

储热储冷多场景应用专刊



耦合热驱动吸附式制冷与相变储冷的车用热管理系统

唐一辉¹, 仵 斯¹, 沈丽丽², 孙晓霞², 李廷贤¹

(¹上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; ²先进越野系统技术全国重点实验室, 北京 100072)

摘 要: 针对机动车辆尤其是混合动力车辆存在的多元化热需求, 本研究提出并实验验证了一种耦合热驱动吸附式制冷与相变储冷的先进热管理系统。该系统以发动机尾气余热为驱动热源, 利用金属卤化物(氯化锶/氯化锰复合吸附剂)与氨工质对的可逆吸附-脱附反应实现热驱动制冷, 结合相变储冷材料实现冷能的存储与稳定可控释放; 同时, 吸附过程可产生稳定的热能输出, 进而将尾气余热有效转换为冷热能灵活利用, 降低车辆热管理能耗。仿真实验表明, 未采用相变储冷时, 系统的制冷功率不稳定, 总的制冷量随着加热温度和流量增加而增加。根据仿真结果搭建实验台并测试了典型工况下系统的性能。结果表明, 在夏季环境(温度为 37℃)工况下, 储冷后相变材料可稳定以平均 1.37 kW 的制冷功率输出温度为 15~20℃ 的冷能, 其储冷能量密度和功率密度分别为 247 kJ/kg 和 47.2 kW/m³, 系统性能系数(COP)为 0.234; 在冬季-30~5℃ 的低温下, 系统最高以平均 1.69 kW 的制热功率稳定输出温度为 60℃ 的热能, 吸附剂的储热能量密度和功率密度分别为 744.6 kJ/kg 和 60.4 kW/m³, 此热能可用于发动机的冷启动暖机、座舱控温等。本研究为提升机动车辆全域环境适应性、提高车辆能源综合利用率提供了潜在的技术路径。

关键词: 车辆热管理; 吸附式制冷; 相变; 余热利用; 吸附剂

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1030

中图分类号: TK 02; TB 66

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-817-11

Research on vehicle thermal management system coupling thermally driven adsorption refrigeration with phase change cold storage

TANG Yihui¹, WU Si¹, SHEN Lili², SUN Xiaoxia², LI Tingxian¹

(¹School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; ²National Key Laboratory of Advanced Offroad System Technology, Beijing 100072, China)

Abstract: In response to the diverse thermal demands of motor vehicles, particularly hybrid electric vehicles, this study proposes and experimentally validates an advanced thermal management system that couples thermally driven adsorption refrigeration with phase change cold storage. The system utilizes waste heat from engine exhaust as the driving heat source, leveraging reversible adsorption-desorption reactions between a metal halide composite adsorbent, such as strontium chloride/manganese chloride, and an ammonia working pair to

收稿日期: 2025-11-14; 修改稿日期: 2025-11-26。

基金项目: 先进越野系统技术全国重点实验室开放课题 (AF20240032); 国家自然科学基金 (52476210)。

第一作者: 唐一辉 (2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为相变储能与吸附制冷, E-mail: sjtu-tyh@sjtu.edu.cn; 通信作者: 仵斯, 副教授, 研究方向为太阳能制冷及储能、先进储能与热管理技术, E-mail: wusi716@sjtu.edu.cn。

引用本文: 唐一辉, 仵斯, 沈丽丽, 等. 耦合热驱动吸附式制冷与相变储冷的车用热管理系统[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 817-827.

Citation: TANG Yihui, WU Si, SHEN Lili, et al. Research on vehicle thermal management system coupling thermally driven adsorption refrigeration with phase change cold storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 817-827.

realize thermally driven cooling. This process is integrated with phase change cold storage materials to enable the storage and regulated release of cooling energy. At the same time, the adsorption process generates stable and controllable thermal output, thereby effectively converting exhaust waste heat into flexible cooling and heating capabilities and reducing the energy consumption of vehicle thermal management. Simulation and experimental results indicate that, in the absence of phase change materials, the cooling power becomes highly unstable, whereas the total cooling capacity increases with increasing heating temperature and flow rate. Under summer conditions with an ambient temperature of 37°C, the system supplies cooling energy at 15–20°C with an average power of 1.37 kW. The phase change material provides a cold storage energy density of 247 kJ/kg and a power density of 47.2 kW/m³, with a system coefficient of performance of 0.234. Under winter conditions ranging from –30°C to 5°C, the system delivers heating at temperatures of up to 60°C with an average power of 1.69 kW. The adsorbent exhibits a thermal energy storage density of 744.6 kJ/kg and a power density of 60.4 kW/m³, supplying heat for engine cold starts and Warm-up and cabin temperature regulation. This work provides a potential technical pathway for improving all-climate adaptability and overall energy utilization efficiency in motor vehicles.

Keywords: vehicle thermal management; adsorption refrigeration; phase change; waste heat utilization; adsorbent

兼具纯电动汽车和传统内燃机汽车优点的混合动力车辆是当前车辆领域的研究热点^[1]。混合动力车辆热管理技术是整车关键技术之一,是保证车辆动力系统、传动系统及其他有散热需求的子系统可靠运行的关键,直接影响车辆在各种复杂环境下的机动性和生存能力。与传统机动车辆相比,混合动力车辆配置了额外的驱动电机、大功率电池组以及控制器等,具有热源部件种类多、工作温度范围广以及各部件工作过程不同步等特点^[2],因此实现高效的整车热管理更具有挑战性。随着我国碳达峰和碳中和(“双碳”)目标战略的实施,交通领域的低碳转型迫在眉睫。目前,蒸汽压缩式制冷空调在燃油车上得到广泛应用,燃油车的空调系统由发动机驱动,空调能耗通常占输出功率的5%~20%,在高海拔、高太阳辐射地区的高温环境下空调能耗进一步增加,进而导致耗油量增加、行驶里程减少^[3];而在极寒地区,发动机的冷启动暖机是机动车辆快速启动面临的关键挑战。同时,一般燃油发动机的排气温度可达200~800°C,属于高温余热,有较大利用价值,但通常被直接排放到空气中,造成环境污染和资源浪费^[4-6]。如何充分利用这部分能量以满足车辆在复杂工况下的冷热需求是发展车用高效热管理系统面临的挑战^[7-9]。

先进的车辆热管理系统需要统筹考虑冷热需求。在利用尾气余热满足夏季工况下车辆制冷需求方面,热驱动的吸附式制冷技术已被证明是一种可行的方案。自从20世纪90年代,国内外学者就开始考虑将热驱动吸附式制冷技术用于汽车空调^[9-10]。Suzuki^[9]介绍了吸附式制冷技术在车辆制冷领域中的应用,指出传热传质强化对发展实际吸附式制冷系统的重要性。高鹏等^[10-11]设计并加工了一套利用汽车尾气驱动的两级吸附式冷藏车制冷系统,实验结果表明,两级吸附式制冷系统在全周期的平均制冷量为1.01 kW,采用热空气模拟发动机尾气,当热空气温度为230°C时,高温盐氯化锰吸附床的解吸时间为75 min,中温盐氯化钙吸附床的解吸时间为65 min,系统性能系数(COP)为0.126。田宜聪等^[12]搭建了使用双卤化物复合吸附剂的车载储冷循环系统,实验验证了该系统可以输出3.2 kW的制冷量。为了降低长途冷藏车制冷设备的油耗,陈领民等^[13]分析了以氯化镱-氨为制冷工质构建的吸附式制冷系统,发现该系统具有较好的制冷效果,可显著降低燃油消耗。发动机余热除了可用于制冷外,还可以储存起来进行按需供热,例如冷启动暖机^[14]。当前,将相变储热装置引入车辆热管理系统正受到越来越多的关注,该装置可作为车辆热管理系统的稳定热

源,从而减少用于热管理的电能或燃油消耗,增加车辆行驶里程^[15-17]。对于不同类型的车辆及其使用场景,选择合适的储热方案以匹配工作温度至关重要。

尽管热驱动吸附式制冷技术与相变储热技术在发动机尾气余热回收利用方面表现出显著优势,但仍面临一些关键问题,主要包括:①现有的吸附式制冷系统普遍采用单吸附床间歇循环或双吸附床切换循环模式,导致制冷过程不连续或制冷功率不稳定,限制了其实际应用^[18-21];②用于发动机尾气余热的相变储热技术功能单一,仅能用于冬季工况下储存热能并在需要时释放,无法用于夏季工况下制冷^[22-23]。因此,现有的单一技术无法充分利用发动机尾气余热满足复杂工况下机动车辆的多元化冷热需求。鉴于此,本研究设计并实验验证了一种耦合吸附式制冷与相变储冷的车用热管理系统,该系统能够利用尾气余热进行制冷、储冷以及按需稳

定供冷与供热。通过研制高性能复合吸附剂与相变储冷材料、采用数值仿真模拟确定系统设计与运行参数、搭建实验测试系统等系列研究,证明了该系统满足车辆典型工况下冷热需求的可行性,为发展新型车用热管理技术奠定了基础。

1 吸附剂的研制及系统工作原理

1.1 吸附剂的研制

本研究选用氯化锶(SrCl_2)和氯化锰(MnCl_2)双卤化物作为吸附剂,双卤化物吸附剂相比单卤化物吸附剂能够有效减少吸附滞后效应, MnCl_2 的添加能够拓宽吸附剂的工作温区^[24]。膨胀石墨(expanded graphite, EG)作为多孔基质负载吸附剂以制备复合吸附剂,EG因具有高导热性和多孔特性,能同时提高复合吸附剂的传热与传质能力^[24]。采用溶液浸渍-模压成型法制备复合吸附剂的流程见图1。

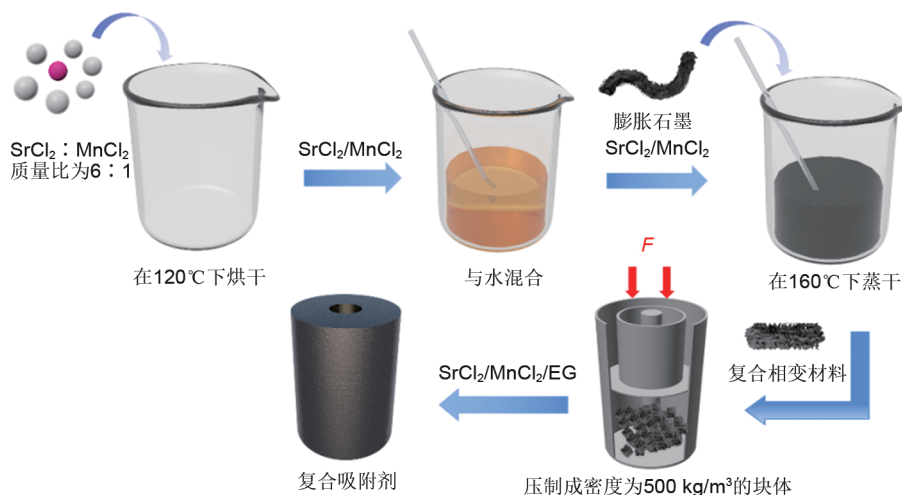


图1 制备复合吸附剂的工艺路线

Fig. 1 Technical map for preparing composite adsorbents

①首先,将块状或颗粒状的 SrCl_2 和 MnCl_2 分别经粉碎机处理得到粉末,取一定量的 SrCl_2 、 MnCl_2 和EG在 120°C 条件下烘干3 h以彻底除去水分,按质量比为6:1:1称量 SrCl_2 、 MnCl_2 、EG备用;②将 SrCl_2 和 MnCl_2 置于容器中,并向容器内加入适量的去离子水,待两者完全溶解后得到饱和盐溶液;③将称量的EG加入上述饱和溶液中,持续搅拌使其混合均匀;④将搅拌后的浆料置于 160°C 的真空干燥箱中加热直至水分完全蒸发;⑤将完全烘干的复合吸附剂材料粉末或颗粒填装到圆柱形模具中,在12 MPa的压力下将其压制成块

体,并保压180 s,综合考虑复合吸附剂的传热性能与氨气吸附的传质性能,将压制后的块体密度控制在 500 kg/m^3 。脱模后得到外径为45 mm、内径为12 mm、高度为250 mm的空心圆柱体 SrCl_2 - MnCl_2 /EG复合吸附剂。

1.2 复合吸附剂的微观形貌与能量色散X射线谱

采用扫描电镜(SEM)和能量色散X射线谱(EDS)对以上得到的固化复合吸附剂进行表征。图2是膨胀石墨负载 SrCl_2 /EG后的微观图像,从图中可以看出,膨胀石墨表面有大量蓬松的孔洞, SrCl_2 /EG细小颗粒均匀分散在膨胀石墨的片层表面及

其孔隙内部,表明膨胀石墨的多孔结构为卤化物提供了充分的填充空间。高温膨化处理使石墨体积显著膨胀,形成疏松多孔、比表面积大的蠕虫状结构,这种结构特性使其表面活性显著提高,对 $\text{SrCl}_2/\text{MnCl}_2$ 混合溶液具有显著的毛细吸附作用。同时,膨胀石墨中相互连接的石墨片层构成有效的热传导路径,不仅提高了声子传输效率,同时增大了卤化物与石墨基体的有效接触界面面积,使得吸附剂与吸附质间的传热过程得到显著强化。

EDS能从微观尺度表征Sr元素和Mn元素在复合吸附剂中的分散状态(图3)。通过对Sr元素和Mn元素特征X射线(能量范围为 $1.806\sim 1.992\text{ keV}$)的能谱图进行分析,可得出以下结论: Sr元素信号强度覆盖全视野($10\text{ }\mu\text{m}\times 10\text{ }\mu\text{m}$),强度值介于 $0\sim 7$, $\text{SrCl}_2/\text{MnCl}_2$ 在膨胀石墨的片层表面无明显缺失区域,表明 $\text{SrCl}_2/\text{MnCl}_2$ 在膨胀石墨中呈现高度弥散状态,进一步证明了上述复合吸附剂制备方法的有效性。

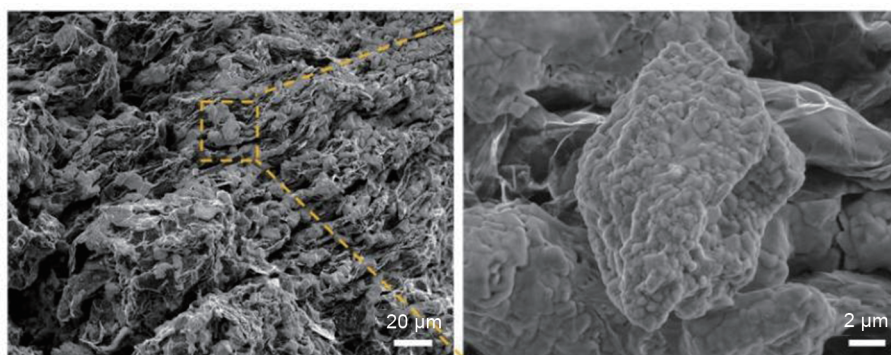


图2 膨胀石墨负载 SrCl_2 和 MnCl_2 的SEM图
Fig. 2 SEM images of SrCl_2 and MnCl_2 loaded on EG

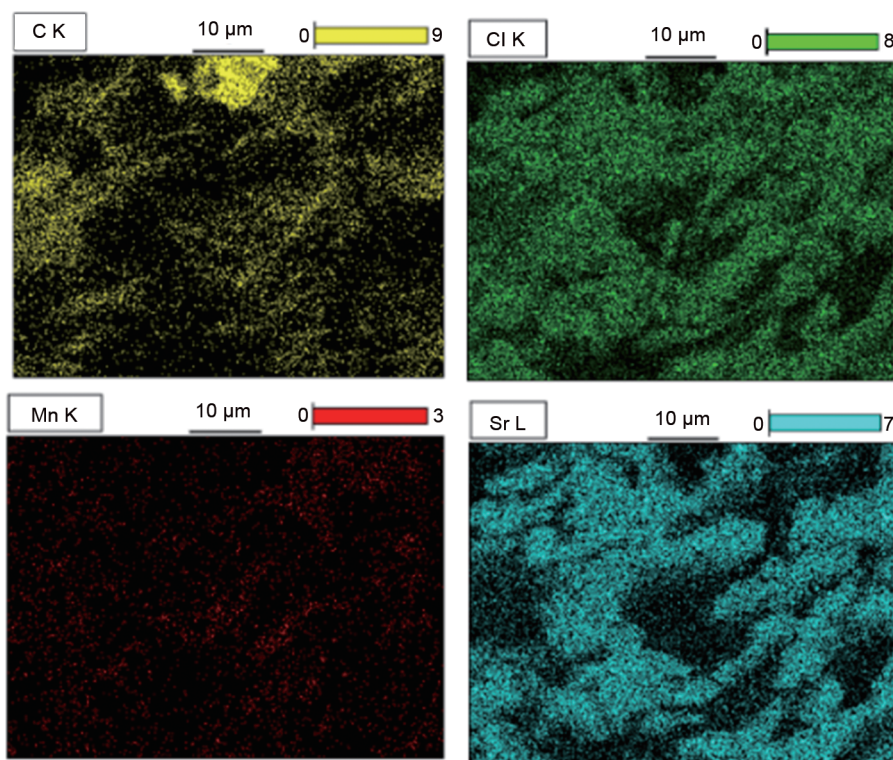


图3 膨胀石墨负载 SrCl_2 和 MnCl_2 的EDS图
Fig. 3 Element energy spectrum of the composite adsorbent

1.3 热力循环与系统工作原理

$\text{SrCl}_2/\text{MnCl}_2$ 与氨气发生固气吸附反应遵循克劳修斯-克拉珀龙关系,即反应平衡状态下温度与压力的关联性^[25-26]。图4展示了该反应体系的热力循环原理,一个完整的循环包含加热解吸-冷凝(A、B→C)与蒸发-吸附(D→E、F)两个关键的热力学过程。基于该反应体系构建的模拟尾气余热驱动的吸附制冷系统结构如图5所示。在该系统中,吸附床的功能类似于传统压缩式制冷系统中的压缩机,其余关键组件包括蒸发器、储液罐、冷凝器及电磁阀等。系统通过电加热器加热空气模拟汽车尾气,并作为系统的驱动热源 Q_{in} 。加热解吸过程中,吸附剂吸收热量后温度升高,释放氨气导致系统内部压力上升;高温高压的氨气在冷凝器中冷凝,释放相变潜热 Q_{cond} 冷却后凝结为液态氨并流入储液罐中。待吸附床内的吸附剂被冷却至室温后,其压力相应地降低,此时可启动蒸发-吸附过程:储液罐中的液氨经膨胀阀节流降压后,流入蒸发器吸收热量并气化,产生制冷量 Q_{evap} 。生成的低温氨气重新进入吸附床与吸附剂结合释放出吸附热 Q_{out} ,从而完成一个热力循环。

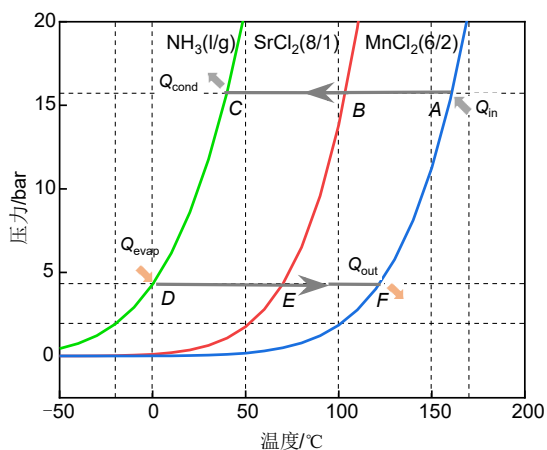


图4 $\text{SrCl}_2\text{-MnCl}_2/\text{EG}$ 工质对的热力循环原理 (1 bar=0.1 MPa)

Fig. 4 Thermodynamic cycle of $\text{SrCl}_2\text{-MnCl}_2/\text{EG}$ working pair

(1) 解吸-冷凝过程。手阀VA2、VA3、VA5、VA6为常开状态。依次开启电加热器、风机、冷凝器风扇,打开阀门VE3、VA1,关闭VE1、VE2、VA7。吸附床在模拟汽车尾气废热 Q_{in} 作用下快速将吸附剂加热升温至160℃左右(A点,图4)。吸附床

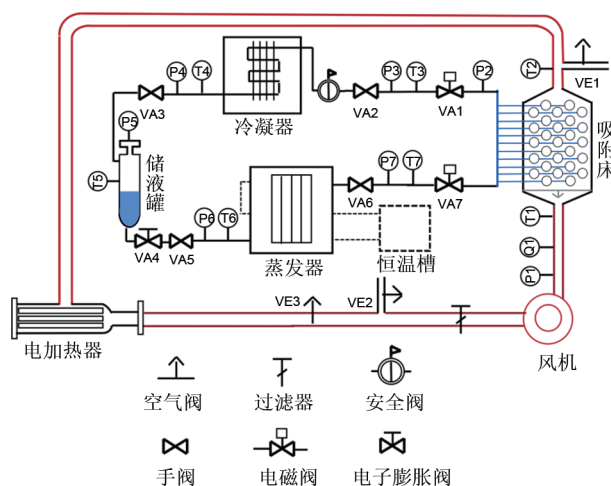


图5 吸附制冷系统设计图

Fig. 5 Design of adsorption refrigeration system

内的 $[\text{Sr}(\text{NH}_3)_8]\text{Cl}_2$ 受热后分解,释放7 mol/mol的氨气并生成 $[\text{Sr}(\text{NH}_3)]\text{Cl}_2$;随着吸附床内吸附剂的温度进一步升高, $[\text{Mn}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_2$ 开始发生解吸反应,脱附4 mol/mol的氨气后转变为 $[\text{Mn}(\text{NH}_3)_2]\text{Cl}_2$ 。高温高压的氨气进入冷凝器中放热,从而凝结成液氨并释放出冷凝热 Q_{cond} ,液氨储存在储液罐中,对应系统中A、B→C过程。随后关闭VA1、VE3,打开VE1、VE2,系统抽取环境风冷却高温的吸附床。

(2) 蒸发-吸附过程。此过程中系统同时进行蒸发制冷与吸附释热。打开阀门VA4、VA7与吸附床连通,液氨在蒸发器中完成蒸发制冷,产生的冷能存储到与蒸发器耦合的相变储冷装置内以便稳定可控地向乘客舱或车辆其他部件供冷。如图4中的D→E、F的过程所示,低温低压液氨在压差的驱使下从储液罐流向蒸发器,蒸发变成蒸气产生冷量 Q_{evap} 。同时,蒸发后的氨气在流向吸附床时与吸附剂发生络合反应产生吸附热 Q_{out} (F点),该热能可在低温工况下对发动机或电池进行预热,减少车辆的燃油或电能消耗。

2 系统仿真优化

2.1 吸附床流道结构优化

在搭建吸附式制冷与相变储冷耦合系统前,首先对吸附床的流道进行优化设计,以提高空气流体与吸附床内吸附剂的换热效率。将上述得到的复合吸附剂块体填充到直径为49 mm、高度为250 mm的单元管内,相邻单元管的数量交替分布按5-6-5-6-5的叉排方式进行空间排列,单元管之间的间隙

为模拟尾气流动(图6)。考虑到结构紧凑性与气流速度的均匀性,吸附床的尺寸设计为250 mm×250 mm×450 mm。为了进一步改善吸附床内空气流动的稳定性与温度场的均匀性,提升吸附床的整体性能,减少不稳定流动引起的压力损失,在吸附床进口处引入了流道过渡段和孔板。

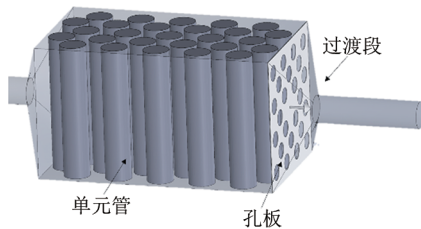
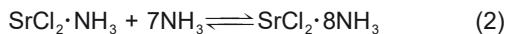
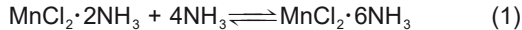


图6 吸附床的仿真模型

Fig. 6 Simulation model of the adsorption bed

2.2 系统运行参数优化仿真

吸附式制冷系统的运行参数对制冷性能有着重要的影响,采用数值模拟的方法研究模拟尾气温度与流量对氨蒸发制冷功率与系统性能系数的影响。 SrCl_2 和 MnCl_2 组成的复合吸附剂在循环过程中与氨的络合反应过程可以简化为式(1)、式(2)。



化学吸附动力学模型的研究对象主要为反应速率,根据双盐吸附/解吸特性方程采用线性类比模型构建吸附/解吸反应动力学方程^[27-30],可表示为式(3)、式(4)。

$$\frac{dX}{dt} = k_i(1-X) \exp\left(-\frac{A_0}{T}\right) \ln\left[\frac{p_c}{p_{eq}(T)}\right] \quad (3)$$

$$x_m = x_{\max} \exp\left[-a\left(\frac{T}{T_s} - 1\right)^n\right] \quad (4)$$

式中, X 为吸附量, mol; k_i 为反应动力学系数; A_0 为常数,通过具体的性能测试得出; p_c 为吸附剂内的实时压力, kPa; $p_{eq}(T)$ 为吸附剂在Clapeyron线上所对应的压力, kPa; x_m 为实时解吸量, mol; $x_{\max}$ 为最大解吸量, mol; T 为吸附剂实时温度, K; T_s 为冷凝温度, K; a 、 n 为特定条件下测试得出的常数, $a=-16.7$ 、 $n=2.32$ 。

系统中吸附剂的解吸热、金属的比热容以及吸附剂本身的显热的消耗均由模拟尾气的热空气提供,即式(5)。

$$Q_{\text{heat}} = c_{\text{air}} m_{\text{air}} (T_{\text{air,in}} - T_{\text{air,out}}) \quad (5)$$

式中, Q_{heat} 为总加热量, kJ; c_{air} 为空气的比热

容, kJ/(kg·K); m_{air} 为空气质量, kg; $T_{\text{air,in}}$ 为吸附床入口处的模拟尾气(被加热空气)温度, K; $T_{\text{air,out}}$ 为吸附床出口的模拟尾气温度, K。

蒸发-吸附过程中产生的冷量(Q_{cold})用氨蒸发的量所对应的汽化潜热(ΔH_{vap} , kJ/mol)计算,即式(6)。

$$Q_{\text{cold}} = \frac{dx_m}{dt} \times \Delta H_{\text{vap}} \quad (6)$$

整个循环过程中的COP计算方法见式(7)。

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{cold}}}{Q_{\text{heat}}} \quad (7)$$

2.3 仿真结果及分析

针对上述模型,设定模拟尾气温度为150℃、200℃、250℃,环境温度为25℃(即冷凝温度和吸附床冷却温度),模拟尾气流量为100 m³/h、150 m³/h、200 m³/h。吸附剂加热解吸时间设定为30 min。当模拟尾气流量为200 m³/h时,不同尾气温度下系统制冷功率的变化如图7所示,系统COP如表1所示。不同模拟尾气温度工况下,蒸发过程中的制冷功率均先急剧上升后快速下降,最大制冷功率可达3 kW;随着蒸发过程的进行,系统的制冷功率逐渐下降,经过30 min后几乎不再制冷。该过程中制冷功率的显著变化不利于获得稳定可控的冷能输出。模拟尾气温度和流量增加均会导致解吸的氨量增多,总的制冷量增加,系统COP升高;但在氨完全解吸后,过量的热量输入导致吸附剂和吸附床的显热消耗增加而系统制冷量几乎不变,因此COP反而会下降。

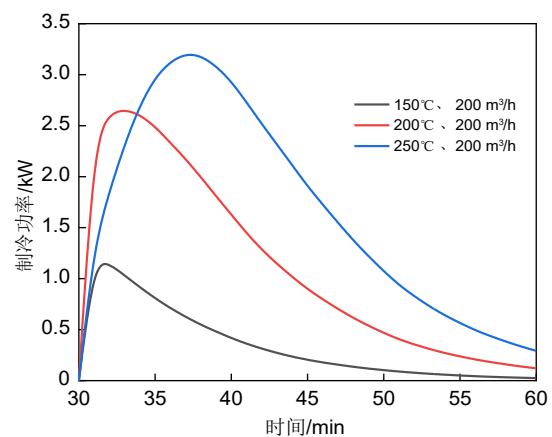


图7 不同模拟尾气温度下系统的制冷功率变化

Fig. 7 The variations of system cooling powers

3 实验系统与性能分析

3.1 蒸发器的设计与系统总装

为了获得稳定可控的冷能输出,将蒸发器与相

表 1 不同加热温度和流量下系统 COP

Table 1 System COP under different temperatures and flowrates

加热温度/℃	流量/(m ³ /h)	平均 COP
150	100	0.120
150	200	0.157
150	300	0.285
200	100	0.269
200	200	0.305
200	300	0.309
250	100	0.306
250	200	0.294
250	300	0.264

变储冷器集成设计了双通道储冷式蒸发器，由氨通道和传热流体通道两个模块拼接而成，每个模块由耐氨腐蚀的铝管焊接组成，如图8(a)所示。每个模块的平行流铝扁管长400 mm、宽96 mm、厚3 mm，内部有26个截面尺寸为2.5 mm×1.5 mm的微通道。蒸发器的微通道扁管之间填充定型复合相变储冷材料块体，该块体由膨胀石墨和正十四烷(熔点为7.8℃)以质量比为1:9制备而成，制备采用熔融吸附-模压成型法^[31]。实验测试过程中，选取图8(b)中所示的6个温度测点的平均温度作为储冷式蒸发器的温度，以监测储释冷阶段的温度演变。

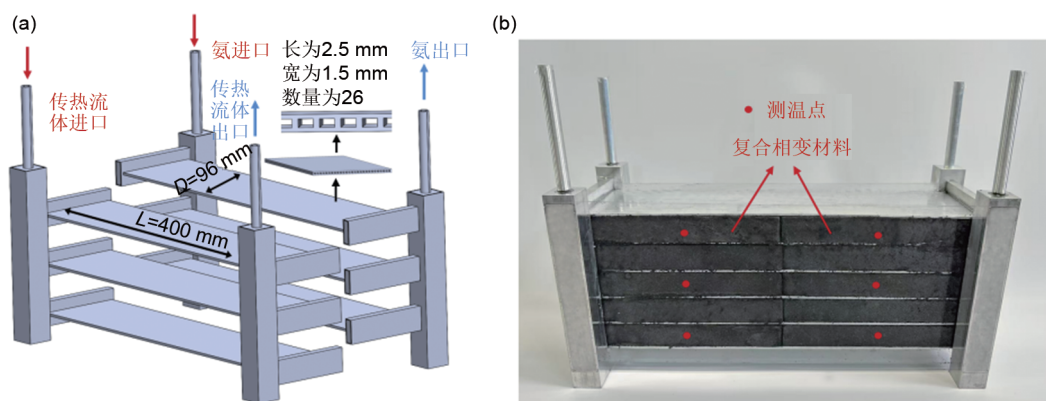


图 8 (a) 储冷式蒸发器的换热器骨架结构；(b) 填充复合相变材料块体的储冷式蒸发器照片及其测温点分布
Fig. 8 (a) The internal structure of evaporator; (b) Composite phase change materials and temperature measurement point

组装后的实验系统如图9所示，主要由吸附床、冷凝器、电加热器、储液罐、蒸发器(集成了相变储冷模块)、恒温槽及管路和阀门构成。

由于蒸发器的双流体通道结构，系统在制冷阶段，液氨在微通道内部蒸发而吸收相变材料的热

量，相变材料完成凝固从而储存冷量，而后氨流向吸附床与吸附剂络合；待有用冷需求时，传热流体通过另一个流体通道从相变材料中获取冷能。传热流体与相变材料之间的传热量即相变储冷器可向外界输出冷量的计算方法见式(8)。

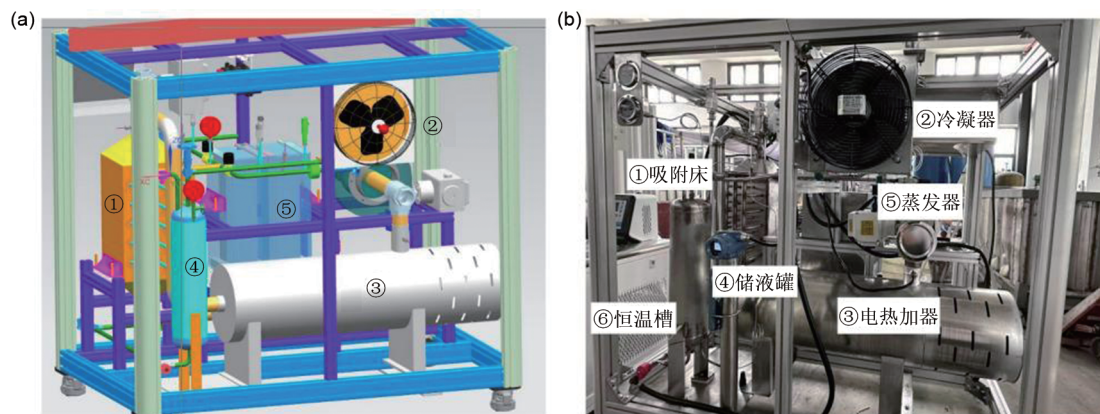


图 9 系统的三维结构图 (a) 和实物图 (b)

Fig. 9 (a) The three-dimensional structure diagram of the system; (b) The physical diagram of the system

$$Q_{\text{cold}} = c_{\text{liq}} m_{\text{liq}} (T_{\text{liq, in}} - T_{\text{liq, out}}) \quad (8)$$

式中, c_{liq} 和 m_{liq} 分别为传热流体的比热容和质量流量; $T_{\text{liq, in}}$ 和 $T_{\text{liq, out}}$ 分别为蒸发器入口处和出口处的传热流体温度。

储冷式蒸发器内的相变材料不仅能够储存冷量, 解决系统制冷与车辆其他部件用冷在时间上不匹配的问题, 而且还能抑制制冷功率波动, 从而稳定输出冷量。系统中复合吸附剂、氨、复合相变储冷材料的用量总结在表 2 中。

表 2 吸附制冷系统中主要材料与用量
Table 2 Main materials and quantities in the adsorption refrigeration system

材料名称	组成成分	质量/kg
复合吸附剂	SrCl_2	2.66
	MnCl_2	0.44
	膨胀石墨	0.44
复合相变材料	正十四烷	7.79
	膨胀石墨	0.87
氨	NH_3	2.88

3.2 系统解吸-冷凝过程测试与分析

实验测试时环境温度为 37°C , 参照数值仿真模拟结果, 控制电加热器的出口温度为 250°C 、尾气流量为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$, 同时为确保氨能完全解吸, 设置加热解吸时间为 1.5 h 、冷却时间为 0.5 h 。图 10 展示了系统解吸-冷凝过程中吸附床和冷凝器部件的温度与压力测试数据。在加热解吸阶段, 冷凝器内的压力从 0.5 MPa 逐渐上升到 1.4 MPa , 此压力对应氨在冷凝温度 37°C 下的饱和蒸气压。相应地, 吸附剂材料的温度持续上升, 在 100°C 和 160°C 时, 分别发生 SrCl_2 和 MnCl_2 的解吸反应, 吸收大量热能, 因此在此温度区间吸附剂温度变化经历了两个缓慢上升的平台期。在加热解吸阶段, 冷凝器内部氨气冷凝释放的冷凝热导致其温度升高, 此冷凝热通过冷凝器风扇释放到环境中。接着对吸附床进行冷却, 在冷却 0.5 h 后, 吸附剂温度下降到 50°C , 系统压力降到约 0.5 MPa , 较低的温度与压力有助于提高液氨在蒸发-吸附阶段的蒸发速率。

3.3 夏季制冷模式性能

由于单级吸附系统间歇性制冷的特点, 因此本实验将系统在蒸发-吸附过程中释放的冷量存储在储冷式蒸发器后再进行释放, 首先分析了单次循环的释冷性能。在蒸发-吸附制冷与相变储冷阶段,

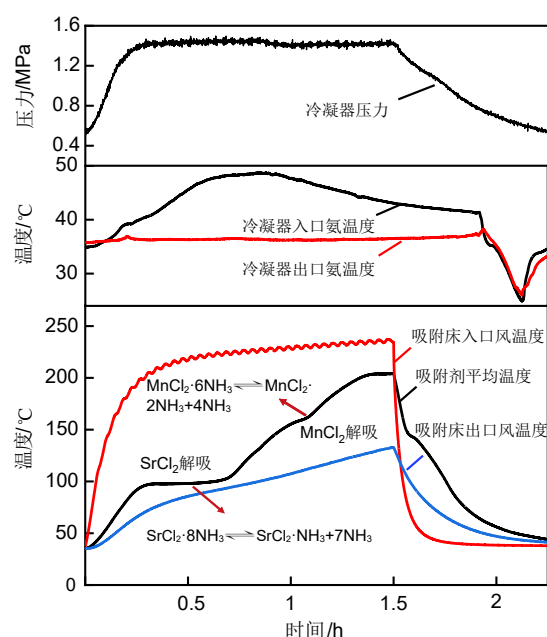


图 10 系统加热解吸-冷凝过程中部分部件的温度与压力测试数据

Fig. 10 Temperature and pressure test data of some components during desorption and condensation process

打开阀门 VA5 与 VA7(图 5), 控制蒸发时间为 0.5 h 。如图 11 所示, 高压过冷液氨在压差的驱动下流向吸附床, 在储冷式蒸发器入口前温度最低达到 -15°C , 流经储冷式蒸发器时, 液氨大量蒸发吸收相变材料的热量, 在出口处温度上升到 10°C 左右。该过程中相变材料的平均温度从 10°C 下降到 4°C 完成相变储冷。

在蒸发-制冷与储冷过程完成后开启释冷过程。

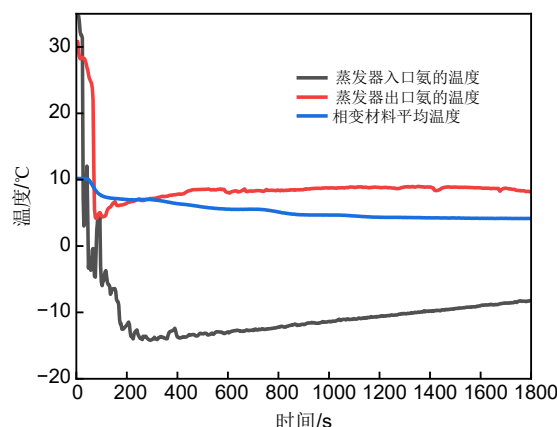


图 11 蒸发-吸附制冷与相变储冷时相变材料的温度变化
Fig. 11 The temperature variation of phase change materials in evaporation-refrigeration and phase change cold storage

如图12所示,在储冷式蒸发器释冷过程中,将传热流体入口温度设置为 20°C ,相变材料释放冷能的同时温度不断升高,当其温度升到 10°C (截止温度)时结束释冷,该过程总时长为 1560 s ,传热流体进出口的平均温差为 4.7°C 。相变材料在 $200\sim 1400\text{ s}$ 时发生相变释放冷量,储冷式蒸发器出口温升速度减缓,此现象说明了相变材料不仅储存了氨蒸发时产生的冷量,其熔化释冷过程还能向外界持续、稳定输出冷量。根据式(8)计算得到的释冷量为 2137 kJ ,平均释冷功率为 1.37 kW ,系统的COP为 0.234 。储冷器总体积为 0.029 m^3 ,由此计算得到的储冷能量密度为 247 kJ/kg 、功率密度为 47.2 kW/m^3 。值得注意的是,相变过程中的释冷功率大部分时间在 $1.2\sim 1.5\text{ kW}$ 内变化,与无相变储冷的直接蒸发制冷相比,冷输出功率波动幅度极小;无相变储冷时释冷功率在约 800 s 后急剧下降至低于 1 kW ,而有相变储冷时释冷功率维持在 1 kW 以上的时间长达 1400 s 。实验证明了系统利用相变储冷技术不仅能实现冷量的稳定输出,而且能延长系统的有效供冷时间,解决了系统产冷和冷需求在时间和功率上不匹配的问题,使汽车在发动机怠速时也能输出较稳定的冷量,这对满足车辆实际的冷量需求至关重要。

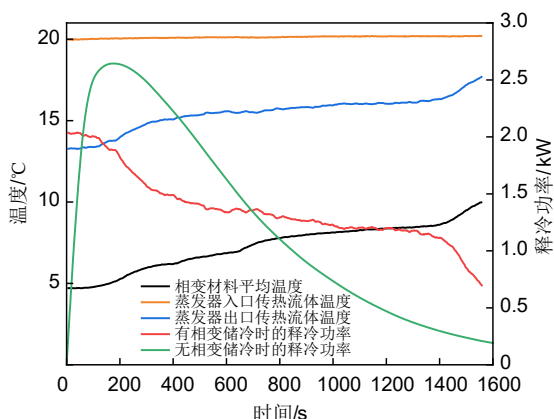


图12 储冷式蒸发器单次循环释冷时的性能随时间的变化

Fig. 12 The performance of the cold storage evaporator during a single cooling release cycle varies with time

3.4 冬季供热模式性能分析

为进一步探究系统在冬季工况下的储供热性能,控制液氨在较低的温度下蒸发以模拟冬季环境,旨在评估系统的热量输出能力。测试结果如图13所示,单次放热的时间设置为 1800 s 。当蒸

发温度为 5°C 时,由于氨与吸附剂发生络合反应并释放络合热,吸附剂的温度迅速上升至 85°C ,吸附床出口空气的平均温度约为 60°C ,余热回收 Q_{rec} 总量根据式(5)计算为 2636 kJ 。从温度变化曲线来看,系统在启动约 200 s 后制热功率达到最大,在整个放热过程中平均制热功率为 1.69 kW ;吸附剂的总质量为 3.54 kg ,吸附床的总体积为 0.028 m^3 ,可得吸附剂储热能量密度为 744.6 kJ/kg 、功率密度为 60.4 kW/m^3 。较高的出口空气温度和供热功率使该系统适用于在冬季环境下对机动车辆发动机、电池组等关键部件预热,以及满足驻车时乘客舱供暖需求,从而提升整车在冬季环境下的适应能力和能源利用效率。当蒸发温度为 -30°C 时,吸附剂的温度有所下降,但仍高于 60°C ,余热回收 Q_{rec} 计算为 1368 kJ ,总回收量相比蒸发温度为 5°C 时下降了 48.1% ,平均制热功率为 0.76 kW 且稳定性有所下降,这是由于蒸发温度变低,蒸发器与吸附床的压差变小,达到平衡时的吸附量减少,因此余热回收量降低。该实验结果证实了系统可在极端低温环境下进行有效的储热与供热。

4 结 论

本研究面向机动车辆多元化热需求,提出并实验验证了一种耦合热驱动吸附式制冷与相变储冷的先进热管理系统,以模拟发动机尾气余热作为驱动热源输入,测试了典型工况下系统的冷热能储存与稳定供冷/热特性,主要结论如下。

(1) 采用数值仿真模拟对氨直接蒸发时系统的制冷功率和性能进行了模拟求解和分析,搭建了吸附床的三维模型,建立了吸附床内复合吸附剂的反应动力学方程并确定了系统的最佳运行参数。模拟结果显示,系统制冷量和COP在一定范围内随模拟尾气温度和流量的增加而增加,但当模拟尾气温度和流量超过一定值后继续增加则会导致吸附床的显热消耗增加而系统制冷量几乎不变,此时系统COP反而会下降。

(2) 对搭建的热驱动吸附式制冷与相变储冷耦合系统的夏季制冷性能进行测试。结果表明,在模拟尾气温度为 250°C 、环境温度为 37°C 时,储冷式蒸发器能稳定释放温度为 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ 的冷能,平均释冷功率为 1.37 kW 、储冷能量密度为 247 kJ/kg 、功率密度为 47.2 kW/m^3 、系统COP为 0.234 。实验证

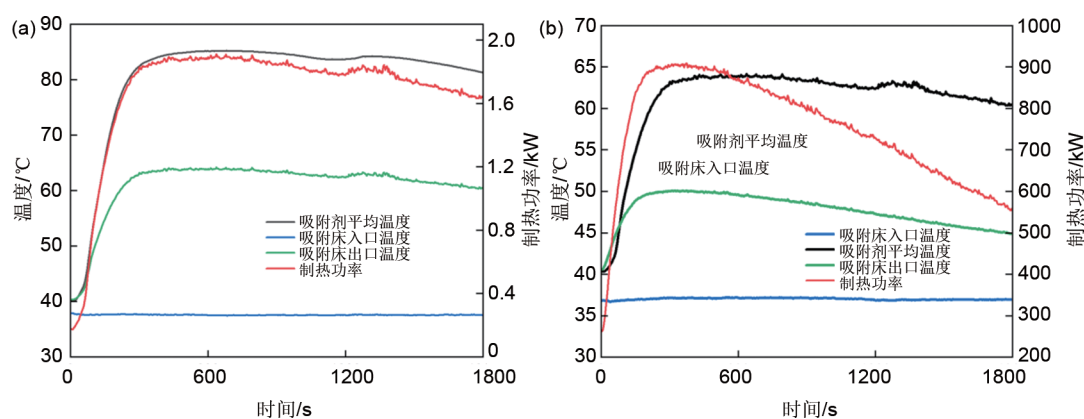


图13 冬季供热模式下制热功率的变化曲线 (a) 蒸发温度 5°C ; (b) 蒸发温度 -30°C

Fig. 13 Heating power under winter mode (a) evaporation temperature at 5°C , (b) evaporation temperature at -30°C

明系统引入相变储冷装置不仅能实现冷量的稳定输出,同时能延长系统的有效供冷时间。

(3) 对耦合系统的冬季供热性能进行实验测试。结果表明,在蒸发温度为 5°C 的供热模式下,吸附剂的平均制热功率约为 1.69 kW ,其储热能量密度为 744.6 kJ/kg 、功率密度为 60.4 kW/m^3 ;系统的供热性能会随蒸发温度降低有所下降,但即使在 -30°C 的蒸发温度下系统仍能输出温度高于 45°C 的热能,展示出对极端低温环境较好的适应性。

(4) 尽管所构建的验证系统展示出了较好的热管理性能,但当前系统仍存在循环周期较长的局限性,未来值得深入研究的方向包括:管路布置优化以减小流动阻力、关键部件轻量化以减小显热热容、吸附床传热与传质强化以提升反应动力学性能等。此外,系统运行层面可在变循环周期与智能调控上进行优化探索;开发新型高性能吸附材料与储冷材料并进行系统集成仍然是储热技术在车辆热管理领域应用的主要发展方向。

参考文献

- [1] 逯云杰. 电力汽车储能系统控制技术[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 608-610. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0013.
- LU Y J. Research on control technology of electric vehicle energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(2): 608-610. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0013.
- [2] LI X Y, WANG R Z. Towards integrated thermal management systems in battery electric vehicles: A review[J]. eTransportation, 2025, 24: 100396. DOI:10.1016/j.etrans.2025.100396.
- [3] HU Z W, QIU D D, ZHAO J, et al. Integrated design of multi-circuit thermal management system with battery waste heat utilization for new energy vehicle and performance assessment[J]. Energy

Conversion and Management, 2024, 312: 118566. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118566.

- [4] HEMMATI S, DOSHI N, HANOVER D, et al. Integrated cabin heating and powertrain thermal energy management for a connected hybrid electric vehicle[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116353. DOI:10.1016/j.apenergy.2020.116353.
- [5] HE L G, JING H D, ZHANG Y, et al. Performance research of integrated thermal management system for battery electric vehicles with motor waste heat recovery[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 84: 110893. DOI:10.1016/j.est.2024.110893.
- [6] CUYPERS R, MARAZ N, EVERSDIJK J, et al. Development of a seasonal thermochemical storage system[J]. Energy Procedia, 2012, 30: 207-214. DOI:10.1016/j.egypro.2012.11.025.
- [7] 闫培泽. 基于新能源低碳背景的汽车电热相变储能系统的动态储热性能分析[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3892-3894. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0879.
- YAN P Z. Analysis of dynamic heat storage performance of automotive electric thermal phase change energy storage system based on new energy low-carbon background[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3892-3894. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0879.
- [8] 马斌, 张宾, 韩锦立. 基于储能技术的轨道电车能源回收与控制策略[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(10): 4040-4042. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0835.
- MA B, ZHANG B, HAN J L. Energy recovery and control strategy of rail tram based on energy storage technology[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(10): 4040-4042. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0835.
- [9] SUZUKI M. Application of adsorption cooling systems to automobiles[J]. Heat Recovery Systems and CHP, 1993, 13(4): 335-340. DOI: 10.1016/0890-4332(93)90058-4.
- [10] 高鹏, 王丽伟, 王如竹, 等. 汽车尾气驱动的吸附式冷藏车制冷系统的研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(10): 2180-2184.
- GAO P, WANG L W, WANG R Z, et al. Investigation of the solid sorption freezing system driven by the engine exhaust for a refrigerated truck[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37

- (10): 2180-2184.
- [11] GAO P, ZHANG X F, WANG L W, et al. Study on $\text{MnCl}_2/\text{CaCl}_2\text{-NH}_3$ two-stage solid sorption freezing cycle for refrigerated trucks at low engine load in summer[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 109: 1-9. DOI:10.1016/j.enconman.2015.11.055.
- [12] 田宜聪, 高娇, 李云飞, 等. 发动机尾气余热驱动的吸附式空调系统仿真与测试[J]. *化工学报*, 2020, 71(8): 3691-3698. DOI:10.11949/0438-1157.20200231.
- TIAN Y C, GAO J, LI Y F, et al. Simulation and test of solid sorption vehicle air-conditioning system driven by exhaust heat[J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(8): 3691-3698. DOI:10.11949/0438-1157.20200231.
- [13] 陈领民, 叶成彬, 吴海欣, 等. 基于吸附式制冷技术的长途冷藏车应用探讨[J]. *制冷与空调(四川)*, 2020, 34(3): 357-359, 368. DOI:10.3969/j.issn.1671-6612.2020.03.015.
- CHEN L M, YE C B, WU H X, et al. Discussion on the application of long-distance refrigerated truck based on adsorption refrigeration technology[J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2020, 34(3): 357-359, 368. DOI:10.3969/j.issn.1671-6612.2020.03.015.
- [14] 王永川, 于善颖, 李建新. 相变储热技术用于改善发动机冷启动性能的试验研究[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(1): 160-164. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2013.01.027.
- WANG Y C, YU S Y, LI J X. Technology of latent heat storage exploited to decrease the cold-start pollution from automobile engine [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2013, 34(1): 160-164. DOI:10.3969/j.issn.0254-0096.2013.01.027.
- [15] WU S, LI T X, YAN T, et al. Experimental investigation on a thermochemical sorption refrigeration prototype using $\text{EG}/\text{SrCl}_2\text{-NH}_3$ working pair[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2018, 88: 8-15. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2017.11.030.
- [16] XIE P, JIN L, QIAO G, et al. Thermal energy storage for electric vehicles at low temperatures: Concepts, systems, devices and materials[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 160: 112263. DOI:10.1016/j.rser.2022.112263.
- [17] WU W, WANG B L, SHI W X, et al. An overview of ammonia-based absorption chillers and heat pumps[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 31: 681-707. DOI:10.1016/j.rser.2013.12.021.
- [18] LI T X, WU S, YAN T, et al. Experimental investigation on a dual-mode thermochemical sorption energy storage system[J]. *Energy*, 2017, 140: 383-394. DOI:10.1016/j.energy.2017.08.073.
- [19] YAN T, KUAI Z H, WU S F. Experimental investigation on a $\text{MnCl}_2\text{-SrCl}_2/\text{NH}_3$ thermochemical resorption heat storage system[J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 874-883. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.033.
- [20] RAO K N, GOPAL M R, BHATTACHARYA S. Analysis of a $\text{SrCl}_2\text{-NH}_3$ solid sorption refrigeration system[J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2015, 10(4): 365-373. DOI: 10.1093/ijlct/ctt046.
- [21] GAO J, TIAN Y C, WANG L W, et al. Investigation on bi-salt chemisorption system for long term energy storage[J]. *Chemical Engineering Science*, 2020, 221: 115699. DOI: 10.1016/j.ces.2020.115699.
- [22] GODEFROY A, PERIER-MUZET M, MAZET N. Thermodynamic analyses on hybrid sorption cycles for low-grade heat storage and cogeneration of power and refrigeration[J]. *Applied Energy*, 2019, 255: 113751. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.113751.
- [23] FITÓ J, CORONAS A, MAURAN S, et al. Hybrid system combining mechanical compression and thermochemical storage of ammonia vapor for cold production[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 180: 709-723. DOI:10.1016/j.enconman.2018.11.019.
- [24] 吴韶飞, 安国亮, 田宜聪, 等. 基于双盐复合吸附剂的跨季节冷热自适应调控新策略[J]. *中国科学(技术科学)*, 2022, 52(5): 755-772. DOI: 10.1360/SST-2020-0502.
- WU S F, AN G L, TIAN Y C, et al. Cold-heat adaptive control for cross-season based on bi-salt composite sorbent[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2022, 52(5): 755-772. DOI:10.1360/SST-2020-0502.
- [25] GAO J, WANG L W, WANG R Z, et al. Solution to the sorption hysteresis by novel compact composite multi-salt sorbents[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 111: 580-585. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.09.152.
- [26] HASSAN H Z, MOHAMAD A A. A review on solar-powered closed physisorption cooling systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 2516-2538. DOI:10.1016/j.rser.2012.02.068.
- [27] AN G L, LI Y F, WANG L W, et al. Wide applicability of analogical models coupled with hysteresis effect for halide/ammonia working pairs[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 394: 125020. DOI: 10.1016/j.cej.2020.125020.
- [28] ZHAO Y J, WANG R Z, ZHANG Y N, et al. Development of SrBr_2 composite sorbents for a sorption thermal energy storage system to store low-temperature heat[J]. *Energy*, 2016, 115: 129-139. DOI: 10.1016/j.energy.2016.09.013.
- [29] NARAYANAN R, AL ANAZI A A, PIPPIA R, et al. Solar desiccant cooling system for a commercial building in Kuwait's climatic condition [J]. *Energies*, 2022, 15(11): 4102. DOI:10.3390/en15114102.
- [30] JIANG L, WANG L W, LIU C Z, et al. Experimental study on a resorption system for power and refrigeration cogeneration[J]. *Energy*, 2016, 97: 182-190. DOI:10.1016/j.energy.2015.12.128.
- [31] 仵斯, 李廷贤, 闫霆, 等. 高性能定形复合相变储能材料的制备及热性能[J]. *化工学报*, 2015, 66(12): 5127-5134. DOI:10.11949/j.issn.0438-1157.20150931.
- WU S, LI T X, YAN T, et al. Preparation and thermal properties of high performance shape-stabilized phase change composites using stearic acid and expanded graphite[J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(12): 5127-5134. DOI:10.11949/j.issn.0438-1157.20150931.