

气调保鲜运输车通风系统阻力特性试验*

吕恩利 陆华忠 杨洲 韩小腾 张东霞 韩谔

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

【摘要】 针对液氮气调运输保鲜环境对运输厢体和通风系统的要求,设计了气调保鲜运输车通风系统试验装置。研究了通风风速、开孔隔板开孔率、堆栈方式、回风道长度等因素对气调保鲜运输车通风系统压力损失及能耗的影响,分析了通风系统的阻力特性。结果表明:通风系统的阻力特性可用 Ramsin 方程表述,通风系统的压差随风速的增大而增大;风速相同时,压差随开孔率的增大而减小;保鲜室内压差分布较均匀;满箱、留中间空隙和留两侧空隙等3种堆栈方式对压力损失的影响不明显;无回风道时压力损失比有回风道时小;气调保鲜运输车开孔隔板的开孔率大于3.89%时,通风系统的压力损失小且能耗较低。

关键词: 气调 阻力特性 开孔率 保鲜运输

中图分类号: S229 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)03-0120-05

Pressure Drop Characteristics of the Ventilation System in Fresh-keeping Transportation with Controlled Atmosphere

Lü Enli Lu Huazhong Yang Zhou Han Xiaoteng Zhang Dongxia Han Xu

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract

An experimental device of ventilation system was established to meet the requirement of fresh-keeping transportation with controlled atmosphere by liquid nitrogen. The pressure drop characteristics of the ventilation system were studied. The effects of airflow velocity, ratio of open area, stack mode and length of return air channel on the characteristics of pressure drop and energy consumption were analyzed. The pressure drop characteristics could be described by the equation of Ramsin. The pressure drop increased with the addition of airflow velocity. At the same airflow velocity, the pressure drop decreased with the addition of ratio of open area. The distribution of pressure drop in fresh-keeping room was steady. The effect of three stack modes on the pressure drop was not striking. The pressure drop was less when there was no return air channel. When the ratio of open area of the separator with holes in fresh-keeping transportation vehicle was bigger than 3.89%, it could meet low pressure loss and had small energy consumption. The research achievements will be instructive to the design of the ventilation system in fresh-keeping transportation with controlled atmosphere.

Key words Controlled atmosphere, Pressure drop characteristics, Ratio of open area, Fresh-keeping transportation

引言

气调保鲜运输是有效、先进的保鲜运输方法之

一^[1]。液氮作为一种气调方式,具有气调效率高、成本低等优点,适宜国内果蔬长途运输。但液氮冷量大、温度低,易造成保鲜车内局部温度过低,使果

收稿日期: 2010-09-27 修回日期: 2010-10-24

* 广东省自然科学基金资助项目(10151064201000038)、广东省科技计划资助项目(2008B021200008)、广东省人大议案项目(粤农函[2009]1099号)、华南农业大学校长科学基金资助项目(2009K008)和现代农业产业技术体系建设专项(nycytx-32)

作者简介: 吕恩利,讲师,博士生,主要从事冷藏运输装备与技术研究,E-mail: enlilv@scau.edu.cn

通讯作者: 陆华忠,教授,主要从事保鲜运输和果园机具研究,E-mail: huazlu@scau.edu.cn

蔬产生冻害；同时，加湿系统雾化不良易造成运输车内果蔬包装箱被打湿，为解决以上问题，设计满足需求的厢体结构及通风系统尤为迫切。

针对果蔬液氮气调保鲜运输的特点，设计了应用于液氮气调保鲜运输的厢体，文献[2~3]表明，该厢体结构适宜采用液氮气调和高压雾化加湿，且效果良好。

为优化厢体参数设计，降低通风系统能耗，需对通风系统的阻力特性进行研究。国内外对保鲜运输通风系统的阻力特性研究较少。文献[4~8]对果蔬差压预冷过程的阻力特性进行了研究。气调保鲜运输通风系统的阻力特性与通风风量、开孔隔板开孔率、回风道长度、包装箱堆栈方式、运输厢体底部通风槽等有关，为此本文搭建气调保鲜运输通风系统，在通风风量、隔板开孔率、回风道长度、包装箱堆栈方式等方面对通风系统的阻力特性进行研究，为气调保鲜运输车设计提供依据。

1 试验装置及方法

气调保鲜运输车通风系统示意图如图1(图中a~g表示气压管)所示。厢体由12 mm厚的有机玻璃板制作，厢体尺寸规格(长×宽×高)为2.38 m×1.28 m×1.40 m，回风道长度可调，其横截面尺寸(宽×高)为0.19 m×0.10 m。厢体内部设底板通风槽，通风槽高度为30 mm。压力室与保鲜室间设有开孔隔板，在开孔隔板上均匀设置不同数目的圆孔(圆孔直径均为60 mm)，得到不同开孔率。风机运转在压力室形成正压区，在回风道形成负压区，利用压力室与回风道间的压差，迫使空气从保鲜室内通过。通过变频器控制风机转速，获得不同通风风量。由AZ 8901型风速仪测定回风道风速，准确度

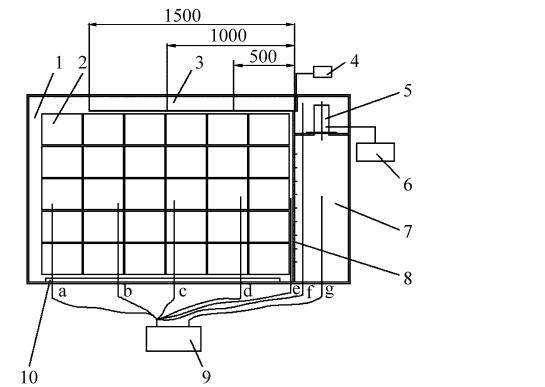


图1 气调保鲜运输车通风系统装置简图

Fig. 1 Schematics of ventilation system in fresh-keeping transportation with controlled atmosphere

1. 保鲜室 2. 荔枝包装箱 3. 回风道 4. 风速仪 5. 风机
6. 变频器 7. 压力室 8. 开孔隔板 9. 数字式压差计 10. 底板通风槽

为 $\pm 2\%$ 。压差由475-000-FM型数字压差计测定，测量范围为0~0.249 kPa。

试验用包装箱为荔枝专用包装箱，规格(长×宽×高)为315 mm×155 mm×265 mm，荔枝包装箱在保鲜室内与开孔隔板保持50 mm的距离，以避免包装箱堵住开孔隔板上的开孔。

以回风道风速、回风道长度、开孔率、堆栈方式为试验因素，试验因素及各因素的水平值如表1所示。

表1 试验因素水平值

Tab. 1 Experimental scheme

试验因素	水平值
回风道风速/ $m \cdot s^{-1}$	2、3、4、6、8、10
回风道长度/m	0、0.5、1.0、1.5
开孔率/%	1.26、2.52、3.78、7.56、15.10、30.21
堆栈方式	满箱、留中间空隙、留两侧空隙

2 结果与分析

2.1 开孔率不同时，风速与压力损失的关系

通过回风道长度单因素试验，发现回风道长度各水平值对通风阻力特性的影响具有相似的规律性。为分析气调保鲜运输车中的通风阻力特性，以1.5 m长回风道为例进行说明。

当回风道长度为1.5 m时，在回风道不同通风速度(通过改变变频器频率调节通风速度)、不同开孔率下，测量压力室与回风道间的压差。

如图2所示，在装满荔枝包装箱的厢体内，压力室与回风道间的压差随风速的增加而增大；此外，开孔率越大，压差变化的曲线离风速轴越近；开孔率越小，压差随风速变化的曲线离压差轴越近。经试验发现，在风速相同、开孔率相同的情况下，装满荔枝包装箱的厢体比空的厢体压差大，说明厢体压力室与回风道的压差还与箱内物料有关。由此可知，压差主要由厢内荔枝包装箱和开孔隔板两方面产生。

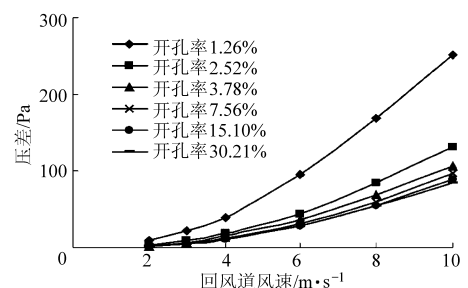


图2 风速与压力损失的关系曲线

Fig. 2 Airflow velocity with respect to pressure drop

由图2可知，气调保鲜运输车通风系统的阻力特性相似。文献[4,9~10]表明，风速与压力损失

可以用 Ramsin 方程表示。即

$$\Delta p = av^b$$

式中 Δp ——压力室与回风道间的压差, Pa

v ——回风道的通风速度, m/s

a 、 b ——系数

将图 2 中各曲线按照 Ramsin 方程进行拟合, 各曲线拟合方程的相关系数 R^2 均大于 0.97。各曲线 Ramsin 方程的系数 a 与开孔率的关系曲线如图 3 所示。

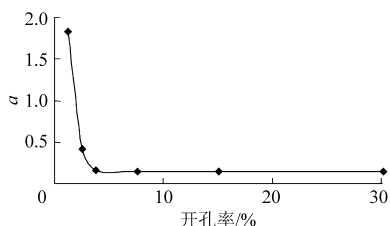


图 3 Ramsin 方程的系数 a 与开孔率的关系

Fig. 3 Venting area with respect to the a coefficients of Ramsin equation

结合图 2 和图 3 可以看出, 开孔率越大, 压力损失就越小; Ramsin 方程的系数 a 随开孔率的增大而减小; Ramsin 方程的系数 a 越大, 压力损失就越大。因此, 通过研究图 3 中 Ramsin 方程的系数 a 与开孔率的关系, 该曲线存在一个临界开孔率点, 当开孔率超过该点时, Ramsin 方程的系数 a 随开孔率增加而减小的速度明显减缓。

将图 3 中的 Ramsin 方程的系数 a 与开孔率的关系曲线进行非线性回归, 发现系数 a 与开孔率呈幂函数关系时, 相关系数 R^2 最大。将最大开孔率和 Ramsin 方程系数 a 的最大值设为 1, 将开孔率和系数 a 进行无因次化, 再按幂函数进行非线性回归, 求出回归曲线曲率最大点所对应的开孔率值^[4], 即为基于压力损失的临界开孔率。经计算, 得出该通风系统基于压力损失的临界开孔率为 3.86%。当开孔隔板的开孔率大于 3.86% 时, 随着开孔率的增大, 压差的减速将明显减缓。

2.2 回风道长度对压力损失的影响

如图 4 所示, 在回风道风速、开孔率相同的情况下, 无回风道(回风道长度为零)时, 压力室与回风道出口处压差比有回风道时均小。回风道长度分别为 0.5、1.0 和 1.5 m 时, 对压差影响不明显。在相同的开孔率下, 风速越大, 压差就越大; 在相同风速下, 开孔率越大, 压差就越小。

2.3 堆栈方式对压差的影响

采用满箱、留中间空隙和留两侧空隙 3 种包装箱堆栈方式, 如图 5 所示。满箱堆栈时, 可容纳荔枝包装箱最多, 为 199 个。其他两种堆栈方式可容纳

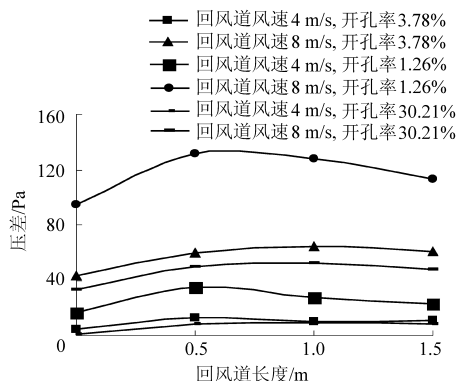


图 4 回风道长度对压力损失的影响

Fig. 4 Length of return air channel with respect to pressure drop

荔枝包装箱最大数均为 166 个。其中留中间空隙的堆栈方式中间有 160 mm 的空隙, 留两侧空隙的堆栈方式两侧各有 80 mm 的空隙。

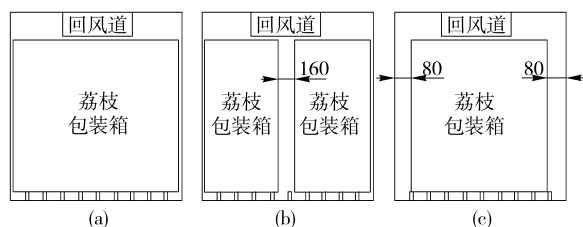


图 5 包装箱堆栈方式

Fig. 5 Stack modes of packing boxes

(a) 满箱 (b) 留中间空隙 (c) 留两侧空隙

试验中因箱体内部设底板通风槽, 再加上实际装载时, 因纸箱尺寸, 使包装箱不能刚好排到顶部, 箱内顶部会留有空隙。以开孔隔板开孔率为 30.21%、回风道长度 1.5 m 时为例, 试验结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 3 种堆栈方式对压力室和回风道间压差的影响不明显。

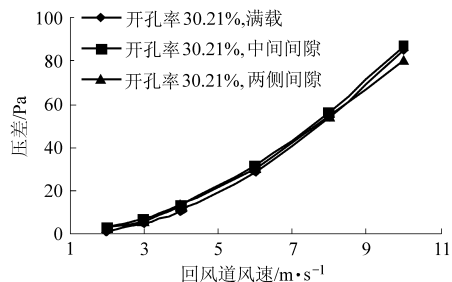


图 6 堆栈方式对压差的影响

Fig. 6 Stack modes with respect to pressure drop

2.4 保鲜室内压差分布

如图 1 所示, 在保鲜室内在距离开孔隔板 0.05、0.50、0.95、1.40、1.85 m 处分别设置一个气压管, 分别测量压力室内气压管与保鲜室内各气压管间的压差。以开孔隔板开孔率为 1.26%, 回风道长度 1.5 m 时为例, 保鲜室内压差分布如表 2 所示。从表 2 可以看出, 保鲜室内各点压力与压力室内压

力基本保持不变,保鲜室内压差分布较均匀。

表 2 保鲜室内压差分布

Tab. 2 Distribution of pressure drop in

fresh-keeping room

Pa

气接管接入压 差计的方式	回风道风速/ $m \cdot s^{-1}$					
	2	3	4	6	8	10
g - e	8	13	24	56	98	141
g - d	8	13	23	59	100	142
g - c	8	14	25	59	99	150
g - b	8	13	23	58	98	150
g - a	8	13	25	57	101	153

2.5 通风系统能耗与开孔率的关系

以 1.5 m 长回风道为例,以风机频率表示通风系统的能耗^[11],风机频率与风速关系曲线如图 7 所示。将风机频率与风速的关系曲线进行线性回归,发现风机频率与风速的关系呈直线,各开孔率下风机频率与风速的相关系数 R^2 均大于 0.99。同等风速下,开孔率越大,通风系统能耗越小。

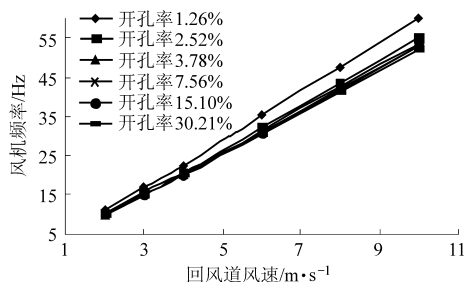


图 7 风机频率与风速的关系曲线

Fig. 7 Fan frequency with respect to airflow velocity

将不同开孔率下的风机频率与风速关系的回归系数与开孔率绘制成图 8 的关系曲线。从图 8 可以看出,开孔率越大,风机频率与风速直线回归系数就越小。将该曲线用幂函数进行非线性回归,对坐标轴进行无因次化后,求出曲线曲率的最大点(3.89%),

即基于能耗的临界开孔率。当包装箱两侧开孔率大于 3.89% 时,通风系统的能耗较小,且随着开孔率的增大,能耗消耗的减速明显减缓。

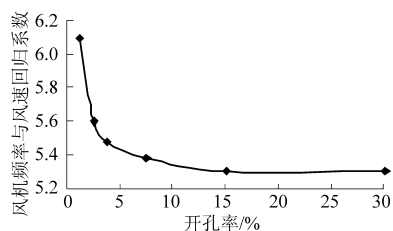


图 8 风机频率-风速关系直线回归系数与开孔率关系曲线

Fig. 8 Device energy consumption with respect to airflow velocity for different venting areas

从 2.1 和 2.5 节试验数据分析可得,基于压力损失的临界开孔率和基于能耗的临界开孔率分别为 3.86% 和 3.89%。因此,气调保鲜运输车通风系统的开孔隔板开孔率应该大于 3.89%,这样压力损失小且能耗消耗较低。

3 结论

(1) 针对液氮气调保鲜运输的工作特点,设计了箱体结构及通风系统,并在通风速度、开孔率、回风道长度、堆栈方式、压差分布、能耗等方面研究了通风系统的阻力特性,为设计气调保鲜运输车通风系统提供依据。

(2) 通风系统的阻力特性满足 Ramsin 方程,通风系统中压力室与回风道间的压差随风速的增大而增加。无回风道时通风阻力比有回风道时大。包装箱的 3 种堆栈方式对通风阻力的影响不明显。保鲜室内压差分布较均匀。

(3) 若从压差损失的角度考虑,开孔隔板的开孔率应大于 3.86%;若从能耗的角度考虑,开孔隔板的开孔率应大于 3.89%。综合考虑压差和能耗对开孔率的影响,气调保鲜运输车通风系统中开孔隔板的开孔率应大于 3.89%。

参 考 文 献

- 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)
- 韩小腾,陆华忠,吕恩利,等. 保鲜运输用高压雾化加湿系统的湿度调节特性[C]//2010 国际农业工程大会论文集,上海,2010.
Han Xiaoteng, Lu Huazhong, Lü Enli, et al. Experimental study on regulation characteristics of special high pressure atomized humidifying system for fresh-keeping transportation [C]//2010 International Agricultural Engineering Conference, Shanghai, 2010. (in Chinese)
- 王广海,陆华忠,吕恩利,等. 果蔬保鲜运输用智能气调系统的应用研究[C]//2010 国际农业工程大会论文集,上海,2010.

- Wang Guanghai, Lu Huazhong, Lü Enli, et al. Applied research in fruits and vegetables fresh-keeping with intelligence controlled atmosphere system [C]//2010 International Agricultural Engineering Conference, Shanghai, 2010. (in Chinese)
- 4 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.
Yang Zhou, Zhao Chun'e, Wang Liuyi, et al. Pressure drop characteristics in forced-air pre-cooling of longan fruits [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1):104~107. (in Chinese)
 - 5 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: 335~348.
 - 6 谭晶莹, 杨昭. 苹果强制通风预冷试验[J]. 农业机械学报,2008,39(7):95~98.
Tan Jingying, Yang Zhao. Experimental study on forced-air pre-cooling of apples in bulk [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 95~98. (in Chinese)
 - 7 Vigneault C, Thompson J, Wu S. Designing container for handling fresh horticultural produce [M]//Benkeblia N, Shiomi N. Post-harvest Technologies for Horticultural Crops, 2009:25~47.
 - 8 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.
Wang Qiang, Liu Fengzhen, Lian Tianda. Experimental study on parameters affecting grape pressure pre-cooling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(4): 212~215. (in Chinese)
 - 9 Chau K V, Gaffney J J, Baird C D, et al. Resistance to airflow of oranges in bulk and in cartons [J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(6): 2 083~2 088.
 - 10 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.
 - 11 闫国琦, 杨洲, 马征. 龙眼压差通风预冷装置风速控制与能耗分析[J]. 农业机械学报,2009, 40(3):125~129.
Yan Guoqi, Yang Zhou, Ma Zheng. Air velocity control and energy analysis in forced-air pre-cooling device of longan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):125~129. (in Chinese)
 - 12 Kan A K, Han H D. Study on temperature field distribution inside reefer containers [C]// International Conference on Cryogenics and Refrigeration Proceedings, 2008: 884~887.
 - 13 Rodríguez-Bermejo J, Barreiro P, Robla J I, et al. Thermal study of a transport container [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 517~527.
 - 14 Moureh J, Flick D. Air flow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(5):464~474.
 - 15 Billing D P, McDonald B, Hayes A J, et al. Temperature characteristics within 20-foot reefer container during export of New Zealand produce [J]. Science et Technique du Froid, 1998(2): 137~147.
 - 16 Punt H, Huysamer M. Temperature variances in a 12 m integral reefer container carrying plums under a dual temperature shipping regime [J]. Acta Horticulturae, 2005, 687: 289~295.
 - 17 Tanner D J, Amos N D. Temperature variability during shipment of fresh produce [C]// Proceedings of the International Conference Postharvest Unlimited, 2003, 599: 193~203.

(上接第 119 页)

- 6 金庆先. 烟气气体常数的确定及与监测质量的关系[J]. 上海环境科学,1994,13(6): 30~33.
- 7 魏龙. 热工与流体力学基础[M]. 北京: 化学工业出版社,2007:226.
- 8 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用[M]. 北京: 电子工业出版社,2008:250.
- 9 牛海霞,刘榴,赵文河,等. 脉动燃烧尾气干燥过程的质量传递特性[J]. 农业机械学报,2011,42(1):129~133.
Niu Haixia, Liu Liu, Zhao Wenhe, et al. Mass transfer between materials and unsteady airflow from a Helmholtz type combustor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1):129~133. (in Chinese)
- 10 路倩倩,杨德勇,郎芝花,等. 脉动燃烧干燥换热特性分析与实验[J]. 农业机械学报,2010,41(3):123~127.
Lu Qianqian, Yang Deyong, Lang Zhihua, et al. Analysis and experiment of heat transfer in Helmholtz pulse combustion dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(3):123~127. (in Chinese)
- 11 杨德勇,谢翔燕,刘相东. 料液脉动燃烧尾气雾化试验[J]. 农业机械学报,2009,40(3):90~92.
Yang Deyong, Xie Xiangyan, Liu Xiangdong. Experiment on atomizing properties of Helmholtz pulse combustor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(3):90~92. (in Chinese)