

文章编号:0253-4339(2024)01-0145-13

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2024.01.145

基于相变技术的便携式储冷箱性能研究

张文宇 赵长颖

(上海交通大学工程热物理研究所 上海 200240)

摘要 在冷链运输末端温度失效问题普遍存在,本文基于相变技术设计了适用于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的冷链末端运输的冷能储存箱。研究了储冷箱在环境温度、真空板厚度、相变材料的种类及其与真空板相对位置等参数变量影响下箱体的温度场特性和储冷性能,并对不同位置相变材料板单独存在时的储冷性能进行分析。结果表明:储冷箱有良好的抵抗外界温度变化的能力,且装配真空板时最大有效保冷时间延长至 29.26 h,相变材料布置在真空板内侧时有效保冷时间延长 54.3%。基于实际应用温度所研究的 4 种相变材料中,相变温度为 $-21.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 2-辛酮储冷性能最佳。对不同位置的相变材料板单独分析发现,底部板对储冷箱整体的储冷效果贡献最大,其单板保冷系数为 0.454。

关键词 冷藏单元;蓄冷;相变材料;性能系数

中图分类号: TB658;TK02

文献标识码: A

Examining the Performance of Portable Cold-storage Box Based on Phase-change Technology

Zhang Wenyu Zhao Changying

(Institute of Engineering Thermophysics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract Temperature failure at the end of cold-chain transportation is common. Based on phase-change technology, a cold energy storage box suited for the end of cold-chain transport below $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ was developed. The temperature field characteristics and cold-storage performance of the cold-storage box under the influence of the environmental temperature, the thickness of the vacuum insulated panel (VIP), relative positions of the phase-change material (PCM) and VIP, type of PCM, and other parameters were examined. The study revealed that the cold-storage box had strong immunity to variations in the ambient temperature, and the maximum effective cold preservation time can be extended to 29.26 h when assembling the vacuum insulated panels. When the VIPs were placed on the outer layer of the corresponding PCM panels, the effective cold preservation period increased by 54.3%. Four types of organic PCMs with different phase-change temperatures were examined for use in cold-storage boxes. It was determined that 2-octanone with a phase transition temperature of $-21.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ had the optimal performance in terms of cold preservation time, uniformity coefficient, and power consumption. The bottom plate had the greatest impact on the overall cold-storage capacity as evidenced by its 0.454 individual plate factor.

Keywords cold storage unit; cold thermal energy storage; phase-change material; coefficient of performance

随着人们生活水平的提高和科技的发展,人们对冷链运输的需求也正逐步增加。根据一项市场调研预计,2023 年全球的冷链运输市场将达到 3 000 亿美元^[1],然而目前冷链需求的快速发展却存在很多问题。一方面,近年来世界各地的食品冷链出现了很多温度失效的问题^[2-3],该问题会使冷冻或保鲜食品出现微生物繁殖而造成食品变质,增加了食物中毒的风险^[4]。在医药冷链领域,对储存温度极为苛刻的疫苗等药品会出现产品效力消失的问题,甚至可能出现因变质而导致的副作用^[5]。因为温度失效的问题而

导致每年约有 35% 的冷冻食品在物流运输过程中损耗^[6]。另一方面,冷链的快速发展会造成能源不必要的浪费,传统冷藏车内大功率的压缩机造成额外的化石能源消耗并排放更多的温室气体,与节能降碳的理念背道而驰^[7]。

为解决冷链运输中温度失效的问题,研究人员提出了很多相关的解决方案,例如建立冷链温度实时监测系统^[8]、提高装载货品期间的温度标准^[9]、研究冷链运输新技术^[10]等。对于新技术的研究,使用相变材料作为冷链运输中冷能存储的介质是目前研究中

基金项目:国家自然科学基金(52090063)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52090063).)

收稿日期:2023-02-25;修回日期:2023-03-24;录用日期:2023-04-14

广泛采用的方案。相变材料是在自身的相变温度附近发生物相转变时释放/吸收大量潜热的一种材料^[11], 它可以利用相变潜热储存夜间用电低谷时制造的冷量^[12], 并在后续冷链运输中将冷量释放至环境和货品中以达到延长储冷时间的效果。该模式使用了夜间电网低谷时所产生的电量, 减轻了用电高峰季电网的负担, 也减少了化石能源的消耗^[13]。

目前相变材料已在电力调峰储能、建筑保温、废热回收、冷链运输^[14-17]中被广泛研究。在冷链运输领域, 现有冷链解决方案研究方向主要集中于冷藏集装箱和小型储冷箱及其储冷材料的研究^[18-21]。对于储冷箱的研究, 由于便携式储冷箱体积灵活、运输便捷, 因此更适合在冷链末端开发应用^[22]。Nie Binjian 等^[23]设计了用于运输疫苗和新鲜食品的储存箱, 储存温度范围为 2~8 °C, 研究结果表明, 使用相变材料可将便携箱维持 2~8 °C 的时间延长至 11.5 h, 且使用复合相变材料后充冷效率和整体能量效率分别提升了 6.09% 和 12.58%。Du Jianping 等^[24]对含有相变材料板的储冷箱进行了数值模拟研究, 储存箱的使用温度区间同样为 2~8 °C, 研究了相变材料的 5 种布局和 2 种保温材料对箱体的有效保冷时间的影响。研究发现, 相变材料的不同布局对箱体的保冷时间影响显著, 不同种 PCM 对保冷时间也有影响, 但并未分析具体的原因。Xu Xiaofeng 等^[25]研究了一种基于相变材料和真空板的多温区储冷运输单元, 其中 3 个存储温度区间分别为常温 (20 °C)、7~10 °C 和 -3~-1 °C, 最终保温箱的中温区和低温区可以分别在 7~9 °C 和 -2~0 °C 保持约 13 h。S. Burgess 等^[26]在 Du Jianping 等^[24]研究的基础上, 探讨了存在负载情况下相变材料在箱体内部的布局。认为最佳布局方式为 PCM 在箱体的顶部、底部和长侧面各分布 25%。在储冷时间方面, 具有高潜热的 PCM 表现更优且较低的 PCM 熔化温度会导致较高的放电效率和较低的温度不均匀性。与相变材料配合延长整体保冷时间的保温材料通常为真空板, 作为新型保温材料, 真空板因结构特殊具有超低的导热系数 [0.008 W/(m·K)], 可以应用于不同的保温场景^[27-28]。在上述研究中已有涉及真空板作为保温材料对储冷箱性能改进^[24-25]的探索, 并且研究表明真空板的存在可以大幅延长储冷箱的保温时间。

分析上述研究发现, 现有研究整体聚集于食品保鲜即 2~8 °C 的温度区间内^[23-24, 26], 而涉及冷冻区间 (<-18 °C) 的保冷研究则相对较少。在对真空板的研究中, 没有分析真空板在箱内的具体布局以及真空板厚度参数对整体保温效果的影响, 缺乏对真空板作

用效果的系统分析。在对 PCM 的布局进行分析时, S. Burgess 和 Du Jianping 均在恒定 PCM 质量情况下, 对不同位置的相变材料平均分配或固定分配以分析不同相变材料布局的性能, 但由于每个位置能够放置的相变材料质量会因尺寸等关系而随之变化, 因此该方法并不能分析箱内不同位置的 PCM (顶部、底部和侧面) 对储冷性能的单独贡献情况。

为解决上述问题, 本文设计了一种相变材料和真空板耦合的适用于存储冷冻产品的冷能储存箱, 对储冷箱性能进行模拟分析, 并对结果进行实验验证。本文通过有效保冷时间、PCM 的冷量功耗和单板保冷系数等参数对储冷箱进行了优化设计, 并对不同的环境温度、不同相变温度的 PCM 和真空板空间位置与厚度参数对冷藏箱性能的影响进行了分析。在每个位置可能承载的最大 PCM 的基础上, 对箱内不同位置的相变材料对储冷性能的贡献程度进行了量化。通过上述研究可以对应用于冷冻货品末端运输的储冷箱设计及相变材料和真空板在储冷箱内的使用起到一定的指导作用。

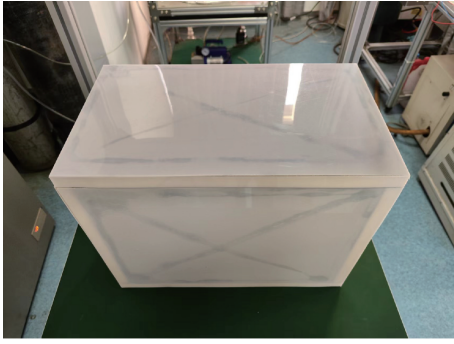
1 实验与数值模型

1.1 实验材料

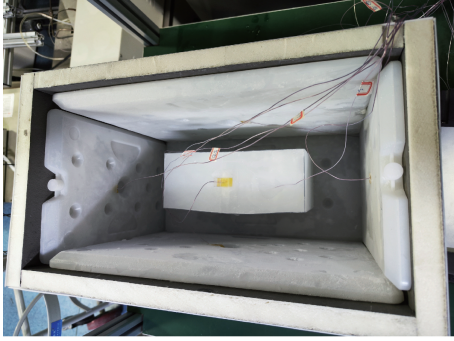
实验设计的储冷箱如图 1 所示, 其外部尺寸为 260 mm×350 mm×445 mm, 内部容积为 27.62 L。箱体主体使用外部聚乙烯 (PP) 材料 (1 mm) 保护、内部聚氨酯 (PU) 材料 (19 mm) 保温; PCM 装填在由聚乙烯材料制成的板壳内而组成 PCM 板, 且 PCM 板通过内附的方式贴附在箱内的各个面上, 板的厚度为 20 mm。根据储冷箱的实际储冷温度, 选择十一烷 (相变温度为 -25.75 °C, 上海迈瑞尔化学试剂有限公司) 作为相变材料, 使用相变材料的总体积为 6.19 L。使用置于箱体底部中心的冰块 (200 mm×80 mm×160 mm) 作为内容物, 该冰块在箱内有效空间中体积占比为 15.15%, 处于实际应用工况范围之内, 且较低的体积占比可以更好的观察内部温度场的变化。为了解在储冷过程中箱体内部温度分布状况, 使用误差为 ±0.4% 的 T 型热电偶收集箱内温度, 共设置 9 个温度采集点, 其中 6 个分布于 PCM 板内表面各面中心处, 2 个分别设置在冰块体积中心处和上表面中心处, 1 个设置在储冷箱外部以采集环境温度。使用盘古 KT612R 无纸记录仪记录实验过程中温度随时间的变化。

1.2 实验方法

实验开始前, 将实验所需的冰块通过冰箱降温至 -20 °C 并保持恒定, 同时使用冰箱将相变材料板的温



(a) 箱体外部



(b) 箱体内部结构

图 1 储冷箱

Fig.1 Cold storage box

度控制在 $-30.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将储冷箱所处的室内温度控制在约 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，当冰块和相变材料温度均达到相应的设定温度后，将其同时按顺序放入储冷箱中，并将储冷箱的顶部盖合。此时使用热电偶采集相应温度测点的温度，记录储冷箱内温度场和环境温度的变化，直至冰块中心温度高于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为止。

1.3 物理模型

通过 SolidWorks 建立仿真所需几何模型，模型包含 PP+PU 聚氨酯箱体、相变材料板、真空板 (vacuum insulation panel, VIP) 和所存储的冰块，具体尺寸与实验设计的储冷箱相同，如图 2 所示。使用 COMSOL Multiphysics 软件对建立的模型进行储冷箱内部温度场的瞬态分析，储冷箱外部模拟空气的自然对流，相变材料板内部考虑材料自然对流，储冷箱内仅考虑热传导。由于储冷箱在热耗散过程中主要为箱体表面的自然对流和内部的热传导，因此忽略储冷箱在开合过程中的冷量损耗，忽略材料和箱体材料之间的热辐射。为了简化计算，忽略存储相变材料和冰所使用的容器厚度，假设不同组分之间无间隙。此外，假设空气为理想气体，其余材料均假定各向同性。

1.4 数学模型

根据建立的几何模型推导发现，本模型在冷量耗散过程中主要方式为固液之间的热传导、箱体外部空

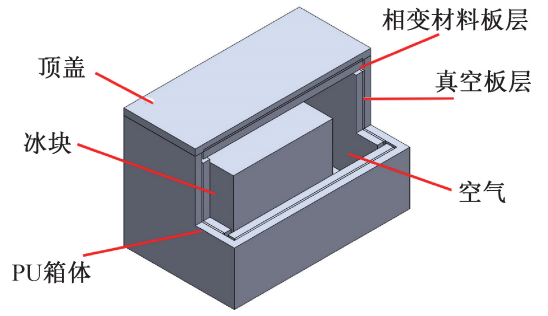


图 2 储冷箱几何模型(仿真)

Fig.2 Geometric model of cold storage box for simulation

气的自然对流和环境对箱体的热辐射。因此，固体和液体热传导的瞬态方程为：

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \vec{u} \cdot \nabla T + \nabla \vec{q} = Q \quad (1)$$

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (2)$$

式中： ρ 为材料的密度， kg/m^3 ； c_p 为材料的比定压热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； T 为材料的温度， K ； t 为时间， s ； k 为材料的导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； \vec{u} 为固体或流体的速度场， m/s ； \vec{q} 为热通量的矢量形式， W/m^2 ； Q 为系统的内热源， W/m^3 ，在本模型中 Q 取 0。

在相变材料熔化时，会因重力作用而在板内形成对流，其质量守恒和动量守恒方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \nabla[-p\vec{I} + \vec{K}] + \vec{F} +$$

$$(\rho - \rho_{\text{ref}})\vec{g} \quad (4)$$

$$\vec{K} = \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \vec{u})\vec{I} \quad (5)$$

式中： p 为材料所处的压力， Pa ； \vec{I} 为单位矩阵； \vec{K} 为黏性应力张量， Pa ； \vec{F} 为体积力的矢量形式， N/m^3 ； \vec{g} 为考虑重力作用下的 N-S 方程的重力加速度， N/kg ； μ 为材料的动力粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。通过方程(1)~(5)，可以得出在相变材料熔化后处于液体状态相变材料的流动过程。同时考虑到在 PCM 相变过程中所发生的能量转换，建立以下的方程归结板内的相变过程：

$$\rho = \rho_{\text{solid}} \quad (6)$$

$$c_p = \theta_1 c_{p,1} + \theta_2 c_{p,2} + L_m \frac{\partial \omega_m}{\partial T} \quad (7)$$

$$\omega_m = \frac{1}{2} \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_1 + \theta_2} \quad (8)$$

$$k = \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2 \quad (9)$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 1 \quad (10)$$

式中: L_m 为材料在相变过程中的相变潜热, J/kg ; θ_1 、 θ_2 为相变前后的相分数; $c_{p,1}$ 、 $c_{p,2}$ 分别为相变前、后的比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; k_1 、 k_2 分别为相变前、后材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; ω_m 为相变后液体状态的质量分数。在储冷箱外部, 为简化模型设置, 6 个面均简化为在环境温度下空气的自然对流, 其中侧面遵循垂直壁自然对流模型, 其传热方程和对流传热表面传热系数的表达式为:

$$-\vec{n} \cdot \vec{q} = q_0 \quad (11)$$

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T) \quad (12)$$

$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} \left(0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492k}{\mu c_p} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{4}{9}}} \right) & Ra_L \leq 10^9 \\ \frac{k}{L} \left(0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492k}{\mu c_p} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 & Ra_L > 10^9 \end{cases} \quad (13)$$

式中: q_0 为边界上的总热量, W/m^2 ; h 为对流传热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; T_{ext} 为外部环境温度, K ; L 为箱体壁表面的特征长度, m , 此处为储冷箱侧壁的高度; Ra_L 为瑞利数, 其表达式为:

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{\text{ext}} - T)L^3}{\alpha\nu} \quad (14)$$

式中: β 为流体的体积膨胀系数; ν 为流体运动粘度, m^2/s ; α 为热扩散系数, m^2/s 。

1.5 初始参数设定

将物理模型导入仿真软件后, 为能够更全面的计算和得到更精确的结果, 需要对模型的初始值和边界条件进行设定:

- 1) 在标准参照模型中, PCM 的初始温度设置为 $-30.75\text{ }^\circ\text{C}$, 比相变温度低 $5\text{ }^\circ\text{C}$;
- 2) 环境温度设置为 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 以符合正常的存储条件;
- 3) VIP 的厚度设置为 5 mm , 导热系数为 $0.008\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [29];
- 4) VIP 和冰块的起始温度设置为 $-20\text{ }^\circ\text{C}$;
- 5) 箱体外部的表面发射率设置为 0.9 , 以衡量环境对箱体外表面的热辐射;
- 6) 使用软件中自带的网格工具划分网格, 网格类型为自由四面体网格。网格包括 $221\ 002$ 个单元,

以网格偏度为基准的平均单元质量为 $0.657\ 8$;

7) 使用具有 0.1 h 初始步长和 0.001 容差的瞬态求解器进行模拟计算;

8) 当箱体中心冰块的平均温度达到 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 停止计算并收集数据。

1.6 性能参数设定

为了能够对不同变量控制下的算例之间储冷性能进行对比, 本文规定 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 为储冷箱内冰块的临界存储温度, 当箱内存储温度高于临界存储温度时储冷箱的储冷性能失效; 箱内冰块平均温度到达临界存储温度所经历的时间称为有效保冷时间, 记作 $t_{\text{ecp}}(\text{h})$; PCM 完全熔化所需要的时间称为熔化时间, 记作 $t_{\text{melt}}(\text{h})$; 在储冷箱内因为 PCM 的存在冰块所降到的最低温度称为 $T_{\text{min}}(\text{ }^\circ\text{C})$ 。

同时为衡量 PCM 对冰块释放冷量的均匀性, 本文引入均匀系数的概念, 计算式为:

$$\varepsilon = t_{\text{melt}}/t_{\text{ecp}} \quad (15)$$

该系数表示 PCM 完全熔化时间所占有效保冷时间的比例。均匀系数可以在一定程度上表示该 PCM 在储冷箱内的适宜程度, 系数太小则说明 PCM 熔化过快, 相变潜热的利用率低; 同时若该系数越大, PCM 完全熔化所用的时间占总保冷过程的时间的比例越大, 其冷量可以在箱内更均匀的释放, 达到更优的储冷效果。

从能量利用角度分析, 达到相同的 t_{ecp} 所使用的 PCM 冷量越少表示冷量利用的比例越高, 同一时间内冷量耗散小, 可以进一步降低储冷箱在储冷过程中的碳排放。为了对比不同参数变量影响下 PCM 冷量使用的高低, 本文定义冷量功耗的概念, 表述为在有效保冷时间内 PCM 所释放的冷量与释放时间的比值:

$$P_{\text{cold}} = \frac{\sum [c_p m_i (T_i - T_{\text{init}}) + m_i \theta_i L_m]}{t_{\text{ecp}}} \quad (16)$$

式中: m_i 为不同位置 PCM 的质量, kg ; T_i 和 θ_i 分别为不同位置 PCM 在 T_{min} 时的温度 ($^\circ\text{C}$) 和相变程度; T_{init} 为 PCM 的初始温度, $^\circ\text{C}$ 。在相同的有效保冷时间内, 冷量功耗越低代表消耗的冷量越少, 功耗越高代表能源浪费越严重。因此, 在其他参数相同的条件下, 对 PCM 的选择应同时考虑冷量功耗高低所带来的影响。

2 结果与分析

2.1 结果验证

2.1.1 网格无关性验证

在对模型进行计算的同时, 网格单元尺寸的大小

可能会影响计算的精确度。为了对模型的网格独立性进行验证,本文使用相同方式生成了常规、细化和较细化 3 个级别的自由四面体网格,其单元数依次为 100 811、221 002 和 620 601。对 3 种单元数的模型进行计算,对比其内部冰块温度随时间的变化,结果如图 3 所示。由图 3 可知网格数量越多冰块温度变化越缓慢,但当规格为细化和较细化时,其整体变化相差较小,其在达到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所使用的时间仅相差 0.85%。因此,本文认为网格规格为细化和较细化两者之间存在无关性,为了节省计算资源,选择单元数为 221 002 的细化网格进行后续的模拟计算。

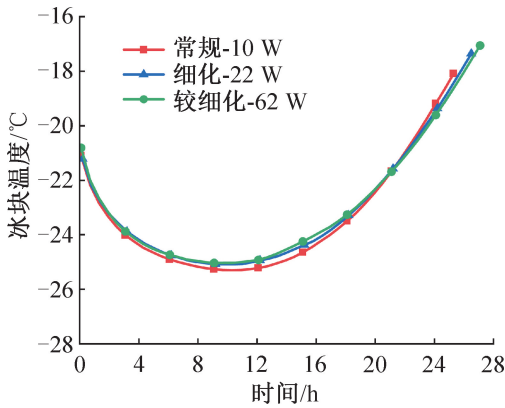


图 3 不同规格网格下冰块温度的变化

Fig.3 Temperature variation of ice block under different grid sizes

2.1.2 实验验证

为验证仿真结果的准确性,建立了与上述实验模型相同的物理模型,便于对比实验结果和仿真结果。为保证实验与仿真算例的一致性,仿真模型的环境参数使用实验过程中采集到的温度数据。经过实验和模拟计算,对比了实验和仿真算例在冰块中心和底部 PCM 板中心这两个位置的温度变化,对比结果如图 4 所示。由图 4 可知,在所测位置实验与模拟算例的温

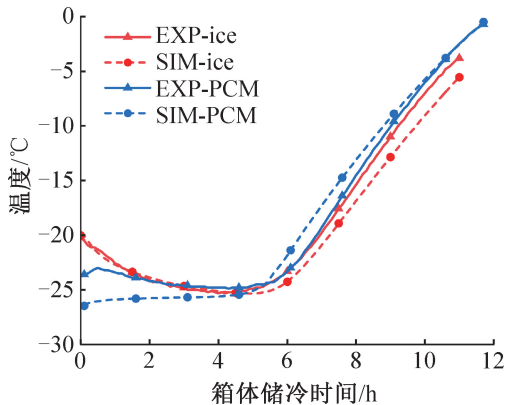


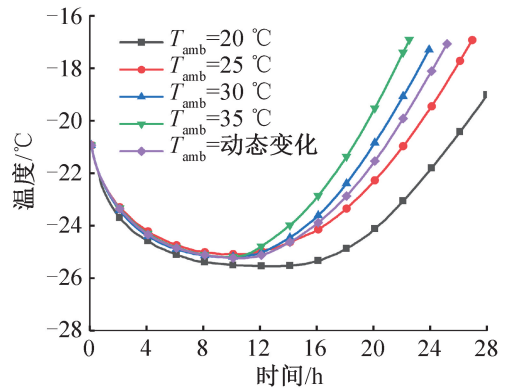
图 4 数值模拟与实验结果对比

Fig.4 Comparison of simulation and experimental results of box inner temperature

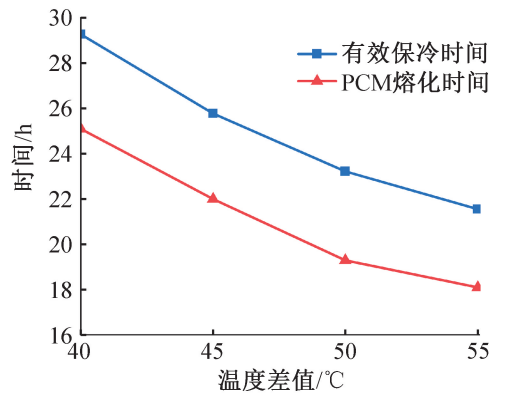
度趋势基本一致,并且在 5 h 时,冰块中心处的温度差仅为 $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在有效保冷时间方面,实验过程的有效保冷时间为 7.4 h,仿真情况下有效保冷时间则为 7.72 h,两者相差 0.32 h,差距为 4.32%。出现差距的原因可能来自于实验箱体各部件之间存在的微小缝隙,导致一部分冷量从缝隙中泄漏,进而使实验所得温度有所偏高,使有效保冷时间 t_{cep} 缩短。

2.2 不同环境温度的影响

在储冷箱的实际使用过程中,外界环境温度的高低变化是影响储冷箱保冷性能的关键因素。对照算例(环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,相变材料为十一烷,真空板厚度为 5 mm)中的环境温度分别设定为 20、25、30、 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,并分别进行计算,得到不同环境温度下储冷箱内冰块平均温度随时间的变化,如图 5 所示,记环境温度为 T_{amb} ,分析储冷箱工作环境温度的高低对储冷箱性能的影响。由图 5(a)可知,在相同的时间条件下,储冷箱所处的环境温度越高,其内部冰块的平均温度越低,说明环境温度的变化对箱内储冷过程的温度场影响显著。分析了环境温度和冰块初始存储温度的温差与有效保冷时间之间的关系,如图 5(b)所示。PCM 的熔化时间随着冰块初始温度与外界温



(a) 冰块温度变化



(b) 保冷时间与温差关系

图 5 不同环境温度下储冷箱储冷性能变化

Fig.5 Change of cold storage performance of cold storage box under different ambient temperatures

差的扩大而不断减小。与此同时,当温差为 40~55 °C 时,其内部有效保冷时间依次为 29.27、25.78、23.22、21.55 h,由此可知,温差越大,有效保冷时间越短。温差每升高 5 °C 时,有效保冷时间最大缩短了 3.49 h;并且以环境温度 25 °C 为基准,温差上升 22.2% 时,有效保冷时间降低了 4.23 h,降幅为 16.4%。该数据表明,环境温差较大时会显著降低储冷箱的有效保冷时间,在实际应用中应避免储冷箱所处的环境温度过高。

为了探究储冷箱在实际使用过程中内部温度的变化,将固定的环境温度替换为一天内实时变化的温度,导入 Comsol 中进行计算,得到更符合实际的内部温度场随环境温度的变化。选取上海测温站夏季某天历史温度记录作为实时变化的环境温度数据,将该环境温度记为 T_{var} ,虽然此温度在一天内波动较大,但由图 5(a) 可知在储冷箱内部 PCM 温度和所存储冰块的平均温度变化曲线表现出较好的平稳性,并未产生明显的波动,说明储冷箱对外部温度波动具有很好的抵抗性。产生该结果的原因主要是箱体隔热材料自身的低热阻使外部温度变化时通过箱体壁的热量变化较小。 T_{var} 的平均温度为 28.35 °C,且其相变材料熔化速度和内部存储冰块平均温度的变化曲

线均在 $T_{amb} = 25\text{ °C}$ 和 $T_{amb} = 30\text{ °C}$ 的曲线之间,符合其平均温度在 25~30 °C 的预期。说明当外界环境温度波动时,储冷箱可以依靠 PCM 的温度缓冲能力中和环境温度变化带来的影响。并且面对实际使用过程中不断变化的环境温度,在分析其对储冷箱有效保冷时间的影响时,可以取环境温度平均值对储冷箱保冷时间进行初步估计。

2.3 真空板的保冷作用

2.3.1 真空板厚度

真空板(VIP)作为保温材料有着比 PU 材料更低的导热系数,保冷性能更优。为探究 VIP 在储冷箱中的使用效果,以算例中 VIP 厚度作为变量,其他条件不变,研究 VIP 厚度对保冷时间的影响。VIP 厚度分别定为 0(无真空板)、2.5、5.0、7.5 mm。分析 5 h 时不同厚度算例的温度云图(图 6)可知,当 VIP 存在时,箱体内部温度明显降低且温度均匀性优于无 VIP 时的算例,且这一特征随着 VIP 厚度的增大而更加显著。因为 VIP 厚度增加可以有效降低箱体壁的热阻,减缓箱体内部冷量的散失,从而使箱体内部温度一致性提高。该结果表明,VIP 可以有效隔绝外部热量的侵蚀,使箱体内部在一定时间内维持较低的温度。

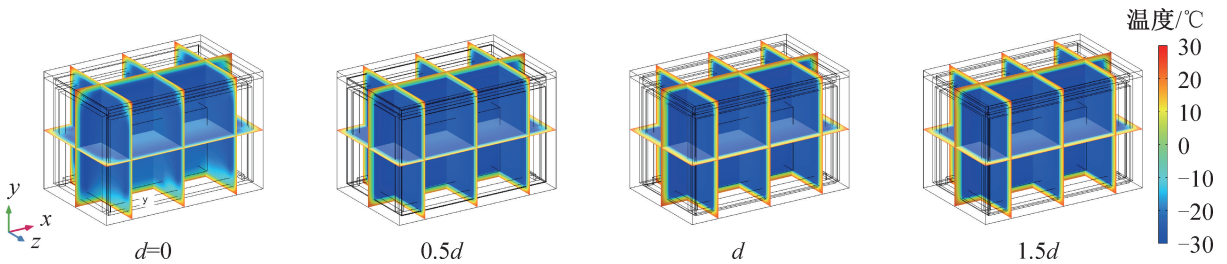


图 6 不同 VIP 厚度的箱内温度云图($t=5\text{ h}$)

Fig.6 Temperature contours of box with different VIP thickness at the fifth hour of simulation

为分析不同 VIP 厚度下箱体储冷性能的差异,以 VIP 厚度 5.0 mm 为基准,分析 VIP 厚度分别增加/减少 50% 时的保温效果。分析不同厚度下 PCM 完全熔化时间和箱体的有效保冷时间,结果如图 7 所示。VIP 的存在使相变材料熔化速度明显放缓,相变材料完全熔化所需时间大幅延长。VIP 从无到有可以使相变材料的熔化时间最大延长 14.6 h,延长了 136.4%;同时使有效保冷时间延长 19.43 h,增幅为 197.7%。分析 t_{ecp} 和 VIP 厚度的关系时,可以发现储冷箱的 t_{ecp} 随 VIP 厚度的线性增长而不断增加,当 VIP 厚度由 d 增加 50% 变为 $1.5d$ 时,可以使有效保冷时间延长 13.3%。其余算例的有效保冷时间、增量以及增幅的具体数值如表 1 所示,分析数据可知, t_{ecp} 随 VIP 厚度的增长而不断增加,但增幅明显降低。

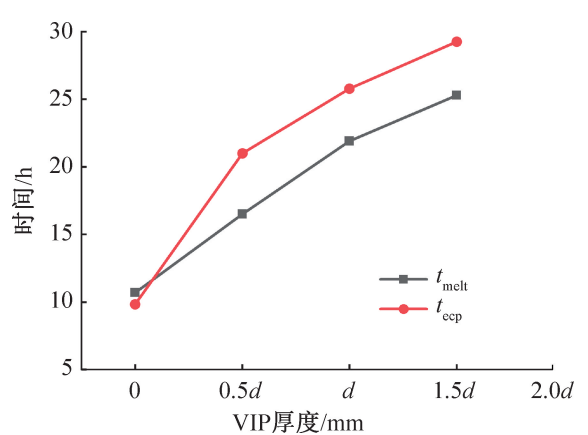


图 7 VIP 厚度对有效保冷时间和 PCM 熔化时间的影响

Fig.7 Effect of VIP thickness on t_{ecp} and t_{melt}

例如在 VIP 厚度从 0 增至 $0.5d$ 和从 d 增至 $1.5d$ 时

增幅相同,但由此产生的有效保冷时间变化后者仅为前者的 31.1%。该结果可由通过壁面的热流密度与厚度之间的关系得到验证,仅考虑导热时从箱体冰块至外部环境的导热公式为:

$$\vec{q} = -\Delta T / (d/k + r_0) \quad (17)$$

式中: r_0 为除真空板热阻之外的总热阻, $K \cdot m^2/W$ 。

表 1 有效保冷时间变化对比
Tab.1 Comparison of changes on t_{cep}

VIP 厚度	t_{cep}/h	t_{cep} 增量/h	增幅/%
0	9.83	—	—
0.5d	21.01	11.18	113.7
d	25.78	4.77	22.9
1.5d	29.26	3.48	13.3

由式(17)可知,热流密度 q 与真空板厚度 d 之间为反比例关系,当 d 不断增加时, q 的减少并非线性,而 q 的大小决定了有效保冷时间的长短,因此可以推断 d 的增加对保冷效果的提升存在一定的边际效应。分析不同厚度 VIP 的算例中均匀系数 ε 和冷量功耗 P_{cold} (图 8)发现,当箱体内存在 VIP 时 PCM 的 ε 会有较大的提高;且冷量功耗随着 VIP 厚度的增加而不断下降,当 VIP 厚度为 1.5d 时冷量功耗仅为无 VIP 的 34.57%,再一次验证了 VIP 在储冷箱内的重要性。

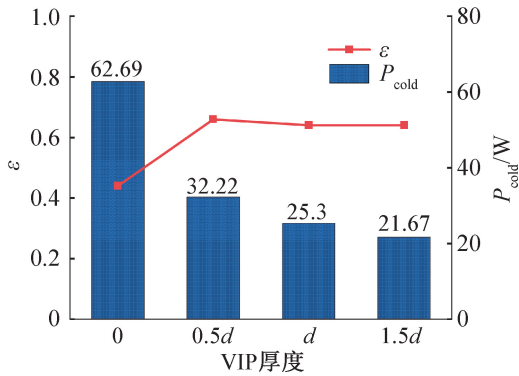


图 8 VIP 厚度改变时均匀系数和冷量功耗的对比

Fig.8 Comparison of ε and P_{cold} when VIP thickness changes

2.3.2 真空板位置

在标准对照算例中,PU 材料、相变材料和真空板从外到内布置形成了储冷箱保冷的复合结构。但 3 种材料因导热系数等性质的不同,其布置顺序可能也会影响储冷箱的保冷效果,为分析该布置顺序对保冷效果的影响,对照算例的 3 种材料进行重新排序并计算分析。由于 PU 材料需要作为外壳材料以保证储冷箱足够的物理强度,因此本文分析内

部相变材料和真空板的相对位置对储冷效果的影响,结果如图 9 所示。在算例 1 中,PCM 层位于 VIP 层的外侧;在算例 2 中,则位于 VIP 层的内侧。对于这两种不同算例,其中 PCM 层及 VIP 层厚度和热物理性质与参照算例中相同。由图 9 可知,当真空板在外部布置时,相变材料的熔化速度明显放缓,最终 t_{melt} 比其在内部布置延长了 9.5 h,且有效保冷时间从 16.71 h 增至 25.78 h,延长了 54.3%。在有效保冷时间内,冰块的平均储存温度也不尽相同,VIP 在外侧的布置可以使冰块平均温度 T_{ave} 由 $-20.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $-23.26\text{ }^{\circ}\text{C}$,降低了 $2.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这是因为当 VIP 布置在 PCM 外侧时,VIP 层可以在很大程度上阻挡向内的热量,使 PCM 有足够长的时间使用其相变潜热进行保冷。在 PCM 相变期间,由于 PCM 的等温特性,内部温差减少,从而降低了内部的传热速率和通过箱体内壁的热通量。该原因可以从两种布置方式下 ε 和 P_{cold} 的差异中得到佐证,通过计算得出算例 2 的 ε 和 P_{cold} 分别为 0.64 和 25.30 W,均优于算例 1 的 0.53 和 39.62 W,说明算例 2 中 PCM 的相变潜热得到了更长时间和更有效的利用。因此 VIP 在外侧可以将 PCM 冷量更均匀的传递给冰块同时降低冷量功耗,进而延长有效保冷时间。所以本文认为在其余参数相同的情况下,真空板在外侧、相变材料在内部的布置方式能够减少冷量损失,增强储冷箱性能。

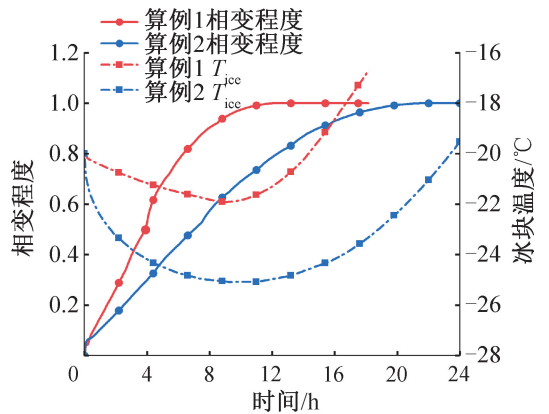


图 9 相变材料和真空板排列顺序对温度场的影响

Fig.9 Influence of the arrangement order of PCMs and VIPs on temperature field

2.4 不同种相变材料的影响

相变材料作为储冷箱中最为重要的储冷保温材料之一,不同种类相变材料的选择直接决定了其保冷效果的差异。为研究不同热物理性质的相变材料对储冷箱保温效果的影响,并根据实际的保冷温度需要,选择 2-辛酮、正十一烷、正癸烷和 2-辛酮与正癸

烷混合物(50:50 质量百分比)4 种不同的有机相变材料对其储冷效果进行研究,分别记为 PCM1~4,具

体物理性质如表 2 所示,模型中其余参数均与参照算例中相同。

表 2 PCM 的热物理性质^[30]
Tab.2 Thermophysical properties of PCM^[30]

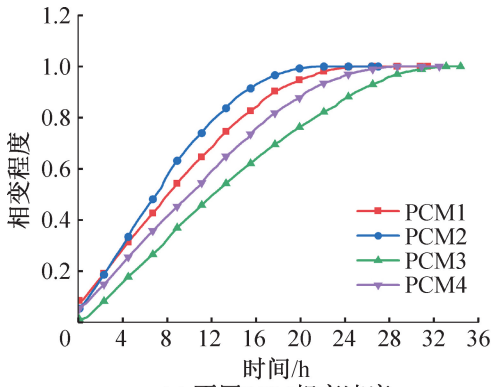
PCM	材料	$\rho_l / (\text{kg}/\text{m}^3)$	相变温度/ $^{\circ}\text{C}$	$k_l / [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	$k_s / [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	$c_p / [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	$L_m / (\text{kJ}/\text{kg})$
PCM1	正癸烷	760	-29.85	0.143	0.57	2 065	194.0
PCM2	正十一烷	744	-25.75	0.153	0.61	2 125	143.9
PCM3	2-辛酮	840	-21.55	0.150	0.60	2 100	190.4
PCM4	正癸烷与 2-辛酮混合	800	-25.70	0.147	0.59	2 082	192.2

注:下标 *l* 表示液相,下标 *s* 表示固相。

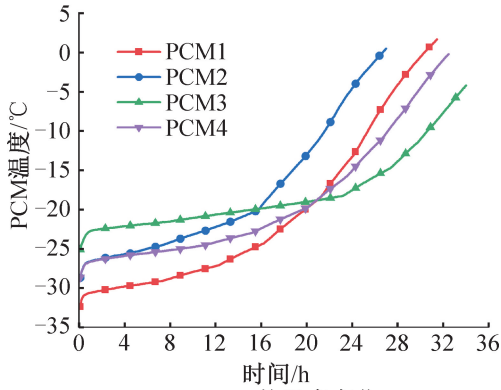
由表 2 可知,因其同属于有机相变材料中的烃类和酮类,本文采用的 4 种相变材料具有相似的导热系数和密度,同时这 4 种材料在相变温度和相变潜热方面则存在较大差异,其中 PCM1 的相变温度最低,PCM3 的相变温度最高且与冰块的初始存储温度仅相差 1.55 $^{\circ}\text{C}$ 。图 10(a)~(b)为 4 种相变材料的相变速度和相变材料温度的变化,可以看出,PCM3 的相变速度最慢且在相变时温度变化程度小的平台期持续时间很长;同时在相同时间内 PCM2 的相变进程最快,这也导致其温度在短时间内迅速上升。PCM 的相变速度和相变温度的区别直接导致了有效保冷时间上的差异,图 10(c)为使用 4 种 PCM 的箱体内部冰块的平均温度变化,分析可知,虽然 PCM3 的冰块最低温度明显高于其他 PCM,但其最低温度最为稳定,且 PCM3 具有最长的有效保冷时间 33.94 h。当选用 PCM1 时冰块温度最低达到 -28.64 $^{\circ}\text{C}$,但冰块温度并未保持且随着时间的推移迅速升高,最终有效保冷时间为 31.29 h。对于 PCM 相变潜热对保冷时长的影响,通过对比 PCM2 和 PCM4 发现二者具有相似的相变温度和初始温度,但相变潜热的不同导致有效保冷时间不同,在箱内装载 PCM4 时比 PCM2 的有效保冷时间长 6.16 h,延长了 23.89%。在 PCM 的其他热物理性质基本相同的情况下,出现该现象是因为 PCM 的相变潜热可以在 PCM 相变过程中持续为箱内提供冷量,减缓箱内温度升高致使 PCM 的潜热越大,对箱内传递冷量越多,即提供更长的保冷时间。

分析 PCM1、PCM3 和 PCM4 在箱内的保冷过程,3 种 PCM 具有基本一致的相变潜热,相变温度和相变材料的初始温度不同,导致不同相变材料初始温度与冰块初始温度之间的温差存在差异:PCM3 的相变温度与冰块初始存储温度的温差最小,PCM1 的温差

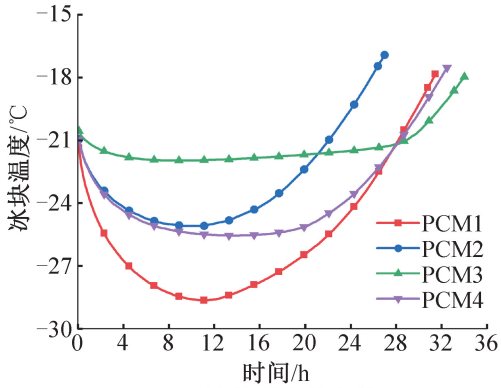
最大。由图 10 可知,对比 3 种材料的相变速度和温度以及箱内冰块温度变化情况可知:PCM3 的性能表现最优,具有最长的有效保冷时间;而相变温度最低的 PCM1 反而因为后期升温速度过快而表现最差。分析产生该现象的原因可能为 PCM1 因为较大的温差而与外界环境在箱体壁上产生较大的热流量,较大的热流量又导致 PCM 熔化速度的变快,造成初期相变潜热的不合理释放,进而缩短了整体的保冷时间。装载不同 PCM 的储冷箱性能分析如图 11 所示,通过分析三者的均匀性系数验证了该结论,PCM1 的均匀系数为 0.62,在 3 种材料中最低,而 PCM3 的均匀系数达到 0.88,在 3 种材料中最高。这表明虽然 PCM3 的相变温度与初始存储温度温差最小,但其相变潜热向箱内释放最均匀,达到最佳的有效保冷时间。进一步分析了 PCM1 和 PCM3 算例中通过箱体底部的热流量差异,结果如图 12 所示。由图 12 可知,在开始的一段时间内,由于 PCM1 的初始温度较低且外界环境的温差更大,因此热流量更大,相变速度也加快。随着相变过程的进行,固态的相变材料逐步转变为液态,导热系数随之下降,PCM3 因为更快的相变速度,导热系数下降更快,通过壁面的热流量也下降更快,因此出现了 PCM1 中的热流量在 19 h 后低于 PCM3 的结果。PCM1 因为相变温度和冰块存储温度的温差很小,初始相变速度更慢,允许其在相变期间释放的冷量均匀的转移至冰块中,从而壁面热流量释放更均衡,延长了储冷箱的有效保冷时间。通过上述分析,推断 PCM 的相变温度与冰块的起始存储温度之间的温差对其均匀系数有一定影响,具体为在其他热物理性质相同的情况下两者的温差越大,冷量释放的均匀性越低,均匀系数的数值越低,进而导致保冷性能下降。



(a) 不同PCM相变速度



(b) PCM的温度变化



(c) 冰块温度的变化

图 10 不同相变材料相变速度及箱内温度变化

Fig.10 Phase transition velocity of different phase change materials and temperature changes inside the box

本文从储冷过程中冷量损耗的角度出发,分析 4 种 PCM 在能源消耗方面的差异,寻找在整个储冷周期内能源使用最合理的材料。在箱体储冷过程中,PCM 的冷量主要有两个去向,一方面通过箱体壁向环境释放,另一方面向箱内冰块中释放。因此影响冷量功耗的主要因素为箱体壁热阻大小和 PCM 与冰块之间的温差,而在本组算例中除 PCM 的种类不同外并无其他差异,因此不同 PCM 的冷量功耗差距并不显著。4 种 PCM 的冷量功耗差异关系如图 11 所示,冷量功耗最低的为 PCM3,仅为 24.22 W;最高的为 PCM1,达到 27.36 W。更低的冷量功耗可以降低因

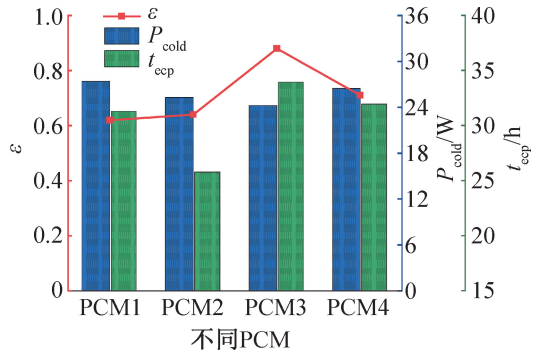


图 11 装载不同 PCM 的储冷箱性能分析

Fig.11 Cold storage performance of boxes with different PCMs

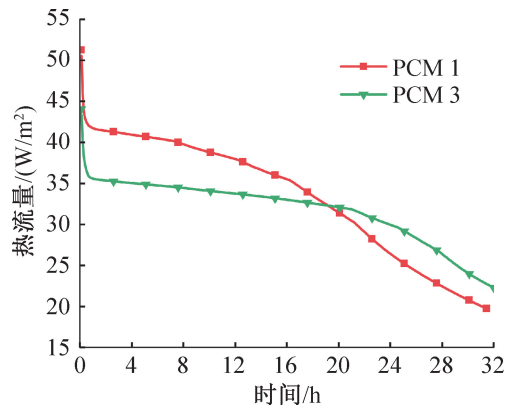


图 12 PCM1 和 PCM3 的箱底热流量变化

Fig.12 Heat flow rate variation at box bottom of PCM1 and PCM3

PCM 蓄冷所产生的电力成本和碳排放。可知在储冷箱使用 PCM3 作为相变材料时,消耗的能源更少,更有利于行业的节能减碳。

本节主要研究不同 PCM 算例的有效保冷时间、均匀系数和冷量功耗之间的差异,综合考虑上述 3 种性能指标,将不同 PCM 的性能指标数值进行线性函数归一化分析,选取每种指标中最优值为 1,结果如表 3 所示。PCM3 为本研究中最适合存储温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 PCM 种类,归一化性能总分为 3.00。因此 PCM3 在本研究所考虑的 3 种性能指标中均为最优,其有效保冷时间最长,均匀系数最佳,说明 PCM 的相变潜热利用最充分。在其余 3 种 PCM 中,PCM2 在性能排行中表现最差,归一化性能分仅为 2.44。

本研究中分析了 PCM 的相变潜热、相变温度和冰块初始温度的差值等性质对箱体保冷时间的影响。然而 PCM 的其他一些性质并未被考虑,例如导热系数、密度和比热容等热物理性质,其数值差异同样可能对储冷性能产生影响。因此本文将标准算例中正

表 3 不同种 PCM 的性能系数对比
Tab.3 Comparison of performance coefficients of different PCMs

PCM 种类	实际数值			归一化值			合计
	$t_{\text{ecp}} / \text{h}$	ε	$P_{\text{cold}} / \text{W}$	t_{ecp}	ε	P_{cold}	
PCM1	31.29	0.62	27.36	0.92	0.70	0.89	2.51
PCM2	25.78	0.64	25.30	0.76	0.73	0.96	2.44
PCM3	33.94	0.88	24.22	1.00	1.00	1.00	3.00
PCM4	31.95	0.71	26.46	0.94	0.81	0.92	2.66

十一烷材料的导热系数、密度及比定压热容的数值通过控制变量的方法分别降低 50% 和增加 50% 后进行模拟计算,以分析它们对储冷箱有效保冷时间的影响。不同工况下有效保冷时间及差异如图 13 所示,由图可知,PCM 的密度变化对有效保冷时间的影响最大,其次是导热系数和比定压热容。其中密度的增加会使 PCM 的有效保冷时间大幅延长,增强箱体的保冷性能;而 PCM 的导热系数和比定压热容的增加则会减少储冷箱的有效保冷时间。分析导致该结果的原因应为本模型中 PCM 为控制体积,更大的密度意味着更多质量的 PCM 在其中发挥作用,有更多的相变潜热可以利用,因此对箱体的保冷时间影响最大。导热系数和比定压热容的变化对保冷时间的影响较为温和,单独减少 50% 的导热系数和比定压热容仅分别增加了 0.79 h 和 0.11 h 有效保冷时间。但值得一提的是,当 PCM 的密度越大时,意味着整个箱体的质量越大,会增加箱体在运输中的成本和降低使用体验。

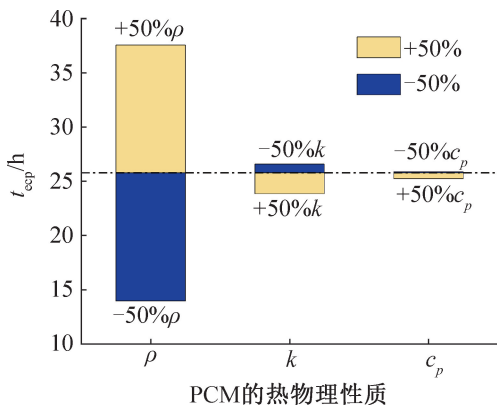


图 13 相变材料的热物理性质对有效保冷时间的影响

Fig.13 Effect of thermophysical properties of PCMs on t_{ecp}

2.5 不同位置相变材料的保冷能力

在前文所述的参照模型中,箱体内相变材料板在 6 个面上均有附着,但不同位置的相变材料板因与储存介质的空间位置关系和自身质量的不同,其保冷效果会存在差异。为研究不同位置相变材料板对整体

保冷效果的影响,在其他条件保持不变的情况下,根据箱体的对称性分别只保留参照模型中单侧短边、单侧长边、底部和顶部的相变材料板,记为位置 1~4,如图 14 所示,对 4 个位置的 PCM 板分别单独存在时的仿真模型进行计算,研究其内部温度分布情况和不同位置板的贡献度。为量化不同位置 PCM 板的贡献程度,本文定义单板保冷系数的概念,记为 η_i , 计算如下:

$$\eta_i = t_{\text{ecp,单板}} / t_{\text{ecp}} \quad (18)$$

式中: $t_{\text{ecp,单板}}$ 为只有单相变材料板存在时的有效保冷时间, h; t_{ecp} 为所有位置相变材料均存在时参照算例的有效保冷时间, h。单板保冷系数可以在一定程度内有效量化不同位置的相变材料对箱体保冷性能的贡献大小,其数值越大,说明 PCM 板单独存在时的保冷时间越长,占总保冷时间的比例即越大,对箱内总保冷性能的贡献越大。

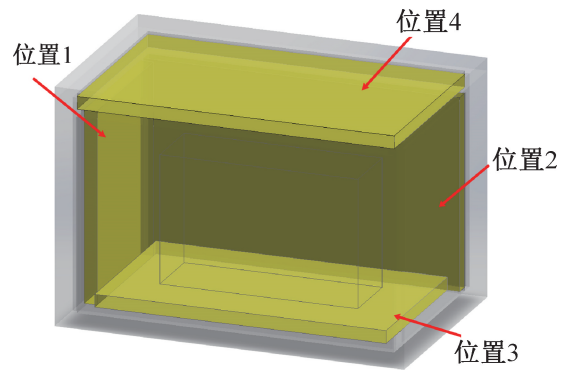


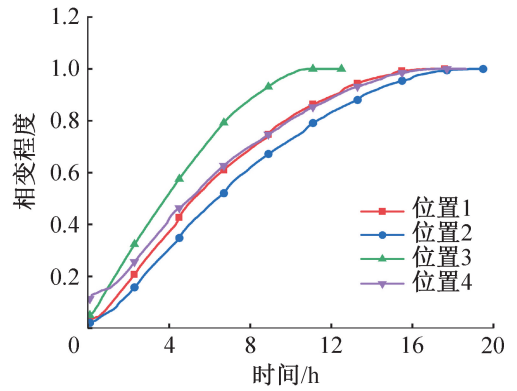
图 14 不同位置的 PCM 示意图

Fig.14 Schematic diagram of PCM in different positions

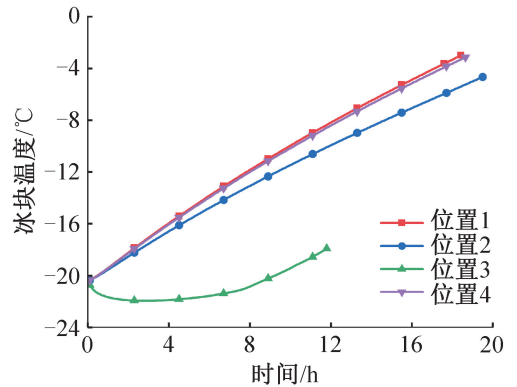
不同位置 PCM 板单独存在时的相变速度及冰块温度变化如图 15 所示。由图 15(a) 不同位置 PCM 的相变速度可知,当 PCM 单独存在时,相变速度均有所加快,位置 3 算例的完全相变时间仅为 11.2 h,但由图 15(b) 箱内冰块温度可知,位置 3 处的 PCM 具有最佳的保冷效果,其有效保冷时间 t_{ecp} 达到 11.7 h,比时间最短的位置 1 多了 434.2%。5 h 时箱体横截

面不同位置 PCM 算例的温度云图如图 16 所示。由图 16 可知,当相变材料板在底部时,相变材料与冰块的温度均匀性最好且趋于一致。出现上述结果的原因为底部相变材料板因与冰块直接接触,相变材料的冷量更多的通过热传导转移至冰块中,加快了 PCM 的相变速度,使同一时间时冰块的温度较其他位置更低,达到更长的保冷时间。其余 3 个位置的算例虽然 PCM 的相变速度很慢,但因未与冰块接触,PCM 的冷量只能通过与冰块之间的空气进行热传导而将冷量传入冰块中。而该过程的冷量远小于冰块散失的冷量,因此如图 15(b) 所示,冰块的温度从一开始就出现了上升,且该处 PCM 的冷量大多散失于环境中。

对不同位置 PCM 的单板系数计算结果如表 4 所示。当相变材料在底部单独存在时其单板系数最大,达到 0.454;其余 3 个位置的单板系数均低于 0.1,数值最低的是单侧短边的单板系数,仅为 0.085。根据单板系数的定义可以得出,在储冷过程中,对箱体保冷贡献最大的为箱体底部的相变材料,贡献最小的为侧面短边的相变材料。虽然该系数可能会因为所存储货品的位置不同而发生变化,但通过本研究仍可以认为与货品直接接触的 PCM 板对其保冷性能的贡献将会最大,PCM 将冷量释放至冰块的过程和比例直接影响了有效保冷时间的长短。同时,通过计算可得 6 个面总的单板系数之和为 0.907,并未达到最大值 1,即当不同位置的 PCM 均存在时,各位置 PCM 对箱



(a) 不同位置PCM的相变速度



(b) 不同位置PCM的冰块温度

图 15 不同位置 PCM 板单独存在时的相变速度及冰块温度变化

Fig.15 Phase change velocity and ice temperature variation with separate PCM boards in different positions

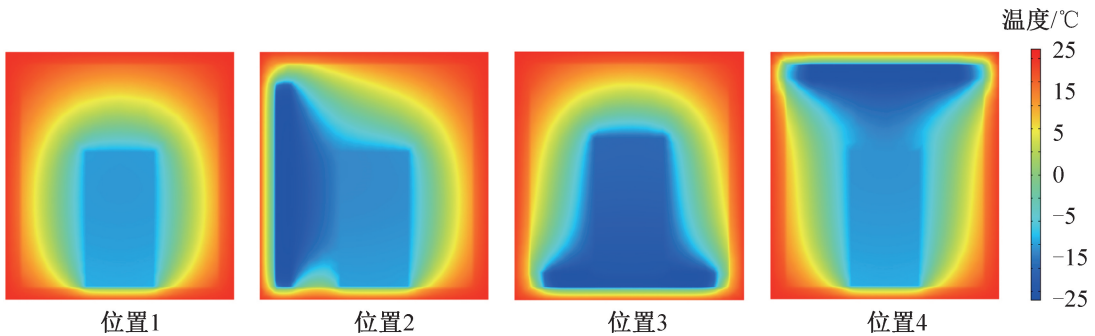


图 16 5 h 时箱体横截面不同位置 PCM 算例的温度云图

Fig.16 Temperature contours of cases of PCM in different positions in cross section at 5 h

表 4 不同位置 PCM 的单板系数

Tab.4 Individual plate factor at different locations

PCM 编号	PCM 位置	单板系数
1	单侧短边	0.085
2	单侧长边	0.098
3	底部	0.454
4	顶部	0.087

体的保冷存在协同作用。

3 结论

本文对一种适用于低于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷链末端运输的储冷箱进行了模拟分析和实验验证,通过对比不同参数变量下箱体的保冷性能,得到如下结论:

1) 环境温度的高低对储冷箱有效保冷时间的影响显著,环境温度越高,有效保冷时间越低,同时储冷箱对变化的环境温度存在一定的抵抗能力。

2) 储冷箱内使用真空板可以大幅延长箱体的有

效保冷时间,且随着真空板厚度的增加而不断增加;当真空板厚度为 1.5d 时可以使 t_{cep} 延长 19.43 h,增幅为 197.7%。同时真空板布置在相变材料板的外侧比在内侧的保温效果更好, t_{cep} 延长 54.3%。

3) 相比于其余 3 种 PCM, 储冷箱使用 2-辛酮具有更好的储冷效果, 有效保冷时间、均匀系数和冷量功耗等性能参数均为最优。此外, PCM 相变温度与存储冰块初始温度的差值在一定程度上决定了均匀系数的大小, 差值越小则均匀系数越大, 储冷性能越好。

4) PCM 热物理性质对储冷时间的影响集中体现在相变潜热和密度上, 二者增大会延长储冷箱的储冷时间; 而导热系数和比定压热容的增加反而会使有效保冷时间降低, 但降幅很小。

5) 底部相变材料板的单板保冷系数为 0.454, 远大于其他位置, 对箱体保冷的贡献度最大。

参考文献

[1] WU J Y, HSIAO H I. Food quality and safety risk diagnosis in the food cold chain through failure mode and effect analysis[J]. Food Control, 2021, 120: 107501.

[2] 林酿志, 李传常. 相变储能材料及其冷链运输应用[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(3): 1040-1050. (LIN Niangzhi, LI Chuanchang. Phase change energy storage material and its application in cold chain transportation [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(3): 1040-1050.)

[3] LUNDÉN J, VANHANEN V, MYLLYMÄKI T, et al. Temperature control efficacy of retail refrigeration equipment[J]. Food Control, 2014, 45: 109-114.

[4] LOISEL J, DURET S, CORNUÉJOLS A, et al. Cold chain break detection and analysis: can machine learning help? [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 391-399.

[5] CARULLO A, CORBELLINI S, PARVIS M, et al. A measuring system for the assurance of the cold-chain integrity[C]//2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Canada: IEEE, 2008: 1598-1602.

[6] ZÖLLER S, WACHTEL M, KNAPP F, et al. Going all the way-detecting and transmitting events with wireless sensor networks in logistics [C]//38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks-Workshops. Sydney: IEEE, 2013: 39-47.

[7] DONG Yabin, MILLER S A. Assessing the lifecycle greenhouse gas (GHG) emissions of perishable food products delivered by the cold chain in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 303: 126982.

[8] CHAUDHURI A, POPOVSKA I D, SUBRAMANIAN N, et al. Decision-making in cold chain logistics using data analytics: a literature review[J]. The International Journal of Logistics Management, 2018, 29(3): 839-861.

[9] RINGSBERG H. Perspectives on food traceability: a systematic literature review [J]. Supply Chain Management: An International Journal, 2014, 19(5/6): 558-576.

[10] 张红雨, 万贤, 陈妍, 等. 相变蓄冷材料在冷链物流中的研究进展[J]. 中国塑料, 2021, 35(4): 106-115. (ZHANG Hongyu, WAN Xian, CHEN Yan, et al. Research progress in phase change cold-storage materials in cold chain logistics [J]. China Plastics, 2021, 35(4): 106-115.)

[11] 金云飞, 武卫东, 伏舜宇, 等. 低温冷链物流用相变材料的优化及应用[J]. 制冷学报, 2021, 42(6): 106-113. (JIN Yunfei, WU Weidong, FU Shunyu, et al. Optimization and application of phase change materials for low-temperature cold chain logistics [J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(6): 106-113.)

[12] ZHAO Y, ZHAO C Y, MARKIDES C N, et al. Medium- and high-temperature latent and thermochemical heat storage using metals and metallic compounds as heat storage media: a technical review[J]. Applied Energy, 2020, 280: 115950.

[13] 陶文博, 谢如鹤. 有机相变蓄冷材料的研究进展[J]. 制冷学报, 2016, 37(1): 52-59. (TAO Wenbo, XIE Ruhe. Research and development of organic phase change materials for cool thermal energy storage [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(1): 52-59.)

[14] DU Kun, CALAUTIT J, WANG Zhonghua, et al. A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges [J]. Applied Energy, 2018, 220: 242-273.

[15] ZHOU Dan, ZHAO Changying, TIAN Yuan. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications [J]. Applied Energy, 2012, 92: 593-605.

[16] DU Kun, CALAUTIT J, EAMES P, et al. A state-of-the-art review of the application of phase change materials (PCM) in mobilized-thermal energy storage (M-TES) for recovering low-temperature industrial waste heat (IWH) for distributed heat supply [J]. Renewable Energy, 2021, 168: 1040-1057.

[17] 李靖, 谢如鹤, 刘广海, 等. 冷藏运输用新型低温相变材料及装备的研制[J]. 制冷学报, 2018, 39(4): 32-37. (LI Jing, XIE Ruhe, LIU Guanghai, et al. Development of new low-temperature phase change material

- and equipment used in refrigerated transportation [J]. *Journal of Refrigeration*, 2018, 39(4): 32–37.)
- [18] 童山虎, 聂彬剑, 李子潇, 等. 基于相变蓄冷技术的冷链集装箱性能研究[J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(1): 211–216. (TONG Shanhu, NIE Binjian, LI Zixiao, et al. Investigation of the cold thermal energy storage reefer container for cold chain application [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(1): 211–216.)
- [19] 杨晋, 殷勇高. 空调蓄冷用相变材料的研究进展[J]. *制冷学报*, 2022, 43(3): 37–44. (YANG Jin, YIN Yonggao. Research progress of phase change materials for cold thermal energy storage in air-conditioners[J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(3): 37–44.)
- [20] ORÓ E, DE GRACIA A, CASTELL A, et al. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications[J]. *Applied Energy*, 2012, 99: 513–533.
- [21] NIE Binjian, PALACIOS A, ZOU Boyang, et al. Review on phase change materials for cold thermal energy storage applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110340.
- [22] SHA Yishun, HUA Weisan, CAO Hongfen, et al. Properties and encapsulation forms of phase change material and various types of cold storage box for cold chain logistics: a review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105426.
- [23] NIE Binjian, CHEN Jie, DU Zheng, et al. Thermal performance enhancement of a phase change material (PCM) based portable box for cold chain applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 40: 102707.
- [24] DU Jianping, NIE Binjian, ZHANG Yanping, et al. Cooling performance of a thermal energy storage-based portable box for cold chain applications [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 28: 101238.
- [25] XU Xiaofeng, ZHANG Xuelai. Simulation and experimental investigation of a multi-temperature insulation box with phase change materials for cold storage [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 292: 110286.
- [26] BURGESS S, WANG Xiaolin, RAHBARI A, et al. Optimisation of a portable phase-change material (PCM) storage system for emerging cold-chain delivery applications [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104855.
- [27] LI Mingli, LIN Zhibin. Numerical study of the feasibility of coupling vacuum isolation panels with phase change material for enhanced energy-efficient buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 251: 111369.
- [28] HAMMOND E C, EVANS J A. Application of vacuum insulation panels in the cold chain – analysis of viability [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 47: 58–65.
- [29] KOUSKSOU T, BRUEL P, JAMIL A, et al. Energy storage: applications and challenges [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 120: 59–80.
- [30] LI Gang, HWANG Y, RADERMACHER R, et al. Review of cold storage materials for subzero applications [J]. *Energy*, 2013, 51: 1–17.

通信作者简介

赵长颖,男,教授,上海交通大学工程热物理研究所,021-34204541, E-mail:changying.zhao@sjtu.edu.cn。研究方向:微纳传热、新型储能、热辐射与超材料能源器件。

About the corresponding author

Zhao Changying, male, professor, Institute of Engineering Thermophysics, Shanghai Jiao Tong University, 86 - 21 - 34204541, E-mail:changying.zhao@sjtu.edu.cn. Research fields: micro-nano heat transfer, new energy storage, thermal radiation and metamaterial energy devices.