DOI:10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.80824

主被动双模式冷藏集装箱设计及箱内 环境特性分析

任晓芬!张 蕾² 童山虎³ 折晓会¹ 李晨旭¹

(1. 石家庄铁道大学机械工程学院,河北 石家庄 050043; 2. 河北工程大学能源与环境工程学院,河北 邯郸 056038; 3. 中车石家庄车辆有限公司,河北 石家庄 051430)

摘要:[目的]提高冷链运输装备分析主被动双模式对冷链集装箱箱内环境分布特性的影响。[方法]提出一种集制冷机 组、纤维送风管道、相变蓄冷板于一体的主被动双模式冷藏集装箱(控温区间为一1~10℃),该系统利用被动释冷模式 运行,箱内空气温度>10℃时切换为主动释冷模式运行,对箱体数值进行模拟研究,并分析箱内环境分布特性。[结果] 主被动双模式箱内速度分布均匀,气流可送达箱内各处;主动释冷模式温度分布均匀,箱内温度梯度较小,最大温差仅 为0.3℃,被动释冷模式箱内温度梯度略大,且温度不均匀性高于主动释冷模式;与单独采用被动制冷模式相比,主被 动双模式可有效保证10℃以下温区长时运输,有利于大多数新鲜货物冷藏运输。[结论]主被动双模式冷链集装箱设计 具有较大的能源优化潜力,且流场均匀、温度稳定并具有较强的实用价值。

关键词:主被动双模式;冷藏集装箱设计;速度场;温度场;保冷效果

Design of active and passive dual modes refrigerated container and analysis of environmental characteristics in the container

REN Xiaofen¹ ZHANG Lei² TONG Shanhu³ SHE Xiaohui¹ LI Chenxu¹

School of Mechanical Engineering Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;
 School of Energy and Environment Engineering, Hebei University of Technology, Handan, Hebei 056038, China;
 CRRC Shijiazhuang Vehicle Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 051430, China)

Abstract: [Objective] Improved cold chain transportation equipment and analyzed the impact of active and passive dual modes on the environmental distribution characteristics inside cold chain containers. [Methods] An active and passive dual-mode refrigerated container (temperature control range is $-1\sim10$ °C) was proposed, which integrated refrigeration unit, fiber air supply pipe and phase-change cold storage plate. The system operated in passive cooling mode, and switched to active cooling mode when the air temperature inside the box was greater than 10 °C. [Results] The results showed that the velocity distribution in the active and passive dual mode box was uniform, and the air flow could reach all parts of the box. The temperature distribution in the active release mode was uniform, the temperature gradient in the box was small, and the maximum temperature difference was only 0.3 °C. The temperature gradient in the passive refrigeration mode alone, the active and passive dual mode could effectively ensure the long-term transportation of the temperature zone below 10 °C, which was conducive to the refrigerated transportation of most fresh goods. [Conclusion] The design of active and passive dual-mode cold chain container has great potential for energy optimization, uniform flow field, stable temperature and strong practical value.

Keywords: active and passive dual mode; design of refrigerated container ; velocity field; temperature field; cold retaining effect

2021年冷链物流市场规模突破4586亿元,同比增长 且承载品种多等优点,成为冷链物流的重要运输工具,并得 19.65%^[1]。冷藏集装箱因具有方便、快捷、利用率高、容量大 到了快速增长^[2-4]。集装箱内空气品质对货物质量有极大影

基金项目:河北省优秀青年科学基金项目(编号:E2022210022);石家庄市重大科技专项(编号:236260237A) 通信作者:童山虎(1986—),男,中车石家庄车辆有限公司高级工程师,硕士。E-mail: 53843063@qq.com 收稿日期:2023-08-25 改回日期:2024-06-13

响,空气流速过大容易造成货物干耗,温度过低容易冻伤货物,温度过高则容易引起货物变质,进而影响经济效益^[5-7]。因此,营造均匀的速度场及温度场,合理分配气流,从而创造 适宜的保鲜货物贮藏环境至关重要。

根据冷藏集装箱的制冷模式可将其分为主动制冷和 被动制冷^[8],主动制冷是利用蒸发器侧送风或者外接风管 送风,营造箱体设计环境达到制冷效果;被动制冷则利用 相变材料的相变吸热消除箱内冷负荷,达到制冷效果。 采用主动制冷模式的冷藏集装箱具有控温范围广、适用 于长途运输等优点,但其运行成本较高且采用蒸发器侧 送风时箱内气流分布不均匀,利用梯级送风⁹¹、纤维风管 送风^[10]、竖壁贴附送风^[11]、加长送风管道^[12]等改变风口分 布的方式,增加货物堆码数量及货物与壁面间隙[13-15],将 防辐射涂料涂于集装箱外表面16回或利用相变材料与绝缘 夹层板构成新的壁面结构[17-21],均可有效改善箱内气流 分布。采用被动制冷模式的冷藏集装箱具有运行成本较 低、适用于中短途运输的优点,其能耗较主动制冷的冷藏 集装箱降低了86.7%[22]。采用被动制冷模式可有效降低 运行能耗,但易受其内部空间及蓄冷材料的影响,其蓄冷 量有限,且尚未见其应用于长距离运输;而针对单一模式 的冷藏集装箱内环境分布特性研究较多,有关双模式冷 藏集装箱的环境分布特性尚未见报道。研究拟提出一种 主被动双模式冷藏集装箱,对箱体进行设计计算,分析箱 内环境分布特性,并对其保冷效果进行说明,旨在为冷链 运输装备的设计及应用提供依据。

1 主被动双模式冷藏集装箱设计

1.1 冷藏集装箱结构

主被动双模式冷藏集装箱集制冷机组、纤维送风管 道、相变蓄冷板于一体(见图1),在箱体顶部布置有两组 蓄冷板,蓄冷板内布置有充冷管路,每组由7根长5.9m的 蓄冷板组成,共14根,悬挂在箱体顶部,板间距为0.05m, 距侧墙距离为0.1m,纤维风管布置于第3、4根蓄冷板之 间,距蓄冷板距离为0.03m,箱体前端布置蒸发器,蒸发器 出风口接半圆形贴壁式纤维风管。风管由柔性帆布制 成,直径为0.4m,长度为12.6m,风管底部开孔,孔距为 0.2m,孔径为0.02m,参考纤维风管选型手册,纤维风管 的渗透风量为总风量的10%,箱体保温材料采用聚氨酯 (PU)泡沫,相变蓄冷材料采用德国 Rubitherm 公司的 RT-4,各部件相对位置尺寸标注如图2所示,箱体结构及 设备参数见表1和表2。

1.2 工作原理

主被动双模式工作原理及控制原理如图3所示,在冷 藏集装箱出发前,利用谷时电价,蓄冷板外接充冷装备为 蓄冷板内的相变材料充冷;首先利用蓄冷板制冷(以下称 为被动模式),在箱体内部布置温度传感器实时监测箱内



图1 主被动双模式冷藏集装箱结构示意图





图 2 主被动双模式冷藏集装箱内各部件相对位置标注图 Figure 2 Positions of components in an active/passive dual-mode refrigerated container

表1 冷藏集装箱箱体结构

Table 1 Structure of refrigerated container m

位置	ĸ	宽	高
车厢	13.716	2.550	2.492
	13.420	2.350	2.486
蓄冷板	5.900	0.201	0.115
箱体厚度	0.090	0.100	0.125
蒸发器	1.000	0.300	0.300

表2 冷藏集装箱设备参数

Table 2 Equipment parameters of refrigerated container

	-	-	
名称	指标	单位	数值
保温材料 PU	密度	kg/m ³	45
	导热系数	$W/(m \cdot K)$	0.024
	比热	$J/(kg \cdot K)$	1 380
相变材料 RT-4	融化温度	K	269
	相变焓	kJ/kg	180

温度变化,并反馈给信息系统,新鲜货物冷藏温度一般 <10℃,当箱内温度>10℃时位于箱体前端的制冷机组 开启,切换为主动释冷模式,箱体前端制冷机组用来制备 通过纤维风管送入箱体的冷量(以下均称为主动模式)。







1.3 主动释冷方式送风量的确定

车载制冷设备用于主动释冷方式,其型号与主动释 冷方式送风量密切相关,主动释冷方式送风量的大小取 决于此过程箱体内部负荷。箱体内部负荷主要包括围护 结构传热形成的冷负荷、太阳辐射热形成的冷负荷、货物 呼吸热形成的冷负荷^[23]。

围护结构传热形成的冷负荷: $Q = 3.6KF (t_w - t_n) \tau$, (1)式中: K——传热系数,W/(m².℃); F----车厢外表面面积,m²; tw、tn——车厢外环境温度及车厢控温温度,℃; τ ——主动释冷方式开启时间.h。 太阳辐射热形成的冷负荷: $Q = 3.6\gamma FK(t_{\rm s}-t_{\rm n})\tau_{\rm s},$ (2)式中: y——车体被太阳照射面积占总面积的百分比(一般 取 γ=50%),%; ts----车厢被太阳照射的面的平均温度(一般取ts=tn+ 12)**.**℃: τ_{s} ——车体被太阳照射的时间,h。 食品呼吸热形成的冷负荷: $Q = m_{\rm f} q_{\rm f} \tau$, (3) 式中: m_f——运输食品的质量,kg; q_f ——食品的呼吸热,kJ/(h·kg)。 纤维风管的总风量:

$$G = \frac{Q}{\rho(i_{\rm n} - i_{\rm o})},\tag{4}$$

G——纤维风管的总风量.m³/s:

Q---主动释冷模式总冷负荷,kW;

 ρ ——空气的密度,kg/m³;

in——车厢内状态点焓值,kJ/kg;

i。——送风状态点焓值,kJ/kg。

经计算,送风量为200 m³/h,纤维风管管径为0.2 m, 由于研究以运输苹果为例,实际货物种类不同,呼吸热不 同,故纤维风管管径应>0.2 m,选择纤维风管为0.4 m,制 冷设备型号为KX-150A,其送风量为550 m³/h。

2 仿真模拟

2.1 仿真模型的建立

利用 ICEM 软件建立集装箱数学模型,采用混合非结构化网格分别对蓄冷板和风管进行划分,且局部加密处理,共划分90万,114万,214万3种不同数量网格,经网格无关性验证后,选择114万网格进行模拟计算。

为方便模拟计算,对模型作如下假设:

(1)车厢内空气为辐射透明介质、低速不可压缩牛顿 流体,采用 Boussinesq 假设,忽略压强变化对空气密度的 影响,只考虑温度变化引起的空气密度变化^[24]。

(2) 只考虑车厢内空气的导热和对流换热,忽略车厢 内部辐射传热的影响。

(3) 忽略车厢内货物水分蒸发引起的潜热影响。

(4) 蓄冷板释冷为有限空间自然对流换热过程。

蓄冷板布置于箱体顶部,受到传热温差及重力的影响产生自然对流现象,使用 R_a 判断流动的强弱^[25]。当 $R_a < 10^8$ 时,流动处于层流状态;当 $10^8 < R_a < 10^{10}$ 时,流体流动处于层流状态;当 $R_a > 10^{10}$ 时,流动处于湍流状态。经计算[见式(5)],流体流动状态处于湍流状态。

$$R_{a} = \frac{g\beta L^{3} \Delta T \rho}{\alpha \mu} = 6.575 \times 10^{11} > 10^{10},$$
(5)
式中:

g — 重力加速度,m/s²; β — 热膨胀系数,K⁻¹; ΔT — 传热温差,K; l — 封闭腔的特征长度,m; ρ — 空气密度,kg/m³; α — 热扩散系数,m²/s;

μ——动力黏度,Pa·s。

因此,蓄冷板释冷为湍流状态。

2.2 边界条件的确定

合适的边界条件对数值模拟起重要作用,主被动双 模式冷藏集装箱边界条件设置为: (1) 人口:纤维管孔口出流速度为7.14 m/s,纤维管渗透速度为0.008 m/s,送风温度为273 K。

(2) 出口:设为自由出流(outflow)。

(3) 壁面: 经表面换热系数公式^[20]a = 9 + 3.5v^{0.66}_p 计 算,车厢左右壁面传热系数设为 0.26 W/(m²·K),上下壁面 为 0.17 W/(m²·K),前后壁面为 0.23 W/(m²·K),平均值为 0.22 W/(m²·K),箱体内部初始温度为 303 K,外界环境温度为 303 K,只考虑围护结构传热的影响,平均热流为 5.5 W/m²。

(4)对于被动释冷过程,选择标准 k-ε 模型,开启融化 与凝固模型,压力速度耦合 simple 算法和一阶迎风格式



的控制方程,压力项选择 PRESTO;对于主动释冷过程,选择带旋流修正的 Realizable *k*-*ɛ*。

2.3 模型验证

在恒温实验室内进行试验测试,设置环境温度为 30℃,利用试验数据对被动模式模型进行有效性验证,由 于现有箱体未安装纤维风管,采用王晓理^[26]提出的射流 轴心速度衰减公式进行被动释冷模式模型有效性验证。 由图4可知,实测值和理论值与模拟值变化规律一致,各 测点的温度和无因次速度误差<10%,表明建立的数值模 型有效。



图4 模型有效性验证

Figure 4 Model validation

- 3 结果与分析
- 3.1 速度场

被动释冷过程利用蓄冷板进行释冷,X=1.3 m 截面速 度分布如图 5 所示,该速度场呈现前后对称的"旋涡状"分 布,冷气流受重力作用在蓄冷板中后段位置下沉到箱体 底部位置后形成贴附射流并吸收箱体底部热量,之后受 到浮升力的作用上升进而形成局部浮力旋涡,箱内速度 为0.02~0.18 m/s,靠近蓄冷板处速度最大为0.18 m/s。

主动释冷过程中,X=1.3 m、Y=3.5 m 两截面速度分布 规律如图6所示。由图6可知,出流孔口位置风速较大为 2 m/s,沿管道长度方向呈倒梯形分布;宽度方向上,射流 呈扇形分布;起始段速度衰减较快,充分发展段速度衰减 缓慢,射流自小孔喷射出风受蓄冷板牵引诱导部分风流 沿蓄冷板贴附流动,射流在冷板数量少的一侧发生偏斜, 撞击箱体底面后向两侧扩散,受箱体宽度的限制形成沿 箱体壁面运动的偏转流,回流区速度为0.2~0.8 m/s。

3.2 温度场

被动释冷方式下,X=1.3 m位置温度分布规律如图7 所示,各时刻温度分布规律基本相同,整体区域内,靠近 冷板底部受益于冷气流的影响温度最低,壁面处温度最 高,箱内空气温度及冷板温度随时间逐渐增加,释冷30h



图5 被动释冷方式速度分布云图

Figure 5 Passive cooling mode velocity distribution nephogram





时,壁面处温度为277.2 K,靠近冷板底部箱内最低温度为 272.2 K,箱内最高温度为273.8 K,其余位置处温度均处 于 272.2~273.8 K,区域温差为 1.6 ℃,冷板温度为 269.1 K;释冷50 h时,壁面处温度为278.7 K,靠近冷板底 部箱内最低温度为 273.5 K,箱内最高温度为 274.9 K,其 余位置处温度均处于 273.5~274.9 K,区域温差为 1.4 ℃, 冷板温度为 269.6 K;箱内空气温度增量为 1.1~1.3 ℃,冷 板温度增量为 0.5 ℃,箱内空气温度增加量大于冷板温 度;主要受外壁面传热的影响,传入的热量大于蓄冷板融 化释放的冷量。Z=1.146 m位置温度变化规律如图 8 所 示。由图 8 可知,箱内温度随时间逐渐增加,均呈两侧温 度高中间温度低的变化趋势,受冷气流下沉的影响,X= 4~9 m位置处箱内温度最低,壁面处温度最高,但箱内各 处温度差异相对较小。







图 8 不同释冷时刻在 Z=1.146 m位置的温度分布曲线 Figure 8 Temperature distribution curves at Z=1.146 m at different cooling time

根据送风方式的不同,主动释冷方式可分为渗透送风和孔口喷射送风两个阶段。取 Y=3.5 m位置的箱内温度分布进行分析,如图9所示,降温30 s时渗透送风起主导作用,在管道周围形成边界层,温度场以半圆风管为中心呈"波状"分布,向冷板数量少的一侧壁面偏斜,靠近风管处最低温度为273.0 K,壁面处最高温度为276.6 K,箱体底部最高温度为275.8 K,其余位置温度均处于273.0~275.8 K,冷板最高温度为283.0 K;降温1h时以喷射送风为主,箱体内部温度及冷板温度均较低,壁面处温度为275.9 K,箱内空气温度为274.0~274.3 K,冷板温度为

280 K;降温10 h时,箱内空气温度为273.5~273.8 K,基本 达到稳定,冷板温度为275.5 K,降温过程中,蓄冷板温度 始终高于箱体内部。





3.3 保冷效果

以运输10d为例,对单独利用被动释冷模式及主被 动双模式冷藏集装箱箱内温度变化进行分析,如图10所 示,单独利用被动释冷模式箱内温度缓慢增至283K,之 后快速增至303K;当主被动双模式中被动释冷模式开启 后,箱内温度逐渐增加,经107h后,箱内温度增加到 283K,控制系统将制冷模式切换为主动释冷模式,箱内 温度快速降低至273K;与单独利用被动释冷模式相比, 该箱体可保证283K以下新鲜货物的长时低温冷藏运输, 能够有效缓解箱内温度超过食品冷藏温度而引起的货物 损耗。





Figure 10 Comparison of temperature variation between passive cooling mode and active and passive dual mode

4 结论

研究设计了一种集制冷机组、纤维送风管道、相变蓄 冷板于一体化的冷藏集装箱。采用主被动双模式运行, 被动制冷模式(蓄冷板)先运行,主动制冷方式(纤维风 管)后运行,控温区间范围为-1~10℃;主被动双模式箱 内速度场分布均匀,且不存在高气流区;被动制冷模式箱 内温度梯度略大,但不存在局部高温区域,其温度区间仍 能满足大多数新鲜货物冷藏运输的需求。研究仅考虑了 环境温度恒定条件下箱内环境分布特性,尚未考虑环境 温度变化对箱内环境分布特性的影响,后续可进一步 完善。

参考文献

[1] 秦玉鸣. 中国冷链物流发展报告: 2021[R]. 北京: 中国财富出版社有限公司, 2021: 356-408.

QIN Y M. China cold chain logistics development report: 2021 [R].Beijing: China Fortune Publishing Company Limited, 2022: 356-408.

- [2] TAHER M A B, KOUSKSOU T, ZERAOULI Y, et al. Thermal performance investigation of door opening and closing processes in a refrigerated truck equipped with different phase change materials[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103097.
- [3] 何伟.果蔬气调保鲜技术及其在冷链物流中的应用研究进展
 [J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 228-232.
 HE W. Research progress of fruit and vegetable air conditioning preservation technology and its application in cold chain logistics[J]. Food & Machinery, 2020, 36(9): 228-232.
 [4] 李航, 董瑞. 后疫情时代基于区块链技术的食品冷链物流追
- 溯体系构建[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 134-138, 155. LI H, DONG R. Construction of food cold chain logistics traceability system based on blockchain technology in the postepidemic era[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 134-138, 155.
- [5] 梅俊,许振琨,郁慧洁,等.冷链物流中海水鱼的腐败机制及 保鲜技术研究进展[J].食品与生物技术学报,2022,41(7): 84-99.

MEI J, XU Z K, YU H J, et al. Research progress on spoilage mechanism and preservation technology of Marine fish in cold chain logistics[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(7): 84-99.

- [6] 尚夔栎, 刘升. 延迟预冷对菠菜冷链流通中营养和品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(5): 50-56. SHANG K S, LIU S. Effect of delayed precooling on nutrition and quality of spinach in cold chain circulation[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(5): 50-56.
- [7] 部海燕,杨海龙,陈杭君,等.生鲜果蔬物流及包装技术研究 与展望[J].食品与生物技术学报,2020,39(8):1-9.
 GAO H Y, YANG H L, CHEN H J, et al. Progress and prospect of logistics and preservation technology on fresh fruit and vegetables[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(8): 1-9.
- [8] 汤磊, 曾德森, 凌子夜, 等. 相变蓄冷材料及系统应用研究进展[J]. 化工进展, 2023, 42(8): 4 322-4 339.
 TANG L, ZENG D S, LING Z Y, et al. Research progress of

phase change storage materials and their system applications[J]. Chemical Industry Progress, 2023, 42(8): 4 322-4 339.

[9] 赵时,姜兆亮,丁兆磊,等.梯级送风对冷藏车厢内温度场的 影响[J].制冷学报,2020,41(5):116-123. ZHAO S, JIANG Z L, DING Z L, et al. Effect of cascade air supply on temperature field in refrigerated carriage[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(5): 116-123.

- [10] 南晓红,魏高亮,赵喜梅.纤维风管喷射渗透比对冷藏库内流场特性的影响[J].农业工程学报,2020,36(9):300-306.
 NAN X H, WEI G L, ZHAO X M. Effect of jet penetration ratio of fiber duct on flow field characteristics in cold storage
 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 300-306.
- [11] 白通通.果蔬冷藏库竖壁贴附送风模式流场特性的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2018:1-77.

BAI T T. Study on flow field characteristics of vertical wall attached air supply mode in fruit and vegetable cold storage [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018: 1-77.

- [12] 何远新,杨瑞,谢斌,等.新型铁路冷藏集装箱风道设计与温度场分析[J]. 包装工程, 2020, 41(23): 230-235.
 HE Y X, YANG R, XIE B, et al. Design and temperature field analysis of new railway refrigerated container air duct[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(23): 230-235.
- [13] 傅泽田, 王大鹏, 张国祥, 等. 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): 347-355.
 FU Z T, WANG D P, ZHANG G X, et al. Effect of refrigerated truck aquatic product stacking method on temperature field[J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 347-355.
- [14] 陈邦器, 阚安康, 华宇捷, 等. 货物堆码方式对冷藏集装箱内 温度分布的影响[J]. 低温与超导, 2017, 45(11): 63-68.
 CHEN B Q, KAN A K, HUA Y J, et al. Effect of cargo stacking method on temperature distribution in reefer container
 [J]. Low Temperature and Superconductivity, 2017, 45(11): 63-68.
- [15] 洪登科, 刘清江, 吕德宝. 果箱堆码间距对其码垛区域内气流组织的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2 377-2 381.

HONG D K, LIU Q J, LUD B. Effect of stacking spacing of fruit boxes on air distribution in their palletizing area[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(6): 2 377-2 381.

- [16] COPERTARO B, PRINCIPI P, FIORETTI R. Thermal performance analysis of pcmin refrigerated container envelopes in the italian context-numerical modeling and validation[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 102: 873-881.
- [17] MICHEL B, GLOUANNEC P, FUENTES A, et al. Experimental and numerical study of insulation walls

containing a composite layer of pu-pcm and dedicated to refrigerated vehicle[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 116: 382-391.

- [18] PRINCIPI P, FIORETTI R, COPERTARO B. Energy saving opportunities in the refrigerated transport sector through phase change materials (PCMS) application[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 923(1): 012043.
- [19] MICHELE C, CLAUDIO Z, GIULIA R, et al. Latent thermal energy storage for refrigerated trucks[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 136: 124-133.
- [20] 刘广海,李庆庭,谢如鹤,等.基于辐射制冷技术的冷链保温 箱隔热性能测试与能耗分析[J].农业工程学报,2022,38 (11):318-325.

LIU G H, LI Q T, XIE R H, et al. Thermal insulation performance test and energy consumption analysis of cold chain incubator based on radiation refrigeration technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 318-325.

- [21] TONG S, NIE B, LI Z, et al. A phase change material (PCM) based passively cooled container for integrated road-rail cold chain transportation: an experimental study[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 195: 1-11.
- [22] 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.

(上接第65页)

[15] 国家认证认可监督管理委员会.出口牛乳制品中牛免疫球 蛋白G的测定酶联免疫吸附法: SN/T 3132—2012[S].北京: 中国标准出版社, 2012: 1-3.

China National Accreditation Service for Conformity Assessment and Supervision Management Committee (CNCA). Detection of bovine immunoglobulin G in milk products of export-enzyme-linked immunosorbent assay method: SN/T 3132—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012: 1-3.

[16] 中国乳制品工业协会. 牛初乳粉: RHB 602-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 4-5.

China Dairy Industry Association. Bovine colostrum powder: RHB 602—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 4-5.

[17] 中华人民共和国农业部. 牛初乳及其制品中免疫球蛋白 IgG 的测定分光光度法: NY/T 2070—2011[S].北京: 中国农业出版社, 2011: 1-2.

Ministry of Agriculture of the PRC. Determination of immunoglobulin G in bovine colostrum and its products-spectrophotometry: NY/T 2070—2011[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2011: 1-2.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准 化管理委员会.保健食品中免疫球蛋白 IgG 的测定:GB/T 5009.194—2003[S].北京:中国标准出版社,2003:1-2. XIE R H, TANG H Y, TAO W B, et al. Optimization of cold plate layout of refrigerated truck based on no-load temperature field simulation and test[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 290-298.

- [23] TAHER M, MAHDAOUI M, KOUSKSOU T, et al. Numerical study of the aero-thermal performance for different scenarios of a refrigerated truck using urans[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 320: 1-10.
- [24] 杨国梁, 胥义, 辛岩, 等. 相变材料蓄冷式双温区城市宅配保 温箱的研制及测试[J]. 包装工程, 2018, 39(23): 43-49.
 YANG G L, XU Y, XIN Y, et al. Development and test of thermal insulation box for urban house with cold storage type of phase change material[J]. Packaging Engineering, 2018, 39 (23): 43-49.
- [25] 李锦, 谢如鹤. 冷藏车隔热厢体多目标设计优化[J]. 农业机 械学报, 2015, 46(1): 224-230.

LI J, XIE R H. Multi-objective design optimization of insulated car body of refrigerated truck[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 224-230.

[26] 王晓理.纤维空气分布系统气流组织特性及设计方法[D].西安建筑科技大学,2015:1-126.

WANG X L. Air distribution characteristics and design method of fiber air distribution system[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015: 1-126.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC, Standardization Administration of China. Determination of immunoglobulin in health foods: GB/ T 5009.194—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003: 1-2.

[19]上海市食品学会.乳及乳制品中免疫球蛋白G的测定(高效液相色谱法):T/SSFS 0002-2021[S].上海:上海市食品学会,2021:1-5.

Shanghai Society of Food Science. Determination of IgG in milk and dairy products-liquid chromatography method: T/SSFS 0002—2021[S]. Shanghai: Shanghai Society of Food Science, 2021: 1-5.

- [20] 艾正文, 徐致远, 叶景锦. 动态高压处理对牛乳中生物活性物质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(7): 210-222.
 AI Z W, XU Z Y, YE J J. Effects of dynamic highpressure processing on bioactive components of milk[J]. Food & Machinery, 2023, 39(7): 210-222.
- [21] 全国统计方法应用标准化技术委员会.统计分布数值表 t 分布: GB/T 4086.3—1983[S].北京:中国标准出版社, 1983:3.

National Technical Committee on Standardization of Statistical Method Application. Statistical distribution values: *t* distribution: GB/T 4086.3—1983[S]. Beijing: Standards Press of China, 1983: 3.