

火锅中的科学：利用非稳态传热模型确定食物加热时间

李晓宇, 刘珂, 张树永*

山东大学化学与化工学院, 济南 250100

摘要: 火锅是一种中国传统特色美食。在食用过程中, 人们通常通过定性观察来判断食物的生熟程度, 缺乏严谨的科学依据, 故存在一定的食品安全风险。本文通过构建简化模型, 借助物理化学原理对片状和球状食物的传热过程进行了讨论, 发现 1.8 mm 厚的肉片在沸水中加热 15 s 时, 其中心温度即可接近 100 °C; 而对于直径 2.6 cm 的肉丸, 其中心温度接近 100 °C 需要 8 min 以上。这些结论对保障饮食安全具有一定的指导意义。

关键词: 火锅; 非稳态传热; 片状模型; 球状模型

中图分类号: G64; O642

Science in Hot Pot: Determining the Heat-Up Duration Using Model of Unsteady Heat Transfer

LI Xiaoyu, LIU Ke, ZHANG Shuyong *

School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University, Jinan 250100, P. R. China.

Abstract: Hot pot is a famous traditional Chinese cuisine. During hot pot, people usually judge whether or not the meat is well done by observation. This way for making judgement lacks scientific support and may possibly cause safety risks. In this paper, we set up two models for meat slice and ball, respectively, and treated the heat transfer from soup to the very center of meat based on these unsteady state heat transfer models. The temperature of very center of meat is plotted against time, and the time required for heating the very center of meat to ca. 100 °C was determined. It was found that the time required for the center temperature to attain 100 °C is ca. 15 s for meat slice of 1.8 mm thick, and more than 8 min for meat ball of 2.6 cm in diameter. The discussion and conclusion are helpful for food safety.

Key Words: Hot pot; Unsteady heat transfer; Plane model; Spherical model

1 引言

火锅是一种中国传统特色美食, 在涮火锅的过程中, 人们通常通过观察肉类色泽和漂浮状态的变化等对食物的生熟程度进行定性判断。消费者通常认为当肉可以漂浮且颜色变为灰色时即可食用。其实, 单凭肉眼观察肉的颜色是否褐变以及是否漂浮, 很容易导致错误判断。这是因为肉类在加热熟制过程中, 颜色一般会随着变性肌红蛋白的增多而变为灰白色, 但有时肉类也会发生未熟褐变和已熟发粉现象^[1]。

在火锅加热食物的过程中, 水基本上保持持续沸腾状态, 食物的温度也在持续改变, 这是一个典型的非稳态传热过程。虽然有学者通过建立球体的非稳态传热模型对其他问题进行了一些讨论^[2], 但目前国内外学者尚未对火锅的传热问题进行系统分析。本文利用数学模型对片状(以肉片为代表)

及球状(以肉丸为代表)食物的加热过程进行了讨论, 得出了加热过程中食物中心温度随时间的变化规律, 进而得出食物加热的建议时间。讨论时我们以传统的加热方式作为参考, 即以接近 100°C 的高温为加热终点, 而不考虑低温烹饪在食用品质、营养品质等方面可能带来的好处^[3]。这是因为低温烹饪的加热终点因人而异, 难以得出统一的结论。

2 分析与讨论

2.1 片状食物的传热

我们把肉片近似为一个薄板, 因为相较于肉片的长度而言肉片的厚度很小, 在相同的时间内, 沿肉片长度方向的传热相较于宽度方向的可以忽略。这样, 计算片状食物加热所需时间就转化为沿着厚度方向, 从肉片表面向中心传热的问题。

假设放入火锅后肉片两面受热均匀, 同时火锅的高汤处于持续沸腾状态, 水的湍动程度很大, 导致水的对流传热系数很高。为了简化处理, 我们近似认为肉片两表面瞬间达到沸腾温度。根据这一假设, 我们将肉片的加热过程简化为无限大平面的一维非稳态传热问题, 并建立如图 1 所示的数学模型。

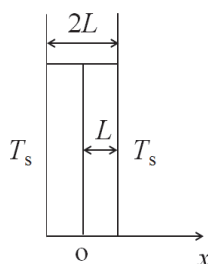


图 1 平板非稳态导热示意图

假设肉片的厚度为 $2L$, 肉片的初始温度为 T_0 , 放入火锅后肉片两面的温度瞬间达到锅内温度 T_s , 且在整个加热过程中 T_s 保持不变, 设加热时间为 t 。由于加热是对称的, 为计算方便, 我们取肉片中心为坐标原点, 距离肉片中心的距离为 x 。

导热的基本微分方程为:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + \frac{q}{k} \quad (1)$$

对于图 1 所示的一维传热问题, 其热传导方程可表示为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

其相应的初始条件和边界条件为^[4]:

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

$$\text{边界条件: } x=\pm L; \quad T=T_s \quad (4)$$

$$x=0; \quad \frac{\partial T}{\partial x}=0 \quad (5)$$

其中 T 表示温度。为求解方程(2), 须首先将边界条件齐次化^[5]。以 $2L$ 为肉片总厚度, 同时引入无量纲温度 T^* , 无量纲长度 L^* 和无量纲时间 F 。分别替代温度 T 、长度 x 和时间 t , 其定义分别为:

$$T^* = \frac{T - T_s}{T_0 - T_s} \quad (6)$$

$$L^* = \frac{x}{L} \quad (7)$$

则方程(2)可化为:

$$\frac{\partial T^*}{\partial F_o} = \frac{\partial^2 T^*}{\partial L^{*2}} \quad (8)$$

相应的定解条件转化为:

$$F_o = 0; \quad T^* = 1 \quad (9)$$

$$L^* = 1; \quad T^* = 0 \quad (10)$$

$$L^* = 0; \quad \frac{\partial T^*}{\partial L^*} = 0 \quad (11)$$

具体求解过程见补充材料(www.dxxh.pku.edu.cn)。最后得到的解为^[4]:

$$T^* = \frac{4}{\pi} \left\{ \exp\left[-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 F_o\right] \cos\left(\frac{\pi}{2} L^*\right) - \frac{1}{3} \exp\left[-\left(\frac{3\pi}{2}\right)^2 F_o\right] \cos\left(\frac{3\pi}{2} L^*\right) + \frac{1}{5} \exp\left[-\left(\frac{5\pi}{2}\right)^2 F_o\right] \cos\left(\frac{5\pi}{2} L^*\right) - \dots \right\} \quad (12)$$

从肉的热物性数据表^[6]可知,猪肉的比热 $C = 3204 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 密度 $\rho = 1170 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 导热系数 $\lambda = 0.50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 则猪肉的热扩散系数为:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C \times \rho} = \frac{0.50}{3204 \times 1170} = 1.30 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (13)$$

一些学者^[7]曾采用水的热扩散系数($\alpha = 1.4 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)近似代替肉类的热扩散系数,而式(13)的结果表明,两者的数值相差不大。

假设肉片的厚度 $2L = 1.8 \text{ mm}$, 其初温 $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, 可得:

$$F_o = \frac{\alpha}{L^2} t = \frac{1.3 \times 10^{-7}}{(0.9 \times 10^{-3})^2} t = 0.1605t \quad (14)$$

以时间 t 对肉片中心, 即 $x = 0$ 处的温度 T 作图得图 2。

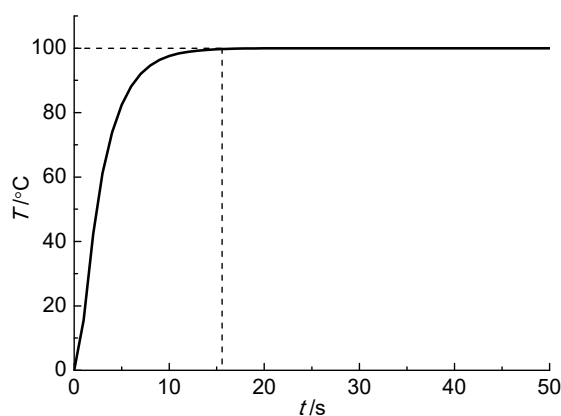


图 2 片状食物中心温度与时间的关系图

图 2 显示,肉片中心的温度随时间的延长迅速上升,在 15 s 左右即接近 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由于蛋白质变性需要一定的时间^[7],为了保证食用安全,将肉片放入火锅中的时间不宜低于 15 s。

2.2 球状食物的传热

将牛肉丸、鱼丸、虾滑等球状食物假设为理想球体。为了简化处理，我们采用球坐标系，将其加热问题等效为沿径向导热的非稳态导热问题。

设肉丸半径为 R_0 ，初始温度为 T_0 ，肉丸放入锅中瞬间其表面温度即等于锅内温度 T_s ，且加热过程中锅内温度 T_s 保持不变。由于加热是对称的，为计算方便，我们取肉丸中心为坐标原点。于是热传导方程及相应的初始条件和边界条件为：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (15)$$

初始条件：

$$t = 0; T = T_0 \quad (16)$$

边界条件：

$$r = \pm R_0; T = T_s \quad (17)$$

$$r = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (18)$$

其中 r 为距离肉丸中心的径向距离。为了将边界条件齐次化，同样引入无量纲温度 T^* ，无量纲长度 X^* ，无量纲时间 n^* 来分别替代温度 T ，径向距离 r 和时间 t ，其定义分别为：

$$T^* = \frac{T - T_s}{T_0 - T_s} \quad (19)$$

$$X^* = \frac{r}{R_0} \quad (20)$$

$$n^* = \frac{\alpha}{R_0^2} t \quad (21)$$

则方程(15)可化为：

$$\frac{\partial T^*}{\partial n^*} = \frac{1}{X^{*2}} \frac{\partial}{\partial X^*} \left(X^{*2} \frac{\partial T^*}{\partial X^*} \right) \quad (22)$$

相应的定解条件化为：

$$n^* = 0; T^* = 1 \quad (23)$$

$$X^* = 1; T^* = 0 \quad (24)$$

$$X^* = 0; \frac{\partial T^*}{\partial X^*} = 0 \quad (25)$$

求解得到^[9]：

$$T^* = \frac{2}{\pi X^*} \{ \exp[-\pi^2 n^*] \sin(\pi X^*) - \frac{1}{2} \exp[-4\pi^2 n^*] \sin(4\pi X^*) + \frac{1}{3} \exp[-9\pi^2 n^*] \sin(9\pi X^*) + \dots \} \quad (26)$$

假设肉丸半径 $R_0 = 1.3 \text{ cm}$ ，初温为冰箱冷藏温度 $T_0 = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ ，代入式(13)求得的热扩散系数可得：

$$n^* = \frac{\alpha}{R_0^2} t = \frac{1.3 \times 10^{-7}}{(1.3 \times 10^{-2})^2} t = 7.692 \times 10^{-4} t \quad (27)$$

由时间 t 对距离肉丸中心 $r = 0.01 \text{ cm}$ 处的温度 T 作图，得到图 3。

由图 3 可知，将肉丸放入沸腾的火锅中，161 s 后肉丸中心的温度仅能达到 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 。有文献报导，把肉丸放入煮沸的汤锅中，约 2 min 后肉丸浮起，此时其中心温度仅为 $45.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[10]，这与我们的计算结果比较一致。这表明以肉丸浮起判断生熟并不准确。为了达到灭菌效果以保证食用安全，肉丸的中心温度应接近 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ，这意味着加热时间应延长至 8 min 以上为宜。

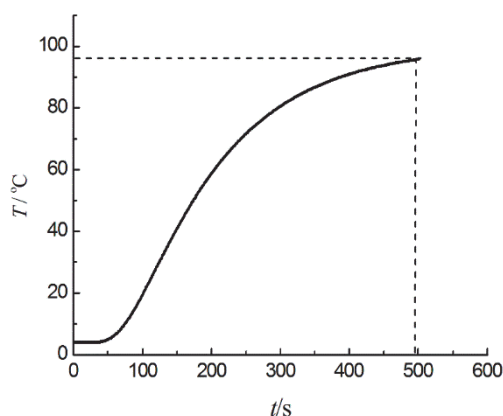


图3 球状食物中心温度与时间的关系

3 结语

利用两个简化的数学模型,将火锅加热食物问题转变为一维方向或者径向的非稳态传热过程,求解相关方程后,绘制了加热时间与食物中心温度的关系图,直观地对加热时长进行了判断。计算表明,对于 1.8 mm 厚的肉片,大约须加热 15 s 才能煮熟。所谓“七上八下”的经验,一方面会导致肉片表面温度降低更不利于煮熟,另一方面时间过短,其实并不安全;而对于直径 2.6 cm 的肉丸,大约 2 min 肉丸即可上浮,而加热 8–10 min 以上才能保证食用的安全,认为肉丸浮起来就是熟了的观点是错误的。

参 考 文 献

- [1] 甄少波, 李兴民, 邹磊, 刘奕忍. 食品研究与开发, **2010**, 31 (12), 221.
- [2] 陈丽萍. 内蒙古科技与经济, **1999**, S2, 90.
- [3] 高文宏, 王君翠, 唐相伟, 韩忠. 现代食品科技, **2016**, 32 (8), 191.
- [4] 陈涛, 张国良. 化工传递过程基础. 第 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2009: 148.
- [5] 刘建亚, 吴臻. 大学数学教程——微积分 2. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [6] 荣玉珊, 胡萍. 肉类工业, **1996**, No. 2, 42.
- [7] 叶庆银, 张桂芳, 易小红, 邹同华. 天津商学院学报, **2007**, 27 (3), 17.
- [8] 卢雁, 李向荣. 化学进展, **2005**, 17 (5), 905.
- [9] 王小增, 曾辉, 杨久红. 机械设计与制造, **2012**, No. 7, 225.
- [10] [2018-03-22]. <http://health.people.com.cn/n1/2017/1013/c14739-29585266.html>.