

斩拌方式和氯化钠浓度对白鲢鱼糜品质特性的影响

马瑶兰, 熊善柏, 尹涛, 尤娟, 胡杨

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

摘要: 以冷冻白鲢鱼糜为原料, 研究真空斩拌(-0.06 MPa)条件下氯化钠浓度对白鲢鱼糜质量特性的影响, 以期真空斩拌技术在鱼糜制品加工中的应用提供理论依据。与常压斩拌相比, 真空斩拌后的鱼糜蛋白的表面疏水性显著增加($p<0.05$), 二硫键含量降低($p<0.05$), 气泡的数量减少、直径减小; 鱼糜凝胶的破断力和破断距离增加($p<0.05$), 持水性增加($p<0.05$), 而白度值降低($p<0.05$)。在真空和常压斩拌条件下, 随着氯化钠浓度的增加, 斩拌后的鱼糜蛋白质的表面疏水性和二硫键含量显著增加($p<0.05$), 起泡性显著增强; 制备的鱼糜凝胶的破断力和破断距离, 随着氯化钠浓度的增加而显著增加($p<0.05$), 浓度超过 1%后显著降低($p<0.05$), 持水性随着氯化钠浓度的增加显著增加($p<0.05$)。常压斩拌条件下, 鱼糜凝胶白度值随着氯化钠浓度的增加而显著增加($p<0.05$)。而在真空斩拌条件下白度值逐渐降低($p<0.05$)。

关键词: 真空斩拌; 鱼糜; 氯化钠; 蛋白结构; 质量特性

文章编号: 1673-9078(2017)8-182-187

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.8.027

Effects of Chopping Method and Sodium Chloride Concentration on the Quality Characteristics of Silver Carp Surimi

MA Yao-lan, XIONG Shan-bai, YIN Tao, YOU Juan, HU Yang

(National R & D Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing (Wuhan), College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Frozen silver carp surimi was used as the raw material to study the effects of sodium chloride concentration on its quality characteristics when prepared under vacuum chopping (-0.06 MPa). Compared with samples prepared under atmospheric chopping, the surimi protein prepared under vacuum chopping had a significantly increased surface hydrophobicity ($p<0.05$), a decreased disulfide bond content ($p<0.05$), and decreased number and diameter of bubbles; the breaking force, penetration distance, and water-holding capacity of surimi gel increased ($p<0.05$), while whiteness decreased ($p<0.05$). Under atmospheric chopping and vacuum chopping, as sodium chloride concentration increased, the surface hydrophobicity, disulfide bond content, and foamability of surimi protein increased significantly ($p<0.05$). The breaking force and penetration distance of surimi gel increased with increasing sodium chloride concentration and then decreased significantly when the sodium chloride concentration was higher than 1% ($p<0.05$). The water-holding capacity increased significantly with increasing sodium chloride concentration ($p<0.05$). With increasing sodium chloride concentration, the whiteness values of surimi gel increased significantly and decreased gradually under atmospheric chopping ($p<0.05$) and vacuum chopping ($p<0.05$), respectively.

Key words: vacuum chopping; surimi; sodium chloride; protein structure; quality characteristics

鱼糜制品是以新鲜鱼肉或冷冻鱼糜为原料, 加入食盐和其他配料, 经斩拌或擂溃, 再成型、加热制备的一类凝胶态食品。氯化钠不仅能赋予鱼糜制品基本的咸味, 也是形成其高弹性质的基本要素之一。氯化钠能够溶解鱼糜的主要成分肌原纤维蛋白, 降低蛋

收稿日期: 2017-01-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2662015QD041);

现代农业产业技术体系专项基金项目(CARS-46-23)

作者简介: 马瑶兰(1990-), 女, 硕士, 研究方向: 水产品加工及贮藏工程

通讯作者: 尹涛(1986-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 水产品加工及贮藏工程

工程

白质的热变性焓, 促进蛋白质三维螺旋结构的伸展^[1,2]。包埋于蛋白质三维螺旋结构内部的功能性基团暴露后, 通过分子间的化学作用力(如二硫键、氢键、离子键、疏水相互作用和异肽交联键等)^[3], 形成鱼糜凝胶的三维网络结构。在一定浓度范围内, 增加氯化钠的浓度会显著提高鱼糜制品的凝胶强度^[4,5]。Tahergerabi 和 Jacynski^[4]的研究发现, 常压斩拌条件下, 添加 2%的氯化钠时阿拉斯加狭鳕鱼糜凝胶强度最大, 超过 2%时鱼糜的凝胶强度逐渐下降。

据报道真空搅拌能促进面筋蛋白分子高级结构的展开^[6]。目前, 真空斩拌技术逐渐被应用于加工高品

质的鱼糜制品,但真空斩拌对鱼糜蛋白分子物化特性的影响还未见报道。另外,真空斩拌条件下,氯化钠浓度对鱼糜凝胶特性的影响还不清楚。

本课题拟研究斩拌过程中,真空环境和氯化钠浓度对白鲢鱼糜蛋白结构变化和胶凝特性的影响,以期真空斩拌技术在鱼糜制品加工中的应用提供加工参数和理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料

冷冻白鲢鱼糜(AAA级)购于湖北洪湖市井力水产食品有限公司,将其切分成800 g小块,真空包装后于-18℃冻藏备用。

1.2 主要仪器设备

UMC5 真空斩拌机,德国 Stephan 公司;FJ-200 高速分散均质机,上海标本模型厂;TA-XTPlus 质构仪,美国 Stable Micro System, Surrey;CR-400 型色差仪,日本柯尼卡美能达公司;Bio-Rad 电泳仪,美国伯乐公司;RF-1501 荧光光度计,日本 Shimadzu;721 型分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;AVANTI J-26 高速冷冻离心机,美国贝克曼公司;光学显微镜,麦克奥迪实业集团有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 鱼糜凝胶的制备

冷冻鱼糜于室温下解冻 40 min,切成 1 cm×1 cm×1 cm 的小块,先用真空斩拌机于 1500 r/min 转速下斩拌 30 s;加入不同浓度的 NaCl(0.5%、1%、1.5%、2%和 2.5%),并加冰水调节水分含量为 78%,接着继续在 1500 r/min 转速下常压或者真空(-0.06 MPa)斩拌 3 min。斩拌过程中,斩拌锅夹层中冷却液的温度为 4℃,鱼糜的温度始终低于 10℃。将斩拌好的鱼糜灌入直径为 22 mm 的塑料肠衣中,两端卡口,采用两段式加热(40℃/1 h, 90℃/0.5 h),冰水冷却后于 4℃下冷藏过夜。

1.3.2 表面疏水性的测定

参考 Poowakanjana and Park^[7]的方法,略作修改。取 2 g 斩拌好的鱼糜加入到 18 mL 缓冲液(0.6 mol/L KCl, 20 mmol/L Tris-HCl, pH 7.0)中,于 5000 r/min 转速下均质 1 min,接着在 10000 r/min 离心力下离心 30 min,用 Lowry 法测定上清液中蛋白质的浓度。用缓冲液(0.6 mol/L KCl, 20 mmol/L Tris-HCl, pH 7.0)调整蛋白质浓度为 0、0.05、0.1、0.15 和 0.2 mg/mL,

向 4 mL 蛋白样品中加 20 μL 荧光显色剂 ANS,放置 10 min。最后测定 390 nm 激发波长和 470 nm 发射波长下的吸光值。

1.3.3 二硫键含量的测定

参考 Benjakul 等^[8]的方法,用 NTSB 试剂法测定,并略作修改。向 1 mL 肌原纤维蛋白(5 mg/mL)中加入 3 mL NTSB(pH 9.5),置于黑暗处反应 25 min,然后测定 412 nm 处的吸光值。计算中摩尔消光系数为 13900 mol⁻¹·cm⁻¹。

1.3.4 气泡的光学显微镜分析

斩拌结束后,取少量鱼糜平铺到载玻片上,盖上盖玻片,然后在 10 倍物镜下用光学显微镜观察气泡并拍照。

1.3.5 凝胶质构特性的测定

将恢复至室温的鱼肠切成 2 cm 长的圆柱体,采用 TA-XT2i 物性分析仪测定样品的破断强度(g)和凹陷深度(mm)。测试参数:探头 P/0.25 s 为直径 5 mm 的球形探头,测前速度 5 mm/s,测中速度 1 mm/s,测后速度 5 mm/s,穿刺距离 15 mm,触发力 5 g。

1.3.6 凝胶持水性的测定

参照 Kocher 的方法^[9],略作修改。将鱼肠切成 5 mm 厚的圆片,称重(m₁),用两层滤纸包裹于 4000 r/min 转速下离心 15 min,称重(m₂)。持水性的计算公式如下:

$$\text{持水性}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1 \times 78\%} \times 100$$

1.3.7 蛋白质模式分析

分别取斩拌后的鱼糜 1 g 和凝胶 2 g,加入 20 mL 5% SDS 在 90℃加热 1 h,4000 r/min 离心 20 min,取上清液测定蛋白浓度。蛋白样品(2 mg/mL)和样品缓冲液(无β-巯基乙醇和有β-巯基乙醇)按 3:1 混匀,100℃加热 3 min。采用 12%分离胶和 5%浓缩胶进行电泳分离,蛋白上样量为 15 μg。电泳结束后,用考马斯亮蓝 R-250 染色液(0.1%, m/V)染色 1 h,然后用脱色液(50%甲醇,10%乙酸)脱色 1 h。

1.3.8 色度

将平衡到室温的鱼糜凝胶切成 20 mm 长的圆柱体,采用 CR-400 型色差仪测定样品的 L*(透明度),a*(+a*表示样品偏红,-a*表示样品偏绿)和 b*(+b*表示样品偏黄,-b*表示样品偏蓝)值,测定前色差仪用标准白板进行校正。白度计算公式如下^[10]:

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2}$$

1.4 数据处理方法

采用 Excel 2007 软件处理数据和绘图, 用 SPSS 17.0 软件对数据进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 表面疏水性

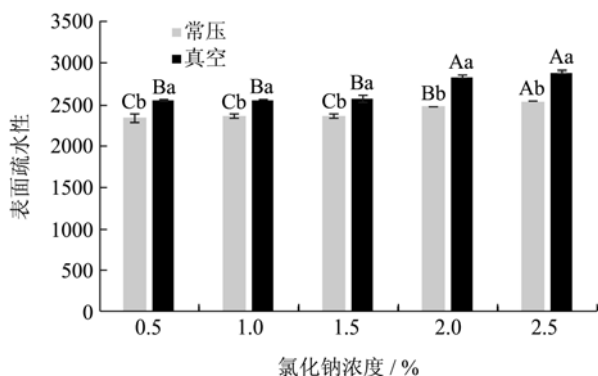


图1 斩拌方式和氯化钠浓度对白鲢鱼糜蛋白表面疏水性的影响

Fig.1 Effect of chopping method and sodium chloride concentration on the surface hydrophobicity of silver carp surimi protein

注: 误差线上不同的大写字母代表不同氯化钠浓度的样品存在显著差异 ($p < 0.05$), 不同的小写字母表示常压和真空斩拌的样品存在显著性差异 ($p < 0.05$), 下同。

斩拌方式和氯化钠浓度对白鲢鱼糜蛋白表面疏水性的影响如图 1 所示。两种斩拌方式下, 蛋白质的表面疏水性均随着 NaCl 浓度的增加而显著增大 ($p < 0.05$)。蛋白质的高级结构是由分子内的氢键、离子键、二硫键和疏水相互作用等共同维持的。外源添加的阳离子 (Na^+) 和阴离子 (Cl^-) 会与蛋白质中带相反电荷的氨基酸结合, 破坏蛋白质分子内的离子键, 同时增大静电斥力, 使蛋白质高级结构部分展开并暴露内部的疏水性基团^[2]。另外, 表面疏水性随着氯化钠浓度的增加而显著增大 ($p < 0.05$), 这可能与鱼糜蛋白的溶解性增加有关。与常压斩拌相比, 真空斩拌显著增加鱼糜的表面疏水性 ($p < 0.05$), 这与 Li 等^[6]报道的真空斩拌可促进面筋蛋白分子高级结构展开的结论相一致。真空斩拌增加鱼糜蛋白的表面疏水性, 其原因可能主要是与斩拌过程中二硫键的形成有关。在真空条件下, 形成的二硫键减少 (图 2), 使蛋白分子内部的束缚作用减弱, 有利于蛋白分子结构的伸展。另一方面, 真空可以促进肌动球蛋白和原肌球蛋白的解离^[11], 并增强氯化钠在肌原纤维蛋白纤维中的渗透扩散^[12]。

2.2 二硫键

鱼糜蛋白分子展开以后, 暴露在分子表面的活性巯基被氧化, 形成分子内和分子间的共价交联二硫键^[7]。由图 2 可知, 在低氯化钠浓度时, 二硫键的含量变化不明显; 氯化钠浓度超过 1.5% 时, 二硫键含量随着氯化钠添加量的增加而显著增加 ($p < 0.05$)。随着氯化钠添加量的增加, 蛋白质的伸展程度逐渐增大 (图 1), 暴露在蛋白质分子表面的活性巯基数量增多; 另外, 鱼糜中混入的空气含量随着氯化钠添加量的增加而增加 (图 3), 使巯基的氧化数量增多。Zhang 等的研究发现高氯化钠浓度有利于肌原纤维蛋白二硫键的形成^[13], 这与本文的研究结果一致。与常压斩拌相比, 真空斩拌的鱼糜蛋白的二硫键含量显著降低 ($p < 0.05$)。真空斩拌有助于蛋白质分子伸展和活性巯基的暴露, 但是显著降低与活性巯基反应的氧气浓度, 最终降低二硫键的形成量。

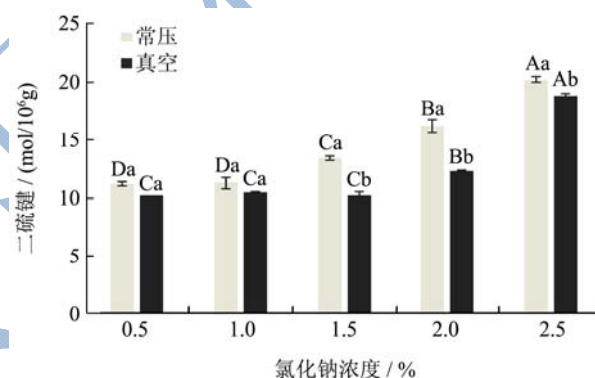


图2 斩拌方式和氯化钠浓度对白鲢鱼糜蛋白二硫键的影响

Fig.2 Effect of chopping method and sodium chloride concentration on the disulfide bonds in silver carp surimi protein

2.3 气泡

图 3 显示了常压和真空条件下, 氯化钠添加量对斩拌后的鱼糜中气泡含量的影响。随着氯化钠添加量的增加, 两组鱼糜样品中气泡数量均增加, 另外常压斩拌组样品中气泡的直径逐渐增大。随着氯化钠添加量的增加, 蛋白质分子的表面疏水性增强 (图 1), 疏水性氨基酸残基暴露增多, 在泡沫膜吸附层中分子间疏水相互作用的机会增大, 空气易在蛋白分子间存留。另外, 鱼糜中盐溶性蛋白的溶解度随着氯化钠添加量的增加而增大, 使鱼糜的黏度增大, 更容易包裹空气。与常压斩拌相比, 真空斩拌的鱼糜中气泡数量减少, 且直径较小。

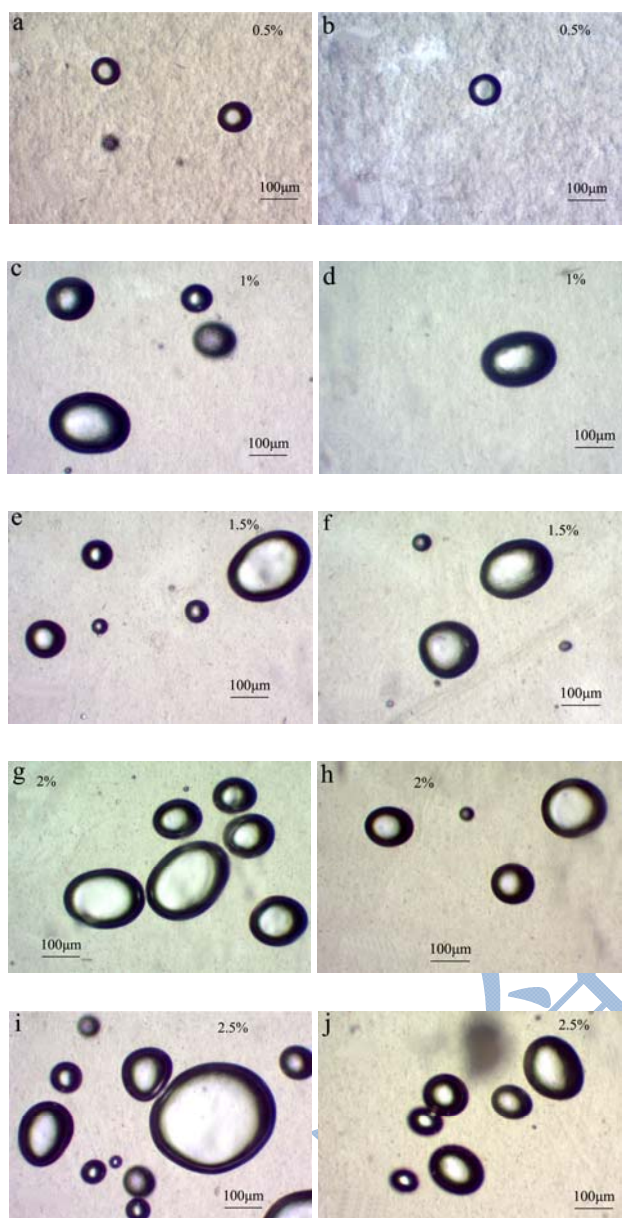


图3 斩拌方式和氯化钠浓度对鱼糜中气泡的影响

Fig.3 Effect of chopping method and sodium chloride concentration on the air bubbles in surimi paste

注: a、c、e、g、i为常压斩拌; b、d、f、h、j为真空斩拌。

2.4 SDS-PAGE

图4为两种斩拌方式制备的鱼糜和凝胶的蛋白质模式图。与还原性电泳相比(图4b),非还原电泳的蛋白质模式图中可见位于肌动蛋白(AC)下的新条带(~40 ku)(图4a),其可能是肌球蛋白轻链(17~22 ku)通过二硫键结合的二聚体;另外,肌球蛋白重链(MHC)的条带强度降低,而位于肌球蛋白重链(MHC)上的条带和电泳胶入口处的条带颜色加深,可能是与通过二硫键形成的肌球蛋白重链多聚体有

关。斩拌和氯化钠浓度对鱼糜蛋白质模式无明显影响。

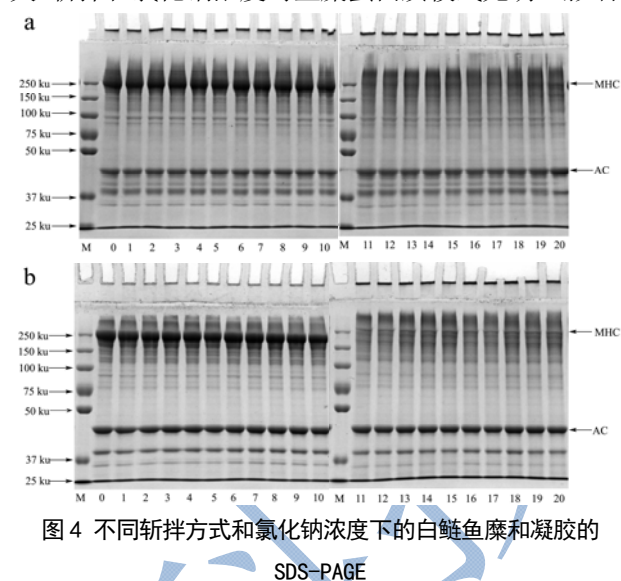


图4 不同斩拌方式和氯化钠浓度下的白鲢鱼糜和凝胶的

SDS-PAGE

Fig.4 SDS-PAGE images of silver carp surimi paste and gel prepared under different chopping methods and sodium chloride concentrations

注: (a) 非还原电泳, (b) 还原性电泳; M表示标准蛋白; 0表示冷冻鱼糜; 1~5表示常压斩拌后的鱼糜,氯化钠添加量分别为0.5%、1%、1.5%、2%和2.5%; 6~10表示真空斩拌后(-0.06 MPa)的鱼糜,氯化钠添加量分别为0.5%、1%、1.5%、2%和2.5%; 11~20表示1~10对应的鱼糜凝胶; MHC表示肌球蛋白重链, AC表示肌动蛋白。

2.5 凝胶强度

图5为斩拌方式和氯化钠添加量对鱼糜凝胶破断强度和凹陷深度的影响。如图所示,随着氯化钠添加量的增加,破断强度和凹陷深度呈先增大后减小的趋势($p < 0.05$)。添加量在1%时,破断强度和凹陷深度最高。Tahergorabi和Jaczynski^[4]研究了氯化钠添加量(1%、2%和3%)对阿拉斯加狭鳕鱼糜凝胶强度的影响,发现2%为最适的氯化钠添加量,氯化钠添加量为3%时凝胶强度下降,这与本文的研究结果基本相似。林婉瑜等^[5]采用擂溃的方式制备鱼糜凝胶,发现添加3%的氯化钠制备的凝胶性能最好。在高氯化钠浓度下凝胶强度下降,可能是因为高氯化钠浓度使肌球蛋白尾部(轻酶解肌球蛋白)发生了变性^[4],使分子内相互作用加强,而分子间相互作用减弱,进而影响了蛋白质凝胶网络的结构。制备鱼糜凝胶的最适的氯化钠浓度不同,其原因可能是与鱼种的蛋白质盐溶差异性和采用的加工方式不同有关。真空斩拌制备的鱼糜凝胶的破断强度显著($p < 0.05$)高于常压斩拌,这与真空脱气(图3)和真空促进蛋白质结构的伸展(图1)密切相关。真空斩拌对鱼糜凝胶蛋白的二硫

键和非二硫共价键无显著性影响(图4)。因此,真空斩拌后充分伸展的鱼糜蛋白可能主要是通过增强分子间疏水相互作用而增强凝胶强度。

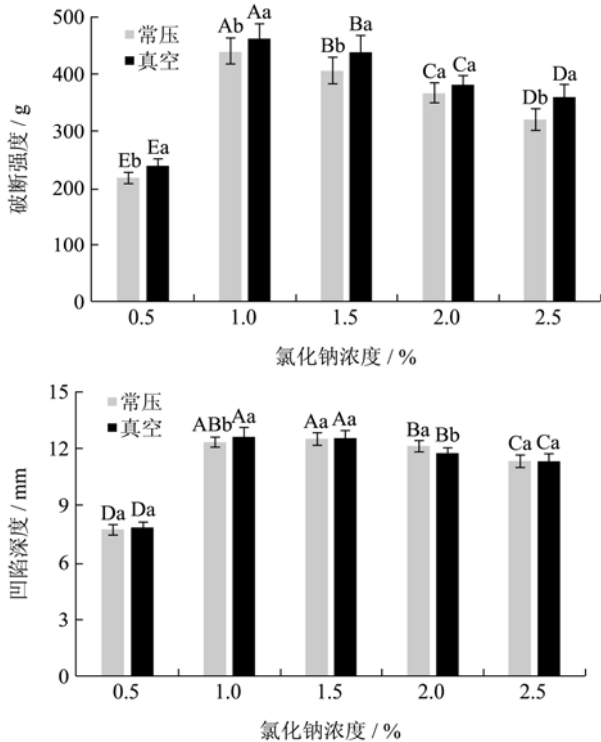


图5 斩拌方式和氯化钠浓度对白鲢鱼糜凝胶破断强度和凹陷深度的影响

Fig.5 Effect of chopping method and sodium chloride concentration on the breaking force and penetration distance of silver carp surimi gels

在鱼糜热诱导过程中,蛋白三维网络结构形成,然后通过物理的方式截留添加的水和鱼糜原料中的水。另外,鱼糜蛋白还能通过氢键结合游离态的水。鱼糜凝胶的持水性反映了水分子与蛋白质基质的相互作用。如图6所示,氯化钠添加量为1%时,凝胶的持水性显著($p<0.05$)高于添加0.5%氯化钠的凝胶。随着氯化钠浓度的进一步增加,凝胶的持水性变化较小。与常压斩拌相比,真空斩拌制备的鱼糜凝胶的持水性显著提高,其原因可能是因为真空斩拌促进蛋白质结构的展开,有利于形成更为均匀、有序的鱼糜蛋白网络结构,更好地截留水分子。

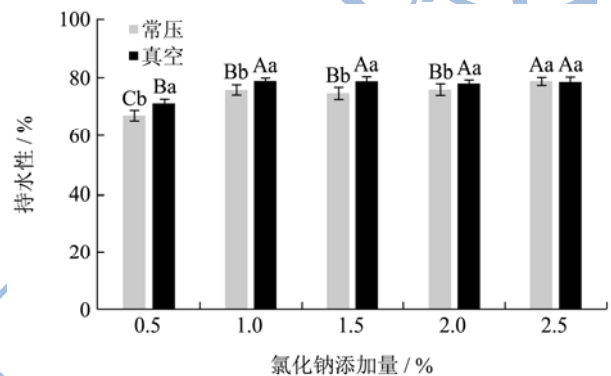


图6 斩拌方式和氯化钠浓度对白鲢鱼糜凝胶持水性的影响

Fig.6 Effect of chopping method and sodium chloride concentration on the water-holding capacity of silver carp surimi gels

2.6 持水性

2.7 白度

表1 斩拌方式和氯化钠浓度对白鲢鱼糜凝胶色度的影响

Table 1 Effect of chopping method and sodium chloride concentration on the whiteness of silver carp surimi gels

NaCl 添加量/%	0.5	1	1.5	2	2.5	
L^*	常压	77.14±0.41 ^{Ba}	78.04±0.67 ^{Aa}	78.28±0.84 ^{Aa}	78.08±0.56 ^{Aa}	78.26±0.62 ^{Aa}
	真空	76.94±0.81 ^{Aa}	76.84±0.31 ^{Ab}	76.64±0.75 ^{Ab}	75.62±0.62 ^{Bb}	74.77±0.88 ^{Bb}
a^*	常压	-2.00±0.03 ^{BCb}	-2.04±0.06 ^{Ca}	-1.96±0.06 ^{ABa}	-1.90±0.04 ^{Aa}	-1.91±0.07 ^{Aa}
	真空	-1.72±0.09 ^{Aa}	-2.00±0.04 ^{Ba}	-2.05±0.05 ^{BCb}	-2.12±0.06 ^{Cb}	-2.14±0.10 ^{Cb}
b^*	常压	4.31±0.17 ^{Ba}	4.03±0.15 ^{Ca}	4.25±0.15 ^{Ba}	4.20±0.11 ^{BCa}	4.50±0.10 ^{Aa}
	真空	3.89±0.11 ^{Ab}	3.79±0.18 ^{Aa}	3.89±0.08 ^{Ab}	3.80±0.17 ^{Ab}	3.78±0.10 ^{Ab}
W	常压	76.65±0.41 ^{Ba}	77.58±0.63 ^{Aa}	77.78±0.81 ^{Aa}	77.60±0.54 ^{Aa}	77.72±0.62 ^{Aa}
	真空	76.55±0.81 ^{Aa}	76.45±0.28 ^{Ab}	76.23±0.75 ^{Ab}	75.23±0.60 ^{Bb}	74.40±0.87 ^{Bb}

注: 同一行中不同大写字母代表不同氯化钠浓度的样品存在显著差异 ($p<0.05$), 同一列中不同小写字母代表真空斩拌和常压斩拌的样品存在显著差异 ($p<0.05$)。

如表1所示,常压斩拌制备的鱼糜凝胶的透明度(L^*)随着氯化钠浓度的增加显著增大($p<0.05$),而真空斩拌制备的鱼糜凝胶的透明度(L^*)随着氯化钠浓度的增加显著减小($p<0.05$)。透明度的变化可能与

光在气泡中的折射和凝胶表面自由水中的散射有关^[14]。随着氯化钠浓度的增加,鱼糜凝胶中的气泡含量增多(图3),使光的折射效果增强,透明度增大;鱼糜凝胶的持水性随着氯化钠浓度的增加显著增大

($p < 0.05$), 降低光的散射效果(图6), 使透明度减小。在常压斩拌下, 鱼糜凝胶透明度受光的折射效应影响较大, 表现为透明度随着氯化钠浓度的增加显著增大。而真空斩拌脱除了部分空气(图3), 使光的折射效应降低, 光的散射效应成为影响鱼糜凝胶透明度的主要因素。氯化钠浓度对凝胶的红色度(a^*)和黄色度(b^*)的影响不大。真空使凝胶的黄色度显著($p < 0.05$)减小。常压斩拌时, 鱼糜凝胶的白度随着氯化钠浓度的增加显著($p < 0.05$)增大; 而真空斩拌时, 凝胶的白度随着氯化钠浓度的增加显著($p < 0.05$)减小。

3 结论

真空斩拌显著增强白鲢鱼糜凝胶强度, 其作用机制除了与脱除气泡有关外, 还与促进蛋白质疏水性基团的暴露有关。在常压斩拌条件下, 随着氯化钠浓度的增加, 斩拌后的鱼糜蛋白质的表面疏水性、二硫键含量显著增加($p < 0.05$), 起泡性显著增强; 制备的鱼糜凝胶的破断力和破断距离先增加后显著降低($p < 0.05$), 持水性和白度值逐渐增加($p < 0.05$)。真空斩拌条件下的表面疏水性、二硫键、起泡性、凝胶强度和持水性随氯化钠浓度变化的趋势与常压斩拌条件下的一致, 而白度值的变化趋势相反。

参考文献

- [1] Park J W, Lanier T C. Scanning calorimetric behavior of tilapia myosin and actin due to processing of muscle and protein purification [J]. *Journal of Food Science*, 1989, 54(1): 49-51
- [2] Lin T M, Park J W. Solubility of salmon myosin as affected by conformational changes at various ionic strengths and pH [J]. *Journal of Food Science*, 1998, 63(2): 215-218
- [3] Jia D, Huang Q L, Xiong S B. Chemical interactions and gel properties of black carp actomyosin affected by MTGase and their relationships [J]. *Food Chemistry*, 2015, 196(1): 1180-1187
- [4] Tahergorabi R, Jaczynski J. Physicochemical changes in surimi with salt substitute [J]. *Food Chemistry*, 2012, 132(132): 1281-1286
- [5] 林婉瑜, 林晶晶, 林向阳, 等. 利用核磁共振技术研究食盐对鱼糜加工的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(5): 105-109
- [6] LIN Wan-yu, LIN Jing-jing, LIN Xiang-yang, et al. Effect of salt on surimi processing explored by nuclear magnetic resonance [J]. *Food Science*, 2013, 34(5): 105-109
- [7] Li M, Zhu K X, Peng J, et al. Delineating the protein changes in Asian noodles induced by vacuum mixing [J]. *Food Chemistry*, 2014, 143(2): 9-16
- [8] Poowakanjana S, Park J W. Biochemical characterisation of Alaska pollock, pacific whiting, and threadfin bream surimi as affected by comminution conditions [J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(1): 200-207
- [9] Benjakul S, Visessanguan W, Thongkaew C, et al. Comparative study on physicochemical changes of muscle proteins from some tropical fish during frozen storage [J]. *Food Research International*, 2003, 36(8): 787-795
- [10] Koehler P N, Foegeding E A. Microcentrifuge-based method for measuring water-holding of protein gels [J]. *Journal of Food Science*, 1993, 58(5): 1040-1046
- [11] 秦影, 汤海青, 欧昌荣, 等. 超高压处理对大黄鱼鱼糜水分状态和蛋白质结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 246-252
- [12] QIN Ying, TANG Hai-qing, OU Chang-rong, et al. Effect of ultra-high pressure on moisture status and protein structure of large yellow croaker surimi gel [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(23): 246-252
- [13] Wang Z, Xu W, Kang N, et al. Microstructural, protein denaturation and water holding properties of lamb under pulse vacuum brining [J]. *Meat science*, 2016, 113: 132-138
- [14] Deumier F, Bohuon P, Trystram G, et al. Pulsed vacuum brining (PVB) of poultry meat: experimental study on the impact of vacuum cycles on mass transfers [J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 58(1): 75-83
- [15] Zhang Z, Yang Y, Tang X, et al. Chemical forces study of heat-induced myofibrillar protein gel as affected by partial substitution of NaCl with KCl, MgCl₂ and CaCl₂ [J]. *CyTA-Journal of Food*, 2015, 14: 1-9
- [16] Yin T, Reed Z H, Park J W. Gelling properties of surimi as affected by the particle size of fish bone [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 58(2): 412-416