

文章编号:0253-4339(2025)03-0032-08  
doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.03.032

面向零碳能源消纳的储冷储热技术

## 溶液吸收式蓄能循环特性分析

陈泽华<sup>1</sup> 王刚<sup>1,2</sup> 赵泳涵<sup>1</sup> 张群力<sup>1</sup>

(1 北京建筑大学 供热、供燃气、通风及空调工程北京市重点实验室 北京 100044;  
2 江苏白雪电器股份有限公司 苏州 215500)

**摘要** 溶液吸收式蓄能是一种热能存储和释放的新型技术,具有蓄能密度高、热量损失小、流动性好、可实现热能长期储存等优点。蓄能密度和蓄能效率是衡量系统热能储存能力和评估系统能量转化效率的关键指标参数。基于热力学原理,对比研究了6种吸收工质溶液在不同工况条件下的系统蓄能特性和适用性。结果表明:蓄能密度和蓄能效率均随热源温度、冷却水温度的升高而增大,随溶液浓度的升高而减小。热源温度为70~120℃、冷凝温度为24~36℃时,NaOH-H<sub>2</sub>O的蓄能密度和蓄能效率最大,CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O的蓄能密度和蓄能效率最小,LiBr-H<sub>2</sub>O的温度范围适用性最广。

**关键词** 吸收式;蓄能;蓄能密度;蓄能效率

**中图分类号**:TK02;TK01<sup>+9</sup>

**文献标识码**:A

## Analysis of the Characteristics of Solution Absorption Heat Storage Cycles

Chen Zehua<sup>1</sup> Wang Gang<sup>1,2</sup> Zhao Yonghan<sup>1</sup> Zhang Qunli<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Heating, Gas Supply, Ventilation and Air Conditioning Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, 100044, China; 2. Jiangsu Baixue Electric Appliance Co., Ltd., Suzhou, 215500, China)

**Abstract** Solution absorption energy storage is a new energy storage and release technology characterized by high energy storage density, low heat loss, good mobility, and long-term energy storage. Energy storage density and energy storage efficiency are the key indexes for measuring the energy storage capacity of absorption energy storage systems and the key parameters for evaluating the energy conversion efficiency of absorption energy storage systems, respectively. Based on thermodynamic principles, the energy storage characteristics and applicability of absorption energy storage systems were investigated using six types of absorption solutions under different conditions. The results show that both energy storage density and energy storage efficiency increase with an increase in heat source temperature and cooling water temperature and decrease with solution concentration. At a heat source temperature of 70–120℃ and condensing temperature of 24–36℃, NaOH-H<sub>2</sub>O has the largest energy storage density and efficiency, CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O has the smallest energy storage density and efficiency, and LiBr-H<sub>2</sub>O has the widest applicability of temperature range.

**Keywords** absorption; energy storage; energy storage density; energy storage efficiency

面对全球能源需求的激增,实现能源的高效利用是能源行业关注的焦点问题<sup>[1]</sup>。太阳能和工业余热是实现能源高效利用的重要可再生能源。但太阳能受气候条件影响且波动性大,工业余热资源受行业分布影响且相对分散。因此,可再生能源在能源供给侧与需求侧间存在时间、空间和能量强度不一致的问题<sup>[2]</sup>。热能储能技术是解决上述问题的关键技术,溶液吸收式蓄能是利用吸收工质溶液对水蒸气的吸收和解吸过程来实现热能储存的技术,如LiBr-H<sub>2</sub>O、NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O等,对提高能源利用效率与环境保护具有重要的现实意义<sup>[3-4]</sup>。

溶液吸收式蓄能与传统的显热和潜热蓄能相比,

具有储能密度高、热量损失小、流动性好、可实现能量长期储存等特点<sup>[5]</sup>。国内外学者已经开展了吸收式蓄能的实验和应用研究<sup>[6-7]</sup>,R. Weber等<sup>[8]</sup>研究了一种基于NaOH-H<sub>2</sub>O溶液的吸收式溶液储能实验装置,该装置利用闭式吸收式系统,通过在低气压条件下的热储/释能过程,实现了高效的季节性热能储存,结果表明,与传统水蓄能相比,该装置在低温空间供暖方面的热容量提高6倍,在65~70℃的家用热水供应方面提高3倍。常明慧等<sup>[9]</sup>研究了一种基于盐溶液的热泵循环系统,该系统结合了压缩热泵和盐溶液储能2个子系统,形成了1个复合循环,并采用多层储液概念设计盐溶液储罐的结构,实现储能密度与

热能品位的提升。N. I. Ibrahim 等<sup>[10]</sup>研究了一种集成式太阳能驱动的且结合吸收式溶液储能的 LiBr-H<sub>2</sub>O 溶液吸收式制冷系统,结果表明,该集成系统能够在太阳光照射期间同时提供冷却和储存能量,冷却效果随太阳辐射变化,最大冷却能力达 20 kW。制冷性能系数 (coefficient of performance, COP) 为 0.69,吸收式能量储存的储能密度为 119.6 kW·h/m<sup>3</sup>。Xu Zhenyuan 等<sup>[11]</sup>提出一种新的单级吸收式蓄热循环系统,对循环系统进行理论计算,并与传统循环进行对比,蓄能密度提高 138%,COP 降低 21%。H. Liu 等<sup>[12]</sup>对太阳能长周期吸收式蓄能供热系统进行研究,对不同工质对的蓄能容量和效率进行对比分析,研究表明,蓄能容量会随蒸发温度和吸收前溶液温度的升高而增加,随着吸收温度的升高而减小。K. E. N'tsoukpoe 等<sup>[13]</sup>模拟研究了基于 LiBr-H<sub>2</sub>O 溶液的吸收式蓄能系统,结果表明,热交换器的尺寸、溶液流量、吸收率对储能系统的蓄能密度和热效率均有较大影响,其中溶液流量是影响储能整个过程中的关键参数。Zhang Xiaoling 等<sup>[14]</sup>实验研究了基于 LiBr-H<sub>2</sub>O 为工质对的溶液储能系统,通过实验验证了 LiBr-H<sub>2</sub>O 工质对的蓄/释能能力,分析了其在不同应用中的蓄能效率和密度。S. L. Grassie 等<sup>[15]</sup>分析了太阳能驱动的吸收式溶液蓄能系统,并提出了氨水蓄能系统作为有效供热方式。

综上所述,采用不同工质吸收剂时蓄能特性的差异性较大,筛选出适合溶液蓄能的吸收工质对尤为重要。现有文献对溶液吸收式蓄能的不同吸收工质对在不同工况下的蓄能特性研究相对较少。本文综合考虑吸收工质对的环保性、热力学特性、蓄能密度和经济实用性,基于文献[16-19],选择了 LiCl-H<sub>2</sub>O、LiBr-H<sub>2</sub>O、NaOH-H<sub>2</sub>O、CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、KOH-H<sub>2</sub>O、SrBr<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 共 6 种不同的吸收工质溶液,再基于热力学原理,对比研究 6 种不同的吸收工质对在变工况下的溶液吸收式蓄能系统的蓄能特性。

## 1 模型建立

### 1.1 溶液吸收式蓄能装置及运行原理

溶液吸收式蓄能是一种热化学蓄能方式,通过蓄能介质之间的结合能发生可逆变化来储存和释放能量。由吸收剂和吸收质之间的热化学反应实现,其中吸收质在不同阶段相态不同,解析过程是蓄能过程,吸收过程是释能过程<sup>[18]</sup>,该可逆吸收过程的充能/释能阶段可表示为<sup>[19]</sup>: AB (稀) + ΔQ ⇌ AB (浓) + B (气)。

AB 是由 A (吸收剂)、B (吸收质) 2 种物质混合

而成的稀溶液,被称为工质对。吸收式蓄/释能过程原理如图 1 所示。蓄能过程,稀溶液 AB (稀) 在外部热量 ΔQ 的作用下被加热,浓缩成为浓溶液 AB (浓),并释放出气态吸收质 B。气态吸收质 B 通过水蒸气循环管在冷凝罐内冷凝成冷剂液并储存,如图 1(a) 所示。释能过程,储存的液态吸收质 B 吸收外部低温热源在低压环境下蒸发成冷剂水蒸气,经蒸气循环管进入吸收/发生器,浓溶液 AB (浓) 吸收水蒸气变成稀溶液 AB (稀),释放溶解热,如图 1(b) 所示。在能量转换和储存的过程中,物质的状态和浓度 (本文浓度均为质量分数) 会发生变化,能量则转化为化学能,可长期或季节性储存,热损失小<sup>[20]</sup>。

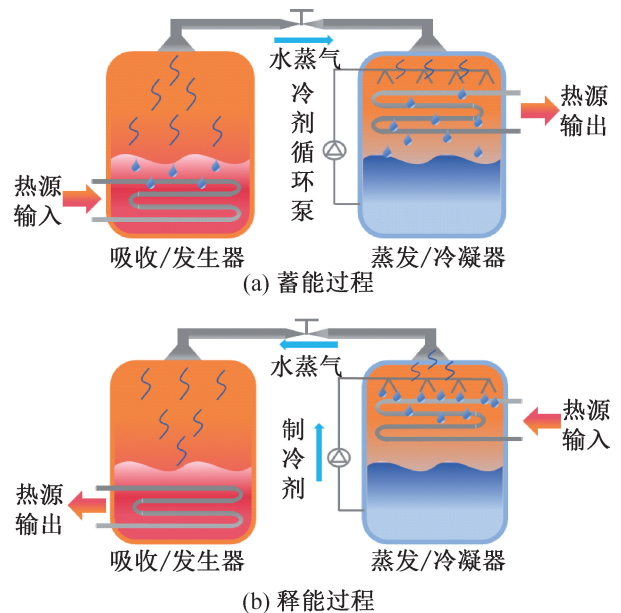


图 1 吸收式蓄/释能过程原理

Fig.1 Principle of absorption energy storage/release process

### 1.2 基本假设

吸收工质对浓度随蓄能过程不断变化导致物性不断变化,该过程是动态平衡的。为便于建模,对溶液吸收蓄能过程进行简化,假设如下:1) 溶液工质对的物性参数是恒定的;2) 系统运行是稳态的;3) 系统内处于真空状态,气液相平衡;4) 系统与环境的能量损失被忽略;5) 系统与换热器间的热量损失被忽略;6) 溶质无相变,溶剂发生相变。

### 1.3 系统建模

#### 1.3.1 蓄能过程的循环模型

典型吸收式蓄能循环  $p$ - $T$  图如图 2 所示。蓄能过程主要分为 2 大阶段:加热阶段 1-2、浓缩阶段 2-3,即加热主导蓄能阶段和浓缩主导蓄能阶段,稀溶液在加热作用下浓缩成浓溶液<sup>[21]</sup>。

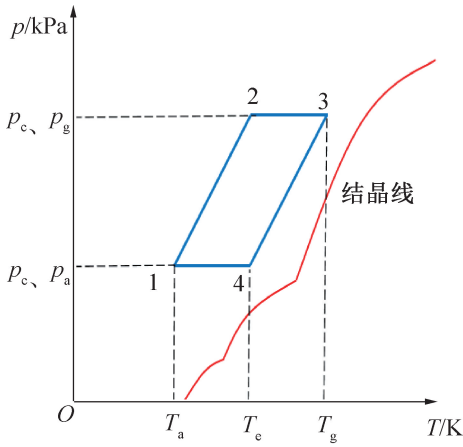


图 2 典型吸收式蓄能循环  $p$ - $T$  图

Fig.2  $p$ - $T$  diagram of a typical absorption energy storage cycle

稀溶液浓缩时产生的水蒸气质量:

$$M_{v,1-3} = M_1 - M_3 \quad (1)$$

根据质量守恒,确定溶液工质对由状态点 1 变化至状态点 3 的浓度和溶液质量的关系:

$$M_3 X_3 = M_1 X_1 \quad (2)$$

根据能量平衡,确定溶液工质对由状态点 1 变化至状态点 3 的耗热量:

$$Q_g = Q_{1-3} = M_3 h_3 - M_1 h_1 + M_{v,1-3} h_{v,1-3} \quad (3)$$

$$t_3 = t_r - \Delta t_1 \quad (4)$$

水蒸气进入冷凝器冷凝成冷剂水,能量守恒方程如下:

$$Q_c = M_{v,3-4} (h_{v,3} - h_{L,4}) \quad (5)$$

$$M_{v,1-3} = M_{v,3-4} \quad (6)$$

稀溶液变成浓溶液后,溶液内能的变化量为:

$$\Delta E_{3-1} = M_3 h_3 - M_1 h_1 \quad (7)$$

蓄能密度 (energy storage density, ESD) 和蓄能效率 (energy storage efficiency, ESE) 的定义式如下:

$$d_{ES} = \frac{Q_g - Q_c}{M_1} = \frac{h_3 + (h_{L,4} - h_1 - h_{L,1}) X_3 / X_1 + h_{L,1} - h_{L,4}}{X_3 / X_1} \quad (8)$$

$$e_{ES} = 1 - Q_c / Q_g = \frac{(X_3 / X_1 - 1) (h_{v,3} - h_{L,4})}{h_3 - h_1 X_3 / X_1 + (X_3 / X_1 - 1) (h_{v,3} - h_{L,1})} \quad (9)$$

### 1.3.2 溶液工质对的状态参数模型

上述能量、质量方程中,溶液温度由溶液的浓度和压力关系式得到:

$$t = f(X, p) \quad (10)$$

当溶液达到一定浓度时,溶液的焓值由溶液的温度和浓度关系式得到:

$$h = f(t, X) \quad (11)$$

冷剂水在特定温度下蒸发,系统中水溶液蒸发压力由水溶液的温度决定:

$$p = f(t) \quad (12)$$

为确保该方程组封闭,引入 11 个物性方程,如表 1 所示。

表 1 物性方程

Tab.1 Physical property equations

类型	方程
温度	$t_1 = f_1(X_1, p_e)$ ; $t_3 = t_r - \Delta t_1$ ; $t_4 = f_2(X_4, p_e)$
焓值	$h_1 = f_3(t_1, X_1)$ ; $h_3 = f_4(t_3, X_3)$ ; $h_4 = f_5(t_4, X_4)$ ; $h_{L,1} = f_6(t_1, p_e)$ ; $h_{v,3} = f_7(t_3, p_g)$ ; $h_{L,4} = f_8(t_4, p_e)$
压力	$p_g = f_9(t_3)$ ; $p_e = f_{10}(t_4)$

上述物性方程中,工质溶液对 LiBr-H<sub>2</sub>O、NaOH-H<sub>2</sub>O 的物性方程分别来自文献[22-24]、文献[25]。工质溶液对 LiCl-H<sub>2</sub>O、CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、KOH-H<sub>2</sub>O、SrBr<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 的物性方程来自于软件 Aspen Plus V11。

### 1.4 系统运行模拟与验证

设定特定的温差和浓度差界限,通过调用溶液物性计算程序,利用 MATLAB 软件进行数值求解,所需参数如表 2 所示,模型求解流程如图 3 所示。

表 2 系统运行模拟参数

Tab.2 Simulation parameters for system operation

参数	值
初始溶液质量 $M_1$ /kg	给定
稀溶液浓度 $X_1$ /%	26~50
浓溶液浓度 $X_2$ /%	36~60
稀/浓溶液浓度差 $\Delta X$ /%	初始为 5
热源温度 $t_r$ /°C	70~120
蓄能温差 $\Delta t_1$ /°C	初始为 5
蓄能温度 $t_3$ /°C	$t_3 = t_r - \Delta t_1$
冷凝温度 $t_4$ /°C	27~36
初始状态溶液焓值 $h_1$ /(kJ/kg)	溶液 $t=t_1, X=X_1$ 时的焓值
浓溶液焓值 $h_3$ /(kJ/kg)	溶液 $t=t_3, X=X_3$ 时的焓值
水蒸气焓值 $h_{v,1-3}$ /(kJ/kg)	$p=p_3, t=t_3$ 时饱和和水蒸气的焓值
发生压力 $p_g$ /kPa	$p_g = 25.014$ kPa
冷凝压力 $p_e$ /kPa	$p_e = 1.226$ kPa

为验证模拟准确性,基于文献[27]设计的实验工况,以本文模拟计算值与文献[27]实验数据进行

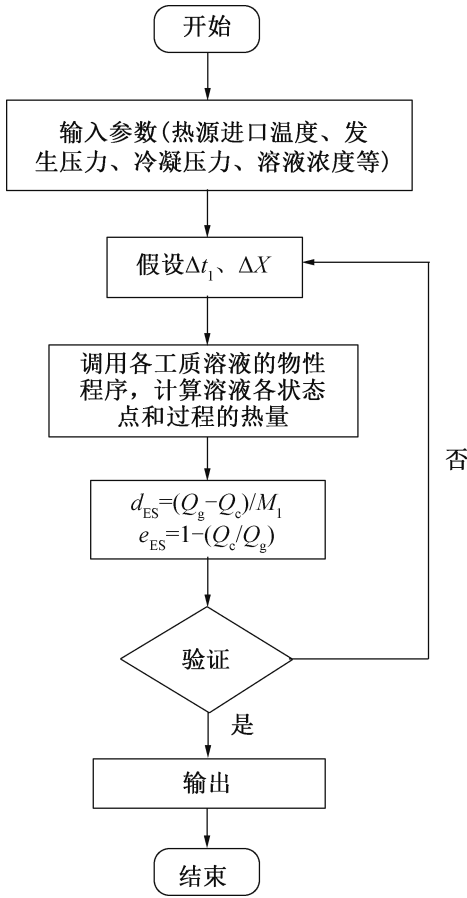


图 3 模型求解流程

Fig.3 Model solving flow

对比如图 4 所示。由图 4 可知,模拟数据与实验数据的最大相对误差为 5.2%,最小相对误差为 1.5%。本模型具有良好的准确性。

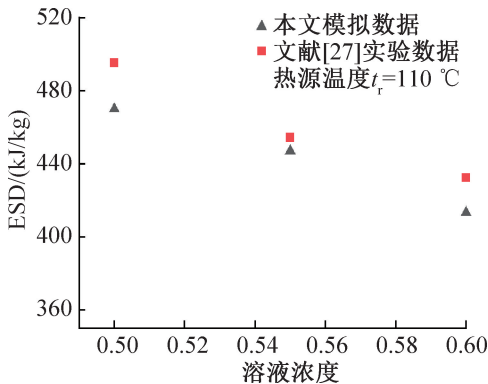


图 4 模拟数据结果与实验数据的对比

Fig.4 Comparison of simulated data results with experimental data

## 2 结果与分析

### 2.1 热源温度对蓄能性能的影响

当  $p_g = p_c = 25.01 \text{ kPa}$ ,  $p_a = p_e = 1.23 \text{ kPa}$ , 冷凝温

度  $t_4 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ , 6 种不同吸收工质溶液 (LiCl-H<sub>2</sub>O、LiBr-H<sub>2</sub>O、NaOH-H<sub>2</sub>O、CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、KOH-H<sub>2</sub>O、SrBr<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O) 在浓度为 35%~55% 时,蓄能密度和蓄能效率随热源温度的变化如图 5、图 6 所示。溶液工质对的蓄能密度和蓄能效率均随热源温度的升高而增大,与文献 [21] 中 LiCl-H<sub>2</sub>O、LiBr-H<sub>2</sub>O、NaOH-H<sub>2</sub>O 溶液在吸收式蓄能系统蓄能过程中热源温度对蓄能密度和蓄能效率影响的结论一致。随着热源温度的升高,发生器内消耗的热量  $Q_g$  增加,溶液工质对的质量  $M_1$  和冷凝热  $Q_c$  保持不变,蓄能密度和蓄能效率均会增大。热源温度的升高,液体分子的平均动能增加,分子间的作用力相对减弱,分子更容易由液态逃逸到气态,溶液的蒸发潜热降低<sup>[28-29]</sup>。

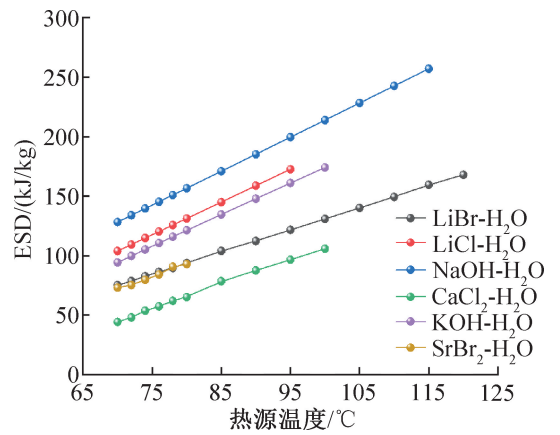


图 5 蓄能密度随热源温度的变化

Fig.5 Variation of energy storage density with heat source temperature

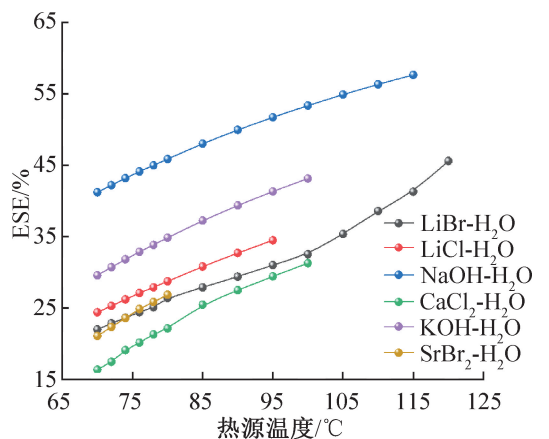


图 6 蓄能效率随热源温度的变化

Fig.6 Variation of energy storage efficiency with heat source temperature

蓄能密度由高至低依次为: NaOH-H<sub>2</sub>O > LiCl-H<sub>2</sub>O > LiBr-H<sub>2</sub>O > SrBr<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O > CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O; 蓄能效率由高至低依次为: NaOH-H<sub>2</sub>O > KOH-H<sub>2</sub>O > LiCl-H<sub>2</sub>O > LiBr-H<sub>2</sub>O > SrBr<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O > CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O。相同温度和

压力下, NaOH-H<sub>2</sub>O 溶液的蓄能密度和蓄能效率最大, 分别为 257.16 kJ/kg 和 57.68%; CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液的蓄能密度和蓄能效率最小, 分别为 44.26 kJ/kg 和 16.36%。

为防止溶液工质对出现结晶现象, 热源最高温度需严格控制。如 SrBr<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液的温度控制区间为 70~80 °C; LiCl-H<sub>2</sub>O 溶液的温度控制区间为 70~95 °C, LiBr-H<sub>2</sub>O 溶液温度控制区间最大为 70~120 °C。

### 2.2 溶液浓度对蓄能性能的影响

当  $p_g = p_c = 25.01$  kPa,  $p_a = p_e = 1.23$  kPa, 热源温度  $t_r = 80$  °C, 冷凝温度  $t_4 = 35$  °C, 6 种工质 LiBr-H<sub>2</sub>O、LiCl-H<sub>2</sub>O、NaOH-H<sub>2</sub>O、CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、KOH-H<sub>2</sub>O、SrBr<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 的浓度变化区间分别为 50%~60%、26%~36%、40%~50%、40%~50%、40%~50%、30%~40%。6 种吸收工质溶液的浓度变化对其在溶液吸收式蓄能装置中的蓄能密度和蓄能效率的影响如图 7、图 8 所示。随着溶液浓度的增大, 蓄能密度和蓄能效率均降低, 与文献[26]中基于 NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液储能远距离输送供能能量系统的蓄能密度和蓄能效率随溶液浓度的增加而降低的结论一致。当热源温度恒定, 溶液浓度的增加直接影响了溶液工质对的热力学参数, 如溶液的焓值, 高浓度溶液导致稀溶液和浓溶液之间的焓差减小<sup>[26]</sup>, 焓差越小, 溶液工质对在蓄能过程中能够存储的热量越小, 蓄能密度和蓄能效率越低。相反, 焓差越大, 蓄能密度和蓄能效率越高。

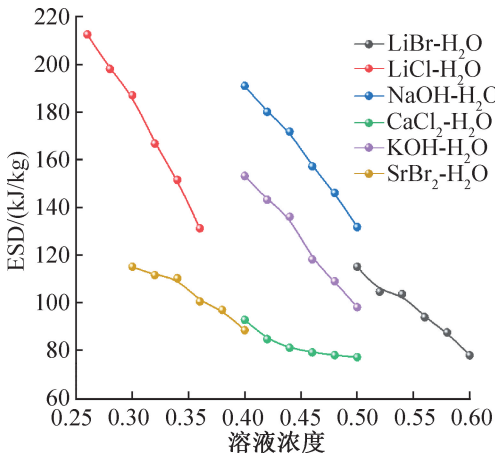


图 7 蓄能密度随溶液浓度的变化

Fig.7 Variation of energy storage density with solution concentration

相同温度和压力下, 不同工质溶液浓度增大时, 蓄能密度和蓄能效率的降幅有所不同。其中, 蓄能密度、蓄能效率降幅最大的分别为 LiCl-H<sub>2</sub>O 溶液、KOH-H<sub>2</sub>O 溶液, 下降比率为 38.2%、25.13%; 蓄能密度、蓄能效率降幅最小的均为 CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液, 下降

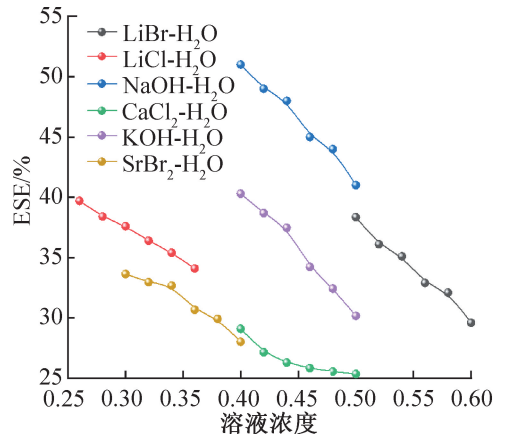


图 8 蓄能效率随溶液浓度的变化

Fig.8 Variation of energy storage efficiency as a function of solution concentration

比率分别为 16.9% 和 13%。

LiCl-H<sub>2</sub>O 溶液的蓄能密度最大, 最大值为 212.12 kJ/kg, NaOH-H<sub>2</sub>O 溶液的蓄能效率最大, 最大值为 51.2%; CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液的蓄能密度和蓄能效率最小, 最小值分别为 44.26 kJ/kg 和 16.36%。

### 2.3 冷凝温度对蓄能性能的影响

当  $p_g = p_c = 25.01$  kPa,  $p_a = p_e = 1.23$  kPa, 热源温度  $t_r = 80$  °C, 6 种吸收工质溶液在浓度为 35%~55% 时, 蓄能密度和蓄能效率随冷凝温度的变化如图 9、图 10 所示。随着冷凝温度增加, 冷凝的制冷剂水温度上升, 水蒸气与制冷剂水之间的焓差减小, 冷凝器内的冷凝热  $Q_c$  减小, 溶液质量  $M_1$  和耗热量  $Q_g$  不变, 溶液工质对的蓄能密度和蓄能效率均增大。

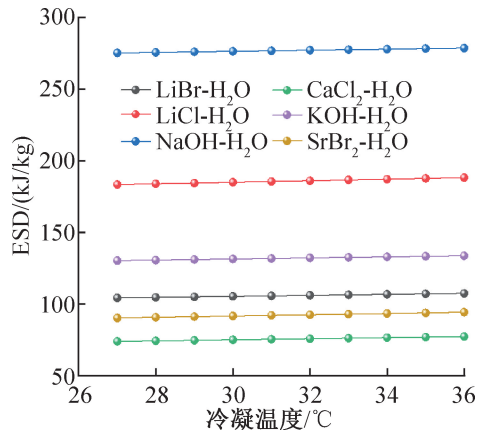


图 9 蓄能密度随冷凝温度的变化

Fig.9 Variation of storage density with condensation temperature

蓄能密度由高至低依次为: NaOH-H<sub>2</sub>O > LiCl-H<sub>2</sub>O > KOH-H<sub>2</sub>O > LiBr-H<sub>2</sub>O > SrBr<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O > CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O; 蓄能效率由高至低依次为: CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O > NaOH-H<sub>2</sub>O >

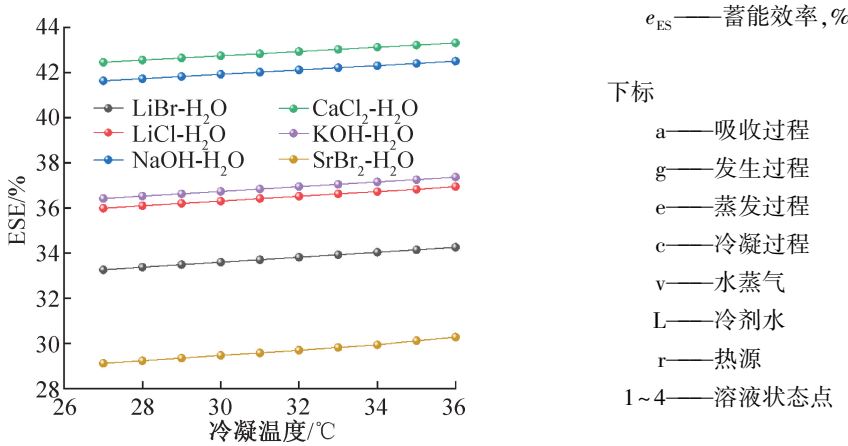


图 10 蓄能效率随冷凝温度的变化

Fig.10 Variation of storage efficiency with condensation temperature

KOH-H<sub>2</sub>O>LiCl-H<sub>2</sub>O>LiBr-H<sub>2</sub>O>SrBr<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O。同一冷凝温度下,不同工质溶液的蓄能密度和蓄能效率存在显著差异,蓄能密度最大和最小的工质溶液对分别为 NaOH-H<sub>2</sub>O 溶液和 CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液,蓄能密度为 278.72、73.96 kJ/kg。蓄能效率最大和最小的工质溶液对分别为 CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液和 SrBr<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 溶液,蓄能效率为 43.32%、29.12%。随着冷凝温度的变化,各工质溶液蓄能密度和蓄能效率的相对大小保持稳定。

### 3 结论

基于热力学基本原理,模拟研究了 LiCl-H<sub>2</sub>O、LiBr-H<sub>2</sub>O、NaOH-H<sub>2</sub>O、CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O、KOH-H<sub>2</sub>O、SrBr<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 共 6 种不同的吸收工质对在变工况下的溶液吸收式蓄能装置的蓄能特性,得到如下结论:

- 蓄能密度和蓄能效率均随热源温度、冷却水温度的升高而增大,随溶液浓度的升高而减小。
- 热源温度、溶液浓度是影响溶液吸收式蓄能特性的关键参数。
- NaOH-H<sub>2</sub>O 的蓄能密度和蓄能效率最优,LiBr-H<sub>2</sub>O 的热源温度区间最大。CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 不被推荐作为溶液吸收蓄能工质。

#### 符号说明

- $M$ ——质量,kg
- $X$ ——溶液浓度,%
- $Q$ ——热量,kJ
- $E$ ——内能,kJ
- $h$ ——焓值,kJ/kg
- $p$ ——压力,kPa
- $t$ ——温度,°C
- $d_{ES}$ ——蓄能密度,kJ/kg

- $e_{ES}$ ——蓄能效率,%
- 下标
- a——吸收过程
- g——发生过程
- e——蒸发过程
- c——冷凝过程
- v——水蒸气
- L——冷剂水
- r——热源
- 1~4——溶液状态点

#### 参考文献

- 姜曦灼,王筱,李恣智,等. 余热驱动的吸收式蓄能工质对的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3366-3373. (JIANG Xizhuo, WANG Xiao, LI Minzhi, et al. Experimental study of working fluids in absorption energy storage systems driven by waste heat[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3366-3373.)
- TZINNIS E, BALDINI L. Combining sorption storage and electric heat pumps to foster integration of solar in buildings [J]. Applied Energy, 2021, 301: 117455.
- 蒋明贺. 太阳能空调中三相蓄能系统特性研究[D]. 北京:北京工业大学, 2015. (JIANG Minghe. Study on characteristics of three-phase energy storage system in solar air conditioning [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.)
- 杨启超,张晓灵,王馨,等. 吸收式化学蓄能的研究综述[J]. 科学通报, 2011, 56(9): 669-678. (YANG Qichao, ZHANG Xiaoling, WANG Xin, et al. Review on absorption thermal energy storage technologies [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(9): 669-678.)
- ALVA G, LIU L, HUANG X, et al. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 68: 693-706.
- AKINYELE D O, RAYUDU R K. Review of energy storage technologies for sustainable power networks [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2014, 8: 74-91.
- MEHARI A, XU Z Y, WANG R Z. Thermal energy storage using absorption cycle and system: a comprehensive review [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 206: 112482.
- WEBER R, DORER V. Long-term heat storage with NaOH [J]. Vacuum, 2008, 82(7): 708-716.
- 常明慧,王林,苑佳佳,等. 盐溶液蓄能型热泵循环特

- 性研究[J]. 化工学报, 2023, 74(增刊1): 329-337. (CHANG Minghui, WANG Lin, YUAN Jiajia, et al. Study on the cycle performance of salt solution-storage-based heat pump[J]. CIESC Journal, 2023, 74(Suppl. 1): 329-337.)
- [10] IBRAHIM N I, AL-SULAIMAN F A, ANI F N. Performance characteristics of a solar driven lithium bromide-water absorption chiller integrated with absorption energy storage[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 150: 188-200.
- [11] XU Zhenyuan, WANG Ruzhu. A sorption thermal storage system with large concentration glide[J]. Energy, 2017, 141: 380-388.
- [12] 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.
- [13] N'TSOUKPOE K E, LE PIERRÈS N, LUO L. Numerical dynamic simulation and analysis of a lithium bromide/water long-term solar heat storage system[J]. Energy, 2012, 37(1): 346-358.
- [14] 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.
- [15] GRASSIE S L, SHERIDAN N R. Modelling of a solar-operated absorption air conditioner system with refrigerant storage[J]. Solar Energy, 1977, 19(6): 691-700.
- [16] 师熙隆. 溴化锂结晶储能供热技术及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023. (SHI Xilong. Study on energy storage and heating technology and performance of lithium bromide crystal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.)
- [17] 翁立奎, 张叶龙, 姜琳, 等. 基于水合盐的热化学吸附储热技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6): 1729-1736. (WENG Likui, ZHANG Yelong, JIANG Lin, et al. Research progress on thermochemical adsorption heat storage technology based on hydrate[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(6): 1729-1736.)
- [18] 余楠, 王如竹, 陆紫生, 等. 三相吸收跨季节储能循环的理论分析[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(3): 423-427. (YU Nan, WANG Ruzhu, LU Zisheng, et al. Theoretical analysis of a three-phase absorption cycle for seasonal heat storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(3): 423-427.)
- [19] KRESE G, KOŽELJ R, BUTALA V, et al. Thermochemical seasonal solar energy storage for heating and cooling of buildings[J]. Energy and Buildings, 2018, 164: 239-253.
- [20] FUMEY B, WEBER R, GANTENBEIN P, et al. Development of a closed sorption heat storage prototype[J]. Energy Procedia, 2014, 46: 134-141.
- [21] 张晓灵. 吸收式蓄能与释能的动态特性及其性能改善方法[D]. 北京: 清华大学, 2014. (ZHANG Xiaoling. Dynamic characteristics of absorption energy storage and release and its performance improvement method[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.)
- [22] 王刚. 吸收循环中溴化锂溶液热力参数与制冷特性耦合研究与分析[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012. (WANG Gang. Study and analysis on coupling of thermodynamic parameters and refrigeration characteristics of lithium bromide solution in absorption cycle[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012.)
- [23] 贾明生. 溴化锂水溶液的几个主要物性参数计算方程[J]. 湛江海洋大学学报, 2002, 22(3): 52-58. (JIA Mingsheng. Several main calculating equations of properties parameter of LiBr-H<sub>2</sub>O[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2002, 22(3): 52-58.)
- [24] 李季桐, 王刚, 熊亚选, 等. 不同工质单效吸收式制冷系统的能量和焓分析[J]. 化工进展, 2023, 42(增刊1): 104-112. (LI Jitong, WANG Gang, XIONG Yaxuan, et al. Energy and exergy analysis of single-effect absorption refrigeration system with different refrigerants[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(Suppl. 1): 104-112.)
- [25] 程惠亭. NaOH水溶液焓的一个关联式[J]. 化学工程, 1991, 19(3): 78-79. (CHENG Huiting. A correlation of enthalpy of NaOH aqueous solution[J]. Chemical Engineering (China), 1991, 19(3): 78-79.)
- [26] 韩冰川. 基于溶液储能的远距离输运供能能量系统及其应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019. (HAN Bingchuan. Research on long-distance transportation energy supply system based on solution energy storage and its application[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.)
- [27] 李季桐. 用于三相蓄能的溴化锂蓄能特性实验及晶体表征[D]. 北京: 北京建筑大学, 2023. (LI Jitong. Experimental and crystal characterization of lithium bromide energy storage for three-phase energy storage[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023.)

(下转第66页)

- 16578-16586.
- [50] TSYBENKO A S, KURANOV B A, CHEPURNOI A D, et al. Thermal stress state of cryogenic high-pressure vessels during chilling and pressurization. Report no. 1. Method of calculation [J]. *Strength of Materials*, 1986, 18(1): 87-92.
- [51] FEDOROV V I, LUK'YANOVA É A. Filling and storage of cryogenic propellant components cooled below boiling point in rocket tanks at atmospheric pressure [J]. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2000, 36(9): 584-587.
- [52] ZHANG Chuanjia, ZHANG Qiyong, ZHU Zhigang, et al. Numerical simulation of thermal-structural behaviour of liquid helium tank during filling process [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 173: 112798.
- [53] ZHU Kang, LI Yanzhong, XU Mengjian, et al. Investigation of the chill-down behavior and thermal stress distribution of a cryogenic tank during the filling process [J]. *Physics Procedia*, 2015, 67: 342-347.
- [54] ZHU Kang, LI Yanzhong, MA Yuan, et al. Experimental study on cool down characteristics and thermal stress of cryogenic tank during LN<sub>2</sub> filling process [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130: 951-961.
- [55] ZHU Kang, LI Yanzhong, MA Yuan, et al. Influence of filling methods on the cool down performance and induced thermal stress distribution in cryogenic tank [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 141: 1009-1019.
- [56] 王鑫. 车载液氢气瓶强度与振动疲劳特性研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022. (WANG Xin. Study on strength and vibration fatigue characteristics of a vehicle-mounted liquid hydrogen cylinder [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.)
- [57] 扬帆, 张超, 张博超, 等. 大型液氢储罐内罐材料研究与应用进展 [J]. *太阳能学报*, 2023, 44(10): 557-563. (YANG Fan, ZHANG Chao, ZHANG Bochao, et al. Research and application progress of inner tank materials for large liquid hydrogen storage tanks [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(10): 557-563.)
- [58] 魏新. 16万方LNG储罐应力场与温度场耦合响应分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016. (WEI Xin. Coupling response analysis of stress field and temperature field for 160 000 m<sup>3</sup> LNG storage tank [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.)
- [59] PARK H, KIM J, BERGAN P G, et al. Structural design of flexible vacuum insulation system for large-scale LH<sub>2</sub> storage [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(92): 39179-39192.
- [60] DUAN Zhongdi, ZHU Yifeng, WANG Chenbiao, et al. Numerical and theoretical prediction of the thermodynamic response in marine LNG fuel tanks under sloshing conditions [J]. *Energy*, 2023, 270: 126935.

#### 通信作者简介

巨永林,男,教授,上海交通大学机械与动力工程学院,021-34206532,E-mail: yju@sjtu.edu.cn. 研究方向:液化天然气及液化氢气技术,低温传热及低温精馏技术。

#### About the corresponding author

Ju Yonglin, male, professor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 86-21-34206532, E-mail: yju@sjtu.edu.cn. Research fields: liquefied natural gas and liquefied hydrogen technology, cryogenic heat transfer and cryogenic distillation.

(上接第38页)

- [28] ALIBAKHSHI A. Enthalpy of vaporization, its temperature dependence and correlation with surface tension: a theoretical approach [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2017, 432: 62-69.
- [29] 史贤林. NaCl饱和的烧碱溶液的物性和汽、液平衡关联式 [J]. *氯碱工业*, 1996(3):5. (SHI Xianlin. Correlation between physical properties and vapor-liquid equilibrium of saturated caustic soda solution [J]. *Chlor-alkali Industry*, 1996(3):5.)

#### 通信作者简介

王刚,男,讲师,北京建筑大学环境与能源工程学院,15911066230,E-mail:wanggang@bucea.edu. 研究方向:吸收式热泵及热化学蓄能技术。

#### About the corresponding author

Wang Gang, male, lecturer, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 86-15911066230, E-mail: wanggang@bucea.edu.cn. Research fields: absorption heat pumps and thermochemical energy storage technology.