

移动式冷库性能及其冷却均匀性分析

朱鉴宇¹, 盛伟^{1,2*}, 陈金龙⁴, 司春强³, 麦尔祖克江², 郑海坤¹

(1. 河南理工大学机械与动力工程学院, 焦作 454000; 2. 哈密豫新能源产业研究院, 哈密 839000; 3. 华商国际工程有限公司, 北京 100069; 4. 新疆天建冷链科技有限公司, 哈密 839000)

摘要: 针对果蔬冷链运输过程中采摘后的“最先一公里”的保鲜问题, 该研究开发了一种移动式冷库。该设备用于田间果蔬预冷以及冷藏, 以消除果蔬采摘后的田间热和呼吸热。对该设备冷库库板的导热热阻、机组制冷系数以及冷库内部的冷却均匀性进行了性能试验研究, 并采用温度异质性系数和温度变异系数用以评价冷库内部的冷却均匀性。结果表明, 冷库板的导热热阻为 $3.98 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, 制冷一体机的制冷系数为 2.07, 具有较高的导热热阻以及制冷系数, 有利于设备的节能运行; 设备运行过程中冷库门侧左上角测点处具有较低的温度异质性系数为 0.08%, 制冷机组侧右上角测点处具有较高的温度异质性系数为 0.48%, 冷库整体的温度变异系数为 0.034%, 不论是温度异质性系数还是温度变异系数均低于 0.5%, 可以认为该冷库具有较高的冷却均匀性, 将有利于降低果蔬预冷过程的损腐率。

关键词: 温度; 均匀性; 制冷性能; 移动式冷库; 温度异质性系数; 温度变异系数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302150

中图分类号: TS255.3, U295.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)10-0257-07

朱鉴宇, 盛伟, 陈金龙, 等. 移动式冷库性能及其冷却均匀性分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 257-263.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302150 <http://www.tcsae.org>

ZHU Jianyu, SHENG Wei, CHEN Jinlong, et al. Analysis of the performance and cooling uniformity of mobile cold storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(10): 257-263. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302150 <http://www.tcsae.org>

0 引言

水果和蔬菜是饮食的重要组成部分, 为人们的健康提供必要的营养物质、植物营养素和纤维。据国家统计局数据, 自 2012 年以来中国果蔬农产品产量呈逐年递增趋势, 截止 2021 年底, 水果及蔬菜产量分别达到 29 970.2 万 t 和 77 548.78 万 t, 较 2012 年分别提高了 35.66% 和 28.54%^[1]。然而果蔬收获后仍然存活, 并具有生命体征, 生物实体的呼吸、蒸发、乙烯释放和其他传播等重要过程持续不断地消耗其有机物质(如糖和淀粉), 从而降低新鲜农产品的质量(如营养成分、功能成分、硬度), 限制其货架寿命^[2-4]。在果蔬产品供应链中采后损失在总损失中占到了相当大的比例, 高达 13%~38%^[5]。对于新鲜的农产品, 温度是影响其损腐率及贮藏寿命的重要参数^[6-8]。因此, 在整个供应链中, 通过冷却和保持最佳产品温度快速消除收获后的田间热量至关重要^[9-12]。

预冷的主要目的是在收获、采摘后迅速去除新鲜农产品的田间热量, 这一步骤减缓了农产品采摘后的物理化学活动, 并将感官特性和营养物质的破坏降至最

低^[13-16]。研究表明, 在果蔬冷链运输过程中, 经过预冷处理的果蔬损失率可以从 25%~30% 降低至 5%~10%^[17]。因此, 对预冷过程进行系统的研究, 优化预冷过程及预冷设备, 是提高冷链物流的经济效益的有效途径。

移动式冷库是指采用一体式制冷装置对移动式保温舱体进行降温的一种冷藏设备, 主要用于解决果蔬采后的最先一公里问题。移动式冷库较普通冷库具有建设周期短、灵活性高、可用于田间地头快速解决果蔬采后田间热的优点^[18-19], 同时冷库预冷作为传统预冷方式, 其具有适用范围广、成本低廉的优点^[20]。在国内有少部分学者在移动式预冷设备开发^[19]、冷库预冷冷却性能^[21-22]以及应用^[23-26]上进行研究, 然而这部分研究缺少对移动式预冷设备的性能以及运行过程中温度均匀性的研究。

本文针对果蔬采后最先一公里问题, 结合制冷技术以及保温集装箱技术, 提出和开发了一种移动式冷库, 并对其进行了性能研究试验。并以冷库的导热热阻以及制冷系数对设备的性能进行了评估, 同时采用温度变异系数和温度异质性系数对运行过程中的冷却均匀性进行定量分析, 拟为解决果蔬采后最先一公里问题提供一定的解决方案。

1 移动式冷库开发

1.1 结构设计

冷库的整体结构是决定其移动性能的重要指标, 移动式冷库的结构如图 1 所示, 移动式冷库整体由制冷一体机以及冷库主体结构组成, 其具有以下几点特点:

收稿日期: 2023-02-24 修订日期: 2023-03-22

基金项目: 自治区重点专项课题(2022394591); 河南援疆资金; 哈密市科技计划支持项目; 新疆维吾尔自治区人才专项课题

作者简介: 朱鉴宇, 研究方向为制冷空调理论与技术。

Email: 18060682270@163.com。

※通信作者: 盛伟, 教授, 研究方向为低温相变传热、相变及吸附热力学、制冷及低温技术及其应用。Email: weisean@163.com。

1) 相较于传统固定式冷库, 本设备冷库主体结构采用集装箱框架作为骨骼构件, 使得其建设周期短, 结构紧凑, 稳定性好。可由车载运输至田间地头对采后果蔬进行预冷;

2) 相较于冷藏箱, 本设备采用制冷一体机作为制冷设备, 结构紧凑, 安装、维修简单, 且置于田间地头时重要部件不易被杂物损伤。在设计初期针对果蔬预冷增大了设备的设计余量, 因此果蔬预冷周期相对较短, 损腐率低;

3) 冷风机安装在冷库内侧壁面天花板处, 且出风口设置有导流格栅, 使得设备运行过程中整体温度变异系数较低, 具有较高的冷却均匀性。

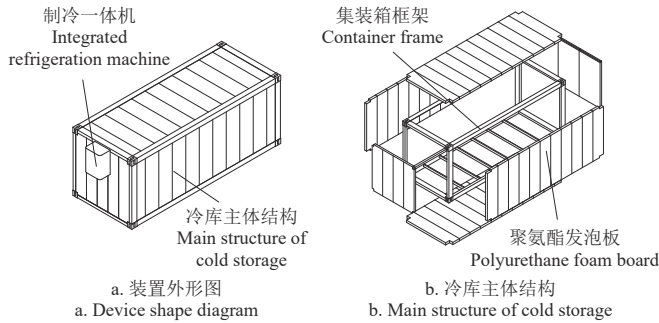


图 1 移动式冷库装置图

Fig.1 Schematic diagram of the mobile cold storage

1.2 循环参数计算

设备主要针对 30 m³ 葡萄预冷设计, 按照 GB 50 072-2021《冷库设计规范》进行热力计算, 并选用聚氨酯发泡板作为冷库板。依据葡萄冷藏最佳温度 0℃, 设备采用 R404A 制冷剂, 蒸发温度设定为 0℃, 过热度为 5℃; 冷凝温度设定为 35℃, 过冷度为 5℃。将上述设计工况代入制冷剂物性参数软件 Coolpack 绘制压焓图, 并由此查得各点的比焓分别为: 蒸发器出口比焓 $h_1 = 372.825$ kJ/kg, 冷凝器进口比焓 $h_2 = 397.946$ kJ/kg, 蒸发器进口比焓 $h_4 = 245.624$ kJ/kg。

以常规高性能压缩机等熵效率^[27]作为设计工况下压缩机的等熵效率, 其值为 0.8, 将其代入到式 (1) 计算其设计工况下的理论制冷系数。

$$\varepsilon_d = \eta_d \frac{q_{de}}{w_d} \quad (1)$$

式中 ε_d 为设计工况下的理论制冷系数; η_d 为等熵效率; q_{de} 为设计工况下的理论制冷量, kJ/kg; w_d 为设计工况下的理论功率, kJ/kg。

$$q_{de} = h_1 - h_4 \quad (2)$$

$$w_d = h_2 - h_1 \quad (3)$$

$$q_{dc} = h_2 - h_4 \quad (4)$$

式中 q_{dc} 为设计工况下的理论冷凝热负荷 (kJ/kg)。

将 h_1 、 h_2 、 h_4 分别代入式 (1)~式 (4), 可求得设计工况下的理论制冷系数为 5.06, 理论制冷量为 127.20 kJ/kg, 理论功率为 25.12 kJ/kg, 理论冷凝热负荷为 152.322 kJ/kg。

由于本文设备主要针对果蔬预冷设计, 因此在设备选型时适当放大了热负荷以减少预冷时间。通过放大所求的冷库热负荷 (即制冷量 $Q_{de} = 10.15$ kW) 并结合设计工况依据式 (1) 求得压缩机功率为 1.6 kW, 故选取压缩机型号为 NTZ068A4 LR1A。将放大后的冷库热负荷 (制冷量) 代入式 (5)~式 (8), 求得蒸发器以及冷凝器所需换热面积分别为 25.36 和 30.39 m², 故选取换热面积为 25 m², 风量为 2 670 m³/h 的冷风机和换热面积为 30 m² 的冷凝器。

$$A_{dc} = \frac{Q_{dc}}{K_{dc}\Delta t} \quad (5)$$

$$A_{de} = \frac{Q_{de}}{K_{de}\Delta t} \quad (6)$$

$$Q_{dc} = q_{dc} \cdot q_g \quad (7)$$

$$q_g = \frac{Q_{de}}{q_{de}} \quad (8)$$

式中 A_{dc} 为设计工况下的冷凝器换热面积, m²; Q_{dc} 为设计工况下的冷凝器热负荷, kW; K_{dc} 为设计工况下的冷凝器传热系数, 取 40 W/(m²·K); Δt 为换热温差, 取 10℃; q_g 为制冷剂质量流量, kg/s; A_{de} 为设计工况下的蒸发器换热面积, m²; Q_{de} 为放大后设计工况下的冷库热负荷, kW; K_{de} 为设计工况下的蒸发器传热系数, 取 40 W/(m²·K)。

1.3 试验装置及方法

1.3.1 试验装置

移动式冷库试验装置如图 1a 所示, 设备主要由移动式冷库主体结构以及制冷一体机组成。其中制冷一体机 (如图 2) 由压缩机、冷凝器、散热风机、储液器、干燥过滤器、四通阀、电子膨胀阀以及冷风机组成; 冷库主体结构 (如图 1b) 由集装箱框架、聚氨酯发泡板组成。主要试验装置和仪表型号及参数如表 1 所示。

本文试验于 2022 年 3 月 30 日—4 月 2 日在新疆哈密某地区进行, 试验过程当地白天温度为 5~17℃, 夜间温度为 1~8℃。

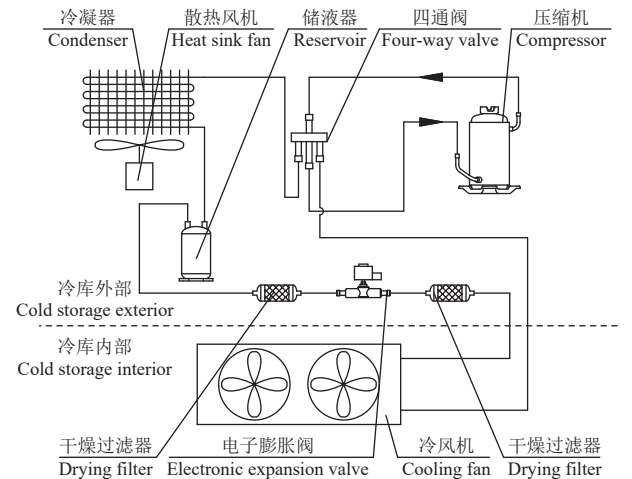


图 2 制冷一体机系统原理图

Fig.2 Principle diagram of the integrated refrigeration machine

表 1 主要试验装置和仪器型号与参数
Table 1 Models and parameters of main test equipments and instruments

装置及仪器 Devices and equipments	型号 Model	性能参数 Performance parameters
移动式冷库主体结构 The main structure of mobile cold storage	—	箱体外形尺寸： 6 058 mm×2 435 mm×2 550 mm 箱体内部尺寸： 5 880 mm×2 115 mm×2 140 mm
压缩机 Compressor	NTZ068A4 LR1A	运转功率：1.873 kW
冷凝器 Condenser	—	—
冷风机 Cooling fan	—	功率：135 W，风量：2 670 m ³ /h
热电偶 Thermocouple	TT-T-24-SLE	温度范围：-267~150 °C
数据采集仪 Data acquisition instrument	GM10	60 通道/s
风速仪 Anemometer	Fluke	量程：0.20~20 m/s，精度：±0.01 m/s-5% 测量值
加热炉 Heater	—	功率：0.853 5 kW
轴流风机 Axial fan	—	功率：380W，风量：57.55 m ³ /h

1. 3. 2 试验方法

(1) 移动式冷库传热系数检测

试验依据标准 GB/T 30 103.3-2013 《冷库热工性能试验方法 第 3 部分：围护结构热流量检测》采用热平衡法进行传热系数测量。试验测点分布如图 3a 所示，试验过程中制冷一体机始终处于停机状态，为了使冷库内外温差保持在 20 °C 以上，在冷库底面几何中心处布置加热炉作为热源使用，轴流式风机则布置于加热炉同一轴线上用于加强冷库内部空气循环，加速升温；同时在冷库内外壁面距几何中心 100 mm 处设置温度测点实时监测冷库内部及外部温度变化情况，其中测点 t_a 、 t_b 、 t_c 、 t_d 、 t_e 、 t_f 设置于冷库内部，测点 t'_a 、 t'_b 、 t'_c 、 t'_d 、 t'_e 、 t'_f 设置于冷库外部。试验时长设置为 24 h（3 月 30 日 10:25~3 月 31 日 10:25），数据采集仪每 5 s 记录一次。

(2) 移动式冷库温度场检测

移动式冷库温度场检测试验测点分布如图 3b 所示，试验依据标准 GB/T 30 103.1-2013 《冷库热工性能试验方法 第 1 部分：温度和湿度检测》进行测试。试验过程中制冷一体机处于正常运行状态，由于当地天气原因，为保持库体内外温差在 20 °C 以上将库温设定为-20 °C，并将除霜周期设置为 4 h；同时在冷库底面几何中心处设置有加热炉，其目的是当制冷一体机检测到库温降至-20 °C 时将会处于待机状态，此时若采用自然升温将会使得测试间隔较长，因此设置加热炉辅助升温。

由于冷库库体长宽高较短，冷风机安装于制冷机组侧壁面天花板处，此时风机射流将在 Coanda 效应的作用下贴附于冷库上壁面流动最终撞击冷库门侧壁面扩散回流。这将会导致冷库门侧壁面处温度显著低于制冷机组侧壁面，而冷库几何中心点处侧测点则接近整体平均温度，且试验为空库测试，冷库整体温差较小。因此在温度较高区域距离箱体顶角三面 100 mm 处布置有 1、2、5、

6 号测点，在温度中等区域距离箱体顶角三面 100 mm 处布置有 3、4、7、8 号测点，而温度较低区域即冷库几何中心处布置有 9 号测点，以此反映冷库的温度场以及冷却均匀性。在冷风机的回风口以及出风口处设置有热电偶监测进风以及出风温度并计算冷风机制冷量。试验时长设置为 12 h（4 月 1 日 22:00—4 月 2 日 10:00），数据采集仪每 5 s 记录一次。

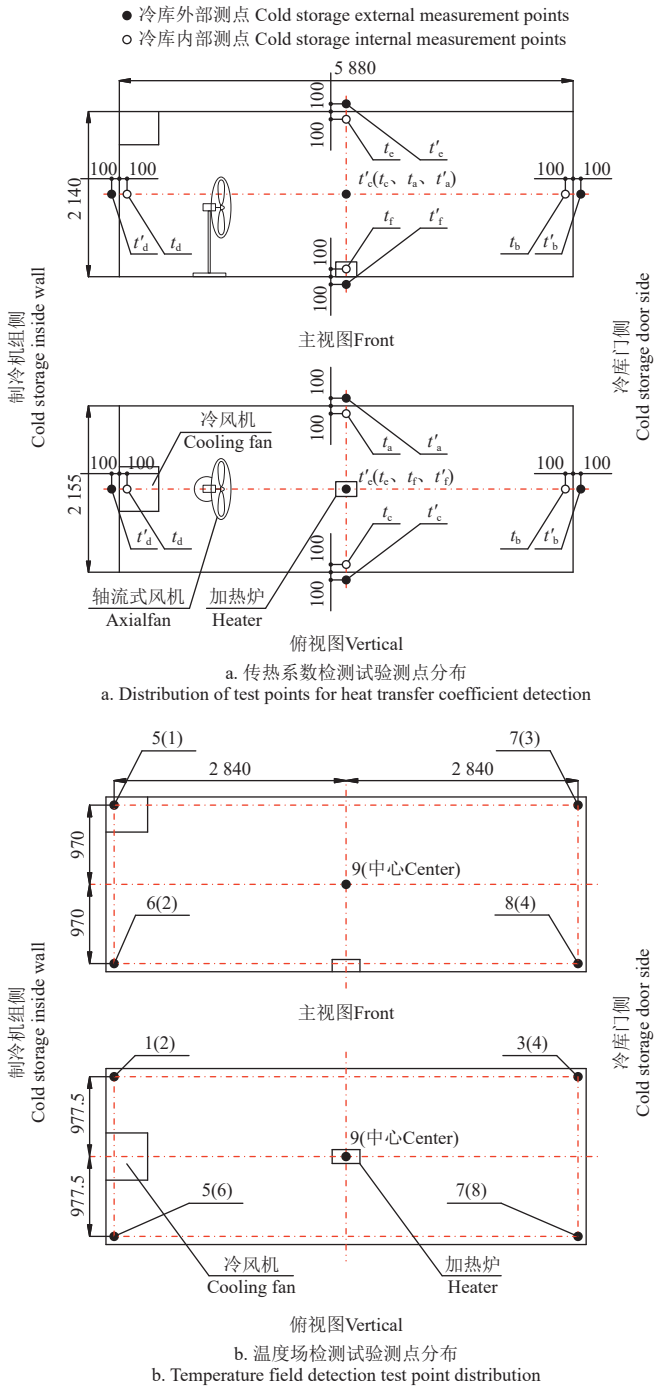


图 3 移动式冷库试验测点分布
Fig.3 Mobile cold storage test point distribution

1. 4 移动式冷库的主要性能指标

(1) 移动式冷库库板的热阻

移动式冷库库板的热阻 R 是反映冷库保温性能的重要指标，定义为试验过程中由冷库传热面积以及冷库内

外温差与其内部热负荷的比值^[27]。

$$R = \frac{A(T_{a1} - T_{a2})}{Q} \quad (9)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (10)$$

$$A = \sqrt{A_1 \cdot A_2} \quad (11)$$

式中 R 为移动式冷库库板的热阻, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$; Q 为试验过程中冷库内部设置的热负荷, W ; A 为传热面积, m^2 ; T_{a1} 库内平均温度, $^\circ\text{C}$; T_{a2} 库外平均温度, $^\circ\text{C}$; Q_1 为加热器功率, W ; Q_2 为轴流风机功率, W ; A_1 为冷库外表面积, m^2 ; A_2 为冷库内表面积, m^2 。

(2) 制冷一体机的制冷系数

制冷一体机的制冷系数 ε 是评价制冷一体机的性能的参数, 定义为制冷一体机的制冷量与其消耗功率的比值^[28]。

$$\varepsilon = \frac{Q_e}{W} \quad (12)$$

$$Q_e = \frac{q_v \rho (H_2 - H_1)}{3600} \quad (13)$$

式中 Q_e 为制冷一体机的制冷量 (其计算式如式 (13) 所示), kW ; W 为制冷一体机消耗的功率, kW ; q_v 为冷风机风量, m^3/h ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; H_1 以及 H_2 分别为冷风机出风口以及回风口空气的焓值, kJ/kg 。

(3) 移动式冷库温度场均匀性

温度异质性系数 (C_{HT})^[29] 以及温度变异系数 (C_{VT})^[30] 可以用于评价一组数据偏离平均值的程度, 且其可以忽略不同时刻平均温度不同带来的影响。温度异质性系数以及温度变异系数越小, 冷库内部温度场分布越均匀。因此本文采用 C_{HT} 以及 C_{VT} 分别评估冷库局部温度均匀性以及整体温度均匀性。

$$C_{HT} = \frac{\sqrt{(T_i - \bar{T})^2}}{\bar{T}} \times 100\% \quad (14)$$

式中 T_i 表示该点处的温度, $^\circ\text{C}$; $\bar{T}$ 表示该冷库温度的平均值, $^\circ\text{C}$ 。

$$C_{VT} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}}{\bar{T}} \times 100\% \quad (15)$$

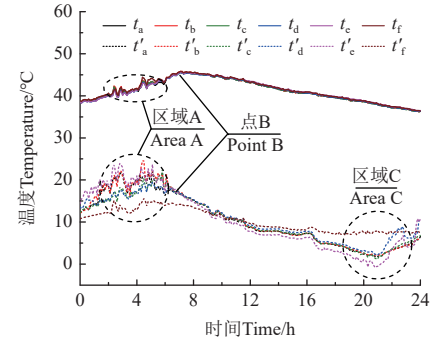
式中 n 为测点数量。

2 结果与分析

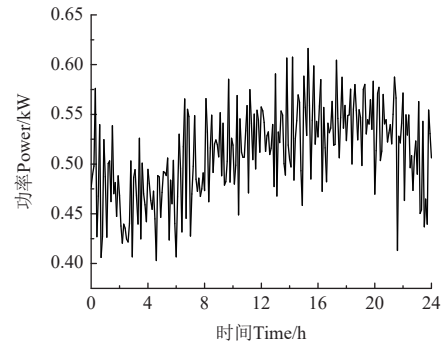
2.1 热阻检测试验结果分析

试验过程中各个测点的温度变化情况如图 4 所示。从图 4a 中可以观察到, 位于冷库内部的测点 $t_a \sim t_f$ 温度曲线基本一致, 而位于冷库外部的测点 $t'_a \sim t'_f$ 则存在一定偏差, 这是由于布置于冷库外部的测点受环境因素影响较大, 因此外部测点温度曲线存在偏差, 区域 A 亦是由于天气的阴晴变化导致了温度波动; 点 B (17:25 左右) 处由于时间已接近黄昏, 因此冷库内外测点温度均出

现下降趋势; 区域 C (9:00 左右) 处由于时间已至早晨, 阳光开始强烈, 冷库外部测点受到不同程度的影响, 因此此处温度曲线呈现递增趋势; 同时通过计算可以得到冷库的平均内外温差为 $T_{a1} - T_{a2} = 30.79^\circ\text{C} > 20^\circ\text{C}$, 符合国标测试要求。冷库内部热负荷变化曲线如图 4b 所示, 经过计算可得平均热负荷 $Q = 0.510 \text{ kW}$ 。将测得结果代入式 (9) 计算可得该移动式冷库库板的热阻为 $3.98 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, 热阻值较高符合使用要求, 且较高的热阻值将有效减少冷库漏热率减少能量消耗。



a. 不同测点温度变化曲线
a. Temperature curve at different measuring points



b. 冷库热负荷功率变化曲线
b. Cold storage thermal load power change curve

图 4 传热系数检测试验结果

Fig.4 Detection test results of heat transfer coefficient

2.2 温度场检测结果分析

试验过程中各个测点的温度变化情况如图 5 所示, 图中依据初始设置的 4 h 除霜周期将整体分为三个部分, 在 0~4 h, 4~8 h 区间交界处由于此时机组开始除霜, 因此温度曲线形成了两个较大的峰值; 而在各个区间内分别由两个较小的峰值, 其形成原因则是由于制冷一体机库温设置为 -20°C , 冷库内部温度降至此温度时制冷一体机停机, 此时冷库内部仅有加热炉在运行, 使得库温快速升至设备运行温度从而开始下一次降温周期。同时可以观察到初次化霜后的首次降温周期要长于第二次化霜, 这是由于初次化霜霜层化为液态水, 在降温过程中此部分液态水的凝固潜热增大了冷库内部的热负荷使得降温周期增长; 而第二次化霜后尽管增加了液态水的凝固潜热, 但已经有一部分在初次化霜后的降温周期中消除, 因此出现了初次化霜后的首次降温周期要长于第二次化霜。

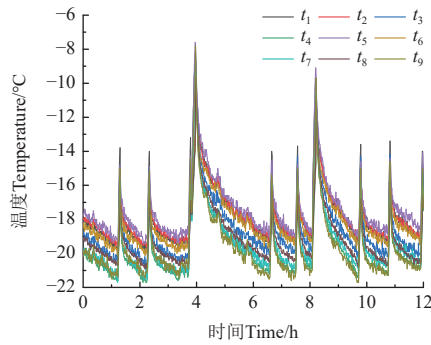


图 5 温度场检测测点温度变化曲线

Fig.5 Temperature change curve at different temperature field detection points

2.2.1 制冷一体机性能分析

冷风机出风及回风温度变化曲线如图 6a 所示, 经过计算可得回风口的平均温度为 -18.4°C , 出风口的平均温度为 -22.2°C , 通过 Coolpack 制冷剂物性软件查得其焓值分别为 $H_2 = 380.79 \text{ kJ/kg}$, $H_1 = 376.97 \text{ kJ/kg}$, 通过式 (13) 计算可得制冷量为 $Q_e = 3.87 \text{ kW}$ 。制冷一体机功率变化曲线如图 6b 所示, 经过计算可得制冷一体机的平均功率 $W = 1.873 \text{ kW}$, 将所得代入式 (12) 可得制冷一体机的 ε 值为 2.07, 设备具有较高的 ε 值, 较为节能。

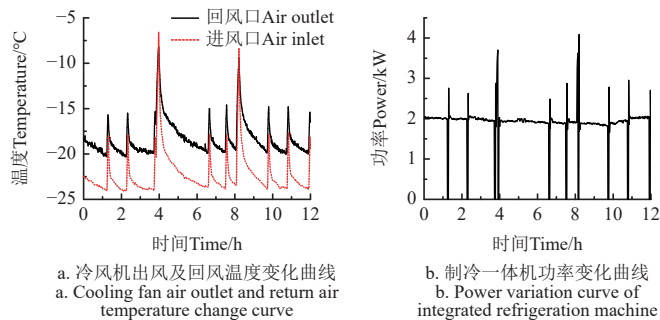


图 6 制冷一体机运行工况

Fig.6 Operating condition of integrated refrigeration machine

2.2.2 移动式冷库温度场均匀性分析

移动式冷库运行过程中的冷却均匀性变化如图 7 所示, 其中图 7a 为各个测点的 C_{HT} 随时间变化的曲线, 即移动式冷库的局部冷却均匀性, 从图中可以看出在制冷一体机停机以及除霜时由于局部温升使得平均温度升高导致各个测点处的 C_{HT} 波动较大, 但整体波动低于 1%。经过计算可以得出各个测点的平均温度异质性系数 (即 $\bar{C}_{HT}$) 均低于 0.5%, 移动式冷库的局部冷却均匀性较好。其中 t_3 处的 $\bar{C}_{HT}$ 值最低, 为 0.08%, 而 t_5 处的 $\bar{C}_{HT}$ 值最高, 为 0.48%。结合图 5 分析可知, 由于测点 3 位于冷库门侧壁面天花板附近, 此处处于冷库内部温度中等区域, 测点温度偏离整体平均温度较少, 因此此处 $\bar{C}_{HT}$ 值低, 冷却均匀性好; 由于测点 5 处于冷库内部温度较高区域, 测点温度偏离整体平均温度较高, 因此此处 $\bar{C}_{HT}$ 值高, 冷却均匀性差。图 7b 为移动式冷库整体温度变异系数 C_{VT} 随时间变化的曲线, 即移动式冷库的整体冷却均匀性, 从整体来看其变化规律与 C_{HT} 曲线相似, 通过计算可以得到 $\bar{C}_{VT} = 0.034\%$, 在 0.05% 以下, 移动式冷库的

整体冷却均匀性较好, 且较好的冷却均匀性将有效减少果蔬在预冷过程中的损腐率。

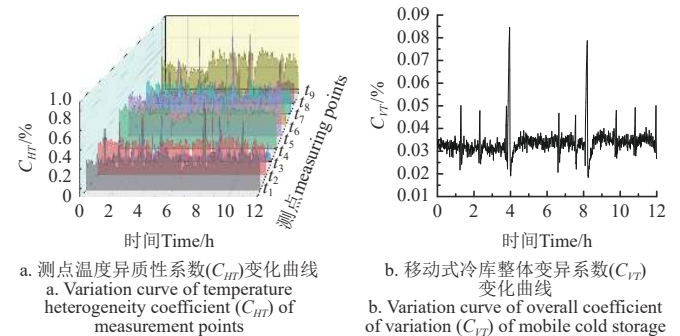


图 7 移动式冷库冷却均匀性

Fig.7 Cooling uniform of mobile cold storage

3 结 论

本文针对果蔬采后最先一公里问题, 提出和开发了一种移动式冷库, 并对其进行了性能研究试验。结果如下:

1) 在移动式冷库传热系数检测试验过程中, 冷库内外平均温差为 30.79°C 大于 20°C , 冷库内部施加的平均热负荷为 0.510 kW ; 最终通过试验和计算得到冷库库板的导热热阻为 $3.98 \text{ m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C/W}$, 较高的导热热阻将降低冷库的漏热率, 减少冷库能耗。

2) 通过试验和理论计算相结合的方式对冷库制冷一体机的性能进行了研究, 制冷一体机的制冷量为 3.87 kW , 功率为 1.873 kW , 制冷系数为 2.07, 设备具有较高的制冷系数, 能够有效减少冷库能耗。

3) 采用温度异质性系数以及温度变异系数对冷库运行过程的冷却均匀性进行了评价, 冷库运行过程中测点冷库门侧左上角测点处的冷却均匀性最好, 其平均温度异质性系数为 0.08%, 制冷机组侧右上角测点处的冷却均匀性最差, 其平均温度异质性系数为 0.48%, 但其值低于 0.5%, 依旧具有较好的冷却均匀性; 同时从整体来看, 平均温度变异系数为 0.034%, 在 0.5% 以下, 可见该移动式冷库具有较好的冷却均匀性, 在果蔬预冷过程中将会在一定程度上降低损腐率。

本文对移动式冷库的开发以及性能进行了系统性的研究。但对于移动式冷库, 其内部结构的变化将很大程度上改变冷库的冷却性能, 如冷风机安装位置及其出风参数、果蔬堆垛排列方式、果蔬包装箱结构等因素。因此在进一步的研究中将结合所开发设备对此进行更加深入的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2012 年—2021 年水果年产量 [EB/OL]. [2022-11-01]. <https://data.stats.gov.cn/easy-query.htm?cn=C01&z=0A0D0K&sj=2021>.
- [2] Han J W, Zuo M, Zhu W Y, et al. A comprehensive review of cold chain logistics for fresh agricultural products: Current status, challenges, and future trends[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 536-551.
- [3] 冯雅蓉. 预冷方式对红玛瑙樱桃果实冷藏期间真菌多样性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 214-221.

- FENG Yarong. Pre-cooling methods affect the diversity of fungal communities on red agate cherry fruit during cold storage[J]. *Food Science*, 2020, 41(11): 214-221. (in Chinese with English abstract)
- [4] 湛英敏, 王贺, 苏勤, 等. 基于 GA-BPNN 的采后蜜桃预冷效果预测模型[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(23): 264-272.
- CHEN Yingmin, WANG He, SU Qin, et al. Prediction model of post-harvest peach pre-cooling effectiveness based on GA-BPNN[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(23): 264-272. (in Chinese with English abstract)
- [5] GUSTAVSSON J, CEDERBERG C, SONESSON U, et al. Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention [R]. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2011.
- [6] 刘广海, 马平川, 李庆庭, 等. 冷链专用蓄冷托盘设计与控温运输性能测试[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(16): 295-302.
- LIU Guanghai, MA Pingchuan, LI Qingting, et al. Design of special cold chain pallet and its temperature-controlled transport performance test[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(16): 295-302. (in Chinese with English abstract)
- [7] HAN J W, RUIZ-GARCIA L, QIAN J P, et al. Food packaging: a comprehensive review and future trends[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2018, 17(4): 860-877.
- [8] 李洋, 张欣硕, 李馨男, 等. 纳米复合相变蓄冷材料的制备及蓄冷特性分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(23): 284-292.
- LI Yang, ZHANG Xinshuo, LI Xinnan, et al. Preparation of nanocomposite phase change cold storage materials and analysis of cold storage characteristics[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(23): 284-292. (in Chinese with English abstract)
- [9] DEFRAEYE T, CRONJÉ P, BERRY T, et al. Towards integrated performance evaluation of future packaging for fresh produce in the cold chain[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 44(2): 201-225.
- [10] ELANSARI A M, FENTON D L, CALLAHAN C W. Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities [M]. Woodhead Publishing, 2019: 161-207.
- [11] 张鹏, 袁兴铃, 薛友林, 等. 精准温度控制对枸杞鲜果贮藏品质和香气成分的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(18): 322-330.
- ZHANG Peng, YUAN Xingling, XUE Youlin, et al. Effects of precise temperature control on the storage quality and aroma components of fresh goji fruit[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(18): 322-330. (in Chinese with English abstract)
- [12] 杨涛, 郜海燕, 张润光, 等. 加压氮气对草莓采后生理及贮藏品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(15): 282-290.
- YANG Tao, GAO Haiyan, ZHANG Runguang, et al. Effects of pressurized nitrogen on strawberry postharvest physiology and storage quality[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(15): 282-290. (in Chinese with English abstract)
- [13] KADER A A. Postharvest Technology of Horticultural Crops [M]. Oakland: University of California (Agriculture and Natural Resources), 2002.
- [14] 季丽丽, 梁芸志, 陈存坤, 等. 不同温度差压预冷及其对西葫芦冷藏效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 287-293.
- JI Lili, LIANG Yunzhi, CHEN Cunkun, et al. Forced-air pre-cooling of different temperatures and its effects on cold storage of Cucurbita pepo[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(1): 287-293. (in Chinese with English abstract)
- [15] 吕恩利, 陈明林, 刘妍华, 等. 喷淋预冷工艺参数对荔枝降温特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(24): 292-298.
- LYU Enli, CHEN Minglin, LIU Yanhua, et al. Effects of different spray precooling parameters on cooling characteristics of litchi[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(24): 292-298. (in Chinese with English abstract)
- [16] 鲁玲, 康宁波, 刘贵珊, 等. 真空预冷结合微孔膜包装对鲜枸杞贮藏品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 245-252.
- LU Ling, KANG Ningbo, LIU Guishan, et al. Storage quality of fresh Lycium barbarum by vacuum precooling and microporous membrane packaging[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(10): 245-252. (in Chinese with English abstract)
- [17] MUKAMA M, AMBAW A, BERRY T M, et al. Energy usage of forced air precooling of pomegranate fruit inside ventilated cartons[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 215: 126-133.
- [18] 韦晓洁, 万兴龙, 李雪. 基于农产品“最先一公里”的移动式产地预冷模式[J]. *全国流通经济*, 2022(2): 28-30.
- WEI Xiaojie, WAN Xinglong, LI Xue. A mobile pre-cooling mode in origin based on "the first kilometer" of agricultural products[J]. *China Circulation Economy*, 2022(2): 28-30. (in Chinese with English abstract)
- [19] 朱晶玉, 谭锋, 左建冬, 等. 移动式冷库的研究与开发[J]. *冷藏技术*, 2017, 40(1): 50-53.
- ZHU Jingyu, TAN Feng, ZUO Jiandong, et al. Research and development of mobile cold storage[J]. *Journal of Refrigeration Technology*, 2017, 40(1): 50-53. (in Chinese with English abstract)
- [20] ZHAO H, LIU S, TIAN C, et al. An overview of current status of cold chain in China[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 88: 483-495.
- [21] 马志艳, 石敏. 基于 CFD 小型冷库预冷过程的数值模拟[J]. *低温与超导*, 2021, 49(7): 67-73.
- MA Zhiyan, SHI Min. Numerical simulation of precooling process of small - scale cold storage based on CFD[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2021, 49(7): 67-73. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王冠邦, 张信荣. 冷库预冷流动传热物理场分布研究[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(3): 668-675.
- WANG Guanbang, ZHANG Xinrong. Study on distribution of physical fields regarding to airflow and heat transfer of room cooling[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(3): 668-675. (in Chinese with English abstract)
- [23] 邓浩, 尹青春, 林玉钦, 等. 不同预冷方式对红毛丹贮藏品质的影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(1): 1-4.
- DENG Hao, YI Qingchun, LIN Yuqin, et al. Effect of different precooling methods on quality of rambutan[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(1): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [24] 时文林, 赵雅琦, 闫志成, 等. 不同预冷方式对甜玉米储藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(15): 218-226.
- SHI Wenlin, ZHAO Yaqi, YAN Zhicheng, et al. Effects of different precooling methods on storage quality of sweet corn[J]. *Food Science*, 2022, 43(15): 218-226. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘琼瑜, 肖波, 吴耀森, 等. 二次冷凝融霜冷库预冷荔枝

- 的降温特性研究[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(2): 7-14.
Liu Qiongyu, Xiao Bo, WU Yaosen, et al. Study on cooling characteristics of pre-cooled litchi in cold storage with secondary condensation and defrosting[J]. Storage and Process, 2023, 23(02): 7-14. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李燕, 刘贵珊, 何建国, 等. 预冷方式对长枣保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2022, 43 (23): 261-268.
LI Yan, LIU Guishan, HE Jianguo, et al. Effect of precooling treatments on postharvest preservation of 'Lingwu Long' Jujube[J]. Food Science, 2022, 43 (23): 261-268. (in Chinese with English abstract)
- [27] 尉迟斌, 卢士勋, 周祖毅. 实用制冷与空调工程手册 (第 2 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [28] 郑贤德. 制冷原理与装置 (第 2 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [29] DEHGHANNYA J, NGADI M, VIGNEAULT C. Mathematical modeling of airflow and heat transfer during forced convection cooling of produce considering various package vent areas[J]. Food Control, 2011, 22(8): 1393-1399.
- [30] 张翔, 韩佳伟, 杨信廷, 等. 不同构造冷藏车厢体的冷却性能模拟与对比[J]. 制冷学报, 2018, 39(2): 89-98.
ZHANG Xiang, HAN Jiawei, YANG Xinting, et al. Simulation and comparison of cooling performances of refrigerated vehicles with different structures[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(2): 89-98. (in Chinese with English abstract)

Analysis of the performance and cooling uniformity of mobile cold storage

ZHU Jianyu¹, SHENG Wei^{1,2*}, CHEN Jinlong⁴, SI Chunqiang³, MAIR Zukjiang², ZHENG Haikun¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Hami Yu Xin Energy Industry Research Institute Co, Hami 839000, China; 3. Huashang International Engineering Co., Ltd., Beijing 100069, China; 4. Xinjiang Tianjian Cold Chain Technology Co., Hami 839000, China)

Abstract: Fruits and vegetables still have vital signs after harvest. Their field heat and respiration of biological entities can greatly dominate the quality of fresh products for a better shelf life. This study aims to keep the fruit and vegetable fresh in the first kilometer after picking during cold chain transportation. An integrated equipment system of mobile cold storage and refrigeration was developed for the precooling and storage of fruits and vegetables in fields, in order to eliminate the field heat and respiratory heat after picking. The performance of the equipment was analyzed from three aspects: the thermal resistance of cold storage panels, the coefficient of performance of the integrated refrigeration, and the cooling uniformity inside the cold storage. Among them, the cooling uniformity was also evaluated using temperature heterogeneity and variation coefficients. Two experiments were carried out to verify the performance and cooling uniformity of mobile cold storage. The heat balance method was used to measure the thermal resistance. Notably, the integrated refrigeration machine was also shut down during the experiment. The temperature difference between the inside and outside of the cold storage was maintained by the external heater and axial fan. Temperature measurement points were arranged 100 mm away from the geometric center of the inside and outside of the cold storage. At the same time, there were eight measuring points 100 mm from three sides of the cold storage top angle inside the cold storage, one of which was arranged in the geometric center of the cold storage. As such, the temperature field distribution was measured to calculate the performance and cooling uniformity of the mobile cold storage, according to the flow and heat transfer characteristics. The results showed that the high thermal resistance of the cold storage panels is $3.98 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ and the coefficient of performance of the integrated refrigeration machine is 2.07, which were conducive to the energy-saving operation of the equipment. There was a small overall fluctuation (about 0.1%) of the temperature heterogeneity coefficient at each measurement point in the process of equipment operation. The largest overall fluctuation was lower than 1%, only when the integrated refrigeration machine was shut down and defrosted. The temperature heterogeneity coefficient was lower at the upper left corner of the cold storage door (0.08 %), and higher at the upper right corner of the refrigeration unit (0.48 %). The temperature coefficient of variation was 0.034% in the integrated refrigeration machine. Both the temperature heterogeneity and variation coefficients were lower than 0.5 %. Therefore, cold storage with high cooling uniformity can be beneficial to reduce the decay rate of fruits and vegetables in the process of pre-cooling.

Keywords: temperature; uniformity; refrigeration performance; mobile cold storage; temperature heterogeneity coefficient; temperature variability coefficient