

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.038

送风风速对苹果差压预冷性能的影响*

韩佳伟^{1,2} 赵春江^{1,2} 杨信廷² 钱建平² 邢斌² 范蓓蕾²

(1. 北京工业大学计算机学院, 北京 100124; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 收后果蔬的及时预冷已成为供应商一项必备的增值业务, 提高其预冷均匀性及预冷速率不仅可以延长果蔬货架期、提高预冷吞吐量, 整体冷链物流的经济效益也可得到直接保证与提升。以富士苹果 2 层瓦楞纸包装箱为研究对象, 建立箱体、衬垫及果品的三维实体模型, 将果品呼吸热、表面蒸发热、冷凝热及对流传热作为果品区域内部热源, 利用 CFD 模拟预冷过程中不同送风速度下箱体内部温度分布情况, 对比分析不同工况下的冷却时间、瞬时冷却速率以及瞬时冷却均匀性, 从冷却时间与冷却所需能耗考虑给出较佳的预冷送风速度。研究表明, 当送风速度超过 2.5 m/s 时, 其制冷时间、冷却速率及冷却均匀性无显著改善, 通过将果品 F6、S6 表层、中心温度模拟值与实验值对比验证得出, 温度最高偏差不大于 1.5℃, 其最大均方根误差与平均相对误差分别为 1.179℃ 和 13.6%。该研究为提高苹果通风包装箱内部预冷均匀性, 选取较佳的送风速度, 降低预冷时间及减少不必要的预冷能耗提供了理论参考。

关键词: 苹果 送风风速 差压预冷 计算流体力学

中图分类号: U469.6⁺6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)11-0280-10

Effect of Air-inflow Velocity on Cooling Efficiency during Forced-air Precooling of Apples

Han Jiawei^{1,2} Zhao Chunjiang^{1,2} Yang Xinting² Qian Jianping² Xing Bin² Fan Beilei²

(1. College of Computer Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: To ensure the quality and safety, and extend storage and shelf life of horticultural products across the entire cold-chain, a critical step in the postharvest cold chain is rapid precooling after harvest to remove field heat. This work established a three-dimensional mathematical model of air-inflow and heat transfer for analyzing the aerodynamic and thermal forced-convection cooling of vented packages simultaneously. A direct model that uses the explicit geometry of stacked products in boxes was developed earlier and was used to study the local and average air-inflow through stacks of horticultural products (the package wall, trays and apples). This study is based on an existing two-layer corrugated box for precooling fresh apples. We accounted for the heat of respiration, transpiration, condensation and convective heat flow inside the produce zone. The results show that a reasonable increasing cooling rate and uniformity are obtained with an increase in air-inflow velocity to 2.5 m/s; any further increase in air-inflow velocity simply wastes energy because it leads to a relatively low increase in cooling rate and uniformity. The model was verified by comparing its results to those of experiments. The predicted results were consistent with the measured results. The maximum temperature deviation was less than 1.5℃, and the maximum root mean square error and average relative error for produce temperature were 1.179℃ and 13.6%,

收稿日期: 2015-07-09 修回日期: 2015-08-18

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAD19B04)和欧盟 FP7 资助项目(PIRSES-GA-2013-612659)

作者简介: 韩佳伟, 博士生, 主要从事计算机模拟与仿真研究, E-mail: hjwlove8@163.com

通讯作者: 赵春江, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业信息化关键技术研究, E-mail: zhaocj@nrcita.org.cn

respectively. This research thus provides a reliable theoretical basis for improving air-inflow and produce-temperature uniformity and minimizing energy consumption during forced-convection cooling of produce.

Key words: Apple Air-inflow velocity Forced-air cooling Computational fluid dynamics

引言

农产品冷链物流过程中,对收货后的农产品进行预冷及时去除田间热是农产品冷链物流的首要环节,也是确保农产品质量和安全、延长农产品货架期的关键环节之一。强制通风预冷(即压差预冷)是在农产品预冷过程中使用较为广泛且有效地预冷方法之一,其原理主要是在预冷包装箱两端产生压差,强制冷空气由包装箱壁面开口通过包装箱,使冷空气与包装箱内部果品发生热量交换的过程^[1]。由于包装箱内部为果品、衬垫的复杂堆栈结构,通过现场实验的方法一般很难了解、预测其箱体内部的空气流动类型、预冷均匀度及农产品自身温度的变化过程,因此很难对包装箱结构做更进一步的优化设计,而且也很难在避免农产品产生冷害的前提下提高预冷吞吐量、均匀性,减少预冷时间与不必要的能量消耗。相关学者^[2-5]利用实验的方法研究了农产品包装箱内空气流动以及传热、传质现象,但因涉及生物材料、农产品物性参数波动等而增加了现场实验的处理难度,且存在代价大、周期时间长等缺陷,不易得到推广应用。随着计算机硬件与软件应用技术的飞速发展,使得计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)数值模拟在各个领域得到了广泛的应用,有效地克服了现场实验的复杂性和成本高等问题,降低了人力、物力的投入。CFD 数值模拟不仅能模拟农产品包装箱内部空气流动类型、压力损失以及传热、传质现象,还能在高时空分辨率条件下获取冷却性能的相关信息^[6-8]。一些学者^[1, 9-12]利用 CFD 模拟和分析了农产品包装箱设计对其内部空气流动类型以及农产品传热、传质过程的影响,并验证了模拟结果的准确性与使用 CFD 数值模拟方法的合理性、可行性。

为更好地了解包装箱内部传热传质现象及空气流动类型,以期确保收货农产品得到更快更均匀的预冷且不会对其产生冷害,近年来,越来越多的学者^[13-17]利用 CFD 数值模拟及结合现场实验验证的方法对其预冷过程中农产品包装箱内空气流动类型和热量传递特点进行了深入的研究与分析。陈秀勤等^[18]针对特定预冷时间,模拟了 2 种开孔包装箱内不同堆码方式下果品表面及其内部的温度分布变化过程,实验结果与模拟结果趋势基本吻合,但其将果品表面蒸发潜热直接作为果品区域蒸腾热加载到体

内热源项中,导致模拟值最大误差达 3.6℃。王贵强等^[19]利用 CFD 模拟研究了包装对食品冻结过程的影响,但未给出具体的流场分析和温度分布图。Delele 等^[20-21]和 Dehghannya 等^[13-14]也对果品包装箱内部温度和速度分布进行了模拟和验证,但都以聚合物球体代替真实果品,致使模拟结果略失真真实性。本文以富士苹果为实验对象,针对市场上普遍使用的瓦楞包装箱,在北京市农林科学院国家精准农业示范基地的冷链物流模拟平台中,将单个苹果包装箱放置于实验搭建的虚拟风洞内对其进行强制通风预冷实验,考虑果品呼吸热、表面蒸发热、冷凝放热、对流传热对预冷过程中果品温度变化的影响,将其作为果品区域内部热源,利用 CFD 模拟预冷过程不同风速下的包装箱内部温度分布,以及冷却时间、冷却速率与冷却均匀性,以期确定较佳的强制通风预冷风速。

1 材料与方 法

1.1 物理模型

苹果在打包过程中,果品形状呈类球形且大小均匀,外包装兼顾箱体自身机械强度和内部冷空气的流通均匀性。相关研究文献表明在符合人机工程学、保持箱体结构机械完整性的情况下,针对不同种类果品其自身形状、大小、物理属性等的不同,其包装箱侧面开孔率、总表面开孔率以及大小也应有所不同;针对不同果品种类,使用不同规格类型包装箱,不仅可以提高箱体内部空间利用率,还可保证其内部气体流通均匀性^[22]。本文以市场上的瓦楞纸苹果包装箱为研究对象,果品以交叉方式摆放,其箱体尺寸为 45 cm × 27 cm × 20 cm(长 × 宽 × 高),壁面厚度为 0.6 cm,果品直径约为 9 cm,迎风面与背风面开孔率为 2.3%,箱体内部衬垫尺寸为 42 cm × 25 cm × 0.3 cm(长 × 宽 × 高),其包装箱具体结构参数及其内部果品摆放方式如图 1 所示。图中 ● 为温度测试点; d 为苹果直径, r 为苹果半径。

1.2 数学模型

1.2.1 模型假设

在建立实际问题的数学模型时,对其进行如下假设:①果品为近似球体,大小均匀、体积相同,属于各向同性的连续介质。②忽略果品成熟、衰老过程对果品呼吸热、蒸腾热的影响。③忽略实验仪器对箱体内部空气流动的影响。④忽略箱体与果品、果

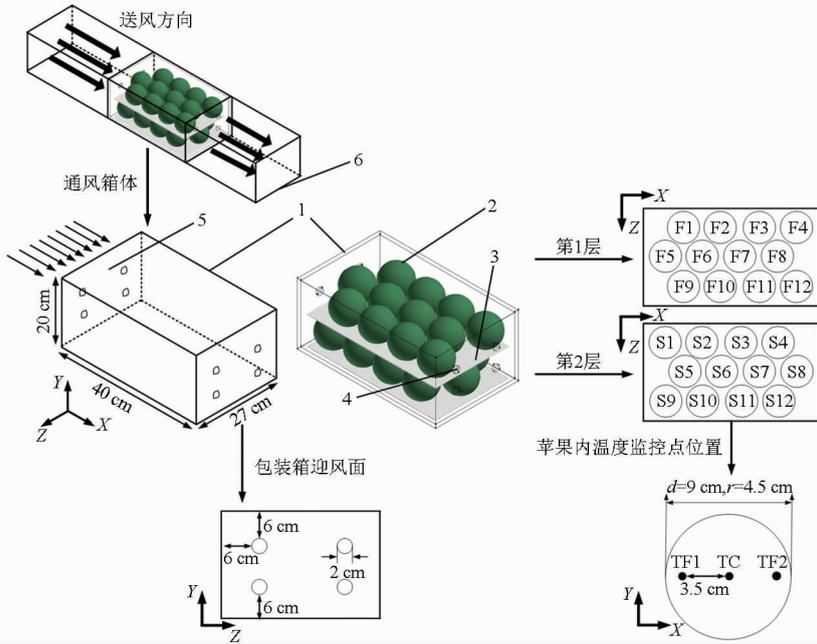


图 1 实验箱体结构图和设备仪器布置图

Fig. 1 Structure diagram of experimental platform and equipment deployment

1. 通风箱体 2. 苹果 3. 衬垫 4. 开孔 5. 迎风面 6. 通风道

品与果品之间的辐射传热。⑤冷空气为不可压缩流体,冷却过程中空气与果品的物性参数不随温度波动而改变。

1.2.2 控制方程

(1) 冷空气区域

对于瞬态、不可压缩流体的空气区域,利用平均雷诺数纳维-斯托克斯方程(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS)进行求解,连续性方程、动量方程、能量方程分别为

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (\rho_a u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_a u_i u_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_a \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_a \overline{u_i' u_j'}) - [1 - \alpha(T_a - T_0)] \rho_a g \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_a c_{p,a} T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_a c_{p,a} u_j T) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_a \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_a c_{p,a} \overline{u_j' T'}) \tag{3}$$

式中 t ——时间, s

p ——压强, Pa

x_i, x_j ——笛卡尔坐标

u_i, u_j ——空气时均速度, m/s

ρ_a ——空气密度, kg/m³

μ_a ——空气动力黏度, Pa·s

u_i', u_j' ——空气脉动速度, m/s

$\overline{u_i' u_j'}$ ——Reynolds 应力分量

α ——热膨胀系数, K⁻¹

T_a ——箱体内部空气温度, K

T_0 ——参考温度, 取冷库内空气温度, K

g ——重力加速度, m/s²

$c_{p,a}$ ——空气比热容, J/(kg·K)

T ——空气温度, K

λ_a ——空气热导率, W/(m·K)

$\overline{u_j' T'}$ ——Reynolds 通量项

T' ——空气脉动温度, K

在实验过程中,由于冷空气会快速充满整个包装箱体,因此取 $T_a = T_0$ 。

(2) 苹果区域

苹果内部热源主要有自身呼吸热(Q_r, W)、水果-空气表面对流传热(Q_{conv}, W)、蒸腾热(Q_e, W)和冷凝放热(Q_{con}, W),将其全部作为内部热源加载到苹果区域导热微分方程中,其控制方程为^[13-14, 20]

$$\rho_p c_{p,p} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \lambda_p \nabla^2 T_p + S_e \tag{4}$$

$$S_e = \frac{Q_r - Q_e + Q_{con} - Q_{conv}}{V_p} \tag{5}$$

$$Q_r = \rho_p q_r V_p \tag{6}$$

$$q_r = 0.003f(1.8T_p + 32)^g \tag{7}$$

$$Q_e = L_p m_t A_p \tag{8}$$

$$L_p = 9.1T_p^2 + 7512.9T_p + 3875100 \tag{9}$$

$$m_t = \begin{cases} k_t(p_s - p_h) & (p_w > p_h, p_s > p_h) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \tag{10}$$

$$k_t = \frac{1}{\frac{1}{k_a} + \frac{1}{k_s}} \quad (11)$$

$$Q_{con} = L_p m_{con} A_p \quad (12)$$

$$m_{con} = \begin{cases} k_a (p_h - p_s) & (p_h > p_s) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (13)$$

$$p_h = V_{RH} p_w \quad (14)$$

$$p_s = V_{VPL} p_w \quad (15)$$

$$p_w = 0.041081186T_a^3 - 32.431887T_a^2 + 8567.5269T_a - 757070.1 \quad (16)$$

$$Q_{conv} = h_p (T_p - T_a) A_p \quad (17)$$

$$Nu = \frac{h_p d}{\lambda_a} = 2 + 1.1 Re^{0.6} Pr^{1/3} \quad (18)$$

式中 ρ_p ——果品密度, kg/m^3
 $c_{p,p}$ ——果品比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 T_p ——果品温度, K
 λ_p ——果品导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
 S_e ——果品内部热源, W/m^3
 Q_r ——果品呼吸热, W/m^3
 q_r ——呼吸热产生速率, W/kg
 f, g ——特定常量参数, 苹果取 $f = 5.6871 \times 10^{-4}$, $g = 2.5977^{[23]}$
 Q_c ——蒸腾热, W/m^3
 L_p ——果品表面蒸发潜热(基于物体表面与周围冷空气温差), J/kg
 m_t ——蒸腾速率, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
 k_t ——蒸腾系数
 p_w ——贮藏温度下的饱和水蒸气压, Pa
 p_s ——果品表面水蒸气压, Pa
 p_h ——箱体包装内水蒸气压, Pa
 Q_{con} ——冷凝放热, W/m^3
 m_{con} ——冷凝系数, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$
 k_a ——空气膜传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$
 V_p ——果品体积, m^3
 A_p ——果品表面积, m^2
 V_{RH} ——相对湿度, %
 V_{VPL} ——由于细胞液中溶解有可溶性物质导致的蒸气压降低效应, 苹果取 $0.98^{[23]}$

k_s ——果蔬表面传质系数, 苹果取 $1.67 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$

Q_{conv} ——水果-空气表面对流传热, W/m^3

h_p ——果品表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

Pr ——普朗特数 Re ——雷诺数

由式(18)知, 取 $Re = 0^{[24]}$, 则 $h_p = 2\lambda_a/d$ 。

k_a 需要通过对流传质关联式 Sherwood-

Reynolds-Schmidt 计算求得^[25]。

$$Sh = \frac{k_a dRT_a}{\delta M_{H_2O}} = 2 + 0.552 Re^{0.53} Sc^{0.33} \quad (19)$$

式中 Sh ——舍伍德数 Sc ——施密特数

R ——气体常数, 取 $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

δ ——水蒸气在空气中的扩散系数, m^2/s

M_{H_2O} ——水蒸气的摩尔质量, 取 $18 \text{ g}/\text{mol}$

由于箱体内部空气流动速度较低, 在此假设雷诺数 $Re = 0$, 则 k_a 可简化为

$$k_a = \frac{2\delta M_{H_2O}}{dRT_a} \quad (20)$$

(3) 空气-苹果耦合界面区域

依据能量守恒, 单位体积空气的体积热增加量应与果品单位体积的体积热减少量相同, 则果品-空气热平衡方程为^[25]

$$(\lambda_a \nabla T_a - \lambda_p \nabla T_p) \mathbf{n}_{ap} = L_p m_{con} - L_p m_t - h_p (T_p - T_a) \quad (21)$$

式中 \mathbf{n}_{ap} ——垂直于果品-空气交界面的单位向量

(4) 纸箱区域

对于包装纸箱区域, 其壁面厚度的 8 倍远小于箱体高度与宽度, 沿壁面厚度方向温度梯度随时间变化极小, 则可将纸箱壁面区域作为无限大平壁处理^[26]。纸箱无内部热源, 因此纸箱区域导热可看作无内热源一维稳态导热。导热微分方程和壁面总热通量可表示为

$$\frac{d^2 T_b}{dx^2} = 0 \quad (22)$$

$$q_w = \frac{T_b - T_0}{\frac{1}{h_i} + \frac{l_w}{\lambda_w} + \frac{1}{h_0}} + q_{wcon} \quad (23)$$

$$Q_{wcon} = L_w m_{wcon} \quad (24)$$

$$L_w = (3151.37 - 2.381T_b) \times 10^3 \quad (25)$$

$$m_{wcon} = \begin{cases} k_a (p_h - p_s) & (p_h > p_s) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (26)$$

式中 T_b ——包装箱自身温度, K

q_w ——包装箱壁面总热通量, W/m^2

q_{wcon} ——包装箱壁面冷凝热通量, W/m^2

l_w ——包装箱壁面厚度, m

L_w ——箱体壁面蒸发潜热(基于箱体表面与冷空气温差)^[24], J/kg

m_{wcon} ——壁面冷凝系数, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

h_i ——包装箱内表面热传递系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

h_0 ——包装箱外表面热传递系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

1.3 实验方法与数值模拟方法

1.3.1 实验方法

(1) 此实验在冷链物流模拟平台的冷库内进

行,将实验包装箱放置于通风道内,通风道壁面为绝热壁面(图1),通风道一端放置1个风扇强制冷空气通过包装箱。为保证实验的精确性与合理性,在预冷过程中冷库处于完全封闭状态。在预冷实验之前将冷库内部温度降为 2°C (预冷过程中忽略库内温度波动现象)。

(2)包装箱内部分为2层苹果,第1层果品分别被编号为F1~F12,第2层分别被编号为S1~S12。

(3)利用CFD数值模拟实时监控果品迎风面与背风面的1 cm深度(分别编号为TF1、TF2)及中心位置(TC)温度变化过程(即虚拟温度传感器),将TF1、TF2两点温度的平均值作为此果品的表层温度(具体位置见图1)。在果品F6、S6的TF1、TF2、TC处分别布置探针式无线传感器实时记录并保存数据,将测试数据作为数值模拟验证数据。由于在预冷过程箱体内部果品表面的温度不易测量,因此该研究并未取果品表面温度作为验证数据。

(4)所有温度传感器设置为每隔1 min记录1次数据,取温度实测值与模拟值进行对比,验证CFD模拟结果的准确性。

1.3.2 数值模拟方法

计算时采用SST $\kappa-\omega$ 湍流模型^[27-28],基于压力的分离式求解器,动量、能量、湍动能、扩散率的离散格式为二阶迎风格式,压力速度耦合方法采用SIMPLE(Semi-implicit method for pressure-linked equations)算法,利用UDF(User-defined Function)接口将所有热源项加载到果品区域控制方程中,时间步长为60 s。针对不同预冷风速,模拟时间不等,直至果品平均温度保持稳定变化。依据相关文献^[17-18]给出冷空气、果品、包装箱及衬垫的热物性参数见表1。

表1 热物性参数

Tab.1 Thermo-physical properties

参数	空气	苹果	箱体	衬垫
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.29	895.81	220	260
热导率/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.024	0.463	0.050	0.050
比热容/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1004.8	3829	1700	1700
动力粘度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	1.72×10^{-5}			

1.4 初始条件与边界条件

初始条件: $t=0$ 时,果品初始温度 $T_{pin}=27^{\circ}\text{C}$ 。

边界条件如下:

(1)入口边界:将箱体迎风面4个开孔设置为速度-进口(velocity-inlet)边界条件,温度为冷库内部温度 2°C ,送风风速分别为0.5、1.0、2.0、2.5、3.0 m/s。

(2)出口边界:将箱体背风面4个开孔定义为出流(outflow)边界条件。此处的冷空气流动是充分发展的,在outflow边界上的所有变量(除压力)梯度为零,如速度分量 u 、 v 、 w 和温度 T 等。

(3)壁面:将箱体内外壁面、衬垫面以及果品表面都定义为无滑移壁面(wall),壁面上速度为零,且垂直于壁面的速度也为零。

1.5 网格划分

利用Gambit前处理软件对箱体、衬垫及果品三维模型进行网格划分,设置网格单元为Tet/Hybrid,网格类型为TGrid(混合网格),对不同区域分别进行混合网格划分。为保证数值模拟计算收敛且降低果品与果品、包装箱壁面之间接触点处的网格歪斜度,在箱体壁面与果品以及果品与果品之间留有一定空隙^[1]。网格化后共有719 963个面、327 997个单元,通过网格质量检查得出其整体模型网格歪斜度均小于0.93。具体网格化后如图2所示。

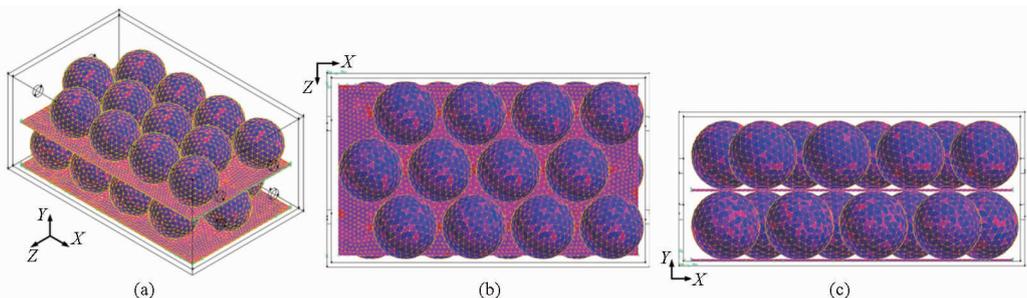


图2 模型网格

Fig.2 Computational meshes of model simulations

(a) 全视图 (b) 顶视图 (c) 侧视图

2 结果与分析

2.1 冷却时间

无量纲参数 $\theta = (T_{wall} - T_a) / (T_{pin} - T_a)$ 用于计

算未达到预定冷却温度的农产品占整体货物的比例,在商业预冷操作中被广泛应用于评估预冷过程的行为与速率,此无量纲参数在某种程度上完全独立于制冷设备,过滤掉初始条件波动现象对预冷过

程的影响,可直观地用于比较不同预冷操作条件的优越性。其中 T_{vwa} 为苹果区域的加权平均温度, K。对无量纲参数 θ 随时间的变化进行指数类型的回归分析(趋势线) $\theta = J \exp(-Ct)$, 当 $\theta = 1/2, 1/8$ 时可以计算出 1/2 预冷时间(HCT, min)和 7/8 预冷时间(SECT, min)分别为 $V_{HCT} = \ln(2J)/C, V_{SECT} = \ln(8J)/C$, 这是反映预冷操作中的 2 个重要参数。其中 C 为冷却系数, min^{-1} ; J 为无量纲参数。因在 7/8 预冷时间点, 农产品温度已与预定冷却温度非

常接近, 因此, 在商业预冷操作中, 在 7/8 预冷时间点即将农产品转移到冷库存储或进行冷藏运输, 在冷库或冷藏车厢内移除农产品剩余田间热, 这样不仅可以减少预冷时间, 也可降低预冷操作所需成本, 提高整体冷链物流的经济效益。

表 2 给出了不同风速下所对应的 J, C, V_{HCT}, V_{SECT} 以及相对偏差 E_{HCT} 和 E_{SECT} (E_{HCT} 与 E_{SECT} 分别为计算的 V_{HCT}, V_{SECT} 时刻所对应 CFD 温度模拟值与 θ 分别等于 1/2、1/8 时所对应的 T_{vwa} 值的相对偏差)。

表 2 不同风速下的 $J, C, V_{HCT}, V_{SECT}, E_{HCT}, E_{SECT}$
Tab. 2 $J, C, V_{HCT}, V_{SECT}, E_{HCT}, E_{SECT}$ for different air-inflow velocities

送风速度 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	J	C / min^{-1}	R^2	V_{HCT}/min	V_{SECT}/min	相对偏差/%	
						E_{HCT}	E_{SECT}
0.5	1.125 9	0.002	0.998 0	406	1 099	5.94	11.89
1.0	1.100 0	0.003	0.998 8	263	725	2.55	3.82
2.0	1.035 0	0.005	0.998 4	146	423	1.44	2.69
2.5	1.028 3	0.006	0.999 7	120	351	3.89	8.22
3.0	1.030 4	0.006	0.999 7	120	351	3.31	6.71

从图 3 可以看出, 随着送风速度的增大, 冷却速率也随之不断增大, 特别是 0.5 m/s 到 2.5 m/s 过程中, 冷却速率显著提高, 但当风速超过 2.5 m/s 时, 冷却速率并无显著提高。从表 2 中可以得出, 冷却系数 C 随风速的提高而不断增大, 当风速提高到 2.5 m/s 以后, 冷却系数 C 已基本保持稳定。当风速从 0.5 m/s 提高到 2.5 m/s 时, V_{HCT} 和 V_{SECT} 分别降低了 70.4% 和 68.1%, 但当风速超过 2.5 m/s 以后, V_{HCT} 和 V_{SECT} 基本上已保持稳定不再降低, 因此, 结合冷却时间与制冷风机所需能耗考虑, 对此规格苹果包装箱进行差压预冷的过程中可优先选取 2.5 m/s 左右的送风速度。

冷却速率 R 对比分析不同时刻的冷却速率, 更为直观地给出不同工况下的冷却速率^[29] (图 4), R 计算公式为

$$R = C(T_{vwa} - T_a) \quad (27)$$

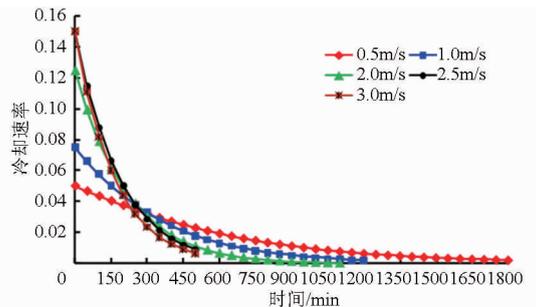


图 4 不同风速下冷却速率变化曲线

Fig. 4 Instantaneous cooling rates with different air-inflow velocities

从图 4 可以看出, 在整个预冷过程中, 冷却速率随预冷时间逐渐减小, 直至趋近于零, 这可能主要归结于在制冷过程中果品温度与冷空气的温差逐渐减小, 致使果品与冷空气之间的热流量随着时间增加而逐渐减小。随着送风速度的提高, 其开始阶段冷却速率也随之增大, 当风速超过 2.5 m/s 以后, 其瞬时冷却速率的变化规律已基本保持稳定并无显著提高。

2.3 冷却均匀性

利用不同时刻箱体内部果品温度的变异系数给出不同风速下预冷过程中冷却均匀性的变化过程(图 5), 温度变异系数的计算式为

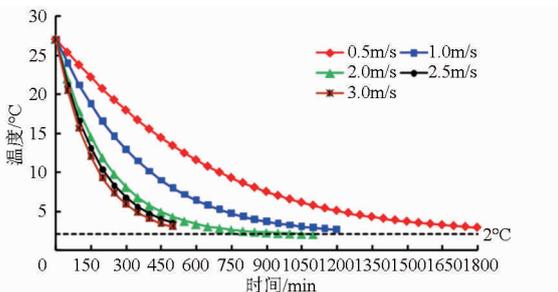


图 3 不同风速下所有果品平均温度变化曲线

Fig. 3 Average temperatures of all apples with different air-inflow velocities

2.2 冷却速率

不同预冷风速下的冷却速率可以由冷却系数 C 反映, 但整个预冷过程中若 C 始终为常数, 则不易详细了解整个过程中冷却速率的变化。为更好地了解预冷过程中不同时刻冷却速率的变化, 利用瞬时

$$T_{cv-t} = \frac{1}{\bar{T}_t} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_{i-t} - \bar{T}_t)^2} \quad (28)$$

式中 T_{cv-t} —— t 时刻的温度变异系数
 \bar{T}_t —— t 时刻所有温度监控点的平均值, K
 T_{i-t} —— t 时刻第 i 个温度测试点的值, K
 n ——温度监控点个数

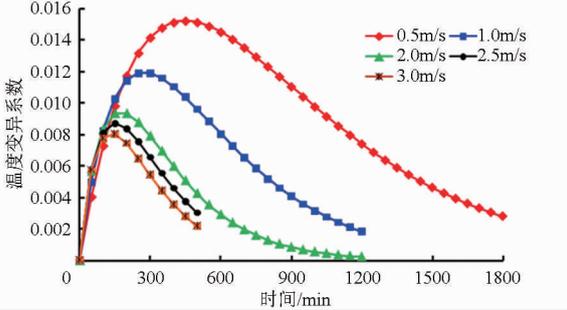


图5 不同风速下温度变异系数变化曲线

Fig.5 Instantaneous temperature variation coefficients with different air-inflow velocities

温度变异系数越大,箱体内部果品温度离散程度越大,冷却均匀性越低,反之越高。在不同果蔬预冷中可能会利用不同温度的冷空气对其制冷,在预冷过程中某时刻整体果蔬的平均温度可能会为 0°C ,由于温度变异系数为温度标准差与平均值的比值,为防止分母为零的情况发生,在计算温度变异系数时应选取开尔文温度^[29]。

从图5可以看出,温度变异系数在整个预冷过程中呈现先增大后减小的趋势。在预冷开始的一定时间段内,不同送风速度下温度变异系数变化基本相同。随着送风速度增大,温度变异系数不断降低,且针对于整个预冷过程来说,送风速度越大,其温度变异系数越小,冷却均匀性越高。当送风速度超过 2.5 m/s 时,温度变异系数降低幅度并不显著,过分追求温度均匀性提高而产生的经济效益可能不足以弥补由于风速增大所需的风机运转能耗。图6给出预冷 300 min 时刻不同送风速度下箱体上下两层果品的瞬时温度分布情况。从图6可以明显看出,上下两层整体果品最大温差及最高温度随风速的提高而逐渐减小,箱体内部果品温度分布也随送风速度的提高变得更为均匀。

3 模型验证

本研究所采用的温度传感器为探针式无线温度传感器,设有终端设备接收、保存及实时显示温度变化(北京农业信息技术研究中心研制)。取送风速度 2 m/s 工况下前 300 min 内果品 F6、S6 的表层、中心温度的测试值与模拟值进行对比验证(图7)。图中 Sim、Expt 分别表示实验值与模拟值,S、C 分别表示表面温度和中心温度。对比所有温度模拟值与实验值得出,最大温度偏差小于 1.5°C ,其具体均方根

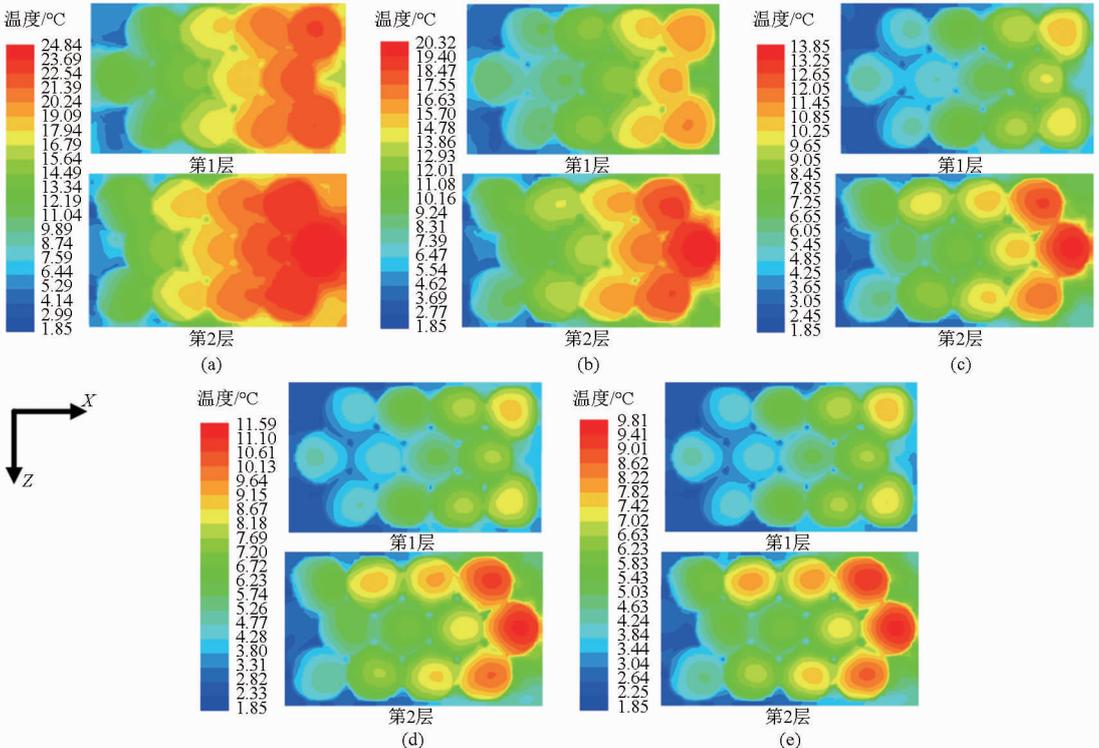


图6 不同风速下果品温度分布云图(模拟时间为 300 min)

Fig.6 Instantaneous static temperature contours with different air-inflow velocities (simulation time of 300 min)

(a) 0.5 m/s (b) 1.0 m/s (c) 2.0 m/s (d) 2.5 m/s (e) 3.0 m/s

误差 (Root mean square error, RMSE)、平均相对误差 (Average relative deviation, ARD) 见表 3。模拟值与实验值存在偏差的原因可能主要归结于果品形状的

简化、测量仪器自身误差、入流速度和温度的波动以及模拟过程值的脉动等。

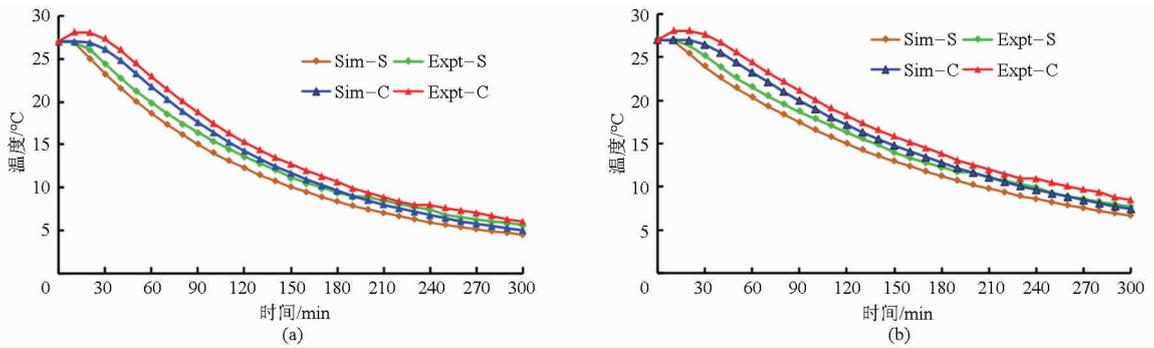


图 7 温度模拟值与实验值比较

Fig. 7 Comparison of simulation and experiment results of temperature

(a) 果品 F6 (b) 果品 S6

表 3 均方根误差与平均相对误差

Tab. 3 Values of RMSE and ARD

指标	F6		S6	
	表面	中心	表面	中心
RMSE/°C	1.036	1.051	1.179	1.127
ARD/%	13.6	11.8	10.3	8.2

4 讨论

4.1 呼吸速率模型

呼吸是果蔬农产品重要的生命活动,其呼吸热是预冷农产品热量的主要来源之一,因此呼吸速率模型对模拟预冷过程中果蔬温度变化过程的准确性也会产生较大影响。本文所使用的呼吸速率模型参照文献[23],并未考虑果品衰老对其呼吸速率的影响。进一步研究表明,果品基因类型、乙烯浓度、损伤和擦伤、病害等因素都会对果品自身呼吸速率产生严重的影响^[30]。甚至相同果品的不同批次其呼吸速率都会有 10%~20% 的偏差^[31]。在稳定的存储条件下,对于一些果品种类其自身的呼吸速率突然增大或减小的现象也普遍存在^[25]。因此,在利用 CFD 数值模拟提高包装箱结构优化设计的研究中,呼吸速率的不确定性对其准确性的提高产生了极大的阻碍。

4.2 多孔介质模型非适用性

多孔介质是以固相为固体骨架,具有相互连通的微小孔隙(空洞),在压差力作用下驱使流体(气体或液体)在其内部产生渗流的固体模型,其多孔介质内部传热传质及流体传输现象被广泛应用于力学、生物力学、地球科学、生物学、生物物理学、材料科学和食品系统等科学与工程领域^[7]。在食品工程领域,此模型多应用于颗粒状谷类或叶茎类蔬菜

在具体工况下其内部的传热传质现象。然而在农产品预冷过程中,由于普遍存在包装箱与内部果品水力直径之比小于 10 的情况,此时包装内部局部非均匀的空气流动对其内部传热传质现象会有较大的影响,且此时多孔介质模型的连续性假设已不成立^[22]。因此,针对园艺农产品预冷,当包装箱与其内部果品的水力直径小于 10 时,多孔介质模型已不适用。

4.3 能耗

货物的初始温度直接决定所需去除田间热的热量,也间接决定所需的制冷能耗量,另外风机运转强制冷空气以不同的速度通过包装箱以及果蔬自身呼吸热的大小也是决定预冷过程中所需能耗的关键因素^[32]。本研究在对比得出较佳的预冷风速时,并未给出具体不同风速下的风机运转所需能耗。这是因为预冷过程中所需能耗涉及较多复杂因素的影响,一次实验并不能给出具体且明确耗能量,本课题组将会以此作为下一步的研究目标,为提高冷链物流整体经济效益提供相应的理论支持。

5 结论

(1) 以富士苹果双层瓦楞纸包装箱为研究对象,在冷链物流模拟平台对其进行预冷实验研究,并建立其箱体、衬垫及果品的三维实体模型,利用 CFD 模拟不同送风速度下预冷过程中箱体内部果品温度分布情况,并对比分析不同送风速度下 1/2 与 7/8 冷却时间、瞬时冷却速率以及瞬时温度均匀性的变化规律,得出较佳的预冷风速。

(2) 通过对比不同送风速度下冷却时间、瞬时冷却速率以及瞬时温度均匀性的变化规律得出:随预冷送风风速的增大,1/2 与 7/8 冷却时间、冷却速率及冷却均匀性不断提高。送风速度从 0.5 m/s 提高到

2.5 m/s时,1/2 与 7/8 冷却时间可降低 70% 左右,但当风速超过 2.5 m/s 以后,其相应的冷却时间、冷却速率以及冷却均匀性虽有少许改善,但其带来经济效益的提高可能比预冷过程中风机运转维持相应风速所需的能耗量要低。因此,针对此规格苹果包装箱的预冷,选用 2.5 m/s 左右的送风速度为较佳。

(3) 取果品 F6、S6 表面、中心温度的实测值与模拟值进行对比验证,其最大均方根误差为 1.179℃,最大平均相对误差为 13.6%,证明了本次实验设计方案的合理性,说明通过考虑果品呼吸热、表面蒸发热、冷凝放热与对流传热以后可提高模拟结果准确性。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Castro de L R, Vigneault C, Cortez L A B. Effect of container opening area on air distribution during precooling of horticultural produce[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(6): 2033–2038.
- 3 Castro de L R, Vigneault C, Cortez L A B. Cooling performance of horticultural produce in containers with peripheral openings [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 38(3): 254–261.
- 4 Ngcobo M E K, Delele M A, Opara U L, et al. Resistance to airflow and cooling patterns through multi-scale packaging of table grapes[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35(2): 445–452.
- 5 Vigneault C, Castro de L R. Produce-simulator property evaluation for indirect airflow distribution measurement through horticultural crop package[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2005, 3(2): 67–72.
- 6 Defraeye T, Lambrecht R, Tsigie A A, et al. Forced-convective cooling of citrus fruit: package design [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 118(1): 8–18.
- 7 Dehghannya J, Ngadi M, Vigneault C. Mathematical modeling procedures for airflow, heat and mass transfer during forced convection cooling of produce: a review[J]. *Food Engineering Reviews*, 2010, 2(4): 227–243.
- 8 Smale N J, Moureh J, Cortella G. A review of numerical models of airflow in refrigerated food applications [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(6): 911–930.
- 9 Alvarez G, Bournet P E, Flick D. Two-dimensional simulation of turbulent flow and transfer through stacked spheres [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(13): 2459–2469.
- 10 Delele M A, Schenk A, Ramon H, et al. Evaluation of a chicory root cold store humidification system using computational fluid dynamics[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 94(1): 110–121.
- 11 Delele M A, Ngcobo M E K, Opara U L, et al. Investigating the effects of table grape package components and stacking on airflow, heat and mass transfer using 3-D CFD modelling[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 6(9): 2571–2585.
- 12 Ferrua M J, Singh R P. Improving the design and efficiency of the forced-air cooling process of fresh strawberries using computational modeling[J]. *Procedia Food Science*, 2011, 1: 1239–1246.
- 13 Dehghannya J, Ngadi M, Vigneault C. Mathematical modeling of airflow and heat transfer during forced convection cooling of produce considering various package vent areas[J]. *Food Control*, 2011, 22(8): 1393–1399.
- 14 Dehghannya J, Ngadi M, Vigneault C. Transport phenomena modelling during produce cooling for optimal package design: thermal sensitivity analysis[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 111(3): 315–324.
- 15 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.
- 16 Opara U L, Zou Q. Novel computational fluid dynamics simulation software for thermal design and evaluation of horticultural packaging[J]. *International Journal of Postharvest Technology and Innovation*, 2006, 1(2): 155–169.
- 17 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]. *农业机械学报*, 2012, 43(增刊): 215–217.
Yang Zhou, Chen Chaohai, Duan Jieli, et al. Simulation and experiment of airflow field in cartons of pressure-difference pre-cooling for litchi[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(Supp.): 215–217. (in Chinese)
- 18 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)
- 19 王贵强,邹平华,刘明生,等.包装对食品冻结过程的影响研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(7): 171–176.
Wang Guiqiang, Zou Pinghua, Liu Mingsheng, et al. Study on the effect of packaging on food freezing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 171–176. (in Chinese)
- 20 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 I: model development and validation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 86(12): 536–545.
- 21 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]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 86(12) : 546 – 555.
- 22 Pathare P B, Opara U L, Vigneault C, et al. Design of packaging vents for cooling fresh horticultural produce[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(6) : 2031 – 2045.
- 23 Becker B R, Misra A, Fricke B A. Bulk refrigeration of fruits and vegetables part I : theoretical considerations of heat and mass transfer[J]. *HVAC & R Research*, 1996, 2(2) : 122 – 134.
- 24 Dehghannya J, Ngadi M, Vigneault C. Simultaneous aerodynamic and thermal analysis during cooling of stacked spheres inside ventilated packages[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2008, 31(11) : 1651 – 1659.
- 25 Rennie T J, Tavoularis S. Perforation-mediated modified atmosphere packaging: part I . development of a mathematical model [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2009, 51(1) : 1 – 9.
- 26 卢改林. 热工基础及流体力学[M]. 北京:中国电力出版社,2012.
- 27 韩佳伟,赵春江,杨信廷,等. 基于 CFD 数值模拟的冷藏车节能组合方式比较[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(19) : 55 – 62.
Han Jiawei, Zhao Chunjiang, Yang Xinting, et al. Comparison of combination mode of energy conservation for refrigerated car based on CFD numerical simulation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(19) : 55 – 62. (in Chinese)
- 28 赵春江,韩佳伟,杨信廷,等. 基于 CFD 的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11) : 168 – 173.
Zhao Chunjiang, Han Jiawei, Yang Xinting, et al. Numerical simulation of temperature field distribution in refrigerated truck based on CFD[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(11) :168 – 173. (in Chineset)
- 29 Defraeye T, Cronjé 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 & Technology*, 2015,44(2) :201 – 225.
- 30 章建浩, 生鲜食品贮藏保鲜包装技术[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- 31 Talasila P C, Chau K V, Brecht J K. Modified atmosphere packaging under varying surrounding temperature[J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(3) : 869 – 876.
- 32 Defraeye T, Lambrecht R, Delele M A, et al. Forced-convective cooling of citrus fruit: cooling conditions and energy consumption in relation to package design [J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 121(1) : 118 – 127.
- 33 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 Chunjiang, Han Jiawei, Yang Xinting, 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. (in Chinese)