

文章编号:0253-4339(2013)02-0085-05
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.02.085

冷藏车开门时车内温湿度变化实验研究

吕 宁 谢如鹤 刘广海

(广州大学物流与运输研究所 广州 510006)

摘 要 配送过程中冷藏车开门时的热质交换会引起车内空气温湿度的剧烈变化,这使得食品的品质难以得到保证。针对目前冷藏车开门卸货时存在的一些问题,进行了对比实验,对不同条件下的车内温度、相对湿度变化进行了分析,得出在开门时长一定的情况下车厢内外空气温差是影响车内温升的主要因素,采用 PVC 门帘可以有效地抑制车内温度升高,一定程度上保证食品安全。

关键词 冷藏车;开门;PVC 门帘;温湿度变化

中图分类号:TB658;U469.6⁺6

文献标识码:A

Experimental Study on the Variations of Temperature and Humidity in a Refrigerated Truck with the Door Opened

Lv Ning Xie Ruhe LiuGuanghai

(Institute for Logistics and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou, 510006, China)

Abstract The dramatic changes of interior air temperature and humidity induced by heat and mass transfer can make the quality of food no longer be assured while the door of the refrigerated truck is opened in the distribution. Comparative experiments are conducted according to the problems in the unloading process. The variations of temperature and humidity under different conditions are analyzed. The conclusion shows that the temperature difference between the inside and outside air is the main factor which impact the temperature rise of interior air, and the use of PVC curtain can effectively inhibit the elevated temperature inside the vehicle and ensure food safety to some extent.

Keywords refrigerated truck; opening; PVC curtain; variations of temperature and humidity

冷藏车是易腐产品短途运输及配送的主要工具。在配送的过程中,冷藏车开门卸货时,车厢内外空气会进行热湿交换,在较短的时间内改变车厢内的温度,引起一系列的问题:1)温度波动引起易腐食品冷耗增加,同时食品冷表面产生凝结水,均会使食品质量安全受到影响;2)增加制冷系统的负荷,增加制冷机组融霜的次数;3)在车厢门口处形成大量的凝结水,不利于装卸。

目前,对于冷藏车开门过程的研究较为少见。在国外,C. P. Tso 等人对一辆带侧开门的冷藏汽车进行了开门时空气热质交换的分析,但其对车内湿度变化关注不够,湿度测点仅有一个,代表性不足^[1]。多数外国学者的研究集中在与冷藏车有着相似性的微型冷库方面。A. M. Foster 利用示踪气体法对目前计算开门空气渗入量的五个模型进行了验证,指出空气渗入量与门的型式、尺寸、相对位置、开度、冷库的尺寸有很大的

关系^[2],并给出了实验测算方法^[3]。P. Chen 等人在 Tamn 理论模型的基础上对冷库卷闸门和侧滑门的开门情况下空气的渗入率进行了实验分析^[4-5]。

国内的刘敬辉等人用 CFD 对外吸风式风幕机在冷藏车开门时的保温性能进行了研究^[6]。翟玉玲、谢晶等人则分别对不同送风型式下小型冷库开门过程进行了模拟^[7-8]。由于冷藏车型式多样,目前还缺少对其大量的实证研究;对于开门过程中湿度变化也未引起足够的重视。

在我国,每年约有 4 亿吨生鲜农产品进入流通领域,而机械式冷藏车保有量约为 20000 辆,冷藏运输能力有待提高^[9]。同时,中小吨位的冷藏车配送是冷链运输环节中的薄弱之处,经常出现客户需求量小,一车供应点多的情况^[6]。这些情况使得冷藏车停车开门频率增加,内部温度变化较大,食品品质难以得到保证。经过调查发现,大多数冷藏配送车辆在

基金项目:国家自然科学基金(51008087,71172077)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51008087 & No. 71172077).)

收稿日期:2012 年 7 月 21 日

实际运输过程中开门卸货时主要存在以下几点问题：1) 不采用有效的保温措施，如悬挂 PVC 门帘、装载风幕机等；2) 由于操作不当，开门时间过长，通过门的漏热严重；3) 开门时不关闭制冷机组，形成车内空气与外界空气的强制对流，耗能严重。

针对以上情况，在理论分析的基础上，设计了分组实验，研究几种不同条件下冷藏车开关门引起的温度变化状况，并进行了分析。

1 热质交换分析

当冷藏车停车开门时，车外高温气体通过门进入车厢内，与车厢内的空气、冷表面进行换热，其所携带的水蒸气在冷表面凝结；同时，车厢内的低温气体也通过门流入外界。其中高温空气与冷表面的对流换热热量 (E_3)、水蒸气凝结所放出的潜热 (E_4) 被冷表面所吸收。那么整个开门过程中，忽略外界通过围护结构导热传入的热量及辐射传入的热量，车厢内空气热质交换的能量方程可表示为：

$$E_f - E_i = E_1 - E_2 - E_3 - E_4 \tag{1}$$

式中： E_i 、 E_f 分别为初、终状态下车厢内空气的能量； E_1 为由外界空气渗入所携带的能量； E_2 为车厢内空气渗出所携带的能量； E_3 为车厢内冷表面通过对流换热吸收的显热量； E_4 为车厢内冷表面吸收的水蒸气凝结热量。

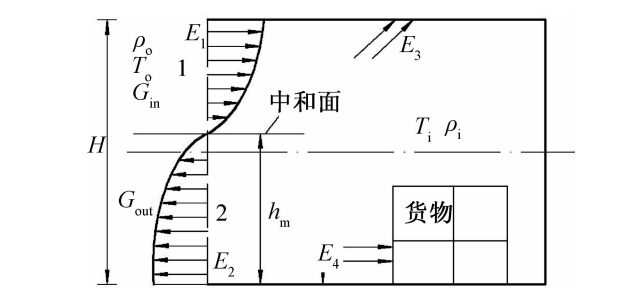


图 1 冷藏车开门时车厢内外空气质能变化
Fig. 1 Changes of the air inside and outside of the refrigerated truck while the door is open

这一过程是车内外空气在热压作用下通过单开口（车门）进行热质交换的过程。在此过程中， E_1 、 E_2 与空气的渗入（出）量 G 、车内外温差 ΔT 及含湿量 D 有关。设 H 为门的高度，中和面距门下缘的高度为 h_m ，中和面将门口分为上下两个部分 1 和 2，开门时，空气从上侧 1 部分流入，从下次 2 部分流出，如图 1 所示。自然对流通风量 $G_{in} = G_{out}^{[10]}$ ：

$$G_{in} = \mu_1 \frac{h_m}{H} F \sqrt{2K_s \times \frac{h_m}{2} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_o} \right) \rho_{in}}$$

$$= \mu_2 \left(1 - \frac{h_m}{H} \right) F \sqrt{2K_s \times \frac{H + h_m}{2} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_o} \right) \rho_o} \tag{2}$$

式中： μ_1 、 μ_2 为门口 1、2 部分对应的流量系数； ρ_{in} 、 ρ_o 为车厢内外空气密度， kg/m^3 ； T_i 、 T_o 为车厢内外空气干球温度， K ； G_{in} 为空气渗入量， kg/s ； F 为冷藏车门口面积， m^2 ； K_s 为与大气压相关的系数， $(\text{Pa} \cdot \text{K})/\text{m}$ ， $K_s = \rho g T$ ， T 为开氏温度。

对于 E_3 、 E_4 ，由对流换热公式及凝结放热过程可知：

$$E_3 = h_c A (\bar{t} - t_i) \text{ (kJ)} \tag{3}$$

$$E_4 = m_{c,w} \cdot r \text{ (kJ)} \tag{4}$$

式中： h_c 为对流换热系数， A 为车厢内部冷表面面积， m^2 ； $\bar{t}$ 为空气的平均温度， $\bar{t} = \frac{1}{2}(t_i + t_f)$ ， $^{\circ}\text{C}$ ； t_i 为冷表面温度，取为车厢内初始状态时空气温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t_f 为车厢内终状态空气温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $m_{c,w}$ 为凝结的水蒸气质量， kg ； r 为水蒸汽凝结放出的潜热量，取冷表面温度即 t_i 对应下的值， kJ/kg 。在此热质交换过程中，潜热交换最为剧烈，而热空气与冷表面的自然对流换热热量与之相比差两个数量级以上，即 $E_3 \ll E_4^{[11]}$ 。 E_4 部分作为潜热释放，对于较短时间内的车内空气温升影响极小。这两部分能量均被车内冷表面吸收，通过延迟对关门后车内冷负荷产生影响。

对于固定车型及尺寸，在车门全开时，式 (2) 中 F 、 μ 均为定值。因此，车厢内空气温度的升高主要与空气流入量 G 、内外温度差 ΔT 、以及开门时长 θ 有关。

2 实验装置与方法

实验基于广州大学物流与运输研究所的冷藏运输条件仿真实验台进行^[12]。该实验台由两部分组成，一部分是外部环境模拟，可以模拟不同温度、湿度的外部环境；一部分是内部冷藏运输模拟单元，其尺寸如图 2 所示，内部保温材料为聚氨酯发泡，单元板壁厚度为 100mm。实验在冷藏运输模拟单元内部布置了 24 个温度度探头，3 个温湿度探头，其余为温度探头，其放置位置如图 3 所示，记录数据的间隔为 15s 一次。针对实际情况，在冷藏车空载时对 8 种不

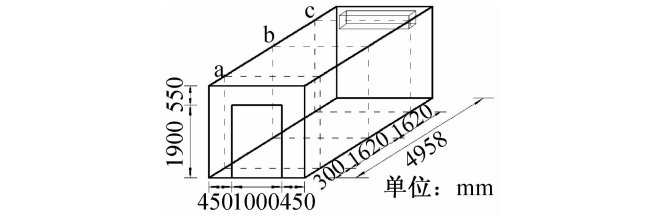


图 2 冷藏单元相关尺寸及测点截面位置
Fig. 2 The size of the refrigeration unit and the location of the cross-section position with the measuring point

同状况下分别进行开门 3min 与开门 6min 的实验,见表 1。为了简化条件,实验中外部环境空气设定干球温度为 30℃,相对湿度 65%;车门开启状态均为全开。

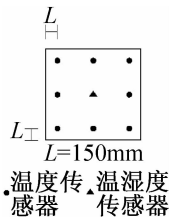


图 3 温湿度传感器在截面上的分布

Fig.3 The distribution of temperature and humidity sensors on the cross-section

表 1 实验中各因素组合状况

状 况	1	2	3	4	5	6	7	8
车厢内空气设定温度 $t_i/^\circ\text{C}$	-15	-15	-15	-15	0	0	0	0
塑料门帘	无	无	有	有	无	无	有	有
制冷机	关	开	关	开	关	开	关	开

3 实验结果分析

图 4、图 5 分别是开门时长为 6min 时,1~4、5~8 状况下的车厢内空气平均温度变化状。图 6、图 7 分别为开门 3min 时,1~4、5~8 状况下车厢内平均空气温度变化状况。

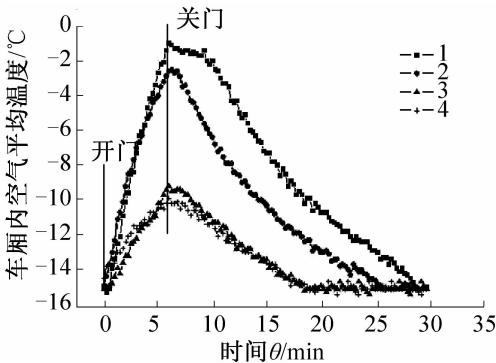


图 4 开门 6min 状况 1~4 的车厢内空气平均温度变化
Fig.4 The variations of average temperature in the truck in cases1 to 4 with the door opened for 6min

通过实验发现,在车门打开后,车厢内外空气立即进行剧烈的热质交换,车厢内空气平均温度迅速升高;而在关门同时,立即开启制冷机组,车厢内空气的平均温度又逐渐回落。表 2 是开门期间,不同状况下车厢内空气平均温度的回升状况。

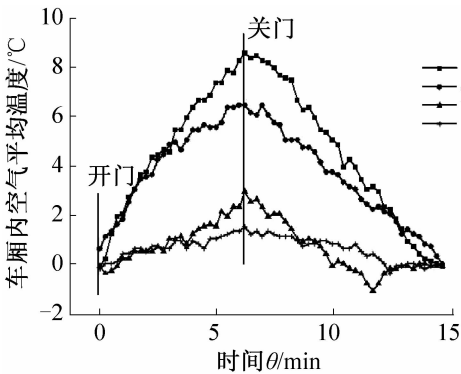


图 5 开门 6min 状况 5~8 的车厢内空气平均温度变化
Fig.5 The variations of average temperature in the truck in cases 5 to 8 with the door opened for 6min

无门帘、制冷机组关闭的情况(状况 1、5),不同的开门时长所对应的车厢内空气平均相对湿度变化如图 8 所示。

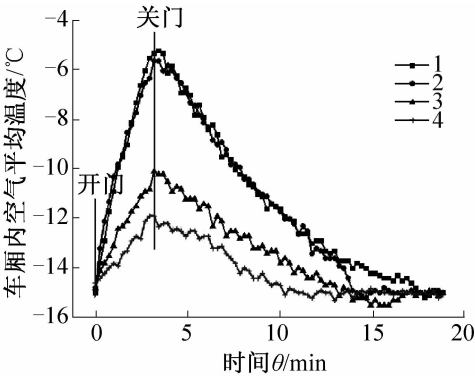


图 6 开门 3min 状况 1~4 的车厢内空气平均温度变化
Fig.6 The variations of average temperature in the truck in cases 1 to 4 with the door opened for 3min

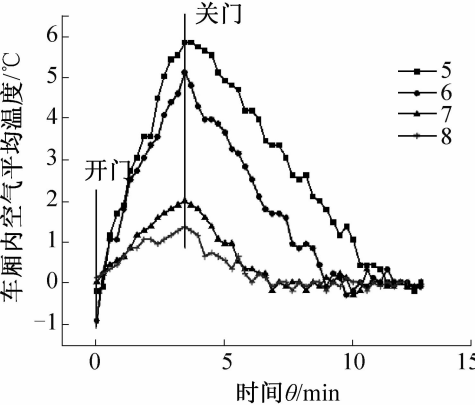


图 7 开门 3min 状况 5~8 的车厢内空气平均温度变化
Fig.7 The variations of average temperature in the truck in cases 5 to 8 with the door opened for 3min

开门后,车厢内空气平均相对湿度迅速升高,达到露点状态。初始状态下车厢内外空气温差对相对湿度升高的速率较大。大温差情况下,车厢内空气相

对湿度达到露点状态较慢。随着开门时间的增加及车厢内空气与初始状态的温差($t-t_1$)的逐渐增大,车厢内空气相对湿度增速减小,这三个因素之间的关系如图 9 所示。

表 2 开门期间温度回升所达到的峰值

温度回升 峰值/℃	1	2	3	4	5	6	7	8
6min	-0.9	-2.4	-9.1	-9.8	8.6	6.5	3	1.6
3min	-5.2	-5.6	-10.1	-12.1	5.6	4.9	1.9	1.3

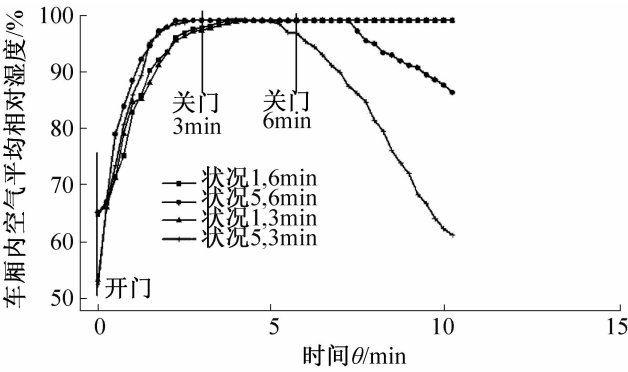


图 8 车厢内空气平均相对湿度变化

Fig.8 The variations of average humidity in the truck in cases 1 and 5 within different opening time

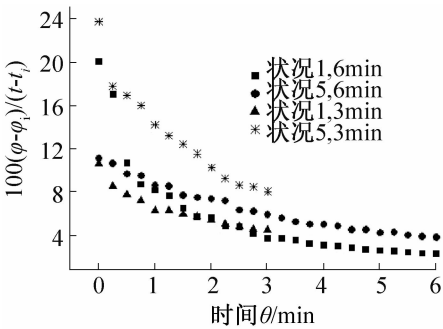


图 9 车厢内空气平均温度、平均相对湿度与开门时长之间的关系

Fig.9 The relationship between the average temperature, average humidity in the truck and the opening time

4 结论与展望

通过理论分析与实验结果可以得到以下结论：
1)冷藏车停车开门时,车厢内外空气的温度差是影响车内空气温升的最主要因素,而车厢内外空气的相对湿度则是次要因素。
2)较大的初始温差,会使开门时车内空气温升速率较快,相对湿度增加的速率较慢,空气中的水蒸

气在冷表面凝结量较多。
3)采用塑料门帘可以在冷藏车开门时的取得良好的保温效果,并且车厢内外空气初始温差越大,开门时间越长,保温效果越明显。
4)在开门过程中,不停止制冷机组对于冷藏车内部空气温升的抑制作用不大,因此无论是否悬挂门帘均应建议关闭制冷机。

对于冷藏车开门过程中空气热质交换的实验研究,还应当从以下方面进行进一步的研究：
1)在不同载重状态下,开门过程中空气热质交换对车厢内平均温度、平均相对湿度的影响。
2)开门过程中,车厢内不同位置的温度变化状况及其可能对货物产生的影响。
3)实际过程中,由于冷藏车的型式、开门方式、内外温差、内外压差等条件的不同而对于空气的热质交换产生不同影响,需要根据实际条件进行分析。

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] Foster A M, Barret R, James S J, et al. Measurement and prediction of air movement through door ways in refrigerated rooms[J]. International Journal of Refrigeration, 2002,25(8):1102-1109.

[4] Chen P, Cleland D J, Lovatt S J, et al. Air infiltration into refrigerated stores through rapid-roll doors[C]//Proc. of the 20th international congress of refrigeration, Sydney, Australia, 1999. 9.

[5] Chen P, Cleland D J, Lovatt S J, et al. An Empirical model for Predicting Air Infiltration into refrigerated stores through doors[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(6):799-812.

[6] 刘敬辉,陈江平,陈芝久,等. 风幕对冷藏车性能影响的仿真分析和实验研究[J]. 流体机械,2006,34(1):52-55,73. (Liu Jinghui, Chen Jiangping, Chen Zhijiu, et al. Simulation Analysis and Experimental Study on Performance of Refrigerated-car Affected by Air Curtain[J]. Fluid Machinery,2006,34(1):52-55,73.)

[9] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 农产品冷链物流发展规划[R]. 2010. 6.

[10] 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):44-48. (Liang

Zhitao, Zhang Xiaoying. Computation of thermal environment of light-weight steel temporary house under natural ventilation condition [J]. New Builddings Materials, 2009 (9) : 44-48.)

[11] 刘浩荣. 多温区冷藏车性能测试及优化[D]. 广州大学, 2012.

[12] 谢如鹤, 刘广海, 郭成. 冷藏运输条件仿真试验台的设计与测试[J]. 制冷学报, 2006, 27 (6) : 52-58. (Xie Ruhe, Liu Guanghai, Guo Cheng. Design and Test on Simulating Test-bed of Refrigerated Transportation Condition[J]. Jour-

nal of Refrigeration, 2006, 27 (6) : 52-58.)

通信作者简介

谢如鹤, 男 (1963 -) , 博导, 教授, 广州大学, 13342886983, E-mail: 583385752@ qq. com。研究方向: 冷藏运输与冷链物流。

About the corresponding author

Xie Ruhe (1963 -) , male, Ph. D/Professor, Guangzhou University, 13342886983, E-mail: 5833857522@ qq. com. Research fields: Refrigerated transport and cold chain logistics.