

# 果蔬热处理传热过程的数值模拟及验证

尹海蛟, 杨昭<sup>\*</sup>, 陈爱强

(天津大学热能研究所, 天津 300072)

**摘要:** 为了研究果蔬采后热处理过程的传热机理, 建立了柱状与球状果蔬热处理的普适传热模型, 对模型进行了数值模拟及试验验证。结果表明: 所建模型能够准确预测多种边界条件下柱状与球状果蔬热处理时的组织温度变化及动态响应, 柱状及球状果蔬的模型预测值与实测值的平均相对误差及均方根误差均低于 5%。热水浸泡法与热空气法的对比试验表明: 达到相同的热处理效果, 伊丽莎白香瓜热水浸泡法的处理时间仅为热空气法的 35%~50%; 热水浸泡法中香瓜果实的表面换热系数为 190~250 W/(m<sup>2</sup>·°C), 而在热空气法中仅为 10~30 W/(m<sup>2</sup>·°C)。所建普适传热模型及相关试验结论可为采后果蔬热处理工艺参数的确定及优化提供参考。

**关键词:** 热处理, 模型, 数值分析, 传热, 果蔬

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.058

中图分类号: S379, O242.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0344-05

尹海蛟, 杨昭, 陈爱强. 果蔬热处理传热过程的数值模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 344-348.

Yin Haijiao, Yang Zhao, Chen Aiqiang. Numerical simulation and experimental verification of heat transfer for fruits and vegetables during heat treatment[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 344-348. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

作为一种无毒、无污染、无化学药剂残留的果蔬贮前预处理方法, 果蔬热处理技术受到了国内外众多学者的关注与研究<sup>[1-8]</sup>。果蔬热处理是指将果蔬短时间置于非致死的高温中进行采后处理的一种物理保鲜方法<sup>[2]</sup>, 具有控制果蔬病虫害, 调节果蔬生理生化代谢, 减轻果蔬冷害, 延缓果蔬衰老及延长果蔬货架期等作用<sup>[3-7]</sup>。热处理方法包括热水浸泡法、热空气法、热蒸汽法及远红外处理法等, 其中以热水浸泡法及热空气法最为常用<sup>[8]</sup>。在果蔬的热处理技术中, 处理温度及处理时间是影响热处理效果的 2 个关键参数<sup>[9]</sup>。不同种类的果蔬, 其最佳的热处理温度及热处理时间不同, 温度过低或时间过短, 处理效果不理想, 温度过高或时间过长则容易引起果蔬的高温热损伤。目前, 国内外学者对果蔬热处理技术进行了大量的研究, 但大多集中在热处理对果蔬保鲜效果的影响方面, 而对热处理技术中果蔬组织的传热规律及传热机理研究尚未见报道, 实践过程中热处理工艺参数的确定基本上依靠经验数据, 具有一定的盲目性和随意性。针对这一问题, 在分析果蔬传热机理的基础上, 建立了果蔬热处理过程的普适传热模型, 对模型进行了数值求解并进行了试验验证, 旨在为采后果蔬热处理工艺参数

的确定及优化提供参考及理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

采用以黄瓜为代表的柱状果蔬及以伊丽莎白香瓜为代表的球状果蔬对所建传热模型的精度及普适性进行试验验证。两种试材均购自天津市红旗农贸市场, 选择大小均一(黄瓜直径为 3.8 cm, 香瓜直径为 9 cm)、无机械伤、无病虫害的果实备用。果实密度以排水法测定, 其他热物性参数根据文献[10]的方法确定, 各参数如表 1。

表 1 试验果蔬的物性参数

Table 1 Physical properties parameters of experimental fruits and vegetables

名称	密度 $\rho$ / (kg·m <sup>-3</sup> )	比热 $C_p$ / (J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	导热系数 $k$ / (W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	热扩散率 $a$ / (10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	呼吸热 $H$ / (W·m <sup>-3</sup> )
黄瓜	932	3850	0.54	1.50	53
香瓜	915	3875	0.56	1.58	48

### 1.2 试验及测试方法

试验前将测试果蔬放置在恒温试验箱(无锡市泰诺试验设备有限公司)内进行内外温度均一化处理, 处理温度为 22°C, 处理时间为 5 h。热水浸泡法传热试验在恒温水槽(宁波天恒仪器厂)内以全浸方式进行; 热空气法试验在试验室的多功能恒温恒湿库<sup>[11]</sup>内进行。采用经标准温度计标定的 T 型热电偶(天津中环仪表厂)测量热处理果实温度变化, 热电偶探针直径为 1 mm, 测温精度为 ±0.1°C。香瓜的测温在其赤道线周线位置处进行, 黄瓜的测温在其中间段位置处进行。

在传热模型精度及普适性验证试验中, 采用热水浸泡法, 测试对象为黄瓜(代表柱状果蔬)及香瓜(代表球状果蔬), 热处理温度为 40°C, 热处理时间为 90 min。

收稿日期: 2010-06-28 修订日期: 2010-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51076112); 教育部博士点基金项目(200800560041)

作者简介: 尹海蛟(1983-), 男, 内蒙赤峰人, 博士生, 主要从事农产品低温冷藏及生物传热技术研究。天津 天津大学热能研究所, 300072。

Email: yinhaijiao83@163.com

\*通信作者: 杨昭(1960-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事生物冷藏保鲜及制冷热泵新技术研究。天津 天津大学热能研究所, 300072。

Email: zhaoyang@tju.edu.cn

在进行不同热处理方法（热水浸泡法及热空气法）对比试验时，以香瓜为测试对象，热处理温度为 40℃，热处理时间为 150 min。各组试验均重复 3 次。

### 1.3 果蔬热处理进程及温度表征

采用无因次过余温度  $\theta$  对热处理果蔬的温度进行表征，无因次过余温度的表达式为

$$\theta = \frac{T - T_h}{T_0 - T_h} \quad (1)$$

式中， $T$  为果蔬热处理某一时刻的温度，℃； $T_0$  为果蔬的初始温度（22℃）； $T_h$  为热处理工艺温度，℃。

另外，以 1/2、3/4 及 7/8 热处理时间对果蔬的热处理传热进程进行量化描述，其对应的无因次过余温度分别为  $\theta=0.5$ ， $\theta=0.25$  及  $\theta=0.125$ 。

### 1.4 模型精度的检验指标

采用平均相对误差  $MD$  与均方根误差  $RMSE$  对模拟及实测结果间差异进行统计检验。

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^m [(t_c - t_s) / t_c]}{m} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m [(t_c - t_s) / t_c]^2}{m}} \quad (3)$$

式中， $t_c$  为试验测量温度； $t_s$  为数值模拟温度； $i$  为数据节点编号； $m$  为数据点总数。

## 2 果蔬热处理的传热模型

### 2.1 模型假设

果蔬热处理是一个具有生命特征的植物传热过程，其内部的水分迁移及呼吸代谢使果蔬的传热过程不同于一般的工程材料。为方便热处理传热模型的建立，做如下假设：果蔬在热处理的温度范围内为常物性，且各向同性；果蔬内部只有导热和水分迁移，且水分迁移不引起热量传递；忽略果蔬表面水分蒸发对果蔬温度的影响；热量传递只在沿果蔬径向的一维方向进行。

### 2.2 柱状和球状果蔬热处理的普适传热模型建立

根据傅立叶定律，建立柱状和球状果蔬热处理时的普适传热模型<sup>[12-14]</sup>

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \psi \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + H \quad (0 < r < R, \tau > 0) \quad (4)$$

微分方程 (4) 的定解条件为  
初始条件

$$T = T_0 \quad (0 \leq r \leq R, \tau = 0) \quad (5)$$

边界条件

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 & (r = 0, \tau > 0) \\ \rho C_p \delta \frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha(T_h - T) - k \frac{\partial T}{\partial r} & (r = R, \tau > 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中， $\rho$  为果蔬的平均密度， $\text{kg/m}^3$ ； $C_p$  为果蔬的比热， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{℃})$ ； $\tau$  为热处理时间， $\text{s}$ ； $k$  为果蔬的平均导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$ ； $\psi$  为果蔬的形状因子（柱状果蔬  $\psi=1$ ，球状果蔬  $\psi=2$ ）； $H$  为果蔬的呼吸热， $\text{W}/\text{m}^3$ ； $r$  为果蔬组织内某点

距中心位置的距离， $\text{m}$ ； $R$  为果蔬半径， $\text{m}$ ； $\alpha$  为热处理时果蔬的表面换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ ； $\delta$  为边界层厚度， $\text{m}$ 。

### 2.3 果蔬热处理的表面换热系数

热处理果蔬的表面换热系数可由与雷诺数有关的 Nusselt 关联式得出<sup>[15]</sup>。

热水浸泡法

$$Nu = 0.2672 Re^{0.432} \cdot Pr^{1/3} \quad (1000 < Re < 24000) \quad (7)$$

热空气法

$$Nu = 1.2639 Re^{0.449} \cdot Pr^{1/3} \quad (1000 < Re < 70000) \quad (8)$$

式中， $Nu$  为努塞尔数； $Re$  为雷诺数； $Pr$  为普朗特数；上述 3 个物理量均为无量纲准则数。

## 3 数值模拟

### 3.1 数值计算方法

在传热问题的数值解法中，有限差分法使用广泛，并具有重要的应用价值。其实质是把传热空间与时间坐标中连续的物理量用一系列有限离散点的集合代替，再通过一定的原则建立这些数据点之间的离散方程，并求解离散方程以获得求解变量的近似值<sup>[16]</sup>。本文采用有限差分方法对果蔬热处理传热过程进行数值求解。

### 3.2 数值计算模型

热处理果蔬的物理模型如图 1 所示。果蔬不同节点位置处的传热离散方程如下<sup>[17-18]</sup>。

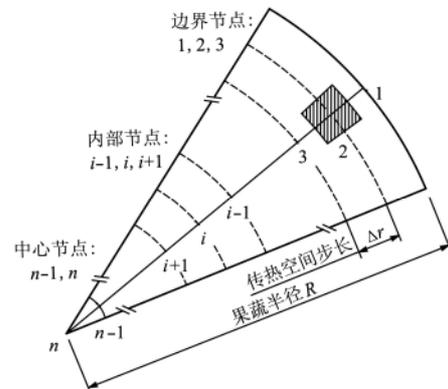


图 1 果蔬热处理数值求解的物理模型  
Fig.1 Physical model of heat-treated fruits and vegetables

#### 3.2.1 内部节点

根据上文所建传热模型，对于果蔬的内部节点  $i$  有

$$\rho C_p \frac{(T'_i - T_i)}{\Delta \tau} = k \left[ \frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{\Delta r^2} + \frac{\psi}{r} \cdot \frac{(T_{i-1} - T_{i+1})}{2\Delta r} \right] + H \quad (9)$$

式中， $\Delta \tau$  为传热分析的时间步长， $\text{s}$ ； $\Delta r$  为传热分析的空间步长， $\text{m}$ ； $T_i$  表示内部节点  $i$  在  $\tau$  时刻的温度，℃； $T'_i$  表示节点  $i$  在  $\tau + \Delta \tau$  时刻的温度，℃，依此类推。

以傅立叶数  $Fo$  表示，则式 (9) 变形为

$$T'_i = \frac{Fo}{2} \left[ \left( 2 + \frac{\psi \cdot \Delta r}{r} \right) T_{i-1} + \left( \frac{2}{Fo} - 4 \right) T_i + \left( 2 - \frac{\psi \cdot \Delta r}{r} \right) T_{i+1} + \frac{2H \cdot \Delta r^2}{k} \right] \quad (10)$$

其中

$$Fo = a \frac{\Delta \tau}{\Delta r^2} \quad (11)$$

式中  $a$  为果蔬组织的热扩散率,  $m^2/s$ 。其计算式为

$$a = \frac{k}{\rho C_p} \quad (12)$$

### 3.2.2 中心节点

对于中心节点  $n$ , 根据罗比塔法则, 当  $r \rightarrow 0$  时

$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (13)$$

于是可得中心节点  $n$  处的离散方程为

$$\rho C_p \frac{(T'_n - T_n)}{\Delta \tau} = 2k(1 + \psi) \left( \frac{T_{n-1} - T_n}{\Delta r^2} \right) + H \quad (14)$$

式中,  $T_n$  表示中心节点  $n$  在  $\tau$  时刻的温度,  $^{\circ}C$ ;  $T'_n$  表示节点  $n$  在  $\tau + \Delta \tau$  时刻的温度,  $^{\circ}C$ 。

将式 (11) 代入上式, 整理可得

$$T'_n = Fo[(2 + 2\psi)T_{n-1} + \left(\frac{1}{Fo} - 2 - 2\psi\right)T_n + \frac{H \cdot \Delta r^2}{k}] \quad (15)$$

### 3.2.3 边界节点

根据果蔬与热处理循环介质间的能量平衡关系, 可得边界节点 1 处的离散方程为

$$\rho C_p \frac{\Delta r (T'_1 - T_1)}{2 \Delta \tau} = \alpha(T_h - T_1) - \frac{k}{\Delta r} (T_1 - T_2) \quad (16)$$

式中,  $T_1$  表示边界节点 1 在  $\tau$  时刻的温度,  $^{\circ}C$ ;  $T'_1$  表示节点 1 在  $\tau + \Delta \tau$  时刻的温度,  $^{\circ}C$ 。

将式 (11) 代入上式, 整理可得

$$T'_1 = 2Fo[T_2 + Bi \cdot T_h + \left(\frac{1}{2Fo} - 1 - Bi\right)T_1] \quad (17)$$

其中,  $Bi$  为热处理果蔬的无因次毕渥数, 其物理含义表示了热处理时果蔬组织内部的导热热阻与果蔬表面对流热阻的相对大小, 其计算式为

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \Delta r}{k} \quad (18)$$

### 3.3 方程的稳定性判据

为了保证离散方程结果的收敛及稳定, 方程的空间步长  $\Delta r$  及时间步长  $\Delta \tau$  须满足一定的条件。以内部节点离散方程式 (10) 为例, 如果  $T_i$  系数为负, 则  $\tau$  时刻的  $T_i$  越低, 节点  $i$  在  $\tau + \Delta \tau$  时的温度  $T_i$  就越高, 违背了热力学原理。因此, 上述离散方程具有稳定性的充分条件是方程中各温度系数不能为负。由此可得方程 (10)、(15) 及 (17) 的稳定性条件分别为

$$\begin{aligned} Fo &\leq 0.5 \\ Fo &\leq \frac{0.5}{1 + \psi} \\ Fo &\leq \frac{0.5}{1 + Bi} \end{aligned} \quad (19)$$

将式 (11) 代入上式, 整理可得柱状与球状果蔬热处理传热方程的稳定性判据分别为

柱状

$$\begin{cases} \Delta \tau \leq \frac{\Delta r^2}{4a} & (Bi \leq 1) \\ \Delta \tau \leq \frac{\Delta r^2}{2a(1 + Bi)} & (Bi > 1) \end{cases} \quad (20)$$

球状

$$\begin{cases} \Delta \tau \leq \frac{\Delta r^2}{6a} & (Bi \leq 2) \\ \Delta \tau \leq \frac{\Delta r^2}{2a(1 + Bi)} & (Bi > 2) \end{cases} \quad (21)$$

### 3.4 数值计算程序

利用 VB6.0 编制果蔬热处理传热方程的数值模拟计算程序, 计算流程如图 2 所示。

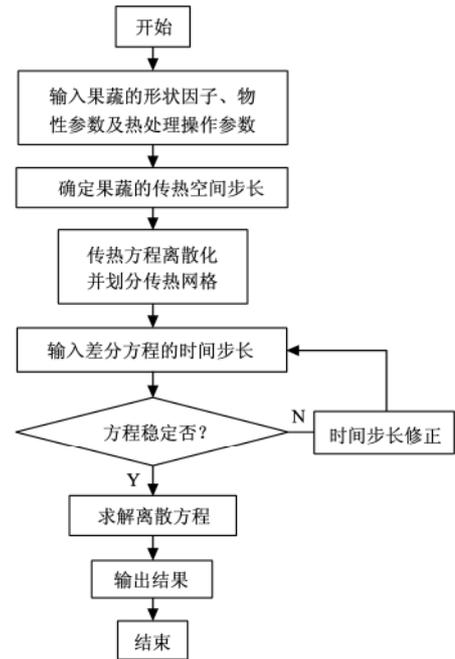


图 2 果蔬热处理传热数值计算流程图  
Fig.2 Flow chart for temperature simulation of heat-treated fruits and vegetables

## 4 结果与分析

### 4.1 数值模拟结果的试验验证

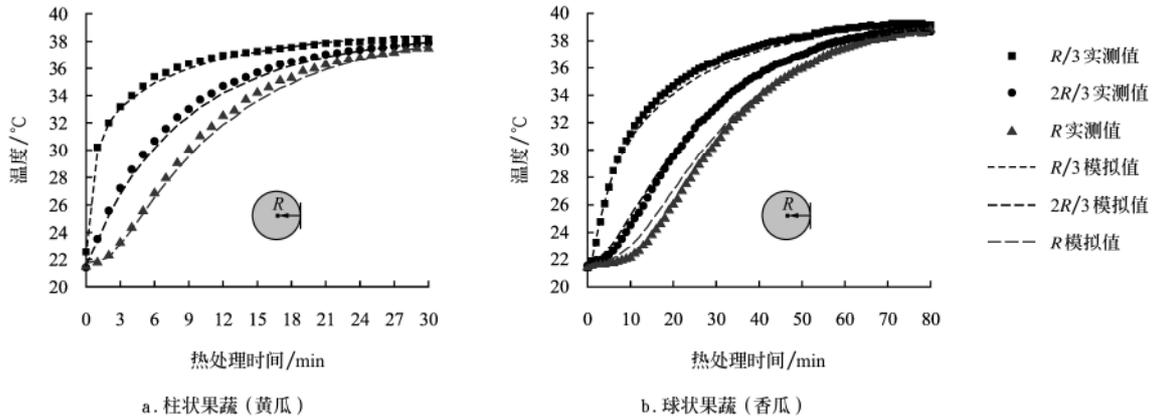
由图 3 果蔬热处理升温曲线可知, 果蔬热处理的传热具有明显的生物时滞效应, 不同深度果蔬组织对热处理温度的响应存在不同程度的反应滞后, 且随组织深度的增加, 滞后现象越明显。由模拟与实测曲线的对比可知, 模型中所引入的形状因子  $\psi$  能够较好地体现果蔬形状对热处理传热效果的影响, 果蔬形状因子的提出及数值的确定 (柱状果蔬  $\psi=1$ ; 球状果蔬  $\psi=2$ ) 是合理可行的。以黄瓜为代表的柱状果蔬的数值模拟与试验结果的  $MD=3.1\%$ ,  $RMSE=4.5\%$ ; 以伊丽莎白香瓜为代表的球形果蔬的  $MD=-2.3\%$ ,  $RMSE=3.8\%$ , 模型具有较好的普适性及预测精度。

### 4.2 不同热处理方法的对比试验

图 4 分别为采用热水浸泡法及热空气法处理时伊丽莎白香瓜的无因次过余温度变化对比。由试验结果可知, 2 种热处理方法在传热时间及对果实温度场分布的影响方面具有明显差异。达到相同的热处理效果时, 热水浸泡法比热空气法能明显缩短热处理时间。热水浸泡法中香瓜中心位置处的  $1/2$  热处理时间 (无因次过余温度

$\theta=0.5$ )、 $3/4$  热处理时间 ( $\theta=0.25$ ) 及  $7/8$  热处理时间 ( $\theta=0.125$ ) 分别是热空气法的 49.6%、41.1% 及 35.2%。另外, 在热水浸泡法中香瓜内部的温度梯度较大, 而在热空气法中香瓜内部的温度则较均匀, 造成这种差异的原因主要与 2 种热处理方法中香瓜表面换热系数的大小有关, 换热系数直接影响着果实热处理时的传热毕渥数  $Bi$ ,  $Bi$  数决定着果实内部温度场的分布特征。热水浸泡法中香瓜表面对流传热热阻相对较小, 果实内部的导热

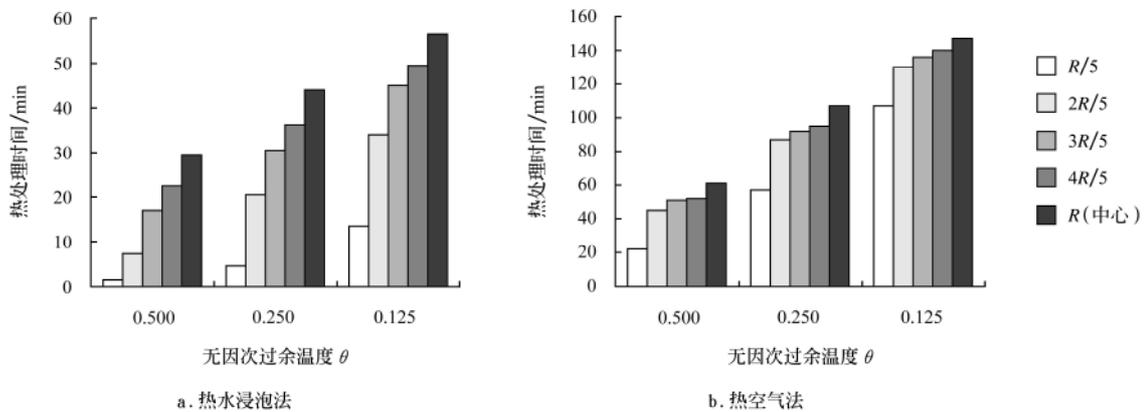
热阻起主导作用, 果实热处理时的传热  $Bi$  数较大, 从而导致了香瓜内部较大的温度梯度。相比而言, 热空气法中香瓜表面对流传热热阻起主导作用, 香瓜热处理时的传热  $Bi$  数相对较小, 因此果实内的温度分布相对均匀。通过数值模拟及试验综合确定热水浸泡法中伊丽莎白香瓜的表面换热系数为  $190\sim 250\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ , 而在热空气法中仅为  $10\sim 30\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 。



注:  $R$  为果实半径 (黄瓜  $R=1.9\text{ cm}$ , 香瓜  $R=4.5\text{ cm}$ ), 热水浸泡法处理温度  $40\text{ C}$

图 3 柱状与球状果蔬热处理温度变化的模拟及实测结果对比

Fig.3 Comparison of simulated and measured results of columnar and spherical fruits and vegetables



注:  $R$  为香瓜半径 ( $R=4.5\text{ cm}$ ), 热处理温度  $T_0=40\text{ C}$ , 热处理时间  $150\text{ min}$

图 4 不同方法热处理时伊丽莎白香瓜的无因次过余温度变化

Fig.4 Dimensionless temperature variation of Elizabeth muskmelon using different heat treatment methods

### 5 结 论

1) 建立了采后圆形和柱形果蔬热处理传热过程的数学模型, 通过引入形状因子概念使模型对柱状与球状果蔬的热处理传热具有普适性。采用有限差分方法对传热模型进行了数值模拟, 得出了与果蔬形状及传热时间步长有关的离散方程的稳定性判据。模型的验证结果表明, 所建数学传热模型能够准确预测多种边界条件下柱状与球状果蔬热处理时的组织温度变化。柱状果蔬的模拟与试验结果间差异指标平均相对误差为 3.1%, 均方根误差为 4.5%; 球状果蔬平均相对误差为 -2.3%, 均方根误差为 3.8%, 模型具有较高的预测精度。

2) 在相同的热处理工艺参数条件下, 达到相同的热处理效果, 伊丽莎白香瓜热水浸泡法的热处理时间仅为热空气处理法的 35%~50%。热水浸泡法处理时伊丽莎白香瓜的表面换热系数为  $190\sim 250\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ , 而在热空气法中仅为  $10\sim 30\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$ 。

#### [参 考 文 献]

[1] Jianbo L, Marie T, Clement V, et al. Effect of heat treatment uniformity on tomato ripening and chilling injury[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 56(2): 155-162.  
 [2] 王育林, 陈洪国, 彭永宏. 果实采后变温生物学的研究进展[J]. 果树学报, 2001, 18(4): 234-238.

- Wang Yulin, Chen Hongguo, Peng Yonghong. Advances in temperature fluctuation biology research of fruit crops[J]. Journal of Fruit Science, 2001, 18(4): 234—238. (in Chinese with English abstract)
- [3] 屠康, 森本哲夫, 桥本康. 采后热处理对优化控制西红柿果实呼吸强度的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 199—204.
- Tu Kang, Sen B, Qiao Benkang. Effect of postharvest heat treatment on optimal control for respiration of tomato fruit[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 199—204. (in Chinese with English abstract)
- [4] 董华强, 蒋跃明, 汪跃华, 等. 苦瓜采后热处理对其抗冷性的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 186—192.
- Dong Huaqiang, Jiang Yueming, Wang Yuehua, et al. Effects of hot water treatments on chilling tolerance of harvested bitter melon[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 186—188. (in Chinese with English abstract)
- [5] Kaituo W, Shifeng C, Peng J, et al. Effect of hot air treatment on postharvest mould decay in Chinese bayberry fruit and the possible mechanisms[J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 141(1): 11—16.
- [6] Wilson R, Hewajulige G, Abeyratne N. Postharvest hot water treatment for the control of Thielaviopsis black rot of pineapple[J]. Postharvest Biology and Technology, 2005, 36(3): 323—327.
- [7] 芮怀瑾, 汪开拓, 尚海涛, 等. 热处理对冷藏枇杷木质化及相关酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 294—298.
- Rui Huaijin, Wang Kaituo, Shang Haitao, et al. Effects of heat treatment on flesh leatheriness and related enzyme activities of loquat fruits during cold storage[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 294—298. (in Chinese with English abstract)
- [8] Susan L. Postharvest heat treatments[J]. Postharvest Biology and Technology, 1998, 14(3): 257—269.
- [9] Budde C O, Pelenta G, Lucangeli C D, et al. Air and immersion heat treatments affect ethylene production and organoleptic quality of 'Dixiland' peaches[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 41(1): 32—37.
- [10] 查世彤, 马一太, 魏东. 食品热物性的研究与比较[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(3): 275—277.
- Zha Shitong, Ma Yitai, Wei Dong. Investigation of food thermophysical properties[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(3): 275—277. (in Chinese with English abstract)
- [11] 郁文红, 杨昭. 小型试验用恒温恒湿保鲜库[J]. 制冷与空调, 2006, 6(5): 89—91.
- Yu Wenhong, Yang Zhao. Small constant temperature and humidity cold storage for experiment[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2006, 6(5): 89—91. (in Chinese with English abstract)
- [12] Tuan P Q. Modelling heat and mass transfer in frozen foods: a review[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(6): 876—888.
- [13] Zhang L, Cleland A C, Cleland D J, et al. A simple method for prediction of chilling times: extension to three-dimensional irregular shapes[J]. International Journal of Refrigeration, 1996, 19(2): 107—114.
- [14] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 65—74.
- [15] Kondjoyan A, Daudin J. Effects of free stream turbulence intensity on heat and mass transfers at the surface of a circular cylinder and an elliptical cylinder, axis ratio 4[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(10): 1735—1749.
- [16] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 75—80.
- [17] 传热的有限差分方程计算[M]. 张凤禄译. 北京: 冶金工业出版社, 1982: 39—159.
- [18] Yilmaz T. Equations for heating and cooling of bodies of various shapes[J]. International Journal of Refrigeration, 1995, 18(6): 395—402.

## Numerical simulation and experimental verification of heat transfer for fruits and vegetables during heat treatment

Yin Haijiao, Yang Zhao<sup>\*</sup>, Chen Aiqiang

(Thermal Energy Research Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to investigate the heat transfer mechanism of postharvest fruits and vegetables during heat treatment, a universal heat transfer model suitable for columnar and spherical fruits and vegetables was established. The results showed that the established model could well predict the temperature changes of heat-treated fruits and vegetables, and the relative errors between simulated and measured results were lower than 5%. With the same treatment effect, the heating time of the Elizabeth muskmelon treated by the hot water method was only 35%—50% of the heating time of the Elizabeth muskmelon treated by hot air method. The surface heat transfer coefficients of the muskmelons treated by hot water and hot air were 190—250 and 10—30 W/(m<sup>2</sup>·°C) respectively. The universal heat transfer model and experimental results can provide guidance for operation and optimization of the heat treatment of postharvest fruits and vegetables.

**Key words:** heat treatment, models, numerical analysis, heat transfer, fruits and vegetables