

## 鱼糜凝胶热稳定性的增强技术研究进展

朱士臣<sup>1,2,3</sup>, 冯媛<sup>1,2,3</sup>, 刘书来<sup>1,2,3</sup>, 周绪霞<sup>1,2,3,4</sup>, 丁玉庭<sup>1,2,3,4\*</sup>

(<sup>1</sup>浙江工业大学食品科学与工程学院 杭州 310014

<sup>2</sup>浙江省深蓝渔业资源高效开发利用重点实验室 杭州 310014

<sup>3</sup>国家远洋水产品加工技术研发分中心(杭州) 杭州 310014

<sup>4</sup>海洋食品精深加工关键技术省部共建协同创新中心 大连工业大学 辽宁大连 116034)

**摘要** 鱼糜凝胶的热加工特性是影响即食鱼糜品质的重要评价指标。如何有效提高鱼糜制品的热稳定性是开发高品质鱼糜制品亟待解决的关键问题。本文综述了影响鱼糜蛋白凝胶热稳定性的内、外因素,如组分构成、微观结构和水分,从物理、化学和生物 3 个方面总结国内外鱼糜凝胶热稳定性的增强技术,为高品质鱼糜凝胶产品的开发提供理论参考。

**关键词** 鱼糜; 凝胶; 热稳定性; 影响因素; 机理

**文章编号** 1009-7848(2022)07-0384-13 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.07.038

鱼糜制品作为一种重要的水产调理食品,其独特的黏弹特性及较高的营养价值深受消费者喜爱。作为评价鱼糜凝胶品质的重要指标之一,鱼糜制品的黏弹特性取决于鱼糜的凝胶化及热加工过程。鱼糜凝胶形成过程本质上是肌原纤维蛋白在热诱导作用下的结构演变过程,主要包括肌原纤维蛋白高级结构展开及再组装<sup>[1-2]</sup>。除了鱼糜凝胶自身的形成过程与温度密切相关外,鱼糜凝胶制品的热加工特性也显著影响其品质。如经高温杀菌处理的鱼糜制品可在常温条件下流通,而经“二次加热”后易导致肌球蛋白重链降解、二级结构转变、鱼糜制品质构特性以及营养品质下降<sup>[3]</sup>。如何提高鱼糜凝胶的热稳定性,是增强其热加工品质亟待解决的关键问题之一。

目前大量研究报道了增强鱼糜凝胶制品热稳定性的方法,如物理法(超声、超高压)<sup>[4-6]</sup>、化学法(多糖、淀粉、磷酸盐等)<sup>[7-13]</sup>和生物法(谷氨酰胺转氨,Transglutamine,TG 酶、激肽原)<sup>[14-16]</sup>等。通过 Web of Science 检索发现,近年来未有相关综述文章对鱼糜蛋白热稳定性增强技术做系统、全面

的总结。仅 Kuraishi 等<sup>[17]</sup>和 Hunt 等<sup>[18]</sup>分别于 2001 年和 2009 年总结了 TG 酶和淀粉在鱼糜中的应用。随着相关研究报道的日益增多,增强鱼糜凝胶热稳定性的方式也进一步丰富,有必要对相关技术进行梳理。

基于此,本文总结影响鱼糜凝胶制品热稳定性的主要因素,如组分构成、微观结构、水分等,重点阐述增强肌原纤维蛋白凝胶热稳定性的手段,以期对高品质鱼糜制品的开发设计提供理论参考。

### 1 影响鱼糜蛋白凝胶热稳定性的相关因素

#### 1.1 蛋白凝胶热稳定性的评价方法

鱼糜蛋白凝胶热稳定性的评价手段一方面可通过差示扫描量热法(Differential scanning calorimetry,DSC)、热重法(Thermogravimetry,TA)、动态温度流变扫描等方法,直接反应鱼糜肌原纤维蛋白的热响应行为。热量的输入会破坏维持蛋白质分子天然三维结构的相互作用力,导致蛋白结构伸展或变性。DSC 通过检测热诱导蛋白质结构转变所需热量(焓变)来表征蛋白质结构的热稳定性。鱼肉 DSC 曲线中有 2 个热吸收峰 Peak 1 和 Peak 2(图 1),分别与肌球蛋白和肌动蛋白的吸热转变有关。一般而言,肌球蛋白的热吸收焓变值高于肌动蛋白焓变值。Pietrowski 等<sup>[19]</sup>发现相较于对照组,添加  $\omega$ -3 多不饱和脂肪酸鱼糜的 DSC 曲线

收稿日期: 2021-07-22

基金项目: 浙江省自然科学基金探索项目(LQ21C200006);  
国家自然科学基金青年科学基金项目(32001768);  
“十三五”国家重点研发计划重点专项(2019 YFD0901600)

作者简介: 朱士臣(1990—),男,博士,讲师

通信作者: 丁玉庭 E-mail: dingyt@zjut.edu.cn

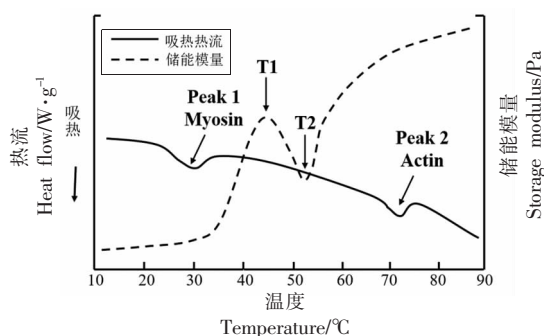


图 1 肌球蛋白与肌动蛋白 DSC 与流变温度扫描曲线

Fig.1 DSC and dynamic temperature rheological diagram of myosin and actin

存在肌动蛋白热吸收峰,表明两者间存在一定的相互作用,从而增强鱼糜蛋白热稳定性。蛋白凝胶化过程是从热诱导的溶液态到凝胶态的相转变过程,因此通过动态温度扫描流变弹性模量值可获得蛋白凝胶化过程黏弹性变化。鱼糜蛋白质凝胶化过程包括低温凝胶化(Setting, 0~50 °C)、凝胶劣化(Modori, 50~70 °C)和鱼糕化(Kamaboko, >70

°C)。低温凝胶化是在内源性转谷氨酰胺酶(TGase)催化转酰胺反应、二硫键及疏水相互作用下促使蛋白质从溶胶到凝胶发生转变,此时弹性模量逐渐升高。升高温度至 50~70 °C 时内源性蛋白酶激活,使凝胶网络结构断裂,弹性模量降低。进一步升高温度,凝胶化过程持续进行并形成结构更为稳定的凝胶弹性体。此外,还可通过高温处理前、后鱼糜蛋白质结构或理化特性改变,间接反映蛋白凝胶的热稳定性。如通过凝胶强度、蛋白质二级结构( $\alpha$  螺旋、 $\beta$  折叠)以及网络结构变化程度等,间接反应鱼糜蛋白凝胶的热力学行为。

## 1.2 鱼糜蛋白凝胶热稳定性影响因素

热处理是鱼糜制品加工过程中的重要环节,主要的加热类型包括煮(酱)制、炸制、熏制、烤制、微波加热、通电加热等。鱼糜制品的热加工品质直接影响了其感官特性以及营养价值。已有研究表明鱼糜蛋白的组成类型、微观结构和水分状态等均会影响蛋白凝胶的热稳定性(表 1)。

表 1 鱼糜蛋白凝胶热稳定性的影响因素

Table 1 Factors affecting the thermal stability of protein gel

因素	结果	影响机制	参考文献
肌球蛋白	凝胶性较好	肌球蛋白在热作用下,由 $\alpha$ -螺旋结构转变为无规卷曲,疏水基团暴露,疏水相互作用增强。肌球蛋白具有极强的亲水性,束缚大量水分,形成均一网状结构,赋予凝胶弹性	李杰等 <sup>[20]</sup>
肌动蛋白	低水平肌动蛋白与肌球蛋白结合可提高凝胶弹性,在较高(6.1%)水平下降低凝胶弹性	肌动蛋白参与凝胶网络形成的贡献有限,与体系的黏度有关	Sun 等 <sup>[21]</sup>
蛋白质浓度	浓度越高,热稳定性越强	蛋白质所占的净基质面积的增加,导致连接处的潜在互连增加	Sun 等 <sup>[21]</sup>
微观结构	微观结构越致密、有序,热稳定性越强	凝胶结构越均匀、致密、有序,热稳定性越好	张莉莉 <sup>[22]</sup>
水分	蛋白质与水分的结合更加紧密,增强体系稳定性	蛋白质和水的相互作用决定和维持三维结构的稳定性	Zhang 等 <sup>[23]</sup>

1.2.1 蛋白类型、浓度 鱼肉蛋白以肌原纤维蛋白、基质蛋白及肌浆蛋白为主。肌原纤维蛋白约占鱼肉蛋白的 60%~75%,由肌球蛋白、肌动蛋白和肌动球蛋白组成<sup>[1]</sup>。其中肌球蛋白是形成鱼糜凝胶的关键蛋白,鱼糜凝胶形成过程中,肌球蛋白  $\alpha$ -螺旋结构逐渐转变为无规则卷曲状态,使维持蛋白质  $\alpha$ -螺旋结构的氢键断裂,疏水基团暴露,疏

水相互作用增强,巯基在加热过程中被氧化成二硫键,使蛋白分子间共价交联程度增强,鱼糜弹性增强(图 2)<sup>[19,24]</sup>。肌动蛋白主要以纤维聚集形式的 F 肌动蛋白存在,约占所有肌原纤维蛋白种类的五分之一,流变学结果表明,肌动蛋白在鱼糜蛋白凝胶化网络形成过程中的作用有限<sup>[2]</sup>,单独存在条件下只能形成弱溶胶,且与体系的黏度有关。

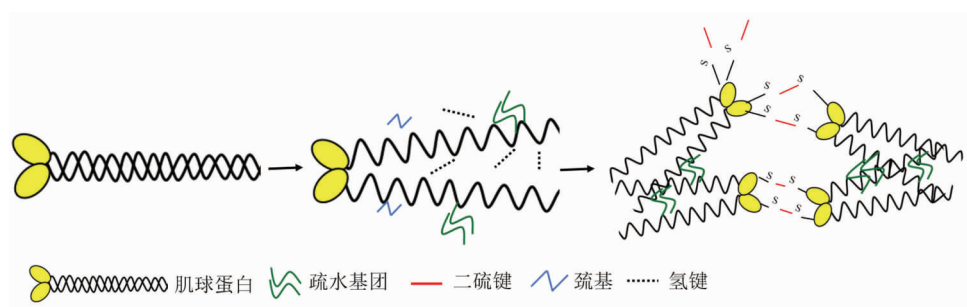


图2 鱼糜肌球蛋白热聚集过程<sup>[19,24]</sup>  
 Fig.2 Thermal aggregation process of myosin in surimi<sup>[19,24]</sup>

除肌肉蛋白种类之外,蛋白质浓度及肌动蛋白与肌球蛋白比例均会影响鱼糜凝胶热稳定性。据报道,肌原纤维蛋白含量达到凝胶化所需“最小凝胶浓度”或临界蛋白质浓度(0.5%)时,即可引发凝胶化过程<sup>[9]</sup>。随着蛋白质浓度的增加,蛋白质分子间的平均分子间距降低,使蛋白质-蛋白质相互作用的可能性增大,热稳定增强。肌动蛋白对肌球蛋白凝胶的热稳定性影响与其比例相关,只有当一半的肌球蛋白重链分子交联时,肌动蛋白才会通过疏水作用参与聚合过程,增强凝胶体系的热稳定性<sup>[25]</sup>。

**1.2.2 微观结构** 鱼糜凝胶的微观结构能够影响鱼糜制品的质构特性、风味释放以及消化能力。因此增强鱼糜凝胶微观结构的热稳定性对于改善鱼糜制品的热加工品质具有重要意义。维持蛋白凝胶网络结构的主要化学作用力包括氢键、静电相互作用、疏水相互作用和共价键。外界加工条件,如温度、压力及环境pH值<sup>[9]</sup>均通过不同程度影响分子间的作用力,调控蛋白网络结构,进而改变鱼糜的热加工特性。当鱼糜处于较低的加热温度时,肌原纤维蛋白变性速度较慢,蛋白伸展速率大于聚集速率,能够形成有序、细致的凝胶网络结构。随温度升高,蛋白质分子通过活性基团的非共价键作用,发生交联和聚集形成胶凝体,进而构建复杂的三维网络结构。刘前等<sup>[26]</sup>认为肌球蛋白在40℃以下不能形成明显的三维网络结构;当加热至50℃时,会形成局部粗糙和不紧凑网孔结构,随着温度继续上升,凝胶网络结构逐渐紧凑,网孔分布更为均匀;当温度超过70℃时,蛋白质螺旋结构继续展开,蛋白质间的交联作用进一步形成稳定的凝胶网络结构。郑昇阳等<sup>[27]</sup>研究发现改变凝胶

化温度可增强鱼糜凝胶热稳定性,将凝胶化温度从35℃提高至50℃时,鱼糜热转变温度从111.23℃逐渐上升至120.21℃。超高压处理通过诱导肌动球蛋白变性,解聚肌动蛋白和肌球蛋白,形成稳定、有序、致密的凝胶网状结构,从而提高鱼糜凝胶制品的热加工品质。然而压强过高会使蛋白分子间相互作用力减弱,网络结构遭到破坏,导致凝胶强度降低和热稳定性下降。除了温度、压强外,加工过程的pH值也会通过改变凝胶的网络结构影响鱼糜凝胶的热稳定性。酸性条件下凝胶的微观结构有序性低,不均匀。在远离等电点的中性条件下,蛋白分子间静电斥力下降,相互作用力增强,其微结构致密均匀,有利于增强热稳定性。

**1.2.3 水分含量、状态及分布** 鱼糜蛋白凝胶化过程是蛋白质分子交联聚集形成三维网络结构的过程,其三维结构的稳定性很大程度上是由蛋白质和水的相互作用及水的存在状态所决定。研究表明,水分含量、状态及分布均会影响蛋白质间的相互作用。改变鱼糜溶胶中不易流动水及自由水的含量可有效抑制高温处理对凝胶结构的破坏<sup>[23]</sup>。较低的水分自由度可使蛋白质与水分间的结合更加紧密,从而可增强鱼糜凝胶的热稳定性。蛋白质凝胶的持水性与凝胶网络结构和蛋白质状态密切相关,因此诸多因素如温度、pH值和压力均可通过调控蛋白质结构或微观网络而影响凝胶的持水性,进而改变鱼糜产品的热稳定性。

## 2 蛋白凝胶热稳定性增强的方法及机理

目前,鱼糜蛋白凝胶热稳定性增强的方法有物理、化学及生物方法(表2)。通过改变蛋白凝胶组分结构、微观结构以及水分含量和状态,可提高



表 2 蛋白凝胶热稳定性增强方法和机理

Table 2 Methods and mechanisms for enhancing thermal stability of protein gels

增强方法	机理	参考文献
物理方法		
超声	空化作用和机械效应下,鱼糜肌球蛋白解链与相互交联速度增加,相互交联度更好	李斌等 <sup>[4]</sup>
微波	微波加热使蛋白分子链之间的相互作用更强,增强质地特性并改善凝胶的持水能力,从而增强鱼糜凝胶的热稳定性	Ji <sup>[5]</sup>
超高压	高压使肌球蛋白构型改变,暴露出巯基基团,破坏分子键,形成有序的三维网络结构;还可抑制内源性蛋白酶活性,减少凝胶劣化	付强 <sup>[6]</sup>
化学方法		
蛋白质	动物血浆蛋白抑制蛋白酶的活性,改善凝胶特性,蛋清蛋白、小麦蛋白和大豆分离蛋白通过自身的凝胶作用来提高热稳定性	励建荣等 <sup>[7]</sup>
多糖胶体	食品胶与蛋白之间相互嵌合,形成致密稳固的三维网状结构,提高鱼糜凝胶强度以及持水性	许时婴等 <sup>[8]</sup>
淀粉	淀粉作为填充剂,受热吸水膨胀向凝胶基质施加压力,且支链分子含量较高的淀粉膨胀程度越大,对鱼糜凝胶增强效果更好	韩静文 <sup>[9]</sup>
纳米材料	鱼骨富含钙,钙离子可提高 TG 酶活性,还可诱导肌球蛋白展开,纳米尺寸可使鱼骨颗粒嵌入肌原纤维蛋白凝胶网络中,使网络结构更加紧凑,增强鱼糜凝胶热稳定性	尹涛 <sup>[10]</sup>
多酚	多酚在氧化条件下与肽的侧链氨基反应,形成多酚-蛋白质交联,可增强胶凝稳定性	Von 等 <sup>[11]</sup>
磷酸盐	磷酸盐与蛋白质结合,隔离整合剂,增加极性基团的数量,增强其溶解度与水结合能力	Zhou 等 <sup>[12]</sup>
脂质	脂肪形成小脂肪球,填充到鱼糜中,乳化脂肪球滴与肌动球蛋白间的相互作用,影响凝胶强度、热稳定性等	Zhou 等 <sup>[13]</sup>
生物方法		
谷氨酰胺转氨酶	TG 酶促进鱼糜蛋白质之间非二硫共价键的形成,增强蛋白分子内或分子间的交联,形成更加稳定的三维凝胶网络结构	郭秀瑾等 <sup>[14]</sup>
激肽原	半胱氨酸蛋白酶抑制剂(激肽原)可有效抑制半胱氨酸蛋白酶的活性,提高鱼糜的凝胶热稳定性	钟婵等 <sup>[15]</sup>
多酚氧化酶	多酚氧化酶可氧化和裂解多酚形成醌类物质,进一步与蛋白质侧链氨基共价交联,形成蛋白质-多酚偶联物	Quan 等 <sup>[16]</sup>

鱼糜凝胶热稳定性。

## 2.1 物理方法

2.1.1 超声 基于超声技术的空穴效应、加热效应和机械效应,一定程度的超声处理可促使鱼糜肌球蛋白解链与交联速率增加,从而增强蛋白的交联度,使鱼糜样品的网格结构更致密,形成的鱼糜凝胶热稳定性提高<sup>[28]</sup>。Boora 等<sup>[29]</sup>研究发现经超声改性后的蛋白凝胶在加工过程中能承受更长时间的高温,较对照组(81.93 ℃),超声改性后的蛋白凝胶具有更高的热转变温度(93.32 ℃),总体热稳定性提高 6 倍左右。Zhang 等<sup>[30]</sup>采用 250 W 超声强度处理罗非鱼鱼糜,结果表明 3 种频率(28, 45, 100 kHz)均可通过破坏细胞壁,并释放其细胞物

质增强鱼糜凝胶热稳定性,其凝胶热稳定性分别增加 45%, 35% 和 75%。Li 等<sup>[31]</sup>也发现 6 min 超声处理的肌原纤维蛋白乳液经 20~90 ℃ 的高温处理后,仍具有最高的弹性模量值。

2.1.2 微波 微波可引起食物中的水分子参与偶极相互作用,具有更均匀的热分布,有助于形成更致密、更坚固稳定的鱼糜凝胶网络。微波加热过程比水浴加热可更快地提高凝胶中心的温度,可有效抑制肌肉蛋白质自溶,并且可显著提高鱼糜凝胶形成速率和热稳定性<sup>[32]</sup>。Liu 等<sup>[32]</sup>研究发现与传统水浴加热方式相比,微波加热对肌球蛋白和肌动蛋白结构的损伤比水浴加热的损伤小,经不同强度微波处理(300, 400, 500 W, 10 min)的鱼糜肌

动球蛋白的热转变峰分别从 106.89 °C 增加至 114.89, 112.89, 110.39 °C。此外, 还可通过微波处理对添加物进行结构修饰, 增强与鱼糜肌动球蛋白的相互作用。Ji 等<sup>[5]</sup>使用微波炉或水浴将混合鱼糜加热至 90 °C, 研究发现微波加热的葡甘露聚糖 (konjac Mannan, KGM) 链具有较高的拉伸速率, 与蛋白质相互作用增强, 有助于形成具有较高热稳定性的鱼糜凝胶网络结构(图 3)。

**2.1.3 超高压** 超高压技术作为一种较为新型的食品加工方法, 可通过影响蛋白质的分子构象进而调控鱼糜凝胶的热加工特性。一定范围的压强可使肌球蛋白变性, 导致蛋白质构型改变及肽链展开, 使蛋白质分子结构中疏水性基团暴露, 形成有序的三维网络结构, 从而束缚更多水分子<sup>[33]</sup>; 另一方面, 超高压可有效抑制鱼糜中内源性组织蛋白酶活力, 抑制肌球蛋白重链的降解程度, 减少凝胶劣化现象发生, 从而增强鱼糜凝胶热稳定性<sup>[6]</sup>。然而进一步增大压强, 蛋白质结构完全破坏, 导致其凝胶结构坍塌, 凝胶热稳定性显著降低。目前关于超高压处理的有效临界强度值尚无一致结论。如付强等<sup>[34]</sup>发现超高压处理导致鱼糜肌原纤维蛋白构象发生变化, 致使鱼糜凝胶网络结构更加稳定, 肌原纤维蛋白的热变性温度提高。当压力升高至 400 MPa 时, 热变性温度由 68.26 °C 达到最高值 72.16 °C, 之后热变性温度呈现降低的趋势。Tabillo-Munizaga 等<sup>[35]</sup>认为 400 MPa 压强处理可使鱼糜破断力、持水力显著增强, 且拥有更均一、致密的网格结构, 凝胶热稳定性增强。

## 2.2 化学方法

**2.2.1 非肉类蛋白** 非肉类蛋白在鱼糜制品中应用广泛, 常见有蛋清蛋白、大豆分离蛋白、小麦蛋白及动物血浆蛋白等<sup>[23]</sup>。不同非肉类蛋白增强鱼糜凝胶热稳定性机理不同: 动物血浆蛋白主要通过抑制蛋白酶的活性来改善鱼糜的凝胶特性, 蛋清蛋白、小麦蛋白则通过自身凝胶作用或与肌原纤维蛋白相互作用, 以提高鱼糜凝胶的热稳定性<sup>[7]</sup>。Zhang 等<sup>[23]</sup>研究发现小麦蛋白可均匀地分散于其网络结构空隙中, 并与周围的肌原纤维蛋白相互作用, 使凝胶的热稳定性显著提高。添加小麦蛋白的复合物在升温过程中(25~90 °C)弹性模量值始终高于纯鱼糜, 形成的凝胶网状结构更为致

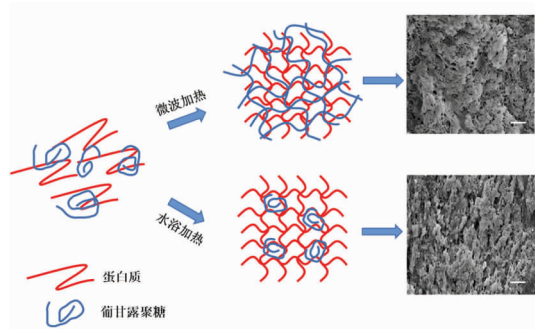


图 3 微波加热与水浴加热下葡甘露聚糖-蛋白质混合凝胶微观结构<sup>[5]</sup>

Fig.3 Microstructure of glucomannan protein mixed gel under microwave heating and water bath heating<sup>[5]</sup>

密。沈晓蕾等<sup>[36]</sup>发现大豆分离蛋白可与盐溶性蛋白及不溶性蛋白结合, 形成致密稳定的三维网状结构。此外, 大豆分离蛋白中还存在鱼肉内源蛋白酶的抑制因子, 能够降低凝胶劣化对鱼糜制品品质的影响, 增强鱼糜的凝胶热稳定性。随大豆分离蛋白添加量(0~9%)的增加, 鱼糜持水性增强, 蒸煮损失降低, 热稳定性提高。Niu 等<sup>[37]</sup>研究发现经 60 °C 加热, pH 1.5 的酸性处理后的大豆分离蛋白与肌原纤维蛋白结合, 形成具有紧密有序构象的凝胶体系, 肌动蛋白变性温度显著增强。刘建华等<sup>[38]</sup>发现蛋清蛋白与多糖糖基化反应产物可使鱼糜制品的热稳定性提高, 其中 90 °C 处理比空白组高 26.9%。

**2.2.2 多糖** 多糖结构中含有丰富的可反应的侧链基团, 在一定的 pH 值和离子强度下, 可与蛋白质形成结构较为稳定的复合物, 从而赋予食品较高的凝胶强度及热稳定性<sup>[39]</sup>。根据所带电荷不同, 大分子多糖可分为阴离子多糖、阳离子多糖、中性多糖。常见的阴离子多糖包括卡拉胶、海藻酸钠/氧化海藻酸钠(含有醛基)、黄原胶、羧甲基纤维素(取代度越大, 负电荷越多)、甲壳素、果胶等; 常见的阳离子多糖有壳聚糖等; 中性多糖主要是魔芋葡聚糖(羧甲基修饰后带负电荷)<sup>[40]</sup>。不同类型的多糖与蛋白质间的相互作用的类型及强度有所差异, 其增强鱼糜凝胶的热稳定性也有所不同。

**2.2.2.1 胶体** 食用胶可与鱼糜中盐溶性蛋白及不溶性蛋白相互交联嵌合, 形成致密稳定的三维网状结构, 提高鱼糜凝胶强度及持水性, 增强其热

稳定性<sup>[6]</sup>。食用胶和蛋白质主要通过共价键或非共价键发生相互作用。蛋白质与食用胶间的美拉德反应,可形成具有疏水性和亲水性基团的双嵌段结构的化合物。研究证明,蛋白质与食用胶偶联,一定程度上能够提高蛋白质-多糖共轭物的热稳定性。经糖基化的蛋白质凝胶比未进行糖基化反应的蛋白具有更高的热稳定性<sup>[41]</sup>。方春华<sup>[42]</sup>发现糖基化作用可以提高肌球蛋白的热焓变值,随魔芋寡糖脱乙酰度的增加,肌球蛋白-魔芋寡糖衍生物的变性温度从 59.34 °C 增加到 72.90 °C。这可能是由于肌球蛋白与魔芋寡糖的共价结合增加了糖基化修饰物表面亲水性和净负电荷,并且糖基化修饰物的空间位阻和静电排斥作用也得到了增强,从而赋予肌球蛋白较为稳定的空间结构,故具有较高的热变性温度。

蛋白质-多糖间的非共价键相互作用主要包括静电作用、疏水作用、氢键作用和范德华力。Zhang 等<sup>[43]</sup>研究发现魔芋葡甘露聚糖可以通过氢键作用与肌球蛋白反应从而增强肌球蛋白的热转变温度,提高鱼糜凝胶热稳定性。韩静文<sup>[9]</sup>发现适量的可得然胶能够与蛋白质通过协同作用提高蛋白的热稳定性,因为可得然胶有利于氢键和疏水性相互作用的形成,促进凝胶蛋白暴露出更多的游离巯基,与鱼糜蛋白相互交联,提高了复合凝胶体系中的交联密度,且其吸水溶胀受热的作用影响不大,填充在鱼糜网络中,从而增加凝胶体系在高温下的热稳定性。然而与共价键作用力相比,基于蛋白质-多糖间的非共价作用对鱼糜蛋白的热稳定提高程度有限<sup>[41]</sup>。这主要是由于非共价相互作用高度受环境条件的影响,例如盐的存在和 pH 值的变化可能会削弱或破坏聚合物之间的静电络合<sup>[44-45]</sup>。

2.2.2.2 淀粉 凝胶基质中充当填充剂的膨胀淀粉颗粒有助于提高凝胶热稳定性。一方面,当温度达到淀粉的糊化温度时,淀粉颗粒(嵌入蛋白质凝胶基质中)开始吸收水膨胀,另一方面,淀粉糊化膨胀并向凝胶网络内部施加压力,导致凝胶基质变得更致密和牢固,显著增加鱼糜蛋白凝胶的热稳定性。

淀粉对鱼糜凝胶热稳定性的影响与淀粉的添加量、直链淀粉与支链淀粉的比例以及变性程度

密切相关。一般来说,添加 6% 的淀粉可改善鱼糜凝胶的咀嚼性和热稳定性,若添加量超过 8% 则会降低鱼糜制品的弹性。王冬妮等<sup>[46]</sup>研究发现,与对照组相比,添加 6% 的红薯淀粉、木薯淀粉、玉米淀粉和马铃薯淀粉均可使鲑鱼鱼糜的凝胶热稳定性分别提高 49.08%, 26.46%, 20.77%, 30.16%。淀粉颗粒的溶胀能力与凝胶强度密切相关,而支链淀粉的含量与淀粉颗粒的溶胀能力成正比。因此,支链淀粉含量越高,凝胶强度越高,其热稳定性越好。含直链淀粉比例较高的淀粉,如玉米淀粉、小麦淀粉和马铃薯淀粉等往往使鱼糜形成比较脆的凝胶,而含支链淀粉比例较高的淀粉,如木薯变性淀粉可使鱼糜形成黏合性较强的凝胶<sup>[47]</sup>。改性淀粉具有比原淀粉更高的黏度和稳定性,成膜性也较好,因此变性淀粉增强鱼糜凝胶热稳定性的效果优于原淀粉<sup>[48]</sup>。Kong 等<sup>[49]</sup>研究发现当温度升高到 80 °C 时,含有交联羟丙基木薯淀粉 (Cross-linked hydroxypropylated cassava starch, CHCS) 和交联乙酰化木薯淀粉 (Cross-linked acetylated cassava starch, CACS) 的样品  $G'$  值大于对照组,所有含淀粉样品的吸热转变温度高于对照组 (88.41 °C),其中含交联羟丙基木薯淀粉的样品吸热转变温度最高为 111.27 °C (图 4)。

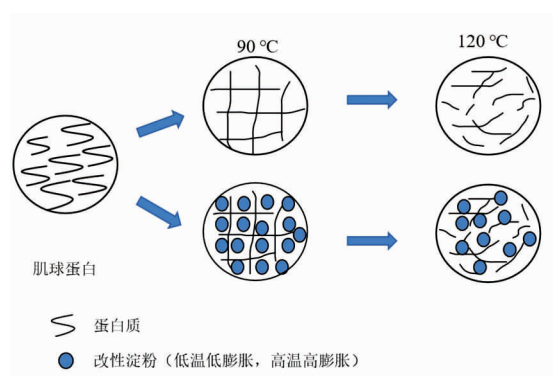


图 4 交联羟丙基木薯淀粉和交联乙酰化木薯淀粉对鱼糜凝胶影响<sup>[49]</sup>

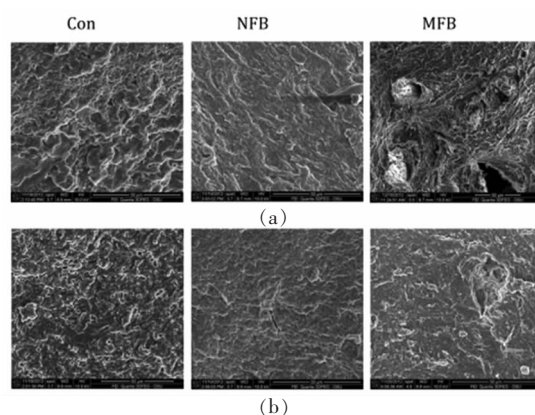
Fig.4 Effect of CACS and CHCS on surimi gel<sup>[49]</sup>

2.2.3 纳米材料 纳米化材料由于特殊的尺寸效应以及化学可反应性在食品中的应用逐渐广泛。将鱼骨纳米化处理后形成的纳米鱼骨钙,一方面可以激活内源性 TG 酶,并通过酶交联作用起到增强鱼糜凝胶热稳定性的目的。另一方面,添加一



定浓度钙离子后可诱导肌球蛋白内部活性基团暴露,利于TG酶的催化交联反应,从而进一步增强鱼糜凝胶稳定性<sup>[10]</sup>。Yin等<sup>[50]</sup>研究表明,鱼骨粉粒径减小,钙离子释放量、流动性、溶解度、电导率和持水量均增加。添加粒径较大的毫米级鱼骨粉(Millimeter fishbone meal,MFB)的鱼糜凝胶网络结构不均一(图5),不利于热稳定性增长。而纳米级鱼骨粉(Nano fishbone meal,NFB)较小的粒径分布可精细地嵌入凝胶网络。Yin等<sup>[51]</sup>进一步研究发现NFB释放的钙离子可通过与TG酶作用,随NFB浓度的增加,轻肌球蛋白链(Light meromyosin,LMM)和肌球蛋白重链(Myosin heavy chain,MHC)聚集程度增大。NFB含量达1%时,凝胶特性改善,热稳定性增强。

2.2.4 多酚 多酚可与蛋白质通过非共价键(疏水键和氢键)或共价键相互作用形成蛋白质-多酚复合物,在一定程度上增强蛋白质的热稳定性(图6、图7)<sup>[52]</sup>。多酚与蛋白质的非共价作用主要有多酚羟基和蛋白质侧链氨基间的氢键作用,多酚的苯环与蛋白质脂肪族以及芳香族氨基酸之间的疏水作用等。Cao等<sup>[53]</sup>通过测定荧光光谱发现随着没食子儿茶素-3-没食子酸酯的添加量从0逐渐增加至1000 mg/L,肌原纤维蛋白荧光逐渐猝灭,表明没食子儿茶素-3-没食子酸酯和色氨酸残基之



注:Con. 不含鱼骨粉的对照凝胶;NFB = 1 g/100 g NFB的凝胶;MFB. 含 1 g/100 g MFB的凝胶。

图5 未添加(a)和添加(b)鱼骨粉的凝胶的微观结构<sup>[50]</sup>  
Fig.5 Microstructures of gels without (a)  
and with setting (b)<sup>[50]</sup>

间具有非共价相互作用。

蛋白质与多酚的相互作用可能导致所得结合物的热稳定性发生变化。研究表明,阿魏酸的酚羟基可通过形成强氢键与蛋白质主要多肽链的C、O和N单键产生强结合作用,使天然牛血清蛋白的熔融温度升高,使阿魏酸-牛血清蛋白复合物热稳定性显著升高<sup>[54]</sup>。Cano等<sup>[55]</sup>发现蛋白质-单宁结合物的稳定性随着与蛋白质非共价结合的单宁含量的增加而增加。Liu等<sup>[56]</sup>研究了多种多酚对蛋白的

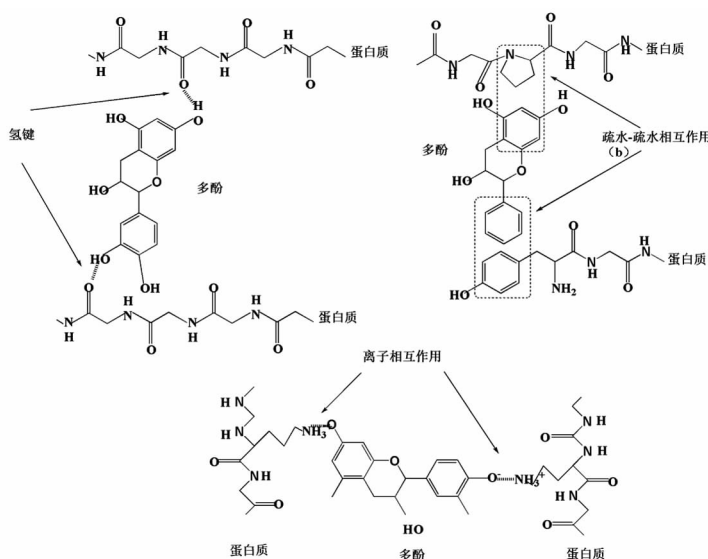
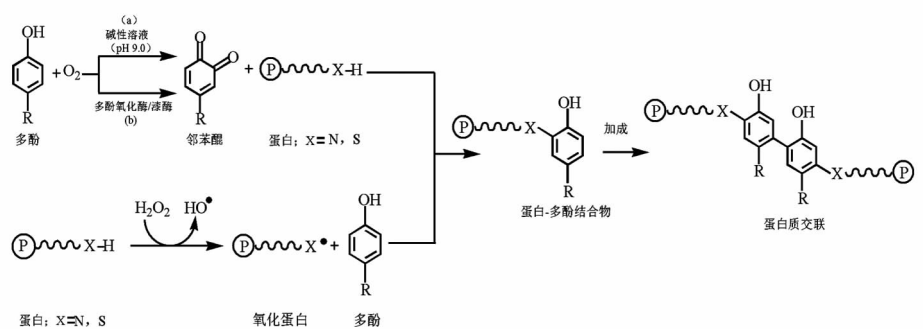


图6 蛋白质与多酚非共价相互作用<sup>[16]</sup>

Fig.6 Non covalent interaction between protein and polyphenols<sup>[16]</sup>

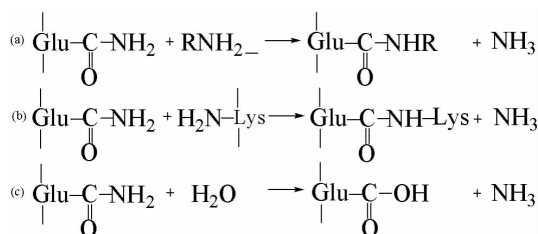
图 7 蛋白质和多酚的酶促与非酶促共价结合反应<sup>[16]</sup>Fig.7 Enzymatic and non enzymatic covalent binding reactions of proteins and polyphenols<sup>[16]</sup>

热稳定性的影响,发现添加绿茶提取物后脱脂牛奶的稳定性提高。此外,乳铁蛋白与多酚在碱性溶液的共价结合可以抑制乳铁蛋白在中性 pH 值下的热聚集。Zhou 等<sup>[12]</sup>发现使用茶多酚共价修饰的蛋清蛋白使鱼糜凝胶具有致密的凝胶网络,热稳定性增强。

2.2.5 脂质 鱼糜加工过程擂溃或斩拌处理会使脂肪形成小脂肪球,在肌原纤维蛋白乳化作用及凝胶化作用下进一步稳定,并填充到鱼糜凝胶体系中。通过乳化脂肪球滴与肌动球蛋白间的相互作用,从而影响诸多凝胶特性,如凝胶强度、热稳定性等<sup>[13]</sup>。Zheng 等<sup>[57]</sup>研究了脂肪链长度和饱和度对肌原纤维蛋白乳液凝胶体系稳定的影响,发现中性脂肪酸和多不饱和脂肪酸有助于增强体系热稳定性,而单不饱和脂肪酸和饱和脂肪酸的稳定作用较差。前者通过改变体系间的表面电荷增大了粒子间静电排斥作用,从而有利于体系的稳定和均一。Kim 等<sup>[58]</sup>对比研究了不同脂肪类型对肌原纤维蛋白流变性和热稳定性的影响。结果表明,鸡肉脂肪的添加能显著提高肌原纤维蛋白凝胶的热稳定性,这可能与脂肪组成及相转变行为有关。

## 2.3 生物方法

2.3.1 谷氨酰胺转氨酶 转谷氨酰胺酶 (TG 酶) 可催化蛋白质 L-赖氨酸上  $\epsilon$ -氨基和谷氨酸上  $\gamma$ -酰胺基之间的结合反应(图 8),通过转谷氨酰胺作用形成共价化合物<sup>[59]</sup>,可分为内源性 TG 酶和外源性 TG 酶。TG 酶交联反应增强蛋白分子内或分子间的交联,催化  $\epsilon$ -( $\gamma$ -谷氨酰基)赖氨酸共价键形成,加固凝胶主体结构,使凝胶网络结构更加致密、有序,从而提高鱼糜制品的热稳定性<sup>[60]</sup>。



注:(a)肽链上谷氨酸残基的  $\gamma$ -酰胺基,与其它化合物中的伯胺相反应;(b)伯胺是赖氨酸或其残基上的基团时,生成  $\epsilon$ -( $\gamma$ -谷氨酸)赖氨酸交联,肽链谷氨酸与肽链上赖氨酸残基的 N 端相连,形成分子内及分子间的网状结构;(c)无伯胺时,水作为酰胺受体参加反应。

图 8 TG 酶催化反应的 3 种类型<sup>[60]</sup>Fig.8 Three types of TG enzyme catalyzed reactions<sup>[60]</sup>

在鱼糜凝胶中通常加入外源性 TG 酶,促进鱼糜蛋白质之间非二硫共价键的形成,增强鱼糜凝胶强度,提高其热稳定性。Lantto 等<sup>[61]</sup>研究发现用 TG 酶将肌原纤维蛋白预处理 1 h,可使肌动蛋白焓变值  $\Delta H$  增加 0.26 J/g,热转变值 0.43  $^{\circ}\text{C}$ 。3D 打印技术制备鱼糜凝胶时,由于高强度微波加热速率导致的水分快速流失使得蛋白质收缩,TG 酶催化 L-赖氨酸上  $\epsilon$ -氨基和谷氨酸上  $\gamma$ -酰胺基之间的结合反应,由于  $\epsilon$ -( $\gamma$ -谷氨酸)-赖氨酸的强度是疏水和氢键强度的 20 倍,因此,当适当强度的微波处理和 TGase 协同作用于鱼糜时,蛋白质聚集体变得更大、更紧密,形成热稳定性高的蛋白凝胶<sup>[62]</sup>。郭秀瑾等<sup>[14]</sup>研究表明,添加 TG 酶组的鱼糜凝胶网络的孔隙当量直径显著小于对照组,凝胶网络更为致密,90  $^{\circ}\text{C}$  加热 30 min 后热稳定性更强。

2.3.2 激肽原 鱼糜中残留酸性半胱氨酸蛋白酶



和碱性丝氨酸蛋白酶是造成凝胶劣化的主要原因,这两种酶广泛存在于溶酶体中,通过分解肌原纤维中肌球蛋白重链等结构蛋白质,引起凝胶网状结构的破坏,导致凝胶弹性下降,热稳定性降低。研究发现,半胱氨酸蛋白酶抑制剂(激肽原)可有效抑制半胱氨酸蛋白酶的活性,提高鱼糜的凝胶热稳定性<sup>[15]</sup>。从猪血中提取的两种激肽原 I 和激肽原 II 分别添加到白鲢鱼肌原纤维中,可有效抑制肌原纤维蛋白中 MHC 在 55 °C 下发生蛋白质降解作用,显著提高鱼糜制品高温处理后的凝胶强度,然而两种激肽原的抑制效率有所差异。当添加质量浓度为 0.02 g/L 的激肽原 II 时,MHC 的降解被明显抑制,然而需添加质量浓度为 0.2 g/L 的激肽原 I 才能达到类似效果。例如:当激肽原添加量为鲢鱼鱼浆质量的 0.03% 时,添加激肽原 I 的凝胶强度提高 4.52%,而添加激肽原 II 的试验组凝胶强度提高 24.08%<sup>[15]</sup>。两种激肽原均随添加浓度的增加,抑制 MHC 降解,提高鱼糜蛋白凝胶热稳定性。

**2.3.3 多酚氧化酶** 多酚氧化酶如酪氨酸酶、漆酶等可氧化多酚形成醌类物质,进一步与蛋白质侧链氨基共价交联形成蛋白质-多酚偶联物<sup>[16]</sup>。酪氨酸酶可通过催化肌球蛋白重链的酪氨酸残基,促进蛋白质分子间的交联,从而提高鱼糜凝胶特性。酪氨酸酶增强鱼糜凝胶特性的能力与其用量密切相关。由于鱼肉中有限的酪氨酸残基(约为肌动蛋白的 3%),因此较高用量的酪氨酸酶(300~500 U/g 蛋白)可作为凝胶增强剂,通过催化形成醌基共价交联作用增强鱼糜凝胶特性。Vate 等<sup>[63]</sup>发现乌贼墨酪氨酸酶结合单宁酸处理能够显著促进蛋白质分子间或分子内的非二硫共价交联,增强鱼糜凝胶特性,然而处理时间过长会导致肌原纤维蛋白的自聚集,降低凝胶特性。

### 3 结语

本文综述了影响鱼糜蛋白热稳定性的相关因素,并进一步重点阐述了近年来鱼糜蛋白凝胶热稳定性增强技术及其机理,以期丰富鱼糜制品种类,开发具有优良热加工特性的鱼糜制品提供参考。对此,在深入理解鱼糜热稳定性增强机理的基础之上,通过多种技术协同处理或是增强鱼糜

制品热稳定性的有效途径之一。此外,鱼糜制品凝胶特性间(如凝胶强度与热稳定等)具有一定相关性,然而缺乏相关定量研究以阐述两者机制间的关联性。再者,热稳定性鱼糜凝胶制品的制备过程常伴随着其它凝胶特性的改变,在提高鱼糜蛋白凝胶热稳定的同时是否影响其它功能特性,如消化特性、营养吸收以及风味释放能力等,也是未来需重点探究的内容。

### 参 考 文 献

- [1] 卢彦宇. 高温处理对商业鱼糜凝胶及其复合凝胶性质的影响[D]. 厦门:集美大学,2016.  
LU Y Y. Effect of high-temperature treatment on the properties of surimi[D]. Xiamen: Jimei University, 2016.
- [2] STONE A P, STANLEY D W. Mechanisms of fish muscle gelation [J]. Food Research International, 1992, 25(5): 381-388.
- [3] 宋恭帅, 陈康, 俞喜娜, 等. 热杀菌对即食鲟鱼鱼糜制品品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 153-160, 167.  
SONG G S, CHEN K, YU X N, et al. Effect of thermal sterilization on ready-to-eat sturgeon (*Acipenser sinensis*) surimi product quality[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(24): 153-160, 167.
- [4] 李斌, 陈海琴, 赵建新, 等. 超声辅助凝胶化对鲢鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(6): 65-69.  
LI B, CHEN H Q, ZHAO J X, et al. Effect of ultrasound assisted gelling on gel properties of silver carp surimi [J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(6): 65-69.
- [5] JI L, XUE Y, ZHANG T, et al. The effects of microwave processing on the structure and various quality parameters of Alaska pollock surimi protein-polysaccharide gels[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63(2): 77-84.
- [6] 付强. 超高压处理对鲢鱼鱼糜品质特性的影响[D]. 上海:上海海洋大学,2015.  
FU Q. Effects of ultra-high pressure treatments on the qualities of silver carp surimi [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.

- [7] 励建荣, 余永名, 仪淑敏, 等. 鱼糜制品热凝胶形成机理研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(23): 380-385.  
LI J R, YU Y M, YI S M, et al. Research of progress in thermal gelation mechanisms of surimi products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(23): 380-385.
- [8] 许时婴, 李博, 王璋. 复配胶在低脂肉糜制品中的作用机理[J]. 无锡轻工大学学报, 1996(2): 102-108.  
XU S Y, LI B, WANG Z. The mechanism of action of compound gum in low-fat minced meat products[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 1996(2): 102-108.
- [9] 韩静文. 鱼糜凝胶热加工特性及耐热型鱼糜肠配方研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.  
HAN J W. Study on thermal processing properties of surimi gels and formulation of the heat tolerant surimi sausage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.
- [10] 尹涛. 纳米鱼骨的制备、特性表征及其对鱼糜胶凝影响的机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.  
YIN T. Studies on production and characterization of nano fish bone and the mechanism of its influences on surimi gelation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [11] VON S M, JARA F L, RUIZ A L T G, et al. Nanocomplex formation between  $\beta$ -lactoglobulin or caseinomacropptide and green tea polyphenols: Impact on protein gelation and polyphenols antiproliferative activity[J]. Journal of Functional Foods, 2012, 4(4): 800-809.
- [12] ZHOU X X, CHEN T, LIN H H, et al. Physicochemical properties and microstructure of surimi treated with egg white modified by tea polyphenols[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 90(5): 82-89.
- [13] ZHOU X X, CHEN H, LYU F, et al. Physicochemical properties and microstructure of fish myofibrillar protein-lipid composite gels: Effects of fat type and concentration[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90(5): 433-442.
- [14] 郭秀瑾, 胡杨, 尤娟, 等. 微生物转谷氨酰胺酶诱导下鲢鱼糜凝胶的结构演化规律[J]. 食品科学, 2017, 37(5): 6-11.  
GUO X J, HU Y, YOU J, et al. Structural evolution of mtgase-induced silver carp surimi gels[J]. Food Science, 2017, 37(5): 6-11.
- [15] 钟婵, 江韬玲, 翁武银, 等. 猪血激肽原的分离纯化及其对白鲢鱼鱼糜的凝胶作用[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2012, 17(1): 13-19.  
ZHONG C, JIANG T L, WENG W Y, et al. The separation and purification of pig plasma kininogen and its effect on the gel of *Hypophthalmichthys molitrix* fish surimi[J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 2012, 17(1): 13-19.
- [16] QUAN T H, BENJAKUL S, SAE-LEAW T, et al. Protein-polyphenol conjugates: Antioxidant property, functionalities and their applications[J]. Trends in Food Ence & Technology, 2019, 91(8): 507-517.
- [17] KURAIISHI C, YAMAZAKI K, SUSU Y. Transglutaminase: Its utilization in the food industry[J]. Food Reviews International, 2001, 17(2): 221-246.
- [18] HUNT A, GETTY K J K, PARK J W. Roles of starch in surimi seafood: A review[J]. Food Reviews International, 2009, 25(4): 299-312.
- [19] PIETROWSKI B N, TAHERGORABI R, JACZYNSKI J. Dynamic rheology and thermal transitions of surimi seafood enhanced with  $\omega$ -3-rich oils[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(2): 384-389.
- [20] 李杰, 汪之和, 施文正. 鱼糜凝胶形成过程中物理化学变化[J]. 食品科学, 2010, 31(17): 103-106.  
LI J, WANG Z H, SHI W Z. Changes in chemical forces and protein conformations during the formation of grass carp surimi gels[J]. Food Science, 2010, 31(17): 103-106.
- [21] SUN X D, HOLLEY R A. Factors influencing gel formation by myofibrillar proteins in muscle foods[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2011, 10(1): 33-51.
- [22] 张莉莉. 高温(100~120 °C)处理对鱼糜及其复合凝胶热稳定性的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.  
ZHANG L L. Effects of high-temperature (100~120 °C) treatment on the thermal stability of surimi and plural gels[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [23] ZHANG L L, LI Q, SHI J, et al. Changes in chemical interactions and gel properties of heat-induced surimi gels from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) filets during setting and heating: Effects of different washing solutions[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 75(2): 116-124.
- [24] YAN B W, JIAO X D, ZHU H P, et al. Chemical interactions involved in microwave heat-induced

- surimi gel fortified with fish oil and its formation mechanism - ScienceDirect[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105(3): 105779.
- [25] SANO T, NOGUCHI S F, MATSUMOTO J J, et al. Role of f-actin in thermal gelation of fish actomyosin[J]. Journal of Food Science, 2010, 54(4): 800-804.
- [26] 刘前, 吴靖娜, 陈晓婷, 等. 加工工艺对鱼糜及其制品品质影响的研究进展[J]. 渔业研究, 2019, 41(6): 540-548.
- LIU Q, WU J N, CHEN X T, et al. Research progress on the effect of processing technology on the quality of surimi and its products[J]. Journal of Fisheries Research, 2019, 41(6): 540-548.
- [27] 郑昇阳, 陈晓婷, 吴靖娜, 等. 凝胶化温度对大黄鱼鱼糜凝胶性质的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(12): 37-45.
- ZHENG S Y, CHEN X T, WU J N, et al. Effect of gelation temperature on gelling properties of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) surimi [J]. Journal of Southwest University (Natural Science), 2018, 40(12): 37-45.
- [28] LIANG F, ZHU Y, YE T, et al. Effect of ultrasound assisted treatment and microwave combined with water bath heating on gel properties of surimi-crabmeat mixed gels [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 133(3): 110098.
- [29] BOORA K A, AMARJEET K, KUMAR K S, et al. Characterization of heat-stable whey protein: Impact of ultrasound on rheological, thermal, structural and morphological properties[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 49(12): 333-342.
- [30] ZHANG Y, ZENG Q X, ZHU Z W, 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.
- [31] LI K, FU L, ZHAO Y Y, et al. Use of high-intensity ultrasound to improve emulsifying properties of chicken myofibrillar protein and enhance the rheological properties and stability of the emulsion[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98(1): 105275.1-105275.11.
- [32] LIU X, FENG D, JI L, et al. Effects of microwave heating on the gelation properties of heat-induced alaska pollock (*Theragra chalcogramma*) surimi [J]. Food Ence & Technology International, 2018, 24(6): 497-506.
- [33] 王汇川, 张志祥, 宣晓婷, 等. 超高压对鲈鱼鱼糜品质与凝胶特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(13): 13-17.
- WANG H C, ZHANG Z X, XUAN X T, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on quality and gel characteristics of perch surimi[J]. Food Research and Development, 2018, 39(13): 13-17.
- [34] 付强, 马海建, 杨璐, 等. 超高压处理对鲢鱼糜品质和贮藏特性的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(3): 465-470.
- FU Q, MA H J, YANG L, et al. Effects of ultra-high pressure treatments on the quality and storability of silver carp surimi [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(3): 465-470.
- [35] TABILO -MUNIZAGA G, BARBOSA -CANOVAS G V. Ultra high pressure technology and its use in surimi manufacture: An overview[J]. Food Ence & Technology International, 2004, 10(4): 207-222.
- [36] 沈晓蕾, 李向红, 俞健, 等. 大豆分离蛋白、木薯淀粉与转谷氨酰胺酶组合对鲢鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(9): 26-31.
- SHEN X L, LI X H, YU J, et al. Effect of combination of soy protein isolate, tapioca starch and transglutaminase on gel quality of carp surimi [J]. Food & Machinery, 2019, 35(9): 26-31.
- [37] NIU H L, XIA X F, WANG C, et al. Thermal stability and gel quality of myofibrillar protein as affected by soy protein isolates subjected to an acidic pH and mild heating [J]. Food Chemistry, 2018, 242(3): 188-195.
- [38] 刘建华, 苏琦, 朱旻琪, 等. 糖基化凝胶增强剂对鱼糜制品凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 102-107.
- LIU J H, SU Q, ZHU M Q, et al. Effect of glycosylated gel enhancers on the gel properties of surimi products[J]. Food Science, 2019, 40(4): 102-107.
- [39] 周扬, 马良, 戴宏杰, 等. 基于凝胶特性改善的多糖-明胶互作及调控研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 277-284.
- ZHOU Y, MA L, DAI H J, et al. Recent progress in polysaccharide-gelatin interaction and its regulation for improved gel properties [J]. Food Science, 2020, 41(11): 277-284.
- [40] WANG C S, PAULA M, HEUZEY M C. A gelation



- mechanism for gelatin/polysaccharide aqueous mixtures[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 79(6): 462–472.
- [41] JIMENEZ –CASTANO L, LOPEZ –FANDINO R, OLANO A, et al. Study on  $\beta$ -lactoglobulin glycosylation with dextran: Effect on solubility and heat stability[J]. *Food Chemistry*, 2005, 93(4): 689–695.
- [42] 方春华. 魔芋寡糖的衍生物对鲢鱼肌球蛋白糖基化修饰的影响研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- FANG C H. Effect of modified konjac oligo-glucomannan on glycation of silver carp myosin [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [43] ZHANG T, LI Z, WANG Y, et al. Effects of konjac glucomannan on heat-induced changes of physicochemical and structural properties of surimi gels[J]. *Food Research International*, 2016, 83: 152–161.
- [44] SETIOWATI A D, RWIGAMBA A, PUAL V D M. The influence of degree of methoxylation on the emulsifying and heat stabilizing activity of whey protein-pectin conjugates[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 54–64.
- [45] JIMÉNEZ –CASTAÑO L, VILLAMIEL M, LÓPEZ –FANDIÑO R. Glycosylation of individual whey proteins by Maillard reaction using dextran of different molecular mass [J]. *Food Hydrocolloids*, 2007, 21(3): 433–443.
- [46] 王冬妮, 范馨茹, 祁立波, 等. 淀粉和蛋白类添加物对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(4): 65–71.
- WANG D N, FAN X R, QI L B, et al. Effect of starch and non-muscle protein on gel properties of squid (*Illex argentinus*) surimi[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(4): 65–71.
- [47] 鲍佳彤, 宁云霞, 杨淇越, 等. 不同淀粉种类对未漂洗革胡子鲶鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(4): 27–33.
- BAO J T, NING Y X, YANG Q Y, et al. Effects of different starch types on gel properties of unrinsed *Clarias gariepinus* surimi[J]. *Meat Research*, 2020, 34(4): 27–33.
- [48] SUN F Y, HUNG Q L, HU T, et al. Effects and mechanism of modified starches on the gel properties of myofibrillar protein from grass carp[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 64(3): 17–24.
- [49] KONG W J, ZHANG T, FENG D D, et al. Effects of modified starches on the gel properties of Alaska pollock surimi subjected to different temperature treatments[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 56: 20–28.
- [50] YIN T, REED Z H, PARK J W. Gelling properties of surimi as affected by the particle size of fish bone[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2014, 58(2): 412–416.
- [51] YIN T, PARK J W. Effects of nano-scaled fish bone on the gelation properties of Alaska pollock surimi[J]. *Food Chemistry*, 2014, 150(5): 463–468.
- [52] 仪淑敏, 李欢, 陈思, 等. 鱼骨粉对金线鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(9): 1–7.
- YI S M, LI H, CHEN S, et al. Effect of fish bone powder on gel properties of *Nemipterus virgatus* surimi[J]. *Food Science*, 2017, 38(9): 1–7.
- [53] CAO Y, TRUE A D, CHEN J, et al. The dual role (anti-and pro-oxidant) of gallic acid in mediating myofibrillar protein gelation and gel *in vitro* digestion[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(15): 3054–3061.
- [54] OJHA H, MISHRA K, HASSAN M I, et al. Spectroscopic and isothermal titration calorimetry studies of binding interaction of ferulic acid with bovine serum albumin[J]. *Thermochimica Acta*, 2012, 548(11): 56–64.
- [55] CANO A, ANDRES M, CHIRALT A, et al. Use of tannins to enhance the functional properties of protein based films[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 100(3): 105443.
- [56] LIU F, WANG D, MA C, et al. Conjugation of polyphenols prevents lactoferrin from thermal aggregation at neutral pH[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 58(7): 49–59.
- [57] ZHENG J Y, SUN D, LI X X, et al. The effect of fatty acid chain length and saturation on the emulsification properties of pork myofibrillar proteins[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2020, 139(1): 110242.
- [58] KIM T K, MIN H L, YONG H I, et al. Impacts of fat types and myofibrillar protein on the rheological properties and thermal stability of meat emulsion systems[J]. *Food Chemistry*, 2021, 346: 128930.
- [59] 陈斌. 热杀菌及添加物对罗非鱼鱼糜肠质构的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- CHEN B. The study on sterilization and additives

- influenced the texture of tilapia sausage [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [60] YOKOYAMA K, NIO N, KIKUCHI Y. Properties and applications of microbial transglutaminase [J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2004, 64 (4): 447–454.
- [61] LANTTO R, PUOLANNE E, KALKKINEN N, et al. Enzyme -aided modification of chicken -breast myofibril proteins: Effect of laccase and transglutaminase on gelation and thermal stability[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2005, 53 (23): 9231–9237.
- [62] ZHAO Z L, WANG Q, YAN B W, et al. Synergistic effect of microwave 3D print and transglutaminase on the self-gelation of surimi during printing[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2021, 67(6): 102546
- [63] VATE N K, BENJAKUI S. Combined effect of squid ink tyrosinase and tannic acid on heat induced aggregation of natural actomyosin from sardine [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 56(5): 62–70.

### Recent Advances of Technologies to Enhance Thermal Stability of Surimi Gel Products

Zhu Shichen<sup>1,2,3</sup>, Feng Yuan<sup>1,2,3</sup>, Liu Shulai<sup>1,2,3</sup>, Zhou Xuxia<sup>1,2,3,4</sup>, Ding Yuting<sup>1,2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>College of Food Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014

<sup>2</sup>Key Laboratory of Marine Fishery Resources Exploiment & Utilization of Zhejiang Province, Hangzhou 310014

<sup>3</sup>National R&D Branch Center for Pelagic Aquatic Products Processing (Hangzhou), Hangzhou 310014

<sup>4</sup>Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, Liaoning)

**Abstract** The thermal stability of surimi gel is an important indicator for quality evaluation of the ready-to-eat surimi products. The thermal stability enhancement of surimi gel still remains unresolved, which restricts the development of surimi with the desired quality. In this paper, the various factors affecting the thermal stability of surimi gel such as composition, microstructure and moisture are reviewed. Importantly, the different strategies for thermal stability enhancement and the corresponding mechanisms are also emphasized in terms of physical, chemical and biological methods. The present review may provide the valuable suggestions for the development of surimi products with the desired quality.

**Keywords** surimi; gel strength; thermal stability; factors; mechanism