

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-09
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250726001

基于新型石墨烯基复合吸附剂的太阳能热驱动蓄冷研究

王科迪¹ 符世鯤¹ 高鹏¹ 武卫东¹ 王丽伟²

(1 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘要 针对传统化学吸附剂普遍存在的结构松散、缺乏有效传热传质通道和循环稳定性差等问题,本文提出并制备了一种新型石墨烯基复合吸附剂,该吸附剂通过将氯化锶(SrCl_2)嵌入三维互联的石墨烯网络中,构建了连续高效的热传导和传质通道,同时显著增强了吸附剂的循环稳定性与热质传输性能。结果表明:该复合材料在 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 蒸发温度下的氨吸附容量高达 0.577 g/g ,为理论值的 84.1% ,单位质量蓄冷能力达到 639.89 kJ/kg ,是冰蓄冷的 1.9 倍。在 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 驱动热源温度的解吸工况下,氨解吸量达 0.572 g/g 。在模拟非聚光太阳能集热器热水驱动的定压解吸实验中,系统可在连续 4 h 稳定日照条件下完成 90% 以上的蓄冷过程。该新型石墨烯基复合吸附剂在储能密度及循环稳定性方面均展现出优异性能,为太阳能吸附式蓄冷系统的工程化提供坚实技术支撑。

关键词 吸附式蓄冷;太阳能;复合吸附剂;储能密度;定压解吸

中图分类号:TK511;TB61;TB64

文献标识码:A

Solar Thermal-Driven Cold Energy Storage Based on a Novel Graphene-Based Composite Sorbent

Wang Kedi¹ Fu Shikun¹ Gao Peng¹ Wu Weidong¹ Wang Liwei²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. Ministry of Education, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract To address the common problems associated with traditional chemisorption sorbents, including their loose structure, lack of effective heat- and mass-transfer pathways, and poor cycling stability, this study proposes and synthesizes a novel graphene-based composite sorbent. By embedding strontium chloride (SrCl_2) into a three-dimensionally interconnected graphene network, continuous and efficient channels for heat conduction and mass transfer were constructed, significantly enhancing the sorbent's cycling stability and thermophysical transfer performance. The composite sorbent achieves a high ammonia uptake, of 0.577 g/g , at an evaporation temperature of $-10\text{ }^\circ\text{C}$, reaching 84.1% of the theoretical value. The specific cold storage capacity reaches 639.89 kJ/kg , which is 1.9 times that of ice storage. Under a desorption condition driven by a $90\text{ }^\circ\text{C}$ heat source, the ammonia desorption capacity reaches 0.572 g/g . In constant-pressure desorption experiments simulating hot water supplied by a non-concentrated solar collector, over 90% of the cold storage process was completed within 4 h of stable sunlight. The proposed graphene-based composite sorbent demonstrated excellent performance in terms of both energy storage density and cyclic stability, thus providing solid technical support for engineering applications of solar-driven adsorption cold storage systems.

Keywords sorption-based cold energy storage; solar energy; composite sorbent; energy storage density; constant pressure desorption

据报道,2024年制冷设备的能耗约占全球总用电量的 20% ^[1]。随着社会经济的不断发展,冷库在食品、医药和物流等领域的应用日益广泛,对其需求持续增长。根据国际制冷学会(IIR, International Institute of Refrigeration)的统计数据,截至2024年6月,中国冷库总容量达到约 2.37 亿 m^3 ,较2023年增

长了 7.73% ^[2]。然而,冷藏仓库的高能耗问题仍是制约其可持续发展的主要挑战之一^[3]。随着冷链物流的快速发展,进一步凸显了在冷库运营管理中提升能源效率的紧迫性^[4]。太阳能驱动制冷系统具有配置灵活简单、效率高、经济效益高等优点^[5],是解决制冷系统高能耗问题的未来方向之一^[6-8]。

基金项目:国家自然科学基金(52236004,52206017)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52236004 & No. 52206017).)

收稿日期:2025-07-26;修回日期:2025-09-28;录用日期:2025-09-28

目前,太阳能在冷库中的利用形式主要包括光伏和光热2类路径。光伏技术可为蒸气压缩制冷系统提供电能,实现制冷机组的绿色电驱动运行^[9];而太阳能光热技术则通过集热器将水加热至50~90℃,驱动吸附式制冷循环,完成热能向冷能的直接转化,具有较高的系统效率和较强的灵活性^[10]。

在白天光照充足的条件下,光热系统还可通过热化学过程储存冷能,为夜间制冷提供驱动力^[11]。例如,胡皓等^[12]构建了基于纳米增强吸附剂的太阳能吸附-压缩复合制冷系统,采用太阳能光伏或光热作为驱动热源,借助压缩与吸附循环协同运行,实现了可再生能源的有效利用。然而,在无蓄能单元或热调节机制的情况下,该类系统在阴雨天气或夜间易出现供能中断,导致冷量输出不稳定的问题。由此可见,单一依赖光伏或光热的驱动方式难以保障系统在实际运行中的持续性与高效性。

为解决太阳能供冷系统中储能能力弱与供能波动大的难题,热化学吸附式蓄冷技术被认为是一种更具发展潜力的路径。该类技术通过太阳能驱动吸附剂-工质对完成吸附/解吸过程,以物理化学方式实现冷量的间歇式储存与延迟释放,具有储能密度高、释冷温区灵活可调、储存周期长等优势^[13-15]。其中,金属卤化物-氨工质对(如 $\text{SrCl}_2\text{-NH}_3$ ^[16]、 $\text{CaCl}_2\text{-NH}_3$ ^[17])因较高的氨吸附容量与中低温驱动特性,成为太阳能蓄冷研究中的主流体系。然而,现有吸附材料在热导率、结构稳定性与可制备性等方面仍存在显著不足。

刘金亚等^[18]开发的 $\text{CaCl}_2/\text{NaCl-NH}_3$ 两级复合吸附系统,以膨胀硫化石墨为骨架实现了低温驱动能力,在不高于100℃热源条件下获得了较理想的制冷输出(最大制冷性能系数达0.27,单位质量制冷功率为132.5 W/kg),但该材料存在吸附剂膨胀引发结构破坏及热质传输受限等问题^[19-21]。公绪金等^[22]进一步将 CaCl_2 与石墨烯引入活性炭基底,通过在多孔骨架中构建高效的热质传递通道,有效改善了吸附剂的导热性能和反应效率。该复合吸附剂在甲醇工质下表现出优异的吸附/解吸特性,最高吸附量可达0.71 g/g,并实现了486.95 kJ/(kg·h)的制冷输出,展示了复合多孔基底与高导热填料协同设计在提升吸附性能方面的潜力^[23-24],表明通过合理优化基底结构,有望进一步改进吸附材料热质传递路径。

针对现有太阳能供冷系统存在的供能不稳定与吸附材料传热性能不足等问题,本文从系统设计与材料创新2个方面进行了研究。在系统构建方面,本文首次提出并搭建了一种光伏-光热分工驱动的太

阳蓄冷系统。白天利用光伏电能驱动蒸气压缩机制冷,满足冷库即时供冷需求;同时,太阳能集热器提供热水驱动吸附床内的解吸过程,使吸附剂中吸附的氨气在升温条件下释放出来,经过冷凝形成液态氨,实现冷量储存。在实验材料方面,本文制备了一种新型 SrCl_2 -石墨烯复合吸附剂,通过将 SrCl_2 嵌入三维互联的石墨烯网络中,构建了连续高效的热传导与传质通道,并围绕该复合材料开展了结构表征、吸附性能测试以及白天定压解吸实验。

1 新型太阳能吸附式蓄冷循环

目前,冷库的制冷需求通常集中在0℃以下的低温区间。为满足冷链系统对清洁、高效冷源的需求,本文创新性地提出将太阳能光热驱动与蒸气压缩制冷技术相融合,构建光电-光热协同供冷系统。该系统通过光伏发电驱动压缩机制冷,同时利用太阳能集热器热水驱动解吸过程,实现热电互补、协同供冷。系统运行采用“白天制冷蓄冷-夜间释冷”的策略,充分利用日照期间的可再生能源,实现高效、节能的冷量输出。

新型太阳能吸附式蓄冷循环系统全天工作原理如图1所示。日间制冷蓄冷原理如图1(a)所示,系统主要依靠由光伏板供电驱动的蒸气压缩制冷循环实现持续供冷。该循环由压缩机、冷凝器、节流装置及蒸发器2构成。在压缩机制冷过程中,产生的冷量一方面用于满足外部冷负荷,另一方面通过板式换热器对解吸产生的氨气进行冷却,从而加速解吸过程。屋顶安装的低成本非聚光太阳能集热器用于收集太阳辐射,并产生热水作为吸附床解吸过程的驱动热源。在热驱动作用下,吸附剂解吸出氨气,最终储存于储氨罐中,实现冷量的有效储存。

夜间释冷原理如图1(b)所示,系统进入释冷阶段。通过调节膨胀阀EV2,液氨以恒定流量进入蒸发器吸收环境热量后汽化为氨气,并被吸附床内的吸附剂重新吸附。该过程中释放的吸附热由冷却水带走。

2 实验材料与测试

2.1 SrCl_2 -石墨烯复合吸附剂制备

SrCl_2 -石墨烯复合吸附剂制备过程如图2所示,首先精确称量氧化石墨烯粉末,搭配去离子水配制质量浓度为10 mg/mL的氧化石墨烯(GO)水溶液,将溶液置于超声波清洗仪中超声处理2 h以确保充分分散。随后,按照1:1质量比向溶液中加入抗坏血酸作为还原剂,并按照 SrCl_2 :石墨烯质量比为4:1向溶

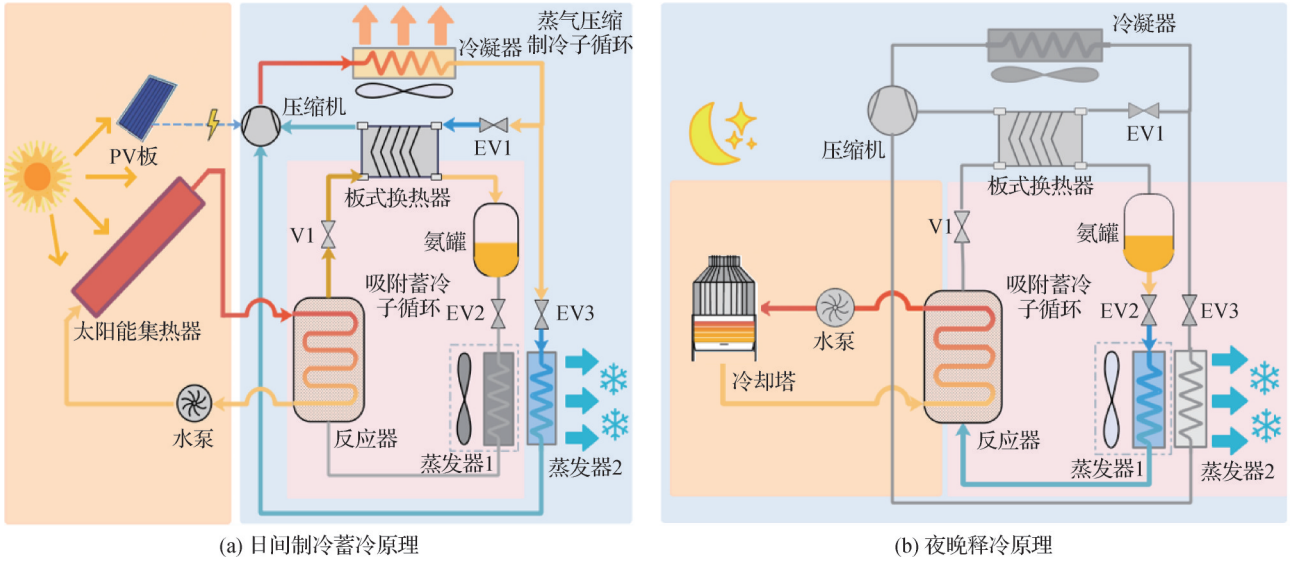


图1 新型太阳能吸附式蓄冷循环系统全天工作原理

Fig.1 Principle of the system's all-day operation principle

液中加入 SrCl_2 粉末,随后磁力搅拌 1 h。将所得均匀分散液注入特制铜质模具中,并置于液氮浴中进行冷冻,随后转移至冷冻干燥机中,在 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 、近真空条

件下冷冻干燥。再将干燥后的样品置于管式炉中进行热还原处理,待样品自然冷却至室温后取出,最后压制成 400 kg/m^3 的圆环块状结构装填进反应器中。

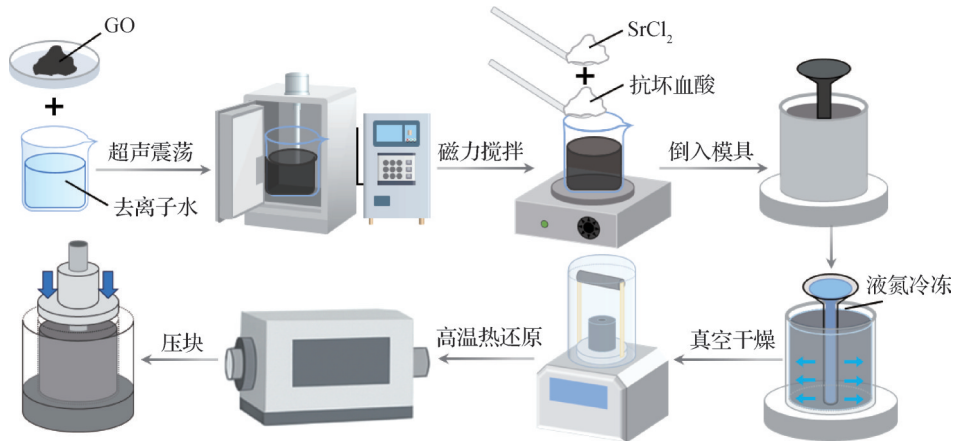


图2 SrCl_2 -石墨烯复合吸附剂制备流程

Fig.2 Synthesis process of SrCl_2 -Graphene composite sorbent

2.2 SrCl_2 -石墨烯复合吸附剂表征

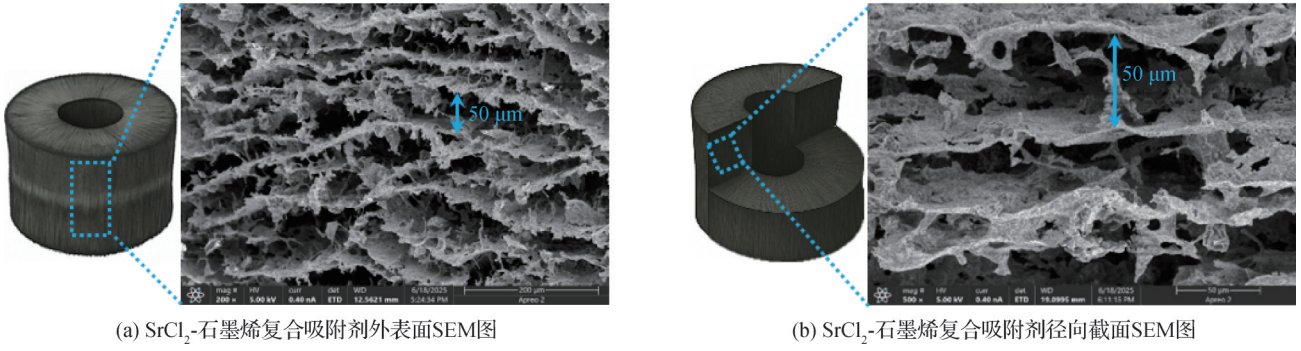
为热还原处理后的 SrCl_2 -石墨烯复合吸附剂整体形貌图,为直观展示复合吸附剂的混合均匀性,分别对其外表面和径向截面进行了扫描电子显微镜 (SEM) 表征,如图 3 所示。

图像分析结果表明,材料内部呈现出良好的径向排列结构,整体结构完整、连续。经 BET 分析测试表明,石墨烯复合吸附剂内部孔径集中分布在 $2\sim 50\text{ nm}$,而氨分子的动力学直径仅为 0.26 nm 。二者尺度差异显著,表明该通道结构为氨分子提供了极为充裕的扩散空间。此外,材料中每一层均存在连贯的通道网络,构建出三维贯通的多孔传输路径。

这种有序的层状通道结构,不仅有利于氨气分子在吸附/解吸过程中的迁移,也为热量的均匀传递创造了条件,从而为后续循环过程中高效的气体传质与热量交换奠定了坚实的结构基础。

2.3 SrCl_2 -石墨烯复合吸附剂吸附/解吸实验装置及方法

将上述 16 个吸附块体依次装填至不锈钢反应器中如图 4(a) 所示,搭建完整的吸附/解吸性能测试系统。实验台原理如图 4(b) 所示,主要包括 2 个恒温槽、反应器、氨冷凝/蒸发器、质量流量控制器、温度传感器与压力传感器、压差变送器等,能够实现吸附-解吸全过程的动态监测。

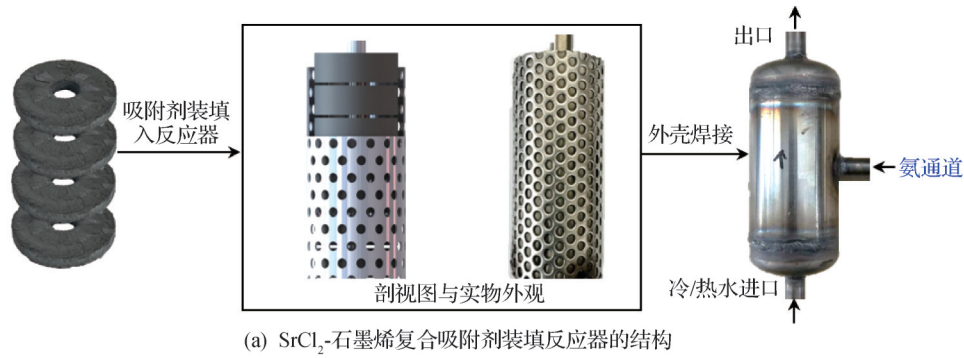


(a) SrCl₂-石墨烯复合吸附剂外表面SEM图

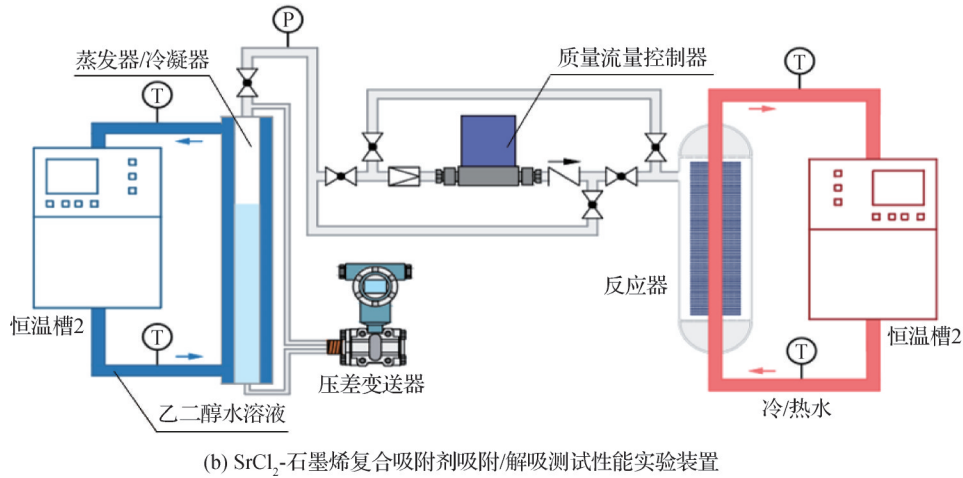
(b) SrCl₂-石墨烯复合吸附剂径向截面SEM图

图3 热还原处理后的SrCl₂-石墨烯复合吸附剂整体形貌及SEM表征图

Fig.3 Overall morphology and SEM images of the SrCl₂-Graphene composite sorbent after thermal reduction treatment



(a) SrCl₂-石墨烯复合吸附剂装填反应器的结构



(b) SrCl₂-石墨烯复合吸附剂吸附/解吸测试性能实验装置

图4 SrCl₂-石墨烯复合吸附剂的反应器结构设计与吸附/解吸性能测试装置

Fig.4 Reactor structure and sorption/desorption performance test system for SrCl₂-Graphene composite sorbent

在本实验系统中,恒温槽1通过循环热水或冷却水实现对吸附单元温度的精确控制,恒温槽2则采用乙二醇-水溶液循环控制冷凝器/蒸发器的的工作温度,模拟实际运行工况。

3 实验结果与讨论

3.1 SrCl₂-石墨烯复合吸附剂吸附性能

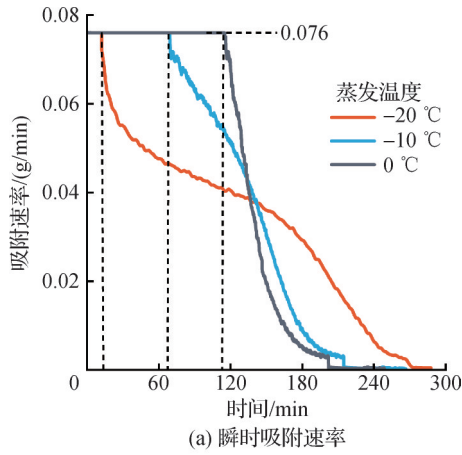
为评估石墨烯碳翅片复合吸附剂在实际应用中的释冷性能,研究蒸发温度对吸附行为的影响,在氨气最大流量保持为100 mL/min的条件下,将蒸发温度分别设定为-20、-10和0℃,反应器热水温度恒定

为30℃,结果如图5所示。

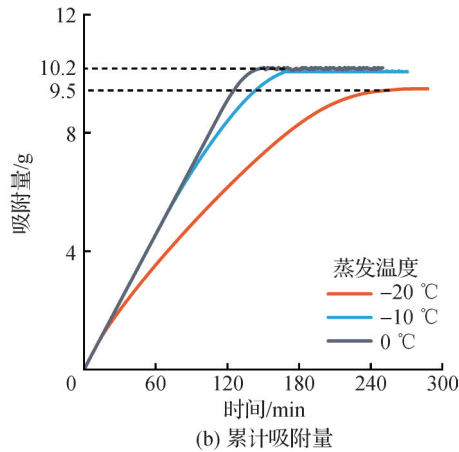
随着蒸发温度升高,吸附反应完成时间明显缩短,且在整个吸附过程中可维持更长时间的最大流量状态。在蒸发温度为0℃条件下,最终吸附量达到10.2 g;而在蒸发温度为-20℃条件下吸附量仅为9.5 g。该差异主要归因于较高温度下系统反应压力升高,使氨气密度增加,从而提高单位体积内氨分子数量。

3.2 SrCl₂-石墨烯复合吸附剂解吸性能

为研究石墨烯碳翅片复合吸附剂在蓄冷过程中的解吸行为,本文设计了新型系统,利用新系统评估



(a) 瞬时吸附速率



(b) 累计吸附量

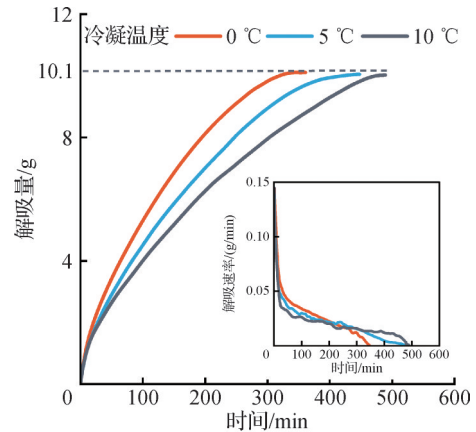
图5 不同蒸发温度下SrCl₂-石墨烯复合吸附剂的吸附性能
Fig.5 Sorption performance of the SrCl₂-Graphene composite sorbent at different evaporation temperatures

了冷凝器温度(0、5、10 °C)、反应器热源温度(80、90 °C)等不同因素对吸附剂解吸性能的影响。

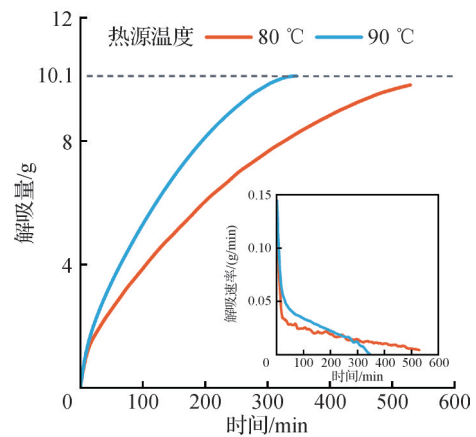
不同工况下SrCl₂-石墨烯复合吸附剂的累计解吸性能对比如图6所示。由图6(a)可知,在反应器温度保持为90 °C、最大氨气流量为190 mL/min条件下,随着冷凝温度由0 °C升至5 °C和1 °C,系统对应冷凝压力逐步上升,解吸速率明显下降,且达到最终平衡时间延长,同时解吸量也略有降低。表明较低的冷凝温度(即更低的冷凝压力)能够增强氨气的逸出驱动力,从而加速气体脱附过程。图6(b)探讨了在冷凝温度恒定为0 °C、氨流量保持为190 mL/min条件下,反应器热源温度(80 °C与90 °C)变化对解吸性能的影响。结果显示,热源温度升高显著加快了解吸速率并略微提升了解吸容量。这主要是因为更高的热能有助于克服解吸势垒,加速氨分子从吸附剂中脱附的过程。

3.3 同SrCl₂/膨胀硫化石墨/Al@C吸附剂吸附/解吸性能对比

为系统评估SrCl₂-石墨烯复合吸附剂的性能优势,参照文献[25]的工艺流程制备了等质量、等比例



(a) 不同冷凝温度下的累计解吸量



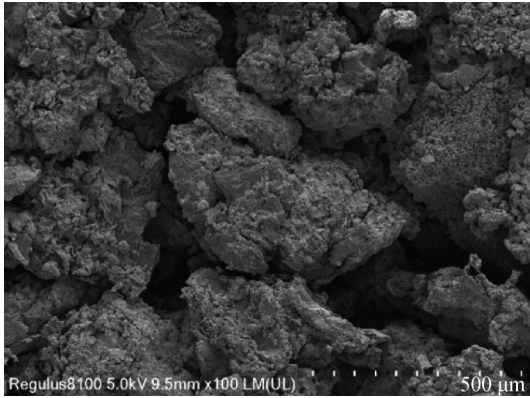
(b) 不同反应器热源温度下的累计解吸量

图6 不同工况下SrCl₂-石墨烯复合吸附剂的累计解吸性能对比

Fig.6 Comparison of cumulative desorption performance of the SrCl₂-Graphene composite sorbent under different operating condition

的SrCl₂/膨胀硫化石墨/Al@C吸附剂,具体包括:将氯化锶(SrCl₂)、膨胀硫化石墨(ENG-TSA)与碳包覆导热铝粉(Al@C)加入去离子水中,经过磁力搅拌和超声分散形成均匀混合体系,随后在烘箱中干燥,获得最终复合吸附剂。同时进行了SEM表征对比测试,如图7所示,可观察到SrCl₂/膨胀硫化石墨/Al@C吸附剂内部结构整体较为松散,SrCl₂颗粒呈不规则团聚分布,且局部存在孔道堵塞与颗粒集结现象。该结构可能对热量传导及气体通道的均匀性造成影响,从而限制吸附/解吸深度。

在SrCl₂/膨胀硫化石墨/Al@C吸附剂的吸附/解吸测试方面,进行了蒸发温度为-20 °C和-10 °C的吸附性能测试以及冷凝压力为0.43 MPa和0.62 MPa的解吸性能测试,并根据测试结果进行了单位质量吸附剂所吸附的氨量计算。不同工况下2种材料的吸附/解吸容量对比如图8所示。由图8(a)可知,在蒸发温度为-20 °C和-10 °C的吸附性能测试中,SrCl₂-石

图 7 SrCl₂/膨胀硫化石墨/Al@C 吸附剂 SEM 图Fig.7 SEM images of SrCl₂/ENG-TSA/Al@C sorbent

石墨烯复合吸附剂的单位吸附量相较于 SrCl₂/膨胀硫化石墨/Al@C 吸附剂分别提高了 4.5% 和 7.4%；由图 8 (b) 可知,在冷凝压力为 0.43 MPa 和 0.62 MPa 的解吸性能测试中,SrCl₂-石墨烯复合吸附剂的单位解吸量相较于 SrCl₂/膨胀硫化石墨/Al@C 吸附剂分别提高了 6.5% 和 6.4%。

该结果表明,SrCl₂-石墨烯复合吸附剂在低温吸

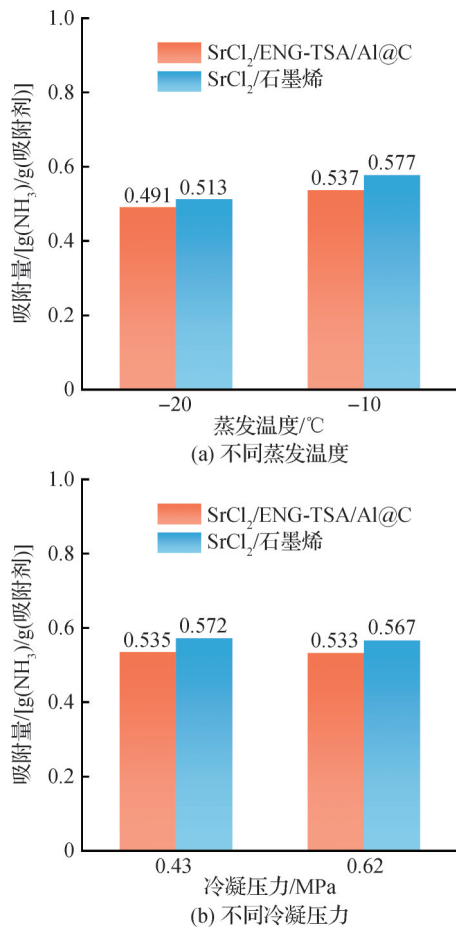


图 8 不同工况下 2 种材料的吸附/解吸容量对比

Fig.8 Sorption/desorption capacity comparison of two materials under various conditions

附和高压解吸条件下均表现出优异的性能提升。其主要原因在于复合吸附剂的三维互联层状结构有效改善了热质传输路径,提高了吸附剂的吸附/解吸量。

3.4 太阳能热化学吸附式蓄冷验证性实验

为进一步评估 SrCl₂-石墨烯复合吸附剂在太阳能驱动条件下的氨气解吸性能,本文进行了变驱动热源温度、定压解吸实验。基于实际集热器出水温度数据^[26]如表 1 所示,设计了恒冷凝温度条件下的变热源温度解吸实验。

表 1 太阳能集热器出水温度及太阳辐射强度变化

Tab.1 Variation of outlet temperature of the solar collector and solar radiation intensity

时间	集热器热水温度/°C	太阳辐射强度/(W/m ²)
09:30	64.8	582.1
10:30	75.6	776.9
11:30	80.9	859.0
12:30	86.7	896.0
13:30	91.1	875.6
14:30	93.5	748.7
15:30	93.0	625.6
16:30	90.9	451.3
17:30	84.4	192.3
18:30	80.5	154.8

在模拟日间定压解吸实验中,系统运行工况如图 9 所示,热水温度依据表 1 中太阳能集热器的出水温度变化规律每小时进行一次调整,将驱动热源温度区间设定在 80~95 °C,冷凝器温度固定为 0 °C(对应冷凝压力为 0.43 MPa)。

系统全过程的解吸速率变化如图 10 所示。可以观察到,在初始阶段(10:00-11:00)内,解吸速率较高,并在较短时间内达到最大值约为 0.14 g/min。该现象主要归因于起始阶段较高的传热温差和较强的热驱动力,使吸附剂内部的氨分子能够快速脱附并迁移至气相,从而导致解吸速率出现陡增。随着运行时间的延长,解吸速率逐步下降。该趋势表明,随着吸附剂中可释放的氨量逐渐减少,反应驱动力随之减弱,使解吸反应由快速阶段逐渐过渡至缓慢阶段。

在系统运行约 4 h 后,解吸过程已完成总解吸量的约 90%,此时吸附剂中的大部分活性位点已被利用,随后解吸速率继续降低并趋于稳定,说明系统逐渐进入解吸末期,残余的氨解吸主要依赖于较弱的热驱动力与有限的扩散过程。整体而言,该变化规

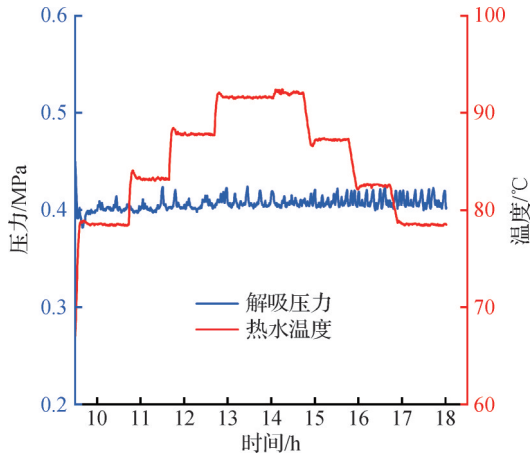


图9 模拟白天定压解吸过程中热水温度与对应设定冷凝压力的变化曲线

Fig.9 Variation of hot water temperature and corresponding set condensation pressure during constant pressure desorption under simulated daytime conditions

律清晰地揭示了解吸反应从“强驱动力-快速释放”至“解吸饱和-缓慢进行”的逐步演变过程,验证了本系统在长时间运行条件下的解吸稳定性。

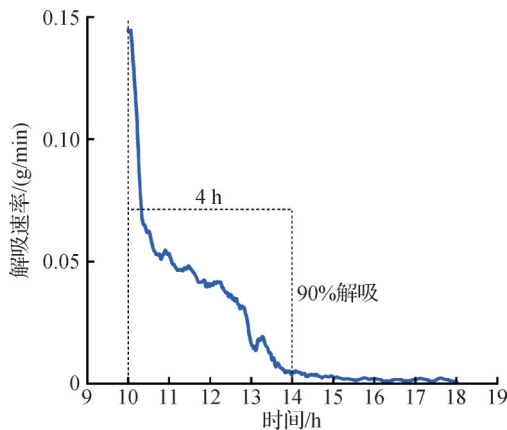


图10 定压解吸瞬时解吸速率

Fig.10 Instantaneous desorption rate during constant pressure desorption

4 结论

本文围绕太阳能热驱动吸附式蓄冷应用,提出并制备了一种氯化锶-石墨烯复合吸附剂,构建了适配中低温热源条件的高性能吸附式蓄冷循环,开展了材料与系统的吸附-解吸性能实验,得出如下结论:

1)面向太阳能冷库的应用需求,本文创新性地提出并构建了一种具备良好负载适应性的新型吸附式蓄冷循环系统。该系统面向冷库连续供冷的实际需求,充分融合太阳能热源的间歇性特征与吸附蓄冷的调节能力,实现了“日间制冷蓄冷-夜间释冷”的

稳定运行模式。

2)制备的新型 SrCl_2 -石墨烯复合吸附剂在三维互联结构中实现了氨工质的高效吸附与稳定解吸,在 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 蒸发温度下吸附容量达 0.577 g/g ,单位质量氯化锶吸附量为 0.721 g/g ,达到理论值的84.1%;相较于 SrCl_2 /膨胀硫化石墨/ Al@C 吸附剂提高了7.4%;在中低温热源($80\sim 95\text{ }^\circ\text{C}$)驱动下,系统在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 冷凝温度下的氨解吸量分别为 0.572 g/g 和 0.567 g/g ,相较于 SrCl_2 /膨胀硫化石墨/ Al@C 吸附剂分别提高了6.5%和6.4%,展现出良好的热源适应性与解吸稳定性。

3)在模拟太阳能热水驱动下进行的定压解吸实验中,系统在连续4 h稳定日照条件下完成了90%以上的冷量储存。该结果表明,构建的吸附式蓄冷系统具备良好的太阳能适应性与运行稳定性,可在稳定日照条件下实现较高的能量利用率。其运行方式符合“日间制冷蓄冷-夜间释冷”的冷库运行特征。

4) SrCl_2 -石墨烯复合吸附剂的单位质量蓄冷能力在 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 蒸发温度下达到 639.89 kJ/kg ,是传统冰蓄冷的1.9倍,展现出显著的蓄冷密度优势。

本研究为太阳能驱动的吸附式蓄冷系统提供了新型吸附材料路径。下一阶段,将进一步开展系统层面的实验研究,围绕太阳能集热-吸附/解吸全过程,搭建实际吸附系统进行测试性能比较,系统评估蓄冷效率、响应特性与稳定运行能力,并探索多工况下的动态匹配特性与优化控制策略,以推动该复合吸附剂在工程化冷链应用中的实际转化。

参考文献

- [1] Piselli C, Balocco C, Forastiere S, et al. Energy efficiency in the commercial sector. Thermodynamics fundamentals for the energy transition [J]. Energy Reports, 2024, 11: 4601-4621.
- [2] International Institute of Refrigeration. China's cold chain growth: increased capacity and sustainable practices in 2024 [EB/OL]. (2025-02-06) [2025-07-15]. <https://iifir.org/en/news/china-s-cold-chain-growth-increased-capacity-and-sustainable-practices-in-2024>.
- [3] 赖坤, 田健. 带喷射器的跨临界 CO_2 系统在大型冷库中的应用[J]. 制冷学报, 2025, 46(2): 162-170. (Lai Kun, Tian Jian. Application of transcritical CO_2 system with ejector in large cold store [J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(2): 162-170.)
- [4] 王雅博, 尹玉成, 刘兴华, 等. 冷库空气幕气流组织优化及冷风渗透实验[J]. 制冷学报, 2023, 44(2): 137-143. (Wang Yabo, Yin Yucheng, Liu Xinghua, et al.

- Optimization of airflow organization and cold air infiltration experiment of air curtain in cold storage [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(2): 137-143.)
- [5] Li Sihui, Peng Jinqing, Li Houpei, et al. Zero energy potential of PV direct-driven air conditioners coupled with phase change materials and load flexibility [J]. *Renewable Energy*, 2022, 200: 419-432.
- [6] Sarmouk M D, Smaili A, Fellouah H, et al. Experimental and numerical investigations of a solar space heating system based on design of experiments method [J]. *Solar Energy*, 2021, 216: 396-410.
- [7] Ding Zhixiong, Wu Wei, Chen Youming, et al. Dynamic characteristics and performance improvement of a high-efficiency double-effect thermal battery for cooling and heating [J]. *Applied Energy*, 2020, 264: 114768.
- [8] Zhou Yuekuan, Zheng Siqian, Zhang Guoqiang. A review on cooling performance enhancement for phase change materials integrated systems—flexible design and smart control with machine learning applications [J]. *Building and Environment*, 2020, 174: 106786.
- [9] Gao Yuhe, Ji Jie, Han Kedong, et al. Comparative analysis on performance of PV direct-driven refrigeration system under two control methods [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 127: 21-33.
- [10] Alobaid M, Hughes B, Calautit J K, et al. A review of solar driven absorption cooling with photovoltaic thermal systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 728-742.
- [11] Wang J, Hu E, Blazewicz A, et al. Simulation of accumulated performance of a solar thermal powered adsorption refrigeration system with daily climate conditions [J]. *Energy*, 2018, 165: 487-498.
- [12] 胡皓, 高鹏, 金胜祥, 等. 压缩强化解吸的新型吸附制冷系统性能研究 [J]. *制冷学报*, 2022, 43(6): 130-137. (Hu Hao, Gao Peng, Jin Shengxiang, et al. Investigation of a novel compression-assisted decomposition chemisorption refrigeration system [J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(6): 130-137.)
- [13] Cao Zhejian, Akhtar F. Porous strontium chloride scaffolded by graphene networks as ammonia carriers [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(30): 2008505.
- [14] Wu S, Li T X, Wang R Z. Experimental identification and thermodynamic analysis of ammonia sorption equilibrium characteristics on halide salts [J]. *Energy*, 2018, 161: 955-962.
- [15] Sharma R, Kumar E A. Ammoniated salt-based gas-solid sorption devices [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, 19: 100652.
- [16] Li Sitong, Li Zhuqing, Chen Yu, et al. A SrBr₂/SrCl₂-expanded graphite composite material for low temperature thermochemical energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 104: 114540.
- [17] N'tsoukpoe K E, Rammelberg H U, Lele A F, et al. A review on the use of calcium chloride in applied thermal engineering [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 513-531.
- [18] 刘金亚, 朱芳敏, 江龙, 等. 以膨胀硫化石墨为基质的氯化钙/氯化钡-氨两级复合吸附式制冷循环实验研究 [J]. *制冷学报*, 2017, 38(2): 51-56. (Liu Jinya, Zhu Fangqi, Jiang Long, et al. Experimental study on the CaCl₂/BaCl₂-NH₃ two-stage chemisorption refrigeration cycle based on the matrix of expanded natural graphite treated with sulfuric acid [J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(2): 51-56.)
- [19] Jiang L, Wang L W, Wang R Z. Investigation on thermal conductive consolidated composite CaCl₂ for adsorption refrigeration [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, 81: 68-75.
- [20] Zhang Lei, Wang Ruzhu, Xia Zhongzhi. Consolidated composite sorbents with expanded natural graphite for adsorption refrigeration: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 529-543.
- [21] Satheeshkumar P, Immanuel Selwynraj A. Experimental studies of activated carbon/graphite composite adsorbent for improved performance of packed and coated bed adsorption cooling system [J]. *Results in Engineering*, 2024, 23: 102800.
- [22] 公绪金, 王君竹, 董玉奇. CaCl₂/石墨烯复配对活性炭-甲醇工质对吸附解吸特性的影响 [J]. *制冷学报*, 2023, 44(1): 104-113. (Gong Xujin, Wang Junzhu, Dong Yuqi. Effects of CaCl₂ impregnation and graphene blending on adsorption refrigeration with activated carbon-methanol working pair [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(1): 104-113.)
- [23] Xia Li, Zhang Yue, Zhao Jing, et al. Multifactor performance evaluation of an energy-saving methanol production process coupled refrigeration-power system driven by waste heat [J]. *Fuel*, 2024, 375: 132581.
- [24] Chao Jingwei, Xu Jiaying, Yan Taisen, et al. Enhanced thermal conductivity and adsorption rate of zeolite 13X adsorbent by compression-induced molding method for sorption thermal battery [J]. *Energy*, 2022, 240: 122797.
- [25] Zhang Wenjing, Fu Shikun, Gao Peng, et al. Solar photovoltaic refrigeration system coupled with a flexible, cost-effective and high-energy-density chemisorption cold energy storage module [J]. *Energy*, 2024, 304: 132163.
- [26] Luo H L, Dai Y J, Wang R Z, et al. Experimental investigation of a solar adsorption chiller used for grain

depot cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26 (11/12): 1218-1225.

通信作者简介

高鹏,男,副教授,上海理工大学能源与动力工程学院, E-mail: p.gao@usst.edu.cn。研究方向:热化学储能、太阳能

制冷。

About the corresponding author

Peng Gao, male, associate professor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology. E-mail: p.gao@usst.edu.cn. Research fields: chemisorption energy storage, solar refrigeration.