DOI：10.19666/j.rlfd.202511017

液态空气储能系统固相蓄冷技术研究进展

李　欣[1,2]，季　伟[1,2]，刘纪云[1,2]，王俊杰[3]
（1. 中绿中科储能技术有限公司，北京　100020；
2. 中国绿发投资集团有限公司，北京　100020；
3. 中国科学院理化技术研究所，北京　100190）

［摘　　要］【目的】蓄冷系统是液态空气储能系统的核心部件，其蓄冷效率直接影响该系统的往返效率。固相蓄冷技术因其较高的安全性成为液态空气储能系统的重要研究方向。然而，目前尚缺乏对不同固相蓄冷技术的系统性综述。为明确固相蓄冷技术的研究现状，指出亟待解决的关键问题与未来发展方向，为液态空气储能系统固相蓄冷技术研究提供参考。【评论】本文简要回顾了液态空气储能系统固相蓄冷技术原理，详细对比了不同固相蓄冷技术的原理及流程；总结了固相蓄冷的研究现状和亟待解决的关键技术问题；讨论了液态空气储能系统蓄冷技术未来的发展方向。【结论】目前，固相蓄冷技术循环效率较低是当前亟待解决的关键问题，近年提出的分层填充床、复合式填充床、径向流填充床等新型填充床结构和流化式固相蓄冷、移动式固相蓄冷等新型固相蓄冷技术，均能不同程度提高固相蓄冷效率，但距离大规模工程化还有一定距离。【展望】未来，斜温层发展机理及抑制策略、新型固相蓄冷填充床结构及新型固相蓄冷技术尚需进一步研究及工程化验证，同时结合能源、化工、材料等多学科开展联合攻关，实现蓄冷工质、蓄冷设备、蓄冷系统及整体蓄冷技术的突破。

［关　键　词］液态空气储能；蓄冷技术；固相蓄冷；冷能储存利用；蓄冷工质

［引用本文格式］李欣，季伟，刘纪云，等. 液态空气储能系统固相蓄冷技术研究进展[J]. 热力发电，2026，55(7)：14.　Li X，Ji W，Liu J Y，et al. Research progress on solid phase cold storage technology for liquid air energy storage systems[J]. Thermal Power Generation，2026，55(7)：14.

Research progress on solid phase cold storage technology for liquid air energy storage systems

Li Xin[1,2], Ji Wei[1,2], Liu Jiyun[1,2], Wang Junjie[3]
(1. Zhonglv Zhongke Energy Storage Technology Co., Ltd., Beijing 100020, China;
2. China Green Development Investment Group Co., Ltd., Beijing 100020, China;
3. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: [Objective] Liquid air energy storage (LAES), characterized by its cleanliness, low carbon footprint, high energy storage density, and geographical flexibility, is among the most promising large-scale long-term energy storage technologies. The cold storage system is the core of LAES, and its efficiency directly affects the round-trip efficiency of the entire system. Current cold storage technologies in LAES mainly include liquid-phase cold storage technology and solid-phase cold storage technology. While liquid-phase cold storage technology offers high efficiency and stable performance over repeated cycles, the flammability and explosivity of currently used liquid-phase cold storage media limit its large-scale application. In contrast, solid-phase cold storage technology has

收 稿 日 期：2025-11-07　修 回 日 期：2025-12-22　接 受 日 期：2025-12-25
基 金 项 目：国家重点研发计划项目（2024YFE0208500）；中国绿发投资集团有限公司科技项目（基于分子间作用机理的深低温混合工质性能调控及蓄冷技术研究）
Supported by：National Key Research and Development Program (2024YFE0208500); Science and Technology Project of China Green Development Investment Group Co., Ltd. (Research on Performance Control and Cold Storage Technology of Deep Cryogenic Mixtures based on Intermolecular Interaction Mechanism)
第一作者简介：李欣（1994），女，博士，主要研究方向为化学工程与液态空气储能，lixin1@cgdg.com。
通信作者简介：季伟（1987），男，博士，高级工程师，主要研究方向为大功率液态空气储能，ji-wei@cgdg.com。

garnered increasing research attention in recent years owing to its inherent safety advantages and wider application prospects. Despite this growing interest, a systematic review and synthesis of the various solid-phase cold storage technologies remain notably absent. This paper aims to clarify the current research status of solid-phase cold storage technology, identify key challenges, and outline future development directions, thereby providing a reference for related research in LAES systems. [Discussion] The principles of solid-phase cold storage in LAES are briefly introduced, followed by a detailed comparison of different solid-phase cold storage technologies in terms of their mechanisms and processes. The research progress and major technical challenges are summarized, and future developmental trends for cold storage in LAES are discussed. [Conclusion] Currently, the relatively low cyclic efficiency of solid-state cold storage remains a key issue to be addressed. Recently proposed novel packed bed structures, such as stratified packed bed, composite packed bed, radial flow packed bed, as well as emerging technologies like fluidized solid-phase cold storage and mobile solid-phase cold storage, can improve solid-phase cold storage efficiency to varying degrees. Nevertheless, there is still a considerable gap before these technologies can be implemented on a large engineering scale. [Prospect] The following directions still need further study: (1) The mechanisms underlying the effects of spatiotemporally coupled asymmetric cold energy transfer on the thermocline and exergy efficiency in packed beds, as well as the corresponding suppression strategies. (2) The structural optimization of novel solid-phase cold storage packed beds should be conducted via a combined approach of theoretical simulation and experimental investigation, with comprehensive consideration of material cycling stability, system scale-up effects, and economic feasibility to demonstrate their viability for large-scale applications. Furthermore, other novel and highly efficient configurations of solid-phase cold storage packed beds should be developed. (3) Novel solid-phase cold storage technologies still require extensive experimental and engineering validation alongside ongoing technical iteration, and the continued exploration and development of other innovative, high-efficiency solid-state cold storage technologies are also imperative for future progress. (4) Moreover, interdisciplinary collaboration across energy, chemical engineering, and materials science should be strengthened to achieve breakthroughs in cold storage materials, equipment, systems, and integrated technology.

Key words: liquid air energy storage; cold storage technology; solid phase cold storage; cold energy storage and usage; cold storage media

我国风力发电、光伏发电的装机规模和发电量持续创新高。国家能源局数据显示，截至 2025 年 6 月底，我国可再生能源发电量达 17 993 亿千瓦时，其中，风电、光伏发电量合计达 11 478 亿千瓦时，较去年同期增长 2 470 亿千瓦时，超出全社会用电量增量[1]。风电、光伏发电出力时段与用户侧用电时段的严重不匹配，使大规模长时储能成为支撑新型电力系统发展的关键技术。

液态空气储能是当前最具潜力的大规模长时储能技术之一，具有清洁低碳、储能密度高、不受地理条件限制等优势[2]。液态空气储能技术是指通过空气压缩冷却液化和复温气化实现电能储存与释放的储能技术，其技术原理如图 1 所示。在储能阶段，空气压缩后进入压缩机级后冷却器降温，初步降温后的空气进入蓄冷单元进一步降温并液化，得到的液态空气储存于低温储罐中，完成电能的储存；在释能阶段，液态空气经液空泵进入蓄冷单元复温并气化，气化后的空气经过膨胀机级前预热器进一步加热后，进入膨胀机组带动发电机发电，完成电能的释放[3]。近年来，国内外针对液态空气储能技术开展了大量研究，并发表了一系列综述。O'Callaghan 等人[4]（2021 年）、DamaK 等人[3]（2022 年）、高远志等[5]（2025 年）总结了不同类型空气液化与发电循环的技术原理，分析了独立及耦合液态空气储能系统的研究进展。刘若男等[6]（2025 年）详细介绍了经典与改进的空气液化技术的流程与原理，并进行了对比分析。She 等人[7]（2025 年）、Ding 等人[8]（2025 年）详细综述了液态空气储能的发展历史、总结了独立和耦合液态空气储能系统的研究进展。Sun 等人[9]（2026 年）对液态空气储能的系统架构、集成策略及热力学分析的研究进展进行了综述。何青等[10]（2023 年）总结了液态空气储能系统中显热与潜热蓄冷技术的流程及设备。上述综述已对液态空气储能的发展历程、工艺原理、系统集成、传统蓄冷技术及设备进行了全面而详细的总结与评述，然而，尚缺乏针对新型蓄冷技术的详细对比与分析。

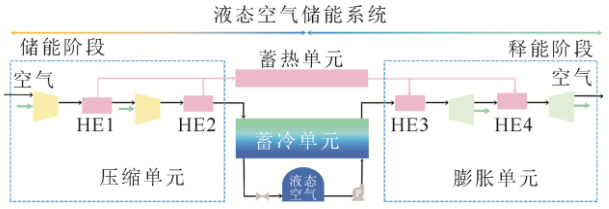


图 1 液态空气储能技术示意

Fig.1 Schematic diagram of liquid air energy storage technology

蓄冷技术是液态空气储能系统的核心，是实现空气液化与复温过程中冷量传递的关键步骤，其蓄冷性能直接影响系统往返效率[11-12]。目前，应用于液态空气储能系统的蓄冷技术主要包括液相蓄冷技术和固相蓄冷技术[13]。液相蓄冷技术效率较高，多次储释能循环后仍能维持稳定的蓄冷性能，但目前使用的液相蓄冷工质易燃易爆，限制了其大规模推广应用；固相蓄冷技术安全性更高、应用前景更广，成为近年的研究热点，针对传统固相蓄冷技术受斜温层发展的影响，在多个储释能循环后效率降低的问题，学者们提出了多种新型固相蓄冷技术。

为阐述液态空气储能系统新型固相蓄冷技术的研究现状，并为后续研究提供参考，有必要对近年来固相蓄冷技术的相关研究进行对比与总结，明确亟待解决的关键科学技术问题，进而指出未来的发展方向。

因此，本文从以下 3 个方面展开，首先，简要回顾了液态空气储能系统固相蓄冷技术原理；其次，总结了不同固相蓄冷技术的研究现状和系统中亟待解决的关键技术问题；最后，讨论了固相蓄冷技术的未来发展方向，为液态空气储能系统蓄冷系统研究提供参考。

1 固相蓄冷技术

不同蓄冷技术示意如图 2 所示。固相蓄冷技术通过岩石、玻璃珠等固相蓄冷工质实现冷量储存和释放。固相蓄冷工质无燃爆风险，安全性高、成本低。当前固相蓄冷技术的瓶颈问题是固相蓄冷填充床在储释能间歇期斜温层的发展，导致固相蓄冷技术循环效率降低[14]。斜温层指换热过程中填充床轴向温度分布中温度梯度较大的区域（图 3）[15]，固相蓄冷填充床长期静置或多次循环后，斜温层厚度增加、温度梯度减小，导致其空气液化能力降低甚至丧失。具体而言，固相蓄冷填充床受到时间和空间维度的协同影响，蓄冷过程中不可避免地向外界漏冷使系统储存的冷能在时间维度上发生不可逆的衰减，导致可用蓄冷量持续减少与整体效率降低；空间维度上由轴向热扩散引起斜温层厚度沿轴向扩展，系统首末端的轴向温度梯度被削弱，这破坏了冷能在空间分布上的陡峭斜温层，导致在释冷时输出不稳定的温度渐升的流体。两个维度的相互作用与协同导致了斜温层厚度、形态与移动速度的复杂演变特性，也导致了蓄冷系统性能（蓄冷效率、蓄冷容量与温度稳定性等）的显著降低[14]。为了削弱固相蓄冷填充床的斜温层效应，提高固相蓄冷效率，在单级填充床蓄冷（图 2b)、图 2c)）之后，陆续提出了两级填充床[14,16]（图 2d)）、级联式两级填充床[17]（图 2e)）、多罐组合填充床[14]（图 2f)）、流化式固相蓄冷[18]（图 2g)）、移动式固相蓄冷[19]（图 2h)）、分层填充床[20]（图 2i)）等多种新型固相蓄冷技术。

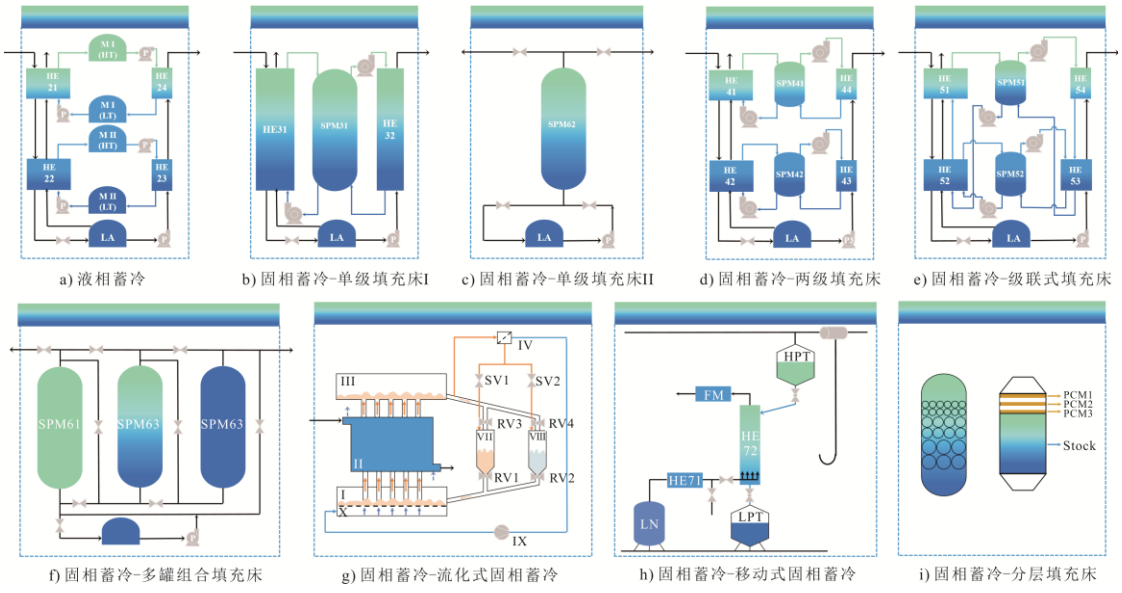


图 2 不同蓄冷技术示意

Fig.2 Schematic diagram of different cold storage technologies

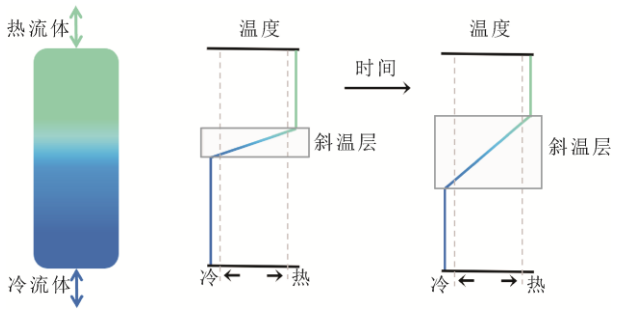


图 3 固相蓄冷斜温层示意
Fig.3 Schematic diagram of thermocline in solid phase cold storage

2 固相蓄冷系统

2.1 单级固相蓄冷

单级填充床固相蓄冷技术[14,21]包括间接蓄冷和直接蓄冷 2 种。间接蓄冷的单级填充床（图 2b)）将压缩空气液化/液态空气气化与填充床释冷/储冷分开，并通过低压循环气（氮气、空气等）将二者连接起来。储冷阶段，液态空气与低压循环气进入换热器进行间接换热，降温后的低温循环气再将冷量传递至填充床进行储冷；释冷阶段，低压循环气进入填充床吸收冷量后，再进入换热器对压缩空气降温，实现冷量释放。2011 年，利兹大学和 Highview Power 公司开发了基于单级固相蓄冷的 350 kW/2.5 MW ⋅h 的液态空气储能系统，其蓄冷部分工艺流程及蓄冷系统如图 4 所示，该蓄冷系统包含 8 个石英岩填充床，各填充床可以通过阀门切换为串联或并联连接方式。Morgan 等人[13]研究发现，该蓄冷系统的冷能回收率为 51%，对应的系统往返效率为 8%。Morgan 等人[22]基于该实验结果进行了理论预测，当冷量回收率提高至 91%时，系统的往返效率可增加至 47%。Sciacovelli 等人[23]建立了瞬态模型，对蓄冷系统在储释冷过程中的动态特性进行研究，结果表明填充床内的温度场变化是导致循环后期液化率减小的主要原因。因此，填充床蓄冷效率直接影响液态空气储能系统的往返效率，固相蓄冷填充床在储释冷循环过程中的动态特性是影响其蓄冷性能的关键因素。

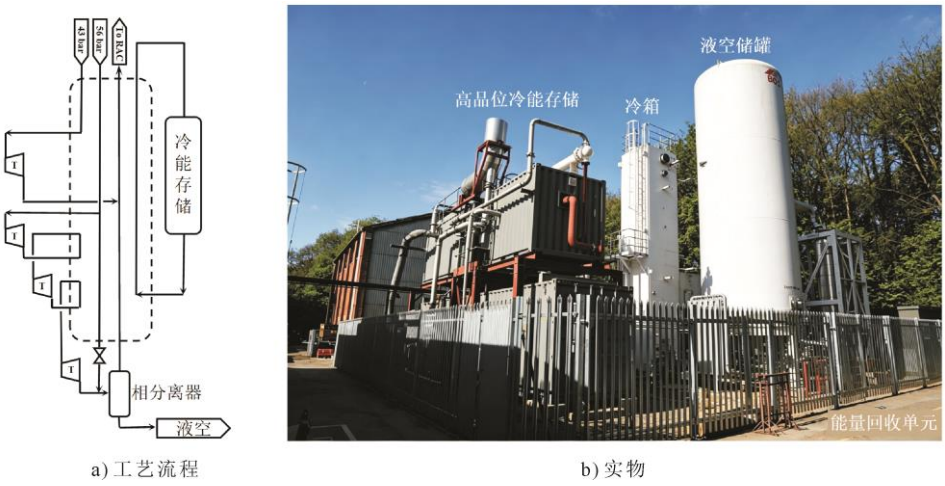


图 4 Highview Power 公司 350 kW/2.5 MW ⋅h 的液态空气储能电站蓄冷系统
Fig.4 Process flow diagram and image of the cold storage system for Highview Power's 350 kW/2.5 MW ⋅h liquid air energy storage power station

直接蓄冷的单级填充床中高压空气液化和填充床释冷过程同时进行，液态空气气化与填充床蓄冷过程同时进行。Guo 等人[24-25]提出一种新型的超临界压缩空气储能系统（图 5），该系统采用直接接触式换热的一级固相蓄冷填充床，空气在降温液化和升温气化过程中均与固相蓄冷工质直接接触。直接蓄冷的固相蓄冷器已有实际应用案例，当前青海格尔木 60 MW 液态空气储能示范项目采用直接蓄冷的单级固相蓄冷填充床，已完成安装（图 6），相比传统液相换热器，其有不受气体流量及流向限制、安全、经济等优势。现阶段尚未投入实际运行，后续还需关注其实际运行数据及稳定性。

目前，尚未检索到对间接和直接蓄冷性能进行直接比较的研究，但理论上，由于间接蓄冷仅换热器需要承受高压，填充床内的压力显著降低，能够有效降低填充床的壁厚及成本，但受间接换热温差、空气与低压循环气体之间存在沿程换热温差等因素影响，冷量损失较大。直接蓄冷减少了传热步

骤，换热㶲损更小，但填充床需要承受较高压力，使填充床壁厚和初始投资成本大幅增加。然而，无论是间接蓄冷还是直接蓄冷均需解决循环过程的斜温层动态特性导致的系统循环效率低的问题。

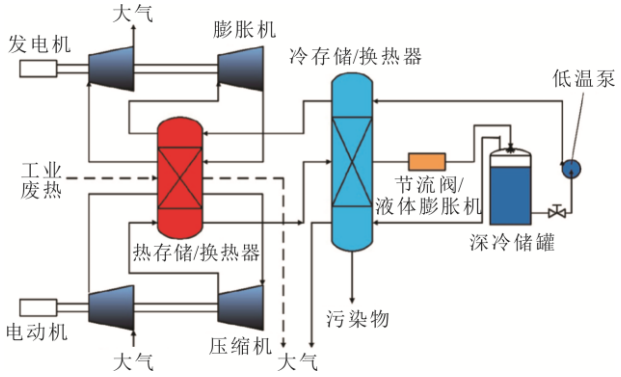


图 5 超临界压缩空气储能及其蓄冷系统示意

Fig.5 Schematic diagram of supercritical compressed air energy storage and cold storage system



图 6 青海 60 MW 液态空气储能示范项目的直接蓄冷式固相蓄冷器

Fig.6 Solid phase cold accumulator based on direct cold storage for Qinghai 60 MW liquid air energy storage demonstration project

2.2 两级固相蓄冷

两级填充床固相蓄冷技术[16]将蓄冷系统分为 2 个阶段，并采用间接蓄冷方式。郭璐娜[14]对单级固相蓄冷和两级固相蓄冷的无冷量损失理想流程进行了热力学分析，发现单级蓄冷的空气液化率为 58.17%，系统往返效率为 44.21%；而两级蓄冷的空气液化率为 83.67%，系统往返效率为 61.94%，表明采用两级固相蓄冷可显著提高系统往返效率。随后，针对两级固相蓄冷填充床进行了储释冷多循环蓄冷系统动态特性分析，分析了多循环过程中，填充床轴向温度分布、斜温层厚度演变及出口温度的动态变化。往返效率随循环次数的增加而下降，当达到相对稳定状态时，考虑冷量损失和间歇期的系统往返效率由 61.9%降低至 35.2%。因此，尽管两级固相蓄冷可以显著提高系统效率，但同样受到系统动态特性的影响，导致系统多次循环后蓄冷效率降低。

针对不同填充床之间的连接形式，张子澳等[12]对轴向流填充床与径向流填充床开展了对比研究，2 种填充床的结构如图 7 所示。图 7a)为径向流结构，空气由底部流入内部通道进入第一蓄冷填充床，沿径向流动并与蓄冷工质进行换热，后通过环形通道进入第二蓄冷填充床进行换热，最终由内部通道经顶部流出。

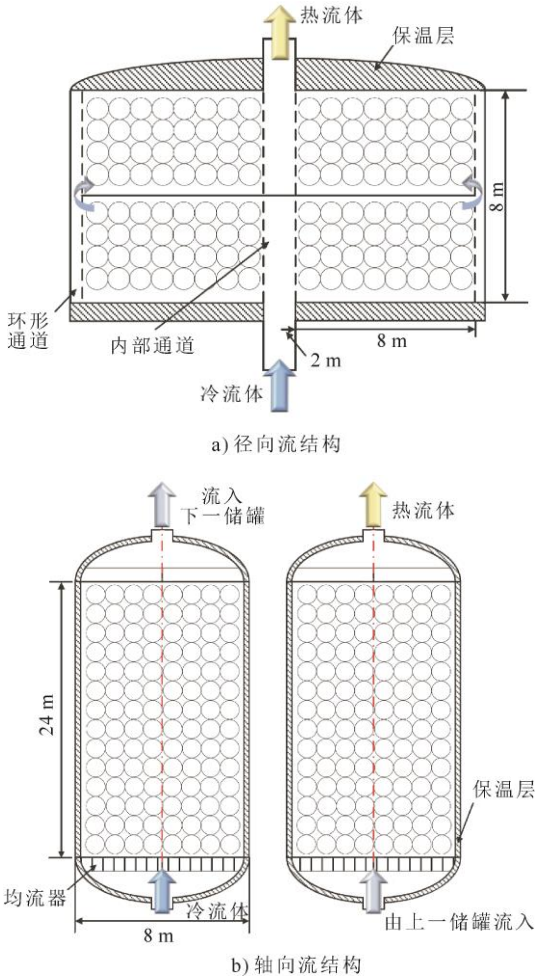


图 7 径向流蓄冷填充床与轴向流蓄冷填充床

Fig.7 Radial flow packed bed and axial flow cold storage packed bed

图 7b)为轴向流结构，换热流体由底部进入，从顶部流出后进入下一蓄冷填充床，与蓄冷工质换热后从顶部流出。研究表明，在储冷量为 74 MW·h 和流体工作压力 0.1 MPa 条件下，径向流填充床储释冷过程压降（2 kPa）明显低于轴向流填充床

（82.8 kPa）；径向流填充床的㶲效率（87.7%）明显高于轴向流填充床（59.8%）。当工作压力升高至 0.8 MPa 时，储释冷过程压降均显著降低，轴向流㶲效率更高（93.1%）。因此，径向流储冷填充床在低压储释冷工况运行更具优势，而轴向流储冷填充床在高压工况运行更具优势，为固相蓄冷填充床结构优化与设计提供了参考。

2.3 级联式固相蓄冷

级联式两级填充床固相蓄冷技术[17]与两级填充床固相蓄冷技术类似，其主要区别为一级蓄冷和二级蓄冷存在交叉部分。以储能阶段为例，压缩空气先后进入液化侧一级、二级换热器，同时，一路循环气体经循环风机进入液化侧二级、一级换热器，另一路循环气体经循环风机从二级固相蓄冷填充床流出并进入二级换热器，对压缩空气进行降温液化。李国跃[17]对采用级联式固相蓄冷的液态空气储能系统（图 8）的蓄冷工质、流程、动态性能进行了研究，研究表明，1 MW 系统循环效率可达到 58.3%，10 MW 系统循环效率可达到 59.4%，分级蓄冷系统能有效提高系统储释能过程中冷能的供需匹配。此外，Kątski 等人[26]对一级固相蓄冷、两级固相蓄冷、级联式两级固相蓄冷进行了对比研究，相同条件下，基于一级固相蓄冷的液态空气储能系统往返效率为 51.2%，平准化储能成本为 304 欧元/(MW h)；基于两级固相蓄冷的液态空气储能系统往返效率为 52.7%，平准化储能成本为 304 欧元/(MW h)；级联式两级固相蓄冷的往返效率为 53.4%，平准化储能成本为 294 欧元/(MW h)。该研究表明级联式两级蓄冷是效率和经济性最佳的固相蓄冷技术。

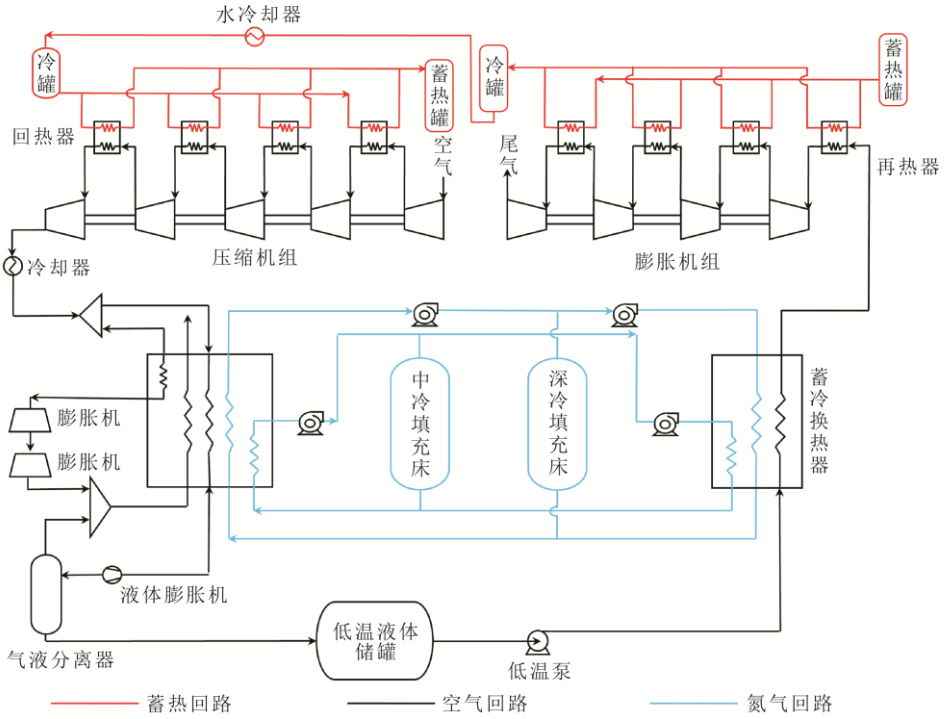


图 8 级联式两级固相蓄冷的液态空气储能系统

Fig.8 Liquid air energy storage system with cascade two-stage solid phase cold storage

2.4 多罐组合填充床固相蓄冷

郭璐娜[14]为了改善多个储释冷循环过程中填充床内斜温层发展导致的系统效率降低，提出“补冷段-蓄冷段-常温段”的多罐组合式固相蓄冷系统。该系统可通过阀门开闭来切换多罐的串并联方式。在储能过程中，常温气体从各填充床顶部进入，液态空气从底部出口流出；在释能过程中，液态空气从各填充床底部进入，气化后从顶部出口流出。实验平台如图 9 所示。研究表明，该方案能够降低蓄冷系统动态特性的影响，一级蓄冷各段比例为补冷段:蓄冷段:常温段=1.0:1.0:0.7；二级蓄冷的各段比例为补冷段:蓄冷段:常温段=1.1:1.0:0.9，才能保证液态空气储能流程不受蓄冷系统动态特性的影响。相比仅有蓄冷段的系统，其储能密度下降了 47.4%。因此，该多罐组合式固相蓄冷系统虽然理论上可以降低斜温层影响，但在实际应用中，需要综合考虑效率、储能密度与可行性。



图 9 多罐组合式固相蓄冷实验平台示意

Fig.9 Schematic diagram of multi tank combined solid phase cold storage experimental platform

2.5 流化式固相蓄冷

上述几种固相蓄冷技术尚未做到消除斜温层影响，相关研究提出了将固相蓄冷工质流化的流化式固相蓄冷技术。Fan 等人[18]提出的流化式固相蓄冷技术如图 2g)所示，主要包括 4 个部分：流化装置（进料流化床、分离流化床、风箱和鼓风机）、管壳式换热器、颗粒塔（高温颗粒塔、低温颗粒塔）和配套部件。储能阶段，高压空气进入换热器，低温石英砂从低温颗粒塔进入进料流化床，风机为风箱供风。在气流驱动下，进料流化床中的石英砂流化并进入流化床换热器。石英砂与空气换热后，进入分离流化床，随后进入高温颗粒塔。同时，气流中的石英砂在气固分离器中进一步分离，气体返回鼓风机，石英砂通过颗粒回收管道进入高温颗粒塔。释能阶段，其运行过程与储能阶段类似。在此基础上，研究了换热器设计条件和流化参数对系统性能的影响，研究表明，较低的空气侧/颗粒侧压降和较高的颗粒输送系数有利于提高系统效率，优化后系统往返效率可达 58.76%，而相同条件下，采用传统固相（一级填充床）与液相（甲醇和丙烷）蓄冷的液态空气系统的往返效率分别为 48.76%和 57.46%。进一步，Fan 等人[27]还对该系统进行了综合评价，随着容量增加到 1 000 MW，系统的平准化储能成本可以降低至 0.703 元/(kW h)。与传统的液态空气储能系统相比，投资回收期减半，盈利能力更强。然而，该流化固相蓄冷技术尚处于模拟研究阶段，还需进行实验验证其实际运行特性。

2.6 移动式固相蓄冷

范啸宇等[19,28]提出的移动式固相蓄冷技术如图 10 所示。蓄冷阶段，液态空气进入移动床换热器，同时，高温颗粒罐中的颗粒在重力作用下流经移动床换热器吸收冷量后进入低温颗粒罐；释冷阶段，调换高、低温颗粒储罐的位置，运行过程与蓄冷阶段类似。在进行运行参数优化后，蓄冷系统过程的循环热效率提升至 91.89%，循环㶲效率提升至 83.58%，优于传统的填充床蓄冷技术。计算结果表明，在当前的蓄冷效率下，系统可实现 51.10%的往返效率。相对于已有的填充床蓄冷技术，移动床蓄冷技术将蓄冷单元的循环㶲效率提高了 16.2%，将系统整体往返效率提高了 13.3%。

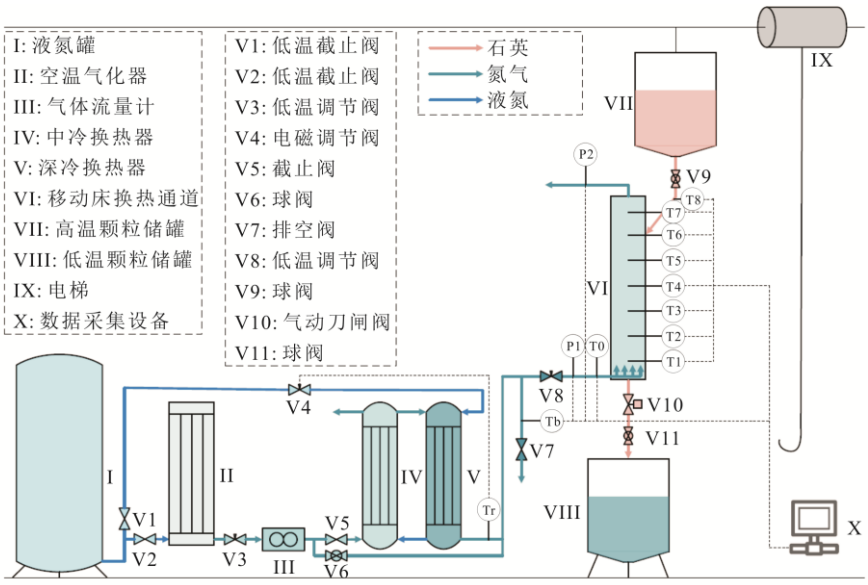


图 10 基于移动床技术的储释冷实验平台示意

Fig.10 Schematic diagram of cold storage and release experimental platform based on moving bed technology

2.7 分层填充床固相蓄冷

分层填充固相蓄冷填充床主要包含多粒径固体颗粒填充床和复合式固相蓄冷填充床。为解决液体空气储能系统蓄冷子系统中高压降与低传热率之间的矛盾，Liu 等人[20]提出了如图 11 所示的多粒径固体颗粒填充床。采用从下到上粒径减小的分层填料结构，较大的颗粒降低了流动阻力，而较小的颗粒增强了低温流体与固体之间的传热，实现了流动阻力降低和传热性能提升。与常规的均匀粒径填充床（粒径 12 mm）相比，优化的分层填充床压降降低了 64.49%（从 3 596.22 Pa 降至 1 277.82 Pa），单位压降的蓄冷能力提高了 41.5%，平均有效温差是均匀填充床的 6.8~16.9 倍。经济性分析表明，多粒径固体颗粒填充床在提升液态空气储能系统效率方面具有较大潜力。

Bai 等人[29]提出了在填充床顶部填充单层或多层相变材料的复合式固相蓄冷技术（图 12），分析了在填充床顶部以不同形式填充相变材料对蓄冷性能的影响。研究结果表明，蓄冷效率和蓄冷密度均随循环次数的增加而降低，综合性能最优的复合蓄冷填充床，其往返效率提高了 0.17%，蓄冷密度提高了 15.54%，蓄冷效率仅下降了 1.32%。在保证对往返效率影响最小的前提下，实现了蓄冷密度的大幅增加。随着液态空气储能向高容量发展，将有助于满足对冷能高密度存储的需求。虽然该研究取得了较有潜力的研究成果，但值得注意的是，对于大型液态空气储能的蓄冷系统，在进行蓄冷密度提升研究时，不能以过多降低蓄冷效率为代价，保证冷量的高效存储和释放才能够保障系统效率。

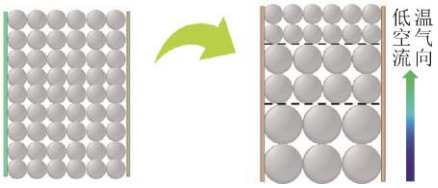


图 11 不同粒径分层填充床示意

Fig.11 Schematic diagram of layered packed bed with different particle sizes

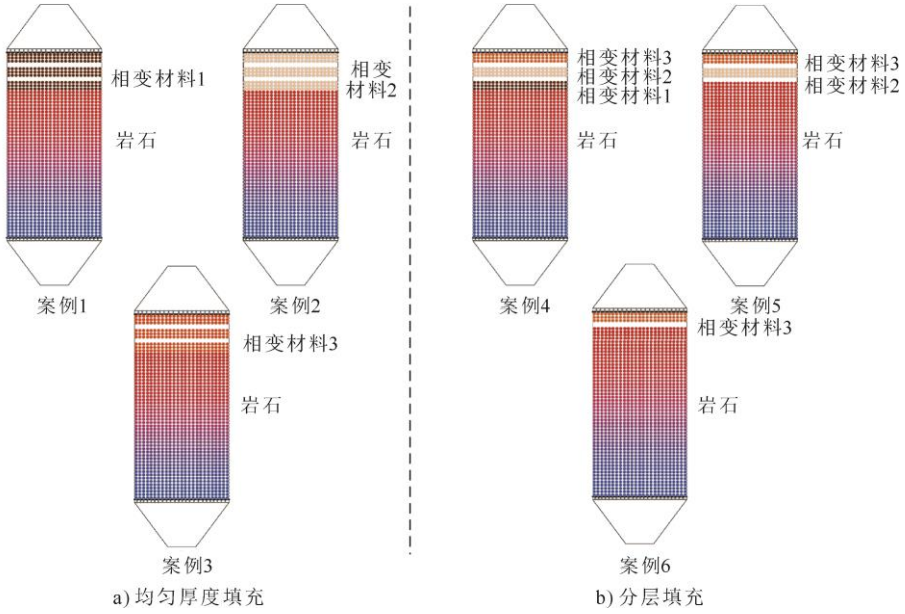


图 12 PCM-固相材料分层填充床示意

Fig.12 Schematic diagram of PCM solid material layered packed bed

3 固相蓄冷工质

本部分总结了现有研究涉及的固相蓄冷工质，并对其性质进行了汇总和对比，不同蓄冷工质及性质如表 1 所示。郭璐娜[14]选取玻璃、红砖、玄武岩、混凝土、花岗岩、氯化钠、白云石 7 种常见非金属材料进行了固相蓄冷材料优选与理论计算，计算了斜温层厚度，发现固相蓄冷性能由优至劣的顺序为：玻璃＞红砖＞玄武岩＞混凝土＞花岗岩＞氯化钠＞白云石。玻璃的蓄冷性能最佳，但成本较高，红砖的蓄冷性能次之，但在填充过程中易发生破碎和粉化，因此，在上述工质中，玄武岩颗粒为较优的固相蓄冷工质。李国跃[17]研究了千次储/释冷循环对大理石、花岗岩、石灰岩和玄武岩 4 种材料热物性和强度的影响，发现石灰岩具有储能密度大、平均导热系数高、抗压强度高、不易脱落等优点，为优选蓄冷工质。Mashayekh 等人[30]对采用石英、玄

武岩、石灰岩和一种相变材料填充的固相蓄冷填充床进行了比较分析，对于 100 MW 的液体空气储能系统，采用石英为固相蓄冷工质的液态空气储能系统，其总成本分别较相变材料、玄武岩和石灰石低 86.1%、37.8%和 17.8%。因此，玄武岩、石灰岩、石英是当前研究中较优的固相蓄冷工质。

表 1 液态空气储能系统固相蓄冷工质

Tab.1 Solid phase cold storage media for liquid air energy storage system

蓄冷工质	比热容/(J (kg·℃)$^{-1}$)	热导率/(W (m·K)$^{-1}$)	单价/(元·t^{-1})	备注
不锈钢棒阵列			8 000~15 000	
花岗岩	0.61（40～–160 ℃，平均值）	2.48（40～–160 ℃，平均值）	几十至几百	千次储/释冷循环后，有少量裂纹和脱落，密度、导热系数和比热容均无明显变化，抗压强度有较大的提高
玄武岩	0.61（40～–160 ℃，平均值）	1.51（40～–160 ℃，平均值）	几十至几百	千次储/释冷循环后，外观、密度、导热系数和比热容均无明显变化，抗压强度基本不变
大理石	0.70（40～–160 ℃，平均值）	3.99（40～–160 ℃，平均值）	几十至几百	千次储/释冷循环后，外观、密度、导热系数和比热容均无明显变化，抗压强度基本不变
石灰岩	0.73（40～–160 ℃，平均值）	3.07（40～–160 ℃，平均值）	几十至几百	千次储/释冷循环后，外观、密度、导热系数和比热容均无明显变化，抗压强度有较大的提高
玻璃珠	940.41~500.50（40～–160 ℃）	1.79~0.70（25～–160 ℃）	2 000~7 000	
白云石			几十至几百	
氯化钠			几百元（工业盐）	
混凝土			几百	
红砖			几十至几百	填充过程中易破碎、粉化
鹅卵石			几十至几百	
石英岩			几十至几百	

4 结 语

1）时空耦合非对称冷能传递效应对填充床斜温层及固相蓄冷效率的影响机理及抑制策略尚需进一步研究。目前关于固相蓄冷系统非对称冷能传递机理的相关研究，分析了斜温层的动态发展对蓄冷系统的影响规律，但尚未得到时空耦合非对称冷能传递效应对填充床斜温层及烟效率的影响机理及相应的抑制策略，这将是未来固相蓄冷理论研究领域的重点攻关方向。

2）新型固相蓄冷填充床结构还需进一步优化。已提出的分层填充床、复合式填充床、径向流填充床等尚处于研究阶段，还需充分考虑材料循环稳定性、系统放大效应、经济性等，采用理论模拟与实验研究相结合的方法验证其大规模应用的可行性，此外，开发其他新型高效固相蓄冷填充床亦是提升固相蓄冷性能的重要途径。

3）新型固相蓄冷技术仍需进行实验与工程验证及持续的技术迭代。已有多种新型固相蓄冷技术显现出了提升固相蓄冷系统效率的重大潜力，但距离大规模工程化应用还有一定距离。例如，流化式固相蓄冷尚处于模拟研究阶段，需要进一步开展实验验证，流化式及移动式固相蓄冷均需考虑循环过程颗粒磨损问题，并进行相应的实验测试及中试验证。此外，更多新型高效固相蓄冷技术也需进一步开发。

4）固相蓄冷技术因其较高的安全性成为液态空气储能系统的重点攻关方向，其循环效率较低仍然是当前理论研究、实验验证、装备研制等各个领域重点关注的核心问题。需结合能源、化工、材料等多学科优势，开展联合攻关，实现蓄冷工质、蓄冷设备、蓄冷系统及整体蓄冷技术的突破。

［参 考 文 献］

［1］ 国家能源局. 国家能源局 2025 年三季度新闻发布会文字实录 [EB/OL] (2025-07-31) [2025-11-07]. https://www.nea.gov.cn/20250731/83ffa46373ec42dd99e0e3271028c151/c.html.
The National Energy Administration. Transcript of the National Energy Administration's Press Conference for the Third Quarter of 2025 [EB/OL] (2025-07-31) [2025-11-07]. https://www.nea.gov.cn/20250731/83ffa46373ec42dd99e0e3271028c151/c.html.

［2］ 李俊先, 刘延江, 刘坤, 等. 基于液态天然气冷能利用的液态空气储能系统优化与性能评估[J]. 热力发电, 2024, 53(9): 69.
Li J X, Liu Y J, Liu K, et al. Optimization and performance evaluation for liquid air energy storage based on liquid natural gas cold energy utilization[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 69.

［3］ Damak C, Leducq D, Hoang M H, et al. Liquid air energy storage (LAES) as a large-scale storage technology for renewable energy integration: a review of investigation studies and near perspectives of LAES[J]. International

Journal of Refrigeration, 2020, 110: 208.
[4] O'Callaghan O, Donnellan P. Liquid air energy storage systems: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 146: 111113.
[5] 高远志, 殷戈, 孙雪丽, 等. 液态空气储能技术研究现状与展望[J].储能科学与技术, 2025, 14(10): 3900.
Gao Y Z, Yin G, Sun X L, et al. Research status and outlooks of liquid air energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(10): 3900.
[6] 刘若男, 范世岩, 何青. 液态空气储能系统的液化技术分析与展望[J]. 动力工程学报, 2025, 45(2): 240.
Liu R N, Fan S Y, He Q. Analysis and prospect of liquefaction technologies in liquid air energy storage system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(2): 240.
[7] She X H, Wang H R, Zhang T T, et al. Liquid air energy storage: a critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 208: 114986.
[8] Ding X Q, Duan L Q, Zheng N, et al. A systematic review on liquid air energy storage system[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 210: 115164.
[9] Sun N, Zhang J Y, Zhang Y X, et al. A review of advancements in liquid air energy storage: system architecture, integration strategies, and thermodynamic analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2026, 226: 116240.
[10] 何青, 张千旭. 液化空气储能系统蓄冷技术研究进展[J]. 油气与新能源, 2023, 35(4): 24.
He Q, Zhang Q X. How cold storage technology research is developing for liquid air energy storage system[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(4): 24.
[11] 安保林, 陈嘉祥, 王俊杰, 等. 液态空气储能系统液化率影响因素研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(11): 2478.
An B L, Chen J X, Wang J J, et al. Study on the influencing factor on liquid air energy storage system liquefaction rate[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(11): 2478.
[12] 张子澳, 王星宇, 路新亮, 等. 液态空气储能径向流储冷填充床性能研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(9): 3311.
Zhang Z A, Wang X Y, Lu X L, et al. Performance study of a radial-flow cold storage packed bed for liquid air energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(9): 3311.
[13] Morgan R, Nelmes S, Gibson E, et al. Liquid air energy storage: analysis and first results from a pilot scale demonstration plant [J]. Applied Energy, 2015, 137: 845.
[14] 郭璐娜. 液态空气储能固相蓄冷机理研究[D]. 北京: 中国科学院理化技术研究所, 2022: 1.
Guo L N. Investigation on solid-phase cold energy storage mechanism of the liquid air energy storage system[D]. Beijing: Technical Institute of Physics and Chemistry Chinese Academy of Sciences, 2022: 1.
[15] Ma Z, Glatzmaier G C, Wagner M, et al. General performance metrics and applications to evaluate various thermal energy storage technologies[C]. Proceedings of the ASME International Conference on Energy Sustainability Collocated with the ASME International Conference on Fuel Cell Science, 2012: 345.
[16] Guo L N, Gao Z Z, Ji W, et al. Thermodynamics and economics of different asymmetric cold energy transfer in a liquid air energy storage system[J]. Energy Technology, 2020, 8(5): 1901487.
[17] 李国跃. 超临界压缩空气储能填充床分级蓄冷方法研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2020: 1.
Li G Y. Research on cascaded packed bed cryogenic storage method based supercritical air energy storage system[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics Chinese Academy of Sciences, 2020: 1.
[18] Fan X Y, Guo L N, Ji W, et al. Liquid air energy storage system based on fluidized bed heat transfer[J]. Renewable Energy, 2023, 215: 118928.
[19] Fan X Y, Ji W, Li J X, et al. Advancing liquid air energy storage with moving packed bed: development and analysis from components to system level[J]. Applied Energy, 2024, 355: 122236.
[20] Liu Y N, Zhang T T, He X F, et al. Stratified particle packed bed: synergistic pressure drop reduction and heat transfer enhancement in LAES[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279: 128017.
[21] Guizzi G L, Manno M, Tolomei L M, et al. Thermodynamic analysis of a liquid air energy storage system[J]. Energy, 2015, 93: 1639.
[22] Morgan R, Nelmes S, Gibson E, et al. An analysis of a large-scale liquid air energy storage system[J]. Energy, 2015, 168(2): 1.
[23] Sciacovelli A, Vecchi A, Ding Y. Liquid air energy storage (LAES) with packed bed cold thermal storage: from component to system level performance through dynamic modelling[J]. Applied Energy, 2017, 190: 84.
[24] Guo H, Xu Y J, Chen H S, et al. Thermodynamic characteristics of a novel supercritical compressed air energy storage system[J]. Energy Conversion & Management, 2016, 115: 167.
[25] 刘佳. 超临界空气蓄热蓄冷数值与实验研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2012: 1.
Liu J. Numerical and experimental study on heat and cold energy storage using supercritical air[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 1.
[26] Kątski B G, Mashayekh A, Desai N B, et al. Comparative analysis of liquid and solid-based cold energy storage configurations for liquid air energy storage systems[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 130: 117083.
[27] Fan X Y, Xu H, Li Y H, et al. A novel liquid air energy storage system with efficient thermal storage: comprehensive evaluation of optimal configuration[J]. Applied Energy, 2024, 371: 123739.
[28] 范啸宇. 基于移动床技术的液态空气储能固相蓄冷储热研究[D]. 北京: 中国科学院理化技术研究所, 2025: 1.
Fan X Y. Investigation on solid-phase cold energy storage research on solid-phase cold and heat storage based on moving bed technology of liquid air energy storage[D]. Beijing: Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 2025: 1.
[29] Bai Y D, Fan S Y, Chen H R, et al. Numerical investigation of phase change material-rock composite cold storage packed bed in liquid air energy storage systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 280: 128128.
[30] Mashayekh A, Park J H, Desai N B, et al. Thermodynamic and economic analyses of liquid air energy storage systems using packed bed cold thermal energy storage with different storing materials[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 60: 103449.

（责任编辑　邓玲惠）