

鲢鱼糜凝胶力学性能对热处理方式的响应性研究

张梦玲¹, 樊瑶¹, 张晋¹, 熊善柏^{1,2}, 刘茹^{1,2}

(1. 华中农业大学食品科技学院, 国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心, 湖北武汉 430070)

(2. 水产高效健康生产湖南省协同创新中心, 湖南常德 415000)

摘要: 本文通过比较不同热处理方式下鱼糜凝胶的力学特性, 探寻满足特异性消费需求的鱼糜热处理方式, 进而为食品工业生产鱼糜凝胶制品提供理论支持。实验以鲢为原料进行采肉, 添加适量微生物转谷氨酰胺酶, 在不同凝胶化条件及鱼糕化条件下制备鱼糜凝胶, 采用质构仪的穿刺测试、TPA 测试、剪切测试、应力松弛测试和蠕变测试模式对鱼糜凝胶力学性能进行表征。研究结果表明: 采用 40 °C 保温 1 h 后于 90 °C 加热 30 min 所形成鱼糜凝胶的破断强度 (1359 g)、硬度 (8863 g) 和内聚性 (0.82) 最高, 适合生产高凝胶强度鱼糜凝胶制品。采用 4 °C 保温 24 h 后于 90 °C 加热 30 min 所形成的鱼糜凝胶脆度 (2785 g/min) 最高, 适合生产高脆性鱼糜凝胶制品。无论采用哪种凝胶化条件, 微波加热都不利于鱼糜的鱼糕化, 与其他鱼糕化方式相比, 降低了最终鱼糜凝胶的强度和脆性。

关键词: 鱼糜; 凝胶性能; 凝胶化; 鱼糕化

文章篇号: 1673-9078(2017)2-129-135

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.2.020

Effects of Heating Modes on the Mechanical Properties of Surimi Gels from Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*)

ZHANG Meng-ling¹, FAN Yao¹, ZHANG Jin¹, XIONG Shan-bai^{1,2}, LIU Ru^{1,2}

(1. National Research and Development Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing, College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China) (2. Collaborative Innovation Center for Efficient and Health Production of Fisheries in Hunan Province, Changde 415000, China)

Abstract: The mechanical properties of surimi gels prepared under different thermal treatments were compared, in order to define the optimal heating mode to meet specific consumer demand. This study provides a theoretical basis for food industries to produce surimi products. With silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) as the raw material and the addition of an appropriate amount of microbial transglutaminase, the surimi gels were prepared under different settings and kamaboko conditions. The mechanical properties of the gels were evaluated using the puncture test on a texture analyzer, texture profile analysis (TPA) test, shear test, stress relaxation test, and creep test. The results indicated that the surimi gel that was set at 40 °C for 1 h and heated at 90 °C for 30 min showed the highest breaking force (1359 g), hardness (8863 g), and cohesiveness (0.82), suggesting that this heating mode could improve the strength of surimi gels. The surimi gel that was set at 4 °C for 24 h and heated at 90 °C for 30 min showed the highest crispness, suggesting this heating mode was suitable for surimi gel products with high crispness. In addition, microwave heating was not suitable for kamaboko, regardless of setting conditions. The final surimi gels heated by microwave exhibited weaker strength and crispness than those heated under the other kamaboko conditions.

Key words: surimi; gel properties; setting; kamaboko

鱼糜凝胶的力学性能是评价鱼糜制品品质的重要指标^[1], 而加热是鱼糜凝胶形成的关键步骤, 鱼糜加

收稿日期: 2016-01-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31371796); 现代农业产业技术体系建设专项 (GARS-46-23)

作者简介: 张梦玲 (1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工及贮藏工程

通讯作者: 刘茹 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品加工及贮藏工程

热形成凝胶主要经历凝胶化、凝胶劣化和鱼糕化三个阶段。凝胶化是指鱼糜在通过 50 °C 以下的区域时, 蛋白质间形成疏水相互作用和非二硫共价键等作用, 由溶液转变成凝胶。在 50~70 °C 温度范围内会激活内源性组织蛋白酶易导致凝胶劣化^[2], 生产加工中常快速通过该温度带, 直接进入鱼糕化阶段以提高鱼糜的凝胶性能。鱼糕化影响凝胶内部蛋白质聚集状态, 改变蛋白质交联网络的结构并影响水分的含量及分布^[3], 目前, 最常用的鱼糕化方式为 85~90 °C 水浴 30

min。与传统的鱼糕化方式相比,微波加热速度快,能耗低。采用微波加热 60 s 即可使鲢鱼鱼糜中心温度达到 90 °C,而采用水浴则需要 600 s^[4]。推测采用微波加热会快速避开凝胶劣化温度带,可能提高鱼糜凝胶的性能。但也有学者提出,微波加热时容易产生冷热点,导致鱼糜受热不均阻碍凝胶的形成,并造成结构缺陷^[5]。高温灭菌(100~121 °C)有利于提高鱼糜制品的货架期,但目前对鱼糕化温度的研究主要集中在 100 °C 以下。Zhang 等^[6]发现阿拉斯加鳕鱼在反压(0.12 MPa)下保持鱼糜中心温度 100±1 °C 加热 10 min 所形成的凝胶网络致密均一,但沸水短时加热对鲢鱼鱼糜凝胶的影响鲜见文献报道。此外,冷冻贮藏是鱼糜常用的贮藏方式,由于鱼蛋白易冷冻变性,故鱼糜冷冻研究关注的重点是抗冻剂^[7],而冷冻处理凝胶化后的鱼糜对其的凝胶形成能力有何影响尚未见报道。

鲢是我国淡水养殖的重要经济鱼类,具有易饲养、生长快、氨基酸均衡和蛋白质生物学效价高等优点,但其浓厚的土腥味,肉薄刺多,在鲜销市场并不受欢迎^[8]。目前,将低价鲢通过精深加工制成鱼糜凝胶制品,可有效提高其附加值,避免大量鲢鱼优质蛋白质浪费^[3]。

本文以鲢为原料制备鱼糜凝胶,采用质构仪的穿刺、TPA、剪切、应力松弛和蠕变模式对鱼糜凝胶力学性能进行表征,比较分析不同凝胶化和鱼糕化条件下鲢鱼糜凝胶力学性能的异同,探寻鲢鱼糜凝胶最佳的热处理方式,为鱼糜制品工艺的改善及鱼肉蛋白质凝胶形成机理提供思路。

1 材料与方法

1.1 实验材料

鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)购自华中农业大学菜市场;TA-XT2i/25 型质构分析仪,英国 Stable Micro System;K600(3205)食品调理机,德国博朗电器;MTGase 由无锡泰兴酶制剂有限公司提供。

1.2 实验方法

1.2.1 鱼糜凝胶制备工艺

将鲢冷水清洗后去头、去鳞、去内脏、去脊椎骨、采肉,用 5 倍体积的自来水漂洗 2 次,再用 5 倍体积 0.5% NaCl 溶液漂洗 1 次,漂洗后以 2500 r/min 离心脱水 4 min,进行斩拌,同时调整水分含量为 82%,并加入 0.05 U/g MTGase 和 2.5% NaCl,灌肠后两端密

封(d=2.5 cm),随后采用两段式加热获得凝胶样品,第一段加热条件(凝胶化)分别为 4 °C 保温 24 h(简称 4 °C)、10 °C 保温 24 h(简称 10 °C)、40 °C 保温 1 h(简称 40 °C),第二段加热条件(鱼糕化)分别为 90 °C 加热 30 min(简称普)、微波中高档火(500 W)下加热 1.5 min(简称微)、沸水加热 10 min(简称沸)、-80 °C 冷冻 5 h 后 90 °C 加热 30 min(简称冻/热),获得的凝胶经流水冷却后于 4 °C 保存过夜,用于测定相关指标。

1.2.2 穿刺性能测定

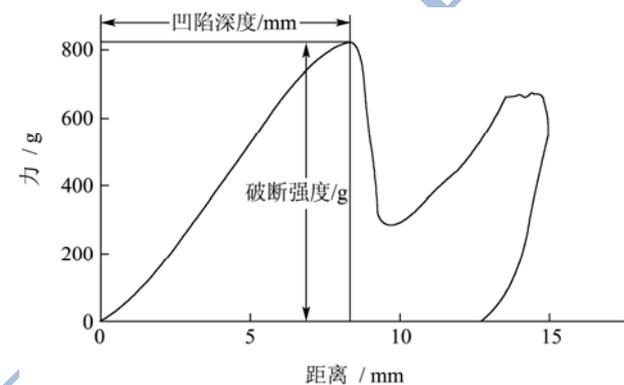


图1 穿刺实验力-距离示意图

Fig.1 Relationship between force and distance in the puncture curve

将鱼糜凝胶切成高 20 mm 的小圆柱体,断面的中心置于质构仪探头的正下方样品台上。选用球形探头 P/0.25S;探头运行程序:Return To Start;进行一次压缩,压缩距离为 15 mm、触发点负载 5 g、探头测试速度 1.0 mm/s。测试所得力与距离的典型关系图见图 1,并计算凝胶的破断强度和凹陷深度。

1.2.3 TPA性能测定

将鱼糜凝胶切成高 20 mm 的小圆柱体,断面中心置于质构仪探头的正下方样品台上。质构仪测试条件设置如下:采用型号为 P/36R 探头对样品进行两次压缩。探头运行程序:Texture Profile Analysis,测定条件如下:测前速度:2 mm/s;测试速度:1 mm/s;测后速度:1 mm/s;压缩比:50%;停留时间:5 s,数据频率 100 pps。其 TPA 测试力与时间示意图及力学指标分析参考 Sahin 和 Sumnu^[9]。

1.2.4 剪切性能测定

将鱼糜凝胶切成高 20 mm 的小圆柱体,断面的中心置于质构仪探头的正下方样品台上。选用测试探头 HDP-BS;设定探头运行程序:Return To Start;进行一次压缩,压缩距离为 15 mm。所得曲线如图 2 所示,最大力即为剪切力;所得最大峰值与起始点连线的斜率用于表征其脆性,其值越大代表鱼糜凝胶脆性越大。

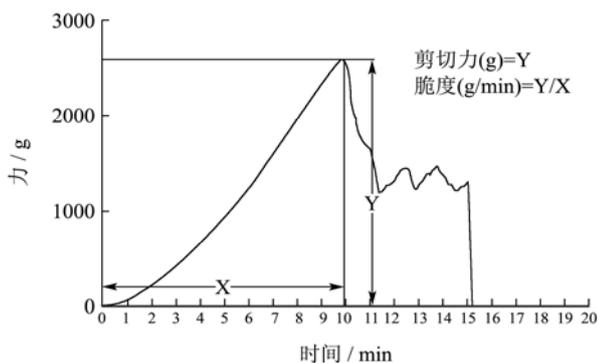


图2 剪切测试力-时间示意图

Fig.2 Relationship between force and time in the shear curve

1.2.5 应力松弛性能测定

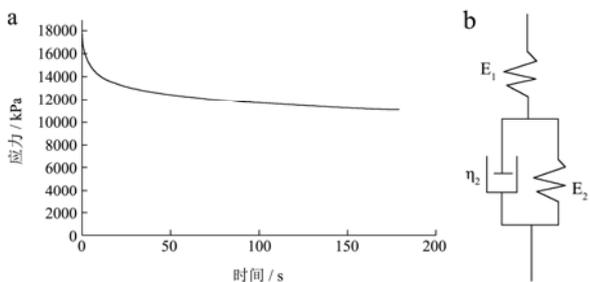


图3 应力松弛应力与时间示意图及 Maxwell 三元件流变物理模型

Fig.3 Relationship between stress and time in the stress relaxation curve and the rheological model of three Maxwell elements

注：a，应力-时间示意图；b，Maxwell 三元件流变物理模型。

将鱼糜凝胶切成高 20 mm 的小圆柱体，断面的中心置于质构仪探头的正下方样品台上。质构仪测试条件设置如下：测试探头 P/35R；测试模式：Measure Force in Compression；探头运行程序：Hold Until Time；测试参数的设置：测前速率 1 mm/s、测试速率 1 mm/s、测后速率 5 mm/s、变形量为 30%、保持时间为 180 s、触发力为 30 g；数据采集速率为 100 pps。其得到的应力松弛应力-时间示意图（图 3a），根据该图形的特点采用 Maxwell 三元件流变物理模型进行拟合（图 3b），其方程为：

$$\sigma(t) = E_1 \varepsilon_0 + E_2 \varepsilon_0 e^{-t/\tau_2}$$

式中， $\sigma(t)$ 为 t 时刻的应力，KPa； E_1 为衰变弹性系数，KPa； E_2 为平衡弹性系数，KPa； ε_0 为形变量，%； τ_2 为松弛时间，s。

1.2.6 蠕变性能测定

将鱼糜凝胶切成高 20 mm 的小圆柱体，断面的中心置于质构仪探头的正下方样品台上。选用测试探头 P/6，设定探头测试模式：Measure Force in

Compression；探头运行程序：Hold Until Time；测试参数的设置：测试前下压速度 1 mm/s，测试速度为 1 mm/s，测试后的上升速度为 5 mm/s、测试压力 100 g、保持时间 60 s；数据采集为 100 pps。其得到的蠕变应力-时间示意图（图 4a），根据该图形的特点采用 Burgerss 四元件流变物理模型进行拟合（图 4b），其方程为：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_a} + \frac{\sigma}{E_b} (1 - e^{-t/\tau_b}) + \frac{\sigma}{\eta} t$$

式中， σ 为蠕变条件下的恒应力，g； E_a 为普弹形变模量，kPa； E_b 为高弹形变模，kPa； τ 为松弛时间，s； η 为黏流系数，kMPa/s； τ_b 为蠕变时间，s。

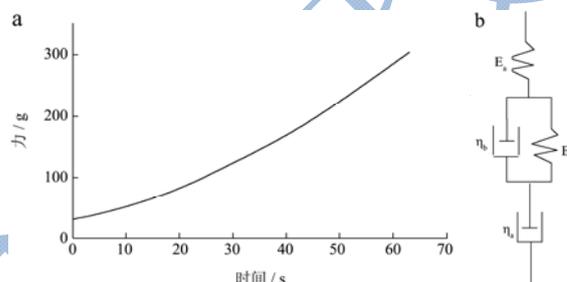


图4 蠕变测试力与时间示意图及 Burgers 四元件流变物理模型

Fig.4 Relationship between force and time in the creep curve and the rheological model of four Burgers elements

注：a，力-时间示意图；b，Burgers 四元件流变物理模型。

1.2.7 数据分析

所有数据均采用 Microsoft Office Excel 2003 和 SAS V8.1 软件进行分析，显著性检验方法为 LSD，检测限为 0.05 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, 2000)，有关数据为 6 次以上重复测定的平均值。

2 结果与分析

2.1 热处理方式对鱼糜凝胶穿刺性能的影响

表 1 显示了不同热处理方式下鱼糜凝胶穿刺性能。40 °C 凝胶化后于 90 °C 加热的鱼糜凝胶破断强度最大 (1359 g)，显著高于其他加热方式，这是因为内源性 TGase 在 40 °C 时具有较高的活性，其催化肌球蛋白分子交联形成了大量的 $[\varepsilon-(\gamma\text{-Glu})\text{Lys}]$ 共价键^[10]；随后的 90 °C 加热使凝胶化过程中形成的网络结构即刻固定下来，从而提高了凝胶力学性能^[11]。4 °C 凝胶化条件下，采用 90 °C 及沸水加热鱼糜凝胶的破断强度显著性高于其他鱼糕化方式；10 °C 凝胶化条件下，采用沸水加热的鱼糜凝胶破断强度显著性高于其他鱼糕化方式，根据化学动力学原理，温度每升高 10 °C，化学反应速率升高 2~4 倍，沸水短时加热虽然不利于疏水基团的暴露和蛋白质的交联^[12]，但因凝胶化温度低

(4 °C 或者 10 °C) 时升温范围宽, 沸水加热可以使样品更快地通过凝胶劣化温度带, 从而形成具有高破断强度的鱼糜凝胶。无论采用哪种凝胶化方式, 冻/热处理后凝胶的破断强度和凹陷深度均无显著性差异。

表 1 不同热处理方式下鱼糜凝胶穿刺性能

凝胶化温度/°C	鱼糕化方式	破断强度/g	凹陷深度/mm
4	普	1214.43±87.61 ^{aAB}	9.87±0.67 ^{abA}
	微	967.29±26.38 ^{cB}	10.62±0.55 ^{aA}
	沸	1186.45±6.22 ^{aB}	9.57±0.24 ^{bB}
	冻/热	1081.32±59.14 ^{bA}	8.56±0.19 ^{cA}

表 2 不同热处理方式下鱼糜凝胶 TPA 性能

凝胶化温度/°C	鱼糕化方式	硬度/g	弹性	内聚性	胶粘性/g	咀嚼性/g
4	普	8567.6±253.52 ^{aA}	0.90±0.01 ^{bB}	0.77±0.01 ^{aB}	6642.27±168.13 ^{abB}	5979.07±69.00 ^{abB}
	微	7897.36±405.81 ^{aA}	0.93±0.01 ^{aAB}	0.77±0.01 ^{aA}	5601.50±739.91 ^{ba}	6218.80±430.83 ^{aA}
	沸	8605.92±426.96 ^{aA}	0.91±0.01 ^{bB}	0.77±0.01 ^{aB}	5963.45±132.75 ^{abA}	5398.46±137.39 ^{ba}
	冻/热	8361.13±597.93 ^{aA}	0.90±0.01 ^{bB}	0.74±0.01 ^{bc}	5875.09±308.66 ^{abA}	5548.84±572.22 ^{abA}
10	普	8694.31±141.97 ^{aA}	0.90±0.01 ^{bB}	0.78±0.03 ^{aAB}	6763.11±240.59 ^{aAB}	6277.61±139.41 ^{aAB}
	微	7439.80±133.00 ^{ba}	0.92±0.01 ^{aB}	0.78±0.01 ^{aA}	5661.15±251.70 ^{ba}	5162.69±266.78 ^{cB}
	沸	8402.67±142.67 ^{aA}	0.91±0.01 ^{aB}	0.77±0.01 ^{aB}	6342.34±332.44 ^{aA}	5773.82±365.03 ^{ba}
	冻/热	8563.97±534.49 ^{aA}	0.92±0.01 ^{aA}	0.75±0.01 ^{aB}	6448.09±407.23 ^{aA}	5447.20±117.64 ^{bcA}
40	普	8863.57±274.81 ^{aA}	0.95±0.01 ^{aA}	0.82±0.01 ^{aA}	7206.82±272.26 ^{aA}	6405.54±243.71 ^{aA}
	微	7519.63±350.09 ^{ba}	0.95±0.01 ^{aA}	0.77±0.02 ^{cA}	6465.35±162.10 ^{ba}	6088.71±106.64 ^{abA}
	沸	7817.16±945.68 ^{ba}	0.93±0.01 ^{ba}	0.80±0.01 ^{ba}	6214.76±86.83 ^{ba}	5680.80±68.27 ^{ba}
	冻/热	8190.59±103.05 ^{abA}	0.91±0.01 ^{cAB}	0.78±0.01 ^{bcA}	5900.37±364.60 ^{ba}	5900.37±364.60 ^{ba}

注: 大写字母不同表示不同凝胶化条件下力学性能具有显著性差异 ($p < 0.05$), 小写字母不同表示在不同鱼糕化条件下力学性能具有显著性差异 ($p < 0.05$)。

表 2 显示了不同热处理方式下鱼糜凝胶 TPA 性能。TPA 是模拟人口腔的两次咀嚼动作, 对测试样品进行二次压缩。40 °C 凝胶化后于 90 °C 加热形成鱼糜凝胶的硬度、弹性、内聚性、胶粘性、咀嚼性普遍高于其他热处理方式, 这与穿刺测试结果一致(见表 1)。4 °C 凝胶化后, 采用冻/热处理会显著降低鱼糜凝胶的内聚性。10 °C 凝胶化后, 采用微波加热的鱼糜凝胶的硬度、胶粘性、咀嚼性均显著低于其他鱼糕化方式的, 这是因为微波加热速度快^[4], 蛋白质的聚集速率可能会高于变性速率, 不利于良好凝胶网络的形成; 与此同时, 微波加热时容易产生过热点, 造成过热点的水分瞬间蒸发, 产生高压, 从而破坏凝胶网络结构^[13]。鱼糜凝胶的硬度受凝胶化方式的影响不显著。

2.3 热处理方式对鱼糜凝胶剪切性能的影响

10	普	1108.90±70.52 ^{bB}	10.41±1.17 ^{aA}
	微	1110.22±55.46 ^{ba}	10.05±0.66 ^{aA}
	沸	1234.68±11.56 ^{aA}	10.17±0.29 ^{aA}
	冻/热	1125.87±53.08 ^{ba}	8.38±0.30 ^{ba}
40	普	1359.53±77.38 ^{aA}	9.63±0.10 ^{aA}
	微	890.36±35.63 ^{cB}	7.68±0.39 ^{cB}
	沸	907.52±7.46 ^{cC}	8.10±0.13 ^{bc}
	冻/热	1087.13±19.10 ^{ba}	8.39±0.04 ^{ba}

注: 大写字母不同表示不同凝胶化条件下力学性能具有显著性差异 ($p < 0.05$), 小写字母不同表示在不同鱼糕化条件下力学性能具有显著性差异 ($p < 0.05$)。

2.2 热处理方式对鱼糜凝胶 TPA 性能的影响

表 3 显示了不同热处理方式下鱼糜凝胶的剪切性能。采用 4 °C 凝胶化后于 90 °C 加热的鱼糜凝胶脆性 (2785.76 g/min) 显著高于其它加热方式的, 这可能与该加热方式下形成的分子间作用力和网络结构有关, 具体原因尚需进一步研究。10 °C 凝胶化条件下, 采用沸水加热的鱼糜凝胶脆性显著高于其他鱼糕化方式; 40 °C 凝胶化条件下, 鱼糕化方式采用 90 °C 加热的鱼糜凝胶脆性高。而无论采用何种凝胶化条件, 微波加热形成的凝胶脆性均最低, 说明微波加热不利于脆性鱼糜凝胶的形成。

4 °C 凝胶化条件下, 采用 90 °C 加热或冻/热处理鱼糜凝胶的剪切力显著性高于其他鱼糕化方式; 10 °C 凝胶化条件下, 各鱼糕化方式间剪切力无显著性差异; 40 °C 凝胶化条件下, 采用 90 °C 加热鱼糜凝胶剪切力显著性高于其他鱼糕化方式。

表3 不同加热条件下鱼糜凝胶剪切性能

Table 3 Shear properties of surimi gels under different thermal

conditions			
凝胶化温度/℃	鱼糕化方式	脆性/(g/min)	剪切力/g
4	普	2785.76±155.18 ^{aA}	2619.84±179.57 ^{aA}
	微	526.64±36.97 ^{dB}	1601.24±116.47 ^{cB}
	沸	1604.18±119.83 ^{bB}	2232.95±29.87 ^{bB}
	冻/热	1293.09±211.81 ^{cA}	2448.9±243.35 ^{abA}
10	普	1344.65±78.41 ^{bB}	2936.78±295.51 ^{aA}
	微	664.96±56.40 ^{cAB}	2661.91±185.61 ^{aA}
	沸	2047.82±290.71 ^{aA}	2925.21±110.93 ^{aA}
	冻/热	1161.45±86.77 ^{bA}	2839.25±435.09 ^{aA}
40	普	1334.1±118.44 ^{aB}	2855.52±244.72 ^{aA}
	微	753.76±107.83 ^{cA}	1441.89±34.51 ^{dB}
	沸	1097.48±94.38 ^{bC}	2441.62±162.08 ^{bB}
	冻/热	602.74±137.01 ^{cB}	1757.91±79.62 ^{cB}

注: 大写字母不同表示不同凝胶化条件下力学性能具有显著性差异 ($p < 0.05$), 小写字母不同表示在不同鱼糕化条件下力学性能具有显著性差异 ($p < 0.05$)。

2.4 热处理方式对鱼糜凝胶应力松弛性能的影响

表4显示了不同热处理方式下鱼糜凝胶应力松弛性能。采用40℃凝胶化后90℃加热的鱼糜凝胶平衡弹性系数 E_2 高于其他热处理方式, 应力松弛时间 τ_2 低于其他热处理方式, 说明此时鱼糜凝胶弹性较高、而黏性较低, 与穿刺测试(表1)和TPA测试(表2)结果相似, 进一步说明了该热处理方式有利于高弹性鱼糜凝胶形成。4℃凝胶化时, 鱼糕化阶段采用冻/热处理的鱼糜凝胶其平衡弹性系数 E_2 、应力松弛时间 τ_2 与90℃加热、冻/热处理的鱼糜凝胶不存在显著性差异, 并且其衰变弹性系数 E_1 显著性高于其他鱼糕化

方式; 10℃凝胶化时, 采用冻/热处理的鱼糜凝胶衰变弹性系数 E_1 、平衡弹性系数 E_2 显著性高于其他鱼糕化方式。说明在4℃和10℃凝胶化条件下, 低温速冻(-80℃)下蛋白质变性程度小, 再加热处理可以获得较好的鱼糜凝胶。

无论采用哪种凝胶化方式, 采用微波加热的鱼糜凝胶衰变弹性系数 E_1 、平衡弹性系数 E_2 显著性低于其他鱼糕化方式, 而应力松弛时间 τ_2 显著性高于其他鱼糕化方式, 其形成的凝胶弹性低、硬度低、粘性高, 与穿刺测试(表1)和剪切测试(表3)结果一致, 进一步证明了该微波条件不利于鱼糜凝胶的形成。

表4 不同热处理方式下鱼糜凝胶应力松弛性能

Table 4 Stress relaxation properties of surimi gels under different thermal conditions

凝胶化温度/℃	鱼糕化方式	E_1 /kPa	τ_2 /s	E_2 /kPa
4	普	15.25±1.26 ^{bA}	31.01±1.38 ^{bA}	30.64±2.10 ^{aB}
	微	1.62±0.10 ^{cB}	41.49±0.57 ^{aB}	3.66±0.39 ^{bA}
	沸	15.28±0.08 ^{bA}	30.21±0.33 ^{bC}	32.28±0.62 ^{aA}
	冻/热	16.87±0.65 ^{aB}	30.18±0.07 ^{bC}	32.66±1.11 ^{aB}
10	普	14.82±1.01 ^{bA}	30.54±0.75 ^{cA}	31.33±2.92 ^{bB}
	微	1.87±0.02 ^{cA}	48.38±0.29 ^{aA}	4.04±0.04 ^{cA}
	沸	15.53±0.54 ^{bA}	30.67±0.03 ^{cB}	34.24±1.56 ^{bA}
	冻/热	18.64±0.15 ^{aA}	32.67±0.31 ^{bB}	38.99±0.91 ^{aA}
40	普	13.65±1.1 ^{aA}	32.40±1.99 ^{cA}	38.15±2.43 ^{aA}
	微	1.77±0.01 ^{bA}	47.81±2.07 ^{aA}	3.94±0.25 ^{cA}
	沸	14.25±0.46 ^{aB}	32.12±0.14 ^{cA}	33.24±0.64 ^{bA}
	冻/热	14.08±0.34 ^{aC}	33.87±5.57 ^{bA}	31.64±0.51 ^{bB}

注: 大写字母不同表示不同凝胶化条件下力学性能具有显著性差异 ($p < 0.05$); 小写字母不同表示在不同鱼糕化条件下力学性能具有显著性差异 ($p < 0.05$)。

2.5 热处理方式对鱼糜凝胶蠕变性能的影响

表5 不同热处理方式下鱼糜凝胶蠕变性能

Table 5 Creep properties of surimi gels under different thermal conditions

凝胶化温度/℃	鱼糕化方式	E_a /kPa	τ_b /s	E_b /kPa
4	普	96.86±2.35 ^{bA}	17.37±0.07 ^{abA}	565.04±19.05 ^{aA}
	微	62.09±7.84 ^{bB}	17.48±2.10 ^{abA}	683.44±141.31 ^{aA}
	沸	148.15±32.37 ^{aA}	19.78±1.13 ^{aA}	643.08±90.51 ^{aA}
	冻/热	92.53±11.92 ^{bAB}	15.03±0.83 ^{bB}	367.38±22.38 ^{bB}
10	普	96.76±23.12 ^{aA}	17.57±1.55 ^{aA}	501.91±169.29 ^{aA}
	微	128.48±25.49 ^{aA}	18.52±0.20 ^{aA}	656.93±22.42 ^{aA}
	沸	128.19±45.11 ^{aA}	18.16±1.02 ^{aAB}	564.34±97.89 ^{aAB}

转下页

接上页

40	冻/热	84.59±7.18 ^{ab}	17.28±0.27 ^{aA}	548.91±18.08 ^{aA}
	普	56.68±0.76 ^{bb}	13.00±0.04 ^{cB}	267.97±44.27 ^{bb}
	微	89.12±17.60 ^{ab}	18.16±0.37 ^{aA}	510.96±59.76 ^{aA}
	沸	85.40±14.30 ^{aA}	16.52±0.52 ^{bb}	462.94±55.53 ^{ab}
	冻/热	104.32±4.57 ^{aA}	16.74±0.54 ^{bA}	511.26±18.13 ^{aA}

注：大写字母不同表示不同凝胶化条件下力学性能具有显著性差异 ($p < 0.05$)；小写字母不同表示在不同鱼糕化条件下力学性能具有显著性差异 ($p < 0.05$)。

表5显示了不同热处理方式下鱼糜凝胶的蠕变性能。由表5看出，40℃凝胶化后于90℃加热的鱼糜凝胶蠕变松弛时间 τ_b 显著性低于其他热处理方式，说明其形成凝胶网络致密、固体性能强，与穿刺测试(表1)、TPA测试(表2)和应力松弛测试(表4)结果一致。

2.6 不同热处理方式下鱼糜凝胶各指标的关联性分析

表6 不同热处理方式下鱼糜凝胶各指标之间的相关性分析

Table 6 Correlation analyses of the properties of surimi gels under different thermal conditions

指标	凹陷深度	硬度	弹性	内聚性	胶粘性	咀嚼性	脆性
破断强度	0.47*	0.75**	-0.22	0.22	0.48*	0.06	0.57*
凹陷深度		0.27	-0.30	0.14	-0.01	0.20	0.28
硬度			-0.36	0.04	0.59*	0.28	0.59*
弹性				0.53*	0.25	0.33	-0.46
内聚性					0.45	0.44	-0.08
胶粘性						0.57*	0.47*
咀嚼性							0.04
脆性							
剪切力							
E_1							
τ_2							
E_2							
E_a							
τ_b							

指标	剪切力	E_1	τ_2	E_2	E_a	τ_b	E_b
破断强度	0.66**	0.49*	-0.49*	0.56*	0.16	-0.29	-0.27
凹陷深度	0.35	-0.14	-0.07	-0.13	0.13	0.17	0.37
硬度	0.56*	0.79**	-0.84**	0.82**	-0.07	-0.34	-0.39
弹性	-0.34	-0.52*	0.53*	-0.36	-0.52*	-0.29	-0.25
内聚性	0.13	-0.13	0.03	0.08	-0.27	-0.38	-0.35
胶粘性	0.48*	0.39	-0.36	0.49*	-0.36	-0.45	-0.61**
咀嚼性	-0.17	-0.11	-0.08	-0.01	-0.66**	-0.44	-0.38
脆性	0.54*	0.57*	-0.61**	0.52*	0.25	0.04	-0.08
剪切力		0.59*	-0.52*	0.60**	0.14	-0.22	-0.27
E_1			-0.94**	0.97**	0.12	-0.27	-0.41
τ_2				-0.93**	-0.05	0.28	0.38
E_2					0.03	-0.39	-0.52*
E_a						0.72**	0.50*
τ_b							0.88**

注: *相关性显著 ($p < 0.05$); **相关性极显著 ($p < 0.01$)。

由表 6 中相关性分析可知, 鱼糜凝胶的硬度与破坏强度、剪切力、衰变弹性系数 (E_1)、衰变弹性系数 (E_2) 之间呈极显著正相关, 与应力松弛时间 (τ_2) 呈极显著性正负相关。证实了四种测试模式 (穿刺、TPA、剪切、应力松弛测试) 都可以较好表征鱼糜凝胶的凝胶强度。其中, 穿刺测试、TPA 和剪切测试方法简便, 适合方便快捷检测鱼糜凝胶强度。应力松弛测试与鱼糜凝胶强度虽也具有较好的相关性, 但是由于需要进行方程拟合得到相应参数, 分析相对复杂。鱼糜凝胶的脆性与应力松弛时间 (τ_2) 呈极显著性负相关, 说明应力松弛时间 (τ_2) 可以在一定程度上反映样品脆性的大小。

3 结论

本文研究了不同热处理方式下鱼糜凝胶力学特性的变化规律。实验结果表明, 采用 40 °C 凝胶化后于 90 °C 加热所形成鱼糜凝胶力学性能强, 适合生产高凝胶强度的鱼糜制品。采用 4 °C 凝胶化后于 90 °C 加热所形成的鱼糜凝胶脆性高, 适合生产脆性鱼糜制品。而微波加热不利于鱼糜鱼糕化的进行, 导致凝胶性能较差。

参考文献

- [1] Poowakanjana S, Park J W, Yoon W B. Assessing the dynamic rheology at various frequencies of surimi paste as affected by heating rates and moisture contents [J]. *Journal of Texture Studies*, 2015, 46(4): 302-311
- [2] Klomklao S, Benjakul S, Kishimura H, et al. Trypsin inhibitor from yellowfin tuna (*Thunnus albacores*) roe: effects on gel properties of surimi from bigeye snapper (*Priacanthus macracanthus*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 65: 122-127
- [3] Weng W, Zheng W. Silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi acid-induced gel extract characteristics: a comparison with heat-induced gel [J]. *International Journal of Food Properties*, 2015, 18(4): 821-832
- [4] Fu X, Hayat K, Li Z, et al. Effect of microwave heating on the low-salt gel from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi [J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 27(2): 301-308
- [5] Mizrahi S. Mechanisms of objectionable textural changes by microwave reheating of foods: a review [J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(1): R57-R62
- [6] Zhang L, Xue Y, Xu J, et al. Effects of high-temperature treatment (≥ 100 °C) on *Alaska pollock* (*Theragra chalcogramma*) surimi gels [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 115(1): 115-120
- [7] Cao L, An Y, Xiong S, et al. Conformational changes and kinetic study of actomyosin from silver carp surimi with modified starch sucrose mixtures during frozen storage [J]. *Journal of Food Quality*, 2016, 39: 54-63
- [8] Rahmanifarah K, Shabanpour B, Shabani A. Effect of thermal microbial inactivation and washing on quality properties of fish sausage during cold storage (4 °C) [J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2015, 24(4): 386-396
- [9] Sahin S, Sumnu S G. *Physical properties of foods* [M]. Springer Science & Business Media, 2006
- [10] Gaspar A L C, de Góes-Favoni S P. Action of microbial transglutaminase (MTGase) in the modification of food proteins: A review [J]. *Food Chemistry*, 2015, 171: 315-322
- [11] 李海萍, 陈海华. 漂洗工艺和热处理对鲤鱼鱼糜凝胶特性的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2009, 35(3): 109-113
LI Hai-ping, CHEN Hai-hua. Effect of washing and thermal treatment on gel properties of carp surimi [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2009, 35(3): 109-113
- [12] Xiong Y, Blanchard S P. Myofibrillar protein gelation: viscoelastic changes related to heating procedures [J]. *Journal of Food Science*, 1994, 59(4): 734-738
- [13] Moore L J, Harrison D L, Dayton A D. Differences among top round steaks cooked by dry or moist heat in a conventional or a microwave oven [J]. *Journal of Food Science*, 1980, 45(4): 777-781