

超声时间对牛肉干品质及其肌原纤维蛋白结构的影响

董智铭, 姜秋婉, 蒋泽临, 王辉, 王见钊, 孔保华, 刘骞, 陈倩

Effect of Ultrasonic Time on Quality Characteristics and Myofibrillar Protein Structure of Beef Jerky

DONG Zhiming, JIANG Qiuwan, JIANG Zelin, WANG Hui, WANG Jianzhao, KONG Baohua, LIU Qian, and CHEN Qian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110216>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高压均质处理对不同浓度肌原纤维蛋白水悬液理化特性及蛋白结构的影响

Effects of High Pressure Homogenization on Physicochemical Properties and Protein Structure of Myofibrillar Protein Aqueous Suspensions with Different Concentrations

食品工业科技. 2019, 40(21): 1-6,12 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.21.001>

复合发酵剂对发酵牛肉干理化品质及安全性能的影响

Effects of Starter Cultures Combination on Physicochemical Quality and Safety of Fermented Beef Jerky

食品工业科技. 2021, 42(7): 43-49 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050370>

蛋白氧化对肉品品质影响及其控制方法研究进展

Progress in Effects of Protein Oxidation on Meat Quality and Its Control Methods

食品工业科技. 2020, 41(15): 315-322 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.15.049>

超声波辅助漂烫预处理对太阳能-热泵联合干燥南瓜片品质的影响

Effect of ultrasonic-assisted blanching pretreatment on the characteristics of solar-heat pump dried pumpkin slices

食品工业科技. 2018, 39(9): 136-142,148 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.09.024>

超声波辅助渗透海藻糖提高冷冻干燥罗非鱼片品质的工艺优化

Optimization of Ultrasonic-Assisted Infiltration of Trehalose to Improve the Quality of Freeze-dried Tilapia Fillets

食品工业科技. 2018, 39(17): 199-205,282 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.17.033>

一卤鲜鲈鱼加工过程中蛋白质结构变化及安全性的研究

Study on protein structure and security analysis during the processing of Yiluxian bass

食品工业科技. 2017(14): 87-92 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.14.017>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

董智铭, 姜菽婉, 蒋泽临, 等. 超声时间对牛肉干品质及其肌原纤维蛋白结构的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 36–42. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110216

DONG Zhiming, JIANG Qiuwan, JIANG Zelin, et al. Effect of Ultrasonic Time on Quality Characteristics and Myofibrillar Protein Structure of Beef Jerky[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 36–42. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110216

· 研究与探讨 ·

超声时间对牛肉干品质及其肌原纤维蛋白结构的影响

董智铭, 姜菽婉, 蒋泽临, 王 辉, 王见钊, 孔保华, 刘 蕺, 陈 倩*
(东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘要: 本文以牛背最长肌为试验原料, 采用超声辅助腌制技术处理原料肉, 探究不同超声时间(0、15、30、45、60 min, 功率300 W, 频率30 kHz)对发酵前牛肉条和经6 d自然发酵后牛肉干的品质特性及蛋白结构的影响。结果表明: 增加超声时间可显著提高发酵前的牛肉条和经6 d自然发酵的牛肉干中水分含量、水分活度、pH和盐含量, 降低剪切力($P<0.05$)。此外, 对超声处理后的牛肉条中肌原纤维蛋白进行结构分析, 结果表明: 随着超声时间的增加, 肌原纤维碎片化指数上升, 羰基含量、活性巯基含量增加, 表面疏水性增强, 总巯基含量降低($P<0.05$)。超声时间超过30 min后, 处理组 a^* 值显著降低($P<0.05$), 且牛肉干嫩度差异不显著($P>0.05$)。综上, 为了避免蛋白过度氧化及能源浪费, 最终确定超声时间30 min为最佳处理条件, 可有效改善牛肉干品质特性。

关键词: 牛肉干, 超声辅助腌制, 超声时间, 品质, 蛋白结构

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)20-0036-07

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2022110216](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110216)

本文网刊:



Effect of Ultrasonic Time on Quality Characteristics and Myofibrillar Protein Structure of Beef Jerky

DONG Zhiming, JIANG Qiuwan, JIANG Zelin, WANG Hui, WANG Jianzhao, KONG Baohua,
LIU Qian, CHEN Qian*

(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In this paper, the beef longissimus dorsi muscle was used as experimental material and subjected to ultrasound-assisted curing. The effects of different ultrasonic times (0, 15, 30, 45, 60 min, 300 W, 30 kHz) on the quality characteristics and protein structure of beef strips before fermentation and beef jerky after 6 days of natural fermentation were investigated. The results showed that increasing the ultrasonic time significantly increased the moisture content, water activity, pH and salt content and decreased the shear force in beef strips before fermentation and beef jerky after 6 days of natural fermentation ($P<0.05$). In addition, the structure analysis of myofibrillar protein in beef strips after ultrasonic treatment showed that the myofibril fragmentation index rose, surface hydrophobicity, carbonyl and active sulphydryl content increased, and total sulphydryl group content decreased with the increase of ultrasonic time ($P<0.05$). The a^* values of the treatment groups were significantly lower after the ultrasonic time exceeded 30 min ($P<0.05$), and the differences in beef jerky tenderness were not significant ($P>0.05$). In conclusion, to avoid excessive oxidation of proteins and waste of energy, an ultrasonic treatment time of 30 min was finally determined as the best treatment condition, which could effectively improve the quality characteristics of beef jerky.

Key words: beef jerky; ultrasonic-assisted curing; ultrasonic time; quality; protein structure

收稿日期: 2022-11-21

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程重大科技专项 (2020ZX07B02, 2021ZX12B05)。

作者简介: 董智铭 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工, E-mail: dongzhiming0121@163.com。

* 通信作者: 陈倩 (1988-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 畜产品加工, E-mail: chenqianego7@126.com。

超声技术是食品加工中一种新兴的绿色、消费者友好型技术, 具有效率高、耗能低等优点。超声技术作为非热加工技术, 可在不损害肉类质量的前提下促进加工进程、提高产品安全^[1]。超声处理对肉类的影响可归因于空化效应、机械效应和热效应。空化效应是指超声频率在 20~100 kHz 下, 传播介质中会形成空化泡并迅速生长、变大、崩溃, 整个环节会产生大量能量, 从而改变肌肉组织内部环境^[2-3]。许多研究表明, 超声的空化效应可以诱导细胞膜破裂, 破坏肌原纤维结构, 从而促进肉类腌制、干燥和嫩化^[4]。机械效应是超声处理的原发效应, 可以通过影响结缔组织的原有结构, 增强传质^[5]。热效应是指由空化效应释放热能, 机械效应摩擦生热, 从而导致局部高温的一种现象, 能够造成肉类品质改变^[6]。

腌制是肉制品加工中重要的工艺环节, 常用的腌制方法包括干腌法和湿腌法^[7]。干腌法是利用食盐和混合盐, 涂擦在肉的表面, 依靠外渗汁液形成盐液进行腌制的方法, 该法腌制时间较长、食盐不均, 且大量的水分流失导致产品质地坚硬^[8]。湿腌法是将原料肉浸泡在提前配制好的食盐溶液中, 通过扩散和水分迁移使得腌制剂渗入肉的内部, 该法食盐分布均匀, 但色泽和风味欠佳, 腌制时间与干腌法相近^[9]。相关研究表明, 超声技术结合湿腌法可以通过提高肉中食盐渗透速率, 加速腌制进程, 且不会对肉类的感官属性、氧化稳定性产生负面影响^[10]; 还可以通过破坏溶酶体, 释放组织蛋白酶和钙蛋白酶, 增加蛋白质溶解度, 破坏纤维结构, 从而改善肌肉嫩度^[11]; 增大肌肉纤维间距, 降低蒸煮损失, 增加保水性^[12]。

牛肉干作为一种具有高蛋白、低脂、美味等优点的传统特色干肉制品, 因其易食、耐贮存和便于携带等特点被广大消费者所喜爱。然而, 传统牛肉干由于质地硬、色泽深、品质不稳定等问题, 已不能很好的适应市场需要^[9]。目前, 对于牛肉干品质改善的研究大多集中在嫩化及保水技术的开发、成品配方的优化、营养与风味的提升等方面^[13-14]。关于超声技术改善牛肉干品质的研究相对较少, 且缺乏超声技术对牛肉干品质及蛋白结构影响的系统分析。前期研究已明确了超声功率对牛肉干品质的影响, 并且获得最佳的超声功率, 基于此, 本研究进一步探究超声时间对牛肉干品质特性及其蛋白结构的影响, 以期为牛肉干品质改善及实际生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

牛里脊肉、食盐、白糖、味精 购于哈尔滨家乐福超市; 食品级亚硝酸钠 购于亿人添加剂有限公司(哈尔滨); 砂仁、桂皮、茴香、胡椒、八角、肉豆蔻、草蔻、丁香、白芷 购于襄阳高新技术开发区食化香精商行; 所用化学试剂均为国产分析纯。

ZE6000 色差计 日本电色工业有限公司; GL-21M 冷冻离心机 湖南湘仪有限公司; PB-30 pH 计

德国 Sartorius 科学仪器有限公司; 202 型电热恒温干燥箱 天津市泰斯特仪器有限公司; S-3400N 型扫描电镜、E-1010 型离子溅射仪 日本 Hitachi 公司; 超声波辅助冷冻机 南京先欧有限公司; TA-XT plus 型质构分析仪 英国 Stabel Micro System 公司; 智能水分活度仪 美国 Decagon 公司; T6 新世纪紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司。

1.2 实验方法

1.2.1 牛肉干的制作 按照课题组前期牛肉干制作方法^[15], 并略做调整。将牛里脊去除筋膜, 顺着肌纤维的方向将其切成 2 cm×2 cm×10 cm 的长条状。按肉液比 1:3(g:mL)制备腌制液, 根据肉重添加水和料包(12% 砂仁、3% 草寇、15% 桂皮、6% 茴香、6% 胡椒、6% 八角、6% 肉豆蔻、3% 丁香和 3% 白芷)进行熬煮, 水沸后继续煮 30 min, 并维持水量在肉重的三倍, 冷却后加入 6% 姜粉、6% 白糖和 6% 味精, 根据水的总重加入 6% 氯化钠、0.01% 亚硝酸钠, 搅拌均匀即可。将切好的牛肉浸没于腌制液中, 根据前期试验结果, 在温度 10 °C、频率 30 kHz、功率 300 W 下进行超声处理, 超声时间设置为 0、15、30、45、60 min, 每 40 s 一次, 间隔 5 s。随后, 将经不同超声时间处理后的牛肉条继续在 10 °C 静置腌制 10 h。将腌制好的牛肉条放入发酵箱中进行自然发酵和干制, 设置温度 25 °C, 湿度 75%~80%, 发酵 6 d 后成品, 即为牛肉干。具体工艺流程如下: 牛里脊→修割切条→制备腌制液→不同超声时间处理(0、15、30、45、60 min)→静置腌制 10 h(牛肉条)→自然发酵、干制 6 d→成品(牛肉干)。

本试验分别对发酵前的牛肉条和发酵后的牛肉干进行理化及品质特性的分析(包括水分含量、水分活度、pH、食盐含量、剪切力和色差), 同时对发酵前的牛肉条微观结构进行观察, 并提取其中的肌原纤维蛋白, 进行结构分析(包括羰基、总巯基、活性巯基含量和表面疏水性)。

1.2.2 水分含量和水分活度的测定 水分含量按照 GB 5009.3-2016 进行测定^[16]; 水分活度按照于秋影等^[17]的方法进行测定。

1.2.3 pH 和食盐含量的测定 pH 按照 GB 5009.237-2016 进行测定^[18]; 食盐含量按照 GB 5009.91-2017 进行测定^[19]。

1.2.4 剪切力的测定 将肉干进行熟制(100 °C 蒸制 20 min), 然后将其冷却至室温, 修割成 1 cm×1 cm 粗细的肉干, 然后进行剪切力的测定。刀头型号为 BSW, 测力传感器 30 kg, 测前速度 10 mm/s, 测量长度 1.5 cm, 切割时刀头需垂直肌纤维方向, 进行 6 次重复试验, 取平均值。

1.2.5 色差的测定 色差按照吴九夷等^[20]的方法进行测定, 将样品切碎处理, 铺满色差杯底部。使用配

备有 8 mm 孔径、D65 光源和 10° 观察角的 ZE6000 色差计测定样品的亮度值(L^*)，红度值(a^*)和黄度值(b^*)。在进行颜色读数之前，用黑色和白色标准板校准仪器。

1.2.6 扫描电镜的观察 按照 Zhou 等^[21]光学显微镜分析肉样的方法进行测定，并略做调整。将牛肉样品切成 5 mm×5 mm×1 mm 的肉片，固定在 2.5% 戊二醛缓冲液中，用 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲溶液(pH7.2)冲洗三次，再用乙醇梯度溶液(50%、70%、90% 和 100%，V/V)脱水。然后，立即用叔丁醇洗涤三次，并在-20 ℃下冷冻。在冷冻干燥和喷金后，使用电子显微镜观察样品微观结构。

1.2.7 肌原纤维蛋白的提取 按照杜洪振等^[22]的方法提取超声处理后牛肉条中的肌原纤维蛋白。将切碎的牛肉条与四倍体积的磷酸盐提取液混合后均质 90 s，所得匀浆在 3000 r/min 下冷冻离心 15 min 后去除上清液。用四倍体积的相同提取液重复匀浆离心两次，随后用四倍体积的氯化钠洗液(0.1 mol/L)将沉淀溶解，均质 60 s，在 3000 r/min 下离心 15 min，重复上述操作三次，通过四层 80 目纱布过滤，用盐酸(0.1 mol/L)调节滤液 pH 至 6.0，收集蛋白并在 24 h 内立即分析。

1.2.8 肌原纤维碎片化指数(myofibril fragmentation index, MFI) MFI 按照马旭华等^[23]的方法进行测定，使用缓冲液调节提取的蛋白溶液浓度至 0.5 mg/mL，记录波长 540 nm 处的吸光度，其平均值乘以 200 即为 MFI。

1.2.9 羰基含量的测定 羰基含量按照 Fan 等^[24]的方法进行测定，并略做调整。取 1 mL 2,4-二硝基苯肼(10 mmol/L)与 1 mL 蛋白溶液(2 mg/mL)混匀，在室温下避光反应 1 h。此后加入 1 mL 20% 三氯乙酸溶液，经 10000 r/min 离心 5 min，取其沉淀用 1 mL 乙醇-乙酸乙酯溶液(1:1, V/V)洗涤三次，并用 3 mL 盐酸胍溶液(6 mol/L)将沉淀完全溶解，记录样品在波长 370 nm 处的吸光度。对照组在开始时以 1 mL HCl 溶液(2 mol/L)取代 2,4-二硝基苯肼，此后操作相同。

1.2.10 总巯基含量的测定 总巯基含量按照扈莹莹等^[25]的方法进行测定，并略作调整。将蛋白溶液调整至 2 mg/mL，取 1 mL 蛋白溶液加入到 8 mL Tris-

甘氨酸缓冲液(0.09 mol/L 甘氨酸, 0.086 mol/L Tris, 8 mol/L 尿素, 4 mmol/L EDTA, pH=8.0)中进行均质。取 4.5 mL 混合溶液与 0.5 mL Ellman 试剂(10 mmol/L DTNB)避光反应 30 min，对照组以 4.5 mL Tris-甘氨酸缓冲液取代混合液。经 DTNB 衍生后，10000 r/min 离心 15 min，记录上清液在波长 412 nm 处的吸光度，测定总巯基含量。

1.2.11 活性巯基含量的测定 活性巯基含量按照 Pan 等^[26]的方法进行测定，并略做调整。将 8 mL Tris-甘氨酸缓冲液(0.09 mol/L 甘氨酸, 0.086 mol/L Tris, 8 mol/L 尿素, 4 mmol/L EDTA, pH=8.0)与 1 mL 蛋白溶液(2 mg/mL)进行均质。在 4.5 mL 混合液中加入 0.5 mL Ellman 试剂，并在室温下避光反应 30 min，Tris-甘氨酸缓冲液作为空白对照。然后 10000 r/min 离心 15 min，通过记录上清液在波长 412 nm 和 540 nm 处的吸光度测定活性巯基含量，计算公式如下：

$$\text{巯基含量}(\text{nmol}/\text{mg蛋白}) = 73.53 \times (A_{412} - 1.6934 \times A_{540} + 0.00923)/C$$

式中：73.53=10⁶/13600；13600 L/(mol·cm)为摩尔消光系数；C(mg/mL)为蛋白溶液浓度。

1.2.12 表面疏水性的测定 表面疏水性按照陈腊梅等^[27]使用溴酚蓝的方法进行测定。将溴酚蓝(1 mg/mL)添加到蛋白溶液(1 mg/mL)中，在室温下充分混合后，以 3500 r/min 的速度离心，记录稀释 10 倍的上清液在波长 595 nm 处的吸光度。对照组用 pH7.0 的磷酸盐缓冲液(10 mmol/L)代替蛋白溶液。通过溴酚蓝结合量反映蛋白表面疏水性，计算公式如下：

$$\text{溴酚蓝结合量}(\mu\text{g}) = \frac{200 \mu\text{g} \times (A_0 - A_x)}{A_0}$$

式中：A₀ 为对照组的吸光度；A_x 为样品的吸光度。

1.3 数据处理

所有数据来自三次重复的独立试验，均以平均值±标准差(SD)来表示。使用 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析，并通过单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 检验确定平均值之间的显著性差异($P < 0.05$)。其他绘图用 Excel 和 Origin 2021 完成。

2 结果与分析

2.1 超声时间对牛肉干水分含量和水分活度的影响

由表 1 可知，发酵后的牛肉干中水分含量和水

表 1 超声时间对牛肉条及牛肉干水分含量和水分活度的影响

Table 1 Effects of ultrasound time on the moisture content and water activity of fresh beef strip and beef jerky

指标	组别	超声时间(min)				
		0	15	30	45	60
水分含量(%)	牛肉条	71.39±0.84 ^{Ac}	72.65±0.59 ^{Abc}	76.20±0.13 ^{Aabc}	77.52±0.81 ^{Aab}	80.73±0.62 ^{Aa}
	牛肉干	25.22±0.29 ^{Bd}	25.80±0.39 ^{Bd}	27.11±0.47 ^{Bc}	28.62±0.16 ^{Bb}	29.87±0.16 ^{Ba}
水分活度	牛肉条	0.981±0.002 ^{Ac}	0.982±0.001 ^{Abc}	0.983±0.001 ^{Abc}	0.987±0.001 ^{Aab}	0.992±0.004 ^{Aa}
	牛肉干	0.704±0.002 ^{Bd}	0.711±0.005 ^{Bcd}	0.722±0.008 ^{Bc}	0.728±0.002 ^{Bb}	0.747±0.005 ^{Ba}

注：小写字母不同表示同一组别中不同超声时间差异显著($P < 0.05$)；大写字母不同表示同一超声时间下牛肉条与牛肉干差异显著($P < 0.05$)；表 2~表 3 同。

分活度均显著低于牛肉条($P<0.05$)，0、15、30、45 和 60 min 处理组的牛肉条经 6 d 自然发酵后，水分含量分别降低至 25.22%、25.80%、27.11%、28.62% 和 29.87%，水分活度分别降至 0.704、0.711、0.722、0.728 和 0.747，这主要因为发酵过程中牛肉条失水所致。此外，随着超声时间的增加，牛肉条与牛肉干中水分含量和水分活度均呈逐渐上升趋势，特别是超声时间在 45 和 60 min 时($P<0.05$)。这说明延长超声时间有助于肌纤维保留更多的水分，本研究结果与 Zhao 等^[12] 报道的一致。一方面可能是因为超声处理可以使肌纤维直径膨胀，纤维间空隙逐渐增大，可以容纳更多的水分；另一方面，空化效应引起的盐加速渗透提高了纤维之间的静电斥力和蛋白溶解，更多水分被束缚在肌肉组织中^[28]。

2.2 超声时间对牛肉干 pH 和盐含量的影响

pH 是发酵肉制品的重要指标之一，对牛肉干品质形成和安全性有影响。由图 1A 可知，经过 6 d 发酵后的牛肉干 pH 显著降低($P<0.05$)，这主要与发酵过程中优势微生物代谢有关，这些微生物主要源于材料自身以及加工环境和设备。随着超声时间的增加，牛肉条 pH 从 5.8 升高至 5.96，发酵后的牛肉干 pH 从 5.24 升高至 5.34($P<0.05$)。这可能是因为超声的空化效应导致蛋白水解酶与脱氨基酶的释放，蛋白质结构的变化会导致离子基团位置发生改变，表现为

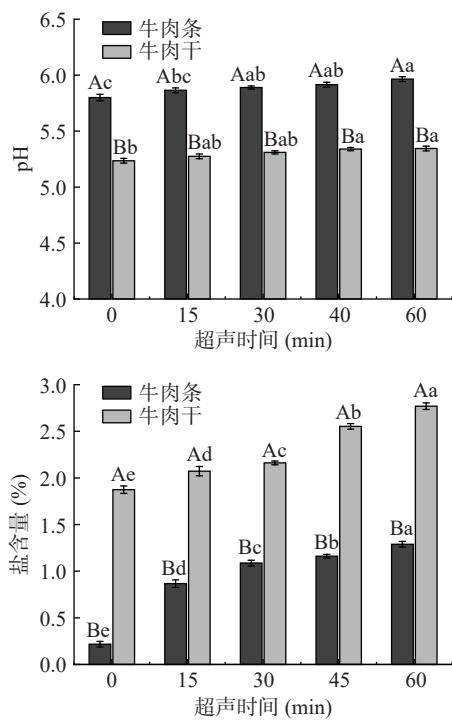


图 1 超声时间对牛肉条及牛肉干 pH(A)和盐含量(B)的影响

Fig.1 Effects of ultrasound time on the pH (A) and salt content (B) of fresh beef strip and beef jerky

注：小写字母不同表示同一组别中不同超声时间差异显著($P<0.05$)；大写字母不同表示同一超声时间下牛肉条与牛肉干差异显著($P<0.05$)；图 2 同。

pH 升高^[29]。Jayasooriya 等^[30] 在研究超声处理对牛半腱肌和最长肌物理性质的影响时，也得出了相同的结论。

超声时间对牛肉干盐含量的影响如图 1B 所示，发酵后的牛肉干中盐含量较牛肉条显著增加($P<0.05$)，这主要与发酵过程中牛肉水分损失有关，导致食盐溶液浓缩，盐含量增高。随着超声时间的增加，牛肉条和发酵后的牛肉干中盐含量均显著上升($P<0.05$)。这与 McDonnell 等^[31] 的研究结果一致，超声辅助处理可以显著改善鸡胸肉腌制过程中的盐渗透，主要是因为当空化气泡在肉表面附近不对称坍塌时，会产生具有瞬时高速(100 m/s)的微射流，将盐水微注射到肉中，从而改善肌肉组织中的盐扩散。此外，超声处理会破坏肌肉组织，排出内部气体，肌肉组织内形成负压降低了腌制液进入肉块的阻力，从而提高食盐渗透效果；超声波产生的湍流和搅动作用也可以进一步增强食盐的转移。

2.3 超声时间对牛肉干剪切力的影响

由图 2 可知，牛肉条各组剪切力均在 13.96 N 以下，经 6 d 发酵后，0、15、30、45 和 60 min 处理组的牛肉干剪切力分别升高至 33.19、30.64、25.01、24.10 和 23.85 N($P<0.05$)。这主要因为牛肉在发酵过程中失水，导致牛肉质地变硬。牛肉条和牛肉干的剪切力均随超声时间的增加(0~30 min)，呈显著降低趋势($P<0.05$)，30 min 后随着超声时间的增加，其剪切力没有显著变化($P>0.05$)。这说明适当增加超声时间可显著提升牛肉干的嫩度，这与刘梦等^[32] 的研究结果一致，超声处理可以破坏牛肉肌原纤维结构，且对肌束膜等结缔组织也有很强的破坏性。超声辅助腌制可以促进肌肉中肌间线蛋白降解，肌原纤维 Z-线断裂程度进一步增大，导致肌原纤维结构被破坏，从而改善牛肉的嫩度^[33]。

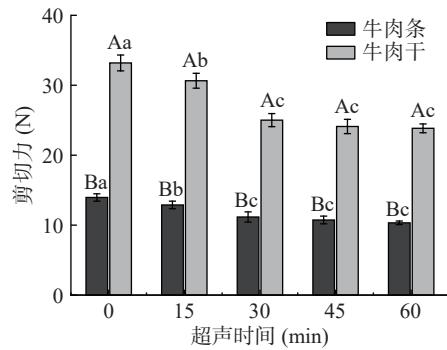


图 2 超声时间对牛肉条及牛肉干剪切力的影响

Fig.2 Effects of ultrasonic time on the shear force of beef strip and beef jerky

2.4 超声时间对牛肉干色差的影响

由表 2 可知，发酵后的牛肉干与牛肉条相比，其 L^* 值、 b^* 值显著增加， a^* 值显著降低($P<0.05$)。并且牛肉条与牛肉干的 L^* 值均随着超声时间的增加逐渐提高，超声处理后的 L^* 值显著高于未经处理组

表 2 超声时间对牛肉条及牛肉干色差的影响

Table 2 Effects of different ultrasound time on the color properties of fresh beef strip and beef jerky

组别	指标	超声时间(min)				
		0	15	30	45	60
牛肉条	L^* 值	31.34±0.43 ^{Bc}	32.55±0.34 ^{Bb}	33.24±0.47 ^{Bab}	33.16±0.73 ^{Bab}	33.99±0.61 ^{Ba}
	a^* 值	14.95±0.45 ^{Ac}	16.68±0.53 ^{Ab}	17.88±0.32 ^{Aa}	16.58±0.41 ^{Ab}	15.38±0.55 ^{Ac}
	b^* 值	11.56±0.14 ^{Bc}	11.99±0.55 ^{Bc}	12.36±0.20 ^{Bbc}	12.84±0.62 ^{Bb}	13.73±0.37 ^{Ba}
牛肉干	L^* 值	36.93±0.35 ^{Ad}	37.79±0.44 ^{Ac}	38.02±0.56 ^{Ac}	39.35±0.45 ^{Ab}	40.26±0.16 ^{Aa}
	a^* 值	12.82±0.67 ^{Bc}	15.29±0.40 ^{Bb}	16.80±0.51 ^{Ba}	15.14±0.73 ^{Bb}	12.99±0.58 ^{Bc}
	b^* 值	12.47±0.34 ^{Ad}	13.35±0.53 ^{Ac}	14.23±0.46 ^{Ab}	14.91±0.73 ^{Ab}	15.77±0.42 ^{Ad}

($P<0.05$)。 L^* 值的升高可能是由于空化气泡在破裂时产生的小范围高温、高压环境导致的肌红蛋白部分变性引起的,也可能是肌肉水分含量增加,提高了其光反射率,产生了颜色增白效果,进而提高了 L^* 值^[34]。Pohlman 等^[35]研究也发现,经过超声辅助腌制的牛胸肌,其 L^* 值显著增加。

a^* 值随着超声时间的增加先增大后减小,在超声 30 min 时达到最大($P<0.05$),牛肉条 a^* 值达到 17.88,牛肉干 a^* 值达到 16.8。这是因为随着超声时间的增加,空化气泡破裂产生了大量自由基,氧合肌红蛋白的形成,导致 a^* 值升高^[36];然而经过长时间超声处理后,氧合肌红蛋白进一步氧化成高铁肌红蛋白,牛肉的 a^* 值降低。此外,可能是因为长时间超声处理在破坏肌纤维的同时,促进纤维中的肌红蛋白释放到腌制液中,降低了牛肉中的肌红蛋白含量,导致 a^* 值降低。 b^* 值随着超声时间的增加而变大,在超声 60 min 时达到最大, b^* 值的增加可能与脂质氧化有关。然而,Carrillo-lopez 等^[37]发现增加超声时间对牛肉的 b^* 值没有显著影响,这可能是因为使用的超声强度太低,释放的能量不足以诱导蛋白质和色素变性,并且与原料肉的差异有关。

2.5 超声时间对牛肉条微观结构的影响

肌肉组织的嫩度和保水性与其微观结构密切相关,对超声处理后的牛肉条样品进行扫描电镜观察,结果如图 3 所示。超声处理 0 min 的对照组,肌束排列良好,彼此紧密接触;超声处理 15 min 后,肌肉组织的相邻肌束间存在明显间隙;超声处理 30 min 后,肌束间隙进一步变大;超声处理 60 min 后,出现了明显的肌束断裂。这说明增加超声时间,空化和机械效应会对肌肉微观结构造成更明显的破坏效果,这也是

促使牛肉干嫩度提高的重要原因,与 Reynolds 等^[38]研究结果一致。

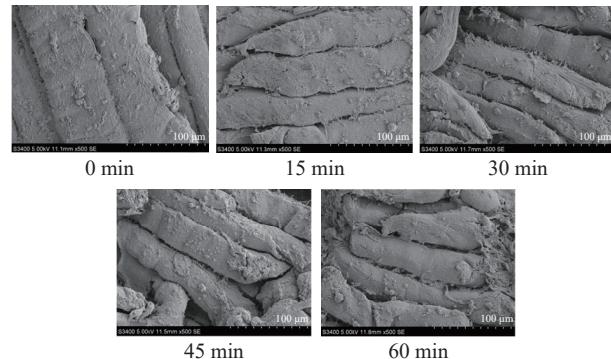


图 3 不同超声时间处理的牛肉条扫描电镜图(500×)

Fig.3 Scanning electron microscope of fresh beef strip with different ultrasound time (500×)

2.6 超声时间对牛肉肌原纤维蛋白结构的影响

通过上述研究发现不同超声时间对牛肉干的品质产生了不同程度的影响,为了进一步揭示其影响机制,对经超声处理后的牛肉条的肌原纤维蛋白结构进行了解析。由表 3 可知,随着超声时间的增加,牛肉 MFI 呈上升趋势,当超声处理 60 min 时达到最大。这说明增加超声时间能够提高牛肉肌原纤维碎片化指数,超声处理的机械效应作为改善肉质的关键因素,可在较短时间内产生强烈的剪切作用,引起肌原纤维蛋白结构弱化、断裂,从而降低剪切力,提高肉的嫩度^[39]。

羰基衍生物的形成主要归因于氨基酸侧链遭受自由基攻击氧化所致,其变化情况如表 3 所示。未经超声处理的对照组羰基含量为 0.31 nmol/mg 蛋

表 3 超声时间对牛肉肌原纤维蛋白 MFI、羰基、总巯基、活性巯基含量和表面疏水性的影响

Table 3 Effects of ultrasound time on the MFI, carbonyl, total sulphydryl, active sulphydryl content and surface hydrophobicity of myofibrillar proteins of fresh beef strip

指标	超声时间(min)				
	0	15	30	45	60
MFI	34.13±0.83 ^d	44.47±1.62 ^c	57.80±1.09 ^b	69.33±1.21 ^a	71.00±2.46 ^a
羰基含量(nmol/mg蛋白)	0.31±0.02 ^d	0.36±0.03 ^{cd}	0.53±0.02 ^{bc}	0.57±0.02 ^b	1.22±0.02 ^a
总巯基含量(nmol/mg蛋白)	58.66±0.32 ^a	57.20±0.49 ^b	55.35±0.46 ^c	54.77±0.32 ^c	53.24±0.41 ^d
活性巯基含量(nmol/mg蛋白)	32.17±0.32 ^d	34.02±0.47 ^c	34.51±0.40 ^{bc}	35.57±0.55 ^b	38.57±0.51 ^a
表面疏水性(μg)	13.68±0.85 ^d	24.43±1.00 ^{cd}	34.61±1.11 ^{bc}	43.31±0.75 ^b	51.30±0.45 ^a

白, 随着超声时间的增加羰基含量逐渐增加, 在 60 min 时达到 1.22 nmol/mg 蛋白($P<0.05$), 约为 30 min 时的 2 倍。这主要是因为超声空化效应引起的盐加速渗透增强了组织内部离子强度, 由此膨胀的肌原纤维导致自由基更易攻击氨基酸侧链生成羰基, 从而增加了羰基含量^[40]。

蛋白质的氧化程度可以用巯基的含量来衡量, 总巯基含量是蛋白质表面及包埋在内部所有巯基的总和。在本研究中, 随着超声时间的延长, 蛋白总巯基含量逐渐降低, 初始总巯基含量为 58.66 nmol/mg 蛋白, 在超声 60 min 后显著降至 53.24 nmol/mg 蛋白($P<0.05$), 且 30 min 和 45 min 处理组间差异不显著($P>0.05$)。这可能是因为长时间超声处理导致巯基中的氢原子被空化产生的自由基捕获, 巯基发生氧化, 并在肽链间或内部形成二硫键^[41]。Zhang 等^[42]也报道了相同的结论, 超声处理的猪臀中肌总巯基含量随超声时间的增加而降低。

随着超声时间的增加, 活性巯基含量从 0 min 的 32.17 nmol/mg 蛋白显著增至 38.57 nmol/mg 蛋白(60 min)($P<0.05$)。这可能是因为长时间的超声处理会使肌原纤维蛋白充分舒展, 暴露出更多的活性巯基基团, 从而导致含量升高, 康大成^[36]也证明了此结论。

表面疏水性是评估蛋白质结构的指标之一, 肌原纤维蛋白与溴酚蓝相互结合可以反映蛋白质的疏水情况。超声时间越长, 表面疏水性越强, 当超声时间 60 min 时, 其值达到 51.30 μg($P<0.05$)。这是因为超声空化效应引起的机械力会破坏肌原纤维蛋白分子间作用力, 蛋白质的展开和重折叠导致包埋的疏水性氨基酸暴露于表面, 疏水性增加, 这与 Gulseren 等^[43]的研究结果一致。

3 结论

本研究表明增加超声时间可以提高牛肉干的保水性、嫩度, 促进食盐渗透, 改善产品色泽; 并且, 增加超声时间促进了牛肉肌原纤维蛋白的氧化程度, 表现为总巯基含量的降低, 羰基含量、活性巯基含量的增加及表面疏水性的增强。当超声时间大于 30 min, 牛肉干嫩度改善不明显, 且过长时间的超声处理会增加颜色劣变、蛋白过度氧化等问题。综上, 确定超声为 30 min 牛肉干的整体品质最佳, 该研究为超声技术在肉干制品中的应用提供了思路, 为工业化生产提供了理论参考。但目前关于超声处理对胶原蛋白等其他蛋白组分的影响研究较少, 超声处理对牛肉干风味的影响也鲜见报道, 因此, 在这些方面有待进一步探究。

参考文献

- [1] 管俊峰, 李瑞成. 超声波技术在肉品加工中的研究进展[J]. 肉类研究, 2010(7): 82–85. [GUAN Junfeng, LI Ruicheng. Advances of research of the ultrasound technique applied in meat processing[J]. Meat Research, 2010(7): 82–85.]
- [2] SUSLICK K S, FLANNIGAN D J. Inside a collapsing bubble:

sonoluminescence and the conditions during cavitation[J]. Annual Review of Physical Chemistry, 2008, 59: 659–683.

[3] CHEN F, ZHANG M, YANG C. Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: A review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63: 104953.

[4] OZUNA C, PUIG A, GARCÍA-PÉREZ J V, et al. Influence of high intensity ultrasound application on mass transport, microstructure and textural properties of pork meat (*Longissimus dorsi*) brined at different NaCl concentrations[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(1): 84–93.

[5] GÓMEZ SALAZAR J A, OCHOA MONTES D A, CERÓN GARCÍA A, et al. Effect of acid marination assisted by power ultrasound on the quality of rabbit meat[J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018:1–6.

[6] 冷雪娇, 章林, 黄明. 超声波技术在肉品加工中的应用[J]. 食品工业科技, 2012(10): 394–397. [LENG Xuejiao, ZHANG Lin, HUANG Ming. Application of the ultrasound technique in meat processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012(10): 394–397.]

[7] 郝修振, 申晓琳. 畜产品工艺学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2015: 78–79. [HAO Xiuzhen, SHEN Xiaolin. Animal product technology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2015: 78–79.]

[8] 周光宏. 畜产品加工学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2015: 106–107. [ZHOU Guanghong. Animal product processing science[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2015: 106–107.]

[9] 李新生, 党娅, 王艳龙. 中国牛肉干加工技术及产业发展现状[J]. 肉类研究, 2012, 26(4): 32–35. [LI Xinsheng, DANG Ya, WANG Yanlong. Chinese beef jerky processing technology and industry development status[J]. Meat Research, 2012, 26(4): 32–35.]

[10] OJHA K S, KEENAN D F, BRIGHT A, et al. Ultrasound assisted diffusion of sodium salt replacer and effect on physicochemical properties of pork meat[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51(1): 37–45.

[11] XIONG G, FU X, PAN D, et al. Influence of ultrasound-assisted sodium bicarbonate marination on the curing efficiency of chicken breast meat[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 60: 104808.

[12] ZHAO X, SUN Y, ZHOU Y, et al. Effect of ultrasonic-assisted brining on mass transfer of beef[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(7): e13257.

[13] 郑加旭, 贾冬英, 张凤, 等. 菌剂发酵对牛肉干质构和风味特性的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(11): 131–135. [ZHENG Jiaxu, JIA Dongying, ZHANG Feng, et al. Properties of texture and flavor of the beef jerky fermented by using starter culture[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(11): 131–135.]

[14] 张玉. 发酵牛肉干发酵工艺优化及品质特性研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2021. [ZHANG Yu. Study on the fermentation characteristics and process optimization of fermented beef jerky[D]. Jilin: Jilin University, 2021.]

[15] WEN R, KONG B, YIN X, et al. Characterisation of flavour profile of beef jerky inoculated with different autochthonous lactic acid bacteria using electronic nose and gas chromatography–ion mobility spectrometry[J]. Meat Science, 2022, 183: 108658.

[16] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1–8.

[National Health and Family Planning Commission. GB 5009.3-2016 National standard for food safety. Determination of moisture in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2016: 1–8.]

[17] 于秋影, 曹传爱, 梁雪, 等. 呼吸式滚揉工作时间对调理牛肉

- 品质的影响 [J/OL]. 食品工业科技: 1-11[2022-09-13]. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040246. [YU Qiuying, CAO Chuanai, LIANG Xue, et al. Effect of duration time of breathing tumbling on the quality profiles of prepared beef[J/OL]. Science and Technology of Food Industry: 1-11[2022-09-13]. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040246.]]
- [18] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.237-2016 食品安全国家标准 食品 pH 的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-6. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.237-2016 National standard for food safety. Determination of food pH [S]. Beijing: China Standards Press, 2016: 1-6.]
- [19] 国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.91-2017 食品安全国家标准 食品中钾、钠的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 4-6. [National Health and Family Planning Commission. GB 5009.91-2017 National standard for food safety. Determination of potassium and sodium in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2017: 4-6.]
- [20] 吴九夷, 曹传爱, 王美娟, 等. 海藻膳食纤维对低脂低盐鸡肉法兰克福香肠品质的影响 [J]. 食品科学, 2023, 44(2): 87-93. [WU Jiuyi, CAO Chuanai, WANG Meijuan, et al. Effect of seaweed dietary fiber on the quality profiles of low-fat and low-salt chicken frankfurters[J]. Food Science, 2023, 44(2): 87-93.]
- [21] ZHOU Y, HU M, WANG L. Effects of different curing methods on edible quality and myofibrillar protein characteristics of pork[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132872.
- [22] 杜洪振, 陈倩, 杨振, 等. 预热处理大豆蛋白对鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶和流变学特性的影响 [J]. 食品科学, 2019, 40(12): 55-61. [DU Hongzhen, CHEN Qian, YANG Zhen, et al. Effect of preheated soy proteins on gelling and rheological properties of common carp myofibrillar protein[J]. Food Science, 2019, 40(12): 55-61.]
- [23] 马旭华, 李亚蕾, 罗瑞明, 等. 秦川牛宰后成熟期间 HSPA6 对肉品质变化影响机制 [J/OL]. 食品科学: 1-14[2022-10-12]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220830.1319.022.html. [MA Xuhua, LI Yalei, LUO Ruiming, et al. Study on the mechanism of HSPA6 effect on meat quality changes during post-slaughter maturation of Qin-chuan beef[J/OL]. Food Science: 1-14[2022-10-12]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220830.1319.022.html]]
- [24] FAN X J, LIU S Z, LI H H, et al. Effects of *Portulaca oleracea* L. extract on lipid oxidation and color of pork meat during refrigerated storage [J]. Meat Science, 2019, 147: 82-90.
- [25] 龚莹莹, 王妍, 于晶, 等. 脂肪添加量对发酵香肠脂质和蛋白质氧化及挥发性化合物形成的影响 [J]. 食品科学, 2019, 40(18): 8-14. [HU Yingying, WANG Yan, YU Jing, et al. Effect of fat addition on lipid and protein oxidation and volatile compound formation in fermented sausages[J]. Food Science, 2019, 40(18): 8-14.]
- [26] PAN J, LIAN H, JIA H, et al. Ultrasound treatment modified the functional mode of gallic acid on properties of fish myofibrillar protein [J]. Food Chemistry, 2020, 320: 126637.
- [27] 陈腊梅, 唐善虎, 李思宁, 等. 丙二醛氧化对牦牛肉肌浆蛋白理化特性及色泽稳定性的影响 [J/OL]. 食品科学: 1-14[2022-10-12]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221008.0838.002.html. [CHEN Lamei, Tang Shanhu, LI Sining, et al. Effects of malondialdehyde oxidation on the physicochemical properties and color stability of yak meat sarcoplasmic proteins[J/OL]. Food Science: 1-14[2022-10-12]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20221008.0838.002.html.]]
- [28] ZANG D, LI H, EMARA A M, et al. Effect of *in vitro* oxidation on the water retention mechanism of myofibrillar proteins gel from pork muscles[J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126226.
- [29] ALARCON-ROJO A D, CARRILLO-LOPEZ L M, REYES-VILLAGRANA R, et al. Ultrasound and meat quality: A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 55: 369-382.
- [30] JAVASOORIVA 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.
- [31] McDONNELL C K, LYNG J G, ALLEN P. The use of power ultrasound for accelerating the curing of pork [J]. Meat Science, 2014, 98(2): 142-149.
- [32] 刘梦, 杨震, 史智佳, 等. 超声辅助腌制处理对牛肉干干燥及理化特性的影响 [J]. 食品科学, 2019, 40(21): 121-126. [LIU Meng, YANG Zhen, SHI Zhijia, et al. Effect of ultrasound-assisted curing on drying rate and physicochemical characteristics of beef jerky[J]. Food Science, 2019, 40(21): 121-126.]
- [33] BAREKAT S, SOLTANIZADEH N. Effects of ultrasound on microstructure and enzyme penetration in beef longissimus lumborum muscle [J]. Food & Bioprocess Technology, 2018, 11: 680-693.
- [34] LI S, GUO X, SHEN Y, et al. Effects of oxygen concentrations in modified atmosphere packaging on pork quality and protein oxidation [J]. Meat Science, 2022, 189: 108826.
- [35] POHLMAN F W, DIKEMAN M E, KROPF D H. Effects of high intensity ultrasound treatment, storage time and cooking method on shear, sensory, instrumental color and cooking properties of packaged and unpackaged beef pectoralis muscle [J]. Meat Science, 1997, 46(1): 89-100.
- [36] 康大成. 超声波辅助腌制对牛肉品质的影响及其机理研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2017. [KANG Dacheng. Effects and mechanism of ultrasound-assisted curing on the quality of beef[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.]
- [37] CARRILLO-LOPEZ L M, HUERTA-JIMENEZ M, GARCIA-GALICIA I A, et al. Bacterial control and structural and physicochemical modification of bovine longissimus dorsi by ultrasound [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 58: 104608.
- [38] REYNOLDS J B, ANDERSON D B, SCHMIDT G R, et al. Effects of ultrasonic treatment on binding strength in cured ham rolls [J]. Journal of Food Science, 1978, 43(3): 866-869.
- [39] STADNIK J, DOLATOWSKI Z J. Influence of sonication on Warner-bratzler shear force, colour and myoglobin of beef [J]. European Food Research and Technology, 2011, 233(4): 553-559.
- [40] STADTMAN E R, LEVINE R L. Free radical-mediated oxidation of free amino acids and amino acid residues in proteins [J]. Amino Acids, 2003, 25(3-4): 207-218.
- [41] LI Y Q, KONG B H, XIA X F, et al. Structural changes of the myofibrillar proteins in common carp muscle exposed to a hydroxyl radical-generating system [J]. Process Biochemistry, 2013, 48(5-6): 863-870.
- [42] ZHANG R, XING L, KANG D, et al. Effects of ultrasound-assisted vacuum tumbling on the oxidation and physicochemical properties of pork myofibrillar proteins [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 74: 105582.
- [43] GULSEREN I, GUZEY D, BRUCE B D, et al. Structural and functional changes in ultrasonicated bovine serum albumin solutions [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2007, 14(2): 173-183.