

## 第十二章 理想气体混合物及湿空气

## 习 题

**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。 $m = 7.51\text{kg}$ ， $V_0 = 4.67\text{m}^3$  (标准状态)。

**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：**  $w_{\text{CO}_2} = 0.056$ 、 $w_{\text{H}_2\text{O}} = 0.020$ 、 $w_{\text{O}_2} = 0.163$ 、 $w_{\text{N}_2} = 0.761$ ；  
 $R_g = 288\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； $M = 28.87 \times 10^{-3}\text{kg}/\text{mol}$ ； $x_{\text{CO}_2} = 0.037$ 、 $x_{\text{O}_2} = 0.147$ 、 $x_{\text{H}_2\text{O}} = 0.032$ 、  
 $x_{\text{N}_2} = 0.784$ ； $p_{\text{CO}_2} = 0.0111\text{MPa}$ 、 $p_{\text{O}_2} = 0.0441\text{MPa}$ 、 $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0.0096\text{MPa}$ 、  
 $p_{\text{N}_2} = 0.2352\text{MPa}$ 。

**12-3** 烟气进入锅炉第一段管群时温度为  $1200^\circ\text{C}$ ，流出时温度为  $800^\circ\text{C}$ ，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为： $\varphi_{\text{CO}_2} = 0.12$ ， $\varphi_{\text{H}_2\text{O}} = 0.08$ ，其余为  $\text{N}_2$ 。

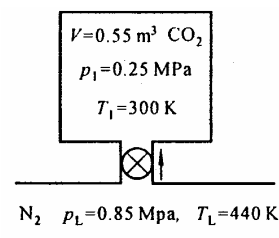
**提示和答案：**  $x_i = \varphi_i$ ，混合气体的热容  $C_{p,m} = \sum x_i C_{p,m,i}$ ， $Q_p = -149.76\text{kJ}$ 。

**12-4** 流量为 3mol/s 的  $\text{CO}_2$ ，2mol/s 的  $\text{N}_2$  和 4.5mol/s 的  $\text{O}_2$  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  $76.85^\circ\text{C}$ ， $0.7\text{MPa}$ ，混合气流的总压力  $p = 0.7\text{MPa}$ ，温度仍为  $t = 76.85^\circ\text{C}$ 。借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  $\Delta H$  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，列稳定流动能量方程， $Q = 0$ ， $W_i = 0$  不计动能差、位能差得  $\Delta H = 0$ ，熵变计算中注意分压力。 $p_{\text{CO}_2} = 0.2211 \text{ MPa}$ 、 $p_{\text{N}_2} = 0.1473 \text{ MPa}$ 、 $p_{\text{O}_2} = 0.3156 \text{ MPa}$ ； $\dot{H} = 100567.63 \text{ J/s}$ ； $\dot{\Delta S} = 82.62 \text{ kJ/(K} \cdot \text{s)}$ ；若为几股同种气流， $\Delta S = 0$ 。

**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  $\text{CO}_2$ ， $\text{N}_2$  气在输气管道中流动，参数保持  $p_L = 0.85 \text{ MPa}$ 、 $T_L = 440 \text{ K}$ ，如图 12-23 所示，打开阀门充入  $\text{N}_2$ ，直到容器中混合物压力达  $p_2 = 0.5 \text{ MPa}$  时关闭阀门。充气



题 12-5 附图

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， $c_{v,\text{N}_2} = 751 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ，

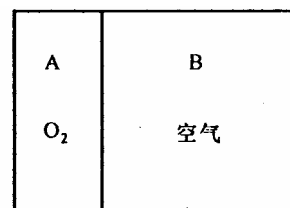
$c_{p,\text{N}_2} = 1048 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ； $c_{v,\text{CO}_2} = 657 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ， $c_{p,\text{CO}_2} = 846 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

**提示和答案：**由混合气体折合气体常数  $R_g = \sum w_i R_{gi}$ ，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，列能量守恒式，联立求解得  $T_2 = 388.9 \text{ K}$ 、 $m_2 = 3.262 \text{ kg}$ 。

**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  $I = T_0 S_g = 245.5 \text{ kJ}$ 。

**\*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，见图 12-24 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



题 12-7 附图

据整个容器，试计算：(1) 渗透终了 A 中氧气的量  $n_{\text{O}_2}^4$ ；(2) B 中氧气和氮气混合物的压力以及各组元的摩尔分数  $x_{\text{O}_2}$ 、 $x_{\text{N}_2}$ ；(3) 渗透前后系统熵变  $\Delta S$ 。

提示和答案：初态A和B中物质的量  $n_{O_2}^{A_1} = \frac{p_1^A V_A}{RT_A} = 24.05 \text{ mol}$ 、 $n_{\text{air}}^{B_1} = \frac{p_1^B V_B}{RT_B} = 40.09 \text{ mol}$ ，

A和B两侧氧气的量  $n_{O_2} = n_{O_2}^{A_1} + n_{O_2}^{B_1} = 32.87 \text{ mol}$ 。取A和B为热力系，是封闭系，因  $Q = 0$ 、 $W =$

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  $p_{O_2} = \frac{n_{O_2} RT}{V_A + V_B} = 71.3 \text{ kPa}$ ，A侧压力即为剩余O<sub>2</sub>的

压力  $p_2^{A_2} = p_{O_2} = 71.3 \text{ kPa}$ ， $n_{O_2}^{A_2} = \frac{p_2^{A_2} V_A}{RT} = 4.287 \text{ mol}$ ；B侧O<sub>2</sub>的量为

$n_{O_2}^{B_2} = n_{O_2} - n_{O_2}^{A_2} = 28.583 \text{ mol}$ ，通过半透膜由A进入到B的O<sub>2</sub>的量为

$\Delta n_{O_2} = n_{O_2}^{A_1} - n_{O_2}^{A_2} = 19.763 \text{ mol}$ 。终态B侧为 28.583 mol O<sub>2</sub>与 31.27 mol N<sub>2</sub>组成的混合物

59.853vmol，压力  $p_2^B = \frac{n_2^B RT}{V_B} = 149293.4 \text{ Pa}$ ，其中  $x_{O_2}^{B_2} = \frac{n_{O_2}^{B_2}}{n_2^B} = 0.4776$ 、 $x_{N_2}^{B_2} = \frac{n_{N_2}^{B_2}}{n_2^B} = 0.5224$ ，

$p_{O_2}^{B_2} = x_{O_2}^{B_2} p_2^B = 71.3 \text{ kPa}$ 、 $p_{N_2}^{B_2} = x_{N_2}^{B_2} p_2^B = 78.0 \text{ kPa}$ 。系统熵变分四部分：留在A中的O<sub>2</sub>，渗透

到B内的O<sub>2</sub>，B中原有的O<sub>2</sub>，B中原有的N<sub>2</sub>的熵变之和，注意到  $T = T_A = T_B = 300 \text{ K}$ ，

$\Delta S_{1-2} = 258.6 \text{ J/K}$ 。

**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  $p_v = \varphi p_s = 2.720 \text{ kPa}$ ，再根据  $p_v$  得  $t_s = 22.47^\circ \text{C}$ 、 $t_d = t_s(p_v) = 22.47^\circ \text{C}$ 、 $d = 0.0174 \text{ kg(水蒸气)/kg(干空气)}$ 、 $h = 72.56 \text{ kJ/kg(干空气)}$ 。

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

	$t/^\circ \text{C}$	$t_w/^\circ \text{C}$	$\varphi/\%$	$d/\text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$	$t_d/^\circ \text{C}$
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

提示和答案：如表所式。

**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)  $\varphi$  和  $d$ ; (2) 在海拔 1500 米处, 大气压力  $p = 0.084\text{MPa}$ , 求这时  $\varphi$  和  $d$ 。

**提示和答案:** 从  $h-d$  图虽可查得总压力  $p = 0.10133\text{MPa}$  时  $\varphi$  和  $d$ , 但不能用同表查取  $p = 0.084\text{MPa}$  时的  $\varphi$  和  $d$ 。(1)  $\varphi = 0.53$ 、 $d = 0.01886 \text{ kg(水蒸气)/kg(干空气)}$ ; (2)  $\varphi = 0.53$ 、 $d = 0.0229 \text{ kg(水蒸气)/kg(干空气)}$ 。

**12-11** (1) 湿空气总压  $p = 0.1\text{MPa}$ , 水蒸气分压力  $p_v$  由  $1.2\text{kPa}$  增至  $2.4\text{kPa}$ , 求含湿量相对变化率  $\Delta d/d_1$ 。(2)  $p = 0.1\text{MPa}$ ,  $p_v$  由  $13.5\text{kPa}$  增大到  $27.0\text{kPa}$ , 求  $\Delta d/d_1$ 。(3)  $p_v = 1.2\text{kPa}$ , 但  $p$  由  $0.1\text{MPa}$  变为  $0.061\text{MPa}$ , 求  $\Delta d/d_1$ 。(4) 写出  $p_v \sim \Delta d/d_1$  的函数关系式。

**提示和答案:** 由式  $d = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v}$  可得 (1)  $\frac{\Delta d}{d_1} = 102.5\%$ ; (2)  $\frac{\Delta d}{d_1} = 13.7\%$ ; (3)  $\frac{\Delta d}{d_1} = 65.2\%$ ; (4)  $p = \text{常数}$ , 设  $p_{v2} = Ap_{v1}$  即可推得  $\frac{\Delta d}{d_1} = \frac{A-1}{1-A(p_v/p)}$ 。

**12-12** 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  $t_3$ ,  $\varphi_3$ ,  $h_3$ 。

**提示和答案:** 由室内外空气的温度和相对湿度确定  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $h_1$  和  $h_2$  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  $h_3 = 23.04\text{kJ/kg(干空气)}$ 、 $d_3 = 0.004561 \text{ kg/kg(干空气)}$ , 进而得  $t_3 = 11.48^\circ\text{C}$ 、 $\varphi_3 = 54.1\%$ 。

**12-13** 湿空气体积流量  $q_v = 15\text{m}^3/\text{s}$ ,  $t_1 = 6^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 60\%$ , 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  $\varphi_2$  和加热量  $Q$ ; (2) 再经绝热增湿装置, 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, 由  $d_2 = d_1 = 0.622 \frac{\varphi_2 p_{s2}}{p - \varphi_2 p_{s2}}$ , 解得  $\varphi_2 = 13.22\%$ ,

进一步解得  $h_2$ , 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

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

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), 迭代使 (a) 式

两侧相等, 最后得  $t_3$ 、 $d_3$ , 喷水量  $q_{m,v} = q_{m,a}(d_3 - d_2) = 0.0585 \text{ kg/s}$ 。

**12-14**  $p = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $\varphi_1 = 60\%$ 、 $t_1 = 32^\circ \text{C}$  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  $15^\circ \text{C}$  的饱和湿空气离开。求每秒钟的凝水量  $q_{m,w}$  及放热量  $\Phi$ 。

**提示和答案:** 离开蒸发盘管的空气  $\varphi = 1$ , 凝水量  $q_{m,w} = q_{m,a}(d_1 - d_2) = 0.0112 \text{ kg/s}$ ,

$$\Phi = q_{m,a}(h_1 - h_2) = 54.9 \text{ kJ/s}。$$

**12-15** 湿空气温度为  $30^\circ \text{C}$ , 压力为  $100 \text{ kPa}$ , 测得露点温度为  $22^\circ \text{C}$ , 计算其相对湿度及含湿量。

**提示和答案:**  $\varphi = 62.7\%$ 、 $d = 0.017 \text{ kg(水蒸气)/kg(干空气)}$ 。

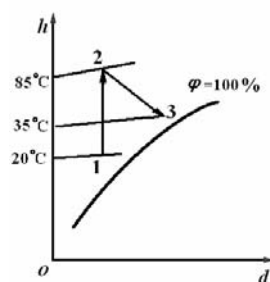
**12-16** 压力为  $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ , 温度为  $t_1 = 30^\circ \text{C}$ , 相对湿度  $\varphi_1 = 0.6$  的湿空气在活塞式压气机内压缩后, 压力升至  $p_2 = 0.2 \text{ MPa}$ , (1) 若压缩过程绝热; (2) 若压缩过程等温, 分别求压缩后湿空气的相对湿度  $\varphi_2$ , 含湿量  $d_2$ 。

**提示和答案:** 初态  $p_{v1} = 2544.6 \text{ Pa}$ 、 $d_1 = 0.162 \text{ kg(水蒸气)/kg(干空气)}$ 、 $x_{v1} = 0.0255$ 、 $x_{a1} = 0.9745$ 。湿空气可作为理想气体, (1) 压缩过程绝热, 可得  $T_2 = 369.4 \text{ K}$ , 假定压缩过程水蒸气和干空气质量不变, 则  $x_{v2} = x_{v1}$ ,  $p_{v2} = x_{v2} p_2 = 5100 \text{ Pa}$ , 故  $\varphi_2 = \frac{p_{v2}}{p_{s2}} = 0.057$ 、

$d_2 = 0.0163 \text{ kg(水蒸气)/kg(干空气)}$ ; (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  $p_{v2} = x_{v2}p_2 = 5100 \text{ Pa} > p_{s2}$ , 假定错误, 所以,  $p_{v2} = p_{s2}$ ,  $\phi_2 = 1$ ,  $d_2 = 0.0135 \text{ kg(水蒸气)/kg(干空气)}$ 。

**12-17** 烘干装置入口处湿空气  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 、 $\phi_1 = 30\%$ 、 $p = 0.1013\text{MPa}$ , 加热到  $t_2 = 85^\circ\text{C}$ 。试计算从湿物体中的吸收  $1\text{kg}$  水分的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, 可再  $h-d$  图中读出  $d_1$ 、 $h_1$ 、 $h_2$  及  $d_3$ , 所以每  $\text{kg}$  干空气吸收水分  $\Delta d = d_3 - d_1$ , 每吸收  $1\text{kg}$  水分需要干空气量

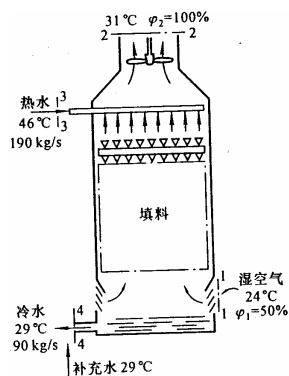


$m_a = 51.3 \text{ kg(干空气)}$ , 每  $\text{kg}$  干空气需加热量

$q = 64.9 \text{ kJ/kg(干空气)}$ , 每吸收  $1\text{kg}$  水分需加热  $Q = m_a q = 3329 \text{ kJ}$ 。 题 12-17 附图

**12-18** 安装一台冷却塔供应某厂工艺用冷却水, 已知热水流量为  $190\text{kg/s}$ , 温度为  $40^\circ\text{C}$ , 设计出口处冷水水温为  $29^\circ\text{C}$ , 流率为  $190\text{kg/s}$ , 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, 补充水温度为  $t_l = 29^\circ\text{C}$ , 见图 12-25。已知干空气和水蒸气的气体常数及比定压热容为  $c_{p,v} = 1.86\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $c_{p,a} = 1005\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $R_{g,a} = 287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $R_{g,v} = 462\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。求: (1) 干空气质量流量  $q_{m,a}$ ; (2) 补充



水质量流量  $q_{m,w}$ 。

题 12-18 冷却塔示意图

**提示和答案:** 由进出的空气和水的参数可求得含湿量、焓等参数, 由能量守恒方程  $q_{m,a}h_1 + q_{m3}h_{w3} + q_{m,w}h_L = q_{m,a}h_2 + q_{m4}h_{w4}$ , 可求出  $q_{m,a} = 233.20\text{kg/s}$ , 进而得补充水量  $q_{m,w} = q_{m,a}(d_2 - d_1) = 4.63\text{kg/s}$ 。

**12-19** 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 12-26 所示, 已知入口空气参数为  $p_1 = 0.1\text{MPa}$ 、 $t_1 = 32^\circ\text{C}$ 、 $\phi_1 = 80\%$ , 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  $10^\circ\text{C}$ , 这时有冷凝水所出, 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  $\Phi_{1-2}$  及加热

器中吸热量  $\Phi_{2-3}$ ；(3) 凝水流率  $q_{m,w}$ 。

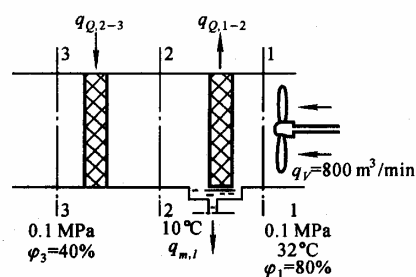


图 12-26 空调系统示意图

**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。

$d_1 = 0.024\ 59\ \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$

$h_1 = 95.123\ \text{kJ/kg(干空气)}$

$d_2 = 0.007\ 727\ \text{kg(水蒸气)/kg(干空气)}$ 、 $h_2 = 29.52\ \text{kJ/kg(干空气)}$ ；冷却去湿器中放热量

$\Phi_{1-2} = 971.47\ \text{kJ/s}$ ，加热器中吸热量  $\Phi_{2-3} = 215.8\ \text{kJ/s}$ ；凝水流量  $q_{m,w} = 0.247\ \text{kg/s}$ 。

**12-20** 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  $t$ 、 $\varphi$ 、 $p_b$ ，

输出  $d$ 、 $h$ 、 $p_v$ 、 $t_d$ 、 $v$ ；(2) 按输入  $t$ 、 $t_w$ 、 $p_b$  输出  $h$ 、 $d$ 、 $p_v$ 、 $\varphi$ 、 $t_d$ 、 $v$ 。

**提示：**解题思路和公式

(1) 输入  $R_{g,a} = 0.287\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 、 $R_{g,v} = 0.462\ \text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 、 $t(^{\circ}\text{C})$ 、 $\varphi(\%)$ 、 $p_b(\text{kPa})$

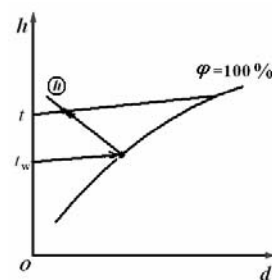
$$\{p_s\}_{\text{kPa}} = \frac{2}{15} \exp \left[ 18.5916 - 3991.11 / (\{t\}_{^{\circ}\text{C}} + 233.84) \right] \quad d = 0.622 \frac{\varphi p_s}{p_b - \varphi p_s}$$

$$\{h\}_{\text{kJ/kg(干空气)}} = 1.005 \{t\}_{^{\circ}\text{C}} + d (2501 + 1.86 \{t\}_{^{\circ}\text{C}})$$

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

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

$$R_g = \frac{1}{1+d} R_{g,a} + \frac{d}{1+d} R_{g,v}, \quad v = \frac{R_g(t+273)}{p_b} (1+d)$$



题 12-20 附图

输出  $d$ 、 $h$ 、 $p_v$ 、 $t_d$ 、 $v$

(2) 输入  $R_{g,a}$ 、 $R_{g,v}$ 、 $t(^{\circ}\text{C})$ 、 $t_w(^{\circ}\text{C})$ 、 $p_b(\text{kPa})$

$$\{h_0\}_{\text{kJ/kg(干空气)}} = -7.495628 + 0.7937629 \{t_w\}_{^{\circ}\text{C}} + 16.93575 \exp(0.053106 \{t_w\}_{^{\circ}\text{C}})$$

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

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

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

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

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

$$\{p_s\}_{\text{kPa}} = \frac{2}{15} \exp \left[ 18.5916 - 3991.11 / (\{t\}_{^\circ\text{C}} + 233.847) \right]$$

$$\varphi = \frac{p_v}{p_s(t)} \quad \{t_d\}_{^\circ\text{C}} = \frac{3991.11}{18.5916 - \ln \frac{15}{2} \{p_v\}_{\text{kPa}}} - 233.84$$

$$R_g = \frac{R_{g,a} + R_{g,v}d}{1 + d}, \quad v = \frac{R_g T}{p_b} (1 + d)$$

输出  $h$ 、 $d$ 、 $p_v$ 、 $\varphi$ 、 $t_d$ 、 $v$ 。

**12-21** 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  $\Phi_{1-2}$  和

加热量  $\Phi_{2-3}$  的程序，用来计算习题 12-18。

提示：解题思路和计算公式，输入： $t_1$ 、 $t_2$ 、 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2 (=1)$ 、 $\varphi_3$ 、 $p_b$ 、 $q_v$ ，

$$\{p_s\}_{\text{kPa}} = \frac{2}{15} \exp \left[ 18.5916 - 3991.11 / (\{t\}_{^\circ\text{C}} + 232.84) \right], \quad d = 0.622 \frac{\varphi p_s}{p_b - \varphi p_s}$$

代入  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、得  $p_{s1}$ 、 $p_{s2}$ 、 $d_1$ 、 $d_2$

$$\{h\}_{\text{kJ/kg(干空气)}} = 1.005 \{t\}_{^\circ\text{C}} + d(2501 + 1.86 \{t\}_{^\circ\text{C}})$$

代入  $t_1$ 、 $d_1$ 、 $t_2$ 、 $d_2$ ，得  $h_1$ 、 $h_2$

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

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



$$p_{v3} = \frac{d_3}{0.622} p_b \left/ \left( 1 + \frac{d_3}{0.622} \right) \right., \quad p_{s3} = \frac{p_{v3}}{\phi_3}$$

$$\{t_3\}_{^{\circ}\text{C}} = \frac{3\,991.11}{18.5916 - \ln \frac{15}{2} \{p_{s3}\}_{\text{kPa}}} - 233.84$$

$$\{h\}_{\text{kJ/kg(干空气)}} = 1.005 \{t\}_{^{\circ}\text{C}} + d \left( 2\,501 + 1.86 \{t\}_{^{\circ}\text{C}} \right)$$

$$\Phi_{2-3} = q_{m,a} (h_3 - h_2), \quad q_{m,w} = q_{m,a} (d_1 - d_3)$$

输出：  $\Phi_{1-2}$  、  $\Phi_{2-3}$  、  $q_{m,w}$  。