

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.06.024

甄琦, 马林欢, 塔娜, 等. 箱内马铃薯码放形式对贮藏效果影响的数值模拟研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(6): 203-210.

ZHEN Q, MA L H, TA N, et al. The study of numerical simulation on the effect of potato stacking forms in packaging boxes on storage efficiency[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(6): 203-210.

箱内马铃薯码放形式对贮藏效果影响的数值模拟研究

甄琦^{1,2}, 马林欢¹, 塔娜^{1,2}✉, 闫彩霞^{1,2}, 孙云峰^{1,2}, 许超²

(1. 内蒙古农业大学 能源与交通工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古农业大学 机电工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 随着马铃薯逐步使用包装箱进行贮藏, 为研究其在包装箱内不同摆放方式下对贮藏效果产生的影响, 采用直接计算流体力学数值方法对模型进行模拟计算。通过对比分析各种码放形式下的气流速度和温度分布均匀性情况, 对贮藏效果的影响进行了分析, 得出了最佳的码放方式。结果表明, 包装箱内中间层气流速度较高, 马铃薯的温度相对较低; 其他平面的气流速度较低, 马铃薯的温度高于中间层的温度且分布较均匀。在通风 300 min 后, 包装箱内马铃薯的温度均降低为 3~5 °C, 符合预期要求, 具有较好的通风效果。针对不同码放形式, 错位间隔排列时上下两平面气流速度的最大值与最小值之比为 2.5, 温度的最大值与最小值相差 0.2 °C; 中间平面气流速度最大值与最小值之比为 4.8、相差约 2.85 m/s, 且箱内气流速度均匀, 降温效果较好。对于箱装马铃薯的贮藏, 应当优先选择错位间隔排列码放方式, 以得到较好的贮藏效果。

关键词: 马铃薯; 包装箱; 数值模拟; 码放形式; 贮藏效果; 计算流体力学**中图分类号:** S379.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2024)06-0203-08**网络首发时间:** 2024-11-07 14:16:49**网络首发地址:** <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20241107.1134.012>

The Study of Numerical Simulation on the Effect of Potato Stacking Forms in Packaging Boxes on Storage Efficiency

ZHEN Qi^{1,2}, MA Lin-huan¹, TA Na^{1,2}✉, YAN Cai-xia^{1,2}, SUN Yun-feng^{1,2}, XV Chao²

(1. College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering,

Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

收稿日期: 2024-04-13**基金项目:** 内蒙古自然科学基金面上项目 (2022MS03040); 内蒙古自然科学基金青年项目 (2024QN03058); 内蒙古自治区高校基本科研业务费项目 (BR22-14-03)**Supported by:** General Program of Natural Science Foundation of Inner Mongolia (No. 2022MS03040); Youth Program of Natural Science Foundation of Inner Mongolia (No. 2024QN03058); Basic Research Funding for Higher Education Institutions of Inner Mongolia (No. BR22-14-03)**第一作者:** 甄琦, 男, 1989 年出生, 在读博士生, 实验师, 研究方向为农业机械化、生物环境调控与设施系统, E-mail: zhenqi17@imau.edu.cn**通信作者:** 塔娜, 女, 1967 年出生, 博士, 教授, 研究方向为农业机械化、农业生物系统工程, E-mail: jdtana@163.com

Abstract: With the gradual use of packaging boxes for potato storage, the influence of different stacking methods on the storage effect of potatoes was studied. This study used direct computational fluid dynamics numerical methods to simulate the models of potatoes in packaging boxes under different stacking forms. By comparing and analyzing the gas velocity and temperature distribution uniformity in various stacking forms, the impact on the storage effect was analyzed, and the optimal stacking method was determined. The results showed that the gas velocity in the intermediate layer of the packaging box was relatively high, resulting in a lower temperature of the potatoes. The gas velocity in the other planes was lower, and the temperature of the potatoes was higher than that in the intermediate layer but with a more uniform distribution. After 300 minutes of ventilation, the temperature of the potatoes in the packaging box decreased to 3~5 °C, meeting the expected requirements and demonstrating good ventilation effects. For different stacking patterns, when arranged in a staggered pattern, the maximum gas flow velocity on the upper and lower planes was 2.5 times the minimum value, and the maximum temperature difference was 0.2 °C. On the middle plane, the maximum gas flow velocity was 4.8 times the minimum value, with a difference of about 2.85 m/s, and the gas flow velocity inside the bin was uniform, with a good cooling effect. For the storage of boxed potatoes, the staggered arrangement stacking method should be prioritized to achieve better storage results.

Key words: potato; boxes; numerical simulation; stacking form; storage effect; CFD

气调贮藏是目前较为有效地提升果蔬贮藏品质的方法之一^[1], 与传统土窖贮藏相比能够显著减少因冷害和生理病害引起的果实损失, 提高经济效益。通过调节贮藏过程中的温度、湿度及气体环境^[2], 气调贮藏能够抑制果蔬的呼吸作用并延迟代谢活动, 在长时间的滞后效应中保证果蔬的新鲜度及品质安全^[3-4]。马铃薯作为一种粮菜兼用作物, 在中国的粮食系统中一直占有重要位置^[5-6]。随着马铃薯逐步采用通风箱体包装, 其在箱内的码放形式对于气流的分布会造成影响。因此, 通过优化码放形式提高马铃薯的贮藏效果变得越来越重要^[7]。

目前, 研究人员利用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)数值技术来对贮藏系统中果蔬通风包装的气流和环境温度分布特性进行研究, 并通过相关实验证明了 CFD 数值模拟的准确性和可行性^[8-9], 通过模拟包装箱内部的气流、压降和传热传质现象, 得到包装系统中空气流动和温度分布的详细信息^[10]。因此, 采用 CFD 数值方法能够对果蔬在包装箱内部的气流和传热传质研究提供参考性价值。

Delete 等^[11]结合实验验证了 CFD 仿真包装系统的可行性, 并分析了该包装系统的气流和传热

特性。Han 等^[12]对传统双层瓦楞包装箱进行了优化设计, 并且研究了不同进气速度对苹果强制对流冷却过程中温度分布的影响。Gruyters 等^[13]通过 CFD 建模与 CT 扫描构建果蔬的三维模型, 探索不同果实品种在纸箱中冷却特性的差异。Wang 等^[14]对两种不同包装内气流分布和传热进行了研究。Chen 等^[15]建立多层桃子包装纸箱的三维 CFD 数值模型, 来研究单个纸箱内部的气动和强制对流冷却过程。Amit 等^[16]对果蔬强制空气冷却的 CFD 建模进行了全面综述。王喜芳等^[17]通过建立包含箱体和果品的三维模型, 研究箱内的温度和速度分布, 证明了同一层果品的温度分布与气流速度分布的高度相关。宫亚芳等^[18]对双层苹果瓦楞纸箱的预冷过程进行了相关研究, 得出适当增大衬垫与箱壁间的距离可以缩短冷却的时间, 提高预冷的均匀性的结论。目前, 针对马铃薯贮藏环境温湿度分布的研究, 多数将马铃薯整体虚拟为多孔介质^[19], 未见通过直接建模法构建马铃薯真实外形, 对其在包装箱内不同的码放形式引起的传热传质变化的相关研究。谌英敏^[20]和朱文颖^[21]分别针对不同果蔬采用直接建模法研究贮藏环境下的传热和气流运动行为, 验证了该方法的准确性和合理性。

故本文通过直接 CFD 建模法构建马铃薯几何外形, 建立单箱马铃薯气调贮藏的数值模型, 研究不同码放方式对箱内流场及温度场的分布, 并提出对码放形式的优化方案, 以期马铃薯箱体气调贮藏的优化设计提供新思路。

1 物理模型构建

1.1 马铃薯三维模型构建

选取一定数量产自内蒙古和林格尔县的铃田红美马铃薯, 依据文献[22]采用的边界样条曲线数据的采集与统计方法, 获得马铃薯的纵剖面数据如图 1 所示; 根据所获取的纵向剖面数据, 基于曲面造型理论构建马铃薯纵向截面样条曲线如图 2 所示。



图 1 马铃薯纵剖面数据

Fig.1 Potato longitudinal profile data

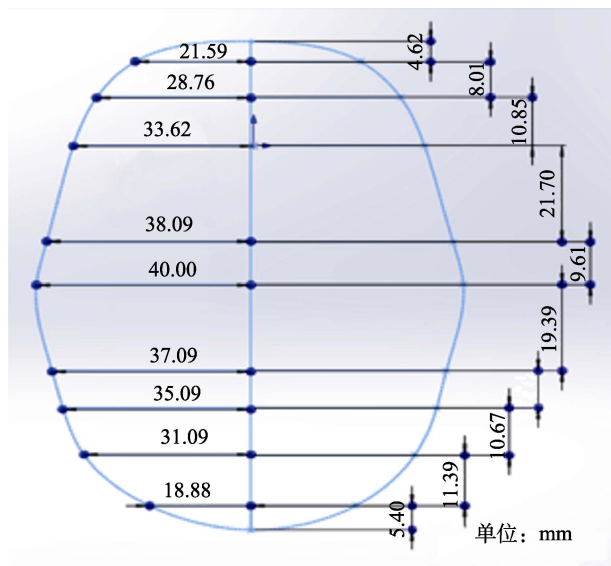


图 2 纵向截面样条曲线

Fig.2 Longitudinal section spline curve

对特殊点进行光滑处理, 并通过旋转光滑样条曲线得到马铃薯模型, 建立的马铃薯实体模型和实际马铃薯对比如图 3 所示。

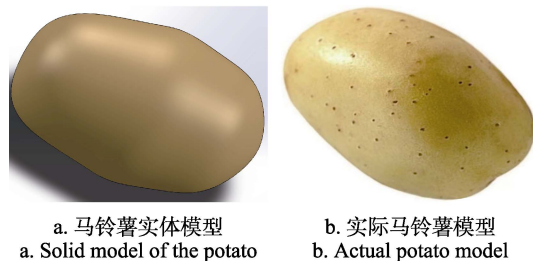


图 3 马铃薯实体模型与实际模型对比

Fig.3 Comparison of potato solid model and actual model

1.2 包装箱模型构建

本文以目前市场上常用的瓦楞纸箱为研究对象, 建立如图 4 所示的包装箱模型 (500 mm×290 mm×270 mm), 壁面厚度为 6 mm。箱内衬垫尺寸为 450 mm×250 mm×3 mm。通风孔设置在包装箱的迎风侧和背风侧, 通风孔直径为 20 mm, 孔心位置如图 5 所示。

包装箱内马铃薯排为三排, 共有三种码放方式, 分别为: A (错位间隔排列)、B (间隔排列) 和 C (平方间隔排列), 以不同码放形式排列箱内马铃薯的数量分别为 36、33、36 个。模型及箱内马铃薯码放形式如图 6 所示。在建模过程中, 马

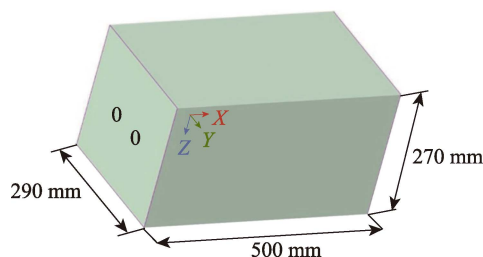


图 4 包装箱模型

Fig.4 Packing box model

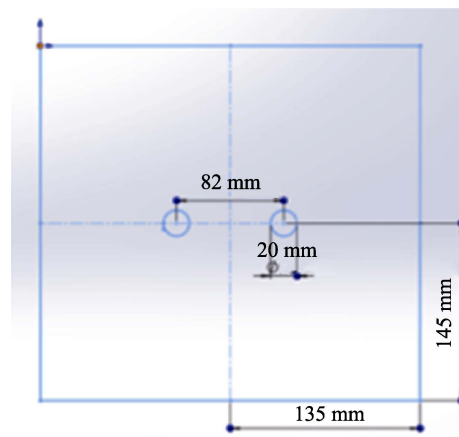


图 5 通风孔孔心位置

Fig.5 Ventilation hole core position

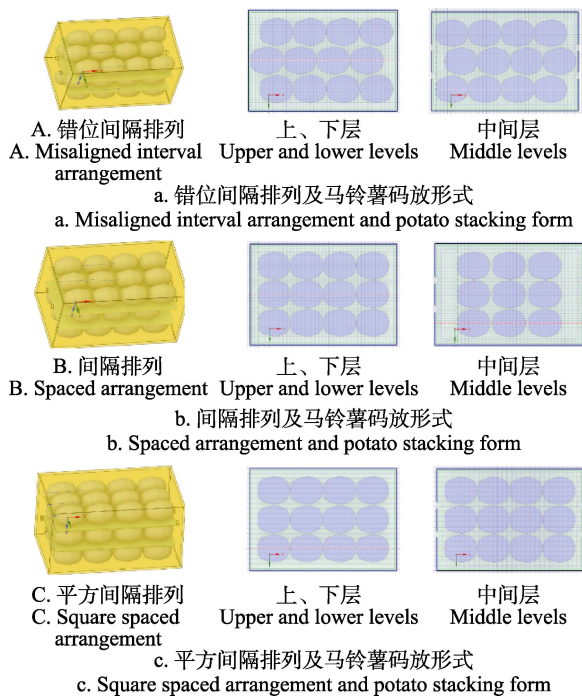
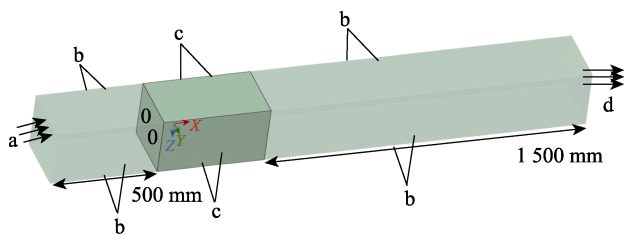


图 6 马铃薯三种码放形式
Fig.6 Three types of potato yarding

铃薯之间及马铃薯与箱体和衬垫之间存在微小空隙。

为了避免进气口和出气口边界对箱体附近气流的影响,也为了便于在仿真时设置边界条件,本文通过增设计算域,即在迎风侧添加 500 mm 的入口段,在背风侧添加 1 500 mm 的出口段,空气的流动方向为 X 方向,重力方向为 Z 方向^[5]。如图 7 所示为所建立的计算域的物理模型,以及相关边界条件的设置。



注: a. 速度入口; b. 对称边界; c. 绝热边界; d. 压力出口。
Note: a. Velocity inlet b. Symmetry boundary c. Adiabatic boundary d. Pressure outlet.

图 7 计算域物理模型及边界条件设置
Fig.7 Calculation domain physical model and boundary condition setting

2 数学模型

2.1 控制方程

基于以上假设,建立计算模型的连续性方程、

动量方程、能量方程^[23],以及马铃薯的呼吸热方程^[24],采用 SST k- ω 湍流模型。

(1) 假设粘性 μ 为常数的不可压缩流体,密度恒定,则满足的连续性方程、动量方程、能量方程分别为

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

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + (\rho U U) = -P + (\mu U) + S_U \quad \text{式 (2)}$$

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} + (\rho C_p U T) = (K T) + S \quad \text{式 (3)}$$

其中, ρ 为空气密度,kg/m³; t 为时间,s; U 为速度矢量,m/s; P 为压力,Pa; μ 为动力粘度,Pa/s; S_U 为广义源项,W/m³; C_p 为定压比热容,kJ/(kg·K); T 为温度,K; K 为热扩散率,m²/s; S 为能量源项,W/m³;

(2) 马铃薯呼吸热方程

$$Q_r = \frac{2822}{6 \times 22.4 \times 10^3} * \frac{R_{O_2} + R_{CO_2}}{2} * \eta \quad \text{式 (4)}$$

其中, Q_r 为呼吸热,kJ/(kg·h); R_{O_2} 为氧气的浓度,Pa; R_{CO_2} 为二氧化碳的浓度,Pa; η 为调整系数。

在构建数学模型的过程中做以下简化假设:

(1) 空气为不可压缩流体;(2) 箱内各个马铃薯的体积、质量和大小均完全相同,将其呼吸热等效为固定内热源^[25];(3) 所有物质的热物性参数恒定,具体参数设置如表 1 所示;(4) 忽略马铃薯之间及马铃薯与衬垫和箱体之间的辐射传热;(5) 包装箱外壁面为无滑移的绝热壁面条件^[26]。

表 1 热物性参数

Table 1 Parameters of thermal-physical properties

名称	密度/ (kg/m ³)	比热容/ (J/kg·K)	导热系数/ (W/m·K)	动力粘度/ (kg/m·s)
马铃薯	1 100	1 420	0.564 7	—
空气	1.288	1 004.8	0.024	1.728×10 ⁻⁵
瓦楞箱	220	1 700	0.05	—
衬垫	260	1 700	0.05	—
内热源	7 790	450	43.5	—

2.2 初始条件及边界条件

初始条件:当 $\tau=0$ 时,包装箱、马铃薯及衬垫的初始温度设置为 15℃。

边界条件:

(1) 在迎风侧施加了均匀的低湍流强度 (0.05%) 的速度入口边界条件^[8], 进风速度为 0.02 m/s, 温度为 3 °C; 在背风侧为压力出口边界条件, 温度为 3 °C。采用添加固定内热源的方式来代替马铃薯在贮藏过程中所产生的呼吸热。

(2) 将包装箱外壁面设置为绝热壁面边界条件, 壁面与空气之间的热通量为零。

(3) 将计算域入口段和出口段的侧面设置为对称边界; 包装箱内壁面、马铃薯与空气接触面、衬垫与空气接触面设置为耦合边界。

3 数值求解方案

3.1 网格划分

在网格划分时需平衡好网格数量和计算速度的关系。根据文献[8]、[18]并考虑现有的网格划分技术, 网格数量应控制在百万量级, 分别为 1 740 860、1 709 304、1 754 597, 面网格的最小尺寸为 1 mm, 最大尺寸为 50 mm。网格质量基本都接近于 1 且所画网格斜度均在 0.09 以下, 可以认为网格划分质量很好。

3.2 数值模拟方法

根据文献[18], 为减少计算资源消耗并迅速获取计算域内所有初始温度条件, 先通过仅计算湍

流与动量方程的稳态模拟, 获得气流分布的稳态解, 并以此为初始条件, 求解非稳态能量方程, 获得瞬态的温度分布。基于时间敏感性分析, 瞬态模拟现实包装箱内通风 300 min 的温度分布与气流分布, 时间步长设为 30 s, 每个时间步长迭代 20 步。采用 SIMPLIE 算法并使用二阶迎风格式离散对流项, 除能量方程的残差标准为 10^{-6} , 其他方程的残差标准为 10^{-4} 。

4 结果与分析

包装箱内马铃薯的码放形式会影响气流的通道和温度的分布, 从而影响马铃薯的贮藏效果。通过采用相同初始和边界条件, 对包装箱内马铃薯的三种码放形式分别进行风速场和温度场分布的对比分析, 得出最佳的码放方式。

4.1 包装箱内的气流速度均匀性分析

箱内风速分布的均匀性会对马铃薯的贮藏效果产生影响。本实验选取三个典型水平面 (H1、H2、H3 平面) 及两个典型垂直面 (V1、V2 平面) 来分析不同码放形式下包装箱内气流的分布, 以便于得出最佳的码放方式。如图 8 所示为马铃薯在不同码放形式下风速分布云图。竖直平面由于衬垫的阻挡, 影响了气流的分布, 使得竖直平面的气流速度较小, 相较于水平面的气流速度分布更均匀。

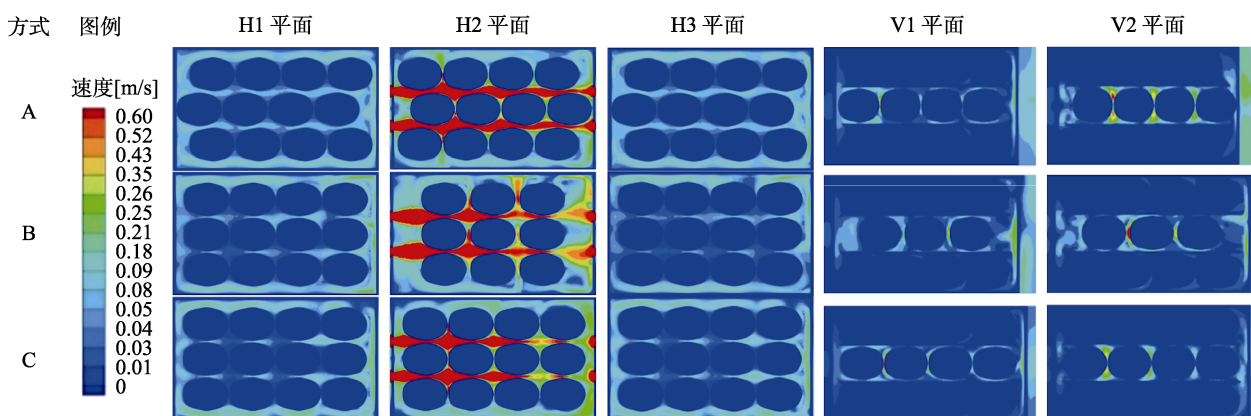


图 8 通风 300 min 典型水平面风速分布云图

Fig.8 Ventilation 300 min typical plane temperature and wind speed distribution cloud map

根据图 8, 在相同通风时间内, 间隔排列中间层由于具有较大的间隙, 故通风效果很好, 因此使得气流速度的最大值与最小值的差值很大; 上下层由于中间层所留的空隙较大, 使得空气的

流通间隙增大, 带动上下层的空气流速也加大, 但由于微小间隙的影响, 阻挡了气流的流动, 因此使得速度分布不均。错位间隔排列中间层由于错位排列使得马铃薯之间的空隙增大, 进而使空

气的流通间隙变大,使气流分布较广且较均匀;上下层之间由于部分马铃薯的排列,阻挡了空气流动,因而气流速度较低。

平方间隔排列由于排列均匀,马铃薯彼此之间的微小间隙阻挡了空气的流通,使风速变大但分布略为不均;上下层间的气流通过衬垫与包装箱之间的空隙而流通,由于流通空间减小和马铃薯彼此之间的阻挡作用,使得气流的分布受到了

阻挡,因而风速较低且相对较均匀。

如图 9 所示为 H1、H2、H3 平面上气流速度在 X 方向不同位置的大小分布。在 H1、H3 平面,箱内气流速度随着 X 方向距离的增大呈现先减小后增大的锯齿形变化,在通风孔出口处的速度大小要比入口处的速度大;在 H2 平面,三种码放形式下箱内的气流速度随着 X 方向距离的增大,整体以先减后增的锯齿形在逐渐变小。

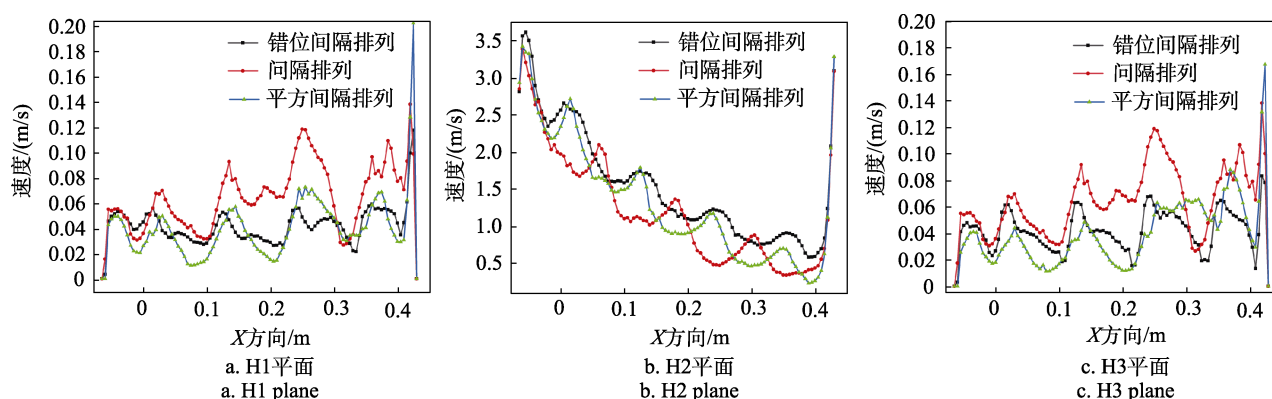


图 9 不同水平面气流速度在 X 方向不同位置的大小分布

Fig.9 Distribution of airflow velocity at different positions in the X-direction at different levels

间隔排列方式的箱内气流速度大小变化较大,其速度的最大值与最小值的差值最大,且大小变化剧烈,H1、H3 平面气流速度最大值是最小值的 6 倍、相差约 0.1 m/s,H2 平面最大值是最小值的 8.5 倍、相差约 3.1 m/s;其次,速度变化较大的是平方间隔排列,与间隔排列方式相比,其气流速度变化相对较均匀,H1、H3 平面气流速度最大值是最小值的 4 倍、相差约 0.06 m/s,H2 平面最大值是最小值的 6 倍、相差约 3 m/s;错位间隔排列方式的箱内气流速度幅值变化较小,且其速度变化曲线相对较平缓,H1、H3 平面气流速度最大值与最小值之比为 2.5、相差约 0.03 m/s,H2 平面最大值与最小值之比为 4.8、相差约 2.85 m/s,故气流速度相对较均匀。

因此,就三种码放形式下的箱内气体流速而言:错位间隔排列方式下的箱内流速变化平缓,差值最小,速度分布最均匀,比较适合马铃薯的贮藏,以便于箱内气流速度的均布。

4.2 包装箱内的温度均匀性分析

马铃薯在贮藏期间与温度的关系至为密切,

箱内气流场温度的均匀性是影响马铃薯贮藏质量的主要因素,以如图 10 所示的典型水平面温度分布云图来分析不同码放形式下包装箱内温度场的分布,以便于得出最佳的码放方式。

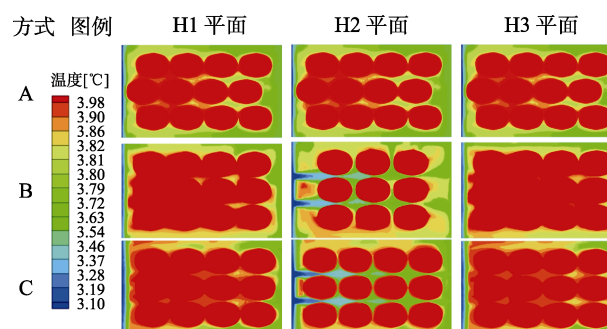


图 10 通风 300 min 典型水平面温度分布云图

Fig.10 Ventilation 300 min typical plane temperature distribution cloud map

图 10 可以看出,所有码放形式下的马铃薯的温度均在 3~5 °C 范围内,具有较好的通风效果。当空气进入包装箱后,通风孔位置处的气流速度较高,且中间层 H2 平面的有效送风量比较足,具有较好的通风和散热效果,因此冷空气的冷量与马铃薯所产生的呼吸热基本抵消;其他平面的

马铃薯温度较 H2 平面高。

为了更准确地分析箱内气流的分布, 本文将定量分析三个水平面上的温度分布情况, 图 11 给出了 H1、H2、H3 平面上温度在 X 方向不同位置的大小分布。包装箱内马铃薯的温度分布与箱内气流速度的分布密切相关, 由图 11 可以看出, 间隔排列方式由于气流速度变化较大, 因此在该排列方式下箱内的温度变化也较大, 温度最大值与最小值的差值较大, 且曲线变化剧烈, H1、H3 平面温度最大值与最小值相差 0.3 °C, H2 平面温

度最大值与最小值相差 0.7 °C。

平方间隔排列方式下的箱内温度分布相对较均匀, H1、H3 平面温度最大值与最小值相差 0.3 °C, H2 平面温度最大值与最小值相差 0.6 °C。错位间隔排列形式下的气流速度分布均匀, 其温度分布也均匀, H1、H3 平面温度最大值与最小值相差 0.2 °C, H2 平面温度最大值与最小值相差 0.6 °C。对比三种码放方式, 间隔排列方式温度变化最剧烈, 差值最大, 最不均匀; 而错位间隔排列方式下的箱内温度变化平缓, 差值最小, 温度分布最均匀。

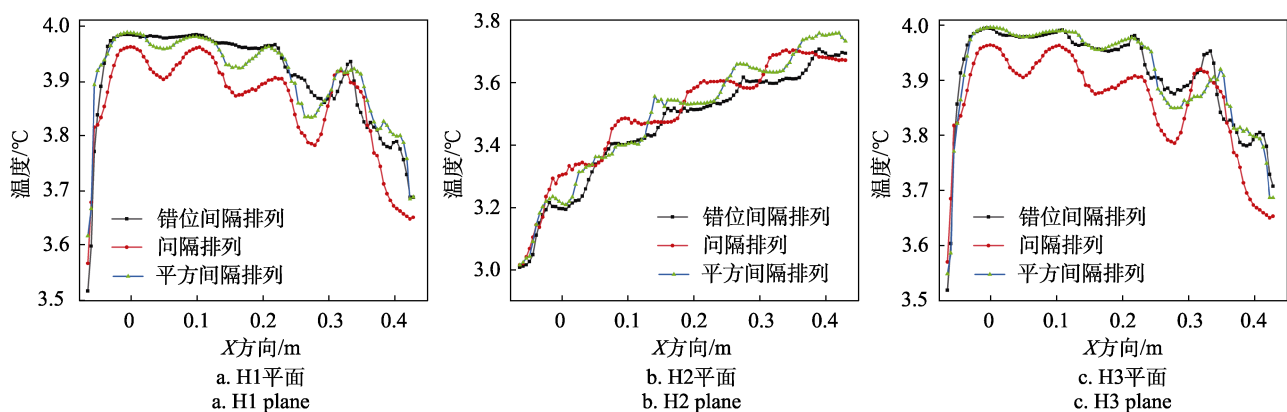


图 11 不同水平面上温度在 X 方向不同位置的大小分布

Fig.11 Size distribution of temperature on different horizontal planes at different locations in the x-direction

5 结论

在考虑马铃薯呼吸热的基础上, 应用曲面造型法构建马铃薯实体模型并根据直接 CFD 建模法构建包装箱内马铃薯数值模型, 用于研究包装箱内马铃薯不同的码放形式对贮藏特性的影响, 得出以下结论:

包装箱内马铃薯的码放形式会影响箱内气流的通道, 进而影响流场和温度场的分布; 在通风 300 min 后, 包装箱内所有马铃薯的温度均降低为 3~5 °C, 说明该包装箱具有较好的通风效果; 马铃薯在错位间隔排列时, H1、H3 平面气流速度最大值与最小值之比为 2.5、相差约 0.03 m/s, 温度最大值与最小值相差 0.2 °C; H2 平面气流速度最大值与最小值之比为 4.8、相差约 2.85 m/s, 温度最大值与最小值相差 0.6 °C。其箱内气流速度均布, 且具有较好的温度分布, 降温效果较好。因此, 在对使用包装箱进行马铃薯贮藏时, 应优先错位间隔排列方式, 以获得最佳的贮藏效果。

参考文献:

- [1] 田甲春, 张洁, 葛霞, 等. 气调贮藏对马铃薯保鲜效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(8): 1-7.
TIAN J, ZHANG J, GE X, et al. Effect of controlled atmosphere storage on potato storage[J]. Storage and Process, 2022, 22(8): 1-7.
- [2] 梁乃锋, 李萌, 陈意, 等. 荔枝物流保鲜的主要领域、技术应用及展望[J]. 物流工程与管理, 2024, 46(1): 45-47.
LIANG N, LI M, CHEN Y, et al. The main fields, technical applications and prospects of lychee logistics preservation[J]. Logistics Engineering and Management, 2024, 46(1): 45-47.
- [3] 赵海云, 邵林, 李涛, 等. 鲜切果蔬保鲜技术的研究进展[J]. 农产品加工, 2023, (10): 81-90.
ZHAO H, SHAO L, LI T, et al. Research progress of fresh-cut fruits and vegetables preservation technology[J]. Farm Products Processing, 2023, (10): 81-90.
- [4] 石钰琢, 杨松, 黄栋, 等. 鲜切果蔬物理保鲜技术研究进展[J]. 食品科技, 2023, 48(7): 37-42.
SHI Y, YANG S, HUANG D, et al. Advances on physical preservation technology of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(7): 37-42.
- [5] ZHANG H, XU F, WU Y, et al. Progress of potato staple food research and industry development in China[J]. Journal of

- Integrative Agriculture, 2017, 16(12): 2924-2932.
- [6] MYRICK S, PRADEL W, LI C, et al. The curious case of C-88: impacts of a potato variety on farmers in Yunnan, China[J]. CABI Agriculture and Bioscience, 2021, 2(1): 1-15.
- [7] 洪登科, 刘清江, 吕德宝. 果箱堆码间距对其码垛区域内气流组织的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2377-2382.
- HONG D, LIU Q, LV D, et al. Effects of the stacking spacing of fruit boxes on air distribution in stacking area[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(6): 2377-2382.
- [8] 韩佳伟. 多层级苹果预冷过程模拟及预冷控制决策优化[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- HAN J. Multi-level numerical simulation and optimal control decisions for the precooling process of apples[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
- [9] 赵春江, 韩佳伟, 杨信廷, 等. 冷链物流研究中的计算流体力学数值模拟技术[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 214-222.
- ZHAO C, HAN J, YANG X, et al. Digital simulation technology of computational fluid dynamics in agricultural cold-chain logistics applications[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 214-222.
- [10] 苏勤, 湛英敏, 柏惠康, 等. 基于计算流体力学的开孔均匀性对番茄预冷性能的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(21): 167-172.
- SU Q, CHEN Y, BAI H, et al. The effect of CFD-based hole uniformity on tomato precooling performance[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(21): 167-172.
- [11] DELELE M, NGCOBO M, GETAHUN S, 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: 536-545.
- [12] HAN J, BADÍA R, YANG X, et al. CFD Simulation of airflow and heat transfer during forced-air precooling of apples[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(2): 12390.1-12390.11.
- [13] GRUYTERS W, LOOVERBOSCH T, WANG Z, et al. Revealing shape variability and cultivar effects on cooling of packaged fruit by combining CT-imaging with explicit CFD modelling[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 162(C): 111098-111098.
- [14] WANG X, LI B, FAN Z. Packaging optimization and integral evaluation of cooling efficiency of apples[J]. Food Science and Technology Research, 2019, 25(5): 677-686.
- [15] CHEN Y, SONG H, CHEN Z, 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.
- [16] AMIT K, RAVI K, SUDHAKAR S. Numerical modeling of forced-air pre-cooling of fruits and vegetables: A review[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 145: 217-232.
- [17] 王喜芳, 李保国, 范中阳. 果品通风包装预冷效果的数值模拟与实验研究[J]. 包装工程, 2019, 40(5): 19-25.
- WANG X, LI B, FAN Z, et al. Numerical simulation and experiment of precooling efficiency inside fruit ventilated package[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(5): 19-25.
- [18] 宫亚芳. 苹果差压预冷过程模拟及包装箱优化[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院大学工程科学学院), 2020.
- GONG Y. A numerical study on the forced-air precooling of apple and the optimization of packaging box[D]. Beijing: School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [19] GRUBBEN N, KEESMAN K. A spatially distributed physical model for dynamic simulation of ventilated agro-material in bulk storage facilities[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2019, 157: 380-391.
- [20] 湛英敏, 赵璐茜, 令狐博祥, 等. 开孔方式对层装蜜桃差压预冷性能的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(3): 150-158.
- CHEN Y, ZHAO L, LINGHU B, et al. effect of vent mode on the differential pressure pre-cooling efficiency of layered peaches[J]. Food Science, 2024, 45(3): 150-158.
- [21] 朱文颖, 史策, 韩帅, 等. 基于 CFD 的苹果隔板包装预冷温度场研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 331-338.
- ZHU W, SHI C, HAN S, et al. Investigation on pre-cooling temperature field in partition packaging based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (1): 331-338.
- [22] 顾丽霞, 王春光, 刘海超, 等. 基于 PeoE5.0 的不规则马铃薯建模仿真研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(12): 32-39.
- GU L, WANG C, LIU H, et al. Simulation analysis on irregular potatoes modeling based on PeoE 5.0[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(12): 32-39.
- [23] 张金斗. 蓄冷包装箱内温度场传热模拟及其对果蔬贮藏品质的影响[D]. 天津: 天津商业大学, 2022.
- ZHANG J. Simulation of temperature field heat transfer in cold storage packaging box and its effect on the storage quality of fruits and vegetables[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2022.
- [24] 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 and Technology, 2016, 120: 23-35.
- [25] 邵士前. 基于呼吸热预测模型的冷藏车制冷控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- SHAO S. Research on intelligent control strategy of refrigerator truck based on predictive model of respiratory heat[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [26] 王亮, 张新宪, 李超, 等. 不同贮藏温度对晋薯 16 号马铃薯采后生理及品质变化的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(5): 34-39.
- WANG L, ZHANG X, LI C, et al. Effects of different storage temperatures on post-harvest physiology and quality of potato 'jinshu 16'[J]. Storage and Process, 2020, 20(5): 34-39. ㊞
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。