

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050289

WU Yuhang, JIN Yamei, ZHANG Xiao, et al. Research Progress of Physical Field Thawing on Foods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(8): 372–379. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050289

· 专题综述 ·

物理场解冻在食品领域中的研究进展

巫宇航¹, 金亚美¹, 张孝¹, 姚黄兵¹, 徐学明^{1,2}, 杨哪^{1,*}

(1. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122;

2. 江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏无锡 214122)

摘要: 冷冻是食品保藏的重要方法, 部分冷冻食品在消费前仍需进行独立的解冻处理。传统解冻方法存在升温不均匀、处理时间长且汁液损耗大的问题。作为新的解冻技术, 物理场解冻受到了广泛的研究和关注。本文综述了近年来物理场解冻在冷冻食品加工中的研究进展, 阐述了超声波、介电和电场等技术在解冻过程中的作用机理和应用效果。相对于传统解冻, 物理场解冻更好地保持食材的营养成分、维持感官品质, 减少汁液流失, 同时提高解冻效率。不同种类的食品原料和解冻方法可能会引起差异性的效果, 需要分析实际原料对物理场的响应规律和特征理化指标, 如介电常数、电导率和脂肪含量等, 从而得到最佳的解冻条件。未来的研究应聚焦于探究高效稳定且低能耗的物理场辅助技术, 继续深入研究对食材品质和解冻效果的影响, 以更好地满足消费者对冷冻食品的高效处理需求。

关键词: 物理场解冻, 超声波, 静电场, 介电, 食品原料

中图分类号: TS205.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)08-0372-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050289

本文网刊:



Research Progress of Physical Field Thawing on Foods

WU Yuhang¹, JIN Yamei¹, ZHANG Xiao¹, YAO Huangbing¹, XU Xueming^{1,2}, YANG Na^{1,*}

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Freezing is an important method for food preservation, and some frozen foods still require separate thawing processes before consumption. Traditional thawing methods suffer from issues such as uneven temperature rise, long processing time, and significant loss of juices. As a new thawing technology, physical field thawing has received extensive research and attention in recent years. This paper reviews the research progress of physical field thawing in frozen food processing, and elaborates on the mechanisms and application effects of technologies such as ultrasound, dielectric, and electric fields in the thawing process. Compared to traditional thawing methods, physical field thawing better preserves the nutritional components of the ingredients, maintains sensory quality, reduces juice loss, and improves thawing efficiency. Different types of food materials and thawing methods may yield different effects, requiring analysis of the response characteristics and physicochemical parameters, such as dielectric constant, conductivity, and fat content, of actual ingredients to determine the optimal thawing conditions. Future research will focus on exploring efficient, stable, and low-energy physical field-assisted technologies, continuing in-depth studies on the impact on ingredient quality and thawing effects, to better meet consumers' demand for efficient processing of frozen foods.

Key words: physical field thawing; ultrasonic; electrostatic field; dielectric; food raw materials

自古以来, 人们就利用雪和冰来保存食物以延长其保质期限。如今, 冷冻食品因其方便性和长保质

期已成为人们日常生活中必不可少的一部分。按照食品法典委员会(CAC)的定义, “冷冻食品”是指任

收稿日期: 2023-05-29

基金项目: 国家自然科学基金-青年科学基金项目(31701522); 国家自然科学基金-面上项目(32172353); 江苏省优秀青年基金项目(BK20211582)。

作者简介: 巫宇航(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程, E-mail: 1204441981@qq.com。

* 通信作者: 杨哪(1982-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 电磁耦合的食品加工技术与装备, E-mail: yangna@jiangnan.edu.cn。

何为了延长保质期和保持品质而有意将其温度保持在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的食品^[1]。冷冻状态可有效地抑制微生物生长及酶的活性,并最大限度地减少导致食物腐败变质的生化类反应,因此被广泛应用于食品工业中。

传统的解冻方法包括自然解冻、浸渍解冻和空气解冻等,具有成本低、操作简单、适用性广、解冻质量好等优势。这些优势主要归因于传统解冻方式相对较慢,能够使食品温度逐渐升高,减少了温度升高不均匀和相应的物理化学反应,从而保证解冻后食品的口感和品质。然而,这些方法存在局限性,例如解冻速度慢、解冻均匀性差以及可能影响食品的质量和安全。此外,解冻食品的品质受到多种因素的影响,例如损耗、质地、颜色、营养价值和有害微生物^[2]。传统解冻技术在实际应用中面临诸多挑战,而物理场解冻作为潜在的新方法,近年来已成为研究的热点。物理场辅助解冻的基本原理是通过引入电磁波、超声波、电场等外部物理手段来改变食品内部的温度和水分迁徙,从而有效促进解冻进程。具体来说,物理场辅助解冻技术可加速解冻过程,提高解冻速率,减少解冻食品品质的影响。此外,物理场的参与还能改变食品内部的热传导,合理的参数使得解冻过程更加均匀。这些特点使得物理场辅助解冻方法在保持食品感官品质和提高生产效率方面具有较高的潜力。

物理场解冻的概念最早出现于 20 世纪 50 年代,至今已有较为成熟的工业化应用方案,比如超声波解冻、射频解冻和欧姆加热解冻。本文旨在综述几种目前常用的物理场解冻技术,同时重点阐述各自在不同食品中的应用。通过总结物理场解冻技术在食品领域中的应用研究现状,探讨其在保持食品品质和提高效率方面的潜力和存在的问题,以为读者提供最新研究进展方面的参考。

1 物理场解冻方式

1.1 超声波解冻

超声波解冻利用声波产生的能量对冷冻食品进行辅助解冻^[3]。这种能量主要作用于冷冻食品内部的冻结面与解冻面的分界处,通过调节超声波的频率和强度,可以在样品该位置处产生出显著的热效应,使冷冻食品的冻结界面稳定地向解冻界面转化和推进^[4]。研究表明,相比其他传统的解冻方法,超声波解冻具有解冻时间短、解冻温度均匀、对蛋白质构象和肌原纤维蛋白凝胶形成的影响更小等优势^[5]。然而,超声波解冻后也可能对食品的营养和理化特性产生不利的影响^[6]。

1.2 高压静电场解冻

高压静电场解冻是利用高压静电场微能源产生的综合效应对冷冻食品进行解冻的一项物理技术^[7]。尽管该解冻方法的作用机理尚不明确,但研究人员推测是由于放电时所形成的电晕及离子风的作用,

同时样品在电势差环境中加快了内部结冰的氢键断裂并转化成更小的冰晶形式,最终成为液体状态,从而加快解冻过程^[8]。该解冻技术与传统解冻方法相比,能减少微生物污染、缩短解冻时间、降低汁液损失、改善持水性等^[7]。但是,该方法可能会导致冷冻食品的持水力降低,并使解冻食品色泽发生显著的变化,如色差值增加等^[9]。

1.3 介电解冻

介电解冻包括微波解冻和射频解冻两种方式,原理是通过偶极子旋转和离子极化在样品内部进行产热。微波解冻常用频率为 915 和 2450 MHz,主要是偶极子转动和摩擦起到内热作用,而射频解冻常用频率为 13.56、27.12 和 40.68 MHz,主要是以离子位移起主要作用^[10]。微波解冻能使冷冻品内外同时解冻升温,具有解冻速度快、效率高、解冻品质较好等特点^[11]。但当解冻大尺寸的冷冻食品时效果往往不佳,这是由于微波加热的穿透深度有限所引起的加热不均匀造成^[12]。射频解冻能使物料内的温度分布更均匀,对食品的品质影响较小,且易于控制等优点,但在加热过程中可能出现由于部分区域的功率吸收差异以及样品界面的电磁场弯曲现象,使射频产生的能量更趋向于样品的局部区域及边缘位置,从而使中心的温度上升较慢,在一定程度上也会导致产品升温不均的问题^[13]。

1.4 欧姆解冻

欧姆解冻是利用极板间电场的热效应对冷冻食品进行解冻。当导电性的食品受到电位差作用时,会诱导其内部产生离子电流,由于食品存在一定的电阻所以会释放出热量,进而引起食品的自热以达到解冻的效果^[14]。与微波和射频解冻相比,欧姆解冻的优点在于解冻速度相对较快,能耗较低。然而,欧姆解冻存在一些局限性,例如由于冷冻物料的不规则形状和表面不平滑会导致样品与电极板不能完全贴合,进而引起局部过热,从而导致解冻食品部分的熟化或严重烧焦变质^[15]。

2 物理场解冻技术在食品中的应用

2.1 畜禽肉中的应用

畜禽肉指的是来自经过屠宰、加工的家畜和家禽肉类产品,其中常见的来源包括牛、羊、猪、鸡等。畜禽肉提供了丰富的蛋白质、脂肪、矿物质和维生素,是人类饮食中重要的营养来源。因此,畜禽肉一直备受广大消费者的青睐。然而,在解冻过程中不可避免会对畜禽肉造成损伤,鉴于此,发展更加高效、低成本、低能耗、对样品感官品质影响最小的物理辅助解冻技术具有重要的现实意义和发展前景。这种技术将提供解冻过程中的可控性和均匀性,有助于保持畜禽肉的质地和口感(表 1)。

2.1.1 解冻猪肉 猪肉在我国肉类食用量中占 60% 左右,含有丰富的蛋白质及脂肪、钙、磷、铁等

表 1 物理场解冻在畜牧肉中的应用

Table 1 Applications of physical field thawing in livestock meat

解冻工艺	解冻原料	工艺条件	主要结论	参考文献
超声波解冻	冷冻碎猪肉	20 kHz, 90、120、150 W/L	超声波解冻明显缩短了解冻时间,并且具有更好的颜色、持水能力和质地;但在150 W/L条件下对肌肉结构造成严重破坏	[39]
	冷冻牛肉	45 kHz, 400 W	超声波解冻耗时最短,并且可以改善牛肉的弹性和pH;但超声处理会降低牛肉硬度	[23]
	冷冻羊肉	40 kHz, 350 W	超声波解冻下减少了滴水损失和烹调损失,提高了羊肉的持水能力,但pH、巯基含量有所上升	[40]
	冷冻鸡胸肉	40 kHz, 200 W/L	超声波辅助弱酸性电解水解冻缩短了解冻时间,并且有效减少蛋白质构象变化并改善流变学特性和凝胶性能	[41]
高压静电场解冻	冷冻盐渍猪里脊	10、15 kV	高压静电场解冻可有效提高NaCl的扩散速度,并降低解冻所需时间,并且对微生物的生长也有明显的抑制作用	[42]
	冷冻牛肉	12、15.2、20、24.8、28 kV	高压静电场解冻可以减少解冻时间,提高冷冻牛肉的解冻率;但会增加牛肉的离心损失	[43]
	冷冻羊肉	1.7、2.0、2.3 kV/cm	高压静电场解冻提高了解冻速率,并降低了冷冻羊肉的微生物总数;但蒸发、蒸煮和总损失率有所提高	[32]
	冷冻鸡胸肉	1.5、2.25、3 kV/cm	高压静电场解冻时间明显缩短,但增加电场强度会破坏肌原纤维元件并且增加了弹性值,并影响样品颜色	[44]
介电解冻	冷冻猪肉背阔肌	100 W	微波结合空气对流解冻有效地缩短解冻时间,保持肉的质量和均匀性	[20]
	冷冻碎牛肉	27.12 MHz, 6 kW	射频解冻可以有效降低解冻时间,但牛肉中水、脂肪和盐的含量会对解冻结构造成影响	[27]
	冷冻羊肉	27.12 MHz, 6 kW	射频解冻降低解冻时间,并且保持良好颜色和质地,但会降低肌原纤维蛋白含量;并且会对微观结构造成轻微破坏	[45]
	冷冻鸡胸肉	27.12 MHz, 50 kW	射频解冻大大缩短了解冻和回火时间,并减少了微观结构损坏	[46]

成分,是日常生活的主要食材来源^[16]。蒋奕等^[17]研究发现,相比于浸渍解冻,超声波解冻处理(40 kHz, 100、200、300、400、500 W)可缩短冷冻猪肉的解冻时间,并且随着功率的增大,猪肉的剪切力值降低,有利于提高肉制品的嫩度,同时猪肉的 pH 也会下降,对抑菌起到一定的作用。然而,超声波解冻也存在一些缺点,例如猪肉样品的解冻汁液损失率、蒸煮损失率、压榨保水性、色泽、水溶性蛋白质和盐溶性蛋白质的含量均随着超声波功率增加而呈下降趋势。此外, Hong 等^[18]研究表明,盐水浸渍解冻(2% NaCl)结合超声波辅助处理(40 kHz, 150 W)能够快速解冻猪肉,并最大限度地减少解冻过程中冰晶重结晶所引起的品质劣变,但是对猪肉样品色泽影响较大。尽管超声波解冻存在局限性,但在冷冻食品的商业解冻方面仍然具有一定的应用和研究价值。

相较于超声波而言,高压静电场解冻在猪肉解冻和贮藏方面也具有一定的潜力。He 等^[19]对比了空气解冻和高压静电场解冻(0.8、1.2、1.6、2 kV/cm)对冷冻猪里脊肉的效果,结果显示,高压静电场解冻显著缩短冷冻猪肉的解冻时间,处理后的样品在 pH、解冻和蒸煮损失、总汁液损失和色差等指标方面与对照组相比没有显著差异,说明高压静电场解冻处理不会影响解冻后冷冻猪肉里脊肉的品质。此外,高压静电场解冻处理还抑制微生物生长,延长冷冻猪肉的新鲜度。Zhu 等^[20]研究六种微波解冻方法(微波、微波与超声波结合、微波与 35 ℃ 水浸结合、微波与 4 ℃ 制冷结合、微波与空气对流结合、微波与运行结合应用水)对猪肉背最长肌的影响效果。结果表明,除微波之外的所有基于微波的方法都避免了局部过热,并且微波与空气对流结合对持水力、颜色、蛋白质溶解度等影响最小,能有效缩短解冻时间,保

持了肉的质量和均匀性。

物理场技术在冷冻猪肉的解冻中具有一定优势,但也存在局限性。例如超声波解冻虽然可以缩短解冻时间,但目前也面临着超声在解冻池中的分布不均,导致不同位置的物料解冻效果存在差异;超声能量衰减快,对于大块物料的解冻效果不佳;以及超声解冻的成本和能耗较高等问题。高压静电场解冻缩短解冻时间的同时不会影响猪肉品质,且能抑制微生物,但需要高昂的安装成本。微波解冻能快速解冻物料的同时,由于微波能量在物料中的传播和吸收存在差异,容易导致解冻不均匀以及物料表面过度融化或熟化,进而可能会导致物料外观和口感的下降。此外,目前研究物理场解冻技术的报道更多关注于它们的应用研究,在与食品原料自身特性的结合方面,例如肉质密度、脂肪含量等对技术应用的影响,还需要进一步探究。以期更好的改进技术工艺,并保存猪肉的品质和营养成分,提高商业化应用的价值。

2.1.2 解冻牛肉 牛肉与其他肉制品相比具有高蛋白质、低脂肪等特点,且富含人体所需的必需氨基酸和有利于健康的不饱和脂肪酸,属于优质蛋白质来源^[21]。Guo 等^[22]研究超声辅助解冻(20 kHz, 0、200、400、600 W)对牦牛肉背最长肌质量的影响,结果表明与对照组相比,适当的超声波解冻处理可有效降低解冻时间,并有助于避免矿物质、水分和可溶性维生素的损失。Wang 等^[23]研究表明超声波处理(400 W, 45 kHz)在冻融过程中可以有效提高牛肉保水能力、弹性,并且降低其硬度。

Zhang 等^[24]探究了冷冻牛肉在高压静电场中的解冻特性及机理,研究结果表明,与对照相比,高压静电场显著缩短牛肉的解冻时间,其中产生的离子风和非均匀电场在冰晶融化过程中都起到了重要作用。

与此同时,高压静电场中电压、电极数目等工艺条件也会影响牛肉的解冻效果。马坚^[25]研究了针状电极产生的高压静电场(50、150 和 250 kV/m)对牛肉解冻品质的影响,结果表明,在 150 kV/m 的场强下能明显地保持肉组织和肌细胞的完整性,进而显著减少此过程中产生的汁液损失。这可能是因为是在冻结和解冻过程中静电场能加速样品通过最大冰晶生成带,从而产生均匀分布的细小冰晶所导致。Amiri 等^[26]探索三种不同针电极(8、16、48)的高压静电场解冻(2.5 kV/cm)对牛肉品质的影响,结果显示,增加针电极数目可降低牛肉的硫代巴比妥酸值、解冻损失、蒸发损失、蒸煮损失和总质量损耗;随着针电极数目的增加,肌原纤维蛋白的持水性、溶解性和凝胶强度呈现先降低后增加的趋势,且净电荷表面和活性巯基含量具有上升趋势。对于高压静电场解冻技术,选择最佳的间隙、电压和电极数目等工艺条件,能降低解冻处理对冷冻牛肉造成的不利影响。

Dong 等^[27]发现,射频加热(6 kW, 27.12 MHz)可以快速解冻冷冻碎牛肉,但碎牛肉中水、脂肪和盐的含量会对解冻效果造成不同的影响。Min 等^[28]进行了高压辅助解冻(200 MPa)、欧姆解冻(40 V/cm)、常规解冻和高压-欧姆解冻(40 V/cm, 200 MPa)对冷冻牛肉的影响,结果表明,相对于其他解冻方式,高压-欧姆解冻所需的时间最少,并且对肉品的质构保持性更佳。这可能是由于高压-欧姆解冻的快速相变转换可将肌肉崩解降至最低。因此,物理场解冻作为一种快速且高效的解冻方法,能提高牛肉的品质和口感。但仍需要进一步的评估和确定对产品品质和营养的影响,并选择最佳的解冻工艺参数。

2.1.3 解冻羊肉 羊肉富含铁、锌、硒、脂肪酸和维生素等高价值的营养物质,已经成为我国居民日常饮食中一种常见的食材^[29]。杜鹏飞等^[30]研究表明,相较于浸渍解冻,超声波解冻(40 kHz, 240 W)可显著提高羊肉的解冻速率和新鲜度,且对羊肉的脂肪酸组成和相对含量没有显著影响,然而,超声波解冻后羊肉的肉色偏暗,汁液流失率偏高。这与古明辉等^[31]研究结果一致,超声波处理(40 kHz, 320 W)后的羊肉会增加汁液的流失并降低其 pH 值。因此,降低超声波解冻带来的负面影响,也需要针对不同样品研究出合适的解冻功率。Behfar 等^[32]研究了高压电场解冻(1.7、2.0、2.3 kV/cm)和空气解冻对冷冻羊肉解冻效果。结果表明,高压电场解冻提高了解冻速率,降低了蒸发、蒸煮和解冻损失。此外,高压静电场解冻过程通过产生臭氧和负离子减少了解冻样品的微生物总数。张莉等^[33]通过空气解冻(25 ℃)、浸渍解冻(15 ℃)、冷藏解冻(4 ℃)、超声波解冻(40 kHz, 250 W, 20 ℃)及微波解冻(122 mm、2 450 MHz、700 W)这五种方式对冷冻羊肉进行处理并研究其品质变化,结果表明,超声波解冻和微波解冻的解冻损耗和蒸煮损失高于其他方法;空气解冻、浸渍解冻后

样品中的肌肉挥发性盐基氮、菌落总数显著高于其他解冻方法;微波解冻后肌肉纤维会发生严重卷曲和断裂;冷藏解冻后羊半膜肌及背最长肌的汁液损耗、蒸煮损失、高铁肌红蛋白含量及挥发性盐基氮值均显著低于其他解冻方式,微观结构破坏程度较小。因此,总结出在羊肉的物理解冻技术中,超声波解冻、微波解冻均可减少样品解冻所需要的时间,但是会对羊肉造成显著的汁液流失,影响色泽,破坏肌肉结构和组织等。在选择合适的解冻方式的同时,需要考虑其对羊肉品质和卫生安全的影响。未来对物理场解冻技术在冷冻羊肉的应用还需要充分考虑成本和效益等因素,故仍然需要进一步的研究和探索。

2.1.4 解冻鸡肉 鸡肉是我国第二大肉类消费品,也是肉类蛋白质的主要来源之一,具有高蛋白低脂肪的特点,因此在日常饮食中具有较高的食用和营养价值^[34]。Zhang 等^[35]考察了空气解冻、浸渍解冻和超声波辅助浸渍解冻(40 kHz, 200、300、400、500 W)对鸡肉品质的影响,同时探究了不同功率对鸡肉品质的影响,结果表明,超声波辅助浸渍解冻的最佳功率为 300W,同时显著降低了样品的解冻和蒸煮损失,并且相较于其它解冻及功率而言降低了固定水、自由水的流动性、汁液损耗以及对肌原纤维蛋白结构的破坏。张昕等^[36]研究发现,超声波解冻工艺(40 kHz, 120、180、240、300 W)可有效提高鸡胸肉解冻速率并显著改善其新鲜度,但解冻后鸡胸肉蛋白质变性导致解冻汁液流失率高且肉色偏暗,对解冻后的鸡胸肉品质具有一定的负面影响。Rahbari 等^[37]研究了在不同电压和电极间隙(1.5、2.25、3 kV/cm)下的高压静电场解冻对冷冻鸡肉的作用,结果显示,在 2.25 kV/cm 时,解冻损失和滴水损失达到最小值,同时保持最低的蛋白质变性水平,显著缩短了鸡胸肉的解冻时间。高压静电场选择合适的电压和电极间隙能够最大程度降低负面影响,在冷冻食品领域具有更好的应用前景。Bedane 等^[38]采用射频解冻技术(65 mm, 10 kW, 27.12 MHz)对鸡肉进行解冻处理,相较于传统解冻,射频解冻速度提升约 23 倍,同时射频解冻鸡肉温度分布均匀,滴水损失最小并且产品的质构特性有所改善。

目前,物理场在鸡肉解冻应用方面具有一定优势和局限性。其中,超声波辅助浸渍解冻可显著降低鸡肉的解冻和蒸煮损失,但对鸡肉蛋白质变性和色泽的影响仍需进一步探究。高压静电场解冻可缩短鸡肉解冻时间并减少其蛋白质变性,但选择合适的电压和电极间隙才能达到最佳的效果。射频解冻可大幅度提高解冻速度,但需要控制解冻温度的均匀性。在未来的物理场解冻领域中,应当研究和探索解冻技术对鸡肉肉质和营养成分的影响,以及优化解冻工艺参数,从而提高能效并保持鸡肉品质。

2.2 水产品中的应用

水产品是人类饮食中重要的营养来源之一,其

富含蛋白质、不饱和脂肪酸、矿物质和维生素等多种营养物质,并且与畜禽肉相比,水产品通常含有较低的脂肪含量,被普遍认可为是相对低脂肪和有益健康的饮食选择。目前,水产品已经成为人们日常饮食中不可或缺的重要组成部分,并且其全球消费量不断增长。然而,水产品在解冻过程中容易出现质地和风味损失等问题,具体详见表 2。因此,采用物理场解冻可以有效提高解冻的效率和质量,在水产品解冻应用领域中具有广阔的前景。

Wang 等^[47]研究了浸渍解冻和超声波解冻(20、40 kHz, 50 W/L)对速冻小黄鱼品质的影响,结果表明采用超声波解冻可以更有效地保留小黄鱼中的酶活性,从而提升其整体品质。Li 等^[48]对比了高压静电场解冻(6、12 kV)、空气解冻和浸渍解冻对鲤鱼冷冻肉块的影响。结果表明,高压静电场解冻能显著缩短解冻时间,并且能减少鱼块的水分流失和微生物污染。宦海珍等^[11]采用微波解冻技术(500、700、900 W)对秘鲁鱿鱼解冻,相较于常规解冻(4 ℃),微波解冻技术能有效缩短解冻时间,但其也可能对样品的硬度、咀嚼性及回弹性等质构特性产生破坏影响。

Cai 等^[49]研究了常规解冻(4 ℃)、微波解冻(2450 MHz, 300 W)、微波(2450 MHz, 300 W, 10 ℃)或超声(20 kHz, 200 W, 10 ℃)结合真空解冻、磁性纳米粒子结合微波(0.1 mg/mL, 2450 MHz)或远红外解冻(0.1 mg/mL, 300 W)对鱼肉的影响,结果表明,微波解冻结合真空解冻以及远红外辅助磁性纳米颗粒解冻这两种方法对鱼肉的理化特性和组织结构的影响较小,同时解冻过程中蛋白质降解和脂肪氧化程度也最低。Lan 等^[50]比较了超声波解冻(200 W, 20 ℃)、射频解冻(27.12 MHz, 25 ℃)、浸渍解冻(16 ℃)、微波解冻(500 W)和冷藏解冻(4 ℃)对冷冻金鲷的影响,结果显示不同的解冻方法都会导致鲷鱼蛋白质的变性和品质的下降,使用射频解冻和超声波解冻的效果与新鲜样品相近,而微波解冻则会导致更严重的局部过热现象。物理场解冻技术不仅能有效

缩短水产品解冻时间,提高生产效率,还能在一定程度上保持原有的食品品质。然而,物理场解冻技术可能会对水产品的质构特性产生影响,或者在解冻过程中可能导致水产品营养成分的流失。因此,未来的研究需要关注如何优化这些技术,以更好地平衡水产品的解冻效率和食品品质。

2.3 果蔬中的应用

冷冻果蔬已经成为现代饮食中的重要组成部分,因为它们具有长保质期、方便易用、最大程度保留营养成分等诸多优点。然而,在解冻过程中,果蔬可能会失去部分水分和营养物质。据报道,采用物理场技术的辅助解冻在处理冷冻果蔬能够带来更好的解冻品质,并且保持果蔬产品的质地和口感。例如,超声波解冻可促进果蔬细胞内的酶活性和代谢,有利于保持果蔬口感和营养成分。此外,微波解冻能加速果蔬中的水分迁移,从而达到快速解冻的效果。然而,需要注意的是,不同种类的果蔬配合不同的解冻方法及工艺都有可能造成差异性的效果(表 3)。

Xu 等^[51]通过对比空气解冻(20 ℃)、浸渍解冻(20 ℃)、冷藏解冻(4 ℃)和微波解冻(2450 MHz, 500 W)来评估低频超声波解冻(20 kHz, 300 W)对冷冻红萝卜处理的可行性,结果表明,在空气和水介质下,低频超声波可显著缩短解冻时间,而微波解冻速度最快,但会对营养和微观结构造成破坏,超声波辅助浸渍解冻可最好地保持红萝卜的颜色和维生素 C 含量。Liu 等^[52]探究浸渍解冻(20±0.5) ℃,微波解冻(500 W),超声波解冻(40 kHz),室温解冻(25±0.5) ℃和冷藏解冻(4 ℃)对冻藏覆盆子的品质影响,结果显示,在使用电子舌技术和模糊综合评估分析覆盆子的感官特性变化后,发现微波解冻可最好地保持覆盆子的气味和口感。Watanabe 等^[53]探讨冷冻苹果在空气(20 ℃)、微波(2450 MHz、300 W)和真空微波(2450 MHz、300 W)三种解冻处理方式下的理化特性变化,发现真空微波解冻可缩短样品解冻时间,并且可以抑制过热和局部加热的现象,保持样品的物理特性,特别是硬度和表面颜色。

表 2 物理场解冻在水产品中的应用

Table 2 Applications of physical field thawing in aquatic products

解冻工艺	解冻原料	工艺条件	主要结论	参考文献
超声波解冻	速冻小黄鱼	20、40 kHz, 50 W/L	超声波解冻小黄鱼中的酶含量影响显著,具有更好的感官品质	[47]
高压静电场解冻	冷冻鲤鱼	6、12 kV	高压静电场解冻可以降低鱼块的失水率,抑制其微生物,并缩短解冻时间	[48]
介电解冻	冷冻秘鲁鱿鱼	500、700、900 W	微波解冻可以对样品肌肉保水性能起到维持作用,并延缓蛋白氧化;但会对质构造成一定破坏	[11]

表 3 物理场辅助解冻在果蔬中的应用

Table 3 Applications of physical field thawing in fruits and vegetables

解冻工艺	解冻原料	工艺条件	主要结论	参考文献
超声波解冻	冷冻芒果浆	0.074~0.123 W/mL	解冻时间较短、维持营养物质及感官品质	[54]
微波解冻	冷冻杏鲍菇	620 W	解冻速率快,对样品造成一定损耗	[55]
欧姆解冻	冷冻酸樱桃浓缩汁	10、15、20 V/cm	解冻时间缩短约90%	[56]

综上所述, 物理场解冻在冷冻果蔬的解冻过程中具有诸多优势, 例如能够更好地保持果蔬的质地和口感。目前已有多种物理场解冻技术被研究和应用于冷冻果蔬制品, 包括超声波解冻、微波解冻、真空微波解冻等。由于果蔬原料的特殊性, 例如存在细胞壁且易被冰晶破坏, 目前的物理解冻相关研究相对较少。在未来, 可以通过探索不同果蔬在解冻过程中的生物化学和物理变化机制, 以深入了解果蔬解冻过程中发生的关键过程, 例如酶活性、细胞结构变化和水分迁移等。这将有助于更好地理解解冻过程的影响因素, 从而改进解冻工艺的条件。此外, 可以探索将不同物理场技术应用于解冻过程, 以期产生协同效应, 进一步提高果蔬解冻的品质。

3 结论与展望

本文全面阐述了超声波解冻、高压静电场解冻、介电解冻和欧姆解冻这四种物理场解冻技术, 并分析了这些技术的作用机理。文中同时讨论了这些技术在畜禽肉、水产品 and 果蔬解冻方面的应用优势, 以及目前仍存在的问题和改进空间。物理场解冻技术是具有潜力的冷冻食品解冻方法, 包括许多优点, 如高效和可持续且能够更好地保持冷冻食材的品质和营养成分。然而, 由于不同种类的食品和解冻方法之间存在着应用效果上的差异, 因此需要针对实际情况进行前期探索并选择出最佳工艺。未来的研究可以探究更加高效和可持续的物理场解冻技术, 包括多种技术的复合应用, 并继续深入研究其对食品的营养成分和微观结构的影响, 以更好地满足消费者对高品质食品的需求。此外, 物理场解冻装备的研究包括更加优化的工程结构和智能化的解冻程序也是上游技术突破的重点。

© The Author(s) 2024. 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] ORGANIZATION F, ORGANIZATION W H. Codex alimentarius: General standard for food additives[J]. Codex Alimentarius: General Standard for Food Additives, 2011.
- [2] WANG B, KONG B H, LI F F, et al. Changes in the thermal stability and structure of protein from porcine longissimus dorsi induced by different thawing Methods[J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126375.
- [3] 吴平, 姚芳, 王正云, 等. 超声波处理对畜肉解冻过程与解冻后品质影响的研究进展[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(8): 361-371, 265. [WU P, YAO F, WANG Z Y, et al. Research progress on the impact of ultrasonic treatment on the thawing process and post-thaw quality of livestock meat[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(8): 361-371, 265.]
- [4] 孙聿尧, 谢晶, 王金锋. 超声波解冻与传统解冻方式的比较与竞争力评估[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(6): 253-258. [SUN Y Y, XIE J, WANG J F. Comparison and competitiveness evaluation of ultrasonic thawing and traditional thawing methods[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(6): 253-258.]
- [5] CHU Y M, TAN M T, BIAN C H, et al. Effect of ultrasonic thawing on the physicochemical properties, freshness, and protein-related properties of frozen large yellow croaker (*Pseudosciaena Crocea*) [J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(1): 52-67.
- [6] NOWAK K W, ZIELINSKA M, WASZKIELIS K M. The effect of ultrasound and freezing/thawing treatment on the physical properties of Blueberries[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2019, 28(3): 741-749.
- [7] 臧芳波, 吕蒙, 付永杰, 等. 高压静电场解冻技术在肉类及肉制品中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(5): 303-308. [ZANG F B, LÜ M, FU Y J, et al. Application of high-voltage electrostatic field thawing technology in meat and meat products[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(5): 303-308.]
- [8] 杨宇帆, 陈倩, 王浩, 等. 高压电场技术在食品加工中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(19): 316-320, 325. [YANG Y F, CHEN Q, WANG H, et al. Research progress on the application of high voltage electric field technology in food processing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(19): 316-320, 325.]
- [9] TIRONI V, LEBAIL A, DE LAMBALLERIE M. Effects of pressure-shift freezing and pressure-assisted thawing on sea bass (*Dicentrarchus labrax*) quality[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(7): 381-387.
- [10] FARAG K W, LING J G, MORGAN D J, et al. A comparison of conventional and radio frequency thawing of beef meats: effects on product temperature distribution[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4(7): 1128-1136.
- [11] 宦海珍, 朱文慧, 步营, 等. 微波解冻对秘鲁鱿鱼肌肉品质与蛋白质氧化程度的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(5): 30-35, 40. [HUAN H Z, ZHU W H, BU Y, et al. Effects of microwave thawing on muscle quality and protein oxidation of peruvian squid [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(5): 30-35, 40.]
- [12] UYAR R, BEDANE F T, ERDOGDU F, et al. Radio-frequency thawing of food products—A computational study[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 146: 163-171.
- [13] 姜纪伟, 周纷, 张艳霞, 等. 射频解冻过程中食品加热均匀性影响因素的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(20): 7354-7360. [JIANG J W, ZHOU F, ZHANG Y X, et al. Research progress on factors affecting the heating uniformity of food during radio frequency thawing[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2020, 11(20): 7354-7360.]
- [14] 戴妍, 邵乐乐, 郭威, 等. 欧姆加热解冻法对猪肉理化及氧化特性的影响[J]. *农产品加工*, 2022(1): 14-19. [DAI Y, SHAO L L, WU W, et al. Effects of ohmic heating thawing on physicochemical and oxidative properties of pork[J]. *Agricultural Products Processing*, 2022(1): 14-19.]
- [15] 田方, 顾笑寒, 孙志栋, 等. 新型解冻技术及其对鱼肉品质影响的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(21): 7049-7056. [TIAN F, GU X H, SUN Z D, et al. Research progress on new thawing technologies and their effects on fish meat quality[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(21): 7049-7056.]
- [16] 杜忍让, 马健, 王刚弟. 猪肉的营养作用及科学食用[J]. *农业与技术*, 2021, 41(18): 116-119. [DU R R, MA J, WANG G D. Nutritional effects and scientific consumption of pork[J]. *Agriculture and Technology*, 2021, 41(18): 116-119.]
- [17] 蒋奕, 程天賦, 王吉人, 等. 超声波解冻对猪肉品质的影响[J]. *肉类研究*, 2017, 31(11): 14-19. [JIANG Y, CHENG T F,

- WANG J R, et al. Effects of ultrasonic thawing on the quality of pork[J]. *Meat Research*, 2017, 31(11): 14–19.]
- [18] HONG G P, CHUN J Y, JO Y J, et al. Effects of water or brine immersion thawing combined with ultrasound on quality attributes of frozen pork loin[J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2014, 34(1): 115–121.
- [19] HE X, LIU R, NIRASAWA S, et al. Effect of high voltage electrostatic field treatment on thawing characteristics and Post-thawing quality of frozen pork tenderloin meat[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 115(2): 245–250.
- [20] ZHU M M, PENG Z Y, LU S, et al. Physicochemical properties and protein denaturation of pork longissimus dorsi muscle subjected to six microwave-based thawing methods[J]. *Foods*, 2019, 9(1): 26.
- [21] 陈浩, 王纯洁, 斯木吉德, 等. 牛肉品质及其影响因素研究进展[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(2): 669–678. [CHEN H, WANG C J, SIMUJIDE, et al. Research progress on beef quality and its influencing factors[J]. *Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(2): 669–678.]
- [22] GUO Z L, GE X Z, YANG L H, et al. Ultrasound-assisted thawing of frozen white yak meat: Effects on thawing rate, meat quality, nutrients, and microstructure[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 70: 105345.
- [23] WANG X D, DONG Y L, WU R J, et al. A method to improve water-holding capacity of beef during freezing-thawing process using ultrasound treatment[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 45(1): e15004.
- [24] ZHANG Y M, DING C J. The study of thawing characteristics and mechanism of frozen beef in high voltage electric field[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 134630–134639.
- [25] 马坚. 高压静电场对牛里脊肉冻结和解冻的保鲜研究[J]. *家电科技*, 2018(7): 68–71. [MA J. Study on the preservation of beef tenderloin during freezing and thawing by high voltage electrostatic field[J]. *Appliance Technology*, 2018(7): 68–71.]
- [26] AMIRI A, MOUSAKHANI-GANJEH A, SHAFIEKHANI S, et al. Effect of high voltage electrostatic field thawing on the functional and physicochemical properties of myofibrillar proteins[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 56: 102191.
- [27] DONG J C, KOU X X, LIU L T, et al. Effect of water, fat, and salt contents on heating uniformity and color of ground beef subjected to radio frequency thawing process[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 68: 102604.
- [28] MIN S G, HONG G P, CHUN J Y, 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.
- [29] CABRERA M C, SAADOUN A. An overview of the nutritional value of beef and lamb meat from south America[J]. *Meat Science*, 2014, 98(3): 435–444.
- [30] 杜鹏飞, 王维婷, 李孟孟, 等. 超声波解冻对羊肉品质的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(1): 39–44. [DU P F, WANG W T, LI M M, et al. Effects of ultrasonic thawing on the quality of mutton[J]. *Meat Research*, 2020, 34(1): 39–44.]
- [31] 古明辉, 杨泽莎, 马萍, 等. 超声波辅助在羊肉多次冻融中保持理化特性及减少蛋白损失的作用[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(18): 3970–3983. [GU M H, YANG Z S, MA P, et al. Role of ultrasonic assistance in maintaining physicochemical properties and reducing protein loss during multiple freeze-thaw cycles of lamb[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(18): 3970–3983.]
- [32] BEHFAR S, VARIDI M J, HAMDAMI N, et al. Impact of high voltage electric field thawing on the quality properties of frozen mutton[J]. *Journal of Food Research*, 2022, 32(3): 129–140.
- [33] 张莉, 孙佳宁, 朱明睿, 等. 解冻方式对羊肉品质及微观结构的影响[J]. *核农学报*, 2022, 36(8): 1607–1617. [ZHANG L, SUN J N, ZHU M R, et al. Effects of thawing methods on the quality and microstructure of mutton[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(8): 1607–1617.]
- [34] 张丽, 许欣纯, 罗威, 等. 鸡肉品质评价及影响因素研究进展[J]. *广东畜牧兽医科技*, 2022, 47(6): 26–33. [ZHANG L, XU X C, LUO W, et al. Research progress on the evaluation of chicken meat quality and influencing factors[J]. *Guangdong Animal Husbandry and Veterinary Science*, 2022, 47(6): 26–33.]
- [35] ZHANG C, SUN Q X, CHEN Q, et al. Effectiveness of ultrasound-assisted immersion thawing on the thawing rate and physicochemical properties of chicken breast muscle[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(5): 1692–1703.
- [36] 张昕, 宋蕾, 高天, 等. 超声波解冻对鸡胸肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(5): 135–140. [ZHANG X, SONG L, GAO T, et al. Effects of ultrasonic thawing on the quality of chicken breast meat[J]. *Food Science*, 2018, 39(5): 135–140.]
- [37] RAHBARI M, HAMDAMI N, MIRZAEI H, et al. Effects of high voltage electric field thawing on the characteristics of chicken breast protein[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 216: 98–106.
- [38] BEDANE T F, ALTIN O, EROL B, et al. Thawing of frozen food products in a staggered through-field electrode radio frequency system: A case study for frozen chicken breast meat with effects on drip loss and texture[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 50: 139–147.
- [39] WU Z Y, MA W R, XUE S J, et al. Ultrasound-assisted immersion thawing of prepared ground pork: Effects on thawing time, product quality, water distribution and microstructure[J]. *LWT*, 2022, 163: 113599.
- [40] XU C C, ZANG M W, QIAO X L, et al. Effects of Ultrasound-assisted thawing on lamb meat quality and oxidative stability during refrigerated storage using non-targeted metabolomics[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 90: 106211.
- [41] KONG D W, QUAN C L, XI Q, et al. Effects of ultrasound-assisted slightly acidic electrolyzed water thawing on myofibrillar protein conformation and gel properties of chicken breasts[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134738.
- [42] JIA G L, SHA K, MENG J, 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.
- [43] ZHANG Y M, DING C J, NI J B, et al. Effects of high-voltage electric field process parameters on the water-holding capacity of frozen beef during thawing process[J]. *Journal of Food Quality*, 2019(4): 1–11.
- [44] RAHBARI M, HAMDAMI N, MIRZAEI H, et al. Investigation of the histological and textural properties of chicken breast thawed by high voltage electric field[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2020, 43(11): e13543.
- [45] SUN Y N, JIA Y M, SONG M X, et al. Effects of radio frequency thawing on the quality characteristics of frozen mutton[J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2023, 139: 24–33.
- [46] KAEWKOT C, CHENG W L, TAN F J. Physicochemical properties and structural changes of chicken breast meat subjected to

- radio frequency tempering combined with conventional thawing Treatments[J]. *Animal Science Journal*, 2023, 94(1): e13836.
- [47] WANG Y Y, YAN J K, DING Y, et al. Effects of ultrasound on the thawing of Quick-frozen small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) based on TMT-labeled quantitative proteomic[J]. *Food Chemistry*, 2022, 366: 130600.
- [48] LI D P, JIA S L, ZHANG L T, et al. Post-thawing quality changes of common carp (*Cyprinus carpio*) cubes treated by high voltage electrostatic field (HVEF) during chilled storage[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 42: 25–32.
- [49] CAI L Y, WAN J L, LI X X, et al. Effects of different thawing methods on physicochemical properties and structure of large-mouth bass (*Micropterus Salmoides*) [J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(3): 582–591.
- [50] LAN W Q, ZHAO Y N, GONG T S, et al. Effects of different thawing methods on the physicochemical changes, water migration and protein characteristic of frozen pompano (*Trachinotus ovatus*) [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2021, 45(8): e13826.
- [51] XU B G, CHEN J N, YUAN J, et al. Effect of different thawing methods on the efficiency and quality attributes of frozen red radish[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 101(8): 3237–3245.
- [52] LIU L, LÜ C M, MENG X J, et al. Effects of different thawing methods on flavor compounds and sensory characteristics of raspberry[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2020, 35(5): 478–491.
- [53] WATANABE T, ANDO Y. Evaluation of heating uniformity and quality attributes during vacuum microwave thawing of frozen apples[J]. *LWT*, 2021, 150: 111997.
- [54] LIU Y, CHEN S H, PU Y F, et al. Ultrasound-assisted thawing of mango pulp: Effect on thawing rate, sensory, and nutritional properties[J]. *Food Chemistry*, 2019, 286: 576–583.
- [55] LI T, LEE J W, LUO L, et al. Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on the quality preservation of *Pleurotus eryngii* [J]. *Applied Biological Chemistry*, 2018, 61(3): 257–265.
- [56] COKGEZME O F, ICIER F. Effect of voltage gradient on ohmic thawing characteristics of sour cherry juice concentrates for the temperature range of $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ [J]. *Food Science and Technology International*, 2019, 25(8): 659–670.