

基于蒸发冷却的辐射供冷/热实验台设计探讨

西安工程大学 闫振华★ 黄翔 宣永梅

摘要 对基于蒸发冷却的辐射供冷/热半集中式空调系统实验台进行了简要介绍,并对实验台的新风系统和水系统设计进行了详细说明。分析了该实验台在中湿度地区不同季节的运行模式,指明了该实验台的特点。

关键词 蒸发冷却 辐射供冷 实验台 半集中式空调系统

Design of a radiant cooling and heating test bed based on evaporative cooling

By Yan Zhenhua★, Huang Xiang and Xuan Yongmei

Abstract Briefly describes the semi-centralized test bed, and expounds the design of its fresh air system and water system. Analyses the operation modes of the test bed in different seasons in medium humid area and points out the features of the test bed.

Keywords evaporative cooling, radiant cooling, test bed, semi-centralized air conditioning system

★ Xi'an Polytechnic University, Xi'an, China

①

0 引言

辐射供冷因其节能、舒适、不占用室内使用面积等优点,已开始在我国部分地区使用,但因其工程应用中存在着诸多障碍而没有像辐射供暖一样得到大面积推广应用。在我国西北地区,采用蒸发冷却技术为辐射供冷末端提供干燥新风和高温冷水,不但能“自然”克服结露难题,省去复杂而昂贵的露点控制系统,而且室内空气质量好。因此蒸发冷却辐射供冷/热复合式空调系统在我国西北地区的应用前景十分广阔^[1-3]。

为研究和推广这一生态节能空调技术,笔者在西安某企业搭建了蒸发冷却+辐射供冷/热复合式半集中空调系统实验台,以期使这种新型空调系统的研究和工程应用取得一定的进展,并供同行参考。

1 实验台概况

该实验台建筑面积为 26.87 m²,其平面图如图 1 所示,系统图如图 2 所示。实验台分测试室和调节室两部分,测试室在建筑面积、围护结构热阻、开窗率等方面都仿照实际房间确定,调节室能模拟四季室外热湿环境,使测试室在作实验时能够处于近似真实的室外热湿工况。

系统采用基于蒸发冷却辐射供冷/热复合式空

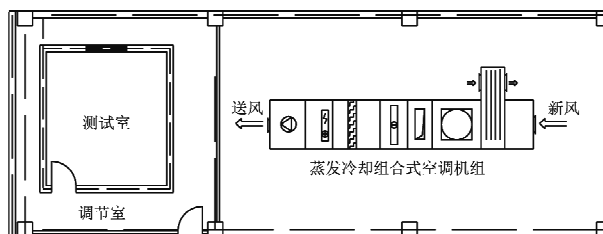


图 1 基于蒸发冷却辐射供冷/热实验台平面图

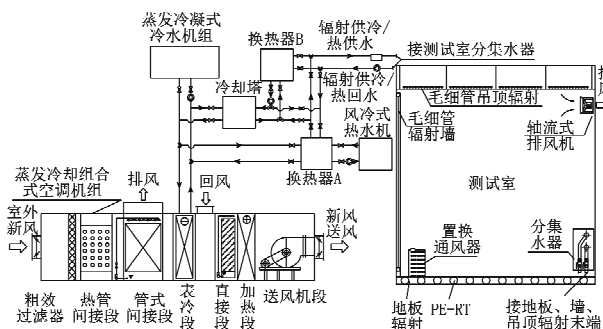


图 2 基于蒸发冷却辐射供冷/热实验台系统图

①☆ 闫振华,男,1975 年 10 月生,硕士研究生,工学硕士,工程师
430064 武汉市武昌区武珞路 442 号中煤国际工程集团武汉
设计研究院

(0) 13886139708

E-mail: kongtiao96@163.com

收稿日期:2008-09-13

修回日期:2008-11-28

调系统,并配以置换通风以改善室内空气质量和提高室内供冷能力。

根据实验要求,系统末端采用辐射地板、辐射墙、辐射吊顶及置换通风器形式。冷热源采用蒸发冷却组合式空调机组,蒸发冷凝式冷水机组、冷却塔和热水机。夏季能够为测试室提供 18°C 左右的高温冷水及温度低于室内设计温度 $1\sim 6^{\circ}\text{C}$ 的新风,冬季能够为测试室提供 60°C 以下的低温热水,冬、夏均能满足测试室空调系统的要求。

测试室总冷负荷设计最大值为 2.447 kW ,总热负荷设计最大值为 3.526 kW ,根据不同测试要求可对冷、热负荷进行相应调整。

2 蒸发冷却新风系统设计

辐射供冷/热空调系统在运行时由于仅承担室内显热负荷而不具备除湿功能,故其单独运行时一般会导致室内相对湿度偏高且空气质量不佳。为此,本实验台采用蒸发冷却组合式空调机组为测试室提供新风。该机组把热管间接蒸发冷却段、管式间接蒸发冷却段、空气冷却段(表冷段)、直接蒸发冷却段和加热段集成于一体,可在不同季节开启相应的功能段,产生冷/热新风,并通过 QL 型置换送风口以较低风速送入测试室,送出的气流沿地板蔓延,遇到人员或电器等发热体后沿发热体通过对流作用向上输送,最后通过布置于测试间侧上方的排风口由排风机排至室外。

3 辐射供冷/热水系统设计

3.1 水系统冷热源的设计

水系统的冷源由蒸发冷凝式冷水机组和冷却塔联合提供。由于在夏季空调设计工况下,西安地区的室外干球温度为 35.2°C ,湿球温度为 26°C ,如采用传统冷却塔供冷,则其仅能提供温度高于 26°C 的高温冷水,如把该高温冷水送入辐射末端,则供冷能力极小。故在西安地区夏季炎热季节,采用蒸发冷凝式冷水机组提供 $7\sim 12^{\circ}\text{C}$ 的低温冷水。该冷水一方面直接进入蒸发冷却组合式空调机组的空气冷却段(表冷段),对间接蒸发冷却段处理后的新风进行除湿并再次冷却至空调区送风要求;另一方面通过高效板式换热器进行间接换热,产生 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ 的高温冷水,然后进入辐射末端。过渡季节可关闭蒸发冷凝式冷水机组,开启冷却塔,用其循环冷却水进行免费供冷。因为随着室外空气温度和相对湿度逐渐降低,室外湿球温度也相应降低,从而冷却塔出口水

温也随之降低;而此时测试室内湿负荷及冷负荷也在不断减小,空调末端所需除湿量减小,此期间可以适当提高冷水的供水温度,减小其除湿能力,完全能满足空调系统舒适性的要求。

空调系统冬季运行时,由风冷式热水机为测试室辐射供热末端提供 $35\sim 45^{\circ}\text{C}$ 的低温热水,同时由蒸发冷却组合式空调机组的热管间接蒸发冷却段对室内排风进行余热回收,对室外新风进行预热,预热后的新风再经过机组的电加热段加热后送入测试室。

由上所述知,空调系统冷热源采用蒸发冷凝式冷水机组、冷却塔、风冷式热水机、蒸发冷却组合式空调机组,可满足测试室四季空调运行的需要。

3.2 辐射末端的设计

空调系统辐射末端具有冷热两用功能,采用铝扣板毛细管辐射吊顶、毛细管辐射墙、辐射地板形式,并通过 6 分支智能分集水器进行集中控制^[4]。

3.2.1 地板辐射供冷/热

地板辐射末端采用湿式结构^[5],盘管采用 $\varnothing 20\times 2.8\text{ mm}$ (外径 $\times$ 壁厚)的耐热增强型聚乙烯管,双回路布置。地面构造做法由下至上依次为:30 mm 厚 XPS(挤塑式聚苯乙烯保温板)绝热层,高光地暖反射膜(铝箔膜),管间距为 150 mm 的 PE-RT 管,50 mm 厚 C15 型豆石混凝土填充层,找平层,如图 3 所示。

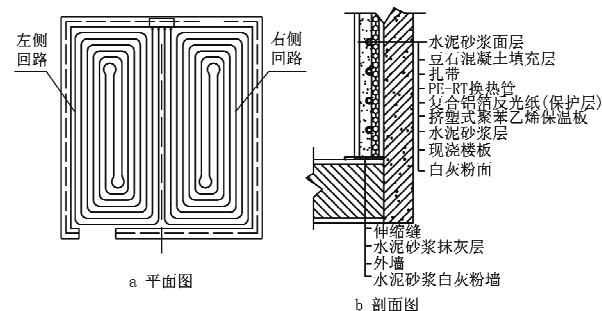


图 3 地板辐射供冷/热布置图

3.2.2 毛细管辐射墙

辐射墙采用德国某品牌毛细管席进行抹灰安装,如图 4 所示。管材为无规共聚聚丙烯(PP-R),K. S15 型,集水管尺寸为 $\varnothing 20\times 2\text{ mm}$,毛细管尺寸

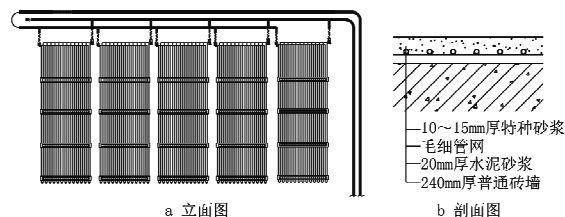


图 4 毛细管辐射墙布置图

为 $\Phi 3.35 \times 0.5$ mm, 管间距为 15 mm, 毛细管席规格为 $960 \text{ mm} \times 3\,000 \text{ mm}$, 单张有效辐射面积为 2.88 m^2 。为有效发挥毛细管席的辐射性能, 在铺设于墙面时, 采取了以下有效措施:

1) 集管采用上供上回式布管方式, 并在与集管相连管道的最高点布置自动排气装置, 从而避免毛细管内水流发生气阻。

2) 连接毛细管席集管的供回水管分别置于集管的两侧, 同时毛细管席之间采用同程水系统, 使毛细管席之间及单张毛细管席各支路间均能保持水力平衡, 布水均匀, 从而确保毛细管席换热均匀, 换热效果好。

3) 由于毛细管席的每个通道很窄, 容易发生阻塞, 故毛细管席在设计安装时采用了独立的封闭循环水系统, 通过高效板式换热器与冷(热)水进行间接换热, 同时又于分集水器的供水端设置过滤器, 确保毛细管网内水流畅通。

4) 采用抗裂砂浆对毛细管席进行均匀涂抹安装, 覆盖层厚度为 $10 \sim 15 \text{ mm}$ 。

5) 尽量沿墙壁铺设, 使毛细管席铺设面积最大化, 增大供冷传热面积, 从而降低传热温差, 提高辐射供冷供回水平均温度, 减小结露的可能性, 同时由于冷水温度的提高, 又有利于系统节能。

3.2.3 毛细管辐射吊顶

辐射吊顶采用德国某品牌毛细管席, 铝扣板吊顶安装, 如图 5 所示。管材为无规共聚聚丙烯(PP-

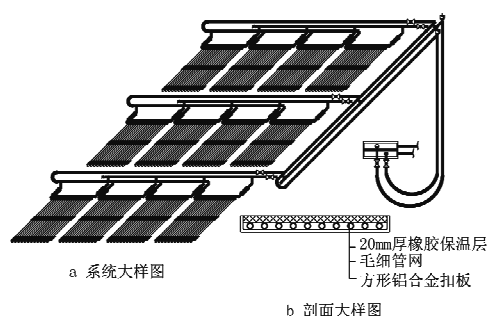


图 5 毛细管辐射吊顶布置图

R), K. S15 型, 集水管尺寸为 $\Phi 20 \times 2 \text{ mm}$, 毛细管尺寸为 $\Phi 3.35 \times 0.5 \text{ mm}$, 管间距为 15 mm, 毛细管席规格为 $960 \text{ mm} \times 1\,500 \text{ mm}$, 共计铺设 12 张, 有效辐射面积为 17.28 m^2 。为有效发挥毛细管席的辐射性能, 在吊顶铺设时, 采取了以下有效措施:

1) 采用质感和装饰感较强的 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ 带孔方形铝合金扣板。这种铝合金扣

板热阻较小, 传热系数大, 传热效果好, 另外还具有良好的防腐、防振、防水、防火功能, 尤其是防水功能, 可以避免辐射供冷偶然结露对吊顶本身的损坏。

2) 毛细管铺设于吊顶上表面时, 采用 AB 胶将毛细管与铝合金扣板均匀地紧密粘牢, 以减小毛细管席和铝合金扣板之间的空气热阻, 提高其换热性能。

3) 为提高辐射供冷量的有效利用率, 确保其沿吊顶向下部空调区传递冷量, 设计安装时在紧贴毛细管上方铺设了 20 mm 厚的橡塑保温板绝热层。

4 实验台运行模式

西安地区属典型的中湿度地区, 蒸发冷却技术与辐射供冷相复合时, 夏季运行模式与其在西北炎热干燥地区的应用相比有显著的不同^[6-7], 蒸发冷却需要与机械制冷配合才能达到除湿效果。

4.1 夏季运行模式

夏季运行时, 辐射供冷末端承担建筑围护结构传热、日照得热、室内设备散热和人员散热产生的瞬时显热负荷。室内的湿负荷和部分显热负荷由蒸发冷却组合式空调机组承担, 新风处理到机器露点 L_x 后, 送入室内与辐射供冷末端处理后的室内循环风混合, 达到室内送风状态点 O_x 。其空调处理过程如图 6 所示, 空调系统运行状态如表 1 所示。

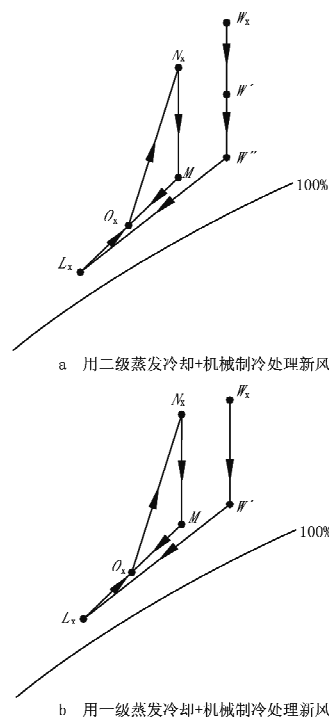


图 6 中湿度地区夏季运行空气处理 h - d 图

表 1 中湿度地区空调系统夏季运行设备开闭工况

类别	新风机组(蒸发冷却组合式空调机组)						冷热源			附属设备		显热末端
	粗效过 滤段	热管间接蒸 发冷却段	管式间接蒸 发冷却段	空气冷却段 (表冷段)	直接蒸发 冷却段	加热段	冷却塔	蒸发冷凝式 冷水机组	风冷式热 水机	换热器 A	换热器 B	
I	✓	✓		✓			✓				✓	✓
II	✓	✓		✓				✓		✓	✓	✓
III	✓	✓		✓			✓	✓		✓	✓	✓
IV	✓		✓	✓			✓	✓		✓	✓	✓
V	✓		✓	✓			✓	✓		✓	✓	✓
VI	✓		✓	✓			✓	✓		✓	✓	✓
VII	✓	✓	✓	✓			✓	✓		✓	✓	✓
VIII	✓	✓	✓	✓			✓	✓		✓	✓	✓
IX	✓	✓	✓	✓			✓	✓		✓	✓	✓

注:✓表示设备开启。

4.2 春、秋季运行模式

春、秋季节时,室外相对湿度偏低,室外空气工况点偏移到室内设计工况点的左侧,空调运行时,负荷分配同夏季。新风处理到机器露点 L 后,送入室内与辐射供冷末端处理后的室内循环风混合,达到室内送风状态点 O 。其空调过程如图 7 所示,空调系统运行状态如表 2 所示。

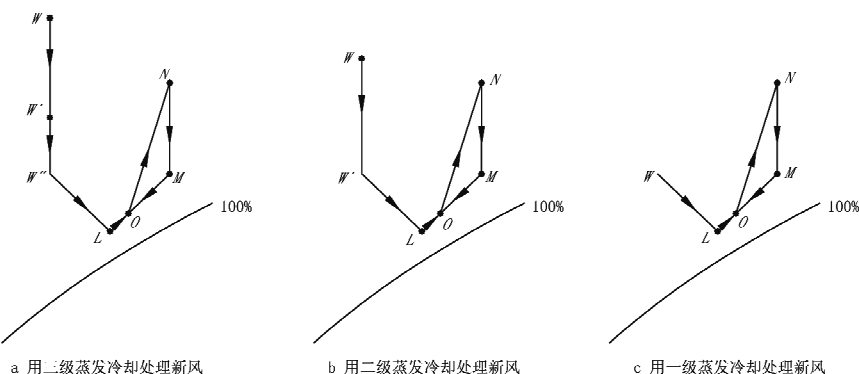
图 7 中湿度地区春、秋季运行空气处理 h - d 图

表 2 中湿度地区空调系统春、秋季运行设备开闭工况

类别	新风机组(蒸发冷却组合式空调机组)						冷热源			附属设备		显热末端
	粗效过 滤段	热管间接蒸 发冷却段	管式间接蒸 发冷却段	空气冷却段 (表冷段)	直接蒸发 冷却段	加热段	冷却塔	蒸发冷凝式 冷水机组	风冷式热 水机	换热器 A	换热器 B	
I	✓				✓		✓				✓	✓
II	✓	✓			✓		✓			✓	✓	✓
III	✓		✓		✓		✓			✓	✓	✓
IV	✓	✓	✓		✓		✓			✓	✓	✓

4.3 冬季运行模式

冬季运行时,辐射供热末端承担室内部分显冷负荷,室内的湿负荷和部分显冷负荷由蒸发冷却组合式空调机组承担,室外新风处理到 W'_d 或 W''_d 后,送入室内与辐射供热末端处理后的室内循环风混合,达到室内送风状态点 O_d 。其空调处理过程如图 8 所示,空调系统运行状态如表 3 所示。

5 实验台特点

该实验台是一个以蒸发冷却技术为核心的综合性实验台,具有以下特点:

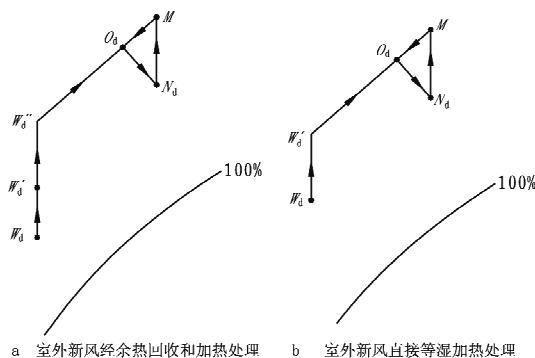
图 8 中湿度地区冬季运行空气处理 h - d 图

表 3 中湿度地区空调系统冬季运行设备开闭工况

类别	新风机组(蒸发冷却组合式空调机组)						冷热源		附属设备		显冷末端	
	粗效过 滤段	热管间接蒸 发冷却段	管式间接蒸 发冷却段	空气冷却段 (表冷段)	直接蒸发 冷却段	加热段	冷却塔	蒸发冷凝式 冷水机组	风冷式热 水机	换热器 A		换热器 B
I	✓	✓							✓	✓		✓
II	✓					✓			✓	✓	✓	✓
III	✓	✓				✓			✓	✓	✓	✓

1) 集蒸发冷却技术、蒸发冷凝技术、冷却塔免费供冷技术及辐射供冷/热节能技术于一体,是国

内首例在中湿度地区搭建的蒸发冷却+辐射供冷/热复合式半集中空调系统实验台。

(下转第 141 页)

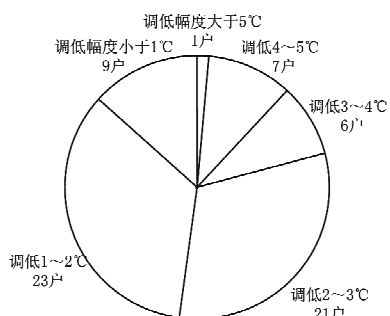


图 14 用户主动调低设定温度幅度分布

从问卷调查、奖励发放效果等分析发现,该技术要大规模推广,需相关的按热计量收费政策支持,从而有效提高用户主动节能积极性。

5 结论

5.1 典型用户的室温控制效果测试表明,室温长期控制在设定温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的范围内,控制效果良好,同时从阀门瞬态开启占空比的变化可以明显看出,室温升高,占空比减小,室温降低,占空比增加,并有提前动作趋势。

5.2 典型用户各房间的室温均匀性测试结果表明,各房间室温偏差在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 左右,只要各房间的散热器设计合理,控制某一个房间的温度即可满足整个用户的室温控制要求。

5.3 对楼栋总流量变化的监测(每 5 min 读取一次楼栋瞬态流量)数据显示,在各个用户单独控制的过程中,楼栋的总流量瞬态变化率基本在 2%以

(上接第 54 页)

2) 测试室辐射末端布置于地板、吊顶、墙壁内,冬夏两用,可研究其单独运行时与蒸发冷却相复合的性能,也可研究其联合运行时与蒸发冷却相复合的性能。

3) 冷风和冷水主要采用蒸发冷却技术免费提供,节能和环保效果显著。

4) 采用辐射空调+新风空调系统,室内垂直温度梯度小,舒适性得到提高,供冷、供暖效果优于传统的对流空调方式。

6 结语

本复合式实验台集蒸发冷却技术和辐射供冷/热技术于一体,在冷热源选择、末端形式、运行模式、空调系统设计等方面均符合以西安为代表的中湿度地区气候特征,是适合西北气候条件的生态节能冷暖兼容的新型空调系统实验台,为研究蒸发冷

内,水力工况平稳。

5.4 通过对楼栋热表的统计,截至 2008 年 2 月 28 日,未调控楼栋的平均耗热量为 $0.1049\text{ MWh}/\text{m}^2$,调控楼栋的平均耗热量为 $0.0854\text{ MWh}/\text{m}^2$,相比未调控楼栋,在仅有 30%的用户长期处于调控状态的情况下,调控楼栋节能 18.6%,如果有更多用户处于长期调控状态,节能效果将更明显。

5.5 对示范小区 85%的示范用户进行了问卷调查,统计结果表明,69%的用户不能接受将室温设定在 20°C ,99%的用户期望室温设定在 22°C 以上,节能意识有待加强;按热计量收费后,约 91%的用户选择少开窗或不开窗,当房间过热时,88%用户选择调低设定温度,因此分户调节、按热计量收费可以有效防止用户过热时开窗;该技术的满意度调查结果表明,有 67%的用户对技术示范感到很满意或满意,28%的用户感觉一般,仅有 5%用户感到不满意,选择一般和不满意的用户主要是由于示范过程中对调控原理、操作不清楚造成了误解或误操作。

6 致谢

在安装和测试的过程中,得到了长春一汽动能公司领导和员工的大力支持,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 刘兰斌,江亿,付林. 对基于分栋热计量的末端通断调节与热分摊技术的探讨[J]. 暖通空调,2007,37(9): 70-73
- [2] 刘兰斌,江亿,付林. 基于分栋热计量的末端通断调节与热分摊技术的应用测试[J]. 暖通空调,2007,37(9): 140-143

却与辐射供冷/热复合式半集中空调系统的性能特点提供了实验平台,同时为该技术在中湿度地区的推广应用提供了技术支持。

参考文献:

- [1] 黄翔. 国内外蒸发冷却空调技术研究进展(3)[J]. 暖通空调,2007,37(4): 24-29
- [2] 王如竹,黄翔,杨昭,等. 制冷学科进展研究与发展报告[M]. 北京:科学出版社,2007
- [3] 闫振华,黄翔,宣永梅. 蒸发冷却与毛细管辐射供冷复合式空调初探[J]. 建筑热能通风空调,2008,27(4): 23-25
- [4] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2008
- [5] 王子介. 低温辐射供暖与辐射供冷[M]. 北京:机械工业出版社,2004
- [6] 兰冶科. 蒸发冷却+干工况风机盘管半集中式空调系统的研究[D]. 西安:西安工程大学,2007
- [7] 李银明,黄翔. 蒸发冷却与冷却吊顶相结合的半集中式空调系统的探讨[J]. 流体机械,2005,33(1): 56-59