

蒸发冷却在我国不同区域地下工程中的适用性分析

解放军理工大学 郭学森[☆] 韩旭 周森林 张华
新疆军区司令部工程科研设计所 窦文平
解放军理工大学 王瑞海

摘要 以送风状态点的干球温度、湿球温度及含湿量为基准,建立了蒸发冷却适用区域的 6 区模型,并以室内状态点的上限值作为送风状态点,分别以夏季空调室外设计参数、地下工程夏季空调设计参数、夏季空调干球温度及不满足 200 h 含湿量作为室外状态设计参数,计算并分析了各种形式的蒸发冷却系统在我国不同区域地下工程中的适用性,为蒸发冷却在地下工程中的应用提供基本设计依据。

关键词 直接蒸发冷却 间接蒸发冷却 地下工程 气象分区

Applicability analysis of evaporative cooling system to underground engineering in different regions of China

By Guo Xuesen[★], Han Xu, Zhou Senlin, Zhang Hua, Dou Wenping and Wang Ruihai

Abstract Establishes a six-zone meteorological model of applicable regions for evaporative cooling systems based on dry bulb temperature, wet bulb temperature and humidity ratio at the state point of air supply. Taking the upper limits of indoor design parameters as the state point of air supply, taking the air conditioning outdoor design parameters in summer, underground engineering air conditioning outdoor design parameters in summer, air conditioning dry bulb temperature in summer and humidity ratio with unsatisfied 200 hours as outdoor design parameters respectively, analyses the applicability of evaporative cooling technology for underground engineering in different districts of China. Provides design basis for evaporative cooling technology applied to underground engineering.

Keywords direct evaporative cooling (DEC), indirect evaporative cooling (IEC), underground engineering, meteorological partition

[★] PLA University of Science & Technology, Nanjing, China

①

蒸发冷却是一种节能环保的空调方式,自上世纪中后期引入我国以来,在研究及应用方面取得了很大进展。针对其适用区域,近年来很多专家从不同应用目的及冷却方式出发,得出很多结论。上世纪 80 年代,陈沛霖研究了冷却效率为 70% 的间接蒸发冷却(IEC)在我国各种气候条件下的适用性^[1];2004 年,颜苏芊等人以送风状态点比焓及含湿量为基线,建立了蒸发冷却的四区模型,分析了蒸发冷却技术在我国各区域应用的可行性^[2];2008 年,辛军哲等人在以室内冷负荷为围护结构导入热量的前提下,推导出直接蒸发冷却(DEC)的室外空气参数应选取干、湿球温度之和不满足某一固定时

数的结论^[3];同年,花严红等人研究了蒸发冷却在我国村镇的适用性^[4]。地下空间建筑,特别是深埋地下建筑,具有较好的封闭性,内部湿负荷大,热负荷受工程内部人数及设备开启状况影响较大,可忽略地表环境通过围护结构的传热影响,这些决定了深埋地下建筑在室外计算气象参数的选取上与地面建筑有很大不同。

①[☆] 郭学森,男,1982 年 1 月生,在读硕士研究生
210007 南京市解放军理工大学工程兵工程学院内设教研室
(0) 15850558182
E-mail: yansen_gh@163.com
收稿日期:2009-07-10

1 蒸发冷却的气象分区

1.1 分区模型的建立

根据热湿负荷及室内设计状态确定室内送风状态点,以送风状态点的干球温度、湿球温度、含湿量为基线,将湿空气分为 6 个区域,见图 1、表 1。区域 I 为直接送风参数区,其余 5 个区域的空气需处理到区域 I 才能作为送风。可以看出,区域 II 空气通过直接蒸发冷却即可达到要求,属于直接蒸发冷却区;区域 III 空气则必须通过间接蒸发冷却才能处理到区域 II 或 I,属间接蒸发冷却区;其余 3 个区域空气无法通过蒸发冷却进行处理,属于蒸发冷却不适用区,但又各有特点。VI 区空气干湿球温度均较低,但含湿量高,对于一些对湿度要求不高的地区,该区域空气可直接作为送风;II 区空气经过 DEC 设备处理后,也可能进入 VI 区,可以作为二次空气,用于 IEC 系统中处理一次空气(送风);V 区空气干球温度低于送风干球温度,但湿球温度较高,对于某些对湿度要求不高空间,可在加大送风速度(1.5~2 m/s)的条件下直接作为送风,也可以除湿后送入工程;IV 区空气高温高湿,蒸发冷却设备一般仅作为附属设备。

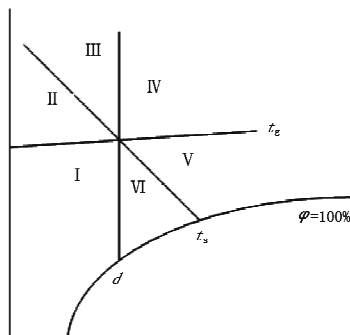


图 1 蒸发冷却的区域模型

表 1 蒸发冷却分区

	参数特点	蒸发冷却类型
区域 I	$t_g \leq t_{g0}, d \leq d_0$	直接送风区
区域 II	$t_g > t_{g0}, t_s \leq t_{s0}$	DEC 区
区域 III	$t_s > t_{s0}, d \leq d_0$	IEC 区
区域 IV	$d > d_0, t_g > t_{g0}$	蒸发冷却不适用区域
区域 V	$t_g < t_{g0}, t_s > t_{s0}$	蒸发冷却不适用区域
区域 VI	$t_s \leq t_{s0}, d > d_0$	蒸发冷却不适用区域

注: t_{g0}, t_{s0}, d_0 分别为送风状态点的干球温度、湿球温度和含湿量; t_g, t_s, d 分别为某地区室外状态选取点的干球温度、湿球温度和含湿量。

1.2 室外气象参数的变化特点

晴天时夏季室外气象参数的变化是有规律的。

干球温度、相对湿度的变化幅度相对较大,且变化趋势相反;而含湿量与湿球温度的变化幅度较小,且变化趋势类似。13:00—18:00,相对湿度存在最小值,干球温度则存在最大值;02:00—04:00 时,干湿球温度、含湿量存在最小值,相对湿度则存在最大值。湿球温度、含湿量的极大值可能出现在干球温度极大值之前,也可能出现在其后,但当干球温度取最小值时,湿球温度、含湿量也取得最小值。图 2 为北京地区典型气象年 6 月 20 日与 7 月 22 日气象参数日变化情况对比^[6]。

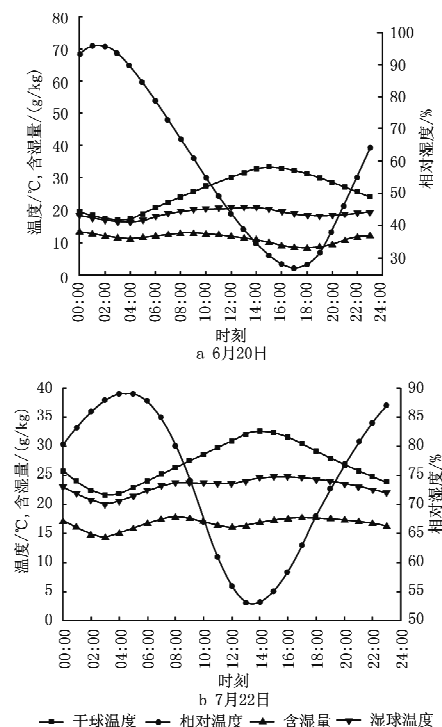


图 2 北京地区典型气象年 6 月 20 日与 7 月 22 日气象参数日变化情况对比

1.3 室外状态参数的选取对分区的影响

根据 GB 50019—2003《采暖通风与空气调节设计规范》对夏季舒适性空调室内计算参数的规定,办公区舒适性空调室内设计参数在风速不大于 0.3 m/s 的情况下,干球温度为 22~28 °C,相对湿度为 40%~65%。取其上限,即温度 28 °C、相对湿度 65%作为送风状态点的上限值,该状态时湿球温度为 23 °C,含湿量为 16 g/kg。以 $t_g = 28$ °C, $t_s = 23$ °C, $d = 16$ g/kg 所确定的 3 条基线将湿空气焓湿图分为 6 个区域,如图 1 所示。对照我国 166 个城市夏季室外气象参数^[6-7],确定蒸发冷却分区。

对于地面建筑及用于商业、交通等有舒适性温湿度要求的浅埋地下建筑,夏季空调室外计算干湿球温度一般采用历年平均不保证 50h 的干、湿球温度。以该参数为指标确定的蒸发冷却空调分区如图 3 所示(因资料所限,未对我国台湾省作分区分析。下同)。

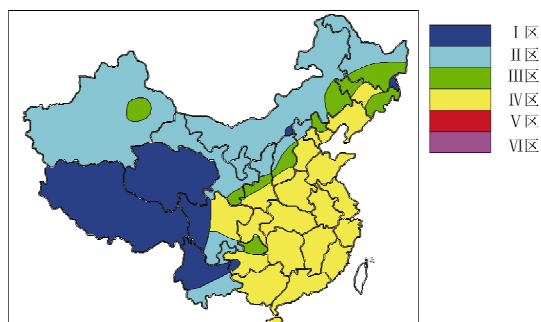


图 3 室外状态参数取干、湿球温度分别不保证 50 h 时的蒸发冷却分区示意

大多数深埋地下建筑对送风湿度的要求高于对温度的要求,一般采用夏季通风温度作为计算干球温度,用不满足 200 h 的含湿量 d_{200} (即近 10 a 来平均每年不保证时间不超过 200 h 的含湿量值)作为计算含湿量。根据夏季通风温度及 d_{200} 确定的蒸发冷却分区如图 4 所示。

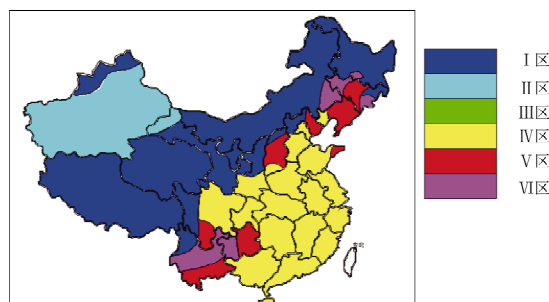


图 4 室外状态参数取夏季通风温度及 d_{200} 时的蒸发冷却分区示意

比较图 3、4,图 3 包含分区模型中 I, II, III, IV 4 个分区,图 4 包含了 I, II, IV, V, VI 5 个分区。这与两种室外计算参数的选取有关。分析全国各地夏季通风和空调计算干球温度数据可知,通风温度普遍比空调温度低 2~4 °C 左右,该温差还呈现南方小、北方大,东部小、西部大的趋势,因为这一温差的存在,使得图 3 中 II 区部分地区在图 4 中转为 I 区,VI 区转为 V 区;全国大部分地区不保证 200 h 的含湿量比夏季空调的计算含湿量大,如图 5 所示。因为含湿量增加及计算干球温度降低,在

图 3 中部分原属 II 区、III 区的地区在图 4 中变为了 I 区或者 V 区、VI 区。

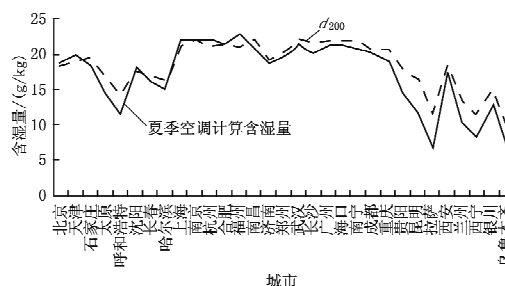


图 5 全国 31 个城市夏季空调计算含湿量与 d_{200} 的比较

从除湿角度来说,取不满足 200 h 的含湿量作为计算含湿量,比用夏季空调计算参数更加精确^①。然而采用夏季通风温度作为计算干球温度,尽管减小了空调机组的装机容量,却增加了设备实际运行时的不满足时间。考虑到蒸发冷却受室外条件的限制比机械制冷更大,可采用不满足 50 h 的干球温度作为计算干球温度,而用不满足 200 h 的含湿量作为计算含湿量来确定蒸发冷却分区,采用这些参数计算的分区结果见图 6。

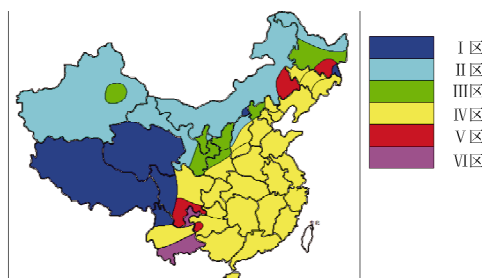


图 6 采用新的计算参数时的分区示意

在图 6 中,6 种分区均存在, I 区仅限于西藏、青海全部地区及云南丽江、四川甘孜、内蒙古集宁、黑龙江绥芬河; II 区包括新疆、内蒙古大部分地区及甘肃省兰州以西、山西大同、黑龙江鹤岗; III 区包括宁夏除盐池外的所有地区,甘肃东南、陕西中北部、河北张家口,以及黑龙江省的齐齐哈尔、安达、鸡西、牡丹江; IV 区包括大半个东北,大部分华北,华东、华南全部地区,以及四川中东部,云南、贵州大部分地区; V 区包括四川、云南、贵州三省交界处及内蒙古通辽,黑龙江哈尔滨; VI 区包括云南的腾冲、昆明。

^① 黄祥夔,忻尚杰,张茂秀,等. 地下工程通风与空气调节[M]. 南京:工程兵工程学院,1984

2 设备实际冷却效率对分区范围的限制

现有直接蒸发冷却设备的效率为 70%~90%,间接蒸发冷却设备为 40%~70%,设备的冷却效率会对蒸发冷却的实际应用区域产生影响。以吐鲁番为例,其夏季空调设计温度为 40.7℃,不满足 200 h 的含湿量为 11.9 g/kg,对应条件下的湿球温度为 23.8℃,在图 6 中属于Ⅲ区。IEC 设备的冷却效率取最大值 70%,则处理后空气干球温度为 28.9℃,仍未进入Ⅰ区(即满足送风状态要求),尽管理论上吐鲁番属于Ⅲ区。因此,设备的实际冷却效率对蒸发冷却的应用具有限制作用。

3 不同组合方式下蒸发冷却的应用

受所在地空气含湿量、空气比焓等自然条件及蒸发冷却设备效率的影响,单级蒸发冷却在全国大部分地区不适用,或者仅在理论上存在适用性。因此,若要在全国范围内推广蒸发冷却,简单的直接或间接系统是不行的,必须与其他方式相结合,提高设备的冷却效率,对空气除湿,以达到送风状态许可范围。

1) 多级蒸发冷却^[5,10,12-14]

可以克服 IEC 冷却效率低的问题,扩大使用区域。多级蒸发冷却包括二级、三级甚至四级蒸发冷却。二级蒸发冷却主要是 IEC+DEC。IEC 可以是板式或管式间接换热器,也可以是间接蒸发冷水机组+冷却盘管。这种模式目前在我国西北地区应用最多。仍以吐鲁番为例,若采用 IEC 冷却效率 65%、DEC 冷却效率 80%的 IEC+DEC 系统,则出风干球温度为 22.6℃,完全可以满足舒适性送风需求。三级系统,包括 IEC 预冷二次空气+IEC+DEC, IEC 冷水盘管预冷一次空气+IEC+DEC,回热型 IEC+DEC 等形式。第一级可为板式、管式间接冷却器或者冷却塔+盘管,第二级一般为板式或管式间接冷却器。黄翔等人实测了新疆地区运行的三级蒸发冷却空调系统,认为当湿球温度低于 18℃时,三级蒸发冷却空调系统完全可以替代传统的机械制冷系统^[10]。根据文献^[15],在西安等中等湿度地区,蒸发冷却空调机组完全可行,采用热管+IEC+DEC 运行模式时,温度可降至 24.0℃,能效比为 19.1,约是机械制冷机组的 6 倍。

2) 蒸发冷却夜间储冷^[5]

蒸发冷却不仅可以降低空气温度,也可以降低水温。对于昼夜温差较大的地区,可利用间接或直接蒸发冷却装置制取冷水,并存储在水箱中,当白天干球温度均升高、不适于蒸发冷却时,冷水可提供足够的冷量。系统形式为:IEC 冷水机组+干式风机盘管+独立新风空调系统。

3) 除湿+蒸发冷却

将 IEC/DEC 与膜除湿、转轮除湿、溶液除湿、机械除湿等技术结合,可大大拓展蒸发冷却的应用范围。根据文献^[8-9],将除湿与蒸发冷却结合比单纯的机械制冷除湿空调系统节能效果要好得多,利用膜除湿+IEC/DEC 系统比采用单独机械蒸发制冷方式节能 58.9%。

4) 机械制冷+蒸发冷却^[10]

将机械制冷冷水机组与蒸发冷却结合的空调方式,在很多场合往往比单独采用机械制冷更节能。根据机械制冷冷却介质的放置位置,可采用以下几种方式:IEC+机械制冷冷水盘管+DEC, IEC+DEC+机械制冷冷水盘管,蒸发式冷凝器。第一种方式冷水盘管置于直接蒸发冷却器之前,提高了空调器运行效率,但盘管尺寸要大一些;第二种形式空调设备运行效率较低,但便于对系统连续控制;第三种方式,实际上是在冷凝器侧通过水的强制蒸发而利用其潜热,以达到节水、节能的目的。根据文献^[16],在西安地区,使用蒸发冷却+机械制冷相结合的空调系统,与常规机械制冷相比,可以减少制冷机装机容量和开机时间,降低造价,减少运行能耗,提高系统效率,具有很大的节能优势。

5) 蒸发冷却用于新风预冷^[11]

夏季炎热季节,利用管式间接蒸发冷却器(TIEC)对新风进行预冷,比单纯使用机械制冷负荷降低 26%;在过渡季节可充分发挥蒸发冷却免费供冷的能力,与机械制冷相比,节能 80%以上。

6) 岩石床蓄冷间接冷却^[5]

以直径 1.2~4 cm 的碎石制作的岩石床的空隙率为 40%~45%,空气很容易通过。岩石床蓄冷间接冷却实际应用可分为两步:首先是蓄冷,充分利用岩石的蓄热能力,对室内排风或夜间的室外空气进行直接蒸发冷却降温,通过岩石床进行蓄冷;然后是供冷,室外新风以 0.10~0.15 m/s 的速度通过岩石床获取冷量。

4 结论

地下工程的特点决定了蒸发冷却空调系统室外计算参数的选取与地面建筑不同,无论采用地面建筑还是一般地下建筑室外设计参数都有其缺点,因此采用地面建筑干球温度及地下建筑含湿量作为计算参数,并采用室内设计参数的上限作为送风参数上限值,计算了蒸发冷却在地下工程中的适用区域:西藏、青海全部地区及云南丽江、四川甘孜、内蒙古集宁、黑龙江绥芬河为直接通风适用区域;新疆、内蒙古大部分地区及甘肃省兰州以西、山西大同、黑龙江鹤岗为直接蒸发冷却适用区域;宁夏除盐池外的所有地区,甘肃东南、陕西中北部、河北张家口,以及黑龙江省的齐齐哈尔、安达、鸡西、牡丹江属于间接蒸发冷却适用区域。

参考文献:

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 辛军哲, 周孝清, 何淦明. 直接蒸发冷却式空调系统的室外气象条件[J]. 暖通空调, 2008, 38(1): 52-53
- [4] 花严红, 曹阳. 蒸发冷却空调系统在我国村镇的适用性研究[J]. 制冷学报, 2008, 29(5): 49-53
- [5] Watt J R, Brown W K. Evaporative air conditioning handbook[M]. 黄翔, 武俊梅, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008

- [6] 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
- [7] 马吉民, 朱培根, 耿世彬, 等. 人民防空工程通风空调设计[M]. 北京: 中国计划出版社, 2006
- [8] El-Dessouky H T, Ettouney H M, Bouhamra W. A novel air conditioning system membrane air drying and evaporative cooling[J]. Institution of Chemical Engineers, 2000, 78(7): 999-1009
- [9] 周亚素, 陈沛霖. 转轮除湿复合式空调系统[J]. 暖通空调, 1999, 29(4): 64-66
- [10] 黄翔, 屈元, 狄育慧. 多级蒸发冷却空调系统在西北地区的应用[J]. 暖通空调, 2004, 34(6): 67-71
- [11] 徐方成, 黄翔, 武俊梅. 蒸发冷却在空调系统中的应用分析[J]. 流体机械, 2009, 37(1): 77-80
- [12] 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
- [13] 黄翔, 周斌, 于向阳, 等. 新疆地区三级蒸发冷却空调系统工程应用分析[J]. 暖通空调, 2005, 35(7): 104-107
- [14] Neil E. Indirect/direct evaporative cooling systems[J]. ASHRAE Journal, 1980, 22(5): 21-25
- [15] 尧德华, 黄翔, 吴志湘. 四级蒸发冷却组合式空调机组能耗分析[J]. 建筑节能, 2009, 37(5): 42-46
- [16] 徐方成, 黄翔, 武俊梅. 西安某办公楼两种空调系统技术经济分析[J]. 制冷空调与电力机械, 2007, 28(6): 39-42

(上接第 51 页)

表 2 我国各典型气候分区代表城市外区进深

气候分区	代表城市	室外计算温度/℃	围护结构传热系数/(W/(m ² ·K))	外区进深/m
严寒地区 A 区	哈尔滨	-29	1.17	4.5
严寒地区 B 区	沈阳	-22	1.26	3.9
寒冷地区	北京	-12	1.41	3.1
夏热冬冷地区	上海	-4	2.05	3.6
夏热冬暖地区	广州	5	2.55	2.1

注: 围护结构传热系数按照 GB 50189—2005《公共建筑节能设计标准》相对应气候分区最低高限值采用, 建筑物体形系数为 0.4, 窗墙面积比为 0.7。

源利用效率。设计人员也可根据 PMV 的计算结果和变化趋势采用适当的供暖方案处理围护结构热负荷。

当地气候条件和围护结构热工性能对空调系统外区进深有较大影响, 降低建筑物围护结构传热系数可以减小外区进深, 甚至可以取消外区供暖以达到简化空调系统、减少系统运行能耗的目的。

当在外区采用了窗边加热措施如窗边散热器或窗边风机盘管送风后, 外围护结构热负荷在窗边即得到处理, 直接提高了外围护结构的内表面温度^[1], 本文所叙述的计算方法就不适用了。

笔者认为这是一种相对简单的设计思路, 可以有效地应用到工程实践中, 避免盲目地设定外区进深而带来一系列其他问题。

参考文献:

- [1] 叶大法, 杨国荣. 变风量空调系统设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007
- [2] 建设部工程质量安全监督与行业发展司, 中国建筑标准设计研究所. 全国民用建筑工程设计技术措施 暖通空调·动力[M]. 北京: 中国计划出版社, 2003
- [3] Heiselberg P. Draught risk from cold vertical surfaces[J]. Building and Environment, 1993, 29(10): 297-301
- [4] 范存养, 李小平. 办公楼建筑窗际热环境的改善和节能[J]. 暖通空调, 1997, 27(2): 18-25