文章编号:0253-4339(2013) 06-0029-06 doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.06.029

横纹管氨水降膜吸收温度场与浓度场计算与测量

陈小砖^{1,2} 柳建华¹ 张 良¹ 王 欢¹ 刘 旗¹

(1上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093;2河南理工大学机械与动力工程学院 焦作 454003)

摘 要 根据降膜吸收传质双膜模型,分析了氨气热量、质量和动量传递过程中相关物理量的变化规律和传递机理。建立了氨 气降膜吸收过程能量、质量守恒方程组,使方程组离散化,然后利用 Gauss-Seidel 迭代法求解。得到了光滑管和横纹管降膜吸收 氨水溶液氨质量分数沿降膜管高度的变化曲线。并绘出了横纹管降膜吸收过程氨水溶液和冷却水模拟计算温度随降膜管无量 纲高度的变化曲线。横纹管相比光滑管在相同工况下有较强的降膜吸收性能,吸收能力在冬夏季节分别提高了 118.5% 和 167.7%。实验结果表明,2 号横纹管氨水溶液与冷却水沿降膜管高度的模拟计算温度与测量温度在溶液降膜吸收过程中吻合 良好。

关键词 氨水;降膜吸收;温度场;质量分数;横纹管 中图分类号:TB61⁺1

文献标识码:A

Calculation and Measurement of Temperature Field and Mass Fraction Field about Aqua Ammonia Falling Film Absorption based on Transversally Grooved Tube

Chen Xiaozhuan^{1,2} Liu Jianhua¹ Zhang Liang¹ Wang Huan¹ Liu Qi¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454003, China)

Abstract According to double membrane mass transfer model of falling film absorption, change law and transport mechanism were analyzed on related physical quantities during ammonia's heat, mass and momentum transfer process. Energy and mass conservation equations were established for ammonia gas falling film absorption, and equations discretization was made. Subsequently Gauss-Seidel iterative method was used to solve these equations. Variation curve of aqua ammonia solution mass fraction along falling film tube height was obtained about smooth tube(SMT) and transversally grooved tube(TGT). The temperature of aqua ammonia and cooling water at different dimensionless height was obtained for falling film absorption of transversally grooved tube. TGT has strong falling film absorption performance in the same conditions compared with that of SMT. Absorptive capacity in winter and summer season increased by 118.5% and 167.7% respectively. The experimental results showed that the predicted temperatures of aqua ammonia and cooling water agree well with the measured temperature in the falling film absorption process.

Keywords aqua ammonia; falling film absorption; temperature field; mass fraction; transversally grooved tube

吸收器是氨水吸收式制冷系统中一个关键的设备,它的稳定运行直接关系到整个系统的正常工作。 吸收效率高的吸收器可以节省大量的金属材料,这是 因为吸收器在整个吸收式制冷系统中金属消耗量占 到大约40%^[12]。目前对吸收器的研究主要集中在 溴化锂吸收式制冷系统,氨水吸收式制冷系统吸收器 的研究目前相对缺乏。由于横纹管在强化传热和溴 化锂降膜吸收方面已经取得一些积极的成果^[34],所 以考虑在氨水吸收器降膜吸收过程尝试使用横纹管 作为降膜管。因此研究横纹管降膜吸收机理和寻求 强化吸收性能的措施显得十分重要。

近年来国内外对吸收式制冷系统吸收器做了很 多研究,取得了积极的成果^[5-7]。马学虎等学者建立 了溴化锂溶液沿平板降膜的流动模型。借助 FLU-ENT 流体力学软件,采用 UDF 宏命令编写入口处液 膜扰动。研究了入口扰动频率、降膜雷诺数和平板倾 斜角对降膜波动演化过程的影响^[8]。Chan Woo Park 研究了粗糙度在 0.386~11.359μm 范围变化的降膜

收稿日期:2013年1月4日

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20093120110003)资助 项目。(The project was supported by Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(No. 20093120110003).)

管的传热传质性能^[9]。韩国的 Kyongmin Kwon 研究 三种不同溶液浓度,氨浓度分别为 3%,14%,30% 时 的吸收性能,主要是从气体与溶液顺流和逆流两个角 度研究^[10]。P.G. Vicente 从实验角度系统研究了波 纹管的传热和摩擦阻力系数变化规律^[11]。李洪亮和 柳坤将横纹管引入到溴化锂吸收制冷系统中,通过大 量的实验研究了溶液喷淋密度、横纹管结构参数如节 距和槽深等因素对强化吸收效果的影响大小^[12]。目 前还没有学者针对氨水溶液降膜吸收器研究横纹管 的吸收效率和热量与质量交换机理。因此可以尝试 在氨气吸收制冷系统吸收器采用该种管型,研究横纹 槽管氨水溶液降膜吸收效果与机理,为高效率、体积 紧凑的吸收器研制提供理论依据。



1 氨泵 2 流量计 3 氨溶液罐 4 氨瓶 5 稳压减压阀 6 压力表 7 温度计 8 吸收器 9 冷却水进口 10 冷却水出口

> 图 1 氨水溶液降膜吸收实验台系统图 Fig. 1 Experimental system diagram of ammonia water falling film absorption

1 氨水吸收实验系统简介

如图 1 所示为氨水溶液降膜吸收实验台的系统 图。降膜前一定浓度的氨水溶液被计量泵吸入,经过 流量计进入吸收实验段的布液装置中。氨水溶液从 降膜管外以液膜的形式流过吸收段,吸收管外空间里 的氨气,吸收后的氨水溶液流入另一个溶液罐储存起 来,便于实验后对该溶液分析研究。冷却水与降膜溶 液逆流换热,带走吸收过程产生的热量。整个实验系 统采用不锈钢材料,符合氨水工质的使用要求。实验 系统加入温度和压力测量设备。实验结束后这些数 据利用 AGILENT34970A 采集输出到电脑,最后对 这些数据分析并加以处理。实验系统吸收器的降 膜管有四种,其中一根光滑圆管 Φ27mm×3mm,另 外三根是在相同圆管基础上加工出来的横纹槽管, 其外形结构实物照片和结构图如图 2、图 3 所示。 这些降膜管有效吸收高度均为 850mm,三根横纹管 编号为横纹管 1、2、3,具体尺寸参数在表 1 中列出。 这些尺寸选择是充分参考螺纹管或横纹管在强化 传热和溴化锂溶液降膜吸收方面已经取得的研究 成果,这些成果包括螺纹管或横纹管的最优尺寸范 围^[3,12]。如图 4 所示为布液器,保证氨水溶液沿降 膜管外壁面布膜均匀。



图 2 光滑管与横纹管照片 Fig. 2 Photograph of SM and TGT



图 3 横纹管结构图 Fig. 3 Structure chart of TGT



图 4 布液器照片 Fig. 4 Photograph of liquor distributor

表 1 横纹管尺寸规格参数 Tab. 1 Dimension parameters of TGT

编号	p∕ mm	e/mm	w∕ mm	e^2/pd
1	9.6	0.8	1.6	0.00247
2	13.2	1.1	2.2	0.0034
3	16.8	1.4	2.8	0.00432

2 实验数据处理方法

2.1 降膜溶液喷淋密度

$$\Gamma = \frac{q_{\rm V}\rho_l}{\pi d} \tag{1}$$

式中:*Γ*为喷淋密度;*q*_v为溶液的体积流量。可 以求得降膜溶液雷诺数为:

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu} \tag{2}$$

2.2 氨水溶液摩尔浓度和质量分数

 C_e 与 C_o 分别为降膜溶液吸收起始与结束时摩尔浓度,mol/L。先利用密度计分别测得降膜溶液吸收前后的密度 ρ_e 和 ρ_o ,根据文献上的拟合公式即可求出溶液对应的氨质量分数^[13]。氨质量分数 w 根据单位体积氨水溶液中的氨质量 m_1 和水质量 m_w 计算求出。

$$w = \frac{m_{\rm L}}{m_{\rm L} + m_{\rm W}} \tag{3}$$

2.3 溶液传质系数

根据定义,以管外氨气压力与降膜溶液表面氨气 饱和分压力的差作为传质推动力,求得:

$$k_{\rm mL} = \frac{m_{\rm a}}{A\Delta p} \tag{4}$$

式中:m_a为氨气吸收速率;k_{mL}为传质系数。A 为 传质面积。管外氨气压力由高精度压力表测得,根据 吸收亨利定律降膜溶液表面氨气饱和分压力由测得 的溶液温度和浓度求得平衡压力。两者之差就是传 质推动力 Δp。

3 降膜吸收建模求解与机理分析

如图 5 所示, 氨水溶液流体主体与相界面之间存 在三个流动区域, 即湍流主体、过渡层和滞流层^[14]。 在滞流层氨工质的传递主要依靠分子扩散作用, 由于 D值较小, 在该区域内分压梯度较大, 曲线陡峭。过 渡层内同时存在分子扩散和涡流扩散, 曲线逐渐平 缓。湍流主体内主要依靠涡流扩散, 大量旋涡引起的 混合作用使得气相主体内溶质的分压趋于一致, 分压 线为直线。延长滞流内层的分压线和气相主体的分 压线交于 H 点, 此点与相界面的距离为 Z_H, 此虚拟的 膜层称为有效滞流膜。整个有效滞流层的传质推动 力为气相主体与相界面处的分压之差, 即全部传质阻 力都包含在有效滞流膜层内。从氨气主体穿过液膜 到冷却水, 存在热量、质量和动量传递。它们相互耦 合, 传递原理也有相似性。如图所示为传递过程温 度、浓度和速度变化趋势的示意图^[15]。



1 滞流层 2 过渡层 3 湍流主体 4 有效滞流层

图 5 下降液膜吸收模型图

Fig. 5 Absorption model diagram of falling liquid film



图 6 下降液膜热量、质量和动量传递示意图 Fig. 6 Heat, mass and momentum transfer schematic diagram of falling liquid film

氨水溶液降膜是一个传热传质相互耦合的复杂 过程,可以利用现代计算理论和工具详细分析降膜吸 收机理,求出氨气吸收过程有关重要参数的变化过 程,揭示气液吸收相互作用规律。根据氨气吸收过程 的质量守恒和能量守恒,列出下列方程组。

$$\begin{split} N_{i+1} - N_i &= k_{\rm mL} (\pi D_{\rm o}) (C_{\rm ai}^* - C_{\rm ai}) \Delta l \\ &= Gv (C_{\rm ai+1} - C_{\rm ai}) \end{split}$$

— 31 —

$$\frac{T_{wi} - T_{wi+1}}{\Delta l} = \frac{K(\pi D_e)}{WC_{P_w}} (T_{Li} - T_{wi})$$

$$\frac{\partial P}{\partial P} + \frac{\partial P}{\partial P$$

3.1 传质系数的计算

横纹管降膜吸收氨气与氨水溶液传质系数 k_{mL}可 以从舍伍德数关联式计算得到。

$$Sh = 0.023 Re^{0.85} (1 + e^2 \times 10^3 / (pd))^{0.261} (7)$$

3.2 氨水溶液表面饱和液体摩尔浓度的计算

C^{*} 是与气相氨气相平衡的氨水溶液摩尔浓度, 可以根据不同温度下饱和氨水溶液的密度和质量分 数联立求出。

3.3 传热系数的计算

氨气与冷却水的传热系数从以下公式计算出。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_a} \frac{D_o}{D_e} + \frac{D_o}{2\lambda_w} \ln \frac{D_o}{D_e} + \frac{1}{h_e}}$$
(8)

$$h_{a} = \varphi \Gamma^{0.5} L_{0}^{-0.065} (1 + e^{2} \times 10^{3} / (pd))^{0.261}$$
(9)

$$\varphi = \frac{\Pi 7.7\lambda Pr^{3.5}}{\sqrt{\mu}} \tag{10}$$

$$h_{e} = 0.023 \frac{\lambda}{d_{e}} R e^{0.8} P r^{0.4}$$
(11)

式中:s为散热系数,这里取为90%。

方程组利用差分离散化后,利用数值计算中 Gauss-Seidel 迭代法求解。本文利用 Matlab7.0 编程 求解,反复调试迭代步长。利用氨水降膜吸收出口处 可以测量参数,如氨水终温和冷却水初温来验证模拟 计算的可靠性,最终求出符合精度要求的数值计算结 果。这些包括氨水溶液和冷却水沿降膜高度的温度 场和浓度场,为全面精确掌握降膜吸收过程物性参数 的变化提供重要数据。

4 温度场与浓度场计算与分析

如图 7 所示为沿降膜高度氨水溶液氨质量分数 随降膜管无量纲高度 x = X/L₀变化曲线。因为在前 期研究中发现 2 号横纹管在降膜吸收实验中表现出 更好的氨气吸收性能,所以这里采用光滑管和 2 号横 纹管做降膜管开展更深入的实验研究。实验分别在 夏季和冬季操作,为不同季节氨气吸收式制冷系统的 可靠运行和系统优化提供数据支持。实验具体参数 和实验结果如表 2 所示。可见横纹管在不同季节实 验均有较高的吸收性能,吸收能力在冬夏季节分别提 高了 118.5% 和 167.7%。



图7 横纹管和光滑管沿降膜高度氨质量分数

Fig. 7 Ammonia mass fraction field along falling film height of No. 2 TGT and smooth tube

表 2 光滑管与横纹管降膜吸收性能

Tab. 2 Falling film absorption performance of SMT and TGT

降膜管 类型	初温 /℃	终温 /℃	喷淋密度/ (kg/(m·h))	初始质 量分数/ %	结束质 量分数/ %
光滑管夏季	34.9	42.1	1739	20.0	26.5
横纹管夏季	34.9	47.5	1739	20.0	37.4
光滑管冬季	19.5	26. 9	1739	31.0	37.5
横纹管冬季	19.5	33.8	1739	31.0	45.2

横纹管不仅增加了气液接触面积,还能增加降膜 溶液的扰动,促进吸收后的氨传入溶液内部,提高了 吸收效果。根据前期研究成果和实验室情况选取 2 号横纹管作为研究对象。沿 L₀ = 850mm 长的降膜管 均匀安装了 6 个热电偶,巧妙让热电偶探头埋入不锈 钢管内部。在降膜管中心线处也均匀布置了 6 个热 电偶,并固定牢固,避免被冷却水流动时偏离设计测 温点。冷却水和氨水溶液流动方向相反,冷却水下进 上出。如图 8 所示为 2 号横纹管在冬夏季节氨水溶 液与冷却水沿降膜管高度的模拟计算温度和测量温 度随降膜管无量纲高度 x 变化。可以看出该系列实 验模拟结果和测量结果均吻合良好。表 3 为氨水溶 液与冷却水分别沿横纹管降膜长度个别关键点的测 量温度数值。

5 结论

根据氨气与氨水溶液传质双膜模型,分析了氨气 热量、质量和动量传递过程中相关物理量的变化规律 和传递机理。建立了氨气吸收过程能量、质量守恒方 程组,使方程组离散化,然后利用数值计算中 Gauss-Seidel 迭代法求解。得出了光滑管和横纹管降膜吸 收氨水溶液氨质量分数的变化曲线。求出横纹管降

— 32 —





表3 溶液与冷却水关键点温度测量数值

Tab. 3 Measured value of aqua ammonia and cooling

water	temperature	on	key	location
-------	-------------	----	-----	----------

实验类型	初温/℃	终温/℃	最高温度/℃
冬季溶液	19.5	33.8	41.6
冬季冷却水	8.1	15.2	15.2
夏季溶液	34. 9	47.5	60. 2
夏季冷却水	21.9	32.8	32. 8

膜吸收过程氨水溶液和冷却水模拟计算温度和测量 温度随降膜管无量纲高度 x 的变化曲线。

1)2 号横纹管相比光滑管在相同工况下有较强的降膜吸收性能,吸收能力在冬夏季节分别提高了 118.5%和167.7%。

2)在冬季降膜吸收实验中2号横纹管氨水溶液 温度从吸收前19.5℃提高到吸收后33.8℃,同时管 内冷却水温度从进口8.1℃上升到出口15.2℃。

3) 在夏季降膜吸收实验中 2 号横纹管氨水溶液 温度从吸收前 34.9℃提高到吸收后 47.5℃,同时管 内冷却水温度从进口 21.9℃上升到出口 32.8℃。 这些研究成果表明2号横纹管可以作为氨水吸 收式制冷系统中吸收器降膜管的设计管型。

本文受上海市重点学科建设项目(S30503)资助。(The project was supported by the Key Subject Funded by Shanghai (No. S30503).)

参考文献

- Srinivas Garimella, Matthew D Determan, J Mark Meacham, et al. Microchannel component technology for system-wide application in ammonia/water absorption heat pumps[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(9):1184-1196.
- [2] Yong Tae Kang, Atsushi Akisawa, Takao Kashiwagi. Experimental correlation of combined heat and mass transfer for NH₃-H₂O falling film absorption [J]. International Journal of Refrigeration, 1999, 22(4):250-262.
- [3] 黄维军,邓先和,黄德斌. 横纹槽管结构优化的正交数值 模拟试验研究[J]. 化工学报,2005,56(8):1445-1450.
 (Huang Weijun, Deng Xianhe, Huang Debin. Shape optimization of transversely ridged tube by orthogonal numerical simulation test[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering,2005,56(8):1445-1450.)
- [4] 牟兴森,杨勇,沈胜强.海水淡化中降膜蒸发过程的实验研究[J]. 热科学与技术,2011,10(4):291-296. (Mu Xingsen, Yang Yong, Shen Shengqiang. Experimental research of horizontal tube falling film evaporation in desalination[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2011,10(4):291-296.)
- [5] NIU Xiaofeng, DU Kai, XIAO Fu. Experimental study on ammonia-water falling film absorption in external magnetic fields[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33 (4):686-694.
- [6] 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.)
- [7] 卜宪标,马伟斌,龚宇烈. 氨水竖管降膜蒸发实验和理论研究[J]. 热能动力工程,2011,26(4):406-409. (Bu Xianbiao, Ma Weibin, Gong Yulie. Experimental and the-oretical study of ammonia water falling film evaporation in a vertical tube[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(4):406-409.)
- [8] 马学虎,薄守石,兰忠,等.降液膜波动的影响因素分析 [J].高校化学工程学报,2010,24(1):10-15.(Ma Xuehu,Bo Shoushi,Lan Zhong, et al. Analysis on wave flow of laminar-wavy falling liquid film[J]. Journal of Chemical

Engineering of Chinese Universities, 2010, 24(1):10-15.)

- [9] Chan Woo Park, Sung Soo Kim, Hyun Churl Cho, et al. Experimental correlation of falling film absorption heat transfer on micro-scale hatched tubes [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(3):758-763.
- [10] Kyongmin Kwon, Siyoung, Jeong. Effect of vapor flow on the falling-film heat and mass transfer of the ammonia/water absorber [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(8):955-964.
- [11] P G Vicente, A Garcia, A Viedma. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(6):671-681.
- [12] 李洪亮,柳坤. 横纹管强化吸收器的传热传质实验研究
 [J]. 化学工程,2011,39(1):14-18. (Li Hongliang, Liu Kun. Experimental study on heat and mass transfer enhancement by grooved tube of absorber[J]. Chemical Engineering,2011,39(1):14-18.)
- [13] 牛晓峰,杜垲,胡智慧,等.磁场影响氨水吸收的实验研 究[J]. 工程热物理学报,2008,29(6):919-922. (Niu
- (上接第4页)
- [11] 张华,徐世林. R410A 双级压缩热泵空调器的特性分析
 [J]. 制冷学报, 2008, 29(6): 21-29. (Zhang Hua, Xu Shilin. Analysis on characteristics of two-stage compression heat pump air-conditioner with R410A [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(6): 21-29.)

作者简介

许树学, 男(1981 -), 助理研究员, 北京工业大学制冷实验 室, (010) 67391613, E-mail: xsx@ bjut. edu. cn。研究方向: 新

Xiaofeng, Du Kai, Hu Zhihui, et al. Experimental analysis on the effect of magnetic field on ammonia-water falling film absorption [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(6):919-922.)

- [14] 阎建民,刘辉. 化工传递过程导论[M]. 北京:科学出版 社,2009:196-197.
- [15] Jesse D Killion, Srinivas Garimella. A critical review of models of coupled heat and mass transfer in falling-film absorption[J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24 (8):755-797.

作者简介

陈小砖,男(1979-),博士生,讲师,河南理工大学机械学院, 15639168358,E-mail:chenxiaozhuan@hpu.edu.cn。研究方向: 工程热物理,制冷空调。

About the author

Chen Xiaozhuan (1979 –), male, Doctoral student, Instructor, School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, 15639168358, E-mail: chenxiaozhuan@hpu.edu.cn. Research fields: Engineering thermophysics; Refrigeration and Air conditioning.

型蒸汽压缩式制冷、热泵循环,自然工质制冷剂,制冷系统测试技术。

About the author

Xu Shuxue (1981 –), male, Research assistant, Lab of Refrigeration, Beijing University of Technology, (010)-67391613, Email: xsx @ bjut. edu. cn. Research fields: New type of vapor compression refrigeration and heat pump cycle, Natural refrigerants, Testing technology for refrigeration system.