^*$  值变化趋势不明显, 表明色差的变化与超声时间有关<sup>[24]</sup>。其中, 经过直流磁场处理后的淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的变化程度显著大于超声处理, 这可能是由于当超声波以水为介质作用于生肉糜时, 已经先一步改变肉糜内部部分化学键, 同时猜测较短的磁化时间无法有效改变肉糜内部各化学作用力的相互作用, 而过长又会降低一部分化学作用力对肉糜中各分子的作用。因此可以看出, 在外观上磁化处理的效果优于超声处理, 同时在磁化 15 min 时的效果较优。

### 2.3 超声波及磁化处理对肉糜凝胶质构特性的影响

表 2 反映的是经过超声及磁化处理淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的质构变化情况。由表 2 可知, 经过处理后的淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶的硬度、回复性、粘性、弹性、咀嚼性和剪切力具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 且硬度、回复性、咀嚼性和剪切力随着处理时间的变化均呈先降低后增大的趋势, 粘性和弹性随着时间的变化呈现先增大后降低。有研究表明, 一定功率范围内的超声波处理可以使肌原纤维蛋白的平均粒径减小<sup>[20]</sup>, 引起肉糜表面的变化, 蛋白质分子通过发生进一步交联, 使凝胶的结构有所加强; 但长时间的超声处理会破坏肉糜中的溶酶体, 使形成的凝胶结构粗糙、不均一, 导致肉糜凝胶质构性能有所下降; 磁场处理有益于降低高温蒸煮过程对肉糜凝胶体系的破坏作用, 使样品具有更加稳定有序的内部结构。随着处理时间的延长, 淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的硬度和弹性得到显著改善, 尤其在热加工温度为 76 °C 时变化明显, 较低的硬度与较高的弹性可以使得肉糜凝胶的口感更好。

图 4 反映的是经过超声及磁化处理后淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的剪切力变化情况。剪切力代表嫩度值, 试验中用嫩度仪对其样品进行测定。超声处理及磁

化处理均促进了鸡胸肉组织降解, 进而显著降低鸡胸肉剪切力, 改善鸡胸肉嫩度。剪切力的大小与产品硬度有很强的相关性, 水分的丧失导致硬度的增大, 咀嚼性也相应增大。可以发现, 超声处理后的剪切力明显高于磁化处理, 随着硬度的减小, 剪切力也相应的减小, 这与质构特性的测定结果一致<sup>[13]</sup>。

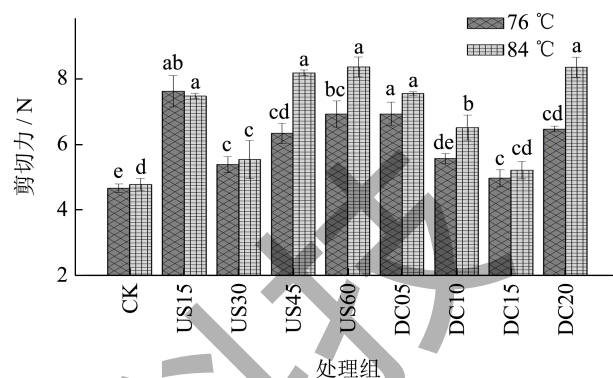


图 4 超声及磁化处理对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶剪切力的影响  
Fig.4 Effect of ultrasonic and magnetized modification on the shear force of spent laying hens breast meat batters

注: 图中不同小写字母表示组内显著性差异 ( $P < 0.05$ )。下同。

通过两种方式的对比结果可知, 直流磁场的改良效果较好, 因此选取磁化处理 15 min 作为处理条件更佳。

### 2.4 超声波及磁化处理对肉糜凝胶保水性的影响

图 5 反映的是经过超声及磁化处理淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的保水性变化情况。由图 5 可以看出, 淘汰蛋鸡鸡胸肉糜经过处理后的蒸煮损失和离心损失明显有所降低。在一定程度上, 超声波发出的剧烈振荡以及磁化处理的搅拌作用破坏了鸡胸肉的微观结构, 使得肌纤维保水能力降低<sup>[21]</sup>。在磁化处理 15 min 及超声处理 30 min 时蒸煮损失率最低, 且与其他组有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 在加热温度为 84 °C 时, 两种最优处理方式的蒸煮损失分别为 17.03% ( $P < 0.05$ ) 和 20.39% ( $P < 0.05$ ); 在热加工温度为 76 °C 时, 随着时间的增加而有所降低, 超声处理对淘汰蛋鸡的蒸煮损失影响并不大, 依然高于对照组 4%, 淘汰蛋鸡鸡胸肉糜经磁化处理 15 min 后的离心损失与对照组相比显著降低, 为 12.47% ( $P < 0.05$ )。磁场可以通过改变水分子的氢键结构来影响蛋白质水化<sup>[25]</sup>, 且在磁化处理时会不断对肉糜进行不断地搅拌, 这有利于将肉糜内肌原纤维蛋白的均匀程度提

高,同时由于搅拌使肉糜凝胶内部截留的水分含量增加,肉糜凝胶的保水性得到有效提升。在适当的磁化时间下,直流磁场处理可以更好地改变蛋白质的结构,从而产生表现出更好多汁性的良好凝胶。相反,磁化时间过长可能会由于蛋白质内部基团的过度暴露或膨胀不足而导致蛋白质结构不稳定,从而导致最终凝胶质量的恶化。

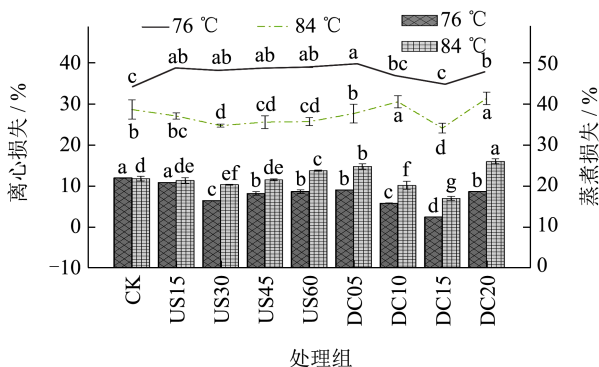


图5 超声及磁化处理对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶保水性的影响

Fig.5 Effect of ultrasonic and magnetized modification on water retention of spent laying hens breast meat batters

### 2.5 超声波及磁化处理对肉糜凝胶pH的影响

图6反映的是经过超声及磁化处理淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的pH变化情况。pH的大小能够影响蛋白质的净电荷,继而影响凝胶的形成<sup>[26]</sup>,且pH值对鸡胸肉的质量有重大影响,变化的速度越快,对肉质影响越大。最终pH值对持水能力、颜色和质地也有着广泛影响<sup>[27]</sup>。

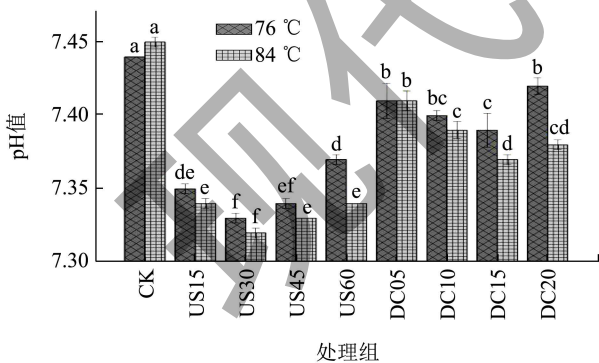


图6 超声及磁化处理对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶pH的影响

Fig.6 Effect of ultrasonic and magnetized modification on pH of spent laying hens breast meat batters

由图6可知,物理处理后其pH值均随着处理时间的延长呈现先降低后增大的趋势,当肉糜处于磁场中时,受到磁场中洛伦兹力的影响,会降低氢氧键的含量,但由于磁场强度较小,经磁化处理后的淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶pH值变化不大,在76 °C

时为7.39 ( $P < 0.05$ ),在84 °C时取得最小值7.37 ( $P < 0.05$ );超声处理可以加速离子从细胞结构释放到细胞质中或蛋白质结构改变,导致某些离子基团位置发生变化<sup>[28]</sup>,因此可以看出超声处理后数值变化较大,在76 °C时为7.33 ( $P < 0.05$ ),在84 °C时取得最小值7.32 ( $P < 0.05$ )。除此之外,肉糜凝胶的pH与离心损失和蒸煮损失呈正相关,说明加热过程中肉糜pH的上升也与蛋白质-水分相互作用变化有关。

### 2.6 超声波及磁化处理对肉糜凝胶水分分布的影响

图7反映的是超声及磁化处理对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜弛豫时间的影响。弛豫时间 $T_{21}$ 位于0~10 ms之间,表示肉糜凝胶中的结合水。与蛋白表面紧密结合的分子层称为结合水,其不易随外界解离蒸发,不易受结构以及所带电荷多少影响,即使受外力变化的影响,也不能改变它的状态,因此对肉类凝胶的保水能力没有影响<sup>[29]</sup>。弛豫时间 $T_{22}$ 位于10~100 ms之间,表示肉糜中的不易流动水,在肉制品凝胶中含量较高,同时易随着外力、蛋白质结构变化的作用而发生变化,因此大多情况下系水力的高低由这部分水决定<sup>[30]</sup>。弛豫时间 $T_{23}$ 大于100 ms,表示肉糜中的自由水,其通过物理吸附存在于肌细胞外间隙中,非常容易流失<sup>[31]</sup>。 $T_2$ 时间越短,水分与底物结合紧密,水分的自由度就越小<sup>[32]</sup>。由图7可知,磁化处将不易流动水的弛豫时间显著提前,主要是由于处理后的体系中水分子内质子的移动性降低,这也就表明了经过处理后的淘汰蛋鸡鸡胸肉糜水分子的结合更加紧密,具有较高的保水性。

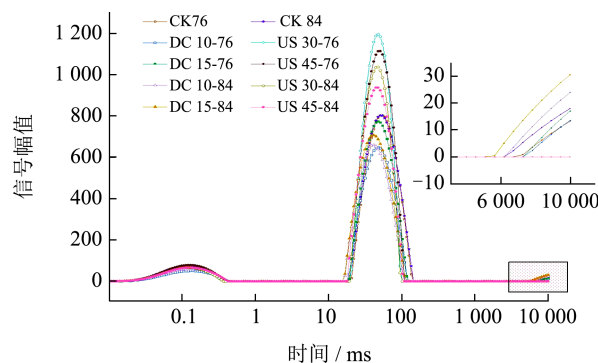


图7 超声及磁化处理对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶弛豫时间的影响

Fig.7 Effects of ultrasonic and magnetized modification on relaxation time of spent laying hens breast meat batters

由图8可知,在76 °C下,磁化处理能够使淘汰蛋鸡鸡胸肉糜不易流动水的含量更加接近于对照



组, 显著优于 84 °C 的处理效果, 并产生了一部分自由水, 而超声处理使不易流动水的比例显著增加 ( $P < 0.05$ ), 自由水比例降低 ( $P < 0.05$ )。这可能是由于在超声处理过程中, 剧烈的空化效应与热效应使细胞间隙间的自由水含量降低, 在肉糜还未加热制成凝胶前已经损失。施加磁场可以将自由水更好的转变为毛细管水存在于细胞间隙中, 在这一过程中, 磁场对蛋白和水的作用促进了二者水合作用的增强, 所以蒸煮后水分的损失率会变得更低。

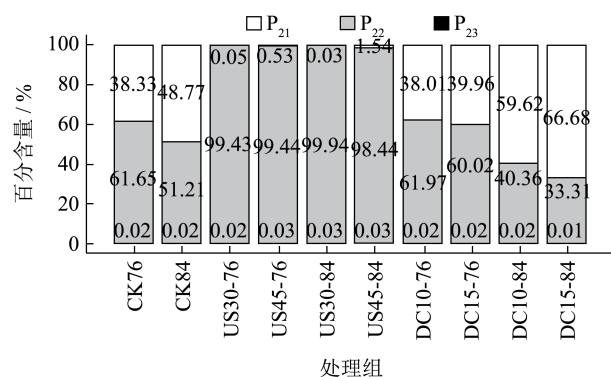


图 8 超声及磁化处理对淘汰蛋鸡鸡胸肉糜凝胶低场核磁弛豫峰面积的影响

Fig.8 Effects of ultrasonic and magnetized modification on the low-field NMR relaxation peak area of spent laying hens breast meat batters

与超声处理相比, 经磁化处理的淘汰蛋鸡鸡胸肉糜性质更加接近商品化肉鸡, 这就意味着磁化处理可以使淘汰蛋鸡鸡胸肉糜拥有与商品化肉鸡相似的性质, 从而达到处理目的。由于水分的迁移与增多程度会随着蛋白质内肌球蛋白所带负电荷数目的增加而减弱, 导致 pH 值呈现降低趋势, 这也与前文研究结果具有一致性。

### 3 结论

本研究通过超声波及直流磁场处理淘汰蛋鸡鸡胸肉糜, 显著提升了其热加工特性。结果发现, 当超声波处理条件为超声功率 220 W、超声时间 30 min 时, 磁化处理条件为磁场强度 30 Gs、搅拌速度 250 r/min、磁化时间 15 min 时, 淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的保水性最高、亮度最强、硬度最小、弹性最大。相较于超声波处理, 直流磁场磁化处理后的淘汰蛋鸡鸡胸肉糜各项指标与市售商品化肉鸡更加贴近。同时, 直流磁场操作简单、原料损耗较少, 更加适合对淘汰蛋鸡的理化性质及凝胶特性进行优化。总体而言, 本研究初步证明通过超声波及直流磁场的处理能够显

著改善淘汰蛋鸡鸡胸肉糜的热加工特性, 为淘汰蛋鸡的热加工提供了理论依据。目前, 磁化装置设计还停留在实验室阶段, 有关工业化应用还需进一步研究。

### 参考文献

- [1] 刘超楠, 杨莎, 巩洋, 等. 我国淘汰蛋鸡加工业的研究现状及发展趋势[J]. 肉类研究, 2013, 27(11): 41-44.
- [2] SEMWOGGERERE F, NEETHLING J, MUCHENJE V, et al. Meat quality, fatty acid profile, and sensory attributes of spent laying hens fed expeller press canola meal or a conventional diet [J]. Poultry Science, 2019, 98(9): 3557-3570.
- [3] 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.
- [4] 李可, 李三影, 扶磊, 等. 低频高强度超声波对鸡胸肉肌原纤维蛋白性质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 122-129.
- [5] 杜方丽, 郑金月, 宋立, 等. 生姜提取物对冷藏期间淘汰蛋鸡鸡胸肉糜品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(19): 309-315, 331.
- [6] 李宇宁, 李钊, 赵圣明, 等. 地皮菜添加量对鸡胸肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(2): 53-59.
- [7] QIU L Q, ZHANG M, BIMAL C, et al. Application of power ultrasound in freezing and thawing processes: effect on process efficiency and product quality [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 68: 105-230.
- [8] ITO Y, TATSUMI R, WAKAMATSU J, et al. The solubilization of myofibrillar proteins of vertebrate skeletal muscle in water [J]. Anim Sci, 2003, 74: 417-425.
- [9] SILVA F L, ZIN G, REZZADORI K, et al. Changes in the physico-chemical characteristics of a protein solution in the presence of magnetic field and the consequences on the ultrafiltration performance [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 242: 84-93.
- [10] YANG K, WANG L M, GUO J J, et al. Structural changes induced by direct current magnetic field improve water holding capacity of pork myofibrillar protein gels [J]. Food Chemistry, 2020, 345(5): 128849.
- [11] GUO J J, ZHOU Y H, YANG K, et al. Effect of low-frequency magnetic field on the gel properties of pork myofibrillar proteins [J]. Food Chemistry, 2019, 274: 775-781.
- [12] SUPAVITITPATANA T, APICHARTSRANGKON A. Combination effects of ultra-high pressure and temperature on the physical and thermal properties of ostrich meat sausage (yor) [J]. Meat Science, 2007, 76(3): 555-560.
- [13] GINA V, HELENE S, FLORE D, et al. Functionality of pork meat proteins: Impact of sodium chloride and phosphates under high-pressure processing [J]. Innovative

- Food Science & Emerging Technologies, 2013, 18: 15-23.
- [14] 郭守立,侯良忠,郭晓峰,等.猪宰后不同部位白肌肉与正常肉品质变化、能量代谢的差异[J].肉类研究,2016,30(6):19-24.
- [15] 张骏龙,周纷,邵俊花,等.低场核磁共振技术研究淀粉添加量对肉糜保水性和质构特性的影响[J].食品工业科技,2016,37(21):66-69,75.
- [16] ZHOU J Z, ZHANG H, GAO L, et al. Influence of pH and ionic strength on heat-induced formation and rheological properties of cottonseed protein gels [J]. Food & Bioproducts Processing, 2015, 96: 27-34.
- [17] GERALDINE A R, XIAO WK, MARTINUS B, et al. Effect of extraction pH on heat-induced aggregation, gelation and microstructure of protein isolate from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) [J]. Food Chemistry, 2016, 209(15): 203-210.
- [18] MULVIHILL D, KINSELLA J E. Gelation characterization of whey proteins and  $\beta$ -lactoglobulins [J]. Food Technology, 1987, 41(9): 102-111.
- [19] XIONG YL, BREKKE C J. Protein extractability and thermally induced gelation properties of myofibrils isolated from presndpostrigor chicken muscles [J]. Food Science, 1991, 56(1): 210-215.
- [20] 成永帅.斩拌、搅拌和腌制对鸡胸肉糜及烤肠品质影响的研究[D].南京:南京农业大学,2019.
- [21] CHENG JR, ZHU MJ, LIU XM. Insight into the conformational and functional properties of myofibrillar protein modified by mulberry polyphenols [J]. Food Chemistry, 2020, 308: 125592-125592.
- [22] DAS P, BHATTACHARYYA S K, BANER J P, et al. Acoustic cavitation assisted synthesis and characterization of photoluminescent carbon quantum dots for biological applications and their future prospective [J]. Nano-Structures & Nano-Objects, 2021, 25: 100641.
- [23] 王安然.超声处理对牛肉品质的影响及机理研究[D].南京:南京农业大学,2018.
- [24] 陈丽艳,潘道东,曹锦轩,等.超声波处理对鹅肉蛋白结构及品质的影响[J].核农学报,2018,32(12):2363-2372.
- [25] 和劲松,杨宏伟,蔡然,等. $\beta$ -乳球蛋白在磁化水中的水合作用:磁化处理对水分子缔合构造及蛋白质水合特性的影响[J].物理化学学报,2010,26(2):304-310.
- [26] CHANG HS, FENG Y M, HULTIN HO. Role of pH in gel formation of washed chicken breast muscle at low ionic strength [J]. Journal of Food Biochemistry, 2001, 25(5): 439-457.
- [27] DEVATKAL S K, VISHNURAJ M R, KULKARNI V V, et al. Carcass and meat quality characterization of indigenous and improved variety of chicken genotypes [J]. Poultry Science, 2018, 97(8): 2947-2956.
- [28] GONZÁLEZ-GONZÁLEZ L, LUNA-RODRÍGUEZ L, CARRILLO-LÓPEZ L M, et al. Ultrasound as an alternative to conventional marination: acceptability and mass transfer [J]. Journal of Food Quality, 2017, 2: 1-8.
- [29] 夏天兰,刘登勇,徐幸莲,等.低场核磁共振技术在肉与肉制品水分测定及其相关品质特性中的应用[J].食品科学,2011,32(21):253-256.
- [30] 周光宏,张兰威,李洪军,等.畜产食品加工学[M].北京:中国农业大学出版社,2002:130-149.
- [31] BERTRAM H C, KARLSSON A H, RASMUSSEN M, et al. The origin of multiexponential  $T_2$  relaxation in muscle myowater [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49, 3092-3100.
- [32] XUF, JIN X, ZHANG L, et al. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods [J]. Food Research International, 2017, 96: 191.