

蒸发冷却
空调技术

间接蒸发冷却技术——中国西北地区可再生干空气资源的高效应用

清华大学 江 亿[☆] 谢晓云

新疆绿色使者空气环境技术有限公司 于向阳

摘要 通过间接蒸发冷却技术制备冷水,解决常规间接蒸发冷却系统风道占用空间大、风机耗电高的问题,是在干燥地区推广应用蒸发冷却技术的关键。介绍了间接蒸发冷却冷水制备技术的原理、研发机组的实测性能及其在工程中的实际应用效果。综述了目前间接蒸发冷却技术的应用状况和推广前景。所研发的间接蒸发冷水机出水温度 16~19℃,达到室外湿球温度和露点温度的平均值,可作为空调的冷源。这种间接蒸发冷水机及其系统在西北地区已经实现了规模化推广。

关键词 间接蒸发冷水机组 干燥空气 露点温度

Indirect evaporative cooling technology: high-performance application of renewable dry air energy in northwest China

By Jiang Yi[★], Xie Xiaoyun and Yu Xiangyang

Abstract The key to promoting application of evaporative cooling technology in dry regions is to produce chilled water by indirect evaporative cooling technology, to solve the problems of too large space occupied by air ducts and too high energy consumption of fans in conventional indirect evaporative cooling system that uses air as the coolant. Presents the principle of chilled water producing technology by indirect evaporative cooling, testing performances of the unit developed and actual application effects. Reviews the applications of this technology at present and prospects in the future. The outlet temperature of indirect evaporative water chiller units is 16 to 19℃, reaching the average value of local outdoor wet-bulb temperature and dew-point temperature, and can be used as the cold source. The indirect evaporative chiller and its system have been promoted to a larger extent in northwest China.

Keywords indirect evaporative water chiller, dry air, dew-point temperature

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

0 引言

我国幅员辽阔,东部和西部有着较明显的气候差异,占国土面积一半以上的西北地区处在干旱、半干旱区。以我国新疆、西藏、青海、宁夏、甘肃 5 省、自治区为例,对各气象台站统计数据^[1]进行平均,得到最湿月的室外空气平均含湿量为 10.2 g/kg,最湿月的室外平均湿球温度为 15.3

℃,最湿月的室外平均露点温度为 11.4℃。如此干燥的空气对于空调系统来说,是非常宝贵的

①☆ 江亿,男,1952 年 4 月生,博士研究生,教授,中国工程院院士
100084 清华大学建筑节能研究中心
(010) 62781339
E-mail: jiangyi@tsinghua.edu.cn
收稿日期:2009-07-11

可再生资源,首先可以直接利用干燥的新风排除室内的湿负荷,同时,还可以利用蒸发冷却技术从干空气中获取冷量。

蒸发冷却技术已有上百年甚至上千年的历史,最早出现的是直接蒸发冷却技术,即利用空气和水直接接触实现蒸发冷却过程。由于直接蒸发冷却设备简单,容易实现,在干燥地区得到了广泛应用和推广^[2]。然而,由于直接蒸发冷却通过对空气加湿而使空气降温,其仅能近似沿等焓线处理空气,其对空气降温的极限温度为室外湿球温度;同时通过直接蒸发冷却处理后的空气湿度增加,其排除室内余湿的能力降低,从而无法在任意室外条件下,实现同时排热和排湿;这使得直接蒸发冷却技术仅能应用于非常干燥的地区,大大限制了蒸发冷却技术的推广应用。因此,出现了间接蒸发冷却技术。

间接蒸发冷却技术,是在直接蒸发冷却过程中嵌入显热换热过程,利用一侧空气和水直接接触蒸发冷却产生的冷量对另一侧空气进行等湿降温。经过间接蒸发冷却后,空气的温度降低,但湿度保持不变,且送风温度可以更低,因此,对间接蒸发冷却技术的研究和应用就变得广泛起来。包括研发不同内部工艺结构的间接蒸发冷却器,比如板式间接蒸发冷却器^[3-4]、管式间接蒸发冷却器^[5-6]、热管式间接蒸发冷却器^[7]、岩板蓄冷式间接蒸发冷却器^[8]等,研发不同流程的间接蒸发冷却器,包括采用室外空气作为二次空气的间接蒸发冷却器^[9],采用室内回风作为二次空气的间接蒸发冷却器^[10],采用被等湿冷却的空气自身出风的一部分作为二次空气的间接蒸发冷却器^[11]等等。自 20 世纪 80 年代起,国内也有许多研究者开展了间接蒸发冷却技术的研究和实践^[12-15]。

然而,目前国内外几乎所有直接、间接蒸发冷却技术均面临一个问题:由于均采用冷风作为载冷介质,房间所有的热、湿负荷统一用低温的冷风来处理,这就要求应用蒸发冷却技术的系统必须为全空气系统,风机电耗高,利用干燥空气制冷而节能的优势无法充分显现,且风道占用空间大,使得蒸发冷却技术仅能在体育馆、影剧院等高大空间被采用,从而限制了蒸发冷却技术的应用场合。目前我国西北干燥地区约 1 亿 m^2 的大型公共建筑中,有 80% 以上的空调系统采用的

是传统空调系统。

从载冷介质出发,冷风和冷水相比,输送相同冷量时冷水系统的输配系统电耗约是冷风系统的 $1/10 \sim 1/4$ 。因此,改变载冷介质,利用间接蒸发冷却技术制备冷水,成为推广应用蒸发冷却技术的迫切需要。并且,若能利用间接蒸发冷却技术制备冷水,由冷水带走房间的显热,新风带走房间的潜热,这是在干燥地区应用温湿度独立控制的空调系统的关键,也是高效利用室外干燥空气的关键,是笔者研究的出发点。本文从间接蒸发冷却冷水技术出发,介绍其原理和实际研发机组的性能,进而介绍间接蒸发冷水机及其系统在中国的应用状况和应用前景。

1 间接蒸发冷水机原理

以水为载冷剂的间接蒸发冷水机组的流程^[16]如图 1 所示。

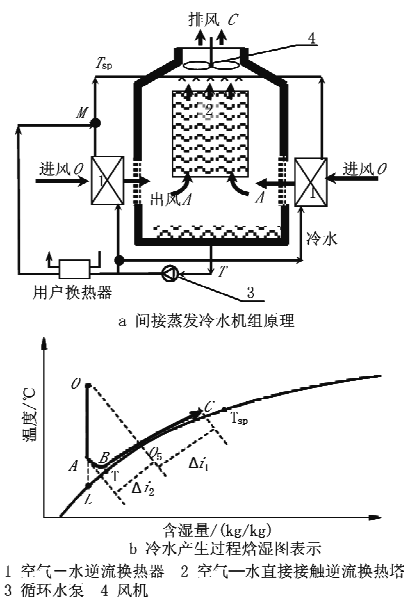


图 1 间接蒸发冷水机组流程

状态为 O 的干燥空气进入空气-水逆流换热器,被从塔底部流出的冷水等湿冷却到 A 状态,之后进入塔的尾部喷淋区,和 t 状态的冷水进行充分的热湿交换,之后近似沿等焓过程到达 B,此时状态已接近饱和线,在排风机的作用下,空气进一步沿塔内填料层上升,上升过程中与顶部喷淋水逆流接触,沿饱和线升至 C 后排出。塔内的热湿交换过程同时产生 t 状态的冷水,一部分冷水进入空气冷却器冷却进风,另一部分冷水输送给用户,两部分冷水回水混合后进入塔部分喷淋产生冷水,从而

完成水侧循环。当换热面积足够大,且各换热部件流量取值匹配时,间接蒸发冷水机的出水温度极限值为进风露点温度。

2 间接蒸发冷水机的实测性能

2005 年,清华大学和新疆某公司合作开发出间接蒸发冷水机组^[17]。其规格型号如表 1 所示。

表 1 间接蒸发冷水机组规格型号^[15]

	SZIJ-L-24	SZIJ-L-48	SZIJ-L-72	SZIJ-L-96	SZIJ-L-120	SZIJ-L-144
总供冷量/kW	140	280	420	560	700	840
冷水机组出水温度/℃	16	16	16	16	16	16
风机盘管进/出水温度/℃	16/21	16/21	16/21	16/21	16/21	16/21
出水量/(m ³ /h)	24	48	72	96	120	144
输入总功率/kW	7.5	15	22.5	30	37.5	45

实测间接蒸发冷水机组出水温度如图 2 所示。由图 2 可以看出,在室外干球温度 30~35℃、室外露点温度 14~15℃ 情况下,间接蒸发冷水机组的出水温度为 17~19℃。可见,实测冷水出水温度低于室外湿球温度,比露点温度高 3~4℃,基本为室外湿球和露点温度的平均值。从而实现了通过间接蒸发冷水机制备出冷水,满足排除室内显热所需的冷源要求。图 3,4 给出了间接蒸发冷水机出水温度与室外露点温度和干球温度的变化。可以发现,实测间接蒸发冷水机组的出水温度主要受室外露点温度的影响,而与室外干球温度没有直接关系。

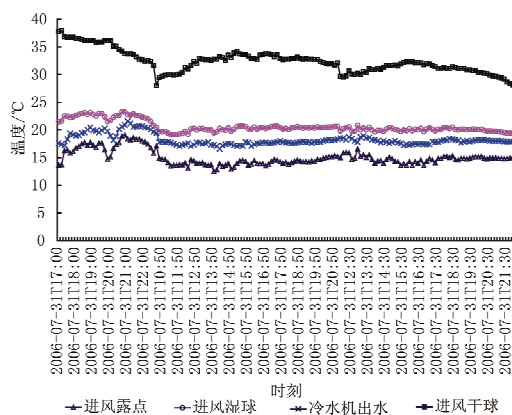


图 2 实测间接蒸发冷水机组出水温度

由于间接蒸发冷水机产生冷量的过程,只需花费空气、水间接和直接接触换热过程所需风机和水泵的电耗,和常规机械压缩制冷方式相比,不使用压缩机,机组的 COP(机组设备的冷量与风机、水泵电耗之和的比值)较高。在乌鲁木齐的气象条件下,实测机组 COP 约为 12~13。且室外空气越干燥,机组 COP 越高。

3 基于间接蒸发冷水机的串联式空调系统

结合建筑既需降温,又需输送新风空调任务,笔者设计了基于间接蒸发冷水机的串联式空调

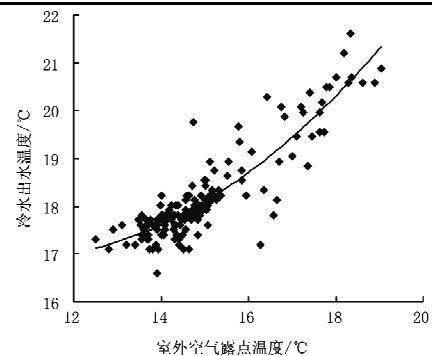


图 3 实测冷水出水温度随室外露点温度的变化

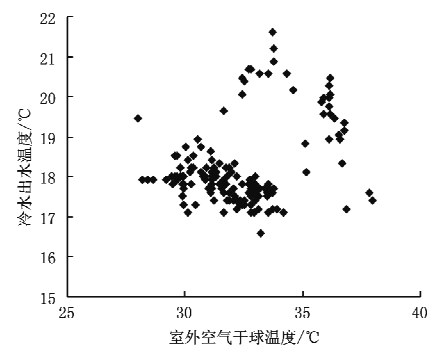


图 4 实测冷水出水温度与室外空气干球温度的关系

系统,如图 5 所示。间接蒸发冷水机制备的冷水首先送入房间的风机盘管或辐射板等显热末端,再送入间接蒸发冷却新风机组的表冷器预冷新风,带走新风的显热。这样,实现了不同温度冷水和不同温度热源相匹配,从而实现了间接蒸发冷水机冷量的梯级利用。

同时,由图 1b 可以看出,室外干空气 O 和间接蒸发冷水机的排风 C 之间的比焓差为从单位质量干空气中获取的冷量,排风 C 的比焓越大,从单位质量干空气中获取的制冷量越大。可见,通过图 5 所示的串联式空调系统流程,提高了间接蒸发冷水机利用室外干燥空气制冷的效率。

而室外干燥的新风通过表冷器预冷之后,也可进一步通过直接或间接蒸发冷却的方式进行处理,

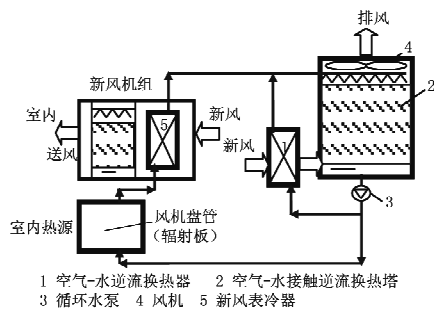


图5 间接蒸发冷水机组串联流程

进一步降低送风温度。根据室外空气干燥程度的不同,合理选择处理新风的方式:直接蒸发冷却、直接与间接相结合或者间接蒸发冷却。对于间接蒸发冷却产生冷风的方式,目前国内已研发出性能较高的间接蒸发模块^[15],实测送风温度已接近室外进风的湿球温度。

4 间接蒸发冷水机目前的应用状况

目前,间接蒸发冷水机及其系统已在新疆石河子凯瑞酒店、阿克苏第一人民医院、自治区人民医院、自治区档案馆、自治区中医院、独山子体育馆、石河子大学等 10 多个建筑约 120 000 m² 面积中应用。以 2007 年新疆自治区中医院的房间实测数据为例,如图 6 所示,温度 24~27℃,相对湿度 50%~65%,用户对环境的舒适度和空气质量的评价都较高,验证了以室外干燥空气为动力的基于间接蒸发冷却冷水制备技术的空调系统相对于常规系统的优势和其实际应用的可靠性。

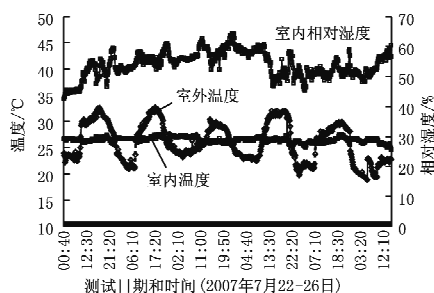


图6 应用间接蒸发冷水机及其系统的房间实测参数

5 间接蒸发冷水机在中国的适用区域

图 7 给出了以 20℃ 出水温度为界而得到的间接蒸发冷水机组在全国适用的地域范围。在红线的上部—新疆、青海、西藏、甘肃、宁夏、内蒙古等地,冷水机的供水温度低于 20℃,而在红线的下部,主要是中国的东南部,供水温度高于 20℃,从经济性考虑,应用间接蒸发冷却技术已不合理。对

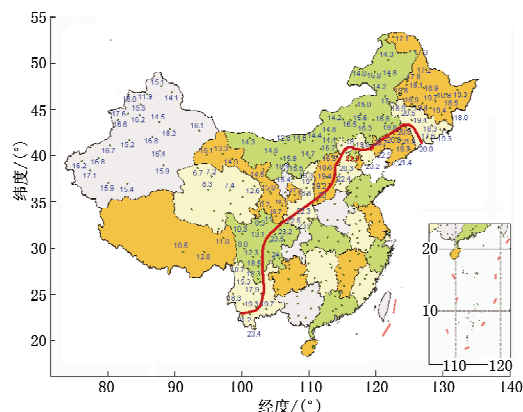


图7 间接蒸发冷水机组在中国的适用区域

于整个空调系统,除考虑间接蒸发冷水机组外,还需校核室外新风带走湿负荷的能力,因此基于间接蒸发冷却技术空调系统的应用范围比红线上部的区域要小,基本集中在新疆、青海、西藏、甘肃、宁夏 5 省、自治区之内。除此之外,该技术在国外,比如美国西部、欧洲东部、中亚地区、澳洲等干燥地区均适用,大致能替代全球目前使用空调的 20%~25%,有着广阔的应用前景。

6 结语

以室外干燥空气为动力,采用间接蒸发冷却冷水制备技术已经得到了成功实践。间接蒸发冷水机供水温度低于室外湿球温度,可达到室外湿球温度和露点温度平均值,很好地满足了干燥地区对空调冷源的需求,并已开始规模化的推广。由于整个系统的驱动源为室外干燥空气,相对于传统空调系统,可节能 40%~70%。同时通过节电而节煤,从而减少 CO₂ 排放,减少空气污染。且蒸发冷却技术不使用 CFC 制冷剂,对大气无污染。因此,西北地区的室外干燥空气作为一种清洁的、可再生的低品位能源,应该加以推广应用,这将成为缓解国家能源紧张状态的一条重要节能途径。

参考文献:

- [1] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [2] Watt J R. Nationwide evaporative cooling is here [G]// ASHRAE Trans, 1987, 93(1): 1237-1251
- [3] Scofield C M, Deschamps N H. Indirect evaporative cooling using plate type heat exchangers [G] // ASHRAE Trans, 1984, 90(1B): 148-153

(下转第 57 页)

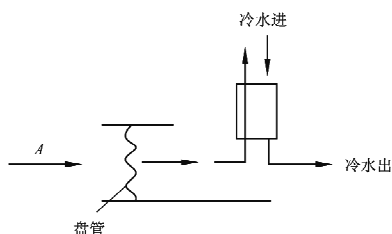


图7 盘管与直接蒸发冷却实现间接蒸发冷却示意

输入任何外界能量（不包括风机、水泵耗能）的情况下可获得低于露点温度的冷水和冷空气，笔者所在单位进行了相关的研究。

3 制热

除了制冷以外，还可运用上述湿能理论实现制热，如图8所示。利用图4,5所示的过程获得温度为 t_{dp} 的空气和空气B，空气B再经过绝热除湿达到P点，绝热除湿过程通过空气B与盐水的直接接触实现。

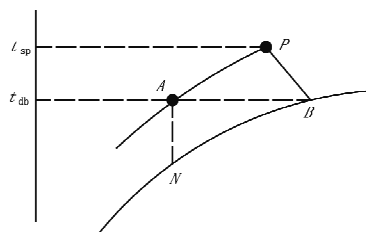


图8 利用湿能理论实现制热的焓湿图

盐水的再生通过图6所示的再生器实现，而不需要输入外界热量。

4 结论

4.1 基于湿能理论的能量转换方法可利用自然的空气实现制冷与制热，而无需外界能量输入。

4.2 湿能理论表明通过空气与水或（和）盐水不同的作用过程及其组合，可获得不同的制冷、制热效果。

4.3 原有的利用干燥空气的冷却主要基于直接蒸发冷却、间接蒸发冷却和多级间接蒸发冷却，其制冷的极限是自然空气的露点温度，基于湿能理论的能量转换方法可使制冷突破露点温度的极限。

4.4 原有的自然空气的利用主要局限于制冷，基于湿能理论的能量转换方法将其利用拓展到了制热。

参考文献：

- [1] 袁一军. 多级再生式多通道蒸发冷却方法及其换热器: 中国, ZL200310122817. 8[P]. 2007-9-19
- [2] Ujjwal Lahoti, Sanjeev Jain, Vibhu Kaushik, et al, A novel air cooler[C]//Proceedings of ACRECONF 2001: International Conference on Emerging Technologies in Air Conditioning and Refrigeration, New Delhi: Allied publishers, 2001:250-258
- [3] Crum D R, Mitchell J W, Beckman W A. Indirect evaporative cooler performance [G] // ASHRAE Trans, 1987, 93(1):1261-1275
- [4] Wu H, Yellott J L. Investigation of a plate-type indirect evaporative cooling system for residences in hot and arid climates[G]//ASHRAE Trans, 1987, 93(1):1252-1260
- [5] Tulsidasani T R, Sawhney R L, Singh S P, et al. Recent research on an indirect evaporative cooler (IEC) part I: optimization of the COP [J]. International Journal of Energy Research, 1997, 21(12):1099-1108
- [6] Singh S P, Tulsidasani T R, Sawhney R L, et al. Recent research on an indirect evaporative cooler part VI: evolution of design pattern for indirect evaporative cooler [J]. International Journal of Energy Research, 1999, 23(7): 557-561
- [7] Scofield C M. The heat pipe used for dry evaporative cooling[G]//ASHRAE Trans, 1986, 92(1B):371-381
- [8] Watt J R, Brown W K, 等. 蒸发冷却空调技术手册 [M]. 3版. 黄翔, 武俊梅, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008:1-30
- [9] Chen P, Qin H, Huang Y J, et al. Energy-saving potential of precooling incoming outdoor air by indirect evaporative cooling[G]//ASHRAE Trans, 1993, 99(1):322-332
- [10] Wicker K. Life below the wet bulb: the Maisotsenko cycle[J]. Power, 2003, 147(9):29
- [11] 陈沛霖. 论间接蒸发冷却技术在我国的应用前景 [J]. 暖通空调, 1988, 18(2):24-29
- [12] 陈沛霖. 间接蒸发冷却在我国的适用性分析[J]. 暖通空调, 1994, 24(5):3-5
- [13] 黄翔, 刘鸣, 于向阳. 我国新疆地区蒸发冷却技术应用现状分析[J]. 制冷与空调, 2001, 1(6): 33-38
- [14] 任承钦. 蒸发冷却焓分析及板式换热器的设计与模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001
- [15] 江亿, 李震, 薛志峰. 一种间接蒸发式供冷装置: 中国, 02202739. 4[P]. 2002-12-11
- [16] 谢晓云, 江亿, 刘拴强, 等. 间接蒸发冷水机组设计开发及性能分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(7): 66-71