

# 盒装荔枝果实降温特性数值分析与验证

郭嘉明<sup>1,2</sup> 吕恩利<sup>1,2</sup> 陆华忠<sup>1,2</sup> 方思贞<sup>1,2</sup> 赵俊宏<sup>1,2</sup>

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

**摘要:** 为掌握冷库带包装荔枝预冷果实温度变化的一般规律,建立了基于气调保鲜试验平台的荔枝果实预冷二维数值模型。结合荔枝果实及包装物理特性,对预冷过程中荔枝果实温度变化进行了数值分析,获得了厢体和包装内流场分布情况。研究结果表明,提高通风风速可以减少预冷时间,但会增大包装内荔枝果实间的温度差异性;当风速达到 6 m/s 以上,预冷时间减少放缓,果实温度变异系数趋于稳定,约为 0.25;降低隔板空气出口温度可以有效促进荔枝果实降温,但会增加包装内荔枝果实间的温度差异性。经试验验证,模拟结果与试验结果吻合良好,平均误差率为 1.91%,均方根误差为 2.34%。

**关键词:** 荔枝; 包装; 预冷; 降温特性; 数值模拟

**中图分类号:** TB69; TS205.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0218-07

## Numerical Analysis and Verification on Characteristics of Temperature Decreasing of Litchi Fruits with Packages

Guo Jiaming<sup>1,2</sup> Lü Enli<sup>1,2</sup> Lu Huazhong<sup>1,2</sup> Fang Sizhen<sup>1,2</sup> Zhao Junhong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** In order to investigate the characteristics of temperature decreasing of litchi fruits with packages during pre-cooling in a cold room, a two-dimension numerical model was built based on the test platform with controlled atmosphere for fruits and vegetables. According to the thermo-physical properties of the package, litchi fruit and the platform, the process of the temperature decreasing of litchi fruit during pre-cooling was simulated by Fluent, after which the airflow information in the container and package were obtained. After that, some results can be drawn. Improving the ventilation velocity can shorten the process of pre-cooling but will improve the variable coefficient of temperature among litchi fruits in the package; When the air duct velocity is bigger than 6 m/s, the cooling rate trends to be steady along with the growing of air duct velocity, the variable coefficient was steady at roughly 0.25; Reducing the air temperature on the partition outlet can effectively improve the temperature decreasing of litchi fruits during pre-cooling but also will improve the variable coefficient of temperature among litchi fruits in the package. A test was done to verify the accuracy of the model, and it found that the simulation values and experimental values are in good agreement, the average difference rate (MD) is 1.91%, and the root-mean-square error (RMSE) is 2.34%. Such results of this research reviews some characteristics of the pre-cooling of litchi fruits with packages in a cold room, which can provide a reference value for the optimization of the equipments and technologies for litchi fruit.

**Key words:** litchi; package; pre-cooling; characteristics of temperature decreasing; numerical simulation

收稿日期: 2016-01-08 修回日期: 2016-03-03

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD19B01-1-3)和现代农业产业技术体系建设专项基金项目(CARS-33-13)

作者简介: 郭嘉明(1987—),男,博士生,主要从事果蔬冷链物流技术与装备研究,E-mail: jming\_guo@163.com

通信作者: 吕恩利(1979—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业工程研究,E-mail: enlily@scau.edu.cn

## 引言

预冷可以减缓荔枝果实在冷链物流过程中的品质变化<sup>[1]</sup>。冷库预冷是冷风预冷方式之一,其原理是冷风经过预冷果蔬表面进行热交换实现降温<sup>[2]</sup>。对荔枝果实进行包装预冷,可以减小果实在预冷过程中失重率的上升,预冷后可直接贮运或销售。对带包装荔枝果实预冷过程进行优化,有利于降低预冷能耗、提高预冷效果<sup>[3]</sup>。目前,预冷风速、包装等因素对荔枝果实预冷过程的影响机理尚不明确,需进一步研究。采用试验方式可以研究预冷过程中果品温度的变化<sup>[4-6]</sup>,但试验对传感器精度要求较高,成本较大。同时,由于荔枝包装形状以及预冷环境变化具有一定的复杂性,虽通过布置传感器可以获得环境变化规律,但很难描述环境与果实之间的传热过程。

近年来,计算流体力学(Computational fluid dynamic, CFD)被国内外相关学者广泛应用于果品预冷优化研究<sup>[7-12]</sup>。文献[13]结合三维和二维模型,研究了冷库内风机高度以及风速对制冷过程的影响,证明二维模型同样可以表征库内流场特性。三维数值模型具有与实际更接近、边界条件简便等优点,但往往需要较大的网格数量,计算时间较长,对计算机性能要求较高。而二维模型网格数量少,计算时间短,有利于开展不同参数对比研究<sup>[14]</sup>,但边界条件设置更为复杂。本文以带包装荔枝果实预冷过程为研究对象,建立荔枝果实预冷二维数值模型,运用ICEMCFD软件对模型实体进行网格划分,并采用Fluent软件对模型进行求解,获得预冷过程荔枝果实温度变化的一般规律,并通过试验验证模型的准确性,为荔枝果实预冷过程优化提供一定的参考。

## 1 物理模型

本文主要研究塑料盒包装荔枝果实的降温特性,采用冷库预冷方式,冷库为已有果蔬气调保鲜试验平台,厢体结构如图1a所示。厢体基于压差原理设计,总尺寸(长×宽×高)为1.90 m×1.10 m×1.50 m,厢体材料为不锈钢和聚乙烯隔温材料,其中不锈钢厚度为1 cm,聚乙烯厚度为8 cm。开孔隔板将厢体分为压力室和保鲜室2部分。压力室自上而下分别是风机、制冷机组的蒸发器。风机运转在回风道形成负压,在压力室形成正压。在压差作用下,气流从保鲜室经回风道进入压力室,然后通过开孔隔板返回保鲜室,如此循环。通过改变回风道风速来改变通风风速。荔枝果实采用塑料盒包装,材质

为PET塑料,其具体结构及外观如图1b所示。其中,换气口A、C尺寸(长×宽)为4.5 cm×0.8 cm,换气口B尺寸(长×宽)为5.5 cm×0.8 cm。荔枝果实直径设为3 cm。本文主要研究通风风速、预冷温度、包装内果实层数对荔枝预冷过程的影响。

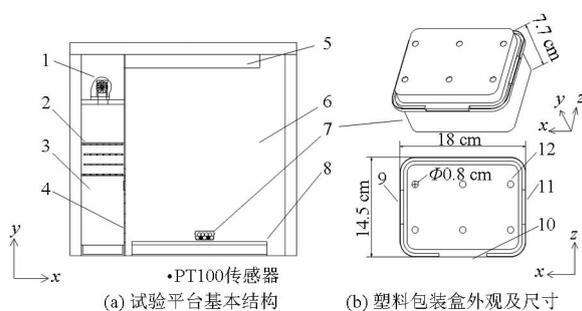


图1 果蔬气调保鲜试验平台结构及包装盒外观  
Fig.1 Structure of test bed with controlled atmosphere and package

1. 风机 2. 蒸发器 3. 压力室 4. 开孔隔板 5. 回风道 6. 保鲜室 7. 包装盒 8. 气流导轨 9. 换气口A 10. 换气口B 11. 换气口C 12. 换气孔

本文研究内容涉及2因素3水平的优化,共需要进行7组模拟,采用二维建模能够提高研究效率。通过AutoCAD进行二维建模,运用ICEMCFD对模型结构进行网格划分,采用非结构化网格划分方法,网格类型为三角形/四边形混合网格。同时,将隔板出口以及荔枝果实、包装换气口等位置进行局部加密。根据研究内容,共涉及到2个网格模型(区别在于包装内为单层或双层荔枝果实),网格数量分别为152 188和173 815。网格最大单元为1.0 cm,最小单元为0.005 cm。网格最大单元歪斜比小于0.8。网格划分部分结果如图2所示。



图2 网格模型结构

Fig.2 Structure of mesh model

## 2 数学模型

为方便计算,对模型进行如下假设:

(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。

(2) 厢体密封性良好,不存在漏气现象。

(3) 厢体内气体为不可压缩气体,符合 Boussinesq 假设<sup>[15]</sup>。

(4) 厢体内气体为牛顿流体,忽略承托架对厢内流场的影响。

(5) 忽略传感器导热对果实降温过程的影响。

采用工业上广泛应用的  $k-\varepsilon$  模型以及比较成熟的 SIMPLE 算法对荔枝果实在预冷过程中的温度变化进行仿真计算。采用有限体积法中的控制方程,包括质量、动量和能量守恒等方程<sup>[16]</sup>:

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式中  $\rho_f$ ——流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\mathbf{v}$ ——速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$

$t$ ——时间,  $\text{s}$

(2) 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  $p$ ——静压,  $\text{Pa}$

$\rho_f \mathbf{g}$ ——重力作用项,  $\text{N}/\text{m}^3$

$\mathbf{F}$ ——流体力,  $\text{N}/\text{m}^3$

(3) 能量方程

空气区域

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

式中  $E_f$ ——流体能量,  $\text{J}/\text{kg}$

$E_p$ ——果品能量,  $\text{J}/\text{kg}$

$\phi$ ——果品开孔率,由于模型中采用荔枝实体建模,这里取值为 0

$\rho_p$ ——果品的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$k_{eff}$ ——有效热导率,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$T$ ——温度,  $\text{K}$

$h_i$ ——组分  $i$  的焓,  $\text{J}/\text{kg}$

$\mathbf{J}_i$ ——组分  $i$  的扩散通量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$S_j^h$ ——热源项,  $\text{W}/\text{m}^3$

果品区域

$$\rho_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{eff} \text{grad} T) + q_p \quad (4)$$

式中  $C_p$ ——荔枝果实等压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$T_p$ ——荔枝果实平均温度,  $\text{K}$

$q_p$ ——荔枝果实呼吸热,  $\text{W}/\text{m}^3$

(4) 荔枝呼吸热模型

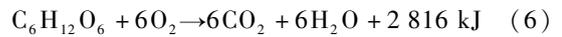
本文考虑了呼吸热对果实预冷过程的影响,荔枝呼吸热表达式推导过程如下:

荔枝果实呼吸速率与温度之间的关系<sup>[17]</sup>为

$$R_{\text{CO}_2} = 1.99 \times 10^{14} \exp\left(\frac{-8528.57}{T_p}\right) \quad (5)$$

式中  $R_{\text{CO}_2}$ ——荔枝果实的呼吸值,  $\text{mL}/(\text{kg} \cdot \text{h})$

植物有氧呼吸反应式<sup>[18]</sup>为



结合式(5)和(6),并进行单位转换,得荔枝呼吸热方程为

$$q_p = 3.0049 \times 10^{11} \exp\left(\frac{-8528.57}{T_p}\right) \quad (7)$$

将呼吸热源项编写成 UDF(用户自定义函数),考虑荔枝呼吸对预冷过程的影响。

### 3 边界条件及设置

与文献[13]不同,本文的研究对象虽然具有对称结构,但风机、回风道部分并不是延伸至厢体  $z$  方向的两端,且包装盒与包装盒以及果实之间也存在间隙,在设置二维边界条件时需对其边界和物性参数进行处理。从而,使得二维截面求解的结果是三维模型中各  $z$  方向水平节点流场数据在该平面上的平均值或投影,因此,二维求解对获取包装盒内的流场数据同样具有较高的准确性和宏观性。

对模型进行雷诺数求解,雷诺数经验公式<sup>[19]</sup>为

$$Re = \frac{UL}{\gamma} \quad (8)$$

式中  $U$ ——速度特征尺度,  $\text{m}/\text{s}$

$L$ ——长度特征尺度,  $\text{m}$

$\gamma$ ——运动学黏性系数,  $\text{m}^2/\text{s}$

求得不同模拟组别雷诺数  $Re$  的最大值均达到了  $10^3$  以上,需选择高雷诺数紊流模型<sup>[20]</sup>。

#### 3.1 入口条件

将隔板出口设置为 Velocity-inlet(速度入口)。通过设置回风道风速来控制预冷风速。通过三维至二维的转换,当回风道风速为 2、4、6、8、10  $\text{m}/\text{s}$  时,隔板出口速度水平分别为 0.56、1.13、1.69、2.26、3.04  $\text{m}/\text{s}$ 。入口温度水平设为 1、3、5 $^{\circ}\text{C}$ 。输入紊流参数为湍流强度  $I$  和水力直径  $D_H$ 。湍流强度  $I$  计算式<sup>[19]</sup>为

$$I = 0.16 (Re_{DH})^{-\frac{1}{8}} \quad (9)$$

式中  $Re_{DH}$ ——以水力直径求出的雷诺数

实际上,制冷系统启动时,隔板出口温度不能马上降至目标温度,因此采用 UDF 将温度的变化添加至隔板出口。

#### 3.2 出口条件

将回风道出口设为 Pressure-outlet,湍流强度按式(9)计算。

### 3.3 壁面条件

将箱体壁面设为热流量边界条件,即将外界对厢内环境的影响通过设置壁面热流条件添加进模型;将包装壁面和荔枝果实表面设为耦合壁面传热边界条件。

### 3.4 模型求解

模型中各部分物性参数根据表 1<sup>[21-23]</sup> 设置。将厢体内环境、荔枝果实温度初始化为 25℃。采用瞬态求解器对模型进行求解,设置步长为 10 s。本文将 5/6 预冷时间<sup>[24]</sup> 作为预冷结束的标准,计算方法为

$$\theta = \frac{T_p - T_a}{T_{pi} - T_a} \quad (10)$$

式中  $\theta$ ——无量纲数,取 1/6

$T_p$ ——果品温度,℃

$T_a$ ——空气温度,℃

$T_{pi}$ ——果品初始温度,℃

当果实平均温度达至 5℃ 时,停止迭代。

表 1 物性参数设置

Tab. 1 Setting of material parameters

名称	参数	数值
空气	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1.225
	比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	1 006
	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.022 5
	动力黏性系数	1.79 × 10 <sup>-5</sup>
厢体材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 612
	比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	2 004.44
	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.35
荔枝	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	932.89
	比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	3 710
	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.51
包装材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 000
	比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	2 200
	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.47

## 4 模拟结果与分析

### 4.1 厢体流场及果实温度分布情况

对模拟结果进行分析,得出回风道风速为 8 m/s 时,厢内空气速度场以及包装内的温度分布情况,分别如图 3 和图 4 所示。从图 3 可以看出,空气经开孔隔板出来后,与包装接触,一少部分空气通过换气口进入包装。空气流动在包装后部形成了低风速区。空气在回风道入口汇聚,进入回风道。包装内平均风速为 0.059 m/s,说明包装盒结构对空气流动具有一定的阻碍作用。

图 4 是预冷结束时包装盒内的温度分布情况。从图中可以看出,处于包装盒靠前位置的荔枝果实

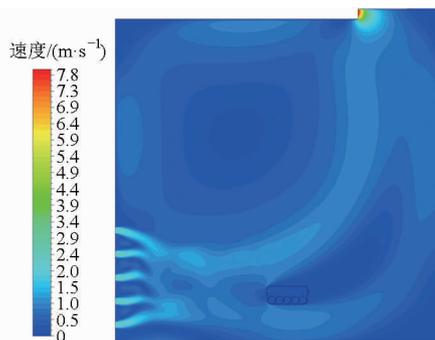


图 3 厢体内速度场分布

Fig. 3 Velocity distribution in container

温度较其他位置低。当包装盒内放置单层荔枝时,预冷结束后,果实最低温为 3.3℃,最高温为 6.7℃;而放置双层荔枝时,预冷结束后,果实的最低温为 2.9℃,最高温为 6.9℃。

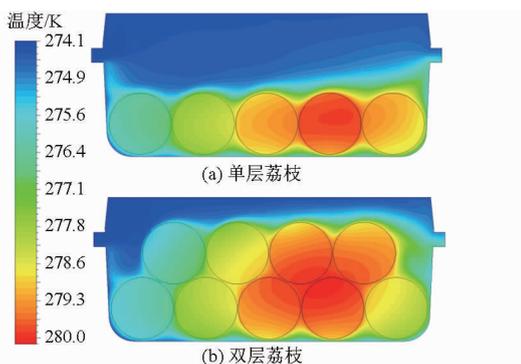


图 4 包装内温度场分布

Fig. 4 Temperature distribution in package

图 5 是包装内单层和双层荔枝果实平均温度在预冷过程中的变化情况,可以看出当包装内放置双层荔枝时,降温速率较单层荔枝小,预冷时间比单层荔枝约多 1 800 s。

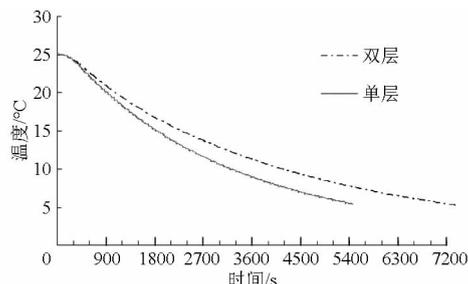


图 5 荔枝层数对预冷时间的影响

Fig. 5 Effects of levels of litchi fruit on process of pre-cooling

### 4.2 模型的验证

为了验证模拟结果的准确性,对回风道风速为 8 m/s,隔板出口温度为 1℃ 时的模拟结果进行试验验证。试验在气调保鲜试验平台上开展,采用 5 个包装盒进行试验,将厢体在该位置 z 水平方向上填满。共布置 10 路 PT100 传感器(德国贺利氏铂电阻,量程: -200 ~ 550℃,精度: ±0.1℃)测量荔枝果

实温度(将每一包装盒靠近中心的2个荔枝插上传感器)。试验材料为“妃子笑”荔枝,果实平均直径为3.15 cm,采用单层放置形式。设置隔板出口空气温度范围为0~2℃,调节回风道风速为8 m/s。采用数据采集仪实时记录传感器读数的变化。当环境和荔枝果实温度为(25±1)℃时,关闭厢门,开启制冷系统,待荔枝果实平均温度达到5℃时,停止预冷。对数据进行分析并与模拟结果进行比较,对比情况如图6所示。可以看出,试验结果与模拟结果吻合较好。采用平均误差MD( $E_{MD}$ )和均方根误差RMSE( $E_{RMSE}$ )来评价试验结果和预测结果的差异<sup>[25]</sup>,计算方法为

$$E_{MD} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{t_i - t_p}{t_i}}{N} \times 100\% \quad (11)$$

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{t_i - t_p}{t_i} \right)^2}{N}} \times 100\% \quad (12)$$

式中  $t_i$ ——温度试验值,℃  
 $t_p$ ——温度预测值,℃

通过计算,预冷同一时刻模拟值和对应试验值平均误差为1.91%、均方根误差为2.34%,证明所建模型具有一定的准确性。

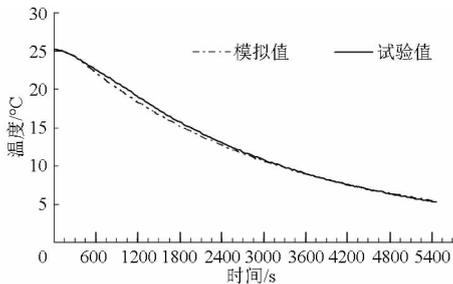


图6 荔枝果实平均温度试验值和模拟值随预冷时间变化

Fig.6 Average temperature change during process of pre-cooling

### 4.3 模型的实际应用

#### 4.3.1 通风风速对预冷时间的影响

预冷风速被证明是影响果蔬预冷时间的关键因素之一<sup>[4]</sup>,因此有必要研究通风风速对荔枝果实降温的影响。当回风道风速分别为2、4、6、8、10 m/s时,果实降温情况如图7所示。从图中看出,在预冷过程中,荔枝果实温度变化呈先快后慢变化趋势。随着预冷风速的增大,预冷时间呈递减趋势。当预冷风速大于6 m/s时,不同预冷风速下荔枝果实预冷时间较接近。虽然增大预冷风速可以提高预冷速度,但会提高系统的能耗。由于风机的能耗与频率呈3次方关系<sup>[26]</sup>,因此在实际预冷过程中应选择

6 m/s作为最佳预冷风速,以达到缩短预冷时间和降低能耗的目的。

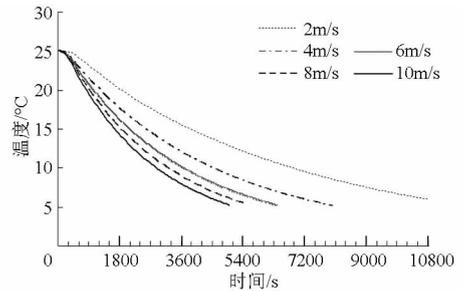


图7 通风风速对果实温度变化的影响

Fig.7 Effects of ventilation velocity on temperature of litchi fruit

预冷均匀性是指预冷过程中不同位置果品的温度差异性,采用变异系数评价<sup>[27]</sup>,计算式为

$$V = \frac{1}{\bar{T}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \quad (13)$$

式中  $V$ ——预冷结束时的温度变异系数  
 $\bar{T}$ ——荔枝果实平均中心温度,℃  
 $T_i$ ——第*i*个荔枝果实中心温度,℃

不同预冷风速下,预冷结束后,荔枝果实中心温度变异系数的计算结果如表2所示。从表2看出,随着预冷风速的提高,果实中心温度变异系数呈先递增后平缓的趋势,当预冷风速大于等于6 m/s后,变异系数稳定在约0.250。

表2 通风风速对果实中心温度差异性的影响

Tab.2 Effect of ventilation velocity on variable coefficient of temperature

参数	通风风速/(m·s <sup>-1</sup> )				
	2	4	6	8	10
果实中心平均温度/℃	5.23	5.17	5.24	5.41	5.31
变异系数	0.209	0.232	0.246	0.251	0.250

#### 4.3.2 隔板出口空气温度对预冷时间的影响

图8是隔板出口空气温度对果实预冷温度变化的影响。从图中可以看出,隔板出口空气温度越低,荔枝果实降温速度越快,这符合傅里叶传热理

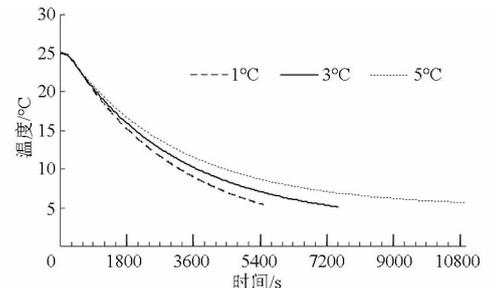


图8 隔板出口空气温度对果实温度变化的影响  
 Fig.8 Effects of air temperature in partition outlet on temperature of litchi fruit

论<sup>[28]</sup>,物体与环境温差越大,越有利于传热。当隔板出口温度为1、3、5℃时,预冷时间分别约为5 500、7 400、10 800 s。

预冷结束后,不同隔板出口温度下果实中心温度差异如表3所示。从表中看出,随着隔板出口温度的提高,荔枝果实平均中心温度变异系数呈递减趋势,即隔板出口空气温度越高,荔枝果实间的温度差异性越小。

表3 隔板出口温度对果肉中心温度的影响

Tab.3 Effects of air temperature in partition outlet on variable coefficient of temperature

参数	隔板出口温度/℃		
	1	3	5
果实中心平均温度/℃	5.41	5.13	5.64
变异系数	0.251	0.145	0.044

## 5 结论

以带包装荔枝果实预冷过程为研究对象,采用

数值模拟方法建立了荔枝果实预冷二维数值模型,通过改变回风道风速和隔板出口空气温度,研究其对荔枝果实温度变化和差异性的影响。经研究,得出以下结论:

(1)包装对空气流动具有一定阻碍作用,当回风道风速为8 m/s时,盒内平均风速仅约0.059 m/s。

(2)提高预冷风速,可以缩短预冷时间,但当预冷风速大于等于6 m/s后,预冷时间减小放缓。因此,为了降低能耗,可选择6 m/s为预冷较优风速;预冷结束时,荔枝果实平均中心温度差异性随预冷风速增大呈递增趋势,但随后稳定在约0.25。

(3)降低隔板出口空气温度可以缩短预冷时间,但会提高荔枝果实中心温度差异性。

(4)经试验验证,模拟结果与试验结果吻合较好,预冷过程同一时刻模拟值和试验值平均误差为1.91%、均方根误差为2.34%。

## 参 考 文 献

- 1 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.  
LV Shengping, LV Enli, LU Huazhong, et al. Effect of different precooling methods on the storage quality of litchi[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(3): 157-162. (in Chinese)
- 2 谭金翠. 双孢蘑菇冷库预冷研究[D]. 淄博: 山东理工大学,2013.  
TAN Jincui. Study on cold storage pre-cooling measurement of *Agaricus bisporus*[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 3 NGCOBO M, DELELE M A, OPARA U L, et al. Performance of multi-packaging for table grapes based on airflow, cooling rates and fruit quality[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(2): 613-621.
- 4 刘斌,申江,邹同华,等. 果蔬预冷风速与风机能耗和预冷效果的实验研究及分析[J]. 制冷学报,2005,26(4): 17-19.  
LIU Bin, SHEN Jiang, ZOU Tonghua, et al. Theoretical and experimental analyses of influences of pre-cooling air velocities on energy consumption of air fan and pre-cooling effects[J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(4): 17-19. (in Chinese)
- 5 何晖,申江,管萍. 垂直通风差压球形果蔬预冷的数学模型[J]. 流体机械,2003,31(9): 46-49.  
HE Hui, SHEN Jiang, GUAN Ping. Mathematical model of spherical fruit and vegetable during pressure pre-cooling for vertical ventilation[J]. Fluid Machinery, 2003, 31(9): 46-49. (in Chinese)
- 6 周慧娟,叶正文,苏明申,等. 预冷与冷链运输和货架期间桃果热传导性能及品质差异[J]. 经济林研究,2013,31(3): 116-120.  
ZHOU Huijuan, YE Zhengwen, SU Mingshen, et al. Difference of peach heat conduction and quality during precooling, cold chain transportation and shelf periods[J]. Monwood Forest Research, 2013, 31(3): 116-120. (in Chinese)
- 7 CHOURASIA M K, GOSWAMI T K. Simulation of transport phenomena during natural convection cooling of bagged potatoes in cold storage, part I: fluid flow and heat transfer[J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(1): 33-45.
- 8 CHOURASIA M K, GOSWAMI T K. Three dimensional modeling on airflow, heat and mass transfer in partially impermeable enclosure containing agricultural produce during natural convective cooling[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(7): 2136-2149.
- 9 DELELE M A, NGCOBO M, 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 and Technology, 2013, 86: 546-555.
- 10 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.
- 11 王强,陈焕新,董德发,等. 黄金梨差压通风预冷数值分析与实验验证[J]. 农业工程学报,2008,24(8): 262-266.  
WANG Qiang, CHEN Huanxin, DONG Defa, et al. Numerical analysis and experimental verification of pressure pre-cooling of golden pears[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 262-266. (in Chinese)
- 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 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.
- 14 刘妍华,曾志雄,郭嘉明,等. 增施 CO<sub>2</sub> 气肥对温室流场影响的数值模拟及验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 194 – 199.  
LIU Yanhua, ZENG Zhixiong, GUO Jiaming, et al. Numerical simulation and experimental verification of effect of CO<sub>2</sub> enrichment on flow field of greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(12): 194 – 199. (in Chinese)
- 15 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2002.
- 16 ANSYS. FLUENT 6.1 user's guide[M]. Lebanon, NH: Fluent, Inc, 2003.
- 17 段华伟,王志伟,胡长鹰,等. 气调环境和温度对荔枝呼吸特性的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2010, 29(5): 676 – 680.  
DUAN Huawei, WANG Zhiwei, HU Changying, et al. Effect of temperature and modified atmosphere on respiration properties of litchi fruit[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2010, 29(5): 676 – 680. (in Chinese)
- 18 SONG Y, VORSA N, YAM K L. Modeling respiration-transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 53(2): 103 – 109.
- 19 朱红钧,林元华,谢龙汉. FLUENT 流体分析及仿真使用教程[M]. 北京:人民邮电出版社,2010.
- 20 孙帮成,李明高. ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
- 21 冯妍卉,张欣欣,武文斐. 枝晶尺度溶质再分配对连续铸造凝固过程的影响[J]. *热科学与技术*, 2003, 2(3): 215 – 220.  
FENG Yanhui, ZHANG Xinxin, WU Wenfei. Effect analysis of micro mass transfer on steel casting solidification process[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2003, 2(3): 215 – 220. (in Chinese)
- 22 谢晶,徐倩,方恒和. 多温区冷藏车热负荷计算的研究[J]. *食品与机械*, 2007, 23(4): 98 – 101.  
XIE Jing, XU Qian, FANG Henghe. The calculation of heat load in a multi-temperature refrigeration truck [J]. *Food & Machinery*, 2007, 23(4): 98 – 101. (in Chinese)
- 23 徐凤英. 荔枝真空红外热辐射干燥传热传质机理研究[D]. 广州:华南农业大学,2006.  
XU Fengying. Study on mechanism heat and mass transfer in litchi vacuum & IR combined drying [D]. Guangzhou:South China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 24 DELELE M A, NGCOBO M, 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, 86:536 – 545. (in Chinese)
- 25 王娟,谭金翠,王相友. 风速对双孢蘑菇预冷过程的影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(10): 203 – 208.  
WANG Juan, TAN Jincui, WANG Xiangyou. Effect of air velocity on pre-cooling process of agaricus bisporus[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(10): 203 – 208. (in Chinese)
- 26 吕恩利,陆华忠,韩小腾,等. 气调保鲜运输车变频通风系统调控与能耗分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 248 – 253.  
LV Enli, LU Huazhong, HAN Xiaoteng, et al. Regulation and energy consumption analysis on frequency conversion ventilation system of fresh-keeping truck with controlled atmosphere [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(16): 248 – 253. (in Chinese)
- 27 李子甲,宋杰,钱杰. 渗透率变异系数不同计算方法的对比分析[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(5): 612 – 614.  
LI Zijia, SONG Jie, QIAN Jie. Comparison and analysis of calculation of different reservoir permeability variation factors[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(5): 612 – 614. (in Chinese)
- 28 LAGUERRE O, DURET S, HOANG H M, et al. Simplified heat transfer modeling in a cold room filled with food products[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 149: 78 – 86.