

除湿溶液表面蒸汽压的实验研究

广州市建筑科学研究院 赵相相[☆]

广州瀚华建筑设计有限公司 张 燕

广州大学土木工程学院 丁云飞 周孝清 郑志敏

摘要 建立了动态法测量除湿溶液表面蒸汽压的实验台,测量了 LiCl 溶液、CaCl₂ 溶液及不同配比的 LiCl 和 CaCl₂ 混合溶液的表面蒸汽压。结果显示,随着 LiCl 在混合溶质中质量分数的增加,对降低溶液表面蒸汽压的作用逐渐减小。综合分析除湿工况下混合溶液的表面蒸汽压及其成本,认为 50% CaCl₂ + 50% LiCl 混合溶液是一种性能优良、价格合理的液体除湿剂。

关键词 除湿溶液 表面蒸汽压 LiCl CaCl₂ 混合溶液

Experiment on surface vapor pressure of liquid desiccant

By Zhao Xiangxiang[★], Zhang Yan, Ding Yunfei, Zhou Xiaoping and Zheng Zhimin

Abstract Sets up an experimental table for dynamically measuring surface vapor pressure of liquid desiccant, and measures the surface vapor pressure of LiCl solution, CaCl₂ solution and mixed solution of LiCl and CaCl₂ in different proportions. The results show that the more the LiCl mass percentage is, the less the surface vapor pressure reduction is by adding LiCl. By a rounded analysis of surface vapor pressure and costs of the mixed solution, considers that the mixed solution of 50% CaCl₂ and 50% LiCl is a liquid desiccant good in both performance and cost.

Keywords liquid desiccant solution, surface vapor pressure, LiCl, CaCl₂, mixed solution

★ Guangzhou Institute of Building Science, Guangzhou, China

①

0 引言

液体除湿是一项节能环保的空气除湿技术,与其他空气除湿技术相比,具有独特的优势,近几年来逐渐成为学术界研究的热点之一。除湿溶液的物理性质是影响液体除湿系统除湿性能的重要因素,尤其是除湿溶液的表面蒸汽压。因为除湿溶液能够对空气进行除湿的最基本条件溶液的蒸汽压低于空气中的水蒸气分压力,对应相同的空气水蒸气分压力,溶液的蒸汽压越低,除湿的推动力越大,除湿效果越好。但即使是同一种除湿溶液,也会因为不同产地的金属卤盐纯度的差异而导致所配制的除湿溶液的表面蒸汽压有所不同,所以实验测量是确定除湿溶液表面蒸汽压的一种重要手段。另外,除湿溶液的价格关系到液体除湿系统的经济性,也是需要考虑的重要因素。

本文建立了测量除湿溶液表面蒸汽压的实验台,采用动态法^[1]测量了 LiCl 溶液、CaCl₂ 溶液及其不同配比的混合溶液在除湿工况浓度下(质量分数为 40%)的表面蒸汽压,并分析了混合配比对除湿溶液表面蒸汽压及溶液成本的影响。

1 实验原理及步骤

测量除湿溶液表面蒸汽压的实验装置如图 1 所示,主要由以下几部分组成:烧瓶、恒温水浴、冷凝管、安全瓶、真空泵、真空活塞、U 形管压力计、

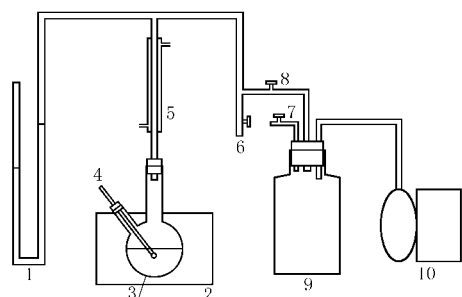
①[☆] 赵相相,男,1981 年 5 月生,工学硕士,工程师
510440 广州市白云大道北 833 号建研大厦建筑节能研究室
(020) 26095396 (O) 13751756965
E-mail: zxxiang2002@yahoo.com.cn

收稿日期:2006-06-13

一次修回:2006-09-28

二次修回:2007-01-30

温度计等。



1 U形管压力计 2 恒温水浴 3 烧瓶 4 温度计 5 冷凝管 6, 7, 8 真空活塞 9 安全瓶 10 真空泵

图1 除湿溶液表面蒸汽压测量装置

实验时,通过调节恒温水浴使烧瓶内溶液的温度达到设定值并保持恒定,采用真空泵对烧瓶抽气,直至烧瓶内的溶液沸腾。由于一定温度下,当溶液达到沸腾时,溶液的表面蒸汽压与溶液上方的外界压力相等,所以烧瓶内溶液沸腾时的真空度就等于溶液的表面蒸汽压。具体的实验步骤如下:

1) 检查装置的气密性。打开真空活塞6, 7, 8, 使系统与大气相通,向冷凝管中通入冷却水,打开电源使真空泵正常工作1~2 min,然后关闭活塞6, 7, 对系统抽气。当系统压力减小至U形管压力计两臂的高度差为700 mm时,关闭活塞8,使系统压力保持不变。打开活塞7使安全瓶与大气相通,关闭真空泵。5 min后若压力计读数不变,则说明装置气密性良好。气密性检查完毕后,打开活塞6, 8, 使烧瓶与大气相通。

2) 准确读取此时的大气压力值。

3) 向烧瓶中注入1/3体积的除湿溶液,连接好装置,将烧瓶放入恒温水浴中,调节水浴温度使其保持25℃。

4) 关闭活塞6, 7, 打开真空泵对系统抽气,使烧瓶内压力缓慢降低。当溶液沸腾时,关闭活塞8,记下此时压力计的读数。打开活塞7使安全瓶与大气相通,关闭真空泵。缓慢旋开活塞8,使系统压力恢复为大气压。

5) 再次读取大气压力值,并与实验前的读数求平均,作为实验过程中的大气压力值。

6) 调节恒温水浴的温度,使其保持30, 35, 40, 45, 50, 55℃,重复步骤2)~5)。

2 实验试剂

LiCl溶液和CaCl₂溶液都是常用的液体除湿

剂,其中LiCl溶液表面蒸汽压低,与湿空气达到平衡时空气的相对湿度小,除湿性能优良,但价格较贵(约42元/kg, 2005年)。由于液体除湿系统采用盐溶液作为主要的工质,所用盐的质量较大,所以在选择除湿溶液时溶质的价格也是一个重要因素。与LiCl相比, CaCl₂价格低廉(约3元/kg, 2005年),且容易获得,但CaCl₂溶液表面蒸汽压较高,而且溶解性不好,黏度大,长期使用会有结晶现象发生,除湿性能易随空气进口参数及溶液浓度的变化而变化。基于LiCl溶液和CaCl₂溶液的性能各有优缺点,考虑将两种溶液混合以期获得一种性能优良、价格合理的除湿溶液。

3 实验结果与分析

实验测量了质量分数均为40%的CaCl₂溶液和LiCl溶液的表面蒸汽压,并与文献[2-4]中相应值进行了比较,结果如图2, 3所示。从图中可以看出,除25℃外,其他温度时溶液表面蒸汽压实验测量值与文献值的差异在20%以内,实验值的偏差主要是由实验条件及使用的CaCl₂和LiCl的产地和纯度不同造成的。25℃时的实验值与文献值偏差较大,主要是因为低温高浓度时,溶液表面蒸汽压值较小,

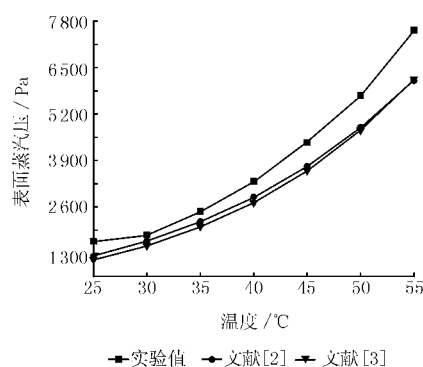


图2 质量分数为40%的CaCl₂溶液的表面蒸汽压

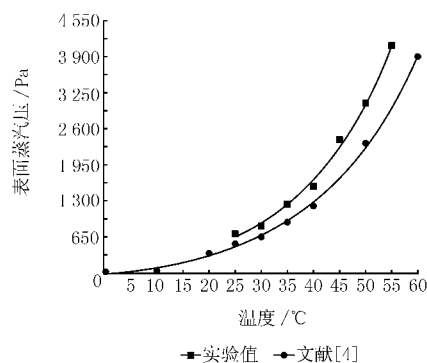


图3 质量分数为40%的LiCl溶液的表面蒸汽压

对实验装置的真空度要求较高,装置的测量精确度降低^[5]。所以在确定低温高浓度除湿溶液的表面蒸汽压时,通常采用拟合的曲线予以修正。

为了获得一种性能优良、价格合理的除湿溶液,本文对不同配比的 CaCl_2 和 LiCl 混合溶液(质量分数为 40%)的表面蒸汽压进行了测量,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,随着 LiCl 的加入,混合溶液的表面蒸汽压降低,且 LiCl 在混合溶质中的质量分数越大,混合溶液的表面蒸汽压越小;随着 LiCl 质量分数的增大,溶液表面蒸汽压下降的幅度逐渐减小,例如,溶液温度为 25 °C 时,当混合溶质中 LiCl 质量分数由 0 增加到 20% 时,溶液表面蒸汽压下降了 266.6 Pa(2 mmHg),而当 LiCl 质量分数由 80% 增加到 100% 时,溶液表面蒸汽压只下降了 133.3 Pa(1 mmHg);随着溶液温度的升高,这种变化趋势更明显,在溶液温度为 55 °C 时, LiCl 质量分数由 0 增加到 20% 时,溶液表面蒸汽压下降了 933.1 Pa(7 mmHg),由 80% 增加到 100% 时,溶液表面蒸汽压只下降了 466.6 Pa(3.5

mmHg)。由此可知,随着 LiCl 在混合溶质中比例的增加,对降低混合溶液表面蒸汽压的作用逐渐减小。

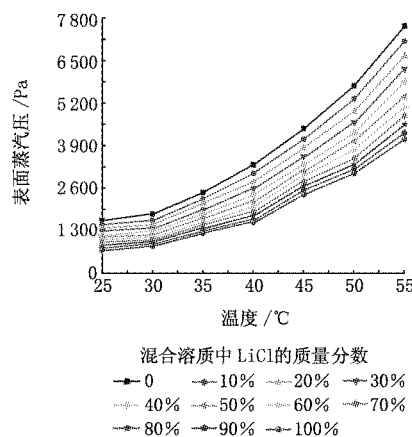


图 4 混合溶液表面蒸汽压的测量值

对除湿工况(温度 25, 30, 35 °C)下混合溶液表面蒸汽压的实验测量值进行了拟合,得到同一温度下混合溶液表面蒸汽压随混合溶质中 LiCl 质量分数的变化关系式:

$$25\text{ °C 时} \quad p_s = -1\,224.429 + 865.926 \exp\left(-\frac{x_{\text{LiCl}}}{121.86}\right) + 2\,009.829 \exp\left(-\frac{x_{\text{LiCl}}}{418.38}\right) \quad (1)$$

$$30\text{ °C 时} \quad p_s = -227.447 + 113.457 \exp\left(-\frac{x_{\text{LiCl}}}{10.14}\right) + 1\,525.204 \exp\left(-\frac{x_{\text{LiCl}}}{116.11}\right) \quad (2)$$

$$35\text{ °C 时} \quad p_s = -547.420 + 995.915 \exp\left(-\frac{x_{\text{LiCl}}}{96.78}\right) + 995.915 \exp\left(-\frac{x_{\text{LiCl}}}{96.77}\right) \quad (3)$$

式(1)~(3)中 p_s 为除湿溶液表面蒸汽压, Pa; x_{LiCl} 为混合溶质中 LiCl 的质量分数, %。

从上述拟合公式可知,同一温度下混合溶液表面蒸汽压随混合溶质中 LiCl 质量分数呈负指数函数关系变化。为了获得较优的混合配比,对除湿工况(温度 25, 30, 35 °C)下混合溶液表面蒸汽压等温线(表面蒸汽压与混合溶质中 LiCl 质量分数的关系曲线)的切线斜率进行了分析,结果如图 5 所示。溶液表面蒸汽压等温线的切线斜率表征混合溶液表面蒸汽压的变化量与混合溶质中 LiCl 质量分数的变化量的比值。从图 5 可以看出,随着 LiCl 在混合溶质中质量分数的增大,切线的斜率逐渐增大,但由于溶液表面蒸汽压等温线的切线斜率为负值,所以切线斜率增大意味着随着混合溶质中 LiCl 质量分数的增大溶液表面蒸汽压的减小量逐渐递减。从图中还可以看到,溶液温度为 30 °C 时,当混合溶质中 LiCl 的质量分数大于 50% 时,切线斜率基本保持不变,也就是说混合溶质中 LiCl 的

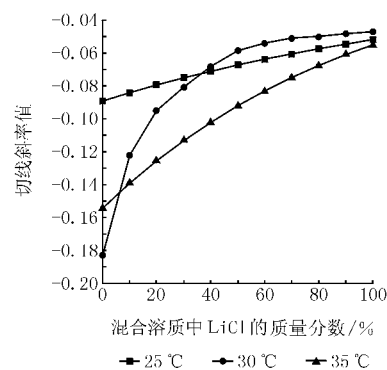


图 5 除湿工况下混合溶液表面蒸汽压等温线切线斜率

质量分数大于 50% 时,再增加 LiCl 所引起的溶液表面蒸汽压的变化量较小。但从图 6 可知,混合溶液溶质的成本随 LiCl 质量分数的增加呈直线增长,每增加 10% LiCl ,混合溶质的成本增加 3.9 元/kg。由于液体除湿系统中除湿溶液的用量较大,溶液的成本直接关系到系统的经济性,所以,笔者认为混合溶质中 LiCl 的质量分数大于 50% 时,除

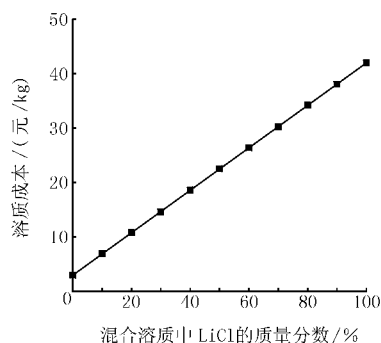


图 6 不同配比的混合溶液溶质的成本

湿溶液的性价比有所下降。

从图 4 可以看出, 30 °C 时, 混合溶质中 LiCl 质量分数由 0 增加到 50%, 溶液表面蒸汽压下降了 666.5 Pa(5 mmHg); 而混合溶质中 LiCl 质量分数由 50% 增加到 100% 时, 溶液表面蒸汽压只下降了 333.3 Pa(2.5 mmHg), 但 100% LiCl 溶液的成本却是 50% CaCl₂ + 50% LiCl 溶液的 1.9 倍, 后者的性价比是前者的 3.8 倍。考虑到除湿溶液既要求具有有利于除湿的较低表面蒸汽压, 又要求溶液成本不能太高, 所以本文认为 50% CaCl₂ + 50% LiCl 是一种性能优良、价格合理的混合除湿溶液。

4 结论

4.1 质量分数为 40 % 的不同配比的 LiCl 与

CaCl₂ 混合溶液表面蒸汽压的实验结果显示, 随着 LiCl 在混合溶质中质量分数的增加, 除湿溶液的表面蒸汽压呈下降趋势, 但下降的程度逐渐减小。

4.2 混合溶液温度为 30 °C 时, 当混合溶质中 LiCl 的质量分数大于 50% 时, 溶液表面蒸汽压等温线的切线斜率基本保持不变, 意味着混合溶质中 LiCl 的质量分数大于 50% 时, 再增加 LiCl 所引起的溶液表面蒸汽压的变化量较小。

4.3 50% CaCl₂ + 50% LiCl 混合溶液是一种性能优良、价格合理的液体除湿剂。

4.4 液体除湿是一个循环过程, 但本文未考虑再生回热过程, 这将是笔者以后进一步研究的内容。

参考文献

- [1] 广西师范大学. 基础物理化学实验[M]. 广西: 广西师范大学出版社, 1991
- [2] 赵云, 施明恒. 太阳能液体除湿空调系统中除湿剂的选择[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(增刊): 165-168
- [3] 朱瑞琪, 李怀富. 液体除湿型空调系统中吸收器的工作模拟与实验[J]. 流体工程, 1992, 20(2): 56-59
- [4] 费秀峰. 蓄能型溶液除湿蒸发冷却空调系统的初步研究[D]. 南京: 东南大学, 2001
- [5] Weissberger A. Physical methods of organic chemistry [M]. 3rd ed. New York: Interscience Publishers, 1945
- [6] 的应用[J]. 暖通空调, 2000, 30(6): 39-41
- [30] Wang Shengwei. Online adaptive control for optimizing variable-speed pumps of indirect water-cooled chilling systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21(11): 1083-1103
- [31] 罗启军, 戴汝平. 空调系统控制的一种动态优化技术[J]. 建筑热能通风空调, 2003, 22(3): 39-42
- [32] Chan K T, Yu F W. Optimum setpoint of condensing temperature for air-cooled chillers [J]. HVAC&R Research, 2004, 10(2): 113-127
- [33] 何厚建, 李树江. 混合遗传算法在中央空调优化控制中的应用[C]// 2005 中国控制与决策学术年会, 2005
- [34] 杨晓平, 李树江. 基于 RBF 模糊神经网络暖通空调模型辨识[C]// 2005 中国控制与决策学术年会, 2005
- [35] 孙一坚. 空调水系统变流量节能控制[J]. 暖通空调, 2001, 31(6): 5-7
- [36] 江大勇, 黄道. 人工神经网络在暖通空调系统中
- [37] 孙英, 刘作军, 董砚. 智能楼宇空调系统的预测控制 [C]// 2000 年中国控制与决策学术年会论文集, 2000
- [38] 曹国庆, 姜承芝, 安大伟. 模糊 PID 自整定控制在空调系统中的应用研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(10): 106-110
- [39] 吴柳波, 张振国. VAV 空调系统中的静压控制[J]. 制冷空调与电力机械, 2005(3): 40-43
- [40] 江亿. 暖通空调系统的计算机控制管理[J]. 暖通空调, 1997, 27(3): 45-58
- [41] 翁史俊. 中央空调系统的自动控制设计和节能思路探讨[J]. 工程设计 CAD 与智能建筑, 2001(6): 18-22
- [42] 曹秋声. 新型中央空调节能控制系统研究[J]. 节能, 2005(6): 31-34
- [43] 钟玮. 我国建筑中央空调能耗现状及全面节能措施 [D]. 重庆: 重庆大学, 2004
- [44] 晋欣桥. 多区域变风量空调系统及其分配控制研究 [J]. 暖通空调, 2001, 31(6): 1-4