

熟肉真空冷却过程的数值模拟

金听祥, 朱鸿梅, 肖尤明, 徐烈

(上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200030)

摘要: 该文主要针对熟肉的真空冷却进行了研究, 并模拟了真空冷却过程中的系统的压力变化、产品温度变化以及质量损失。模拟结果与试验数据相比较, 结果发现数值模拟的结果与试验数据吻合得很好, 模拟的压力与试验测定的压力的最大偏差在 200 Pa 以内; 模拟温度与试验温度的差值在 5 以下; 模拟与试验的质量损失的偏差在 5% 左右。数据模拟结果表明, 文中的数学模型可以被用于预测真空冷却过程中的压力、温度和质量损失的变化, 来分析熟肉的真空冷却过程。

关键词: 真空冷却; 熟肉; 数值模拟

中图分类号: TS205.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)06-0142-04

0 引言

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。为了减少肉中细菌的繁殖, 屠宰以后的热鲜肉应该被迅速冷却。另外, 通过把肉煮熟可以破坏肉中病原性微生物的滋养阶段。但是煮的过程并不能杀死所有的微生物。微生物学家推荐熟肉的温度应该被快速降低, 尤其是在 5~60 温度范围内, 细菌特别容易繁殖。熟肉快速降温可以减少细菌繁殖降低污染^[1]。为了使熟肉及其熟制品能够快速冷却, 如爱尔兰食品安全咨询委员会规定大块熟肉从 74 冷却到 4 必须在 2.5 h 内^[2], 另外一些欧洲国家也制定了相类似食品安全规范^[3]。我国也制定了一些关于肉及肉制品的处理标准^[4]。熟肉的冷却是食品安全中一个重要的环节。一般通过风冷、水冷等传统的方法使产品冷却降温。但是传统方法冷却时间都比较长, 需 6~10 h 左右^[5]。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的田间热, 以降低这些产品的温度和延长寿命^[6-8]。真空冷却也被用于鲜肉的冷却保鲜^[9]。

真空冷却的原理是利用真空造成的低压环境, 使产品内部的水分得以蒸发, 由于蒸发吸热, 导致产品本身的温度降低。真空冷却的基本特征为: 水的饱和温度是与饱和压力相对应的, 在大气压力下, 水的饱和温度是 100, 当真空度为 609 Pa 时, 水的沸点就降低到 0^[10]。为了保证熟肉及其肉制品的安全, 使它们能够在规定的时间内冷却到一定的温度, 国外很多学者已经对熟肉的真空冷却作了一些研究^[11, 12]。根据我国的国情, 本文针对熟肉的真空冷却进行了探讨, 着重描述了真空冷却系统和熟肉真空冷却过程中的数学模型。

1 数学模型

一般来说, 真空冷却过程被分为两个阶段: 首先是真空室内的压力降低到产品初始温度对应的饱和压力, 在饱和压力下, 闪点出现。在这个阶段, 蒸发很慢, 冷却

的效果也不明显; 然后进入第二阶段, 压力继续降低, 蒸发开始进行, 随着蒸发的进行, 产品的温度开始降低, 一直进行到预先设定的温度。但是蒸发的蒸汽必须通过冷凝器和真空泵除去。

1.1 模型建立

在建立数学模型时, 产品的形状被认为是圆柱形, 产品内部水分的蒸发引起温度变化, 产品温度只在径向变化。为了简化计算, 作如下假设:

产品的初始温度和水分含量是均匀分布的;

在真空冷却过程中, 产品的热物性参数一直保持不变;

产品各向同性;

在真空冷却过程中, 忽略产品表面的对流换热, 只考虑热传导和热辐射;

根据以上的假设, 产品在真空冷却过程中的换热方程为:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + q_v \quad (1)$$

初始条件为:

$$t = 0, T = T_0 \quad (2)$$

边界条件为:

$$\text{在产品的中心, } t > 0, r = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

$$\text{在产品的表面, } t > 0, r = \frac{D}{2},$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \sigma \cdot \epsilon \cdot (T_{k, sf}^4 - T_{k, vc}^4) + q_{sf} \quad (4)$$

式中 T ——产品的温度, ; T_0 ——产品的初始温度, ; $T_{k, sf}$ ——产品的表面温度, K; $T_{k, vc}$ ——真空室内的温度, K; t ——产品的冷却时间, s; λ ——产品的导热系数, $W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$; ρ ——产品的密度, $kg \cdot m^{-3}$; C ——产品的比热, $J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$; r ——产品中心到任一点的径向变量, m; D ——产品的直径, m; σ ——斯蒂芬-波尔兹曼常数, $5.7 \times 10^{-8} W \cdot (m^2 \cdot K^4)^{-1}$; ϵ ——发射率; q_v ——产品单位体积水分蒸发吸收的热量, $W \cdot m^{-3}$; 它的表达式为:

收稿日期: 2004-05-08 修订日期: 2004-08-30

作者简介: 金听祥(1976-), 男, 河南洛阳人, 博士生, 从事食品真空冷却冷藏以及食品冷却保鲜研究。上海交通大学 279# 信箱, 200030, Email: txjin@sjtu.edu.cn

$$q_v = - h_{vg} \cdot \dot{m}_v \quad (5)$$

在方程(4)中, q_{sf} 表示产品表面单位面积蒸发的热量, $W \cdot m^{-2}$; 表达式为:

$$q_{sf} = \frac{D}{4} \cdot q_v = - \frac{D}{4} \cdot h_{vg} \cdot \dot{m}_v \quad (6)$$

式中 h_{vg} ——蒸发潜热, $kJ \cdot kg^{-1}$; \dot{m}_v ——单位体积的蒸发速率, $kg \cdot (m^3 \cdot s)^{-1}$ 。

真空冷却过程中, 水分从产品中蒸发, 产品单位体积的蒸发速率为^[13]:

$$\dot{m}_v = \frac{4}{D} h_m (P_{sat} - P_{vc}) \quad (7)$$

在方程(7)中, $h_m = 8.4 \times 10^{-7} kg \cdot (Pa \cdot m^2 \cdot s)^{-1}$ 是产品的沸腾系数; P_{vc} ——真空室内的压力, Pa; P_{sat} ——产品温度 T 对应下的饱和压力, Pa; P_{sat} 与产品温度 T 的关系式可以表达为^[14]:

$$P_{sat} = \exp\left[23.209 - \frac{3816.44}{T - 46.44}\right] \quad (8)$$

真空室内压力 P_{vc} 随着时间变化的关系式为:

$$\frac{dP_{vc}}{dt} = - \frac{S \cdot P_{vc}}{V_f} \quad (9)$$

式中 S ——真空泵的泵速, $m^3 \cdot s^{-1}$; V_f ——真空室的容积, m^3 。

1.2 数值模型

方程(1)和方程(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求解。在本文中, Crank-Nicolson 方法被用来求解上述方程。为了求解方程(1), 方程(1)中的微分可以被表达为以下形式^[15]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1} + T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{4\Delta r} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{i+1}^{n+1} + T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^n + T_{i-1}^n - 2T_i^n}{2\Delta r^2} \quad (12)$$

产品的径向变量 $r(0 \leq r \leq \frac{D}{2})$ 被分为 $I(1 \leq i$

$I)$ 点, 步长 $\Delta r = \frac{D}{2(I-1)}$, 在任一节点 i 的距离 $r = (i-1) \cdot \Delta r$ 。同样道理, 将时间坐标划分为 $N-1$ 等分, 得到 N 个时间节点, 设定时间间隔为 Δt , 那么在时间节点 $n(0 \leq n \leq N)$ 的时间可以被计算为 $t = n \cdot \Delta t$ 。 T_i^n 表示在位置 $r = (i-1) \cdot \Delta r$ 和时间 $t = n \cdot \Delta t$ 时刻的温度。把式(10)、(11)和(12)代入方程(1)中, 产品的密度、导热系数和比热被认为是常数, 经过简化后, 方程被离散为

$$\begin{aligned} & \left[\frac{(2i-1) \cdot \lambda}{4(i-1)\Delta r^2} \right] \cdot T_{i+1}^{n+1} - \left[\frac{\rho C}{\Delta t} + \frac{\lambda}{\Delta r^2} \right] \cdot T_i^{n+1} + \\ & \left[\frac{(2i-3) \cdot \lambda}{4(i-1)\Delta r^2} \right] \cdot T_{i-1}^{n+1} = - \left[\frac{q_{v,i+1}^{n+1} + q_{v,i}^{n+1}}{2} \right] + \\ & \left[\frac{(1-2i) \cdot \lambda}{4(i-1)\Delta r^2} \right] \cdot T_{i+1}^n + \left[\frac{\lambda}{\Delta r^2} - \frac{\rho C}{\Delta t} \right] \cdot T_i^n + \end{aligned}$$

$$\left[\frac{(3-2i) \cdot \lambda}{4(i-1)\Delta r^2} \right] \cdot T_{i-1}^n \quad (13)$$

2 模型验证与结果分析

上述的数学模型通过 Matlab 6.1 软件来进行数值求解, 为了验证数学模型, 在真空冷却装置上对熟肉的真空冷却进行试验。在超市中买了一些火腿, 然后通过电热锅(型号为 RF-P130Y) 将其加热到 70 左右, 火腿的直径为 80 mm。试验过程中产品的中心温度和表面温度通过铜/康铜热电偶来测量, 热电偶的精度为 0.1, 温度信号通过数字显示仪(Agilent 34970A, Agilent Technologies, USA)来收集。产品冷却前后的质量通过电子天平来测量。产品的初始温度为 72, 环境温度 20。

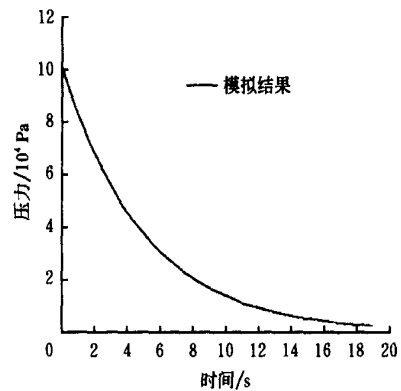


图 1 第一阶段真空室内压力的变化曲线

Fig 1 Variation of pressure in vacuum chamber during the first cooling phase

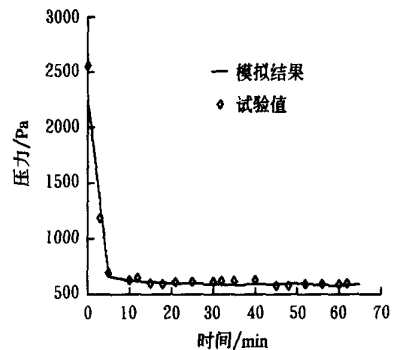


图 2 第二阶段真空室内压力的变化曲线

Fig 2 Variation of pressure in vacuum chamber during the second cooling phase

图 1 和图 2 显示了真空冷却过程中压力的变化曲线。从前面所述已经知道, 真空冷却的第一阶段是真空室内的压力从大气压降低到产品温度对应的饱和压力。从图 1 中可以看出在第一阶段真空室内的压力从 101325 Pa 降到 2272.2 Pa, 这个过程仅仅用了十几秒。真空室的容积为 0.02 m³, 泵速为 14.4 m³/h。第一阶段时间较短是由于试验装置中真空室的容积较小的原因。另外, 由于压力传感器测量范围太小的原因, 图 1 中没有显示出试验过程中真空室内的压力变化。真空冷却的第二阶段是从真空室内的压力达到产品温度对应的饱

和压力开始的,在这个阶段,产品开始失去水分并迅速冷却。从图2中可知第二阶段真空室内的压力从2272 Pa降到620 Pa,这一阶段持续时间较长,总共为66 min。模拟的真空压力变化与实验过程中的压力变化基本一致,没有太大的偏差。但是从图2中可以看出真空冷却过程中的压力会有一些波动,这是因为当压力降到设定的压力时,补气阀就打开,以保证真空室内的压力不能够过低,外界的一部分空气进入真空室内造成真空室内压力的不稳定。

图3显示了真空冷却过程中产品温度的变化。从图3中可以看出在真空冷却过程中产品的表面温度低于中心的温度,这是因为产品内部的传热方式以热传导为主。产品在70 min内从72℃被冷却到5℃。常规的冷却方法如风冷和水冷在同样条件下需要6~10 h,真空冷却的冷却时间远远低于常规冷却方法的冷却时间。模拟的温度与试验的温度基本一致,它们之间的误差在5%以内,最终产品的表面温度为1.2℃,中心温度为5.5℃。为了避免产品表面冷冻,在真空冷却过程应该一直保持产品的温度在0℃以上,这一点可以从图3中看出。

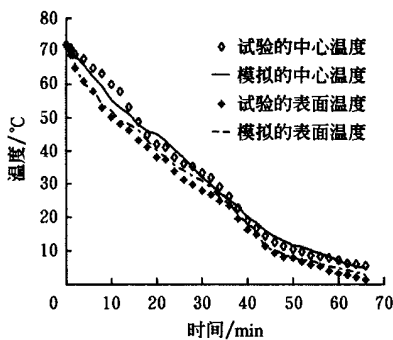


图3 真空冷却过程中温度变化曲线

Fig. 3 Variation of temperatures during vacuum cooling

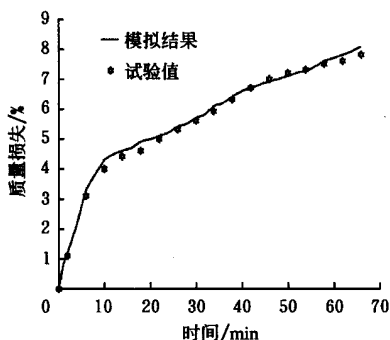


图4 真空冷却过程中的质量损失

Fig. 4 Variation of mass loss during vacuum cooling

图4显示了真空冷却过程中产品质量损失的变化。真空冷却的原理主要是依靠产品内部的水分蒸发来产生冷却效应,这就不可避免真空冷却过程中产品的质量会减少。模拟结果显示真空冷却的质量损失为8.1%,然而真空冷却质量损失的实验结果却为7.8%,它们之间的误差在4%左右。

3 结论与讨论

本文主要针对熟肉的真空冷却进行了研究,并模拟了真空冷却过程中的系统的压力变化、产品温度变化以及质量损失。模拟结果与试验数据相比较,结果发现数值模拟的结果与试验数据吻合的很好,误差在5%以内。数值模拟的结果表明文中建立的数学模型能够较准确地预测真空冷却过程中的系统的压力变化、产品温度变化以及质量损失。误差的产生是多方面因素综合的结果,在理论计算中,产品的热物性参数被认为是常数,然而在实际中,这些参数都是一直变化的。另一方面,在试验过程中,温度、压力的测量都会存在一些误差。

真空冷却的原理就是利用产品内部的水分蒸发来产生冷却效应从而使产品降温的。这就决定了真空冷却过程中产品会损失一定的水分,导致质量的减少。理论模拟的质量损失为8.1%。产品内部的水分损失也会对产品产生一些负面影响,因此在今后的研究中,要进一步研究真空冷却过程中水分损失机理以及真空冷却过程中的水分迁移。

[参 考 文 献]

- [1] James S J, James C. Meat Refrigeration[M]. U S A, New York: CRC Press LLC, 2000
- [2] Food Safety Advisory Committee. Guidelines on cook-chill systems in hospitals and catering premises [R]. Ireland, Dublin: Government Publications Office, 1991.
- [3] Department of Health and Social Security. Chilled and frozen: guidelines on cook-chill and cook freeze catering systems [R]. U K, London: HM SO Publications Center, 1989.
- [4] GB 12694-90, 肉类加工厂卫生规范[S]
- [5] Sun Dawen, Wang Lijun. Heat transfer characteristics of cooked meats using different cooling methods [J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23: 508-516
- [6] Sun Dawen, Tadhg Brosnan. Extension of the vase life of cut daffodil flowers by rapid vacuum cooling [J]. International Journal of Refrigeration, 1999, 22: 472-478
- [7] Noble R. A review of vacuum cooling of mushrooms [J]. Mushroom Journal, 1985, 149: 168-170
- [8] Rennie T J, Vigeault C, Raghavan G S V, et al. Effects of pressure reduction rate on vacuum cooled lettuce quality during storage [J]. Canadian Biosystems Engineering, 2001, 43(3): 339-343
- [9] 陈椒,张青,徐世琼,等. 鲜肉真空冷却保鲜工艺的研究[J]. 保鲜与加工, 2001, 5: 9-11
- [10] 贺素艳,李云飞. 果蔬真空预冷过程中热质传递的理论分析[J]. 真空与低温, 2003, 9(3): 29-34
- [11] James S J. The cooling of cooked meat products[A]. In: Proceedings of the Future Meat Manufacturing Processes [C]. London, U K: Institute of Mechanical Engineering, 1990, 1-9
- [12] Karl McDonald, Sun Dawen. Effect of evacuation rate on the vacuum cooling process of a cooked beef product

- [J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 48: 195- 202
- [13] Wang Lijun, Sun Dawen. Modelling 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.
- [14] Wang Lijun, Sun Dawen. Modelling vacuum cooling process of cooked meat—part 1: analysis of vacuum cooling system [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25: 854- 861.
- [15] Campanone L A, Giner S A, Mascheroni R H. Generalized model for the simulation of food refrigeration: development and validation of the predictive numerical method[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25: 975- 984.

Numerical simulation during vacuum cooling of cooked meat

Jin Tingxiang, Zhu Hongmei, Xiao Youming, Xu Lie

(*Institute of Refrigeration & Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China*)

Abstract: The vacuum cooling of cooked meats was studied in this paper. The variations of the pressure in vacuum chamber, the temperature and the mass loss of the cooked meats were simulated by numerical method during the process of the vacuum cooling. The predicted vacuum pressure, temperature variations and mass loss are compared with the measured values. The maximum deviation between the simulated and the experimental vacuum pressure is within 200 Pa. It is found that the difference between the simulated and the experimental temperature is within 5 °C by comparing the simulated results with the experimental data. The deviation between the simulated and the experimental mass loss is about 5%. The simulation results agree with the experimental data well. Therefore, the mathematical model can be used to predict the variations of vacuum pressure, temperature and mass loss during vacuum cooling for analyzing the vacuum cooling process of cooked meats.

Key words: vacuum cooling; cooked meats; numerical simulation

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.

Jin Tingxiang, Zhu Hongmei, Xiao Youming, et al. Numerical simulation during vacuum cooling of cooked meat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(1): 142- 145. (in Chinese with English abstract)