

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-269-07

# 两种高效间接蒸发冷却器性能对比与适用性研究

武苗苗<sup>1</sup> 黄翔<sup>1</sup> 陈梦<sup>1</sup> 屈名勋<sup>1</sup> 史东旭<sup>1</sup>

陈红卫<sup>2</sup> 王晓东<sup>2</sup> 苗会成<sup>2</sup>

(1. 西安工程大学 西安 710048; 2. 欧伏电气股份有限公司 廊坊 065201)

**【摘要】** 随着我国“双碳”目标的提出,给数据中心冷却领域带来了全新的挑战,间接蒸发冷却技术以其“绿色、高效、适用”等特点成为数据中心主要的冷却方式之一。通过实验测试得出板翅式、板式换热芯体的平均湿球效率分别为64.1%、60.4%,从节能角度出发板翅式换热芯体具有更好的应用前景,为间接蒸发冷却空调设备的开发提供了指导意义。同时计算并预测了在数据中心以新风自然冷却以及间接蒸发冷却为冷源应用于乌鲁木齐市、北京市、广州市的全年运行小时数,板翅式换热芯体为7902h、6306h、2992h,全年占比90.2%、72.0%、34.2%;板式换热芯体为7307h、5911h、2681h,全年占比83.4%、67.5%、30.6%。该研究为不同地区数据中心推广与应用间接蒸发冷却空调提供了参考依据。

**【关键词】** 数据中心; 间接蒸发冷却; 湿球效率; 板翅式换热芯体; 板式换热芯体; 运行小时数  
中图分类号 TU831 文献标识码 A

## Performance Comparison and Applicability Analysis of two Kinds of Efficient Indirect Evaporative Coolers

Wu Zhuomiao<sup>1</sup> Huang Xiang<sup>1</sup> Chen Meng<sup>1</sup> Qu Mingxun<sup>1</sup> Shi Dongxu<sup>1</sup>  
Chen Hongwei<sup>2</sup> Wang Xiaodong<sup>2</sup> Miao Huicheng<sup>2</sup>

(1. Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048; 2. Onoff Electric Co., Inc, Langfang, 065201)

**【Abstract】** With the proposal of "dual carbon" in China, it brings new challenges to the cooling field of data center. Indirect evaporative cooling technology has become one of the main cooling methods of data center due to its "green, efficient and applicable" characteristics. In this paper, the experimental results show that the average wet-bulb efficiency of plate fin and plate heat exchange core is 64.1% and 60.4% respectively. From the perspective of energy saving, the plate fin heat exchange core has a better application prospect and provides guidance for the development of indirect evaporative cooling air conditioning equipment. At the same time, the annual operating hours of fresh air natural cooling and indirect evaporative cooling applied in Urumqi, Beijing and Guangzhou were calculated and predicted. The plate-fin heat exchanger cores were 7902h, 6306h and 2992h, accounting for 90.2%, 72.0% and 34.2% in the whole year. Plate heat exchanger core is 7307h, 5911h, 2681h, accounting for 83.4%, 67.5%, 30.6% of the whole year. This study provides a reference for the promotion and application of indirect evaporative cooling air conditioning in data centers in different areas.

**【Keywords】** The data center; Indirect evaporative cooling; Wet bulb efficiency; Plate fin heat exchanger core; Plate heat

基金项目: 廊坊市科技计划项目(重大科技成果转化专项)“间接蒸发冷却空调机组规模化生产及产业化推广应用”  
(项目编号: 2021004004A)

作者简介: 武苗苗(1996.06-),男,在读硕士研究生, E-mail: 347119369@qq.com

通讯作者: 黄翔(1962.07-),男,教授, E-mail: huangx@xpu.edu.cn

收稿日期: 2021-09-06

exchanger core; Hours of operation

### 0 引言

近些年来,数据中心产业在中国新基建背景下蓬勃发展,用电量也在不断增加。数据中心的能耗主要由IT设备、制冷设备、供配电系统、照明等消耗电能的数据中心设备组成,值得一提的是制冷设备的能耗就占到总能耗的40%左右,数据中心蓬勃发展背后的变化对于机楼的冷却技术带来一定的挑战<sup>[1]</sup>。传统的集中式空调系统中压缩机所占能耗巨大,这即不满足数据中心低PUE的要求,也会严重影响“双碳”目标的实现。蒸发冷却空调由于是用水作为制冷剂,不会排放CFC,因此蒸发冷却空调是一种低碳、节能、经济、健康的环保空调技术<sup>[2,3]</sup>。从数据中心应用的角度出发,目前机房设计标准放宽、高回风温度设计、匹配的建筑气流设计、模块化集成技术和显著的节能优势,大力推动了间接蒸发冷却技术在数据中心的应用和发展<sup>[4,5]</sup>。然而现阶段蒸发冷却空调产品普遍面临着以下的技术障碍:冷却效率低、温降幅度有限、设备体积比较大以及受环境空气湿球温度的影响程度大。这些问题都与间接蒸发冷却器密切相关,因此对于不同的间接蒸发冷却器性能对比与适用性研究就显得尤为重要。

Vollebregt 和 DeJong 研究了用于降低温室内空气的温度和湿度的板式间接蒸发冷却器强化传热方法,研究表明,一次空气的温度和湿度均有降低;空气流速较低时,效果更好;在此条件下,潜热量是显热量的两倍多<sup>[6]</sup>。樊丽娟<sup>[7]</sup>等设计了一台换热管采用多孔陶瓷材料且换热管立式布置的间接蒸发冷却器,研究其温降和效率等性能。常江<sup>[8]</sup>等人对板管式间接蒸发冷却换热器,从芯体结构、材料的选择、芯体的换热计算和各功能部件的设计计算等方面进行详细设计分析。贾晨昱<sup>[9]</sup>等引出了间接蒸发冷却技术应用于数据中心时对应的3种节能运行模式并对运行模式的切换条件进行了计算分析。钟彩霞<sup>[10]</sup>采用夏季空调室外逐时气象参数对陕北地区榆林、延安、定边3个典型城市进行了分析,判别蒸发冷却技术在中等湿度地区的适应性。

本文主要从理论上分析了间接蒸发冷却传热机理与制取冷风的原理。通过在数据中心两种高效间接蒸发冷却器实验平台上的对比,得出各自在不同二/一次风量比下的换热效率,进而推算出各个

换热芯体在干模式、湿模式和混合模式切换条件。再结合我国典型气候特征的三个城市全年室外气象参数,得出两种不同结构形式间接蒸发冷却器各个模式下全年的小时数占比,进而分析其适用性。

## 1 间接蒸发冷却技术

### 1.1 间接蒸发冷却器传热分析

间接蒸发冷却器是间接蒸发冷却空调的核心部件<sup>[11]</sup>,它由两个不同的空气流道组成,一次通道内为被冷却的空气,二次空气流道内发生直接蒸发冷却过程降低二次空气温度,通过二/一次间壁传热再降低一次空气温度<sup>[12]</sup>。如图1所示,二次空气经蒸发冷却后的空气温度为 $t_2$ ,经过二次空气与水膜之间的传热热阻 $1/h_2$ 温度升至 $t_{w3}$ ;之后通过水膜的导热热阻 $\delta_2/\lambda_2$ 与换热器的导热热阻 $\delta_1/\lambda_1$ 温度升至 $t_{w1}$ ;最后再经过一次空气与换热器壁面之间的传热热阻 $1/h_1$ 温度达到 $t_1$ 。此时的 $t_1$ 即为一次通道侧被冷却后空气的出风温度<sup>[13,14]</sup>。

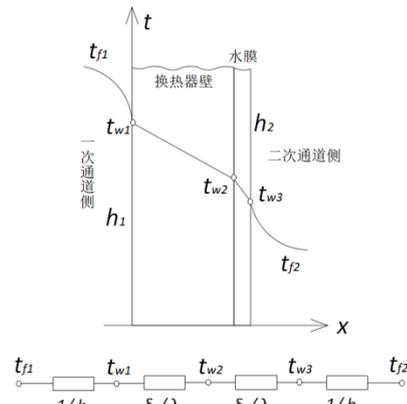


图1 水膜与器壁的传热

Fig.1 Heat transfer between water film and wall

### 1.2 间接蒸发冷却制取冷风过程

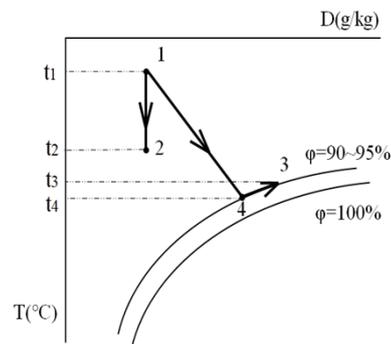


图2 间接蒸发冷却器焓湿图

**Fig.2 Enthalpy moisture diagram of indirect evaporative cooler**

图 2 为间接蒸发冷却空调空气处理焓湿图,干通道侧一次空气发生等湿冷却过程,湿通道侧二次空气发生等焓冷却加湿过程。二次空气由状态点 1 被等焓冷却到状态点 4,此过程近似为一个绝热过程。得到湿通道冷量的一次空气从状态点 1 被等湿冷却到状态点 2。同时,一次侧的热量就会传递到二次侧,此时状态点 4 的水会持续升温进而加速蒸发,最终到达状态点 3<sup>[15]</sup>。

### 1.3 评价指标

换热效率是衡量间接蒸发冷却器性能的重要指标之一,它可以间接的反应一次空气的温降程度,而干模式与湿模式的计算效率方法也是不同的<sup>[16]</sup>。如下式:

$$\text{干模式: } \eta_{\text{干}} = \frac{t_{g1,in} - t_{g1,out}}{t_{g1,in} - t_{g2,in}} \quad (1)$$

$$\text{湿模式: } \eta_{\text{湿}} = \frac{t_{g1,in} - t_{g1,out}}{t_{g1,in} - t_{s2,in}} \quad (2)$$

其中,  $\eta_{\text{干}}$ 、 $\eta_{\text{湿}}$  为间接蒸发冷却器干模式、湿模式下的换热效率, %;  $t_{g1,in}$ 、 $t_{g1,out}$  为一次空气进、出风干球温度, °C;  $t_{g2,in}$ 、 $t_{s2,in}$  为二次空气进风干球、湿球温度, °C。

## 2 两种换热芯体及其测试平台

### 2.1 两种换热芯体

本次研究对象为目前数据中心普遍使用的两种高效换热芯体,均为金属铝箔材料,分别是板翅式与板式换热芯体。如图 3 (a) 所示,板翅式间接蒸发冷却器由翅片、隔板和封条三部分组成。一次空气与二次空气分别在各自的流道中流动,它们的热交换方式是通过翅片及与翅片连成一体的隔板进行传热。从中我们可以看出板翅式间接蒸发冷却换热芯体结构非常紧凑,因此换热效率高。正是因为其结构紧凑,所以它的流道非常窄,容易积灰或产生水垢,这样不仅会增大传热热阻,换热效率降低;同时还会使空气流经流道时的阻力增大,从而使风机的消耗功率加大。

如图 3 (b) 所示,板式间接蒸发冷却换热芯体<sup>[17]</sup>的一次空气流经管内,二次空气在管外侧垂直

掠过板管。该换热芯体的优点有很多,主要有:布水均匀,易形成均匀水膜;该芯体与管式换热芯体一样,流道比较宽,可以很好的解决流道堵塞问题,从而使空气流动阻力较小。它的缺点主要是紧凑型不高,不如板翅式换热效率高。



(a) 板翅式



(b) 板式

图 3 两种间接蒸发冷却器实物图

Fig.3 Real drawings of two indirect evaporative coolers

### 2.2 测试平台



(a) 板翅式



(b) 板式

图 4 间接蒸发冷却空调测试平台实物图

Fig.4 Physical drawing of indirect evaporative cooling air conditioning test platform

图 4 (a) 为板翅式间接蒸发冷却空调测试平台实物图, 尺寸 (DWH) 为: 2000mm×800mm×1800mm, 风量 5000m<sup>3</sup>/h。图 4 (b) 为板式间接蒸发冷却空调测试平台, 尺寸 (DWH) 为: 6058mm×2825mm×3600mm, 风量 55000m<sup>3</sup>/h。两个实验平台均为用于数据中心的间接蒸发冷却空调机组。

### 2.3 测试仪器

为了减少实验误差, 本次实验在换热芯体一次空气侧进、出口以及二次空气侧进、出口 4 个位置分别布置多个测点, 每个位置取测点所测数据的平均值。分别测出各个位置的干球温度、相对湿度以及风速, 具体情况如表 1 所示。

表 1 测试内容及仪器

Table 1 Test contents and instruments

编号	测点位置	测试内容	测试仪器
1	一次空气进口	干球温	Testo174H 温湿度
2	一次空气出口	度、相对	自记仪、Testo405V1
3	二次空气进口	湿度、风	热敏式风速仪、
4	二次空气出口	速	多路数据记录仪

## 3 性能对比

### 3.1 温降、效率对比分析

本次实验干、湿模式条件下室外气象参数均一致, 即二次风进口干球温度为 25℃, 相对湿度为 39.3%, 湿球温度为 16℃; 用锅炉加热装置模拟数据中心高散热设备, 使得一次空气进风干球温度 (数据中心回风温度) 维持在 37.7℃。通过改变二次风进口风速 (1.2m/s~3.1m/s) 使二/一次风量比维持在 0.8~1.4 之间。

在干模式运行情况下, 由图 5 可知, 当二/一次风量比从 0.8 到 1.4 时, 板翅式与板式间接蒸发冷却器的一次风温降和效率都会有所上升。在当前测试环境下, 板翅式、板式间接蒸发冷却器温降在 7.9℃~8.8℃、7.5℃~8.3℃之间, 各自对应的换热效率在 62.2%~69.3%、59.1%~65.4%之间。如图 6 所示, 湿模式运行时板翅式、板式间接蒸发冷却器温降在 13.2℃~14.4℃、12.4℃~13.6℃之间, 各自对

应的湿球效率在 60.8%~66.4%、57.1%~62.7%之间, 湿模式下一次风温降相较于干模式更大, 板翅式平均温降大 5.6℃, 板式平均温降大 5.2℃。

由图 5、6 可知, 无论干模式或湿模式, 增加二次进风量会使换热效率增大。但过多的增大风量, 效率提升速率会变得很缓慢, 这样会造成风机能耗加大; 同时会导致二次通道侧风速增大, 不利于壁面水膜的均匀附着, 同时空气与水膜接触的时间也会减少, 使蒸发冷却效率下降。因此合理的二/一次风量比也是非常重要的。同时, 板翅式换热效果明显优于板式。

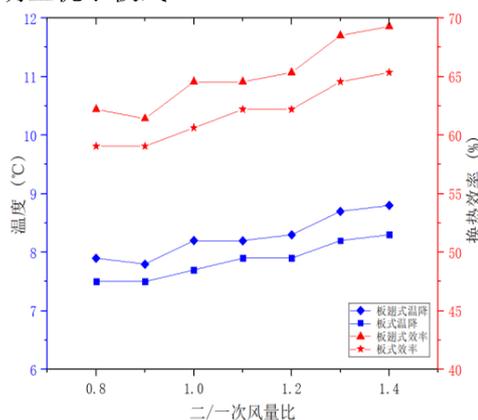


图 5 干模式下温降、效率对比

Fig.5 Temperature drop and efficiency comparison in dry mode

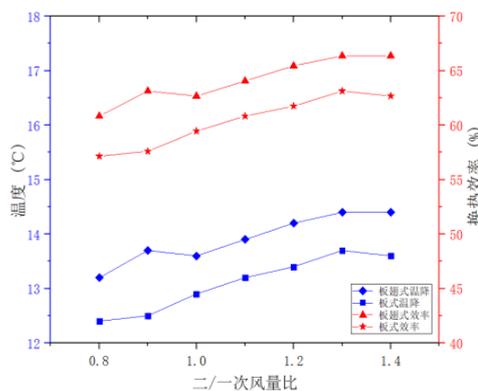


图 6 湿模式下温降、效率对比

Fig.6 Temperature drop and efficiency comparison in wet mode

### 3.2 不同模式出风温度对比分析

如图 7 所示, 在干模式下板翅式间接蒸发冷却器一次风出风温度在 28.9℃~29.8℃范围内, 湿模式下一次风出风温度在 23.3℃~24.5℃范围内。板式间接蒸发冷却器一次风出风温度如图 8 所示, 干

模式下一次风出风温度在 29.4℃~30.2℃范围内, 湿模式下一次风出风温度在 24.1℃~25.3℃范围内。板翅式一次风出风温度明显低于板式。

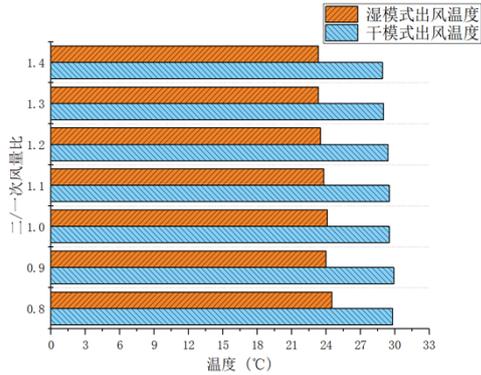


图 7 板翅式出风温度

Fig.7 Plate-fin outlet temperature

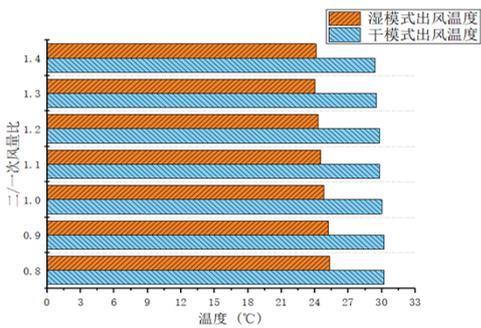


图 8 板式出风温度

Fig.8 Plate outlet air temperature

根据《数据中心设计规范》(GB 50174-2017)和《数据中心蒸发冷却空调技术规范》(T/DZJN 10-2020) [18,19]中规定的数据中心机房送风温度在 18℃~27℃之间, 回风温度在 35℃~38℃之间。本次测试的室外环境干球温度为 25℃, 相对湿度为 39.3%, 湿球温度 16℃。从图 7、8 中可以看出此状态下两种换热芯体湿模式送风温度均在 23.3℃

~25.3℃范围内, 是符合数据中心送风要求的; 而此时干模式送风温度在 28.9℃~30.2℃范围内, 不符合数据中心送风要求。因此接下来对两种不同结构的间接蒸发冷却器在不同室外空气状态参数下各个模式的适用小时数进行划分[20]。

## 4 适用性分析

### 4.1 温度区间划分

由于在数据中心全年运行中, 间接蒸发冷却空调二/一次风量比会根据室外环境的变化而进行调整, 芯体换热效率也会随之波动[21]。为了充分保证数据中心全年稳定运行, 板翅式间接蒸发冷却器取最低效率值 62.2% (干模式)、60.8% (湿模式); 板式间接蒸发冷却器取最低效率值 59.1% (干模式)、57.1% (湿模式)。数据中心送风温度取 24℃, 目前国内大部分机房送回风温差选取 12℃, 故回风温度确定为 36℃。根据式 (1)、(2) 计算得到全年运行模式室外二次空气的切换条件[22]:

$$\text{干模式: } t_{g2,in} \leq t_{g1,in} - \frac{t_{g1,in} - t_{g1,out}}{\eta_{干}}$$

$$\text{湿模式: } t_{g2,in} \geq t_{g1,in} - \frac{t_{g1,in} - t_{g1,out}}{\eta_{干}}$$

$$t_{s2,in} \leq t_{g1,in} - \frac{t_{g1,in} - t_{g1,out}}{\eta_{湿}}$$

$$\text{混合模式: } t_{s2,in} \geq t_{g1,in} - \frac{t_{g1,in} - t_{g1,out}}{\eta_{湿}}$$

注: 以下结果保留一位小数。

不同间接蒸发冷却器对应三种冷却模式下的温度区间划分不同, 三种冷却模式的设备运行状态也不同, 代入上述已知数据, 得到的结果如表 2 所示。

表 2 运行模式的温度划分

Table 2 Operating mode temperature division

运行模式	板翅式	板式	设备运行状态
干模式	$t_{g2,in} \leq 16.7^\circ\text{C}$	$t_{g2,in} \leq 15.7^\circ\text{C}$	风机开启、水泵与压缩机关闭
湿模式	$t_{g2,in} \geq 16.7^\circ\text{C}$ 、 $t_{s2,in} \leq 16.3^\circ\text{C}$	$t_{g2,in} \geq 15.7^\circ\text{C}$ 、 $t_{s2,in} \leq 15.0^\circ\text{C}$	风机与水泵开启、压缩机关闭
混合模式	$t_{s2,in} \geq 16.3^\circ\text{C}$	$t_{s2,in} \geq 15.0^\circ\text{C}$	风机、水泵、压缩机均开启

### 4.2 典型城市选取

蒸发冷却空调作为气象空调[23,24], 其性能参数

往往受室外空气的干球温度和相对湿度的影响较为严重, 因此, 室外气象参数对间接蒸发冷却空调

应用于数据中心的适用性有着重要的影响<sup>[25]</sup>。本次实验对象选取我国干燥地区<sup>[26]</sup>（乌鲁木齐市）、中

湿度地区（北京市）以及高湿度地区（广州市）三个城市为代表，如表 3 所示。

表 3 三个典型城市的气候特征

Table 3 Climatic characteristics of three typical cities

城市	夏季空调设计湿球温度（℃）	气候特征
乌鲁木齐	18	干燥地区（ $t_s \leq 23^\circ\text{C}$ ）
北京	27.7	中湿度地区（ $23^\circ\text{C} \leq t_s \leq 28^\circ\text{C}$ ）
广州	28.8	高湿度地区（ $t_s \geq 28^\circ\text{C}$ ）

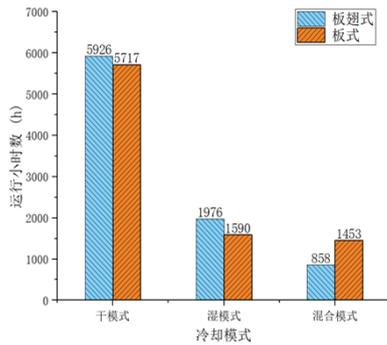
4.3 全国典型城市适用性分析

利用 DeST 模拟软件，输出模拟结果报表，得到上述三个城市全年 8760 小时的逐时室外气象参数，依据气象数据<sup>[27]</sup>并结合表 2 各个运行模式的切换条件，得到这三个城市全年各冷却模式的运行小时数，如图 9 所示。

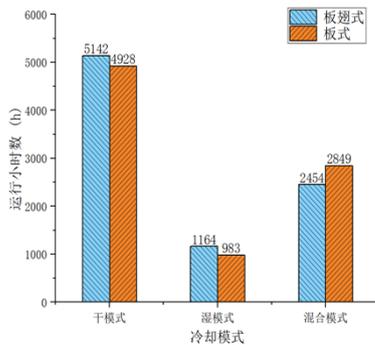
图 9 不同城市各个模式运行小时数

Fig.9 Operating hours of different modes in different cities

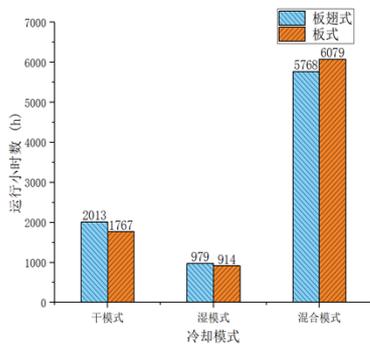
由图 9 可知，由于各个城市全年室外空气状态不同，全新风自然冷却（干模式）、间接蒸发冷却（湿模式）、机械制冷补冷（混合模式）各自占比也是不同的。板翅式、板式换热芯体的三种模式运行小时数在乌鲁木齐市分别为 5926h、1976h、858h；5717h、1590h、1453h。在北京市运行小时数分别为 5142h、1164h、2454h；4928h、983h、2849h。在广州市运行小时数分别为 2013h、979h、5768h；1767h、914h、6079h。同时，无论在那个地区，板翅式间接蒸发冷却器的干模式与湿模式运行小时数均大于板式；混合模式运行小时数均小于板式。



(a) 乌鲁木齐



(b) 北京



(c) 广州

5 结论

(1) 通过实验对比，板翅式、板式换热芯体的平均湿球效率分别为 64.1%、60.4%，且在相同二/一次风量比条件下，无论是干模式还是湿模式，板翅式换热芯体的换热效率总是大于板式换热芯体，与理论分析的结果一致，因此板翅式间接蒸发冷却器具有良好的节能效果与推广应用价值。同时板翅式、板式换热芯体的湿模式比干模式平均温降分别大 5.6℃、5.2℃，这充分体现了间接蒸发冷却技术的优势。

(2) 在三个典型城市各个模式运行小时数中，无论板翅式或者板式换热芯体，乌鲁木齐市（干燥地区）的干模式占比最大，混合模式占比最小；北京市（中湿度地区）的干模式占比最大，湿模式占比最小；广州市（高湿度地区）的混合模式占比最大，湿模式占比最小。造成此种现象的原因为各个城市的全年室外气象参数不同，干空气能的下降会直接影响间接蒸发冷却空调的适用性，随之系统所需要的机械制冷补冷量也会增大。

(3) 当数据中心采用新风自然冷却以及间接蒸发冷却为冷源时,板翅式换热芯体在乌鲁木齐、北京、广州的全年运行小时数为7902h、6306h、2992h,全年占比90.2%、72.0%,34.2%;而板式换热芯体在乌鲁木齐、北京、广州的全年运行小时数为7307h、5911h、2681h,全年占比83.4%、67.5%,30.6%。故该研究为不同地区数据中心推广与应用间接蒸发冷却空调提供了参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 钟志鲲.新基建形势下数据中心冷却的冷思考[C].2020年中国通信能源会议论文集,2020:170-173,180.
- [2] 黄翔.蒸发冷却空调原理与设备[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [3] 黄翔.蒸发冷却空调理论与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [4] 薛志强,高书辰,吴刚,等.绿色数据中心间接蒸发冷却应用设计[J].信息技术与标准化,2018,(10):65-69.
- [5] 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,2004,(2):56-60.
- [6] H J M Vollebregt, T de Jong. Indirect evaporative cooler with condensation of primary air flow[J]. ASHRAE Trans, 1994,100:354-359.
- [7] 樊丽娟,黄翔.多孔陶瓷立管式间接蒸发冷却器的设计与性能分析[J].流体机械,2019,47(7):85-88.
- [8] 常江,黄翔,杨立然,等.板管式间接蒸发冷却换热器的设计分析[J].节能,2020,39(2):88-90.
- [9] 贾晨昱,黄翔,田振武,等.间接蒸发冷却技术在国内外数据中心的应用研究[J].制冷与空调,2020,20(1):61-67.
- [10] 钟彩霞,折建利,黄翔.蒸发冷却技术在中等湿度地区的适用性分析[C].第七届全国建筑环境与能源应用技术交流大会文集,2017:157-160.
- [11] 崔鑫,张思聪,闫伟超,等.蒸发冷却预冷式复合空调系统在热带潮湿环境下的性能[J].西安工程大学学报,2019,33(4):375-379.
- [12] 宋祥龙,黄翔.间接蒸发冷却技术在空调系统中的节能分析[J].棉纺织技术,2021,49(3):6-10.
- [13] 杨世铭.传热学[M].北京:人民教育出版社,1980.
- [14] [日]尾花英朗.热交换器设计手册(上册)[M].徐忠权(译).北京:石油工业出版社,1981.
- [15] 刘海潮,邵双全,张海南,等.间接蒸发冷却技术研究现状[J].制冷与空调,2019,19(8):14-22.
- [16] 周斌,袁建新,齐典维.间接蒸发冷却效率浅析[J].暖通空调,2019,49(11):73-77.
- [17] 任承钦,王华辉,张龙爱,等.板式间接蒸发冷却器热工特性的实验研究[J].热科学与技术,2007,6(4):331-335.
- [18] GB 50174-2017,数据中心设计规范[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [19] T/DZJN 10-2020,数据中心蒸发冷却空调技术规范[S].北京:中国计划出版社,2020.
- [20] 陈丽媛,黄翔.蒸发冷却技术在“一带一路”沿线的国家的适用性[J].西安工程大学学报,2016,30(5):596-602.
- [21] 肖新文.间接蒸发冷却空调机组应用于数据中心的节能分析[J].暖通空调,2019,49(3):67-71.
- [22] 常健佩,黄翔,贾晨昱,等.立管式间接蒸发冷却器的设计与适用性研究[J].流体机械,2020,48(12):68-73.
- [23] 薛运,黄翔,刘凯磊.气象条件对某新型蒸发冷却空调的影响[J].西安工程大学学报,2016,30(2):177-182,193.
- [24] Sun X, Zhang Q, Medina M A, et al. Performance of a Free-air Cooling System for Telecommunications Base Stations Using Phase Change Materials (PCMs): In-situ Tests[J]. Applied Energy, 2015,147:325-334.
- [25] 田振武,黄翔,郭志成,等.新型蒸发冷却空调系统在数据中心的运行测试分析[J].制冷与空调,2020,34(3):297-302.
- [26] 金洋帆,黄翔,吴磊,等.干燥地区蒸发冷却空调系统运行效果及能耗分析[J].制冷与空调,2021,35(1):64-69.
- [27] 中国气象局气象信息中心气象资料室.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.