

# 基于计算流体力学的冷藏汽车制冷效果分析

李长玉, 吕东霖, 李细霞, 张继华

(华南理工大学广州学院 汽车与交通工程学院, 广州 510800)

**摘要:** **目的** 为了研究冷藏汽车的制冷效果,设计一种冷藏汽车车厢结构及其内部气流导向机构。**方法** 建立该冷藏汽车车厢的三维模型。利用计算流体力学的方法分析该冷藏汽车车厢的制冷效果。比较无间隙一体堆码、有间隙一体堆码、二体堆码、四体堆码等4种堆码方式下冷藏汽车的制冷效果。进一步研究分析四体堆码方式中货物间距对制冷效果的影响。**结果** 为验证文中方法的可靠性,将仿真结果与实验结果进行了对比,得出仿真结果和实验结果平均相对最大误差为5.9%,发现四体堆码方式优于其他方式,四体堆码时车厢平均温度最低,可达 $-8.2970\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。四体堆码时货物间的间隙超过175 mm时前后端货物温度趋于一致,温度分布均匀度最高。**结论** 采用计算流体力学的方法可定量计算冷藏汽车车厢内温度场,得出的结论对冷藏汽车设计和制冷效果分析具有一定的指导意义。

**关键词:** 冷藏汽车; 制冷效果; 温度场; 堆码方式

**中图分类号:** TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)19-0203-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.19.029

## Refrigeration Effect of Refrigerated Truck Based on Computational Fluid Dynamics

LI Chang-yu, LYU Dong-lin, LI Xi-xia, ZHANG Ji-hua

(School of Automotive and Traffic Engineering, Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou 510800, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study the refrigeration effect of refrigerated truck and design a compartment structure and internal air flow guide mechanism of refrigerated truck. A three-dimensional model of the refrigerated truck was established. The refrigeration effect of the refrigerated truck carriage was analyzed by computational fluid dynamics (CFD). The refrigeration effects of four cargo stacking modes (gapless one body stacking, gapped one body stacking, two body stacking and four body stacking) of refrigerated vehicles were compared to further analyze the influence of cargo clearance in four body stacking mode on the refrigeration effect. To verify the reliability of this method, the simulation results were compared with the experimental results. The average relative maximum error between simulation results and experimental results was 5.9%. It was found that the four body stacking method was better than other methods, and the average compartment temperature of the four body stacking mode was the lowest, which was up to  $-8.2970\text{ }^{\circ}\text{C}$ . When the cargo clearance was more than 175 mm, the temperature of the front and rear goods tended to be the same, and the temperature distribution uniformity was the highest. The method of computational fluid dynamics adopted in this paper can be used to calculate the temperature field in the compartment of refrigerated truck quantitatively, and the conclusions obtained have certain guiding significance for the design of refrigerated truck and the analysis of refrigeration effect.

**KEY WORDS:** refrigerator truck; refrigeration effect; temperature field; stacking mode

收稿日期: 2019-11-08

基金项目: 广东省特色创新项目(自然科学类)(2017KTSCX218); 广东省青年创新类人才项目基金(2016KQNCX226)

作者简介: 李长玉(1981—), 男, 博士, 华南理工大学广州学院副教授, 主要研究方向为传热传质。

通信作者: 李细霞(1982—), 女, 硕士, 华南理工大学广州学院副教授, 主要研究方向为冷链物流中的关键技术。

随着社会经济的发展,冷链物流迅速崛起。冷藏汽车是目前我国冷链物流中的重要一环<sup>[1-3]</sup>。冷藏运输过程中的温度作为冷藏效果的一个主要评价指标,越来越受到人们的关注<sup>[4-5]</sup>。越来越多的研究者对冷藏汽车制冷时温度场的分布进行了研究。近几年的主要研究可以归结如下。

张哲等<sup>[6]</sup>分析了不同堆码方式下的温度分布并通过实验验证了分析的正确性。高超等<sup>[7]</sup>量化出日光辐射对冷藏车内部温度分布的影响,得出了日光辐射对内部温度分布影响不大,但会增加制冷时间和负荷的结果。陶文博<sup>[8]</sup>通过研究冷板冷藏车不同的冷板布置方式以寻求较合理的车厢内部温度场的均匀性。李锦等<sup>[9]</sup>在考虑车外温度、行驶速度、多温区内部的空气流动规律等因素,分析了各条件下对多温区冷藏车降温特性的影响因素。田津津等<sup>[10]</sup>对各堆码方式的温度分布进行了分析并在试验中测定某截面的温度变化以进一步得出冷藏车内流场情况。李曼<sup>[11]</sup>为优化冷藏车内流场分布,设计了多种风道形式,并通过比对确定了最佳的风道形式。郭嘉明等<sup>[12]</sup>比对模拟与试验结果,揭示了果蔬保鲜车厢内部的温度场规律。Li Minwang<sup>[13]</sup>提出了一个冰模冷藏车中气流和温度变3D模拟开启和关闭的自动动态循环,以降低能耗同时提高产品的存储质量。Ankang Kan<sup>[14]</sup>分析了一种海产运输集装箱中的货物堆放堆数、高度、长度、间隙等对厢内温度场的影响,得到了符合实际的结果。谢如鹤、唐海洋等<sup>[15]</sup>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。

文中拟设计一种冷藏汽车的车厢结构以及冷藏汽车内部气流导向机构,建立冷藏汽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汽车车厢的制冷效果进行分析,比较4种不同堆码方式冷藏汽车的制冷效果,得到各种情况的温度场分布结果。

## 1 冷藏车车厢设计及三维建模

根据实际应用要求,设计的车厢长、宽、高分别为4000 mm×1800 mm×1800 mm,车厢壁为保证一定的强度刚度和维护方便,内外表面采用3 mm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80 mm的硬质聚氨酯泡沫为保温隔热层<sup>[16]</sup>,此外为进一步保证车厢的强度及各层间的结合强度,内外板内侧每隔200 mm交叉焊接壁厚为1 mm的U型加强肋。

就车厢类型而言,如今冷藏车主要分为2种,其中一种是蓄冷式冷藏车,其主要特点有较环保、维护方便,同时也存在充冷、制冷效率低的缺点<sup>[17-19]</sup>;另一种则是带制冷机组式冷藏车,其特点则正好相反。为了结合2种冷藏车的特点,文中设计了一种新

型的冷藏车结构,即在带制冷机组的基础上,在蒸发器出风口后端增加一块弧形导板和微孔薄膜,将出风口吹出的冷风导流至车厢顶部以保证装载空间的同时,利用微孔薄膜的微孔对冷气较均匀地分配至车厢下部分的装载区中,再利用蒸发器回风口的回流作用形成车厢内部的强制对流。另外车厢箱体与蒸发器、导流机构的装配见图1。

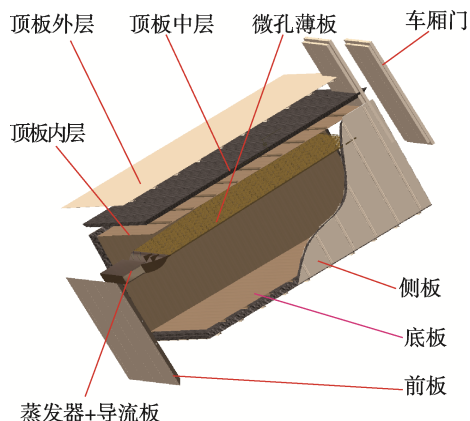


图1 冷藏汽车车厢实体模型

Fig.1 Solid model of refrigerated truck compartment

## 2 数理模型及可靠性验证

### 2.1 简化假设

车厢内空气在重力与温差作用下会导致流体域内的密度不均,即浮升力作用,故文中采用考虑浮升力的 $k-w$ 湍流模型。为方便分析计算,对模型做如下简化<sup>[20]</sup>。

1) 假设车厢具有良好的密封性能,不存在漏气现象。

2) 假设车厢内空气为牛顿流体,且符合Boussinesq假设。

3) 将车厢壁三层简化为单层结构并辅以热通量边界条件,以减少网格数及计算量并提高网格划分质量。

4) 假设车厢内的气体流动为低速且稳态湍流,并忽略各地、各季节差异所引起的辐射差异影响。

5) 由于导流机构的加入,可近似认为弧形导板后的微孔薄膜部分即为恒温冷源,而蒸发器则保留回风口位置。

### 2.2 控制方程

相应的控制方程可由式(1)表示。

连续性方程:

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

运动方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( p + \frac{2}{3} \rho k \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \mu_i \right) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \beta (T_0 - T) \rho g \right]$$

(2)

湍流流动能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{\mu}{P_r} + \frac{\mu_i}{\sigma_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + \frac{q_T}{C_p}$$

(3)

湍流脉动动能方程（ $\kappa$  方程）：

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

(4)

湍流脉动动能耗散率方程（ $\varepsilon$  方程）：

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

(5)

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）； $q$  为热流密度（W/m<sup>2</sup>）； $\mu$  为气体层流动力粘性系数（m<sup>2</sup>/s）； $\mu_i$  为气体紊流动力粘性系数（m<sup>2</sup>/s）； $G$  为湍流脉动动能产生项， $G = \mu_i (\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) \partial u_i / \partial x_j, i, j = 1, 2, 3$ ； $\mu_j$  为湍流粘性系数  $u_j = C_u \rho k^2 / \varepsilon$ ； $g$  为重力加速度（m<sup>2</sup>/s）； $k$  为空气紊流脉动动能（m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>）； $P_r$  为紊流时的普朗特数； $q_T$  为热源强度（W/m<sup>3</sup>）； $T_0$  为参照温度（K）； $\varepsilon$  为紊流能量耗散率（m<sup>2</sup>·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

结合几何模型建立数理模型时进行了适当的简化，为验证数理模型的可靠性，利用文中采用的方法对文献[18]，文献[21]描述的模型进行了数值仿真分析，具体的参数设置情况参考文献[18, 21]。将仿真得到的数据和文献中的实验结果进行了对比分析。具体各采样点仿真分析和实验对比情况见图 2。

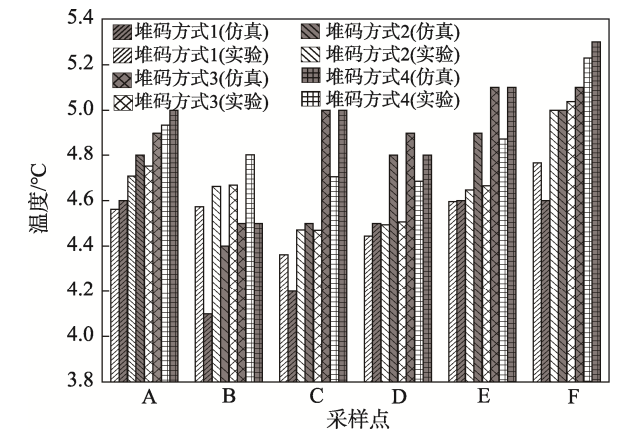


图 2 仿真结果和实验结果对比情况  
Fig.2 Comparison between simulation results and experimental results

从图 2 可以看出，实验和仿真得出的结果在趋势上基本一致在采集点 A 位置误差最小。通过统计分析计算了各种堆码方式的均方根误差和平均相对误差，见表 1。发现温度均方根误差最大达到 0.3 °C，平均相对误差最大达到 5.9%，计算结果较为准确。

表 1 仿真和实验误差比较

Tab.1 Comparison of simulation and experiment errors

| 堆码方式 | 均方根误差/°C | 平均相对误差/% |
|------|----------|----------|
| 1    | 0.1      | 2.7      |
| 2    | 0.2      | 3.5      |
| 3    | 0.3      | 5.9      |
| 4    | 0.2      | 3.8      |

3 数值模拟与计算

由于将微孔薄膜部分简化为恒温冷源，所以该部分（文中简称为恒温冷源）的边界条件可以以温度条件给出，设此时恒温冷源的温度为-10 °C，车厢及外界初始温度为 25 °C。由于车厢三层结构简化为单层并辅以热通量条件，即除了冷板外的壁面均设置为热通量边界条件，根据文献对车厢壁面换热系数的分析计算，取换热系数为 4 W/(m<sup>2</sup>·°C)，入口风速设为 3 m/s。

在分析车厢的制冷效果时，车厢内货物堆码方式具有较大的影响。文中通过对比货物无间隙、货物两侧预留间隙（一体堆码）、货物纵向方向留间隙（二体堆码）、货物纵向横向均留间隙 4 种堆码方式所得的温度分布情况，寻求较合理的堆码方式；再针对该合理的堆码方式进一步分析不同间隙时该堆码方式的温度分布情况，以寻求最佳间隙值；另外分析各不同货物高度对车厢内空气流动及温度分布影响。货物堆码方式及各边界条件见图 3，设置的 4 种堆码方案参数见表 2。

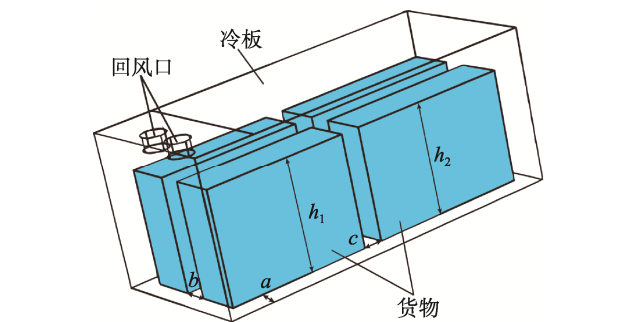


图 3 车厢货物堆码示意  
Fig.3 Schematic diagram of cargo stacking in refrigerated truck compartment

表 2 4 种货物堆码方案参数  
Tab.2 Parameters of four cargo stacking schemes

| 堆码方式 | $a/\text{mm}$ | $b/\text{mm}$ | $c/\text{mm}$ | $h_1/\text{mm}$ | $h_2/\text{mm}$ |
|------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 1    | 0             | 0             | 0             | 1.2             | 1.2             |
| 2    | 50            | 0             | 0             | 1.2             | 1.2             |
| 3    | 50            | 200           | 0             | 1.2             | 1.2             |
| 4    | 50            | 200           | 200           | 1.2             | 1.2             |

表 2 中  $a$  为货物与各车厢壁面的距离,  $b$  为左右 2 组货物间的距离,  $c$  为前后 2 组货物间的距离。堆码方式 1, 2 都是一体堆码, 区别在于方式 2 的货物与车厢各壁面间存在 50 mm 的距离, 方式 3 则为左右分置的二体堆码方式, 方式 4 即为前后左右均有间隙的四体堆码方式。各堆码方式在 COMSOL 中的分析结果如下所述。

结合表 2 与图 4, 并对比堆码方式 1, 2 可知, 稳态时其表面最高温度变化量最大由 25.5 °C 下降至 19.2 °C, 车厢平均温度从 7.2250 °C 下降至 -5.0180 °C,

温度最大值及平均值均下降明显, 该变化的主要原因在于货物与车厢侧壁间预留了一定的间隙, 车厢顶部冷气可流动到间隙, 从而减少了车厢外部热量直接传递到货物上, 同时考虑到汽车行驶过程中难免经过一些崎岖不平路面, 也可减少车厢侧壁传递到货物上的冲击振动等, 而底部中间部分因直接与壁面接触且无冷气的对流换热, 温度为最高。对比堆码方式 3, 4 发现其表面最高温度由 18.1 °C 下降至 16.2 °C, 车厢平均温度则由 -8.1206 °C 下降至 -8.2970 °C, 该变化的主要原因是由二体堆码到四体堆码, 货物与车厢内部冷空气的接触表面积增大而导致对流换热率增大, 从而使温度进一步降低。由此可见, 在相同宽度间隙下四体堆码方式相比于二体堆码和一体堆码降温效果、温度分布均匀性均更好。

为进一步探讨四体堆码时货物间隙及高度的选择, 根据图 3 的堆码物理模型, 设计以下 4 种堆码方式, 以进一步研究不同间隙下的温度分布以寻求更优化的结果。其中 range (50, 25, 300) 表示以 50 为起始值, 每次增加 25 直至 300, 共 11 个点。具体的参数取值见表 2。

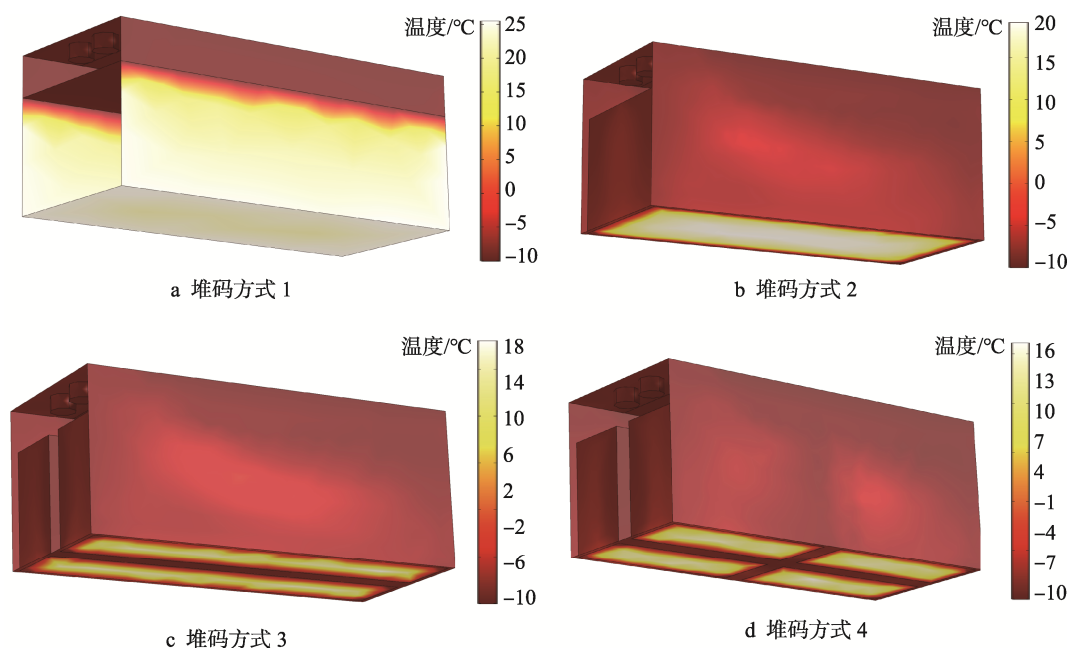


图 4 不同堆码方式车厢及货物表面温度云图

Fig.4 Temperature cloud chart of refrigerated truck and cargo surface in different stacking modes

表 3 四体堆码方式参数  
Tab.3 Parameters of four body stacking modes

| 方式 | $a/\text{mm}$ | $b/\text{mm}$ | $c/\text{mm}$ | $h_1/\text{mm}$ | $h_2/\text{mm}$ |
|----|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 1  | 50            | —             | 200           | 1.2             | 1.2             |
| 2  | 50            | 100           | 200           | 1.2             | 1.2             |
| 3  | 50            | 200           | 100           | 1.2             | 1.2             |
| 4  | 100           | 100           | 200           | 1.2             | 1.2             |



另外把车厢纵向方向分成 4 等份, 并在一二等份、三四等份间设置温度剖面, 以了解前后货物中部温度分布, 其三维视图见图 5。

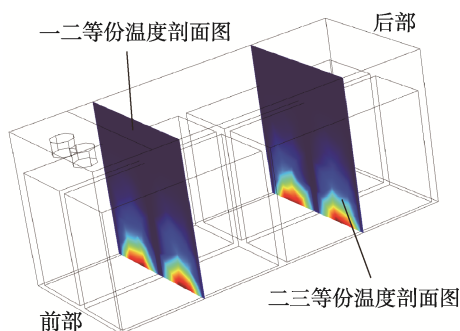


图 5 一二、三四等份间的温度剖面图

Fig.5 Temperature profile between one two and three four equal parts

车厢整体表面最高温度、各等份间的温度剖面、车厢平均温度的变化对比见图 6。由图 6 可知, 方式 1 中随着四体堆码横纵向距离的增大, 平均温度单调递减地从  $-7.7227^{\circ}\text{C}$  下降至  $-8.4823^{\circ}\text{C}$ , 车厢表面最高温度、一二等份间温度剖面、平均温度等都呈现下降趋势, 而三四等份温度剖面则围绕  $14.3^{\circ}\text{C}$  上下波动。在温度分布均匀性方面, 间隙为  $50\text{ mm}$  时, 车厢三四等份 (后部) 剖面温度为  $18^{\circ}\text{C}$ , 高出车厢一二等份 (前部) 温度剖面  $4.1^{\circ}\text{C}$ , 主要原因在于此时货物间间隙太小, 对顶部冷气流至车厢后部底层的阻隔作用较强, 而在间隙增加至  $175\text{ mm}$  以后, 前后端货物温度趋于一致, 即温度分布均匀度更高。

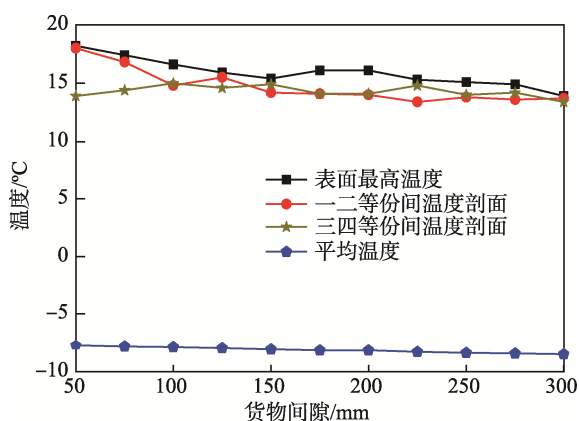


图 6 各温度随货物间隙的变化

Fig.6 Change of temperature with cargo clearance

方式 2, 3 的区别在于方式 2 的纵向间隙小于方式 3 纵向间隙, 但方式 2 横向间隙大于方式 3 的, 结果显示方式 2 最高表面温度为  $16.4^{\circ}\text{C}$ , 平均温度为  $-8.9154^{\circ}\text{C}$ , 而方式 3 则为  $17^{\circ}\text{C}$ , 平均温度为  $-9.0001^{\circ}\text{C}$ , 主要原因在于冷板与回风口呈纵向布置, 纵向间隙越大则对流换热越大以至于温度越低。方式 2 与方式 4 的区别在于侧边间隙由  $50\text{ mm}$  增加

至  $100\text{ mm}$ , 分析结果显示方式 4 最高表面温度为  $15.2^{\circ}\text{C}$ , 平均温度为  $-9.0955^{\circ}\text{C}$ , 方式 2 最高表面温度为  $17^{\circ}\text{C}$ , 平均温度为  $-9.0001^{\circ}\text{C}$ , 原因主要在于侧壁间隙的增大使得侧面气流的阻碍作用减小, 增大了侧面的换热效果, 使温度有所降低, 温度分布也更趋于均匀。

## 5 结语

文中通过设计一种新型的冷风导流机构, 选取了最优的堆码方式, 并且对最优的堆码方式中货物间距对制冷效果的影响进行了分析, 得到了堆码货物的最优间距。结合该冷藏车厢的特点, 对车厢内不同货物堆码方式下温度场进行仿真分析发现: 四体堆码方式优于一体、二体堆码方式; 车厢纵向间隙相对于横向间隙对车厢温度分布的均匀性更有利; 为保证车厢前后端温度分布的均匀性, 建议四体堆码时间隙大于  $175\text{ mm}$  为宜。

## 参考文献:

- [1] 汪磊, 谢晶. 计算流体力学技术在食品冷藏链中的应用[J]. 包装工程, 2017, 38(9): 118—123.  
WANG Lei, XIE Jing. Application of Computational Fluid Dynamics Technology in Food Cold Chain[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(9): 118—123.
- [2] 张哲, 李立民, 田津津, 等. 冷藏车温度场不均匀度对蔬菜保鲜效果的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 309—316.  
ZHANG Zhe, LI Li-min, TIAN Jin-jin, et al. Effects of Refrigerated Truck Temperature Field Uniformity on Preservation of Vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 309—316.
- [3] 韩佳伟, 赵春江, 杨信廷, 等. 基于 CFD 数值模拟的冷藏车节能组合方式比较[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 55—62.  
HAN Jia-wei, ZHAO Chun-jiang, YANG Xin-ting, et al. Comparison of Combination Mode of Energy Conservation for Refrigerated Car Based on CFD Numerical Simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural, 2013, 29(19): 55—62.
- [4] 张钟, 江潮. 食品冷冻技术的研究进展[J]. 包装与食品机械, 2014, 123(1): 65—68.  
ZHANG Zhong, JIANG Chao. Research Progress of Freezing Technique in Foods[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 123(1): 65—68.
- [5] 赵鑫鑫, 王家敏, 李丽娟, 等. 多温区冷藏车回风导轨对厢内温度场的影响分析[J]. 食品与机械, 2014, 122(1): 149—154.  
ZHAO Xin-xin, WANG Jia-min, LI Li-juan, et al. Analysis of the Influence of the Return Air Guide Rail

- of the Multi Temperature Zone Refrigerator Car on the Temperature Field in the Car[J]. Food and Machinery, 2014, 122(1): 149—154.
- [6] 张哲, 郭永刚, 田津津, 等. 冷板冷藏汽车箱体内部温度场的数值模拟及试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(S1): 18—24.  
ZHANG Zhe, GUO Yong-gang, TIAN Jin-jin, et al. Numerical Simulation and Experiment of Temperature Field Distribution in Box of Cold Plate Refrigerated Truck Distribution in Box of Cold Plate Refrigerated Truck[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(S1): 18—24.
- [7] 高超. 海运冷藏集装箱内部温度场研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018: 5—7.  
GAO Chao. Study on International Temperature Field of Marine Refrigerated Container[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018: 5—7.
- [8] 陶文博. 冷板冷藏车的传热模拟及冷板布置方式优化[D]. 广州: 广州大学, 2016: 7—11.  
TAO Wen-bo. Heat Transfer Simulation of Cold Plate Refrigerator Car and Optimization of Cold Plate Layout[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2016: 7—11.
- [9] 李锦, 谢如鹤, 刘广海, 等. 多温冷藏车降温特性及其影响参数研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 128—135.  
LI Jin, XIE Ru-he, LIU Guang-hai, et al. Cooling Characteristics and Influence Parameters of Multi-temperature Refrigerated Truck[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 128—135.
- [10] 田津津, 张哲, 李曼, 等. 冷藏集装箱内部温度场的试验研究[J]. 流体机械, 2016, 44(6): 56—60.  
TIAN Jin-jin, ZHANG Zhe, LI Man, et al. Experimental Research on Internal Temperature Field in Reefer Container[J]. Fluid Machinery, 2016, 44(6): 56—60.
- [11] 李曼. 冷藏集装箱内部流场及送风形式的研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2015: 5—8.  
LI Man. Study on the Internal Flow Field and Air Supply Form of Refrigerated Container[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2015: 5—8.
- [12] 郭嘉明, 吕恩利, 陆华忠, 等. 保鲜运输车果蔬堆码方式对温度场影响的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 12(13): 231—236.  
GUO Jia-ming, LYU En-li, LU Hua-zhong, et al. Numerical Simulation on Temperature Field Effect of Stack Method of Garden Stuff for Fresh-keeping Transportation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 12(13): 231—236.
- [13] WANG L, LIN Z, LIAN G. A CFD Simulation of 3D Air Flow and Temperature Variation in Refrigeration Cabinet[J]. Procedia Engineering, 2015, 102(12): 1599—1611.
- [14] XU F, LU T J, SEFFEN K A, et al. Mathematical Modeling of Skin Bioheat Transfer[J]. Applied Mechanics Reviews, 2009, 62(5): 1201—1210.
- [15] 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.  
XIE Ru-he, TANG Hai-yang, TAO Wen-bo, et al. Optimization of cold-plate Location in Refrigerated Vehicles Based Simulation and Test of no-load Temperature Field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 290—298.
- [16] 李细霞, 吕东霖, 李长玉. 冷藏车车厢结构优化设计及关键参数分析[J]. 中国工程机械学报, 2018, 12(4): 316—320.  
LI Xi-xia, LYU Dong-lin, LI Chang-yu. Structure Optimization and Key Parameter Analysis of a Refrigerated Truck Carriage[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2018, 12(4): 316—320.
- [17] 金晓平. 新型冷板冷藏车的研制[J]. 铁道车辆, 2006, 12(7): 26—28.  
JIN Xiao-ping. Development of New Type Cold Plate Refrigerator Car[J]. Rolling Stock, 2006, 12(7): 26—28.
- [18] 邸倩倩, 王亚会, 刘斌, 等. 风速对冷藏车内温度分布的影响[J]. 食品科技, 2017, 30(5): 46—51.  
DI Qian-qian, WANG Ya-hui, LIU Bin, et al. The Influence of Wind Speed on the Temperature Distribution in the Refrigerator Car[J]. Food Science and Technology, 2017, 3(5): 46—51.
- [19] 赵春江, 韩佳伟, 杨信廷, 等. 基于 CFD 的冷藏车车厢内部温度场空间分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 16(11): 168—173.  
ZHAO Chun-jiang, HAN Jia-wei, YANG Xin-ting, et al. Numerical Simulation of Temperature Field Distribution in Refrigerated Truck Based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 16(11): 168—173.
- [20] 夏全刚, 刘宝林, 宋晓燕. 一种新型冷藏车箱体模型的设计与实验验证[J]. 制冷学报, 2014, 122(4): 108—112.  
XIA Quan-gang, LIU Bao-lin, SONG Xiao-yan. Design and Experimental Verification of a New Refrigerator Car Box Model[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 122(4): 108—112.
- [21] 傅泽田, 王大鹏, 张国祥. 冷藏车水产品堆栈方式对温度场的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 347—356.  
FU Ze-tian, WANG Da-peng, ZHANG Guo-xiang. Simulation and Experiment on Influence of Stacking Mode of Refrigerated Truck Aquatic Products on Temperature Field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 347—356.