丁陈辉, 任中阳, 石林凡, 等. 加热温度对凡纳滨对虾虾糜凝胶性质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 109−115. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010254

DING Chenhui, REN Zhongyang, SHI Linfan, et al. Effect of Heating Temperature on the Gel Properties of Shrimp Surimi of *Penaeus vannamei*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 109−115. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010254

· 研究与探讨 ·

加热温度对凡纳滨对虾虾糜凝胶性质的影响

丁陈辉[1], 任中阳[1,2], 石林凡[1,2], 翁武银[1,2,*]

（1.集美大学海洋食品与生物工程学院, 福建厦门 361021;
2.福建省海洋功能食品工程技术研究中心, 福建厦门 361021）

摘　要: 本研究以凡纳滨对虾为原料制备热诱导虾糜凝胶，通过测定凝胶的质构、微观结构和膨胀率等指标，探究加热温度对虾糜凝胶形成性能的影响规律。结果表明，当加热温度从 20 ℃ 升高至 40 ℃ 时虾糜凝胶的储能模量和损耗模量均发生下降，而在 50 ℃ 至 75 ℃ 之间虾糜从溶胶态转变为热不可逆凝胶。虾糜凝胶的质构硬度、破断力和破断距离均随加热温度升高呈先上升后下降的趋势，在 89 ℃ 时出现最高值，分别为 1225.74 g、158.86 g 和 9.28 mm。虾糜凝胶持水性在 89 ℃ 热诱导温度下制备时达到最高值 94.28%，但升高或降低热诱导温度均发生下降。随加热温度的升高，虾糜凝胶的 L^*值逐渐降低，而 a^*和 b^*值逐渐上升。不同加热温度处理的虾糜凝胶的肌球蛋白重链和肌动蛋白条带没有明显的变化。当加热温度从 86 ℃ 升高至 89 ℃ 虾糜凝胶逐渐形成了致密有序的网络结构，但继续升高加热温度凝胶网络结构会遭到破坏。当加热温度从 86 ℃ 升高至 98 ℃ 时，虾糜凝胶的膨胀率从 32.89% 增大到 118.97%。因此，在 89 ℃ 下加热诱导的虾糜凝胶具有良好的质构性质和稳定的网络结构。

关键词: 凡纳滨对虾, 加热温度, 虾糜凝胶, 凝胶性质, 微观结构

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0109−07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010254　　本文网刊:

Effect of Heating Temperature on the Gel Properties of Shrimp Surimi of *Penaeus vannamei*

DING Chenhui[1], REN Zhongyang[1,2], SHI Linfan[1,2], WENG Wuyin[1,2,*]

（1.College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;
2.Fujian Provincial Engineering Technology Research Center of Marine Functional Food, Xiamen 361021, China）

Abstract: In this study, heat-induced shrimp surimi gel was prepared from *Penaeus vannamei*. The effects of heating temperature on the gel's formation properties were evaluated by examining its texture, microstructure, and swelling rate. The results revealed that the storage modulus and loss modulus of the shrimp surimi gels decreased as the heating temperature increased from 20 ℃ to 40 ℃. Furthermore, shrimp surimi underwent a transition from a sol-gel state to a thermally irreversible gel between 50 ℃ and 75 ℃. The textural hardness, breaking force, and breaking distance of the shrimp surimi gel initially increased and then decreased with increasing heating temperature. The highest values were recorded at 89 ℃, with textural hardness of 1225.74 g, breaking force of 158.86 g, and breaking distance of 9.28 mm. The water-holding capacity of the shrimp surimi gels peaked at 94.28% at a heat-induced temperature of 89 ℃, decreasing when the temperature was either raised or lowered from this point. The L^* value of the gel decreased with increasing heating temperature, while the a^* and b^* values increased. No obvious changes were observed in the myosin heavy chain and actin bands of the shrimp surimi gel treated with different heating temperature. A dense and orderly network structure gradually formed in the shrimp surimi gel as the heating temperature increased from 86 ℃ to 89 ℃. However, the network structure was disrupted when the heating temperature was further increased beyond 89 ℃. Additionally, the swelling rate of the

收稿日期: 2025−01−23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目（32272266）; 福建省促进海洋与渔业产业高质量发展专项资金项目（FJHYF-L-2023-19）。

作者简介: 丁陈辉（2000−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工, E-mail: ding18750975135@163.com。

*** 通信作者:** 翁武银（1974−）（ORCID: 0000−0003−2996−5423）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产品加工与综合利用, E-mail: wwymail@jmu.edu.cn。

shrimp surimi gel increased from 32.89% to 118.97% as the heating temperature rose from 86 ℃ to 98 ℃. Therefore, the shrimp surimi gel prepared at 89 ℃ exhibited optimal textural properties and a stable network structure.

Key words: *Penaeus vannamei*; heating temperature; shrimp surimi gel; gel properties; microstructure

凡纳滨对虾(*Penaeus vannamei*)又称南美白对虾,是目前国内养殖规模最大的对虾品种,具有高蛋白低脂肪的营养特性并富含多种人体必需氨基酸、维生素以及矿物质[1]。我国凡纳滨对虾养殖业近年来稳步发展,2023 年养殖总产量高达 224 万吨[2]。凡纳滨对虾中的肌原纤维蛋白含量丰富,具有良好的凝胶形成能力[3],围绕凡纳滨对虾市场上已经开发出各种虾滑产品。虾滑是一种以虾肉为主要原料制成的生虾糜制品,具有营养丰富、食用便捷、口感嫩滑和味道鲜美等特点,深受广大消费者青睐[4−5]。然而,虾滑在烹饪过程中常因高温沸煮出现结构松散和质地软化等品质缺陷问题,这与虾滑主要成分中虾糜的热诱导凝胶特性密切相关[4,6]。因此,探究加热温度对虾糜凝胶性质的影响,对于帮助解决实际生产中遇到的虾滑品质问题具有重要意义。

虾糜凝胶的制备过程中,热处理是形成凝胶的关键环节,其中肌球蛋白分子的结构变化与热诱导凝胶的形成机制紧密相关[7−8]。加热升温会促使虾糜中的肌球蛋白分子结构展开,导致其内部疏水基团暴露;这些未折叠的肌球蛋白分子随后通过疏水相互作用以及二硫键等化学作用力相互交联,构建形成稳定的凝胶网络结构[9]。这一过程使得虾糜从溶胶态转变为热不可逆凝胶,并赋予其独特的凝胶质地和稳定性。当前,水浴沸煮是满足饮食要求的一种合理且快捷的传统烹饪方式[10]。但已有研究表明,高温烹饪不可避免地会对产品品质造成一定程度的破坏。Wang 等[11] 研究报道猪肉丸在 100 ℃ 沸水煮制过程中其质地会随煮制时间的延长而不断变差,这是由于高温造成其凝胶网络结构破坏。Chen 等[12] 探究了高温(75~95 ℃)处理下鸡肉 MP 凝胶的劣化机制,发现过热(85~95 ℃)会引起蛋白质过度聚集使凝胶网络结构间的交联减弱,导致凝胶品质劣化。Li 等[13] 的研究也表明,在 100 ℃ 下加热制备的鲢鱼鱼糜凝胶的凝胶强度明显低于在 90 ℃ 下加热制备的凝胶。然而,有关加热温度对虾糜凝胶性质的影响尚未见报道。

因此,本研究基于虾滑在烹饪过程中出现的品质缺陷问题,以凡纳滨对虾为原料,探究加热温度对虾糜凝胶的凝胶强度、微观结构和膨胀率等主要指标的影响,旨在阐明虾糜的凝胶性质受加热温度的影响规律,结果将为热诱导虾糜凝胶制品的品质调控提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冷冻凡纳滨对虾虾仁　福建盛匠食品科技有限公司;十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)、丙烯酰胺(化学纯)　美国 Bio-Rad 公司;磷酸二氢钠、磷酸氢二钠　西陇化工股份有限公司;其他试剂均属于分析纯。

MQ335 手持式料理机　上海德龙博朗家电有限公司;BHS-4 数显恒温水浴锅　中国福州泰美实验仪器有限公司;DHR-2 流变仪　美国 TA 仪器有限公司;TA-XT Plus 质构仪　英国 Stable Micro System 公司;Avanti J-25 高速冷冻离心机　美国 Beckman 公司;YS3010 分光测色仪　深圳市三恩时科技有限公司;Phenom ProX G6 扫描电子显微镜　美国赛默飞世尔科技公司。

1.2 实验方法

1.2.1 虾糜凝胶的制备　凡纳滨对虾虾仁于 4 ℃ 冰箱中过夜解冻后,利用料理机将其搅碎,经过 3 min 空擂处理,随后加入虾仁质量 2% 的 NaCl 进行盐擂 15 min,制备成虾糜溶胶。整个擂溃过程在 10 ℃ 以下的低温环境中进行。将制备好的虾糜溶胶填充至敞口模具(内径 30 mm,高度 60 mm)中。依据文献报道的鱼糜凝胶最佳加热温度 90~95 ℃[14−15],结合实验地区大气压条件下的水沸腾点(98 ℃),本研究设置了 86、89、92、95 和 98 ℃ 五个温度梯度研究加热温度对虾糜凝胶理化性质的影响。样品在各设定温度下水浴加热 15 min 后,立即移至 40 ℃ 水浴中保温 30 min,最后脱模进行各项指标测定。

1.2.2 流变性质的测定　使用流变仪测定虾糜溶胶的流变性质。将虾糜溶胶置于平行板间并调整间隙为 1 mm,使用硅油对平行板四周进行液封用于防止水分蒸发。测定前采用 0.01%~100% 的剪切应变及 10 rad/s 的角频率先确定样品的线性黏弹区域,然后将虾糜溶胶在线性黏弹区范围内以 5.0 ℃/min 的升温速率进行 20~100 ℃ 温度扫描,并监测虾糜溶胶储能模量(G')和损耗模量(G")的变化。

1.2.3 全质构(texture profile analysis, TPA)的测定　参考 Fang 等[16] 的方法,在室温下利用装配 P/36R 圆柱形探头的质构仪对虾糜凝胶进行连续的双压缩循环测试。将虾糜凝胶统一切成高度 30 mm 的圆柱体并置于探头与平台正中央。触发力设定为 5 g,最大压缩比设定为原始样品高度的 30%,间隔设定为 5 s,测试前和测试中速度均为 1 mm/s,探头回升速度为 5 mm/s。记录硬度、咀嚼性和弹性等 TPA 参数。

1.2.4 凝胶强度的测定　参考杨玉等[17] 的方法,在室温下使用装配 P/5S 球形探头的质构仪测定虾糜凝胶的凝胶强度。触发力设定为 5 g,穿刺深度设定为 20 mm,以 0.5 mm/s 的下压速度对虾糜凝胶(高度 30 mm)进行穿刺实验。记录虾糜凝胶的破断力和破断距离。

1.2.5　水分含量的测定　采用直接干燥法测定虾糜凝胶的水分含量。准确称取 2 g 左右的虾糜凝胶置于干燥的称量皿中并于 105 ℃ 的条件下干燥至恒重后，冷却至室温并称重。

1.2.6　持水性（water holding capacity，WHC）的测定　参考柳丽宁等[18] 的方法，准确称取 2 g 左右的块状虾糜凝胶（W_1），经三层滤纸包裹置于离心管底部进行离心（4 ℃，1000×g，15 min），离心结束后称量虾糜凝胶重量（W_2）。根据公式计算虾糜凝胶的持水性。

$$WHC(\%)=\frac{W_2}{W_1}\times 100$$

式中：W_1 表示虾糜凝胶离心前重量，g；W_2 表示虾糜凝胶离心后重量，g。

1.2.7　色泽的测定　在室温下，利用便携式色差仪对虾糜凝胶的色泽进行测定，测定前使用标准白板（L^*=96.79，a^*=−0.28，b^*=0.34）及黑板（L^*=0.08，a^*=0.09，b^*=−0.03）对色差仪进行校准，测定参数包括：L^*值（亮度）、a^*值（红度）、b^*值（黄度）。

1.2.8　十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳（sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis，SDS-PAGE）　参考 Zhang 等[19] 的方法，将虾糜凝胶溶解于含有 20 mmol/L Tris-HCl、2% SDS、8 mol/L 尿素的可溶性液（pH8.8）中，利用离心（10000×g，15 min）得到的上清液调制成电泳样品，采用浓度为 5 g/100 mL 的浓缩胶和 8 g/100 mL 的分离胶对样品进行电泳。电泳结束后，将凝胶浸泡于含考马斯亮蓝的染色液中过夜，再用含有甲醇的乙酸溶液进行脱色并拍照。

1.2.9　微观结构的观察与分形分析　将虾糜凝胶切成 3 mm×3 mm×2 mm 的薄片，浸泡在含戊二醛（2.5%）的 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液（pH7.2）中并放置于 4 ℃ 环境下固定 1 d，而后用 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液（pH7.2）漂洗以去除残留的戊二醛，再经酒精梯度脱水后对样品进行冷冻干燥。最后，将冻干的样品喷金并在扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM）下采用 10 kV 的电压进行观察。利用 ImageJ 软件和盒子计数法根据公式计算分形维数（fractal dimension，D_f）。

$$D=-\frac{\log N_\varepsilon}{\log \varepsilon}$$

$$D_f=D+1$$

式中：N_ε表示在一定比例（ε）下图像中的盒子数；D 和 D_f 分别代表二维空间和三维空间的分形维数。

1.2.10　膨胀率的测定　参考王丹丹等[20] 的方法，选取一个大小适宜的量筒，并将纯水作为置换介质，分别对初始和膨胀后的虾糜体积进行测定。根据公式计算虾糜凝胶的膨胀率。

$$膨胀率(\%)=\frac{V_2-V_1}{V_1}\times 100$$

式中：V_1 表示虾糜凝胶初始的体积，mL；V_2 表示虾糜凝胶膨胀后的体积，mL。

1.3　数据处理

实验数据以平均值±标准偏差的形式表示，采用 SPSS statistics 17.0 软件进行 Duncan 检验，对数据进行显著性分析，显著性水平设为 0.05。

2　结果与分析

2.1　虾糜溶胶的动态流变学特性

储能模量（G'）和损耗模量（G"）分别代表凝胶的弹性和胶黏性质[21]，通过测定 G'和 G"能够了解加热过程中虾糜凝胶形成能的变化特征。图 1 显示了加热温度对凡纳滨对虾虾糜 G'和 G"的影响。随着加热温度从 20 ℃ 升高至 40 ℃，虾糜溶胶的 G'逐渐下降，这是因为虾糜肌球蛋白尾部发生变性和肌动球蛋白发生解离，从而使凝胶结构遭到破坏[3]。在 40~50 ℃ 加热范围内 G'保持相对平稳的状态，不同于 Zhang 等[21] 研究报道的凡纳滨对虾虾糜流变性质中 G'在 48 ℃ 左右出现峰值，这可能是由于本研究采用的虾仁原料中内源性转谷氨酰胺酶（glutamine transaminase，TGase）含量较低的缘故。Jiang 等[22] 研究发现添加 TGase 使凡纳滨对虾虾糜 G'在 45 ℃ 附近的峰值出现升高是因为促进了肌球蛋白交联和凝胶化反应。当加热温度从 50 ℃ 继续升高，G'值快速增加并于 75 ℃ 左右开始趋于稳定，表明虾糜在该温度下开始形成稳定的凝胶结构。这与鲢鱼鱼糜（75 ℃）[23] 和阿拉斯加狭鳕鱼糜（75 ℃）[24] 的凝胶化转变温度接近，表明了凡纳滨对虾虾糜热诱导凝胶形成的温度与鱼糜相类似。在升温过程中虾糜凝胶 G"的变化趋势与 G'类似，但 G"值始终低于 G'值，表明虾糜蛋白有序聚集的强度较高。

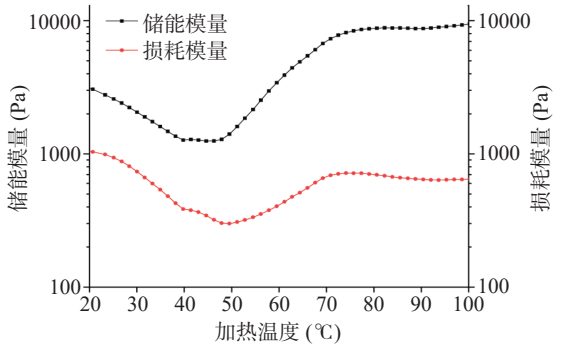


图 1　加热温度对虾糜储能模量（G'）和损耗模量（G"）的影响

Fig.1　Effect of heating temperature on the energy storage modulus (G') and loss modulus (G") of shrimp surimi

2.2　加热温度对虾糜凝胶全质构（TPA）的影响

表 1 显示，虾糜凝胶的硬度和咀嚼性随加热温度的升高呈现先上升后下降的趋势，其中在 89 ℃ 下制备的凝胶硬度和咀嚼性均最大。98 ℃ 下制备的虾糜凝胶硬度和咀嚼性比 89 ℃ 下制备的虾糜凝胶

表 1 加热温度对虾糜凝胶 TPA 的影响

Table 1 Effect of heating temperature on the TPA of shrimp surimi gels

加热温度(℃)	硬度(g)	咀嚼性(g)	内聚性	回复性	弹性
86	1149.98±23.74^{b}	896.36±27.30^{b}	0.84±0.01^{b}	0.57±0.01^{ab}	0.92±0.01^{a}
89	1225.74±11.60^{a}	938.07±14.00^{a}	0.84±0.01^{b}	0.57±0.01^{ab}	0.94±0.01^{a}
92	962.08±9.82^{c}	766.90±11.55^{c}	0.85±0.01^{a}	0.58±0.01^{a}	0.94±0.01^{a}
95	870.47±5.96^{d}	688.40±2.24^{d}	0.84±0.01^{b}	0.56±0.01^{b}	0.94±0.01^{a}
98	589.59±51.51^{e}	469.32±52.10^{e}	0.83±0.01^{c}	0.54±0.01^{c}	0.95±0.03^{a}

注: 同一列不同小写字母表示差异显著(P<0.05); 表2~表3同。

分别下降了 51.90% 和 49.97%。并且, 虾糜凝胶的内聚性和回复性伴随着加热温度的升高出现减弱的趋势。这与孔保华等[25] 探究加热温度(50~90 ℃)对猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响, 所观察到凝胶硬度和咀嚼性的变化趋势一致。这可能是由于加热有助于虾糜蛋白展开并形成三维网状结构。然而, 虾糜凝胶内部的蒸汽可能随着加热温度的升高而增加, 过高的加热温度促使逸出大量的蒸汽破坏了凝胶网络结构。在本研究中虾糜凝胶的弹性受加热温度的影响不显著(P>0.05), 可能是在 30% 压缩比的测试条件下虾糜凝胶的网络结构未受到破坏。

2.3 加热温度对虾糜凝胶强度的影响

加热温度对虾糜凝胶破断力和破断距离的影响如表 2 所示。随着加热温度的升高, 虾糜凝胶的破断力和破断距离呈现先增大后减小的趋势, 其中利用 89 ℃ 水浴加热制备的虾糜凝胶破断力和破断距离最大。这可能是因为肌原纤维蛋白中疏水基团及巯基的暴露促进了肌球蛋白相互作用形成致密的网络结构, 而高温诱导蛋白质过度聚集会导致凝胶网络结构被破坏。类似的现象也出现在热处理温度(75~95 ℃)对猪肉肌原纤维蛋白凝胶强度的影响[26]。因此, 在 89 ℃ 下加热有利于高强度的凡纳滨对虾虾糜凝胶的形成。

表 2 加热温度对虾糜凝胶破断力和破断距离的影响

Table 2 Effect of heating temperature on the breaking force and breaking distance of shrimp surimi gels

加热温度(℃)	破断力(g)	破断距离(mm)
86	133.54±3.45^{b}	8.00±0.08^{d}
89	158.86±6.51^{a}	9.28±0.15^{a}
92	133.59±4.02^{b}	9.10±0.08^{a}
95	121.49±2.84^{c}	8.50±0.10^{b}
98	113.61±8.10^{c}	8.19±0.07^{c}

2.4 加热温度对虾糜凝胶水分含量和持水性的影响

不同加热温度对虾糜凝胶水分含量和持水性的影响如图 2 所示。当加热温度升高至 89 ℃ 时, 虾糜凝胶的水分含量从 82.97 g/100 g 增加到 84.32 g/100 g, 而进一步提高加热温度虾糜凝胶水分含量无显著变化。这是因为加热能够促进蛋白质的结构展开发生相互作用从而增强对水分子的束缚能力[27]。另一方面, 虾糜凝胶的持水性在加热温度为 89 ℃ 时达到最高值, 降低或升高加热温度均会使虾糜凝胶的持水性下降。这与虾糜凝胶的硬度和凝胶强度变化趋势一致, 表明致密的凝胶网络结构能够束缚更多水分子, 而高温加热会对凝胶网络造成破坏导致持水性下降[28]。

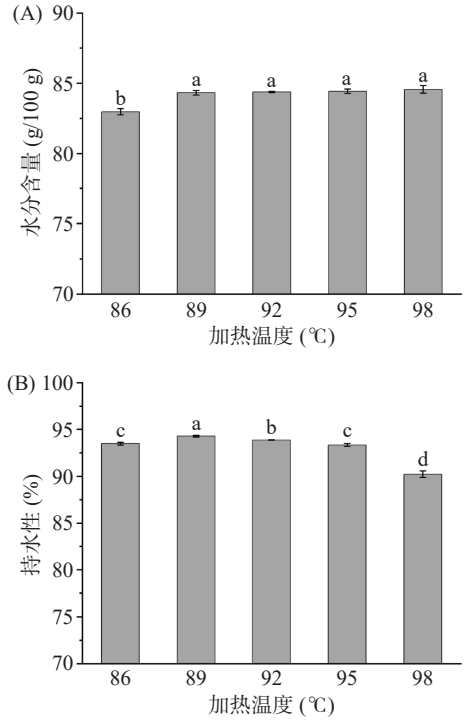


图 2 加热温度对虾糜凝胶水分含量(A)和持水性(B)的影响

Fig.2 Effect of heating temperature on the water content (A) and water holding capacity (B) of shrimp surimi gels

注: 不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05); 图 5 同。

2.5 加热温度对虾糜凝胶色泽的影响

表 3 显示了不同加热温度下虾糜凝胶色泽的变化。虾糜凝胶的 L^*值越高代表色泽越明亮, a^*值越高代表红度越深, b^*值越高代表色泽越黄[4]。随着加热温度的升高, 虾糜凝胶的 L^*值降低, a^*和 b^*值增加。这表明了高温加热会导致虾糜凝胶的亮度降低并使色泽朝红、黄方向转变。有研究报道, 虾糜凝胶的亮度与凝胶网络结构的致密性有关, 致密的凝胶网络结构会使虾糜凝胶的亮度增大[29]。因此, 虾糜凝胶的 L^*值降低可能是由于加热温度的升高使凝胶网络结构变得松散, 从而削弱了对光的反射能力。虾糜凝胶的 a^*和 b^*值增加可能源于虾肉中虾青素与蛋白质或脂质间的酯键热分解作用[30]。雷佳佳等[31] 在研究蒸制和水煮对小龙虾色泽的影响时, 虾肉的 a^*、b^*值升高可归因于结合态的虾青素因受热转变成游离态。

表 3　加热温度对虾糜凝胶色泽的影响

Table 3　Effect of heating temperature on the color of shrimp surimi gels

加热温度(℃)	颜色参数		
	L^*	a^*	b^*
86	76.59±0.58^{a}	8.06±0.24^{c}	8.34±0.43^{c}
89	75.42±0.16^{b}	8.21±0.04^{c}	8.61±0.11^{c}
92	74.51±0.19^{c}	8.33±0.30^{bc}	9.51±0.19^{b}
95	73.53±0.36^{d}	8.94±0.35^{a}	10.16±0.04^{a}
98	71.86±0.21^{e}	8.75±0.12^{ab}	10.31±0.26^{a}

2.6　加热温度对虾糜凝胶蛋白组分的影响

利用 SDS-PAGE 分析了加热温度对虾糜凝胶蛋白组分的影响(图 3)。虾糜凝胶的主要蛋白条带包括肌球蛋白重链(myosin heavy chain, MHC)、肌动蛋白(Actin)和原肌球蛋白(tropomyosin, TM)[29]。在非还原状态的 SDS-PAGE 中，虾糜凝胶主要含有 MHC、Actin 和 TM，以及未能进入浓缩胶的高分子量聚合物(high molecular weight fractions, HMWF)。然而，不同加热温度并未引起虾糜凝胶蛋白组分发生明显改变。在还原状态的 SDS-PAGE 中，浓缩胶顶部的 HMWF 条带浓度明显减弱，而 MHC 条带和 Actin 条带浓度明显增强，表明虾糜凝胶中 MHC 分子与 Actin 分子主要通过二硫键交联形成 HMWF。

2.7　加热温度对虾糜凝胶微观结构的影响

虾糜凝胶微观组织结构如图 4 所示。在放大 500 倍的 SEM 图中，发现经 86 ℃ 制备的虾糜凝胶具有明显的孔隙，孔隙随着加热温度的升高逐渐增大且数量逐渐增加，98 ℃ 下制备的凝胶网络结构遭到明显破坏。在放大 8000 倍的 SEM 图中，发现当加热温度从 86 ℃ 上升至 89 ℃，虾糜凝胶网络结构由粗糙的片状转变为致密的网状；当加热温度进一步升高，结构转向聚集的团簇状。为了定量描述虾糜凝胶网络结构的致密程度，利用分形维数(D_f)对 SEM 图像进行量化分析，其中 D_f 值越大所代表的凝胶网络结构越致密有序[32]。结果表明，89 ℃ 制备的虾糜凝胶具有最大的 D_f 值，伴随加热温度的升高或降低，D_f 值均出现下降的趋势。该趋势与虾糜凝胶的硬度、破断力、破断距离和持水性结果一致，表明适当的加热温度能够促进虾糜形成致密有序的网络结构，进而提高虾糜凝胶的物理性质。

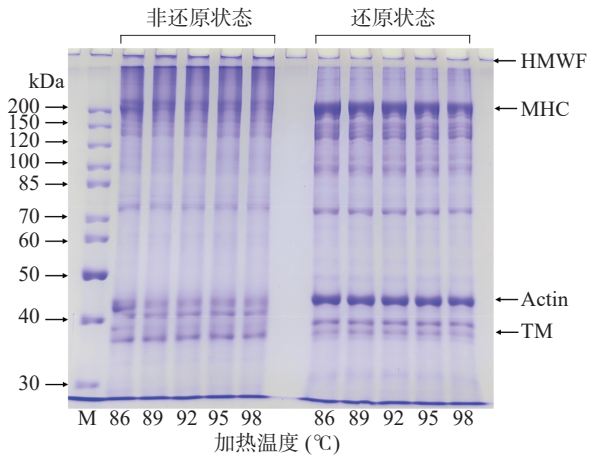


图 3　加热温度对虾糜凝胶蛋白组分的影响

Fig.3　Effects of heating temperature on protein patterns of shrimp surimi gels

注：M：标准蛋白；HMWF：高分子聚合物；MHC：肌球蛋白重链；Actin：肌动蛋白；TM：原肌球蛋白。

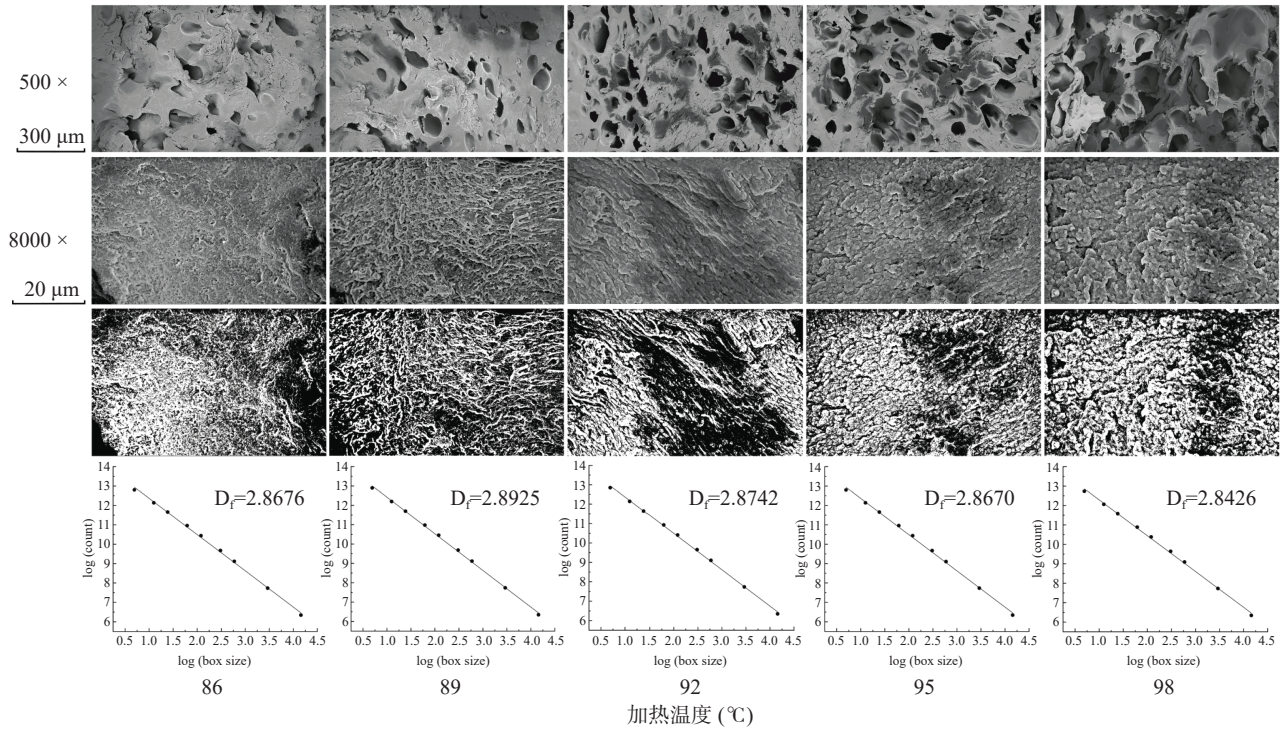


图 4　加热温度对虾糜凝胶微观结构和分形维数的影响

Fig.4　Effect of heating temperature on the microstructure and fractal dimension of shrimp surimi gels

2.8 加热温度对虾糜凝胶膨胀率的影响

图 5 显示了加热温度对虾糜凝胶膨胀率的影响。虾糜在 86 ℃ 下加热 15 min 后，膨胀率为 32.89%，并随着加热温度的升高逐渐增大。这是由于加热温度升高促进了凝胶内部水分的蒸发和气化逃逸，导致孔隙率增加（图 4）。当加热温度升至 98 ℃，虾糜凝胶内部蒸气压急剧增大，可能超过凝胶网络的机械强度阈值，致使其三维结构发生部分坍塌，从而导致膨胀率骤增至 118.97%（图 5）。这一结构变化直接导致了虾糜凝胶的硬度和咀嚼性发生显著降低（表 1）。类似的现象也出现在加热温度对海藻酸钠水凝珠的影响，高温加热产生的内部蒸汽对网络骨架造成损坏[33]。结果表明，虾糜凝胶的膨胀行为受加热温度的显著调控。在 86~92 ℃ 的适度加热条件下，有利于形成均匀致密的网状结构；而当温度超过 95 ℃ 时，过高的蒸汽压会产生破坏作用，导致虾糜产品品质劣变。因此，在实际生产中，需要平衡凝胶化促进和热破坏预防之间的关系，以优化虾糜制品的质构特性。本研究的发现不仅为热诱导虾糜的品质控制提供了理论依据，同时也为后续通过外源添加剂优化配方体系以抑制高温加工导致的网络结构破坏，进而改进加工工艺指明了方向。

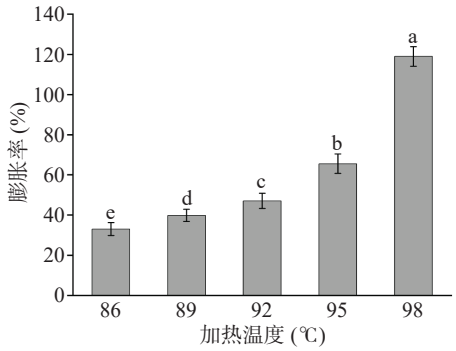


图 5 加热温度对虾糜凝胶膨胀率的影响

Fig.5 Effect of heating temperature on the expansion rate of shrimp surimi gels

3 结论

本研究揭示了加热温度对凡纳滨对虾虾糜凝胶性质的影响规律。研究发现，89 ℃ 的水浴加热能诱导虾糜形成致密有序的网络结构，进而提高凝胶的硬度、破断力、破断距离和持水性。然而，进一步提高加热温度会使虾糜凝胶内部孔隙逐渐增大且数量逐渐增加，结果导致凝胶网络结构遭到破坏，进而降低凝胶的物理性质。因此，采用 89 ℃ 的加热温度有利于虾糜凝胶网络结构的形成，并能够抑制高温加热引起的膨胀对凝胶网络结构的破坏。今后，将通过添加亲水胶体及谷氨酰胺转氨酶等外源添加剂抑制虾糜凝胶在热加工中的膨胀，以进一步提高虾糜凝胶的口感品质。

© The Author(s) 2026. 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] ZHANG Caiyu, SHI Renli, LIU Weihua, et al. Effect of different thermal processing methods on sensory, nutritional, physicochemical and structural properties of *Penaeus vannamei*[J]. Food Chemistry, 2024, 438: 138003.

[2] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 17−46. [Fisheries and Fisheries Administration of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024: 17−46.]

[3] SONG Linlu, YU Jiao, XIE Honglin, et al. Physical properties and conformational changes of shrimp surimi from *Litopenaeus vannamei* during cold gelation[J]. LWT, 2022, 153: 112516.

[4] 李慧, 陈百科, 金素莱曼, 等. 油脂对虾糜凝胶品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 143−149. [LI Hui, CHEN Baike, JIN Sulaiman, et al. Effect of grease and oil on the quality of minced shrimp gel[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(8): 143−149.]

[5] WANG Yueyue, LIU Xiaofang, JIANG Pengfei, et al. Inhibition of protein denaturation and oxidation of prepared shrimp paste by sturgeon skin collagen peptide[J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103766.

[6] 焦云爽, 王月月, 姜鹏飞, 等. 解冻方式对南极磷虾滑品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(5): 309−317. [JIAO Yunshuang, WANG Yueyue, JIANG Pengfei, et al. Effect of different thawing methods on quality changes of prepared Antarctic krill paste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(5): 309−317.]

[7] TONG Jingjing, JIA Ru, XIA Geran, et al. Influence mechanisms of different setting time at low temperature on the gel quality and protein structure of *Solenocera crassicornis* surimi[J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102344.

[8] 徐一宁, 曹传爱, 贺俊杰, 等. 亲水胶体调控肌原纤维蛋白热诱导凝胶形成机制的研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 285−293. [XU Yining, CAO Chuanai, HE Junjie, et al. Research progress in the regulatory mechanism of hydrocolloids on the formation of heat-induced myofibrillar protein gel[J]. Food Science, 2024, 45(6): 285−293.]

[9] CHEN Zhaohui, DAI Zechuan, LIU Chunhui, et al. Microbial transglutaminase promotes cross-linking for enhancing gelation of myofibrillar protein in frozen *Litopenaeus vannamei* through deamination reaction[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109332.

[10] HE Shudong, ELFALLEH W, SUN Xianbao, et al. Quality and sensory characteristics of *Volutharpa ampullacea* Perryi (false abalone) meat during the boiling cooking[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2019, 28(1): 93−106.

[11] WANG Kaiqiang, LUO Shuizhong, ZHONG Xiyang, et al. Effect of modified wheat gluten on boiling resistance capacity of pork meatballs[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(2): E430−E437.

[12] CHEN Bo, ZHOU Kai, WANG Yu, et al. Insight into the mechanism of textural deterioration of myofibrillar protein gels at high temperature conditions[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127186.

[13] LI Wenrong, WEN Li, XIONG Shanbai, et al. Investigation of the effect of chemical composition of surimi and gelling temperature on the odor characteristics of surimi products based on gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry[J]. Food Chemistry, 2023, 420: 135977.

［14］ YANG Zheng, LU Kunyu, ZHAO Yadong, et al. Effects of different heat-induced setting methods on the structural stability and properties of 3D-printed surimi gels[J]. LWT, 2024, 198: 115957.
［15］ 韩宗元, 邵俊花, 潘燕墨, 等. 蛋白质适度加工：热聚集与凝胶品质阐述以及过度聚集的调控对策[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 177−184. ［HAN Zongyuan, SHAO Junhua, PAN Yanmo, et al. Moderate protein processing: Elucidation of thermal aggregation and gel quality and regulatory strategies for excessive aggregation[J]. Food Science, 2023, 44(9): 177−184.］
［16］ FANG Qian, SHI Linfan, REN Zhongyan, et al. Effects of emulsified lard and TGase on gel properties of threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) surimi[J]. LWT, 2021, 146: 111513.
［17］ 杨玉, 李婕妤, 石林凡, 等. 盐浓度对欧洲鳗肌原纤维蛋白理化性质和凝胶形成性能的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 68−75. ［YANG Yu, LI Jieyu, SHI Linfan, et al. Effects of NaCl concentration on physicochemical properties and gel-forming ability of myofibrillar protein from European eel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 68−75.］
［18］ 柳丽宁, 翁武银, 大迫一史. 淀粉和鱼糜品质对鱼糜凝胶性质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(11): 80−84,88. ［LIU Lining, WENG Wuyin, OSAKO Kazufumi. Effects of starch and surimi quality on the gel properties of surimi gels[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(11): 80−84,88.］
［19］ ZHANG Enhan, ZHAO Yuan, REN Zhongyang, et al. Comparative effects of W/O and O/W emulsions on the physicochemical properties of silver carp surimi gels[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100988.
［20］ 王丹丹, 汪兰, 李江涛, 等. 鱼糜-淀粉脆片压差膨化加工工艺研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(16): 211−219. ［WANG Dandan, WANG Lan, LI Jiangtao, et al. Pressure difference puffing process of surimi-starch chips[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(16): 211−219.］
［21］ ZHANG Tong, WANG Jie, FENG Jiaqi, et al. Ultrasonic pretreatment improves the gelation properties of low-salt *Penaeus vannamei* (*Litopenaeus vannamei*) surimi[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106031.
［22］ JIANG Qixing, CHEN Nuo, GAO Pei, et al. Influence of L-arginine addition on the gel properties of reduced-salt white leg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) surimi gel treated with microbial transglutaminase[J]. LWT, 2023, 173: 114310.
［23］ XIONG Zhiyu, WANG Xin, LI Mengzhe, et al. Investigation of the enhancement mechanism of ethanol addition on the gel performance of heat-induced surimi[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 355: 111581.
［24］ TAHERGORABI R, JACZYNSKI J. Physicochemical changes in surimi with salt substitute[J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1281−1286.
［25］ 孔保华, 王宇, 夏秀芳, 等. 加热温度对猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 50−54. ［KONG Baohua, WANG Yu, XIA Xiufang, et al. Influence of heating temperature on gel properties of porcine myofibrillar protein[J]. Food Science, 2011, 32(5): 50−54.］
［26］ YAO Wenjing, ZHAO Zihan, ZHANG Jingming, et al. Revealing the deterioration mechanism in gelling properties of pork myofibrillar protein gel induced by high-temperature treatments: Perspective on the protein aggregation and conformation[J]. Meat Science, 2024, 217: 109595.
［27］ LIANG Feng, ZHU Yajun, YE Tao, et al. Effect of ultrasound assisted treatment and microwave combined with water bath heating on gel properties of surimi-crabmeat mixed gels[J]. LWT, 2020, 133: 110098.
［28］ JIANG Qixing, WU Wenmin, HAN Jingwen, et al. Characteristics of silver carp surimi gel under high temperature (≥100 ℃): Quality changes, water distribution and protein pattern[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(7): 4613−4627.
［29］ ZHANG Xinxin, ZHANG Shutong, YANG Wenge, et al. Investigation of the influence of Alaskan pollock surimi on the gel quality, protein structure and flavor property of shrimp (*Solenocera crassicornis*) surimi gel and its mechanism[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(8): 2459−2469.
［30］ ZHU Kai, YAN Wen, DAI Zhiyuan, et al. Astaxanthin extract from shrimp (*Trachypenaeus curvirostris*) by-products improves quality of ready-to-cook shrimp surimi products during frozen storage at −18 ℃[J]. Foods, 2022, 11(14): 2122.
［31］ 雷佳佳, 黄晓岚, 黄万一, 等. 蒸制和水煮对小龙虾色泽、虾青素含量及抗氧化性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(13): 58−66. ［LEI Jiajia, HUANG Xiaolan, HUANG Wanyi, et al. Effects of steaming and boiling on the color, astaxanthin content and antioxidant activity of crayfish[J]. Food Science, 2024, 45(13): 58−66.］
［32］ YU Jiao, XIAO Hong, SONG Linlu, et al. Impact of O/W emulsion stabilized by different soybean phospholipid/sodium caseinate ratios on the physicochemical, rheological and gel properties of surimi sausage[J]. LWT, 2023, 175: 114461.
［33］ SAQIB M N, LIU F, CHEN M S, et al. Thermo-mechanical response of liquid-core beads as affected by alginate molecular structure[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107777.