

熟肉真空冷却过程中水分迁移理论分析和实验

金听祥¹, 张海川¹, 李改莲¹, 陈焕新²

(1. 郑州轻工业学院机电工程学院, 郑州 450002; 2. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 真空冷却过程是复杂的相关传热传质过程。该文在能量和质量守恒理论的基础上, 经过适当的简化, 建立熟肉真空冷却过程中水分迁移的数学模型来分析水分迁移机理。利用圆柱形熟肉块的真空冷却实验来验证真空冷却过程中水分迁移的数学模型以获得真空冷却过程中熟肉的温度和压力的变化。结果分析发现: 温度的模拟结果与实验数据基本一致, 最大误差在 5% 以内, 这表明此模型能够很好地预测真空冷却过程中熟肉内部的温度和压力分布。而且, 通过模拟结果和实验数据可以得知: 真空冷却过程中水分从熟肉内部向外部迁移的主要驱动力是熟肉内部之间的压差以及熟肉与真空室内之间的压差。因此, 在实际应用过程中, 为了提高真空冷却速率, 应尽可能降低真空室内的压力以增加水分迁移的驱动力。

关键词: 真空冷却; 水分迁移; 熟肉; 数学模型

中图分类号: TQ025.2

文献标识码: B

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0309-04

金听祥, 张海川, 李改莲, 等. 熟肉真空冷却过程中水分迁移理论分析和实验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 309-312.

Jin Tingxiang, Zhang Haichuan, Li Gailian, et al. Theoretic analysis and experimental study on the mechanism of moisture movement during vacuum cooling of cooked meat[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 309-312.(in Chinese with English abstract)

0 引 言

真空冷却是一种快速蒸发的冷却方法, 它已经被广泛应用于去除花卉和果蔬内部的田间热, 以降低这些产品的温度和延长寿命。近几年来, 食品安全问题, 尤其是肉制品的安全问题已经越来越受到世界各国人们的重视。为了控制肉制品中的细菌繁殖和减少污染, 必须使肉制品能够快速冷却。传统的冷却方法如风冷、水冷等方法的冷却时间比较长, 需 6~10 h 左右, 已经不能够满足产品的快速冷却要求。因此, 真空冷却的应用就延伸到食品工业中, 并在熟肉以及肉制品的快速冷却中发挥了极大的作用。

真空冷却过程是一个复杂的传热传质耦合过程。为了研究真空冷却的过程机理。许多学者通过建立真空冷却过程的数学模型来描述真空冷却过程中的热质耦合。从已有的文献中可以发现几种模型存在^[1-14]。但是, 以前的数学模型中从未考虑真空冷却过程中的水分迁移以及产品内部的压力分布, 本文作者以前对熟肉真空冷却的数值模拟也只是模拟了真空冷却过程中产品温度的变化过程, 没有考虑真空冷却过程中产品内部压力和含水率的变化^[9]。真空冷却主要是依靠水分蒸发吸收热量从而使得产品温度降低, 真空冷却过程中的水分蒸发也就是一个水分迁移过程。为此, 本文将以熟肉为实验材料, 建立真空冷却过程中水分迁移的数学模型, 求解真空冷却过程中熟肉内部不同位置的温度、压力以及熟肉的冷却曲线, 以研究真空冷却过程中水分迁移的主要机理。

1 真空冷却过程中水分迁移数学模型的建立

真空冷却速度取决于真空室内的压力和产品的属性, 真空冷却主要是通过产品内部的水分蒸发吸收热量从而使得产品温度降低。图 1 显示了真空冷却过程中的水分迁移过程。熟肉的

真空冷却过程包括水分从熟肉的内部到表面和水分在表面蒸发到真空室。真空冷却过程中水分迁移包括自由水在熟肉内部以液态和蒸气两种型式扩散。然而, 一般情况下, 气体的扩散速率是液体扩散速率的 10000 倍^[15,16]。因此, 在建立真空冷却过程中水分迁移数学模型时, 与气体扩散相比, 液态自由水的扩散可以忽略。

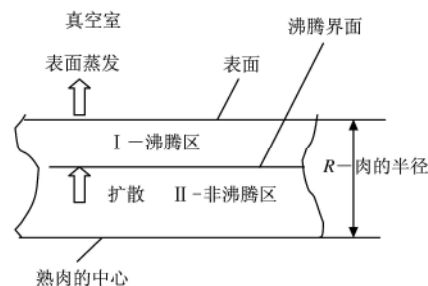


图1 真空冷却过程中熟肉内部的水分迁移

Fig.1 Moisture movement within cooked meat during vacuum cooling

一般来说, 水的沸点随着饱和压力的变化而变化。当水的沸点为 0℃时, 其对应的饱和压力是 609 Pa。在熟肉真空冷却期间, 当真空室内的真空压力低于或者等于熟肉温度对应的饱和压力时, 熟肉内部的水分将会沸腾蒸发以产生冷却效应。真空冷却初始阶段, 当产品的温度分布不均匀时, 水分将会首先在温度较高的地方沸腾, 然后, 如图 1 所示, 沸腾界面将会向低温方向移动, 直到产品内部的水分全部沸腾。另一方面, 当产品的初始温度分布均匀时, 产品表面的水分将会首先沸腾, 沸腾界面然后慢慢向中心移动。沸腾界面把产品分为两个区: 沸腾区和非沸腾区。在沸腾区水分是以气态和液态形式出现的; 在非沸腾区水分是仅仅以液态形式出现。在下面的分析和数学模型中, 研究对象为圆柱形的熟肉块。在建立数学模型时, 为了简化计算, 作如下假设:

- 1) 只考虑一维的热量和质量传递;
- 2) 真空冷却初始阶段, 熟肉的温度、压力和含水率分布均匀;
- 3) 熟肉表面的热对流和热辐射很小, 可以忽略不计。

根据上面的分析和假设, 在非沸腾区, 热传导可以通过傅立叶定律来表达:

收稿日期: 2007-03-07 修订日期: 2008-07-04

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究项目 (072300440140); 河南省自然科学基金基础研究项目 (2008A470013); 郑州轻工业学院科研基金资助项目 (2006XYJJ07); 郑州市重大科技攻关项目 (08ZGBN13054)

作者简介: 金听祥 (1976—), 男, 河南洛阳人, 博士后, 从事食品真空冷却冷藏以及食品冷却保鲜研究。郑州 郑州轻工业学院机电工程学院, 450002。Email: txjin@126.com

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (1)$$

式中 T ——产品的温度, $^{\circ}\text{C}$; t ——产品的冷却时间, s ; ρ ——产品的密度, kg/m^3 ; c_p ——产品的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; r ——产品的半径, m ; λ ——产品的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

相似地, 产品内的压力分布可以表达为^[17]:

$$\alpha \frac{\partial P}{\partial t} = k \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{k}{r} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (2)$$

式中 P ——压力, Pa ; α ——压力扩散系数, Pa^{-1} ; k ——气体的渗透率, $\text{m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ 。压力扩散系数和气体的渗透率分别可以被表达为:

$$\alpha = \frac{\omega}{\rho_g R_g T} \quad (3)$$

$$k = \frac{K}{\eta} \quad (4)$$

式中 K ——气体的比渗透率, m^2 ; η ——气体的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ω ——熟肉的孔隙率, %; R_g ——水蒸气的气体常数, $461 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ_g ——水蒸气的密度, kg/m^3 。

在沸腾区, 水分的沸腾对热量传递的影响应该被考虑, 控制方程可以通过下式来表达^[9]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + q_v \quad (5)$$

式中 q_v ——单位体积产品内部水分蒸发吸收的热量, W/m^3 。可以表达为:

$$q_v = h_v \dot{m}_v \quad (6)$$

式中 h_v ——水蒸气的蒸发潜热, J/kg ; \dot{m}_v ——单位体积产品内水分的蒸发速率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。其表达式为^[6]:

$$\dot{m}_v = 4 \frac{\omega}{d} h_m (P_{sat} - P) \quad (7)$$

式中 d ——熟肉内部通道的直径, m ; h_m ——沸腾系数, $\text{kg}/(\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2)$; P_{sat} ——熟肉温度对应的饱和压力, Pa 。其表达式为^[18]:

$$P_{sat} = \frac{2}{15} \times 10^3 \exp \left[18.5916 - \frac{3991.11}{T - 39.31} \right] \quad (8)$$

方程 (1)、(2) 和 (5) 的初始条件如下:

$$t = 0, \quad T = T_0 \quad (9)$$

$$P = P_{sat,0} \quad (10)$$

方程 (1)、(2) 和 (5) 在熟肉中心和表面的边界条件如下: 在熟肉中心:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (11)$$

在熟肉表面:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = q_{sf}, \quad P = P_{vc} \quad (12)$$

式中 T_0 ——产品的初始温度, $^{\circ}\text{C}$; $P_{sat,0}$ ——产品的初始温度对应的饱和压力, Pa ; P_{vc} ——真空室内的压力, Pa ; q_{sf} ——单位面积产品内部水分蒸发吸收的热量, W/m^2 。其表达式为:

$$q_{sf} = \dot{m}_{sf} h_v \quad (13)$$

式中 \dot{m}_{sf} ——熟肉单位面积产品中水分的蒸发速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。其表达式为^[6]:

$$\dot{m}_{sf} = h_m (P_{sat} - P) \quad (14)$$

2 模型验证

2.1 材料与方法

方程 (1)、(2) 和 (5) 以及边界条件可以构成一个非线性微分方程, 一般来说, 很难求出这类方程的分析解, 因此必须通过数值方法来进行求解。在本文中, 利用修改过的 CONDUCT 程序, 通过有限差分来求解水分迁移模型, 模型中仅仅考虑了熟肉径向的热量传递和水分迁移。在模拟中用的是直径为 60 mm 和长度为 150 mm 的圆柱形肉块。在模拟过程中, 熟肉的初始温度为 63°C , 初始含水率为 71%, 空间和时间步长分别为 $\Delta r = 2 \text{ mm}$ 和 $\Delta t = 30 \text{ s}$ 。熟肉的初始物性参数如表 1 所示。熟肉的比热容和热导率与其含水率有着很大的关系, 本文中所用到的熟肉的比热容和热导率是通过下面的公式来进行计算出来的^[19]。

$$c_p = 0.837 + 3.349W \quad (15)$$

$$\lambda = 0.26 + 0.33W \quad (16)$$

式中 W ——食品中的含水率, %。

表 1 真空冷却过程中水分迁移模型中的物性参数

Table 1 Parameters of moisture movement model during vacuum cooling

| 模 型 参 数 | | | | | | | |
|---|---|--|--|----------------------------------|--|---|---|
| 熟肉密度(ρ) / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 比热(c_p) / $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ | 传热系数(λ) / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ | 熟肉的孔隙率 ^a (ω) /% | 通道直径 ^a (d) /mm | 气体黏度(η) / $\text{Pa} \cdot \text{s}$ | 气体密度(ρ_g) / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 潜热(h_v) / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
| 1093 | 3214.8 | 0.4943 | 6 | 2.5 | 9.62×10^{-6} | 0.0512 | 2791.2 |

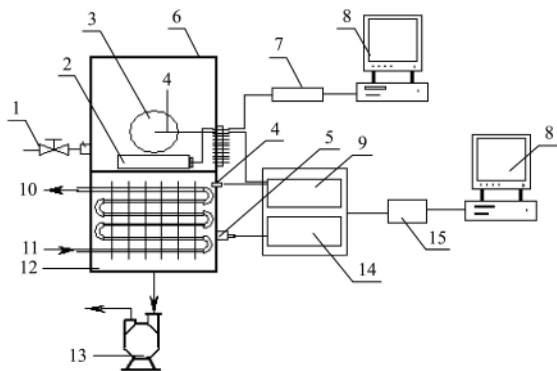
a: 熟肉内部通道在真空冷却前是充满水, 真空冷却期间水蒸气逐渐充满熟肉内部通道^[6]。

验证水分迁移模型通过熟肉的真空冷却实验来进行, 真空冷却实验装置如图 2 所示^[20]。真空冷却实验装置主要由 4 部分组成: 真空室、真空泵、冷阱和制冷系统。本实验所用的样品为猪后腿去骨肉, 在市场上直接购买。生肉通过 RF-P130Y 型电热锅 (珠海格力电器) 在水中被加热到一定的温度。实验过程中熟肉的温度分布是通过 T 型铜—康铜热电偶进行测量的, 测量精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。真空室内的压力是通过 CPCA-130Z 型压力传感器 (上海振太仪表有限公司) 来测量的, 精度为 $\pm 1 \text{ Pa}$ 。实验监控和数据采集系统采用北京亚控自动化软件科技有限公

司开发的工业自动化通用组态软件组态王 5.0, 压力和温度的数据采集通过牛顿模块 I-7018P 来实现。

2.2 结果与分析

图 3 显示了真空冷却过程中不同位置的温度变化。从图 3 中可以看出, 计算结果与实验结果吻合得较好, 它们之间的最大误差在 5% 左右。由于熟肉内部存在着热传导, 因此真空冷却过程中熟肉的表面和中心之间有着一定的温差, 当真空冷却过程结束后, 熟肉的表面温度和中心温度分别是 3.5°C 和 7.5°C 。



注: 1.放气阀 2.质量传感器 3.样品 4.热电偶 5.压力传感器 6.真空室 7.电子天平 8.采样计算机 9.温度控制器 10.制冷剂出口 11.制冷剂进口 12.冷阱 13.真空泵 14.压力控制器 15.I-7018P 模块

图2 真空冷却实验装置示意图^[20]

Fig.2 Schematic diagram of the vacuum cooler system

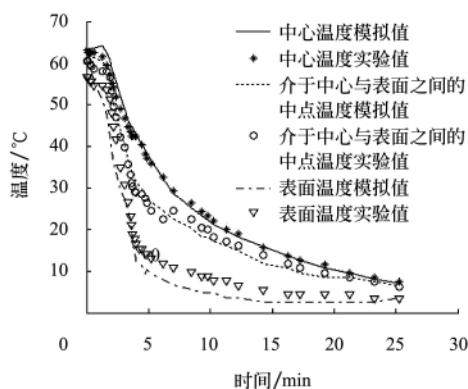


图3 在不同位置中模拟温度与实验温度的比较

Fig.3 Comparison of the calculated temperature in different position with experimental results

图4显示了熟肉内部的压力分布。在真空冷却初始阶段，熟肉内部的压力分布是均匀的。真空冷却过程中，真空室内的压力变化对熟肉内部的压力分布有着明显地影响。图5显示了真空冷却过程真空室内的压力变化，可以明显地看出真空室内的压力在2 min内从大气压降低到9867 Pa。当压力低于或者等于熟肉温度对应的饱和压力时，熟肉内部的水分将会沸腾。在非沸腾区，熟肉的温度分布仅仅被热传导影响，压力和温度分布呈抛物线形状。在沸腾区，压力分布与温度分布互相影响，真空冷却过程中沸腾界面是沿着熟肉的径向方向移动的。根据熟肉内部的压力分布和真空室内的压力变化可知，真空冷却过

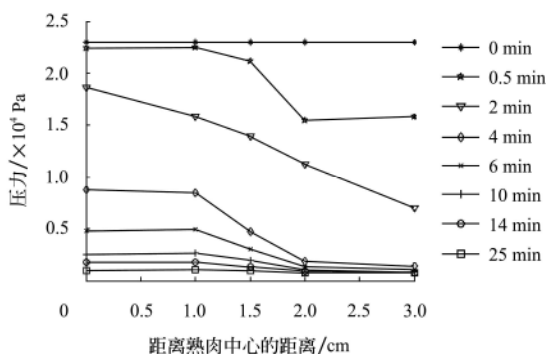
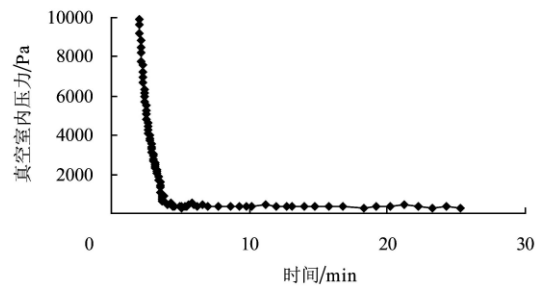


图4 真空冷却过程中熟肉内部的压力分布

Fig.4 Calculated pressure distribution from moisture movement model for cooked meat during vacuum cooling



注: 由于刻度的原因, 真空室内的初始压力变化没有在图中显示

图5 真空室内的压力变化^[20]

Fig.5 Variation of pressure in the vacuum chamber during vacuum cooling

程中，熟肉表面的水分首先沸腾，沸腾界面然后向中心移动。从沸腾界面到熟肉中心，由于压力高于熟肉温度对应的饱和压力，因此水分没有沸腾。然而，随着真空室内压力的快速降低，沸腾界面在2 min内从熟肉表面移动到中心。

3 结论

本文主要针对真空冷却过程中水分迁移机理进行了研究，建立了真空冷却过程中水分迁移的数学模型。此模型能够预测真空冷却过程中产品内部的温度和压力分布。由于熟肉内部压力不能测试，只能验证产品的温度，通过实验验证，温度模拟结果与实验结果基本一致，最大误差在5%以内。从真空冷却过程熟肉含水率和水分蒸发速率的变化以及熟肉的温度和压力分布中，可以得出以下结论：熟肉内部以及熟肉与真空室之间的压差是真空冷却过程中水分迁移的主要驱动力。水分迁移的方向主要沿着径向方向，主要是以蒸气的形式向外迁移的。随着真空冷却过程的进行，沸腾界面从熟肉表面向中心移动，随着真空室内压力的快速降低，沸腾界面在2min内就从熟肉表面移动到中心。

[参考文献]

- [1] Scharer M R, Houska M, Podlousky S, et al. Mathematical model of the vacuum cooling of liquids[J]. Journal of Food Engineering, 1996, 29(3), 339—348.
- [2] Dostal M, Petera K. Vacuum cooling of liquids: mathematical model[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61, 533—539.
- [3] 贺素艳. 果蔬真空预冷实验研究与理论分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2004.
- [4] Jin T X, Xu L. Numerical study on the performance of vacuum cooler and evaporation-boiling phenomena during vacuum cooling of cooked meat[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47, 1830—1842.
- [5] Wang L J, Sun D W. Modeling vacuum cooling process of cooked meat — part 1: analysis of vacuum cooling system[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25: 854—861.
- [6] Wang L J, Sun D W. Modeling vacuum cooling process of cooked meat — part 2: mass and heat transfer of cooked meat under vacuum pressure[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25: 862—871.
- [7] Sun Dawen, Hu Zehua. CFD simulation of coupled heat and mass transfer through porous foods during vacuum cooling process[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26: 19—27.
- [8] Sun Dawen, Hu Zehua. CFD predicting the effects of various parameters on core temperature and weight loss profiles of cooked meat during vacuum cooling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34: 111—127.
- [9] 金听祥, 朱鸿梅, 肖尤明, 等. 熟肉真空冷却过程的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 142—145.
- [10] Jin T X, Zhu H M, Xu L. Experimental investigation on moisture movement and its effect on ultrastructure of cooked meat during vacuum cooling[J]. Biosystems Engineering, 2006, 95(1): 111—118.
- [11] 金听祥, 李改莲, 张全国, 等. 不同蔬菜真空冷却过程影响因素分析

- [J]. 河南农业大学学报, 2005, 39(1): 71—74.
- [12] 金听祥, 朱鸿梅, 李改莲, 等. 真空冷却技术的研究进展[J]. 食品科学, 2005, 16(6): 276—280.
- [13] 金听祥, 李改莲, 徐烈, 等. 真空冷却过程的机理分析[J]. 真空与低温, 2005, 11(2): 116—120.
- [14] 金听祥, 朱鸿梅, 肖尤明, 等. 真空冷却过程中水分迁移的数学模型[J]. 真空与低温, 2004, 10(4): 221—224.
- [15] Hines A L. Mass Transfer: Fundamentals and Applications[M]. Englewood Cli, NJ: Prentice-Hall, 1985: 232.
- [16] McDonald K, Sun D W. The formation of pores and their effects in a cooked beef product on the efficiency of vacuum cooling[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 47: 175—183.
- [17] Siau J F. Transport Process in Wood[M]. New York: Springer-verlag, 1984: 218.
- [18] 沈维道, 蒋智敏, 童钧耕. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [19] Sweat V E. Thermal properties of foods[M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 1995: 166.
- [20] 金听祥, 李改莲, 徐烈. 熟肉真空冷却过程的水分迁移对其肌肉组织的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 229—232.

Theoretic analysis and experimental study on the mechanism of moisture movement during vacuum cooling of cooked meat

Jin Tingxiang¹, Zhang Haichuan¹, Li Gailian¹, Chen Huanxin²

(1. School of Mechanical and Electricity Engineering, Zhengzhou Institute of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. School of Energy and Power, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Vacuum cooling is a complicated heat and mass transfer process. Based on the theory of energy and mass balance, a simplified moisture movement model for vacuum cooling of cooked meat was developed. Vacuum cooling of cooked meat with cylindrical shape was carried out to obtain the variations of temperature and pressure. From the results, it can be found that the simulation results of temperature agree with the experimental data well, the maximum deviation between the simulated and the experimental data is within 5%, which shows that moisture movement model can be used to predict the temperature and pressure distributions within cooked meat during vacuum cooling. In addition, the calculated and experimental results suggest that total pressure differences within cooked meat and between cooked meat and vacuum chamber are the major driving forces. Therefore, in order to increase vacuum cooling rate, the pressure in the vacuum chamber should be reduced for the increment of driving forces of moisture movement during vacuum cooling of cooked meat.

Key words: vacuum cooling; moisture movement; cooked meat; mathematical model