

# 保鲜运输用超声波加湿的数值模拟

陆华忠<sup>1,2</sup>, 曾志雄<sup>2</sup>, 吕恩利<sup>1,2</sup>, 郭嘉明<sup>2</sup>, 李亚慧<sup>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, 广东广州 510642)

(2. 华南农业大学工程学院, 广东广州 510642)

**摘要:** 为掌握保鲜运输用超声波加湿流场的分布特性, 本文针对压差原理的保鲜运输厢体结构, 以脐橙为试验物料, 建立厢体的 1/4 等比例三维紊流模型, 借助有孔模型和组分传输模型, 结合 SIMPLE 算法和壁面函数法, 运用 Fluent 软件进行超声波加湿的数值模拟, 分析了厢体内温湿度场的变化。模拟结果表明: 采用超声波加湿可以在 212 s 内将厢体内的相对湿度自 70% 升高至 90%; 厢体内温度场和湿度场分布均匀, 厢体内温差不超过 1 °C, 相对湿度差小于 3.5%; 加湿过程对温度场的影响较小; 货物表面的相对湿度差不超过 3%; 货物区水蒸气扩散较快。经试验验证, 试验结果与模拟结果相吻合。该研究结果对于保鲜运输加湿装置的结构优化具有一定的参考价值。

**关键词:** 保鲜; 运输; 超声波加湿; 湿度场; 数值计算

**文章编号:** 1673-9078(2013)7-1533-1538

## Numerical Simulation and Experimental Verification of Ultrasonic Humidification for Fresh-keeping Transportation

LU Hua-zhong<sup>1,2</sup>, ZENG Zhi-xiong<sup>2</sup>, LV En-li<sup>1,2</sup>, GUO Jia-ming<sup>2</sup>, LI Ya-hui<sup>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 510640, China)

**Abstract:** To improve the cognition of humidity regulation characteristics, the flow field data of fresh-keeping environment when ultrasonic humidification device works were collected and fresh-keeping transportation envelope based on the structure of differential pressure principle and equipped with oranges was studied. A three-dimensional turbulence model of 1/4 ratio envelope was established and numerical simulation of ultrasonic humidification is obtained using hole and component transmission models and fluent software, combined with SIMPLE algorithm with wall function method. The temperature and humidity changes in the compartment body were analyzed. The results showed that ultrasonic humidification could increase relative humidity from 70% to 90% in compartment body within 212 seconds. Temperature and humidity field distribution in compartment body was uniform while the difference of temperature was less than 1 °C and the difference of relative humidity was no more than 3.5%. The humidification process showed a little influence on temperature. The difference of relative humidity of different goods surface was less than 3% and water vapor in goods area diffused faster. Experimental validation showed that test results were in good agreement with simulation results. The results had a certain reference value for optimizing humidification of fresh-keeping transportation equipment.

**Key words:** fresh-keeping; transportation; ultrasonic humidifier; humidity; numerical simulation

相对湿度是影响果蔬保鲜运输品质的重要因素之一<sup>[1]</sup>。文献<sup>[2]</sup>设计了保鲜运输用超声波加湿装置, 具有雾化颗粒细、加湿速度快等特点, 适用于保鲜运输,

收稿日期: 2013-03-22

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金 (CARS-33-13); 国家自然科学基金项目 (31101363); 广东省自然科学基金资助项目 (S2012010010388); 国家科技支撑计划项目课题 (2013BAD19B01)

作者简介: 陆华忠 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业工程研究

但未对湿度场分布特性展开研究。目前对于湿度场的研究, 主要是通过理论推导或者试验测试, 但理论推导耗费时间且难度大, 试验测试成本代价高<sup>[3-4]</sup>。随着计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD) 的发展, 数值模拟成为研究果蔬冷链流场的趋势<sup>[4-5]</sup>。

国内外研究中, 文献<sup>[6-11]</sup>应用 CFD 技术于保鲜环境模拟中。文献<sup>[6-9]</sup>采用紊流模型、SIMPLE 算法和壁面函数法分别对冷藏库的气体流场、保鲜库的降温过

程、挂车的货物区流场和水果储藏室的气流场进行了数值模拟。王以忠等应用 Fluent 软件借助非稳态求解方法研究了冷藏车制冷过程对温度场和湿度场的影响<sup>[10]</sup>，而该冷藏车不具有加湿功能。M.A.Delele 等基于离散相模型和有孔模型进行了高压雾化对冷库加湿的模拟研究<sup>[11]</sup>。暂未发现超声波加湿流场模拟的相关文献。为掌握保鲜运输用超声波加湿流场的分布特性，针对湿度场模拟的需要，将相对湿度转换成水蒸气的质量分数，利用 Pro/Engineer 建立厢体的等比例三维物理模型，采用 ANSYS ICEM CFD 的非结构化网格划分方法生成网格，借助 Fluent 流体模拟软件对超声波加湿模型进行湿度场和温度场的数值模拟。

### 1 物理模型

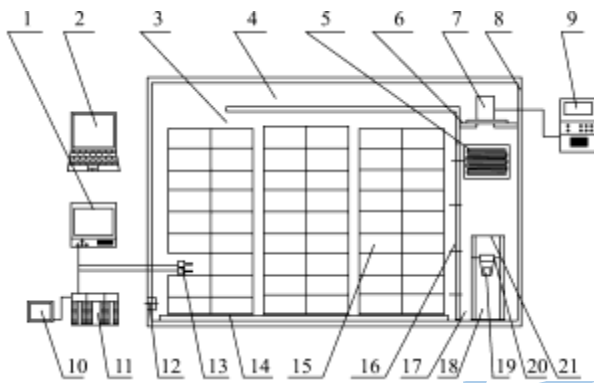


图1 保鲜环境综合调控试验平台

Fig.1 Integrated control test platform for fresh-keeping

注：1.无纸记录采集仪；2.计算机；3.保鲜室；4.回风道；5.蒸发器；6.风机托板；7.风机；8.进气阀；9.变频器；10.触摸屏；11.可编程控制器；12.排气阀；13.温度和湿度控制传感器；14.通风槽；15.果蔬货物；16.开孔隔板；17.压力室；18.储水箱；19.超声波振子；20.浮子；21.出气口。

研究对象为基于压差原理的保鲜运输厢体试验平台，如图1所示。厢体的尺寸规格（长×宽×高）为2.38m×1.28m×1.4m，外覆100mm厚聚氨酯保温板。开孔隔板将厢体分为压力室和保鲜室，风机的运转在回风道处形成负压，在压力室内形成正压<sup>[12]</sup>，在正负压差的作用下，保鲜室的气体从回风道进入压力室，然后通过开孔隔板的开孔流进保鲜室，从而形成闭式循环流场。超声波加湿装置主要由储水箱、超声波振子（型号为JAS-20-B，雾化量>400 mL/h，供电电压为24 VDC，额定功率为12.3 W，数量12个）、出气口和浮子等组成。加湿时，超声波加湿装置产生的雾化颗粒在风机的带动下，经过开孔隔板流进保鲜室。在保鲜室后部布置湿度传感器（测量范围：相对湿度

0~100%，精度：(±3)%，广州西博臣科技有限公司生产）和温度传感器（测量范围：-20~80℃，精度：(±0.3)℃，广州西博臣科技有限公司生产）。试验材料为江西脐橙，质量为350kg，用塑料筐装载，共24筐。试验平台采用西门子可编程控制器S7-300控制。

采用 Pro/Engineer Wildfire 三维设计软件建模，通过 ANSYS ICEM CFD 网格生成软件对 1/4 等比例保鲜运输厢体模型进行非结构化网格划分。选择 Tetra/Mixed 网格类型和 Robust (Octree) 网格生成方法生成体网格，并对进出口、水箱、回风道等部位进行加密，网格歪斜度 Skewness 约为 0.79，厢体网格模型如图2所示。

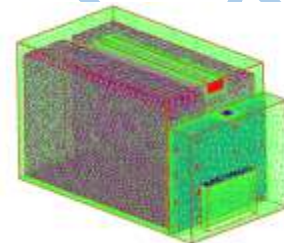


图2 厢体网格模型

Fig.2 Grid model of compartment body

### 2 数学模型

为简化模型，提高仿真效率，对模型进行如下假设<sup>[4-11]</sup>：

- 1) 厢体内气体为牛顿流体；
- 2) 货物单元为多孔介质且各向同性；
- 3) 厢体密封性能好，与外界绝热且壁面不吸热；
- 4) 厢体内气体在流动过程中不可压缩且符合 Boussinesq 假设；
- 5) 超声波加湿出口为已汽化的水蒸气；
- 6) 忽略蒸发器和通风槽对加湿流场的影响；
- 7) 水蒸气在固体壁面不凝结；

本文采用  $k-\epsilon$  模型、组分输运模型和 SIMPLE 算法<sup>[13]</sup>对超声波加湿过程的流场变化进行模拟。运用有限体积法中的通用微分方程，由于厢体气流为瞬态流动，微分方程<sup>[14]</sup>描述为：

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + s \tag{2-1}$$

注： $\rho$  是密度， $\text{kg/m}^3$ ； $u$  是速度矢量， $\text{m/s}$ ； $\phi$  是广义变量； $\Gamma$  是与  $\phi$  相对应的广义扩散系数； $s$  是与  $\phi$  相对应的广义源项。各方程不同对应关系如表1所示。

表 1 各控制方程变量、扩散系数及源项<sup>[4-6]</sup>

Table 1 Variables, diffusion coefficients and source terms of each control equation

方程	$\phi$	$\Gamma$	$s$
X 方向动量方程	$u$	$\eta + \eta_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\eta_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\eta_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\eta_{eff} \frac{\partial u}{\partial z})$
Y 方向动量方程	$v$	$\eta + \eta_t$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\eta_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\eta_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\eta_{eff} \frac{\partial v}{\partial z})$
Z 方向动量方程	$w$	$\eta + \eta_t$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\eta_{eff} \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\eta_{eff} \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\eta_{eff} \frac{\partial w}{\partial z})$
紊流能量方程	$K$	$\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k}$	$\rho G_k - \rho \epsilon$
紊流能量耗散方程	$\epsilon$	$\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k}(c_1 \rho G_k - c_2 \rho \epsilon)$
能量方程	$T$	$\frac{\eta}{Pr} + \frac{\eta_t}{\sigma_t}$	0

注： $G_k = \frac{\eta_t}{\rho} \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\}$ ,  $\eta_{eff} = \eta + \eta_t$ ,  $\eta_t = c_\mu \rho k^2 / \epsilon$ ,  $\mu, \nu, \omega$  分别为 X, Y, Z 方向的速度矢量, m/s; K 是湍动能,  $m^2/s^2$ ;  $\epsilon$  是耗散率,  $m^2/s^3$ ; T 是温度,  $^\circ C$ ;  $\eta$  是流体动力黏度,  $kg/(m \cdot s)$ ;  $\eta_t$  是湍流黏性系数。

$\kappa$ - $\epsilon$ 模型中采用的 6 个经验系数<sup>[4-6]</sup>如表 2 所示。

表 2  $\kappa$ - $\epsilon$ 模型中的系数

Table 2 Coefficients of model  $\kappa$ - $\epsilon$

$c_\mu$	$c_1$	$c_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$\sigma_T$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	0.9~1.0

注： $c_\mu, c_1, c_2, \sigma_T$  为经验常数,  $\sigma_k$  为湍动能普朗特数,

$\sigma_\epsilon$  为湍动耗散率普朗特数。

为研究厢体内湿度场的分布规律, 引入基于组分质量分数的输运方程<sup>[17]</sup>。其方程为:

$$\frac{\partial(\rho \cdot C_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot C_s u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (D_s \rho \frac{\partial C_s}{\partial x_i}) + S_s \quad (2-2)$$

注:  $D_s$  为组分 S 的扩散系数;  $C_s$  为该组分的体积浓度, mol/L;  $\rho \cdot C_s$  为该组分的质量浓度, mol/kg;  $S_s$  为该组分的生产率, %; t 为时间, s。

根据果蔬货物单元的特性, 激活多孔介质模型<sup>[4]</sup>。其方程描述为:

$$S_i = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu \nu_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v_j| |v_j| \right) \quad (2-3)$$

注:  $S_i$  是 i 方向的动量源项; D 是粘性阻力系数; C 是惯性阻力系数;  $\mu$  是流体粘度,  $N \cdot s / m^2$ ;  $\rho$  为流体密度,  $kg/m^3$ ;  $\nu_j$  是 j 向流速, m/s。

### 3 边界条件设定及求解

对保鲜运输厢体进行雷诺数计算, 根据雷诺数求解公式<sup>[14]</sup>, 求得流场雷诺数 Re 约为  $10^5$ , 属于高雷诺数紊流模型<sup>[16]</sup>。

$$Re = UL / \nu \quad (3-1)$$

注: U 是速度特征尺度, m/s; L 是长度特征尺度, m;  $\nu$  是运动学粘性系数。

1) 入口边界。本模型存在风机入口和超声波加湿装置的雾化颗粒入口共两个入口边界。试验厢体采用风机驱动循环模式, 因此厢体的风机入口设置为速度入口边界条件。输入紊流参数为湍流强度 I 和水力直径  $D_H$ 。其中, 湍流强度 I, 按式 3-2<sup>[15]</sup>求出:

$$I = 0.16(Re_{DH})^{-1/8} \quad (3-2)$$

注: Re 是以水力直径求出的雷诺数。

超声波加湿装置的雾化颗粒入口采用质量流量入口边界的输入方式, 通过相对湿度转换成水蒸气的质量分数输入, 并利用用户自定义函数 (User-Defined Function, UDF) 进行定义。

相对湿度是绝对湿度气压与饱和蒸汽压的比值, 饱和蒸汽压可以通过气压、环境温度等条件查饱和蒸汽压表<sup>[21]</sup>获得, 在获取相对湿度与饱和蒸汽压的基础上, 就可确定绝对湿度气压, 如式 3-3 所示。

$$p_1 = RH \times p_2 \times 100\% \quad (3-3)$$

注: RH 是相对湿度, %;  $p_1$  是绝对湿度气压, pa;  $p_2$  是饱和蒸汽压, pa。

根据理想气体状态方程, 按式 3-4 求出, 可获得水蒸气的质量, 从而计算出水蒸气的质量分数。

$$m = \frac{p_1 V}{rT} \quad (3-4)$$

注: V 是气体体积,  $m^3$ ; r 是比例系数, 与气体种类有关系; T 是温度, K; m 是质量, g。

2) 出口边界。出口边界采用压力出口条件。

3) 货物单元。实际货物为装有江西脐橙的包装箱, 若作独立处理计算复杂。为简化运算, 本文将脐橙与包装箱处理成一个货物单元, 并令货物单元为多孔介质模型, 货物内部为层流模式, 且增加热源项。根据



脐橙的呼吸热计算公式 (3-5) [22], 求得呼吸热为 9.04 w/m<sup>3</sup>。通过相关计算 [18], 求得脐橙货物单元的具体参数 [16], 如表 3 所示。

$$q = 0.0000273T^{-1} - 0.002123T^2X + 0.007161T^2y + 8.9982 \quad (3-5)$$

注: q 为呼吸热, w/m<sup>3</sup>; T 为贮藏温度, °C; x 为 CO<sub>2</sub> 体积分数, %; y 为 O<sub>2</sub> 体积分数, %。

表 3 脐橙货物单元具体参数

Table 3 Specific parameters of citrus goods units

密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	比热容/ [J/(kg·°C)]	导热系数/ [w/(m·°C)]	呼吸热/ (w/m <sup>3</sup> )	开孔率/ %
981	3240	0.4	9.04	30

脐橙的保鲜参数要求: 温度为 5~10 °C, 相对湿度为 85~90% [19-20]。设定超声波加湿初始环境: 温度为 5 °C, 相对湿度为 70%。由于保鲜运输厢体内部为循环气流场, 风机入口的相关参数处于动态变化中, 需在压力出口与风机入口之间利用 UDF 设定温度和水蒸气质量分数的传递函数。

采用 Fluent 非稳态求解器进行求解计算, 添加全浮力影响因子, 设置环境重力加速度为 9.81 N/kg、时间步长为 1 s。结合项目组的经验与预试验研究, 设定回风道风速为 4 m/s。模拟过程中在保鲜室后部湿度传感器的等比例位置引入相对湿度监测点, 监测点的相对湿度达到 90% 时, 停止迭代。

#### 4 模拟结果分析与试验验证

##### 4.1 模拟结果分析

##### 4.1.1 厢体纵横截面相对湿度分布

通过 Fluent 计算, 迭代到监测点的相对湿度为 90% 时, 耗时 212 秒; 保鲜室的相对湿度分布均匀, 相对湿度最高值与最低值差值仅为 3.5%, 如图 3 和图 4 所示, 结果表明, 采用超声波加湿能均匀快速调节保鲜运输环境的相对湿度。

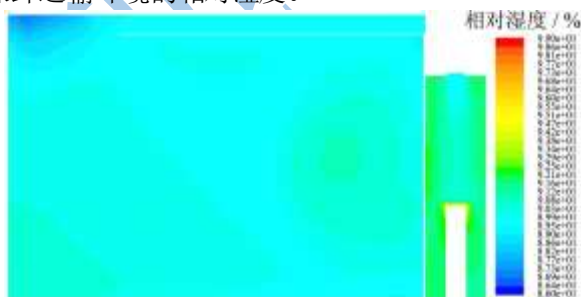


图 3 厢体对称纵截面相对湿度云图

Fig.3 Cloud map of relative humidity in symmetry plane of compartment body

为研究水蒸气在流场中的扩散快慢, 引入扩散系数分析该组分的传递性质。扩散系数是指当浓度为—

个单位时, 单位时间内通过单位面积的气体量 [23]。厢体纵截面的水蒸气扩散系数云图如图 5 所示, 保鲜室货物区的扩散系数较大, 表明了该区的雾化颗粒充分扩散, 流动损失较低, 利于果蔬保鲜。

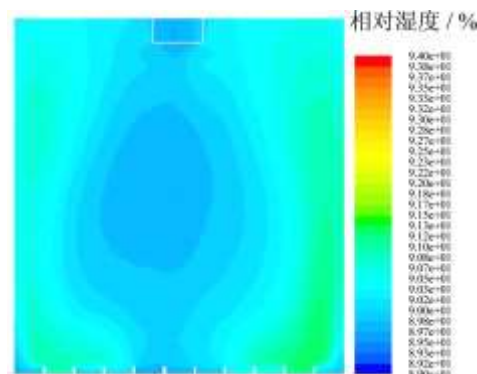


图 4 厢体对称横向截面相对湿度云图

Fig.4 Cloud map of relative humidity in symmetry plane of cross section

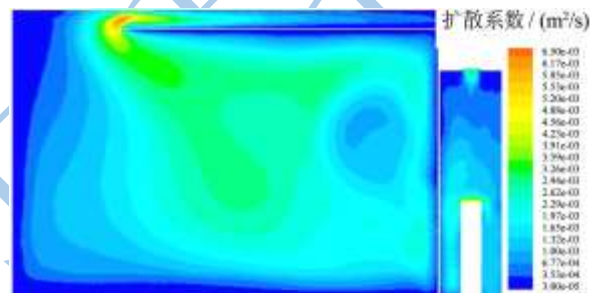


图 5 纵截面的水蒸气扩散系数云图

Fig.5 Cloud map of water vapor diffusion coefficient in symmetry plane of enclosure

##### 4.1.2 货物表面相对湿度分布

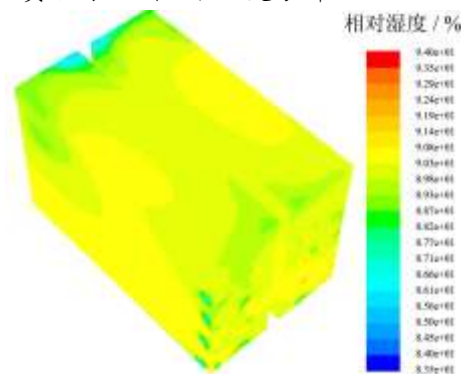


图 6 货物表面的相对湿度云图

Fig.6 Cloud map of relative humidity of goods surface

从图 6 表明, 货物表面的相对湿度分布平均, 湿度差不超过 3% RH, 水汽与货物间的湿度传递良好。结合图 3、图 4 和图 5 可知, 货物单元的相对湿度分布与流通区域的相对湿度分布基本一致, 货物区的相对湿度均匀性较好。

##### 4.1.3 厢体对称纵截面温度分布

加湿过程中厢体内温度场较均匀, 温度相差不超过

1 ℃, 厢体纵截面温度云图如图 7 所示。结合图 3 和图 7 可以看出, 厢体内右上角区域存在相对湿度相对较低、温度相对较高的情况。这是由于上升气流遇到回风道入口的阻力, 形成局部的小涡流。



图 7 厢体对称纵截面温度云图

Fig.7 Cloud map of temperature in symmetry plane of compartment body

#### 4.2 试验验证

为了评估数值模拟的准确性, 在试验平台上开展了超声波加湿试验进行验证。通过制冷机组调节厢体内的保鲜环境, 当厢体内的气体温度为 5.0 ℃, 相对湿度为 70% 时, 关闭制冷机组, 开启超声波加湿装置 (回风道风速 4 m/s), 直至厢体内的相对湿度升高至 90%, 并记录相对湿度随时间的变化。试验结果与模拟结果的对比如图 8 所示, 从 70% RH 到 90% RH 加湿试验共耗时 205 s, 而模拟结果为 212 s, 模拟值与试验值随时间变化的规律是基本吻合的, 模拟值与试验值相对湿度最大偏差值不超过 3%, 加湿速率基本一致, 其中从 80% RH 到 90% RH 的相对湿度模拟值与试验值吻合较好。试验结果表明, 保鲜运输用超声波加湿的数值模拟具有科学性和参考价值。

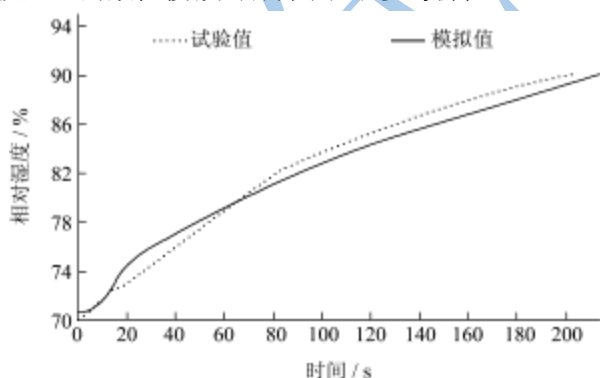


图 8 试验结果与模拟结果的对比

Fig.8 Comparison of experimental and simulation results

### 5 结论

5.1 经过对保鲜运输用超声波加湿的数值模拟研究发现: 采用超声波加湿可以在 212 s 内将厢体内的相对湿度自 70% 升高至 90%, 加湿速度较快; 保鲜环境

的温度场和湿度场分布均匀, 温度最大差值小于 1 ℃, 相对湿度最大差值小于 3.5%; 货物表面的相对湿度分布平均, 相差不超过 3%; 货物单元内部的相对湿度与流通区域的相对湿度相差约 2%; 货物区水蒸气扩散较快。

5.2 经试验验证, 模拟结果与试验结果加湿时间相差 7 s, 模拟值与试验值相对湿度最大偏差值不超过 3%RH, 模拟值与试验值随时间变化规律基本吻合, CFD 模型有效。采用 Fluent 对超声波加湿的流场进行数值模拟具有一定科学性, 有助于认清湿度分布规律, 为保鲜运输用超声波加湿装置优化设计提供参考。

5.3 此外, 果蔬类型、空气流量以及货物摆放方式会对模拟结果造成影响, 本课题组正在对此进行深入地相关研究。

#### 参考文献

- [1] 韩小腾, 陆华忠, 吕恩利, 等. 保鲜运输用高压雾化加湿系统湿度调节特性的试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 332-337  
Han Xiaoteng, Lu Huazhong, Lü Enli, et al. Experiment on regulation characteristics of high pressure humidifying system for fresh-keeping transportation [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 332-337
- [2] 吕恩利, 陆华忠, 罗锡文, 等. 果蔬气调保鲜运输车的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 9-16  
Lü Enli, Lu Huazhong, Luo Xiwen et al. Design and experiment of fruits and vegetables fresh-keeping transportation vehicle with controlled atmosphere [J]. Transactions of CSAE, 2012, 28(19): 9-16
- [3] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011
- [4] 郭嘉明, 吕恩利, 陆华忠, 等. 冷藏运输厢体结构对流场影响的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 74-80  
Guo Jiaming, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Numerical simulation of effects of transport enclosure structure on flow field [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp.1): 74-80
- [5] 程秀花, 毛罕平, 倪军. 温室环境-作物湿热系统 CFD 模型构建与预测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 173-179  
Cheng Xiuhua, Mao Hanping, Ni Jun. Numerical Prediction and CFD Modeling of Relative Humidity and Temperature for Greenhouse-Crops System [J]. Transactions of the CSAM, 2012, 42(2): 173-179
- [6] 谢晶, 瞿晓华, 徐世琼. 冷藏库内气体流场数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 11-16

- Xie Jing, Qu Xiaohua, Xu Shiqiong. Numerical simulation and verification of airflow in cold-store [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 11-16
- [7] 杨磊,汪小岳.微型保鲜库预冷气流组织的仿真分析[J].计算机仿真,2009,26(5):220-222
- Yang Lei, Wang Xiaochan. Simulation analysis of flow field of chilling process in a mini type cool store [J]. Computer Simulation, 2009, 26(5): 220-222
- [8] J Moureh, D Flick. Airflow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(5): 464-474
- [9] S Sadi, M L Hellickson. Computational Fluid Dynamics Simulation of Airflow in a Fruit Storage Room [A]. 7th International Controlled Atmosphere Research Conference, 2001
- [10] 王以忠,胡春园,陈绍慧,等.冷藏车内温度场和湿度场的数值模拟研究[J].保鲜与加工,2010,58(10):26-29
- Wang Yizhong, Hu Chunyan, Chen Shaohui, et al. Study on numerical simulation of temperature and humidity fields in a refrigerated vehicle [J]. Storage and Process, 2010, 10(3): 26-29. (in Chinese with English abstract)
- [11] M A Delele, A Schenk, E ijskens, et al. Optimization of the humidification of cold stores by pressurized water atomizers based on a multiscale CFD model [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 228-239
- [12] 张东霞,吕恩利,陆华忠,等.保鲜运输车温度场分布特性试验研究[J].农业工程学报,2012,28(11):254-260
- Zhang Dongxia, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Experimental study on temperature field distribution characteristics in fresh-keeping transportation [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 254-260
- [13] 江帆,黄鹏.FLUENT 高级应用与实例分析[M].北京:清华大学出版社,2008
- [14] 陶文铨.数值传热学(第2版)[M].西安:西安交通大学出版社,2002
- [15] 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
- [16] 郭嘉明,吕恩利,陆华忠,等.保鲜运输车果蔬堆码方式对温度场影响的数值模拟[J].农业工程学报,2012,28(13): 231-236
- Guo Jiaming, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Numerical simulation of effects of transport enclosure structure on flow field [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 231-236
- [17] 谭升魁,王锐,安瑞冬,等.基于组分输运模型和 RNG k-ε 模型的浑水异重流数学模型研究及其应用[J].四川大学学报(工程科学版),2011,43(增刊 1):48-53
- Tan Shengkui, Wang Rui, An Ruidong, et al. Research and application of numerical model of turbidity currents based on species transport model and RNG k-ε model [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(Supp.1): 48-53
- [18] S A Tassou, W Xiang. Modelling the Environment Within a Wet Air-cooled Vegetable Store [J]. Journal of Food Engineering, 1998: 38(2), 169-187
- [19] J J Smoot, C F Melvin. A Comparison of Postharvest Fungicides for Decay Control of Florida Oranges [A]. Proceedings of the florida State Horticultural Society, 1970
- [20] A K Thompson. Controlled Atmosphere Storage of Fruits and Vegetables [M]. CAB INTERNATIONAL,1998
- [21] 严家驊,余晓福,王永青.水和水蒸气热力性质图表(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2006
- [22] N K Kole, Suresh Prasad.在气调条件下某些水果的呼吸率和呼吸热[J].冷藏技术.1995,72(3):45-48
- [23] 查传钰,吕钢.多孔介质中流体的扩散系数及其测量方法[J].地球物理学进展,1998,13(2):60-72
- Zha Chuanyu, Lu Gang. Diffusion coefficient and measurement method of fluid in the porous media [J]. Progress in Geophysics, 1998, 13(2): 60-72