

蒸发冷却空调技术的研究状况

北京工业大学 刘忠宝[☆] 张 强

摘要 重点介绍了两级蒸发冷却及露点蒸发冷却空调技术的研究状况,此外还介绍了水蒸发冷却技术的两个较新的应用实例研究。

关键词 两级蒸发冷却 露点蒸发冷却 气幕伞 湿帘窗

Recent research status of evaporative cooling air conditioning technology

By Liu Zhongbao[★] and Zhang Qiang

Abstract Presents research status of two-stage evaporative cooling and dew point evaporative cooling air conditioning technologies, and two new application examples of this technology.

Keywords two-stage evaporative cooling, dew point evaporative cooling, air curtain umbrella, window with wet curtain

[★] Beijing University of Technology, Beijing, China

①

不饱和空气与水接触时,水会在空气中蒸发使空气的含湿量增加,且进入空气的水蒸气吸收汽化潜热。水与空气间的热湿交换使空气温度下降。只要空气未饱和,湿球温度总低于干球温度,也即水温度总是低于空气干球温度。用水直接喷淋空气或通过换热器与空气换热,都能使空气降温接近当地湿球温度,甚至是露点温度和所需要的一定的空调温度,然后作为送风降低室温,这种利用未饱和空气的干湿球温差来制取冷量的方式就是蒸发冷却。

蒸发冷却主要分为直接蒸发冷却(DEC)和间接蒸发冷却(IEC)^[1]。

蒸发冷却技术被广泛认为是一种有着广阔应用前景的空调技术,为了克服空气湿度大、温降有限等问题,国内外学者作了大量相关研究。主要集中在以两级蒸发为代表的复合式蒸发冷却技术和最近几年发展起来的露点蒸发冷却技术,还有将蒸发冷却技术与其他技术相结合(除湿、机械制冷)等。本文结合蒸发冷却的最新研究,对这几个方面作了进一步的探讨;另外还介绍了蒸发冷却领域最新的两个应用研究。

1 两级蒸发冷却技术

间接蒸发冷却器与直接蒸发冷却器结合构成的两级蒸发冷却器是复合式蒸发冷却器的代表,在

这种冷却系统中,一次空气先经过间接蒸发冷却器,被等湿冷却,之后经过直接蒸发冷却器,实现等焓降温过程,同时被加湿。该系统可以提供比间接蒸发冷却器更大的降温效果。

Hisham El-Dessouky 等人以科威特当地气候为条件,设计了一套两级蒸发冷却系统,实验验证了系统的性能,详细讨论了系统中间接蒸发冷却器的努塞尔数($Nu_a = h_a d / \lambda_a$)的影响因素。在科威特夏季空气干球温度最高超过 45 °C 的情况下,测试的系统效率在 90% ~ 120% 之间。努塞尔数在 150 ~ 450 之间,相应的间接蒸发冷却器的热传递系数为 0.1 ~ 0.4 kW/(m² · K)^[1]。

B. Tashtoush 等人对两级蒸发冷却系统的运行特性作了模拟,结果表明,两级蒸发冷却器的 COP 比单独的间接蒸发冷却器高 20%^[2]。

Dilip Jain 设计了一种两级蒸发冷却系统,测试了其效果,并把这套系统用于水果和蔬菜的储存中。这套系统由一个换热器和两个蒸发冷却室构成。在印度的夏季气候条件下,这套冷却系统的降温在 8 ~ 16.1 °C,能使空气温度降到其湿球温度,

①[☆] 刘忠宝,男,1971 年 7 月生,博士,副教授
100124 北京市朝阳区平乐园 100 号北京工业大学
(0) 13693600650
E-mail: liuzhongbao@bjut.edu.cn
收稿日期:2009-03-02

并且能使空调房间维持 $17 \sim 25.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度和 $50\% \sim 75\%$ 的相对湿度。这套系统用于水果与蔬菜的储存中,通过维持植物的中等呼吸速率明显延长了其保存时间^[3]。

M. Lain 等人对应用于捷克电视中心的两级蒸发冷却系统作了能耗分析,发现单级蒸发冷却在捷克不可能保证室内舒适度和空气质量^[4]。

秦继恒等人详细探讨了两级蒸发冷却的作用过程和发生机理,建立了两级蒸发冷却器(TSEC)的数学模型,建立模型时考虑了温度、空气流速、换热器结构参数等因素,并建立了试验台,从理论与试验两方面分析了各因素对 TSEC 出口温度和冷却效率的影响。结果表明,减小 IEC 板间距,降低一次空气入口流速,降低一次、二次空气入口相对湿度,增大二次空气与一次空气流速比以及增加 IEC 填料厚度,均有利于获得较低的一次空气出口温度和较高的冷却效率。理论与试验对比得出了优化参数,为改进和优化两级蒸发冷却器提供了参考^[5]。

刘忠宝等人申请了两级水蒸发冷却房间空调器的国家发明专利,该空调器是将直接蒸发冷却和间接蒸发冷却结合的两级水蒸发冷却柜式空调器。该发明的主要部件是位于空调器中间的板式换热器 1(见图 1),还包括 1 个封闭的可以自动补水的水箱 4,位于空调器的底部。该空调器结构紧凑,降温效果明显,能将室外空气处理到湿球温度以下,使用双级水蒸发冷却送风,还可以根据实际需要灵活地选择开启间接段或者直接段。比如在室外空气温度不是很高、且不需要加湿时,只需开启间接蒸发冷却段就完全可以满足新风要求;当新风需要加湿时,开启直接蒸发冷却段即可。在冬季房

间供暖时,间接段可以作为一个热回收器单独使用^[6]。

郑久军等人设计了一种回收排风能量的热管式两级蒸发冷却空调系统。在这一系统中第一级采用热管式间接蒸发冷却器,热端布置 4 种散热方式:1) 传统显热散热,即排风直接进入热端;2) 排风经过喷水室降温后进入热端;3) 排风经过填料式直接蒸发冷却器降温后进入热端;4) 直接在热端顶部淋水。第二级采用填料式直接蒸发冷却器。通过对比实验发现,相对于方式 1,方式 2,3,4 新风进、出口干球温差上升了 $1.0 \sim 2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,热管换热器换热效率提高了 $7.6\% \sim 16.2\%$ 。其中方式 4 效果最佳,新风温降 $9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,换热效率 67.6% ^[7]。

宋福元等人把两级蒸发冷却和吸收除湿相结合,设计了用于船舶上代替机械式制冷的冷却系统。对比分析表明,这种两级蒸发冷却氯化锂吸收除湿空调系统由于充分利用了低位余热热源,提高了能源利用率,并且该装置代替传统的压缩机,起到了节能的作用。实验表明,该空调系统既可以用于干热地区,又可以在湿热地区运行,特别适用于又湿、又热的海上运行。氯化锂蒸发冷却空调系统在船舶上应用具有非常广阔的发展前景^[8]。

蒋毅等人构建了溶液除湿蒸发冷却系统(LDCS),详细介绍了两级蒸发冷却的空气处理过程和溶液除湿与再生过程,并对该系统的控制进行了初步研究。溶液再生能耗是 LDCS 的主要能耗,没有压缩机,因而耗电量大大降低。实例计算表明,LDCS 完全能够达到空调的要求,系统总体性能好。在设定工况下,再生效率 η_r 为 0.86,蓄能密度为 $1\,000\text{ MJ/m}^3$,系统 COP 为 1.0。该系统可有效利用太阳能、工业废气余热、燃气发动机余热等低位热源来实现溶液再生^[9]。

2 露点蒸发冷却技术

露点间接蒸发冷却技术是利用空气的干球温度和不断降低的湿球温度之差换热,最终能提供干球温度比室外湿球温度低且接近露点温度的空气,温降较大。

目前所用的露点间接蒸发冷却器多为板翅式,其结构由纵向干空气通道和横向湿空气通道组成,纵向干空气通道中的空气湿度不变,但纵向通道的中间有小气孔,流经此处的空气可以穿过气孔流入横向湿空气通道中,并与湿空气通道中原有空气一

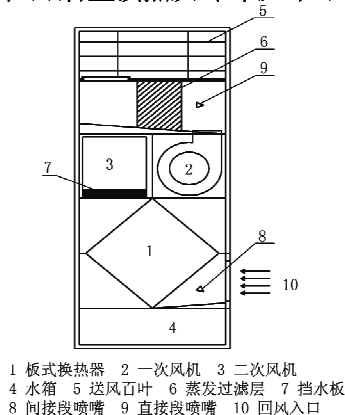


图 1 两级水蒸发冷却柜式空调器结构

起被绝热加湿,自身温度降低,进而对纵向通道中的空气进行等湿冷却,直至接近露点温度。其原理如图 2 所示。

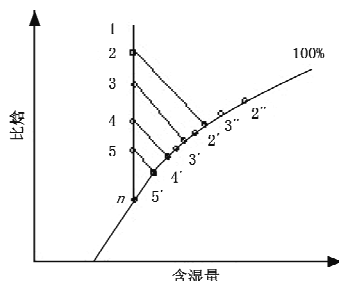


图 2 露点间接蒸发冷却工作原理图

当气流被风机吹入冷却器纵向干通道板时,首先被其湿侧初步冷却,状态从 1 变化到 2。由于干通道板的中间有小气孔,所以一部分一次空气穿过这些气孔流入横向湿通道板中,与湿通道中的原有空气一起作为二次空气,则流入湿侧的一次气流与水进行热湿交换,达到状态 2 的湿球温度 $2'$ 。同时,由于湿通道中水分蒸发,吸收干通道中热量,状态从 $2'$ 到 $2''$,一次空气等湿冷却,故从状态 2 到 3。随着流入湿侧的空气量不断增大,一次空气进一步得到冷却,状态从 3 变化至 4,而二次空气继续经加湿、饱和、升温,状态从 $3'$ 变化到 $3''$ 。如此下去,直到一次空气被等湿冷却到初始状态 1 的湿球温度以下且接近其露点温度状态 n ,并保持湿度不变。二次空气从横向湿通道板的两侧排出^[10]。

Zhao 等人对用于露点蒸发冷却的一种新型的逆流式换热器进行了详细的研究,通过模拟优化了冷却器的结构参数和运行条件,以便提高冷却效率,使能源利用效率最大化。模拟结果表明,冷却效率和能源利用效率主要取决于气流通道尺寸、气流速度及工作气体流量与进气量之比,而与供水温度关系很小。建议进气流速应控制在 $0.3 \sim 0.5$ m/s,气流通道高度方向尺寸在 6 mm 以下,工作气体流量与进气量之比应在 0.4 左右。以英国夏季为气候条件,这种露点冷却设备的湿球效率可高达 130%,露点效率也达到了 90%^[11]。

陈俊萍等人从理论上分析了露点间接蒸发冷却器的传热、传质过程,对其一、二次空气进行分析,建立数学模型和控制方程,并搭建了样机测试实验台。测试结果表明,出口干球温度受进口空气湿球温度、进口比焓、进口干球温度的影响比较大,

成正相关关系。一、二次风量最佳比值为 $1.48:1$,此时冷却器效率最高。并在相同测试条件下比较了几种间接蒸发冷却器的性能,在同风量下,露点间接蒸发冷却器的阻力比管式和热管式间接蒸发冷却器大,但露点间接蒸发冷却器湿球效率比管式间接蒸发冷却器高 10%,比热管式间接蒸发冷却器高 20%,露点效率比韩国同类冷却器高 5.4%,且效率还有提升空间^[12]。

Maisotsenko 提出了一种露点间接蒸发冷却器,该冷却器由一些铺附有纤维素复合纤维材料的平板组成,这样做可以达到均匀吸水的目的,少量的水就可以在换热器内形成均匀的湿表面,加强一次空气热量转移。纤维素材料的自然吸水性也有助于防止水在湿表面的聚集^[13]。它使用的是位于每一个湿润通道中结构复杂而价格昂贵的喷头,它的干通道侧包附有挤压成型的聚乙烯。使用聚乙烯是因为它在厚度方向的低热阻性能,有利于干侧和湿侧之间的换热,同时在宽度和长度方向具有较高的热阻,一次空气热量不易向前方传递。该产品的中间通道有穿孔,呈 V 形,角度很大。从穿孔处经过的空气在最末端有挡板挡住,即不作为送风,只能从气孔处进入湿通道,以交叉流的方式在上、下侧面流流出风通道。

麦索特森科设计了另一种露点间接蒸发冷却器,将换热的薄塑料板制成小斜坡形,两侧对称形成向上或向下的角度,在 $-10^\circ \sim +10^\circ$ 之间,使其横向传热产生有效的芯吸作用。芯吸层可包括以下材料中的一种:纤维素、有机纤维、有机基纤维、泡沫塑料、碳纤维、聚酯、聚丙烯、玻璃纤维、硅基纤维以及这些物质的组合。该芯吸层可基本上覆盖湿润侧的整个表面^[14],通过供给器芯吸部件供水。它的穿孔可为圆形或者倒圆角的多角形,防止湍流,使通过间接蒸发冷却器的压降最小化。从穿孔处经过的气流在最末端也被挡住,不作为送风。其板翼以 $-10^\circ \sim +10^\circ$ 从中心向上或向下倾斜。向下倾斜的优势在于由于重力的作用,液体将更容易到达边缘,即使增加板翼的长度也同样可以润湿,并且有助于减小含有矿物质的液体在板上积累的程度。缺点是多余的被冷却的水形成液滴向下排走,浪费冷源,降低了蒸发冷却器的效率。向上倾斜,板翼虽不会在边缘收集到多余的水,但是很可能使到达边缘的水不够,导致冷却潜能的损失和

矿物质积累在干燥边缘处。

J·A·M·赖因德斯等人申请了一种露点冷却器的专利,包括两个通过热传导壁部相互连接的介质回路,即第一介质回路,以及通过一个至少部分传热的壁部而与该第一介质回路热连接的第二介质回路。两种单独的介质可以通过这两个回路逆流流动,其中,至少该第二介质包含一种气体,例如空气,其相对湿度小于 100%,两种介质可通过该介质回路流动,其中次要介质包括气体,壁部包括传导热的突出部分;其中壁部和突出部分被亲水性的涂层覆盖,该亲水性的涂层可以吸收可蒸发的液体,并通过蒸发散热使润湿的涂层、热传导表面和突出部分被冷却,该涂层包括多孔工艺的陶瓷材料,例如矿物棉^[15]。

W·梅杰发明设计了一种露点冷却设备用于冷却气流,该设备有至少一个冷却通道,该冷却通道具有用于冷却气流的流入开口和用于已冷却气流的流出开口,至少一个蒸发通道,该蒸发通道与冷却通道通过传导壁分离,并且蒸发通道具有流入开口和流出开口,流入开口与冷却通道的流出开口相连,用于湿润传导壁朝向蒸发通道的一侧的装置,可对冷却通道中的气流除湿^[16]。

袁一军发明了一种多级再生式多通道冷却方法及其换热器(见图 3),一股或多股气流流入多通道换热板的干侧,被逐渐冷却,其中部分依次通过干、湿侧之间的通孔依次进入湿侧,加湿、饱和、升温后排出,另一部分直接从干侧排出^[17]。

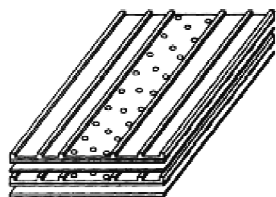


图 3 多级再生式多通道蒸发冷却器

黄翔等人发明的露点板式间接蒸发冷却器包括相连接的预冷段和冷却段构成的板式冷却器机芯和供水装置,预冷段和冷却段内折叠的隔层构成空气通道,相对布置的光面之间构成一次空气通道,相对布置的毛面之间构成二次空气通道,构成一次空气通道的隔层内部夹有轧制多个水平流向波纹流道的夹层,构成二次空气通道的隔层的内部夹有轧制多个弯曲流道的夹层。冷却段内隔层的

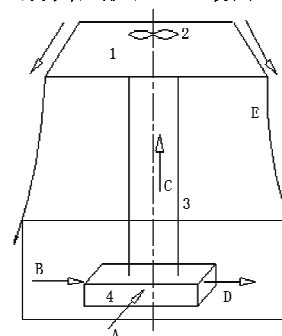
下部设多个通孔,构成一次空气通道的隔层顶部呈凹槽状。供水装置包括预冷段和冷却段上方、下方分别设置的喷淋水管和蓄水池,蓄水池在预冷段和冷却段之间由隔板隔开。该结构使换热效率大大提高,出风空气温度接近露点,并且湿通道壁面水膜分布更加均匀^[18]。

黄翔等人还发明了一种方形多孔陶瓷立管式露点间接蒸发冷却器。该冷却器由机芯、布水装置、风机以及蓄水池和水泵组成,冷却器机芯则由多根竖直放置、且构成多排、多列矩阵形式的换热管组成,多根换热管组成的矩阵分为三段,且三段换热管的长度按一次进风方向依次递减,每段换热管之间设置隔板;布水装置包括每根换热管顶端设置的导流格栅和淋水管。该结构使一次空气水平掠过方形陶瓷管束,二次空气由下及上流经管内,而一次空气依次穿过机芯的三段,这样在不同段进入二次空气通道的空气温度逐渐降低,与水进行热湿交换后的最终湿球温度会逐渐降低。该结构使热湿交换效率大大提高,布水更加均匀,使出风空气温度接近露点^[19]。

3 蒸发冷却技术应用上的最新研究

3.1 有限空间开式蒸发式冷却装置(气幕伞)

刘忠宝等人设计开发的有限空间开式蒸发式冷却装置包括气幕伞和水蒸发双级复叠制冷系统两部分(见图 4)。该装置下部的箱体中装有间接蒸发冷却器、直接蒸发冷却器、水箱、水泵、风机等设备,系统的上部装有风机。一次风(新风)经进风口由外部进入箱体,在箱体中经间接蒸发冷却器与二次风进行热交换,温度降低;降温后送入直接蒸发冷却器,在直接蒸发冷却器中被降温加湿后由风机压入,沿开式空间边缘向下



1 水箱 2 喷水室 3 立式喷水室 4 板式换热器
A 一次风进风 B 二次风进风 C 一次风送风
D 二次风排风 E 空气幕

图 4 蒸发式冷却装置空气处理的原理图

流动,形成气幕。气幕将外部空气和内部空气隔开,形成一个相对密封的空调空间。这样就达到了对空调空间进行降温 and 加湿的目的。二次风(回风)经间接蒸发式冷却器内二次风进风口进入箱体,与一次风换热后由排风口排到室外^[20]。

3.2 湿帘窗节能降温系统

刘忠宝等人申请了一种湿帘窗节能降温装置的发明专利,该装置由水槽、水泵、布水器、湿帘等构成(见图 5)。在夏季高温或风的作用下,湿帘上的水汽不断蒸发。根据蒸发吸热的原理降低窗户周围的空气温度,有效地阻止外面热负荷的侵入,大大减少室内的热负荷。另外这种方法也同时可以增加窗户周围的湿度,可用于北方一些夏季干热地区。湿帘上纳米二氧化钛光催化剂的存在使得其有了自清洁能力,且能吸附及降解一些污染性气体,提高室内的空气质量^[21]。

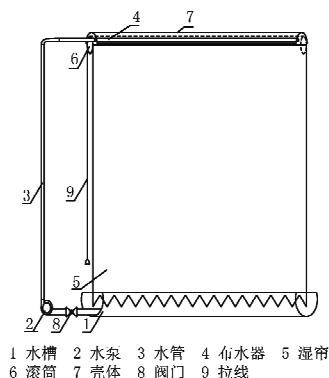


图 5 湿帘窗节能降温装置系统图

这种装置可以用于民用建筑,也能应用于宾馆、办公楼、餐饮、娱乐、体育馆、影剧院等场所。

4 结语

蒸发冷却是一种绿色空调方式,针对影响其推广应用的主要问题,国内外学者进行了大量研究,在两级蒸发冷却技术及露点蒸发冷却技术领域也取得了不少成果,但还需要进行深入的传热、传质理论及分析研究,在技术推广应用上进一步开拓思维。

参考文献:

- [1] Hisham El-Dessouky, Hisham Ettouney, Ajeel Al-Zeefari. Performance analysis of two-stage evaporative coolers [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 102(3): 255-266
- [2] Tashtoush B, Mahmood T, Ahmed Al-Hayayneh. Thermodynamic behavior of an air-conditioning system employing combined evaporative-water and air coolers [J]. Applied Energy, 2001, 70(4): 305-319
- [3] Dilip Jain. Development and testing of two-stage evaporative cooler [J]. Building and Environment, 2007, 42(7): 2549-2554
- [4] Lain M, Duska M, Matejcek K. Application of evaporative cooling techniques in the Czech Republic [C] // International Congress of Refrigeration 2003, 2003: 1-8
- [5] 秦继恒. 两级蒸发冷却的理论及实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007
- [6] 刘忠宝, 郝玉涛. 双级水蒸发冷却房间空调器: 中国, ZL200720104158. 9[P]. 2007-04-06
- [7] 郑久军, 黄翔, 王晓杰, 等. 热管式两级蒸发冷却空调系统性能实验研究[J]. 西安工程科技学院学报, 2007, 21(1): 122-125
- [8] 宋福元, 任能, 张鹏. 两级蒸发冷却、吸收除湿空调系统在船舶中的应用[J]. 应用科技, 2002, 29(10): 46-48
- [9] 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
- [10] 陈俊萍, 黄翔, 宣永梅. 露点间接蒸发冷却器性能测试研究[J]. 西安工程科技学院学报, 2007, 21(3): 393-397
- [11] Zhao X, Li J M, Riffat S B. Numerical study of a novel counter-flow heat and mass exchanger for dew point evaporative cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(14): 1942-1951
- [12] 陈俊萍. 露点间接蒸发冷却器优化及应用研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2008
- [13] Valeriy Maisotsenko. The maisotsenko cycle for air desiccant cooling [C] // The 4th International Symposium on HVAC, Beijing, China, 2003
- [14] 麦索特森科 V. 用于露点蒸发冷却器的方法和板装置: 中国, 02828060. 1[P]. 2002-12-11
- [15] 赖因德斯 J A M, 贝尔文 E J E. 露点冷却器: 中国, 03814728. 9[P]. 2003-02-27
- [16] 梅杰 W. 露点冷却设备: 中国, 200680044438. 3[P]. 2006-11-28
- [17] 袁一军. 多级再生式多通道蒸发冷却方法及换热器: 中国, 200310122817. 8[P]. 2003
- [18] 黄翔, 陈俊萍, 武俊梅, 等. 一种露点板式间接蒸发冷却器: 中国, 200710017989. 7[P]. 2007-06-05
- [19] 黄翔, 毛秀明, 文力, 等. 一种方形多孔陶瓷立管式露点间接蒸发冷却器: 中国, 200810150336. 0[P]. 2008-07-14
- [20] 刘忠宝, 秦继恒. 有限空间开式水蒸发冷却装置: 中国, ZL200510075284. 1[P]. 2006-11-16
- [21] 刘忠宝, 张强. 有限空间开式水蒸发冷却装置: 中国, 200820080182. 8[P]. 2008-04-25