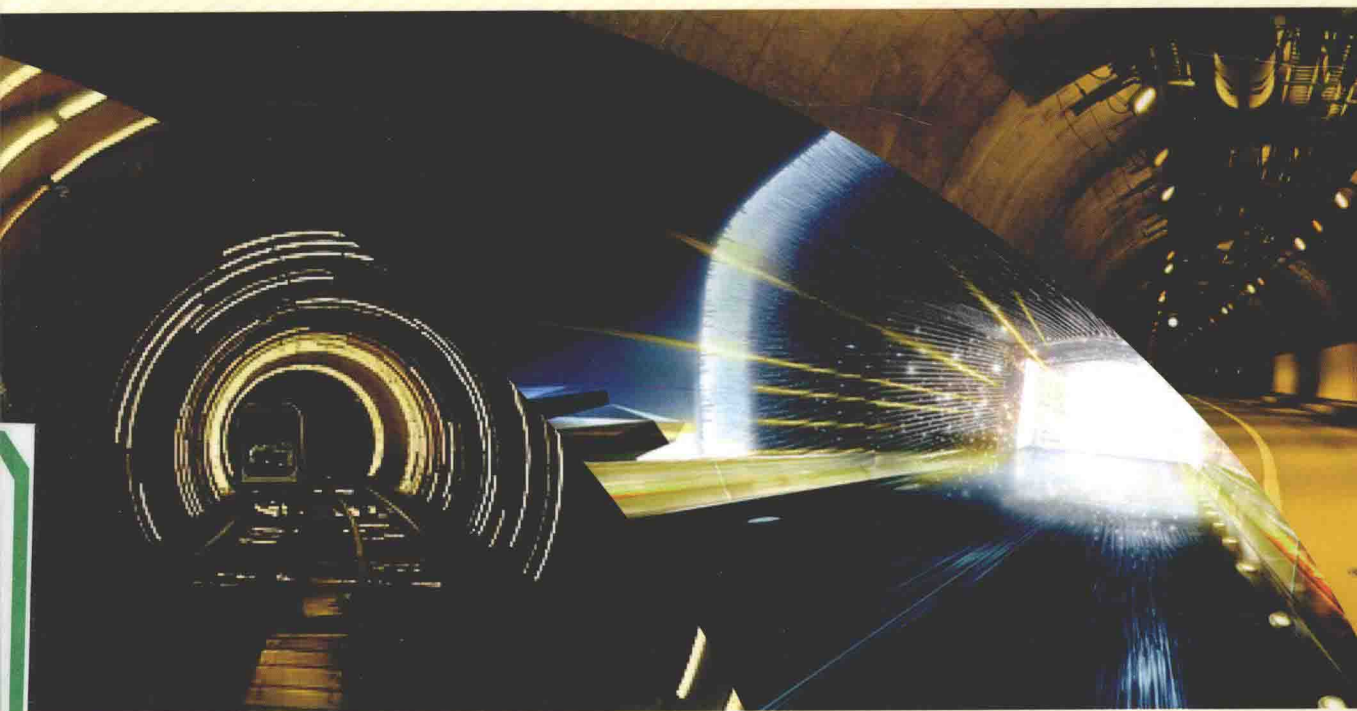


高等学校十二五规划教材·基础科学类

地下工程通风与空气调节

刘顺波 主编



西北工业大学出版社

高等学校教材

DIXIA GONGCHENG TONGFENG YU KONGQI TIAOJIE

地下工程通风与空气调节

主编 刘顺波

编者 刘顺波 李亚奇 李 辉

汪 波 韩晓霞

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书系统地介绍了地下工程通风与空气调节技术的基本原理及工程应用。其内容包括湿空气的物理性质和焓湿图,空调房间的热湿负荷与送风量,防护通风原理与设备,空气热湿处理原理与设备,空调系统设计与运行调节,空调房间的气流组织,地下工程防火排烟,空调系统的消声减振,以及空调系统的测定与调整等内容。

本书可作为高等院校地下工程通风与空气调节课程的教材,也可供从事地下工程通风与空气调节工程的设计、施工、工程监理和运行管理等方面的工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程通风与空气调节/刘顺波主编. —西安:西北工业大学出版社,2015.8
ISBN 978-7-5612-4586-6

I. ①地… II. ①刘… III. ①地下建筑物—通风设备 ②地下建筑物—空气调节设备
IV. ①TU96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 210876 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张:16.125

字 数:390 千字

版 次:2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价:39.00 元

前 言

地下工程包括人防工程、国防工程、地下铁道和地下商场等。地下工程具有隐蔽、安全、恒温等优点,但也有潮湿、氨浓度偏高、空气品质差的不足,火灾时人员疏散与防排烟困难以及不利于噪声控制等问题。地下工程通风与空气调节系统用于保障环境温湿度和空气质量,也解决火灾时的防排烟以及噪声控制等问题。

本书在突出地下工程专业教材特色的基础上尽量体现新规范、新标准的内容和要求,并力求反映本学科的技术发展和工程应用。

本书由刘顺波、李亚奇、李辉、汪波和韩晓霞分工合作编写,刘顺波担任主编。具体分工:第一至四、七章由刘顺波编写,第五章由汪波编写,第六章由韩晓霞编写,第八、九章由李亚奇编写,第十、十一章由李辉编写。

编写本书曾参阅了相关国家标准、专业规范、设计手册和文献资料等,在此,特对各相关作者表示衷心的感谢。

由于笔者水平有限,书中不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2015 年 3 月

目 录

第1章 通风空调基础	1
1.1 湿空气	1
1.2 湿空气焓湿图及其应用	6
1.3 环境空气对人与物资贮存的影响	11
1.4 地下工程内空气质量	15
第2章 地下工程热湿负荷计算	23
2.1 室内外空气计算参数与地层温度	23
2.2 围护结构传热计算	25
2.3 设备、照明和人体散热量	44
2.4 湿负荷计算	46
第3章 防护通风系统	51
3.1 通风与防护通风	51
3.2 防护通风方式	53
3.3 防护进风系统	60
3.4 防护排风系统	62
3.5 平战结合通风	64
3.6 人防工程防护通风系统示例	66
3.7 柴油发电站通风系统	70
第4章 防护通风设备	80
4.1 防波消波设备	80
4.2 粗滤器	85
4.3 滤尘器	88
4.4 过滤吸收器	90

4.5 通风密闭阀门	94
4.6 自动排气活门	99
4.7 其他设备	104
4.8 通风机	105
第5章 通风换气量与通风管道计算	119
5.1 全面通风换气量	119
5.2 通风管道设计	122
5.3 风管内空气流动时的压力损失	126
5.4 通风管道计算	130
第6章 空气调节系统	134
6.1 空气调节系统的分类	134
6.2 空调房间送风状态和送风量的确定	136
6.3 集中式空调系统	140
6.4 一次回风空调系统的运行调节	145
6.5 变风量空调系统	149
第7章 空气热湿处理设备	155
7.1 加热器	155
7.2 加湿器	157
7.3 冷冻除湿机	160
7.4 冷风机	162
7.5 升温除湿机	163
7.6 调温除湿机	166
7.7 全工况除湿机	170
7.8 转轮除湿机	171
7.9 组合式空气处理机组	177
第8章 地下工程空调房间的气流分布	180
8.1 气流分布的基本要求及分类	180
8.2 送风口和回风口形式	181
8.3 地下工程房间典型的气流分布形式	184
8.4 地下工程房间气流分布的计算	185
8.5 气流分布性能指标	194

第 9 章 地下工程防火排烟	197
9.1 火灾烟气的危害	197
9.2 防火分区与防烟分区划分	198
9.3 加压送风防烟及送风量	200
9.4 机械排烟及排烟风量	201
9.5 通风空调系统防火要求	203
第 10 章 通风空调系统的噪声及其控制	204
10.1 噪声的特性、评价及控制	204
10.2 通风空调系统的噪声	209
10.3 消声器	213
10.4 空调设备的隔振	220
第 11 章 通风空调系统的测定与调整	225
11.1 风量的测定与调整	225
11.2 防护通风系统的检测与调试	233
附录	240
附录 1 湿空气的密度、水蒸气压力、含湿量和焓	240
附录 2 部分城市室外气象参数	243
附录 3 全国主要城市实测地温($\pm 0.0 \sim -3.2$ m)	244
附录 4 湿空气焓湿图	249
参考文献	250

第 1 章 通风空调基础

通风与空气调节的根本意义就在于创造一个适宜的空气环境,为生产、生活、科研等活动中的人和设备提供一个良好的环境保证。

本章介绍地下工程通风与空气调节课程所需的基本知识。

1.1 湿空气

通风与空气调节就是改造空气和利用空气,所以首先要了解空气的组成及其物理性质。

1.1.1 湿空气组成

自然界中的空气是湿空气,由干空气和水蒸气组成的混合气体。干空气由氮(N_2)、氧(O_2)、二氧化碳(CO_2)和稀有气体、微量气体等组成,见表 1-1。除表 1-1 所示成分及其含量比例外,在空调空气中尚不同程度地含有灰尘、微生物和有害气体等杂质,空调工程中虽把干空气当作整体看待,但杂质的处理则是必须要解决的问题。

表 1-1 海平面附近清洁干燥大气的主要标准成分

成分气体(分子式)	相对分子质量	体积分数/(%)	质量分数/(%)
氮(N_2)	28.013	78.13	75.55
氧(O_2)	31.999	20.90	23.10
氩等稀有气体		0.94	1.30
二氧化碳(CO_2)	44.010	0.03	0.05
氢(H_2)	2.016		

空气中的水蒸气,是江河湖海中的水分蒸发而形成的,也来自于人们生产、生活过程。空气中的水蒸气含量随海拔、季节、气候、湿源等各种条件而变化。虽然空气中水蒸气含量少,但它对空气状态变化的影响却很大,并且对人体热舒适、产品制造、储存和使用产生直接影响。所以,湿空气中水蒸气的处理是空气调节的一个重要内容。

湿空气可以认为是理想气体,其气体常数 $R=287\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,摩尔质量 $M=28.96\text{ kg}/\text{kmol}$ 。

1.1.2 湿空气状态参数

空气的物理性质,用空气的状态参数表示和衡量。与通风空气调节密切关系的状态参数有压力、温度、湿度、焓、密度和比体积等。

1. 空气强力

(1) 大气压强(B)

环绕地球的空气层对单位地球表面积形成的压力称作大气压强。大气压强通常用 B 表示,单位为帕(Pa)或千帕(kPa)。

大气压强不是一个定值,它随着各地海拔高度不同而存在着差异,同时,还随着季节的变化和天气的变化而稍有变化。海平面上标准大气压强为 101.325 kPa。大气压强随海拔高度的变化关系如图 1-1 所示。例如上海地区海拔高度为 4.5 m,夏季大气压强为 100.5 kPa,冬季为 102.5 kPa;西宁市海拔高度为 2261.2 m,夏季大气压强值为 77.3 kPa。冬季为 77.5 kPa。大气压强不同时,空气的状态参数也要发生变化,因此,空调系统运行中一些设计参数也就相应地变化,如不考虑当地大气压强高低的影响,就会造成一定的误差。

在空调系统中空气的压强是用压强表测出的,但压强表指示的压强不是空气的绝对压强值,而是空气的绝对压强与当地大气压强的差值,称作工作压力,也叫表压。空气的绝对压强是空气压强的一个基本状态参数。凡未指明工作压强的,均应理解为绝对压强。不同单位制中压强有不同单位和数值,其换算关系见表 1-2。

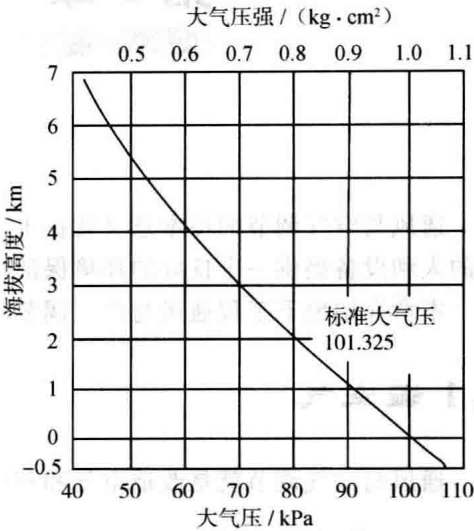


图 1-1 大气压与海拔高度的关系

表 1-2 大气压强单位换算表

物理大气压/atm	毫米水银柱/mmHg	毫巴/mbar	帕斯卡/Pa	毫米水柱/mmH ₂ O
1	760	1 013.25	101 325	10 332
$1.315\ 79\times 10^{-3}$	1	1.333 32	133.332	13.595 1
$9.869\ 23\times 10^{-4}$	$7.500\ 62\times 10^{-1}$	1	100	10.197 2
$9.869\ 23\times 10^{-6}$	$7.500\ 62\times 10^{-3}$	10^{-2}	1	$10.197\ 2\times 10^{-2}$
$9.678\ 41\times 10^{-5}$	$7.355\ 6\times 10^{-2}$	$9.806\ 65\times 10^{-2}$	9.806 65	1

(2) 水蒸气分压强(p_q)

湿空气含有的水蒸气所产生的压强,称为水蒸气分压强。由于大气是由干空气和水蒸气组成的,因而大气压强也就必然是干空气的分压强和水蒸气分压强之和,即

$$B=p_g+p_q \tag{1-1}$$

式中: B 为湿空气的压强即大气压强,Pa; p_g 为干空气的分压强,Pa; p_q 为水蒸气的分压强,Pa。

水蒸气分压强的大小,反映了空气中水蒸气含量的多少。但是空气中水蒸气的含量有一个最大的限度,这个限度决定于空气温度的高低,对应于某一温度数值,空气含有的水蒸气都存在一个最大量值,当空气中水蒸气含量达到最大值时,就再也不能容纳更多的水蒸气了,此时空气的状态称为饱和状态。饱和状态下的水蒸气分压力称为饱和水蒸气分压力,用 $p_{q,b}$ 表

示。不同温度下的饱和水蒸气分压力 $p_{q,b}$ 见表 1-3。当 $t=0\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,饱和水蒸气分压力与空气绝对温度的关系为

$$\ln(p_{q,b}) = \frac{c_1}{T} + c_2 + c_3 T + c_4 T^2 + c_5 T^3 + c_6 \ln(T) \quad (1-2)$$

式中: $p_{q,b}$ 为饱和水蒸气分压力(Pa); T 为空气的绝对温度(K); 系数 $c_1\sim c_6$ 分别为 $c_1 = -5\,800.220\,6$, $c_2 = 1.391\,499\,3$, $c_3 = -0.048\,602\,39$, $c_4 = 0.041\,764\,768 \times 10^{-4}$, $c_5 = -0.144\,520\,93 \times 10^{-7}$, $c_6 = 6.545\,967\,3$ 。

表 1-3 湿空气的饱和水蒸气分压力

$t/^{\circ}\text{C}$	$P_{q,b}/10^2\text{ Pa}$	$t/^{\circ}\text{C}$	$P_{q,b}/10^2\text{ Pa}$	$t/^{\circ}\text{C}$	$P_{q,b}/10^2\text{ Pa}$	$t/^{\circ}\text{C}$	$P_{q,b}/10^2\text{ Pa}$
-20	1.02	-2	5.16	16	18.13	34	53.07
-19	1.13	-1	5.61	17	19.32	35	56.10
-18	1.25	0	6.09	18	20.59	36	59.26
-17	1.37	1	6.56	19	21.92	37	62.60
-16	1.50	2	7.04	20	23.31	38	66.09
-15	1.65	3	7.57	21	24.80	39	69.75
-14	1.81	4	8.11	22	26.37	40	73.58
-13	1.98	5	8.70	23	28.02	41	77.59
-12	2.17	6	9.32	24	29.77	42	81.80
-11	2.37	7	9.99	25	31.60	43	86.18
-10	2.59	8	10.70	26	33.53	44	90.79
-9	2.83	9	11.46	27	35.56	45	95.60
-8	3.09	10	12.25	28	37.71	46	100.61
-7	3.36	11	13.09	29	39.95	47	105.87
-6	3.67	12	13.99	30	42.32	48	111.33
-5	4.00	13	14.94	31	44.82	49	117.07
-4	4.36	14	15.05	32	47.43	50	123.04
-3	4.75	15	17.01	33	50.18	55	156.94

由于水蒸气分压力反映了空气中水蒸气含量的多少,因此,它也是空气状态的一个基本参数。气象资料中把它称作空气的绝对湿度。

2. 空气温度

空气温度表示空气的冷热程度。一般用 t 表示摄氏温度($^{\circ}\text{C}$),用 T 表示绝对温度(K),而工程计算中,采用绝对温度。 T 与 t 的关系为

$$T = 273.15 + t \approx 273 + t \quad (1-3)$$

(1) 干球温度(t 或 t_g)

用温度计直接测量出来的空气的温度,称作空气的干球温度,简称干球温度或温度。

(2) 湿球温度(t' 或 t_{sh})

在温度计的温包上包以湿润的纱布时所测得的空气的温度,称作空气的湿球温度,简称湿球温度。

湿球温度 t_{sh} 与水蒸气分压力 p_q 的关系为

$$p_q = p_{q \cdot b} - A(t - t_{sh})B \quad (1-4)$$

式中: $A=0.000\ 667$,或根据风速计算,即 $A=\left(65+\frac{6.75}{v}\right)\times 10^{-5}$; B 为大气压,Pa。

在同一环境下,湿球温度只能低于或等于干球温度。干湿球温度差越大,表明空气越干燥;温差越小,则说明空气越潮湿,如二者相等,则说明此时的空气已达饱和状态。如图 1-2 所示。

(3) 露点温度(t_l)

保持某一状态下空气中含水蒸气的量不变而降低其温度至一定程度时,空气中便有水蒸气凝结,呈露状析出,此一开始凝露时的温度,称作该状态下空气的露点温度,简称露点。秋天的白昼草木叶上没有露水而黄昏或早晨出现露珠,就是因空气达到露点温度而结露的现象之一。当 $t_l=0\sim 65\ ^\circ\text{C}$ 时,有

$$t_l = 8.22 + 12.4 \ln p_q + 1.9 (\ln p_q)^2$$

干球温度、湿球温度及露点温度均能从一个侧面说明空气的一个性质,所以它们都是空气的状态参数。

3. 空气湿度

空气的湿度,有绝对湿度、相对湿度和含湿量等表示方法。

(1) 绝对湿度(ρ_s)

单位立方米湿空气中所含有的水蒸气的质量称作湿空气的绝对湿度(g/m^3)。由于湿空气中水蒸气含量不定,湿空气的体积又随温度的变化而变化,所以工程实用中很难测量和计算,故不常使用,此处仅介绍一下它的概念。有时也有称绝对湿度为绝对含湿量。

(2) 含湿量(d)

单位质量干空气中所含水蒸气质量称为含湿量,即

$$d = m_q / m_g \quad (1-5)$$

式中: d 为湿空气中水蒸气含量, g/kg ; m_q 为湿空气中水蒸气的质量, g ; m_g 为湿空气中干空气的质量, kg 。

如用空气的压力表示空气的含湿量时,则有

$$d = 622 \frac{p_q}{B - p_q} \quad (1-6)$$

式中: d 为湿空气中水蒸气含量, g/kg 。

同饱和水蒸气分压力一样,某一温度下每千克干空气的水蒸气含量也有一个极限值,此即为该温度下的饱和含湿量 d_b ,表示式为

$$d_b = 622 \frac{p_{q \cdot b}}{B - p_{q \cdot b}} \quad (1-7)$$

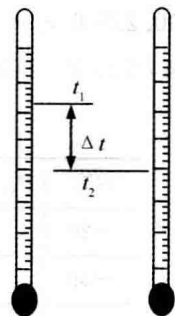


图 1-2 干湿球温度计

如温度发生变化,空气的饱和水蒸气分压力和饱和含湿量将相应地随着变化,见表1-4。

表1-4 空气温度与饱和水蒸气分压力、饱和含湿量的关系(B=101 325 Pa)

空气温度 $t/^{\circ}\text{C}$	饱和水蒸气分压力 $p_{q,b}/\text{Pa}$	饱和含湿量 $d/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$
10	1225	7.63
20	2331	14.70
30	4232	27.20

(3) 相对湿度(φ)

相对湿度为空气中水蒸气分压力与同温下水蒸气饱和分压力之比,即

$$\varphi = \frac{p_q}{p_{q,b}} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中: $p_q, p_{q,b}$ 含义同前。

由式(1-8)可知,相对湿度表示空气中实际含有水蒸气量接近饱和状态的程度,相对湿度值越小,说明空气离饱和状态越远,越干燥,吸湿能力越强;反之则相反。当相对湿度等于100%时,则表明空气已经饱和,不能再吸收水蒸气了。

相对湿度还可近似表示为

$$\varphi \approx \frac{d}{d_b} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中: d, d_b 含义同前,用此式计算会造成2%~3%的误差。

用相对湿度表示空气的潮湿程度是比较方便和实用的,空调工程中经常会用到。

4. 空气焓

空气的焓是空气中干空气及其水蒸气所包含的总热量。定义为(1+d)kg湿空气的总热量。由于热量是一个相对物理量,所以常取0℃时1kg干空气及其所含的水蒸气所具有的总热量为零。湿空气焓的计算式为

$$h = 1.01t + (2500 + 1.84t)d = (1.01 + 1.84d)t + 2500d \quad (1-10)$$

式中: h 为对应于1kg干空气的湿空气的焓,kJ/kg;1.01,1.84分别为干空气和水蒸气的比热容,kJ/(kg·℃);2500为水的汽化潜热,kJ/kg; d 为空气的含湿量,kJ/kg; t 为空气的温度,℃。

式(1-10)中的 $(1.01 + 1.84d)t$ 是随温度变化而显现出来的热量,故称为“显热”,而 $2500d$ 是0℃时 $d(\text{kg})$ 水的汽化热,它仅随含湿量 d 大小而变化,与温度无关,故称为潜热。

5. 湿空气密度和比体积

单位容积空气的质量称为空气的密度,而单位质量空气所占有的容积称为空气的比体积。两者互为倒数,互不独立,所以只能视为一个状态参数,有

$$\rho = \frac{1}{v} = m/V = 0.03484 \frac{B}{T} - 0.00134 \frac{p_q}{T} \quad (1-11)$$

式中: ρ 为空气的密度,kg/m³; v 为空气的比体积,m³/kg; $v = 1/\rho = V/m$; m 为空气的总质量,kg; V 为空气的总容积,m³。

由上述的基本概念可知,湿空气各状态参数间存在着密切的内在联系。就干空气、水蒸气与其共同组成的湿空气来讲,它们的同名状态参数存在如图1-3所示的关系。湿空气本身各状态参数之间存在着如图1-4的相互关系。



温度: $T_g = T_q = T$; 容积: $V_g = V_q = V$;
质量: $m_g + m_q = m$; 密度: $\rho_g + \rho_q = \rho$
压力: $p_g + p_q = P$; 焓: $h_g + dh_q = h$

图 1-3 湿空气组成

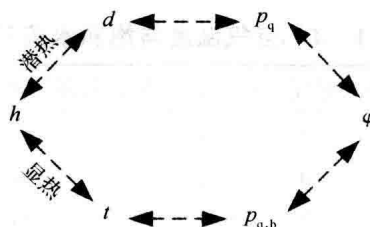


图 1-4 湿空气各状态参数间关系

由图可知 t 与 $p_{q,b}$ 互相对应,不能互相独立,只能算作一个状态参数; d 与 p_q 互相对应,不能互相独立,只能算作一个状态参数,而 $t(p_{q,b})$, $d(p_b)$, h 及 ϕ 为相互独立的状态参数;只要知道了两个彼此独立的状态参数,空气所处的状态就被确定下来了,其余的状态参数便可以通过一定计算公式计算出来了。

1.2 湿空气焓湿图及其应用

在空调工程的设计或使用管理中,已知一些参数,确定另外一些参数是经常需要的,虽有一些公式可以运用,但计算过程是相当烦琐的。为方便使用,利用空气状态参数之间的一些关系,针对不同大气压力,做出一些既能联系若干参数关系,又能表达空气变化过程的图线来是很有价值的。焓湿图($h-d$ 图,见图 1-5)即属此类图线。

1.2.1 焓湿图

在湿空气的主要参数 t, d, h, ϕ, p_q 及 ρ 中, t, d 为基本参数,有了它们,即可决定空气的状态。在 $h-d$ 图中,将 B 定为已知参数;为使用方便用 h 代替 t 作纵坐标,将 d 作横坐标;为解决直角坐标中图线过于集中在左上侧的问题,将 h 与 d 间夹角作成 135° 。由此构成的 $h-d$ 图如图 1-5 所示。图中除坐标 h, d 外,还有 t, ϕ 两组等值参数线。等温线是根据公式 $h = 1.01t + d(2500 + 1.84t)$ 绘制的。等温线为一组自左至右略向上倾斜近似平行的直线,每条线代表一个温度值等相对湿度线是根据公式 $d = 0.622 \frac{\phi p_{q,b}}{B - \phi p_{q,b}}$ 绘制的。等相对湿度线为一组由左下方向右上方发散的下弯曲线,每条线代表一个相对湿度值。 $\phi = 100\%$ 的相对湿度线为湿空气的饱和线,以 $\phi = 100\%$ 线为界,以上为未饱和区,以下为过饱和区。过饱和区意味着空气中悬浮着水滴,所以又称“雾区”。

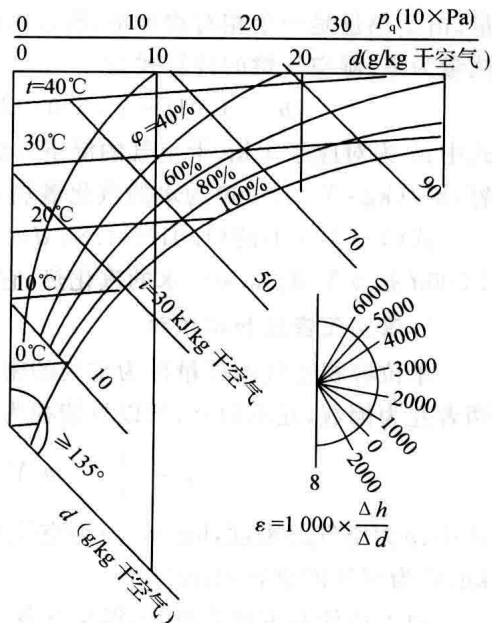


图 1-5 湿空气焓湿图

由公式 $d = 0.622 \frac{\phi p_{q,b}}{B - \phi p_{q,b}}$ 变换为 $p_q =$

$\frac{Bd}{0.622+d}$ 知,水蒸气分压力 p_q 在 B 已知的情况下仅与 d 有关,因此,在 d 轴的上方作一水平线,标出 d 值对应的 p_q 值得到水蒸气分压力线。

图中未绘等密度线(或等比体积线),这是因为在空调范围内空气密度在 $1.1 \sim 1.3 \text{ kg/m}^3$ 之间,计算时常取 1.2 kg/m^3 即可满足要求了。

焓湿图上的热湿比线 ϵ 表示湿空气由一个状态变为另一个状态过程中的焓差与含湿量差之比,即

$$\epsilon = \frac{Q}{W} = \frac{G\Delta h}{G\Delta d} = \frac{\Delta h}{\Delta d}$$

也表示湿空气状态变化前后的换热量与传湿量之比。热湿比 ϵ 表示空气状态变化的方向和特征。不同热湿比等值线,一般绘制在 $h-d$ 图的右下角。

1.2.2 空气状态变化过程及热湿比

设某地下工程房间内由于人员的活动和设备的运转,每小时产生热量 Q 和湿量 D (Q, D 通常称为余热、余湿),因而房间温、湿度不断升高,为保持该房间温湿度条件不变,就需不停地送入温度较低、湿度较小、数量合适的空气去吸收房间内的余热余湿。如果送入房间的空气数量及状态合适,则送入空气就会按照一定的过程由送入状态 S ,变化到室内状态 N 。将该变化表示在 $h-d$ 图上,如图 1-6 所示。因为状态 S 的空气送入室内后的变化原因是吸收室内余热、余湿所致,所以过程线 SN 的方向(数学上叫斜率)一定与 Q/D 之比有关,如以 ϵ 表示 Q, D 之比,则

$$\epsilon = Q/D \quad (1-12)$$

称为热湿比。

计算与实践均表明:(1) 送入空气的吸热、吸湿过程同时进行;(2) 送入室内的空气吸热、吸湿过程沿 $\epsilon = Q/D$ 的方向变化,起点为 S , ϵ 值越大,过程线上倾, ϵ 值越小则越下斜;(3) 不同的热湿比 ϵ 可以做成一束过 $h-d$ 图原点 ($h=0, d=0$) 的放射形直线。若某状态的送风吸收余热、余湿的热湿比与过原点的某热湿比相等,则两 ϵ 线必然平行。在 $h-d$ 图上,热湿比线束并不全部作出,有的以短线段表示在边框上,有的则在图面空位处单独做出,这样不仅不妨碍使用,而且还使图面清晰。

1.2.3 焓湿图应用

在空调工程中 $h-d$ 图的应用十分广泛,而且也十分直观和方便。现就常用的几种情况加以介绍。

1. 空气状态及其参数确定

确定空气的状态及其状态参数时,往往是根据容易测量参数,确定难以测量参数。易测参数有干球温度 t 、湿球温度 t_w 以及相对湿度 φ 等,难测参数有焓 h 、露点温度 t_l 、含湿量 d 和 d_b 、水蒸气分压力 p_b 和 $p_{q,b}$ 。

例 1-1 已知某工程所在地大气压力 $B = 101\,325 \text{ Pa}$ (760 mmHg),测得空气的 $t =$

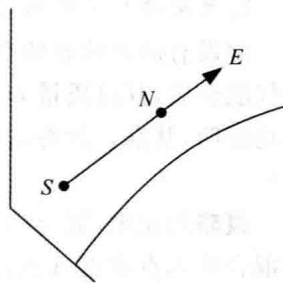


图 1-6 送风状态变化过程图

23 °C, $\varphi = 50\%$ 。试利用 $h-d$ 图确定该状态下空气的其他状态参数。

解 (1) 在 $B = 101\ 325\text{ Pa}$ 的 $h-d$ 图上, 根据 $t = 23\text{ °C}$, $\varphi = 50\%$, 查得该状态下空气的状态点 A (见图 1-7)。

(2) 查得 A 点的其他状态参数为

$$h = 38.6\text{ kJ/kg}$$

$$d = 7.3\text{ g/kg}$$

$$d_b = 14.6\text{ g/kg}$$

$$p_q = 12.7 \times 10^2\text{ Pa}$$

$$p_{q,b} = 23.5 \times 10^2\text{ Pa}$$

$$t_l = 9.3\text{ °C}$$

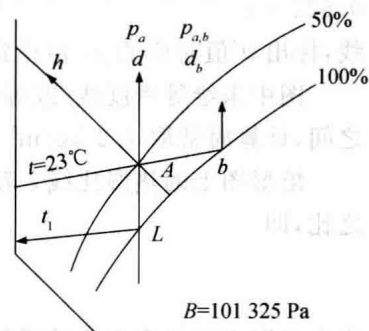


图 1-7 例 1-1 附图

2. 确定两种不同状态空气的混合状态

假设有两种状态的空气 A, B , 如图 1-8 所示, 其质量分别为 m_A 和 m_B 。显然, 两种状态的空气混合后, 其总质量 $m = m_A + m_B$; 其混合状态一定是介于两种空气的状态之间。计算和实践均证明, 其混合状态点在原两空气状态点的联线上, 如 H 点。但是 H 点的具体位置如何确定呢?

概略的说来, 混合后空气的状态点与混合前两种空气份额有关, 如 A 状态的空气份额大, 其混合状态点靠近 A 点, B 状态空气的份额大则靠近 B 点, 如用线段 AH 和 BH 之长短表示其份额比例, 则有

$$\frac{AH}{BH} = \frac{m_B}{m_A} \quad (1-13)$$

即线段 AH 与 BH 之比, 为两点状态下空气质量的反比。利用这个关系式, H 点的位置就被确定下来了。例如 $m_A = 1\ 000\text{ kg}$, $m_B = 9\ 000\text{ kg}$, 则有

$$\frac{AH}{BH} = \frac{m_B}{m_A} = \frac{9\ 000}{1\ 000} = \frac{9}{1}$$

这表明, 线段 AH 的长度为线段 BH 长度的 9 倍。把 AB 分成 10 等份, 则 H 点距 A 点的距离为 9 等份, 距 B 点的距离为 1 等份。

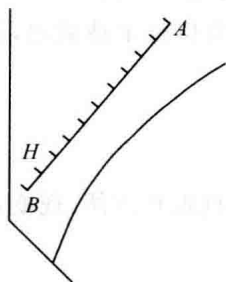


图 1-8 空气混合在 $h-d$ 图上表示

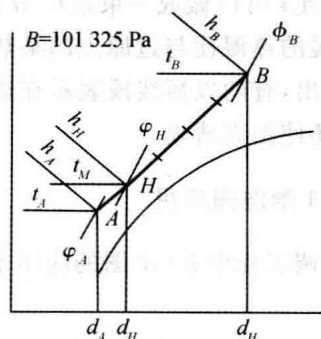


图 1-9 例 1-2 附图

例 1-2 某空调系统采用新风与室内回风进行处理后送至室内。已知大气压力 $B = 101\ 325\text{ Pa}$, 回风量 $m_A = 2\ 000\text{ kg/h}$, 状态 $t_A = 20\text{ °C}$, $\varphi_A = 60\%$; 新风量 $m_B = 500\text{ kg/h}$, 状态 $t_B = 35\text{ °C}$, $\varphi_B = 80\%$ 。求混合空气的状态 H 。

解 ① 在大气压力 $B = 101\ 325\ \text{Pa}$ 的 $h-d$ 图上找到状态点 A, B , 并以直线相连, 如图 1-9 所示。

② 设混合点为 H , 则有

$$\frac{BH}{AH} = \frac{m_A}{m_B} = \frac{4}{1}$$

③ 将线段 AB 分成 5 等份, 则 H 点在靠近 A 点 1 等份处。查得: $t_A = 23.1\ ^\circ\text{C}$, $\varphi_H = 73\%$, $h_H = 56\ \text{kJ/kg}$, $d_H = 12.8\ \text{g/kg}$ 。

3. 空气状态变化过程在 $h-d$ 图上的表示

空气状态的变化是由热、湿因素引起的, 如吸热、散热、加湿、减湿等。欲使室内空气状态保持在一定范围之内, 在空调工程中其根本手段就是送入一定状态、一定数量的空气, 去消除(吸收或加入)热、湿负荷的影响, 从而达到保持室内空气状态在一定范围之目的。6 种典型的空气状态变化过程如图 1-10 所示。

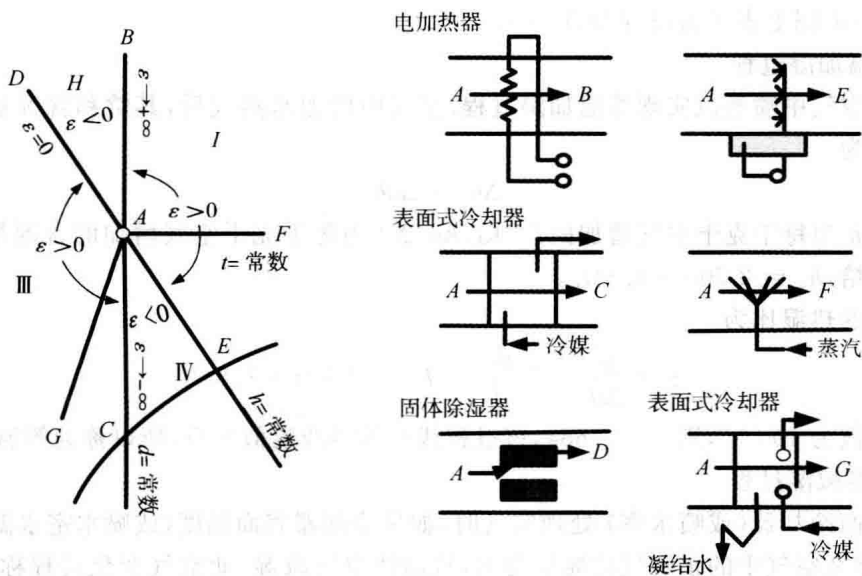


图 1-10 6 种典型的空气状态变化过程

(1) 等湿加热过程

等湿加热过程为空气的焓增加而含湿量不变的过程, 又称为干式加热过程。空气通过表面式换热器或电加热器被加热的过程即为等湿加热过程, 该加热过程的热湿比为

$$\epsilon = \Delta h / \Delta d = \Delta h / 0 \rightarrow +\infty$$

此过程在 $h-d$ 图上表示为过程线 $A \rightarrow B$ 。

(2) 等湿冷却过程

干式冷却过程为空气的焓减少而含湿量不变的过程, 又称为等湿冷却过程。空气通过表面式换热器冷却, 而且换热器表面温度高于空气的露点温度, 则此冷却过程即为干式冷却过程。干式冷却过程的热湿比为

$$\epsilon = \Delta h / \Delta d = -\Delta h / 0 \rightarrow -\infty$$

此过程在 $h-d$ 图上表示为过程线 $A \rightarrow C$ 。

(3) 等焓减湿过程

如使用固体吸湿剂(硅胶或氯化锂)除湿时,被处理的空气失去水蒸气,同时也失去了水蒸气所具有的潜热,而水蒸气被吸附后凝结在固体吸湿剂中又放出冷凝潜热,冷凝潜热又传还给空气,于是空气在干燥过程中得失热量基本保持平衡,所以焓值不变,有

$$\epsilon = \Delta h / \Delta d = 0 / -\Delta h \rightarrow -\infty$$

此过程在 $h-d$ 图上表示为过程线 $A \rightarrow D$ 。

(4) 等焓加湿过程

用喷淋室喷循环水处理空气使空气加湿时,空气传给水的热量促使水分蒸发,蒸发后的水蒸气又进入空气中以潜热形式将热量带回。由于循环水始终保持在湿球温度水平上,其蒸发带到空气中的液体热而使空气焓增加很少,所以空气焓值基本保持不变。等焓加湿过程由于空气与外界没有换热,故称绝热加湿过程,该过程热湿比为

$$\epsilon = \Delta h / \Delta d = 0 / \Delta d = 0$$

此过程在 $h-d$ 图上表示为过程线 $A \rightarrow E$ 。

(5) 等温加湿过程

通过向空气中喷蒸汽实现等温加湿过程。空气中增加水蒸气后,其焓和含湿量都将增加,焓的增加量为

$$\Delta h = \Delta dh_q \quad (1-14)$$

式中: Δh 为每千克干空气增加的焓, kJ/kg ; Δd 为每千克干空气增加的含湿量, kg/kg ; h_q 为水蒸气的焓, $h_q = 2500 + 1.84t_q$ 。

此过程的热湿比为

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{\Delta dh_q}{\Delta d} = h_q = 2500 + 1.84t_q$$

如果喷入蒸汽为 100°C , 则 $\epsilon = 2684$, 该过程线与等温线近似平行, 所以称为等温加湿过程。

(6) 降温减湿过程

当用表面冷却器(或喷水室)处理空气时,如果冷却器表面温度(或喷水室水温)低于空气露点温度,那么空气中的水蒸气将凝结为水,从而使空气减湿。此空气变化过程称为降温减湿过程,该过程热湿比为

$$\epsilon = \frac{h_G - h_A}{d_G - d_A} = \frac{-\Delta h}{-\Delta d} > 0$$

此过程在 $h-d$ 图上表示为过程线 $A \rightarrow G$ 。

空气处理过程及处理方法见表 1-5。

表 1-5 空气处理过程及处理方法

过程线	热湿比	空气处理过程	处理设备	处理方法
A-1	$\epsilon > 0$	减焓降温减湿 (冷却干燥)	喷水室	用低于空气露点温度的水喷淋
			表面冷却器	用低于空气露点温度的水或蒸发温度 低于空气露点温度的制冷剂通过冷却器