

第十二章 理想气体混合物及湿空气

12-1 混合气体中各组成气体的摩尔分数为: $x_{\text{CO}_2} = 0.4$, $x_{\text{N}_2} = 0.2$, $x_{\text{O}_2} = 0.4$ 。混合气体的温度 $t = 50^\circ\text{C}$, 表压力 $p_e = 0.04\text{MPa}$, 气压计上水银柱高度为 $p_b = 750\text{mmHg}$ 。求:

(1) 体积 $V = 4\text{m}^3$ 混合气体的质量; (2) 混合气体在标准状态下的体积 V_0 。

提示和答案: 先求混合气体折合摩尔质量及折合气体常数, 再按理想气体状态方程计算。

注意表压力和绝对压力及标准状态。 $M_{\text{eq}} = x_{\text{CO}_2} M_{\text{CO}_2} + x_{\text{N}_2} M_{\text{N}_2} + x_{\text{O}_2} M_{\text{O}_2} = 36.01 \times 10^{-3} \text{kg/mol}$,

$$R_{\text{g,eq}} = \frac{R}{M_{\text{eq}}} = 230.9 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad , \quad p = p_e + p_b = 0.14 \times 10^6 \text{Pa} \quad , \quad m = \frac{pV}{R_{\text{g,eq}} T} = 7.51 \text{kg} \quad ,$$

$$V_0 = m \frac{V_{0,m}}{M_{\text{eq}}} = 4.67 \text{m}^3 \quad .$$

12-2 50 kg 废气和 75kg 的空气混合, 废气中各组成气体的质量分数为: $w_{\text{CO}_2} = 14\%$, $w_{\text{O}_2} = 6\%$, $w_{\text{H}_2\text{O}} = 5\%$, $w_{\text{N}_2} = 75\%$ 。空气中的氧气和氮气的质量分数为: $w_{\text{O}_2} = 23.2\%$, $w_{\text{N}_2} = 76.8\%$ 。混合后气体压力 $p = 0.3\text{MPa}$, 求: (1) 混合气体各组分的质量分数; (2) 折合气体常数; (3) 折合摩尔质量; (4) 摩尔分数; (5) 各组成气体分压力。

提示和答案: 混合气体质量 $m = 125\text{kg}$, $m_{\text{CO}_2} = w_{\text{CO}_2} m = 7\text{kg}$, $m_{\text{H}_2\text{O}} = w_{\text{H}_2\text{O}} m = 2.5\text{kg}$,

$$m_{\text{O}_2} = w_{\text{gas,O}_2} m_{\text{gas}} + w_{\text{a,O}_2} m_{\text{a}} = 20.4\text{kg} \quad , \quad m_{\text{N}_2} = w_{\text{gas,N}_2} m_{\text{gas}} + w_{\text{a,N}_2} m_{\text{a}} = 95.1\text{kg} \quad .$$

$$w_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{m} = 0.056 \quad , \quad w_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m} = 0.020 \quad , \quad w_{\text{O}_2} = \frac{m_{\text{O}_2}}{m} = 0.163 \quad , \quad w_{\text{N}_2} = \frac{m_{\text{N}_2}}{m} = 0.761 \quad ;$$

$$R_{\text{g}} = \sum_i w_i R_{\text{g},i} = 288 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad ; \quad M = \frac{R}{R_{\text{g}}} = 28.87 \times 10^{-3} \text{kg/mol} \quad ; \quad x_{\text{CO}_2} = \frac{R_{\text{g,CO}_2}}{R_{\text{g}}} w_{\text{CO}_2} = 0.037 \quad ,$$

$$x_{\text{O}_2} = \frac{R_{\text{g,O}_2}}{R_{\text{g}}} w_{\text{O}_2} = 0.147 \quad , \quad x_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{R_{\text{g,H}_2\text{O}}}{R_{\text{g}}} w_{\text{H}_2\text{O}} = 0.032 \quad , \quad x_{\text{N}_2} = \frac{R_{\text{g,N}_2}}{R_{\text{g}}} w_{\text{N}_2} = 0.784 \quad ;$$

$$p_{\text{CO}_2} = x_{\text{CO}_2} p = 0.0111 \text{MPa} \quad , \quad p_{\text{O}_2} = x_{\text{O}_2} p = 0.0441 \text{MPa} \quad , \quad p_{\text{H}_2\text{O}} = x_{\text{H}_2\text{O}} p = 0.0096 \text{MPa} \quad ,$$

$$p_{\text{N}_2} = x_{\text{N}_2} p = 0.2352 \text{MPa} \quad .$$

12-3 烟气进入锅炉第一管群时温度为 1200°C , 流出时温度为 800°C , 烟气的压力几

乎不变。求每 1 kmol 烟气的放热量 Q_p 。可借助平均摩尔定压热容表计算。已知烟气的体积分数： $\varphi_{\text{CO}_2} = 0.12$ ， $\varphi_{\text{H}_2\text{O}} = 0.08$ ，其余为 N_2 。

提示和答案： $x_i = \varphi_i$ ，所以 $x_{\text{CO}_2} = 0.12$ ， $x_{\text{H}_2\text{O}} = 0.08$ ， $x_{\text{N}_2} = 0.8$ 。查得各气体平均摩尔定压热容，混合气体的热容 $C_{p,m} = \sum x_i C_{p,m,i}$ ， $C_{p,m} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{800^\circ\text{C}} = 33.321\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ， $C_{p,m} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{1200^\circ\text{C}} = 34.694\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ， $Q_p = n \left(C_{p,m} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{800^\circ\text{C}} t_2 - C_{p,m} \Big|_{0^\circ\text{C}}^{1200^\circ\text{C}} t_1 \right) = -149.76\text{kJ}$ 。

12-4 流量为 3mol/s 的 CO_2 ，2mol/s 的 N_2 和 4.5mol/s 的 O_2 三股气流稳定流入总管道混合，混合前每股气流的温度和压力相同，都是 76.85°C ， 0.7MPa ，混合气流的总压力 $p = 0.7\text{MPa}$ ，温度仍为 $t = 76.85^\circ\text{C}$ 。藉助气体热力性质表试计算：（1）混合气体中各组分的分压力；（2）混合前后气流焓值变化 $\Delta\dot{H}$ 及混合气流的焓值；（3）导出温度、压力分别相同的几种不同气体混合后，系统熵变为： $\Delta S = -R \sum n_i \ln x_i$ ，并计算本题混合前后熵的变化量 $\Delta\dot{S}$ ；（4）若三股气流为同种气体，熵变如何？

提示和答案： 三股来流等压混合， $q_n = \sum q_{n_i} = 9.5\text{mol/s}$ ， $x_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n} = 0.3158$ ，
 $x_{\text{N}_2} = \frac{n_{\text{N}_2}}{n} = 0.2105$ ， $x_{\text{O}_2} = \frac{n_{\text{O}_2}}{n} = 0.4737$ 。 $p_{\text{CO}_2} = x_{\text{CO}_2} p = 0.2211\text{MPa}$ ，
 $p_{\text{N}_2} = x_{\text{N}_2} p = 0.1473\text{MPa}$ ， $p_{\text{O}_2} = x_{\text{O}_2} p = 0.3156\text{MPa}$ 。列稳定流动能量方程， $Q = 0$ ， $w_i = 0$
 不计动能差、位能差得 $\Delta H = 0$ 。 $H = \sum H_i$ ，混合物的摩尔焓 $H_m = \sum x_i H_{m,i}$ ，由气体热力性质表查得， $H_{m,\text{CO}_2} = 11399.75\text{J}/\text{mol}$ ， $H_{m,\text{N}_2} = 10182.15\text{J}/\text{mol}$ ， $H_{m,\text{O}_2} = 10223.1\text{J}/\text{mol}$ ，故
 $H_m = 10807\text{J}/\text{mol}$ ， $\dot{H} = q_n H_m = 100567.63\text{J/s}$ 。

$\Delta S = -R n_{\text{CO}_2} \ln \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}_2,1}} - R n_{\text{N}_2} \ln \frac{p_{\text{N}_2}}{p_{\text{N}_2,1}} - R n_{\text{O}_2} \ln \frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{O}_2,1}} = -R \sum n_i \ln x_i$ ， $\Delta\dot{S} = 82.62\text{kJ}/(\text{K}\cdot\text{s})$ 。若

为几股同种气流，来流各股 p 、 T 相同，且与混合物流的 p 、 T 也相同，这时 $\Delta S = 0$ 。

12-5 $V = 0.55\text{m}^3$ 的刚性容器中装有 $p_1 = 0.25\text{MPa}$ 、 $T_1 = 300\text{K}$ 的 CO_2 ， N_2 在输气管道中流动，参数保持 $p_L = 0.85\text{MPa}$ 、 $T_L = 440\text{K}$ ，如图 12-1 所示，打开阀门充入 N_2 ，直到容器中混合物压力达 $p_2 = 0.5\text{MPa}$ 时关闭阀门。充气过程绝热，求容器内混合物终温 T_2

和质量 m_2 。按定值比热容计算， $c_{v,N_2} = 751\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ， $c_{p,N_2} = 1048\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ；

$c_{v,\text{CO}_2} = 657\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ， $c_{p,\text{CO}_2} = 846\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

提示和答案：刚性容器中原有气体质量

$$m_1 = \frac{p_1 V}{R_{g,\text{CO}_2} T_1} = 2.425 \text{ kg}, \text{ 混合气体折合气体常数 } R_g = \sum w_i R_{g_i},$$

$$\text{因 } R_g = \frac{m_1}{m_1 + m_{\text{in}}} R_{g,\text{CO}_2} + \frac{m_{\text{in}}}{m_1 + m_{\text{in}}} R_{g,N_2}, \text{ 而 } m_2 = m_1 + m_{\text{in}},$$

$$T_2 = \frac{p_2 V}{m_2 R_g}, \text{ 故可求得充入气体质量与终态温度的关系式。取容器内为控制体积,}$$

$\delta Q = dU + h_{\text{out}} \delta m_{\text{out}} - h_{\text{in}} \delta m_{\text{in}} + \delta W_i$ ，据题意 $\delta Q = 0$ 、 $\delta W_i = 0$ 、 $\delta m_{\text{out}} = 0$ ，能量守恒式简化

为， $0 = U_2 - U_1 - h_{\text{in}} \delta m_{\text{in}}$ ，其中 $U_1 = m_1 c_{v,\text{CO}_2} T_1$ 、 $U_2 = U_{2,\text{CO}_2} + U_{2,N_2} = m_1 c_{v,\text{CO}_2} T_2 + m_{\text{in}} c_{v,N_2} T_2$ 联

立求解并考虑到 $h_{\text{in}} = c_{p,N_2} T_L$ ，得 $R_g = 0.2167 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ， $T_2 = 388.9\text{K}$ 、 $m_{\text{in}} = 0.83779 \text{ kg}$ ，

$m_2 = 3.26279 \text{ kg}$ 。

12-6 同例 12-2，氧气和氮气绝热混合，求混合过程 损失。设环境温度为 $T_0 = 298\text{K}$ 。

提示和答案：绝热过程 $S_f = 0$ ， $\Delta S = S_g$ ， 损失为 $I = T_0 S_g = 249.3 \text{ kJ}$ 。

***12-7** 刚性绝热容器中放置一个只能透过氧气，而不能透过氮气的半渗透膜，如图 12-2

所示。两侧体积各为 $V_A = 0.15\text{m}^3$ ， $V_B = 1\text{m}^3$ ，渗透开始前左

侧氧气压力 $p_{A1} = 0.4\text{MPa}$ ，温度 $T_{A1} = 300\text{K}$ ，右侧为空气

$p_{B1} = 0.1\text{MPa}$ 、 $T_{B1} = 300\text{K}$ ，这里空气中含有的氧气和氮气

的摩尔分数各为 0.22 和 0.78。通过半渗透膜氧气最终将均匀

占据整个容器，试计算：(1) 渗透终了 A 中氧气的量 $n_{O_2}^A$ ；(2) B 中氧气和氮气混合物的压

力以及各组元的摩尔分数 x_{O_2} 、 x_{N_2} ；(3) 渗透前后系统熵变 ΔS 。

提示和答案：初态 A 和 B 中物质的量 $n_{O_2}^A = \frac{p_1^A V_A}{RT_A} = 24.05\text{mol}$ 、 $n_{\text{air}}^B = \frac{p_1^B V_B}{RT_B} = 40.09\text{mol}$ ，

A 和 B 两侧氧气的量 $n_{O_2} = n_{O_2}^A + n_{O_2}^B = 32.87\text{mol}$ 。取 A 和 B 为热力系，是封闭系，因 $Q = 0$ 、

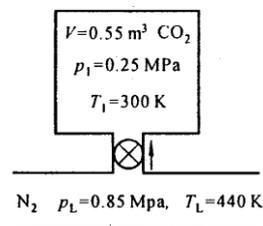


图 12-1

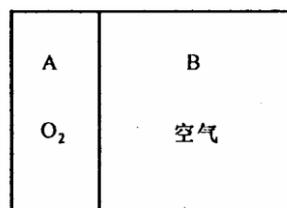


图 12-2

$W=0$, 由能量守恒方程可得 $\Delta U=0$, $U_2=U_1$, 得 $T=T_A=T_B=300\text{K}$ 。氧气由 A 渗透到 B,

使 A 和 B 中氧气均匀分布, 渗透后氧气的压力 $p_{\text{O}_2} = \frac{n_{\text{O}_2} RT}{V_A + V_B} = 71.3\text{kPa}$, A 侧压力即为剩余

O_2 的压力 $p_2^{\text{A}} = p_{\text{O}_2} = 71.3\text{kPa}$, $n_{\text{O}_2}^{\text{A}} = \frac{p_2^{\text{A}} V_A}{RT} = 4.287\text{mol}$; B 侧 O_2 的量为

$n_{\text{O}_2}^{\text{B}} = n_{\text{O}_2} - n_{\text{O}_2}^{\text{A}} = 28.583\text{mol}$, 通过半透膜由 A 进入到 B 的 O_2 的量为

$\Delta n_{\text{O}_2} = n_{\text{O}_2}^{\text{A}} - n_{\text{O}_2}^{\text{B}} = 19.763\text{mol}$ 。终态 B 侧为 28.583 mol O_2 与 31.27 mol N_2 组成的混合物

59.853vmol, 压力 $p_2^{\text{B}} = \frac{n_2^{\text{B}} RT}{V_B} = 149293.4\text{Pa}$, 其中 $x_{\text{O}_2}^{\text{B}} = \frac{n_{\text{O}_2}^{\text{B}}}{n_2^{\text{B}}} = 0.4776$ 、 $x_{\text{N}_2}^{\text{B}} = \frac{n_{\text{N}_2}^{\text{B}}}{n_2^{\text{B}}} = 0.5224$,

$p_{\text{O}_2}^{\text{B}} = x_{\text{O}_2}^{\text{B}} p_2^{\text{B}} = 71.3\text{kPa}$ 、 $p_{\text{N}_2}^{\text{B}} = x_{\text{N}_2}^{\text{B}} p_2^{\text{B}} = 78.0\text{kPa}$ 。系统熵变分四部分: 留在 A 中的 O_2 , 渗透到 B 内的 O_2 , B 中原有的 O_2 , B 中原有的 N_2 的熵变之和,

$$\Delta S_{12} = n_{\text{O}_2}^{\text{A}} [S_{\text{m},\text{O}_2}(p_2^{\text{A}} T) - S_{\text{m},\text{O}_2}(p_1^{\text{A}} T_A)] + \Delta n_{\text{O}_2}^{\text{A}} [S_{\text{m},\text{O}_2}(p_{\text{O}_2}^{\text{B}} T) - S_{\text{m},\text{O}_2}(p_{\text{O}_2}^{\text{A}} T_A)] + n_{\text{O}_2}^{\text{B}} [S_{\text{m},\text{O}_2}(p_{\text{O}_2}^{\text{B}} T) - S_{\text{m},\text{O}_2}(p_{\text{O}_2}^{\text{B}} T_B)] + n_{\text{N}_2}^{\text{B}} [S_{\text{m},\text{N}_2}(p_{\text{N}_2}^{\text{B}} T) - S_{\text{m},\text{N}_2}(p_{\text{N}_2}^{\text{B}} T_B)]$$

注意到 $T=T_A=T_B=300\text{K}$, 氧气熵变中温度项为零, 氮气温度和分压力均不变, 解得

$$\Delta S_{1-2} = 258.6\text{J/K}。$$

12-8 设大气压力 $p_b = 0.1\text{MPa}$, 温度 $t = 28^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\varphi = 0.72$, 试用饱和空气状态参数表确定空气的 p_v 、 t_d 、 d 、 h 。

提示和答案: 由 $t = 28^\circ\text{C}$ 求得 $p_v = \varphi p_s = 2.720\text{kPa}$, 进而得 $t_d = t_s(p_v) = 22.47^\circ\text{C}$ 、

$$d = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0.0174 \text{ kg/kgDA}、h = 1.005t + d(2501 + 1.86t) = 72.56\text{kJ/kgDA}。$$

12-9 设压力 $p = 0.1\text{MPa}$, 填充下列六种状态的空格。

提示和答案: 如表。

| | $t/^\circ\text{C}$ | $t_w/^\circ\text{C}$ | $\varphi/\%$ | $d/\text{kg(水蒸汽)/kg(干空气)}$ | $t_d/^\circ\text{C}$ |
|---|--------------------|----------------------|--------------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 25 | 16.1 | 40 | 0.0079 | 10 |
| 2 | 20 | 15 | 60 | 0.0088 | 12 |
| 3 | 20 | 14 | 52.5 | 0.0077 | 10 |
| 4 | 30 | 26.1 | 73.5 | 0.020 | 24.7 |
| 5 | 20 | 20 | 100 | 0.0149 | 20 |
| 6 | 22 | 16.8 | 60 | 0.010 | 13.96 |

12-10 湿空气 $t = 35^\circ\text{C}$, $t_d = 24^\circ\text{C}$, 总压力 $p = 0.10133\text{MPa}$, 求: (1) φ 和 d ; (2)

$h-d$ 上读得: $p_v = 1.2\text{kPa}$ 、 $d = 0.77\text{kg/kgDA}$ 、 $t_d = 9^\circ\text{C}$ 、 $h = 40\text{kJ/kgDA}$ 、 $\varphi_B = 52\%$ 。

利用水蒸汽表(或饱和湿空气表)。查表得 $p_s(20^\circ\text{C}) = 2.337\text{kPa}$ 、 $p_s(14^\circ\text{C}) = 1.597\text{kPa}$ 。A

为饱和状态, $\varphi = 100\%$, $t = t_w = t_d$, $p_{v,A} = 1.597\text{kPa}$ 。

$$d_A = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0.0101 \text{ kg/kgDA}, \quad h_A = 1.005t_A + d_A(2501 + 1.86t_A) = 39.58\text{kJ/kg}。$$

由于等湿球温度线与等焓线近似重合, 故待求状态点 B 的焓 $h_B \approx h_A = 39.58\text{kJ/kg}$ 。即

$h_B = 1.005t_B + d_B(2501 + 1.86t_B) = 39.58\text{kJ/kg}$, 解得 $d_B = 0.00767 \text{ kg/kgDA}$ 。而

$$d_B = 0.622 \frac{p_{v,B}}{p - p_{v,B}}, \quad \text{故 } p_{v,B} = 1.22\text{kPa}, \quad \varphi_B = \frac{p_{v,B}}{p_s(B)} = 52.2\%。$$

12-13 室内空气的 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 、 $\varphi_1 = 40\%$, 与室外 $t_2 = -10^\circ\text{C}$ 、 $\varphi_2 = 80\%$ 的空气相混合, 已知 $q_{m,a1} = 50\text{kg/s}$ 、 $q_{m,a2} = 20\text{kg/s}$, 求混合后湿空气状态 t_3 、 φ_3 、 h_3 。

提示和答案: 由室内外空气的温度和相对湿度从水蒸汽热力性质表(或饱和湿空气表)确定 $d_1 = 0.005869$ 、 $d_2 = 0.001291 \text{ kg/kgDA}$ 、 $h_1 = 30.5\text{kJ/kgDA}$ 和 $h_2 = -6.844\text{kJ/kgDA}$ 等参数, 再由能量守恒方程 $q_{m,a1}h_1 + q_{m,a2}h_2 = (q_{m,a1} + q_{m,a2})h_3$ 和质量守恒方程 $q_{m,a1}d_1 + q_{m,a2}d_2 = (q_{m,a1} + q_{m,a2})d_3$ 得 $h_3 = 23.04\text{kJ/kgDA}$ 、 $d_3 = 0.004561 \text{ kg/kgDA}$, 进

而, 因 $h_3 = c_{p,a}t_3 + d_3(2501 + c_{p,v}t_3)$, 得 $t_3 = \frac{h_3 - 2501d_3}{c_{p,a} + c_{p,v}} = 11.48^\circ\text{C}$; $d_3 = 0.622 \frac{p_{v,3}}{p - p_{v,3}}$, 解

得 $p_{v,3} = 0.733 \text{ kPa}$, 并查出 $p_s(t_3) = 1.335 \text{ kPa}$, 所以 $\varphi_3 = \frac{p_{v,3}}{p_s(t_3)} = 54.1\%$ 。

12-14 湿空气体积流率 $q_v = 15\text{m}^3/\text{s}$ 、 $t_1 = 6^\circ\text{C}$ 、 $\varphi = 60\%$, 总压力 $p = 0.1\text{MPa}$, 进入加热装置, (1) 温度加热到 $t_2 = 30^\circ\text{C}$, 求 φ_2 和加热量 Q ; (2) 再经绝热喷湿装置, 使其相对湿度提高到 $\varphi_3 = 40\%$, 喷水温度 $t_{w,i} = 22^\circ\text{C}$, 求喷水量。(喷水带入的焓值忽略不计, 按等焓过程计算)

提示和答案: (1) 加热过程为等 d 过程, $d_1 = 0.622 \frac{\varphi_1 p_{s1}}{p - \varphi_1 p_{s1}} = 0.00351 \text{ kg/kgDA}$, 由

$d_2 = d_1 = 0.622 \frac{\varphi_2 p_{s2}}{p - \varphi_2 p_{s2}}$ ，解得 $\varphi_2 = 13.22\%$ ， $h_2 = c_{p,a} t_2 + d_2 h''(t_2) = 39.12 \text{ kJ/kgDA}$ ，湿

空气折合气体常数 $R_g = \frac{R_{g,a} + R_{g,v} d}{1+d} = 287.6 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 、空气质流量

$q_m = \frac{p q_v}{R_g T_1} = 18.6938 \text{ kg/s}$ ，其中干空气的质量流量 $q_{m,a} = \frac{1}{1+d} q_m = 18.6284 \text{ kg/s}$ ，水蒸气

质量流量 $q_{m,v} = q_m - q_{m,a} = 0.06536 \text{ kg/s}$ ，加热量 $\Phi = q_{m,a} (h_2 - h_1) = 452.11 \text{ kJ/s}$ ；(2) 喷水

加湿过程为等 h 过程， $h_3 = h_2$ ，

$$h_3 = c_{p,a} t_3 + d_3 h''(t_3) \quad (\text{a})$$

$$d_3 = 0.622 \frac{\varphi_3 p_s(t_3)}{p - \varphi_3 p_s(t_3)} \quad (\text{b})$$

已知 $\varphi_3 = 40\%$ ，设定 t_3 ，查得 $h''(t_3)$ 、 $p_s(t_3)$ 代入式 (b)，再代入式 (a)，迭代直至 (a) 式

两侧相等得 $t_3 = 22$ 、 $d_3 = 0.0066496 \text{ kg/kgDA}$ ，喷水量

$q_{m,v} = q_{m,a} (d_3 - d_2) = 0.0585 \text{ kg/s}$ 。

12-15 $p = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $\varphi_1 = 60\%$ 、 $t_1 = 32^\circ \text{C}$ 的湿空气，以 $q_{m,a} = 1.5 \text{ kg/s}$ 的质量流量进入到制冷设备的蒸发盘管，被冷却去湿，以 15°C 的饱和湿空气离开。求每秒钟的凝水量 $q_{m,w}$ 及放热量 Φ 。

提示和答案：由水蒸气热力性质表， $t_1 = 32^\circ \text{C}$ 、 $t_2 = 15^\circ \text{C}$ 时分别有：

$p_s(t_1) = 4.7574 \text{ kPa}$ 、 $h_{v1} = h''(t_1) = 2558.96 \text{ kJ/kg}$ ； $p_s(t_2) = 1.7053 \text{ kPa}$ 、

$h_{v2} = h''(t_2) = 2528.07 \text{ kJ/kg}$ 。离开蒸发盘管的空气 $\varphi = 1$ ，

$d_1 = 0.622 \frac{\varphi_1 p_{s1}}{p - \varphi_1 p_{s1}} = 0.01828 \text{ kg/kgDA}$ ， $d_2 = 0.622 \frac{\varphi_2 p_{s2}}{p - \varphi_2 p_{s2}} = 0.01079 \text{ kg/kgDA}$ ，凝水

量 $q_{m,w} = q_{m,a} (d_1 - d_2) = 0.0112 \text{ kg/s}$ ， $h_1 = c_{p,a} t_1 + d_1 h''(t_1) = 78.94 \text{ kJ/kgDA}$ ，

$h_2 = c_{p,a} t_2 + d_2 h''(t_2) = 42.35 \text{ kJ/kgDA}$ ， $\Phi = q_{m,a} (h_1 - h_2) = 54.9 \text{ kJ/s}$ 。

12-16 湿空气温度为 30°C ，压力为 100 kPa ，测得露点温度为 22°C ，计算其相对湿度及

含湿量。

提示和答案：从饱和空气表（或饱和水和水蒸气表）查得 $t = 30^\circ\text{C}$ 的饱和压力 $p_s = 4.2417\text{kPa}$ ，露点（ 22°C ）水蒸气分压力等于饱和压力， $p_s = 2.6596\text{kPa} = p_v$ ，

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s} = 62.7\%、d = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0.017 \text{ kg/kgDA}。$$

12-17 压力为 $p_1 = 0.1\text{MPa}$ ，温度为 $t_1 = 30^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\varphi_1 = 0.6$ 的湿空气在活塞式压缩机内压缩后，压力升至 $p_2 = 0.2\text{MPa}$ ，（1）若压缩过程绝热；（2）若压缩过程等温，分别求压缩后湿空气的相对湿度 φ_2 ，含湿量 d_2 。

提示和答案： $t = 30^\circ\text{C}$ ， $p_s = 4.241$ ，初态 $p_{v1} = \varphi p_s = 2.544$ 、

$$d_1 = 0.622 \frac{p_{v1}}{p_1 - p_{v1}} = 0.162 \text{ kg/kgDA}、x_{v1} = \frac{p_{v1}}{p} = 0.0255、x_{a1} = 0.9745。湿空气可作为$$

理想气体，（1）压缩过程绝热， $T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 369.4\text{K}$ ，由于湿空气过程中干空气质量不变，若压缩过程有水蒸气凝结将使水蒸气的摩尔分数下降，假定压缩过程水蒸气质量不变，即 $x_{v2} = x_{v1}$ ，将得到水蒸气分压力的最大值。 $x_{v2} p_2 = 5.100 \text{ Pa}$ ， $T = 369.4 \text{ K}$ ，

$$p_s = 89.0 \text{ kPa} > 5.1\text{kPa}，故 $p_{v2} = 5.100 \text{ Pa}$ 。 $\varphi_2 = \frac{p_{v2}}{p_{s2}} = 0.057、d_2 = 0.0163 \text{ kg/kgDA}；$$$

（2）压缩过程等温，仍可假定压缩过程水蒸气和干空气质量不变， $x_{v2} = x_{v1}$ ，则 $p_{v2} = x_{v2} p_2 = 5.100 \text{ Pa} > p_s$ ，假定错误，所以， $p_{v2} = p_{s2}$ ， $\varphi_2 = 1$ ， $d_2 = 0.0135 \text{ kg/kgDA}$ 。

12-18 烘干装置入口处湿空气 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 、 $\varphi_1 = 30\%$ 、 $p = 0.1013\text{MPa}$ ，加热到 $t_2 = 85^\circ\text{C}$ 后送入烘房，烘房出口温度 $t_3 = 35^\circ\text{C}$ 。试计算从湿物体中吸收 1kg 水分所需干空气质量和加热量。

提示和答案：烘干装置加热过程为等含湿量过程，吸湿过程为等焓过程。在 $h-d$ 图中 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 、 $\varphi_1 = 30\%$ 两条等值线交于点 1，读出 $d_1 = 0.0045 \text{ kg/kgDA}$ 、 $h_1 = 31.4 \text{ kJ/kgDA}$ 。

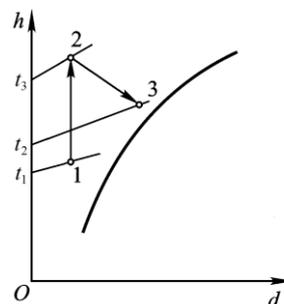


图 12-4

过程 1-2 等 d ，与 $t_2 = 85^\circ\text{C}$ 等温度线交于点 2 读出 $h_2 = 96.3 \text{ kJ/kgDA}$ 。过程 1-3 等 h ，与

$t_3 = 35^\circ\text{C}$ 等温线交于 3, 读出 $d_3 = 0.024 \text{ kg/kgDA}$ 。所以每 kg 干空气吸收水分分为 $\Delta d = d_3 - d_1 = 0.0195 \text{ kg/kgDA}$, 每吸收 1kg 水分需要干空气气量 $m_a = 51.3 \text{ kg}$, 每 kg 干空气需加热量 $q = h_2 - h_1 = 64.9 \text{ kJ/kgDA}$, 每吸收 1kg 水分需加热 $Q = m_a q = 3329 \text{ kJ}$ 。

12-19 某干燥作业流程如图 12-5 所示, 现测得温度为 30°C , 露点温度为 20°C , 流量为 $1000\text{m}^3/\text{h}$ 的湿空气在冷却器中除去水分 2.5kg/h 后, 经预热器预热到 50°C 后进入干燥器, 操作在常压 ($p_b = 100\text{kPa}$) 下进行, 试求: (1) 流出冷却器空气的温度和含湿量; (2) 流出预热器空气的相对湿度。

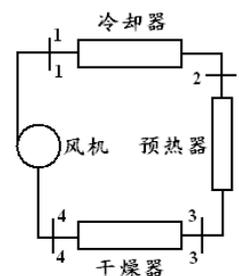


图 12-5

提示和答案: (1) 状态 1 空气 $p_{s,30^\circ\text{C}} = 4.24 \text{ kPa}$,

$p_{v1} = p_{s,20^\circ\text{C}} = 2.337 \text{ kPa}$; 状态 3 $p_{s,50^\circ\text{C}} = 12.335 \text{ kPa}$ 。

$\phi_1 = \frac{p_{v1}}{p_{s1}} = 0.551$, $p_{a1} = p_1 - p_{v1} = 97.663\text{kPa}$, $d_1 = 0.622 \frac{p_{v1}}{p_{a1}} = 0.01488 \text{ kg/kgDA}$,

$q_{m,a} = \frac{p_{a1} q_v}{R_{g,a} T_1} = 0.312 \text{ kgDA/s}$; 状态 2, $q_{m,v2} = q_{m,a} d_1 - q_{m,w} = 0.00395\text{kg/s}$,

$d_2 = \frac{q_{m,v2}}{q_{m,a}} = 0.01266 \text{ kg/kgDA}$, $p_{v2} = \frac{p_2 d_2}{0.622 + d_2} = 1.995 \text{ kPa}$ 。冷却器中进行冷却去湿的

过程, 流出冷却器的空气处于饱和状态, 故 $p_{s2} = p_{v2} = 1.995 \text{ kPa}$, 插值得 $t_2 = 17^\circ\text{C}$ 。(2)

预热器中进行等 d 过程, $d_3 = d_2 = 0.01266 \text{ kg/kgDA}$ 。 $d = 0.622 \frac{p_v}{p_b - p_v}$, 因 p_b 不变,

所以 $p_{v3} = p_{v2} = 1.995 \text{ kPa}$, $\phi_3 = \frac{p_{v3}}{p_{s3}} = 16.2\%$ 。

12-20 某厂一台机械通风冷却塔供应工艺用循环冷却水。已知热水流量为 190 kg/s , 温度为 40°C , 设计出口处冷水水温为 29°C , 流量 190 kg/s , 湿空气进口参数, $p_1 = 0.1\text{MPa}$ 、 $t_1 = 24^\circ\text{C}$ 、 $\phi_1 = 50\%$, 流出时为 $t_2 = 31^\circ\text{C}$ 的饱和湿空气, 为保持水流量稳定, 向底部冷却水中充入补充水, 补充水温

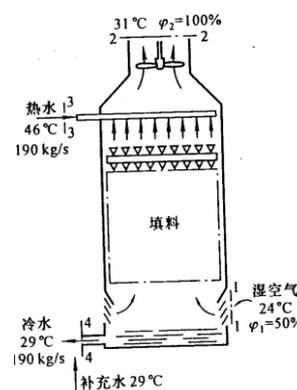


图 12-6

度为 $t_1 = 29^\circ\text{C}$ ，如图 12-6 所示。已知干空气和水蒸气的气体常数及比定压热容为 $c_{p,v} = 1.86\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $c_{p,a} = 1005\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $R_{g,a} = 287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $R_{g,v} = 462\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。求：
 (1) 干空气质量流量 $q_{m,a}$ ；(2) 补充水质量流量 $q_{m,w}$ 。

提示和答案：由进出的空气和水的参数查水蒸气热力性质表可求得含湿量、焓等参数，
 $p_s(t_1) = 2.984\ 6\ \text{kPa}$ ， $p_s(t_2) = 4.494\ 9\ \text{kPa}$ ， $h_{w3} = h'(t_3) = 192.60\ \text{kJ/kg}$ ，
 $h_2 = h_{w4} = h'(t_4) = 121.50\ \text{kJ/kg}$ 。 $d_1 = 0.622 \frac{\varphi_1 p_s(t_1)}{p - \varphi_1 p_s(t_1)} = 0.009\ 423\ \text{kg/kgDA}$ ，
 $h_1 = 1.005t_1 + d_1(2501 + 1.86t_1) = 48.11\ \text{kJ/kgDA}$ ， $d_2 = 0.029\ 27\ \text{kg/kgDA}$ ，
 $h_2 = 106.05\ \text{kJ/kgDA}$ ，由能量守恒方程 $q_{m,a}h_1 + q_{m3}h_{w3} + q_{m,w}h_L = q_{m,a}h_2 + q_{m4}h_{w4}$ ，可出
 $q_{m,a} = 233.20\ \text{kg/s}$ ，进而得补充水量 $q_{m,w} = q_{m,a}(d_2 - d_1) = 4.63\ \text{kg/s}$ 。

12-21 实验室需安装空调系统，它由冷却去湿器和加热器组成，如图 12-7 所示，已知入口空气参数为 $p_1 = 0.1\text{MPa}$ 、 $t_1 = 32^\circ\text{C}$ 、 $\varphi_1 = 80\%$ ，体积流率 $q_v = 800\text{m}^3/\text{min}$ ，经冷却盘管冷却到饱和湿空气后，继续冷却到 10°C ，这时有冷凝水输出，凝水量 $q_{m,w} = \Delta q_{m,v} = q_{m,a}(d_1 - d_2)$ ，然后进入加热器，加热到相对湿度 $\varphi_3 = 40\%$ 时离开空调系统。求：(1) d_1 、 h_1 、 d_2 、 h_2 ；(2) 在冷却去湿器中放热量 Φ_{1-2} 及加热器中吸热量 Φ_{2-3} ；(3) 凝水流率 $q_{m,w}$ 。

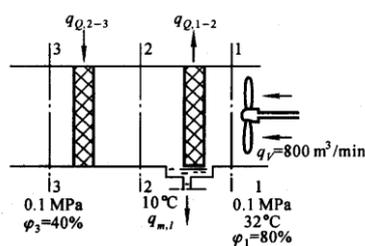


图 12-7

提示和答案：湿空气冷却过程含湿量不变，达到饱和后继续冷却则含湿量下降；冷却去湿器中放热量及加热器中吸热量均为焓差。查附表

14 得各参数，计算得 $d_1 = 0.622 \frac{\varphi_1 p_{s1}}{p - \varphi_1 p_{s1}} = 0.024\ 59\ \text{kg/kgDA}$ 、 $d_2 = 0.007\ 727\ \text{kg/kgDA}$ 、

$h_1 = 1.005t_1 + d_1(2501 + 1.86t_1) = 95.123\ \text{kJ/kgDA}$ 、 $h_2 = 29.52\ \text{kJ/kgDA}$ ；冷却去湿器中

$q_{m,a} = \frac{(p - \varphi_1 p_{s1})q_v}{R_{g,a}T_1} = 14.65\ \text{kg/s}$ ， $h_{w,2} \approx c_w t_2 = 41.87\ \text{kJ/kg}$ ，列能量方程：

$\Phi_{1-2} = q_{m,a}(h_1 - h_2) + q_{m,a}(d_1 - d_2)h_{w,2}$ ，放热量 $\Phi_{1-2} = 971.43\ \text{kJ/s}$ ，加热器中，

$d_3 = d_2 = 0.007\ 727\ \text{kg/kgDA}$ ，解得 $p_{v3} = 1.227\ \text{kPa}$ ， $p_{s3} = \frac{p_{v3}}{\varphi_3} = 3.067\ 6\ \text{kPa}$ 。查得

$t_3(p_{s3}) = 24.5\ ^\circ\text{C}$ 。计算有 $h_3 = 44.30\ \text{kJ/kgDA}$ ，吸热量 $\Phi_{2-3} = q_{m,a}(h_3 - h_2) = 216.4\ \text{kJ/s}$ ；凝

水流量 $q_{m,w} = q_{m,a}(d_1 - d_2) = 0.247\ \text{kg/s}$ 。

12-22 编写一个程序，用来确定大气压力 p_b 下湿空气的性质。(1) 按输入 t 、 φ 、 p_b ，输出 d 、 h 、 p_v 、 t_d 、 v ；(2) 按输入 t 、 t_w 、 p_b 输出 h 、 d 、 p_v 、 φ 、 t_d 、 v 。

提示：解题思路和公式：

(1) 输入 $R_{g,a}$ [kJ/(kg·K)]、 $R_{g,v}$ [kJ/(kg·K)]、 t ($^\circ\text{C}$)、 φ (%)、 p_b (kPa)

$$\{p_s\}_{\text{kPa}} = \frac{2}{15} \exp \left[18.5916 - \frac{3991.11}{\{t\}_{\text{C}} + 233.84} \right]$$

$$d = 0.622 \frac{\varphi p_s}{p_b - \varphi p_s} \text{ kg/kgDA}$$

$$\{h\}_{\text{kJ/kgDA}} = 1.005 \{t\}_{\text{C}} + d(2501 + 1.86 \{t\}_{\text{C}})$$

$$p_v = \varphi p_s \text{ kPa}$$

$$\{t_d\}_{\text{C}} = \frac{3\ 991.11}{18.591\ 6 - \ln \frac{15}{2} \{p_v\}_{\text{kPa}}} - 233.84$$

$$R_g = \frac{1}{1+d} R_{g,d} + \frac{d}{1+d} R_{g,v}$$

$$v = \frac{R_g(t+273)}{p_b} (1+d)$$

输出 d 、 h 、 p_v 、 t_d 、 v 。

(2) 输入 $R_{g,a}$ [kJ/(kg·K)]、 $R_{g,v}$ [kJ/(kg·K)]、 t ($^\circ\text{C}$)、 t_w ($^\circ\text{C}$)、 p_b (kPa)。

$$p_b = p_0 (p_0 = 101.3\ \text{kPa})$$

$$\{h_0\}_{\text{kJ/kgDA}} = -7.495628 + 0.7937629 \{t_w\}_{\text{C}} + 16.93575 \exp(0.053106 \{t_w\}_{\text{C}})$$

若 $p_b \neq p_0$ ($p_0 = 101.3\ \text{kPa}$) 则按下式修改

$$\{h\}_{\text{kJ/kgDA}} = 1.005 \{t_w\}_{\text{C}} \left(1 - \frac{101.3}{\{p_b\}_{\text{kPa}}} \right) + \{h_0\}_{\text{kJ/kgDA}} \left(\frac{101.3}{\{p_b\}_{\text{kPa}}} \right)$$

$$d_s = \frac{h - 1.005t}{(2501 + 1.86t)}$$

再由 $1.005t + d(2501 + 1.86t) + 4.1868t_w(d_s - d) = h(t_w)$ 解出 d 。

$$\{p_v\}_{\text{kPa}} = \left(\frac{\{d\}_{\text{kg/kgDA}}}{0.622} \{p_b\}_{\text{kPa}} \right) / \left(1 + \frac{\{d\}_{\text{kg/kgDA}}}{0.622} \right)$$

$$\{p_s\}_{\text{kPa}} = \frac{2}{15} \exp \left[18.5916 - \frac{3991.11}{\{t\}_{\text{C}} + 233.84} \right]$$

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s(t)}$$

$$\{t_d\}_{\text{C}} = \frac{3991.11}{18.5916 - \ln \frac{15}{2} \{p_v\}_{\text{kPa}}} - 233.84$$

$$R_g = \frac{R_{g,a} + R_{g,v}d}{1 + d}$$

$$v = \frac{R_g T}{p_b} (1 + d)$$

输出 h 、 d 、 p_v 、 φ 、 t_d 、 v 。

12-23 利用上题确定湿空气性质的程序，编写一个计算冷却去湿过程的放热量 Φ_{1-2} 和加热量 Φ_{2-3} 的程序，用来计算习题 12-21。

提示： 解题思路和计算公式：

输入： t_1 、 t_2 、 φ_1 、 $\varphi_2 (=1)$ 、 φ_3 、 p_b 、 q_v

$$\{p_s\}_{\text{kPa}} = \frac{2}{15} \exp \left[18.5916 - \frac{3991.11}{\{t\}_{\text{C}} + 233.84} \right]$$

$$\{d\}_{\text{kg/kgDA}} = 0.622 \frac{\varphi \{p_s\}_{\text{kPa}}}{\{p_b\}_{\text{kPa}} - \varphi \{p_s\}_{\text{kPa}}}$$

将 t_1 、 t_2 、 φ_1 、 φ_2 代入得 p_{s1} 、 p_{s2} 、 d_1 、 d_2 。

$$\{h\}_{\text{kJ/kgDA}} = 1.005\{t\}_{\text{°C}} + d(2501 + 1.86\{t\}_{\text{°C}})$$

代入 t_1 、 t_2 、 d_1 、 d_2 数据，得 h_1 、 h_2 。

$$q_{m,a} = \frac{(p_b - \varphi_1 p_{s1}) q_v}{R_{g,a} T_1}$$

$$\Phi_{1-2} = q_{m,a} [h_1 - h_2 + (d_1 - d_2) c_w t_2]$$

$$p_{v3} = \frac{d_3}{0.622} p_b / \left(1 + \frac{d_3}{0.622} \right)$$

$$p_{s3} = \frac{p_{v3}}{\varphi_3}$$

$$\{t_3\}_{\text{°C}} = \frac{3991.11}{18.5916 - \ln \frac{15}{2} \{p_{s3}\}_{\text{kPa}}} - 233.84$$

$$\{h\}_{\text{kJ/kgDA}} = 1.005\{t\}_{\text{°C}} + d(2501 + 1.86\{t\}_{\text{°C}})$$

$$\Phi_{2-3} = q_{m,a} (h_3 - h_2)$$

$$q_{m,w} = q_{m,a} (d_1 - d_3)$$

输出： Φ_{1-2} 、 Φ_{2-3} 、 $q_{m,w}$ 。