

箱装西兰花流态冰预冷包装充冰工艺的数值模拟与验证

Numerical simulation and validation of ice filling process for ice slurry precooling box packaging of broccoli

李 淦¹ 王 清² 卢立新^{1,3} 潘 嘹^{1,3}

LI Gan¹ WANG Qing² LU Lixin^{1,3} PAN Liao^{1,3}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所, 北京 100097; 3. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Institute of Agricultural Products Processing and Food Nutrition, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要: [目的] 解决流态冰充冰过程中冰晶分布的均匀度问题。[方法] 以西兰花为研究对象, 建立纸箱包装西兰花物理模型, 采用 CFD 模拟分析充冰过程中充冰速度和充冰角度对冰晶分布均匀度的影响, 以此确定合适的充冰工艺参数。[结果] 充冰速度和充冰角度对冰晶均匀度具有显著影响; 过低、过高的充冰速度均不利于获得充冰均匀度; 角度倾斜充冰会导致箱内上层西兰花无法充分覆盖流态冰。[结论] 保持水平角度和 3 m/s 的充冰速度可获得最均匀的冰晶分布, 满足西兰花预冷和一定时间段的低温贮运要求。

关键词: 西兰花; 流态冰; 预冷; 包装; CFD; 充冰速度; 充冰角度

Abstract: [Objective] In order to solve the problem of uniformity of ice crystal distribution in the process of ice slurry filling. [Methods] Taking broccoli as the research object, the physical model of packing broccoli in carton was established, and the effects of ice filling speed and ice filling Angle on ice crystal distribution uniformity during the ice filling process were analyzed by CFD simulation, so as to determine appropriate ice filling process parameters. [Results] The ice-filling speed and filling angle significantly impact the uniformity of ice crystal

distribution. Both excessively low and high ice-filling speeds were detrimental to achieving uniform ice distribution. Tilting the filling angle results in inadequate coverage of fluidized ice on the upper layers of broccoli within the container. [Conclusion] Maintaining a horizontal angle and an ice-filling speed of 3 m/s yields the most uniform distribution of ice crystals, meeting the pre-cooling requirements for broccoli and enabling a certain duration of low-temperature storage.

Keywords: broccoli; ice slurry; precooling; packaging; CFD; ice filling rate; ice filling Angle

西兰花, 十字花科芸薹属一年生或二年生草本植物, 营养成分齐全, 具有防癌抗癌功效。其主要食用部分为幼嫩花球, 此部位离开母体后仍维持着活跃的生命活动^[1], 易出现黄化、失水、腐败、发臭等品质下降问题。低温贮运可有效降低西兰花的呼吸代谢活动, 延长品质保持时间^[2]。

目前, 果蔬常用的预冷方法有冷库预冷、压差预冷、冰水预冷等, 而西兰花常采用碎冰进行预冷和贮运, 但碎冰质量大, 充填过程人工操作效率低, 费时费力^[3]。流态冰是一种由冰晶颗粒和载液构成的二元溶液, 具有较高的潜热和换热能力, 相比传统冰, 流态冰具有更快的冷却速率和更低的预冷温度^[4]。同时流态冰的冰晶颗粒直径为 0.2~0.8 mm, 颗粒微小, 质地软, 其与果蔬接触面面积大, 不会损坏果蔬表面, 更能保持果蔬中的水分, 在果蔬保鲜领域应用前景广阔^[5-6]。刘瑶等^[7-8]从可溶性蛋白含量、可溶性固形物含量等多项理化特征指标的变化趋

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(编号: CARS-23)

作者简介: 李淦, 男, 江南大学在读硕士研究生。

通信作者: 王清(1979—), 女, 北京市农林科学院副研究员, 博士。

E-mail: wangqing@nrcv.org

收稿日期: 2023-11-24 **改回日期:** 2024-04-27

势,证明了流态冰能极大延长甜玉米和西兰花的贮藏时间。李翠红等^[9]研究发现,流态冰预冷处理的西兰花叶绿素含量、萝卜硫素含量等营养物质指标均高于未处理组。时文林等^[10]对比了冷库预冷、压差预冷和流态冰预冷对甜玉米品质的影响,其中流态冰预冷在贮藏期间的保鲜效果最佳。李淦等^[11]从包装角度采用 CFD 技术模拟流态冰贮藏西兰花过程中温度场和冰晶颗粒的变化,发现冰晶颗粒分布、流态冰体积分数对果蔬预冷均匀性影响显著。董迪等^[12]从包装材料的角度,探究了钙塑箱、覆膜纸箱、涂膜纸箱对流态冰预冷西兰花品质的影响,通过预冷试验和抗压试验,对比了箱内温度变化和强度损失,得出钙塑箱更能满足流态冰低温运输的要求。孟维岩等^[13]探究了甜玉米包装中果蔬排列对流态冰预冷效果的影响,发现甜玉米竖直放置更有利于甜玉米预冷。上述研究从内部流态冰自身和外部包装方面分别探讨了流态冰预冷的有效性及影响因素,而有关流态冰包装过程的研究尚未见报道。流态冰一般采用泵直接注冰,其在箱内流动的效果很大程度上取决于初始速度及其方向。

试验拟以箱装西兰花为研究对象,考虑西兰花自身的呼吸和蒸腾作用,建立其 CFD 模拟分析物理模型,分析充冰速度和充冰角度对箱内冰晶分布均匀性的影响,确定合适的充冰工艺参数。通过静态贮藏仿真和实验验证充冰工艺的有效性,旨在为果蔬流态冰预冷及贮运保鲜应用提供依据。

1 箱装西兰花物理模型的建立

依据托盘规格,选择典型的西兰花包装纸箱规格(600 mm×400 mm×400 mm)、西兰花(直径 180 mm)为研究对象,建立三维模型(图 1)。在箱体两侧设有充冰孔(100 mm×50 mm)和排水孔(60 mm×20 mm),以适配充冰设备和充冰需求。西兰花采用 3×2 排列方式,形成两层叠放。

鉴于流态冰包含水相和冰晶颗粒相,采用欧拉—欧拉双流体模型。该模型通过水相和冰晶颗粒之间的相互作用力实现耦合,再分别求解各自的 N-S 方程^[14]。模型包含流态冰流体域和西兰花固体域。在静态贮运过程中,预冷和保温过程均视为非稳态传热过程^[15]。

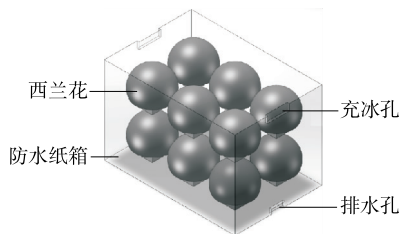


图 1 箱装西兰花包装三维模型

Figure 1 Three-dimensional packaging model of boxed broccoli

2 数学模型及计算方法

2.1 基本假设

考虑模拟分析有效性及运算时间限制,在构建数学模型过程中引入以下假设:流态冰为不可压缩流体;忽略分析过程中环境温湿度对流态冰、西兰花、箱体的热物理性质影响;流态冰流动主要涉及固体导热与对流换热,忽略辐射传热。根据物理模型,将整体计算域划分为两个子区域:流态冰流体域和果蔬固体域。

2.2 流态冰流体域控制方程

流态冰流动遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒定律,各模型分别建有连续方程、动量方程和能量方程。

2.2.1 VOF 模型 VOF 模型是一种固定的欧拉网格下的表面追踪方法,在计算过程中,不同的流体组分共用一套动量方程,同时 VOF 模型可以与 Solidification & Melting 模块结合,模拟各相相变过程^[16]。

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

式中:

ρ ——各相流体的密度, kg/m³;

$\mathbf{v}$ ——速度矢量, m/s。

(2) 动量方程:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] +$$

$$\rho \mathbf{g} + \mathbf{F}, \quad (2)$$

式中:

P ——微元体上的压强, Pa;

μ ——流体的动力黏度, Pa·s;

T ——温度, K;

$\mathbf{g}$ ——重力加速度, m/s²;

$\mathbf{F}$ ——微元体力, N。

2.2.2 Solidification & Melting 模块控制方程

(1) 连续性方程:

$$\nabla \cdot (\rho_i \mathbf{v}_i) = 0, \quad (3)$$

式中:

ρ_i ——冰相密度, kg/m³;

$\mathbf{v}_i$ ——冰相速度矢量, m/s。

(2) 动量方程:

$$\frac{\partial (\rho_i \mathbf{v}_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i) = -\nabla \rho_i + \nabla (\mu_i \mathbf{v}_i) + S, \quad (4)$$

式中:

μ_i ——冰相动力黏度, Pa·s;

S ——源项。

(3) 能量方程

$$\rho_i \frac{\partial H}{\partial t} = \lambda_i \nabla^2 T_i, \quad (5)$$

式中：

H ——任意时刻的比焓，J/kg；

λ_i ——冰相导热系数，W/(m·K)；

T_i ——冰相任意时刻的温度，K。

2.2.3 欧拉双流体模型 欧拉双流体模型在欧拉坐标系下采用与连续流体类似的质量、动量、能量守恒方程，分别对连续相和离散相进行描述。将离散相看作拟流体，认为连续相与拟流体相互渗透，在计算网格内共存，每一项都有各自的连续性方程和动量方程通过压力和相间作用模型耦合。将流态冰分为液体相和颗粒相，液相作为主相，颗粒相进行拟流体化作为次相^[17]。

(1) 连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \tag{6}$$

(2) 动量方程：

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \rho \mathbf{f} + \nabla \cdot \mathbf{P}. \tag{7}$$

2.3 西兰花固体域方程

西兰花的预冷降温是一个复杂的非稳态降温过程，既有西兰花、包装与流态冰之间以对流主导的显热交换，也有流态冰相变潜热以及西兰花自身的呼吸热和蒸腾热^[18]。西兰花的呼吸热主要以固体导热的方式进行传热，将呼吸热作为内热源添加到能量方程的广义源项 Q_f 中，控制方程为

$$\rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \lambda_f \nabla^2 T_f + Q_f, \tag{8}$$

式中：

ρ_f ——西兰花密度，kg/m³；

c_f ——西兰花比热容，J/(kg·K)；

T_f ——西兰花温度，℃；

λ_f ——西兰花导热系数，W/(m·K)；

Q_f ——西兰花内热源，W/m³。

西兰花的内热源主要考虑呼吸热 Q_r 和蒸腾热 Q_e ^[19]。西兰花采摘后，果实仍进行呼吸作用产生热量，增加预冷负荷；而蒸腾作用是将西兰花内部的水分蒸发到空气中，同时带走大量的热量，降低自身以及周围环境的温度以促进降温，因此西兰花的内热源项可表示为

$$Q_f = \frac{Q_r - Q_e}{V_f}, \tag{9}$$

式中：

Q_r ——西兰花呼吸热，W；

Q_e ——西兰花蒸腾热，W；

V_f ——西兰花体积，m³。

2.4 初始条件及仿真设置

利用 ANSYS Fluent 进行求解，计算过程采用双精度求解器。采用欧拉—欧拉双流体模型，模拟充冰过程，分为水相和冰晶颗粒相，冰晶颗粒直径统一设置为 0.5 mm。采用 VOF 两相流模型和 Solidification & Melting 模块，模拟西兰花预冷和低温贮藏过程中，流态冰的相变和传热情况。动量、能量、湍动能的离散格式为二阶迎风格式，湍流模型选择 SST $k-\omega$ 模型，压力速度耦合采用 SIMPLEC 算法，利用 UDF 接口将热源项加载到果蔬区域的控制方程中。包装箱采用淋膜防水纸箱，通过试验测得西兰花(25℃)、流态冰(0℃)和包装箱(25℃)的热物性参数见表 1。

2.5 网格划分

采用 ANSYS Workbench meshing 模块进行网格划分。由于西兰花表面的不规则性以及热量与质量的传递，对于收敛性要求较高。除了设定适当的全局网格尺寸外，在西兰花表面和进出口处进行局部网格加密。在保持网格质量的前提下，密集的网格通常意味着更准确的计算结果^[20]。然而，增加网格数量会显著增加计算负担，降低计算速度。对于试验工况的流场，除了靠近西兰花表面的区域涉及质量和热量传递外，其余地方的网格可以相对稀疏，精确性要求不高。

在模型建立中，为了综合考虑计算效率，采用全局网格尺寸为 20 mm，并在西兰花表面以及包装箱进出口处进行局部网格加密，尺寸分别为 10, 7, 5, 3, 2 mm，网格数量见表 2。通过监控西兰花的温度变化，并检查网格质量对仿真结果的影响，相对于最精细的网格，前 4 种网格得出的最大误差分别为 4.862%，3.475%，0.650%，0.389%。考虑计算效率和结果准确性，选择局部加密尺寸为 5 mm。因此，认为 5 mm 的网格尺寸可以充分反映箱体内部的流动和传热情况。

3 模拟分析与讨论

结合产品包装及前期流态冰预冷试验相关结果，选

表 1 材料的热物性参数

Table 1 Thermophysical property parameters of materials

热物性 参数	密度 / (kg·m ⁻³)	比热容 / (J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	导热系数 / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	动力黏度 / (kg·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	潜热 / (J·kg ⁻¹)	呼吸热 / (kJ·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)
流态冰	910.0	2 110.0	0.032 34	0.000 513	446 000.0	—
西兰花	758.0	3 313.0	0.073 00	—	—	218.672
包装箱	220.0	1 800.0	0.038 00	—	—	—

表 2 不同网格尺寸参数表

Table 2 Different mesh size parameters table

工况	局部加密尺寸/mm	网格数量
粗糙	10	201 668
略粗	7	404 621
中等	5	808 164
精细	3	1 609 714
极细	2	3 206 386

择一组典型充冰工艺参数为例进行分析,即设置进口流量为 5 kg/s,充冰时间为 20 s,充冰质量为 20 kg。

3.1 充冰速度对箱内冰晶均匀度的影响

在保持充冰时间 20 s、充冰质量 20 kg、充填角度 0° (水平)条件下,不同充冰速度下的箱内冰晶颗粒分布云图如图 2 所示,截取包装箱纵横两个方向的截图进行分析。图 3 为冰晶颗粒在箱内的速度矢量图。由图 2 可知,随着充冰速度的提高,冰晶的分布范围扩大,但过快的充冰速度会导致部分上层西兰花未被充分覆盖。由于水相和冰晶颗粒在动力黏度上的差异性,冰晶随着水流运动到箱内任意位置后,部分冰晶会被西兰花表面捕获,加快充冰速度其更容易抵达上层空间,因此上层西兰花冰晶

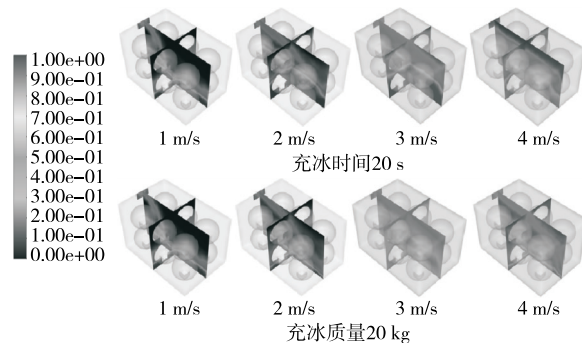


图 2 不同充冰速度下的箱内冰晶颗粒分布云图

Figure 2 Ice crystal particle distribution contour maps at different ice-filling speeds inside the box

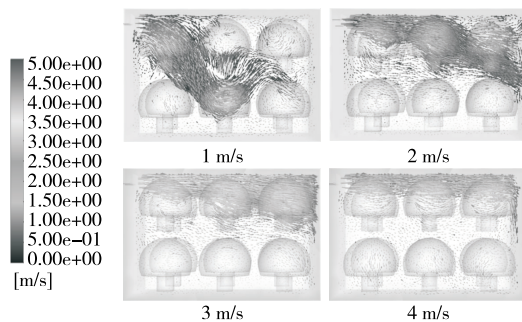


图 3 不同充冰速度下箱内冰晶速度矢量图

Figure 3 Velocity vector maps of ice crystals at different ice-filling speeds inside the box

覆盖越多。由图 3 可知,低速下,冰晶由于动能不足无法到达箱内右侧以及上层,随着充冰速度的提高,冰晶颗粒的运动轨迹逐渐覆盖箱体,当充冰速度为 4 m/s 时,水流速度过快,冰晶的动能过大,不易被西兰花表面捕获,反而随着水流囤积在下层。

为了准确描述冰晶在箱内分布的均匀性,通过包装箱内不同位置冰晶颗粒的占比波动大小来进行定量比较,在每个西兰花的顶部区域进行定点采样,可表达为:

$$\theta = \frac{1}{p} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2}, \quad (10)$$

式中:

θ ——均匀度;

N ——包装箱内的西兰花数量;

$\bar{p}$ ——包装箱内冰晶的平均占比;

p_i ——第 i 个西兰花顶部区域的冰晶占比。

θ 越小,表明包装箱内西兰花顶部区域的冰晶分布离散程度越小,分布更加均匀,预冷均匀性越好。图 4 为不同充冰速度下,相同充冰时间和充冰质量,箱内冰晶的均匀度。随着充冰速度的增大,均匀度偏差先降低后增加,当充冰速度为 3 m/s 时,均匀度相对较低的充冰速度下降了 75% 左右。因此,选择适当的充冰速度可显著提高箱内流态冰分布的均匀性。

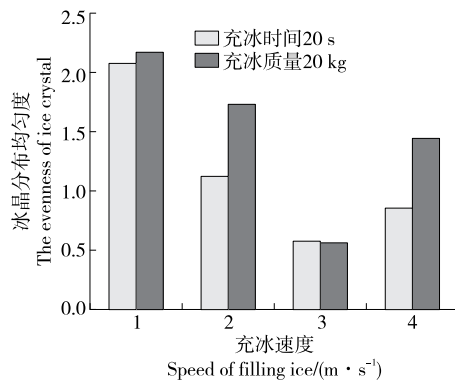


图 4 不同充冰速度下箱内冰晶的均匀度

Figure 4 Uniformity of ice crystal within the box under different speed conditions

3.2 充冰角度对箱内冰晶均匀度的影响

在保持充冰时间 20 s、充冰质量 20 kg、充冰速度 3 m/s 条件下开展分析。由图 5 可知,当充冰角度有偏斜时,流态冰会向箱体底部聚集,无法到达箱体右上部分。图 6 为不同充冰角度下,包装箱内部冰晶的分布情况,选取纵横两个方向截面进行分析。偏斜的充冰角度导致箱体右上区域无冰晶,且偏斜角度越大,右上区域的冰晶存留量越少。由图 7 可知,充冰角度越大,均匀度偏差越高,冰晶分布越不均匀。

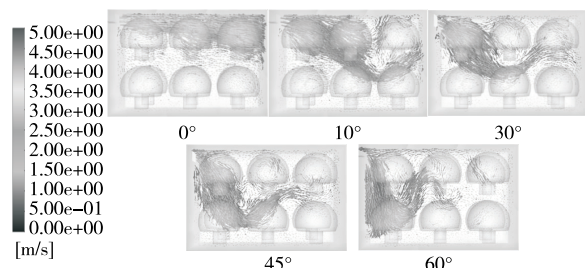


图 5 不同充冰角度下箱内冰晶速度矢量图

Figure 5 Velocity vector maps of ice crystals inside the box at different ice-filling angles

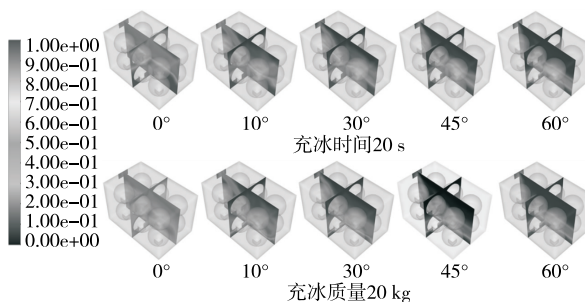


图 6 不同充冰角度下箱内冰晶颗粒分布云图

Figure 6 Contour maps of ice crystal particle distribution inside the box at different ice-filling angles

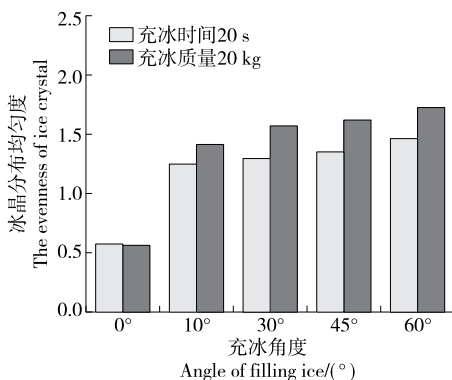


图 7 不同充冰角度下的冰晶均匀度

Figure 7 The uniformity of ice crystal distribution at different ice-filling angles

综上, 充冰角度控制了冰晶在箱内的流动方向, 若果蔬多层排列, 充冰角度应尽量水平, 否则容易导致上层果蔬无法被冰晶覆盖, 造成箱内冰晶分布不均, 进而导致预冷不均匀。

3.3 箱装西兰花预冷及贮藏温度分析

流态冰作为一种载冷物质, 最主要的作用是快速预冷以及保持西兰花低温贮藏运输。根据充冰工艺的数值模拟, 可确定充冰速度为 3 m/s、充冰角度为 0° 时箱内流态冰分布最均匀。因此选择此工况作为前置条件, 对单箱西兰花进行充冰, 充冰时间设置为 20 s。随后使用

VOF 两相流模型和 Solidification & Melting 模块, 模拟流态冰预冷过程和低温贮藏过程中的相变和传热情况。

由图 8 和图 9 可知, 箱内西兰花上下层均有效降温。上下层西兰花在 30 min 内均降至 5 °C 以下, 由于充冰过程中上层西兰花经过流态冰的淋浴, 表面热量被带走得更快, 所以上层西兰花降温更快。通过贮藏模拟, 上下层西兰花在 48 h 内均维持 10 °C 以下, 在贮藏后期, 上层空间冰晶融化导致上层西兰花温度上升速度较快。

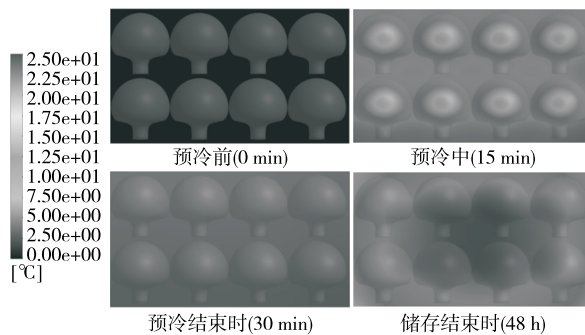


图 8 箱装西兰花预冷和贮藏的温度云图

Figure 8 Temperature contour maps for pre-cooling and storage of boxed broccoli

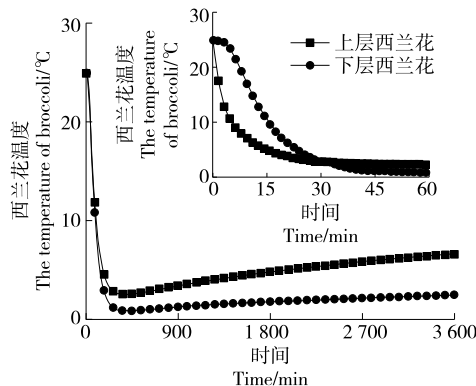


图 9 箱装西兰花预冷和贮藏的温度变化

Figure 9 Temperature variations during pre-cooling and storage of boxed broccoli

4 实验验证

试验于北京市农林科学研究院国家蔬菜研究中心进行。制备流态冰的原材料为质量浓度为 0.25% 的盐溶液, 经流态冰制冰设备, 生产出冰晶体积分数为 30% 的流态冰。新鲜西兰花产地为河北。进行 3 组重复性试验, 每组均采用淋膜防水纸箱 (600 mm × 400 mm × 400 mm), 装载 10 kg 西兰花。试验前, 所有试验材料放入 25 °C 恒温仓库中预处理 8 h, 并在包装箱内上下两层西兰花的内部, 各放置一个温度记录仪, 记录西兰花温度变化; 然后进行充冰, 保持水平充冰 20 s, 随后记录每箱质量, 观察箱内冰晶分布状态, 封箱后于 25 °C 贮藏 1 h,

监测西兰花的温度变化。

充冰完成后,观察到箱内冰晶分布较均匀,上层西兰花基本被冰晶覆盖,通过监控西兰花温度变化(图 10)可知,总体上,试验值与仿真值变化趋势一致,预冷初期试验值与仿真计算值存在一定误差,但均 $\leq 15\%$ 。这是由于仿真建模过程中,西兰花为实体模型,实际上西兰花为多孔结构,冰水可渗透进西兰花,更快地带走热量,预冷速度更快。

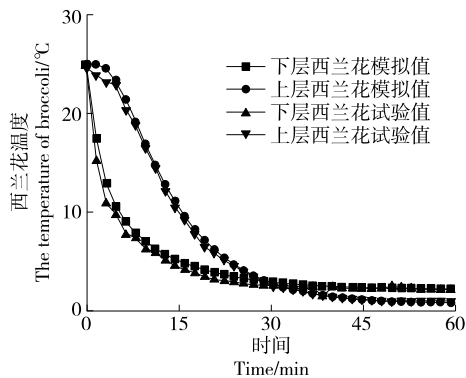


图 10 试验与仿真预冷温度变化对比图

Figure 10 Comparison of precooling temperature change between test and simulation

5 结论

研究采用 CFD 仿真模拟技术与实验验证相结合的方式,模拟了流态冰充冰工艺过程,探究了不同充冰速度和充冰角度对箱内冰晶分布均匀性的影响。结果表明,在相同的充冰时间和充冰质量条件下,箱内流态冰的冰晶均匀性随充冰速度的增加呈先上升后降低的趋势。在充冰过程中,当以水平角度保持 3 m/s 的充冰速度进行充冰时,冰晶分布最均匀,且满足预冷和低温贮运的要求。研究仅考虑了充冰工艺参数对冰晶分布的影响,实际流态冰本身的冰晶体积分数和箱内西兰花排列方式也会影响分布状态,后续可进一步探究产品参数对充冰均匀性的影响。

参考文献

- [1] 闫琰,陈庆敏,张智,等.不同物流方式对西兰花品质的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(12):183-187.
YAN Y, CHEN Q M, ZHANG Z, et al. Effects of different logistics methods on the quality of broccoli [J]. Food & Fermentation Industries, 2022, 48(12): 183-187.
- [2] 何伟.果蔬气调保鲜技术及其在冷链物流中的应用研究进展[J].食品与机械,2020,36(9):228-232.
HE W. Research on application of modified atmosphere in fresh-keeping technology of fruits and vegetables in cold chain logistics [J]. Food & Machinery, 2020, 36(9): 228-232.

- [3] 贾连文,吕平,王达.果蔬预冷技术现状及发展趋势[J].中国果菜,2018,38(3):1-5.
JIA L W, LU P, WANG D. Present station and development trend of fruit and vegetable precooling technology [J]. China Fruit & Vegetable, 2018, 38(3): 1-5.
- [4] 高蕊笑,张庆钢,王艺,等.冰浆的研究现状与发展趋势[J].制冷技术,2019,39(5):65-71.
GAO R X, ZHANG Q G, WANG Y, et al. Research status and development trend of ice slurry[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2019, 39(5): 65-71.
- [5] LU F, ZHU R R, TANG W, et al. Progress of ice slurry in food industry: application, production, heat and mass transfer [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(2): 842-855.
- [6] KAUFFELD M, WANG M J, GOLDSTEIN V, et al. Ice slurry applications[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(8): 1491-1505.
- [7] 刘瑶,左进华,高丽朴,等.流态冰预冷处理对甜玉米贮藏品质的影响[J].制冷学报,2020,41(3):83-90.
LIU Y, ZUO J H, GAO L P, et al. Effect of slurry ice precooling treatment on quality of sweet corn[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(3): 83-90.
- [8] 刘瑶,左进华,高丽朴,等.流态冰预冷处理对西兰花品质及生理的影响[J].现代食品科技,2019,35(4):77-86.
LIU Y, ZUO J H, GAO L P, et al. Effect of slurry ice precooling treatment on quality of broccoli [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(4): 77-86.
- [9] 李翠红,魏丽娟,李长亮,等.流态冰预冷近冰温贮藏对西兰花贮藏品质的影响[J].甘肃农业科技,2022,53(9):52-57.
LI C H, WEI L Y, LI C L, et al. Effect of fluid-ice precooling at near-freezing point on storage quality of broccoli [J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2022, 53(9): 52-57.
- [10] 时文林,赵雅琦,闫志成,等.不同预冷方式对甜玉米储藏品质的影响[J].食品科学,2022,43(15):218-226.
SHI W L, ZHAO Y Q, YAN Z C, et al. Effects of different precooling methods on storage quality of sweet corn [J]. Food Science, 2022, 43(15): 218-226.
- [11] 李淦,王清,卢立新,等.流态冰预冷西兰花温度场数值模拟[J].食品与机械,2023,39(7):125-130.
LI G, WANG Q, LU L X, et al. Numerical simulation study on temperature field of ice slurry pre-cooled broccoli [J]. Food & Machinery, 2023, 39(7): 125-130.
- [12] 董迪,卢立新,王清.西兰花流态冰预冷包装纸箱性能试验[J].农业工程技术,2020,40(23):18-20.
DONG D, LU L X, WANG Q. Performance test of broccoli fluidized ice pre-cooling packaging carton [J]. Agricultural Engineering Technology, 2020, 40(23): 18-20.

(下转第 131 页)

- uric acid and adiposity: deciphering causality using a bidirectional mendelian randomization approach [J]. *PLoS One*, 2012, 7(6): e39321.
- [7] AROOR A R, JIA G H, HABIBI J, et al. Uric acid promotes vascular stiffness, maladaptive inflammatory responses and proteinuria in western diet fed mice[J]. *Metabolism*, 2017, 74: 32-40.
- [8] ZHANG C W, LI L J, ZHANG Y P, et al. Recent advances in fructose intake and risk of hyperuricemia [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2020, 131: 110795.
- [9] CHOI H K, MCCORMICK N, LU N, et al. Population impact attributable to modifiable risk factors for hyperuricemia[J]. *Arthritis & Rheumatology*, 2020, 72(1): 157-165.
- [10] 李娜, 董嘉慧, 高玉敏, 等. 高尿酸血症相关危险因素的孟德尔随机化研究[J]. *现代预防医学*, 2024, 51(2): 200-204, 215.
- LI N, DONG J H, GAO Y M, et al. Mendelian randomization of risk factors associated with hyperuricemia[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2024, 51(2): 200-204, 215.
- [11] MAIUOLO J, OPPEDISANO F, GRATTERI S, et al. Regulation of uric acid metabolism and excretion [J]. *International Journal of Cardiology*, 2016, 213: 8-14.
- [12] MEHMOOD A, ZHAO L, ISHAQ M, et al. Renoprotective effect of stevia residue extract on adenine-induced chronic kidney disease in mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2020, 72: 103983.
- [13] 洪鑫月, 吴健妹, 罗小乔, 等. 多酚化合物对黄嘌呤氧化酶抑制作用的研究进展[J]. *食品与机械*, 2021, 37(2): 1-8.
- HONG X Y, WU J M, LUO X Q, et al. Research progress on the inhibition of xanthine oxidase by polyphenol compounds[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(2): 1-8.
- [14] YIN H, LIU N, CHEN J. The role of the intestine in the development of hyperuricemia[J]. *Frontiers in Immunology*, 2022, 13: 845684.
- [15] 乐心逸, 刘艺, 李默影, 等. 腺嘌呤诱导慢性高尿酸血症大鼠模型实验研究[J]. *实验动物与比较医学*, 2015, 35(2): 125-128.
- LE X Y, LIU Y, LI M Y, et al. Experimental study on chronic hyperuricemia induced by adenine in rat model [J]. *Laboratory Animal and Comparative Medicine*, 2015, 35(2): 125-128.
- [16] ZHOU M, LI X, LIU J, et al. Adenine's impact on mice's gut and kidney varies with the dosage administered and relates to intestinal microorganisms and enzyme activities[J]. *3 Biotech*, 2024, 14(3): 88-102.
- [17] DIWAN V, BROWN L, GOBE G C. Adenine-induced chronic kidney disease in rats [J]. *Nephrology (Carlton)*, 2018, 23(1): 5-11.
- [18] NAKAGAWA T, KANG D H. Fructose in the kidney: From physiology to pathology[J]. *Kidney Research and Clinical Practice*, 2021, 40(4): 527-541.
- [19] DIWAN V, BROWN L, GOBE G C. The flavonoid rutin improves kidney and heart structure and function in an adenine-induced rat model of chronic kidney disease[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 33: 85-93.
- [20] 姜金池, 顾敏雯, 苏印, 等. 益生菌对糖脂代谢紊乱相关疾病的缓解作用及机制[J]. *食品与生物技术学报*, 2024, 43(4): 17-24.
- JIANG J C, GU M W, SU Y, et al. Alleviating effect and mechanism of probiotics on disorders of glucose and lipid metabolism[J]. *Chinese Journal of Food and Biotechnology*, 2024, 43(4): 17-24.
- [21] JENSEN T, ABDELMALEK M F, SULLIVAN S, et al. Fructose and sugar: a major mediator of non-alcoholic fatty liver disease[J]. *Journal of Hepatology*, 2018, 68(5): 1 063-1 075.
- (上接第 93 页)
- [13] 孟维岩, 尹忠俊, 郑秋云, 等. 低含冰率冰浆预冷甜玉米温度场的数值模拟研究[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(6): 159-162.
- MENG W Y, YI Z J, ZHENG Q Y, et al. Numerical simulation of temperature field of precooled sweet corn with low ice content[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(6): 159-162.
- [14] ONOKOKO C L, GALANIS N, PONCET S, et al. Heat transfer of ice slurry flows in a horizontal pipe: a numerical study [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 142: 54-67.
- [15] FERRUA M J, SINGH R P. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, Part I: numerical model[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(2): 335-348.
- [16] 布关印, 陈海文, 徐立, 等. 管内冰浆在振动工况下的流动及传热特性[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(9): 1 280-1 286.
- BU G Y, CHEN H W, XU L, et al. Flow and heat transfer characteristics of ice crystals in polar vessel pipelines under vibration conditions[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2021, 42(9): 1 280-1 286.
- [17] YADAV S K, ZIYAD D, KUMAR A. Numerical investigation of isothermal and non-isothermal ice slurry flow in horizontal elliptical pipes[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 97: 196-210.
- [18] HAN J W, ZHAO C J, QIAN J P, et al. Numerical modeling of forced-air cooling of palletized apple: integral evaluation of cooling efficiency[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 89: 131-141.
- [19] WANG D, LAI Y, ZHAO H, et al. Numerical and experimental investigation on forced-air cooling of commercial packaged strawberries[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2019, 15(7): 339-350.
- [20] 殷峻杰, 刘龙, 李江华, 等. 基于 CFD 模拟的七烯甲萘醌发酵过程优化[J]. *食品与生物技术学报*, 2023, 42(5): 78-87.
- YIN J J, LIU L, LI J H, et al. Optimization of menaquinone-7 fermentation process based on CFD simulation[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2023, 42(5): 78-87.