

915 MHz 和 2 450 MHz 频率下温度和大豆分离蛋白 对鲢鱼糜复合素材介电特性的影响

杨松¹, 刘世雄², 程裕东^{1*}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306;

2. 东京海洋大学食品科学部, 日本 东京 108-8477)

摘要: 以鲢鱼糜及其添加不同比例的大豆分离蛋白乳化物的复合素材为对象, 在 10 ~ 80 °C 范围内, 采用同轴探针方法分别测定了 915 MHz 和 2 450 MHz 频率下的介电常数和介电损失率。结果表明, 鲢鱼糜及其复合素材的介电常数随温度的升高而减小, 介电损失率随温度的升高而增大; 温度一定时, 介电常数和介电损失率均随频率的增加而减小; 添加大豆分离蛋白乳化物添加量在 6.5% ~ 28% 范围内时, 介电常数和介电损失率随添加量的增加而增大。鲢鱼糜及其复合素材的穿透深度随温度的升高而减小, 随大豆分离蛋白乳化物的添加量增加而减小。频率、温度和大豆分离蛋白乳化物对鲢鱼糜的介电特性和穿透深度有较大影响。利用 SPSS 软件进行回归分析得到预测方程, 对介电常数、介电损失率和穿透深度能够有效预测。

关键词: 鲢鱼糜; 大豆分离蛋白; 介电特性; 温度; 频率; 穿透深度

中图分类号: TS 254

文献标识码: A

微波在食品的加热、再加热、调理、解冻等中得到了广泛应用^[1]。微波技术应用于鱼糜类制品加工的设想在 20 世纪 70 年代就曾提出, YAMAGUCHI^[2], TOISI^[3] 和 MURANAKA^[4] 等报道了微波加热鱼糜类制品的效率和经济效益, CAO 等^[5] 也研究了微波加热应用于鱼糜类制品凝胶化过程的可行性。目前, 微波加热也仅用于鱼糜制品生产中的预加热过程, 因为微波加热会导致产品的温度分布不均匀从而严重影响产品的品质^[6]。食品的介电特性、几何形状以及电场强度等因素都会影响微波加热的温度分布, 其中介电特性是最关键的因素^[7]。

介电特性是研究食品与电场相互作用的关键因素, 通常考察两个参数, 即介电常数(ϵ')和介电损失率(ϵ'')。介电常数反映物料的电容性, 即在电磁场中贮存能量的能力; 介电损失率则反映物料的电阻, 表征物料将电磁能转化成热能的能

力。影响食品介电特性的因素包括含水率、温度、频率、食品成分及密度等^[8], 国内外的一些学者, 对介电特性做了大量研究, 积累了大量不同种类食品的介电数据。WANG^[9]、BENGTSSON^[10]、MUDGETT^[11]和 VAN DYKE^[12]等分别研究了鲑鱼片、冷冻肉、鱼和牛肉等肉制品的介电特性; MAO^[13]和何天宝^[14]等就温度、频率、含盐量、淀粉等对鱼糜介电特性的影响进行了研究。

从食品工程角度看, 在微波加热系统中, 电磁能的分布受带有相应边界条件的麦克斯韦方程(Maxwell equations)控制, 而介电特性是麦克斯韦方程的主要物理参数。因此, 对介电特性理论性质方面的知识需求显得更加重要^[15]。同时, 随着现代食品品质评价技术的不断发展, 食品的介电特性已被用于食品品质检测, 货架期预测等领域^[16]。

淡水渔业资源和大豆蛋白资源是我国传统的

收稿日期:2010-08-10 修回日期:2010-10-22

资助项目:上海市科学技术委员会攻关项目(063919136)

通讯作者:程裕东, E-mail: ydcheng@shou.edu.cn

食物资源,特别是近年来两者的产量得到了大幅度的提高。大豆分离蛋白(soybean protein isolate, SPI)添加到淡水鱼糜中,可提高鱼糜的营养成分,满足人们对动植物蛋白质平衡摄取的需求,同时还能提高鱼糜制品的弹性和口味^[17-18]。

为了使得微波加热能够很好的应用在鱼糜类制品,必须改善加热的均匀性。目前国内外对淡水鱼糜类制品的介电特性的研究并不多见,因此,通过研究介电特性进一步了解微波加热过程中的内部温度分布,以改善加热凝胶化的品质,显得极其重要。

本研究围绕温度和大豆分离蛋白乳化物含量对淡水鱼糜(鲢)的介电特性的影响,探讨 915 MHz 和 2 450 MHz 微波加热频率下淡水鱼糜及其复合素材的介电特性和温度的关系,为从理论

上建立数学模型预测鱼糜微波加热时的温度分布提供了条件,为更深一步研究淡水鱼糜微波加热凝胶化提供了基础;同时,也为以鲢等大宗低值鱼为原料,开发生产高品质鱼糜制品的微波工业化生产提供参考,对于推进了我国水产品精深加工技术的开发和应用具有重要的实际意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

冷冻鲢鱼糜(SA级;荆州市中科龙生食品有限公司)、大豆分离蛋白(SPI bespro 700级;南通光合生物技术有限公司)和植物油(金龙鱼第二代;上海嘉里食品工业有限公司),其成分组成如表1所示。

表1 实验材料的化学成分
Tab.1 The composition of experimental materials

成分 ingredients	水分 moisture	蛋白质 crude protein	脂肪 crude oil	其他 others
鲢鱼糜 silver carp surimi	74.4%	16.34%	1.21%	8.05%
大豆分离蛋白 soybean protein isolate	6.50%	91.20%	0.46%	1.84%

1.2 鲢播溃鱼浆及其复合素材的制备

参考文献[5]的方法鲢鱼糜室温流水自然半解冻,然后切成小块,补加冷水,调整水分。使用搅拌机(法国 Modele depose)斩拌 5 min 后加入 NaCl 播溃 20 min,经真空脱气(控制操作温度小于 10 ℃),填充烧杯中密封置于 4 ℃ 冰箱中待用;植物油 + 水混合斩拌 2 min,按所定重量添加大豆

分离蛋白再斩拌 3 min 形成乳化物,按比例与盐播溃鱼糜混合斩拌 3 min,经真空脱气(控制操作温度小于 10 ℃),制得鲢播溃鱼浆及其添加不同比例的大豆分离蛋白乳化物的复合素材,并填充烧杯中密封置于 4 ℃ 冰箱中供试。鲢播溃鱼浆及其复合素材的样品组分如表 2。

表2 鲢播溃鱼浆及其复合素材的组分
Tab.2 Formulas of silver carp surimi paste and surimi-soybean compound

成分 ingredients	鲢播溃鱼浆及其复合素材组分 formulas of silver carp surimi paste and surimi-soybean compound			
	A	B	C	D
鲢鱼糜(g) silver carp surimi	742	645	519	319
水(g) water	228	260	296	371
NaCl(g)	30	30	30	30
^a SPI 乳化物(g) SPI emulsions	0	65	155	280
总重(g) total	1 000	1 000	1 000	1 000
水分含量 moisture content	78%	78%	78%	78%
SPI 乳化物含量 SPI emulsions content	0	6.5%	15.5%	28%
动物蛋白与植物蛋白比 ratio of animal protein to vegetable protein	1	9:1	3:1	1:1

注:a. SPI 乳化物中:SPI:植物油:水=1:1:3。

Notes:a. SPI emulsions content is SPI: vegetable oil: water = 1:1:3.

1.3 介电特性的测量

样品的介电常数(ϵ')和介电损失率(ϵ'')的测定方法采用同轴探针介电特性测定仪(HP85070B;Hewlett Packard Corp.,USA)进行测定;该系统由计算机、测试软件、介电测试探针、网络分析仪、探针电缆和一个恒温箱构成,测定的频率范围为 200 MHz ~ 13.5 GHz,测定的温度范围为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本研究选择的频率范围为 404 ~ 2 791 MHz,频率间隔是 34.1 MHz;温度范围是 $10 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度间隔 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测定之前用蒸馏水对介电测定探针进行校正。整个测定过程中,采用铜-镍热电偶测温仪对样品的温度进行监测,其精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。每种样品 ϵ' 和 ϵ'' 均平行测量 3 次。

2 结果和讨论

2.1 温度和频率对鲢鱼糜介电常数和介电损失率的影响

当频率一定时,鲢鱼糜的介电常数(图 1-a)随温度的升高而下降:在 915 MHz 频率下,介电常数由 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 59.9 减小到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 50.3;在 2 450 MHz 频率下,介电常数由 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 54.2 减小到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 46.5。介电损失率(图 1-b)随温度的升高而增大,915 MHz 频率下,鲢鱼糜的介电损失率由 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 57.8 增大到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 130.8,2 450 MHz 频率下,介电损失率由 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 37.5 增大到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 54.1。

鲢鱼糜介电常数随温度的升高而减小,介电损失率随温度的升高而增大,这一变化趋势与 MAO^[13]以鳕鱼糜为研究对象相类似。温度对介电特性的影响与食品中的束缚水含量、自由水含量、离子传导性能有关。由于鱼糜是一种高含水量的食品,其自由水含量(大于 70%)远远大于束缚水含量(小于 2%)^[18],而自由水则使介电常数与温度成负相关,而束缚水则使介电常数与温度成正相关^[19],这就决定了其介电常数随温度升高而减小;由于温度的升高使离子溶液的黏度降低,且离子流动性增强,离子溶液中的电导率(σ)随温度的升高而增加^[20];而微波频率下的介电损失机理是离子损失(ϵ''_{σ})和偶极损失(ϵ''_d),根据式(1),离子电导(σ)增加,介电损失率也增加^[8]。

$$\epsilon'' = \epsilon''_d + \epsilon''_{\sigma} = \epsilon''_d + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (1)$$

式中, ϵ''_{σ} 为离子损失, ϵ''_d 为偶极损失, σ 为离子

电导。

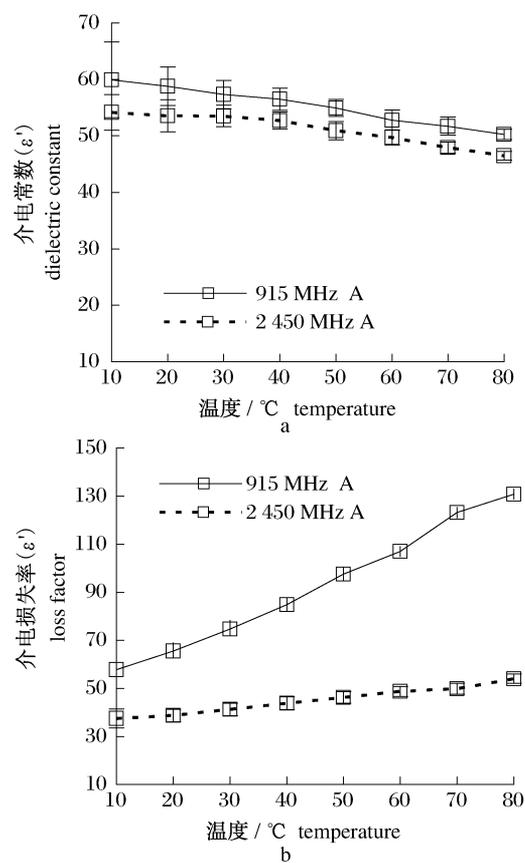


图 1 温度对鲢鱼糜介电常数(a)和

介电损失率(b)的影响(A:鲢鱼糜)

Fig.1 Effect of temperature on dielectric constant(a) and loss factor(b) of silver carp surimi paste(A:silver carp surimi paste)

当温度一定时,鲢鱼糜的介电常数(图 2-a)随频率的升高而减小,介电常数由 915 MHz 的 58.78 ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 减小到 2 450 MHz 的 53.57 ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$),减小的幅度为 8.9%。介电常数随频率的升高而减少的变化趋势与文献[11,15,16]相类似。

鲢鱼糜的介电损失率(图 2-b)随频率的升高而减小,介电损失率由 915 MHz 的 65.53 ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 减小到 2 450 MHz 的 38.75 ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$),减小的幅度为 40.9%,介电损失率随频率的升高而减小的变化趋势与 MAO^[13]等以含 3% NaCl 的阿拉斯加鳕鱼为研究对象具有相同的变化趋势;而何天宝^[14]等以狭鳕鱼糜和罗非鱼糜为研究对象,随频率的增加,两种鱼糜的介电损失率呈先减小后增加的趋势,在某一拐点频率时达到最小值,OHLSOON 等^[21]也有类似的报道。产生这两种

现象的原因是在微波频率下,介电损失是偶极子损失和离子损失两部分的共同效应。频率增加,离子损失增加而偶极损失减少,由于食品中的成分存在着差异,尤其是水分、蛋白质等的差异导致介电损失率变化的数值不同^[22]。

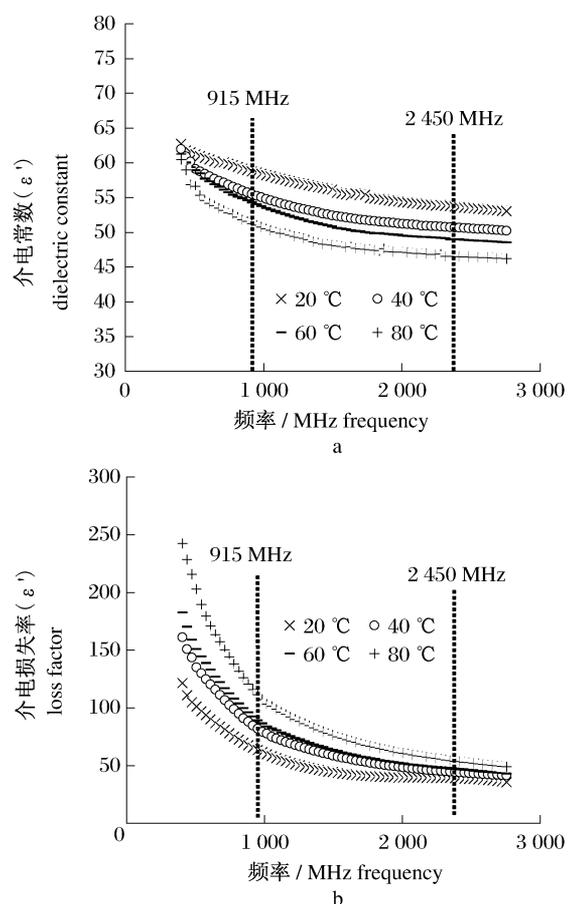


图2 频率对鲢播渍鱼浆介电常数(a)和介电损失率(b)的影响

Fig. 2 Effect of frequency on dielectric constant (a) and loss factor (b) of silver carp surimi paste

2.2 温度和SPI乳化物含量对鱼糜复合素材的介电常数和介电损失率的影响

当频率一定时,3种不同含量的SPI乳化物鱼糜复合素材的介电常数(图3-a)都随温度的升高而下降,介电损失率(图3-b)随温度的升高而增大。

在同一温度下,鱼糜复合素材的介电常数和介电损失率随SPI乳化物浓度的增加而增加(图3)。含6.5%SPI乳化物复合素材的介电常数和介电损失率最小,分别为51.71(915 MHz和20℃)和39.67(915 MHz和20℃),含28%SPI乳化物复合素材的介电常数和介电损失率最大,分别为58.51

(915 MHz和20℃)和54.67(915 MHz和20℃)。导致这一现象的一种可能性原因与SPI乳化物中大豆分离蛋白的含量有关,JASIM^[23]报道了SPI含量在0~15 g/100 g时,介电常数和介电损失率随SPI含量的增大而增大。另外动植物蛋白有不同的介电特性,动植物蛋白吸附自由水的比例不同,影响介电特性,表现为蛋白质吸附自由水越多,介电性能越差^[24];此外,蛋白质发生变性,其介电特性也发生变化^[22],动植物蛋白在发生变性时,介电特性发生不同的变化。

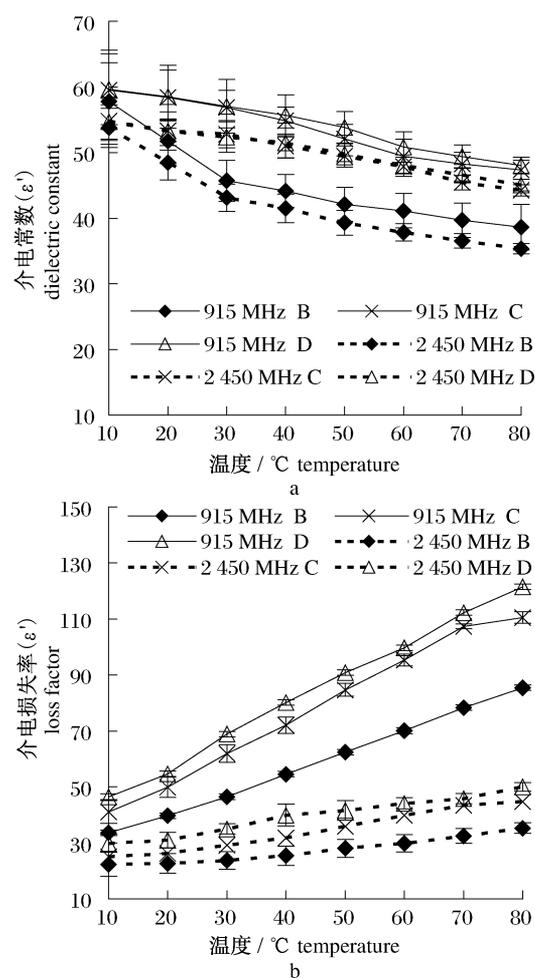


图3 温度和SPI乳化物对鱼糜复合素材介电常数(a)和介电损失率(b)的影响

B: 含6.5%SPI乳化物的鱼糜复合素材,C: 含15.5%SPI乳化物的鱼糜复合素材,D: 含28%SPI乳化物的鱼糜复合素材。

Fig. 3 Effect of temperature and SPI emulsions on dielectric constant (a) and loss factor (b) of surimi-soybean compound

B: surimi paste with 6.5% of emulsified SPI. C: surimi paste with 15.5% of emulsified SPI. D: surimi paste with 28% of emulsified SPI.

3 种不同比例复合素材的温度与介电常数和介电损失率之间的关系曲线(图 3)之间有明显的区别,导致这一现象可能与 SPI 乳化物中脂肪含量有关,OHLSSON 等^[21]在 900 MHz 频率下,在乳状肉中添加 0% ~ 15% 的脂肪,介电损失率明显减小;LYNG 等^[25]在 2 430 MHz 的频率下,在牛肉汉堡包中添加 10% 的脂肪,不同程度上减小了介电常数和介电损失率;LYNG 等^[26]发现添加 20% 的脂肪后,猪肉和牛肉介电常数和介电损失率显著下降。ZHANG 等^[27]认为脂肪在微波场中的介电性能非常弱,由于脂肪的疏水性,当脂肪含量增加时,将降低食品体系中的水分,由此将减小食品体系的介电特性。

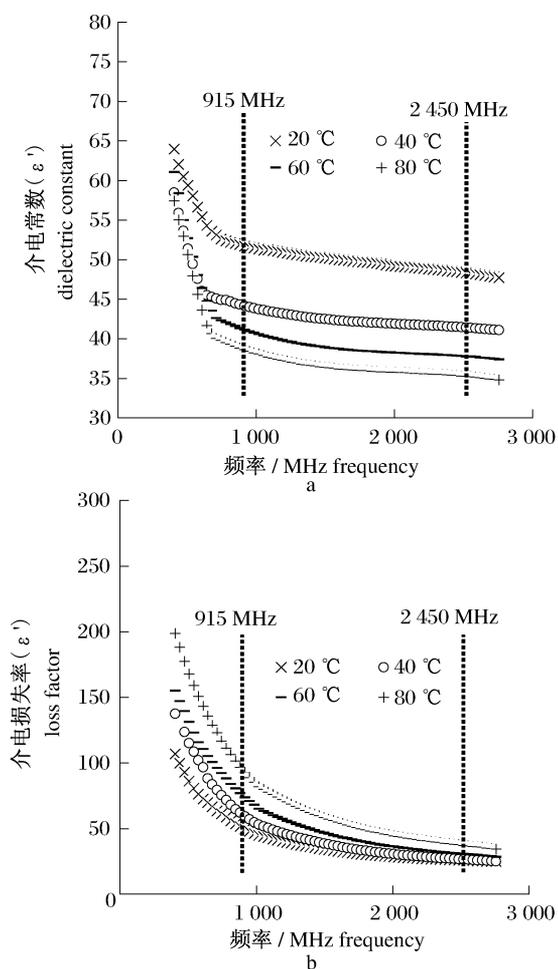


图 4 频率对含 6.5% SPI 乳化物的鱼糜复合素材介电常数 (a) 和介电损失率 (b) 的影响

Fig. 4 Effect of frequency on dielectric constant (a) and loss factor (b) of surimi paste with 6.5% of emulsified SPI

当温度一定时,含 6.5% SPI 乳化物的鱼糜复合素材介电常数(图 4-a)随频率的升高而减小,介电常数由 915 MHz 的 51.73 (20 °C) 减小到 2 450 MHz 的 48.45 (20 °C),介电损失率(图 4-b)随频率的升高而减小,介电损失率由 915 MHz 的 49.67 (20 °C) 减小到 2 450 MHz 的 25.93 (20 °C)。介电常数和介电损失率随频率的变化趋势与单一鲢鱼糜相类似。

2.3 鲢插溃鱼浆及其复合素材的穿透深度

穿透深度是指微波在穿透过程中其能量减少为原来的 $1/e$ ($e = 2.718$) 之处距离表面的深度,可表征食品物料对微波能的衰减能力的大小。穿透深度(d_p)是衡量微波加热食品内部温度分布情况的重要参数,食品中微波能的穿透深度用米做单位,可按公式(2)计算^[28]:

$$d_p = \frac{c_0}{2\pi f + \sqrt{2\epsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]}} \quad (2)$$

c_0 是自由空间光速 ($c_0 = 3 \times 10^8$ m/s), f 是所测定的频率。其中 $\lambda_0 = c_0 / f$, λ_0 表示自由空间微波波长,915 MHz 频率下是 32.76 cm, 2 450 MHz 频率下是 12.24 cm。

在 915 MHz 频率下,鲢插溃鱼浆及其复合素材的穿透深度(图 5)在 8 ~ 19 mm 范围内,随温度的升高而减小。鲢插溃鱼浆的穿透深度最小,由 10 °C 的 10.8 mm 减小到 80 °C 的 7.4 mm,减少的幅度为 31%。同一温度下,复合素材的穿透深度随 SPI 乳化物浓度的增加而减小,由 SPI 乳化物含量为 6.5% 时的 14.9 mm (30 °C) 减小到 SPI 乳化物含量为 28% 时的 11.3 mm (30 °C)。

在 2 450 MHz 频率下,鲢插溃鱼浆及其复合素材的穿透深度(图 5)在 3 ~ 7 mm 范围内变化,随温度的升高而减小。鲢插溃鱼浆的穿透深度最小,由 10 °C 的 4.0 mm 减小到 80 °C 的 2.8 mm,减少的幅度为 30%。同一温度下,复合素材的穿透深度随 SPI 乳化物浓度的增加而减小,由 SPI 乳化物含量为 6.5% 时的 5.6 mm (30 °C) 减小到 SPI 乳化物含量为 28% 时的 4.2 mm (30 °C)。

2.4 预测方程

运用 SPSS 软件对所测数据进行回归分析,得到鱼糜及其复合素材的介电常数、介电损失率和穿透深度的预测方程见表 3。

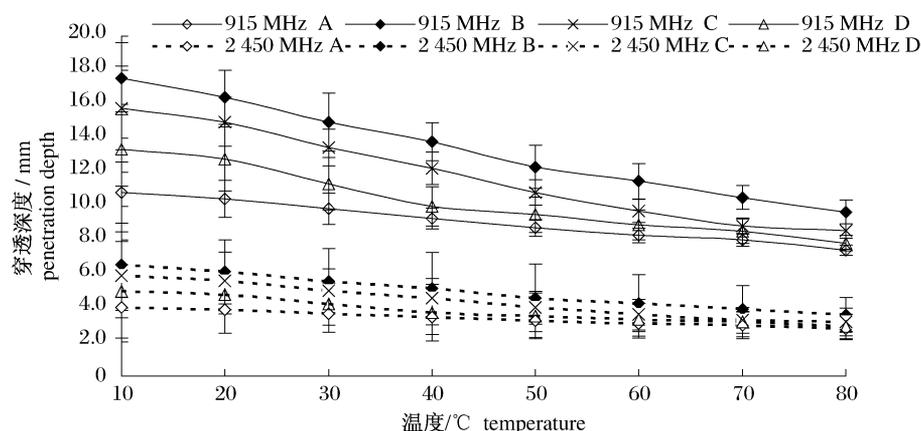


图5 温度对鲢插渍鱼浆及其复合素材穿透深度的影响

A: 鲢插渍鱼浆, B: 含 6.5% SPI 乳化物的鱼糜复合素材, C: 含 15.5% SPI 乳化物的鱼糜复合素材, D: 含 28% SPI 乳化物的鱼糜复合素材。

Fig. 5 Effect of temperature on penetration depths of surimi paste and surimi-soybean compound

A; Silver carp surimi paste. B; Surimi paste with 6.5% of emulsified SPI. C; Surimi paste with 15.5% of emulsified SPI. D; Surimi paste with 28% of emulsified SPI.

表3 鱼糜及其复合素材介电常数、介电损失率和穿透深度的预测方程

Fig. 3 Predictive equations for the dielectric constant & the loss factor & the penetration depths of the surimi paste and surimi-soybean compound

	温度(°C) temperature	频率(MHz) frequency	预测方程 predictive equations	R ²	序号 no.
介电常数 dielectric constant					
鲢鱼糜 silver carp surimi paste	10~80	915	$y = 1E - 057^3 - 0.001 8T^2 - 0.055 5T + 60.574$	0.99	1
		2 450	$y = 2E - 057^3 - 0.003 6T^2 + 0.090 3T + 53.435$	0.99	2
含 6.5% SPI 乳化物的鱼糜复合素材 surimi paste with 6.5% of emulsified SPI	10~80	915	$y = -9E - 057^3 + 0.016 5T^2 - 1.111 3T + 67.454$	0.99	3
		2 450	$y = -7E - 057^3 + 0.012 5T^2 - 0.914 7T + 61.827$	0.99	4
含 15.5% SPI 乳化物的鱼糜复合素材 surimi paste with 15.5% of emulsified SPI	10~80	915	$y = 7E - 057^3 - 0.008 8T^2 + 0.140 2T + 58.805$	0.99	5
		2 450	$y = 1E - 057^3 - 0.002 5T^2 - 0.020 4T + 55.04$	0.99	6
含 28% SPI 乳化物的鱼糜复合素材 surimi paste with 28% of emulsified SPI	10~80	915	$y = 3E - 057^3 - 0.005 3T^2 + 0.057 2T + 59.396$	0.99	7
		2 450	$y = 5E - 067^3 - 0.001 2T^2 - 0.061 5T + 55.236$	0.99	8
介电损失率 loss factor					
单一鱼糜 simplex surimi	10~80	915	$y = -0.000 1T^3 + 0.017 3T^2 + 0.261 8T + 53.853$	0.99	9
		2 450	$y = 8E - 077^3 + 0.000 4T^2 + 0.191 4T + 35.238$	0.99	10
含 6.5% SPI 乳化物的鱼糜复合素材 surimi paste with 6.5% of emulsified SPI	10~80	915	$y = -5E - 057^3 + 0.007 6T^2 + 0.413 3T + 28.756$	0.99	11
		2 450	$y = -2E - 057^3 + 0.004 7T^2 - 0.082 9T + 22.643$	0.99	12
含 15.5% SPI 乳化物的鱼糜复合素材 surimi paste with 15.5% of emulsified SPI	10~80	915	$y = -0.000 2T^3 + 0.022 6T^2 + 0.310 1T + 36.089$	0.99	13
		2 450	$y = -9E - 057^3 + 0.01 3T^2 - 0.226 2T + 26.217$	0.99	14
含 28% SPI 乳化物的鱼糜复合素材 surimi paste with 28% of emulsified SPI	10~80	915	$y = -3E - 057^3 + 0.002 7T^2 + 1.044 1T + 35.004$	0.99	15
		2 450	$y = -6E - 067^3 + 0.000 2T^2 + 0.309 7T + 26.036$	0.98	16
穿透深度 penetration depths					
单一鱼糜 simplex surimi	10~80	915	$y = 3E - 067^3 - 0.000 3T^2 - 0.042 1T + 1.127 5$	0.99	17
		2 450	$y = 1E - 067^3 - 0.000 1T^2 - 0.0157T + 0.421 25$	0.93	18
含 6.5% SPI 乳化物的鱼糜复合素材 surimi paste with 6.5% of emulsified SPI	10~80	915	$y = 8E - 067^3 - 0.000 7T^2 - 0.110 7T + 1.872 4$	0.99	19
		2 450	$y = 3E - 067^3 - 0.000 3T^2 - 0.041 4T + 0.699 58$	0.98	20
含 15.5% SPI 乳化物的鱼糜复合素材 surimi paste with 15.5% of emulsified SPI	10~80	915	$y = 3E - 057^3 - 0.0037^2 - 0.026 9T + 1.635 2$	0.99	21
		2 450	$y = 1E - 057^3 - 0.001 1T^2 - 0.01T + 0.610 96$	0.96	22
含 28% SPI 乳化物的鱼糜复合素材 surimi paste with 28% of emulsified SPI	10~80	915	$y = 2E - 067^3 + 0.000 4T^2 - 0.13T + 1.481 3$	0.99	23
		2 450	$y = 9E - 077^3 + 0.000 1T^2 - 0.048 6T + 0.553 4$	0.96	24

运用 SPSS 软件回归分析得到的预测方程能够对鱼糜及其复合素材在 10 ~ 80 °C 范围内两种不同频率下的介电特性进行预测,为建立模型预测鱼糜及其复合素材内部温度分布提供基础。

3 结论

鱼糜及其复合素材的介电常数随温度的升高而增大,介电损失率随温度的升高而减少,当温度一定时,频率的增加,介电常数和介电损失率均减小。在鱼糜中添加大豆分离蛋白乳化物能够改变复合素材的介电特性,表现在介电常数和介电损失率随大豆分离蛋白乳化物的浓度增加而增加。根据介电常数和介电损失率计算出鱼糜及其复合素材的穿透深度,穿透深度随温度的升高而减小,复合素材的穿透深度随 SPI 乳化物浓度的增加而减小。频率、温度和 大豆分离蛋白乳化物对鱼糜及其复合素材的介电特性和穿透深度有较大影响。并通过 SPSS 软件回归分析得到预测方程,对介电常数、介电损失率和穿透深度能够进行有效预测。

参考文献:

- [1] 高福成,陈卫. 微波食品[M]. 北京:中国轻工业出版社,1999.
- [2] YAMAGUCHI Z. About the microwave heating equipment for kamaboko[J]. *New Food Ind*,1982, 24:1-5. (in Japanese).
- [3] TOISI T. Applications to microwave food[J]. *New Food Ind*,1982,24:13-16. (in Japanese).
- [4] MURANAKA T. The foundation and applications of microwave heating [M] // Omori T, ed. *Electromagnetic Waves and Food*; Korin, Tokyo, 1993:23-97.
- [5] CAO Y, Cheng Y D, WANG X C, *et al.* Effects of heating methods on gel-forming ability of silver carp surimi[J]. *J Shanghai Fisheries University*,2003,12 (suppl.):78-85.
- [6] Yaghmaee P, Durance T D. Predictive equations for dielectric properties of NaCl, D-sorbitol and sucrose solutions and surimi at 2 450 MHz [J]. *Food Science*,2001,67(6):2207-2211.
- [7] 王邵林. 微波食品工程[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- [8] 李云飞等. 食品物性学[M]. 北京:中国轻工业出版社,2009.
- [9] WANG Y, Tang J, Rasco B, *et al.* Dielectric properties of salmon fillets as a function of temperature and composition[J]. *Food Engineering*, 2008,87:236-246.
- [10] BENGTSSON N E, Melin J. Measurements of the dielectric properties of frozen and defrosted meat and fish in the frequency range 10 - 200 MHz [J]. *Science of Food and Agriculture*. 1963, 14: 592-604.
- [11] MUDGETT R E, MUDGETT D R. Dielectric properties of frozen meats [J]. *Microwave Power*, 1979,14(3):209-216.
- [12] VAN DYKE D, WANG D I. Dielectric loss factor of reconstituted ground beef [J]. *Food Technology*, 1969,23:944-946.
- [13] MAO W J, Noboru S. Dielectric properties of surimi at 915 MHz and 2 450 MHz as affected by temperature[J]. *Salt and Starch Fishery Sci*,2003, 69:1042-1047.
- [14] 何天宝,程裕东. 温度和频率对鱼糜介电特性的影响[J]. *水产学报*,2005,29(2):252-257.
- [15] 徐树来(译). 食品微波加工技术[M]. 北京:中国轻工业出版社,2008.
- [16] 李里特. 食品物性学[M]. 北京:中国农业出版社,1998.
- [17] 沈月新,陈舜胜(编). 水产食品学[M]. 北京:中国轻工业出版社,2001,5:108-127.
- [18] 王锡昌. 鱼糜制品加工技术[M]. 北京:中国轻工业出版社,1997:10.
- [19] Rajnish K, Calay M. Predictive equations for the dielectric properties of foods [J]. *Food Science and Technology*,1995,29:699-713.
- [20] Stogryn A. Equations for calculating the dielectric constant of saline water [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech MTT*,1971,19:733-736.
- [21] OHLSSON T, BENGTSSON N E. Dielectric food data for microwave sterilization [J]. *Microwave Power*,1975,10:93-108.
- [22] Datta A K. *Handbook of microwave technology for food application*[M]. New York: CRC,2001.
- [23] JASIM A. Dielectric properties of soybean protein isolate dispersions as a function of concentration, temperature and pH [J]. *Lwt-food Science and Technology*,2008:71-81.
- [24] Rao M A, Rizvi Syed S, Datta A K. *Engineering properties of foods*[M]. Third Edition (Food Science and Technology). New York: CRC,2005.
- [25] LYNG J G, Scully M, McKenna B M. The influence of compositional changes in beefburgers on their

- temperatures during microwave heating and their thermal and dielectric properties [J]. Journal of Muscle Food, 2002, 13: 123 – 142.
- [26] LYNG J G, ZHNAG L, Brunton N P. A survey of the dielectric properties of meats and ingredients used in meat product manufacture [J]. Meat Science, 2005, 69: 589 – 602.
- [27] ZHNAG L, LYNG J G, Brunton N P. The effect of fat, water and salt on the thermal and dielectric properties of meat batter and its temperature following microwave or radio frequency heating [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80: 142 – 151
- [28] Cheng Y D, Sakai N, Hanzawa T. Effects of dielectric properties on temperature distributions in food model during microwave heating [J]. Food Sci Technol, 1997, 3: 324 – 328.

Dielectric properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi-soybean compound at 915 MHz and 2 450 MHz as affected by temperature and soy protein isolate

YANG Song¹, LIU Shi-xiong², CHENG Yu-dong^{1*}

(1. College of Food Science & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Department of Food Science and Technology Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo 108-8477, Japan)

Abstract: The dielectric constant and loss factor of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi paste and surimi-soybean compound added by different proportions of soy protein isolate emulsion were measured by the open-ended coaxial probe method at 915 MHz and 2 450 MHz from 10 °C to 80 °C. The results suggested that dielectric constant of silver carp surimi paste and surimi-soybean compound decreased with increasing temperature, however, loss factor increased. The dielectric constant and loss factor of silver carp surimi paste and surimi-soybean compound decreased with increasing frequency. With the addition of soy protein isolate emulsion ranging from 6.5% to 28%, the dielectric constant and loss factor increased. Penetration depth of silver carp surimi paste and surimi-soybean compound decreased both with increasing temperature, and with the soy protein isolates emulsion addition. Frequency, temperature, and soy protein isolate emulsion had a significant effect on the dielectric properties and penetration depth of silver carp surimi paste. The application of SPSS software to regression analysis and prediction of dielectric constant, loss factor and penetration depth was effective.

Key words: silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi; soy protein isolate; dielectric properties; temperature; frequency; penetration depth

Corresponding author: CHENG Yu-dong. E-mail: ydcheng@shou.edu.cn