

鲢鱼肉冷冻过程中传热预测模型的建立与验证

刘庆^{1,2}, 熊善柏^{1,2,3}, 鲁长新¹, 胡杨^{1,2,3}, 刘茹^{1,2,3}

(1. 华中农业大学食品科技学院, 湖北武汉 430070) (2. 国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心(武汉), 湖北武汉 430070) (3. 水产高效健康生产湖南省协同创新中心, 湖南常德 415000)

摘要: 准确模拟冷冻过程、预测冻结时间对速冻设备的设计与控制以及保证产品质量均有重要意义。本文在鲢鱼肉热物性参数预测模型和焓模式数学模型的基础之上, 采用有限差分法对平板状鲢鱼肉建立物理模型, 分别预测了鲢鱼肉热中心及边界层的冷冻过程和冻结时间。实验验证表明, 厚度为 44 mm 的鲢鱼肉的热中心和边界层的模拟温度与实验温度的平均差方和分别为 1.85 和 1.30, 冻结时间的预测相对误差为 -1.64%。在此基础上, 对厚度分别为 24 mm 和 34 mm 的鲢鱼肉热中心的降温过程进行了模拟, 其热中心的模拟温度与实验温度的平均差方和分别为 1.73 和 1.58。说明将热物性参数预测模型和数值模拟相结合的方法, 建立的模型具有很高的拟合精度, 并能实现对不同厚度鲢鱼肉的冷冻过程进行模拟, 为淡水鱼冷冻加工、品质控制及设备开发提供了模拟方法。

关键词: 冷冻过程; 冻结时间; 数值模拟; 热物性; 鲢鱼肉

文章编号: 1673-9078(2017)3-110-115

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.3.018

Establishment of a Heat Transfer Model of Silver Carp Muscle during Freezing and Experimental Verification

LIU Qing^{1,2}, XIONG Shan-bai^{1,2,3}, LU Chang-xin¹, HU Yang^{1,2,3}, LIU Ru^{1,2,3}

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China) (2. National R&D Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing (Wuhan), Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China) (3. Collaborative Innovation Center for Efficient and Health Production of Fisheries in Hunan Province, Changde 415000, China)

Abstract: Accurate simulation of the freezing process and prediction of freezing time are important for the design and control of freezing devices and assurance of product quality. Based on the prediction model of thermophysical parameters and an enthalpy-based mathematical model for silver carp muscle, a finite difference method was adopted to establish a physical model for flat silver carp muscle. The freezing process and freezing time for the thermal center and boundary layer of the silver carp muscle were also predicted. The results showed that the mean sums of squared differences between the simulated value and experimental data of the thermal center and boundary layer of the silver carp muscle with a thickness of 44 mm were 1.85 and 1.30, respectively. The relative error of the predicted freezing time versus real-time was -1.64%. Based on these results, the cooling processes for the thermal center of silver carp muscle with thicknesses of 24 mm and 34 mm were simulated, and the corresponding mean sums of squared differences between the simulated value and experimental data of the thermal center were 1.73 and 1.58, respectively. In conclusion, the model established using a combination of the prediction model of thermophysical parameters and numerical simulation showed high simulation accuracy for the freezing process of silver carp muscle with different thicknesses, providing a new simulation method for the freezing, processing, and quality control of freshwater fish and equipment design.

Key words: freezing; freezing time; numerical simulation; thermal property; silver carp muscle

冷冻是使得水产品更加市场化的重要途径^[1], 我国加工的水产品中, 50%以上是冷冻产品。冷冻产品
收稿日期: 2016-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31471686); 现代农业产业技术体系专项基金项目 (GARS-46-23)

作者简介: 刘庆 (1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工及贮藏
通讯作者: 刘茹 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品加工及贮藏

的质量与产品的冻结速率密切相关, 食品冻结时, 通过最大冰晶生成带的时间越短, 生成的冰晶越小, 产品的质量越好^[2]。同时, 食品冻结时间也是影响速冻装置能耗的原因之一, 因此, 准确模拟冷冻过程、预测冻结时间对速冻设备的设计与控制以及保证产品质量均有重要意义。多年来国内外对食品冷冻过程的预测方法研究主要是基于传热模型下的分析计算法、无量纲变量法和数值模拟法。分析计算法通过引入各种

修正参数来简化实际问题,得到的预测结果往往与实际冷冻过程相差较大,而无量纲变量法常用于当理论分析非常复杂,涉及参数很多时,通过将公式整理为准则数的形式来简化模型,但是运算过程较繁琐,在实际应用中具有较大的局限性^[3]。随着计算机技术的提高,结合Matlab编程或商业软件CFD技术的数值模拟法在预测食品冷冻过程中的应用越来越多。数值模拟法是在对食品传热过程与机理研究分析的基础之上,建立数学模型,设定边界条件,进而利用计算机求解的方法^[1]。李杰^[4]和宋晓燕^[5]等人应用CFD软件,分别模拟了虾仁在鼓风冻结装置中的冷冻过程以及馒头在速冻机中的速冻过程,得到冻结时间的预测相对误差分别为3.8%和3.35%。误差来源主要是因为将热物性参数经验值代入模型来进行模拟,然而食品是多组分物质,其冷冻过程是一个复杂的相变传热过程,热物性参数随温度的变化而不断变化,直接代入经验值导致了模拟结果与实际冷冻过程之间的差异。Tocci等人^[6]采用三种不同方法计算碎牛肉的热物性参数,并分别用于几种不同的冻结时间预测方法中,结果发现出于不同的热物性参数引起的冻结时间预测误差为10%。可见,准确和可靠的热物性参数对提高模型拟合精度具有重要意义。因此,本文在焓模式数学模型建立能量方程的基础上,采用有限差分法对平板状鲢鱼肉建立物理模型,代入通过大量实验数据建立的、具有高拟合精度的鲢鱼肉的冰点和表观比热等参数预测模型^[7],从而对鲢鱼肉的导热问题进行数值求解,预测鲢鱼肉冷冻过程及冻结时间,并与实验值进行比较分析,为鲢鱼肉热物性参数在低温工程中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

鲢鱼,购自华中农业大学菜市场,大小在1.50 kg/条左右。鲜活鲢鱼去头、鳞和内脏,取背部肌肉,切成均匀平板状(鱼肉长×宽为50×30 mm²;厚度分别为24 mm, 34 mm和44 mm)。PC-2 WS型多通道温度记录仪,武汉三龙电器有限公司。FCD-195GS型冷冻柜,海尔特种冰柜有限公司。

1.2 降温数据采集

将鱼肉有序装入无盖绝热盒(导热率为0.035 W/m·°C,内长×内宽×内高为200×150×44 mm³)中,冻结温度场实验装置(用针头固定热电偶,热电偶位置为0, m/2,其中m是鱼肉厚度,热电偶位置指的是

温度探头与鱼肉表面的垂直距离)示意图如图1所示,待鱼肉表面初始温度均匀一致(控制鱼肉初温为11.50 °C)后,迅速放入内部温度为-18 °C左右的冷冻柜中(实验过程中冷冻柜温度从-17.3±1.41 °C降至-20.7±0.00 °C,温度曲线如图3所示)进行冻结试验,利用多通道温度记录仪采集其降温数据^[8],每60 s采集一次数据,当鱼肉中心温度降至-18 °C时停止记录,并保存记录数据,实验重复5次,取平均值。

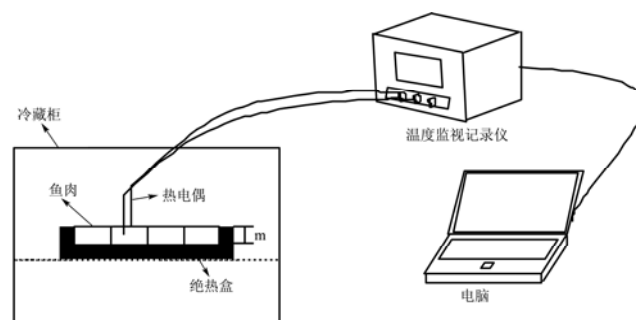


图1 冻结温度场实验装置示意图

Fig.1 Schematic drawing of experimental device for freezing temperature field

1.2.1 冻结时间的测定

根据国际制冷协会定义,冻结时间是指食品从规定起始温度开始冷却,冻结至食品热中心温度降至规定的温度所需要的时间,也称为有效冻结时间^[3]。本文统计了鲢鱼肉从起始温度降至热中心温度为-18 °C时所需要的时间,作为冻结时间。

1.2.2 冻结速率的测定

根据国际制冷协会定义,食品的冻结速率计算公式:

$$V_f = 3600L/t \quad (1)$$

式中, V_f 为冻结速率, mm/h; L 为食品表面与热中心的最短距离, mm; t 为食品表面达到0 °C至热中心温度达冰点温度以下10 °C时所需时间, s。

1.3 数学模型

由于鱼肉组织中的液体是一种多组分溶液,其相变是在一个区域内进行,并且相变时液固区的成分会不断变化,加上材料的各相异性,使得实际的计算困难,为此,作如下假设:

(1) 鱼肉内部物性均匀,各向同性,且随温度连续性变化;

(2) 鱼肉在冻结过程尚未结束之前分为明显的冻结区、未冻结区及相变界面,冻结过程由表及里,热量由未冻结区向冻结区传递;

(3) 鱼肉内部只存在导热,不计相变过程中的自然对流和传质,已冻结区的显热和冻结过程中释放的

潜热通过冻结层以导热的形式传送，并向环境释放。

不考虑鱼肉中水溶液浓度的变化，只考虑一维相变，对于无限大平板状食品，采用焓法将热焓和温度一起作为待定函数在整个求解区域建立统一的能量方程^[9]：

$$\rho c \frac{\partial H(x,t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

式中， ρ 为鱼肉的密度， kg/m^3 ； c 为鱼肉的比热， $\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ ； λ 为鱼肉的导热率， $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ； $H(x,t)$ 为冻结至 t 时刻位于距热中心 x 处单元释放的热焓， J/g 。

$$\text{初始条件: } T(x, 0)=T_0, (t=0, 0\leq x\leq\delta) \quad (3)$$

$$\text{边界条件: } \begin{cases} -\lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = h(T-T_\infty), (t>0, x=\delta) \\ \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = 0, (t>0, x=0) \end{cases} \quad (4)$$

式中， x 为鱼肉在 t 时刻的冷冻界面距热中心的距离， m ； t 为冷冻时间， s ； T_0 为鱼肉初温， $^\circ\text{C}$ ； T_∞ 为冷却介质温度， $^\circ\text{C}$ ； δ 为样品的特征厚度， m ； h 为鱼肉与冻结环境之间的对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ 。

1.4 物理模型

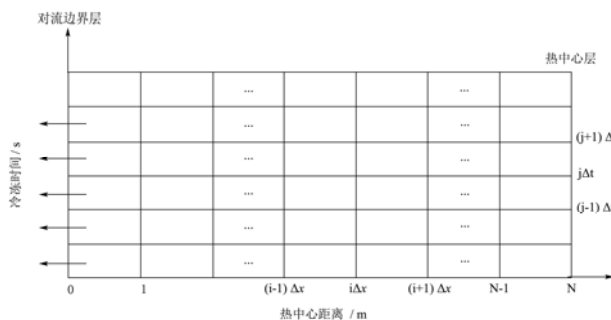


图2 平板状鱼肉离散化网格示意图

Fig.2 Schematic drawing of discretization grid of flat plane fish muscle

本文采用有限差分法对无限大平板状食品的导热问题进行数值求解。非稳态导热的特点是温度不仅随空间坐标变化，并且还随时间坐标变化。因此，离散化的处理必须同时把所研究的空间和时间范围各自等

分成许多细小的间隔^[9]，如图 2 所示。按照能量守恒定理，对每一个单元容积都可以列出热平衡式。

a) 第 1 层~第(N-1)层：选取第 i 个单元容积作为研究对象，则在第 j 个时间步长内从第 $(i+1)$ 层传到第 i 层的热量为 Δq_{i+1} ，从第 i 层传到第 $(i-1)$ 层的热量为 Δq_{i-1} ，在 Δt 的时间内，第 i 个单元体内能的减少量为 Δq_i ，由能量平衡可知， $\Delta q_{i+1}+\Delta q_i=\Delta q_{i-1}$ ，则有：

$$\lambda_i S \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} \Delta t + \rho_i c_i (T_i^j - T_i^{j+1}) S \Delta x = \lambda_i S \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{\Delta x} \Delta t \quad (5)$$

$$T_i^{j+1} = \frac{\alpha_i \Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1}^j + T_{i-1}^j) + \left(1 - \frac{2\alpha_i \Delta t}{\Delta x^2}\right) T_i^j$$

式中， c_i 为第 i 层的表观比热， $\text{J/g}\cdot^\circ\text{C}$ ； ρ_i 为第 i 层的密度， kg/m^3 ； S 为相界面有效面积， m^2 ； $\alpha_i=\lambda_i/(\rho_i c_i)$ 为第 i 层鱼肉的热扩散率， m^2/s 。

b) 第 N 层（绝热边界层）：在一维冻结食品的中心界面，即 $x=0$ 处，有绝热边界条件，它是第二类边界条件：

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} = 0, (t>0, x=0)$$

即：

$$T_{i+1}^j = T_{i-1}^j$$

由此可解得中心截面的温度：

$$T_N^{j+1} = \frac{2\alpha_N \Delta t}{\Delta x^2} T_{N-1}^j + \left(1 - \frac{2\alpha_N \Delta t}{\Delta x^2}\right) T_N^j \quad (6)$$

c) 第 0 层（对流边界层）：在 Δt 的时间内，从第 0 层与第 1 层的热量交换的增量为 Δq_1 ，第 0 层与外界环境的能量交换的减量为 Δq_∞ ，第 0 层单元体内能的减量 Δq_0 ，由能量平衡可知， $\Delta q_1+\Delta q_0=\Delta q_\infty$ ，则有：

$$\lambda_0 S \frac{T_1^j - T_0^j}{\Delta x} \Delta t + \frac{1}{2} \rho_0 c_0 (T_0^j + T_0^{j+1}) S \Delta x = h(T_0^j - T_\infty) S \Delta t, \quad (7)$$

$$T_0^{j+1} = \frac{2\alpha_0 \Delta t}{\Delta x^2} T_1^j + \left(1 - \frac{2\alpha_0 \Delta t}{\Delta x^2} - \frac{2h\Delta t}{\rho_0 c_0 \Delta x}\right) T_0^j + \frac{2h\Delta t}{\rho_0 c_0 \Delta x} T_\infty$$

1.5 鲢鱼肉热物性参数

表 1 鲢鱼肌肉的基本组成及热物性参数

Table 1 General composition and thermal property parameters of silver carp muscle

理化指标	水分含量/%	可溶性固形物含量/%	蛋白质含量/%	脂肪含量/%	温度范围/ $^\circ\text{C}$
	82.74±0.18	5.12±0.17	15.35±0.16	2.39±0.07	
冰点/ $^\circ\text{C}$	$T_f = -2.157 + 2.617X_w - 27.496X_k + 4.033 X_p$				
密度/ (kg/m^3)	$\rho=1050.7$				$T \geq T_f$
	$\rho=985.5$				$-5 \leq T < T_f$
	$\rho=995.4 + 2.441T + 0.04144T^2$				$T < -5$

转下页

接上页

	$\lambda=0.536$	$T \geq T_f$
导热率/(W/m·°C)	$\lambda=-0.147T+0.389$	$-5 \leq T < T_f$
	$\lambda=1.0206-0.0147T+0.0002T^2$	$T < -5$
表观比热/(J/g·°C)	$C_{app}=2.778+1.073X_w+0.211X_p+1.029X_f$	$T \geq T_f$
	$C_{app}=1.952+(141.0+33.264T+2.608T^2)e^{\alpha(T-T_f)}$	$T < T_f$

注: X_w 、 X_k 、 X_p 和 X_f 分别代表水分、可溶性固形物、蛋白质和脂肪的含量; T_f 表示冰点温度。

表1为鲢鱼肉的理化指标及热物性参数。其中鲢鱼肉的冰点和表观比热是通过DSC测定建立的预测模型^[7],密度和导热率引用文献^[10]报道的结果,对流传热系数是利用实验测定边界层的温度,用边界条件方程计算得出的平均值为15.10 W/(m²·°C)。

2 结果与讨论

2.1 冷冻过程中温度变化的拟合效果

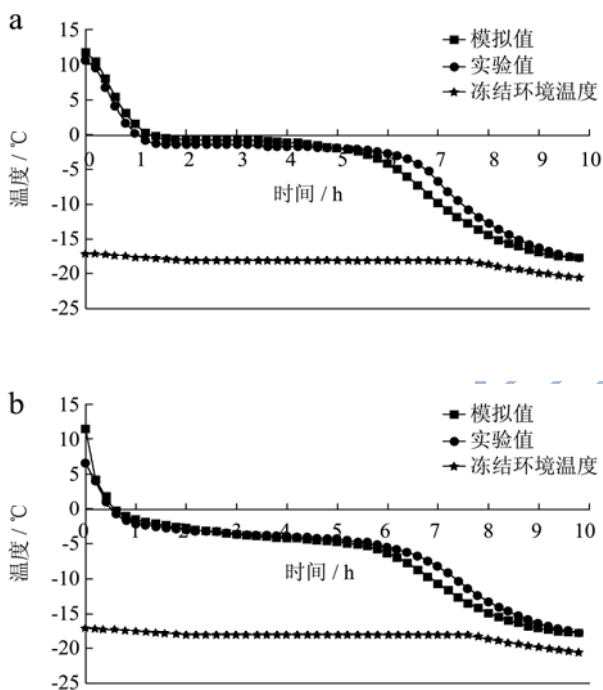


图3 鲢鱼肉冷冻过程的模拟与实验温度曲线

Fig.3 Simulated and experimental temperature curves of silver carp muscle during freezing

注: a, 热中心层; b, 边界层

鱼肉冷冻过程可分为三个阶段。第一阶段,鱼肉中心温度从初温急剧下降至过冷温度,此阶段会放出显热使温度略有回升,但显热与该阶段全部放出的热量相比较小,故降温快,曲线较陡。第二阶段为鱼肉内部冰晶体生成阶段,该阶段鱼肉中大部分水分开始冻结成冰,放出的相变潜热减慢了温度的下降趋势,因此,曲线较平缓。第三阶段,鱼肉中残留水分继续

结冰,已成冰的部分进一步降温至冻结终温。水变成冰后其比热容下降,冰进一步降温的显热减小,但因还有残留水分结冰放出的冻结潜热,所以降温没有冷冻初期快,曲线也不及冷冻初期陡^[2,11]。

将表1中的鲢鱼肉热物性参数模型分别代入公式(5)、(6)和(7),空间步长 Δx 和时间步长 Δt 分别取2.44 mm和4 s。通过Excel拟合计算,就可分别得到图3中鲢鱼肉热中心及边界层的模拟降温曲线。图3a为鲢鱼肉热中心层的模拟和实验温度曲线,从图中可以看出,模拟与实验的降温曲线相吻合,在冷冻过程的第二阶段,鲢鱼肉的模拟温度高于实测值约0.4 °C,整个冷冻过程中,模拟温度与实验温度的平均差方和为1.85,说明模拟的鱼肉热中心层降温曲线能较好的反映实际情况。模拟的误差主要来源于冷冻过程的第三阶段,这是由于模拟假设相变的潜热通过冻结层以导热方式传递,且没有考虑溶质浓度的变化,而在实际过程中,肌肉组织中绝大多数的自由水首先冻结,热中心层溶质的浓度逐渐增大,使其冰点温度下降,继续使热中心的溶质冻结困难^[12]。图3b为鲢鱼肉边界层的模拟和实验温度曲线,两条温度曲线的第一阶段和第二阶段几乎重叠在一起,模拟温度与实验温度的平均差方和为1.30,对鱼肉表面的模拟比对热中心的模拟具有更高的拟合精度。模拟的误差也主要来源于冷冻过程的第三阶段,这可能是由于在实际冷冻过程后期,食品表面温度越来越接近周围冷却介质的温度,温差的减小导致了鱼肉表面降温速度变慢,曲线逐渐趋于平缓达到最终冻结温度。

2.2 冻结速率和冻结时间的拟合效果

表2为鲢鱼肉冻结速率和冻结时间的模拟及实验结果。模拟和实验的冻结速率分别为3.32 mm/h和3.10 mm/h,相对误差为7.10%,实验和模拟得到的冻结速率均低于5.00 mm/h,表明鱼肉在冷冻柜中的冷冻过程符合慢速冻结的标准(冻结速率为1.0 mm/h~10 mm/h)。这说明在冷冻柜中不利于鱼肉预冷处理,为了防止预冷处理对鱼肉品质的损害,最好采用快速预冷设备进行冷冻处理。

表2中还显示了鲢鱼肉冻结时间的模拟及实验结

果, 分别为 9.56 h 和 9.72 h, 相对误差为-1.64%, 误差结果均小于表 3 中显示的近些年研究报道的关于食品冻结时间的数值模拟预测误差, 说明, 在现有的热物性参数预测模型的基础之上, 建立的数值模拟方法预测的冻结时间与实验值非常吻合。其中模拟的冻结时间略微短于实验值, 主要是因为模拟忽略了溶质浓度的变化, 随着冻结时间的延长, 内部溶质的浓度越来越高, 溶质冰点温度逐渐降低, 冻结越困难, 冻结时间越长。因此, 建议适当延长实际冷冻时间至热中

心温度降至规定终温。

表 2 鲢鱼肉冻结速率和冻结时间的模拟及实验结果

Table 2 Results of simulated and experimental freezing velocities and times of silver carp muscle

	模拟结果	实验结果	相对误差/%
冻结速率/(mm/h)	3.32±0.01	3.10±0.05	7.10
冻结时间/h	9.56±0.04	9.72±0.11	-1.64

注: 相对误差 (%) $\frac{\text{模拟结果} - \text{实验结果}}{\text{实验结果}} \times 100$ 。

表 3 不同数值模拟方法得到的食品冻结时间预测误差统计

Table 3 Results of predictive errors in food freezing time based on different numerical simulation methods

参考文献	研究对象	方法 (软件)	热物性参数来源	冻结环境	相对误差/%
[1]	蟹爪	2D 有限 (Comsol)	实验值	工业隧道式冻结机 (环境温度-40 °C)	4.46
[4]	虾仁	CFD (Fluent)	文献值	高效鼓风冻结装置 (环境温度-40 °C)	3.81
[5]	馒头	CFD (Fluent)	文献值	变温平面网带食品速冻机 (深冷腔体温度-35 °C)	3.35
[9]	猪肉	1D 有限差分 (Matlab)	经验式	冰箱 (环境温度为-13.4 °C)	-6.67
				冰箱 (环境温度为-80 °C)	3.57
[13]	牛肉	1D 有限差分 (Excel)	实验值	速冻装置 (环境温度-30 °C)	-8.03

注: 相对误差 (%) $\frac{\text{模拟结果} - \text{实验结果}}{\text{实验结果}} \times 100$ 。

2.3 鱼肉厚度对冷冻过程拟合效果的影响

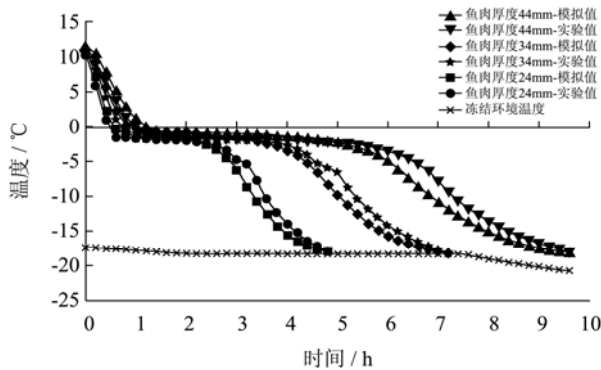


图 4 不同厚度鲢鱼肉热中心层的模拟与实验降温曲线

Fig.4 Simulative and experimental temperature curves of thermal center of silver carp muscle with different thicknesses during freezing

本文在成功模拟了厚度为 44 mm 的鲢鱼肉冷冻过程的基础之上, 保持其他参数条件不变, 对厚度为 24 mm 和 34 mm 的鲢鱼肉冷冻过程进行了模拟, 并与实验值进行比较分析 (测点为鱼肉中心点), 结果如图 4 所示。对于厚度为 24 mm、34 mm 和 44 mm 的鲢鱼肉, 在整个冷冻过程中, 其模拟温度与实验温度的平均差方和分别为 1.73、1.58 和 1.85。说明本文建立的模型也可用于模拟不同厚度鱼肉的冷冻过程。同时, 从图 4 中还可以看到完全冻结热中心所需要的时间随鱼肉厚度的变化而变化, 冻结所需时间的延长或缩短

主要取决于冷冻过程的第二阶段和第三阶段。这是因为鱼肉中心层的热量主要通过导热形式向环境中转移, 鱼肉越厚, 导热热阻越大, 从而所需要的冻结时间越长^[14]。

3 结论

本文对冷冻柜中鲢鱼肉的导热问题进行了数值模拟, 预测了鲢鱼肉的冷冻过程及冻结时间, 并考虑了鲢鱼肉厚度对冷冻过程拟合效果的影响, 结论如下:

3.1 在鲢鱼肉热物性参数预测模型及焓模式数学模型的基础之上, 采用有限差分法对平板状鲢鱼肉建立物理模型, 分别模拟了鲢鱼肉热中心及边界层的冷冻过程及冻结时间。厚度为 44 mm 的鲢鱼肉的热中心和边界层的模拟温度与实验温度的平均差方和分别为 1.85 和 1.30, 冻结时间的预测相对误差为-1.64%, 模拟结果与实验结果吻合较好。厚度为 24 mm 和 34 mm 的鲢鱼肉热中心的模拟温度与实验温度的平均差方和分别为 1.73 和 1.58, 说明本文建立的模型也可用于不同厚度鱼肉的冷冻过程的模拟。

3.2 鲢鱼肉冷冻过程的模拟与实验温度曲线显示, 模拟的误差主要来源于冷冻过程的第三阶段, 这是由于模拟假设没有考虑溶质浓度的变化, 而在实际冷冻过程中, 肌肉组织中绝大多数的自由水先冻结, 热中心层溶质的浓度逐渐增大, 使其冰点温度下降, 继续使热中心的溶质冻结困难。另外, 食品表面与周围冷却

介质温差的逐渐减小,也导致了在实际冷冻过程中,食品表面的降温速度不断变慢,曲线逐渐趋于平缓达到最终冻结温度。

3.3 鲢鱼肉在冷冻柜中的模拟和实验的冻结速率分别为3.32 mm/h和3.10 mm/h,根据国际制冷协会规定,属于慢速冻结(冻结速率为1.0 mm/h~10 mm/h),说明在冷冻柜中不利于对鱼肉进行预冷处理,为了防止预冷处理对鱼肉品质的损害,最好采用快速预冷设备进行冷冻处理。

参考文献

- [1] Dima J B, Santos M V, Baron P J, et al. Experimental study and numerical modeling of the freezing process of marine products [J]. Food and Bioproducts Processing, 2014, 92(1): 54-66
- [2] Xanthakis E, Havet M, Chevallier S, et al. Effect of static electric field on ice crystal size reduction during freezing of pork meat [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 20: 115-120
- [3] Delgado A E, Sun D W. Heat and mass transfer models for predicting freezing processes-a review [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 47(3): 157-174
- [4] 李杰,谢晶.鼓风冻结虾仁时间的数值模拟及实验验证[J].农业工程学报,2009,25(4):248-252
LI Jie, XIE Jing. Numerical simulation of freezing time of shelled shrimps in an air blast freezer and experimental verification [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 248-252
- [5] 宋晓燕,邹同华,洪乔荻.馒头变温速冻过程的数值模拟研究[J].粮油食品科技,2015,23(2):14-16
SONG Xiao-yan, ZOU Tong-hua, HONG Qiao-di. Research on numerical simulation of temperature variation of steamed bread during quick-frozen [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2015, 23(2): 14-16
- [6] Tocci, Mascheroni. Simplified equation for predicting the thermo-physical properties of foods [J]. Food Technology, 1998, 28: 299-309
- [7] 刘茹,鲁长新,熊善柏,等.淡水鱼低温相变区热特性参数预测模型的建立[J].农业工程学报,2009,25(2):256-260
LIU Ru, LU Chang-xin, XIONG Shan-bai, et al. Modeling for the thermal parameters of freshwater fish muscles during low temperature phase transition [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 256-260
- [8] Stevens D, La Rocca A, Power H, et al. Estimating the temperature evolution of foodstuffs during freezing with a 3D meshless numerical method [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2015, 53: 46-55
- [9] 刘朝华.形状规则食品冻结过程的研究[D].武汉:华中科技大学,2005
LIU Chao-hua. A research for freezing process of food with regular shape [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2005
- [10] Chaiwanichsirira S, Laohasongkrama K, Koon-Areeb O. Freezing time prediction for cuttlefish [J]. Science Asia, 2001, 27: 221-226
- [11] Pham Q T. Freezing time formulas for foods with low moisture content, low freezing point and for cryogenic freezing [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 127: 85-92
- [12] Kiani H, Zhang Z, Sun D W. Experimental analysis and modeling of ultrasound assisted freezing of potato spheres [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 26: 321-331
- [13] Wang Z, Wu H, Zhao G, et al. One-dimensional finite-difference modeling on temperature history and freezing time of individual food [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(2): 502-510
- [14] 张涛洪,刘伟民,姜松,等.平板状食品冷却过程的 MATLAB 模拟[J].农业工程学报,2002,18(6):148-150
ZHANG Tao-hong, LIU Wei-min, JIANG Song, et al. Simulation study on cooling process of plain food with matlab [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(6): 148-150