

柑橘皮在热处理过程中内部温度的时空分布特性

Research on internal temperature temporal and spatial distribution of citrus peel in heat treatment process

赵 曜 何昭颖 姜玉红 蔡翔宇 李世权

ZHAO Yao HE Zhaoying JIANG Yuhong CAI Xiangyu LI Shiquan

(重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆 400016)

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

摘要:目的: 获得柑橘热处理过程中果实内部不同点随时间变化的温度分布规律。方法: 从传热的角度研究柑橘皮在热处理过程中的温度变化; 提出一种新的方法来计算柑橘皮中的温度传递规律, 建立一个新的数学模型来模拟柑橘皮在热处理过程中的温度分布; 并重点研究 3 种柑橘(奉节脐橙、长寿血橙和资阳蜜桔)内部温度场的时空分布。结果: 热处理时间随水温的升高呈指数级下降, 得到了不同品种柑橘的详细指数关系表达式, 并通过数据回归方法提出了柑橘热处理时间与水温之间的函数公式。结论: 热处理时间随着水温升高呈指数衰减, 过低的水温会因传热温差过小导致热处理时间极大延长, 增加能源消耗。

关键词: 温度分布; 热处理; CFD 仿真; 柑橘皮

Abstract: **Objective:** This study aimed to obtain the temperature distribution law of different points in citrus fruit over time during heat treatment. **Methods:** The temperature change of citrus peel during heat treatment was studied from the perspective of heat transfer. A new method was applied to calculate the temperature transfer rule in citrus peel, and a new mathematical model was established to simulate the temperature distribution of citrus peel during heat treatment. The spatial and temporal distribution of the internal temperature field of three kinds of citrus (Fengjie Navel orange, longevity blood orange and Ziyang Tangerine) was studied. **Results:** The study showed that the heat treatment time decreased exponentially with the increase of water temperature, the detailed exponential relationship expression of different varieties of citrus was obtained, and the function formula between the heat treatment time and water bath temperature was

proposed by the data regression method. **Conclusion:** Heat treatment time decreases exponentially with the increase of water bath temperature. Due to an insufficient heat transfer temperature differential, too low water temperatures will significantly lengthen the time needed for heat treatment and increase energy usage.

Keywords: temperature distribution; heat treatment; CFD simulation; citrus peel

柑橘在采后会由于青霉病、绿霉病、酸霉病、蒂腐病、炭疽病等病害而引起腐烂变质, 造成大量经济损失^[1-2]。目前, 多运用杀菌剂等化学方法来控制柑橘果实采后腐烂, 但化学杀菌剂长期使用对人体有害, 对环境也会造成污染^[3], 因此政府和监管机构对采后化学杀菌剂的使用有一定的限制^[4-5]。

近年来, 采后热处理由于经济、便捷、安全、无药剂残留等优点被广泛运用于果蔬采后处理方法中。然而, 不同果蔬之间热处理所需温度和时间不同, 热处理导致的生理生化变化和对贮藏效果的影响也不同。杨乐^[6]研究了风速、果实热扩散速率或水循环速度、果实径向尺寸对苹果热处理过程中传热速率的影响, 并得到了相应状态下果实中心温度达到热处理要求所需的时间。Dai 等^[7]研究表明, 杨梅果实 48 ℃ 的热空气中处理 3 h, 能够明显抑制贮藏过程中的果实腐烂和失重。Garcia-Martin 等^[8]对柑橘进行了不同温度—时间组合热水处理, 结果表明, 柑橘热水处理的最佳条件为 53 ℃ 处理 3 min, 该条件下能够显著降低柑橘的腐烂发生率以及维持良好的硬度。Wei 等^[9]研究表明, 樱桃番茄在 38 ℃ 的热风下处理 12 h, 可以降低樱桃番茄的自然腐烂率, 延缓硬度下降, 抑制果胶的呼吸速率和乙烯产量, 延缓果胶的增溶和纤维素的降解。这种物理防腐方法通常在高于柑橘成熟季节温度的温度下使用, 通常为 30~55 ℃^[10], 以杀死或预防致病

基金项目: 重庆市自然科学基金项目 (编号: CSTB2023NSCQ-MSX0164)

作者简介: 赵曜 (1983—), 男, 重庆交通大学副教授, 博士。

E-mail: zhaoyao@cqjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-06-19 **改回日期:** 2023-11-23

菌,并改变酶的活性为目的^[11-12]。同时,该方法还具有诱导宿主、热休克蛋白以防御真菌病原体发育的能力^[13]。

热处理过程中最重要的两个关键参数为温度和时间^[14],不同的水温 and 加热时间复合模式会导致果实不同的生理生化反应^[15]。在柑橘热处理过程中,掌握果实内部不同点随时间变化的温度分布规律是控制热处理质量的关键因素^[16]。但目前的研究仅限于定性分析和实证研究^[8],具有一定的盲目性和随机性,缺乏热处理过程中温度和时间控制的理论依据。张娜^[17]建立了柱状黄瓜的二维多层物理传热模型,模拟了黄瓜在热处理过程中的非稳态传热过程。张治权^[18]建立了柱形和球形果蔬的分层传热模型,模拟了不同果蔬在热处理过程中的内部温度场,研究了果蔬贮藏过程中的传热规律。丁玉先^[19]对苹果、梨、芒果、脐橙、草莓、葡萄和黄瓜的热水处理过程进行了传热模拟,分析了果蔬保鲜效果和热伤害的原因。Carlescu 等^[20]基于 CFD 软件建立了杏热处理过程的传热模型,研究了杏热处理前后内部温度和水分的变化规律。Laguerre 等^[21]建立了番茄的瞬态传热模型,研究了番茄香味与传热特性的关系。综上,热物理模型是一种有效的传热研究方法,有助于使热处理科学技术和植物生命科学的成果定量化,从而促进生命科学的进步。在传热研究领域,CFD 可以提供更详细的实际过程信息,以支持和解释试验观测结果^[22-23]。

目前,有关柱形和球形果蔬的分层传热模型的研究多集中在对整个果实内部传热过程的分析上,有关果皮内部传热特性的研究较少,而大多数果蔬热处理效果主要发生在果皮上。同时,柑橘热处理温度和时间组合一直是根据经验确定的,缺乏从传热角度进行计算的专业理论依据。由于柑橘热处理的效果主要发生在果皮上,因此选择果皮作为传热研究对象,研究不同温度和时间组合的传热规律。而柑橘皮相对较薄,只有 1~2 mm,很难用试验温度测量方法来获得果皮内部的温度。研究拟采用数值模拟方法建立数学模型,揭示水浴热处理过程中柑橘皮内部温度的变化规律;其次,基于数学模型,模拟不同种类柑橘皮在热处理过程中内部温度的时空分布规律;最后,提出热处理过程中温度—时间函数与果实厚度参数变化的关系,并对柑橘类水果的热处理提出合

理建议,旨在为热处理过程提供有利于节约能源的温度与时间选择方法。

1 理论和方法

1.1 假设

应用工程热物理的瞬态传热理论研究柑橘皮内部的温度变化。尽管水和无机物的供应被切断,但柑橘果实采收后仍然是一个活的有机体。光合作用已经停止,呼吸作用和水分的迁移仍在进行,呼吸代谢在果实中分布均匀,其影响归因于不均匀的植物组织和温度的变化,为了简化计算过程,需要一些假设。

(1) 柑橘类果实在热处理温度范围内的性质是恒定的。

(2) 热处理过程中,成分和组织结构稳定。

(3) 组织呼吸作用在果实内部均匀分布。

1.2 控制方程和数学模型

该数学模型考虑了代表性元素体积的热交换、代谢热和外部热。果实组织被认为是一个热交换控制体积(图 1)。利用热传导理论和能量守恒定律,通过对微控体积换热的分析,建立瞬态热传导的量化模型。模拟过程中涉及的主要方程为能量守恒,即球坐标下的热传导微分方程公式,在球坐标下,热传导过程中,从球形果实中分裂出一个无穷小的物体。

在 $d\tau$ 时间内,微观物体沿 r 方向输入和输出的净热量:

$$\Theta \Phi_r = q_r r^2 \sin\theta d\varphi d\theta d\tau, \quad (1)$$

$$q_r = -\lambda \frac{\partial t}{\partial r}, \quad (2)$$

$$\frac{\Phi_{r+dr} - \Phi_r}{dr} = \frac{\partial \Phi_r}{\partial r}, \quad (3)$$

$$\therefore \Phi_r - \Phi_{r+dr} = \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r^2 \sin\theta \frac{\partial t}{\partial r}) dr d\varphi d\theta d\tau. \quad (4)$$

在 $d\tau$ 时间内,微观物体沿 φ 方向进出口的净热量:

$$\Theta \Phi_\varphi = q_\varphi r dr d\theta dz, \quad (5)$$

$$q_\varphi = -\lambda \frac{1}{r \sin\theta} \frac{\partial t}{\partial \varphi}, \quad (6)$$

$$\frac{\Phi_{\varphi+d\varphi} - \Phi_\varphi}{d\varphi} = \frac{\partial \Phi_\varphi}{\partial \varphi}, \quad (7)$$

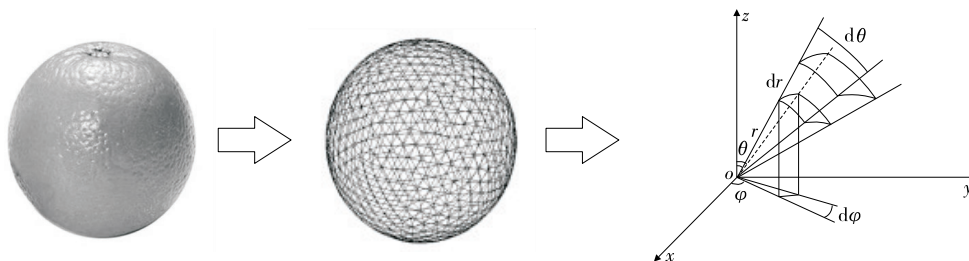


图 1 柑橘球坐标

Figure 1 Citrus sphere coordinates

$$\therefore \Phi_{\varphi} - \Phi_{\varphi+d\varphi} = \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) dr d\varphi d\theta d\tau. \quad (8)$$

在 $d\tau$ 时间内,微观物体沿 θ 方向进出口的净热量:

$$\Theta \Phi_{\theta} = q_{\theta} r \sin \theta dr d\varphi d\tau, \quad (9)$$

$$q_{\theta} = -\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial \theta}, \quad (10)$$

$$\frac{\Phi_{\theta+d\theta} - \Phi_{\theta}}{d\theta} = \frac{\partial \Phi_{\theta}}{\partial \theta}, \quad (11)$$

$$\therefore \Phi_{\theta} - \Phi_{\theta+d\theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \sin \theta \frac{\partial t}{\partial \theta} \right) dr d\varphi d\theta d\tau. \quad (12)$$

增加了 r, φ, θ 3 个方向的微观物体进出口的净热量:

$$I = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \sin \theta \frac{\partial t}{\partial r} \right) dr d\varphi d\theta d\tau + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) dr d\varphi d\theta d\tau + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \sin \theta \frac{\partial t}{\partial \theta} \right) dr d\varphi d\theta d\tau. \quad (13)$$

在 $d\tau$ 时间内,柑橘类水果呼吸的热源形成无穷小的体:

$$II = H_v r^2 \sin \theta dr d\varphi d\theta d\tau. \quad (14)$$

在 $d\tau$ 时间内,无穷小物体的热力学增量:

$$III = \rho c \frac{\partial t}{\partial r} r^2 \sin \theta dr d\varphi d\theta d\tau. \quad (15)$$

同时 I 、 II 、 III 球坐标下可用的热传导微分方程式:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = H_v + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \sin \theta \frac{\partial t}{\partial \theta} \right) \quad (0 < r < R, t > 0). \quad (16)$$

传热微分方程的确定条件为:

(1) 初始条件:

$$T = T_0 \quad (0 \leq r \leq R, t = 0). \quad (17)$$

(2) 边界条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial r} \\ \rho C_p \delta \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha (T_a - T) - \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \end{cases}, \quad (18)$$

式中:

ρ ——果实密度, kg/m^3 ;

C_p ——比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

t ——时间, s ;

λ ——果实导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$;

H ——果实呼吸热, W/m^3 ;

r ——距果实中心点的距离, m ;

R ——半径, m ;

α ——果实表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

δ ——等效边界层厚度, m 。

1.3 导热系数的测量

采用 TE3000E 瞬态热线法测定导热系数。瞬态热线法具有测量时间短、精度高、对环境要求低的优点,其基本工作方程式为:

$$\Delta T_{\text{id}}(r_0, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln t + \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \left(\frac{4\alpha}{r_0^2 C} \right). \quad (19)$$

1.4 预处理方法及解决步骤

根据第三边界条件计算柑橘皮与热水之间的热交换,使用式(20)作为对流传热系数,对果皮表面进行强制对流计算。

$$h = 0.34 \frac{\lambda_m}{d} \left(\frac{ud}{\nu_m} \right)^{0.6}. \quad (20)$$

具体参数值和边界条件见表 1,在预处理过程中构建三维结构化网格,如图 2 所示,采用隐式和非定常模式计算,离散格式采用一阶逆风公式。当动能的归一化残差 $< 10^{-6}$ 时,实现了模拟的收敛性。

表 1 3 种不同地区柑橘的基本参数值

Table 1 Basic parameter values for citrus in three different regions

参数	单位	参考值
奉节脐橙直径	m	0.09
长寿血橙直径	m	0.06
资阳蜜桔直径	m	0.04
奉节脐橙果皮厚度	m	0.008
长寿血橙果皮厚度	m	0.004
资阳蜜桔果皮厚度	m	0.002
奉节脐橙导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	0.136 9
长寿血橙导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	0.358 9
资阳蜜桔导热系数	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	0.334 3
初始温度	$\text{K}(^\circ\text{C})$	293 (20)
比热容	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	3.78×10^3
密度	g/cm^3	0.95
水浴温度	$\text{K}(^\circ\text{C})$	311(38), 318(45), 323(50)

2 结果与分析

2.1 温度场理论分析

图 3~图 5 为不同水浴温度下柑橘皮内部节点温度随时间的变化,总时间为 7 200 s。一般规律为:温度梯度在前 1/3 的时间内迅速增加,在后期逐渐减弱,同时由于

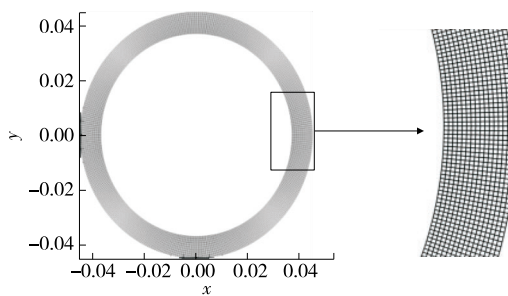


图 2 网格划分

Figure 2 Meshing

传热过程中需要温差,果皮温度和水温之间仍有较小的温差。当水温分别为 38,45,50 ℃时,资阳蜜桔果皮内表面达到果皮外表面温度大约需要 1 200 s;当水温分别为 38,45,50 ℃时,长寿血橙果皮内表面达到果皮外表面温度大约需 2 400 s;当水温分别为 38,45,50 ℃时,奉节脐橙果皮内表面达到果皮外表面温度约需 7 200 s。

图 6 为不同类型柑橘皮在 10,100,500 s 时间点的内部温度轮廓。由图 6 可知,由于不同类型柑橘皮的厚度

不同,10 s 时各类型柑橘皮的内部温度分布也不同。其中,由于奉节脐橙的果皮最厚,因此其大部分果皮仍处于初始温度,温度只传递到了果皮的浅表面;对于长寿血橙,温度传递到了果皮的 1/2 深度,果皮的内部依然保持原始温度;由于资阳蜜桔的果皮最薄,因此其温度已传递到果皮表面内侧,整个果皮的温度也发生了变化。

2.2 计算条件优化

实际上,热处理过程中,由于温差是传热的驱动力,

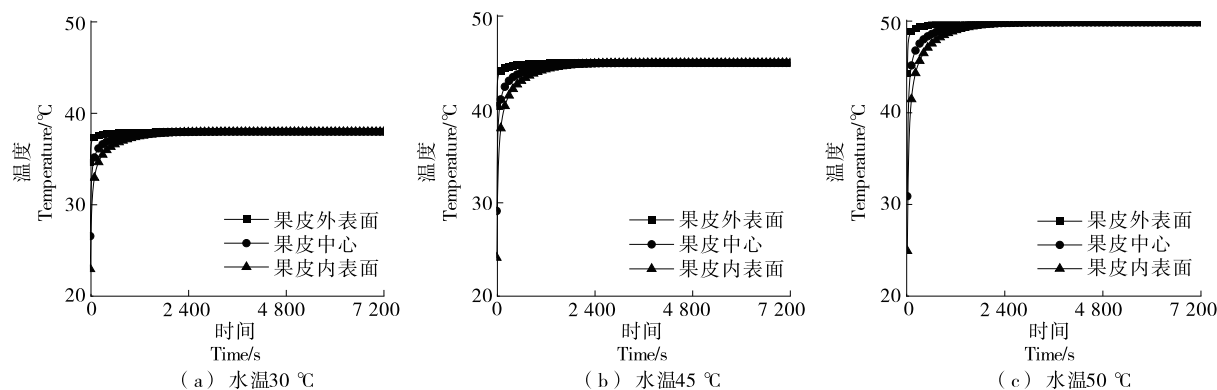


图 3 资阳蜜桔在不同水浴温度下的热处理时间

Figure 3 Heat treatment time of Ziyang tangerine at different water bath temperatures

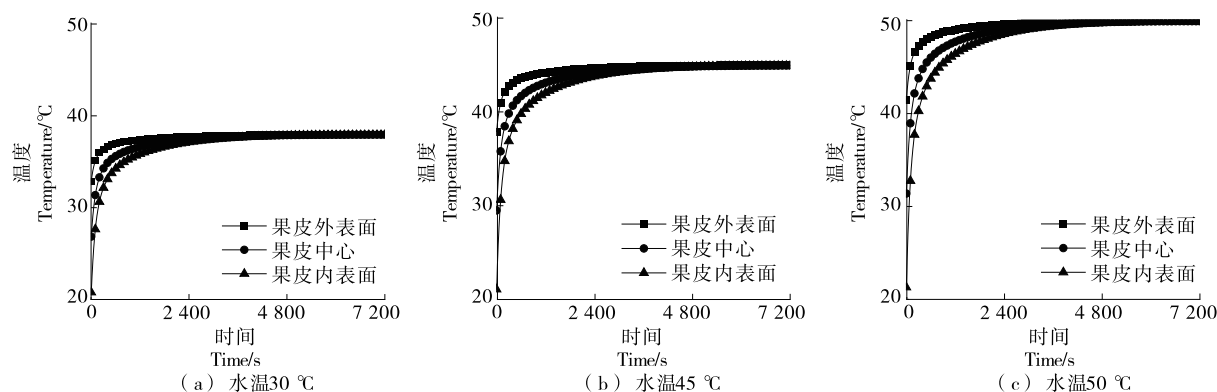


图 4 长寿血橙在不同水浴温度下的热处理时间

Figure 4 Heat treatment time of longevity blood orange at different water bath temperatures

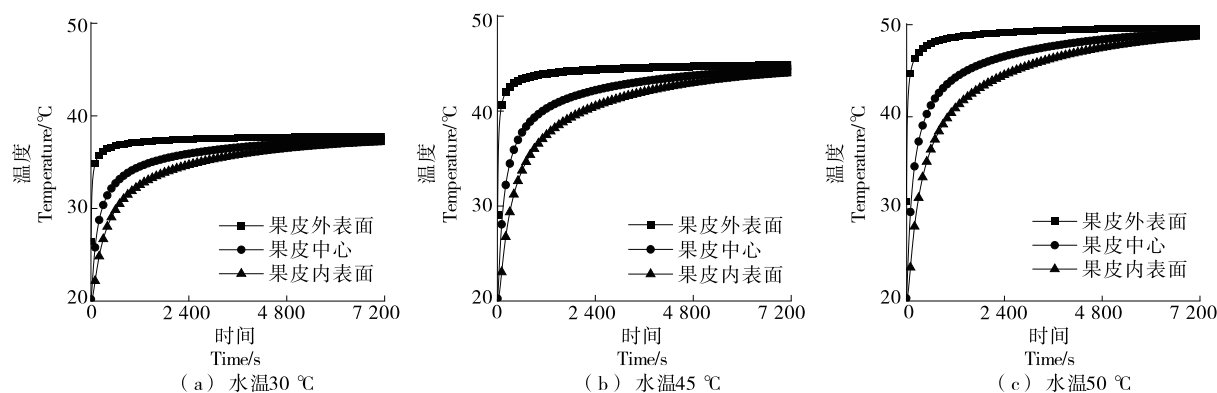
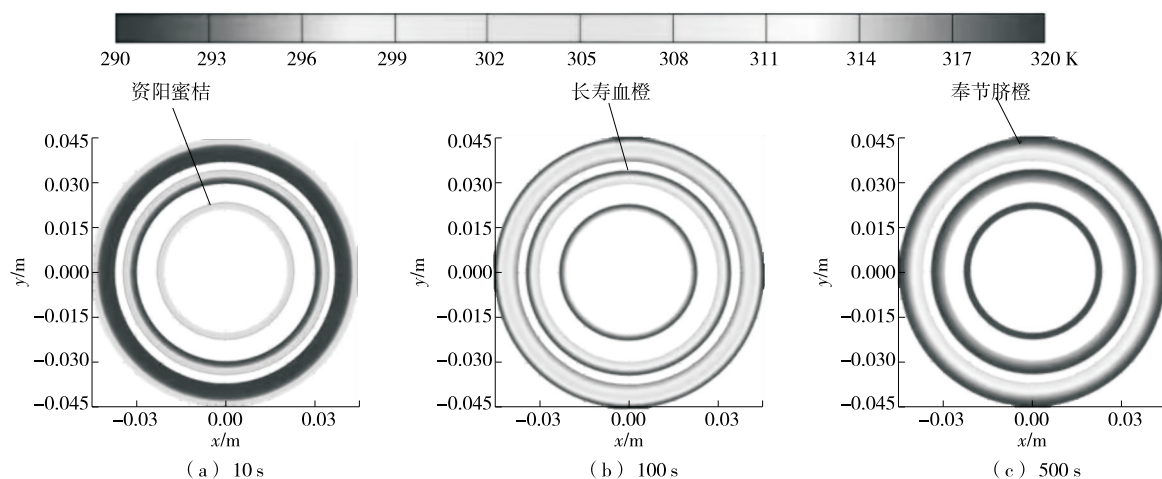


图 5 奉节脐橙在不同水浴温度下的热处理时间

Figure 5 Heat treatment time of Fengjie navel orange at different water bath temperatures



由内到外依次为资阳蜜桔、长寿血橙和奉节脐橙

图 6 不同种类桔子在不同时间点的内部温度分布

Figure 6 Internal temperature distribution of different species of oranges at different time

如果内表面温度达到水温,相对来说需要很长的时间,浪费了更多的热量和时间,从而降低了生产效率。热处理的效果主要作用于果皮外表面层,因此不需要使内表面达到与水温相同的温度,内表面达到高于成熟温度的温度即可,因此推荐值约为 38°C ,这是热处理需求所需的最低温度,将有助于缩短热处理时间,同时节约能源,提高生产率。

图 7 为不同(恒温)水浴温度下 3 种柑橘内表面达到 38°C 左右所需的时间。考虑到传热所需的温差,水温选择在 $40, 45, 50^{\circ}\text{C}$ 。由图 7 可知,提高水温会缩短传热时间,时间—温度关系为非线性,水温从 40°C 升高至 50°C ,加热时间约为原始条件的 $1/10$ 。

当水温为 $40\sim 90^{\circ}\text{C}$ 时,继续改变水温,得到了果皮温度达到 38°C 的时间曲线如图 8 所示。由图 8 可知,3 种柑橘类水果的变化趋势相同,整个曲线可分为 3 个区

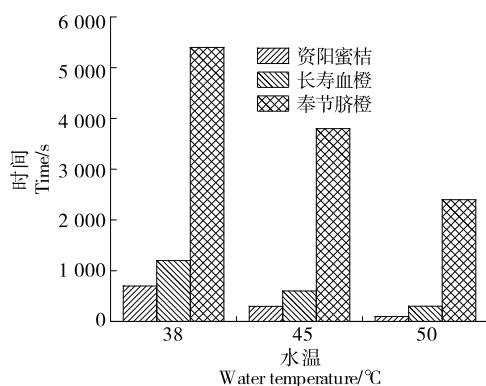


图 7 不同水温下果皮内表面达到 38°C 所需的时间

Figure 7 The time required for the inner surface of the peel to reach 38°C at three different water temperatures

域:大梯度区、衰减区和均匀区。在大梯度区时,水浴温度 $< 55^{\circ}\text{C}$,传热时间 $> 500\text{ s}$;在衰减区时,水浴温度为 $55\sim 75^{\circ}\text{C}$,传热时间分布在 $250\sim 500\text{ s}$;在均匀区时,水温 $> 75^{\circ}\text{C}$,传热时间稳定在 250 s 左右。

在果皮内表面温度达到 38°C 的条件下,通过数据回归方法获得了热处理时间、果皮厚度和水温相关的数学函数,其中热处理时间相关参数近似计算:

$$t = m \times 5 \times 10^7 \kappa^{-0.05m-3.5}, \quad (21)$$

式中:

m ——果皮厚度,mm;

κ ——水温, $^{\circ}\text{C}$;

t ——热处理时间,s。

通过改变水浴温度,可以在一定程度上调整热处理时间,而不会增加柑橘的物理热损伤,从而可以提高生产效率。以血橙果皮厚度 4 mm 为例,在 50°C 热处理水浴温度条件下,计算得出热处理时间为 103 s ,与程玉娇等^[24]的结果近似吻合。因此,试验所得计算方法对柑橘热处理过程的温度和时间操作参数组合具有一定的指导作用。

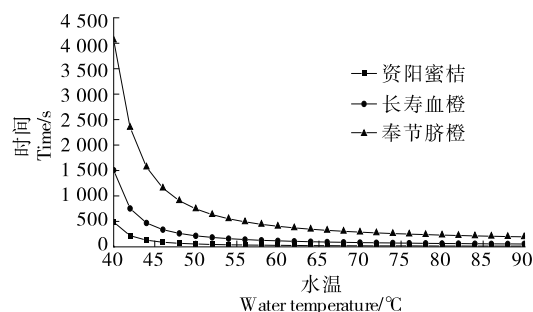


图 8 不同类型柑橘果皮内表面达到 38°C 所需的时间

Figure 8 Time required for the inner surface of the peel to reach 38°C

热处理过程中的传热规律随着时间的推移,果皮内各点的温差逐渐减小,果皮内表面的温度逐渐接近水浴温度,但由于温差是传热的驱动力,在非常小的温差下的热传递将减缓温度传播速度。如果内果皮表面温度达到与水浴温度相同的温度,热处理时间将太长而无法接受,同时,由于热处理的效果主要集中在果皮的外层,热处理可以在一定程度上降低对内表面温度的要求,因此,可以选择略高于果实成熟温度的温度作为内果皮表面温度标准,这样可以减少热处理时间和能耗。

3 结论

通过传热控制方程和边界条件,探讨了3种柑橘(奉节脐橙、长寿血橙和资阳蜜桔)果实热处理过程中的瞬态传热物理模型,研究了内部温度场的时空分布。结果表明,在柑橘皮内部温度传递过程中,不同点的温度随着时间的推移逐渐趋于均匀,温度梯度可以分为3个区域:在第一个大梯度区,温度梯度变化较大;在第二个衰减区,温度梯度逐渐衰减;在第三个衰减区,柑橘皮的温度变得均匀,此过程中的传热需要相对较长的时间。传热时间过长会造成能源浪费,由于热处理效果主要作用于果皮外层,适当增加果皮内外层的温差可以缩短加热时间,从而提高生产效率,节约能源,因此,建议在38℃的果皮内表面温度条件下,参考热处理参数时间和果皮厚度之间的关系,推荐的函数关系为 $t = m \times 5 \times 10^7 \kappa^{-0.05m-3.5}$ 。后续应进一步对大温差短时间热处理作用下果实品质变化进行研究,进一步扩大合理的热处理时间与水温匹配范围。

参考文献

- [1] 马亚琴, 贾蒙, 周心智. 柑橘采后贮藏保鲜技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(22): 290-297.
- [2] MA Y Q, JA M, ZHOU X Z. Research progress of citrus postharvest storage and preservation technology [J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(22): 290-297.
- [3] KUMAR A, ZHIMO V Y, BIASI A, et al. Impact of packhouse treatments on the peel microbiome of mandarin fruit (cv. Orr) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 176: 114-121.
- [4] 王文军, 曾凯芳, 刘晓佳, 等. 不同保鲜剂对柑橘果实贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 110-116.
- [5] WANG W J, ZENG K F, LIU X J, et al. Effects of different preservatives on storage quality of citrus fruits [J]. Food & Machinery, 2017, 33(4): 110-116.
- [6] COVARELLI L, BECCARI G, MARINI A, et al. A review on the occurrence and control of ochratoxigenic fungal species and ochratoxin A in dehydrated grapes, non-fortified dessert wines and dried vine fruit in the Mediterranean area [J]. Food Control, 2012, 26(2): 347-356.
- [7] SARUBBI F, FORMISANO G, AURIEMMA G, et al. Patulin in homogenized fruit's and tomato products [J]. Food Control, 2016, 59: 420-423.
- [8] 杨乐. 采后球形果实热处理过程中的热物理研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2010: 38-46.
- [9] YANG L. Thermophysical study of postharvest spherical fruit heat treatment [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University: 38-46.
- [10] DAI K, HAN P P, ZOU X R, et al. Hot air treatment reduces postharvest decay in Chinese bayberries during storage by affecting fungal community composition [J]. Food Research International, 2021, 140: 1-8.
- [11] GARCIA-MARTIN J F, OLMO M, GARCIA J M. Decay incidence and quality of different citrus varieties after postharvest heat treatment at laboratory and industrial scale [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 118: 96-102.
- [12] WEI Y Y, ZHOU D D, WANG Z J, et al. Hot air treatment reduces postharvest decay and delays softening of cherry tomato by regulating gene expression and activities of cell wall-degrading enzymes [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(6): 2 105-2 112.
- [13] ZHOU Y H, DENG L L, ZENG K F. Enhancement of biocontrol efficacy of *Pichia membranaefaciens* by hot water treatment in postharvest diseases of citrus fruit [J]. Crop Protection, 2014, 63: 89-96.
- [14] TALIBI I, BOUBAKER H, BOUDYACH E H, et al. Alternative methods for the control of postharvest citrus diseases [J]. Journal of Applied Microbiology, 2014, 117(1): 1-17.
- [15] DI FRANCESCO A, DI FOGGIA M, FASANO A, et al. Heat treatment effect on *Cadophora luteo-olivacea* of kiwifruit [J]. Plant Pathology, 2022, 71(3): 644-653.
- [16] SHI W J, SU S C, LI B B, et al. Molecular characterisation and expression analysis of a sHSP gene involved in heat shock treatment-induced chilling tolerance in highbush blueberry fruit [J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2017, 92(5): 455-464.
- [17] ZHANG M F, XU R W, SUG C N, et al. The effect of short-term temperature pretreatments on sugars, organic acids, and amino acids metabolism in valencia orange fruit [J]. Journal of Food Quality, 2022, 2 022: 321-329.
- [18] GHANEM N, MIHOUBI D, KECHAOU N, et al. Microwave dehydration of three citrus peel cultivars: Effect on water and oil retention capacities, color, shrinkage and total phenols content [J]. Industrial Crops and Products, 2012, 40: 167-177.
- [19] ZHAO Y F, ZHENG R S. Combination of fruit and vegetable storage and fresh-keeping with postharvest heat treatment [J]. Journal of Chemistry, 2022, 2 022: 251-263.
- [20] 张娜. 果蔬采后热处理的理论与试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2016: 30-49.
- [21] ZHANG N. Theoretical and experimental study on postharvest heat treatment of fruits and vegetables [D]. Tianjin: Tianjin University: 30-49.

(下转第134页)

- YANG X Q, WANG C G. Relationship between mechanical properties and damage of hetao muskmelons under static compression [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(3): 31-37.
 - [13] 王芳, 韩媛媛, 魏星, 等. 河套蜜瓜跌落冲击特性[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(8): 199-201.
WANG F, HAN Y Y, WEI X, et al. Drop impact characteristics of hetao melon [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45 (8): 199-201.
 - [14] 姜松, 鲍黄贵, 蔡健荣, 等. 柑橘力学差异性研究[J]. 江苏农业科学, 2009(5): 244-246.
JIANG S, BAO H G, CAI J R, et al. Study on mechanical differences of citrus[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2009 (5): 244-246.
 - [15] 姜松, 鲍黄贵, 蔡健荣, 等. 不同成熟度柑橘力学特性研究[J]. 食品工业科技, 2009(12): 117-119.
JIANG S, BAO H G, CAI J R, et al. Study on mechanical parameters of orange at different maturity stages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2009(12): 117-119.
 - [16] 鲍黄贵. 基于机器人采摘的柑橘力学特性分析及柑橘贮藏期品质变化研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009: 53.
BAO H G. Analysis of mechanical properties of citrus based on robot picking and study on quality change of citrus during storage [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009: 53.
 - [17] 尹伊君. 宽皮柑橘压缩损伤特性与机械损伤评估研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 68.
YIN Y J. Research on compression damage characteristics and Mechanical damage evaluation of wide-peel citrus [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018: 68.
 - [18] 陈红, 尹伊君, 潘海兵, 等. 宽皮柑橘机械损伤致损因素分析及缓冲减损防护措施[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1): 258-266.
CHEN H, YIN Y J, PAN H B, et al. Loss factor analysis of mechanical damage and cushioning protection measure for citrus reticulate blanco [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(1): 258-266.
 - [19] 陈红, 徐翔宙, 尹伊君, 等. 宽皮柑橘移动夹持剥皮力学特性与果皮分离特性试验研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 25-31.
CHEN H, XU X Z, YIN Y J, et al. Experimental study on mechanical properties and peel separation characteristics of citrus reticulate blanco with peel clamped moving[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(14): 25-31.
 - [20] 王剑英, 王海宝, 罗强, 等. 沃柑果实跌落的仿真分析[J]. 南方农业, 2022, 16(21): 241-245.
WANG J Y, WANG H B, LUO Q, et al. Simulation analysis of Orah mandarin fruit drop [J]. South China Agriculture, 2022, 16 (21): 241-245.
 - [21] PALLOTTINO F, COSTA C, MENESATTI P, et al. Assessment of the mechanical properties of Tarocco orange fruit under parallel plate compression[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(3): 308-316.
 - [22] 邵显. 宽皮柑橘挤压损伤与品质劣变机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 32-33.
SHAO X. Study on mechanism of extrusion damage and quality deterioration of wide-peel citrus [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 32-33.
 - [23] 张新, 王博, 张黎骅. 葵花籽仁力学特性的有限元分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 31-35.
ZHANG X, WANG B, ZHANG L H. Finite element analysis on mechanical properties of sunflower seed [J]. Food & Machinery, 2017, 33(2): 31-35.
-
- (上接第 127 页)
- [18] 张治权. 果蔬导热系数影响因素及其内部温度场数值模拟研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2019: 36-58.
ZHANG Z Q. Numerical simulation study on the influencing factors of thermal conductivity of fruits and vegetables and their internal temperature field [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2019: 36-58.
- [19] 丁玉先. 采后果蔬热处理传热分析与试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2020: 17-24.
DING Y X. Analysis and experimental study on heat transfer in post-harvest vegetable heat treatment [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020: 17-24.
- [20] CARLESCU P M, ARSENOAIA V, ROSCA R, et al. CFD simulation of heat and mass transfer during apricots drying [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 85: 479-486.
- [21] LAGUERRE O, DENIS A, BOULEDJERAF N, et al. Heat transfer and aroma modeling of fresh fruit and vegetable in cold chain: Case study on tomatoes[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 133: 133-144.
- [22] DUGA A T, DELELE M A, RUYSEN K, et al. Development and validation of a 3D CFD model of drift and its application to air-assisted orchard sprayers[J]. Biosystems Engineering, 2017, 154: 62-75.
- [23] ZHANG J L, MENG Y M, WANG H, et al. Optimization design of cane sugar evaporative crystallizer based on orthogonal test and computational fluid dynamics [J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(4): 1-10.
- [24] 程玉娇, 李云云, 张敏. 热处理对‘塔罗科’血橙物流变温环境下的保鲜效果[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 254-260.
CHENG Y J, LI Y Y, ZHANG M. Fresh-keeping effect of heat treatment on 'Taroco' blood orange logistics temperature change environment[J]. Food Science, 2016, 37(6): 254-260.