

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.027

# 水产品超高压加工技术研究与应用\*

朱松明 苏光明 王春芳 詹耀 胡菲菲 于勇

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

**摘要:**超高压技术的优势越来越受到国内外从事农产品加工研究者的认可。与果蔬产品相比,超高压技术在水产品中的应用还较为薄弱。随着对超高压技术功效认识的不断深入,该技术在水产品中能发挥的作用越来越受到关注。基于近十多年来的综合调研,就超高压在水产品杀菌、保鲜、快速冷冻和解冻、脱壳、活性物质提取和物质改性等方面的研究进行阐述,深入分析各方面研究结果的意义、应用价值和前景,并对进一步开展相关研究的关键技术和主要方向进行了探究。

**关键词:**农产品加工 水产品 超高压 杀菌 保鲜

**中图分类号:** TS254.4; TS201.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-1298(2014)01-0168-10

## 引言

超高压加工是将农产品(食品)物料放入一个高压容器内,以水等液体为媒介施加一定的压力并保持一定的时间,然后卸压取出。超高压能改变生物体高分子中的非共价键结构,使蛋白质变性、淀粉糊化、酶失活、微生物菌体破坏而死亡。而超高压却不能改变共价键结构。因此,生物物料中具有小分子结构的营养成分能得以较完整地保存。超高压加工是一种完全不同于传统热加工方法的新技术。

水产品的冷鲜加工是超高压加工技术的一个重要应用领域。近年来,国内外对于超高压技术应用于水产品加工的报道逐渐增多。水产品按生物种类形态可分为鱼类、虾蟹贝类、藻类和水生哺乳动物,目前国内外的超高压水产品加工技术研究则主要针对鱼类和虾蟹贝类。其中,超高压技术在鱼类加工中的应用主要表现在灭菌和鱼糜制品品质构的改良方面;而虾蟹贝类由于很易受到微生物及病毒的污染,因此,超高压技术在贝类加工中的应用主要表现在杀灭有害微生物、脱壳等。此外,超高压技术在鱼类和贝类加工中的应用研究还涉及与其风味和营养价值相关的物理性质和生化性质。

按照超高压技术在水产品加工中的应用目标,可将这些应用研究分为水产品杀菌、保质、脱壳、改性、快速冷冻和解冻、活性物质提取等6个主要方面,本文对这6个方面分别进行阐述。

## 1 水产品杀菌

超高压水产品杀菌是超高压技术应用于水产品加工的最早目标。在该领域,国外的相关研究起步较早,自20世纪中后期,日本学者率先开展了相关研究,并逐渐发展到欧美国家。而我国的相关研究大多始于21世纪。

就单个水产品类型而言,超高压水产品杀菌技术应用于牡蛎的加工是国外超高压水产品加工产业化发展的成功案例之一,相关的研究也较多<sup>[1]</sup>。该研究所针对的主要目标菌是副溶血性弧菌以及大肠杆菌等。

对于超高压牡蛎杀菌的技术参数,国外研究人员已获得了较佳的压力和保压时间控制水平,并获得了中温与超高压协同杀菌的有效控制参数。Calik等研究发现345 MPa、90 s的处理是杀灭牡蛎中副溶血弧菌的最佳条件,可以将其菌落数降到不能检出的水平<sup>[2]</sup>。López-Caballero等研究发现400 MPa、10 min的处理可以有效减少牡蛎中的总菌落数<sup>[3]</sup>。Kural等研究得到如果要将新鲜牡蛎中的副溶血性弧菌的含量降低5个对数的数量级,在1~35℃时需要大于350 MPa的压力以及保压2 min,而将温度提高至40℃,则对压力要求降低,只需大于300 MPa<sup>[4-5]</sup>。由此可见中温起到了一个很好的协同作用。张晓敏等<sup>[6]</sup>、夏远景等<sup>[7]</sup>也进行了超高压对牡蛎菌群的影响研究,结果表明,压力、保压时间对牡蛎杀菌效果影响显著,随着压力的增大和时间

收稿日期:2013-09-10 修回日期:2013-10-12

\*国家自然科学基金资助项目(31071620)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100801)

作者简介:朱松明,教授,博士生导师,主要从事食品非热加工技术研究,E-mail:zhusm@zju.edu.cn

的增长,菌群的灭活率增大。

在此基础上,国内外学者逐渐将该技术应用于其他贝类水产品,如虾类、毛蚶、贻贝等。López-Caballero 等在 200 MPa 和 400 MPa 高压下对冷冻真空包装对虾货价期的研究指出,高压处理后的对虾比未处理的对虾货价期分别延长了 7 d 和 14 d 左右<sup>[8]</sup>。谢慧明等考察了不同温度和保压时间协同超高压对小龙虾中金黄色葡萄球菌的作用效果,并获得了小龙虾超高压杀菌处理的优化条件<sup>[9]</sup>。王瑞等发现,采用 500 MPa 超高压在 40℃ 处理生鲜毛蚶 5 min,其细菌、大肠杆菌、霉菌、酵母菌的存活率都显著下降<sup>[10]</sup>。Fletcher 等研究发现 10 ~ 40℃ 之间,400 MPa 处理可以使贻贝中单核细胞李斯特菌下降至保证食品安全的数量级<sup>[11]</sup>。

此外,国内外学者将该技术应用于鱼类水产品的研究也在不断地开展。Gómez-Estaca 等发现沙丁

鱼在 300 MPa、15 min、20℃ 处理下,肠杆菌科微生物菌落数降至不能检出的水平,且这一效果可以维持 21 d (5℃ 保存)<sup>[12]</sup>。Ramirez-Suarez 等利用超高压处理长鳍金枪鱼,发现 275 MPa 高压处理之后 4℃ 保藏前 5 d 菌落数保持不变,而 310 MPa 保压 6 min,可以将货架期延长至 22 d (4℃ 贮藏) 和 93 d (-20℃) 以上<sup>[13]</sup>。Paarup 等研究发现 400 MPa 可以有效延长鱿鱼的货架期<sup>[14]</sup>。李庆领等针对海参的研究结果却表明,增大处理压力和延长保压时间可以显著提高对海参的杀菌效果,但是当压力超过 300 MPa、保压时间超过 10 min 时,这种影响会大大减弱,压力超过 500 MPa、保压时间大于 30 min 时,压力和保压时间对杀菌效果基本上无影响,这一结果目前还未有明确的机理研究进行解释<sup>[15]</sup>。近年来,这方面的研究逐渐成为热点,国内外其他针对鱼类水产品的主要研究结果如表 1 所示。

表 1 水产品超高压杀菌研究与应用

Tab. 1 Researches and applications of HPP pasteurization on aquatic products

文献来源	国家	目标菌或线虫	研究对象	工艺参数	结果	对照
[16]	意大利	海兽胃线虫幼虫	鲭鱼	100 ~ 300 MPa, 5 min	300 MPa, 5 min 能 100% 杀灭	-
[17]	韩国	嗜冷菌	生鱿鱼片	200 ~ 400 MPa, 20 min	400 MPa, 20 min 处理, 目标菌减少 4.7 对数以上	常压
[18]	冰岛	李斯特菌	熏三文鱼	400 ~ 900 MPa, 10 ~ 60 s	700 ~ 900 MPa, 10 s 处理, 目标菌从 4 500 cfu/g 减到 0.3 cfu/g 以下	-
[19]	智利	假单胞菌、希瓦氏菌、需氧嗜温嗜冷菌	鲍鱼	500 MPa 下 8 min, 550 MPa 下 3 ~ 5 min	高压处理鲍鱼的货架期可从 30 d 延长到 65 d 以上	常压
[20]	中国	菌落总数	腌制生食泥螺	300 ~ 600 MPa, 10 ~ 20 min, 20 ~ 40℃	300 MPa, 20 min, 20℃ 最优; 致病菌未检出, 菌落总数和大肠杆菌低于其标准	-
[21]	中国	菌落总数、大肠杆菌、霉菌和酵母	鱼肉肠	100 ~ 500 MPa, 5 ~ 25 min, 20 ~ 60℃	400 MPa, 5 min, 30℃ 最优; 菌落总数减少 97.25%, 大肠杆菌、霉菌和酵母致死率 100%, 致病菌未检出	-
[22]	中国	菌落总数	海虾	300 ~ 500 MPa, 10 ~ 30 min, 1 ~ 4 次脉冲处理	400 MPa, 15 min, 3 个压力脉冲, 杀菌 99.3%	-
[23]	中国	菌落总数	鱼籽	150 ~ 450 MPa, 3 ~ 15 min, 1 ~ 4 次脉冲处理	350 MPa, 15 min, 2 个压力脉冲, 杀菌效果最好	-

从以上研究中可以看出,在有些条件下利用超高压技术进行水产品杀菌是可行的。我国学者主要关注水产品超高压杀菌的效果,而国外学者更多地关注产业化目标要求。目前,国外已有超高压杀菌加工水产品进入商业市场,而我国却没有,其原因,一方面是我国对超高压杀菌水产品的质量认证的空白,另一方面是我国对这方面的相关研究还不够。而这两个原因也是同一问题的两个方面。总之,深入地研究是解决我国超高压杀菌加工水产品商业化的必然途径。

## 2 水产品脱壳

超高压水产品脱壳技术通常认为是超高压水产

品杀菌技术研究的副产物。在超高压水产品杀菌技术应用于牡蛎加工的研究过程中,学者发现,当牡蛎置于高压下,压力能够松懈肌肉纤维和壳体的粘联组织,拆开牡蛎肉壳之间蛋白质的束缚,当超高压加工完成时,牡蛎可以在不借助任何去壳工具的作用下轻松去壳。由此,超高压技术解决了牡蛎产业的两大问题:消除牡蛎中有害致病菌和牡蛎脱壳。这也是超高压技术成功应用于牡蛎产业化加工的主要原因。

Hsu 等研究表明超高压 250 MPa 下保压 2 min, 或 300 MPa 下保压 0 min 都能使牡蛎的脱壳率达到 100%<sup>[24]</sup>。He 等研究也表明,在 241 MPa、2 min 的高压处理下,88% 的牡蛎有效脱壳,300 MPa 处理

下,脱壳效率达到 100%<sup>[25]</sup>。类似的研究还在不同国家有开展(表 2),其应用也较多。

在此基础上,超高压水产品脱壳技术被应用于多种贝类水产品,如大龙虾、小龙虾、凡纳滨对虾、贻贝等。在该领域,国内学者也作了较多的研究工作。杨徽等将超高压技术用于凡纳滨对虾的脱壳,研究表明,200 MPa 压力和 3 min 保压时间是较佳的工艺参数,并通过虾仁完整性、汁水流失率、产虾仁率、虾仁颜色以及嫩度参数就凡纳滨对虾超高压进行了评价<sup>[26]</sup>。通过对超高压水产品脱壳技术的文献分析发现,该技术的应用报道比较多,这是因为,一方面,超高压水产品脱壳的压力要求相对较低,比较容易实现;另

一方面,超高压水产品脱壳的机理已比较清楚。

### 3 水产品感官保质

超高压水产品感官保质研究通常认为是伴随着超高压水产品杀菌技术研究发展起来的。它通常指的是超高压杀菌加工参数下对水产品颜色、气味、质地等的影响,与传统热杀菌相比,由于超高压杀菌过程中温度较低,且超高压加工对水产品共价键不产生影响,超高压杀菌后水产品感官品质的保持效果较好,但这并不意味着超高压加工对水产品感官品质有改善的作用,而是相对传统的热加工而言,感官品质有较大的提高。

表 2 超高压脱壳在水产品中研究应用

Tab.2 Applications of HPP shell shucking to aquatic products

文献来源	国家/地区	研究对象	工艺参数	结果	对照
[24]	中国台湾	牡蛎	150 ~ 300 MPa, 0 ~ 2 min, 4℃	250 MPa, 2 min 或 300 MPa, 0 min 均能使脱壳率达到 100%	常压
[25]	美国	牡蛎	207 ~ 310 MPa, 0 ~ 2 min	300 MPa, 0 min 脱壳率达 100%	常压
[26]	中国	凡纳滨对虾	100 ~ 400 MPa, 1 ~ 10 min	最优条件: 200 MPa, 3 min	常压
[27]	日本	牡蛎	40℃ 预热 15 min, 40℃, 80 MPa, 5 min	脱壳率达 100%	-
[28]	爱尔兰	牡蛎	100 ~ 800 MPa, 10 min, 20℃	基本上全部脱壳	常压
[29]	中国	贻贝	200 ~ 400 MPa, 1 ~ 5 min	最优条件: 300 MPa, 2 min	常压
[30]	中国	凡纳滨对虾	100 ~ 300 MPa, 0 ~ 10 min	最优条件: 200 MPa, 3 min	常压

在颜色方面, Yagiz 等应用超高压技术加工新鲜的大马哈鱼, 发现超高压杀菌对鱼肉颜色有较大影响, 当压力为 300 MPa 时, 颜色参数  $L^*$  值、 $b^*$  值增大, 但  $a^*$  值减小<sup>[31]</sup>。杨徽的研究发现, 200 ~ 500 MPa 超高压处理可使凡纳滨对虾头部变黑加速<sup>[26]</sup>。

在气味方面, 超高压杀菌加工对水产品的气味品质也有一定的影响, 这种影响多数是正面的。有研究显示, 超高压加工后的水产品在被藏期间由乳酸菌引起的腐败气味比一般加工方法少很多<sup>[3]</sup>。这是因为超高压加工杀灭或大大减少了鱼和贝类中所含的乳酸菌含量, 并抑制其生长。

在质地方面, Yagiz 等的研究还发现, 高压对鱼肉肉质结构有不利的影 响, 随着压力的升高, 鱼肉硬度增大, 黏性下降。该变化虽然改变了鱼肉的质地, 但对于水产品的后期加工, 如分割、切片等, 是有利的<sup>[31]</sup>。然而超高压对水产品质地的影响不是单向的, Angsupanich 等对鳕鱼的研究发现, 在 0 ~ 300 MPa 压力之间, 随着压力的升高, 鱼肉弹性增强; 200 MPa 时, 粘度急剧下降, 在 400 MPa 和 600 MPa 时, 粘度增大; 而且 400 MPa 和 600 MPa 处理后鱼肉的硬度和咀嚼度都比 200 MPa 和未高压处理强; 但 800 MPa 处理后反而使其下降了<sup>[32]</sup>。进而, 有研究

人员利用这一特性: 日本大洋渔业公司研究所将狭鳕鱼糜采用 400 MPa, 保压 10 min, 制成的鱼糕, 咀嚼感坚实, 破坏强度达 1 200 g, 鱼糕弹性比原来产品(加热 90℃, 保持 30 min)高出 50%<sup>[27]</sup>。

针对超高压水产品的感官保质研究, 还有一些代表性的报道如表 3 所示。

从这些研究中可以发现, 超高压对水产品颜色、气味、质地等的影响既存在一些有利的方面, 也存在一些不利的方面, 且当压力增高时, 不利影响也逐渐增加。通常, 保持水产品的品质并非是水产品超高压加工的主要目的(超高压快速冷冻除外)。这是因为, 在产业化生产中, 单纯地保持水产品的品质, 通常是靠冷冻技术实现的。因此, 超高压水产品保质效应通常是作为超高压水产品杀菌技术研究和应用过程中, 控制和优化杀菌工艺参数的参考指标, 并以此作为限制超高压水产品杀菌工艺参数选择范围的依据。

很多学者在探索超高压水产品保质效应的机理研究同时, 把相关研究延伸到了一个新的领域, 即超高压水产品改性技术。

### 4 水产品改性

超高压水产品改性技术研究源于超高压水产品保

表 3 超高压保质在水产品中研究应用

Tab.3 Applications of HPP quality holding to aquatic products

文献来源	国家	研究对象	研究指标	工艺参数	结果	对照
[33]	爱尔兰	牡蛎	颜色和剪切力	260,400 和 600 MPa,5 min	压力增大, $L^*$ 、 $b^*$ 增大, $a^*$ 减小;压力处理比未处理的剪切力增加	常压
[34]	印度	黑虎虾	颜色和硬度	100,270 和 435 MPa,5 min	压力增大, $L^*$ 、 $b^*$ 增大, $a^*$ 减小,硬度增大	常压
[35]	捷克	鲑鱼肉	生物胺	300 MPa 和 500 MPa	压力升高,生物胺含量减少	常压
[36]	西班牙	三文鱼	表观粘度	300 MPa,10 min,5℃ 和 40℃	高压处理降低鱼肉表观粘度	热处理
[37]	印度	印度白虾	颜色和质构	100,270、435 和 600 MPa	压力增大, $L^*$ 、 $b^*$ 增大, $a^*$ 减小,硬度增大	常压
[38]	法国	鲤鱼	游离脂肪酸	100,140,180 和 200 MPa	高压处理提高 TBA 值	常压
[39]	智利	银三文鱼	气味	135,170 和 200 MPa	超高压处理可降低腐臭味道	常压
[40]	西班牙	三文鱼	质地	210,310 和 400 MPa	高压处理降低了坚实度	常压
[41]	美国	三文鱼、 鲑鱼	柔软度、克雷默剪 切力和汁液度	0.1,414 和 690 MPa	压力升高,剪切力增大, 柔软度下降,汁液度下降	常压和 热处理

质效应的机理探索。Cruz-Romero 等对超高压加工牡蛎产生的物理化学变化进行了研究<sup>[42]</sup>,结果发现高压处理(100~800 MPa、10 min、20℃)导致牡蛎的收缩肌蛋白质变性,这使得含水率相对于未加工的牡蛎增加,而灰分和蛋白质含量相对减少。Gou 等研究发现,高压处理后鲑鱼的氧化三甲胺脱甲基酶活性(该物质活性是造成鲑鱼体内甲醛含量增高的主要原因)由原来的 21.5 nkat/g 下降至 5 nkat/g。在储藏第 12 天,产物二甲基乙酰胺含量明显下降<sup>[43]</sup>。

随着以上研究的不断深入,研究人员开始关注压力引起的蛋白质变性,它与温度的作用机理不同,而且对不同的对象,施加大小不同的温度和压力,其作用效果也是不同的。Campus 等用超高压技术加工深海鲤鱼,发现压力为 300 MPa 和 400 MPa 时能

很好地保持鱼肉的弹性和韧度,200 MPa 的压力却使弹性下降。通过电泳分析和蛋白质印迹分析发现高压可以抑制肌间线蛋白的分解,这其实是蛋白质变性和裂解酶受高压失活导致的<sup>[44]</sup>。其研究还表明,用比较稳定的高压处理由 100 多种肌形质酶构成的鱼肉水溶性蛋白质,在 100 MPa 的压力下 16% 产生了变性,200 MPa 下 40%,400 MPa 下 80% 变性,并且变性难易程度因蛋白质种类而异<sup>[44]</sup>。

随着研究的进一步深入,这方面的报道集中于压力处理对蛋白凝胶的影响(表 4)。与热诱导形成的凝胶不同,高压诱导形成的凝胶更柔韧、弹性好,还能保持原有的色泽和风味。例如,高压形成的青鱼凝胶与 90℃、20 min 热处理诱导形成的相比,更透明,韧性更好,也更易消化。还有研究发现高压引起的肉制品变化可用于提高低品质肉的食用价值<sup>[45]</sup>。

表 4 超高压在水产品改性中研究应用

Tab.4 Applications of HPP to the modification of aquatic products

文献来源	国家	研究对象	改性分子	改性所影响的品质	工艺参数	结果
[47]	英国	三文鱼	鱼肉蛋白质	持水能力	100,150 和 200 MPa, 10 和 20 min	高压处理使持水性下降
[48]	葡萄牙	黑鲈	肌浆蛋白	蛋白质溶解度	100,250 and 400 MPa	高压处理降低蛋白质溶解度
[49]	西班牙	鲑鱼	鱼皮中的蛋白凝胶	水解程度	100,200 和 300 MPa	高压处理加速水解速率
[50]	法国	海鲈	半胱氨酸蛋白酶, D-组织蛋白酶	酶活性	0.1~500 MPa	500 MPa 提高了半胱氨酸蛋白酶的活性, 300 MPa 降低了 D-组织蛋白酶的活性
[51]	葡萄牙	鲟鱼	鱼肉蛋白凝胶	质构和持水性	100~300 MPa	高压处理提高了质构品质和持水性
[52]	泰国	黑虎虾	虾肉蛋白凝胶	破裂力	400~600 MPa	400 MPa 压力和热的结合处理能够提高 虾肉凝胶的破裂力

在该领域,国内学者也进行了研究,陆海霞等利用超高压技术改善秘鲁鲑鱼的凝胶品质<sup>[46]</sup>。研究发现,超高压 300 MPa、10 min 时,秘鲁鲑鱼肌原纤维蛋白凝胶弹性达到最大值;超高压 400 MPa、25 min 时凝胶的硬度达到最大值;超高压 300 MPa、保压 25 min 时凝胶强度达到最高值。

目前,超高压水产品改性研究中,压力处理对蛋白质的影响研究已经成为一个重要的研究领域,它

一方面发展为以蛋白凝胶为对象的与口感、色泽、风味等改良相关的研究分支,一方面发展为以过敏原等医学临床效应为对象的改性蛋白研究分支,该分支已深入到医学领域。

## 5 水产品活性物质提取

超高压提取全称为超冷等静压提取,是在常温下用 100~1 000 MPa 的流体静压力作用于料

液,在预定压力保持一段时间,使原料细胞内外压力达到平衡(有效成分达到溶解平衡)后迅速卸压,使细胞内外渗透压差增大,细胞内的有效成分穿过细胞膜(细胞膜的结构在超高压下发生变化),转移到细胞外的提取液中,达到提取目标成分的目的。

目前,国内外将超高压技术用于非水产品的活性物质提取的研究和应用已较多,提取的目标物质包括黄酮类、皂苷类、多糖类、生物碱类和风味物质等<sup>[53]</sup>。然而,水产品活性物质的超高压提取相关研

究还处于探索期,研究报道不多(表5)。

其中,较为系统的研究报道,如王菁利用超高压技术提取虾下脚料中的虾青素<sup>[55]</sup>,其研究表明,200~300 MPa、5 min的提取条件下,虾青素的提取率较高,并在此基础上确定了虾下脚料的提取压力、保压时间以及提取过程中的料液比、溶剂选择、下脚料粒度等关键参数。此外,通过对所提取虾青素的抗氧化能力研究发现,通过超高压提取的虾青素的抗氧化能力高于超声波和常规化学提取等其他提取技术获得的虾青素。

表5 超高压在水产品活性物质提取中研究应用

Tab.5 Application of HPP to the extraction of aquatic products

文献来源	国家	研究对象	提取物	工艺参数	结果	对照
[54]	西班牙	多佛比目鱼鱼皮	明胶	250 MPa, 10 min 或 20 min; 400 MPa, 10 min 或 400 MPa, 5 min, 5 min 两次脉冲处理	提取时间明显缩短	常压
[55]	中国	南美白对虾虾壳	虾青素	100~600 MPa, 0~20 min	超高压提取产品纯度高, 抗氧化能力强	常压
[56]	中国	草鱼鱼鳞	胶原蛋白	100~300 MPa, 5~25 min	250 MPa, 15 min, 提取率 83.45%, 品质最好	传统热水提取
[57]	中国	巴沙鱼皮	明胶	压力: 0.1~500 MPa; 时间: 0~30 min; 提取温度: 30~70℃; 提取时间: 0.5~6 h	300 MPa, 10 min, 温度 50~60℃, 提取时间 4 h, 得率 75.03%	-

超高压水产品活性物质提取技术将是生物活性物质提取领域的重要发展方向,其原因,一方面是超高压提取具有常温提取和高效提取的优势,即能保证提取效率又能保证提取物的品质;另一方面是水产品,如藻类物质,含有的生物活性物质较高,如藻类中的植物蛋白含量远高于陆生生物,其提取效益较高。另外,超高压技术由于其自身的特点,在水产品活性物质提取的过程中,还会因为其对于水产品内源酶的影响,使得所要提取的物质含量高于其通常的实际含量,此作用称为超高压活性物质富集,国外学者有利用该技术富集藻类中 GABA( $\gamma$ -氨基丁酸)的成功案例<sup>[58]</sup>。

## 6 水产品快速冷冻和解冻

超高压水产品快速冷冻技术是超高压技术应用的一个具有独立基础理论的分支,该研究在国内外尚属起步阶段,其机理是利用水在温度和压力协同作用下的相变点变化。

在一定压力范围内,水与冰的相变温度会随压力升高而下降。就纯水来说,当压力从常压(约 0.1 MPa)升高至 210 MPa 时,相变温度将从 0℃ 下降至 -21℃ 左右(图 1)<sup>[59]</sup>。这就是说,在 210 MPa 的压力下, -21℃ 的水仍然可以不结冰,如果此时压力快速卸掉,水的相变温度将上升至 0℃,而在这一瞬间,超低温的水却仍然没有结冰,这样就出现了一个很大的超冷度(水的温度低于结冰相变温度的差

值)(图 1)。这种利用快速卸压来创造非常大超冷度的快速冷冻新方法被称为 PSF 冷冻法或卸压超冷速冻法。该方法的基本过程有 4 步:加压(图 1 中 A-B);在一定压力下冷却(图 1 中 B-C,但 C 点的温度不能低于结冰相变温度);快速卸压(图 1 中 C-D-E-F),产生非常大的超冷度(图 1 中 D-E),形成冰晶核;在常压下完成冷冻(图 1 中 F-G)。

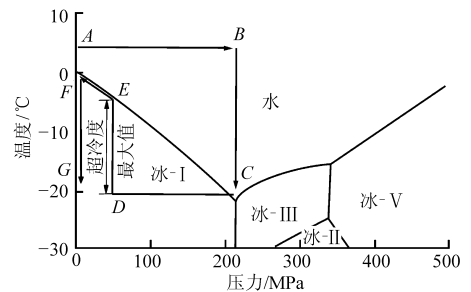


图1 超高压条件下水的相变及 PSF 冷冻法原理

Fig.1 Procedure of pressure shift freezing based on water-ice phase diagram

冷冻是一种被广泛使用的食品和生物材料保存方法,冰晶体的大小和形成的位置被认为是影响冷冻产品品质的最重要因素。在传统冷冻过程中,热量总是通过热传导的方式由中心传递至表面,其冰晶的形成是从表面逐步移向中心。由于受冷却速度的限制,传统的冷冻过程一般比较缓慢,形成粗大而不均匀的冰晶体,从而导致生物组织损伤严重、细胞破裂、解冻后汁液流失等后果,给产品的品质和风味带来严重影响<sup>[60]</sup>。

冷冻方式和冷冻速率是影响冰晶体形成和长大的关键要素<sup>[61]</sup>。Burke 等曾报道超冷度每增大 1℃, 冰晶核形成的速率就会增加约 10 倍, 由于能创造非常大的超冷度, PSF 冷冻可以形成无数微小的、分布均匀的冰晶核, 使冷冻产品中的冰晶体细小、均匀<sup>[62]</sup>。因此, PSF 冷冻法可以大幅有效地减小冰晶体的尺寸, 大大降低甚至消除冷冻组织的损伤, 有效提高冷冻产品的品质。

近年来, PSF 冷冻法已成为超高压研究的新热点, 其水产品研究对象包括: 三文鱼<sup>[63-64]</sup>、大比目鱼<sup>[65-66]</sup>等(表 6)。这些研究表明 PSF 冷冻对生物组织的损伤要比传统冷冻法小得多。Fernández 等以质量分数 10% 的明胶为试样, 进行 PSF 冷冻研究, 结果表明 PSF 冷冻能产生细小均匀的冰晶体<sup>[67]</sup>。Tironi 等研究表明 PSF 冷冻能有效地减少黑鲈解冻后的汁液流失, 但 200 MPa 压力将使蛋白质明显变性, 色泽显著改变<sup>[68]</sup>。

高压解冻从广义上讲是高压冷冻的逆过程, 如图 2 所示高压解冻过程分为 3 步: 首先将冷冻样品加压到一定压力(A-B); 样品在高压下完成解冻(B-C-D); 最后快速卸压完成高压解冻过程(D-E)。冷冻样品在高压下, 冻结点的下降明显, 增加

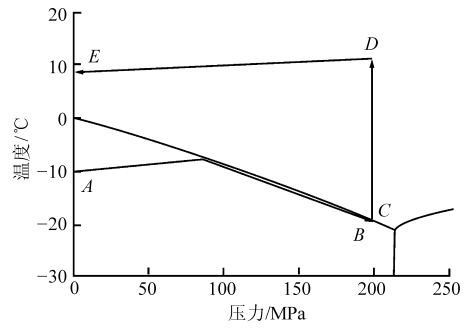


图 2 超高压条件下水的相变及 PSF 解冻法原理

Fig. 2 Procedure of high pressure thawing based on water-ice phase diagram

了样品与环境温度的温度差, 这有效地增大了解冻的驱动力和解冻速率<sup>[69]</sup>; 另外, 在高压下冰的熔解热焓比在常压下的熔解热焓显著降低, 如在 193 MPa 压力下, 冰的熔解热焓从常压下 333 kJ/kg 减少至 241 kJ/kg。熔解热焓的降低, 减少了冰转化成水所需的从环境中吸收的热量, 从而能够加速冻结食品的熔解, 减少解冻时间<sup>[70]</sup>。

与高压冻结相比, 国内外对高压解冻的研究相对较少(表 6)。对高压解冻的研究报道最早可追溯到 20 世纪 60 年代, Taylor 等研究发现在 255 MPa 的压力下完成解冻过程, 可以提高人结膜细胞的存活率<sup>[73]</sup>。

表 6 超高压快速冷冻和解冻在水产品中研究应用

Tab. 6 Applications of PSF and HPT to aquatic products

文献来源	国家	研究对象 (冷冻/解冻)	研究指标	工艺参数	结果	对照
[63]	加拿大	三文鱼 (冷冻)	冷冻过程中传热特性和冰晶特征	100 MPa、-8.4℃; 150 MPa、-14℃; 200 MPa、 -20℃	200 MPa 冷冻产生的冰晶最小最均匀, 冷冻时间最短	空气冷冻和液体浸没冷冻
[64]	法国	三文鱼(冷冻)	冰晶	200 MPa、-18℃; 100 MPa、 -10℃	高压冷冻产生的冰晶截面面积小, 且分布更均匀	空气冷冻, 表面接触冷冻
[65]	法国	大比目鱼(冷冻)	冰晶、质构、盐溶蛋白	200 MPa、-18℃	高压冷冻的龙虾肉硬度高, 盐溶蛋白含量低, 生成冰晶小	空气冷冻
[66]	法国	大比目鱼(冷冻)	冰晶和解冻汁液流失	140 MPa、-14℃	高压冷冻产生的冰晶小且均匀, 贮藏 75 d 后, 解冻时汁液流失明显减少	空气冷冻
[69]	法国	白斑角鲨和扇贝 (解冻)	汁液流失	100、150 和 200 MPa	150 MPa 压力最优	常压下 12℃ 水解冻
[70]	德国	鳕鱼、牙鳕鱼、鲑鱼等(解冻)	感官特征、总菌落数、pH 值、持水力、质构	200 MPa	高压解冻后的样品颜色变浅, 解冻后持水率下降, 汁液减少, 硬度增加; 总菌落数明显减少; 蛋白出现变性	常压下 15℃ 水解冻
[71]	加拿大	三文鱼(解冻)	颜色、汁液流失、质构	100、150 和 200 MPa	压力越高, 解冻时间越短, 低于 150 MPa 能有效保持颜色和硬度不变	常压下水解冻 (4℃ 和 20℃)
[72]	法国	三文鱼(解冻)	含水率、李斯特菌、解冻时间	200 MPa	含水率降低; 200 MPa 处理降低 3 个对数数量级的李斯特菌菌落; 解冻时间缩短	常压下 5℃ 水 解冻

对高压解冻的研究主要集中在高压解冻的传热过程,以及高压解冻对产品品质的影响。Okamoto 研究认为与传统的低温解冻和流水解冻相比较,高压解冻能够有效保持解冻过程中食品的品质<sup>[74]</sup>; Takai 等发现高压解冻过程能够缩短解冻过程,但是高压的作用会引起鲑鱼蛋白变性,最终导致解冻后的鲑鱼色泽改变<sup>[75]</sup>; Murakami 等通过研究也发现样品经高压解冻产生发生变化( $L^*$ 值增大)、蛋白的持水力降低,但是微生物能够控制在一定的水平内<sup>[76]</sup>。Zhu 等通过对三文鱼高压解冻后的品质分析认为:较低压力的高压解冻能够有效保持三文鱼样品的品质(汁液流失,颜色和质构),而较高的压力虽然能够更多地缩短解冻时间,但是品质受高压的影响比较大<sup>[71]</sup>。

可见,超高压水产品快速冷冻技术研究已有一些优势,但是相关研究需要超高压研究设备具有温度监控系统,因此目前国内外只有少数几个实验室能开展这方面的研究。其应用不仅需要相关研究的进一步完善和深入,还对超高压产业化装备有精确控温和高效传热等方面的要求。因此,其应用前景广阔,但还需各学科的交叉支持。

## 7 结论

超高压加工技术在水产品中的研究与应用应主要围绕以下几个方面:

(1) 贝类水产品脱壳与杀菌保鲜的联合实施技术及产业化工艺优化研究与应用。应考虑脱壳与杀菌保鲜两个问题共同解决的工艺流程以及配套设备的整体开发。

(2) 鱼类水产品感官品质与蛋白改性的联合研究与应用。应考虑保证水产品感官品质具有消费可接受程度下的蛋白改性,其中蛋白改性研究除了对感官品质受高压影响的机理探索研究,还应包括蛋白改性后的有害物质产生,如过敏原蛋白的产生等,确保食品安全。

(3) 藻类水产品的活性物质提取技术研究与应用。应结合超高压技术的优势与特点,充分利用提取与富集两种效能,进一步提高水产资源的利用效率。

(4) 深入开展超高压水产品快速冷冻的研究,探明水产品快速冷冻的冰相变化规律,发挥快速冷冻对水产品品质保持的优势,并结合相关设备的研发与升级,开展产业化应用研究。

## 参 考 文 献

- Martin D E, Hall S G. Oyster shucking technologies: past and present[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2006, 41(3): 223 ~ 232.
- Calik H, Morrissey M, Reno P, et al. Effect of high-pressure processing on *Vibrio parahaemolyticus* strains in pure culture and pacific oysters[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(4): 1 506 ~ 1 510.
- Lopez-Caballero M, Perez-Mateos M, Montero P, et al. Oyster preservation by high-pressure treatment[J]. Journal of Food Protection, 2000, 63(2): 196 ~ 201.
- Kural A G, Shearer A E, Kingsley D H, et al. Conditions for high pressure inactivation of *Vibrio parahaemolyticus* in oysters[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 127(1): 1 ~ 5.
- Kural A G, Chen H. Conditions for a 5-log reduction of *Vibrio vulnificus* in oysters through high hydrostatic pressure treatment[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 122(1): 180 ~ 187.
- 张晓敏, 吴立杰, 吴佳艳, 等. 牡蛎的超高压加工技术研究[J]. 中国食物与营养, 2010(1): 55 ~ 58.  
Zhang Xiaomin, Wu Lijie, Wu Jiayan, et al. Study on the ultra R-high pressure processing technology of oyster[J]. Food and Nutrition in China, 2010(1): 55 ~ 58. (in Chinese)
- 夏远景, 陈淑花, 薛路舟, 等. 超高压处理牡蛎灭菌实验研究及人工神经网络模拟[J]. 现代食品科技, 2009, 25(5): 530 ~ 533.  
Xia Yuanjing, Chen Shuhua, Xue Luzhou, et al. Experimental study and artificial neural network simulation of ultra-high pressure sterilization of oysters[J]. Modern Food Science and Technology, 2009, 25(5): 530 ~ 533. (in Chinese)
- López-Caballero M, Pérez-Mateos M, Borderias J, et al. Extension of the shelf life of prawns (*Penaeus japonicus*) by vacuum packaging and high-pressure treatment[J]. Journal of Food Protection, 2000, 63(10): 1 381 ~ 1 388.
- 谢慧明, 张文成, 潘见, 等. 淡水小龙虾中金黄色葡萄球菌超高压杀菌模型建立研究[J]. 食品科学, 2006, 27(11): 214 ~ 216.  
Xie Huiming, Zhang Wencheng, Pan Jian, et al. Modeling the sterilization of *Staphylococcus aureus* in *Crayfish*. *Germ Falls* by UHP[J]. Food Science, 2006, 27(11): 214 ~ 216. (in Chinese)
- 王瑞, 乔长晟, 贾鹏, 等. 生鲜毛蚶超高压杀菌工艺的研究[J]. 食品工业科技, 2007, 28(1): 156 ~ 158.
- Fletcher G C, Youssef J F, Gupta S. Research issues in inactivation of *Listeria monocytogenes* associated with New Zealand greenshell mussel meat (*Perna canaliculus*) using high-pressure processing[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2008, 17(2): 173 ~ 194.
- Gómez-Estaca J, Montero P, Giménez B, et al. Effect of functional edible films and high pressure processing on microbial and oxidative spoilage in cold-smoked sardine (*Sardina pilchardus*) [J]. Food Chemistry, 2007, 105(2): 511 ~ 520.
- Ramirez-Suarez J C, Morrissey M T. Effect of high pressure processing (HPP) on shelf life of albacore tuna (*Thunnus alalunga*)

- minced muscle[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*,2006,7(1):19~27.
- 14 Paarup T, Sanchez J A, Pelúez C, et al. Sensory, chemical and bacteriological changes in vacuum-packed pressurised squid mantle (*Todaropsis eblanae*) stored at 4°C [J]. *International Journal of Food Microbiology*,2002,74(1):1~12.
- 15 李庆领,宋吉昌,吴俊飞,等. 海参超高压保鲜的工艺研究[J]. *食品科学*,2009,30(12):117~119.  
Li Qingling, Song Jichang, Wu Junfei, et al. Fresh-keeping effects of ultrahigh pressure treatment on fresh sea cucumber[J]. *Food Science*,2009,30(12):117~119. (in Chinese)
- 16 Brutti A, Rovere P, Cavallero S, et al. Inactivation of *Anisakis simplex* larvae in raw fish using high hydrostatic pressure treatments [J]. *Food Control*,2010,21(3):331~333.
- 17 Gou J, Xu H, Choi G-P, et al. Application of high pressure processing for extending the shelf-life of sliced raw squid [J]. *Food Science and Biotechnology*,2010,19(4):923~927.
- 18 Guðbjörnsdóttir B, Jonsson A, Hafsteinsson H, et al. Effect of high-pressure processing on *Listeria* spp. and on the textural and microstructural properties of cold smoked salmon [J]. *LWT—Food Science and Technology*,2010,43(2):366~374.
- 19 Briones L S, Reyes J E, Tabilo-Munizaga G E, et al. Microbial shelf-life extension of chilled Coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) and abalone (*Haliotis rufescens*) by high hydrostatic pressure treatment [J]. *Food Control*,2010,21(11):1530~1535.
- 20 陈小娥,孙龙召,方旭波,等. 腌制生食泥螺的超高压杀菌工艺研究[J]. *粮油食品科技*,2009,17(4):77~79.  
Chen Xiaoe, Sun Longzhao, Fang Xubo, et al. Study on sterilization of pickled raw *Bullacta exarata* by ultra-high pressure [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*,2009,17(4):77~79. (in Chinese)
- 21 陆海霞,杭瑜瑜,励建荣. 鱼肉肠的超高压杀菌工艺优化[J]. *食品科学*,2012,33(12):89~92.  
Lu Haixia, Hang Yuyu, Li Jianrong. Optimization of ultra high pressure sterilization conditions for fish sausage [J]. *Food Science*,2012,33(12):89~92. (in Chinese)
- 22 宋吉昌,李庆领. 海虾超高压灭菌的试验研究[J]. *渔业现代化*,2009,36(1):42~46.  
Song Jichang, Li Qingling. Experimental study on ultra-high pressure treatment of fresh marine shrimp [J]. *Fishery Modernization*,2009,36(1):42~46. (in Chinese)
- 23 敬琼,冯志云,康鹏天. 鱼籽超高压杀菌技术研究[J]. *中国水产*,2012(10):70~72.
- 24 Hsu K C, Hwang J S, Chi H Y, et al. Effect of different high pressure treatments on shucking, biochemical, physical and sensory characteristics of oysters to elaborate a traditional Taiwanese oyster omelette [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,2010,90(3):530~535.
- 25 He H, Adams R, Farkas D, et al. Use of high-pressure processing for oyster shucking and shelf-life extension [J]. *Journal of Food Science*,2002,67(2):640~645.
- 26 杨徽. 基于超高压技术的虾脱壳工艺与品质检测研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.  
Yang Hui. High pressure shelling of shrimp and quality detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2011. (in Chinese)
- 27 室越章. 牡蛎むき身装置の開発[J]. *日本水産学会誌*,2004,70(5):671~673. (in Japanese)  
Murokoshi A. Development of a device for shucking oysters [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*,2004,70(5):671~673.
- 28 Cruz-Romero M, Smiddy M, Hill C, et al. Effects of high pressure treatment on physicochemical characteristics of fresh oysters (*Crassostrea gigas*) [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*,2004,5(2):161~169.
- 29 王敏. 超高压对贻贝脱壳及品质的影响研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.  
Wang Min. The effect of high pressure treatment on the shucking of mussels and meat quality [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2012. (in Chinese)
- 30 易俊洁,丁国徽,胡小松,等. 南美白对虾脱壳工艺比较及其对虾仁品质的影响[J]. *农业工程学报*,2012,28(17):287~292.  
Yi Junjie, Ding Guowei, Hu Xiaosong, et al. Comparison of shucking techniques for white shrimp and its effect on quality of peeled shrimp [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2012,28(17):287~292. (in Chinese)
- 31 Yagiz Y, Kristinsson H G, Balaban M O, et al. Effect of high pressure processing and cooking treatment on the quality of Atlantic salmon [J]. *Food Chemistry*,2009,116(4):828~835.
- 32 Angsupanich K, Ledward D. High pressure treatment effects on cod (*Gadus morhua*) muscle [J]. *Food Chemistry*,1998,63(1):39~50.
- 33 Cruz-Romero M, Kerry J, Kelly A. Changes in the microbiological and physicochemical quality of high-pressure-treated oysters (*Crassostrea gigas*) during chilled storage [J]. *Food Control*,2008,19(12):1139~1147.
- 34 Kaur B P, Kaushik N, Rao P S, et al. Effect of high-pressure processing on physical, biochemical, and microbiological characteristics of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) [J]. *Food and Bioprocess Technology*,2013,6(6):1390~1400.
- 35 Matějková K, Křížek M, Vácha F, et al. Effect of high-pressure treatment on biogenic amines formation in vacuum-packed trout flesh (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Food Chemistry*,2013,137(1~4):31~36.
- 36 Ojagh S, Núñez-Flores R, López-Caballero M, et al. Lessening of high-pressure-induced changes in Atlantic salmon muscle by the combined use of a fish gelatin-lignin film [J]. *Food Chemistry*,2011,125(2):595~606.
- 37 Bindu J, Ginson J, Kamalakanth C, et al. Physico-chemical changes in high pressure treated Indian white prawn (*Fenneropenaeus indicus*) during chill storage [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*,2013,17:37~42.
- 38 Sequeira-Munoz A, Chevalier D, LeBail A, et al. Physicochemical changes induced in carp (*Cyprinus carpio*) fillets by high



- pressure processing at low temperature[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*,2006,7(1):13~18.
- 39 Aubourg S P,Rodríguez A,Sierra Y,et al. Sensory and physical changes in chilled farmed coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*): effect of previous optimized hydrostatic high-pressure conditions[J]. *Food and Bioprocess Technology*,2013,6(6):1539~1549.
- 40 Picouet P A,Cofan-Carbo S,Vilaseca H,et al. Stability of sous-vide cooked salmon loins processed by high pressure[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*,2011,12(1):26~31.
- 41 Mckenna D,Nanke K,Olson D. The effects of irradiation, high hydrostatic pressure, and temperature during pressurization on the characteristics of cooked-reheated salmon and catfish fillets[J]. *Journal of Food Science*,2003,68(1):368~377.
- 42 Cruz-Romero M,Kelly A,Kerry J. Effects of high-pressure and heat treatments on physical and biochemical characteristics of oysters (*Crassostrea gigas*)[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*,2007,8(1):30~38.
- 43 Gou J,Lee H-Y,Ahn J. Effect of high pressure processing on the quality of squid (*Todarodes pacificus*) during refrigerated storage [J]. *Food Chemistry*,2010,119(2):471~476.
- 44 Campus M,Addis M F,Cappuccinelli R,et al. Stress relaxation behaviour and structural changes of muscle tissues from Gilthead Sea Bream (*Sparus aurata* L. ) following high pressure treatment[J]. *Journal of Food Engineering*,2010,96(2):192~198.
- 45 Hwang J-S,Lai K-M,Hsu K-C. Changes in textural and rheological properties of gels from tilapia muscle proteins induced by high pressure and setting[J]. *Food Chemistry*,2007,104(2):746~753.
- 46 陆海霞,张蕾,李学鹏,等. 超高压对秘鲁鱿鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. *中国水产科学*,2010,17(5):1107~1114.  
Lu Haixia,Zhang Lei,Li Xuepeng,et al. Effect of ultra-high pressure on gel properties of myofibril of jumbo squid,*Dosidicus gigas* [J]. *Journal of Fishery Science of China*,2010,17(5):1107~1114. (in Chinese)
- 47 Lakshmanan R,Parkinson J A,Piggott J R. High-pressure processing and water-holding capacity of fresh and cold-smoked salmon (*Salmo salar*) [J]. *LWT—Food Science and Technology*,2007,40(3):544~551.
- 48 Teixeira B,Fidalgo L,Mendes R,et al. Changes of enzymes activity and protein profiles caused by high pressure processing in sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,2013,61(11):2851~2860.
- 49 Alemán A,Giménez B,Gómez-Guillén M C,et al. Enzymatic hydrolysis of fish gelatin under high pressure treatment [J]. *International Journal of Food Science & Technology*,2011,46(6):1129~1136.
- 50 Cheret R,Delbarre-Ladrat C,de Lamballerie-Anton M,et al. High-pressure effects on the proteolytic enzymes of sea bass (*Dicentrarchus labrax* L. ) fillets[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,2005,53(10):3969~3973.
- 51 Cardoso C L,Mendes R O,Saraiva J A,et al. Quality characteristics of high pressure-induced hake (*Merluccius capensis*) protein gels with and without MTGase[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*,2010,19(3~4):193~213.
- 52 Checharoen J,Kijroongrojana K,Benjaku S. Improvement of physical properties of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) meat gel induced by high pressure and heat treatment[J]. *Journal of Food Biochemistry*,2011,35(3):976~996.
- 53 Zhang Shouqin,Zhu Junjie,Wang Changzhen. Novel high pressure extraction technology [J]. *International Journal of Pharmaceutics*,2004,278(2):471~474.
- 54 Gómez-Guillén M,Giménez B,Montero P. Extraction of gelatin from fish skins by high pressure treatment [J]. *Food Hydrocolloids*,2005,19(5):923~928.
- 55 王菁. 超高压辅助提取虾壳中虾青素的研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.  
Wang Jing. Studies on the extraction of astaxanthin from shrimp shell assisted by high pressure processing [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2013. (in Chinese)
- 56 温馨. 草鱼鱼鳞胶原蛋白提取纯化工艺研究[D]. 福州:福建农林大学,2012.  
Wen Xin. Study on grass carp fish scale collagen extraction and purification [D]. Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University,2012. (in Chinese)
- 57 张宇昊,马良,师莹. 鱼皮明胶的超高压辅助提取工艺[J]. *食品科学*,2011,32(6):99~103.  
Zhang Yuhao,Ma Liang,Shi Xuan. Ultra-high pressure-assisted extraction of gelatin from fish skin[J]. *Food Science*,2011,32(6):99~103. (in Chinese)
- 58 Shimada M,Hasegawa T,Nishimura C,et al. Anti-hypertensive effect of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA)-rich chlorella on high-normal blood pressure and borderline hypertension in placebo-controlled double blind study [J]. *Clinical and Experimental Hypertension*,2009,31(4):342~354.
- 59 Bridgman P W. Water in the liquid and five solid forms under pressure [J]. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*,1912,XLVII(13):441~558.
- 60 Bello R A,Luft J H,Piggott G M. Ultrastructural study of skeletal fish muscle after freezing at different rates [J]. *Journal of Food Science*,1982,47(5):1389~1394.
- 61 Martino M,Otero L,Sanz P,et al. Size and location of ice crystals in pork frozen by high-pressure-assisted freezing as compared to classical methods [J]. *Meat Science*,1998,50(3):303~313.
- 62 Burke M,George M,Bryant R. Water in plant tissues and frost hardness [M] // Duckworth R B. Water relations of foods. London:Academic Press,1975:111~135.
- 63 Zhu S,Bail A L,Ramaswamy H. Ice crystal formation in pressure shift freezing of Atlantic salmon (*Salmo salar*) as compared to classical freezing methods [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*,2003,27(6):427~444.

- 64 Alizadeh E, Chapleau N, de-Lamballerie M, et al. Impact of freezing process on salt diffusivity of seafood; application to salmon (*salmo salar*) using conventional and pressure shift freezing[J]. Food and Bioprocess Technology, 2009, 2(3): 257 ~ 262.
- 65 Chevalier D, Sequeira-Munoz A, Le Bail A, et al. Effect of freezing conditions and storage on ice crystal and drip volume in turbot (*Scophthalmus maximus*): evaluation of pressure shift freezing vs. air-blast freezing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2000, 1(3): 193 ~ 201.
- 66 Chevalier D, Sequeira-Munoz A, Le Bail A, et al. Effect of pressure shift freezing, air-blast freezing and storage on some biochemical and physical properties of turbot (*Scophthalmus maximus*) [J]. LWT—Food Science and Technology, 2000, 33(8): 570 ~ 577.
- 67 Fernández P, Otero L, Guignon B, et al. High-pressure shift freezing versus high-pressure assisted freezing: effects on the microstructure of a food model[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(4): 510 ~ 522.
- 68 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): C381 ~ C387.
- 69 Rouillé J, LeBail A, Ramaswamy H, et al. High pressure thawing of fish and shellfish[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 53(1): 83 ~ 88.
- 70 Schubring R, Meyer C, Schlüter O, et al. Impact of high pressure assisted thawing on the quality of fillets from various fish species [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2003, 4(3): 257 ~ 267.
- 71 Zhu S, Ramaswamy H, Simpson B. Effect of high-pressure versus conventional thawing on color, drip loss and texture of Atlantic salmon frozen by different methods[J]. LWT—Food Science and Technology, 2004, 37(3): 291 ~ 299.
- 72 LeBail A, Mussa D, Rouillé J, et al. High pressure thawing. Application to selected sea-foods[J]. Progress in Biotechnology, 2002, 19: 563 ~ 570.
- 73 Taylor A C. The physical state transition in the freezing of living cells[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1960, 85(2): 595 ~ 609.
- 74 Okamoto A, Suzuki A. Effects of high hydrostatic pressure-thawing on pork meat[J]. Progress in Biotechnology, 2002, 19: 571 ~ 576.
- 75 Takai R, Kozhima T, Suzuki T. Low temperature thawing by using high-pressure[M] // Les Actes du XVIII e Congrès International du Froid. Montreal, 1991: 1 951 ~ 1 955.
- 76 Murakami T, Kimura I, Yamagishi T, et al. Thawing of frozen fish by hydrostatic pressure[J]. Colloques Institut National de la Sante et de la Recherche Medicale Colloques et Seminaires, 1992: 329 ~ 329.

## Research and Application on High-pressure Processing of Aquatic Products

Zhu Songming Su Guangming Wang Chunfang Zhan Yao Hu Feifei Yu Yong  
(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** The advantages of high pressure (HP) technology have been widely accepted by researchers in domestic and overseas in recent years. However, research and development on HP processing of aquatic products didn't attract much attention in last century as compared to that of fruit and vegetable products. Since entering the new century, more and more research work has been done focusing on HP processing of aquatic products. Literature information on HPP of aquatic products was analyzed, including pasteurization, preservation, HP freezing and thawing, shellfish shucking, compound extraction and functional modification. The significance, applications and prospect of these research achievements were introduced and discussed. The main research fields for future development on HP processing of aquatic products were explored and presented.

**Key words:** Food processing Aquatic product High pressure Pasteurization Preservation