

文章编号: 0253-4339(2012)01-0001-05

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.01.001

垂直管氨水降膜吸收传质研究

徐振中 夏再忠 林 芃 郭沛民 王如竹

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘 要 吸收器是影响氨水吸收式制冷系统的关键部件。对常用的垂直管氨水降膜吸收器进行绝热吸收模拟分析,并将模拟分析结果与实验结果进行了对比。在此基础上,通过实验进一步研究了稀溶液进口过冷和外部吸收冷却对吸收传质的影响,得到稀溶液进口过冷能够促进吸收传质的结论。结果表明:氨水吸收式制冷传质率的模拟结果与实验结果的偏差在20%以内,在冷却吸收和进口过冷的实验测试工况下,吸收传质率提高了132%。

关键词 工程热物理; 氨水降膜吸收; 绝热吸收; 过冷

中图分类号: TB61⁺1; TK511⁺3

文献标识码: A

Mass Transfer Study of Ammonia-water Falling-film Absorption in Vertical Tube

Xu Zhenzhong Xia Zaizhong Lin Peng Guo Peimin Wang Ruzhu

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract Absorber is the key component of Ammonia-water absorption refrigeration. This study simulate the falling film adiabatic absorption to analyse the characteristics of mass absorption and compare the simulated result with the experiment result. The error of the simulated value of mass transfer rate comparing to the experiment value is less than 20%. Besides the experiment shows that subcooling of weak solution before absorption can promote the mass absorption. In experiment, cooled absorption with subcooling improve the mass absorptive rate by 132%.

Keywords Engineering thermophysics; Ammonia-water falling film absorption; Adiabatic absorption; Subcooling

吸收式制冷能够利用工业余热和太阳能等低品位能源,契合节能的倡导,其研究和发展也得到越来越多的重视。常用的吸收制冷工质对为LiBr-H₂O和NH₃-H₂O。相比于溴化锂吸收机组,以氨水为工质的吸收机组制冷温度可达到0℃以下,运行时系统处于正压条件,特别氨水系统能够采用风冷冷却^[1-2],去除水冷冷却塔,可降低系统投资,实现系统小型化,从而解决太阳能驱动的小型家用吸收制冷机所面临的问题^[3]。

氨水吸收制冷的COP较低,需要进行系统部件的优化,其中吸收器是影响吸收制冷系统性能的主要部件。垂直管内降膜吸收器是常用的吸收器,降膜式吸收具有传热效率高、传热温差损失小、无静压头引起的沸点升高及物料停留时间短等特点。在典型的氨水管内垂直降膜吸收器中,沿管内壁垂直降下的氨水液膜吸收管内的氨气,释放大量的热,冷却介质在吸收管外侧带走热量,使得管内的

吸收过程持续进行,形成了复杂的传热传质过程。

国内外学者对于氨水降膜吸收传热传质过程进行了许多模拟研究。Kim^[4]采用连续性方程,动量方程,能量方程和扩散方程分析氨水降膜吸收过程,研究了气流方向、氨水浓度、氨气浓度和外部冷却对吸收过程的影响。Goel和Goswami^[5]采用双膜模型模拟了平板吸收器在平板外侧水冷情况下氨水逆流吸收的传热传质,模型同时考虑了气相侧和液相侧的传质阻力。实验方面的研究工作较少,Kwon^[6]等研究了在螺旋盘管降膜吸收器中氨气流向对吸收传热传质的影响。Kang^[7]等人对平板换热器中氨水降膜顺流吸收进行了实验研究,并拟合出Nusselt和Sherwood的关系式。同时他们还进行了鼓泡吸收的实验,得到了其传质关系式^[8]。

国内外研究者在对氨水吸收过程的研究中,吸收过程均伴随外部冷却,带走吸收产生的热量,传热和传质过程相互耦合,这里对氨水垂直光管降

膜吸收的传质研究主要从绝热吸收的角度入手,对绝热吸收情况进行模拟和实验,将模拟与实验结果比较,集中研究吸收过程中的传质特性,特别是过冷度对吸收传质的影响。

1 氨水绝热吸收过程模拟

在氨水绝热吸收模拟中,稀氨水溶液从上端进入,氨气从下端进入,形成逆流吸收,吸收管外为绝热条件,没有冷却。

模拟采用双膜模型^[9],其主要假设是:1)气、液两相流体间存在着稳定的相界面,界面两侧各有一个很薄的停滞膜,相界面两侧的传质阻力集中于这两个停滞膜内,吸收质以扩散方式通过此二膜层由气相主体进入液相主体;2)在相界面处,气、液两相处于平衡,界面上没有传质阻力;3)在两个停滞膜以外的气、液两相主体中,由于流体充分湍动,不存在浓度梯度,物质组成均匀。

由此传质吸收过程首先从气相主体传到界面,在界面内传质不存在阻力,界面处于平衡状态,最后由界面向液相主体传质。图1为模拟传质吸收的示意图。在沿吸收管段方向上建立气相主体、界面和液相主体的微元控制容积,利用质量平衡、组分平衡、能量平衡以及传热、传质方程式建立数学模型。绝热降膜吸收中的传热传质过程包括:主流气相向气液界面的传热传质,气液界面向主流液相的传热传质,各传热、传质系数利用参考文献[10-11]以及切尔顿·科尔本比拟^[12]得出。

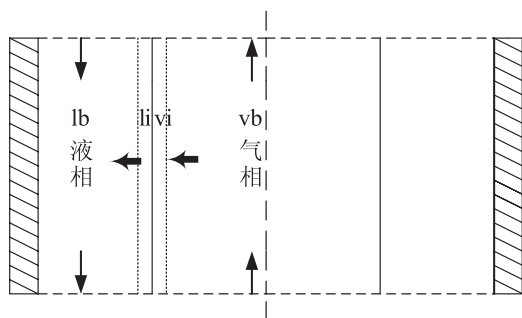


图1 氨水逆流绝热吸收示意图

Fig.1 Schematic diagram of countercurrent ammonia-water adiabatic absorption

2 氨水吸收实验

2.1 实验装置介绍

氨水垂直降膜吸收的实验台如图2示意图所示,实验垂直吸收管长1m,外径25mm,壁厚2mm,材料为碳钢。系统主要由氨水溶液循环、氨气循环和冷却水循环组成。在加热发生装置中的

稀氨水溶液由磁力齿轮泵泵送经过换热器和质量流量计,送至吸收器顶部的液槽,溶液溢过吸收管管口,沿吸收管内壁垂直下流形成降膜,与进入吸收管的氨水接触进行吸收,吸收后的浓溶液在底端流回最下部的加热发生装置。氨气由加热发生器产生,通过阀门控制,经吸收器顶部或吸收器底部进入吸收管,与液膜形成顺流或逆流吸收。冷却水循环一路流过吸收器管外套管,在水冷冷却吸收条件下使用,另一冷却水循环流过套管换热器对稀溶液进行过冷。图3为实验装置的实物图。

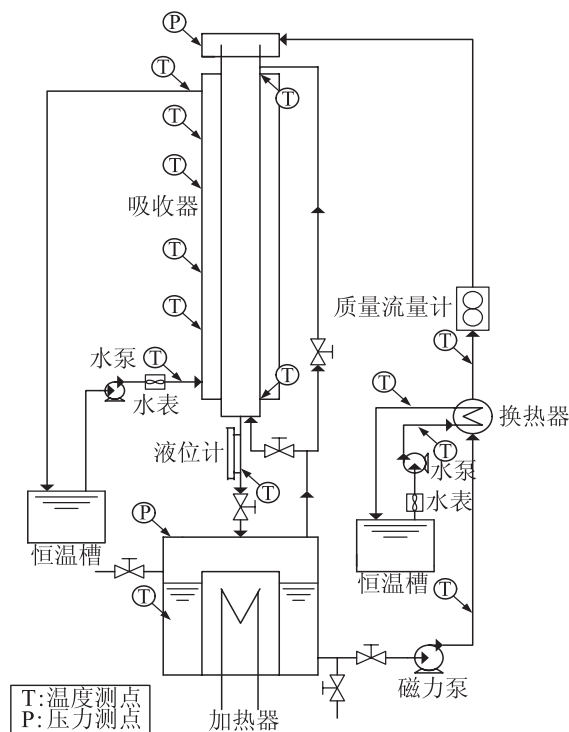


图2 氨水垂直降膜吸收实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental apparatus



图3 氨水垂直降膜吸收实验装置实物图

Fig.3 Picture of the experimental apparatus

实验测量部分主要为流量、密度、温度和压力，科里奥利质量流量计测量进入吸收管的稀溶液质量流量和密度。PT100和压力测量位置见图2标记。水表测量吸收管水冷和换热器水冷的冷水流量。测量设备和精度见表1。

表1 测量设备和精度

Tab.1 Measurement and accuracy of the instruments

测量设备	测量参数/量程	精度
科里奥利 流量计	质量流量: 0~2.7g/s	流量: $\pm 0.2\%$
	密度: 0.5~2.5g/cm ³	密度: $\pm 0.002\text{g/cm}^3$
水表	体积流量: 0.75~50L/min	$\pm 0.5\%$
PT 100	温度: 0~200℃	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
压力传感器	压力: 0~1600kPa	$\pm 1\%$

2.2 实验数据测量和数据计算处理

实验中，控制冷却水在吸收器套管和换热器的流量和温度，进行了绝热吸收，水冷吸收不同条件下的实验。实验测量工况如表2所示。

表2 实验测试状况

Tab.2 Test conditions of the experimental study

实验控制量	范围
冷却水温度	26~32℃
稀溶液进口过冷度	0~32℃
稀溶液进口浓度	0.24~0.36
吸收压力	300~550kPa (绝对压力)
稀溶液降膜Re	70~350
氨气流向	从下往上，与氨水溶液逆流

氨水降膜吸收过程中，总质量、氨组分质量和总能量守恒方程如下：

$$m_w + m_v = m_s \quad (1)$$

$$m_w x_w + m_v x_v = m_s x_s \quad (2)$$

$$m_w h_w + m_v h_v = m_s h_s + Q \quad (3)$$

m_w 由流量计直接测量， x_w 由温度和密度计算得到， x_v 由氨气温度和压力计算得到， h_w 由温度和 x_w 计算得到， h_v 由氨气温度和 x_v 算得， h_s 与 x_s 和对应温度相关。 Q 通过冷却水流量和进出口温度得到，在绝热吸收当中， Q 为零。

通过方程组求解 m_v 、 m_s 和 x_s 这些未知量。 $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ 混合物物性计算依据参考文献[13]。

3 结果分析与讨论

3.1 绝热吸收浓度分布模拟

图4是模拟绝热吸收得到的浓度分布曲线。稀溶液进口温度为30℃，过冷度为27℃，降膜Re

为230，吸收压力为350kPa。稀溶液从上端降膜(L=0)，氨气从底端(L=1)进入，进行逆流吸收。从图中可以看到，界面液相的浓度始终高于液相主体浓度，两者之间的浓度差，从上端往下，迅速下降。界面液相浓度在入口处显著高于液相主体浓度，浓度差为0.14。这是因为稀溶液入口过冷，界面平衡温度降低，使得初始界面液相平衡浓度比较高。沿管段下降，随着吸收放热过程进行，界面液相浓度逐渐下降，浓度差减小。在稀溶液入口段，还存在气相调整过程。起始段气相主体浓度 X_{vb} 低于界面平衡气相浓度 X_{vi} 。但是由于入口的过冷，界面温度低于气相的饱和温度，从而发生氨的冷凝，产生传质，产生大量的热，界面温度升高。随着调整气相主体浓度进而高于界面平衡气相浓度，继续进行传质吸收。

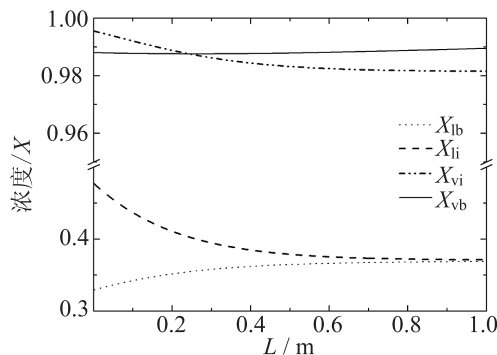


图4 绝热吸收模拟浓度分布曲线(L=0~1m)

Fig.4 Concentration along the absorber by simulation (L=0~1m)

从图4的液相主体浓度分布可以看到，在0~0.5m段液相主体浓度由0.33上升到0.365，吸收器的出口浓度为0.369，因而吸收过程主要发生在吸收管的上段。

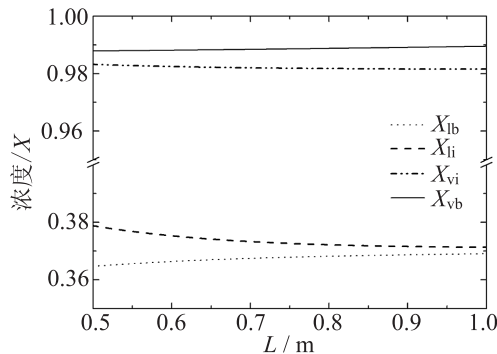


图5 绝热吸收模拟浓度分布曲线(L=0.5~1m)

Fig.5 Concentration along the absorber by simulation (L=0.5~1m)

放大图4的L=0.5~1m段，得到图5。结合图4和图5的浓度分布曲线，可以看到在吸收管的上段

($L=0\sim0.68\text{m}$)液相主体浓度 X_{lb} 与界面平衡液相浓度 X_{li} 的浓度差要高于气相主体浓度 X_{vb} 与界面平衡气相浓度 X_{vi} 之间的浓度差,而在下段($L=0.68\sim1\text{m}$)处,气相主体浓度 X_{vb} 与界面平衡气相浓度 X_{vi} 之间的浓度差则要更大,在出口处气相浓度差为0.0079,而液相浓度差为0.00224。

3.2 绝热吸收传质率模拟与实验

图6是绝热吸收传质率模拟与实验结果之间的比较。通过实验测量得到了吸收压力为350kPa,稀溶液进口过冷度为27℃情况下,不同降膜流量的吸收传质率。吸收传质率随着降膜稀溶液 Re 的增大而升高,与模拟结果的趋势一致。从模拟值与实验值的比较来看,实验值要低于模拟结果。实验与模拟结果的偏差最小为12.1%,最大为18.5%。在该实验条件下,最大吸收传质率为0.126g/s。

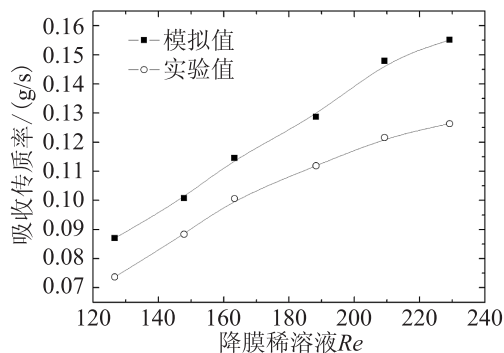


图6 吸收传质率模拟与实验结果比较

Fig.6 Comparison of mass transfer rate from simulation and experiment

3.3 过冷度对吸收传质影响

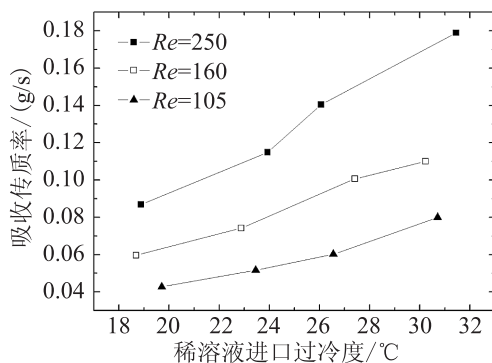


图7 绝热传质率随过冷度变化

Fig.7 Adiabatic absorptive mass transfer rate under different subcooling

通过控制实验中稀溶液进口过冷度,测量了不同过冷度下绝热吸收传质情况。图7为吸收压力350kPa条件下,过冷度对吸收传质率的影响。相同降膜 Re 下,增大过冷度,绝热吸收传质率随之升

高,稀溶液过冷能够提高吸收传质速率。过冷使得溶液浓度与饱和溶液浓度差变大,同时过冷溶液的有更大的热容,促进吸收放热。

3.4 冷却吸收

在吸收管套管和换热器用冷却水进行冷却,冷却水温度为26℃。吸收前稀溶液具有过冷,在吸收过程中,水冷冷却带走吸收放热,进行冷却吸收。图8和图9是冷却吸收条件下,吸收传质率和吸收传热量变化的情况。随吸收压力的提高,总吸收传质率也上升。同时吸收传质率与吸收传热量变化趋势呈现一致。

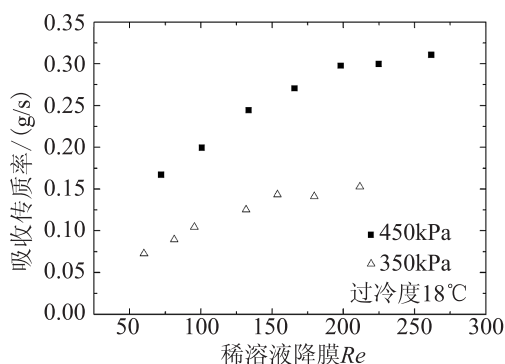


图8 冷却吸收传质率

Fig.8 Mass transfer rate with water cooling

从图7和图8的比较可以看到,在350kPa吸收压力下, Re 为160时,绝热吸收传质率为0.060g/s,而水冷冷却吸收条件下,能够达到0.14g/s。在 Re 为105时,绝热吸收传质率为0.043g/s,水冷冷却吸收条件下,能够达到0.10g/s,传质速率提高了132%,可见冷却吸收条件下传质率能够显著高于绝热吸收条件下的传质率。因而在吸收过程中,需要合理进行过冷和吸收冷却。

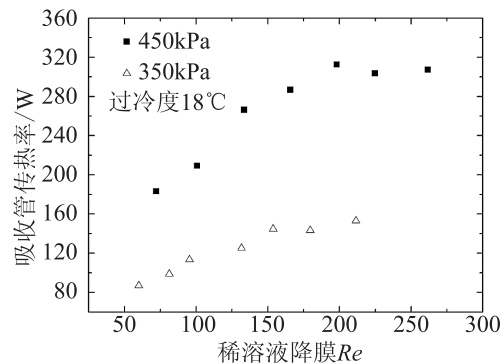


图9 冷却吸收传热量

Fig.9 Heat transfer with water cooling

4 结论

进行了垂直管氨水降膜吸收的绝热传质模

拟, 并实验测量了绝热吸收和水冷却吸收情况的吸收传质率。绝热吸收传质率的模拟与实验测量结果偏差在20%以内。

1) 绝热吸收模拟的浓度曲线结果显示: 在进口过冷条件下, 降膜吸收入口段气相存在着调整过程。液相界面与主体液相的浓度差随着降膜过程迅速减小。在模拟的吸收管段中, 吸收过程集中在0~0.5m段。吸收管的上段液相主体浓度与界面平衡液相浓度的浓度差要高于气相主体浓度与界面平衡气相浓度之间的浓度差, 液相侧传质阻力要大于气相侧传质阻力, 为强化传质, 需要减少液相侧传质阻力, 加大液相侧传质驱动力。

2) 绝热吸收和冷却吸收的实验表明: 在同等条件下, 随入口溶液过冷度的增加, 吸收传质率升高。采用冷却吸收, 排出吸收放热, 同时对吸收前的稀溶液进行过冷, 得到的吸收传质率要高于过冷绝热吸收的情况。因而在吸收制冷实验装置中, 吸收前的稀溶液通过溶液换热器实现一定过冷度, 有利于促进吸收传质。

本文受上海交通大学研究生创新能力培养专项基金项目资助。(The project was supported by Shanghai Jiao Tong University Innovation Fund For Postgraduates.)

符号说明

d	管径	h	焓	L	长度
m	质量流量密度	Q	热流密度	Re	雷诺数
T	温度	x	质量浓度		
下标					
w	稀溶液	v	气相	s	浓溶液
lb	液相主体	i	界面	vb	气相主体
li	界面-液相	vi	界面-气相		

参考文献

- [1] Seara J F, Uhia F J, Sieres J. Analysis of an air cooled ammonia-water vertical tubular absorber[J].International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46:93-103.
- [2] Lin Peng, Wang Ruzhu, Xia Zaizhong. Numerical investigation of a two-stage air-cooled absorption refrigeration system for solar cooling: Cycle analysis and absorption cooling performances[J].Renewable Energy, 2011,36(5):1401-1412.
- [3] Wang Ruzhu, Ge Tianshu, Chen C J,et al. Solar

sorption cooling systems for residential applications: options and guidelines[J]. International Journal of Refrigeration,2009,32: 638-660.

- [4] Kim B. Heat and Mass Transfer in a Falling Film Absorber of Ammonia-Water Absorption Systems[J].Heat Transfer Engineering, 1998, 19(3):53-63.
- [5] Goel N, Goswami D Y. Analysis of a counter-current vapor flow absorber[J].International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48:1283-1292.
- [6] Kwon K, Jeong S. Effect of vapor flow on the falling-film heat and mass transfer of the ammonia/water absorber[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27: 955-964.
- [7] Kang Y T, Akisawa A, Kashiwagi T. Experimental correlation of combined heat and mass transfer for $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ falling film absorption[J].International Journal of Refrigeration, 1999, 22:250-262.
- [8] Kang Y T, T Nagano, Kashiwagi T. Mass transfer correlation of $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ bubble absorption[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25:878-886.
- [9] Lewis W K, Whitman W G. Principles of gas absorption[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1924, 16:1215-1220.
- [10] Yih S M, Chen K Y. Gas absorption into wavy and turbulent falling liquid films in a wetted-wall column[J]. Chemical Engineering Communications, 1982, 17: 123-136.
- [11] Kakac S, Shah R C, Aung W. Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer[M].John Wiley & Sons Inc., 1987.
- [12] Chilton T H, Colburn A P. Mass transfer (absorption) coefficients[J].Ind. Engrg. Chem.,1934,26:1183-1187.
- [13] Conde M.Thermodyamic properties of $\{\text{NH}_3+\text{H}_2\text{O}\}$ mixtures for the industrial design of absorption refrigeration equipment[M]. M Conde Engineering, 2006.

通讯作者简介

夏再忠, 男(1971-), 博士, 副教授, 上海市东川路800号, 上海交通大学制冷与低温工程研究所, 200240, (021)34206296, E-mail: xzz@sjtu.edu.cn。研究方向: 传热传质强化和低品位热能的吸收吸附制冷等。

About the corresponding author

Xia Zaizhong (1971-), male, Ph.D./ associate professor. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, 800 Dongchuan Road, Shanghai, China, 200240, (021)34206296, E-mail:xzz@sjtu.edu.cn. Research fields: Enhanced heat and mass transfer, Low grade waste heat driven sorption refrigeration.