

暖通空调新技术 4

NEW TECHNOLOGY OF HV&AC

中国建筑学会暖通空调委员会 ■ 中国建筑工业出版社 主编

中国建筑工业出版社

暖通空调新技术

2002年11月出版

《暖通空调新技术》编委会

编委会主任：吴元炜

编委会成员（按姓氏笔画为序）：

马殿良 王盛卫 计育根 龙惟定 田胜元 那景成
李志浩 李娥飞 杨纯华 吴元炜 吴德绳 张永铨
张家平 陆耀庆 陈在康 陈沛霖 陈貽谅 范存养
郎四维 赵文德 赵先智 胡仰香 彦启森 姚荣华
蔡路得

主 编：吴元炜

栏目负责人

编者寄语：吴元炜

行业综述与展望：郎四维 彦启森

行业名厂专访：张永铨 龙惟定

新技术天地：李志浩 张家平 陈在康 赵先智

工程实录：那景成 李娥飞 计育根 陆耀庆 蔡路得

行业大事记：范存养 赵文德

企业园地：胡明安 赵文德

责任编辑：姚荣华 胡明安 齐庆梅

创刊年份：1999年

地 址：中国北京西郊百万庄

电 话：(010) 68393813

E-mail: yrh@china-abp.com.cn, qingmei3@sina.com

广告代理：北京旋风广告有限责任公司

广告经营许可证号：京工商广临字 99034 号

出版单位：中国建筑工业出版社

邮 编：100037

传 真：(010) 68319299

中国建筑工业出版社出版、发行（北京西郊百万庄）

新华书店经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本：880×1230毫米 1/16 印张：10

插页：1 字数：317千字

2002年11月第一版 2002年11月第一次印刷

印数：1—2500册

定价：25.00元

ISBN 7-112-05371-4

TU·4709 (10985)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题，可寄本社退换

（邮政编码 100037）

本社网址：http://www.china-abp.com.cn

网上书店：http://www.china-building.com.cn

图书在版编目（CIP）数据

暖通空调新技术/吴元炜主编. —北京：
中国建筑工业出版社，2002

ISBN 7-112-05371-4

I. 暖… II. 吴… III. ①采暖—新技术
②通风工程—新技术③空气调节系统—
新技术 IV. TU83

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2002）
第 081694 号

编 者 寄 语

在各方努力下,《暖通空调新技术》第四期在 2002 年全国暖通空调制冷学术年会前问世了。内容上做到了年年有新面貌。

本期“行业综述与展望”栏,引入了 7 篇文章,有单项技术领域,有新材料方面,还有地区应用前景。不同格调,便于将这个栏目搞活泼些。

“新技术天地”栏,引入了 11 篇,大部分都有实验、实测做基础,而且内容较新颖,对当前工程实践关心的问题,提供了一些启示。

“工程实录”栏,大部分为工程设计介绍,阐述工程设计中的成功经验,工程实录只有一篇。这部分数量上相对于建筑量居世界首位的中国暖通空调界而言是不多的。今后仍需要广大设计人员关注,或撰稿或推荐项目。总之,积累时日,可以看出我们行业的进步。

“行业名企专访”栏,发表了“百年开利在中国”,对于了解世界空调业的发展也有帮助。空调与冷气只有本质区别的,后者形象说明服务于温度的改变,前者则内涵广泛,百年之初,集中于湿度处理与控制之创造。对此,值得我业内人士深思。

进入 21 世纪,暖通空调在中国会有更大的发展,但也面临严峻挑战,即在实现室内环境的安全、健康、舒适的同时,要使为此消耗的能源在可能提供的资源允许容量内,而对大气环境的不利影响(温室效应等)又要在其可能承受的限度内。我们今后发展,走一条什么样的路,值得加以认真对待。博采众长,为我所用,是我们习知的。我们要用系统工程思维和工作方法,学习运用新原理、新技术来解决我国发展中提出的各种问题,进一步提升我们自己。开拓创新,与时俱进。

再次感谢作者、编委、编辑、中国建筑工业出版社领导及给予我们支持的企业。

吴元炜

2002.9.21

目 录

编者寄语

行业综述与展望

- 生物安全技术与微生物控制..... 沈晋明 黄霞 (1)
- 除湿法空调及系统..... 江亿 李震 (5)
- 多元变频 VRV 空调系统原理 邵双全 石文星 李先庭 彦启森 (10)
- 住宅用铜铝(或钢铝)复合型散热器技术评析
..... 牟灵泉 楚广明 张双喜 牟冬 (15)
- 新型耐热塑料(PE-RT)管的发展与应用 陆耀庆 (22)
- 自然风的 $1/f$ 紊动特性的研究现状与展望 欧阳沁 朱颖心 (29)
- 武汉地区水源热泵系统应用前景分析..... 陈焰华 祁传斌 茅贵文 陈睿 (33)

行业名企专访

- 百年开利在中国..... 龙惟定 张永铨 (37)

新技术天地

- 纳米材料光催化空气净化器 VOCs
降解模型及应用..... 张寅平 杨瑞 许瑛 赵荣义 (41)
- 改进旋风器结构提高除尘效率的新方法..... 陈剑 沈恒根 许文元 陈东武 (46)
- 无风道诱导风机通风空调系统研究..... 殷平 (49)
- 基于网络环境的暖通虚拟实验室的研究..... 林尧林 张国强 何彦 (53)
- 某剧场座椅下送风空调方式的温热环境与气流分布研究——
(1) 实验室模拟分析 白玮 潘毅群 谭洪卫 村田敏夫 (57)
- (2) CFD 模拟 潘毅群 白玮 谭洪卫 村田敏夫 (61)
- 剧场空间置换空调系统的应用研究
之 1: 地上侧送风方式 谭洪卫 村田敏夫 (65)
- 之 2: 座椅送风方式 谭洪卫 潘毅群 白玮 村田敏夫 (69)
- 冬季热压作用对某办公楼空调效果和能耗的影响..... 朱伟峰 薛志峰 江亿 (73)
- 某剧场座椅送风热环境实测研究..... 陆俊俊 王威 李先庭 (76)
- 低温热水地板辐射供暖辐射板面散热量计算..... 刘宇 赵先智 (82)
- 空气幕常用设计计算方法应用与改进分析..... 秦红 (87)

工程实录

- 哈尔滨远大商业广场暖通空调设计..... 高甫生 高鹏 (91)
- 某高大空间厂房中央空调系统设计的研究..... 余跃进 吴雁 郁华斌 (97)
- 某特殊工艺要求厂房的暖通空调设计 黄保民 涂光备 (100)
- 武汉瑞通广场暖通空调设计 陈焰华 刘晓燕 (104)
- 整体化蓄冰空调设计 杨光 苏夺 周凌云 (108)
- 西安国际商展中心空调设计 崇楠 (113)
- 干燥房空调设计 马伟骏 周静瑜 (118)
- 西安城运村体育馆空调通风设计 殷元生 (122)
- 和兴小区采暖热计量和控制系统 方修睦 徐细兵 (126)

深圳彭年酒店空调设计	赖庆林 陆 葵	(130)
舟山普陀东港隧道通风改造工程设计研究	林志勇 张 帆	(136)
由松树俱乐部五星级酒店看发达国家的空调设计	王伟卿 董洪伦	(140)
杨凌国际农业会展中心暖通设计	王 谦	(144)
北京顺义国际学校空调通风工程设计	曾志华 郭 莉 胡 萍	(150)

行业大事记

2001 年行业大事记	(156)
-------------------	-------

生物安全技术与微生物控制

沈晋明 黄霞

同济大学暖通空调研究所

摘要 本文说明生物安全技术的重要性,微生物控制的特点以及生物安全实验室分级,并重点阐述实施生物安全技术原理,控制理念,建筑与设施的要点。

关键词 生物洁净技术 空调系统 无菌环境控制

1 引言

生物安全技术是用于进行微生物研究工作的一项安全防护技术。人们将进行微生物研究的特殊的工作环境称为微生物与生物医学实验室,我国通常称之为生物安全实验室。由于各种各样的微生物具有不同程度的生物危害,在研究微生物的同时工作人员完全有可能不断地受到微生物危害,感染疾病,危及生命安全,甚至严重污染环境。世界上会不时出现不明微生物,遗传工程也不断地产生新的微生物,对此类微生物的特性与危害难以预料。因此研究人员进行微生物实验的危害程度及受感染的危险性就更大。由于生物安全实验室是以防止微生物污染的外逸、保护工作人员和周围环境为目的,它不仅要求除菌,更要求隔离。因此又被称为隔离式生物洁净室。

近代常有生物安全实验室的工作人员受到传染性微生物感染的记录。早在1941年 Meger and Eddee 报告了美国74实验室发生了马尔他热感染。1949年 Sulkin and Pike 报道了实验室发生的222例病毒感染。美国分别在1951年,1965年和1976年共调查了5000个试验,累计有3921个案例,其中多数病种和20%病例与已报告事故相关,并与当时所产生的气溶胶有关。生物安全引起人们高度重视。

美国在20世纪70年代末期,80年代初期就已经很清楚地了解在微生物与生物医学实验室里工作所需要具备的知识、技能以及防止感染性疾病的一些方法,然而并没有很明确地规范此类实验室内的的工作行为。在美国国家疾病管理中心(CDC)主

持下制定了一系列的指导原则,这一指导原则一再地被沿用和更新,至今已发展到第四个版本。这个指导原则的中心概念是用分类的方法,根据不同的感染性质的病菌以及实验室的工作内容来分类,依据不同的类别来决定微生物与生物医学实验室内工作规范及行为,以防感染性疾病的发生。

由于操作对象的特殊性以及它的危害性,生物安全技术一直致力于将实验室内可能发生的生物危害和风险降低到最低限度和缩小到最小范围,这也是生物安全防护实验室建设的最重要前提。一个好的生物安全实验室应该是指安全因素得到最充分考虑的实验室。

生物安全实验室的建设工作要根据将在其中进行的实验和操作对象来开展。建设者应该针对实验室各类操作对象所引起的疾病的严重性、感染途径、感染性与毒性、对抗生素抗性范围、有效的治疗与疫苗、传媒(如节肢动物)是否存在、病原是否为本土性及对动植物的影响等来进行生物危害评估。对不同生物危害级别的操作对象,人员受感染所引起的疾病的严重性、感染途径和感染性也不会相同,因而对生物安全防护实验室的相应级别、设计与建造、设备与装置会提出不同的要求。为了减少甚至完全消除对工作人员的危害以及对外在环境的可能污染,生物安全实验室的工作环境中注重有效地隔离、防范和处理这些具有感染性的病菌扩散的安全措施与方法。

自从2001年9月11日恐怖组织攻击美国本土之后,生化恐怖主义和生化攻击的手段引起国际间的特别注意和重视,生物危害震惊全球,各国都加强防范生物污染和检疫,加快了生物安全防护实验

室的建立。随着我国卫生防疫体制的改变,各地纷纷建立起疾病预防控制中心,国家疾病预防控制中心已在4月23日挂牌,生物安全防护实验室已是必不可少的设施。我国尚无安全性要求最高的四级生物安全防护实验室,目前正在进行前期工作。近期由于艾滋病的需要,我国将建立20多个3级实验室。

本文将结合我们的实践和工作中所累积的资料,对生物安全防护实验室作一简要的介绍,特别重点阐述对各级生物安全防护实验室所牵涉到的建筑与公共设施的设计上的一些问题。

2 微生物与生物医学实验室的分级

生物安全实验室的等级是由它所隔离的微生物危险程度所确定。危险程度分为有高度危害性、中度危害性、低度危害性和微度危害性。

国际上根据微生物病菌病的感染性强度及危害性将生物安全实验室 Biosafetylab (BSL) 分为四类,从BSL1至BSL4的四个级别。BSL1是属于轻度的,危害性最低的级别;BSL4是属于高感染性的工作环境。美国“9.11”事件后,生化恐怖活动以及细菌武器中可能所运用到的病毒和菌种大多属于BSL4的范围。

在微生物及生物医学实验室的四个级别中,BSL1到BSL3实验室在过去有许多实践与成功经验。但仍有许多知识尚未被大多数工程技术人员所熟知。然而对于BSL4实验室这方面的研究及运用知之甚少,很少有公开的资料。一方面就全球范围来讲建设量固然太少,另一方面也惟恐对资料理解不透彻、建造出不合格的BSL4实验室而成为人类或环境的安全隐患。一般来说BSL3实验室的建造与研究菌种要到所在国卫生部备案,而BSL4实验室的建造与研究菌种要到联合国备案,并接受检查。

国外一些国家既有微生物危险性分类表,又指出进行操作相对应的实验室级别,对于保护人员和环境具有很强的指导作用。根据研究对象的危险程度的不同,美国等国分别将生物安全防护实验室分成了四类。我国即将颁布国家标准,“生物安全通用准则”,对人体有危害的微生物按其危险性也分成四级。两者差异见表1。

微生物与生物医学实验室的分级 表1

级 别			操作对象的生物危害性	
中国	NIH	CDC	中 国	美 国
1 级	P1	BSL—1	对健康成年人已知无致病作用	不会经常引发健康成人疾病
2 级	P2	BSL—2	对人或环境具有中等潜在危害	人类病原菌,因皮肤伤口、吸入、黏膜暴露而发生危险
3 级	P3	BSL—3	主要通过呼吸途径使人传染上严重的甚至是致死疾病,通常已有预防传染的疫苗	内源性和外源性病原菌,可通过气溶胶传播,能导致严重后果或生命危险
4 级	P4	BSL—4	对人体具有高度的危险性,通过气溶胶途径传播或传播途径不明。目前尚无有效的疫苗或治疗方法	对生命有高度危险的危险性病原或外源性病原;致命、通过气溶胶而致实验室感染;或未知传播风险的有关病原

注: NIH—美国国立卫生研究所; CDC—美国疾病管理中心。

3 控制理念

为了保障生物安全防护实验室的工作人员不受危险微生物的感染以及实验室周围环境不受污染。生物安全的控制理念是确保建立一套完备、可靠的保障体系。尤其是3级与4级的生物安全实验室,要做到万无一失。建造生物安全实验室必须具有高度的责任感和安全意识。当然也没有必要患生物恐怖症,盲目提高生物安全实验室的级别,否则会造成巨大的浪费。特别是没有必要过多建造4级生物安全防护实验室。

国内有些单位由于对生物安全控制理念不清楚,往往照搬洁净室做法。有的直接采用工业洁净室技术,有的套用GMP规范,也有的误做实验动物室处理。加大送风量、盲目提高洁净度级别、强调室内浓度场均匀性,或设置过多的缓冲室、人净物净流程烦琐,对生物安全控制反而不利。生物安全实验室重点在于防护,对室内的洁净度要求并不高,最多为10万到万级要求。而国内提出洁净度的要求主要考虑保障与延长室内生物安全柜运行寿命。国外生物安全实验室的洁净度要求则低得多。无菌要求高的、控制最严的操作均在室内的生物安

全柜中进行。与洁净室概念相反,生物安全柜就是污染区。因此生物安全柜应远离实验室入口,避开工作人员频繁走动区域,且有利于形成气流从清洁区流向污染区的气流流型。而不像洁净室要求浓度场均匀性,因此不能用双侧均匀分布的排风口,也不采用上送上排的通风设计。洁净室系统重视送风,生物安全系统更重视排风,3级生物安全实验室的排风必须经过高效过滤器排出。4级生物安全实验室的排风必须连续经过2个高效过滤,美国有的4级生物安全实验室经高效过滤后的排风甚至要经过高温燃烧器,彻底灭菌。当然更换粘满病菌的高效过滤器不容丝毫马虎,必须进行就地消毒或采用可在气密袋中进行更换高效过滤器结构,再经高效消毒,或高温烧毁。也可采用特定菌的抗菌过滤器,可大大降低系统阻力,节约运行成本与更换费用,但是最后一级必须是高效过滤器。

国内建造生物安全实验室往往过分重视建筑与设施。其实生物安全实验室软件重于硬件,除了强调安全设施与技术措施外,严格管理与正确操作更为重要。事实上大多数生物感染事件是由于实验设备(如离心杯和转子)发生或泄露气溶胶,或由于操作不当而使污染飞溅、转移或手套等人身防护被尖物刺破等。因此在管理与操作上不产生新的污染(如将产生气溶胶的设备加以密闭,强制排风,严格处于物理隔离之下),不转移(或泄露)污染,以及严格防范(要极其小心处理被污染的针头和具有尖角的设备、强调针尖和尖物不得用手去捡,不得打破、弯曲、重新带上与使用,用塑料代替玻璃等)是一个重要原则。

一般须经过如下几个步骤:

3.1 首先要根据微生物危害评估的原则(如传染性微生物致病能力、传播途径、稳定性、感染剂量、操作浓度和规程、实验对象来源(本土或境外)、实验动物实验数据、有效预防和治疗方法等因素)确定实验室的级别;

3.2 建立相应的实验室里的严格的管理体系以及操作规程;

3.3 根据所研究的微生物,配置相应的安全操作的设备;

3.4 建筑与公共设施系统的设计。

建筑与公共设施系统的设计强调严格的物理隔离措施。要求生物安全防护实验室的建设者要深刻

了解物理隔离的概念,一般将物理隔离分为两级屏障,有的还分为三级屏障。

一级屏障是指操作危险微生物的场所,采取把危险微生物隔离在一定空间内的措施。是危险微生物和操作者之间的隔离,是以防止操作人员被感染为目的。方式包括:生物学安全柜和隔离箱方式;系列生物学安全柜方式和罩式防护衣方式。

二级屏障指为了防止病原体从实验室漏到外部环境中而对实验室和外界的隔断,是以防止实验室外的人或环境被感染为目的。方式包括:处于负压、双重门、缓冲室以及设外侧走廊。

有的还将所在的建筑物作为三级屏障实验室的选址,要求建在独立建筑物或建筑物内独立区域,要求建筑的合理平面布局与严密的建筑围护结构,设置防灾的应急措施与紧急出口通道,既要防止突发事件中微生物意外泄漏,又要保护室内工作人员。

其实生物安全实验室就是依据所研究的微生物的危害程度来决定以上三种屏障的隔离、防范、排除、处理等措施不同的组合方式。

各级生物安全防护实验室的物理隔离要求如表2所示。

生物安全防护实验室的物理隔离 表2

实验室级别	一级屏障	二级屏障
1级	工作服、防护眼镜	开放实验台、洗手池
2级	1级、2级生物安全柜;实验服、手套、若需要则采取面部保护措施	1级的基础上增加:高压灭菌锅、洗眼装置、门自动关闭
3级	2级或2级以上生物安全柜;保护性实验服、手套、若需要则采取呼吸保护措施	2级的基础上增加:高压灭菌锅(不产生蒸汽)、自成一区、和进入走廊隔开、双门进入并连锁、独立的通风空调、排出的空气不循环、实验室内负压
4级	3级生物安全柜或2级生物安全柜加全身、供气、正压防护服	3级的基础上增加:单独建筑或隔离区域、有供气系统、排气系统、真空系统、消毒系统、其他有关要求

由表2可见生物安全防护实验室从规划到设计所着重的是隔离、负压的保护概念,消除任一污染

可能的渗漏途径。其目的是要防止微生物因意外的泄漏而造成扩散与污染。在1级和2级的规划上只着重建筑与装修上的要求,而3级和4级则更强调公用设施系统对气流方向的保证,负压的维持等方面的要求。

生物安全防护实验室的适用性
与净化空调要求 表3

实验室 级 别	适 用 性	净化空调设计要求
1 级	适用于已知种类生物材料的工作(如:大肠杆菌、传染性犬疫)	无特殊要求,按一般空调设计
2 级	包括对于工作人员和环境具有各中等程度危害的生物材料的工作(不是致死性),可得到免疫注射或抗生素处理	1. 无特殊要求 2. 处理气溶胶时,应用1级或2级生物安全柜
3 级	通过吸入途径吸入的生物材料将可能产生严重的或潜在致命疾病、可能用气溶胶扩散病菌、如感染则后果十分严重	1. 采用全新风方式的净化空调系统 2. 选用全新风时,在排风系统应装设高效过滤器,并以12m/s的风速向高空排放 3. 室内洁净度应保持在100000级以上 4. 其净化空调系统应独立设置 5. 室内保持负压 6. 可使用2级生物安全柜,其排气可和室内排气合在一起排至室外,但管路系统阻力应保持平衡 7. 排风管道应为负压
4 级	对人体具有高度危害性,通过气溶胶途径传播或传播途径不明,目前尚未有有效的疫苗和治疗方法;与上述情况类似的不明微生物(类似抗原病毒)待到有充分数据后再决定此微生物或毒素。(如:埃波拉病毒、刚果克米亚出血热脑炎病毒、Hypr病毒(黄病毒))	1. 采用独立的送排风系统 2. 采用全新风方式 3. 房间排风与生物安全柜排气应分开设置 4. 生物安全柜排气管路上应装设两级高效过滤器 5. 室内保持负压(-15~50Pa) 6. 使用3级生物安全柜 7. 送排风应有连锁装置,排风发生故障时,送风即停止

4 结束语

随着我国微生物控制要求的提高以及疾病控制中心的体制建立,生物安全实验室近年来会出现一个建设高潮。以生物安全技术为中心的综合保障措施已是实验空间控制的不可替代的有效手段。一个好的生物安全实验室应该是指安全因素得到最充分考虑的实验室。因此生物安全实验室必须由建筑、基本装备、空调净化、医用气体、水、电等多个专业的配合和支撑所构成,完整地实施了设计、施工、检测、验收各个阶段的内容,另外还需要与此相适应的科学合理的运行与严格管理的措施,才能充分地体现生物安全实验室的综合整体,有效地实现综合保障体系。

生物安全技术不同于工业洁净室技术,药品GMP规范,也不同于实验动物环境控制。生物安全实验室是以防止微生物污染的泄露、保护工作人员和周围环境为目的,是一种完全不同的生物洁净技术。尤其设计与建造3级与4级的生物安全实验室要特别慎重。但愿本文的一些综述资料与观点有助于工程技术人员对这方面知识的了解,有利于我国生物安全实验室的建设,使我国生物安全技术提高到一个新的水平。

参 考 文 献

- 1 许钟麟,沈晋明. 空气洁净技术应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989 年
- 2 Foarde K. K Hanley, J. T. Veeck, A. C. Efficacy of Antimicrobial Filter Treatment. ASHRAE Journal, Dec. 2000
- 3 VDI 6022 Teil 3: "Hygienische Anforderungen an Raumlufttechnische Anlagen in Produktionsbetrieben", Sept. 2001
- 4 中华人民共和国标准. (GB 15982—1995), 医院消毒卫生标准. 1995
- 5 沈晋明, 黄霞. 生物洁净技术与微生物控制. 《洁净与空调技术》, 2002 年第 2 期
- 6 CDC, "Biosafety in Microbiological and Biomedical Labs", 4th edition, USA
- 7 中华人民共和国国家标准. 生物安全通用准则 (报批稿). 2001 年

除湿法空调及系统

江 亿 李 震

清华大学建筑学院建筑技术科学系

摘 要 本文综合了各种湿度控制方式，总结出液体除湿方式的优势。该方式对提高空调系统运行性能，优化城市能源结构有重要意义。

关键词 独立除湿 溶液 三联供 能效比

1 引言

空调的湿负荷主要来自室内人员的产湿以及新风中的湿，这部分湿负荷在总的空调负荷中占20%~40%，是整个空调负荷的重要组成部分。目前，常用的空调形式的空气处理方式采用表冷器降温除湿。这样为了满足除湿的要求，经常要把空气冷到很低的温度。如满足室内舒适性需求的空气温度为24℃，露点为14℃，为了实现除湿的目的，冷冻水的温度要低到7℃，而冷机的蒸发温度低到2~5℃。不难看出，需要在温度为24℃的热源下取热以满足降温要求，而需要在14℃下取热以满足除湿要求。冷源的低温要求首先是为了满足除湿要求而设定的，若只是为了降温，蒸发温度可以高得多。为了除湿在冷凝过程中把干空气也冷到了同样低的温度，某些情况下还需要再热来满足送风温度的要求，这也造成能量的浪费。

所以，需要一种能够独立除湿的手段，把除湿和降温过程分开，从而使用温度较高的冷源就能把空气处理到送风状态，提高了制冷机的效率，也可提高室内的舒适性。

本文对目前各种除湿方法进行分析比较，进而给出一种通过液体除湿实现空调的方法。

2 现有的除湿方法及吸附除湿过程的基本原理

2.1 几种现有的除湿方法

除湿有很多方法，归纳起来如下表：
对表中各种除湿方式比较可以看出，利用吸附材料除湿是现有的除湿方式中能够实现湿度独立控

除湿原理	除湿方式		特 点
通过降低空气中饱和含水量的办法使水分析出	冷凝除湿		效率低（如引言所述）
	将空气加压冷疑		干空气也同时被压缩，功耗大
营造一个外部吸湿源来吸收空气中的湿	膜法除湿	另一侧抽真空（依靠膜两侧的水蒸气分压差）	抽真空方法同样耗功很大，另外对膜的强度也有很高的要求
		另一侧加热再生（依靠膜两侧的水蒸气化学势差）	膜本身很薄，膜两侧的温差较小，而温差又是产生化学势差的原因，所以，导致膜两侧的传湿动力很小，不可行
	利用吸附材料吸湿	固体吸附材料	多孔材料：硅胶、活性炭、沸石（分子筛）、氧化铝凝胶、有机物及盐类；高分子材料，氯化锂晶体等
		液体吸附材料	溴化锂、氯化锂、氯化钙、乙二醇、三甘醇等 ^[2]

制的较为可行的方式。

2.2 吸湿材料除湿基本原理

采用液体和固体吸湿材料除湿^[1,4]的系统出现于20世纪50年代，之后蓬勃的发展起来，已经开发出多种形式的系统。篇幅所限，这里不做介绍。吸湿剂完成整个除湿—再生循环的状态变化如下图1所示：

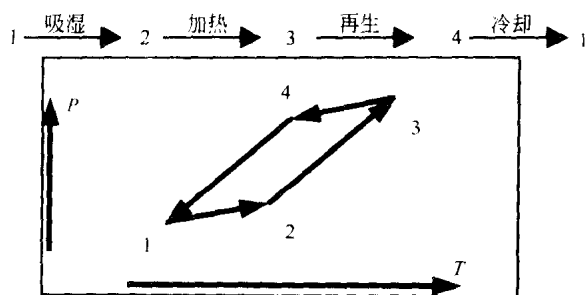


图1 吸湿剂状态的变化

采用固体吸附材料除湿的系统，有固定床式和转轮式2种。固定床式固体吸附除湿装置是通过改变空气侧流向实现间歇式的吸湿再生；转轮式除湿得到了更广泛的应用，它可实现连续的除湿和再生。这两种除湿方式有着致命的弱点，就是都是动态的运行过程，期间混合损失大，影响效率，另外，这种形式很难实现等温的除湿过程，而除湿过程释放出的潜热使除湿剂的温度升高，吸湿能力大打折扣，整个过程传热传质的不可逆损失大，效率不高。

相对于固体吸附材料，由于液体具有流动性，采用液体吸湿材料的传热传质设备比较容易实现；另外，液体除湿过程容易被冷却，从而实现等温的除湿过程，不可逆损失可以减小。所以采用液体吸收除湿的方法有可能达到较好的热力学效果。

图2、图3是带有不同浓度溶液的饱和分压力线的湿空气的温湿图。图2是液体除湿中溶液状态变化过程，1→2是除湿过程，溶液浓度升高，同时若采用逆流、冷却等手段，该过程可以近似等温甚至降温进行；2→3→4是溶液被加热、再生的过程，该过程需要提供热量，使溶液中的水分蒸发，溶液变浓；4→1溶液被冷却，再进入除湿器除湿。图3表示的是液体除湿中空气的状态的变化过程，双线表示除湿的过程，单线表示再生的过程。

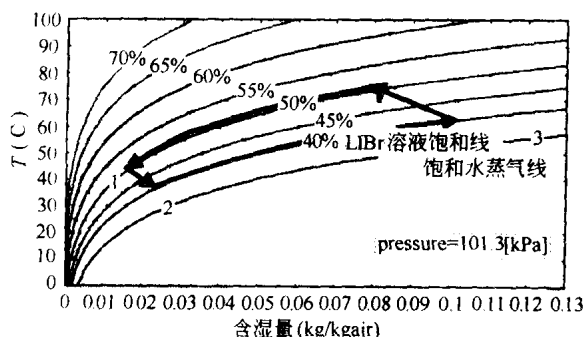


图2 吸湿溶液的循环过程

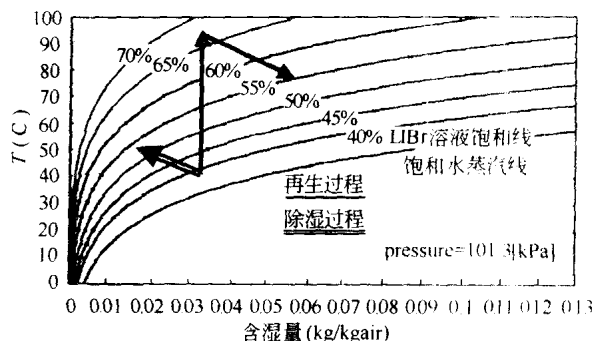


图3 除湿及再生空气的循环过程

3 液体除湿空调系统

液体除湿系统发展已经有40多年的历史，应用过程中出现了诸多问题，如开始使用的溴化锂、氯化锂溶液对管道、设备有强腐蚀性，而一些有机的溶液如三甘醇有挥发性，有机物弥漫在空气中，会危害人体健康；由于稀释和再生过程都为变温过程，不可逆损失大，导致该类系统的效率很低，产出冷量与消耗的再生热量的比（能效比）一般在0.3左右。上述的问题现在已经基本得到了解决：使用塑料材料可以防止盐溶液的腐蚀，而且成本较低，盐溶液不会挥发到空气中影响污染室内空气。

通过对调整工艺流程，可以得到接近等温的除湿与再生过程，实现较高的能效比。

3.1 液体除湿系统的能耗分析

要提高液体除湿系统的能耗，首先要分析原有的液体除湿系统能耗低的原因。传统的液体除湿空调系统除湿器溶液的流量很大，浓溶液和稀溶液的浓度差在2%左右。这样尽管在除湿过程中采取一些冷却的措施来减小由于溶液温升导致其吸湿能力的下降，但是传质过程中的水蒸气分压差造成的不可逆损失仍然很大。如图4所示。

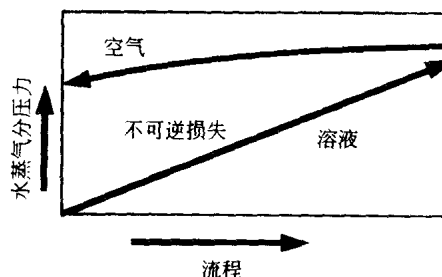


图4 传统除湿器内的不可逆损失

上述过程导致的直接后果是再生温度高，从而再

再生器的效率低。由于解决上述问题的方法是采用分级除湿的思路^[5]，即在除湿的过程盐溶液的浓度是随着湿空气湿度的变化而变化的，同时每一级都采取相应的冷却措施。这样，如图5所示，传热温差，传质的浓度差会大大减小，从而减小了除湿过程的不可逆损失。充分地利用了溶液的吸湿能力，即在吸收同样多的湿量的情况下，分级的方法可使得溶液的浓度差达到10%左右。这样送回再生器的溶液的浓度降低了，更容易被再生，从而减少了高温热源的消耗。

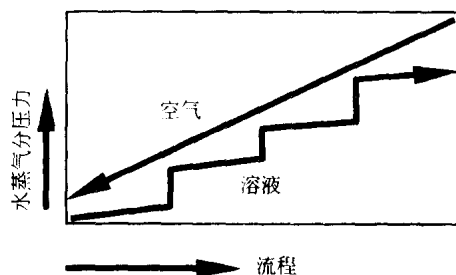


图5 采用分级除湿的思路减小不可逆损失

根据质量平衡关系，采用了分级思想的除湿器溶液的流量会因为浓度差的增大而变小，而小流量会减小气、液的接触面积。为了强化换热，保证除湿器每一级内的溶液流量很大，而级与级之间的流量很小。这样既保证了换热有充分的接触面积，又使得溶液进出口可以实现高的浓度差。整个除湿器的流程简图如图6所示，图中的数据是一组实验结果。其中，除湿过程不断被冷却，冷却水一部分来自室外的冷却塔，一部分来自室内回风。对室内回

风的焓的回收也使得整个系统运行的能效比大大提高。

对于再生器也要采用分级的思想，用高温的热源再生比较浓的溶液，用比较低温的热源再生比较稀的溶液，这样使得热源的利用效率提高。图7是一种分级再生器的思想，图中的温度都为设计温度。定义以下几个参数：

$$EER_{\text{liquid}} = \frac{Q_c}{Q_h}$$

其中 EER_{liquid} 为液体除湿空调的能效比， Q_c 为得到的冷量，kW； Q_h 为再生器的加热量，kW。

对于除湿器，由于冷却水的引入，使得整个过程近似等温的进行，被处理的室外空气状态为：33.9℃，22.3g/kgair，焓值为91.3kJ/kgair，出口状态为39.4℃，6g/kgair，该空气经过与室内回风间接蒸发冷却，状态被处理至22℃，6g/kgair，焓值为37.3kJ/kgair。之后，空气被等焓加湿到送风状态（17℃）。空气处理的焓差为54kJ/kgair，除湿量 Δd 为16.3g/kgair。

Δi 为被处理空气的焓差，则 Q_c 表示为： $Q_c = \Delta i = 91.3 - 37.3 = 54 \text{ kJ/kgair}$

如图7中的一个热水进水温度为90℃，出水温度为65℃的再生器，设计的空气进口状态为33.9℃，含湿量 d_{in} 为22.3g/kgair，焓值 i_{in} 为91.3kJ/kgair，换热器的温差按照5℃计，得再生空气的出口状态为58℃，含湿量 d_{out} 为48g/kgair，焓值 i_{out} 为183.4kJ/kgair，这样，每除去1g水，再生器需要的加热量 q 为：

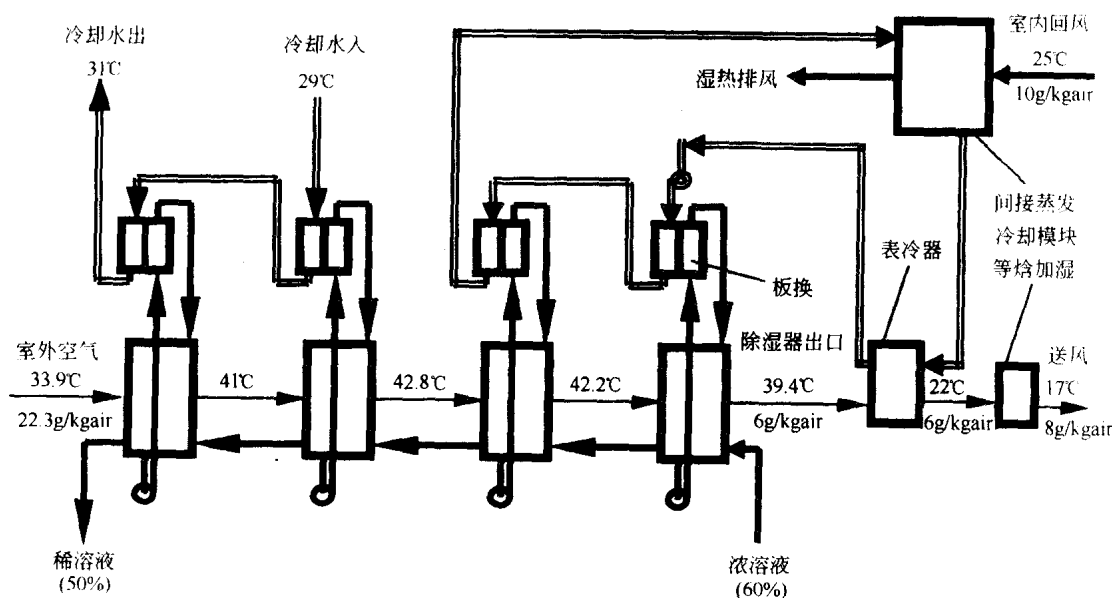


图6 除湿器流程图

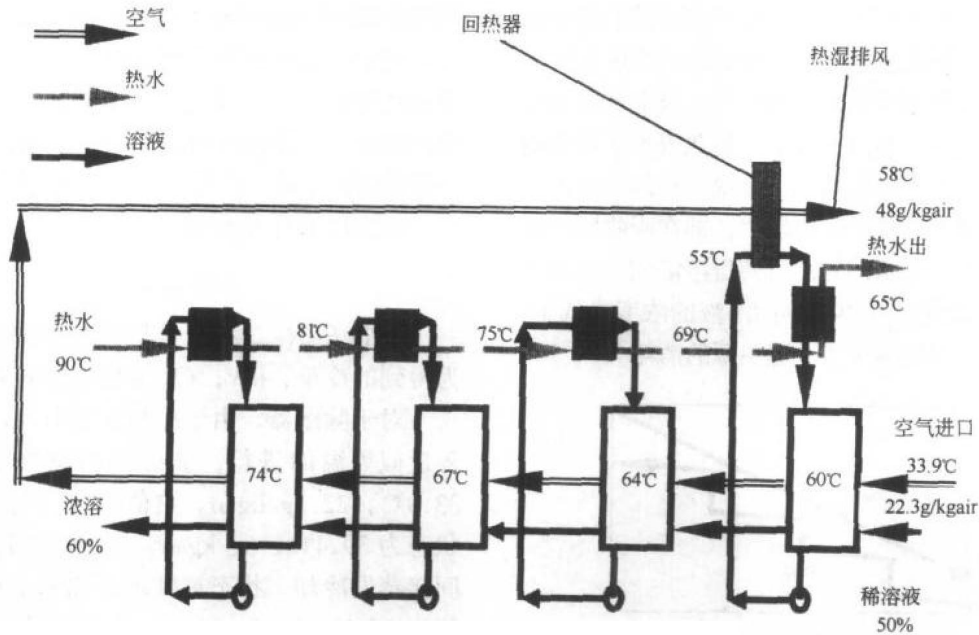


图 7 再生器流程图

$$q = \frac{i_{in} - i_{out}}{d_{in} - d_{out}} = \frac{183.4 - 91.3}{48 - 22.3} = 3.58 \text{ (kJ/g)}$$

再根据除湿器的数据，得到：

$$EER_{liquid} = \frac{Q_c}{Q_h} = \frac{Q_c}{\Delta d \times q} = \frac{54}{16.3 \times 3.58} = 0.93$$

可见在热源最高温度为 90℃ 的情况下，采用该方式能够比采用同样热源驱动的吸收式制冷机有更高的效率。

3.2 集中再生的液体除湿空调系统

将液体除湿系统的空气处理部分和再生部分分开，并且多个空气处理部分共用一个再生器，构成

如图 8 所示的集中再生的液体除湿空调系统。集中的再生器可采用多级回热的形式以提高其效率。浓溶液分出各个支路通往空气处理模块，吸湿后的稀溶液通过管路流回再生器再生，如此循环。溶液的回路带有储液罐，起到了蓄能调峰的作用。末端的空气处理模块有两股空气流过，即被处理的空气 3 和起冷却作用的空气 2，被处理的空气被除湿并冷却，放出的热量被排风吸收，排到大气中。还有一小部分经过除湿的干空气通过蒸发冷却的方法产生冷水可以冷却除湿后温度较高的送风达到适宜的送风温度，如图 8 中的 11 所示。

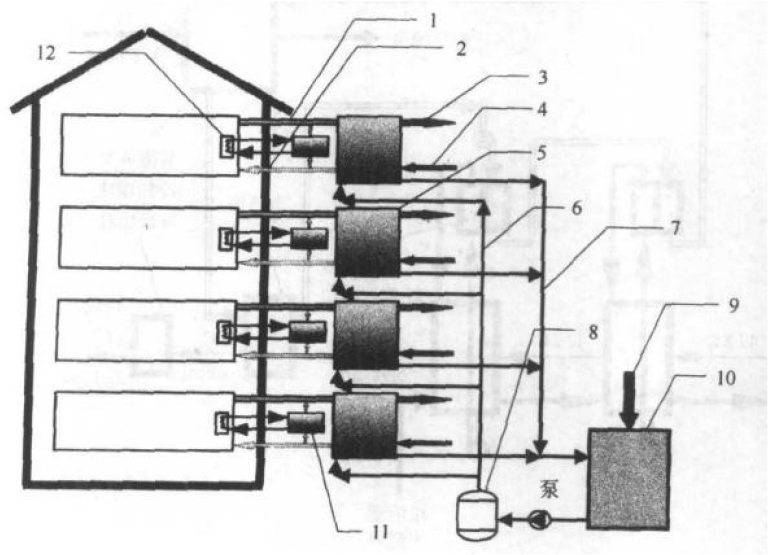


图 8 集中再生的液体除湿空调系统
1—送风；2—冷却空气进口；3—被处理空气进口；4—湿热排风；5—空气处理模块；
6—浓溶液；7—稀溶液；8—储液罐；
9—再生热源；10—再生器；11—间接蒸发制冷模块；12—表冷器

采用液体除湿空调系统与传统的空调系统的设备相比,主要的换热部件采用塑料材料,防腐蚀而且价格低廉,溶液的管道尺寸小且无需外保温,这些都使得设备的成本很低。相比之下,溶液的投资占了整个系统投资的主要部分,综合下来,整个系统的投资会低于传统的空调方式。

3.3 液体除湿系统的优势

采用液体除湿空调系统与传统的空调系统相比有以下优势:

1 热负荷、湿负荷分开处理,避免了过度冷却和再热的损失,有较高的能源利用效率并提高了室内的舒适程度;

2 通过溶液的喷洒可以除去空气中的尘埃、细菌、霉菌及其他有害物;同时由于避免了使用有凝结水的盘管,也消除了室内的一大污染源;可采用全新风运行;提高了室内空气品质;

3 可使低温用热源驱动,为低品位热源的利用提供了有效的途径;

4 可以方便地实现蓄能,系统中设储浓溶液的容器,负荷小的时候储存浓溶液,负荷大的时候用来除湿,从而减小了系统的容量和相应的投资;单位质量蓄冷能力为冰的蓄冷能力的60%,而且无需保温等措施;

5 整个设备各个部件构造简单,节省初投资。

4 应用前景展望

随着我国城市能源结构的调整,天然气将成为重要的城市能源,燃气—蒸汽联合循环是天然气利用的理想的方式^[3]。在该方式中,一年四季都需要有热负荷。在冬季,燃气—蒸汽联合循环所提供的热能可用来供暖;在夏季,该热源用于空调中有以下几种方式:采用集中的制冷机,送冷水到用

户,由于冷水的温差小,冷水流量就会很大,造成管路初投资、冷水的输运损失都很大;还有一种方法是送热水来驱动末端用户的吸收机,这种方法的问题在于所提供的热水温度不是很高,导致吸收机的能效比下降,一般只有0.4~0.6左右,这种方法基本上也不可行。根据本文前面的介绍,采用液体除湿空调系统无疑是理想的选择。

5 总结

综合各种除湿方式,液体除湿法空调是可以实现湿度独立控制的空调方式,避免了冷凝除湿的能源浪费,并且该方式可以利用低品位的热源(温度为90℃)来驱动,而且具有较高的效率。而目前其他已有的技术对于应用这样低温的热源制冷没有什么令人满意的办法。其应用在热电冷三联供系统中,是优化城市能源结构的有效的方式。

参考文献

- 1 Desiccant cooling and dehumidification. 1992, p33-39, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta
- 2 S. Younus Ahmed, P. Gandhidasan. 1998 Thermodynamic analysis of Liquid Desiccants, Solar energy, Vol. 62, pp. 11-18
- 3 Fu Lin, Jiang Yi, Yuan Weixing, Qin Xuzhong. 2001. Influence and return water temperatures on the energy consumption of a district cooling system, Applied Thermal Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 511-521
- 4 ASHRAE 2000. ASHRAE Handbook-Systems and Equipment, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta
- 5 Yuan Yijun. 2000, Genius air conditioner, Nuan Tong Kong Tiao, Vol. 30, No. 3, pp. 46-47

多元变频 VRV 空调系统原理

邵双全 石文星 李先庭 彦启森

清华大学建筑技术科学系

摘 要 本文给出了变频 VRV 空调系统的定义, 论述了各种单冷、热泵及热回收型多元 VRV 空调系统的工作原理和性能特点, 并指出了在多元 VRV 空调系统中尚需解决的问题。

关键词 VRV 空调系统 变频控制 工作原理

1 VRV 空调系统的定义及控制原理

VRV 空调系统是在电力空调系统中, 通过控制压缩机的制冷剂循环量和进入室内换热器的制冷剂流量, 适时地满足室内冷热负荷要求的高效率冷剂空调系统。VRV 空调系统需采用变频压缩机、多极压缩机、卸载压缩机或多台压缩机组合来实现压缩机容量控制; 在制冷系统中需设置电子膨胀阀或其他辅助回路, 以调节进入室内机的制冷剂流量; 通过控制室内外换热器的风扇转速, 调节换热器的能力。在变频调速和电子膨胀阀技术逐渐成熟之后, VRV 空调系统普遍采用变频压缩机和电子膨胀阀。

空调系统在环境温度、室内负荷不断变化的条件下工作, 而且系统各部件之间、系统与环境之间相互影响, 因此 VRV 空调系统的状态不断变化, 需通过其控制系统适时地调节空调系统的容量, 消除其影响, 是一种柔性调节系统。其工作原理是: 由控制系统采集室内舒适性参数、室外环境参数和表征制冷系统运行状况的状态参数, 根据系统运行优化准则和人体舒适性准则, 通过变频等手段调节压缩机输气量, 并控制空调系统的风扇、电子膨胀阀等一切可控部件, 保证室内环境的舒适性, 并使空调系统稳定工作在最佳工作状态。

2 VRV 空调系统的特点

变频 VRV 空调系统的相对于定速系统具有明显的节能、舒适效果:

(1) VRV 空调系统依据室内负荷, 在不同转速下连续运行, 减少了因压缩机频繁启停造成的能

量损失; 在制冷/制热工况下, 能效比 COP 随频率的降低而升高, 由于压缩机长时间工作在低频区域, 故系统的季节能效比 SEER 相对于传统空调系统大大提高; 采用压缩机低频启动, 降低了启动电流, 电气设备将大大节能, 同时避免了对其他用电设备和电网的冲击。

(2) VRV 空调系统具有能调节容量的特性, 在系统初开机时室温与设定温度相差很大, 利用压缩机高频运行的方式, 使室温快速地到达设定值, 缩短室内不舒适的时间; 系统调节容量使室温波动很小, 改善了室内的舒适性; 极少出现传统空调系统在启停压缩机时所产生的振动和噪声, 且室内机风扇电机普遍采用直流无刷电机驱动, 速度切换平滑, 降低了室内机的噪声。由于 VRV 空调系统比冷水机组的蒸发温度高 3℃ 左右, 其 COP 值约提高 10%; 结构紧凑, 体积小, 管径细, 不需要设置水系统 and 水质管理设备, 故不需要专门的设备间和管道层, 可较大程度地降低建筑物造价, 提高建筑面积的利用率; 室内机的多元化, 可实现各个房间或区域的独立控制; 而且热回收 VRV 空调系统, 能在冬季和过渡季节, 向需要同时供冷和供热的建筑物提供冷、热源, 将制冷系统的冷凝负荷和蒸发负荷同时利用, 大大提高了能源利用效率。因此, 多元 VRV 空调系统将是今后中小型楼宇空调系统的发展主流之一^[1]。

3 多元变频 VRV 空调系统的工作原理

在传统的冷库、空调系统中, 为适应多用户库(室)内负荷的变动, 减小系统的启动电流, 常采用

卸载压缩机或多台压缩机并联的制冷系统。当负荷变动时,根据回气压力的高低,增减压缩机的运行台数。多元 VRV 空调系统即是吸收了此思想,而发展起来的变制冷剂流量制冷系统。由于多元 VRV 空调系统存在有制冷剂流量分配控制和系统稳定性控制问题难以解决,在微电脑、电子膨胀阀、变频技术诞生以后才开始重视其研究开发工作。自 1985 年开始发展至今,世界上主要是日本三菱、日立、大金、夏普、松下等少数几家大企业拥有这项技术。目前,多元 VRV 空调系统主要有单冷型、热泵型和热回收型三种型式,将这三种型式与蓄热(冷)系统、变风量系统等结合,又扩大了 VRV 空调系统的应用范围。

3.1 单冷或热泵型多元 VRV 空调系统

表 1 示出了各种单冷和热泵型多元 VRV 空调系统的原理图。在典型的单冷(图 1)或热泵(图

3) 型多元 VRV 空调系统中,压缩机通常采用 1 台变频压缩机,在大系统中,由 1 台变频压缩机或多极压缩机与多台定速压缩机构成压缩机组;在各室内机和室外机上,设置有供节流和流量调节的电子膨胀阀(有些系统在室外机上采用普通膨胀阀^[2]);在系统的典型部位安放有温度传感器和压力传感器。在制冷工况下,室外机电子膨胀阀全开,通过室内机电子膨胀阀节流降压,控制室内温度和各室内机热交换器出口制冷剂的过热度,由压缩机频率调节吸气压力;在制热工况下,室外机电子膨胀阀,控制室外机热交换器出口制冷剂的过热度,室内机电子膨胀阀控制室温和室内热交换器出口的制冷剂过冷度,通过改变压缩机频率调节压缩机排气压力。为提高系统的稳定性、可控性和可靠性,在一些系统中,增设了辅助回路。

各种单冷和热泵型多元 VRV 空调系统原理图

表 1

序号	系 统	空 调 系 统 原 理 图	备 注
图 1	单冷型多元 VRV 系统		A: 压缩机 C: 室外热交换器 E: 室内热交换器 F: 气液分离器 EV1: 电子膨胀阀 EV2: 电子膨胀阀 EV3: 电子膨胀阀
图 2	带内部热交换单冷型多元 VRV 系统		同上 D: 内部热交换器 (HIC 回路)
图 3	热泵型多元 VRV 系统		同上 B: 四通阀 V1: 电子膨胀阀

续表

序号	系 统	空调系统原理图	备 注
图 4	热泵蓄热型多元 VRV 系统		同上 H: 制冷剂泵 V2, V3: 电子膨胀阀 E1, E2, E3, E4, E5: 电磁 阀

1994 年,三菱开发出带有内部热交换回路的变频单冷型多元 VRV 空调系统^[3],由图 2 可知,通过回热回路,实现了制冷剂的有效移动,减少了系统的压力损失,提高了系统的能效比。研究表明,经回热回路的流量为压缩机循环流量的 2%~22%时,制冷量基本一致,能效比提高 10%。同时由于采用了高压制冷剂的饱和点控制,减少了系统中的制冷剂的充灌量。

面临电力供应的紧张局面,“移峰填谷”是亟待解决的问题,随着峰谷电价的实施,蓄热空调系统开始得到发展,从 1995 年开始,开始应用于热泵型 VRV 空调系统中^[4,5]。蓄热型 VRV 空调系统如图 4 所示,由室外机、蓄热槽和多个室内机组组成。室外机内有变频压缩机、制冷剂泵和热交换器;在蓄热槽内部装有盘管换热器和相变蓄热材料。系统在制冷和制热运行时,都各具有 3 种运转模式,即蓄冷(热)运行、蓄冷(热)利用制冷(热)运行和压缩机制冷(热)运行。在蓄冷(热)运行和压缩机制冷(热)运行模式下,制冷剂泵停

止运行,系统的工作方式和普通蓄冷空调系统一致;在蓄冷利用制冷运行模式下,制冷剂泵运转,将一部分制冷剂压缩,送入蓄冷槽盘管换热器,制冷剂将热量排至蓄冷材料(取冷)而冷凝,与在室外热交换器内冷凝后的制冷剂液体汇合,经室内机电电子膨胀阀节流,送入室内机进行制冷;同理,在蓄热利用制热运行模式下,制冷剂泵运转,在蓄热材料中取热,送入室内机。系统“移峰填谷”的机理是利用降低冷凝温度或提高蒸发温度,减小压缩比,降低高峰电力的使用量。

3.2 热回收型多元 VRV 空调系统

热回收型 VRV 空调系统是于 20 世纪 90 年代初研制出,它不仅具有单冷和热泵形系统的功能,同时由于冷凝负荷和蒸发负荷都被利用,所以大大改善了能源利用效率。对于同时需要供冷与供热的建筑物逐渐增多的今天,具有极大的应用前景,所以也就成为了当前研究的重要课题之一。当今的热回收型 VRV 空调系统具有 3 管式和 2 管式两种形式^[6-12],参见表 2。

热回收型多元 VRV 空调系统原理图

表 2

序号	系 统	空调系统原理图	备 注
图 5	3 管式热回收型多元 VRV 系统		A: 压缩机 C: 室外热交换器 E: 室内热交换器 F: 气液分离器 EV1: 电子膨胀阀 EV2: 电子膨胀阀 EV3: 电子膨胀阀 V1: 电子膨胀阀 E1~E8: 电磁阀