

# 两种微波加热处理方式对白鲢鱼糜凝胶特性的影响

闫虹, 林琳, 叶应旺, 邓伟, 姜绍通, 陆剑锋

(合肥工业大学生物与食品工程学院, 安徽合肥 230009)

**摘要:** 为提高鱼糜制品的品质, 研究两种微波加热处理(单独微波和水浴微波联用)对白鲢鱼糜凝胶特性的影响。以凝胶强度、持水性、白度为检测指标, 采用单因素和正交试验, 优化得到单独微波加热和水浴微波联用加热的工艺条件; 并采用凝胶溶解度、化学作用力、SDS-PAGE 凝胶电泳、扫描电镜等检测方法, 进一步研究不同加热处理方式对鱼糜凝胶蛋白质分子结构的影响。优化试验结果表明, 单独微波加热的最佳工艺条件为微波功率 600 W、微波时间 60 s, 此时凝胶强度 608.64 g·cm, 持水性 83.64%, 白度 75.79; 水浴微波联用加热的最佳工艺条件为水浴温度 40 ℃, 水浴时间 1 h, 微波功率 450 W、微波时间 60 s, 此时凝胶强度 627.37 g·cm, 持水性 85.37%, 白度 74.37。验证试验结果表明, 在提高白鲢鱼糜凝胶特性方面, 两种微波加热显著优于传统水浴加热(即水浴二段加热), 且水浴微波联用加热比单独微波加热更好。

**关键词:** 白鲢鱼糜; 微波; 水浴; 加热方式; 凝胶特性

文章编号: 1673-9078(2014)4-196-204

## Effects of Two Microwave Heating Methods on Gelling Properties of Silver Carp Surimi

YAN Hong, LIN Lin, YE Ying-wang, DENG Wei, JIANG Shao-tong, LU Jian-feng

(College of Biotechnology and Food Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** To improve the quality of surimi, the effects of two microwave heating methods (microwave and water bath-microwave combined heating) on gel properties of silver carp surimi were investigated. Single-factor experiments and orthogonal array design were adopted to obtain the optimum technical conditions by using gel strength, water-holding capacity (WHC) and whiteness as the indexes of surimi quality assessment. The changes of different heating methods on the protein molecular structure of surimi were further studied through protein solubility, chemical forces, SDS-PAGE and scanning electron micrographs. The optimum power and time of microwave heating treatment were 600 W and 60 s, respectively, under which the gel strength, WHC and whiteness of silver carp surimi were 608.64 g·cm, 83.64% and 75.79, respectively. The best conditions for water bath-microwave combined heating treatment were water-bath heating at 40 ℃ for 1 h and microwave treatment at 600 W for 60 s, under which the gel strength, WHC and whiteness of silver carp surimi were 627.47 g·cm, 85.37% and 74.37, respectively. The results of verifying test showed that the two microwave heating methods aforementioned were better than the conventional heating method (two-stage water bath heating), while the water bath-microwave combined heating was also better than only microwave heating treatment.

**Key words:** silver carp surimi; microwave; water bath; heating method; gel property

鱼糜制品的凝胶特性是凝胶强度、持水性及白度等的综合体现, 也是衡量其品质的重要指标。凝胶特性的高低取决于鱼糜凝胶形成过程及处理方法, 鱼糜凝胶形成过程主要分为三个阶段<sup>[1]</sup>: 50 ℃以前是凝胶化阶段, 肌原纤维蛋白在盐分的作用下溶出, 形成松

收稿日期: 2013-11-06

基金项目: 国家农业科技成果转化资金项目(2012GB2C300202); 安徽省 115 产业创新团队计划资助(2012d5t146)

作者简介: 闫虹(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水产品加工及贮藏工程

通讯作者: 陆剑锋(1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向为水产动物资源保护及综合利用研究

散的网状结构, 即溶胶变为凝胶; 50~70 ℃时是凝胶劣化阶段, 凝胶化形成的网状结构逐渐断裂, 这是由于鱼肉中的内源性蛋白水解酶在这个温度区间最为活跃, 导致肌原纤维蛋白的肽键大量降解, 使鱼糜凝胶特性降低, 严重影响鱼糜的商品价值; 当温度达到 70 ℃以上后, 进入鱼糕化阶段, 凝胶变成有序、非透明状, 鱼糜凝胶强度明显增大。因此加热处理方法是直接影响鱼糜凝胶形成过程的关键环节。

目前, 加热处理鱼糜制品的主要方法有水浴加热、蒸汽加热、微波加热、欧姆加热等。实际生产中常采用水浴加热的方法, 其热量由鱼糜外部向内部缓慢传递, 不仅能耗大、升温慢, 而且凝胶在 50~70 ℃温度

区间停留时间过长,加剧了凝胶劣化程度。而微波加热是利用物料中的极性分子,在快速变化的电磁场中产生剧烈转动,与临近分子发生摩擦效应,从而使物料升温。微波能够使物料整体同时受热,不需要从外到内的热传导过程,与水浴加热相比,微波加热具有传热速度快、加热时间短、物料受热均匀、热效率高等优点<sup>[2]</sup>,它可以迅速经过 50~70 °C 的温度区间,使内源性蛋白水解酶快速失活,避免鱼糜凝胶劣化,因此微波加热在鱼糜凝胶形成过程中具有显著优势。但也正是由于微波加热速度快等原因,易造成 50 °C 以前的凝胶化过程不够充分,肌原纤维蛋白分子不能充分延展,相互交联形成的网状结构稳定性差,从而影响鱼糜的凝胶特性。由此可见,结合水浴与微波各自优点的加热方法在今后鱼糜制品加工中将更具吸引力。

通过加热方式的改变提高鱼糜凝胶特性和加快生产效率是鱼糜制品加工的研究热点之一。已有的研究表明,白鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 含水量大、肉质嫩、蛋白氧化敏感性高,属于难凝胶化、易凝胶劣化的鱼种。鉴于此,本文以白鲢鱼糜为原料,采用单因素及正交试验优化单独微波加热、水浴微波联用加热的工艺条件,并比较单独微波、水浴微波联用和传统水浴三种加热方式对鱼糜凝胶特性的影响,可为今后冷冻淡水鱼糜的进一步产业化综合利用提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

白鲢:购自合肥家乐福超市,质量(800±100)g,体长(35±3)cm;肠衣:聚乙烯材料,直径23mm,市购;氯化钠,食品级;牛血清白蛋白,生化级;氯化钠,三羟基氨基甲烷(Tris)、浓盐酸,尿素,β-巯基乙醇,十二烷基硫酸钠(SDS),三氯乙酸(TCA),丙烯酰胺,戊二醛,无水乙醇等,均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

SZC-180型采肉机,广州旭众食品机械有限公司;S2-5型斩拌机,广州旭众机械有限公司;SS300型三足离心机,上海浦东天本离心机机械有限公司;T18型高速分散器,德国IKA公司;TA-XT Plus型质构仪,英国Stable Micro System公司;CT15RT型台式高速冷冻离心机,上海天美生化仪器设备工程有限公司;SC-80C型全自动测色色差计,北京康光仪器有限公司;HH型数显恒温水浴锅,江苏金坛市金城国胜实

验仪器厂;NJL07-3实验专用微波炉,中国南京杰全微波设备有限公司;722E型可见光分光光度计,上海光谱仪器有限公司;DYY-11型电泳仪,北京市六一仪器厂;JSM6490/LV型扫描电镜,日本电子株式会社。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 白鲢鱼糜的制备

鱼糜制备工艺:生鲜白鲢→预处理(去头、尾、鳞、内脏)→清洗→采肉→漂洗(鱼肉:水为5:1(kg/L);两次清水和一次盐水漂洗)→脱水→混入抗冻剂(蔗糖质量分数4%,山梨醇质量分数4%,复合磷酸盐质量分数0.3%)→分装(每袋400g)→冻藏

#### 1.3.2 鱼糜凝胶的制备

凝胶制备工艺:鱼糜解冻(4 °C条件下)→斩拌(空斩3min→盐斩8min,添加质量分数2.5%氯化钠)→灌肠(鱼肠重量为30g/根)→加热(单独微波加热、水浴微波联用加热、传统水浴加热)→冷却→4 °C条件下放置过夜→测定凝胶性质

单独微波加热工艺要点:加热时将鱼糜肠置于微波炉中心处,以保证受热均匀,为防止大量蒸汽破坏鱼糜凝胶结构,采用间歇式加热(即加热20s暂停20s),微波功率设置为300W、450W、600W、750W和900W,使鱼糜快速地从溶胶状变为凝胶状,并直接进入鱼糕化阶段。

水浴微波联用加热工艺要点:前期先在低温水浴下加热60min,使鱼糜从溶胶状变为凝胶状;后期再置于微波炉中加热(工艺要点同单独微波加热),使鱼糜凝胶快速鱼糕化。

传统水浴加热(即水浴二段加热)工艺要点:在35 °C的低温阶段加热60min,使鱼糜从溶胶状变为凝胶状;再在90 °C的高温阶段加热30min,使鱼糜凝胶鱼糕化。

#### 1.3.3 凝胶强度的测定

将4 °C下放置的鱼糜肠切成3段2.5cm高度的圆柱体,使用直径5mm球形探头(p/5s)在质构仪上测定其凝胶特性,包括破断力(breaking force, g)和凹陷深度(即破断距离, breaking distance, cm),如图1所示。其中,破断力为穿刺曲线上的第一个最高峰值;凹陷深度为与破断力相对应的破断距离;凝胶强度(gel strength, g·cm)为破断力与凹陷深度乘积<sup>[3]</sup>。参数设定:测前速率0.1cm/s、测试速率0.11cm/s、测后速率1.0cm/s、下压距离1cm、触发力10g。

#### 1.3.4 持水性的测定

将凝胶样品切成厚度约2mm的薄片,将其8等分后取1.5g~2.0g样品,平摊在滤纸上并包裹好放入

离心管中,用离心法(转速 8000 r/min, 时间 10 min, 温度 18 ℃)测定持水性, 每组平行 3 次, 结果取平均值。持水性 WHC (water-holding capacity) 计算式为:

$$\text{WHC} = w_2/w_1 \times 100\%$$

注:  $w_1$ -离心前质量/g;  $w_2$ -离心后质量/g。

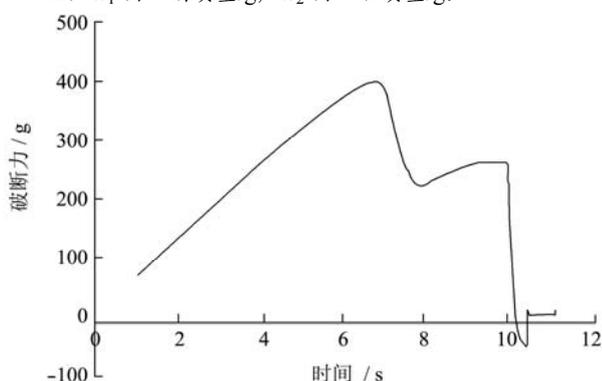


图1 质构仪的穿刺曲线

Fig.1 Graph of force to puncture with texture analyzer

### 1.3.5 白度的测定

将凝胶样品切成厚度约 5 mm 的薄片, 用全自动测色色差计测定白度, 每个样品取 3 片, 每片测 5 次, 取 15 次平均值。白度 W (whiteness) 计算式<sup>[4]</sup>为:

$$W = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2}$$

注:  $L^*$ -亮度;  $a^*$ -正值偏红, 负值偏绿;  $b^*$ -正值偏黄, 负值偏蓝。

### 1.3.6 凝胶溶解度的测定

参照 Benjakul 等<sup>[5]</sup>的方法。称取鱼糜凝胶 1 g, 切碎后加入 20 mL 0.02 mol/L 的 Tris-HCl 缓冲液 (含 8 mol/L 尿素、1% (m/V) SDS、2% (V/V)  $\beta$ -巯基乙醇, pH 8.0), 用高速分散器匀浆 4 min, 沸水浴加热 2 min, 冷却至室温后搅拌 4 h, 在 10000 r/min 条件下离心 30 min, 吸取上清液 10 mL 并添加 2.5 mL 50% (m/V) TCA, 在 4 ℃ 条件下静置 18 h, 在 8000 r/min 条件下离心 30 min, 沉淀物用 3 倍体积 10% (m/V) 冷的 TCA 洗涤, 待沉淀干燥后溶解于 30 mL 0.5 mol/L NaOH 溶液中。鱼糜凝胶直接溶解于 30 mL 0.5 mol/L NaOH 溶液中测得的蛋白含量为总蛋白含量, 溶解于缓冲液中的蛋白含量与总蛋白含量的百分比即为凝胶溶解率。采用双缩脲法测定蛋白含量。

### 1.3.7 化学作用力的测定

参照 Gómez-Guillén 等<sup>[6]</sup>的方法。称取鱼糜凝胶 2 g, 切碎后分别加入 10 mL 的 SA 溶液 (0.05 mol/L NaCl)、SB 溶液 (0.6 mol/L NaCl)、SC 溶液 (1.5 mol/L 尿素、0.6 mol/L NaCl)、SD 溶液 (8 mol/L 尿素、0.6 mol/L NaCl) 和 SE 溶液 (0.6 mol/L NaCl、8 mol/L 尿素、0.05 mol/L  $\beta$ -巯基乙醇), 高速分散器匀浆 4 min,

在 4 ℃ 条件下静置 1 h, 8000 r/min 离心 15 min, 取上清液测定蛋白含量。离子键的贡献为 SB 溶液与 SA 溶液中蛋白含量之差; 氢键的贡献为 SC 溶液与 SB 溶液中蛋白含量之差; 疏水性相互作用的贡献为 SD 溶液与 SC 溶液中蛋白含量之差; 二硫键的贡献为 SE 溶液与 SD 溶液中蛋白含量之差。采用双缩脲法测定蛋白含量。

### 1.3.8 SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳 (SDS-PAGE)

参照 Kudre 等<sup>[7]</sup>的方法。称取鱼糜凝胶 1 g, 切碎后加入 9 mL 5% SDS 溶液, 高速分散器均质 3 min, 85 ℃ 水浴加热 1 h, 冷却后 8000 r/min 离心 10 min, 取上清液与样品缓冲液按 1:1 (V/V) 混合, 沸水浴 5 min。制胶后上样 10  $\mu$ g, 浓缩胶浓度 5%, 分离胶浓度 10%, 100 V 恒压下进行凝胶电泳。电泳完成后用 0.1% 的考马斯亮蓝染色 5 min-10 min, 用脱色液脱色至背景基本无色, 最后在凝胶成像仪上成像。

### 1.3.9 扫描电镜微结构观察

将鱼糜凝胶切成 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 3 mm 小块, 在 4 ℃ 条件下用 3% 戊二醛溶液固定 24 h, 然后用 0.1 mol/L pH 7.2 的磷酸缓冲液漂洗数次, 50%、70%、90%、100% 的乙醇溶液梯度脱水, 再经临界点冷冻干燥后用真空离子溅射仪喷金, 最后用扫描电镜观察并拍照。

### 1.3.10 数据处理

采用 Excel 对数据进行单因素方差分析, 以凝胶强度、持水性和白度为指标, 设计三因素三水平  $L_9(3^4)$  正交试验表, 采用 V3.1 正交设计助手软件进行数据分析,  $p < 0.05$  为影响显著,  $p < 0.01$  为影响极显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单独微波加热条件的优化

单独微波加热白鲢鱼糜的基本参数设定为: 微波功率 600 W、微波时间 60 s。通过改变其中一个因素水平, 固定另一个因素水平, 分析两个因素分别对鱼糜凝胶强度、持水性、白度三个指标的影响, 优化出最佳微波加热工艺条件。各因素的水平梯度为: 微波功率 300 W、450 W、600 W、750 W、900 W; 微波时间 20 s、40 s、60 s、80 s、100 s。

#### 2.1.1 微波功率对白鲢鱼糜制品凝胶特性的影响

表 1 为微波功率对白鲢鱼糜凝胶强度、持水性和白度的影响。由图表 1 可知, 鱼糜凝胶强度随着微波功率的增加, 先增大后减小, 当微波功率为 600 W 时, 鱼糜凝胶强度达到最大值, 与微波功率为 300 W、450 W 和 900 W 水平组间差异显著 ( $p < 0.05$ )。由于微波

功率的增加导致鱼糜凝胶升温速度加快,促使鱼糜凝胶迅速经过劣化温度段,因此鱼糜凝胶强度显著增大。同时,鱼糜持水性随着微波功率的增加而逐渐增大,当微波功率为900 W时,鱼糜持水性达到最大值,与微波功率为450 W、600 W和750 W水平组间差异不显著( $p>0.05$ ),但与300 W水平组间差异显著( $p<0.05$ )。付湘晋等<sup>[8]</sup>的研究表明,在相同的微波时间下,微波高档水平下的鱼糜持水性达到最大值,显

著高于微波低档和微波中档,这可能是由于高功率条件下鱼糜失水率变大,凝胶蛋白浓度提高,使得凝胶结构更加致密,鱼糜持水性增强。而鱼糜白度则随着微波功率的增加,先增大后减小,当微波功率为600 W时,鱼糜白度达到最大值,但与其它水平组间无显著差异( $p>0.05$ )。综合考虑微波功率对白鲢鱼糜制品凝胶特性的影响,选择最佳微波功率为600 W。

表1 微波功率对鱼糜凝胶强度、持水性和白度的影响

Table 1 Effects of different microwave power on surimi gel strength, water-holding capacity, and whiteness

微波功率/W	300	450	600	750	900
凝胶强度/(g·cm)	282.90±24.91 <sup>a</sup>	348.09±53.40 <sup>b</sup>	484.01±34.63 <sup>c</sup>	437.20±70.88 <sup>c</sup>	410.32±74.94 <sup>d</sup>
持水性/%	83.49±0.39 <sup>a</sup>	84.28±0.18 <sup>ab</sup>	84.54±0.51 <sup>ab</sup>	85.41±1.20 <sup>b</sup>	87.21±0.23 <sup>b</sup>
白度	74.58±0.51 <sup>a</sup>	76.10±0.36 <sup>a</sup>	76.27±0.37 <sup>a</sup>	76.17±0.36 <sup>a</sup>	74.92±0.27 <sup>a</sup>

注:同行数据字母相同表示差异不显著,字母不同表示差异显著;下同。

### 2.1.2 微波时间对白鲢鱼糜制品凝胶特性的影响

表2为微波时间对白鲢鱼糜凝胶强度、持水性和白度的影响。由表2可知,鱼糜凝胶强度随着微波时间的增加,先增大后减小,当微波时间为60 s时,鱼糜凝胶强度达到最大值,与微波时间为20 s和40 s水平组间差异显著( $p<0.05$ )。微波时间的延长虽然使得鱼糜中的肌原纤维蛋白可以充分延展并互相交联,提高鱼糜的凝胶强度,但随着微波时间增加,鱼糜中水分损失加剧,凝胶变硬,严重影响鱼糜凝胶强度,这与孔保华等<sup>[9]</sup>的研究结果一致。同时,鱼糜持水性随着微波时间的增加而逐渐增大,当微波时间为100 s

时,鱼糜持水性达到最大值,与微波时间为40 s、60 s和80 s水平组间差异不显著( $p>0.05$ ),但与20 s水平组间差异显著( $p<0.05$ )。这可能是随着鱼糜凝胶强度的增加,凝胶网状结构更加致密,鱼糜持水性增强。而鱼糜白度随着微波时间的增加,呈先上升后略微下降的趋势,当微波时间为80 s时,鱼糜白度达到最大值,与微波时间为40 s、60 s和100 s水平组间差异不显著( $p>0.05$ ),但与20 s水平组间差异显著( $p<0.05$ )。由于微波时间的延长导致加热温度上升,鱼糜色泽从淡黄色转变为乳白色,白度将明显增加。综合考虑微波时间对白鲢鱼糜制品凝胶特性的影响,选择最佳微波时间为60 s。

表2 微波时间对鱼糜凝胶强度、持水性和白度的影响

Table 2 Effects of different microwave time on surimi gel strength, water-holding capacity, and whiteness

微波时间/s	20	40	60	80	100
凝胶强度/(g·cm)	168.83±44.81 <sup>a</sup>	218.81±13.46 <sup>a</sup>	442.70±24.49 <sup>b</sup>	367.77±16.46 <sup>c</sup>	374.70±38.67 <sup>c</sup>
持水性/%	84.37±0.70 <sup>a</sup>	86.13±0.20 <sup>ab</sup>	86.24±0.93 <sup>ab</sup>	86.56±0.67 <sup>ab</sup>	87.22±0.2 <sup>b</sup>
白度	66.61±1.84 <sup>a</sup>	74.23±0.42 <sup>b</sup>	74.86±0.16 <sup>b</sup>	75.73±0.55 <sup>b</sup>	74.10±0.76 <sup>b</sup>

## 2.2 水浴微波联用加热条件的优化

鱼糜肌原纤维蛋白只有在前期低温水浴过程中充分展开后,才有利于后期微波快速加热过程中蛋白间的相互交联。刘蕾等<sup>[10]</sup>的研究表明,各不同组成鱼糜(100%的白鲢鱼糜或不同配比的复合白鲢鱼糜)在凝胶温度为40℃左右时,其凹陷深度和破断力会随着凝胶化时间的延长而上升,凝胶化时间为60 min时达到最大值,随后趋于下降;本实验室对白鲢鱼糜的优化试验同样表明,凝胶化时间为60 min时鱼糜凝胶特性达到最大值。因此我们将水浴加热时间直接固定为60 min,不再进行优化(见1.3.2),而其它基本参数则在本文单

独微波加热条件优化的基础上进行设定:微波功率600 W、微波时间60 s、水浴温度35℃。通过改变其中一个因素水平,固定另外两个因素水平,分析三个因素分别对鱼糜凝胶强度、持水性、白度三个指标的影响,优化出最佳水浴微波联用加热工艺条件。各因素的水平梯度为:微波功率300 W、450 W、600 W、750 W、900 W;微波时间20 s、40 s、60 s、80 s、100 s,水浴温度:25℃、30℃、35℃、40℃、45℃。

### 2.2.1 微波功率对白鲢鱼糜制品凝胶特性的影响

表3为微波功率对白鲢鱼糜凝胶强度、持水性和白度的影响。由表3可知,随着微波功率的增加,鱼

糜凝胶强度先增大后减小,当微波功率为 600 W 时,鱼糜凝胶强度达到最大值,与微波功率为 900 W 水平组间差异显著 ( $p<0.05$ ),但与其他水平组间差异不显著 ( $p>0.05$ )。同时,鱼糜持水性随着微波功率的增加而增大,当微波功率为 900 W 时,鱼糜持水性达到最大值,与微波功率为 600 W 和 750 W 水平组间差异不显著 ( $p>0.05$ ),但与 300 W 和 450 W 水平组间差异

显著 ( $p<0.05$ )。而随着微波功率的增加,鱼糜白度呈先上升后下降的趋势,当微波功率为 750 W 时,鱼糜白度达到最大值,但与微波功率为 450 W、600 W 和 900 W 水平组间差异不显著 ( $p>0.05$ )。综合考虑微波功率对白鲢鱼糜制品凝胶特性的影响,选择最佳微波功率为 600 W。

表 3 微波功率对鱼糜凝胶强度、持水性和白度的影响

Table 3 Effects of different microwave power on surimi gel strength, water-holding capacity, and whiteness

微波功率/W	300	450	600	750	900
凝胶强度/(g·cm)	411.33±67.06 <sup>a</sup>	436.45±23.31 <sup>a</sup>	482.43±52.56 <sup>a</sup>	476.37±32.64 <sup>a</sup>	363.24±29.53 <sup>b</sup>
持水性/%	85.98±0.12 <sup>a</sup>	86.50±0.49 <sup>a</sup>	87.11±0.20 <sup>b</sup>	87.85±0.28 <sup>b</sup>	87.87±0.35 <sup>b</sup>
白度	74.53±0.28 <sup>a</sup>	76.39±0.59 <sup>b</sup>	76.59±0.17 <sup>b</sup>	76.69±0.31 <sup>b</sup>	75.88±0.36 <sup>ab</sup>

## 2.2.2 微波时间对白鲢鱼糜制品凝胶特性的影响

表 4 为微波时间对白鲢鱼糜凝胶强度、持水性和白度的影响。由表 4 可知,鱼糜凝胶强度随着微波时间的增加,先增大后减小,当微波时间为 60 s 时,鱼糜凝胶强度达到最大值,与其他水平组间差异显著 ( $p<0.05$ )。同时,鱼糜持水性随着微波时间的增加而逐渐增大,当微波时间为 100 s 时,鱼糜持水性达到最大值,但与其他水平组间差异不显著 ( $p>0.05$ )。而

鱼糜白度随着微波时间的增加呈逐渐上升趋势,当微波时间为 80 s 时,鱼糜白度达到最大值,与微波时间为 60 s 和 100 s 水平组间差异不显著 ( $p>0.05$ ),但与 20 s 和 40 s 水平组间差异显著 ( $p<0.05$ )。综合考虑微波时间对白鲢鱼糜制品凝胶特性的影响,选择最佳微波时间为 60 s。

## 2.2.3 水浴温度对白鲢鱼糜制品凝胶特性的影响

表 4 微波时间对鱼糜凝胶强度、持水性和白度的影响

Table 4 Effects of different microwave time on surimi gel strength, water-holding capacity, and whiteness

微波时间/s	20	40	60	80	100
凝胶强度/(g·cm)	284.81±35.73 <sup>a</sup>	518.49±60.21 <sup>b</sup>	671.11±15.55 <sup>c</sup>	415.69±19.22 <sup>d</sup>	457.17±36.17 <sup>d</sup>
持水性/%	87.62±0.44 <sup>a</sup>	86.98±0.45 <sup>a</sup>	87.20±0.99 <sup>a</sup>	87.64±0.63 <sup>a</sup>	88.44±0.26 <sup>a</sup>
白度	75.16±0.62 <sup>a</sup>	75.67±0.39 <sup>a</sup>	76.69±0.30 <sup>b</sup>	76.72±0.27 <sup>b</sup>	76.51±0.38 <sup>b</sup>

表 5 水浴温度对鱼糜凝胶强度、持水性和白度的影响

Table 5 Effects of different water heating temperatures on surimi gel strength, water-holding capacity, and whiteness

水浴温度/℃	25	30	35	40	45
凝胶强度/(g·cm)	478.30±50.44 <sup>a</sup>	520.01±36.71 <sup>b</sup>	567.30±53.11 <sup>b</sup>	588.63±42.44 <sup>b</sup>	466.74±18.31 <sup>a</sup>
持水性/%	83.50±0.44 <sup>a</sup>	84.82±0.27 <sup>ab</sup>	85.34±0.45 <sup>b</sup>	84.90±0.11 <sup>b</sup>	84.63±0.16 <sup>b</sup>
白度	74.71±0.68 <sup>a</sup>	75.33±0.09 <sup>a</sup>	75.96±0.29 <sup>a</sup>	76.34±0.38 <sup>a</sup>	76.16±0.68 <sup>a</sup>

表 5 为水浴温度对白鲢鱼糜凝胶强度、持水性和白度的影响。由表 5 可知,鱼糜凝胶强度随着水浴温度的增加,先增大后减小,当水浴温度为 40 ℃时,鱼糜凝胶强度达到最大值,与水浴温度为 25 ℃和 45 ℃水平组间差异显著 ( $p<0.05$ )。鱼糜在水浴加热过程中从溶胶变为凝胶,肌原纤维蛋白分子内的疏水基团暴露,分子间相互作用形成网状结构,但随着水浴温度增加,内源性蛋白水解酶会逐渐活跃,破坏鱼糜凝胶结构,降低鱼糜凝胶强度<sup>[1]</sup>。同时,鱼糜持水性也先增大后减小,当水浴温度为 35 ℃时,鱼糜持水性达到最大值,与水浴温度为 30 ℃、40 ℃和 45 ℃

水平组间差异不显著 ( $p>0.05$ ),但与 25 ℃水平组间差异显著 ( $p<0.05$ )。而鱼糜白度随着水浴温度的增加呈上升趋势,当水浴温度为 40 ℃时,鱼糜白度达到最大值,但与其他水平组间差异不显著 ( $p>0.05$ )。综合考虑水浴温度对白鲢鱼糜制品凝胶特性的影响,选择最佳水浴温度为 40 ℃。

## 2.2.4 水浴微波联用加热最佳条件的确定

由微波功率、微波时间和水浴温度的单因素试验可知,三个因素的最适水平分别在 600 W、60 s 和 40 ℃左右。综合单因素试验结果,采用  $L_9(3^4)$  正交表进行正交组合试验,因素水平见表 6。

以鱼糜凝胶强度、持水性和白度为指标进行方差分析, 并采用综合评分法进行判定(将凝胶强度、持水性和白度的权重分别设为0.4、0.3和0.3)。正交试验结果见表7, 方差分析结果见表8。

在本试验中, 综合分越高越好, 通过对正交试验结果表7的直观分析, 得到最佳工艺条件为试验2, 即A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>(微波功率450 W, 微波时间60 s, 水浴温度40 ℃); 但通过进一步极差分析, 得到最佳工艺条件为A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>(微波功率600 W, 微波时间60 s, 水浴温度40 ℃)。方差分析结果见表8所示, 因素B(微波时间)和C(水浴温度)对正交试验有显著影响, 因素A(微波功率)影响不显著, 因此影响鱼糜凝胶特性的因素主次顺序为:C>B>A。比较直观分析与极

差分析的最佳工艺条件, 仅仅因素A(微波功率)选取的水平不一致, 但因素A(微波功率)对鱼糜凝胶特性影响不显著, 因此从节能减耗等方面考虑, 选取微波水浴联用加热的最加工工艺条件为A<sub>1</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>, 即微波功率450 W, 微波时间60 s, 水浴温度40 ℃。

表6 因素水平表

Table 6 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素		
	A(微波功率/W)	B(微波时间/s)	C(水浴温度/℃)
1	450	40	35
2	600	60	40
3	750	80	45

表7 正交试验结果

Table 7 Results of orthogonal experiment

试验号	A	B	空列	C	凝胶强度/(g·cm)	持水性/%	白度	综合分
1	1	1	1	1	570.72	86.40	72.61	275.99
2	1	2	2	2	674.06	84.77	73.28	317.04
3	1	3	3	3	463.30	85.05	75.32	233.43
4	2	1	2	3	538.00	85.91	74.52	263.33
5	2	2	3	1	610.12	86.28	75.06	292.45
6	2	3	1	2	636.80	85.54	74.56	302.75
7	3	1	3	2	656.30	86.24	73.73	310.51
8	3	2	1	3	520.00	86.45	74.88	256.4
9	3	3	2	1	477.04	85.53	75.05	238.99
K <sub>1</sub>	275.49	283.28	278.38	269.14				
K <sub>2</sub>	286.18	288.63	273.12	310.10				
K <sub>3</sub>	268.63	258.39	278.80	251.05				

表8 方差分析结果

Table 8 Results of variance analysis

因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
微波功率	469.013	2	7.808	19.000	
微波时间	1562.462	2	26.012	19.000	*
空列	60.066	2	1.000	19.000	
水浴温度	5491.205	2	91.420	19.000	*
误差	60.070	2			

试验

表9 鱼糜凝胶特性的对比试验结果

Table 9 Results of verifying test of surimi gel properties

加热工艺	凝胶强度/(g·cm)	持水性/%	白度
单独微波加热	608.64±14.9	83.64±1.21	75.79±0.36
水浴微波联用加热	627.37±10.7	85.37±0.96	74.37±0.14
水浴二段加热	578.22±9.8	83.10±0.89	72.67±0.45

由表9可知, 两种微波加热(单独微波和水浴微波联用)的鱼糜凝胶特性均高于水浴二段加热, Cao等<sup>[11]</sup>的研究表明, 样品在微波加热下的升温速度几乎是水浴加热的15倍。由于微波具有传热速度快等特点, 鱼糜凝胶可以快速通过劣化温度段(50~70 ℃), 从而促使内源性蛋白水解酶在短时间内失活, 因此获得比水浴二段加热更高的凝胶特性。此外, 水浴微波联用加热的鱼糜凝胶强度和持水性均高于单独微波加热, 这是因为从溶胶变为凝胶的过程中, 鱼糜肌原纤维蛋白在前期低温水浴过程中充分展开, 有助于后期微波加

### 2.3 不同加热方式的对比试验

对比三种不同的加热方式: 单独微波加热(功率600 W, 时间60 s), 通过单因素试验优化得到; 水浴微波联用加热(先水浴加热: 40 ℃, 60 min; 后微波加热: 功率450 W, 时间60 s), 通过正交试验和计算分析得到; 水浴二段加热(先35 ℃加热60 min, 后90 ℃加热30 min), 即传统水浴加热工艺。

#### 2.3.1 不同加热方式的白鲢鱼糜凝胶特性对比

热过程中相互交联。

### 2.3.2 不同加热方式的白鲢鱼糜凝胶溶解度对比试验

表 10 凝胶溶解度对比试验结果

Table 10 Results of verifying test of protein solubility

检测指标	单独微波加热	水浴微波联用加热	水浴二段加热
凝胶溶解度/%	72.41±0.36	69.33±0.17	75.64±0.71

含有尿素、β-巯基乙醇和 SDS 的 Tris-HCl 缓冲溶液可以破坏鱼糜凝胶网络中除了非二硫共价键（主要为 ε-(γ-Glu)-Lys 共价键）以外的所有共价键，由此测得的凝胶溶解度可以反映出 ε-(γ-Glu)-Lys 共价键的多少<sup>[12]</sup>。ε-(γ-Glu)-Lys 共价键的存在赋予了鱼糜较高的凝胶强度和弹性，因此凝胶溶解度越低则表明凝胶中的 ε-(γ-Glu)-Lys 共价键越多，鱼糜的凝胶强度越高。由表 10 可知，经单独微波加热和水浴微波联用加热后的鱼糜凝胶溶解度分别为 72.41% 和 69.33%，显著低于水浴二段加热后的鱼糜凝胶溶解度，而水浴微波加热的鱼糜凝胶溶解度略低于单独微波加热的鱼糜。这个变化趋势与鱼糜凝胶强度相反，表明凝胶溶解度与鱼糜凝胶强度呈反比，即溶解度越低鱼糜凝胶强度越大。

### 2.3.3 不同加热方式的白鲢鱼糜化学作用力对比试验

由图 2a 可知，经单独微波加热和水浴微波联用加热后的鱼糜，其蛋白分子间的氢键和离子键作用低于水浴二段加热后的鱼糜，但是水浴二段加热的鱼糜凝胶强度显著低于经两种微波处理过的鱼糜样品，由此可知，氢键和离子键不是维持鱼糜凝胶网状结构稳定性的主要化学作用力。由图 2b 可知，水浴二段加热后的鱼糜中蛋白质分子间的疏水作用力和二硫键的作用低于经两种微波处理过的鱼糜样品，这与三种样品凝胶强度的趋势相一致，所以疏水相互作用和二硫键是维持鱼糜凝胶结构稳固的主要化学作用力。研究表明，鱼糜在加热的过程中，部分肌球蛋白二级结构单元 α-螺旋变为无规则卷曲结构，维持 α-螺旋结构的氢键显著下降；非极性多肽疏水基团暴露，使周围非极性多肽的疏水相互作用逐渐增强；大量-SH 被氧化为二硫键，促进蛋白质分子交联<sup>[13]</sup>，因此疏水相互作用和二硫键是维持凝胶网状结构，提高鱼糜凝胶强度的主要作用力。

### 2.3.4 不同加热方式的白鲢鱼糜 SDS-PAGE 凝胶电泳

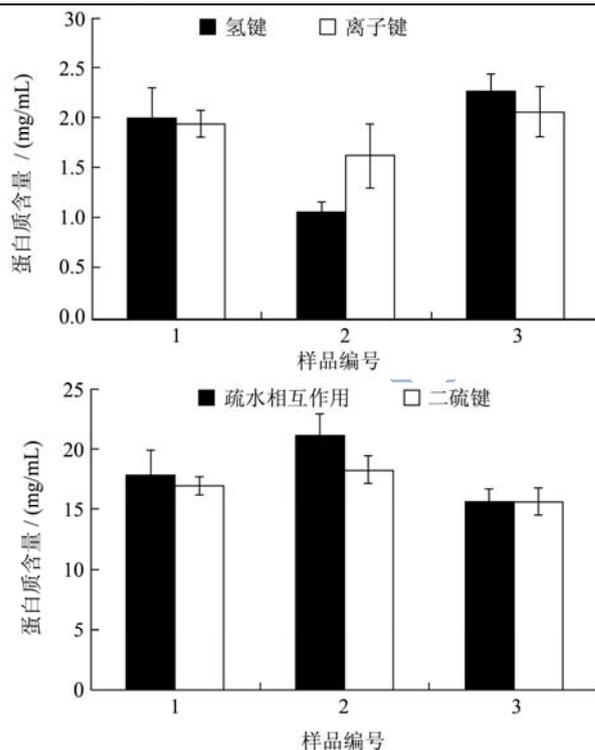


图 2 不同加热方式鱼糜氢键和离子键 (a)、鱼糜疏水相互作用和二硫键 (b) 的变化

Fig.2 Changes in hydrogen bonds and ionic bonds (a), hydrophobic interactions and disulfide bonds (b) for different heating methods

注：1-单独微波加热鱼糜凝胶；2-水浴微波联用加热鱼糜凝胶；3-水浴二段加热鱼糜凝胶。

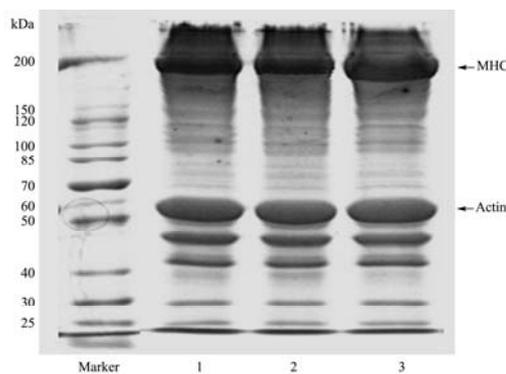


图 3 鱼糜凝胶 SDS-PAGE 图

Fig.3 SDS-PAGE pattern of surimi gels from silver carp

注：1-单独微波加热鱼糜凝胶；2-水浴微波联用加热鱼糜凝胶；3-水浴二段加热鱼糜凝胶。

由图 3 可知，经水浴微波联用加热的鱼糜凝胶（第 2 道）其肌球蛋白重链（MHC）条带明显细于单独微波加热和水浴二段加热的鱼糜凝胶；单独微波加热的鱼糜凝胶（第 1 道）其 MHC 条带又显著细于水浴二段加热的鱼糜凝胶（第 3 道）；但三种加热方式的鱼糜

凝胶,其肌动蛋白条带无明显变化。王金余等<sup>[14]</sup>的研究表明,MHC的数量会随着低温凝胶化时间的延长而减少,形成MHC聚集体,MHC聚集体因分子过大而无法进入分离胶。单独微波加热由于速度过快,迅速通过鱼糜凝胶化,而水浴微波联用加热的鱼糜,由于经过40℃、60min的低温水浴加热,MHC会充分交联,因此泳道2中MHC含量低于泳道1的含量。水浴二段加热由于在50~70℃温度区间停留时间比微波加热长,加剧凝胶劣化程度,MHC聚集效果差,因此泳道3中MHC含量高于泳道1和泳道2的含量。

### 2.3.5 不同加热方式的白鲢鱼糜扫描电镜微结构观察

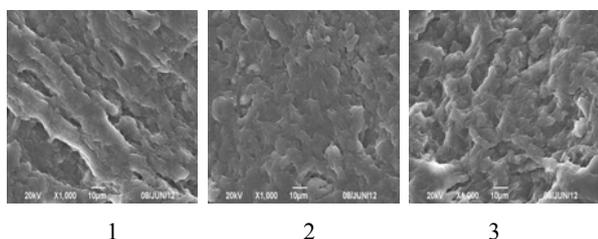


图4 鱼糜凝胶扫描电镜图

Fig.4 Scanning electron micrographs of surimi gels

注:1-微波加热鱼糜凝胶;2-水浴微波联用加热鱼糜凝胶;3-水浴二段加热鱼糜凝胶。

由图4可知,微波加热的鱼糜凝胶其表面蛋白呈粗丝状,孔洞较小,且纹理结构平整;水浴微波联用加热的鱼糜凝胶其蛋白间互相交联成网状结构,孔洞细小,表面纹理更细腻致密;而水浴二段加热的鱼糜凝胶其表面微观结构较疏松,孔洞较大,纹理结构排列不整齐,这与本试验两种微波处理过的鱼糜凝胶均表现出比水浴二段加热鱼糜更高的凝胶强度相一致,且水浴微波联用加热的鱼糜凝胶其蛋白间网状交联程度上高于微波加热的鱼糜凝胶。

## 3 结论

3.1 通过单因素试验得到单独微波加热的最佳工艺条件为微波功率600 W、微波时间60 s,此时鱼糜凝胶强度608.64 g·cm,持水性83.64%,白度75.79;在单因素和正交试验基础上,采用综合评分法分析得到水浴微波联用加热的最佳工艺条件为微波功率450 W、微波时间60 s、水浴温度40℃。此时鱼糜凝胶强度627.37 g·cm,持水性85.37%,白度74.37;常规水浴二段加热工艺条件下,鱼糜凝胶强度578.22 g·cm,持水性83.10%,白度72.67。由此可知,经水浴微波联用加热的鱼糜凝胶特性优于单独微波加热的鱼糜,而单独微波加热的鱼糜凝胶特性又优于水浴二段加热的鱼糜。

3.2 对凝胶溶解度和化学作用力的分析可知,两种微

波加热的鱼糜凝胶,其凝胶溶解度、氢键和离子键与凝胶强度成反比,均低于水浴二段加热的鱼糜凝胶;疏水相互作用和二硫键与凝胶强度成正比,均高于水浴二段加热的鱼糜;鱼糜凝胶电泳结果显示,由于MHC的交联,两种微波加热的鱼糜凝胶其MHC条带显著细于水浴二段加热的鱼糜凝胶;扫描电镜微结构观察显示,经微波加热的鱼糜凝胶微观结构比水浴二段加热的鱼糜凝胶表面平整平滑和细腻致密。

3.3 微波加热具有传热速度快、加热时间短等特点,可以快速通过鱼糜凝胶劣化温度段(50~70℃),有助于鱼糜凝胶特性的改善或提高,但同时也会快速通过鱼糜凝胶温度区间,造成肌原纤维蛋白不能充分展开,进而影响蛋白的后续交联,将水浴低温加热与微波高温加热相结合,既节约加热时间,又保证鱼糜品质,可为鱼糜加热条件改进及鱼糜凝胶特性改良提供参考。

## 参考文献

- [1] 李艳青,孔保华,夏秀芳.鱼糜凝胶形成机理及提高鱼糜凝胶特性的添加物研究新进展[J].食品科技,2012,37(7):140-144  
LI Yan-qing, KONG Bao-hua, XIA Xiu-fang. Gel formation mechanism of surimi and research progress on new additives of enhancing gel properties of surimi [J]. Food Science and Technology, 2012, 37(7): 140-144
- [2] Fu X J, Hayat K, Li Z H, et al. Effect of microwave heating on the low-salt gel from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27: 301-308
- [3] 张崑,陶红丽,曾庆孝,等.不同漂洗处理对罗非鱼浆的影响[J].现代食品科技,2007,23(10):50-52,61  
ZHANG Yin, TAO Hong-li, ZENG Qing-xiao, et al. Effects of washing conditions on the quality of minced Tilapia [J]. Modern Food Science and Technology, 2007, 23 (10): 50-52, 61
- [4] Xiong G, Cheng W, Ye L, et al. Effects of konjac glucomannan on physicochemical properties of myofibrillar protein and surimi gels from grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Food Chemistry, 2009, 116 (2): 413-418
- [5] Benjakul S, Visessanguan W, Tueksubana J, et al. Effect of some protein additives on proteolysis and gel-forming ability of lizardfish (*Saurida tumbil*) [J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18 (3): 395-401
- [6] Gómez-Guillén M C, Borderías A J, Montero P. Chemical interactions of nonmuscle proteins in the network of sardine (*Sardine pilchardus*) muscle gels [J]. LWT-Food Science and Technology, 1997, 30(6): 602-608

- [7] Kudre T, Benjakul S, Kishimura H. Effects of protein isolates from black bean and mungbean on proteolysis and gel properties of surimi from sardine (*Sardinella albella*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 50 (2): 511-518
- [8] 付湘晋,许时婴,王璋.微波加热法制备白鲢低盐鱼糜凝胶[J].中国食品学报,2010,10(3):52-57  
FU Xiang-jin, XU Shi-ying, WANG Zhang. Study on the preparation of low salt surimi gel from silver carp by microwave heating [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2010, 10(3): 52-57
- [9] 孔保华,耿欣,郑冬梅.加热对鲢鱼鱼糜凝胶特性及二硫键的影响[J].食品工业科技,2004,25(6):71-73  
KONG Bao-hua, GENG Xin, ZHENG Dong-mei. The effect of heating on gel character and disulphur bonds of silver carp [J]. Science and Technology of Food Industry, 2004, 25(6): 71-73
- [10] 刘蕾,洪惠,宋永令,等.不同加热条件对复合鱼糜凝胶特性的影响[J].肉类研究,2010,24(6):15-18  
LIU Lei, HONG Hui, SONG Yong-ling, et al. Study on gel properties of the composed surimi at different setting conditions [J]. Meat Research, 2010, 24(6): 15-18
- [11] Cao Yan, Cheng Yudong, Wang Xichang, et al. Effects of heating methods on gel-forming ability of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2003, 12(S1): 78-85
- [12] Ahmed A M, Kuroda R, Kawahara S, et al. Dependence of microbial transglutaminase on meat type in myofibrillar proteins cross-linking [J]. Food Chemistry, 2009, 112(2): 354-361
- [13] 刘海梅,熊善柏,谢笔钧,等.鲢鱼糜凝胶形成过程中化学作用力及蛋白质构象的变化[J].中国水产科学,2008,15(3): 469-475  
LIU Hai-mei, XIONG Shan-bai, XIE Bi-jun, et al. Changes of chemical interactions and protein conformation during forming of silver carp surimi gel [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(3): 469-475
- [14] 王金余,刘承初,赵善贞,等.白鲢鱼糜肌球蛋白交联反应和凝胶化最适条件的研究[J].食品科学,2008,29(11):223-227  
WANG Jin-yu, LIU Cheng-chu, ZHAO Shan-zhen, et al. Optimal condition for maximal cross-linkage of Myosin Heavy Chain (MHC) and gelation of surimi product from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. Food Science, 2008, 29(11): 223-227