

脉冲电场快速解冻设备的应用案例

姚黄兵¹, 张孝¹, 杨哪^{1,2}

(1. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214000; 2. 英都斯特(无锡)感应科技有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: 解冻是冷冻食品加工和烹煮前的必要环节, 与产品的最终品质息息相关。脉冲电场作为一种新型物理解冻技术, 主要基于焦耳热定律, 使电能转化为热能, 因而具有升温速率快和能效高的特点, 在提高冻品解冻速率和改善品质上具有潜在应用价值。本文应用恒流脉冲电场解冻装置(PET-S1)对冷冻肉制品进行解冻的效果验证, 并对产品解冻后的理化品质变化进行对比分析。针对不同厚度和种类的肉制品设置了对应的恒流输出条件, 以验证脉冲电场解冻的实际应用效果。基于此, 提供了不同冷冻食品脉冲电场解冻的应用案例, 并初步揭示作用机制, 期望为今后该设备的商业或工业化应用提供技术支持。

关键词: 脉冲电场; 冷冻食品; 解冻; 电极; 恒流

Application case of pulsed electric field rapid thawing device

Yao Huangbing¹, Zhang Xiao¹, Yang Na^{1,2}

(1. School of food science and technology, Jiangnan University, Wuxi 214000, China; 2. Induce-Tech Co., Ltd, Wuxi, 214000, China)

Abstract: Thawing is an essential aspect of frozen food before processing and cooking, which is closely linked to the ultimate product's quality. As a novel physical thawing technology, the pulsed electric field is mainly based on Joule's heat law, which converts electric energy into thermal energy. Consequently, it boasts a fast heating rate and high energy efficiency and has potential application value in improving the thawing rate and quality of frozen products. In this paper, a constant-current pulsed electric field thawing device (PET-S1) is used to verify the effectiveness of thawing frozen meat, and the changes in the physicochemical quality of the products after thawing are comparatively analysed. Furthermore, constant current output conditions were set for different types and thicknesses of meat to evaluate the practicality of employing pulsed electric field thawing. Based on this, the study provides cases of pulsed electric field thawing of various frozen foods, and reveals the mechanism of action, which is expected to provide technical support for the commercial or industrial application of this equipment.

Keywords: Pulsed electric field; frozen food; thawing; electrodes; constant current

1 仪器设备

脉冲电场解冻设备 (PET-S1) 如图 1 所示, 其包括: AC 控制电源、电极组件、解冻室、电流控制系统。应用范畴包括: 冷冻畜肉、禽肉 (冷冻猪肉、冷冻牛肉、冷冻鸡肉等)、冷冻水产品 (冷冻鱼虾、冷冻鱼糜等) 以及冷冻面团等的解冻。

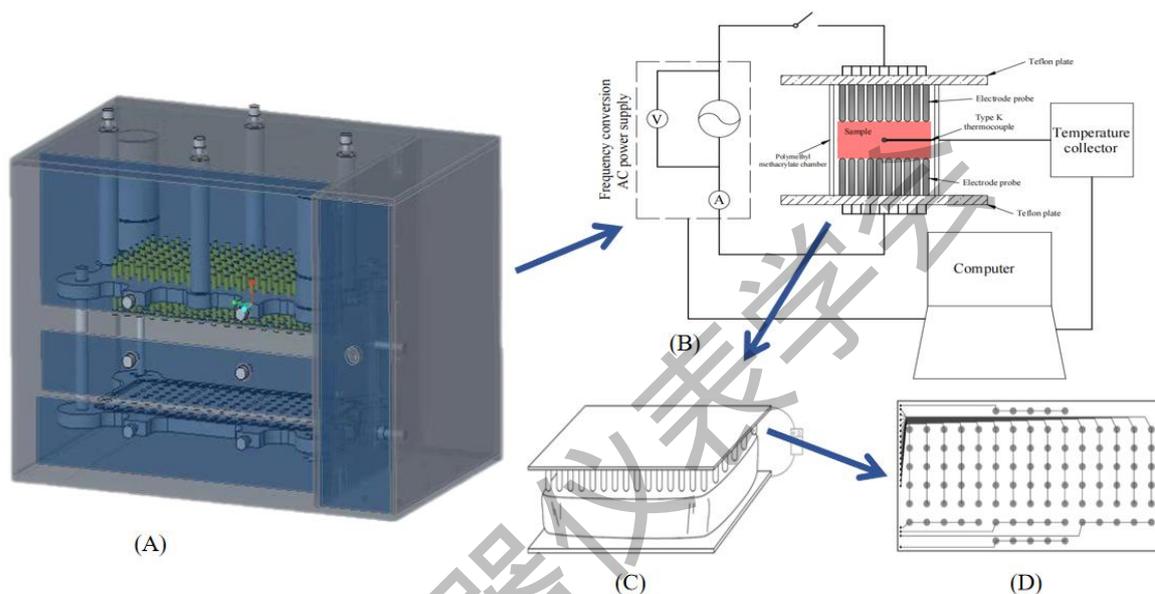


图 1 (A): 脉冲电场解冻装置 (PET-S1)图; (B): 脉冲电场解冻流程图; (C): 电极-原料接触图; (D): 电极组件连接图

脉冲电场解冻装置 (*) 的相关技术参数如表 1 所示, 具备振荡电流强度、波形、频率、周期可调, 根据冷冻食品的特点选择电极组件形式。

表 1 磁感应电场低温杀菌系统—技术参数

指标	仪器性能
振荡电流强度 (有效值)	3-2000 mA
振荡电压 (有效值)	20-300 V
电流占空比	1-99%
频率	1-100 kHz
波形	方波/锯齿波
周期	0-10 min
周期内电流输出形式	恒流

2 前处理流程和分析方法

2.1 处理流程

对冷冻肉进行脉冲电场解冻处理，取新鲜的猪肉、牛肉、鸡胸肉和鱼肉，剔除表面筋膜，修整长宽规格为 6 cm × 6 cm，平均厚度分别为 3~4、5~6、7~8 和 2~3 cm。样品中心插入温度探头，用保鲜膜封装后，放置于-20℃的冷冻室中冷冻 48 h。选择弹簧电极组件，电极材质为 316 不锈钢，电极顶部的结构呈半球形且直径为 5 mm，电极的高度为 20 mm，相邻两个电极之间的最小间距为 8 mm。两振荡电流发射组件均包含 100 个电极，每 5 个电极连接为一路输出（即，每 5 个电极作为一个导电模块，下同），故此振荡电流发射组件包含 40 条输出引线，并上下配对，各自形成振荡电流闭合回路。将上述冷冻食品放置于电场解冻室，运转上下组件的控制电机，使电极组件与原料表面完全接触。根据原料厚度和电导率，设置解冻过程的电学参数，启动电源，使冷冻食品在恒定的振荡电流作用下，实现整体加热，均匀升温的快速解冻效果。待设备完成所有解冻程序后，打开解冻室，取出样品，并进行相关指标测试。

2.2 处理参数和条件

根据冷冻食品的电导率和厚度不同，来设置不同的电场处理参数和条件。冷冻猪肉脂肪含量约为 8%，电导率相对较低；牛肉脂肪含量低于猪肉，同时含有大量游离电解质，有利于电流传导；鸡胸肉厚度最大；鱼肉的厚度最小；四种冷冻肉制品的具体处理参数如表 2 所示：

表 2 不同冷冻肉的脉冲电场处理参数

样品	阶段	电流强度（单位模块）	波形	频率	占空比	周期	总时间
猪肉	1	200 mA	方波	1000 Hz	60%	5 min	16 min
	2	100 mA			30%	5 min	
	3	60 mA			18%	3 min	
	4	25 mA			7.5%	3 min	
牛肉	1	250 mA	方波	2000 Hz	75%	7 min	19 min
	2	150 mA			45%	4 min	
	3	50 mA			15%	5 min	
	4	20 mA			6%	3 min	

	1	300 mA			90%	5 min	
	2	180 mA			54%	4 min	
鸡胸肉	3	80 mA	锯齿波	5000 Hz	24%	6 min	21 min
	4	30 mA			9%	4 min	
	5	15 mA			4.5%	2 min	
	1	180 mA			54%	5 min	
鱼肉	2	60 mA	锯齿波	200 Hz	18%	4 min	14 min
	3	20 mA			6%	5 min	

2.3 分析方法

2.3.1 中心温度曲线及表面温度分布测定

参考 He (2013) 等的方法, 采用 K 型热电偶记录解冻过程样品中心温度变化情况, 通过温度采集器收集数据并绘制温度曲线; 采用红外成像仪测定样品表面温度分布情况, 主要包括样品表面的最高温度 (T_{\max}), 最低温度 (T_{\min}) 以及平均温度 (T_{avg})。

2.3.2 解冻损失及色泽测定

参考 Gambuteanu (2015) 等的方法并稍作修改, 解冻完后, 用滤纸轻轻擦拭并吸干样品表面水分, 设定肉块解冻前质量 M_0 , 解冻后质量 M_1 , 则解冻损失按下式计算:

$$\text{Thawing Loss}(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100$$

采用 CIE-L*a*b*法测定肉块的表面色泽, 其中 L*代表明暗值, a*代表红绿值, b*代表黄蓝值。利用手持色差仪对样品的 5 个不同位点进行采集, 并进行均值分析。

2.3.3 肌肉微观组织结构测定

使用光学显微镜、SEM 和 TEM 评估脉冲电场处理对猪肉肌纤维微观结构的影响, 以初步揭示其作用原理, 方法参照 Choi (2017) 等、Wu (2023) 等和 Hu (2021) 等并稍作修改。猪肉沿顺纤维的方向切取小块肌肉组织, 修成 (5 mm×5 mm×5 mm) 的立方块, 放置于冷冻托盘上, OCT 冷冻包埋后, 用冷冻切片机切成 10 μm 的薄片, 4%多聚甲醛聚固定 10 min, 去离子水冲洗 2 min, 再依次用苏木素、去离子水、尹红分别染色 6、10 和 1 min, 最后用 70%乙醇冲洗 2 次, 封片后用光学显微镜于 40 倍镜下观察肌肉组织。SEM 则将修整好了猪肉立方块放入 2.5%的戊二醛溶液中固定 48 h。结束后, 样品用 0.1 M PBS 洗涤三次, 每次 10 min, 再用体积分数为 30%、50%、70%、90%和 100%的乙醇进行梯度脱水, 重复三次。充分挥发乙醇, 喷金后, 在 500 倍下用扫描电子显微镜观察样品横截面形貌。TEM 前处理步骤同上, 后续则将梯度乙醇脱水的样品放置于混合溶液 (乙醇: 环氧树脂=1: 1) 中浸泡

24 h; 再用纯包埋液（100%环氧树脂）浸透过夜，并在 60 °C下聚合 48 h。用超薄切片机顺肌纤维方向切成约 50 nm 的薄片，再用 3%醋酸铀酰和 3%柠檬酸铅进行染色处理，最后进行 TEM 成像。

3 不同冷冻肉在脉冲电场下解冻的应用案例分析

3.1 脉冲电场解冻的温度曲线和表面温度分布情况

图 2 和表 3 分别显示了在不同电流强度和周期下，脉冲电场处理后，猪肉、牛肉、鸡肉和鱼肉解冻过程中心温度变化曲线和表面温度分布情况。所有样品在完成解冻周期后，中心温度均可达到 $0\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，解冻前期（ $-20\sim -6^{\circ}\text{C}$ ）样品的中心温度均快速上升，但在达到最大冰晶生成带（ $-5\sim -1^{\circ}\text{C}$ ）时，解冻速率逐渐下降，此时冰晶相变吸热使解冻时间延长。样品厚度和电导率会影响解冻速率，适宜增加电流强度有利于缩短解冻时间，但解冻末期样品阻抗的迅速下降，易导致局部电流过大，进而引起原料迅速升温 and 局部过热。结合表 3，在上述脉冲电场处理下，不同冷冻食品解冻过程的温升均可得到良好的控制，表面最高温度可维持在 8°C 以下，且未出现样品表面过热或过熟现象。综上，脉冲电场解冻设备对不同冷冻肉均可达到良好的解冻效果，在提高解冻速率的同时，还能改善解冻过程的温度分布均匀性，进而提高产品品质。

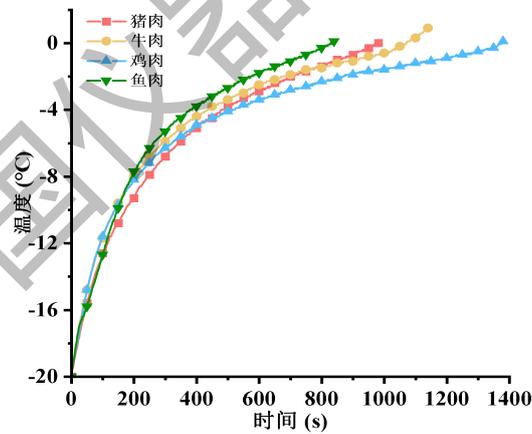


图 2 不同冷冻肉脉冲电场解冻过程中心温度变化曲线

表 3 不同冷冻肉脉冲电场解冻过程表面温度分布情况

原料	最高温度(°C)	最低温度(°C)	平均温度(°C)
猪肉	5.4 ± 0.8^b	0.5 ± 0.8^{bc}	2.2 ± 0.6^a
牛肉	6.7 ± 0.4^{ab}	1.0 ± 0.6^{ab}	3.2 ± 0.4^a
鸡肉	6.6 ± 0.9^{ab}	-0.8 ± 1.1^c	2.5 ± 1.2^a
鱼肉	7.9 ± 1.3^a	2.3 ± 0.4^a	3.9 ± 0.8^a

注：数据表示三次重复的平均值±标准偏差。同一列中不同字母的 a-c 表示不同组别之间存在显著差异(P < 0.05)。

3.2 不同冷冻肉脉冲电场解冻的水分流失和色泽变化分析

表 4 显示了不同脉冲电场时间处理后，猪肉、牛肉、鸡肉和鱼肉的汁液流失和表面色泽变化情况。四种原料在脉冲电场解冻下均可得到较小的汁液流失率（低于 4%），一方面是比较快的解冻速率显著缩短了相变过程，使肌肉受到的冰晶破坏和氧化损伤程度降低，进而保持了较好的蛋白结构和持水性能；另一方面则是电场作用使水分子重排，改变了水分子状态并使其流动性下降。解冻会显著影响肉品色泽，这与解冻过程中的脂肪氧化、酶促反应进程以及肌红蛋白氧化、变性和流失等均存在一定关联。结合表 4 来看，脉冲电场解冻可减少产品的色泽变化，总色差值均低于 3%，说明经该解冻处理的样品与新鲜样品的色泽较为接近。尤其是对于肌红蛋白含量不高的鸡肉，脉冲电场对其色泽的影响最小，总色差仅达到 1.36%。牛肉肌红蛋白含量最高，解冻过程易随汁液一同流失，或被氧化形成高铁肌红蛋白，进而导致产品红度下降，因此总色差最高，达到了 2.84%。值得注意的是，相较于猪肉和鸡肉类的禽畜肉，鱼肉中则含有更多脂质和氧化还原酶，因此，尽管其解冻时间较短，但色泽变化程度却更大。综上所述，脉冲电场处理可降低冷冻肉解冻过程的水分流失，同时在较快的解冻速率下，使产品保持了更贴近于新鲜样品的色泽和感官品质。

表 4 不同冷冻肉脉冲电场解冻过程的解冻损失和色泽变化

组别	猪肉	牛肉	鸡肉	鱼肉
解冻损失(%)	2.35±0.25	3.15±0.58	3.68±0.48	3.11±0.44
L*	45.75±1.77	37.48±0.53	51.22±0.57	43.14±0.76
a*	3.94±0.53	21.96±0.39	2.17±0.05	0.20±0.04
b*	3.01±0.51	11.39±1.03	6.60±0.10	-1.44±0.67
ΔE	1.93±0.61 ^{bc}	2.84±0.60 ^a	1.36±0.57 ^c	2.28±0.29 ^{ab}

注：数据表示三次重复的平均值±标准偏差。同一行中不同字母的 a-c 表示不同处理之间存在显著差异(P < 0.05)。

3.3 脉冲电场解冻对肌肉组织微观结构的影响

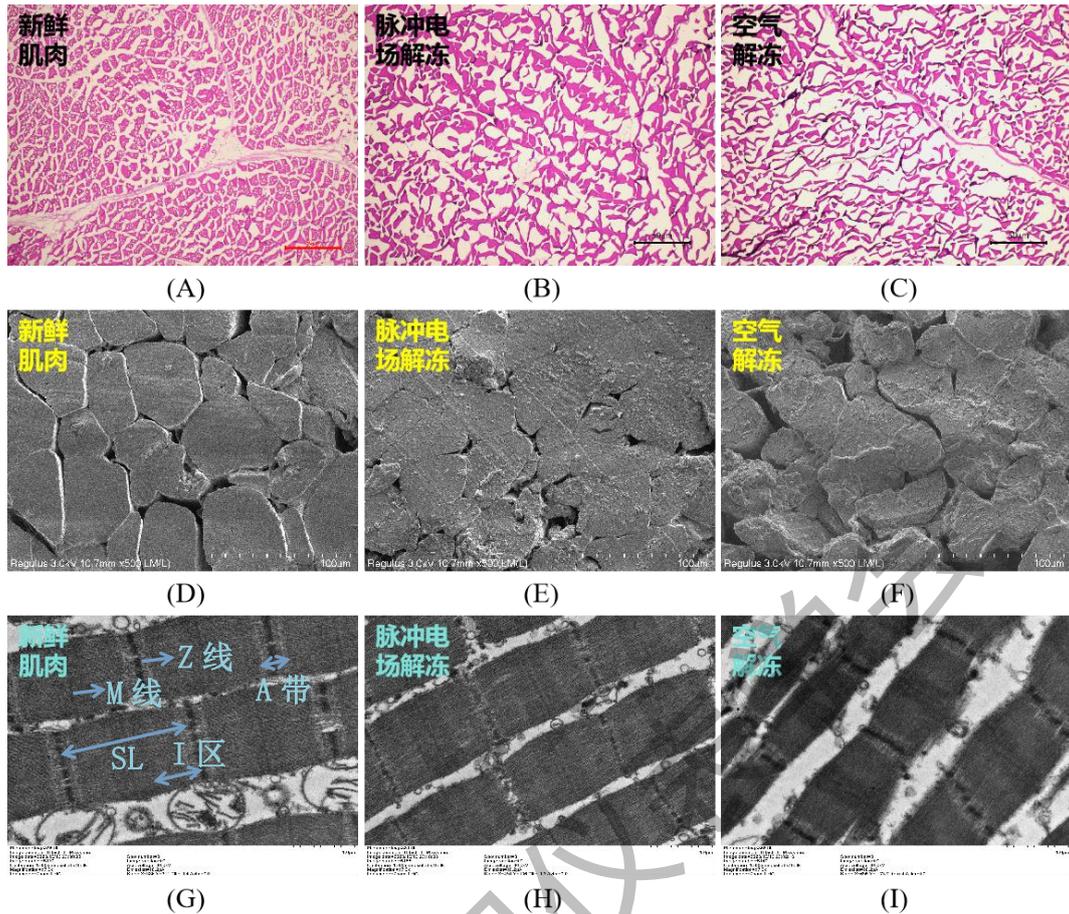


图3 不同解冻方式对猪肉微观组织结构的影响；图(A)~(C)：猪肉的光学显微镜图像，从左到右依次为新鲜肉、脉冲电场解冻肉和空气解冻肉；图(D)~(F)：猪肉的SEM图像，从左到右依次为新鲜肉、脉冲电场解冻肉和空气解冻肉；图(G)~(I)：猪肉的TEM图像，从左到右依次为新鲜肉、脉冲电场解冻肉和空气解冻肉

图3为光学显微镜（40X）、SEM（500X）和TEM（7000X）下观察到的猪里脊肉肌纤维横截面和纵切面纤维束微观结构，其中，新鲜肉和空气解冻组为对照实验。由图3可知，新鲜样品的肌纤维分布均匀，排列紧密有序，且可见到明显的纤维轮廓和平滑的表面结构。然而，经冻融处理后的猪里脊肉肌纤维排列松散，结构收缩，同时还伴有纤维间隙增大，表面坑洼、模糊、粗糙的现象。空气解冻组样品的结构破坏最为严重，纤维间隙显著增大，形成的水渠促进了肌肉中的水分流动，进而导致了更多汁液流失。相比之下，脉冲电场解冻样品的肌纤维结构保留更为完整，排列也更整齐，且具有较为清晰的纤维轮廓，表面仅存在少量孔隙残留。说明在该电场解冻条件下，肌肉组织受到的机械损伤较小，这可能与脉冲电场促进冰晶融化，减少了相变过程的不利影响有关；另一方面，较快的解冻速率和均匀的温升条件也有利于减少肌原纤维蛋白的变性聚集，使肌肉持水力得到较好的维持。此外，TEM

结果显示, 空气解冻后的肌肉纤维束伸缩严重, 肌节完整性被破坏, 同时 M 线消失, 且出现混乱的塌陷肌节。表明冻融过程中, 肌球蛋白丝的规则点状阵列变得扭曲, 因而不利于维持产品质构和持水能力。相反, 脉冲电场解冻对肌肉的 M 线和 Z 线影响相对较小, 同时呈现规则的 I 区和 A 带排列, 说明肌节蛋白丝受到的机械损伤相对较小, 这可能与电流作用促进肌肉舒张, 并抑制了肌球蛋白丝的聚集有关。在该电场条件下, 肌原纤维蛋白结构得到较好维持, 这可能是其减少肌肉水分流失的主要原因之一。综上所述, 脉冲电场处理可通过干预解冻过程中肌球蛋白丝的聚集来维持肌束的完整结构, 同时利用电流的高效传热速率, 来缩短相变时间, 并减小冰晶融化导致的机械损伤, 进而有效改善解冻效果和产品品质。

参考文献:

- [1] He, X.L., Liu, R., Nirasawa, S., Zheng, D.J., Liu, H.J., (2013). Effect of high voltage electrostatic field treatment on thawing characteristics and post-thawing quality of frozen pork tenderloin meat. *Journal of Food Engineering* 115(2), 245-250.
- [2] Gambuteanu, C., Alexe, P., (2015). Comparison of thawing assisted by low-intensity ultrasound on technological properties of pork Longissimus dorsi muscle. *Journal of Food Science and Technology-Mysore* 52(4), 2130-2138.
- [3] Wu, G.Y., Yang, C., Bruce, H.L., Roy, B.C., Li, X., Zhang, C.H., (2023). Effects of alternating electric field assisted freezing-thawing-aging sequence on longissimus dorsi muscle microstructure and protein characteristics. *Food Chemistry* 409.
- [4] Hu, F.F., Qian, S.Y., Huang, F., Han, D., Li, X., Zhang, C.H., (2021). Combined impacts of low voltage electrostatic field and high humidity assisted-thawing on quality of pork steaks. *LWT - Food Science and Technology* 150.
- [5] Choi, E.J., Park, H.W., Chung, Y.B., Park, S.H., Kim, J.S., Chun, H.H., (2017). Effect of tempering methods on quality changes of pork loin frozen by cryogenic immersion. *Meat Science* 124, 69-76.