

冷藏车冷风导流系统的设计及热流场分析

田甜, 李细霞, 徐添桦, 李长玉
(广州城市理工学院, 广州 510800)

摘要: **目的** 为了使冷藏车在运输过程中冷风分布更均匀, 提高对货物的冷却效果。**方法** 设计一种冷藏车冷风导流系统, 建立其三维几何模型及冷藏车制冷时的热物理模型。利用计算仿真的方式分析了冷藏车在运输苹果过程中车厢内冷风流向及温度场随时间变化情况, 分析了冷风导流系统及其气孔直径、气孔间隔、导流槽尺寸、回风道宽度、入口风速等关键参数对运输过程中冷却效果的影响。通过分析的结果确定了冷风导流系统的关键尺寸。**结果** 发现设计的冷风导流系统可将运输过程中货物温度最大值降低 5.9 K, 回风道宽度在 150 mm 左右为宜。**结论** 文中设计的冷藏车冷风导流系统可有效提高冷却效果, 相关的方法可为冷藏车设计提供一定的参考。

关键词: 冷藏车; 冷风导流系统; 热流场; 入口风速

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)21-0123-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.21.016

Design of Cold Air Guide System and Analysis of Heat Flow Field of Refrigerated Truck

TIAN Tian, LI Xi-xia, XU Tian-hua, LI Chang-yu

(Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, China)

ABSTRACT: The work aims to make the cold air distribution of refrigerated truck more uniform during transportation and improve the cooling effect on goods. A cold air guide system was designed for refrigerated truck, and its three-dimensional geometric model and thermodynamic model during refrigeration were established. The changes of cold air flow direction and temperature field in the compartment with time during the transportation of apples were analyzed by means of calculation and simulation. The effects of key parameters such as pore diameter, pore interval, guide groove size, return air duct width and inlet wind speed on the cooling effect during the transportation were analyzed. Through the analysis results, the key dimensions of the cold air guide system were determined. It was found that the designed cold air guide system could reduce the maximum goods temperature by 5.9 K during transportation, and the width of return air duct should be about 150 mm. The designed cold air guide system can effectively improve the cooling effect, and the relevant methods can provide a certain reference for the design of refrigerated truck.

KEY WORDS: refrigerated truck; cold air guide system; heat flow field; inlet wind speed

随着我国电子商务行业的崛起, 食品等易腐物品的运输越来越普及, 冷链物流需求也越来越大。冷藏车是冷链物流重要一个环节, 合理的冷藏车运输过程

中热流场分布可提高冷藏车冷却货物的效果^[1-4], 近年, 针对冷藏汽车相关设计及温度场分析的相关研究也越来越多, 具体可归结如下。

收稿日期: 2022-02-17

基金项目: 广东省特色创新项目(自然科学类)(2021KTSCX172)。

作者简介: 田甜(1983—), 女, 硕士, 实验师, 主要研究方向为汽车结构设计与分析。

通信作者: 李细霞(1983—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为冷链物流中的关键技术。

张超等^[5]针对冷藏车运输荷兰芹过程中货物堆码位置对其品质影响做了研究,发现在冷藏车车厢后上堆货物放会引起荷兰芹品质下降。夏全刚等^[6]设计了一种冷藏车厢体模型,结合三维数值模拟和实验,分析了该冷藏车在运输上海青过程中温度变化情况。谢如鹤等^[7]通过计算流体力学的方法对某冷板冷藏车不同冷板布置情况下的温度场进行了分析,通过实验进行了验证,发现冷板部分侧置,部分顶置的方式比较合理。李锦等^[8]运用湍流模型研究了冷藏车隔热材料、出风口位置等参数对运输过程中温度分布的影响。李细霞等^[9]针对分体式冷板冷藏车空载预冷过程进行了温度场分析,发现顶置加侧置方式可以保证冷却效果。张哲等^[10]针对冷板冷藏车,采用数值模拟的方法计算了空载时厢体温度场分布,并通过实验进行了验证。李锦等^[11]基于动态平衡理论,建立了冷藏车厢内温度随时间变化降温数学模型,并通过试验对模型进行了验证。分析了车速、隔热材料的热导率等对降温时间的影响。田津津等^[12]针对某冷藏车进行了内部流场的动态数值模拟与实验验证,发现实验结果和仿真结果较一致。邱倩倩等^[13]建立了某冷藏车内部流场数学模型,分析了风速对车厢内部温度变化的影响。

文中设计一冷藏车冷风导流系统,建立了装配该冷风导流系统后的冷藏车厢内部几何模型及热物理模型,通过仿真计算的方式得到了该系统的热流场分布的情况,分析了该系统的关键参数对冷藏车冷却效果的影响。

1 冷风导流系统设计

文中针对厢体内尺寸为4 085 mm×2 000 mm×1 900 mm的冷藏汽车设计内部导流系统。结合该冷藏汽车的蒸发器尺寸,设计了顶部冷风导流系统。其中包括弧形导板,挡风导板,气孔板3部分组成。顶部导流系统主要用于将蒸发器出风口的冷风往车厢后部导流,使其均匀地从车厢顶部往下部流动。具体的结构和尺寸如图1所示。其中 D_{sto} 为气孔直径, L_{inr} 为气孔间隔。

冷藏车经顶部冷风导流系统导流之后,流经车厢冷藏货物,通过货物之间留置的回风道和底部冷风导流系统流经回风口,设计的底部冷风导流系统结构和尺寸见图2。导流槽除了对冷风进行导流之外,还可以将运输过程中产生的液体导入入集污槽。

设计的冷藏车冷风导流系统装配关系如图3所示。车厢由外壁、内壁和中间隔热层构成,其中内壁和外壁由玻璃钢制成,隔热层采用聚氨酯泡沫板。顶部导流系统连接冷藏车蒸发器。底部导流系统置于冷藏车底部。在装置货物时预留回风道。设计的冷风导流系统预计的冷风流向为:从蒸发器出口经过气孔板流入车厢,经过货物间隙,通过回风道,底部导流槽经回风口再流入蒸发器。

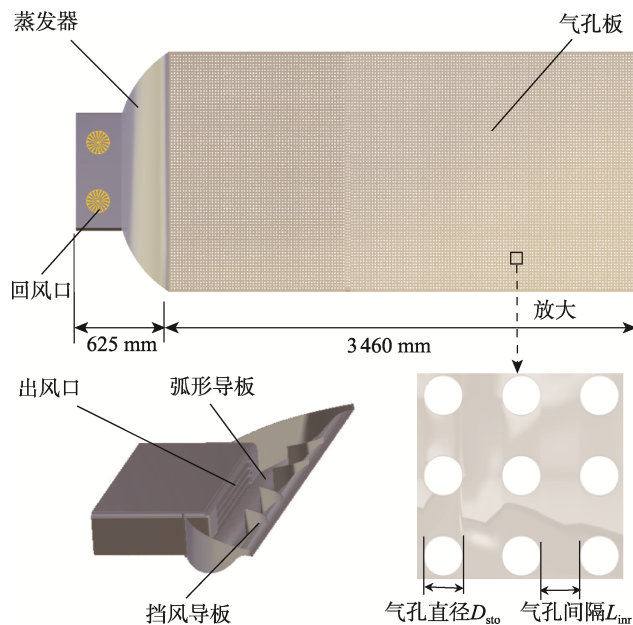


图1 顶部冷风导流系统
Fig.1 Cold air guide system on top

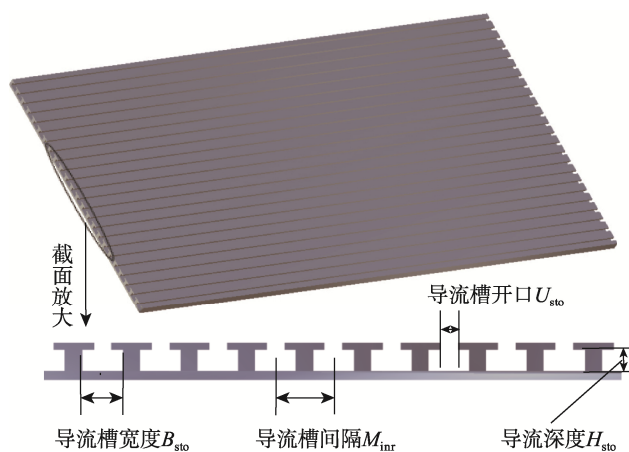


图2 底部冷风导流系统
Fig.2 Cold air guide system at bottom

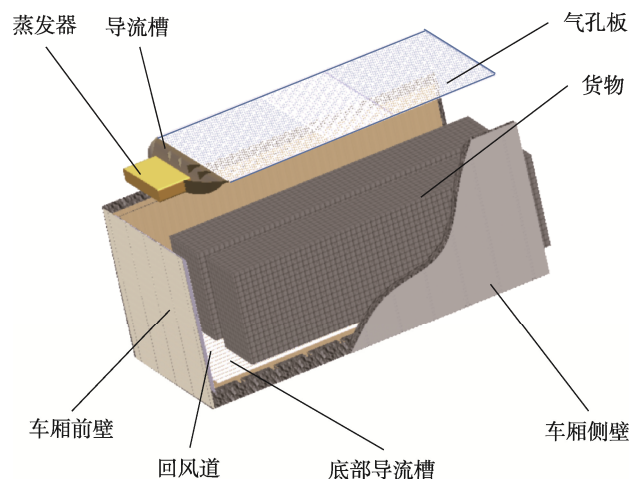


图3 导流系统装配关系
Fig.3 Assembly relationship of guide system

2 热流场分析的数理模型

2.1 坐标设置

在进行热流场分析时需要先建立坐标系。建立的坐标系如图 4 所示,以冷藏车厢内右下角为坐标系原点,汽车行驶方向为 x 轴正方向,驾驶员左手方向为 y 轴正方向,垂直底面为 z 轴正方向。截面 A 通过回风口圆心和 x 轴平行。

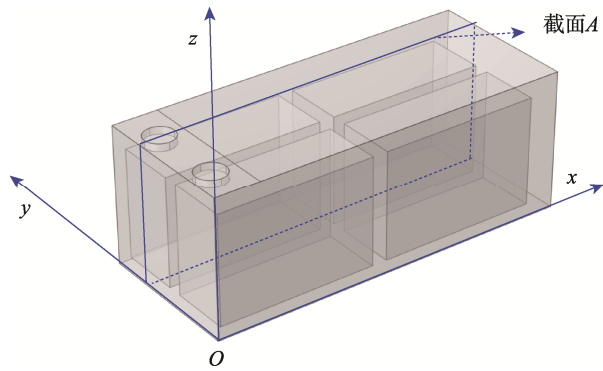


图 4 坐标设置
Fig.4 Coordinate setting

2.2 控制方程

文中针对运输苹果过程中温度分布情况建立热物理模型,该模型包括货物内部固体传热,车厢内空气和货物之间的对流换热,及流体流动传热几个物理过程。其中固体传热控制方程见式(1),流体运动的控制方程见式(2)——(6)^[14-16]。

$$\rho_b c_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T_b}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T_b}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T_b}{\partial z}) \quad (1)$$

式中: ρ_b 为货物密度; T_b 为货物温度; t 为时间; c_b 为货物的恒压热容; k 为货物导热系数。

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

式中: u_i 为空气流动的速度分量, $i=1, 2, 3$ 表示 x 、 y 、 z 方向。

运动方程:

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

式中: ρ 为空气密度; p 为压力; T 为空气温度; β 为空气体积膨胀系数; μ 为气体层流动力黏性系数。

湍流流动能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\frac{\mu}{P_r} + \frac{\mu_t}{\sigma_t}) \frac{\partial T}{\partial x_i}] + \frac{q_T}{C_p} \quad (4)$$

式中: q_T 为热源强度; C_p 为空气定压比热
湍流脉动动能方程 (κ 方程):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i}) + G - \rho \varepsilon + \beta g \frac{\mu_t}{P_r} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) + (c_1 G - c_2 \rho \varepsilon) + c_3 \beta g \frac{\mu_t}{k P_r} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (6)$$

式中: G 为湍流脉动动能; u_i 为湍流黏性系数; k 为空气紊流脉动动能; P_r 为紊流普朗特数; T_0 为参考温度, K; ε 为紊流能量耗散率。各经验系数取值 $c_1=1.45$ 、 $c_2=1.82$ 、 $c_3=1$ 、 $\sigma_3=0.08$ 、 $\sigma_k=1$ 。

3 分析与讨论

分析时以运输苹果为例,苹果的半径为 50 mm。分析时考虑苹果外包装为网格泡沫,为简化计算此处忽略了其影响,设苹果间隙为 3 mm。各部分材料的热物理参数见表 1^[13,17-18]。

表 1 材料的热物理参数
Tab.1 Thermophysical parameters of materials

参数	导热系数/[W·(m·°C) ⁻¹]	密度/(kg·m ⁻³)	恒压热容/[J·(kg·°C) ⁻¹]
货物	0.21	911	3213
厢体保温层	0.03	25	2
挡板	155	2730	893

图 5 表示了不同回风道设置时,车厢内达到稳定状态时气流和温度分布情况。从图 5 中可以看出当车辆空载时车厢内部温度很快和蒸发器出风口位置温度达到一致,回风口位置空气温度略高。当不设置纵

向、横向回风道时,车厢内的最高,最低温度相差 3.2 K。仅设置纵向回风道是车厢内最低、最高温度相差 2.5 K,同时设置纵向、横向回风道时车厢温度最大在、最小值相差 1.8 K。从图 5 中还可以看出,因设计的冷风

导流装置的作用,冷空气自顶向下进入车厢,冷却货物后经回风道和车辆底部的通风槽流向回风口。

图6表示了不同情况下截面A的温度云图及空气流向分布情况。从图6中可以看出,当同时设置纵向和横向通风道时制冷效果最好,在制冷10 h之后车

厢内温度最大值和最小值相差3.9 K。不设置通风道时制冷效果最差,在制冷10 h之后温度最大值和最小值相差4.9 K。从图6中还可以看出,未设置纵,横向通风道时货物后下方及前下方温度较高。同时设置纵,横向通风道时货物仅后下方温度稍高。

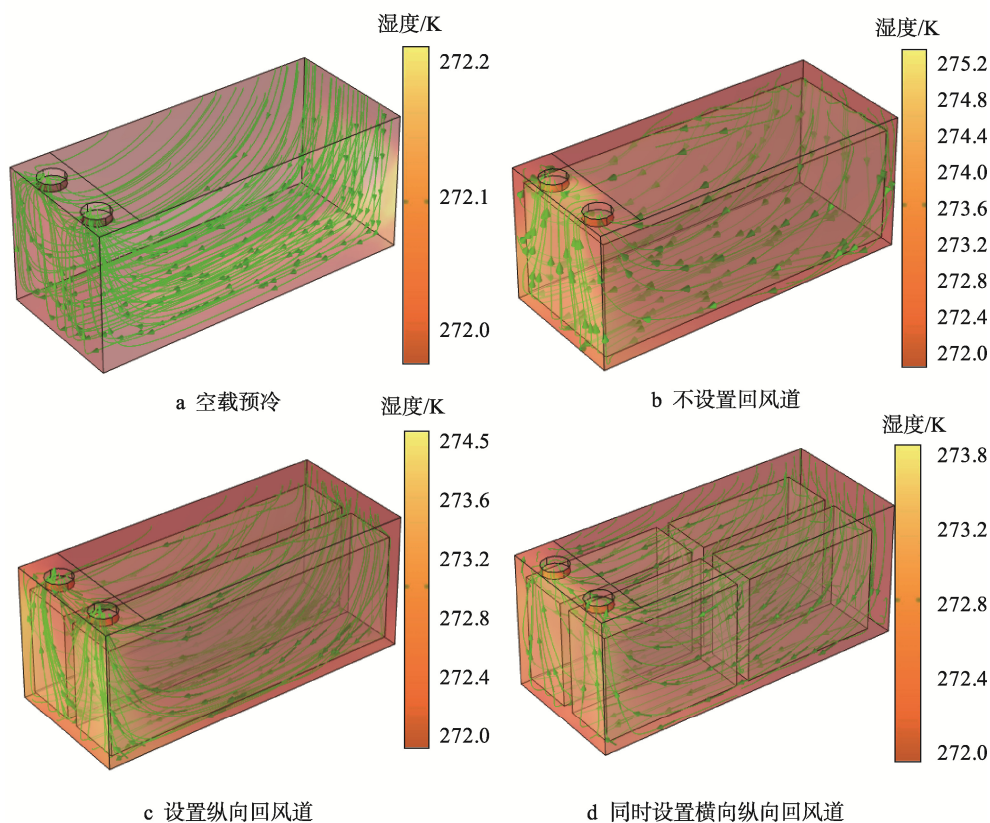


图5 不同回风道设置时气流及温度分布

Fig.5 Air flow and temperature distribution in different return air duct settings

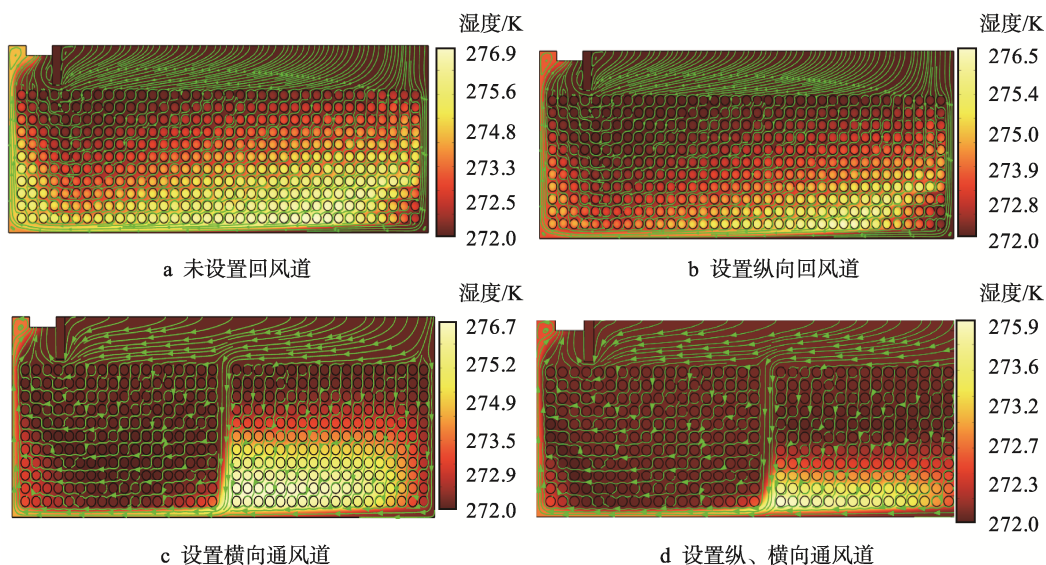


图6 不同情况下截面A温度分布云图及气流流向($t=10$ h)

Fig.6 Cloud diagram of temperature distribution and air flow direction of section A under different conditions($t=10$ h)

图 7 表示了设计的冷风导流装置对货物温度最大值, 最小值变化的影响情况。在计算时取货物及车厢空气温度初始值均为 288.15 K, 蒸发器出口的冷风温度为 272.15 K。从图 7 中可以看出当无冷风导流装置时, 货物温度的最大值明显要高于增加了导流装置时的温度, 在 $t=10$ h, 无冷风导流装置情况下, 货物温度最大值为 283.5 K, 只有底部冷风导流装置情况下货物温度最大值为 281.7 K, 同时设置顶部和底部冷风导流装置情况下货物温度最大值为 277.6 K。设计的冷风导流装置可以将货物的最大温度降低 5.9 K 左右。从图 7 中还可以看出未设置冷风导流装置时货物的最小温度要略低于值设置顶部或同时设置顶部底部冷风导流装置, 但是整体影响不大。

图 8 表示了装入货物预冷温度不同时, 货物的最高温度和最低温度随时间变化的情况, 从图中可以看出无论货物初始温度取何值, 在经过足够长的冷却时间 ($t=24$ h) 后, 货物温度的最小值区别不大, 均接略高于冷藏车蒸发器出口的温度值 272.15 K。从图中可以看出装入货物的预冷温度越低, 货物温度达到适合运输的温度所需的时间越少, 当货物的预冷温度为 278.15 K 时, 经过 3 h 货物温度最小值达到 273.31 K, 货物温度最大值达到 277.15 K, 是比较适合运输的温度。如果装入货物, 初始温度为 288.15 K, 货物的最大温度达到 277.15 K, 需要经过 11 h。

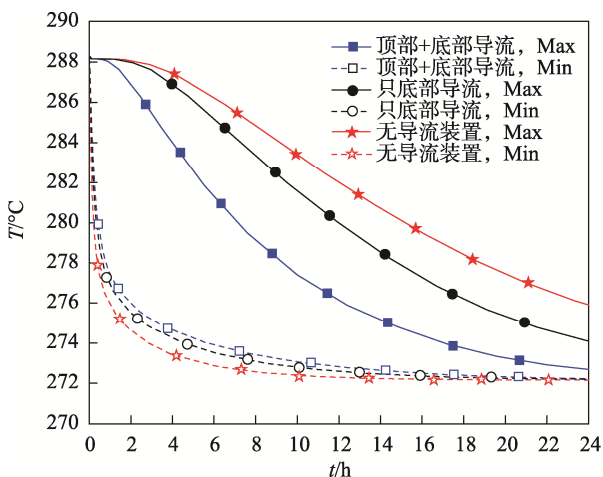


图 7 冷风导流装置对温度变化情况的影响
Fig.7 Effect of cold air guide device on temperature distribution

图 9 表示了当入口风速不同时, 货物的不同位置温度随时间变化情况, 各位置的坐标为: 位置 1 (400、30、30 mm), 位置 2 (400、30、120 mm), 位置 3 (150、30、120 mm), 位置 4 (80、30、120 mm)。从图 9 中可以看出。当入口风速为 3 m/s 时货物温度降低明显越快。在位置 1, 温度降低至 276.15 K。需要 11 h, 当入口风速为 5 m/s 时则只需要 7.9 h。从图中还可以看出, 靠近出风口位置 (位置 4) 温度下降

速度明显较快, 在车辆后方货物中间位置, 货物温度明显下降较慢。

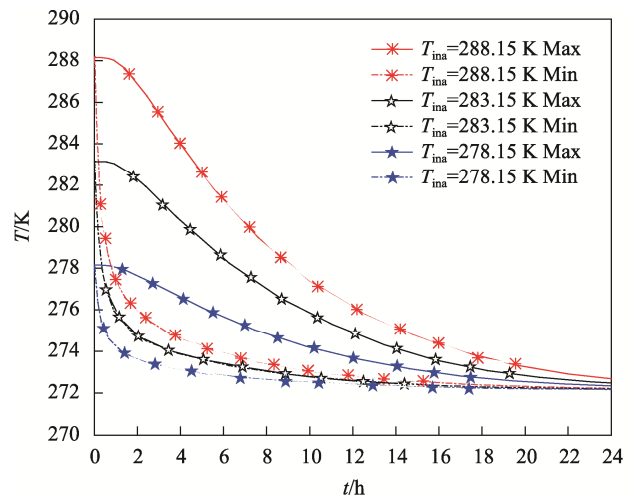


图 8 货物预冷温度对温度变化情况的影响
Fig.8 Effect of precooling temperature of goods on temperature change

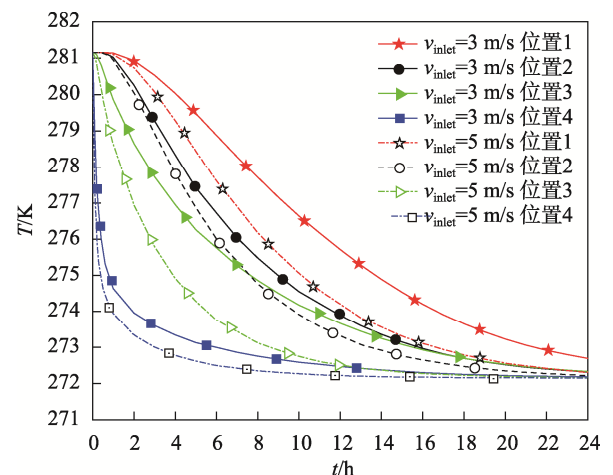


图 9 不同的入口风速对不同位置温度变化的影响
Fig.9 Effect of different inlet wind speed on temperature changes at different locations

为了分析冷风导流系统关键参数对冷却效果的影响。顶部导流系统分 3 个尺寸, 分别为尺寸 A ($D_{sto}=10$ mm、 $L_{inr}=5$ mm), 尺寸 B ($D_{sto}=10$ mm、 $L_{inr}=10$ mm), 尺寸 C ($D_{sto}=5$ mm、 $L_{inr}=10$ mm)。底部导流系统分 2 个尺寸, 分别为尺寸 M ($U_{sto}=30$ mm、 $B_{sto}=60$ mm、 $M_{inr}=80$ mm、 $H_{sto}=30$ mm), 尺寸 N ($U_{sto}=40$ mm、 $B_{sto}=80$ mm、 $M_{inr}=100$ mm、 $H_{sto}=60$ mm)。图 10 横坐标表示回风道的宽度, 横坐标表示车厢内货物从装入时的 281.15 K 降低至 276.15 K 所需要的时间。图 10 中的点为计算所得的实际值, 曲线为散点拟合的曲线。从图 10 中可以看出随着纵向通风道宽度增加, 所需冷却时间先减少后略有增加。分析原因是通风道宽度增加空气流动性好, 冷却效果好, 但

是当通风道过宽时冷空气容易未流经货物就流向回风口从而降低冷却效果。从图中还可以看出冷却效果最差的是C、M尺寸此时顶部导流系统气孔直径小,气孔之间的间隙大,气流不畅。底部倒流系统草流槽截面积较小,导流不充分。冷却效果最好的是B、N尺寸组合。此时顶部倒流系统气孔直径和间隙取值合理,气流从前至后分布更均匀,底部倒流系统截面积大,导流更充分。

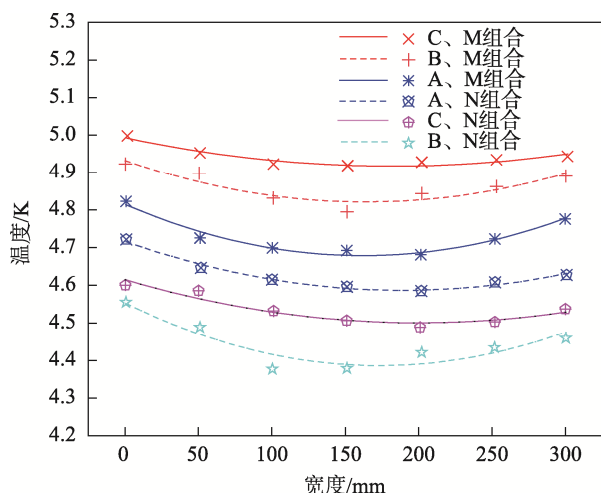


图10 导流系统关键参数对冷却效果的影响
Fig.10 Effect of key parameters of guide system on cooling effect

4 结语

文中设计了一冷藏车冷风导流系统,在车厢顶部采用气孔板导流,车厢底部采用通风槽导流,货物间设置回风道。建立了该冷藏车工作时的热流场模型。分析了导流系统对该冷藏车冷却效果的影响。发现设计的冷风导流系统可提高冷藏车制冷过程中货物温度分布的均匀性,合理的冷风导流系统尺寸可提高冷却效果。货物堆放时留置回风道可有效降低货物温度,回风道宽度150 mm左右为宜。车厢底部通风槽可有效将冷风导入车厢底部,降低车厢底部货物温度。

参考文献:

- [1] 许欣,郑丰,孔俊,等. 冷链运输包装纸板的研究现状及发展趋势[J]. 包装工程, 2021, 42(21): 133-142.
XU Xin, ZHENG Feng, KONG Jun, et al. Research Status and Development Trend of Cold Chain Transport Packaging Paperboard[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(21): 133-142.
- [2] 徐笑锋,章学来,王建军. 不同环境温度下蓄冷式冷藏车温度场的模拟研究[J]. 低温与超导, 2018, 46(2): 65-69.
- [3] 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.
- [4] 谢如鹤,罗荣武,李绍荣. 新型机械冷板冷藏车的技术经济分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(2): 100-106.
XIE Ru-he, LUO Rong-wu, LI Shao-rong. Technical and Economical Analysis on New Type Mechanically Freezing-Plate Refrigerator Car[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004, 1(2): 100-106.
- [5] 张超,董雪临,马越,等. 冷藏运输中堆放位置对鲜切荷兰芹品质的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(4): 176-180.
ZHANG Chao, DONG Xue-lin, MA Yue, et al. Effect of Position in the Vehicle on the Qualities of Fresh-Cut Parsley during Refrigerated Transportation[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(4): 176-180.
- [6] 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 Type of Refrigerated Vehicle Model[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 122(4): 108-112.
- [7] 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 on Simulation and Test of No-Load Temperature Field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 290-298.
- [8] 李锦,谢如鹤,刘广海. 易腐食品冷藏运输车内温度场影响因素仿真研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(3): 190-194.
LI Jin, XIE Ru-he, LIU Guang-hai. Simulation Study on Compartment Temperature Field Influence Factors of Perishable Food Refrigerated Trucks[J]. Food & Ma-

- chinery, 2012, 28(3): 190-194.
- [9] 李细霞, 肖颖, 汤云峰, 等. 分体式冷板冷藏车设计及温度场分析[J]. 包装工程, 2018, 39(23): 56-61.
LI Xi-xia, XIAO Ying, TANG Yun-feng, et al. Design of a Split Type Cold Plate Refrigerated Truck and Its Temperature Field Analysis[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(23): 56-61.
- [10] 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[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(S1): 18-24.
- [11] 李锦, 谢如鹤, 刘广海, 等. 冷藏车降温数学模型建立与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 175-182.
LI Jin, XIE Ru-he, LIU Guang-hai, et al. Establishment of Cooling Mathematical Model and Analysis of Influence Factors for Refrigerated Trucks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013(6): 175-182.
- [12] 田津津, 王飒飒, 张哲, 等. 冷藏集装箱内部流场的动态数值模拟与验证[J]. 食品与机械, 2016, 32(4): 136-142.
TIAN Jin-jin, WANG Sa-sa, ZHANG Zhe, et al. Dynamic Numerical Simulation and Experimental Research on Internal Flow Field of Refrigerated Containers[J]. Food & Machinery, 2016, 32(4): 136-142.
- [13] 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. Effect of Wind Speed on the Distribution of Temperature Field in the Liquid Nitrogen Refrigerated Vehicle[J]. Food Science and Technology, 2017, 30(5): 46-51.
- [14] 方文康, 宋海燕, 吴迪. 基于 Fluent 的多温区保温包装箱温度场仿真分析[J]. 包装工程, 2020, 41(3): 62-69.
FANG Wen-kang, SONG Hai-yan, WU Di. Temperature Field Simulation of Multi-Temperature Zone Thermal Insulation Box Based on Fluent[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(3): 62-69.
- [15] LI Z Q, LI X J. Bus LNG Container Heat Insulated Performance Estimate[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(4): 1-5.
- [16] 潘欣艺, 王冬梅, 朱宏. 保温材料对保温箱内温度场的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(8): 115-118.
PAN Xin-yi, WANG Dong-mei, ZHU Hong. Study on Temperature Field of Different Materials in Incubator[J]. Food & Machinery, 2018, 34(8): 115-118.
- [17] 张哲, 田津津. 冷藏车内部流场的数值研究[J]. 低温与超导, 2009, 37(8): 59-61.
ZHANG Zhe, TIAN Jin-jin. Numerical Research on Flow Field in a Refrigerated Truck[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2009, 37(8): 59-61.
- [18] 谢晶, 邱伟强. 我国食品冷藏链的现状与展望[J]. 中国食品学报, 2013, 13(3): 1-7.
XIE Jing, QIU Wei-qiang. Recent Situation and Development of Food Cold Chain in China[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(3): 1-7.

责任编辑: 曾钰婵