

The Air Conditioning Technology of Dew Point Indirect and Direct Evaporative Cooling

Xiang Huang¹, Xiaowen Liu², Zhixiang Wu³

Xi'an Polytechnic University, Xi'an, China, 710048

1..huangx@xpu.edu.cn, 2.liuxiaowen166@163.com, 3.wzx1040@126.com

Abstract: Put forward a new energy called dry air energy which is used as cold source in evaporative cooling air conditioning system, and produce the classification of the air conditioning briefly. And then propose the dew point indirect and direct evaporative cooling air conditioning, its principle is analyzed. Through the experiment we know its temperature drop effect is better than the original evaporative cooler. In contrast with the traditional mechanical refrigeration, it can save energy consumption largely and reduce operation costs. Consequently the dry air energy of evaporative cooling can be vigorously promoted as a new kind of cold source, which will make great contributions to our energy-saving and emission reduction.

Keywords: dry air energy; direct evaporative cooling; dew point indirect evaporative cooling; energy saving

露点间接—直接蒸发冷却空调技术

黄翔¹, 刘小文², 吴志湘³

西安工程大学, 西安, 中国, 710048

1. huangx@xpu.edu.cn, 2. liuxiaowen166@163.com, 3. wxz1040@126.com

摘要: 提出了一种利用干空气能作为空调行业冷源的蒸发冷却空调方式, 并简单介绍了这种空调的分类。在此基础之上提出了露点间接—直接蒸发冷却空调, 对其原理进行了分析。同时通过实验测试说明了这种空调系统的温降效果较传统蒸发冷却设备有了明显的提高。与传统的机械制冷相比, 可以大大节约能耗, 减少运行费用。因此蒸发冷却干空气能作为一种新型冷源值得在我国大力推广, 为我国节能减排做出应有贡献。

关键词: 干空气能; 直接蒸发冷却; 露点间接蒸发冷却; 节能

1 引言

现今社会的能源问题已成为世界性的核心问题。多年来由于能源资源的过度消耗而使我国能源资源日益短缺, 越来越依靠进口, 主要矿产品对外依存度从1990年的5%提高到现在的50%左右^[1]。面对严峻的能源现状, 一方面我们要积极寻求新型能源, 另一方面必须严格的执行国家节能减排政策。

目前, 我国建筑能耗约占全社会总能耗的三分之一左右, 而空调能耗就占其60%以上, 随着工业化和城镇化的快速发展, 这个比例还在不断上升^[2]。为了缓解各国的能源危机, 节能低碳生活已经逐渐成为国际国内建筑界的主流趋势。因此 HVAC 系统的节能显得尤为重要。

传统集中式空调系统, 以消耗大量的电能来制取冷量, 是一种高能耗产品。随着使用年限的增加, 设备性能的衰减以及维护费用的增加, 使运行成本大大增加, 造成能源的极大浪费。其制冷剂 CFCS 及 HCFC 对臭氧层有破坏作用并导致温室效应的产生。而且所消耗的电能很大程度上依赖于大量的矿物燃料, 既不经济也不环保。蒸发冷却是以水作为制冷介质来制取冷量的, 不会对环境造成污染; 其耗能设备只有风机和水泵, 因此是一种绿色、“零费用制冷”的空调方式。

通常机械系统的装机功率为 50W/m², 而蒸发冷却系统为 10W/m², 能耗约为机械制冷的 1/5, 节电 80%左右^[3]。且蒸发冷却空调结构简单, 通常机械制冷系统的造价为 400 元/m²左右, 而蒸发冷却系统仅为 250

元/m³左右^[4]。因此在能源日益紧缺的今天，尽可能多的使用蒸发冷却技术成为空调行业的一种必然趋势。目前已在我国西北干燥地区如新疆等地宾馆、办公楼、餐厅、体育馆、影剧院等近两百余项工程中得到应用，并收到了良好效果^[5-11]。

全球化的低碳经济为蒸发冷却技术在我国的应用创造了良好的机遇。那么，如何提高各种蒸发冷却设备的换热效率，使能源利用效率最大化，是我们对蒸发冷却空调提出的新的要求。

2 蒸发冷却技术简介

目前，自然界中可以利用的可再生能源主要有：风能、太阳能、水能、潮汐能。而蒸发冷却是利用干燥空气自燃湿能的一种新型可再生能源，以此作为空调行业的新型冷源，与传统机械压缩式制冷系统相比，省去了冷水机组和冷却塔两套设备，而且其空调器中只有水泵和风机为耗电部件，大大节约了电能和系统的初投资费用。蒸发冷却技术分为直接蒸发冷却和间接蒸发冷却两种。

直接蒸发冷却器的原理非常简单，通过在填料顶部喷淋循环水，使流经换热器的空气与填料表面的水膜直接接触进行热湿交换。空气处理过程基本上为等焓冷却，其极限温度逼近待处理空气的湿球温度。其结构图如图 1 所示。其中填料是直接蒸发冷却器的关键部件，其性能直接影响到换热器的效率^[12]。

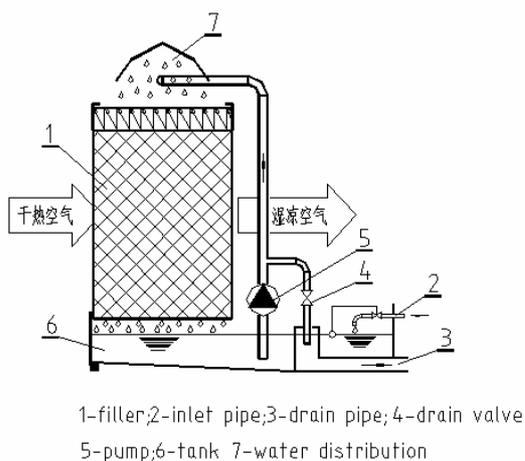


Figure 1 the schematic of direct evaporative cooler
图 1 直接蒸发冷却器结构示意图

间接蒸发冷却技术的基础是质交换（蒸发）然后才是热交换（冷却），因此质交换是这一技术的核心。

其换热过程为气—水—气，二次流道中喷淋循环水，二次空气和水膜进行热湿交换后，水的温度降低，再和一次流道中的空气进行显热交换，冷却一次空气。一次空气的极限温度为室外空气的湿球温度。目前间接蒸发冷却器主要有：管式间接、板翅式间接、热管式间接几种形式，图 2 为板翅式间接蒸发冷却器结构示意图。

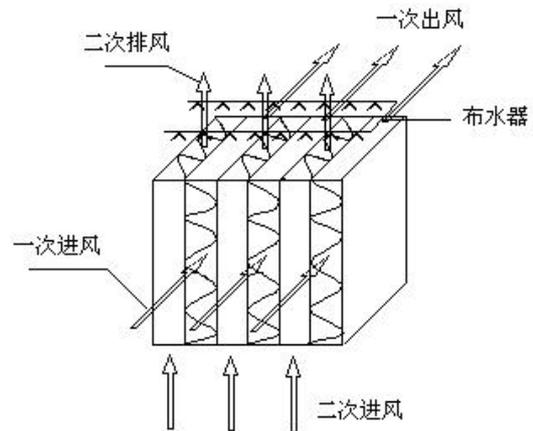


Figure 2 plate-fin indirect evaporative cooler

图 2 板翅式间接蒸发冷却器

3 露点间接—直接蒸发冷却空调机组

蒸发冷却技术作为一种节能高效的新型空调技术，如何进一步提高其设备的效率，充分利用可再生的干空气能为人类服务是蒸发冷却技术的首要任务。

间接蒸发冷却作为蒸发冷却的核心技术，受到人们的广泛关注。对于蒸发冷却空调而言，换热器的布水均匀性直接影响着换热效率，因此众多学者纷纷从改善布水方式入手，寻求提高间接蒸发冷却器换热效率的方法。对于管式间接目前有管外包覆吸水性材料和亲水涂层两种方法，但是时间长了，包覆性材料会发生老化下垂脱离管道壁面而亲水涂层也会失效，造成布水的不均匀，影响换热效果。热管式间接蒸发冷却器虽然换热效率高，但是体积大造价高，限制了它的推广使用。板翅式间接流道较窄，在风沙大的地区使用流道容易堵塞，降低了换热效率。这些传统间接蒸发冷却器的使用效果均不理想，其极限温度为二次空气的湿球温度。目前在实际工程应用中，间接蒸发冷却器的效率一般只有 70% 左右，这使得单独使用间接蒸发冷却器时，送风温度过高，难以满足送风状态点的要求实现室内建筑的空气调节。而露点间接蒸发冷却技术是在原有间接蒸发冷却基础上的一个新发

展，其极限温度可以达到室外空气的露点温度，具有更大的节能潜力，因此受到国内外学者的高度重视。露点间接蒸发冷却的驱动势远大于传统间接蒸发冷却，如图 3 所示，因此换热效率有了很大的改善。

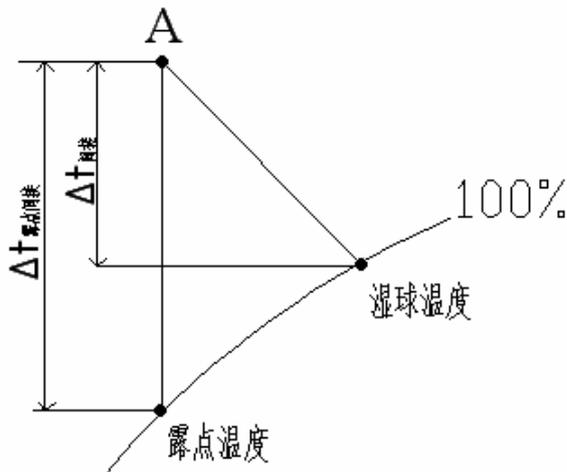


Figure 3 the driving force of dew point indirect and traditional indirect

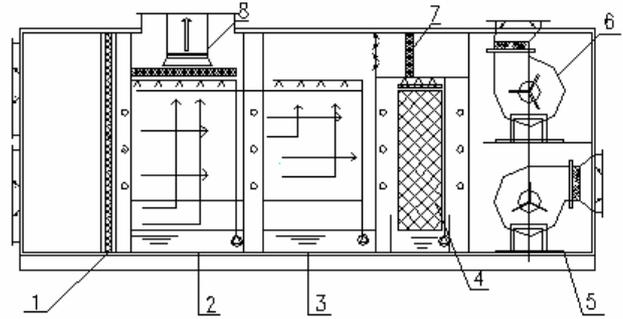
图 3 露点间接与传统间接蒸发冷却器驱动势

直接蒸发冷却的效率一般在 80%—95%之间，虽然效率很高，但是单独使用时送风湿度过大，排风处理不当容易引起人体的不舒适感。

多级蒸发冷却是指直接和间接蒸发冷却的组合，虽然这种组合方式可以提高机组的制冷效果，但是级数越多占地空间，初投资和运行维护费用也随之增加，同时空气流动阻力也大大增加，造成送风机能耗过高。国内外理论和实践也证明了，无论从技术还是经济上考虑，使用间接—直接的两级蒸发冷却才是最佳的组合方式。因此笔者综合考虑，提出了露点间接—直接蒸发冷却空调机组，这种组合方式大大提高了设备的效率，使能源利用最大化，具有显著的节能前景。

此空调机组主要功能段包括：过滤段、预冷段、冷却段、直接蒸发段、风机段。其结构示意图如图 4 所示。露点间接—直接蒸发冷却空调机组工作原理：当室外新风经过过滤段进入预冷段后，分为两部分，一部分作为预冷段二次空气与二次侧的水膜直接接触进行热湿交换后从预冷段二次风机 8 排出，另一部分一次空气被冷却后沿着预冷段一次流道进入冷却段。这部分空气在冷却段又分为两部分，一部分经冷却段冷却后从底部有穿孔的地方进入二次流道作为二次空气，二次流道中的空气湿球温度不断降低，再来冷却

冷却段中剩余部分的一次空气，这部分二次空气通过冷却段二次风机 6 排到室外。理论上，经过此时露点间接蒸发冷却段的出风温度可以达到露点，但是实际中距离露点还有一定的差距。因此经过冷却段后的一次空气继续经过直接蒸发冷却段进一步降温。对冷却段的效果是一个补充，以便更加逼近露点，最后从送风机 5 进入空调区域。其实物照片如图 5 所示。



1-过滤段；2-预冷段；3-冷却段；4-直接蒸发段；5-主风机；6 冷却段二次风机；7-挡水板；8 预冷段二次风机

Figure 4 the schematic of dew point indirect and direct evaporative cooling air conditioning unit

图 4 露点间接—直接蒸发冷却空调机组结构示意图



Figure 5 the picture of dew point indirect and direct evaporative cooling air conditioning unit

图 5 露点间接—直接蒸发冷却空调机组实物图

此露点式空调机组的核心部件是露点板式间接蒸发冷却器^[13]，包括预冷段和冷却段。露点间接蒸发冷却的原理如图 6：空气经过预冷段进入干通道前的状态点为 1，吹入干通道后被湿侧的二次空气进行初步冷却到达状态点 2。此时部分空气通过一次流道末端的小孔进入湿侧，与水进行热湿交换到达状态 2 的湿

球温度 $2'$ 。同时，由于湿通道中 $2'$ 点的水分蒸发，吸收干通道中的热量，状态点从 $2' - 2''$ 。而干侧被等湿冷却，状态点从 $2 - 3$ 。随着湿侧气流的不断加大，一次空气继续被显性冷却，而二次空气则不断被湿侧加湿，饱和，升温。在此过程中能量是梯级利用的，状态 1 与水膜 $2'$ 进行换热，状态 2 与水膜 $3'$ 最终经过露点间接蒸发冷却段后，一次空气温度逼近露点。

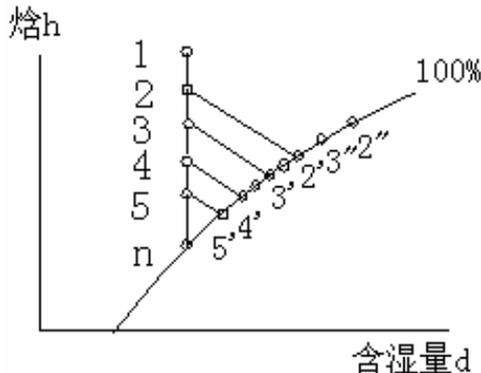


Figure 6 the principle of dew point indirect evaporative cooling

图 6 露点间接蒸发冷却原理

与原有的板式和管式间接蒸发冷却器最大不同就是，干通道的一次空气经预冷后部分可以经过一次流道中的穿孔进入二次流道，然后作为二次空气与水进行热湿交换。这样随着一次空气被预冷的程度越大，作为二次空气时与水热湿交换的基准温度就越低。露点间接蒸发冷却技术利用室外空气的干球温度和不断降低的湿球温度之差来换热，这不同于一般间接蒸发冷却技术是利用空气的干球温度和固定的湿球温度之差来换热的。所以，露点间接蒸发冷却技术的极限是空气的露点温度，其换热效率远高于传统间接蒸发冷却器，能够更加有效的利用干空气能。

此机组中的露点板式间接与现有一般的露点式间接蒸发冷却器相比，具有如下特点：1) 在露点冷却段前增加了预冷段。减少了冷却段二次空气的不可逆损失强化了二次侧的换热效果，同时降低了进入冷却段的二次空气的基准温度，加大了一二次侧空气的温差。另一方面气流通过预冷段具有整流作用，使得进入冷却段的气流分布更加均匀，换热更充分。2) 此空调机组露点间接段在布水方式上也进行了改进，采用喷淋水袋的方式。在换热器顶部设置有凹槽，水从喷淋管流入凹槽至满溢出，沿着换热器二次通道壁面均匀流下，改善了间接蒸发冷却器布水的均匀性，促进了二次侧的热质交换，进而增强了露点间接蒸发冷却

段的换热效果，大大节约能源。

4 实际应用

在福州地区对直接蒸发冷却、一般露点间接蒸发冷却和露点间接—直接蒸发冷却空调机组的实际使用效果进行测试，整理后得到如下表 1 所示。(测试时间：2010.7)

Table 1.experiment test

表 1 实验测试

	入口参数		出口参数	效率	温降
一般露点式	33.96	27.8	29.9	0.66	4.06
预冷+冷却	34.02	27.8	28.95	0.82	5.07
单独使用直接	34	28	28.4	0.93	5.6
单独使用间接	34.02	27.8	29.49	0.73	4.53
露点间接+直接	34.02	27.8	26.6	低于湿球	7.42

通过以上的对比分析得到：

1) 加上预冷段后，露点间接的效率相比传统露点间接蒸发冷却大大提高。且在高湿度地区效率可以达到 82%，值得推广。

2) 露点间接单独使用时，温降可以达到 5.07℃，接近于单独使用直接蒸发冷却的效果 5.6℃，且没有增加空气的含湿量。因此单独使用时温降大且避免了直接蒸发室内湿度过大的问题。

3) 在以福州为代表的高湿度地区，露点间接—直接蒸发冷却空调机组的温将为 7.42℃，低于此时室外的湿球温度 27.8℃，那么在干湿球温差大的中湿度地区和干燥地区，其驱动势大于高湿度地区，因此冷却效果必定接近室外空气的露点温度。同时这种露点间接—直接的两级蒸发冷却空调机组相比单独使用直接蒸发冷却湿度有所降低，如图 7 所示。单独使用直接后的含湿量为 d_1 ，使用露点间接—直接后的含湿量 d_2 ， $d_2 < d_1$ 。

5 展望

露点间接—直接蒸发冷却空调机组无论是单独使用间接段还是采用两级蒸发冷却的方式，其温降效果均明显优于传统蒸发冷却空调设备，充分利用了自然界可再生干空气能，且与传统机械制冷空调相比具有更大的节能空间，是一种节能环保的空调方式。

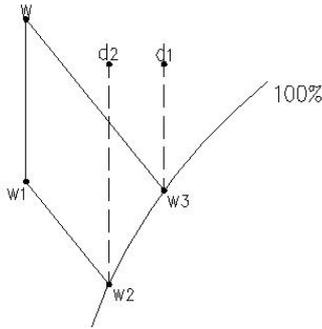


Figure 7
图 7 含湿量对比

目前蒸发冷却在我国的应用主要是用于干燥地区舒适性空调领域。而通过以上实验和分析我们可以得到，露点间接—直接蒸发冷却空调的温降效果较传统蒸发冷却空调有了明显的提高。不仅可以用作干燥地区舒适性空调领域，也可以在中湿度地区配合机械制冷或者作为机械制冷的预冷设备辅助制冷，节约高品位能源。在以显热为主的工业车间中，由于机器的散热量很大，如果采用传统的机械制冷空调系统，其能耗过高。而如果选择露点间接—直接蒸发冷却空调方式，既可以获得很好的温降效果，又可以改善室内空气质量，大大节约能源。其在工业领域中的应用范围主要为网吧、制鞋厂、印刷厂、纺织厂、联通基站等高温场所，采取适当的温降即可获得较好的舒适感。

综上所述，露点间接—直接蒸发冷却这种采用干空气能的蒸发冷却空调方式，大大降低了高品位能源的使用，为我国节能减排做出贡献，值得在全国范围内适合使用的地区和场所广泛推广！

References (参考文献)

[1] Zhang Zhuoyuan. Energy saving and emission reduction is the hard constraints[J],Theoretical Trends,2007,(15):P1-9(Ch).
张卓元.节能减排是硬约束[J],理论动态,2007,(15): P1-9.
[2] Huang Xiang, Xu Fangcheng.The important role of Evaporative

cooling air conditioning on Energy-saving and emission reduction[J], Refrigeration and Air conditioning, 2008, 8(4): P17-20(Ch).

黄翔, 徐方成. 蒸发冷却空调技术在节能与减排中的重要作用[J],制冷与空调, 2008,8 (4): P17-20.

[3] Huang Xiang.Evaporative Cooling Technologies Meeting Challenge of Environmental Protection,Energy Saving, Economy and IAO[J],Building Energy&Environment,2003,22(4):1-4(Ch)
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): 1-4.
[4] Zhang Dan,Huang Xiang, Liu Jian,Dong Aoshuang.The study of the design principles and steps of evaporative cooling air conditioning system[J], Refrigeration and Air conditioning, 2008, 8(2):P18-24(Ch).
张丹, 黄翔, 刘舰, 董傲霜.蒸发冷却空调系统的设计原则与设计方法的研究[J],制冷与空调, 2008, 8 (2): 18-24.
[5] Wang Ruzhu.Advances in Refrigeration and HVAC[M], Beijing: Science Press,2007(Ch).
王如竹. 制冷学科进展研究与发展报告[M],北京: 科学出版社, 2007.
[6] Sukhdev S. Mathaudhu .P.E.Evaporative cooling in California[J]. ASHRAE Journal, 2000: 81-83.
[7] Bourhan Tashtoush, Mahmood Tahat, Ahmed AL-Hayayneh. Thermodynamic behavior of an air-conditioning system employing combined evaporative-water and air coolers[J]. Applied Energy, 2001, 70: 305-319.
[8] Milos LAIN, Michal DUSKA, Karel MATEJICEK. Application of evaporative cooling techniques in the CZECH Republic[A]. International Congress of Refrigeration 2003[C], 2003: 1-8.
[9] Watt, J.R. Evaporative air conditioning[M]. New York: Chapman and Hall, 1963.
[10] Public buildings energy-efficient design standards GB50189-2005[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2005(Ch).
公共建筑节能设计标准 GB50189-2005[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
[11] Zhang Zhendong, Yu Xiangyang,Zhou bin.Promotion evaporative cooling air conditioning in dry and hot areas is the effective way to conduct public buildings energy-efficient design standards[J], China Construction Heating&Refrigeration,2006,(7):P48-52(Ch).
张振东, 于向阳, 周斌. 干热地区推广应用蒸发冷却空调是实施“公共建筑节能设计标准”的有效途径[J], 中国建设信息供热制冷, 2006, (7): P48-52.
[12] Huang Xiang.Air conditioning engineering[M]. China machine press,2008(Ch).
黄翔.空调工程[M].机械工业出版社, 2008
[13] Huang Xiang,Chen Junping etc.An dew point plate indirect evaporative cooler:China, 200710017989.7 [P]. 2007-6-5(Ch).
黄翔, 陈俊萍等. 一种露点板式间接蒸发冷却器: 中国, 200710017989.7 [P]. 2007-6-5