

文章编号:0253-4339(2013)05-0008-05
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.05.008

氨水绝热喷雾吸收过程的特性分析

苏风民 邓洋波 高洪涛

(大连海事大学轮机热能研究所 大连 116026)

摘 要 吸收器是吸收制冷系统中的关键部件之一,吸收性能的好坏直接关系着整个制冷系统的性能。作为一种重要的吸收方式,绝热喷雾吸收将吸收工质通过喷嘴在冷剂蒸汽中形成微米级的液滴,进而形成巨大的气液接触面积,可以极大地提高吸收速率。在 Newman 模型的基础上,考虑吸收热对吸收过程中的影响,一个改进的绝热喷雾吸收模型被建立。借助此模型,对氨水绝热喷雾吸收过程进行性能分析。结果显示,吸收时间的延长可以提高吸收量 M_A ,但是当 t/t_{Max} 达到 0.6,吸收量 M_A 达到了最大吸收量的 90%,即过分延长吸收时间不是一个经济的强化方法。最大吸收时间与液滴半径的平方成正比,即半径的减少可以提高喷雾吸收效率,但半径的减少会增加系统的能耗。研究结果将为高效绝热喷雾吸收器的设计提供理论参考。

关键词 吸收制冷;氨水;模型;绝热喷雾吸收

中图分类号:TU96⁺2; TQ051.5

文献标识码:A

Characteristic Analysis of Adiabatic Spray Absorption Process in Aqueous Ammonia Solution

Su Fengmin Deng Yangbo Gao Hongtao

(Institute of Marine Engineering and Thermal Science, Dalian Maritime University, Dalian, 116026, China)

Abstract An absorber is a key device of absorption refrigeration system, and it directly affects the performance of refrigeration system. As an important absorption type, adiabatic spray absorption process disperses the absorption fluid into fine droplets by nozzles and forms immense surface exposed to the coolant vapor. Therefore, it can improve the absorption performance. In the paper, an improved analytical Newman model is presented which can consider the absorption heat effect on adiabatic spray absorption process. Using the model, the absorption characteristics of the adiabatic spray in aqueous ammonia is studied. The results show that increasing absorption time can increase absorption mass, M_A . However, when t/t_{Max} approaches to 0.6, M_A has reached to 90% of the maximum absorption mass. In other words, increasing absorption time can hardly improve M_A after t/t_{Max} exceeds 0.6. The maximum absorption time, t_{Max} , is proportional to the square of the droplet radius. Decreasing droplet radius can improve the absorption rate, but this increases the energy consumption of the refrigeration system. The current investigation can result in a better understanding of absorption mechanisms of the adiabatic spray absorption.

Keywords absorption refrigeration; aqueous ammonia; model; adiabatic spray absorption

吸收式制冷方式是由热能驱动的一种绿色制冷方式,它所需要的热能可以来自各种工业生活中产生的余热和太阳能等低品位热能,被认为可能成为能源利用与环境保护的有效中间链。吸收器作为吸收制冷系统的核心部件,其性能的好坏直接影响着整个制冷系统。因此,对吸收过程的强化研究一直是吸收制冷系统研究的热点之一。

吸收方式按照气液分布方式的不同可以分为三

类:降膜吸收、泡状吸收和喷雾吸收。与其他吸收方式相比,喷雾吸收方式具有以下特点:1)气液接触面积大,给定的吸收液流量下,喷雾形成的液滴直径为 $300\mu\text{m}$ 时,气液接触面积是降膜吸收方式的 200 倍^[1];2)可以实现传热传质的分离,使得分别强化传热过程和传质过程成为可能;3)结构简单,体积小,有利于实现吸收制冷系统的小型化和空冷化。Summerer 等^[2-3]最早建立了两套采用喷雾吸收器的双效

基金项目:国家自然科学基金(51006013)和中央高校基本科研业务费专项资金(2011JC003)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51006013) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (No. 2011JC003).)

收稿日期:2012 年 10 月 10 日

吸收制冷实验系统,证明了这种新型吸收器在吸收制冷系统中应用是可行的。申江等^[4,5]建立了采用喷雾吸收器的双效吸收制冷系统的热力学模型,分析了各操作参数变化对使用喷雾吸收的制冷系统性能的影响。Venegas 等^[6]实验研究了用 $\text{LiNO}_3\text{-NH}_3$ 溶液来吸收氨气的喷雾式吸收器性能。Warnakulasuriya 等^[1,7]采用实验研究了喷雾吸收中各参数的变化对雾化形成的液滴尺度及吸收速率的影响,发现液滴的最佳直径为 $300\mu\text{m}$ 。

目前针对绝热喷雾吸收过程的研究多集中在实验方面,缺乏数值方面的理论研究。目前计算过程多是借用 Newman 模型^[8]。该模型主要用于模拟等温吸收过程,没有考虑热效应对吸收过程中传质过程的影响,而氨水喷雾吸收过程属于典型的非等温过程。因此研究中,将考虑热效应对吸收过程的影响,在 Newman 模型的基础上,建立一个改进模型,并在此基础上,分析氨水绝热喷雾吸收过程的特性。

1 模型建立

在氨水绝热喷雾吸收过程中,氨是制冷剂,氨水是吸收剂。如图 1 所示,温度为 T_0 ,浓度为 X_0 的过冷吸收剂通过雾化喷嘴分散成微米级的液滴直接进入压力为 p_0 的氨蒸气腔内。由于吸收剂—氨水对应的饱和压力低于 p_0 ,氨蒸气被氨水溶液吸收。如果忽略气液界面的传质阻力,液滴表面始终处于气液平衡状态,氨的对应饱和浓度为 X_i 。因为 $\text{Pe} \approx 0$,所以忽略液滴内部的宏观流动。在传质推动力 $X_i - X_0$ 作用下,氨分子以分子扩散的形式从气液界面向液滴内部运动。

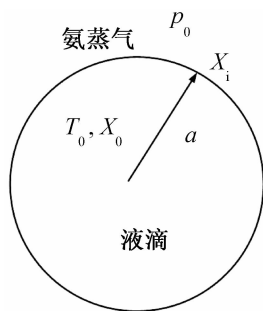


图 1 氨水喷雾吸收的物理模型

Fig. 1 Physical model of the ammonia spray absorption

在 Newman 模型中^[8],氨在气液界面的饱和浓度 X_i 被假设在整个吸收过程中为常数。但是在实际的吸收过程中,由于氨吸收热的作用,液滴的温度会明显上升,而这个上升则会导致 X_i 的下降。因此 X_i 常数的假设是不适用于氨水吸收过程的。在该模型中,

X_i 被表达成如下形式:

$$X = X_i = X_i^0 - bt \quad r = a, t > 0 \quad (1)$$

式中: X_i^0 表示 $t=0$ 时刻气液界面处溶液的饱和浓度; t 为吸收时间; b 为由于吸收热导致的饱和浓度下降率。在液滴传热过程中,由于 Boit 数小于 0.1,因此假设液滴内部温度分布是均匀的。根据热平衡,单位质量的吸收工质的吸收热 Q 可表达成如下形式:

$$Q = M_A h_{gl} = c_p \Delta T \quad (2)$$

式中: M_A 是单位质量吸收工质在 t 时间内的吸收量, h_{gl} 为氨的气化潜热, c_p 为氨水溶液比热; ΔT 为氨水溶液的温差。

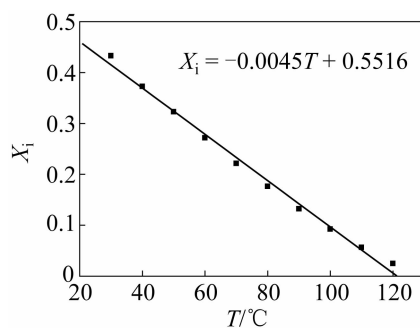


图 2 饱和浓度随溶液温度变化的关系 ($p=0.266\text{MPa}$)

Fig. 2 Equilibrium temperature vs solution concentration ($p=0.266\text{MPa}$)

图 2 显示了在氨蒸汽压力为常数 ($p=0.266\text{MPa}$) 时,氨的饱和浓度随溶液温度变化而变化的关系。两者之间存在一个近似的线性关系:

$$X_i = -0.0045T + 0.5516 \quad (20^\circ\text{C} < T < 120^\circ\text{C}) \quad (3)$$

整理方程(3),则:

$$\frac{\Delta X_i}{\Delta T} = -0.0045 \quad (4)$$

结合方程(2),则:

$$\frac{\Delta X_i}{\Delta T} = \frac{X_i - X_i^0}{\frac{M_A h_{gl}}{c_p}} = \frac{-bt}{\frac{M_A h_{gl}}{c_p}} = -0.0045 \quad (5)$$

即:

$$b = 0.0045 \frac{M_A h_{gl}}{c_p t} \quad (6)$$

如图 1 所示,以液滴球心为原点建立球状坐标,氨分子的质量传递方程可以表示为:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{D}{r^2} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \right] = \frac{D}{r} \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} (rX) \right] \quad (7)$$

式中: D 为氨分子在氨水中的扩散系数。

初始条件和边界条件如下:

$$X = X_0 \quad t = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial X}{\partial r} = 0 \quad r = 0 \quad (9)$$

$$X = X_i = X_i^0 - bt \quad r = a \quad t > 0 \quad (10)$$

利用变量分离法, 方程(7)可以被求解, 液滴内部氨的浓度分布可以表示为:

$$V = V_i - bt + \frac{2a}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin \frac{n\pi r}{a} \frac{a^2 b}{Dn^2 \pi^2} - \frac{2a}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{\frac{-Dn^2 \pi^2 t}{a^2}} \sin \frac{n\pi r}{a} \left(V_i + \frac{a^2 b}{Dn^2 \pi^2} \right) \quad (11)$$

其中: $V = X - X_0$, $V_i = X_i^0 - X_0$ 。

对方程(11)进行积分整理, 单位质量吸收工质在吸收时间 t 内的吸收量可以表示为:

$$M_A = -6D \sum_{n=1}^{\infty} \frac{bt}{Dn^2 \pi^2} + \left(V_i + \frac{a^2 b}{Dn^2 \pi^2} \right) \frac{1}{Dn^2 \pi^2} \left(e^{\frac{-Dn^2 \pi^2 t}{a^2}} - 1 \right) \quad (12)$$

为了求解单位质量吸收工质在吸收时间 t 内的吸收量 M_A , 计算过程中, 采用迭代的方法。首先假设 $b=0$, 通过方程(12)计算 M_A , 将其代入方程(6), 计算出新的 b 值, 再次代入方程(12), 计算新的 M_A , 如此反复, 直到前后两次计算结果相差小于 0.01%。图 3 显示了 M_A 和 b 随迭代次数变化而变化的情况。

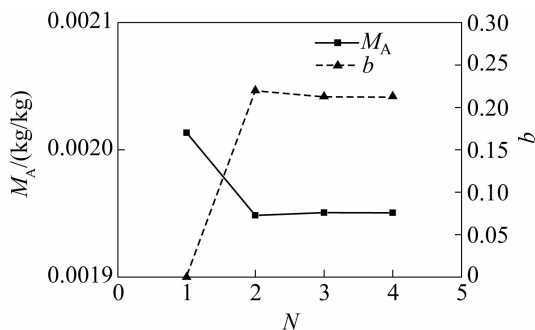


图 3 迭代次数对 M_A 与 b 的影响 ($t=0.01s$, $a=300\mu m$)

Fig.3 Effect of the iteration times on M_A and b
($t=0.01s$, $a=300\mu m$)

2 结果与讨论

当模型中系数 $b=0$ 时, 模型即转化为 Newman 模型。图 4 表示了两个模型对单位质量吸收工质在 t 时间内吸收量的计算结果。可以看出在相同时刻, 改进后模型的计算结果要低于 Newman 模型, 并且随着吸收时间 t 的增加, 这种差距会越来越大。分析原因主要是在氨水绝热喷雾吸收这种非等温吸收过程中, 氨蒸汽在吸收过程中会放出大量潜热, 使得液滴的温度上升。在氨蒸汽压力 p 不变的情况下, 氨饱和浓度 X_i 会随着液滴温度的上升而下降 (图 2 所示)。这就导致传质推动力的下降, 进而降低了吸收速率。而在

Newman 模型中液滴表面氨的饱和浓度被假设为常数, 无法考虑到吸收热引起的传质推动力下降对吸收速率的影响。随着吸收时间的增加, 氨蒸汽的吸收量增加, 放出的潜热也增加, 热效应对传质推动力的影响就会更明显, 两个模型的计算结果就会更明显。

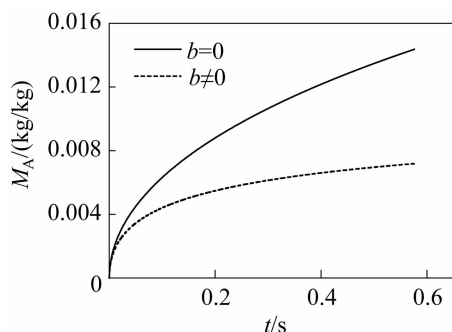


图 4 与 Newman 模型的对比 ($a=300\mu m$)

Fig.4 Comparison with Newman model ($a=300\mu m$)

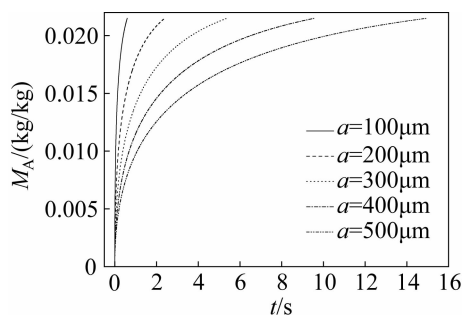


图 5 吸收量 M_A 随吸收时间的变化关系

Fig.5 Absorption mass per unit mass vs absorption time of the droplet

图 5 显示了不同液滴半径条件下, 吸收量 M_A 随时间变化而变化的关系。可以看出, 随着时间的增加, 吸收量 M_A 是持续增加的, 但增加的速率会逐渐下降。原因是绝热喷雾吸收过程是一个非稳定吸收过程, 随着吸收的进行, 传质推动力逐渐下降。这导致吸收速率逐渐下降, 即吸收量的增加速率下降。当传质推动力为 0 时, M_A 达到最大值, 吸收过程就会停止。这个吸收时间可以定义为最大吸收时间 (t_{Max})。工质在吸收器中停留的时间超过这个时间, 吸收量也不会再增加。传质推动力的下降有两方面原因, 一是溶液中氨的浓度的不断增加, 二是热效应导致的溶液饱和浓度的下降。而在 Newman 模型中, 只能考虑到第一个因素, 而从理论上讲, 如果只是溶液中氨浓度的增加导致传质推动力下降, 传质过程只有经过无限长时间吸收过程才会停止, 即 Newman 模型无法预测最大吸收时间。而改进后的模型则同时考虑了两个因素, 可以预测这个最大吸收时间。图 6 显示了不同液滴半径的最大吸收时间。从图中可以看出, 最大吸

收时间与液滴半径的平方成正比,即液滴半径越小,溶液达到最大吸收量的时间越短。另外,从图 5 可以看出,在相同吸收时间内,液滴半径越小,吸收量 M_A 越大,即吸收平均速率是随着液滴半径的减少而增加的。这些都意味着吸收性能是随着液滴半径的下降而提高的。但液滴体积的减小除了带来吸收性能的提高之外,会引起吸收制冷系统能耗的增加。根据 Estes 等人的研究^[9],液滴的直径可以表示为:

$$\frac{d_l}{d_0} = 3.67 \left[\frac{\rho^{\frac{1}{2}} \Delta p d_0^{\frac{3}{2}}}{\sigma^{\frac{1}{2}} \mu_f} \right]^{-0.259} \quad (13)$$

式中: d_0 为喷嘴直径; ρ 为氨水密度; σ 为氨水的表面张力; μ_f 为氨水的粘度; Δp 为喷嘴前后的压力差。从方程(13)看出液滴尺度越少,所需要的 Δp 越大,这意味着制冷系统能耗的增加。因此,液滴的半径并不是越小越好。Warnakulasuriya 等^[7]实验研究发现液滴的最佳直径为 $300\mu\text{m}$ 。

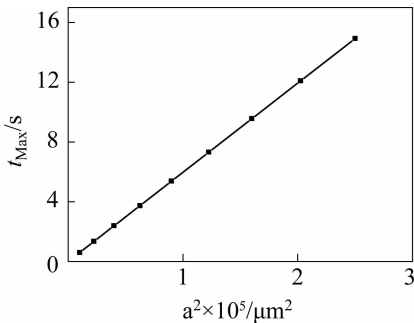


图 6 最大吸收时间随液滴半径的变化关系

Fig. 6 Maximum absorption time vs droplet radius

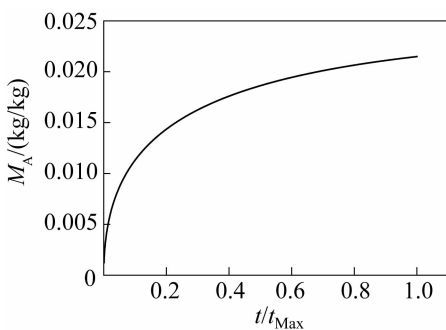


图 7 吸收量 M_A 随无量纲吸收时间的变化关系

Fig. 7 Absorption mass per unit mass vs dimensional absorption time

如果将吸收时间 t 与最大吸收时间 t_{Max} 之比作为一个无量纲吸收时间,以此为横坐标作图,如图 7 所示。可以发现不同半径液滴的吸收量 M_A 将遵循一个同样的规律。同时从图 7 可以看出,当 t/t_{Max} 达到 0.6,吸收量 M_A 即达到了最大吸收量的 90%。即 t/t_{Max} 超过 0.6 之后,吸收时间的增加将无法进一步大

幅度提高吸收量 M_A 。吸收时间的增加意味着吸收器体积的增加,及设备建造费用的升高,因此,过分延长吸收时间并不是一个经济的强化方法。

3 结论

研究中以 Newman 模型为基础,通过边界条件的改变,考虑了氨水绝热喷雾吸收过程中热效应对传质过程的影响,建立了改进模型。通过两个模型计算结果比较,发现热效应对吸收过程影响非常明显,是传质推动力下降的重要因素,模拟过程中需要予以考虑。另外计算结果显示,吸收时间的延长可以提高吸收量 M_A ,但是当 t/t_{Max} 达到 0.6,吸收量 M_A 即达到了最大吸收量的 90%,即过分延长吸收时间并不是一个经济的强化方法。最大吸收时间与液滴半径的平方成正比。半径的减少可以提高吸收过程的效率,但半径的减少会增加系统的能耗。

参考文献

- [1] Warnakulasuriya F S K, W M Worek. Drop formation of swirl-jet nozzles with high viscous solution in vacuum-new absorbent in spray absorption refrigeration[J]. International Journal of heat and Mass transfer, 2008, 51 (13): 3362-3368.
- [2] Summerer F, Ziegler F, Riesch P, et al. Hydroxide absorption heat pumps with spray absorber [J]. ASHRAE Transactions, 1996, 102(1): 1010-1016.
- [3] Flemensbeck M, Summerer F, Riesch P, et al. A cost effective absorption chiller with plate heat exchanges using water and hydroxides [J]. Applied Thermal Engineering, 1998, 18(6): 413-425.
- [4] 李慧宇,申江,乔海军,等. 采用预冷却绝热吸收的溴化锂吸收式制冷循环的研究[J]. 流体机械,2006,34(6): 56-60. (Li Huiyu, Shen Jiang, Qiao Haijun, et al. Study on LiBr Absorption Refrigeration Cycle of Using Pre-cooling Adiabatic Absorption[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(6): 56-60.)
- [5] 吴双,申江,邹同华,等. LiBr 喷雾吸收器的传热传质分离研究[J]. 制冷,2003,22(4): 59-63. (Wu Shuang, Shen Jiang, Zou Tonghua, et al. Study on Heat and Mass Transfer and Mass Separation of Spray Absorber using Lithium Bromide as Working Fluids[J]. Refrigeration, 2003, 22(4): 59-63.)
- [6] Venegas M, Rodriguez P, Lecuona A, et al. Spray absorbers in absorption systems using lithium Nitrate-ammonia solution[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28 (4): 554-564.
- [7] Warnakulasuriya F S K, Worek W M. Adiabatic water absorption properties of an aqueous absorbent at very pres-

- tures in a spray absorber[J]. International Journal of heat and Mass transfer, 2006, 49(9): 1592-1602.
- [8] Newman A B. The drying of porous solids diffusion and surface emission equations[J]. AIChE Journal, 1931, 27: 203-220.
- [9] Estes K A, Mudawar I. Correlation of Sauter mean diameter and critical heat-flux for spray cooling of small surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(16): 2985-2996.

通信作者简介

苏风民,男(1978-),博士/副教授,大连海事大学轮机热能工程研究所,大连海事大学轮机工程学院,(0411)84725295, E-mail:fengminsu@dlmu.edu.cn. 研究方向:吸收式制冷系统的优化研究,热管应用研究。现在进行的研究项目有:国家自然科学基金项目(51006013)——双组分纳米流体强化 $\text{NH}_3/$

H_2O 泡状吸收的多因素耦合作用机理的研究,中央高校基本科研业务费专项资金(2011JC003)——吸收制冷系统中的预冷却绝热喷雾吸收过程的热质传递强化机理研究等。

About the corresponding author

Su Fengmin (1978-), male, Ph. D./Associate Professor, Institute of Marine Engineering and Thermal Science, Dalian Maritime University, (0411) 84825295, E-mail: fengminsu@dlmu.edu.cn. Research fields: optimization research for absorption refrigeration system, application research for heat pipe. The author takes on project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51006013): Multifactorial coupling mechanism for enhancing $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ bubble absorption in binary nanofluid and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (No. 2011JC003): Heat and mass transfer characteristics of precooling adiabatic spray absorption process in absorption refrigeration system.

(上接第7页)

- systems: A review[J]. Applied Energy, 2010, 87(12): 3611-3624.
- [16] Jelinek M, Levy A, Borde I. Performance of a triple-pressure level absorption/compression cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 42(1): 2-5.
- [17] Boer D, Valles M, Coronas A. Performance of double effect absorption compression cycles for air-conditioning using methanol-TEGDME and TFE-TEGDME systems as working pairs [J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21(7): 542-555.
- [18] Kumar A R, Udayakumar M. Studies of compressor pressure ratio effect on GAXAC (generator-absorber-exchange absorption compression) cooler [J]. Applied Energy, 2008, 85(12): 1163-1172.
- [19] Lin P, Wang R Z, Xia Z Z. 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.
- [20] 彦启森,石文星,田长青. 空气调节用制冷技术(第4

版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

- [21] Ventas R, Vereda C, Lecuona A, et al. Experimental study of a thermochemical compressor for an absorption/compression hybrid cycle [J]. Applied Energy, 2012, 97(1): 297-304.

通信作者简介

李先庭,男(1967-),教授,清华大学建筑技术科学系,010-62785860. E-mail: xtingli@tsinghua.edu.cn. 研究方向:热泵与制冷系统;建筑热环境。现在进行的项目:国家杰出青年基金。

About the corresponding author

Li Xianting (1967-), male, professor, Department of Building Science, Tsinghua University, 010-62785860, E-mail: xtingli@tsinghua.edu.cn. Research fields: Heat pump and refrigeration systems; Building thermal environment. The author takes on project supported by the Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China.