DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.01.036

冷冻和解冻技术在水产品中的应用研究进展

Research status and prospect of freezing and thawing technologies of aquatic products

张亚瑾[1,2] 焦 阳[1,2,3]

ZHANG Ya-jin[1,2] *JIAO Yang*[1,2,3]

(1. 上海海洋大学食品学院,上海 201306;2. 上海海洋大学食品热处理技术工程研究中心,上海 201306;3. 国家淡水水产品加工技术研发中心〔上海〕,上海 201306)

(1. *College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*; 2. *Engineering Research Center of Food Thermal-Processing Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*; 3. *National R & D Branch Center for Freshwater Aquatic Products Processing Technology〔Shanghai〕, Shanghai* 201306, *China*)

摘要:阐述了传统和新型冷冻、解冻方法的作用原理与优缺点,总结了冷冻和解冻技术在水产品应用中的研究现状,并对冷冻和解冻技术的发展方向进行了展望。

关键词:水产品;品质;冷冻方法;解冻方法;

Abstract: The principles, advantages and disadvantages of the traditional and novel freezing and thawing methods were elaborated, and the research status of the applications of freezing and thawing technologies in aquatic products were also summarized. The development direction of freezing and thawing technologies was then prospected in this review.

Keywords: aquatic products; quality; freezing method; thawing method

水产品富含优质蛋白质、不饱和脂肪酸以及维生素等营养成分,是人体蛋白质的主要来源[1-3]。在运输和贮藏过程中,水产品会因处理不当而导致品质劣变,营养价值降低。水产品的冷冻保鲜包括冷冻、冷藏和解冻,其中冻结和解冻是其运输和生产过程中的重要环节[4]。

冻结过程中由于低温抑制了水产品及微生物中大部分酶活性,且水分呈冰晶状态,降低了生化反应速率,从而很好地保持了水产品品质并延长了其贮藏时间[5]。冰晶的形成包括成核和冰晶生长两个阶段,成核是指足够数量的分子在三维空间中结合形成一个热力学稳定的聚合体,即临界核,其提供了适合晶体生长的表面,而冰晶生长阶段是粒子扩散到临界核表面并有序地聚集到生长晶体上的过程[6]。成核和结晶过程之间的相互作用决定了冰晶体大小、分布和形态等特征,对冷冻食品的质量和冷冻过程的效果有很大影响,因此需要控制冰晶的形成[6-7]。冻结速率较低时,会产生较大的冰晶体;快速冻结会产生小的冰晶体均匀分布在细胞组织中,因此为了保持冷冻食品的冻结品质,应严格控制冻结速率[8]。传统的冷冻、解冻方法包括空气冷冻、接触冷冻、水解冻、空气解冻、低温库解冻等,其会对水产品品质造成不同程度的影响,如破坏肌原纤维的完整性及肉质的嫩度、促进脂肪氧化和微量元素损失等。近年来,为提高冷冻水产品品质,新型冷冻、解冻技术如压力辅助冷冻解冻技术[9-10]、超声波辅助冷冻解冻技术[11-12]、电磁场辅助冷冻解冻技术[3,13]、欧姆解冻技术[14]等被研发并广泛应用。新型冷冻技术通过提高冷冻、解冻速率,控制冰晶体大小,降低冰晶体对细胞的机械损伤。与传统的解冻方法相比,新型解冻技术避免了解冻介质直接与水产品接触,降低了微生物污染,此外,还可以更加高效地解冻冰晶,保持水产品的营养成分和品质。

文章拟阐述传统和新型冷冻、解冻方法的作用原理与优缺点,总结传统和新型冷冻、解冻技术在水产品应用中的研究进展,并提出新型冷冻、解冻技术中存在的问题,旨在为水产食品工业发展提供依据。

1 冷冻技术

冷冻技术在水产品中的应用可以延长水产品的贮藏时间[12]。目前应用于食品的冷冻技术较多,主要分为传统冻结方法和新型物理场辅助冻结方法,传统的冷冻技术主要分为空气冻结法、间接接触冻结法和直接接触冻

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(编号:31801613)

作者简介:张亚瑾,女,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:焦阳(1985—),女,上海海洋大学副教授,博士。E-mail: yjiao@shou.edu.cn

收稿日期:2020-10-14

结法；新型物理场辅助冻结技术主要分为压力辅助冻结法、超声波辅助冻结法、电场辅助冻结法和磁场辅助冻结法。而冷冻过程可分为 3 个阶段：① 预冷阶段，使物料从初温降低到冰点温度；② 相变阶段，物料中大部分水转化为冰晶；③ 继续冻结阶段，使物料达到目标温度。

1.1 传统冷冻技术

1.1.1 空气冻结法　空气冻结法是通过静止空气自然对流或者强制对流的方式与食品进行热交换，使食品冻结。根据冻结装置的不同可以分为管道式鼓风冻结和隧道式送风冻结[15]。彭欢欢等[16]研究－20 ℃冰箱慢速冷冻和快速冷冻对斑点叉尾鮰鱼品质的影响，结果表明冷冻速率越小，形成的冰晶数量越少且体积较大，慢速冷冻会促进蛋白变性。以空气为介质冻结物料在食品工业中应用较为普遍，但是空气中的微生物会附于产品表面，由于空气的导热性较差，导致冻结时间较长，而且空气的温度波动较大，会造成水产品中的水分形成较大冰晶，对水产品的细胞造成损害，降低食品品质。

1.1.2 间接接触冻结法　间接接触冻结法是将水产品置于制冷剂或载冷剂已冷却的板、盘、带等载冷器上，通过热交换的方式冻结产品，其中平板冻结较为常见。周俊鹏等[17]研究了－30 ℃平板冻结、－80 ℃冰箱冻结和－80 ℃液氮冻结对鲫鱼、鲈鱼、鳜鱼品质的影响，结果表明－30 ℃平板冻结对 3 种鱼的解冻损失最大，且自由水含量增加。间接接触法接触壁面的导热性比空气的好，相同冻结温度下其冻结速率较空气快，成本低、操作方便，但是难以控制冻结后食品的形状。

1.1.3 直接接触冻结法　直接接触冻结法是载冷剂通过喷淋或浸渍的方式与物料直接接触，以热交换的方式冻结产品，常见的接触介质有盐水和液氮。王雪松等[18]研究表明，盐渍冻结可以提高冻结速率，但是由于冻结介质与鱼体直接接触，导致蛋白质变性和脂肪氧化程度较高。直接接触冻结法速率快、能耗低，冷冻介质的导热系数大，但是对于浸渍冷冻法，冷冻液性能不佳以及传热极限等问题制约该技术在水产品中的应用，应提高低温冷冻液的综合性能[19]。该冻结方法适用于贴体包装水产品的冻结，且要保证冷冻液的安全无污染。

1.2 物理场辅助冻结

由于传统冻结方法存在冻结时间长、冰晶体积大，会对水产品的组织细胞造成机械损伤，不能很好地保持产品的品质，而物理场辅助冻结技术的研发可以很好地解决这些问题。物理场辅助冻结方法应用于水产品，可以缩短冻结时间，提高冻结速率，减小冰晶体积，更好地提高产品品质。常见的物理场辅助冻结法如表 1 所示。

1.2.1 高压辅助冻结法　高压辅助冻结法一般是在 200～400 MPa 下对食品进行冷冻处理，主要包括高压冻结法、高压辅助冻结法和压力位移辅助冻结法。由图 1 可知，当压力＜200 MPa 时，冰点温度随压力的升高而下降；当压力＞600 MPa 时，冰点温度＞0 ℃，且随压力的增加而升高；当压力＞210 MPa，温度稍高于－20 ℃时，水转化为体积比冰型Ⅰ更小的冰型Ⅲ，减少了对细胞组织的损伤；当温度＜－25 ℃，压力为 250～330 MPa 时，冰型由Ⅲ转化为体积更小的冰型Ⅱ，可能是在压力逐渐增大的情况下，溶液扩散形成更小的冰晶体[22]。Cheng 等[23]研究表明，200 MPa 压力可以有效减少肌动球蛋白的变性，300 MPa 压力是影响肌动球蛋白变性的关键点，压力＞300 MPa 会促进肌动球蛋白变性。崔燕等[24]研究表明，压力为 300 MPa 时会促进虾壳脱落，随着压力的增大，肌原纤维蛋白的破坏程度增加，Ca^{2+}-ATPase 活性下降。超高压辅助冷冻水产品不仅能抑制水产品的蛋白质分解，还能减少冷藏初期的微生物负荷，有效抑制微生物生长[9]。Hurtado 等[25]对鳕鱼进行超高压处理（200 MPa，7 ℃，5 min，3 次循环），结果表明微生物减少了一个数量级，相同条件下，400 MPa 处理的微生物减少了两个数量级，但表面有熟化现象。该技术设备成本高，未研发出适合工业生产的连续和半连续工业规模的压力辅助冷冻设备是影响高压辅助冷冻技术应用于食品工业

表 1　物理场辅助冻结法

Table 1　Physical field-assisted freezing method

物理场		原理	评价
压力	高压辅助	增大过冷度	相变时间短，冰晶粒径减小，以玻璃态或非晶态存在
	压力偏移辅助	增大过冷度	相变时间稍长，冰晶粒径小，分布均匀
	高压再结晶	冰型变化	常规冷冻后使用，降低微生物数量，但是会破坏物料结构[20]
超声波		微射流和空化气泡助晶核形成	提高冰晶成核温度，大冰晶破裂成小冰晶，分布均匀，加快冻结速率。由于成本高、技术不成熟，未能实现工业化
电场	静电场	电场促进冰晶定向形成	诱导冰晶成核，冰晶粒径减小，延长相变时间。技术受限，工作环境要求高
	交变电场	抑制水分子聚集	交变电场的频率影响晶核的形成，可能存在安全隐患，技术受限
磁场	微波、射频	诱导水分子偶极旋转[21]	冰晶粒径减小且均匀分布，处于探索初级阶段

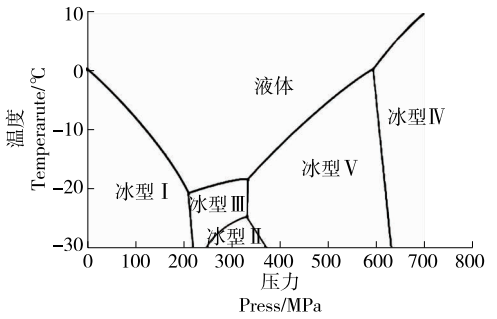


图 1　高压冻结和解冻过程中的水相变化[8]

Figure 1　Water phase changes during high pressure freezing and thawing

的主要原因,同时压力辅助过程中产生的热效应影响食品品质等。

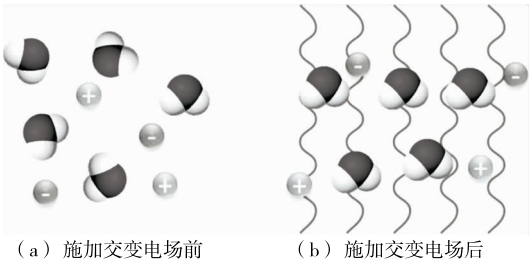
1.2.2　超声波辅助冻结法　食品工业生产中应用的超声波频率为 $2\times10^4\sim2\times10^9$ MHz。超声波产生的空化气泡能促进水产品冻结过程中初级冰晶的形成,空化气泡破裂产生的微射流,可促进大冰晶破碎成体积更小、分布更均匀的冰晶,改善冰晶对食品品质的影响[26]。Shi 等[27]研究表明,0.38 W/cm^2 超声波体系可以减少草鱼的冻结时间,保持肌原纤维结构,减少解冻损失,并对蛋白质羰基含量无显著性影响,随着超声功率的增加,草鱼肌原纤维结构及品质会遭到不同程度的破坏。Sun 等[11]研究表明,经 175 W 超声辅助浸泡的冻结速率最快,效果最优;经超声辅助冻结的鲤鱼的持水性比传统冻结方式下的更高,冰晶尺寸减小,提高了鱼肉品质。超声辅助冻结应用于水产品冻结方面的较少,其应用于水果[28]和蔬菜[29]方面的较多。超声波辅助冻结法虽然可以促进冰晶分布更均匀,颗粒更小,但是声强控制不当可能会破坏食品品质。此外,超声处理时间也是影响冷冻成核过程的重要因素之一,处理时间过长会导致生热,不利于冰的成核。因此,需研究适用于不同种类、重量及尺寸水产品的超声功率,扩大超声解冻技术在水产品中的应用范围。

1.2.3　微波辅助冻结法　微波是一种波长为 0.3～300.0 GHz 的电磁波。微波应用于冻结的原理为磁波诱导水分子偶极旋转产生摩擦热,摩擦热在冰晶的成核与生长过程中导致冰晶瞬间反复融化和再生,从而阻碍冰晶体的生长[30]。冰晶尺寸越小,对细胞造成的机械损伤越小,有利于保持细胞完整性和冻结水产品品质[31]。Jackson 等[32]研究发现,在乙二醇溶液的玻璃化过程中持续使用微波(2.45 GHz 和 1 000 W)辅助冷冻可以抑制冰晶形成。Xanthakis 等[33]研究表明,微波功率为 3 W 的微波辅助冷冻使鳕鱼组织细胞中冰晶尺寸明显减小,且在微波处理过程中,温度的振荡可能导致冰晶的瞬时反复融化和再结晶,抑制了冰晶的生长。此外,脉冲微波(2.45 GHz)辅助冷冻法在猪里脊[30]中形成了更小的冰晶,并降低了过冷度,且由于微波生热,冻结速率随微波功率的增加而降低。目前,有关微波辅助冻结水产品的研究较少,后续可以扩大微波在水产品冻结的应用范围,开发针对不同物料的微波辅助冻结参数,通过对物料进行品质分析,探索微波辅助冷冻法对水产品品质的影响。

1.2.4　射频辅助冻结法　射频是一种波长为 0.3～300.0 MHz 的电磁波,其在电极之间产生交变电场,水和食品中的带电离子不断地向两极重新定向(如图 2 所示)。射频应用于冷冻食品中,其原理与微波相似,诱导水分子偶极旋转,降低冰点,促进冰晶和更多成核位点的形成,并将初始冰晶分解成小冰晶[21,34-35]。射频辅助冻结的冻结速率优于微波辅助冻结,可能是因为射频可以更好地促进冰晶成核[36]。Hafezparast 等[36]利用射频辅助冷冻虹鳟鱼(其射频辅助冷冻装置如图 3 所示),研究表明射频辅助冷冻法的冻结速率与传统鼓风冻结法的相当,但是射频辅助冷冻法可以有效减小冰晶尺寸,当电极间距为 2 cm 时,形成的冰晶尺寸约为对照组的 75%,其颜色、质构与新鲜样品相似。目前,射频辅助冷冻法仅在实验室研究中取得了较好的效果,尚未拓展到食品工业应用中,后续可探索射频辅助冻结中试放大的可行性,并扩大其对水产食品的应用范围,对工业应用提供更多的理论依据。

2　解冻技术

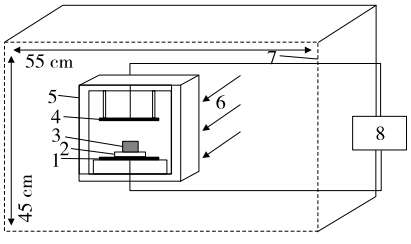
冷冻水产品在进一步加工前需先进行解冻,食品工业中冷冻水产品的解冻终温一般为−2～−5 ℃,此温度



(a) 施加交变电场前　　(b) 施加交变电场后

图 2 射频加热机理[34]

Figure 2　Mechanism of RF heating



1. 下极板　2. 聚四氟乙烯板　3. 样品　4. 上极板　5. 射频腔　6. 气流　7. 冰箱内表面　8. 射频发生器

图 3　射频辅助冷冻虹鳟鱼的试验装置[37]

Figure 3　Experimental setup for radio frequency assisted frozen rainbow trout

下，解冻后的水产品便于切割或进一步深加工利用[38-40]。由于水产品中含有大量不饱和脂肪酸，不适当的解冻方法会造成水产品脂肪氧化、水分流失、蛋白质氧化以及微生物污染等问题[41-42]。为保证冷冻水产品解冻后能保持较好的品质，应根据水产品的种类、冻结前后物料的状态和解冻后的用途采用较优的解冻方法。解冻技术一般分为传统解冻技术和新型解冻技术，新型解冻技术主要有超声波解冻法、高压静电场解冻法、欧姆解冻法、微波解冻法和射频解冻法(表 2)。

2.1 传统解冻法

2.1.1 空气解冻法　空气解冻在食品工业和生活中比较常见，一般在 15 ℃、相对湿度 90%～95%下进行[43]。通过空气对流传热，使冻结食品由外向内逐渐解冻。常见的空气解冻主要为静止空气解冻、流动空气解冻和加压流动空气解冻[44]。该方法操作简单、成本低，但是由于其解冻时间长，冻结食品的水分容易挥发，汁液流失比较严重，空气中的微生物会接触食品表面，从而降低食品的营养价值[45]。

2.1.2 水解冻法　水解冻法的解冻速率较空气解冻法的快，对水产品品质影响较小，但是解冻后水产品汁液流失严重，微生物容易污染食品表面，适合于解冻有包装的冻结食品。余文晖等[46]采用 4 种解冻方法(空气解冻、静水解冻、流水解冻和微波解冻)解冻金枪鱼，结果表明，静水解冻可以保持金枪鱼的品质，具体表现为解冻后鱼肉蛋白质变性不明显，且持水力较高，解冻损失较低，有良好的质构特性。水解冻时，水温不宜超过 18 ℃，且水解冻适合于带包装的厚度较小的冷冻水产品的解冻，避免水与待解冻物料直接接触产生交叉污染。

2.2 新型物理场解冻法

2.2.1 超声波辅助解冻　超声波解冻的原理主要是利用其热效应，使介质内部温度升高，解冻迅速且温度分布较均匀，这主要由于超声波在冻融边界附近迅速衰减，将超声波在介质中产生的振动能量转化为热能，从而达到解冻的目的[12,47]。Kissam 等[48]采用超声波(1 500 Hz，60 W)水浸解冻对鱼块进行解冻，与水浸解冻相比，其解冻时间缩短了 71%，但两种解冻方法对鱼块品质的影响无显著性差异。Mingtang 等[49]使用超声结合微波和超声结合远红外的方法解冻黑鲈鱼，并测定了蛋白质的聚集及其二级结构，结果表明，两种方法均可以保持蛋白质的稳定性和凝胶性，并改善鱼肉品质。Lu 等[50]研究了超声波结合微波和超声波结合红外解冻红姑鱼，发现两种方法均可抑制蛋白质的变性和水分迁移。超声辅助解冻技术虽然是一种新颖有效的技术，但其功耗高、局部加热、穿透性差等问题仍然存在[51]。

2.2.2 高压静电场解冻法　高压静电场产生的微能量能加速冻结食品的冰层结构氢键断裂，使冰晶粒径减小，促进冰晶过渡到水的状态，以达到加速解冻速率的目的[52]。Mousakhani 等[53]在电极间隙为 3.0，4.5，6.0 cm，电压为 4.5～14.0 kV 下解冻金枪鱼，发现高压电场解冻可以显著提高金枪鱼的解冻速率，抑制微生物生长，并降低总挥发性盐基氮含量，但是鱼的颜色、质构、蛋白质的溶解度降低。Li 等[54]研究表明，高压静电场不仅可以有效缩短鲤鱼的解冻时间，提高鱼肉的持水力和降低微生物数量，还可以提高 AMP-脱氨酶活性。唐梦等[55]研究表明，3.8 kV 高压静电场的解冻速率为空气的 1.59 倍，而且较好地保持了金枪鱼的品质。高压静电场解冻技术的解冻速率快，能较大程度保持水产品的品质，但是由于解冻环境湿度大，电压较高的情况下，空气可能会被击穿，存在一定的安全隐患，后续需深入探究不同电压和电极间隙等条件对不同类型水产品的解冻速率、蛋白质以及微生物的影响。

2.2.3 欧姆解冻　欧姆解冻又称电阻解冻，其解冻原理为电流通过冷冻食品形成电阻，电能在食品内部瞬间转化为热能，从而快速解冻冷冻食品[14,56]。Miao 等[57]发现

表 2　新型物理场解冻法原理及评价

Table 2　Principles and evaluation of new physical field thawing method

解冻方法	原理	评价
超声波解冻	超声波在介质中产生的振动能量转化为热能	解冻速率快，可以保持食品品质，但功耗较高，局部加热，穿透性较差
高压静电场解冻	微能量能加速冻结食品中冰的氢键断裂	解冻速率快，电场电离产生的臭氧可以减少微生物数量，但解冻环境湿度大，电压高，存在安全隐患
欧姆解冻	电能在食品内部瞬间转化为热能	解冻速率较快，但解冻样品与电极直接接触，可能会造成食品污染
微波解冻	通过离子震荡和偶极旋转产生热量	解冻速率较快，穿透性较差；不适合大块物料解冻，存在边角过热现象，可能会降低食品品质
射频解冻	通过离子震荡和偶极旋转产生热量	解冻速率较快，穿透性好；解冻均匀性受物料形状、大小、介电特性等影响，且存在边角过热现象

鱼糜的解冻速率随电极溶液浓度的增加而线性增加,由于欧姆解冻速率较快,从而抑制解冻过程中重结晶生成,并且经欧姆解冻后的鱼糜凝胶比传统解冻方法的更强。Liu 等[58]研究表明,水分含量高和脂肪含量低的金枪鱼部位电导率最高,解冻速率最快,且沿肌肉纹理平行放置电极和肌肉膜的去除会提升其电导率,加快金枪鱼的解冻速率。欧姆解冻应用于冷冻水产品中,由于电极直接与样品接触,可能会对食品造成污染,对于非均质的食品解冻,由于食品内部电阻不同会造成解冻不均匀现象。目前,有关欧姆解冻在水产品中的应用尚且较少,后续可以将欧姆解冻应用于较薄的片状或块状的水产品中。

2.2.4　微波解冻法　微波解冻的原理是食品内部偶极子在交变电磁场的作用下不断转动,摩擦产生热量,可显著提高其解冻速率[59]。Baygar 等[60]研究表明,经微波解冻多次冻融的鲈鱼,其 pH、挥发性盐基氮(TVB-N)、三甲胺(TMA-N)、硫代巴比妥酸值(TBA)值升高,粗蛋白和粗脂肪含量降低,鱼鳍、鱼尾等部位有熟化现象,建议不宜采用微波解冻反复冻融的整条鱼。微波解冻存在温度分布不均匀的问题,由于在解冻过程中,鱼的尾和鳍部位肉质薄,其介电损耗常数在解冻过程中会急剧增加,吸收更多热量,而未解冻的部位吸收的热量较少,造成边角过热[61-62]。宦海珍等[63]研究表明,500 W 微波对鱿鱼的保水性及颜色的影响最小,微波解冻速率显著优于冷藏解冻,但是不利于秘鲁鱿鱼品质保持。Zhang 等[64]研发了 915 MHz 中频微波解冻系统的数值模拟模型,并分析了其加热特性。后续应优化适当的数字模拟模型,以解决微波加热不均匀的问题。

2.2.5　射频解冻法　射频解冻原理与微波解冻的相同,射频的电磁波频率低于微波,其穿透深度较大,解冻速度快,均匀性相对较好,可较好地保持水产品品质。Llave 等[39]研究表明,当解冻终温为 -3～1 ℃时,金枪鱼的冰晶开始融化成水,介电常数增大,与传统解冻方法相比,其解冻速率减小了 3 倍,且温度分布均匀。王亚盛[65]研究了 27.12 MHz 射频体系解冻鲅鱼,结果表明解冻后的鲅鱼色泽和质构较好,解冻速率较快且温度分布较为均匀,这是由于射频穿透深度远大于鲅鱼块厚度,提高了样品的温度分布均匀性。Koray 等[66]采用射频解冻 1.5 kg 虾块,发现射频解冻虾块温度分布均匀,当极板间距为 15 cm,射频时间为 7 min 时,虾块中心温度由 -22 ℃升至 -3 ℃。Bedane 等[67]研究表明在传送带条件下解冻食品物料可以提高温度分布均匀性。Llave 等[68]建立了金枪鱼射频解冻的数学模型,使用 13.56 MHz 的平行板射频系统测试模拟结果,通过建立数学模型,发现上电极尺寸与样品表面尺寸接近时,解冻均匀性最佳。He 等[69]研究表明解冻样品为圆柱状时,可减少边角效应,提高解冻均匀性。射频解冻适用于体积较大的块状水产食品,对于不规则水产食品的解冻可以通过改善样品形状[13]以及解冻环绕介质等方法提高射频解冻均匀性,并进一步研究水产品解冻后的理化性质。此外,通过建立数学模型,减小研究成本和试验中的误差,促进射频技术更好地应用于水产品解冻中。

3　结论及展望

为防止腐败,冷冻水产品的加工、贮藏、运输、销售过程中都应保持在温度较低的环境中。将新型冷冻解冻技术应用于冷冻水产品冷链中,扩大新型冷冻解冻技术的应用范围,可以在销售前最大程度保持水产品的品质。传统的冷冻、解冻技术成熟,但处理时间长,水产品品质受到了较大程度的影响。新型冷冻、解冻技术的应用可以较大程度保持水产品的品质,但仍存在一些固有的问题,如成本较高、对不同种类的水产品普适性较差以及不能实现大批量生产等问题。因此需要更深入地研究其机理,针对不同种类、形态、组分的水产品,优化新型冻结、解冻技术及工艺,并使用多重联合冷冻、解冻技术,扩大新技术在水产品中的应用范围。研究过程中应深入对冻结、解冻后的水产品进行理化品质分析,探究新型冷冻、解冻技术对水产品品质的影响。此外,需进一步研发适合工业使用的冻结、解冻设备,减小处理空间并提升产量,实现新型冻结、解冻技术在食品工业中的大规模生产。

参考文献

[1] 蔡路昀, 台瑞瑞, 曹爱玲, 等. 冷冻因素对水产品品质的影响及冷冻保鲜的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018(20): 308-313.

[2] 丁海燕, 孙晓杰, 盛晓风, 等. 几种主要养殖淡水、海水经济鱼类肌肉营养组成及对比分析[J]. 食品科技, 2016(3): 150-155.

[3] ZHAN Xi-ming, SUN Da-wen, ZHU Zhi-wei, et al. Improving the quality and safety of frozen muscle foods by emerging freezing technologies: A review[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2018, 58(17): 2 925-2 938.

[4] HANENIAN R, MITTAL G S. Effect of freezing and thawing on meat quality[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2004, 2(3/4): 74-80.

[5] 文静, 梁显菊. 食品的冻结及解冻技术研究进展[J]. 肉类研究, 2008(7): 76-80.

[6] RUSSO KRAUSS I, MERLINO A, VERGARA A, et al. An overview of biological macromolecule crystallization[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2013, 14(6): 11 643-11 691.

[7] KIANI H, SUN Da-wen. Water crystallization and its importance to freezing of foods: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(8): 407-426.

[8] WU Xiao-fei, ZHANG Min, ADHIKARI B, et al. Recent developments in novel freezing and thawing technologies applied to foods[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2017, 57(17):

3 620-3 631.
[9] TRUONG B Q, BUCKOW R, STATHOPOULOS C E, et al. Advances in high-pressure processing of fish muscles[J]. Food Engineering Reviews, 2014, 7(2): 109-129.
[10] TIRONI V, DE LAMBALLERIE M, LE-BAIL A. Quality changes during the frozen storage of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) muscle after pressure shift freezing and pressure assisted thawing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(4): 565-573.
[11] SUN Qin-xiu, ZHAO Xin-xin, ZHANG Chao, et al. Ultrasound-assisted immersion freezing accelerates the freezing process and improves the quality of common carp (*Cyprinus carpio*) at different power levels[J]. LWT, 2019, 108: 106-112.
[12] LI Xiu-xia, SUN Pan, JIA Jing-ze, et al. Effect of low frequency ultrasound thawing method on the quality characteristics of Peru squid (*Dosidicus gigas*)[J]. Ciencia Y Tecnologia De Los Alimentos Internacional, 2019, 25(2): 171-181.
[13] LI Yu-lin, LI Feng, TANG Ju-ming, et al. Radio frequency tempering uniformity investigation of frozen beef with various shapes and sizes[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 48: 42-55.
[14] GAVAHIAN M, TIWARI B K, CHU Yan-hwa, et al. Food texture as affected by ohmic heating: Mechanisms involved, recent findings, benefits, and limitations[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86: 328-339.
[15] 余小领，周光宏，徐幸莲. 肉品冷冻工艺及冻结方法[J]. 食品工业科技，2006(5)：199-202.
[16] 彭欢欢，刘小莉，张金振，等. 不同冷冻方式对斑点叉尾鮰鱼片品质的影响[J]. 食品研究与开发，2017(8)：177-182.
[17] 周俊鹏，朱萌，章蔚，等. 不同冷冻方式对淡水鱼品质的影响[J]. 食品科学，2019，40(17)：247-254.
[18] 王雪松，谢晶. 不同解冻方式对冷冻竹荚鱼品质的影响[J/OL]. 食品科学.（2020-10-10）[2020-12-12]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20201010.1451.002.html.
[19] 李晓燕，陈杰，樊博玮，等. 浸渍式冷冻技术的研究进展[J]. 食品与发酵工业，2020，46(15)：307-312.
[20] VAN BUGGENHOUT S, GRAUWET T, VAN LOEY A, et al. Effect of high-pressure induced ice I/ice III-transition on the texture and microstructure of fresh and pretreated carrots and strawberries[J]. Food Research International, 2007, 40(10): 1 276-1 285.
[21] ANESE M, MANZOCCO L, PANOZZO A, et al. Effect of radiofrequency assisted freezing on meat microstructure and quality[J]. Food Research International, 2012, 46(1): 50-54.
[22] CHEVALIER D, LE BAIL A, GHOUL M. Freezing and ice crystals formed in a cylindrical food model: part II. Comparison between freezing at atmospheric pressure and pressure-shift freezing[J]. Food Eng, 2000, 46(4): 277-285.
[23] CHENG Li-na, SUN Da-wen, ZHU Zhi-wei, et al. Effects of high pressure freezing (HPF) on denaturation of natural actomyosin extracted from prawn (Metapenaeus ensis)[J]. Food Chem, 2017, 229: 252-259.
[24] 崔燕，宣晓婷，林旭东，等. 超高压协同冷冻辅助脱壳对南美白对虾肌原纤维蛋白理化性质的影响[J]. 现代食品科技，2019(2)：32-39.
[25] HURTADO J L, MONTERO GARCÍA P, BORDERÍAS A J. Extension of shelf life of chilled hake (*Merluccius capensis*) by high pressure[J]. Food Science & Technology International, 2000, 6(6): 243-249.
[26] 陶兵兵，邹妍，赵国华. 超声辅助冻结技术研究进展[J]. 食品科学，2013(13)：370-373.
[27] SHI Zhi-jia, ZHONG Sai-yi, YAN Wen-jie, et al. The effects of ultrasonic treatment on the freezing rate, physicochemical quality, and microstructure of the back muscle of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. LWT, 2019, 111: 301-308.
[28] DELGADO A E, ZHENG Li-yun, SUN Da-wen. Influence of ultrasound on freezing rate of immersion-frozen apples[J]. Food & Bioprocess Technology, 2009, 2(3): 263-270.
[29] XU Bao-guo, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Effect of ultrasound-assisted freezing on the physico-chemical properties and volatile compounds of red radish[J]. Ultrason Sonochem, 2015, 27: 316-324.
[30] XANTHAKIS E, LE-BAIL A, RAMASWAMY H. Development of an innovative microwave assisted food freezing process[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 176-181.
[31] 蔡迎红，唐君言，司春强，等. 微波/射频辅助食品冻结的研究进展[J]. 冷藏技术，2018(4)：7-12.
[32] JACKSON T H, UNGAN A, CRITSER J K, et al. Novel microwave technology for cryopreservation of biomaterials by suppression of apparent ice formation[J]. Cryobiology, 1997, 34(4): 370-372.
[33] XANTHAKIS E H J, ELIASSON L, JHA P K, et al. Evaluation of microwave assisted freezing (MAF) impact on meat and fish matrices[M]. Beijing: Chinese Association of Refrigeration, 2018: 176-181.
[34] ROSA A R D, BRESSAN F, LEONE F, et al. Radio frequency heating on food of animal origin: A review[J]. European Food Research and Technology, 2019, 245(9): 1 787-1 797.
[35] JHA P K, CHEVALLIER S, XANTHAKIS E, et al. Effect of innovative microwave assisted freezing (MAF) on the quality attributes of apples and potatoes[J]. Food Chem, 2020, 309: 125594.
[36] HAFEZPARAST-MOADAB N, HAMDAMI N, DALVI-ISFAHAN M, et al. Effects of radiofrequency-assisted freezing on microstructure and quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet[J]. Innovative Food Science & E-

merging Technologies, 2018, 47: 81-87.
[37] DI ROSA A R, BRESSAN F, LEONE F, et al. Radio frequency heating on food of animal origin: A review[J]. European Food Research and Technology, 2019, 245(9): 1 787-1 797.
[38] FARAG K W, DUGGAN E, MORGAN D J, et al. A comparison of conventional and radio frequency defrosting of lean beef meats: Effects on water binding characteristics[J]. Meat Sci, 2009, 83(2): 278-284.
[39] LLAVE Y, TERADA Y, FUKUOKA M, et al. Dielectric properties of frozen tuna and analysis of defrosting using a radio-frequency system at low frequencies[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 139: 1-9.
[40] ZHU Ya-li, LI Feng, TANG Ju-ming, et al. Effects of radio frequency, air and water tempering, and different endpoint tempering temperatures on pork quality[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(4): 1-8.
[41] XIA Xiu-fang, KONG Bao-hua, LIU Jing, et al. Influence of different thawing methods on physicochemical changes and protein oxidation of porcine longissimus muscle[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46(1): 280-286.
[42] 胡晓亮, 王易芬, 郑晓伟, 等. 水产品解冻技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2015(29): 39-46.
[43] SRINIVASAN S, XIONG Y L, BLANCHARD S P, et al. Effects of freezing and thawing methods and storage time on physicochemical properties of freshwater prawns (*Macrobrachium rosenbergii*)[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 1998, 7(2): 47-68.
[44] NGAPO T M, BABARE I H, REYNOLDS J. Freezing and thawing rate effects on drip loss from samples of pork[J]. Meat Science, 1999, 53(3): 149-158.
[45] 陈怡璇, 焦阳. 冻藏及解冻过程对水产品品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(2): 36-41.
[46] 余文晖, 王金锋, 谢晶. 不同解冻方式对金枪鱼品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019(12): 189-197.
[47] CHANDRAPALA J, OLIVER C M, KENTISH S, et al. Use of power ultrasound to improve extraction and modify phase transitions in food processing[J]. Food Reviews International, 2012, 29(1): 67-91.
[48] KISSAM A D, NELSON R W, NGAO J, et al. Water-thawing of fish using low frequency acoustics[J]. Journal of Food science, 1982, 47(1): 71-75.
[49] 谭明堂, 谢晶, 王金锋. 解冻方式对鱿鱼品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 94-101.
[50] CAI Lu-yun, ZHANG Wen-di, CAO Ai-ling, et al. Effects of ultrasonics combined with far infrared or microwave thawing on protein denaturation and moisture migration of Sciaenops ocellatus (red drum)[J]. Ultrason Sonochem, 2019, 55: 96-104.
[51] LI Bing, SUN Wen-da. Effect of power ultrasound on freezing rate during immersion freezing of potatoes[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(3): 277-282.
[52] 唐梦, 岑剑伟, 李来好, 等. 高压静电场解冻技术在食品中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016(10): 373-376.
[53] MOUSAKHANI-GANJEH A, HAMDAMI N, SOLTANI-ZADEH N. Effect of high voltage electrostatic field thawing on the lipid oxidation of frozen tuna fish (*Thunnus albacares*)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 36: 42-47.
[54] LI Da-peng, JIA Shi-liang, ZHANG Long-ting, 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.
[55] 唐梦, 岑剑伟, 李来好, 等. 高压静电场解冻对冻罗非鱼片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017(13): 1-6.
[56] ICIER F, IZZETOGLU G T, BOZKURT H, et al. Effects of ohmic thawing on histological and textural properties of beef cuts[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(3): 360-365.
[57] YELIAN MIAO J C A N. Studies on the ohmic thawing of frozen surimi[J]. Food Science and Technology, 2007, 13(4): 296-300.
[58] LIU Lei, LLAVE Y, JIN Yin-zhe, et al. Electrical conductivity and ohmic thawing of frozen tuna at high frequencies[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 197: 68-77.
[59] 彭泽宇, 朱明明, 孙红东, 等. 肉品新型解冻技术及其对蛋白特性影响的研究进展[J]. 食品科学, 2019, 41(19): 303-310.
[60] BAYGAR T, ALPARSLAN Y. Effects of multiple freezing (−18±2 ℃) and microwave thawing cycles on the quality changes of sea bass (*Dicentrarchus labrax*)[J]. J Food Sci Technol, 2015, 52(6): 3 458-3 465.
[61] SOSA-MORALES M E, VALERIO-JUNCO L, LÓPEZ-MALO A, et al. Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(8): 1 169-1 179.
[62] CHIZOBA E, FLORA G, SUN Da-wen, Zhang Han, et al. Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017(67): 58-69.
[63] 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(5): 30-35, 40.
[64] ZHANG Rou-jia, WANG Yi-fen, WANG Xi-chang, et al. Study of heating characteristics for a continuous 915 MHz pilot scale microwave thawing system[J]. Food Control, 2019, 104: 105-114.

(下转第 236 页)

次疫情影响,“生鲜电商+冷链宅配”迎来了业务大爆发,不仅仅是市场需求的爆发,政策红利也在不断释放。近期浙江省政府办公厅发布的《关于提振消费促进经济稳定增长的实施意见》特别提到“宅经济”,其中提到了加快推广农产品“生鲜电子商务+冷链宅配”“中央厨房+食材冷链配送”等服务新模式。

因此,互联网革命的大环境下,不管是国际间的进出口贸易,还是国内消费升级使得物流业开始由标准化的大宗物流转向个性化、快速响应市场的碎片化物流,这对食品行业的过程分析技术提出了更高的要求:更加方便快捷、成本更低、可追溯性更强。尤其是经过这次疫情,市场监管的重要性体现得淋漓尽致,食品质量与安全成为食品行业乃至全球的热点。

该书侧重于讲述已有和新兴的过程分析技术工具,以宏观的视角讲述了过程分析技术在食品监管、生产、研发和品质控制等环节的应用和发展情况,分析了其实施战略。该书涉及了目前国际上最先进的相关技术,有助于了解前沿的技术进展,开拓视野,可供食品工程、过程工程、分析化学等领域科技人员阅读,也可供高校专业师生学习。通过列举过程分析技术中的不同工具在不同领域的具体应用,以具体案例进行分析,突出了过程分析技术的重要性,分析了影响食物质量安全的因素,如作者在食品工业中拉曼光谱的过程分析技术应用案例中,列举说明了如何正确的选择仪器来消除复杂的食品体系中拉曼散射之外的光学干扰。这种举例的方式,不仅让概念化的内容更加具体地展现在读者面前,且有参考可寻。同时该书也有较为完善的理论框架,通过对互联网背景下的过程分析技术作出说明,以及展示前沿的研究成果,结合具体案例,将晦涩深奥的专业知识转换为通俗易懂的日常知识,使非专业的读者也能够学到知识。

2　该书的学科价值

食品行业是国家经济发展的支柱行业,对食品安全也提出了更高的要求。2015 年 10 月开始实施新修订的《食品安全法》扩大了对食品的监管范围,加大了处罚力度,其中的一个重点是明确了“全过程”监管制度,在技术手段上提出了自始至终的监管要求。同时,消费者对食品安全的需求,商业中通过过程分析技术对生产工艺的优化,降低生产成本和增加能源效率,过程分析技术还可以与绿色生产策略进行结合,实现环境可持续性。

《食品工业中的过程分析技术》一书简介了过程分析技术的概念和发展及其未来面临的挑战。书中详细介绍了从试验设计到数据分析和处理技术,为行业内普遍的数据分析技术提供了参考。书中对信息管理系统的详细介绍,为数据监测、数据采集和处理以及根据数据进行决策提供了有效的方法参考,同时可以实现数据和食品安全的可追溯性。详细介绍了红外光谱、拉曼光谱、磁共振成像和核磁共振谱、计算机视觉、热成像、高光谱影像、超声诊断等技术及其在不同种类的食品和不同的阶段中的使用,通过材料和成分分析,能够在整个过程中监测产品质量。

该书既有利于业内人士详细了解过程分析技术,也可以作为行业外人员学习本行业技术的入门书,其主要原因有:① 该书按照不同的技术分为不同章节,详细介绍其技术原理,并通过具体实例说明在食品过程分析中的使用,专业且易懂,逻辑通顺;② 内容编写严谨,使人在阅读的过程中有一个明显的框架感,读者可根据自身需求准确定位,更能引发阅读兴趣和欲望;③ 该书集中了基础知识和最新研究成果,更利于读者掌握基础专业知识和最新技术;④ 行业内的读者,可将该书作为行业技术的基础字典,根据自身需求,按目录选择需要阅读的章节。

3　该书的社会价值

该书被视为社会食品行业的重要参考书籍,其不仅具有重要的学术价值,更有重要的社会价值。食品安全已升级为国家战略。近几年屡屡爆出的食品安全问题,随着网络信息的快速传播受到了广泛的关注,同时,从 2015 年 10 月实施新修订的《食品安全法》后,对于食品安全的监管范围和深度都在不断增加,使得食品工业中的过程分析变得十分重要,这样既可以对食品安全有更高的保障,同时也可以通过过程分析中的数据,提高部分环节的生产效率。

《食品工业中的过程分析技术》对食品工业中新兴的过程分析技术进行了介绍,使得读者能够了解行业前沿技术,而且有些已在其他互补流程工业中被验证过,可以为后续的技术发展和读者的研究提供参考方向。

(作者:赵飞,男,绥化学院工程师,学士)

(上接第 221 页)

[65] 王亚盛. 冷冻水产品复合相介电特性与射频解冻研究[J]. 食品科学, 2007(7): 501-504.

[66] KORAY PALAZOGLU T, MIRAN W. Experimental comparison of microwave and radio frequency tempering of frozen block of shrimp[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41: 292-300.

[67] BEDANE T F, CHEN Long, MARRA F, et al. Experimental study of radio frequency (RF) thawing of foods with movement on conveyor belt [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 201: 17-25.

[68] LLAVE Y, LIU S, FUKUOKA M, et al. Computer simulation of radiofrequency defrosting of frozen foods [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 152: 32-42.

[69] 何佳玲, 陈璐, 张汝怡, 等. 不同形状尺寸冷冻牛肉的射频解冻均匀性探究[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 122-128.