

文章编号: 1671-6612 (2021) 03-401-06

蒸发冷却技术在轨道交通领域的应用形式探讨

寇凡¹ 黄翔¹ 罗绒¹ 马健² 乔小博³

(1. 西安工程大学 西安 710600; 2. 重庆福琛兴科技有限公司 重庆 400020;
3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司 西安 710048)

【摘要】 介绍了蒸发冷却空调技术在轨道交通领域的三种应用形式, 并通过测试数据论述该技术在解决目前国内地铁工程中存在的地铁高架站候车区环境舒适性差、冷却塔布置困难等问题中发挥的重要作用。

【关键词】 轨道交通; 高架站; 蒸发冷却; 蒸发冷凝; 应用形式

中图分类号 TU831.5 文献标识码 A

Discussion on the Application Form of Evaporative Cooling Technology in Rail Transit

Kou Fan¹ Huang Xiang¹ Luo Rong¹ Ma Jian² Qiao Xiaobo³

(1. Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710600; 2. Chongqing Fu Chenxing Technology Co., Ltd, Chongqing, 400020;
3. China Railway First Survey And Design Institute Group Co., Ltd, Xi'an, 710048)

【Abstract】 This paper introduces three application forms of evaporative cooling air conditioning technology in the field of rail transit, and discusses the important role of this technology in solving the problems of waiting area environment comfort and cooling tower layout difficulty existing in domestic metro engineering through the test data.

【Keywords】 rail transit; Elevated station; Evaporative cooling; Evaporation condensation; forms of application

基金项目: 兰州地铁 1 号线直接蒸发冷却通风降温系统运行实测研究 (编号: 19-53-01)

作者简介: 寇凡 (1996-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 1227627172@qq.com

通讯作者: 黄翔 (1962-), 男, 教授, 研究方向为蒸发冷却技术与建筑可再生能源理论与应用, E-mail:

huangx@xpu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-11

0 引言

近年来,我国城市轨道交通发展速度不断加快,已成为城市轨道交通建设里程最长、建设速度最快的国家。而在能源危机日益严峻的今天,轨道交通也在向智能、绿色的方向发展。蒸发冷却作为一种低碳、节能、经济、健康的环保空调技术^[1],在轨道交通行业节能进程中扮演着重要的角色,也衍生出不同的形式以适应不同场合的需求。

1 单元式蒸发冷却空调

随着地铁建设的蓬勃发展,高架线路在地铁工程中也越来越多,然而地铁高架车站公共区基于降

低造价和节省能源的目的考虑大多采用自然通风的方式。但是乘客候车区属于半开放的建筑形式,夏季高峰时段人流密集,采用自然通风方式,其环境舒适性相对较差^[2]。为缓解高架站台的恶劣候车环境,各站台均采取了一定的通风降温措施,表 1 列举了目前高架站台常用的几种降温方式。

表 1 高架站台几种常见降温方式的优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of several common cooling methods in elevated platform

| 方式 | 优点 | 不足 |
|----|----------|-----------|
| 风扇 | 投资小, 耗能小 | 无法降低空气温度 |
| 喷雾 | 投资小, 耗能小 | 影响安保监控效果; |

| 续表 1 高架站台几种常见降温方式的优缺点对比 | | |
|-------------------------|------------------------|-----------------------|
| 方式 | 优点 | 不足 |
| 空调候车室 | 体感舒适 | 能耗高, 空间狭小、密闭, 易引发群体感染 |
| 蒸发式冷气冷 | 移动便捷、初投资和运行费用低、满足“过渡性舒 | “气象”空调, 降温幅度有限 |

造成地面湿滑, 存在安全隐患

气机 适”

在众多高架站台降温设备中, 单元式蒸发冷却空调以其移动灵活、初投资及运行费用低的特点成为越来越多地铁高架站通风降温以及地下车站消除局部热点的首选方式。图 1 为单元式蒸发冷却空调在地铁车站的应用形式, 一般贴壁放置, 设备最大温降能够达到近 12℃, 出风射程最大能达到 10 米以上, 给来往人群带来阵阵清凉。



图 1 单元式蒸发冷却空调在地铁站的应用

Fig.1 Application of unit evaporative cooling air conditioning in subway station

随着单元式蒸发冷却空调在地铁站的推广应用, 其形式也逐渐向美观性、实用性靠拢, 图 2 为广告牌式蒸发冷却空调器在天津地铁高架站台的应用。机组风量 9000m³/h, 球形风口四面送风, 机

身上设置有广告位, 可设置导向牌或宣传标语, 将蒸发式冷气机的实用性与媒体宣传相结合, 达到一机多用的效果。表 2 为广告牌式蒸发冷却空调的设备参数表。

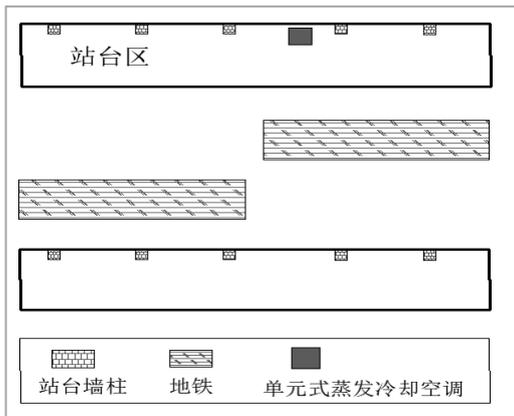


图 2 广告牌式蒸发冷却空调在天津地铁华山里高架站的应用

Fig.2 Application of billboard type evaporative cooling air conditioning in Huashanli Elevated Station of Tianjin Metro

表 2 广告牌式蒸发冷却空调设备参数

Table 2 Parameters of billboard type evaporative cooling air conditioning equipment

| 电源电压/频率 (V/Hz) | 最大输入 功率 (kW) | 风量 (m ³ /h) | 出风口直径 (mm) | 单面进风口尺 寸 (mm) | 填料尺寸 (mm) | 风机 类型 | 水泵 (2 台) |
|-------------------|-----------------|---------------------------|---------------|------------------|--------------|----------|-------------|
|-------------------|-----------------|---------------------------|---------------|------------------|--------------|----------|-------------|

| | | | | | | | |
|--------|-----|------|-----|---------|-------------|------|------------|
| 200/50 | 1.1 | 9000 | 180 | 900×300 | 650×550×100 | 变频轴流 | BPS25-18-3 |
|--------|-----|------|-----|---------|-------------|------|------------|

在大暑节气对该单元式蒸发冷却空调在极端工况的运行效果进行测试如图 3 所示。

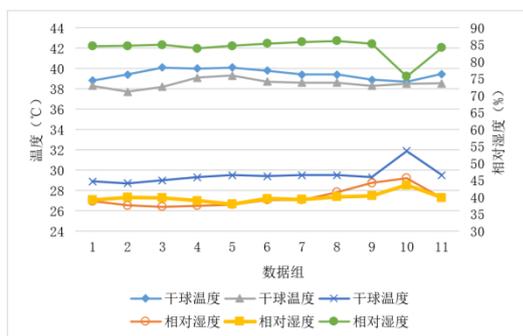


图 3 华山里高架站广告牌式蒸发冷却空调降温性能

Fig.3 Cooling performance of billboard type evaporative cooling air conditioner in Huashanli Elevated Station

站台环境平均干球温度为 39.46 °C, 设备出风

口平均干球温度为 29.5 °C, 平均温降可达 9 °C, 蒸发冷却效率为 80%, 较好的满足乘客候车-乘车之间的“过渡性舒适”要求。

测试期间站台环境的相对湿度平均为 39.87, 由于在填料段空气与水发生等焓加湿降温过程, 设备出风口处平均相对湿度 84.2%, 设备送入环境中与周围气体混合后, 送风区域内的相对湿度为 66.7% < 70%, 根据《地铁设计规范》(GB 50157-2013), 满足人员的舒适性要求。

另外使用红外热成像仪对站台顶棚及设备表面温度分布情况进行热成像分析如图 4 所示, 华山里高架站玻璃顶棚最高温度接近 70 °C, 尽管玻璃可折射大部分太阳辐射热, 但人员活动区仍然热负荷显著。对单元式蒸发冷却空调整体进行红外线热成像分析显示, 设备出风均匀, 无局部热点存在。

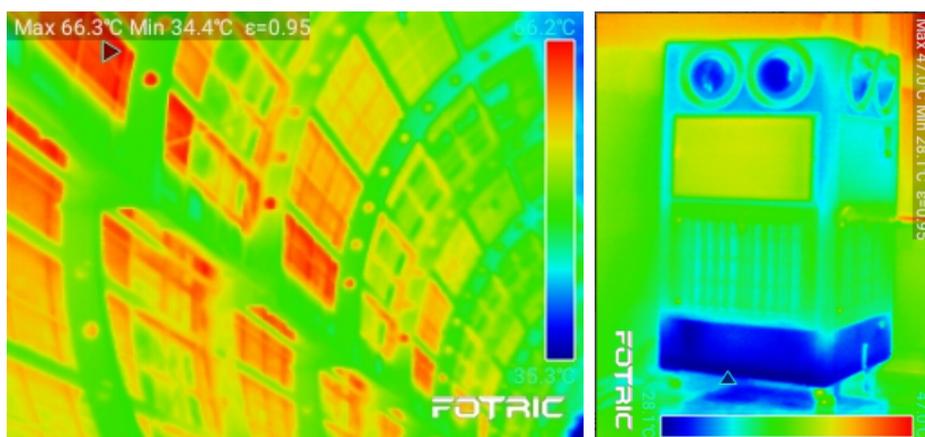


图 4 顶棚及单元式蒸发冷却空调温度分布情况

Fig.4 Temperature distribution of ceiling and unit evaporative cooling air conditioning

由于蒸发冷却空调降温效果与室外的气象参数的变化密切相关, 为保证机组在高温高湿工况下的降温效果^[3], 西安工程大学与重庆某公司联合开发单元式蒸发冷却设备与机械制冷相结合的制冷系统, 并搭建试验台进行测试, 试验台为风量 9000m³/h 的单元式蒸发冷却空调配备一台风冷冷水机组, 单元式蒸发冷却空调填料内侧设置表冷器, 冷水机组制取的冷冻水分两路, 一路直接对填料进行喷淋, 另一路供给表冷器, 冷水机组与蒸发冷却空调之间设置保温平衡水箱。图 5 为试验台实物图。

对该系统在湿帘运行模式和表冷器运行模式下的性能进行测试结果如表 3 所示。



图 5 试验台实物图

Fig.5 Physical picture of the test rig

表 3 不同模式下的运行参数分析

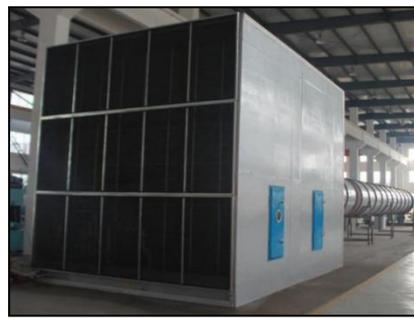
Table 3 Analysis of operation parameters in different modes

| 模式 | 干球温 度℃ | 湿球温度 ℃ | 相对湿 度% | 露点温 度℃ |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 湿帘供冷冻 进风口 | 25.0 | 19.4 | 60 | 16.7 |
| 水运行 出风口 | 16.1 | 12.9 | 70 | 10.6 |
| 单表冷器运 进风口 | 25.3 | 19.9 | 62 | 17.5 |
| 行 出风口 | 18.1 | 13.2 | 65 | 10.5 |

根据实测数据,在重庆这样的高湿度地区,在进风干湿球温差仅 5℃左右时,采用湿帘喷淋冷冻



(a) 乌鲁木齐 1 号线



(b) 兰州地铁 1 号线

图 6 直接蒸发冷却空调机组在地铁站的应用

Fig.6 Application of direct evaporative cooling air conditioning unit in subway station

根据《地铁设计规范》(GB 50157-2013),地铁通风与空调系统的确定应符合规定:在夏季当地最热月的平均温度超过 25℃,且地铁高峰时间内每小时的行车对数和列车车辆数的乘积小于 180 时,应采用空调系统;当夏季最热月的平均温度超过 25℃,全年平均温度超过 15℃,且地铁高峰时间内每小时的行车对数和每列车车辆数的乘积小于 120 时,应采用空调系统^[5]。以兰州为例,通过查阅《中国建筑热环境分析专用气象数据集》对兰州市的全年气象参数进行整理,其最热月平均温度及日平均温度如图 7、图 8 所示。

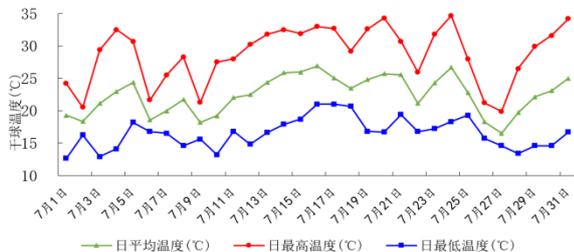


图 7 兰州市最热月干球温度变化图

Fig.7 Variation of dry bulb temperature in the hottest

水的运行模式,机组的温降为 9℃,比单表冷器运行的温降略高,原因是表冷模式被处理空气与冷冻水之间是间接换热,湿帘喷淋冷冻水模式被处理空气与冷冻水直接接触,并且发生蒸发冷却,降温幅度更大。

2 直接蒸发冷却空气处理机组

在地下车站里,蒸发冷却技术也发挥着重要的作用。新疆、甘肃等干燥地区,空气干湿球温差较大,干空气能富足,直接蒸发冷却有着得天独厚的条件。在兰州地铁 1 号线、乌鲁木齐 1 号线所采用的制冷设备就是直接蒸发冷却空气处理机组,如图 6 所示。

month in Lanzhou city

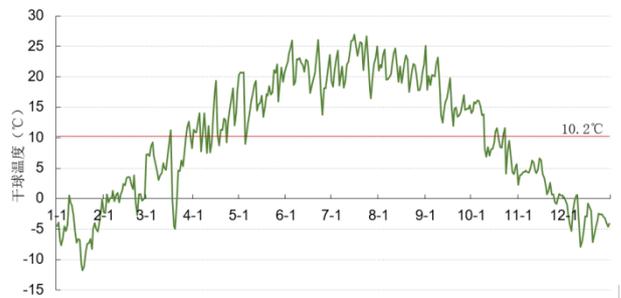


图 8 兰州市日平均温度统计图

Fig.8 Statistical chart of daily mean temperature in

Lanzhou

由上图可知,兰州最热月平均温度 22.4℃ (< 25℃),全年平均温度为 10.2℃ (< 15℃),1 号线采用 A 型车 6 辆编组,列车运行对数 30 对/小时,地铁高峰时间内每小时的行车对数和每列车车辆数的乘积数为 180。根据规范要求,不具备设置空调的标准。应贯彻国家能源政策,践行运营节能原则,并宜利用自然冷源。

由于兰州特有的气候条件资源,可直接利用丰富的干空气能,采用蒸发冷却技术对室外新风降温加湿达到人员的热舒适要求,解决地下空间的通风降温问题。兰州地铁 1 号线于 2019 年 6 月正式通车,这也成为了国内第一条正式通车的全线都采用直接蒸发冷却系统降温的地铁线路。该直接蒸发冷却系统,采用全新风直流的方式,通过直接蒸发冷却对空气进行降温后,再由风管送入站厅内。兰州大学站安装 2 台 108000m³/h 风量的直接蒸发冷却空调机组,在室外空气干球温度为 30.9℃时,机组出风温度最低可达 15.6℃,温降可达 15℃,蒸发冷却效率 96.3%,站厅环境温度可达 23℃,降温效果显著。

蒸发冷却空调系统在西北等干燥地区还具有以下优势:

- (1) 直接蒸发冷却空调放置在土建风道内,减少了机房的占地面积,节约了土建成本投入。
- (2) 直接蒸发冷却空调的填料能够湿式过滤,在西北风沙较大区域,可起到净化除尘的功效,有效改善地铁环境的空气品质。
- (3) 直接蒸发冷却空调系统初投资虽与传统机械制冷相比差别不大,但运行维护费用相对较低,具有较好的经济效益^[6,7]。

3 蒸发冷凝冷水/空调机组

一般地铁车站多采用冷却塔+水冷冷水机组的方案,存在选址难、征地难、布置难等问题,外加越来越重视节能环保等相关问题,基于对地铁空调节约空间、节能、节水等因素的考虑,很多省市的地铁开始将目光聚焦在蒸发式冷凝技术上,希望通过这项技术解决地铁工程中的通风空调系统存在的问题^[8,9]。

蒸发冷凝技术,利用蒸发冷却原理对冷凝器进行散热,将冷凝器与冷却塔合二为一,省去了庞大复杂的冷却水管路,解决了冷却塔的占地问题。循环水量为传统方式的 50%~70%,整体装配式结构使得安装维护十分方便,可安装在地下室,有效消除噪声污染,避免室外景观影响^[10]。

在广州地铁 2 号线三元里站、厦门地铁 1 号线、青岛地铁 4 号线全线、西安地铁 3 号线鱼化寨站、杭州地铁 4 号线联庄站、武汉地铁 6 号线江汉路站、重庆地铁 6 号线国博中心站等地铁站都应用了蒸

发冷凝冷水机组。在广州地铁 2 号线三元里站,安装了 1 台冷量为 230kW 的板管型蒸发冷凝式螺杆冷水机组,如图 9 所示,经过广州建设工程质量安全检测中心有限公司检测,当提供相等冷量的前提下,板管蒸发冷却式空调冷源系统所需能耗为常规风冷空调冷源系统所需能耗的 47.2%,节能量为后者能耗的 52.8%,节能效果十分显著。



图 9 广州地铁 2 号线三元里站板管型蒸发冷凝冷水机组
Fig.9 Plate-tube evaporative condensing water chiller at Sanyuanli Station of Guangzhou Metro Line 2

北京地铁阜通站采用隧道嵌装式直膨蒸发冷凝空调系统,蒸发式冷凝器采用多页对开的形式设置在排风道内,在非空调季节及火灾工况可旋转关闭,满足不同工况的运行需求,冷凝器管外侧的喷淋水与风道内的低温排风进行换热温度降低,带走管内制冷剂的凝结热,实现制冷剂蒸气的冷凝^[11,12]。

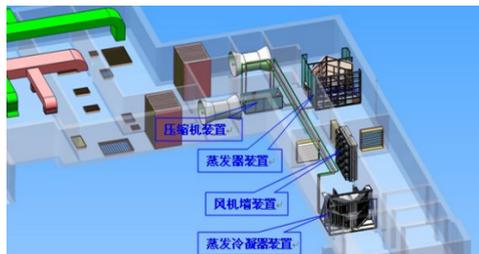


图 10 隧道嵌装式蒸发冷凝机组布置示意图
Fig.10 A schematic diagram of the layout of the embedded evaporative condensing unit in the tunnel



图 11 多页对开蒸发式冷凝器

Fig.11 Folio - off evaporative condenser

4 结论

(1) 在地铁高架站候车区域采用单元式直接蒸发冷却空调具有耗能低、绿色环保的特点,可以为乘客营造一个较为舒适的乘车环境。高温高湿地区可辅助机械制冷方式保证机组降温效果。

(2) 蒸发冷却空调机组结合地铁土建风道设置,在干空气能富足的地区降温效果显著,在我国西北地区具有良好的节能效果和推广应用价值。

(3) 在地下车站利用蒸发冷凝冷水机组代替传统水冷冷水机组加冷却塔的制冷方式在技术上是可行的,其解决了地铁工程室外冷却塔布置协调困难的工程难题。因地制宜的在轨道交通行业发展应用蒸发冷却技术,对建设绿色轨道交通具有重要意义。

参考文献:

- [1] 黄翔. 蒸发冷却空调原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社,2019.
- [2] 乔小博. 直接蒸发冷却通风降温在地铁高架车站的应用[J].铁道标准设计,2011,(9):116-119.
- [3] 杨立然,黄翔,贾曼,郭志成. 蒸发冷却与机械制冷协同耦合空调机组探讨[J].制冷与空调,2018,32(1):7-13.
- [4] GB 50157-2013,地铁设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2014.
- [5] 盛晓文,黄翔,屈元. 直接蒸发冷却通风降温系统在兰州地铁的应用分析[J].制冷与空调,2014,14(4):85-88.
- [6] 高源基,黄翔,苏晓青. 直接蒸发冷却通风空调系统方案在兰州地铁的实验研究[J]. 制冷与空调,2016,30(3):340-344.
- [7] 陈洁. 蒸发式冷凝空调系统在地铁中的应用分析[J]. 建筑热能通风空调,2020,39(7):57-59.
- [8] 苏晓青,黄翔,宋祥龙,等. 蒸发冷凝式冷水机组应用于地铁空调系统中的可行性分析[J]. 制冷与空调,2016,30(2):158-162.
- [9] 郭谊婵. 蒸发式冷凝技术在地铁车站空调系统中的应用研究[J].黑龙江科技信息,2017(17):82-83.
- [10] 苏晓青,黄翔,李鑫. 蒸发冷却技术在地铁环控系统中研究现状及应用形式探讨[J]. 制冷与空调,2015,29(6):616-620.
- [11] 徐东. 北京地铁 14 号线技术创新综述[J]. 都市快轨交通,2019,32(2):19-28.
- [12] 周群,高吉祥,罗佳. 直膨式蒸发冷凝空调系统应用于南方地铁车站的可行性分析[J]. 建筑技术开发,2017,44(1):151-152.
- [12] 晋瑞芳,付海明,徐芳,等. 同心套管式相变蓄热装置凝固过程的数值模拟[J]. 建筑热能通风空调,2009,28(1):15-17.
- [13] LONG J Y, ZHU D S. Numerical and experimental study on heat pump water heater with PCM for thermal storage[J]. Energy & Buildings, 2008,40(4):666-672.

(上接第 346 页)

- [10] 董建锴,姜益强,姚杨,等. 空气源热泵相变蓄能除霜系统实验研究[J].太阳能学报,2010,31(4):428-431.
- [11] 朱颖秋,张寅平. 内通传热流体的圆管外相变材料的无量纲储热准则的研究[J]. 太阳能学报,1999,20(3):244-250.