

储热储冷多场景应用专刊



高效相变储冷板设计及性能研究

郭婵¹, 方祥¹, 王蔚伶², 钱高¹, 李秉杰¹, 苗琪², 张富善², 金翼²
(¹民政部一零一研究所, 北京 100070; ²江苏金合能源科技有限公司, 江苏 镇江 212400)

摘要: 添加储冷模块可实现冷库用能的峰谷调节提高冷库运行经济性, 但需解决相变储冷板因热导率低导致充冷速率慢的问题。过度减薄储冷板虽可加速传热, 但显著牺牲单板的储冷能力。本研究系统开展了模块容量与传热的协同优化研究, 通过数值模拟(Ansys Fluent)系统分析厚度与开孔结构对相变材料(PCM)凝固过程的影响, 并基于模拟结果开展模块结构设计与实验验证, 获得了最佳冷板结构。结果表明: 厚度减薄显著缩短凝固时间, 增加储冷效率, 33 mm储冷板需 11.68 h, 而 25 mm储冷板仅需 8.3 h, 降幅达 28.9%, 单位时间储冷量提高 6.6%; 在此基础上引入 18 mm 孔径开孔结构, 进一步将凝固时间缩短至 7.9 h, 降幅为 4.8%, 单位时间储冷量增加了 453.58 J, 且储冷板的单板储冷量基本维持不变。实验验证采用 25 mm 厚度、18 mm 孔径结构, 在 -24℃ 恒温环境中, PCM 于 7.71 h 完成凝固, 与模拟预测值 7.9 h 的相对误差仅 2.46%。本研究通过厚度优化与表面开槽增大传热面积的协同作用, 成功设计出满足 8 h 谷电时段充冷要求的储冷板结构, 为冷库节能降耗提供了高效技术方案。

关键词: 冷库; 相变储冷板; 协同优化; 传热强化; CFD 数值模拟

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1071

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-933-09

Design and performance of high-efficiency phase change cold storage plate

GUO Chan¹, FANG Xiang¹, WANG Weiling², QIAN Gao¹, LI Bingjie¹, MIAO Qi²,
ZHANG Fushan², JIN Yi²

(¹101 Research Institute of the Ministry of Civil Affairs, Beijing 100070, China; ²Jiangsu Jinhe Energy Technology Company Limited, Zhenjiang 212400, Jiangsu, China)

Abstract: Refrigerated warehouses can achieve peak shaving on the user side through the integration of phase change material (PCM) modules, thereby improving operational economics. However, the low heat transfer performance of phase change cold storage plates limits the charging rate, posing a key challenge. While reducing plate thickness can enhance heat transfer, it significantly decreases the cold storage capacity of individual plates. This study aims to optimize module storage capacity and the thermal charging process. The effects of plate thickness and perforated structures on PCM solidification were analyzed via numerical simulations. Based on these results, an optimized cold storage plate design was developed and experimentally validated. Results indicate that reducing thickness substantially

收稿日期: 2025-12-01; 修改稿日期: 2025-12-30。

基金项目: 中央财政专项 (102118220110000009026)。

第一作者: 郭婵 (1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为燃烧与储能, E-mail: chanchan0407@126.com; 通信作者: 方祥, 高级工程师, 研究方向为自动化控制, E-mail: fangxiang1211@163.com。

引用本文: 郭婵, 方祥, 王蔚伶, 等. 高效相变储冷板设计及性能研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 933-941.

Citation: GUO Chan, FANG Xiang, WANG Weiling, et al. Design and performance of high-efficiency phase change cold storage plate[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 933-941.

shortens solidification time and improves cold storage efficiency: A 33 mm plate required 11.68 h, whereas a 25 mm plate required only 8.3 h, a reduction of 28.9%, with a 6.6% increase in cold storage capacity per unit time. Introducing perforations with an 18 mm diameter further reduced solidification time to 7.9 h (a 4.8% decrease) and increased cold storage capacity per unit time by 453.58 J, while maintaining essentially the same single-plate capacity. Experimental validation using a 25 mm plate with 18 mm perforations in a constant temperature environment at -24°C demonstrated complete solidification in 7.71 h, a relative error of only 2.46% compared to simulations. Through the combined effects of thickness optimization and perforated surfaces to increase heat transfer area, this study successfully designed a cold storage plate capable of meeting the 8 h cold charging requirement during off-peak electricity periods, providing an efficient technical solution for energy conservation in refrigerated warehouse applications.

Keywords: refrigerator warehouse; phase change cold storage plate; collaborative optimization; heat transfer enhancement; CFD numerical simulation

冷库作为食品、药品等需低温保鲜物品的关键储存设施^[1-3],其持续低温运行依赖大量能源及稳定电力供应^[4-5]。为响应国家峰谷电价政策对能源错峰消纳与电网安全的引导,冷库行业亟需提升谷电利用率以实现节能降耗与运行成本优化^[6-8]。核心问题在于如何高效、大量存储谷电时段产生的冷量,并于峰电时段释放利用,在维持库温稳定的前提下显著降低峰电制冷能耗。该需求对高效储冷技术的开发提出了迫切要求。

相变材料(PCM)储能技术是解决上述问题的理想方案之一^[9-10]。该技术利用材料特定温度下发生相变时吸收或释放大潜热的特性^[11-12],可在谷电时段通过制冷系统将冷量以潜热形式固化储存;在峰电时段或制冷系统停机期间,材料熔化释放冷量,维持冷库温度稳定。该机制显著降低峰电时段的制冷设备运行能耗,实现运行成本节约和能源效率提升^[13-14]。

作为储冷介质,PCM储冷常被封装于空腔板中制成储冷板。该板多采用高密度聚乙烯、聚氯乙烯、尼龙复合膜、铝塑复合膜等高分子材料^[15-16]。该结构不仅有效防止液态PCM泄漏,确保系统清洁安全,还具有优异的耐化学耐腐蚀性和长期使用稳定性^[17],从而保障了PCM在冷库等复杂环境中的长期可靠运行。然而,由于储冷板封装材料的热导率普遍较低 $[0.2\sim 0.5\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$,导致PCM与外界环境发生热交换的热阻增大,严重制约了PCM在快速调温场景应用的储冷速率^[18-19]。通过优化储

冷板封装结构设计,可显著提升其传热效率,进而实现整体热性能的优化^[20-21]。

刘丽辉等^[22]在针对板式石蜡相变储能单元的研究中,系统探究了单元厚度(20 mm、30 mm、40 mm及50 mm)对传热过程的影响。研究发现,减小厚度能显著提升传热性能,当厚度从50 mm降至20 mm时,其传热速率提升了约17.36%,储冷容积降低了约8.9%。张榜等^[23]建立了相变储冷板的凝固过程传热模型,系统分析了结构厚度对凝固时间的影响。其研究表明,减薄板厚能显著缩短完全凝固时间:当板厚从基准的25 mm减小至20 mm和15 mm时,完全凝固时间分别缩短了15.7%和36.8%,储冷容积分别降低了20%和40%。

上述研究均表明,减小厚度有助于加速相变过程。然而,厚度过薄将不可避免地减少单位模块的相变材料封装量,从而影响其总体储冷能力。考虑到国内普遍实施的分时电价政策中,谷电时段通常为夜间8小时,为满足冷链物流在该时段高效充冷的需求,必须在8小时内完成充分的储冷过程。张楠等^[24]通过实验研究了表面结构对相变储能单元换热特性的影响,发现凸起的半圆形花纹能通过增大接触面积与扰动气流,提升对流换热系数,从而强化换热。Wu等^[25]基于数学模型分析指出,带有外翅片的冰板相较于无翅片结构可节省高达17.5%的储冷时间,且传热面积越大,储冷速率越快。因此,通过优化板型结构以增大换热面积,是提高换热效率、强化相变储冷过程的有效途径^[26-27]。然

而,无论是翅片还是凸起半圆结构,其应用均受到空间约束,这会显著提升储冷板的安装复杂性与改造成本。因此,当前的核心挑战在于突破现有空间限制,探索能在不显著牺牲储冷密度的前提下,大幅增强PCM与储冷板间接触面积的新型方案,以实现空间效率与热性能的协同优化。

本研究聚焦于此,区别于传统的单一参数调整,提出了“厚度-表面结构”协同优化的储冷板设计方法。该方法首先通过系统数值模拟,从多厚度方案(33 mm、30 mm、25 mm、20 mm和15 mm)中优选确定25 mm为兼顾充冷速率与储冷量的最优厚度;进而,在优选厚度基础上引入表面规则挖孔结构,通过“增大有效换热面积”与“缩短内部热传导距离”的协同效应,实现传热有效强化,并系统揭示了孔径(0 mm、10 mm、15 mm、18 mm和20 mm)对充冷性能的调控规律。最终,基于“模拟指导实验设计”的研究思路,成功设计出厚度25 mm结合孔径18 mm的复合结构储冷板并开展实验。实验验证表明,其实际凝固时间(7.71 h)与模拟预测(7.9 h)误差仅为2.46%,完全满足8 h谷电充冷的工程需求,为相变储冷单元的高效设计与工程应用提供了坚实技术支撑。

1 研究方法 with 实验设计

1.1 数值模拟方法

1.1.1 几何模型及边界条件

本研究探究单个储冷板表面结构对传热特性的

影响,采用Ansys Fluent对单个储冷板的凝固过程进行数值模拟。采用稳态模型分析空气的自然对流过程,其中浮升力由温度差与重力共同作用产生。在模拟过程中,环境温度保持 -24°C ,PCM初始温度为 20°C 。

储冷板为长方体形状,其外部尺寸(长 $\times$ 高 $\times$ 厚)为 $215\text{ mm}\times 145\text{ mm}\times 15\text{ mm}$,储冷板壁厚为1.5 mm,材质为高密度聚乙烯,如图1(a)所示。为探究储冷板厚度对凝固过程的影响,在保持长、宽尺寸、边界条件及模拟方法一致的前提下,将储冷板厚度分别调整为20 mm、25 mm、30 mm和33 mm进行对比仿真。

为强化充冷过程传热,在优选厚度(25 mm)储冷板表面(尺寸: $215\text{ mm}\times 145\text{ mm}\times 25\text{ mm}$)引入开孔结构,通过增大换热面积与缩短内部热传导路径提升效率。基于此,设计了四孔对称结构:将储冷板作四等分划分,并在各分区中心位置开设孔道,使四孔均布于储冷板平面并呈中心对称[图1(b)],由此形成的四个对称“冷点”,确保了PCM凝固前能够同步、均匀地向四周推进。首先对孔径10 mm进行仿真,进而将孔径增大至15 mm、18 mm和20 mm进行对比模拟,以揭示孔径对PCM充冷速率的影响规律。

1.1.2 相变材料

本研究采用的储冷介质为江苏金合能源科技有限公司提供的JH-Y-B18产品,其相变温度及相变焓值见图2,其他关键热物性参数详见表1。

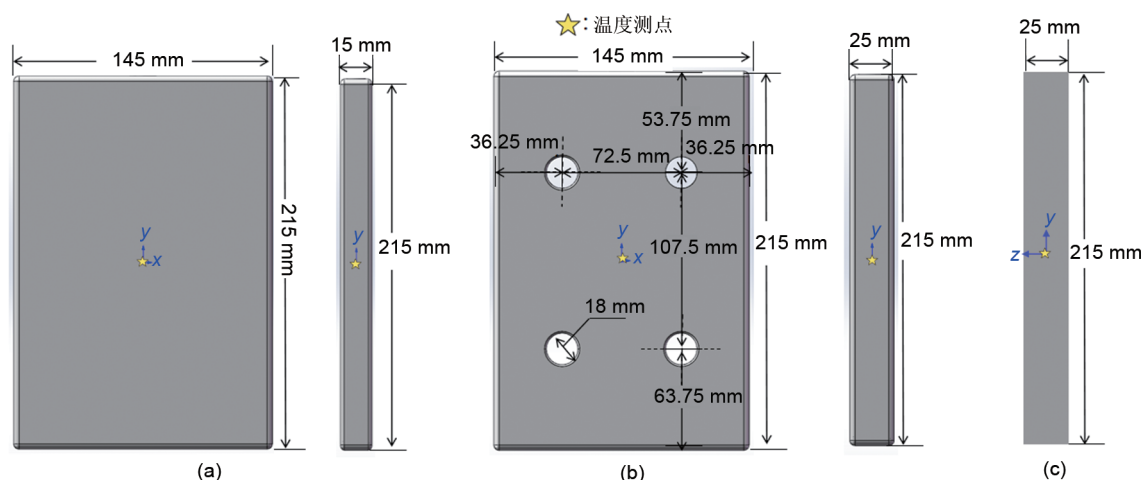


图1 不同几何结构的储冷板: (a) 未开孔; (b) 开孔; (c) 内部截面(Y-Z平面)

Fig. 1 Cold plates with different geometric configurations: (a) Without holes; (b) With holes; (c) Internal cross-section (Y-Z plane)

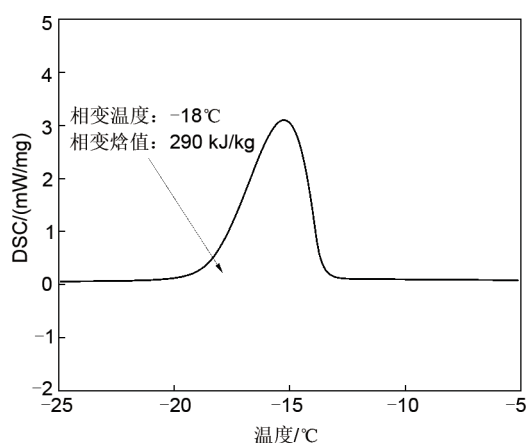


图2 JH-Y-B18 DSC 曲线图
Fig. 2 DSC curve of sample JH-Y-B18

表1 相变材料参数

Table 1 Phase change material parameters

类别	数值
密度	1020 kg/m ³
比热容(固)	1.50 J/(g·K)
比热容(液)	3.40 J/(g·K)
热导率	0.63 W/(m·°C)
动力黏度	2.50 mPa·s
潜热	290 J/g
相变点	-18.00°C

为从换热面积增大的角度定量分析挖孔结构的强化效果,需首先对结构修改后的有效换热面积进行量化计算。为此,本研究依据式(1)~(4)计算了关键参数。

$$S_1 = 2(ab + bh + ah) \quad (1)$$

$$S_2 = 8\pi r^2 \quad (2)$$

$$S_3 = 8\pi rh \quad (3)$$

$$S = S_1 + (S_3 - S_2) \quad (4)$$

式中, a 为储冷板长度, m; b 为储冷板宽度, m; h 为储冷板厚度, m; r 为圆孔半径, m; S_1 为未挖孔储冷板表面积, m²; S_2 为挖孔储冷板减少表面积, m²; S_3 为挖孔储冷板增加表面积, m²; S 为挖孔储冷板表面积, m²。

为量化评估挖孔结构对储冷性能的影响,本研究通过式(5)~(7)计算了 PCM 相应的储冷量。

$$\begin{cases} V = abh, \text{未挖孔} \\ V = abh - 4\pi r^2 h, \text{挖孔} \end{cases} \quad (5)$$

$$m = \rho V \quad (6)$$

$$Q = mq \quad (7)$$

式中, a 为储冷板长度, m; b 为储冷板宽度,

m; h 为储冷板厚度, m; m 为 PCM 填充量, kg; Q 为储冷量, kJ; q 为 PCM 潜热, 290 kJ/kg; r 为圆孔半径, m; V 为储冷板容积, m³; ρ 为 PCM 密度, kg/m³。

表2 不同结构储冷板的储冷材料质量与理论储冷量

Table 2 Mass of PCM and theoretical cold storage capacity of cold plates with different structures

储冷板编号	储冷板厚度/mm	储冷板孔径/mm	换热面积/m ²	储冷量/J
1	33	—	0.08611	304311
2	30	—	0.08395	276647
3	25	—	0.08035	230539
4	20	—	0.07675	184431
5	15	—	0.07315	138323
6	25	10	0.08286	228215
7	25	15	0.08365	225312
8	25	18	0.08397	223012
9	25	20	0.08412	221246

1.1.3 控制方程

本研究采用 Solidification & Melting 模型,对 PCM 的凝固过程进行模拟。

(1) 液相分数

$$\begin{cases} \beta = 0, & T < T_{\text{solidus}} \\ \beta = 1, & T > T_{\text{liquidus}} \\ \beta = \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}}, & T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, T_{liquidus} 为液相线温度, K; T_{solidus} 为固相线温度, K; β 为液相分数。

(2) 焓方程(能量守恒)

$$h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dT + \beta L \quad (9)$$

式中, C_p 为 PCM 比热容, J/(kg·K); h_{ref} 为基准焓值, J/K; L 为 PCM 潜热, J/kg; βL 为当前相态下已吸收/释放的潜热量, J/kg。

(3) 动量方程源项(Darcy 阻尼项)

$$S = -C \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} \mathbf{u} \quad (10)$$

式中, C 为糊状区阻尼系数; S 为动量方程的源项; $\mathbf{u}$ 为 PCM 速度矢量, m/s; ε 为极小值, 取 0.001。

1.1.4 网格无关性验证

在数值模拟中,网格划分的精细程度对计算结果的准确性和计算资源消耗具有关键影响。网格过于稀疏,会削弱对温度场与传热过程的解析能力;

而网格过度加密,则会显著增加计算成本。因此,开展网格无关性验证,以确定既能保证精度又兼顾效率的网格规模,是十分必要的。

本研究通过系统的网格无关性分析来确定最优网格配置。首先,基于热通量的评估结果(图3)表明,当网格数量达到约60000以后,计算结果趋于稳定,继续加密网格对热通量的影响小于2%。为进一步考察网格对温度场和相变过程的影响,随后对比了五套网格(从38316至95000单元)下的凝固行为。从图4可以看出,网格数增至63824之后,凝固时间基本保持一致。综上所述,本研究最终选用包含63824个单元的网格方案,该方案在确保计算结果准确性的同时,有效控制了计算资源的需求。

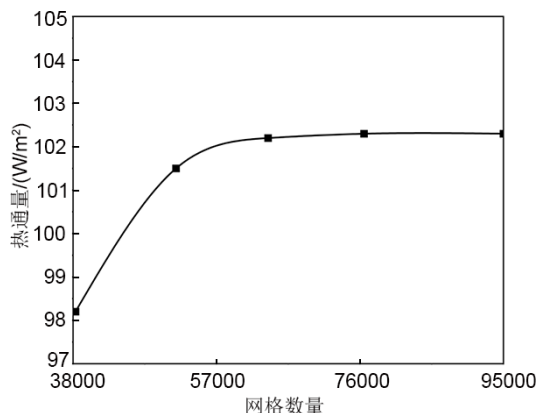


图3 网格数量对热通量的影响

Fig. 3 Effect of mesh density on heat flux

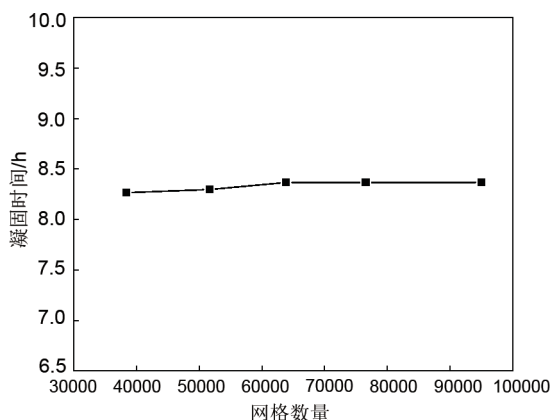


图4 网格数量对PCM凝固时间的影响

Fig. 4 Effect of mesh resolution on the solidification time of PCM

1.2 实验设计

基于数值模拟结果,构建储冷板相变特性测试

平台(图5),采用高精度HOBO温度记录仪对储冷单元凝固过程进行温度监测,基于温度-时间特征曲线提取凝固时间等关键参数。

将储冷板灌装JH-Y-B18,灌装质量769.007 g; A级PT100温度传感器置于储冷板内部液体的中心点位置(图1中☆标记处),将储冷板置于-24℃恒温箱中(温度波动 $\leq 0.3^{\circ}\text{C}$),持续冷冻直至温度记录仪显示PCM温度随环境温度下降,直至-24℃,判定PCM完全凝固;为减小随机误差,进行3次平行实验,最终结果取平均值。

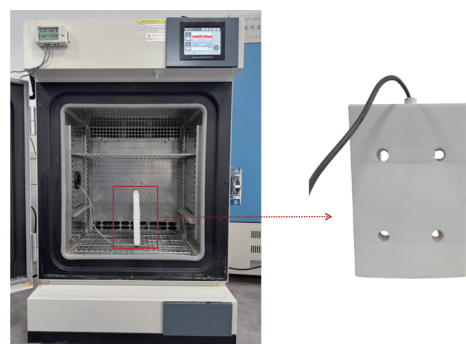


图5 储冷板凝固实验装置实物图

Fig. 5 Experimental setup for cold storage plate solidification

2 结果与讨论

2.1 储冷板厚度对PCM凝固过程的影响

图6展示了不同时刻储冷板内部截面[Y-Z平面,轮廓尺寸215 mm×25 mm,位置见图1(c)]的温度分布云图,分析可知内部区域温度始终高于外部区域,这表明PCM的凝固过程呈现明显的径向特征,即由储冷板外壁向中心区域逐步推进,直至整个PCM完全凝固。另一方面,图7显示PCM的凝固速度随时间推移而逐渐放缓,究其原因,该现象主要受PCM与环境(恒温箱)之间有效温差的驱动。具体而言,凝固初期,较大的初始温差产生了强烈的热驱动力,显著提升了热传递速率,从而加速了凝固过程;然而随着凝固相变进行并接近完成,PCM温度逐渐趋近其凝固点,导致有效温差显著减小,此阶段热驱动力减弱,因此充冷速率明显放缓,最终表现为凝固过程持续时间延长。

图8所示为不同厚度储冷板在 $t=14400\text{ s}$ 时的温度场分布。当凝固时间相同时,厚度为15 mm储冷板的PCM中心点温度显著低于厚度为20 mm、

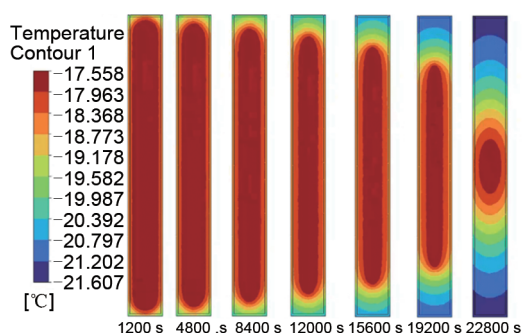


图6 截面不同时刻温度分布云图

Fig. 6 Temperature distribution of the cross-section at different times

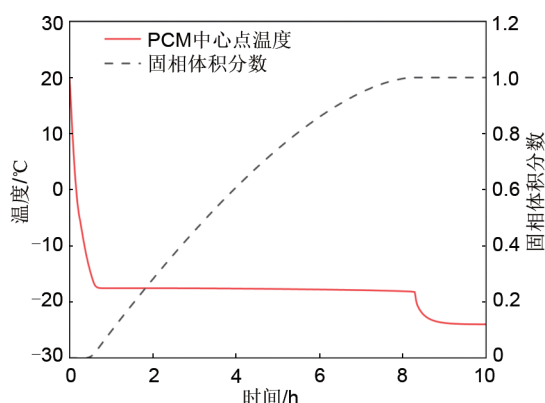
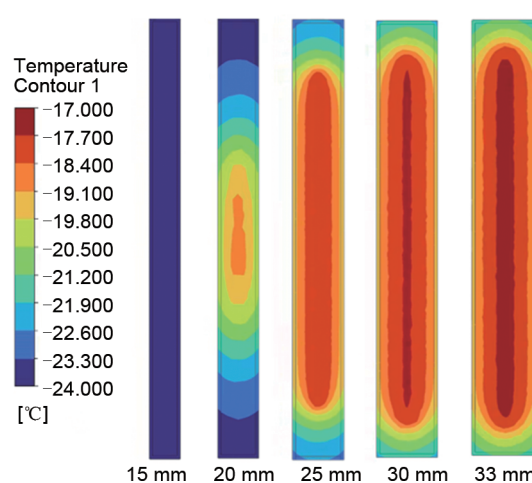
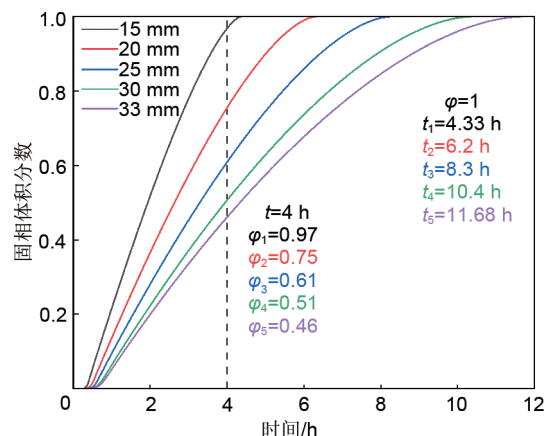


图7 凝固过程中PCM中心点温度与固相体积分数随时间的变化关系

Fig. 7 Variation of the PCM's center temperature and solid fraction over time during solidification

25 mm、30 mm与33 mm的储冷板。结合图9不同厚度储冷板中PCM固相体积分数随时间变化的曲线图可知,在 $t=14400$ s时,厚度为33 mm、30 mm、25 mm、20 mm和15 mm储冷板的PCM固体分数为0.46、0.51、0.61、0.75和0.97。随着储冷板厚度的增加,PCM的充冷速率逐渐变缓。

进一步对比了不同厚度储冷板的PCM完全凝固时间。如图9所示,当PCM完全凝固,即固相体积分数 φ 为1时,厚度为33 mm、30 mm、25 mm、20 mm和15 mm的储冷板中PCM的凝固时间分别为11.68 h、10.4 h、8.3 h、6.2 h和4.33 h。当储冷板厚度由33 mm减小至15 mm,即厚度减少18 mm时,PCM完全凝固所需时间缩短了62.9%。随着冷板厚度的减小,PCM的完全凝固时间缩短。这主要是因为:储冷板厚度减小时,PCM沿法向热传导距离缩短,显著降低了最大换热面积方向的热流路径长度,降低了热阻,从而加速了相变传热过程。

图8 不同厚度储冷板在 $t=14400$ s的截面温度分布云图Fig. 8 Temperature distribution across cold storage plates of different thicknesses at $t=14400$ s图9 储冷板厚度对PCM固相体积分数随时间变化的影响
Fig. 9 Effect of cold storage plate thickness on the temporal variation of the solid fraction in the PCM

减小储冷板厚度虽可缩短热传导距离,但由表2可知,当厚度从33 mm减薄至15 mm时,储冷量由304311 J下降至138323 J,降幅达54.55%,表明过度减薄会显著降低储冷容积,从而牺牲单板储冷能力。值得注意的是,厚度为25 mm的储冷板其PCM凝固时间为8.3 h,已接近满足谷电时段8小时充冷要求的临界值。此外,在25 mm厚度下,与33 mm厚度相比,储冷量由304311 J降至230539 J,凝固时间由11.68 h缩短至8.3 h,单位时间储冷量则从26054 J增加至27775 J,增幅约为6.6%。在维持25 mm厚度不变的前提下,提升充冷速率并突破时间制约的关键途径在于增大储冷板的有效换热面积。为此,下文提出在储冷板表面设计开孔结构,以期实现有效换热面积的显著提

升, 从而进一步优化其充冷性能。

2.2 储冷板有效换热面积对储冷过程的影响

图10显示在 $t=22800$ s时, 孔径20 mm储冷板的PCM中心高温区面积明显小于10 mm、15 mm及18 mm孔径板, 表明其凝固进程更深入; 此现象与图11的固相分数曲线相互印证——22800 s时, 孔径0 mm、10 mm、15 mm、18 mm与20 mm储冷板的PCM固相分数分别为0.89、0.93、0.94、0.95和0.94, 表明充冷速率随孔径增大而显著提升。这一加速效应的核心机制在于: 如表2所示, 储冷板孔径由0 mm增大至20 mm时, 换热面积由 0.08035 m^2 增加至 0.08412 m^2 , 孔径越大, 孔洞内壁面增加传热界面越高, 在PCM内部创造了额外的“冷点”, 使得凝固过程从储冷板外边界与孔洞内壁面双路径同步向内部推进, 从而缩短了热传递距离并强化了PCM的结晶界面发展, 最终有效缩短了整体凝固时间。

从表2来看, 在PCM完全凝固(固相分数 $\varphi=1$)的条件下, 孔径由0 mm增大至20 mm, 储冷量从230539 J降低至221246 J, 凝固时间从8.3 h降低至7.9 h, 单位时间储冷量从27775.78 J增大至28005.82 J, 增加了230.04 J。进一步分析发现, 孔径从18 mm增加至20 mm时, 储冷量从223012 J降低至221246 J, 凝固时间并未进一步减少, 保持7.9 h, 单位时间储冷量从28229.37 J降低至

28005.82 J, 这表明20 mm孔径的充冷速率低于18 mm孔径。因此, 18 mm孔径被确定为最优方案。

开孔设计(孔径18 mm)带来的核心优势在于传热强化: 与未开孔的25 mm的储冷板相比, 换热面积从 0.08035 m^2 增加至 0.08397 m^2 , 换热面积增加4.5%, 直接促使凝固时间由8.30 h减少至7.9 h。其直接效益是, 尽管单板总储冷量从230539 J微降至223012 J(仅损失3.26%), 不但使单板储冷量保持在25 mm未开孔的95%以上, 还使单位时间储冷量提升了453.58 J。这一提升确保了充冷过程可在8小时谷电窗口内完成, 最终实现了在储冷量基本不变条件下充冷速率的有效提升。

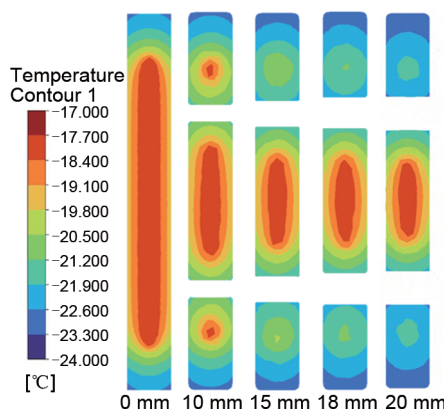


图10 不同孔径储冷板在 $t=22800$ s的截面温度分布云图
Fig. 10 Temperature distribution contours of cold plates with different hole diameters at $t=22800$ s

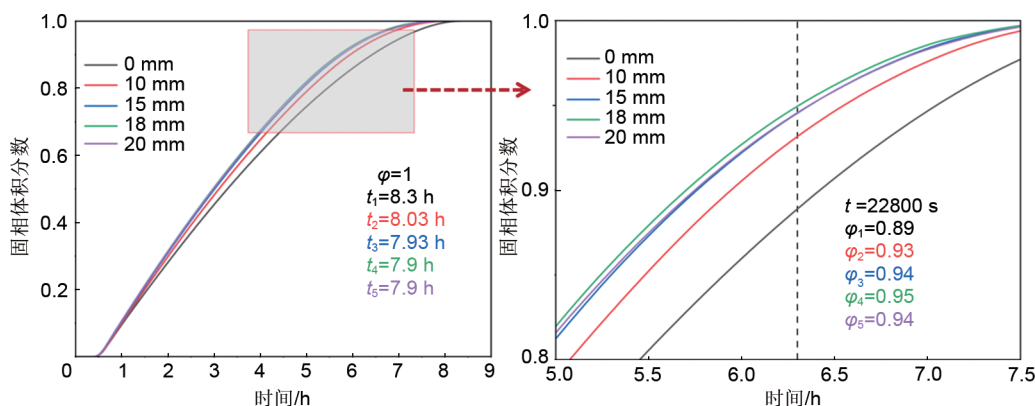


图11 储冷板孔径对PCM固相分数演化过程的影响

Fig. 11 Effect of pore size in cold storage plates on the evolution of the solid fraction in PCM

2.3 实验结果与模拟对比分析

基于模拟结果, 最终选定储冷板厚度25 mm、孔径18 mm作为最优参数组合, 制作储冷板模块, 搭建实验平台开展实验验证。如图13所示为实验

测得的PCM中心点温度随时间变化的曲线图, 在环境温度恒定为 -24°C 的条件下, PCM于 -18.23°C 进入凝固相变阶段, 7.71 h后, 其温度曲线与环境温度变化趋势重合, 表明PCM凝固已基本完成,

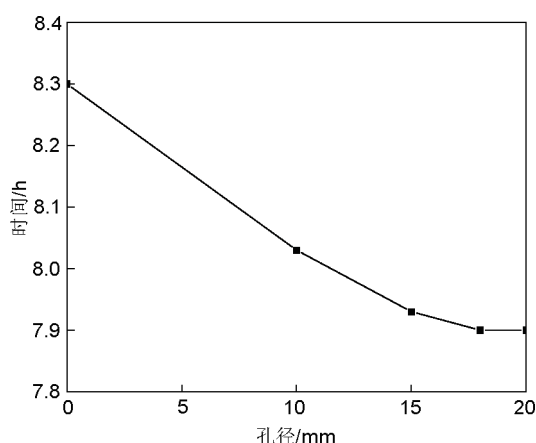


图12 储冷板孔径对PCM凝固时间的影响

Fig. 12 Effect of the pore size in cold storage plates on the solidification time of PCM

时间为7.71 h。数值模拟预测PCM完全凝固时间为7.9 h，相对误差仅2.46%。说明基于模拟指导实验的策略，最终设计出的储冷板方案可满足8 h谷电充冷需求，为后续储冷板结构设计奠定基础。

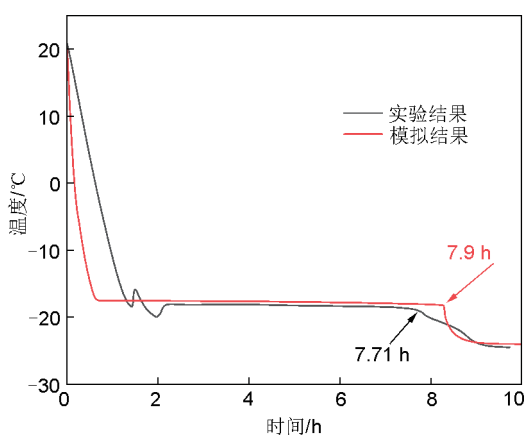


图13 PCM中心点温度随时间变化对比

Fig. 13 Comparison of PCM central point temperature with time

3 结论与展望

为突破相变储冷板“充冷速率-单板储冷量”的固有矛盾，响应冷库谷电充冷8 h的需求，本研究创新性提出“厚度控制+表面开孔”的协同优化机制：通过厚度减薄缩短热传导路径，同时利用表面开孔实现增加换热面积的目的，实现传热强化与储冷能力提升的高效协同。主要结论如下：

(1) 将储冷板厚度由33 mm优化至25 mm，厚度减薄24.24%，凝固时间缩短3.38 h，单位时间储冷量提升6.6%，有效提升传热效率。

(2) 在25 mm厚度的优化储冷板基础上，引入18 mm孔径开孔使有效传热面积增加4.5%，形成孔壁内外同步凝固的双路径相变机制，凝固时间进一步降低0.4 h，开孔后储冷板的单板储冷量仍保持在25 mm未开孔的95%以上，同时PCM单位时间储冷量增加了453.58 J，实现“面积增量换体积损失”的高效补偿。

(3) 对采用25 mm厚度与18 mm开孔结构的储冷板，在-24 °C恒温环境下进行凝固实验，测得实际凝固时间为7.71 h。该结果与数值模拟预测的凝固时间7.9 h高度吻合，相对误差仅为2.46%。基于模拟指导实验的策略，最终成功设计出满足8 h谷电充冷要求的储冷板方案。

为推动本研究提出的结构在冷链储冷中的实际应用，未来的研究可在以下方面深化：①将研究条件从恒温环境拓展至更贴合实际工况的动态变温场景，评估温度波动对充冷过程的影响；②对本研究采用的固定孔径结构进行参数化拓展，系统分析孔个数、间距、排布方式及表面花纹等其他关键构型参数的影响规律，从而实现对结构性能的定向设计与优化。

参考文献

- [1] 屈笑羽, 豆流鑫. 储能技术在食品电商冷链物流中的创新应用与前景分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2336-2338. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0501.
- QU X Y, DOU L X. Innovative application and prospect analysis of energy storage technology in cold chain logistics of fresh agricultural products e-commerce[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2336-2338. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0501.
- [2] OMARA A A M, MOHAMMEDALI A A M. Thermal management and performance enhancement of domestic refrigerators and freezers via phase change materials: A review[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 66: 102522. DOI: 10.1016/j.ifset.2020.102522.
- [3] BHATT T, BASER M, TYAGI A, et al. CRYOMOVE: Cold chain real-time management of vaccine delivery using PCM and deep learning[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 255: 123962. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.123962.
- [4] 张继龙. 冷库建设运营的成本控制与优化: 冷库建设运营的成本分析与控制[J]. 物流技术与应用, 2016, 21(13): 36-40. DOI:10.3969/j.issn.1007-1059.2016.z1.009.
- ZHANG J L. Cost analysis and control of cold storage construction and operation[J]. Logistics & Material Handling, 2016, 21(13): 36-40. DOI:10.3969/j.issn.1007-1059.2016.z1.009.
- [5] 杨延萍. 浅谈相变储能材料在冷链物流运输过程中产生的影响[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(9): 3041-3042.
- YANG Y P. Influence of phase change energy storage materials on cold chain logistics and transportation[J]. Energy Storage

- Science and Technology, 2023, 12(9): 3041-3042.
- [6] 童山虎, 廖良金, 李子潇, 等. 基于相变蓄冷技术的冷库供冷系统性能分析[J]. 中国果菜, 2024, 44(5): 27-32. DOI: 10.19590/j.cnki.1008-1038.2024.05.005.
- TONG S H, LIAO L J, LI Z X, et al. Performance analysis of cold storage cooling system based on phase change thermal energy storage technology[J]. China Fruit & Vegetable, 2024, 44(5): 27-32. DOI: 10.19590/j.cnki.1008-1038.2024.05.005.
- [7] WU W Z, HE Z J, LU S L, et al. Study on the phase change cold storage and release characteristics of the capillary cold storage plate for district cooling applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 285: 129225. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.129225.
- [8] 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. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.03.058.
- [9] MADHU M, KIRAN M, KUMAR D. Numerical simulation of N-tetradecane PCM for enhanced cold chain logistics in refrigerated trucks: Integrating experimental data for improved energy efficiency and power crisis management[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 98: 113001. DOI: 10.1016/j.est.2024.113001.
- [10] OUYANG Z W, ABDULAZIZ MOHAMMED T A, LIU L H, et al. Performance analysis on direct-expansion refrigeration-cold storage integrated cold plates[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 280: 128138. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128138.
- [11] 仇豆豆, 翟鑫钰, 阮春晨, 等. 相变蓄冷材料研究进展[J]. 新能源科技, 2024, 5(3): 1-14. DOI: 10.20145/j.32.1894.20240301.
- QIU D D, ZHAI X Y, RUAN C C, et al. Review on phase change materials for cold thermal energy storage[J]. New Energy Science and Technology, 2024, 5(3): 1-14. DOI: 10.20145/j.32.1894.20240301.
- [12] 张爱芳. 相变储能材料在冷链物流运输中的热效应作用分析[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(5): 1943-1945. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0415.
- ZHANG A F. Analysis of thermal effect of phase change energy storage materials in cold chain logistics transportation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(5): 1943-1945. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0415.
- [13] 张爱芳. 相变储能在冷链物流中的应用与研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(10): 3277-3278.
- ZHANG A F. Application and research progress of phase change energy storage in cold chain logistics[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(10): 3277-3278.
- [14] HUA W S, LI M S, SHI Y, et al. New low carbon path for cold store —Research progress of new type of cold store based on phase change thermal energy storage technology[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 126: 117109. DOI: 10.1016/j.est.2025.117109.
- [15] 孙锦涛. 带蓄冷板的排管冷库的设计及优化[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- SUN J T. Design and optimization of a row tube cold storage with cold storage plate[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.
- [16] ZHAO Y, ZHANG X L, XU X F, et al. Research progress of phase change cold storage materials used in cold chain transportation and their different cold storage packaging structures[J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 319: 114360. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.114360.
- [17] ORÓ E, MIRÓ L, BARRENECHE C, et al. Corrosion of metal and polymer containers for use in PCM cold storage[J]. Applied Energy, 2013, 109: 449-453. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.10.049.
- [18] 孙锦涛, 游辉, 谢晶. 蓄冷板对冷库保温的影响实验[J]. 包装工程, 2022, 43(13): 107-116. DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.13.014.
- SUN J T, YOU H, XIE J. Experimental research on influence of cold storage plate on insulation of cold storage[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(13): 107-116. DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.13.014.
- [19] ZAYED M E, ZHAO J, LI W J, et al. Recent progress in phase change materials storage containers: Geometries, design considerations and heat transfer improvement methods[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 30: 101341. DOI: 10.1016/j.est.2020.101341.
- [20] SALUNKHE P B, SHEMBEKAR P S. A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8): 5603-5616. DOI: 10.1016/j.rser.2012.05.037.
- [21] ZHU C H, DONG X D, GUAN Y L, et al. Research on the heat storage and optimization of the heat transfer performance of a phase change heat storage heat exchanger based on flow heat transfer[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2026, 78: 107658. DOI: 10.1016/j.csite.2026.107658.
- [22] 刘丽辉, 莫雅菁, 孙小琴, 等. 板式相变储能单元的蓄热特性及其优化[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6): 1784-1789. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0107.
- LIU L H, MO Y J, SUN X Q, et al. Thermal storage characteristics and optimization of plate-type phase change energy storage unit [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(6): 1784-1789. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0107.
- [23] 张榜, 崔小敏, 廖芳, 等. 蓄冷板中相变材料蓄冷过程影响因素研究[J]. 制冷与空调, 2024, 24(12): 96-99, 105. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8402.2024.12.018.
- ZHANG B, CUI X M, LIAO F, et al. Influencing factors of cold storage process of phase change material in cold storage plate [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2024, 24(12): 96-99, 105. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8402.2024.12.018.
- [24] 张楠, 陆威, 吴志根, 等. 平板式相变储能单元空气侧表面换热性能分析[J]. 化学工程, 2023, 51(10): 53-57. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2023.10.010.
- ZHANG N, LU W, WU Z G, et al. Analysis of surface heat transfer performance on air side of plate phase change energy storage unit[J]. Chemical Engineering, 2023, 51(10): 53-57. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2023.10.010.
- [25] WU K, ZHAO H B, WANG Y. Cold storage and release characteristics of phase change cold storage plate with non-uniform fins[J]. Energies, 2024, 17(15): DOI: 10.3390/en17153610.
- [26] FARID M M, KHUDHAIR A M, ALI K RAZACK S, et al. A review on phase change energy storage: Materials and applications[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(9/10): 1597-1615. DOI: 10.1016/j.enconman.2003.09.015.
- [27] SRIVASTAVA U, SAHOO R R. Advanced fin designs for enhancement in thermal management of eutectic phase change materials in a latent heat thermal energy storage system[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2026, 170: 109932. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109932.