

文章编号: 1674 - 5566(2016)03 - 0471 - 09

DOI:10.12024/jsou.20150501463

## 虾肉糜及其复合素材的介电特性和热物性研究

王冰冰, 杨林莘, 程裕东, 金银哲

(上海海洋大学 食品学院, 上海 201306)

**摘要:** 以凡纳滨对虾肉糜为对象, 测定不同大豆分离蛋白乳化物含量的虾肉糜在 10 ~ 80 °C 范围内的介电特性和热物性。结果表明, 虾肉糜及其复合素材的介电常数随着温度的升高而减小, 介电损失则随着温度的升高而增加, 穿透深度随着温度升高而显著降低。一定温度和频率下, 大豆分离蛋白乳化物含量的增加会降低介电常数, 而对介电损失和穿透深度无显著影响。密度随温度的升高而减小, 比热容、热导率和热扩散系数随温度的升高而增大; 密度和比热容随着大豆蛋白乳化物浓度的增加而减小, 而对热导率和热扩散系数无显著影响。对所测数据进行拟合, 得到预测 10 ~ 80 °C 介电特性和热物性的拟合方程。

**关键词:** 虾肉糜; 大豆分离蛋白; 介电特性; 热物性

**中图分类号:** TS 254.1      **文献标志码:** A

凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 又称南美白对虾, 占我国对虾养殖产量 70% 以上, 但凡纳滨对虾主要还是以鲜销为主<sup>[1]</sup>, 即使加工也只处于初级阶段, 深加工研究相对较少。虾肉糜制品以味道鲜美、口感好而深受国内外市场青睐。在虾肉糜中加入大豆分离蛋白和油脂, 可以显著提高制品的弹性、色泽、风味及口感<sup>[2]</sup>。

凝胶强度是决定虾肉糜制品质量优劣的关键因素, 其中加热方式与加热条件对制品的凝胶形成有重要的影响<sup>[3]</sup>。微波作为一种新型的加热方式, 在加热、干燥、解冻、杀菌、烹饪等领域得到了充分的利用<sup>[4-5]</sup>。曹燕等<sup>[6]</sup>研究了微波加热应用于鱼糜类制品凝胶化过程的可行性。但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。食品的几何形状、热物性、介电特性、温度和频率等因素都会影响微波加热的温度分布, 其中介电特性和热物性是最关键的因素<sup>[7]</sup>。而介电特性包括介电常数  $\epsilon'$ 、介电损失  $\epsilon''$ 。介电常数表征电磁能的能力, 介电损失反映电磁能转化为热能的能力。热物性包括密度、比热、热导率和热扩散系数。

许多学者对水产品 and 肉制品的介电特性和热物性做了大量研究。MAO 等<sup>[8]</sup>、何天宝等<sup>[9]</sup>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。ZHANG 等<sup>[10]</sup>研究了脂肪、水分和盐分对猪肉介电特性和热物性的影响。LYNG 等<sup>[11]</sup>对不同组份肉制品的介电特性进行了测定。ZHENG 等<sup>[12]</sup>对对虾及腌渍虾在 7 ~ 90 °C 内的介电特性和 10 ~ 70 °C 范围内热导率进行了研究。HU 等<sup>[13]</sup>测定了 10 ~ 50 °C 下生蚝的介电特性和热物性。然而, 在虾肉糜中添加植物蛋白、脂肪等辅料后的介电特性和热物性暂未见报道。

本文的目的是研究虾肉糜及其复合素材加热凝胶化过程中的介电特性和热物性随温度的变化规律, 并建立介电特性和热物性与温度的拟合方程, 为从理论上建立数学模型预测虾肉糜微波加热时的温度分布提供基础。

### 1 材料与方法

#### 1.1 实验材料与仪器

主要材料包括冷冻凡纳滨对虾虾仁(上海珍

收稿日期: 2015-05-28      修回日期: 2015-08-29

基金项目: 上海市科委部分地方院校能力建设项目(12290502200); 上海高校知识服务平台-上海海洋大学水产动物遗传育种中心项目(ZF1206)

作者简介: 王冰冰(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品热加工。E-mail: bb\_wang@foxmail.com

通信作者: 金银哲, E-mail: yzjin@shou.edu.cn

鱼实业有限公司)、大豆分离蛋白(谷神生物科技集团有限公司)、金龙鱼菜籽油(上海嘉里食品工业有限公司)和氯化钠(AR,上海化学试剂有限公司)。凡纳滨对虾与大豆分离蛋白的成分组成见表1。

表1 凡纳滨对虾与大豆分离蛋白的化学成分

Tab.1 The composition of experimental materials

项目 items	水分/% moisture	蛋白质/% protein	脂肪/% fat	灰分/% ash
凡纳滨对虾 <i>Litopenaeus vannamei</i>	77.60	19.24	1.26	1.90
大豆分离蛋白 soy protein isolate	6.50	91.20	0.46	1.84

主要仪器包括 BS224S 分析天平(德国赛多利斯有限公司)、DHG-9245 数显电热鼓风干燥箱(上海慧泰仪器制造有限公司)、DSC823e 差式扫描仪(梅特勒托利多国际股份有限公司)、THERMIC

MODEL 2100A 热电偶测温仪(ETO DENKI 公司)、HSG-LC-2 恒温水浴锅(上海华琦科学仪器有限公司)、搅拌机(WARING Commercial 公司)、PNA-L 网络分析仪(美国安捷伦科技有限公司)和 SH-241 恒温恒湿箱(日本 ESPEC 公司)。

## 1.2 虾肉糜素材的制备

虾肉糜及其复合素材制备:将冷冻虾仁从冷库中取出,置于流水下解冻至半解冻状态。补加冰水,调整水分至 80%。于搅拌机中斩拌 3 min 后加入 NaCl,继续斩拌 5 min 至虾肉糜呈乳白色粘稠状。经真空脱气后置于 4 °C 冰箱中待用。植物油与水混合斩拌 2 min,按所定质量比(大豆分离蛋白:植物油:水 = 1:1:3)添加大豆分离蛋白再斩拌 3 min 形成乳化物,按比例(表 2)与盐搗虾肉糜混合斩拌 3 min,真空脱气后置于 4 °C 冰箱中待用。以上所有过程操作温度控制在 10 °C 以内。虾肉糜及其复合素材样品组分见表 2。

表2 虾肉糜及其复合素材样品组分

Tab.2 Component of shrimp surimi and surimi-soybean compound

成分 composition	g		
	A(单一虾糜) simplex surimi	B(5% SPI 乳化物) 5% SPI composite surimi	C(10% SPI 乳化物) 10% SPI composite surimi
虾肉 shrimp	852	765	678
水 water	138	175	212
NaCl	10	10	10
大豆分离蛋白乳化物 soy protein isolate(SPI) composite	0	50	100
总量 total	1 000	1 000	1 000

注: SPI 乳化物中, SPI: 植物油: 水质量比为 1:1:3。

Note: Among the SPI composite, the mass ratio between SPI, vegetable oil and water is 1:1:3.

## 1.3 介电特性的测定

用同轴探针法测定介电常数和介电损失率。该系统由测试软件(Model 85070E)、探针、网络分析仪、恒温恒湿箱和热电偶测温仪构成。将制备样品放入恒温恒湿箱,当样品中心温度达到指定温度后,迅速取出样品,置于探针下进行测量。每种样品平行测定 3 次。测定频率范围为 300 ~ 3 000 MHz,频率间隔 5 MHz,温度范围 10 ~ 80 °C,温度间隔 10 °C。仪器在每次测定前至少提前 2 h 开启以获得更稳定的实验结果,采用空气-短路-去离子水的校准程序对仪器校准。

## 1.4 密度的测定

密度( $\rho$ , kg/m<sup>3</sup>)测量方法参照文献[14],温度范围是 10 ~ 80 °C 之间,间隔是 10 °C。样品挤压灌入一端密封的不锈钢圆筒(D = 4.4 cm, H =

5.6 cm, M = 62.83 g)中;置于恒温水浴中,用热电偶监测中心温度,中心温度达到恒温水浴温度,开始修减不锈钢圆筒外样品,以保证体积不变,称重,重复直至样品恒重,算得样品密度值;每种样品均平行测量 3 次。

## 1.5 比热的测定

比热容[ $C_p$ , kJ/(kg · °C)]的测量是用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)进行测定。测定原理<sup>[15]</sup>:用 DSC 测定比热时,试样是处在线性程序升温控制下,流入试样的热流速率是连续测定的,它等于样品吸收的热量;而比热和样品吸收的热量之间存在下列关系:

$$C_p = \frac{dH}{dt} \times \frac{1}{\beta m} \quad (1)$$

式中: $m$ 为样品质量(kg); $\beta$ 为升温速率( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ), $\frac{dH}{dt}$ 为试样 DSC 曲线对空白基线的纵坐标位移量。本研究采用蓝宝石法测量。蓝宝石法是在相同的条件下将参比物质蓝宝石作为样品进行测量,然后通过计算可由已知蓝宝石的比热容求得未知样品的比热容。测量的温度范围为  $10 \sim 80^{\circ}\text{C}$ ,升温速率为  $10^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,氮气流量为  $20 \text{ mL}/\text{min}$ ,每种样品  $C_p$  均平行测量 3 次。

### 1.6 热导率的测定

热导率 [ $K, \text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ] 的测量方法是基于线热源瞬态模型的热探针法。具体方法<sup>[16]</sup>:采用标准样品纯水(电阻率  $18.4 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ )对热探针进行标定。选择电路输入电压为  $3 \text{ V}$  左右,对探针加热前调节精密电阻箱的阻值  $R_s$ ,使输出电压信号  $\Delta V_i$  接近  $0$ (一般小于  $10^{-5}$ ),然后闭合电路,对探针进行加热,以  $0.5$  秒每点的速度采集输出电位差与加热时间的变化量,对采集的输出电位差  $\Delta V$  与时间的对数( $\ln t$ )用 Excel 图表向导进行线性时段拟合处理,按相关度最大的原则,计算出  $d(\Delta V)/d(\ln t)$ 。两次测量时间间隔为  $10 \text{ min}$ ,以便热针与被测样品恢复到初始平衡态(以下测试同样),每种样品  $K$  均平行测量 6 次,然后求其平均值。测量的温度范围  $10 \sim 80^{\circ}\text{C}$ ,间隔温度  $10^{\circ}\text{C}$ 。

$$K = \frac{E^3}{R_s^2 C} \frac{d(\Delta V)}{d(\ln t)} \quad (2)$$

$$C = \alpha_0 R_0 / (64 \pi L) \quad (3)$$

式中: $C$ 为仪器常数; $R_0$ 、 $\alpha_0$ 分别为  $0^{\circ}\text{C}$ 时铜的电阻值( $\Omega$ )和铜电阻温度系数; $L$ 为铜丝单位长度( $\text{m}$ ); $E$ 为电路输出电压( $\text{V}$ ); $R_s$ 为电阻箱阻值( $\Omega$ ); $t$ 为时间( $\text{s}$ )。

### 1.7 热扩散系数

热扩散系数( $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$ )由式(4)计算可得。

$$\alpha = K / \rho C_p \quad (4)$$

式中: $K$ 为热导率 [ $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ]; $\rho$ 为密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ); $C_p$ 为比热容 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ]。

### 1.8 数据处理

本研究所有数据采用 OriginPro 8.6 (OriginLab, Massachusetts, USA) 和 Excel 2007 (Microsoft, Washington, USA) 进行处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 介电特性

#### 2.1.1 介电常数

由图 1 可知,在  $915 \text{ MHz}$  和  $2450 \text{ MHz}$  频率下,不同 SPI 乳化剂浓度虾肉糜的介电常数随着温度的升高逐渐降低。同一温度下, $915 \text{ MHz}$  频率下的介电常数显著高于  $2450 \text{ MHz}$  频率下的介电常数。频率一定时,介电常数随温度升高而降低,可能是由于温度升高,分子间振动加剧而打乱了水分子间的有序排列,导致其储存电磁能的能力下降<sup>[17]</sup>。同一温度下,介电常数随频率升高而降低,可能是由于虾肉糜的主要组分水分对介电常数的影响最大,而水的介电常数随频率的升高而降低<sup>[18]</sup>。

在同一温度和频率下,随着 SPI 乳化剂浓度的增加,虾肉糜及其复合素材的介电常数减小。ZHANG 等<sup>[10]</sup>和 BENGTSOOND 等<sup>[18]</sup>也发现脂肪含量增加会导致介电常数降低。造成这一现象的原因可能与 SPI 乳化剂中脂肪含量的增加有关。在食品中,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<sup>[10]</sup>。

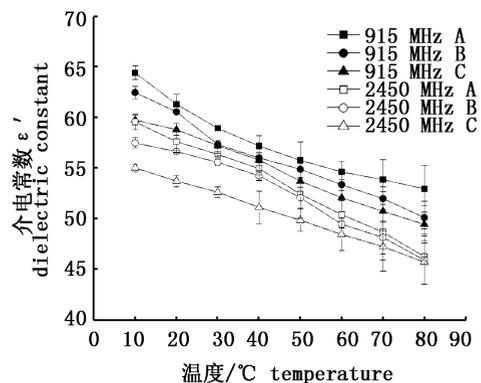


图 1 温度对虾肉糜及其复合素材介电常数的影响

Fig.1 Effect of temperature on dielectric constant of shrimp surimi and surimi-soybean compound

A: 单一虾肉糜; B: 含 5% SPI 乳化剂虾肉糜复合素材; C: 含 10% SPI 乳化剂虾肉糜复合素材。图 2-7 同此。

A: simplex surimi; B: 5% SPI composite surimi; C: 10% SPI composite surimi. The same in fig. 2-7.

### 2.1.2 介电损失

在 915 MHz 和 2 450 MHz 频率下, 虾肉糜及其复合素材介电损失随着温度的升高而升高。同一温度下, 915 MHz 频率下的介电损失高于 2 450 MHz 频率下的介电损失。微波频率范围内, 造成介电损失的机理分为偶极子旋转和离子传导。随着温度的升高, 含盐食品的离子传导随着温度升高而加剧, 导致介电损耗随温度增加而上升<sup>[4]</sup>(图 2)。

虾肉糜及其复合素材的介电损失随着 SPI 乳化物含量增加无明显变化。很可能与 SPI 乳化物中的蛋白质和脂肪有关。OHLSSON 等<sup>[19]</sup>在 900 MHz 频率下, 在乳状肉中添加 0~15% 的脂肪, 介电损失明显减小; LYNG 等<sup>[20]</sup>在 2 430 MHz 的频率下, 在牛肉汉堡包中添加 10% 的脂肪, 会降低介电损失。而 AHMED 等<sup>[21]</sup>报道了 SPI 含量在 0~15g/100g 水之间时, 介电常数和介电损失率随 SPI 含量的增大而增大。蛋白质变性对样品的介电损失也会产生一定影响<sup>[22]</sup>。本研究中, 虾肉糜及其复合素材水分含量达到 80%, 是影响介电损失的重要因素, 而蛋白质及脂肪含量变化较小(小于 3%), 且对介电损失的影响相对水分较小, 所以造成不同 SPI 乳化物含量虾肉糜的介电损失无明显变化。

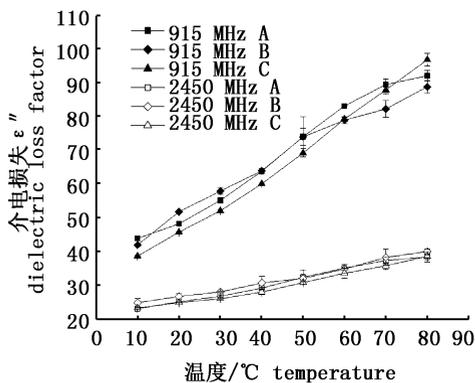


图 2 温度对虾肉糜及其复合素材介电损失的影响  
Fig. 2 Effect of temperature on dielectric loss factor of shrimp surimi and surimi-soybean compound

### 2.1.3 穿透深度

穿透深度( $d_p$ )是指微波在穿过程中其能量减少为原来的  $1/e$  ( $e = 2.7183$ ) 时距离表面的深度, 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, 可由介电常数和介电损

失计算可得:

$$d_p = \frac{c}{2\sqrt{2}\pi f} \left[ \epsilon' \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]^{-1/2} \quad (5)$$

式中:  $c$  为光速 ( $2.998 \times 10^8$  m/s);  $f$  为频率 (Hz)。

915 MHz 频率下虾肉糜及其复合素材的穿透深度在 5~11 mm 范围内, 高于 2 450 MHz 频率下的 3.5~6.5 mm。一定频率下, 虾肉糜及其复合素材的穿透深度随温度的升高而减小, 原因是随着温度升高, 介电损耗增加, 导致穿透深度显著降低。同一温度和频率下, 不同 SPI 乳化物含量的虾肉糜穿透深度没有明显区别(图 3)。

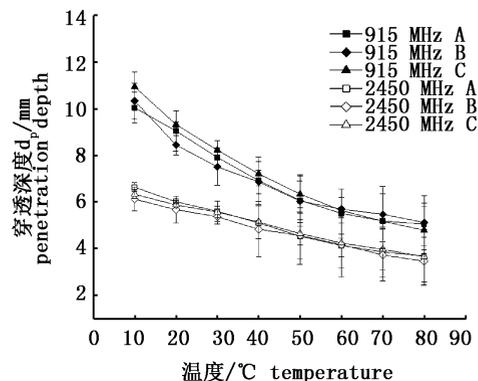


图 3 温度对虾肉糜及其复合素材穿透深度的影响  
Fig. 3 Effect of temperature on penetration depth of shrimp surimi and surimi-soybean compound

### 2.2 密度

单一虾肉糜和复合素材的密度随着温度的升高而减小。主要是因为随着温度升高, 食品中的组分(水分、蛋白质等)减少而导致<sup>[23]</sup>。在同一温度下, 单一虾肉糜与复合素材的密度存在差异, 密度随大豆分离蛋白乳化物浓度的增加而减少。原因是在水分含量不变的情况下, 随着 SPI 乳化物含量的增加, 蛋白质含量相对减少, 脂肪含量略有增加, 而脂肪的密度显著低于蛋白质的密度(图 4)。

CHOI & OKOS(简称 CO)<sup>[24]</sup>报道了  $-40 \sim 150$  °C 温度范围内食品主要成分(水分、蛋白质、脂肪等)的密度与温度的关系式, 并提出各种食品材料密度的预测模型:

$$\rho = \frac{1}{\sum X_i / \rho_i} \quad (6)$$

式中:  $X_i$  为食品中各种组分的质量分数(%);  $\rho_i$  为食品中各种组分的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

将虾肉糜及其复合素材的 CO 模型预测值与

实验值比较,两者呈现较好的一致性。说明 CO 模型可以较好地预测本研究中虾肉糜及其复合素材的密度(图 4)。

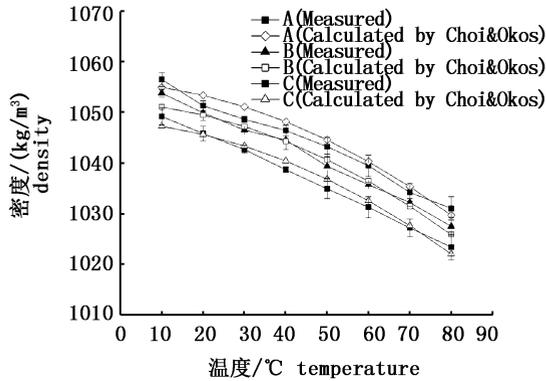


图 4 温度对虾肉糜及其复合素材密度的影响  
Fig. 4 Effect of temperature on density of shrimp surimi and surimi-soybean compound

### 2.3 比热容

在 10 ~ 80 °C 范围内,虾肉糜及其复合素材比热在 3.6 ~ 4.2 [kJ/(kg · °C)] 之间,并随温度的升高而上升。在同一温度下,单一虾肉糜和复合素材的比热容存在差异,比热容随 SPI 乳化物浓度的增加而减少,单一虾肉糜的比热容最大。可能的原因是在水分含量不变的情况下,随着 SPI 乳化物含量的增加,蛋白质含量降低,脂质含量增加。而蛋白质的比热容显著高于脂质的比热容。ZHANG 等<sup>[10]</sup> 也认为食品中蛋白质和脂肪含量不同会导致比热不同(图 5)。

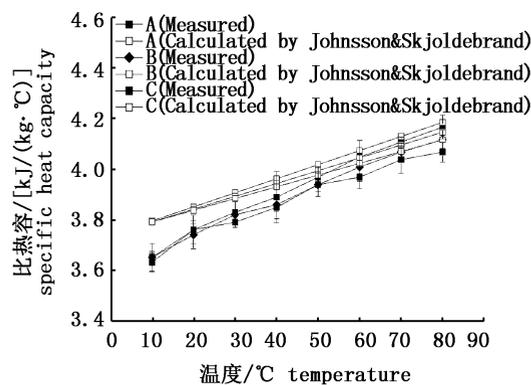


图 5 温度对虾肉糜及其复合素材比热容的影响  
Fig. 5 Effect of temperature on specific heat capacity of shrimp surimi and surimi-soybean compound

JOHNSON & SKJOLDEBRAND(简称 JS)<sup>[14]</sup> 认为与食品比热直接相关的是食品中的水分和固形物含量,食品的比热与水分含量和固形物含

量存在着下式关系:

$$C_p = X_w C_{pw} + (1 - X_w) C_{ps} \quad (7)$$

$$C_{ps} = aT + b \quad (8)$$

式中: $X_w$  为水分含量(%); $C_{pw}$  为水比热[4.2 kJ/(kg · °C)]; $C_{ps}$  为固形物比热[kJ/(kg · °C)]; $a, b$  均为常数。

运用 JS 模型预测值与实验值进行比较,可以发现 JS 模型在较高温度范围内(50 ~ 80 °C)与实验值较为接近,而在较低温度时与实验值有一定的偏差(图 5)。

### 2.4 热导率

10 ~ 80 °C 范围内,虾肉糜及其复合素材的热导率在 0.50 ~ 0.62 W/(m · °C) 之间。随着温度的升高,热导率增加。同一温度下,单一虾肉糜与复合素材的热导率基本没有差异。食品组分中,水的热导率要远远高于蛋白质、脂质、灰分等其他组分,故水分含量对食品的热导率影响最大<sup>[23]</sup>。本实验中,虾肉糜及其复合素材的水分含量高达 80%,故其与水的热导率随温度变化趋势类似。这一结论与 HU 等<sup>[13]</sup> 对生蚝(水分含量 86%)热导率的研究结果一致。MITTAL 等<sup>[25]</sup> 曾报道香肠中蛋白质和脂肪的添加量由 1% 增至 3% 时,其热导率降低,不过降低幅度小于 5%。ZHANG 等<sup>[10]</sup> 发现猪肉中脂肪的添加量由 12.4% 增加至 29.7% 时,热导率由 0.38 W/(m · °C) 降低至 0.34 W/(m · °C)。本研究中虾肉糜及其复合素材的蛋白质和脂肪含量均没有明显增加(低于 1%),故单一虾肉糜与复合素材的热导率未见明显变化(图 6)。

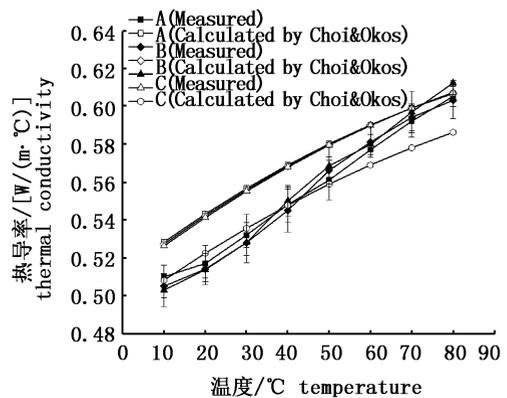


图 6 温度对虾肉糜及其复合素材热导率的影响  
Fig. 6 Effect of temperature on thermal conductivity of shrimp surimi and surimi-soybean compound

CO<sup>[24]</sup> 报道了 10 ~ 90 °C 范围内食品组分

(水、蛋白质、脂肪等)热导率与温度的经验公式:

$$K = \sum K_i V_i \quad (9)$$

式中: $K_i$  为各组分热导率 [ $W/(m \cdot ^\circ C)$ ];  $V_i$  为各组分体积分数 (%)。

IBARZ 等<sup>[24]</sup>通过分析各种食品的热导率,提出了 0 ~ 180  $^\circ C$  范围内食品热导率的预测模型:

$$K = (326.8 + 1.0412t - 0.00337t^2)(0.44 + 0.54X_w)1.73 \times 10^{-3} \quad (10)$$

式中: $t$  为温度 ( $^\circ C$ );  $X_w$  为水分质量分数 (%)。

由图 6 可知,CO 模型预测单一虾肉糜及其复合素材的热导率在 10 ~ 80  $^\circ C$  范围内无明显差异,与本实验结果一致。不过在温度较低时(10 ~ 50  $^\circ C$ ),CO 模型与实测值偏差较大,而 RIEDEL 模型在温度较低时(10 ~ 50  $^\circ C$ )与实测值接近。

### 2.5 热扩散系数

通过实验测得热导率、比热容和密度,计算可得热扩散系数。如图 7 所示,10 ~ 80  $^\circ C$  范围内,虾肉糜及其复合素材的热扩散系数在  $1.30 \times 10^{-7} \sim 1.46 \times 10^{-7} m^2/s$  之间,并随着温度的升高呈上升趋势。同一温度下,单一虾肉糜及其复合素材的热扩散系数存在一定差异,可能与样品的组分有关。BELIBAGLI 等<sup>[26]</sup>以银鲑和马鲛鱼糜为研究对象,发现鱼糜组分不同影响热扩散系数,在鱼糜中添加淀粉也能够改变热扩散系数。

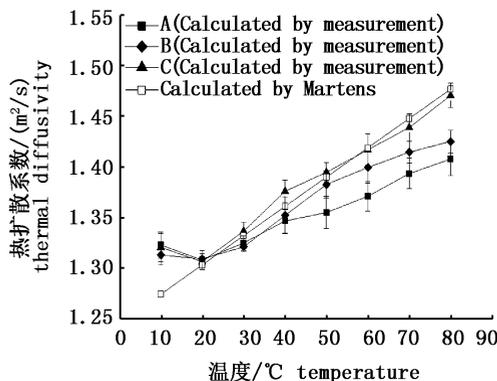


图 7 温度对虾肉糜及其复合素材热扩散系数的影响

Fig.7 Effect of temperature on thermal diffusivity of shrimp surimi and surimi-soybean compound

MARTENS<sup>[27]</sup>通过回归分析 246 种已报道的食品热扩散率,提出了食品热扩散系数的模型公

式:

$$\alpha = [0.0574W + 0.000288(t + 273)] \times 10^{-6} \quad (11)$$

式中: $W$  表示含水率 (%);  $t$  表示温度 ( $^\circ C$ )。

运用 MARTENS 模型与经实验所得热扩散系数数值进行比较,MARTENS 模型与实验计算值接近,但不能预测不同 SPI 乳化剂浓度虾肉糜的热扩散系数,原因是 MARTENS 模型是基于水分含量而得出不同温度条件下的热扩散系数,而本研究中 3 种样品的水分含量相同(图 7)。

### 2.6 回归分析

对所测数据进行回归分析,可以得到虾肉糜及其复合素材介电特性和热物性与温度的拟合方程。方程拟合度均在 0.98 以上,说明拟合方程可对虾肉糜及其复合素材在 10 ~ 80  $^\circ C$  范围内的介电特性和热物性进行预测,为下一步建立模型预测虾肉糜及其复合素材内部温度分布提供基础(表 3)。

## 3 结论

本研究主要考察了温度和大豆蛋白乳化剂浓度对虾肉糜介电特性和热物性的影响。水分含量对虾肉糜及其复合素材的介电特性和热物性影响较大。温度一定时,915 MHz 下的介电常数、介电损失和穿透深度要显著高于 2 450 MHz 下的介电特性值。在 10 ~ 80  $^\circ C$  温度范围内,随着温度的升高,介电常数减小,介电损失增加,穿透深度则有显著降低。一定温度和频率下,SPI 乳化剂含量从 0% 增加至 10% 时,介电常数降低,介电损失和穿透深度则无显著变化。密度与温度呈负相关,比热、热导率以及热扩散系数均与温度呈正相关;SPI 乳化剂对虾肉糜的热物性也有一定影响,密度和比热容随着 SPI 乳化剂浓度的增加而减小,而对热导率和热扩散系数无显著影响。用不同模型对虾肉糜及其复合素材的热物性进行了计算,与实验值大致吻合。同时,采用回归分析法得到了介电特性和热物性随温度变化的回归方程,拟合度均在 0.98 以上,回归方程可以很好地在 10 ~ 80  $^\circ C$  范围内对介电特性和热物性进行预测。

表3 虾肉糜及其复合素材介电特性和热物性拟合方程

Tab.3 Predictive equations for the dielectric and thermal properties of the surimi paste and surimi-soybean compound

样品 sample	频率 frequency	预测方程 regression equation	$R^2$
介电常数 dielectric constant			
A	915MHz	$-2 \times 10^{-5}t^3 + 0.0048t^2 - 0.4348t + 68.3054$	0.999 8
	2 450MHz	$2 \times 10^{-6}t^3 - 9 \times 10^{-4}t^2 - 0.1234t + 60.7525$	0.995 1
B	915MHz	$-3 \times 10^{-5}t^3 + 0.005t^2 - 0.4049t + 66.2687$	0.990 1
	2 450MHz	$-2 \times 10^{-5}t^3 + 2 \times 10^{-6}t^2 - 0.1009t + 59.6541$	0.993 6
C	915MHz	$3 \times 10^{-5}t^3 - 0.0037t^2 - 0.0088t + 60.2082$	0.998 7
	2 450MHz	$4 \times 10^{-7}t^3 - 2 \times 10^{-4}t^2 - 0.1194t + 56.2226$	0.999 0
介电损失 dielectric loss factor			
A	915MHz	$2 \times 10^{-4}t^3 + 0.0317t^2 - 0.4078t + 45.1492$	0.999 7
	2 450MHz	$-5 \times 10^{-5}t^3 + 0.0074t^2 - 0.0442t + 23.0162$	0.996 7
B	915MHz	$-4 \times 10^{-6}t^3 - 0.0025t^2 + 0.9065t + 33.4376$	0.990 3
	2 450MHz	$-8 \times 10^{-6}t^3 + 0.002t^2 + 0.094t + 23.7967$	0.991 1
C	915MHz	$-5 \times 10^{-5}t^3 + 0.0097t^2 + 0.3425t + 34.5721$	0.999 2
	2 450MHz	$-2 \times 10^{-5}t^3 + 0.0041t^2 + 0.0031t + 22.9769$	0.996 8
密度 density			
A	-	$1059.63 - 0.3509t$	0.987 0
B	-	$1057.81 - 0.3695t$	0.993 4
C	-	$1053.35 - 0.3717t$	0.998 9
比热容 specific heat capacity			
A	-	$-2 \times 10^{-5}t^2 + 0.0091t + 3.5709$	0.996 5
B	-	$-2 \times 10^{-5}t^2 + 0.0082t + 3.5759$	0.995 6
C	-	$-3 \times 10^{-5}t^2 + 0.0089t + 3.5601$	0.980 8
导热系数 thermal conductivity			
A	-	$3 \times 10^{-6}t^2 + 0.0012t + 0.4954$	0.996 0
B	-	$-1 \times 10^{-6}t^2 + 0.0016t + 0.4851$	0.987 2
C	-	$-1 \times 10^{-8}t^2 + 0.0016t + 0.4839$	0.993 3

## 参考文献:

- [1] 崔和. 我国对虾产业市场分析、发展现状及前景[J]. 中国水产, 2011, (6): 68-71.  
CUI H. Market analysis, development status and prospects of shrimp industry[J]. China Fisheries, 2011, (6): 68-71.
- [2] 夏松养, 奚印慈, 谢超. 水产食品加工学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
XIA S Y, XI Y C, XIE C. Aquatic Food Processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [3] 王锡昌, 汪之和. 鱼糜制品加工技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1997.  
WANG X C, WANG Z H. Surimi Processing Technology[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1997.
- [4] 张永欣. 微波食品加工原理与应用[M]. 台北: 财团法人台湾冷冻食品发展协会, 1993.  
ZHANG Y X. Microwave Food Processing Principles and Applications[M]. Taipei: Consortium Taiwan Frozen Food Development Association, 1993.
- [5] 陈中, 彭志英. 微波加热技术与食品工业[J]. 食品与发酵工业, 1997, 23(6): 53-56.  
CHEN Z, PENG Z Y. Microwave heating technology and food industry[J]. Food and Fermentation Industries, 1997, 23(6): 53-56.
- [6] 曹燕, 程裕东, 王锡昌, 等. 加热方式对白鲢鱼糜类素材凝胶形成能力的影响(英文)[J]. 上海水产大学学报, 2003, 12(s1): 78-85.  
CAO Y, CHENG Y D, WANG X C, 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.
- [7] FARAG K W, LYNG J G, MORGAN D J, et al. Dielectric and thermophysical properties of different beef meat blends over a temperature range of -18 to +10°C [J]. Meat Science, 2008, 79(4): 740-747.
- [8] MAO W J, WATANABE M, SAKAI N. Dielectric properties

- of surimi at 915 MHz and 2450 MHz as affected by temperature, salt and starch[J]. *Fisheries Science*, 2003, 69(5): 1042–1047.
- [9] 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.  
HE T B, CHENG Y D. Effect of temperature and frequency on dielectric properties of surimi[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2005, 29(2): 252–257.
- [10] ZHANG 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(1): 142–151.
- [11] LYNG J G, ZHANG L, BRUNTON N P. A survey of the dielectric properties of meats and ingredients used in meat product manufacture [J]. *Meat Science*, 2005, 69(4): 589–602.
- [12] ZHENG M, HUANG Y W, NELSON S O, et al. Dielectric properties and thermal conductivity of marinated shrimp and channel catfish[J]. *Journal of Food Science*, 1998, 63(4): 668–672.
- [13] HU X P, MALLIKARJUNAN P. Thermal and dielectric properties of shucked oysters[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2005, 38(5): 489–494.
- [14] ABUDAGGA Y, KOLBE E. Thermophysical properties of surimi paste at cooking temperature [J]. *Journal of Food Engineering*, 1997, 32(3): 325–337.
- [15] MCHUGH J, FIDEU P, HERRMANN A, et al. Determination and review of specific heat capacity measurements during isothermal cure of an epoxy using TM-DSC and standard DSC techniques[J]. *Polymer Testing*, 2010, 29(6): 759–765.
- [16] 张敏. 采后果蔬热导率测试系统研究及其内部传热温度场模拟[D]. 郑州: 河南农业大学, 2005.  
ZHANG M. Study of thermal conductivity measurement system and temperature field simulation of postharvest fruits and vegetables [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2005.
- [17] WANG Y, TANG J M, RASCO B, et al. Dielectric properties of salmon fillets as a function of temperature and composition [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 87(2): 236–246.
- [18] BENGTTSSON N E, RISMAN P O. Dielectric properties of foods at 3 GHz as determined by a cavity perturbation technique [J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 1971, 6(2): 107–124.
- [19] OHLSSON T, BENGTTSSON N E. Dielectric food data for microwave sterilization processing [J]. *The Journal of Microwave Power*, 1975, 10(1): 93–108.
- [20] LYNG J G, SCULLY M, MCKENNA B M, et al. The influence of compositional changes in beefburgers on their temperatures and their thermal and dielectric properties during microwave heating [J]. *Journal of Muscle Foods*, 2002, 13(2): 123–142.
- [21] AHMED J, RAMASWAMY H S, RAGHAVAN G S V. Dielectric properties of soybean protein isolate dispersions as a function of concentration, temperature and pH[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2008, 41(1): 71–81.
- [22] DATTA A K. *Handbook of Microwave Technology for Food Application*[M]. New York: CRC Press, 2001.
- [23] RAO M A, RIZVI S S H, DATTA A K, et al. *Engineering Properties of Foods: Food Science and Technology*[M]. 3rd ed. New York: CRC Press, 2005.
- [24] IBARZ A, BARBOSA-CANOVAS G V. *Unit Operations in Food Engineering: Food Preservation Technology*[M]. 2nd ed. New York: CRC Press, 2002.
- [25] MITTAL G S, WANG C Y, USBORNE W R. Thermal properties of emulsion type sausages during cooking [J]. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 1989, 22(4): 359–363.
- [26] BELIBAGLI K B, SPEERS R A, PAULSON A T. Thermophysical properties of silver hake and mackerel surimi at cooking temperatures[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 60(4): 439–448.
- [27] MARTENS T. *Mathematical model of heat processing in flat containers*[D]. Belgium: Catholic University of Louvain, 1980.

## Dielectric and thermal properties of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) surimi and surimi-soybean compound

WANG Bingbing, YANG Linxin, CHENG Yudong, JIN Yinzhe

(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Dielectric and thermal properties of shrimp (*Litopenaeus vannamei*) surimi and surimi-soybean compound were measured in the temperature range from 10 °C to 80 °C. The results suggested that dielectric constant and penetration depth decreased as temperature increased, while loss factor increased with increasing temperature. The addition of soybean protein isolate (SPI) compound depressed dielectric constant at a given temperature and frequency, but had no significant influence on loss factor and penetration depth. Density of shrimp surimi and surimi-soybean compound decreased with increasing temperature, and specific heat capacity, thermal conductivity and thermal diffusivity increased as temperature increased. The addition of soybean protein isolate emulsion also had an impact on the thermal properties. Density and specific heat capacity decreased with the increase of concentration of soy protein isolate emulsion. Established equations by comparing the model prediction and experimental data obtained can predict the conditions for a given temperature.

**Key words:** shrimp surimi; soybean protein isolate; dielectric properties; thermal properties