



基于拓扑优化的冷藏车蓄冷板高效充冷翅片设计

李博然^{1,2}, 童山虎^{1,3,5}, 王 达^{4,5}, 任晓芬^{1,2}, 赵学敏^{1,2}

(¹石家庄铁道大学机械工程学院低温储能研究中心, 河北 石家庄 050043; ²石家庄铁道大学河北省新型储能国际联合研究中心, 河北 石家庄 050043; ³中车石家庄车辆有限公司, 河北 石家庄 051430; ⁴中华全国供销合作总社济南果品研究所, 山东 济南 250101; ⁵河北省轨道交通制冷与空调绿色数智技术重点实验室, 河北 石家庄 051430)

摘 要: 随着冷链物流规模快速增长, 蓄冷式冷藏车因其节能环保特性备受关注, 但蓄冷梁中相变材料的充冷速度缓慢、温度分布不均成为研究瓶颈。为此, 本研究创新性地提出基于拓扑优化的蓄冷板高效充冷翅片设计方法, 首先利用 COMSOL 多物理场数值模拟, 对翅片结构进行拓扑优化, 然后通过参数化简化重构, 兼顾高效传热与工程可制造性。研究表明, 拓扑优化翅片在相同体积比(尤其 5.8%)下较传统直肋型翅片传热效率提升了 71.4%, 简化后结构热性能偏差小于 0.2℃, 同时成本和加工难度大幅降低。进一步分析不同管径对相变固相率的影响, 发现 80 mm 较 65 mm 管径的综合性能提升了 10%。本研究不仅为蓄冷式冷藏车翅片设计提供了系统化优化思路, 还在提高充冷效率与维护蓄冷容量平衡方面取得了突破, 为低碳环保冷链运输技术的发展注入新动能。

关键词: 蓄冷式冷藏车; 拓扑优化; 相变材料; 充冷效率

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0767

中图分类号: TB 657.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-555-12

Optimizing finned charging tubes for thermal energy storage in cold storage vehicles

LI Boran^{1,2}, TONG Shanhu^{1,3,5}, WANG Da^{4,5}, REN Xiaofen^{1,2}, ZHAO Xuemin^{1,2}

(¹Low Temperature Energy Storage Research Center, School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China; ²International Joint Research Center for New Energy Storage, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China; ³CRRC Shijiazhuang Vehicle Co., Ltd. Shijiazhuang 051430, Hebei, China; ⁴China National Supply and Marketing Cooperative Federation Fruit Research Institute, Jinan 250101, Shandong, China; ⁵Hebei Province Key Laboratory of Green Digitalization Technologies for Rail Transit Refrigeration and Air Conditioning, Shijiazhuang 051430, Hebei, China)

Abstract: With the rapid growth of cold chain logistics, cold storage refrigeration vehicles have garnered increasing attention for their energy-saving and environmentally friendly characteristics. However, slow charging rates and nonuniform temperature distribution of phase change materials (PCMs) in cold storage plates remain performance bottlenecks. This

收稿日期: 2025-08-26; 修改稿日期: 2025-09-15。

基金项目: 石家庄市驻冀高校重大科技专项 (241260497A), 河北省青年拔尖人才项目 (BJ2025206), 河北省燕赵黄金台聚才计划骨干人才项目 (50199990661)。

第一作者: 李博然 (2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为相变蓄冷, E-mail: 2304448599@qq.com; 通信作者: 赵学敏, 讲师, 研究方向为相变材料、规模化制备与表征, E-mail: 1625085843@qq.com。

引用本文: 李博然, 童山虎, 王达, 等. 基于拓扑优化的冷藏车蓄冷板高效充冷翅片设计[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 555-566.

Citation: LI Boran, TONG Shanhu, WANG Da, et al. Optimizing finned charging tubes for thermal energy storage in cold storage vehicles[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 555-566.

study proposes an efficient charging-fin design method for cold storage plates based on topology optimization. First, a multiphysics numerical simulation was conducted using COMSOL, and the fin structure was optimized via the density method. Then, parametric simplification and structural reconstruction were applied to achieve a balance between high heat transfer efficiency and engineering manufacturability. The results indicate that, under the same volume ratio, topology-optimized fins achieve a 71.4% higher heat transfer efficiency than conventional straight-rib fins, with only a 5.8% increase in material volume. The thermal performance deviation between the optimized and simplified structures is $<0.2^{\circ}\text{C}$, and cost and processing difficulty are significantly reduced. Further analysis of pipe diameter effects on the solid fraction of the PCM reveals that an 80 mm diameter yields the best overall performance. This study offers a systematic optimization approach for fin design in cold storage refrigeration vehicles, achieving improved charging efficiency while maintaining balanced cold storage capacity, thereby advancing low-carbon and environmentally friendly cold chain transportation technologies.

Keywords: refrigeration vehicle with cold storage; topology optimization; phase change material; cooling efficiency

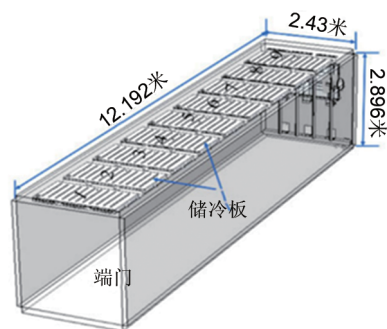
随着全球冷链物流需求的快速增长,冷藏运输车辆受到广泛关注。《中国冷链物流发展报告(2023)》指出,2022年我国冷链物流市场规模已突破5200亿元,并持续以年均超过10%的速度增长。有些产品对温度敏感度极高,如金枪鱼需在 -20°C 保存,而在传统冷藏车运输的过程中,外部环境的变化会对易腐食品的质量、保质期以及潜在的细菌滋生产生较大的影响^[1],且传统冷藏车多采用柴油发动机驱动,依靠压缩机制冷维持车厢温度,不仅存在系统复杂、设备体积大、车厢空间受限、运行成本高等问题,并且这一链条占全球能源总能耗的30%^[2],占全球温室气体排放量的1%^[3],其高能耗与碳排放也难以满足“双碳”战略下绿色物流的发展要求。为应对上述问题,相变蓄冷式冷藏车逐渐成为一种具备绿色环保潜力的替代方案。该系统通过在运输前将相变材料(phase change materials, PCM)预冷冻结于车载蓄冷板内,运输过程中无需持续供能即可实现“无源冷却”,不仅提高了车厢利用率,同时显著降低了运行能耗和环境负担。然而,现有蓄冷系统普遍存在充冷速度慢、传热效率低、温度分布不均等技术瓶颈,极大地限制了其推广与工程实效。

Tan等^[4]研究发现将水作为相变材料添加到蓄冷单元中,通过低温天然气让其凝固,这种新型系统显著提高了内部热效率和相变效率。Fioretti等^[5]

通过实验和理论探讨了在冷藏车外壳中使用相变材料的应用,该系统所需的总能量减少了4.7%。Ben Taher等^[6]研究发现在冷藏车中加装填充相变材料的蓄冷板后,系统寿命延长,在装载以及卸载的情况下冷藏车的温度波动大大降低,这节约了能量并且减少了温室气体的排放。Copertaro等^[7]针对配置相变蓄冷单元的冷藏运输车辆开展了系统性评估,实验数据显示,采用蓄冷装置后,车厢内部的热量可减少约1/5,同时制冷系统能耗下降幅度达到4.65%。上述研究表明,添加相变材料的蓄冷板换热结构设计会对系统热响应性能有显著影响。图1展示了蓄冷式冷藏车集装箱内安装的多块蓄冷板形式,蓄冷板中盛装相变材料,在冷库中通过充冷管对相变材料进行冻结蓄冷。现有研究在相变蓄冷技术领域已取得重要进展,但仍存在若干关键问题亟待解决,如冷藏车蓄冷梁内部结构的优化,蓄冷梁内部翅片的实际应用情况等。李晓燕等^[8]指出利用相变材料蓄冷,可避免重复启停、控制压缩机机制的情况,可有效提升能源的利用效率,同时大大减小车厢内部温度波动。田津津等^[9]基于建立相变储能单元释冷数值模型,研究发现,NaCl蓄冷板释冷时间与环境温度呈负相关。当环境温度高于其共晶温度(-21.2°C)时,温度越高,共晶冰完全融化所需时间越短。蒋玉龙等^[10]分析了泡沫复合相变储能单元熔融速率演变特征、空间温度梯度分布规

律。实验数据表明,多孔泡沫基体的引入可显著延缓储能系统的冷量释放周期。范中阳等^[11]通过对比实验发现,相变储能单元采用周向分布式布局可显著提升冷藏箱内温度均匀性,使温度波动降低约40%,温度分布更为均衡。Zivkovic等^[12]通过建立基于焓法的等温相变数学模型,结合实验验证,发现在相同体积和传热面积下,矩形容器的熔化时间比圆柱形容器缩短近50%,为太阳能储热系统的容器设计提供了优化依据。Mousazade等^[13]在冷藏卡车的蓄冷板中应用了三种类型的相变材料,研究了卡车速度对整体传热系数以及冷藏箱内部温度变化的影响。结果表明,E-26相变材料在测试中表现出最优异的性能,其整体传热系数最低 $[0.27 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$,熔化时间最长(17200秒)。Alzuwaid等^[14]研发了一种基于相变蓄冷技术的新型热交换装置,该设计将相变介质布置于蒸发器管束后方区域。在制冷系统停机时段,蓄冷介质可释放冷量维持箱体内部温度稳定。田绅等^[15]通过对蓄冷板加装热管的方式加快相变材料相变的速度以快速放冷。童山虎等^[16]对蓄冷板充冷时长,运输过程中冷藏车集装箱内各部位温度,湿度以及能耗进行了检测,大概在6小时后冷藏车可以完成充冷,运行过程中温湿度波动小,且运行成本低于传统的利用制冷机组制冷的冷藏车。张榜等^[17]通过数值模拟方法研究了蓄冷板外壳材质、厚度及环境温度对相变材料蓄冷速度的影响,结果表明不锈钢外壳使相变材料完全固化时间缩短11.6%;厚度减少后可大幅缩短释冷时间。Tassou等^[18]研究发现在车厢内加入循环通风系统可有效提高车厢内的温度均匀性,进而更大化地利用冷源。杨凤等^[19]针对冷库运行过程中的温度稳定性问题,研究证实在庫体顶部加装相变储能装置可显著抑制因融霜过程引起的温度波动现象。邓静等^[20]发现在蓄冷板内加装充冷管并在充冷管上加装翅片可大幅提高蓄冷板充冷,补冷速度。Habib等^[21]针对紧凑型翅片管式潜热储能系统开展了数值模拟研究,结果表明:提升肋片布置密度可显著缩短相变周期,使系统功率提高约30%。以上研究表明现在对于蓄冷式冷藏车结构优化已有一定进展,但大多数优化研究都停留在冷藏车车厢内部的结构上,没有对蓄冷梁内部结构进行足够的优化研究。

另一方面,拓扑优化作为近年来兴起的结构优化方法逐渐被引入强化换热翅片设计中。Han等^[22]



(a) 示意图



(b) 实物图

图1 蓄冷集装箱示意图及实物图

Fig. 1 Cold storage container schematic diagram

建立新型三维六面体模型,研究多孔骨架内相变材料的非平衡传热行为。结果表明,增大相变材料体积分数和连通面积分数会增强局部非平衡效应,双温度模型可有效预测该过程,且耦合因子随这两个参数增大呈近线性减小。Han等^[23]提出了一种用于圆柱动力电池的创新型空气冷却热管理系统,通过非等长开槽环形翅片结构优化设计。研究结果表明,该设计在不同工况下能将电池组最高温度降低 $1.91\sim 2.20^\circ\text{C}$,最大温差减少至传统模型的70.54%~82.38%,同时有效抑制热失控传播,显著提升了电池组温度均匀性和安全性。Yu等^[24]通过数值模拟优化了分形树状翅片在潜热储存单元中的结构参数,研究发现优化后的分形树状翅片相比传统平板翅片,总熔化时间缩短了26.7%,平均蓄热速率提高了45.4%。Zhang等^[25]与Ao等^[26]分别提出了应用在管壳式换热器上环形翅片与纵向翅片共同应用的混合型翅片及倾斜式环形翅片,创新了环形

翅片的优化思路。Al-Mudhafar等^[27]在管壳式相变储能装置中创新性地设计了一种T型肋片结构,实验显示,采用该新型肋片可使相变材料的完全相变周期缩短33%。Choudhari等^[28]通过数值模拟方法研究了矩形、梯形、三角形、I型和T型翅片及翅片数量对锂离子电池相变材料热管理模块性能的影响,结果表明I型翅片最大限度提升了传热效率与温度均匀性。Kalapala等^[29]研究发现水平热交换器中,底部布置翅片效果最佳;垂直热交换器中,倾斜或非均匀分布翅片可增强对流。Li等^[30]将仿生设计理论应用到翅片设计中,创新性地提出了一种类似于叶脉的叶形翅片,并将翅片优化为针型翅片,以揭示仿生翅片下的相变行为和传热模式。Ren等^[31]针对具有分形特征的雪花状肋片储能系统开展了创新性研究,其结果表明相较于常规肋片结构,相变材料完全熔融周期缩短45.59%。Shahsavari等^[32]重点考察了翅片空间分布对相变材料相变过程的影响规律。当采用周向均匀分布的翅片阵列结构时,相变材料的完全熔化周期较无翅片基准案例缩减41.4%,而凝固过程耗时也减少了9.7%。

以上结论揭示了分形几何结构在强化相变传热中的重要作用,但传统设计翅片方法的局限性如仅凭研究人员直觉设计翅片以及翅片传热效率低等,促使研究人员改为利用拓扑优化的方法设计翅片。Pandey等^[33]利用拓扑优化方法提出了一种应用于液冷散热器的翅片,该散热器比利用传统鳍型翅片的散热器降低了24%的平均温度。Yang等^[34]以最小化容量耗散为目标函数对管壳式相变蓄热器翅片进行拓扑优化,拓扑优化后的翅片使相变材料熔化过程加速93%,凝固过程提速80%。Petrovic等^[35]通过拓扑优化方法设计了板式换热器的翅片结构,传热效率比传统设计提升16%~22%,并通过实验验证了性能。但受限于3D打印精度,实际效果略低于模拟值。Zhao等^[36]研究发现在相变小球中加入拓扑优化翅片后相变材料熔化时间缩短了24%。Lohan等^[37]探讨了不同目标函数对优化结果的影响,结果表明,目标函数的选择对优化结构性能有显著影响,最大温度最小化能降低热点温度13%~30%,而温度方差优化则能改善温度均匀性但可能牺牲最大温度性能。

综上所述,冷藏车蓄冷板充冷过程强化换热设

计存在如下难题:①当前大多数冷链运输研究集中在冷藏箱布局、通风系统或相变材料选型方面,针对充冷翅片结构对相变效率的影响尚缺乏系统分析;②拓扑优化在移动式蓄冷设备中充冷翅片的应用探索较少,尤其在考虑工程可行性与高传热结构统一方面,缺乏有效解决方案。因此,本研究引入拓扑优化方法对冷藏车蓄冷板的翅片结构以及充冷管径大小进行优化,以提升相变蓄冷板的整体传热效率与实用价值。本研究的创新点在于将结构拓扑优化技术应用于蓄冷板内部翅片设计中,通过设计轻量化、高导热的一体式拓扑翅片结构,在实现复杂流体传热耦合性能最优的同时兼顾结构简洁性与工艺可实现性。该优化翅片不仅显著增加了有效传热面积,还提高了充冷过程中相变材料的熔化均匀性,从而大幅缩短充冷时间、提升蓄冷密度,为移动蓄冷装备的高效换热结构设计提供了新思路。

1 研究方法

1.1 几何模型

根据现有蓄冷式冷链冷藏车尺寸,规定本研究中冷藏车车厢尺寸为12.192 m×2.43 m×2.896 m(图2)。车厢顶部安装蓄冷板,蓄冷板由14根蓄冷管以及外壳组成,蓄冷管分为前后两组,每7根为一组,每根管长为5900 mm,尺寸为200 mm×120 mm。

蓄冷管主要由充冷管道和外部壳体两部分构成,每管内置一根独立充冷管道。本研究采用半径为40 mm的圆形管道作为充冷管,内部流通载冷剂。充冷时,管道接口连接制冷机组,载冷剂循环流动,通过换热使相变材料逐渐凝固;相变材料完全凝固即表示充冷完成。

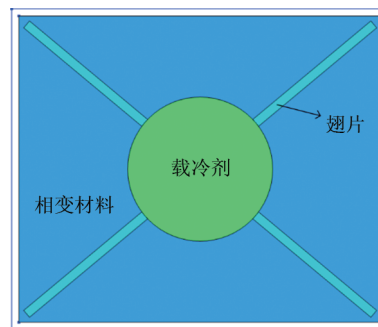


图2 蓄冷梁横截面模型

Fig. 2 Cold storage collection and storage beam cross-sectional model

如图2所示,蓄冷管道的截面结构主要由中心的充冷管道及环绕其布置的翅片组成。翅片将均匀安装在充冷管道的外壁上,其具体设计需要综合考虑多方面因素,包括充冷管道的管径尺寸、翅片本身的厚度以及翅片的整体结构形式等。

1.2 数学模型

为简化数学模型,方便计算,作出如下假设:

(1) 认为相变材料在液态时是层流的,不可压缩流体。

(2) 认为相变材料的物性是恒定的常量,与温度变化无关。

(3) 忽略相变材料在固态时的下沉。

基于上述假设,包含连续性、动量和动能的控制方程可表达为:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot \mathbf{u}) - \frac{\partial \rho}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot \mathbf{v}) - \frac{\partial \rho}{\partial x} + S_v + S_b \quad (3)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4)$$

式(1)~(4)为基于焓形式的能量方程,式中 H 为焓,定义为潜焓 ΔH 及显焓 h_s 之和。

$$H = \Delta H + h_s \quad (5)$$

$$\nabla H = \beta L_h \quad (6)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (7)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & T_s < T < T_l \\ 1 & T > T_l \end{cases} \quad (8)$$

上述方程中, ρ 是密度, $\mathbf{v}$ 是流体的速度, u 和 v 是流体在 x 和 y 方向上的速度, μ 是动力黏度, k 是导热系数, β 是液体分数, L_h 是潜热, h_{ref} 是参考焓, T_{ref} 是参考温度, S_u 、 S_v 、 S_b 和 S_h 是源项,可用式(9)~(12)表示:

$$S_u = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} u \quad (9)$$

$$S_v = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} v \quad (10)$$

$$S_b = \frac{\rho g \beta (h - h_{ref})}{c_p} \quad (11)$$

$$S_h = \frac{\partial (\rho \Delta H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \Delta H) \quad (12)$$

A_{mush} 是一个反映熔融峰的糊状带常数($10^4 \sim 10^7$),在本研究中,取其为 10^5 , ε 是一个小常数,在本研究中设为0.0001,避免被零除。

1.3 求解设置

本工作研究超低温冷链运输车,因此采用符合本研究需求的相变温度较低,以相变潜热要求较高的氯化镁水溶液作为相变材料。本研究由于只讨论翅片结构对相变材料完成相变速度的影响,同时为方便计算,并且便于之后的研究可以顺利进行,建立以蓄冷梁横截面为基础的二维模型,氯化镁水溶液相变温度为239.55 K,因此将载冷剂进入入口时的温度设置为227 K,确保有足够的温差促进相变过程。依据现有冷藏车保温措施,认为冷藏车保温效果良好,故蓄冷梁四周的壁面设置成绝热壁面,以排除外部热对于相变过程的影响。蓄冷梁整体初始温度设为273 K,在材料选择方面,充冷管道及翅片最终采用铝金属,主要基于其在保证优异导热性能的同时,具备良好的经济性,能够有效平衡热管理效率与系统成本之间的需求。相变材料的固态密度以及液态密度为1209 kg/m³,相变温度区间为4 K,相变焓差为221.88 kJ/kg,比热容为2.4 kJ/(kg·K),导热系数为0.531 W/(m·K)。

1.4 网格无关性验证

在本研究中,计算域的离散化处理采用了COMSOL Multiphysics商业模拟软件提供的自由四面体网格划分方法。这种网格类型特别适用于处理具有复杂几何特征的计算模型,为了确保数值模拟结果的可靠性,本研究建立了如图3所示的模型,为确保模拟可靠性,以充冷管半径40 mm、加装4翅片的基准模型为基础,系统开展了网格无关性验证。设计了六种不同密度的网格方案(单元数依次为326、502、1234、1684、1842和2094),并以300 min时相变材料的平均温度为指标进行分析。结果表明(图4),当网格单元数低于1684时,平均温度与其他方案存在显著差异,说明网格分辨率不足会引入明显误差。采用1684个网格单元时,关键参数误差已满足工程精度要求,且计算资源消耗较低。且当以相变完成时间作为评价指标进行网格独立和验证时,结果如图5所示,同样是在网格数目高于1684后,相变完成时间与网格数目开始没

有明显差异。基于这一分析结论,本研究最终确定将 1684 个单元的网格密度作为后续所有模拟计算的基准网格配置。这一选择不仅确保了数值结果的可靠性,还显著提高了大规模参数化研究的计算效率,为开展系统的参数优化研究奠定了坚实的基础。

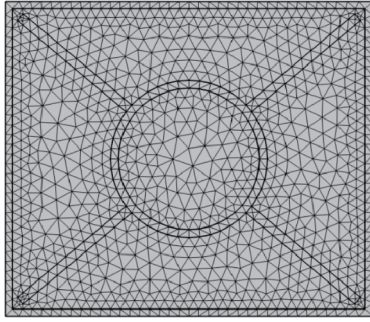


图3 网格验证模型

Fig. 3 Grid verification model

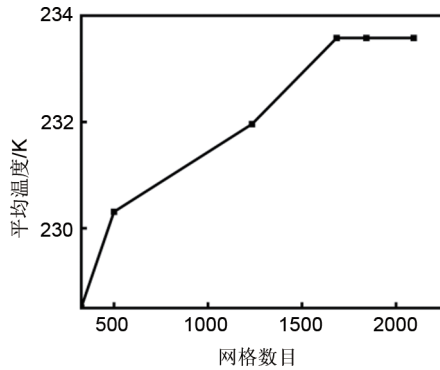


图4 以相变材料平均温度为指标的网格独立化曲线

Fig. 4 The grid independence curve based on the average temperature of the phase change material

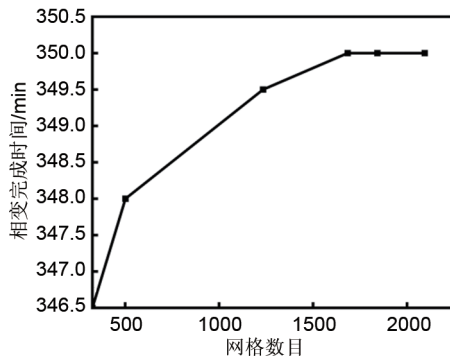


图5 以相变完成时间为指标的网格验证独立化曲线

Fig. 5 The independent verification curve of the grid based on the completion time of phase change

1.5 翅片拓扑优化原理

利用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics

对蓄冷梁内部的翅片布局进行拓扑优化设计,旨在实现两个关键目标:其一,大幅缩短蓄冷梁的充冷时间;其二,有效改善相变材料在相变过程中的温度均匀性。本研究聚焦于拓扑优化翅片结构对蓄冷梁充冷速率的提升效果,基于此研究目标,对三维蓄冷梁模型进行了合理的简化处理。考虑到问题的对称性和计算效率,将原本的三维传热问题简化为二维截面模型进行分析,这种简化方法在保证计算精度的同时显著降低了计算复杂度。在实施拓扑优化过程中,重点针对蓄冷梁截面的二维模型开展优化设计,并设定模型四周边界为绝热条件以模拟实际工况。待完成二维截面的拓扑优化后,将获得的优化翅片构型通过轴向延伸的方式应用于完整的三维蓄冷梁模型中。

在拓扑区域引入相对密度 γ , 采用 SIMP 模型对拓扑区域的物性参数进行插值,插值公式如式(13)~(15):

$$k(\gamma) = k_{\text{pcm}} + (k_{\text{fin}} - k_{\text{pcm}})\gamma \quad (13)$$

$$\rho(\gamma) = \rho_{\text{pcm}} + (\rho_{\text{fin}} - \rho_{\text{pcm}})\gamma \quad (14)$$

$$C_p(\gamma) = C_{p\text{pcm}} + (C_{p\text{fin}} - C_{p\text{pcm}})\gamma \quad (15)$$

式中, $k(\gamma)$ 、 $\rho(\gamma)$ 、 $C_p(\gamma)$ 分别代表拓扑区域的导热系数、密度和比热容 k_{pcm} 、 ρ_{pcm} 和 $C_{p\text{pcm}}$ 为相变材料的导热系数、密度和比热容, k_{fin} 、 ρ_{fin} 和 $C_{p\text{fin}}$ 为铝翅片的导热系数、密度和比热容。 γ 是引入的相对密度,在一个由伪密度表征的设计域内,每个设计单元密度值可以取 0~1 之间的任何数值。可以看出当 γ 为 1 时,此设计域的单元材料为翅片,当 γ 为 0 时,此设计域的单元材料为相变材料。

在优化过程中,不稳定结果和局部最优解的存在会导致产生网格依赖性和镶嵌现象。所以采用亥姆霍兹方程对计算结果进行过滤,表达式见式(16):

$$\gamma_f = \gamma_c + r_{\min}^2 \nabla^2 \gamma_f \quad (16)$$

式中, $r_{\min}$ 是过滤半径; γ_f 是过滤后的设计变量; γ_c 是没有过滤的设计变量。

过滤后的拓扑结构数值更加稳定,但是这种方法产生了大量 $1 > \gamma > 0$ 的单元,导致翅片的边界不清晰,为了使结构的边界更加清晰,采用了双曲正切投影的方法锐化拓扑结构边界,表达式如式(17)。

$$\gamma = \frac{\tanh[\beta(\gamma_f - \gamma_\beta)] + \tanh(\beta\gamma_\beta)}{\tanh[\beta(1 - \gamma_\beta)] + \tanh(\beta\gamma_\beta)} \quad (17)$$

式中, β 为投影率, γ_β 为投影点。低投影率的效

果并不会明显,高投影率则会增大计算量,不易收敛。因此本研究选取投影斜率 β 为8,投影点 y_β 为0.5。

2 优化分析

2.1 直肋型翅片分析

本研究旨在通过优化蓄冷管翅片结构提升充冷效率。基于工程实际应用需求,以DN80钢管(外径89 mm)为基础,在半径为40 mm的充冷管外壁对

称布置翅片,两组传统直翅片分别以 60° 和 120° 均匀分布,长度60 mm,厚度5 mm。在 180° 方向增设第三组强化翅片,长度90 mm,厚度5 mm。在 90° 方向布置第四组翅片,长度40 mm,厚度5 mm。三组翅片与相变材料的体积占比分别为5.8%、7.61%和8.89%。该阶梯式布局在有限空间内最大化换热面积,同时保证相变材料填充体积,为充冷性能分析提供了系统的结构模型。

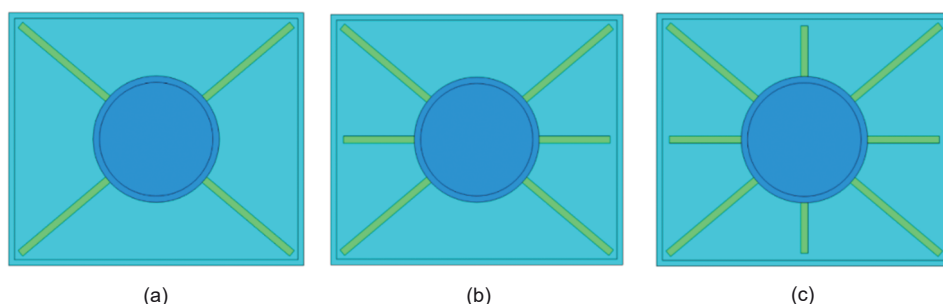


图6 三种不同的直肋型翅片模型: (a) 两组翅片; (b) 三组翅片; (c) 四组翅片

Fig. 6 Three different models of straight-ribbed finned plates: (a) Two sets of fins; (b) Three sets of fins; (c) Four sets of fins

图7对以上三种翅片进行了初步的固相率对比,结果表明,通过增加直肋型翅片的数量和体积占比,可显著加快相变材料的相变速率,从而有效提升蓄冷梁的充冷效率。然而,需要特别指出的是,蓄冷梁中相变材料的实际填充体积与其蓄冷能力呈正相关关系,这一关键参数将直接影响冷链运输装备的最远续航里程。基于工程应用的综合考量,在确保充冷效率得到优化提升的前提下,本研究最终确定不再继续增大翅片在蓄冷梁中的体积占比。这一决策旨在维持相变材料的最佳装载量,从而保证蓄冷系统在实际运行过程中能够满足预期的蓄冷容量和运输距离要求。

2.2 拓扑优化翅片分析

基于传统直肋型翅片固有缺陷,本研究以相变材料区域的平均温度最小化作为拓扑优化的目标函数,主要因为常规直肋结构在充冷过程中难以避免地会导致相变材料温度分布不均的问题,这种现象不仅显著降低了充冷速率,还会造成大量冷量的无效耗散,从而导致可观的能量浪费。为建立科学的对比基准,本研究严格控制拓扑优化翅片与最优直肋型翅片保持相同的体积占比,据此分别开展了体积分数上限为5.8%、7.61%和8.89%三种工况的独立优化计算。每个工况的拓扑优化过程均经历了

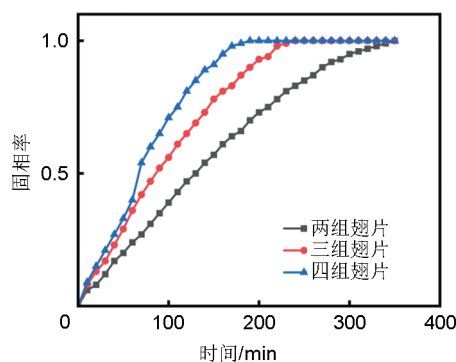


图7 三种不同的直肋型翅片模型的固相率

Fig. 7 The solidification rates of three different straight-ribbed fin models

完整的形态演进,通常经过4次迭代后目标函数(平均温度)的结果充分收敛,表明获得了稳定的最优拓扑结构。通过这种对照实验设计,确保了不同结构方案之间具有完全可比性。图8展示了经优化后获得的三种具有形态差异的翅片构型。

由图8可见,三组翅片体积比虽不同,但由于体积比差别较小,三种翅片的形状大致相同,只是部分细节不同。将三种翅片固相率结果与同体积比的情况下直肋型翅片的固相率结果进行对比,结果如图9所示。

研究结果表明,在相同体积占比下,拓扑优化

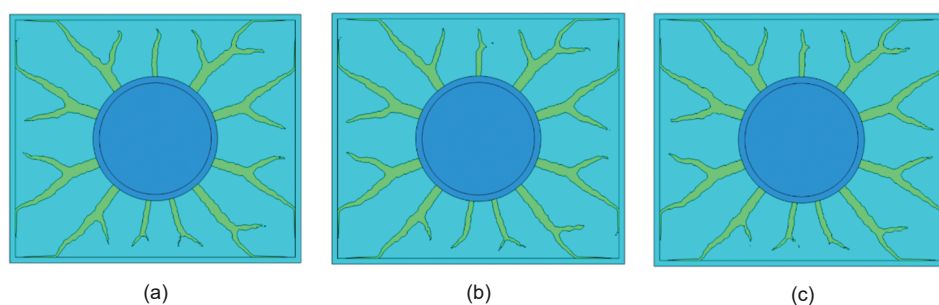


图8 不同体积比的拓扑优化翅片模型: (a) 翅片体积比为5.8%模型; (b) 翅片体积比为7.61%模型; (c) 翅片体积比为8.89%模型

Fig. 8 Topological optimization fin models with different volume ratios: (a) Fan fin volume ratio: 5.8% model; (b) Fan fin volume ratio: 7.61% model; (c) Fan fin volume ratio: 8.89% model

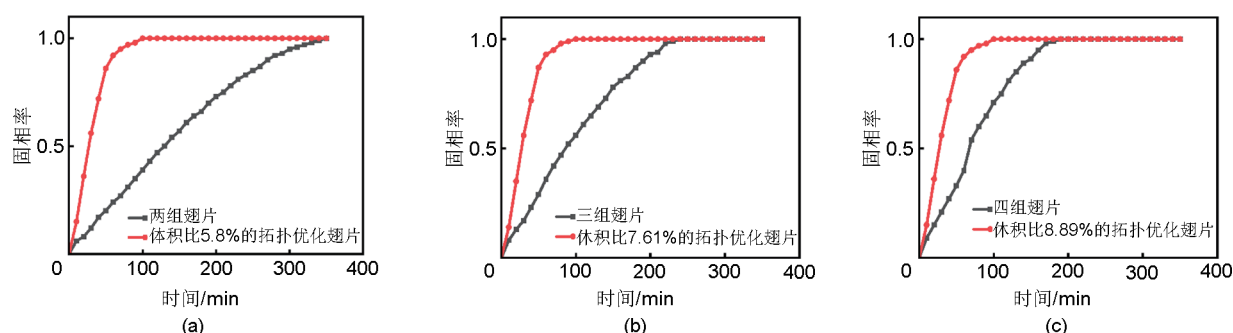


图9 三种翅片模型固相率与同体积比的情况下直肋型翅片模型固相对比: (a) 体积比为5.8%的翅片固相率; (b) 体积比为7.61%的翅片固相率; (c) 体积比为8.89%的翅片固相率

Fig. 9 Comparison of solidification rates of three fin models with the same volume ratio and that of the straight fin type fin model: (a) Solid phase ratio of fins: 5.8%; (b) Solid phase ratio of fins: 7.61%; (c) Solid phase ratio of fins: 8.89%

翅片的性能显著优于传统直肋型翅片。随着翅片体积占比增加,两者固相率差异逐渐减小,但拓扑优化翅片在整个充冷过程中始终保持更优的传热性能,尤其在低体积占比时仍能维持高相变速率。这主要得益于拓扑优化可依据传热需求智能分配材料,从而在有限空间内形成更高效的传热路径。模拟数据充分证明,相较于传统的同体积比下的直肋型翅片,体积比为5.8%、7.61%、8.89%的拓扑优化翅片传热效率分别提升了71.4%、37.5%、25.7%。

通过拓扑优化翅片的蓄冷梁模型温度云图(图10)可以得到:安装拓扑优化翅片的蓄冷梁模型温度分布较为均匀,绝大多数相变材料处于同一温度,即使温度不同,但温差很小,说明拓扑优化翅片不仅可以极大地提升换热效率,同时传热效果比较均匀。

2.3 拓扑翅片几何重构

由于拓扑优化翅片结构具有树叉型的分布特

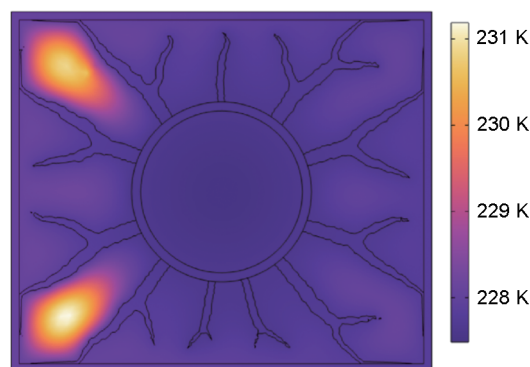


图10 拓扑优化翅片的蓄冷梁模型温度云图

Fig. 10 Topological optimization fin-based cold storage beam model

征,形状结构没有规律。在正常的生产工艺下不具备在实际工程中大规模生产的条件,所以根据上述研究的拓扑结构进行调整重建,使其易于加工和计算。在结构简化过程中,本研究首先识别并提取了决定翅片整体形态的关键特征点,包括外缘轮廓中的显著突出点、翅片分支处的拓扑节点,以及与充

冷管连接处的接口位置坐标。通过这些代表几何主特征的点位依次连接,构建出了连续而光滑的简化轮廓,进而生成保留了原拓扑结构传热功能、同时大幅降低几何复杂度的翅片模型。该简化模型不仅有利于后续的数控加工与模具设计,也为进一步数值模拟和性能优化提供了良好的计算适应性,同时该方法在其他拓扑优化模型中也具有通用性。同时,为了选择最合理的拓扑优化模型进行简单几何重构,对以上三种拓扑优化翅片模型的固相率变化率进行了对比,结果如图11所示。

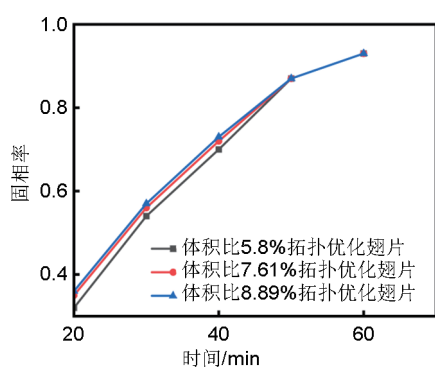


图11 三种拓扑优化翅片模型的固相率
Fig. 11 The solid fraction of three types of topological optimization fin models

由上述结果可以看出,安装三种不同体积比的拓扑优化翅片的蓄冷梁中相变材料固相率变化率几乎没有差别,仅在充冷开始后20~50 min时固相率有些许差异,体积比为5.8%的翅片仅仅比8.89%的翅片的传热效果最多低1.3%。因此选择体积比最小的翅片进行简化,以添加更多的相变材料。本研究是利用拓扑优化模型中翅片的关键点位的坐标,将形状复杂的拓扑优化翅片简化为简单的多边形的。利用COMSOL的多边形功能将各个关键坐标连接后,形成简化后的拓扑优化翅片,但其基本形状保持不变。如图12所示,调整后翅片边界为直线,这样生产和计算都更加简便。

为保证简化后的拓扑优化翅片是合理实用的,将简化后的拓扑优化翅片与原有的拓扑优化翅片进行固相率对比,结果如图13所示,可以明显看出两组翅片的传热效果几乎相同,安装拓扑优化翅片的模型中相变材料仅仅只在中间时段的固相率较简化后拓扑优化翅片的模型中相变材料高5%,而之后的时段固相率继续保持一致。因此,在两种翅片拥有几乎一样优越的传热性能的情况下,为了降低

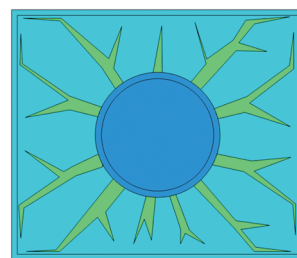


图12 简化后的拓扑优化翅片模型

Fig. 12 Simplified topological optimization fin model

加工成本,避免使用3D打印技术,应选择简化后的拓扑优化翅片。该翅片结构充分考虑了传统制造工艺的约束,无须依赖高成本的3D打印技术,可通过铸造、挤压等常规方法实现高效、稳定加工。这一特点显著降低了生产门槛,使优化结构更易于大规模商业化推广,在满足高性能传热需求的同时,具备更强的工程适应性与经济性。

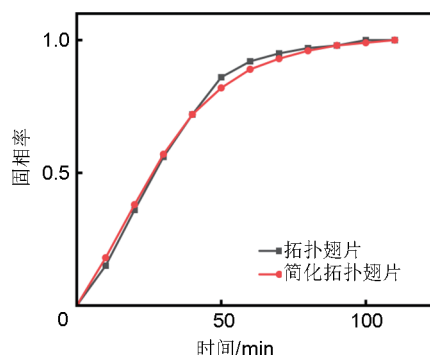


图13 简化拓扑优化翅片与拓扑优化翅片固相率

Fig. 13 Simplified topology-optimized fins and solid-phase ratio of topology-optimized fins

2.4 蓄冷梁管径优化

本研究基于工程实际应用需求,选用DN80标准钢管作为蓄冷梁充冷管道的基础结构。为探究管径对相变材料固相率演化规律的影响,并确保研究的科学性与可比性,选取DN65和DN100两种规格钢管进行对比分析。本设计充分考虑了冷链运输车辆的空间布局、重量限制及空间占比等实际约束,因此未选用更大管径规格。为严格控制实验变量,本研究采用以下关键控制措施:首先,保持所有对比模型的蓄冷梁长度 L 、宽度 W 与充冷管半径 R 的比例参数严格一致;其次,确保不同管径方案下的翅片体积占比完全相同。这种实验设计方法有效隔离了管径变化与其他参数的相互影响,使得研究能够精准考察换热面积这一单一因素对相变过程的独

立作用。通过这种严谨的实验设计,所获得的模拟结果能够准确揭示管径尺寸变化对相变材料固相率

演化过程的作用机制,为工程实践提供可靠的理论依据。

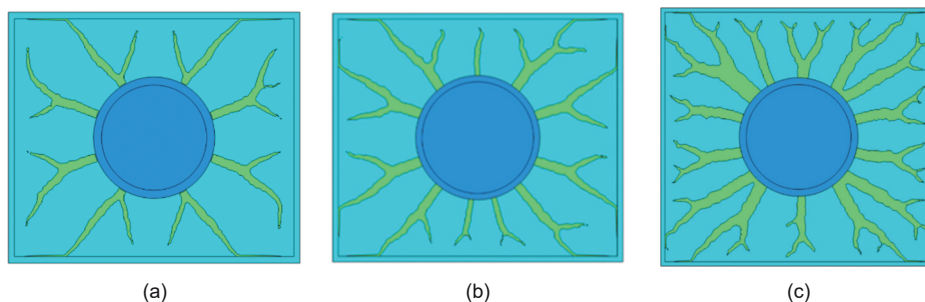


图14 不同管径下的拓扑优化翅片: (a) 充冷管选用 DN65; (b) 充冷管选用 DN80; (c) 充冷管选用 DN100

Fig. 14 Topological optimization fins under different pipe diameters: (a) The cooling tube is selected as DN65; (b) The cooling tube is selected as DN80; (c) The cooling tube is selected as DN100

因此,本研究在保持 WIR 以及 L/R 不变的条件下,分别建立了如图14所示的三个模型,并将其翅片体积比上限维持在 5.89%。然后对比分析了不同管径条件下,在保持拓扑优化翅片体积占比相同的情况下,蓄冷梁内相变材料固相率的变化特性。通过严格控制翅片体积比上限这一参数,重点考察管径尺寸对相变速率的独立影响机制,旨在确定最优的蓄冷梁管径设计方案。研究采用定量化的分析方法,对不同工况下的固相率演化曲线进行对比评估,从而为工程实践提供科学依据,具体对比结果如图15所示。

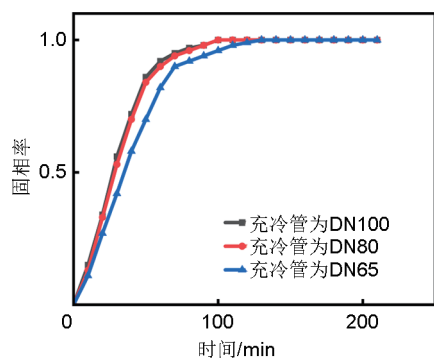


图15 不同管径下的拓扑优化翅片固相率

Fig. 15 Solid phase ratio of topological optimization fins under different pipe diameters

从以上结果可以看出,三种管径下相变材料完成相变的时间基本一致,采用 DN80 的管径时,固相率变化速率稍微高于其他两种管径下相变材料的固相率变化速率。因此,本研究选择采用 DN80 管作为充冷管。

3 结 论

本研究通过拓扑优化翅片结构和管径设计,显著提升了蓄冷式冷藏车的充冷效率,为低碳冷链运输技术的发展提供了理论依据和工程优化方案,得到如下结论:

(1) 本研究对比分析了直肋型与拓扑优化翅片在相变蓄冷中的性能差异。结果表明:相同体积比条件下,拓扑优化翅片的充冷效率显著优于直肋型翅片,且低体积比(5.8%)与较高体积比(7.61%、8.89%)相比的充冷效率最大相差不大,因此为了保持更高的蓄冷量,更推荐选择低体积比下的拓扑优化翅片。

(2) 本研究通过关键点坐标连接将拓扑优化翅片简化为便于实际加工的多边形结构,简化后的翅片与原始拓扑结构在传热效率上基本一致,平均温度偏差小于 0.2°C ,同时在可制造性与经济性方面具有显著优势,更适用于实际工程推广与应用。

(3) 本研究对比了 DN65、DN80 和 DN100 管径下的相变效率。结果表明,管径对相变效率影响较小,在实际工程设计中,管径选择应更多考量安装空间、系统兼容性、材料成本等实际约束条件,而非单纯追求传热性能的边际提升。未来研究可进一步探讨更大或更小管径下的流动与传热特性,系统分析管径与翅片结构的耦合优化机制,以及多管径并联布置等复杂工况对系统充冷性能的综合影响,为蓄冷单元的大型化或紧凑化设计提供更全面的理论支撑。

参考文献

- [1] VRAT P, GUPTA R, BHATNAGAR A, et al. Literature review analytics (LRA) on sustainable cold-chain for perishable food products: Research trends and future directions[J]. *Opsearch*, 2018, 55(3): 601-627. DOI: 10.1007/s12597-018-0338-9.
- [2] KAYFECI M, KEÇEBAŞ A, GEDIK E. Determination of optimum insulation thickness of external walls with two different methods in cooling applications[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 217-224. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.06.031.
- [3] JAMES S J, JAMES C. The food cold-chain and climate change[J]. *Food Research International*, 2010, 43(7): 1944-1956. DOI: 10.1016/j.foodres.2010.02.001.
- [4] TAN H B, LI Y Z, TUO H F, et al. Experimental study on liquid/solid phase change for cold energy storage of liquefied natural gas (LNG) refrigerated vehicle[J]. *Energy*, 2010, 35(5): 1927-1935. DOI: 10.1016/j.energy.2010.01.006.
- [5] FIORETTI R, PRINCIPI P, COPERTARO B. A refrigerated container envelope with a PCM (phase change material) layer: Experimental and theoretical investigation in a representative town in central Italy[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 122: 131-141. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.05.071.
- [6] BEN TAHER M A, KOUSSOU 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. DOI: 10.1016/j.est.2021.103097.
- [7] COPERTARO B, PRINCIPI P, FIORETTI R. Thermal performance analysis of PCM in refrigerated container envelopes in the Italian context-Numerical modeling and validation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102: 873-881. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.050.
- [8] 李晓燕, 张晓雅, 邱雪君, 等. 相变蓄冷技术在食品冷链运输中的研究进展[J]. *包装工程*, 2019, 40(15): 150-157.
- LI X Y, ZHANG X Y, QIU X J, et al. Research progress of phase change cold storage technology in food cold chain transportation[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(15): 150-157.
- [9] 田津津, 张哲, 王怀文, 等. 蓄冷板释冷过程的数值模拟和实验研究[J]. *制冷学报*, 2016, 37(3): 29-34. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4339.2016.03.029.
- TIAN J J, ZHANG Z, WANG H W, et al. Numerical simulation and experiment research on cold plate melting process[J]. *Journal of Refrigeration*, 2016, 37(3): 29-34. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4339.2016.03.029.
- [10] 蒋玉龙, 张素军, 李菊香. 泡沫材料冰蓄冷板融化过程的研究[J]. *制冷学报*, 2015, 36(5): 65-73. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4339.2015.05.065.
- JIANG Y L, ZHANG S J, LI J X. Investigation on melting process of ice cold-plate with porous material[J]. *Journal of Refrigeration*, 2015, 36(5): 65-73. DOI:10.3969/j.issn.0253-4339.2015.05.065.
- [11] 范中阳, 刘升, 武卫东, 等. 蓄冷板摆放方式对冷链宅配过程的影响[J]. *制冷技术*, 2017, 37(6): 51-54. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4468.2017.06.203.
- FAN Z Y, LIU S, WU W D, et al. Effect of laying modes of cold plates on cold chain delivery process[J]. *Chinese Journal of Refrigeration Technology*, 2017, 37(6): 51-54. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4468.2017.06.203.
- [12] ZIVKOVIC B, FUJII I. An analysis of isothermal phase change of phase change material within rectangular and cylindrical containers[J]. *Solar Energy*, 2001, 70(1): 51-61. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00112-2.
- [13] MOUSAZADE A, RAFEE R, VALIPOUR M S. Thermal performance of cold panels with phase change materials in a refrigerated truck[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 120: 119-126. DOI: 10.1016/j.jrefrig.2020.09.003.
- [14] ALZUWAID F A, GE Y T, TASSOU S A, et al. The novel use of phase change materials in an open type refrigerated display cabinet: A theoretical investigation[J]. *Applied Energy*, 2016, 180: 76-85. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.088.
- [15] 田绅, 马翠玲, 陈雨虹, 等. 嵌入热管强化相变蓄冷板释冷性能的研究及优化[J]. *制冷学报*, 2021, 42(6): 114-120, 153. DOI:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.06.114.
- TIAN S, MA C L, CHEN Y H, et al. Investigation and optimization of discharging performance enhancement of phase change cold storage panel using embedded heat pipes[J]. *Journal of Refrigeration*, 2021, 42(6): 114-120, 153. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4339.2021.06.114.
- [16] 童山虎, 聂彬剑, 李子满, 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. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2019-0242.
- TONG S H, NIE B J, LI Z X, 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. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2019-0242.
- [17] 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.
- [18] TASSOU S A, DE-LILLE G, GE Y T. Food transport refrigeration - Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(8/9): 1467-1477. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.06.027.
- [19] 杨凤, 刘清江, 宋瑞亭, 等. 顶置蓄冷板对冷库融霜时库温波动的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(12): 85-89. DOI:10.13652/ji.ssn.1003-5788.2020.12.018.
- YANG F, LIU Q J, SONG R T, et al. Effect of overhead cool storage plate on the storage temperature fluctuation in the cold storage during defrosting[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(12): 85-89. DOI:10.13652/ji.ssn.1003-5788.2020.12.018.
- [20] 邓静, 陈永东, 王严冬, 等. 肋片布置对相变蓄冷用冷藏车蓄冷板充冷过程的影响[J]. *流体机械*, 2023, 51(8): 73-79. DOI:10.3969/j.

- issn.1005-0329.2023.08.011.
- DENG J, CHEN Y D, WANG Y D, et al. The effect of fins arrangement on the charging process of cold panel with phase change material in a refrigerated truck[J]. *Fluid Machinery*, 2023, 51(8): 73-79. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2023.08.011.
- [21] EL HABIB AMAGOUR M, BENNAJAH M, RACHEK A. Numerical investigation and experimental validation of the thermal performance enhancement of a compact finned-tube heat exchanger for efficient latent heat thermal energy storage[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124238. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124238.
- [22] HAN P, WANG H R, FAN J H, et al. The local non-equilibrium heat transfer in phase change materials embedded in porous skeleton for thermal energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 82: 110450. DOI: 10.1016/j.est.2024.110450.
- [23] HAN P, WANG J Y, ZHAO X M, et al. Performance study of fin structure in air-cooled thermal management system for column power battery[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 104: 114697. DOI: 10.1016/j.est.2024.114697.
- [24] YU C, WU S C, HUANG Y P, et al. Charging performance optimization of a latent heat storage unit with fractal tree-like fins [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 30: 101498. DOI: 10.1016/j.est.2020.101498.
- [25] ZHANG Y, YANG X G, ZOU S L, et al. Enhancing the phase change material based shell-tube thermal energy storage units with unique hybrid fins[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 157: 107763. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107763.
- [26] AO C, YAN S Y, ZHAO X Y, et al. Design optimization of a novel annular fin on a latent heat storage device for building heating[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 64: 107124. DOI: 10.1016/j.est.2023.107124.
- [27] AL-MUDHAFAR A H N, NOWAKOWSKI A F, NICOLLEAU F C G A. Enhancing the thermal performance of PCM in a shell and tube latent heat energy storage system by utilizing innovative fins [J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 120-126. DOI: 10.1016/j.egy.2021.02.034.
- [28] CHOUDHARI V G, DHOBLE A S, PANCHAL S. Numerical analysis of different fin structures in phase change material module for battery thermal management system and its optimization[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 163: 120434. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120434.
- [29] KALAPALA L, DEVANURI J K. Influence of operational and design parameters on the performance of a PCM based heat exchanger for thermal energy storage-A review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 20: 497-519. DOI: 10.1016/j.est.2018.10.024.
- [30] LI C, LI Q, GE R H. Assessment on the melting performance of a phase change material based shell and tube thermal energy storage device containing leaf-shaped longitudinal fins[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 60: 106574. DOI: 10.1016/j.est.2022.106574.
- [31] REN F, DU J, CAI Y F, et al. Study on thermal performance of a new optimized snowflake longitudinal fin in vertical latent heat storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104165. DOI: 10.1016/j.est.2022.104165.
- [32] SHAHSAVAR A, GOODARZI A, MOHAMMED H I, et al. Thermal performance evaluation of non-uniform fin array in a finned double-pipe latent heat storage system[J]. *Energy*, 2020, 193: 116800. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116800.
- [33] PANDEY V, LEE P S. Maximizing liquid-cooled heat sink efficiency with advanced topology-optimized fin designs[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 229: 125746. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125746.
- [34] YANG X H, NIU Z Y, BAI Q S, et al. Experimental study on the solidification process of fluid saturated in fin-foam composites for cold storage[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 161: 114163. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114163.
- [35] PETROVIC M, FUKUI K, KOMINAMI K. Numerical and experimental performance investigation of a heat exchanger designed using topologically optimized fins[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218: 119232. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119232.
- [36] ZHAO Y, MOU X Z, CHEN Z Q, et al. Topology optimization and bionic analysis of heat sink fin configuration based on additive manufacturing technology[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 155: 107544. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107544.
- [37] LOHAN D J, DEDE E M, ALLISON J T. A study on practical objectives and constraints for heat conduction topology optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 61(2): 475-489. DOI: 10.1007/s00158-019-02369-6.