

空气与静水环境下速冻荔枝解冻过程的数值模拟

黄文权¹, 吴紫云¹, 阚启鑫¹, 肖首鹏², 李吉星³, 刘春燕³, 陈运娇^{1*}, 曹庸^{1*}

(1. 华南农业大学食品学院, 广东省功能食品活性物重点实验室, 广东广州 510642)

(2. 河源汇联气体有限公司, 广东河源 517000) (3. 广东氮生记食品有限公司, 广东湛江 524000)

摘要: 为了探究空气与静水环境下速冻荔枝解冻过程的内部温度变化与解冻完成时间, 该研究采用数值模拟结合试验验证方法对其进行分析。结果表明: 荔枝在解冻过程中的热物性参数主要受到其水分含量尤其是冰-水相变过程的影响。数值模型能够较为准确的预测荔枝解冻期间的温度变化规律, 空气解冻组与静水解冻组的均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 分别为 2.02 °C 和 1.79 °C, 二者解冻时间的实测值与模拟值偏差分别为 2.32% 和 1.50%; 相比空气解冻, 静水环境下荔枝的果皮、果肉和果核的解冻时间分别缩短了 93.33%、74.94% 和 69.25%; 荔枝横纵径尺寸越大、解冻介质的温度与换热系数越高, 荔枝的解冻完成时间越短, 但是内部温度的均匀性也会越差, 另外荔枝的解冻速率不仅取决于解冻介质与果实的换热效率, 还会受到荔枝果实内部导热性能的影响。简言之, 在确定荔枝的化学组成与热物性参数后, 速冻荔枝的解冻过程能够实现良好的数值模拟, 另外荔枝的横纵径尺寸、解冻环境的温度与换热系数会影响荔枝的解冻特性。

关键词: 空气解冻; 静水解冻; 速冻荔枝; 数值模拟

文章编号: 1673-9078(2025)08-179-187

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.8.0670

Numerical Simulation of Air Thawing and Still-water Thawing of Quick-frozen Litchi

HUANG Wenquan¹, WU Ziyun¹, KAN Qixin¹, XIAO Shoupeng², LI Jixing³, LIU Chunyan³, CHEN Yunjiao^{1*}, CAO Yong^{1*}

(1.College of Food Science, Guangdong Provincial Key Laboratory of Nutraceuticals and Functional Foods, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China) (2.Heyuan Huilian Gas Co. Ltd., Heyuan 517000, China)

(3.Guangdong Nitrogen Shengji Food Co. Ltd., Zhanjiang 524000, China)

Abstract: The thawing of quick-frozen litchis in air and still-water environments was analyzed via numerical simulation and experimental verification by monitoring the internal temperature changes and thawing time. The thermal properties of litchis during thawing, especially the ice-water phase transition, were mainly influenced by the moisture content. The temperature changes of litchi during the thawing period could be accurately predicted using the numerical model. The root mean square error (RMSE) for the air-thawed group and the still-water-thawed group was 2.02 and 1.79 °C, respectively.

引文格式:

黄文权,吴紫云,阚启鑫,等.空气与静水环境下速冻荔枝解冻过程的数值模拟[J].现代食品科技,2025,41(8):179-187.

HUANG Wenquan, WU Ziyun, KAN Qixin, et al. Numerical simulation of air thawing and still-water thawing of quick-frozen litchi [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 179-187.

收稿日期: 2024-05-16

基金项目: 广东省乡村振兴战略专项科技兴农项目 (2023LZ04); 农业和社会发展科技专题项目 (SL2022B03J01173); 广东省功能食品活性物重点实验室 (2018B030322010)

作者简介: 黄文权 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与贮藏, E-mail: 631746613@qq.com

通讯作者: 陈运娇 (1984-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 岭南特色果蔬高值化加工与利用, E-mail: yunjiaochen@scau.edu.cn; 曹庸 (1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工物化变化, E-mail: caoyong2181@scau.edu.cn

The measured and simulated thawing times for the two groups had deviations of 2.32% and 1.50%, respectively. Compared with air thawing, the thawing time of litchi peel, pulp, and core in the still-water environment was shortened by 93.33%, 74.94%, and 69.25%, respectively. The larger the horizontal and vertical diameters of litchi, the higher the temperature and heat transfer coefficient of the thawing medium, and the shorter the thawing completion time, whereas the internal temperature was less uniform. The thawing rate of litchi depends not only on the heat exchange efficiency between the thawing medium and the fruit, but also on the internal thermal conductivity of the litchi fruit. In summary, after determining the chemical composition and thermal properties of litchi, the thawing of frozen litchi was effectively analyzed through numerical simulation. Thawing is also affected by the horizontal and vertical diameters of litchi and the temperature and heat transfer coefficient of the thawing medium.

Key words: air thawing; still-water thawing; quick-freezing litchi; numerical simulation

荔枝作为我国岭南地区的特色水果,具有较高的食用价值和经济价值^[1]。但是荔枝成熟于高温季节,且采后生理状态活跃^[2],容易腐败变质,因此新鲜荔枝的货架期通常较短,荔枝的长期保鲜困难成为限制其产业经济效益的重要因素。随着科学技术的进步,液氮速冻等新兴速冻技术成为长期保藏荔枝的有效方法。有研究发现,相比于传统的空气缓冻,液氮和浸渍速冻技术能够更好地保护荔枝的微观结构,并且降低其营养物质和果肉汁液的损失^[3]。而解冻工艺是冷冻食品二次加工或消费之前的必要步骤,同样会对冷冻食品的品质产生重要影响^[4]。准确预测解冻时间有助于减少汁液损失或组织脱水,防止不需要的酶和非酶过程,从而改善解冻食品的质量,同时达到降低生产成本和缩短工艺时间的要求^[5]。数值模拟技术主要依托计算机知识对多物理场现象或过程进行模拟,相比于理论计算法和经验公式法,数值模拟方法可以更加直观地解释食品加工过程复杂的物理机制,该方法也适用于研究更加复杂的几何性状、材料属性和边界条件,从而更好地实现食品加工系统的优化^[6-8]。李慢等^[9]采用有限元分析软件 COMSOL 模拟马铃薯在超声解冻过程的温度变化规律,结果表明模拟值和试验值较为接近,超声辅助解冻组的 RMSE 为 0.393 °C,静水解冻组的 RMSE 为 1.162 °C。Jiang 等^[10]使用计算机模拟的方法对不同形态冷冻带鱼的射频解冻性能进行了评价,结果表明,使用计算机建立的模型能较准确地预测带鱼体内温度分布(最小 RMSE 为 0.44 °C)。Cevik 等^[11]利用有限差分法和有限体积法成功建立了肉糜样品欧姆解冻的数值模型,其中有限差分模型的预测数据与实验数据的百分比误差小于 10%,可以应用于简单几何形状中

心的温度预测,而有限体积模型可以用于模拟详细的温度分布。

尽管当前有许多新兴的解冻技术如射频解冻、超声辅助解冻、欧姆解冻、高压解冻等方法正在被广泛的研究,但空气与静水解冻因为使用方便、成本较低的原因依旧是最常使用的解冻方法。该研究首先明确了荔枝各部分的化学组成及其热物性参数变化,构建了速冻荔枝在空气与静水环境下解冻的数值模型,接着对该模型进行验证,最后应用该模型了解工艺参数(荔枝规格尺寸、解冻介质温度与换热系数)对其解冻性能的影响,从而为速冻荔枝的科学解冻提供理论依据与指导。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

液氮速冻荔枝(妃子笑),购买自广州鲜汇冷冻技术有限公司。

硫酸铜、硫酸钾、硫酸(均为分析纯),广州化学试剂厂;氢氧化钠、溴甲酚绿、甲基红(均为分析纯),天津市大茂化学试剂厂;硼酸(分析纯),西陇化工股份有限公司;无水乙醇、石油醚(均为分析纯),天津市津东天正精细化学试剂厂。

1.1.2 主要仪器设备

PT100 低温专用温度传感器,杭州贵中科技有限公司;LU-U1200 智能无纸记录仪,厦门安东电子有限公司;ZGX-160B-LED 植物生长光照箱,宁波科晟实验仪器有限公司;HH-2 数显恒温水浴锅,常州澳华仪器有限公司。

1.2 数值模拟

1.2.1 几何模型建立

随机选取 10 个荔枝测定其果实及果核的纵径、横径、果皮厚度等规格尺寸, 取其平均值, 绘制其二维轴对称模型。为了简化计算, 对荔枝的几何模型和组成做了如下假设: (1) 荔枝由果皮、果肉和果核三部分组成, 每个部分都视作是均匀的; (2) 荔枝关于垂直方向轴对称; (3) 荔枝整果及果核近似椭球状。荔枝的二维轴对称几何模型如图 1 所示。

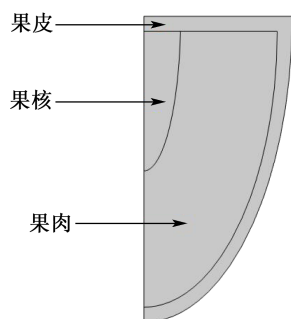


图 1 荔枝二维轴对称几何模型

Fig.1 Two dimensional axisymmetric geometric model of litchi

1.2.2 热物性参数确定

确定荔枝各部分的主要化学成分是合理计算其热物理参数的基础。荔枝果皮、果肉及果核的水分含量参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法进行测定; 蛋白质含量参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法进行测定; 脂肪含量参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法进行测定; 灰分含量参照 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中的灼烧法进行测定。对以上实验重复三次取其平均值, 碳水化合物含量可通过减去其余化学成分含量计算可得。

各组分的热物理性质参考《食品工程原理》^[12]。由于食品在解冻过程中涉及到冰-水相变, 且冰和水的热物理性质存在较大的差异, 因此在解冻期间食品的热物性参数通常会发生变化。为了更加准确地描述荔枝在解冻过程中的热物性参数, 在该研究中, 采用与温度相关的函数分别描述荔枝各部分的含冰率、比热容、热导率及密度变化。

荔枝各部分中冰的质量分数 (X_{ice})、已解冻的水的质量分数 (X_{water}) 可分别由式 (1)、(2)

表示^[13]。

$$X_{ice} = X'_{water} \times \left(1 - \frac{T_f}{T}\right) \quad (1)$$

$$X_{water} = X'_{water} - X_{ice} \quad (2)$$

式中:

X_{ice} ——荔枝各部分中冰的质量分数, %;

X_{water} ——荔枝各部分中已解冻水的质量分数, %;

T_f ——初始冻结温度, °C, 根据文献总结与实验测得的解冻曲线结果, 荔枝各部分的 T_f 视为 -1.5 °C;

T ——荔枝各部分的温度, °C;

X'_{water} ——荔枝各部分总的水分质量分数, %。

在解冻过程中, 冰融化成水的期间会吸收大量潜热。 L 冰融化成水释放的潜热, 333.6 kJ/kg^[14]。在本次试验模拟中采用表观比热容法对潜热的吸收进行处理, 即把相变潜热看作是在相变区域有一个很大的显热容。荔枝果皮、果肉及果核的比热容计算式由式 (3) 表示:

$$C_p(T) = \sum X_i C_{pi} - L X_{water} \frac{T_f}{T^2} \quad (3)$$

式中:

$C_p(T)$ ——荔枝果皮、果肉及果核的比热容, J/(kg·K);

X_i ——各组分对应的质量分数, %;

C_{pi} ——各组分对应的比热容, J/(kg·K);

L ——冰融化成水释放的潜热, 333.6 kJ/kg。

荔枝果皮、果肉及果核的热导率计算式由式 (4) 表示^[15]:

$$k(T) = \sum X_i k_i \quad (4)$$

式中:

$k(T)$ ——荔枝果皮、果肉及果核的热导率, W/(m·K);

k_i ——各组分对应的热导率, W/(m·K)。

荔枝果皮、果肉及果核的密度计算式由式 (6) 表示:

$$\rho(T) = \frac{1}{\sum \frac{X_i}{\rho_i}} \quad (5)$$

式中:

$\rho(T)$ ——荔枝果皮、果肉及果核的密度, kg/m³;

ρ_i ——各组分对应的密度, kg/m³。

1.2.3 控制方程、边界条件及初始条件

本试验是研究速冻荔枝在空气和静水环境下的解冻过程, 速冻荔枝四周与空气和静水直接接触, 荔枝表面通过与介质自然对流传热, 荔枝内部通过导热进行传热。为了简化模型作出以下假设: 荔枝

的初始温度均匀一致，且解冻环境温度一定；荔枝各部分相变温度一定；荔枝的内部只靠导热进行热传递，且荔枝表面对流换热系数保持不变；荔枝内部非凝固区不考虑传质与流动。基于上述假设，食品解冻过程的热传导方程由式（6）表示：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + q$$

(6)

式中：

T ——荔枝各部分的温度，℃；

t ——解冻时间，min；

ρ ——荔枝的密度，kg/m³；

C_p ——荔枝的比热容，J/(kg·K)；

k ——荔枝的热导率，W/(m·K)；

q ——内热源，W/m³，此处为 0。

荔枝与解冻环境中的空气和静水发生自然对流换热，视为第三类边界条件^[16]，对流传热系数的准确预测通常较为困难^[17]，参考相关文献并结合试验数据，确定空气解冻时取 20 W/(m²·K)，静水解冻时取 200 W/(m²·K)^[18]；具体由式（7）表示：

$$q = h(T - T_f)$$

(7)

式中：

h ——对流传热系数，W/(m²·K)；

T ——荔枝的表面温度，℃；

T_f ——解冻环境的温度，25℃。

假设荔枝的果皮、果肉及果核各部分均匀，温度一致，其初始条件方程如下：

$$T(x, y, z, 0) = T_0$$

(8)

式中：

T_0 ——荔枝解冻的初始温度，-18℃。

1.2.4 实验及模型验证

将速冻荔枝从 -18℃ 冰箱中取出，分别置于生长光照箱和水浴锅（温度均设置为 25℃）中进行解冻，解冻过程中将温度探头插入荔枝中心（果肉及果核交界处），记录温度变化，当荔枝中心温度达到 4℃ 时视为解冻完成。

为了验证有限元模拟模型的准确性，采用均方根误差式（9）对模拟及实测结果间的差异进行统计检验^[19,20]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_s - T_p)^2}$$

(9)

式中：

T_s ——数值模拟的温度，℃；

T_p ——是三次重复实验的平均温度，℃。

1.2.5 模型预测

验证后的模型用于预测荔枝的果实横径（25.0、30.0、35.0、40.0、45.0 mm）和果实纵径（25.0、30.0、35.0、40.0、45.0 mm）、以及解冻介质温度（4、12、25、37、50℃）和表面换热系数（20、50、200、500、1 000 W/(m²·K)）对荔枝解冻效果的影响，为进一步优化解冻工艺提供理论依据。

1.3 数据分析

采用 COMSOL Multiphysics 进行数值模拟和计算，使用 Excel 2016 进行实验结果的统计，使用 Origin 2022 进行绘图。

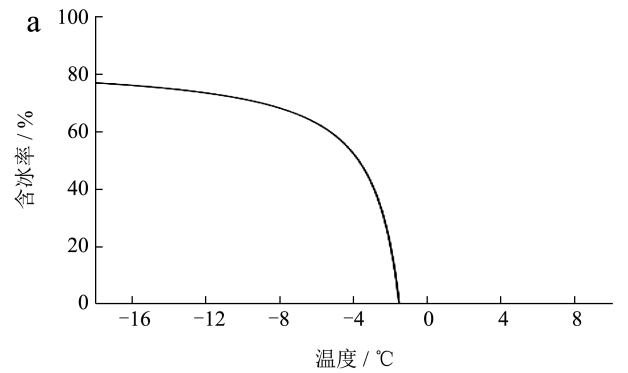
2 结果与讨论

2.1 荔枝主要化学组成与热物性参数变化

表 1 展示了荔枝果皮、果肉及果核的主要化学组成。如表 1 所示，无论是果皮、果肉还是果核，含量最高的是水分（分别为 78.22%、84.09% 及 63.24%），其次是碳水化合物（分别为 18.97%、14.11% 及 33.70%）、蛋白质以及灰分。其中，水在结冰后的热导率远高于其他化学组分，而冰融化成水的过程中会吸收大量的潜热，已解冻水的比热容也较其他化学组分更高。因此，水分含量会显著影响速冻荔枝各部分在解冻过程中的热物理性质与温度变化特性。

表 1 荔枝果皮、果肉及果核的主要化学组成（%）
Table 1 The main chemical composition of litchi peel, pulp, and core

部位	水分	蛋白质	碳水化合物	灰分
荔枝果皮	78.22	1.81	18.97	0.71
荔枝果肉	84.09	0.93	14.11	0.67
荔枝果核	63.24	2.38	33.70	0.56



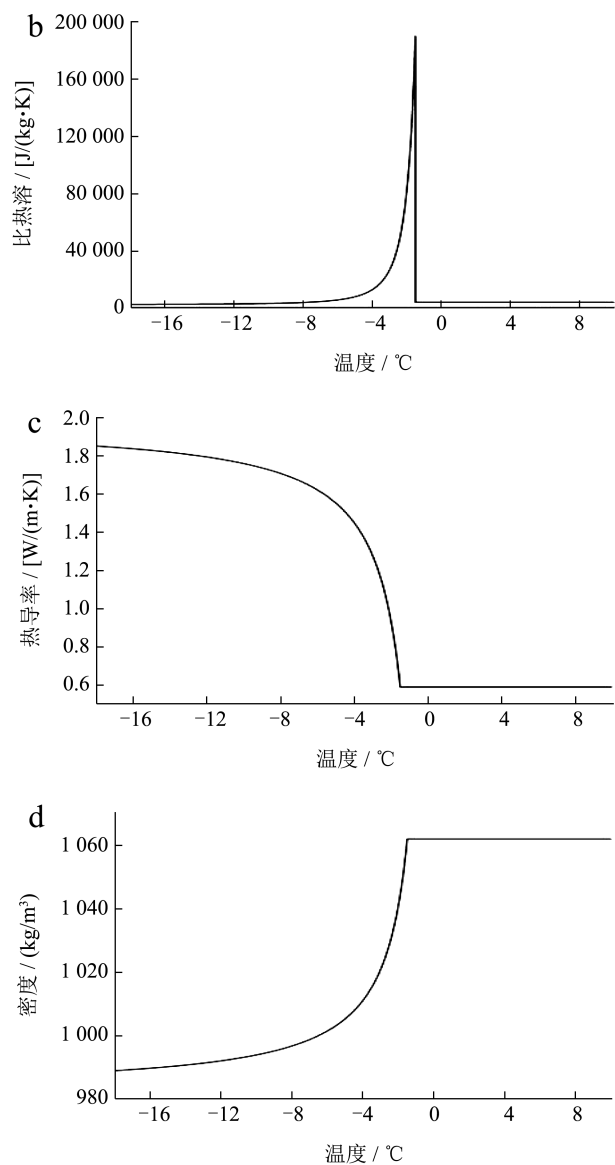


图 2 荔枝果肉的热物性参数变化

Fig.2 Changes in thermal properties parameters of litchi pulp

以荔枝果肉为例，图 2 分别展示了其含冰率、比热容、热导率及密度随温度变化的趋势。随着温度的上升，荔枝果肉的含冰率逐渐降低，并在到达冰点时（-1.5℃）为 0，表明此时荔枝内部中的冰已经全部融化成水，在这个过程中已解冻水的质量分数也在不断上升。荔枝果肉的比热容呈现先上升后急剧下降的趋势，这主要是因为速冻荔枝在冰-水相变的过程中需要吸收大量的潜热，而这个潜热远大于荔枝果肉本身的比热容，从而导致荔枝果肉在冰点以前的比热容较高，当相变结束后，荔枝果肉不再吸收潜热，因此比热容下降。在低于冰点温度以前，荔枝果肉的热导率呈下降趋势，密度呈上升趋势，当温度高于冰点以后均趋于稳定，其主要原因是冰比水有着更高的热导率和更低的密度，随

着温度的上升果肉中冰含量逐渐减少，解冻水含量逐渐增加，当果肉中的冰完全融化成水时，其热物理性质便不再受到温度的影响。综上所述，荔枝解冻期间各部分的热物性参数会受到其水分含量的影响，尤其体现在冰-水相变的过程。荔枝果皮与果核的热物性参数变化规律与果肉类似。

2.2 模型验证分析

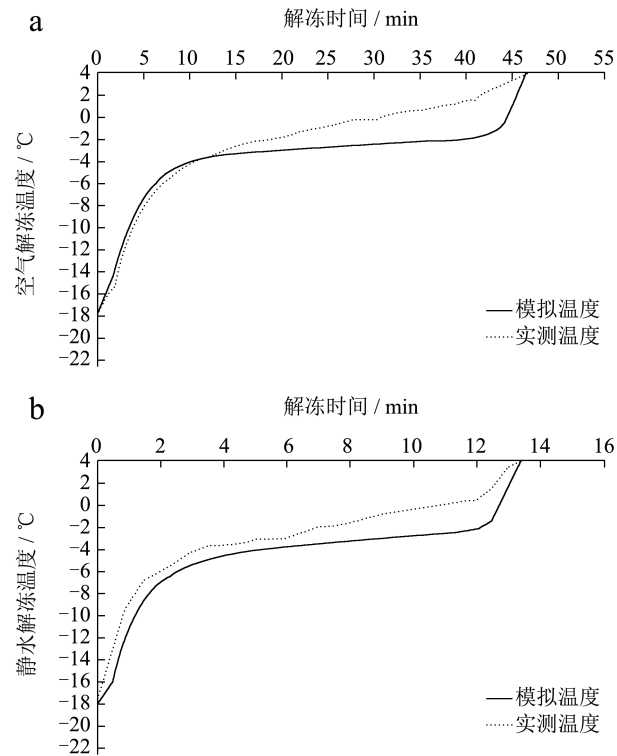


图 3 速冻荔枝在空气与静水解冻过程中的实测温度与模拟温度

Fig.3 Simulated value and experimental results of temperature of quick-freezing litchi cheated with airing thawing and still water thawing

为了验证有限元模拟模型的准确性，将实验测得的温度曲线与模型预测的温度曲线进行对比分析，图 3 为荔枝在空气与静水解冻过程中的实测温度与模拟温度。如图 3 所示，在解冻初期，空气解冻与静水解冻的模拟温度曲线与实测温度曲线较为吻合，模拟计算较为准确；而当解冻温度接近最大冰晶生成区时（-5~1℃），模拟温度与实验温度的偏差开始变大，其中空气解冻组的差异更为明显，这可能是因为模拟计算的显热容法以及假定的相变区间与实际解冻过程存在一定的差异而导致的^[21]。空气解冻组解冻完成时间的实测值为 47.4 min，模拟值为 46.3 min，两者偏差为 2.32%；静水解冻组解冻完成时间的实测值为 13.5 min，模拟值为

13.3 min，两者偏差为 1.50%。通过均方根误差公式计算，发现空气解冻组与静水解冻组的 RMSE 分别为 2.02 ℃和 1.79 ℃。综上所述，该有限元模拟模型能够较为准确地预测荔枝解冻期间的温度变化，其中静水解冻组的模拟结果更精确。

2.3 速冻荔枝在解冻过程中的温度分布云图

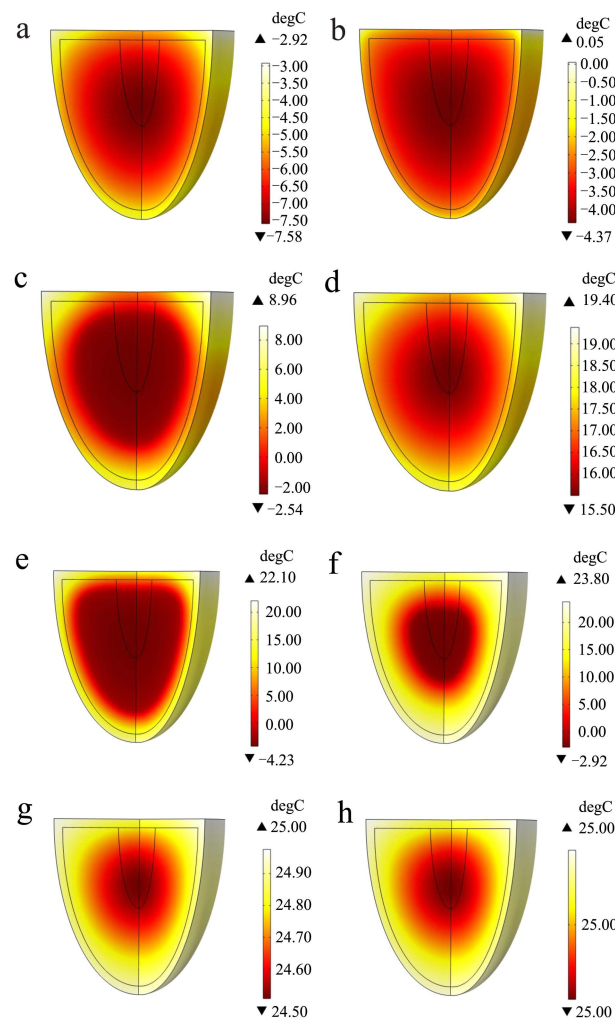


图 4 速冻荔枝在解冻过程中的温度分布云图
Fig.4 Temperature cloud diagram of quick-freezing litchi during thawing

注：a~d 分别为空气解冻第 5、10、30、60 分钟，e~h 分别为静水解冻第 5、10、30、60 分钟。

空气解冻和静水解冻时荔枝的内部温度分布如图 4 所示，分别取解冻第 5、10、30、60 分钟时荔枝最大截面处的温度分布来观察。由图可知，随着解冻时间的延长，空气解冻组与静水解冻组的荔枝的整体温度均在升高，低温区在逐渐减少，而且果皮温度>果肉温度>果核温度。这是因为荔枝在解

冻过程中，果皮首先与解冻介质进行对流热交换，果皮迅速升温，进而导致果皮与果肉之间、果肉与果核之间存在温度梯度，荔枝从内到外与外界环境进行热量交换，因此表现出荔枝内部比外部温度更低的现象。由于解冻介质温度保持在 25 ℃，因此荔枝完成解冻后每个部分的温度均不会超过 25 ℃，不存在解冻过热的现象。对比不同解冻处理组可以发现，解冻第 5 分钟时，空气解冻组内部的最高温度为 -2.92 ℃，最大温差为 4.66 ℃，而静水解冻组的最高温度为 22.1 ℃，最大温差为 26.72 ℃；解冻第 10 分钟时，静水解冻组的低温区域面积明显小于空气解冻组，其内部的最高温度与最大温差依旧大于空气解冻组；解冻第 30 分钟时，静水解冻组的最低温度为 24.5 ℃，此时荔枝已经完成解冻，而空气解冻组的最低温度为 -2.45 ℃，解冻过程仍在继续；解冻第 60 分钟时，静水解冻组的荔枝内部温度已经完全达到平衡（25 ℃），而空气解冻组的荔枝内部仍存在温度差异。由此可知，静水解冻具有比空气解冻更快的解冻速率，但是其解冻过程中荔枝内部的温度均匀性不及空气解冻组，造成上述两种现象的原因是液体的换热系数远大于气体和荔枝内部的导热速率^[22]。

2.4 速冻荔枝在解冻过程中温度变化曲线

分别选取果皮、果肉与果核位置绘制解冻温度变化曲线。图 5 为速冻荔枝在不同解冻方式下的中心温度变化曲线。如图所示，两种解冻方式下的果皮、果肉与果核的温度变化趋势大致相同，解冻速率均表现出“快-慢-快”的变化规律。解冻初期，荔枝的中心温度上升较快，这是因为此时荔枝与解冻介质的温差较大，加速了热量交换，同时在该温度段下荔枝内部的大部分水分是冰，而冰具有较低的比热容和较高的热导率，在吸收相同的热量后会更快地升温；解冻中期，荔枝中心的升温速率开始变慢，其主要原因是随着解冻过程的不断进行，荔枝内部越来越多的冰晶开始融化成水，此时吸收的热量主要是作为相变的潜热，因此温度上升并不明显；解冻后期，荔枝内部已完成“冰-水”相变，升温速率重新变快。无论是空气解冻还是静水解冻，果皮升温速率>果肉升温速率>果核升温速率，这与荔枝解冻期间的温度分布云图结果一致。相比空气解冻，静水环境下荔枝的果皮、果肉和果核的解冻时间分别缩短了 93.33%、74.94% 和 69.25%。

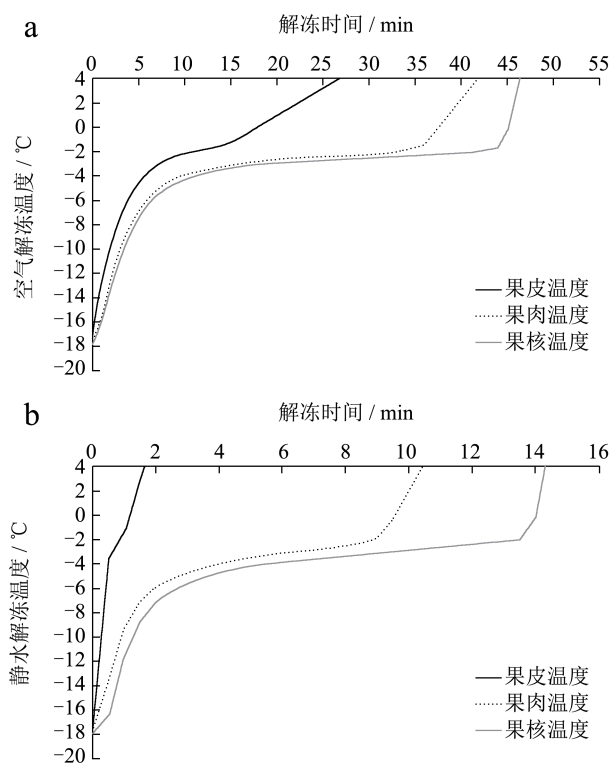


图5 速冻荔枝在解冻过程中温度变化曲线

Fig.5 Temperature variation curve of quick-freezing litchi during thawing

2.5 模型预测结果分析

2.5.1 荔枝果实尺寸对其解冻特性的影响

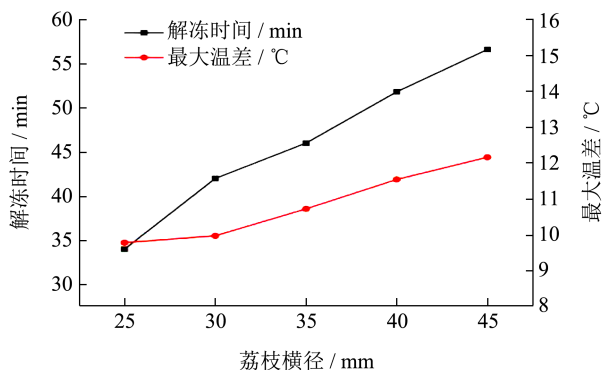


图6 不同横径尺寸荔枝的预测解冻时间与内部最大温差

Fig.6 Predicting thawing time and maximum internal temperature difference of different cross-sectional dimensions of litchi

食品的形状和体积大小会对解冻效果有直接的影响。为了进一步比较不同横纵径尺寸的荔枝在相同解冻环境下的解冻规律,在保持解冻温度(25 °C)不变的前提下,分别改变荔枝横径与纵径参数进行数值模拟。如图6和图7所示,随着果实尺寸的不断增大,荔枝所需的解冻时间也越长,解

冻完成后其内部的最大温差也越大。横径45 mm荔枝的解冻时长比横径25 mm荔枝多22.6 min,最大温差大2.38 °C;纵径45 mm荔枝的解冻时长比纵径25 mm荔枝多11.3 min,最大温差大1.9 °C。相比于纵径尺寸,横径尺寸的增加会导致更长的解冻时间和更大的最大温差,这可能是因为荔枝呈椭球状缘故,因此水平方向热阻的增加会造成更大的温度差异。所以,在实际加工过程中,必须根据不同横纵径尺寸的荔枝调整相应的解冻时间,而且横纵径尺寸较小的荔枝更有利于达到均匀解冻的要求。

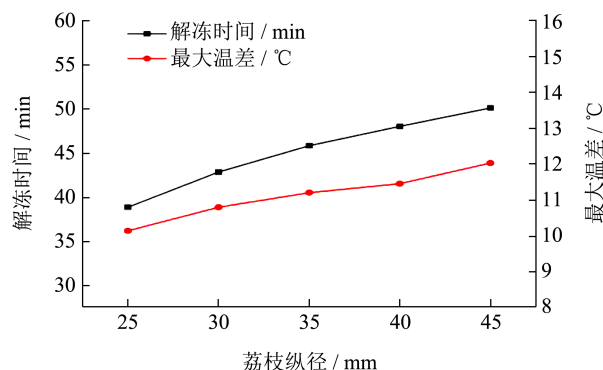


图7 不同纵径尺寸荔枝的预测解冻时间与内部最大温差

Fig.7 Predicting thawing time and maximum internal temperature difference of different longitudinal diameter sizes of litchi

2.5.2 解冻介质温度对其解冻特性的影响

通过改变解冻介质的温度,可以达到优化食品解冻速率的目的,从而改善食品解冻效果。为了进一步研究不同解冻介质温度下荔枝的解冻特性,在保持荔枝横纵径尺寸不变的前提下,改变解冻介质温度对其解冻过程进行数值模拟。观察图8发现,随着解冻温度的上升,荔枝所需的解冻时间越来越短,相比4 °C解冻,12 °C解冻所需的时间减少了79.74%,然而当继续使用更高的解冻温度时,解冻时间并未大幅度减少,这是因为荔枝的解冻速率不仅取决于解冻介质与果实的换热效率,还会受到荔枝果实内部导热性能的影响。另外,解冻荔枝内部的最大温差与解冻温度呈负相关关系,解冻温度的增加可能会导致荔枝在解冻期间出现局部过热现象。有研究表明,果蔬类原料在解冻过程中的内外温度不均匀可能会导致解冻损失率增大,然而过长时间的解冻同样会造成不规则冰晶对细胞的物理损伤^[23,24]。因此在实际加工过程中,必须根据解冻能耗、温度均匀性、解冻品质等要求采用合适的解冻温度。

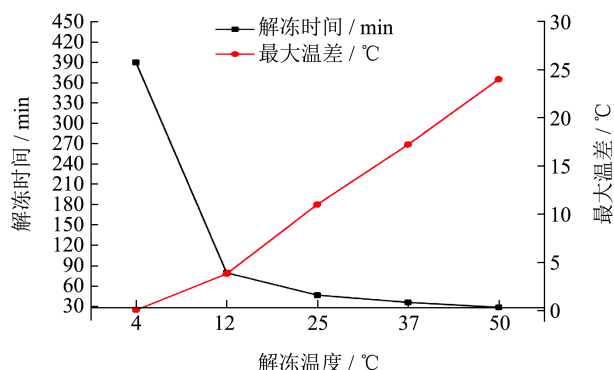


图8 不同解冻温度下荔枝的预测解冻时间与内部最大温差

Fig.8 Predicting thawing time and maximum internal temperature difference of litchi cheated with different thawing temperature

2.5.3 表面换热系数对其解冻特性的影响

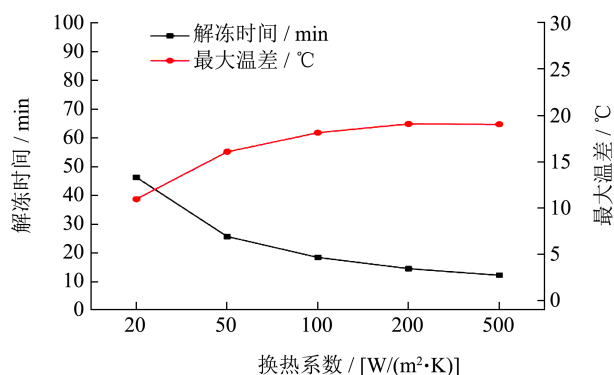


图9 不同表面换热系数下荔枝的预测解冻时间与内部最大温差

Fig.9 Predicting thawing time and maximum internal temperature difference of litchi cheated with different surface heat transfer coefficient

表面换热系数可以表示换热的强度,在数值上等于流体与换热表面间温度相差1 K时,在单位时间内单位面积所传递的热量^[18]。对流表面传热系数与冷却介质的种类、流动状态、食品表面状况等许多因素有关^[25]。为了进一步研究不同表面换热系数下荔枝的解冻特性,在保持解冻温度与荔枝不变的前提下,改变表面换热系数对其解冻过程进行数值模拟。图9为不同表面换热系数下荔枝的预测解冻时间与内部最大温差,当换热系数不断增加时,解冻荔枝内部的最大温差总体呈上升趋势,所需的解冻时间呈下降趋势,而且二者变化的态势均逐渐趋于平缓,前者可能是因为是在解冻介质温度不变的情况下,解冻荔枝内部的最大温差存在某个最大临界值,而出现后者的原因与解冻介质温度的不断增加类似。在实际加工过程中,可以尝试提高表面换

热系数以缩短解冻时间,但同样要考虑可能引起的温度不均匀现象。

3 结论

该研究对空气与静水环境下速冻荔枝的解冻过程进行了实验与数值模拟研究。实验结果表明,水分是荔枝各部分中含量最高的化学组分,水分含量是影响荔枝热物性参数与解冻温度特性的主要因素,尤其体现在冰-水相变的过程。使用 Comsol 仿真软件建立的数值模型能够较为准确地预测空气与静水环境下解冻荔枝的温度变化规律,在解冻过程中,低温区域始终在荔枝的几何中心处,其中果核温度<果肉温度<果皮温度。相比于空气解冻,静水解冻能够显著缩短速冻荔枝的解冻时间,但同时也会增加其解冻温度的不均匀性。模型预测结果分析显示,荔枝的果实尺寸、解冻介质的温度与换热系数会对解冻过程产生显著影响,荔枝横纵径尺寸越大、解冻介质的温度与换热系数越高,荔枝的解冻完成时间越短,但是内部温度的均匀性也会越差。值得注意的是,相比于纵径尺寸,横径尺寸的增加会导致荔枝更长的解冻时间和更大的内部温差,另外荔枝的解冻速率不仅取决于解冻介质与果实的换热效率,还会受到荔枝果实内部导热性能的影响,因此随着解冻介质温度与换热系数的进一步提高,荔枝解冻完成时间的降幅也会不断减小。综上所述,使用有限元软件建立的数值模型能够较为准确地对速冻荔枝的解冻特性进行预测和分析,而荔枝的横纵径尺寸、解冻环境的温度与换热系数会对荔枝的解冻特性产生明显的影响。

参考文献

- [1] 喻文涛,曲姗姗,李萌萌,等.采前脱落酸处理对荔枝贮藏的保鲜作用[J].现代食品科技,2022,38(10):170-177.
- [2] 巫梅婷,陈于陇,戚英伟,等.室温下不同电商包装对荔枝保鲜效果的比较[J].现代食品科技,2022,38(7):177-183.
- [3] 吴炜俊,程丽娜,徐玉娟,等.液氮喷雾速冻及梯度解冻在荔枝品质保鲜上的优势[J].现代食品科技,2022,38(3):105-114.
- [4] ZHANG Y, LI F, YAO Y, et al. Effects of freeze-thaw cycles of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) subjected to radio frequency tempering on melanosis and quality [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102860.
- [5] GORAL D, KLUZA F, SPIESS W E L, et al. Review of thawing time prediction models depending on

- process conditions and product characteristics [J]. Food Technology and Biotechnology, 2016, 54(1): 3-12.
- [6] 成芳,杨小梅,由昭红,等.食品冷冻过程的数值模拟技术[J].农业机械学报,2014,45(7):162-170.
- [7] CEUOLI C, FABBRI A, TYLEWICZ U, et al. Finite element model to study the thawing of packed frozen vegetables as influenced by working environment temperature [J]. Biosystems Engineering, 2018, 170: 1-11.
- [8] WANG L J, SUN D W. Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry-a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2003, 14(10): 408-423.
- [9] 李慢,刘东红,吕瑞玲,等.马铃薯超声解冻过程的数值模拟研究[J].中国食品学报,2019,19(8):130-137.
- [10] JIANG H, YANG H, ZHANG W, et al. Computational study on radio frequency thawing of irregularly shaped aquatic product: Using hairtail fish as an example [J]. Journal of Food Engineering, 2023, 354: 111564.
- [11] CEVIK M, ICIER F. Numerical simulation of temperature histories of frozen minced meat having different fat contents during ohmic thawing [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 165: 106958.
- [12] 李云飞.食品工程原理[M].北京:中国农业大学出版社, 2002.
- [13] 冯亦步.冻结食品热物性的计算及应用[J].天津商学院学报,1997,3:2-8.
- [14] DIMA J B, SANTOS M V, BARON P J, et al. Experimental study and numerical modeling of the freezing process of marine products [J]. Food and Bioprocess Processing, 2014, 92(1): 54-66.
- [15] SANTOS M V, LESPINARD A R. Numerical simulation of mushrooms during freezing using the FEM and an enthalpy: Kirchhoff formulation [J]. Heat and Mass Transfer, 2011, 47(12): 1671-1683.
- [16] 李杰,谢晶.鼓风冻结虾仁时间的数值模拟及实验验证[J].农业工程学报,2009,25(4):248-252.
- [17] KIANI H, ZHANG Z, SUN D. Experimental analysis and modeling of ultrasound assisted freezing of potato spheres [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 26: 321-331.
- [18] 张兴中.传热学[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [19] YANG H, ZHANG Y, GAO W, et al. Steam replacement strategy using microwave resonance: A future system for continuous-flow heating applications [J]. Applied Energy, 2021, 283: 116300.
- [20] SONG C, CHEN Y, PU H, et al. Modeling microwave heating of frozen chinese fast foods based on dielectric properties [J]. International Journal of Food Engineering, 2018, 14(9-10): 1-13.
- [21] 李贺强,邹同华,宋睿琪,等.真空条件下猪肉解冻过程的模拟与试验[J].农业工程学报,2020,36(20):311-319.
- [22] 王晋,高学慧,陈云云,等.解冻方式对船载超低温鲑鱼肌肉保水性及品质的影响[J].食品与机械,2022,38(9):159-164,197.
- [23] 刘艳,唐小闲,高丹,等.解冻方式对微波干燥甜菜理化性质的影响[J].食品与机械,2023,39(11):166-172.
- [24] 李翰卿,马俪珍,陈胜军,等.不同解冻方式对鸛乌贼胴体肌肉品质的影响[J].食品与生物技术学报,2023,42(5):20-28.
- [25] 刘宝林.食品冷冻冷藏学[M].北京:中国农业出版社,2010.