

物理场新技术在鱼糜制品加工中的应用

周琳¹, 李轶¹, 赵建新^{1,*}, 黄建联², 王华川¹, 周文果^{2,3}, 张文海², 张灏¹

(1.江南大学食品学院, 食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122;

2.福建安井食品股份有限公司, 福建 厦门 361022; 3.无锡华顺民生食品有限公司, 江苏 无锡 214218)

摘要: 传统鱼糜制品的加工多采用蒸煮和煎烤等方式, 存在加工精度较低、处理时间较长、营养损失较多等问题, 且加工品种单一, 不能满足日益提高的消费需求。新型物理场加工技术以其明确的优势, 可以较好地保持鱼糜制品的固有营养成分、风味和色泽, 实现对产品品质的提升和绿色加工, 是开发优质鱼糜制品的新思路。本文针对超声、超高压、欧姆加热、挤压和微波等物理场新技术在鱼糜制品加工中的应用进行综述, 旨在为鱼糜制品的进一步研究和推广提供参考, 促进水产品加工业的全面发展。

关键词: 鱼糜制品; 物理场; 新技术; 应用

Applications of New Physical Field Technologies in Surimi Products

ZHOU Lin¹, LI Yi¹, ZHAO Jian-xin^{1,*}, HUANG Jian-lian², WANG Hua-chuan¹, ZHOU Wen-guo^{2,3}, ZHANG Wen-hai², ZHANG Hao¹

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, School of Food Science and Technology, Jiangnan University,

Wuxi 214122, China; 2. Fujian Anjoyfood Share Co. Ltd., Xiamen 361022, China;

3. Wuxi Huashun Minsheng Food Co. Ltd., Wuxi 214218, China)

Abstract: Traditional surimi products were usually prepared by steaming, boiling, roasting and frying. This raised several issues such as low machinery accuracy, long processing time, nutrients losses and monotonous product species, which could not meet the increasing consumer requirements. New physical field technologies showed attractive advantages in maintaining inherent nutrients, flavor and color of surimi products, which provided new insights into the surimi product development including improving product quality and eco-processing. This paper reviewed the applications of new physical field technologies in the processing of surimi products, including ultrasonic treatment, ultra high pressure, ohmic heating, extrusion and microwave treatment. This work aimed to provide a reference for further exploration and development of surimi products, and to improve the overall development of seafood manufacturing.

Key words: surimi products; physical field; new technologies; application

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2013)19-0346-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201319071

我国自改革开放以来已逐渐发展为世界第一水产养殖和出口大国^[1]。其中, 鱼糜制品因营养丰富、风味独特、食用方便, 受到消费者的普遍欢迎^[2]。鱼糜加工在我国具有悠久历史, 但早期多为手工加工方式, 自1984年从日本引进冷冻鱼糜生产线, 实现了工业化生产后, 鱼糜制品加工业发展迅速, 2000—2008年鱼糜制品年产量以28.86%的复合增长率递增^[3], 前景十分看好。然而, 与产量的快速增加相比, 我国的鱼糜加工工艺还很落后, 鱼糜制品的品种比较单一, 大都以冷冻鱼糜制品为主^[4]。随着人们生活水平提高和科学技术不断进步, 加强水产资源综合利用, 丰富产品类型, 寻找提高产品

品质和营养价值的新工艺、新方法是鱼糜加工产业发展的必然趋势。

1 传统技术在鱼糜制品加工中的应用现状

传统意义上的鱼糜制品是将冷冻鱼糜解冻, 经擂溃、调味、成型、加热和冷却处理, 制成的凝胶状产品。其中加热是鱼糜制品生产中的重要工艺之一, 加热过程中鱼糜所经历的温度和时间直接关系着鱼糜制品凝胶性能的强弱^[5]。传统加热技术包括蒸、煮、焙、烤、炸5种^[5], 使用传统技术对鱼糜进行加热过程中, 热量均由

收稿日期: 2012-08-23

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD28B05)

作者简介: 周琳(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品生物技术。E-mail: zhoulin1022@hotmail.com

*通信作者: 赵建新(1970—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品生物技术。E-mail: jxzhao@jiangnan.edu.cn

物料外部向内部传递,加热速度慢、物料温度梯度大、加热时间长,易引起凝胶劣化而导致鱼糜制品品质下降^[6]。

研究人员从鱼糜凝胶的过程和机理入手,通过改进传统加工工艺、优化工艺参数、改善产品配方等,围绕着提高鱼糜制品的品质展开了一系列研究。部分研究成果已在鱼糜制品加工业中广泛应用,带来巨大的经济效益,如二段式加热法和谷氨酰胺转氨酶的使用等。大量研究发现30~40℃是鱼糜的凝胶化温度带,在此温度范围放置促进了鱼糜凝胶网络结构的形成,再进行高温加热,使其快速通过凝胶劣化温度带(50~70℃),避免质构破坏,这种二段式加热法使鱼糜具有更高的弹性和强度^[5]。王金余等^[7]通过对白鲢鱼糜进行35℃保温5h,85℃加热30min的二段式加热,使破断强度提高了超过2倍。谷氨酰胺转氨酶是一种新型食品加工用酶,它通过催化蛋白质交联聚合,有效改善蛋白质的凝胶性能,提高产品营养价值和持水性^[8]。杨青等^[9]研究发现谷氨酰胺转氨酶对鱼糜制品硬度、弹性、黏聚性均有显著的改善作用,而对其颜色白度无显著影响,是一种有效的鱼糜品质改良剂。此外,研究人员还发现改变漂洗条件和次数、CaCl₂浓度^[9],以及通过淀粉、胶、非肌肉蛋白等凝胶增效剂的复配^[10]等,可以使鱼糜制品的性能有所提高。

然而,传统技术加工方法具有一定局限性,得到的鱼糜产品品种单一,品质提升空间有限,难以满足消费者越来越多样的消费需求;传统方法对鱼糜原料的要求较高,能源资源利用率难以提高,这给鱼糜制品加工业提出了新的课题。

2 物理场新技术在鱼糜加工中的应用趋势

袁春红等^[11]的问卷调查结果显示,当前消费者最关心的是鱼糜制品的弹性及口味;我国鱼糜消费市场定位狭窄,亟须拓宽。另外,食品安全性问题日益突出,使消费者对食品的天然营养和安全无添加愈加青睐,激发了人们去寻找能较好保持食品固有的营养成分、质构、风味和色泽的加工方法,因此一些物理场新技术的应用受到了广泛的关注。下面就围绕几种物理场新技术在鱼糜制品加工中的研究和应用展开综述。

2.1 超声技术在鱼糜制品加工中的应用

超声技术是指利用超声的振动能量,在介质中产生强大的剪切力和高温,改变物质的结构和功能、加速反应速度的技术^[12]。文献[13-14]对鱼糜进行超声处理,发现凝胶的断裂力、形变、凝胶强度以及盐溶蛋白含量均显著高于对照组($P<0.05$)。蛋白质电泳结果进一步印证了超声波可以加速鱼糜肌肉组织分解和细胞破碎,促进盐溶蛋白溶出。另外,超声处理还会增强罗非鱼的内源性谷氨酰胺转氨酶活性,同时抑制组织蛋白酶活性,促

使鱼糜凝胶强度提高^[15]。值得注意的是,适当的超声处理才能有效增强鱼糜制品的机械性能^[13]。超声处理时间过短(<5min)或过长(>50min),盐溶蛋白溶出均无显著提高,而长时间的超声处理可能导致盐溶性蛋白变性,或被细胞释放出的组织蛋白酶分解为短肽。

目前虽然有研究证明超声技术对鱼糜制品凝胶性能的增强作用,但已有报道表明局限于罗非鱼,超声处理对于不同鱼种的作用效果还应进行验证和比较。超声技术在鱼糜制品加工中的应用研究才刚刚起步,还有许多未知领域需要探索。已有研究围绕鱼糜斩拌前进行超声处理对鱼糜制品的影响展开,而超声技术在加热及冷却工艺中的应用还未有报道,可以进行研究尝试。另外,超声技术与其他多种技术结合,协同提高鱼糜制品的品质可作为一个研究热点。研究已发现超声处理后再斩拌对罗非鱼鱼糜的凝胶强度具有协同提高作用^[13];结合二段式加热工艺,实验中得到了具有理想机械性能的产品^[15]。此外,目前的研究仅限于单频超声技术,化学作用优于单频超声的复频或双频超声在鱼糜制品加工中的应用还未见报道,可作为一个研究方向。

2.2 超高压技术在鱼糜制品加工中的应用

超高压技术是利用高压使食品中的酶、蛋白质等生物高分子物质失去活性或变性的食品加工技术。超高压对形成蛋白质的肽键以及维生素、色素和风味物质等低分子物质的共价键影响较小,因而可以很好地保持食品原有的营养价值、色泽和天然风味,迎合现代社会的消费趋势,应用前景非常可观^[16]。超高压技术在鱼糜制品加工中具有多重应用,极具开发潜力,是当前鱼糜制品加工的研究热点。

2.2.1 超高压杀菌

超高压技术的杀菌效果已得到食品界认同,但在鱼糜抑菌中的应用并不多。超高压会导致微生物细胞的结构和功能发生不可逆的变化^[16],使细胞膜的通透性过大,从而致使微生物死亡^[17]。研究证实超高压杀菌会减少鲤鱼糜的初始菌数,抑制其在贮藏过程中活菌数的增加,延迟腐败时间,提高其保存性^[16]。压力大小对超高压杀菌效果影响较大,压力越高,贮藏起始菌数就越少,鱼糜的保藏期就越长。

2.2.2 超高压凝胶化

鱼糜制品中,肌原纤维蛋白的凝胶特性直接影响鱼糜制品的组织结构、保水性等。超高压可提高肌原纤维蛋白的溶解性,改善鱼糜制品凝胶性能^[4]。

Ashie等^[18]借助SDS-PAGE从机理上探究了超高压对鱼糜凝胶化的作用,发现加压处理时并未立即发生肌球蛋白的交联,高压作用导致底物肌球蛋白构象改变,使其在凝胶化过程中更易与TG酶接近,促进了分子间的交联。Luo Xiaolin等^[19]研究发现超高压对鱼糜制品的硬度

和咀嚼性影响显著。胡飞华等^[20]研究了各参数对超高压鱼糜凝胶强度的影响,发现压力的影响最大,其次为协同温度和保压时间。鱼糜凝胶强度随压力增大呈现先增大后减小的趋势。这是因为压力导致肌原纤维蛋白发生变性和解聚,形成更紧密的凝胶网络结构,使凝胶性能增强。但压力过高时,可能会因蛋白质变性过快反而使凝胶的网络交联度降低。经超高压处理的梅鱼鱼糜的凝胶强度和弹性分别为热处理的2.2倍和1.6倍,但硬度不及热处理效果。因此,有必要寻找合适的凝胶增强剂来进一步提高超高压诱导鱼糜的凝胶特性。陆剑锋等^[21-22]发现卡拉胶或结冷胶作为凝胶增强剂,与超高压处理协同作用可以进一步提高超高压诱导鱼糜的凝胶特性,能够促进白鲢鱼糜形成优质凝胶。Carlos等^[23]结合超高压处理和添加TG酶,显著提高了凝胶能力弱的鱼糜原料的凝胶性能。

研究还发现,温度对于超高压鱼糜加工产品性能非常重要。Chevalier等^[24]认为高压条件下鱼肉蛋白对温度敏感,低于100℃条件下的高压处理有利于凝胶形成,并能有效增强凝胶强度,相同的结论也在胡飞华等^[16]的研究中得出。另外,加压处理后的鱼糕放置于低温条件下,弹力会进一步增强,如将300MPa加压处理的鱼糜凝胶在5℃低温条件下放置120h,凝胶强度约为加压完成后的4倍,约为通常加热的3倍^[25]。

2.2.3 超高压解冻

高压会使冰的融化温度下降。将这种性质用于食品解冻即称为超高压解冻,既省时,又使冻品解冻后保持优良品质。Jocelyn等^[26]选择角鲨和扇贝2种海产品,比较超高压解冻和大气压条件下水解冻的效果,发现超高压解冻可显著降低冻品汁液流失,延长加压时间后减少汁液流失的效果尤为显著,最佳解冻效果在150MPa条件下获得。Schubring等^[27]对200MPa高压解冻的鱼片和15℃流水解冻的鱼片分别进行感官评定、微生物、pH值以及持水力测试,发现高压解冻鱼片的各项品质指标都明显优于流水解冻鱼片。但目前,高压解冻由于成本过高、设备投资大等弊端,在商业生产中应用仍较少。

超高压技术是目前产业化程度最高的食品非热处理技术,虽然在鱼糜制品加工中的应用起步较晚,但其在改善鱼糜制品凝胶性能、抑菌、节能等方面表现出的独特优势,为鱼糜制品加工、贮藏以及新产品开发提供了更多选择。超高压技术在鱼糜制品加工中的应用研究还有很多值得探索的方面,如尝试寻找一些协同措施以降低超高压杀菌压力,评价超高压处理对鱼糜的风味物质及营养成分的影响,研究超高压技术与其他技术的组合应用效果等。另一方面,超高压设备制造成本高,配套工业化设备不完备等弊端都使得连续生产困难较大,制约着超高压技术在实际生产中的应用。但随着基础理

论、设备开发等研究的深入,高压技术必将得到更加广泛的使用,为鱼糜制品的生产加工注入新的活力。

2.3 欧姆加热技术在鱼糜制品加工中的应用

欧姆加热(Ohmic heating)是在物料两端施加电场,利用物料本身的电阻特性直接把电能转化为热能的一种加热方式,具有加热速度快、加热均匀、无污染、易操作、能量利用率高等优点^[27]。从目前国内外的研究和使用情况来看,欧姆加热主要是运用于加工液态和颗粒流体食品,鱼糜制品的欧姆加热研究还处于起步阶段^[28]。

食品物料的电导率是影响欧姆加热速率的关键因素,而食品电导率的大小受很多因素影响,如温度、食品的组成成分、电解质浓度、颗粒大小等^[29]。因此,目前关于鱼糜制品欧姆加热的主要研究围绕着物料的电导率变化规律进行。Pongviratchai等^[30]将阿拉斯加鳕鱼与不同浓度马铃薯淀粉混合,进行多频欧姆加热。物料电导率随着水分含量、电场频率、电压的增加而增大;温度对电导率影响尤为显著,在鱼糜-淀粉体系中二者大致呈线性关系,但温度超过55℃后,淀粉含量高的体系中电导率上升加快,可能是淀粉颗粒受热膨胀使电导率改变。Pongviratchai等^[31]比较不同处理方式的鱼糜样品,发现与传统加热相比,欧姆加热使鱼糜凝胶性能显著加强,而对凝胶色泽影响小。另外向鱼糜中添加蛋白类成分会使凝胶强度进一步增强,淀粉只有在低含量(3%)条件下对凝胶性能起增强作用,当其含量上升到9%,与体系中蛋白质竞争水分,反而使凝胶强度下降。李媛等^[32]发现脂肪含量也会影响电导率,由于脂肪的不良导电性,肉糜电导率下降,加热处理时间延长。

Kanjanapongkul等^[33]还尝试将欧姆加热用于处理鱼糜漂洗废水,使蛋白质凝结以降低生化污染,并用一个基于能量守恒定律的模型预测废水温度,与实际拟合度很高。实验中欧姆加热系统可使废水中约60%蛋白质凝结,为鱼糜漂洗废水的处理提供了实际可行的新思路。

欧姆加热与水浴加热相比有速度快、效果好的显著优势,但欧姆加热也存在对微生物杀菌程度低、可能促进产品脂肪氧化等问题^[34]。这是由于鱼糜制品的蛋白质和水分含量高,又富含易氧化的不饱和脂肪,易发生腐败和氧化。欧姆加热时间较短,可能不足以致死细菌。如何提高欧姆加热鱼糜制品的杀菌效率、抑制脂肪氧化、延长产品货架期十分重要,可以作为今后研究的一个着手点。鱼糜制品体系复杂,各种辅配料会使电导率有不同改变,影响欧姆加热的时间和效果,因此对鱼糜制品中常用辅料进行全面系统研究,可为欧姆加热在鱼糜制品加工业中的实际应用奠定一定的基础。

2.4 热塑挤压技术在鱼糜制品加工中的应用

热塑挤压是利用热和机械剪切力,使食品成分的结构和性质发生激烈变化的一种加工技术,可以用于开发

新产品,提高物料消化率,抑制不良酶类及抗营养因子(如胰蛋白酶抑制剂、丹宁酸),在产量、节能及营养品质方面较传统工艺有着明显的优势^[35]。

热塑挤压会对物料产生强烈作用,使产品的形貌、质构、性能等均与原料不同,为低值鱼蛋白的精深加工提供了新思路。鱼糜的热塑挤压研究开始较早,但是开展的研究工作并不多。研究人员对热塑挤压的过程参数对鱼肉蛋白质特性的影响规律进行了一系列探索,为控制挤压过程实现预期目标提供了依据。Gour等^[36]考查了比目鱼肌肉蛋白酶在挤压过程中的失活情况。机头料温在50~80℃范围内,肌肉蛋白酶快速失活;螺杆转速降低会使蛋白酶失活程度提高。Suknark等^[37]发现同时增加螺杆温度和转速,会增强膨化效果,使产品堆积密度和剪切强度降低。刘俊荣等^[38]发现挤压操作参数对挤出物水分含量、堆积密度、蛋白质分子结构及营养价值都有一定影响,可通过建立模型指导生产。Gour等^[39]发现鱼糜的固形物含量是重要参数,它会影响物料黏度和温度,使经蛋白酶水解处理的鱼糜与对照组在挤压过程中形成显著差异。Murali等^[40]向鱼凝凝胶中添加20%、25%甘油增塑,在110、120℃进行双螺杆挤压然后在80℃成型,开发得到质量优异的可食性膜,为挤压技术在鱼糜制品加工中找到了一个新的应用方向。

热塑挤压改变食品成分的同时,也会对食品营养价值产生一定影响。杨涛等^[35]认为这种影响具有双重性,有利影响包括破坏抗营养因子、提高蛋白质消化率、促进淀粉凝胶化、增加水溶性膳食纤维和减少脂肪氧化等,不利影响包括加剧了蛋白质与还原糖之间的美拉德反应、对热不稳定的维生素可能会有不同程度的损失,具体的影响还主要取决于原料的类型、成分和工艺条件。

利用热塑挤压技术开发鱼肉蛋白质重组产品,对提高低值鱼综合利用率、增加产品附加值、丰富鱼糜制品形式、开拓鱼糜休闲食品市场等有好处。但目前,热塑挤压过程变量多、生产不易控的问题还未得到很好解决,需要进一步研究各参数对产品质构和感官性质的影响,并对产品配料和工艺参数进行优化,进行多种尝试,开发多样的鱼糜挤压新食品。

2.5 微波技术在鱼糜制品加工中的应用

微波加热是利用微波使极性分子碰撞产生的摩擦热,使物料内各部分均匀升温加热,具有方便快捷、高效节能、穿透性强等优势^[41],在鱼糜制品加工中颇具应用潜力。

付湘晋等^[42]认为鱼糜微波加热时,组织蛋白酶快速失活,且凝胶中心温度快速越过“凝胶劣化区”,使鱼糜凝胶性质显著优于水浴加热,并发现微波加热加强二硫键和非二硫共价键的形成,增强蛋白质间的交联,同时抑制了凝胶过程中的蛋白质自溶,提高了低盐鱼糜

凝胶的机械性能^[43]。在加工中灵活应用微波技术还可进行新产品开发。杨瑞金^[44]以鱼糜为主要原料,接种面包酵母,经微波加热开发出一种发酵微波膨化鱼糜休闲食品,扩大了鱼糜产品的市场范围。

然而对鱼糜制品进行微波复热常导致凝胶机械特性下降。Groppe等^[45]认为这可能是由于微波加热不均匀使鱼糜产生了局部热点,使蛋白凝胶网络形成缺陷,从而导致凝胶机械特性改变。Uzzana等^[46]发现微波复热产品只要产生内部沸腾,就会导致韧性显著增加,并伴随着明显的收缩和密度增大。这是由于微波加热产生蒸汽,导致封闭的孔隙中压力过大使孔隙破裂塌陷,加热停止后,弹性的孔隙壁重新关闭,蒸汽冷凝和空气减少使产品变得紧实、韧性增加。Mizrahi^[47]认为内部沸腾在微波加热中相当常见,是产生不期望质构变化的主要诱因。为避免沸腾的发生可以在微波炉内设计一个感受器,通过检测温度或湿度来判断沸腾是否开始,从而避免沸腾进一步发生;另一种构想是通过优化微波复热条件避免不良质构产生,都具有实际应用价值,可以进行深入研究。

微波食品安全问题仍然倍受舆论关注。微波加热过程中可能伴随着营养流失、质构改变,甚至产生安全隐患。对此,蒋岚等^[41]认为微波加热会使食品品质产生一定变化,但并非对所有的营养物质都会产生不利影响,对不同食材中不同的营养成分微波加热的影响是不同的。在维生素保存、微生物抑制等方面,微波加热相对于传统加热都具有优势。因此,只要掌握正确微波技术,科学合理使用,避免对食品进行长时间微波加工、反复微波辐射或微波高温,就能有效地减少或防止微波加工可能的潜在危害。

微波鱼糜产品凝胶性能好,并具有节能、省时的显著优势,有潜力取代传统加工鱼糜制品。但微波技术在鱼糜制品加工中的应用还存在一些需要探讨的问题,如微波加工和微波复热分别对鱼糜营养成分及质构特性的具体影响,通过改进设备和工艺条件优化,减弱或避免微波处理对产品造成的不利影响等。

3 结 语

物理场加工技术与传统加工方法相比,往往能较好地保持鱼糜制品的固有营养成分、风味和色泽,对于鱼糜的凝胶性质及质构特性也有不同程度的提高效果。合理地利用这些物理场新技术不仅可以提高鱼糜产品品质、缩短加工时间、节省能源、增强水产资源综合利用,也有助于开发新形式的鱼糜制品,拓宽鱼糜制品市场定位。物理场新技术在鱼糜制品加工中应用前景宽广,已成功获得一些研究成果和应用实例。然而,现有报道中针对物理场新技术对鱼糜凝胶结构和营养成分的

具体影响及相关机制的研究较少,综合利用几种高新技术的实例较少,超声、欧姆加热等几种物理场技术在鱼糜制品加工中的应用研究也才刚刚起步,此外,微波等物理场技术对于食品安全性的影响还存在争议,都可作为今后进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 林英.我国成为世界水产业第一大国[N].光明日报,2011-05-30.
- [2] 任宏伟,胡柳.我国鱼糜制品现状及发展态势[J].中国水产,2010(8):25-26.
- [3] 刘海梅.鲢鱼糜凝胶及形成机理的研究[D].武汉:华中农业大学,2007.
- [4] 罗晓玲.马鲛鱼鱼糜超高压凝胶化工艺研究[D].无锡:江南大学,2010.
- [5] 夏松养,奚印慈,谢超.水产食品加工学[M].北京:化学工业出版社,2008:132-137.
- [6] 朱玉安,刘友明,张秋亮,等.加热方式对鱼糜凝胶特性的影响[J].食品科学,2011,32(23):107-110.
- [7] 王金余,刘承初,赵善贞,等.白鲢鱼糜肌球蛋白交联反应和凝胶化最适条件的研究[J].食品科学,2008,29(11):223-227.
- [8] 杨华,薛长湖,娄永江,等.谷氨酰胺转氨酶在水产品中的应用研究[J].食品科技,2003(7):81-83;90.
- [9] 杨青,江波,张涛,等.谷氨酰胺转氨酶对鲢鱼鱼糜品质的影响[J].食品与发酵工业,2010(10):24-29.
- [10] 龙虎,蔡自建,刘鲁蜀,等.不同添加物对白鲢鱼丸凝胶特性影响的研究[J].西南民族大学学报:自然科学版,2010,36(5):757-762.
- [11] 袁春红,程裕东,陈舜胜,等.我国鱼糜制品消费嗜好的调查分析[J].渔业现代化,2002(1):31-33;18.
- [12] 袁英髦,曹雁平.食品工业中超声技术现状与发展趋势[J].食品工业科技,2011(3):442-445.
- [13] 张崑,曾庆孝,张佳敏,等.超声和斩拌对罗非鱼鱼糜凝胶强度的影响[J].食品研究与开发,2010(10):63-67.
- [14] ZHANG Yin, ZENG Qingxiao, ZHU Zhiwei, et al. Effect of ultrasonic treatment on the gel strength of tilapia (*Sarotherodon nilotica*) surimi[J]. Journal of Food Process Engineering, 2011, 34(2): 533-548.
- [15] ZHANG Yin, ZENG Qingxiao, ZHU Zhiwei. Effect of ultrasonic treatment on the activities of endogenous transglutaminase and proteinases in tilapia (*Sarotherodon nilotica*) surimi during gel formation[J]. Journal of Food Process Engineering, 2011, 34(5): 1695-1713.
- [16] 胡飞华.梅鱼鱼糜超高压凝胶化工艺及凝胶机理的研究[D].杭州:浙江工商,2010.
- [17] MALONE A S, SHELLHAMMER T H, COURTNEY P D. Effects of high pressure on the viability, morphology, lysis, and cell wall hydrolase activity of *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(9): 4357-4363.
- [18] ASHIE I N A, LANIER T C. High pressure effects on gelation of surimi and turkey breast muscle enhanced by microbial transglutaminase[J]. Journal of Food Science, 1999, 64(4): 704-708.
- [19] LUO Xiaolin, YANG Ruijin, ZHAO Wei, et al. Gelling properties of Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) surimi as affected by washing process and high pressure[J]. International Journal of Food Engineering, 2010, 6(4): 1556-3758.
- [20] 胡飞华,陆海霞,陈青,等.超高压处理对梅鱼鱼糜凝胶特性的影响[J].水产学报,2010,34(3):329-335.
- [21] 陆剑锋,邵明栓,林琳,等.卡拉胶和超高压对鱼糜凝胶性质的影响[J].农业机械学报,2011(12):164-170.
- [22] 陆剑锋,邵明栓,林琳,等.结冷胶和超高压对鱼糜凝胶性质的影响[J].农业工程学报,2011(11):372-377.
- [23] CARLOS L C, ROGERIO O M, JORGE A S, 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.
- [24] CHEVALIER D, LE B A, GHOUL M. Effects of high Pressure treatment(100—200MPa) at low temperature on turbot (*Scophthalmus maximus*) muscle[J]. Journal of Food Science, 2001, 34(5): 425-429.
- [25] 陈复生,张雪,钱向明.食品超高压加工技术[M].北京:化学工业出版社,2005:12-17.
- [26] JOCELYN R, ALAIN L, RAMASWAMYB H S, et al. High pressure thawing of fish and shellfish[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 53(1): 83-88.
- [27] SCHUBRING R, MEYER C, SCHLUTER C, et al. Impact of high pressure assisted thawing on the quality of fillets from various fish species[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2003, 4(3): 257-267.
- [28] 耿建暖.欧姆加热及其在食品加工中的应用[J].食品与机械,2006,22(6):144-146;153.
- [29] 贾琛,李媛,刘毅,等.欧姆加热技术在肉品工业中的应用[J].肉类研究,2010,133(3):69-72.
- [30] PONGVIRATCHAI P, PARK J W. Electrical conductivity and physical properties of surimi-potato starch under Ohmic heating[J]. Journal of Food Science, 2007, 72(9): 503-507.
- [31] PONGVIRATCHAI P, PARK J W. Physical properties of fish proteins cooked with starches or protein additives under Ohmic heating[J]. Journal of Food Quality, 2007, 30(5): 783-796.
- [32] 李媛,刘毅,贾琛,等.电压梯度与脂肪含量对欧姆加热肉糜制品加热速率和品质的影响[J].农产品加工:学刊,2010,214(7):29-32.
- [33] KANJANAPONGKUL K, TIA S, WONGSA-NGASRI P, et al. Coagulation of protein in surimi wastewater using a continuous Ohmic heater[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(2): 341-346.
- [34] 贾琛,刘毅,朱晓红,等.欧姆加热对肉制品中大肠杆菌杀灭效果及其品质影响[J].农产品加工:学刊,2011,250(7):4-7;22.
- [35] 杨涛,辛建美,徐青,等.热塑挤压技术对食品营养成分影响的研究进展[J].食品科学,2010,31(7):312-316.
- [36] GOUR S C, BINOY K G. Protease inactivation in fish muscle by high moisture twin-screw extrusion[J]. Journal of Food Science, 1996, 61(6): 1219-1222.
- [37] SUKNARK K, PHILLIPS R D, HUANG Y W. Tapioca-fish and tapioca-peanut snacks by twin-screw extrusion and deep-fat frying[J]. Journal of Food Science, 1999, 64(2): 303-308.
- [38] 刘俊荣,薛长湖,佟长青,等.鱼肉蛋白质热塑挤压组织化中过程参数的优化模型[J].水产学报,2005,29(5):118-123.
- [39] GOUR S C, AKHILESH G. Effects of hydrolysed fish muscle on intermediate process variables during twin-screw extrusion of rice flour[J]. Food Science and Technology, 2003, 36(7): 667-678.
- [40] MURALI K, CALEB I N, SEA C M. Development of fish gelatin edible films using extrusion and compression molding[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(2): 337-344.
- [41] 蒋岚,朱毅,罗云波.微波加热食品的安全性[J].食品工业,2011(9):1-4.
- [42] 付湘晋,许时婴,王璋.微波加热法制备白鲢鱼低盐鱼糜凝胶[J].中国食品学报,2010,10(3):52-57.
- [43] FU Xiangjin, HAYAT K, LI Zhonghai. Effect of microwave heating on the low-salt gel from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(2): 301-308.
- [44] 杨瑞金.一种发酵微波膨化鱼糜休闲食品及其生产方法:江苏,CN101904518A[P].2010-12-08.
- [45] GROPPER M, RAMON O, KOPELMAN I J, et al. Effects of microwave reheating on surimi gel texture[J]. Food Research International, 1997, 30(10): 761-768.
- [46] UZZANA M, ELLINA K, RAMONB O, et al. Mechanism of textural changes induced by microwave reheating of a surimi shrimp imitation[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(2): 279-284.
- [47] MIZRAHI S. Mechanisms of objectionable textural changes by microwave reheating of foods: a review[J]. Journal of Food Science, 2012, 77(1): 57-62.