

空调用制冷设备

李 树 林 编

机械工业出版社

本书比较全面地介绍了各种空调用制冷系统的组成、各制冷设备的构造、工作原理、主要性能、使用范围,阐述了空调用制冷设备的选择依据及一般选择计算方法。书中内容以蒸气压缩式制冷为主,对近年来广泛用作空调冷源的蒸汽喷射式和溴化锂吸收式制冷装置的工作原理、设计及使用维护等方面也作了一定的说明。

本书可供从事空调制冷工程技术人员使用,也可作为高等及中等学校的教学参考书。

空调用制冷设备

李树林 编

*

责任编辑:蒋有彩 版式设计:冉晓华

封面设计:姚毅 责任校对:熊天荣

责任印制:王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $14 \frac{1}{2}$ · 插页 1 · 字数 359 千字

1990年2月北京第一版·1990年2月北京第一次印刷

印数 0,001—3,500 · 定价:10.90元

*

ISBN 7-111-01681-5/TB·73

前 言

随着科学技术的发展与人民生活水平的提高,空气调节得到了广泛的应用,因而作为获得空气调节的冷源的制冷技术,近几年来发展迅速,供空气调节用的各种制冷装置及制冷设备日益增多。空调用制冷设备,已发展成为一种专门的机械设备和技术领域。根据这一情况,我们在总结实际工作经验的基础上,参阅了有关书籍和技术资料编写成本书。

书中以蒸气压缩式制冷为主,介绍空调用制冷装置主要设备的构造、工作原理、性能、使用范围,并阐述了空调用制冷设备的选择依据。此外,对近年来广泛用作空调冷源的蒸汽喷射式制冷装置和溴化锂吸收式制冷装置等的工作原理、设计、使用维护等方面也作了一般的说明。

本书可供从事空调制冷的工程技术人员使用,也可作为高等及中等专业学校的教学参考。

本书由西安交通大学周子成教授审阅。在编写过程中,得到了西安冶金建筑学院杨磊教授的支持和帮助。陶慰祖、高颖光和宋东晓等同志承担了全部插图的绘制。在此向他们表示衷心感谢!由于水平所限,书中的缺点及不足之处在所难免,希望读者给予批评指正。

作者

1988年7月

目 录

绪论	1
第一章 基础知识	6
第一节 空气的性质及其焓-湿图	6
第二节 空气的处理过程	9
第三节 蒸气制冷循环和热泵循环	14
第四节 空调用制冷的制冷剂	17
第五节 蒸气压缩式制冷系统及其组成	20
第二章 活塞式制冷压缩机	23
第一节 活塞式制冷压缩机的工作原理及分类	23
第二节 活塞式制冷压缩机的总体结构	28
第三节 活塞式制冷压缩机的制冷量及所需功率	41
第四节 活塞式制冷压缩机的工况及其运行特性	46
第五节 活塞式制冷压缩机的润滑油	49
第三章 其它型式的制冷压缩机	52
第一节 螺杆式制冷压缩机	52
第二节 离心式制冷压缩机	60
第三节 滚动转子式制冷压缩机和斜盘式制冷压缩机	64
第四章 冷凝器和蒸发器	68
第一节 冷凝器的种类、基本构造和工作原理	68
第二节 冷凝器的传热分析	75
第三节 冷凝器的选择计算	77
第四节 蒸发器的种类、基本构造和工作原理	81
第五节 蒸发器的传热分析	88
第六节 蒸发器的选择计算	90
第五章 辅助设备	96
第一节 润滑油的分离及收集设备	96
第二节 制冷剂的贮存及分离设备	99
第三节 制冷剂的净化设备	101
第四节 安全设备	105
第五节 其它辅助设备	108
第六章 制冷系统的自动控制及其控制器件	111
第一节 供液量的自动调节及自动节流机构	111
第二节 温度的自动调节	121
第三节 制冷系统的自动保护及安全装置	125
第四节 空调用制冷系统自动控制	129
第七章 空气调节机组	133

第一节 冷风机组	137
第二节 恒温恒湿空调机组	138
第三节 特殊用途的空调机组和空气去湿机	140
第四节 空调机组的性能及其选择	143
第八章 冷水机组	148
第一节 活塞式冷水机组	148
第二节 螺杆式冷水机组	151
第三节 离心式冷水机组	155
第九章 蒸汽喷射式制冷装置	162
第一节 蒸汽喷射式制冷原理及其装置	162
第二节 蒸汽喷射式制冷的的主要设备	167
第三节 蒸汽喷射式制冷装置的运行特性及制冷量调节	170
第四节 蒸汽喷射式制冷装置的安装和运行	172
第十章 溴化锂吸收式制冷装置	175
第一节 溴化锂吸收式制冷装置的工作原理及其循环	175
第二节 溴化锂吸收式制冷装置的结构型式及热力计算	178
第三节 溴化锂吸收式制冷的辅助设备及附加措施	185
第四节 溴化锂吸收式制冷装置的性能及其制冷量调节	189
第五节 溴化锂吸收式制冷装置的安装及维护管理注意事项	193
第十一章 冷却水和冷冻水系统	197
第一节 冷却水系统	197
第二节 冷冻水系统	206
主要参考文献	209
附录	211
附表 1 制冷及空调工程中常用计量单位及其换算表	211
附表 2 饱和水及饱和水蒸气的热力性质表	211
附表 3 NaCl水溶液的物性值	213
附表 4 CaCl ₂ 水溶液的物性值	214
附表 5 R717饱和液体及饱和蒸气热力性质表	215
附表 6 R11饱和液体及饱和蒸气热力性质表	216
附表 7 R12饱和液体及饱和蒸气热力性质表	218
附表 8 R22饱和液体及饱和蒸气热力性质表	219
附图 1 R717的 $p-h$ 图	222
附图 2 R12的 $p-h$ 图	223
附图 3 R22的 $p-h$ 图	224
附图 4 R11过热蒸气区的 $p-h$ 图	225
附图 5 LiBr-H ₂ O溶液的 $h-\xi$ 图 (1)	226
附图 6 LiBr-H ₂ O溶液的 $h-\xi$ 图 (2)	插页一
附图 7 湿空气比焓-湿图	插页二

绪 论

一、空调的意义和任务

空调就是使某一空间的空气温度、湿度、清洁度和风速符合一定要求的工程技术。进行空调的空间，可以是工业生产厂房、公共建筑物、生活用房或者水、陆、空交通工具等。如果在规定的空间内，只要求保持一定的温度而对其它参数无要求，则称为降温或供热；如果只用空气流动的方式来消除空气中的灰尘及有害物质，则称为通风。降温、供热和通风是空气调节的特殊情况，通常都不将它们包括在空气调节技术领域之内。一般所说的空气调节，总是关系到温度 and 湿度的控制，有时还要控制空气中含尘颗粒的大小及数量。有些建筑，例如体育馆、音乐厅、录音室等，不仅对空气条件有一定要求，而且对噪声、净化、风速等方面也都有一定的要求。

被调空间所需保持的参数中，最主要的是温度和湿度。对于温度和湿度，通常要求保持在一定的数值上，并且不允许超出一定的波动范围。这一要求可表示如下：

温度： $(t \pm \Delta t)^\circ\text{C}$

相对湿度： $(\varphi \pm \Delta\varphi)\%$

其中 t 和 φ 为空调基数，分别称为基准温度和基准相对湿度； Δt 和 $\Delta\varphi$ 为允许的变动幅度，即实际的温度和相对湿度偏离空调基数的最大波动值。空调精度（或空调等级）是指在空调区域内，空气的温度、相对湿度在要求的持续时间内允许的波动幅度，即测量温度和相对湿度在仪表上所表示出的数值，偏离空调基数允许的最大上下波动值 Δt 及 $\Delta\varphi$ 。例如，某车间要求 $t = (23 \pm 1)^\circ\text{C}$ 和 $\varphi = (50 \pm 10)\%$ ，就是说该车间的最高温度不能超过 24°C ，最低不得低于 22°C ，相对湿度不能高于 60% 或低于 40% 。大多数的空调系统是一般精度的空调，即 $\Delta t \geq 1^\circ\text{C}$ 。少数是高精度的空调，即 $\Delta t \leq \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。对于相对湿度变动幅度的要求，一般是 $\Delta\varphi = \pm 5\%$ ，当要求较高时，约为 $\Delta\varphi = \pm 2\%$ 。通常对 $\Delta t \leq \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $\Delta\varphi = \pm 5\%$ 的空调工程系统，称为恒温恒湿工程。

被调空间中对卫生条件的要求，通常是规定空气中有害物质的浓度不得超过某一最大允许值。例如，空气中的最常见的有害物质是 CO_2 气体和灰尘。为了保证人体的健康，对于长期停留的房间， CO_2 的最大允许浓度为 $1.86\text{g}/\text{m}^3$ ；含石英 10% 以上的灰尘，其最大允许浓度为 $2\text{mg}/\text{m}^3$ ；不含石英的灰尘，其最大允许浓度为 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 。对于一些特殊情况，才提出卫生方面的要求，例如多尘车间、某些化工生产车间、原子能装置、某些电子工业生产车间、生物学实验室及医院手术室等。对于一般的空调房间，只要能保证足够的换气量，对空气进行除尘处理，便可满足卫生方面的要求。

要保持室内的温度和湿度稳定不变，则必须使进入室内和从室内排出的热量和湿量都保持平衡。进入室内的热量与从室内排出的热量之差，称为余热量。余热量为正值时，则室内空气温度将升高，反之温度将降低；产湿量与排湿量之差称为余湿量。余湿量为正值时，则室内空气湿度将升高，反之湿度将降低。为了使进入室内和从室内排出的热量和湿量都保持平衡，就得不断地将进入室内的余热、余湿及有害物质排除出去，这就是空气调节的基本任务。

消除余热及余湿的方法很多,可以利用天然冰、深井水及冬灌冷水等天然冷源,但主要还是利用制冷机。因此,空调和降温是与人工制冷密切相关的。

二、空气调节的种类和目的

根据空调对象的不同,有生产性空调和舒适性空调之分。生产性空调是为了满足产品生产过程的要求,它的对象主要是生产厂房,以及直接为生产服务和进行科学研究的实验室。例如在光学仪器、钟表及精密器械的生产过程中,只有在室内空气温度、湿度和清洁度都能满足要求时,生产过程才能正常进行,才能保持机具和仪表的精度,才能生产出合格的产品。否则,如果灰尘和水分进入到这些产品、机具和仪表时,就会引起磨损和腐蚀,降低和影响产品的质量,缩短机具和仪表的寿命。在纺织厂中,纺织过程需要在一定的温度和湿度的空气下进行。空气温度太高或太低,不仅影响工人的健康,而且影响工人的正常操作。空气太干燥会使纱线变粗而脆,加工时易产生静电,造成飞花和断头,甚至纺不成纱;空气过于潮湿,又会使纱线粘结,不但影响生产率,而且影响产品质量。电子工业的某些车间,不但要求室内空气具有一定的温度和湿度,而且对空气的含尘颗粒的大小和数量有严格的要求,否则就会影响微小元件的加工精度和质量,以致降低成品率。同样,在食品加工厂中,只有在适当的空气条件下,一些生产过程才能正常进行,才能减少干缩损耗和抑制微生物的生长。对于类似这样一些生产过程进行空气调节,目的是创造适宜的条件,使生产能正常进行,并提高产品的产量和质量。此外,在图书馆、文史馆、档案馆及一些物品的贮藏室中,也需要进行空气调节,这样可以在较长时间内保持贮藏品的质量。这些场合下的空气调节,实际上也是属生产性的。在生产性空气调节中,需保持的空气条件主要取决于产品(或贮藏品)的要求。

舒适性空气调节是为了适应人的活动(劳动、工作及文娱体育活动)的要求,它的对象可以是各种建筑物,例如生产厂房、实验室、影剧院、宾馆及公共建筑物和生活用房等,也可以是各种水陆交通工具。舒适性空气调节的目的,是将室内或某一特定场所的空气,调整到对人体最适宜的状态,以创造良好的劳动条件和工作条件,对劳动者进行劳动保护,以提高劳动生产率和工作效率;或者创造一个适宜的居住和休息环境,以利于学习和休息,并增进身心健康。舒适性空气调节中所保持的空气条件,应根据人在活动中的感觉及卫生要求来确定。如在公共建筑和集体场所,考虑到人的正常活动和舒适,不仅要求室内空气具有一定的温度、湿度,而且要求空气足够的新鲜。

空气调节按照其使用时间,可以分为全年性的及季节性的两种。全年性的空气调节要求在全年中,都要保持所规定的空气条件,生产性空气调节大都具有这样的特性。季节性空气调节,只要在一年中的某些时间进行空气调节,舒适性空调及科研实验室中的空调多属这一类。

为了获得符合房间要求的冷风或热风,消除房间的热、湿干扰,必须对空气进行调节。空气调节所用的设备包括三部分:预先对空气(室外空气及一部分由室内抽回的空气)进行加热、加湿(一般冬季用)、冷却、干燥(一般夏季用)和净化等处理的设备,称为空气处理设备;处理后的空气送入房间,需要输送空气和分配空气的设备与部件,如风机、风道、送风口及回风口等;此外还需要供热、供冷系统,如冷、热水管道系统等。这三部分设备加在一起,就组成空气调节系统。空气调节系统按其组成和特性,可分为集中式和分散式两种。

集中式空调系统的特点是:空气处理设备和风机等集中设在专用的机房内,冷源、热源

也往往集中在冷冻站或锅炉房内。室外空气经过滤器清除灰尘和脏物,再经过喷水室、加热器等处理设备,使空气达到所要求的送风温度和湿度,然后送入室内。为了节省处理设备的能量消耗和尽可能减少室外进风对室内的影响,也常利用一部分室内回风。集中式空调的优点是设备比较集中,因而有可能使用大型的制冷装置、风机及水泵等;冷却水的供应及其再冷却也比较方便;需要的管理人员也较少,这在空调技术知识还不普及、自动化程度不高的情况下仍具有一定的意义。其缺点是风道系统较长较大,在空气流速稍高的情况下,还会产生很大的噪声;此外它难以满足不同房间对空调的不同要求,而且运转的机动性也比较差。因此,在很多情况下,集中式空调系统已被分散式空调系统所代替。但在一些常年需要空调的工厂中、较大型的车间中,以及剧院、宾馆、饭店、大会堂等公共建筑中,仍可使用集中式空调系统。

分散式空调系统是局部使用空调机组或空调器的系统。这种系统实际上就是将空气处理设备和制冷装置、风机等组合在一起。空调机组或各种空调器已由一些工厂定型生产,它可以直接安放在空调房间,也可以放在相邻的房间,而用很短的风道与空调房间相连。这种空调系统可以满足不同房间的不同送风要求,占地面积小,使用灵活,移动方便。

此外,还有集中式与分散式相结合的混合式空调系统。近年来在我国已经使用的新型诱导式空调系统及风机盘管系统等,都是在上述两种类型的基础上发展起来的。

三、制冷在空调中的应用

空调对于冷源的要求是多方面的,首先是冷源的温度和供应的冷量要满足空气降温 and 去湿的要求;同时必须考虑获取冷源的方法要尽量经济和可靠,运行使用方便,而且对空气不能有污染。

天然冷源大量存在于自然界中,价格较低廉,其温度可以满足某些空调降温、去湿的要求。所以在空调工程中,天然冷源经常被优先考虑。例如 $15\sim 16^{\circ}\text{C}$ 的地下水,对于一般空调降温就是很理想的冷源。用这样的冷水喷雾、使空气降温,一般可以保持室内温度在 $28\sim 30^{\circ}\text{C}$ 。但是天然冷源也不是很容易获取的,而且使用中受到地区、时间等条件的限制,特别是在温度方面有很大的局限性。工业生产及科学实验等对空气调节的要求,大多是用人工冷源即人工制冷来满足的。

人工制冷就是利用各种类型的制冷机械进行冷量的生产,所以也称为机械制冷。它虽然没有天然冷源那样的优点,需要比较复杂的技术和设备,而且生产的冷量成本较高,但是却完全克服了天然冷源的不足之处,特别是它可以根据不同的需要,为空调提供不同温度的冷量,而且在使用中有很大的灵活性。

人工制冷的方法较多,包括各种型式的蒸气制冷、气体膨胀制冷及半导体制冷等,但作为空气调节的冷源,使用广泛的还是蒸气制冷。根据能量的补偿形式及其设备不同,蒸气制冷又分为蒸气压缩式、吸收式及蒸气喷射式等三种型式,而且以蒸气压缩式制冷在空调工程中使用最为广泛。

冷源是空气调节中重要的组成部分。采用什么样的方式通过制冷使空气降温呢?人们在实践中,根据空调建筑的用途及对空调的具体要求、空调负荷的特点、使用情况等因素的不同,创造了许多不同的方式。空调中被冷却的最终对象是空气,根据其冷却方式及冷却途径的不同,通过制冷使空气降温,可以分成直接冷却和间接冷却两种方法。

直接冷却又称为直接蒸发式冷却。这种冷却方式,是把制冷装置的蒸发器直接放在被冷

却的空气中。制冷剂液体通过蒸发器，吸收空气中的热量而汽化成蒸气，空气也就被冷却降温了。被冷却的空气由通风管道输送到空调房间去。机组式直接蒸发系统，则是利用空调机组或空调器，使某一空间的空气得到冷却。

间接冷却方式的特点是：制冷装置的蒸发器不与被冷却的空气直接进行热量交换，而是由蒸发器先冷却一种称为载冷剂的中间物质，即空调中的冷冻水或盐水（低于 0°C 以下采用），再通过冷冻水或盐水去冷却空气。由于有中间物质参加热交换，所以叫间接冷却。间接冷却一般也有两种形式：喷雾式（喷水式）和表面式冷却器冷却。喷雾式冷却空气时，低温冷冻水与空气直接接触，它们之间同时进行热量、质量交换。而表面式冷却器冷却空气时，冷冻水或盐水不与空气直接接触，而是冷冻水或盐水在表面冷却器内与空气进行热量交换，使空气得到冷却。

直接冷却系统构造简单，不需要中间冷却物质，冷量损失小，冷却效果好。但是由于蒸发器直接与空气接触，对于蒸发器的严密性要求较高。特别是以氨为制冷剂时，因为氨有特殊臭味和腐蚀性，如果漏入空气中，会使空气污染，对人体有害。对于以氟利昂为制冷剂的制冷装置，一般尽可能采用直接蒸发式冷却。

在冷源集中而空调室分散的情况下，往往采用间接冷却方式较为方便。当空气温度要求处理到 0°C 以下时，则要求采用盐水作为载冷剂。根据要求的温度制备盐水的合适浓度，使盐水不致结冰。一般来说，用盐水喷雾，在空调系统中是不允许的。因为盐分被带到空调房间，对人和设备都是有害的。这种情况可以采用表面式盐水冷却器。

实际工程中情况往往是很复杂的，空调要求是多种多样的，直接冷却和间接冷却又有多种不同的形式。但是，不管怎样，制冷在空调中的应用，大致可以分为空调提供冷冻水或盐水和用来直接冷却空气的两种方式。

四、制冷技术的发展简况

现代制冷技术作为一门科学，是19世纪中期和后期发展起来的。1834年美国入波尔金斯试制成功了第一台以乙醚为制冷剂的蒸气压缩式制冷机。1844年高里在美国用封闭循环的空气制冷机建立了一座空调站。1859年卡列发明了氨水吸收式制冷系统。到1875年，卡列和林德用氨作制冷剂，制成了氨蒸气压缩式制冷机，从此蒸气制冷一直占据统治地位。1910年左右，马利斯·莱兰克发明了蒸汽喷射式制冷系统。

进入20世纪以后，制冷技术有了更大的发展。随着制冷装置的发展，制冷剂的种类也不断增多，1930年以后，氟利昂制冷剂的使用和氟利昂制冷系统的出现，使制冷技术的发展进入了一个新的阶段。近十多年来，对混合制冷剂进行了大量的试验研究，并开始使用共沸溶液作为制冷剂，使蒸气压缩式制冷的发展有了重大的技术突破。

现在制冷机的发展已经达到了比较完善的程度。人们利用逆向循环实现热量的转换，热泵也列入了制冷技术的范畴。从制冷的温度范围来说，可以获得从稍低于环境温度到接近于绝对零度的低温。单机组的制冷量从几十瓦到几千千瓦，成套建筑空调用的冷水机组制冷量可达7000kW。制冷机的种类和型式不断增加，制冷系统的流程、主机、辅机、制冷剂及自动控制都有了新的发展。在制冷机的设计、制造、测试、控制及生产管理等方面，都开始使用电子计算机，更好地实现了设计的优化及制冷系统调节控制的自动化，取得了最佳技术经济效果。

我们的祖先很早就知道利用天然冰进行食品的冷藏和防暑降温，在《诗经》和《周礼》

中就有了“凌人”和“凌阴”的记载。“凌”就是冰，也就是在奴隶社会的周朝，已有专门管理冰的人员和贮藏冰的房屋。1986年在陕西省姚家岗秦雍城遗址发掘了可贮藏190m³冰块的地下冰室，这说明了早在春秋时期，秦就很重视食物冷藏和防暑降温方面的设施建设。然而，由于中国长期处于封建社会，束缚了生产力的发展，现代的制冷技术一直没有得到发展。直到1949年，我国还没有能制造制冷设备的工厂，只在沿海几个大城市，有几家进行配套安装空调工程的洋行和修理冰箱的作坊，制冷设备均为国外引进。

我国现在的制冷机制造业，是50年代末期，在几个安装、修理厂的基础上发展起来的。从开始仿制生产活塞式制冷机，到自行设计和制造，并制定了有关的系列，以后又陆续发展了其他类型的制冷机。目前已有活塞式、螺杆式、离心式、吸收式、热电式及蒸喷式六大类制冷装置。许多产品的质量已接近和达到世界先进水平。以往我国的制冷装置主要用于工业生产和大型建筑的空调中。近年来由于人民生活水平的不断提高，制冷装置用于生活中的比例迅速增加，产品的数量也急剧增加。可以预计，随着国民经济的发展和人民生活水平的提高，制冷机的生产和应用将会达到更高的水平。

第一章 基础知识

第一节 空气的性质及其焓-湿图

要解决空气调节中的一系列基本问题,首先就得对调节对象——空气有本质的了解,进而研究反映空气物理性质的焓-湿图,并掌握其使用方法。

一、空气的性质

空气实际是若干种气体的混合物。在正常情况下,不带水蒸气的干空气中,各种气体是有一定比例的,其主要成分如表1-1所示。

表1-1 干空气的主要成分

组成气体	氮 气 N_2	氧 气 O_2	稀有气体	二氧化碳 CO_2
容积(%)	78.09	20.95	0.93	0.03
质量(%)	75.53	23.14	1.28	0.05

实际上不含有水蒸气的干空气是不存在的,因为地球表面大部分是海洋、湖泊、江河,必然有大量的水蒸气进入大气,使大气成为干空气与水蒸气的混合气体。这种混合气体称为湿空气。空气调节中用到的空气就是湿空气。在空调设备的选用和使用过程中,往往涉及到空气的状态参数及其状态变化等问题。空气的状态参数主要包括压力、温度、含湿量、湿度、焓、比容等。

1. 压力

一般空调工程中的空气就是大气。空气的压力就是地球表面上一层很厚的空气层对地面所形成的压力,即所谓大气压力或总压力。压力的法定单位为帕(Pa)或千帕(kPa), $1Pa = 1N/m^2$ 。

此外,压力还有多种单位,如习惯以巴(bar)和物理大气压或称标准大气压(atm)表示。米制单位中,压力单位常采用工程大气压(at)、毫米水柱(mmH₂O)和毫米汞柱(mmHg)等单位。几种压力单位换算关系参看附表1。

空气是由干空气与水蒸气组成的混和气体,因此,空气的总压力(大气压力)等于干空气的分压力与水蒸气的分压力之和,即

$$B = p_s + p_s \quad (1-1)$$

式中 B ——湿空气压力,即大气压力;

p_s ——干空气的分压力;

p_s ——水蒸气的分压力。

大气压力随地区的海拔高度不同而不同,也因气候的变化稍有变化。通常以纬度45°处海平面上的平均压力作为标准。一个标准大气压也称物理大气压,其值为101325Pa。

在空调工程中,空气的压力是用仪表测出的,但仪表指示的压力不是空气压力的绝对值,而是与当地大气压的差值,称为工作压力(或表压力)。它不能代表空气压力的真正大小,只

有空气的绝对压力才是空气的一个基本状态参数。工作压力与绝对压力的关系为:

$$\text{压力} = \text{当地大气压} + \text{工作压力} \quad (1-2)$$

凡未指明是工作压力的, 均应理解为绝对压力。

2. 温度

空气的温度表示其冷热的程度。表示热力学温度的是开尔文温标, 简称开氏温标, 单位为K。它是以气体分子热运动平均动能趋于零的温度为起点, 定为0 K。以水的三相点温度为定点, 定义为273.16 K。

由于历史的原因, 现在常用的温标还有摄氏温标(单位为 $^{\circ}\text{C}$)和华氏温标(单位为 $^{\circ}\text{F}$)两种。若以 T 、 t 和 F 分别表示某一温度的开氏、摄氏和华氏温标的值, 则它们之间的换算关系为:

$$T = (t + 273.15) \approx (t + 273) \quad (\text{K}) \quad (1-3)$$

$$t = (F - 32)/1.8 \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (1-4)$$

$$F = (1.8 t + 32) \quad (^{\circ}\text{F}) \quad (1-5)$$

3. 含湿量

湿空气是干空气和水蒸气组成的, 其中1kg干空气所含有的水蒸气量称为含湿量, 即

$$d = 1000 \frac{m_s}{m_g} \quad (1-6)$$

式中 d ——含湿量(g/kg干空气);

m_g ——湿空气中干空气质量(kg);

m_s ——湿空气中水蒸气质量(kg)。

这就是说, 1kg干空气带有 d g水蒸气, 或者说是在 $\left(1 + \frac{d}{1000}\right)$ kg的湿空气中, 含有 d g或 $\frac{d}{1000}$ kg水蒸气。

空气湿度的表示方法, 除含湿量外, 还可用绝对湿度, 它表示1m³湿空气中含有的水蒸气质量(kg)。但绝对湿度使用起来并不方便, 因为在水分蒸发或凝结时, 湿空气中的水蒸气质量是变化的, 而且湿空气的容积也随温度而变。因此, 即使水蒸气质量不变, 由于湿空气容积的改变, 绝对湿度总会相应地变化, 因而不能确切地反映湿空气中水蒸气量的多少。在空调工程中, 对空气进行加湿或去湿时, 干空气量不变, 而 d 值作相应的改变, 因此用含湿量 d 可以方便地度量空气中的水蒸气量, 说明湿空气是增湿或是降湿。

4. 相对湿度

相对湿度是指空气中水蒸气分压力与同温度下饱和水蒸气分压力之比, 即

$$\varphi = \frac{p_s}{p_B} 100\% \quad (1-7)$$

式中 φ ——相对湿度;

p_s ——空气的水蒸气分压力;

p_B ——同温度下空气的饱和水蒸气分压力。

相对湿度表示某状态的空气接近饱和状态的程度, 也就是空气潮湿的程度。在一定的温度下, φ 值小, 说明空气饱和程度小, 吸收水蒸气的能力强; φ 值大, 则说明空气饱和程度

大或空气潮湿,吸收水蒸气的能力弱。当 $\varphi = 100\%$ 时,空气含水蒸气量已达最大(即饱和), $\varphi = 0$, 即为干空气。因此,用相对湿度这个参数能比较明确地表示空气的干湿程度。

5. 焓

在空调工程中,对空气的加热和冷却都是在定压条件下进行的,而过程中吸收或放出的热量,可方便地用过程前后的焓差来计算。

湿空气的焓是指 1kg 干空气的焓和 $\frac{d}{1000}\text{kg}$ 水蒸气的焓的总和,即

$$h = h_s + 0.001d h_v = 1.01t + 0.001d(2500 + 1.84t) \quad (1-8)$$

式中 h —— 对应于 1kg 干空气的湿空气的焓 (kJ/kg 干空气);

h_s —— 1kg 干空气的焓 (kJ/kg);

h_v —— 1kg 水蒸气的焓 (kJ/kg);

t —— 空气的温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

上式中 $(1.01t + 0.001 \times 1.84dt)$ 这两部分热量,是由温度 t 显示出来的,称为“显热”。而 $(0.001 \times 2500d)$ 这一热量,是在 0°C 时, $d\text{kg}$ 水的汽化热,它与温度无关,所以称为“潜热”。显热加潜热称为全热,即空气的焓。

6. 密度和比容

单位容积空气所具有的质量称为空气的密度,而单位质量的空气所占有的容积称为空气的比容。两者互为倒数,因此,只能视为一个独立的状态参数。其表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-9)$$

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-10)$$

式中 ρ —— 空气的密度 (kg/m^3);

V —— 空气的总容积 (m^3);

m —— 空气的总质量 (kg)。

湿空气为干空气与水蒸气的均匀混合物。湿空气的密度 ρ 为干空气密度 ρ_s 与水蒸气密度 ρ_v 之和,即:

$$\rho = \rho_s + \rho_v \quad (1-11)$$

根据热力学知识,还可推导出下面的公式:

$$\rho = \frac{p_s}{R_s T} + \frac{p_v}{R_v T} \quad (1-12)$$

式中 p_s —— 干空气的分压力;

p_v —— 水蒸气的分压力;

R_s —— 干空气的气体常数;

R_v —— 水蒸气的气体常数;

T —— 空气的温度。

二、湿空气的焓-湿图

空气调节的过程,就是改变空气状态参数的过程。尽管可以通过公式计算或查表法来求得这些参数值,但均比较麻烦。在空调工程中,常利用湿空气的焓-湿图来简便地解决问题。

湿空气的焓-湿图也称 $h-d$ 图。它是将一定大气压下的空气各参数间相互关系，用以含湿量 d 为横坐标和以焓 h 为纵坐标的线图表示出来。如图 1-1 所示，图中由四个基本参数 t 、 h 、 d 、 φ 组成了四组定值线，纵坐标与横坐标之间的夹角由 90° 扩展为 135° 。当大气压力为定值时，水蒸气的分压力 p 仅取决于含湿量 d 。因此在 d 轴的上方设一水平线，标出 d 值所对应的 p 值。

以上为 $h-d$ 图的基本组成部分。 $h-d$ 图上的一个点就代表湿空气的一个状态，而一条线则代表湿空气的状态变化过程。为了说明空气自一个状态到另一个状态的热湿变化过程，在 $h-d$ 图上还标有热湿比线 ε 。热湿比表明空气状态变化过程的方向和特征，常用状态变化前后焓差与含湿量差的比值来表示，即

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{Q}{\frac{W}{1000}} \quad (1-13)$$

式中 Δh ——空气状态变化前后的焓差 (kJ/kg 干空气)；

Δd ——空气状态变化前后的含湿量差 (g/kg 干空气)；

Q ——空气状态变化后得到 (或失去) 的热量 (kJ/s)；

W ——空气状态变化后得到 (或失去) 的湿量 (kg/s)。

实际上，连接空气处理前后的两个状态点， ε 就是该连线的斜率，它反映了过程线的倾斜角度，故又称“角系数”。斜率与起始位置无关，因此起始状态不同的空气，只要斜率相同，其变化过程线必定互相平行。根据这一特性，在 $h-d$ 图上以一点为中心作一系列不同值的 ε 标尺线。实际应用时，只需把等值的 ε 标尺线平移到空气状态点，就可作出该空气状态的变化过程了。

在空调工程中，利用焓-湿图不仅可以简化大量的计算工作，而且能简明地反映出空气状态参数及其变化全过程。

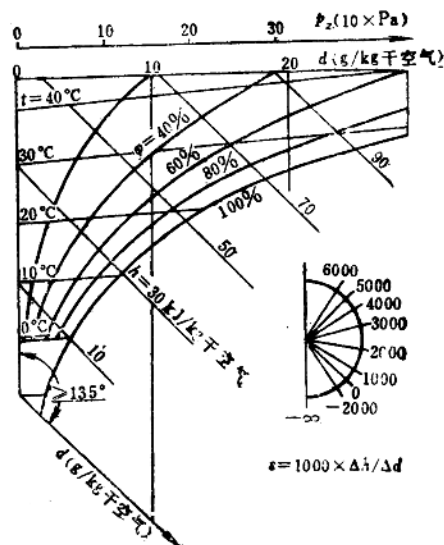


图 1-1 湿空气的焓-湿图

第二节 空气的处理过程

在空气处理设备中，通常是用喷水，进行干式加热或冷却、不同参数的空气混合或空气与水蒸气混合等几种方法，来改变空气的状态参数。下面对这些过程分别予以说明。

一、喷水处理过程

用喷水的方法来处理空气，是空调工程中最常用的方法，其特点是经济、简便。用喷水方法处理空气的设备，称为喷雾室或喷水室，其组成及工作过程如图 1-2 所示。被处理的空气是在通风机的作用下流过喷雾室，而水是在水泵的作用下，用装在喷水管上的喷嘴喷入气流中。喷水管一般有两排或三排。水经喷嘴流出时，被分裂成很小的水滴，并在喷嘴外形

成圆锥形水雾,这样就可以增大空气与水的接触表面,有利于空气处理过程的进行。

当空气与水接触时,在理想情况下,如果接触时间很长,接触面积很大,而且水量足够充沛,则最后终将使空气变为饱和空气,且其温度与水的温度相等。这一过程可用湿空气的 $h-d$ 图表示,如图 1-3 所示。图中空气的初态用点 A 表示,其干球温度为 t_a ,水的温度为 t_w ,其状态可用等温线 t_w 与饱和曲线 ($\varphi=100\%$) 的交点 B 来表示。当空气与水直接接触发生热量交换及质量交换时,在理想情况下,空气的终态将用点 B 表示,即成为水温 t_w 下的饱和空气。连接点 A 及 B 的直线即为喷水过程线,它表示空气处理过程中各参数之间的关系。

由图 1-3 可以看出,空气经喷水处理之后,温度、含湿量和焓值都将发生变化,其变化的趋势及变量的大小是与水的温度有关。图 1-4 表示当状态为 A 的空气,分别与 t_1 、 t_2 、 t_3 …… t_7 等不同温度的水接触时的状态变化过程,它们的过程线分别为直线 $A-1$ 、 $A-2$ 、 $A-3$ 、……、 $A-7$ 。这些过程的特性分别如表 1-2 中所示。从图 1-4 及表 1-2 可以看出:

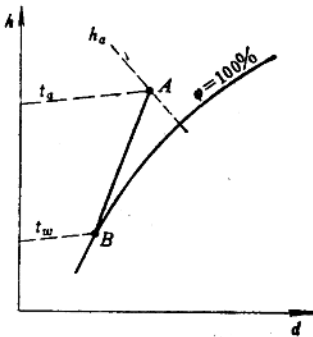


图1-3 喷水处理的理想过程的 $h-d$ 图

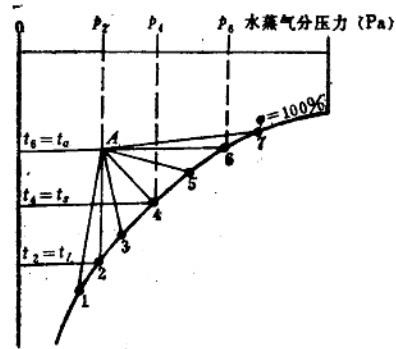


图1-4 水温对喷水处理过程的影响

表1-2 喷水处理各种过程的特性

过程	保持条件	空气状态参数的变化			过程特性	实用情况
		温 度	含 湿 量	焓		
A-1	$t_w < t_a$	降 低	减 小	减 小	减焓冷却干燥	用冷水喷雾
A-2	$t_w = t_a$	降 低	不 变	减 小	减焓等湿冷却	
A-3	$t_a < t_w < t_s$	降 低	增 加	减 小	减焓冷却加湿	用流动的水喷雾
A-4	$t_w = t_s$	降 低	增 加	不 变	等焓冷却加湿	用循环水加湿
A-5	$t_s < t_w < t_a$	降 低	增 加	增 大	增焓冷却加湿	
A-6	$t_w = t_a$	不 变	增 加	增 大	增焓等湿加湿	
A-7	$t_w > t_s$	升 高	增 加	增 大	增焓加热加湿	用热水喷雾

注:表中 t_a 、 t_s 、 t_l 分别为空气的干球温度、湿球温度和露点温度, t_w 为水温。

(1) 空气温度的变化取决于水温 t_w 与空气干球温度 t_a 的关系。 $t_w < t_a$ 时则空气温度降低, 相反时则升高;

(2) 空气含湿量的变化取决于水温 t_w 与空气露点温度 t_d 的关系。 $t_w < t_d$ 时则减湿, 相反则加湿;

(3) 空气焓值的变化取决于水温 t_w 与空气湿球温度 t_s 的关系, $t_w < t_s$ 时焓值减小, 相反时则增大。

$t_w = t_s$ 时的过程称为绝热喷雾, 此时空气的温度降低, 含湿量增大, 而焓值不变; 水与空气之间虽有显热和潜热的交换, 但总的热交换量为零, 即显热与潜热的交换数量相等、方向相反。

实际喷雾过程中, 除了绝热喷雾之外, 水的温度总是要变化的, 其变量可由喷雾过程的热平衡求得。喷雾过程的热平衡式如下:

$$M(h_1 - h_2) = W(t_{w1} - t_{w2})C_p \quad (1-14)$$

式中 M ——通过喷雾室的空气量 (kg/s);

W ——喷水量 (kg/s);

h_1, h_2 ——空气初态及终态的焓 (kJ/kg);

t_{w1}, t_{w2} ——水的初温及终温 (°C);

C_p ——水的定压比热容 [kJ/(kg·K)]。

则水温的变化为

$$\Delta t_w = t_{w2} - t_{w1} = \frac{1}{C_p} (h_1 - h_2) \frac{M}{W} \quad (1-15)$$

$\mu = \frac{W}{M}$ 称为喷雾系数。在焓差 ($h_1 - h_2$) 一定的情况下, μ 越大则水温的变化越小。实

际使用中, 一般 μ 取在 0.2~3.0 之间。

上面所分析的各种空气处理过程, 都是在假定水量无限大、水温不变的条件下进行的。但是喷水室的实际过程要复杂得多, 这里不予详细讨论。

二、空气的混合

两部分不同参数的空气混合, 也是改变空气状态的一种方法。假设有流量 M_1 、状态为 h_1, d_1 的空气与流量 M_2 、状态为 h_2, d_2 的空气相混合, 其焓-湿图如图 1-5 所示。两部分空气混合后的流量为 M_3 , 则

$$M_3 = M_1 + M_2 \quad (\text{kg/s}) \quad (1-16)$$

而混合后空气的含湿量及焓值分别为:

$$d_3 = \frac{M_1 d_1 + M_2 d_2}{M_1 + M_2} \quad (1-17)$$

$$h_3 = \frac{M_1 h_1 + M_2 h_2}{M_1 + M_2} \quad (1-18)$$

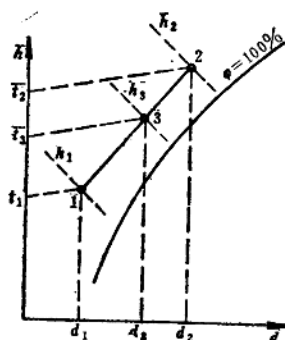


图1-5 空气的混合过程的 $h-d$ 图

根据 d_3 及 h_3 即可在 $h-d$ 图上确定混合后空气的状态点 3。

对公式 (1-17)、(1-18) 进行简单的数学变换, 即可得出下述关系式:

$$\frac{d_2 - d_1}{d_3 - d_1} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_1} = \frac{M_1}{M_2} \quad (1-19)$$

即在 $h-d$ 图上, 状态点 1、2、3 是在同一条直线上, 且点 3 的坐标值 d_3 和 h_3 分别将坐标差 $(d_2 - d_1)$ 和 $(h_2 - h_1)$ 分成两段, 两段长度之比与混合空气中两种状态空气量成反比。在 $h-d$ 图上的作图解法如图 1-5 所示, 将表示两部分空气状态的点 1 和点 2 连成一直线, 再按 M_1/M_2 反比例地将线段 1—2 分成两段, 其分点 3 即表示空气的混合状态, 从而可查出 d_3 及 h_3 。

用水蒸气与空气混合, 也是处理空气的一种比较简单的方法 (主要用于加湿)。设有流量 $M_1 \text{ kg/s}$ 的空气与流量 $a \text{ kg/s}$ 水蒸气混合, 则混合后的参数为:

$$d_3 = \frac{M_1 d_1 + 1000 a}{M_1} = d_1 + 1000 \frac{a}{M_1} \quad (1-20)$$

$$h_3 = \frac{M_1 h_1 + a h_s}{M_1} = h_1 + 2690 \frac{a}{M_1} \quad (1-21)$$

式中 d_1 ——空气起始状态的含湿量;

h_1 ——空气起始状态的焓;

d_3 ——混合后空气的含湿量;

h_3 ——混合后空气的焓;

h_s ——水蒸气的焓。

根据 d_3 和 h_3 , 即可以确定混合状态点 3 在 $h-d$ 图上的位置。从公式 (1-20) 和 (1-21)

可知, 混合后空气的含湿量和焓, 分别增加了 $1000 \frac{a}{M_1}$ 和 $\frac{a h_s}{M_1}$, 空气状态变化的热湿比为:

$$\epsilon = h_s$$

如果与空气混合的蒸汽为 100°C 左右的低压蒸汽, 其焓值约为 2690 kJ/kg , 即 $\epsilon \approx 2690$ 。在 $h-d$ 图中, $\epsilon = 2690$ 的方向与等温线近似平行。所以空气与 100°C 左右的低压水蒸气混合过程, 可近似地看作等温过程。当然只有在混入空气中的水蒸气量较少 (空气未达饱和状态) 时, 其混合过程才是等温的。如果混入的水蒸气量较多, 致有凝结水出现时, 空气不仅达到饱和, 而且温度会升高。空调工程中, 可以将蒸汽通过喷嘴喷入空气中, 对空气进行等温加湿。

三、干式加热 (等湿加热) 过程

用蒸汽加热器或电加热器对空气进行加热, 称为干式加热。在干式加热过程中, 空气与加热器固体表面之间没有湿量交换, 故含湿量 d 保持不变, 因而空气的状态变化过程在 $h-d$ 图中, 是用垂直于横坐标的线段 1—2 表示, 如图 1-6 所示。由图可以看出, 空气经干式加热后温度升高, 焓值增大, 相对湿度减小, 过程的热湿比 ϵ 为 $+\infty$ 。加热过程中空气所吸收的热量, 可根据加热前后空气的焓差或温差计算, 即

$$Q = M(h_2 - h_1) = 1.05 V \rho (t_2 - t_1) \quad (1-22)$$

式中 Q ——加热量 (kW);

M ——处理空气量 (kg/s);

V ——处理空气的容积 (m^3/s);

ρ ——空气的密度 (kg/m^3)。