

黄金梨差压通风预冷数值分析与实验验证

王强^{1,2}, 陈焕新¹, 董德发², 刘凤珍²

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074; 2. 山东建筑大学热能工程学院, 济南 250101)

摘要: 为给果蔬差压通风预冷送风速度选择、包装箱设计等提供理论参考, 根据差压通风预冷流动传热机理, 建立了黄金梨预冷仿真模型, 利用计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics) 软件, 对包装箱内直排和叉排两种摆放形式黄金梨预冷过程进行了模拟。分析了不同送风速度、开孔形式和开孔大小等参数对黄金梨预冷过程的影响。数值模拟结果和实验测试结果对比分析表明, 数学模型较好地反映了差压通风预冷过程中各参数对预冷效果的影响, 实验测试验证了理论模型的可靠性。送风速度由 1 m/s 提高到 2 m/s, 黄金梨冷却到 5℃ 时, 冷却时间减少了 15%~20%; 开孔形式对冷却时间的影响在 5% 左右; 40 mm 和 45 mm 两种开孔大小工况下黄金梨冷却时间差别在 10% 左右; 两种排列摆放方式对黄金梨冷却时间的影响在 10%~12%。建议送风速度 1.5~2.0 m/s, 圆形开孔, 孔径 45 mm 左右, 排列摆放方式为叉排。

关键词: 差压预冷; 数值模拟; 冷却速度; 黄金梨

中图分类号: TB69

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-8-0262-05

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 with English abstract)

0 引言

从“九五”国家重点科技攻关项目“生鲜食品物流冷链系统关键技术及综合示范工程”到“十一五”期间“果蔬产地预冷、冷链技术集成与产业化示范”列入国家科技支撑计划重点项目, 果蔬预冷技术在国家经济发展过程中的重要作用越来越凸显。差压通风预冷是利用差压风机在包装箱的两侧造成压差, 使冷空气强制从包装箱内部通过, 直接与箱内果蔬接触换热的一种冷却方式。其特点是降温速度快、效率高, 冷却 7/8 时间是冷库强制通风预冷的 1/4~1/8^[1]。

差压通风预冷是一项应用性很强的技术, 近年来很多学者陆续开展了这方面的试验研究, 对影响预冷效果的相关参数如冷风温度、送风速度、包装箱开孔形式、开孔面积等进行了研究^[2-6]。文献[7,8]建立了冷风流过包装箱内非线性稳态渗透多孔介质流动方程, 从理论上研究了冷风流速对箱内压力场的影响, 总结了压差与流速与特性尺寸的关系式, 但并没有对流场与温度场的耦合进行研究。本文建立果蔬差压通风预冷三维湍流流动数学模型, 对包装箱内直排摆放和叉排摆放两种摆放形式的黄金梨预冷流场和温度场进行耦合求解, 模拟了黄金梨的降温过程, 并对相应工况下的预冷过程进行了实验测试。希望能对果蔬差压通风预冷过程中送风参数的确定、包装箱设计等提供一定理论指导。

收稿日期: 2007-11-21 修订日期: 2008-06-17

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20060400844); 华中科技大学博士后科学基金资助项目(2005033)

作者简介: 王强(1971-), 男, 山东文登人, 博士后, 副教授, 主要从事低温食品冷藏链研究。武汉 华中科技大学能动学院制冷低温研究所 430074。Email: jdwq@sina.com

1 差压通风预冷物理模型的建立

为增强理论模拟结果与实验结果的可比性, 包装箱物理模型尺寸选择了实验包装箱内部的实际尺寸, 其长、宽、高分别为 356、285、214 mm, 为便于计算, 假定箱内黄金梨为球形, 直径 71.2 mm。包装箱两侧开各 6 个孔, 孔型分别为圆形、正方形, 黄金梨在箱内作直排摆放和叉排摆放两种摆放方式, 如图 1 所示。

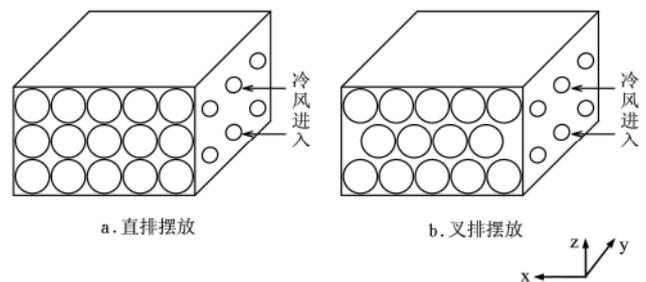


图 1 预冷箱内果蔬两种排列摆放物理模型

Fig.1 Physical model of pre-cooling carton with different stacking patterns

2 数学模型的建立

2.1 三维流动换热数学方程

为方便数学模型的建立与计算的简化, 对实际预冷过程进行了必要的假设。预冷过程为三维非稳态传热; 果蔬物性参数为常数, 各向同性; 冷风的热物性参数为常数; 忽略单体之间的接触传热; 预冷过程在较低的温度环境下进行, 忽略辐射热; 忽略预冷过程中的水分蒸发。由文献[9,10]可得连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \rho F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu_e(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] \quad (2)$$

$$\mu_e = \mu + \mu_t$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho t)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u_i t)}{\partial x_i} = \text{div}(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} t) + S_T \quad (3)$$

式中: ρ ——密度, kg/m^3 ; τ ——时间, s ; u_i, u_j ——各时均速度分量, $i, j=1, 2, 3$, m/s ; x_i, x_j ——各坐标分量, $i, j=1, 2, 3$; F_i ——单位质量力, N/kg ; p ——流体的时均压力, Pa ; μ_e ——湍流黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ ——分子黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_t ——涡黏性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; t ——流体温度, $^\circ\text{C}$; λ ——导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c_p ——定压比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; S_T ——广义源项。

2.2 处理条件

包装箱入口边界条件

$$u=0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 \text{ m/s}, v=0, w=0, t=1^\circ\text{C}$$

箱壁面传热条件

$$v=0 \quad \frac{\partial t}{\partial y}=0, \quad w=0 \quad \frac{\partial t}{\partial z}=0$$

箱内单体的初始条件 $\tau=0 \quad T=T_0$

出口边界条件 $\frac{\partial u}{\partial x}=0, \quad \frac{\partial t}{\partial x}=0$

式中 $u、v、w$ —— $x、y、z$ 方向上的速度分量; m/s ;
 T ——黄金梨温度, $^\circ\text{C}$; T_0 ——黄金梨的冷却初始温度, $^\circ\text{C}$ 。

3 数值计算

3.1 网格的划分

黄金梨摆放方式为分直排 (straight stacking)和叉排 (staggered stacking)两种, 如图 2 所示。区域划分采用非结构化网格。

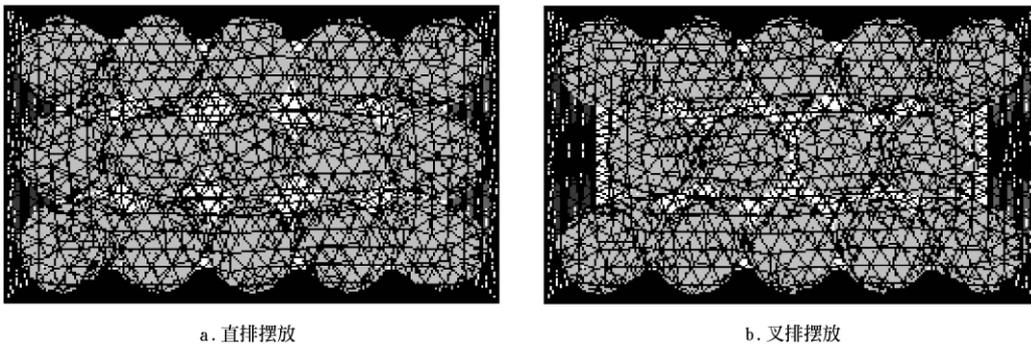


图 2 两种排列方式的网格划分
Fig.2 Grid division of different stacking patterns

3.2 方程的离散与求解

采用有限容积积分法, 应用泰勒级数展开式对计算区域及控制方程进行离散; 时间导数采用朝前差分格式, 空间导数采用中心差分格式。鉴于问题的复杂性, 对流扩散项采用一阶迎风格式; 源项采用线性化处理; 边界条件的处理采用附加源项法, 进出边界控制容积的热量作为与之相邻控制容积的当量源项。

采用湍流流动 $k-\varepsilon$ 模型和SIMPLE算法进行, 在计黄金梨三维预冷问题, 为了保持差分方程的稳定性, 时间步长和空间步长的选择需要满足以下条件^[11],

$$a\Delta\tau(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}) = F_o \leq 1.5 \quad (4)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

式中 a ——热扩散率, m^2/s ; $\Delta\tau$ ——时间步长, s ;
 $\Delta x、\Delta y、\Delta z$ ——空间步长, m ; F_o ——傅立叶(Fourier)数; c ——黄金梨比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

取三个方向的空间步长相等, 即:

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z$$

则稳定条件变为

$$\frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} = F_o \leq 0.5$$

本文取傅立叶数为 0.2 进行计算, 即:

$$\Delta\tau \leq 0.2 \frac{\rho c \Delta x^2}{\lambda}$$

在网格划分时, 空间步长选择 0.01m 为一个单位, 在模拟计算时选择 60 s 作为迭代时间步长以为保证方程的稳定性。

4 模拟结果与验证

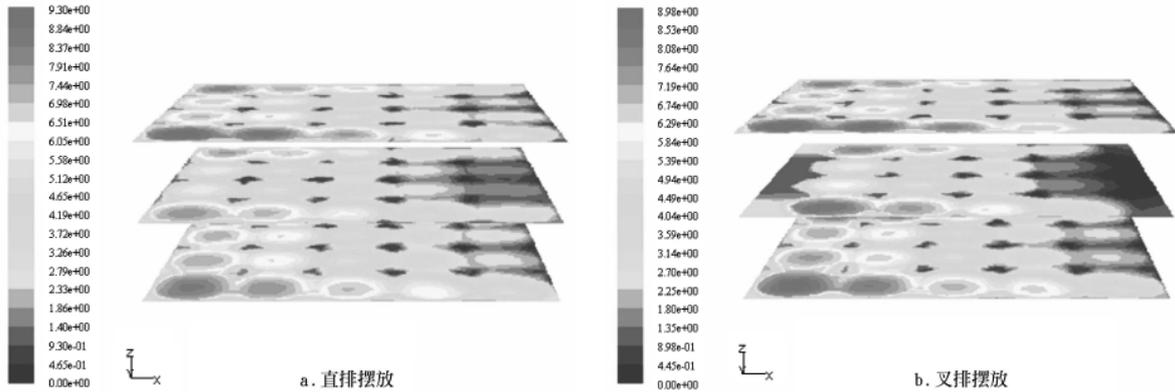
4.1 温度场的模拟

对冷风温度 1°C 、送风速度 1.5 m/s 、直排和叉排两种摆放方式、初始温度为 300 K 黄金梨的差压通风预冷过程进行了模拟, 预冷 2.5 h 后的与温度分布如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 在冷风进口处, 叉排摆放的黄金梨降温比直排摆放的更明显一些; 而直排摆放预冷箱内黄金梨降温均匀性要比叉排摆放好。这是由于叉排摆放

带来的冷风阻力损失大于直排摆放，所以使得直排摆放

的速度场比叉排摆放均匀。



注：圆形孔，直径 45 mm，冷风温度 1℃，送风速度 1.5 m/s，初始温度 300 K，预冷 2.5 h

图 3 预冷箱内不同排列方式黄金梨温度场

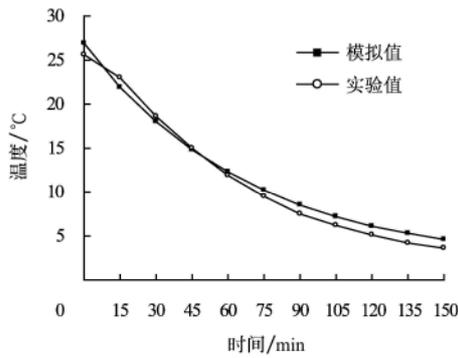
Fig.3 Temperature field of golden pear with different stacking pattern in pre-cooling cartons

4.2 模拟结果与试验结果的对比如

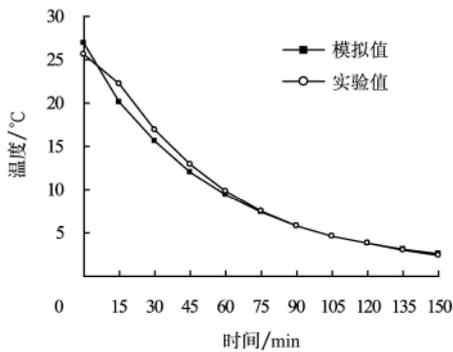
研究表明，位于包装箱底层中间靠壁面位置的果蔬冷却降温情况较具代表性^[7]，对该位置黄金梨单体的预冷过程进行了理论模拟，参照文献[12-15]建立了实验台，确定了实验方案，进行了实验测试，并将两者进行了对比分析。

4.2.1 不同送风速度工况下的预冷过程

直排摆放、圆形开孔、孔径 45 mm、送风速度分别 1.0 m/s 和 2 m/s 工况下，理论模拟和试验测试结果对比如图 4 所示。



a. 风速 1 m/s



b. 风速 2 m/s

注：直排摆放，圆形开孔，直径 45 mm

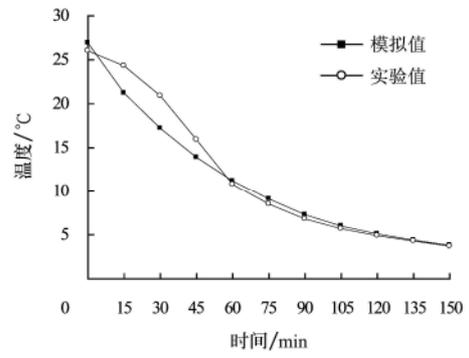
图 4 不同送风速度工况下的冷却过程

Fig.4 Cooling process with different airflow rate

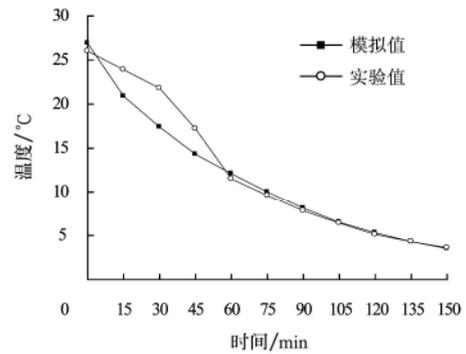
由图 4 中可以看出，随着风速的增大，黄金梨降温速度加快，黄金梨由初始温度冷却到 5℃时，送风速度 2 m/s 工况下的冷却时间比 1 m/s 工况缩短了 15~20 min 左右；受初始库温影响，预冷开始阶段实验测试值略高于理论模拟值，但从整个预冷过程来看，两种风速工况下理论模拟结果与实验测试结果基本相吻合。

4.2.2 不同开孔形式工况下的预冷过程

叉排摆放、送风速度 1 m/s、圆形开孔和方形开孔直径都为 45 mm 工况下，理论模拟和实验测试结果如图 5 所示。



a. 圆形开孔



b. 方形开孔

注：叉排摆放，送风速度 1 m/s，直径 45 mm

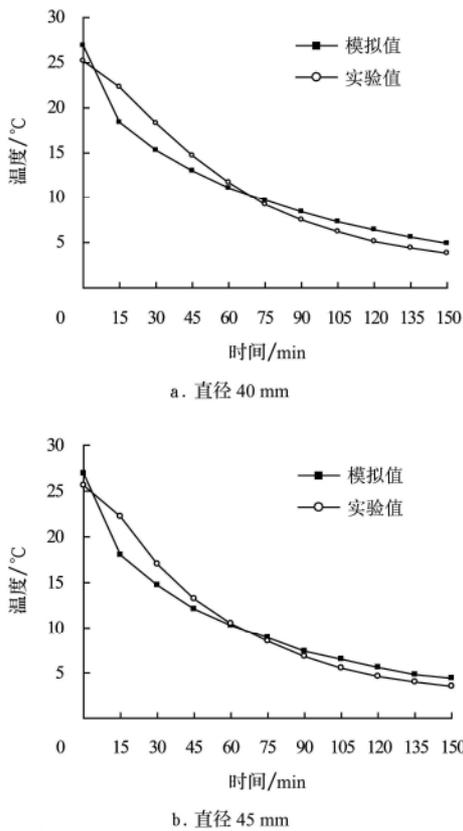
图 5 不同开孔形式工况下的冷却过程

Fig.5 Cooling process with different vent hole types

由图 5 可以看出，圆形开孔工况下黄金梨的降温速度略快于方形开孔工况下的黄金梨降温速度，这是由于圆形开孔对进口冷风的阻力影响较小，冷却到 5℃ 时，冷却时间差别在 5% 左右。实验初始 60 min 内受冷库温度波动的影响，黄金梨降温梯度较小。预冷 1 h 之后，库温稳定，理论模拟结果与试验测试结果较接近，预冷进行 2 h 后，温度基本吻合。

4.2.3 不同开孔大小工况下的预冷过程

叉排摆放、送风速度 1 m/s、圆形开孔、孔径分别 40、45 mm 工况下，底层黄金梨预冷进行 2.5 h，理论模拟和实验测试结果如图 6 所示。



注：叉排摆放，送风速度 1 m/s，圆形开孔

图 6 不同开孔大小工况下的冷却过程

Fig.6 Cooling process with different vent hole size

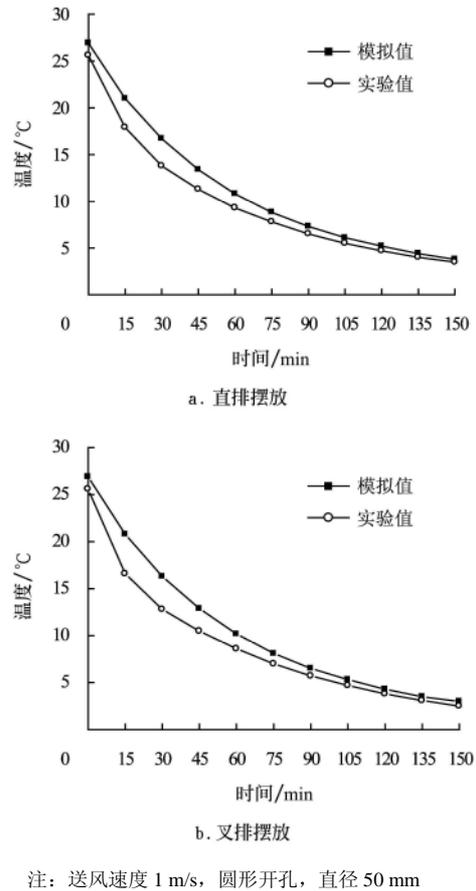
由图 6 中可以看出，开孔大小对黄金梨的冷却效果有一定影响。40、45 mm 两种孔径工况下黄金梨冷却到 5℃ 时，冷却时间相差 10~15 min，差别在 10% 左右。两种开孔大小工况下黄金梨预冷降温趋势基本一致，理论模拟结果与实验测试结果吻合较好。受实验初始阶段冷库温度波动的影响，黄金梨的测试温降速度比理论模拟要慢一些。

4.2.4 不同摆放方式工况下冷却过程的对比

送风速度 1 m/s、圆形开孔、孔径 50 mm、直排摆放和叉排摆放工况下，黄金梨的预冷过程理论模拟和实验测试结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出，叉排摆放黄金梨的冷却降温速度从模拟和测试值看都要快于直排摆放。黄金梨冷却到

5℃ 时，叉排摆放冷却时间短 15 min 左右，差别在 10%~12%。这是由于不同排列摆放方式产生的流体通道和孔隙率不同，影响了包装箱内的流场，从而带来冷却速度的不同。实验测试降温速度比数值模拟结果要快一些，这是由于在理论模拟部分对摆放方式的压力损失进行修订时，损失系数的设定大于实际情况下的损失率。但从在整个降温过程来看，理论模拟结果比较理想地反映了黄金梨实际预冷过程中的降温情况。



注：送风速度 1 m/s，圆形开孔，直径 50 mm

图 7 不同排列摆放方式工况下的预冷过程

Fig.7 Cooling process with different stacking pattern

5 结 论

1) 建立了果蔬差压通风预冷三维湍流流动数学模型，采用湍流流动 $k-\epsilon$ 模型和 SIMPLE 算法，在计算区域内对流场和温度场进行耦合求解，对包装箱内直排摆放和叉排摆放两种摆放形式黄金梨的预冷过程进行了数值模拟。

2) 分析了不同送风速度、开孔形式和开孔大小工况下黄金梨的降温过程，并将数值模拟结果与实验测试结果进行了对比，冷却降温曲线趋势基本一致。

3) 送风速度由 1 m/s 提高到 2 m/s，黄金梨的冷却到 5℃ 时，冷却时间减少了 15%~20%；开孔形式对冷却时间的影响在 5% 左右；40 mm 和 45 mm 两种开孔工况下黄金梨冷却时间差别在 10% 左右；叉排摆放和直排摆放两种摆放方式对黄金梨冷却时间的影响在 10%~12%。

4) 建议黄金梨差压通风预冷选送风速度 1.5~2 m/s；

圆形开孔；开孔直径 45 mm 左右；摆放方式为叉排摆放。

[参 考 文 献]

- [1] 王 强, 刘晓东. 实施蔬菜产地预冷完善低温冷藏链[J]. 制冷, 2001, 20(1): 40—44.
- [2] 陈天及, 郭亚丽, 余本农, 等. 番茄差压预冷速度影响因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 105—107.
- [3] Arifin B B, Chau K V. Cooling of strawberries in cartons with new vent hole designs[J]. ASHARE Transactions, 1994, 91(1): 1415—1426.
- [4] Gakwaya A, Sadfa S O. Study of parameters affecting cooling rate and temperature distribution in forced-air pre-cooling of strawberry[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(6): 1950—1955.
- [5] 刘凤珍, 王 强. 草莓差压通风预冷过程中影响参数的研究[J]. 制冷学报, 2001, (4): 49—5.
- [6] 王 强, 刘凤珍, 连添达. 葡萄差压通风预冷影响参数的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 212—215.
- [7] Talbot M T, Oliver C C, Gaffney J J. Pressure and velocity distribution for air flow through fruits packed in shipping containers using porous media flow analysis[J]. ASHARE Transactions, 1990, 91(1): 406—417.
- [8] Brooker O B, Hjelmfelt A T. Nonlinear flow through an anisotropic porous media[J]. Transactions of ASAE, 1995, 38(3): 863—868.
- [9] 陈懋章. 黏性流体动力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [10] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [11] 陶文铨. 数值传热学(第2版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005.
- [12] Brosnan T, Sun D. Precooling techniques and applications for horticultural products[J]. Int J Refrigeration, 2001, 24(2): 154—170.
- [13] 高丽朴, 郑淑芳, 李 武, 等. 果蔬差压预冷设备及预冷技术研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 185—189.
- [14] 杨 洲, 赵春娥, 汪刘一, 等. 龙眼果实差压预冷过程中的阻力特性[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 104—107.
- [15] Vigneault C, Markarian N R, Silva A, et al. Pressure drop during forced-air ventilation of various horticultural produce in containers with different opening configurations[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(3): 807 - 814.

Numerical analysis and experimental verification of pressure pre-cooling of golden pears

Wang Qiang^{1,2}, Chen Huanxin¹, Dong Defa², Liu Fengzhen²

(1. College of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. College of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: In order to provide theoretical reference for air flow rate choice and carton design in pressure pre-cooling of vegetables and fruits, a mathematical model of pressure pre-cooling of golden pears was developed according to the flow and heat transfer principles in pressure pre-cooling process. The commercial computational fluid dynamics software was utilized to simulate the cooling process of golden pears with straight and staggered stacking patterns in cartons respectively. The key parameters that affected cooling process such as different air flow rates, type and size of vent hole, were analyzed by simulation and test. Results show that the numerical simulations give the good prediction with the experimental data and mathematical model is reasonable. Cooling time decreases by 15%~20% when air flow rate increases from 1m/s to 2 m/s. The effect on cooling rate of different vent hole types is about 5%. The cooling time of golden pears with vent hole size 45 mm is about 10% shorter than that with vent hole size 40 mm. The effect on cooling time of different stacking patterns is within 10%~12%. Therefore, it is suggested that air flow rate is between 1.5 m/s and 2 m/s, vent hole type is circle with diameter about 45mm, stacking pattern is staggered stacking.

Key words: pressure pre-cooling; numerical simulation; cooling rate; golden pears