

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-07
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250724002

冰箱冷藏搁架蜜桃传热传质模型参数修正

刘子畅 陈爱强 彭港生

(天津商业大学机械工程学院 天津 300133)

摘要 现阶段模拟研究主要聚焦于冰箱温度场和球形水果冷藏过程的流场分析,且普遍采用理想化条件,导致模型的模拟值与实际值存在偏差。本文采用数值模拟与实验相结合的研究方法,建立了风冷冰箱冷藏室内蜜桃贮藏过程的传热传质模型,在传统模型基础上引入呼吸热与蒸发潜热,修正密度并进一步调整动力粘度系数。结果表明:MAE值均显著降低,由原始模型的1.74~2.98 K降至0.22~0.76 K。证实了改进后的模型能更有效表征球形水果在冷藏空间流场分布情况及温度变化规律,为优化冰箱内气流组织和温湿度控制策略提供依据。

关键词 模拟仿真;低温冷藏;温度场;相对湿度

中图分类号: TS206;TS255.3;TB61⁺1

文献标识码: A

Correction of Heat Transfer and Mass Transfer Model Parameters for Peaches in Refrigerated Storage

Chen Aiqiang Liu Zichang Peng Gangsheng

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin, 300133, China)

Abstract Simulation research has focused primarily on flow-field analysis of the temperature field in refrigerators and on the refrigeration of spherical fruits, generally under idealized conditions, leading to discrepancies between simulated and actual values. This study employed a combination of numerical simulation and experimental methods to establish a heat and mass transfer model for the storage of peaches in a fan-cooled refrigerator. It introduces the respiratory heat and latent heat of evaporation based on traditional models, corrects the density, and further adjusts the dynamic viscosity coefficient. These changes significantly reduced the MAE, from the original model's range of 1.74–2.98 K to the revised model's range of 0.22–0.76 K. The improved model therefore more effectively characterizes the flow-field distribution and temperature change patterns of spherical fruits in refrigerated spaces, thereby providing a basis for optimizing the airflow organization and temperature and humidity control strategies within refrigerators.

Keywords analog simulation; hypothermic storage; temperature field; relative humidity

冰箱作为广泛使用的家电,用于食品保鲜。在其研发优化过程中,高度依赖于对其内部复杂多物理场(流动、传热、相变)的深入理解。数值模拟作为一种高效的研究方法,应用于温度分布^[1]、湿度变化^[2]以及风速场^[3]等关键参数的仿真分析。

许多研究人员针对冰箱的室内温湿度和气流分布进行了研究。V. T. Lacerda等^[4]通过粒子图像测速技术(PIV, particle image velocimetry)研究冰箱室内空气速度分布等工作。Shu Shengwen等^[5]对高温高湿环境内部温度和湿度的分布进行了精细测量。这些研究突破不仅为开发高效节能的智能冰箱系统提供了理论支撑,更推动了食品保鲜技术的创新发展。

水果保鲜一直是研究重点,有学者利用CFD (computational fluid dynamics, 计算流体动力学)模拟

樱桃、苹果等球形水果在冷藏过程中不同气流速度对水果温度的影响^[6-8]。H. Nalbandi等^[9-10]对草莓预冷过程的并联气流系统(MPAS, modified parallel airflow system)进行了优化,进行了敏感性分析,通过实验验证传热传质模型的准确性,同时使用2个包装和2个气流速率来验证模型。也有学者以非球形水果为研究对象,刘泽勤等^[11]以微型轻便式节能型果蔬冷藏库为研究对象,采用香蕉为实验物料,应用Fluent分析方法,探讨了3种送风方式对果蔬冷库温度场的影响。G. Tagliavini等^[12]提出了单个芒果果实的热流体动力学模型,以更好地了解具有更复杂、非球形形状和异质成分的果实的对流冷却行为。

果蔬冷藏过程中内部参数和持续进行的生理生化过程会发生变化,如呼吸热和蒸发潜热、密度、导

热系数等。使CFD模拟准确度不足,影响该模拟的使用。

因此,本文以蜜桃为例,建立风冷冰箱冷藏室内球形水果贮藏的热质传递CFD模型,引入呼吸热和蒸发潜热通过比对实验测试数据对既有数学模型进行优化,改进密度项和动力黏度,改进后的模型能够更准确地预测冷藏室内温湿度场,进而为优化冰箱内气流组织和温湿度控制策略提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为蜜桃,产自山西省晋中市太谷区,于2025年7月1日采摘,并于7月3日到达天津商业大学,果实平均直径约为80 mm,密度为 691.95 kg/m^3 ,挑选无病害损伤、大小均匀、成熟度一致的果实。蜜桃作为易腐水果,常温下能储存4~7 d,放入冷藏室 8°C 预冷后再贮存于约 1°C 可延长至30 d^[13-14]。

1.2 实验方法

1.2.1 环境温度测量

采用温湿度记录仪(GP-20,横河测量技术有限公司)的便携式无纸记录仪,日本)对风冷冰箱(BCD-650WGHFD12STU1,海尔智家股份有限公司,中国)冷藏室内部空间的温湿度进行动态监测。在冷藏室内沿垂直方向均匀布置3个监测点,分别位于每层搁架中心,如图1所示,所有监测点均避开冷风直吹区域。

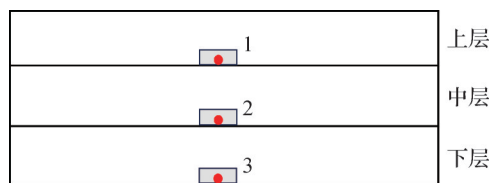


图1 监测点位置

Fig.1 Location of monitoring points

设置冰箱温度为 8°C ,空载运行10 h后,记录400 min内冰箱温度的变化,如图2所示。由图2可知,冰箱冷藏室上、中、下层的上下限温度差值在 0.5°C 以内,湿度差值在2%以内,温湿度差异较小,为减小计算量,实验在上层和中层放置蜜桃。

1.2.2 蜜桃温度测量

采用便携式无纸记录仪(COS-04,山东仁科测控技术有限公司)的温湿度记录仪,中国)实时监测果实核心温度。采用线性拟合方法对T型热电偶(WRCK-191,泰州苏欧电热电器有限公司,中国)进行校准,校准后的热电偶测量误差为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。随后

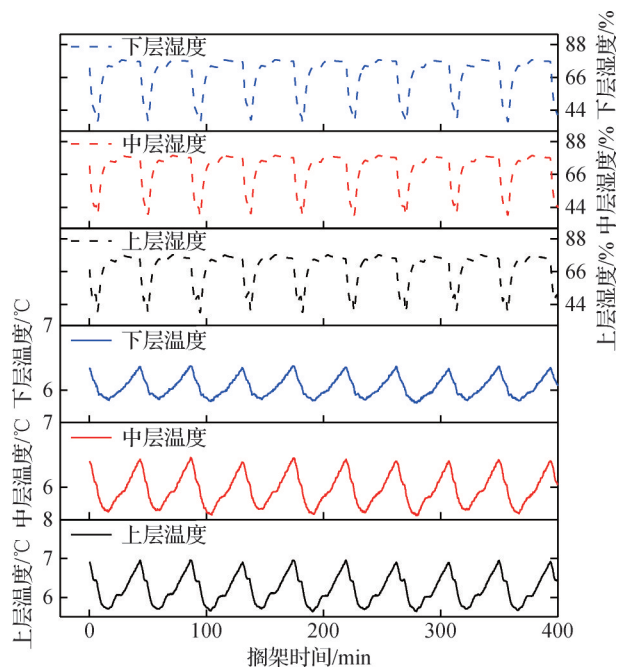


图2 搁架空间内温湿度变化

Fig.2 Variation of temperature and humidity in the shelving space

将热电偶探针插入每个蜜桃的几何中心位置,以确保温度测量的准确性。

选取12个蜜桃样本,按冰箱的不同层位进行系统编号:每层编号为N-1至N-6,字母N表示层数,具体三维空间分布和热电偶布置如图3所示。

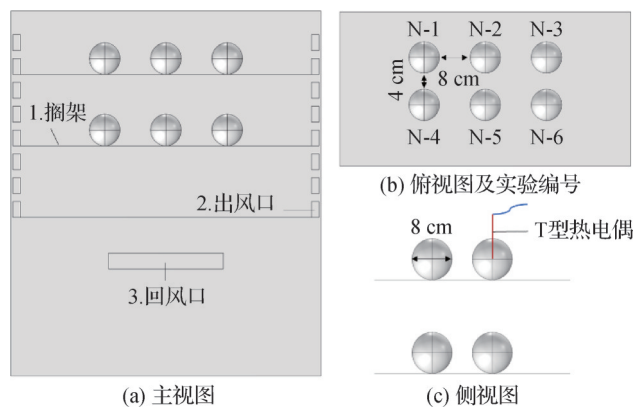


图3 蜜桃摆放位置

Fig.3 Placement of peaches

1.3 仿真方法

使用COMSOL Multiphysics 6.3软件建立冷空气和蜜桃传热模型,采用 $k-\varepsilon$ 模型和SIMPLE算法进行模拟仿真。空箱模拟使用UDF导入实际温度,负载模拟在空箱基础上每层放置蜜桃,分析蜜桃的传热传质模型。建立3种不同工况下的传热传质数值模型:第一种模型忽略了热源项的影响;第二种模型在蜜桃的计算域中考虑了内热源(呼吸热和蒸发潜热)

和密度变化的影响;第三种模型在第二种模型基础上进一步改进热平衡方程中的动力黏度系数。模型可分为3个计算域,分别为湿空气自由流动区域、蜜桃内部区域和湿空气与蜜桃表面耦合区域。

1.3.1 湿空气自由流动区域

对于不可压缩流体在瞬态自由气流区域中的求解问题,其控制方程主要由3部分构成。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U} \vec{U}) = \nabla(\mu \nabla \vec{U}) + \vec{\rho} \vec{f} - \nabla p \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \nabla(\rho c_p \vec{U} T) = \nabla(\lambda \nabla T) \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度,kg/m³;t为时间,s; $\vec{U}$ 为速度矢量,m/s; μ 为动力黏度,Pa·s;p为水蒸气压力,Pa; $\vec{f}$ 为单位质量流体体积力矢量,m/s; λ 为导热系数,W/(m·K); c_p 为空气比定压热容,J/(kg·K);T为温度,K。

1.3.2 蜜桃内部区域

由能量守恒方程可知,热源项(Q_{in} ,W/m³)主要由呼吸热(Q_r ,W/m³)和蒸发潜热(Q_e ,W/m³)构成,计算如下:

$$Q_{in} = (Q_r - Q_e)/V_p \quad (4)$$

$$Q_r/V_p = \rho_p \times f_p \quad (5)$$

$$Q_e/V_p = L_p m_p A_p/V_p = 3L_p m_p/r \quad (6)$$

式中: f_p 为单位质量呼吸热生产速率,W/kg; L 为蒸发潜热,J/kg; m 为水分蒸发速率,kg/(m²·s); V 为体积,m³; ρ 为密度,kg/m³; r 为半径,m; A 为面积,m²;下标p代表蜜桃。

1.3.3 湿空气与蜜桃表面耦合区域

根据能量守恒定律可得热平衡方程:

$$(\lambda_a \nabla T_a - \lambda_p \nabla T_{p,0}) n_{ap} = L_p (m_{con} - m_p) - \alpha_p (T_{p,0} - T_a) \quad (7)$$

式中: n_{ap} 为垂直于蜜桃与冷空气交界面的单位矢量; $T_{p,0}$ 为蜜桃初始温度,K; a_p 为蜜桃表面对流传热系数,W/(m²·K); m_{con} 为冷凝系数,kg/(m²·s); T_a 为湿空气温度,K。

对动量方程进行调整:

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{U} \vec{U}) = \nabla(\beta \mu \nabla \vec{U}) + \vec{\rho} \vec{f} - \nabla p \quad (8)$$

式中: β 为动力黏度系数。

1.3.4 蜜桃密度变化修正

蜜桃在冷藏过程中进行热质交换,蜜桃随着水

分散失其密度会发生变化,对密度进行修正:

$$\rho = \frac{M_s}{M - M_w} \cdot \rho_s + \frac{M - M_w - M_s}{M - M_w} \cdot \rho_w \quad (9)$$

式中: M_s 为蜜桃干果肉质量,kg; M 为蜜桃初始质量,kg; M_w 为蒸发的水的质量,kg; ρ_s 为果肉密度,kg/m³; ρ_w 为水的密度,kg/m³。

1.3.5 误差分析

为了验证本研究中构建的蜜桃传热传质CFD数值模型的准确性,采用平均绝对误差Mi(MAE,mean absolute error)作为评价指标,对模型预测温度(S_i)与实测温度(E_i)进行了详细的对比分析,计算式如下:

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - S_i| \quad (10)$$

1.4 初始条件及物性参数设定

为简化模型,进行如下假设:忽略冰箱的壁厚;蜜桃热物理特性恒定,各向同性,同时其内部组织结构均匀且为等直径球体;忽略能量方程中的黏性耗散项;忽略辐射换热;冰箱冷藏室内空气认为是牛顿Newtonian流体和Boussinesq流体,具有恒定热特性的不可压缩流体。采用第三类边界条件,蜜桃冷却边界条件为:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T_f}{\partial x} n_x + \frac{\partial T_f}{\partial y} n_y + \frac{\partial T_f}{\partial z} n_z \right) = h(T_f - T) \quad (11)$$

式中: n_x 、 n_y 、 n_z 为方向因子; h 为对流传热系数,W/(m²·K); T_f 为蜜桃温度,K; T 为流体温度,K。

根据实验数值设定蜜桃初始温度为30℃,取冷藏室内部平均温度为6.5℃。各物体热物性参数如表1所示^[15],通过修改密度、比热容、导热系数等物性参数,可适用于不同近似球形水果在冷藏室内的温湿度场模拟。

表1 材料热物性参数

Tab.1 Material thermal properties parameters

物质	ρ / (kg/m ³)	c_p / [J/(kg·K)]	λ / [W/(m·K)]	μ / (Pa·s)
蜜桃	691.95	3 898.3	0.472	0.01
湿空气	1.293	1 006	0.023 43	1.73×10 ⁻⁵
搁架	0.86	2.53	1.09	—
冰箱壳体	35	11.38	0.024	—

1.5 网格划分

为减少计算量,针对冷藏室几何模型,采用四面体网格进行离散(如图4(a)),为有效解析温度场分布特征,特别是蜜桃表面及壁面区域的热力学行为,对该区域实施了网格加密处理(如图4(b))。加密网格参数设置如下:最小单元尺寸为0.018 4,最大单元

增长率设为 1.3, 曲率因子为 0.2。

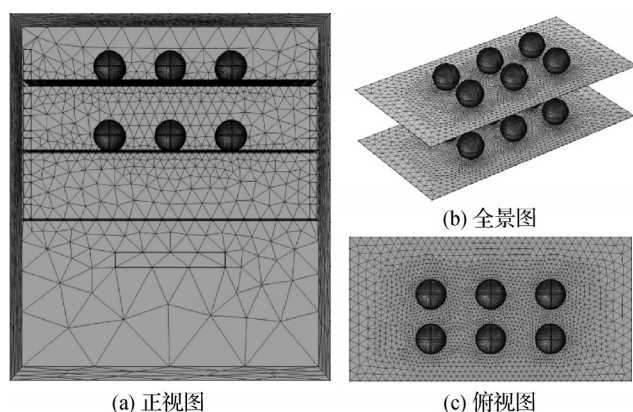


图 4 物理模型网格划分

Fig.4 Physical model meshing

2 结果与分析

2.1 冷藏室内部流场分布变化规律

图 5 所示为冷藏室内温度场与湿度场的空间分布特征及其动态演变规律。为系统研究冷藏室内环境参数的变化特性,选取了通过蜜桃几何中心的 3 个代表性横切面进行分析。由实验数据可得,600 min 时温度有轻微波动,为观测是否影响最终结果,选取至 800 min 温度稳定时刻作为最终结束时间。结果显示,冷藏过程可划分为 3 个典型阶段:在初始快速降温阶段(0~100 min),蜜桃温度急剧下降,湿度场发生剧烈波动;进入过渡阶段(100~200 min),温湿度变化速率显著减缓;至后期稳定阶段(200~800 min),温度分布趋于稳定,冷藏室整体温度与湿度的均匀性随时间推移得到显著提升。空间分布分析表明,靠近送风口区域的蜜桃(两侧)冷却速率显著高于中心区域,这主要归因于其更接近冷源(送风口)的几何位置。冷空气自送风口向门体侧流动过程中,受冷热空气密度梯度力驱动,产生下沉运动,而热空气自然上浮。这种自然对流效应致使第二层蜜桃的降温速率高于第一层,符合实际工况。

2.2 引入内热源-修正密度对蜜桃温度的影响

在以往经验中,呼吸热和蒸发潜热通常较小而被忽略,同样冷藏过程中密度变化也较小,但为了使模型尽可能接近实际值,需要引入呼吸热和蒸发潜热,同时考虑密度变化。

以一层和二层的 1、3 号蜜桃为例,呈现了冷藏室内不同区域贮藏蜜桃引入内热源-修正密度和无内热源-固定密度的模拟温度与实测温度的对比,如图 6 所示。由图 6 可知,实验温度与仿真温度的整体变化趋势具有一致性,在贮藏初期(0~200 min),模拟温

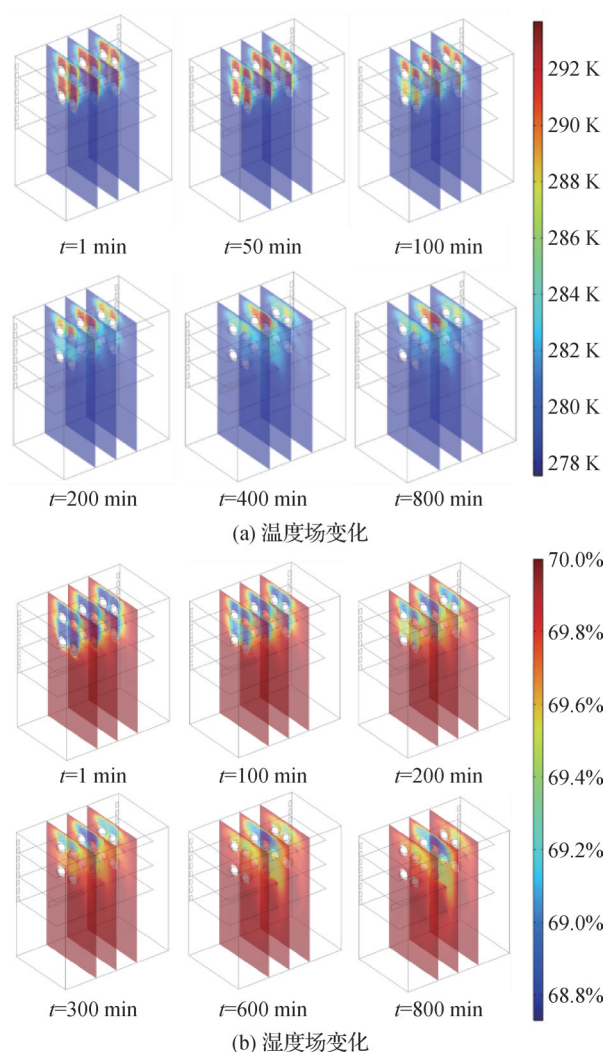


图 5 冷藏室内流场变化分布云图

Fig.5 Distribution map of flow field variations in the refrigeration chamber

度降幅相较于实测温度降温更为显著;在贮藏中期(200~400 min),模拟与实测温度的差距减小;在贮藏后期(400~650 min),蜜桃的模拟温度趋于稳定,而实测值出现小幅度波动,波动不超过 0.5 °C,这与冰箱内的实际温湿度处于波动状态有关;在贮藏末期(650~800 min),模拟与实测温度最终都趋于稳定。其中,引入内热源-修正密度的模型要比未修正的模型更接近实测值,但仿真结果与实验结果之间仍存在偏差。结果表明,引入内热源-修正密度的模型预测能力有一定的优化,但不能精准预测。

2.3 修改动力黏度系数对蜜桃温度的影响

以一、二层内 1 号与 3 号蜜桃样本为例,在引入内热源和密度修正模型的基础上,通过修改动力黏度系数对传热传质模型进行优化,结果如图 7 所示。在模型修改过程中,通过数次模拟后发现,动力黏度系数 β 满足下式:

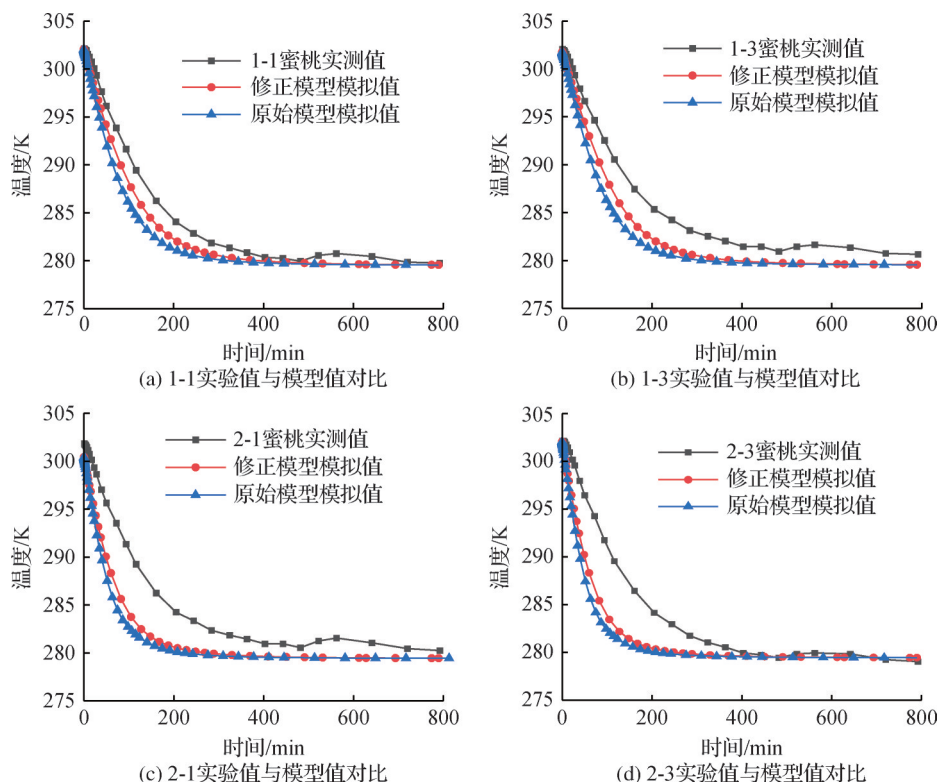


图6 修正密度与实验值对比分析

Fig.6 Comparative analysis of corrected density and experimental values

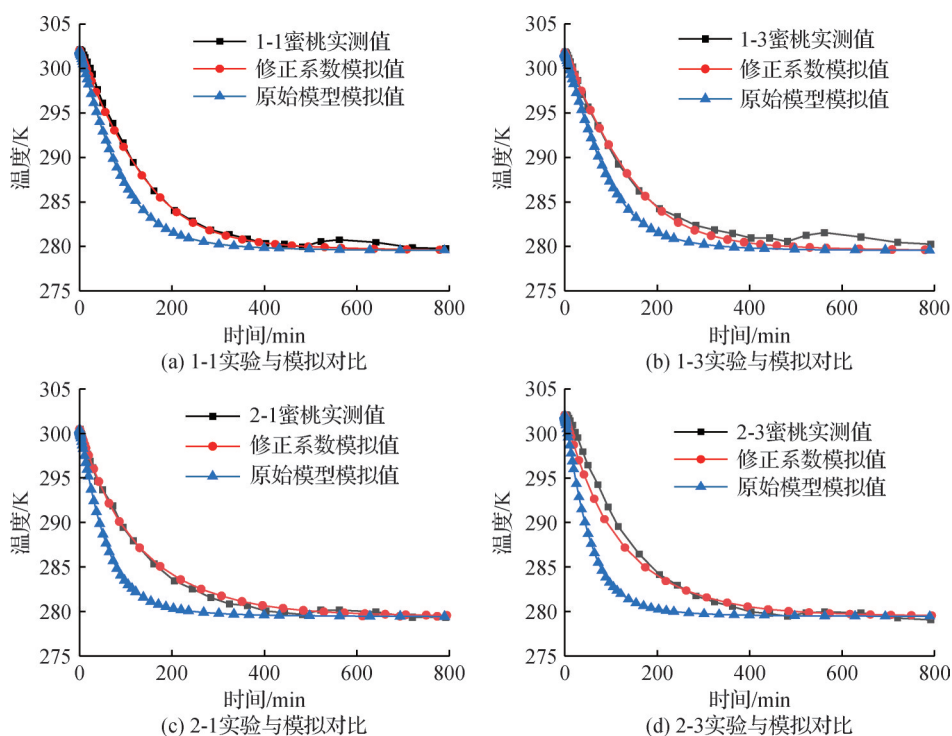


图7 改进后模型与实验值对比分析

Fig.7 Comparative analysis of corrected model and experimental values

$$\beta = 0.6N + 1 \quad (12)$$

式中: N 为层数,由上至下依次为1、2、3。

将一层蜜桃的动力黏度系数 β 调整为1.6,二层调整为2.2时,模拟值与实验值趋于一致。该情况可

能是实际冷藏过程中,温度不一致且湿空气中的水蒸气有一部分自然下沉,导致二层的动力黏度系数比一层要高。此外,仿真结果是在一系列理想化假设条件下计算得出,而实际实验过程中不可避免地

会受到多种外部因素的干扰,例如风冷冰箱与外界环境之间的热交换等,导致实验结果与仿真结果之间也存在一些微小的偏差。

由图7与图6的对比可知,动力黏度系数是影响蜜桃冷藏温度模拟准确性的关键因素之一。调整动力黏度系数的模型结果显著优于改进前模型,表明建立的传热传质模型仍能够较为准确地反映蜜桃在冷藏过程中的温度变化,为进一步探究球形水果贮藏过程中的热质传递过程分析提供了参考。

2.4 误差分析

对蜜桃传热传质模型在第一层和第二层进行了误差分析,分别如下表2和表3所示,对比了引入内热源-修正密度-修改动力黏度系数后的模型和未改进模型的预测性能。MAE越小,表明模拟值与实际值之间的偏差越小,预测准确性越高。分析结果显示,对于第一层和第二层蜜桃,未修改模型的MAE分布在1.74~2.98 K。相比之下,引入内部热源-修正密度-调整动力黏度系数后的模型展现出显著提高的预测精度,该模型的MAE明显下降,整体至少降低了约2 K右,其范围收窄为0.22~0.76 K。

结果表明,在模拟蜜桃在冰箱中的传热传质过程时,引入内热源-修正密度-修改动力黏度系数后的模型能够改进模型预测精度,使模型更精确地反映蜜桃的温度变化,为优化冰箱内气流组织和温湿度控制策略提供依据。

表2 第一层蜜桃模型与实验数据误差分析

Tab.2 Analysis of errors between the first layer of the peach model and experimental data

编号	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
改进模型	0.35	0.46	0.62	0.76	0.72	0.69
原始模型	1.98	1.93	1.82	1.74	1.77	2.25

表3 第二层蜜桃模型与实验数据误差分析

Tab.3 Analysis of errors between the second layer peach model and experimental data

编号	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6
改进模型	0.22	0.64	0.62	0.47	0.67	0.53
原始模型	2.10	2.14	2.98	2.31	2.95	2.68

3 结论

本研究建立了风冷冰箱冷藏室内蜜桃贮藏的热质传递CFD模型,在传统模型基础上,将呼吸热和蒸发潜热作为核心参数引入计算域,并对既有数学模型进行了改进与优化,得到如下结论:

1)在既有模型基础上,引入呼吸热和蒸发潜热,并修改密度变化量,初步改善了模型对温度场的模拟能力,但仍存在一定偏差。

2)对上述模型进一步优化,改进动力黏度系数,与未改进的模型相比,改进后的模型准确度大幅提高,表明动力黏度是影响传热传质过程模拟准确性的关键参数之一。改进后的模型能够更精确地反映蜜桃在非均匀流场中的冷却行为,为冰箱内球形水果冷藏过程的气流组织与温湿度控制策略的优化提供了理论依据。

3)误差分析表明,经多参数修正后的模型的MAE均显著降低,由原始模型的1.74~2.98 K降至0.22~0.76 K。验证了模型在模拟蜜桃冷藏过程中温度变化的可靠性与准确性。虽然仍存在因理想化假设及外部环境干扰所致的微小误差,但模型整体表现出良好的工程适用性与预测一致性。

本文受天津市自然科学基金面上项目(24JCYBJC00720)和津甘双地科技特派员项目(24CXNA079)资助。(The project was supported by the Tianjin Natural Science Foundation General Project (No. 24JCYBJC00720) and the Jingan Dual Location Science and Technology Special Commissioner Project (No. 24CXNA079).)

参考文献

- [1] Yang Yikun, Huang Dong, Zhao Rijong, et al. Analysis of temperature rapid rise phenomenon during damper-off cycle in side-by-side frost-free refrigerator [J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 133: 201-213.
- [2] Laguerre O, Benamara S, Flick D. Numerical simulation of simultaneous heat and moisture transfer in a domestic refrigerator [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(7): 1425-1433.
- [3] Alfaro-ayala J A, Uribe-ramírez A R, Minchaca-mojica J I, et al. Numerical prediction of the unsteady temperature distribution in a cooling cabinet [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 73: 235-245.
- [4] Lacerda V T, Melo C, Barbosa J R, et al. Measurements of the air flow field in the freezer compartment of a top-mount no-frost refrigerator: the effect of temperature [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28 (5): 774-783.
- [5] Shu Shengwen, Zhan Zhaoxuan, Xu Junwei, et al. Three-dimensional numerical simulation and experiment of moisture condensation mechanism inside high voltage switchgear [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 151: 109129.

- [6] Liu Fang, Jia Binguang, Li Zichun, et al. Thermodynamics analysis for forced air pre-cooling of cherry[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(11): e13881.
- [7] Han Jiawei, Badía-melis R, Yang Xinting, et al. CFD simulation of airflow and heat transfer during forced-air precooling of apples [J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(2): e12390.
- [8] Chen Yingmin, Song Haiyan, Chen Zhenshi, et al. Sensitivity analysis of heat and mass transfer characteristics during forced-air cooling process of peaches on different air-inflow velocities[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(12): 6592–6602.
- [9] Nalbandi H, Seiedlou S. Exploration of heat and momentum transfer in turbulent mode during the precooling process of fruit[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(8): 4098–4111.
- [10] Nalbandi H, Seiedlou S. Sensitivity analysis of the precooling process of strawberry: effect of package designing parameters and the moisture loss [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(5): 2458–2471.
- [11] 刘泽勤, 徐静, 高行恭, 等. 送风高度对果蔬冷藏库内热环境的数值模拟研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(12): 72–77. (Liu Zeqin, Xu Jing, Gao Xingong, et al. Numerical simulation of air supply modes on temperature and humidity fields in fruit and vegetable cold storage[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(12): 72–77.)
- [12] Tagliavini G, Defraeye T, Carmeliet J. Multiphysics modeling of convective cooling of non-spherical, multi-material fruit to unveil its quality evolution throughout the cold chain [J]. Food and Bioproducts Processing, 2019, 117: 310–320.
- [13] 王静, 苗利军. 大久保桃冷藏条件的研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(6): 1321–1323. (Wang Jing, Miao Lijun. Preservation of amygdalus persica cv. okubao by refrigeration [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(6): 1321–1323.)
- [14] 王贵禧, 王友升, 梁丽松. 不同贮藏温度模式下大久保桃果实冷害及其品质劣变研究[J]. 林业科学研究, 2005, 18(2): 114–119. (Wang Guixi, Wang Yousheng, Liang Lisong. Studies on chilling injury and quality deterioration of 'okubao' peach under different storage temperature strategies [J]. Forest Research, 2005, 18(2): 114–119.)
- [15] 湛英敏. 采后蜜桃传热传质及预冷效果模型构建研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2021. (Chen Yingmin. Study on the model construction of heat and mass transfer and precooling effect of postharvest peaches [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2021.)

通信作者简介

陈爱强, 男, 副教授, 天津商业大学机械工程学院, 13652177159, E-mail: chenaiqiang@tjcu.edu.cn。研究方向: 制冷系统优化, 食品冷冻冷藏工艺。

About the corresponding author

Chen Aiqiang, male, associate professor, School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, 86–13652177159, E-mail: chenaiqiang@tjcu.edu.cn. Research fields: optimization of refrigeration systems, freezing and refrigeration processes in food.