

基于 CFD 技术的预冷参数对盒装荔枝微环境温湿度的影响

郭嘉明, 蒋易宏, 林济诚, 张霄丹, 蔡威, 林国鹏,
刘东峰, 曾志雄, 吕恩利*
(华南农业大学 工程学院, 广州 510642)

摘要: **目的** 深入研究外环境参数对荔枝包装盒内环境的影响, 获得荔枝包装盒内外环境温度湿度规律。**方法** 建立盒装荔枝果实和外流场的三维模型。结合荔枝果实和包装物理特性, 对预冷过程中包装荔枝果实内外环境温湿度变化进行数值分析, 获得包装内流场的分布情况。**结果** 在达到二分之一冷却时间之前, 提高风速可以缩短预冷时间, 并且能够加快荔枝果实的传热; 在达到二分之一冷却时间之后, 风速超过 6 m/s 后, 荔枝果实温度变化不显著, 相邻风速间果实温度标准差的差值较小, 标准差趋于稳定; 包装内相对湿度主要受荔枝果实温度的影响; 预冷初始阶段选择较低环境温度, 有利于加快荔枝果实与空气的传热, 促进果实温度的降低, 但是荔枝果实间的温度差异随着环境温度降低而增大。**结论** 在预冷期间, 外环境参数温度和风速对包装内环境温湿度有较大的影响。

关键词: 荔枝; 预冷; 数值模拟

中图分类号: S667.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)17-0059-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.17.008

Effect of CFD Technology Based Pre-cooling Parameters on Temperature and Humidity of Micro-environment for Litchi with Packages

GUO Jia-ming, JIANG Yi-hong, LIN Ji-cheng, ZHANG Xiao-dan, CAI Wei, LIN Guo-peng,
LIU Dong-feng, ZENG Zhi-xiong, LYU En-li*

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of environmental parameters on the environment inside the litchi packaging box in depth to obtain the temperature and humidity pattern of the environment inside and outside the packages. A three-dimensional model of the litchi fruit in the box and the external flow field was established. Combining the physical characteristics of the litchi fruit and the package, the numerical analysis of the temperature changes inside and outside the packaged litchi fruit during the pre-cooling process was carried out, and the distribution of the flow field in the package was obtained. Before one-half the cooling time, increasing the wind speed shortened the pre-cooling time and accelerated the heat transfer to the litchi fruit. After reaching one-half of the cooling time and wind speeds above 6 m/s, the variation of litchi fruit temperature was not significant. The difference in standard deviation of fruit temperature between adjacent wind speeds was small and the standard deviation tended to stabilize. The relative humidity inside the package was mainly affected by the temperature of the litchi fruit. Selection of low ambient temperature in the initial stage of pre-cooling was conducive to accelerating the heat transfer between litchi fruit and air, and promoting the reduction of fruit temperature. But the temperature difference between litchi fruit increased as the ambient temperature decreased. During pre-cooling,

收稿日期: 2022-12-21

基金项目: 广东省 2019 年省级农业科技创新及推广项目 (2023KJ101); 农产品保鲜物流共性关键技术研发创新团队项目 (2023KJ145); 国家自然科学基金项目 (31901736, 31971806); 国家荔枝龙眼产业体系项目 (CARS-32-11)

the external ambient parameters temperature and wind speed have a large effect on the ambient temperature and humidity inside the package.

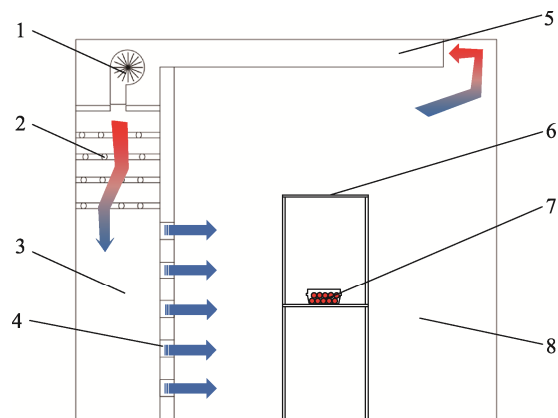
KEY WORDS: litchi; pre-cooling; numerical simulation

荔枝生产于高温高湿的夏季, 采后易腐烂褐变^[1], 不耐贮运, 通过预冷可以有效延长荔枝保鲜周期、减小荔枝质量损失^[2-3]。冷库预冷是常见预冷方式之一, 其原理是冷风经过果蔬时, 与果蔬进行对流换热, 从而降低果蔬的温度^[4]。冷库预冷通过调节风速、温度、相对湿度等多目标参数, 可延长荔枝保鲜周期。然而, 环境参数波动或制冷风机高风速易导致荔枝失水褐变加速^[5]。包装可以减小环境参数波动对荔枝品质的影响, 但会阻碍内外环境的热质传递, 导致内外参数存在差异。因此, 对带包装荔枝果实内外环境参数变化进行研究, 有利于降低预冷能耗、提高预冷效果。通过试验可以研究预冷过程中包装荔枝果实内外环境参数变化, 但传感器很难准确地显示出包装内各参数的平均值, 包装内流场变化复杂, 并且多目标参数的调控需要花费大量的成本和人力。

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 是通过计算机模拟流体流动、传热、化学反应等物理现象的技术。近年来, CFD 已在预冷研究领域得到广泛运用^[6-8], 其卓越的可视化能力和数值模拟的高精度性质备受认可^[9], 能够有效地深入分析气流特性和温度分布, 为研究对象提供更为全面的解析。郭嘉明等^[10]建立了荔枝果实预冷二维数值模型, 对不同风速和不同温度的预冷过程进行了数值模拟, 研究了荔枝果实的降温特性, 但没对包装荔枝内外环境参数对荔枝降温效果的影响进行研究, 并且三维数值模型具有与实际更接近、边界条件简便等优点, 有利于开展不同参数对比研究^[11]。本文以 PET 盒包装荔枝果实预冷过程为研究对象, 建立 PET 盒装荔枝果实和外流场的三维模型, 运用 ICEM 进行非结构化网格划分, 并采用 FLUENT 对模型进行数值模拟, 获得 PET 盒内外环境温湿度规律, 为荔枝果实预冷过程优化提供一定的参考。

1 材料与方法

本文采用已有的保鲜试验平台, 箱体基于压差原理进行运作。该厢体的外尺寸: 长为 1.9 m、宽为 1.1 m、高为 1.5 m, 如图 1 所示, 整体被隔热材料聚氨酯板所覆盖。该箱体被划分为保鲜区和制冷区, 位于风机后方的回风道产生负压, 使保鲜区内的气体被推入制冷区, 在经过蒸发器的冷却后, 冷却的气体通过开孔隔板重新流回至保鲜区, 从而形成一个封闭式循环。通风风速可以通过调整回风道的风速进行改变, 从而实现通风效果的调控。



1. 风机; 2. 蒸发器; 3. 压力区; 4. 开孔隔板;
5. 回风道; 6. 架子; 7. 盒装荔枝; 8. 保鲜区。

图1 保鲜运输试验平台结构

Fig.1 Structure of fresh-keeping transportation test-bed

本文主要研究塑料盒包装的内外环境温差特性, 通过 CATIA 建立了实验配置的计算模型, 精确模拟整个试验平台需要大量的计算和时间成本, 因此对模型进行简化。将荔枝堆放在塑料盒内, 单个产品被离散地建模。塑料盒具体结构及外观如图 2 所示, 材质为 PET 塑料, 开孔率为 7.5%。其中, 换气口 A、B 尺寸 (长×宽) 为 26 mm×7 mm, 换气口 C、D 尺寸 (长×宽) 为 48 mm×7 mm, 换气孔直径为 8 mm。荔枝果实被建模为直径 300 mm 的球体和各向同性的连续介质。共 23 颗荔枝, 并且荔枝果实被摆放为双层, 默认它们大小均匀一致, 理想地布置在塑料盒内。本文研究了通风风速、预冷温度对盒装荔枝内外环境温差的影响。

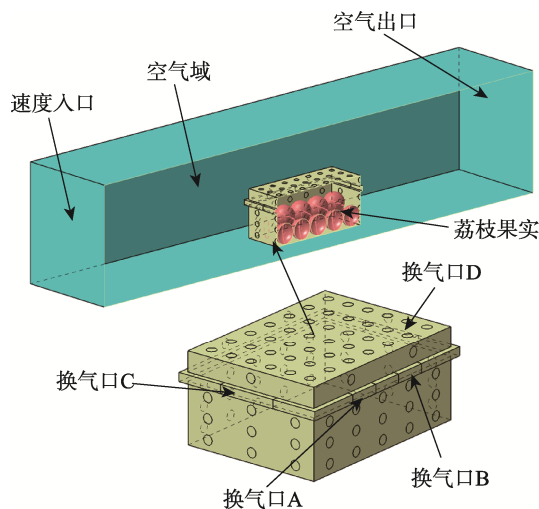


图2 三维计算模型

Fig.2 Three-dimensional computational model

2 数学模型

塑料箱内荔枝果实的不稳定传热和传质在强制空气冷却过程中非常复杂, 不仅包括以对流为主导的显热交换, 还包括通过热传导、辐射、蒸腾和呼吸等进行的潜热传递。因此, 为了简化计算且仍然能正确描述实验系统, 做出了以下假设^[12-13]:

1) 忽略荔枝果皮与果肉、果肉与果核之间传热差异的影响, 即整个果实的热物理参数是统一的, 并且认为成熟或衰老不会影响荔枝果实的呼吸和蒸腾作用。

2) 忽略辐射传热。

3) 箱体内存空气为牛顿不可压缩流体, 符合 Boussinesq 假设。

4) 各物质的热物理性质参数在模拟过程中是恒定的。

在预冷过程中, 每个域的流动和传热特性由它们的控制方程描述, 如下所示^[14]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = S_m \quad (1)$$

式中: ρ_f 为流体密度, g/m^3 ; $\mathbf{v}$ 为速度矢量, m/s ; S_m 为质量源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho_f \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \rho_f \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

式中: p 为静压, Pa ; $\rho_f \mathbf{g}$ 为重力作用项, N/m^3 ; $\mathbf{F}$ 为外力项, N/m^3 , 包括源项和流体力。

能量方程^[10]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi \rho_f E_f + (1-\phi) \rho_p E_p) + \nabla \cdot (\mathbf{v} (\rho_f E_f + p)) = \nabla \cdot k_{\text{eff}} \cdot \nabla T - \sum_i h_i J_i + S_i^h \quad (3)$$

其中: ϕ 为介质的孔隙率; E_f 为流体能量, J/kg ; E_p 为荔枝能量, J/kg ; ρ_p 为荔枝密度, kg/m^3 ; k_{eff} 为有效热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h_i 为组分 i 的焓, J/kg ; T 为温度, K 。 S_i^h 为热源项, W/m^3 。

荔枝呼吸热模型^[10]:

$$Q_s = 3.0049 \times 10^{11} \exp\left(\frac{-8528.57}{T_p}\right) \rho \quad (4)$$

式中: Q_s 为呼吸热, W/m^3 ; T_p 为荔枝果实平均温度, K ; ρ 为荔枝密度, kg/m^3 。

3 CFD 模型及参数

3.1 网格独立性研究

文中运用 ICEM 对模型结构进行网格划分, 将计

算域划分为四面体非结构化网格, 如图 3 所示。采取 4 种不同数量的网格, 用于本节的网格独立性的研究^[15], 在保证数值计算结果满足精度的前提下, 减少网格数量能有效缩短计算时间。表 1 显示了 4 种网格数量, 网格尺寸由粗糙到精细, 相邻的 2 套网格数量大概相差 1 倍。在相同速度 ($v=4 \text{ m/s}$) 的情况下, 采用瞬态求解器对模型进行求解, 到 1 800 s 时停止迭代, 得到荔枝果实的平均温度。表 1 列出了 4 套网格的果实平均温度以及相对误差。

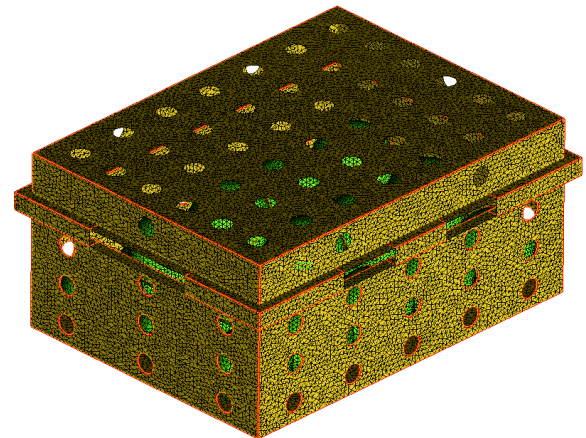


图 3 网格模型结构

Fig.3 Structure of mesh model

表 1 不同网格数量的对比

Tab.1 Comparison of the number of different meshes

网格编号	网格数量/万	平均温度/K	相对误差
I	78	279.1194	0.117
II	147	279.232 7	0.158
III	286	278.602 3	0.068 3
IV	623	278.792 6	

从表 1 中可以明显看出 III 号网格与 IV 号网格之间的相对误差明显小于 I 号网格、II 号网格与 IV 号网格之间的相对误差。考虑到计算时间问题以及保证计算结果精度, 本文数值模拟选择 III 号网格, 即网络数量为 286 万, 其相对误差在可接受范围内。

3.2 边界条件及初始条件设置

雷诺数作为仿真的重要边界参数, 并通过雷诺数判断流体类型。对模型的雷诺数 Re 进行求解。

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (5)$$

式中: Re 为雷诺数; ρ 为流体的密度 (空气的密度为 $1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$); d 为特征长度, m ; v 为入口速度, m/s ; μ 为黏度系数, 一般为 1.7894×10^{-5} 。

3.2.1 入口边界条件

速度入口边界条件用于定义入口速度。在恒定入口温度(温度为3℃)的模拟中,入口速度分别设置为2、4、6、8、10 m/s。在恒定入口速度(速度为4 m/s)的模拟中,入口温度分别设置为-1、1、3、5℃。入口相对湿度恒为90%。水力直径计算入口为长方形,湍流强度计算见式(6)^[16]。

$$I = 0.16(Re_{DH})^{-1/8} \quad (6)$$

式中: Re_{DH} 为以水力直径计算的雷诺数。

3.2.2 出口边界条件

模型出口为压力出口,其中湍流强度和水力直径设置与入口一致。

3.2.3 壁面条件

将外流场壁面设为热流量边界条件,即将外界对保鲜试验平台的影响通过设置壁面热流条件添加进模型。

将网格文件导入 FLUENT 软件后,进行稳态求解器求解,待流场稳定,即稳态收敛后(残差收敛标准为 10^{-3}),以稳态收敛值作为瞬态求解的初始值。初始化环境、荔枝果实温度为23℃。本研究中,采用 SIMPLE 算法来处理压力-速度耦合问题,对梯度进行计算时运用了最小二乘法。在计算压力、动量和能量时,采用了二阶离散方案,而湍动能和湍能耗散率的求解则采用了一阶离散方案。在文中,将半冷却时间和八分之七冷却时间作为预冷结束的标准,并采用以下计算方法^[17]:

$$T_i = \frac{T_p - T_a}{T_{pi} - T_a} \quad (7)$$

式中: T_i 为无量纲数,这里取1/2和1/8; T_{pi} 为荔枝初始温度, K; T_a 为环境温度, K; T_p 为荔枝温度, K。

模型中具体的物性参数如表2所示

表2 物性参数设置

Tab.2 Setting of physical property parameters

名称	参数	数值
空气	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.225
	比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1 006
	导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.022 5
	动力黏性系数	1.79×10^{-5}
荔枝	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	932.89
	比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	3 710
	传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.51
包装材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 000
	比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	2 200
	传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.47
外流场壁面	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 612
	比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	2 004.44
	传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.35

4 模拟结果与分析

4.1 模型验证

为了验证简化后的模型,将模拟结果与试验测量值进行对比。试验在保鲜试验台上进行,调节隔板孔出口处的空气温度为-1~2℃,调节回风道的风速为5 m/s。放入2个包装盒进行试验,并且每盒包装布置2路PT100传感器(德国贺利氏铂电阻,量程为-50~200℃,精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$)测量包装盒内环境温度。使用叶轮风速仪(Testo410i,量程为0.4~30 m/s,精度为 $(\pm 0.2 + 0.02)$ m/s, Testo SE & Co. KGaA)测出开孔隔板后面的风速,以模拟入口的风速。制冷前,维持厢体环境温度和荔枝果实温度为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$;关闭厢门后,开启制冷系统2 h后停止预冷。温度模拟值和试验值如图4所示,总体而言,试验值与模拟值差异较小。通过计算,模拟值和试验值的平均误差为2.80%、均方根误差为3.20%,证明所建模型拟合程度较优。

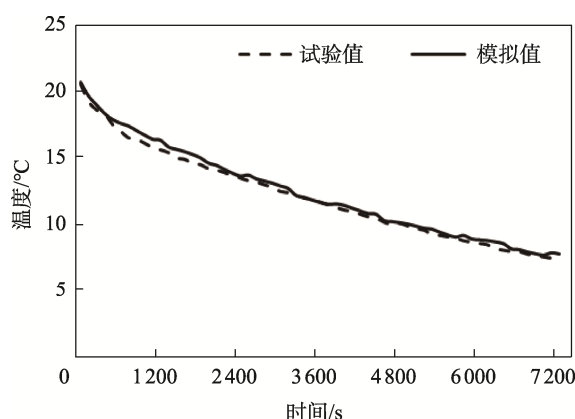


图4 模拟温度和试验温度对比

Fig.4 Comparison of simulated and test temperatures

4.2 风速对包装内环境的影响

图5a给出了塑料板条箱内的荔枝果实的平均中心温度,显示了不同风速的相应半冷却时间和八分之七冷却时间。荔枝果实的预冷时间随风速增大不断缩短,但风速超过6 m/s后只有相对较小的差异,说明在风速达到临界点时,风速对预冷效果和预冷时间的影响减小。半冷却时间之前,除了2 m/s风速外,其他风速下的荔枝果实的温度在此阶段快速下降。这说明超过一定风速后对半冷却时间之前的冷却速率没有显著影响,这可能是因为在在此阶段,荔枝果实和冷空气之间温差较大(从图5a可以看出),在较低风速下也会进行大量的对流换热。综上,在半冷却时间之前,采用较低风速也可以满足现阶段产品冷却的需

求,并且还可以节省能源。

图5b给出了不同风速下PET包装盒内相对湿度的变化。从图5b中可以看出,风速越大,相对湿度上升得越快,并且到八分之七预冷时间的相对湿度越高。在八分之七预冷时间时,最大风速和最小风速的平均相对湿度相差2%。对比图5a和图5b可以看出,在预冷过程中进行加湿处理,包装内的平均相对湿度上升,与温度下降趋势相反。这说明风速对包装内相对湿度有一定的影响,但包装内荔枝果实温度对相对湿度的影响较大。

图5c给出了不同风速下PET盒子内外环境温度差。从图5c中可以看出,在预冷过程中,PET盒内外环境温度差变化先快后慢。盒内外环境温度差减小,盒内荔枝果实传热衰减,果实降温就会减缓。随着风速的提高,温差降低速度加快,且到达八分之七预冷时间越短,说明提高风速能够加快荔枝果实的传热。当预冷风速大于6 m/s时,不同风速下预冷时间较接近,并且温差下降速度也比较接近。高风速对应着高能耗,因此在预冷过程中选择6 m/s作为较好的预冷风速,能够快速促进PET盒内外环境温度差,加速荔枝果实的降温。

图6显示了预冷30 min时PET塑料盒和荔枝果实的温度分布。从图6中可以看出,随着风速的增加,荔枝果实的冷却效果越好(高温区域减小),尤其是当风速增大到4 m/s时,荔枝果实高温区域骤降。说明当风速在2~4 m/s时,增加风速能够加快荔枝果实的冷却,然而风速进一步超过6 m/s后,荔枝果实温度变化不显著。

从表3可以看出不同风速下八分之七冷却时间的温度标准差,其中样本为每个荔枝果实的中心温度。标准差随着风速的增大在减少,说明风速高,有利于热量交换,减小盒内荔枝果实温度差异性,提高冷负荷利用效率,每个荔枝都能有较好的降温效果。然而相邻风速间标准差的差值逐渐减小,6 m/s和8 m/s风速间标准差的差值为0.099,小于0.1。说明过度增加风速不能有效地提高预冷效果,反而会增加能耗。综上可得,6 m/s的风速能够有助于荔枝果实的传热与降温。

4.3 温度对包装内温度的影响

图7显示了不同环境温度下PET盒内外环境温度差。从图7中可以看出,4种环境温度的温差下降速度趋于一致,并且最终都趋向于0,说明温差下降速度不受环境温度的影响。然而,随着环境温度的升高,开始阶段的温差有明显的区别,环境温度越高,开始阶段温差越小。这有可能是因为荔枝初始温度相同,且荔枝不断产生呼吸热,造成盒内温度较高,而环境温度越高就更加接近包装内温度。因此,在预冷开始

阶段选择较低环境温度有利于提高PET盒内外环境温度差,加快荔枝果实与空气的传热,促进果实温度的降低。

环境温度对果实中心温度标准差的影响如表4所示。从表4中看出,随着环境温度的升高,荔枝果实中心温度标准差在减小。说明整体环境温度越高,果实中心温度的差异性就越小,并且环境温度不是越低越好。

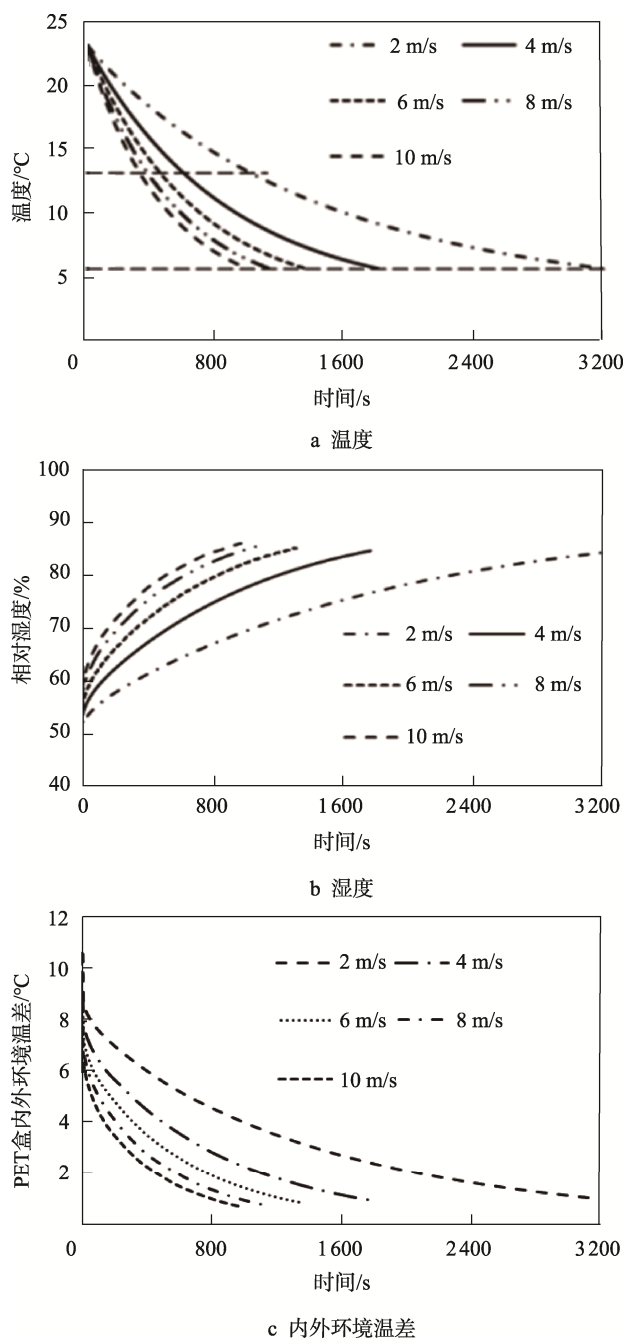


图5 风速对荔枝果实温度、相对湿度、内外环境温度差的影响
Fig.5 Effect of wind speed on temperature, relative humidity and temperature difference of litchi

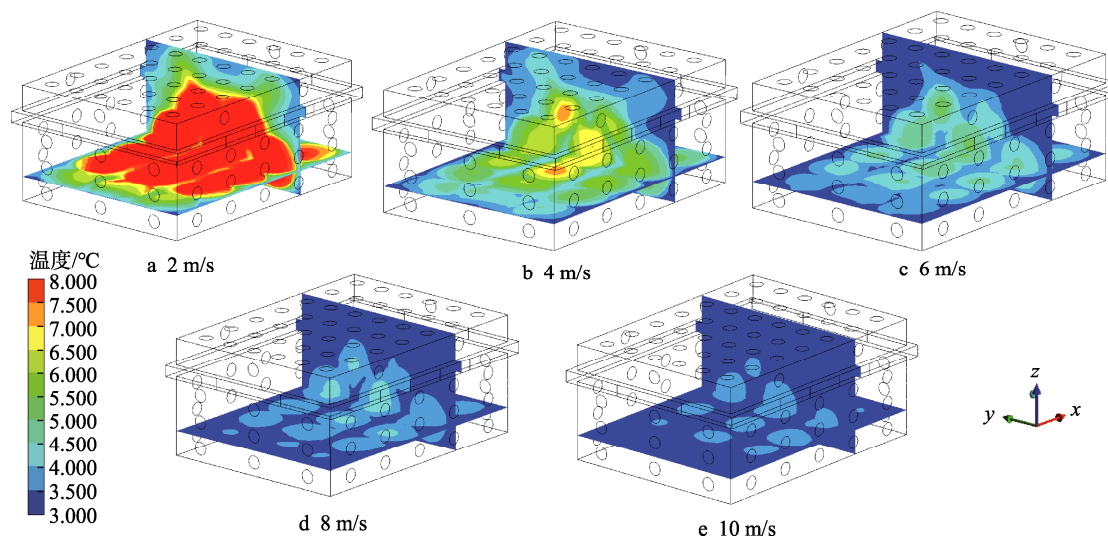


图6 不同风速下包装内的温度分布

Fig.6 Temperature distribution in package under different wind speeds

表3 风速对荔枝中心温度标准差的影响
Tab.3 Effect of wind speed on standard deviation of litchi center temperature

风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	标准差
2	5.5	0.967
4	5.5	0.813
6	5.5	0.678
8	5.5	0.581
10	5.5	0.501

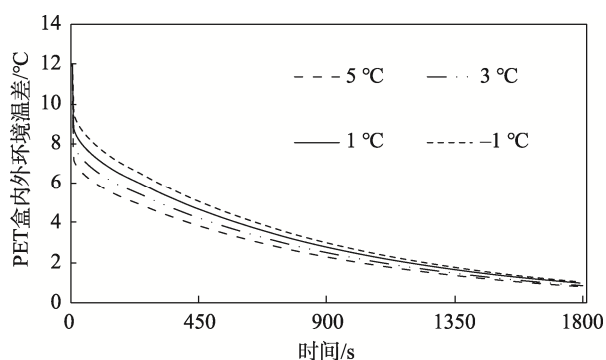


图7 温度对包装内外环境温差的影响

Fig.7 Effect of temperature on environmental temperature difference inside and outside of the package

表4 温度对荔枝中心温度标准差的影响
Tab.4 Effect of temperature on standard deviation of litchi center temperature

环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	标准差
-1	5.5	1.692
1	5.5	1.313
3	5.5	0.831
5	5.5	0.203

5 结语

以 PET 盒包装荔枝果实为研究对象,建立三维数值模型进行数值模拟,通过改变通风风速和通风温度,研究包装盒内外环境温差对荔枝果实降温的影响。经研究,得出以下结论:

- 1) 在半冷却时间之前,风速对荔枝果实冷却效果不显著,可以使用较低风速进行预冷,以减少能耗。
- 2) 在半冷却时间之后,使用 6 m/s 的风速进行预冷,能够快速对荔枝果实进行降温,减少预冷时间。
- 3) 风速增加,有助于热量释放并提高冷负荷的利用效率,并且有利于加湿。然而过度增加风速不能有效地提高预冷效果,会增加能耗。
- 4) 预冷开始阶段,选择较低环境温度能够加快荔枝果实的降温,但是会增大果实间的温度差异。

参考文献:

- [1] 魏华,李小东.可释放 SO_2 保鲜包装袋在荔枝保鲜中的应用[J].包装工程,2020,41(3):57-61.
WEI Hua, LI Xiao-dong. Application of Fresh-Keeping Packaging Bags with Releasable SO_2 in Litchi Preservation[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 57-61.
- [2] HAN Qiang, GAO Hai-yan, CHEN Hang-jun, et al. Precooling and Ozone Treatments Affects Postharvest Quality of Black Mulberry (*Morus Nigra*) Fruits[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1947-1953.
- [3] 甘玲,陈明林,吕恩利.不同预冷方式对荔枝预冷效果的影响[J].现代农业装备,2020,41(5):8-13.
GAN Ling, CHEN Ming-lin, LYU En-li. Effects of Different Precooling Methods on Precooling Effect of Lit-

- chi[J]. Modern Agricultural Equipment, 2020, 41(5): 8-13.
- [4] 吕盛坪, 吕恩利, 陆华忠, 等. 不同预冷方式对荔枝贮藏品质的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(3): 157-162.
- LYU Sheng-ping, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Effect of Different Precooling Methods on the Storage Quality of Litchi[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(3): 157-162.
- [5] 郭嘉明. 荔枝气调保鲜热质耦合机理与优化研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016: 23-54.
- GUO Jia-ming. Study on Coupling Mechanism and Optimization of Heat and Mass for Modified Atmosphere Preservation of Litchi[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016: 23-54.
- [6] GUO Jia-ming, WEI Xin-yu, LI Bin, et al. Characteristic Analysis of Humidity Control in a Fresh-Keeping Container Using CFD Model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179(4): 105816.
- [7] WANG Da, LAI Yan-hua, JIA Bin-guang, et al. The Optimal Design and Energy Consumption Analysis of Forced Air Pre-Cooling Packaging System[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 165(2): 114592.
- [8] GAO Yu-ping, SHAO Shuang-quan, TIAN Shen, et al. Energy Consumption Analysis of the Forced-Air Cooling Process with Alternating Ventilation Mode for Fresh Horticultural Produce[J]. Energy Procedia, 2017, 142: 2642-2647.
- [9] 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 and Electronics in Agriculture, 2017, 136: 13-24.
- [10] 郭嘉明, 吕恩利, 陆华忠, 等. 盒装荔枝果实降温特性数值分析与验证[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 218-224.
- GUO Jia-ming, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Numerical Analysis and Verification on Characteristics of Temperature Decreasing of Litchi Fruits with Packages[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 218-224.
- [11] HO S H, ROSARIO L, RAHMAN M M. Numerical Simulation of Temperature and Velocity in a Refrigerated Warehouse[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(5): 1015-1025.
- [12] CHOURASIA M K, GOSWAMI T K. Simulation of Effect of Stack Dimensions and Stacking Arrangement on Cool-Down Characteristics of Potato in a Cold Store by Computational Fluid Dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(4): 503-515.
- [13] WANG X, FAN Z, LI B, et al. Variable air Supply Velocity of Forced-Air Precooling of Iceberg Lettuces: Optimal Cooling Strategies[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 187: 116484.
- [14] GONG Y, CAO Y, ZHANG X. Forced-Air Precooling of Apples: Airflow Distribution and Precooling Effectiveness in Relation to the Gap Width between Tray Edge and Box Wall[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 177: 111523.
- [15] Guo JM, LV EL, LU HZ, et al., Numerical Simulation of Gas Exchange in Fresh-Keeping Transportation Containers with a Controlled Atmosphere[J]. Food Science and Technology Research, 2016. 22(4): 429-441.
- [16] 朱红钧, 林元华, 谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- ZHU Hong-jun, LIN Yuan-hua, XIE Long-han. Practical Course of FLUENT Fluid Analysis and Simulation[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010.
- [17] WANG Xi-fang, LI Bao-guo, FAN Zhong-yang. Packaging Optimization and Integral Evaluation of Cooling Efficiency of Apples[J]. Food Science and Technology Research, 2019, 25(5): 677-686.

责任编辑: 曾钰婵