



高等学校推荐教材

# 空气调节

(第三版)

赵荣义 范存养 薛殿华 钱以明 编



中国建筑工业出版社

高等学校推荐教材

# 空 气 调 节

(第三版)

赵荣义 范存养 薛殿华 钱以明 编

中国建筑工业出版社

# 目 录

绪论 .....	1
第一章 湿空气的物理性质及其焓湿图 .....	4
第一节 湿空气的物理性质 .....	4
第二节 湿空气的焓湿图 .....	8
第三节 湿球温度与露点温度 .....	11
第四节 焓湿图的应用 .....	14
第五节 空气状态参数的算法及另一种焓湿图 .....	17
第二章 空调负荷计算与送风量 .....	20
第一节 室内外空气计算参数 .....	20
第二节 太阳辐射热对建筑物的热作用 .....	28
第三节 通过围护结构的得热量及其形成的冷负荷 .....	33
第四节 室内热源、湿源的散热散湿形成的冷负荷与湿负荷 .....	51
第五节 空调房间送风量的确定 .....	55
第三章 空气的热湿处理 .....	60
第一节 空气热湿处理的途径及使用设备的类型 .....	60
第二节 空气与水直接接触时的热湿交换 .....	61
第三节 用喷水室处理空气 .....	66
第四节 用表面式换热器处理空气 .....	78
第五节 空气的其它加热 加湿方法 .....	99
第六节 空气的其它减湿方法 .....	102
第四章 空气调节系统 .....	113
第一节 空气调节系统的分类 .....	113
第二节 新风量的确定和空气平衡 .....	114
第三节 普通集中式空调系统 .....	116
第四节 变风量系统 .....	131
第五节 半集中式空调系统 .....	136
第六节 局部空调 机组 .....	146
第五章 空调房间的空气分布 .....	151
第一节 送风射流的流动规律 .....	151
第二节 排(回)风口的气流流动 .....	156
第三节 空气分布器及房间气流分布形式 .....	157
第四节 房间气流分布的计算 .....	160

第五节	气流分布性能的评价 .....	173
<b>第六章</b>	<b>空调系统的运行调节 .....</b>	<b>176</b>
第一节	室内热湿负荷变化时的运行调节 .....	176
第二节	室外空气状态变化时的运行调节 .....	181
第三节	集中式空调系统的自动控制 .....	188
第四节	变风量空调系统的运行调节 .....	195
第五节	半集中式空调系统的运行调节 .....	197
<b>第七章</b>	<b>空气的净化与质量控制 .....</b>	<b>205</b>
第一节	内部空间空气净化的要求 .....	205
第二节	空气悬浮微粒的特性及其捕集机理 .....	206
第三节	空气过滤器 .....	216
第四节	空气净化系统 .....	221
第五节	空气质量控制 .....	225
<b>第八章</b>	<b>空调系统的消声、防振与空调建筑的防火排烟 .....</b>	<b>229</b>
第一节	噪声及其物理量度 .....	229
第二节	噪声的主观评价和室内噪声标准 .....	232
第三节	空调系统的噪声源 .....	233
第四节	空调系统中噪声的自然衰减 .....	235
第五节	消声器消声量的确定 .....	237
第六节	消声器的种类和应用 .....	239
第七节	空调装置的防振 .....	243
第八节	空调建筑的防火排烟 .....	247
<b>第九章</b>	<b>空调系统的测定与调整 .....</b>	<b>253</b>
第一节	系统空气动力工况的测定与调整 .....	253
第二节	系统热力工况的测定 .....	259
第三节	消声与隔振检测 .....	261
第四节	系统调试中可能出现的故障分析及其排除 .....	262
<b>附录</b>	.....	<b>264</b>
<b>参考书目</b>	.....	<b>302</b>

## 绪 论

人类改造客观环境的能力取决于社会生产力和科学技术的发展水平。面对地球表面自然气候的变化和自然灾害的侵袭，古代人类只能采用简单的防御手段来保持生命的延续。随着生产力和科学技术的发展，人类从穴居到建造不同功能和不同质量的建筑物，从取火御寒、摇扇驱暑到人工地创造受控的空气环境，经历了漫长的岁月。直到本世纪初，能够实现全年运行并带有喷水室的空气调节系统，才首次在美国的一家印刷厂内建成。这标志着空气调节技术已经发展到实际应用的阶段。将空气调节应用到民用建筑以改善房间内空气环境，是首先在公共建筑物内实现的(1919—1920, 芝加哥一电影院)。我国于1931年首先在上海纺织厂安装了带喷水室的空气调节系统，其冷源为深井水。随后，也在一些电影院和银行实现了空气调节。

经过本世纪的发展，以热力学、传热学和流体力学为主要理论基础，综合建筑、机械、电工和电子等工程学科的成果，形成了一个独立的现代空气调节技术学科分支，它专门研究和解决各类工作、生活、生产和科学实验所要求的内部空气环境问题。

空气调节(Air Conditioning)的意义在于“使空气达到所要求的状态”或“使空气处于正常状态”。据此，一个内部受控的空气环境，一般是指在某一特定空间(或房间)内，对空气温度、湿度、空气流动速度及清洁度进行人工调节，以满足人体舒适和工艺生产过程的要求。现代技术发展有时还要求对空气的压力、成分、气味及噪声等进行调节与控制。由此可见，采用技术手段创造并保持满足一定要求的空气环境，乃是空气调节的任务。

众所周知，一定空间内的空气环境一般要受到两方面的干扰：一是来自空间内部生产过程、设备及人体等所产生的热、湿和其它有害物的干扰；另一是来自空间外部气候变化、太阳辐射及外部空气中的有害物的干扰。这些干扰因素有些是稳定的，有些不稳定，有些随季节变化。在保证内部空气环境的有关参数(温度、湿度、风速及清洁度)处于限定的变化范围内时，有的干扰因素在一定条件下会成为有利因素，如太阳辐射在冬季一般是有利的；而对于内部环境造成不利影响的热、湿及其它有害物等干扰因素就需要采取技术手段来克服它们的影响。所谓的技术手段主要是：采用换气的方法保证内部环境的空气新鲜；采用热、湿交换的方法保证内部环境的温湿度，以及采用净化的方法保证空气的清洁度。因此，一定空间的空气调节，并非是封闭的空气再造过程，而主要是置换和热质交换过程。

由上可见，空气调节主要涉及以下内容：内部空间内、外扰量的计算；空气调节的方式和方法；空气的各种处理方法(加热、加湿、冷却、干燥及净化等)；空气的输送与分配及在干扰量变化时的运行调节等。在工程上，将只实现内部环境空气温度的调节技术称为供暖或降温，将为保持内部环境有害物浓度在一定卫生要求范围内的技术称为工业通风。显然，供暖及工业通风降温都是调节内部空气环境的技术手段，只是在调节的要求上

及在调节空气环境参数的全面性方面与空气调节有别而已。因此，可以说空气调节是供暖和通风技术的发展。此外，空气调节所需的冷热源是为调节空气的温湿度服务的，可能是人工的，也可能是自然的。

空气调节对国民经济各部门的发展和对人民物质文化生活水平的提高具有重要意义。这不仅意味着受控的空气环境对工业生产过程的稳定操作和保证产品质量有重要作用，而且对提高劳动生产率、保证安全操作、保护人体健康、创造舒适的工作和生活环境有重要意义。实践证明，空气调节不是一种奢侈手段，而是现代化生产和社会生活中不可缺少的保证条件。

空气调节应用于工业及科学实验过程一般称为“工艺性空调”，而应用于以人为主的空气环境调节则称为“舒适性空调”。显示工艺空调重要作用的典型部门，有以高精度恒温恒湿为特征的精密机械及仪器制造业。在这些工业生产过程中，为避免元器件由于温度变化产生胀缩及湿度过大引起表面锈蚀，一般严格规定环境的基准温度和湿度，并制订了温度和湿度变化的偏差范围，如： $20 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ； $50 \pm 5\%$ 。在电子工业中，除有一定的温湿度要求外，尤为重要是保证室内空气的清洁度。对超大规模集成电路生产的某些工艺过程，空气中悬浮粒子的控制粒径已降低到 $0.1\mu\text{m}$ ，规定每升空气中等于和大于 $0.1\mu\text{m}$ 的粒子总数不得超过一定的数量，如3.5粒，0.35粒等。在纺织、印刷等工业部门，对空气的相对湿度要求较高。如在合成纤维工业中，锦纶长丝的多数工艺过程要求相对湿度的控制精度在 $\pm 2\%$ 。此外，如胶片、光学仪器、造纸、橡胶、烟草等工业也都有一定的温湿度控制要求。作为工业中常用的计量室、控制室及计算机房，均要求有比较严格的空气调节。药品、食品工业以及生物实验室、医院病房及手术室等，不仅要求一定的空气温湿度，而且要求控制空气的含尘浓度及细菌数量。

在公共与民用建筑中，大会堂、会议厅、图书馆、展览馆、影剧院、办公楼等均需设空气调节。随着旅游业的发展，空气调节在宾馆、酒店、商业中心、游乐场所已很普遍。在居住房间内对实现空气调节的要求也与日俱增。我国家用空调的装备率也在逐年上升。

交通运输工具如汽车、飞机、火车及船舶，空气调节的装备率有的已经很高，有的则在逐步提高。

现代农业的发展也与空气调节密切相关，如大型温室、禽畜养殖、粮种贮存等都需要对内部空气环境进行调节。

另外，在宇航、核能、地下与水下设施以及军事领域，空气调节也都发挥着重要作用。

因此可以概括地说：现代化发展需要空气调节，空气调节技术的提高与发展则依赖于现代化。

当前，对空气调节的广泛应用也提出了挑战。这主要表现在全球变暖和大气臭氧层破坏这样两个全球性问题以及内部空间的空气质量问题。由于空气调节要消耗能量，在一些工业企业（如电子工业）空调耗能约占全部能耗的40%以上，而所消耗的电能或热能大多来自热电站或独立的工业锅炉房，其燃烧过程的排放物是造成大气层温室效应的根源。因此，节约能量消耗不仅关系到能量资源的合理利用，而且关系到对地球的保护。在这种形势下，空气调节不但要提高设备的能量转换性能，提高系统能量综合利用效果，尽可能寻求合理的运行调节方法，从而达到节约用能的目的，而且应重视能源的开发，尤其是自然

清洁能源的开发，如太阳能、地热及风能等。其次，采用压缩机制冷的空调冷源所用工质多为卤化烃（CFC<sub>2</sub>）物质，该类物质中尤以空调制冷中常用的氟里昂 12 对臭氧层破坏性大，国际上已列为限用以至禁用。因此，寻求过渡性或永久性替代物已迫在眉睫。

在空间内部空气质量方面，由于大量合成材料用于建筑装饰和保温，同时为了节能尽量提高建筑物的密闭性，降低新风量供给，造成空间内空气质量下降，出现了“令人疲倦和致病”的建筑物。在这些建筑物内长期停留和工作的人，则会产生闷气、粘膜刺激、头疼及昏睡等症状。初步研究表明，空气调节系统本身就是一个重要的污染源。空气中的负离子经过过滤、管道及换热器等器件也将大为减少。

再者，长期在空调环境内生活的结果，一些人产生“空调适应不全”，即空调系统长期维持的“低温”使皮肤汗腺和皮脂腺收缩，腺口闭塞，导致血流不畅，神经功能紊乱等各种症状。

综上所述，空气调节技术的发展，不仅要在能源利用、能量的节约和回收、能量转换和传递设备性能的改进、系统的技术经济分析和优化及计算机控制等方面继续研究和开发，而且要进一步研究创造有利于健康的适于人类工作和生活的内部空间环境。

可以预料，空气调节将由目前主要解决空气环境的调节和控制发展到内部空间环境质量的全面调节和控制，即所谓的内部空间的人工环境工程。这一发展过程需要有诸多的研究成果及通过这些成果的实际应用检验才能完成。本书主要阐述了空气环境的调节原理和设计方法，部分地也涉及了空间空气质量控制，但这只是初步的，还需要进一步发展。

总之，空气调节的发展前景是广阔的，面对新的挑战，相信从事这一事业的人们将把握机遇，开拓进取。



# 第一章 湿空气的物理性质及其焓湿图

创造满足人类生产、生活和科学实验所要求的空气环境是空气调节的任务。湿空气既是空气环境的主体又是空气调节的处理对象，因此熟悉湿空气的物理性质及焓湿图，则是掌握空气调节的必要基础。

## 第一节 湿空气的物理性质

大气是由于空气和一定量的水蒸气混合而成的，我们称其为湿空气。干空气的成分主要是氮、氧、氩及其它微量气体，多数成分比较稳定，少数随季节变化有所波动，但从总体上可将干空气作为一个稳定的混合物来看待。

为统一干空气的热工性质，便于热工计算，一般将海平面高度的清洁干空气成分作为标准组成。目前推荐的干空气标准成分见表1-1所示。

干空气的标准成分(推荐)

表 1-1

成分气体(分子式)	成分体积百分比(%)	对于成分标准值的变化	分子量(C-12标准)
氮(N <sub>2</sub> )	78.084	—	28.013
氧(O <sub>2</sub> )	20.9476	—	31.9988
氩(Ar)	0.934	—	39.934
二氧化碳(CO <sub>2</sub> )	0.0314	*	44.00995
氖(Ne)	0.001818	—	21.183
氦(He)	0.000524	—	4.0026
氪(Kr)	0.000114	—	83.80
氙(Xe)	0.0000087	—	131.30
氢(H <sub>2</sub> )	0.00005	?	2.01594
甲烷(CH <sub>4</sub> )	0.00015	*	16.04303
氧化氮(N <sub>2</sub> O)	0.00005	—	44.0128
臭氧(O <sub>3</sub> )	0~0.000007	*	47.9982
	0~0.000002	*	47.9982
二氧化硫(SO <sub>2</sub> )	0~0.0001	*	64.0828
二氧化氮(NO <sub>2</sub> )	0~0.000002	*	46.0055
氨(NH <sub>3</sub> )	0~微量	*	17.03061
一氧化碳(CO)	0~微量	*	28.01055
碘(I <sub>2</sub> )	0~0.000001	*	253.8088
氡(Rn)	6×10 <sup>-13</sup>	?	+

注：\* 随时间和场所的不同，该成分对标准值有较大变化；

+ 氡有放射能，由Rn<sup>220</sup>和Rn<sup>222</sup>两种同位素构成，因为同位素混合物的原子量变化，所以不作规定。(Rn<sup>220</sup>半衰期54s, Rn<sup>222</sup>半衰期3.83日)

空气环境内的空气成分和人们平时所说的“空气”，实际是干空气加水蒸汽，即湿空

气。

在湿空气中水蒸汽的含量虽少，但其变化却对空气环境的干燥和潮湿程度产生重要影响，且使湿空气的物理性质随之改变。因此研究湿空气中水蒸汽含量的调节在空气调节中占有重要地位。

地球表面的湿空气中，尚有悬浮尘埃、烟雾、微生物及化学排放物等，由于这些物质并不影响湿空气的物理性质，因此本章不涉及这些内容。

在热力学中对湿空气的物理性质以及焓湿图已有过论述。本书作必要的重复，在于强调其重要性并要求牢固地掌握它们。

在常温常压下干空气可视为理想气体，而湿空气中的水蒸汽一般处于过热状态，且含量很少，可近似地视作理想气体。这样，即可利用理想气体的状态方程式来表示干空气和水蒸汽的主要状态参数——压力、温度、比容等的相互关系，即

$$P_k V = m_k R_k T \quad \text{或} \quad P_k v_k = R_k T \quad (1-1)$$

$$P_q V = m_q R_q T \quad \text{或} \quad P_q v_q = R_q T \quad (1-2)$$

式中  $P_k, P_q$ ——干空气及水蒸汽的压力，Pa；

$V$ ——湿空气的总容积， $m^3$ ；

$m_k, m_q$ ——干空气及水蒸汽的质量，kg；

$R_k, R_q$ ——干空气及水蒸汽的气体常数， $R_k = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $R_q = 461 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；

$T$ ——湿空气的热力学温度，K；

$v_k = \frac{V}{m_k}$ ， $v_q = \frac{V}{m_q}$ ，分别为干空气及水蒸汽的比容， $m^3/\text{kg}$ 。而干空气及水蒸汽的

密度则等于比容的倒数，即  $\rho_k = \frac{m_k}{V} = \frac{1}{v_k}$ ， $\rho_q = \frac{m_q}{V} = \frac{1}{v_q}$ 。

根据道尔顿定律，湿空气的压力应等于干空气的压力与水蒸汽的压力之和，即

$$B = P_k + P_q \quad (1-3)$$

$B$ 一般称为大气压力，以Pa或kPa（千帕）表示。海平面的标准大气压为101325Pa或101.325kPa，相当于1013.25mbar（毫巴）。多种大气压力之间的换算见表1-2。

大气压力单位换算表

表 1-2

帕(Pa)	千帕(kPa)	巴 (bar)	毫巴(mbar)	物理大气压(atm)	毫米汞柱(mmHg)
1	$10^{-3}$	$10^{-5}$	$10^{-2}$	$9.86923 \times 10^{-6}$	$7.50062 \times 10^{-3}$
$10^3$	1	$10^{-2}$	10	$9.86923 \times 10^{-3}$	7.50062
$10^5$	$10^2$	1	$10^3$	$9.86923 \times 10^{-1}$	$7.50062 \times 10^2$
$10^6$	$10^3$	$10^{-1}$	1000	$9.86923 \times 10^{-1}$	$7.50062 \times 10^3$
101325	101.325	1.01325	1013.25	1	760
133.332	0.133332	$1.33332 \times 10^{-3}$	1.33332	$1.31579 \times 10^{-3}$	1

大气压力随海拔高度的变化如图1-1所示。大气压力值一般在 $\pm 5\%$ 范围内波动。

下面着重说明湿空气的主要参数及其确定法。

### 1. 湿空气的密度 $\rho$

湿空气的密度等于干空气密度与水蒸汽密度之和，即

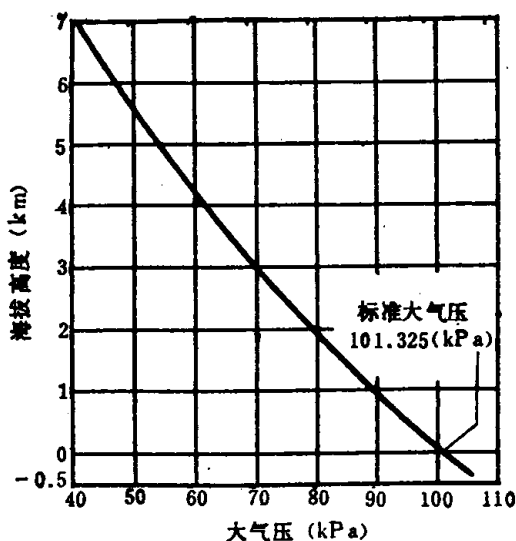


图 1-1 大气压与海拔高度的关系

而空调过程经常涉及湿空气的温度变化，因此采用水蒸汽密度作为衡量湿空气含有水蒸汽量的参数会给实际计算带来诸多不便。

现取湿空气中的水蒸汽密度与干空气密度之比作为湿空气含有水蒸汽量的指标，换言之，即取对应于一公斤干空气的湿空气所含有的水蒸汽量。所以有

$$d = \frac{\rho_a}{\rho_g} = \frac{R_g}{R_a} \cdot \frac{P_a}{P_g} = 0.622 \frac{P_a}{P_g}$$

或 
$$d = 0.622 \frac{P_a}{B - P_a} \quad \text{kg/kg.干} \quad (1-5)$$

考虑到湿空气中水蒸汽含量较少，因此含湿量  $d$  的单位也可用  $\text{g/kg.干}$  表示，这样公式 (1-5) 则可写成

$$d = 622 \frac{P_a}{B - P_a} \quad \text{g/kg.干} \quad (1-5)'$$

### 3. 相对湿度 $\varphi$

另一种度量湿空气水蒸汽含量的间接指标是相对湿度，其定义为湿空气的水蒸汽压力与同温度下饱和湿空气的水蒸汽压力之比，即

$$\varphi = \frac{P_a}{P_{a,b}} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中  $P_{a,b}$ ——饱和水蒸汽压力，Pa。

由式 (1-6) 可见，相对湿度表征湿空气中水蒸汽接近饱和含量的程度。式中  $P_{a,b}$  是温度的单值函数，可在一些热工手册中查到，表 1-3 只列出常用的几个数据。 $P_{a,b}$  的具体计算式则可在本章的第五节内查得。

湿空气的相对湿度与含湿量之间的关系可由式 (1-5) 导出。根据

$$d = 0.622 \frac{P_a}{B - P_a} = 0.622 \frac{\varphi P_{a,b}}{B - \varphi P_{a,b}}$$

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_g + \rho_a = \frac{P_g}{R_g T} + \frac{P_a}{R_a T} \\ &= 0.003484 \frac{B}{T} - 0.00134 \frac{P_a}{T} \quad (1-4) \end{aligned}$$

在标准条件下（压力为 101325 Pa，温度为 293 K，即 20°C）干空气的密度  $\rho_g = 1.205 \text{ kg/m}^3$ ，而湿空气的密度取决于  $P_a$  值的大小。由于  $P_a$  值相对于  $P_g$  值而言数值较小，因此，湿空气的密度比干空气密度小，在实际计算时可近似取  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 。

### 2. 湿空气的含湿量 $d$

采用湿空气中水蒸汽密度作为含有水蒸汽量的度量是一种方法。考虑到在近似等压的条件下，湿空气体积随温度变化而改变，

空气温度与饱和水蒸汽压力及饱和含湿量的关系

表 1-3

室气温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和水蒸汽压力 $P_{a,b}(\text{Pa})$	饱和含湿量 $d_b(\text{g}/\text{kg}\cdot\text{干})(B=101325\text{Pa})$
10	1225	7.63
20	2331	14.70
30	4232	27.20

及 
$$d_b = 0.622 \frac{P_{a,b}}{B - P_{a,b}}$$

故 
$$\frac{d}{d_b} = \frac{P_a(B - P_{a,b})}{P_{a,b}(B - P_a)} = \varphi \cdot \frac{(B - P_{a,b})}{(B - P_a)}$$

所以 
$$\varphi = \frac{d}{d_b} \cdot \frac{(B - P_a)}{(B - P_{a,b})} \times 100\% \quad (1-7)$$

式(1-7)中的 $B$ 值远大于 $P_{a,b}$ 和 $P_a$ 值,认为 $B - P_a \approx B - P_{a,b}$ 只会造成1%~3%的误差。因此相对湿度可近似表示为

$$\varphi = \frac{d}{d_b} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中  $d_b$ 为饱和含湿量,  $\text{kg}/\text{kg}\cdot\text{干}$ 或 $\text{g}/\text{kg}\cdot\text{干}$ 。

#### 4. 湿空气的焓 $i$

在空气调节中,空气的压力变化一般很小,可近似于定压过程,因此可直接用空气的焓变化来度量空气的热量变化。

已知干空气的定压比热 $c_{p,g}=1.005\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,近似取1或1.01;

水蒸汽的定压比热 $c_{p,q}=1.84\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;则

干空气的焓: $i_g=c_{p,g}\cdot t$ ,  $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{干}$ ;

水蒸汽的焓: $i_q=c_{p,q}\cdot t+2500$ ,  $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{汽}$ 。

式中2500为 $t=0^{\circ}\text{C}$ 时水蒸汽的汽化潜热( $r_0$ )。

显然湿空气的焓 $i$ 应等于一公斤干空气的焓加上与其同时存在的 $d$ 公斤(或克)水蒸汽的焓,即

$$\left. \begin{aligned} i &= c_{p,g}\cdot t + (2500 + c_{p,q}\cdot t)d \\ \text{或} \quad i &= c_{p,g}\cdot t + (2500 + c_{p,q}\cdot t)\frac{d}{1000} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

上式 $d$ 以 $\text{kg}/\text{kg}\cdot\text{干}$ 计,下式 $d$ 以 $\text{g}/\text{kg}\cdot\text{干}$ 计。当 $t=0^{\circ}\text{C}$ 时, $i=2.5d$ ,不为0( $d$ 以 $\text{g}$ 计)。

已知水的质量比热为 $4.19\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,因此 $t^{\circ}\text{C}$ 时水蒸汽的汽化潜热为 $r_t=r_0+1.84t-4.19t$ 或 $r_t=2500-2.35t$ ,  $\text{kJ}/\text{kg}$ 。

上述式(1-5)及(1-9)构成了湿空气特性的主要方程组,应牢固掌握。

【例 1-1】 已知大气压力为 $101325\text{Pa}$ ,温度 $t=20^{\circ}\text{C}$ ,①求干空气的密度;②求相对湿度为90%时的湿空气密度。

【解】 ①已知干空气的气体常数 $R_g=287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,此时干空气压力即为大气压力 $B$ ,所以

$$\rho_s = \frac{B}{287 \cdot T} = 0.00348 \frac{B}{T} = 0.00348 \frac{101325}{293}$$

$$= 1.205 \text{ kg/m}^3$$

②由表1-3查得，20℃时的水蒸汽饱和压力为 $P_{a,b}=2331\text{Pa}$ ，代入式(1-4)即可得湿空气的密度：

$$\rho = 0.003484 \frac{B}{T} - 0.00134 \frac{\varphi P_{a,b}}{T}$$

$$= 0.003484 \frac{101325}{293} - 0.00134 \frac{0.9 \times 2331}{293}$$

$$= 1.195 \text{ kg/m}^3$$

可见湿空气的密度比完全干空气的密度在压力相同时要小一些。

**【例 1-2】** 试求例 1-1②中空气的含湿量及焓值。

**【解】**

按式(1-5)计算含湿量：

$$d = 0.622 \frac{\varphi P_{a,b}}{B - \varphi P_{a,b}} = 0.622 \frac{0.9 \times 2331}{101325 - 0.9 \times 2331}$$

$$= 0.0132 \text{ kg/kg} \cdot \text{干}$$

按式(1-9)计算焓值：

$$i = 1.01t + (2500 + 1.84t)d$$

$$= 1.01 \times 20 + (2500 + 1.84 \times 20)0.0132$$

$$= 53.7 \text{ kJ/kg} \cdot \text{干}$$

## 第二节 湿空气的焓湿图

在空气调节中，经常需要确定湿空气的状态及其变化过程。单纯地求湿空气的状态参数用前述各计算式即可满足要求，或可查业已计算好的湿空气性质表（见附录1-1）。而对于湿空气状态变化过程的直观描述则需借助于湿空气的焓湿图。

根据第一节中式(1-5)，(1-6)及(1-9)，加上 $P_{a,b}=f(t)$ 的函数关系，在反映湿空气的 $B$ ， $t$ ， $d$ ， $\varphi$ ， $i$ 及 $P_a$ 等状态参数之间的联系上，取不同的坐标系可以得到不同的线图形式。

常用的湿空气性质图是以 $i$ 与 $d$ 为坐标的焓湿图( $i$ - $d$ 图)。为了尽可能扩大不饱和和湿空气区的范围，便于各相关参数间分度清晰，一般在大气压力一定的条件下，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 $135^\circ$ （见图1-2及附录1-2）。在实际使用中，为避免图面过长，常将 $d$ 坐标改为水平线。

在选定的坐标比例尺和坐标网格的基础上，进一步确定等温线、等相对湿度线、水蒸汽分压力标尺及热湿比等。

### 1. 等温线

根据公式 $i=1.01t+(2500+1.84t)d$ ，当 $t=\text{const.}$ ， $i=a+bd$ 的形式，因此只须给定两个值，即可确定一等温线。显然 $1.01t$ 为等温线在纵坐标轴上的截距， $(2500+1.84t)$ 为等

温线的斜率。可见不同温度的等温线并非平行线，其斜率的差别在于 $1.84t$ 又由于 $1.84t$ 与2500相比很小，所以等温线又可近似看作是平行的(参见图1-3)。

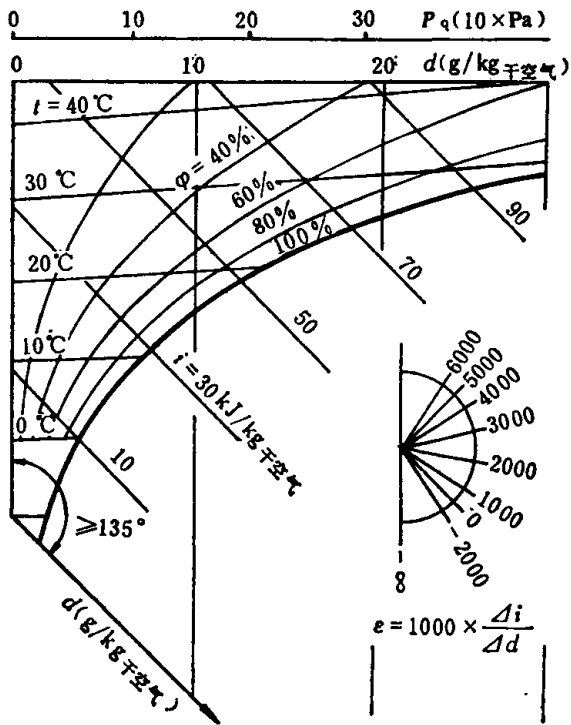


图 1-2 湿空气焓湿图

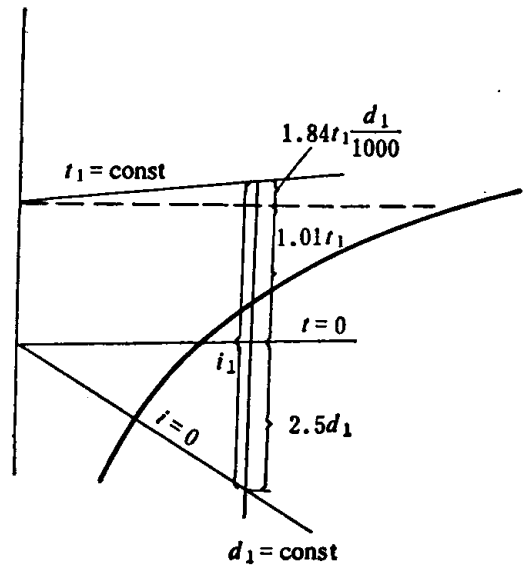


图 1-3 等温线在 $t-d$ 图上的确定

## 2. 等相对湿度线

由式 (1-5)，可得

$$P_q = \frac{B \cdot d}{0.622 + d}$$

因此，给定不同的 $d$ 值，即可求得对应的 $P_q$ 值。在 $i-d$ 图上，取一横坐标表示水蒸汽分压力值，则如图1-2所示。

在已建立起水蒸汽压力坐标的条件下，对应不同温度下的饱和水蒸汽压力可从附录1-1中查到或由 $P_{q,s} = f(t)$ 的经验式求得(见本章第五节)。连接不同温度线及其对应的饱和水蒸汽压力线的交点即可得到 $\phi = 100\%$ 的等 $\phi$ 线。又据 $\phi = \frac{P_q}{P_{q,s}}$ 式或 $P_q = \phi P_{q,s}$ ，当 $\phi = \text{const.}$ ，则可求得各不同温度下的 $P_q$ 值，联接在各等温线与 $P_q$ 值相交的各点即成等 $\phi$ 线。

这样做出的 $i-d$ 图则包含了 $B$ ， $t$ ， $d$ ， $i$ ， $\phi$ 及 $P_q$ 等湿空气参数。在大气压力 $B$ 一定的条件下，在 $i$ ， $d$ ， $t$ ， $\phi$ 中，已知任意两个参数，则湿空气状态就确定了，在 $i-d$ 图上也就是有一确定的点，其余参数均可由此点查出，因此，将这些参数称为独立参数。但 $d$ 与 $P_q$ 则不能确定一个空气状态点，因而 $P_q$ 与 $d$ 只能有一个作为独立参数。

## 3. 热湿比线

一般在 $i-d$ 图的周边或右下角给出热湿比(或称角系数) $\epsilon$ 线。热湿比的定义是湿空气的焓变化与湿量变化之比，即

$$e = \frac{\Delta i}{\Delta d} \quad \text{或} \quad e = \frac{\Delta i}{\frac{\Delta d}{1000}} \quad (1-10)$$

若在*i-d*图上有*A*、*B*两状态点（见图1-4），则由*A*至*B*的热湿比则为

$$e = \frac{i_B - i_A}{\frac{d_B - d_A}{1000}}$$

进一步，如有*A*状态的湿空气，其热量(*Q*)变化(可正可负)和湿量(*W*)变化(可正可负)已知，则其热湿比应为

$$e = \frac{\pm Q}{\pm W} \quad (1-11)$$

式中 *Q*的单位为kJ/h；*W*的单位为kg/h。

可见，热湿比有正有负并代表湿空气状态变化的方向。

在图1-2（详见附录1-2）的右下角示出不同*e*值的等值线。如*A*状态湿空气的*e*值已知，则可过*A*点作平行于*e*等值线的直线，这一直线（假定如*A*→*B*的方向）则代表*A*状态的湿空气在一定的热湿作用下的变化方向。

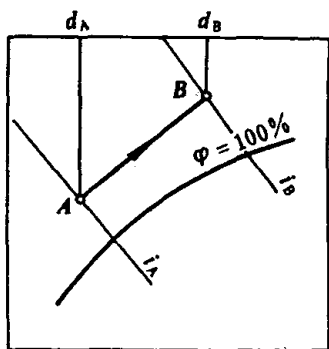


图 1-4 *e*值在*t-d*图上的表示

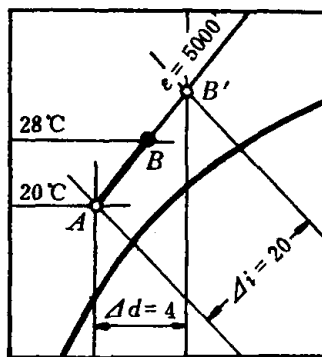


图 1-5 例1-3示图

**【例 1-3】** 已知*B*=101325Pa，湿空气初参数为*t<sub>A</sub>*=20℃，*φ<sub>A</sub>*=60%，当加入10000kJ/h的热量和2kg/h湿量后，温度*t<sub>B</sub>*=28℃，求湿空气的终状态。

**【解】** 在*B*=101325Pa的*i-d*图上，据*t<sub>A</sub>*=20℃，*φ<sub>A</sub>*=60%找到空气状态*A*（图1-5）。求热湿比：

$$e = \frac{+Q}{+W} = \frac{10000}{2} = 5000$$

过*A*点作与等值线*e*=5000的平行线，即为*A*状态变化的方向，此线与*t*=28℃等温线的交点即为湿空气的终状态*B*。由*B*点可查出*φ<sub>B</sub>*=51%，*d<sub>B</sub>*=12g/kg·干，*i<sub>B</sub>*=59kJ/kg·干。

过某状态点作热湿比线，可不使用*i-d*图中的*e*线标尺而直接在*i-d*图上通过作图求得，利用例1-3数据，已知*Q*=10000kJ/h，*W*=2000g/h，则

$$e = \frac{\Delta i}{\Delta d} = \frac{10000}{2000} = 5$$

亦即  $\Delta i : \Delta d = 5 : 1$ 。过*A*点任选一 $\Delta d$ （或 $\Delta i$ ）线段长度，按5 : 1的比例求出 $\Delta i$

(或 $\Delta d$ ) 的值, 按 $i_A + \Delta i$ 的等 $i$ 线与 $d_A + \Delta d$ 的等 $d$ 线的交点与 $A$ 的连线即符合 $\frac{\Delta i}{\Delta d}$ 的热湿比线。如图1-5中 $B'$ 所示。

此外, 值得提出的是, 附录1-2给出的 $i-d$ 图是以标准大气压 $B=101.325\text{kPa}$ 做出的。当某地区的海拔高度与海平面有较大差别时, 使用此图会产生较大的误差。因此, 不同地区应使用符合本地区大气压的 $i-d$ 图。当缺少这种 $i-d$ 图时, 简便易行的方法是利用标准大气压的 $i-d$ 图加以修改。已知

$$d = 0.622 \frac{P_q}{B - P_q} = 0.622 \frac{\frac{\varphi P_{q,s}}{B}}{1 - \frac{\varphi P_{q,s}}{B}}$$

当 $\varphi = \text{const.}$ ,  $B$ 增大,  $d$ 则减小, 反之 $d$ 则增大。以 $\varphi = 100\%$ 为例,  $P_{q,s}$ 只与温度有关, 上式中给定 $B$ 值则可求出不同温度下相对应的饱和含湿量 $d_s$ , 将各 $(t, d_s)$ 点相连即可画出新 $B$ 值下的 $\varphi = 100\%$ 曲线(见图1-6)。其余的相对湿度线可依此类推。如果要用到水蒸汽压力坐标则也要用如前所述的方法重新修改此分度值。

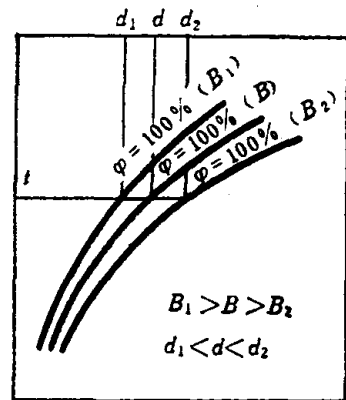


图 1-6  $B$ 变化时,  $\varphi$ 的变化

### 第三节 湿球温度与露点温度

湿球温度的概念在空气调节中至关重要。

在理论上, 湿球温度是在定压绝热条件下, 空气与水直接接触达到稳定热湿平衡时的绝热饱和温度, 也称热力学湿球温度。现以图1-7说明如下:

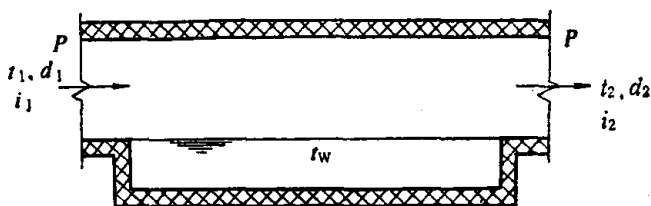


图 1-7 绝热加湿小室

设有一空气与水直接接触的小室, 保证二者有充分的接触表面和时间, 空气以 $P, t_1, d_1, i_1$ 状态流入, 以饱和状态 $P, t_2, d_2, i_2$ 流出, 由于小室为绝热的, 所以对应于每公斤干空气的湿空气, 其稳定流动能量方程式为:

$$i_1 + \frac{(d_2 - d_1)}{1000} i_w = i_2 \quad (1-12)$$

式中  $i_w$ ——液态水的焓,  $i_w = 4.19t_w$ ,  $\text{kJ/kg}$ 。

由式(1-12)可见, 空气焓的增量就等于蒸发的水量所具有的焓。利用热湿比的定义可以导出:

$$\varepsilon = \frac{i_2 - i_1}{d_2 - d_1} = i_w = 4.19t_w \quad (1-13)$$



显然，在小室内空气状态的变化过程是水温的单值函数。由于在前述条件下，空气的进口状态是稳定的，水温也是稳定不变的，因而空气达到饱和时的空气温度即等于水温( $t_2 = t_w$ ) 展开式(1-12)，得

$$i_1 + \frac{(d_2 - d_1)}{1000} \cdot 4.19t_2 = 1.01t_2 + (2500 + 1.84t_2) \frac{d_2}{1000} \quad (1-14)$$

可以说，满足式(1-14)的 $t_2$ 或 $t_w$ 即为进口空气状态的绝热饱和温度，也称为热力学湿球温度。

由于绝热加湿小室并非实际装置，一般则用湿球温度计所读出的湿球温度，近似代替热力学湿球温度。

在*i-d*图上，从各等温线与 $\varphi=100\%$ 饱和线的交点出发，作 $e=4.19t_s$ 的热湿比线，则可得等湿球温度线(见图1-8)。显然，所有处在同一等湿球温度线上的各空气状态均有相同的湿球温度。另外，当 $t_s=0^\circ\text{C}$ 时， $e=0$ ，即等湿球温度线与等焓线完全重合；而当 $t_s > 0$ 时， $e > 0$ ； $t_s < 0$ 时， $e < 0$ 。所以，严格来说，等湿球温度线与等焓线并不重合，但在工程计算中，考虑到 $e=4.19t_s$ 数值较小，可以近似认为等焓线即为等湿球温度线。

在*i-d*图上，若已知某湿空气状态点*A*(见图1-9)，由*A*沿 $i=\text{const.}$ ( $e=0$ )线找到与 $\varphi=100\%$ 的交点*B*，*B*点的温度 $t_B$ 即为*A*状态空气的湿球温度(近似)。同样，如果已知某湿空气的干球温度 $t_A$ 和湿球温度 $t_B$ ，则由 $t_B$ 与 $\varphi=100\%$ 线交点*B*沿等焓线找到与 $t_A=\text{const.}$ 线的交点*A*即为该湿空气的状态点。同样方法，如沿等湿球温度线 $e=4.19t_s$ 与 $\varphi=100\%$ 线交于*S*，则 $t_s$ 即为准确的湿球温度。可见，湿球温度也是湿空气的一个重要参数，而且在多数情况下是一个独立参数，只是由于它的等值线与等焓线十分接近，在*i-d*图上，想利用已知焓值和湿球温度两个独立参数来确定湿空气的状态点是困难的，且在湿球温度为 $0^\circ\text{C}$ 时，它成为非独立参数，这时的等焓线与等湿球温度线重合。湿球温度一般用 $t_s$ 来表示。

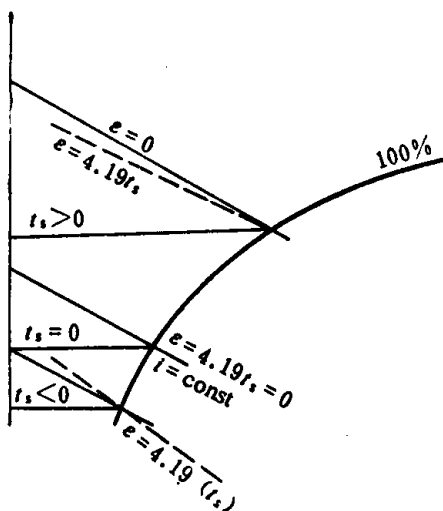


图 1-8 等湿球温度线

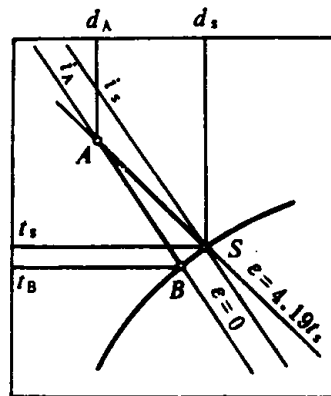


图 1-9 已知干、湿球温度确定空气状态

**【例 1-4】** 已知 $B=101325\text{Pa}$ ， $t=45^\circ\text{C}$ ， $t_s=30^\circ\text{C}$ ，试在*i-d*图上确定该湿空气状态(状态参数*i*，*d*， $\varphi$ )。

**【解】** ①近似作图求法：

以 $t_s=30^\circ\text{C}$ 等温线与 $\varphi=100\%$ 饱和线相交得*B*点，由*B*点沿等焓线与 $t=45^\circ\text{C}$ 等温线相交得*A*点，*A*点即为所求的湿空气状态(见图1-10所示)，其参数分别为： $i=100\text{kJ/kg}\cdot\text{干}$ ，