

无线电波加热提高狭鳕鱼糜的解冻效率

胡晓亮^{1,2}, 王锡昌², 李玉林², 沈建¹

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092) (2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

摘要: 应用传统的方法解冻鱼糜耗时较长, 为了加快冷冻鱼糜的解冻速率并保持鱼糜的品质, 本实验以狭鳕鱼糜为研究对象, 比较了空气解冻、流水解冻、无线电波直接加热和无线电波间歇加热 4 种解冻方式对冷冻狭鳕鱼糜解冻效率和品质的影响。结果表明: 空气解冻和流水解冻过程中狭鳕鱼糜温度分布较为均匀。无线电波解冻过程中鱼糜边角部位会出现局部过热现象, 采用无线电波间歇式加热能有效延缓鱼糜表面温度的过快升高。无线电波加热解冻速度快, 仅需 4.6 min 就可以使狭鳕鱼糜的中心温度达到 1.8 ℃。应用无线电波间歇加热后的狭鳕鱼糜的持水力为 78.8%, 白度值为 61.7, 无线电波加热在一定程度上能增加狭鳕鱼糜的弹性和抑制微生物的生长繁殖, 解冻后的狭鳕鱼糜菌落总数仅为 4.9×10^3 CFU/g。采用无线电波间歇式加热的物料温度分布均匀性较好, 解冻效率高, 又能最大限度地保持冷冻食品的品质, 是一种极具潜力的解冻方式。

关键词: 鱼糜; 无线电波; 解冻; 温度分布

文章编号: 1673-9078(2018)08-138-144

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.8.021

Influence of Radio Frequency Heating on Thawing Efficiency of Pollack Surimi

HU Xiao-liang^{1,2}, WANG Xi-chang², LI Yu-lin², SHEN Jian¹

(1. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Shanghai 200092, China) (2. School of Food Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: It takes a long time to defrost surimi using traditional methods. In order to rapidly thaw the frozen surimi and maintain its quality, in this paper, the effects of natural thawing, running water thawing, direct heating and intermittent heating of radio frequency on thawing efficiency and quality of frozen Pollack surimi were compared. The results showed that the temperature distribution of Pollack surimi was uniform by natural thawing and running water thawing. Local overheating occurred at the corner of the surimi during the radio frequency heating. Using radio frequency intermittent heating could effectively delay the excessive increase of the temperature of surimi surface. Radio frequency heating has features of rapidly raising temperature, it only cost 4.6 minutes to reach the central temperature over 1.8 ℃. The water holding capacity was 76.8% and the whiteness value was 61.7 for radio frequency heating. In addition, radio frequency heating could increase the elasticity of surimi and effectively inhibit the growth of the microorganism, the colony-forming unit of surimi was only 4.9×10^3 CFU/g. As a potential thawing method, radio frequency intermittent heating has a high efficiency of heating that can maintain the quality of frozen food.

Key words: surimi; radio frequency; heating; temperature distribution

鱼糜是原料鱼经过采肉、漂洗、精滤、脱水、分装和冻结等工序制得的一种水产调理食品^[1]。冷冻鱼糜可用于大规模工业化食品制造, 同时又能满足餐饮、家庭式手工菜肴制作, 是水产品深加工的重要原料^[2]。冻藏的鱼糜需解冻后, 再进入后续的加工和零售环节, 如何快速解冻生产原料并保持其品质不仅是鱼糜生产

收稿日期: 2018-03-14

基金项目: 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所基本科研业务费(2017LK052); 上海市自然科学基金项目“射频加热技术对冷冻鱼糜快速解冻的机理研究”(16ZR1445000)

作者简介: 胡晓亮(1987-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事水产品加工工艺的研究

加工的一大难题, 同时也是食品加工领域迫切需要提高的技术^[3]。

空气解冻是最常用的鱼糜解冻方法, 通过空气同鱼糜的直接接触将热量传递到鱼糜表面以及内部, 从而达到解冻的目的。这种方法成本低, 适用性广, 但是耗时比较长, 会导致与空气直接接触部位鱼糜失水、蛋白质结构变化以及表面微生物繁殖^[4,5]。流水解冻虽比空气解冻快, 但依然会导致鱼糜中水溶性营养物质的流失^[6]。目前在研的解冻新技术包括: 微波解冻、无线电波解冻、射流冲击解冻和欧姆加热解冻等^[7]。其中微波和无线电波解冻, 统称介电解冻, 因其独特的整体加热方式被认为是最具潜力的解冻技术

[8~10]。

无线电波是一种频率范围在 1 MHz 到 300 MHz 之间的电磁波,产生的高频交变电磁场能激发食品内部的离子振动以及水分子极性转动从而导致食品整体性被加热^[11]。此外,无线电波所携带能量较低,所以只具有加热效应,不具有电离食品内的分子结构等所带来的潜在风险^[12]。国外很早就开始应用无线电波加热技术来解冻食品,而国内有关无线电波解冻的相关研究较少。

Cathcart 等^[13]利用频率为 14~17 MHz,功率为 3 kW 的无线电波来解冻鳕鱼鱼片,无线电波仅加热 10 min 就能使鳕鱼片的温度从-17℃上升到了 9.4℃,既节约时间又提高了解冻产品质量。Jason 等^[14]比较了不同解冻方式对冷冻鲱鱼和白鲑鱼解冻效果影响,同空气解冻相比,使用 36~40 MHz 的无线电波解冻能大大缩短解冻时间,同时更好地保持了鱼的营养成分。Farag 等^[15]研究了 27.12 MHz 无线电波解冻 4 kg 块

状冷冻牛肉,初始温度为-20℃的冷冻牛肉在 500 W 功率的无线电波加热 11 min 后可升温到-3.6℃左右,无线电波具有更高的解冻效率,能量消耗更低。

本试验以狭鳕鱼糜为研究对象,比较了空气解冻、流水解冻和无线电波直接加热和无线电波间歇加热 4 种解冻方式对冷冻鱼糜解冻效率和品质的影响,分析了不同解冻方式下狭鳕鱼糜的中心温度、解冻时间、持水力、白度、鱼糜弹性以及微生物等指标的变化。获得一种能快速解冻冷冻鱼糜的解冻方式,为后续冷冻鱼糜解冻方式的优化提供技术支持,同时也为该解冻其他冷冻食品提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

阿拉斯加狭鳕鱼糜:2017 年 6 月购于舟山兴业有限公司。鱼糜的主要成分见表 1。

表 1 狭鳕鱼糜的主要成分

Table 1 The composition of the Pollack surimi

	水分/%	pH 值	灰分/%	盐度/%	粗蛋白/%	脂肪/%
狭鳕鱼糜	74.00±3.20	7.40±0.06	0.80±0.06	0.05±0.01	13.88±0.32	1.50±0.08

1.2 试验仪器与设备

光纤温度传感器 (THERMIC MODEL 2100A), ETO NENKI 公司; 12RF50 型射频加热设备、恒温恒湿培养箱 (YHS-150S), 上海姚氏; 恒温水浴箱 (HSG-LC-2), 上海华琦; 分析天平 (ML54T/02), 梅特勒; 均质器 (VOSHIN-600R), 无锡沃信; pH 计 (PHSJ-6L), 上海雷磁; 红外热成像分析仪 (HW-TI100), 山东华网; 高速冷冻离心机 (ST16R), 美国 THERMO 公司; 物性测试仪 (TA.TOUCH), 上海保圣; 数显白度仪 (SBDY-1), 上海精密。

1.3 解冻方式

1.3.1 空气解冻

将-18℃冷库储藏的狭鳕鱼糜去掉包装后,用切割器将冷冻鱼糜按 300 mm×200 mm×30 mm 的尺寸切成块放在托盘上。

再按照图 1 所示的鱼糜温度测定点,钻孔插入光纤温度传感器,将放有温度探头的冷冻鱼糜置于 18±1℃的房间内自然解冻,待 3 个温度测量点显示的温度均高于 0℃,视为完全解冻,检测狭鳕鱼糜的各项品质指标。

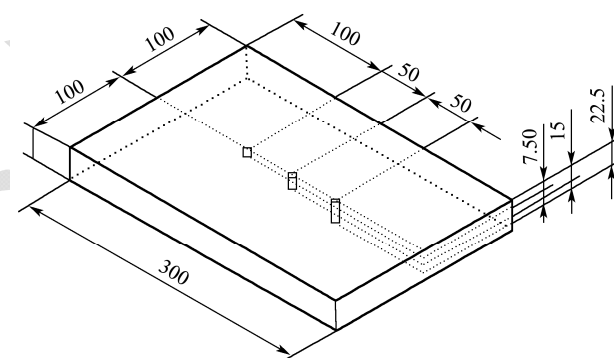


图 1 鱼糜温度测定点示意图

Fig.1 Diagram of temperature measurement point of surimi

1.3.2 流水解冻

将-18℃冷库储藏的狭鳕鱼糜去掉包装后,用切割器将冷冻鱼糜按 300 mm×200 mm×30 mm 的尺寸切成块放在托盘上,再按照图 1 所示的鱼糜温度测定点,钻孔插入光纤温度传感器,将放有温度探头的冷冻鱼糜置于 16±1℃的流水解冻,流速约 12 L/min,待 3 个温度测量点显示的温度均高于 0℃,视为完全解冻,检测狭鳕鱼糜的各项品质指标。

1.3.3 无线电波解冻

将-18℃冷库储藏的狭鳕鱼糜去掉包装后,用切割器将冷冻鱼糜按 300 mm×200 mm×30 mm 的尺寸切

成块放在托盘上,再按照图 1 所示的鱼糜温度测定点,钻孔插入光纤温度传感器,将放有温度探头的冷冻鱼糜置于射频加热设备对狭鳕鱼糜进行解冻试验,无线电波功率为 4 kW,电极板间距 130 mm,待 3 个温度测量点显示的温度均高于 0 ℃,视为完全解冻,停止加热,检测狭鳕鱼糜的各项品质指标。间歇式加热采用功率为 4 kW,电极板间距 130 mm 的无线电波加热 180 s 后停机 60 s 再继续加热直到完全解冻。

1.4 鱼糜表面温度分布的测量

参照郭洁玉等^[16]的方法,使用红外热成像分析仪,扫描不同解冻方式处理后的冷冻鱼糜,以获得鱼糜表面的温度分布。

1.5 鱼糜中心温度的测量

参照 Alfaifi 等^[17]的方法,按照图 1 所示的鱼糜温度测定点,钻孔插入光纤温度传感器,记录空气解冻、流水解冻和无线电波解冻过程各测量点的温度变化,以升温速率最慢的测量点的温度变化值作为记录值。

1.6 鱼糜品质测定

1.6.1 鱼糜持水力

参照陈潜等^[18]的方法,称取 5 g 左右的解冻后的鱼糜样品,称重记为 M_1 ,用滤纸包裹后放入 10 mL 的离心管,设定 4 ℃、转速 5000 r/min 的条件下离心 20 min,称量离心后的鱼糜质量记为 M_2 ,按照式 1 计算鱼糜的持水力 N ,每种解冻方式做 3 组平行,结果取平均值。

$$N/\% = [(M_1 - M_2)/M_1] \times 100 \quad (1)$$

式中: N 为鱼糜样品的持水力,%; M_1 为离心前鱼糜样品的质量, g; M_2 为离心后鱼糜样品的质量, g。

1.6.2 鱼糜弹性

参照欧阳杰等^[19]的方法,将解冻后的鱼糜样品切割成 10 mm×10 mm×10 mm 的小块,用物性测试仪进行测量,使用直径 5 mm 的圆形测试探头,设定探头最大下压距离为 5 mm,探头下降速率为 2.0 mm/s,记录探头下压过程中样品的反作用力数值,以最大值作为弹性值。

1.6.3 鱼糜白度值

参照 Martín 等^[20]的方法,使用经校准后的白度仪测定不同解冻方式处理后鱼糜的白度值,每种解冻方式做 3 组平行,结果取平均值。

1.6.4 鱼糜菌落总数

参照张信仁等^[21]的方法,取用不同解冻方式处理

后的鱼糜样品 10 g,放入盛有 240 mL 灭菌生理盐水的无菌均质杯中,8000 r/min 均质 1.5 min,然后制备 10 倍系列的稀释样品匀液,吸取 1 mL 样品匀液于培养基内,在 36 ℃ 培养 48 h 后记录相应的稀释倍数和菌落数量,菌落计数以菌落形成单位表示,每个稀释度的菌落数采用两个平板的平均数。

1.7 数据分析

用 Excel 2013 软件对试验数据进行制图;用统计分析软件 SPSS 16.0 对试验数据进行分析 and 显著性检验,显著水平 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

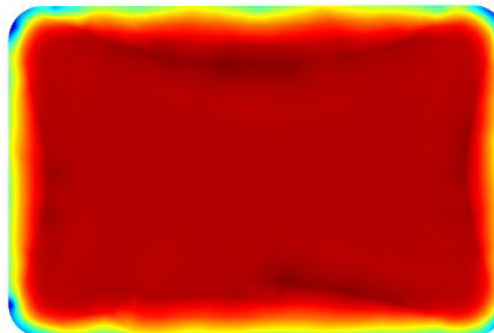
2.1 不同解冻方式处理后鱼糜表面的温度分布



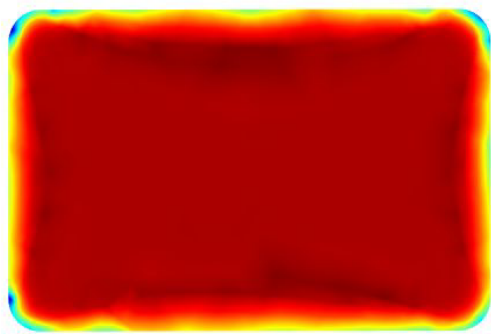
a 空气解冻后鱼糜表面的温度分布



b 流水解冻后鱼糜表面的温度分布



c 无线电波边缘式加热后鱼糜表面的温度分布



d 无线电波间歇式加热后鱼糜表面的温度分布

图2 不同解冻方式处理后鱼糜表面的温度分布

Fig.2 Temperature distribution of surimi surface by different thawing methods

由图2可知,经空气解冻和流水解冻后的狭鳕鱼糜表面温差较小,温度分布较为均匀。无线电波解冻过程中鱼糜表面会出现局部过热现象,特别是鱼糜的边角部位同鱼糜中心位置温差较大,这是由于介电加热具有选择加热的特性,随着被加热鱼糜温度的升高,鱼糜的介电特性随温度的变化会导致热点部位吸收能量越来越多,升温越来越迅速,而相应的较冷部位吸收能量少,导致温度分布差异增大。此外,鱼糜样品温度分布的不均匀还与无线电波加热腔内电场分布的不均匀性有关。Ma等^[22]研究发现无线电波加热腔体内不同位置的电场强度差异较大,无线电波在传播过程中遇到金属壁而发生反射形成驻波,无线电波的振动传递给临近的质点后形成二次波源,腔体内部空气分子谐振引起对电磁波能量吸收的不均匀,致使加热腔内的电场强度呈现强弱交错的峰。Uyar等^[6]应用无线电波加热肉块也得出了类似的结论,当电磁波进入物料后,肉块样品中间部位的电场分布是比较均匀的,但在样品边角部位的电场发生了扭曲,所以导致了冷冻肉块的边角部位电场强度较高。采用间歇式加热并不能完全缓解无线电波加热过程出现的局部过热现象,但间歇式加热后的鱼糜表面温度分布均匀性要优于连续式加热,因为在间歇时间内,狭鳕鱼糜高温部位与低温部位发生热交换,从而延缓了鱼糜表面温度的过快升高。

2.2 不同解冻方式处理后鱼糜中心温度的变化

物料的中心温度是反应解冻进程的重要参数,本试验以狭鳕鱼糜中心温度高于0℃作为完全解冻的标准。由图3可知,三种解冻方式中,无线电波解冻耗时最短,流水解冻次之,空气解冻耗时最长。应用无线电波解冻的鱼糜中心温度上升最快,加热时间仅需

4.6 min 就可以使狭鳕鱼糜的中心温度达到1.8℃;应用流水解冻使狭鳕鱼糜的中心温度达到1.7℃需要花费35 min左右;采用空气解冻鱼糜的中心温度上升最缓慢,需要195 min才能使狭鳕鱼糜的中心温度超过0℃。

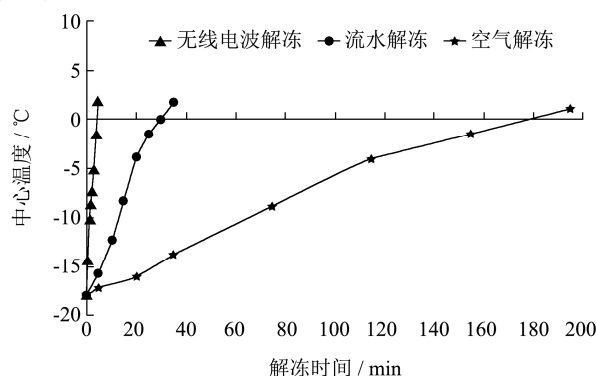


图3 不同解冻方式处理后鱼糜中心温度变化

Fig.3 Changes in central temperature of surimi by different thawing methods

Farag等^[15]人应用无线电波对块状冷冻牛肉进行解冻也得出了类似的结论。空气解冻最大的缺陷是解冻时间较长,此外空气解冻通常都在专用的解冻室内进行,占地面积较大。流水解冻比空气解冻的速度快,这是因为水的传热性比空气的传热性能好的缘故,但采用流水解冻会造成物料的质量损失。Soyer等^[23]对冷冻鸡肉进行解冻,发现没有包装的冷冻鸡肉,采用流水解冻后的质量损失高于空气解冻,这是由于流水解冻时,冷冻鸡肉直接与水接触,切断面的可溶性物质被水浸出增加了汁液的流失。无线电波加热具有整体加热的特性,无须热传导过程就能使被加热物料内外部同时加热、同时升温,无线电波加热可以将解冻时间缩短到传统方法的三十分之一。

2.3 不同解冻方式处理后鱼糜持水力的变化

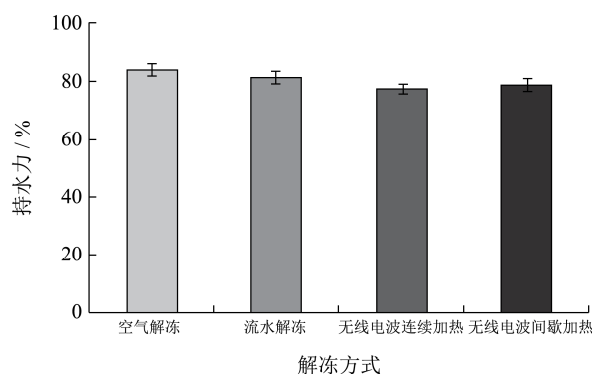


图4 不同解冻方式处理后鱼糜持水力的变化

Fig.4 Changes in water holding capacity of surimi by different thawing methods

汁液流失和持水力的下降是水产品解冻过程中常

出现的问题。图4为不同解冻方式处理后狭鳕鱼糜的持水力变化。由图4可知,四种解冻方式对冷冻鱼糜持水力的变化没有显著差异,经空气解冻和流水解冻的狭鳕鱼糜持水力分别为83.8%和81.5%,空气解冻和流水解冻后鱼糜的持水力要优于无线电波解冻,采用无线电波连续加热处理后的鱼糜持水力最低仅为77.3%。这可能是由于无线电波加热升温迅速,鱼糜内部冰晶融化成水,这些水分子不能完全回复到原细胞中重新被吸收,造成细胞结构被破坏,鱼糜持水力降低。欧阳杰等^[19]研究冷冻大黄鱼的解冻方法也得出了类似的结论:低温解冻时大黄鱼温度上升缓慢,冰晶融化速率相对较慢,对肌肉细胞的破坏较小,所以能保持较高的持水力。胡晓亮等^[11]研究发现:物料持水力的降低与肌肉组织在冻结与解冻过程中产生的冰晶和受到的机械损伤有关,缓慢解冻可减少物料的汁液流失和营养成分的降低。

2.4 不同解冻方式处理后鱼糜弹性的变化

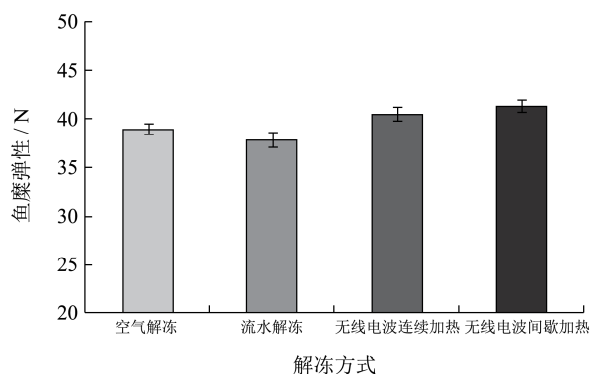


图5 不同解冻方式处理后鱼糜弹性的变化

Fig.5 Changes in elasticity of surimi by different thawing methods

鱼糜弹性是评价鱼糜品质和口感的重要参数之一。图5为不同解冻方式处理后狭鳕鱼糜的弹性变化。由图5可知,不同解冻方式处理后鱼糜弹性的变化没有显著差异,应用无线电波解冻后的鱼糜弹性略优于空气解冻和流水解冻,采用无线电波间歇加热后的鱼糜弹性值最高,可达到42.30/N,这可能是因为:空气解冻和流水解冻速度缓慢,通过最大冰晶融解带的时间长,长时间的缓慢升温造成狭鳕鱼糜中的蛋白质发生酶解、氧化、变性等一系列不利的影响。虽然无线电波加热会导致鱼糜局部温度上升过快,但由于鱼糜过热的面积小,局部温度不会过高,所以对鱼糜质构的影响较小,无线电波解冻比传统解冻方式更为高效,适用于大块物料的解冻,是一种极具潜力的解冻方式。

2.5 不同解冻方式处理后鱼糜白度的变化

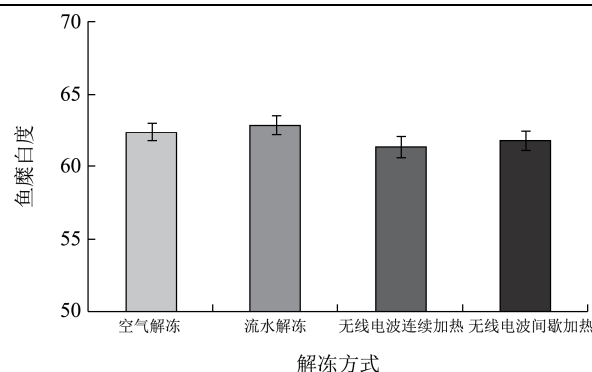


图6 不同解冻方式处理后鱼糜白度的变化

Fig.6 Changes in whiteness of surimi by different thawing methods

鱼糜白度值是评价鱼糜品质的重要参数之一,鱼糜的白度值同鱼糜的漂洗次数及脂肪氧化程度有关^[24]。图6为不同解冻方式处理后狭鳕鱼糜的白度值变化。由图6可知:采用空气解冻、流水解冻和无线电波解冻狭鳕鱼糜对鱼糜的白度值变化没有显著差异,流水解冻后的狭鳕鱼糜白度值最大,白度值可达到62.8,采用无线电波连续加热后的狭鳕鱼糜白度值最小,白度值为61.3。沈金金等^[25]对鳊鱼糜的漂洗工艺开展了研究,结果表明:随着漂洗时间的增加,鱼糜的离子强度会逐渐降低,增加了肌原纤维蛋白的流失,从而影响了鱼糜的凝胶强度,漂洗12 min后鳊鱼糜白度值最高,可达到69.39。无线电波快速解冻虽有局部过热现象,但温度仍处于可控的范围内,不会使鱼糜熟化变色而降低狭鳕鱼糜的白度值。

2.6 不同解冻方式处理后鱼糜菌落总数的变化

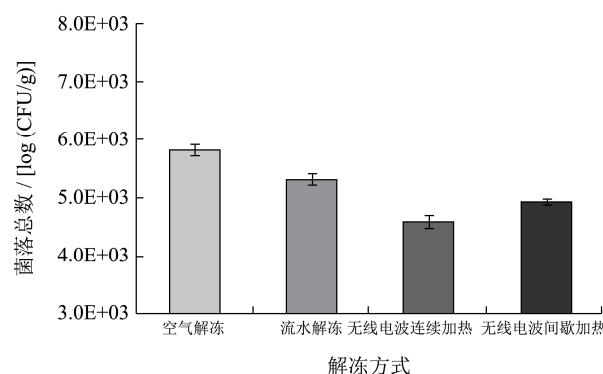


图7 不同解冻方式处理后鱼糜菌落总数的变化

Fig.7 Changes in total bacterial amount of surimi by different thawing methods

菌落总数是反应狭鳕鱼糜受微生物侵染程度的重要参考指标。狭鳕鱼糜富含水分及各种营养成分,微生物的生长繁殖是引起鱼糜品质劣变的主要原因之一

[26]。图7为不同解冻方式处理后狭鳕鱼糜的菌落总数变化。由图7可知:采用空气解冻、流水解冻和无线电波解冻狭鳕鱼糜对鱼糜的菌落总数变化没有显著差异,采用无线电波解冻的狭鳕鱼糜菌落总数要低于流水解冻和空气解冻,这是由于无线电波解冻速度快,高频交变电磁场产生的热量在一定程度上抑制了微生物的生长;空气解冻虽然耗时较长,但鱼糜温度长时间维持在-4℃以下,起到了抑制微生物生长的作用,空气解冻后的狭鳕鱼糜菌落总数为 5.8×10^3 CFU/g。赵伟^[27]等应用功率为6 kW,频率为27.12 MHz的无线电波设备对椰菜粉进行杀菌处理也得出了相似的结论,认为无线电波加热可以有效杀灭椰菜粉中的微生物,经无线电波处理5 min后微生物从7.2个对数降低到3.0个对数,且颜色基本不改变。无线电波加热能在保持食品品质的前提下杀灭微生物,可见无线电波加热在食品杀菌领域也有较好应用潜力和研究前景。

3 结论

3.1 空气解冻和流水解冻后的狭鳕鱼糜温度分布较为均匀;无线电波解冻过程中鱼糜边角部位会出现局部过热现象,采用无线电波间歇式加热能有效延缓鱼糜表面温度的过快升高。

3.2 应用无线电波解冻时,加热时间仅需4.6 min就可以使狭鳕鱼糜的中心温度达到1.8℃;而采用空气解冻鱼糜的中心温度上升最缓慢,需要195 min才能使狭鳕鱼糜的中心温度超过0℃。无线电波加热具有整体加热的特性,无须热传导过程就能使鱼糜内外部同时升温,且升温迅速,无线电波加热可以将解冻时间缩短到传统方法的三十分之一。

3.3 应用无线电波解冻后的狭鳕鱼糜的持水力和白度值同传统解冻方法没有显著差异,无线电波间歇加热后的狭鳕鱼糜的持水力为78.8%,白度值为61.7。无线电波加热在一定程度上能增加狭鳕鱼糜的弹性,无线电波解冻能有效抑制鱼糜微生物的生长繁殖,解冻后的狭鳕鱼糜菌落总数仅为 4.9×10^3 CFU/g。采用无线电波间歇式加热的物料温度分布均匀性较好,解冻效率高,又能最大限度地保持冷冻食品的品质,是一种极具潜力的解冻方式。

参考文献

- [1] 曹燕,程裕东.鲢、狭鳕鱼糜微波加热凝胶形成的动力学分析[J].水产学报,2005,29(04): 547-551
CAO Yan, CHENG Yu-dong. Study on gel-forming kinetics of silver carp and alaska pollack surimi during microwave

heating [J]. Journal of Fisheries of China, 2005, 29(4): 547-551

- [2] Miao Y, Chen J Y, Noguchi A. Studies on the ohmic heating of frozen surimi [J]. Food Science and Technology Research, 2007, 13(4): 296-230
- [3] 阙婷婷,刘文娟,陈士国,等.水产品低温保鲜技术研究现状[J].中国食品学报,2013,13(8):142-143
QUE Ting-ting, LIU Wen-juan, CHEN Shi-guo, et al. Research progress of low temperature preservation technology in aquatic products [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(8): 181-183
- [4] Piyasena P, Dussault C, Koutchma T, et al. Radio frequency heating of foods: Principles, applications and related properties-A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2003, 43(6): 587-606
- [5] Bengtsson N. Electronic defrosting of meat and fish at 35 and 2450 MHz-a laboratory comparison [J]. Food Technology, 1963, 17(10): 1309-1312
- [6] Uyar R, Erdogdu F, Marra F. Effect of load volume on power absorption and temperature evolution during radio-frequency heating of meat cubes: A computational study [J]. Food and Bioproducts Processing, 2014, 92(C3): 243-251
- [7] Birla S L, Wang S, Tang J. Computer simulation of radio frequency heating of model fruit immersed in water [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84: 270-280
- [8] Jiao Y, Tang J, Wang S. A new strategy to improve heating uniformity of low moisture foods in radio frequency treatment for pathogen control [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 141: 128-138
- [9] Romano V, Marra F. A numerical analysis of radio frequency heating of regular shaped foodstuff [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(3): 449-457
- [10] Uyar R, Bedane T F, Erdogdu F, et al. Radio-frequency thawing of food products- A computational study [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 146: 163-171
- [11] 胡晓亮,王易芬,郑晓伟,等.水产品解冻技术研究进展[J].中国农学通报,2015,31(29):39-46
HU Xiao-liang, WANG Yi-fen, ZHENG Xiao-wei, et al. Research process of thawing technology of aquatic products [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(29): 39-46
- [12] 张宁,王冉冉,李法德.射频加热技术在农产品和食品工业的应用研究进展[J].食品工业,2013,34(11):199-203
ZHANG Ning, WANG Ran-ran, LI Fa-de. Research

- advances of application of radio frequency heating in agro-product and food industry [J]. The Food Industry, 2013, 34(11): 199-203
- [13] Cathcart W H, Parker J J. Defrosting frozen foods by high frequency heat [J]. Food Research, 1946, 11: 341-344
- [14] Jason A C, Sanders H R. Dielectric thawing of fish [J]. Food Technology, 1962, 16(6): 101-112
- [15] Farag KW, Lyng J G, Morgan D J, et al. A comparison of conventional and radio frequency tempering of beef meats: Effects on products temperature distribution [J]. Meat Science, 2008, 80: 88-495
- [16] 郭洁玉. 冷冻猪肉的射频解冻工艺[D]. 无锡: 江南大学, 2015
GUO Jie-yu. Radio frequency thawing process of frozen pork [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015
- [17] Alfaifi B, Tang J, Jiao Y, et al. Radio frequency disinfestation treatments for dried fruit: Model development and validation [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 120: 268-276
- [18] 陈潜, 范大明, 曹洪伟, 等. 射频对冷冻鱼浆的解冻效果研究 [J]. 食品研究与开发, 2017, 38(22): 90-96
CHEN Qian, FAN Da-ming, CAO Hong-wei, et al. Study on thawing effect of radio frequency on frozen minced fish [J]. Food Research and Development, 2017, 38(22): 90-96
- [19] 欧阳杰, 倪锦, 吴锦婷, 等. 解冻方式对大黄鱼解冻效率和品质的影响 [J]. 肉类研究, 2016, 30(8): 30-33
OUYANG Jie, NI Jin, WU Jin-ting, et al. Influence of thawing methods on thawing efficiency and quality of *Pseudosciaena crocea* [J]. Meat Research, 2016, 30(8): 30-33
- [20] Martín-Sánchez A M, Navarro C, Pérez-Álvarez J A, et al. Alternatives for efficient and sustainable production of surimi: A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2009, 8(4): 359-374
- [21] 张信仁, 张云, 程立军, 等. 解冻条件对鳗鱼寿司品质的影响 [J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(10): 4010-4012
ZHANG Xin-ren, ZHANG Yun, CHENG Li-jun, et al. Effects of the roasted eel thawing conditions on the quality of eel sushi [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(10): 4010-4012
- [22] Lizhang Ma. Experimental validation of a combined electromagnetic and thermal FDTD model of a microwave heating process [J]. IEEE. Transactions on Microwave Theory and Technique, 1995, 43: 2565-2572
- [23] Soyer A, Ozalp B, Dalmis U, et al. Effects of freezing temperature and duration of frozen storage on lipid and protein oxidation in chicken meat [J]. Food Chemistry, 2010, 120(4): 1025-1030
- [24] 邵懿, 薛勇, 薛长湖, 等. 解冻方式及漂洗方法对冷冻竹荚鱼鱼糜品质的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(12): 83-86
SHAO Yi, XUE Yong, XUE Chang-hu, et al. Effect of the different thawing ways and washing on the quality of surimi from frozen *Trachurus japonicus* [J]. Food and Fermentation Industries, 2007, 33(12): 83-86
- [25] 沈金金, 金邦领, 张晓月, 等. 漂洗工艺对鲢鱼鱼糜品质的影响 [J]. 食品科技, 2010, 35(6): 166-169
SHEN Jin-jin, JIN Bang-ling, ZHANG Xiao-yue, et al. Effect of rinsing process on the quality of armored weaselfish surimi [J]. Food Science and Technology, 2010, 35(6): 166-169
- [26] Marra F, Lyng J, Romano V, et al. Radio-frequency heating of food stuff: Solution and validation of a mathematical model [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(3): 998-1006
- [27] 赵伟, 杨瑞金. 脱水蔬菜粉射频杀菌研究 [J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(5): 68-74
YANG Wei, YANG Rui-jin. Study on radio frequency heating to inactivate microorganisms in broccoli powder [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(5): 68-74