

果品通风包装预冷效果的数值模拟与实验研究

王喜芳¹, 李保国¹, 范中阳²

(1.上海理工大学, 上海 200093; 2.浙江盾安冷链系统有限公司, 杭州 310051)

摘要: **目的** 为了准确预测果品通风包装箱内的气流分布和传热传质过程。**方法** 建立一个包含箱体、衬垫和果品的3D压差预冷数值模型, 采用Fluent模拟箱内的速度和温度分布, 并与实验值对比验证模型的可靠性。**结果** 模拟值与实验值两者变化趋势基本吻合, 其最大平均相对误差和均方根误差分别为12.2%和1.34℃。大量的冷气流进入与开孔位置近的果品一层, 从初温预冷到同一目标温度, 预冷时间比果品二层缩短了近35.6%。**结论** 建立的模型能为研究通风包装内部气流分布和传热传质提供参考; 包装箱的开孔应均布在包装箱的迎风面上, 以确保冷气流均匀地进入各果品层。

关键词: 果品包装; 数值模拟; 开孔位置; 气流分布; 实验研究

中图分类号: TB69; TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)05-0019-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.05.003

Numerical Simulation and Experiment of Precooling Efficiency inside Fruit Ventilated Package

WANG Xi-fang¹, LI Bao-guo¹, FAN Zhong-yang²

(1.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2.Zhejiang Dun'an Cold Chain System Co., Ltd., Hangzhou, 310051, China)

ABSTRACT: The work aims to accurately predict the airflow distribution and heat and mass transfer process inside fruit ventilated package. A 3D forced-air cooling numerical model including package wall, tray and fruits was developed. Fluent was employed to simulate the velocity and temperature distribution in carton, and the reliability of model was validated by comparing with experimental results. There was a good agreement between the simulated and experimental results, and the maximum average relative error and root-mean-square error were 12.2% and 1.34℃, respectively. Due to the large amount of cooling airflow through first layer of stacked apples close to the vent position, the pre-cooling time was nearly 35.6% shorter than that in the second layer from initial temperature to the same target temperature. This model can be used as a reference to study airflow distribution and heat and mass transfer inside ventilated package. The vents should be evenly distributed on the windward side of package to ensure the cold airflow through each fruit layer uniformly.

KEY WORDS: ventilated package; numerical simulation; vent position; airflow distribution; experiments validation

果蔬采摘后仍进行着旺盛的呼吸和蒸腾作用, 不断消耗自身营养物质和水分, 此外还携带着大量的田间热, 加速果蔬的后熟和衰老, 导致其品质下降和货

架期缩短^[1], 因此对采摘后的农产品进行预冷, 及时去除田间热是确保其质量、安全和延长货架期的关键环节。差压预冷是农产品预冷过程中常用且有效的预

收稿日期: 2018-12-21

基金项目: 上海市联盟计划 (LM201826)

作者简介: 王喜芳 (1993—), 女, 上海理工大学博士生, 主要研究方向为农产品冷冻冷藏和保鲜技术。

通信作者: 李保国 (1961—), 男, 博士, 上海理工大学教授、博导, 主要研究方向食品加工新技术。

冷方法之一^[2-3]。

近年来,申江^[4]、许茹楠^[5]、季丽丽^[6]采用实验的方法对农产品差压预冷进行了研究,由于实验过程中农产品被反复搬运、摆放,造成其物性参数变化较大,影响了测量数据的可靠性;另外,实验的方法难以了解箱内农产品周围的冷空气流动特性,并且费时费力。计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)能克服实验的复杂性,降低人力、物力成本^[7],还能直观地展现出果品包装箱内的气流分布和果品的温度变化^[8]。有学者^[3,9-17]利用 CFD 数值模拟技术对农产品通风包装箱内的冷气流分布、传热和传质进行了系列研究,证明了使用 CFD 数值模拟的方法预测通风包装箱内气流特性、传热传质过程是可行的。目前研究中仍存在着一些不足,例如,杨洲等^[12]采用标准 κ - ε 模型,利用 Fluent 软件对荔枝差压预冷包装箱内的气流分布进行了模拟,由于 κ - ε 模型适用于远离壁面充分发展的湍流区域,对于包装箱内近壁面的湍流流动则不适合,导致对包装箱内压力的模拟值与实测值偏离较大,最大偏差达到 10 Pa。Delele 等^[13]对农产品包装系统的气流和传热特性进行了预测,但却以装满水的塑料球为研究对象进行实验,导致实测数据与预测数据偏差较大。季阿敏^[14]、刘斌等^[15]基于多孔介质模型,对番茄差压预冷过程的热传递和气流分布情况进行了数值模拟,由于多孔介质运用了平均化理论,导致难以预测包装箱内局部气流的特性^[18]。同时还有文献^[19]研究表明,当包装箱与果品的水力直径

之比小于 10 时,包装箱内非均匀的空气流动对其内部传热传质现象会有较大的影响,多孔介质模型中的连续性假设不再成立,因此,利用多孔介质模型模拟番茄包装箱内传热传质过程是不适合的。

文中以市场上流通的双层瓦楞纸箱为研究对象,建立农产品通风包装 3-D 数值传热模型,利用 Fluent 软件对箱内气流特性、传热传质进行模拟研究,并结合实验进行验证,以期对农产品的预冷研究提供较为可靠的预测工具。

1 模型与方法

1.1 物理模型

选用的包装箱为富士苹果双层瓦楞纸箱,规格(长×宽×高)为 430 mm×270 mm×185 mm,纸箱壁厚为 7 mm,衬垫尺寸(长×宽×高)为 395 mm×235 mm×3 mm,将箱内苹果错位间隔摆放,苹果平均直径为 86 mm,箱体两侧各开一个键槽型孔。包装箱参数和果品摆放见图 1, T_c 表示监测果品的中心温度。

1.2 数学模型

1.2.1 模型假设

在求解包装箱数值模型前作出以下假设:将苹果视为球形、大小一致,且为各向同性材料;忽略苹果后熟过程对呼吸热和蒸腾热的影响;忽略辐射换热;空气为不可压缩流体,且空气和苹果的物性参数视为常量。

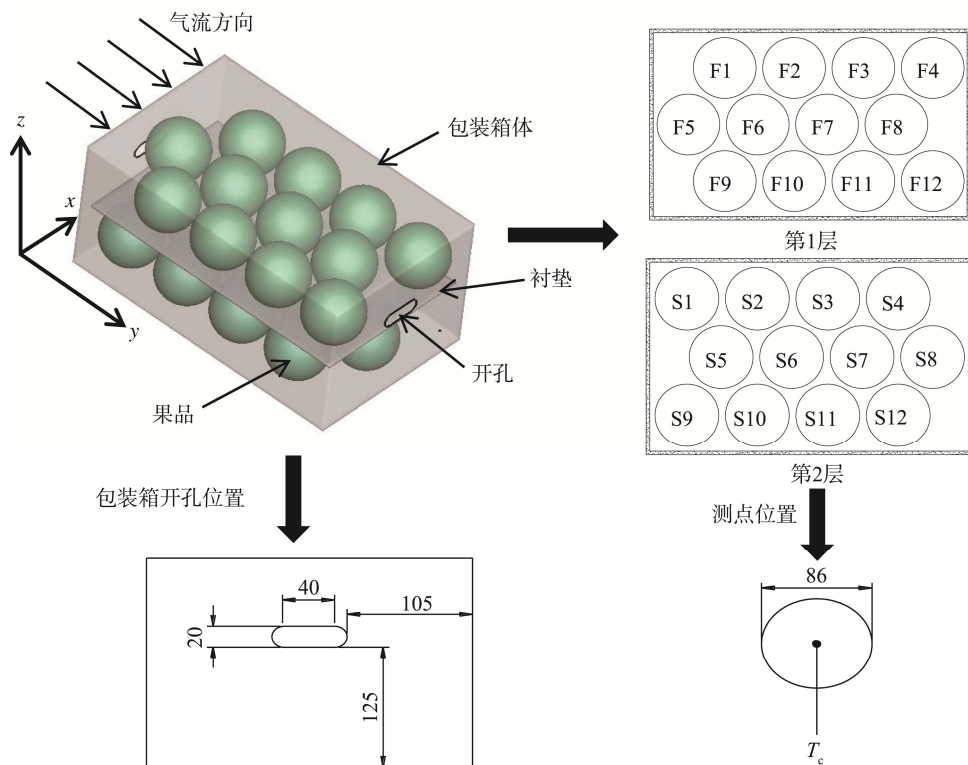


图1 包装箱几何示意和测点位置

Fig.1 Geometric diagram of package and location of measuring points

1.2.2 控制方程

1) 冷气流区域。连续性方程、动量方程、能量方程分别为:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_a u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_a \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] -$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_a \overline{u_i' u_j'} \right) - [1 - \alpha(T_a - T_0)] \rho_a \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_a c_{p,a} T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_a c_{p,a} u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_a \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) -$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho_a c_{p,a} \overline{u_j' T'} \right) \quad (3)$$

式中: P 为压强 (Pa); x_i, x_j 为笛卡尔坐标; ρ_a 为空气密度 (kg/m^3); u_i, u_j 为空气时均速度 (m/s^2); μ_a 为空气动力粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); u_i', u_j' 为空气脉动速度 (m/s); $\overline{u_i' u_j'}$ 为 Reynolds 应力分量; α 为热膨胀系数 (K^{-1}); T_a 为箱内气体温度 (K); T_0 为冷库内空气温度 (K); g 为重力加速度 (m/s^2); $c_{p,a}$ 为空气比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); T 为空气温度 (K); λ_a 为空气热导率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$); $\overline{u_j' T'}$ 为 Reynolds 通量项; T' 为空气脉动温度 (K)。

2) 果品区域。充分考虑苹果的呼吸和蒸腾作用产生的热量, 以及预冷过程中苹果与冷空气的对流换热、苹果表面产生的冷凝放热, 并作为内部热源加载到果品区域导热微分方程中, 从而得到控制方程为^[2]:

$$\rho_p c_{p,p} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \lambda_p \nabla^2 T_p + S_e \quad (4)$$

$$S_e = \frac{Q_r - Q_e + Q_{\text{con}} - Q_{\text{conv}}}{V_p} \quad (5)$$

式中: ρ_p 为果品密度 (kg/m^3); $c_{p,p}$ 为果品比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); T_p 为果品温度 (K); λ_p 为果品导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$); S_e 为果品内部热源 (W/m^3); Q_r 为果品呼吸热 (W/m^3); Q_e 为蒸腾热 (W/m^3); Q_{con} 为冷凝放热 (W/m^3); V_p 为果品体积 (m^3); Q_{conv} 为水果-空气表面对流换热 (W/m^3)。

3) 冷空气-果品耦合界面区域。依据能量守恒原理, 果品-冷空气热平衡方程^[20]为:

$$(\lambda_a \nabla T_a - \lambda_p \nabla T_p) \cdot \mathbf{n}_{\text{ap}} = L_p m_{\text{con}} - L_p m_t - h_p (T_p - T_a) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{n}_{\text{ap}}$ 为垂直于果品-空气交界面的单位向量; L_p 为果品表面蒸发潜热 (J/kg); m_{con} 为冷凝系数 ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); m_t 为蒸腾速率 ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); h_p 为果品表面对流换热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)。

4) 纸箱区域。由于纸箱壁面厚度远小于箱体的高度和宽度, 故将纸箱区域作为大平壁处理^[21]。将纸箱壁面导热看作是无内热源的一维稳态导热, 得到控制方程为:

$$\frac{d^2 T_b}{dx^2} = 0 \quad (7)$$

式中: T_b 为包装箱自身温度 (K)。

1.2.3 初始及边界条件

初始条件: 果品、衬垫、包装箱的初温均设定为 27°C 。

边界条件: 将包装箱进风口设置为速度进口, 冷风温度为 0°C , 速度为 2 m/s ; 将包装箱出风口设置为自由出流。

1.3 方法与模拟

1.3.1 实验

实验在冷库内进行, 库内设置风道, 风道一端设置有轴流风机, 在轴流风机的抽吸作用下, 库内冷空气进入包装箱与果品换热。包装箱内共 24 个苹果, 分上下两层分别编号, 第 1 层为 F1—F12, 第 2 层为 S1—S12 (见图 1)。实验开始前, 先开启制冷机组和风机, 设置库温为 0°C , 风道内设风速仪, 调节风机转速, 使风道内风速维持在 2 m/s , 当库温维持在 0°C 时开始实验。苹果、纸箱、衬垫的初始温度为 27°C , 热电偶针式探头分别插入第 1 层果品 F1, F7, F12 和第 2 层果品 S1, S6, S12 的中心位置, 测温仪终端每隔 1 min 接收一次温度数据, 当苹果中心温度达到 $7/8$ 预冷时间对应的温度 (约 3.5°C) 时实验结束, 实验分 3 组, 求平均值作为模型验证数据。

1.3.2 实验仪器

实验仪器: 多点测温仪, 北京市农业信息技术研究中心, 精度为 $\pm 0.3^\circ\text{C}$; 风速仪, 型号为 TS19545-A, 美国 TSK (Trust Science Innovation) 公司, 精度为 $\pm 3\%$ 。

1.3.3 数值模拟

利用网格划分软件 Gambit 对通风包装箱、衬垫和果品进行三维建模和划分网格。为防止苹果间, 苹果与包装箱壁间相切处网格出现歪斜, 建立数值模型时在苹果间, 以及苹果与壁面间需留有适当的空隙, 并进行局部网格细化处理^[22], 共划分 340 003 个网格单元, 经检验网格的歪斜度不超过 0.93。

采用 SST $k-\omega$ 湍流模型和 SIMPLE 算法, 时间步长设为 60 s , 每步迭代计算 40 次, 并对预冷过程中的果品中心温度进行监测, 每隔 1 min 记录 1 次温度数据。冷空气、苹果、衬垫和包装箱的热物性参数^[2]见表 1。

表 1 热物性参数
Tab.1 Thermo-physical properties

类别	密度/(kg·m ⁻³)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	动力粘度/(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
冷空气	1.29	0.024	1004.8	1.72×10 ⁻⁵
苹果	880.64	0.463	3829	
包装箱	220	0.05	1700	
衬垫	260	0.05	1700	

2 结果与分析

2.1 模型验证

预冷实验取果品 F1, F7, F12, S1, S6 和 S12 的中心温度值与模拟值对比, 见图 2。由图 2 看出, 实验数据与模拟数据吻合较好, 最大误差不超过 1.35 °C。计算模拟值与实验值的均方根误差 (Root Mean Square Error, R_M) 和平均相对误差 (Average Relative Deviation, A_R):

$$R_M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - S_i)^2} \quad (8)$$

$$A_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|E_i - S_i|}{E_i} \times 100\% \quad (9)$$

式中: $n=24$; E_i 为第 i 个苹果的平均中心温度实验值; S_i 为第 i 个苹果的平均中心温度模拟值。

得到上下层苹果的 R_M 和 A_R 分别为 1.12 °C, 12.2%; 1.34 °C, 11.4%, 测量值与模拟值之间产生偏差的原因可能是苹果形状的简化、包装箱进口冷空气速度和温度的变化以及测量仪器对箱内冷气流分布的影响所致。

2.2 气流与温度分布

通风包装箱内的气流分布见图 3。由图 3 可知, 当冷气流通过包装开孔时, 流动截面减小, 气流速度变大, 导致进风口附近的苹果表面冷气流速度较高, 对应的湍流强度大, 从而造成该处果品传热速度较快。随着冷空气向出口流动, 流动截面变大, 加上堆积果品的阻力作用, 气流速度不断下降。另外, 由于包装箱的开孔靠近一层果品, 大量的冷气流进入一层果品, 较少量的冷气流进入二层果品, 导致两果品层的气流分布存在较大差异, 进而导致上下果品降温速度存在差异。从图 2 中可看出, 一层果品预冷 850 min, 温度达到 3.5 °C, 二层果品则需要 1320 min。当 2 个果品层的产品从初温 27 °C 预冷到相同的目标温度

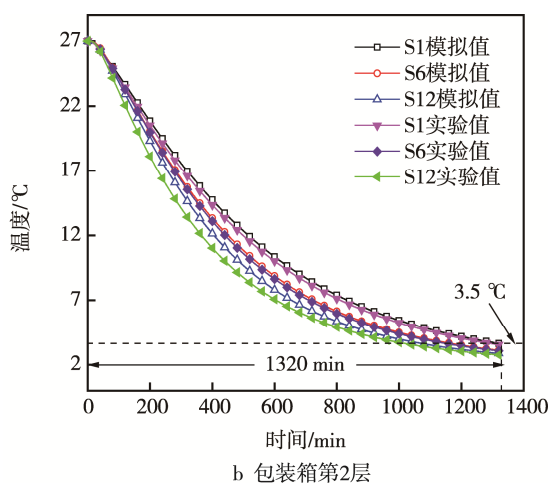
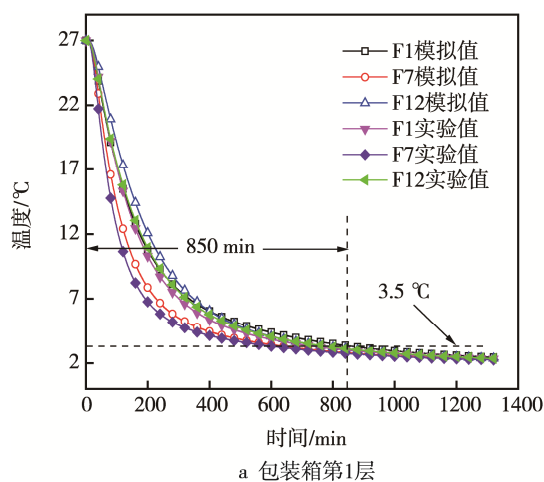


图 2 预冷过程中苹果中心温度实验值与模拟值对比
Fig.2 Comparison between experimental and simulated apple centre temperatures during precooling

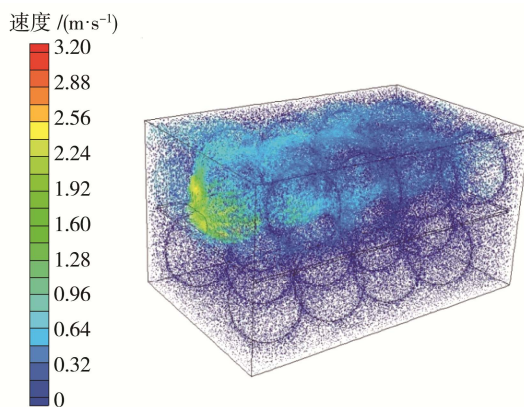


图 3 包装箱内冷气流速度矢量
Fig.3 Cooling airflow velocity vector inside package

时，一层果品将多预冷 470 min。在实际应用中，由于包装箱之间的相互遮挡开孔，将会导致更大的气流分布不匀。由此可见，包装箱的开孔位置与其内的气流分布和果品的降温速度具有相关性。

给出了沿包装箱气流方向（长边）各层果品温度和冷气流速度的分布，见图 4a—b。由图 4 可看出，对于一层果品，沿着包装箱内气流方向果品的温度呈现由低到高的分布，冷气流的速度逐渐减小；二

层果品却与一层果品相反，沿着包装箱内气流方向果品的温度呈现由高到低的趋势，冷气流的速度呈现由小到大的趋势。这主要是由于大量的冷气流进入了一层果品，在出口处气流的流动截面减小，气流流动的阻力增加，引起部分冷气流在出口附近通过衬垫与包装箱壁面的间隙进入二层果品，从而导致二层果品在出口附近的湍流程度增加（见图 5），果品换热速度加快。

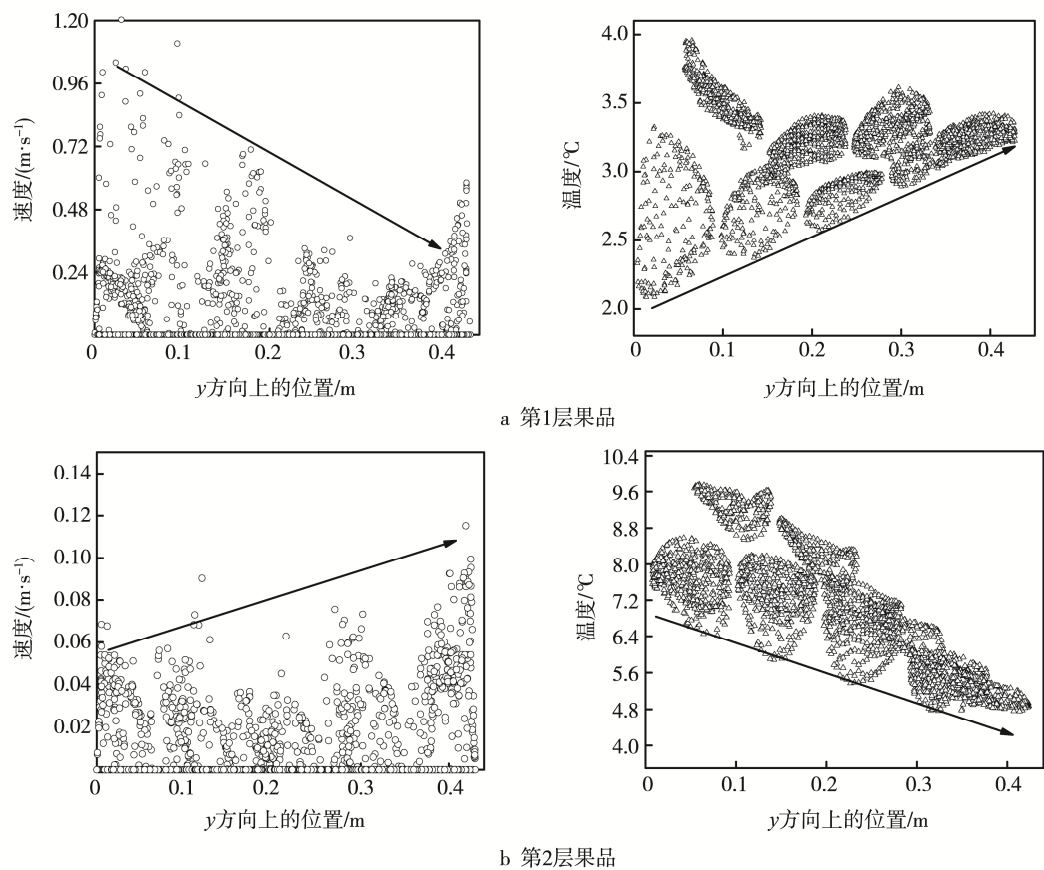


图 4 预冷 12h 时包装箱内冷空气速度分布（左边）和果品温度（右边）分布
Fig.4 Distribution of cooling air velocity (left) and produce temperature (right) inside carton after 12 h of cooling

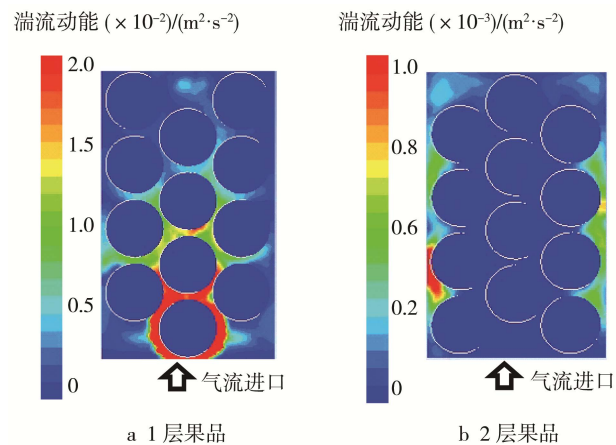


图 5 不同果品层冷空气湍流动能的分布
Fig.5 Contours of turbulent kinetic energy for different produce layers

对同一果品层而言，冷气流速度的大小与果品层的温度分布存在较大的相关性。气流速度较高的区域，果品降温速率较快，对应的区域果品温度较低。

3 结语

在前期研究的基础上，充分考虑农产品呼吸热、表面蒸发热、冷凝放热等因素，并作为内部热源，建立了 3D 农产品通风包装箱数值模型，通过实验对所建模型的可靠性进行了验证，分析了相关数据，得出如下结论。

1) 实验验证了通风包装数值模型的可靠性，模拟值与实验值吻合较好，最大 R_M 和 A_R 分别为 1.34℃ 和 12.2%。建立的模型为农产品通风包装箱内传热传质分析提供参考。

2) 开孔应均匀地分布在通风包装的迎风面上, 开孔位置对果品层之间的冷空气流量分配影响较大。结果显示, 与开孔位置较近的一层果品进入的冷空气流量大, 从而导致一层果品的降温速度比二层果品快, 从初温预冷到目标温度, 一层果品的预冷时间比二层果品缩短了近 35.6%。

3) 同一果品层气流速度的分布与果品温度的分布具有较高的相关性。气流速度越高, 对应的果品温度越低。

参考文献:

- [1] ZHAO C J, HAN J W, YANG X T, et al. A Review of Computational Fluid Dynamics for Forced-air Cooling Process[J]. *Applied Energy*, 2016, 168: 314—331.
- [2] 韩佳伟, 赵春江, 杨信廷, 等. 送风风速对苹果差压预冷性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 280—289.
HAN Jia-wei, ZHAO Chun-jiang, YANG Xin-ting, et al. Effect of Air-inflow Velocity on Cooling Efficiency during Forced-air Precooling of Apples[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 280—289.
- [3] O'SULLIVAN J, FERRUA M J, LOVE R, et al. Modelling the Forced-air Cooling Mechanisms and Performance of Polylined Horticultural Produce[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2016, 120: 23—35.
- [4] 申江, 丁峰, 张现红. 变送风参数对西红柿差压预冷节能效果研究[J]. *制冷学报*, 2015, 36(2): 113—118.
SHEN Jiang, DING Feng, ZHANG Xian-hong. Research on Energy Saving of Tomato Pressure Pre-cooling by Changing the Supply Air Parameter[J]. *Journal of Refrigeration*, 2015, 36(2): 113—118.
- [5] 许茹楠, 于晋哲, 刘斌, 等. 不同差压预冷风速对贮藏期蒜薹品质的影响[J]. *制冷学报*, 2018, 39(4): 38—41.
XU Ru-nan, YU Jin-zhe, LIU Bin, et al. Effect of Different Differential Pressure Precooling Wind Speed on the Quality of Garlic Sprouts during Storage[J]. *Journal of Refrigeration*, 2018, 39(4): 38—41.
- [6] 季丽丽, 梁芸志, 陈存坤, 等. 不同温度差压预冷及其对西葫芦冷藏效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 287—293.
JI Li-li, LIANG Yun-zhi, CHEN Cun-kun, et al. Forced-air Pre-cooling of Different Temperatures and Its Effects on Cold Storage of Cucurbita Pepo[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(1): 287—293.
- [7] MOONEY R P, MCFADDEN S, GABALCOVAZ, et al. An Experimental-numerical Method for Estimating Heat Transfer in a Bridgman Furnace[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 67(1/2): 61—71.
- [8] DEFRAEYE T, LAMBRECHT R, TSIGE A A, et al. Forced-convective Cooling of Citrus Fruit: Package Design[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 118(1): 8—18.
- [9] DELELE M A, NGCOBO M E K, GETAHUN S T, et al. Studying Airflow and Heat Transfer Characteristics of a Horticultural Produce Packaging System Using a 3-D CFD Model. Part II: Effect of Package Design[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2013, 86(3): 546—555.
- [10] DEFRAEYE T, LAMBRECHT R, DELELE M A, et al. Forced-convective Cooling of Citrus Fruit: Cooling Conditions and Energy Consumption in Relation to Package design[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 121(1): 118—127.
- [11] HAN J W, ZHAO C J, YANG X T, et al. Computational Modeling of Airflow and Heat Transfer in a Vented Box during Cooling: Optimal Package Design[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91: 883—893.
- [12] 杨洲, 陈朝海, 段洁利, 等. 荔枝压差预冷包装箱内气流场模拟与试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(S1): 215—217.
YANG Zhou, CHEN Chao-hai, DUAN Jie-li, et al. Simulation and Experiment of Airflow Field in Cartons of Pressure-difference Pre-cooling for Litchi[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(S1): 215—217.
- [13] DELELE M A, NGCOBO M E K, GETAHUN S T, et al. Studying Airflow and Heat Transfer Characteristics of a Horticultural Produce Packaging System Using a 3-D CFD Model. Part I: Model Development and Validation[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 86(3): 536—545.
- [14] 季阿敏, 郭靖, 孟庆海. 番茄压差预冷理论模拟与实验[J]. *哈尔滨商业大学学报 (自然科学版)*, 2013, 29(1): 115—117.
JI A-min, GUO Jing, MENG Qing-hai. Theoretical Modeling and Experiment on Pressure-difference Pre-cooling of Tomato[J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2013, 29(1): 115—117.
- [15] 刘斌, 郭亚丽, 关文强. 果蔬差压预冷方式研究[J]. *保鲜与加工*, 2003, 3(6): 16—18.
LIU Bin, GUO Ya-li, GUAN Wen-qiang. Study on Forced Air Precooling Mode of Fruit and Vegetable[J]. *Storage & Process*, 2003, 3(6): 16—18.
- [16] 陈秀勤, 卢立新, 王军. 包装箱内层装果品差压预冷温度场的数值模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(12): 249—257.
CHEN Xiu-qin, LU Li-xin, WANG Jun. Numerical Simulation and Experimental Verification of Forced-air Precooling Temperature Field inside Fruit Packaging Box with Multiple-layer Grids[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014,

- 30(12): 249—257.
- [17] 蔡景辉, 刘斌, 王艳红, 等. 差压预冷外部遮挡开孔方式数值研究及实验验证[J]. 制冷学报, 2011, 32(1): 51—57.
CAI Jing-hui, LIU Bin, WANG Yan-hong, et al. Numerical Study and Experimental Verification of Vent-hole Type of External Cover on Differential Pressure Cooling[J]. Journal of Refrigeration, 2011, 32(1): 51—57.
- [18] DEHGHANNYAJ, NGADI M, VIGNEAULT C. Mathematical Modeling Procedures for Airflow, Heat and Mass Transfer During Forced Convection Cooling of Produce: A Review[J]. Food Engineering Reviews, 2010, 2(4): 227—243.
- [19] 陈秀勤, 卢立新. 集合包装水果的差压预冷研究进展[J]. 包装工程, 2014, 35(1): 141—147.
CHEN Xiu-qin, LU Li-xin. Research Advances of Forced-air Precooling for Multi-packed Fruits[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(1): 141—147.
- [20] 王达. 果蔬压差通风预冷研究及对其品质影响分析[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
WANG Da. Forced-air Precooling Research of Fruit and Vegetable and Analysis of Effects on Its Quality [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2016.
- [21] 卢改林. 热工基础及流体力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
LU Gai-lin. Thermotechnical Foundation and Fluid Dynamics[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [22] TUTAR M, ERDOGDU F, TOKA B. Computational Modeling of Airflow Patterns and Heat Transfer Prediction Through Stacked Layers' Products in a Vented Box during Cooling[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(2): 295—306.