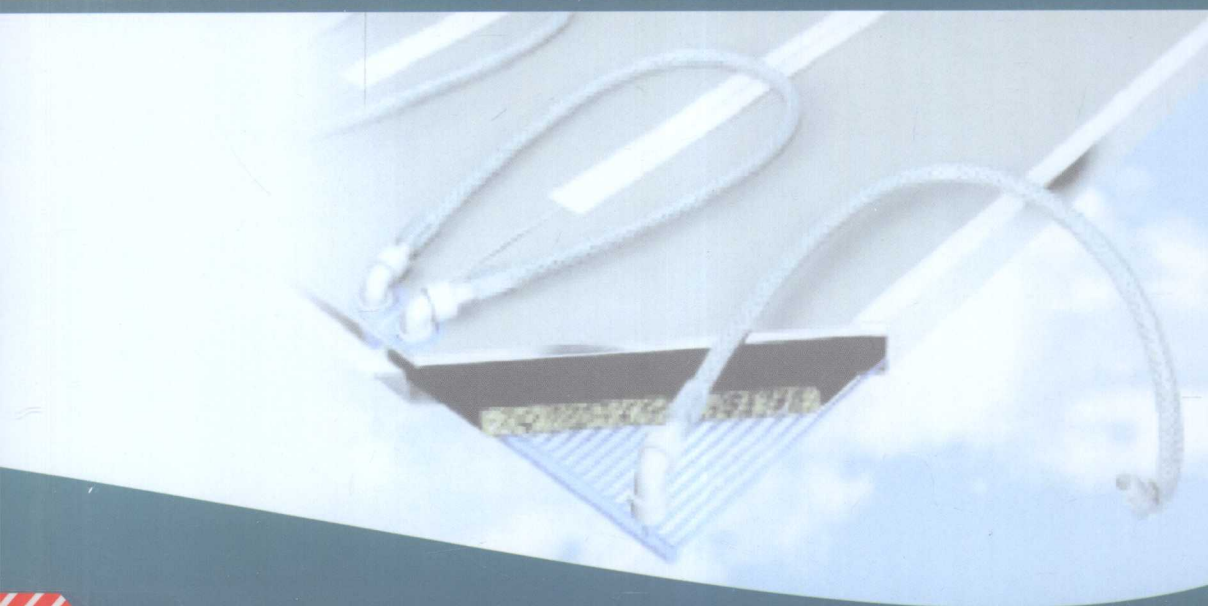


毛细管

平面辐射空调技术

刘学来 李永安 著 ©



 冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

毛细管平面辐射空调技术

刘学来 李永安 著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 提 要

本书共分7章,第1章简要介绍了建筑空调和平面辐射空调的研究现状,第2章介绍了空气温湿度独立控制理论,第3~7章分别介绍了毛细管平面辐射空调节能及舒适性、热工特性、冷热负荷的计算、系统设计以及系统适宜性。

本书可供从事暖通空调设计和研究的工程技术人员和管理人员阅读,也可供高等院校建筑环境相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

毛细管平面辐射空调技术/刘学来,李永安著. —北京:
冶金工业出版社, 2016. 10
ISBN 978-7-5024-7364-8

I. ①毛… II. ①刘… ②李… III. ①毛细管—空调技术
IV. ①TB657. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 251219 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨秋奎 加工编辑 唐晶晶 美术编辑 杨 帆 版式设计 杨 帆

责任校对 禹 蕊 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7364-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 10 月第 1 版, 2016 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 10 印张; 193 千字; 150 页

40.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

传统空调系统的弊病，如吹冷风问题、噪声问题、为保证室内空气新鲜不断开窗问题等不断凸显出来。为了解决上述问题，提高建筑空间内的舒适度，减少长期处于空调环境的不适，山东建筑大学“毛细管平面空调”课题组从2004年开始进行毛细管平面空调的研究。先后参加这项工作的有：戎卫国教授、刘学亭研究员，以及顾皓、马玉奇、薛红香、田丹丹、孙娟娟、闫佳佳、崔新阳、原军伟、王婷婷、吴杰、李玉苹、李寒梅、史丽娜、刘舒涵等，一大批对该课题感兴趣的新同学陆续加入。相关工作还得到了山东城市建设职业学院孟繁晋老师和山东建筑大学热能工程学院诸多教师的大力协助和支持。“毛细管平面空调”课题组形成的良好学术研究环境，保证了研究工作的顺利进行，先后得到山东省科技发展计划项目“毛细管平面辐射空调关键技术的研究与示范（2008GG30006005）”、“毛细管平面辐射空调系统的研究与工程应用（2014GSF116007）”的支持，感谢山东省科技发展计划研究经费的大力支持，使得课题组研究得以持续并取得丰硕的成果，同时能够不断培养出新的研究人才。

本书是“毛细管平面空调”近年部分成果的集中体现，同时也是近年来课题组对室内毛细管平面空调系统理论研究和工程设计的初步总结，对毛细管平面辐射空调的节能效果、舒适度、热工特性、冷热负荷计算方法、系统设计、系统的适宜性等进行了较为深入的论述。

书中各章参加编撰的人员如下：

第1章 刘学来、李永安

第2章 李永安、刘学来、顾皓、马玉奇、薛红香

第3章 薛红香、孙娟娟、刘学来、戎卫国

第4章 崔新阳、原军伟、刘学来、闫佳佳、田丹丹

目 录

1 绪论	1
1.1 建筑空调现状及趋势	1
1.1.1 技术背景	1
1.1.2 传统空调的缺陷	2
1.1.3 平面辐射空调简介	4
1.1.4 毛细管平面辐射空调末端	6
1.2 国内外研究现状	8
1.2.1 国外研究现状	8
1.2.2 国内研究现状	11
2 空气温湿度独立控制理论	14
2.1 余热的来源及消除	15
2.1.1 余热的来源	15
2.1.2 余热的消除	16
2.2 余湿的产生及消除	17
2.2.1 余湿的产生	17
2.2.2 余湿的消除	20
2.3 温湿度独立控制系统	23
3 毛细管平面辐射空调节能及舒适性	26
3.1 焓分析理论	26
3.2 夏季焓分析	27
3.3 冬季焓分析	28
3.4 毛细管平面辐射空调舒适性分析	30
3.4.1 室内热舒适控制的理论基础	30
3.4.2 热舒适性的评价方法	33
3.5 毛细管平面辐射空调房间热平衡模型	35
3.5.1 窗、外墙的单位面积导热热量	36
3.5.2 第 i 表面的单位面积对流换热量	36

3.5.3	第 i 表面的单位面积辐射换热量	36
3.5.4	内热源单位散热量	37
3.6	毛细管平面辐射空调房间热舒适研究	37
3.6.1	初始条件的确定	37
3.6.2	平均辐射温度对热舒适性的影响	41
3.6.3	毛细管平面辐射空调房间计算温度探讨	42
3.6.4	相对湿度对空调房间热舒适性的影响	45
4	毛细管平面辐射空调热工特性	48
4.1	毛细管平面辐射空调介绍	48
4.1.1	毛细管平面辐射空调的分类	48
4.1.2	毛细管平面辐射空调系统构成	49
4.2	毛细管平面辐射空调系统热工模型	51
4.2.1	毛细管平面辐射空调系统的物理模型	51
4.2.2	毛细管平面辐射空调系统传热的数学分析	52
4.2.3	毛细管换热器管内热介质与装饰层的换热	56
4.2.4	装饰层与室内空气及壁面的换热	59
4.3	数学模型的求解	60
4.3.1	毛细管换热器与装饰层换热求解	60
4.3.2	室内温度场、速度场及浓度场的求解	63
4.4	毛细管换热器平面空调系统理论分析	63
4.4.1	毛细管换热器与装饰层换热的数值分析	63
4.4.2	装饰层与室内换热的数值模拟	73
5	毛细管平面辐射空调冷热负荷的计算	85
5.1	空调负荷计算方法介绍	85
5.1.1	稳态传热计算时期	85
5.1.2	周期不稳定传热计算时期	85
5.1.3	动态负荷计算时期	86
5.2	基于 CFD 软件的毛细管平面辐射空调系统负荷计算方法的研究	86
5.2.1	外墙得热模型构建	86
5.2.2	外窗得热模型构建	86
5.3	模拟计算结果的分析	87
5.3.1	毛细管不同布置位置对空调房间负荷的影响	88
5.3.2	与传统空调负荷的比较	90

5.3.3 毛细管平面辐射空调系统负荷的分析	92
5.4 毛细管平面辐射空调系统负荷计算的方法	94
5.4.1 改变室内温度法	94
5.4.2 修正系数法	94
6 毛细管平面辐射空调系统设计	95
6.1 毛细管换热器形式及换热面积	95
6.1.1 毛细管换热器安装类型	95
6.1.2 毛细管换热器单位面积冷量确定	98
6.2 毛细管换热器阻力	99
6.2.1 毛细管平面辐射空调系统水力计算介绍	99
6.2.2 基于遗传算法的供回水管路水力计算的研究	100
6.2.3 毛细管平面空调系统末端装置的水力计算	110
6.3 新风系统	121
6.3.1 新风送风量计算	121
6.3.2 最小新风量的确定	124
6.4 毛细管平面辐射空调控制系统	125
6.4.1 毛细管平面辐射空调系统结露过程分析	125
6.4.2 控制方式的比较	126
6.4.3 毛细管平面辐射空调系统控制设计的原则	128
6.4.4 影响毛细管平面辐射空调控制系统的主要参数	129
6.4.5 毛细管平面辐射空调控制系统的分析	129
7 毛细管辐射空调系统适宜性	134
7.1 毛细管辐射空调冷热源适宜性	134
7.1.1 毛细管辐射空调与太阳能结合空调系统	134
7.1.2 毛细管网与热泵结合空调系统	137
7.2 毛细管辐射空调建筑类型适宜性	139
7.3 毛细管辐射空调区域适宜性	140
附录 毛细管格栅顶板与装饰层换热计算程序框图及程序	142
附录1 程序框图	142
附录2 毛细管格栅冬季供热 MATLAB 计算程序	143
附录3 毛细管格栅夏季供冷 MATLAB 计算程序	144
参考文献	146

1 绪 论

1.1 建筑空调现状及趋势

1.1.1 技术背景

1997 年 12 月在日本东京举行了《联合国气候变化框架公约》第三次缔约方大会,来自世界 149 个国家和地区的代表参会,会议通过了旨在限制发达国家温室气体排放量以抑制全球变暖的《京都议定书》。由于《京都议定书》的减排协议将于 2012 年届满,2009 年 12 月 7~18 日,在丹麦首都哥本哈根举行了第十五次缔约方会议,重点讨论 2012 年《京都议定书》第一承诺期结束后的全球应对气候变化框架^[1]。会议上,欧盟承诺至 2020 年在 1990 年基础上减排 20%,如果其他发达国家有类似的减排承诺,可将这一数字提升至 30%;日本提出至 2020 年在 1990 年基础上减排 25%;中国提出到 2020 年单位 GDP 二氧化碳排放比 2005 年降低 40%~45%;印度提出至 2020 年单位 GDP 二氧化碳排放比 2005 年降低 20%~25%^[2]。毋庸置疑,节能减排业已成为当前发展的关键主题。

进入 2010 年以来,我国许多城市频繁出现雾霾天气,2014 年 2 月 21 日的北京甚至达到橙色预警状态。2013 年,雾霾现象波及全国 25 个省市,全年雾霾天数在许多城市多达 30 天,比 2012 年同期高出 10 天,为 52 年来的最高值,就连旅游胜地海南都难逃雾霾侵袭。在大气环境污染日益严重的情况下,节能减排的呼声越来越高。建筑节能是当前节能减排的重点内容,且有极大的节能空间^[2~4]。20 世纪 80 年代初,欧洲及北美的一些国家就提出绿色建筑与生态建筑的概念。90 年代,绿色建筑的理念开始被中国所认知。中国是世界人口大国,随着经济的飞速发展,建筑能耗也在急剧增加,所以建筑节能变得尤为重要和紧迫。我国目前建筑业迅猛发展,建筑总能耗已占我国总能耗的 20%~30%^[5]。

2013 年,国家信息中心公布的数据表明建筑房间内的空调、灯光及其他用电设备的能耗占建筑总能耗的 98%。其中用电设备能耗占总能耗的 17%,灯光能耗占总能耗的 21%,而空调系统能耗占建筑总能耗的 60%左右^[6],因此建筑节能减排的重点是空调系统。

随着我国人民生活水平的提高,空调系统除了提供适宜的温度与湿度的基本功能外,越来越多的人对空调系统的舒适性与节能性有更高的要求。回顾历史,我国传统的采暖方式是在房间内设置燃煤炉,直接采用烟气采暖,这种采暖方式燃烧效率低,烟尘污染严重,操作麻烦,劳动强度大,且存在煤气中毒等安全隐

患。后来出现了土暖气供暖,但是土暖气供暖质量差,需要人 24 小时看守,燃烧状况时好时坏,安全稳定性差,基本没有改变燃烧效率低及污染严重的问题。改革开放之后,我国大力发展城市集中供热,中央空调系统等暖通空调方式,最近几年太阳能空调、地源热泵和平面辐射空调等新型的供暖制冷技术也得到了很大的发展。通过近几年技术的进化升级,理论研究的不断深入细致,平面辐射空调这种新型的空调末端形式受到越来越多的关注。

1.1.2 传统空调的缺陷

传统的中央空调系统自 20 世纪 50 ~ 60 年代在全世界应用至今已沿袭了几十年,尽管在这一过程中经历了不断的改进和完善,但是仍没有从本质上彻底解决其问题和缺陷。如热湿耦合处理的低温供冷问题、对流传导的风感问题、盘管送风的噪声问题等。这些问题的存在,不仅与当前人们对居住环境质量越来越高的需求相矛盾,而且高能耗问题也在当前能源日趋紧张的情况下更显得突出和严重。必须高度重视采用更节能、更先进的空调系统。

传统的空调系统采用热湿耦合处理方法。夏季采用低温水冷凝除湿方式(采用 7°C 的冷冻水),经过空气冷却器对空气的冷凝达到降温、除湿目的。显热负荷(排热)约占总负荷的 50% ~ 70%,而潜热负荷(排湿)约占总负荷的 50% ~ 30%。占总负荷一半以上的显热负荷部分,本可以采用高温冷源(小于室内控制温度即可)排走,却与除湿一起共用 $5 \sim 7^{\circ}\text{C}$ 的低温冷冻水来处理,这就造成了能源在品位上的浪费。经过冷凝除湿后的空气,虽然湿度(含湿量)满足要求,但有些场合温度过低(此时相对湿度约为 90%),只好对空气进行再热处理,使之达到送风温度的要求,这就造成了能源的进一步浪费。图 1-1 所示为一次回风的全空气系统空气处理,从中不难发现,过程 $L-C$ 为再热过程,致使传统空调系统能源浪费明显^[7]。下面对传统空调存在缺陷进行分析。

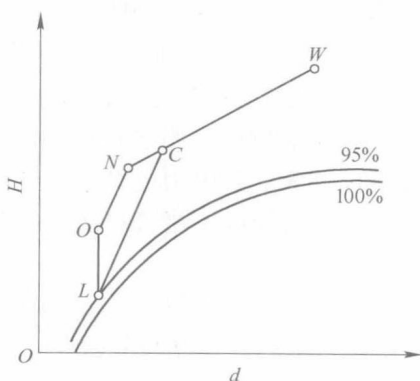


图 1-1 一次回风的全空气系统空气处理

(1) 热湿耦合处理的能量损失问题。传统的空调系统普遍采用的是热湿耦合处理的方式,即利用低温冷冻水(7°C)经空气冷却器对空气进行处理,空气的冷却和冷凝除湿同时完成,然后送入室内,去除室内的显热负荷和潜热负荷。如果空调送风仅满足室内排热的要求,冷冻水的温度低于室内空气的干球温度(约 25°C)即可,考虑传热温差与介质的输送温差,冷冻水的温度也只需要 $15\sim 18^{\circ}\text{C}$ 。传统空调热湿耦合处理的方式需要同时满足排湿的要求,由于采用冷凝除湿方法,冷冻水的温度需要低于室内空气的露点温度,考虑到 5°C 传热温差和 5°C 介质输送温差,从而就不得不使冷冻水的温度降到 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$ 。占总负荷一半以上的显热负荷部分,本可以采用高温冷冻水来处理,却与除湿一起共用 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$ 的低温冷冻水进行处理,造成能量品位利用上的极大浪费。而且,经过冷凝除湿后的空气,虽然湿度(含湿量)满足要求,但由于温度过低,许多情况下还要对空气进行再热处理,以达到送风温度,这就造成了能源的进一步浪费。

(2) 显热负荷与潜热负荷不相协调问题。显热负荷由围护结构传热、太阳辐射、室内人员与设备散热等部分组成。潜热负荷则由室内人员、敞开水面、植物蒸发等散湿部分构成。通过冷凝方式对空气进行冷却和除湿,其热湿比只能在一定的范围内变化,而建筑物实际需要的热湿比却有较大的变化范围。一般说来,室内的湿负荷产生于人体,当居住人数不变时,产生的潜热不变。但显热却随气候、室内设备状况等的不同发生较大幅度的变化。而另一些场合,室内人数有可能有大范围变化,但很难与显热量的变化成正比。这种变化的热湿比与传统的热湿耦合空气处理方式的基本固定的热湿比不相匹配。因此一般是牺牲对湿度的控制,通过仅满足室内温度的要求来妥协。这就造成室内相对湿度过高或过低。过高的结果是不舒适,进而通过降低室温来改善热舒适,造成能耗不必要的浪费,相对湿度过低也将导致室内外焓差增大而使处理室外新风的能耗增加。

(3) 室内环境及空气品质的问题。空调在改善人民生活质量和提高生产效率的同时,也带来了能源与环境的双重危机。室内环境的健康问题也越来越引起关注,影响室内健康因素主要有霉菌、粉尘和室内散发的 VOC(可挥发有机物)等造成。传统的空调系统是通过冷表面对空气进行降温除湿。这就导致冷表面成为潮湿表面甚至产生积水。室外空气中致病微生物进入到组合式空调箱或室内末端风机盘管中,它们就会黏附在冷表面上和沉降在凝结水盘中。而冷表面高湿的特点正有利于滋生和繁殖大量的病原微生物,最终导致将其送入房间。空调系统繁殖和传播霉菌成为可能引起健康问题的主要原因。

传统空调系统为排除室内装修与家具产生的 VOC、排除人体散发的异味、降低室内 CO_2 浓度,最有效的措施是加大室内通风换气量。然而大量引入室外空气就需要消耗大量冷量(冬季为热量)去对室外空气降温除湿(冬季为加热)。当

建筑物围护结构性能较好室内发热量不大时,处理室外空气需要的冷量可达总冷量的一半或一半以上,造成空调能耗加大。

(4) 空调末端装置的噪声问题。为排除余热余湿,同时又不使送风温度过低,就要求有较大的循环风量,会产生室内较大的空气流动,使居住者产生不适的吹风感。很大的风量还极易引起空气噪声,并且很难有效消除。在冬季,为了避免吹冷风,还要增加一套暖气系统实现供热,造成室内重复安装两套环境控制系统。

(5) 输送能耗问题。为完成室内环境控制的任务,就需要输配系统以带走余热、余湿、 CO_2 、气味等。在中央空调系统中,风机、水泵等输送能耗占空调能耗的 40% ~ 70%。

可见,传统空调系统明显具有自身存在的、难以克服的局限性,不论从满足人们日益增长的室内舒适性要求、保障人们的健康、保护我们人类共同生活的地球环境,还是保证我国国民经济持续健康发展的角度,发展新型健康节能的中央空调系统都有着深远的意义。

1.1.3 平面辐射空调简介

平面辐射空调是一种新型的空调末端形式,其本身是具有换热功能的换热器,它与合适的冷热源组成复合空调系统联合运行时,节能性显著。

平面辐射空调技术源于 1907 年的英国 Arthur H. Barker 教授,他将热水管道埋于地板中,取得了很好的采暖效果。之后 20 世纪 70 年代,北欧等地区的建筑节能工作者对辐射供冷进行了大量研究^[7]。

辐射供冷(供暖)末端装置按照其结构形式不同划分为三大类^[8,9]。

一类是辐射供暖楼板,将塑料管埋在水泥楼板中,形成辐射地板或顶板,如图 1-2 所示,称为“水泥核心”结构(concrete core system,简称 C 型)。这一结构在瑞士得到较广泛的应用,在我国住宅建筑如济南太阳树小区等中有所应用。这种辐射板结构具有较大的蓄热能力,但是启动时间长,动态响应慢,不利于控制调节。

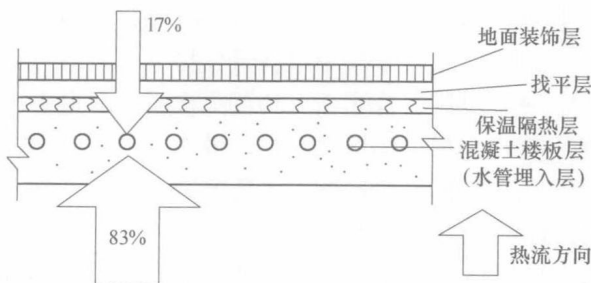


图 1-2 “水泥核心”结构的混凝土埋管系统示意图

另一类是以金属或塑料为材料,制成模块化(module panel)的辐射板,形成冷辐射吊顶或墙壁,这类辐射板的结构形式多种多样,如图1-3所示,又称为“三明治”结构(sandwich,简称S型)。该结构的辐射吊顶板集装饰和环境调节功能于一体,是目前应用较广泛的辐射板结构。具有对负荷反应迅速灵敏,占用室内空间小,安装、检修方便,运行噪声低等特点。但S型辐射板质量大,耗费金属较多,价格偏高,表面温度分布不均匀等。

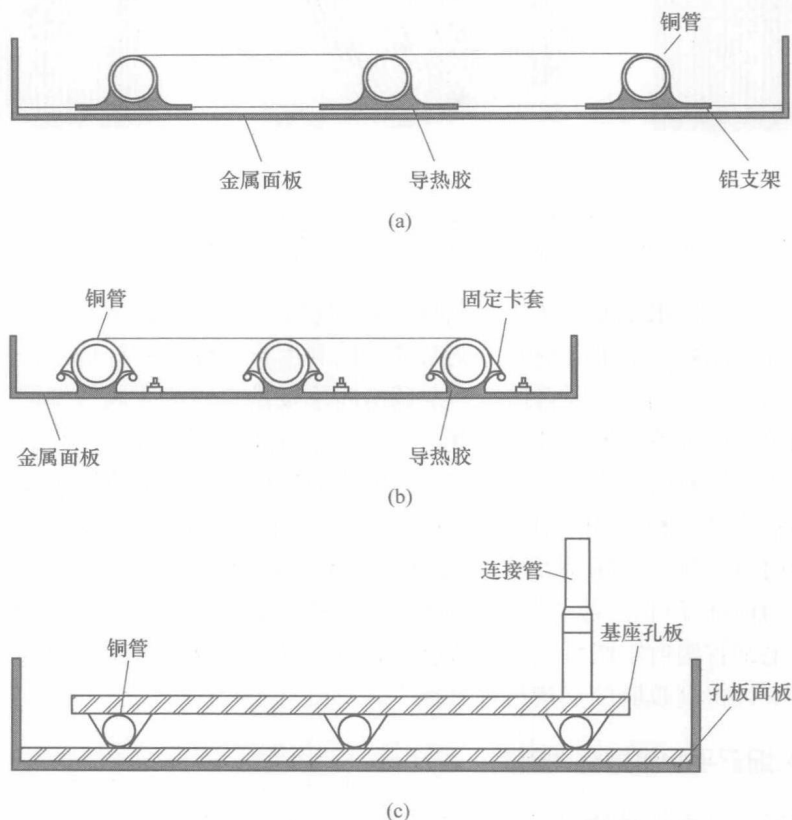


图1-3 常见的几种金属辐射板形式示意图

第三类就是毛细管平面辐射空调系统(capillary tubes mat air-conditioning system),当用作供冷时也被称为“毛细管格栅”(capillary grid system)。管内水流速度较慢,大约在 $0.1 \sim 0.2 \text{ m/s}$,因此系统的噪声低。格栅的表面积大,温度分布均匀,布置灵活,适用于新建项目和改造项目。它对冷负荷变化的反应时间介于金属辐射板和混凝土辐射板之间,如图1-4所示。

毛细管辐射板换热面积比传统的空调末端形式(散热器、风机盘管等)大得多,且由于毛细管网管壁比较薄,导热性能好,因此毛细管辐射空调相较于传统的换热器是一种高效节能的空调末端形式。毛细管辐射空调系统冬季供水温度

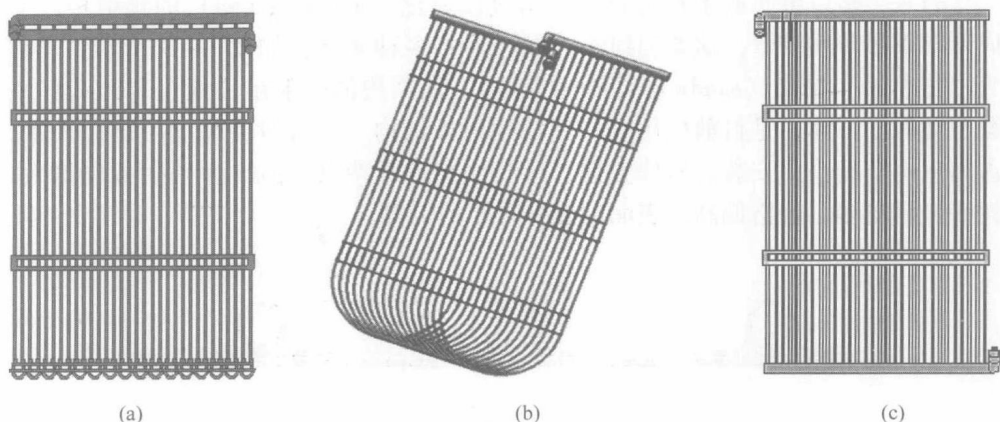


图 1-4 “毛细管格栅”的三种产品形式

(a) S 型毛细管格栅；(b) U 型毛细管格栅；(c) G 型毛细管格栅

30℃左右、夏季供水温度 20℃左右就能达到理想的采暖、制冷效果。因此为了提高空调系统的能效，毛细管辐射空调系统可以利用自然界中一些低品位能源为冷热源，组成复合空调系统联合运行为空调房间采暖供冷。该空调系统能够直接或间接地利用一些天然能源，如太阳能、地热能、工业余热或其他低品味能源等，从而节约化石燃料的燃烧量，减少废气、废物的排放。从这个角度来说，毛细管辐射空调系统是一种节能的建筑空调系统形式，有利于减轻日益严重的雾霾问题。以济南市为例，采用毛细管辐射空调系统代替传统的散热器等采暖末端形式，年节约标准煤可达 40 余万吨，减少二氧化碳排放 100 余万吨。由此可见，建筑采用毛细管辐射空调系统是降低能耗、发展绿色建筑的重要手段和措施，该空调方式应该得到政府的支持与重点推广。

1.1.4 毛细管平面辐射空调末端

毛细管格栅模拟植物叶脉和人体皮肤下的毛细血管机制，由外径为 3.5 ~ 5.0mm（壁厚约 0.9mm）的毛细管和外径 20mm（壁厚 2mm 或 2.3mm）的供回水主干管构成管网格栅（图 1-4），通过毛细管内流动的水来调节自身温度，从而达到与周围环境温度的平衡。毛细管格栅平面辐射空调主要以辐射方式调节室温。

毛细管格栅平面辐射空调在冬季供暖时，在系统中循环的热水温度为 28 ~ 32℃，夏季供冷时，循环水温为 18 ~ 20℃，可直接或用热泵间接利用各种工业废热、太阳能、地热或其他低温能源，节约煤、油、气等有限的、不可再生的化石能源。并能减少废物排放，保护环境。毛细管格栅平面辐射空调单位面积供热和制冷效率高，可实现快速供冷供热；毛细管格栅平面辐射空调交换面积大，室内

温度均匀,能有效解决传统空调在大房间出现温度死角的问题。其具体的优点有^[10]:

(1) 创造优雅的室内环境。传统的风机盘管空调系统,在室内排列各种送水管、冷凝水管,吊装风机盘管、风口,在各房间要穿墙凿洞,房间内要吊顶及制造造型,这就造成了很大空间浪费,增加层高,造成投资的浪费。而毛细管格栅平面辐射空调是一种隐形空调,安装厚度一般小于5mm,充满水质量在 $600 \sim 900\text{g/m}^2$,可以灵活布设在天花板、墙壁或地面上,且安装极为方便。这就大大减少了室内空间占用和简化了造型的复杂,既节省了建筑空间,又增强了室内美观。

(2) 舒适性高。在较为舒适的情况下,人体产生的热量,按辐射45%、对流30%、蒸发25%的比例散发。辐射换热对人体的舒适感是极为重要的。毛细管格栅平面辐射空调弥补了传统空调以对流传热为主,使人体散热不适的缺点,增加了人体的瞬时辐射换热。毛细管格栅系统主要是以辐射方式换热,这种静态供冷供热模式营造出了与自然环境相类似的效果,人体在这种环境里感到自然、舒适:

1) 毛细管格栅在顶棚或墙壁内均匀布置,室内温度水平分布均匀。

2) 使用毛细管格栅空调时,只需要一定量的新风,送风量少,风速低,人体无吹风感。

3) 由于送风量少,降低了室内空气对流的速度,降低了通风带来的空气垂直温差。

4) 以辐射方式供冷供暖,室内温度变化速度快,轻柔安静,无空气流动和设备产生的噪声。

(3) 室内无运转装置,噪声很小。

(4) 毛细管格栅平面辐射空调系统的节能性。

1) 在辐射换热作用下,人体的实感温度会比室内空气温度要低(供冷)或高(供暖),因此在相同的热感觉下与传统空调系统相比,采用毛细管格栅平面辐射空调系统的室内设计温度在夏季略高,冬季略低,建筑冷(热)计算负荷均减少,使空调能耗降低。

2) 围护结构、地面和环境中的设备表面吸收辐射冷(热)量,形成天然冷(热)体,可以缓解和转移冷(热)负荷的波峰值出现的时间。

3) 毛细管格栅平面承担大部分的负荷,只需要处理少量新风,送风量减小带来动力消耗的降低。

4) 毛细管格栅平面辐射空调使用较高温度的冷冻水,可以采用天然低温水等,也可以提高制冷机的制冷系数,大大减少制冷机的耗能与制冷设备的投资。采暖使用较低水温热水,可直接或间接利用各种工业余热、太阳能、天然温泉水

等, 节约能源。

(5) 毛细管格栅平面辐射空调绿色环保。毛细管格栅平面辐射空调系统封闭运行, 不产生废水、废气污染。原材料卫生无毒, 可回收再利用。

毛细管格栅平面辐射空调系统是一种全新的空调设计方法, 它能够更高层面的创造良好的舒适环境、提高室内空气品质和节能^[11]。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

由于辐射供冷能够给人们创造舒适、更接近自然的环境, 所以一直是人们关心的热点。早在 20 世纪 30 年代, 瑞士苏黎世一家商店就开始尝试采用辐射供暖(供冷), 但是由于当时材料、控制技术等方面的限制, 造成供冷量严重不足, 并且还经常造成水管断裂、锈蚀、系统漏水等现象。

据文献 [12] 报道, 直到 20 世纪 70 年代辐射吊顶作为空调系统的末端供热(供冷)形式, 在许多建筑中得以广泛应用, 并规定了辐射吊顶表面温度和供水、回水温度等技术参数, 这就是辐射供热(供冷)较为成熟技术的开始。

关于辐射供热(供冷), 目前世界各国学者主要集中在如下几个方面进行研究。

1.2.1.1 辐射传热机理研究

这方面早期的研究主要是在辐射板供暖的换热机制方面^[13,14]。

L. Laurenti 等人^[15]、Y. Z. Xia 等人^[16]、I. B. Kilis 等人^[17]、R. K. Stand 等人^[18,19]通过对辐射供冷原理及物理、数学模型的研究各自提出了辐射供冷的数学模型, 描述并求解了辐射供热(供冷)的热传导问题。

T. Kim 等人^[20]、S. Murakami 等人^[21]、C. Stetiu^[22]开展的 CFD 仿真研究和能耗分析显示辐射供冷系统比全空气系统节能, 并指出辐射系统代替全空气系统可节约 30% 的能源及 27% 的峰值耗电。

K. Kitagawa 等人^[23]的研究表明室内微小的气流运动可以增加顶板供冷的舒适性。

以上研究主要集中在辐射平面的热传递机理、辐射对流各占比例、单位面积的散冷量、顶棚结露等问题研究, 很少有关于房间动态负荷变化、对房间热负荷响应等方面的描述。

1.2.1.2 毛细管格栅与置换通风复合空调系统的研究

据文献 [24]~[26] 报道, 有人建立了机械通风结合冷却顶板、顶部保温的金属辐射板等系统的简化计算数学模型。该模型可以用来计算自然对流情况下的冷却顶板冷却能力; 还可以分析机械通风情况下, 混合对流对冷却顶板的

影响。

美国宾夕法尼亚州立大学 A. Novoselac 等人^[27]对冷却顶板与置换通风结合系统在美国的设计和应用进行了研究,指出置换通风承担的冷负荷份额对垂直温差和室内空气品质有影响。采用冷却顶板结合置换通风系统对于靠近冷却顶板的位置空气湿度更大,这加大了顶棚结露的可能。研究针对不同气候、不同建筑类型和不同的冷负荷的设计规范显得非常重要。

美国的 C. L. Conroy 等人^[28]将冷却顶板、独立新风以及消防系统结合起来,对其经济性、可行性以及各技术细节进行了分析,得出了很好的性价比。

S. A. Mumma 等人^[29]给出了辐射供冷与独立新风相结合的复合空调系统的设计步骤及该复合空调系统在商业上的应用。

D. L. Loveday^[30]用实验方法验证了冷却顶板/置换通风复合空调系统的热舒适性优于常规空调系统的结论。

文献[31]指出:在置换通风与冷却顶板环境中,如果室内空气令人满意的话,温度梯度在 $4^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

S. A. Mumma^[32]在充分考虑毛细管格栅与置换通风复合系统一次投资与运行状况的情况下,研究了除湿措施。

以上研究主要集中在传统的置换通风结合毛细管格栅的舒适度、温度梯度等方面,较少涉及合适的新风量研究,室内气流组织对舒适度的研究也不多。

1.2.1.3 辐射顶板性能改进研究

伊朗学者 M. M. Ardehali 等人^[33]对辐射顶板的能量交换机制进行了研究,建立了解析数学模型并与已有的文献数据进行了比较,吻合较好。

法国 J. Miriel 等人^[26]利用建于雷恩的实验室对金属辐射顶板的性能、热舒适性和能耗进行了实验和模拟研究。为在法国的应用提供了有利参考数据和推广依据。

土耳其学者 A. Misirlioglu 等人^[34]为了强化冷却顶板房间内的空气流动,在房间吊顶上安装了一个翼形结构,对其进行了 CFD 模拟,表明在冷却顶板房间中加上一个翼形结构可以起到增强通风的效果。

1.2.1.4 毛细管格栅空调的舒适性研究

美国供热通风工程师协会于 1919 年在匹兹堡建立了实验室,最初就是以室内气候对人的舒适和健康的影响作为研究开端。在 20 世纪 20~30 年代,英国的 H. Vernon、Bedford 和 Warner 等人一直进行着舒适性基础理论以及工业应用方面的研究工作,同时美国也进行着有关舒适性的重要实验研究工作。

20 世纪 20 年代, Houghton 和 Yaglou 等人对空气温度、湿度、气流速度等对舒适性的综合作用进行了研究,并导出了有效温度指标 ET,对热舒适的研究产生了深远的影响。^[35]

20 世纪 60 年代, 丹麦技术大学 P. O. Fanger^[36,37] 教授在总结人体环境的生理物理实验的基础上, 提出了热舒适方程, 并给出了热舒适指标即预计平均舒适度 PMV(predicted mean vote) 和预计不满意率 PPD(predicted percentage of dissatisfaction)。该指标是目前国际上公认的能较好地反映人体热舒适性的指标, 前者是七度热感觉尺度的客观评价, 后者是对环境不满意的人员百分数, 两个热舒适指标都是大量人员受试后的统计结果。

X. X. Yuan 等人^[38] 研究了换气次数、冷负荷、热源位置、围护结构及房间高度对置换通风空调系统运行的影响, 进行了温度梯度、风速、污染物分布对舒适性、节能影响的分析。并对毛细管格栅结合置换通风空调系统的一次投资进行了分析。

J. Miriel 等人利用 TRANSYS 软件, 对利用冷却吊顶进行夏季供冷的房间舒适性和能耗情况进行了模拟研究, 指出为了避免结露, 吊顶表面温度不能低于 17℃。^[39]

以上研究主要集中在温度梯度、风速、污染物等因素对舒适度的影响, 较少涉及在较好的舒适度情况下, 空调的设计参数的数值范围, 或能够应用于设计的合适参数。

1.2.1.5 毛细管格栅空调适应性研究

新加坡的 R. Kosonen 等人^[40] 和泰国的 P. Vangtook 等人^[41,42] 对高温高湿气候下的通风冷却顶板可行性进行了实验研究和模拟, 研究表明减少渗透进风, 独立新风足以排除室内湿负荷。辅以有效的防凝露控制措施完全可以在新加坡、泰国这样的气候条件下使用冷却顶板。

韩国学者 J. H. Lim 等人^[43] 针对韩国人喜欢席地而坐的生活习惯, 对辐射供冷系统的控制进行了研究, 研究表明采用水温控制比水流控制效果更好。

日本学者 K. Nagano 等人^[44] 就医院病床或卧室中, 人处于仰卧状态下, 采用毛细管格栅的控制参数进行了实验研究, 得出了人在仰卧状态下达到舒适时的设计参数。

日本东京大学的 D. Song 等人^[45] 研究了在夏季将自然通风引入室内的辐射板供冷情况。他们采用 CFD 模拟和实验的方法对辐射板设置在工作区的情况进行研究。结果表明这种设置会产生凝结水, 并给出通过凝水盘收集凝结水, 然后排走, 为了防止霉菌滋生繁殖, 应在辐射板上涂以抑制霉菌生长剂或杀菌剂。

荷兰的 J. Niu 等人^[46] 用逐时模拟法对冷却顶板与全空气系统进行了比对研究。得出在荷兰气候条件下, 冷却顶板与变风量系统可以很好的兼容, 并且性能优于全空气系统。

1.2.1.6 毛细管格栅空调节能技术研究

温湿度独立控制技术和独立新风系统 (dedicated outdoor air - conditioning sys-