



## Thermophysical properties and corrosivity of $\text{CaCl}_2\text{--LiBr--LiNO}_3\text{--KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ working pair

Na LI<sup>1</sup>, Chunhuan LUO<sup>1,2</sup>, Qingquan SU<sup>1,2\*</sup>

1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Beijing Engineering Research Center for Energy Saving and Environmental Protection, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

**Abstract:** The new working pair of  $\text{CaCl}_2\text{--LiBr--LiNO}_3\text{--KNO}_3$  (mass ratio 16.2:2:2:1)/ $\text{H}_2\text{O}$  was systematically evaluated in terms of the crystallization temperature and the saturated vapor pressure. The corrosion rates of the carbon steel, 316L stainless steel and copper in  $\text{CaCl}_2\text{--LiBr--LiNO}_3\text{--KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  were measured with a weight loss method. The results showed that under the same refrigeration conditions, the temperature required for collecting solar energy or the generation temperature of  $\text{CaCl}_2\text{--LiBr--LiNO}_3\text{--KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  for a single-stage absorption refrigeration cycle decreases by  $6.2^\circ\text{C}$  comparing with  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ . The corrosion rates of 316L and copper are low enough for practical applications.

**Key words:** solar energy, absorption refrigeration, working pair, crystallization temperature, saturated vapor pressure

## $\text{CaCl}_2\text{--LiBr--LiNO}_3\text{--KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ 工质对的热物性和腐蚀性

李娜<sup>1</sup>, 罗春欢<sup>1,2</sup>, 苏庆泉<sup>1,2\*</sup>

1. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083

2. 北京科技大学节能与环保北京高校工程研究中心, 北京 100083

**摘要:** 提出  $\text{CaCl}_2\text{--LiBr--LiNO}_3\text{--KNO}_3$ (质量比 16.2:2:2:1)/ $\text{H}_2\text{O}$  新型工质对, 测定了其结晶温度和饱和蒸汽压, 并与  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  进行比较, 采用浸泡法测定了碳钢、316L 不锈钢和紫铜在  $\text{CaCl}_2\text{--LiBr--LiNO}_3\text{--KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  中的腐蚀速率。结果表明,  $\text{CaCl}_2\text{--LiBr--LiNO}_3\text{--KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  作为工质对用于太阳能单级吸收式制冷循环时, 在相同制冷工况下, 其太阳能集热温度比  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  工质对降低  $6.2^\circ\text{C}$ , 316L 不锈钢和紫铜的腐蚀性非常小, 可满足实际工程应用要求。

**关键词:** 太阳能; 吸收式制冷; 工质对; 结晶温度; 饱和蒸汽压

中图分类号: TB61+6 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2018)04-0764-05

### 1 前言

太阳能制冷是夏季太阳能热利用的理想方式<sup>[1-3]</sup>。太阳能吸收式制冷主要采用  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  工质对<sup>[4,5]</sup>, 单级  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  吸收式制冷循环所需发生温度达  $88.0^\circ\text{C}$ <sup>[6-8]</sup>, 目前广泛使用的平板式集热器或全玻璃真空管集热器难以满足需求<sup>[9]</sup>, 解决途径一是采用中高温太阳能集热

器, 二是采用两级吸收式制冷<sup>[10]</sup>。He 等<sup>[11]</sup> 分析了采用热管式真空管集热器的山东乳山 100 kW 单级太阳能吸收式空调系统的性能及经济性, 表明系统集热效率有了提升, 但由于热管式真空管的成本较高, 导致系统的初期投资成本增加; Florides 等<sup>[12]</sup>分析了采用 CPC 集热器的  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  吸收式制冷系统长期运行的经济性, 发现在相同制冷温度和制冷量下, 吸收式制冷系统的初投资

收稿: 2017-11-06, 修回: 2017-12-01, 网络发表: 2018-03-23, Received: 2017-11-06, Revised: 2017-12-01, Published online: 2018-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51506005); 中国博士后科学基金资助项目(编号: 2014M560049); 高校基本科研业务费资助项目(编号: FRF-BD-16-009A)

作者简介: 李娜(1986-), 女, 山西省临汾市人, 博士研究生, 动力工程及工程热物理专业, E-mail: 263603082@qq.com; 苏庆泉, 通讯联系人, Tel: 010-62333542, E-mail: suqingquan@ustb.edu.cn.

**引用格式:** 李娜, 罗春欢, 苏庆泉.  $\text{CaCl}_2\text{--LiBr--LiNO}_3\text{--KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  工质对的热物性和腐蚀性. 过程工程学报, 2018, 18(4): 764-768.  
Li N, Luo C H, Su Q Q. Thermophysical properties and corrosivity of  $\text{CaCl}_2\text{--LiBr--LiNO}_3\text{--KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  working pair (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(4): 764-768, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217382.

约是压缩式制冷系统的3倍,其中太阳能集热器子系统的成本高于吸收式制冷子系统;李戡洪等<sup>[13]</sup>对采用平板式集热器的广东江门市100 kW两级太阳能吸收式制冷空调系统的性能进行了分析,表明两级制冷系统热水利用温差大,可解决集热温度高的问题,但制冷系数(Coefficient of Performance, COP)非常低。综上,由于热管式真空管和聚光型等中高温集热器价格昂贵,而两级吸收式制冷系统结构复杂且COP低,因而太阳能制冷技术迄今未能实现工程应用。

针对以上问题,以降低发生温度为主要目标,本研究分别对 $\text{LiNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ 两种工质对的饱和溶液的饱和蒸汽压进行测定,并与 $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ 进行比较,发现 $\text{LiNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ 由于受各自饱和溶解度的限制,吸收能力不足,无法满足太阳能吸收式制冷的需求。与 $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ 相比, $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ 工质对具有有益于吸收式制冷循环的吸收特性,即在低于吸收器常用工作压力(0.872 kPa)的饱和蒸汽压下具有略高的吸收温度,而在高于发生器常用工作压力(6.290 kPa)的饱和蒸汽压下具有明显较低的吸收温度。对 $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ 工质对进一步研究发现, $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ 具有价格低廉、热力性能较好等优点,但在饱和溶解度(结晶温度)和腐蚀性方面有不足之处。为此,以提高饱和溶解度和吸收能力为目的,在 $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ 工质对的基础上添加一定的 $\text{LiBr}$ 、 $\text{LiNO}_3$ 和 $\text{KNO}_3$ 组成新的工质对,对其热物性和腐蚀性进行了研究。

## 2 实验

### 2.1 材料与试剂

无水 $\text{CaCl}_2$ (分析纯,纯度 $\geq 96.0\%$ ,国药集团北京试剂公司),无水 $\text{LiBr}$ 、无水 $\text{LiNO}_3$ 和 $\text{NaCl}$ (纯度 $\geq 99.5\%$ ,优级纯,天津津科化学试剂公司), $\text{KNO}_3$ (纯度 $\geq 99.0\%$ ,优级纯,国药集团北京试剂公司)。实验用超纯水电阻率为 $18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ (常温 $25.0^\circ\text{C}$ )。

### 2.2 实验设备与方法

结晶温度测定采用动态变温法<sup>[14]</sup>。测定装置主要由SYP玻璃恒温水浴(河南予华仪器有限公司)、PL4002精密天平(美国Mettler Toledo公司)、锥形瓶和支架组成。恒温水浴变温幅度 $\leq 0.5^\circ\text{C}$ 时所测晶体析出温度即为结晶温度。为验证实验方法的有效性,对60.0wt% $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ 溶液的结晶温度进行测定并与文献值<sup>[15]</sup>比较,标准不确定度(即测定值与文献值相比不能被肯定的程度)为 $\pm 2.0^\circ\text{C}$ 。

饱和蒸汽压测定采用静态法<sup>[16]</sup>。测定装置主要由DKU-30恒温循环器(北京博医康实验仪器有限公司)、

高压釜、Pt-100铂电阻(上海铸江机电设备有限公司)、TRP-24真空泵(北仪优成真空技术有限公司)、真空阀、磁力搅拌器(河南予华仪器有限公司)、MIK-P3000精密数字绝对压力表(测定范围0~20 kPa,西安奥信自动化仪表有限责任公司)和AX-110精密数字绝对压力表(测定范围0~110 kPa,西安奥信自动化仪表有限责任公司)组成。将待测溶液放入高压釜后抽真空,在给定温度下达到气液平衡时记录绝压表读数。为验证实验方法的有效性,测定 $10.0\sim 90.0^\circ\text{C}$ 下纯水的饱和蒸汽压并与文献值<sup>[17]</sup>比较,相对标准不确定度为 $\pm 3.0\%$ 。

根据吸收式热泵在工程应用中的实际工况,采用浸泡失重法<sup>[18]</sup>测定碳钢、紫铜和316L不锈钢在吸收溶液中的腐蚀速率。测定装置主要由高压釜、BSA224S分析天平(德国赛多利斯公司)、Pt-100铂电阻(上海铸江机电设备有限公司)、YB-150真空压力表(北京布莱迪仪器仪表有限公司)、TRP-24真空泵(北仪优成真空技术有限公司)和恒温铝槽组成。

## 3 结果与讨论

### 3.1 结晶温度

为研究 $\text{LiBr}$ 、 $\text{LiNO}_3$ 和 $\text{KNO}_3$ 对 $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ 结晶温度的影响,对 $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ 工质对( $\text{CaCl}_2$  56.3~85.2 g,  $\text{LiBr}$ 和 $\text{LiNO}_3$ 各10.0 g,  $\text{KNO}_3$  5.0 g,  $\text{H}_2\text{O}$  75.0 g)溶液的结晶温度进行了测定,并与 $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ 溶液的结晶温度及文献值<sup>[19]</sup>比较,结果如图1所示,测定值与文献值的平均绝对误差为0.62%。与 $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ 溶液相比,五元工质对的结晶温度较低,表明添加一定量 $\text{LiBr}$ 、 $\text{LiNO}_3$ 和 $\text{KNO}_3$ 有助于降低 $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ 溶液的结晶温度。

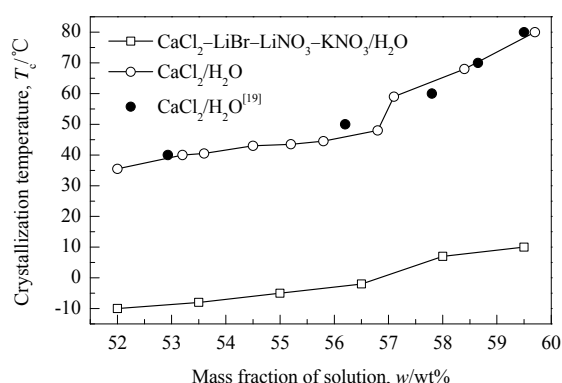


图1  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$ 溶液和新工质对对溶液的结晶温度  
Fig.1 Crystallization temperatures of  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  and new working pair

### 3.2 饱和蒸汽压

通过对 $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$ 溶液(质量比

1:10:10:5:75)的饱和蒸汽压进行测定,得出在吸收式制冷循环常用吸收温度 37.0℃、吸收压力 0.872 kPa 条件下,总溶液含量为 58.5wt%,其中 CaCl<sub>2</sub> 含量为 44.7wt%。因此确定含量 58.5wt% 的 CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O 溶液为单级太阳能吸收式制冷循环最佳吸收溶液。为给吸收式制冷循环提供设计参数,测定了 30.0wt%~65.0wt%含量下该溶液的饱和蒸汽压,结果见表 1。

表 1 不同含量的 CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub> (mass ratio 16.2:2:2:1)/H<sub>2</sub>O 溶液的饱和蒸汽压  
Table 1 Saturated vapor pressure (*p*) of CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>(16.2:2:2:1)/H<sub>2</sub>O solutions of different mass fractions at different temperatures (*T*)

Mass fraction of solution, ω/wt%													
30.0		35.0		40.0		45.0		50.0		55.0		60.0	
<i>T</i> /℃	<i>p</i> /kPa	<i>T</i> /℃	<i>p</i> /kPa	<i>T</i> /℃	<i>p</i> /kPa	<i>T</i> /℃	<i>p</i> /kPa	<i>T</i> /℃	<i>p</i> /kPa	<i>T</i> /℃	<i>p</i> /kPa	<i>T</i> /℃	<i>p</i> /kPa
20.0	1.050	20.0	0.879	20.0	0.707	20.0	0.536	20.0	0.418	20.0	0.332	20.0	0.236
25.0	1.563	25.0	1.291	25.0	1.058	25.0	0.787	25.5	0.626	27.1	0.561	25.0	0.343
30.0	2.234	30.0	1.864	30.0	1.534	30.0	1.164	30.1	0.881	29.9	0.683	30.0	0.498
35.0	3.226	35.0	2.637	36.1	2.349	35.2	1.664	35.8	1.332	35.4	0.971	35.0	0.701
40.0	4.506	40.0	3.733	41.1	3.319	40.5	2.447	40.3	1.809	40.0	1.349	39.9	0.963
45.0	6.161	45.0	5.132	45.8	4.471	45.2	3.337	44.9	2.484	45.2	1.891	44.6	1.322
50.0	8.366	50.0	6.918	50.0	5.828	50.0	4.469	50.1	3.475	50.1	2.631	49.9	1.836
55.0	11.250	55.0	9.123	54.9	7.727	55.2	6.065	55.5	4.819	55.0	3.545	55.5	2.566
60.0	14.339	60.0	11.728	60.0	9.853	60.0	7.978	60.0	6.185	60.1	4.609	60.3	3.323
65.0	18.194	65.0	15.057	65.0	12.656	65.1	10.254	65.5	8.120	65.0	5.981	65.0	4.223
70.0	22.421	70.0	18.941	71.1	16.841	70.0	12.900	70.0	9.985	70.3	7.776	69.9	5.450
75.0	27.309	75.0	23.462	75.0	19.688	75.2	16.374	75.7	13.031	75.0	9.753	75.2	7.090
80.0	33.955	80.0	28.900	80.5	24.489	80.0	20.077	80.0	15.650	80.2	12.353	80.1	8.908
85.0	42.150	85.0	34.783	85.0	29.441	84.9	24.558	85.0	19.360	85.0	15.366	84.9	11.054
90.0	50.194	90.0	41.964	90.0	35.758	90.0	30.011	90.0	23.931	90.0	19.126	89.8	13.765
95.0	59.256	95.0	49.723	95.0	42.950	95.4	37.281	95.0	29.628	95.0	23.010	94.9	17.031
100.0	71.920	100.0	60.571	100.2	52.442	100.0	44.681	100.0	36.817	100.1	27.914	99.8	21.215

Note: Standard uncertainties  $u(T)=\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $u(w)=\pm 0.3\%$ , and the relative standard uncertainties  $u_r(p)=\pm 3.0\%$ .

将以上数据用安托万方程拟合,将其表达成温度和含量的函数<sup>[20]</sup>:

$$\lg p = \sum_{i=0}^4 [A_i + B_i / (T - C_i)] w^i,$$

式中,  $p$  为溶液的饱和蒸汽压(kPa),  $T$  为温度(℃),  $w$  为溶液含量(wt%),  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  为回归参数,采用最小二乘法确定,  $i=0, 1, 2, 3, 4$  为序列号。饱和蒸汽压测定值与拟合值的平均绝对相对偏差(Average absolute relative deviation, AARD)由式(2)计算,结果见表 2。

$$\text{AARD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(p_{\text{exp}} - p_{\text{cal}}) / p_{\text{exp}}|$$

式中,  $N$  为测点数,  $p_{\text{exp}}$  为饱和蒸汽压测定值,  $p_{\text{cal}}$  为计算值。

表 2 CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O 饱和蒸汽压的回归参数和平均绝对相对偏差

Table 2 Regression parameters and AARD for CaCl <sub>2</sub> -LiBr-LiNO <sub>3</sub> -KNO <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O				
<i>i</i>	<i>A<sub>i</sub></i>	<i>B<sub>i</sub></i>	<i>C<sub>i</sub></i>	AARD/%
0	5.322×10 <sup>0</sup>	-5.532×10 <sup>2</sup>	-103.4	1.44
1	-5.168×10 <sup>-2</sup>	3.601×10 <sup>-6</sup>	90.06	
2	1.417×10 <sup>-3</sup>	1.630×10 <sup>-6</sup>	40.79	
3	-1.279×10 <sup>-5</sup>	-1.915×10 <sup>-3</sup>	-143.3	
4	5.740×10 <sup>-8</sup>	4.548×10 <sup>-6</sup>	-34.13	

图 2 为按式(1)计算的饱和蒸汽压和测定结果。从图可以看出,测定值与拟合值吻合良好,表明由式(1)可准

确得出给定温度和含量下溶液的饱和蒸汽压。

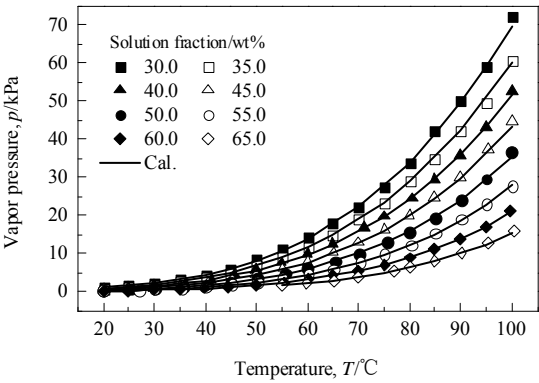


图 2 CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>(质量比 16.2:2:2:1)/H<sub>2</sub>O 溶液的饱和蒸汽压

Fig.2 Saturated vapor pressure of CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub> (mass ratio16.2:2:2:1)/H<sub>2</sub>O solution

图 3 为相同饱和蒸汽压和温度下, CaCl<sub>2</sub>-LiBr-LiNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O 与 LiBr/H<sub>2</sub>O 吸收特性的比较。由图可见,当饱和蒸汽压低于 0.872 kPa 时,五元工质对的吸收温度与 LiBr/H<sub>2</sub>O 基本相同;而当饱和蒸汽压高于 6.290 kPa 时,前者的吸收温度明显低于 LiBr/H<sub>2</sub>O。显然,对于制冷循环,五元工质对的吸收特性优于 LiBr/H<sub>2</sub>O。当制取 7.0℃冷量(工程应用中一般是按制取 7.0℃冷量来计算)、放气范围为 3.0%(浓溶液和稀溶液

的浓度差,通常取 2%~5%(溶液含量为 61.5wt%),且发生器饱和蒸汽压为 6.290 kPa 时,根据式(1)得出五元工质对所需的发生温度为 74.8℃,即所需的太阳能集热温度为 81.8℃,比相同制冷工况下的  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  低 6.2℃. 这为太阳能集热子系统采用普通平板式集热器或全玻璃真空管式集热器创造了条件,可大幅降低初期投资成本,十分有利于用于单级太阳能吸收式制冷系统工程.

另外,采用  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  为工质对时,总含量为 61.5wt% 的溶液的结晶温度为 15.0℃,比发生器温度低 59.8℃,比吸收器温度低 22.0℃,因而运行时不会结晶.

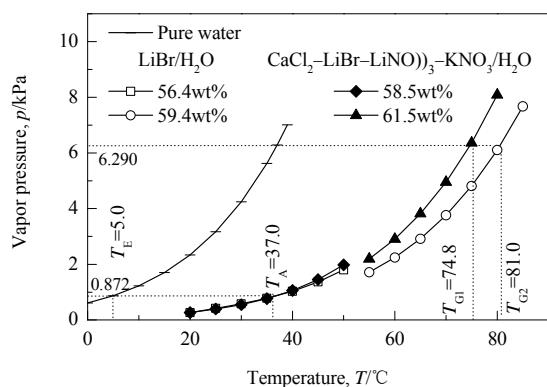


图3 不同含量的  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  溶液和  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  溶液的吸热特性

Fig.3 Absorption characteristics of water,  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  solutions at different mass fractions

### 3.3 腐蚀性

为研究  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  对吸收式热泵结构材料和换热材料的腐蚀性,将碳钢、316L 不锈钢和紫铜在 80.0℃、pH=9.7 条件下,在 61.5wt% 的溶液中浸泡 200 h,测定腐蚀速率,并与在 59.4wt%  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  溶液中的腐蚀速率进行比较,结果如图 4 所示.从图可以看出,碳钢在 61.5wt% 的  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  中的腐蚀速率为 40.98  $\mu\text{m}/\text{a}$ ,大于实际工程应用要求;316L 不锈钢的腐蚀速率仅为 0.68  $\mu\text{m}/\text{a}$ ,且无局部腐蚀;紫铜的腐蚀速率仅为 0.29  $\mu\text{m}/\text{a}$ ,小于相同条件下在 59.4wt%  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  溶液中的腐蚀速率.可见,316L 不锈钢作为结构材料、紫铜作为换热材料完全能够满足实际工程应用的要求.

## 4 结论

在  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  工质对的基础上添加一定量  $\text{LiBr}$ ,  $\text{LiNO}_3$  和  $\text{KNO}_3$  组成新的五元工质对,对其热物性和腐蚀性进行了研究,得出以下结论:

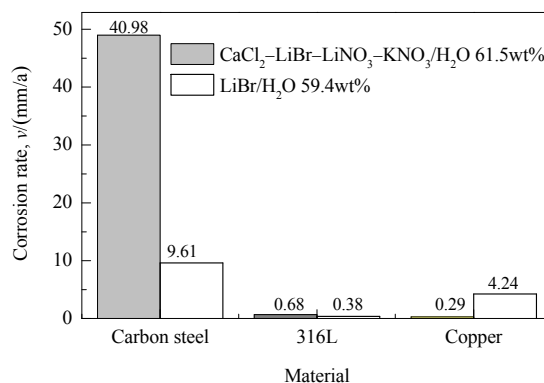


图4 碳钢、316L 不锈钢和紫铜在  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  溶液中的腐蚀速率

Fig.4 Corrosion rates of carbon steel, 316L stainless steel and copper  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$

(1) 作为吸收式制冷循环的工质对,  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  具有优于  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  的吸收特性,当  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  具有相同的吸收器饱和蒸汽压、吸收温度及发生器饱和蒸汽压时,  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  的发生器吸收温度(发生温度)比  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  低.

(2) 在  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  中添加  $\text{LiBr}$ ,  $\text{LiNO}_3$  和  $\text{KNO}_3$  明显降低了结晶温度,提高了吸收剂的饱和溶解度,从而提高了溶液的吸收能力.

(3)  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-KNO}_3(16.2:2:2:1, \text{wt.})/\text{H}_2\text{O}$  作为太阳能单级吸收式制冷循环的工质对制取 7.0℃ 冷量,所需太阳能集热温度为 81.8℃,比相同工况下用  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  时低 6.2℃. 这是因为前者的吸收特性优于  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$ .

(4) 80.0℃ 下 61.5wt% 的  $\text{CaCl}_2\text{-LiBr-LiNO}_3\text{-KNO}_3/\text{H}_2\text{O}$  吸收溶液对 316L 不锈钢和紫铜的腐蚀速率分别为 0.68 和 0.29  $\mu\text{m}/\text{a}$ ,完全能满足工程应用要求.

### 参考文献

- [1] Xu Z Y, Wang R Z. Absorption refrigeration cycles: categorized based on the cycle construction [J]. Int. J. Refrig., 2016, 62: 114-136.
- [2] 杨俊斌, 耿世彬. 太阳能空调的技术现状与发展 [J]. 洁净与空调技术, 2017, 1: 95-99.  
Yang J B, Geng S B. Current situation and development of solar air-conditioning technology [J]. Contamination Control Air-conditioning Technology, 2017, 1: 95-99.
- [3] Boonrit P. Performance test of a small size  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  absorption chiller [J]. Energy Procedia, 2014, 56: 487-497.
- [4] Li Z Y, Yue J, Liu J P. Thermodynamic study of a novel solar  $\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$  absorption chiller [J]. Energy Build., 2016, 133: 565-576.
- [5] Grazia L. Solar systems integrated with absorption heat pumps and thermal energy storages: state of art [J]. Renewable Sustainable Energy Rev., 2017, 70: 492-505.
- [6] Xu Z Y, Wang R Z, Wang H B. Experimental evaluation of a

- variable effect LiBr-water absorption chiller designed for high-efficient solar cooling system [J]. *Int. J. Refrig.*, 2015, 59: 135–143.
- [7] N'Tsoukpoe K E, Perier-muzet M, Le Pierre's N, et al. Thermodynamic study of a LiBr-H<sub>2</sub>O absorption process for solar heat storage with crystallisation of the solution [J]. *Sol. Energy*, 2014, 104: 2–15.
- [8] Zheng D X, Li D, Huang W J, et al. A review of imidazolium ionic liquids research and development towards working pair of absorption cycle [J]. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2014, 37: 47–68.
- [9] 王如竹, 代彦军. 太阳能制冷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 138.
- Wang R Z, Dai Y J. Solar energy refrigeration [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 138.
- [10] Ventas R, Lecuons A, Vereda C, et al. Two-stage double-effect ammonia/lithium nitrate absorption cycle [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2016, 94: 228–237.
- [11] He Z N, Ge H C, Jiang F L, et al. A comparison of optical performance between evacuated collector tubes with flat and semicylindric absorbers [J]. *Sol. Energy*, 1997, 60: 109–117.
- [12] Florides G A, Kalogirou S A, Tassou S A, et al. Modelling and simulation of an absorption solar cooling system for cyprus [J]. *Sol. Energy*, 2002, 72: 43–51.
- [13] 李戡洪, 马伟斌. 100 kW 太阳能制冷空调系统 [J]. *太阳能学报*, 1999, 20(3): 239–243.
- Li J H, Ma W B. 100 kW solar refrigeration air conditioning system [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 1999, 20(3): 239–243.
- [14] 罗春欢, 张渊, 苏庆泉. LiBr-[BMIM]Cl/H<sub>2</sub>O 工质对的饱和蒸汽压、结晶温度和腐蚀 [J]. *化工学报*, 2016, 67(4): 1110–1116.
- Luo C H, Zhang Y, Su Q Q. Saturated vapor pressure, crystallization temperature and corrosion of LiBr-[BMIM]Cl/H<sub>2</sub>O working fluid [J]. *CIESC Journal*, 2016, 67(4): 1110–1116.
- [15] 陈东, 谢继红. 热泵技术及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 197.
- Chen D, Xie J H. The technology and application of heat pump [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 197.
- [16] Luo C H, Su Q Q, Mi W L. Solubilities, vapor pressures, densities, viscosities, and specific heat capacities of the LiNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O binary system [J]. *J. Chem. Eng. Data*, 2013, 58: 625–633.
- [17] 刘光启, 马连湘, 刘杰. 化学化工物性数据手册: 无机卷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 17.
- Liu G Q, Ma L X, Liu J. Chemical and chemical properties data sheet: inorganic volumes [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 17.
- [18] Luo C H, Su Q Q. Corrosion of carbon steel in concentrated LiNO<sub>3</sub> solution at high temperature [J]. *Corros. Sci.*, 2013, 74: 290–296.
- [19] Atherton S. Solubilities of inorganic and organic compounds [M]. New York: D. Van Nostrand Company Inc., 1953: 280.
- [20] Verevkin S, Safarov J, Bich E, et al. Study of vapour pressure of lithium nitrate solutions in ethanol [J]. *J. Chem. Thermodyn.*, 2006, 38: 611–616.