



基于溶液除湿潜能释能的制冷系统的构建与研究*

殷勇高 张小松 蒋毅

(东南大学动力工程系 南京 210096)

摘要 基于溶液除湿潜能的蓄能模式,构建一种新型除湿潜能释能冷水机组,以给空调系统提供冷源,特别是为辐射供冷的空调系统提供冷源途径。介绍了新构建系统的流程形式与工作过程,阐述了潜能蓄能机理,从理论上计算分析了该系统的单位理想制冷量随蒸发温度、冷却水温度和溶液浓度的变化关系,数据结果表明该系统在一定工况下能获取空调用冷水,并具有较大的单位理想制冷量,单位理想制冷量能达到 10kW,该系统所能获取冷冻水的理论最低温度为除湿干燥后湿空气的露点温度。

关键词 工程热物理;冷水机组;除湿潜能;释能过程;溶液除湿剂;蒸发冷却

Construction and Research on a Refrigeration System Based on Liquor Desiccant Potential Discharging

Yin Yonggao^{*}, Zhang Xiaosong and Jiang Yi

^{*}Power Engineering Department of Southeast University, Nanjing, 210096, China

Abstract A new type of chiller system relying on desiccant potential discharging was constructed based on the energy storage mode using liquor desiccant potential, which was able to provide cooling resource for air conditioning system and especially for radiant cooling air conditioning. The mechanism about the energy storage mode – using desiccant potential was explained. The influence of evaporative temperature, cooling water temperature, and liquor concentration on the normalized cooling capacity of the system was calculated and analyzed theoretically. The results show that the system could obtain chiller water for air conditioning under designated operation conditions and the high – normalized cooling capacity could reach 10 kW. In addition, the minimum temperature of the chiller water provided by the system depended on dew point temperature of the air after dehumidification.

Keywords Engineering Thermophysics; Water chiller; Desiccant potential; Exoergic process; Liquor desiccant; Evaporative cooling

1 引言

随着传统制冷空调设备的广泛应用,制冷空调系统能耗和对环境的污染问题成为该领域面临的两个严峻问题,也是可持续性发展的两大核心主题。开发和节能、绿色环保的新型空调方法是解决这两大问题的有效途径之一。

近几年来,除湿蒸发冷却空调系统受到国内外的普遍关注,特别是溶液除湿蒸发冷却系统,由于其具有运动部件少、溶液再生温度低、可发展一种高密度的潜能蓄能模式等优点,引起了大量的国内外学者的关注。早在 1995 年和 1998 年 Grossman 等人对溴化锂水溶液的开式和半开式吸收制冷系统进行了数值模拟计算^[1-2],得到了性能系数随参数的变化关系。总体来看,在溶液除湿蒸发冷却领域,大量的研究集中

在不同地域的可行性与潜在利用价值的研究、溶液除湿再生过程的实验研究^[3-5]。2004 年,谢晓云^[6]等人对利用盐溶液制备冷水的冷水机组进行了研究,利用室外的空气预冷后进行直接蒸发冷却,输出冷水,同时利用溶液热回收技术对排出系统的湿空气进行冷量回收,得到不同室外气候条件的系统性能及其影响情况。溶液除湿潜能蓄能思想经提出后^[7],在此方面的研究相对比较单薄,基于溶液除湿潜能的蓄能模式,提出一种除湿潜能释能制取冷水的新流程,以提供空调系统冷源,主要对除湿潜能蓄能释能机理、系统的构建、释能过程系统性能进行理论研究与分析。

2 基于溶液除湿潜能释能的冷水系统的构建

2.1 溶液潜能蓄能模式与机理

已经被广泛研究的液体除湿蒸发冷却空调系

* 国家自然科学基金资助项目(50376052)

收稿日期:2005 年 10 月 1 日

统^[8]是利用浓溶液首先对被处理的湿空气除湿干燥,然后将之在直接蒸发冷却器中绝热加湿,达到需要的送风状态点,送入空调房间完成空气调节过程。除湿后的稀溶液经过加热后到再生器中再生浓缩,恢复到原有的浓度状态,这样完成一种开式的制冷空调系统,这种制冷空调系统尤其适合于太阳能驱动^[9]。可见,此系统只要有足够多的浓溶液就可以实现制冷空调过程;那么,可以在热源相当充足的时候或者利用风谷电价比较低廉的时候再生系统所需要的一定量的浓盐溶液,并储存于系统储液罐中,在热源不足时将这部分储备的浓溶液释放出来进行制冷空调,此种蓄能模式称之为溶液除湿潜能蓄能^[10]。在蓄能系统中,除湿溶液经过温度较低的热源(50~75℃)加热后与环境空气在填料式再生器中进行热质交换,使得除湿溶液浓度得到不断增加,最终浓缩到设定要求的浓度储存在储液槽中,在此过程以消耗电能、热能、太阳能等为代价,获得溶液除湿潜能并储存起来,表现为溶液除湿能力的提升,浓溶液再生过程也即是蓄能过程。在需要释能时,释放出储存在储液槽中的浓度较高的除湿溶液,进入除湿器与被处理空气发生传热传质,除湿溶液吸收空气中的水蒸汽,浓度不断降低,除湿潜能逐步释放,表现为溶液除湿能力的下降,被处理的空气湿度减小,通过蒸发冷却释放冷量可用于空气调节,溶液除湿、除湿空气蒸发冷却过程也即是溶液潜能释能过程。

潜能蓄能^[11]是蓄能的一种新思维、新方法,与传统的蓄能技术直接储存冷量或热量不同,它是通过储存一种潜能而间接的储存能量,再在一定条件下通过一定的手段把潜能释放出来,转化为制冷空调系统所需要的热量或冷量。溶液除湿潜能蓄能是指在溶液除湿空调系统中,通过储存溶液的除湿潜能而达到蓄能的目的,溶液的除湿潜能,是指溶液的除湿能力。具体的说,为了使除湿溶液能够得以循环使用,必须对除湿之后的稀溶液进行浓缩再生,由于在环境温度下,溶液表面的水蒸气分压力比空气的水蒸气分压力低,因而由热力学第二定律可知,该过程不可能自发的进行,而必须付出一定的代价,即耗费一定的能量。溶液除湿潜能蓄能就是把需要储存的能量比如电能、热能、太阳能等,用于浓溶液再生,从而提高溶液的除湿能力,在此过程中以消耗能量为代价,获得了除湿潜能,将这种具有除湿能力的

溶液储存起来就意味着把能量储存起来了,在需要时再通过浓溶液除湿的方式把除湿潜能释放出来。

2.2 基于溶液除湿潜能释能的冷水系统的构建

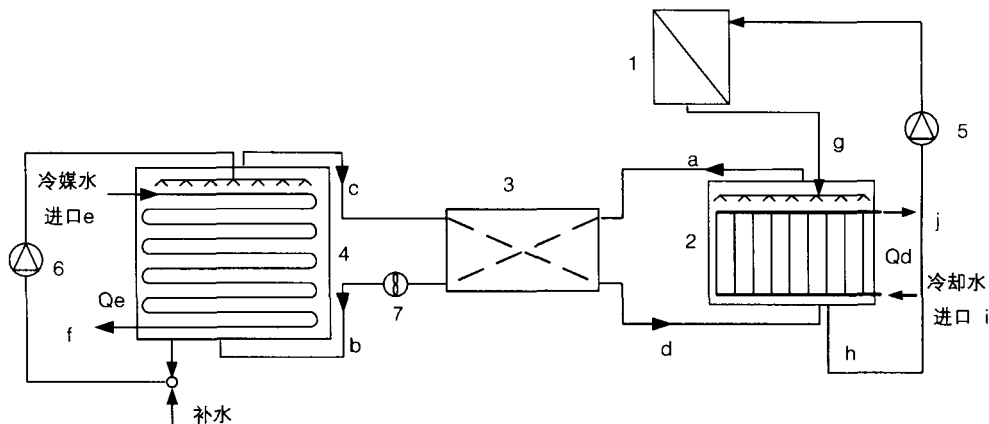
基于溶液除湿潜能释能的冷水系统如图 1 所示,由潜能蓄能装置、内冷型除湿器、蒸发冷却器、回热器、溶液泵、水泵、风机等主要部件组成。系统工作过程如下:

1) 溶液循环:潜能蓄能装置 1 通过潜能蓄能过程存储一定量的浓盐溶液于高浓度储液罐中,在系统需要供应冷量时释放浓溶液 g 进入除湿系统 2 (内冷型除湿器具体结构示意图如图 2 所示),经过布液装置喷撒到除湿器上端形成除湿降膜,与来自除湿器底部的湿空气形成逆流、直接接触传热传质,完成对空气除湿干燥过程后较稀的盐溶液 h 经过泵 5 输送到潜能蓄能装置 1 中的稀溶液储液罐,盐溶液如此反复循环直至溶液不再具备应有的除湿能力,即释能过程结束;

2) 封闭湿空气循环:该系统中,在间接蒸发冷却器 4 和内冷型除湿器 2 之间是封闭的湿空气循环($a-b-c-d-a$),该湿气流首先在除湿器 2 中与降膜溶液以逆流形式发生充分热质传递,被除湿冷却,从除湿器顶部流出之后进入回热器 3 与来自间接蒸发冷却器 4 的温度较低的湿空气进行显热交换,预冷之后进入间接蒸发冷却器,产生冷量由蒸发冷却器盘管中冷媒水带走。蒸发冷却后加湿的空气从蒸发冷却器的顶部流出进入回热器 3 预冷来自除湿器的干燥空气。湿空气在除湿干燥过程中释放热 Q_d 由冷却盘管中的冷却水带走。

3) 加湿循环水及补水系统:间接蒸发冷却器 4 中顶部设有加湿循环水的喷水布液装置,使得此部分循环水能比较均匀地喷到冷媒水盘管外表面,与来自底部的干空气进行热质交换,对空气进行蒸发加湿,然后又通过泵 6 输送到间接蒸发冷却器顶部。补水是用于间接蒸发冷却器中加湿循环水量的减少,当间接蒸发冷却器中水少于一定量时,需要通过补水管道及时补充足够的加湿循环水。

4) 冷媒水循环与冷却水循环系统:冷媒水系统是通过一定入口温度的冷媒水 e 经过冷媒水盘管后温度降低至 f 流出间接蒸发冷却器输出系统冷量 Q_c ;冷却水循环系统是通过常温冷却水($i-j$)带走盐溶液除湿过程中产生的相变潜热和溶解热 Q_d 。



1. 势能蓄能装置; 2. 内冷型溶液除湿器; 3. 回热器; 4. 间接蒸发冷却器; 5. 6. 泵; 7. 风机

图 1 基于溶液除湿潜能释能的冷水系统

3 新型溶液除湿潜能释能系统性能分析

图 1 所示系统中封闭循环的湿空气流、除湿溶液在理想运行工况在水蒸汽压力 - 温度图 ($P_v - T$) 上的表示如图 3 所示(以氯化锂水溶液为除湿溶液)。系统的投入是势能蓄能阶段所需热量, 暂不考虑此过程的效率, 仅分析此流程释能过程中各运行参数对系统产出性能的影响情况, 分析和计算过程均按照理论运行工况进行计算, 具体工况要求如下:

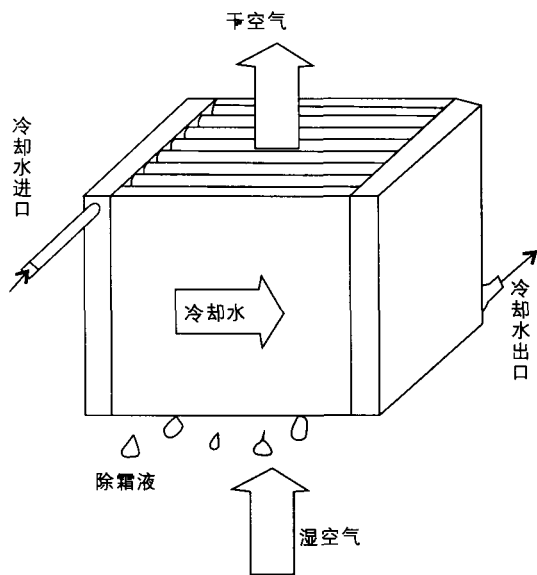


图 2 除湿器结构示意图

- 1) 换热器使得循环空气预冷/回热足够充分, 使得 $t_b = t_c$;
- 2) 除湿器中实现的是等温除湿, 除湿过程释放的潜能被冷去水带走;
- 3) 蒸发冷却器实现绝热加湿, 但加湿后空气不

一定要求饱和, 最终冷水出水温度 t_f 等于空气出口温度 t_c 。

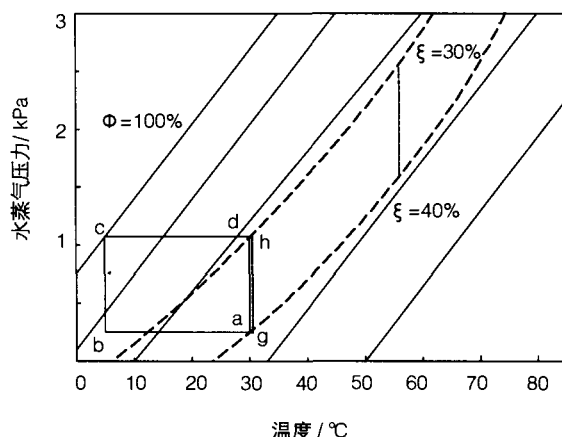


图 3 循环过程水蒸汽分压力 - 温度图 ($P_v - T$) 上的表示

图 3 中过程 d - a 是封闭循环湿空气在内冷型除湿器中实现的等温除湿过程(图中所示除湿过程中冷却水温为 30°C), 除湿过程释放潜热 Q_d 被冷却水带走, 除湿终了湿空气的状态 a 取决于溶液浓度 ξ_g 和冷却水温度 t_i , 即满足关系式:

$$\omega_a = f(p_w) = g(\xi_g, t_i) \quad (1)$$

其中,
$$f(p_w) = \frac{0.622 p_w}{B - p_w} \quad (2)$$

除湿器入口湿空气状态 d 的含湿量取决于冷冻水温度 t_f (图 3 中所示的系统蒸发温度为 5°C), 即

$$\omega_a = f(p_g) \quad (3)$$

$$\ln(p_g) = A_0/T_f + A_1 + A_2 T_f + A_3 T_f^2 + A_4 T_f^3 + A_5 \ln(T_f) \quad (4)$$

其中, $A_0 = -5800.22, A_1 = 1.391, A_2 = -0.049, A_3 = 0.417 \times 10^{-4}, A_4 = 0.145 \times 10^{-7}, A_5 = 6.546$ 。

除湿溶液表层水蒸汽分压力是溶液浓度和温度的函数^[12],表示为:

$$p_{v, sol} = p_{H_2O}(T) \Psi \left\{ 2 - \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_0} \right)^{\pi_1} \right]^{\pi_2} + \frac{T}{T_{C, H_2O}} \right. \\ \left. \left\{ \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_3} \right)^{\pi_4} \right]^{\pi_5} - 1 \right\} \right\} \quad (5)$$

$$\Psi = 1 - \left[1 + \left(\frac{\xi}{\pi_6} \right)^{\pi_7} \right]^{\pi_8} - \pi_9 e^{-\frac{(\xi-0.1)^2}{0.005}} \quad (6)$$

其中, $\pi_0 = 0.28, \pi_1 = 4.30, \pi_2 = 0.60, \pi_3 = 0.21, \pi_4 = 5.10, \pi_5 = 0.49, \pi_6 = 0.362, \pi_7 = -4.75, \pi_8 = -0.40, \pi_9 = 0.03, T_{C, H_2O}$ 为水的临界温度。

为便于分析系统性能,定义系统单位理想制冷量 Q_0 为单位质量流量的湿空气所产生的蒸发冷量,即可定量描述为:

$$Q_0 = (\omega_c - \omega_b) r \quad (7)$$

其中 r 为水的汽化潜热,取 2500kJ/kg; ω 为湿空气含湿量,kg/kg 干空气。

可见,系统单位理想制冷量 Q_0 取决于系统中溶液浓度、蒸发温度和环境冷却水温度,同时理论上达到的最低蒸发温度为湿空气 a 状态的露点温度。为分析此除湿潜能释能系统性能,分别计算了氯化锂溶液浓度在 33% ~ 40% 之间变化,环境冷却水温在 20℃ ~ 30℃ 之间变化,蒸发温度在 5℃ ~ 12℃ 之间变化时系统的单位理想制冷量,如图 4~6 所示。

图 4 表示的是系统蒸发温度为 10℃、冷却水温度为 30℃ 时,除湿浓溶液浓度变化对单位理想制冷量的影响。随着除湿溶液浓度的增加,单位理想制冷量也增加,当溶液浓度由 33% 增加到 40% 时单位理想制冷量当溶液浓度低于 31% 时,系统制冷量为 0,说明低于此浓度时无法获取低于 10℃ 的冷水。

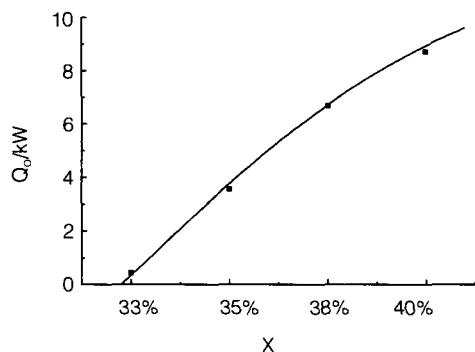
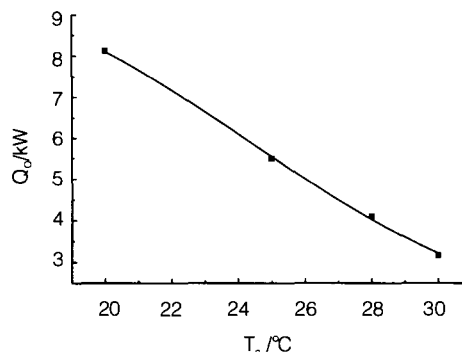


图 4 单位理想制冷量随溶液浓度变化曲线

图 5 表示的是系统蒸发温度为 5℃、除湿浓溶液浓度为 40% 时,冷却水温度变化对单位理想制冷量的影响。随着冷却水温度的增加,单位理想制

冷量减少,当冷却水温由 20℃ 增加到 30℃ 时,单位理想制冷量由 8.125kW 减少到 3.165kW。



5 单位理想制冷量随冷却水温的变化曲线

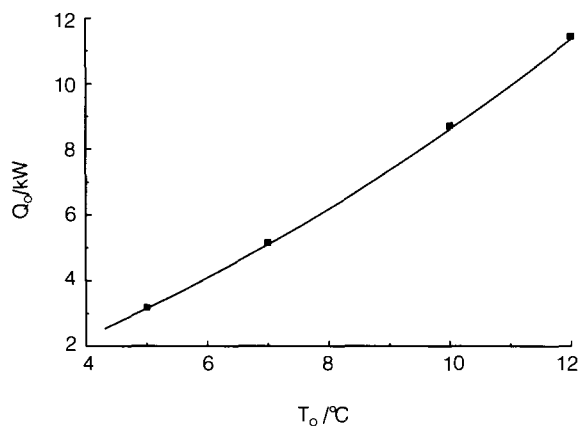


图 6 单位理想制冷量随蒸发温度的变化曲线

图 6 表示的是系统冷却水温度为 30℃、除湿浓溶液浓度为 40% 时,蒸发温度变化对单位理想制冷量的影响。从图上可以看出,随着蒸发温度的降低,系统单位理想制冷量减少,当蒸发温度由 12℃ 降低到 5℃ 时,单位理想制冷量由 11.453kW 降低到 3.165kW。

4 结论

从以上计算分析可以看出:

1) 该系统能够采用一种新的封闭湿空气循环避免了除湿溶液对室内空气品质的影响,同时系统冷量输出介质与溶液侧湿空气无接触,不同于常规的溶液除湿蒸发冷却空调系统,不用担心冷量输出过程造成的对人体健康的影响;

2) 该系统能够充分利用潜能蓄能技术,蒸发冷却释能获取空调用冷水,可为辐射供冷空调系统提供冷源,是一种为热湿独立处理空调系统提供冷源的有力途径;

3) 计算数据表明了构建的该冷水机组能够提

供5~12℃的冷水,并且一般单位理想制冷量能够达到10kW左右,该系统能获取的最低水温理论上是除湿干燥后湿空气的露点温度;

4) 影响系统性能的因素主要包括除湿溶液浓度、蒸发冷冻温度和除湿过程冷却水温度。计算分析得到了蒸发温度、除湿溶液浓度、冷却水温度对系统制冷性能的影响情况,为系统的运行提供理论参考。

参考文献

- [1] Hellann, Grossman. Simulation and analysis of an open-cycle dehumidifier evaporator regenerator (DER) absorption chiller for low-grade heat utilization[J]. Int. J. Refrig., 1995, 18(3): 177~189
- [2] Pohl, Hellman, Grossman. Investigation and comparison of two configurations of a novel open-cycle absorption chiller[J]. Int. J. Refrig., 1998, 21(2): 142~149
- [3] Sanjeev Jain, Dhar P L, Kaushik S C. Experimental studies on the dehumidifier and regenerator of a liquid desiccant cooling system[J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(3): 253~267
- [4] Khedari, Rawangkul, Chimchavee et al. Feasibility study of using agriculture waste as desiccant for air conditioning system [J]. Renewable Energy, 2003, 28(10): 1617~1628
- [5] Gommed, Grossman, Ziegler. Experimental investigation of a LiCl-Water open absorption system for cooling and dehumidification[J]. Transactions of the ASME, 2004, 126: 710~715
- [6] 谢晓云等. 利用盐溶液制备冷水的冷水机组[J]. 暖通空调, 2004, 34(11): 110~113
- [7] Kessling, Laevemann, Peltzer. Energy storage in open cycle liquid desiccant cooling systems[J]. Int. J. Refrig., 1998, 21(2): 150~156
- [8] 张小松, 殷勇高, 曹毅然. 蓄能型液体除湿冷却空调系统的建立与实验研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 546~549
- [9] 殷勇高等. 蓄能型太阳能溶液除湿蒸发冷却空调系统的研究[J]. 东南大学学报, 2005, 35(1): 73~76
- [10] 张小松等. 基于溶液除湿的潜能蓄能技术及其应用[C]. 杭州: 第三届全国制冷空调新技术研讨会, 2005, 47~54
- [11] 徐士鸣. 蓄能技术新概念-制冷/制热潜能储存技术[J], 电力需求侧管理, 2003, 5(1): 43~51
- [12] Manuel R Code. Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design[J]. International Journal of Thermal Science, 2004, 43: 367~382



2006年山东省制冷空调学术年会 暨节能与环保学术论坛在烟台隆重召开

2006年山东省制冷空调学术年会暨节能与环保学术论坛于2006年8月19日-20日在美丽的海滨城市烟台东海宾馆召开。出席会议的有山东制冷学会林诚理事长、中国制冷学会杨一凡副秘书长、山东渔业船舶检验局郑玉柱总工等有关方面的领导和设计、施工、科研、高校、监理、物业管理、生产企业等单位的近300名代表。会议就当前制冷空调行业的热点问题:建筑节能、食品冻结冷藏、物流冷链,做了具有前瞻性的精彩报告,受到与会代表的热烈欢迎。最后山东制冷学会副理事长李永安教授致闭幕词,他号召各单位会员、会员和同仁要积极参加学会组织的各项活动,努力开拓,勇于创新,同时要积极撰写论文迎接2007年山东制冷空调学术年会的召开。