

刘品品, 周家华, 张超, 等. 脉冲电场辅助低温解冻对猪肉品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 343–348. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010184

LIU Pinpin, ZHOU Jiahua, ZHANG Chao, et al. Effect of Pulsed Electric Field Assisted Low Temperature Thawing on Pork Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 343–348. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010184

· 贮运保鲜 ·

脉冲电场辅助低温解冻对猪肉品质的影响

刘品品^{1,2}, 周家华², 张超², 王宝刚², 石兴明^{2,3}, 洪海强⁴, 王云香², 徐冉冉², 江利华^{1,*}

(1. 河北工程大学生命科学与食品工程学院, 河北邯郸 056038;

2. 北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所, 北京 100097;

3. 北京农学院, 北京 102206;

4. 华商国际工程有限公司, 北京 100069)

摘要: 为研究脉冲电场 (Pulsed Electric Field, PEF) 辅助低温解冻对猪肉品质的影响, 以猪背最长肌为原料, 置于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱中冷冻 7 d, 取出后分别在 Control: $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0 kV, 自然解冻; PEF 解冻: P3 ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 kV)、P5 ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 5 kV)、P10 ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 kV)。分析不同解冻处理对猪肉解冻时间、色泽、质构、水分损失以及水分分布的影响。结果表明: PEF 处理可以缩短解冻时间, 改善猪肉质量。P10 组相比于 Control 组猪肉的解冻时间缩短了 44.4%; 不同解冻处理对猪肉蒸煮损失的影响无显著差异 ($P>0.05$); PEF 解冻后猪肉的硬度显著低于 Control 组 ($P<0.05$); PEF 解冻可以降低猪肉表面色泽的劣变程度, 减少肌肉微观结构损伤。综上, 当解冻温度为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 脉冲电压为 10 kV 时, 解冻时间最短, 解冻损失最低, 肉样状态更接近鲜样, 品质更好。

关键词: 脉冲电场, 猪背最长肌, 解冻, 品质, 劣变

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)01-0343-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024010184

本文网刊:



Effect of Pulsed Electric Field Assisted Low Temperature Thawing on Pork Quality

LIU Pinpin^{1,2}, ZHOU Jiahua², ZHANG Chao², WANG Baogang², SHI Xingming^{2,3}, HONG Haiqiang⁴,
WANG Yunxiang², XU Ranran², JIANG Lihua^{1,*}

(1. College of Life Science and Food Engineering, Hebei University of Technology, Handan 056038, China;

2. Institute of Agri-food Processing and Nutrition, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;

3. Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China;

4. Hua Shang International Engineering Co., Ltd., Beijing 100069, China)

Abstract: The effect of pulsed electric field (PEF) assisted low temperature on the quality of frozen pork longissimus dorsi muscle during thawing was investigated in this study. The muscle frozen at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 7 d was treated with 0 (Control), 3, 5, 10 kV PEF at $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (P3, P5, P10). The effects of different treatments on thawing time, color, texture, water loss and water distribution of muscle were analyzed. Results showed that PEF treatment reduced thawing time and improved the quality of muscle. Thawing time of frozen muscle treated with 10 kV PEF was 44.4% shorter than that of control. Cooking loss of muscle did not change significantly by PEF treatment ($P>0.05$). The hardness of thawed muscle with PEF treatment was significantly lower than that in control ($P<0.05$). Surface color fading and microstructure damage of muscle were reduced by PEF treatment. These results suggested that 10 kV PEF at $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ had the shortest thawing time, the lowest thawing loss, the state of meat sample was closer to fresh sample, and the quality was better.

收稿日期: 2024-01-19

基金项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设项目 (KJCX20230413)。

作者简介: 刘品品 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 193832762@qq.com。

* 通信作者: 江利华 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 24730563@qq.com。

Key words: pulsed electric field (PEF); pork longissimus dorsi muscle; thawing; quality; deterioration

猪肉营养丰富,在全球的肉类消费中占据着举足轻重的地位,是我国人民最重要的肉食来源。冷冻可以通过抑制微生物繁殖和降低细胞代谢来延长保质期,是长期保存肉类最有效的方法^[1]。解冻是冷冻肉在食用和加工前必须进行的步骤。但在解冻过程中,冰晶的融化常常导致大量的汁液流失^[2],由于冰的导热系数(2.2 W/mK)高于水(0.6 W/mK),这种融化过程通常需要很长的时间^[3],这可能会加重冻肉品质的劣变,如微生物增殖,蛋白质和脂类的氧化,可溶性营养物质的损失,以及感官品质的降低等^[4-5]。因此,加强解冻过程的质量控制是十分必要的。

冷冻肉的解冻一般采用空气解冻、水解冻以及微波解冻等传统解冻方式^[6],这些方法对设备要求简单,易操作,但在具体的工业生产中存在很多局限性,例如解冻速度慢、解冻均匀性差、会对食品的质量和品质产生影响等^[7]。为了改善这一现状,学者们进行了大量的研究,近年来研究较多的新型的解冻方式有超声波辅助解冻、磁场解冻、电场解冻。相比于传统解冻技术,电场解冻技术能耗低、解冻速度快、能够缓解食物质量和营养的不良变化,保持食物的物理和感官属性。目前研究较多的电场技术主要有高压静电场解冻和脉冲电场解冻两种。其中,高压静电场解冻技术在肉类解冻中已有较为广泛的应用,不仅能够较好地保持肉类的品质,还可以防止食品酸化腐败^[8],但其电源电压低、电场强度不高,加工效率低^[9]。因此具有高电压(0~50 kV)、高脉冲(0~2000 Hz)的 PEF 技术受到了研究学者的广泛关注。PEF 技术能够对放置在两个电极之间的样品施加具有高电场强度的极短电压脉冲(μs),破坏水分子间的稳态结构并形成离子风以及产生负离子和臭氧从而改善解冻效果^[10]。

目前,PEF 已被证实在食品保鲜^[11]、辅助发酵^[12]、辅助提取^[13]、辅助干燥^[14]、辅助解冻^[15-16]等领域具有可观的效果。但关于脉冲电场辅助解冻的研究还为数甚少,已有的研究中使用的 PEF 强度不高且单一。因此本研究以猪背最长肌为研究材料,以空气解冻作为对照,探讨了不同强度脉冲电场对冷冻猪肉解冻速率以及解冻品质的影响,旨在开发一种新型解冻技术,为进一步理解不同 PEF 对解冻品质的影响规律提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

猪背最长肌(Longissimus thoracis et lumborum) 北京锦绣大地农副产品批发市场,立即置于 4℃ 冷藏运回实验室。

BCE224I-1CCN 电子天平 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;HH-6 数显恒温水浴锅 金坛市鸿科仪器厂;CR-400 色差仪 日本柯尼卡美能达公

司;TA.XT Plus 质构分析仪 英国 Stable Micro System 有限公司;NM120-025V-1 低场核磁共振仪及成像系统 上海纽迈电子科技有限公司;HITACHI Regulus 8100 扫描电镜 日本日立有限公司;脉冲电场装置 北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 取 10 条猪背最长肌,于 4℃ 下对其表面可见脂肪和结缔组织进行剔除,分割为 $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ ($20 \pm 0.05 \text{ g}$) 的肉块,共 120 块,随机分为 5 组,分别为新鲜样品组(Fresh)、对照组(Control)、3 kV PEF 处理组(P3)、5 kV PEF 处理组(P5)、10 kV PEF 处理组(P10),用透明聚乙烯袋密封后,置于 -18℃ 冰箱中冻藏 7 d,将冻结完全的肉样取出,在 4℃ 冷库中进行不同的解冻处理。

1.2.2 脉冲电场辅助低温解冻处理 本实验所采用的脉冲电场装置(图 1)由脉冲电场发生装置(AC 220 V、0~100 Hz)和放电板(43×27 cm)组成,两放电板间距离为 10 cm。所有解冻实验均在 4℃ 冷库中进行。解冻时,将肉样放入提前备好的保鲜盒中,以垂直于电场的方向置于放电板之间(放电板平行放置)。脉冲电场发生装置输出电压范围为 0~10 kV。

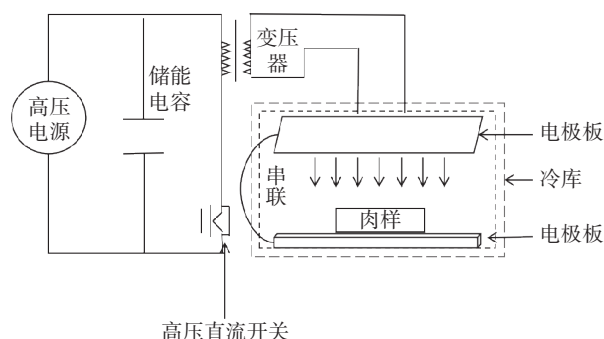


图 1 脉冲电场实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device of pulsed electric field

1.2.3 解冻时间的测定 解冻时间的测定参考 HU 等^[4]的方法并进行修改,使用温度记录仪进行记录,将记录仪探针插入肉块中心,每隔 30 min 记录一次温度值,所有肉样的初始解冻温度均为 -18℃,以肉块中心温度达到 4℃ 作为解冻完成的标志。

1.2.4 色泽的测定 色泽的测定参考胡斐斐^[17]的方法,使用色差分析仪进行测定,测定前使用白板对色差分析仪进行校准,再测定样品表面的亮度值 L^* 、红度值 a^* 、黄度值 b^* 。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

式中: ΔE 为总色差, ΔL 为处理组与新鲜肉样 L^* 值之差, Δa 为处理组与新鲜肉样 a^* 值之差, Δb 为

处理组与新鲜肉样 b^* 值之差。

1.2.5 质构的测定 参考王策^[18] 的方法并稍作修改。将肉样置于保鲜袋中密封, 水浴锅水浴加热至肉样中心温度 70 ℃, 静水冷却至室温后, 使用 P50 探头, 方法选择全质构分析(Texture Profile Analysis, TPA)模式, 参数设置为测前速度 1.5 mm/s、测中速度 1.0 mm/s、测后速度 5 mm/s, 肉样形变量 40%。

1.2.6 解冻损失的测定 解冻损失的测定参考 HU 等^[4] 的方法并进行修改, 解冻终点为猪肉中心温度达到 4 ℃, 解冻完成后取出猪肉, 用滤纸去除其表面水分后准确称量, 即为解冻后质量, 计算解冻损失。

解冻损失(%) = $\frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100$

式中: M_0 为解冻前肉样的质量, g; M_1 为解冻后肉样的质量, g。

1.2.7 蒸煮损失的测定 蒸煮损失的测定参考胡斐斐^[17] 的方法并进行修改, 解冻后用滤纸吸干肉样表面水分后称其质量记为 M_2 , 置于聚乙烯袋中于 72 ℃ 水浴 30 min, 冷却至室温, 用滤纸吸干肉样表面水分后称其质量记为 M_3 , 计算蒸煮损失。

蒸煮损失(%) = $\frac{M_2 - M_3}{M_2} \times 100$

式中: M_2 为蒸煮前肉样的质量, g; M_3 为蒸煮后肉样的质量, g。

1.2.8 低场核磁弛豫时间和氢质子成像测定 低场核磁共振(Low Field-Nuclear Magnetic Resonance, LF-NMR)和氢质子成像参照杨川等^[19] 的方法稍作修改。将解冻后的肉样品修剪为 2×1×2 cm³ 的肉块, 仪器参数: 主频(SF): 20 MHz, 偏移频率(O1): 809225.92 kHz, 90°脉冲(P1): 7 μs, 180°脉冲(P2): 13.04 μs, 采样点数(TD): 111998, 重复时间(TW): 3270 ms, 累加次数(NS): 4, 回波数(NECH): 2800。将样品放入直径为 30 mm 的检测管中, 采用核磁共振成像系统自旋回波成像序列对肉样进行氢质子密度成像测定, 参数设置为: 重复时间(TR): 500 ms, 纵向弛豫时间(T_1): 20 ms, 自旋回波时间(TE): 20 ms。

1.2.9 微观结构的观察 使用扫描电子显微镜对猪肉的微观结构进行观察, 采用 WU 等^[20] 的方法并稍作修改。将解冻后的猪肉沿准纤维方向切成 5×2×2 mm³ 的长方体, 在 2.5% 戊二醛溶液中室温避光固定 48 h, 用 0.1 mol/L PBS 洗涤 3 次, 每次 10 min, 然后用体积分数分别为 30%、50%、70%、80%、90%、95%、100% 的乙醇梯度脱水, 重复三次。待乙醇充分蒸发后, 对样品进行喷金, 在扫描电镜下观察样品并拍照(放大倍数 600 倍)。

1.3 数据处理

本实验采用 Origin 2020 软件处理数据并绘制分析图, 指标测定均为 3 次平行测定结果, 表示为平均值±标准差, 利用 SPSS 20 软件进行 Duncan 法多

重比较及显著性分析($P<0.05$ 表示差异显著)。

2 结果与分析

2.1 PEF 辅助解冻对猪肉解冻时间的影响

解冻是极其复杂的过程, 解冻时肉样长时间暴露于空气, 易受到多种因素的影响, 引起肉品品质的劣变, 因此解冻时间对冷冻肉品质具有重要影响^[4]。图 2 为不同强度 PEF 处理下冷冻猪肉中心温度的变化情况。直到整个解冻完成, Control 组总共花费了 1080 min, 耗时较长, 解冻速率较慢, PEF 解冻组解冻时间明显缩短, 其中 P10 组解冻时间较 Control 组缩短了 44.4%, 这表明脉冲电场处理有助于加快解冻进程, 提高解冻效率。这与方胜等^[21] 研究结果相似, 这可能是因为电极表面的电晕放电电离空气, 加速离子的动量并将动能传递给食品, 从而增强对流传热传质^[15]。处理组 P10 解冻时间短于 P3 和 P5 处理组, 表明相较于低强度 PEF, 高强度 PEF 更有利于缩短解冻时间。

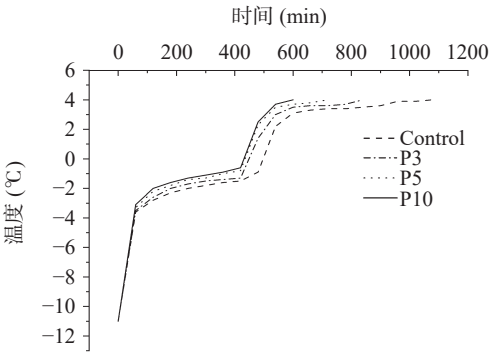


图 2 PEF 辅助解冻处理下冷冻猪肉的中心温度变化曲线
Fig.2 Curves of central temperature change of frozen pork under different PEF assisted thawing treatments

2.2 PEF 辅助解冻对猪肉色泽的影响

颜色作为评价肉质最直观的指标, 极大地影响着消费者的购买欲望。一般来说, L^* 值代表肉样的亮度, 该值越大说明肉光泽度越好; a^* 值代表红度, 该值越高说明肉色泽越好, 越新鲜; b^* 值代表黄度, 该值越高说明肉越不新鲜^[22]。如表 1 所示, 相比于新鲜肉样, PEF 解冻组 L^* 值和 a^* 值降低, b^* 值升高。表明在解冻过程中色泽发生劣变, 肉样新鲜度降低。PEF 解冻组肉样 L^* 值与 a^* 值高于 Control 组, 表明 PEF 能够一定程度上抑制 L^* 、 a^* 值的下降。 b^* 值被认为与

表 1 PEF 辅助解冻对猪肉色泽的影响

Table 1 Effect of PEF assisted thawing on pork color

部位	处理组	指标			
		L^*	a^*	b^*	ΔE
猪背最长肌	Fresh	49.99±0.85 ^a	6.95±0.15 ^a	4.83±0.67 ^b	—
	Control	45.89±0.85 ^d	5.24±0.38 ^d	7.41±0.30 ^a	5.15±0.37 ^a
	P3	46.59±0.17 ^{cd}	5.88±0.37 ^c	7.42±0.41 ^a	4.45±0.54 ^{ab}
	P5	47.74±1.47 ^{bc}	6.29±0.13 ^{bc}	7.48±0.32 ^a	3.36±0.47 ^{bc}
	P10	48.91±0.23 ^{ab}	6.72±0.11 ^{ab}	7.52±0.03 ^a	2.98±0.69 ^c

注: 同列不同的小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$)。

表 2 PEF 辅助解冻对猪肉质地特性的影响

Table 2 Effect of PEF assisted thawing on texture characteristics of pork

组别	Fresh	Control	P3	P5	P10
硬度(g)	1646.37±106.79 ^c	3182.13±92.09 ^a	2813.63±127.41 ^b	2345.57±108.77 ^c	2093.51±113.37 ^d
弹性	0.81±0.02 ^a	0.77±0.01 ^b	0.78±0.02 ^{ab}	0.80±0.03 ^{ab}	0.79±0.03 ^{ab}
内聚性	0.71±0.02 ^a	0.67±0.02 ^b	0.69±0.01 ^{ab}	0.69±0.01 ^{ab}	0.70±0.01 ^{ab}
咀嚼性	905.07±88.62 ^b	1523.69±44.89 ^a	1522.34±75.89 ^a	1524.24±18.47 ^a	1528.55±35.59 ^a
恢复性	0.34±0.01 ^a	0.31±0.02 ^b	0.32±0.01 ^b	0.32±0.01 ^b	0.32±0.01 ^b

注: 同行不同的小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$)。

肉的脂质氧化程度密切相关, b^* 值的升高在一定程度上代表着脂质氧化程度的增大^[23]。以往的研究表明 PEF 电离空气会产生臭氧从而加剧样品的氧化导致表面颜色恶化^[24]。本研究中 b^* 值差异不大可能是由于解冻时间短, 电场不足, 使得 b^* 值略有增加。

2.3 PEF 辅助解冻对猪肉质地构的影响

PEF 辅助解冻对猪肉质地构的影响如表 2 所示, 可以看出与新鲜猪肉相比, 冻结-解冻后的肉样, 硬度和咀嚼性呈现出上升的趋势, 而弹性、内聚性和恢复性呈下降趋势。其中各处理组间硬度存在显著差异($P<0.05$), 相比较于新鲜样品, Control、P3、P5 和 P10 处理组, 肉样硬度分别上升了 93.28%、70.90%、42.47% 和 27.16%, 这表明 PEF 处理能够显著地抑制解冻后肉样硬度的增大。各处理组之间肉样弹性、内聚性、咀嚼性和恢复性差异无统计学意义($P>0.05$)。在本研究中 P10 处理组肉样的质地特性更接近于新鲜肉样, 效果更好。

2.4 PEF 辅助解冻对猪肉系水力的影响

系水力可以在一定程度上反映肉品的组织状态, 与其品质和营养价值密切相关。系水力的下降不仅会导致水分流失的增多, 还会引起肉中维生素和矿物质等营养物质的溶出, 最终导致肉的营养价值下降。肉类产品的系水力大小可以通过解冻损失、蒸煮损失来评价, 肉的解冻损失和蒸煮损失少, 则解冻肉品的系水力好^[25]。在本研究中, PEF 辅助解冻对猪肉解冻损失的影响如图 3(A)所示, P3、P5 和 P10 处理组解冻损失分别为 4.14%、3.59%、2.87%, 显著低于对照组 5.51%($P<0.05$), 可能是因为对照组解冻速率慢, 增加了肌纤维蛋白的变性程度, 间隙水的自由度增加, 导致了较高的汁液流失^[26]。YAO 等^[27]也报道了类似的现象, 结果表明 PEF 处理减少了冷冻猪肉的解冻损失。此外, 脉冲电压为 10 kV 时, 肉样解冻损失显著低于脉冲电压为 3 kV 和 5 kV 时($P<0.05$), 说明高压脉冲电场环境更有利于冷冻肉解冻损失的降低。生肉在蒸煮过程中会因为肌肉收缩和蛋白质变性等原因造成质量减少。从图 3(B)可看出, 相比于新鲜样品, 四个处理组肉样蒸煮损失都有显著的升高($P<0.05$), PEF 处理对蒸煮损失的大小无显著影响($P>0.05$)。本部分研究结果表明, 脉冲电场辅助低温解冻能够改善猪肉的系水力, 减少解冻后的水分流失。

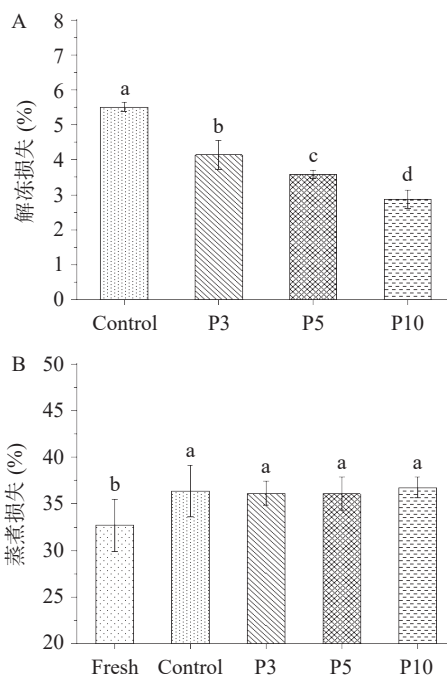


图 3 PEF 辅助解冻对猪肉系水力的影响

Fig.3 Effect of PEF assisted thawing on the hydraulic power of pork

注: 不同的小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$); 图 4 同。

2.5 PEF 辅助解冻对 T_2 弛豫时间、水分分布的影响

低场核磁共振(LF-NMR)作为一种快速、无损技术, 已被广泛用于监测肌肉中水分子流动性^[28]。 T_2 弛豫时间能够精确地反映肉样在解冻过程中水分的“态变”和迁移^[29]。从图 4(a)核磁共振波谱中可以观察到肌肉中三种形式的水, 分别是结合水(T_{2b} , 范围 0.1~10 ms)、不易流动水(T_{21} , 10~100 ms 左右)和自由水(T_{22} , 范围 100~1000 ms)^[30]。从图中可以看出, 相对于鲜样, 四个处理组肉样 T_{21} 对应的弛豫时间延长, 这可能是因为冻藏过程中, 冰晶的形成在一定程度上破坏了肌肉的组织结构^[31]。图 4(b)为不同的 PEF 处理下肉样中结合水、不易流动水和自由水相对比例, 从图中可以看出解冻后不易流动水含量下降, 自由水含量上升, 这表明解冻后水分发生迁移, 部分不易流动水态变为自由水。解冻过程中蛋白质结构展开, 氨基氢与羰基氧之间的氢键断裂, 螺旋结构被破坏, 引起蛋白质性质和功能特性的变化, 变性的蛋白与水的结合能力减弱, 一部分不易流动水发生迁移流到细胞外, 态变为自由水^[27]。ZHANG 等^[32]认为

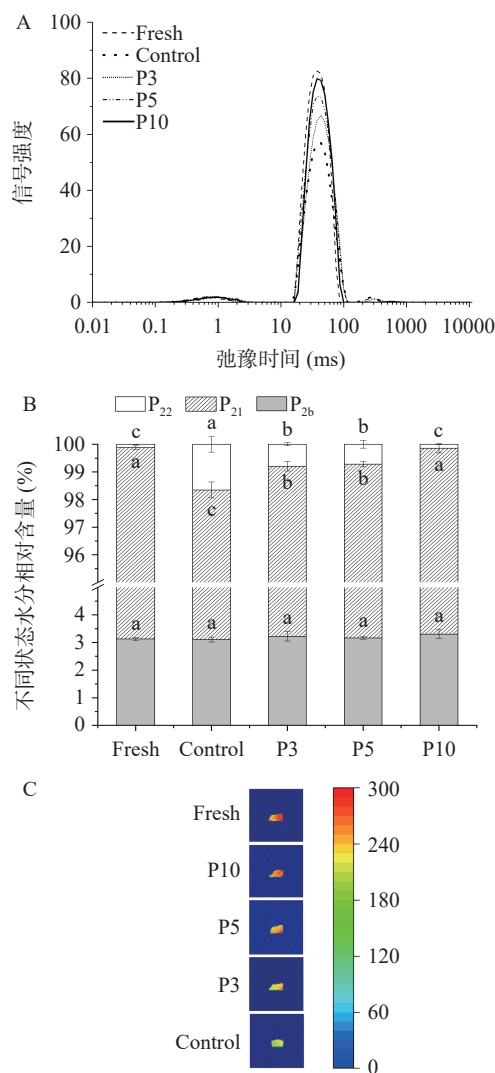


图4 PEF辅助解冻对 T_2 弛豫时间、水分分布、氢质子密度的影响

Fig.4 Effects of PEF assisted thawing on T_2 relaxation time, moisture distribution and hydrogen proton density

注: P_{22} , 自由水相对含量; P_{21} , 不宜流动水相对含量; P_{2b} , 结合水相对含量。

自由水含量越高表明肉样系水力越差。在本研究中Control组 P_{22} 最高,P10处理组最低,与其持水力结果一致。

氢质子的密度可用来反映肉样的含水率。不同PEF处理下肉样中氢质子密度分布情况如图4(c)所示。其中红、蓝分别代表氢质子密度的高、低,当肉样中水分含量高时,成像出的结果中,红色区域的占比高,反之则蓝色部分占比高。图4(c)中,新鲜样品的成像上,红色区域较多,说明其含水率高,各处理组图像中红色区域均有所减少。其中PEF组红色区域较Control组多,表明电场处理能够在一定程度上改善解冻后猪肉的系水力。

2.6 PEF辅助解冻对猪肉微观结构的影响

在扫描电镜(600×)下观察到猪肉的微观结构如图5所示。新鲜猪肉的肌纤维排列紧密,结构清晰完整。经不同解冻处理后的猪肉,肌纤维结构都有不同程度的崩坏,在电镜下呈现出结构松散、空隙增大

的现象。这可能是因为解冻过程中原本冻结的冰晶融化,使得肌纤维间出现空隙,肌肉中的水从孔隙流出,肌肉的系水力下降,进而引发结构特性的改变^[17]。在本研究中,Control组结构破坏最为严重,空隙扩大,表面模糊,与其相比,PEF解冻组肉样肌纤维结构保存较为完整、空隙较小,纤维轮廓也更加清晰,这表明PEF解冻更有利于保护猪肉的微观组织结构。造成这种结果的原因可能是,Control解冻时间较长,肌纤维结构发生氧化造成额外的损伤。

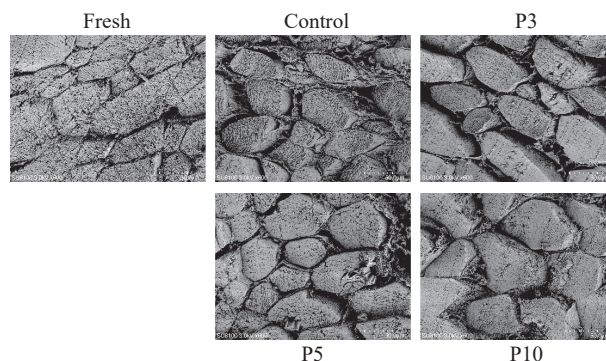


图5 PEF辅助解冻对猪肉微观结构的影响

Fig.5 Effect of PEF assisted thawing on microstructure of pork

3 结论

本实验探究了不同PEF辅助低温解冻对猪肉品质影响。结果表明,PEF对冷冻猪肉的解冻品质有着一定的积极影响,且脉冲电压越高,解冻品质越好。当脉冲电压为10 kV时,解冻时间最短,为10 h,解冻损失率最低,为2.87%。进一步的分析表明,PEF能够抑制肌肉中不易流动水向自由水迁移的趋势,保护微观组织结构的完整性,从而在一定程度上减少肌肉中水分的损失,改善猪肉品质。综上,本实验给出了不同强度的PEF在肉类解冻技术中的应用效果,后续可对PEF处理对肉类品质的改善机制进行研究。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 白京, 田寒友, 邹昊, 等. 不同冻结方式对冻结猪肉保水性的影响机制[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 83-89. [BAI J, TIAN H Y, ZOU H, et al. Effect mechanism of different freezing methods on water retention of frozen pork[J]. Food Science, 2020, 41(11): 83-89.]
- [2] 张芳, 张俊杰. 冻肉解冻技术发展综述[J]. 肉类工业, 2005, 4: 7-10. [ZHANG F, ZHANG J J. Review on the development of thawing technology of frozen meat[J]. Meat Industry, 2005, 4: 7-10.]
- [3] LEYGONIE C, BRITZ J T, HOFFMAN C L. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review[J]. Meat Science, 2012, 91(2): 93-98.
- [4] HU F, QIAN S, HUANG F, et al. Combined impacts of low voltage electrostatic field and high humidity assisted-thawing on

- quality of pork steaks[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150(4): 111987.
- [5] HU R, ZHANG M, JIANG Q Y, et al. A novel infrared and microwave alternate thawing method for frozen pork: Effect on thawing rate and products quality[J]. *Meat Science*, 2023, 198: 109084.
- [6] GAN S L, ZHANG M, MUGUMDAR A S, et al. Effects of different thawing methods on quality of unfrozen meats[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 134: 168–175.
- [7] 巫宇航, 金亚美, 张孝, 等. 物理场解冻在食品领域中的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(8): 372–379. [WU Y H, JIN Y M, ZHANG X, et al. Research progress of physical field thawing in food field[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(8): 372–379.]
- [8] 张馨月, 邓绍林, 胡洋健, 等. 几种新型解冻技术对肉品质影响的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(12): 293–298. [ZHANG X Y, DENG S L, HU Y J, et al. Research progress on the effects of several new thawing technologies on meat quality[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(12): 293–298.]
- [9] 邱金艳, 林颖, 王丽, 等. 高压电场杀菌技术研究进展[J]. *肉类研究*, 2023, 37(9): 52–59. [QI J Y, LIN Y, WANG L, et al. Research progress of high voltage electric field sterilization technology[J]. *Meat Research*, 2023, 37(9): 52–59.]
- [10] 陈俊文, 刘巧瑜, 李湘奎, 等. 解冻方式、反复冻融对猪肉品质的影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(4): 14–17. [CHEN J W, LIU Q Y, LI X L, et al. Effects of thawing methods and repeated freezing and thawing on pork quality[J]. *Food Industry*, 2021, 42(4): 14–17.]
- [11] ZHANG Z N, ZHANG B, YANG R J, et al. Recent developments in the preservation of raw fresh food by pulsed electric field[J]. *Food Reviews International*, 2022, 38(S1): 247–265.
- [12] 范成凯. 高压脉冲电场提高酿酒酵母发酵能力及其机制研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2019. [FAN C K. Study on improving fermentation ability of *saccharomyces cerevisiae* by high voltage pulsed[D]. Hangzhou: Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2019.]
- [13] 李晓娟. 脉冲电场在天然产物提取中的应用研究[J]. *现代食品*, 2020(17): 108–113. [LI X J. Application of pulsed electric field in extraction of natural products[J]. *Modern Food*, 2020(17): 108–113.]
- [14] 吕敏明, 杜慧慧, 蔡乐, 等. 脉冲电场预处理在果蔬干燥中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(12): 430–436. [LÜ M M, DU H H, CAI L, et al. Research progress on the application of pulsed electric field pretreatment in fruit and vegetable drying[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(12): 430–436.]
- [15] LI J H, SHI J Y, HUANG X W, et al. Effects of pulsed electric field on freeze-thaw quality of Atlantic salmon[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 65: 102454.
- [16] 徐燕, 姜爱华, 董卓琪, 等. 不同的解冻方式对芷江鸭肉品质的影响[J]. *现代食品*, 2023, 29(23): 61–65. [XU Y, LOU A H, DONG Z Q, et al. Effect of different thawing methods on the quality of Zhijiang duck meat[J]. *Modern Food*, 2023, 29(23): 61–65.]
- [17] 胡斐斐. 低压静电场辅助冻藏及解冻对猪肉品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. [HU F F. Effect of low voltage electrostatic field assisted frozen storage and thawing on pork quality[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.]
- [18] 王策. 含氧气调包装对冷却肉持水性的影响机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018. [WANG C. Effect mechanism of oxygen-containing modified packaging on water holding capacity of chilled meat[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.]
- [19] 杨川, 武广玉, 李应彪, 等. 低压静电场结合高湿解冻对羊肉保水性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(11): 86–94. [YANG C, WU G Y, LI Y B, et al. Effect of low voltage electrostatic field combined with high humidity thawing on water retention of mutton[J]. *Food Science*, 2023, 44(11): 86–94.]
- [20] WU G Y, YANG C, BRUCE H, et al. Effects of alternating electric field assisted freezing-thawing-aging sequence on longissimus dorsi muscle microstructure and protein characteristics[J]. *Food Chemistry*, 2022, 409: 135266.
- [21] 方胜, 孙学兵, 张涛, 等. 利用高压脉冲电场加速食物解冻的实验研究及其装置的研究[J]. *食品科学*, 2003, 11: 45–51. [FANG S, SUN X B, ZHANG T, et al. Experimental study on accelerating food thawing by high voltage pulsed electric field and its device[J]. *Food Science*, 2003, 11: 45–51.]
- [22] GUO L J, KUN S, JIN M, et al. Effect of high voltage electrostatic field treatment on thawing characteristics and post-thawing quality of lightly salted, frozen pork tenderloin[J]. *LWT*, 2018, 99: 268–275.
- [23] KIM Y, KEETON J, SMITH S, et al. Evaluation of antioxidant capacity and colour stability of calcium lactate enhancement on fresh beef under highly oxidising conditions[J]. *Food Chemistry*, 2008, 115(1): 272–278.
- [24] JIANG S T, HE M L, JIANG S H, et al. Color and quality of mackerel surimi as affected by alkaline washing and ozonation[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 63(4): 652–655.
- [25] 张孝, 金亚美, 巫宇航, 等. 介电解冻技术对肉类原料品质影响的研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(8): 283–291. [ZHANG X, JIN Y M, WU Y H, et al. Research progress on the effect of dielectric thawing technology on the quality of meat raw materials[J]. *Food Science*, 2024, 45(8): 283–291.]
- [26] MIN S, HONG G, CHUN J, et al. Pressure ohmic thawing: A feasible approach for the rapid thawing of frozen meat and its effects on quality attributes[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 9(4): 564–575.
- [27] YAO H B, JIN Y M, ZHANG X, et al. Influence of pulsed electric field on thawing of frozen pork: Physical properties, fat oxidation and protein structure[J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103175.
- [28] 李靖, 袁乙平, 刘婷, 等. 基于低场核磁共振技术的冷冻猪背最长肌品质变化研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(5): 149–155. [LI J, YUAN Y P, LIU T, et al. Study on quality changes of frozen pig longissimus dorsi muscle based on low field nuclear magnetic resonance technology[J]. *Food and Machinery*, 2019, 35(5): 149–155.]
- [29] BERTRAM C H, ANDERSEN H R, ANDERSEN J H. Development in myofibrillar water distribution of two pork qualities during 10-month freezer storage[J]. *Meat Science*, 2006, 75(1): 128–133.
- [30] MCDONNELL C K, ALLEN P, DUGGAN E, et al. The effect of salt and fibre direction on water dynamics, distribution and mobility in pork muscle: A low field NMR study[J]. *Meat Science*, 2013, 95(1): 51–58.
- [31] PAN N, DONG C H, DU X, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the quality of quick-frozen pork patty with different fat content by consumer assessment and instrument-based detection[J]. *Meat Science*, 2020, 172: 108313.
- [32] ZHANG X, GAO T, SONG L, et al. Effects of different thawing methods on the quality of chicken breast[J]. *International Journal of Food Science Technology*, 2017, 52(9): 2097–2105.