



液体除湿研究与进展*

华南理工大学 徐学利[☆] 张立志 朱冬生

摘要 介绍了液体除湿原理、除湿剂的选择、液体除湿器的工作原理和传质模型,以及液体除湿空调系统的优势及其发展。

关键词 液体除湿 除湿剂 除湿器 传质模型 空调

Progress of liquid dehumidification

By Xu Xueli[★], Zhang Lizhi and Zhu Dongsheng

Abstract Presents the principle of liquid dehumidification, the selection of liquid desiccants, the mechanism and mass transfer models of liquid dehumidifiers, the advantages and progress of liquid desiccant air conditioning systems.

Keywords liquid dehumidification, desiccant, dehumidifier, mass transfer model, air conditioning

[★] South China University of Technology, Guangzhou, China

①

0 引言

空气湿度过大不仅影响人的生活环境,还直接影响工农业生产及产品的储存,如文物和档案的保存。因此,人们必须采取有效的措施来保证空气湿度符合要求。于是,各种除湿技术得到了广泛的关注和发展^[1],其中液体除湿技术由于其所具备的优势被越来越多地应用到各种除湿环境中。

1 液体除湿原理

液体除湿过程是一个复杂的传热与传质过程,传质的推动力是空气中水蒸气的分压与溶液表面的饱和蒸汽压之差,这个压力差就是所谓的传递势。除湿过程的传质平均压差可用下式表示:

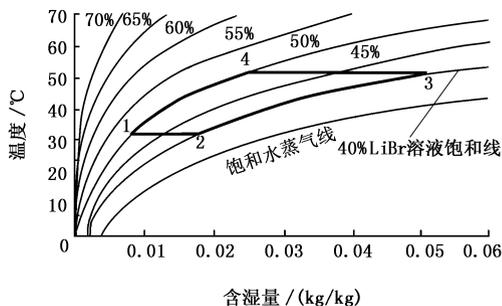
$$\Delta p = \frac{1}{H} \int_0^H (p_v - p_s) dh \quad (1)$$

式中 H 为除湿器入口和出口之间的距离; p_v 为被处理湿空气的水蒸气分压; p_s 为除湿溶液表面的水蒸气分压。

由于空气的水蒸气分压高于溶液表面的蒸汽压,水蒸气由气相向液相传递。随着传质过程的进行,被处理空气的湿度下降, p_v 减小,而除湿溶液

被稀释, p_s 增大;若气液两相接触的时间足够长,则 $p_v = p_s, \Delta p = 0$,两相的传递过程达到平衡。

以 LiBr 溶液吸湿材料在常温下吸附空气中水分、降低空气中的含湿量为例,说明液体除湿原理。为了使浓度降低的 LiBr 溶液再生使用,只需对其加热,蒸发水分,提升浓度即可。其除湿—再生过程如图 1 所示。



1—2 吸湿 2—3 加热 3—4 再生 4—1 冷却
图 1 LiBr 溶液除湿—再生过程

^① [☆] 徐学利,男,1978年9月生,在读硕士研究生,助理工程师 510640 华南理工大学化工所教育部传热与节能重点研究实验室 (020) 88187205 E-mail: xlxu2001@sina.com 收稿日期:2003-12-26 修回日期:2004-06-08

除湿过程中释放出来的部分潜热被冷却空气带走,保证传热传质过程进行得较充分。吸湿后的稀溶液经电能、太阳能或地热、工业余热等低品位能源加热升温,送入再生器,由于除湿溶液表面的水蒸气分压高于空气的水蒸气分压,这时水蒸气开始由液相向气相传递,这样就实现了除湿溶液的再生。再生后的浓溶液被送到除湿器进行除湿,这样就形成了除湿和再生的连续循环过程。

2 除湿剂的选择

除湿过程中,除湿剂的特性对除湿系统性能有重要影响,直接关系到系统的除湿效率和再生温度。除湿剂的特性包括物理性质(溶解度、蒸汽压、密度和黏度等)和热力学性质(比热容和传热传质特性等)。理想的除湿剂应具备以下性质^[2]:

a) 在除湿器的工作条件下有较高的溶解度,以减小耗用量。

b) 在除湿器的工作条件下有较低的蒸汽压,以减少挥发损失。

c) 在操作温度下黏度要低,以改善除湿塔内的流动状况,提高吸收速率,降低泵的功耗,减小传热阻力。

d) 应尽可能具有无毒性、无腐蚀性、不易燃、不发泡、冰点低、价格便宜的特点,并具有化学稳定性。

除湿溶液的除湿性能可以用其表面水蒸气分压的大小来衡量。因此,除湿溶液的蒸汽压是其最为关键的物理特性,是选择液体除湿剂时考虑的重要因素之一。

另外,除湿剂的选择不仅要考虑其除湿效果,还要考虑其市场价格和带来的副效应,从而使其性价比最高。

按照以上的要求,应用于太阳能液体除湿空调的除湿溶液就应具有以下一些特性:化学性质稳定;在给定条件下,具有较低的水蒸气压力;在工作温度范围内不结晶;对碳钢和铜等金属材料具有低腐蚀性、无毒、传热性能好等性质。

在空调工程中,最早被使用的液体除湿剂是三甘醇,目前常用的有 LiBr, LiCl, CaCl₂, 乙二醇等溶液。由于三甘醇是有机溶剂,黏度较大,在系统中循环流动时有部分滞留,黏附于系统表面,从而影响了系统的稳定工作,所以三甘醇在液体除湿的应用中受到了限制。乙二醇性能较好,但易挥发,

容易进入空调房间,对人体造成危害,应用也受到限制。而现在研究较多的是 CaCl₂, LiBr, LiCl 等水溶液,它们都各有其特点。若溶液与空气接触时间足够长,水分的传递过程将达到平衡。平衡状态时这些除湿溶液的质量分数与空气相对湿度的关系见图 2^[3]。

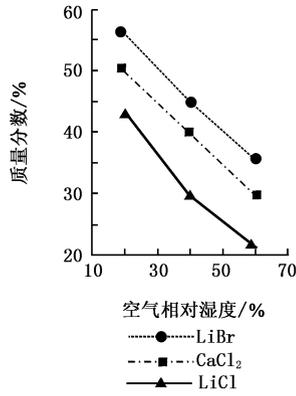


图 2 除湿溶液的质量分数与空气相对湿度的关系

由图 2 可以看出,在相同质量分数下,与 LiBr 溶液和 CaCl₂ 溶液相比, LiCl 溶液处理过的空气具有更低的相对湿度,溶液表面的饱和水蒸气分压更低,可见 LiCl 溶液的除湿性能较好。此外,选择除湿剂浓度时,要考虑结晶问题, LiCl 溶液一般采用 30%~40% 浓度范围,此时再生温度比 LiBr 溶液低,意味着能更有效地利用低湿热源。

选择除湿剂除了考虑本身的除湿性能,还要考虑除湿剂对除湿器及再生器的器壁有无腐蚀性。CaCl₂, LiBr, LiCl 等都属于非氧化性卤素盐,其溶液对碳钢及铜材料具有一定的腐蚀性,溶液与材料表面接触时发生氧去极化腐蚀,即吸氧腐蚀^[4]。碳钢及铜材料的腐蚀与溶液的 pH 值密切相关,如图 3 所示。

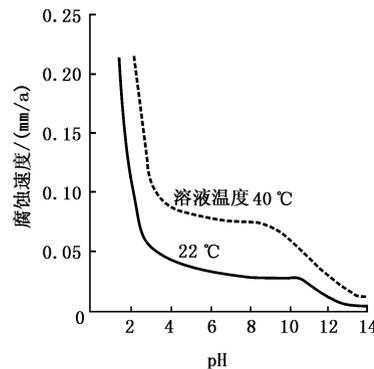


图 3 碳钢的腐蚀速度与溶液 pH 值的关系

在相同的摩尔浓度下,三种溶液 pH 值的大小顺序是: LiBr > LiCl > CaCl₂。LiCl 是中性盐,溶液 pH 值为 7.0,由于 CaCl₂ 溶液偏酸性,对金属的腐蚀性较大。温度升高时腐蚀更加剧烈。相同的温度下, LiBr 和 LiCl 溶液腐蚀性能大体相当。然而在再生过程中,由于 LiBr 溶液所需的再生温度比 LiCl 高,所以对设备的腐蚀相对较严重。

从以上分析可以看出, LiCl 溶液作为液体除

湿剂最合适,但若同时考虑成本因素:LiCl 的价格较高, LiBr 最贵, 而 CaCl₂ 最便宜, 大约是 LiCl 市场价格的 1/20, 单纯地使用 LiCl 溶液, 性价比并不是最高。

LiCl 溶液的各项性能都比较满意, 但价格昂贵; 而 CaCl₂ 溶液要便宜得多, 但它的溶解性不好, 黏度大, 长期使用有结晶现象, 且吸湿能力也不如 LiCl。A. Eratas 等学者曾提出用 LiCl 和 CaCl₂ 混合物溶液作为除湿剂以使成本降低; 通过一系列的溶液混合实验, 他认为两者按 1 : 1 的质量比混合, 可以达到除湿性和经济性最佳结合。ZnCl₂ 也可作为液体除湿系统的除湿剂, 价格便宜且易得, 但其具有腐蚀性且黏性较大, 所以有人采用 CaCl₂ 和 ZnCl₂ 的混合物溶液(摩尔比为 1 : 1)作为除湿溶液, 由于复杂的四氯化物的形成, 在很大程度上降低了各自的黏度, 并且具有较高的溶解度, 溶液饱和浓度可达 50%, 表现出比单一成分的除湿剂溶液更好的特性。

各种除湿剂按照何种比例混合来获得高性价比的除湿溶液, 这是今后进一步研究的内容。众多的金属卤盐溶液的除湿和物理性能越来越被人们关注, 如何改进传统的除湿剂的性价比和寻找性能更优良的除湿剂, 将是影响液体除湿系统应用的重要因素之一。

3 液体除湿装置

一般包括除湿器、除湿剂再生器、蒸发冷却器、换热器、泵等设备。图 4 是一个典型的液体除湿装置系统的流程图。

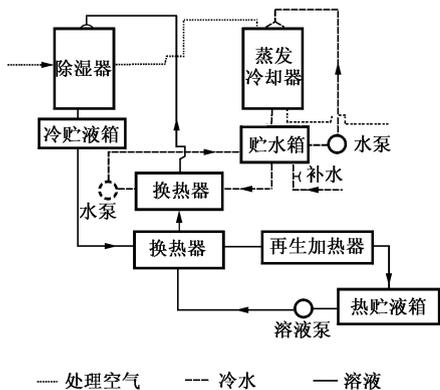


图 4 液体除湿装置系统流程示意图

除湿器是液体除湿装置系统的核心部分, 其工作机理如图 5 所示。高温高湿的空气由送风管道自下而上通过紧密床体(大多由填料层构成), 液体

除湿剂由溶液泵通过液体分布器喷淋到紧密床体上并形成均匀的液膜向下流动, 与空气在除湿器内进行热质交换, 达到除湿的目的。

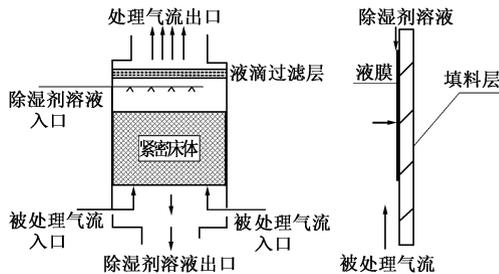


图 5 除湿器的工作机理

为了得到最大的除湿效果, 尽可能地减少空气在除湿器内的压损, 已有许多型式的除湿器被开发和研究^[5]。目前所应用的除湿器的结构型式多种多样, 根据其在除湿过程中冷却与否可以将其分为两类: 绝热型和内冷型。

绝热型除湿器是指在空气和液体除湿剂的流动接触中完成除湿, 除湿器与外界的热传递很小, 可以忽略, 除湿过程可近似看成绝热过程。一般采用填料喷淋塔式布液方式, 塔内可以填充不同类型的填料, 具有结构简单、比表面积大等优点, 但同时, 空气流动的阻力增大, 由于除湿溶液的绝热吸湿升温, 除湿效率低, 使其应用受到了限制。图 6

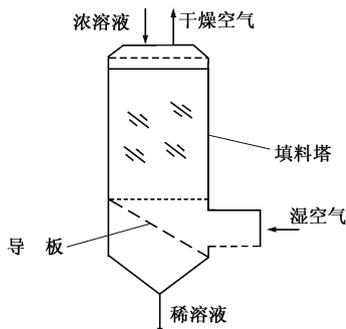


图 6 绝热型除湿器结构简图

给出了一种绝热型除湿器的结构形式, 除湿剂溶液从除湿器顶部喷洒而下, 在填料塔内的填料层上以均匀薄膜的形式缓缓下流, 被处理的空气从塔的下部逆流而上, 在塔内与除湿溶液发生热质交换。另外, 保持溶液的大流量, 可以起到溶液对自身的冷却效果, 以保持良好的除湿性能。

早期的研究主要集中在绝热型除湿器上, 20 世纪 90 年代以来, 内冷型除湿器受到了人们的普遍关注。内冷型除湿器中空气和液体除湿剂之间进行除湿的同时, 被外加的冷源(如冷却水或冷却空气等)所冷却, 藉以带走除湿过程中所产生的潜热(水蒸气液化所放出的潜热), 该除湿过程近似于等温过程。一般采用冷水盘管或冷却空气(都不与

除湿溶液直接接触)将除湿过程释放出的部分潜热带走,抑制除湿溶液的温升,提高除湿效率。由于绝热型除湿器中空气与溶液的质量比一般比较小^[6],因此它的蓄能能力差,而内冷型除湿器的蓄能能力较强。图 7 显示的是一种水冷型除湿器^[7],

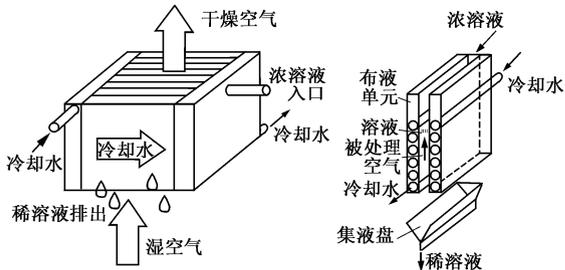


图 7 水冷型除湿器结构简图

它属于内冷型除湿器。除湿剂溶液从除湿器上部沿着平板往下流动,平板上的涂层使除湿剂溶液均布于整个平板上,被处理的空气从下往上流动,在板间与溶液发生热质交换。而冷却水管敷设于平板内部,这样湿空气内的水蒸气液化所产生的潜热会被冷却水带走。冷却水或冷却空气的泄漏会影响内冷型除湿器的正常工作,因此要求密封性好,这使得它的制造比绝热型除湿器复杂。

图 8 所示也是一种内冷型除湿器。被处理的

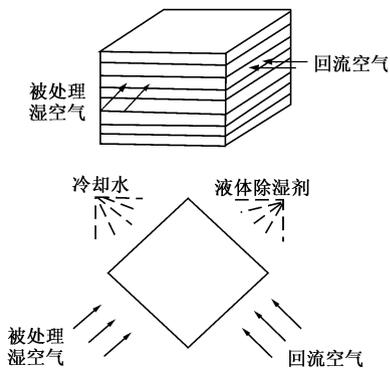


图 8 交叉流型板式除湿器结构简图

空气在平板的一侧与除湿剂溶液直接接触从而被除湿,同时,从空调室出来的回风与水在平板的另一侧直接接触发生热质交换,带走主流空气侧在除湿过程中所产生

的潜热。从图中可以看出,平板两侧的流体是以交叉流的形式流动的,所以这种除湿器也被称为交叉流型板式除湿器。

液体除湿系统中的关键设备是除湿器中的床层,一般情况下,常常使用喷淋塔;但考虑到溶液在床层内的停留时间和接触面积以及床层压降等因素,把填料应用到床层中,这样,使用填料的填料塔在以上方面优于喷淋塔。得到最大的除湿效果,尽量减少除湿器内部的空气压降,是研究开发新型除湿器的重点方向。

4 传质模型的研究概况

在液体除湿装置系统中,除湿器对于系统性能及蓄能特性有至关重要的影响。为了提高除湿效率,必须深入探讨除湿器内部复杂的传热传质过程,建立液体除湿系统的数学模型。

常用的液体除湿器由逆流(气流与液膜运动方向相反)或叉流式平行板型气液接触设备构成。Zografos 和 Petroff 建立了逆流式除湿器的传热传质数学模型^[8]。Wilkinson 针对蒸发冷却在除湿器中的应用作了分析,对新风量及蒸发冷却循环水量进行了优化^[9]。Chen 等人研究了设计和运行参数对除湿器性能的影响,发现除湿效率与除湿液浓度、进口空气的温湿度以及除湿液和空气的流量有关^[10]。代彦军等人对蜂窝状结构的叉流降膜除湿装置进行了分析,建立了叉流式液体除湿系统中再生加热器以及除湿器的数学模型^[11]。Ryan 等人对一种家用液体干燥除湿器作了试验研究,对顺流及逆流两种方式进行了探讨,得出了流动方式影响传热传质的规律^[12]。Z. Lavan 等人利用热力学第二定律对常压下的简单开式除湿冷却型空调系统进行了分析,利用他们定义的“等效冷凝温度”“等效蒸发温度”和“等效发生温度”,类似于闭式吸收式制冷循环分析的方法得到了系统不依赖于除湿剂种类的理想性能系数^[13]。袁卫星等人利用热力学第二定律对热能驱动的任意结构型式的开式除湿冷却型空调系统进行了理论分析,得到了此类空调系统在可逆条件下的理想性能^[14]。

以上许多模型都在不断完善改进,但每一种模型的建立都离不开假设,每种模型的应用效果很大程度上与假设是否适当有关。所以,模型建立前的假设是相当关键的。

5 液体除湿空调系统

传统的压缩式制冷空调系统所带来的 CFC 和 HCFC 的排放问题以及在大通风量和高湿环境下效率较低的问题已经越来越为人们所关注,人们将目光投向了那些功耗低且无污染的空调方式,液体除湿空调系统就是其中之一。

Lof 于 20 世纪 50 年代建立了第一个液体干燥冷却系统^[15]。Peng 和 Howell 提出并分析了一种使用三甘醇作干燥剂的液体除湿系统^[16]。Albers 和 Beckman 取得了一项液体干燥冷却系统的专利^[17]。

液体除湿空调系统由于其除湿器结构的不同,形成了各种类型,如逆流填料式液体除湿系统、交叉流填料式液体除湿系统等;以不同的能源作为再生能量形成多种除湿空调系统,如太阳能除湿空调系统等;根据其他特点还有集中再生式除湿空调系统、无泵循环液体除湿型空调系统等。

液体除湿空调系统与传统的空调系统相比有以下优势^[18]:

a) 热负荷、湿负荷分开处理,避免了过度冷却和再热的损失,有较高的能源利用效率并提高了室内的舒适程度。

b) 通过溶液的喷洒可以除去空气中的尘埃、细菌、霉菌及其他有害物;同时由于避免了使用有凝结水的盘管,也消除了室内的一大污染源;可采用全新风运行;提高了室内空气品质。

c) 可使用低温热源驱动,为低品位热源的利用提供了有效的途径。

d) 可以方便地实现蓄能,系统中设储浓溶液的容器,负荷小的时候储存浓溶液,负荷大的时候用来除湿,从而减小了系统的容量和相应的投资;单位质量蓄冷能力为冰的蓄冷能力的 60%,而且无需保温等措施。

e) 整个设备各个部件构造简单,节省初投资。

液体除湿空调系统,从保护环境、节约能源等方面来看是一种很有吸引力的新的空调方式。它可利用太阳能、地热及工业余热等低品位能源作为再生热源,耗电极少,约为压缩式空调系统的 1/3。

图 9 是以太阳能为主要能源的太阳能液体除湿

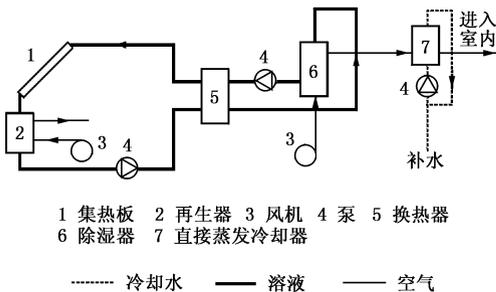


图 9 太阳能液体除湿空调系统示意图

除湿空调系统示意图^[19]。太阳能除湿空调系统能直接吸收空气中的水蒸气,可避免压缩式空调系统为了降低空气的湿度而首先必须将空气降温到露点以下,从而造成系统效率降低的问题;此外,该系统用水做工作介质,消除了对环境的破坏;该系统还

可单独控制处理空气的温度和湿度,能满足多用途的需要^[20]。在大通风量和高湿地区该系统仍有较高的效率。如有足够的再生面积,它还可以储备浓溶液,以备夜间使用,能改善太阳能利用的限制。所有这些优点使得国内外众多的科学家将目光投向太阳能液体除湿空调系统。

6 结语

正是由于机械制冷空调设备数量的激增,使得能耗也越来越大,同时也造成了不同程度的环境污染。所以,无臭氧损耗、无温室效应的替代工质和制冷方式以及各种利用低品位能源的新型空调系统成为当今空调领域内的热点和焦点。所以在环保高效基础上,提供给人们新鲜健康空气,能够营造较高舒适度环境的液体除湿空调系统,具有很好的发展前景。

参考文献

- 1 杨婉. 新型转轮除湿机的应用与分析. 制冷与空调, 2003, 3(3): 49 - 50
- 2 杨英, 李心刚, 李惟毅, 等. 液体除湿特性的实验研究. 太阳能学报, 2000, 21(2): 155 - 159
- 3 赵云, 施明恒. 太阳能液体除湿空调系统中除湿剂的选择. 工程热物理学报, 2001, 22(Suppl): 165 - 168
- 4 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用. 北京: 化工工业出版社, 1984. 199 - 207
- 5 张村, 施明恒. 三种太阳能液体除湿空调系统除湿器的比较. 节能技术与产品, 2002, 23(6): 29 - 32
- 6 Kelling W, Laevemann E, Kapfhammer C. Energy storage for desiccant cooling systems component development. Solar Energy, 1998, 64: 209 - 221
- 7 张小松, 费秀峰, 施明恒, 等. 蓄能型溶液除湿蒸发冷却空调系统中除湿器研究. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 72 - 75
- 8 Zografos A I, Petroff C. A liquid desiccant dehumidifier performance model. In: ASHRAE Trans. 1991, 97(1). 650 - 656
- 9 Wilkinson W H. Evaporative cooling trade-offs in liquid desiccant systems. In: ASHRAE Trans. 1991, 97(1). 642 - 649
- 10 Chen L C, Kuo C L, Shyu R J. The performance of a packed bed dehumidifier for solar liquid desiccant systems. In: Proceedings of the 11th Annual ASME Solar Energy Conference, San Diego, Calif, 1989. 371 - 377