

采后热风与热水处理杀虫的水果温度场有限元模拟

黄智¹, 严荣军¹, 李瑞¹, 朱瀚昆¹, 令博¹, 王绍金^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学机械与工程学院, 杨凌 712100;

2. Washington State University, Department of Biological Systems Engineering, Pullman, WA 99164-6120, USA)

摘要: 热风和热水加热具有高效、环保且易于控制的优点, 是一种替代化学熏蒸控制采后水果虫害的有效物理方法。但由于缺乏对加热速率、加热时间与温度分布等问题的深入与系统研究, 常导致杀虫效果较差或对水果品质造成一定负面影响。为了研究水果采后热处理过程的传热机理, 建立了水果热处理时的非稳态传热模型, 利用有限元分析软件 COMSOL 建模求解, 并进行了试验验证。结果表明, 模拟值与实测值之间的均方根误差均低于 8%, 从而验证了模拟的可靠性。达到相同的热处理效果, 水果热水 (55℃) 加热时的热处理时间仅为热风 (55℃) 的 30%, 所以热水是一种更有效的加热介质。增加热风的流速可以提高加热速率, 而热水循环速度对传热速率影响较小。水果内部的传热速率主要受水果大小、介质流动速度和水果形状的影响, 热扩散系数对水果加热时间的影响较小。所建立的水果传热模型及相关试验结果可为水果采后热杀虫工艺参数的确定及优化提供参考。

关键词: 有限元分析; 水果; 虫害控制; 热风; 热水; 加热速率; 温度分布

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.02.033

中图分类号: S661, O242

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-02-0252-08

黄智, 严荣军, 李瑞, 等. 采后热风与热水处理杀虫的水果温度场有限元模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 252-259.

Huang Zhi, Yan Rongjun, Li Rui, et al. Finite element analysis on fruit temperature fields based on postharvest disinfestations with hot air and water treatments[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(2): 252-259. (in Chinese with English abstract)

0 引言

近年来, 由于人们环保与健康意识的不断增强, 以及相关国际公约的不断出台, 甲基溴等化学熏蒸剂的使用逐步受限, 使得热水、蒸汽和热风等非化学采后热处理技术被广泛应用于农产品 (香蕉、柑橘类、木瓜、芒果等) 采后病虫害的控制^[1-8]。采后热处理可有效控制生理病害, 杀灭果蔬表皮与内部的虫卵、幼虫, 降低水果软化速率并提高储藏保鲜效果^[9]。然而, 由于害虫和虫卵通常在果蔬内部, 而传统加热方法通过对流传热的方式将热量由果蔬表面传递至其内部, 加热时间较长且果蔬内部的温度分布均匀性差, 常造成果蔬品质受损。因此, 热处理过程中的加热速率与温度分布是评价杀虫

效果的重要指标, 并直接影响到果蔬的生理代谢、品质和贮藏寿命^[10]。

长期以来, 由于受到测量技术与实际可操作性等因素的限制, 针对果蔬热处理过程中加热速率与温度分布的研究还较为缺乏, 且结果不尽理想。例如, 要对热处理过程中农产品的各种温度参数进行直接监测或在线检测, 在实际操作中还难以实现。而通过探针测量果蔬内部温度的变化与分布, 其工作量又较大, 且存在引入探针后影响果蔬品质的问题^[11-12]。

随着计算机技术的飞速发展, 使得应用数值方法求解果蔬中的传热问题成为可能^[10,13]。这种基于传热理论的计算机模拟能够高效方便地预测温度在果蔬内部的分布状况, 得到果蔬受热时的温度场, 从而为研究果蔬的各种物理参数对传热速率的影响提供了可能, 同时达到了优化加热参数与有效控制虫害的目的。目前, 国内果蔬热处理的研究主要集中于试验研究, 部分温度场的计算采用有限差分法^[10,13-14]。这种求解过于复杂, 即使引入实测结果或粗略估计值后能够求解方程, 仍无法满足模拟的方便快捷性要求, 更不能进一步用于加热参数的优化。使用 COMSOL 软件应用有限元法对温度场进行模拟, 借鉴了有限差分法中离散处理的方式,

收稿日期: 2013-03-27 修订日期: 2013-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31371853); 教育部博士点基金项目 (20120204110022); 西北农林科技大学人才专项资金项目 (Z111021101)。

作者简介: 黄智 (1989-), 男, 陕西汉中, 主要从事食品与农产品加工技术研究。杨凌 西北农林科技大学, 机械与电子工程学院, 712100。Email: hzz521@163.com

*通信作者: 王绍金 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 食品与农产品微波射频加工与食品安全控制技术。杨凌 西北农林科技大学, 机械与电子工程学院, 712100。

Email: shaojinwang@nwsuaf.edu.cn

能更精确地求解形状复杂物体的传热方程, 达到快速求解^[15]。目前, 尚未出现针对水果加热过程中精确预测加热速率的有限元分析研究报道。

本文通过建立水果热处理的有限元模型, 采用试验及有限元模拟的方法对水果的传热特性进行研究。目的在于通过试验检测不同热处理条件下水果表面与中心的瞬态温度, 从而验证有限元法模拟的水果内部温度场。利用验证后的数学模型来预测不同水果直径、不同热扩散系数、不同介质流动速度与不同水果形状对加热速率的影响, 为优化热风 and 热水加热参数与建立有效的农产品采后热杀虫技术提供理论依据。

1 水果温度的计算机模拟

1.1 能量平衡模型

水果热处理是一种三维的复杂传热过程。为简化传热模型, 做了如下假设: 水果组织物性仅受温度影响, 且在一定温差范围内视为均匀物性; 热处理不改变水果的主要成分组成; 忽略表面水分蒸发对水果温度的影响; 热量传递只在沿水果径向的一维方向进行^[16]。不同种类和形状的水果其内部的传热过程都是径向位置和热处理时间的函数。传统加热过程中, 热风或热水为热源, 热量以对流的形式从加热介质传递至水果表面, 其边界传热方程^[17]为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h[T - T_e] \quad (1)$$

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

式中: k 为导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; h 为表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; n 为沿半径方向的法向量; t 为加热时间, s ; T_0 为水果的初始温度, $^\circ C$; x 、 y 分别为水果二维几何截面内的横纵坐标, m ; T 为水果加热时的瞬态温度, T_e 为加热介质的温度, $^\circ C$ 。

由式(1)可知, 加热介质与水果表面间的热通量与表面传热系数 h 以及加热介质和水果表面间的温度差 ($T - T_e$) 成正比。根据水果几何体的边界层相似性原理, 由于存在强制对流和湍流流动, 对流传热系数可以由下式进行估算^[17]:

$$h = \frac{k_f Nu}{d} = 0.34 \frac{k_f}{d} \left(\frac{ud}{\nu_f}\right)^{0.6} \quad (3)$$

式中: d 为水果直径 (非球体取近似直径), m ; k_f 为介质的导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; Nu 为无量纲努塞尔系数, u 为加热介质流动速度, m/s ; ν_f 为介质的运动粘度, m^2/s 。水果表面的热阻可视为 $1/h$ 。增加介质 (风或水) 的流动速度可增加 h 值, 从而减小水果表面的热阻。

热量传递到水果表面后, 以热传导的形式继续传递至水果内部。导热微分方程是能量守恒定律与

傅里叶定律结合而建立的数学关系式, 其基本控制方程如下^[18-19]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + Q \quad (4)$$

在 $20^\circ C \sim 55^\circ C$ 温差范围内, 水果物性受温度影响不大, 固 C_p 、 k 和 ρ 可视为定值。式(4)可转化为直角坐标系下的二维非稳态导热微分方程^[20]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + Q \quad (5)$$

式中: C_p 为水果的比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; Q 为水果的内热源, W/m^3 ; ρ 为水果密度, kg/m^3 。由于整个加热过程中, 没有如微波或射频加热的内热源, 加上水果的呼吸作用较小可以忽略, 因此 $Q=0$ 。方程(5)变为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad (6)$$

式中: $\alpha = k/\rho C_p$ 为热扩散系数, m^2/s 。上式即为水果的传热方程。

根据热力学第二定律, 水果中心达到外界环境温度 $55^\circ C$ 时, 整个果体即处于一个 $55^\circ C$ 的热平衡状态。只要知道水果的初始温度、加热介质温度及介质流速、不同水果的几何特征、热特性参数, 式(1)和式(6)便可以联立求解。水果温度作为加热时间和不同位置坐标的函数, 可通过 COMSOL Multiphysics 4.3a (中仿科技有限公司, 中国) 使用时间步长为 $1 s$ 的瞬态迭代过程求解得到整个水果体的温度场分布。COMSOL 软件使用的这种顺序求解算法, 能够快速、精确和直接求解。

1.2 有限元模拟

1.2.1 水果的热特性和几何模型

在使用 COMSOL 软件编写程序时, 首先选取瞬态流体传热模块用来求解上述传热方程, 再根据球形水果的几何特征选择二维轴对称模型^[21]。水果的热特性参数作为输入模型所必须的材料属性, 由文献查得。本文采用的水果 (苹果, 梨) 与介质的热特性参数^[22]见表 1。

表 1 所选水果和介质的热特性
Table 1 Thermal properties of selected fruits and medium

水果 Fruit	密度 Density /($kg \cdot m^{-3}$)	比热容 Specific heat /($J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	导热系数 Thermal conductivity /($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	热扩散系数 Thermal diffusivity /($10^{-7} \cdot m^2 \cdot s^{-1}$)
梨 Pear	1 000	3 700	0.595	1.61
苹果 Apple	840	3 600	0.513	1.70
空气 Air	1.2	1 200	0.025	173
水 Water	1 000	4 180	0.56	1.34

1.2.2 网格划分

有限元分析软件 COMSOL 在分析水果传热的过程中, 若采用均匀网格划分, 占用空间较大, 计

算速度较慢,所以选用非结构化网格划分(误差不超过0.1%)。网格设定为标准单元尺寸,整体网格划分较稀疏,在几何尺寸变化较大处网格划分较细以提高准确性。二维瞬态网格划分共由1 162个三角形边界元素,333个边元素(线性)和46个顶点元素组成。初始和最大时间步长设置为0.001和1 s。结束模拟时,代表不同温度的相邻网格间的叠代误差不超过0.1%。模拟软件运行在型号为戴尔790的计算机上,使用Windows 7 64位操作系统,占用内存容量500 MB,整个求解时间为5 min。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验材料为陕西洛川红富士苹果和陕西丹凤白梨,2种水果均直接购自当地(陕西杨凌)超市,苹果平均果径约为6.8 cm,梨平均果径约为7.2 cm。果实均无病虫害、无机械损伤。所有水果全部在20℃的恒温恒湿箱(BSC-150,温度波动为±0.5℃,上海博讯实业有限公司医疗设备厂)内稳定4 h后进行试验,每组试验重复2次。

2.2 试验设备

热风加热所用设备为电热鼓风干燥箱(101-1AB,天津市泰斯特仪器有限公司,中国)。电加热器产生的热量在风扇作用下形成热风,热风速度和空气温度由风扇转速和电加热器的功率决定^[12]。测试样品放在风箱内的中心位置。

水浴加热试验使用数控超级恒温槽(SC-15,宁波新芝生物科技股份有限公司,中国),以维持恒定的水浴温度55℃,水流速度为1 m/s左右。样品固定在铁丝笼内以防止与恒温槽壁接触并且可以完全浸入在水浴中。要达到100%的害虫(苹果蠹蛾、梨圆蚧等)死亡率,其最佳温度范围是50~55℃,如50℃和52℃需要5和2 min,而55℃只需要0.5 min^[23]。为发挥高温短时处理的优势,本研究的热处理温度选择在55℃。

2.3 试验方法

温度试验用3个TMQSS-020U-6型热电偶,试验测定前用高精度温度测量仪对每个热电偶测量端接点在0~60℃进行标定,并将测得的实际温度值进行修正。热电偶分别插入水果的中心,表面和加热介质内,并通过数据采集器(CR1000,北京曙光新航科技有限公司,中国)将采集的各时刻温度数据记录下来。数据采样频率为每秒1次,然后把1 min内的平均数据保存到计算机。

2.4 模型的试验验证

为了验证有限元模拟模型的精度,采用均方根误差(RMSE)对模拟及实测结果间的差异进行统

计检验。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((T_m(i) - T_s(i)) / T_m(i))^2} \quad (7)$$

式中: T_s 为模拟温度,℃; T_m 为水果选定位置的实测温度,℃; i 为数据节点编号; N 为数据点总数。

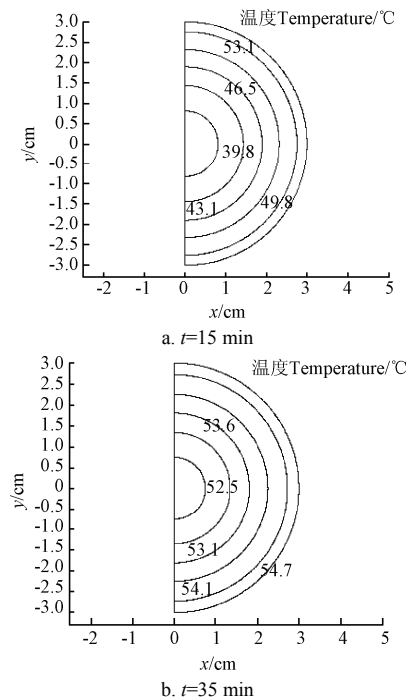
2.5 模型的预测

验证后的模型用于预测不同水果直径(4、6和8 cm),热扩散系数(1.6、1.8和 $2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$),加热介质速率(0.5、1、2和4 m/s)和不同的形状(球形、猕猴桃形)对水果中心温度的影响,为进一步优化加热方法与工艺提供可靠的理论依据。

3 结果与分析

3.1 模拟结果

热风(55℃)加热时,取 $k_f=0.025 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$, $d=0.072 \text{ m}$, $u=1 \text{ m/s}$, $v_f=19.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,根据方程(3)计算可得到 $h=16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ 。水浴加热时,取 $k_f=0.56 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{℃})$, $v_f=0.553 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,则 $h=3\,098 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ 。为了研究水果内部的温度分布情况,用二维有限元法求解了水果2个加热时间点上的温度场。梨在水浴(55℃,1 m/s)加热过程中,其内部的瞬态温度分布如图1所示。



注: x, y 为梨(直径为7.2 cm)截面纵横坐标;水浴温度55℃,流速1 m/s; t 为加热时间;梨热扩散系数为 $1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

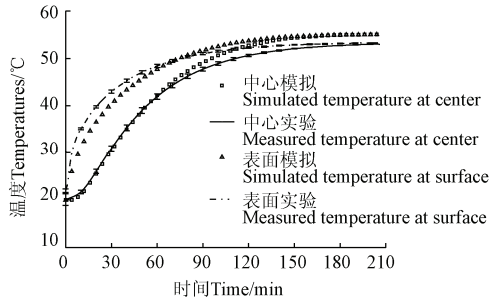
Note: x, y are coordinates of pear (7.2 cm in diameter) section; Water temperature is 55℃, flow rate is 1 m/s; t is heating time; Pear thermal diffusivity is $1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

图1 水浴加热时预测的梨中心垂直截面等温曲线

Fig.1 Predicted isothermal curves of pear at vertical center section for hot water heating

3.2 模拟结果的验证

图 2 对比了热风加热时，梨中心和表面的模拟与实测温度。刚开始加热时，由于从表面到中心存在明显的热滞后效应，梨的表面温度上升较快，中心温度增加缓慢。同理，当梨的内部温度接近加热介质温度时，水果中心温度增加放缓。



注：热风温度为 55℃，流速 1 m/s；梨直径为 7.2 cm，热扩散系数为 $1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
 Note: Hot air temperature is 55℃, flow rate is 1 m/s; Pear diameter is 7.2 cm, thermal diffusivity is $1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

图 2 热风加热时梨中心和表面温度模拟与实测值对比
 Fig.2 Comparison of center and surface temperatures of pear between measurement and simulation for hot air heating

表 2 有限元模拟和试验结果的均方根误差 (RMSE)
 Table 2 Root mean square error (RMSE) between measured and predicted temperatures using the computer simulation model

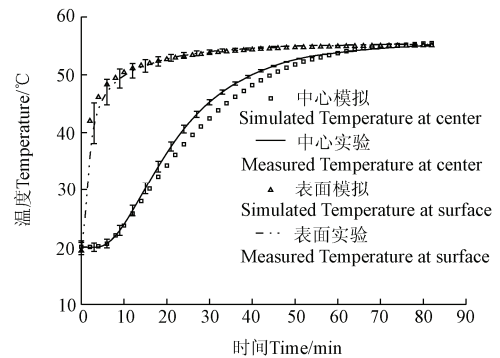
水果/加热方法 Fruit/Heating method	中心 Center	表面 Surface	%
梨/热风加热 Pear/Hot air heating	1.0	3.9	
梨/水浴加热 Pear/Hot water heating	3.3	5.6	
苹果/水浴加热 Apple/Hot water heating	2.6	7.8	

梨表面和中心温度实测值和有限元模拟温度的均方根误差 (RMSE) 值通过式 (7) 得出，结果如表 2 所示。最大均方根误差 (RMSE) 为 7.8%，出现在苹果水浴加热时的表面温度处，最小均方根误差 (RMSE) 为 1.0%，出现在梨热风加热时的中心温度处。这可能与不同加热介质内，水果表皮处传感头的轻微松动以及不同水果的热特性差异有关。

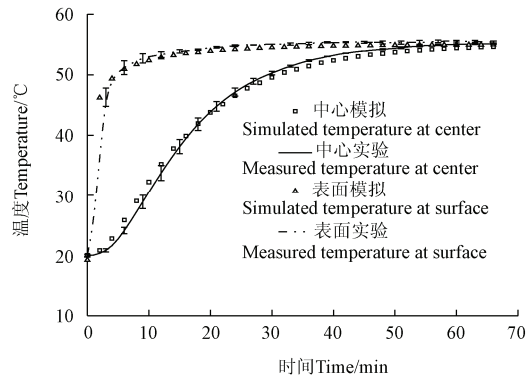
由图 2 可知，热风加热过程中，热风温度恒定为 55℃，但是表面和中心温度始终达不到 55℃，造成最终模拟—实测曲线未能完全重合。由式 (3) 可知热阻与梨的直径和风速有关，梨的直径越大热阻越大，风速越小热阻也越大。热阻越大，加热速率越低，这就造成了水果表面和中心温度很难达到和介质温度 (55℃) 相同。梨热风加热时，表面和中心温度的均方根误差 (RMSE) 值分别为 3.9% 和

1.0% (表 2)。模拟和实测曲线在初始加热过程中存在较大差异，可能是由有限元模拟把水果形状 (非标准球形) 简化成标准球形引起的。此外，T 型热电偶探头未能准确插入梨的几何中心点以及近似的水果热特性参数^[24-25]也可能造成试验数据的一些误差。

图 3a 是水浴加热时梨表面和中心温度的模拟和实测温度对比曲线图。梨水浴加热时的升温速率大于热风，所以加热时间从大约 200 min (图 2) 缩短到 60 min。梨水浴加热过程中表面和中心温度的均方根误差 (RMSE) 分别为 5.6% 和 3.3%。图 3b 是水浴加热时苹果表面和中心温度的模拟和实测温度对比曲线图。苹果水浴加热过程中表面和中心温度的均方根误差 (RMSE) 分别为 7.8% 和 2.6%。综上所述，有限元模拟和试验数据的良好拟合证明在利用热风和热水进行热处理的过程中，有限元模拟模型能够有效而较为精确的预测水果内部的动态温度分布。



a. 梨 (直径为 7.2 cm)
 a. Pear (7.2 cm in diameter)



b. 苹果 (直径为 6.8 cm)
 b. Apple (6.8 cm in diameter)

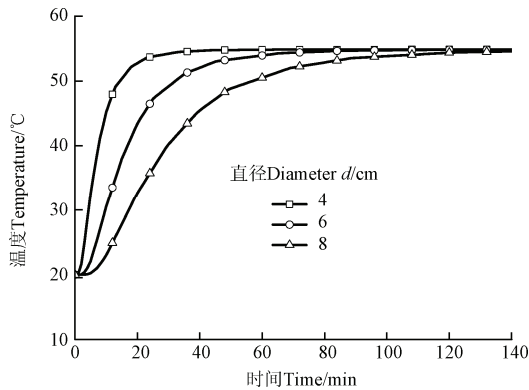
注：水浴温度 55℃，流速 1 m/s；梨热扩散系数为 $1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ；苹果热扩散系数为 $1.70 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
 Note: Pear diameter is 7.2 cm; Apple diameter is 6.8 cm; Water temperature is 55℃, flow rate is 1 m/s; Pear thermal diffusivity is $1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; Apple thermal diffusivity is $1.70 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

图 3 水浴加热时水果中心和表面温度模拟和实测值对比
 Fig.3 Comparison of center and surface temperatures of fruits between measurement and simulation for hot water heating

3.3 模型的实际应用

3.3.1 不同水果直径的影响

图 4 是热风 (55°C, 1 m/s) 加热时, 模拟不同果径 (4、6 和 8 cm) 对梨中心温度的影响。直径分别为 4、6 和 8 cm 的梨中心温度达到 50°C 所需时间分别为 14、32 和 57 min。几何尺寸小的水果加热速率比几何尺寸大的水果快。使用热风或热水加热使水果达到 50°C 的过程中, 中等大小水果中 1 cm 的直径差异可能会导致 27%~35% 的加热时间误差。直径分别为 4 和 8 cm 的梨和直径为中间值 6 cm 的梨相比, 处理所需时间分别有 56% 和 78% 的差别。由此可见, 水果的热传导速率在很大程度上取决于果径的大小。因此, 在使用热风或热水加热的热处理方式时, 为实现均匀加热, 对水果进行大小分级是非常必要的。



注: 热风温度 55°C, 流速 1 m/s; 梨热扩散系数为 $1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
 Note: Hot air temperature is 55°C, flow rate is 1 m/s; Pear thermal diffusivity is $1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

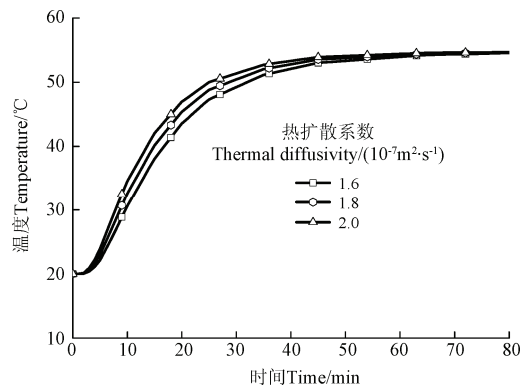
图 4 热风加热时梨直径对中心模拟温度的影响
 Fig.4 Simulated center temperatures of pear influenced by diameters when subjected to hot air heating

3.3.2 不同热扩散系数的影响

导热系数、比热容和密度是影响水果加热速率的主要热特性参数。由式 (6) 可知, 热扩散系数是唯一控制水果内部温度变化的参数。所以对直径为 6 cm 的水果分别取热扩散系数为 1.6、1.8 和 $2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 进行水浴加热模拟。图 5 是水浴 (55°C, 1 m/s) 加热时, 模拟不同热扩散系数对水果加热速率的影响。热扩散系数分别为 1.6、1.8 和 $2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 的水果中心温度达到 50°C 所需时间分别为 33、28 和 24 min。热扩散系数越高, 加热速度越快。热水处理时, 热扩散系数为 1.6 与 $2.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 的水果和热扩散系数为中间值 $1.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 的水果相比, 中心温度升高所需时间的差别分别为 17% 和 14%。所以, 由水果品种引起的热扩散系数的不同对加热时间的影响较小, 因而不会对实际处理造成较大影响。

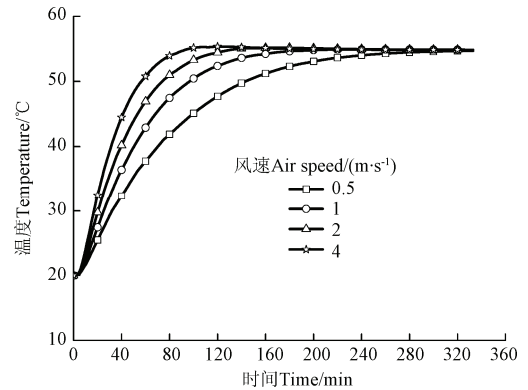
3.3.3 不同介质流动速率的影响

图 6 是直径为 6 cm 的梨在不同风速下的热风加热模拟结果。风速为 0.5 m/s 时, 水果中心温度增加缓慢, 到达 50°C 时需要 138 min, 但加热速率随热风速度的增加而增加。热风速度增加到 1、2 和 4 m/s 时, 上升到 50°C 所需的时间减少到 103、74 和 58 min。风速在 0.5~4m/s 间的变化, 造成热处理时间约 58% 的差异。但在水浴加热过程中, 热水循环的速度对加热时间的影响较小^[23], 可能与水果表面的传热系数已经达到 $1500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 以上有关, 即热水加热时升温速率主要取决于水果内部的热传导速率。



注: 水果直径为 6.0 cm; 水浴温度 55°C, 流速 1 m/s
 Note: Fruit diameter is 6.0 cm; Water temperature is 55°C, flow rate is 1 m/s

图 5 水浴加热时热扩散系数对水果中心模拟温度的影响
 Fig.5 Simulated center temperatures of fruit influenced by thermal diffusivity when subjected to hot water heating



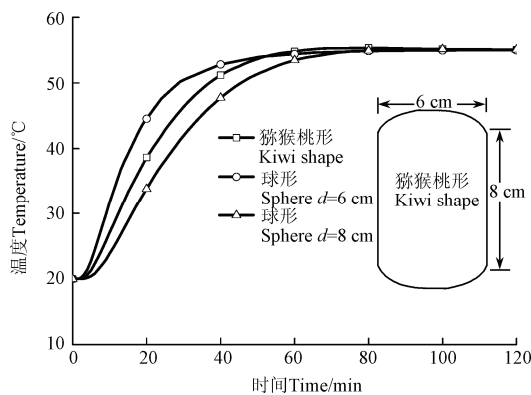
注: 热风温度 55°C; 梨直径为 6.0 cm, 热扩散系数为 $1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
 Note: Hot air temperature is 55°C; Pear diameter is 6.0 cm, thermal diffusivity is $1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

图 6 热风加热时介质速度对梨中心模拟温度的影响
 Fig.6 Simulated center temperatures of pear influenced by heat medium speed when subjected to hot air heating

3.3.4 不同水果形状的影响

图 7 是水浴加热时, 模拟不同梨的形状对中心温度的影响。与直径分别为 6 和 8 cm 的球形梨相比, 轴向长度为 8 cm, 径向厚度为 6 cm 的非球形

(猕猴桃形)梨的加热速率介于2球形梨之间。非球形(猕猴桃形)梨中心温度到达 50°C 所需时间为37 min,直径分别为6和8 cm的球形梨中心温度到达 50°C 所需时间分别为28和47 min。由于猕猴桃形的梨径向传热距离短,达到热平衡所需的时间短,加热速率快;轴向传热距离长,加热速率慢。所以猕猴桃形状的梨综合传热速率受轴向尺寸影响较大。这就说明,对同种水果,形状的差异性也会对加热速率造成影响。直径分别为6和8 cm的球形梨与非球形(猕猴桃形)梨相比,热水处理所需时间分别有32%和27%的差别。由于猕猴桃形水果是匀质的轴对称图形,只需求出其二维截面内的温度分布,通过旋转便可得到水果整个体积内的温度场。



注: 水浴温度 55°C , 流速 1 m/s ; 梨热扩散系数为 $1.61\times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$
 Note: Water temperature is 55°C , flow rate is 1 m/s ; Pear thermal diffusivity is $1.61\times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$

图7 水浴加热时梨形状对中心模拟温度的影响

Fig.7 Simulated center temperatures of pear influenced by its shape when subjected to hot water heating

本研究基于对水果传热微分方程的建立,借助有限元分析软件(COMSOL Multiphysics 4.3a)进行建模来预测水果内部的温度分布。输入程序的是水果属性(直径和扩散系数),几何和边界条件(几何形状、加热介质温度、初始水果温度),加热方法(热风或热水)。输出的则是水果选定位置的温度曲线和任意时刻水果内部的温度场。所以,研究单个水果的加热过程可为大规模水果加热系统的设计提供思路^[26],也为精确预测水果内部的加热速率提供了理论依据。

由于热风和热水缓慢的热传递速度,为达到水果内部的杀虫效果,可能需要数小时的热处理时间^[27],会造成水果表面和内部品质不同程度的破坏,其中包括果皮褐变、点蚀、颜色加深和软化等^[28]。由式(5)可知,若 $Q\neq 0$,即存在外热源使水果内部产生热量则可以极大缩短热处理时间,这也是近年来兴起使用微波或射频等新型热处理方法的依

据^[21,29]。目前,热风、热水等热处理方式与其他技术(微波或射频)的结合运用在果蔬贮藏保鲜中得到了广泛的研究^[30-32]。

4 讨论

本研究所建立的模型在应用时首先需假设水果组织物性均匀且仅受温度影响,所以对于内部组织相对均匀且几何形状呈轴对称状的水果,如苹果、桔子、樱桃等适用性较高,而对于石榴、荔枝、桂圆等内部不均匀水果,由于内部热特性参数难以准确测量误差可能较大^[16]。此外,本研究所建立的模型如用于其他形状水果,如猕猴桃、柿子,草莓等热处理时,仅需修改热特性参数和边界条件并绘制出近似的几何形状即可,而对于形状相对复杂的几何体还可以借助CAD软件绘图后直接导入COMSOL进行建模求解。

本研究中水果的表面模拟和试验误差均大于中心,其主要原因可能有以下几个方面:首先是测量水果表面温度的热电偶插在果皮内,不容易固定,在加热过程中,随时间增加传感头可能会出现轻微松动从而造成最终测量温度的波动。其次是加热介质实际温度的波动以及模型中忽略了水果的呼吸传热对其表面温度造成较大的影响^[16]。水果采后热处理可有效控制病虫害及腐烂,但最大的不足就是热伤害。不同种类的水果,热处理介质、处理时间和温度可能不同,温度过低或时间过短则效果不理想,温度过高或时间太长则易造成热伤害^[14]。所以,高温短时热处理对水果品质的影响还有待进一步的研究。

本研究通过有限元模拟对水果传统加热过程进行了分析,但结合COMSOL软件中的焦耳加热可进一步开展微波射频加热技术来改善果蔬加热均匀性方面的研究,为传统热处理方式与新型加热技术的结合提供了一种新思路^[23,29,32]。此外,结合昆虫死亡动力学和品质动力学信息^[23],可以有效预测特定热处理条件下的灭虫效果并为选择适当的热处理条件提供指导。

5 结论

通过对梨和苹果热处理过程的有限元模拟,可以直观、定量地分析传热过程中果实内部的温度变化。水果内部温度变化的模拟值与实测值的最大均方根误差(RMSE)为7.8%,从而验证了模型的可靠性。预测结果表明,相比热风,热水是一种更有效的加热介质。水果内部的传热速率主要受水果大小、介质流动速度和水果形状的影响,热扩散系数对水果加热时间的影响较小。该研究为水果

内部温度分布和传热速率的预测提供了一种新方法, 所建立的模型为果蔬采后热杀虫的精确控制提供了依据。

[参 考 文 献]

- [1] Fallik E. Prestorage hot water treatments (immersion, rinsing and brushing)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2004, 32(2): 125—134.
- [2] Chen M, Jiang Q, Yin X R, et al. Effect of hot air treatment on organic acid-and sugar-metabolism in ponkan (*Citrus reticulata*) fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 147(12): 118—125.
- [3] Jemric T, Ivic D, Fruk G, et al. Reduction of postharvest decay of peach and nectarine caused by *Monilinia laxa* using hot water dipping[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 4(1): 149—154.
- [4] Kim Y, Lounds-Singleton A J, Talcott S T. Antioxidant phytochemical and quality changes associated with hot water immersion treatment of mangoes (*Mangifera indica* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2009, 115(3): 989—993.
- [5] Paull R E, Chen N J. Heat treatment and fruit ripening[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 21(1): 21—37.
- [6] Maxin P, Weber R W, Lindhard P H, et al. Hot-water dipping of apples to control *Penicillium expansum*, *Neonectria galligena* and *Botrytis cinerea*: effects of temperature on spore germination and fruit rots[J]. *European Journal of Horticultural Science*, 2012, 77(1): 1—9.
- [7] Obenland D, Collin S, Sievert J, et al. Impact of high-temperature forced-air heating of navel oranges on quality attributes, sensory parameters, and flavor volatiles[J]. *HortScience*, 2012, 4(7): 386—390.
- [8] Self G, Ducamp M N, Thauay P, et al. The effects of phytosanitary hot water treatments on West African mangoes infested with *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae)[J]. *Fruits*, 2012, 67(6): 439—449.
- [9] 王世珍, 张红印, 黄星奕. 热处理对水果采后病害防治的研究进展[J]. *食品科学*, 2008, 29(2): 477—480. Wang Shizhen, Zhang Hongyin, Huang Xingyi. Advance in research of heat treatments for control of postharvest diseases of fruits[J]. *Food Science*, 2008, 29(2): 477—480. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张敏, 孙治强, 张杰, 等. 热激处理金冠苹果果实内部温度动态预测模型的研究[J]. *果树学报*, 2005, 22(4): 305—310. Zhang Min, Sun Zhiqiang, Zhang Jie, et al. Study on the predictive dynamic temperature model of golden delicious apple fruit during heat shock treatment[J]. *Journal of Fruit Science*, 2005, 22(4): 305—310. (in Chinese with English abstract)
- [11] Saudreau M, Sinoquet H, Santin O, et al. A 3D model for simulating the spatial and temporal distribution of temperature within ellipsoidal fruit[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147(1): 1—15.
- [12] Wang S, Tang J, Cavalieri R. Modeling fruit internal heating rates for hot air and hot water treatments[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2001, 22(3): 257—270.
- [13] 胡克敏, 张杰. 荔枝热处理的计算机模拟[J]. *包装工程*, 2010, 183(9): 25—28. Hu Kemin, Zhang Jie. Computer simulations of litchi fruit after heat treatment[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 183(9): 25—28. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈莉, 屠康, 赵艺泽, 等. 采后 1-MCP 和热处理对红富士苹果生理变化和贮藏品质的影响[J]. *果树学报*, 2006, 23(1): 59—64. Chen Li, Tu Kang, Zhao Yize, et al. Effects of 1-MCP and hot-air treatments on postharvest physiology and quality of Red Fuji apples[J]. *Journal of Fruit Science*, 2006, 23(1): 59—64. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张世伟, 张志军, 孔宁华, 等. 基于三维实体模型的玉米热风干燥模拟计算[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2013, 34(6): 871—874. Zhang Shiwei, Zhang Zhijun, Kong Ninghua, et al. Simulation of hot air drying on corn grains based on the three dimension entity model[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2013, 34(6): 871—874. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(11): 344—348. (in Chinese with English abstract)
- [17] Zalba B, Marin J M, Cabeza L F, et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003, 23(3): 251—283.
- [18] Ikediala J N, Tang J, Wig T. A heating block system for studying thermal death kinetics of insect pests[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2000, 43(2): 351—358.
- [19] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [20] Knorr D, Zenker M, Heinz V, et al. Applications and potential of ultrasonics in food processing[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2004, 15(5): 261—266.
- [21] Birla S, Wang S, Tang J. Computer simulation of radio frequency heating of model fruit immersed in water[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 84(2): 270—280.
- [22] Sahin S, Sumnu S G. *Physical properties of foods*[M]. New York: Springer New York, 2006.
- [23] Tang J, Ikediala J, Wang S, et al. High temperature short time thermal quarantine methods[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 21(1): 129—145.
- [24] Lahsasni S, Kouhila M, Mahrouz M, et al. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 61(2): 173—179.
- [25] 王荣, 焦群英, 魏德强, 等. 葡萄的力学特性及有限元模拟[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(2): 7—10. Wang Rong, Jiao Qunying, Wei Deqiang, et al. Mechanical characteristics and the finite element analysis of grapes[J]. *Transactions of the Chinese Society of*

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(2): 7–10. (in Chinese with English abstract)
- [26] 陈燕, 蔡伟亮, 邹湘军, 等. 荔枝的力学特性测试及其有限元分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 358–363.
- Chen Yan, Cai Weiliang, Zou Xiangjun, et al. Mechanical properties test and finite element analysis for litchi[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(12): 358–363. (in Chinese with English abstract)
- [27] 林明光, 曾玲, 汪兴鉴, 等. 中国芒果输出蒸热杀虫处理研究[J]. 昆虫知识, 2010(3): 479–485.
- Lin Mingguang, Zeng Ling, Wang Xingjian et al. Study on vapor heat treatment to disinfest Oriental fruit fly in Chinese mango fruits for exporting to foreign countries[J]. Chinese Bulletin of Entomology, 2010, 47(3): 479–485. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陆振中, 徐莉, 王庆国. 热空气处理对中华寿桃贮藏品质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 375–379.
- Lu Zhenzhong, Xu Li, Wang Qinguo. Effect of hot air treatment on postharvest quality of Zhonghuashou peach[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(1): 375–379. (in Chinese with English abstract)
- [29] Liu Y, Tang J, Mao Z, et al. Quality and mold control of enriched white bread by combined radio frequency and hot air treatment[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(4): 492–498.
- [30] Yousefi A, Niakousari M, Moradi M. Microwave assisted hot air drying of papaya (*Carica papaya* L.) pretreated in osmotic solution[J]. African Journal of Agricultural Research, 2013, 8(25): 3229–3235.
- [31] Hazevazife A, Moghadam P A, Nikbakht A M, et al. Designing, manufacturing and evaluating microwave-hot air combination drier[J]. Life Science Journal, 2012, 9(3): 630–637.
- [32] Liu Yanhong, Tang Juming, Mao Zhihui, et al. Comparison between combined radio frequency and hot air treatment and hot air treatment on bread fresh-keeping[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(9): 323–328.

Finite element analysis on fruit temperature fields based on postharvest disinfestations with hot air and water treatments

Huang Zhi¹, Yan Rongjun¹, Li Rui¹, Zhu Hankun¹, Ling Bo¹, Wang Shaojin^{1,2*}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Washington State University, Department of Biological Systems Engineering, Pullman, WA 99164-6120, USA)

Abstract: Hot air and hot water heating have been extensively studied as effective physical treatment methods to replace chemical fumigation for controlling insect pests in fruits and vegetables because of environmental benefit and easy control. However, it is lack of systematic research on heating rate, heating time and temperature distribution, the insect mortality requirement is not met or fruit quality is negatively affected. To study the heat transfer mechanism of postharvest fruit heat treatment process, a computer simulation model was developed to analyze the heating rate and the transient temperature distribution in thermally treated fruits using finite element-based commercial software, COMSOL, based on the unsteady heat transfer. a set of differential equations that govern heat transfer in fruits was reduced into a group of algebra equations in the simulation model. The measured surface and center temperatures of fruits during hot air and water heating were compared against to the results obtained from the finite element simulation. The root mean square error between simulated and measured temperatures was all below 8%. The comparison analysis showed that the simulation results were in good agreement with the measured values, which indicates the reliability of the simulation model. With the validated simulation model, the impacts of various parameters on heating rates were systematically studied using forced hot air and water treatments. To reach the same thermal effect, hot water (55°C) heating time was about 30% in hot air (55°C) treatments. Water was more efficient medium than air. Increasing air speed increased heating rates, but water circulation speeds had little impact on heat transfer rate. The most important parameters in the model included the fruit size, fruit shape and the heating medium followed by the heating medium speed and thermal diffusivity. This study demonstrated that the computer simulation model can be used to evaluate the impacts of various heating parameters on the temperature–time history in fruits. These parameters include fruit size, fruit shape, heating medium speed, and thermal diffusivity. Combining the hot air or hot water treatment with the fast heating method, e.g. radio frequency or microwave energy, further improves the fruit heating efficiency since electromagnetic energy may eliminate conduction as a major rate-limiting factor directly delivered to the fruit interior. Furthermore, when combined with insect mortality and quality kinetic information, the model can be used to support for the heat treatment process and optimize the process parameters in postharvest thermal disinfestations.

Key words: finite element analysis; fruits; insect control; hot air; hot water; heating rate; temperature distribution

(责任编辑: 信世强)