

文章编号: 1671-6612 (2025) 04-483-10

吸收式制冷不同工质对发生过程传质特性研究

栗军霞 孙亮亮 袁艳平

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 针对低于 80℃ 的热源驱动单效吸收式制冷循环, 对比分析了甲酸钾溶液和溴化钙溶液的热物性数据, 同时将其与溴化锂溶液进行比较; 搭建发生-冷凝过程实验台, 研究甲酸钾溶液和溴化钙溶液在发生过程的传质特性, 并分析超声对制冷工质对发生过程传质特性的强化作用。结果表明: 甲酸钾溶液和溴化钙溶液的饱和蒸气压和导热系数比溴化锂溶液更大, 使用甲酸钾溶液和溴化钙溶液能够利用更低的热源温度; 在同一热源温度下, 饱和蒸气压更大的甲酸钾溶液越能利用低温热源产生更多的制冷剂水; 采用超声装置以后, 超声波对于传质过程有一定的强化作用, 超声强化率可达 17%~43%; 当超声功率小于 800W 时, 功率越大, 对发生性能的提升效果越好。

【关键词】 吸收式制冷; 工质对; 强化传质; 超声波

中图分类号 TB61+6 文献标志码 A

Study on Mass Transfer of Different Working Fluids to the Process of Absorption Refrigeration

Su Junxia Sun Liangliang Yuan Yanping

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Aiming at a single effect absorption refrigeration cycle driven by a heat source below 80℃, The thermophysical property data of potassium formate solution and calcium bromide solution were compared and analyzed, and at the same time, they were compared with lithium bromide solution; an experimental platform for the generation-condensation process was set up to study the mass transfer characteristics of potassium formate solution and calcium bromide solution during the generation-condensation process, and the strengthening effect of ultrasound on the mass transfer characteristics of the refrigeration working medium during the occurrence process was analyzed. The results show that using potassium formate solution and calcium bromide solution can obviously reduce the temperature of starting heat source in the process of occurrence. Under the same heat source temperature, the potassium formate solution with higher saturated vapor pressure can generate more coolant water by low temperature heat source. After the use of ultrasonic device, ultrasonic has a certain strengthening effect on the mass transfer process, and the lower the heat source temperature, the more obvious the strengthening effect, The ultrasonic enhancement rate can reach 17% to 43%; The higher the ultrasonic power is, the greater the effect of improving the coolant water production.

【Keywords】 Absorption refrigeration; Working pair; Enhanced mass transfer; Ultrasonic wave

0 引言

随着能源问题的日益突出, 能源的消费总量越来越多, 而工业余热作为一次能源在生产过程中所

产生的二次能源, 约占其燃料消耗总量的 17%~67%^[1], 利用余热回收技术将这些能源加以利用, 不仅可以降低能源消耗和生产成本, 还能减少

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (52038009)

作者简介: 栗军霞 (2000.12-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: su18229588716@163.com

通讯作者: 孙亮亮 (1982.04-), 女, 博士, 副教授, E-mail: sunliangliang@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-06-04

对环境的负面影响。目前, 余热回收主要以冶金、石化等行业生产过程中产生的高温显热为主, 占比较大的中低温余热 ($60^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$) 由于换热设备庞大、回收温差小、经济效益低等原因依旧需要进一步发展^[2,3]。而吸收式制冷技术作为能够利用低品位热源、可再生热源所驱动的一种制冷技术, 可以面向大型工业废热回收或是小型分散式制冷的低碳能源利用^[4-6], 但是吸收式制冷中常用的单效吸收式制冷机所需要的发生温度通常在 85°C 以上, 对 85°C 以下的中低温热源利用率较低。

对于吸收式循环来说, 吸收式工质对是其核心部分之一, 工质对的选择和优化一直都是吸收式系统发展的重要影响因素。目前, 商业所使用最广的是 $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ 和 $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ 工质对体系。但是传统的溴化锂-水溶液存在着诸多不利因素: 在高真空环境下具有腐蚀性^[7]、易结晶^[8]、难以利用中低温热源^[9]等问题。氨-水溶液的主要缺点有: 氨、水的沸点相差较小, 需要额外的精馏设备, 装置难以小型化^[10]、氨具有较强的毒性和爆炸性等。因此, 基于传统工质对的改进和新型工质对体系的开发, 对于进一步利用中低温热源的吸收式制冷系统有着重大意义。

近年来, 对于吸收式制冷循环性能系数的提升有着诸多研究, 主要是集中在以下几个方向: (1) 改变工质对的种类, 找寻替代的工质对。例如向 $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ 溶液中加入锂盐^[11-14]或是有机盐物质^[15]组成多元溶液, 从而改善溴化锂-水溶液的突出缺陷, 但是腐蚀性和结晶问题难以解决; 采用离子液体^[16-19]作为吸收剂, 这样的溶液不存在结晶问题, 但是大部分效率较差, 且成本更高; 采用有机溶剂作为吸收剂^[20-22], 但是工质对体系制冷效率低、吸收性能欠佳。综合来看, 选用的工质对应具有较高的蒸发潜热、较好的化学稳定性且易获得、溶液比热低、吸收剂的吸收能力强等特点^[23]。而甲酸钾溶液^[24,25]和溴化钙溶液^[26]在已有的研究中显示出其相比较溴化锂溶液更小的腐蚀性、更好的吸湿性能、更低的比热和更高的导热系数, 这都表明甲酸钾溶液和溴化钙溶液可以作为吸收式制冷循环中溴化锂溶液的替代工质。(2) 优化吸收式制冷系统循环形式。根据不同的热源或是制冷需求提出不同的循环形式, 如半效循环^[27]、两级循环^[28]、双效循环^[29]、三效循环^[30]、1.n 效循环^[31]、压缩-吸收

式负荷制冷循环^[32]、双效应吸收-蒸汽压缩级联制冷循环^[33]等; 或是在循环中增加部件设备, 主要集中在对吸收式制冷系统中不同位置增加压缩机^[34,35]和喷射器^[36]。(3) 提高吸收式制冷机组强化传热传质的研究。在吸收式循环中, 传热传质发生/吸收过程主要是在发生器和吸收器中, 提高这两个部件的传热传质可以同步提高整个系统性能。目前, 针对这二者的提升主要有采用高效传热管^[37]。针对发生器中的发生过程, 超声波强化传热作为一种主动式强化传热技术, 可以明显提高针对低温差的传热效果, 对于利用中低温热源的吸收式制冷循环是一个有效的提升途径。Lemlich 等人^[38]将超声波技术应用于纯水强化传热系数进行实验研究, 结果表明超声强化传热效率可达 51%。张佳等^[39]研究了频率是 28kHz 的超声波对沸腾传热的影响, 证明空化效应是强化传热的一个主要原因。Zheng 等^[40]针对溴化锂溶液吸收式循环体系, 对比分析了不同结构换热管在超声作用下的传热性能差异, 发现翅片管内的强化传热相较于其他更高, 当超声频率为 21kHz 时, 翅片管内的强化传热可提高 17.85%, 然而, 大于 100kHz 的高频声波较少应用于强化传热, 随着超声频率的增加, 气泡崩溃次数逐渐减小并随着浮力逸出, 即稳态超声空化过程。针对吸收器中的吸收过程, 多是直接改变吸收器的形式^[41], 例如鼓泡吸收器、降膜吸收器、喷洒吸收器; 或是采用膜反转板式吸收器^[42], 采用机械振动强化吸收性能^[43]。

针对吸收式制冷技术在低温热源加热下的蒸发问题, 以降低发生温度为主要目的, 本文首先对甲酸钾溶液和溴化钙溶液的热物性 (饱和蒸汽压、比热容、导热系数和密度)、成本和腐蚀性进行分析并与溴化锂溶液进行对比, 然后对甲酸钾溶液和溴化钙溶液两种工质对在发生-冷凝过程中的传质特性进行研究; 同时, 在发生器中加入超声装置, 通过超声波对气泡产生过程的空化效应来促进制冷剂水的传质过程, 为后续的工质对应用和发展提供基础数据。

1 实验装置和实验过程

1.1 实验装置

在单效吸收式制冷循环中, 低品位热源驱动的传质阻力主要出现在发生器内部稀溶液沸腾产生

制冷剂水蒸汽的过程中，对吸收式循环来说，冷剂水的产生过程实际上是一个蒸馏过程，这一过程的快慢直接影响到系统的整体效率，因此，提高冷剂水生成速率可以有效提高系统的制冷效率。

本实验的重点在于研究冷剂水在发生器内的分离效果。基于此，实验装置只保留了吸收式循环中的发生器和冷凝器两个核心部件，分别采用双层玻璃发生器和冷凝管进行替代，整个实验装置如图 1 所示。该装置主要由玻璃发生器、冷凝管、冷剂水收集量筒、高低温水循环器以及电子秤组成。玻璃发生器的有效容积设计为 500mL，其顶部配置加液漏斗结构可在真空环境下完成工质的定量注入。设备采用双层玻璃复合结构设计，中间夹层引入高低温水循环系统输送的热水，通过此方式模拟热源加热功能。当溶液受热汽化形成水蒸气后，经发生器顶部导流装置进入配套冷凝管，在冷却水循环作用下完成冷凝过程，最终由量筒系统进行收集。在吸收式循环的发生-冷凝阶段，冷剂水的收集速率是衡量参与制冷工质量的重要指标，且冷剂水的生成速率与系统的制冷性能呈正相关，即冷剂水生成速率越快，系统制冷效果越好。

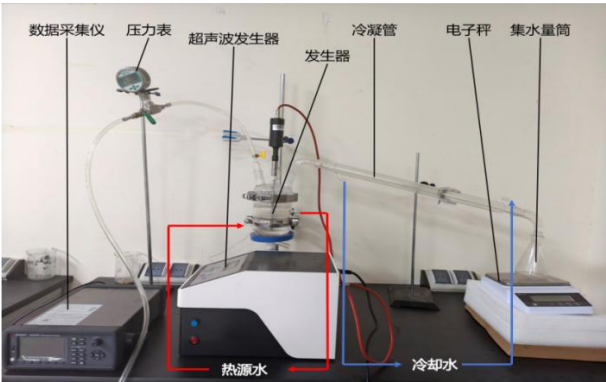


图 1 发生-冷凝过程实验装置

Fig.1 Experimental device for the generation-condensation process

超声波强化发生过程实验台搭建主要是在发生过程实验台的基础上增加了一个超声波换能器，在发生器的顶端插入一个超声探头，使用超声波发生器控制超声振子的功率。

发生器中溶液的温度由 T 型热电偶测量，冷剂水收集质量由电子称称量，发生器内的压力由真空压力表测量。实验中所用仪器具体参数如表 1 所示。

表 1 仪器具体参数

Table 1 Specific parameters of the instrument		
设备名称	范围	精度
超声波发生器	功率范围：0~900W	——
压力表	-100kPa~100kPa	0.5 级
电子称	最大称量：1000g	0.01g
T 型热电偶	-200℃~260℃	±0.5%

1.2 实验所用工质对

在发生实验中使用的工质对分别是 30%、40%、50%浓度的甲酸钾溶液和溴化钙溶液。将甲酸钾和溴化钙两种物质的基础物性同溴化锂溶液的基础物性^[44]对比如表 2 所示，成本数据来源于试剂网查询。

表 2 基础物性参数表

Table 2 Basic physical property parameters					
物质	相对分子质量	沸点	比热容	相对密度	成本
甲酸钾	84.12	253℃	2.42J/(g·K)	1.9	48.9 元/100g
溴化钙	199.9	806℃	0.921J/(g·K)	3.353	115.9 元/100g
溴化锂	86.85	1265℃	2J/(g·K)	3.464	123.9 元/100g

从 316L 不锈钢在上述三种工质对溶液中对发生腐蚀的可能性和腐蚀倾向性来说，甲酸钾溶液和溴化钙溶液的表现均优于溴化锂溶液^[45,46]。三种工质对溶液呈现碱性，从热力学角度和腐蚀动力学角度来看，甲酸钾溶液的腐蚀性小于溴化钙溶液。

1.2.1 饱和蒸汽压

针对饱和蒸汽压数据，选择动态沸点法，通过实验系统测定了甲酸钾和溴化钙的饱和蒸汽压，并将其同溴化锂溶液的饱和蒸汽压数据^[47]进行对比，结果如图 2 所示。

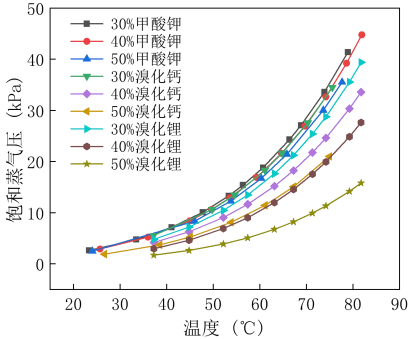


图 2 不同工质对饱和蒸汽压随温度的变化

Fig.2 Changes of saturated vapor pressure of different working medium with temperature

在相同的浓度下,溶液饱和蒸气压随温度的升高而增大,随浓度的增大而减小;同浓度下的甲酸钾溶液的饱和蒸气压比氯化钙溶液更大,氯化锂溶液得饱和蒸气压最小。本文中实验时均使用质量分数表示浓度,将其换算成摩尔分数,在相同摩尔分数下,甲酸钾溶液浓度和氯化钙溶液质量分数之比为 84.12:199.9,很显然,同摩尔分数的甲酸钾溶液的饱和蒸气压大于氯化钙溶液。对于氯化钙溶液来说,钙离子是一个二价离子,而甲酸钾溶液中的钾离子是一个单价离子,二价离子的电荷密度更高,与水分子的相互作用也越强;且氯化钙溶液中存在氯化钙会解离成一个钙离子和两个氯离子,而甲酸钾解离成一个钾离子和一个甲酸根离子,离子对数量越多,与水分子形成的离子-偶极作用越大,从而使得甲酸钾溶液的饱和蒸气压比氯化钙更大。

这意味着在同发生压力下,同浓度的甲酸钾溶液比氯化钙溶液的解析性能更强,但是甲酸钾溶液与水的压差比氯化钙溶液更小,对于吸收蒸汽性能来说,甲酸钾溶液较弱。

1.2.2 比热容

使用差示扫描量热仪,对不同浓度的甲酸钾溶液和氯化钙溶液的比热容数据进行测量,并将其与氯化锂溶液得比热容数据^[47]进行对比,结果如图 3 所示。

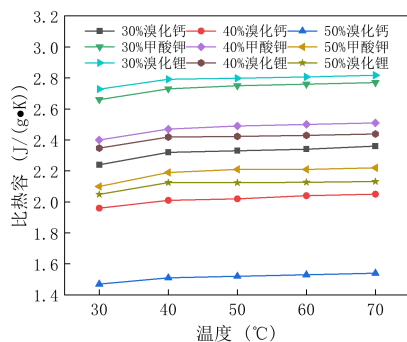


图 3 不同工质对比热容随温度的变化

Fig.3 Change of specific heat capacity of different working medium with temperature

通过图 3 可以看出,当浓度一定时,溶液的比热容随温度升高而增大;温度一定时,随着溶液浓度的提高,比热容逐渐减小,溶剂(水)的比热容大于溶质(甲酸钾/氯化钙)的比热容,所以当溶液浓度增加以后,整体溶液的比热容会更趋向于溶质的比热容,导致比热容减小;由于甲酸钾溶液中有有机部分甲酸根离子的比热容比无机离子的大,所以在相同浓度下,甲酸钾溶液的比热容相对较大。

对于沸腾蒸发过程中,比热容越小的溶液在达到沸点或者说饱和状态点的时候所需要的热量就越少,所以更有利于在中低温热源下使用。

1.2.3 导热系数

使用导热系数仪测量不同浓度的工质对对应的导热系数并将其与氯化锂溶液^[47]进行对比,如图 4 所示。

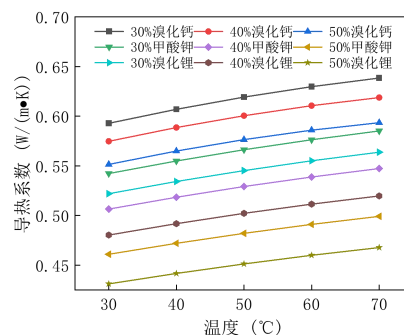


图 4 不同工质对导热系数随温度的变化

Fig.4 Changes of thermal conductivity of different working medium with temperature

通过图 4 可以看出,当浓度一定时,导热系数随着温度的升高而升高,同一工质对的导热系数随着浓度的升高而减小。随着温度的升高,溶液粘度降低,分子阻力减小,溶液中分子运动加剧,分子间的碰撞频率增大,这有利于热量的传递,因而导热系数随温度升高而升高。同浓度下的氯化钙溶液导热系数比甲酸钾溶液更高,氯化钙溶液中解离的钙离子电荷比甲酸钾溶液中的钾离子电荷高,其离子间相互作用更强,有利于提高导热系数。

1.2.4 密度

使用振动管密度计来测量工质对溶液所对应的密度,将其与氯化锂溶液的数据^[48]进行对比,如图 5 所示。

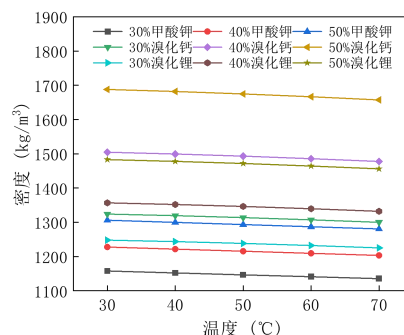


图 5 不同工质对密度随温度的变化

Fig.5 Change of density of different working medium with temperature

通过图5可以看出,溶液工质对的密度均随着温度的升高而有所下降,随着浓度的升高而增大。当温度升高时,溶液中的离子运动增强,分子间距离增大,因此溶液的体积膨胀,从而导致密度下降;当浓度升高时,溶质相较于溶剂增多,而溶质的密度比水分子密度大,因此随着溶液浓度增大,其整体密度也会增加。相同温度和浓度下,溴化钙溶液的密度比甲酸钾溶液的密度更大,因为溴化钙的摩尔质量大于甲酸钾的摩尔质量,在形成的水溶液中,溶质的摩尔质量越大,密度就会越大。

1.3 系统性能评价

本实验通过对比实验中所测得到的制冷剂水量来表征传质效果的强弱。

通过采用发生速率来评价溶液发生过程制冷剂水量增长速率,计算公式如式(1)所示:

$$y_t = \frac{\Delta m}{t} \quad (1)$$

式中: y_t 为发生速率; Δm 为后一次读数与此次读数的差值, g; t 为两次读取制冷剂水收集量时间间隔的时间, min, 本文为每五分钟读取一次制冷剂水收集量, 所以取 $t=5\text{min}$ 。

通过公式(2)计算得到超声强化率来客观评价超声强化效果的优劣:

$$E_t = \frac{m_{\text{with}} - m_{\text{without}}}{m_{\text{without}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_{with} 表示有超声作用下的制冷剂水收集量; m_{without} 表示无超声作用下的制冷剂水收集量。

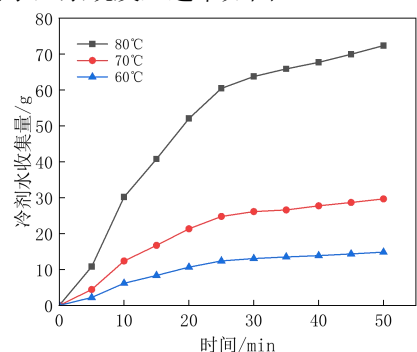
2 实验结果和讨论

在本实验过程中, 冷却水温度为 25°C , 测试了不同温度对于不同浓度的工质对蒸发传质过程的影响来进行研究。由于甲酸钾和溴化钙本身具有相对较高的沸点, 在加热过程中几乎不存在蒸发, 因此可以认为其水溶液在沸腾蒸发时只有水分子会从液相转换成气相。在实验期间, 对发生器内部进行了充分的抽真空处理, 确保真空度低于 1kPa , 有效排除了不凝性气体的存在, 因此, 可以判定气相中的主要成分就是水蒸气。

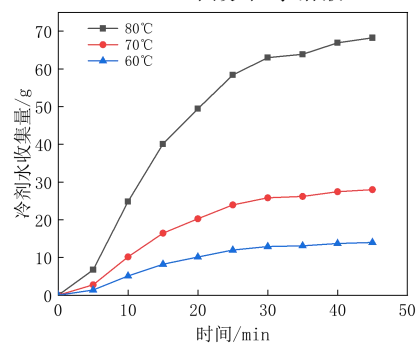
2.1 热源温度对不同工质对的影响

热源温度在 60°C 、 70°C 、 80°C 时, 甲酸钾溶液和溴化钙溶液的浓度皆为 30%。对比不同驱动热源

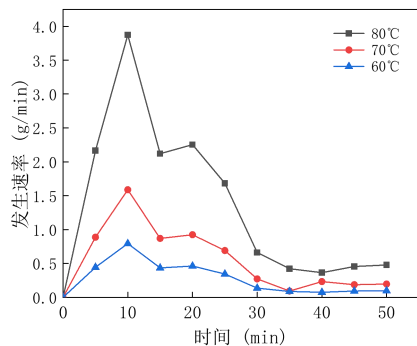
温度下制冷剂水收集量随时间的变化规律如图6(a)(b)所示, 系统发生速率如图6(c)(d)所示。



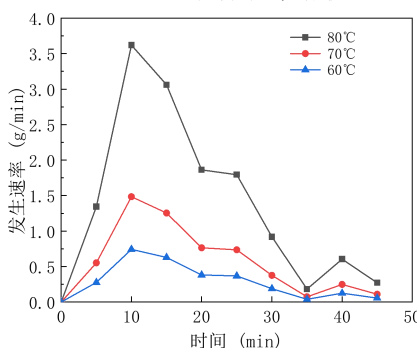
(a) 30%甲酸钾-水溶液



(b) 30%溴化钙-水溶液



(c) 30%甲酸钾-水溶液



(d) 30%溴化钙-水溶液

图6 热源温度对制冷剂水收集量和发生速率的影响

Fig.6 Influence of heat source temperature on the amount and rate of coolant water collection

由图 6 可见,随着热源温度的升高,收集的水量也随之增加。且驱动热源温度升高,系统发生速率也随之增大。这是因为当热水进口流量和系统发生压力不变时,在相同的溶液浓度下,工质对的饱和温度就越低,而热源温度越高,所对应的溶液侧温度越高,从而传质驱动势能越大,所以发生速率随温度升高都是增大的。

系统发生速率整体趋势总是呈现先增大后平缓的趋势,这是因为在系统开始加热时,此时发生器内部的压力较小,工质对溶液的饱和温度点较低,此时当加热温度超过饱和温度点以后,溶液就会剧烈沸腾,从而产生大量制冷剂蒸汽,热源温度恒定且工质对的浓度随着水蒸气的产出而逐渐增大,其饱和温度逐渐增大,与热源之间的温差变小,从而使得溶液的沸腾会逐渐放缓,制冷剂的蒸发速率也就因此而变小。

2.2 不同工质对在同一热源温度下的影响

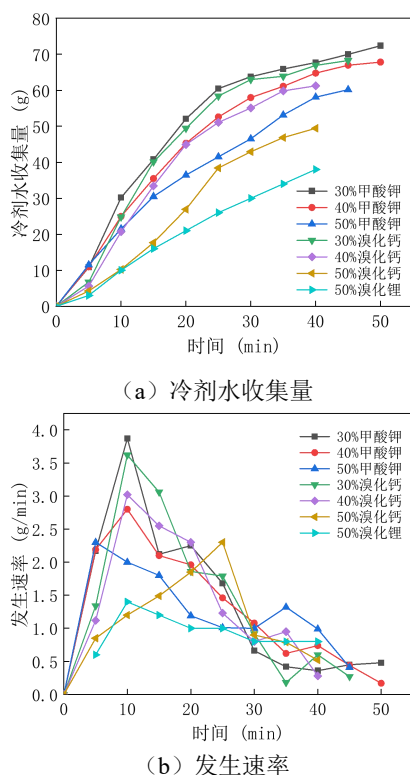


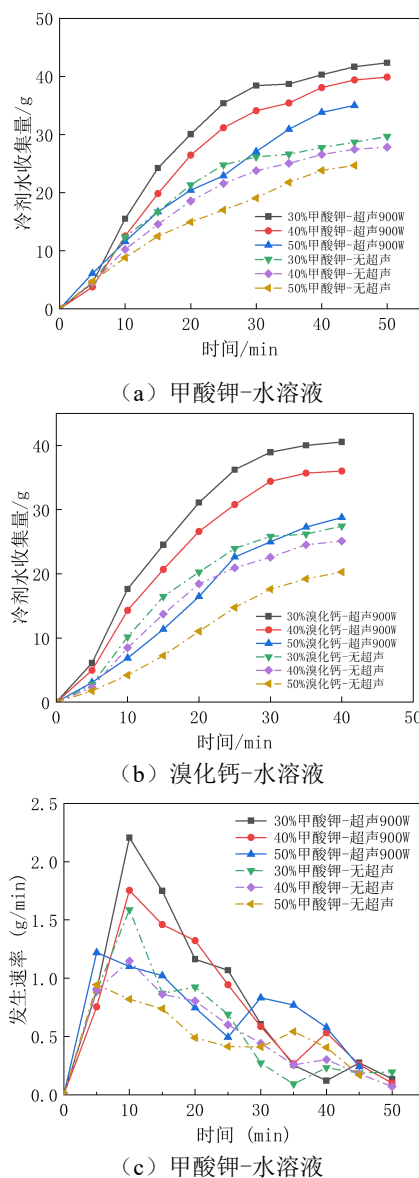
图 7 不同工质对的制冷剂水收集量和发生速率

Fig.7 Coolant water collection amount and occurrence rate of different working medium pairs

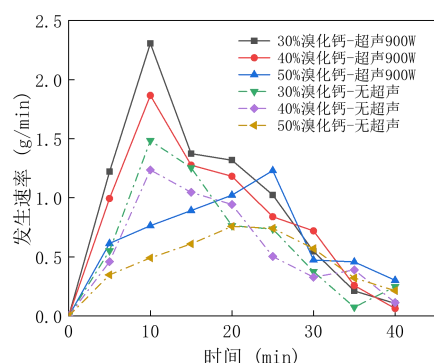
图 7 是在同一热源温度 80°C 下,不同浓度的工质对所对应的制冷剂水收集量和发生速率,与溴化锂溶液的制冷剂水收集量^[49]进行对比。从图中可以看

出,相同浓度的甲酸钾溶液要比溴化钙溶液的发生效果更好,同时将溴化锂溶液的发生速率进行对比,发现甲酸钾溶液和溴化钙溶液的制冷剂水收集量和发生速率比同浓度下的溴化锂溶液更高。且随着浓度的增加,其制冷剂水的收集量更少。这是甲酸钾溶液和溴化钙溶液本身特性所决定的,从三种工质对的饱和蒸汽压特性曲线中不难得到,当压力恒定时,甲酸钾溶液的饱和温度相较于溴化钙溶液更小,溴化锂溶液的饱和温度最大,此时在同样的热源温度下,饱和温度越低,其差值越大,热量传递的驱动力更大,溶液能够更快吸收热量,从而使得蒸发速度加快。

2.3 超声振动对工质对传热传质的影响



(c) 甲酸钾-水溶液



(d) 溴化钙-水溶液

图 8 有无超声时的制冷剂水收集量和发生速率

Fig.8 Coolant water collection amount and rate of occurrence with or without ultrasound

如图 8 所示是甲酸钾溶液和溴化钙溶液在有无超声作用下的制冷剂水收集情况。实验数据表明, 超声波的应用对于吸收式制冷循环系统中的发生过程有促进作用。在加入超声强化装置以后, 整个传质过程的曲线呈现明显上升趋势, 制冷剂水收集量较未使用超声时存在显著提高, 有无超声作用时的制冷剂水收集量变化趋势基本一致, 此外, 对于同一工质对, 使用超声前后的发生速率有明显的增加, 超声波强化传质不仅可以通过提升制冷剂水产生量来增加系统的制冷量, 而且在提高制冷剂水产生速率方面也有一定的效果, 在使用了超声以后, 显著提升了吸收式制冷系统的发生性能, 可见超声波强化发生过程可以有效适用中低温热源驱动的吸收式制冷系统。在实验开始加热阶段, 超声波的引入显著加快了工质对溶液进入稳定泡核沸腾状态的过程, 缩短了溶液经历过冷沸腾和自然对流沸腾的时间, 使得溶液从一开始就能够迅速达到充分沸腾阶段。在系统启动十分钟内, 有超声影响的制冷剂水生成速率明显大于常规工况。随着加热时间推移, 系统持续保持传热过程, 沸腾现象逐步平稳, 制冷剂水的增长速率也逐渐趋于平缓, 但是在超声作用下的增长速率始终高于无超声时的速率。

如图 9 所示是不同工质对在同一热源温度下的超声强化率随时间的变化。由图 9 可见, 同浓度甲酸钾溶液的超声强化率要比溴化钙溶液的超声强化率低, 从理论研究来说, 液体的蒸气压越大, 超声作用产生的空化效应会减弱, 即随着气泡内蒸汽压力的升高, 气泡生长的最大半径减小, 从而导致气泡的振动减弱, 空化强度下降^[50]。

对于溴化钙溶液来说, 超声强化率在初始启动阶段较大, 之后逐渐减小并在 15 分钟后趋于平缓。针对此情况, 主要可概括为以下阶段: 系统刚启动时, 超声强化率最大, 强化效果好; 当实验继续进行, 溶液温度不断升高, 超声强化率呈现下降趋势并逐渐趋于稳定。但是对于甲酸钾溶液, 从超声强化率随时间变化的趋势来看, 超声强化率逐渐增大直至趋于平缓。这个趋势与溴化钙溶液的趋势有所不同, 从二者的物理性质来看, 同浓度的溴化钙溶液的比热容比甲酸钾溶液小, 导热系数比甲酸钾溶液大, 这意味着同样的热源水温度, 溴化钙溶液在加热初期时温度上升更快, 气泡形成速度与体积、数量增长更快, 超声波主要是通过机械效应和空化效应来增强传质效果的, 在系统沸腾过程中, 超声强化使得气泡破裂和溶液本身沸腾导致的气泡破裂存在竞争, 因此在溶液温度较低的时候, 超声强化率更高; 随着不断加热, 溶液温度也在升高, 冷凝管将产生的气体冷凝带走, 发生器内的压力基本保持稳定, 此时对于沸腾蒸发来说, 气泡产生变得困难, 超声作用减弱, 超声强化率降低。对甲酸钾溶液来说, 比热容大, 升温速率下降, 在沸腾初期, 液体中作为气泡核的微小颗粒较少, 超声空化作用有限, 随着时间的推移, 溶液温度上升, 更多的气泡核被激活, 空化效应增强, 超声作用越发显著。

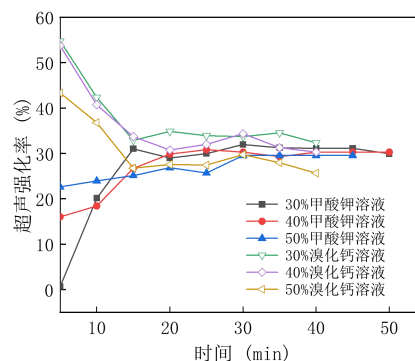


图 9 超声强化率随时间的变化

Fig.9 Changes of ultrasonic enhancement rate over time

2.4 超声功率对工质对传热传质的影响

随着超声功率的升高, 制冷剂水收集量也明显的增加, 表 3 是实验结束后不同超声功率的超声强化率, 可知功率越大, 对系统冷水产生率提升效果越大。超声功率可以调节超声声压的输出, 而超声声压对气泡的运动有着直接的作用。当超声功率较小时, 气泡难以急剧膨胀收缩, 此时处于稳态空化状

态,当超声功率增加以后,空化状态会转换为瞬态空化^[51],因此,当超声波发生器的功率提高,输出的声压就越大,超声空化效应更好^[52]。但是随着功率的增大,提升效果的增长幅度明显下降,在超声功率分别为 500W、600W、700W、800W 时,整个实验过程中,甲酸钾溶液的冷剂水收集量较前一个功率分别提升了 12.07%、3.57%、2.08%,这是因为随着声压幅值继续增大,空化气泡的半径在正压相内增大到了一定的程度以后,在之后的负压相内并没有能压缩到较小的半径,从而导致空化气泡在崩溃时的温度和压力减小,减弱了空化效应,最终影响到溶液沸腾,所以超声功率提升 100W,冷剂水收集量并不会呈现等比上升趋势。从实验最终获得的冷剂水收集量来看,超声功率 900W 时冷剂水收集量比 800W 要少,这是因为实验过程,溶液温度随时间慢慢上升,在实验开始时,热源与溶液存在较大温差,此时更大功率的超声作用可以提供更强的能量,从而生成更多空化泡,增强冷剂水产生量,温度上升以后,发生器内系统接近热平衡状态,900W 下空化过度,空化气泡之间的干扰和抵消作用明显,从而在最后呈现出冷剂水总量不如 800W 时。

表 3 不同超声功率对应的超声强化率

Table 3 Ultrasonic intensification rates corresponding to different ultrasonic powers

工质对 \ 功率	50%甲酸钾溶液	50%溴化钙溶液
500W	12.41%	13.36%
600W	24.48%	21.36%
700W	28.05%	28.84%
800W	30.13%	30.90%
900W	29.57%	29.55%

3 结论

本研究针对吸收式制冷系统低于 80℃ 的中低温热源利用率低的问题,通过对比甲酸钾溶液、溴化钙溶液和溴化锂溶液的热物性参数和发生过程传质特性,同时结合超声波强化技术,得出以下结论:

(1) 与同浓度的溴化锂溶液相比,甲酸钾溶液和溴化钙溶液具有更大的饱和蒸汽压和导热系数、更小的密度和比热容,可以更有效利用热源。

(2) 在发生器中,热源温度越高,冷剂水的产生量越多,发生速率越大;在同一热源温度下,浓度越大,冷剂水产生量和发生速率降低。此外,同浓度下三种工质对的冷剂水产生量和发生速率由大到小依次为甲酸钾溶液、溴化钙溶液、溴化锂溶液。

(3) 超声对于吸收式循环中发生过程的冷剂水产生有明显的强化作用,超声强化率可达 17%~43%,且热源温度越低,其强化效果就越明显,超声强化作用有助于改善吸收式制冷系统受限于发生温度而导致的效率较低的问题。

(4) 当超声功率不超过 800W 时,随着超声功率增大,冷剂水产生量和发生速率均增大,但功率超过 800W 时,空化效应效率反而会降低,不利于冷剂水的产生。

参考文献:

- [1] 李金玉.工业余热的回收利用[J].节能技术,1986, (3): 41-44.
- [2] Ji Dongxu, Liu Guokun, Romagnoli, Alessandro, et al. Low-grade thermal energy utilization: Technologies and applications[J]. APPLIED THERMAL ENGINEERING, 2024,244.
- [3] 吴维成,谷志卿,鞠朋,等.工业低温余热回收利用研究进展[J].可再生能源,2024,42(8):1096-1103.
- [4] 朱润祺,蔡德华,宋海,等.小型太阳能空气制水机设计及性能分析[J].制冷与空调,2022,22(9):5-9,20.
- [5] 杨霏.小型溴化锂吸收式制冷空调性能实验研究[D].北京:华北电力大学,2018.
- [6] 陈光明,石玉琦.吸收式制冷(热泵)循环流程研究进展[J].制冷学报,2017,38(4):1-22.
- [7] 王沐.含离子液体的三元溶液固/汽-液相平衡理论与实验探究[D].南京:东南大学,2019.
- [8] C Somers, A Mortazavi, Y Hwang, et al. Al-Hashimi, Modeling water/lithium bromide absorption chillers in ASPEN Plus[J]. Applied Energy, 2011,88(11):4197-4205,
- [9] 杨磊,李华山,陆振能,等.溴化锂吸收式制冷技术研究进展[J].新能源进展,2019,7(6):532-541.
- [10] 张晓斌.氨水吸收式制冷实验与仿真研究[D].青岛:青岛科技大学,2020.
- [11] Saravanan R, Maiya MP. Thermodynamic comparison of

- H₂O-based working fluid combination for a vapour absorption refrigeration system. *Applied Thermal Engineering* 1998;18:553-568.
- [12] Parham K, Atikol U, Yari M, et al. Evaluation and optimization of single stage absorption chiller using (LiCl+H₂O) as the working pair[J]. *Advances in mechanical engineering*, 2013,5:683157.
- [13] A novel low-grade heat-driven absorption refrigeration system with LiCl-H₂O and LiBr-H₂O working pairs[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015,58:219-234.
- [14] Gommed K, Grossman G, Ziegler F. Experimental investigation of a LiCl-water open absorption system for cooling and dehumidification[J]. *J. Sol. Energy Eng.*, 2004,126(2):710-715.
- [15] Lucas A D, Donate M, Juan F. Rodríguez. Vapour pressures, densities, and viscosities of the (water + lithium bromide + potassium acetate) system and (water + lithium bromide + sodium lactate) system[J]. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2006,38(2):123-129.
- [16] 王晓坡,杜家浩,陈建林,等.不同制冷剂/离子液体工质对的吸收式制冷循环性能分析[J].*中南大学学报(自然科学版)*,2021,52(6):1817-1825.
- [17] Kühn R, Meyer T, Ziegler F. Experimental investigation of ionic liquids as substitute for lithium bromide in water absorption chillers[J]. *Energy*, 2020,205:117990.
- [18] GONG Y, YANG L, LU Z, et al. Thermodynamic performance assessment of ammonia/ionic liquid based half effect absorption refrigeration cycle[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021,25:100924.
- [19] 郭紫君,孙晗,党超斌,等.离子液体用于吸收式制冷系统的筛选[J].*制冷与空调*,2019,33(2):112-118.
- [20] ZHANG X, CAI L, CHEN T, et al. Vapor-liquid equilibrium measurements and assessments of low-GWP absorption working pairs (R32+DMETEG, R152a+DME TEG, and R161+DMETEG) for absorption refrigeration systems[J]. *Energy*, 2021,224:120082.
- [21] 贾秀臻,罗勇,王晓坡.DME或R600a与角鲨烷为工质对的吸收式制冷循环性能分析[J].*制冷学报*,2022,43(2):62-69.
- [22] 高赞军.卤代烃+有机吸收剂相平衡理论与实验研究[D].杭州:浙江大学,2015.
- [23] 崔晓龙.新型吸收制冷工质相平衡理论与实验研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [24] 臧伟伟,徐同台,赵忠举,等.甲酸铯及其他甲酸盐水溶液的物理化学特性[J].*油田化学*,2010,27(1):100-105,51.
- [25] Wen. Experimental study on the corrosion behavior and regeneration performance of KCOOH aqueous solution[J]. *SOLAR ENERGY*, 2020(201):638-648.
- [26] Grzybowski W, Atkinson G. Thermodynamics of concentrated electrolyte mixtures. Part 8. Apparent molal volumes, adiabatic compressibilities, and hydration numbers of aqueous zinc bromide, calcium bromide, and sodium bromide at 25. degree. C[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1986,31(3):309-312.
- [27] Kim D S, Infante Ferreira C A. Air-cooled LiBr-water absorption chillers for solar air conditioning in extremely hot weathers[J]. *Energy Conversion and Management*, 2009,50(4):1018-1025.
- [28] 陈滢,朱玉群,耿玮,等.低温热源驱动的单效/双级(SE/DL)吸收式制冷循环[J].*太阳能学报*,2002,23(1):102-107.
- [29] Cheung K, Hwang Y, Judge J F, et al. Performance assessment of multistage absorption cycles[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1996,19(7):473-481.
- [30] Kaita Y. Simulation results of triple-effect absorption cycles[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002,25(7):999-1007.
- [31] 陈亚平,王克勇,施明恒.1.x级溴化锂吸收式制冷循环性能分析[J].*工程热物理学报*,2005,(2):193-195.
- [32] 曹毅然,张小松,鲍鹤灵.太阳能驱动的压缩吸收式复合制冷循环分析[J].*流体机械*,2002,(10):51-53.
- [33] Cimsit C. Thermodynamic performance analysis of the double effect absorption-vapour compression cascade refrigeration cycle[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2018,13(1):JTST0007-JTST0007.
- [34] 陈光明,冯仰浦,王剑锋,等.一个用太阳能驱动的新型吸收制冷循环[J].*低温工程*,1999,(1):50-54.
- [35] 胡兴华,舒水明.新型溴化锂增压吸收式制冷循环[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*,2002,(7):11-13.
- [36] 石玉琦,洪大良,陈光明,等.一个带喷射器的两级吸收式制冷循环[J].*太阳能学报*,2015,36(3):599-603.

- [37] 董沅昌.高导热材料的研究进展[J].当代化工研究, 2019,(10):179-180.
- [38] LEMLICH R, HWU C K. The effect of acoustic vibration on forced convective heat transfer[J]. AICHE J, 1961,7(1):102-108.
- [39] 张佳,白博峰.超声波对池沸腾换热影响[J].工程热物理学报,2011,32(6):961-964.
- [40] ZHENG Mujia, LI Bin, WAN Zhenping, et al. Ultrasonic heat transfer enhancement on different structural tubes in Li Br solution[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,106:625-633.
- [41] 拉姆著,刘凤志,等译.气体吸收[M].北京:化学工业出版社,1985.
- [42] 周兵.波纹板双面液膜反转强化吸收传热传质研究[D].南京:东南大学,2010.
- [43] 申江,邹国文,王建民,等.机械振动强化吸收式制冷传热传质的实验研究[J].制冷学报,2016,37(2):46-52.
- [44] William M. Haynes. CRC Handbook of Chemistry and Physics[M]. CRC Press, 2014.
- [45] Wen Tao, Luo Yimo, Sheng Liyuan. Experimental study on the corrosion behavior and regeneration performance of KCOOH aqueous solution[J]. SOLAR ENERGY, 2020,201,638-648.
- [46] 童守宝.面向不同除湿需求的新型除湿溶液物性测量及性能探究[D].南京:东南大学,2022.
- [47] Kaita Y. Thermodynamic properties of lithium bromide-water solutions at high temperatures[J]. International Journal of Refrigeration, 2001,24(5):374-390.
- [48] Chua H T, Toh H K, Malek A, et al. Improved thermodynamic property fields of LiBr-H₂O solution[J]. International Journal of Refrigeration, 2000,23(6):412-429.
- [49] 葛子平.基于超声空化的小型太阳能吸收式空调传质强化及系统优化设计[D].广州:华南理工大学,2012.
- [50] Holzfuss J, Ruggeberg M, Mettin R. Boosting Sonoluminescence[J]. Physical ReviewLetter, 1998, 81(9):1961-1964.
- [51] 罗贤能,赵良举,奉策强,等.声空化气泡成长及破裂研究[J].工程热物理学报,2009.
- [52] Yang X, Church C C. A Model for the Dynamics of Gas Bubbles in soft Tissue [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2005,118(6):3595-3606.