

热加工对肉糜类制品品质的影响及调控研究进展

辛光斌, 许玉娟, 李聪, 王兆明, 周辉, 徐宝才*
(合肥工业大学食品与生物工程学院, 合肥工业大学农产品生物化工教育部工程研究中心,
合肥工业大学动物源食品绿色制造与资源挖掘安徽省重点实验室, 安徽合肥 230009)

摘要: 肉糜类制品具有独特的口感和风味, 在国内占据较大的消费市场。热加工处理是肉糜类制品实现安全和美味的先决条件, 热诱导肌原纤维蛋白结构和功能特性的改变是赋予产品理想的食用品质和质地特性的关键。然而, 过度的热处理通常会对肌原纤维蛋白 (Myofibrillar Protein, MP) 产生不可逆的负面影响从而降低产品的最终品质。因此, 如何在加热条件下改变肌原纤维蛋白的结构和功能特性进而对肉糜类制品的品质进行调控具有重要意义。基于此, 本综述首先概述了加热过程中肌原纤维蛋白结构和功能特性的变化及其在肉糜类制品品质中的体现, 进而重点关注了加热条件下肌原纤维蛋白不同改性方法的作用机制及其在肉制品中的应用效果, 以期为肉制品在热加工过程中品质的保持提供理论参考。

关键词: 肉糜类制品; 肌原纤维蛋白; 热处理; 食用品质; 质地特性; 调控

文章编号: 1673-9078(2025)11-348-358 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.11.1091

Research Progress on the Effects and Regulation of Thermal Processing on the Quality of Minced Meat Products

XIN Guangbin, XU Yujuan, LI Cong, WANG Zhaoming, ZHOU Hui, XU Baocai*
(School of Food and Bioengineering, Engineering Research Center of Bio-process, Ministry of Education, Key Laboratory of Animal Source of Anhui Province, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Minced meat products have unique texture and flavor, representing a significant segment of the domestic consumer market. Heating is a prerequisite for achieving safety and deliciousness for minced meat products, and the heat-induced changes in the structural and functional characteristics of myofibrillar protein (MP) are key to imparting ideal eating quality and textural characteristics to the products. However, excessive heat treatment often results in irreversible negative effects on MP, which can compromise the final quality of the product. Therefore, how to modify the structure and functional characteristics of MP under heating conditions to regulate the quality of minced meat products is of great significance. In light of this, this review first outlines the changes in the structural and functional characteristics of MP during the heating process and their manifestation in the quality of minced meat products. Subsequently, this review focuses on the mechanisms underlying the MP regulation methods under heating as well as their application effects in meat products, with the aim of providing theoretical references for maintaining the quality of meat products during thermal processing.

Key words: comminuted meat products; myofibrillar protein; heating; eating qualities; texture qualities; regulation

引文格式:
辛光斌,许玉娟,李聪,等.热加工对肉糜类制品品质的影响及调控研究进展[J].现代食品科技,2025,41(11):348-358.
XIN Guangbin, XU Yujuan, LI Cong, et al. Research progress on the effects and regulation of thermal processing on the quality of minced meat products [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(11): 348-358.

收稿日期: 2024-07-27 ; 修回日期: 2024-09-12 ; 接受日期: 2024-09-13
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD2100803)
作者简介: 辛光斌 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail : 1301850671@qq.com
通讯作者: 徐宝才 (1973-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail : baocaixu@163.com

肉类是一种营养丰富的食物,富含人类所需的必需氨基酸和蛋白质。与豆类蛋白和谷物蛋白等植物源蛋白质相比,肉类蛋白质具有更高的消化率,是人体膳食结构的重要组成部分^[1]。肉糜类制品是指以瘦肉和肥膘为原料经过切割、绞碎、斩拌、熟制等工艺制成的肉类制品^[2]。从微观结构上,肉糜类制品是由分散的脂肪相嵌入连续多孔的肌原纤维蛋白凝胶中组成的^[3]。肌原纤维蛋白是肌肉中最重要的蛋白质,约占蛋白质总质量分数的55%~60%。肌球蛋白是肌原纤维蛋白中含量最多、最重要的蛋白质,约占肌原纤维蛋白总质量分数的50%~55%,对肌原纤维蛋白凝胶特性的形成贡献最大^[4]。肌原纤维蛋白的结构特性和功能特性如溶解性、乳化特性、凝胶形成能力等在很大程度上决定了肉和肉制品的食用品质^[5]。通常,肉糜类制品中会添加香料、盐和其他辅料等非肉类成分,以赋予其特殊的风味和口感。常见的肉糜类制品如香肠、肉饼和肉丸广受消费者喜爱,在肉制品市场中快速发展并占据重要地位^[1]。

众所周知,要获得美味安全的肉制品,热加工处理是必不可少的。然而,热加工处理在赋予肉制品食用品质的同时,通常会对肌原纤维蛋白的结构和功能特性产生负面影响,进而最终导致肉制品的质地、嫩度、多汁性等品质下降^[6],这对消费者和肉类加工业者都会产生不利影响。因此,在热加工处理条件下对肌原纤维蛋白进行调控对于改善肉糜类制品的品质非常重要。

一般来说,蛋白质改性方法可分为化学方法和物理方法。物理方法通过外力对肌原纤维蛋白作用以改变其功能属性,化学方法通常是添加剂分子与肌原纤维蛋白在分子层面的相互作用^[7]。然而,目前仍缺乏热加工条件下对肌原纤维蛋白调控方法的综述。为此,本文综述了热加工条件下改变肌原纤维蛋白结构和功能特性的不同改性途径,并探讨了这些手段应用于典型的肉糜类制品时的优势和不足,以期改善热加工引起的肉糜类制品品质劣变提供新思路。

1 肉糜类制品的品质特性

肉糜类制品的品质特性反映了其消费性能和潜在价值,品质特性较好的肉糜类制品易于被消费者接受。肉糜类制品的品质特性主要分为食用品质和质地特性。食用品质主要分为色泽、风味、嫩度、保水性和多汁性,而质地特性则以硬度、弹性等为代表。

1.1 食用品质

一般来说,肉糜类制品的食用品质包括风味、色泽、嫩度和多汁性。风味是口感和香气的结合,肉的

风味大都是通过以高温为基础的烹调方式产生的,生肉一般只有咸味、金属味和血腥味^[8]。肉制品的浓郁香气和丰富口感主要是通过蛋白质、脂类和碳水化合物等前体物质受热反应产生的。这些反应主要是碳水化合物降解、脂质氧化和降解、美拉德反应和硫胺素降解^[9]。嫩度和多汁性是通过人类的咀嚼感知的,是评价肉制品品质的重要指标。在热处理过程中,肌原纤维蛋白、肌浆蛋白和结缔组织蛋白的变性、聚集和降解被认为是导致熟肉嫩度变化的主要原因^[10]。加热过程中肉制品的中心温度是决定多汁性的重要指标,相对较低的温度会减少水分流失,从而使肉制品的多汁性更加理想^[11]。肉制品的色泽是消费者对食用品质的第一印象,肉类的肌红蛋白会随着烹饪温度的升高而变性,导致颜色从红色变为棕色^[12],从而影响肉制品的可接受性。由此可见,热加工处理与肉糜类制品的食用品质密切相关,是决定肉糜类制品食用品质的决定性因素之一。

1.2 质地特性

肉的质地特性是基于视觉、听觉、躯体知觉和动觉的感知属性。质地特性与肉在外力作用下的变形、崩解和流动有关,可以通过质量、时间和距离的函数来客观地测量^[13]。不同于通过感官分析评估的食用品质,质地特性主要是通过质地轮廓分析仪和流变仪等仪器测量出来的参数,如硬度、黏附性、弹性、内聚性、咀嚼性、胶性、和回弹性^[14]。肉制品的质地特性是由加热过程中结缔组织、可溶性蛋白和肌原纤维蛋白的变化决定的。通常,加热过程中肌原纤维蛋白的变性以及胶原蛋白溶解度的变化会显著地影响肉的质地^[15]。在所有的质地特性中,硬度是最具代表性的参数,因为它与嫩度和多汁性密切相关,在一定程度上反映了肉制品的适口性和新鲜度。由此可见,热加工处理是影响肉糜类制品质地特性的关键因素,对肉糜类制品的最终质地特性具有决定性作用。

2 热加工对肉糜类制品品质的影响

热加工处理是肉糜类制品品质特性形成的主导性因素,它通过改变肉糜类制品的质地特性从而赋予其不同的食用品质。表1列举了典型的肉糜类制品并分别阐述了热加工处理对其品质特性的影响。

2.1 热加工对香肠品质的影响

香肠可定义为将瘦肉和脂肪切碎并斩拌后,加入香料、盐和某些添加剂,然后填充到肠衣中,最后经过一系列加工处理而制成的肉糜类制品^[16]。作

为一类方便肉制品，香肠具有方便、多样、经济、营养的特点。在世界范围内，香肠因其独特的风味、质地和营养价值而成为最受消费者欢迎的肉类食品之一^[17]。在香肠制品中，无论是加工的过程中，还是对成品的灭菌，热处理都是确保特定感官特性和延长货架期不可缺少的工艺。在香肠制品中，肉类蛋白质是主要的功能成分，盐的添加使得肉蛋白在肉糜制作过程中被溶解，并形成蛋白质膜将脂肪球包裹。随后，热处理诱导薄膜中的蛋白质变性形成凝胶结构，将水和脂肪锁在其中^[18]。热处理过程中蛋白质和脂肪的变化是决定香肠品质属性的主要因素，同时热处理对品质属性的影响具有双面性。适当的加热温度可以得到品质理想的产品如低温蒸煮香肠，而过高的温度则会对香肠的食用品质和质地特性产生负面影响。Zhu 等^[19]的研究发现，120 ℃ 蒸煮加热 20 min 的乳化肠比 90 ℃ 蒸煮加热 20 min 的乳化肠发生了更多的蛋白质降解，这使得香肠的色泽、持水能力和凝胶结构恶化，从而降低了营养价值和感官特性。综上可知，加热过程中肌原纤维蛋白变性、聚集形成的致密凝胶网络是赋予香肠理想食用品质的关键。而过度加热则会损伤肌原纤维蛋白的凝胶性质导致香肠的质地退化。

2.2 热加工对肉饼和肉丸的影响

除香肠外，肉饼和肉丸也是很受欢迎的肉糜类制品，它们不仅具有令人满意的口感，而且还具有烹调简便的特点，这使得它们在过去几十年中一直保持着较高的消费量。肉饼是由绞碎的瘦肉和脂肪按一定的比例混合，并加入香料等调味剂进行搅拌，最终成型为饼状的肉糜类制品。肉饼在经过高温加工后硬度会显著增加，这种效应可归因于变性肌原纤维蛋白（主要是肌动球蛋白）在低温烹饪时的聚集，以及在高温烹饪时肌内膜和肌周胶原的收缩。也就是说，加热过程中肌原纤维蛋白功能特性的变化是肉饼最终品质的决定性因素。Xia 等^[20]比较了不同加热温度下（烤箱分别预热至 150、190、230、270、310 ℃，肉饼每面烤制 10 min）牛肉饼理化性质的变化，结果表明随着温度的升高肌原纤维蛋白变性聚集并发生氧化并且溶解度也随之下降，这些变化导致肉饼在加热过程中色泽变暗。由于独特的口感和浓郁的香味，肉丸已成为全球消费量最大的肉类产品之一。Wang 等^[21]探讨了不同温度（120、140、160 ℃）下的油炸加热对牛肉丸的影响，结果表明高温促进了肌原纤维蛋白凝胶网络的交联，肉丸的硬度、回弹性、内聚性、咀嚼性和蒸煮损失随温度的升高而增加。

表 1 热加工处理对不同肉糜类制品品质的影响

Table 1 Effect of heating on the quality attributes of different comminuted meat products				
肉糜类制品种类	热加工处理条件	肌原纤维蛋白分子的变化	肉糜类制品品质的变化	参考文献
猪肉香肠	0、90、100、110、120 ℃ 下加热 20 min	肌球蛋白和肌动蛋白降解	硬度降低，弹性增加，产生油脂味和辣味	[19]
猪肉香肠	加热至中心温度达到 65、72、78、85 ℃	乳化体积降低，肌原纤维蛋白变性	产量降低、蒸煮损失增加、硬度增加、黏性增加、咀嚼性增加	[22]
猪肉香肠	121 ℃ 射频加热 1 min，125 ℃ 射频加热 2 min，130 ℃ 射频加热 2 min	肌球蛋白和肌动蛋白变性	硬度降低，蒸煮损失增加	[23]
骆驼肉肠	加热至中心温度达到 85、95、105 ℃	肌原纤维蛋白变性从而与悬浮脂肪球形成牢固的凝胶结构	嫩度增加，多汁性降低，乳化性增加，粘度增加	[24]
猪肉饼	微波加热至中心温度达到 76.7 ℃	肌原纤维蛋白展开，发生分子间相互作用形成凝胶	肉饼直径降低、肉饼厚度降低、蒸煮损失增加、脂肪含量增加	[25]
牛肉饼	加热至中心温度达到 55、60、65、70 ℃	肌原纤维蛋白交联形成凝胶网络	硬度增加、红度降低、粒度增加	[26]
牛肉饼	在 150、190、230、270、310 ℃ 下各加热 20 min	溶解度降低、变性和氧化程度加深，疏水作用降低了蛋白质与水的结合能力	红度降低、黄度增加、脂质氧化和蛋白质氧化程度加深、蒸煮损失增加	[20]
牛肉丸	欧姆加热直至中心温度达到 75 ℃	肌原纤维蛋白热变性聚集	肉丸直径降低、肉丸体积减小、脂肪含量增加、蛋白质含量增加、蒸煮损失增加	[27]
牛肉丸	欧姆加热直至中心温度达到 75 ℃	肌原纤维蛋白变性、硬化并形成致密凝胶	硬度降低、红度降低、咀嚼性降低、肉丸直径减小、肉丸体积减小、蒸煮损失增加	[28]

综上, 热处理对肉糜类制品的影响具有双面性, 一方面, 它赋予产品令人满意的风味和口感, 另一方面, 过度加热对肌原纤维蛋白功能特性的损伤会对产品的质地特性产生不可逆的负面影响。因此, 如何调控高温对肌原纤维蛋白的破坏从而改善产品的品质特性将是肉糜类制品的发展方向。

3 热加工对肌原纤维蛋白的影响

热加工处理是肉制品熟化和杀菌的一种常用方式, 是大多数肉制品实现安全和美味的先决条件。一方面, 它赋予了肉制品理想的色泽、嫩度、风味、多汁性等食用品质以及硬度、弹性等质地特性。另一方面, 热处理使肉制品达到特定的核心温度以灭活食源性病原体和腐败微生物, 从而提高肉制品的微生物安全性并延长产品的货架期。肉制品的食用品质和质地特性主要取决于肌肉蛋白的凝胶特性, 肌原纤维蛋白是肌肉蛋白的主要成分, 在加热过程中对凝胶特性的形成贡献最大。热加工处理对肌原纤维蛋白结构和功能特性的影响是肉糜类制品品质改变的决定性因素。

3.1 热加工对肌原纤维蛋白结构的影响

肉糜类制品的生产需要热处理, 加热后蛋白质的凝胶化对产品的质地特性和食用品质至关重要, 在热加工过程中肌原纤维蛋白与肉制品的结构形成特性密切相关^[29]。肌球蛋白是肌原纤维蛋白中对凝胶特性的形成贡献最大的蛋白质, 加热过程中肌原纤维蛋白的结构变化主要是热诱导凝胶形成的过程。肌原纤维蛋白在肉加工条件(0.5~0.6 mol/L NaCl, pH 值 6.0~6.5, <80 °C)下的凝胶机制已被进行了广泛研究。Sharp 等^[30]对热诱导肌球蛋白凝胶变化的连续观察表明肌球蛋白的头部在 35 °C 时发生解聚, 产生头-头交联的二聚体和多聚体; 当温度升至 40 °C 时, 形成头部紧密相连、尾部向外的球状聚集体; 当温度升至 50~60 °C 时, 低聚物的尾端交联产生凝胶颗粒, 形成凝胶网络。Wei 等^[31]对鸡肉肌原纤维蛋白的研究发现, 当温度达到 42.03 °C 时, 肌原纤维蛋白开始变性; 当温度达到 63.50 °C 时, 肌原纤维蛋白大多变性并形成凝胶结构; 当温度达到 73.28 °C 时, 肌原纤维蛋白完全变性形成致密凝胶。魏相茹^[32]的研究表明, 鸭肉肌球蛋白在 25~30 °C 下的聚集程度和三维网络结构显著低于 40~45 °C。结合以上研究, 热诱导肌球蛋白凝胶的形成过程如图 1 所示, 对热致肌球蛋白凝胶的变化进行连续观察发现: 肌球蛋白头部(S-1 亚基)在 35 °C 发生解聚, 并且产生了头-头交联的二聚体和多聚体; 当温度上升到 40 °C, 头部紧密相连, 尾部朝外

的球状聚集体形成; 45 °C 时, 低聚物和由两个甚至是更多的低聚物形成的聚合体共存; 50~60 °C, 低聚物的尾-尾交联产生凝胶颗粒, 凝胶微粒构成了凝胶网络。

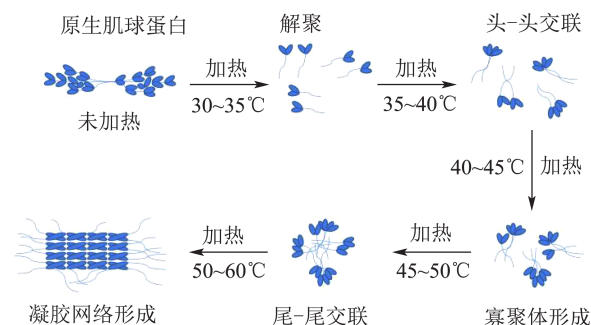


图 1 加热过程中肌原纤维蛋白结构变化示意图

Fig.1 Schematic diagram of structural changes of myofibrillar proteins during heating

就适口性特征而言, 60~65 °C 的温度足以使肉类蛋白质变性并释放蛋白质基质中的液体^[33]。然而, 这样的温度不能保证肉制品的微生物安全。美国农业部建议肉类产品的最低核心温度为 73.9 °C, 以实现适口性和微生物安全。高温肉制品是指在加热处理过程中, 加热介质温度高于 100 °C (通常为 115~120 °C) 的肉制品。此外, 为了实现商业无菌, 肉制品通常还要进行二次高温杀菌。虽然高温处理能有效杀灭细菌, 但较高的温度会导致肉制品品质下降。Chen 等^[6]的研究表明 80 °C 以上的温度会促进蛋白质过度聚集, 导致肌原纤维蛋白凝胶结构恶化。综上, 相对温度较低的热加工处理能够促进肌原纤维蛋白凝胶的形成, 有助于肉糜类制品形成良好的食用品质和质地特性, 但无法保证产品的微生物安全。高温处理虽然能够达到商业无菌的目的, 但同时会破坏肌原纤维蛋白的凝胶网络, 导致肉糜类制品的最终品质下降。

3.2 热加工对肌原纤维蛋白功能的影响

蛋白质的功能特性被定义为通过影响食品体系中蛋白质的加工和行为来决定产品的最终品质的物理化学性质^[34]。蛋白质的功能特性主要分为三类: 溶解性、乳化性和凝胶性^[35]。这些功能特性是肉糜类制品具有理想食用品质的基础。

蛋白质的溶解度可定义为在特定条件下进入溶液且在适度离心力作用下不会沉淀的肌肉蛋白质占总量的百分比。肌原纤维蛋白的溶解度对肉制品的质地和感官特性非常重要, 其溶解度与肌球蛋白的特性密切相关, 在持续加热后, 肌球蛋白会形成头-头交联、头-尾交联和尾-尾交联的凝胶网络, 最终导致肌原纤维蛋白的溶解度下降^[36]。根据 Chen 等^[37]的研究,

在 40~85 °C 的温度下,牛肉肌原纤维蛋白的表面疏水性增加,溶解度降低。此外,Chen 等^[38]表明,随着温度从 30 °C 升高到 80 °C,盐溶肌原纤维蛋白的溶解度从 100% 逐渐下降到 5%。Li 等^[39]研究发现,在 37 °C 和 55 °C 的加热温度下,肌原纤维蛋白的乳化性能大大降低,这是由于加热后肌原纤维蛋白的溶解度降低,蛋白质分子倾向于聚集并重新排列其结构,最终形成更大面积的界面膜,导致对油滴颗粒的阻挡减弱。在肉糜类制品中,肌原纤维蛋白理想的乳化能力是提高产品凝胶性能和品质的基础,它对产品的保水性以及脂肪的保留至关重要。童今柱^[40]的研究表明,随着温度升高,通过水浴、红外、微波等加热方式均使得鸭肉肌原纤维蛋白变性增强,水油界面上所形成的膜的黏度和硬度降低,使得乳化活性指数呈现下降的趋势。张桂艳^[41]的研究得出了相似的结论,牛肉肌原纤维蛋白经过 90 °C 的加热后乳化性显著降低 ($P<0.05$)。在肉类加工中,凝胶形成能力是肌原纤维蛋白最重要的理化特性之一。肌原纤维蛋白凝胶的微观结构和流变特性与肉糜类制品的质地、外观、保水性、乳化稳定性等属性密切相关。Zhuang 等^[42]的研究表明,在 56~72 °C 的范围内,随着温度的升高,猪肉肌原纤维蛋白的粒径、zeta 电位显著增加,水的流动性降低,从而形成了更好的凝胶网络。康怀彬等^[43]探究了高温处理 (110、115、121 °C 分别加热 3、6、9、12、15 min) 对牛肉肌原纤维蛋白结构的影响,结果表明,随着温度的升高肌原纤维蛋白发生了明显的降解聚集,并形成了大量小分子质量的蛋白片段,促进了凝胶网络的形成。Chen 等^[6]的研究指出,在过度加热 (85~95 °C, 20 min) 的情况下,蛋白质分子的过度聚集形成了不均匀和更大的蛋白质聚集体,这减少了维持凝胶网络的非共价交联,使得肌原纤维蛋白凝胶的热稳定性降低。

4 热加工处理下肉糜类制品品质的调控

肉糜类制品在加工过程中由于热处理会导致肌原纤维蛋白物理化学性质的改变,使得产品的最终品质恶化。添加不同物质和采用新型加工技术可以对肌原纤维蛋白进行调控以改善热加工处理下肌原纤维蛋白的结构恶化从而改善肉糜类制品的最终品质。表 2 总结了一些不同的调控方法。

4.1 不同添加物质

目前,不同类型的物质如膳食纤维、转谷氨酰胺酶和植物蛋白等被应用于肌原纤维蛋白的调控和肉糜类制品质地属性的改善。

4.1.1 膳食纤维

膳食纤维被定义为不能被人体吸收或不能被人体胃肠道酶消化的非淀粉多糖。在加热过程中,膳食纤维促进肌原纤维蛋白中的 α -螺旋向 β -折叠转变,从而使肌原纤维蛋白凝胶网络的孔洞变小、结构更加均匀致密,最终改善肉糜类制品的品质属性^[53]。

Li 等^[54]探究了添加不同质量分数 (0%、1%、2%、3% 和 4%) 的竹笋膳食纤维 (Bamboo Shoot Dietary Fiber, BSDF) 对猪肉糜理化性质的影响,结果表明,随着 BSDF 添加量的增加,猪肉糜的蒸煮损失和表现失水率显著降低 ($P<0.05$),而硬度和凝胶强度则明显增加 ($P<0.05$),这是因为 BSDF 的添加能促进肌原纤维蛋白凝胶形成更均匀致密的微观结构。此外,BSDF 可作为一种活性填料填充到蛋白质凝胶基质中,在热诱导凝胶形成过程中与蛋白质发挥协同作用,使三维网络结构更加致密和有序。肌原纤维蛋白中 β -折叠的增加和聚集使凝胶网络的排列更加规则,从而提高了凝胶强度和保水性,这也是肉饼硬度和多汁性增加的原因。庄昕波等^[55]探究了添加不同质量分数 (1%、2%、3%) 的改性甘蔗膳食纤维对猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响,结果表明,改性甘蔗膳食纤维的添加能够减少热诱导凝胶过程中蛋白网络结构内部水沟壑的形成,间接地促进肌原纤维蛋白之间的交联,形成致密的均一的网络结构。此外,膳食纤维的填充效应还可用于肉丸,以增强其功能特性,如乳化稳定性和凝胶强度,以及在加热过程中的质地特性,如硬度和咀嚼性^[56]。

膳食纤维主要通过填充效应使得肌原纤维蛋白凝胶的结构更致密和坚固,从而对肉糜制品在加热过程中的品质劣变进行调控。值得注意的是,膳食纤维的添加一般会增加产品的硬度和咀嚼性且具有浓度依赖性,适量的添加会减缓肌原纤维蛋白在加热过程中的损伤并改善产品的品质。而过量的添加可能会使产品的食用品质有所下降。

4.1.2 转谷氨酰胺酶

转谷氨酰胺酶 (Transglutaminase, TGase) 是一种广泛存在于微生物和动物体内的酶,它通过谷氨酰胺和赖氨酸残基之间的酰基转移反应催化蛋白质的分子内和分子间横向交联从而稳定蛋白质的网络结构^[57]。由于便于获取,微生物转谷氨酰胺转胺酶 (Microbial Transglutaminase, MTGase) 成为肌原纤维蛋白结构修饰中应用最广泛的酶。在肉糜类制品中, TGase 常被用于改善产品的质地特性和感官特性。

表 2 不同添加物质和新型加工技术对肌原纤维蛋白和肉糜类制品的影响

Table 2 Summary of effects of the addition of different substances and novel techniques on MP and comminuted meat products					
肌原纤维蛋白来源	肌原纤维蛋白调控方法	处理条件	肌原纤维蛋白分子的变化	肉糜类制品品质的变化	参考文献
牛肉香肠	南瓜籽粉膳食纤维	添加质量分数为 1.5%、2.2% 和 3.0% 的南瓜籽粉膳食纤维, 90 ℃ 水浴加热至中心温度达到 72 ℃	凝胶强度增加, 凝胶基质中填充了南瓜籽粉膳食纤维	粘度增加、持水力增强、硬度增加、咀嚼性降低、回弹性降低	[44]
猪肉香肠	黑藜麦膳食纤维	添加质量分数为 3% 的黑藜麦膳食纤维, 水浴加热至中心温度达到 72 ℃	肌原纤维蛋白变性后形成连续交联的凝胶网络, 通过氢键和二硫键得到稳定	硬度增加、内聚性降低、弹性增加、黏性增加	[45]
猪肉乳化肠	改性纤维素	添加质量分数为 0.0%、0.4%、0.8% 和 1.2% 的改性纤维素, 80 ℃ 水浴加热至中心温度达到 75 ℃	凝胶强度增加, 凝胶网络被改性纤维素填充, 韧性增强	乳液稳定性增加、黏性增加、咀嚼性增加、硬度增加	[46]
牛肉丸	转谷氨酰胺酶	添加质量分数为 0.0%、0.5% 和 1.0% 的转谷氨酰胺酶, 在 4 ℃ 下保存 24 h, 然后在电烤架上烤制加热至中心温度达到 72 ℃	热诱导凝胶网络结构更规整, 凝胶簇更多, 结构更均匀	弹性增加、内聚性增加、黏性增加、咀嚼性增加、硬度降低	[47]
牛肉丸	重组微生物转谷氨酰胺酶	添加浓度为 0.4 U/g, 40 ℃ 下保存 2 h, 然后在烤箱中加热至中心温度达到 72 ℃	形成共价二硫键, 暴露的疏水氨基酸聚集, 凝胶强度增加。	多汁性增加, 咀嚼性增加、蒸煮损失降低、持水性增加	[48]
猪肉香肠	大豆分离蛋白	添加质量分数为 5% 的大豆分离蛋白, 在 40 ℃ 下干燥 5 min, 在 55 ℃ 下干燥 10 min, 然后装入蒸煮袋在 80 ℃ 下蒸煮 30 min	α -螺旋含量降低, β -折叠含量增加、肌原纤维蛋白解聚、二硫键含量增加、凝胶强度增加	乳化稳定性和持水性增加	[49]
猪肉香肠	超高压加工	在 200 Mpa 下处理 2 min, 水浴加热至中心温度达到 75 ℃ 并保持 15 min	肌原纤维蛋白解聚、部分解聚和变性, 凝胶强度增加	硬度、内聚性、弹性、咀嚼性、韧性增加, 蒸煮损失降低	[50]
猪肉香肠	高强度超声	在频率为 20 kHz、功率为 200 W 的条件下处理 30 min, 80 ℃ 水浴加热 30 min	粘度增加, 肌原纤维蛋白分子之间的阻力减小	硬度、内聚性、弹性、咀嚼性、表观粘度增加, 蒸煮损失降低	[51]
牛肉饼	真空烹调	在真空包装条件下, 分别在 55、60 和 65 ℃ 下蒸煮 15 min	粘度增加、二硫键含量增加、疏水相互作用变强、凝胶强度增加	硬度、弹性、咀嚼性增加, L^* 值、 a^* 值、 b^* 值、蒸煮损失降低	[52]

Erdem 等^[47]研究了添加不同质量分数（0.0%、0.5%、1.0%）的 TGase 对牛肉丸质量的影响，与对照组相比，添加了质量分数为 0.5% 和 1.0% TGase 的肉丸在弹性、内聚性、咀嚼性和硬度方面都有所改善，烹饪损失显著降低（ $P<0.05$ ）。这是因为 TGase 使得热诱导肌原纤维蛋白凝胶具有更规则的交联网络结构、更多的凝胶簇和更均匀的结构相。Ersoz 等^[48]研究了 MTGase 对熟牛肉丸理化性质的影响，结果表明，MTGase 的添加可促进共价二硫键的形成，从而形成致密、规则的肌原纤维蛋白凝胶网络，这些变化增强了肉丸的持水能力，从而减少了烹饪损失。同时，肉丸的咀嚼性和多汁性也得到了改善，色泽没有发生明显变化（ $P<0.05$ ）。Chen 等^[58]采用拉曼光谱和质构分析仪研究了 MTGase 对热诱导猪肉肌原纤维蛋白结构的影响，结果表明 MTGase 的添加导致猪肉肌原纤维蛋白的 α -螺旋含量显著降低而 β -折叠、 β -转角

和无规则卷曲的含量显著增加，此外肌原纤维蛋白的硬度也显著增加，这些变化都表明 MTGase 的加入形成了一种强烈的、不可逆的热诱导凝胶。Sun 等^[59]观察到 MTGase 有助于改善热诱导鸡肉肌原纤维蛋白的凝胶性能，这是由于 MTGase 的添加使肌原纤维蛋白分子通过谷氨酰-赖氨酸相互作用交联从而使得凝胶硬度和强度大大提高。这种影响与添加浓度有关，当 MTGase 在 0~15 U 的水平下加入时，凝胶峰值力随着 MTGase 的增加而增加，当 MTGase 水平大于 15 U 时，凝胶峰值力有下降趋势。为了解释肌原纤维蛋白热凝胶性能改善的内在原因，Aktas 等^[60]研究了 MTGase 对肌球蛋白的影响，他们发现 MTaseG 的加入显著提升了肌球蛋白的热稳定性，有利于致密有序构象的分子复合物的形成。TGase 的作用效果与添加量高度相关，根据产品类型和加热条件选择适当的添加量可达到最佳效果。

4.1.3 植物蛋白

植物蛋白作为脂肪或肉类的替代品已被广泛应用于肉糜类制品中。通常,植物蛋白的添加是为了改善产品的质地特性、风味和烹饪产量。大豆蛋白是应用最广泛的植物蛋白,它们在肉糜类制品中用作粘合剂、凝胶剂和乳化剂^[61]。Sha 等^[49]向乳化肠中添加了大豆分离蛋白(Soybean Protein Isolate, SPI),结果表明,与对照组相比,加入了 SPI 的香肠的肌原纤维蛋白在加热的过程中 α -螺旋含量下降、 β -折叠含量上升,这有助于在凝胶中形成更有序的蛋白质骨架,最终提升香肠的乳化稳定性。此外, SPI 的添加导致了肌原纤维蛋白的解聚,进一步破坏了香肠中的离子键从而提升了食用品质。Shen 等^[62]探究了通过顺序脱酰胺和偶联修饰的豌豆蛋白(Pea Protein Modified Via Sequential Deamidation and Conjugation, PGG)的添加对牛肉饼物理和感官性能的影响,结果表明,添加了 PGG 的牛肉饼在质地方面具有更低的硬度、内聚性和弹性,这是由于 PGG 改善了肌原纤维蛋白的凝胶性和乳化性。另一方面,添加了 PGG 的肉饼的多汁性低于对照组而风味反之。此外, PGG 的添加显著降低了肉饼的蒸煮损失。由此可见,直接添加植物蛋白在改善肉糜类制品质地特性的同时可能会对其食用品质造成负面影响,对植物蛋白进行适当的改性具有良好的发展前景。

综上,膳食纤维主要作为填充物介入肌原纤维蛋白凝胶,使凝胶网络孔隙更小、更致密均匀,从而在加热过程中增强肌原纤维蛋白的凝胶特性,改善肉糜类制品的品质。值得注意的是,添加膳食纤维往往会增加产品的硬度,适当添加可增强产品的咀嚼感,而过量添加则会降低感官属性。TGase 通过催化肌原纤维蛋白分子内和分子间的横向交联,在高温下稳定蛋白质的网络结构。膳食纤维和 TGase 可通过增强肌原纤维蛋白的凝胶特性来改善肉糜类制品的质地和感官特性。同样,所有添加剂都具有浓度依赖性,添加前应严格控制用量。对于添加剂的负面影响,改性是一个很有前景的发展方向,如改性纤维和改性植物蛋白,它们可以在改善肉糜类制品品质的同时将负面影响降至最低。

4.2 新型加工技术

目前,一些典型新型的加工技术如超高压加工(High-Pressure Processing, HPP)、高强度超声(High-Intensity Ultrasound, HIU)和真空烹调(Sous Vide Processing, SV)被用来辅助或者取代传统肉制品加工技术,其通过修改肌原纤维蛋白的结构和功能特性来改善肉制品在传统加工中由于热处理引起的品质劣变。

4.2.1 超高压加工

超高压加工是一种使用液体变送器对产品施加 100 MPa 以上压力进行静态处理的食品加工技术^[63]。肌原纤维蛋白决定了肉糜类制品的最终品质,因为肌原纤维蛋白的结构与凝胶化、乳化性和溶解性等功能特性高度相关,而 HPP 可以改变蛋白质的结构从而改变其功能特性。

热加工过程会改变肉制品中肌原纤维蛋白的结构特性和功能特性如溶解性、乳化特性、凝胶形成能力,进而导致肉糜制品的质地、嫩度、多汁性等品质下降。在热处理前应用高压可以增强肉制品中肌原纤维蛋白的热凝胶特性从而改善产品品质。Yang 等^[64]在加热前(10 °C)对猪肉香肠施加 200 MPa 的高压处理,结果表明 HPP 可以降低香肠的蒸煮损失并改善其结构和流变性能。施加 200 MPa 的压力诱导了肉糜中肌原纤维蛋白的解聚、部分展开和变性,改善的蛋白质网络增加了对水分和脂肪的保留从而减少了蒸煮损失。陈燕婷等^[65]对带鱼鱼糜蛋白凝胶质构特征的研究发现,与对照组相比,经 350 MPa 超高压处理的蛋白凝胶,其硬度、咀嚼性显著上升,弹性和黏聚性略优于对照组,随着压力继续增加,弹性、咀嚼性、硬度呈先上升后下降的趋势,粘聚性呈下降趋势。也有研究表明,高压处理(10 °C, 400 MPa)通过促进蛋白质的溶解和部分蛋白质的展开诱导了凝胶交联,导致低盐牛肉香肠的持水性显著改善、蒸煮损失降低并最终改善口感^[66]。同样的结论在肉饼中也得到了证实, Iwasaki 等^[67]在加热前对猪肉肉饼进行 200 MPa 的 HPP 处理,结果表明肉饼的表观弹性比未加压处理组高 2 倍,这是因为 HPP 改善了热诱导凝胶的流变学特性。

研究表明,对肉和肉制品的高压处理会促进脂质氧化,一般情况下,300 MPa 以下的高压对脂质氧化的影响不大,而更高的压力则会产生显著的影响^[58]。适当的脂质氧化有利于独特风味的形成,而过度的脂质氧化则会对产品的风味和贮存产生不利的影响。因此压力大小、作用时间等参数对 HPP 的工作效应密切相关。

4.2.2 高强度超声加工

超声波技术是一种绿色、高效的新兴食品加工技术,它主要通过空化效应使食品的微观结构和特性发生改变。一般来说,超声波分为低频(16~100 kHz)和高频(100~1 MHz)^[68]。

在肉和肉制品中,主要应用 HIU 对肌原纤维蛋白结构进行调控进而改善产品的品质特性。Amiri 等^[69]的研究表明 HIU 处理可以提高牛肉肌原纤维蛋白

的溶解度从而使其持水性、乳化性、发泡性以及凝胶强度显著 ($P < 0.05$) 提高, 这些变化证明了 HIU 改善肉制品品质的可能性。王子凌等^[70]的研究表明, 随着 HIU 处理时间的增加, 肌原纤维蛋白的溶解度先上升后下降, 进而影响蛋白的聚集程度, 改变肌原纤维蛋白的凝胶网络结构。Huang 等^[51]研究了超声波与 *L*-精氨酸/*L*-赖氨酸联合使用对 80 °C 加热下成熟的乳状香肠的影响, 结果表明超声波与氨基酸的联合作用使 MP 凝胶基质更具弹性, 进而改善流变性能、增加表观粘度并稳定脂肪/油脂来改善乳化香肠的物理稳定性。Wang 等^[21]的研究发现超声辅助处理可以缩短 120、140 和 160 °C 下肉丸的煎炸时间, 并且对肉丸的保水性和质地产生积极的影响, 这归因于高强度超声处理促进了肌原纤维蛋白网络的交联从而降低了高温对肉丸质地特性的损伤。

与 HPP 相似, HIU 也会促进肉和肉制品中的蛋白质氧化和脂质氧化, 从而影响其最终品质^[71]。因此, 在进行 HIU 处理之前要根据不同的产品选择适当的超声功率和时间以防止过度氧化带来的负面影响。

4.2.3 真空烹调

真空烹调是指在在精确监控条件下长时间烹饪真空密封的食品的加工技术。根据生产模式, SV 可以被分为高温和低温两类^[72]。与传统热加工技术相比, SV 可以减少高温下肌原纤维蛋白的过度聚集和凝胶特性从而改善肉糜类制品的食用品质和质地特性^[73]。Naveena 等^[74]探究了 SV 加工对鸡肉香肠物理化学性质的影响, 结果表明 100 °C、30 min 的加工条件生产的鸡肉肠与未经 SV 加工的对照组相比, 蒸煮损失显著降低 ($P < 0.05$), 嫩度和含水量显著增加 ($P < 0.05$)。SV 加工在改善鸡肉香肠质地的同时并不会对肌原纤维蛋白的结构和溶解度产生负面影响。Janardhanan 等^[52]探究了 HPP 与 SV 加工的结合对牛肉肉饼理化性质的影响, 结果表明肉饼的最佳加工工艺为在 HPP (350 MPa) 下处理 10 min, 并在 55 °C 下进行 SV 加工。在此条件下肉饼的硬度和烹饪损失均最低, 这可能是由于 SV 缓解了 HPP 和加热引起的肌原纤维蛋白的损伤。也有研究表明, SV 改善了猪肉饼的嫩度和多汁性并且提高了其贮藏稳定性^[75]。由此可见, SV 是一种很有潜力的新型加工技术, 它可以最大限度地保留加热过程中肌原纤维蛋白的功能特性并显著改善肉糜类制品的品质属性。不可忽视的是, SV 需要精准的条件控制, 而且对真空包装材料的要求较高。

总的来说, 新型加工技术对热加工处理下肌原纤维蛋白的修饰具有很大的潜力, 它们可以不同程度地改善传统热加工技术对肉糜类制品带来的负面影响。

HPP 和 HIU 可以改变肌原纤维蛋白的溶解性和凝胶性, 而高温下肌原纤维蛋白功能特性的改变是肉糜类制品最终品质改善的基础。SV 通过长时间的真空密封加热以减少肌原纤维蛋白的过度聚集, 同时不会对肉糜类制品的功能特性如溶解性、凝胶性和乳化性产生显著的负面影响。此外, 所有的新型加工技术都需要严格的条件控制, 不同类型的肉糜类制品需要设置相应的工作参数, 例如 HPP 的压力、HIU 的频率以及 SV 的真空包装材料选择。值得注意的是, 每种新型加工技术只对相应的肉糜类制品品质属性产生显著改变, 因此不同方法的联用将是一个有前景的研究领域。这些联用包括不同新型加工技术之间、新型加工技术与添加物质之间以及不同添加物质之间。它们在实际应用中的优势互补可能会发挥更好的效果。

5 结论

本文综述了热加工处理条件下典型的改善肉糜类制品的品质属性的不同添加物质和新型加工技术。它们通过改变肌原纤维蛋白的结构特性和功能特性来改善产品的最终品质。此外, 还需要关注这些调控方法带来的负面影响和局限性, 例如不同添加物质对产品的色泽、风味等食用品质的影响以及新型加工技术对产品的硬度、咀嚼性等质地特性的影响。如何精准地控制这些方法对肉糜类制品品质属性的改变是未来研究的重点。添加物质对肌原纤维蛋白的作用一般比较温和, 它们通过共价或非共价作用来改善肉糜类制品的品质, 而新型加工技术的作用一般较剧烈, 它们通过强烈物理作用调控肉糜类制品的品质。添加物质相对易控制而新兴技术作用效果较显著。因此, 不同调控方法的结合将是有前景的, 它们可以在肉糜类制品品质属性的改善中优势互补。

参考文献

- [1] 李艳慧, 郭金英, 郝红涛, 等. 肉糜类制品中脂肪替代物的应用及研究进展[J]. 中国调味品, 2023, 48(8): 203-207, 14.
- [2] KAISER Y, OWAS Y, SHAFIQ QADRI O, et al. Incorporation of soluble dietary fiber in comminuted meat products: special emphasis on changes in textural properties [J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2022, 27: 100288.
- [3] GRAVELLE A J, MARANGONI A G, BARBUT S. Insight into the mechanism of myofibrillar protein gel stability: Influencing texture and microstructure using a model hydrophilic filler [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 415-424.
- [4] ASGHAR A, SAMEJIMA K, YASUI T. Functionality of muscle proteins in gelation mechanisms of structured meat products [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1985, 22(1): 27-106.
- [5] XU Y J, XU X L. Modification of myofibrillar protein functional

- properties prepared by various strategies: A comprehensive review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(1): 458-500.
- [6] CHEN B, ZHOU K, WANG Y, et al. Insight into the mechanism of textural deterioration of myofibrillar protein gels at high temperature conditions [J]. *Food Chemistry*, 2020, 330: 127186.
- [7] HONGHONG G, JIAO L, LIMEI W, et al. Strategies to optimize the structural and functional properties of myofibrillar proteins: Physical and biochemical perspectives [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(13): 4202-4218.
- [8] BEGUM N, RAZA A, SONG H L, et al. Effect of thermal treatment on aroma generation from bovine bone marrow extract during enzymatic hydrolysis [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(10): e14105.
- [9] AFZAL A, SAEED F, AFZAAL M, et al. The chemistry of flavor formation in meat and meat products in response to different thermal and non-thermal processing techniques: An overview [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(10): e16847.
- [10] DOMINGUEZ-HERNANDEZ E, SALASEVICIENE A, ERTBJERG P. Low-temperature long-time cooking of meat: Eating quality and underlying mechanisms [J]. *Meat Science*, 2018, 143: 104-113.
- [11] 张慢,熊晓筱,刘俊,等.真空低温烹调技术对肉制品品质的影响研究进展[J].*食品工业科技*,2024,45(11):333-340.
- [12] KARKI R, BREMER P, SILCOCK P, et al. Effect of sous vide processing on quality parameters of beef short ribs and optimisation of sous vide time and temperature using third-order multiple regression [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2022, 15(7): 1629-1646.
- [13] PATRA A, PRASATH V A, SUTAR P P, et al. Evaluation of effect of vacuum frying on textural properties of food products [J]. *Food Research International*, 2022, 162: 112014.
- [14] CHANG H J, WANG Q A, XU X L, et al. Effect of heat-induced changes of connective tissue and collagen on meat texture properties of beef semitendinosus muscle [J]. *International Journal of Food Properties*, 2011, 14(2): 381-396.
- [15] 李雪松,杨帆,张更旭,等.加工工艺对植物基炸鸡块感官特性影响的研究进展[J].*食品工业科技*,2023,44(2):10-18.
- [16] KARSLIOGLU B, CICEK U E, KOLSARICI N, et al. Lipolytic changes in fermented sausages produced with Turkey meat: Effects of starter culture and heat treatment [J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2014, 34(1): 40-48.
- [17] MORIKEN S, ROMDHANE K. Evaluation and monitoring of the quality of sausages by different analytical techniques over the last five years [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(26): 8136-8160.
- [18] SCHOLLIERS J, STEEN L, FRAEYE I. Partial replacement of meat by superworm (*Zophobas morio* larvae) in cooked sausages: Effect of heating temperature and insect: Meat ratio on structure and physical stability [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 66: 102535.
- [19] ZHU N, ZHANG S L, ZHAO B, et al. Effect of processing on protein degradation and quality of emulsion sausages [J]. *Food Bioscience*, 2020, 37: 100685.
- [20] XIA C, WEN P P, YUAN Y M, et al. Effect of roasting temperature on lipid and protein oxidation and amino acid residue side chain modification of beef patties [J]. *Rsc Advances*, 2021, 11(35): 21629-21641.
- [21] WANG Y, ZHANG W G, ZHOU G H. Effects of ultrasound-assisted frying on the physiochemical properties and microstructure of fried meatballs [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2019, 54(10): 2915-2926.
- [22] CHOI Y S, KU S K, KIM T K, et al. Distribution of microorganisms in *cheongyang* red pepper sausage and effect of central temperature on quality characteristics of sausage [J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2018, 38(4): 749-758.
- [23] JANTAPIRAK S, TAKAHASHI C, UEMURA K. Effect of radiofrequency heating of vacuum-packed nitrite-free sausage on quality properties and microorganism inactivation [J]. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 2021, 85(4): 907-915.
- [24] MOHAMED H M H, EMARA M M T, NOUMAN T M. Effect of cooking temperatures on characteristics and microstructure of camel meat emulsion sausages [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(9): 2990-2997.
- [25] JEONG J Y, LEE E S, CHOI J H, et al. Cooking pattern and quality properties of ground pork patties as affected by microwave power levels [J]. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 2009, 29(1): 82-90.
- [26] BAO Y L, PUOLANNE E, ERTBJERG P. Effect of oxygen concentration in modified atmosphere packaging on color and texture of beef patties cooked to different temperatures [J]. *Meat Science*, 2016, 121: 189-195.
- [27] SENGUN I Y, TURP G Y, ICIER F, et al. Effects of ohmic heating for pre-cooking of meatballs on some quality and safety attributes [J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2014, 55(1): 232-239.
- [28] TURP G Y, ICIER F, KOR G. Influence of infrared final cooking on color, texture and cooking characteristics of ohmically pre-cooked meatball [J]. *Meat Science*, 2016, 114: 46-53.
- [29] YUEMEI Z, GENPENG B, GUOFENG J, et al. Role of low molecular additives in the myofibrillar protein gelation: underlying mechanisms and recent applications [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(11): 3604-3622.
- [30] SHARP A, OFFER G. The mechanism of formation of gels from myosin molecules [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1992, 58(1): 63-73.
- [31] WEI S M, XU Y N, KONG B H, et al. Effect of microwave heating time on the gel properties of chicken myofibrillar proteins and their formation mechanism [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2022, 57(8): 5024-5035.
- [32] 魏相茹.鸭肉烤制过程温度对肌球蛋白聚集行为的调控作用[D].北京:中国农业科学院,2020.
- [33] JEREMIAH L E, GIBSON L L. Cooking influences on the palatability of roasts from the beef hip [J]. *Food Research International*, 2003, 36(1): 1-9.
- [34] XIONG Y L. Myofibrillar protein from different muscle fiber types: implications of biochemical and functional properties in meat processing [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1994, 34(3): 293-320.

- [35] KANG D, ZHANG W, LORENZO J M, et al. Structural and functional modification of food proteins by high power ultrasound and its application in meat processing [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(11): 1914-1933.
- [36] 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.
- [37] CHEN H, ZHAO G M, YU X L, et al. Exploring *in vitro* gastrointestinal digestion of myofibrillar proteins at different heating temperatures [J]. Food Chemistry, 2023, 414: 135694.
- [38] CHEN X, XU X L, LIU D M, et al. Rheological behavior, conformational changes and interactions of water-soluble myofibrillar protein during heating [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 524-33.
- [39] LI Y L, XU Y J, XU X L. Continuous cyclic wet heating glycation to prepare myofibrillar protein-glucose conjugates: A study on the structures, solubility and emulsifying properties [J]. Food Chemistry, 2022, 388: 133035.
- [40] 童今柱.加热方式对鸭肉肌原纤维蛋白结构和功能性质及肉品质形成的影响研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [41] 张桂艳.食盐和加热对肌原纤维蛋白与 I 型胶原蛋白乳化特性的影响[D].郑州:河南农业大学,2022.
- [42] ZHUANG-LI K, LING-HUI K, ZAI-SHANG G, et al. Effect of temperature increase and NaCl addition on aggregation and gel properties of pork myofibrillar protein [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(11): e15923.
- [43] 康怀彬,邹良亮,张慧芸,等.高温处理对牛肉蛋白质化学作用力及肌原纤维蛋白结构的影响[J].食品科学,2018,39(23):80-86.
- [44] MUMYAPAN M, AKTAS N, GERCEKASLAN K E. Seed pumpkin flour as a dietary fiber source in Bologna-Type sausages [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): e16586.
- [45] FERNANDEZ-LOPEZ J, LUCAS-GONZALEZ R, VIUDA-MARTOS M, et al. Chemical and technological properties of bologna-type sausages with added black quinoa wet-milling coproducts as binder replacer [J]. Food Chemistry, 2020, 310: 125936.
- [46] ZHAO Y Y, HOU Q, ZHUANG X B, et al. Effect of regenerated cellulose fiber on the physicochemical properties and sensory characteristics of fat-reduced emulsified sausage [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2018, 97: 157-163.
- [47] ERDEM N, BABA OGLU A S, POCAN H B, et al. The effect of transglutaminase on some quality properties of beef, chicken, and turkey meatballs [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(10): e14815.
- [48] ERSOZ F, DINCER E A, OZCELIK A T, et al. Effect of recombinant transglutaminase on the quality characteristics of cooked beef meatballs [J]. Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi, 2021, 27(2): 209-215.
- [49] SHA L, LIU S S, LIU D Y. Effects of soybean protein isolate on protein structure, batter rheology, and water migration in emulsified sausage [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): e14711.
- [50] YANG H J, KHAN M A, YU X B, et al. Changes in protein structures to improve the rheology and texture of reduced-fat sausages using high pressure processing [J]. Meat Science, 2016, 121: 79-87.
- [51] HUANG Y J, ZHANG Y Y, ZHANG D J, et al. Combination effects of ultrasonic and basic amino acid treatments on physicochemical properties of emulsion sausage [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(2): 2088-2097.
- [52] JANARDHANAN R, VIRSEDA P, HUERTA-LEIDENZ N, et al. Effect of high-hydrostatic pressure processing and sous-vide cooking on physicochemical traits of Biceps femoris veal patties [J]. Meat Science, 2022, 188: 108772.
- [53] ZHANG S S, DUAN J Y, ZHANG T T, et al. Effect of compound dietary fiber of soybean hulls on the gel properties of myofibrillar protein and its mechanism in recombinant meat products [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1129514.
- [54] LI K, LIU J Y, FU L, et al. Effect of bamboo shoot dietary fiber on gel properties, microstructure and water distribution of pork meat batters [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2020, 33(7): 1180-1190.
- [55] 庄昕波,陈银基,周光宏.改性甘蔗膳食纤维对猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J].中国农业科学,2021,54(15):3320-3330.
- [56] ZHAO D W, GUO C X, LIU X B, et al. Effects of insoluble dietary fiber from kiwi fruit pomace on the physicochemical properties and sensory characteristics of low-fat pork meatballs [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2021, 58(4): 1524-1537.
- [57] IONESCU A, APRODU I, DARABA A, et al. The effects of transglutaminase on the functional properties of the myofibrillar protein concentrate obtained from beef heart [J]. Meat Science, 2008, 79(2): 278-284.
- [58] CHEN H Y, HAN M Y. Raman spectroscopic study of the effects of microbial transglutaminase on heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with textural characteristics [J]. Food Research International, 2011, 44(5): 1514-1520.
- [59] SUN X D, ARNTFIELD S D. Gelation properties of chicken myofibrillar protein induced by transglutaminase crosslinking [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 107(2): 226-233.
- [60] AKTAS N, KILIC B. Effect of microbial transglutaminase on thermal and electrophoretic properties of ground beef [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2005, 38(8): 815-819.
- [61] 窦薇,张鑫,赵煜,等.海藻酸钠添加对大豆浓缩蛋白植物肉特性的影响[J].食品科学,2022,43(12):147-152.
- [62] SHEN Y T, HONG S, DU Z J, et al. Effect of adding modified pea protein as functional extender on the physical and sensory properties of beef patties [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2022, 154: 112774.
- [63] SIMONIN H, DURANTON F, DE LAMBALLERIE M. New insights into the high-pressure processing of meat and meat products [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2012, 11(3): 285-306.
- [64] YANG H J, HAN M Y, WANG X, et al. Effect of high pressure on cooking losses and functional properties of reduced-fat and reduced-salt pork sausage emulsions [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 29: 125-133.
- [65] 陈燕婷,林露,高星,等.超高压对带鱼鱼糜凝胶特性及其肌原纤维蛋白结构的影响[J].食品科学,2019,40(21):115-120.
- [66] SIKES A L, TOBIN A B, TUME R K. Use of high pressure to reduce

- cook loss and improve texture of low-salt beef sausage batters [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2009, 10(4): 405-412.
- [67] IWASAKI T, NOSHIROYA K, SAITOH N, et al. Studies of the effect of hydrostatic pressure pretreatment on thermal gelation of chicken myofibrils and pork meat patty [J]. *Food Chemistry*, 2006, 95(3): 474-483.
- [68] SORIA A C, VILLAMIEL M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2010, 21(7): 323-331.
- [69] AMIRI A, SHARIFIAN P, SOLTANIZADEH N. Application of ultrasound treatment for improving the physicochemical, functional and rheological properties of myofibrillar proteins [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 111: 139-147.
- [70] 王子凌,熊可心,蒋景淳,等.高强度超声处理时间对克氏原螯虾肌原纤维蛋白理化性质的影响[J].*食品科学*,2023,44(23):13-20.
- [71] ALVES L D, DONADEL J Z, ATHAYDE D R, et al. Effect of ultrasound on proteolysis and the formation of volatile compounds in dry fermented sausages [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 67: 105161.
- [72] ONYEAKA H, NWAIZU C C, EKAETTE I. Mathematical modeling for thermally treated vacuum-packaged foods: A review on sous vide processing [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 126: 73-85.
- [73] THATHSARANI A P K, ALAHAKOON A U, LIYANAGE R. Current status and future trends of sous vide processing in meat industry: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 129: 353-363.
- [74] NAVEENA B M, KHANSOLE P S, KUMAR M S, et al. Effect of sous vide processing on physicochemical, ultrastructural, microbial and sensory changes in vacuum packaged chicken sausages [J]. *Food Science and Technology International*, 2017, 23(1): 75-85.
- [75] CHO D K, LEE B, OH H, et al. Effect of searing process on quality characteristics and storage stability of sous-vide cooked pork patties [J]. *Foods*, 2020, 9(8): 1011.