

第一章 空气调节与制冷原理基础知识

第一节 常用名词及概念

一、空气的组成及其主要状态参数

在热工学中，我们把含有水蒸气的空气叫做湿空气。在大气中永远包含一定量的水蒸气，所以绝对干的空气在自然界中是不存在的。而在一般空调研究中，把干空气作为一个整体，对它的组成成分不作详细讨论，因此，我们就可认为：

$$\text{湿空气} = \text{干空气} + \text{水蒸气}$$

空调就是空气调节，也就是将外界空气（湿空气）经过一定的处理并用一定的方式送入室内，使室内空气的温度、相对湿度、气流速度和洁净度等控制在一定范围内。湿空气是空气调节的对象，湿空气的状态通常用压力、温度、相对湿度、含湿量及焓等参数来度量和描述，这些参数称为湿空气的状态参数。因此，首先要对湿空气的状态参数，如压力、温度、湿度和焓等有所了解。

1. 压 力

地球表面的大气层对单位地球表面所形成的压力称为大气压力。空气对容器壁面的实际压力称为绝对压力。在空调系统中，空气的压力是用仪表测出的，仪表上指示的压力称为工作压力，

它是当地大气压作为参考点，所测得的工作压力就不是绝对压力，而是绝对压力与当时当地大气压的差值，也称为表压力。压力的单位用帕 (Pa) 或千帕 (kPa) 表示。

工作压力与绝对压力的关系为：

$$\text{绝对压力} = \text{当地压力} + \text{工作压力}$$

只有绝对压力才是湿空气的状态参数。凡未指明是工作压力的，均应理解为绝对压力。由上所述的湿空气是由干空气和水蒸气所组成的混合气体，所以湿空气的压力即为干空气分压力 p_g 与水蒸气的分压力 p_s 之和，即：

$$p = p_g + p_s \quad (1.1)$$

在空调工程中所处理的湿空气就是大气，所谓湿空气的总压力 p 就是当地的大气压 p_b ，即：

$$p_b = p_g + p_s \quad (1.2)$$

为了对湿空气的压力，特别是对其中水蒸气的分压力有进一步的认识，必须了解饱和空气和未饱和空气的概念。

饱和空气：在一定的温度条件下，空气中水蒸气分子的含量越多，水蒸气的分压力就越大。如果空气中水蒸气的含量超过某一含量时，空气中就有水析出。这说明在一定温度条件下，湿空气中容纳的水蒸气的数量是有一个最大限度的。也就是说，湿空气中水蒸气分压力有一个最大值，这个最大值就称为该温度下的饱和水蒸气分压力 p_{sb} 。在大气中，如从水蒸发为汽的数量与空气中水蒸气凝结为水的数量相等，此时大气中所含的水蒸气数量达到最大限度，即水蒸气处于饱和状态。这种湿空气就是干空气和饱和水蒸气的混合物，称为饱和空气。

未饱和空气：若湿空气中水蒸气的分压力低于其相同温度下饱和空气的水蒸气分压力，这时的水蒸气就处于过热状态，这种湿空气就是干空气和过热水蒸气的混合物，称为未饱和空气。由此可见，在一定温度条件下，湿空气中水蒸气分压力的大小，是衡量水蒸气含量即空气干燥或潮湿的指标。温度相同的情况下，水蒸气分压力越高，说明空气中水蒸气的含量就越多；水蒸气含量相同的情况下，温度越高，水蒸气的分压力就越大。

2. 温 度

空气的温度是表示空气冷热程度的物理量，它是分子动能的宏观结果。温度的高低用“温标”来衡量，目前常用的温标有绝对温标、摄氏温标和华氏温标。

绝对温标也称热力学温标或开尔文温标，简称开氏温标，符号为 T ，单位为 K。这种温标以气体分子热运动的平均动能（分子的移动动能，转动动能和振动动能）趋于零的温度为起点，定为 0 K，即绝对零度。3 种温标的换算关系为：

$$T = t + 273.15 \approx t + 273 \quad (\text{K}) \quad (1.3)$$

$$t = 5/9(t_F - 32) \quad (^\circ\text{C}) \quad (1.4)$$

式中 T ——绝对温度，K；

t ——摄氏温度， $^\circ\text{C}$ ；

t_F ——华氏温度， $^\circ\text{F}$ 。

温度是空气调节中的一个重要参数。当空气受热后，其内部分子动能增大，空气则表现为温度升高。湿空气是干空气和水蒸气的混合物，所以湿空气的温度就是干空气的温度，也是水蒸气的温度，即：

$$T = T_g = T_q \quad (1.5)$$

3. 湿 度

湿度是表示空气中所含水蒸气量多少的物理量。根据用途，湿度可用以下几种方法表示。

(1) 绝对湿度

每立方米湿空气中所含有的水蒸气质量，称为湿空气的绝对湿度，用 ρ_v 表示。

绝对湿度只能说明湿空气在某一温度下所含水蒸气的质量，不能直接反映湿空气的干、湿程度。水蒸气的饱和程度与温度有关，温度低，水蒸气易达到饱和点；温度高，则饱和点也高。因此，同一绝对湿度的空气在不同的温度下其吸收水分的能力是不同的，故在空气调节中常采用相对湿度和含湿量来表示湿空气的湿度。

(2) 相对湿度

相对湿度是空气中水蒸气分压力与同温度下饱和水蒸气分压力之比，用符号 φ 表示，即：

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_{v \max}} = \frac{\rho_v}{\rho_v''} \quad (1.6)$$

式中 ρ_v —— 湿空气的绝对湿度；

ρ_v'' —— 干饱和蒸汽的密度。

从式(1.6)可看出，相对湿度反映了湿空气中所含水蒸气的量接近饱和的程度，相对湿度越小，说明空气越干燥，吸湿能力越强；反之，相对湿度越大，说明空气越潮湿，空气的吸湿能力越弱。当相对湿度为100%时，指的是饱和湿空气；反之，相对湿度值为0时，指的是干空气。故相对湿度亦可称为饱和度。

(3) 含湿量

在空调工程中，调节湿空气中水蒸气的含量是经常要遇到的问题。但用什么样的数值来表达

水蒸气的含量最为方便呢？若以单位体积即绝对湿度来表示，由于空气温度的变化，其体积也随之而变化，虽然其中水蒸气的绝对含量不变，但单位体积即每立方米体积内含有的水蒸气量相应地发生了变化，绝对湿度的数值也就不同了；若用单位质量即 1 kg 湿空气中所带有水蒸气量来表示，虽然没有随着空气温度变化的问题，但湿空气在其状态变化过程中，由于水分的蒸发或水蒸气的凝结，不仅水蒸气的含量发生了变化，而且因为 $m = m_a + m_q$ ，湿空气以体积或质量作为标准，都会给计算带来麻烦。但可以看到，无论湿空气的状态如何变化，其中干空气的质量总是不变的。为了计算方便，就采用 1 kg 干空气作为计算的标准。

随 1 kg 干空气同时存在的水蒸气质量 (g)，称为湿空气的含量，用符号 d 来表示，即：

$$d = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{g/kg, 干空气}) \quad (1.7)$$

式中 m_v —— 水蒸气质量；

m_a —— 干空气质量。

要注意：这里是以 1 kg 干空气作为标准，而非为 1 kg 的湿空气，湿空气的质量应是 $(1 + d/1000)$ kg。

相对湿度和含湿量都是表示空气湿度的参数，但意义却不相同。相对湿度能表示空气接近饱和的程度，却不能表示水蒸气的含量多少；而含湿量能表示水蒸气的含量多少，却不能表示空气接近饱和的程度。

4. 焓

在空调工程中，湿空气的状态经常发生变化，也经常需要确定此状态变化过程中的热交换量。

例如，对空气进行加热和冷却时，常需要确定空气吸收或放出多少热量。湿空气的焓是以 1 kg 干空气作为计算基础的。含有 1 kg 干空气的湿空气即 $(1 + d/1000)$ kg 湿空气的焓 h ，是 1 kg 干空

气的焓 h_a 和 d (g) 水蒸气的焓 h_q 的总和，即：

$$h = h_a + 0.001d \times h_q \quad (1.8)$$

从热工学的基础知道，在压力不变的情况下，焓差值等于热交换量。而空调工程中对空气加热或冷却都是在定压条件下进行的，故空气定压过程中热量的变化量等于空气状态变化前后的焓差，即：

$$q = h_2 - h_1 \quad (1.9)$$

二、湿空气的焓湿图

空气的主要状态参数包括 t 、 d 、 B 、 ϕ 、 h 、 p (B 为大气压力)。在空调工程中，为了避免烦琐的公式计算，在设计和运行时需要有一个线算图，它既能联系以上 6 个参数，又能表达空气状态的各种变化过程，这就是本节要介绍的焓湿图。

线算图有各种形式，我国现在使用的是以焓和含湿量为纵横坐标的焓湿图，也叫 $h-d$ 图，如图 1.1 所示。为了更好地掌握和运用它，下面先介绍该图的绘制过程。

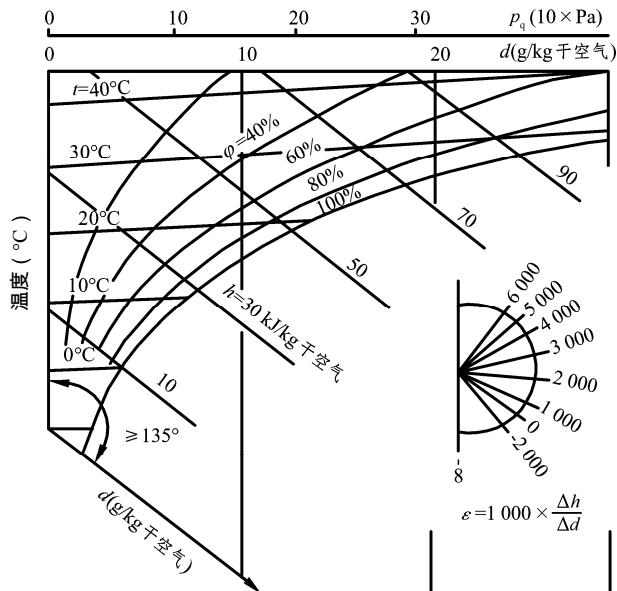


图 1.1 湿空气的 $h-d$ 图

一般平面图形只能有两个独立的坐标。而湿空气的状态取决于 t 、 d 、 B 3 个基本参数，因而应该有 3 个独立的坐标。然而可以选定大气压力 B 为已知（在空气调节中，空气的变化过程可以认为是在一定大气压力下进行的），这样，只剩下 t 、 d 两个坐标参数，就可以进行图形绘制了。但是，因焓 h 与温度有关，为了便于使用，用焓 h 代替温度 t 。因此，选定焓 h 为纵坐标，以含水量 d 为横坐标建立坐标系。为使图面展开，线条清晰，两坐标轴之间的夹角由常用的 90° 扩展为大于或等于 135° 。为了避免图面过长，又常取一水平线画在图的上方代替实际的 d 轴。

1. 等焓线和等含水量线

确定坐标比例尺之后，就可以在图上绘出一系列与纵坐标平行的等 d 线及与横坐标平行的等 h 线。 $t=0$ 和 $d=0$ 的干空气状态点为坐标原点。

2. 等温线

等温线是根据公式

$$h = 1.005t + d \times (2501 + 1.86t) \quad (1.10)$$

制作而成的。由此可见，当温度等于常数时，公式为直线方程， h 、 d 相对应，因此，只需已知两个点即可绘出等温线。若温度常数值分别为 -5 、 0 、 10 、 20°C ... 时，则得到一系列对应的等温线。

显然，等温线为一组不平行的直线。公式中 $1.005t$ 为截距， $(2501 + 1.86t)$ 为斜率，由于 t 值不同，因而每一等温线的斜率是不相同的。但是，由于 $1.86t$ 远小于 2501 ，温度对斜率的影响不明显，因此，等温线又近似平行直线。

3. 等相对湿度线

根据公式

$$d = 0.622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} \quad (1.11)$$

可以绘出等相对湿度线。在一定的大气压力 p 下，当相对湿度 φ 为常数时，含湿量 d 就取决于 p_s ，而 p_s 又是温度 t 的单值函数，其值可从水蒸气性质表中查出。因此，给定不同的温度 t ，可求得对应的 d 值，根据 t 、 d 值，就可以在 $h-d$ 图中找出若干点，连接各点即成等 φ 线。等 φ 线是一组发散形曲线。 $\varphi = 0\%$ 的等 φ 线即是纵轴线， $\varphi = 100\%$ 的是饱和湿度线。公式表明，等 φ 线为曲线，因此，对应点取得越多，曲线就越准确。

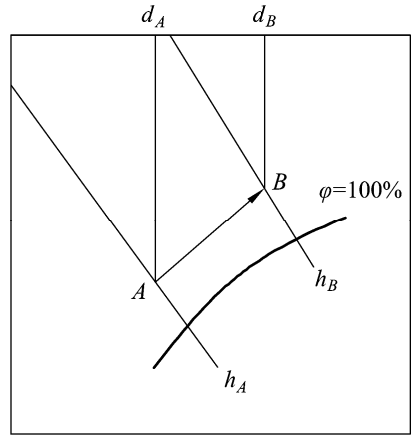


图 1.2 空气状态在 $h-d$ 图上的表示

以 $\varphi = 100\%$ 线为界 (见图 1.2)，曲线以下为过饱和区，由于过饱和状态是不稳定的，通常有凝结现象，所以又称为“有雾区”；曲线以上为湿空气区，又称为“未饱和区”。在湿空气区，水蒸气处于过热状态。

4. 水蒸气分压力线

公式 (1.11) 可变换为：

$$p_s = \frac{pd}{(0.622 + d)\varphi} \quad (1.12)$$

当大气压力 p 为定值时，式 (1.12) 为 $p_s = f(d)$ 的函数形式，水蒸气分压力 p_s 仅取决于含湿量 d 。因此，可在 d 轴的上方设一水平线，标上 d 值所对应的 p_s 值即可。

5. 热湿比线

在空调过程中，被处理的空气常常由一个状态变为另一个状态。在整个过程中，如果空气的

热湿变化是同时进行的，那么，在 $h-d$ 图上由状态 A 到状态 B 的直线连线就代表空气状态变化过程线，如图 1.2 所示。为了说明空气状态变化的方向和特征，常用状态变化前后焓差和含湿量差的比值来表示，称为热湿比 ε ，即：

$$\varepsilon = \frac{h_B - h_A}{d_B - d_A} = \frac{\Delta h}{\Delta d} \quad (1.13)$$

将式 (1.13) 的分子、分母同乘以总空气量 G ，将得到：

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{G \cdot \Delta h}{G \cdot \Delta d} = Q/W \quad (1.14)$$

由式 (1.14) 可见，总空气量 G 在处理过程中所得到的（或失去）的热量 Q 和湿量 W 的比值，与相应 1 kg 空气的比值 $\Delta h/\Delta d$ 是完全一致的。式 (1.13)、(1.14) 中， Δd 和 W 是以 kg 来度量的，若改用 g 为单位，则有：

$$\varepsilon = (\Delta h/\Delta d)/1\,000 = (Q/W)/1\,000 \quad (1.15)$$

由式 (1.13)、(1.14) 可见， ε 就是直线 AB 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。根据这一特征，就可以在 $h-d$ 图上以任意一点为中心作一系列不同的 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，就可以绘出该空气状态的变化过程了。

三、空气的干、湿球温度和露点温度

1. 干、湿球温度

在空调运行中，经常使用干、湿温度计来测量空气的温度。干、湿球温度计是由两支相同的温度计组成。其中一支的感温包裹上脱脂棉纱布，纱布的下端浸入盛有蒸馏水的玻璃小杯中，在毛细作用下纱布经常处于润湿状态，将此温度计称为空气的湿球温度计。使用时，在热湿交换达

到平衡，即稳定的情况下，所测得的读数称为空气的湿球温度。另一支未包纱布的温度计相应地称为干球温度计，它所测得的温度称为空气的干球温度，也就是实际的空气温度。以后分别用 t 和 t_s 表示空气的干球温度和湿球温度。

湿球温度计的读数，实际上反映了湿纱布上水的温度。但是，值得注意的是，并不是任一读数都可以认为是湿球温度，只有在热湿交换达到平衡，即稳定条件下的读数才称之为湿球温度。下面用传热传湿原理分析空气流经湿球表面时所发生的热湿交换过程。

当空气的相对湿度 $\varphi < 100\%$ 时，纱布上的水必然产生蒸发现象。若水温高于空气的温度，蒸发所需要的汽化热必然首先取自水分本身，因此，纱布上的水温下降。湿球温度计上的读数开始高于干球温度上的读数，随后下降。无论原来水温多高，经过一段时间后，水温终将降至空气干球温度以下。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偿水分蒸发所吸收的汽化热，此时，水温不再下降。如果湿球纱布上最初水温低于湿球温度，则空气向水面的温差传热一方面供给水分蒸发所需的汽化热，另一方面供水温的升高。随着水温的升高，传热量减少，最终仍将达到温差传热与蒸发需热相等，水温稳定并等于空气湿球温度。在空气相对湿度不变的情况下，湿纱布上水分蒸发可以认为是稳定的，从而蒸发所需的热量也是一定的。

当空气相对湿度较低时，湿球纱布上的水分蒸发快，蒸发需要的热量多，水温下降得也愈多，因而干、湿球温差大。反之，如空气相对湿度大，则干、湿球温差小。当 $\varphi = 100\%$ 时，湿纱布上的水分不再蒸发，干、湿球温度也就相等了。由此可见，在一定的空气状态下，干、湿球温度的差值反映了空气相对湿度的大小。

根据传湿原理，可知水分蒸发时，在湿球纱布表面上首先形成一层温度等于水温的饱和空气边界层。如果该饱和空气边界层的水汽分压力大于周围空气的水汽压力，饱和空气边界的水汽分子就要向空气扩散，而水中的分子也不断脱离水面进入饱和边界层，即水不断向空气蒸发。这一过程即为空气与水之间的湿交换过程。

另外，应该指出的是，由于水与空气之间的传热过程及水的蒸发过程都与湿球周围的空气流速有关。因此，在相同的空气污染条件下，空气流经湿球表面的流速不同时，所测得的湿球温度也会产生差异。当空气不流动或流速很小，热湿交换不充分时，出现的误差较大。空气的流速较大，传热与蒸发进行得越充分，湿球温度越准确。实验证明，当空气流速 $\geq 2.5 \sim 4 \text{ m/s}$ 时，空气流速对热、湿交换过程的影响已不显著，湿球温度趋于稳定。因此，要准确地反映空气的相对湿度，应使湿球周围的空气流速保持在 2.5 m/s 以上。

2. 湿球温度在 $h-d$ 图上的表示

由前述可知，当空气流经湿球时，由于空气与水之间存在热湿交换现象，而在湿球周围形成一层与水温相等的薄饱和空气层。该饱和空气状态为 B ，原空气状态为 A 。空气由状态 A 变为 B 的过程中，传给水的热量又由水以潜热的形式带了回来，因而空气焓值基本不变， $A \rightarrow B$ 可近似认为是等焓过程。在 $h-d$ 图上由点 A 作等焓线与 $\varphi = 100\%$ 饱和线交得 B 点，该点的温度即是湿球温度 t_s 。

但是严格地说，空气的焓值并非不变，而是略有增加。这是因为水蒸发到空气中去的过程中，除带进汽化热外，还带进了水本身的汽化热，此时空气增加的焓为：

$$\Delta h = h_s - h_A = \Delta d \cdot c \cdot t_s \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1.16)$$

式中 Δd ——每千克干空气增加的含湿量，kg/kg。

$$\Delta d = d_s - d_A \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1.17)$$

因而 A 状态的空气达到饱和时，其状态变化过程的热湿比为：

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{\Delta d \cdot c \cdot t_s}{\Delta d} = c \cdot t_s = 4.19t_s \quad (1.18)$$

式中 c ——水的质量热容， $c=4.19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

即状态 A 的空气沿热湿比 $\varepsilon = 4.19t_s$ 过程线达到饱和状态 S ，实际湿球温度是 t_s 而不是 t_B 。因而 $\varepsilon = 4.19t_s$ 线又称为空气的等湿球温度线。但在空气调节中一般 $t_s \leq 30^\circ\text{C}$ ， $\varepsilon = 4.19t_s$ 等湿球温度线和 $\varepsilon = 0$ 的等焓线非常接近，而且当 $t_s = 0^\circ\text{C}$ 时，两线完全重合。因此，以等焓线代替湿球温度线在工程上是允许的。

3. 露点温度

前已叙及，空气的饱和含湿量随着空气温度的下降而减少。现把不饱和状态的空气 A 沿等含湿量线冷却。随着空气温度的下降，对应的含湿量减少，而实际含湿量并未变化，因此空气相对湿度增大。当温度下降至 t_1 时相对湿度达到 100%，这时空气本身的含湿量也已饱和，如再继续冷却，则会有凝结水产生。由此可见， t_1 为空气结露与否的零界温度。空气沿等含湿量线冷却，最终达到饱和时所对应的温度为露点温度，而饱和点 C 称为露点。显然，空气的露点只取决于空气的含湿量，当含湿量不变时，露点温度亦为定值。

由于含湿量和水蒸气分压力呈对应关系，因此，露点温度也可以理解为饱和水蒸气分压力所对应的温度。

在空气调节中，常用等湿冷却将空气温度降到露点温度，再进一步冷却使水蒸气凝结，从而

达到干燥空气的目的。

四、空气焓湿图在空气调节技术中的应用

1. 空气状态变化过程在 $h-d$ 图上的表示

由前述可知， $h-d$ 图不仅能确定空气的状态参数，而且还能显示空气的变化过程，其变化过程的方向和特征可用热湿比 ε 来表示。图 1.3 所示为空气状态变化的几种典型过程，现分述如下。

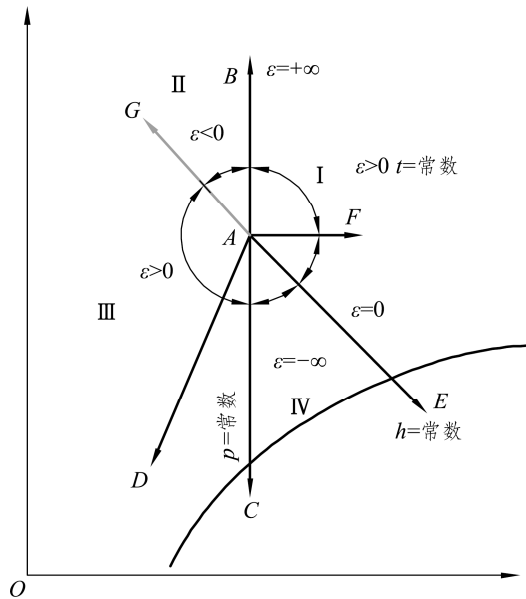


图 1.3 几种典型的空气状态变化过程

(1) 等湿 (干式) 加热过程

空气调节过程中常用电加热器来处理空气。当空气通过加热器时获得了能量，提高了温度，但含湿量并没有变化。因此，空气状态变化是等湿升温过程，如图 1.3 中过程线 $A \rightarrow B$ 。在状态变化过程中 $d_A = d_B$, $h_B > h_A$, 故其热湿比 ε 为:

$$\varepsilon = \Delta h / \Delta d = (h_B - h_A) / (d_B - d_A) = (h_B - h_A) / 0 = +\infty \quad (1.19)$$

(2) 等湿(干式)冷却过程

如果用表面式冷却器处理空气,其表面温度比空气露点温度高,则空气将在含湿量不变的情况下冷却,其焓值必相应减少。因此,空气状态为等湿降温过程,如图 1.3 中 $A \rightarrow C$ 。由于 $d_A = d_C$, $h_C < h_A$, 故热湿比 ε 为:

$$\varepsilon = (h_C - h_A) / (d_C - d_A) = (h_C - h_A) / 0 = -\infty \quad (1.20)$$

(3) 减湿冷却过程

如果用表面式冷却器处理空气,当冷却器的表面温度低于空气的露点温度时,空气中的水蒸气将凝结为水,从而使空气减湿(或谓干燥),空气的变化过程为减湿冷却过程或冷却干燥过程,此过程线如图 1.3 中 $A \rightarrow D$, 因为空气焓值及含湿量均减少,故热湿比 ε 为:

$$\varepsilon = (h_D - h_A) / (d_D - d_A) = (-\Delta h / -\Delta d) > 0 \quad (1.21)$$

如果用水温低于空气露点温度的水处理空气,也能实现此过程。

(4) 等焓减湿过程

用固体吸湿剂(例如硅胶)处理空气时,水蒸气被吸附,空气的含湿量降低,空气失去潜热而得到水蒸气凝结时放出的汽化潜热使温度增高,但焓值基本没变,只是略微减少了凝结水带走的液体,空气近似按等焓减湿升温过程变化,如图 1.3 中 $A \rightarrow G$ 所示。其 ε 值为:

$$\varepsilon = (h_G - h_A) / (d_G - d_A) = 0 / (d_G - d_A) = 0 \quad (1.22)$$

(5) 等焓加湿过程

用喷水室循环水处理空气时,水吸收空气的热量而蒸发为水蒸气,进入到空气中使空气含湿量增加,潜热量也增加。由于空气失掉显热,得到潜热,因而空气焓值基本不变,所以,称此过

程为等焓加湿过程。由于此过程和外界没有热量交换，故又称为绝热加湿过程，如图 1.3 中 $A \rightarrow E$ 。

此时，循环水将稳定在空气的湿球温度上。由于状态前后空气的焓值相等，因而 ε 为：

$$\varepsilon = (h_E - h_A) / (d_E - d_A) = 0 / \Delta d = 0 \quad (1.23)$$

此过程和湿球温度计表面空气的状态变化过程相似，严格地讲，空气的焓值也是略有增加的，其增加值为蒸发到空气中的水的液体热。但因这部分热量很少，因而近似认为绝热加湿过程是一等焓过程。

(6) 等温加湿过程

如图 1.3 中 $A \rightarrow F$ 过程。这也是一个典型的状态变化过程，是通过向空气喷蒸汽而实现的。空气中增加水蒸气后，其焓和含湿值都将增加，焓的增加值为加入蒸汽的全热量，即：

$$\Delta h = \Delta d \cdot h_q \quad (\text{kg/kg}) \quad (1.24)$$

式中 Δd —— 每 kg 干空气增加的含湿量，kg/kg；

h_q —— 水蒸气的焓，其值由 $h_q = 2500 + 1.84t_q$ 计算。

此过程的 ε 值为：

$$\varepsilon = \Delta h / \Delta d = (\Delta d \cdot h_q) / \Delta d = h_q = 2500 + 1.84t_q \quad (1.25)$$

如果蒸汽的温度为 100°C 左右，则 $\varepsilon \approx 2690$ ，该过程线与等温线近似平行，故为等温加湿过程。

以上介绍了空气调节中常用的 6 种典型空气状态变化过程。从图 1.3 可看出代表 4 种过程的 $\varepsilon = \pm\infty$ 和 $\varepsilon = 0$ 的两条线将 $h-d$ 图平面分成了 4 个象限，每个象限内的空气状态变化过程都有各自的特征，详见表 1.1。

表 1.1 空气状态变化的 4 个象限及特征表

| 象 限 | 热湿比 | 状态变化的特征 |
|-----|-------------------|-----------------|
| I | $\varepsilon > 0$ | 增焓加湿升温 (等湿降温) |
| II | $\varepsilon < 0$ | 增焓减湿升温 |
| III | $\varepsilon > 0$ | 减焓减湿降温 (等湿升温) |
| IV | $\varepsilon < 0$ | 减焓加湿降温 |

2. 两种不同状态空气混合过程的计算

在空气调节系统的计算过程中，经常遇到不同状态的空气相混合的情况，为此，必须研究空气的混合规律。

假设质量流量为 G_A (kg/s)、状态为 A (h_A 、 d_A) 的空气和质量流量为 G_B (kg/s)、状态为 B (h_B 、 d_B) 的两种空气相混合，混合后空气质量流量为 $G_C = G_A + G_B$ (kg/s)，状态为 C (h_C 、 d_C)。

在混合过程中，如果与外界没有热、湿交换，根据平衡和湿平衡原理，可以列出下列方程式：

$$G_A \cdot h_A + G_B \cdot h_B = G_C \cdot h_C \quad (1.26)$$

$$G_A \cdot d_A + G_B \cdot d_B = G_C \cdot d_C \quad (1.27)$$

将 $G_C = G_A + G_B$ 代入式 (1.26) 和式 (1.27) 中，即：

$$G_A \cdot h_A + G_B \cdot h_B = (G_A + G_B) \cdot h_C \quad (1.28)$$

$$G_A \cdot d_A + G_B \cdot d_B = (G_A + G_B) \cdot d_C \quad (1.29)$$

用 G_B 除以式 (1.28) 和式 (1.29)，并整理后可得：

$$G_A/G_B = (h_B - h_C) / (h_C - h_A)$$

$$G_A/G_B = (d_B - d_C) / (d_C - d_A)$$

综合两式可得：

$$G_A/G_B = (h_B - h_C) / (h_C - h_A) = (d_B - d_C) / (d_C - d_A) \quad (1.30)$$

$$(h_B - h_C) / (d_B - d_C) = (h_C - h_A) / (d_C - d_A) \quad (1.31)$$

由前述可知，在 $h-d$ 图上 $(h_B - h_C) / (d_B - d_C)$ 是直线 \overline{BC} 的斜率，而 $(h_C - h_A) / (d_C - d_A)$ 是直线 \overline{CA} 的斜率，两条直线的斜率相同。因此，直线 \overline{BC} 和 \overline{CA} 平行，但又有 C 为公共点，因而 A 、 B 、 C 3 点必然在一直线上，如图 1.4 所示。

下面进一步分析混合点 C 在 AB 线上的位置。根据三角形相似原理及式 (1.18), 从图 1.4 可得到下式 :

$$\frac{\overline{CB}}{\overline{CA}} = \frac{d_B - d_C}{d_C - d_A} = \frac{h_B - h_C}{h_C - h_A} = \frac{G_A}{G_B} \quad (1.32)$$

式 (1.32) 表明混合点 C 将线段 \overline{AB} 分成两段, 两段长度之比和参与混合的两种空气的质量成反比, 混合点靠近质量大的空气状态一端。

以上即为“混合规律”。利用混合规律可以很快地求出混合空气状态点, 即只要已知参与混合的两种空气状态及质量, 就可按质量反比分割其连线, 分割点即为混合状态点, 状态参数可查图求出, 也可以根据已知条件列出相应的比例式来解出。

如果混合点 C 出现在“有雾区”, 这种空气状态只能是暂时的, 多余的水蒸气立即凝结为水从空气中分离出来, 空气仍恢复到饱和状态。空气的变化过程为 $C \rightarrow D$, 如图 1.5 所示。因为空气在变化过程中, 凝结水带走了水的显热 (即液体热), 因此, 空气的焓值略有降低 ($h_D < h_C$)。 h_D 与 h_C 间存在下列关系 :

$$h_D = h_C - 4.19 \Delta t_D \quad (1.33)$$

式中, h_D 、 h_C 、 t_D 是 3 个相互关联的未知数。要确定 h 值, 必须通过试选法, 从 C 点引出很多过程线, 分别与 $\varphi = 100\%$ 的饱和线交于不同的 D 点, 从其中找出一组 h_D 、 h_C 、 t_D 值正好符合公式 (1.33) 的恒等关系, 则该 h_D 即为真正的饱和空气焓, D 点就是所求的混合空气状态点。

实际上, 由于水带走的显热很少, 因此, 空气变化的过程线也可近似看做等焓过程。

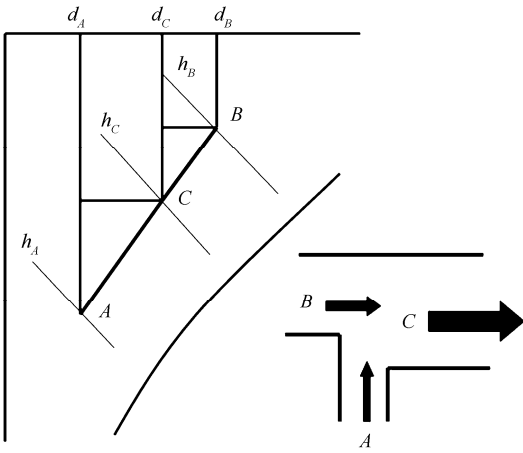


图 1.4 两种状态的空气混合过程

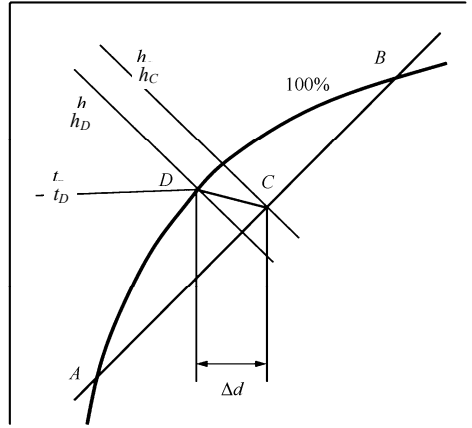


图 1.5 过饱和区空气状态变化过程图