

万琛,陈红,田皓予,等. 蒸烫处理的宽皮柑橘温度场分布及传热过程分析[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(2): 251-258.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.02.031

蒸烫处理的宽皮柑橘温度场分布及传热过程分析

万琛¹, 陈红^{1,2}, 田皓予¹, 崔前锦¹, 李光辉¹, 府胜杰¹, 周建飞¹

1. 华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;
2. 国家柑橘保鲜技术研发专业中心, 武汉 430070

摘要 为解决宽皮柑橘蒸烫去皮效果差、果肉品质受损等问题, 基于有限元法建立宽皮柑橘的传热模型, 考察宽皮柑橘在蒸烫条件下内部温度场的变化规律, 并对不同果径宽皮柑橘的蒸烫时间进行预测。结果表明: 在蒸烫处理时, 蒸汽与柑橘果皮表面发生对流换热使其温度骤升, 热量沿径向向果肉中心传递。随着蒸烫时间的延长, 柑橘沿径向受热更加均匀, 果肉表面温度迅速升高而后趋于稳定, 其传热速率先升后降。果径越小, 果肉表面传热速率越大, 并且在同一蒸烫时间下果肉表面温度也越高。为保证柑橘果肉品质不会受损, 小果径柑橘蒸烫时间应小于77 s, 大果径柑橘蒸烫时间应小于172 s。

关键词 宽皮柑橘; 蒸烫处理; 温度分布; 传热速率; 蒸烫去皮

中图分类号 TS255.36 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)02-0251-08

去皮是宽皮柑橘深加工前的重要环节, 其技术的优劣极大地影响产品的品质和附加值^[1-2]。蒸烫能够降低果皮脆性, 增加果皮韧性, 减小果皮与果肉之间的黏结力, 有利于提高去皮的效果和降低去皮的难度^[3-4]。现有蒸烫参数的设计多是基于有限的、较粗略的试验进行, 缺乏蒸烫过程中传热特性、蒸烫时间与温度场分布相关关系等理论指导, 且受原料体积大小等因素的影响, 常存在因蒸烫不足或蒸烫过度, 去皮难度大、果皮难以成片剥离和果肉受到热损伤等问题, 导致去皮率低、果肉损伤率高、原料适应性差和产品质量不稳定, 无法满足市场的需求^[5-7]。

国内外已有学者对果蔬内部的传热特性进行了深入研究。张娜^[8]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^[9]建立了柱形和球形果蔬的分层传热模型, 模拟了不同果蔬在冷藏过程和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^[10]对苹果、梨、芒果、脐橙、草莓、葡萄和黄瓜的热水处理过程进行传热模拟, 分析了果蔬保鲜效果和热伤害的原因。Carlescu等^[11]基于CFD软件建立了杏热烫过程的传热模型, 研究了杏热烫处

理前后内部温度和水分的变化规律。Laguette等^[12]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。Zhu等^[13]对果蔬真空冷却过程进行了模拟仿真, 对真空冷却技术的关键参数进行了预测分析。宽皮柑橘蒸烫效果与内部温度场分布密切相关, 有关柑橘蒸烫过程中温度分布的研究少有报道。

本研究建立宽皮柑橘在二维平面上的分层传热模型, 利用ABAQUS软件进行有限元仿真, 结合热成像技术, 对蒸烫过程中的柑橘内部温度场进行模拟仿真, 探究热量从果皮表面到果肉中心的传递行为和分布特点, 旨在为宽皮柑橘蒸烫去皮的参数设计与优化提供理论基础及应用技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验研究对象为中熟温州蜜橘(*Citrus unshiu*), 于2021年11月3日采自武汉市江夏区柑橘果园。果实均已完全成熟, 成熟度一致, 完整无破损, 无病虫害。利用电子数显游标卡尺测量并统计该批次中90个柑橘的尺寸和果皮厚度, 按照果径尺寸相差5 mm为一等级对温州蜜橘进行分级, 将试验柑橘

收稿日期: 2022-06-09

基金项目: 现代农业(柑橘)产业技术体系建设专项(CARS-26); 柑橘全程机械化科研基地建设项目(农计发[2017]19号)

万琛, E-mail: W19970319@163.com

通信作者: 陈红, E-mail: chen hong@mail.hzau.edu.cn

分为小果径、中果径和大果径3种类型,果径越大,果皮越厚^[5],具体尺寸如表1所示。

表1 不同果径宽皮柑橘的尺寸
Table 1 Size of *Citrus reticulata* Blanco with different fruit diameters

类型 Type	果径 Fruit diameter	皮厚 Peel thickness	果高 Fruit height
小果径 Small fruit diameter	60.0±2.5	2.1±0.2	55.0±3.0
中果径 Medium fruit diameter	65.0±2.5	2.5±0.2	55.0±3.0
大果径 Large fruit diameter	70.0±2.5	2.8±0.2	55.0±3.0

1.2 试验设备

HYUNDAI SMS-32D 恒温蒸汽锅;AB135-S 电子分析天平,梅特勒-托利多公司,精度为0.1 mg;电子数显游标卡尺,德国美耐特公司,精度为0.1 mm;Q600 同步热分析仪,美国TA公司,DTA 灵敏度为0.001 °C,量热精度为2%;电热恒温鼓风干燥箱,上海丙林电子科技有限公司;Fluke Ti300 手持式红外热像仪,福禄克公司,温度测量精度为0.1 °C。

1.3 宽皮柑橘热物性参数确定和热分析条件

将装有一定量水的量杯放置电子分析天平上,称取质量为 m_0 ,并记录水的体积为 v_0 。将处理干净的试样轻放至杯中,再用细铁丝轻抵使其完全浸没于水中,称取质量为 m_1 ,记录此时杯中水和试样的总体积为 v_1 。测量试样分别为宽皮柑橘果皮和柑橘果肉,每种试样测量重复5次,通过计算可以得到试样的密度,计算公式如下式:

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{v_1 - v_0} \quad (1)$$

式(1)中, ρ 为密度, kg/m^3 ; m_0 为量杯与水的总质量, kg ; m_1 为量杯、水和试样的总质量, kg ; v_0 为量杯中水的体积, m^3 ; v_1 为量杯中水和试样的总体积, m^3 。

将宽皮柑橘果皮放入干燥箱内烘干24 h后研磨成均匀粉末,取30 mg果皮粉末作为待测试样。将果皮粉末试样和30 mg标准蓝宝石试样放入同步热分析仪中,设置参数如下:以室温20 °C为起始温度恒温3 min,以10 °C/min的加热速率升温至100 °C后再恒温3 min;吹扫气及流量设置为高纯度氮气,50 mL/min;保护气及流量设置为高纯度氮气,100 mL/min,试验重复3次。测得2个样品间的热流差,绘制出热流曲线,通过计算可得到宽皮柑橘果皮的比热容^[14],计算公式如式(2):

$$c_p = \frac{y}{y'} c'_p \quad (2)$$

式(2)中, c_p 为宽皮柑橘果皮的比热容, $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$; c'_p 为标准蓝宝石的比热容, $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$; y 为宽皮柑橘果皮热流曲线的纵坐标, J/min ; y' 为标准蓝宝石热流曲线的纵坐标, J/min 。

经过分析可知,宽皮柑橘蒸烫是一个相变的瞬态凝结换热过程(忽略热辐射),按发生的先后顺序可分为2个传热过程:一是常温果皮表面与高温蒸汽间发生的有相变对流换热凝结过程;二是因热对流而持续升温的果皮表面与柑橘内部产生温度梯度,出现的径向热传导过程,该过程又可分为果皮表面与果皮内部、果皮与果肉和果肉内部3个热传导过程。

将宽皮柑橘蒸烫过程近似等同于水平管外的膜状凝结对流换热过程^[15],将中果径柑橘近似于果径65 mm、果皮厚度2.5 mm的水平环状圆管结构。由努塞尔理论分析推广至水平圆管表面上的层流膜状凝结,平均表面换热系数的计算公式如式(3):

$$h = 0.729 \left[\frac{rg\lambda_1^3 \rho_1^2}{\eta_1 d (t_s - t_w)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

式(3)中, r 为饱和蒸汽的汽化潜能, kJ/kg ; λ_1 为定性温度下水的热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; ρ_1 为定性温度下水的密度, kg/m^3 ; η_1 为定性温度下水的运动黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; t_s 为饱和蒸汽压对应的饱和温度, K ; t_w 为柑橘果皮外的初始温度, K ; d 为宽皮柑橘的直径, m 。

武汉地区气压约为1.014 MPa,查表^[16]得蒸汽的饱和温度 $t_s=100$ °C,该温度下饱和蒸汽的物料参数 $r=2\,256.4$ kJ/kg,而柑橘果皮表面初始温度 $t_w=22$ °C,其余参数通过计算定性温度 $t_m = \frac{t_s + t_w}{2} = 61$ °C,查表^[16]可得: $\rho_1 = 983.2$ kg/m^3 、 $\lambda_1 = 0.654$ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $\eta_1 = 4.66 \times 10^{-4}$ $\text{Pa}\cdot\text{s}$,代入式(3)可得 $h=935.12$ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

根据试验结果和查阅相关资料^[17-18]得到宽皮柑橘果皮和果肉的热物性参数,其中,果皮和果肉的密度分别为956.3、1 345.1 kg/m^3 ,比热容分别为6 786.0、3 800.2 $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$,热导率分别为0.580、0.471 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

1.4 仿真模型简化

如图1所示,建立中果径宽皮柑橘二维平面上的分层传热模型:果径65 mm,皮厚2.5 mm,初始温度22 °C,对流换热系数 $h=935.12$ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,2个同心圆分别代表果皮表面和果肉表面,在100 °C饱和蒸汽

中蒸烫一定时间的热能传递模型。设定如下条件:宽皮柑橘按均匀同质处理,柑橘组织物性仅受温度影响,热处理不改变柑橘主要成分组成,忽略表面水分蒸发对柑橘温度的影响;热量传递只在沿柑橘径向的一维方向进行^[19]。

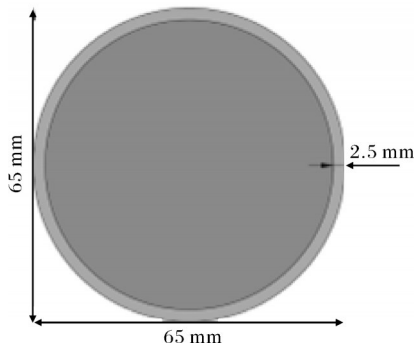


图1 柑橘仿真模型

Fig.1 Citrus simulation model

1.5 材料属性定义和网格划分

采用ABAQUS软件中的八节点线性传热六面体单元类型对中果径宽皮柑橘模型的蒸烫过程进行瞬态传热仿真分析。分别定义柑橘果皮与果肉的热物性参数,实例布种尺寸为0.001 m,指派网格控制属性为果皮和果肉,指派单元类型为DC3D8,检查网格无误后,完成网格划分(图2)。

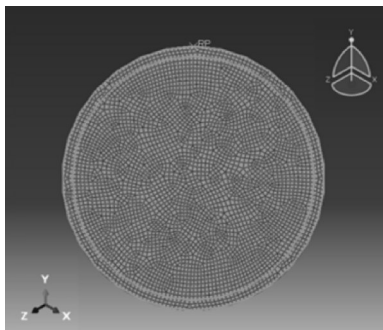


图2 柑橘模型的网格划分

Fig.2 Mesh generation of citrus model

1.6 分析步定义和载荷边界条件

设置果皮表面与蒸汽对流换热的相互作用方式,设定对流换热系数 $h=935.12 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,创建果皮与果肉、果肉与果肉间的瞬态热传递分析步,设定蒸烫时长为240 s、增量步大小为1 s。创建周围蒸汽温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的边界条件,柑橘初始温度为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 的预定义场,创建作业完成,计算求解。为研究不同果径宽皮柑橘的传热特性,根据表1改变宽皮柑橘模型的尺寸(小果径60 mm、皮厚2.1 mm和大果径70 mm、皮厚2.8 mm),分别进行有限元模拟仿真。

1.7 仿真模型验证试验

对中果径宽皮柑橘进行蒸烫试验来验证柑橘仿真模型的精度。利用红外热像仪测量柑橘横切面温度随径向距离的变化和果肉表面温度随时间的变化,通过对比模拟和实测温度来验证模型的精度。柑橘横切面温度实测方法:用标记笔标出柑橘的赤道位置,将柑橘放入恒温蒸汽锅(水蒸气 $100 \text{ }^\circ\text{C}$)中进行蒸烫处理,蒸烫时间分别为60、120、180和240 s。蒸烫完毕后在蒸汽锅中5 s内用工具刀沿赤道线将柑橘横切,迅速取出用红外热像仪对柑橘横切面拍照,图像保存为.IS2格式,试验重复5次。

果肉表面温度实测方法:用标记笔在柑橘赤道附近画 $20 \text{ mm}\times 20 \text{ mm}$ 的矩形,将柑橘放入恒温蒸汽锅(水蒸气 $100 \text{ }^\circ\text{C}$)中进行蒸烫处理,蒸烫时间分别为0(空白对照)、30、60、90、120、150、180、210和240 s。蒸烫完毕后在蒸汽锅中5 s内用工具刀沿正方形三边切割果皮,迅速取出外翻果皮用红外热像仪对柑橘果肉表面拍照,图像保存为.IS2格式,试验重复5次。利用Fluke Connect软件对红外热像仪拍摄的图像进行处理和分析,得到柑橘横切面和果肉表面的温度。

蒸烫处理下的宽皮柑橘温度场分布及传热过程分析的试验流程如图3所示。

2 结果与分析

2.1 蒸烫处理下宽皮柑橘内部温度分布

在蒸烫时间分别为60、120、180和240 s时,宽皮柑橘横切面的温度分布云图如图4所示。在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温蒸汽中,蒸汽先与柑橘果皮表面发生对流换热,使其温度骤升。随着蒸烫时间的延长,果皮表面的热量沿径向逐渐向内传递,并呈现出周向更均匀、径向更深入的特点。

图5为在不同蒸烫时间下宽皮柑橘横切面温度沿径向变化的曲线图,从果皮表面至果肉中心温度迅速降低到室温 $22 \text{ }^\circ\text{C}$,越靠近果肉中心其下降速率越小。蒸烫时间越久,从果皮到果肉中心温度下降也越平缓,柑橘沿径向受热更加均匀。因此,在对宽皮柑橘进行蒸烫去皮时,蒸烫时间会影响柑橘内部的温度分布,从而影响柑橘去皮的效果和柑橘果肉的品质。

2.2 仿真模型精度验证

利用红外热成像仪测量中果径宽皮柑橘在蒸烫处理后的实际温度,图6为柑橘横切面的温度云图,

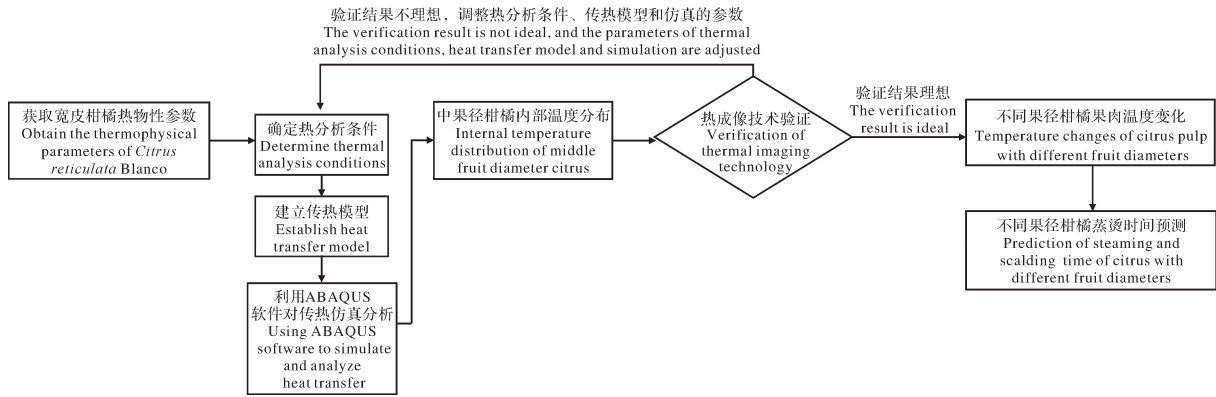
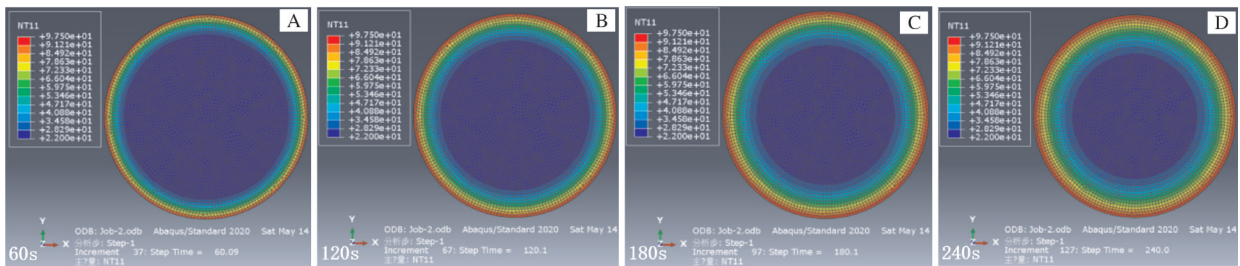


图 3 试验流程图

Fig.3 Test flow chart



A: 蒸烫处理 60 s Steam blanching for 60 s; B: 蒸烫处理 120 s Steam blanching for 120 s; C: 蒸烫处理 180 s Steam blanching for 180 s; D: 蒸烫处理 240 s Steam blanching for 240 s.

图 4 不同蒸烫时间下柑橘横切面温度分布云图

Fig.4 Temperature distribution of citrus cross section under different steaming time

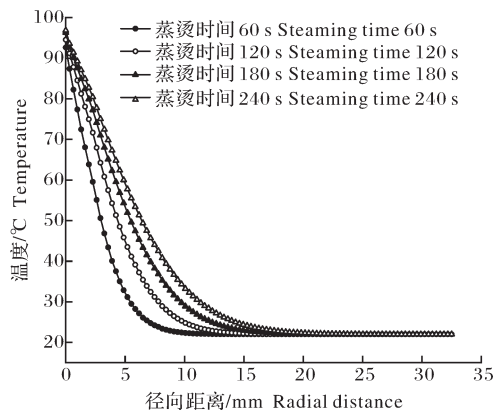


图 5 不同蒸烫时间下柑橘横切面沿径向温度变化

Fig.5 Radial temperature change of citrus cross section under different steaming time

通过对比柑橘温度的模拟值和实测值来验证模型的准确性。图 7 对比了在不同蒸烫时间下,柑橘横切面沿径向从果皮表面到果肉中心的模拟和实测温度。整体来看,实测值与模拟值变化趋势相似,但从红外热像仪拍摄的图像中提取的径向温度低于仿真得到的温度,蒸烫 60、120、180 和 240 s 的均方根误差 (RMSE) 分别为 2.638 9、3.038 6、3.186 3 和

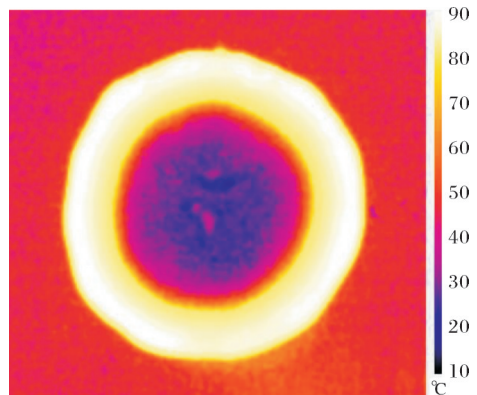
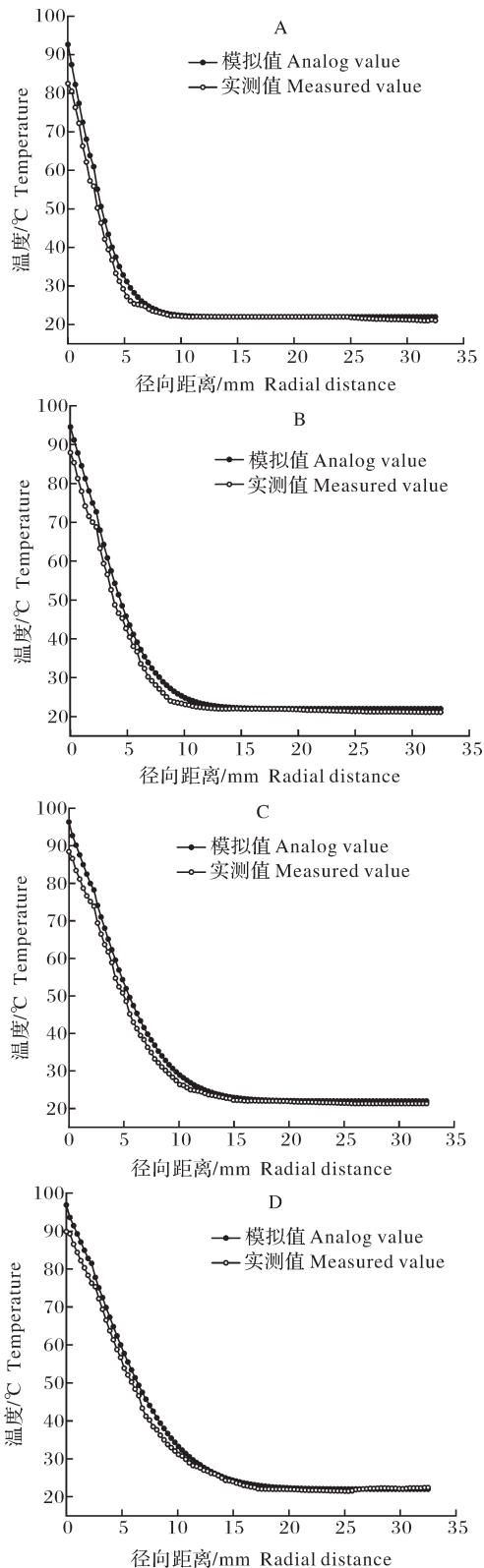


图 6 柑橘横切面温度云图

Fig.6 Temperature nephogram of citrus cross section

2.379 9 °C。原因可能是柑橘在拍照过程中,果皮表面、横切面与周围空气发生对流换热,导致温度降低,而温度降低程度与暴露时间、温度梯度和导热能力等因素有关。由于果皮表面全过程与空气接触且与空气温差最大,并且果皮的导热能力强于果肉,故其温度降低程度果皮表面最大、果皮次之、果肉最小。

图 8 是在果肉表面即径向距离 2.5 mm 处,模拟和实测温度随时间变化的对比图。与柑橘横切后拍



A: 蒸烫处理 60 s Steam blanching for 60 s; B: 蒸烫处理 120 s Steam blanching for 120 s; C: 蒸烫处理 180 s Steam blanching for 180 s; D: 蒸烫处理 240 s Steam blanching for 240 s.

图7 柑橘横切面沿径向温度变化

Fig.7 Radial temperature variation of citrus cross section

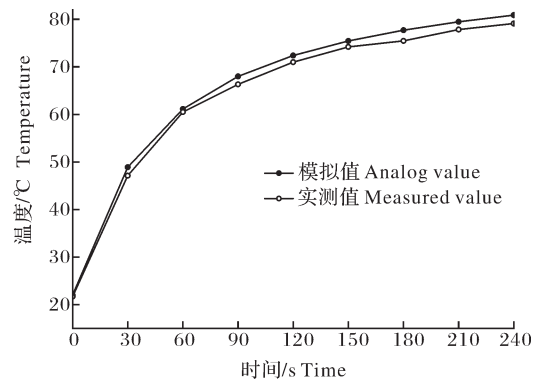


图8 果肉表面的模拟和实测温度

Fig.8 Simulation and measured temperature of pulp surface

照对比,果皮切割外翻后对果肉表面拍照明显缩短了时间,减少了与空气的对流换热,从红外热像仪拍摄的图像中提取的温度更接近真实值。果肉表面温度模拟值和实测值的均方根误差(RMSE)为 1.159 0 °C,明显低于柑橘横切面径向温度模拟值和实测值的均方根误差(RMSE)。果肉表面温度除了在蒸烫时间 30 s 时模拟值和实测值相对误差达到 3.76%,其余蒸烫时间下相对误差均在 2.98% 以内,吻合度较高。综上所述,有限元模型和试验数据的良好拟合证明在柑橘蒸烫处理过程中,该有限元模型能够有效且较为精确地预测宽皮柑橘内部的动态温度分布。

2.3 不同果径对宽皮柑橘果肉温度的影响

图9是在蒸烫处理下,模拟不同果径(小果径、中果径和大果径)对柑橘果肉表面温度的影响,即分别在径向距离 2.1、2.5 和 2.8 mm 处的温度。取单位时间内温度变化量(°C/s)作为传热速率,传热速率变化衡量着柑橘果肉与传热介质热量的交换程度。图 10

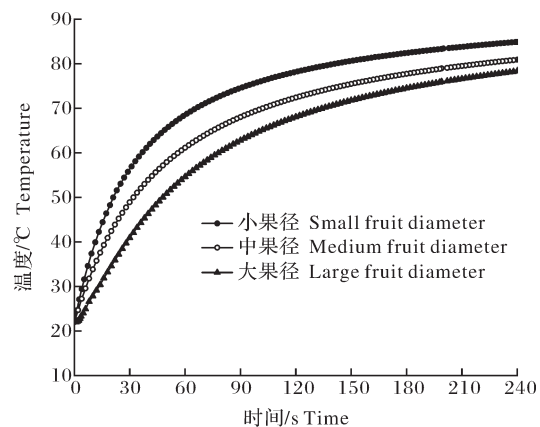


图9 不同果径对柑橘果肉表面温度的影响

Fig.9 Effects of different fruit diameters on surface temperature of citrus pulp

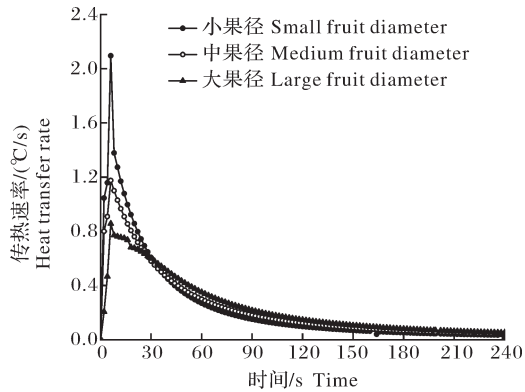


图10 不同果径柑橘果肉表面传热速率变化

Fig.10 Changes of surface heat transfer rate of citrus pulp with different fruit diameters

是不同果径柑橘果肉表面传热速率的变化。果肉表面温度随蒸烫时间的延长而升高并趋于稳定,果肉表面传热速率先升后降,这是由于刚受到蒸烫后,处于初温的柑橘果肉对热量传导反应迅速,在6 s后传热速率开始下降,120 s后开始趋于水平。果径越小,果肉表面传热速率越大,并且在同一蒸烫时间下果肉表面温度也越高。要使果肉表面温度达到70℃,小果径和大果径柑橘的蒸烫时间与中果径相比,分别有35.6%和42.3%的差别。在蒸烫时间为120 s时,小果径和大果径柑橘果肉表面温度与中果径相比,分别有5.67、5.83℃的差别。

对于中果径的宽皮柑橘,在蒸烫去皮过程中蒸烫时间对其感官品质影响非常显著,当蒸烫时间超过2 min时,感官品质会受到影响,果肉品质受损^[20]。由图5可知,在蒸烫作用下,柑橘果肉温度最高处位于果肉表面,因此,此处果肉在长时间蒸烫作用下,最容易受到热损伤从而影响果肉的品质。图9中,果径柑橘蒸烫2 min时,果肉表面温度为72.38℃。为保证柑橘在蒸烫作用下果肉品质不会受损,果肉表面温度不能高于72.38℃,则小果径柑橘蒸烫时间不能超过77 s,大果径柑橘蒸烫时间不能超过172 s。蒸烫时间越长,宽皮柑橘果皮越易剥离且剥皮效果越好,则大果径柑橘可以适当延长蒸烫时间。

3 讨论

本研究基于ABAQUS软件对宽皮柑橘在标准大气压下100℃蒸汽热烫过程进行了模拟仿真,分析了蒸烫作用下的柑橘内部温度分布,利用红外热成像技术验证了该模型的精度,探讨了不同果径对柑

橘果肉温度的影响,并对不同果径柑橘的蒸烫时间进行预测。本研究结果表明,在蒸烫过程中,柑橘横切面的温度分布特点为从果皮表面到果肉中心温度逐渐减小,且趋于平缓。蒸烫时间越久,柑橘沿径向受热越均匀。在传热过程中,果皮升温明显,而果肉升温缓慢,这与黄智等^[21]对水果采后热水处理传热分析中的温度分布极其相似。果肉温度受到蒸烫处理影响较大的大多分布在果皮附近,因此,在后续研究中应当着重研究果皮附近果肉温度和品质的变化。

试验结果显示,柑橘横切面沿径向从果皮表面到果肉中心的模拟和实测温度,均方根误差(RMSE)分布在2.379 9~3.186 3;柑橘果肉表面模拟和实测温度,相对误差小于3.76%,均方根误差(RMSE)为1.159 0,吻合度较高,建立的有限元模型能够预测柑橘内部的动态温度分布。在后续研究中可以继续采用该仿真模型,优化相关参数,进而研究更多不同种类及尺寸柑橘的蒸烫过程。

果肉表面温度随蒸烫时间的延长而升高,传热速率呈现先升高后下降的趋势。果肉表面温度和传热速率随果径减小而升高。为保证果肉品质不会受损,果肉表面温度应该不高于72.38℃。因此,在蒸烫作用下,果径会影响柑橘内部温度分布和传热速率,在对宽皮柑橘进行蒸烫去皮前,根据果径大小对柑橘进行分级处理是非常必要的。后续可以根据该传热模型,通过改变蒸烫温度、蒸烫时间等工艺参数,优化现有的蒸烫去皮工艺,为宽皮柑橘蒸烫去皮技术的发展提供理论依据和技术支持。

参考文献 References

- [1] SHAN Y. Canned *Citrus* processing [M]. [S. l.]: Academic Press, 2016.
- [2] 莫小荣,陈传武,胡承孝. 柑橘果实浮皮的研究与展望[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(2): 136-143. MO X X, CHEN C W, HU C X. Research and prospect of citrus fruit puffing[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(2): 136-143 (in Chinese with English abstract).
- [3] 邓秀新,彭抒昂. 柑橘学[M]. 北京:中国农业出版社, 2013. DENG X X, PENG S A. Citrology [M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2013 (in Chinese).
- [4] 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 reticulata* Blanco with peel clamped moving[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 25-31 (in Chinese with English abstract).
- [5] 卢敏. 宽皮柑橘剥皮方法的试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013. LU M. Experimental study of *Citrus reticulata* peel method [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王振亚. 基于对辊式剥皮机的柑橘果皮剥离及果肉损伤机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016. WANG Z Y. Study on separation and damage mechanism of citrus peeling based on the dual rollers peeling machine [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [7] 施晓春. 宽皮柑橘果皮分离特性的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016. SHI X C. Study on the separation characteristics of citrus peel with wide peel [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [8] 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. ZHANG N. Theoretical and experimental study on heat treatments of postharvest fruits and vegetables [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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. ZHANG Z Q. Research of influencing factors of thermal conductivity and internal temperature field numerical analyzation for fruit and vegetables [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [10] 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. DING Y X. Heat transfer analysis and experimental study of post-harvest fruit and vegetable heat treatment [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [11] CĂRLESCU P M, ARSENOAIA V, ROȘCA R, et al. CFD simulation of heat and mass transfer during apricots drying [J]. LWT - food science and technology, 2017, 85: 479-486.
- [12] 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.
- [13] ZHU Z W, LI Y, SUN D W, et al. Developments of mathematical models for simulating vacuum cooling processes for food products: a review [J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2019, 59(5): 715-727.
- [14] 杜斌, 王丽娜, 夏正豪, 等. STA 449 F3型同步热分析仪测量比热的实验校验[J]. 伊犁师范学院学报(自然科学版), 2016, 10(3): 24-27. DU B, WANG L N, XIA Z H, et al. Experimental checkouts for heat capacities measurement by STA 449 F3 simultaneous thermal analyzer [J]. Journal of Yili Normal University (natural science edition), 2016, 10(3): 24-27 (in Chinese with English abstract).
- [15] 刘晴. 猕猴桃热烫去皮技术的机理研究与设备设计[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017. LIU Q. Mechanism research and equipment design of kiwifruit steam peeling technology [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [16] 傅秦生. 热工基础与应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. FU Q S. Fundamentals and applications of thermal engineering [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002 (in Chinese).
- [17] 张敏, 钟志友, 杨乐, 等. 果蔬比热容的影响因素[J]. 食品科学, 2011, 32(11): 9-13. ZHANG M, ZHONG Z Y, YANG L, et al. Affecting factors of heat capacity of fruits and vegetables [J]. Food science, 2011, 32(11): 9-13 (in Chinese with English abstract).
- [18] 张敏, 张杰, 孙治强, 等. 生鲜食品导热系数影响因素的试验与分析[J]. 河南农业大学学报, 2007, 41(6): 680-683. ZHANG M, ZHANG J, SUN Z Q, et al. Experimental study on factors influencing fresh food thermal conductivity [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2007, 41(6): 680-683 (in Chinese with English abstract).
- [19] 丁玉先, 张娜, 陈爱强. 采后果蔬热处理条件的传热特性分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(7): 188-193. DING Y X, ZHANG N, CHEN A Q. Analysis of heat transfer characteristics of postharvest heat treatment conditions of fruits and vegetables [J]. Food and fermentation industries, 2020, 46(7): 188-193 (in Chinese with English abstract).
- [20] SHAO X, CHEN H, PAN H B, et al. Effect of steam blanching on peelability and quality of *Citrus reticulata* Blanco [J]. Journal of food science and technology, 2021, 58(10): 3790-3797.
- [21] 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 Z, YAN R J, LI R, et al. Finite element analysis on fruit temperature fields based on postharvest disinfestations with hot air and water treatments [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 252-259 (in Chinese with English abstract).

Temperature field distribution and heat transfer process of steam blanched *Citrus reticulata* Blanco

WAN Chen¹, CHEN Hong^{1,2}, TIAN Haoyu¹, CUI Qianjin¹, LI Guanghui¹, FU Shengjie¹, ZHOU Jianfei¹

1. College of Engineering/Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in Middle-Lower Yangtze River,

Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. National R&D Center for Citrus Preservation, Wuhan 430070, China

Abstract Steam blanching is needed to reduce the difficulty of peeling *Citrus reticulata* Blanco before peeling. Because the parameters of steam blanching depend mainly on experience, insufficient or excessive steaming often leads to poor peeling and damages quality of pulp. The heat transfer model of *Citrus reticulata* Blanco was established based on the finite element method. The variation law of the internal temperature field of citrus under steaming was studied. The steaming time of citrus with different fruit diameters was predicted. The results showed that the convection heat transfer between steam and the surface of citrus peel caused the temperature to increase sharply during steam blanching. The heat was transferred radially to the pulp center. With the extension of steaming time, citrus was heated more evenly along the radial direction, the surface temperature of pulp increased rapidly and then stabilized, and its heat transfer rate increased first and then decreased. The smaller the fruit diameter, the greater the heat transfer rate on the pulp surface, and the higher the pulp surface temperature at the same steaming time. In order to ensure that the quality of citrus pulp will not be damaged, the blanching time of citrus with small fruit diameter should be less than 77 s, and the blanching time of citrus with large fruit diameter should be less than 172 s. It will provide reference for optimizing steam blanched peeling process of *Citrus reticulata* Blanco.

Keywords *Citrus reticulata* Blanco; steam blanching; temperature field distribution; heat transfer rate; scalding and peeling

(责任编辑:陆文昌)