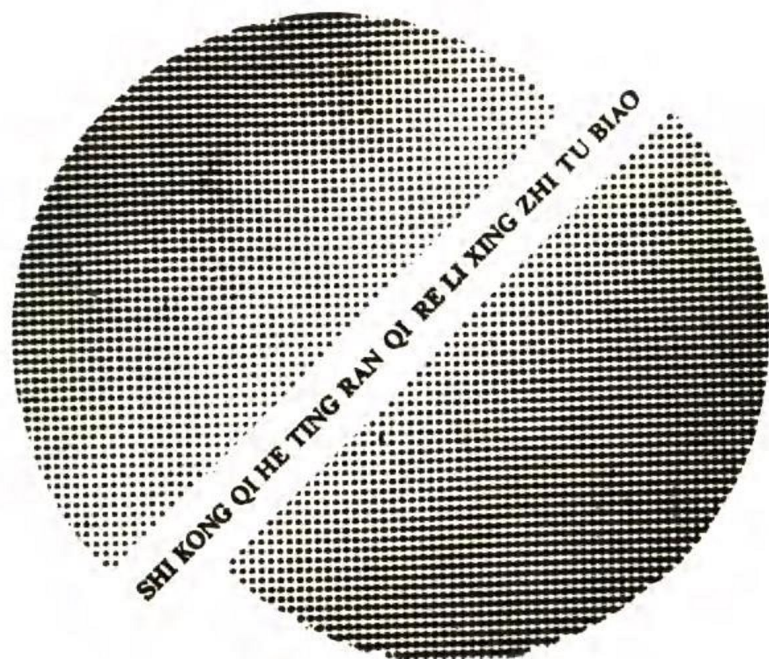


# 湿空气和烃燃气 热力性质图表

严家驷 尚德敏 著



高等教育出版社

6-64



# 前 言

湿空气和烃燃气是动力、化工、建筑、气象及其它有关部门经常会遇到的工作流体。它们的热力性质是进行热力计算和设计的基本依据，通常都可以按理想混合气体来考虑。国内外现有的湿空气热力性质线图（焓湿图或温湿图）都是针对一定的压力绘制的，对不同的压力需绘制不同的线图；现有的燃气热力性质表都是针对特定的燃料编制的，对不同的燃料需编制不同的表。这样，图表的量势必很大，而且也很难全面覆盖。

考虑到上述情况，对湿空气，我们提出了比相对湿度的概念，并绘制了可用于不同压力的湿空气通用焓湿图；对烃燃气，我们提出利用 $\text{CH}_2$ 和碳作为参考燃料，通过 $\text{CH}_2$ 纯燃气、碳纯燃气和空气的热力性质计算不同氢碳比烃燃料生成的不同燃料系数的燃气性质。这些做法，不是通过增加图表的数量，而是通过赋予图表以新的功能，使其应用领域得以扩充，几十倍地发挥原来图表的作用。

为了适应制冷、空调、干燥等多方面的需要，湿空气图表的温度范围取为 $-50\sim 1300^\circ\text{C}$ ，并且根据不同温度范围绘制了低温、常温、中温和高温四个温度段的通用焓湿图。烃燃气表的温度范围取为 $200\sim 1800\text{K}$ （在此温度范围内可不考虑离解），可用于任何烃类燃料生成的不同空气系数的燃气。烃燃气表中包含了空气的性质。

为便于读者了解本图表的原理及应用，书中给出了制表的热力学基础知识、基本数据和计算公式，并且列举了各种计算例题。

本书中的湿空气和烃燃气的热力性质表以及湿空气通用焓湿图全部由计算机打印、绘制。表中的数据和图中的曲线都有很好的准确性。感谢张巍和徐斌二位同志，他们出色地完成了这部分工作；对其他同志给予本书的热心支持，在此也一并表示感谢。

本书初次出版，时间也比较仓促，如有错误或不妥之处，衷心希望读者给予批评指正。

严家骝于哈尔滨工业大学

1988年9月

## 符 号 表

$a$ ——音速  
 $C$ ——摩尔热容；常数  
 $c$ ——比热容  
 $H$ ——焓  
 $h$ ——比焓  
 $k$ ——定熵指数  
 $L$ ——融解潜热  
 $M$ ——相对分子质量  
 $m$ ——质量  
 $n$ ——氢碳比  
 $p$ ——压力  
 $Q$ ——热量  
 $q$ ——单位质量的热量  
 $R$ ——气体常数  
 $R_M$ ——摩尔气体常数  
 $r$ ——摩尔分数；汽化潜热  
 $S$ ——熵  
 $s$ ——比熵  
 $T$ ——绝对温度  
 $t$ ——摄氏温度  
 $U$ ——内能  
 $V$ ——容积  
 $d$ ——露点  
 $f$ ——燃料  
 $g$ ——燃气  
 $i$ —— $\text{CH}_2$  纯燃气；冰  
 $j$ ——碳纯燃气  
 $MA$ ——湿空气  
 $\max$ ——最大  
 $v$ ——比容；流速

$w$ ——功  
 $x$ ——氮氧比  
 $\alpha$ ——空气系数  
 $\beta$ ——燃料系数  
 $\epsilon$ ——热湿比  
 $\eta$ ——效率  
 $\pi$ ——相对压力  
 $\rho$ ——密度  
 $\varphi$ ——相对湿度；速度系数  
 $\psi$ ——比相对湿度

### 顶 标

•——流率

### 上角标

\*——滞止

### 下角标

$a$ ——空气  
 $c$ ——临界  
 $DA$ ——干空气  
 $n$ ——氢碳比为  $n$   
 $p$ ——定压  
 $ri$ ——相对内（效率）  
 $s$ ——定熵  
 $s$ ——饱和  
 $v$ ——定容  
 $v$ ——水蒸气  
 $w$ ——湿球；水  
 $\beta$ ——燃料系数为  $\beta$

# 目 录

符号表 .....	3	C. 换热和燃烧过程 .....	36
第一部分 湿空气热力性质图表 .....	1	参考文献 .....	40
1-1 湿空气各参数的定义及焓湿图 .....	1	附录	
1-2 湿空气的比相对湿度及有关计算式 .....	3	表 1-1 冰和水的饱和蒸汽压 .....	41
1-3 湿空气表及通用焓湿图说明 .....	7	表 1-2 干空气的真实定压比热容 (理想气体状态) .....	43
1-4 湿空气图表应用举例 .....	9	表 1-3 水蒸气的真实定压比热容 (理想气体状态) .....	44
A. 查图表练习 .....	9	表 1-4 水蒸气的比分压力与含湿量的关系 .....	45
B. 定压加热和定压冷却过程 .....	10	表 1-5 湿空气的热力性质 .....	47
C. 绝热加湿过程 .....	13	表 2-1 燃气及空气的焓 .....	84
D. 去湿过程 .....	14	表 2-2 燃气及空气的对数相对压力 .....	105
E. 湿式冷却塔过程 .....	16	表 2-3 燃气及空气的真实定压摩尔热容 .....	126
F. 绝热混合过程 .....	17	表 2-4 燃气的摩尔组成、平均相对分子质量和气体常数 .....	129
G. 绝热节流过程 .....	18	附图一 湿空气的通用焓湿图 (低温部分)	
第二部分 烃燃气热力性质表 .....	20	附图二 湿空气的通用焓湿图 (常温部分)	
2-1 名词解释 .....	20	附图三 湿空气的通用焓湿图 (中温部分)	
2-2 有关的热力学关系式 .....	21	附图四 湿空气的通用焓湿图 (高温部分)	
2-3 燃烧室和后燃室中燃料系数的计算方法 .....	24		
2-4 基本数据、计算公式和燃气表说明 .....	27		
2-5 烃燃气表应用举例 .....	29		
A. 查表练习 .....	29		
B. 绝热膨胀和绝热压缩过程 .....	31		

# 第一部分 湿空气热力性质图表

## 1-1 湿空气各参数的定义及焓湿图

绝对湿度 ( $\rho_v$ ) 是指单位容积 (通常指  $1 \text{ m}^3$ ) 的湿空气中所含水蒸气的质量。所以, 绝对湿度也就是湿空气中水蒸气的密度:

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} = \frac{1}{v_v} \quad (1-1)$$

对于饱和空气

$$\rho_{sv} = \frac{1}{v_{sv}} \quad (1-2)$$

相对湿度 ( $\varphi$ ) 是指绝对湿度与相同温度下可能达到的最大绝对湿度 (即饱和空气的绝对湿度) 的比值:

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_{v, \max}} = \frac{\rho_v}{\rho_{sv}} \quad (1-3)$$

相对湿度也可以表示成未饱和空气中水蒸气的分压力与相同温度的饱和空气中水蒸气的分压力的比值 (将低压水蒸气看作理想气体):

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_{sv}} = \frac{p_v / (R_v T)}{p_{sv} / (R_v T)} = \frac{p_v}{p_{sv}} \quad (1-4)$$

当湿空气温度 ( $t$ ) 所对应的水蒸气饱和压力 ( $p_{sv}$ ) 超过湿空气的压力 ( $p_{M\Lambda}$ ) 时 (或者说, 当湿空气温度超过湿空气压力所对应的水蒸气饱和温度时), 湿空气中水蒸气所能达到的最大分压力不再是  $p_{sv}$ , 而是湿空气的总压力 (这时干空气的分压力已趋于零)。在这种情况下, 相对湿度应定义为

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{v, \max}} = \frac{p_v}{p_{M\Lambda}} \quad (1-5)$$

露点温度 ( $t_d$ ) 是指湿空气中水蒸气的分压力所对应的饱和温度, 露点温度下的饱和蒸汽压即是水蒸气的分压:

$$p_v = p_{sv}(t_d) \quad (1-6)$$

因此, 相对湿度可以表示为露点温度所对应的水蒸气饱和压力与干球温度 (即湿空气温度  $t$ ) 所对应的水蒸气饱和压力之比:

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{sv}} = \frac{p_{sv}(t_d)}{p_{sv}(t)} \quad (1-7)$$

湿球温度 ( $t_w$ ) 是指包有湿纱布的温度计在湿空气流过时所指示的温度 (图1-1)。

对于未饱和空气, 湿球温度总是介于露点温度和干球温度之间:

$$t_d < t_w < t \quad (\varphi < 1) \quad (1-8)$$

对于饱和空气, 这三个温度相等:

$$t_d = t_w = t \quad (\varphi = 1) \quad (1-9)$$

湿球温度与湿空气的流速及周围物体的温度有一定关系。但实验表明, 风速在  $2 \sim 40 \text{ m/s}$  的宽广范围内, 湿球温度的读数变化很小。因此, 只要周围物体的温度与湿球温度相差并不悬殊, 辐射换热的影响不大, 通常都可以认为湿球温度只取决于湿空气的状态 (温度和相对湿度), 并且等于绝热饱和温度 (绝热饱和温度是指湿空气在绝热条件下吸湿降温到饱和状态时具有的温度)。

含湿量是指单位质量 (每千克) 的干空气所携带的水蒸气的质量 (克数):

$$\begin{aligned} d &= 1000 \frac{m_v}{m_{DA}} = 1000 \frac{m_v/V}{m_{DA}/V} = 1000 \frac{\rho_v}{\rho_{DA}} = 1000 \frac{M_v}{M_{DA}} \frac{p_v}{p_{DA}} \\ &= 1000 \times \frac{18.0152}{28.9651} \frac{p_v}{p_{MA} - p_v} = 621.96 \frac{p_v}{p_{MA} - p_v} \quad \text{g/kg(DA)} \quad (1-10) \end{aligned}$$

湿空气的焓是对  $1 \text{ kg}$  干空气而言的, 或者说是对于  $(1 + 0.001d) \text{ kg}$  湿空气而言的:

$$H = h_g + 0.001dh_v \quad \text{kJ/kg(DA)} \quad (1-11)$$

为便于进行湿空气过程的分析 and 计算, 可将湿空气的热力性质绘制成线图。通常, 这种图

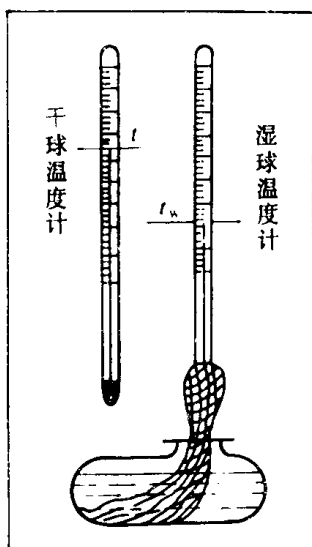


图 1-1

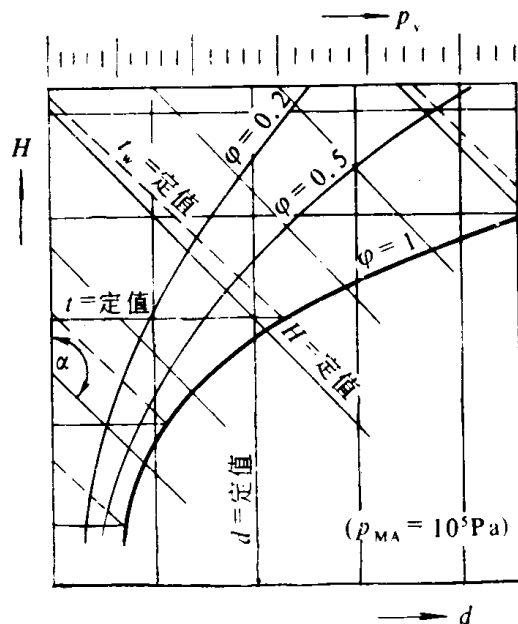


图 1-2

都是针对某一指定的湿空气压力,以含湿量和焓(或温度)为坐标,画出各个参数(如 $H$ 、 $d$ 、 $t$ 、 $\varphi$ 、 $t_w$ 等)的定值线。在绘制以焓为纵坐标,含湿量为横坐标的焓湿图时,为了充分利用图面,避免定相对湿度线过分集中于一角,往往将坐标轴的夹角适当放大(大于 $90^\circ$ )。例如图1-2所示的湿空气焓湿图,压力取 $10^5\text{Pa}$ <sup>①</sup>,坐标轴夹角取 $\alpha = 145^\circ$ ,图中画出了定温线、定焓线、定含湿量线、定相对湿度线和定湿球温度线。

在指定压力下,给出湿空气的任意两个参数,即可在焓湿图中查到相应的其它参数。例如,当 $p_{MA} = 10^5\text{Pa}$ 时,已知 $t = 30^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 0.6$ (图1-3中状态 $a$ ),即可从焓湿图中直接查到 $H = 72\text{kJ/kg(DA)}$ ,  $d = 16.3\text{g/kg(DA)}$ 。

湿球温度可由通过状态 $a$ 的定湿球温度线(虚线)直接查得

$$t_w = 24^\circ\text{C}$$

由于在常温下定湿球温度线与定焓线基本平行,因此,当相对湿度较大时,湿球温度可由给定状态 $a$ 沿定焓线往右下方与饱和空气线( $\varphi = 1$ )相交于 $b$ 点, $b$ 点的温度( $24^\circ\text{C}$ )即为湿球温度。

露点温度可由状态 $a$ 沿定含湿量线垂直往下,与饱和空气线相交于 $c$ 点, $c$ 点的温度( $21.5^\circ\text{C}$ )即为露点温度 $t_d$ 。

由式(1-10)可知,当湿空气压力已经指定时,水蒸气的分压力与含湿量之间有着以下简单的对应关系:

$$p_v = \frac{p_{MA}d}{621.96 + d} \quad (1-12)$$

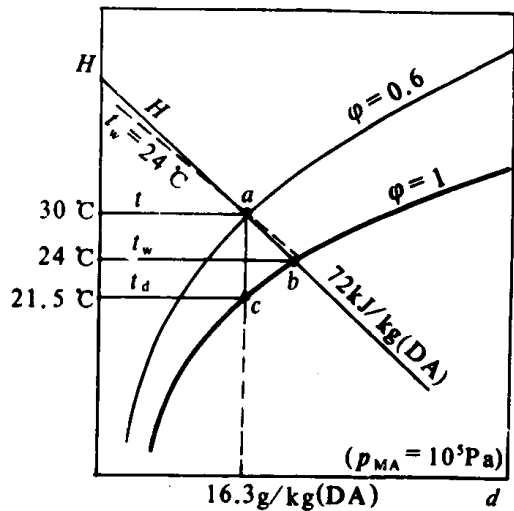


图 1-3

图1-2的上方表示了这种对应关系,可以根据 $d$ 查出 $p_v$ ,也可以通过式(1-12)计算出 $p_v$ 。在本例中

$$p_v = \frac{10^5 \times 16.3}{621.96 + 16.3} = 0.0255 \times 10^5\text{Pa}$$

## 1-2 湿空气的比相对湿度及有关计算式

在不同的场合下,湿空气的压力可能不同。例如:高原地区和平原地区的大气压力就有较大的差别;在不同的工业生产过程中,湿空气的压力可能有更大的差别;即使在同一生产过程中,由于抽空、压缩、阻力、节流等原因,湿空气压力也可能有明显差异。目前国内外采用的焓湿图(或温湿图)都是针对一定压力而绘制的,对不同的压力需要绘制不同的焓湿图。这样,不仅需要绘制很多张图,而且有时还需要插值或修正。另外,对压力有显著变化

<sup>①</sup>  $10^5\text{Pa} = 1\text{bar}$ ,下同。



而不能视为定压的过程，用这种指定压力的图进行分析计算也有一定困难。因此，如果能有一张可用于不同压力的通用焓湿图，无疑将会给湿空气过程的分析 and 计算提供很大的方便。

作者根据如下的想法，提出了比相对湿度的概念，并相应地绘制了通用焓湿图。这种想法就是：当湿空气的温度和含湿量一定时，相对湿度仅仅取决于水蒸气的分压力，而这一分压力在含湿量不变的情况下与湿空气的总压力成正比。所以，如果在焓湿图中用相对湿度与湿空气总压力的比值代替通常的相对湿度，就可绘制出适用于不同压力的通用焓湿图<sup>[1]</sup>。令湿空气的相对湿度  $\varphi$  与湿空气总压力  $p_{MA}$  的比值为  $\psi$ ，并称之为比相对湿度：

$$\psi = \frac{\varphi}{p_{MA}} \quad 10^{-5} \text{Pa}^{-1} \quad (1-13)$$

湿空气的比相对湿度也就是单位压力的相对湿度。单位压力取  $10^5 \text{Pa}$  即  $1 \text{bar}$ ，因为  $10^5 \text{Pa}$  的压力值 ( $750.062 \text{mmHg}$ <sup>①</sup>) 比较接近我国平原地区的大气压力。所以，比相对湿度也就是平均每  $10^5 \text{Pa}$  的相对湿度。对于  $10^5 \text{Pa}$  的压力而言，比相对湿度和相对湿度的值是相同的，但单位不同。比相对湿度的单位是  $10^{-5} \text{Pa}^{-1}$ ，相对湿度则无单位（无量纲数）。

令水蒸气的分压力  $p_v$  与湿空气总压力的比值为  $p'_v$ ，并称之为水蒸气的比分压力：

$$p'_v = \frac{p_v}{p_{MA}} \quad (1-14)$$

(水蒸气的比分压力实质上也就是水蒸气的摩尔分数或容积成分。)

水蒸气的比分压力与比相对湿度之间的关系为

$$p'_v = \frac{p_v}{p_{MA}} = \frac{p_v}{p_{sv}(t)} \cdot \frac{p_{sv}(t)}{p_{MA}} = \frac{\varphi p_{sv}(t)}{p_{MA}} = \psi p_{sv}(t), \quad p_{MA} \geq p_{sv}(t), \quad (1-15)$$

$$p'_v = \frac{p_v}{p_{MA}} = \varphi = \psi p_{MA} \quad p_{MA} \leq p_{sv}(t), \quad (1-16)$$

由式(1-10)可得

$$d = \frac{621.96 p_v}{p_{MA} - p_v} = \frac{621.96 p_v / p_{MA}}{1 - p_v / p_{MA}} = \frac{621.96 p'_v}{1 - p'_v} \quad (1-17)$$

从而得

$$p'_v = \frac{d}{621.96 + d} \quad (1-18)$$

可见水蒸气的比分压力和含湿量之间有着简单的对应关系。

作者根据1963年的饱和水蒸气国际骨架表<sup>[2]</sup>和1969年基南(Keenan)等人编制的水蒸气表<sup>[3]</sup>，分别拟合了  $0^\circ \text{C}$  以上和  $0^\circ \text{C}$  以下的饱和蒸汽压方程<sup>[4]</sup>如下：

$$p_{sv} = 221.20 \exp \left\{ \left[ 7.21275 + 3.981 \left( 0.745 - \frac{t + 273.15}{647.3} \right)^2 + 1.05 \left( 0.745 - \frac{t + 273.15}{647.3} \right)^3 \right] \left( 1 - \frac{647.3}{t + 273.15} \right) \right\} \quad (1-19)$$

$t \geq 0^\circ \text{C} \quad 10^5 \text{Pa}$

① 在我国法定计量单位中不包括这个单位。

$$p_{sv} = 0.006108 \exp \left[ 22.46 \left( 1 - \frac{273.15}{t + 273.15} \right) \right]$$

$$t \leq 0^\circ\text{C} \quad 10^5 \text{Pa} \quad (1-20)$$

干空气和低压水蒸气的定压比热容根据乌卡洛维奇 (Вукалович) 等人提供的数据拟合:

$$c_{pDA} = 1.0036 + 0.02413 \times 10^{-3}t + 0.42830 \times 10^{-6}t^2 + 0.03868 \times 10^{-9}t^3$$

$$- 0.95024 \times 10^{-12}t^4 + 0.89676 \times 10^{-15}t^5 - 0.25726 \times 10^{-18}t^6$$

$$t = 0 \sim 1300^\circ\text{C} \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (1-21)$$

$$c_{pV} = 1.8594 + 0.16341 \times 10^{-3}t + 1.78228 \times 10^{-6}t^2 - 3.62086 \times 10^{-9}t^3$$

$$+ 4.36657 \times 10^{-12}t^4 - 2.72855 \times 10^{-15}t^5 + 0.66082 \times 10^{-18}t^6$$

$$t = 0 \sim 1300^\circ\text{C} \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (1-22)$$

$$c_{pDA} = 1.0036 + 0.000022t \quad t = -50 \sim 0^\circ\text{C} \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (1-23)$$

$$c_{pV} = 1.8594 + 0.000136t \quad t = -50 \sim 0^\circ\text{C} \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (1-24)$$

冰的比热容 ( $-50 \sim 0^\circ\text{C}$ ) 取为

$$c_{pi} = 2.039 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

水的比热容 ( $0 \sim 100^\circ\text{C}$ ) 取为

$$c_{pw} = 4.1868 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

$0^\circ\text{C}$  时冰的融解潜热为

$$L = 333.5 \text{kJ}/\text{kg}$$

$0^\circ\text{C}$  时水的汽化潜热为

$$r = 2501.6 \text{kJ}/\text{kg}$$

湿空气焓的计算式:

$$H = \int_0^t c_{pDA} dt + \frac{d}{1000} \left[ h_{v(0^\circ\text{C})} + \int_0^t c_{pV} dt \right]$$

$$= 1.0036t + 0.01207 \times 10^{-3}t^2 + 0.14277 \times 10^{-6}t^3 + 0.00967 \times 10^{-9}t^4$$

$$- 0.19005 \times 10^{-12}t^5 + 0.14946 \times 10^{-15}t^6 - 0.03675 \times 10^{-18}t^7$$

$$+ \frac{0.62196 \psi p_{sv}(t)}{1 - \psi p_{sv}(t)} (2501.6 + 1.8594t + 0.08171 \times 10^{-3}t^2$$

$$+ 0.59409 \times 10^{-6}t^3 - 0.90522 \times 10^{-9}t^4 + 0.87331 \times 10^{-12}t^5$$

$$- 0.45481 \times 10^{-15}t^6 + 0.09440 \times 10^{-18}t^7)$$

$$t \geq 0^\circ\text{C} \quad \text{kJ}/\text{kg}(\text{DA}) \quad (1-25)$$

$$H = \int_0^t c_{pDA} dt + \frac{d}{1000} \left[ h_{v(0^\circ\text{C})} + \int_0^t c_{pV} dt \right]$$

$$= 1.0036t + 0.000011t^2 + \frac{0.62196 \psi p_{sv}(t)}{1 - \psi p_{sv}(t)} (2501.6 +$$

$$+ 1.8594t + 0.000068t^2) \quad t \leq 0^\circ\text{C} \quad \text{kJ}/\text{kg}(\text{DA}) \quad (1-26)$$

绝热饱和过程的能量方程为

$$H = H_{(t_w, \varphi=1)} - \frac{d_{s(t_w)} - d}{1000} h_{w(t_w)} \quad t_w \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-27)$$

$$H = H_{(t_i, \varphi=1)} - \frac{d_{s(t_i)} - d}{1000} h_{i(t_i)} \quad t_i \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1-28)$$

$t_i$ 为冰球温度。当温度低于  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  时，湿球将变为冰球。式(1-27)中

$$h_{w(t_w)} = c_{pw} t_w = 4.1868 t_w \quad \text{kJ/kg}$$

式(1-28)中

$$h_{i(t_i)} = -L_{(0^\circ\text{C})} + c_{pi} t_i = -333.5 + 2.039 t_i \quad \text{kJ/kg}$$

根据式(1-27)可解得  $t_w \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  时比相对湿度的计算式如下：

$$\psi = \frac{A_w - D_1}{A_1 p_{MA} - (A_1 - A_w + D_1) p_{sv(t)}} \quad 10^{-5} \text{Pa}^{-1} \quad (1-29)$$

式中

$$A_1 = (1555.90 + 1.15647t + 0.05082 \times 10^{-3}t^2 + 0.36950 \times 10^{-6}t^3 - 0.56301 \times 10^{-9}t^4 + 0.54317 \times 10^{-12}t^5 - 0.28284 \times 10^{-15}t^6 + 0.05871 \times 10^{-18}t^7 - 2.60402t_w) \frac{p_{sv(t)}}{p_{MA} - p_{sv(t)}}$$

$$A_w = (1555.90 - 1.44755t_w + 0.05082 \times 10^{-3}t_w^2 + 0.36950 \times 10^{-6}t_w^3 - 0.56301 \times 10^{-9}t_w^4 + 0.54317 \times 10^{-12}t_w^5 - 0.28284 \times 10^{-15}t_w^6 + 0.05871 \times 10^{-18}t_w^7) \frac{p_{sv(t_w)}}{p_{MA} - p_{sv(t_w)}}$$

$$D_1 = 1.0036(t - t_w) + 0.01207 \times 10^{-3}(t^2 - t_w^2) + 0.14277 \times 10^{-6}(t^3 - t_w^3) + 0.00967 \times 10^{-9}(t^4 - t_w^4) - 0.19005 \times 10^{-12}(t^5 - t_w^5) + 0.14946 \times 10^{-15}(t^6 - t_w^6) - 0.03675 \times 10^{-18}(t^7 - t_w^7)$$

$$p_{sv(t)} = 221.20 \exp \left\{ \left[ 7.21275 + 3.981 \left( 0.745 - \frac{t + 273.15}{647.3} \right)^2 + 1.05 \left( 0.745 - \frac{t + 273.15}{647.3} \right)^3 \right] \left( 1 - \frac{647.3}{t + 273.15} \right) \right\} \quad 10^5 \text{Pa}$$

根据式(1-28)可解得  $t_i \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  时比相对湿度的计算式如下：

$$\psi = \frac{A_i - D_2}{A_2 p_{MA} - (A_2 - A_i + D_2) p_{sv(t)}} \quad (1-30)$$

式中  $A_2 = (1763.32 + 1.15647t + 0.0000423t^2 - 1.26818t_i) \frac{p_{sv(t)}}{p_{MA} - p_{sv(t)}}$

$$A_i = (1763.32 - 0.11171t_i + 0.0000423t_i^2) \frac{p_{sv(t_i)}}{p_{MA} - p_{sv(t_i)}}$$

$$D_2 = 1.0036(t - t_i) + 0.000011(t^2 - t_i^2)$$

$$p_{sv(t)} = 0.006108 \exp \left[ 22.46 \left( 1 - \frac{273.15}{t + 273.15} \right) \right] \quad 10^5 \text{ Pa}$$

式(1-29)和(1-30)建立了比相对湿度和干、湿(冰)球温度及湿空气压力之间的关系:

$$\psi = f_1(t, t_w, p_{MA})$$

$$\psi = f_2(t, t_i, p_{MA})$$

而相对湿度可由比相对湿度与湿空气压力的乘积求得:

$$\varphi = \psi p_{MA}$$

应该指出, 式(1-29)和(1-30)中的 $\psi$ 是根据式(1-4)所给的相对湿度的定义得出的, 它们适用于 $p_{MA} \geq p_{sv(t)}$ 的情况。当 $p_{MA} \leq p_{sv(t)}$ 时, 只需将根据式(1-29)和(1-30)计算所得的比相对湿度 $\psi$ 乘以 $\frac{p_{sv(t)}}{p_{MA}}$ , 即可得到正确的比相对湿度值:

$$\psi = \frac{\varphi}{p_{MA}} = \frac{p_v}{p_{MA}} = \frac{p_v}{p_{sv(t)} p_{MA}}, \quad \frac{p_{sv(t)}}{p_{MA}} = \psi_{\text{计}} \frac{p_{sv(t)}}{p_{MA}} \quad (1-31)$$

上述各计算式的适用参数范围为

$$t = -50 \sim 1300^\circ\text{C}$$

$$p_{MA} = 0 \sim 10 \times 10^5 \text{ Pa}$$

### 1-3 湿空气表及通用焓湿图说明

根据上节给出的各式计算出湿空气的各种性质, 然后可将计算结果分别列成表或绘制成线图。查表可获得较精确的值; 查图则较直观, 便于对各种过程进行分析。

表1-1为冰与水在不同温度下的饱和蒸汽压, 是根据式(1-19)和(1-20)计算得到的。

表1-2为干空气在理想气体状态下的真实定压比热容, 其值随温度的升高而增大, 可由式(1-21)和(1-23)计算得到。

表1-3为水蒸气在理想气体状态下的真实定压比热容, 其值也随温度的升高而增大, 可由式(1-22)和(1-24)计算得到。

表1-4为水蒸气比分压力和含湿量的关系, 可由式(1-18)计算得到。

表1-5为湿空气的热力性质。表中列出了不同温度( $t$ )和不同比相对湿度( $\psi$ )下的含湿量( $d$ )、焓( $H$ )和湿空气压力为 $10^5 \text{ Pa}$ 时的湿球温度( $t_w > 0^\circ\text{C}$ )或冰球温度( $t_i < 0^\circ\text{C}$ )。

附图一、二、三、四为不同温度范围的通用焓湿图。它们均以焓为纵坐标、含湿量为横坐标, 但坐标夹角有所不同。这四张图的温度范围、含湿量范围及坐标夹角分别为

附图一 (低温段)

$$t = -40 \sim 15^\circ\text{C}$$

$$d = 0 \sim 10 \text{ g/kg(DA)}$$

$$\alpha = 90 + \arctan \frac{1}{2} = 116.565^\circ$$

附图二 (常温段)

$$t = -10 \sim 100^\circ\text{C}$$

$$d = 0 \sim 100 \text{ g/kg(DA)}$$

$$\alpha = 90 + \arctan 1 = 135^\circ$$

附图三 (中温段)

$$t = 0 \sim 200^{\circ}\text{C}$$

$$d = 0 \sim 200\text{g/kg(DA)}$$

$$\alpha = 90 + \arctan 2 = 153.435^{\circ}$$

附图四 (高温段)

$$t = 0 \sim 1300^{\circ}\text{C}$$

$$d = 0 \sim 1300\text{g/kg(DA)}$$

$$\alpha = 90 + \arctan 2 = 153.435^{\circ}$$

图中除作为坐标的定焓线和定含湿量线外, 还画出了定比相对湿度线和定湿球温度线。图的上方标出了水蒸气的比分压力和含湿量的对应关系。定比相对湿度线一直画到  $\psi = 5 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1}$ , 它相当于湿空气压力  $p_{MA} = 0.2 \times 10^5 \text{Pa}$  时的饱和空气线 (当  $p_{MA} = 0.2 \times 10^5 \text{Pa}$

$$\text{时, } \psi = \frac{\varphi}{p_{MA}} = \frac{1}{0.2 \times 10^5} = 5 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1} \text{)。$$

通用焓湿图的用法和一般焓湿图基本相同, 如果湿空气压力为  $10^5 \text{Pa}$ , 那么只要将图中  $\psi$  的值视为  $\varphi$  的值就可以了。这时饱和空气线 ( $\varphi = 1$ ) 也就是  $\psi = 1 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1}$  的定值线;  $\varphi = 0.5$  的定相对湿度线, 也就是  $\psi = 0.5 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1}$  的定值线。如果湿空气的压力为  $5 \times 10^5 \text{Pa}$ , 则饱和空气线为  $\psi = 0.2 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1}$  的定值线;  $\varphi = 0.5$  的定相对湿度线为  $\psi = 0.1 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1}$  的定值线。如果湿空气的压力为  $0.25 \times 10^5 \text{Pa}$ , 则饱和空气线为  $\psi = 4 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1}$  的定值线;  $\varphi = 0.5$  的定相对湿度线为  $\psi = 2 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1}$  的定值线。余此类推。总之, 对于任意指定的湿空气压力  $p_{MA}$ , 只要将通用焓湿图中的比相对湿度值, 按  $\varphi = \psi p_{MA}$  的简单关系换算成相对湿度值, 就成了该指定压力下的一般焓湿图了。因此, 一张通用焓湿图代表了很多 (无数) 张不同指定压力的焓湿图。

通用焓湿图中与定焓线基本平行的虚线是定湿球温度线。这些定湿球温度线都是直线, 在图中只有确定的斜率 (随湿球温度的提高而稍趋平坦), 而无固定位置。在给定了湿空气压力, 因而饱和空气线也随之确定的条件下, 根据饱和空气线上湿球温度和干球温度相等的原理, 将标出的定湿球温度线平行移动到相应位置, 便得到该压力下的定湿球温度线的具体位置。通用焓湿图 (附图一、二、三、四) 中画出的定湿球温度线的位置是  $10^5 \text{Pa}$  压力下的实际位置, 例如, 图1-4中三条平行线  $aa$ 、 $bb$ 、 $cc$  分别是压力为  $0.5 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 $10^5 \text{Pa}$  和  $1.25 \times 10^5 \text{Pa}$  (其饱和空气线分别为  $\psi = 2 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1}$ 、 $\psi = 1 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1}$  和  $\psi = 0.8 \times 10^{-5} \text{Pa}^{-1}$ ) 时  $30^{\circ}\text{C}$  的定湿球温度线。在通用焓湿图中,  $aa$  线和  $cc$  线可由实际画出的  $bb$  线平行移动到相应位置而得出。

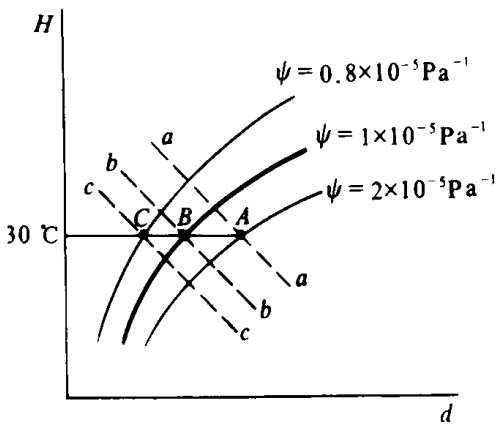


图 1-4

通用焓湿图 (附图一、二、三、四) 中的定  $\psi$  线是对  $p_{MA} \geq p_{sv}(t)$  的情况而言的。当  $p_{MA} \leq p_{sv}(t)$  时, 应将图中查得的比相对湿度  $\psi_{\text{图}}$  乘以  $\frac{p_{sv}(t)}{p_{MA}}$ , 方可得到正确的比相对湿度值

[参看式(1-31)], 即

$$\psi = \psi_{\text{图}} \frac{p_{sv}(t)}{p_{MA}} \quad (1-32)$$

## 1-4 湿空气图表应用举例

### A. 查图表练习

例 1-1 求饱和空气的含湿量、焓和水蒸气的分压力。

已知: (a)  $t = 40^\circ\text{C}$ ,  $p_{MA} = 10^5 \text{ Pa}$ ;

(b)  $t = 40^\circ\text{C}$ ,  $p_{MA} = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

解 (a) 当  $p_{MA} = 10^5 \text{ Pa}$  时, 饱和空气线 ( $\varphi = 1$ ) 的比相对湿度为

$$\psi = \frac{\varphi}{p_{MA}} = \frac{1}{10^5} = 1 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$$

查表 1-5 中  $t = 40^\circ\text{C}$ 、 $\psi = 1 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$  一栏可得

$$d = 49.51 \text{ g/kg(DA)}$$

$$H = 167.73 \text{ kJ/kg(DA)}$$

饱和空气中水蒸气的分压力也就是该温度所对应的饱和蒸汽压。查表 1-1 可得

$$p_v = p_{sv(40^\circ\text{C})} = 0.07374 \times 10^5 \text{ Pa}$$

亦可查通用焓湿图 (附图二) 中  $t = 40^\circ\text{C}$  与  $\psi = 1 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$  线的交点 (图 1-5 中 a 点), 得

$$d = 49.5 \text{ g/kg(DA)}$$

$$H = 167.5 \text{ kJ/kg(DA)}$$

$$p_v = p'_v p_{MA} = 73.7 \times 10^{-3} \times 10^5$$

$$= 0.0737 \times 10^5 \text{ Pa}$$

(b) 当  $p_{MA} = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$  时, 饱和空气的比相对湿度为

$$\psi = \frac{\varphi}{p_{MA}} = \frac{1}{2 \times 10^5} = 0.5 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$$

查表 1-5 中  $t = 40^\circ\text{C}$ 、 $\psi = 0.5 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$  一栏, 可得

$$d = 23.81 \text{ g/kg(DA)}$$

$$H = 101.51 \text{ kJ/kg(DA)}$$

水蒸气的分压力同 (a), 即

$$p_v = p_{sv(40^\circ\text{C})} = 0.07374 \times 10^5 \text{ Pa}$$

亦可查通用焓湿图中  $t = 40^\circ\text{C}$  与  $\psi = 0.5 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$  的交点 (图 1-5 中 b 点), 得

$$d = 23.8 \text{ g/kg(DA)}$$

$$H = 101.5 \text{ kJ/kg(DA)}$$

$$p_v = p'_v p_{MA} = 36.8 \times 10^{-3} \times 2 \times 10^5 = 0.0736 \times 10^5 \text{ Pa}$$

例 1-2 求湿空气的相对湿度、含湿量和焓。已知:

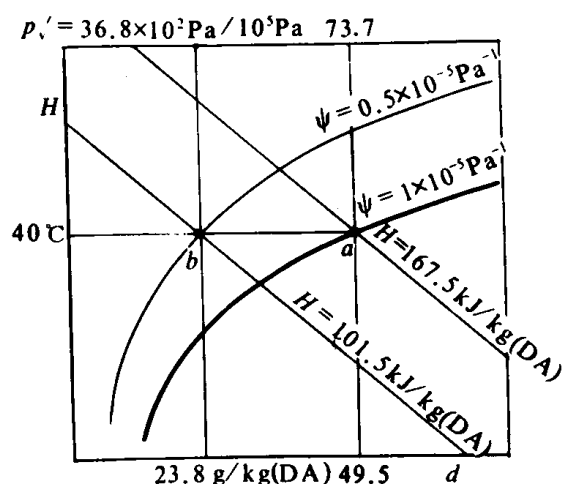


图 1-5

(a) 干球温度  $t = 30^\circ\text{C}$ , 湿球温度  $t_w = 25^\circ\text{C}$ ,  $p_{M_A} = 10^5 \text{ Pa}$ ;

(b) 干球温度  $t = 30^\circ\text{C}$ , 湿球温度  $t_w = 25^\circ\text{C}$ ,  $p_{M_A} = 0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

解 (a)  $p_{M_A} = 10^5 \text{ Pa}$ ,  $\varphi = \psi p_{M_A}$ 。查表1-5  $t = 30^\circ\text{C}$  一栏, 得  $\varphi = 0.6$  时:  $t_w = 23.79^\circ\text{C}$ ,  $d = 16.24 \text{ g/kg(DA)}$ ,  $H = 71.66 \text{ kJ/kg(DA)}$ ;  $\varphi = 0.7$  时:  $t_w = 25.49^\circ\text{C}$ ,  $d = 19.03 \text{ g/kg(DA)}$ ,  $H = 78.79 \text{ kJ/kg(DA)}$ 。利用直线插入法可得

$$\varphi = 0.6 + \frac{25 - 23.79}{25.49 - 23.79} \times (0.7 - 0.6) = 0.691$$

$$d = 16.24 + \frac{0.671 - 0.6}{0.7 - 0.6} \times (19.03 - 16.24) = 18.22 \text{ g/kg(DA)}$$

$$H = 71.66 + \frac{0.671 - 0.6}{0.7 - 0.6} \times (78.79 - 71.66) = 76.72 \text{ kJ/kg(DA)}$$

由通用焓湿图 (附图二) 亦可直接查得

$$\varphi = \psi p_{M_A} = 0.67$$

$$d = 18.2 \text{ g/kg(DA)}$$

$$H = 76.5 \text{ kJ/kg(DA)}$$

(b)  $p_{M_A} = 0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  时, 饱和空气线为  $\psi = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$  的定比相对湿度线。查附图二, 将图中  $t_w = 25^\circ\text{C}$  的定湿球温度线平行移动, 使之通过  $t = 25^\circ\text{C}$  的定干球温度线与  $\psi = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$  (即  $\varphi = 1$ ) 的定值线的交点(图1-6中  $a$  点), 即得  $0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  压力下  $t_w = 25^\circ\text{C}$  定湿球温度线的实际位置 (也可以近似地认为通过  $a$  点的定焓线就是  $t_w = 25^\circ\text{C}$  的定湿球温度线。当  $t_w$  不很高, 而  $\varphi$  又不太小时, 不会造成明显误差)。

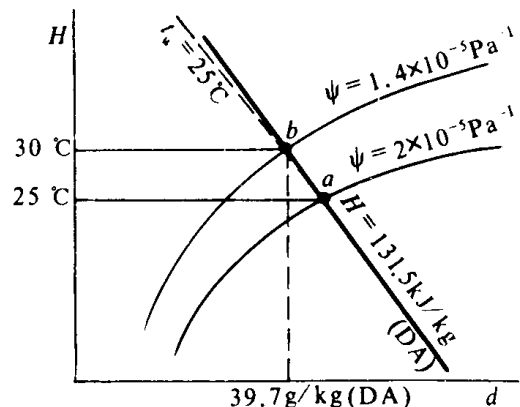


图 1-6

$t_w = 25^\circ\text{C}$  的定湿球温度线与  $t = 30^\circ\text{C}$  的定干球温度线的交点  $b$ , 即为所求的状态。从图中可查得

$$d = 39.7 \text{ g/kg(DA)}$$

$$H = 131.5 \text{ kJ/kg(DA)}$$

$$\psi = 1.4 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$$

所以

$$\varphi = \psi p_{M_A} = (1.4 \times 10^{-5}) \times 0.5 \times 10^5 = 0.7$$

## B. 定压加热和定压冷却过程

例 1-3 将温度  $t = 5^\circ\text{C}$ 、相对湿度  $\varphi = 0.75$  的空气在大气压力下加热到  $25^\circ\text{C}$ , 需加入多少热量? 加热后的相对湿度为若干? 设: (a) 大气压力  $p_{M_A} = 10^5 \text{ Pa}$  (平原地区); (b) 大气压

力  $p_{MA} = 0.8 \times 10^5 \text{ Pa}$  (高原地区)。

解 这种定压加热过程是在含湿量不变的情况下进行的, 在焓湿图中表示为一垂直线段。

(a)  $p_{MA} = 10^5 \text{ Pa}$  时  $\psi_1 = \frac{\varphi_1}{p_{MA}} = 0.75 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$

查附图二 (参看图1-7中过程 1-2) 可知, 所需热量为

$$q = H_2 - H_1 = 35.5 - 15.5 = 20 \text{ kJ/kg(DA)}$$

加热后的相对湿度为

$$\varphi_2 = \psi_2 p_{MA} = (0.21 \times 10^{-5}) \times 10^5 = 0.21$$

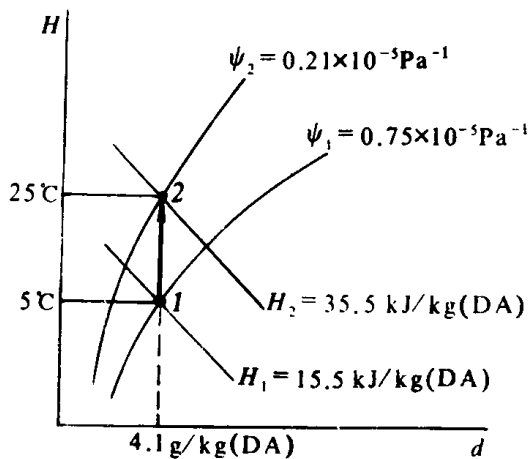


图 1-7

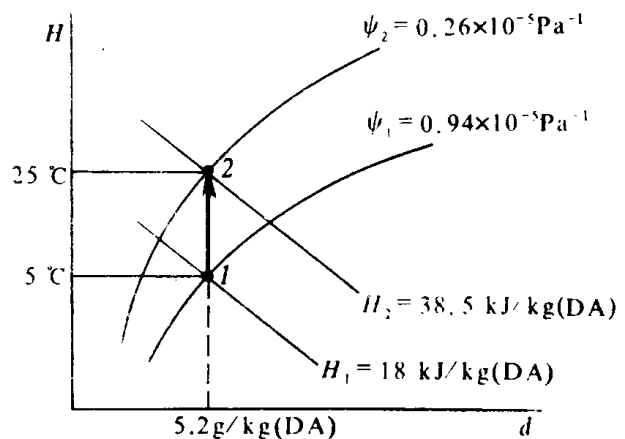


图 1-8

(b)  $p_{MA} = 0.8 \times 10^5 \text{ Pa}$  时  $\psi_1 = \frac{\varphi_1}{p_{MA}} = \frac{0.75}{0.8 \times 10^5} = 0.94 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$

查附图二 (参看图1-8中过程 1-2) 可知, 所需热量为

$$q = H_2 - H_1 = 38.5 - 18 = 20.5 \text{ kJ/kg(DA)}$$

加热后的相对湿度为

$$\varphi_2 = \psi_2 p_{MA} = (0.26 \times 10^{-5}) \times 0.8 \times 10^5 = 0.208$$

例 1-4 压力  $p_{MA} = 10^5 \text{ Pa}$  的热空气, 已测得干球温度为  $135^\circ\text{C}$ , 湿球温度为  $60^\circ\text{C}$ , 求其相对湿度。若将它定压冷却到  $70^\circ\text{C}$ , 放出热量多少? 冷却后的相对湿度是多少?

解 查附图三 (参看图1-9中过程 1-2) 可得

$$\psi_{1\text{湿}} = 0.05 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$$

$135^\circ\text{C}$  所对应的饱和压力为

$$p_{sv(135)} = 3.131 \times 10^5 \text{ Pa}$$

由于  $p_{MA} < p_{sv(135)}$ , 因此实际的比相对湿度为 [参看式 (1-32)]:

$$\psi_1 = \psi_{1\text{湿}} \frac{p_{sv(135)}}{p_{MA}}$$



$$= (0.05 \times 10^{-5}) \times \frac{3.131 \times 10^5}{10^5} = 0.157 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$$

$$\varphi_1 = \psi_1 p_{MA} = 0.157$$

过程1-2的热量为

$$q = H_2 - H_1 = 375 - 455 = -80 \text{ kJ/kg(DA)}$$

(负值表示放出热量。)冷却后空气的相对湿度为

$$\varphi_2 = \psi_2 p_{MA} = 0.5$$

(因为  $p_{MA} > p_{sv}(70^\circ\text{C})$ , 所以  $\psi_2 = \psi_2$  图。)

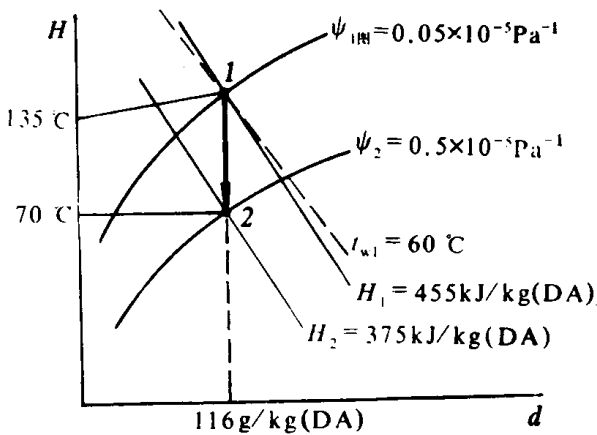


图 1-9

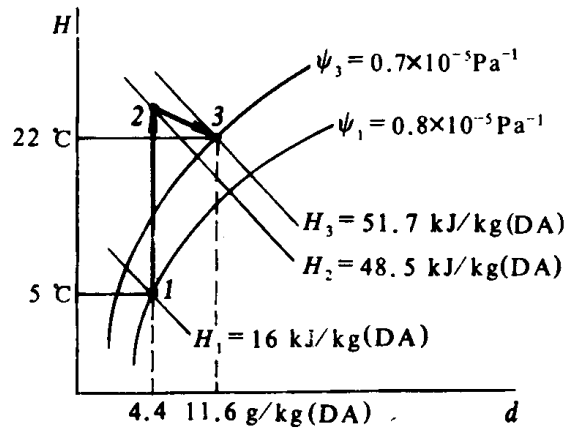


图 1-10

例 1-5 某车间, 单位时间散发出的热量  $\dot{Q} = 170 \text{ kJ/min}$ , 蒸发出的水分为  $\dot{m}_w = 0.38 \text{ kg/min}$ 。室外冷空气温度  $t_1 = 5^\circ\text{C}$ , 相对湿度  $\varphi_1 = 80\%$ , 大气压力为  $10^5 \text{ Pa}$ 。若将室外空气加热后供给车间, 并要求维持车间空气温度  $t_3 = 22^\circ\text{C}$ , 相对湿度  $\varphi_3 = 70\%$ , 问需要多大的通风量和加热量。

解  $p_{MA} = 10^5 \text{ Pa}$ , 所以

$$\psi_1 = \frac{\varphi_1}{p_{MA}} = 0.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$$

$$\psi_3 = \frac{\varphi_3}{p_{MA}} = 0.7 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$$

室外空气状态 1 和室内空气状态 3 如图 1-10 所示。室外空气加热后的状态 2 可根据空气状态变化的热湿比来确定:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{q}{\dot{m}_w} = \frac{\Delta H}{\Delta d} = \frac{H_3 - H_2}{d_3 - d_2} \\ &= \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_w} = \frac{170}{0.38 \times 1000} = 0.4474 \text{ kJ/g} \end{aligned}$$