

储热储冷多场景应用专刊



面向通信基站的制储一体化相变蓄冷系统蓄释能特性分析

郭俊¹, 朱明哲², 高佳诚¹, 冯乐军¹, 隋军¹, 白阳²

(¹中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; ²广东弘展大数据有限公司, 广东 东莞 523000)

摘要: 基于通信基站冷却系统在室外环境与冷负荷波动下的冷量调节需求, 本工作搭建高效制储一体化相变蓄冷实验装置, 通过实验获得相变材料(phase change material, PCM)蓄冷板蓄冷量与蓄释能特性。结果显示, 纯水蓄冷工况在15~4℃、5 m³/h条件下, 实验蓄冷量与理论值偏差3.81%, 往返效率83%~86%, 验证了装置测量的可靠性。PCM板工况下, 流量5 m³/h实现了27.2℃到4.03℃蓄冷, 蓄冷量55025.5 kJ, 对应释冷量42184.5 kJ。当流量由4 m³/h提升至5 m³/h时, 蓄冷功率提升38.3%, 达到相同蓄冷量所需时间缩短4.7 h。15~4℃条件下, 纯水体积218.72 L、PCM体积237.6 L时, PCM相变蓄冷量29943.3 kJ为纯水蓄冷的3倍, PCM相变蓄冷单位体积储能密度为126.03 kJ/L, 可达纯水蓄冷单位体积储能密度的2.74倍。本研究为通信基站场景下板式PCM潜热蓄冷方案提供了设计参考与数据支撑, 为通信基站实现削峰降载提供实验依据, 推动该技术工程应用。

关键词: 制储一体化; 相变蓄冷; 蓄冷功率; 往返效率; 通信基站

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0099

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-895-11

Analysis of charging and discharging characteristics of an integrated phase-change cold thermal energy storage system for telecommunication base stations

GUO Jun¹, ZHU Mingzhe², GAO Jiacheng¹, FENG Lejun¹, SUI Jun¹, BAI Yang²

(¹The Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²Guangdong Hongzhan Big Data Co., Ltd., Dongguan 523000, Guangdong, China)

Abstract: To meet the cooling-capacity regulation demand of telecommunication base-station cooling systems under outdoor environmental variations and fluctuating cooling loads, this study developed a high-efficiency integrated cooling-storage phase change cold thermal energy storage (CTES) experimental rig and experimentally characterized the cold storage capacity and charging/discharging behaviors of plate-type phase change material (PCM) modules. The results show that for pure-water storage from 15℃ to 4℃ at 5 m³/h, the measured stored cooling capacity was 21781 kJ, deviating by 3.81% from the theoretical value of 20981.6 kJ, with a round-trip efficiency of 83%—86%, confirming the reliability of the measurements. In the PCM-plate mode at 5 m³/h, cooling from 27.2℃ to 4.03℃ achieved a

收稿日期: 2026-01-30; 修改稿日期: 2026-02-27。

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFB4206500)。

第一作者: 郭俊(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为相变材料储能, E-mail: guojun@iet.cn; 通信作者: 冯乐军, 副研究员, 研究方向为多能互补分布式能源系统集成设计与相变储能, E-mail: fenglejun@iet.cn。

引用本文: 郭俊, 朱明哲, 高佳诚, 等. 面向通信基站的制储一体化相变蓄冷系统蓄释能特性分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 895-905.

Citation: GUO Jun, ZHU Mingzhe, GAO Jiacheng, et al. Analysis of charging and discharging characteristics of an integrated phase-change cold thermal energy storage system for telecommunication base stations[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 895-905.

cumulative charging capacity of 55025.5 kJ and a corresponding discharging capacity of 42184.5 kJ; the peak charging power reached 4.75 kW and decayed over time. Increasing the flow rate from 4 to 5 m³/h enhanced the charging power by 38.3% and shortened the time required to reach the same stored cooling capacity by 4.7 h. Under identical operating conditions (15°C to 4°C), the system-level cold storage capacity increased from 20000 kJ (pure water) to 40000 kJ with PCM integration; for a water volume of 218.72 L and a PCM volume of 237.6 L, the PCM latent cooling capacity was 29943.3 kJ, corresponding to a volumetric energy storage density of 126.03 kJ/L, compared with 45.98 kJ/L for pure-water sensible storage, indicating that the PCM contribution reaches 2.74 times that of pure-water cold storage. These results provide design-relevant data and experimental evidence for plate-type PCM latent CTES in telecommunication base-station applications, supporting peak shaving and load leveling and facilitating engineering deployment.

Keywords: integrated cooling-storage; plate-type phase change cold energy storage; cold storage power; round-trip efficiency; telecommunication base-station cooling

通信基站作为全天候运行的通信基础设施,其机房散热负荷随业务量、设备工况与室外环境温度呈显著波动特征,空调系统长期处于频繁启停或高负荷运行状态,导致峰值用电突出、能效下降及供冷可靠性风险增加^[1-3]。近年来,面向基站场景的节能性研究逐步从“单一设备效率提升”转向“系统层削峰与热量缓冲”,通过引入蓄释冷环节以平滑负荷波动、降低压缩机制冷的峰值容量需求,已成为提升基站冷却系统韧性与经济性的有效路径之一^[4-5]。

相变材料(phase change material, PCM)凭借在相变温区内高能量密度、近恒温换热与可逆储释能等优势,被认为是低温蓄冷领域的关键材料体系,可在低谷电价或低室外温度时段完成蓄冷,并在高温与峰值负荷阶段释放冷量以实现削峰降载^[6-7]。围绕相变材料蓄冷温区匹配、过冷与相分离抑制、导热强化与循环稳定性提升等问题,国内外已形成较系统的材料改性与应用研究基础^[8-10]。其中,面向低温工况的无机盐合物复合PCM因成本与潜热优势受到关注,但其工程应用仍需与结构化封装与高效换热设计协同优化,以保证可控的蓄冷速率与稳定的释冷输出^[8-9]。进一步,面向工程部署,PCM装置的“有效蓄冷量”与“动态蓄释冷功率”往往受换热器结构热阻、材料过冷与相分离以及运行参数共同影响,导致不同研究之间可比性不足,难以形成可直接指导选型与控制的实验基准^[7, 11-13]。

在具体装置设计与蓄释能实验研究方面,板

式、管壳式与其他换热结构已被广泛用于提升PCM与热传递介质之间的换热效率^[14-16]。国内外研究也针对不同结构的PCM储能单元开展了蓄热与蓄冷特性实验,并对影响蓄能性能的因素进行了深入分析。刘丽辉等^[17]针对板式PCM储能单元进行了蓄热特性及优化研究。张榜等^[18]探讨了蓄冷板中PCM蓄冷过程影响因素,为设计高效蓄冷单元提供了参数参考。Li等^[19]通过实验与数值研究系统分析了板式潜热储能换热器的蓄释能过程,揭示了流量、入口温度及结构参数对传热性能与蓄能效率的耦合影响,表明板式结构有利于提升单位体积蓄能功率。此外,Mao等^[15]针对管壳式PCM储能装置开展了蓄热与放热实验研究,指出壳侧流动组织与PCM传热路径对相变过程后期传热衰减具有决定性作用。Mastani Joybari等^[16]则以板式换热结构为对象,系统评估了低温潜热储能系统在不同运行参数下的蓄能特性,验证了新型换热结构在降低传热热阻、提升动态响应性能方面的潜力。上述研究表明,通过合理选择储能单元结构并优化运行参数,可有效改善PCM储能装置的蓄释能性能,但在面向通信基站等工程应用场景时,仍需结合实际运行边界对装置层蓄冷量进行可量化评估。

尽管已从结构形式与运行参数角度较系统地揭示了PCM储能单元的传热与蓄释能特性^[14-18],但面向通信基站这类体积受限且边界波动显著,需要可量化冷量支撑的应用场景,仍存在不足:一是基站相关研究多侧重节能可行性评估,而装置层水侧显

热与PCM潜热贡献的可复核分离内容相对有限,难以形成可比的冷量基准与选型依据^[5, 14, 19];二是板式储能装置的实验研究普遍指出蓄冷后期存在传热衰减与功率下滑,但不同结构与流量条件下的量化规律尚不统一,缺少可直接支撑运行参数决策的对照数据^[17-18];三是新型板式换热结构潜热储能装置的系统性实验表征与工程化评估仍相对欠缺,性能边界与可靠性仍需装置级证据支撑^[14, 19]。

基于此,本工作以自研高效制储一体化相变蓄冷实验装置为对象,在通信基站典型冷却温区内开展纯水与PCM板工况两种模式的蓄释冷实验,在PCM板工况下定量获取装置蓄冷量、释冷量与功率随时间的演化特征,并通过流量对照实验探究运行参数对蓄冷功率与过程时长的影响规律;最后将PCM板工况与纯水模式进行对比,评估其在有限体积约束下提升冷量储备的优势,为基站低谷蓄冷、峰值释冷的削峰降载应用提供可复核的数据支撑与设计依据。

1 实验设计与研究方法

1.1 相变材料与蓄冷装置

本研究所采用的潜热储能(latent heat thermal energy storage, LHTES)单元储能组件结构如图1

所示。该单元由多层堆叠的高密度聚乙烯(HDPE)板构成,板内主要填充水合无机盐相变材料,此板因填充相变材料被称为PCM板,板表面加工有交替分布的凸起圆环与凹陷圆形沟槽结构,如图1(a)所示,本研究主要对象即为PCM板,其外观尺寸参数如表1所示。PCM板按一定顺序整齐布置于储能槽内,如图1(c)所示。其中,凹陷沟槽用于增大换热面积;凸起圆环主要具有两项功能:

(1) 机械支撑与定位:凸起结构在相邻PCM板之间起到机械支撑作用,并与相邻板上的对应结构相互嵌合,形成稳定的层间支撑体系。

(2) 流道构建与换热强化:凸起结构在相邻板之间形成规则的流体通道,促进传热流体(heat transfer fluid, HTF)在板组内部的流动与换热,如图1(b)所示,从而提高换热效率。

为进一步优化流动分配,在装置入口与出口处设置了带孔导流挡板,其设计尺寸如图1(d)所示。该挡板能够保证传热流体均匀进入各换热通道,从而维持蓄冷槽内稳定的传热过程。

受篇幅与研究重点限制,本工作未开展材料级过冷度与长期循环稳定性的独立测试,主要关注装置级蓄/释冷性能与冷量核算。结合后续本工作3次重复纯水蓄冷与9次重复PCM板蓄冷实验,装置

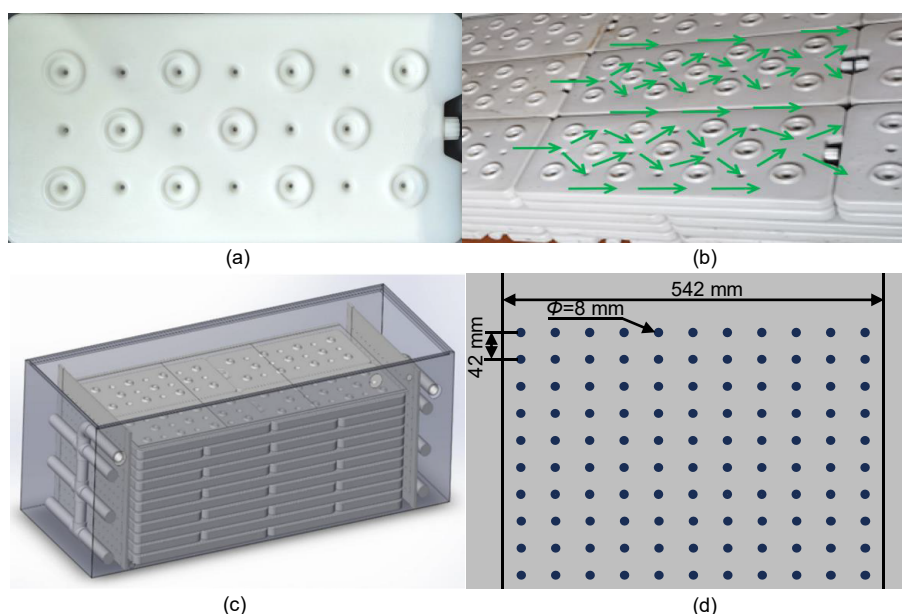


图1 LHTES结构示意图。(a)单块PCM相变蓄冷板实物照片;(b)相邻蓄冷板之间的传热流体水(HTF)流道示意;

(c)LHTES单元蓄冷槽三维结构示意图;(d)蓄冷槽内穿孔导流挡板的结构设计图

Fig. 1 Schematic structure of LHTES. (a) Photograph of a single phase change cold plate, (b) Heat transfer fluid channels between adjacent cold plates, (c) Three-dimensional view of the cold storage tank of the LHTES unit, (d) Design drawing of the perforated baffle plate in the cold storage tank

表 1 PCM 板尺寸外观参数

Table 1 Geometric parameters of the PCM plate

名称	数值	单位
长度	600	mm
宽度	300	mm
高度	30	mm
体积	0.0054	m ³
材质	HDPE	—

表 2 各项材料热物性参数

Table 2 Thermol physical properties of the materials

材料	潜热 ζ /(kJ/kg)	固体密度 ρ_{sol} /(kg/m ³)	液体密度 ρ_{liq} /(kg/m ³)	固体导热系数 $\lambda_{\text{p, sol}}$ /[W/(m·K)]	液体导热系数 $\lambda_{\text{p, liq}}$ /[W/(m·K)]	固体比热容 $c_{\text{p, sol}}$ /[kJ/(kg·K)]	液体比热容 $c_{\text{p, liq}}$ /[kJ/(kg·K)]
PCM	124	1469	1462	0.8	0.6	2.3	2.5
高密度聚乙烯	—	960	—	0.35	—	2.2	—
换热流体水	—	—	—	0.6	—	4.182	—

1.2 高效制储一体化相变蓄冷实验装置

为验证平板式相变蓄冷装置储能性能，本研究设计并搭建了高效制储一体化相变蓄冷实验装置，测试44块PCM板储能特性。该装置可根据试验需求实现传热流体(HTF)流量的自动调节、蓄冷/释冷工况的切换以及蓄冷温度的可变设定。系统主要由蓄冷槽、风机盘管机组、循环水泵、冷量计及控制平台等组成。PCM板在蓄冷槽内采用“每层4块、共11层”的平铺堆叠方式进行安装，主要基于以下考虑：①几何匹配与空间利用率：该布置方式与蓄冷槽有效内腔尺寸相匹配，可在保证必要流道空间与安装间隙的前提下提高PCM装填率；②流动分配与换热均匀性：分层平铺结构便于入口/出口导流与并联流道组织，有利于结合穿孔导流挡板实现多通道供液均匀；③结构稳定性与维护性：每层4块可形成较稳定的支撑与定位关系，便于模块化安装、拆装维护及传感器布置。通过水侧流动与PCM板换热方式进行实验，以实现多板并联通道的同步供水与换热。

图2(a)给出了高效制储一体化相变蓄冷实验装置的三维结构设计图，并标注了主要部件名称：各部件的模型参数汇总见表3。图2(b)为装置实物外观，图2(c)展示了系统蓄冷部分的内部结构。

槽内通过均匀布置9个LX/PT1000-IN温度传感器来进行平均温度观测，进出水口处分别设置2个温度传感器，进出口水温均定为两个温度传感器平均值，槽内均匀布置的传感器取平均值为槽内平均温度。对实验装置设计后，给出其几何特征，蓄

冷量表现出较好的重复性；针对过冷度表征及长期循环稳定性，后续将结合材料级测试与长周期运行实验进一步研究。

相变材料热物性参数通过实验室测定，此处不再进行详细说明，相变材料相变温度区间为5~8℃，相变材料热物性参数，平板外壳HDPE以及传热流体水的热物性参数由厂家资料获得，上述各项材料热物性参数汇总见表2。

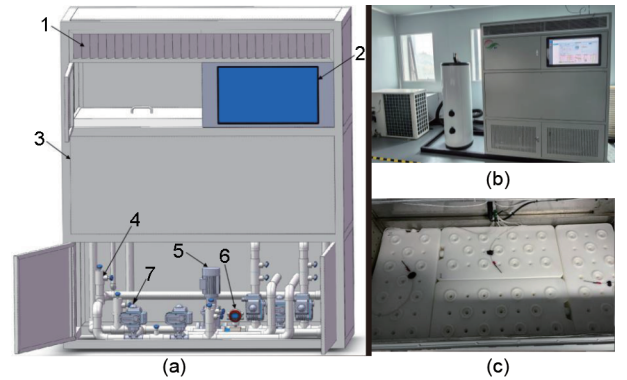


图2 实验装置示意图：(a) 高效制储一体化相变蓄冷实验装置的三维设计图：1—风机盘管单元；2—控制面板；3—储冷罐；4—温度、压力传感器；5—循环泵；6—流量计；7—电磁阀；(b) 蓄冷装置、水箱和制冷机的实物照片（三者构成完整的高效制储一体化相变蓄冷实验装置冷量释放和储存运行模式）；(c) 装置内部实物照片

Fig. 2 Schematic of the Experimental facilities: (a) 3D design drawing of the Cooling system integrated with LHTES device: 1—Fan coil unit; 2—Control panel; 3—Cold storage tank; 4—Temperature/pressure sensor; 5—Circulation pump; 6—Cold energy meter; 7—Electric valve; (b) Actual photograph of the device, water tank, and chiller (the three constitute the complete LHTES cold release and storage operation modes); (c) Actual photograph of the internal cold storage tank

冷槽与PCM板物理量总结见表4。

1.3 实验运行工况

系统运行工况可归纳为蓄冷(充冷)与释冷(放冷)两种基本模式，其水力回路与阀门切换关系如图3所示。

表 3 设备型号与规格参数

Table 3 Model and specifications of the machine

组件	型号	范围	补充说明
风机盘管	EKCW600YC	空气流量：0~1020 m³/h 水流量：0~1.5 m³/h	—
数据收集系统	—	—	—
蓄冷槽	304 不锈钢	—	—
温度传感器	LX/PT1000-IN	-50~200℃	—
压力传感器	LX-Pm300	-40~150℃	压力范围：0~1.6 MPa
循环水泵	ALG40-16	蓄冷流量3~5 m³/h, 释冷流量0.5~1.5 m³/h	—
冷量计	LX-92W1-N32	流量范围：-20~60 m³/h	精度：±0.01 m³/h
控制阀门	220 V 交流电	-25~60℃	—
热电阻	Pt1000	-200~200℃	温度精度：±0.1℃
风冷冷水机组	AH11DCE-AC	工作温度范围4~60℃	温度稳定度：±0.1℃

表 4 测量参数汇总

Table 4 Summary of measured parameters

组件/分组	参数	数值	单位
PCM 蓄冷槽(相变蓄冷槽)	内腔长度	1600	mm
	内腔宽度	620	mm
	内腔高度	620	mm
	水位高度	460	mm
	几何总容积	615.04	L
	有效容积	456.32	L
	PCM 层厚度	30	mm
	HDPE 壳体厚度	3	mm
	单板长度	600	mm
	单板宽度	300	mm
相变蓄冷板(PCM 板)	板数量	44	—
	单板体积(PCM 占 78%)	5.4	L
	单板质量	7	kg
	PCM 板总体积	237.6	L
	PCM 板总质量	309.3	kg
	流道长度	1200	mm
传热流体(HTF)流道	流道宽度	600	mm
	流道高度	8	mm
	HTF 总体积	218.72	L
	HTF 总质量	218.72	kg
	HTF 充满蓄冷槽的总体积	456.32	L
	HTF 与 PCM 板壁面换热面积 Ac	0.72	m²

如图 3(a)，在蓄冷模式下，系统通过制冷主机向蓄冷槽输入冷量，实现相变储能单元的蓄冷。此时传热流体的循环路径为：制冷主机→V1→V2→蓄冷槽→循环泵→V4→流量计→V3→制冷主机。在该过程中，制冷主机提供稳定的冷源，高效相变潜热储能装置作为受冷端完成冷量吸收与储存；循

环泵用于调节 HTF 的体积流量，从而实现不同蓄冷工况下的流量控制与换热强度调节。

如图 3(b)，在释冷模式下，相变蓄冷装置释放其储存的冷量并经由 HTF 输送至末端换热设备。释冷回路的流动路径为：蓄冷槽→循环泵→V5→风机盘管机组→V6→流量计→V1→V2→蓄冷槽。此阶段中，蓄冷单元作为冷源向 HTF 输出冷量；循环泵同样承担流量调节功能，以控制冷量输出速率与末端换热匹配；风机盘管机组作为冷量消纳端，将 HTF 携带的冷量与环境空气进行换热，从而实现冷量的吸收与耗散。

本工作运行工况还涉及水蓄冷实验，旨在进行水蓄冷与高效相变潜热储能的比较分析，同时也通过对水蓄冷量的测试值与理论值对比验证装置的可靠性与合理性。

1.4 性能表征方法

为实现高效制储一体化相变蓄冷实验装置在纯水模式与 PCM 板模式下蓄冷和释冷过程的统一量化评价，本工作基于水侧瞬态测量进出口水温与体积流量，构建性能表征体系，并给出了与实验数据处理相匹配的计算流程与不确定度评估方法。

(1) 纯水蓄冷理论蓄冷量：

$$Q_{th,water} = m_w c_{p,w} (T_{w,0} - T_{w,1}) \tag{1}$$

式中， $Q_{th,water}$ 为纯水蓄冷理论蓄冷量，kJ； m_w 为蓄冷槽中水的体积，取 456.32 L； $c_{p,w}$ 为水的比热容，取 4.182 kJ/(kg·K)；从初始平均温度 $T_{w,0}$ 降至末状态 $T_{w,1}$ ，℃。

(2) 瞬时蓄冷功率：

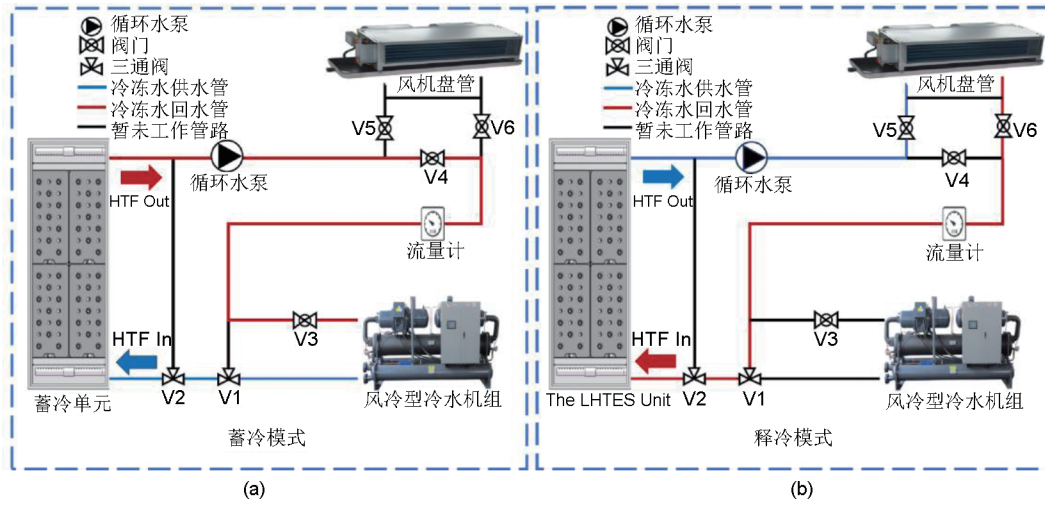


图3 高效制储一体化相变蓄冷装置工作流程图; (a) 蓄冷过程; (b) 释冷过程

Fig. 3 Working flow diagram of the high-efficiency integrated cooling-storage phase change cold thermal energy storage system: (a) Charging process; (b) Discharging process

$$P_{ch}(t) = \rho_w c_{p,w} \dot{m}(t) [T_{out}(t) - T_{in}(t)] = \rho_w c_{p,w} \dot{m}(t) \Delta T(t) \quad (2)$$

式中, $P_{ch}(t)$ 为蓄冷过程中的瞬时蓄冷功率, kJ/min 或 kW/60; ρ_w 为水的密度, 1000 kg/m³; $c_{p,w}$ 为水的比热容, 取 4.182 kJ/(kg·K); $\Delta T(t)$ 为进出口水温差瞬时值, $T_{out}(t)$ 为出口水温瞬时值, $T_{in}(t)$ 为进口水温瞬时值, °C; $\dot{m}(t)$ 为质量流量, m³/h。

(3) 瞬时释冷功率:

$$P_{dis}(t) = \rho_w c_{p,w} \dot{m}(t) [T_{in}(t) - T_{out}(t)] = \rho_w c_{p,w} \dot{m}(t) \Delta T(t) \quad (3)$$

(4) 蓄冷阶段累计蓄冷量定义为:

$$Q_{ch}(t) = \int_{t_{0, ch}}^t P_{ch}(\tau) d\tau \quad (4)$$

式中, $Q_{ch}(t)$ 为蓄冷过程累计蓄冷量, kJ; $t_{0, ch}$ 为蓄冷过程开始时刻, t 为蓄冷过程持续时间, min; τ 为蓄冷过程中的任意时刻, min; $P_{ch}(\tau)$ 为 τ 时刻蓄冷过程的瞬时蓄冷功率, kJ/min。

(5) 释冷阶段累计释冷量定义为:

$$Q_{dis}(t) = \int_{t_{0, dis}}^t P_{dis}(\tau) d\tau \quad (5)$$

(6) 储能往返效率:

$$\eta_{rt} = \frac{Q_{dis, end}}{Q_{ch, end}} \quad (6)$$

式中, η_{rt} 为储能往返效率, %。

(7) 纯水蓄冷实验蓄冷量与理论蓄冷量相对偏差:

$$\delta = \frac{|Q_{exp, water} - Q_{th, water}|}{Q_{th, water}} \times 100\% \quad (7)$$

式中, δ 为纯水蓄冷实验蓄冷量与理论蓄冷量相对偏差, %; $Q_{exp, water}$ 为纯水蓄冷实验蓄冷量, kJ。

(8) 单位体积蓄冷量:

$$q_{V, PCM} = \frac{Q_{ch, PCM}}{V_{PCM}} \text{ 或 } q_{V, water} = \frac{Q_{ch, water}}{V_{water}} \quad (8)$$

式中, $q_{V, PCM}$ 为PCM板单位体积蓄冷量, kJ/L; $q_{V, water}$ 为PCM板单位体积蓄冷量, kJ/L; V_{PCM} 为44块PCM板总体积, 237.6 L; V_{water} 为蓄冷槽中水的体积, 218.72 L。

1.5 数据不确定度分析

在实验实施前, 对拟测量参数进行不确定度分析。实验的核心测量量包括温度与传热流体水通道流量, 其测量不确定度评估如下:

(1) 温度测量不确定度: 实验采用PT1000铂电阻温度传感器, 仪器标称精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。按均匀分布假设, 其标准不确定度为

$$u_T = \frac{0.1}{\sqrt{3}} \approx 0.058 \quad (9)$$

取覆盖因子 $k=2$ (置信水平95%), 可得扩展不确定度为

$$U_T = ku_T \approx 0.12 \quad (10)$$

即温度测量的扩展不确定度为 $\pm 0.12^\circ\text{C}$ 。

(2) 流量测量不确定度: HTF流量采用电磁流量计测量(仪表参数见表3), 满量程误差为 $\pm 0.01 \text{ m}^3/\text{h}$ 。同样按均匀分布假设, 其标准不确定度为

$$u_{\dot{m}(t)} = \frac{0.01}{\sqrt{3}} \approx 0.0058 \quad (11)$$

取覆盖因子 $k=2$ (置信水平95%),扩展不确定度为

$$U_{\dot{m}(t)} = k u_{\dot{m}(t)} \approx 0.012 \quad (12)$$

即流量测量的扩展不确定度为 $\pm 0.012 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

综上分析,温度与流量测量不确定度对高效相变潜热储热蓄释冷过程中的温度变化与蓄释冷量计算结果影响较小,认为其干扰可忽略,实验数据的可靠性满足本研究的测试需求。

2 实验结果及分析

2.1 纯水蓄冷实验验证

为验证高效制储一体化相变蓄冷实验装置在纯水模式下的能量核算可靠性与系统运行合理性,本工作首先开展纯水蓄冷实验,并将实验蓄冷量与理论显热蓄冷量进行对照。图4(a)给出通过高效制储一体化相变蓄冷实验装置以流量为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下的典型纯水蓄冷过程,初始状态蓄冷槽整体处于 15.05°C ,进出口水温从 15.05°C 逐步降至 4.05°C ,过程历时 185 min ,蓄冷末期,蓄冷槽进口水温 4.03°C ,出口水温 4.04°C 趋于一致,表明水侧换热驱动力显著减弱、系统接近热平衡状态,蓄冷过程结束。纯水蓄冷实验累计蓄冷量为 21781 kJ ,即 6.050 kWh ,对应平均蓄冷功率 1.96 kW ,通过对 15°C 至 4°C 纯水蓄冷模式进行显热理论计算得理论蓄冷量 20981.6 kJ ,即 5.828 kWh ,通过计算得纯水蓄冷实验蓄冷量与理论蓄冷量相对偏差 δ 为 3.81% 。

图4(b)给出以流量 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下的纯水释冷过程,由蓄冷过程结束平衡状态开始释冷, 4.22°C 释冷到 15.22°C ,累计释冷量达到 18705.8 kJ ,纯水蓄冷储能往返效率达到 85.9% 。

在相同蓄冷边界条件与 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 蓄冷流量下进行3次重复实验。如图5所示,三次纯水蓄冷累计蓄冷量分别为 21781 kJ 、 20943 kJ 、 20526 kJ ,纯水蓄冷实验测得量与理论量相对偏差分别为 3.81% 、 1.99% 、 2.17% ,结果波动较小,表明装置在纯水模式下运行过程稳定。同时,三次试验对应的蓄释冷往返效率分别为 85.9% 、 83.0% 、 83.8% ,整体维持在较高水平。综合理论、实验偏差与往返效率结果,认为该装置在纯水蓄释模式下具备良好的能量闭合与运行合理性,作为后续PCM板工况性能对比分析的可靠基准。

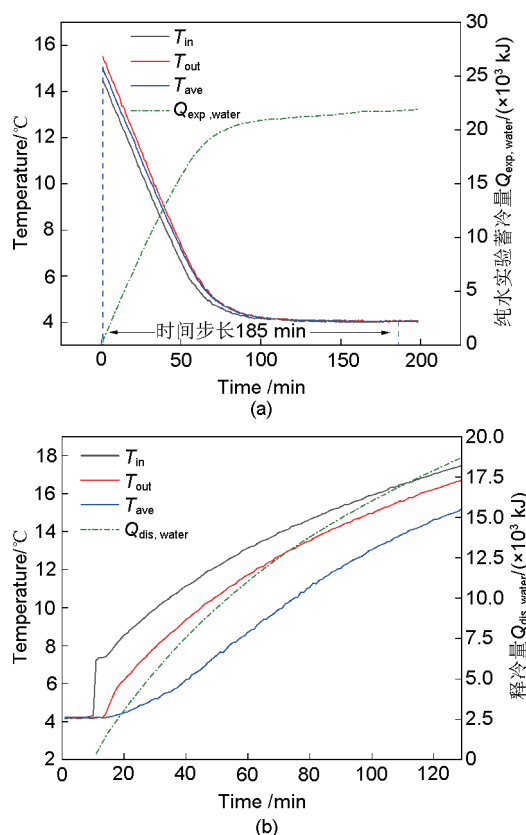


图4 高效制储一体化相变蓄冷装置纯水实验;(a)蓄冷过程;(b)释冷过程

Fig. 4 Pure-water experiments of the high-efficiency integrated cooling-storage phase change cold thermal energy storage system: (a) Charging process; (b) Discharging process

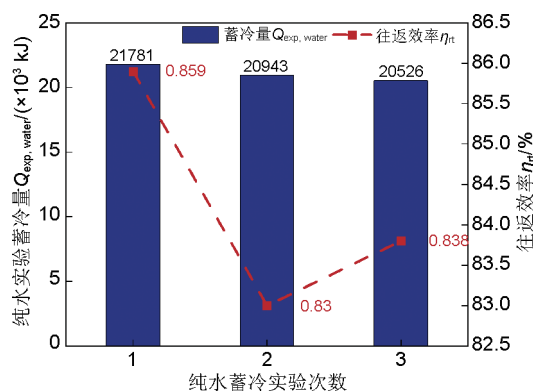


图5 多组纯水实验验证

Fig. 5 Validation of multiple pure-water experimental cases

2.2 PCM板蓄冷实验

图6(a)给出了44块PCM板在体积流量为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 条件下的典型蓄释冷过程。蓄冷阶段装置初始平均温度约为 27.2°C ,随后在冷源驱动下逐步降至 4.03°C ;

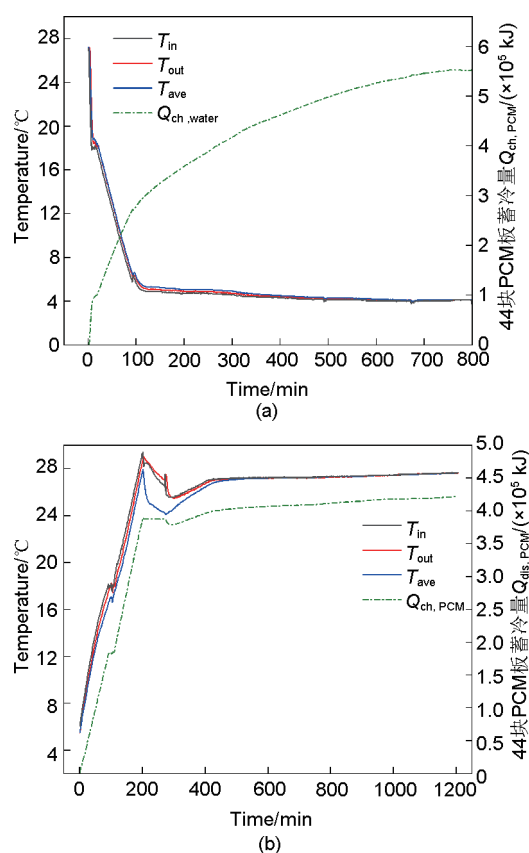


图6 高效制储一体化相变蓄冷装置44块PCM板蓄冷实验; (a) 蓄冷过程; (b) 释冷过程

Fig. 6 Cold storage experiments with 44 PCM plates in the high-efficiency integrated cooling-storage phase change cold thermal energy storage system: (a) Charging process; (b) Discharging process

累计蓄冷量为55025.5 kJ, 即15.285 kWh。图6(b)给出了在释冷阶段, 装置由5.5°C起始释冷并升至27.6°C, 累计释冷量达到42184.5 kJ, 此蓄释冷循环的储能往返效率为76.7%, 效率水平主要受环境热损、结构件显热滞留与释冷终止条件等因素影响; 释冷阶段过程后期换热驱动力降低, 导致部分冷量以更长时间尺度释放, 从而降低可用释冷量。

2.3 流量对PCM板蓄冷功率的影响

如图7所示, 在15~4°C蓄冷边界条件下, 对比了体积流量4 m³/h与5 m³/h两种工况的蓄冷功率变化。流量为5 m³/h时, 蓄冷功率峰值可达4.75 kW; 流量为4 m³/h时峰值为4.5 kW。流量5 m³/h时730 min达到蓄冷最大值, 平均蓄冷功率为0.913 kW; 流量4 m³/h时1010 min达到蓄冷最大值0.660 kW, 流量由4 m³/h提升至5 m³/h, 蓄冷时间缩短4.7 h, 蓄冷功率提升38.3%。两种流量下

蓄冷功率均呈现初期高、随后衰减并趋于低水平稳定的特征, 随着装置温度降低, 水侧有效温差驱动力逐渐减弱, 传热热阻逐步占主导的综合作用。

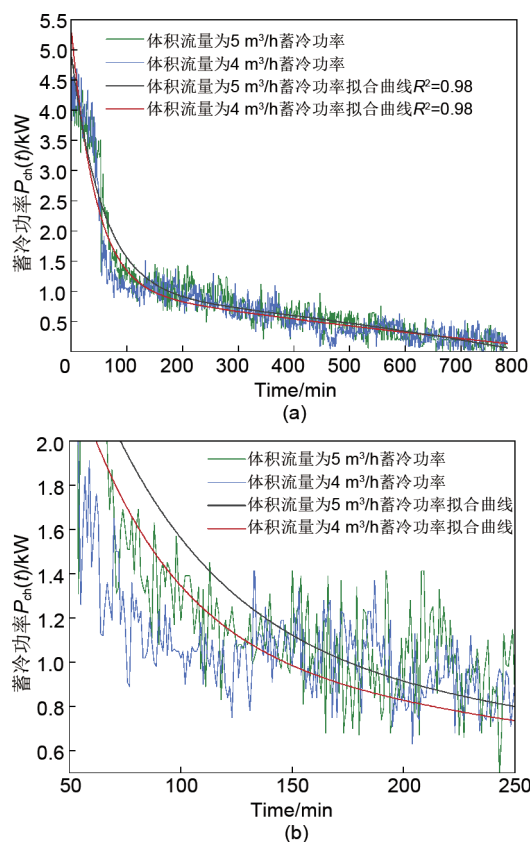


图7 流量变化对蓄冷功率的影响; (a) 体积流量分别为4 m³/h、5 m³/h的蓄冷功率变化; (b) 蓄冷进行50~250 min时蓄冷功率变化

Fig. 7 Effect of flow rate on cold storage power: (a) variation of cold storage power at volumetric flow rates of 4 m³/h and 5 m³/h; (b) cold storage power evolution during the charging period from 50 to 250 min

大流量对应更高的对流换热强度, 在过程起始阶段, 系统主要受温差驱动力控制, 两种流量下功率均处于较高水平。随着蓄冷推进, 进出口温差减小, 功率曲线进入衰减段并最终趋于平稳。末期曲线逐渐收敛, 系统接近热平衡、蓄冷量增长放缓时, 流量对蓄冷功率的影响可近似忽略, 此时水侧温差已显著降低、换热驱动力不足, 继续增大流量对功率提升有限。

2.4 PCM相变蓄冷与纯水蓄冷对比分析

为定量评估制储一体化相变蓄冷实验装置在15~4°C工况下的储能增益, 本工作将装置在布置44块PCM板与不布置PCM板(纯水)两种模式下的

蓄冷量进行对比,如图8与图9所示。结果表明:当装置内布置44块PCM板时,累计蓄冷量可达40000 kJ以上;当蓄冷槽内无PCM板时,纯水蓄冷量约为20000 kJ,即PCM板工况模式下总蓄冷量达到纯水模式的2倍以上。

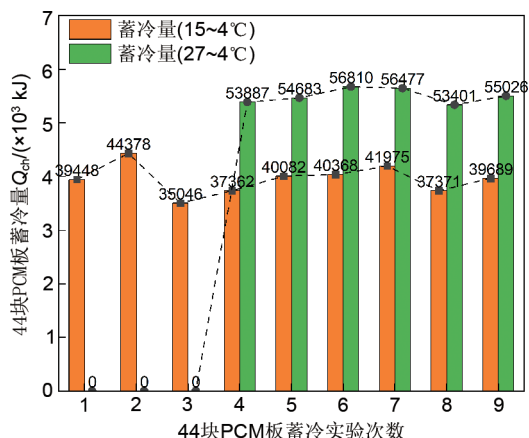


图8 重复9次44块PCM板蓄冷实验

Fig. 8 Repeated cold storage experiments with 44 PCM plates (nine cycles)

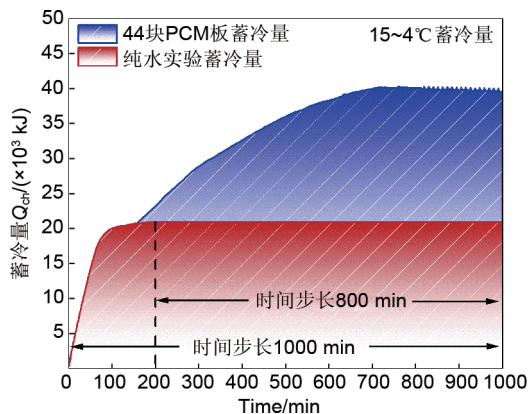


图9 44块PCM板相变蓄冷与纯水蓄冷比较

Fig. 9 Comparison between phase change cold storage using 44 PCM plates and pure-water cold storage

进一步从内部储能介质构成出发,实验中纯水体积为218.72 L, PCM所占体积为237.6 L。在PCM板蓄冷过程中,纯水蓄冷量为10056.7 kJ, PCM板相变蓄冷量为29943.3 kJ。得单位体积蓄冷量分别为:

$$q_{V, PCM} = \frac{Q_{ch, PCM}}{V_{PCM}} = \frac{29943.3}{237.6} = 126.03 \text{ kJ/L} \quad (13)$$

$$q_{V, water} = \frac{Q_{ch, water}}{V_{water}} = \frac{10056.7}{218.72} = 45.98 \text{ kJ/L} \quad (14)$$

单位体积PCM相变蓄冷量约为纯水的2.74

倍,装置内部PCM板蓄冷贡献为纯水的3倍。

需要指出的是,本工作主要从装置蓄冷容量与体积储能密度角度比较PCM与纯水蓄冷性能,尚未对材料成本、设备投资与全生命周期经济性进行定量评估。相较纯水,PCM材料初始成本通常更高,但在通信基站这类体积受限场景中,PCM显著提高单位体积冷量储备的能力有望带来蓄冷槽体积压缩、主机峰值容量降低及削峰运行收益,从而部分抵消材料成本的增加。

此外,该装置在工程应用中仍存在一定不足,包括蓄释冷过程环境热损与结构件显热滞留导致往返效率下降、多板并联流道可能存在局部分配不均、蓄冷后期温差驱动力降低引起功率衰减明显等问题。后续将结合结构优化、控制策略与真实基站动态边界测试进一步提升其工程适用性与运行经济性。

3 结论

为面向通信基站室外环境温度波动与机房冷负荷波动条件下的稳定供冷需求,本工作构建高效制储一体化相变蓄冷实验装置开展PCM蓄/释冷性能测试实验,系统分析运行参数与储能介质差异对装置动态与容量特性的影响。主要结论如下:

(1) 设计的高效制储一体化相变蓄冷系统纯水蓄冷量实测值与理论值相对偏差为3.81%;实验往返效率稳定在83%~86%区间,装置在蓄释冷工况下运行稳定,可作为PCM蓄冷模式对比评价的可信基准。

(2) 44块PCM板实现27.2~4.03℃蓄冷,累计蓄冷量可达55025.5 kJ;5.5~27.6℃释冷过程累计释冷量为42184.5 kJ。在15~4℃工况下,流量由4 m³/h提升至5 m³/h,蓄冷功率峰值由4.5 kW提升至4.75 kW,达到蓄冷最大值时间由1010 min缩短至730 min,平均蓄冷功率由0.660 kW提升至0.913 kW,蓄冷功率可提升38.3%。

(3) 在15~4℃条件下,装置布置44块PCM板时总蓄冷量可达40000 kJ,无PCM板纯水模式约20000 kJ,可实现2倍以上容量提升。装置纯水体积218.72 L、PCM体积237.6 L, PCM板相变蓄冷量29943.3 kJ、纯水蓄冷量10056.7 kJ,对应单位体积储能密度分别为126.03 kJ/L与45.98 kJ/L,则单位体积PCM相变蓄冷量约为纯水的2.74倍,

装置内部PCM板蓄冷贡献为纯水的3倍。

本工作以装置级蓄释能特性与冷量定量识别为重点, 尚未开展材料成本、设备投资、削峰收益的系统经济性评估, 也未在真实基站动态边界下进行长周期运行验证; 后续将结合材料循环稳定性、控制策略与工程运行数据开展综合评估。为推动本研究提出的结构在通信基站中实际应用, 未来的研究可在以下方面深化: ①在贴近基站实际的室外温度波动、负荷波动下开展长周期运行测试, 量化削峰效果与经济性; ②结合控制策略优化蓄/释冷切换与流量调节, 提升有效释冷量与往返效率。③开展模块化集成与系统级评估, 形成面向不同基站规模的参数化设计与选型方法。

参考文献

- [1] LI J M, TANG A K, JIN Y, et al. Cooling performance enhancement and economic analysis of air conditioner systems integrated with phase change materials for telecommunication base station[J]. *Energy*, 2025, 333: 137297. DOI: 10.1016/j.energy.2025.137297.
- [2] 张毅, 崔四齐, 白静, 等. 通信机柜用空调热管一体化设备过渡季性能实测研究[J]. *制冷学报*, 2024, 45(6): 75-82. DOI: 10.12465/j.issn.0253-4339.2024.06.075.
ZHANG Y, CUI S Q, BAI J, et al. Experimental study on performance of air conditioning and heat pipe integrated equipment for communication cabinet in transition season[J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(6): 75-82. DOI: 10.12465/j.issn.0253-4339.2024.06.075.
- [3] BAI J, XU C, CUI S Q, et al. Study on an energy-saving thermal management system in outdoor base stations[J]. *Thermal Science*, 2024, 28(3 Part A): 2051-2058. DOI: 10.2298/tsci2403051b.
- [4] 汤磊, 曾德森, 凌子夜, 等. 相变蓄冷材料及系统应用研究进展[J]. *化工进展*, 2023, 42(8): 4322-4339. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1777.
TANG L, ZENG D S, LING Z Y, et al. Research progress of phase change materials and their application systems for cool storage [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(8): 4322-4339. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1777.
- [5] 朱江恬, 张圆, 罗意彬, 等. 基于相变材料蓄热的5G通信基站柜体优化[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(9): 2789-2798. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0293.
ZHU J T, ZHANG Y, LUO Y B, et al. Optimization of 5G communication base station cabinet based on heat storage of phase change material[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(9): 2789-2798. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0293.
- [6] 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 Technology*, 2024, 5(3): 1-14. DOI: 10.20145/j.32.1894.20240301.
- [7] 李沐, 李亚溪, 李传常. 相变储冷技术及其在空调系统中的应用[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(1): 180-197. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0498.
LI M, LI Y X, LI C C. Phase-change cold storage technology and its application in air conditioning systems[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(1): 180-197. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0498.
- [8] 喻彩梅, 章学来, 华维三. 十水硫酸钠相变储能材料研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(3): 1016-1024. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0007.
YU C M, ZHANG X L, HUA W S. Research progress of sodium sulfate decahydrate phase changematerial[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(3): 1016-1024. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0007.
- [9] LIN N Z, LI C C, ZHANG D Y, et al. Enhanced cold storage performance of $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ /expanded graphite composite phase change materials[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 48: 101596. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101596.
- [10] NIE B J, PALACIOS A, ZOU B Y, et al. Review on phase change materials for cold thermal energy storage applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134: 110340. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110340.
- [11] 孙世平, 李翔, 申月, 等. 无机水合盐相变储能材料研究进展[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(4): 26-31, 38. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2023.04.005.
SUN S P, LI X, SHEN Y, et al. Research progress of inorganic hydrated salt phase change energy storage materials[J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(4): 26-31, 38. DOI: 10.19817/j.cnki.issn1006-3536.2023.04.005.
- [12] COMODI G, CARDUCCI F, NAGARAJAN B, et al. Application of cold thermal energy storage (CTES) for building demand management in hot climates[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 103: 1186-1195. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.035.
- [13] HABIB M A, RAHMAN M M. Phase change materials for applications in building thermal energy storage (review) [J]. *Thermal Engineering*, 2024, 71(8): 649-663. DOI: 10.1134/S0040601524700174.
- [14] LI J, ZHANG Y, PENG Z A, et al. Thermal performance of a plate-type latent heat thermal energy storage heat exchanger - An experimental investigation and simulation study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 65: 107295. DOI: 10.1016/j.est.2023.107295.
- [15] MAO Q J, CHEN K L, LI T. Heat transfer performance of a phase-change material in a rectangular shell-tube energy storage tank [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 215: 118937. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118937.
- [16] MASTANI JOYBARI M, SELVNES H, VINGELSGÅRD E, et al. Parametric study of low-temperature thermal energy storage using carbon dioxide as the phase change material in pillow plate heat exchangers[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 221:

119796. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2022.119796.
- [17] 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.
- 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.
- [18] 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.
- [19] XU T H, HUMIRE E N, TREVISAN S, et al. Experimental and numerical investigation of a latent heat thermal energy storage unit with ellipsoidal macro-encapsulation[J]. Energy, 2022, 238: 121828. DOI:10.1016/j.energy.2021.121828.