

带壳类水产品的壳肉分离技术研究进展

赵煜, 朱旭, 朱建平*, 赵家宾, 方国艾

(上海海洋大学 工程学院, 上海 201306)

摘要: 随着带壳类水产品产量的逐年增加, 传统销售和手工加工模式(鲜售、醉渍和手工去壳等)已经不能缓解市场供过于求的矛盾。对带壳类水产品进行自动化深加工既可以提升带壳类水产品的加工效率, 确保食品安全, 又能保证劳动者的身体健康, 从而促进中国水产品加工业的高质量发展。壳肉分离技术是带壳类水产品深加工的前提, 对促进带壳类水产品深加工设备的发展具有重要意义。带壳类水产品的壳肉分离技术主要分为预处理和去壳两类技术, 本文综述了加热/冷却预处理、酶预处理、超高压预处理及联合法预处理等几种预处理技术, 以及切割法、挤压法、离心法和高压水喷射法等几种去壳技术的研究进展。针对带壳类水产品壳肉分离过程中存在的不足, 提出未来应向加工装置大型化、自动化和智能化方向发展, 并加强船载加工设备和蟹类深加工设备的研发等, 以期为进一步开展带壳类水产品的自动化加工设备研究提供有益参考。

关键词: 带壳类水产品; 壳肉分离; 预处理; 去壳; 自动化

中图分类号: S 985

文献标志码: A

中国是目前世界上最大的水产养殖和捕捞国^[1], 水产品产量一直呈增长的态势。据统计, 2021年中国甲壳类及贝类水产品养殖总产量分别约为643.91万t和1545.67万t^[2]。带壳类水产品一般包含贝类、虾类和蟹类等几大种类, 其深加工在中国经济发展中占有重要地位, 是中国渔业未来向规模化、整体化发展的重要方向。

对带壳类水产品进行深加工, 不仅可以解决其集中上市供过于求, 以及离开水易死亡和变质的问题^[3-4], 还可以提高这类水产品的综合利用率, 增加经济价值^[5]。去壳是带壳类水产品加工的首要步骤。据调查, 目前中国的带壳类水产品大部分仍采用活体销售, 用于餐桌食用; 另一部分被用于商业化生产, 但主要依靠人工剥壳, 水产品加工行业的机械化、自动化程度不高^[6]。

人工剥壳存在的主要问题有3方面: 一是, 水产品供应受季节、天气等诸多因素的影响, 加工有时间限制; 二是, 使用手工剥壳器械(如锤、镦、铲、针、叉和剪刀等)虽在一定程度上可以降低加工商的生产成本, 但这种方式耗时长、劳动强度大, 且易对肉质造成污染, 影响食品安全; 三是,

水产品加工环境较为潮湿, 且一些甲壳较为坚硬锋利, 长期在此环境下工作很容易损害操作者健康并引发疾病。因此, 研究带壳类水产品壳肉分离技术对促进水产品深加工装备发展乃至中国渔业高水平发展具有重要意义。本文综述了带壳类水产品的去壳加工技术研究进展, 以期为进一步开展带壳类水产品的自动化加工装备研究提供科学参考。

1 带壳类水产品的形态特征及壳肉连接方式

基于水产品生物学特征的分析是确定其壳肉分离方式的重要参考依据, 对分离原理的确定、分离机构的设计乃至整个深加工装备的设计都具有重要的意义。

1.1 带壳类水产品形态特征

不同水产品具有不同的形态特征。贝类水产品加工对象多为牡蛎、扇贝和贻贝等, 其物理特征非常类似。以海湾扇贝(*Argopecten irradians*)为例, 其贝壳呈扇形, 左右两壳几乎对称, 右壳稍高于左壳, 左右壳连接部分平直。贝壳内部主要包含贝柱、

收稿日期: 2023-03-23

基金项目: 上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心(2021科技02-12)

作者简介: 赵煜(1982—), 女, 博士, 讲师。E-mail: y-zhao@shou.edu.cn

通信作者: 朱建平(1977—), 女, 博士, 副教授。E-mail: jp-zhu@shou.edu.cn

裙边和内脏等结构，贝柱及其周围结构通常附着在右壳上^[7]，其中，可食用部分为贝柱和裙边。

虾类水产品加工对象多为凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*)、克氏原螯虾 (*Procambarus clarkii*) 和口虾蛄 (*Oratosquilla oratoria*) 等，其虾尾特征极其相似。以凡纳滨对虾为例，其主要分为头部、胸部和腹部3部分，全身甲壳较薄。虾头一般为不可食用部分，主要由眼、触角、口器和鳃等组成；胸部有3对足，但因含肉量较少，一般也不食用；腹部为主要食用部分，约占虾整体长度的2/3，虾仁肉质饱满，外部只有一层腹部甲壳包裹。

蟹类水产品加工对象多为中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 和三疣梭子蟹 (*Fortunus trituberculatus*) 等，蟹类结构较为相似。以中华绒螯蟹为例，其体形近圆形，背面隆起，身体结构主要分为头胸部、腹部和胸足三大部分，整体外壳较为坚硬。蟹头部包含蟹嘴、胃和心脏等不可食用部分；胸足包含蟹肉，可食用，但其坚硬锋利，剥壳难度较大；蟹身为主要食用部分，其位于蟹腹部，背甲下方，背甲与蟹身之间含有营养价值较高的蟹黄和不可食用的蟹腮。

1.2 壳肉连接方式

不同带壳水产品的壳肉连接方式不同，壳肉分离的目的也不同，由此决定了其壳肉分离的思路和方法也存在较大差异。其中，贝类壳肉分离的目的是将贝壳打开，取得其中的贝肉和贝柱。贝类内部结构中使贝壳保持紧闭的是横纹肌和平滑肌，二者共同组成闭壳肌。贝柱为闭壳肌的主要部分，其中，横纹肌反应灵敏，具有较强的收缩能力，能快速关闭贝壳；平滑肌动作迟缓，能保持贝壳处于闭合状态。贝壳打开主要依靠韧带实现，当横纹肌松弛时，韧带展开使两壳张开。因此，贝类壳肉分离的主要思路是设法刺激横纹肌，使其失活，进而使左右两贝壳张开。

虾类壳肉分离的目的是将虾头及虾尾的虾壳去除，以获得完整虾仁。其中，虾尾的虾壳与虾仁之间主要依靠虾壳内部的表皮内纤维微管相互交叉，牢固地连接在肌肉上。因此，虾类壳肉分离的主要思路是破坏虾壳与虾仁之间的连接蛋白，使其失活或断裂失去黏结力，进而借助外力作用将虾仁取出。

蟹类壳肉分离的目的有二，其一是去除背甲以获得蟹身里的蟹黄，其二是去除蟹身上的蟹壳以获得蟹肉。其中，蟹黄黏附在蟹身中间部位，蟹壳和蟹肉之间主要依靠连接蛋白连接。因此，蟹类壳肉

分离的主要思路是首先去除背甲以获得蟹黄，然后破坏壳肉连接处的连接蛋白，使其失活变性后，借助壳肉分离方法获得蟹肉。

综上所述，贝类和虾类水产品的形态特征较为简单，蟹类较为复杂，在一定程度上增加了蟹类水产品壳肉分离的难度。贝类水产品主要依靠闭壳肌实现左右贝壳的紧闭，而虾类和蟹类水产品主要依靠壳肉之间的连接蛋白实现二者相连。因此，带壳类水产品壳肉分离的主要思路是先使连接处的闭壳肌或连接蛋白变性失活，然后借助外力作用实现壳肉分离。

2 壳肉分离的预处理

预处理即用于机械或人工去壳的前处理，通常是指使用一些物理或化学方法，如加热/冷却、酶和超高压等，破坏壳肉连接处的连接蛋白，从而降低壳肉之间的连接程度，以便于实现壳肉分离。预处理技术广泛应用于虾、蟹类水产品的加工，其主要作用是杀菌、促进脱壳和改善肉质等^[8-9]，但经过预处理后水产品的一些物理和化学特性也会发生改变，从而导致其风味和营养价值发生变化。

2.1 加热/冷却预处理

加热/冷却预处理是通过高温/冷却的方式对水产品进行预处理，主要包括高温蒸汽、水浴和冷冻等方式，使肌肉受温度影响丧失闭合功能，从而促进外壳与肉质分离的方法。经加热处理的水产品不仅肉壳容易分离，还可以杀死许多致病菌，一定程度上保证了食品的安全。该方法主要应用于贝类水产品的去壳预处理，在对虾类水产品去壳预处理中也有应用。

加热/冷却预处理方法在贝类水产品中最先应用于牡蛎去壳，后来逐渐扩展到扇贝、贻贝等贝类去壳。1995年，集美大学陈木荣等^[10]率先研究了高温对牡蛎去壳的影响，虽实现了中小规模的牡蛎去壳加工，但未考虑到高温热处理对牡蛎外观及汁液流失、营养价值降低等方面的影响。福建农林大学刘志杰等^[11]测定了开壳牡蛎营养价值最优时牡蛎内部最佳温度，找到了方便控制加热蒸汽温度和时间的方法。

随着牡蛎去壳技术的研究越来越多，人们开始研究扇贝去壳方法。2013年，张静等^[12]和弋景刚等^[13]在牡蛎去壳技术的基础上，研究了高温蒸汽对扇贝去壳效果的影响，并实现了将XMT智能温控技术应用到蒸汽发生器上，进一步提高了扇贝

去壳装置的自动化。高温方式虽然能在一定程度上帮助去壳,但经过长时间高温蒸煮的扇贝,肉质已经熟透,甚至变性,只能做成干成品售卖,难以得到消费者的普遍认可,因此,冷/热交替预处理方法逐渐开始应用于扇贝和贻贝等贝类水产品的去壳加工^[14]。美国 Martin 等^[15]设计了一种蒸汽加热后再用低温液氮快速冷却的方法,扇贝脱壳率达到 85%。由于高温处理的时间较短,只破坏了保持贝类两壳紧闭的闭壳肌且仅造成少部分贝肉汁液流失,经过冷/热交替预处理后的贝类肉质品质较好,在实现壳肉分离的同时,最大程度地保全了肉质本身的营养价值和良好的食用口感,具有较好的应用前景。

综上所述,高温预处理对贝类壳肉分离具有积极意义:一方面,高温能破坏闭壳肌与贝壳之间的连接,完成壳肉分离;另一方面,高温能在一定程度上消除了致病菌,保证了食品安全。但高温预处理也存在严重缺点:需要严格控制作用时间及温度,否则极易造成肉质变性,影响口感及售卖。

在实际市场应用方面,考虑到加工数量需求,一般加工装置结构较为简单,仅考虑蒸汽加热发生装置,后续的冷却步骤大多采用水流降温处理。早在 20 世纪 30 年代,美国发明了蒸汽贝类脱壳机且不断改进,在高温蒸汽对贝类持续作用后,利用振动筛将壳肉分离^[16]。日本研制的扇贝自动脱壳机,利用真空吸力将开壳扇贝周边的脏器吸除,仅保留闭壳肌,该机具有一定的自动化水平,但只适用于壳面平整的大体型扇贝,对小个体扇贝作用效果较

差^[17]。目前,中国主流的蒸汽式贝类加工设备多为大型设备,自动化程度较高,如大连中通食品机械有限公司的 BL-200/500/800 型贝类加工设备^[18](图 1),可通过调节蒸汽的温度和喷射时间,以及冷水的温度和喷淋时间,以适应不同加工情况;在确保肉质的同时,设备加工效率分别可达 200、500、800 kg/h,大大提高了贝类水产品壳肉分离效率。



图 1 BL-200/500/800 型贝类加工设备^[18]

Fig. 1 BL-200/500/800 type of shellfish processing equipment^[18]

冷却预处理则比较适合虾类去壳。很早之前渔民就发现,捕捞后的鲜虾放置在冰水中一段时间后更容易去壳。这是因为遇冷虾尾肌肉的收缩程度大于虾壳收缩程度,壳肉之间的连接组织蛋白遇冷失活变性,丧失了原有功能,增大了壳肉之间缝隙,便于去壳。冷却预处理在虾类去壳方面的研究见表 1,经过冷却预处理后,虾壳与虾肉之间拉力减小,去壳更加容易,且虾仁品质大多较好。目前,由于加工工艺等原因,冷却法去壳技术仍处于实验室研发阶段,并未实际应用到市场。

表 1 冷却预处理方法在虾类去壳加工中的研究比较

Tab. 1 Comparison of cooling pretreatment method in shrimp shelling processing

研究对象 research object	预处理参数 pretreatment parameter	结果 result	缺点 disadvantage	参考文献 references
凡纳滨对虾 (<i>L. vannamei</i>)	4%的冰盐处理 0.5 h -30 ℃ 混合冰水中浸泡 8 h	壳肉间拉力为 1.7 N, 虾仁肉质较好 剥壳率达 100%, 虾仁完整率为 95%, 但容易产生冰晶 剥壳难度较小, 虾仁质量较好	仅探讨了盐含量和时间对虾去壳的影响, 忽略了样品大小、冰盐比例等其他因素 忽略了虾仁的肉质优劣 对虾的预处理(浸泡)时间过长	刘金昉等 ^[19] (2013) 张秀花等 ^[20] (2014) Xu 等 ^[21] (2019)

2.2 酶预处理

酶可以在表皮和外壳中产生大量水解蛋白。在酶成熟过程中许多水解产物丢失,导致肌层连接处材料丢失,从而松懈肌肉与壳体的连接结构,使外壳与肌肉之间留下间隙,降低壳肉分离难度。酶预处理方法最早应用在牡蛎去壳,后来扩展至虾类去壳。酶的种类也从早期单一的高浓度镁溶液发展成

不同配比的酶混合物。但酶预处理对肉质的影响目前尚未明确,因此,该种方式仍只是停留在实验室研发阶段,尚未广泛应用到实际生产中。

在实验室研究方面,1994 年,日本相田稔等首次发现,将牡蛎浸泡在高浓度镁溶液中进行预处理后能促进牡蛎开壳^[22]。2012 年,中国科学院水产研究所成功实现了小型甲壳动物在酶预处理条件下的壳肉分离^[23]。

酶预处理方法除应用于小型甲壳动物脱壳外，也有学者在虾类产品中进行了尝试。2018年，严金红等^[24]发现，体积分数为6%~8%的柠檬酸对凡纳滨对虾的去壳有较大帮助，经处理后的虾壳更加柔软，避免了虾壳破碎与虾肉混在一起，对虾的壳肉分离具有较大帮助。国外一些学者也对酶预处理方法在虾去壳方面的效果进行了探究，研究发现，内外蛋白酶搭配使用比单种酶能更好地促进虾松壳^[25]。对比高压预处理技术^[26]，发现酶的这两种预处理方式都能对虾表皮和壳的微观结构及蛋白质产生较大影响，且均能扩大外壳与表皮之间的间隙，但效果不同。这主要体现在两方面，即不同预处理方式和同一种预处理方式的不同参数，如蛋白酶*Endocut-03L*的预处理效果优于*Tail21*，高压200 MPa的预处理效果优于高压600 MPa。此外，Dang等^[25]研究表明，对于凡纳滨对虾去壳预处理，不同类型的酶作用效率也是不一样的。因此，在进行酶预处理时，应综合考虑酶类型的选择，以便在较短的时间内完成去壳。

综上所述，酶预处理方法可以松懈肌肉与壳体之间的连接结构，降低虾、贝类壳肉分离难度，但需要特别注意的是酶预处理过程中存在微生物污染的风险，特别是反复使用的酶液，微生物污染风险更高，处理过程中其对肉质的影响还暂未明确。

2.3 超高压预处理

超高压预处理是将虾、蟹和贝等带壳类水产品置于超高压容器中，利用流体静压迫使水产品的肌肉纤维和粘连组织变性，使肉体从外壳上脱落的方法。该方法是将食品类的超高压工艺经过一定的工艺改动和完善，应用到带壳类水产品的脱壳生产中。有研究表明，高压技术不仅可以改善肉的品质和口感^[6-8]，还可以杀灭产品中的大量微生物，延长新鲜肉质的保质期^[9]，确保食品安全。

2.3.1 国外超高压预处理研究 国外对该领域的相关研究起步较早，最早可追溯到水果和蔬菜的去皮方面。自20世纪中叶起，国外已开始对带壳类水产品高压去壳进行相关研究^[27]，其中对虾、贝类水产品研究较多。2002年，He等^[28]通过研究高压对牡蛎的脱壳影响后率先指出，高压对牡蛎脱壳有积极作用。Hsu等^[29]和Bindu等^[30]确定了加压到300 MPa后立即减压和300 MPa作用5 min分别为牡蛎和贻贝脱壳的最佳条件。后来的研究表明，适当的压强和保压时间（200~300 MPa, 1~3 min）可以有效地促进虾壳松动，解决鲜虾脱

壳过程中虾仁易破碎、脱壳效率较低和虾仁完整性较差等难题。与传统手工剥壳相比，高压脱壳时间显著缩短，脱壳后虾仁的加工性能、汁液流失率和持水性等均有大幅提升。2011年，Jabbar等^[31]提出了一种将超高压技术应用到蟹类水产品脱壳的思路，但这一想法到目前为止并未得到大规模应用。

国外应用超高压技术对带壳类水产品去壳的设备较为完善。21世纪初期，西班牙NC Hiperbaric公司研制出一款型号为Hyperbaric 300的超高压扇贝处理设备^[32]（图2），在600 MPa条件下能较好地完成扇贝脱壳，其加工效率可达420 kg/h。然而，由于该设备的制造研发价格不菲（50~100万英镑），最终未能在市场上广泛应用。目前，美国、加拿大等国家对超高压设备的使用较为成熟，其中，牡蛎超高压去壳已经在美国实现了商业化应用，超高压处理后的大龙虾已经在加拿大市场上广泛售卖^[33]。



图2 Hyperbaric 300型超高压扇贝处理设备^[32]

Fig. 2 Hyperbaric 300 ultra-high pressure scallop processing equipment^[32]

2.3.2 中国超高压预处理研究 中国在应用超高压技术进行带壳类水产品脱壳方面的研究起步较晚。近年来，超高压预处理方法被广泛应用于凡纳滨对虾、口虾蛄和克氏原螯虾等虾类去壳加工，去壳效果、虾仁肉质及去壳最优条件等一系列关键参数也被逐步研究获取并验证^[34-36]，为超高压技术应用于虾类去壳的工业生产提供了理论和技术支撑。此外，超高压预处理方法在贝类去壳加工生产中也有较多应用^[37-39]（表2）。由此可见，超高压预处理能够促进贝壳去壳，且在改善肉质、降低微生物含量等方面具有积极作用。

基于上述去壳理论，中国超高压去壳设备也逐渐发展起来。21世纪初期，由宁波市农科院牵头，多所高校和科研院所共同研发了中国第一台虾、贝超高压脱壳设备^[40]。在宁波、湖北建立了3个示范基地，可节省人工50%以上，填补了中国在带壳类水产品超高压壳肉分离设备领域的空白，也为

表2 超高压预处理方法在贝类去壳加工中的研究比较

Tab. 2 Comparison of ultra-high pressure pretreatment method in shellfish shelling processing

研究对象 research object	预处理方法 pretreatment parameter	结果 result	参考文献 reference
海湾扇贝 (<i>Argopecten irradians</i>)	200 MPa, 3 min	海湾扇贝 100%分离, 且不可检测的天然微生物最少	Yi 等 ^[8] (2013)
牡蛎 (<i>Crassostrea gigas</i>)	275 MPa, 3 min 或 300 MPa, 2 min	牡蛎内肌完全释放, 去壳效果较好且能够降低微生物丰度, 延长牡蛎的保质期	Cao 等 ^[37] (2017)
虾夷扇贝 (<i>Patinopecten yessoensis</i>)	250 MPa, 3 min	去壳效果显著提高, 对肉质影响较小	陈启航等 ^[9] (2021)
扇贝 scallop	300 MPa, 4 min	扇贝去壳率达到 100%, 且肉质含水率较高, 营养品质较好	巩雪等 ^[38] (2021)
海湾扇贝 (<i>Argopecten irradians</i>)	200、400、600 MPa, 5 min 或 10 min	肉质色泽明亮, 咀嚼性提高且微生物活性降低, 去壳较容易	金婧彧等 ^[39] (2022)

后续相关设备的研发提供了参考。目前, 中国主流的超高压去壳设备, 如力得福科技有限公司生产的SSH型海鲜机超高压脱壳设备^[41] (图3), 适用于大部分虾、贝类水产品去壳, 可实现连续进出料生产, 提高了加工效率, 大幅增加了设备的空间利用率。

综上所述, 超高压预处理不仅可以促进带壳类水产品去壳, 改善肉质^[9,38], 而且可以降低肉中微生物含量, 延长产品的储存时间^[9]。然而, 超高压设备体积较大、价格昂贵等弊端, 制约了超高压设备在水产品去加工中的广泛应用。

图3 SSH型海鲜脱壳机^[41]Fig. 3 SSH seafood sheller^[41]

2.4 联合法预处理

各种预处理方法具有不同的优缺点。近年来, 国内外学者探究了不同预处理方法联合进行水产品去壳的可行性, 主要研究方向集中在基于超高压预处理并联合高温、冷却、酶和多次增压等预处理方法, 以提高去壳成功率和提升肉质。其中, 超高压预处理联合温度预处理去壳是当前的一个研究热点。

在研究高压对克氏原螯虾壳肉分离效果时发现, 当达到克氏原螯虾去壳条件后, 增压次数与克氏原螯虾的最终脱壳效率及虾仁的得肉率之间关联不大, 但先经过热烫再经超高压处理后, 所得到的

虾仁含水率显著降低, 且增压次数与虾仁含水率之间成正比。此外, 先热烫后高压处理的虾仁微生物含量也显著降低, 虾仁硬度等其他指标并未发生明显变化。因此, 热烫和超高压联合预处理方法相比单一方法具有较大的优势^[42]。Dang 等^[43] 进一步确定了 350 MPa 以下为热烫和超高压联合预处理法分离克氏原螯虾壳肉的较佳高压条件。

由于热烫温度较高, 极易造成蛋白质变性和水产品肉质变差, 崔燕等^[44] 尝试使用冷冻联合超高压技术对凡纳滨对虾去壳, 去壳效果大幅提升的同时保持了虾仁的良好品质。因此, 与热烫联合超高压预处理相比, 冷冻联合超高压预处理可能更适合水产品去壳, 尤其是用于虾、贝类去壳。

2.5 不同预处理方法的比较

4 种预处理方法为实现带壳类水产品的壳肉分离提供了多种思路, 但各有利弊 (表3)。简单的加热/冷却方法具有诸多优点, 但也存在一定弊端, 需要严格控制温度和时间。冷、热交替处理方法可以快速降低肉质温度, 防止肉质变性, 应用前景良好。由于贝类水产品形态结构简单, 因此, 加热/冷却方法在贝类水产品壳肉分离上有较多应用。使用酶来断开壳肉之间连接是一种尝试, 经过处理后的带壳水产品壳肉分离率较高, 但对于处理后肉质中的微生物未进行详细评估, 尤其是反复使用的酶液中微生物污染风险较高, 肉质无法长久保存。目前, 酶处理方法仍停留在实验室研发阶段, 尚未应用到实际生产中。超高压技术作为一种新兴的壳肉分离方法, 不仅能够松懈肌肉纤维和壳体的粘连组织, 实现壳肉分离, 而且还能改善肉质口感、延长肉类保质期。但高压在一定程度上也会稳定胶原蛋白结构, 防止壳肉间隙扩大, 因此, 在加工中需要控制压力和保压时间。超高压设备在虾、贝类水产品壳肉分离加工中均有较多应用, 但超高压壳肉分

离设备价格昂贵、体积较大等弊端是阻碍其大规模市场化应用的一大难题。联合法预处理是一种发展趋势，其可以综合上述几种预处理方法的优点，对带壳类水产品进行去壳，该方法有助于提升带壳类

水产品的去壳加工技术，但由于该工艺过于复杂等原因，目前仍停留在实验室研发阶段，尚未实现市场化应用。

表3 带壳类水产品预处理方法比较

Tab. 3 Four pretreatment methods for fishery products with shells

预处理方法 pretreatment method	处理条件 treatment condition	应用现状 current application	优点 advantage	缺点 disadvantage
加热/冷却 heating/cooling	高温/冷却 high temperature/cooling	主要应用在贝类加工，已经形成市场化应用，技术成熟	可以杀死或抑制体内致病菌的繁殖	容易造成蛋白质变性，影响肉质和口感
酶 enzyme	酶解 enzymatic hydrolysis	主要应用在虾、贝类加工，停留在实验室研发阶段，尚未市场化应用	脱壳率较高；废弃物对环境影响较小	杀菌效果不佳；产品存储时间短
超高压 ultra high-pressure	高压 high pressure	主要应用在虾、贝类加工，已经形成市场化应用，技术成熟	对肉质影响较小；可改善肉质；灭菌效果好，产品保质期长	设备成本高、体积大、耗能高
联合法 joint method	高温、冷却、酶解、高压、微波等两种或多种方法联合处理	主要应用在贝类加工，停留在实验室研发阶段，尚未市场化应用	可以综合上述各种方法的优点	操作工艺复杂

3 去壳方法

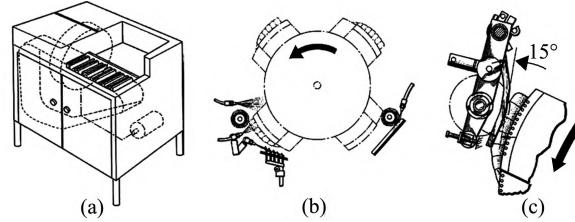
带壳类水产品深加工的目的就是为了获得其中较为完整的肉质，因此，壳肉分离是带壳类水产品深加工过程中的关键步骤。目前，已经出现了切割、离心、挤压和高压水喷射等多种去壳方法，其中，切割法与挤压法主要应用于虾、蟹类水产品的壳肉分离，离心法多用于贝类的壳肉分离，高压水喷射法在贝类、蟹类水产品的壳肉分离中都有应用。

3.1 切割法

切割法就是使用刀具或者切割器等对产品的外壳进行剖切，从而使肉质暴露出来，以便进行壳肉分离。切割装置的优点在于结构简单，操作方便，成本低廉，但是由于虾、蟹类水产品的物理结构复杂，所以对刀具和夹具的设计和安装精度要求较高。目前，切割法在蟹类去壳中的应用较少，大部分用在虾类和贝类的去壳加工。

1) 虾类壳肉分离。切割法在虾去壳方面应用较多，美国、澳大利亚等国家普遍实现了虾去壳的自动化操作，加工效率和规模大大提高。美国专利局公布了一种半自动虾仁去皮机，采用夹持轮辅助、刀片切割和虾针取肉的壳肉分离方式^[45]。基于这种加工方式，美国 Gregor Jonsson 公司的圆形旋转盘式对虾剥壳机在技术上较为先进^[46](图4)，实现了连续完成抓虾、压实、开背去肠和取肉等工序。此外，该机器还设计了插针深度自动可调的取肉装置以适应不同加工需求，减少了手工

操作，得到的虾仁质量较好。但不足之处是需要预先去除虾头才能实现逐个去壳，加工效率相对较低。澳大利亚 Joseph Lee 公司的虾去壳设备不仅能简单地完成虾开背去壳取肉等工序，而且还能根据需要自动转换刀具，将虾仁加工成圆形、蝴蝶状等多种样式，且虾的最大加工效率可达 5 000 只/h，该设备在当地市场应用较为普遍^[47]。

图4 圆形旋转盘对虾剥壳机工作示意图^[46]Fig. 4 Schematic diagram of the work of the circular rotary disc shrimp sheller^[46]

虾切割法的研究在中国起步较晚，研究成果与国外发达国家相比仍有着不小差距，面临着多项技术难题。在市场应用方面，中国还没有较为成熟的采用切割法的去虾壳设备，去虾壳主要还是用挤压法。目前，中国各高校、研究所和企业等科研单位正致力于智能化切割法虾去壳设备的研究。21世纪初，广东省农业研究所在参考国外先进装置的基础上，突破了虾体干净去壳和去除肠线的技术难点^[48]。2014 年，河北农业大学基于对虾的生理结构特点研制了一款对虾剥壳装置，通过人工将去头对虾放置在夹持机构上，去壳刀片在滚珠丝杆的带动下将虾背上壳剥离，虾针将虾仁取走，实现了对

虾的流水线加工^[49]。2018年,安徽机电职业技术学院公布了一种去头虾自动剥壳装置,利用夹断装置将虾身夹裂,刀片将虾身切割成上下两半,对上下两部分分别采用拉外壳和虾针取肉方式处理^[50]。2021年和2023年,武汉轻工大学先后公布了两种克氏原螯虾去壳加工装置,包含了克氏原螯虾的清洗、去头、开背和去壳各工序,且对去头后的虾头设计了专门的收集装置,该装置整体作业为自动化,大大提高了克氏原螯虾加工效率^[51-52]。2022年,佛山松瀚智能设备有限公司设计的自动剥虾机,基于PLC控制,结合了机械手、传感器、图像处理和深度学习等多种现代化技术,实现了机械手的准确定位、虾尾的高效去壳,得到的虾仁更加完整^[53]。

2) 贝类壳肉分离。有部分学者在贝类的切割去壳技术上进行了研究^[54-55],大多采用切割片在贝类左右两壳连接处切割,将两壳之间的连接韧带切断,使左右两壳丧失连接功能,但其中也存在贝类夹持较难、对贝类连接处定位不准等问题。

3) 蟹类壳肉分离。切割法在蟹类去壳方面应用相对较少,最初用于蟹身切块处理。20世纪末,国外第一台处理蟹壳的装置在美国问世^[56](图5)。该设备先将蟹脚去除,接着通过清洁刷将蟹鳃去除,最后将蟹身对切,用于后续蟹身壳肉分离加工。对于去除背甲后的蟹身,Smith^[57]采用一种特制的椭圆形旋转切刀对蟹身分切,以获得蟹肉。2021年,德国Tomoda等^[58]设计了一种具有上下齿轮、传送带及固定装置的去壳器,完成了蟹腹部及背甲的去除和蟹身对切,但尚未实现蟹身部分的壳肉分离。该装置结构简单,工人只需借助装置就能高效完成蟹背甲去除。这一方面减轻了人工劳动强度,确保劳动安全;另一方面,大幅缩短了蟹前处理时间,极大地提高了加工效率。此外,加拿大也研制了一种机械臂加工螃蟹的设备,其采用传感器、机械臂等现代化技术,解决了吸附螃蟹准确定位、精准去背甲和灵活取蟹肉等问题,实现了螃蟹去壳加工的自动化和智能化,效率较高,但其也对应着高昂的成本和售价,因此,国外只有一些规模较大的水产加工企业在使用该种类流水线作业。

中国关于蟹类切割去壳技术的研究开展得稍晚。2016年,周鹏飞^[59]基于蟹的物理形态特征设计了一种包含椭圆形的背甲去除切刀和吸料管吸滤的蟹黄、蟹肉收集器的蟹加工设备,自动化程度较高。2019年,吴江锐^[60]对背甲去除刀具进行了改进设计,配合传送装置简单实现了蟹背甲的去

除,再利用高速旋转的锯盘将蟹从中间对切。由于蟹类物理结构复杂,目前中国的蟹类切割去壳仍停留在实验室研发阶段,尚未市场化应用。

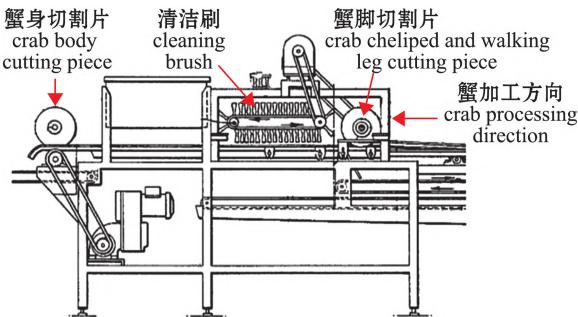


图5 蟹壳处理装置示意图^[56]

Fig. 5 Schematic diagram of crab shell treatment device^[56]

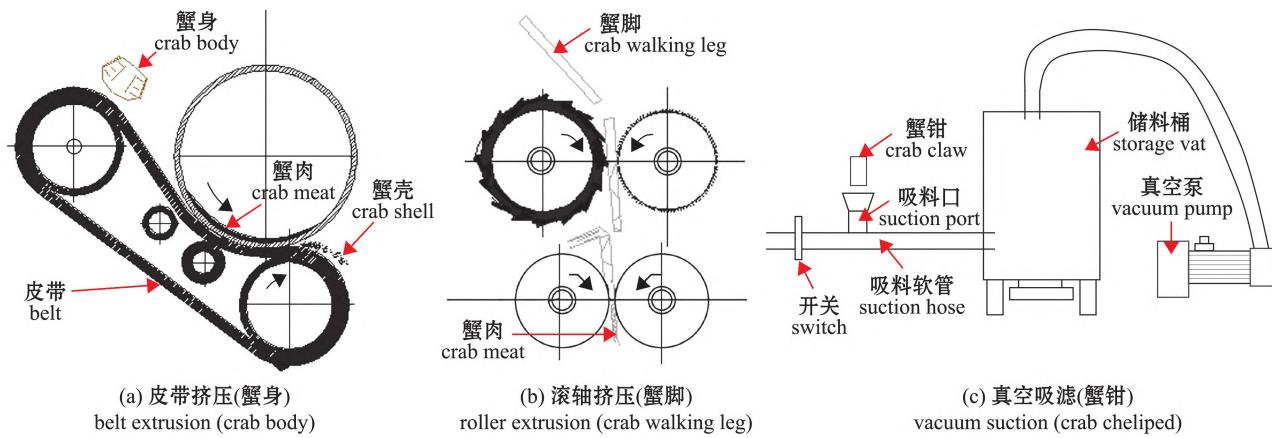
综上所述,切割法在虾类去壳中应用最为广泛,现有虾类去壳设备基本是从虾背开切,配合长线刷和虾针完成壳肉分离,去壳效果好,得肉率高,技术较成熟;切割法在贝类去壳中也有应用,但存在定位、切割准确性不够等问题;在蟹类去壳加工中,主要用于蟹身切块及腹部和背甲的去除,后续壳肉分离处理技术及相应设备尚需进一步研究。

3.2 挤压法

挤压法是靠单个或多个直径相同或不同、转动方向相反、转速相等的圆柱辊或者辊筒,对处理好的水产品进行挤压,其原理是利用样品和辊子表面产生的摩擦力致使外壳与肉分离,该技术多用于蟹类和虾类的去壳中。

1) 蟹类壳肉分离。挤压法最初由美国Davis^[61]于1978年提出,该法利用辊轴相互挤压的方式进行蟹类的壳肉分离,并搭配高压水冲洗辊轴表面,以实现蟹肉收集;此后,国外蟹类挤压法去壳设备多以辊轴挤压为基础,并不断优化改进。2012年,中国学者欧阳杰等^[62]在此基础上进一步确定了用于蟹身、蟹钳和蟹脚3个不同部位壳肉分离的最恰当处理方式分别为皮带挤压、真空吸滤和辊轴挤压(图6)。后续又有陈超等^[63]针对挤压法用于蟹脚壳肉分离进行了进一步研究,提高了分离过程的自动化程度,并确定了蟹脚加工送料角度、辊轴转速和辊轴间隙等关键参数,为蟹类壳肉分离自动化加工提供了理论依据。目前,中国基于挤压法的蟹类壳肉分离设备并不多见,大多还停留在借助工具进行人工去壳分离的阶段。

2) 虾类壳肉分离。与蟹类相比,挤压法在虾类去壳加工方面应用更广泛,技术更成熟。国外针对虾类挤压法去壳已有完善的设备,去壳效果好,

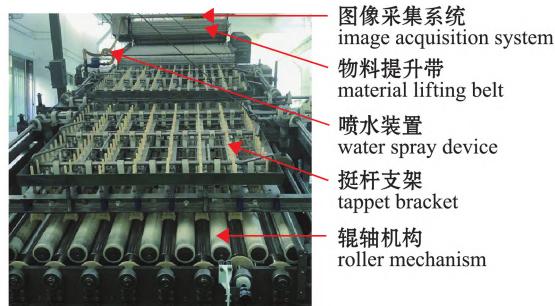
图 6 河蟹不同部分挤压方式示意图^[62]Fig. 6 Schematic diagram of extrusion methods for different parts of crab^[62]

工作效率高。其中，美国 Laitram Machinery 公司生产的 A 型自动虾剥壳机^[64]（图 7）在南美、墨西哥、北欧和约旦等国家和地区应用较为广泛。该装置由多根滚筒式辊轴并列组成，通过辊之间的挤压实现壳肉分离。其中，根据虾去壳加工时的实际状况，设计了大小两种直径的辊轴，大直径辊轴能较好地分离尾部虾仁，小直径辊轴则可以分离头部虾肉和尾部虾仁。德国 Martak 公司的 MAR-A 型虾自动去壳机也具有相当的市场规模^[65]，其在德国市场应用最为广泛。该设备在进料箱出口前设置有振动臂以确保虾可以单层进入进料皮带上，并下降到挤压辊轴上进行挤压。挤压辊轴上半部分为橡胶辊轴，可以增大与虾壳间的摩擦，更好去壳；下半部分是光滑的钢辊，有助于将已经松动的虾壳和虾仁分开，去壳效率高，得到的虾仁品质较好。此外，MAR-A 型虾自动去壳机的能耗也比较小。

图 7 A 型自动虾剥壳机^[64]Fig. 7 Mode A automatic shrimp shelling machine^[64]

中国关于虾类挤压去壳技术方面的理论研究较多，相应的加工设备还在研发阶段。2013 年，赵玉达等^[66]参考 A 型自动虾剥壳机（图 7），率先

设计了一台虾挤压去壳半自动样机，需要人工开虾背后放置在对辊之间，以实现挤压去壳。后续也有学者尝试了异径辊轴挤压的方法，以降低虾壳碎屑与虾仁的混合比例^[67]。2016 年，郑晓伟等^[68]设计了一款含有 8 组辊轴的虾去壳自动化设备样机，加工效率预期能达到 60 kg/h，但使用样机试验后发现，根据虾仁肉质情况需要人工实时调整加工量，自动化程度不高。2021 年，熊师等^[69]将机器视觉识别技术应用到了辊轴式虾去壳机上（图 8），通过视觉识别技术检测对虾的规格，进而自动调节喂入速度和辊轴之间的间距，能够适应不同大小的对虾加工，提高了设备的自动化程度。

图 8 机器视觉辊轴式对虾剥壳机^[69]Fig. 8 Machine vision roller shrimp shelling machine^[69]

目前，中国市场上应用的虾挤压去壳设备以重庆 HI-SEA 公司的 HS-150/300 型虾去皮机^[70] 和上海锐澜科技的 SPMP-I 型虾去壳设备^[71] 为主，都是采用多对异形辊轴设计。其中，HI-SEA 公司的虾去皮机（图 9）包含清洗、分级和去壳等功能，各功能可单独运行，生产安排较为灵活，且虾去壳率高达 96%，加工效率最高可达 300 kg/h。上海锐澜科技公司的 SPMP-I 型虾去壳设备则在中国应用更为广泛，可以实现规模化生产加工。该设备主要由 5 台单独的虾剥壳单机及其他清洗设备等组成，

可根据产量需要开启不同数量的虾剥壳机,剥壳效率是人工剥壳的30倍左右。与重庆HI-SEA公司的虾去皮机相比,该设备形成生产线后还可以根据不同需要,搭配供料系统和后处理加工系统,形成不同的虾仁制品。



图9 HS-150/300型虾去皮机^[70]

Fig. 9 HS-150/300 shrimp peeling machine^[70]

综上所述,挤压法在虾类去壳加工方面应用相对成熟,去壳效果好、效率高,这与虾仁与虾壳之间相对独立的连接方式有关,相应的设备在国内外发展也比较成熟。挤压法也是蟹类去壳常用的方法,但由于蟹肉和蟹壳之间连接比较复杂,蟹肉在蟹壳内较为分散,挤压过程容易使蟹壳和蟹肉混合,从而影响去壳效果,降低蟹肉品质。目前,相关研究多集中在蟹脚去壳方面,成熟的蟹类去壳设备并不多,尚未完全实现蟹类去壳机械化和自动化。

3.3 离心法

离心法去壳就是将预处理过后的产品进行旋转或振荡离心,利用物体高速旋转时产生的强大离心力,使置于旋转体中的物体之间因受力大小的不同而产生分离,从而达到壳肉分离的目的。离心技术具有设备工艺结构简单、加工效果好和使用寿命长等优点。

1) 蟹类壳肉分离。20世纪80—90年代,离心法用于带壳类水产品去壳技术在国外掀起一股热潮,但随后因性价比不高而逐渐淡出视野。Guglielmo等^[72]和Lapeyre等^[73]研究证实了将去除内脏等部分后的蟹身切后离心取肉的可行性,早期的离心分离装置如图10所示。后来又有学者发现,蟹壳和蟹肉容易黏在一起^[74],离心法并不能将其完全分离,故去壳效果并不理想。国外对离心法的研究大多只针对蟹身,对蟹脚和蟹钳部分研究较少,并且对于分离之前蟹黄如何收集也未见报道。

2) 贝类壳肉分离。中国关于离心法的研究主要集中在贝类去壳方面。离心法最初应用于人工贝

类去壳,即通过手工抖动筛筒使蛤类水产品实现壳肉分离。后来据此改进后,通过振荡箱反复振荡运动实现了贻贝壳肉分离,使贻贝的分离效率和得肉率大大提高,且适用于规模化加工^[75]。2012年,郑晓伟等^[76]结合单因素和响应面分析方法对南极磷虾的离心脱壳工艺进行了研究,确定了用离心法分离南极磷虾壳肉效果最好时的工艺参数为离心转速8 000 r/min、作用时间15 min,但并未应用于设备的设计。

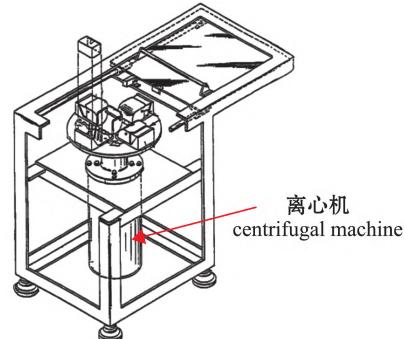


图10 蟹身离心分离装置示意图^[73]

Fig. 10 Schematic diagram of crab body centrifugal separation device^[73]

综上所述,离心法用于蟹类去壳的研究多集中在初期,虽然已经研制有蟹身离心分离装置,但未进一步继续研发和优化;应用于贝类和虾类去壳有可行性,但与其他分离方式相比,优势并不明显。因此,离心法在带壳类水产品去壳方面研究并不多,在市场工业化生产中几乎没有应用。

3.4 高压水喷射法

高压水喷射法是利用水作为工作介质,经增压设备增压后,使其成为高能级的流束,经特定的喷嘴高速喷出,作用于水产品外壳或肉上,作用物体因为受到力的作用而改变原本的状态,从而迫使肉与外壳分离。该方法多用于蟹类和贝类等外壳坚硬的水产品加工,虾类等应用较少。

目前,国内外有关高压水喷射法去壳的研究均较少。Cooke Deceased等^[77]于1976年最先在蟹类中开始高压水喷射壳肉分离方法的研究,通过高压水冲击蟹身剖面,将蟹肉冲刷出来。2017年,Lim等^[78]又尝试用高压水去除蟹鳃,作为研究蟹类水产品去壳装置的补充。中国在用高压水进行蟹类壳肉分离的研究几乎没有,少数学者研究了高压水在贝类水产品去壳方面的影响^[79-80],但并不深入。

与其他几种去壳方法相比,高压水喷射法采用的介质是水,因此,该方法更加经济、安全和环

保，且该方法属于冷加工，热影响较小，能保证食品的新鲜；但高压水冲刷后对肉质感官、营养成分等会产生一定的影响。综合国内外研究现状，高压水喷射去壳方法并未得到广泛应用。

3.5 不同去壳技术的比较

4种去壳技术为实现带壳类水产品的壳肉分离提供了多种思路，但各有利弊（表4）。切割法主要应用于物理结构规则的水产品，如虾类、贝类等，该方法利用刀具对带壳类水产品进行壳肉分离，操作简单，易于实现，但在刀具的设计和安装精度方面要求较高；切割法用于蟹类水产品的壳肉

分离效果不明显，应用较少。挤压法是利用辊轴反向旋转产生的摩擦力将带壳类水产品的外壳与肉质分离，得肉率相比其他几种去壳方法更高，但由于得到的肉质中易混入外壳杂质，需要一定的后处理，且需要控制辊筒间隙，否则难以达到理想效果。离心法利用物体高速旋转产生的离心力完成壳肉分离，在贝类水产品去壳方面效果较好，但需要经过一定的预处理，否则可能无法达到理想的去壳效果。高压水喷射法利用高压水将肉从外壳中冲刷出来，但是得肉率不能保证，且经过冲刷后容易造成营养成分流失，进而降低肉质的品质、口感及营养价值等。

表4 带壳类水产品去壳方法比较

Tab. 4 Four shell-removing methods for fishery products with shells

去壳方法 shell-removing method	应用现状 current application	处理方法 treatment method	优点 advantage	缺点 disadvantage
切割法 cutting method	主要用于虾、贝、蟹类，在虾类壳肉分离加工中市场应用较多	使用刀片等从外部进行剖切	结构简单、成本低廉和操作方便；对虾类进行去壳加工时可用的工厂设备较多	对刀具和夹具的设计和安装精度要求较高
挤压法 extrusion method	主要用于虾类，已经形成成熟的市场应用	利用辊筒反向转动使外壳与肉分离	得肉率较高；多轴滚轴设备在虾类去壳加工中应用较多	得到的肉质易变形；容易混有杂质，口感较差
离心法 centrifugation method	主要用于贝类，研发成果少，基本未形成市场应用	利用高速旋转产生的离心力完成壳肉分离	操作便捷；脱壳率较高	需要提前进行适当的预处理
高压水喷射法 high-pressure water jet method	主要用于贝类和蟹类，目前仍停留在实验室研发阶段，尚未进入市场应用	将高压水作用于肉或外壳与肉的连接处	经济环保；属于冷加工，不会造成肉质变性	需要增压设备；得到的肉质可能会受到影响；性价比不高

4 存在问题及展望

4.1 水产品壳肉分离技术研究中存在的问题

带壳类水产品去壳技术的研究主要分为预处理和去壳两种方法。虽然国内外诸多学者进行了大量研究，也取得了不少成果，但仍存在一些问题与不足，主要体现在以下几个方面。

1) 带壳类水产品壳肉分离的相关预处理与去壳技术多停留在实验室研发阶段。一些先进的实验室技术尚未应用到市场中，现有市场设备落后，较好的预处理技术与去壳技术未能有效地结合在一起形成成熟设备。

2) 去壳设备自动化程度较低，壳肉分离效果差强人意。现有市场壳肉分离装置大多自动化程度不高，如虾去壳时需要人工去头，并定向精准地放置在去壳设备上，才能完成去壳操作，尤其是蟹类水产品的壳肉分离技术较为落后，难以实现自动化加工。

4.2 未来重点研究方向

1) 加工装置的大型化。加工装置大型化是促进带壳类水产品深加工行业高质量发展的必经之路。通过预处理、去壳、取肉和边角料开发等技术的进一步研究，实现带壳类水产品加工装置一体化和大型化，带动和促进其养殖业的大型化、规模化和生态化发展，进而推动相关产业的整体化发展。

2) 加工装置的自动化和智能化。水产品的高附加值能够促进水产品养殖业的长远发展，而水产品价值的提升依托于水产品深加工自动化和智能化的发展。将机器人、机器视觉和物联网等前沿技术融入带壳类水产品加工装置，将有利于带壳类水产品加工设备的自动化、智能化。

3) 船载加工装置的研发。带壳类水产品船载加工设备的优势：可以有效地避免水产品死亡、营养价值流失等不可控因素对产品肉质的影响；可以较好地运用水循环系统，提供清洁水源，保证良好的加工环境；可以利用海上风能、太阳能等可再生能源，为船载加工设备提供更多的能源保障，降

低船载能耗;可以有效地降低鲜活水产品的保鲜和运输成本,提升带壳类水产品去壳肉质的质量。

4) 蟹类深加工设备的研发。蟹类外壳坚硬锋利,蟹身结构复杂,发展蟹类深加工装置,可以提升蟹类水产品的加工效率和加工品质,扩展蟹类产品的销售渠道,实现蟹类水产品高附加值,进而推动蟹类养殖业乃至整个相关产业的发展。

参考文献:

- [1] 中国常驻联合国粮农机构代表处. 全球渔业和水产养殖最新状况[J]. 世界农业,2020(7):110.
Permanent Representative Office of China to the Food and Agriculture Agencies of the United Nations. The latest situation of global fishery and aquaculture[J]. World Agriculture, 2020 (7):110. (in Chinese)
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 2022 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2022.
Fishery Administration Bureau of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Station, China Society of Fisheries. 2022 China fisheries statistical yearbook [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2022. (in Chinese)
- [3] BOZIARIS I S. Seafood processing: technology, quality and safety [M]. Chichester: Wiley Blackwell, 2014:368-375.
- [4] 赵前,周进,刘俊荣,等. 水产品鲜活品质评价体系研究进展[J]. 大连海洋大学学报,2021,36(4):706-716.
ZHAO Q, ZHOU J, LIU J R, et al. Evaluation of sushi-grade seafood quality: a review [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021,36 (4):706-716. (in Chinese)
- [5] 刘志东,马德蓉,陈雪忠,等. 南极磷虾虾青素研究进展[J]. 大连海洋大学学报,2021,36(5):866-874.
LIU Z D, MA D R, CHEN X Z, et al. Research progress of astaxanthin from Antarctic krill: a review [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021,36(5):866-874. (in Chinese)
- [6] LI J R, LU H X, ZHU J L, et al. Aquatic products processing industry in China: challenges and outlook [J]. Trends in Food Science & Technology, 2009, 20(2):73-77.
- [7] SUN X J, LI L, ZHANG T S, et al. Identification and characterization of phosphoproteins in the striated and smooth adductor muscles of Yesso scallop *Patinopecten yessoensis* [J]. Food Chemistry, 2022, 372:131242.
- [8] YI J J, XU Q, HU X S, et al. Shucking of bay scallop (*Argopecten irradians*) using high hydrostatic pressure and its effect on microbiological and physical quality of adductor muscle [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 18:57-64.
- [9] 陈启航,文丽华,陈小娥,等. 超高压辅助脱壳对虾夷扇贝肌原纤维蛋白生化特性及结构的影响[J]. 食品科学, 2021, 42 (11):102-107.
CHEN Q H, WEN L H, CHEN X E, et al. Effect of ultra-high pressure assisted shelling on biochemical characteristics and structure of myofibrillar protein in *Patinopecten yessoensis* [J]. Food Science, 2021, 42(11):102-107. (in Chinese)
- [10] 陈木荣,刘翠琴,王美贵. 牡蛎开壳脱肉方法试验研究[J]. 渔业机械仪器,1995,22(5):18-22.
CHEN M R, LIU C Q, WANG M G. Experimental study on the method of shelling and removing meat from oysters [J]. Fishery Modernization, 1995,22(5):18-22. (in Chinese)
- [11] 刘志杰,周素珊,唐庆强,等. 牡蛎蒸汽开壳试验研究[J]. 福建农机,2006(3):46-49.
LIU Z J, ZHOU S S, TANG Q Q, et al. Experimental study on steam shell opening of oysters [J]. Fujian Agricultural Machinery, 2006(3):46-49. (in Chinese)
- [12] 张静,弋景刚,姜海勇,等. 蒸汽式扇贝柱脱壳技术优化[J]. 广东农业科学,2013,40(14):120-122.
ZHANG J, YI J G, JIANG H Y, et al. Shelling technique optimization of scallop by steam [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013,40 (14):120-122. (in Chinese)
- [13] 弋景刚,张静,姜海勇,等. 蒸汽式扇贝柱脱壳机控制系统设计[J]. 农机化研究,2014,36(9):99-102.
YI J G, ZHANG J, JIANG H Y, et al. Design of control system of steam scallop shelling machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014,36(9):99-102. (in Chinese)
- [14] 吕飞,沈军樑,丁玉庭. 热压开壳对贻贝品质的影响及其脱壳机理[J]. 现代食品科技,2014,30(11):175-181,174.
LÜ F, SHEN J L, DING Y T. Effect of heat-pressure treatments on mussel quality and shucking efficiency [J]. Modern Food Science and Technology, 2014,30(11):175-181,174. (in Chinese)
- [15] MARTIN D E, SUPAN J, NADIMPALLI U, et al. Effectiveness of a heat/cool technique for shucking oysters [J]. Aquacultural Engineering, 2007,37(1):61-66.
- [16] SNOW F H. Shucking of bivalves: US3564648[P]. 1971-02-23.
- [17] 李秋实,王家忠,弋景刚,等. 海湾扇贝闭壳肌剥离设备的发发展现状与展望[J]. 广东农业科学,2013,40(10):198-201.
LI Q S, WANG J Z, YI J G, et al. Development state and prospect of bay scallop's adductor splitting device [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013,40(10):198-201. (in Chinese)
- [18] 大连中通食品机械有限公司. 贝类加工生产线 [EB/OL]. [2019-01-19]. <http://zt-jx.com/Product/Content.aspx?ProductId=21>.
Dalian Zhongtong Food Machinery Co., Ltd. Shellfish processing line [EB/OL]. [2019-01-19]. <http://zt-jx.com/Product/Content.aspx?ProductId=21>. (in Chinese)
- [19] 刘金昉,申亮,刘红英,等. 冰盐预处理对南美白对虾剥壳的影响研究[J]. 食品工业科技,2013,34(22):111-115.
LIU J F, SHEN L, LIU H Y, et al. Study on effect of ice-salt pre-treatment on shelling of *Penaeus vannamei* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013,34 (22):111-115. (in Chinese)
- [20] 张秀花,赵庆龙,赵玉达,等. 对虾对辊挤压式剥壳工艺参数及预处理条件优化[J]. 农业工程学报,2014,30(14):308-314.
ZHANG X H, ZHAO Q L, ZHAO Y D, et al. Parameter and pre-treatment condition optimization of dual rollers extrusion peeling device for *Litopenaeus vannamei* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(14):308-314. (in Chinese)
- [21] 徐南,史伟哲,王晓春,等. 冰水预处理对冰盐剥壳效果的影响[J]. 中国水产科学,2013,13(1):10-14.
XU N, SHI W Z, WANG X C, et al. Effect of ice water pretreat-

- ment on the quality of Pacific white shrimps (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(2) : 645-655.
- [22] 李春泉. 牡蛎开壳新方法[J]. 齐鲁渔业, 1996, 13(3) : 14.
- LI C Q. New method of oyster shell opening[J]. Qilu Fishery, 1996, 13(3) : 14. (in Chinese)
- [23] 刘志东, 黄洪亮, 陈雪忠, 等. 一种小型甲壳动物壳肉分离的方法:CN201210285267.0[P]. 2012-11-28.
- LIU Z D, HUANG H L, CHEN X Z, et al. Method for separating shell and meat of small crustacean: CN201210285267. 0 [P]. 2012-11-28. (in Chinese)
- [24] 严金红, 缪文华, NYAISABA B, 等. 有机酸软化凡纳滨对虾脱壳的效果研究[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2018, 37(5) : 394-399.
- YAN J H, MIAO W H, NYAISABA B, et al. The softening effect of organic acid on the shell of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2018, 37 (5) : 394-399. (in Chinese)
- [25] DANG T T, GRINGER N, JESSEN F, et al. Enzyme-assisted peeling of cold water shrimps (*Pandalus borealis*) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47 : 127-135.
- [26] DANG T T, JESSEN F, MARTENS H J, et al. Proteomic and microscopic approaches in understanding mechanisms of shell-loosening of shrimp (*Pandalus borealis*) induced by high pressure and protease[J]. Food Chemistry, 2019, 289 : 729-738.
- [27] HEREMANS K. High pressure effects on proteins and other biomolecules[J]. Annual Review of Biophysics and Bioengineering, 1982, 11 : 1-21.
- [28] HE H, ADAMS R M, FARKAS D F, et al. Use of high-pressure processing for oyster shucking and shelf-life extension[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(2) : 640-645.
- [29] 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.
- [30] BINDU J, GINSON J, KAMALAKANTH C K, et al. High pressure treatment of green mussel *Perna viridis* Linnaeus, 1758; effect on shucking and quality changes in meat during chill storage[J]. Indian Journal of Fisheries, 2015, 62(2) : 70-76.
- [31] JABBOUR T, HOGNASON G. Method for shucking lobster, crab or shrimp:US7871314[P]. 2011-01-18.
- [32] 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.
- [33] 崔燕, 林旭东, 康孟利, 等. 超高压技术在水产品贮藏与加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(21) : 291-299.
- CUI Y, LIN X D, KANG M L, et al. Advances in application of ultra high pressure for preservation and processing of aquatic products[J]. Food Science, 2016, 37(21) : 291-299. (in Chinese)
- [34] 王芝妍, 杨文鸽, 周果, 等. 超高压辅助中华管鞭虾脱壳及对其肌肉品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(7) : 43-48.
- WANG Z Y, YANG W G, ZHOU G, et al. Shelling of *Solenocera melantha* using ultra high pressure and its effect on the quality of muscle[J]. Food Science, 2017, 38(7) : 43-48. (in Chinese)
- [35] 李高尚, 陈燕婷, 宣仕芬, 等. 不同处理方式对虾蛄脱壳效率及肌肉品质的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(8) : 1551-1558.
- LI G S, CHEN Y T, XUAN S F, et al. Effect of different treatments on the shelling efficiency and muscle quality of *Oratosquilla oratoria*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(8) : 1551-1558. (in Chinese)
- [36] 叶韬, 陈志娜, 吴盈盈, 等. 超高压对鲜活小龙虾脱壳效率、肌原纤维蛋白和蒸煮特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(1) : 149-156.
- YE T, CHEN Z N, WU Y Y, et al. Impact of high pressure processing on the shelling efficacy, myofibrillar protein, and cooking characteristics of fresh crayfish[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(1) : 149-156. (in Chinese)
- [37] CAO R, ZHAO L, LIU Q. High pressure treatment changes spoilage characteristics and shelf life of Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) during refrigerated storage[J]. Journal of Ocean University of China, 2017, 16(2) : 351-355.
- [38] 巩雪, 常江, 李丹婷, 等. 超高压对扇贝界面闭壳肌结构的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(13) : 87-93.
- GONG X, CHANG J, LI D T, et al. Effect of ultrahigh pressure on the structure of scallop adductor muscle[J]. Food Science, 2021, 42(13) : 87-93. (in Chinese)
- [39] 金婧彧, 吴紫荷, 锁然, 等. 超高压处理对海湾扇贝柱蛋白质变性及理化特性的影响[C]//中国食品科学技术学会第十八届年会摘要集. 北京:中国食品科学技术学会, 2022: 347-348.
- JIN J Y, WU Z T, SUO R, et al. Effects of ultra-high pressure treatment on the protein denaturation and physicochemical characteristics of the bay scallop (*Argopecten irradians*) adductor muscle[C]//Abstract collection of the 18th annual meeting of the Chinese Society of Food Science and Technology. Beijing:Chinese Society of Food Science and Technology, 2022: 347-348. (in Chinese)
- [40] 廖小军, 凌建刚, 谢国平, 等. 日加工 10 吨虾贝超高压首套示范样机关键技术研究[Z]. 宁波:宁波市农业科学研究院, 2019-11-23.
- LIAO X J, LING J G, XIE G P, et al. Research on key technologies of the first demonstration prototype for processing 10 tons of shrimp shells per day under ultra high pressure [Z]. Ningbo: Ningbo Institute of Agricultural Sciences, 2019-11-13. (in Chinese)
- [41] 山山西力得福科技有限公司. SSH-海鲜机 HPP 超高压海鲜脱壳 [EB/OL]. [2022-10-13]. <https://www.hppssh.com/product/hxtk/9.html>.
- Shanxi Lidefu Technology Co., Ltd. SSH-seafood machine HPP ultra-high pressure seafood shelling[EB/OL]. [2022-10-13]. <https://www.hppssh.com/product/hxtk/9.html>. (in Chinese)
- [42] 汪兰, 何建军, 贾喜午, 等. 超高压增压次数对小龙虾脱壳及虾仁品质影响的研究[J]. 食品工业, 2017, 38(5) : 49-52.
- WANG L, HE J J, JIA X W, et al. Effect of number of pressurization on shucking of red swamp crayfish and properties of shrimp meat[J]. The Food Industry, 2017, 38(5) : 49-52. (in Chinese)

- [43] DANG T T, FEYISSA A H, GRINGER N, et al. Effects of high pressure and ohmic heating on shell loosening, thermal and structural properties of shrimp (*Pandalus borealis*) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 59:102246.
- [44] 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,2019,35(2):32-39.
- CUI Y, XUAN X T, LIN X D, et al. Effect of high hydrostatic pressure combined with freezing treatment on shucking and physicochemical properties of myofibrillar protein of *Penaeus vannamei* [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(2):32-39. (in Chinese)
- [45] KEITH J T, BETTS E D, DANCY M J, et al. Semi-automatic shrimp peeling machine: US5366405[P]. 1994-11-22.
- [46] 欧阳杰,沈建,郑晓伟,等.水产品加工装备研究应用现状与发展趋势[J].渔业现代化,2017,44(5):73-78.
- OUYANG J, SHEN J, ZHENG X W, et al. Research and application status and development tendency of aquatic products processing equipment [J]. Fishery Modernization, 2017, 44(5):73-78. (in Chinese)
- [47] Joseph Lee & Co. Prawn. Shrimp peeling & shelling machine [EB/OL]. [2021-10-26]. <https://www.jlpackaging.com.au/food-equipments/prawn-shrimp-peeling-shelling-machine/>.
- [48] 张进疆,张林泉,赵锡和,等.虾剥壳装备研究与设计[J].现代农业装备,2011(7):50-52.
- ZHANG J J, ZHANG L Q, ZHAO X H, et al. Research and design of shrimp shelling equipment [J]. Modern Agricultural Equipment, 2011(7):50-52. (in Chinese)
- [49] 金金,徐鹏云,袁兴茂,等.对虾剥壳设备的设计与研究[J].农机化研究,2014,36(9):134-137.
- JIN J, XU P Y, YUAN X M, et al. Research and design on the equipment of shrimp shelling [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(9):134-137. (in Chinese)
- [50] 方慧敏,胡如方,赵文英,等.一种海虾自动剥壳机及其剥壳方法:CN109042823A[P]. 2018-12-21.
- FANG H M, HU R F, ZHAO W Y, et al. Automatic shelling machine of prawns as well as shelling method of automatic shelling machine: CN109042823A[P]. 2018-12-21. (in Chinese)
- [51] 江立杰,宋少云,万雅妮,等.龙虾加工装置:CN112825905A[P]. 2021-05-25.
- JIANG L J, SONG S Y, WAN Y N, et al. Lobster processing device: CN112825905A[P]. 2021-05-25. (in Chinese)
- [52] 邵秋雨,宋少云,潘庆华,等.小龙虾加工处理设备:CN115669712A[P]. 2023-02-03.
- SHAO Q Y, SONG S Y, PAN Q H, et al. Crayfish processing equipment: CN115669712A[P]. 2023-02-03. (in Chinese)
- [53] 黄松,陈柏元,廖福吟.一种自动剥虾机的剥虾方法:CN112155048A[P]. 2022-02-25.
- HUANG S, CHEN B Y, LIAO F Y. Shrimp peeling method of automatic shrimp peeling machine: CN112155048A[P]. 2022-02-25. (in Chinese)
- [54] 尹欣玲,孔德刚,杨淑华,等.锯片切割式扇贝开壳试验台的设计与试验[J].中国农机化学报,2016,37(5):118-121.
- YIN X L, KONG D G, YANG S H, et al. Design and experiment of saw cutting shells opening tester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(5):118-121. (in Chinese)
- [55] 谷晓翠.转盘式海湾扇贝闭壳肌剥离生产线的研制[D].保定:河北农业大学,2018.
- GU X C. Development of spinning shell scallop closure muscle stripping production line [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [56] LOCKERBY L W, GUGLIELMO A R. Apparatus and method for processing crabs: US4503586[P]. 1985-03-12.
- [57] SMITH C M. Crab butchering machine: US4293981[P]. 1981-10-13.
- [58] TOMODA H, KIYONORI E. Crab processing device and crab processing method: CA2962992c[P]. 2021-04-13.
- [59] 周鹏飞.螃蟹剥壳机:CN203087410U[P]. 2016-06-01.
- ZHOU P F. Crab shelling machine: CN203087410U[P]. 2016-06-01. (in Chinese)
- [60] 吴江锐.螃蟹自动化加工设备研究[D].舟山:浙江海洋大学,2019.
- WU J R. Research on crab automation processing equipment [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019. (in Chinese)
- [61] DAVIS W L. Machine for separating meat from crab shells: US4083084[P]. 1978-04-11.
- [62] 欧阳杰,虞宗敢,周荣,等.机械式壳肉分离加工河蟹的研究[J].现代食品科技,2012,28(12):1730-1733.
- OUYANG J, YU Z G, ZHOU R, et al. Experimental study of mechanical separation of crab shell and meat [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(12):1730-1733. (in Chinese)
- [63] 陈超,李彤,张拥军,等.蟹脚壳肉分离装置的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(23):297-302.
- CHEN C, LI T, ZHANG Y J, et al. Design and experiment of crab legs' shell and meat separation mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(23):297-302. (in Chinese)
- [64] LAPEYRE J, LAPEYRE R, PROFUMO F, et al. The lapeyre automatic shrimp peeling machine, model 'A', No. 572, 1979[M]. Biloxi, Mississippi: American Society of Mechanical Engineers, 2004.
- [65] Martak. Shrimp peeler with infeed-food industry equipment [EB/OL]. [2022-10-24]. <https://martak.com/shrimp-processing-equipment/shrimp-peelers/shrimp-peeler-with-infeed/>.
- [66] 赵玉达,张秀花,王泽河.对辊挤压式对虾剥壳试验研究[J].广东农业科学,2013,40(19):200-202.
- ZHAO Y D, ZHANG X H, WANG Z H. Experimental study on roller extrusion of shrimp peeling [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(19):200-202. (in Chinese)
- [67] 张秀花,赵玉达,王泽河,等.对虾剥壳机的设计[J].大连海洋大学学报,2014,29(2):198-200.
- ZHANG X H, ZHAO Y D, WANG Z H, et al. Design of shrimp sheller [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2014, 29(2):198-200. (in Chinese)
- [68] 郑晓伟,沈建.南极磷虾捕捞初期适宜挤压脱壳工艺参数[J].农业工程学报,2016,32(2):252-257.

- ZHENG X W, SHEN J. Appropriate shelling process parameters of Antarctic krill at initial stage of fishing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 252-257. (in Chinese)
- [69] 熊师, 李佳, 周利明, 等. 辗轴式对虾剥壳机控制系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2021, 52(sup 1): 457-465.
- XIONG S, LI J, ZHOU L M, et al. Design and test of control system for roller shrimp peeling machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(sup 1): 457-465. (in Chinese)
- [70] HI-SEA. Shrimp peeling machine [EB/OL]. [2011-10-09]. <http://www.cqhisea.com/Shrimp-Peeling-Machine-269-3321-1.html>.
- [71] 上海锐澜机械工程有限公司. SPMP-I 虾去壳生产线 [EB/OL]. [2022-10-24]. <http://www.lanfoodtech.com/product/38.html>. Shanghai Ruilan Mechanical Engineering Co., Ltd. SPMP-I Shrimp Shelling Production Line [EB/OL]. [2022-10-24]. <http://www.lanfoodtech.com/product/38.html>. (in Chinese)
- [72] GUGLIELMO A R, LOCKERBY W L. Process for extracting crab meat; US4752988 [P]. 1988-06-28.
- [73] LAPEYRE G C, GREVE C G, RUYS H J. Trimming and cutting apparatus for the preparation of crabs for meat extraction; US4715093 [P]. 1987-12-29.
- [74] STORESUND J R. Processing machine for boiled/cooked crab; US5149294 [P]. 1992-09-22.
- [75] 杨炬, 付宗国, 于晓龙, 等. 新型贻贝加工设备设计研究 [J]. 机械工程师, 2016(2): 95-98.
- YANG J, FU Z G, YU X L, et al. Research and design in the processing and exploitation of mussel [J]. Mechanical Engineer, 2016(2): 95-98. (in Chinese)
- [76] 郑晓伟, 欧阳杰, 沈建. 南极磷虾离心脱壳工艺参数的研究 [J]. 食品工业科技, 2012, 33(3): 183-185.
- ZHENG X W, OUYANG J, SHEN J. Study on the process parameters of centrifugal shelling of Antarctic krill [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(3): 183-185. (in Chinese)
- [77] COOKE DECEASED M B, PRITCHARD E K. Method and apparatus for removing meat from crabs; US3962752 [P]. 1976-06-15.
- [78] LIM, YOUNG H. Crab shell stripping apparatus for easily removing gills; CA2995327 [P]. 2020-02-23.
- [79] 解秋阳, 王家忠, 戴景刚, 等. 利用水射流剥离海湾扇贝柱的方法及装置 [J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 90-93.
- XIE Q Y, WANG J Z, YI J G, et al. Using water jet to remove the bay scallop column method and the equipment [J]. Food & Machinery, 2014, 30(3): 90-93. (in Chinese)
- [80] 王家忠, 杨淑华, 谢秋阳, 等. 水射流剥离扇贝闭壳肌的试验与参数优化 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 289-294.
- WANG J Z, YANG S H, XIE Q Y, et al. Experiment and operating parameter optimization using water jet technology for scallops shucking processing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(7): 289-294. (in Chinese)

Research progress on shell-meat separation technology of shelled aquatic products: a review

ZHAO Yu, ZHU Xu, ZHU Jianping*, ZHAO Jiabin, FANG Guoai

(College of Engineering and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: As the production of shelled aquatic products increases year by year, the traditional sales and manual processing mode (fresh sale, drunkenness and manual shelling) can no longer alleviate the contradiction of oversupply in the market. Automated deep processing of shelled aquatic products can improve the processing efficiency and ensure the health of workers and food safety, thus promoting the high-quality development of fisheries in China. Shell-meat separation technology is a prerequisite for deep processing of shelled aquatic products, and it is important to promote the development of deep processing equipment for shelled aquatic products. This paper reviews different methods of shell meat separation for shelled aquatic products, and classifies shell meat separation into pretreatment and shell removal technologies, analyzing and summarizing the research on several pretreatment technologies including heating and cooling pretreatment, enzyme pretreatment, ultra-high pressure pretreatment and combined pretreatment, and several shell removal technologies such as cutting, extrusion, centrifugation and high-pressure water jetting. In view of the deficiencies in the process of shell-meat separation of shelled aquatic products, it is proposed that large-scale processing equipment, automation and intelligence should be further developed and the research and development of shipboard processing equipment and crab deep processing should be strengthened. This review will provide ideas and references for further research on automatic processing equipment of shelled aquatic products.

Key words: shelled aquatic product; shell-meat separation; pretreatment; shell removal; automation