

溶液除湿蒸发冷却空调系统 及其若干重要问题*

东南大学 曹熔泉[☆] 张小松[△] 彭冬根

摘要 从系统流程的构建、系统性能的研究、系统关键部位的优化等方面介绍了溶液除湿蒸发冷却空调系统的研究情况,探讨了进一步研究中的关键问题。

关键词 溶液除湿 蒸发冷却 空调 节能

Liquid desiccant evaporative cooling air conditioning systems and certain key problems

By Cao Rongquan[★], Zhang Xiaosong and Peng Donggen

Abstract Presents recent researches on liquid desiccant evaporative cooling air conditioning systems in the aspects of system flow establishing, performance study and key configuration optimization. Discusses several points to be focused on for further study.

Keywords liquid desiccant, evaporative cooling, air conditioning, energy conservation

★ Southeast University, Nanjing, China

①

0 引言

据住房和城乡建设部统计,我国建筑能耗总量逐年上升。20 世纪 70 年代末,建筑能耗占能源消耗总量的 10%,近年已上升至 27.8%。而建筑中最大的耗能点则是供暖和空调,统计数据表明我国供暖和空调能耗占建筑总能耗的 55%。在生活水平较高的城市,如上海、北京、重庆等,夏季空调系统用电量占城市用电量的 30% 以上。随着人民生活水平的提高以及城市大型公共建筑的建设发展,以电制冷为主的传统空调给夏季电网带来越来越大的压力,成为能源问题的主要矛盾之一。

环境污染是近年来制冷空调领域突起的另一重要问题。一方面,传统以电制冷为主的空调系统消耗的能量主要来源于矿物燃料,给人们带来热舒适的同时,也向大气排放了大量的 CO₂, SO₂ 等有害气体,加剧了温室效应。另一方面,制冷空调系统中使用的 CFC 类制冷工质的泄漏,破坏了地球大气层中的臭氧层,严重危害着人类的生存、发展。

探寻节能、环保的制冷技术和空调方法是制冷空调发展的必然之路。

1 蒸发冷却技术的研究概况

蒸发冷却以水为制冷工质,在常压下与空气传热传质,从自然环境中提取冷量,符合可持续发展的要求^[1-3]。

按照其工作原理,蒸发冷却可划分为:直接蒸发冷却、间接蒸发冷却、直接-间接蒸发冷却以及复合式蒸发冷却。直接蒸发冷却的研究主要有各种填料传热传质性能的理论实验研究^[4]、净化能力的测试以及在干燥地区的直接应用^[3,5]。目前,直接蒸发冷却空调被广泛应用于农业设施和高温车间,但是受室外气象参数的影响较大,即使是在干燥地区,也有部分时间无法保证室内的设计参数^[6]。间接蒸发冷却器有板肋式、管式、热管式、露点式等多种形式,研究焦点集中于数学模型的建立、简化及实验研究等方面^[6-9],目前主要用于能量

①☆ 曹熔泉,男,1984 年 4 月生,在读硕士研究生

△ 210096 东南大学能源与环境学院

(0) 13951974528

E-mail: rachpe@seu.edu.cn

收稿日期:2009-03-19

修回日期:2009-08-06

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50676018),国家科技支撑重点资助项目(编号:2008BAJ12B02)

回收^[2],国内外也有少量用冷却塔生产冷水用于过渡季节供冷的研究实例^[10-11]。直接-间接蒸发冷却空调的使用地域范围、气象参数范围较直接蒸发冷却空调更为广泛,但仍然存在气象盲区。相比之下,复合式蒸发冷却,包括多级蒸发冷却、建筑被动蒸发冷却、溶液除湿蒸发冷却等形式,具有巨大的应用价值^[2,5]。其中,溶液除湿蒸发冷却是溶液除湿技术与蒸发冷却技术的复合形式,溶液除湿使得蒸发冷却应用于潮湿地区成为可能。采取适当的能量回收方式,这种复合形式可在高温、高湿季节运行,除湿过程无需将空气温度降低至露点,可利用太阳能、工业废热等低品位热源进行溶液再生,且具备蓄能特性,是一种节能、环保的空调方式^[12-15]。

2 溶液除湿蒸发冷却系统流程的构建

溶液除湿蒸发冷却系统中,溶液除湿担负排除室内湿负荷和部分或者全部室内冷负荷的任务,而蒸发冷却则扮演着能量回收以及将除湿后的干空气所携带的能量以冷量形式释放出来的角色。目前,溶液除湿的研究主要包括除湿盐溶液的热物性研究^[16-18]、除湿/再生器的实验研究^[19-21]和除湿/再生传热传质的理论研究^[22-25]等方面。随着这些基础研究逐步趋于成熟,众多专家学者对溶液除湿蒸发冷却空调的系统流程进行了探索。

早在 1955 年, Löf 首次提出太阳能溶液除湿蒸发冷却空调系统,并对此进行了实验研究^[13]。该系统采用三甘醇为除湿剂,被干燥的空气经过蒸发室进行冷却,除湿后的稀溶液由被太阳能加热的空气再生。

1987 年, Patnaik 提出一个溶液除湿蒸发冷却空调系统^[14],其原理如图 1 所示。在该系统中,环境空气被除湿器干燥后,在显热换热器中预冷,然后经过直接蒸发冷却器加湿降温。一部分空气直

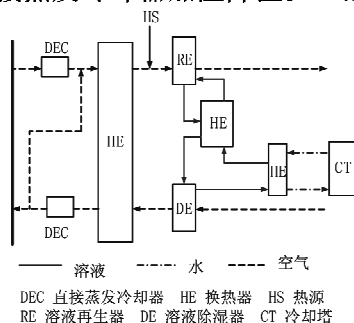


图1 溶液除湿蒸发冷却系统原理图^[14]

接送入空调房间,排除室内余热余湿;另一部分与经直接蒸发冷却的排风混合后冷却送风,之后经热源加热后用于溶液再生。再生之后的高温浓溶液与除湿后的稀溶液换热后,由冷却塔提供的冷水进行冷却,恢复除湿能力。据测试,虽然没有其他冷却设备,但该系统的制冷量可达 3.5~10.4 kW。

图 2 是 Jain 于 2000 年提出的一次回风溶液除湿蒸发冷却全空气系统^[26]。室外新风与部分房间排风混合后,经过除湿器干燥,由显热换热器冷却,一部分经直接蒸发冷却器加湿冷却后送入空调房间,另一部分则被引入冷却塔,蒸发冷却产生的冷水用来冷却除湿器出口的空气。系统使用冷却塔排除除湿过程中的凝结热,但再生后的浓溶液与除湿后的稀溶液换热之后未进行冷却即被送入除湿器。Ritunesh Kumar 等人指出该系统的不足之处在于: 1) 除湿器进口溶液没有充分冷却,影响了除湿效果; 2) 部分室内空气直接排至室外,室内的能量未得到充分回收利用^[27]。在此基础上,对系统循环进行了改进,提出两级(如图 3 所示)、三级的溶液除湿蒸发冷却系统,性能系数分别提高了 67% 和 116%。

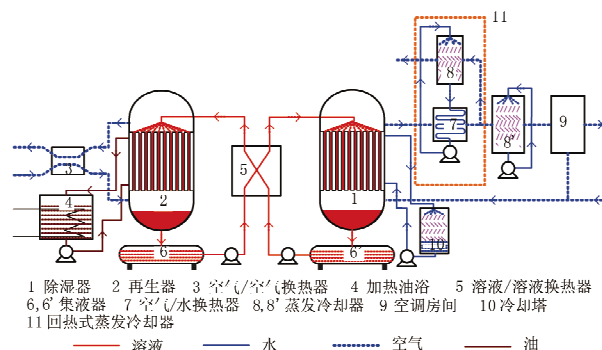


图2 单级溶液除湿蒸发冷却系统^[26]

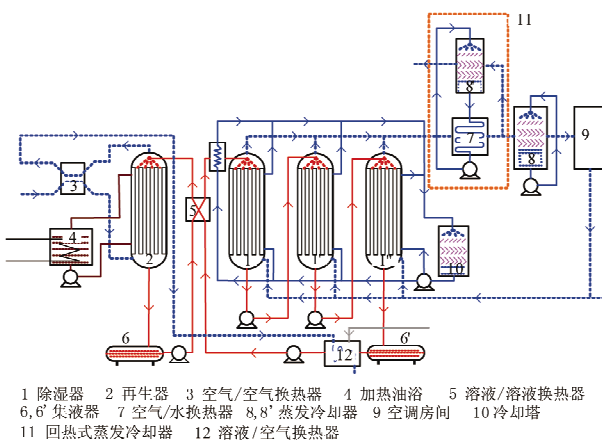
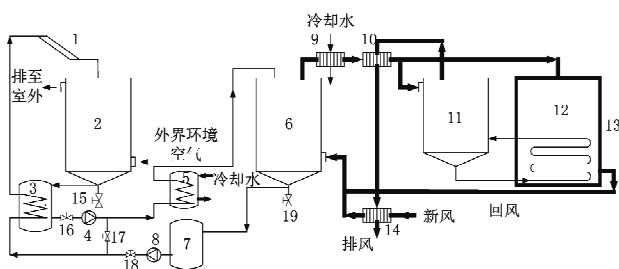


图3 双级溶液除湿蒸发冷却系统^[27]

以武汉、南京、重庆、南昌等为代表的长江中下游地区,夏季气温高、湿度大,人体感觉极端闷热,排除室内余湿成为该地区提高人体舒适性的关键问题。在这种气候条件下采用溶液除湿蒸发冷却空调系统,回收排风中的有用能具有重要的意义^[6]。图4是张小松等人构建的太阳能溶液除湿蒸发冷却与辐射供冷空调系统,主要由除湿器、太阳能集热器、再生器、绝热加湿器、辐射盘管、间接蒸发冷却器、其他换热器、溶液泵、风管、水管等组成^[28]。该空调系统将除湿之后的空气一部分直接送入室内用于排除室内潜热负荷,另一部分进入绝热加湿器,产生的高温冷水送入空调房间的屋顶或者周围墙壁的辐射盘管,通过辐射供冷方式去除室内显热负荷。绝热加湿器出口的低温高湿的空气被送风回收冷量,经间接蒸发冷却器预冷除湿器进口的新风后,排至室外环境。为使除湿溶液恢复除湿能力,可利用太阳能等低温热源(60~80℃)实现溶液再生。



1 太阳能集热器 2 填料塔再生器 3 带盘管换热器的浓溶液储液桶 4 泵 5 水冷换热器 6 内冷型除湿器 7 稀溶液储液桶 8 泵 9 空气-水换热器 10 空气-空气换热器 11 绝热加湿器 12 辐射盘管 13 空调房间 14 间接蒸发冷却器 15~19 阀

图 4 热湿独立处理的新型一体化制冷空调系统流程图^[28]

该系统室内排风没有直接释放到室外,而是经过除湿、降温、加湿冷却送风、间接蒸发冷却新风等一系列过程后排出,实现了排风的全热回收;除湿器进口浓溶液由冷却塔产生的冷却水或者环境水进行冷却,新风经预冷后引入除湿器,促进了除湿过程的进行;采取溶液除湿蒸发冷却的方式可生产13~18℃的高温冷水,用于辐射供冷;采用辐射供冷与置换通风相结合的末端形式,可解决常规辐射供冷的结露问题,同时可实现温湿度独立控制。

3 系统性能的研究

理论分析表明,溶液除湿蒸发冷却空调系统具有节能、环保、健康等优势。然而,系统是否具有可行性依赖于系统的综合性能,需要对溶液除湿蒸发

冷却空调系统在不同地域条件下的制冷量、性能系数以及各参数对系统性能的影响进行研究。

1995年, Hellmann等人对早期 Niebergall提出的除湿-蒸发冷却-再生开式空调系统(DER)编制了计算程序, 分析了循环各状态点运行工况对系统性能系数、制冷量的影响, 在设计工况下性能系数达0.43、制冷量达21.58 kW^[29]。相对于闭式吸收式制冷机, 该系统具有诸多优势, 从综合性能上来说具有一定的可行性。

Gandhidasan 针对诸如达兰、沙特阿拉伯等夏季湿热地区,提出太阳能驱动的开式通风模式系统^[30]。该系统主要由溶液除湿器和绝热加湿器组成,除湿后的稀溶液利用太阳能进行再生,该文献作者给出了制冷量的表达式,并分析了环境空气参数、太阳辐射、冷却水温度和溶液浓度对系统性能的影响。

Alizadeh 对位于澳大利亚布里斯班的太阳能溶液除湿蒸发冷却系统进行了测试^[31]。该系统以太阳能作为溶液再生热源,引入间接蒸发冷却与板式换热器相结合的内冷除湿器。送风被内冷除湿器除湿后,经直接蒸发冷却送入空调房间,室内回风在除湿器中被间接蒸发冷却,吸收除湿过程的凝结热之后经直接蒸发冷却器冷却除湿器进口浓溶液。系统制冷量 20 kW,热力系数 0.82,仅消耗 3.5 kW 电能。实验测定结果表明,系统可对 120 m² 的商业建筑进行较好的温湿度独立控制。

Katejanekarn 等人提出用冷却塔冷却送风和除湿浓溶液的太阳能溶液除湿空调系统,并在泰国多种天气条件下对该系统进行了实验研究^[32]。该系统中,经过除湿后的空气,由冷却塔提供的冷水进行间壁式冷却后,直接送入空调房间。实验结果表明,系统能够将送风温度降低 1.2 °C、含湿量降低 4.2 g/kg,在该地区太阳能可提供足够的热量维持系统的持续运行。然而,为了满足制冷量要求,系统冷却塔供冷的方式需要改进,或者使用常规的制冷方式。

Davies 于 2005 年将溶液除湿蒸发冷却用于蔬菜大棚降温^[33] (如图 5 所示)。该系统将新风先引入除湿器进行除湿干燥, 然后经过第一蒸发冷却器加湿降温后送入大棚, 排风和部分环境空气经过第二蒸发冷却器产生冷水, 用于吸收除湿过程中产生的凝结热。再生器布置于大棚屋顶, 利用太阳能进

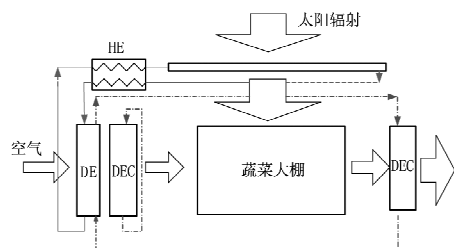


图5 太阳能溶液除湿蒸发冷却蔬菜大棚通风系统流程图^[33]

行再生,同时可以部分削减大棚的得热。通过与单独的机械通风系统、传统直接蒸发冷却系统进行比较,理论计算表明在夏季使用该系统的蔬菜大棚较单独机械通风系统室温要低 15°C ,较传统直接蒸发冷却系统低 5°C 。对阿布扎比的气象参数进行了分析,结果表明每年可将生菜的生长时间从 3 个月延长至 6 个月,西红柿、黄瓜的生长时间从 7 个月延长至全年。

Al-Sulaiman 等人提出了两级蒸发冷却、一级间接蒸发冷却、级间设置溶液除湿器的一次回风系统^[34]。利用 MFI 型分子筛膜进行溶液再生,再生过程产生的液态水用于补充蒸发冷却过程的水分损失,特别适用于像沙特阿拉伯等缺水国家和地区。对系统进行了能量分析,结果表明,风机消耗的电量远比溶液泵和水泵消耗的电量多,在设计条件下性能系数达 1.2。

上述的研究初步表明,溶液除湿蒸发冷却空调系统在一些热湿地域具有可行性,存在潜在的应用价值。然而目前的研究还主要停留在粗略模拟及理论计算上,实验研究相对匮乏,主要部件的耦合关系研究等几乎未见报道。

4 系统关键部位的优化

在溶液除湿蒸发冷却空调系统中,除湿器和再生器是最为关键的两个设备,其性能直接关系到系统是否能够达到满足设计要求的除湿、降温能力。这些系统关键部件的改进也是近年来的研究热点之一,主要包括内冷除湿、多级除湿和太阳能溶液再生等。

4.1 内冷除湿

与其他大多数除湿方式相同,溶液除湿过程也会产生吸附热,使得除湿过程中溶液的温度升高,其表面水蒸气分压力增大,阻碍了除湿过程的进行。Khan 等人提出一种降膜溶液除湿单元与降膜蒸发冷却单元相组合的内冷除湿设备,结构如图 6 所示,

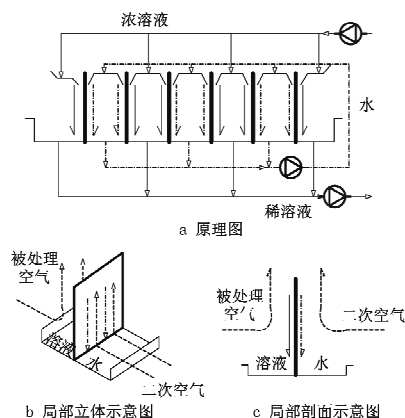


图6 蒸发冷却式内冷降膜除湿器结构^[35]

并对其建立了数学模型^[35]。数值模拟结果表明,除湿器的尺寸结构、蒸发冷却侧空气与除湿侧空气流量比、两侧的传质单元数对其热力性能具有较大影响,而顺流、逆流的两种流程布置形式性能没有明显差别。经过负荷分析,得出单独使用该结构的设备无法满足送风的除湿降温任务,需要辅助制冷设备的结论。但是,采用 LiCl 水溶液作为除湿剂时,该结构可将进口温度 32°C 、含湿量 22 g/kg 的空气降温除湿至 23°C 、含湿量 9 g/kg ,具有很好的除湿效果。

Pietruschka 等人在夏季温度 32°C 、相对湿度 40% 的室外设计参数下,对 4 种回风热量回收系统建立了数学模型,并进行了实验验证^[36]。结果表明,在设计参数下如图 7 所示的内冷除湿器与直接蒸发冷却相结合的排风能量回收系统可将送风冷却至 18.8°C ,该除湿器较固体转轮除湿器和液体绝热除湿器除湿效果更佳。基于经实验验证的数学模型,该文献作者对该蒸发冷却式内冷叉流除湿器进行了优化,指出除湿器湿润面积和内部冷却情况对除湿及系统供冷能力影响较大。

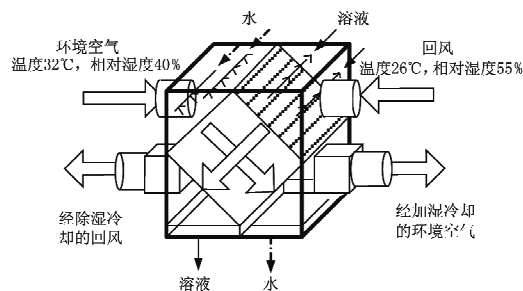


图7 蒸发冷却式内冷叉流除湿器原理图^[36]

东南大学制冷与空调实验室构建了一种新型的平板肋片换热器(PFHE),用来构成内冷/内热

型除湿再生器^[37],其结构如图 8 所示。当水管道中使用冷却水时,该装置可用作内冷型除湿器;当使用热水代替冷水时,可以用作内热型再生器;而当水管道不使用的時候,该装置可以构成绝热型除湿/再生器。

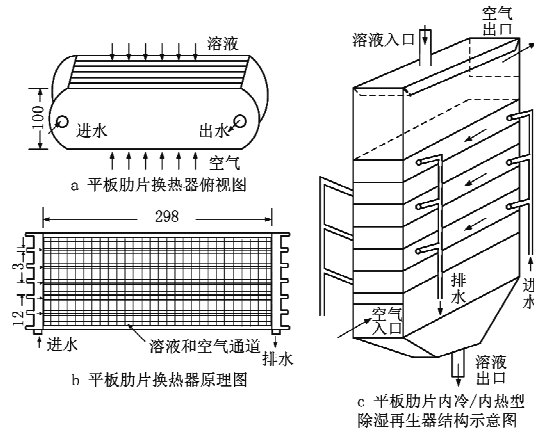


图 8 平板肋片内冷/内热型除湿再生器结构示意图^[37]

针对以上三种情形,殷勇高等人对不同的工况进行了实验研究^[37]。实验结果表明,内冷情形下除湿器进口浓溶液温度较低时除湿效果最佳。图 9 给出了内冷/绝热两种工况下,除湿量随溶液入口温度变化的实验数据。由图 9 可知,在其他工况不变时,随着溶液入口温度的升高,除湿器进出口含湿量差变小;与绝热工况相比,内冷工况时,除湿器进出口含湿量差要大很多,除湿效果提升显著。

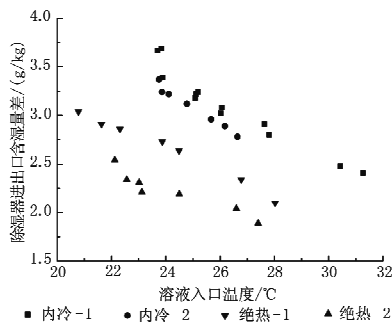


图 9 内冷/绝热除湿性能比较^[37]

4.2 多级除湿

李震等人对溶液除湿过程进行了不可逆分析,提出分级除湿的方式^[38],在各级除湿器间采取相应的冷却措施(如图 10 所示),使得传热温差、传质浓度差大大减小,从而减小了除湿过程中的不可逆损失。为了保证气液接触面积,各级除湿器内流量要很大;而为了充分利用溶液的吸湿能力,各级除湿器之间的流量要控制得很小。据计算,分级除湿

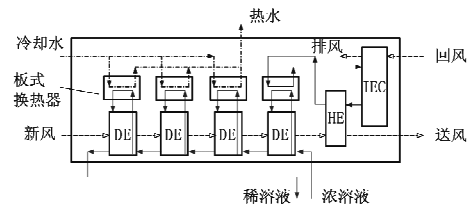


图 10 分级溶液除湿原理图^[38]

方法可使得溶液的质量分数差达到 10% 左右,除湿后的稀溶液更容易被再生,减小了再生热源的消耗。

4.3 新型太阳能溶液再生

利用太阳能对稀溶液进行再生是溶液除湿领域的研究热点之一,不少学者对自然对流、强迫对流、顺流、逆流等集热/再生模式进行了理论与实验研究^[39-40]。然而在潮湿地区,室外高湿天气对直接利用室外空气进行溶液再生会产生非常不利的影响。张小松等人提出一种新型太阳能集热/再生流程^[28],如图 11 所示。该系统将从溶液换热器出来的一部分低温浓溶液送至空气预处理器中,对室外再生用空气进行预先除湿,有利于太阳能集热/再生器中溶液再生的进行。该改进循环将加热再生溶液、降低再生用空气湿度、提高再生用空气温度等三种促进溶液再生因素相结合,与传统集热/再生器相比,理论上可提升溶液浓度差达 90%,增加蓄能密度 50%。

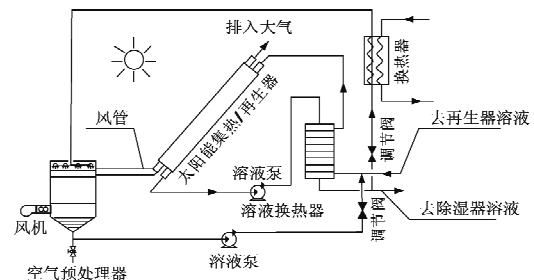


图 11 太阳能空气预处理集热/再生流程图^[28]

图 12 显示新型再生装置的有效蓄能密度 ESC 随预处理溶液量的增多而缓慢增加,ESC 的这种变化趋势说明新型溶液集热/再生装置比传统装置具有更强的蓄能能力^[28]。同时,当预处理溶液量增大至再生溶液量的 36% 时,溶液出口质量分数 ε_{out} 由 0.4 升高到 0.49,相对溶液入口质量分数(0.3)增加幅度达 90%,这说明了空气预处理再生装置的出口浓溶液浓度比传统再生装置有大幅提高,从而可极大提高溶液除湿蒸发冷却空调系统

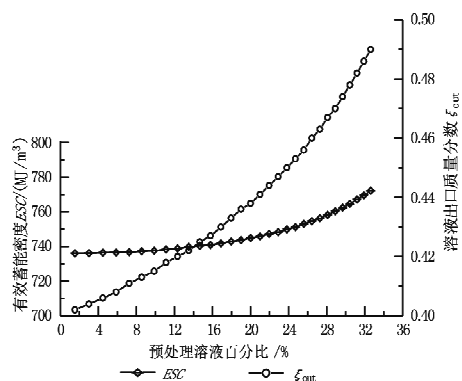


图 12 有效蓄能密度、出口浓度随预处理溶液百分比的变化^[38]

的性能。

5 关键问题和发展方向

溶液除湿蒸发冷却空调将排除余湿的功能从传统温湿度联合处理的空调模式中解耦出来,实现了温湿度独立控制,采用太阳能等低品位热源驱动,可有效降低夏季电网负荷,具有节能、环保、健康等优势,具有广阔的应用前景。

目前,溶液除湿蒸发冷却空调系统基础技术的研究正逐步趋于成熟,虽然系统的构建及其整体性能的研究在不断开展,但是仍然停留在粗略的系统模拟、理论计算以及使用潜力评估上。进一步发展面临的主要问题有:

1) 在高温高湿的气候下,能量回收显得尤为重要,溶液除湿蒸发冷却类空调系统的流程布置对系统综合性能有较大影响;

2) 溶液除湿蒸发冷却空调的系统性实验研究较少,溶液除湿与蒸发冷却之间的耦合问题仍需解决;

3) 溶液除湿蒸发冷却空调系统可由低品位热源再生,具有节能优势,但是目前其除湿、冷却效果较传统空调系统差,溶液再生也需要较大的太阳能集热面积,致使系统体积庞大,影响其推广应用;

4) 空调房间的热湿负荷随着室外环境和房间使用状况不断发生变化,目前系统热湿实时控制方面的研究还比较匮乏;

5) 产业化与工艺问题需要解决,尤其是设备的标准化、序列化和紧凑化是实现产业化和推广应用的关键,另外克服溶液的腐蚀性以及避免带液也是亟待解决的工艺问题。

总之,进一步提高系统能源利用率、充分发挥溶液除湿蒸发冷却各组件的性能,减小设备尺寸,

探索新型高效的系统流程,获取系统运行经验,解决好产业化与工艺问题将是未来溶液除湿蒸发冷却空调系统发展的主要方向。

参考文献:

- [1] 黄翔. 面向环保、节能、经济及室内空气品质联合挑战的蒸发冷却技术[J]. 建筑热能通风空调, 2003, 22(4): 1-3
- [2] 彭美君, 任承钦. 间接蒸发冷却技术的应用研究与现状[J]. 制冷与空调, 2005, 5(2): 1-5
- [3] 黄翔. 国内外蒸发冷却空调技术研究进展(1)[J]. 暖通空调, 2007, 37(2): 24-30
- [4] 蒋毅. 高效节能的蒸发冷却技术及其应用的建模与实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2006
- [5] 颜苏芊, 黄翔, 文力, 等. 蒸发冷却技术在我国各区域适用性分析[J]. 制冷空调与电力机械, 2004, 25(3): 25-28
- [6] 任承钦. 蒸发冷却(炯)分析及板式换热器的设计与模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001
- [7] 陈沛霖. 间接蒸发空气冷却器热工计算的改进模型及其实验验证[J]. 制冷学报, 1992(2): 22-26
- [8] 周孝清, 陈沛霖. 间接蒸发冷却器的设计计算方法[J]. 暖通空调, 2000, 30(1): 39-42
- [9] Stoitchkov N J, Dimitrov G I. Effectiveness of cross-flow plate heat exchanger for indirect evaporative cooling [J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21(6): 463-471
- [10] 朱冬生, 涂爱民. 闭式冷却塔直接供冷及其经济性分析[J]. 暖通空调, 2008, 38(4): 100-103
- [11] Costelloe B, Finn D. Thermal effectiveness characteristics of low approach indirect evaporative cooling systems in buildings [J]. Energy and Buildings, 2007, 39(12): 1235-1243
- [12] 刘晓华, 江亿. 温湿度独立控制空调系统[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
- [13] Löf G O G. Cooling with solar energy[C]//Proc of the World Symposium on Applied Solar Energy, 1995: 171-189
- [14] Patnaik S, Lenz T G, Löf G O G. Experimental studies with a solar open cycle liquid desiccant system [C]//Proceeding of the ISES Solar World Congress, Hamburg, Germany, 1987: 1013-1018
- [15] Wang R Z, Oliveira R G. Adsorption refrigeration—an efficient way to make good use of waste heat and solar energy [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(4): 424-458
- [16] Ahmed S Y, Gandhidasan P, Al-Farayedhi A A. Thermodynamic analysis of liquid desiccants [J]. Solar Energy, 1998, 62(1): 11-18

- [17] Patil K R, Tripathi A D, Pathak G. Thermodynamic properties of aqueous electrolyte solutions 1 vapor pressure of aqueous solutions of LiCl, LiBr and LiI [J]. *Journal of Chemical Engineering*, 1990, 35(2): 166-168
- [18] Conde M R. Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2004, 43(4): 367-382
- [19] Öberg V, Goswami D Y. Experimental study of the heat and mass transfer in a packed bed liquid desiccant air dehumidifier [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1998, 120(4): 289-297
- [20] Fumo N, Goswami D Y. Study of an aqueous lithium chloride desiccant system: air dehumidification and desiccant regeneration [J]. *Solar Energy*, 2002, 72(4): 351-361
- [21] Liu X H, Zhang Y, Qu K Y, et al. Experimental study on mass transfer performance of cross flow dehumidifier using liquid desiccant [J]. *Energy Conversion & Management*, 2006, 47(15/16): 2682-2692
- [22] Yin Yonggao, Zhang Xiaosong. A new method for determining coupled heat and mass transfer coefficients between air and liquid desiccant [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(13/14): 3287-3297
- [23] Saman W Y, Alizadeh S. Modeling and performance analysis of a cross-flow type plate heat exchanger for dehumidification/cooling [J]. *Solar Energy*, 2001, 70(4): 361-372
- [24] Abdul-Wahab S A, Zurigat Y H, Abu-Arabi M K. Predictions of moisture removal rate and dehumidification effectiveness for structured liquid desiccant air dehumidifier [J]. *Energy*, 2004, 29(1): 19-34
- [25] Gandhidasan P. Quick performance prediction of liquid desiccant regeneration in a packed bed [J]. *Solar Energy*, 2005, 79(1): 47-55
- [26] Jain S, Dhar P L, Kaushik S C. Optimal design of liquid desiccant cooling systems [G] // *ASHRAE Trans*, 2000, 106(1): 79-86
- [27] Kumar R, Dhar P L, Jain S, et al. Multi absorber stand alone liquid desiccant air-conditioning systems for higher performance [J]. *Solar Energy*, 2009, 83(5): 761-772
- [28] 张小松, 彭冬根, 殷勇高. 太阳能溶液除湿制冷技术研究进展[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2008, 38(6): 1126-1132
- [29] Hellmann H M, Grossman G. Simulation and analysis of an open-cycle dehumidifier-evaporator-regenerator (DER) absorption chiller for low-grade heat utilization [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1995, 18(3): 177-189
- [30] Gandhidasan P. Performance analysis of an open-cycle liquid desiccant cooling system using solar-energy for regeneration [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1994, 17(7): 475-480
- [31] Alizadeh S. Performance of a solar liquid desiccant air conditioner—an experimental and theoretical approach [J]. *Solar Energy*, 2008, 82(6): 563-572
- [32] Katejanekarn T, Chirattananon S, Kumar S. An experimental study of a solar-regenerated liquid desiccant ventilation pre-conditioning system [J]. *Solar Energy*, 2009, 83(6): 920-933
- [33] Davies P A. A solar cooling system for greenhouse food production in hot climates [J]. *Solar Energy*, 2005, 79(6): 661-668
- [34] Al-Sulaiman F A, Gandhidasan P, Zubair S M. Liquid desiccant based two-stage evaporative cooling system using reverse osmosis (RO) process for regeneration [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(14/15): 2449-2454
- [35] Khan A Y, Martinez L. Modelling and parametric analysis of heat and mass transfer performance of a hybrid liquid desiccant absorber [J]. *Energy Conversion & Management*, 1998, 39(10): 1095-1112
- [36] Pietruschka D, Eicker U, Huber M, et al. Experimental performance analysis and modelling of liquid desiccant cooling systems for air conditioning in residential buildings [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006, 29(1): 110-124
- [37] Yin Yonggao, Zhang Xiaosong, Wang Geng, et al. Experimental study on a new internally cooled/heated dehumidifier/regenerator of liquid desiccant systems [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2008, 31(5): 857-866
- [38] 李震, 江亿, 陈晓阳, 等. 溶液除湿空调及热湿独立处理空调系统[J]. *暖通空调*, 2003, 33(6): 26-29
- [39] Yang R, Wang P L. Experimental study of a forced convection solar collector/regenerator for open cycle absorption cooling [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1994, 116(4): 194-199
- [40] Alizadeh S, Saman W Y. An experimental study of a forced flow solar collector/regenerator using liquid desiccant [J]. *Solar Energy*, 2002, 73(5): 345-362