

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-859-04

# 冷藏车开门过程厢体内温度的 数值模拟和实验研究

张婧瑜<sup>1</sup> 郭 域<sup>2</sup>

(1. 上海市质量监督检验技术研究院 上海 201114;  
2. 深圳市大沙河建设投资有限公司 深圳 518000)

**【摘 要】** 以冷藏车温度作为研究对象, 通过实验测试与数值模拟相结合的方法研究冷藏车开门过程厢体内温度变化的特征。搭建了冷藏车实验台、建立了冷藏车物理模型和数学模型, 采用 FLUENT 软件完成了冷藏车(90%满载状态下)车门开启过程的瞬态计算。分析了不同环境温度对冷藏车车门开启后平均温度和温度分布的影响。结果表明: 环境温度是重要的影响因素, 货物整体三个外表面受冷藏车门开启时间影响程度各不相同。为后续冷藏车温度分布的数值模拟研究提供参考。

**【关键词】** 冷藏车; 环境温度; 开门时间

中图分类号 TK311 文献标识码 A

## Numerical Simulation and Experimental Study of Temperature of Refrigerated Truck in Opening Process

Zhang Jingyu<sup>1</sup> Guo Yu<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical Research, Shanghai, 201114;  
2. Shenzhen Dashahe Construction Investment Co., Ltd, Shenzhen, 518000)

**【Abstract】** In this paper, the temperature of refrigerated truck is taken as the research object, and the characteristics of the temperature change during the opening process of refrigerated truck are studied through the method of combining experimental test and numerical simulation. The test bed of refrigerated truck, physical and mathematical models are built up. FLUENT is used to complete the transient calculation of the door opening process of refrigerated truck (under 90% full load). The effects of different ambient temperatures on the average temperature and temperature distribution of refrigerated truck doors after opening were analyzed. The results show that the ambient temperature is an important factor, and the three outer surfaces of the cargo are affected by the opening time to varying degrees. This paper could provide reference for the simulation and calculation of refrigerated truck temperature distribution in the future.

**【Keywords】** Refrigerated truck; Ambient temperature; Opening time

## 0 引言

随着社会经济的不断发展, 冷链物流迅速崛起。冷藏车作为冷藏链的重要中间环节, 是重要的陆地运输易腐食品的交通工[1]。冷藏运输过程中的温度是冷藏效果的一项重要评价指标, 越来越受到人们的关注。目前, 我国冷藏链中比较薄弱的环

节就包括冷藏车。随着我国公路冷藏车运量的年增长率急速增长, 对冷藏车的技术研究愈发重要。

冷藏车在运输过程中, 冷藏车厢内的易腐产品保存质量直接依赖于箱内的温度分布和空气流场, 近年来数值模拟方法已逐渐成为研究气流组织的有效手段。国内外学者研究主要集中在冷藏车厢温

度场分布规律、温度场优化、温度对承运生鲜食品影响等方面<sup>[2-6]</sup>。现存冷藏车将制冷设备安装在车厢前部,实用可靠,缺点是车厢前部的气流速度非常高;紧凑的货物和流通阻力导致车厢后部通风不良,存在气流停滞区<sup>[7]</sup>。吕宁等针对冷藏车开口卸货时存在的问题,对不同条件下的车内温度、相对湿度进行了对比实验,得出在开口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<sup>[8]</sup>。谢如鹤、唐海洋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<sup>[9]</sup>。

文中测试一种冷藏车的车厢结构以及冷藏车内部平均温度,建立冷藏车车厢结构的三维模型,利用计算流体力学的方法对该冷藏车车厢的温度分布进行分析,研究车门开门过程厢体内温度变化特征。

## 1 实验对象

冷藏车实验台结构尺寸为 6600mm×2300mm×2300mm (长×宽×高)。车厢温度运行平均温度为 5℃。风机和机组集中在集装箱的前部,送风方式采用单一冷风机送风,冷风机由车前向车后送风。车厢内外表面采用 3mm 玻璃钢。为了保证一定的保温隔热效果、车厢轻量化和工艺成熟性,夹层选用 80mm 的硬质聚氨酯泡沫作为保温隔热层。车厢货物 90%满载堆砌在车厢中间位置,室外环境温度为 11℃。在车厢空间内开展温度测试时共设置 33 个测温点,在车厢高度方向平均分为 3 层,每层均匀布 11 个点,底层距离车厢 5cm,顶层与冷风机出风口下端平齐,中层介于顶层与底层中间。

## 2 物理模型及可靠性验证

### 2.1 简化假设

采用  $\kappa$ - $\varepsilon$  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  $10^{-3}$ 。模拟中涉及到的库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。

此次模拟采用 FLUENT 软件计算流体力学软件计算。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/m<sup>3</sup>,热膨胀系数为 0.003536;货物以及车厢箱体密度为 2719kg/m<sup>3</sup>,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/(m<sup>2</sup>·K);货物表面为对流换热边界条件,对流换热系数为 1W/(m<sup>2</sup>·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℃;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:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial X_i} \left[ \left( \frac{\mu}{\rho} + \frac{\mu_t}{\sigma_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + \frac{q_r}{C_p} \quad (2)$$

湍流脉动动能方程 ( $\kappa$  方程):

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

湍流脉动动能耗散率方程 ( $\varepsilon$  方程):

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

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;  $\rho$  为空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $P$  为压力, Pa;  $T$  为空气温度;  $\beta$  为空气体积膨胀系数,

1/°C;  $\mu$ 为气体层流动力粘性系数,  $m^2/s$ ;  $\mu_t$ 为气体紊流动力粘性系数,  $m^2/s$ ;  $G$ 为湍流脉动动能产生项,  $G = \mu_i (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ,  $i, j, = 1, 2, 3$ ;  $g$ 为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $k$ 为空气紊流脉动动能,  $m^2/s$ ;  $P_r$ 为紊流时的普朗特数;  $q_T$ 为热源强度,  $W/m^3$ ;  $\epsilon$ 为紊流能量耗散率,  $m^2/s$ , 式中各经验系数取值为  $c_1=1.44$ ,  $c_2=1.92$ ,  $c_3=1$ ,  $\sigma_3=0.09$ ,  $\sigma_k=1$ 。

### 2.3 可靠性验证

在环境温度为11°C时, 以冷藏车车厢的平均温度为研究对象, 将冷藏车车厢的实验测量结果与模拟计算结果进行对比分析, 如图1所示。

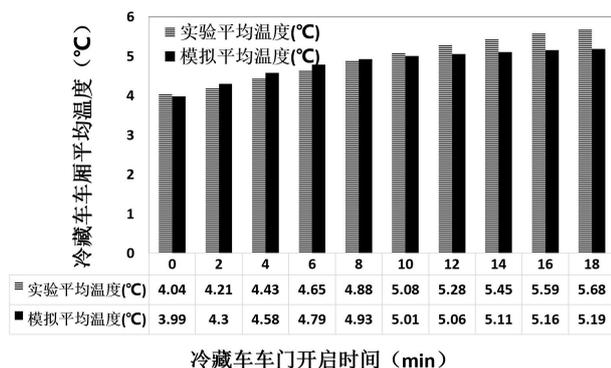


图1 仿真结果与实验结果对比情况

Fig.1 Comparison between simulation results and experimental results

从图1可以看出, 随着冷藏车车门的开启, 实验和仿真得出平均温度的变化趋势基本一致, 都是随着时间的增加, 平均温度也随之增加。当车门开启时间为10分钟时, 冷藏车车厢的实验平均温度和模拟平均温度均首次超过5°C, 分别为5.08°C和5.01°C, 仿真计算与实验测量结果拟合较好。

## 3 数值模拟与计算

### 3.1 不同环境温度对冷藏车车门开启后车厢平均温度的影响分析

图2为室外环境温度在11°C和25°C条件下, 冷藏车车门全部开启后, 当车厢内平均温度为5°C时, 车厢厢体内的温度分布云图。图例选用同一温度标尺, 可以发现当环境温度为25°C时, 车厢厢体靠近车门位置的最高温度远高于环境温度为11°C时相应位置的温度。由于车厢是90%满载堆放货物, 越靠近车头位置, 温度值越低, 温度分布也越趋于均匀。

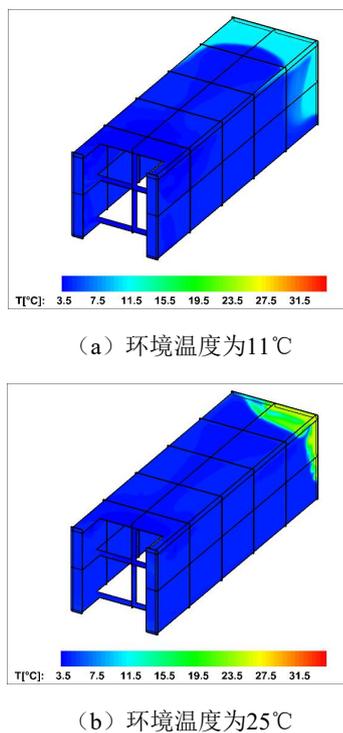


图2 车厢厢体平均温度为5°C时的温度云图

Fig.2 Temperature cloud diagram when the average temperature of the carriage body is 5°C

本模型是瞬态计算模型, 在计算过程中当发现车厢内平均温度首次大于5°C时, 记录下车门开启时长, 如图3所示。当环境温度为11°C时, 车厢平均温度超过5°C所需时长为579.5s, 当环境温度为25°C时, 车厢平均温度超过5°C所需时长为117.5s。虽然环境温度只增长了130%, 但车厢平均温度超过5°C所需时长却缩短了393%。因此可以发现, 当车门开启时, 环境温度的改变会对车厢内平均温度产生较大的影响。

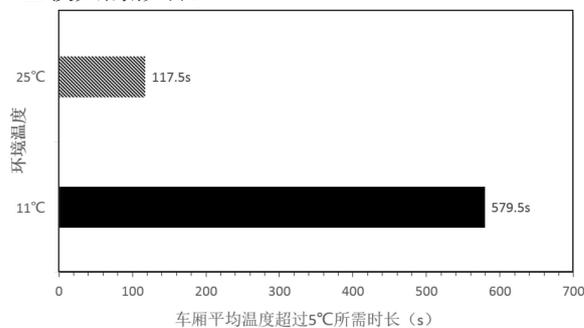


图3 不同环境温度下车厢平均温度超过5°C所需时长  
Fig.3 Time required for the average temperature of the carriage to exceed 5°C under different ambient temperatures

### 3.2 环境温度为11℃时货物表面温度受开门时间的影响分析

为进一步寻找环境温度为11℃时，货物表面温度云图随车门开启时间的变化规律，模拟截取了车厢内货物的近门表面、侧表面和上表面的切面云图进行分析。图4为室外环境温度11℃时，冷藏车车门开门时长分别为40s、80s、290s和579.5s（均温5℃）时，货物三表面的温度云图。可以发现随着车门开启时间的不断推移，货物表面温度分布越来越呈现不均匀的现象。当车门开启时长由40s增加至80s时，三表面温度分布变化并不是很明显，其中货物靠近车厢侧面方向的侧表面温度分布最均匀。当车门开启时长由80s增加至290s时，货物近门表面的温度出现明显的分布不均匀，其中近门表面在车门两侧方向的温度率先开始升高。当车门开启时长由290s增加至579.5s时，货物近门表面温度依然沿着车门两侧方向显著升高、车厢上方温度值较低，侧表面和上表面温度变化不显著。通过分析可以发现，当冷藏车车门全部打开时，货物表面温度的增加不随开门时间长短正比例增加，货物表面的温度会受到冷风机进出风、环境温度、风速、空间布局等多种因素的影响，而在不同的货物表面位置呈现出不同的温度分布变化趋势，货物三个表面受车门开启时间影响程度由大到小依次为：货物近门表面>货物上表面>货物侧表面。

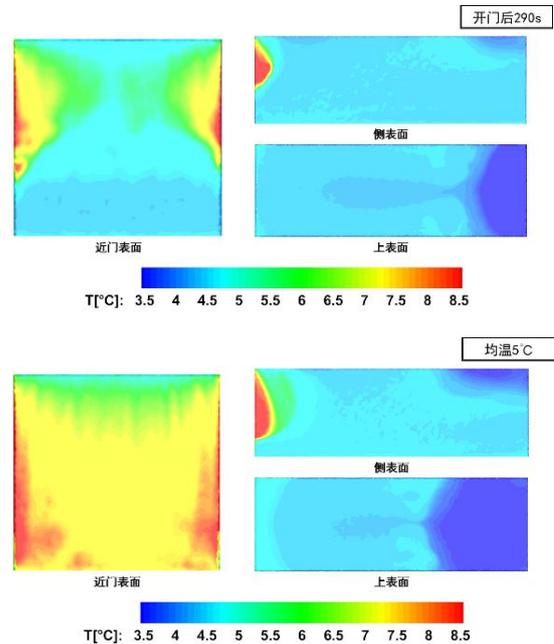


图4 环境温度11℃时不同开门时长货物表面温度云图

Fig.4 Cloud chart of surface temperature of goods with different opening hours at ambient temperature of 11℃

### 4 结语

本文以冷藏车内部温度作为研究对象，搭建冷藏车实验台，测试厢体温度分布及平均温度。将实验数据与冷藏车温度流场模拟进行比对验证，建立了三维冷藏车的物理模型和数学模型，采用计算流体力学模拟软件完成冷藏车车门开启过程的瞬态计算。研究发现冷藏车车门开启后的车厢内平均温度及温度分布情况受外界环境温度影响较大。货物三个表面受冷藏车门开启时间影响程度最大的是货物近门表面，其次为货物上表面，影响最小的是货物侧表面。同时通过冷藏车的实验测量与数值模拟研究，发现使用数值模拟的方法开展冷藏车温度分布计算能够有效减少实验研究周期，显著提高研究效率，是未来冷藏车领域的重要研究途径，具有广阔的应用前景。

### 参考文献：

- [1] 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.
- [2] 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936页)

