

文章编号:0253-4339(2025)03-0011-14
doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.03.011

面向零碳能源消纳的储冷储热技术

吸收式储能研究进展

丁志雄 隋云任 吴伟

(香港城市大学能源及环境学院 香港 999077)

摘要 储能可解决能源供需之间的不匹配问题,是可再生能源及废热利用中的重要技术。吸收式储能技术具有高储能密度、高储能效率、低蓄能温度、低热损失及灵活输出形式等优势,近年来备受关注。综述了吸收式储能循环、储能工质及实验样机的最新研究进展。先进储能循环可以有效提高储能密度、提高储能效率、降低蓄能温度;新型储能工质解决了传统盐溶液的结晶问题,为不同应用场景增加了工质对选择,并降低了工质对成本;实验样机的成功研发和测试证实了吸收式储能的优异性能,为其推广应用奠定基础。最后指出了吸收式储能面临的挑战和机遇,展望了其未来的发展方向。

关键词 吸收式储能;储能密度;储能效率;蓄能温度;工质对

中图分类号:TK02;TB61⁺6

文献标识码:A

Research Progress in Absorption Thermal Energy Storage

Ding Zhixiong Sui Yunren Wu Wei

(School of Energy and Environment, City University of Hong Kong, Hong Kong, 999077, China)

Abstract Energy storage technology can balance the mismatch between energy supply and demand, which is an important link between the use of renewable energy and waste heat. Absorption thermal energy storage has attracted considerable attention in recent years owing to its high energy-storage density, high energy-storage efficiency, low charging temperature, low heat loss, and flexible output. A state-of-the-art review of advanced cycles, working pairs, and experimental prototypes was conducted. The development of advanced cycles has further improved the energy storage density and efficiency and lowered the charging temperature. The screening of novel working pairs solved the crystallization problem of conventional salt solutions, increased the options of working fluids for different scenarios, and reduced costs. The successful development and operation of experimental prototypes have confirmed the excellent performance of absorption thermal energy storage and paved the way for its promotion and application. In conclusion, the challenges and opportunities of absorption thermal energy storage for the future are summarized, and the development direction is discussed.

Keywords absorption thermal energy storage; energy storage density; energy storage efficiency; charging temperature; working pair

全球经济的不断发展以及生活水平的不断提高,导致能源和环境问题日益加剧^[1]。为了应对环境污染和全球变暖带来的挑战,开发和利用更多的可再生能源以替代传统化石燃料是必要手段^[2]。然而,可再生能源虽然分布广泛、储量充沛,但通常具有不稳定性、间歇性的特点,使其在强度和时间上无法直接匹配用户冷热需求^[3]。而储冷储热技术通过将过剩能源转换存储,并按需释放,解决了不匹配问题,为可再生能源供能侧和用能侧之间建立了桥梁^[4-5]。

当前储冷储热技术可根据工作原理主要分为3类:显热储能、潜热储能及热化学储能^[6],如图1所示。评价储能技术的主要指标通常包括储能密度(energy storage density, ESD)、储能效率(energy stor-

age efficiency, ESE)、储能温度、储能速率、经济性等。显热储能基于储能材料的温度变化,是一种古老、简单的储能方式。显热储能材料通常较为常见,易于获取,例如水、油、岩石、盐等,所以价格便宜^[7]。然而,由于热源温度的限制,储能温差无法过大,显热储能的ESD较低。由于系统与环境温差较大,为减小热损失,显热储能通常对保温要求较高。潜热储能基于物质的相变吸/放热量进行储能,ESD通常高于显热储能,且系统较为简单,蓄能和释能过程温度稳定,这些优点使其成为近十几年的热点研究方向^[8-9]。但相变材料的低导热系数、过冷、相位分离等问题仍然阻碍着潜热储能的广泛应用。热化学储能是新兴的储冷储热技术,包括化学反应储能、吸附式储能和吸

基金项目:国家自然科学基金(52106028,52322812)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52106028 & No. 52322812).)

收稿日期:2024-12-16;修回日期:2024-12-27;录用日期:2025-01-03

收式储能。化学反应储能通常需要高温或高压条件,难以被低品位热源驱动^[10]。吸附式储能和吸收式储能具有高 ESD 和低蓄能温度,近年来愈发受到关注。吸附式储能通常设备紧凑,但由于固体材料换热较差,储能速率较低^[11]。而吸收式储能综合表现优异,通过液体的流动可增强传热传质,以获得更高的储能速率。此外,吸收式储能将热量转化为溶液浓度差,溶液长期存储浓度不会发生变化,相比于显热和潜热储能,可显著降低长期储能的热损失,提升 ESE。并

且吸收式储能蓄存低品位热能,释放的能量可用于制冷、制热、除湿等,具有高度灵活性^[12]。图 2 所示为不同热储能技术的性能对比,对比了主要热储能技术的 ESD 和蓄能温度,由图 2 可知,吸收式储能在热源温度低于 200 °C 时具有突出的 ESD 优势。

本文从先进储能循环、新型储能工质和储能样机研发 3 方面系统性地回顾了国内外吸收式储能的相关研究,指出了目前吸收式储能发展所面临的机遇和挑战,并提出了吸收式储能研发和集成新方向。

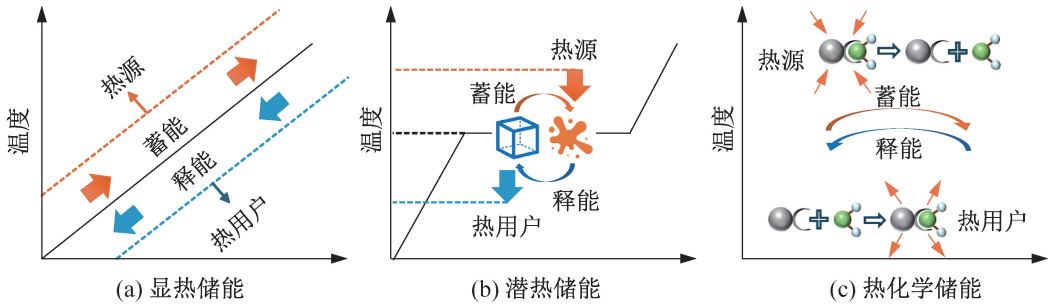


图 1 3 种基本热储能技术

Fig.1 Three basic thermal energy storage technologies

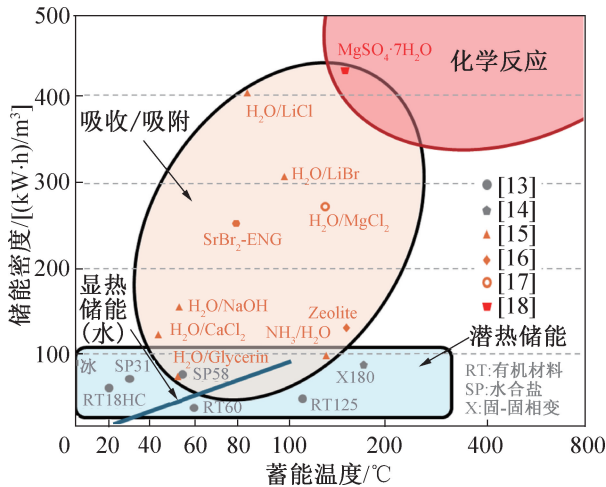


图 2 不同热储能技术的性能对比^[13-18]

Fig.2 Performance comparison of different thermal energy storage technologies^[13-18]

1 吸收式储能原理

吸收式储能机组主要包括溶液罐、制冷剂罐及联通两罐的蒸气管道,溶液罐和制冷剂罐中各设置一套换热器,蒸气管道上安装阀门,如图 3 所示。喷淋式换热器在吸收式储能机组中最为常见,液体流动可以加快溶液混合,使浓度和温度更加均匀,可以提高换热盘管表面的传热传质系数。蓄能过程中,溶液罐用作发生器,联通外部热源进行蓄热;制冷剂罐用作冷凝器,联通外部冷源进行排热。太阳能、废热等外部

热源(通常需 70~90 °C)用来加热发生器中的溶液,产生制冷剂蒸气;蒸气通过管道流入制冷剂罐,在冷却盘管上冷凝。随着溶液浓度不断上升,热量逐渐以浓度差的形式蓄存起来。蓄能结束后,蒸气管道上的阀门关闭,以防制冷剂蒸气回流。在有冷热需求时,打开阀门进入释能模式。在释能制热过程中,溶液罐用作吸收器,对用户进行供热;制冷剂罐用作蒸发器,提取环境低位热源。吸收器中的浓溶液吸收制冷剂蒸气后释放出大量吸收热用于供热;随着闭式系统内压力下降,蒸发器中的液态制冷剂不断蒸发,持续从环境中提取热量。若释能用于制冷,则吸收器联通外部冷源,将冷凝热排向环境;而蒸发器对用户进行供冷。 Q_g 、 Q_c 、 Q_a 、 Q_e 分别为发生热(输入热量)、冷凝热、吸收热(制热量)、蒸发热(制冷量),单位为 kW; V 为阀门。

2 先进吸收式储能循环

通过构建新型的吸收式储能循环,可有效提高 ESD 和 ESE,降低蓄能温度,为不同应用场合提供最优循环选择,充分发挥吸收式储能的作用。当热源温度较低时,基本循环所能实现的浓度差较小,导致 ESD 偏低,甚至无法运行。为解决该问题,Xu Zhenyuan 等^[19-20]提出了四罐型双级吸收式储能循环,对比研究了双级循环在不同工况下的制冷、制热性能。对于采用 NH_3/H_2O 工质对的四罐型双级循环^[19],在蓄能过程中增加一套冷却子循环来辅助

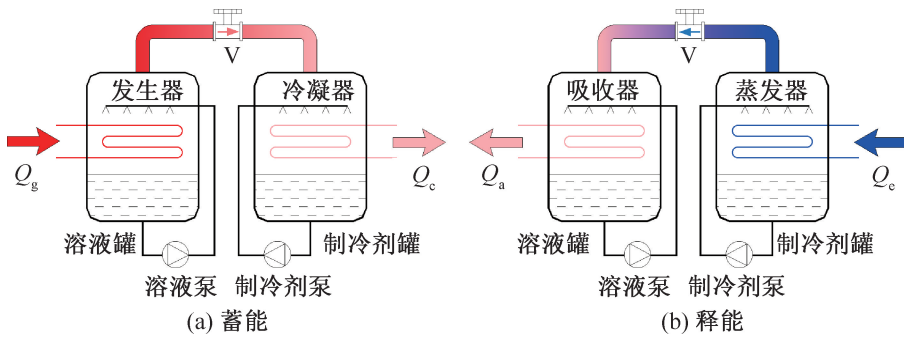


图3 基本吸收式储能原理

Fig.3 Principle of basic absorption thermal energy storage

储能子循环冷凝,从而强化储能子循环的发生-冷凝过程,获得更高的蓄能浓度(图4(a))。结果表明,当环境温度为30℃、冷冻水温度为-5℃时,ESD提高138%,但ESE降低20%;在环境温度为-10℃下,基本循环已无法运行,四罐型双级循环仍可提供40℃的制热输出,ESD达293.9 kJ/kg, ESE为0.18。对于采用H₂O/LiBr工质对的四罐型双级循环^[20],在释能过程中增加一套加热子

循环辅助储能子循环蒸发,从而强化储能子循环的吸收-蒸发过程,获得更低的释能浓度,同样增大了浓度差(图4(b))。在环境温度为5℃、制取热水温度为50℃时,双级循环的ESD高达254.0 kJ/kg (110.0 kW·h/m³),比基本循环提高7.32倍。Gao Jintong等^[21]建立了四罐型双级吸收式储能循环实验台,研究表明,双级循环ESD相比单级循环提高2.51倍。

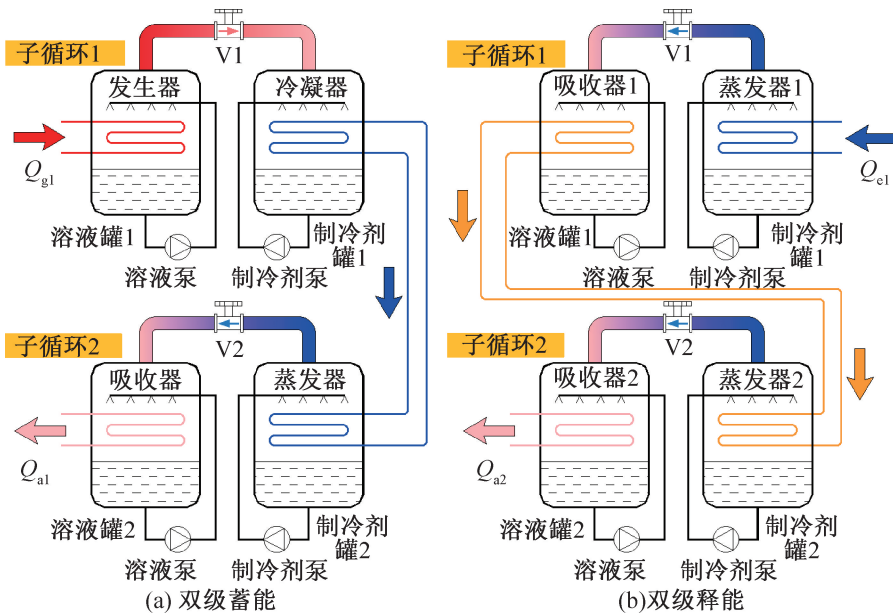


图4 四罐型双级吸收式储能原理

Fig.4 Principle of double-stage absorption thermal energy storage

此外,机械增压技术也被应用于吸收式储能循环,以降低所需热源温度(图5),并提高ESD^[22-24]。Ding Zhixiong等^[22]提出蓄能增压、释能增压和蓄释增压3种增压方式,对吸收式储能循环进行改善。结果表明,在蓄能温度为80℃的制冷工况下,基本循环的ESD和ESE分别为104.8 kW·h/m³和0.58,3种增压方式分别将ESD提至143.1、245.7、282.8 kW·h/m³,ESE分别提至0.62、0.70、0.67。

Ding Zhixiong等^[25]提出了三罐型双级吸收式储能循环,相比前述四罐型双级循环,三罐型双级循环减少了1个溶液罐,在二级蓄能过程中直接连通2个溶液罐,利用辅助溶液罐的吸收效应强化主溶液罐的发生过程(图6)。实验结果表明,三罐型双级循环在蓄能温度为70℃的制冷工况下,可将ESD由62.7 kW·h/m³ (163.1 kJ/kg)提至100.0 kW·h/m³ (260.1 kJ/kg),但ESE由0.53略微降至0.46。且实

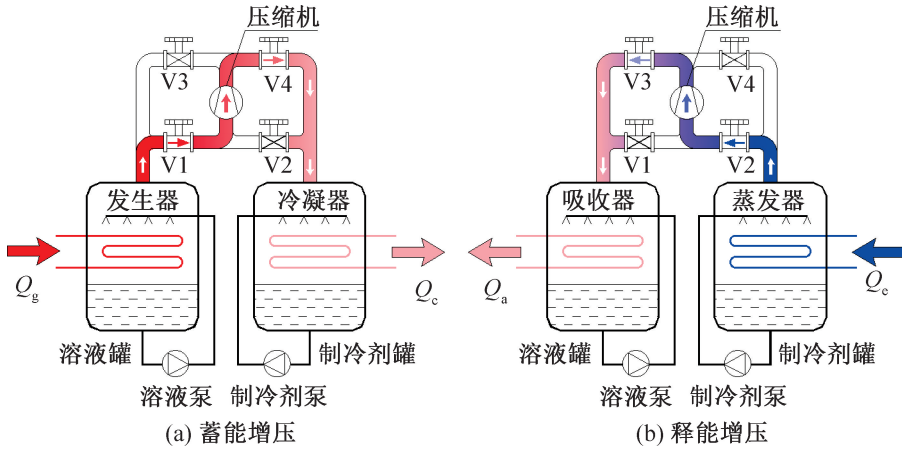


图5 增压吸收式储能原理

Fig.5 Principle of compression-assisted absorption thermal energy storage

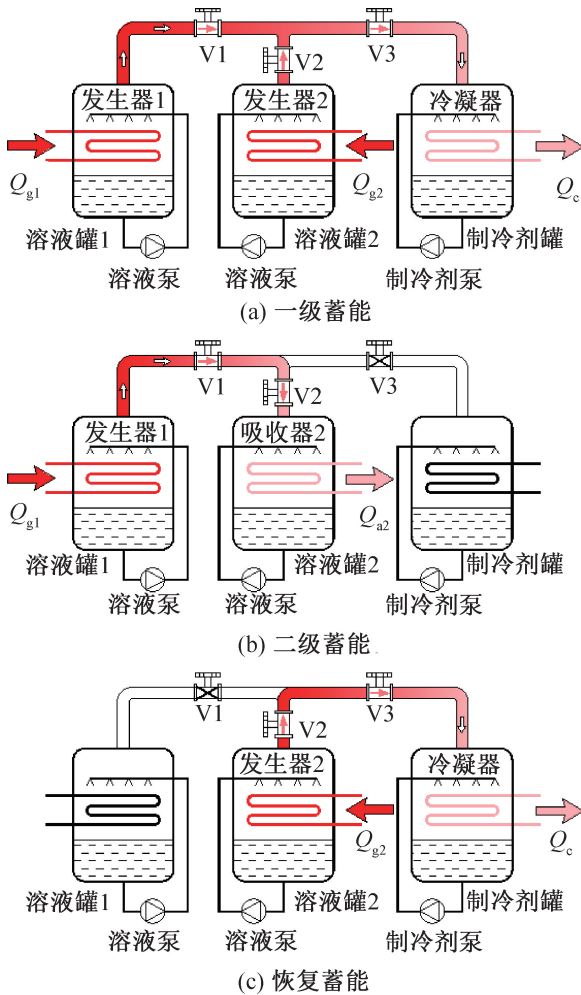


图6 三罐型双级吸收式储能原理

Fig.6 Principle of two-stage absorption thermal energy storage

测三罐型双级循环最低蓄能温度达 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 大幅拓宽了可蓄温域, 涵盖了大部分低品位可再生能源和废热。团队还进一步研究了三罐型双级循环2个溶液罐的溶液充注量分配策略^[26], 蓄能温度越高, 主溶液罐分配的溶液应该越多; 并提出三罐型双级循环尤其

适用于长期储能, 在冬季储冷夏季制冷、夏季储热冬季供热、长短期联合储能等方式中, 三罐型双级循环均可发挥其降低蓄能温度的作用, 从而拓宽可蓄热源、提高ESD。

当热源条件有利, 即蓄能温度较高(如 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上)时, 基本吸收式储能的ESE非但无法提高, 可能还因显热损失而有所下降, 无法充分利用高温热源。因此Ding Zhixiong等^[27]提出了双效吸收式储能循环, 引入一个低压溶液罐回收高压溶液罐的冷凝热用于二次发生, 从而实现了能源的梯级利用, 提高高温热源的利用效率(图7)。结果表明, 无论是制冷工况还是制热工况, ESE均实现了1的突破, 即输出能量

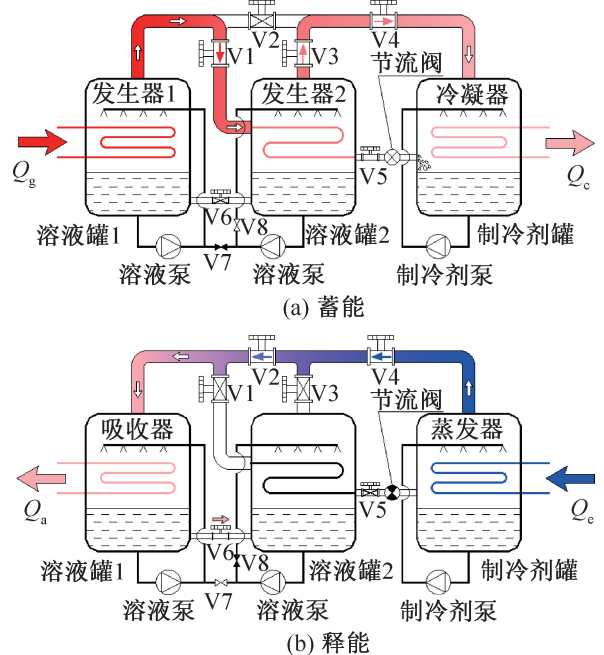


图7 双效吸收式储能原理

Fig.7 Principle of double-effect absorption thermal energy storage

大于输入能量;当蓄能温度区间为 160~200 °C 时,制冷 ESE 相比基本循环提升幅度高达 57.1%~61.6%,最高为 1.27;制热 ESE 提升幅度高达 58.2%~61.8%,最高为 1.44。

为降低双效循环所需的热源温度,Ding Zhixiong 等^[28]提出了双效增压循环(图 8),在蓄能温度为 130 °C 时,ESE 和 ESD 相比双效循环提升 24%、145%。双效增压循环的最佳适用温度区间为 100~150 °C,填补了单效循环和双效循环之间的温域空白。

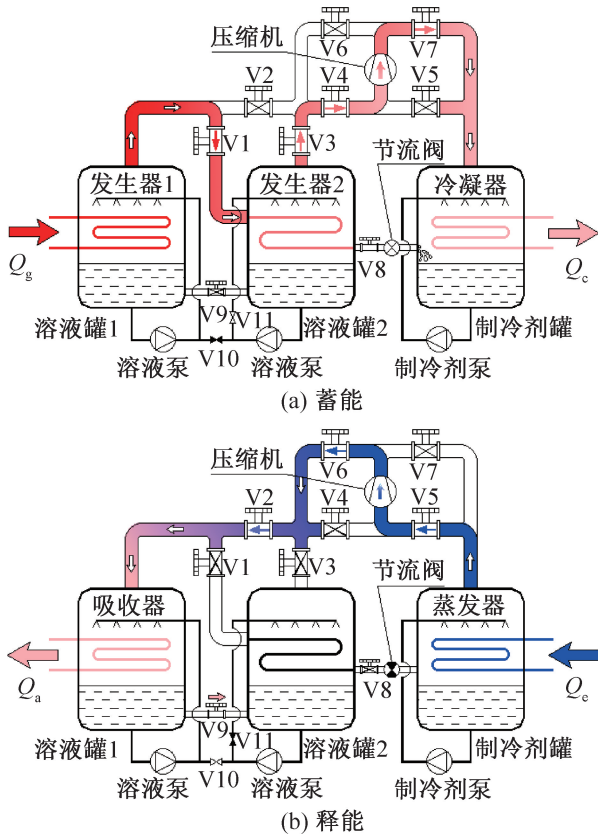


图 8 双效增压吸收式储能原理

Fig.8 Principle of double-effect compression-assisted absorption thermal energy storage

在相同热源条件下,低温环境虽然有利于蓄能过程的冷凝热排放,但会造成释能过程的供热能力衰减甚至无法运行。为此,Ding Zhixiong 等^[29]提出了相变材料(phase change material, PCM)辅助吸收式储能循环(图 9),利用 PCM 水箱将蓄能过程的冷凝热进行回收并蓄存。该循环虽然会减弱蓄能过程,但可以在 PCM 蓄能完成后切换回自然冷源冷凝模式,所以蓄能的终了浓度不变。在释能过程中,若蒸发器难以从环境中提取低位热源,则可利用 PCM 水箱加热蒸发器,从而提高蒸发温度,强化吸收过程,提高供热输出能力。研究表明,石蜡和盐作为相变材料均

能有效提升储能性能,ESE 由 0.73 升至 0.76(石蜡)和 0.78(盐),ESD 则大幅提高 64%(石蜡)和 100%(盐)。

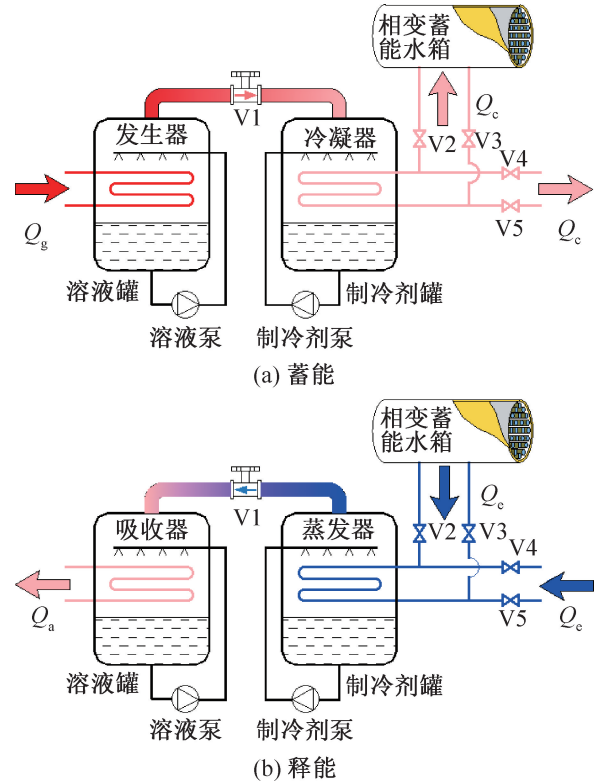


图 9 PCM 辅助吸收式储能原理

Fig.9 Principle of PCM-assisted absorption thermal energy storage

除了时间上供需不匹配外,能源品位上的不匹配也是热储能技术需要攻克的一个难题。吸收式储能在蓄能过程中将热量转换为浓度差,而浓溶液的吸收效应就成为了释能过程的驱动力,浓度差又转换为温差。若在释能过程中对蒸发器继续输入热量,吸收器则可产生高于热源温度的输出热量,实现能量品位的提升。参考吸收式热泵的命名方式,该类升温型吸收式储能可称为第 2 类吸收式储能或吸收式储能变温器^[30]。相比吸收式储能,吸收式储能变温器的 ESD 相似,虽然 ESE 因释能过程的热量输入而有所降低,但高温能量输出则提高了焓效率(exergy efficiency, EXE)。在输入温度为 60 °C、输出温度为 90 °C 时,温度提升 30 °C,吸收式储能变温器的 ESD 为 137.5 kW·h/m³、ESE 为 0.37、EXE 为 0.49。此外,参数分析显示,储能性能和升温能力是此消彼长的关系,在实际应用中应根据需求去权衡设计。将增压技术应用到吸收式储能变温器中可降低所需热源温度,提高热量输出温度,并同时提高储能性能^[31]。同样由 60 °C 升至 90 °C,相比于无

表 1 先进吸收式储能循环性能总结
Tab.1 Performance summary of advanced absorption thermal energy storage cycles

循环类型	工质对	工况		性能		参考文献
		$T_{in}/^{\circ}\text{C}$	$T_{out}/^{\circ}\text{C}$	ESE	ESD	
四罐型双级	$\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$	90	40	0.18	293.9 ^a	[19]
		90	-5	0.27 (0.34)	123.2 ^b (89.3 ^b)	
	$\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$	90	50	0.4 (0.18)	254.0 ^a (34.7 ^a) 110.0 ^b (17.0 ^b)	[20]
		85	11	0.44	143 ^a	[21]
		85	13	0.43	175 ^a	
		85	50	0.38 (0.46)	257 ^a (130 ^a)	
增压	$\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$	80	7	0.67 (0.58)	282.8 ^b (104.8 ^b)	[22]
三罐型双级	$\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$	70	3.5~10.9	0.46 (0.53)	260.1 ^a (163.1 ^a) 100 ^b (62.7 ^b)	[25]
双效	$\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$	160	40	1.44 (0.89)	95.9 ^b (98.6 ^b)	[27]
		160	7	1.27 (0.79)	84.2 ^b (86.9 ^b)	
双效增压	$\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$	130	7	1.24(1.00)	231.9 ^b (94.6 ^b)	[28]
PCM 辅助	$\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$	80	45	0.78 (0.73)	141.5 ^b (70.7 ^b)	[29]
变温器	$\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$	80	110	0.37	137.5 ^b	[30]
增压变温器	$\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$	60	90	0.43 (0.24)	282.7 ^b (35.2 ^b)	[31]
双级变温器	$\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$	65	95	0.19	54.8 ^b	[32]

注:括号中的数据为相应工况下的对比循环性能,除双效增压的对比循环为双效循环外,其余均为基本循环;上标 a 表示单位为 kJ/kg,上标 b 表示单位为 kW·h/m³。

增压情况,增压变温器可将 ESD 由 35.2 kW·h/m³ 大幅提升至 282.7 kW·h/m³,同时 ESE 由 0.24 提升至 0.43,EXE 由 0.32 提升至 0.54。双级技术同样可以用于提高吸收式储能变温器的升温能力^[32]。在释能过程通过辅助子循环的吸收热来加热主循环的蒸发器,以获得更高的输出温度。表 1 所示为先进吸收式储能循环的性能改善研究进展。

3 新型吸收式储能工质

工质对作为吸收式储能循环的“血液”,对吸收式储能的动态特征和循环性能至关重要。水/吸湿盐(如 $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$)是吸收式技术中最常见的工质对,其高效的特点使之广泛应用于各类吸收式热泵和储能循环中^[33]。然而, $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ 在高热源温度/低热汇温度下容易出现结晶问题,为系统的安全可靠运行带来了巨大挑战。 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 在低温工况下具有良好的循环特性,因而在制冰和低温制冷中占据重要地位^[34]。但 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 系统通常需要精馏器来提高制冷剂蒸气的纯度,从而增加了系统的复杂性和成

本^[35]。为避免该问题, $\text{NH}_3/\text{盐}$ 混合物作为替代方案得到关注,实现了去精馏化和系统性能提升^[36]。然而, $\text{NH}_3/\text{盐}$ 又带来了结晶风险^[37-38],也限制了其在吸收式系统中的广泛应用。

近年来,离子液体(ionic liquid, IL)作为一种新型吸收剂被引入到吸收式技术领域,有潜力克服盐基工质对的一些固有缺点。IL 因其独特的无结晶特性以及较宽的温域,展现出了巨大的应用潜力^[39-40]。与传统的吸湿性盐不同,IL 的分子结构通常由阴离子和分子尺寸较大的有机阳离子组成^[41],该不对称结构使得离子间相互作用较弱,从而导致 IL 具有较低的熔点,使其在室温下能够保持液态,避免了传统工质对可能出现的结晶问题^[42]。IL 种类繁多,且可以通过调整阴离子和阳离子的种类与结构对其物理化学性质进行定制化设计^[43]。图 10 所示为 IL 中常见的阳离子和阴离子结构,有利于进一步理解 IL 的化学组成及性质^[41]。2006 年, M. Sen 等^[44]首次提出将 IL 作为吸收剂应用于吸收式制冷循环,并指出 IL 具有不挥发、无毒、不可燃等优点。为了提高吸收式循

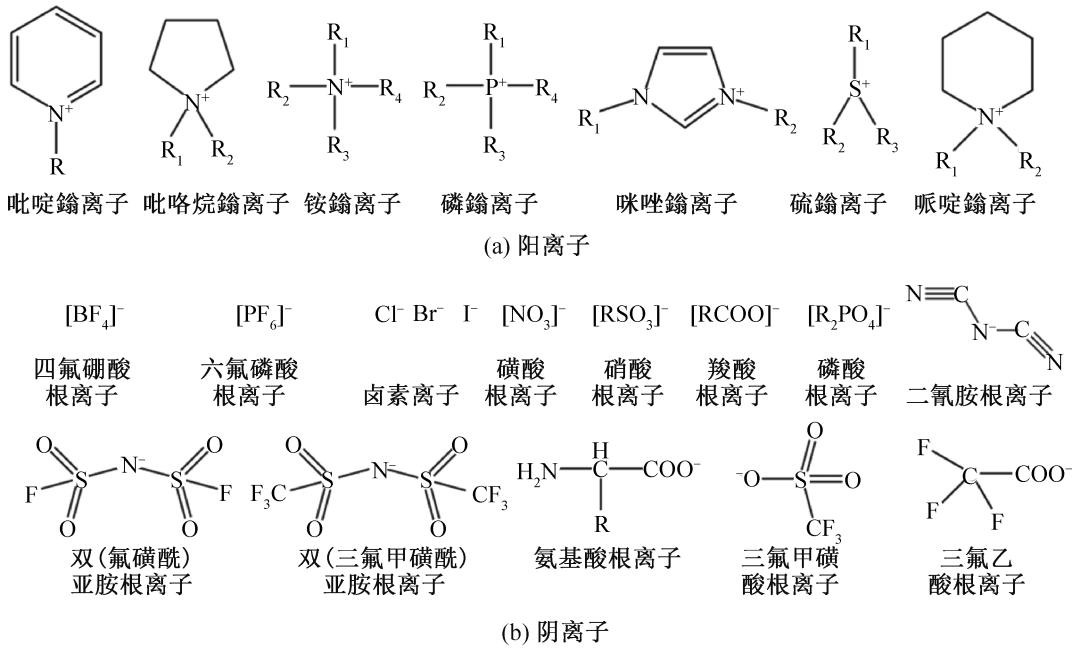


图 10 离子液体中常见的阳离子和阴离子结构^[41]

Fig.10 Molecular structures of common cations and anions in ionic liquids^[41]

环的效率,还提出 IL 工质对需具备较高的热/质传递系数。A. Yokozeki 等^[45-46]对不同 IL (如 [EMIM][OAc]) 中氨和水的溶解度进行了测量。通过将实测压力-温度-浓度数据与状态方程相结合,进一步揭示了 NH₃/ILs 和 H₂O/ILs 在提高吸收式循环性能方面的巨大潜力。Zhang Xiaodong 等^[47]通过模拟研究评估了 H₂O/[EMIM][DMP] 在吸收式循环中的热力学性能。研究结果显示,虽然该新型工质对的效率略低于传统的 H₂O/LiBr,但仍保持在 0.7 以上,并且 H₂O/[EMIM][DMP] 所需的驱动温度低于 H₂O/ILs,有利于吸收式循环在低热源条件下的进一步推广。

此外,D. B. Boman 等^[49]对新型吸收式工质对进行了全面的热物理性质和循环性能分析。结果表明,水系工质对在制冷应用中能效最优。Gao Jintong 等^[50]将 IL 工质对的热物理性质与其循环性能相关联,建立了新型工质对循环性能预测模型,其中关键物性主要包括吸收剂/制冷剂间的亲和力和发生过程的超额焓。该模型为热储能及相关技术的工质对设计与筛选提供了指导。此外,筛选结果表明 [EMIM][EtSO₄] 有着最高的 ESE(0.62) 和 EXE(0.32)^[51]。Wu Wei 等^[23]将 H₂O/ILs 应用在吸收式循环中,以实现无结晶和性能更优的吸收式储能;建立了精确的 H₂O/ILs 物性模型和吸收式储能动态模型,以评估不同 H₂O/ILs 的动态蓄能和释能特性;对比了 14 种 H₂O/ILs 的循环性能,发现 H₂O/[DMIM][DMP] 的性能系数(0.745)最高、H₂O/[EMIM][OAc] 的蓄能

密度最高(87.5 kW·h/m³)^[52];筛选了适用于增压吸收式循环的 H₂O/ILs,结果表明,H₂O/[EMIM][EtSO₄] 在低热源温度下有着更优的循环性能^[24]。由于 IL 种类繁多、分子结构可调,基于数据驱动的机器学习模型有助于实现高精度工质对预测和高通量分子结构优选^[39,53],结果表明,IL 能够显著提升吸收式储能性能。IL 在性能上具有一定优势,但较高的成本和复杂的合成过程制约了其大规模应用的经济性^[54]。综上所述,如何降低新型工质对的成本并简化其合成过程,仍是未来吸收式储能技术的关键研究方向之一。

深共熔溶剂(deep eutectic solvents, DES)与 ILs 具有相似的热力学特性,并具有无结晶特性、可生物降解性以及可低成本制备等优势,逐渐成为吸收式循环中的一类新兴绿色吸收剂^[55-57]。DES 是由氢键受体(hydrogen bond acceptor, HBA)和氢键供体(hydrogen bond donor, HBD)组成的混合物,由于具有共晶结构,其熔点较低^[58]。随着研究的不断深入,DES 的种类也愈发多样,图 11 所示为常见的 HBD 和 HBA 结构。据估计,这些潜在材料的组合可以产生约 10⁶~10⁸ 种不同的二元 DES 混合物。R. Abedin 等^[59-60]通过分子动力学模拟研究了氟利昂与 DES 的相互作用,并探讨了氟利昂/DES 在吸收式制冷中的可行性。R. Haghbakhsh 等^[61-62]通过理论研究将 DES 应用于吸收式循环,并与传统盐基工质对和 IL 工质对进行对比,发现所研究的 DES 工质对在循环

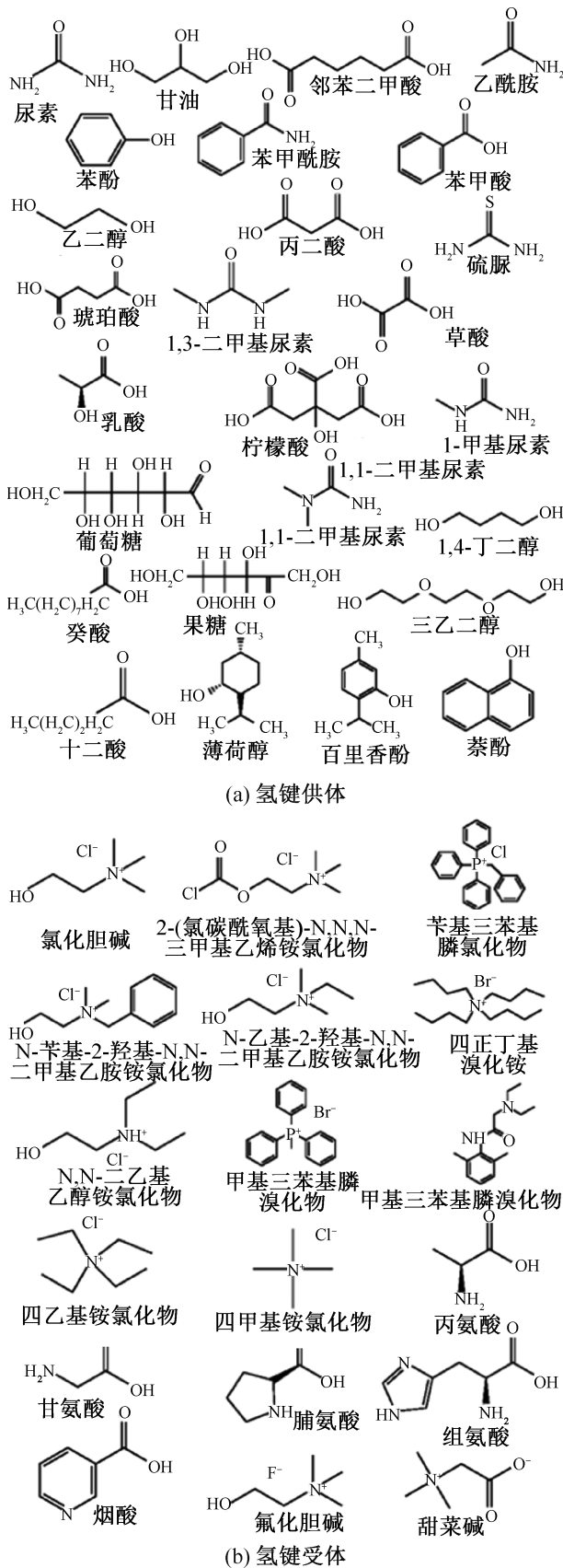
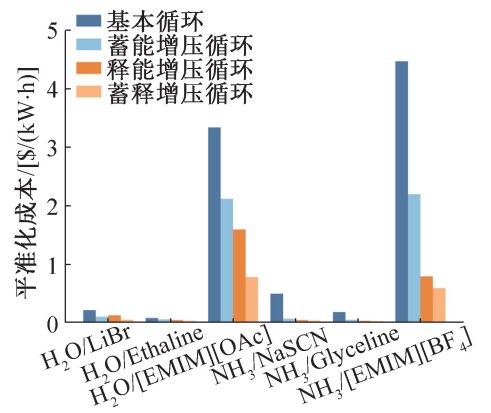


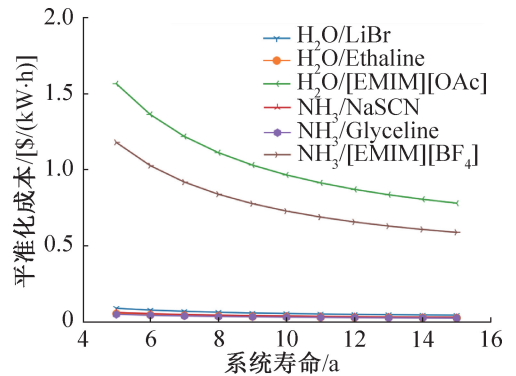
图 11 深共熔溶剂中常见的氢键受体和氢键供体结构^[48]
Fig.11 Molecular structures of common hydrogen bond acceptors and hydrogen bond donors in deep eutectic solvents^[48]

性能上较优。F. Z. Nessakh 等^[63]评估了 2 种 H₂O/DESs 在吸收式热变换器中的循环性能,并取得了显著的温升效果。这些研究结果为 DES 在吸收循环中的应用的可行性提供了有利的证明。

为了探明吸收式储能技术的经济可行性, Sui Yunren 等^[38]对比了 5 种 H₂O/DESs, 4 种 NH₃/DESs 和 3 种盐基工质对在基本吸收式储能循环和增压吸收式储能循环中的储能性能。如图 12(a) 所示,水系工质对中, H₂O/Ethaline 的 ESE 和 ESD 最优;氨系工质对中, NH₃/Glyceline 的 ESE 和 ESD 最优。NH₃/Glyceline 在基本吸收式储能循环中的 ESE 和 ESD 分别可达 0.736 和 452.98 kJ/kg。此外,由于 DES 的低成本和可生物降解特性,其可将传统 H₂O/LiBr 的平准化成本降低 41.9% (图 12(b))。综上所述, DES 凭借其独特的物理化学特性,不仅解决了传统工质对的结晶问题,还能显著降低其储能成本,在吸收式储能中有着广阔的应用前景。



(a) 不同吸收式循环和工质对的平准化成本



(b) 不同系统寿命下基本吸收式储能的平准化成本

图 12 吸收式储能的平准化成本

Fig.12 Levelized cost of absorption thermal energy storage

4 吸收式储能样机研发

样机研发是一项新兴技术走向应用的重要环节。R. Weber 等^[64]开发了一套使用 H₂O/NaOH 工质对

的实验样机(图13(a)),溶液罐和制冷剂罐体积为200 L,样机采用316不锈钢制造以防止腐蚀,该研究分享了一些实验样机在蓄能过程的运行经验,但指出释能过程还有待研究,且未提供运行的动态特性。K. E. N'tsoukpo等^[65]开发了一台使用H₂O/LiBr工

质对的样机(图13(b)),设计储能容量为8 kW·h,供热输出为1 kW;水箱和管道采用不锈钢材质防止腐蚀,溶液罐采用玻璃材质便于观察。该研究展示了动态蓄能和释能运行结果,但释能过程性能不佳,作者尝试多种方式改善仍未奏效。

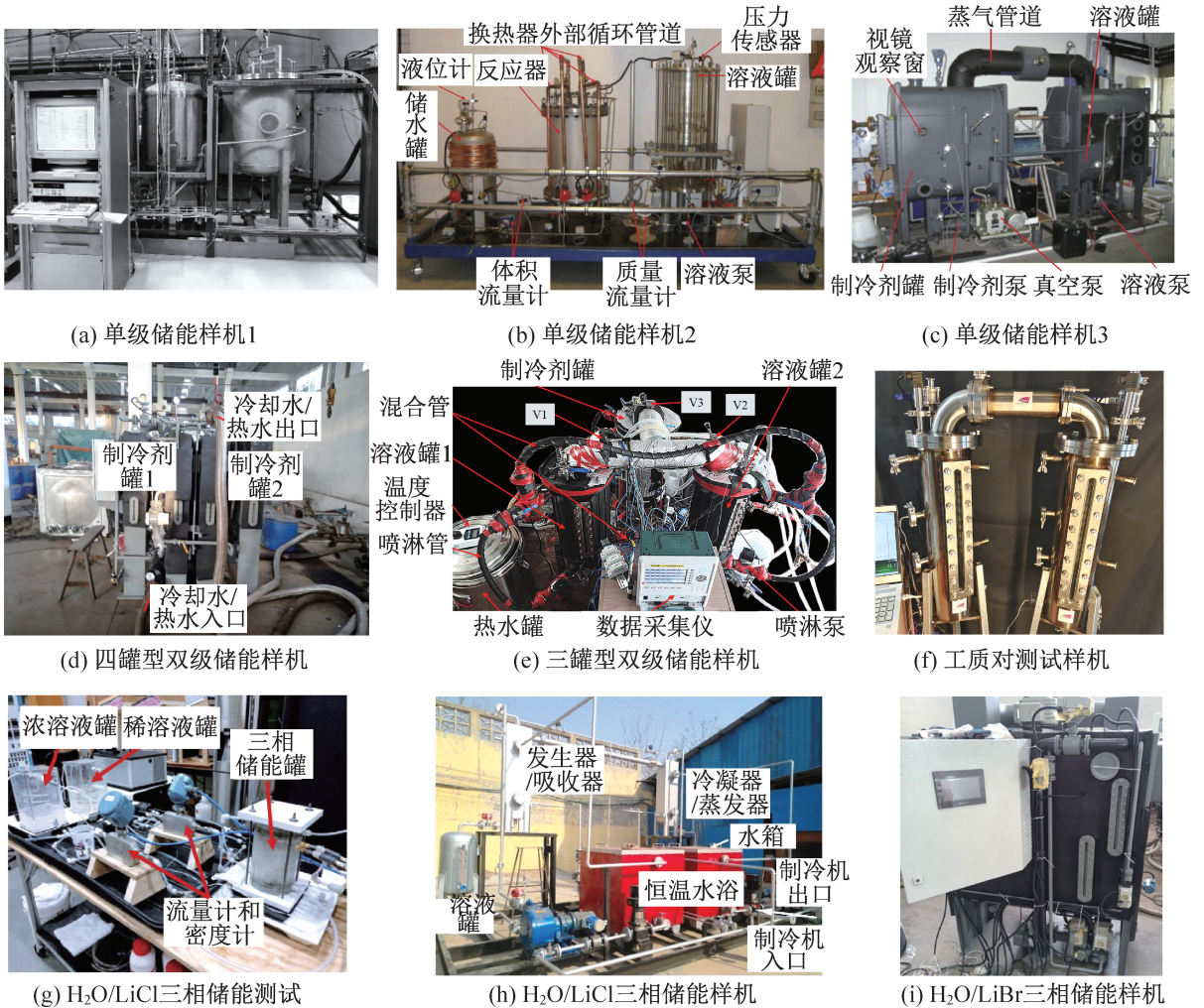


图13 吸收式储能样机研发

Fig.13 Prototype development of absorption thermal energy storage

Zhang Xiaoling等^[66]建立了一台储冷容量为10 kW·h的样机(图13(c)),采用H₂O/LiBr为工质对。样机可提供7℃的冷冻水、65℃生活热水和43℃供暖热水。供冷、供生活热水及供暖3种工况下ESD分别为42、88、110 kW·h/m³,而ESE分别为0.51、0.97、1.03。Gao Jintong等^[21]搭建了四罐型双级吸收式储能样机(图13(d)),LiBr溶液总充注量为380 kg(浓度40%,本文中浓度均指质量分数),该研究分析了溶液、制冷剂及冷热水进出口的温度动态变化特征。在制热工况下,蒸发器温度为12~15℃时,ESD为67 kW·h/m³;当蒸发器温度升至15~18℃时,ESD为85 kW·h/m³;制冷工况下,供冷温度为11℃时,ESD为66 kW·h/m³,当供冷温度升至13℃

后,ESD为81 kW·h/m³。Ding Zhixiong等^[25]搭建了三罐型双级吸收式储能样机(图13(e)),LiBr溶液总充注量为40 kg(浓度50%),设计储冷容量为5 kW·h。经过72 h稳压测试,样机表现良好,压力稳定约为3.4 kPa。该研究分析了温度(溶液、制冷剂、冷热水)、压力、冷热水流量及热负荷等参数的动态变化特征,并实测了不同蓄能温度下的循环性能,结果表明,三罐型双级循环可在低蓄能温度下提升ESD。基于该三罐型双级吸收式储能样机,团队还开展了三罐型双级变温器的研究,在70℃的热源温度下实现了输出温度大于90℃。本团队建立了3 kW·h的吸收式储能样机来测试新型工质对的循环性能(图13(f)),结果表明,新型吸收剂IL([EMIM])

[OAc]) 和 DES (Ethaline) 均可在低蓄能温度 (50 °C) 下正常运行。

通过结晶进一步提升 ESD 的三相吸收式储能近年来也广受关注。Wang Lingshi 等^[67]测试了 LiCl 溶液三相储能的性能 (图 13 (g)), ESD 最高可达 300 kW·h/m³, 释能速率达 1.3 kW。A. Mehari 等^[68]也测试了 LiCl 溶液三相储能的性能, 不同之处在于, 该研究为开式系统, 采用空气作为传热流体, 测得 ESD 高达 333~405 kW·h/m³。Lin Yao 等^[69-70]建立了 1 台三相吸收式储能实验样机 (图 13 (h)), 初始充注约 115 kg LiCl 溶液 (浓度为 38%), 并添加乙二醇作为活性剂提高 LiCl 的溶解度。该研究给出了详细的蓄能和释能动态变化特征及循环性能, 因为加入了乙二醇, ESD 有 18%~48% 的提升, 达 108~177 kW·h/m³; 与传统的两相循环相比, 三相储能的 ESD 提高 19.3%~80.3%。You Jinfang 等^[71-72]建立了 1 台采用 LiBr 溶液的三相吸收式储能样机, 通过滤筒过滤、高位进液、加热棒熔晶及冷剂旁通冲洗的手段实现了结晶防堵塞。相比无结晶情况, 三相储能测得的 ESD 提高 102%~210%。三相吸收式储能的融晶和防堵措施还需进一步深入研究, 尤其对于长周期储能, 其可靠性和高效性还需进一步探究。

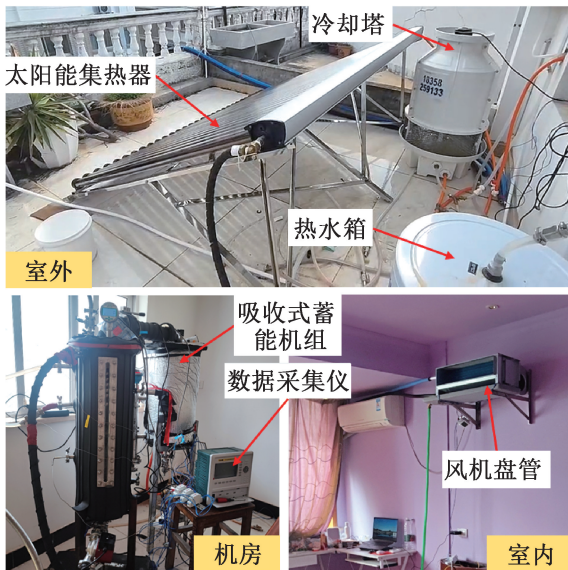


图 14 太阳能驱动吸收式储能系统

Fig.14 System of solar-driven absorption thermal energy storage

为促进吸收式储能的应用, 本团队建立了太阳能吸收式储能项目示范用于房间供冷供热, 如图 14 所示。该系统采用太阳能集热器作为热源, 冷却塔作为冷源, 风机盘管作为供能末端。在冷热源温差的驱动下, 设计储能容量为 5 kW·h 的吸收式储能机组成功

实现为房间供冷供热。供冷工况下, 房间温度可长时间稳定约为 26 °C; 供热工况配合冷凝热回收, 实现连续供暖, 且实测 ESD 和 ESE 达 414.1 kW·h/m³ 和 1.21, 均创最高实验记录。

5 挑战与机遇

先进储能循环、新型储能工质均为吸收式储能的高效性、紧凑性、适用性、经济性带来了较大的改善, 一系列成功研发的实验样机也为吸收式储能技术走向应用奠定了基础。为应对能源危机和环境问题两大挑战, 我国提出了“双碳”目标^[73], 吸收式储能技术在该大背景下, 将迎来前所未有的机遇。而未来吸收式储能还需要不断提高自身性能, 找准应用场景, 具体发展方向如下:

1) 研发吸收动力学和热力学性能更优异的吸收剂具有重要意义。盐溶液工质虽表现出较优的性能, 但腐蚀性、易结晶和高成本等缺点阻碍了吸收式储能技术的大规模推广。离子液体和深共熔溶剂等新兴的无结晶吸收剂具有低腐蚀性、可设计性和制冷剂多样性 (如水、氨、醇、氟、二氧化碳等) 的优势, 大幅增加了工质对的选择范围。深共熔溶剂成本极低, 有利于推动吸收式储能的大规模商业化, 但高黏度和低导热系数的关键挑战仍需解决。

2) 目前仍缺乏高效的长期 (如季节性储能) 和大容量 (如高层建筑、社区甚至区域规模) 的热储能技术。吸收式储能具有高储能密度和低热损失, 非常符合长期和大容量储能系统的基本特征。结合短期和长期储能的太阳能吸收式储能有可能实现连续输出, 增加储能系统的利用率。此外, 低蓄能温度和多样化输出形式 (如制冷、制热、升温) 使吸收式储能能在多能互补系统中具有显著的灵活性和多功能性。例如, 吸收式储能可以集成到发电厂中, 以回收发电过程中的废热及消纳多余的电力, 既可以提高能源利用效率, 同时提高电网的灵活性。

3) 数据中心、电子设备和电池热管理中日益增长的冷却需求不仅给制冷行业带来了挑战, 也为低碳制冷设备的发展创造了机遇。可再生能源驱动的吸收式储能可应用于此类场景, 以处理部分或全部冷负荷, 从而实现节能减排。此外, 由于蓄能温度低, 吸收式储能还具有从此类发热设备中回收热量的潜力。通过合理的耦合运行策略和热回收机制, 吸收式储能集成冷却系统有望实现高效性和经济性。

注: 本文作者丁志雄和隋云任的贡献相同, 视为共同一作。

参考文献

- [1] CHENG Xiaosong, YIN Yonggao, CHE Chunwen, et al. Experimental and simulation study on an air conditioning system cascade driven by waste heat using multicomponent solution [J]. *Building and Environment*, 2024, 247: 111021.
- [2] ROGELJ J, HUPPMANN D, KREY V, et al. A new scenario logic for the Paris Agreement long-term temperature goal [J]. *Nature*, 2019, 573 (7774): 357–363.
- [3] MIN Haye, CHOI H W, JEONG J, et al. Daily sorption thermal battery cycle for building applications[J]. *Energy*, 2023, 282: 129016.
- [4] YU Nan, WANG Ruzhu, WANG Liwei. Sorption thermal storage for solar energy [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, 39(5): 489–514.
- [5] 李梓龙, 王智彬, 贾莉斯, 等. 非均匀热流下细小通道内相变微胶囊悬浮液传热特性[J]. *制冷学报*, 2023, 44(6): 100–109. (LI Zilong, WANG Zhibin, JIA Lisi, et al. Heat transfer characteristics of microencapsulated phase change material slurry in a minichannel with nonuniform heat flux[J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(6): 100–109.)
- [6] DING Z, WU W, LEUNG M. Advanced/hybrid thermal energy storage technology: material, cycle, system and perspective [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 145: 111088.
- [7] AHMED N, ELFEKY K E, LU L, et al. Thermal and economic evaluation of thermocline combined sensible-latent heat thermal energy storage system for medium temperature applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 189: 14–23.
- [8] 张春伟, 陈静, 王成刚, 等. 相变储能技术的传热强化方法综述 [J]. *制冷学报*, 2023, 44 (1): 1–13. (ZHANG Chunwei, CHEN Jing, WANG Chenggang, et al. Review on heat transfer enhancement methods of latent heat storage technology [J]. *Journal of Refrigeration*, 2023, 44(1): 1–13.)
- [9] 张文宇, 赵长颖. 基于相变技术的便携式储冷箱性能研究[J]. *制冷学报*, 2024, 45(1): 145–157. (ZHANG Wenyu, ZHAO Changying. Examining the performance of portable cold-storage box based on phase-change technology [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(1): 145–157.)
- [10] WU Wei, BAI Yu, HUANG Hongyu, et al. Charging and discharging characteristics of absorption thermal energy storage using ionic-liquid-based working fluids [J]. *Energy*, 2019, 189: 116126.
- [11] LI G, HWANG Y, RADERMACHER R. Review of cold storage materials for air conditioning application [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35 (8): 2053–2077.
- [12] ZHANG W Y, MEHARI A, ZHANG X J, et al. Ammonia-based sorption thermal battery: concepts, thermal cycles, applications, and perspectives[J]. *Energy Storage Materials*, 2023, 62: 102930.
- [13] RUBITHERM. PCM technology [EB/OL]. (2024–12–12). <https://www.rubitherm.eu>.
- [14] PCM products limited phase change material products [EB/OL]. (2023-11-27) [2024-12-12]. <https://www.pcmproducts.net/>.
- [15] LIU H, EDEM N K, NOLWENN L P, et al. Evaluation of a seasonal storage system of solar energy for house heating using different absorption couples[J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(6): 2427–2436.
- [16] KERSKES H. Experimental and numerical investigations on thermo chemical heat storage [C]//Proceedings of the EuroSun 2010 Conference. Graz: International Solar Energy Society, 2010.
- [17] ZONDAG H, KIKKERT B, SMEDING S, et al. Prototype thermochemical heat storage with open reactor system[J]. *Applied Energy*, 2013, 109: 360–365.
- [18] BALES C, GANTENBEIN P, JAENIG D, et al. Laboratory tests of chemical reactions and prototype sorption storage units [R]. Iea, 2008.
- [19] XU Zhenyuan, WANG Ruzhu. A sorption thermal storage system with large concentration glide[J]. *Energy*, 2017, 141: 380–388.
- [20] XU Zhenyuan, WANG Ruzhu. Absorption seasonal thermal storage cycle with high energy storage density through multi-stage output[J]. *Energy*, 2019, 167: 1086–1096.
- [21] GAO Jintong, XU Zhenyuan, WANG Ruzhu. Experimental study on a double-stage absorption solar thermal storage system with enhanced energy storage density [J]. *Applied Energy*, 2020, 262: 114476.
- [22] DING Zhixiong, WU Wei. A hybrid compression-assisted absorption thermal battery with high energy storage density/efficiency and low charging temperature [J]. *Applied Energy*, 2021, 282: 116068.
- [23] WU Wei, DING Zhixiong, SUI Yunren, et al. Comparative dynamic performance of hybrid absorption thermal batteries using H₂O/1,3 – dimethylimidazolium dimethylphosphate [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 228: 113690.
- [24] WU Wei. Low-temperature compression-assisted absorption thermal energy storage using ionic liquids[J]. *Energy and Built Environment*, 2020, 1(2): 139–148.
- [25] DING Zhixiong, SUI Yunren, LIN Haosheng, et al.

- Experimental study on a two-stage absorption thermal battery with absorption-enhanced generation for high storage density and extremely low charging temperature ($\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) [J]. *Applied Energy*, 2024, 363: 123050.
- [26] DING Zhixiong, WU Wei. Dynamic characteristics and performance enhancement of two-stage absorption thermal battery for long-term renewable energy storage[J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124752.
- [27] 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.
- [28] DING Zhixiong, WU Wei. A novel double-effect compression-assisted absorption thermal battery with high storage performance for thermal energy storage [J]. *Renewable Energy*, 2022, 191: 902–918.
- [29] DING Zhixiong, WU Wei. A phase-change-material-assisted absorption thermal battery for space heating under low ambient temperatures [J]. *Energy*, 2024, 299: 131407.
- [30] DING Zhixiong, WU Wei. Type II absorption thermal battery for temperature upgrading: energy storage heat transformer[J]. *Applied Energy*, 2022, 324: 119748.
- [31] DING Zhixiong, WU Wei, HUANG Simin, et al. A novel compression-assisted energy storage heat transformer for low-grade renewable energy utilization [J]. *Energy*, 2023, 263: 125681.
- [32] WANG Cun, BI Yuehong. Dynamic characteristics and performance analysis of a double-stage energy storage heat transformer with a large temperature lift [J]. *Energy*, 2024, 308: 132963.
- [33] MEHARI A, WANG R, XU Z. Evaluation of a high-performance evaporative cooler-assisted open three-phase absorption thermal energy storage cycle for cooling [J]. *Applied Energy*, 2022, 325: 119818.
- [34] HERNÁNDEZ J A, RIVERA W, COLORADO D, et al. Optimal COP prediction of a solar intermittent refrigeration system for ice production by means of direct and inverse artificial neural networks [J]. *Solar Energy*, 2012, 86 (4): 1108–1117.
- [35] ALTAMIRANO A, LE PIERRÈS N, STUTZ B. Review of small-capacity single-stage continuous absorption systems operating on binary working fluids for cooling: theoretical, experimental and commercial cycles [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2019, 106: 350–373.
- [36] CAI Dehua, JIANG Jingkai, HE Guogeng, et al. Experimental evaluation on thermal performance of an air-cooled absorption refrigeration cycle with $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$ and $\text{NH}_3\text{-NaSCN}$ refrigerant solutions[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 120: 32–43.
- [37] WU Wei, WANG Baolong, SHI Wenxing, et al. Crystallization analysis and control of ammonia-based air source absorption heat pump in cold regions[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, 5: 140341.
- [38] SUI Yunren, DING Zhixiong, ZHAI Chong, et al. Crystallization-free and low-cost deep eutectic solvents for absorption thermal battery utilizing ultra-low-grade energy [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 284: 116984.
- [39] SUI Yunren, ZHAI Chong, WU Wei, et al. Multi-scale computer-aided molecular design of Ionic liquid for absorption heat transformer based on machine learning[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 261: 115617.
- [40] ZUO Guilun, ZHAO Zongchang, YAN Shuanghua, et al. Thermodynamic properties of a new working pair: 1-Ethyl-3-methylimidazolium ethylsulfate and water[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 156(3): 613–617.
- [41] ZHOU Teng, GUI Chengmin, SUN Longgang, et al. Energy applications of ionic liquids: recent developments and future prospects[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123 (21): 12170–12253.
- [42] FAIZAN M, AHMED R, ALI H M. A critical review on thermophysical and electrochemical properties of Ionanofluids (nanoparticles dispersed in ionic liquids) and their applications [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2021, 124: 391–423.
- [43] KOUTSOUKOS S, PHILIPPI F, MALARET F, et al. A review on machine learning algorithms for the ionic liquid chemical space [J]. *Chemical Science*, 2021, 12(20): 6820–6843.
- [44] SEN M, PAOLUCCI S. The use of ionic liquids in refrigeration [C]//ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Chicago, 2007: 131–134.
- [45] YOKOZEKI A, SHIFLETT M B. Vapor–liquid equilibria of ammonia + ionic liquid mixtures [J]. *Applied Energy*, 2007, 84(12): 1258–1273.
- [46] YOKOZEKI A, SHIFLETT M B. Water solubility in ionic liquids and application to absorption cycles [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(19): 9496–9503.
- [47] ZHANG Xiaodong, HU Dapeng. Performance simulation of the absorption chiller using water and ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium dimethylphosphate as the working pair [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(16): 3316–3321.
- [48] HANSEN B B, SPITTLE S, CHEN B, et al. Deep eutectic solvents: a review of fundamentals and applications

- [J]. *Chemical Reviews*, 2021, 121(3): 1232–1285.
- [49] BOMAN D B, HOYSALL D C, STAEDTER M A, et al. A method for comparison of absorption heat pump working pairs[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 77: 149–175.
- [50] GAO Jintong, XU Zhenyuan, WANG Ruzhu. Towards high-performance sorption cold energy storage and transmission with ionic liquid absorbents [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 241: 114296.
- [51] GAO Jintong, XU Zhenyuan. Performance evaluation of absorption thermal energy storage/transmission using ionic liquid absorbents [J]. *Energy and Built Environment*, 2023, 4(3): 259–269.
- [52] SUI Yunren, LIN Haosheng, DING Zhixiong, et al. Compact, efficient, and affordable absorption Carnot battery for long-term renewable energy storage[J]. *Applied Energy*, 2024, 357: 122504.
- [53] SUI Yunren, ZHAI Chong, LIN Haosheng, et al. How to rationally screen refrigerant/ionic liquids for thermal cooling: a multi-criteria approach based on machine learning[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 282: 116853.
- [54] MEHARI A, XU Z, WANG R. Thermal energy storage using absorption cycle and system: a comprehensive review [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 206: 112482.
- [55] LIU Y, BRENT FRIESEN J, MCALPINE J B, et al. Natural deep eutectic solvents: properties, applications, and perspectives [J]. *Journal of Natural Products*, 2018, 81(3): 679–690.
- [56] ABO-HAMAD A, HAYYAN M, ALSAADI M A, et al. Potential applications of deep eutectic solvents in nanotechnology[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 273: 551–567.
- [57] DENG Dongshun, GAO Bao, ZHANG Chao, et al. Investigation of protic NH_4SCN -based deep eutectic solvents as highly efficient and reversible NH_3 absorbents [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 358: 936–943.
- [58] DAI Y, VAN SPRONSEN J, WITKAMP G J, et al. Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2013, 766: 61–68.
- [59] ABEDIN R, HEIDARIAN S, FLAKE J C, et al. Computational evaluation of mixtures of hydrofluorocarbons and deep eutectic solvents for absorption refrigeration systems[J]. *Langmuir*, 2017, 33(42): 11611–11625.
- [60] ABEDIN R, SHEN Y, FLAKE J C, et al. Deep eutectic solvents mixed with fluorinated refrigerants for absorption refrigeration: a molecular simulation study[J]. 2020, 124(22): 4536–4550.
- [61] HAGHBAKHSH R, PEYROVEDIN H, RAEISSI S, et al. Investigating the performance of novel green solvents in absorption refrigeration cycles: energy and exergy analyses [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 113: 174–186.
- [62] HAGHBAKHSH R, PEYROVEDIN H, RAEISSI S, et al. Energy conservation in absorption refrigeration cycles using DES as a new generation of green absorbents[J]. *Entropy*, 2020, 22(4): 409.
- [63] NESSAKH F Z, MUTELET F, NEGADI A. Efficiency of two working fluids constituted of a deep eutectic solvent and water in absorption heat transformer [J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(15): 23578–23594.
- [64] WEBER R, DORER V. Long-term heat storage with NaOH [J]. *Vacuum*, 2008, 82(7): 708–716.
- [65] N'TSOUKPOE K E, LE PIERRÈS N, LUO L. Experimentation of a LiBr- H_2O absorption process for long-term solar thermal storage: prototype design and first results[J]. *Energy*, 2013, 53: 179–198.
- [66] ZHANG Xiaoling, LI Minzhi, SHI Wenxing, et al. Experimental investigation on charging and discharging performance of absorption thermal energy storage system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 85: 425–434.
- [67] WANG Lingshi, LIU Xiaobing, YANG Zhiyao, et al. Experimental study on a novel three-phase absorption thermal battery with high energy density applied to buildings[J]. *Energy*, 2020, 208: 118311.
- [68] MEHARI A, WANG Ruzhu, XU Zhenyuan. Experimental analysis of a high-performance open sorption thermal storage system with absorption-crystallization-adsorption processes[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 270: 116220.
- [69] LIN Yao, XIAO Fu, WANG Shengwei, et al. Experimental study on a closed absorption thermal energy storage system using modified LiCl solution for enhancing energy storage density[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 103: 114551.
- [70] LIN Yao, XIAO Fu, WANG Lingshi, et al. Experimental investigation and performance evaluation of a closed three-phase absorption thermal energy storage system [J]. *Energy*, 2024, 313: 134038.
- [71] YOU Jinfang, GAO Jintong, WANG Ruzhu, et al. High-density and anti-clogging three-phase absorption heat storage with crystallization management [J]. *Applied Energy*, 2024, 376: 124240.

MMA approximations for structural optimization [J].
Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, 24
(4): 263-276.

- [20] IMRE A R, BOGAERT J. The fractal dimension as a measure of the quality of habitats [J]. Acta Biotheoretica, 2004, 52(1): 41-56.
- [21] 张虎明, 赵明, 许一帆. 基于分形理论的两相变储热优化结构的换热特性分析 [J]. 化学工程, 2024, 52(11): 44-48. (ZHANG Huming, ZHAO Ming, XU Yifan. Analysis of heat transfer characteristics in phase change thermal storage with optimized structure based on fractal theory [J]. Chemical Engineering (China), 2024,

52(11): 44-48.)

通信作者简介

赵耀,男,副教授,上海交通大学智慧能源创新学院,021-64355111-6185,E-mail: zhaoyao@sjtu.edu.cn。研究方向:高效储热、热机械储能、智慧能源。

About the corresponding author

Zhao Yao, male, associate professor, College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, 86-21-64355111-6185, E-mail: zhaoyao@sjtu.edu.cn. Research fields: thermal energy storage, thermo-mechanical energy storage, smart energy.

(上接第 10 页)

soil heat balance of ground-coupled heat pump system [J].
Journal of Refrigeration, 2016, 37(3): 42-47.)

- [32] 张思雨, 殷勇高, 贾鹏琦, 等. 双 U 型埋管群跨季节蓄热特性研究 [J]. 化工学报, 2023, 74(增刊 1): 295-301. (ZHANG Siyu, YIN Yonggao, JIA Pengqi, et al. Study on seasonal thermal energy storage characteristics of double U-shaped buried pipe group [J]. CIESC Journal, 2023, 74(Suppl. 1): 295-301.)

E-mail: y. yin@seu.edu.cn。研究方向:溶液除湿及低品位热利用、新型热泵与空调系统节能、面向建筑碳中和的储能技术研究。

About the corresponding author

Yin Yonggao, male, professor, School of Energy and Environment, Southeast University, 86-13611515279, E-mail: y. yin@seu.edu.cn. Research fields: solution dehumidification and low-grade heat utilization, energy-saving of new heat pumps and air conditioning systems, energy storage technology for building carbon neutrality.

通信作者简介

殷勇高,男,教授,东南大学能源与环境学院,13611515279,

(上接第 23 页)

- [72] 游锦方, 高金彤, 闵恒, 等. 高储能密度三相吸收式储热系统的设计与测试 [J]. 制冷学报, 2024, 45(6): 33-40. (YOU Jinfang, GAO Jintong, MIN Heng, et al. Design and test of a three-phase absorption thermal storage system with high energy storage density [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(6): 33-40.)

- [73] 丁仲礼, 张涛. 碳中和: 逻辑体系与技术需求 [M]. 北京: 科学出版社, 2022. (DING Zhongli, ZHANG Tao. Carbon neutralization: logical system and technical requirements [M]. Beijing: Science Press, 2022.)

通信作者简介

吴伟,男,副教授,香港城市大学能源及环境学院,852-34424436,E-mail:weiwu53@cityu.edu.hk。研究方向:高效热泵、高密度储能、先进热管理、可再生能源利用、零能耗建筑等。

About the corresponding author

Wu Wei, male, associate professor, School of Energy and Environment, City University of Hong Kong, 86-852-34424436, E-mail:weiwu53@cityu.edu.hk. Research fields: advanced heat pumps, thermal energy storage, advanced thermal management, renewable energy utilization, net-zero energy buildings, etc.