

# 流态冰预冷西兰花温度场数值模拟

## Numerical simulation study on temperature field of ice slurry pre-cooled broccoli

李 淦<sup>1</sup> 王 清<sup>2</sup> 卢立新<sup>1,3</sup> 潘 嘹<sup>1,3</sup>

LI Gan<sup>1</sup> WANG Qing<sup>2</sup> LU Li-xin<sup>1,3</sup> PAN Liao<sup>1,3</sup>

(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: 解决流态冰预冷包装过程中较复杂的问题, 为流态冰在果蔬贮运、保鲜等方面的应用提供依据。方法: 以西兰花为研究对象, 建立流态冰预冷西兰花的传热模型, 应用 CFD 模拟流态冰在预冷和贮藏西兰花过程中, 温度场和冰晶颗粒状态变化, 分析流态冰冰晶体积分数与流态冰质量占比对西兰花预冷和贮藏温度的影响, 并进行验证实验。结果: 冰晶体积分数越大, 冰晶颗粒分布越均匀, 预冷均匀性越好; 当流态冰质量占比为 100% 时, 流态冰可满足预冷温度要求。结论: 调整流态冰的体积分数和质量占比, 减少包装内部上层空间冗余, 可提升西兰花预冷效果, 延长贮藏时间。

**关键词:** 流态冰; 预冷; 包装; CFD; 冰晶体积分数; 西兰花

**Abstract: Objective:** In order to solve the problem of complicated state in the process of pre-cooling packaging of fluid ice, it provides a basis for the application of fluid ice in the storage and transportation of fruits and vegetables, fresh-keeping and so on. **Methods:** Taking broccoli as the research object, the heat transfer model of pre-cooling broccoli with fluidized ice was established. The change of temperature field and ice crystal particles during the process of precooling and storage of broccoli was simulated by CFD. The effects of fluid ice crystal integral number and mass ratio of fluid ice on broccoli precooling and storage temperature were analyzed, and the verification experiment was carried out. **Results:** The larger the volume

fraction of ice crystal, the more uniform the distribution of ice crystal particles and the better the precooling uniformity; When the mass ratio of fluidic ice was 100%, the fluidic ice could meet the requirement of precooling temperature. **Conclusion:** By adjusting the volume fraction and mass ratio of fluid ice and reducing the redundancy of the upper space inside the packaging, the pre-cooling effect of broccoli can be improved and the storage time can be extended.

**Keywords:** ice slurry; precooling; packaging; CFD; ice crystal volume fraction; broccoli

西兰花营养价值高, 但因叶绿素含量高, 生命活动旺盛, 西兰花采后极易黄化, 贮藏流通时间短暂<sup>[1]</sup>。因此, 采用合适的预冷方式在田间进行预冷降温, 对维持西兰花的品质非常重要<sup>[2]</sup>。常用的果蔬采后预冷方法包括真空预冷、压差预冷、冷库预冷、冷水预冷和冰水预冷, 前三者均受设备、成本和预冷时间等各方限制, 无法进行田间作业<sup>[3]</sup>; 冷水预冷使用方便, 但热交换效率低, 冷却速率慢<sup>[4]</sup>; 冰水热交换效率高, 但流动性差, 不适合批量作业<sup>[5]</sup>。流态冰预冷是一种新型预冷方法, 其热交换效率和流动性高, 可用于快速田间作业<sup>[6-7]</sup>。流态冰又称冰浆, 由盐或醇等二元复合溶液在降温过程中析出的细小球状冰颗粒组成, 具有载冷能力强、流动性好、可泵送、颗粒细小光滑不伤产品表面等优点<sup>[8-10]</sup>。目前, 流态冰主要被用于制冷换热设备以及水产品保鲜领域, 但因其高潜热、流动性好可泵送, 在果蔬保鲜领域具有极大前景。

Kondel 等<sup>[11-12]</sup>利用建模与试验相结合的方法, 验证了流态冰冰晶体积分数与传热系数的反向作用关系。高红岩等<sup>[13-17]</sup>研究发现, 流态冰与冰温相结合可延长新鲜

**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:** 2022-12-15 **改回日期:** 2023-04-22

鳕鱼、澳洲肺鱼、大黄鱼、熟沙丁鱼及琵琶鱼的保质期,并维持良好的品质。孟维岩等<sup>[5]</sup>从预冷速度、预冷均匀性探究了包装中甜玉米排列方式、摆放余量对液态冰预冷效果的影响,发现垂直方向排列更有利于甜玉米预冷;刘瑶等<sup>[18-19]</sup>从感官指数、可溶性固形物含量、可溶性蛋白含量、可溶性淀粉含量等各指标探究了液态冰预冷处理对甜玉米和西兰花贮藏品质的影响,结果表明液态冰预冷处理可有效维持果蔬的贮藏品质。

研究拟基于西兰花包装,考虑产品自身的呼吸和蒸腾作用,建立液态冰预冷包装西兰花的传热模型,模拟分析不同冰晶体积分数、液态冰使用量对包装箱内产品温度和冰晶颗粒变化的影响,并验证仿真结果的有效性,以期对液态冰在果蔬贮运、保鲜等方面的应用提供依据。

## 1 物理模型及计算方法

### 1.1 西兰花液态冰包装的物理模型

以常用的西兰花包装(长 780 mm,高 340 mm)、西兰花(大小均匀、直径 100 mm 的圆形)为研究对象,建立二维物理模型(见图 1)。

果蔬的预冷过程属于非稳态传热过程,包含固体导热、对流换热、辐射等多种热交换过程,且果蔬自身的呼吸作用和蒸腾作用可以产生和带走热量;对于液态冰,热量的持续进入会引起相变融化,形成冰水混合物,整体传热过程复杂多变。模型分为西兰花固体域和液态冰流体域,固体域热量传递主要以西兰花自身导热和内热源为主,忽略对流换热;流体域热量传递主要以对流换热为主,忽略导热;液态冰流动采用欧拉-欧拉双流体模型,针对水和冰晶颗粒两相分别建立  $N-S$  方程,通过两相之间的相互作用力实现耦合<sup>[20]</sup>。西兰花固体域初始温度为 20 °C,液态冰流体域初始温度为 -1 °C,固体与流体区域为界面耦合区域,通过设置界面层的镜面反射系数和弹性恢复系数表现冰晶颗粒与固体表面的碰撞行为<sup>[21]</sup>。

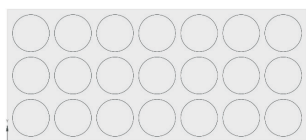


图 1 西兰花液态冰包装物理模型

Figure 1 Physical model of broccoli precooling

### 1.2 理论分析

1.2.1 基本假设 液态冰预冷西兰花过程复杂,根据建立的模型可将计算域分为液态冰流体域和西兰花固体域。液态冰流体域主要涉及对流换热,西兰花固体域主要涉及固体导热。对求解问题作必要假设:

(1) 包装箱内的西兰花大小均一、各项同性,不考虑体积随温度变化。

(2) 西兰花及液态水的密度、导热系数及比热容保持

不变。

(3) 西兰花表面对流换热系数不变,液态冰预冷西兰花为自然对流换热。

1.2.2 液态冰流体域控制方程 液态冰流动性较好,为不可压缩的均质流体,且预冷以及相变涉及到热量传递,因此模拟过程中的控制方程需考虑连续性方程、动量方程和能量方程。

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \text{div}(\rho_a \mathbf{U}) = 0, \quad (1)$$

式中:

$\rho_a$ ——液态水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\mathbf{U}$ ——速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$ 。

(2) 动量方程:

$$\rho_a \frac{\partial u}{\partial t} = \rho_a \text{div}(u\mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu_a \text{grad}u) + F_x, \quad (2)$$

$$\rho_a \frac{\partial v}{\partial t} = \rho_a \text{div}(v\mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu_a \text{grad}v) + F_y, \quad (3)$$

$$\rho_a \frac{\partial w}{\partial t} = \rho_a \text{div}(w\mathbf{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu_a \text{grad}w) + F_z, \quad (4)$$

式中:

$\rho_a$ ——液态水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\mathbf{U}$ ——速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$u, v, w$ —— $x, y, z$  3 个方向上的速度分量;

$p$ ——微单元上压力,  $\text{N}/\text{m}^2$ ;

$\mu_a$ ——冰水动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

$F_x, F_y, F_z$ —— $x, y, z$  3 个方向上的广义源项。

液态水为不可压缩流体,只受重力影响,所以  $F_x = F_y = 0, F_z = -\rho_a g$ 。

(3) 能量方程:

$$\rho_a \frac{\partial T_a}{\partial t} + \rho_a \text{div}(UT_a) = \text{div}\left(\frac{\lambda_a}{c_a} \text{grad}T_a\right), \quad (5)$$

式中:

$\rho_a$ ——液态水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$T_a$ ——冰水温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\lambda_a$ ——冰水导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;

$c_a$ ——冰水比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

1.2.3 西兰花固体域控制方程 西兰花固体域涉及固体导热,以温度梯度的差异性驱动热量传递,对流换热忽略为 0,并且将西兰花的呼吸热和蒸腾热添加到能量方程的广义源项  $Q_{T_p}$  中,其能量控制方程为:

$$\rho_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial p}{r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin\theta \frac{\partial T_p}{\partial \theta} \right) \right] + Q_{T_p}, \quad (6)$$

式中:

$r$ ——西兰花半径,  $\text{m}$ ;

$T_p$ ——西兰花温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

- $\rho_p$ ——西兰花密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;
- $c_p$ ——西兰花比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;
- $\lambda_p$ ——西兰花导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;
- $Q_{T_p}$ ——西兰花内热源项,  $\text{W}/\text{m}^3$ 。

## 2 流态冰预冷西兰花的温度模拟

### 2.1 流态冰与西兰花的参数测试

采用导热系数仪测定流态冰、西兰花导热系数分别为  $0.032\ 34, 0.073\ 00\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; 采用差式扫描量热仪测定流态冰潜热为  $446\ 000.0\ \text{J}/\text{kg}$ 、西兰花比热容为  $3\ 313.0\ \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 采用电子天平测定流态冰、西兰花平均密度分别为  $910.0, 758.0\ \text{kg}/\text{m}^3$ ; 采用数字式黏度计测定流态冰黏度为  $0.000\ 513\ \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

### 2.2 网格划分

采用 ANSYS Spaceclaim 构建西兰花流态冰预冷包装的二维模型, 为保证各计算域连通, 便于计算结果收敛, 西兰花与包装壁, 西兰花与西兰花之间保持  $10\ \text{mm}$  的间隙。图 2 为西兰花预冷包装模型的网格划分图, 采用三角形非结构网格, 在流固耦合界面区设置界面层, 使得界面处计算更加精确, 网格数量  $56\ 046$  个。采用 VOF 两相流模型和 Solidification & Melting 模块相结合, 模拟流态冰预冷过程中的相变和传热情况。采用瞬态求解模式, 求解方法选择基于压力与速度耦合的 SIMPLE 求解器, 控制方法选择二阶迎风离散格式。为保证收敛性, 残差  $< 10^{-4}$  认为计算收敛。

### 2.3 结果与分析

#### 2.3.1 不同冰晶体积分数的流态冰预冷过程模拟

(1) 初始及边界条件设置: 图 3 为 3 种体积分数的流态冰预冷西兰花前后的冰晶颗粒相云图, 预冷时间为  $100\ \text{min}$ , 冰晶颗粒均匀分布于计算域中。流体计算域四周设置  $20\ \text{C}$  作为流通环境温度, 固体域设置  $20\ \text{C}$ , 代表西兰花采摘后的果品温度。冰晶与壁面碰撞恢复系数为

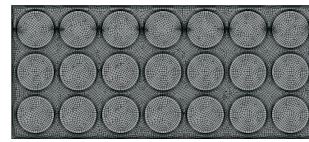


图 2 西兰花预冷包装模型的网格划分图  
Figure 2 Model meshing of broccoli precooling packaging model

$0.9$ , 镜面系数为  $0.015$ 。

(2) 预冷  $100\ \text{min}$  后冰晶颗粒轨迹分析: 由图 3 可知, 体积分数为  $10\%$  的流态冰冰晶颗粒显著减少, 不足以保持低温状态; 随着贮藏时间的延长, 体积分数为  $20\%$  的流态冰冰层与水层出现分层, 冰晶在上层富集, 下层几乎无冰晶存在, 当外界热量不断进入时, 将导致包装内部上下层温度不均匀; 体积分数为  $30\%$  的流态冰在预冷过程中, 冰晶较多, 均匀分布在包装内部, 未出现上浮现象。

(3) 预冷  $100\ \text{min}$  后包装内部温度分析: 图 4 为 3 种体积分数的流态冰预冷前后的包装内部温度云图, 体积分数为  $10\%$  的流态冰不能使西兰花完全降温, 温度最低降至  $5.5\ \text{C}$ ; 体积分数为  $20\%$  的流态冰由于冰层富集, 温度分布不均匀, 出现上层温度低, 下层温度高的情形, 随着贮藏时间的延长, 上下温差可达到  $10\ \text{C}$  以上; 体积分数为  $30\%$  的流态冰从颗粒分布看, 冰晶颗粒均匀分布在包装内部, 包裹在西兰花四周, 不会出现上浮现象, 保持西兰花的长时间低温状态, 预冷均匀性较好。

由图 5 可知, 体积分数为  $30\%$  的流态冰预冷速度最快, 预冷至  $0\ \text{C}$  需  $50\ \text{min}$ , 而体积分数为  $20\%$  的流态冰需  $80\ \text{min}$ 。经体积分数为  $10\%$  的流态冰预冷  $100\ \text{min}$  后, 西兰花内部温度只下降至  $5.5\ \text{C}$ 。综上, 针对西兰花预冷, 冰晶体积分数越大, 预冷速度越快, 预冷均匀性越好。

#### 2.3.2 流态冰用量对西兰花贮藏过程中温度变化的影响

(1) 初始及边界条件设置: 图 6 为不同流态冰用量贮

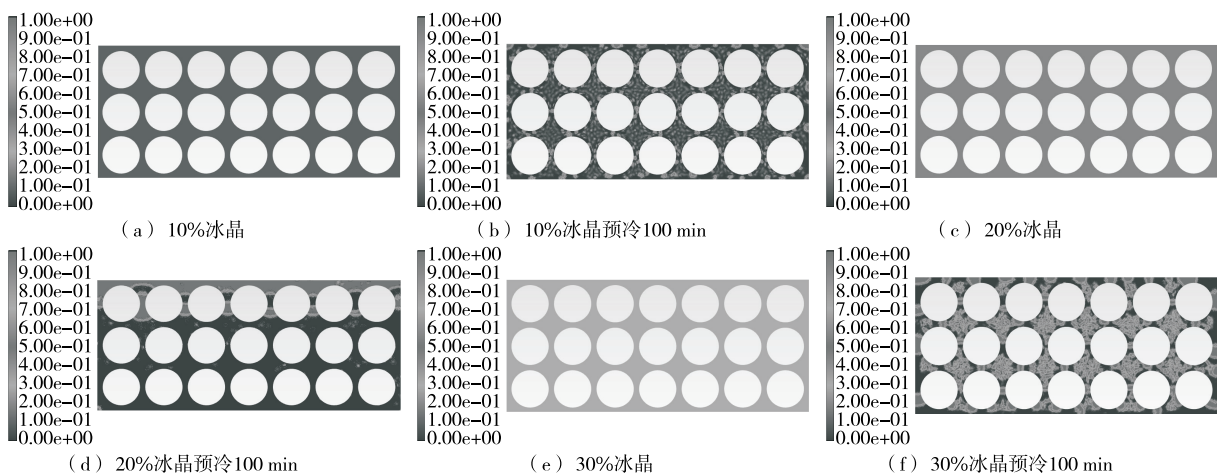


图 3 流态冰预冷前后的冰晶颗粒相云图

Figure 3 Phase cloud images of ice crystal particles before and after ice slurry precooling

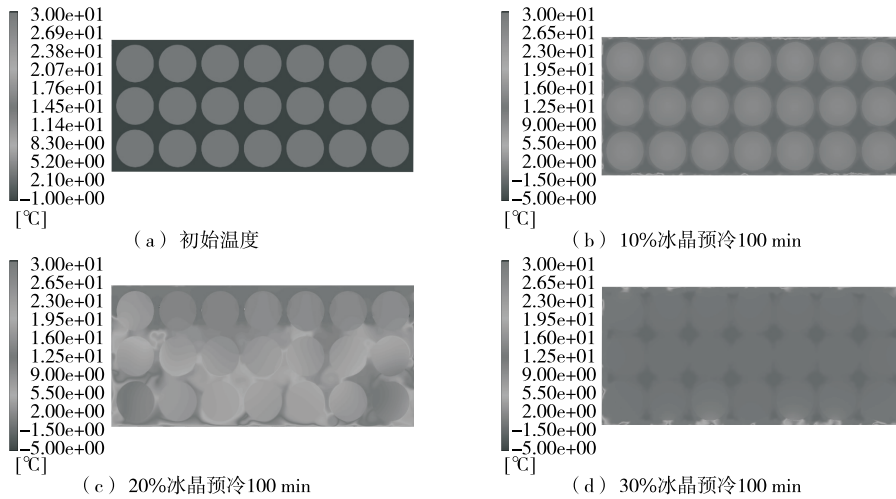


图 4 流态冰预冷前后包装内部温度云图

Figure 4 Temperature cloud map inside the package before and after ice slurry precooling

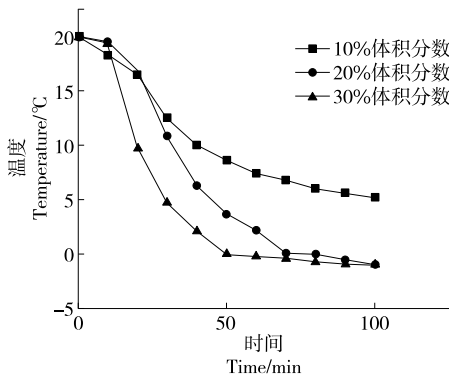


图 5 不同体积分数的流态冰预冷速度对比

Figure 5 Comparison of precooling speed of ice slurry with different volume fractions

藏西兰花 48 h 后的温度云图,流态冰体积分数为 30%,通过流态冰流体域与西兰花固体域面积与各自密度的乘

积之比,确定西兰花与流态冰的质量之比,设置流态冰质量占比分别为 50%,100%,150% 3 种工况条件。

(2) 流态冰贮藏 48 h 后包装内部温度分析:由图 6 可知,由于固体、液体与气体导热能力的巨大差异,与冰直接接触的西兰花降温迅速,充分体现了流态冰潜热大的优点。当流态冰质量占比为 50%时,由于热力上浮与果蔬自身呼吸热的原因,上层西兰花降温缓慢,甚至长时间保持较高温度,无法有效预冷降温。当流态冰质量占比为 100%时,流态冰与上层西兰花接触,降温较明显,上层西兰花温度可维持在 5 °C 左右,满足贮藏温度需求。当流态冰质量占比为 150%时,上下层西兰花均保持 0 °C 低温。综合考虑成本和实际使用,流态冰质量占比为 100%可以保证预冷温度要求,但应减少包装内部上层空间冗余。

### 3 实验验证

于北京市农林科学研究院国家蔬菜研究中心进行试

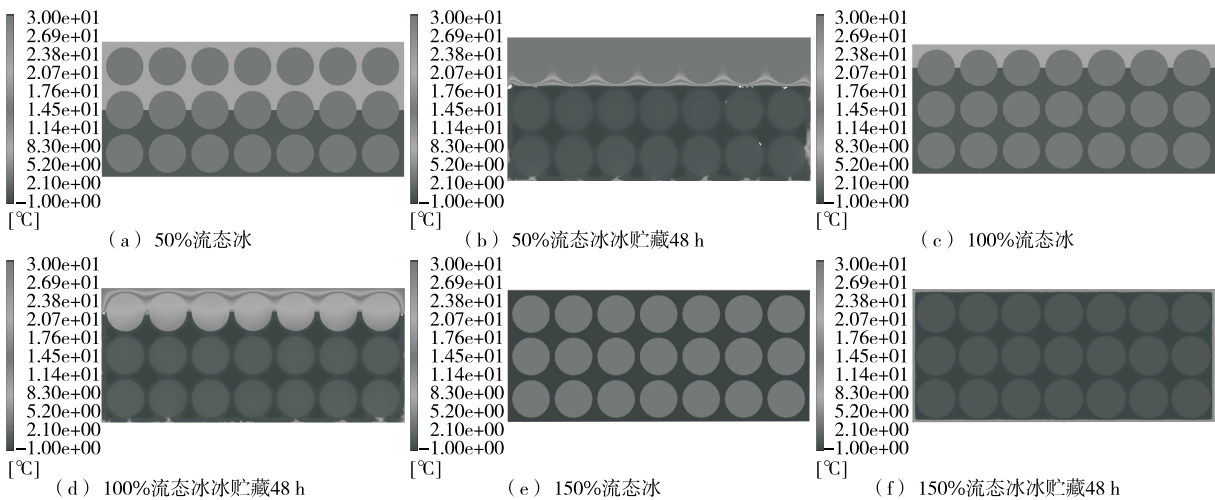


图 6 西兰花贮藏 48 h 前后的温度分布云图

Figure 6 Cloud map of temperature distribution before and after 48 h storage of broccoli

验,制备流态冰冰晶体积分数为30%,盐溶液浓度为2.5%,所用新鲜西兰花采购于北京海淀区农贸批发市场,产地为河北。

试验分为A、B、C3组,每组采用长780 mm,高340 mm的包装箱,装载10 kg西兰花,并于20℃恒温仓库中预处理8 h。试验前,每组包装箱内上下两层各放置一个温度记录仪,温度记录仪传感器插入西兰花内部,记录西兰花内部温度变化。然后进行充冰,A组5 kg,B组10 kg,C组15 kg,封箱后于20℃贮藏48 h。

由图7可知,预冷0~15 min时,试验值与仿真计算值存在一定误差,但均<20%,由于模拟仿真未考虑预冷初期流态冰尚未发生冰晶聚集,因此流动性较强,预冷速度更快;预冷15~100 min时,试验值与仿真计算值两者误差<10%,表明采取的仿真分析有效。

由图8可知,包装内部上下层西兰花温度出现显著差异( $P<0.05$ ),上层温度曲线上升趋势明显高于下层,是因为热力学上浮,热量集中于上层,导致箱中温度出现明显分层,与仿真模拟结果一致。综上,在实际生产过程中,应减少包装内部上层空间冗余。

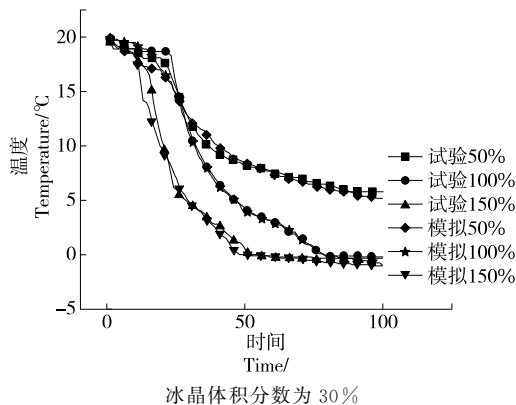


图7 试验组与模拟组预冷速度与温度变化对比

Figure 7 Comparison of precooling speed and temperature change between experimental group and simulation group

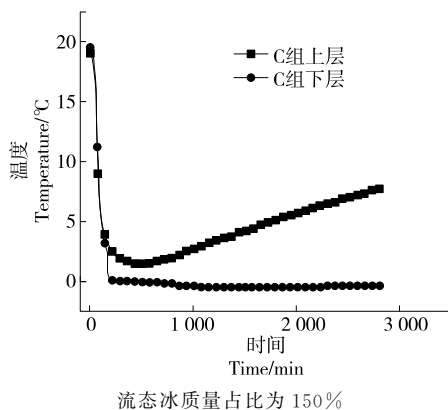


图8 上下层西兰花的温度变化对比

Figure 8 Comparison of temperature changes between upper and lower layers of broccoli

## 4 结论

应用CFD仿真模拟技术与实验验证相结合的方式,模拟了流态冰对西兰花的预冷过程,探究了不同体积分数和不同质量占比的流态冰对西兰花预冷及贮藏时温度变化的影响。结果表明,冰晶体积分数越大,冰晶颗粒分布越均匀,西兰花预冷均匀性越好;西兰花保持低温的时间受流态冰质量占比和上层冗余空间的共同影响,实际生产过程中,应保证流态冰对西兰花质量占比为100%以上,且减少包装内部上层空间冗余,避免热量集中于上层空间。研究在模拟过程中,只采用二维模型,并未充分考虑流态冰在三维空间内的流动和湍流情况。但在实际过程中,流态冰的流动和湍流也会加速西兰花预冷,且试验箱型和对象单一,因此后续的模拟研究可考虑在三维模型的基础上进一步探究箱型对流态冰预冷果蔬的影响,使模拟研究更好地应用于生产实际。

## 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] LIANG Y S, WONGMETHA O, WU P S, et al. Influence of hydrocooling on browning and quality of litchi cultivar Feizixiao during storage[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 1 173-1 179.
- [5] 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, YIN 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.
- [6] 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.
- [7] KAUFFELD M, WANG M J, GOLDSTEIN V, et al. Ice slurry applications[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(8): 1 491-1 505.
- [8] 林雪, 邓尚贵, 王盼盼, 等. 流化冰在鲑鱼保鲜中的应用研究[J].

食品工业, 2014, 35(5): 20-23.

LIN X, DENG S G, WANG P P, et al. Study on the application of slurry ice for the preservation of common mackerel[J]. The Food Industry, 2014, 35(5): 20-23.

[9] KEYS D R, LOWDER A C, MIRELES DEWITT C A. Conditions for the effective chilling of fish using a nano-sized ice slurry[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(3): e13564.

[10] 袁鹏翔. 流化冰对鲈鱼的保鲜研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2015: 10-12.

YUAN P X. Ice slurry on the preservation effect of squid[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2015: 10-12.

[11] KNODEL B D, FRANCE D M, CHOI U S, et al. Heat transfer and pressure drop in ice-water slurries [J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(7): 671-685.

[12] 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.

[13] 高红岩, SIGURJÓN A, 胡瑞卿, 等. 流化冰预冷与冰温贮藏新鲜鳕鱼片质量特性分析研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(2): 48-52.

GAO H Y, SIGURJÓN A, HU R Q, et al. Analysis on quality of fresh cod (*Gadus Morhua*) fillets pre-cooled with slurry ice and further superchilled storage[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(2): 48-52.

[14] ZAKHARIYA S Y, FOTEDAR R, PRANGNELL D. The effects of two forms of ice on microbiological and physiochemical properties of barramundi (*Lates calcarifer*, Bloch) fillets[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39: 12540.

[15] 郭伟岳, 凌建刚, 叶宇飞, 等. 流化冰超冷却对养殖大黄鱼贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(8): 307-312.

GUO R Y, LING J G, YE Y F, et al. Effect of superchilling in slurry ice on the preservation of farmed large yellow croaker[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(8): 307-312.

[16] LIN H M, DENG S G, HUANG S B, et al. Effects of precooling with slurry ice on the quality and microstructure of Anglerfish (*Lophius americanus*) liver [J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 45: 12193.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 南家莲. 用于非冷藏生鲜食品运输过程的多层瓦楞纸盒热性能模拟[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 137-141.

NAN J L. Simulating study on thermal performance of multilayer box for fresh food transportation[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 137-141.

[21] 安兆元, 师占群. 新型粉丝烘干室流场模拟与结构优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 68-73.

AN Z Y, SHI Z Q. Flow field simulation and structure optimization of a new type of vermicelli drying room[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 68-73.

(上接第 110 页)

[17] 韩跃新, 朱一民, 王泽红, 等. 介质特性对铝土矿在振动磨机中选择性磨矿的影响[J]. 现代矿业, 2009, 25(4): 36-39.

HAN Y X, ZHU Y M, WANG Z H, et al. Research on influence of medium characteristics on selective grinding of bauxite in vibration mill[J]. Morden Mining, 2009, 25(4): 36-39.

[18] JUNNING P Z. Technology of superfine grinding and its application in food industry[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2010, 17(10): 991-1 009.

[19] 李宏玲, 董玉德, 黄智豪, 等. 基于相似性理论的轮胎花纹相似度检测与分析[J]. 中国机械工程, 2021, 32(14): 1 646-1 652.

LI H L, DONG Y D, HUANG Z H, et al. Similarities detection and analysis of tire patterns based on similarity theory [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(14): 1 646-1 652.

[20] 陶晓东, 郭安福, 李辉, 等. 基于灵敏度分析的盘式开沟机性能分析及优化[J]. 工程设计学报, 2022, 29(1): 59-65.

TAO X D, GUO A F, LI H, et al. Performance analysis and optimization of disc ditcher based on sensitivity analysis [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2022, 29(1): 59-65.

[21] 唐果宁, 黄良沛, 刘伟, 等. 团聚性对超细振动磨机粉碎影响的试验分析[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(S1): 48-51.

TANG G N, HUANG L F, LIU W, et al. Experimental research on glomeration to effect of ultra-fine vibration mill grinding [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(S1): 48-51.

[22] JAQUELINE M, FLORENCE S A, CELIA M L F. Effect of ball milling on structural and physicochemical characteristics of cassava and Peruvian carrot starches [J]. Starch, 2013, 65(3): 200-209.

[23] 程敏, 刘保国, 刘彦旭. 磨介球对小麦麸皮振动冲击破碎性能的影响[J]. 振动与冲击, 2019, 38(24): 249-256.

CHENG M, LIU B G, LIU Y X. The influence of grinding ball on the vibration-impact crushing properties of wheat bran[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 249-256.

[24] 郭亚军, 易平涛. 线性无量纲化方法的性质分析[J]. 统计研究, 2008(2): 93-100.

GUO Y J, YI P T. Character analysis of linear dimensionless methods[J]. Statistical Research, 2008(2): 93-100.