

超声对动物蛋白结构及性质影响研究进展

邹宇欣, 谢静雯, 王洪涛, 吴越, 刘嘉涵, 刘思琦, 王跃猛, 李鑫

Research Progress on the Effect of Ultrasound on Animal Protein Structure and Properties

ZOU Yuxin, XIE Jingwen, WANG Hongtao, WU Yue, LIU Jiahuan, LIU Siqi, WANG Yuemeng, and LI Xin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060247>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大豆-动物蛋白混合体系功能性质研究进展

Review on the Functional Properties of Mixed Soy-Animal Protein System

食品工业科技. 2020, 41(22): 358-363,370 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030277>

挤压对淀粉微观结构和理化性质影响的研究进展

Research Progress of the Effects of Extrusion on Microstructure and Physicochemical Properties of Starch

食品工业科技. 2020, 41(5): 305-310 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.05.050>

微波处理对高粱理化性质及蛋白质结构特性的影响研究

Effects of Microwave Treatment on Physicochemical Properties and Protein Structure Characteristics of Sorghum

食品工业科技. 2021, 42(23): 27-33 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010203>

超声处理对小米淀粉结构及理化性质的影响

Effects of Ultrasonic Treatment on the Structure and Physicochemical Properties of Millet Starch

食品工业科技. 2021, 42(24): 60-67 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040127>

低温超微粉碎对豆渣蛋白结构及功能性质的影响

Effects of Superfine Comminution of Low Temperature on the Structural and Functional Properties of Soy Dregs Protein

食品工业科技. 2018, 39(23): 50-55 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.23.009>

超声波处理对蜂王浆蛋白功能和结构的影响

Effects of Ultrasound Treatment on the Functional Properties and Structure of Royal Jelly Proteins

食品工业科技. 2019, 40(10): 50-56 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.10.009>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

邹宇欣, 谢静雯, 王洪涛, 等. 超声对动物蛋白结构及性质影响研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 399-409. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060247

ZOU Yuxin, XIE Jingwen, WANG Hongtao, et al. Research Progress on the Effect of Ultrasound on Animal Protein Structure and Properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 399-409. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060247

· 专题综述 ·

超声对动物蛋白结构及性质影响研究进展

邹宇欣¹, 谢静雯¹, 王洪涛¹, 吴越¹, 刘嘉涵¹, 刘思琦¹, 王跃猛², 李鑫^{1,*}

(1.烟台大学生命科学学院, 山东烟台 264005;

2.烟台理工学院食品与生物工程学院, 山东烟台 264003)

摘要: 动物性蛋白主要来源于禽、畜及鱼类等的肉、蛋、奶。动物蛋白营养价值高且应用广泛, 但天然动物蛋白质的功能特性通常不能完全满足工业要求。超声作为一项非热加工物理处理技术, 它会导致动物蛋白质理化性质及结构变化从而改善功能特性。但目前关于超声对各种动物蛋白影响的联系和区别尚待研究。因此, 为明确超声处理对动物蛋白结构和性质的影响以及各自之间的联系和区别, 本文主要从超声功率、超声时间和动物蛋白种类出发, 对动物蛋白的理化性质、微观结构、界面性质和功能性质分别进行综述, 解析了动物蛋白质理化性质及微观结构的变化与其界面性质和功能性质的变化之间的关系, 并对超声处理对动物蛋白的应用进行了讨论和展望, 以期后续超声处理在动物蛋白的应用和推广提供理论参考。

关键词: 动物蛋白, 超声处理, 理化性质, 微观结构, 功能性质, 界面性质

中图分类号: TS253.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)09-0399-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060247



本文网刊:

Research Progress on the Effect of Ultrasound on Animal Protein Structure and Properties

ZOU Yuxin¹, XIE Jingwen¹, WANG Hongtao¹, WU Yue¹, LIU Jiahuan¹, LIU Siqi¹, WANG Yuemeng², LI Xin^{1,*}

(1.College of Life Science, Yantai University, Yantai 264005, China;

2.College of Food and Biosystem Engineering, Yantai Institute of Technology, Yantai 264003, China)

Abstract: Animal proteins are mainly derived from meat, eggs and milk. They are usually rich in nutritional value, whereas their functional properties usually cannot fully meet industrial requirements. As a kind of non-thermal physical treatments, ultrasound can lead to changes in the physicochemical and structural properties of animal proteins, therefore, improving their functional properties. However, relationships between the effects of ultrasound on various animal proteins and changes in their properties are still unclear and need to be studied. In order to clarify the effects of ultrasonic treatment on the structure and properties of animal proteins, the physicochemical properties, microstructure, interfacial properties and functional properties of different kinds of animal proteins are reviewed under different ultrasonic power and ultrasonic time in this study. Relationships between their changes are also analyzed. At last, in order to provide theoretical reference for the application and promotion of ultrasonic treatment on animal proteins, their application is discussed and prospected.

Key words: animal proteins; ultrasonic treatment; physicochemical properties; microstructure; functional properties; interfacial properties

作为常见的动物蛋白, 禽、畜及鱼类等的肉、蛋、奶营养组成与人类的营养结构比较吻合。除营养价值外, 动物蛋白的功能性质也尤为重要, 其中与

界面性质有关的起泡性、乳化性以及凝胶性在蛋白质工业应用中占据重要地位。然而, 天然动物蛋白质的功能性质通常不能完全满足工业要求。例如天然

收稿日期: 2023-06-26

基金项目: 山东省自然科学基金青年基金项目 (ZR2021QC065); 烟台大学博士科研启动基金资助项目 (SM20B61)。

作者简介: 邹宇欣 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 蛋白质理化及功能性质研究, E-mail: zou1483487740@163.com。

* 通信作者: 李鑫 (1989-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 蛋白质界面性质, E-mail: nallyxin@163.com。

胶原蛋白具有较差的热稳定和机械强度, 蛋黄颗粒的水不溶性致密结构导致蛋黄颗粒溶解度较低, 限制了其在食品工业的应用^[1-3]。如肌原纤维蛋白质(myofibrillar protein, MP)是比较有代表性的动物蛋白, 它的天然结构具体如图1所示, MP是一种盐溶性蛋白质, 在低离子强度溶液中的溶解性较差, 这是因为天然的MP在静电吸引的作用下容易聚集从而形成不溶性的丝状聚合物, 这就导致MP具有不溶性和不稳定的特性。近年来, 人们对动物蛋白的品质要求也越来越高, 因此许多技术手段被用来修饰和改善动物蛋白, 这些理化手段包括温度、紫外线、超声波、高压、剪切等物理手段及酸、碱、有机溶剂、重金属盐类等化学方法^[4-6]。而其中的超声处理作为一种非热物理处理技术, 在食品行业中得到了广泛应用。

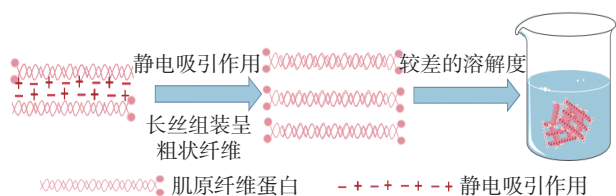


图1 肌原纤维蛋白天然结构示意图及其劣势

Fig.1 Natural structure diagram of myofibrillar protein and its disadvantage

超声波是一种机械波, 声波频率大于或者等于20 kHz。对于蛋白的改性一般采用低频高强度功率超声^[7]。超声之所以能够改善蛋白质性质, 是因为它能够产生快速移动的微气泡流以及气泡破裂即空化效应, 产生高温和高压, 而且整个过程中通常伴随着强烈的冲击波和微射流, 从而影响蛋白结构及其功能性^[8-9]。图2为超声空化现象的具体原理图。现阶段, 已有很多研究利用超声波技术对动物蛋白进行改性, 主要是因为超声的空化效应能够破坏动物蛋白非共价相互作用和结构, 进而引起功能性质的改变^[10-11]。因此, 本文将从超声功率、超声时间和动物蛋白种类出发, 重点综述超声处理对动物蛋白理化性质、微观结构、界面性质和功能性质的影响, 旨在梳理超声处理后动物蛋白理化性质及微观结构的变化与其界面性质和功能性质的变化之间的关系, 为超声

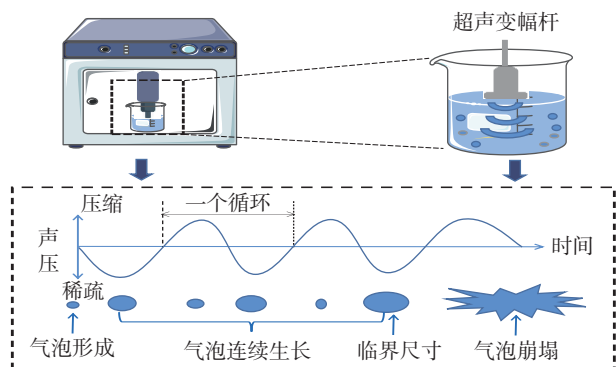


图2 超声波空化效应原理图

Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic cavitation effect

技术更好地应用于动物蛋白工业提供理论基础。

1 超声处理对动物蛋白理化性质的影响

超声波处理对动物蛋白理化性质影响显著, 但不同理化性质影响程度不尽相同, 主要包括对其溶解度、粒径、电位和表面疏水性的影响, 具体情况如下:

1.1 溶解度

溶解度与蛋白质的乳化性、凝胶性、起泡性密切相关, 不溶性蛋白在食品中的应用则十分有限^[12]。研究学者们发现, 超声处理对蛋白溶解度影响较大, 且无论超声功率还是超声处理时间均有不同程度的影响。从超声功率出发, Sheng等^[13]研究发现, 采用高强度超声(0~480 W/10 min)处理蛋清蛋白(egg white protein, EWP)后, 溶解度呈现先增加后减小的趋势。溶解度在360 W时达到最大值。这是因为超声的空化效应和机械剪切作用使EWP中卵粘蛋白-溶菌酶复合物被解离以及蛋白亲水部分由内向外移动, 分别导致了可溶性蛋白含量和蛋白质-水相互作用的增加, 最终溶解度上升。当超声功率超过360 W时, 原本分散的蛋白质由于过度处理发生结合、沉淀进而导致EWP溶解度下降。研究表明^[14], 当采用高强度超声(0~600 W/15 min)处理猪肉MP时, 随着超声功率的增加, 蛋白溶解度一直呈增加趋势。超声处理的机械剪切力和空化效应所产生的冲击力造成蛋白超螺旋结构的丢失和丝状肌球蛋白结构的解离是MP溶解度增加的主要机制。超声处理使得蛋白质的结构展开和颗粒尺寸的减小一定程度上也增大了蛋白溶解度, 可见溶解度受多重因素影响。此外, 因为MP结构比EWP致密, 对于超声功率过度处理的界限也变得更高。

有学者^[15]发现超声处理时间也会影响EWP溶解度。超声处理(0~20 min/振幅40%)EWP溶液后, 蛋白溶解度呈现先上升后下降的趋势, 溶解度在15 min时达到最大值。蛋白质的亲水基团从内部向外部逐渐暴露, 蛋白质-水相互作用不断增加, 导致溶解度逐渐上升。此外, 超声处理EWP时导致的蛋白质构象变化也使得电荷基团(NH₄⁺, COO⁻)数量增加从而导致更强的静电力、更强的蛋白质-水相互作用, 表现为溶解度的增大。但当超声处理时间延长至20 min时, 蛋白内部疏水基团暴露过多, 使得蛋白之间出现聚集, 最终表现为溶解度的下降。

实际上, 超声对动物蛋白溶解度的影响也取决于蛋白种类。例如, Arzeni等^[16]研究了相同超声处理条件下乳清浓缩蛋白(whey protein concentrate, WPC)和EWP溶解度的变化, 发现EWP的溶解度显著升高, 而WPC溶解度没有显著变化, 这是由于WPC中含有大量的乳糖, 在处理过程中表现出保护作用。由此可见, 蛋白种类不同, 超声处理效果也不同。

综上所述, 当超声处理动物蛋白质时, 为了达到改善蛋白溶解度的效果, 必须控制功率和时间, 因为当超声应用于复杂的蛋白质系统时, 过度增大功率和

过度延长处理时间会出现蛋白质功能性降低的聚集现象, 最终导致溶解度下降。

1.2 粒径

蛋白质颗粒的大小及聚集程度会影响蛋白的功能性质。超声作为一种改性蛋白质的手段, 能够产生快速移动的微气泡流, 具有空化效应和机械剪切作用, 导致处理过程中对蛋白质产生机械、化学或者物理影响, 从而使得蛋白质颗粒粒径发生变化^[17]。

Zhang 等^[18]研究了超声处理(0~500 W/20 min)对乳清分离蛋白(whey protein isolate, WPI)的影响, 表明随着超声功率的增加, 蛋白质的粒径显著减小。一方面, 这是因为超声空化和声湍流的联合效应导致蛋白质颗粒碰撞的速率和强度增加引起的; 另一方面, 超声波产生的机械剪切力有助于通过破坏疏水相互作用和静电相互作用来减小蛋白质的粒径^[19]。

也有学者^[20]发现, 不同的超声处理时间(0~30 min/120 W)对 EWP 的粒径影响较大。粒径呈现先减小后增大的趋势, 在 20 min 时达到最小值。这可能是由于超声所产生的空化效应和机械剪切破坏了疏水和静电相互作用等非共价结合力, 促进颗粒解体, 从而减小了蛋白质的粒径。而超声处理 30 min 时粒径有所增大, 这可能是暴露出了更多的疏水性基团, 这些疏水基团通过疏水和静电作用相互交联, 使蛋白质重新生成聚集体, 从而增加了蛋白质的粒径。

由此可见, 超声功率、超声时间都会在不同程度上影响蛋白质粒径大小。一定的超声处理能够减小粒径大小, 而过度的超声处理会增大粒径。一般颗粒粒径越小, 比自由表面积、溶解度越大。因此, 对于粒径大小最优化, 设计合适的超声处理参数显得尤为重要。

1.3 Zeta 电位

Zeta 电位是反映蛋白质稳定性的重要参数, 也是反映蛋白质溶液 pH 和静电力的主要指标之一^[21-22]。研究学者们提出超声空化效应会破坏蛋白分子间的聚集和蛋白质构象, 使得蛋白表面电荷和极性残基暴露出来^[23-24], 使电位绝对值上升。其中超声处理时间和超声处理功率都与蛋白质 Zeta 电位变化有关。

Stefanovic 等^[15]研究发现延长超声处理时间对 EWP 电位有明显的效果, 超声处理导致了颗粒间的静电排斥, 破坏了可能出现的蛋白质聚集, 并阻止了后续的聚集。这些都是蛋白质作为一种分散体而稳定性良好的表现, 也为 EWP 后续起泡性、乳化性等功能性质奠定了良好基础。

关于超声处理功率, 研究发现超声处理(0~500 W/20 min)WPI, 随着功率上升, Zeta 电位绝对值呈上升趋势^[18]。电位变化表明蛋白质结构发生了变化, 蛋白表面暴露出了不同数量的可电离基团。超声波机械剪切产生较小颗粒增加了内部基团与水接触的机会, 进一步增加了蛋白质表面带负电氨基酸的数量^[25]。Liu 等^[26]研究超声处理(0~600 W/15 min)对

MP 的电位影响, 发现随着超声功率的增加, 电位绝对值呈现先增加后降低的趋势, 在 450 W 时达到最大电位绝对值。Zeta 电位的增加是由于超声处理诱导了 MP 丝状聚合物的物理降解和展开, 暴露了内部极性位点。这些极性基团因为转移到了颗粒表面而赋予了蛋白质更高的静电荷^[27]。而过高的超声功率处理时, 蛋白质过度展开而促进了分子间疏水相互作用, 导致蛋白质聚集从而导致疏水极性位点迁移至蛋白内部, 使得电位绝对值下降。

综上所述, Zeta 电位是对颗粒之间相互排斥或吸引力强度大小的度量。蛋白颗粒的粒径、溶解性和电位都与蛋白聚集程度有关。一定的超声处理所具有的空化效应和机械剪切作用会使蛋白颗粒聚集程度下降, 因而蛋白粒径变小, Zeta 电位绝对值变高, 体系也随之更加稳定, 也为后续蛋白质功能性质的改善提供了基础条件。

1.4 表面疏水性

蛋白质的表面疏水性(H_0)是用于反映表面疏水基团数量的指标, 是判断蛋白质构象变化的最重要指标之一。研究表明^[28-32], 超声波能通过空化效应影响动物蛋白氢键和疏水相互作用, 改变蛋白构象, 使蛋白质分子展开, 引起内部疏水基团迁移和暴露, 从而增加蛋白表面疏水性。

关于超声处理功率对动物蛋白表面疏水性的影响。李可等^[33]研究了不同超声波功率(0~600 W/6 min)对鸡肉 MP 表面疏水性的影响, 发现随着超声功率的增加, MP 表面疏水性显著增大, 且在 450 W 时达到最大表面疏水性。 H_0 的增加归因于超声处理的空化效应和剪切作用促进了 MP 大分子聚集体的分解, 从而暴露了部分埋藏的内部疏水基团。同时, 超声处理时空化效应导致了气泡崩塌释放能量, 释放的能量可提供疏水相互作用所需的能量, 这也是 H_0 增加的另一个原因。此后, 蛋白表面疏水性的降低可能是由于蛋白质在疏水相互作用的驱使下相互靠近形成二聚体或者聚合物, 聚集体的形成使疏水基团被包埋, 因此表面疏水性下降, 具体过程可见图 3。

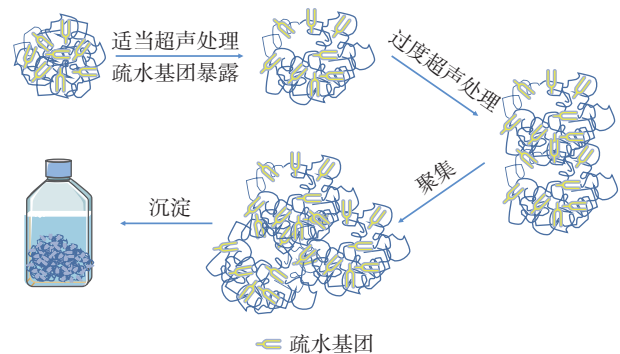


图 3 蛋白质疏水基团在不同超声程度下的变化图

Fig.3 Changes of protein hydrophobic groups under different degrees of ultrasound

超声处理时间也会影响蛋白质表面疏水性。李弓中等^[34]研究了超声时间(0~30 min/580 W)对 EWP

表1 超声处理对动物蛋白理化性质的影响

Table 1 Effect of ultrasonic treatment on physicochemical characteristics of animal proteins

处理指标	动物蛋白类型	超声参数	指标变化趋势	参考文献
溶解度	蛋清蛋白	0~480 W/10 min	先增大后减小, 360 W时最大	[13-16]
	猪肉肌原纤维蛋白	0~600 W/15 min	整体呈增大趋势	
	蛋清蛋白	0~20 min/振幅40%	先增大后减小, 15 min时最大	
	乳清浓缩蛋白	750 W/20 min	无显著变化	
粒径	蛋清蛋白	750 W/20 min	显著增大	[17-20]
	乳清分离蛋白	0~500 W/20 min	整体呈减小趋势	
	蛋清蛋白	0~30 min/120 W	先减小后增大, 20 min时最小	
电位	蛋清蛋白	0~20 min/振幅40%	先增大后减小, 15 min时最大	[15,21-27]
	乳清分离蛋白	0~500 W/20 min	整体呈增大趋势	
	肌原纤维蛋白	0~600 W/15 min	先增大后减小, 450 W时最大	
表面疏水性	鸡肉肌原纤维蛋白	0~600 W/6 min	先增大后减小, 450 W时最大	[28-34]
	蛋清蛋白	0~30 min/580 W	先增大后减小, 15 min时最大	

表面疏水性的影响,发现随着超声时间的延长,EWP的表面疏水性呈先升高后降低的趋势,在15 min时表面疏水性达到最大。表面疏水性的增大是因为超声处理时的空化效应可以展开蛋白结构、减小蛋白粒径、增大疏水基团的暴露,进而提高EWP的表面疏水性。而过度延长超声处理时间,蛋白质会重新聚集,表面疏水性下降。关于超声处理对不同动物蛋白理化性质的影响具体可见表1。

总的来说,一定的超声功率和超声时间会展开动物蛋白结构从而减小粒径,增大电位绝对值、溶解度和表面疏水性,而这几种理化性质之间也有着紧密的联系。例动物蛋白粒径的减小有利于蛋白溶解度的上升等,这些为后续动物蛋白界面可吸附蛋白含量上升以及蛋白灵活性增强提供了有利条件。然而,超声过度处理时,动物蛋白的溶解度降低、粒径增大、电位绝对值以及表面疏水性下降,这会影响到动物蛋白的结构以及后续与界面性质息息相关的乳化性和起泡性等。由此可见,超声技术应用于动物蛋白质改性时,合适的超声处理参数设置显得尤为重要。

2 超声处理对动物蛋白微观结构的影响

蛋白质的微观结构常常与其理化性质及功能特性密切相关。近年来研究发现^[35-38],超声波技术能够使蛋白质的非共价作用遭到破坏,引起蛋白质分子结构和聚集方式发生改变,从而使动物蛋白微观结构发生改变。

王静宇等^[23]研究发现,超声波处理后的MP凝胶空间结构与未处理的样品相比,结构变得更加致密均匀,网孔更小。但是当超声功率达到300 W及以上时,静电斥力与疏水相互作用之间的平衡遭到破坏,致使其均匀的凝胶结构遭到破坏,凝胶网孔变大,且不均匀,蛋白质凝胶网络结构变得粗糙。董智铭等^[39]研究了不同超声功率(0~600 W/30 min)对牛肉MP微观结构的影响,发现随着超声功率的增加,超声空化效应和机械效应导致MP排列逐渐变得散乱且肌束间间隙变得越来越大,可见肌肉结构逐渐松弛,600 W时甚至发生细胞破裂。这些发现表明超

声功率对蛋白质微观结构具有重要影响,超声空化效应直接关系到蛋白网络结构的大小及粗糙程度。

戴泽川等^[40]探究了不同超声处理时间(0~30 min/382 W)对凡纳滨对虾蛋白结构和功能特性的影响,发现未经过超声处理的样品细胞组织之间连接紧密且分布不均匀,随着超声时间的延长,样品组织之间间隙扩大,蛋白组织趋于均匀。另一方面,未经过超声处理的样品显示出光滑、完整的边缘,而超声处理5 min即可观察到片状组织碎片,且直到15 min时能观察到越来越多的碎片,并且出现条状组织碎片,时间超过25 min时表面出现不规则的孔洞,结构受到严重破坏,这足以说明超声处理可以改变其微观结构。Meng等^[41]研究了不同超声处理时间(0~40 min/600 W)对WPI微观结构的影响,发现未经过超声处理的WPI的片状结构相对较大。超声处理后,大薄片被破碎成不规则的小薄片。这是因为超声所产生的剪切力、微射流可以减小蛋白粒径大小甚至分解蛋白聚集体。Ahmad等^[42]研究了不同超声时间(2~4 h/500 W)提取牛皮明胶时微观结构的变化,发现超声处理时间越长,明胶样品的结构完整性越低。明胶的微观结构与明胶的物理性质有关。随着超声处理时间的增加,明胶结构密度增大,结构完整性降低,粒径变小,结构不规则且相互连接,孔隙增大。长时间超声处理导致蛋白质部分展开,疏水基团暴露,这导致蛋白质分子之间有较强的疏水相互作用,从而蛋白质聚集和网络形成。

由此可见,微观结构其实是蛋白质聚集程度的一种反映。超声处理作为一种空化效应的来源,能使蛋白聚集程度发生变化。当超声功率过大或超声时间过长时,动物蛋白分布不均匀,微观结构变得粗糙、不规则,结构完整性变低,受到不可逆的破坏。因此,对不同要求的改变程度应该设计合理的超声处理条件,以达到改善蛋白后续功能性质的要求。

3 超声处理对动物蛋白界面性质的影响

3.1 表面张力

表面张力可反映蛋白质在界面处的吸附和覆盖

情况,进而决定蛋白质界面性质。一般来说,蛋白质分子靠近液滴表面,会降低液滴的表面张力^[43]。研究指出^[44],一定的超声能导致多肽解聚,产生更小的粒径,增加表面电荷并暴露疏水性基团从而使得蛋白质表面活性增强,表面张力减小。

Odelli 等^[45]测量了超声处理后鱼皮明胶在气-液界面的表面张力,发现与未经超声处理的明胶相比表面张力有所下降,这是因为超声处理后明胶对分散相的亲水性提高,暴露出更多的疏水区域。此外,关于超声处理功率对蛋白表面张力的影响,有学者^[13]研究了不同超声功率处理(0~480 W/10 min)对 EWP 表面张力的影响,发现表面张力随着超声功率的增大呈现先减小后增大的趋势。这是因为超声空化效应导致蛋白粒径减小,使得蛋白质更好地吸附在界面上,但是后续功率过大导致蛋白聚集、分子柔韧性下降、吸附位点被掩埋,因此,蛋白表面张力增大。Zhang 等^[18]研究了不同超声功率处理(0~500 W)下的 WPI 的表面张力,发现蛋白表面张力均降低。这是因为超声处理促进了蛋白构象状态的改变和疏水残基的暴露以及结构的展开,并增强了界面处的吸附接触点,这促进了蛋白质分子在界面处的吸附,降低了表面张力。同时,空化效应导致蛋白颗粒变小,促进蛋白质迁移到界面。最后,疏水残基的暴露和结构的展开也有利于蛋白质的吸附,从而降低表面张力。

邹捷等^[20]研究了不同超声处理时间(0~30 min/240 W)对蛋清液表面张力的影响,发现所有样品一开始表面张力都显示出逐渐降低的趋势,这是因为 EWP 超声处理后蛋白质结构发生变化,出现去折叠现象,蛋白质在界面迅速扩散并重排。而后表面张力下降不明显则是因为蛋白质在界面上的吸附逐渐趋于饱和,从而在吸附和重排过程中形成了能壁。然而当超声处理时间超过 20 min 时,表面张力呈下降趋势,这是因为过度超声处理使蛋白粒径以及电荷绝对值增大从而导致静电壁垒,减缓了蛋白在气-液界面的吸附速率。

由此可见,表面张力其实与动物蛋白界面性质息息相关。超声处理对动物蛋白溶解度、粒径、电位、表面疏水性以及微观结构等的影响也会影响其在界面的吸附和排列。一定的超声处理参数能使动物蛋白的表面张力降低,从而达到后续改善蛋白功能性质的要求。

3.2 界面流变

乳液和泡沫的稳定性与蛋白质界面性质之间存在明显的联系。从蛋白质界面性质来说,除了表面张力之外,还有诸如粘弹性能此类的机械性能,这种机械性能可以通过蛋白质膜界面流变学来研究^[46]。近年来,许多研究^[47-49]发现,超声处理通过影响动物蛋白分子结构、粒径及表面张力等来改变蛋白质的油-水界面和气-水界面的流变性质。

Yu 等^[50]研究了不同超声功率(0~600 W/16 min)

对贻贝肌原纤维蛋白(mussel myofibrillar protein, MMP)界面流变的影响,发现随着超声功率的增加,黏度整体呈下降趋势,储能模量(G')和损耗模量(G'')也呈下降趋势。空化效应使得 MMP 稳定的乳状液液滴尺寸更均匀、更小,液滴之间的聚集程度减小从而黏度降低。这种降低也可以认为与超声空化效应所产生的物理力有关,空化破坏了 MMP 蛋白细丝之间的相互作用,导致流体中分子重新排列,从而降低了流动阻力。 G' 和 G'' 的下降一方面是因为超声空化效应减小了乳液液滴的粒径和聚集程度,进而影响乳液的分子间相互作用和流变性能,另一方面则因为超声处理在促进蛋白展开的同时,还削弱了蛋白分子之间的非共价作用,导致分子间相互作用减少。

Akber 等^[51]研究了不同超声处理时间(4~20 min/320 W)对 EWP 乳状液界面流变的影响,发现随着超声处理时间的增加,乳液黏性逐渐降低。这是因为超声空化效应能降低蛋白粒径和表面张力从而降低乳状液粘度。然而,有学者^[52]研究了不同超声处理时间(0~5 min/振幅 20%)对乌贼蛋白泡沫液界面流变的影响,发现随着超声时间的增加,泡沫液黏性逐渐增大,这是因为超声的空化效应使得乌贼蛋白表面疏水性上升,蛋白质侧链就能更好的与其他蛋白或水分子发生相互作用。分子相互作用越大,蛋白流动阻力也就越大,因此黏性增大。可见,不同动物蛋白质黏性的变化与自身性质、聚集程度和变性程度有关。Tan 等^[53]研究了不同超声处理时间(0~25 min/振幅 60%)对 WP 所稳定的泡沫体系界面流变的影响,发现超声处理后的蛋白 G' 和 G'' 均高于未处理的样品。较高的 G' 和 G'' 是因为超声处理后,WP 通过疏水相互作用和二硫键发生了轻微聚集,而这种蛋白间的相互作用能够稳定泡沫网络结构从而形成粘弹性凝胶状薄膜,最终产生更坚固的泡沫,即泡沫稳定性更高。此外,WP 泡沫的 G' 和 G'' 会随着超声时间的增加而增加,这是因为超声的空化效应能够引起气泡周围变性的 WP 聚集,从而形成一层真正的凝胶网络吸附层,这种改变同样也提高了泡沫体系的黏性。

综上所述,超声功率和超声时间分别对动物蛋白的界面流变有着不同程度的影响,超声空化效应导致动物蛋白粒径、结构、表面张力、相互作用等发生改变,从而使蛋白乳液和泡沫体系的粘弹性发生变化。然而,过度处理后的动物蛋白会出现溶解度减小、粒径增大、电位减小、表面疏水性减小等表现,蛋白的理化性质和界面性质也并不是相互独立的,这些理化性质的改变也会影响蛋白的界面特性,而界面性质的改变又影响着如起泡性和乳化性等功能性质的改变。

4 超声处理对动物蛋白功能性质的影响

近年来的食品科学研究表明,食品结构单元和相态特性多通过改变界面(气-液界面和油-水界面)性质、控制界面膜形成来控制食品功能性质(乳化

性、起泡性、凝胶性等)^[54]。超声处理可通过空化效应及机械剪切等作用改变蛋白质的理化性质以及结构从而影响界面性质,而起泡性和乳化性是蛋白质在不同界面(即气-水界面和油-水界面)吸附特性的表现。具体情况如下:

4.1 起泡性

泡沫由液相薄层、液壁和普拉特奥边界组成。泡沫结构中的气泡被捕获在液相薄层之间,液壁是两个相邻气泡之间的界面。液壁相遇的地方被称为“普拉特奥边界”(即三个液薄壁连接成 120°)。关于泡沫具体结构可见图4。动物蛋白作为一种表面活性剂能够降低表面张力,泡沫的形成和稳定性很大程度上也取决于蛋白质在气-液界面的吸附、展开、定向排列以及它们之间的相互作用^[55]。超声处理之所以能改善动物蛋白泡沫性质主要是因为超声空化产生的高剪切力和湍流会破坏蛋白质中的共价键,从而构建腔室泡沫^[56]。近年来有学者^[57-58]提出,超声处理作为一种物理处理手段,能够在蛋白质的表面张力、表面疏水性、粒径和结构灵活性等基础上影响蛋白质分子动力吸附进而影响起泡性。

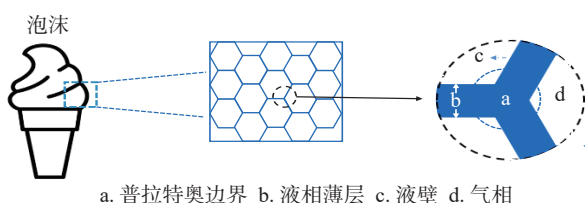


图4 泡沫结构示意图

Fig.4 Diagram of foam structure

超声对蛋白起泡性的影响与其处理功率密切相关。Ding等^[59]研究了不同超声功率下EWP发泡性能的变化,在超声处理(0~480 W/30 min)的条件下,起泡能力(foaming capacity, FC)随功率的增加呈先上升后下降趋势,在360 W时达到最大。超声处理能通过调节蛋白质分子之间的静电力和疏水相互作用来改变蛋白质聚集状态,使EWP出现明显的细小碎屑和不规则孔隙,EWP的溶解度和分子柔韧性上升。蛋白溶解度越高,可吸附在气-水界面的蛋白含量也就越高。分子柔韧性上升使EWP更快地吸附到气-水界面并实现定向排列,最终表现为起泡能力的增强。而超声功率过高会导致蛋白疏水基团过度暴露,蛋白质间发生交联而重新聚集、降低分子灵活性最终影响界面吸附和排列速率。此外,泡沫稳定性(foaming stability, FS)整体却呈下降趋势。这主要是因为超声的空化效应和机械剪切作用会断裂卵粘蛋白中的肽键和二硫键从而分解EWP中的卵粘蛋白,而卵粘蛋白在蛋清的FS中起着重要作用。Omana等^[60]认为卵粘蛋白是蛋清中浓厚蛋白的主要成分,是EWP粘度的主要贡献者。因此卵粘蛋白的减少会破坏蛋白质分子之间的网络结构,从而降低FS。然而,Xiong等^[61]在超声对卵白蛋白发泡性能影响

的研究中发现卵白蛋白的FS整体呈上升趋势,与Ding等^[59]发现的EWP随超声功率上升,FS下降并不一致。这种差异是由于EWP属于复合蛋白质,是由40多种单一蛋白组成的混合物,而卵白蛋白为其中一种单一蛋白,因此,不能直接决定EWP的泡沫变化情况。

超声时间对动物蛋白起泡性也有一定影响。Amir等^[62]研究了不同超声处理时间(0~30 min/200 W)对MP的功能性质的影响,发现FC呈现先增大后减小的趋势,在15 min达到最大值。而后延长处理时间会导致FC和FS呈下降趋势。这是因为适度的处理时间会诱导蛋白质的部分展开,使蛋白质迅速吸附在气-水界面,使其具有相对较高的FC和FS。然而,随着处理时间的延长,气泡尺寸增大,导致蛋白质分子在界面出现解吸现象,且与其它解吸分子相互作用会形成新的聚集体^[63]。其次,长时间处理会使蛋白质暴露更多的疏水基团,蛋白中出现聚集现象。这种聚集不仅会降低蛋白质的吸附能力还会降低界面蛋白质的稳定效应。

综上所述,蛋白质的吸附动力学受其分子粒径、表面疏水性和结构等的影响,一定的超声处理使动物蛋白分子粒径减小、分子灵活性及疏水性增加,从而改善蛋白在界面的吸附和排列等界面行为。然而,过度的超声处理也会导致蛋白分子的表面疏水性下降、粒径增大、分子灵活性下降,这些都会破坏蛋白在界面的吸附,从而影响起泡特性。

4.2 乳化性

乳液和泡沫一样,属于热力学不稳定体系。而动物蛋白作为一种表面活性剂可以降低连续相和分散相之间的界面张力,来提高乳液体系的稳定性^[64]。单层乳液包括水包油型(O/W)和油包水型(W/O),乳液液滴类型形成机理可见图5。研究发现,超声技术能够在蛋白质的表面张力、表面疏水性、粒径和表面电荷等理化性质的基础上影响蛋白质分子动力吸附进而影响乳化性^[65-66]。

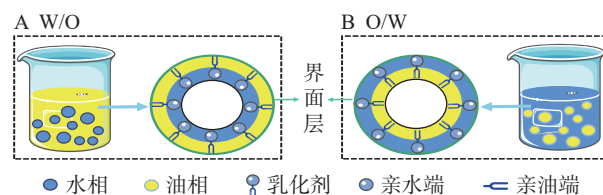


图5 乳液液滴结构示意图

Fig.5 Diagram of the structure of emulsion droplet

超声处理功率会影响动物蛋白乳化性。Shi等^[67]研究了超声处理(0~600 W/30 min)对WPI乳化性影响,发现随着超声功率的上升,乳化活性(emulsifying activity index, EAI)逐渐增大。这是因为超声处理的空化效应使蛋白质结构展开从而增大了WPI的表面疏水性,减小了蛋白粒径,使WPI完全分散在油-水界面,使蛋白质更快更好地吸附在界面上,从而改善

乳化性能。乳化稳定性(emulsification stability index, ESI)随着超声功率增加而提高。乳化稳定性与蛋白质分子柔韧性相关, 超声改变了蛋白结构, 使分子柔韧性上升, 蛋白吸附量增大, 从而阻碍油滴的重新聚集, 最终表现为 ESI 的上升。此外, Xiong 等^[68]探究了不同超声处理功率(0~600 W/12 min)下 MP 乳液稳定性的变化, 结果发现, 300 W 超声处理的乳液表现出最小的粒径和表面张力, 并具有最均匀的液滴分布和最佳的乳液稳定性, 而 600 W 超声处理下却最差。这是因为过度超声会导致蛋白质分子发生自聚集行为, 形成不溶性聚集体, 使其在油-水界面的吸附作用减弱, 从而导致乳液稳定性降低。此外, Zou 等^[69]研究了超声处理(0~200 W/20 min)对鸡肉肌动球蛋白的乳化性的影响, 发现所有超声处理功率均降低了鸡肉肌动球蛋白的 ESI, 与 100 W 和 150 W 的超声功率相比, 200 W 的超声功率显著降低了鸡肌动球蛋白的 EAI。这些差异可能是由于肌肉种类和超声功率的不同。

超声处理时间也可影响动物蛋白的乳化性。Li 等^[70]研究了高强度超声(0~6 min/450 W)处理对鸡肉 MP 乳化性能的影响。随着超声处理时间的增加, MP 的 EAI 显著增加, 表明超声处理能够促进蛋白质-油脂或蛋白质-蛋白质相互作用。超声处理使 MP 制备的乳化液粒径减小, 乳化液液滴变小且分布均匀, 增加了吸附蛋白的含量, 促进了 MP 在油滴表面的吸附。且 MP 的 ESI 也显著上升, 这是因为超声诱导水包油型乳状液的结构发生变化, 油滴周围界面蛋白增加, 从而改善了乳状液的乳化性能。

综上所述, 超声处理对动物蛋白的乳化性的影响与蛋白质的粒径、电位、表面张力和结构等理化性质的变化息息相关。超声过度处理时, 溶解度的减小和粒径的增大等理化性质的改变会影响动物蛋白的分子结构、分子灵活性等, 使动物蛋白在界面上的吸附受到限制, 进而乳化性会发生不良变化。因此, 一定的超声处理条件能够改善蛋白的 EAI 和 ESI。

4.3 凝胶性

动物蛋白的凝胶性是指其胶体溶液在一定条件下, 分子发生聚集形成网络结构, 成为凝胶状态的一种性质。近年来, 一些研究^[71-72]发现, 超声处理能通过影响蛋白质-水相互作用、蛋白质-蛋白质相互作用、蛋白质结构、表面疏水性等进而影响动物蛋白的凝胶性质。

关于超声处理功率对动物蛋白凝胶性的影响, Li 等^[73]研究了超声不同功率(0~500 W/60 min)处理对凡纳滨对虾 MP 凝胶强度的影响, 发现随着超声功率增大, 蛋白凝胶强度显著增加。超声处理时的空化效应使得分子快速运动, 加速了蛋白分子展开及交联过程, 影响了蛋白质之间的疏水相互作用致使其形成刚性、均匀的凝胶网络且凝胶强度增加。Zhang 等^[74]研究了不同超声处理(0~1000 W/15 min)对鸡

胸肉 MP 凝胶性的影响, 发现中度超声功率处理(500~600 W)之后, 凝胶密度变得更大、分布更均匀, 这是因为超声处理后, 蛋白质颗粒粒径减小, 疏水基团暴露在蛋白质表面, 使得蛋白质分子间能通过二硫键和疏水相互作用形成网络更紧密均匀的凝胶。但是, 当功率超过 600 W 时, 凝胶空腔变大且不均匀, 这是因为在热诱导蛋白凝胶形成的过程中, 其致密网络结构的形成主要取决于蛋白质展开和聚集的相对速度, 当聚合速度超过展开速度时, 凝胶结构会更致密更均匀, 反之则更粗糙、更不均匀。而过度的超声功率处理使得蛋白质变性严重, 蛋白分子大幅度展开, 大量疏水性基团暴露, 以至于在热诱导形成凝胶的过程中, 聚合速度相对于展开速度来说更慢从而导致凝胶结构不均匀。

超声处理时间对动物蛋白凝胶性质也有一定影响。有学者研究了不同超声时间处理(0~9 min/150 W)对 EWP 凝胶性质的影响, 发现随着超声时间的延长, EWP 凝胶硬度和持水能力均先上升后下降^[75]。这是因为 EWP 的凝胶性质跟蛋白质的聚集速率和变性程度有关。一定的超声空化效应使得 EWP 解聚, 生成粒径更小的粒子, 内部疏水基团的暴露程度增大, 表面电荷的增加, 都有利于 EWP 的聚集, 从而提升 EWP 的凝胶硬度。而持水能力的上升是因为超声在暴露疏水基团的同时也暴露了更多的酰基受体, 生成了更多磷酸化基团。这些基团能与水分子通过氢键连接, 因此持水能力上升。而长时间超声处理使得蛋白质聚集, 部分化学键断裂, 从而影响凝胶性质。姜昕等^[76]研究了不同超声时间处理(0~50 min/360 W)对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响及相关性分析, 发现鱼糜凝胶强度随着超声时间呈先上升后下降的趋势, 这是因为适当超声时间处理的空化效应使盐溶性蛋白质二级结构发生改变, 分离肌球蛋白自组装, 这有利于鱼糜在加热成型过程中形成紧凑的网络结构。而过度时间处理导致蛋白变性严重, 结构变化程度较大, 影响凝胶特性。关于超声对动物蛋白功能性质的影响具体如表 2 所示。

综上所述, 超声处理对动物蛋白起泡性、乳化性和凝胶性等功能性质的影响与蛋白质的疏水相互作用、粒径、结构等息息相关。因此, 可看出动物蛋白的功能性质本身是由许多相关因素的共同作用而产生的结合, 蛋白本身的物理化学性质, 如粒径、表面疏水性、溶解度、结构等, 均会对其功能性质产生影响。此外, 动物蛋白的功能性质与界面性质并不是相互独立、完全不同的性质, 它们之间会相互联系、相互影响。

4.4 超声协同技术

值得一提的是, 当超声处理协同其他改性技术时比单独的改性处理更能有效改善动物蛋白的功能性质。有学者研究了超声复合高压均质处理对 WPI 起泡性的影响, 发现在 120 MPa 和 600 W 的高压均质和超声复合处理下, 蛋白的 FS 比单一处理时有显

表2 超声处理对动物蛋白功能性质的影响

Table 2 Effect of ultrasonic treatment on functional characteristics of animal proteins

处理指标	动物蛋白类型	超声参数	指标变化趋势	参考文献
起泡性	蛋清蛋白	0~480 W/30 min	FC先增大后减小, 360 W时最大; FS整体呈下降趋势	[59-63]
	卵白蛋白	0~40 min/振幅60%	FS整体呈上升趋势	
乳化性	猪肉肌原纤维蛋白	0~30 min/200 W	FC和FS均先增大后减小, 15 min时最大	[67-70]
	乳清分离蛋白	0~600 W/30 min	FC和FS整体均呈上升趋势	
	猪肉肌原纤维蛋白	0~600 W/12 min	EAI和ESI均先上升后下降, 300 W时最大	
	鸡肉肌球蛋白	0~200 W/20 min	EAI显著下降	
凝胶性	鸡肉肌原纤维蛋白	0~6 min/450 W	EAI和ESI均显著上升	[73-76]
	凡纳滨对虾肌原纤维蛋白	0~500 W/60 min	凝胶强度整体呈上升趋势	
	鸡胸肉肌原纤维蛋白	0~1000 W/15 min	凝胶保水性先上升后下降, 600 W时最大	
	蛋清蛋白	0~9 min/150 W	凝胶保水性和强度均先上升后下降, 5 min时最大	
	鲢鱼鱼糜	0~50 min/360 W	凝胶强度先增大后减小, 10 min时最大	

著性提高^[74]。刘明艳等^[77]将超声复合糖基化反应来改善蚕蛹蛋白乳化性,发现超声功率为580 W,超声时间2 min时与糖基化反应结合时有效优化了蛋白乳化性。Gao等^[78]研究了超声和酸碱联合处理对WPI的影响,发现在碱性条件下联合超声处理比单一超声处理更能显著减小蛋白的粒径,提高表面疏水性,从而改善WPI的乳液性能。

然而,无论是超声单独处理还是超声协同其他改性技术处理,都应该注意处理时动物蛋白的温度变化。超声处理时除了最主要的空化效应,实际上还有热效应。这是因为超声波能量会被介质吸收从而温度局部升高。同时,振动超声波也会使介质间相互摩擦而产生热能^[8]。温度可以影响蛋白质的空间结构及其功能性质。适当的热处理使动物蛋白的表面疏水性增加,且起泡性及乳化性等功能性质均会有不同程度的改善;而温度过高可能会导致蛋白质发生热变性,促进蛋白质-蛋白质相互作用,从而出现聚集现象,这会引起不溶性蛋白质的絮凝和蛋白质颗粒的再聚集而使蛋白溶解度下降。例如有研究^[18]发现进行超声处理EWP后达到的最高温度为49℃,比较接近EWP的变性温度60℃。现在的超声设备一般都配有温度警示系统,如今普遍采用冰水浴来控制蛋白温度。

5 结语

超声作为一种非热处理技术可通过空化效应所产生的物理作用来改变蛋白质的结构进而改善其界面性质和功能性质,系统地介绍了超声处理对几种动物蛋白质的影响,发现超声处理能够改变动物蛋白的溶解度、粒径Zeta电位、表面疏水性等理化性质及微观结构,这些理化性质会影响蛋白在气-水界面和油-水界面的吸附、排列、相互作用进而影响动物蛋白起泡性、乳化性和凝胶性等功能性质。可见,动物蛋白的理化性质、结构、界面性质、功能性质并不是相互独立的。另外,超声协同其他改性技术在蛋白加工业中具有很大潜力,例如超声复合酶解、高压等处理,相信随着这些技术的不断完善,动物蛋白的界面性质将得到更大程度地改善从而获得蛋白更佳的功能性质。

但也存在以下问题:

a.关于超声条件参数设置还需要深入研究。超声功率和超声时间等参数应该得到合理控制,避免蛋白结构被过度破坏。因此,根据动物蛋白种类选择适宜的处理条件至关重要,这为后续的研究与探索提供了坚实的理论基础和可行意义,且科学技术与科研能力也在不断地进步和完善,相信超声处理在食品领域中必将有广泛的应用前景。

b.目前超声波技术的研究大多处于实验室阶段,还未能实现规模化的应用。超声技术在蛋白理化性质及功能特性方面的研究将有助于市场和企业深入了解超声处理对动物蛋白的影响,也便于针对不同的工业需求设计和开发专用型超声波设备,以实现快速、高效工业化生产。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] ADAMIAK K, SIONKOWSKA A. Current methods of collagen cross-linking: Review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 161: 550-560.
- [2] 杨建荣, 吴越, 焦涵, 等. 物理、化学、生物法处理蛋黄颗粒对其乳化特性影响的研究进展[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(12): 129-138. [YANG J R, WU Y, JIAO H, et al. Research progress in the emulsifying properties of egg yolk granules after physical, chemical, and biological treatments[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(12): 129-138.]
- [3] GENG F, XIE Y, WANG Y, et al. Depolymerization of chicken egg yolk granules induced by high-intensity ultrasound[J]. *Food Chemistry*, 2021, 354: 129580.
- [4] 康大成, 刘云国, 张万刚. 高功率超声波对蛋白质功能特性的影响及其在肉品加工中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 289-297. [KANG D C, LIU Y G, ZHANG W G. Recent advances in understanding the effect of high power ultrasound on protein functional characteristics and its applications in meat processing[J]. *Food Science*, 2019, 40(23): 289-297.]
- [5] 牛淑萍, 艾麦提·巴热提. 超高压技术在蛋白质食品加工中的应用分析[J]. *现代食品*, 2021, 29(20): 125-127. [NIU S P,

- AIMAITI B. Application analysis of ultra-high pressure technology in protein food processing[J]. *Modern Food*, 2021, 29(20): 125–127.]
- [6] 朱学仲, 王凯, 徐俊杰, 等. 羟基自由基结合宰后高温处理的鸭肉肌原纤维蛋白氧化及凝胶结构变化[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(11): 240–247. [ZHU X S, WANG K, XU J J, et al. Oxidation and gel structure of duck myofibrillar protein in post-slaughter heat and hydroxyl radical-treated duck meat[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(11): 240–247.]
- [7] ALARCON-ROJO A D, JANACUA H, RODRIGUEZ J C, et al. Power ultrasound in meat processing[J]. *Meat Science*, 2015, 107: 86–93.
- [8] 梁诗洋, 张鹰, 曾晓房, 等. 超声波技术在食品加工中的应用进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 44(4): 462–467. [LIANG S Y, ZHANG Y, ZENG X F, et al. Research progress on the application of ultrasound in food processing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 44(4): 462–467.]
- [9] SUSLICK K S, EDDINGSAAS N C, FLANNIGAN D J, et al. Extreme conditions during multibubble cavitation: Sono luminescence as a spectroscopic probe[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, 18(4): 842–846.
- [10] REN X F, MA H L, MAO S Y, et al. Effects of sweeping frequency ultrasound treatment on enzymatic preparations of ACE-inhibitory peptides from zein[J]. *European Food Research and Technology*, 2014, 238(3): 435–442.
- [11] LU Q, TANG Q H, XIONG Y T, et al. Protein/peptide aggregation and amyloidosis on biointerfaces[J]. *Materials*, 2016, 9(9): 740.
- [12] BURGER T G, SINGH I, MAYFIELD C, et al. Comparison of physicochemical and emulsifying properties of commercial pea protein powders[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(6): 2506–2514.
- [13] SHENG L, WANG Y B, CHEN J H, et al. Influence of high-intensity ultrasound on foaming and structural properties of egg white[J]. *Food Research International*, 2018, 108: 604–610.
- [14] LIU H T, ZHANG H, LIU Q, et al. Solubilization and stable dispersion of myofibrillar proteins in water through the destruction and inhibition of the assembly of filaments using high-intensity ultrasound[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 67: 105160.
- [15] STEFANOVIC A B, JOVANOVIC J R, DOJCINOVIC M B, et al. Effect of the controlled high-intensity ultrasound on improving functionality and structural changes of egg white proteins[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(7): 1224–1239.
- [16] ARZENI C, MARTINEZ K, ZEMA P, et al. Comparative study of high intensity ultrasound effects on food proteins functionality[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 108(3): 463–472.
- [17] WANG X M, MAJZOBI M, FARAHNAKY A. Ultrasound-assisted modification of functional properties and biological activity of biopolymers: A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 65: 105057.
- [18] ZHANG M, FAN L P, LIU Y F, et al. Relationship between protein native conformation and ultrasound efficiency: For improving the physicochemical stability of water-in-oil emulsions[J]. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 651: 129737.
- [19] KHATKAR A B, KAUR A, KHATKAR S K, et al. Characterization of heat-stable whey protein: Impact of ultrasound on rheological, thermal, structural and morphological properties[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 49: 333–342.
- [20] 邹婕, 王琪, 马美湖, 等. 高场强超声对蛋清液起泡特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(1): 163–171. [ZOU J, WANG Q, MA M H, et al. Effects of high intensity ultrasound on foaming characteristics of egg white liquid[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(1): 163–171.]
- [21] LI Z Y, ZHENG Y M, SUN Q, et al. Structural characteristics and emulsifying properties of myofibrillar protein-dextran conjugates induced by ultrasound Maillard reaction[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 72: 105458.
- [22] HAO Y H, WANG F, HUANG W N, et al. Sucrose substitution by polyols in sponge cake and their effects on the foaming and thermal properties of egg protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 57: 153–159.
- [23] 王静宇, 杨玉玲, 周磊, 等. 超声波对肌原纤维蛋白理化性质和质构特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(11): 12–16, 21. [WANG J Y, YANG Y L, ZHOU L, et al. Effects of ultrasound on physicochemical and texture property in myofibrillar protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(11): 12–16, 21.]
- [24] CHEN J H, CHEN X, ZHOU G H, et al. New insights into the ultrasound impact on covalent reactions of myofibrillar protein[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 84: 105975.
- [25] LIANG Q F, REN X F, QU W J, et al. The impact of ultrasound duration on the structure of beta-lactoglobulin[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 292: 110365.
- [26] LIU H T, ZHANG J N, WANG H, et al. High-intensity ultrasound improves the physical stability of myofibrillar protein emulsion at low ionic strength by destroying and suppressing myosin molecular assembly[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 74: 105554.
- [27] SHI X J, ZOU H N, SUN S, et al. Application of high-pressure homogenization for improving the physicochemical, functional and rheological properties of myofibrillar protein[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 138: 425–432.
- [28] 黄东杰. 黄粉虫蛋白超声改性研究及水包油乳液的制备[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [HUANG D J. Study on ultrasonic modification of tenebrio molitor protein and preparation of oil-in-water emulsion[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.]
- [29] ARZENI C, PEREZ O E, PILOSOFF A M R. Functionality of egg white proteins as affected by high intensity ultrasound[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 29(2): 308–316.
- [30] CHEN X, ZHOU R Y, XU X L, et al. Structural modification by high-pressure homogenization for improved functional properties of freeze-dried myofibrillar proteins powder[J]. *Food Research International*, 2017, 100: 193–200.
- [31] VARGAS S A, DELGADO-MACUIL R J, RUIZ-ESPINOSA H, et al. High-intensity ultrasound pretreatment influence on whey protein isolate and its use on complex coacervation with kappa carrageenan: Evaluation of selected functional properties[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 70: 105340.
- [32] SHEN X, FANG T Q, GAO F, et al. Effects of ultrasound treatment on physicochemical and emulsifying properties of whey proteins pre- and post-thermal aggregation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63: 668–676.
- [33] 李可, 张俊霞, 王欣瑶, 等. 不同超声波功率处理对类PSE鸡肉肌原纤维蛋白结构和乳化稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2023, 41(13): 23–31. [LI K, ZHANG J X, WANG X Y, et al. Effect of different ultrasound power on the structure and emulsifying properties of PSE-like chicken myofibrillar protein[J]. *Food Sci-*

- ence, 2023, 41(13): 23-31.]
- [34] 李弓中, 赵英, 王俊彤, 等. 超声处理对蛋清蛋白结构性质及蛋清液起泡性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 68-75. [LI G Z, ZHAO Y, WANG J T, et al. Effect of ultrasonic treatment on protein structure and physicochemical and foaming properties of liquid egg white[J]. Food Science, 2019, 40(9): 68-75.]
- [35] 李可, 王艳秋, 张怡雪, 等. 低钠条件下超声处理对鸡肉肌原纤维蛋白乳液稳定性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 58-65. [LI K, WANG Y Q, ZHANG Y X, et al. Effects of ultrasound treatment on the emulsion stability of chicken myofibrillar protein under low NaCl condition[J]. Food Science, 2023, 44(9): 58-65.]
- [36] LI S Y, YANG X, ZHANG Y Y, et al. Effects of ultrasound and ultrasound assisted alkaline pretreatments on the enzymolysis and structural characteristics of rice protein[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 31: 20-28.
- [37] 李朝蕊, 韩馨蕊, 范鑫, 等. 超声对豌豆分离蛋白结构及乳化性能的调控效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(22): 4894-4905. [LI Z L, HAN X L, FAN X, et al. Regulation effects of ultrasound on the structure and emulsification properties of pea protein isolate[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(22): 4894-4905.]
- [38] CHEN Y X, SHENG L, GOUDA M, et al. Impact of ultrasound treatment on the foaming and physicochemical properties of egg white during cold storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 113: 108308.
- [39] 董智铭, 么紫瑶, 姜菽婉, 等. 超声功率对牛肉干品质及牛肉肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 27-34. [DONG Z M, ME Z Y, JIANG D W, et al. Effects of ultrasonic power on the quality of beef jerky and the structure of beef myofibrillar proteins[J]. Food Science, 2023, 44(19): 27-34.]
- [40] 戴泽川, 毛相朝, 郝亚楠, 等. 高强度超声对凡纳滨对虾蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 80-87. [DAI Z C, MAO X Z, HAO Y N, et al. Effect of high intensity ultrasound on structural and functional properties of proteins in *Litopenaeus vannamei*[J]. Food Science, 2022, 43(19): 80-87.]
- [41] MENG Y Y, LIANG Z Q, ZHANG C Y, et al. Ultrasonic modification of whey protein isolate: Implications for the structural and functional properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 152: 112272.
- [42] AHMAD T, ISMAIL A, AHMAD S A, et al. Characterization of gelatin from bovine skin extracted using ultrasound subsequent to bromelain pretreatment[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80: 264-273.
- [43] LI W W, WANG Y S, LI J C, et al. Synergistic and competitive effects of monoglycerides on the encapsulation and interfacial shear rheological behavior of soy proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 631-636.
- [44] AI M M, ZHANG Z, FAN H, et al. High-intensity ultrasound together with heat treatment improves the oil-in-water emulsion stability of egg white protein peptides[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106256.
- [45] ODELLI D, SARIGIANNIDOU K, SOLIANI A, et al. Interaction between fish skin gelatin and pea protein at air-water interface after ultrasound treatment[J]. Foods, 2022, 11(5): 659.
- [46] 王丽君, 乔秀颖, 孙康. 蛋白质膜界面流变行为研究进展[J]. 化学通报, 2012, 75(3): 195-201. [WANG L J, QIAO X Y, SUN K. Advance in the investigations of the interfacial rheological behaviors of protein films[J]. Chemistry, 2012, 75(3): 195-201.]
- [47] ASAITHAMBI N, SINGHA P, SINGH S K. Comparison of the effect of hydrodynamic and acoustic cavitations on functional, rheological and structural properties of egg white proteins[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 82: 103166.
- [48] ZISU B, SCHLEYER M, CHANDRAPALA J. Application of ultrasound to reduce viscosity and control the rate of age thickening of concentrated skim milk[J]. International Dairy Journal, 2013, 31(1): 41-43.
- [49] ZISU B, BHASKARACHARYA R, KENTISH S, et al. Ultrasonic processing of dairy systems in large scale reactors[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2010, 17(6): 1075-1081.
- [50] YU C P, LI S H, SUN S, et al. Modification of emulsifying properties of mussel myofibrillar proteins by high-intensity ultrasonication treatment and the stability of O/W emulsion[J]. Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 641: 128511.
- [51] ABKER A M, WANG S R, CHEN S H, et al. The effects of high-intensity ultrasound and oil types on the physicochemical properties of egg white protein emulsions[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 339: 111276.
- [52] ARREDONDO-PARADA I, TORRES-ARREOLA W, SUAREZ-JIMENEZ G M, et al. Effect of ultrasound on physicochemical and foaming properties of a protein concentrate from giant squid (*Dosidicus gigas*) mantle[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 121: 108954.
- [53] TAN M C, CHIN N L, YUSOF Y A, et al. Effect of high power ultrasonic treatment on whey protein foaming quality[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2016, 51(3): 617-624.
- [54] 李鑫. 基于界面特性解析蛋清蛋白体系泡沫性质及其调控机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [LI X. Engineered interface for explaining foaming characteristics of egg white protein systems and regulation mechanisms[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]
- [55] 张晓敏, 何志勇, 曾茂茂, 等. 大豆蛋白及其水解物的界面流变学行为和搅打性质[J]. 食品工业科技, 2019, 40(15): 8-13. [ZHANG X M, HE Z Y, ZENG M M, et al. Interfacial rheological behavior and whipping properties of soy protein and its hydrolysates[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(15): 8-13.]
- [56] 王跃猛, 郭宜鑫, 焦涵, 等. 蛋清蛋白起泡性改性手段及作用机制研究进展[J]. 食品科技, 2023, 48(1): 197-204. [WANG Y M, GUO Y X, JIAO H, et al. Research progresses on modifications and mechanisms on foaming properties of egg white protein[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(1): 197-204.]
- [57] 望运滔, 王莹娟, 田金凤, 等. 高强度超声对鹰嘴豆分离蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 9-14, 71. [WANG Y T, WANG Y J, TIAN J F, et al. Effect of high intensity ultrasound on structural and functional properties of chickpea protein isolate[J]. Food and Machinery, 2020, 36(8): 9-14, 71.]
- [58] 衣程远, 孙冰玉, 刘琳琳, 等. 超声处理对大豆蛋白结构及性质的影响研究进展[J]. 中国调味品, 2022, 47(12): 197-200. [YI C Y, SUN B Y, LIU L L, et al. Research progress on the effect of ultrasonic treatment on structure and properties of soybean protein[J]. China Condiment, 2022, 47(12): 197-200.]
- [59] DING L X, XIA M Q, ZENG Q, et al. Foaming properties and aggregation mechanism of egg white protein with different physical treatments[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 153: 112505.
- [60] OMANA D A, WANG J P, WU J P. Ovomucin-a glycoprotein with promising potential[J]. Trends in Food Science & Tech-

- nology, 2010, 21(9): 455–463.
- [61] XIONG W F, WANG Y T, ZHANG C L, et al. High intensity ultrasound modified ovalbumin; Structure, interface and gelation properties[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 31: 302–309.
- [62] AMIRI A, SHARIFIAN P, MORAKABATI N, et al. Modification of functional, rheological and structural characteristics of myofibrillar proteins by high-intensity ultrasonic and papain treatment [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 72: 102748.
- [63] LI R, CHEN X E, CHANG Y K, et al. Increase of bubble size playing a critical role in foam-induced protein aggregation: Aggregation of BSA in foam fractionation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 174: 387–395.
- [64] YUST M D, PEDROCHE J, MILLAN-LINARES M D, et al. Improvement of functional properties of chickpea proteins by hydrolysis with immobilised Alcalase[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(4): 1212–1217.
- [65] 李姚昌, 余静怡, 林秋瑀, 等. 超声均质法制备糖基化蛋白-茶油纳米乳液及其稳定性的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(23): 165–172. [LI Y C, YU J Y, LIN Q Y, et al. Preparation of glycosylated protein-camellia oil nanoemulsion by ultrasonic homogenization and study on the stability[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(23): 165–172.]
- [66] 杨学为, 尹乐斌, 罗雪韵, 等. 超声辅助半仿生酶法制备大豆多肽及其抗氧化活性研究[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(4): 126–131. [YANG X W, YIN L B, LUO X Y, et al. Study on the preparation of soybean peptides by ultrasound-assisted semi-bionic enzymatic method and its antioxidant activity[J]. *Cereals & Oils*, 2023, 36(4): 126–131.]
- [67] SHI R J, LIU Y, HU J L, et al. Combination of high-pressure homogenization and ultrasound improves physicochemical, interfacial and gelation properties of whey protein isolate[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 65: 102450.
- [68] XIONG Y, LI Q R, MIAO S, et al. Effect of ultrasound on physicochemical properties of emulsion stabilized by fish myofibrillar protein and xanthan gum[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 54: 225–234.
- [69] ZOU Y, XU P P, WU H H, et al. Effects of different ultrasound power on physicochemical property and functional performance of chicken actomyosin[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 113: 640–647.
- [70] 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: 105275.
- [71] 李颖畅, 师丹华, 张馨元, 等. 超声波辅助没食子酸改善海鲈鱼肌原纤维蛋白的凝胶性能[J]. *食品科学*, 2022, 43(11): 82–91. [LI Y C, SHI D H, ZHANG X Y, et al. Gallic acid combined with ultrasound treatment improves the gel properties of lateolabrax japonicas myofibrillar protein[J]. *Food Science*, 2022, 43(11): 82–91.]
- [72] 王莹, 刘晶晶, 张飞飞, 等. 乳清蛋白成膜条件及其应用[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(1): 172–179. [WANG Y, LIU J J, ZHANG F F, et al. Film forming conditions of whey protein and its application[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(1): 172–179.]
- [73] LI N, ZHANG K X, DU J Y, et al. High-intensity ultrasound improved the physicochemical and gelling properties of *Litopenaeus vannamei* myofibrillar protein[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 90: 106217.
- [74] ZHANG Z Y, REGENSTEIN J M, ZHOU P, et al. Effects of high intensity ultrasound modification on physicochemical property and water in myofibrillar protein gel[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 34: 960–967.
- [75] 刘俊锋, 樊睿, 魏海燕, 等. 超声波结合磷酸化改性对蛋清凝胶特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(9): 201–206. [LIU J F, FAN R, WEI H Y, et al. Effect of ultrasound combined with phosphorylation modification on properties of egg white gel[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(9): 201–206.]
- [76] 姜昕, 陈晴, 田志航, 等. 超声时间对鲢鱼糜凝胶特性和蛋白结构的影响及相关性分析[J]. *水产学报*, 2023, 47(6): 165–175. [JIANG X, CHEN Q, TIAN Z H, et al. Effect and correlation analysis of ultrasonic time on gel properties and protein structure of *Hypophthalmichthys molitrix* surimi[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(6): 165–175.]
- [77] 刘明艳, 葛双妹, 贾俊强, 等. 超声辅助糖基化反应改善蚕蛹蛋白乳化性的研究[J]. *蚕业科学*, 2022, 48(6): 531–539. [LIU M Y, GE S M, JIA J Q, et al. Study on improving the emulsification of silkworm pupa protein by ultrasonic-assisted glycosylation[J]. *Acta Sericologica Sinica*, 2022, 48(6): 531–539.]
- [78] GAO H, MA L, LI T Q, et al. Impact of ultrasonic power on the structure and emulsifying properties of whey protein isolate under various pH conditions[J]. *Process Biochemistry*, 2019, 81: 113–122.