

溴化锂溶液真空表面蒸发实验研究

张峰榛, 钟悦声, 杜怀明, 彭 李

(四川理工学院材料与化学工程学院, 四川 自贡 643000)

摘 要:以质量浓度为0~15%溴化锂溶液为“工质”,研究操作温度在40~70℃条件下溶液真空表面蒸发过程。实验结果表明:溴化锂溶液的蒸发速率随溶液浓度的增大而减小,但随溶液温度的升高而增大;该实验条件下获得的对流传热系数值在700~1400 W·m⁻²·℃⁻¹范围内,且随溶液浓度增大而显著减小。这主要是由于溶液浓度增大使得其粘度显著增加,导致热阻增大所致。

关键词:溴化锂;表面蒸发;蒸发速率;对流传热系数

中图分类号:TQ026.4

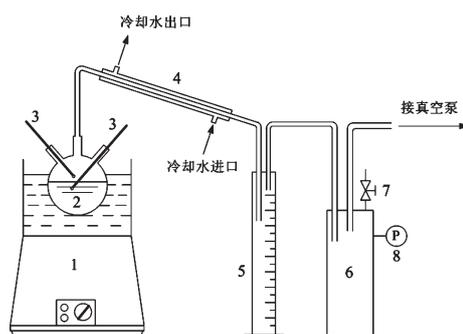
文献标志码:A

溴化锂溶液无毒无害且具有强吸湿性,常被用作吸收式制冷剂。相比以氟利昂为工质依靠电能驱动的传统制冷技术,溴化锂吸收式制冷机则以低品位热源驱动,可回收工业废热及高温排气,实现热能综合利用,符合低碳经济的发展趋势^[1-2]。溴化锂吸收式制冷机中的一个重要部件是发生器,余热热源在发生器中加热溴化锂稀溶液使水不断汽化蒸发,稀溶液浓缩为浓溶液。蒸发是溶液被加热汽化实现溶剂与溶质的分离,实质是热量、质量同时传递过程。相对于剧烈的沸腾蒸发,溶液表面蒸发过程具有汽液相界面清晰,蒸发面积易于定量,传热系数容易测量等优点,常被作为传热传质的典型实验供实验室研究^[3-6]。基于此,本文研究真空条件下溴化锂溶液的表面蒸发过程,获得其传递规律,以期后续溴化锂吸收式制冷过程开发提供参考。

1 实验装置及流程

溴化锂溶液真空表面蒸发实验装置如图1所示。蒸发装置主要由恒温水浴、上部套有绝热保温层的蒸发器、冷凝管、带刻度的集液瓶、真空泵等组成。蒸发器内装有一定体积配置好的溴化锂溶液,经恒温水浴加热,溶液表面汽化,蒸汽离开蒸发器经冷凝管冷凝并由集液

瓶收集,集液瓶与放空系统和真空源连接以排出体系中不凝气。实验通过调节恒温水浴温度及操作压力,控制蒸发器内溶液温度,并控制溶液过热度小于5℃以防止溶液沸腾。



1-恒温水浴锅 2-蒸发器 3-温度计 4-冷凝管
5-集液瓶 6-缓冲瓶 7-放空阀 8-真空表

图1 实验装置示意图

实验测量不同操作条件下溶液温度和汽相温度,并在一定的时间间隔内测量收集的冷凝液,作出冷凝液随时间的变化曲线,进而获得蒸发速率。为防止溶液因蒸发浓缩使得溴化锂溶液浓度变化较大,每一组实验控制收集的冷凝液总体积不超过初始溶液体积(280 mL)的10%。

收稿日期:2013-07-06

基金项目:四川理工学院人才引进项目(2012RC07)

作者简介:张峰榛(1980-),男,四川德阳人,讲师,博士,主要从事传质与分离及化工多相流技术方面的研究,(E-mail)zhangfengzhen421@163.com

2 表面蒸发过程分析

溶液表面蒸发是指当溶液主体温度略高于溶液饱和温度,传热仅依靠自然对流方式从溶液主体传至汽液相界面,并在相界面处蒸发的热质耦合传递过程。忽略散热损失,认为液体主体向汽液相界面传递的热量全部用于表面蒸发所需的潜热,对该过程作热量衡算,得:

$$Wr_v = A\alpha(t_l - t_s) \quad (1)$$

式(1)中, W 为溶液中水的蒸发速率($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$); r_v 为汽化潜热($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$); A 为蒸发面积(m^2),即蒸发器内溶液液面面积。实验使用的蒸发器为三颈烧瓶,溶液液面面积可近似由球缺公式估算。因蒸发量小于初始体积的10%,液面面积变化不超过5%,可将蒸发面积视为定值; α 为对流传热系数($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$); t_l 与 t_s 分别为溶液主体温度及溶液表面温度($^{\circ}\text{C}$)。已有研究表明^[6]对于液体表面蒸发过程,传热阻力主要集中在液相,蒸发过程满足热力学准平衡条件,即 t_s 微大于 t_g , t_g 为汽相温度。因此,式(1)中 t_s 可近似由 t_g 代替。

水的蒸发速率 W 可由式(2)获得。

$$W = \frac{\Delta m}{\Delta \tau} \quad (2)$$

式(2)中, $\Delta \tau$ 为蒸发时间间隔, Δm 为 $\Delta \tau$ 时间间隔内的蒸发量(kg), W 可由回归分析获得。因此蒸发过程的对流传热系数为:

$$\alpha = \frac{Wr_v}{A(t_l - t_g)} \quad (3)$$

在不同的操作条件下,通过回归获得的蒸发速率及实验测量的汽、液两相温度可求得对流传热系数。

3 结果与讨论

表1给出了实验条件及测量结果。可见,每组实验的溶液主体温度 t_l 与液面附近汽相温度 t_g 之差小于 5°C ,保证溶液不沸腾,处于自然对流的溶液表面蒸发阶段。

表1 实验条件及测量结果

实验序列	$w / \%$	P / kPa	$t_l / ^{\circ}\text{C}$	$t_g / ^{\circ}\text{C}$	$(t_l - t_g) / ^{\circ}\text{C}$
1	0	8.1	44.8	42.3	2.5
2	5	7.9	45.4	43.7	1.7
3	10	7.4	45.0	43.3	1.7
4	15	6.9	44.9	43.1	1.8
5	0	25.1	68.3	65.6	2.7
6	5	24.7	68.1	65.6	2.5
7	10	23.9	67.7	65.4	2.3
8	15	23.1	68.2	65.9	2.3

3.1 溶液浓度及温度对蒸发过程的影响

图2和图3分别给出了溴化锂溶液温度为 45.0°C

和 68.0°C ,不同溴化锂溶液浓度条件下蒸发量 m 随时间 τ 的变化规律。可见, m 与 τ 呈线性关系,由回归分析得,溶液温度为 45.0°C ,溶液质量浓度分别为0%(纯水),5%,10%,15%条件下 m 与 τ 的函数关系分别为: $m = 1.19 \times 10^{-5} \tau$, $m = 6.2 \times 10^{-6} \tau$, $m = 5.3 \times 10^{-6} \tau$, $m = 5.0 \times 10^{-6} \tau$;溶液温度为 68.0°C ,溶液质量浓度分别为0%,5%,10%,15%条件下 m 与 τ 的函数关系分别为: $m = 1.33 \times 10^{-5} \tau$, $m = 9.6 \times 10^{-6} \tau$, $m = 7.7 \times 10^{-6} \tau$, $m = 6.5 \times 10^{-6} \tau$ 。以上线性回归相关系数 R 皆大于0.97。结果表明,在相同温度条件下,蒸发速率,即 m 与 τ 的函数斜率值,随溶液浓度增大而降低。这是因为较大的溴化锂溶液浓度增大了表面蒸发阻力所致。

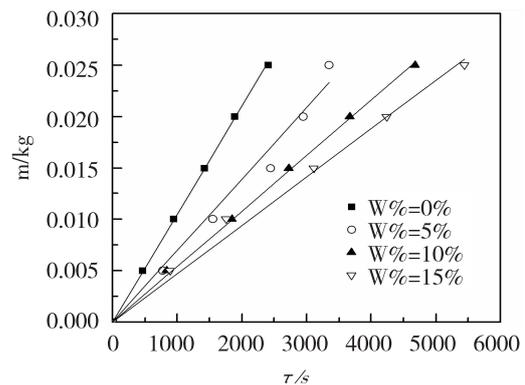


图2 溶液蒸发量随时间变化关系(45.0°C)

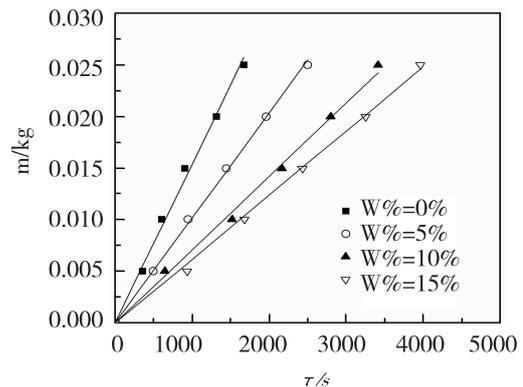


图3 溶液蒸发量随时间变化关系(68.0°C)

由图2和3的结果还可看出,相同溶液浓度条件下溶液温度越高,蒸发速率越大。这是由于升高温度,水分子的运动速度加快,汽液相界面处水分子更容易从液面上逸出所致。

3.2 蒸发过程对流传热系数

图4给出了溴化锂溶液蒸发过程中对流传热系数 α 随溶液质量浓度 w 的变化规律。可见,在该实验条件下对流传热系数在 $700 \sim 1400 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$ 范围内,且随着溶液浓度的增大显著减小。这是因为随着溶液浓度增大

其粘度也增加^[7-8],在相同的流动状态下,流体粘度越大,传热边界层较厚,热阻增大所致。该实验规律亦得到了文献[9-10]的支持。

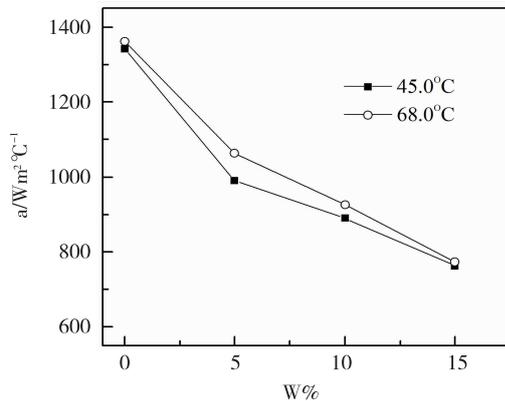


图 4 对流传热系数随溴化锂溶液浓度的变化 (45.0 °C)

4 结论

溴化锂溶液质量浓度为 0 ~ 15%, 溶液温度在 40 ~ 70 °C 的实验条件下:

(1) 溴化锂溶液的表面蒸发速率随溶液浓度的增大而减小,但随溶液温度的升高而增大。

(2) 表面蒸发过程的对流传热系数可达 700 ~ 1400 W·m⁻²·°C⁻¹。蒸发过程对流传热系数受溴化锂溶液浓度影响显著,对流传热系数值随溴化锂溶液浓度增大而迅速减小,这主要是由于溶液粘度增大导致热阻增大所致。

参考文献:

- [1] 姜周曙,胡亚才,屠传经,等.溴化锂吸收式制冷技术在余热回收中的研究[J].节能技术,1999,17(3):10-11.
- [2] 周东一,石楚平,袁文华,等.利用汽车发动机余热的溴化锂吸收式制冷研究[J].节能,2008,311(6):23-26.
- [3] 王补宣,张金涛,彭晓峰.薄膜液表面蒸发对降液膜传热和传质的影响[J].中国科学(E辑),2000,30(3):216-221.
- [4] 石程名,王洋,宫世吉.溴化锂溶液竖管内降膜蒸发传热性能分析[J].重庆大学学报,2010,33(9):113-118.
- [5] Cherif A S, Jabrallah S B, Corriou J P, et al. Intensification of the liquid film evaporation in a vertical channel[J]. Desalination, 2010, 250(1):433-437.
- [6] 张峰榛,魏文焜,余徽,等.连续液柱流表面真空蒸发模型[J].化工学报,2011,62(12):3323-3329.
- [7] 王闻天.强电解质水溶液粘度的通用估算式[J].化工设计,1989,2:44-51.
- [8] 侯满州,李成容,王英利,等.强电解质溶液粘度的研究[J].化学通报,2011,74(4):356-361.
- [9] 陈建利,王魁,刘德春,等.磷酸自然循环低温蒸发实验研究[J].磷肥与复肥,2011,26(5):26-28.
- [10] 余林春,杜怀明,张峰榛,等.硝酸钙溶液自然循环低温预浓缩实验研究[J].四川理工学院学报:自然科学版,2013,26(2):25-27.

Experimental Study on the Vacuum Surface Evaporation of the LiBr Solution

ZHANG Feng-zhen, ZHONG Yue-sheng, DU Huai-ming, PENG Li

(School of Material and Chemical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: With the mass concentration ranged from 0 to 15% and temperature from 40 °C to 70 °C, the vacuum surface evaporation process of the LiBr solution was studied. The experiment results showed that: the evaporation rate of the LiBr solution declined with the rise of the solution concentration, however, increased with the rise of the solution temperature. The heat transfer coefficient obtained under the experiment conditions ranged from 700 W·m⁻²·°C⁻¹ to 1400 W·m⁻²·°C⁻¹, and decreased significantly with the increasing of the solution concentration. It was caused by the enhancement of heat transfer resistance due to the elevated viscosity which resulted from the increased solution concentration.

Key words: lithium bromide; surface evaporation; evaporation rate; heat transfer coefficient