

馒头变温速冻过程的数值模拟研究

宋晓燕, 邹同华, 洪乔荻

(天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室, 天津 300134)

摘要:采用 Fluent 软件对馒头的速冻过程进行数值模拟, 建立了数学模型, 并进行实验验证, 结果显示模拟值与实验值吻合较好, 冻结时间的相对误差为 3.35%。为面食在变温平面网带食品速冻机内的应用提供了参考。

关键词:馒头; 速冻; 温度; 数值模拟

中图分类号:TS 210.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2015)02-0014-03

Research on numerical simulation of temperature variation of steamed bread during quick-frozen

SONG Xiao-yan, ZOU Tong-hua, HONG Qiao-di

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134)

Abstract: A numerical simulation has been made for steamed bread's quick-frozen by Fluent software, the mathematical model was developed, and the experiment has been made, the simulative result matched well with the experiment date, the relative error of freezing time was 3.35%. This provided a reference for application of multi-temperature plane net belt quick-freezer in flour products industry.

Key words: steamed bread; quick-frozen; temperature; numerical simulation

随着人们生活水平的提高, 对冷藏食品的质量要求也越来越高。速冻技术由于能够避免食品细胞之间产生大的冰晶体, 降低浓缩残留水对细胞组织内部的危害, 减少食品细胞内外水分外析, 能够有效抑制微生物的生长等优点^[1-3], 得到迅猛发展。食品的冻结过程是一个复杂的过程, 它是一种典型的伴有相变的热传导过程^[4]。Cleland^[5]、Earle^[6]、Coskan Ilicali^[7]等人通过建立数学模型预测了食品的冻结时间, 并进行验证。李杰^[8]等人利用 CFD 软件建立了土豆在冰箱冷冻室内的三维非稳态数值模型, 得到了土豆在冻结过程中各个阶段的温度分布。本实验以馒头为研究对象, 对其速冻过程中的温度分布进行数值模拟, 并进行实验验证。为各种面食在变温平面网带食品速冻机内的应用提供参考。

1 馒头速冻过程的数学模型

1.1 几点假设

建立数学模型前, 需对馒头作如下假设, 以简化计算: (1) 馒头为半径 R 的理想半球; (2) 馒头内部各项同性; (3) 冻结过程中馒头无明显体积变化; (4) 馒头内部只存在导热, 馒头内部忽略对流换热^[9]。

1.2 控制方程及参数选取

馒头速冻过程的非稳态导热^[10]方程如下:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\lambda \frac{\partial T}{\partial \theta}) \quad (1)$$

$$\text{初始条件: } T = T_0, \tau = 0 \quad (2)$$

$$\text{边界条件: } -\lambda (\frac{\partial T}{\partial r}) = h(T - T_f), r = R \quad (3)$$

$$-\lambda (\frac{\partial T}{\partial \theta}) = h(T - T_f), \theta = \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

其中: ρ 为馒头密度 450.9 kg/m^3 ;

λ 为馒头的导热率^[11]:

$$\text{冻结前导热率: } \lambda_1 = w\lambda_w + (1-w)\lambda_{df} \quad (5)$$

$$\text{冻结后导热率: } \lambda_2 = \lambda_1 + wm(\lambda_i - \lambda_w) \quad (6)$$

式(5)、式(6)中: λ_{df} —淀粉的导热率, $0.245 \text{ W/m} \cdot \text{K}$; λ_w —水的导热率, $0.6 \text{ W/m} \cdot \text{K}$; λ_i —冰的导热率, $2.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$; w —馒头的含水率, 40.22% ; m —馒头的冻结率, 90% 。

c_p 为馒头比热:

$$\text{冻结点以上: } c_p = 3.35w + 0.84 \quad (7)$$

$$\text{冻结点以下: } c_p = 1.26w + 0.84 \quad (8)$$

h 为对表面流换热系数, $31.9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; T_f 为库温(预冷库 268.15 K , 结晶库温 248.15 K , 深冷库温 238.15 K)。

2 材料与方法

2.1 实验装置

实验装置为天津商业大学的变温平面网带食品速冻机^[12], 主要由保温库体、输送装置、制冷系统、

收稿日期: 2014-09-02

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD37B07)

作者简介: 宋晓燕, 1990 年出生, 女, 硕士研究生。

自动控制系统、数据采集系统组成,生产能力 100 kg/h。速冻库体内设置有食品传送装置,速冻库体上设置有进料口和出料口,库体内部通过保温材料依次分隔成预冷腔体、结晶腔体、深冷腔体三个腔体,预冷腔体、结晶腔体、深冷腔体内部分别安装有蒸发器和冷却风机,如图 1 所示。

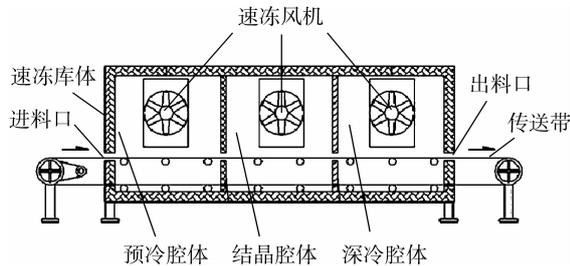


图 1 变温平面网带食品速冻机示意图

2.2 实验方法

选取初始温度为 25 ℃,半径约为 5 cm 的新鲜馒头为实验对象,将其直接放置在传送带上,馒头间距 5 cm。传送带频率设置为 10 Hz,馒头从进料口依次经过预冷腔体(温度 -5 ℃,风速 4 m/s)、结晶腔体(温度 -25 ℃,风速 4 m/s)和深冷腔体(温度 -35 ℃,风速 4 m/s)到达出料口。分别在其表面、中心和距离表面 1.5 cm 处各布一个热电偶,记录馒头在速冻过程中不同位置处的温度变化。重复该实验 3 次。

3 结果与分析

3.1 模拟结果

采用 ICEM - CFD 软件对馒头进行网格划分,网格分布见图 2,网格数为 252 829 个。网格划分的好坏直接决定了模拟结果的准确性,所以网格划分也是至关重要的。



图 2 馒头的网格划分示意图

采用 Fluent 软件进行数值模拟,求解方式设为 SIMPLEC 算法。由于馒头在速冻机各个腔体内所经过的时间与腔体长度以及传送带频率有关,而预冷段、结晶段、深冷段长度分别为 3、4 和 1 m,所以各段时间比设为 3:4:1。并在相应温度段的计算时间内设置与实验相同的冷空气温度。图 3 所示为馒头模拟 500 s 和 3 500 s 时刻的温度变化图。模拟 500 s 时馒头中心温度和表面温度分别为 22.85 ℃

和 -2.15 ℃,模拟 3 500 s 时馒头中心温度和表面温度分别为 -18.15 ℃和 -38.15 ℃。由此可知,约 3 500 s 后馒头内外均可达到 -18 ℃,满足储藏要求。(图中图标 2.55e + 02 表示温度为 255 K,即 -18.15 ℃。)

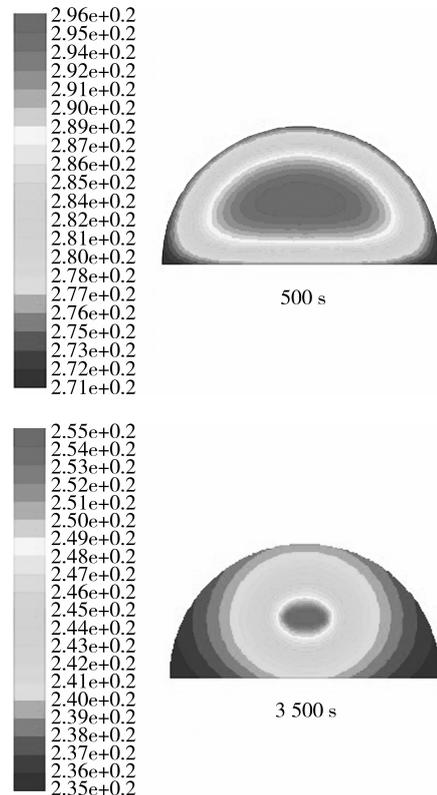


图 3 馒头温度云图

3.2 实验结果

馒头速冻过程中不同位置处的温度变化如图 4 所示,从图中可以看出,馒头表面温度下降最快,中心温度下降最慢,在同一时间内,越靠近食品中心温度越高。由于食品表面与冷空气进行强制对流换热,而食品内部则主要靠导热进行换热,所以不同深度的食品温度下降速度不同,越靠近食品表面,温度就越接近流体温度。

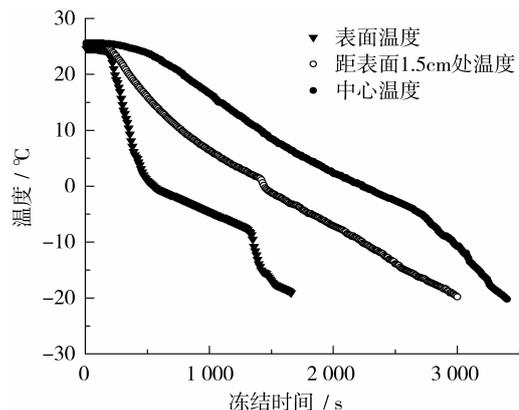


图 4 馒头不同位置的温度

3.3 数值计算与实验结果对比及误差分析

图5、图6、图7分别为馒头表面、距表面1.5 cm处、中心温度实验值与模拟值的对比结果。从三张图中可以看出,数值计算较好的模拟了速冻过程中馒头各位置处温度的变化,但模拟值与实验值仍存在一定误差。当冻结时间分别为3 280 s和3 390 s时,食品中心温度降至-18℃,速冻过程结束。实验与模拟的冻结时间分别为3 280 s和3 390 s,相对误差为3.35%,吻合较好。

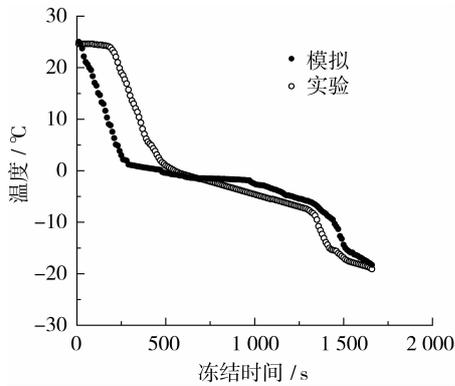


图5 表面温度对比

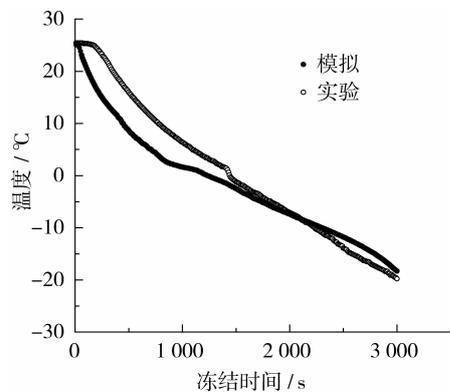


图6 距表面1.5 cm处温度对比

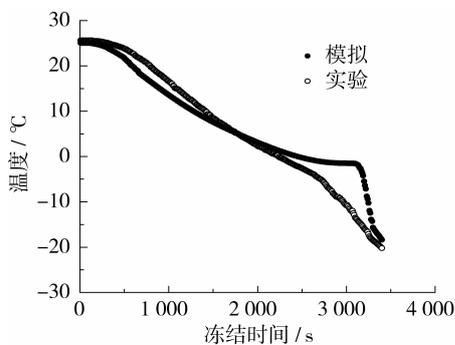


图7 中心温度对比

模拟计算与实际结果之间的误差大致有以下原因造成:实验过程中温度降至馒头冰点时,馒头内部的水结为冰,而冰的导热系数比水大,故温度下降较快;且模拟过程中馒头热物性参数的变化与实际的热物性变化存在一定的差别;模拟体初始温度与实验体初始温度存在偏差,模拟过程中,馒头内外温度

一致,皆为25℃,而实验过程中,馒头表面温度与中心温度相差约1℃;模拟之前,需要进行网格划分,网格划分的越细、越整齐,模拟结果就越接近实际结果。

馒头的速冻过程是一个很复杂的相变传热过程,会受到很多因素的影响。在建立数学模型时,为了求解需要,对实际的速冻过程进行了简化,做出一些理想假设。在模型中,假设馒头为半径5 cm的理想半球,而实际过程中馒头并不是规则的半球体;馒头在冻结过程中无明显体积变化,实际上馒头在冻结过程中,内部的水会结成冰,导致体积变化;馒头内部只存在导热,忽略热对流及传质过程;表面换热系数均匀一致且为常量等。这些假设必然会使模拟计算结果与实际结果有出入。因此,馒头速冻过程的理论模拟与实际过程存在差异。

4 结论

面食品在变温平面网带食品速冻机内的速冻过程是一个很复杂的相变传热过程,采用Fluent软件对馒头的速冻过程进行了数值模拟,为研究三温段食品速冻机的速冻过程提供了依据。虽然模拟结果与实验结果存在一定的误差,但在一定程度上能够反应速冻过程的真实性,为其它面食品在三温段食品速冻机内的速冻过程提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Zaritzky N E, Chemical and physical deterioration of frozen foods [J]. Chemical Deterioration and Physical Instability of Food and Beverages. 2010;561-607.
- [2] Griko Y V, Privalov P L. Calorimetric study of the heat and cold denaturation of B-lactoglobulin [J]. Biochemistry, 1992, (31): 8810-8815.
- [3] Carballo J. et al. High pressure/thermal treatment of meat batters prepared from freeze-thawed pork [J]. Meat Science, 2000, (54): 357-364.
- [4] 叶水泉,孙芝芳,武铁军. 食品流态化速冻的数值计算 [J]. 制冷技术, 1995, (3): 21-28.
- [5] Cleland D J, et al. Prediction of freezing and thawing times for multi-dimensional shape by numerical methods [J]. Int. J. Refrig. 1987, (10): 32-39.
- [6] Cleland A C, Earle R L. A comparison of analytical and numerical methods of predicting the freezing times of foods [J]. Journal of Food Science, 1997, (42): 1390-1395.
- [7] Coskan Ilicali, Tang Hee Teik, Lim Phaik Shian. Improved Formulations of Shape Factors for the Freezing and Thawing Time Prediction of Foods [J]. Lebensm. -Wiss. u. -Technol. 1999, (32): 312-315.
- [8] 李杰,谢晶,陆芳娟. 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): 123-125.
- [9] Min Zhang, Zhen-Hua Duan, et al. Effects of freezing conditions on quality of areca fruits [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61: 393-397.
- [10] 杨世铭,陶文铨. 传热学(第3版) [M]. 北京:高等教育出版社, 1998.
- [11] 季阿敏. 半球状食品解冻时间的数值模拟与试验研究 [J]. 中国食品学报, 2006, 6(3): 79-83.
- [12] 天津商业大学. 三温段食品速冻机 [P]. 中国: 201020637605. 9, 2011-08-03. 6