

# 鲍鱼浸入式快速冷冻理论及实验验证

倪锦, 顾锦鸿, 沈建

(中国水产科学院渔业机械仪器研究所, 国家水产品加工装备研发分中心, 上海 200092)

**摘要:** 计算流体力学(CFD)可准确预测鲍鱼冷冻过程中的传热传质变化, 鲍鱼冷冻过程中内部温度变化和冷冻所需时间的预测对品质研究具有重要意义。本文以鲍鱼为研究对象, 研究鲍鱼的浸入式快速冷冻, 基于计算流体力学建立鲍鱼的三维非稳态数值计算模型, 选用冻结计算模式, 建立鲍鱼热物性的多项式计算方法, 提高鲍鱼冷冻过程的计算精度, 利用CFD计算获得鲍鱼冷冻过程的温度分布状态, 获得鲍鱼质量与冷冻时间的关系, 并开展了实验验证, 结果表明鲍鱼的数值计算结果是可信的, 能够较为准确的预测鲍鱼快速冷冻过程中温度的变化与冷冻所需时间。

**关键词:** 鲍鱼; 快速冷冻; 数值分析; 计算流体力学

文章编号: 1673-9078(2013)4-710-714

## Rapid Immersion Freezing Mechanism of Abalone and its Experimental Verification

NI Jin, GU Jin-hong, SHEN Jian

(Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, National R&D Branch Center for Aquatic Product Processing Equipment, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Computational fluid dynamics (CFD) technology can predicts heat and mass transfer during rapid freezing. In this paper, the immersion rapid freezing of abalone was investigated and computational fluid dynamics technology was employed to establish three-dimension unsteady numerical calculation model of abalone rapid freezing. Solidification model was selected and the polynomial calculation method was developed for calculating abalone thermal properties in order to improve numerical solving accuracy. The distribution of abalone temperature during the freeze process and the relationship between abalone mass and frozen time were got by using CFD technology. It was found that numerical calculation model and the simulation methods for abalone rapid immersion freezing were reliable, which could predicate abalone freeze process and freeze time.

**Key words:** abalone; rapid freeze; numerical analysis; computational fluid dynamics

近年来随着食品行业的快速发展以及冷冻冷藏技术的提高, 快速冷冻食品由于具有较好的品质, 正逐渐受到越来越多消费者的青睐。速冻鲍鱼的品质取决于冻结速度<sup>[1]</sup>, 在冷冻过程中, 经历最大冰晶生成带的时间越短, 冰晶的几何尺寸较小, 冷冻后鲍鱼的品质越好。为获取鲍鱼达到特定温度所需的信息, 传统的方法是实验测量, 但是这种做法耗时耗财、局限性大且获得的信息有限, 计算流体力学(CFD)是一种适用于流体流动及传热传质问题的数值计算技术<sup>[2-3]</sup>, 采用CFD技术可获得鲍鱼冻结过程中内部温度场, 可精确预测内部的温度分布情况, 为速冻品质分析和冷

收稿日期: 2012-11-26

基金项目: 国家 863 项目 (2011AA100803); 国家贝类产业技术体系资金资助 (CARS-48-08B)

作者简介: 倪锦 (1985-), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事制冷和水产品冷冻保鲜等研究工作

冻工艺优化建立条件<sup>[4-5]</sup>。CFD技术在工业各领域得到广泛应用, 并取得了显著的效果, 在食品冻结领域的研究起步较晚, 近年来才逐渐引起学者们的重视<sup>[6-8]</sup>。李杰<sup>[9]</sup>等对鼓风冻结虾仁进行了数值模拟, 预测了冻结时间并以实验验证, 模拟结果与实验结果吻合较好, 冻结时间差异百分数为3.8%, 验证了CFD技术在食品冻结领域运用的可行性; 此外李杰<sup>[10]</sup>等采用CFD技术实现了土豆冷冻过程的模拟, 较好的获得了土豆冷冻数据。陈天及<sup>[11]</sup>采用CFD技术对茄子冷冻过程中的温度场进行了三维模拟, 采用变物性参数模拟不同冻结速度和不同厚度下茄子冷冻过程的温度变化情况, 模拟结果与实验吻合较好。

上述研究表明, CFD技术可以很好地实现食品冷冻过程的数值计算, 本文以鲍鱼为主要研究对象, 建立了以液体酒精为速冻介质的速冻平台, 开展了鲍鱼浸入式速冻的理论和实验研究, 采用了K-ε模型和

Simple算法实现了鲍鱼的快速冷冻的动态模拟,研究了冷冻过程中鲍鱼内部温度场变化特点,获得了鲍鱼冷冻过程中的温度场,并开展了实验研究,验证了CFD数值计算结果的可靠性,进一步研究了鲍鱼重量与冷冻时间的关系,为鲍鱼快速冷冻工艺优化和温度控制提供基础数据。

## 1 鲍鱼冷冻过程的传热模型

### 1.1 鲍鱼的物理及数值计算模型

本文主要研究鲍鱼的浸入式快速冷冻,主要研究对象为装满酒精的冻结区域和放置其中的鲍鱼,盛放酒精的容器为圆柱形,外形尺寸为高×底面半径:10 cm×15 cm,酒精进口管道和出口管道的直径均为3 cm,容器的上盖可开启且可完全密封,容器外面隔热层为3 cm的玻璃纤维棉板,酒精进入容器的温度为213 K,流速为2.5 m/s。乙醇在-60℃时的粘度<sup>[2]</sup>为 $8.70 \times 10^{-3}$  pas,密度为885.1 kg/m<sup>3</sup>。容器内局部流体的雷诺数接近 $10^4$ 数量级,故鲍鱼的快速冷冻属于湍流流动换热问题<sup>[13]</sup>。

当冷冻装置内的酒精温度达到稳定时,理论上装置内酒精的温度应该和进入容器的酒精的温度一致,即温度为213 K,但实际中温度控制环节的扰动以及流场的不均匀可能导致冷冻装置内酒精温度场不均匀,此外,在冷冻装置中鲍鱼通过细微金属棒上的镂空金属支架固定在酒精槽中,但对于整个流场细微金属棒的扰动极小。

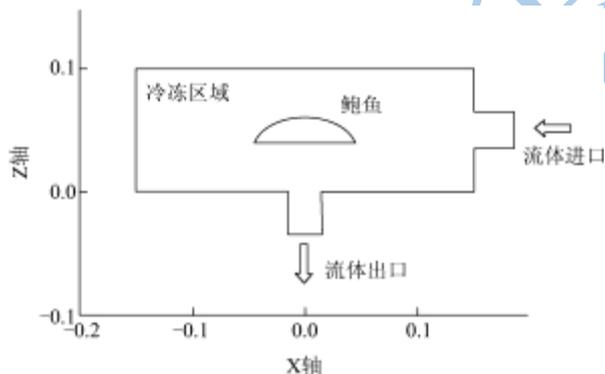


图1 鲍鱼与冷冻区域的组合截段示意图

Fig.1 Sketch diagram of combinations of abalone and frozen region

从简化模型和减小计算量出发,本文认为冻结区域中的细微金属棒对流场没有影响;冻结装置内的酒精为不可压缩流体,冷冻开始时容器内部酒精的温度为213 K且温度场均匀,冻结装置各壁面绝热,冻结装置内流体的流动为稳态湍流。

在冷冻过程中随着温度的变化,鲍鱼的物性会随着温度的变化而变化,鲍鱼的冷冻本质上是一个复杂

的、变物性的非稳态导热问题<sup>[14]</sup>和对流换热问题,鲍鱼内部非稳态导热的三维数学模型可描述为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

鲍鱼表面的流体对流换热的数学模型<sup>[15]</sup>为:

$$\frac{\partial T}{\partial x} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

注:  $T$ 为食品各几何点的温度, K;  $x, y, z$ 为几何点坐标值;  $c$ 为食品比热容, J/(kg·K);  $\lambda$ 为食品热导率, W/(m·K);  $\rho$ 为鲍鱼密度, kg/m<sup>3</sup>;  $t$ 为时间, s;  $\alpha$ 为热扩散率, m<sup>2</sup>/s;  $u, v, w$ 为流体的速度分量, m/s。

### 1.2 边界条件及初始条件

为避免冷冻过程中酒精渗入到鲍鱼肉质中,冷冻中鲍鱼需包装在小包装的PE保鲜袋中并抽取真空,考虑到PE保鲜袋影响鲍鱼的导热系数,为保证求解精度,需在鲍鱼热物性中修正一下导热系数。忽略支撑镂空金属架与鲍鱼之间的导热,鲍鱼的主要换热形式为与容器中酒精发生强制对流换热,属于第三类边界条件:

$$Q = h(t)A[T_w(t) - T_g(t)] \quad (3)$$

式中:  $Q$ 为对流换热热量, W;  $w$ 为边界符号;  $h$ 为对流换热表面传热系数, W/m<sup>2</sup>;  $T_w$ 为鲍鱼表面温度, K;  $T_g$ 为流体温度, K。

在CFD计算模型中,将鲍鱼表面与酒精接触面耦合,酒精的温度按照实际测量值赋值,fluent自行计算获得对流换热热量。

本文认为鲍鱼内部各项均匀,温度均匀,初始时刻容器内部的酒精的温度也视为定值,那么鲍鱼初始条件方程为:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (4)$$

鲍鱼和酒精的初始温度分别按照实验测定值赋值。冷冻容器中酒精进口采用速度进口条件,酒精出口采用压力出口条件,进口速度按照实验测量结果赋值,压力出口按照压力测量值赋值,壁面选用绝热壁面,材料为钢。

### 1.3 鲍鱼的热物性参数

在冷冻过程中,鲍鱼的热物性会发生较大变化,如果能够利用数学模型能较好的描述鲍鱼热物性的变化规律,可保证鲍鱼冷冻过程分析与模拟结果的准确性。Fluent中可以采用分段多项式数学模型来描述鲍鱼物性的变化规律。确定鲍鱼主要成分是合理评估鲍鱼热物理参数的基础,从文献中可知鲍鱼的主要成分为水、蛋白质、脂肪、碳水化合物和灰分等组成<sup>[16]</sup>。

在冻结阶段鲍鱼体内的水会发生相变,导致热物理性质会发生较大的变化,分别建立鲍鱼的比热容和导热系数的计算方法,具体如下:

### 1.3.1 鲍鱼的比热容

在冷冻过程,水逐渐变成冰晶,冰形成的比例是随着温度的降低而升高,为了计算冷冻过程中鲍鱼的比热系数,需要了解鲍鱼体内任意时刻未冻结水的质量分数,鲍鱼体内水的质量分数计算如下:

$$\omega_{w,u} = \omega_{w,z} \frac{F_z - F^0}{F_u - F^0} \quad (6)$$

注:  $\omega_{w,u}$  为任一温度时水的质量分数,  $\omega_{w,z}$  为初始时的质量分数,  $F$  为函数,  $F^0$ 、 $F_z$  和  $F_u$  分别对应于  $T^0$ 、 $T_z$  和  $T_u$  的函数值。其中上标: 0 代表处于  $T^0=273.15\text{K}$  时的状态,下标:  $W$  代表未冻结水,  $Z$  代表初始时刻,  $\mu$  代表任一温度时刻

上式中的函数  $F$  为:

$$F = F(T) = \exp\left[\frac{L}{RT}\right] \quad (7)$$

注:  $T$  为温度,  $K$ ,  $L$  为相变潜热,  $\text{KJ/mol}$ ,  $R$  为气体常数,  $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{k})$

在冻结过程中,随温度下降时冰量增加,冰和水总的的质量分数保持不变,任意时刻冰的质量分数  $\omega_{f,u}$  为:

$$\omega_{f,u} = \omega_{w,z} - \omega_{w,u} \quad (8)$$

注:  $\omega_{f,u}$  为任一温度时已冻结水的质量分数。其中下标:  $f$  代表冰。

鲍鱼其余主要成分的质量在冷冻过程中保持不变,结合水和冰质量分数的计算公式,可算出各温度下鲍鱼各组分的质量分数,最终鲍鱼的比热容由各组分的比热容叠加获得,任意温度下鲍鱼的比热容计算公式为:

$$C_u = \sum C_i \omega_i \quad (9)$$

注:  $C$  为比热容,  $\text{J}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$ , 下标:  $i$  为任一组分。

### 1.3.2 鲍鱼的导热系数

预测冷冻过程中鲍鱼的热导率是比较困难的,这不仅因为鲍鱼的热导率与纤维方向有关,而且因为在冻结过程中鲍鱼的密度,空隙度等都会发生明显的变化,而这些都对热导率产生很大的影响。根据参考文献,本文采用垂直模型<sup>[17]</sup>计算鲍鱼的导热系数,假设鲍鱼组分的分布排列与热流方向垂直,鲍鱼的有效导热系数可以利用各组分的体积分数和热导率计算获得,在计算过程中未冻水和已冻冰作为两个组分处理,计算公式如下:

$$\frac{1}{\lambda} = \sum \frac{\varphi_i}{\lambda_i} \quad (10)$$

注:  $\varphi_i$  为  $i$  组分的体积系数,  $\lambda_i$  为  $i$  组分的导热系数。

其中各组分的体积系数由下式计算获得:

$$\varphi_i = \frac{\frac{\omega_i}{\rho_i}}{\sum \frac{\omega_i}{\rho_i}} \quad (11)$$

注:  $\omega_i$ 、 $\varphi_i$ 、 $\rho_i$ 、 $\lambda_i$  分别为各组分的质量分数、体积系数、密度和热导率。

## 2 鲍鱼冷冻温度场的数值计算

为了准确计算鲍鱼冻结过程中内部温度场的变化过程,本文做出如下假设:①鲍鱼初始温度均匀一致;②鲍鱼内部的传热以导热为主,不计入对流传热;③鲍鱼各项同性;④鲍鱼的非凝固区不考虑传质和流动。

鲍鱼的冷冻过程主要是一个对流传热和辐射过程,鲍鱼在低温酒精中经历预冷、相变和深冷过程,采用冻结求解模型研究鲍鱼的速冻。采用Gambit进行鲍鱼速冻模型的建模并划分网格,共划分网格109278个,将鲍鱼的网格文件读入Fluent,并设置鲍鱼与液体酒精的耦合,设定相应的边界条件、初始条件,采用差分控制容积法对控制方程进行分离,选用三维隐式非稳态计算模型,在操作条件中激活重力项,根据建模时的坐标位置,在Z轴方向设重力加速度为  $-9.81 \text{ m/s}^2$ ,时间步长为  $0.1 \text{ s}$ ,除能量方程收敛精度为  $10^{-8}$ ,其余方程都为  $10^{-2}$ 。

初始时刻酒精和鲍鱼都是均匀温度体,温度分别为  $213 \text{ K}$  和  $293 \text{ K}$ ,采用固定步长进行计算,计算鲍鱼中心温度冻结到  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  所需的时间,并观察冻结过程中鲍鱼内部温度场的变化情况。由于CFD计算的三维显示只能显示鲍鱼表面温度场的分布情况,无法显示鲍鱼内部的温度变化情况,此外也无法显示流场的速度分布情况,故本文选取鲍鱼具有代表性的中心切面作为分析对象。

鲍鱼周围模拟流场速度矢量图如图2所示,由流场矢量图可知:液体酒精成射流状进入冷冻容器内腔,酒精流经鲍鱼表面时产生附于其表面的现象,鲍鱼上表面的酒精流速大于下表面流速,且流体的连续性也优于后者。

由鲍鱼与周围冻结区的二维速度矢量图易知,鲍鱼的冻结主要以对流换热为主。鲍鱼冷冻过程中经历了预冷、相变和深冷3个过程,本文进一步计算鲍鱼冷冻过程中的温度场,分别取  $30 \text{ s}$ 、 $120 \text{ s}$ 、 $390 \text{ s}$  和  $621 \text{ s}$  时鲍鱼温度场的进行观察。

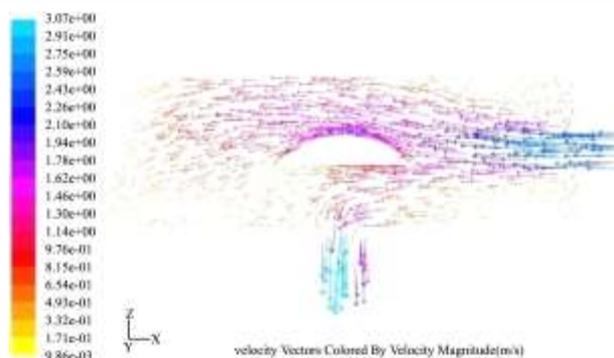


图2 鲍鱼与周围冻结区的二维速度场

Fig.2 Two-dimensional velocity field of abalone around the freeze zone

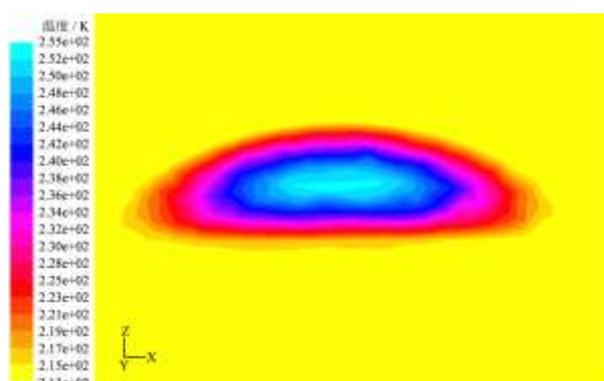


图5 冻结395 s后的二维温度场

Fig.5 Two-dimensional temperature field after freeze 390 s

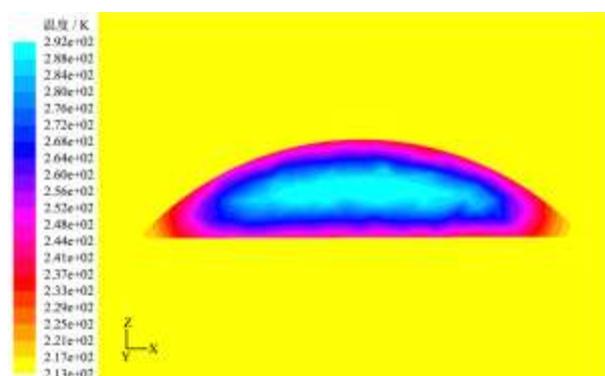


图3 冻结30 s后的二维温度场

Fig.3 Two-dimensional temperature field after freeze 30 s

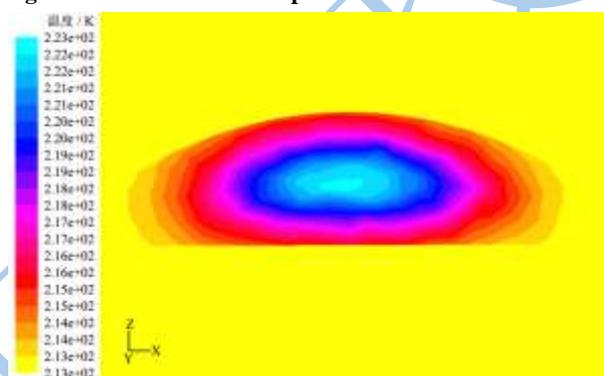


图6 冻结621 s后的二维温度场

Fig.6 Two-dimensional temperature field after freeze 621 s

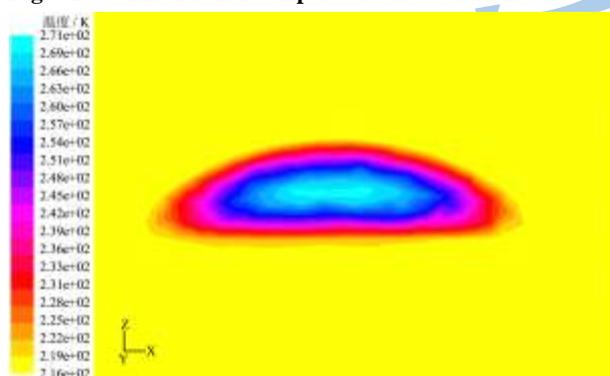


图4 冻结120 s后的二维温度场

Fig.4 Two-dimensional temperature field after freeze 120 s

由模拟结果可知,鲍鱼冻结开始后30 s后,鲍鱼与酒精发生剧烈的热交换,鲍鱼的边缘部分换热最剧烈,迅速降温,而鲍鱼内部的温度影响较小。

冻结到120 s时,鲍鱼的表面温度下降速率非常快,鲍鱼的内部由于导热作用温度下降到-2℃左右,鲍鱼的冻结由边缘深入到鲍鱼中心,此外相变作用使得导热速率减低。

鲍鱼冻结至390 s,鲍鱼中心温度降至-18℃,边缘的导热作用使得鲍鱼中心降温速率明显加快,在对流作用下,右侧迎流面降温梯度大于左侧。

鲍鱼冻结到621 s时,鲍鱼的中心温度降至-50℃,鲍鱼的快速冷冻完成。

从上述鲍鱼冷冻的二维温度场可知,鲍鱼本身的比热容较小,在强烈的对流换热流场中,鲍鱼的降温速率较快,鲍鱼的迎流侧的降温速度略快于背流侧,对于本文中初始温度为22℃的鲍鱼,其中心温度达到-18℃所需的时间为395 s,中心温度达到-50℃所需的时间为621 s,其冷冻时间明显优于常规冷冻方法。

### 3 鲍鱼快速冷冻的实验研究

为了验证CFD模拟计算的准确性,本文开展了实验验证研究。采用的实验仪器如下:和普电子CHT8000-12数字式温度巡回检测仪,铜-康铜热电偶(T型,外径为0.5 mm),ABB的DE43F型电磁流量计。实验测得鲍鱼中心温度为22℃,冻结装置内酒精温度约为-60℃,酒精的流量为 $1.77 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 换成流速则管道中酒精进口速度约为2.5 m/s。管子直径3 cm。

将与CFD计算中同等规格相同初始温度的鲍鱼放置到冷冻装置内,利用温度在线采集系统获得中心温度的变化曲线,如图7。

由图7可知:CFD计算鲍鱼中心温度达到-18℃所需的时间为395 s,达到-50℃所需的时间为621 s。实

实验得鲍鱼中心温度达到-18℃所需的时间为401 s, 达到-50℃所需的时间为614 s。鲍鱼冷冻过程中中心温度的最大温差为2.2℃。由于温度传感器存在测量滞后以及测量过程中存在仪器误差等, 故认为CFD模拟的冷冻时间基本反映了鲍鱼时间冷冻所需的时间。

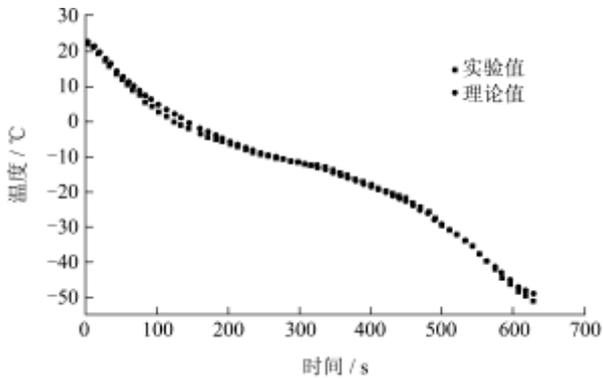


图7 鲍鱼中心温度的变化曲线

Fig.7 The abalone center temperature curve

为了研究鲍鱼质量对降温速度的影响, 进一步开展实验研究, 针对不同规格大小的鲍鱼, 先利用CFD技术获得中心温度达到-50℃所需的时间, 再开展实验研究, 验证CFD技术预测鲍鱼冷冻过程中温度预测的准确性。

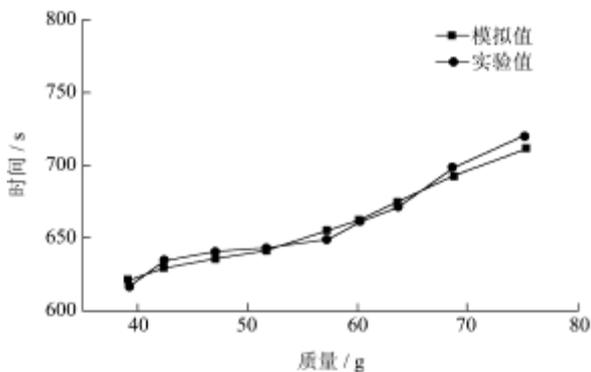


图8 鲍鱼质量与中心温度降温时间的关系

Fig.8 Sketch of relationship between the abalone quality and center temperature cooling time

从图8中易知, 随着鲍鱼质量的增大, 鲍鱼中心温度达到-50℃所需时间越来越长, 两者的关系类似于线性关系, 采用CFD计算模拟和实验获得的时间差异不大, 最大时间误差在1.5%, 属于允许的误差范围。

由于各种条件不同, 鲍鱼的初始温度存在很大差异, 为此开展了不同初始温度条件下鲍鱼快速冷冻的实验研究, 主要研究不同初始温度条件下中心温度达到-50℃所需时间的差异, 不同初始温度下鲍鱼中心温度达到-50℃所需时间如图9所示。

在图9中, 无预冷鲍鱼的初始温度为22℃, 有预冷鲍鱼的初始温度为2℃, 鲍鱼的预冷明显减少了鲍鱼中心温度达到目标值所需的时间, 最快降温时间提

高了17%左右, 可见预冷能够有效减小鲍鱼的冷冻时间, 提高鲍鱼的冷冻效率。

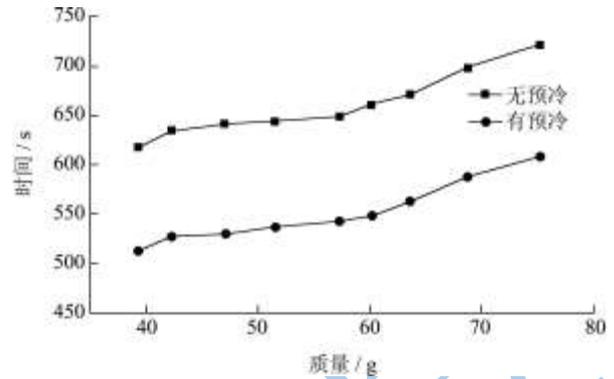


图9 不同初始温度下鲍鱼质量与冻结时间的关系

Fig.9 Sketch of relationship between abalone quality freeze time under different initial temperature

从上述研究结果可知, CFD模拟值与实验值吻合较好, 说明本文建立的鲍鱼浸入式快速冷冻的计算模型是正确合理的, 利用CFD技术研究鲍鱼的快速冷冻是可行的。

#### 4 结论

4.1 利用CFD技术对鲍鱼浸入式快速冷冻过程进行数值模拟, 可以比较准确的预测鲍鱼在冷冻过程中温度与时间之间的变化规律, 可以预测鲍鱼在某一条件下冻结到要求的条件所需的时间, 以及在某一时间点温度, 可以根据时间需要制定鲍鱼冻结方案, 降低冻结成本, 提高冻结效率。

4.2 研究结果表明, 数值模拟结果能够较好的反映实际冷冻情况, 本文建立的鲍鱼冷冻的传热模型及其处理方法具有较高的精度, 可以全面准确的预测鲍鱼在冻结过程中三维温度场的变化, 能够准确地预测冻结时间, 模拟结果与实验结果吻合较好, 冻结过程中温度最大差值为2.2℃, 中心温度时间差异在1.5%, 表明CFD计算技术运用在鲍鱼快速冷冻是可行的。

4.3 经过预冷的鲍鱼明显缩短快速冷冻所需的时间, 最快降温时间提高了17%左右, 因此, 降低鲍鱼的初始温度, 可有效的减少鲍鱼快速冷冻所需的时间, 提高鲍鱼快速冷冻的效率。

#### 参考文献

[1] Cleland A C, Oxilgen S. Thermal design calculations for food freezing equipment-past, present and future [J]. International Journal of Refrigeration, 1998,21(5): 359-371

[2] Delgado A E, Sun Da-Wen. Heat and mass transfer models for predicting freezing processes- a review [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 47(3): 157-174

- [3] Hu Zehua, Sun Da-Wen. CFD simulation of heat and moisture transfer for predicting cooling rate and weight loss of cooked ham during air-blast chilling process [J]. Journal of Food Engineering, 2000, 46(3): 189-197
- [4] 李学英,迟海,杨宪时,等.预冷却温度对冷藏大黄鱼品质变化的影响[J].现代食品科技,2012,28(5):486-489
- [5] 张方乐,曾庆孝.冷却速率对罗非鱼片冷藏品质的影响[J]现代食品科技,2010,26(11):1200-1203
- [6] 谢晶,瞿晓华,施骏业.计算流体力学在食品工业中的应用[J].上海水产大学学报,2004(2):170-175
- [7] Scott G M, Richardson P. The application of computational fluid dynamics in the food industry [J].Trends in Food Science and Technology, 2001,8 (4):119-124
- [8] Hu Z H, Sun D W. CFD simulation of heat and moisture transfer for predicting cooling rate and weight loss of cooked ham during air blast chilling process [J]. Journal of Food Engineering, 2000,46 (3):189-197
- [9] 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
- [10] 李杰,谢晶,陆方娟.食品冻结过程温度场及冻结时间的数值模拟与实验研究[J].食品工业科技,2009,30(2):123-128
- [11] 陈天及,龚璐洁,谢堃.茄子冷冻过程热湿迁移数值模拟研究[J].食品工业科技,2010,31(10):344-351
- [12] 刘光启,马连湘,刘杰.化学化工物性数据手册有机卷[M].北京:化学工业出版社,2002
- [13] Moureh J, Derens E. Numerical modeling of the temperature increase in frozen food packaged in pallets in the distribution chain[J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23(7): 540-552
- [14] 杨世铭,陶文铨.传热学.第四版[M].北京:高等教育出版社,2006
- [15] 周俊波,刘洋等.Fluent6.3流场分析从入门到精通[M].北京:机械工业出版社,2011
- [16] 任艳艳,李卫华.酶解鲍鱼制备增味剂的研究[J].食品科技,2011,36(10):236-242
- [17] 关志强,李敏.食品冷冻冷藏原理与技术[M].北京:化学工业出版社,2010
- [18]