

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.037

基于 CFD 的苹果隔板包装预冷温度场研究

朱文颖^{1,2} 史策^{1,2} 韩帅^{1,2} 刘欢^{1,2} 杨信廷^{1,2}

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 2. 农产品质量安全追溯技术及应用国家工程实验室, 北京 100097)

摘要: 温度调控失误和物理损伤是影响采后水果质量损失的关键因素。以单层隔板包装箱和单层普通包装箱为研究对象, 采用计算流体力学(Computer fluent dynamic, CFD)非稳态剪切压力 SST $k-\omega$ 三维湍流模型, 比较相同初始条件和边界条件下, 隔板包装与普通包装内部的温度场分布、风速场分布、冷却时间、冷却速率和冷却均匀性。结果表明: 隔板包装和普通包装的冷却时间和冷却速率基本一致, 冷却温度差值不超过 0.67°C , 冷却速率差值不超过 $0.012^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 隔板包装温度变异系数略大于普通包装温度变异系数, 两种包装具有相同预冷效果, 满足冷链运输过程中的预冷需求。对比模拟结果与实验结果, 两种结果的均方根误差为 1.13°C , 平均相对误差为 8.2% , 证明了模拟结果的合理性和准确性。

关键词: 冷链运输; 隔板包装; 预冷; 计算流体力学; 温度分布

中图分类号: TB48; O368 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)01-0331-08

Investigation on Pre-cooling Temperature Field in Partition Packaging Based on CFD

ZHU Wenyi^{1,2} SHI Ce^{1,2} HAN Shuai^{1,2} LIU Huan^{1,2} YANG Xinting^{1,2}

(1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

2. National Engineering Laboratory for Agri-product Quality Traceability, Beijing 100097, China)

Abstract: Temperature mismanagement and physical damage are considered as the most common causes for postharvest losses of fresh fruit. The partition packaging and common packaging without partitions were taken as research objects. A three dimensional mathematical shear stress transport (SST) $k-\omega$ model of computational fluid dynamics (CFD) was established to simulate the temperature and velocity field distribution of partition packaging and common packaging under the same boundary condition and the same initial condition. Compared with cooling time, cooling rate and cooling uniform of two packages, the partition package and common package were basically the same, the difference of cooling temperature was not more than 0.67°C , the maximum difference of cooling rate was $0.012^{\circ}\text{C}/\text{min}$, and the coefficient of temperature variation of partition packaging was slightly larger than that of common packaging temperature. The two kinds of packaging had the same pre-cooling effect and met the pre-cooling requirement in cold chain transport. Compared with experimental results, the root mean square error of two packaging results was 1.13°C and the average relative error was 8.2% , which proved the rationality and accuracy of simulated result. The research result was of great significance for the relationship between balance temperature loss and physical damage.

Key words: cold chain transport; partition packaging; pre-cooling; computer fluent dynamic; temperature distribution

0 引言

目前, 果品产业中最大的关注点是采收后水果

在供应链中的质量损失, 据统计从水果收获后直至到达消费者手中, 损失率高达 $13\% \sim 38\%$ ^[1], 减少水果的采后损失是确保未来水果产业食品安全的重

收稿日期: 2018-07-02 修回日期: 2018-09-21

基金项目: 北京市农林科学院 2018 年度科研创新平台建设项目 (PT2018-21)

作者简介: 朱文颖(1992—), 女, 工程师, 主要从事冷链物流与计算机模拟研究, E-mail: zhuwy@nertica.org.cn

通信作者: 史策(1989—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事农业信息化与货架期预测研究, E-mail: shic@nertica.org.cn

要组成部分^[2]。温度调控失误和物理损伤是导致水果质量损失的重要因素,隔板包装(包装箱内部含有隔板)能够防止水果的挤压和碰撞,研究隔板包装的内部温度场分布具有重要意义^[3-4]。

计算流体力学(Computer fluent dynamic, CFD)数值模拟方法在研究预冷过程中的温度场分布发挥着重要作用。赵春江等^[5-6]总结归纳了 CFD 技术在处理预冷问题时前处理、求解过程和后处理 3 个阶段的具体方法,阐述了近 10 年中 CFD 技术在冷链物流发展中的应用,展望了冷链物流未来的发展趋势。HAN 等^[7]针对内含两层苹果的包装箱开孔方式进行了模拟分析,比较了包装箱内部气流温度场分布云图,发现增加包装箱开气孔数量能够增强预冷速率,减少预冷时间。文献[8-10]模拟不同大小橘子在单个包装盒内部的气流形式,为水果不规则排布的温度分布提供了参考。FERRUA 等^[11-12]模拟装有不规则形状、不同尺寸草莓的塑料盒在不同开孔方式下盒中温度分布情况,为不规则形状温度场分布提供了参考。HAN 等^[13]收集整理了 10 种常见不同尺寸和开孔方式的包装箱,得到最优预冷包装箱。DELELE 等^[14]模拟 9 种相同尺寸、不同开孔方式的包装箱在装载和空载情况下的预冷状况,对比分析得到开孔数目、开孔形状和开孔位置对包装箱内部气流温度的影响。

然而,包装箱内部结构对温度场和气流场分布也具有重要意义^[15]。相比普通包装箱(内部不含隔板的包装箱),隔板包装箱具有较好抗震功能,能够

防止水果的挤压和碰撞^[16-17],减少水果质量损失。而正确评价隔板包装箱的预冷效果在预冷研究中同样至关重要。

为此,本文以苹果为研究材料,分别建立隔板包装模型和普通包装模型,对满载相同数量苹果的两种包装箱分别进行 CFD 模拟计算,得到两种包装箱内部温度气流分布,对比分析两种包装箱内部苹果的冷却时间、冷却速率以及冷却均匀性,客观评价隔板包装箱和普通包装箱的预冷效果。

1 材料与方法

1.1 物理模型

苹果在打包过程中,包装箱设计应兼顾防止苹果机械损伤和保证冷空气流通均匀性的作用。文献[18-19]表明,改变包装箱通风孔尺寸、形状位置等因素,水果的冷却时间、冷却速率以及冷却均匀性都会发生改变。本文以装有苹果的包装箱为研究对象,分为单层隔板包装和单层普通包装,采用 Icem 软件进行几何建模,两种包装箱结构如图 1 所示。包装箱材料采用市场上常用 B 楞的瓦楞纸,尺寸(长×宽×高)为 55 cm×40 cm×14 cm,箱体厚度为 0.5 cm,隔板包装箱的隔板厚度为 0.3 cm,包装箱内分为 12 个隔间,每个隔间内装有一个苹果,苹果直径为 12 cm,两种包装箱内苹果摆放位置相同。两种包装开孔方式相同,进风口和出风口均为圆形,直径 4 cm,单面开孔率都为 3.3%,具体位置如图 1 所示。

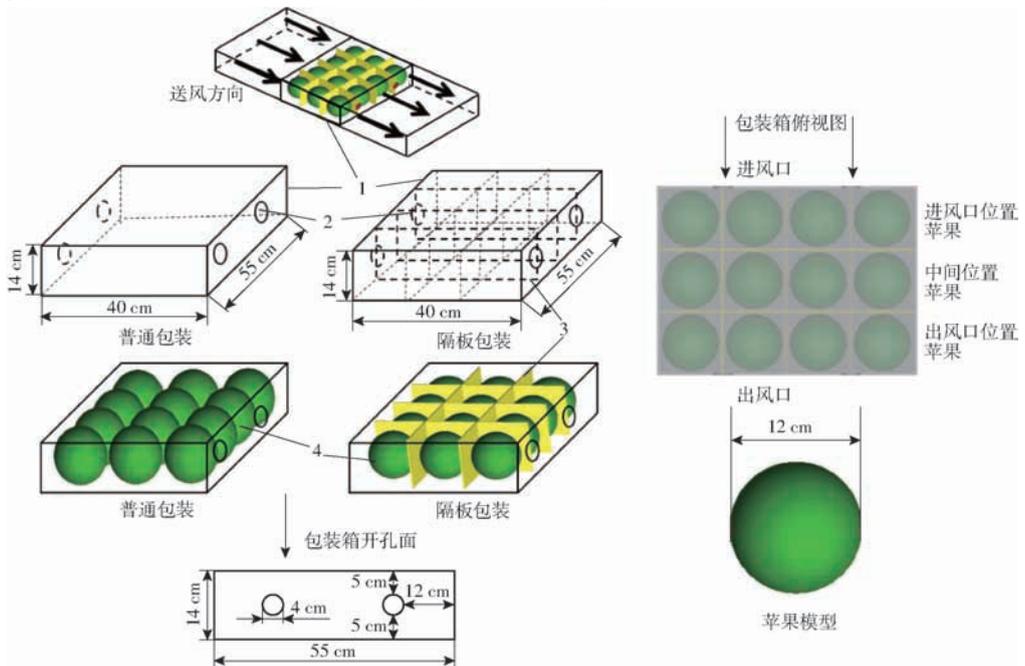


图 1 两种包装箱箱体的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of two kinds of packaging

1. 通风箱体 2. 开孔 3. 隔板 4. 苹果

1.2 网格划分

本文采用 Icem 进行网格划分, 为提高计算精度, 保证计算的收敛性, 整个箱体及内部结构采用六面体结构化网格进行划分, 苹果与壁面、苹果与隔板之间留有一定空隙, 苹果、进风口以及出风口等球体或圆形区域采用“O”型网格技术生成六面体结构化网络, 并进行局部加密。隔板包装箱最大网格尺寸不超过 3 mm, 网格数量为 646 443 个

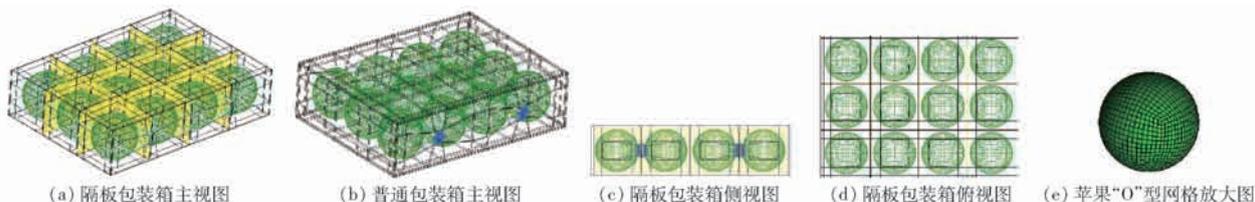


图 2 网格划分

Fig. 2 Mesh generation

1.3 数学模型

建立数学模型求解两种包装箱内部预冷过程的温度分布情况时, 为了对实际模型进行简化, 减少计算时间, 对模型做如下假设: 两种包装箱密封性良好, 不存在漏气现象; 空气为不可压缩气体; 苹果、包装箱和隔板的物理参数不随温度的变化而改变; 苹果是各项同性连续介质等直径球体, 忽略苹果产生的呼吸热和蒸腾热, 忽略苹果之间的辐射作用; 苹果与纸箱之间采用缩小法建模^[21], 缩小系数为 0.93。

模型的材料主要包括空气、外包装箱体、隔板以及苹果, 依据文献[22-23], 空气、苹果、外包装箱体及隔板的具体热物性性能参数如表 1 所示。

表 1 热物性性能参数

Tab. 1 Thermo-physical properties

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	导热率/ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)
苹果	837.22	2 821.96	0.450
外包装箱体	220.00	1 700.00	0.048
隔板	260.00	1 700.00	0.048
空气	1.29	1 005.00	0.070

1.4 初始条件与边界条件

(1) 初始条件: 当时间 $t=0$ 时, 外包装箱体、隔板、包装箱内部空气以及苹果的初始温度 $T=25^\circ\text{C}$ 。

(2) 入口边界: 将包装箱迎风口面的两个开孔设置为速度入口边界条件, 文献[24]表明, 当送风速度超过 2.5 m/s 时, 制冷时间、冷却速度以及冷却均匀性无显著改变, 因此本文入口边界设置为: 风速 2.5 m/s 、空气温度 0°C 、湍流动能 $0.04\text{ m}^2/\text{s}^2$ 、耗散率 12.5 s^{-1} 。

(3) 出口边界: 将包装箱背风口面的两个开孔设置为出口边界条件, 边界上所有物理量梯度为零。

单元, 普通包装箱最大网格尺寸不超过 5 mm , 网格数量为 617 422 个单元, 划分结果如图 2 所示。由于本文采用六面体结构化网格对模型进行划分, 利用正交性和宽高比对网格进行检测^[20], 正交性指标分布从 0 到 1, 趋于 0 则网格质量较差。结果表明 2 种包装网格的正交性和宽高比良好, 正交性指标均大于 0.6, 宽高比均控制在 $1:1\sim 5:1$ 之间。

(4) 壁面边界: 苹果表面、纸箱表面和隔板表面设置为无滑移壁面条件, 壁面上速度为零, 且垂直于壁面的速度也为零。

1.5 数值模拟方法

采用基于有限体积法的 CFD 商用软件 Fluent 15.0 进行求解计算和后处理分析, 考虑重力的影响, 利用非稳态剪切压力传输 (Shear stress transport, SST) $k-\omega$ 湍流模型、基于压力的分离式求解器进行计算, 在空气流体区采用的控制方程为质量守恒方程、动量守恒方程以及能量守恒方程, 将热源加载到苹果区域控制方程中, 采用 SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations) 算法求解, 时间步长设置为 6 min , 步数设为 100 步, 共计 10 h 。

1.6 评估参数

采用预冷模拟中常用的 3 个参数进行模拟评估, 分别是冷却时间、瞬时冷却速率和瞬时冷却均匀性。

无量纲数 θ 用来评估达到冷却温度的农产品占整体农产品的比值, 计算公式为

$$\theta = (T_{\text{in}} - T_0) / (T_{\text{ave}} - T_0) \quad (1)$$

式中 T_{in} ——包装箱内苹果初始平均温度, $^\circ\text{C}$

T_{ave} ——所有苹果平均温度, $^\circ\text{C}$

T_0 ——进风口预冷温度, 即预期预冷温度, $^\circ\text{C}$

当 $\theta=7/8$ 时, 果品预冷基本达到预期温度, 所用时间称为 $7/8$ 冷却时间 (Seven-eight cooling time, SECT); 当 $\theta=1/2$ 时, 冷却速率达到平均水平, 所用时间称为 $1/2$ 冷却时间 (Half cooling time, HCT)。

瞬时冷却速率用来评估苹果在冷却过程中的降温快慢, 计算公式为

$$R = (T_{i-1} - T_i) / i \quad (2)$$

式中 T_i —— t 时刻苹果温度, $^\circ\text{C}$

T_{t-i} —— $t-i$ 时刻苹果温度, °C

i ——时间步长, min

通常采用温度变异系数来评估冷却均匀性, 温度变异系数越大, 箱体内部苹果温度数据离散程度越大, 温度分布越不均匀; 反之, 温度变异系数越小, 箱体内部苹果温度数据离散程度越小, 温度分布越均匀。温度变异系数计算公式^[25]为

$$N = \frac{1}{T_{ave}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (T_k - T_{ave})^2} \times 100\% \quad (3)$$

式中 n ——包装箱内苹果总数量

T_k ——苹果 k 的温度

温度变异系数通常采用热力学温度进行计算。

2 结果与分析

2.1 冷却时间

图3为两种包装在相同初始条件和相同边界条件下, 通过CFD模拟得到的苹果内部平均温度变化曲线和苹果表面平均温度变化曲线。虚线与曲线的交点横坐标代表7/8冷却时间。

由图3可知, 隔板包装和普通包装的温度曲线趋势基本相同, 随着冷却时间增长, 冷却速率逐渐减慢。两种包装苹果表面平均温度差值不超过0.67°C, 两种包装苹果内部平均温度差值不超过0.26°C。苹果表面平均温度低于苹果内部平均温度, 随着冷却时间增长, 苹果内部受热传导作用的影响, 表面平均温度曲线与内部平均温度曲线逐渐重合。

但是, 隔板包装和普通包装在箱体内部相同位

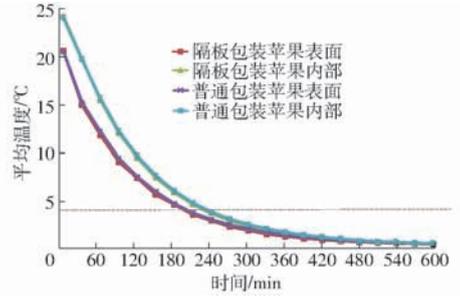


图3 相同边界条件苹果平均温度变化曲线

Fig. 3 Changing curves of average temperature of all apples with the same boundary condition

置的苹果温度差别较大, 相同包装箱内部不同位置苹果的温度也有所差别, 按照位置的不同, 将包装箱内部的苹果分为3部分: 进风口位置苹果、中间位置苹果和出风口位置苹果, 内部平均温度曲线如图4所示。

如图4c所示, 隔板包装和普通包装中间位置苹果温度基本相同; 而隔板包装进风口位置苹果温度低于普通包装进风口位置苹果温度, 如图4b所示, 存在该现象的原因归结于内部隔板对冷空气的传播起到阻碍作用, 冷空气从进风口进入包装箱后, 受到隔板阻碍, 在进风口隔间内停留, 形成局部低温区域, 无法传递到出风口处, 致使隔板包装在出风口隔间位置相对高温, 如图4d所示, 中间区域次之。

2.2 冷却速率

冷却过程中, 两种包装在相同初始条件和边界条件下, 苹果瞬时冷却速率随时间的变化曲线如图5所示。

由图5可知, 在整个预冷过程中, 隔板包装和普

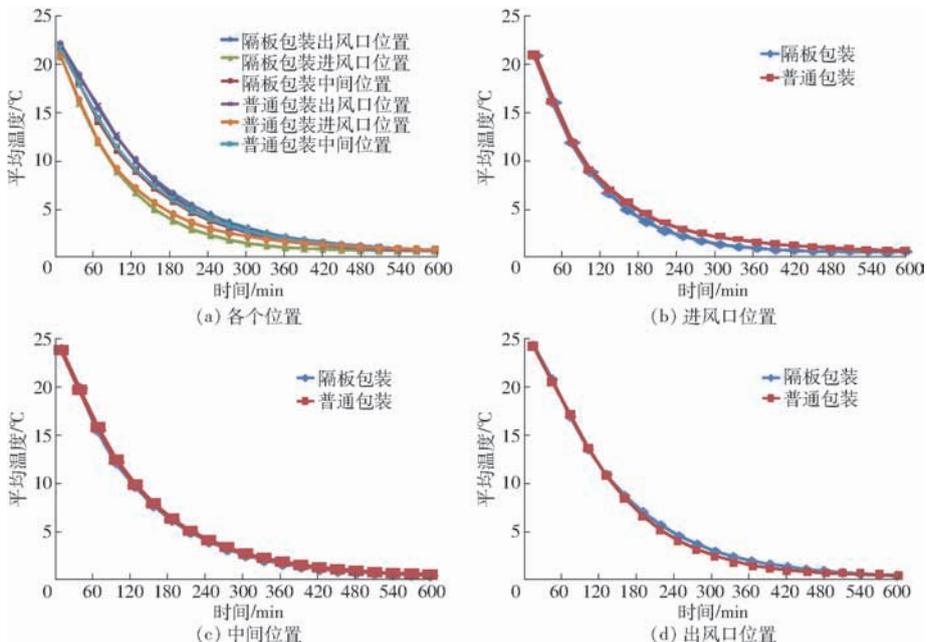


图4 相同边界条件两种包装不同位置苹果内部平均温度曲线

Fig. 4 Changing curves of average temperature of apples at different positions with the same boundary condition

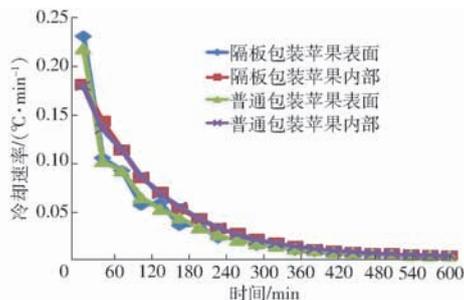


图 5 相同边界条件苹果瞬时冷却速率曲线

Fig. 5 Curves of instantaneous cooling rates of all apples with the same boundary condition

通包装内部苹果冷却速率曲线整体趋势基本相同,随着冷却时间增加冷却速率逐渐减慢,两种包装苹果表面冷却曲线和苹果内部冷却曲线基本重合。冷却时间 30 min 内,苹果表面冷却速率远大于苹果内部冷却速率;冷却时间超过 30 min 后,冷却速率下降到 0.15°C/min,苹果表面冷却速率逐渐慢于苹果内部冷却速率;冷却时间超过 300 min 后,苹果表面冷却速率和苹果内部冷却速率基本重合。整个过程中,两种包装瞬时冷却速率差值不超过 0.012°C/min。

同理比较包装箱内部 3 个位置的苹果温度,隔板包装进风口位置苹果冷却速率快于普通包装进风口位置冷却速率,隔板包装出风口位置苹果冷却速率慢于普通包装出风口位置冷却速率,两种包装中间位置苹果冷却速率基本相同。

比较隔板包装和普通包装的冷却时间和冷却速率,两种包装的整体预冷效果基本一致,均能满足冷链运输过程中的预冷需求。

2.3 冷却均匀性

隔板包装和普通包装温度变异系数随时间变化的曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,隔板包装和普通包装的温度变异系数均为先增大后减小,随着冷却时间增长,包装箱

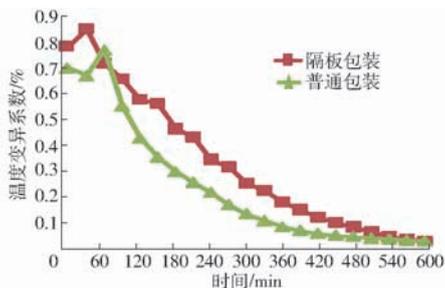


图 6 相同边界条件下温度变异系数曲线

Fig. 6 Curves of instantaneous temperature variation coefficients with the same boundary condition

内苹果之间温度差值逐渐减小,温度变异系数逐渐减小。对比两种包装的冷却过程,普通包装的温度变异系数小于隔板包装的温度变异系数,普通包装苹果冷却均匀性优于隔板包装苹果冷却均匀性。存在该现象的原因归结于隔板包装内部冷空气受到隔板阻碍,隔断之间冷空气无法直接热传递,形成温度差异,随着冷却时间增长,两种包装内部温度逐渐趋于零,包装内部温度场逐渐均匀,温度变异系数逐渐趋于零。

2.4 云图分析

图 7 和图 8 给出不同冷却时间隔板包装和普通包装的内部温度场分布云图,由图 7 和图 8 可以明显看出,在相同冷却时间,隔板包装与普通包装温度场分布基本相同,冷空气进入包装箱后,进风口位置苹果首先预冷降温,进风口位置苹果温度小于出风口位置苹果温度。冷却 3 h 后,两种包装箱内部所有苹果的温度均降至 10°C 以下;冷却 5 h 后,两种包装箱内部所有苹果的温度降至 4°C 以下,满足 7/8 冷却时间的冷却条件;冷却 10 h 后,两种包装箱内空气温度和苹果温度基本保持在 0°C。

普通包装内温度分布云图如图 8 所示,冷空气从进风口均匀流入,出风口均匀流出,内部温度分布

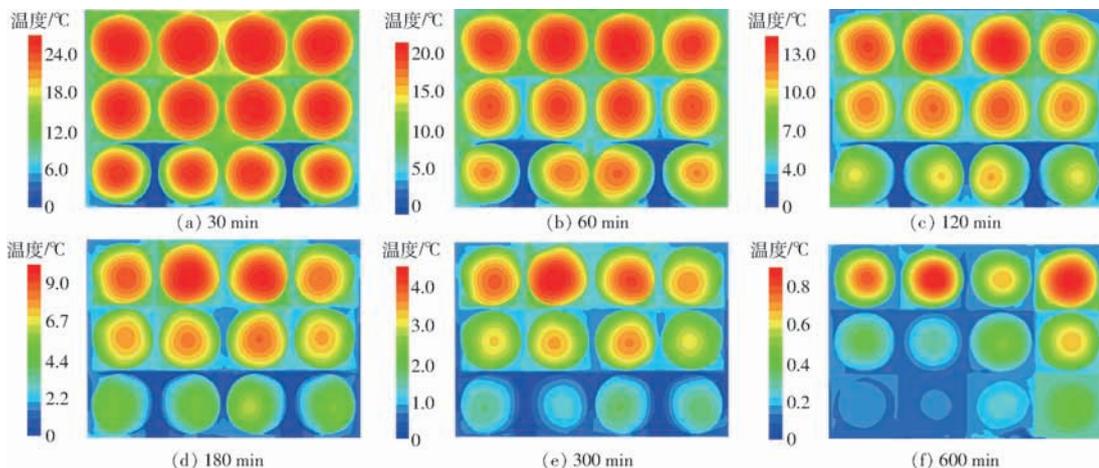


图 7 冷却过程中不同时间下隔板包装内的温度分布云图

Fig. 7 Instantaneous static temperature contours of partition packaging with the same boundary condition

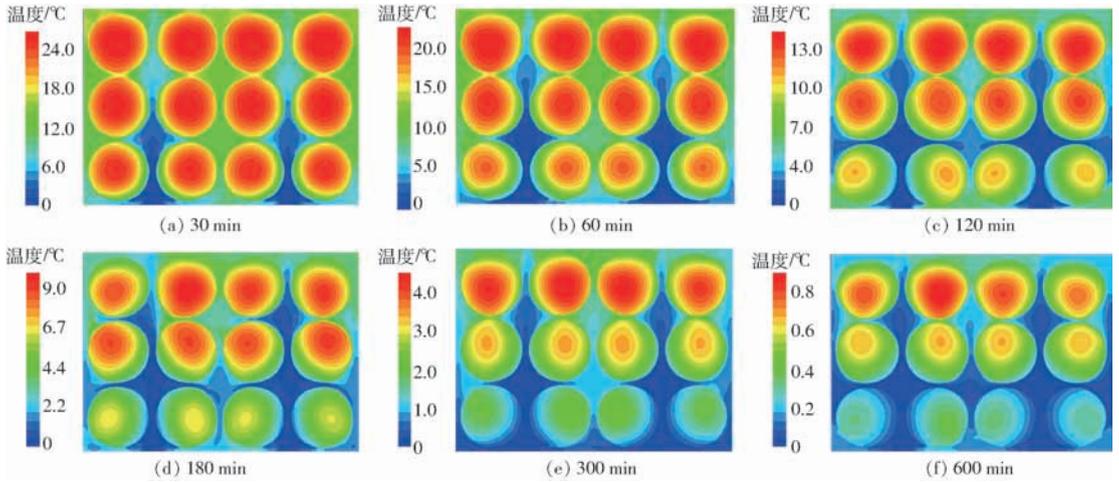


图8 冷却过程中不同时间下普通包装内的温度分布云图

Fig.8 Instantaneous static temperature contours of ordinary packaging with the same boundary condition

平缓,没有隔板阻碍现象和温度突变现象。相比普通包装,隔板包装箱的内部隔板对冷空气具有明显阻碍现象,隔板之间存在微小温度差,如图7所示。

图9和图10给出冷却时间为120 min 隔板包装和普通包装内部的风速分布图。由图9和图10能够明显看出,两种包装内部风速范围基本相同,均保持在1.0 m/s左右。普通包装内部风速分布较为平稳均匀,如图10所示。相比普通包装,隔板包装内部隔板对风速传播具有阻碍作用,隔板处风速约为2.5 m/s,高于箱体内部其他位置风速,如图9所示。

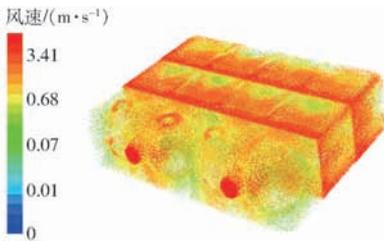


图9 冷却120 min 隔板包装的风速分布图

Fig.9 Velocity distribution of partition packaging at 120 min

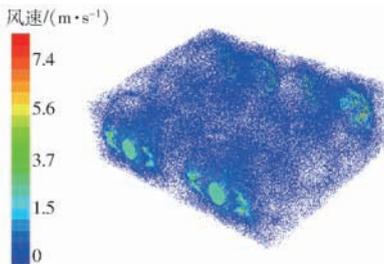


图10 冷却120 min 普通包装的风速分布图

Fig.10 Velocity distribution of ordinary packaging at 120 min

3 实验验证

3.1 验证方法

为验证模拟结果的正确性,以装满苹果的隔板包装箱为研究对象,采用天津商业大学的压差预冷实验台进行实验验证,实验装置布置图如图11所

示。图中隔板包装纸箱中装有12个直径为8 cm的苹果,分别编号为1~12,分为进风口位置苹果(编号为1~4)、中间位置苹果(编号为5~8)和出风口位置苹果(编号为9~12)3组,每个苹果如图11所示插入2个温度传感器,实时监测苹果内部温度,图11中“·”为温度测试点。实验前,首先确保纸箱内部苹果平均温度为25℃,通入风速为2.5 m/s的冷空气,隔板纸箱内苹果开始降温,采用日本Yokogawa温度记录仪进行测试记录,温度传感器灵敏度为0.5℃,每隔2 min记录一次数据,记录时间为3 h,共90个数据。

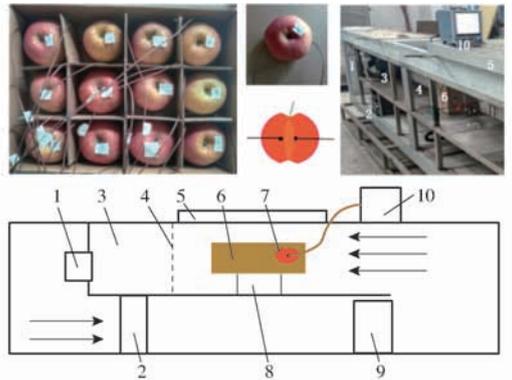


图11 实验平台结构与实验装置布置图

Fig.11 Structure diagram of experiment platform and equipment deployment

- 1. 压差风机 2. 蒸发器 3. 静压室 4. 蜂窝网 5. 盖子 6. 隔板纸箱 7. 插有温度传感器的苹果 8. 支架 9. 加湿器 10. 温度记录仪

3.2 结果与分析

读取实验中温度记录仪的数据并进行数据处理,计算平均值,风速为2.5 m/s时,3 h内苹果的温度模拟值和温度实验值曲线如图12所示。

由图12可知,3 h内隔板包装箱内全部苹果平均温度模拟值与平均温度实验值变化趋势相同,对

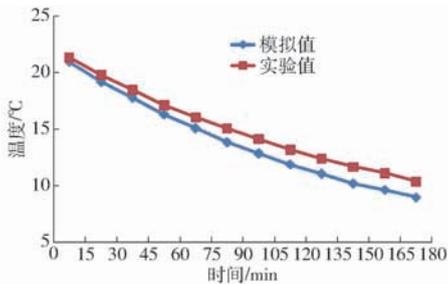


图 12 温度模拟值和实验值比较

Fig. 12 Comparison of experiment and simulation results of temperature

比所有温度模拟值与实验值得出,温度最大差值小于 1.5℃。模拟值与实验值存在偏差的可能原因主要归结于苹果形状的简化、测量仪器自身误差、外界环境的简化以及压差预冷实验台风速温度的误差。

风速为 2.5 m/s 时,3 h 内隔板包装箱内不同位置苹果的温度实验值如图 13 所示。

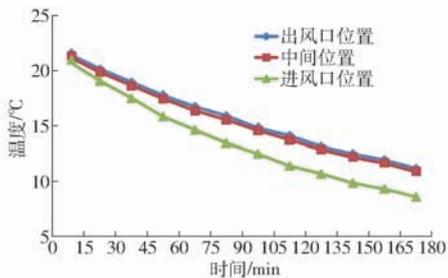


图 13 风速 2.5 m/s 不同位置苹果温度实验曲线

Fig. 13 Experimental temperature at different positions with wind speed of 2.5 m/s

由图 13 可知,隔板包装内不同位置苹果温度实验结果和温度模拟结果趋势基本相同,区别在于出风口位置温度实验值低于出风口位置温度模拟值。中间位置和出风口位置苹果温度实验值曲线重合。

采用均方根误差 (Root mean square error,

RMSE) 和平均相对误差 (Average relative deviation, ARD) 判定实验值与模拟值之间的关系,计算结果见表 2。

表 2 均方根误差与平均相对误差
Tab. 2 Values of RMSE and ARD

指标	全部	进风口位置	中间位置	出风口位置
RMSE/℃	1.13	0.51	1.34	1.73
ARD/%	8.2	3.2	9.0	13.8

由表 2 可知,进风口位置模拟值和实验值偏差小,出风口位置模拟值和实验值偏差大,存在偏差的原因可归结于模拟值忽略包装箱体外界环境,实验过程中隔板包装箱外部温度逐渐降低,出风口位置苹果在开孔处与外界冷空气相接触,温度模拟值比温度实验值大。

4 结论

(1) 隔板包装和普通包装内苹果的冷却时间和冷却速率曲线基本一致,冷却温度最大差值不超过 0.67℃,冷却速率最大差值不超过 0.012℃/min。

(2) 冷却过程中,隔板包装温度变异系数略大于普通包装温度变异系数,隔板包装进风口位置苹果温度低于普通包装进风口位置苹果温度,隔板包装出风口位置苹果温度高于普通包装出风口位置苹果温度,但不影响冷却效果。

(3) 冷却过程中隔板包装和普通包装在相同时间内部的温度分布范围基本一致,120 min 时隔板包装和普通包装内的风速分布趋势基本相同,基本保持在内部风速约为 1.0 m/s。

(4) 经过实验验证,实验结果与模拟结果基本一致,温度最大差值小于 1.5℃,全部苹果的均方根误差为 1.13℃,平均相对误差为 8.2%,实验验证了本研究利用 CFD 模拟的合理性与准确性。

参 考 文 献

[1] KUMMU M, MOEL H D, PORKKA M, et al. Lost food, wasted resources; global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use[J]. Science of the Total Environment, 2012, 438(3):477-489.

[2] OPARA U L, PATHARE P B. Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce—a review [J]. Postharvest Biology & Technology, 2014, 91:9-24.

[3] OPARA U L, MDITSHWA A. A review on the role of packaging in securing food system; adding value to food products and reducing losses and waste [J]. African Journal of Agricultural Research, 2013,8(22): 2621-2630.

[4] PATHARE P B, OPARA U L. Structural design of corrugated boxes for horticultural produce: a review [J]. Biosystems Engineering, 2014, 125:128-140.

[5] 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/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):214-222. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150331&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.031.

ZHAO Chunjiang, HAN Jiawei, YANG Xinting, et al. Digital simulation technology of computational fluid dynamics in agricultural cold-chain logistics applications[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 214-222. (in Chinese)

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] DELELE M A, VERBOVEN P, HO Q T, et al. Advances in mathematical modelling of postharvest refrigeration processes [J]. *Stewart Postharvest Review*, 2010, 6(2): 1 – 8.
- [9] PATHARE P B, OPARA U L, VIGNEAULT C, et al. Design of packaging vents for cooling fresh horticultural produce [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2012, 5(6): 2031 – 2045.
- [10] AMBAW A, VERBOVEN P, DELELE M A, et al. CFD modelling of the 3D spatial and temporal distribution of 1-methylcyclopropane in a fruit storage container [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2013, 6(9): 2235 – 2250.
- [11] 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.
- [12] FERRUA M J, SINGH R P. Modeling the forced-air cooling process of fresh strawberry packages, part II: experimental validation of the flow model [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(2): 349 – 358.
- [13] HAN J W, QIAN J P, ZHAO C J, et al. Mathematical modelling of cooling efficiency of ventilated packaging: integral performance evaluation [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 111: 386 – 397.
- [14] 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.
- [15] AMBAW A, MUKAMA M, OPARA U L. Analysis of the effects of package design on the rate and uniformity of cooling of stacked pomegranates: numerical and experimental studies [J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2017, 136: 13 – 24.
- [16] 李春飞, 卢立新, 宋妹妹. 缓冲包装结构对箱装苹果振动损伤与动力学特性的影响 [J]. *食品与生物技术学报*, 2007, 26(3): 10 – 13.
- LI Chunfei, LU Lixin, SONG Shumei. Effect of cushion packaging construction on vibration bruising and dynamic property of apples [J]. *Journal of Food Science of Biotechnology*, 2007, 26(3): 10 – 13. (in Chinese)
- [17] 刘继飞. 缓冲包装材料性能的分析方法与研究进展 [J]. *包装工程*, 2014(7): 149 – 155.
- LIU Jifei. Analysis method and research progress in cushioning performance of cushion packaging materials [J]. *Packaging Engineering*, 2014(7): 149 – 155. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] AMBAW A, DELELE M A, DEFRAEYE T, et al. The use of CFD to characterize and design postharvest storage facilities: past, present and future [J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2013, 93: 184 – 194.
- [20] 张翔, 韩佳伟, 杨信廷, 等. 不同构造冷藏车箱体的冷却性能模拟与对比 [J]. *制冷学报*, 2018, 39(2): 89 – 98.
- ZHANG Xiang, HAN Jiawei, YANG Xinting, et al. Simulation and comparison of cooling performances of refrigerated vehicle with different structures [J]. *Journal of Refrigeration*, 2018, 39(2): 89 – 98. (in Chinese)
- [21] 韩佳伟, 赵春江, 钱建平, 等. 基于球体模型的苹果接触点局部处理方式研究 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 8 – 17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161102&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.002.
- HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, QIAN Jianping, et al. Local processing mode of contact points for apples based on sphere models [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 8 – 17. (in Chinese)
- [22] 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/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(增刊): 215 – 217. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s43&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.043.
- YANG Zhou, CHEN Chaohai, DUAN Jieli, et al. Simulation and experiment of airflow field in cartons of pressure difference precooling for litchi [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(Supp.): 215 – 217. (in Chinese)
- [23] 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 Xiuqin, LU Lixin, 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 CSAE*, 2014, 30(12): 249 – 257. (in Chinese)
- [24] 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/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 280 – 289. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151138&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.038.
- HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et al. Effect of air-inflow velocity on cooling efficiency during forced-air precooling of apples [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 280 – 289. (in Chinese)
- [25] DEFRAEYE T, CRONJE P, OPARA U L, et al. Towards integrated performance evaluation of future packaging for fresh produce in the cold chain [J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2015, 44(2): 201 – 225.