

LiCl 水溶液垂直降膜吸收过程的实验与模拟

王明华 郑丹星*

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘要: 文中介绍了以空气除湿为目的的 LiCl 水溶液的吸收实验和模拟工作。建立了垂直结构的吸收器实验系统; 研究了 LiCl 水溶液与空气的液气体积流量比和溶液初始浓度对垂直降膜结构吸收器性能的影响; 发现垂直降膜结构的吸收器优于鲍尔环填料结构的吸收器。实验与一维稳态分子扩散原理的模拟结果表明, 在实验的操作条件下, 该装置可以使空气的相对湿度下降 6% ~ 35%。

关键词: LiCl 水溶液; 垂直降膜; 吸收过程; 除湿; 传质模型

中图分类号: O642.4

引言

建筑物空气调节常常需要除湿, 从节约能源、保护环境等方面来看, 液体吸收式除湿系统是一种引人注目的新型除湿方式^[1]。它直接吸收空气中的水蒸气, 节省了压缩式制冷空调系统中需要将空气冷却到露点温度进行除湿所消耗的能量^[2]; 还可以利用太阳能、地热以及工业余热等低品位能源作为再生热源。因此其相关研究与开发近年来倍受关注^[3]。

Frances 等^[4]研究了影响水平光滑管 LiBr 水溶液降膜吸收器的性能的多个因素。采用无泵循环的方式, Rix 等^[5]研制出了一台家用无泵循环液体除湿装置的样机。Kathabar 公司的液体吸收式除湿机采用平行排列片状结构, 虽然处理量很大, 但设备的体积也比较大, 设备和运行费用偏高, 并且多用于食品、药品、医院等一些空间较大的场合。

崔晓钰等^[6]对 LiBr 溶液竖板降膜吸收器进行了传热传质的实验研究。赵巍等^[7]研究了竖直平行排列的膜面结构的吸收器的模型, 但没有进行实验工作。韩东海^[8]提出的空气的除湿方法及其装置, 着重探讨了利用太阳能进行除湿剂的再生, 吸收过程是绝热的, 导致处理后的空气温度高达 40℃。

本研究利用 LiCl 水溶液为工质, 以间壁冷却垂直降膜吸收方式进行实验和模型化的工作, 力图推进对该过程机理的认识与把握。

1 垂直降膜吸收实验装置

1.1 实验装置

图 1 为本研究的吸收实验流程示意图, 它由吸收器 ABS、溶液泵 PUMP、储液罐 TKA、储液罐 TKB 以及两个引风机 FN1 和 FN2 构成。吸收器主体高为 2.5 m、直径为 100 mm, 采用有机玻璃制造, 可以观察实验过程中所发生的载液或液泛等现象。垂直降膜方式所采用的管子为长 2 m、直径 16 mm 的不锈钢管, 按照正三角形排列。

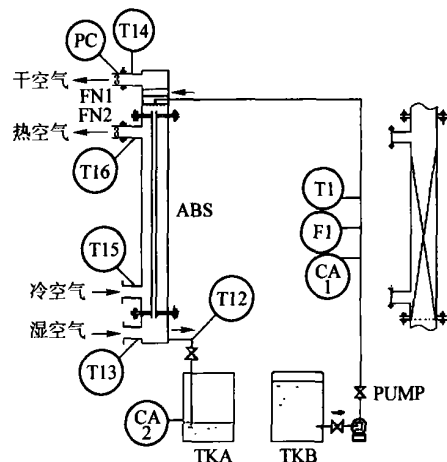


图 1 吸收实验装置

Fig. 1 Experimental instrument of absorption

两个引风机的功率都是 35 W, 分别安装在吸收器上部的两个封头处。两个储液罐容积均为 40 L

收稿日期: 2004-03-12

基金项目: 国家重点基础研究资助项目 (G2000026307)

第一作者: 男, 1980 年生, 硕士生

*通讯联系人

E-mail: wmh @98431.com

的塑料桶。为了提高测量溶液流量的准确性,实验中采用了一个转子流量计和一个美国 GPI 公司生产的 S0501 电子数字流量计进行相互校正。另外,图 1 右侧给出了一个填料结构为主体的吸收塔局部示意,表示本系统的吸收塔 ABS 也可以更改内部结构。例如,不采用上述的管式结构,而采用各种形式的填料充填在吸收塔里。

1.2 流程原理

待处理空气被引风机 FN1 引入垂直降膜吸收器 ABS 并与 LiCl 水溶液充分接触。当空气中的水蒸气的分压大于除湿剂溶液表面的蒸气压时,空气中的水分就会向除湿剂溶液转移。只要推动力存在,而接触时间足够长,两相的水蒸气压可以达到平衡。因此,空气中的水分含量逐渐减小,即空气的相对湿度降低,从而达到除湿的目的。减湿后的干空气经吸收器布液器管口上方的除沫装置排出,以避免因风速高而引起的雾沫夹带。

实验前预先配制好的 LiCl 浓溶液由储液罐 TKA 经泵 PUMP 送入吸收器,再经布液器流入分布在吸收塔内的换热管内表面,形成降膜式吸收。浓溶液与由吸收器底部进入的湿空气接触,吸收空气中的水蒸气后浓度变稀,稀溶液离开吸收器底部流入储液罐 TKB。

在吸收器的壳程,由引风机 FN2 引入外界空气。进行吸收过程时,空气经过壳程,带走吸收过程所放出的热量,使吸收过程在近似等温的情况下进行。相对于绝热吸收,此时因温度较低,除湿剂溶液的表面蒸气压维持在较低的水平,过程的推动力增大,改善了吸收效果。

2 数据处理原理

根据溶液出口的密度,借助文献[9]中的密度与浓度的关系图可以得到对应的溶液浓度。通过干球温度 t 、湿球温度 t_w 和大气压 p 可以求解进口空气的湿度^[10]

$$H_{in} = \frac{1.01(t - t_w) - H_s r_w}{1.88(t_w - t) - r_w} \quad (1)$$

式中, r_w 为水的汽化潜热; H_s 为空气的饱和湿度。分别为

$$r_w = -2.4 t_w + 2499 \quad (2)$$

$$H_s = 0.622 \frac{p_s}{p - p_s} \quad (3)$$

式中, p_s 为水的饱和蒸气压。可由 Antoine 方程解

得

$$p_s = \frac{101.325}{260} \exp \left(a - \frac{b}{273.15 + t_w + c} \right) \quad (4)$$

式中的 Antoine 常数分别为, $a = 18.3036$; $b = 3816.44$; $c = -46.13$ 。

而进口空气的水蒸气分压为

$$p_{in} = \frac{H_{in} p}{0.622 + H_{in}} \quad (5)$$

即可同时得到相对湿度

$$f_{in} = \frac{p_{in}}{p_s} \quad (6)$$

和进口空气的水蒸气分率

$$y_{in} = \frac{p_{in}}{p} \quad (7)$$

根据 LiCl 水溶液的初始密度、实际液体流量 L 和实际气体流量 G ,经单位换算有液气体积流量比

$$\frac{V_L}{V_G} = \frac{22.4 L}{1080 G} \quad (8)$$

而出口空气的水蒸气分率 y_{out} 为

$$y_{out} = y_{in} - \frac{V_L}{V_G} (x_{in} - x_{out}) \quad (9)$$

式中, x_{in} 和 x_{out} 分别为 LiCl 水溶液的进口和出口质量分数。

根据 Raoult 定律,出口空气的分压 p_{out} 湿度 H_{out} 和相对湿度 f_{out} 可由湿球温度 t_w 和出口空气的水蒸气的分率 y_{out} 可得

$$p_{out} = y_{out} p \quad (10)$$

$$H_{out} = 0.622 \frac{p_{out}}{p - p_{out}} \quad (11)$$

$$f_{out} = \frac{p_{out}}{p_s} \quad (12)$$

3 吸收过程的传质模型

吸收器为垂直的膜面结构,如图 2 所示。为了更好地研究垂直降膜吸收器,可以通过传质机理来模拟所研究的吸收体系。垂直降膜吸收过程为传质与传热的耦合,建立传质模型是基于如下的几点假设:忽略吸收过程中的化学热,吸收过程按绝热处理;气液充分接触;LiCl 溶液和被处理的空气均为一维稳态流动,参数只沿流动方向变化,不随时间变化。

则根据二元系的扩散方程^[10]可得水蒸气的物质通量

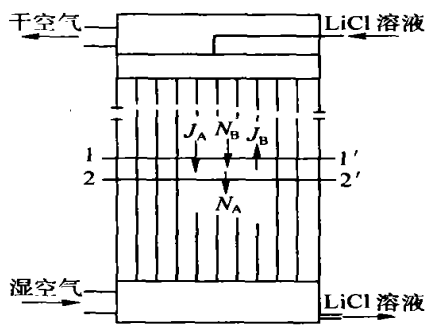


图 2 吸收器结构示意图
Fig. 2 Sketch of absorber structure

$$N_A = - \frac{M_A M_B}{M^2} D_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A (N_A + N_B) \quad (13)$$

式中, N_A , N_B 分别为水蒸气和 LiCl 溶液的物质通量; D_{AB} 为扩散系数; dy_A/dz 为水蒸气的摩尔分数梯度; M 为混合物的相对分子质量; M_A , M_B 为水蒸气和 LiCl 溶液的相对分子质量。

$$M = y_A M_A + y_B M_B \quad (14)$$

由于此吸收过程是一维稳定分子扩散,并且具有总体流动,故属于单向扩散。此时通过任一固定截面的传质速率都应考虑分子扩散和摩尔扩散的总效应。设 J_A 为水蒸气的分子扩散通量, N_b 为总体流动通量。对两截面 11 及 22 之间的体积作物料衡算,水蒸气扩散通量为

$$N_A = J_A + y_A N_b \quad (15)$$

LiCl 溶液扩散通量为

$$0 = J_B + y_B N_b \quad (16)$$

式中, J_B 为 LiCl 溶液产生的分子扩散通量,根据扩散原理, J_A , J_B 大小相等,方向相反。

(15), (16) 两式相加得

$$N_A = J_A + J_B + N_b \quad (17)$$

故总体流动 N_b 即水蒸气通过截面 22 的传质通量,也即任一截面处 LiCl 溶液的分子扩散与总体流动方向相反,大小相等,正好抵消,没有净的传质,所以 LiCl 溶液为停滞组分。故水的物质移动速度

$$N_A = - \frac{M_A M_B}{M^2} D_{AB} \frac{dy_A}{dz} \frac{1}{1 - y_A} \quad (18)$$

定义 $K_{AB} = \frac{D_{AB}}{M_A} \frac{dy_A}{dz}$ 为传质系数,则(18)式表示为

$$N_A = - K_{AB} \frac{M_A^2 M_B}{M^2} \frac{1}{1 - y_A} \quad (19)$$

式中, K_{AB} 采用文献[1]中给出的公式,经过量纲转

换得到

$$K_{AB} = 0.0562 Z^{-0.24} S^{-0.702} V_L^{0.197} V_G^{0.261} \quad (20)$$

式中, Z 为吸收器的高度, S 为吸收器的截面积。

4 实验结果

(1)维持进口气体流量为 $0.75 \text{ m}^3/\text{min}$ 和溶液的进口质量分数 0.423 不变,表 1 给出了 5 组典型实验操作条件下 V_L/V_G 与空气出口湿度关系的数据。表中的溶液流量采用转子流量计和电子数字流量计两块仪表来进行测定;而溶液出口的密度,是采用密度计进行多次测量后的平均值。

表 1 液气体积流量比与空气出口湿度 (H_{out}) 的关系

Table 1 Relation of $\frac{V_L}{V_G}$ and air exit humidity						
溶液 流量 (L/h)	出口溶 液质量 分数	实际液 气体积 流量比	进口空 气湿度	进口空 气相对 湿度	出口空 气相对 湿度	$H_{out}/$ (kg/kg)
10.0	0.354	0.340 148	0.019 0	0.942 2	0.715 3	0.014 6
11.0	0.362	0.374 163	0.017 1	0.873 2	0.715 7	0.014 0
12.0	0.357	0.408 178	0.018 4	0.926 9	0.691 6	0.013 6
13.0	0.367	0.442 193	0.012 4	0.831 9	0.681 9	0.011 0
14.0	0.367	0.476 207	0.013 0	0.853 9	0.695 5	0.010 6

从表 1 可以看出,在液气体积流量比为 $0.35 \sim 0.50$,被处理空气的相对湿度可以下降 $15\% \sim 25\%$ 。

(2)维持液体和气体的流量都不变(液气体积流量比为 0.408),表 2 给出了 5 组除湿剂溶液进口质量分数与空气出口湿度关系的计算值。

表 2 溶液进口浓度 (x_{in}) 与空气出口湿度 (H_{out}) 的关系

Table 2 Relation of LiCl solution entrance concentration and air exit humidity					
进口 溶液的 质量 分数	出口 溶液的 质量 分数	进口 空气 湿度	进口空 气相对 湿度	出口 空气 相对 湿度	$H_{out}/$ (kg/kg)
0.45	0.43	0.0139	0.855 1	0.534 3	0.008 6
0.423	0.4	0.0173	0.874 7	0.571 1	0.011 2
0.40	0.374	0.0183	0.930 2	0.583 8	0.011 3
0.364	0.353	0.0163	0.918 4	0.755 3	0.013 3
0.357	0.353	0.0146	0.882 7	0.821 6	0.013 6

从表 2 可以看出,在进口溶液的质量分数为 0.35~0.45,被处理空气的相对湿度可下降 6%~35%。

5 讨论与分析

5.1 液气比对吸收器性能的影响

由实验结果进行图形化,图 3 为溶液与空气的液气比对吸收器性能的影响。从图 3 中的虚线可以看出,随着液气比的增加,空气的出口湿度下降。这是由于在进口溶液浓度不变的前提下,增大液气体积比,不仅会使汽液接触面积增大,而且根据式(20),传质系数也会随 $V_L^{0.197}$ 增大。并且根据传质守恒,在相同的除湿能力的情况下,随着 V_L/V_G 的增大,除湿剂溶液的进出口浓度差减小,从而有利于质量交换,使得除湿过程进行的更完全。

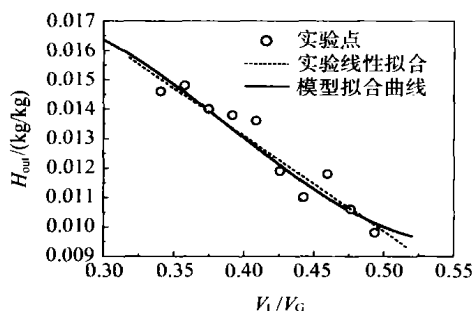


图 3 液气体积流量比(V_L/V_G)与空气出口湿度(H_{out})关系图

Fig. 3 Relation of V_L/V_G and air exit humidity

从图 3 中实线所拟合的曲线来看,当采用模型拟合的最小 V_L/V_G 的 1.4 倍作为实际液气体积流量比时,空气湿度 H 拟合方程为

$$H = K_{AB} \left[0.49953 \left(\frac{V_L}{V_G} \right)^3 - 0.58298 \left(\frac{V_L}{V_G} \right)^2 + 0.18974 \left(\frac{V_L}{V_G} \right) - 0.00158 \right] \quad (21)$$

其拟合结果与实验结果基本一致,并且波动范围也都是在 $\pm 1\%$ 以内。由于模型中考虑了传质系数,故从拟合的曲线可以看出,当 V_L/V_G 增大到 0.48 后,空气的出口湿度变化将变的平缓,一是由于传质效率的问题,从影响传质系数的因数来看,随 V_L/V_G 的增大, K_{AB} 是增大的;二是由于出口空气的湿度受到除湿剂溶液的浓度和温度的限制,其极限就是与溶液平衡蒸气压对应的湿度。由此,可以采用模型化的方法对垂直降膜吸收器进行研究,以便得出符合各种实际情况的液气比,从而得到不同规格的设备参数和不同场合的操作参数。

5.2 LiCl 水溶液初始浓度对吸收器性能的影响

图 4 表示了除湿剂溶液的进口浓度与吸收器空气出口湿度的关系。实线表示垂直降膜结构,虚线表示填料结构。从两种结构的吸收器都可以看出,随着进口溶液浓度的增加,出口空气的湿度减小。这是由于在液气体积流量比不变的前提下,增大进口溶液的浓度,会使其对应的水蒸气压降低,从而使得吸收时平衡推动力增大,有利于吸收的进行。

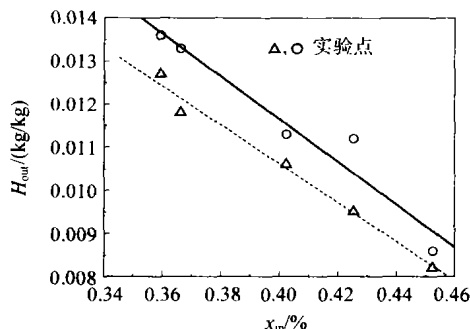


图 4 溶液进口质量分数(x_{in})与空气出口湿度(H_{out})的关系图

Fig. 4 Relation of solution entrance concentration and air exit humidity

5.3 垂直降膜结构与填料结构的比较

在进行填料结构的实验时,采用了直径为 25 mm 的金属鲍尔环作为填料。其堆积密度为 49500 m^{-3} 。在以水作介质的实验中,发现壁流现象比较严重。维持 $0.75 \text{ m}^3/\text{min}$ 风速不变,当液体流量达到 12 L/h 左右时会发生液泛现象;在单纯增大气速的情况下,系统更加敏感。经过多次重复实验发现,采用金属鲍尔环填料时处理量不能很大(液体最大流量平均为 11.5 L/h 左右)。当直接利用 LiCl 水溶液做实验时,在不发生液泛的前提下,发现吸收结果不稳定。原因是在吸收器中鲍尔环堆积不均匀,导致某些局部阻力过大。在在操作时,随着操作参数(即液体流量或风速)的改变,就造成了不一致的壁流现象,从而使得吸收不稳定;并且由于局部阻力过大,限制了其处理量。

相比较而言,采用垂直降膜吸收形式的吸收系统由于各向都很均匀,单位面积的通量也较大,故其处理量大,即使溶液流量为 $10 \sim 15 \text{ L/h}$ 仍未发现液泛,并且操作稳定。实验发现吸收结果按照操作参数的改变具有如图 3,4 所示的变化规律;从图 4 可以看出,降膜吸收效果较采用填料时要好。因为垂直降膜是在近似等温的情况下进行吸收,而填料结

构是在绝热的情况下操作。

6 结论

(1) 采用 LiCl 水溶液为工作介质在常温和质量分数为 35 % ~ 45 % 进行垂直降膜吸收实验。

(2) 在 V_L/V_G 为 0.35 ~ 0.5, LiCl 水溶液初始质量分数为 0.40 或 V_L/V_G 为 0.408, LiCl 水溶液初始质量分数为 35 % ~ 45 % 时, 垂直降膜吸收器可使空气的相对湿度分别下降为 15 % ~ 25 %, 6 % ~ 35 %。

(3) 基于一维稳定分子扩散理论建立了吸收过程的传质模型, 并且模拟了液气比体积流量对垂直降膜吸收器性能的影响, 其结果较好的符合了此过程; 由此可以通过模型化来研究吸收体系, 以便得出最佳设备结构参数和操作参数。

(4) 通过对比垂直降膜结构与鲍尔环填料结构的吸收器, 可以得到垂直降膜结构吸收器不仅处理量大, 吸收效果良好, 而且操作稳定。

参 考 文 献

- [1] Waugaman D G, Kini A, Kettleborough C F. Review of desiccant cooling systems [J]. Journal of Energy Resource Technology, 1993, 115(1): 101 - 105
- [2] 杨 英, 李心刚, 李惟毅, 等. 液体除湿特性的实验研究 [J]. 太阳能学报, 2000, 21(2): 155 - 159
- [3] 袁卫星, 江 亿, 张寅平, 等. 热能驱动与电能驱动空调系统技术经济性比较方法 [J]. 太阳能学报, 2001, 22(1): 12 - 16
- [4] Frances S, Manuel V, Ojer P, *et al.* Validation of a model for the absorption process of H_2O (vap) by a LiBr (aq) in a horizontal tube bundle, using a multi-factorial analysis [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(17): 3299 - 3312
- [5] Rix J, Nevralla D, Chauvet L, *et al.* Gas-powered liquid desiccant dehumidifier [J]. Applied Energy, 1993, 45(3): 167 - 180
- [6] 崔晓钰, 蔡祖恢, 李美玲, 等. 溴化锂溶液降膜吸收过程实验研究 [J]. 上海理工大学学报, 2000, 22(1): 21 - 24
- [7] 赵 巍, 朱瑞琪, 阚怡松. 无泵循环液体除湿型空调系统的仿真研究 [J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(1): 30 - 34
- [8] 韩东海. 空气的除湿方法及其装置 [P]. 中国专利, 97104379. 1998-09-02
- [9] Manuel R. Aqueous solutions of lithium and calcium chloride: Property formulations for use in air conditioning equipment design [C]. M. Conde Engineering Zurich-Switzerland. Zurich-Switzerland: Univ of Zurich, 2002, 1 - 26
- [10] 谭天恩, 麦本熙, 丁恩华. 化工原理 (下册) [M]. 北京: 化学工业出版社, 1990.

Experiment and simulation of vertical falling-film absorption process of LiCl solution

WANG Ming-hua ZHEN G Dan-xing

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The work of LiCl solution absorption experiment and simulation with a vertical configuration absorber for the aim to dehumidification was introduced. The effect of the rate of LiCl solution and air and the entrance concentration of LiCl solution on the absorption of the vertical falling film. The results show that the vertical falling film is better than Pall ring filler in configuration of an absorption tower. The results of the experiment and simulation through the theory of Fick diffuse indicate the equipment can decrease the relative humidity to 6 % ~ 35 % under the condition of laboratory.

Key words: LiCl solution; vertical falling film; absorption process; dehumidification; mass transfer model

(责任编辑 云志学)