

文章编号:0253-4339(2024)02-0127-08

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2024.02.127

增压型鼓泡吸收输运特性实验装置的设计与研究

李季桐¹ 王刚^{1,2} 熊亚选¹ 张群力¹

(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 北京市建筑能源高效综合利用工程中心 北京 100044)

摘要 为探索真空环境下,气泡在溶液吸收过程中流动、传热特性及其机理,设计了一种增压型垂直管内溶液鼓泡吸收输运特性测量实验装置,并介绍了该装置的结构和工作原理,通过系统真空度维持、气泡流动和能量校核等实验分别验证系统的可靠性和准确性。结果表明,增压技术实现了负压环境下的鼓泡吸收。静置 12 h 系统真空度上升率仅为 2.33%,系统气体泄漏量为 2.4 mL/h,装置具有良好的可靠性。实验过程中的气泡产生、上升、碰撞、聚并和破裂行为与文献气泡流动行为一致。溶液和冷却水的出口温度、溶液出口质量分数测量结果最大相对偏差分别为 0.08%、0.02%和 0.01%;不同溶液入口温度和溶液流量的能量校核实验的最大误差分别为 10.4 J 和 12.5 J,装置具有良好的准确性。为探究真空环境下鼓泡吸收的输运特性及揭示其传递机理奠定了良好的实验基础。

关键词 增压;鼓泡吸收;流动;传热;实验装置

中图分类号:TB61⁺1; TB663

文献标识码: A

Design and Research of Experimental Device for Pressurized Bubble Absorption and Transport Characteristics

Li Jitong¹ Wang Gang^{1,2} Xiong Yaxuan¹ Zhang Qunli¹

(1. Beijing Key Laboratory of Heating, Gas Supply, Ventilation and Air Conditioning Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing, 100044, China; 2. Beijing Building Energy Efficient Comprehensive Utilization Engineering Center, Beijing, 100044, China)

Abstract To evaluate the thermal-hydraulic characteristics and mechanism of the bubble absorption process inside a solution in a vacuum environment, we design an experimental device for measuring the bubble absorption and transport characteristics of solutions in a pressurized vertical tube and introduce the structure and work of the device. Its reliability is verified by system vacuum pressure experiments, and its accuracy is verified by bubble flow and energy conservation experiments. The results show that pressurization technology achieves bubble absorption in a vacuum environment. The vacuum increase rate of the system is only 2.33% after 12 h of idling, corresponding to a gas leakage rate of 2.4 mL/h. The device exhibited good reliability. The behavior of bubble generation, rising, collision, coalescence, and rupture during the experiment was consistent with the bubble flow behavior reported in the literature. The maximum relative deviations in the outlet temperature and outlet concentration of the solution and cooling water were 0.08%, 0.02%, and 0.01%, respectively. The maximum errors of the energy calibration experiment of the different solution inlet temperatures and solution flow rates are 10.4 J and 12.5 J, respectively, and thereby the device has good accuracy. The experimental device provides a good experimental foundation for evaluating the transport characteristics of bubble absorption and the heat transfer characteristics of bubble absorption in a vacuum environment and revealing its transfer mechanism.

Keywords pressurized; bubble absorption; flow; heat transfer; experimental device

鼓泡吸收器是典型的气液接触设备,具有传递阻力小、相界面积大、结构简单和造价低等优点,被广泛应用于化工、生物、环境及制冷低温等领域^[1]。与降膜吸收方式相比,鼓泡吸收的被吸收气体以气泡形式

进入吸收液体^[2],气泡被完全包围在液体中,具有更大的吸收面积、更好的润湿性和更充分的气液混合^[3]。因此,鼓泡吸收输运特性的研究对吸收器的设计^[4]和热泵系统性能的提升具有重要的理论指导

意义。鼓泡吸收是一种较为复杂的气液相间运动和热、质传递过程,主要依靠气泡在静止或流动的液相中流动带动气相组分进行质量和热量的交换,同时,质量传递和热量传递之间存在着耦合的作用。因此,开发一套通过实验探索鼓泡吸收的流动状态、热和物质的传递数量以及传递规律来确定吸收器的平均传热、传质系数的实验装置是必要的。

鼓泡吸收器在工业领域内,因具有良好的热力学性能而备受关注。针对鼓泡吸收器内的流动问题,A. Kemoun 等^[5]为了观察加压条件下鼓泡塔中气体的滞留现象,搭建了由 CREL 扫描仪、多孔板分布器和不锈钢气泡柱组成的可视化高压气泡碰撞实验装置;Wu Xi 等^[6]为了探究在振动状态下 R134a-DMAC 的气泡行为和两相流型,搭建了由工质制备系统、振动台系统、反应容器系统和数据采集系统构成的可视化气泡吸收的振动实验装置;Y. T. Kang 等^[7]为了捕捉气泡的流动行为和测量气泡的体积直径,利用高速相机、不锈钢蒸汽分配器和加氨容器搭建了氨水气泡吸收可视化流动实验装置;H. Y. Kim 等^[8]为了得到氨-水混合物吸收高度以及吸收器中的溶液流型,设计搭建了一种测试段全部由透明材料构成的逆流段塞流吸收器的实验装置;Li Lirong 等^[9-10]为了得到甲醇/ Al_2O_3 纳米吸收剂中多个 CO_2 气泡的运动,设计搭建了使用质量流量控制器精确控制气体流速的可视化实验装置;S. Roy 等^[11]为了得到鼓泡塔气泡的流型,搭建了具有较高相对持液率的鼓泡塔反应实验装置;孔祥强等^[12]为探究 R134a-DMF 在垂直管内鼓泡吸收过程中流型转变的过程,搭建了垂直单管鼓泡吸收可视化实验装置。

针对鼓泡吸收传热、传质问题,Y. T. Kang 等^[13]为了研究氨水气泡吸收传质系数,设计搭建了由压力调节阀和截止阀控制氨蒸气的质量流量的气泡吸收传质测量实验装置;蒋孟男等^[14]为了研究制冷剂气体流率和吸收溶液流率等对鼓泡吸收过程传热传质的影响,搭建了垂直管内气泡吸收传热传质特性可视化实验装置;H. Y. Kim 等^[15]为了得到液体侧局部传热传质系数,设计了氨-水溶液垂直逆流段塞流吸收器的实验装置;Jiang Mengnan 等^[16-17]为了观察 R124-DMAC 气泡吸收性能变化条件时,搭建了玻璃气泡吸收器实验装置。鼓泡吸收是一个复杂的气液两相流过程。但在鼓泡吸收器内,气泡被吸收过程中的流动特征和热、质的传递数特征以及传递规律等方面的实验探索中尚不完善,缺少将气泡流动状态、传热和传质特性相耦合的实验装置。

在制冷空调领域中,目前用于测试鼓泡吸收气泡

特征和热传递特性实验装置的工质对主要集中在氨水和 R134a-DMAC 鼓泡吸收方面。H. Y. Kim 等^[18]设计了一种吸收器采用氨-水为工质的垂直逆流段塞流吸收器的实验装置;J. K. Kim 等^[19]为了研究二元纳米流体增强鼓泡吸收机理,设计了带有调节器的氨气瓶和气泡行为可视化设备的高效 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ 的吸收实验装置;Wu Xi 等^[6]为了研究在振动状态下 R134a-DMAC 工质鼓泡吸收过程,搭建了具有同心圆环管反应容器的 R134a-DMAC 鼓泡吸收实验装置;赵锐等^[20]为了研究氨水的鼓泡吸收过程,利用有机玻璃制成的封闭吸收容器以及高压氨气钢瓶组成的氨水鼓泡吸收实验装置。P. Donnellan 等^[21]为了研究气泡在浓溴化锂水溶液中的吸收效果,搭建了常压下的溴化锂溶液鼓泡吸收实验装置。然而,溴化锂吸收式机组实际运行于真空环境下,该工况下气体浮升力无法克服溶液内阻力产生气泡,限制了鼓泡吸收技术在溴化锂吸收式循环机组中的应用。

基于增压吸收关键技术^[22-24],本文设计了一种利用变频增压泵为制冷剂蒸气提供克服高度势能差和流动阻力的驱动力增压型溶液鼓泡吸收实验装置。利用该实验装置开展真空度维持实验和气泡流动、能量校验实验,分别验证装置的可靠性和准确性。该实验装置开发与设计为进一步研究真空环境下溶液鼓泡吸收的输运特性及揭示其传递机理奠定良好的实验基础。

1 实验装置

1.1 系统结构

垂直管内溴化锂溶液鼓泡吸收输运特性实验装置的结构原理和实物分别如图 1 和图 2 所示。实验装置由蒸气系统、溶液系统、冷却水系统、鼓泡吸收器和实验数据测试与分析系统 5 个部分组成。

1) 蒸气增压系统主要包括变频增压泵、真空泵、蒸气发生器、流量调节阀和止回阀等,用于提供实验所需蒸气并保证合适流速。为克服液位势差阻力和流动阻力,系统采用变频增压泵为水蒸气提供适当压力,确保气泡产生与上升,如图 3 所示。蒸气发生器带有电加热功能,使蒸馏水在低压下加热沸腾汽化,生成水蒸气。止回阀用于防止液体倒流、平衡系统内压力。

2) 溶液系统主要包括浓溶液储液罐、稀溶液储液罐、溶液泵、恒温恒压罐、流量调节阀和管道等,用于实现浓溶液、稀溶液的存储、发生与循环,并保证吸收溶液以特定温度经顶端溶液管路顺利进入鼓泡吸收器。浓溶液储液罐下端设有进液口,利用系统真空

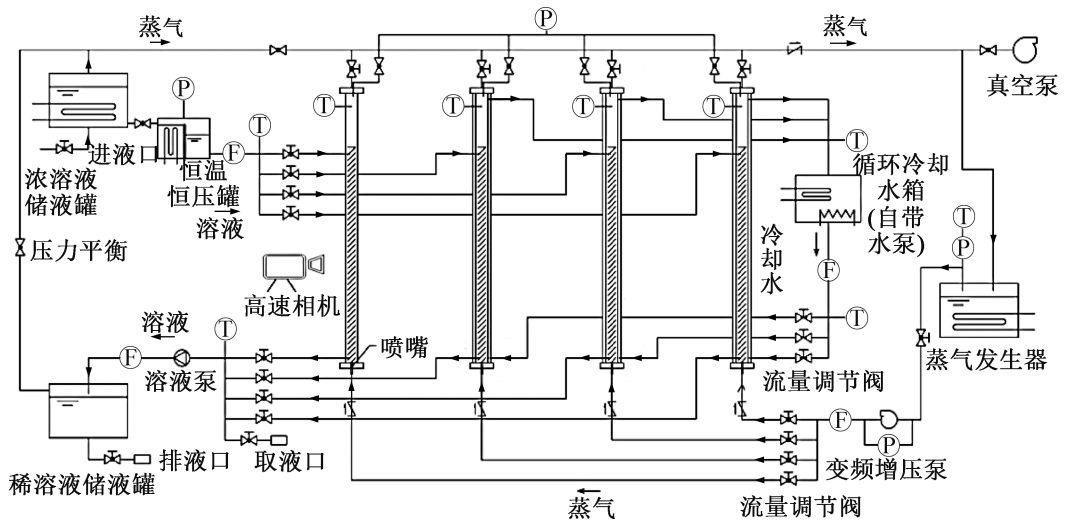


图 1 溶液鼓泡吸收实验装置结构原理

Fig.1 Structure principle of bubble absorption experimental device for solution

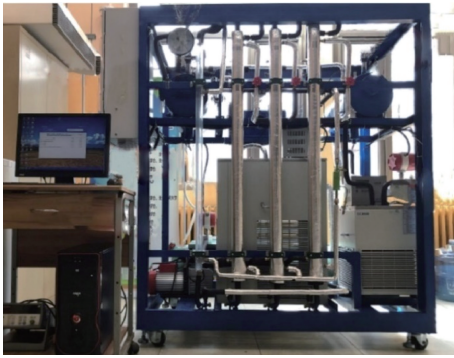


图 2 溶液鼓泡吸收实验装置

Fig.2 Solution bubble absorption experimental device

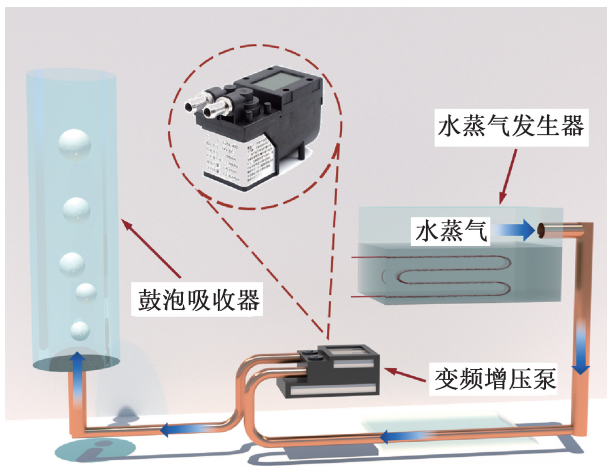


图 3 蒸气增压系统

Fig.3 Steam pressurization system

3) 鼓泡吸收器主要包括圆柱形有机玻璃套管和高速摄像机组成的可视化鼓泡吸收器,以及圆柱形双层铜制套管和温度传感器组成的非可视化鼓泡吸收器,可视化鼓泡吸收器用于测试溶液鼓泡吸收中气泡的流动特征,非可视化鼓泡吸收器用于测试溶液鼓泡吸收中的热、质传递特性。各鼓泡吸收器均与取样口连接,便于测试溶液的质量分数。

4) 冷却水系统主要包括恒温循环水浴、流量调节阀、阀门和管道等,恒温循环水浴分别为鼓泡吸收器提供冷却水和为浓溶液储液罐提供恒定热源。

5) 实验数据测试与分析系统主要包括热电偶、压力传感器、流量计、密度仪、高速摄像机、数据采集仪和计算机等。实验装置材料参数如表 1 所示,采用的仪器仪表参数如表 2 所示。

1.2 系统运行

1) 抽真空。实验开始前,关闭与大气连通的阀门(排气阀/进气阀),将系统内部所有阀门打开,保证系统内部相通。利用真空泵将系统抽真空,待达到设定真空度后,关闭真空泵阀门和真空泵,保持系统处于真空状态。利用系统真空度向溶液储液罐内充液,待达到充注量后,关闭进液口阀门,再次对系统抽真空,排出不凝性气体。

2) 实验时,开启循环冷却水箱,控制进出鼓泡吸收器外管的冷却水流量和温度;开启溶液循环泵,将恒温的浓溴化锂溶液泵入鼓泡吸收器内管,待鼓泡吸收器内液柱高度达到设定位置,开启流量调节阀使鼓泡吸收器内溶液自底部出口流回稀溶液储液罐;开启蒸汽发生器,通过变频增压泵对系统内水蒸气进行增压后由喷嘴送入鼓泡吸收器内进行鼓泡吸收过程,流

度吸入溶液,出口与恒温恒压罐相连,上方设置蒸气系统相连的管路。恒温恒压罐保证进入鼓泡吸收器的水蒸气温度和压力恒定。

表 1 鼓泡吸收器材料参数
Tab.1 Parameters of bubble absorber material

仪器	型号	量程	精度	备注
溶液泵	AQG-24-硅胶管	480 mL/min	2%	—
变频增压泵	V60L-JJ-24V	18 L/min	—	$\Delta p \geq -88$ kPa
真空泵	ROAIRVAC9.0	4 L	—	—
保温材料	聚乙烯保温材料	—	—	—
鼓泡吸收器	可视化	材质:玻璃;喷嘴口径:4 mm;管径:30 mm;管长:1.2 m		
	不可视	材质:铜;喷嘴口径:2、4、6 mm;内管径:30 mm;外管径:40 mm;管长:1.2 m		

表 2 仪器仪表参数
Tab.2 Instrumentation parameters

仪器	型号	量程	精度
溶液流量计	NKGF02F1L1	0.6~6 L/H	$\pm 0.5\%$ FS
气体流量计	MF5000	0~50 L/min	$\pm 1.5\%$ FS
冷却水流量计	NKGF02F1L1	0.6~6 L/H	$\pm 0.5\%$ FS
压力传感器	PT-8303B	0~150 kPa	$\pm 0.5\%$ FS
热电偶	SWT-KPS-NI600-T1-20-2000	-200~300 °C	± 0.5 °C
密度仪	KEM WBA-505	0~3 g/cm ³	± 0.00005 g/cm ³
高速摄像机	Phantom Ametek V211	—	—
数据采集仪	Keysight 34901A	—	—

量调节阀调节水蒸气的流量,部分未被吸收的水蒸气通过单向阀送回蒸汽发生器内。

3) 可视化实验时,待系统鼓泡吸收过程中的气泡流动稳定后,利用高速摄像机拍摄气泡流动形态、尺寸大小、吸收高度和流速等流动参数,利用图片处理软件进行后处理,气泡实际尺寸利用喷嘴实际尺寸与图像中喷嘴尺寸之比进行修正;非可视化实验时,待吸收运行稳定后,采用高精度热电偶、流量计、压力传感器和密度仪测量系统冷却水的进出口温度、流量,溶液的进出口温度、流量和质量分数,水蒸气的压力、温度和流量等热工参数,最后,利用数据采集仪进行数据处理。

4) 实验结束后,关闭浓溶液储液罐、蒸气发生器和循环冷却水箱的电源。待系统温度与环境温度平衡时,再利用真空泵对系统抽真空,确保系统处于负压状态。

2 系统可靠性

实验对系统真空密闭性有很大要求,实验需对系统真空可靠性进行验证。本文利用电子卤素检漏仪和肥皂水对系统进行检漏,再利用真空泵对系统抽真

空,真空值 1 kPa。真空度上升率,如式(1)所示。

$$R = \frac{p_1 - p_0}{T_1 - T_0} \quad (1)$$

式中: R 为系统真空度上升率; p_0 和 p_1 分别为系统测量的初始、结束表压, Pa; T_0 和 T_1 分别为系统测量的初始、结束时间, h。系统压力随时间的变化如图 4 所示,静置 12 h 后,系统压力增加了 280 Pa,真空度上升率为 2.33%。

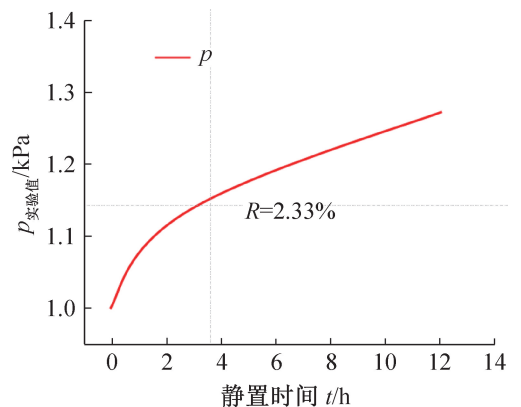


图 4 系统压力随时间的变化

Fig.4 Change of system pressure with time

根据理想气体状态方程,系统气体泄漏量为 2.4 mL/h,远低于规范中气密性允许值的容许泄漏量 6.5 mL/h^[25]。因此,系统气密性良好。

3 系统准确性

为验证实验装置的准确性,本文开展了气泡流动、热传递和能量守恒的实验研究。根据热泵运行工况,选择蒸气温度为 20 °C,其饱和压力为 2.338 kPa。由于吸收式热泵系统中的吸收压力近似等于蒸发压力,本实验中的吸收压力设定为 2.338 kPa。由于高质量分数溴化锂溶液存在过冷结晶的风险,实验选定溶液质量分数为 55%。实验工况参数如表 3 所示。

表 3 实验工况参数

Tab.3 Experimental condition parameters

实验工况参数		数值
溶液	入口温度	35~40 °C
	入口流量	10~50 L/h
冷却水	入口温度	20 °C
	入口流量	0.014 3 L/h
其他	喷嘴口径	2~6 mm
	蒸气入口速度	2 m/s
	增压比	1.1

3.1 气泡流动验证

实验选择喷嘴直径为 4 mm,通过高速相机捕捉鼓泡吸收过程中气泡的产生和上升,如图 5 所示。增压后的水蒸气在喷嘴处逐渐形成小气泡,随着气泡体

积的增加开始脱离喷嘴进入溶液,产生阶段中其平均直径为 5.45 mm。溶液中的气泡受到初始压力和浮力的作用抖动上升,小气泡会迅速追赶前面的气泡,并发生碰撞、聚并的行为,形成侧面带圈状震荡波纹水母状的大气泡,即泰勒气泡,该阶段气泡平均直径为 16.84 mm。大气泡继续上升至溶液液面,与液面发生挤压停留后破裂,该阶段气泡平均直径为 12.94 mm。在鼓泡吸收器内,气泡产生、上升、碰撞、聚并和破裂的行为与文献[6]的气泡流动行为一致。因此,从气泡流动实验方面验证了本实验装置的准确性。但本实验中的气泡形态和大小与文献[6]存在差异,如图 6 所示。主要是因为本实验条件处于真空环境,与常压环境下的压强不同,作用在气泡上的合力发生明显变化。

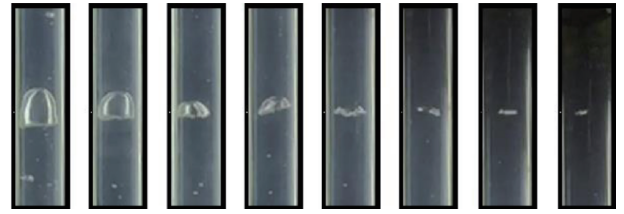


图 6 气泡可视化实验结果^[6]

Fig.6 Bubble visualization experimental results^[6]

3.2 热传递验证

实验选择溴化锂溶液初始温度为 40 °C,冷却水初始温度为 20 °C。在不同喷嘴口径下进行了溶液出口温度、质量分数和冷却水出口温度的测量,并计算相对偏差。图 7 所示为溶液出口温度和冷却水出口温度随喷嘴尺寸的变化,溶液出口温度测量最大相对偏差小于 0.08%,冷却水出口温度测量最大相对偏差小于 0.02%。图 8 所示为溶液出口质量分数随喷嘴尺寸变化,溶液出口质量分数测量最大相对偏差小于 0.01%。因此,从热传递角度验证了本实验装置的准确性。

3.3 能量守恒验证

基于能量守恒定律,本文从溴化锂溶液侧、蒸气侧和冷却水侧进行了能量平衡校核实验。

溶液侧和蒸气侧热平衡方程:

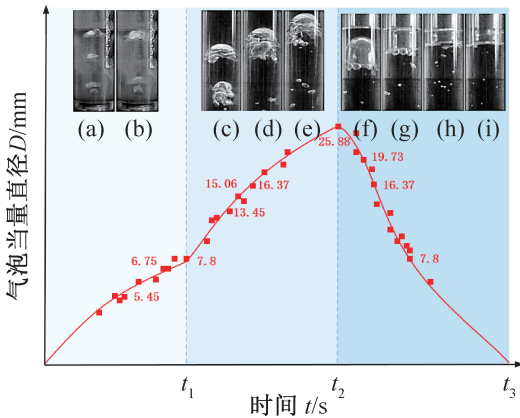
$$Q_s = m_s(h_{s,out} - h_{s,in}) \quad (2)$$

$$Q_a = m_a(h_{a,out} - h_{a,in}) \quad (3)$$

冷却水侧热平衡方程:

$$Q_w = c_w m_w(t_{out} - t_{in}) \quad (4)$$

利用溶液和蒸气焓值变化对系统失热量进行计算,并与冷却水得热量进行对比。如图 9 和图 10 所示,改变溴化锂溶液入口温度,温度范围为 35~39 °C,



(a)~(b) 气泡产生阶段; (c)~(e) 气泡上升阶段;
(f)~(i) 气泡破灭阶段。

图 5 气泡产生、上升、破灭阶段

Fig.5 Bubble generation, rise, burst stage

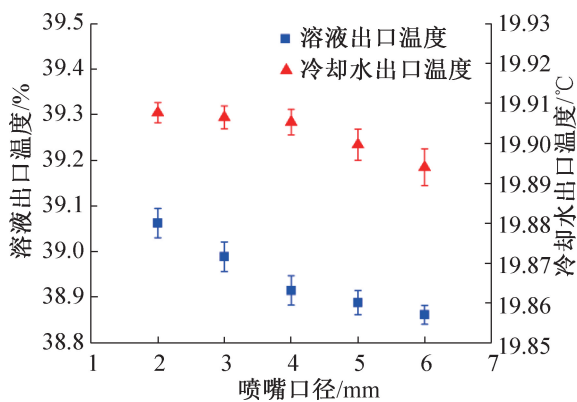


图 7 溶液出口温度和冷却水出口温度变化

Fig.7 Change of solution outlet temperature and cooling water outlet temperature

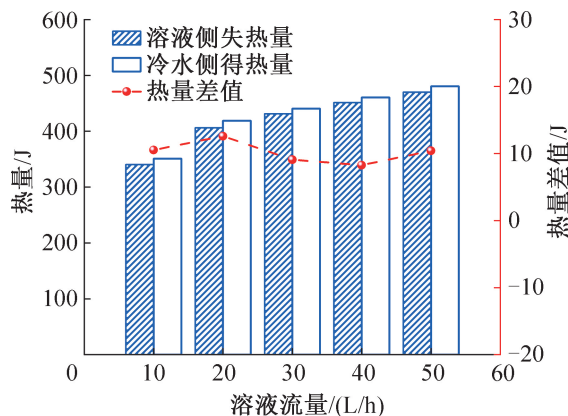


图 10 不同溶液流量能量平衡误差

Fig.10 Energy balance error of different solution flow

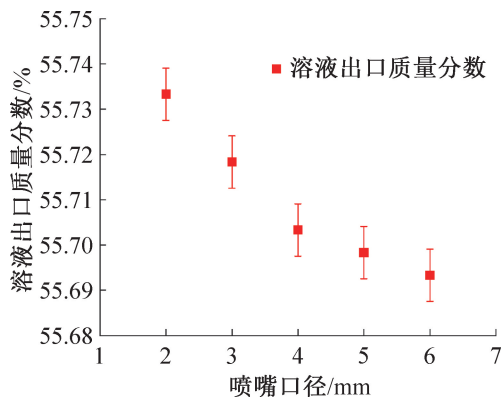


图 8 溶液出口质量分数变化

Fig.8 Change of mass fraction at the solution outlet

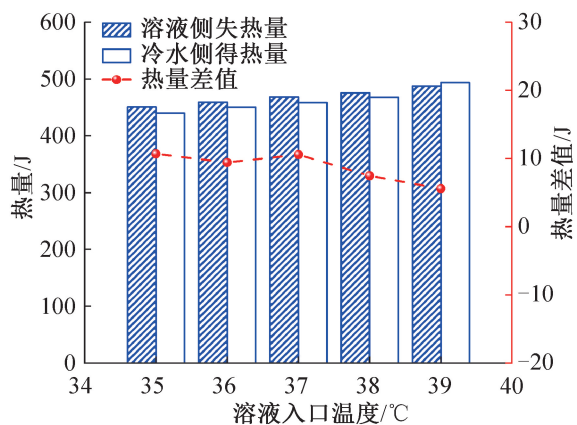


图 9 不同溶液入口温度能量平衡误差

Fig.9 Energy balance error of different solution inlet temperature

能量平衡误差最大为 10.4 J。改变溴化锂溶液流量, 范围在 10~50 L/h 间, 能量平衡误差最大为 12.5 J, 系统能量平衡校核实验误差较小。因此, 从能量平衡角度验证了本实验装置的准确性。

4 结论

本文提出一种利用变频增压泵为制冷剂蒸气提供克服高度势能差和流动阻力的驱动力的增压型溶液鼓泡吸收实验装置。利用该实验装置开展系统真空度维持、气泡流动和能量校核等实验, 分别验证了装置的可靠性和准确性。得到结论如下:

1) 在负压环境下, 利用增压技术实现了水蒸气在溶液中的鼓泡吸收。

2) 实验装置真空度上升率为 2.33%, 系统气体泄漏量为 2.4 mL/h, 气密性良好, 实验装置运行可靠。

3) 实验过程中的气泡产生、上升、碰撞、聚并和破裂行为与文献气泡流动行为一致。在吸收压力为 2.338 kPa, 蒸气温度为 20 °C 时, 溶液出口和冷却水出口温度测量值最大相对偏差分别为 0.08% 和 0.02%, 溶液出口质量分数测量结果最大相对偏差为 0.01%。

4) 基于能量守恒定律, 不同溶液入口温度和溶液流量的能量平衡校核最大误差分别为 10.4 J 和 12.5 J, 实验装置准确性良好。

本文受北京建筑大学-市属高校基本科研业务费项目 (X23029) 资助。(The project was supported by Beijing University of Architecture-Basic Research Business Fund for Municipal Universities (No. X23029).)

符号说明

- c ——比热容, J/(kg·K)
- h ——焓, J/kg
- m ——质量, kg
- t ——温度, K
- p ——压强, Pa

Q ——换热量, J
 R ——真空度上升率
 T ——时间, h

下标

in——入口
out——出口
w——冷却水
s——溶液
a——蒸气

参考文献

- [1] 邱中举. 溴化锂吸收式热泵系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. (QIU Zhongju. Study on lithium bromide absorption heat pump system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.)
- [2] 程文龙, 赵锐, 刘畅, 等. 氨水鼓泡吸收的实验研究——添加剂影响[J]. 制冷学报, 2006, 27(3): 35-40. (CHENG Wenlong, ZHAO Rui, LIU Chang, et al. Experimental study of influence of additives on ammonia bubble absorption[J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(3): 35-40.)
- [3] 董佩文. 垂直管内溴化锂溶液鼓泡吸收热质传递特性的模拟研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021. (DONG Peiwen. Simulation study on heat and mass transfer characteristics of bubbling absorption of lithium bromide solution in vertical tube [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021.)
- [4] 盛伟, 武卫东, 张华, 等. 纳米颗粒对氨水鼓泡吸收性能的强化实验[J]. 制冷学报, 2010, 31(1): 31-34. (SHENG Wei, WU Weidong, ZHANG Hua, et al. Experimental study on enhancement of ammonia bubble absorption process by adding nanoparticles[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(1): 31-34.)
- [5] KEMOUN A, ONG B C, GUPTA P, et al. Gas holdup in bubble columns at elevated pressure via computed tomography [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(5): 929-946.
- [6] WU Xi, LIU Jiawei, XU Shiming, et al. Effect of vibration parameters on the bubble absorption characteristics of working fluids R134a-DMAC in a vertical tube[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 99: 234-242.
- [7] KANG Y T, NAGANO T, KASHIWAGI T. Visualization of bubble behavior and bubble diameter correlation for $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ bubble absorption[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(1): 127-135.
- [8] KIM H Y, SAHA B B, KOYAMA S. Development of a slug flow absorber working with ammonia-water mixture: part I—flow characterization and experimental investigation [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(5): 508-515.
- [9] LI Lirong, KANG Y T. Bubble behaviors and CO_2 absorption characteristics in nanoabsorbents[J]. Journal of CO_2 Utilization, 2019, 33: 488-499.
- [10] LI Lirong, KANG Y T. Effects of bubble coalescence and breakup on CO_2 absorption performance in nanoabsorbents [J]. Journal of CO_2 Utilization, 2020, 39: 101170.
- [11] ROY S, VASHISHTHA M, SAROHA A K. Catalytic wet air oxidation of oxalic acid using platinum catalysts in bubble column reactor: a review[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2010, 3(1): 95-107.
- [12] 孔祥强, 李华昭, 李见波. R134a-DMF 垂直管内鼓泡吸收特性研究[J]. 制冷学报, 2022, 43(2): 80-88. (KONG Xiangqiang, LI Huazhao, LI Jianbo. Study on bubble absorption characteristics of R134a-DMF in vertical tube [J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(2): 80-88.)
- [13] KANG Y T, NAGANO T, KASHIWAGI T. Mass transfer correlation of $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ bubble absorption[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(7): 878-886.
- [14] 蒋孟男, 徐士鸣, 胡军勇, 等. 垂直管内 R124-DMAC 鼓泡吸收过程流型演化可视化实验[J]. 化工学报, 2015, 66(7): 2433-2441. (JIANG Mengnan, XU Shiming, HU Junyong, et al. Visual experiment on evolution of flow pattern of R124-DMAC bubble absorption process in vertical tube[J]. CIESC Journal, 2015, 66(7): 2433-2441.)
- [15] KIM H Y, SAHA B B, KOYAMA S. Development of a slug flow absorber working with ammonia-water mixture: part II—data reduction model for local heat and mass transfer characterization[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(6): 698-706.
- [16] JIANG Mengnan, XU Shiming, WU Xi, et al. Visual experimental research on the effect of nozzle orifice structure on R124-DMAC absorption process in a vertical bubble tube[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 68: 107-117.
- [17] XU Shiming, JIANG Mengnan, HU Junyong, et al. Visual experimental research on bubble absorption in a vertical tube with R124-DMAC working pair [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 74: 1-10.
- [18] KIM H Y, SAHA B B, KOYAMA S. Development of a slug flow absorber working with ammonia-water mixture: part I—flow characterization and experimental investigation [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(5): 508-515.
- [19] KIM J K, JUNG J Y, KANG Y T. The effect of nanoparticles on the bubble absorption performance in a binary

- nanofluid [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(1): 22–29.
- [20] 赵锐, 程文龙, 江守利, 等. 氨鼓泡吸收的动力学模型及其吸收特性[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(增刊 1): 25–28. (ZHAO Rui, CHENG Wenlong, JIANG Shouli, et al. Kinetic model of ammonia bubble absorption and its absorption characteristics[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(Suppl. 1): 25–28.)
- [21] DONNELLAN P, CRONIN K, LEE W, et al. Absorption of steam bubbles in lithium bromide solution[J]. *Chemical Engineering Science*, 2014, 119: 10–21.
- [22] XIE Guozhen, WU Qingping, FA Xiaoming, et al. A novel lithium bromide absorption chiller with enhanced absorption pressure [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 38: 1–6.
- [23] 王刚, 解国珍, 王亮亮. 溴化锂吸收式循环的内外热物理参数与机组制冷特性耦合[J]. *化工学报*, 2012, 63(增刊 2): 1–7. (WANG Gang, XIE Guozhen, WANG Liangliang. Coupling of lithium bromide absorption cycle inside and outside thermal physical parameters and refrigeration unit characteristics [J]. *CIESC Journal*, 2012, 63 (Suppl. 2): 1–7.)
- [24] 胡磊, 王晓. 复合式三效溴化锂吸收式制冷循环特性分析[J]. *建筑热能通风空调*, 2018, 37(4): 1–5. (HU Lei, WANG Xiao. Characteristic analysis of hybrid triple-effect LiBr/water absorption refrigeration cycle [J]. *Building Energy & Environment*, 2018, 37(4): 1–5.)
- [25] 戴永庆. 溴化锂吸收式制冷空调技术实用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. (DAI Yongqing. *Practical handbook of lithium bromide absorption refrigeration and air conditioning technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 1999.)

通信作者简介

王刚,男,博士,讲师,北京建筑大学环境与能源工程学院,15911066230,E-mail: wanggang@bucea.edu.cn。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 Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 86–15911066230, E-mail: wanggang@bucea.edu.cn. Research fields: absorption heat pump and thermochemical energy storage technology.