



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

# 建筑暖通空调

郑庆红 主编



冶金工业出版社

[www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn)



委 员 会 内

普通高等教育“十三五”规划教材

# 建筑暖通空调

郑庆红 主编

冶金工业出版社

2017

## 内 容 提 要

本书共分7章, 主要内容包括暖通空调相关知识、供暖工程、供热系统的热源及主要设备、燃气工程、建筑通风及防排烟、空气调节以及空气调节用制冷技术。

本书为高等院校建筑给排水、建筑工程、建筑管理及监理、建筑学等相关专业的教材(配有教学课件), 也可作为有关工程技术人员参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

建筑暖通空调/郑庆红主编. —北京: 冶金工业出版社, 2017. 10

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7614-4

I. ①建… II. ①郑… III. ①房屋建筑设备—采暖设备—高等学校—教材 ②房屋建筑设备—通风设备—高等学校—教材 ③房屋建筑设备—空气调节设备—高等学校—教材 IV. ①TU83

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第238451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 yjcbcs@cnmp.com.cn

责任编辑 俞跃春 杜婷婷 美术编辑 杨帆 版式设计 禹蕊

责任校对 郑娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7614-4

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷  
2017年10月第1版, 2017年10月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14.5印张; 352千字; 222页

39.00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

本书主要介绍了现代建筑工程中的供暖工程、通风工程、冷热源工程、空调工程、燃气供应等相关知识。本书将理论与实际工程相结合，在介绍工程基本原理的基础上，主要针对各工程的系统组成形式和特点、设备种类及功能、安装敷设方式等方面进行详细阐述。

本书配合工程相关图表等，突出对各工程系统、相关设备的基本内容和内部构造的讲解，加强各部分内容的衔接，突出基础理论在工程实际整体中的应用，以利于缺乏工程实践经验的学生对相关系统、设备的特点和作用的理解和掌握。在每章内容后配有习题，便于学生加深对本章内容的理解和认识。本书内容符合学生的认知层次，体系完善，内容先进。

本书的编写分工为：第1章和第6章由西安建筑科技大学郑庆红编写；第2章由西安建筑科技大学设计研究院李婧编写；第3章和第4章由西安建筑设计研究院许彤编写；第5章由西安建筑科技大学金振星编写；第7章由西安建筑科技大学孙婷婷编写。郑庆红负责统稿。

本书配套教学课件读者可在冶金工业出版社官网 (<http://www.cnmp.com.cn>) 输入书名搜索资源并下载。

由于作者水平所限，书中不妥之处，敬请读者指正。

编 者  
2017年5月

# 目 录

1 暖通空调相关知识 .....	1
1.1 热工学概述 .....	1
1.1.1 基本概念 .....	1
1.1.2 水蒸气的物理性质 .....	3
1.2 湿空气的物理性质与焓湿图 .....	4
1.2.1 湿空气的组成 .....	4
1.2.2 湿空气的状态参数 .....	4
1.2.3 湿空气的焓湿图 .....	6
1.2.4 湿球温度与露点温度 .....	8
1.3 传热基本原理 .....	8
1.3.1 传热基本方式 .....	8
1.3.2 传热过程 .....	10
习题 .....	12
2 供暖工程 .....	13
2.1 供暖系统热负荷 .....	13
2.1.1 供暖建筑及室内外设计计算温度 .....	13
2.1.2 热负荷 .....	18
2.2 热水、蒸汽供暖系统分类 .....	21
2.2.1 供暖系统的分类及特点 .....	21
2.2.2 室内热水供暖系统 .....	23
2.2.3 高层建筑热水供暖系统 .....	29
2.2.4 室内蒸汽供暖系统 .....	32
2.2.5 室内供暖系统的选择 .....	32
2.3 辐射供暖(供冷) .....	34
2.3.1 辐射供暖系统的种类 .....	34
2.3.2 辐射供暖的特点 .....	35
2.3.3 地板辐射供暖系统 .....	35
2.3.4 燃气红外线辐射供暖 .....	37
2.3.5 辐射供暖的热负荷计算 .....	37
2.3.6 辐射供暖的散热量计算 .....	38
2.4 热风供暖 .....	39

2.4.1	集中式热风供暖	39
2.4.2	分散式暖风机供暖	39
2.4.3	热风幕	40
2.5	供暖设备与附件	40
2.5.1	散热器	40
2.5.2	膨胀水箱	48
2.5.3	集气罐	49
2.5.4	阀门	49
2.5.5	补偿器	51
2.5.6	其他设备及附件	53
2.6	供暖系统热计量	58
2.6.1	热负荷计算	58
2.6.2	带热计量的室内供暖系统	59
2.6.3	室内供暖系统干管管路布置	61
2.7	小区供暖系统	63
2.7.1	小区供暖的负荷	63
2.7.2	小区供暖系统形式	63
2.7.3	热水供热的室外管网系统种类	63
2.7.4	小区供暖系统的平面布置原则与形式	67
2.7.5	小区供暖系统的敷设	69
2.8	室内供暖系统设计	73
2.8.1	室内供暖系统设计计算	73
2.8.2	供暖设计热负荷	75
2.8.3	供暖设计方案	79
2.8.4	供暖系统的水力计算	80
	习题	86
3	供热系统的热源及主要设备	88
3.1	热电厂供热	88
3.2	锅炉及锅炉房设备	89
3.2.1	供热锅炉的种类	89
3.2.2	燃煤锅炉的基本构造	91
3.2.3	燃煤锅炉的工作过程	94
3.2.4	其他类型锅炉	95
3.3	锅炉房工艺系统及主要设备	98
3.3.1	锅炉房的工艺系统组成	98
3.3.2	引、送风系统	99
3.3.3	水、汽系统	99
3.3.4	燃料系统	99

3.3.5	仪表附件及控制系统 .....	101
3.4	锅炉的选择及锅炉房布置 .....	101
3.4.1	锅炉的选择 .....	101
3.4.2	锅炉房位置的确定 .....	102
3.4.3	锅炉房布置的一般原则 .....	103
3.4.4	锅炉间、辅助间及生活间布置 .....	104
3.4.5	锅炉房对土建施工的特殊要求 .....	105
	习题 .....	105
4	燃气工程 .....	106
4.1	燃气的分类 .....	106
4.1.1	天然气 .....	106
4.1.2	人工燃气 .....	106
4.1.3	液化石油气 .....	107
4.1.4	沼气 .....	107
4.2	燃气输配系统及设备 .....	108
4.2.1	长输管道系统 .....	108
4.2.2	城市燃气输配系统 .....	109
4.2.3	燃气输配系统设备 .....	112
4.3	建筑燃气供应系统 .....	114
4.3.1	建筑燃气供应系统的构成 .....	114
4.3.2	建筑燃气管道的布置和敷设要求 .....	115
4.4	燃气表与燃气用具 .....	120
4.4.1	燃气表 .....	120
4.4.2	燃气用具 .....	121
	习题 .....	122
5	建筑通风及防排烟 .....	123
5.1	建筑室内的环境污染 .....	123
5.1.1	建筑室内环境污染的来源及危害 .....	123
5.1.2	环境质量和排放标准 .....	127
5.2	通风方式 .....	131
5.2.1	通风的分类 .....	131
5.2.2	自然通风 .....	132
5.2.3	机械通风 .....	135
5.2.4	全面通风 .....	138
5.3	建筑防火排烟 .....	143
5.3.1	建筑火灾烟气的特性 .....	143
5.3.2	火灾烟气控制原则 .....	145

5.3.3	通风空调系统的防火	153
5.4	通风系统设备及附件	156
5.4.1	通风系统的设备组成	156
5.4.2	通风系统的附件	160
5.4.3	通风管道常用板材	161
	习题	162
6	空气调节	163
6.1	空气调节系统组成及分类	163
6.1.1	空调系统的组成	163
6.1.2	空调系统的分类	163
6.1.3	空调系统的特点	165
6.1.4	空调系统的选择	173
6.2	空调房间热工要求及空调负荷	175
6.2.1	空调房间热工要求	175
6.2.2	空调负荷	177
6.3	空调房间气流组织与效果	181
6.3.1	送风口、回风口的形式	181
6.3.2	典型的气流组织形式	183
6.4	空气处理设备	186
6.4.1	空气冷、热处理设备	186
6.4.2	除湿设备与加湿设备	188
6.4.3	空气净化设备	193
6.4.4	消声设备	194
6.4.5	空调机房布置原则	196
	习题	197
7	空气调节用制冷技术	199
7.1	空气调节用制冷系统的原理及分类	199
7.1.1	蒸气压缩式制冷系统的构成及原理	199
7.1.2	溴化锂吸收式制冷系统的构成及原理	200
7.2	制冷剂与载冷剂	201
7.2.1	制冷剂	201
7.2.2	载冷剂	204
7.3	蒸气压缩式制冷系统的主要设备	204
7.3.1	制冷压缩机	204
7.3.2	蒸发器	206
7.3.3	冷凝器	206
7.3.4	节流装置	206



7.3.5 冷却塔 .....	207
7.4 制冷技术在空调中的应用 .....	208
7.4.1 冷水机组 .....	208
7.4.2 热泵 .....	210
7.4.3 多联机中央空调 .....	214
7.4.4 冰蓄冷技术 .....	215
7.5 制冷机房 .....	218
7.5.1 空调系统与其冷源的连接关系 .....	218
7.5.2 制冷机房 .....	218
习题 .....	221
参考文献 .....	222

# 1

## 暖通空调相关知识

### 1.1 热工学概述

在暖通空调工程中经常会遇到计算供暖、空调房间负荷，确定换热设备规格，处理送入房间的空气等问题。要解决这类问题就需要具备热工学方面的知识。本节简要介绍有关水蒸气的性质、湿空气的性质以及传热学等的基本知识。

#### 1.1.1 基本概念

##### 1.1.1.1 工质

在暖通空调系统中，经常会需要实现热能与机械能的转换、或热能的转移等热力过程，通常都需要借助于一种能携带热能的工作物质来实现这些热力过程，这种工作物质简称工质，工程中常用的工质有气体、液体和蒸汽等。

##### 1.1.1.2 热力系统

热力学的重要研究方法之一就是选取及建立热力系统，本节研究的物质的热力状况，可以将这种物质利用一个闭合的边界（设备界面、与外界的接触面等真实或假想的边界），将其从周围的环境划分出来，边界内部所包围的空间物体就称为热力系统，边界外部物体称为边界或环境。

热力系统与外界之间没有热的相互作用，这种系统称为绝热系统。系统既不与外界发生质量交换，又不发生能量交换，则称为孤立系统。但，孤立系统也可能是由几个物质和能量交换的分系统组成。这两个系统的概念是抽象的概念，虽然自然界不存在绝对的绝热和孤立系统，但对热力系统的研究有帮助。

##### 1.1.1.3 温度

温度是表征物体冷热程度的参数，是物质分子平移运动的平均动能的量度；在一个系统中大量分子的热运动，可以用一个平均速度表示其热运动的情况，分子热运动越强烈，分子热运动平均速度越大，表现为系统的温度越高。因此，气体的平均动能仅与温度有关，并与热力学温度成正比。可见，温度的高低标志着物质内部大量分子热运动的强烈程度。

物体温度用温度计测量。测量的依据是：处于热平衡中的各个物体间具有相同的温度。所以当温度计与被测物体达到热平衡时，温度计指示的数值即为被测物体的温度。为保证各种温度计测出的温度值具有一致性，必须有统一的温度标尺，即温标。热力学温标为基本温标，其基本温度为热力学温度，也叫绝对温度，用  $T$  表示，单位为开尔文（Kelvin），符号为 K。热力学温度也可采用摄氏（Celsius）温度，用  $t$  表示，单位为摄氏度，符号为  $^{\circ}\text{C}$ 。两种温标的关系为：

$$t = T - 273.15 \approx T - 273, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-1)$$

#### 1.1.1.4 比热容

为了计算热力过程所交换的热量,必须知道单位数量物质的热容量。单位数量物质的热容量称为比热容。比热容的定义是:在加热(或冷却)过程中,使单位质量(kg)的物质温度升高(或降低)1K(或 $1^\circ\text{C}$ )所吸收(或放出)的热量。表示物量的单位不同,比热容的单位也不同。对固体、液体常用质量(kg)表示,相应的是质量热容,用符号 $c$ 表示,单位是 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 。对气体除用质量外,还常用标准容积( $\text{m}^3$ ,标态)和千摩尔(kmol)作单位,对应的是容积热容和摩尔热容。单位分别为 $\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot^\circ\text{C})$ 和 $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot^\circ\text{C})$ 。比热容除与物质性质有关外,还与其温度有关。在温度变化不很大的场合,一般可把比热容看作定值。

质量为 $m$ 、比热容为 $c$ 的物质,从温度 $t_1$ 升高到 $t_2$ 所需吸收的热量 $Q$ ,可用式(1-2)计算:

$$Q = mc(t_2 - t_1) \quad (1-2)$$

气体比热容的大小与热力过程的特性有关。定压加热过程中气体的比热容称为质量定压热容,用符号 $c_p$ 表示;定容加热过程气体的比热容称为质量定容热容,用符号 $c_v$ 表示。定压加热是保持气体压力不变的加热过程。在一个闭口系统中,在气体定压加热过程中,气体可以膨胀,所以加入的热量除了用来增加气体分子的动能外,还应克服外力做功,因此对同样质量的气体升高同样的温度,在定压过程中所需加入的热量比定容过程要吸收更多的热量。因此,同种物质,其质量定压热容 $c_p$ 比质量定容热容 $c_v$ 大。

#### 1.1.1.5 热力平衡及状态方程

如果系统内部的压力与温度都均匀一致,并与外界的压力和温度平衡,该系统则处于热力平衡状态。如果系统只有压力平衡称为力的平衡,只有温度平衡称为热平衡,两者都平衡才称为热力平衡。处于热力平衡状态的物质,其系统中各部分具有相同的压力、温度、比容等状态参数值,且与外界也处于平衡。

当气体作为理想气体对待时,其绝对压力 $p$ 、绝对温度 $T$ 和比容 $v$ 之间存在一定关系,可以用理想气体状态方程来表示。对于1kg气体而言,其状态方程式为:

$$pv = RT \quad \text{或} \quad pV = mRT \quad (1-3)$$

式中  $p$ ——绝对压力, Pa;

$v$ ——比容,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;

$T$ ——绝对温度, K;

$V$ —— $m\text{kg}$ 气体所占的容积,  $\text{m}^3$ ;

$R$ ——气体常数,  $R = \frac{8314.4}{\mu}$ ;

$\mu$ ——气体相对分子质量。

实际气体与理想气体之间有所不同,对实际气体应用式(1-3)是有偏差的,其偏差随压力的升高、温度的降低而增大。暖通空调工程中所涉及的压力均不很高、温度也不很低,因此,可以近似采用上述方程式进行计算。

#### 1.1.1.6 显热和潜热

工程热力学中涉及的物质称为工质。当工质被加热或被冷却时,只改变温度,而不改

变质量和物态,这种变化过程吸收或放出的热量称为显热。可用式(1-2)计算。如果工质吸热或放热时只改变其质量或物质存在形态而不改变温度,这种过程称为相变过程,其放出或吸收的热量称为潜热,用符号 $r$ 表示,单位是 $\text{kJ/kg}$ 。液体变成气体吸收的热量称为气化潜热,而气体变成液体所放出的热量称为凝结潜热。固体溶解为液体所吸收的热量称为溶解潜热。工质在相变过程中所需的热量可用式(1-4)计算:

$$Q = mr, \text{ kJ} \quad (1-4)$$

### 1.1.1.7 焓

焓是工程热力学中的一个重要参数,它表示流动工质的能量中取决于工质热力状态的那部分能量。理想气体的焓和内能一样,也仅是工质温度的单值函数。

$$i = u + pv \times 10^{-3} = f(T), \text{ kJ/kg} \quad (1-5)$$

式中  $i$ ——工质的焓,  $\text{kJ/kg}$ ;

$u$ ——工质的内能,即物质内部所有的分子总能量,  $\text{kJ/kg}$ ;

$pv$ ——代表 $1\text{kg}$ 工质的流动功,  $\text{J/kg}$ 。

如果工质没有流动,焓只是一个复合的状态参数。在许多热工设备中,工质总是从一处流向另一处,其能量变化就用焓差来表示。焓的绝对值很难直接确定,实际上也没有必要去求它的绝对值。通常需要的是工质从一个状态变化到另一个状态时焓的变化值。所以,人为地把工质为 $0^\circ\text{C}$ 时的焓值确定为0。

## 1.1.2 水蒸气的物理性质

水蒸气是暖通工程上经常遇到的工质。因此,掌握水蒸气的性质十分重要。

### 1.1.2.1 气化

工质由液态转变为气态的过程称为气化,相反的过程称为凝结。气化有蒸发和沸腾两种方式。蒸发是在液体表面上进行的气化过程,它可在任意温度下进行。蒸发是由于液体表面上的一些能量较高的分子,克服其邻近分子的引力而离开液体表面进入周围空间所致。液体温度越高,具有较高能量的分子数目越多,蒸发越剧烈。蒸发除与液体温度有关外,还与蒸发表面积大小及液面上空的压力有关。由于能量较高的分子离开液面,致使液体分子平均动能减小,液体的温度随之降低。蒸发时与之相反的过程也在同时进行,即空间某些蒸汽分子与液面相接触而由气态转变为液态。

在封闭容器内,当蒸发与凝结的分子数目相等时,蒸汽分子浓度保持不变,蒸汽压力达到最大值,此时气液两相处于动态平衡。两相平衡的状态称为饱和状态;所对应的蒸汽、液体、气液两相的温度和压力分别称为饱和蒸汽、饱和液体、饱和温度、饱和压力。在一定温度下的饱和蒸汽,其分子浓度和分子的平均动能是一个定值,因此蒸汽压力也是一个定值。温度升高,蒸汽分子浓度增大,分子平均动能增大,蒸汽压力也升高。所以,对应于一定的温度就有一个确定的饱和压力;反之,对应于一定的压力也有一确定的饱和温度。例如, $100^\circ\text{C}$ 水的饱和压力为 $101.325\text{kPa}$ , $20^\circ\text{C}$ 时其饱和压力为 $2.29\text{kPa}$ 。

沸腾是指表面和液体内部同时进行的剧烈气化现象。在一定的外部压力下,当液体温度升至一定值时,液体的内部产生大量气泡,气泡上升至表面破裂而放出大量蒸汽,这就是沸腾,对应的温度称为沸点。沸点随外界压力的增加而升高,二者具有一一对应关系,

例如, 压力为 100kPa 时, 水的沸点为 99.63℃; 压力为 500kPa 时, 其沸点相应为 151.85℃。不同性质的液体沸点不相同, 如在一个物理大气压下酒精沸点为 78℃, 氨的沸点为 -33℃。

### 1.1.2.2 湿饱和蒸汽、干饱和蒸汽和过热蒸汽

若在定压下对液体进行加热, 当达到饱和温度时, 液体沸腾变成蒸汽; 继续加热, 则比容增加, 温度不变, 称为饱和温度。这时容器内存在饱和液体与饱和蒸汽的混合物, 称为湿饱和蒸汽状态。再继续加热, 液体全部变成饱和蒸汽, 此时称为干饱和蒸汽状态。如进一步加热, 则蒸汽的温度升高而超过该饱和压力下对应的饱和温度, 比容也将增加, 这种状态称为过热蒸汽。过热蒸汽温度与饱和温度之差称为过热度。

水蒸气是由液态水气化而来的一种气体, 它离液态较近, 不能将其作为理想气体。对水蒸气热力性质的研究, 通常按各区别通过实验测定并结合热力学微分方程, 推算出水蒸气不可测的参数值, 将数据列表或绘图供工程计算用。部分温度下饱和水蒸气压力见表 1-1。

表 1-1 部分温度下饱和水蒸气压力

空气温度/℃	10	15	20	25	30	35	40	45	50
饱和水蒸气压力/Pa	1225	1701	2331	3160	4232	5610	7358	9560	12301

## 1.2 湿空气的物理性质与焓湿图

湿空气既是空气环境的主体又是空调工程的处理对象。因此, 首先要熟悉湿空气的物理性质及空气的焓湿图。

### 1.2.1 湿空气的组成

大气由于空气和一定量的水蒸气混合而成的, 称为湿空气。干空气的成分主要是氮、氧、氩及其他微量气体, 其中多数成分比较稳定, 少数随季节和气候条件的变化有所波动。但从总体上仍可将干空气作为一种稳定的混合物来看待。

空气环境内的空气成分和人们平时所说的“空气”实际上是干空气和水蒸气的混合物, 即湿空气。湿空气中水蒸气的含量虽少, 质量比通常为千分之几至千分之二十几。此外, 水蒸气含量常随季节、气候、地理环境等条件的变化而变化。因此, 湿空气中水蒸气含量的变化对空气环境的干湿程度产生重要影响, 并使湿空气的物理性质随之改变。

### 1.2.2 湿空气的状态参数

#### 1.2.2.1 压力

地球表面的空气层在单位面积上所形成的压力称为大气压力。大气压力随着各个地区的海拔高度不同而存在差异, 海平面的标准大气压力为 101.325kPa。

湿空气中水蒸气单独占有湿空气容积, 并具有与湿空气相同的温度时所产生的压力称为水蒸气分压力。根据道尔顿定律, 湿空气的压力应等于干空气的分压力与水蒸气的分压

力之和:

$$B = P_g + P_q \quad (1-6)$$

式中  $B$ ——湿空气压力, 即大气压力, Pa;

$P_g, P_q$ ——干空气及水蒸气分压力, Pa。

在常温常压下干空气可视为理想气体, 而湿空气中的水蒸气一般处于过热状态且含量很少, 可近似地视作理想气体。所以, 湿空气也应遵循理想气体的状态方程。

### 1.2.2.2 含湿量

在空调工程中经常涉及湿空气的温度变化, 湿空气的体积也会随之而变。用水蒸气密度作为衡量湿空气含有水蒸气量多少的参数会给实际计算带来诸多不便。为此, 定义含湿量为: 相应于 1kg 干空气的湿空气中所含有的水蒸气量, 即:

$$d = \frac{m_q}{m_g}, \text{ kg/kg}_T \quad (1-7a)$$

因为  $m_g = V\rho_g, m_q = V\rho_q$ , 所以, 式 (1-7a) 还可写为:

$$d = \frac{\rho_q}{\rho_g}, \text{ kg/kg}_T \quad (1-7b)$$

### 1.2.2.3 相对湿度

在一定温度下, 湿空气所含的水蒸气量有一个最大限度, 超过这一限度多余的水蒸气会从湿空气中凝结出来。这种含有最大限度水蒸气量的湿空气称为饱和空气。饱和空气所具有的水蒸气分压力和含湿量称为该温度下湿空气的饱和水蒸气分压力和饱和含湿量。若温度发生变化, 它们也将相应地变化, 见表 1-2。

表 1-2 空气温度与饱和水蒸气压力及饱和含湿量的关系

空气温度 $t/^\circ\text{C}$	饱和水蒸气压力 $P_{q,b}/\text{Pa}$	饱和含湿量 $d_b/\text{g} \cdot \text{kg}_T^{-1}$ ( $B=101325\text{Pa}$ )
10	1225	7.63
20	2331	14.70
30	4232	27.20

湿空气中水蒸气分压力与同温度下饱和水蒸气分压力之比称为相对湿度  $\phi$ , 它是另一种度量水蒸气含量的间接指标, 可表示为:

$$\phi = \frac{P_q}{P_{q,b}} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中  $P_{q,b}$ ——饱和水蒸气分压力, Pa。

### 1.2.2.4 湿空气的焓

在暖通工程中, 空气的压力变化一般很小, 可近似于定压加热或冷却过程。因此, 可直接用空气焓的变化来度量空气的热量变化。湿空气的焓应等于 1kg 干空气的焓  $i$  加上与其同时存在的  $d\text{kg}$  (或  $\text{g}$ ) 水蒸气的焓。已知干空气的质量定压热容  $C_{p,g} = 1.01\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , 水蒸气的质量定压热容  $C_{p,q} = 1.84\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , 则湿空气的焓为:

$$i = 1.01t + (2500 + 1.84t)d, \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (1-9a)$$

$$\text{或} \quad i = 2500d + (1.01 + 1.84d)t, \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (1-9b)$$

由式 (1-9b) 可看出,  $[(1.01+1.84d)t]$  是随温度而变化的热量, 称为显热; 而  $(2500d)$  仅随含湿量变化而与温度无关, 称为潜热。由此可见, 湿空气的焓将随温度和含湿量的升高而增大, 随其降低而减少。式 (1-9) 中的常数 2500 是水在  $0^{\circ}\text{C}$  时的气化潜热。

### 1.2.3 湿空气的焓湿图

湿空气的主要状态参数有  $t$ 、 $d$ 、 $B$ 、 $\varphi$ 、 $I$ 、 $P_0$  等, 采用计算方法确定这些状态参数十分麻烦。

工程上应用一种能够全面反映湿空气性质, 既能表示空气的各种状态参数, 又能表达空气状态变化过程的列线图称为焓湿图 (又称  $i-d$  图), 如图 1-1 所示。焓湿图的应用使得空气状态及其参数的确定大为简化, 又能清晰直观地反映出空气状态变化过程。它是空调工程设计与运行中一种十分重要的工具。

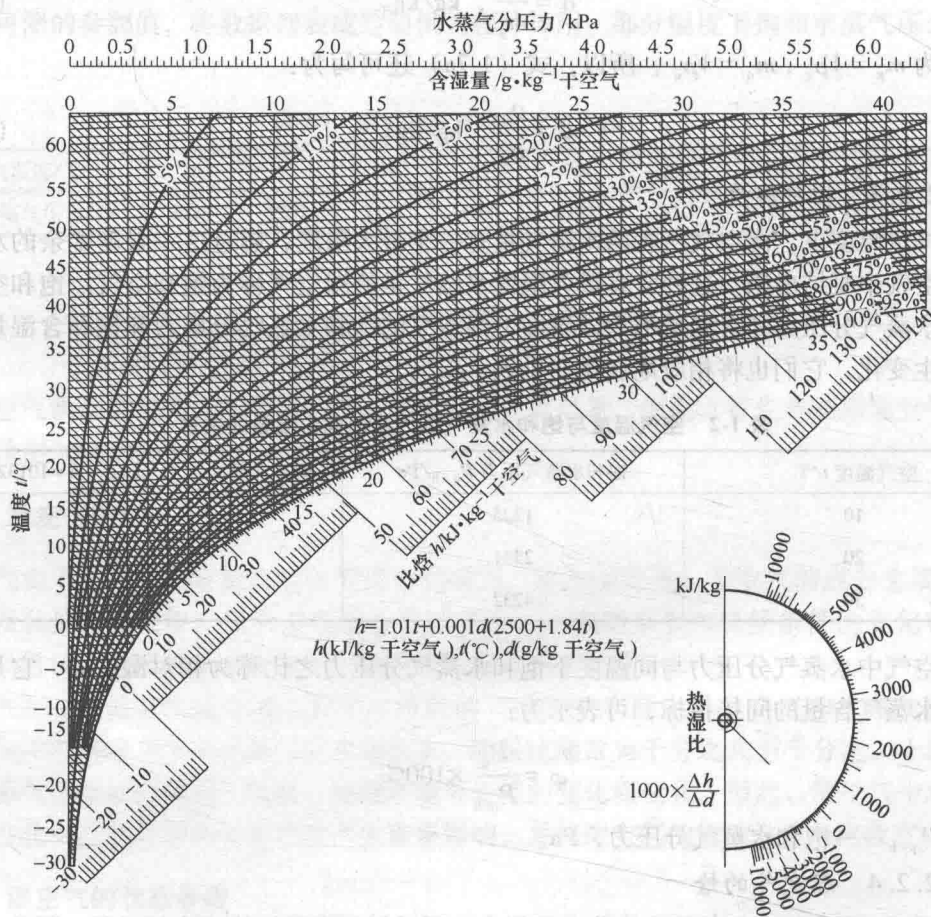


图 1-1 湿空气在标准大气压时的焓湿图

#### 1.2.3.1 $i-d$ 图的结构

$i-d$  图的具体形式因绘制者不同而有差异。图 1-2 所示为我国常用的  $i-d$  图结构示意图。绘制时取焓  $i$  为纵坐标, 含湿量  $d$  为横坐标, 且两坐标之间的夹角等于或大于  $135^{\circ}$ 。在实际使用中, 为避免图面过长, 常将  $d$  坐标改为水平线。 $i-d$  图主要由  $i$ 、 $d$  及  $P_q$ 、 $t$ 、 $\varphi$  的等

值线列所构成。需要注意的是： $\varphi = 0\%$  的等值线与纵坐标轴相重合，这代表了干空气的状态。 $\varphi = 100\%$  的等值线是一条特殊的饱和曲线，它代表了饱和空气状态。该曲线将  $i-d$  图分成两部分，其左上方为湿空气区（又称未饱和区），该区内水蒸气处于过热状态；其右下方为过饱和区，空气在该区内的状态是不稳定的，其中的水雾易出现凝结现象，故该区又称为“雾区”。

### 1.2.3.2 热湿比 $\varepsilon$

在  $i-d$  图上任何一点均表示空气的某一状态。空调工程中常常需要对空气进行加热、加湿、冷却、减湿等处理。这势必引起空气状态发生变化。空气的这些变化取决于所吸收或放出的热量和湿量，并且认为一定量的空气吸收这些热量和湿量是“同时”和“均匀”

进行的。这样在  $i-d$  图上就可以用变化前后两个状态点的

连线来代表空气这一状态变化过程。假定对  $m\text{kg}$  空气加入  $Q\text{kJ}$  的热量和  $W\text{kg}$  的湿量，从而使空气由  $A$  状态变化为  $B$  状态。该过程在  $i-d$  图上用  $AB$  连线来表示，如图 1-3 所示。

焓及含湿量的变化分别为：

$$\Delta i = i_B - i_A = \frac{Q}{m} \quad (1-10a)$$

$$\Delta d = d_B - d_A = \frac{W}{m} \quad (1-10b)$$

由式 (1-10) 可进一步得出：

$$\frac{\Delta i}{\Delta d} = \frac{i_B - i_A}{d_B - d_A} = \frac{Q}{W}$$

通风空调技术中，常常借助于状态变化前后焓差与含湿量差的比值来表征空气状态变化过程的方向和特征，这一比值称为热湿比  $\varepsilon$ ，即：

$$\varepsilon = \frac{\Delta i}{\Delta d} = \frac{i_B - i_A}{d_B - d_A} = \frac{Q}{W} \quad (1-11a)$$

式 (1-11a) 中如  $\Delta d$  改用  $g$  作单位，则应变为如下形式：

$$\varepsilon = \frac{\Delta i}{\Delta d} = \frac{i_B - i_A}{\frac{d_B - d_A}{1000}} = \frac{Q}{\frac{W}{1000}} \quad (1-11b)$$

显然， $\varepsilon$  值还是过程  $AB$  的斜率，它反映  $AB$  连线的倾斜程度，故又称为角系数。斜率与起始位置无关，且斜率相同的各条直线必定相互平行。据此，可以在  $i-d$  图上以任意点为中心设置  $\varepsilon$  标尺，如图 1-2 中右下方所示。实际应用时，只需按已知  $\varepsilon$  值把等值的  $\varepsilon$  标尺平行移动到既定的空气初始状态点，即可获得所需的过程线。然后，再结合其他条件确定出终状态点，进而将空气状态变化过程完全确定下来。

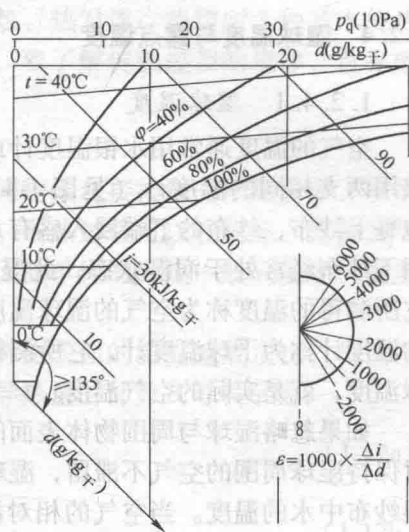


图 1-2 焓湿图

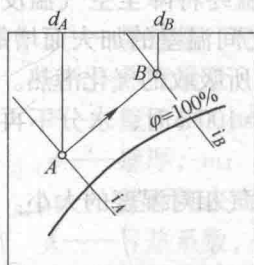


图 1-3  $\varepsilon$  在焓湿图上的表示



### 1.2.4 湿球温度与露点温度

#### 1.2.4.1 湿球温度

空气的温度通常用水银温度计或酒精温度计测出。如果用两支相同的温度计（见图 1-4），将其中一支的感温包裹上纱布，纱布的下端浸入盛有水的小杯中，在毛细作用下纱布经常处于润湿状态，此湿度计称为湿球温度计，它所测得的温度称为空气的湿球温度。另一支未包裹纱布的温度计称为干球温度计，它所测得的温度称为空气的干球温度，就是实际的空气温度。

如果忽略湿球与周围物体表面间辐射换热的影响，同时保持湿球周围的空气不滞留，湿球温度计的读数反映了湿纱布中水的温度。当空气的相对湿度  $\phi < 100\%$  时，必然存在着水的蒸发现象。无论原来水温多高，经过一段时间后，水温终将降至空气温度以下。这时，也就出现了空气向水面的传热。此热量随着空气与水之间温差的加大而增加。当水温降到某一数值时，空气向水面的温差传热恰好补充水分蒸发所吸收的气化潜热。此时水温不再下降，这一稳定温度称为湿球温度  $t_s$ 。当相对湿度  $\phi = 100\%$  时，水分不再蒸发，干球、湿球温度相等。

由此可见，在一定的空气状态里，干湿球温度的差值反映了空气相对湿度的大小。在  $i-d$  图上，可以近似地认为等焓线即为等湿球温度线。

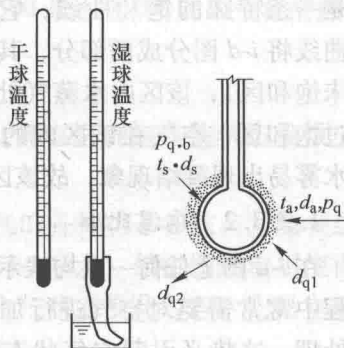


图 1-4 干湿球温度计

#### 1.2.4.2 露点温度

湿空气的露点温度  $t_l$  定义为在含湿量不变的条件下，湿空气达到饱和时的温度。露点温度也是湿空气的状态参数，它与  $d$ （或  $P_q$ ）相关，因而不是独立参数。在  $i-d$  图上（见图 1-5） $A$  状态湿空气的露点温度是  $A$  沿等  $d$  线向下与  $\phi = 100\%$  线交点的温度。当  $A$  状态湿空气被冷却时（或与某冷表面接触时），只要湿空气温度大于或等于其露点温度，则不会出现结露现象。因此，湿空气的露点温度是判断是否结露的依据。

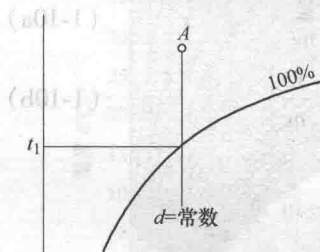


图 1-5 湿空气露点温度

## 1.3 传热基本原理

### 1.3.1 传热基本方式

凡是存在温度差的地方，就有热量由高温物体传到低温物体。因此，传热是自然界和人类活动中非常普遍的现象。以房屋墙壁在冬季的散热为例，整个过程如图 1-6 所示，可以将这个过程分为 3 段。首先室内空气以对流换热的方式、墙与物体间的以辐射方式把热量传给墙内表面；再由墙内表面以固体导热方式传递到墙外表面；最后由墙外表面以空气对流换热、墙与物体间以辐射方式把热量传

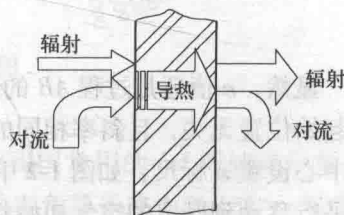


图 1-6 墙体传热过程