

液氮充注气调厢开门时 O₂ 体积分数预测模型研究*

杨松夏^{1,2} 吕恩利^{1,2} 陆华忠^{1,2} 吕盛坪^{1,2} 刘杰坤^{1,2}

(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: 为掌握液氮充注气调厢开门时厢内 O₂ 体积分数的变化规律, 在分析热压作用下气调厢开门渗风特性的基础上, 建立了 O₂ 体积分数预测模型, 并进行了试验验证。研究表明: 气调厢开门期间, 开门时间越短则气调厢内外空气交界面的平均温度上升越快; 在气调厢内相对湿度为 90% ~ 95% 情况下, 气调厢内外空气交界面的相对湿度在开门后 60 s 内即迅速上升至 100%, 并且开门期间平均相对湿度均在 97% 以上; 开门时气调厢内 O₂ 体积分数上升速度随着开门时间的延长而逐渐降低, 通过对比计算数据和试验数据发现气调厢内 O₂ 体积分数试验值和理论值存在一定误差, 开门时间为 3 min 以上时, 相对误差均在 10% 以内。

关键词: 冷藏运输 气调厢 开门 氧气体积分数 预测模型

中图分类号: S229⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0223-05

Prediction Model of O₂ Volume Fraction in Controlled Atmosphere Compartments by Liquid Nitrogen Injection during Door-opening

Yang Songxia^{1,2} Lü Enli^{1,2} Lu Huazhong^{1,2} Lü Shengping^{1,2} Liu Jiekun^{1,2}

(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: Studying the features of gas changes in controlled atmosphere compartment contributes to improve performance and promote the application of controlled atmosphere compartment. In order to obtain the changing regulations of oxygen volume fraction in the controlled atmosphere compartment by liquid nitrogen injection, the air infiltration characteristics under thermal pressure of compartment were analyzed, and then the predicting model of oxygen volume fraction in the compartment was established. Moreover, verification experiment was also carried out. Results indicate that during the door-opening, the shorter the door-opening time is, the faster the average temperature rises. The relative humidity quickly rises to 100% within 60 s after opening the door on condition that the relative humidity in the compartments is 90% ~ 95%, and the average relative humidity is more than 97% during door-opening. What's more, the rising velocity of oxygen volume fraction gradually decreases with longer duration of door-opening, and there is certain error between experimental value and theoretical value of oxygen volume fraction based on theoretical calculation and experiment. However, the relative error between the experimental and theoretical value is within 10% when the door-opening time is more than 3 min. This research provides a reference for predicting matching amount for liquid nitrogen and safety range of oxygen volume fraction for safe operation.

Key words: Refrigerated transportation Controlled atmosphere compartment Door-opening Oxygen volume fraction Predicting model

收稿日期: 2014-07-28 修回日期: 2014-09-11

* 广东省自然科学基金资助项目 (S2012010010388)、广州市科技计划资助项目 (2014J2200070) 和广东省科技计划资助项目 (2012B020313007)

作者简介: 杨松夏, 博士生, 主要从事农产品冷链物流研究, E-mail: ysx8706@163.com

通讯作者: 吕恩利, 副教授, 主要从事农产品冷链物流研究, E-mail: enlilv@scau.edu.cn

引言

气调厢是先进的保鲜运输装备之一,其通过调节运输环境的温度、相对湿度以及气体成分达到保鲜的目的^[1-2]。在气调厢开门过程中,在气调厢内外热压差的作用下厢内外发生气体交换,直接导致厢内 O₂ 体积分数逐渐上升,从而进一步导致气调成本的增加。

目前,国内外有关保鲜装备开门渗风对温度的影响研究较多,文献[3-4]对冷藏车开门时车厢内温度和相对湿度的变化进行了试验研究;文献[5]对冷藏车开门状态下温度变化的影响因素进行了理论分析和试验验证;文献[6-7]对冷库开关门过程中空气流动和温度场的变化进行了数值模拟;文献[8]对冷藏车开门时传热传质过程和温湿度的变化进行了理论分析和试验;文献[9-10]对冷库开门时内外空气交换气流速度进行了数值分析与试验验证。然而,有关气调厢开门渗风对厢内 O₂ 体积分数的影响研究较少。为此,本文在研究气调厢开门渗风特性的基础上,建立气调厢 O₂ 体积分数的变化模型并进行试验验证,为预测气调运输液氮匹配量和气调厢内安全作业的 O₂ 体积分数提供理论参考。

1 模型构建

在气调厢开门时,厢外常温空气通过厢门进入厢内部,同时厢内的低温低氧空气通过厢门流出。首先对气调厢开门时的渗风量进行研究,然后建立气调厢 O₂ 体积分数的变化模型。此外,建模之前还需要做以下假设:经过长时间运输后气调厢内温度、相对湿度和 O₂ 体积分数均处于稳定、均匀状态;气调厢外环境为自然环境,温度、相对湿度和 O₂ 体积分数均处于稳定、均匀状态;忽略开门速度、外界环境风速等随机因素对开门渗风量的影响;忽略开门期间外界环境通过气调厢围护栏传热引起的厢内温度波动。

1.1 气调厢开门渗风量

气调厢开门时,厢内外空气传热传质过程是空气在热压差作用下通过单开口进行的,可以参考建筑物渗风的研究方法。气调厢内外温差导致厢门内外两侧存在一定的热压差,在不考虑厢外界风压影响时,在厢门高度的 1/2 处存在一中和面^[5,11],在中和面以上,厢外热空气流入厢内,在中和面以下,厢内冷空气流出厢体,并且相对中和面距离越远压差越大,空气流速越大。以车门内壁竖直方向为 x 轴,以厢底部水平方向为 y 轴建立平面坐标系,则热压分布示意图如图 1 所示。

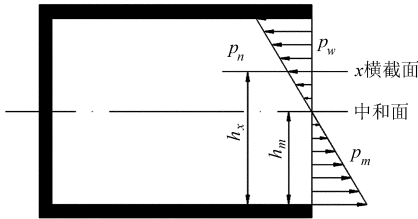


图 1 热压分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat distribution

如图所示,假设车门高度 $H/2$ 处的中和面的压力为 p_m ,则气调厢内外 x 横断面压力分别为^[5]

$$p_n = p_m + \rho_n g (h_x - h_m) \tag{1}$$

$$p_w = p_m + \rho_w g (h_x - h_m) \tag{2}$$

式中 p_n, p_w —— x 横断面气调厢内压力和外压力,Pa
 h_m, h_x ——中和面高度、 x 横断面高度,m
 ρ_n —— x 横断面气调厢内空气密度,kg/m³
 ρ_w ——气调厢外空气密度,kg/m³
 g ——重力加速度,m/s²

因此, x 横断面气调厢内外压差为

$$\Delta p_x = p_n - p_w = p_m + \rho_n g (h_x - h_m) - [p_m + \rho_w g (h_x - h_m)] = (\rho_n - \rho_w) g (h_x - h_m) \tag{3}$$

湿空气的密度与温度、相对湿度的关系式为^[12]

$$\rho = \rho_0 \frac{273 (p - 0.378 \varphi p_b)}{(273 + t) p_0} \tag{4}$$

式中 ρ ——湿空气密度,kg/m³
 ρ_0 ——标准状态下干空气密度,1.293 kg/m³
 t ——温度,℃
 p ——大气绝对压力,kPa
 p_0 ——标准大气压,101.3 kPa
 φ ——湿空气相对湿度,%
 p_b ——饱和水蒸气压力(可以通过查询饱和水蒸气压力表获取),kPa

此外,由于气调厢内外温差一般较大,在气调厢开门时,厢外高温空气和厢内低温空气发生热传递,气调厢门内侧的温度和相对湿度均会上升。一般,果蔬保鲜要求相对湿度范围相对较高(85% ~ 95%),具有加湿功能的气调厢内相对湿度水平较高,开门时气调厢靠近门内侧的空气相对湿度迅速上升至 100%。为方便计算,做以下假设:气调厢外的环境温度和相对湿度保持不变,气调厢靠近门内侧的空气温度随着开门时间的增加而不断上升,靠近门内侧的相对湿度在开门后迅速升至 100%。因此,气调厢靠近门内侧的湿空气密度变化可表示为

$$\rho(\tau) = \rho_0 \frac{273 (p - 0.378 p_b)}{(273 + t(\tau)) p_0} \tag{5}$$

式中 τ ——开门时间,s

$t(\tau)$ ——气调厢靠近门内侧的空气温度随开门时间变化的函数

对于 $t(\tau)$, 可以通过对试验数据进行拟合而得到表达式。

因此, x 横断面气调厢内外压差可以表示为

$$\Delta p_x = (\rho(\tau) - \rho_w)g(h_x - h_m) \quad (6)$$

在建立厢内外压差表达式后, 可以建立空气流速与空气压差的关系式^[13]

$$\Delta p_x = \frac{\rho \xi v^2}{2} \quad (7)$$

式中 ξ ——门洞阻力系数, 取 2.59^[14]

v —— x 横截面上 y 方向的空气速度, m/s

式(7)中, ρ 取 ρ_w 和 $\rho(\tau)$ 的平均值。

联立式(6)、(7), 整理得

$$v = \sqrt{\frac{2(\rho(\tau) - \rho_w)g(h_x - h_m)}{\rho \xi}} \quad (8)$$

因此, 气调厢开门时外界环境空气进入气调厢的渗风量为

$$q = W \int_{h_m}^H \sqrt{\frac{2(\rho(\tau) - \rho_w)g(h_x - h_m)}{\rho \xi}} dh \quad (9)$$

式中 q ——气调厢开门进气流量, m³/s

W ——开门宽度, m

1.2 O₂ 体积分数变化模型

为获得 O₂ 体积分数随时间的变化规律, 对气调厢渗风过程进行以下假设^[15-16]:

(1) τ (s) 时刻气调厢内 O₂ 体积分数为 x (%), 在 $d\tau$ (s) 时间内 O₂ 体积分数变化量为 dx (%), 初始时刻 O₂ 体积分数为 x_0 (%)。

(2) 外界空气的渗风量为 q (m³/s), O₂ 体积分数为 20.9%, 并假设渗入的空气迅速与气调厢内的空气均匀混合。在 $d\tau$ (s) 时间内, 气调厢排出的气

体量等于进气量, 均为 $qd\tau$ (m³)。

(3) 进入气调厢的 O₂ 体积量为 $qd\tau \times 20.9\%$, 排出气体中 O₂ 体积量为 $xqd\tau$, 两者之差等于气调厢内 O₂ 体积增加量。

根据假设, O₂ 体积分数随时间变化的计算公式为

$$0.209qd\tau - xqd\tau = V_s dx \quad (10)$$

式中 V_s ——气调厢需要气调部分的容积, m³

对式(10)积分, 整理得

$$q\tau = -(\ln(0.209 - x) + \ln b) V_s \quad (11)$$

式中 b ——待定常数

当 $\tau = 0$ 时, O₂ 体积分数为 x_0 (%), 则 $\ln b = -\ln(0.209 - x_0)$ 。

对式(11)整理得到 O₂ 体积分数变化模型

$$x = 0.209 - (0.209 - x_0)e^{-\frac{q\tau}{V_s}} \quad (12)$$

2 模型验证

2.1 试验设备与方法

2.1.1 试验设备

试验平台为液氮充注气调保鲜试验平台, 结构如图 2 所示。试验平台箱体外尺寸(长×宽×高)为 1 600 mm×1 100 mm×1 500 mm, 侧开门结构, 门尺寸(宽×高)为 640 mm×980 mm。试验平台控制器根据传感器系统采集的厢体环境信息控制制冷系统、加湿系统和气调系统的开启与关闭, 调节运输厢体内的温度、相对湿度和 O₂ 体积分数在所需要的范围内^[17-20]。其中, 控制器为可编程控制器(SIMENS S7-300 型 PLC, 西门子中国有限公司)。传感器系统包括温度传感器(范围 -20~80℃, 精度 ±0.3℃, 广州西博臣科技有限公司)、相对湿度传感器(范围 0~100%, 精度 ±3%, 广州西博臣科技有限公司)、

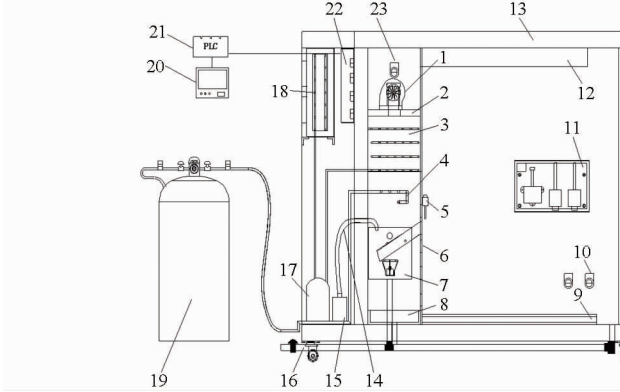


图 2 保鲜运输试验平台结构示意图和实物图

Fig.2 Schematic diagram and picture of fresh-keeping transportation experimental platform

1. 风机 2. 风机安装板 3. 蒸发器 4. 汽化盘管 5. 监测温度传感器 6. 开孔隔板 7. 加湿器 8. 积水槽 9. 气流导轨 10. 排气阀
11. 传感器盒 12. 回风道 13. 压差式厢体 14. 进水管 15. 补水箱 16. 排水管 17. 制冷压缩机 18. 冷凝器 19. 液氮罐 20. 记录仪
21. 可编程控制器 22. 继电器盒 23. 进气阀

O₂体积分数传感器(范围0~23%,精度±3%,深圳市旺晟达科技有限公司)。执行机构包括制冷机组(1 550 W,广州市绰盈制冷设备有限公司)、加湿机(加湿量72 g/h,广州市绰盈制冷设备有限公司)、液氮罐(YDZ-175型,北京君方科仪科技发展有限公司)、换气阀(jl-15 DN32CR03型,天津市君灵电子有限公司)。

2.1.2 试验方法

在厢体内装载空的瓦楞纸箱尺寸(长×宽×高)为320 mm×150 mm×260 mm,瓦楞纸箱堆距离厢体前、后壁面约为6 cm,距离左、右壁面约为11 cm。在门框范围内外空气交界面的上(距门框下端245 cm)、中(距门框下端490 cm)、下(距门框下端735 cm)位置分别布置一个温湿度传感器(AQ3020型,广州奥松电子有限公司)用以记录开门后门框范围内外空气交界面的温度和相对湿度,在厢体前、中、后位置分别布置一个O₂体积分数传感器用以记录开门后厢体内O₂体积分数。具体的试验条件参数如表1所示。调节试验厢体内环境稳定在所需试验条件范围后关闭控制系统,完全打开厢门并同时开启数据记录仪(VX8140R型,杭州盘古自动化系统有限公司)开始试验。对于该研究中的试验平台,试验平台厢体尺寸较小,当开门时间为6 min时,车厢内的O₂体积分数已经接近大气环境中的O₂体积分数,因此,本试验开门时间最长选取6 min,并且温湿度传感器和O₂体积分数的数据采集时间间隔均为10 s。

表 1 试验条件参数

Tab.1 Parameters of experiment conditions

试验条件	参数范围
环境温度/℃	2.0±1(厢内);30.0±1(厢外)
环境相对湿度/%	90.0±3(厢内);65.0±5(厢外)
O ₂ 体积分数/%	2.0±1(厢内);20.9(厢外)
开门时间/min	1,2,3,4,5,6

2.1.3 数据处理方法

将门框范围内外空气交界面的上、中、下3个位置的温度平均值作为交界面的温度,然后将对应开门时间内的交界面温度取平均作为该次开门试验的平均温度。将6次开门试验的平均温度进行曲线拟合,得到厢门框范围内外空气交界面的平均温度随开门时间的变化方程式。

将开门时间代入平均温度随开门时间变化的函数中求得对应开门时间气调厢靠近门内侧空气的平均温度,将空气平均温度代入式(5)求得对应开门时间气调厢靠近门内侧湿空气的密度,然后将湿空气密度代入式(9)求得对应开门时间内的理论渗风

量,最后将理论渗风量代入式(12)求得O₂体积分数理论值。

取厢体内前、中、后位置的O₂体积分数平均值为厢体内O₂体积分数试验值,将O₂体积分数试验值与理论值进行对比,相对误差为理论值与试验值的差值绝对值占理论值的百分比。

2.2 试验结果与分析

2.2.1 温度和相对湿度变化

气调厢内外空气交界面的平均温度和平均相对湿度随开门时间的变化如图3所示。由图3可以看出,平均温度随着开门时间的增加而增加,并且开门时间越短则对应时间内平均温度上升越快,对应 τ 开门时间内气调厢内外空气交界面处平均温度 T 变化方程为 $f(\tau)=-0.40(\tau/60)^2+5.41(\tau/60)-1.55(R^2=0.99)$ 。试验发现,每次开门期间相对湿度在开门后60 s内即迅速上升至100%。由图3可以看出,6次开门试验每次开门期间气调厢内外空气交界面的平均相对湿度均在97%以上,因此在计算中相对湿度可取100%。

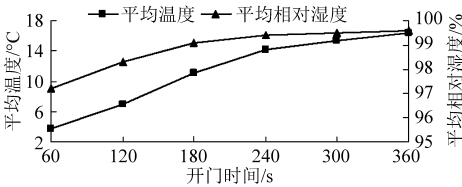


图3 平均温度和平均相对湿度变化曲线
Fig.3 Changes of average temperature and average relative humidity

2.2.2 O₂体积分数理论值与试验值对比

不同开门时间气调厢内O₂体积分数的理论值与试验值如表2所示。

表 2 O₂体积分数的试验值与理论值

Tab.2 Experimental and theoretical value of oxygen volume fraction

开门时间/min	试验值/%	理论值/%	相对误差/%
1	17.2	20.7	16.77
2	18.1	20.9	13.37
3	18.7	20.9	10.52
4	18.9	20.9	9.57
5	19.2	20.9	8.13
6	19.7	20.9	5.74

由表2可以看出:

(1) 开门期间,气调厢内的O₂体积分数逐渐上升,开门时间越长,气调厢内的O₂体积分数上升幅度越大,并且上升速度随着开门时间的延长而逐渐降低,这主要是由气调厢内外温差越来越小而导致的。

(2) O₂体积分数试验值和理论值存在一定的

误差, O₂ 体积分数理论值大于试验值。在开门时间为 1 min、2 min 和 3 min 时, O₂ 体积分数试验值和理论值的误差较大, 相对误差均大于 10%, 导致这一现象的主要原因为: 较短时间的开门过程中进入厢体的空气未与厢体内的空气进行完全混合就流出了厢体。而开门时间为 3 min 以上时, 相对误差均在 10% 以内。

3 结论

(1) 液氮充注气调厢开门期间, 开门时间越短则气调厢内外空气交界面的平均温度上升越快; 在厢体内相对湿度为 90% ~ 95% 情况下, 气调厢内外空气交界面的相对湿度在每次开门后 60 s 内即迅速上升至 100%, 并且每次开门期间气调厢内外空

气交界面的平均相对湿度均在 97% 以上; 开门时间越长则厢体内 O₂ 体积分数上升幅度越大, 并且上升速度随着开门时间的延长而逐渐降低。

(2) 液氮充注气调厢开门时气调厢 O₂ 体积分数试验值和理论值存在一定的误差, 在 6 min 的试验中, 相对误差均在 17% 以内, 并且开门时间越长相对误差越小, 该模型可为预测液氮充注气调运输液氮匹配量和气调厢内安全作业 O₂ 体积分数提供参考。

因此, 通过所建立的液氮充注气调厢开门时 O₂ 体积分数预测模型, 可以预测液氮充注气调运输的液氮匹配量, 避免运输过程中液氮装载不足或过多。此外, 通过模型还可以预测开门后气调厢内安全作业的 O₂ 体积分数, 避免作业中出现人员缺氧窒息。

参 考 文 献

- 1 吕恩利, 陆华忠, 杨洲, 等. 果蔬气调保鲜运输技术发展研究[J]. 农机化研究, 2010(6): 225 - 228.
Lü Enli, Lu Huazhong, Yang Zhou, et al. Research status and prospects in fruits and vegetables fresh-keeping with controlled atmosphere transportation technologies [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(6): 225 - 228. (in Chinese)
- 2 Singh A K, Goswami T K. Controlled atmosphere storage of fruits and vegetables: a review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2006, 43(1): 1 - 7.
- 3 吕宁, 谢如鹤, 刘广海. 冷藏车开门时车内温湿度变化实验研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(2): 85 - 89.
Lü Ning, Xie Ruhe, Liu Guanghai. Experimental study on the variations of temperature and humidity in a refrigerated truck with the door opened[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(2): 85 - 89. (in Chinese)
- 4 刘广海, 屈睿瑰, 邹毅峰, 等. 冷链运输装备开门渗风试验及温度场分析[J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2013, 12(4): 87 - 90.
Liu Guanghai, Qu Ruigui, Zou Yifeng, et al. Air infiltration experiment and temperature field analysis of cold chain transportation equipment under opening door[J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2013, 12(4): 87 - 90. (in Chinese)
- 5 李锦, 谢如鹤. 冷藏车开门状态升温影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 254 - 259.
Li Jin, Xie Ruhe. Influence factors of air-temperature increasing within refrigerated trucks during door-opening state [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 254 - 259. (in Chinese)
- 6 何媛, 南晓红. 三维 CFD 模型预测热压作用下冷库门的冷风渗透率[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 26 - 30.
He Yuan, Nan Xiaohong. Theoretical study and CFD prediction of infiltration rate through a cold store entrance under thermal pressure[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 26 - 30. (in Chinese)
- 7 孟岩勇, 南晓红. 冷库门在热压作用下冷量渗透的数值模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2007, 26(2): 40 - 41.
Meng Yanyong, Nan Xiaohong. Numerical simulation of cold capacity at cold-storage door under thermal pressure[J]. Building Energy & Environment, 2007, 26(2): 40 - 41. (in Chinese)
- 8 Tso C P, Yu S C M, Poh H J, et al. Experimental study on the heat and mass transfer characteristics in a refrigerated truck[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(3): 340 - 350.
- 9 Foster A M, Swain M J, Barrett R, et al. Experimental verification of analytical and CFD predictions of infiltration through cold store entrances[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(8): 918 - 925.
- 10 Foster A M, Swain M J, Barrett R, et al. Effectiveness and optimum jet velocity for a plane jet air curtain used to restrict cold room infiltration[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(5): 692 - 699.
- 11 梁志滔, 张小英. 自然通风条件下轻钢活动板房热环境计算研究[J]. 新型建筑材料, 2009(9): 44 - 47.
Liang Zhitao, Zhang Xiaoying. Computation of thermal environment of light-weight steel temporary house under natural ventilation condition[J]. New Building Materials, 2009(9): 44 - 47. (in Chinese)
- 12 周西华, 王继仁, 洪林. 湿空气密度的快速准确测算方法[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(4): 49 - 50.
Zhou Xihua, Wang Jiren, Hong Lin. Rapid and accurate calculation method of wet density[J]. Mining Safety & Environment Protection, 2005, 32(4): 49 - 50. (in Chinese)
- 13 陆耀庆. 供暖通风设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- 14 何嘉鹏. 冷库空气幕的计算方法[J]. 南京建筑工程学院院报, 1992(1): 21 - 26.

2005, 21(2): 11 – 16. (in Chinese)

59 Hoang M L, Verboven P, De Baerdemaeker J, et al. Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics[J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23(2): 127 – 140.

60 Chourasia M K, Goswami T K. CFD simulation of effects of operating parameters and product on heat transfer and moisture loss in the stack of bagged potatoes[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(3): 947 – 960.

61 Chourasia M K, Goswami T K. Simulation of effect of stack dimensions and stacking arrangement on cool-down characteristics of potato in cold store by computational fluid dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(4): 503 – 515.

62 Tassou S A, Xiang W. Modelling the environment within a wet air-cooled vegetable store[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 38(2): 169 – 187.

63 赵长青,傅泽田,刘雪,等. 食品冷链运输中温度监控与预警系统[J]. 微计算机信息, 2010, 26(6): 27 – 28.
Zhao Changqing, Fu Zetian, Liu Xue, et al. Temperature monitoring and warning system in cool food chain transportation[J]. Microcomputer Information, 2010, 26(6): 27 – 28. (in Chinese)

64 Tassou S A, De-Lille G, Ge Y T. Food transport refrigeration-Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8 – 9): 1467 – 1477.

65 Silvia Estrada-Flores, Andrew Eddy. Thermal performance indicators for refrigerated road vehicles[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(6): 889 – 898.

66 Moureh J, Menia N, Flick D. Numerical and experimental study of airflow in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34(1 – 3): 25 – 42.

67 Cao Zhikun, Gu Bo, Han Hua, et al. Application of an effective strategy for optimizing the design of air curtains for open vertical refrigerated display cases[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(6): 976 – 983.

68 Giovanni Cortella, Marco Manzan, Gianni Comini. CFD simulation of refrigerated display cabinets[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(3): 250 – 260.

69 Pedro Dinis Gaspar, Carrilho Goncalves L C, Pitarma R A. Three-dimensional CFD modelling and analysis of the thermal entrainment in open refrigerated display cabinets[C]. Proceedings of 2008 ASME Summer Heat Transfer Conference, 2008, 2: 63 – 73.

70 Yu Kezhi, Ding Guoliang, Chen Tianji. A correlation model of thermal entrainment factor for air curtain in a vertical open display cabinet[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(14 – 15): 2904 – 2913.

71 Simon van Mourik, Dirk Vries, Johan P M, et al. Physical parameter estimation in spatial heat transport models with an application to food storage[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(1): 14 – 21.



(上接第 227 页)

15 韩谔,吕恩利,陆华忠,等. 液氮充注气调保鲜环境数学模型[J]. 广东农业科学, 2012, 39(17): 178 – 180.
Han Xu, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Mathematical model of fresh-keeping experimental with controlled atmosphere by liquid nitrogen injection[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(17): 178 – 180. (in Chinese)

16 栾明川,王世清,孙振华. 气调库内氮、氧气体含量的预测[J]. 农业机械学报, 2001, 32(5): 123 – 124.

17 韩谔,吕恩利,陆华忠,等. 液氮充注气调保鲜运输厢内环境因素间耦合关系[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 275 – 280.
Han Xu, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Coupling effect of environmental factors in fresh-keeping transportation container with controlled atmosphere by liquid nitrogen injection[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 275 – 280. (in Chinese)

18 王广海,吕恩利,陆华忠,等. 保鲜运输用液氮充注气调控制系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 255 – 259.
Wang Guanghai, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Design and experiment of controlled atmosphere system based on liquid nitrogen injection for fresh-keeping transportation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 255 – 259. (in Chinese)

19 吕恩利,杨洲,陆华忠,等. 保鲜运输用液氮充注气调的温度调节性能优化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 237 – 243.
Lü Enli, Yang Zhou, Lu Huazhong, et al. Optimization of temperature regulating performance in fresh-keeping transportation by liquid nitrogen injection[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 237 – 243. (in Chinese)

20 周晓龙,吕恩利,陆华忠,等. 基于 Linux 的车载气调保鲜运输控制系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 155 – 160.
Zhou Xiaolong, Lü Enli, Lu Huazhong, et al. Control system for fresh-keeping transportation truck with controlled atmosphere based on Linux[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 155 – 160. (in Chinese)