

文章编号: 1671-6612 (2021) 03-461-06

# 蒸发冷却(凝)技术在国内外地铁站的应用研究

吴磊<sup>1</sup> 黄翔<sup>1</sup> 常若新<sup>1</sup> 寇凡<sup>1</sup> 乔小博<sup>2</sup>

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司城建院 西安 710048)

**【摘要】** 根据目前国内轨道交通运营入不敷出的实际情况,介绍了节能环保的蒸发冷却(凝)技术以及蒸发冷却(凝)空调的应用形式,并对国内外不同地铁站使用的蒸发冷却(凝)空调系统实际工程进行了详细介绍,对不同地区地铁站应采取怎样的空调系统才能更好地节能进行了分析说明。总结出最大限度的利用自然冷源,在不同地区因地制宜的采用不同形式的蒸发冷却空调系统,才能达到节能的目的,降低地铁站运营成本,这也将是未来地铁站节能的发展方向。

**【关键词】** 轨道交通;直接蒸发冷却;间接蒸发冷却;干通道;湿通道;蒸发冷凝

中图分类号 TU831.6 文献标识码 A

## Application Research of Evaporative Cooling(Condensation) Technology in Metro Stations at Home and Abroad

Wu Lei<sup>1</sup> Huang Xiang<sup>1</sup> Chang Ruoxin<sup>1</sup> Kou Fan<sup>1</sup> Qiao Xiaobo<sup>2</sup>

(1.School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048;

2.Urban Construction Institute, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Xi'an, 710048)

**【Abstract】** According to the actual situation of domestic rail transit operation, this paper introduces the energy-saving and environmental protection evaporative cooling technology and the application form of evaporative cooling air-conditioning, and introduces in detail the actual engineering of evaporative cooling air-conditioning system used in different subway stations at home and abroad, and analyzes and explains what kind of air-conditioning system should be adopted for different subway stations in order to better save energy. In order to achieve the purpose of energy saving and reduce the operation cost of subway station, it is concluded that the maximum use of natural cold source and the adoption of different forms of evaporative cooling air conditioning system in different regions according to local conditions can achieve the purpose of energy saving and reduce the operation cost of subway station, which will also be the development direction of energy saving of subway station in the future.

**【Keywords】** Rail transit; Direct evaporative cooling; Indirect evaporative cooling; Trunk passage; Wet passage; Evaporation condensation

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: 吴磊(1994.6-), 男, 在读研究生, E-mail: 635944561@qq.com

通讯作者: 黄翔(1962.7-), 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: 2020-09-29

## 0 引言

近年来,我国的各大城市正在大力建设地铁,随着城市地铁的飞速发展,高能耗显得尤为突出。

许多资料表明,大多数的地铁站能耗分布如图 1 所示,空调系统的能耗占到 40%。巨大的运行能耗,给地铁运营公司带来巨大压力,而通风空调系统的

能耗已经达到地铁站总能耗的 40% 左右; 地铁站空调系统只要减少耗能 30%, 就能减少整个地铁系统 12% 的运行成本<sup>[1]</sup>。在列车牵引设备无法升级的情况下, 地铁站想要减少碳排放、降低耗电量和运行费用, 必须选择更加节能的空调系统。在地铁非牵引的能耗中, 通风空调设备的能耗占据了绝大部分的比例。据不完全统计 (31 个城市), 2019 年, 全国平均运营收支比为 72.7%, 其中, 运营收支比超过 100% 的城市仅有杭州、深圳、北京、青岛 4 市, 均为资源经营收入高的城市; 其余城市运营收支比均低于 100%。整体来看, 城轨交通运营成本入不敷出依然是普遍状况, 需要政府补贴。整体来看, 城市轨道交通运营普遍存在着入不敷出的现象<sup>[2]</sup>。因此, 地铁站节能势在必行也刻不容缓, 空调系统的节能是地铁站节能的重中之重, 也是地铁站降低能耗的重要途径。可以说空调系统的能耗决定了地铁站是否可以扭亏转盈。

盛晓文<sup>[3]</sup>、李鑫<sup>[4]</sup>通过对兰州地区的气象参数进行分析, 从理论上分析了在兰州地区地铁站采用直接蒸发冷却空调的可行性, 并对在应用过程中的关键问题进行了剖析。黄翔<sup>[5]</sup>、高源基<sup>[6]</sup>结合兰州的气候特性, 采用理论与测试相结合的方法对应用于兰州地铁站的直接蒸发冷却通风降温试验样机进行了研究, 提出了实际应用的技术方案。笔者将对蒸发冷却 (凝) 在国内地铁的应用进行详细介绍, 旨在推动蒸发冷却 (凝) 技术在地铁站更多的应用, 为地铁站节能运行做出应有的贡献。

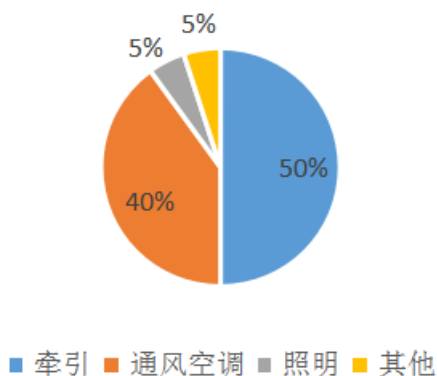


图1 地铁站能耗分布

Fig.1 Energy consumption distribution of subway station

## 1 蒸发冷却技术

蒸发冷却技术是一项利用水蒸发吸热制冷的绿色节能技术<sup>[7]</sup>, 蒸发冷却技术是利用空气与水的

直接接触, 由于两者间的水蒸气分压力差以及温差利用水的蒸发潜热进行制冷, 其本身以水作为制冷剂而替代了传统制冷剂, 节能、环保、无污染。按照被处理空气与水的接触方式不同, 蒸发冷却一般可分为直接蒸发冷却、间接蒸发冷却、蒸发冷凝<sup>[8]</sup>。

表1 机械制冷与蒸发冷却的费用对比

Table 1 Cost comparison between mechanical refrigeration and evaporative cooling

| 制冷方式     | 费用<br>初投资 | 维护费<br>用 | 运行费<br>用 |
|----------|-----------|----------|----------|
| 传统机械制冷技术 | 1         | 1        | 1        |
| 现代蒸发冷却技术 | 1/2       | 1/3      | 1/4      |

### 1.1 直接蒸发冷却技术

当流动的空气与水发生直接接触时, 空气会源源不断给水传递显热, 以降低自己的温度, 同时, 由于水吸收热量而释放汽化潜热, 也降低自身的温度。这种以显热换潜热的技术称为直接蒸发冷却技术<sup>[9]</sup>。应用该技术的蒸发冷却空调按照形式来分主要有冷雾式直接蒸发冷却空调和冷风式直接蒸发冷却空调。

### 1.2 间接蒸发冷却技术

产出介质 (空气或水) 与工作介质 (空气或水) 间接接触, 仅进行显热交换, 产出介质与工作介之间不存在质的交换, 以获取冷风或冷水的技术。这种依靠显热传递热量的技术称为间接蒸发冷却技术<sup>[10]</sup>。应用该技术的主要有间接蒸发冷却空调机组和间接蒸发冷却冷水机组。

### 1.3 蒸发冷凝技术

蒸发冷凝技术的核心是蒸发式冷凝器, 工作时, 启动水泵和风机, 此时水箱中的水经过水泵的抽吸作用通过喷嘴喷出, 淋在换热盘管表面, 形成均匀的水膜; 空气由进风口进入, 由于风机作用, 强迫掠过盘管表面后排出。空气在盘管表面与水膜接触, 水膜和空气在温度差和水蒸气分压力差的共同作用下进行热质交换, 发生直接蒸发冷却过程, 水膜表面温度被降低, 然后通过换热盘管的导热作用, 冷却管内介质, 使高温高压的制冷剂蒸汽冷凝成低温的制冷剂液体, 冷凝热被管外侧空气通过风机排到外界<sup>[11]</sup>。

## 2 蒸发冷却技术应用于地铁站的形式

### 2.1 直接蒸发冷却

## 2.1.1 冷雾式直接蒸发冷却空调机组

冷雾式直接蒸发冷却空调机组主要利用高压柱塞泵将水压提高至 7MPa, 然后将加压后的水经耐高压管线送至专业喷嘴将其雾化, 产生直径为  $3\sim 15\mu\text{m}$  的微雾颗粒, 使其能够迅速从空气中吸收热量完成汽化并扩散, 从而达到对空气既加湿又降温的目的<sup>[12]</sup>, 如图 2 所示。

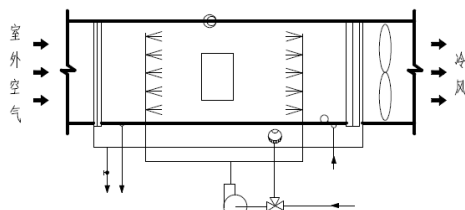


图 2 冷雾式直接蒸发冷却空调机组

Fig.2 Cold fog direct evaporative cooling air conditioning unit

## 2.1.2 冷风式直接蒸发冷却空调机组

冷风式直接蒸发冷却空调主要当站外空气经过填料时, 与填料表面的水膜接触, 空气与水发生热湿交换, 得到等焓降温加湿的空气, 如图 3 所示。

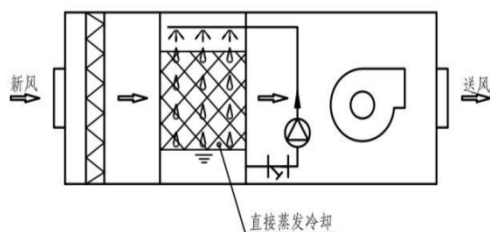


图 3 冷风式直接蒸发冷却空调机组

Fig.3 Cold air direct evaporative cooling air conditioning unit

## 2.2 间接蒸发冷却

## 2.2.1 间接蒸发冷却空调机组

一般有两股互不接触的空气, 二次空气在二次风送风机的作用下进入到间接蒸发冷却器湿通道中, 与附着在湿通道表面上的水膜进行热湿交换, 使得局部被降温, 进而来冷却干通道内的一次空气, 使得一次空气被等湿冷却, 如图 4 所示。

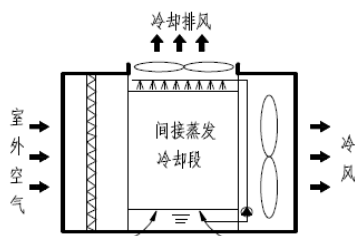


图 4 间接蒸发冷却空调机组

Fig.4 Indirect evaporative cooling air conditioning unit

## 2.2.2 间接预冷式蒸发冷却冷水机组

间接预冷式蒸发冷却冷水机组, 其主要由表冷器与淋水填料等换热系统、风机与水泵等动力系统以及电气自控系统组成, 如图 5 所示。

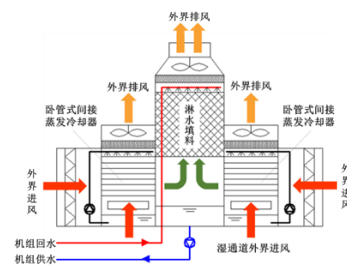


图 5 间接预冷式蒸发冷却冷水机组

Fig.5 Indirect pre cooling evaporative cooling chiller

## 2.3 多级蒸发冷却

## 2.3.1 二级蒸发冷却空调机组

二级蒸发冷却空调机组, 其主要由一个间接蒸发冷却段和一个直接蒸发冷却段串联组成, 使得空气先等湿降温, 然后再等焓降温, 如图 6 所示。

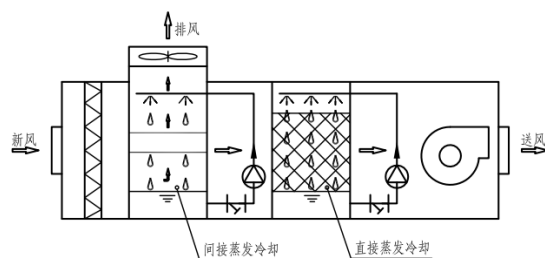


图 6 间接—直接蒸发冷却空调机组

Fig.6 Indirect direct evaporative cooling air conditioning unit

## 2.3.2 三级蒸发冷却空调机组

三级蒸发冷却空调机组, 其主要由两个间接蒸发冷却段和一个直接蒸发冷却段串联组成, 使得空气经过两次等湿降温后, 再等焓降温, 如图 7 所示。

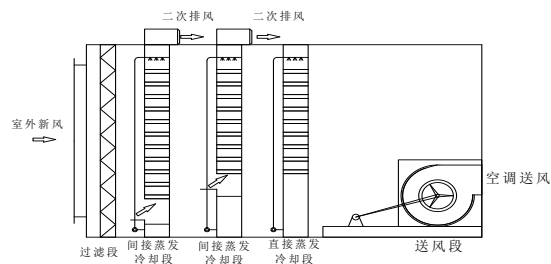


图 7 间接—间接—直接蒸发冷却空调机组

Fig.7 Two stage indirect direct evaporative cooling  
air conditioning unit

## 2.4 蒸发冷却与机械制冷复合

蒸发冷却与机械制冷复合空调机组,其主要是由一个间接蒸发冷却段、机械制冷段、直接蒸发冷却段组成,通过间接蒸发冷却段的二次排风来给机械制冷冷凝器散热,如图8所示。

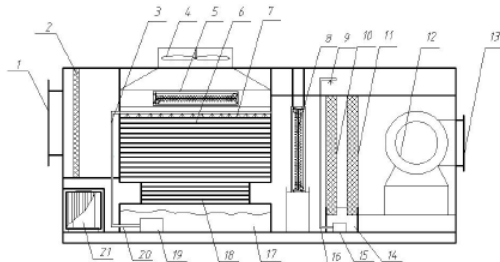


图8 蒸发冷却与机械制冷复合空调机组

Fig.8 Evaporative cooling and mechanical refrigeration  
combined air conditioning unit

## 2.5 蒸发冷凝

蒸发冷凝的核心是蒸发式冷凝器,它将冷却塔和冷凝器“合二为一”,以空气和水作为冷却介质,其原理如图9所示。蒸发式冷凝器主要由喷淋装置、风机、换热盘管、水箱、循环水泵、挡水板等组成。工作时,启动水泵和风机,此时水箱中的水经过水泵的抽吸作用通过喷嘴喷出,淋在换热盘管表面,形成均匀的水膜;空气由进风口进入,由于风机作用,强迫掠过盘管表面后排出。空气在盘管表面与水膜接触,水膜和空气在温度差和水蒸气分压力差的共同作用下进行热质交换,发生直接蒸发冷却过程,水膜表面温度被降低,然后通过换热盘管的导热作用,冷却管内介质,使高温高压的制冷剂蒸汽冷凝成低温的制冷剂液体。冷凝热被管外侧空气通过风机排到外界<sup>[1]</sup>。

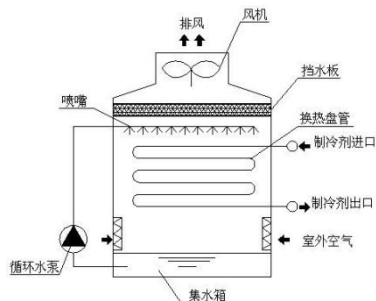


图9 蒸发式冷凝器原理图

Fig.9 Schematic diagram of evaporative condenser

## 3 蒸发冷却技术在地铁站的应用

### 3.1 冷雾式直接蒸发冷却技术在地铁站的应用

西班牙马德里 Penagrande 地铁站和 Illuatracion 地铁站采用了冷雾式直接蒸发冷却空调系统,如图10所示。首先,站内水箱中的水通过高压柱塞泵加压后,经过专业喷嘴使其雾化后喷出,弥漫在整个公共区环境中,接下来站外空气经过送风机送到站内公共区,空气与小水雾发生热湿交换,使得空气的温度降低,以消除站内的热负荷。



图10 马德里地铁站实际工程

Fig.10 Actual project of Madrid Metro Station

英国伦敦在2008到2012年新建成的三条线地铁线路中,其中一条线的地铁站也采用了冷雾式直接蒸发冷却空调系统,对站内的空气进行降温。

### 3.2 冷风式直接蒸发冷却技术在地铁站的应用

#### 3.2.1 集中式直接蒸发冷却技术在地铁站的应用

在国内,兰州地铁1号线采用了集中式直接蒸发冷却空调系统,如图11所示。站外空气通过送风道进入到机组内,与不锈钢填料表面的水膜发生热湿交换,空气被等焓加湿降温,再通过送风机送入到地铁站内公共区,以消除站内的热量。

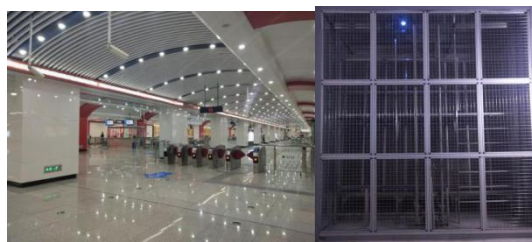


图11 兰州地铁1号线地铁站实际工程

Fig.11 Actual project of Lanzhou Metro Line 1

乌鲁木齐地铁1号线也采用了集中式直接蒸发冷却空调系统,如图12所示。



图 12 乌鲁木齐地铁 1 号线地铁站实际工程

Fig.12 Actual project of Urumqi Metro Line 1

在国外,英国伦敦在 2008 到 2012 年新建成的三条线地铁线路中,其中一条线的地铁站也采用了集中式直接蒸发冷却空调系统,以达到地铁站要求的制冷需求,对站内的空气进行降温。伊朗首都德黑兰的部分地铁站也采用集中式直接蒸发冷却通风降温系统来满足站厅站台人员舒适性要求。

### 3.2.2 单元式直接蒸发冷却技术在地铁站的应用

在国内,天津地铁 1 号线高架站采用了单元式直接蒸发冷却空调,如图 13 所示。由于地铁高架站属于半开放空间,传统的空调方式不能高效节能的降低站内公共区的温度,因此,采用可移动的单元式直接蒸发冷却空调机组来进行车站的降温是最佳的选择。



图 13 天津地铁 1 号线地铁站实际工程

Fig.13 The actual project of Tianjin Metro Line 1

同时,国内香港红磡地铁站、西安地铁 3 号线、厦门地铁 1 号线、广州地铁 5 号线也都能看到单元式直接蒸发冷却空调机组的身影,为地铁站提供降温服务,如图 14 所示。



图 14 国内地铁站应用单元式直接蒸发冷却空调实际工程

Fig.14 Application of unit type direct evaporative cooling air conditioning in domestic subway station

在国外,日本连接横滨市与埼玉市的京滨东北

线地铁站也广泛的采用了单元式直接蒸发冷却空调,如图 15。该单元式直接蒸发冷却空调,不仅有效的给乘客提供一定的降温服务,而且还有一定的广告宣传,提高地铁站的运营收入。



图 15 日本地铁站实际工程

Fig.15 Practical engineering of Japanese subway station

英国伦敦在 2008 到 2012 年新建成的三条线地铁线路中,其中有一条线的地铁站也采用了单元式直接蒸发冷却空调,消除站内的局部热点。

### 3.3 蒸发冷却(凝)技术在地铁站的应用

在国内,北京、上海、广州、重庆、武汉、杭州、西安等地的地铁站都采用了蒸发冷凝的地铁站空调系统,来消除站内的余热余湿。在结构上将冷却塔与冷凝器设置成一体,不单独设置冷却塔,应用该系统可以解决传统机械制冷空调冷却塔占地面积较大的问题,同时蒸发冷凝是通过水蒸发的潜热进行传热的,是效率最高的冷凝方式,可以最大限度上降低冷凝器的压力,降低压缩机的功率,提高制冷能力,拥有巨大的节能潜力,如图 16 所示。



图 16 国内地铁站应用蒸发冷凝实际工程

Fig.16 Application of evaporative condensation in domestic subway station

## 4 地铁站各种空调系统对比

地铁站各种空调系统的对比如表 2 所示<sup>[13]</sup>,单

级蒸发冷却适合在非常干燥的地区,两级蒸发冷却、三级蒸发冷却适合在湿度较小的地区使用,而蒸发冷却与机械制冷复合的机组适合在中等湿度地区

应用,以减少机械制冷开启的时间,节省运行费用。在高湿度地区采用蒸发冷凝最大限度的为冷凝器进行散热,减小冷凝压力,降低压缩机功率。

表 2 地铁站空调系统特点

Table 2 Characteristics of air conditioning system in subway station

| 空调系统形式      | 功能介绍                                         | 应用场所            | 优缺点                                |
|-------------|----------------------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| 直接蒸发冷却      | 空气与水直接接触实现蒸发冷却,能获得的最低温度为干空气的湿球温度             | 非常干燥地区          | 设备简单,会增加室内的湿度,无法实现同时排热和除湿          |
| 两级蒸发冷却      | 间接蒸发冷却+直接蒸发冷却,可获得介于干空气湿球温度与露点温度间的送风温度        | 低湿度地区室内散湿量较小的场所 | 效率高于直接蒸发冷却,无法除湿                    |
| 三级蒸发冷却      | 两级间接蒸发冷却+直接蒸发冷却,可获得介于干空气湿球温度与露点温度间的送风温度,效率更高 | 低湿度地区室内负荷较大的场所  | 效率较高、送风温度比直接蒸发冷却、两级蒸发冷却低,除湿效果差     |
| 蒸发冷却与机械制冷复合 | 间接蒸发冷却+直接蒸发冷却+机械制冷辅助,可获得低于露点温度的送风温度          | 低、中湿度地区的各种场所    | 设备较复杂,可实现同时排热和除湿。效率高,应用地域可扩展到中湿度地区 |
| 蒸发冷凝        | 将冷却塔和冷凝器“合二为一”,能最大程度带走冷凝器的热量                 | 中、高湿度地区负荷很大的场合  | 是效率最高的冷凝方式,但冷凝器易结垢                 |

## 5 结论

由于地铁站人员密集,散热设备多,降温的同时还需要一定的新风量来保证乘客和工作人员的健康需求。蒸发冷却技术是凭借着水蒸发吸收潜热来进行降温。在干燥地区地铁站采用直接蒸发冷却空调系统比传统机械制冷空调系统的空气品质更佳,比机械通风降温方式大大减小了土建风道的尺寸,降低了占地面积,并且空气采用了全新风直流的方式,可以将站内的细菌、病毒排出站外,防止细菌、病毒进一步在站内扩散,交叉感染。同时,设备的结构简单,初投资和运行费用低,具有明显的经济效益。在中等湿度地区地铁站采用蒸发冷却和机械制冷复合形式的地铁站空调系统,能减少机械制冷的开启时间,节约运营成本。在高湿度地区采用蒸发冷凝空调系统能给冷凝器更好的散热,相比传统的风冷和水冷,蒸发冷是效率最高的冷却方式,使得机械制冷的效率大大提高。因此,对于地铁站空调系统的选择,应结合当地气候特征,选择最佳的空调形式,降低空调能耗,减小运营成本。

## 参考文献:

- [1] 赵超峰.蒸发冷凝技术在地铁通风空调中的应用浅析[J].城市建设理论研究(电子版),2011,(17).
- [2] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通 2019 年度统计

和分析报告[R].2020.

- [3] 盛晓文.浅谈直接蒸发冷却空调在地铁的适用性[J].制冷技术,2012,12(4):59-62.
- [4] 李鑫.浅谈蒸发冷却技术在干燥地区地铁应用中的关键性问题[J].洁净与空调技术,2013,9(3):92-95.
- [5] 黄翔.干燥地区某地铁站直接蒸发冷却通风降温试验样机的性能测试与分析[J].暖通空调,2017,47(7):51-55.
- [6] 高源基.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,2016,6(3):340-344.
- [7] 黄翔.国内外蒸发冷却空调技术研究进展(1)[J].暖通空调,2007,(2):24-30.
- [8] 夏青,黄翔,殷清海.直接蒸发冷却术语诠释[J].制冷与空调,2012,(3):234-237.
- [9] 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.
- [10] 黄翔,孙铁柱,汪超.蒸发冷却空调技术的诠释(1)[J].制冷与空调,2012,12(2):1-6.
- [11] 黄翔.蒸发冷却空调原理与设备[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [12] 李民伟.关于高压微雾加湿器与汽水混合冷雾加湿器的探讨[J].科技信息,2009,(3):34-53.
- [13] 邓保顺.蒸发冷却空调技术在铁路旅客站房中的应用分析[J].房屋建筑,2010,(5):103-105.

