

文章编号: 1671-6612 (2025) 06-854-06

不同环境温度 和车门开启下冷藏车箱内温度分布研究

张婧瑜

(上海市质量监督检验技术研究院有限公司 上海 201114)

【摘要】 以冷藏车车厢温度作为研究对象, 搭建实验台测试厢体温度, 建立三维冷藏车物理模型和数学模型, 采用 FLUENT 软件将实验数据与模拟结果进行可靠性验证, 确定数值模拟瞬态计算模型。分析了不同室外环境温度 (11℃、20℃、25℃、30℃、35℃) 和车门开启状态 (全开和半开) 对冷藏车平均温度、温度分布、升温速度的影响。结果表明: 环境温度是影响车厢温度场的重要因素, 货物整体三个外表面中的近门表面受环境温度影响最大, 当环境温度较高时, 货物应尽量堆放在靠近车头区域, 并加快货物装卸时间。车门开启状态对车厢温度分布有一定影响, 车门半开启状态能降低车厢平均温度的升温速度, 为后续冷藏车节能技术改造、货物装卸方法、温度控制测量等研究提供技术参考。

【关键词】 冷藏车; 环境温度; 车门开启状态; 瞬态模拟; 温度分布

中图分类号 TK123 文献标志码 A

Temperature Distribution Study of Refrigerated Truck under Different Ambient Temperatures and Door Opening Conditions

Zhang Jingyu

(Shanghai Institute of Quality Supervision and Inspection Technology Co., Ltd, Shanghai, 201114)

【Abstract】 Taking the temperature of the refrigerated truck as the research object, an experimental platform was constructed to test the temperature of the refrigerated truck, and a three-dimensional physical and mathematical model were established. FLUENT software was used to verify the reliability of the simulation results by experimental test, and the transient calculation model of numerical simulation was determined. The influence of different outdoor ambient temperature (11℃, 20℃, 25℃, 30℃, 35℃) and door opening conditions (full open and half open) on the average temperature, temperature distribution and temperature rise rate of refrigerated truck was analyzed. The results show that the ambient temperature is an important factor affecting the temperature field of refrigerated truck, and the surface near the door of three cargo-outer-surfaces is the most affected by the ambient temperature. When the ambient temperature is high, the cargo should be stacked near the front and reduce cargo handling time. The door opening condition has a certain influence on the temperature field of refrigerated truck, and the door half-open condition can reduce the temperature rise rate of the average temperature, which provides a technical reference for the subsequent research on energy-saving technology transformation of refrigerated trucks, cargo handling methods, and temperature control measurement.

【Keywords】 Refrigerated truck; Ambient temperature; Door opening condition; Transient simulation; Temperature distribution

0 引言

近年来我国冷链物流行业迅猛发展,以生鲜农产品、医药疫苗等为代表的冷链物流市场需求从2016年的1.25亿吨增长至2023年的3.5亿吨,带动了冷链运输规模持续增长^[1]。为支持冷链物流发展,国家相继颁布了一些政策法规,例如2021年12月13日,国务院办公厅印发了《“十四五”冷链物流发展规划》,明确指出通过冷链物流的高质量发展来提升人民的生活水平。随着我国公路冷藏车运量的年增长率急速增长,冷藏车作为重要的陆地运输易腐食品的交通工具,已成为物流链中的重要环节,对冷藏车的技术研究愈发重要。冷藏车厢内的易腐产品保存质量依赖于箱内的温度分布和空气流场,冷藏运输中的温度性能是冷藏效果的一项重要评价指标,直接影响食品、药品等产品的质量和安全^[2,3]。冷藏车在运输过程中,应根据环境条件合理安排装载位置和数量,确保车厢内部温度的均匀分布和稳定性。目前国内外学者对冷藏车的研究热点集中在蓄冷材料性能、冷藏厢内温度场分布、外界条件对冷藏车承运生鲜食品影响等方面,采用的主要方法为数值模拟与实验研究。例如邓静等^[7]研究了肋片布置对相变蓄冷用冷藏车蓄冷板充冷过程的影响。徐双喜^[8]对冷板冷藏车相变蓄冷换热器进行了数值模拟与实验研究。谢如鹤^[9]等基于空载温度场模拟与实验,研究了冷板布置方式对冷藏汽车车厢内温度场分布的影响。但对不同环境温度和车门开启状态下,冷藏车车厢温度场分布的研究较少^[4-15]。

本文将实验测试与数值模拟相结合,建立冷藏车数值模拟瞬态计算模型,利用计算流体力学方法对该冷藏车车厢温度场进行分析,研究不同环境温度和车门开启状态下,车门开启过程车厢内温度的变化特征。

1 冷藏车实验台

冷藏车实验台尺寸 6600mm×2300mm×2300mm(长×宽×高),车厢运行平均温度 5℃,风机和机组集中在车厢前部,采用单一冷风机由车前向车后送风,送风温度 3.16℃,风速 2m/s。车厢内外表面采用 3mm 玻璃钢,夹层为 80mm 硬质聚氨酯泡沫保温层。室外环境温度 11℃,车厢 90%

满载堆砌货物,将车厢高度方向平分 3 层,平面方向每层均匀布 11 个测温点,全车厢共设 33 个测温点,冷藏车实验台如图 1 所示。

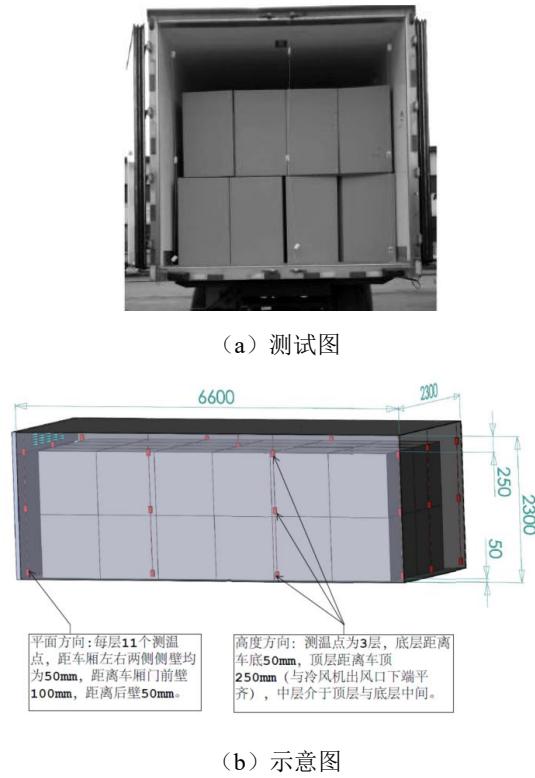


图 1 冷藏车实验台

Fig.1 Test bench of refrigerated truck

2 数值模拟可靠性验证

2.1 简化假设和模拟条件

采用 κ - ϵ 湍流模型进行瞬态数值模拟,时间步长为 0.5s,模型的壁面处理为标准壁面函数。初始条件为稳态计算温度稳定在 4℃ 时打开车门进行非稳态数值计算,求解方式为 simple 算法,收敛判断依据为当能量方程残差低于 10^{-6} ,速度项残差低于 10^{-4} ,其他方程残差低于 10^{-3} 。模拟中涉及到的车内流体流动与传热过程均服从质量守恒定律、能量守恒定律及动量守恒定律。在数值模拟计算中,对所建的物理模型有以下假设条件:

- (1) 车厢内空气为不可压缩流体。
- (2) 空气在固体壁面上无滑移。
- (3) 忽略影响微乎其微的流体粘性力做功产生的耗散热。
- (4) 忽略场景内影响较小的辐射传热。

模拟采用 FLUENT 流体力学软件计算。流体

域为冷藏车车厢内部，尺寸为 6600mm×2300mm×2300mm（长×宽×高）；风口位于车门对侧，尺寸为 1200mm×500mm（长×宽），居中布置在车厢壁，风口水平底端距地 1700mm；货物（内部无缝隙）长宽高尺寸 6200mm×2000mm×2000mm，距门 100mm 居中布置。计算采用非结构网格，基本网格数量为 2300210 个，网格质量在 0.36 以上。

模拟中冷藏车开门过程通过预模拟工况稳定后改变门位置的边界条件加以实现。空气密度为 1.2423kg/m³，热膨胀系数为 0.003536；货物以及车厢箱体密度为 2719kg/m³，热导率为 202.4W/(kg·K)。车门关闭时边界条件与车壳相同，开启时为压力出口边界条件，温度为室外温度，压力为标准大气压强。车壳采用对流换热边界条件，对流换热系数为 0.5W/(m²·K)；货物表面为对流换热边界条件，对流换热系数为 1W/(m²·K)。冷风机进风口为速度入口边界条件，风速为 2m/s，压力为标准大气压强，送风温度 3.16°C；冷风机回风口为速度出口边界条件，风速标量与进风口相同，压力为标准大气压强。

2.2 控制方程

相应的控制方程可由式（1）表示。

连续性方程：

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

湍流流动能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (P u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{P_r} + \frac{\mu_i}{\sigma_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + \frac{q_r}{c_p} \quad (2)$$

湍流脉动能方程（ κ 方程）：

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (P u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \rho \varepsilon + \beta g \frac{\mu_i}{P_r} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (3)$$

湍流脉动能耗散率方程（ ε 方程）：

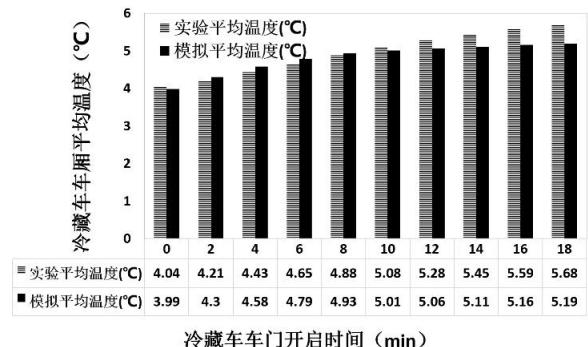
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (P u_i \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \\ &(c_1 G - c_2 \rho \varepsilon) + c_3 \beta g \frac{\varepsilon}{k} \frac{\mu_i}{P_r} \frac{\partial T}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (4)$$

式中： u_i 为空气流动的速度分量，m/s， i 取 1, 2, 3 时分别对应 x, y, z 方向； ρ 为空气密度，kg/m³； T 为空气温度； β 为气体体积膨胀系数，1/°C； μ 为气体层流动力粘性系数，m²/s； μ_i 为气体紊流动力

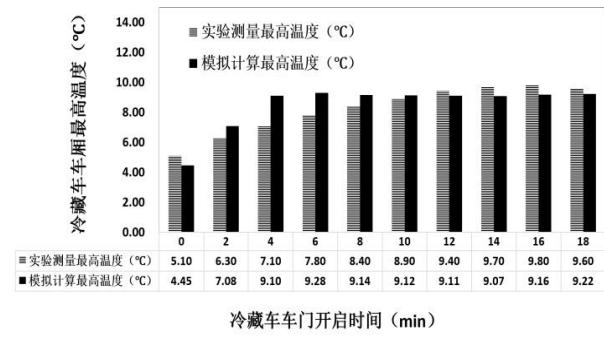
粘性系数，m²/s； G 为湍流脉动能产生项， $G = \mu_i (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) \partial u_i / \partial x_j, i, j = 1, 2, 3$ ； g 为重力加速度，m²/s； k 为空气紊流脉动能，m²/s； P_r 为紊流时的普朗特数； q_r 为热源强度，W/m³； ε 为紊流能量耗散率，m²/s，式中各经验系数取值为 $c_1 = 1.44, c_2 = 1.92, c_3 = 1, \sigma_3 = 0.08, \sigma_k = 1$ 。

2.3 可靠性验证

在环境温度为 11°C 时，以冷藏车车厢平均温度为研究对象，将冷藏车车厢的实验结果与模拟结果对比分析，如图 2 所示。



(a) 车厢平均温度



(b) 车厢最高温度

图 2 模拟结果与实验结果对比

Fig.2 Comparison between simulation and experimental results

可以发现随着冷藏车车门开启时间增加，车厢平均温度和最高温度的模拟结果和实验结果变化趋势基本一致。当车门开启时间为 10 分钟时，冷藏车车厢模拟平均温度和实验平均温度均首次超过 5°C，分别为 5.08°C 和 5.01°C；冷藏车车厢模拟最高温度和实验最高温度的差值最小，分别为 9.12°C 和 8.90°C，模拟与实验结果拟合较好。

3 数值模拟与计算

3.1 不同环境温度对冷藏车车门全部开启后车厢温度的影响分析

3.1.1 车厢厢体平均温度为5℃时的温度分布云图

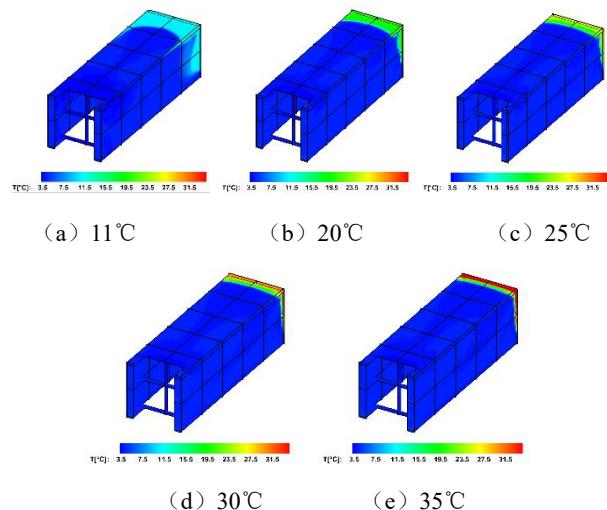


图3 车厢厢体平均温度为5℃温度云图 (不同环境温度)

Fig.3 Temperature cloud diagram when the average temperature of the truck is 5°C (different ambient temperatures)

图3为环境温度在11℃、20℃、25℃、30℃、35℃时,冷藏车车门全部开启后,当车厢平均温度首次为5℃时,车厢厢体的温度分布云图。图例选用同一温度标尺,可以发现随着环境温度升高,车厢厢体靠近车门位置最高温度显著升高,厢体车门区域温度梯度变化明显,但厢体靠近车头区域温度变化不明显。当环境温度较高时,货物应尽量堆放在靠近车头区域,该区域的温度值和温度分布均匀性受室外环境温度影响较小。

冷藏车车门全部开启,当环境温度为11℃、20℃、25℃、30℃、35℃时,计算得到车厢平均温度首次到达5℃时车门的开启时长,计算结果如表1所示。当环境温度由20℃降低到11℃时,车厢平均温度超过5℃所需时长发生显著增加(时长增长268%);当环境温度由30℃降低到20℃时,车厢平均温度超过5℃所需时长发生一定增加(时长增长67%)。可以发现当车门全部开启时,车厢平均温度超过5℃所需时长变化速率与室外环境温度变化速率不成正比,当室外环境温度低于20℃时,车厢平均温度超过5℃所需时长会随温度降低发生

显著增加,当室外环境温度高于20℃时,需要加快货物装卸时间,以确保车厢平均温度不超过5℃。

表1 不同环境温度时车厢平均温度

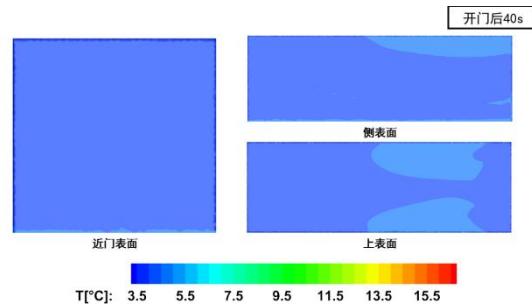
为5℃车门全部开启时长

Table 1 Duration of door full-open when the average temperature of the truck reaches 5°C under different ambient temperatures

环境温度	均温超过5℃的时间/s
11℃	579.5
20℃	157.5
25℃	117.5
30℃	94.5
35℃	79.5

3.1.2 货物表面温度受开门时间影响分析

为进一步寻找货物表面温度随车门开启时间的变化规律,模拟以环境温度20℃为例,截取了车厢内货物的三个外表面(简称三表面),即近门表面、侧表面和上表面的切面云图进行分析,图4为冷藏车车门全部开启,开门时长分别为40s、80s、157.5s(均温5℃)和290s时,货物三表面的温度云图。当车门开启时长由40s增加至80s时,三表面温度分布变化不明显。当车门开启时长由80s增加至157.5s时,货物近门表面的温度出现较为明显的不均匀分布,其中近门表面在车门两侧方向温度先升高。当车门开启时长由157.5s(均温5℃)增加至290s时,近门表面温度在车门两侧方向显著升高,侧表面和上表面温度变化不显著。可以发现,当冷藏车车门全部打开时,受到冷风机进出风、环境温度、风速空间布局等多种因素的影响,货物表面温度增加同样不随开门时间正比例增加,不同的货物表面位置呈现出不同的温度分布变化趋势,其中货物近门表面温度受环境温度影响最大。



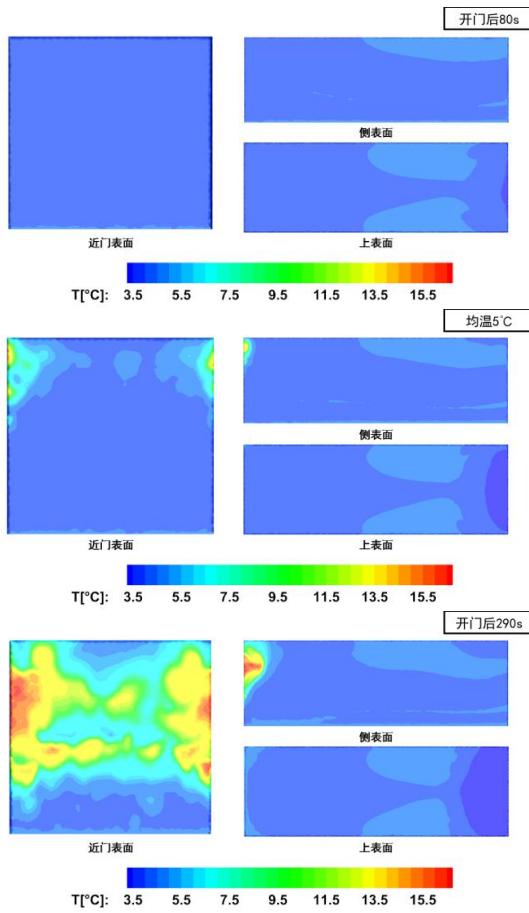


图 4 环境温度 20°C 时不同开门时长货物表面温度云图

Fig.4 Temperature cloud diagram of goods surface temperature with different opening hours at ambient temperature of 20°C

3.2 25°C 环境温度下冷藏车车门全开和半开后车厢温度的影响分析

在 25°C 环境温度下, 模拟计算冷藏车车门全开启和半开启对车厢温度的影响。图 5 为当车厢平均温度为 5°C 时, 两种工况的车厢厢体温度分布云图。图例选用同一温度标尺, 可以发现车厢厢体靠近车门区域温度有明显差异, 厢体靠近车头区域温度变化不明显。为进一步寻找货物表面温度与车门开启状态的变化规律, 当车厢平均温度为 5°C 时, 截取了车门全开启和半开启状态下, 车厢内货物近门表面 (距车门 25mm 和 75mm) 的切面云图进行分析 (见图 6 和图 7)。当环境温度为 25°C 时, 距离车门越近, 货物的表面温度值越高。在车门半开状态下, 货物开门半侧的表面温度远高于关门半侧, 两侧温度分布对称性差。在车门全开状态下, 货物近门表面温度的两侧温度分布对称性较好。可

以发现冷藏车车门全开启和半开启状态对车厢温度分布有一定影响, 尤其是对货物近门表面温度分布的对称性影响较大。

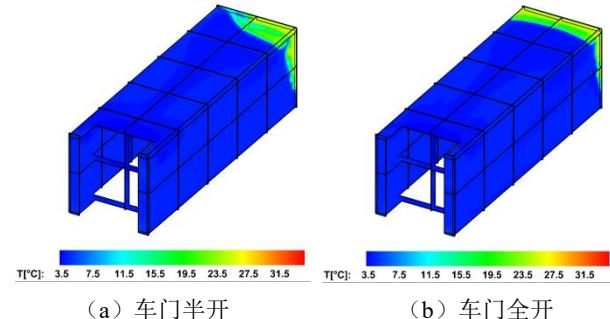
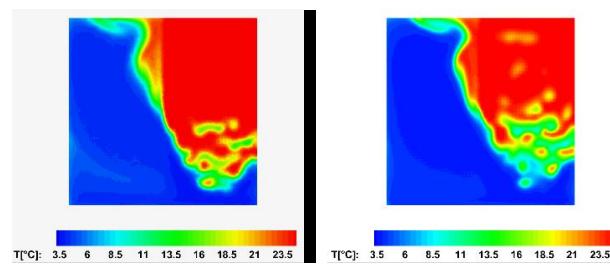


图 5 车厢厢体平均温度为 5°C 温度云图 (环境温度 25°C)

Fig.5 Temperature cloud diagram when the average temperature of the truck is 5°C(ambient temperature 25°C)



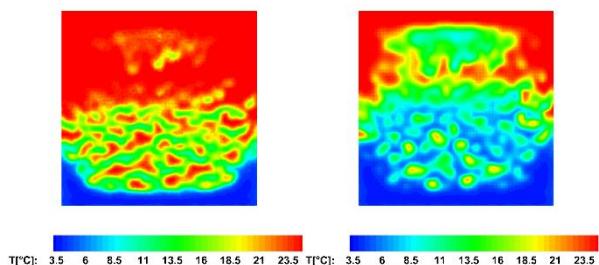
(a) 距车门 25 毫米

(b) 距车门 75 毫米

图 6 车门半开启时货物近门表面温度云图

(环境温度 25°C)

Fig.6 Surface temperature cloud diagram of goods near the door when the door half-open (ambient temperature 25°C)



(a) 距车门 25 毫米

(b) 距车门 75 毫米

图 7 车门全开启时货物近门表面温度云图

(环境温度 25°C)

Fig.7 Surface temperature cloud diagram of goods near the door when the door full-open (ambient temperature 25°C)

在 25°C 环境温度下, 当冷藏车车门为全开启和半开启两种状态时, 计算得到车厢平均温度与车

门开启时长的关系(见图8),车门全开启时车厢平均温度的升温速度显著高于车门半开启时。冷藏车车门全开启时,车厢平均温度升至5℃所需时长为117.5s,冷藏车车门半开启时,车厢平均温度升至5℃所需时长为172.5s,可以发现环境温度相同时(均为25℃),车门半开启状态能有效延长车厢平均温度升至5℃所需时长,降低车厢平均温度的升温速度。

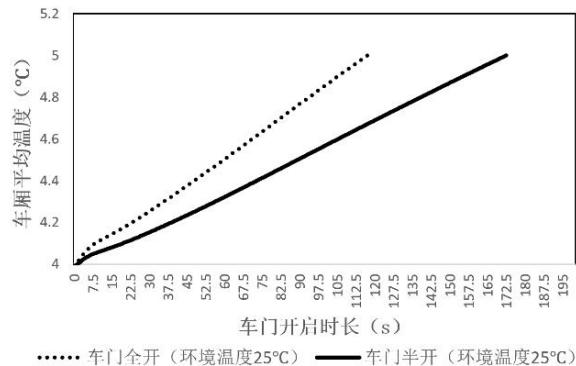


图8 车厢平均温度升至5℃的升温速度

Fig.8 Temperature rise rate of the average temperature of the truck to 5°C

4 结语

本文以冷藏车车厢温度作为研究对象,搭建实验台并进行厢体温度分布测试,同时建立三维冷藏车物理模型和数学模型,通过计算流体力学模拟软件进行计算,将实验数据与冷藏车温度流场模拟结果进行可靠性验证后确定计算模型,改变环境温度条件,完成冷藏车车门全开启和半开启过程的瞬态计算。研究发现环境温度对冷藏车厢体温度变化影响较大,车厢平均温度升至5℃所需时长变化速率与室外环境温度变化速率不成正比。当车厢车门全部开启,车厢平均温度为5℃时,环境温度越高,车厢厢体靠近车门位置最高温度越高,厢体车门区域相较于车头区域温度变化更明显,因此当环境温度较高时,需要加快货物装卸时间,货物应尽量堆放在靠近车头区域,该区域的温度值和温度分布均匀性受室外环境温度影响较小。

在20℃环境温度下,货物表面温度增加不随开门时间正比例增加,不同的货物表面位置呈现出不同的温度分布变化趋势,其中货物近门表面温度受环境温度影响最大。在25℃环境温度下,冷藏车车门全开启和半开启状态对车厢温度分布有一

定影响,尤其是对货物近门表面温度分布的对称性影响较大。车厢厢体靠近车门区域温度有明显差异,厢体靠近车头区域温度变化不明显。距离车门越近,货物的表面温度值越高。在车门半开状态下,货物开门半侧的表面温度远高于关门半侧,两侧温度分布对称性差。在车门全开状态下,货物近门表面温度的两侧温度分布对称性较好。车门半开启状态能有效延长车厢平均温度升至5℃所需时长,降低车厢平均温度的升温速度。

使用数值模拟方法开展冷藏车温度分布计算能够减少实验研究周期,提高研究效率,为冷藏车节能技术改造、货物装卸方法、温度控制测量等提供技术参考,具有较为广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 中国物流与采购联合会冷链物流专业委员会,等.中国冷链物流发展报告(2023)[M].北京:中国财富出版社有限公司,2023:26-29.
- [2] 黄艳,章学来.蓄冷技术在食品冷链物流中的研究进展[J].包装工程,2015,(15):23-29.
- [3] 蔡明花.电动冷藏车制冷系统节能运行优化及应用研究[D].广州:广东技术师范大学,2023.
- [4] Kang Z, Tan R, Qiu K, et al. Numerical Simulation of A Medium-Sized Refrigerated Truck Box with Low-Temperature Phase Change Cold Storage Material[J]. Journal of Energy Storage, 2024(98): 113175.
- [5] 陆定宇,章学来,丁兴江,等.蓄冷式多温区冷藏车厢体温度场模拟与试验验证[J].流体机械,2022,50(12): 35-41.
- [6] 张玉林,王漫漫,李任强,等.新型冷藏车冷藏厢温度场数值模拟研究[J].低温与超导,2025,53(1):79-86.
- [7] 邓静,陈永东,王严冬,等.肋片布置对相变蓄冷用冷藏车蓄冷板充冷过程的影响[J].流体机械,2023,51(8): 73-79.
- [8] 徐双喜.冷板冷藏车相变蓄冷换热器的数值模拟与实验研究[D].天津:天津商业大学,2023.
- [9] 谢如鹤,唐海洋,陶文博,等.基于空载温度场模拟与试验的冷藏车冷板布置方式优选[J].农业工程学报,2017, 33(24):290-298.
- [10] 田津津,张哲,王怀文,等.蓄冷板释冷过程的数值模拟和实验研究[J].制冷学报,2016,(3):29-34.

(下转第904页)