

不同模式超声波辅助低温腌制对牛肉品质的影响

Effects of different modes of ultrasonic assisted low-temperature curing on beef quality

吴梦迪 马海乐 刘会敏

WU Mengdi MA Haile LIU Huimin

(江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013)

(School of Food and Bioengineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

摘要:目的:探索适合家用冰箱冷藏室的绿色、快速的腌制方法。方法:在低温条件下,采用不同频率组合的超声波辅助腌制牛肉,研究其对牛肉品质的影响。结果:对比低温静腌,同步超声波 22+40 kHz(SIU 22+40 kHz)的腌制效果最好,其盐分含量(0.327 4%)提高了 74.15% ($P<0.05$),蒸煮损失(34.933%)降低了 11.45% ($P<0.05$),硬度(293.545 N)降低了 18.39% ($P<0.05$),回弹性(1.436 N/mm²)降低了 17.54% ($P<0.05$),咀嚼性(2 209.964 N/mm)降低了 20.12% ($P<0.05$)。结论:在 2~6 °C 的低温条件下,超声波辅助低温腌制可以有效地提高牛肉的盐分含量,降低牛肉的蒸煮损失,改善牛肉的嫩度,同时较好地保持牛肉的色泽品质。顺序超声波(SEU)和同步超声波(SIU)辅助低温腌制的腌制效果优于单频超声波(MU)辅助低温腌制。

关键词:牛肉;超声波;低温腌制;冰箱冷藏

Abstract: Objective: This study aimed to discover a green, fast curing method for the domestic refrigerator freezer. **Methods:** Under the control of low-temperature condition, different frequency combination of ultrasonic assisted curing beef was used to study its effect on beef quality. **Results:** Compared with low-temperature static curing, simultaneous ultrasonic 22+40 kHz (SIU 22+40 kHz) had the best curing effect, and the salt content (0.327 4%) was increased by 74.15% ($P<0.05$), with the cooking loss (34.933%) reduced by 11.45% ($P<0.05$). The hardness (293.545 N) was reduced by 18.39% ($P<0.05$), and the resilience (1.436N/mm²) was reduced by 17.54% ($P<0.05$), with the chewiness (2 209.964 N/mm) reduced by

20.12% ($P<0.05$). **Conclusion:** Under the low temperature condition of 2~6 °C, ultrasonic-assisted low temperature salting can effectively increase the salt content, reduce the cooking loss, improve the tenderness, and better maintain the color quality of beef. The curing effect of sequential ultrasonic (SEU) and synchronous ultrasonic (SIU) assisted low temperature curing was better than that of single frequency ultrasonic (MU) assisted low temperature curing. The curing effect of sequential ultrasonic (SEU) and simultaneous ultrasonic (SIU) assisted low-temperature curing was better than that of mono-frequency ultrasonic (MU) assisted low-temperature curing.

Keywords: beef; ultrasonic; low temperature curing; refrigeration

腌制是肉制品加工过程中一道重要的工序,家庭日常腌制肉品常使用传统的干腌法和湿腌法,但是传统腌制方法存在腌制时间长、腌制品质不稳定、标准化程度不高等问题^[1],夏天在冰箱中腌制肉品时,腌制过程更加缓慢。针对传统腌制方法存在的不足,目前已涌现出许多新型腌制方法,主要有滚揉腌制法^[2]、超高压辅助腌制法^[3]、静态变压腌制法^[4]、脉冲电场辅助腌制法^[5]等。这些新型腌制方法均可以有效地改善肉品品质,提高腌制速率,但是它们多适用于肉品的工业腌制,采用家用冰箱冷藏室腌制时,还存在一定的局限性,比如腌制效果易受到肉品成分的影响等。

超声波技术作为一种非热加工技术,因具有高能量、高效率、绿色环保等特点而受到广泛关注^[1]。Kang 等^[6]研究发现超声波辅助腌制肉品时,可以有效提高肉品的腌制速率,增加盐分含量。Shi 等^[7]和付丽等^[8]研究发现对比湿腌,超声波处理可以显著降低肉品的嫩度。但目前多数研究集中于常温条件下单频超声波辅助腌制肉品,2~6 °C 低温条件下多频超声波辅助快速腌制尚未见报道。研究拟采用不同频率组合的超声波辅助低温腌制牛肉,研究不同模式超声波辅助低温腌制对牛肉品质的影响。

基金项目:江苏省重点研发计划(现代农业重点项目)(编号:BE2018368)

作者简介:吴梦迪,女,江苏大学在读硕士研究生。

通信作者:马海乐(1963—),男,江苏大学教授,博士生导师,博士。E-mail: mhl@ujs.edu.cn

收稿日期:2023-07-27 **改回日期:**2023-09-17

1 材料与方 法

1.1 试验材料

牛里脊肉、食盐:市售;

硝酸、硝酸银、硫酸高铁铵、硫氰酸钾等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验仪器及设备

三频槽式超声波反应器:WKSTQ900/3S 型,江苏江大五棵松生物科技有限公司;

热电偶测温仪:HT-9815 三通道 K 型,北京鑫思特科技开发有限公司;

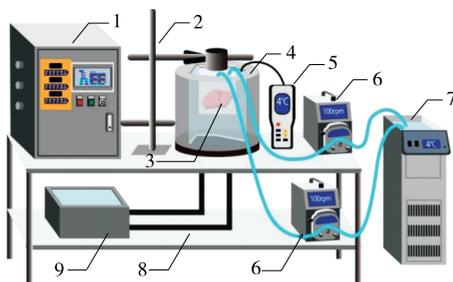
冷却水循环泵:CCA-20 型,上海越众仪器设备有限公司;

低场核磁共振分析仪:NIMI20-030V-I 型,苏州纽迈分析仪器股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 低温静腌处理 取新鲜牛肉,擦干表面生水,剔除表面可见的脂肪组织和结缔组织,切成 $10\text{ cm} \times 8\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)大小的肉块,将肉块放入腌制袋中,使肉块浸没在质量分数为 9% 的 NaCl 腌制液中, $m_{\text{牛肉}}:V_{\text{腌制液}}=100:50$ (g/mL),排气,封口,置于 $(4 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱腌制 30 min。

1.3.2 超声波辅助低温腌制处理 使用三频槽式超声波设备进行辅助腌制,试验设备搭建图如图 1 所示。该超声波设备有 22,33,40 kHz 3 个不同频率的换能器,超声槽容量为 3 L。一共可以采用 12 种超声波工作模式,分别为单频超声波(MU 22 kHz、MU 33 kHz 和 MU 40 kHz),顺序超声波(SEU 22/33 kHz、SEU 22/40 kHz、SEU 33/40 kHz、SEU 22/33/40 kHz 和 SEU 22/40/33 kHz)和同步超声波(SIU 22+33 kHz、SIU 22+40 kHz、SIU 33+40 kHz 和 SIU 22+33+40 kHz)。研



1. 电气控制箱(包含超声波发声器) 2. 铁架台 3. 样品 4. 超声反应腔体 5. 热电偶测温仪 6. 蠕动泵 7. 冷却水循环泵 8. 管路 9. 水浴锅

图 1 试验设备搭建示意图

Figure 1 Schematic diagram of test equipment construction

究中,统一设置超声波的功率密度为 50 W/L ,经 1.3.1 预处理的牛肉,将腌制袋放入超声槽中心处,通过外置蠕动泵以及循环泵保证超声波辅助低温腌制过程中温度控制在 $(4 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内(预试验发现,腌制温度在 $2\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内,腌制效果没有明显变化)。设置不同的超声波工作模式,超声间歇比为 $10:1$,工作时间为 30 min。

将腌制处理后的牛肉用蒸馏水冲洗除去表面盐分,使用厨房用纸擦干表面水分,用于各项指标测定。其中未腌制的新鲜牛肉为空白组(FS),低温静腌处理的牛肉为对照组(CK)。

1.3.3 盐分含量测定 按 GB 5009.44—2016《食品安全国家标准 食品中氯化物的测定》中的佛尔哈德法执行。

1.3.4 蒸煮损失测定 依据 Farag 等^[9]的方法,并稍作修改。具体操作如下:将腌制处理后的牛肉,切取 $4\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)大小的肉样,用天平称取肉块的初始质量,将肉块放入高温蒸煮袋中,置于 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中保温蒸煮 30 min,取出冷却至室温,擦干表面水分,再称其重量,根据式(1)计算肉样的蒸煮损失。

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

式中:

c ——蒸煮损失,%;

m_1 ——初始的肉块质量,g;

m_2 ——蒸煮后的肉块质量,g。

1.3.5 色度测定 依据唐善虎等^[10]的方法,并稍作修改。具体操作如下:将腌制处理后的牛肉,切取 $4\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)大小的肉样,切面在空气中暴露 30 min,用色差仪测定 L^* 、 a^* 和 b^* 值,每个样品都在瘦肉部分随机选择 3 个点测定,每个点测定 3 次,取每个点的平均值,总平均值作为肉样的色度值。

1.3.6 质构测定 依据 Chen 等^[11]的方法,并稍作修改。具体操作如下:将腌制处理后的牛肉,放入高温蒸煮袋中,置于 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中保温蒸煮 30 min,取出冷却至室温,擦干表面水分,沿肌原纤维方向将肉切开,取中间部位 $4\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)大小的肉块,利用物性测试仪测定样品的硬度、回弹性、咀嚼性。

1.3.7 水分分布测定 依据高子武等^[12]的方法,并稍作修改,具体操作如下:称取腌制处理后的牛肉样品 $(3.00 \pm 0.50)\text{ g}$,擦去表面水分,将样品放置于玻璃瓶后放入直径为 40 mm 的专用核磁共振管中。利用低场核磁共振分析仪测定水分分布。

1.3.8 数据处理与统计分析 所有试验重复 3 次,数据用“平均值 \pm 方差”表示。使用 Excel 2010 对数据进行收集整理,SPSS 2021 软件对数据进行单因素方差分析,差异显著性为 $P < 0.05$,使用 Origin 2021 软件进行图表

绘制。

2 结果与讨论

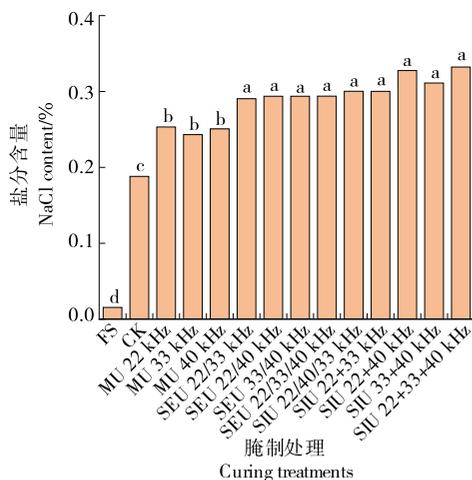
2.1 超声波辅助低温腌制对牛肉盐分含量的影响

经试验,人的适口盐含量约为 0.296 9%~0.362 9%。由图 2 可知,低温静腌条件下,牛肉的盐含量为 0.188 0%;单频超声波、顺序超声波以及同步超声波工作模式下,牛肉的盐分含量最高分别可达到 0.253 1%,0.300 1%,0.332 0%,对比低温静腌,牛肉的盐分含量分别显著增加了 34.61%,59.60%,76.62%($P<0.05$),与龙锦鹏等^[13]的试验结果一致。超声波辅助腌制可以加速腌制液的渗透速率,可能是超声波的空化效应破坏了牛肉的组织结构,导致了毛细血管的扩张和孔隙的形成,从而促进腌制液进入牛肉中,提高了牛肉的盐分含量^[14]。超声波的机械效应也会加速盐分进入到牛肉中^[15]。

图 2 显示:多频超声波工作模式下牛肉的盐分含量显著高于单频超声波下的,同时,多频超声波工作模式下牛肉的盐分含量基本达到了人的适口盐分含量,而单频超声波工作模式下牛肉的盐分含量未达到。这可能是多频超声波工作时每个超声波频率都能产生空化效应,当某个频率的空化泡破裂时也可为其他频率的空化作用提供更多的空化核,使得多频超声波产生的空化效应和机械效应更明显^[16-17],盐分也更快更均匀地扩散到牛肉中。因此,相同的腌制时间内,超声波辅助低温腌制可以增加牛肉中的盐分含量,多频超声波的效果更好。

2.2 超声波辅助低温腌制对牛肉持水能力的影响

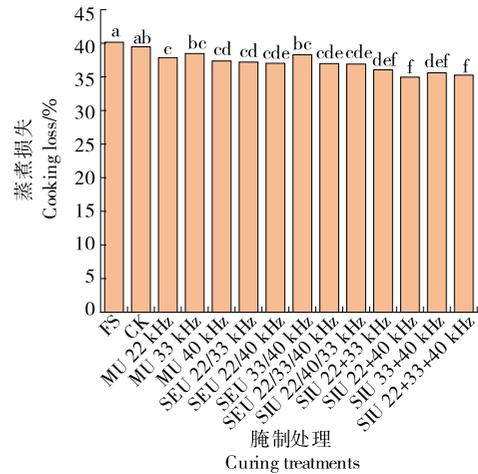
由图 3 可知,对比鲜肉,腌制处理后牛肉的蒸煮损失都有所降低,这是因为腌制处理后盐分进入牛肉中,与肉中的蛋白质发生相互作用,使得蛋白质溶解和溶胀,从而



字母不同代表存在显著性差异($P<0.05$)

图 2 不同腌制处理后牛肉的盐分含量

Figure 2 Salt content in beef after different curing treatments



字母不同代表存在显著性差异($P<0.05$)

图 3 不同腌制处理后牛肉的蒸煮损失

Figure 3 Cooking loss in beef after different curing treatments

降低了牛肉的蒸煮损失^[18]。低温静腌条件下牛肉的蒸煮损失为 39.450%,单频超声波、顺序超声波以及同步超声波工作模式下,牛肉的蒸煮损失最低分别可达到 37.339%,36.887%,34.933%,对比低温静腌,牛肉的蒸煮损失分别降低了 5.35%,6.50%,11.45%($P<0.05$)。SIU 22+40 kHz 和 SIU 22+33+40 kHz 辅助腌制后,牛肉的蒸煮损失显著低于其他超声波条件下的($P<0.05$)。这与 Kang 等^[19]研究超声波辅助腌制对牛肉持水能力影响的结果一致,认为可能是超声波的空化效应破坏了牛肉的肌原纤维结构,使得肌原纤维蛋白可以容纳更多的水。同时,超声波处理后更多的盐分进入肉中,使得更多的蛋白质侧链与水结合,提高牛肉的持水能力^[20]。因此,超声波辅助低温腌制可以有效降低牛肉的蒸煮损失,这有助于改善牛肉的质构特性,减少牛肉在蒸煮过程中的水分流失。

2.3 超声波辅助低温腌制对牛肉色度的影响

如表 1 所示,对比新鲜牛肉,腌制处理后牛肉的 L^* 值显著增强($P<0.05$), a^* 值和 b^* 值出现下降的趋势,这主要是因为腌制处理时腌制液中的水分进入牛肉中,同时,部分肌红蛋白溶于水,稀释了牛肉中的色素。低温静腌条件下,牛肉的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值分别为 30.94, 9.57, 7.74。对比低温静腌条件下的牛肉,SIU 22+40 kHz 辅助腌制后 L^* 值最高(33.55),显著增加了 8.42%($P<0.05$),SIU 22+33+40 kHz 辅助腌制后的 a^* 值(7.70)和 b^* 值最低(6.73),显著降低了 19.49%和 13.05%($P<0.05$)。这可能是因为超声波的空化效应加速了呈色物质的溶出以及水的溶入,从而改变了牛肉的色度。李佳麒^[21]研究发现,随着超声功率的增强, L^* 、 a^* 、 b^* 值

表 1 不同腌制处理后牛肉的色度[†]

Table 1 Chromaticity of beef after different pickling treatments

腌制处理	<i>L</i> [*]	<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]
FS	29.04±0.20 ^d	10.47±0.99 ^a	8.01±0.17 ^a
CK	30.94±0.38 ^c	9.57±0.93 ^{ab}	7.74±0.87 ^{ab}
MU 22 kHz	33.42±1.04 ^{ab}	7.98±0.29 ^c	7.09±0.06 ^{abc}
MU 33 kHz	31.02±1.24 ^c	8.50±0.70 ^{bc}	6.99±0.28 ^{bc}
MU 40 kHz	31.97±0.52 ^{abc}	8.66±0.46 ^{bc}	6.93±0.19 ^{bc}
SEU 22/33 kHz	32.02±1.50 ^{abc}	8.20±0.65 ^{bc}	7.10±0.60 ^{abc}
SEU 22/40 kHz	31.51±0.93 ^{abc}	8.46±0.16 ^{bc}	6.91±0.20 ^{bc}
SEU 33/40 kHz	32.31±0.89 ^{abc}	8.73±0.77 ^{bc}	7.05±0.32 ^{bc}
SEU 22/33/40 kHz	31.71±0.70 ^{abc}	7.86±0.31 ^c	7.13±0.25 ^{abc}
SEU 22/40/33 kHz	31.85±0.30 ^{abc}	8.28±0.60 ^{bc}	7.04±0.71 ^{bc}
SIU 22+33 kHz	32.09±0.56 ^{abc}	8.07±0.17 ^{bc}	6.96±0.27 ^{bc}
SIU 22+40 kHz	33.55±0.82 ^a	8.18±0.97 ^{bc}	6.74±0.22 ^c
SIU 33+40 kHz	31.26±0.73 ^c	8.56±0.30 ^{bc}	6.91±0.30 ^{bc}
SIU 22+33+40 kHz	32.58±0.76 ^{abc}	7.70±0.73 ^c	6.73±0.37 ^c

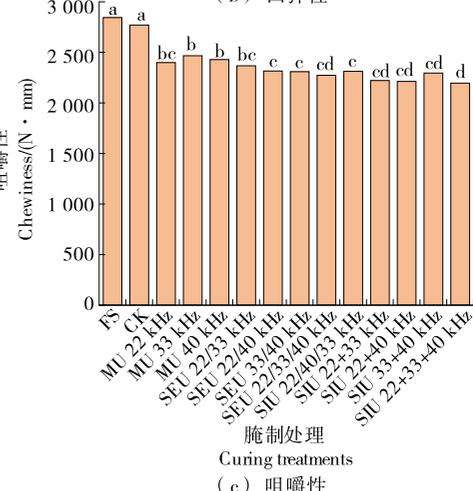
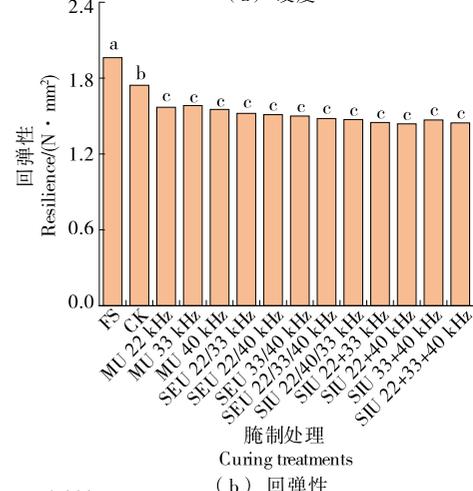
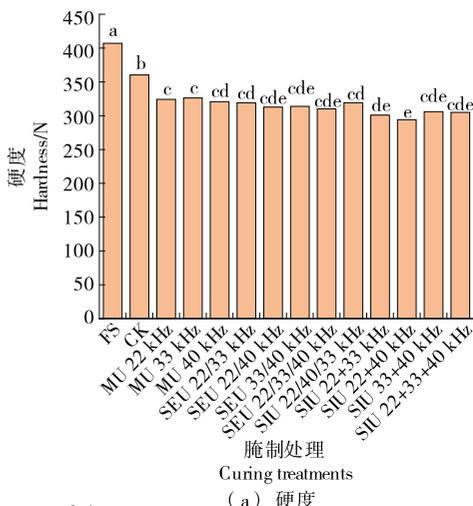
[†] 同列数值后字母不同代表存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

都出现了显著性变化 ($P < 0.05$)，主要是因为超声波的空化效应和机械效应促进牛肉中的亚铁血红素被释放，从而导致了 *L*^{*} 值升高。同时超声波促进了水分子裂解产生了更多的羟自由基，使得牛肉中的肌红蛋白被氧化，从而使得 *a*^{*} 值降低。

对比低温静腌条件，牛肉超声波辅助低温腌制后的部分色度值出现显著性变化，但是人的肉眼不能直观地区别低温静腌和超声波辅助低温腌制后的牛肉。说明超声波辅助低温腌制后可以较好地保持牛肉的色度，不影响消费者的可接受性。

2.4 超声波辅助低温腌制对牛肉质构特性的影响

如图 4 所示，对比新鲜牛肉，腌制处理后牛肉的硬度、回弹性、咀嚼性都显著降低 ($P < 0.05$)。这是因为腌制处理后，腌制液中的盐进入到牛肉中，电荷增加使得肉内部的静电斥力增大，从而导致牛肉肌肉内部的结合力减小，质构发生改变^[22]。低温静腌条件下，牛肉的硬度为 359.680 N，回弹性值为 1.741 N/mm²，咀嚼性值为 2 766.438 N/mm。对比低温静腌，SIU 22+40 kHz 辅助腌制条件下，牛肉的硬度达到最低 (293.545 N)，降低了 18.39% ($P < 0.05$)，该超声波条件下，牛肉的回弹性 (1.436 N/mm²) 也显著降低了 17.54% ($P < 0.05$)。SIU 22+33+40 kHz 条件下，牛肉的咀嚼性达到最低 (2 192.737 N/mm)，降低了 20.74% ($P < 0.05$)。这与 Gonzalez-gonzalez 等^[23] 研究超声波对牛肉嫩度影响的结论一致，他们认为可能是超声波的空化效应破坏了肌原



字母不同代表存在显著性差异 ($P < 0.05$)

图 4 不同腌制处理后牛肉的质构特性

Figure 4 Texture characteristics of beef after different curing treatments

纤维蛋白结构的完整性，改善了牛肉的质构特性。同时，超声波也可以促进内源性蛋白酶的释放，进一步破坏肌原纤维蛋白的结构，改善牛肉的柔嫩度^[24]。对比单频超

声波工作模式下的硬度、回弹性及咀嚼性,多频超声波工作模式中,SIU 22+40 kHz 腌制条件下的硬度显著低于单频超声波条件下的($P<0.05$),回弹性低于单频超声波条件下的,但并未存在显著性差异($P>0.05$),同步超声波辅助低温腌制条件下的咀嚼性显著低于单频超声波条件下的($P<0.05$)。说明多频超声波辅助低温腌制处理可以更有效地改善牛肉的嫩度。

2.5 超声波辅助低温腌制对牛肉水分分布的影响

如图 5、图 6 所示,牛肉中的水分主要以不易流动水的形式存在。低温静腌条件下,牛肉的结合水、不易流动水和自由水含量分别为 3.831%,95.662%,0.507%,超声波辅助低温腌制后牛肉不易流动水含量有增加趋势,自由水含量显著降低($P<0.05$)。其中 SEU 22/40 kHz 辅助腌制条件下牛肉的不易流动水含量最高(96.301%),增加了 0.67%($P<0.05$),该条件下牛肉自由水含量最低(0.272%),降低了 46.17%($P<0.05$)。这与 Tong 等^[25]和 Zou 等^[26]的研究结果一致,可能是因为超声波使得更多的盐分进入肉品中,盐溶性蛋白溶出吸收了更多的水分。水分分布的变化也解释了牛肉持水能力的变化。有研究^[27]表明,自由水含量和不易流动水含量与肉品的持水能力有关,自由水含量降低表明水的结合能力增强,更多的自由水转变成不易流动水。牛肉经过蒸煮后,主要损失的是自由水,也有少部分不易流动水会从肌纤维结构中流出,而超声波腌制处理后自由水含量减少以及不易流动水含量增加都使得牛肉的蒸煮损失降低,持水能力增强。因此,超声波辅助低温腌制可以改变牛肉中的水分分布,进而提高牛肉的持水能力。

3 结论

与低温静腌相比,超声波辅助低温腌制处理可以增加牛肉的盐分含量,提高牛肉的持水能力,提高牛肉的嫩度,同时可以较好地保持牛肉的外观色泽,为家用冰箱冷藏室腌制肉品提供了一种更快速的腌制方式。在家用

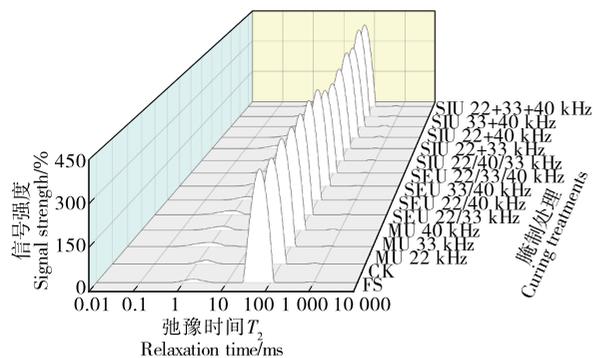
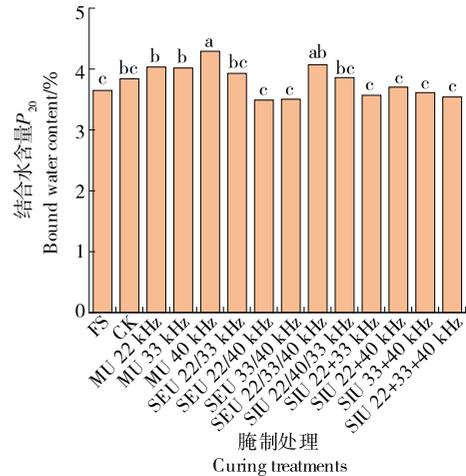
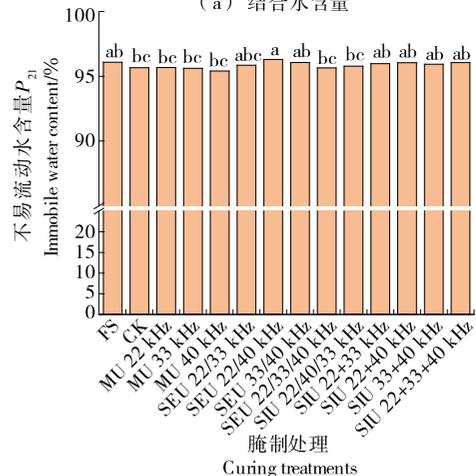


图 5 不同腌制处理后牛肉的横向弛豫图谱

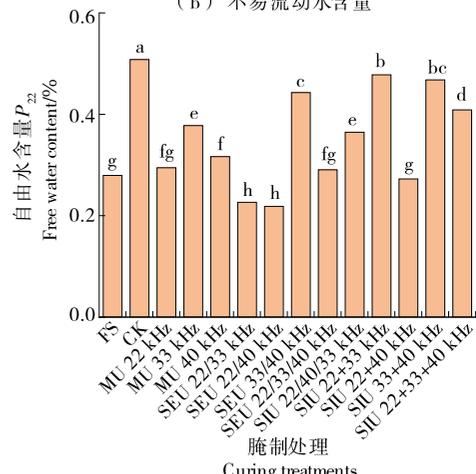
Figure 5 Transverse relaxation spectra of beef after different curing treatments



(a) 结合水含量



(b) 不易流动水含量



(c) 自由水含量

字母不同代表存在显著性差异($P<0.05$)

图 6 不同腌制处理后牛肉 3 种水分状态的相对含量
Figure 6 Relative contents of three moisture states in beef after different curing treatments

冰箱冷藏室腌制肉品时,还需要考虑热量消耗问题,后续可以进行放大试验,测定腌制肉品过程中的热量消耗,以

期实现在家用冰箱冷藏室中使用超声波辅助腌制肉品。

参考文献

- [1] 刘瑞, 李雅洁, 陆欣怡, 等. 超声波技术在肉制品腌制加工中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 445-453.
LIU R, LI Y J, LU X Y, et al. Recent advances in the application of ultrasonic technology in the curing of meat products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(24): 445-453.
- [2] N'GATTA K C A, KONDJOYAN A, FAVIER R, et al. Impact of combining tumbling and sous-vide cooking processes on the tenderness, cooking losses and colour of bovine Meat[J]. Processes, 2022, 10(6): 1 229.
- [3] 王琳, 冉佩灵, 熊双丽, 等. 超高压腌制对烤制猪肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 19-26.
WANG L, RAN P L, XIONG S L, et al. Effect of ultra-high pressure curing on the quality of roasted pork[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(15): 19-26.
- [4] 焦慎江, 赵志磊, 张良, 等. 腌制预处理对红烧肉品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 72-79.
JIAO S J, ZHAO Z L, ZHANG L, et al. Effect of marination pretreatment on the quality of braised pork in brown sauce[J]. Food Science, 2018, 39(15): 72-79.
- [5] 霍俊辉, 郭雨晨, 韩敏义, 等. 不同脉冲电场处理对牛肉腌制效果及食用品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(17): 216-222.
HUO J H, GUO Y C, HAN M Y, et al. Effects of different pulsed electric field treatments on the curing effect and edible quality of beef[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(17): 216-222.
- [6] KANG D C, WANG A R, ZHOU G H, et al. Power ultrasonic on mass transport of beef: Effects of ultrasound intensity and NaCl concentration [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 35: 36-44.
- [7] SHI H B, ZHANG X X, CHEN X, et al. How ultrasound combined with potassium alginate marination tenderizes old chicken breast meat: Possible mechanisms from tissue to protein [J]. Food Chemistry, 2020, 328: 127144.
- [8] 付丽, 郑宝亮, 高雪琴, 等. 牛肉的超声波快速腌制与嫩化工艺优化[J]. 肉类研究, 2017, 31(12): 23-29.
FU L, ZHENG B L, GAO X Q, et al. Optimization of rapid ultrasonic-assisted curing and tenderization of beef [J]. Meat Research, 2017, 31(12): 23-29.
- [9] FARAG K W, DUGGAN E, MORGAN D J, et al. A comparison of conventional and radio frequency defrosting of lean beef meats: Effects on water binding characteristics[J]. Meat Science, 2009, 83(2): 278-284.
- [10] 唐善虎, 李思宁, 巴琳惠. 超声波快速腌制法对牦牛肉理化和感官特性的影响[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2017, 43(5): 456-461.
TANG S H, LI S N, BA L H. Effect of ultrasonic rapid curing method on the physicochemical and sensory characteristics of yak meat[J]. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2017, 43(5): 456-461.
- [11] CHEN L, ZHOU G H, ZHANG W G. Effects of high oxygen packaging on tenderness and water holding capacity of pork through protein oxidation [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(11): 2 287-2 297.
- [12] 高子武, 吴丹璇, 王恒鹏, 等. 腌制方式对牛肉肌原纤维蛋白特性及水分分布的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(24): 179-186.
GAO Z W, WU D X, WANG H P, et al. Effects of curing process on myofibrillar protein characteristics and water distribution of beef[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(24): 179-186.
- [13] 龙锦鹏, 唐善虎, 李思宁, 等. 超声波辅助腌制法对牦牛肉腌制速率和品质影响的研究[J]. 食品科技, 2018, 43(12): 131-137.
LONG J P, TANG S H, LI S N, et al. Effect of ultrasonic-assisted curing on the curing speed and quality of yak meat [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(12): 131-137.
- [14] SANCHES M A R, COLOMBO SILVA P M O, BARRETTO T L, et al. Technological and diffusion properties in the wet salting of beef assisted by ultrasound[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 112036.
- [15] BERMUDEZ-AGUIRRE D. Sonochemistry of foods [M]// Ultrasound: Advances for food processing and preservation. [S.l.]: Elsevier, 2017: 131-143.
- [16] 张磊, 文青, 赵子梦, 等. 基于多模式超声场作用下的空泡空化机理[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 302-307.
ZHANG L, WEN Q, ZHAO Z M, et al. Cavitation mechanism of bubbles under multi-mode ultrasonic field[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2017, 38(3): 302-307.
- [17] EBRAHIMINIA A, MOKHTARI-DIZAJI M, TOLIYAT T. Dual frequency cavitation event sensor with iodide dosimeter [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 28: 276-282.
- [18] ZOU Y, YANG H, ZHANG M H, et al. The influence of ultrasound and adenosine 5'-monophosphate marination on tenderness and structure of myofibrillar proteins of beef[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2019, 32(10): 1 611-1 620.
- [19] KANG D C, GAO X Q, GE Q F, et al. Effects of ultrasound on the beef structure and water distribution during curing through protein degradation and modification[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 317-325.
- [20] XIONG G Y, FU X Y, PAN D M, et al. Influence of ultrasound-assisted sodium bicarbonate marination on the curing efficiency of chicken breast meat [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 60: 104808.

(下转第 233 页)

- antioxidant capacity of wheat bran[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 149: 111996.
- [44] 张晶, 张美莉. 超高压处理对谷物淀粉影响的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(7): 172-179.
ZHANG J, ZHANG M L. Research progress on the effect of high hydrostatic pressure treatment on cereal starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(7): 172-179.
- [45] 夏洁人, 徐学明, 臧继鑫. 小麦麸皮酶解产物对面包品质的影响[J]. *食品与机械*, 2012, 28(6): 36-42.
XIA J R, XU X M, ZANG J X. Qualites of bread affected by the hydrolysates of wheat bran[J]. *Food & Machinery*, 2012, 28(6): 36-42.
- [46] NAUMENKO N, POTOROKO I, KALININA I. Stimulation of antioxidant activity and γ -aminobutyric acid synthesis in germinated wheat grain *Triticum aestivum* L. by ultrasound: Increasing the nutritional value of the product [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 86: 106000.
- [47] SHEIKHOLESLAMI Z, MAHFOUZI M, KARIMI M, et al. Modification of dough characteristics and baking quality based on whole wheat flour by enzymes and emulsifiers supplementation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 139: 110794.
- [48] 王家宝, 何松, 苏子良, 等. γ -聚谷氨酸对全麦冷冻面团烘焙特性的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(2): 9-13, 41.
WANG J B, HE S, SU Z L, et al. Effects of γ -polyglutamic acid on baking properties of whole wheat frozen dough [J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(2): 9-13, 41.
- [49] DRABINSKA N, ZIELINSKI H, KRUPA-KOZAK U. Technological benefits of inulin-typefructans application in gluten-free products: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 56: 149-157.
- [50] 郭颖希, 王满生, 成军虎, 等. 非热加工技术消减食物过敏原研究进展[J]. *食品与机械*, 2019, 35(5): 219-223, 230.
GUO Y X, WANG M S, CHENG J H, et al. A review on elimination of food allergens by non-thermal processing technologies[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(5): 219-223, 230.
- [51] SUNG D E, LEE J, HAN Y, et al. Effects of enzymatic hydrolysis of buckwheat protein on antigenicity and allergenicity[J]. *Nutrition Research and Practice*, 2014, 8(3): 278.

(上接第 182 页)

- [21] 李佳麒. 超声波辅助腌制对牛肉干制品嫩度的影响及其机制探讨[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021: 14-16.
LI J Q. Effect of ultrasonic-assisted pickling on tenderness of beef jerky products and its mechanism [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021: 14-16.
- [22] 胡欣颖. 调理猪肉制品的研制及贮藏期品质变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020: 41-43.
HU X Y. Study on the development and quality change of marinated pork products during storage[D]. Chongqing: Southwest University, 2020: 41-43.
- [23] GONZALEZ-GONZALEZ L, ALARCON-ROJO A D, CARRILLO-LOPEZ L M, et al. Does ultrasound equally improve the quality of beef? An insight into longissimus lumborum, infraspinatus and cleidoocipitalis[J]. *Meat Science*, 2020, 160: 107963.
- [24] 银峰. 滚揉腌制对牛肉品质的影响及其作用机制探究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021: 10-11.
YIN F. Effect of tumbling on the quality of beef and its mechanism [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021: 10-11.
- [25] TONG H Q, CAO C W, DU Y L, et al. Ultrasonic-assisted phosphate curing: a novel approach to improve curing rate and chicken meat quality[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(5): 2 906-2 917.
- [26] ZOU Y H, ZHANG W G, KANG D C, et al. Improvement of tenderness and water holding capacity of spiced beef by the application of ultrasound during cooking[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(3): 828-836.
- [27] SERGEEV A, SHILKINA N, TARASOV V, et al. The effect of ultrasound treatment on the interaction of brine with pork meat proteins[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 61: 104831.

(上接第 208 页)

- [74] LAN W Q, ZHANG W J, LIU J L, et al. Effects of precooling with slurry ice on the freshness of farmed perch (*Lateolabrax japonicus*) during logistics process[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2021, 30(2): 162-175.
- [75] 班超方, 卢立新, 潘嘹. 冷冻型复合相变蓄冷材料的制备与性能评价[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(5): 218-221, 226.
BAN C F, LU L X, PAN L. Preparation and performance evaluation of freeze type composite phase change material[J]. *New Chemical Materials*, 2019, 47(5): 218-221, 226.
- [76] 章学来, 徐蔚雯, 刘田田, 等. 月桂酸-癸酸/十四醇-十二烷复合相变储能材料的制备与性能研究[J]. *制冷学报*, 2016, 37(1): 60-64.
ZHANG X L, XU W W, LIU T T, et al. Preparation and properties of lauric acid-decanoic/tetradecyl alcohol-dodecane composite as PCMs for thermal energy storage[J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(1): 60-64.
- [77] ZHAO Y, ZHANG X, XU X, et al. Development of composite phase change cold storage material and its application in vaccine cold storage equipment [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 30: 101455.