

静磁场辅助微冻对猪肉品质的影响

杜曼婷^{1,2}, 胡斌¹, 陈博^{1,2}, 栗俊广^{1,2}, 李可^{1,2}, 白艳红^{1,2*}, 孟少华³, 李胜杰⁴

(1. 郑州轻工业大学食品与工程学院, 河南郑州 450001) (2. 河南省冷链食品质量安全控制重点实验室, 食品生产与安全河南省协同创新中心, 河南郑州 450001) (3. 河南双汇投资发展股份有限公司, 河南漯河 462000) (4. 大连工业大学食品学院, 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁大连 116034)

摘要: 以猪背最长肌为研究对象, 通过分析磁场强度分别为 1、2、3、4 和 5 mT 静磁场辅助 (-2°C) 微冻与常规无磁场 (-2°C) 微冻的冻结处理条件下, 进行贮藏 0、5、10、15、20 和 25 d 样品的冻结曲线、菌落总数、贮藏和蒸煮损失率、pH 值、色泽、剪切力、脂肪氧化及微观结果等指标的变化, 明确静磁场辅助微冻对猪肉冻结解冻品质的影响。结果表明: 经 3、4、5 mT 静磁场辅助微冻处理后, 形成的冰晶小且均匀, 对肉样内部的肌纤维结构破坏较小, 使得肉样原有品质得到较好的保持。同时, 第 25 天时 3 mT 静磁场辅助微冻组菌落总数、脂肪氧化和 b^* 值分别为 5.58 lg CFU/g、0.24 mg/kg、10.94, 均显著低于无磁场微冻对照组 ($P<0.05$), 贮藏保鲜效果得到提升。综上, 静磁场辅助微冻有助于改善冻结冰晶对猪肉品质的破坏, 延缓猪肉在贮藏期间的品质劣变, 提升解冻肉品质, 且达到延长货架期的目的, 其中 3 mT 静磁场辅助微冻对猪肉贮藏保鲜效果最佳, 该研究为猪肉低温贮藏保鲜技术的发展提供新的思路。

关键词: 微冻贮藏; 静磁场; 猪肉品质; 保鲜

文章编号: 1673-9078(2025)03-262-270

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.0078

Effects of Static Magnetic Field-assisted Superchilling on the Quality of Pork

DU Manting^{1,2}, HU Bin¹, CHEN Bo^{1,2}, LI Junguang^{1,2}, LI Ke^{1,2}, BAI Yanhong^{1,2*},
MENG Shaohua³, LI Shengjie⁴

(1.College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China) (2.Henan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Collaborative Innovation Center of Food Production and Safety, Zhengzhou 450001, China) (3.Henan Shuanghui Investment and Development Co. Ltd., Luohe 462000, China) (4. National Engineering Research Center of Seafood, School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Samples of longissimus dorsi muscle of pigs were subjected to static magnetic field-assisted superchilling (at -2°C and magnetic field strengths of 1, 2, 3, 4, and 5 mT) and conventional superchilling (at -2°C) without applying a magnetic field. The freezing curves, total number of colonies, storage loss rates, cooking loss rates, pH values, color, shear force values, fat oxidation, and microstructures of the samples after storage for 0, 5, 10, 15, 20, and 25 days were determined

引文格式:

杜曼婷,胡斌,陈博,等.静磁场辅助微冻对猪肉品质的影响[J].现代食品科技,2025,41(3):262-270.

DU Manting, HU Bin, CHEN Bo, et al. Effects of static magnetic field-assisted superchilling on the quality of pork [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 262-270.

收稿日期: 2024-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32372382); 河南省高等学校重点科研项目 (25CY040); 河南省科技创新领军人才项目 (23HASTIT047)

作者简介: 杜曼婷 (1991-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 肉品科学, E-mail: mantingdu@163.com

通讯作者: 白艳红 (1975-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 肉品加工与质量安全控制, E-mail: baiyanhong212@163.com

to reveal the effects of static magnetic field-assisted superchilling on the freezing and thawing quality of pork. The results show that the ice crystals formed by static magnetic field assisted-superchilling at 3, 4, and 5 mT were small and uniform, and the damage to the internal muscle fiber structures of the meat samples was relatively small, indicating that the original quality of the meat samples was better maintained. Meanwhile, on the 25th day of storage, the total number of colonies, fat oxidation, and b^* value in the 3 mT magnetic field-assisted superchilling group were 5.58 lg CFU/g, 0.24 mg/kg, and 10.94, respectively, which were significantly lower than those in the control group (superchilling without a static magnetic field) ($P < 0.05$). These results indicate that the storage and preservation performances were improved. In conclusion, static magnetic field-assisted superchilling can help alleviate the reduction in pork quality caused by ice crystals, delay the deterioration of pork quality during storage, improve the quality of thawed meat, and extend the shelf life of pork. In particular, 3 mT magnetic field-assisted superchilling exhibited the best effects on pork storage and preservation. This study provides new ideas for the development of low-temperature storage and preservation technology for pork.

Key words: superchilling storage; static magnetic field; pork quality; preservation

温度是决定肉品货架期和品质的主要因素之一,目前肉品保鲜主要是通过低温贮藏抑制微生物生长繁殖和内源酶活性实现的^[1]。传统低温贮藏主要是冷藏和冻藏,而微冻贮藏通常是将食品的贮藏温度控制在其冰点以下 1~2 °C 之间的温度带内^[2],此时食品内部处于轻微冻结状态,又称为部分冻结,能够在一定程度上保持细胞的完整性,有效保留食品原有品质。彭涛等^[3]研究了猪里脊肉在微冻(-2 °C)、冷藏(4 °C)和冻藏(-18 °C)3种低温贮藏方式下肉品品质的变化,与冷藏相比,微冻货架期延长了 21 d;与冻藏相比,微冻汁液流失率更低,有较好的持水性,表明微冻是一种有效的保鲜方式。Kaewthong 等^[4]研究发现微冻贮藏与冷藏相比货架期延长了 10 d,与冻藏相比,微冻处理鸡胸肉的肌原纤维断裂程度低,肉样保水性、质构、颜色等品质保持较好。

磁场作为一种非热加工技术,能够避免热效应所带来的食品品质劣变。近年来,研究人员将磁场作为一种物理改性技术,应用于肉类低温贮藏保鲜中,在延长货架期的同时,较大程度上保持了肉品的原有品质。有研究表明,磁场辅助冷冻技术能够有效缩短肉类冻结过程中的相变时间,促进冰核形成并抑制冰晶生长,减少冰晶对肉品品质造成的不可逆性机械损伤^[5]。Lin 等^[6]研究发现,牛肉经 8 mT 静磁场过冷贮藏后,货架期延长 6 d 以上,且贮藏 14 d 肉样微观结构无明显损伤,与常规冷冻组相比,汁液流失下降了 47.8%。针对传统冻结对肉品品质损伤较大等问题,本研究利用静磁场辅助微冻技术,通过探究不同静磁场强度辅助微冻对猪肉贮藏期品质的影响,进一步提高微冻技术的贮藏

保鲜效果,为微冻和静磁场技术在肉品保鲜减损中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

选取 3 只检疫合格,饲养条件、生理成熟度等条件一致的杜长大三元杂交猪。屠宰后风冷排酸 24 h,取双侧背最长肌剔除脂肪和肉眼可见的筋膜,置于冰盒内快速运输至实验室。

1.1 材料与试剂

平板计数琼脂,北京奥博星生物技术有限责任公司;2-巯代巴比妥酸,国药集团化学试剂有限公司;三氯乙酸、丁基羟基茴香醚、氯化钾,上海麦克林生化科技有限公司;无水乙醇,天津富宇精细化工有限公司;氯化钠,天津市大茂化学试剂厂;伊红 Eosin-Y,赛默飞世尔科技公司。

1.2 仪器与设备

AT4508 多路温度巡检仪,常州安柏精密仪器有限公司;TA.XT.Plus 质构分析仪,英国 Stable Micro System;MFI-F1 磁场辅助冷冻冷藏实验箱,英都斯特(无锡)感应科技有限公司;MIR-554-PC 低温恒温培养箱,日本松下;Scientz-04 拍打式匀浆机,宁波新芝生物科技股份有限公司;WSC-80C 便携式色差仪,北京世纪仪器有限公司;CryoStar NX50 冷冻切片机,美国赛默飞世尔科技公司;BX53M 偏光显微镜,日本奥林巴斯;Ultraturrax T25 高速匀浆机,德国 IKA 公司;Avanti J-26s XPI 高速冷冻离心机,美国 Beckman 公司;SW-CJ-1FD 超净工作台,苏州安泰空气技

术有限公司; Tecan-Spark-20M 多功能微孔板检测仪, 上海迪奥生物科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品处理

将猪背最长肌分割为 8 cm×6 cm×3 cm 的长方体, 每块质量为 150±5 g, 分割后装入透明聚乙烯袋中随机均分为 6 组, 每组 3 次生物学重复。其中 6 组分别为无磁场微冻对照组 (MF-0) 及静磁场强度为 1 mT (MF-1)、2 mT (MF-2)、3 mT (MF-3)、4 mT (MF-4)、5 mT (MF-5) 的辅助微冻组, 待冻结处理完成后置于 -2 ℃ 下进行微冻贮藏实验。各处理组肉样分别在贮藏第 0、5、10、15、20 和 25 天时进行取样, 所取样品置于 4 ℃ 冰箱中解冻约 12 h 至肉样中心温度达 4 ℃ 后, 再进行相关指标的测定。

1.3.2 冰点的测定

将数显型多路温度巡检仪的测温金属探头插入肉样几何中心用以测量其中心温度的变化, 将自动测温记录仪的测温间隔设为 10 s, 随后将肉样置于 -18 ℃ 冻藏室中进行冷却冻结处理, 直至肉样中心温度到达并稳定于 -18 ℃ 时视为结束测定。

1.3.3 冻结曲线的测定

同冰点的测定方法, 将按插完成测温探头的肉样放入不同处理条件的环境中进行冷却冻结处理, 直至肉样中心温度到达并稳定于 -2 ℃ 时视为结束测定, 冻结过程中肉样的中心温度随着时间变化的曲线称之为冻结曲线。

1.3.4 菌落总数的测定

菌落总数的测定参考 GB 4789.2-2020^[7]《食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数测定》的方法。

1.3.5 贮藏损失率的测定

准确称量肉样贮藏前的质量并记为 m_1 , 解冻后用滤纸擦除其表面水分, 称量并记录其贮藏后的质量, 记为 m_2 , 按下列公式计算贮藏损失率:

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

式中:

A ——贮藏损失率, %;

m_1 ——贮藏前肉样的质量, g;

m_2 ——贮藏后肉样的质量, g。

1.3.6 蒸煮损失率的测定

准确称量肉样解冻后的质量并记为 m_2 , 将肉样装入聚乙烯袋中, 80 ℃ 水浴锅恒温加热至肉样中心温度达 70 ℃ 视为结束, 冰水浴冷却至室温, 用滤纸擦除其表面水分及渗出物, 称量并记录蒸煮后的质量, 记为 m_3 , 按下列公式计算蒸煮损失率:

$$B = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

B ——蒸煮损失率, %;

m_2 ——蒸煮前肉样的质量, g;

m_3 ——蒸煮后肉样的质量, g。

1.3.7 pH值的测定

pH 值的测定参考 GB-5009.237-2016^[8]《食品安全国家标准食品 pH 值的测定》的方法。

1.3.8 色泽的测定

将解冻肉用滤纸擦干表面残留的水分, 使用色差仪测试口对准且紧贴肉样表面以此直接测定样品表面色泽。便携式色差仪在使用前先用比色板进行校正后再进行样品的测量, 测定参数为 L^* (亮度值), a^* (红度值), b^* (黄度值)。每组样品平行测定 6 次。

1.3.9 剪切力的测定

剪切力的测定参考 NY/T 1180-2006^[9]《肉嫩度的测定剪切力测定法》的方法。

1.3.10 脂肪氧化的测定

称取 5 g 搅碎肉样, 加入 15 mL 去离子水与其均质混匀 (12 000 r/min, 10 s), 取 1 mL 均质液与 50 μ L 质量分数为 7.2% 丁基羟基茴香醚溶液及 2 mL 2-巯代巴比妥酸 / 三氯乙酸混合液 (20 mmol/L 2-巯代巴比妥酸及质量分数为 15% 三氯乙酸) 进行混合并涡旋混匀, 90 ℃ 水浴 15 min 后, 放入冰水浴中冷却 10 min, 离心 15 min (4 ℃、3 000 r/min), 取上清液在 532 nm 处测量其吸光度, 空白组取 1 mL 去离子水替代样品均质液在相同条件下进行配制, 按下列公式计算脂肪氧化 (TBARS) 值:

$$C = (A_{532}X - A_{532}Y) \times 5.88 \quad (3)$$

式中:

C ——TBARS 含量, mg MDA/kg;

$A_{532}X$ ——样品上清液在 532 nm 处的吸光度;

$A_{532}Y$ ——空白上清液在 532 nm 处的吸光度。

1.3.11 微观结构的观察

将肉样切成大小为 $1\times 1\times 0.5\text{ cm}^3$ 的形状,使用包埋剂将其完全包裹后置于冷冻切片机中切成约 $10\text{ }\mu\text{m}$ 厚的薄片,置于载玻片上,伊红染色 30 s 后,用体积分数为 75% 乙醇洗脱 3 次,吸除多余染液,置于偏光显微镜下观察猪肉肌纤维结构。

1.4 数据分析

采用 SPSS Statistics 25.0 和 Origin 2021 软件对实验结果进行数据分析及作图。实验结果用平均值 $\pm$ 标准差表示,实验均进行 3 次重复,每组样品做 3 次平行。

2 结果与分析

2.1 猪肉冰点和微冻温度测定

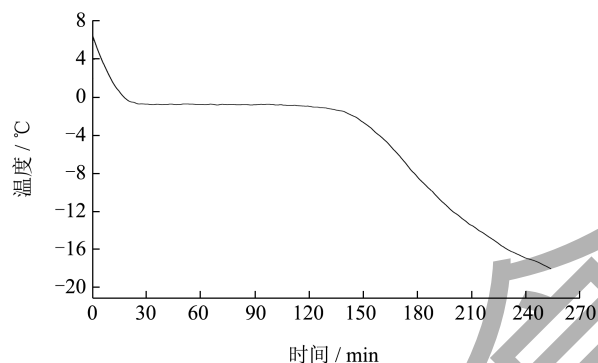


图1 猪肉的冻结曲线

Fig.1 The freezing temperature curve of pork

由图1可知,冻结初期时,肉样温度由初始的 $6.64\text{ }^{\circ}\text{C}$ 迅速下降至 $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,随后进入了平台期,这是因为肉样经冷却后温度快速下降至其冻结点,此时肉样内部水分冻结成冰,释放出与之相对应的结晶潜热,与外界给予的低温相抗抵消,使得温度下降变为平缓。冰点是指物样内冰与水平衡共存时的温度,即平台期的温度范围定义为样品的冰点温度,而微冻贮藏通常是将食品贮藏温度控制在其冰点以下 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的温度带中。本研究中猪背最长肌的冰点温度为 $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此本研究确定 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为猪背最长肌的微冻贮藏温度。

2.2 不同磁场强度对猪肉冻结曲线的影响

冻结曲线表示为冻结过程中温度-时间的关系,能够较好的反映出肉样内部在冻结过程中所发生的变化。由图2可知,与无磁场微冻对照组(MF-0)相比,施加静磁场辅助微冻有助于加快其冻结速率,

缩短冻结时间,其中静磁场强度为 3 mT (MF-3)、 4 mT (MF-4)和 5 mT (MF-5)辅助微冻组表现最为显著。对于常规微冻冻结而言,施加适当强度的静磁场辅助微冻能够缩短其 9% 的整体冻结时间。研究结构表明,施加一定强度的静磁场辅助微冻能够达到提升冻结速率,达到缩短冻结时间的效果^[10]。

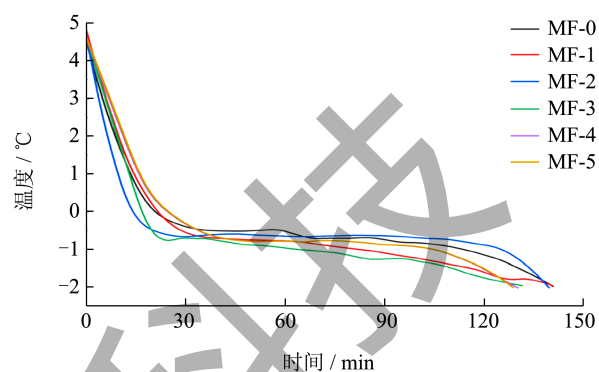


图2 不同处理方式对猪肉冻结曲线的影响

Fig.2 Effects of different treatments on freezing temperature curve of pork

2.3 贮藏期间猪肉菌落总数的变化

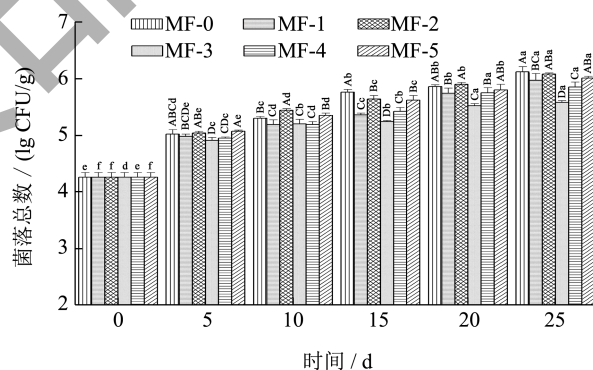


图3 贮藏期间不同处理方式对猪肉菌落总数的影响

Fig.3 Effects of different treatments on TVC of pork during storage

注:不同大写字母代表不同处理组之间的差异显著;不同小写字母代表不同贮藏时间之间的差异显著($P<0.05$)。下同。

菌落总数可直观的反应出食品的污染程度^[11],是衡量肉品腐败变质的重要指标之一。由图3可知,随着贮藏时间的延长,贮藏肉样的菌落总数逐渐上升,肉品品质在逐渐劣变。在整个贮藏期间,MF-3组的菌落总数值始终低于同时间段的MF-0组($P<0.05$),贮藏保鲜效果较为显著。第 25 天时,MF-0、MF-1、MF-2、MF-3、MF-4、MF-5组的菌落总数分别为 6.12 、

5.97、6.08、5.58、5.85、6.01 lg CFU/g, 其中 MF-3 和 MF-4 组的菌落总数值显著小于 MF-0 组 ($P < 0.05$), 贮藏保鲜效果得到提升且货架期得以延长。适当强度的静磁场辅助微冻可有效改善冻结损伤, 保持肉样内部的完整性, 从而降低肉样被污染的程度, 延缓了肉样的腐败变质。此外, 酶也是导致食品腐败变质的重要因素之一, 有相关研究表明, 磁场可以通过破坏水分子的氢键, 使之与水结合的蛋白酶构象无法维持, 进而控制酶活性, 达到延长食品货架期的目的^[12]。

2.4 贮藏期间猪肉持水力的变化

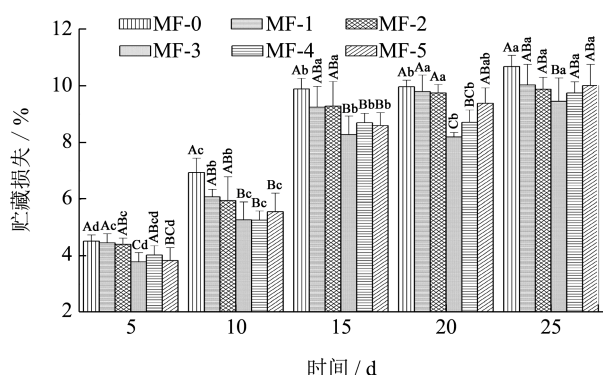


图4 贮藏期间不同处理方式对猪肉贮藏损失的影响

Fig.4 Effects of different treatments on purge loss of pork during storage

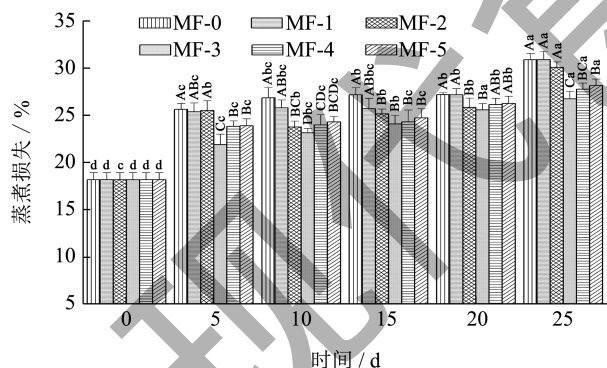


图5 贮藏期间不同处理方式对猪肉蒸煮损失的影响

Fig.5 Effects of different treatments on cooking loss of pork during storage

肉品的持水性主要是以贮藏损失和蒸煮损失共同表征^[13]。冻结肉在解冻后, 因冰晶损伤导致肌细胞流失的水分无法重新被完全吸收, 汁液流失加重, 进而造成营养物质的损失及品质的劣变^[14]。由图4可知, 随着贮藏时间的延长, 贮藏损失整体呈上升趋势。贮藏前期时, MF-3、MF-4、MF-5组与MF-0组相比, 冻伤程度得到改善, 贮藏损失较

低。贮藏后期时, 可能是因为微冻处于轻度冻结状态, 重结晶现象的发生导致冻伤程度逐渐增加, 从而导致贮藏损失提高。第25天时, MF-0、MF-1、MF-2、MF-3、MF-4、MF-5组的贮藏损失分别为10.68%、10.03%、9.88%、9.45%、9.75%、10.01%, 其中MF-3组效果最佳, 贮藏损失显著低于MF-0组 ($P < 0.05$)。

由图5可知, 随着贮藏时间的延长, 蒸煮损失逐渐增加。第5天时, MF-3、MF-4、MF-5组的蒸煮损失显著低于MF-0组 ($P < 0.05$), 且整个贮藏期间MF-3组的蒸煮损失始终低于MF-0组 ($P < 0.05$)。第25天时, MF-0、MF-1、MF-2、MF-3、MF-4、MF-5组的蒸煮损失分别为30.91%、30.92%、30.10%、26.76%、27.79%、28.17%, MF-3、MF-4、MF-5组的蒸煮损失显著低于MF-0组 ($P < 0.05$)。相关研究表明, 磁场能够使水分子团簇的自由能增大, 导致其自由扩散的能力降低, 分子团簇变得更为有序且稳定, 从而抑制冰晶的生长^[15], 最终形成小且均匀的冰晶形态, 降低了冻结冰晶对肉品造成的不可逆性损伤。因此, 研究结果表明, 通过施加一定强度的静磁场辅助微冻可有效降低猪肉的贮藏及蒸煮损失率, 提高肉品的持水能力, 从而提升解冻肉品质。

2.5 贮藏期间猪肉pH值的变化

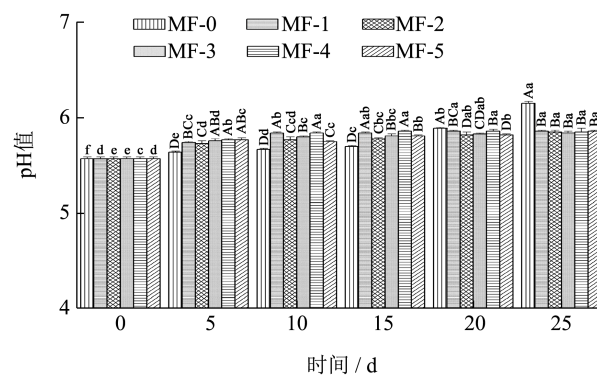


图6 贮藏期间不同处理方式对猪肉 pH 值的影响

Fig.6 Effects of different treatments on pH value of pork during storage

pH 值是判断肉品新鲜程度的一个重要指标, 是影响色泽、持水力、嫩度和微生物生长等的关键因素^[16], 宰后肉样 pH 值的变化可以反映出肉样品质的变化。由图6可知, 随着贮藏时间的延长, 各不同处理组 pH 值均成上升趋势, 其中MF-0组肉样的 pH 值在贮藏15 d后增长速度加快, pH 值均显

著高于各不同静磁场强度辅助微冻组 ($P<0.05$)。这可能是因为微生物的生长繁殖及内源酶作用所导致, 蛋白质被分解为生物胺与氨类等碱性物质并不断积累^[17]。第 20 天后, 各施加静磁场辅助微冻组的 pH 值均显著低于 MF-0 组 ($P<0.05$)。第 25 天时, MF-0 组 pH 值从第 0 天鲜肉的 5.57 显著上升至 6.15 ($P<0.05$), 显著高于各不同静磁场强度辅助微冻组 ($P<0.05$)。研究结果表明, 通过施加静磁场辅助微冻有利于延缓猪肉中的蛋白质分解, 限制碱性物质的生成, 从而提升其贮藏保鲜效果, 达到延长猪肉货架期的目的。

2.6 贮藏期间猪肉色泽的变化

肉色通常被人们作为初步判断肉样新鲜度的主要依据, 色泽的优劣程度直接影响消费者的购买选

择^[18]。在一定范围内, a^* 值越大表示肉品越新鲜, b^* 值越大则越不新鲜^[19]。由表 1 可知, 随着贮藏时间的延长, 各不同处理组肉样的亮度值 (L^*) 均成上升趋势。第 5 天时, 各不同处理组的 L^* 值均显著大于第 0 天的鲜肉样 ($P<0.05$), 这可能是由于冻结冰晶的形成导致肉样内部组织结构受损, 降低了内部细胞组织吸收水分的能力, 解冻后样品表面渗出液增加, 增强了表面对光的折射, 最终导致 L^* 值的升高^[20], 贮藏期间 L^* 值呈上升趋势。在整个贮藏过程中, MF-3、MF-5 组的 L^* 值要显著低于 MF-0 组 ($P<0.05$)。此研究结果表明, 通过施加适当强度的静磁场辅助微冻能改善冰晶的形成对肉品带来的冻结损伤, 减少其汁液流失, 降低表面对光的折射, 其中 MF-3 组效果最佳, 与贮藏损失及蒸煮损失结果一致。

表 1 贮藏期间不同处理方式对猪肉色泽的影响
Table 1 Effects of different treatments on color of pork during storage

色泽	贮藏时间/d	组别					
		MF-0	MF-1	MF-2	MF-3	MF-4	MF-5
L^*	0	47.32 ± 0.57 ^c	47.32 ± 0.57 ^c	47.32 ± 0.57 ^c	47.32 ± 0.57 ^c	47.32 ± 0.57 ^c	47.32 ± 0.57 ^c
	5	52.14 ± 0.48 ^{Ab}	52.12 ± 0.21 ^{Ab}	52.26 ± 0.49 ^{Ab}	49.12 ± 0.67 ^{Bab}	50.67 ± 0.19 ^{ABb}	48.78 ± 0.52 ^{Bbc}
	10	52.71 ± 0.61 ^{Ab}	52.68 ± 1.11 ^{Ab}	53.01 ± 0.61 ^{Ab}	48.73 ± 1.27 ^{Bb}	50.18 ± 0.59 ^{Bb}	48.76 ± 2.02 ^{Bbc}
	15	54.43 ± 0.31 ^{Aa}	52.44 ± 0.31 ^{Bb}	52.88 ± 0.67 ^{Bb}	49.80 ± 0.28 ^{Cab}	52.68 ± 0.16 ^{Ba}	50.13 ± 0.63 ^{Cab}
	20	54.47 ± 0.48 ^{Aa}	54.08 ± 1.10 ^{Aa}	53.21 ± 0.52 ^{Aab}	50.29 ± 0.55 ^{Ba}	53.21 ± 0.55 ^{Aa}	50.37 ± 0.65 ^{Bab}
	25	54.80 ± 0.60 ^{Aa}	54.69 ± 0.39 ^{Aa}	54.14 ± 0.33 ^{Aa}	50.44 ± 0.91 ^{Ca}	53.21 ± 0.26 ^{Ba}	51.12 ± 0.11 ^{Ca}
a^*	0	15.26 ± 0.94 ^a	15.26 ± 0.94 ^a	15.26 ± 0.94 ^a	15.26 ± 0.94 ^a	15.26 ± 0.94 ^a	15.26 ± 0.94 ^a
	5	15.01 ± 0.23 ^{Aab}	14.48 ± 0.29 ^{Aab}	15.09 ± 0.43 ^{Aa}	15.01 ± 0.37 ^{Aa}	15 ± 0.62 ^{Aab}	14.68 ± 0.13 ^{Aab}
	10	14.36 ± 0.48 ^{Abc}	14.66 ± 1.27 ^{Aab}	13.56 ± 0.70 ^{Ab}	14.91 ± 1.05 ^{Aab}	15.15 ± 0.40 ^{Aa}	14.29 ± 0.51 ^{Ab}
	15	13.64 ± 0.05 ^{BCc}	13.5 ± 0.52 ^{BCbc}	12.93 ± 0.26 ^{Cbc}	15.04 ± 0.16 ^{Aa}	13.88 ± 0.76 ^{Bb}	13.20 ± 0.22 ^{BCc}
	20	12.36 ± 0.06 ^{BCd}	12.49 ± 0.77 ^{BCcd}	12.09 ± 0.42 ^{Cc}	13.65 ± 0.88 ^{Abc}	12.69 ± 0.40 ^{ABCc}	13.28 ± 0.46 ^{ABc}
	25	11.38 ± 0.40 ^{De}	11.62 ± 0.22 ^{CDd}	12.32 ± 0.15 ^{Bc}	13.43 ± 0.48 ^{Ac}	12.51 ± 0.50 ^{Bc}	12.09 ± 0.26 ^{BCd}
b^*	0	8.07 ± 0.30 ^c	8.07 ± 0.30 ^d	8.07 ± 0.30 ^c	8.07 ± 0.30 ^b	8.07 ± 0.30 ^c	8.07 ± 0.30 ^b
	5	9.34 ± 0.78 ^{Ab}	8.98 ± 0.15 ^{ABc}	9.68 ± 0.28 ^{Ab}	8.22 ± 0.29 ^{Bb}	8.15 ± 0.35 ^{Bc}	8.07 ± 0.71 ^{Bb}
	10	11.10 ± 0.82 ^{ABa}	11.75 ± 0.20 ^{Aa}	10.53 ± 0.52 ^{Ba}	10.86 ± 0.25 ^{ABa}	11.14 ± 0.13 ^{ABa}	10.84 ± 0.49 ^{ABa}
	15	11.20 ± 0.23 ^{Aa}	10.92 ± 0.80 ^{ABb}	10.92 ± 0.10 ^{ABa}	10.76 ± 0.10 ^{ABa}	10.29 ± 0.50 ^{Bb}	10.39 ± 0.16 ^{Ba}
	20	11.15 ± 0.11 ^{Aa}	11.00 ± 0.30 ^{Ab}	10.99 ± 0.73 ^{Aa}	10.62 ± 0.24 ^{Aa}	10.39 ± 0.16 ^{Ab}	10.64 ± 0.67 ^{Aa}
	25	11.88 ± 0.40 ^{Aa}	11.69 ± 0.12 ^{ABa}	11.27 ± 0.32 ^{ABCa}	10.94 ± 0.22 ^{Ca}	10.73 ± 0.12 ^{Cab}	10.80 ± 0.24 ^{Ca}

注: 同列右肩不同大写字母表示不同处理组之间的差异显著; 不同小写字母表示不同贮藏时间之间的差异显著 ($P<0.05$)。

a^* 值代表肉品的红度, b^* 值代表肉品的黄度。随着贮藏时间的延长, 各不同处理组 a^* 值逐渐降低, 而 b^* 值逐渐上升, 说明贮藏过程中肉样的色泽在逐渐劣变, 这可能是因为肌红蛋白的过度氧化以及微生物的生长繁殖, 促使呈褐色的高铁肌红蛋白形成所导致。第 0~10 天, 各不同处理组间 a^* 值均无显著差异 ($P>0.05$)。第 15~25 天, MF-3 组的 a^* 值显著大于 MF-0 组 ($P<0.05$)。第 25 天时, MF-2、MF-3、MF-4 及 MF-5 组的 a^* 值分别为 12.32、13.43、12.51 及 12.09, 均显著大于 MF-0 组 ($P<0.05$)。Xia 等^[21] 表明磁场能够通过降低中心铁原子的氧化速率及增加 Zeta 电位来提高肌红蛋白的稳定性, 从而有助于维持肉样色泽红度的稳定性。贮藏第 25 天时, MF-1、MF-2、MF-3、MF-4 及 MF-5 组的 b^* 值分别为 11.88、11.69、11.27、10.94、10.73 及 10.80, 其中 MF-3、MF-4 和 MF-5 组的 b^* 值显著小于 MF-0 组 ($P<0.05$), 说明一定强度的静磁场辅助微冻能够抑制贮藏肉样 b^* 值的升高, 减缓其色泽的劣变程度且达到延长猪肉产品货架期的目的, 与菌落总数结果一致。

2.7 贮藏期间猪肉嫩度的变化

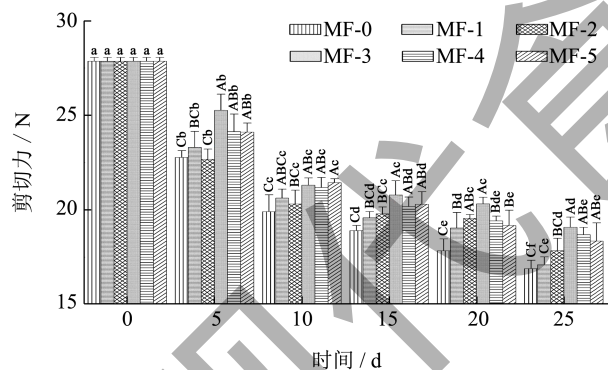


图 7 贮藏期间不同处理方式对猪肉剪切力的影响

Fig.7 Effects of different treatments on shear force of pork during storage

嫩度决定了肉品的食用口感, 是影响消费者评价品质的重要指标之一。肉品剪切力的大小与其嫩度密切相关, 嫩度可由剪切力大小表征。由图 7 可知, 随着贮藏时间的延长, 肉样剪切力整体呈下降趋势^[22]。第 5 天时, 各不同处理组肉样的剪切力值均显著小于第 0 天时的鲜肉 ($P<0.05$), 这可能是因为经过微冻处理, 冻结冰晶的形成破坏了肌原纤维结构所导致, 使得各不同处理组肉样的剪切力值与未冻结鲜肉相比均显著降低 ($P<0.05$)。有

研究表明, 肉品嫩度主要与肌原纤维和结缔组织结构相关, 然而在冻结过程中细胞内外冰晶的形成会引起肌肉组织完整性的破坏, 促使微观结构发生劣变, 这种肌纤维结构的破坏可以在一定程度上改变肌肉嫩度^[23], 促进肉样的嫩化。同时第 5 天时, MF-3、MF-4、MF-5 组肉样的剪切力值显著大于 MF-0 组 ($P<0.05$)。第 25 天时, MF-0、MF-1、MF-2、MF-3、MF-4、MF-5 组的剪切力分别为 16.90、17.11、17.85、19.09、18.70、18.36 N, MF-2、MF-3、MF-4、MF-5 组贮藏肉样的剪切力值显著大于 MF-0 组 ($P<0.05$), 其中 MF-3 组效果最佳, 延缓猪肉的嫩化程度, 从而提升解冻肉品质。有相关研究表明, 将磁场技术协调作用于低温贮藏保鲜中, 对肉品损伤程度减小, 同时使其口感、色泽、质构特性等指标更接近于新鲜肉品^[24]。

2.8 贮藏期间猪肉脂肪氧化的变化

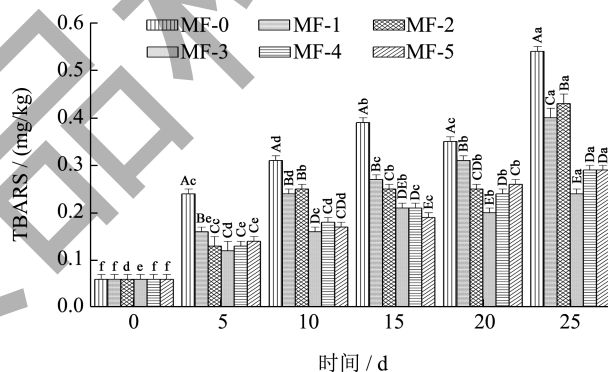


图 8 贮藏期间不同处理方式对猪肉 TBARS 的影响

Fig.8 Effects of different treatments on TBARS of pork during storage

TBARS 值是反映脂质氧化程度的重要参数, 可通过测定肉品中丙二醛的不同含量来反映其脂质氧化程度^[25]。由于脂质氧化分解成醛类、酸类、酮类和酯类等挥发性化合物, 是肉类食品风味产生的重要途径^[26], 但过度氧化则会产生有害物质及不良风味。由图 8 可知, 随着贮藏时间的延长, TBARS 值不断升高, 脂质氧化程度逐渐增加。整个贮藏期间, 施加静磁场辅助微冻组的 TBARS 值均显著小于 MF-0 组 ($P<0.05$)。贮藏 5 d 后, 各不同静磁场强度组间 TBARS 值出现显著差异 ($P<0.05$), 其中 MF-3、MF-4、MF-5 组脂质氧化程度较低。第 25 天时, MF-0、MF-1、MF-2、MF-3、MF-4、MF-5 组的 TBARS 值分别为 0.54、0.40、0.43、0.24、0.29、0.29 mg/kg, 不同静磁场强度辅助微冻组的

TBARS 值均显著小于 MF-0 组 ($P < 0.05$), 其中 MF-3、MF-4、MF-5 组的效果较佳。研究表明, 一定强度的静磁场辅助微冻能够抑制脂肪酶的活性和阻止氢过氧化物分解自由基, 从而抑制贮藏期间肉品 TBARS 值的上升^[27]。

2.9 贮藏期间猪肉微观结构的变化

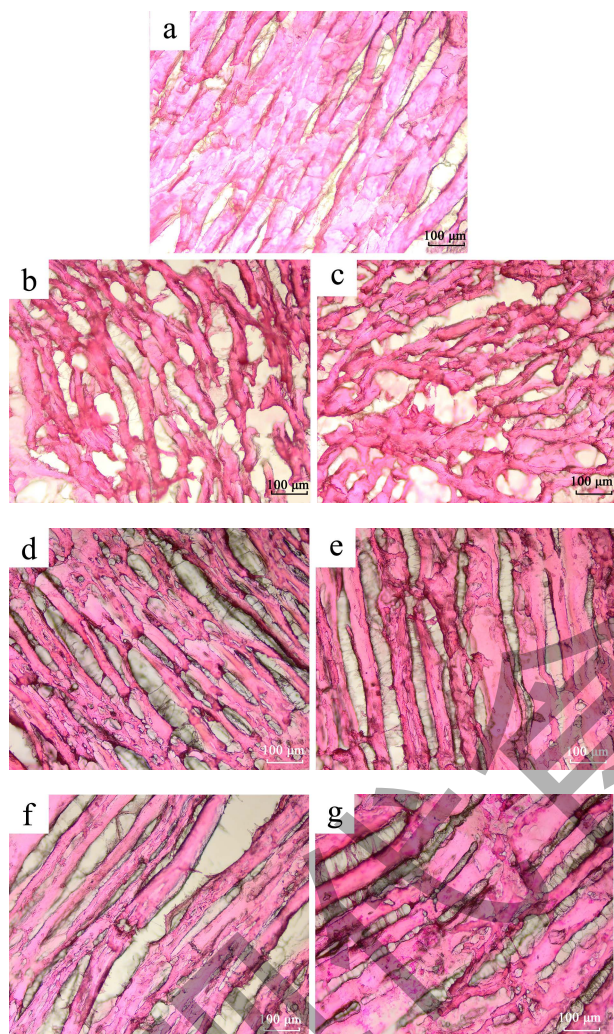


图9 不同处理方式对猪肉微观结构的影响

Fig.9 Effects of different treatments on the microstructure of pork

注: (a) 0 d; (b) MF-0-25 d; (c) MF-1-25 d; (d) MF-2-25 d; (e) MF-3-25 d; (f) MF-4-25 d; (g) MF-5-25 d。

在肉品冻藏过程中, 冻结冰晶的无规则生长会对食品内部原有的组织结构造成破坏, 同时冰晶的大小、形状及分布对肉品品质造成的影响不同^[28]。随着贮藏时间的延长, 重结晶现象的发生是导致冻结损伤逐渐加重的主要原因。图9分别展示了第0天及各不同处理组在贮藏第25天时, 猪肉的肌纤维纵截面图, 其中红色部分为猪肉肌纤维结构, 白

色部分则为冰晶形成所留下的空间缝隙。由图9可知, 第0天未经冻结处理的肉样肌原纤维完整且有序, 然而第25天时, 各不同处理组肉样的肌纤维结构均有不同程度的损伤, 其中MF-0组最为严重, 肌纤维结构出现多处断裂且杂乱无章, 与冰晶间隙散乱分布, 冻结过程中无规则生长的冰晶给肌纤维结构造成了不可逆性的机械损伤; MF-1组与MF-0组相比无明显改善作用; MF-2组略有改善, 但肌纤维较为纤细且出现分支和断裂; MF-3和MF-4组肌纤维结构清晰可见且较为整齐和完整, 冰晶间隙小而均匀, 纤维断裂程度较轻; MF-5组肌纤维结构相对完整, 冰晶间隙较小, 但部分纤维有断裂、分支及模糊现象; 其中MF-3组的效果最佳, 与第0天时肉样微观结构最为相似, 同时与持水性及剪切力的结果相符。

3 结论

与常规微冻相比, 静磁场辅助微冻可有效改善冻结冰晶引起的结构和品质损伤, 其中磁场强度为3 mT 静磁场辅助微冻组解冻肉样品质最佳。第5天时, MF-3组肉样贮藏损失、蒸煮损失、剪切力分别为9.45%、26.76%、19.09 N, 均显著高于MF-0组 ($P < 0.05$), 且肉品原有色泽及口感等得到较大程度的保留。随着贮藏时间的延长, 猪肉在贮藏过程(0~25 d)中品质逐渐劣变。第25天时, MF-3、MF-4、MF-5组贮藏肉样内部形成的冰晶小且均匀, 对肌纤维组织的破坏较小, 肉原有品质得到了较好的保持。同时, 第25天时, MF-3组菌落总数、TBARS 和 b^* 值分别为5.58 lg CFU/g、0.24 mg/kg、10.94, 均显著低于MF-0组 ($P < 0.05$), 延缓了贮藏期间猪肉品质的劣变, 贮藏保鲜效果得到提高。

参考文献

- [1] BANERJEE R, MAHESWARAPPA N B. Superchilling of muscle foods: Potential alternative for chilling and freezing [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(8): 1256-1263.
- [2] 卢晓, 董鹏程, 张一敏, 等. 微冻贮藏对牛肉保水性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(7): 253-259.
- [3] 彭涛, 邓洁红, 谭兴和, 等. 微冻贮藏对猪肉品质的影响研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(3): 74-78.
- [4] KAEWTHONG P, POMPONIO L, CARRASCAL J R, et al. Changes in the quality of chicken breast meat due to superchilling and temperature fluctuations during storage [J].

- Journal of Poultry Science, 2019, 56(4): 308-317.
- [5] WANG Z, TAN Y Y, YANG N, et al. Influence of oscillating uniform magnetic field and iron supplementation on quality of freeze-thawed surimi [J]. RSC Advances, 2019, 9(57): 33163-33169.
- [6] LIN H X, ZHAO S S, HAN X Y, et al. Effect of static magnetic field extended supercooling preservation on beef quality [J]. Food Chemistry, 2022, 370(15): 1-11.
- [7] GB 4789.2-2022,食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S].
- [8] GB 5009.237-2016,食品安全国家标准 食品pH值的测定[S].
- [9] 中华人民共和国农业部.NY/T 1180-2006,肉嫩度的测定 剪切力测定法[S].
- [10] TANG J Y, SHAO S Q, TIAN C Q. Effects of the magnetic field on the freezing parameters of the pork [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 107: 31-38.
- [11] 王正荣,康壮丽,朱明明,等.食品鲜度保持卡对冰温贮藏鸡胸肉品质特性的影响[J].食品工业科技,2019,40(19): 273-279,290.
- [12] 翁金通,生庆海,刘敬科,等.磁场辅助低温贮藏技术在食品中的应用及研究进展[J].食品科学,2023,44(23):372-382.
- [13] WANG C, WANG H, LI X, et al. Effects of oxygen concentration in modified atmosphere packaging on water holding capacity of pork steaks [J]. Meat Science, 2019, 148: 189-197.
- [14] HOLMAN B W B, COOMBS C E O, MORRIS S, et al. Effect of long term chilled (up to 5 weeks) then frozen (up to 12 months) storage at two different sub-zero holding temperatures on beef: 1. Meat quality and microbial loads [J]. Meat Science, 2017, 133: 133-142.
- [15] KANG T Y, YOU Y S, JUN S. Supercooling preservation technology in food and biological samples: a review focused on electric and magnetic field applications [J]. Food Science and Biotechnology, 2020, 29(3): 303-321.
- [16] SUJIWO J, KIM D, JANG A. Relation among quality traits of chicken breast meat during cold storage: correlations between freshness traits and torrymeter values [J]. Poultry Science, 2018, 97(8): 2887-2894.
- [17] 谢菲菲.电场辅助(超)冰温贮藏对生鲜肉品质的影响[D].宁夏:宁夏大学,2022.
- [18] SUMAN S P, HUNT M C, NAIR M N, et al. Improving beef color stability: Practical strategies and underlying mechanisms [J]. Meat Science, 2014, 98(3): 490-504.
- [19] EGELANDSDAL B, ABIE S M, BJARNADOTTIR S, et al. Detectability of the degree of freeze damage in meat depends on analytic-tool selection [J]. Meat Science, 2019, 152: 8-19.
- [20] 张语杰.微冻贮藏对冷鲜鸭肉品质特性的影响及其机理研究[D].武汉:武汉轻工大学,2021.
- [21] XIA M Q, CHEN Y X, MA J, et al. Effects of low frequency magnetic field on myoglobin oxidation stability [J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125651.
- [22] 丁大茗.微冻贮藏对猪肉货架期和品质的影响[D].南京:南京农业大学,2022.
- [23] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, THONGKAEW C, et al. Comparative study on physicochemical changes of muscle proteins from some tropical fish during frozen storage [J]. Food Research International, 2003, 36(8): 787-795.
- [24] LENG D M, ZHANG H N, TIAN C Q, et al. The effect of magnetic field on the quality of channel catfish under two different freezing temperatures [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 140: 49-56.
- [25] LI F F, ZHONG Q, KONG B H, et al. Deterioration in quality of quick-frozen pork patties induced by changes in protein structure and lipid and protein oxidation during frozen storage [J]. Food Research International, 2020, 133(7): 1-11.
- [26] WANG Y, WANG X F, WANG Z P, et al. Effects of different freezing methods on the quality of conditioned beef steaks during storage [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(7): e14496.
- [27] KASAIKINA O T, KRUGOV D A, MENGELE E A. Unusual antioxidant effects in multiphase and complex systems [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(6): 1600286.
- [28] KAALE L D, EIKEVIK T M. A study of the ice crystal sizes of red muscle of pre-rigor Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets during superchilled storage [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(3): 544-551.