

第七章 气体和蒸汽的流动

7-1 空气以 $c_f = 180\text{m/s}$ 的流速在风洞中流动, 用水银温度计测量空气的温度, 温度计上的读数是 70°C , 假定气流在温度计周围得到完全滞止, 求空气的实际温度 (即所谓热力学温度)。

提示和答案: $T_1 = T_0 - \frac{c_f^2}{2c_p} = 327.03\text{K}$, 注意比热容的单位。

7-2 已测得喷管某一截面空气的压力为 0.5MPa , 温度为 800K , 流速为 600m/s , 若空气按理想气体定比热容计, 试求滞止温度和滞止压力。

提示和答案: 绝热滞止可近似为等熵过程。 $T_0 = 979.1\text{K}$ 、 $p_0 = p_1 \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 1.014\text{MPa}$ 。

7-3 喷气发动机前端是起扩压器作用的扩压段, 其后为压缩段。若空气流以 900km/h 的速度流入扩压段, 流入时温度为 -5°C , 压力为 50kPa 。空气流离开扩压段进入压缩段时速度为 80m/s , 此时流通截面积为入口截面积的 80% , 试确定进入压缩段时气流的压力和温度。

提示和答案: $T_2 = T_1 + \frac{c_{f1}^2 - c_{f2}^2}{2c_p} = 296.06\text{K}$, 由质量守恒 $v_2 = 0.8v_1 \frac{c_{f1}}{c_{f2}}$, 流动过程中理

想气体也满足状态方程, 故 $v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = 0.8 \frac{R_g T_1}{p_1} \frac{c_{f1}}{c_{f2}}$, $p_2 = \frac{1}{0.8} p_1 \frac{T_2}{T_1} \frac{c_{f1}}{c_{f2}} = 215.7\text{kPa}$ 。

7-4 进入出口截面积 $A_2 = 10\text{cm}^2$ 的渐缩喷管的空气初速度很小可忽略不计, 初参数为 $p_1 = 2 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、 $t_1 = 27^\circ\text{C}$ 。求空气经喷管射出时的速度, 流量以及出口截面处空气的状态参数 v_2 、 t_2 。设空气取定值比热容, $c_p = 1005 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 、 $\kappa = 1.4$, 喷管的背压力 p_b 分别为 1.5MPa 和 1MPa 。

提示和答案: 初速度很小, 进口截面的温度和压力即为滞止温度和滞止压力。
 $p_{cr} = v_{cr} p_1 = 1.056\text{MPa}$, 比较两种喷管的背压力与临界的关系可确定两种情况的出口截面压力, 从而求解得背压。 $p_b = 1.5\text{MPa}$, 则 $p_2 = p_b = 1.5\text{MPa}$, $T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 276.47\text{K}$ 、

$v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = 0.0529\text{m}^3 / \text{kg}$ 、 $c_{f2} = \sqrt{2c_p(T_1 - T_2)} = 218.2\text{m/s}$ 、 $q_m = \frac{A_2 c_{f2}}{v_2} = 4.12\text{kg/s}$; 背压

$p_b = 1\text{MPa}$ ，则 $p_2 = p_{cr} = 1.056\text{MPa}$ ， $T_2 = 250.09\text{K}$ 、 $v_2 = 0.0680\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $c_{f2} = 317.2\text{m/s}$ 、 $q_m = 4.66\text{kg/s}$ 。

7-5 空气进入渐缩喷管时的初速为 200m/s ，初压为 1MPa ，初温为 500°C 。求喷管达到最大流量时出口截面的流速、压力和温度。

提示和答案： $T_0 = T_1 + \frac{c_{f1}^2}{2c_p} = 792.9\text{K}$ ， $p_0 = p_1 \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 1.093\text{MPa}$ 。初态及 A_2 确定的收

缩喷管内的流动，出口截面为临界截面，即流速达到音速时，流量最大。所以

$$p_2 = p_0 v_{cr} = 0.5771\text{MPa}、T_2 = T_0 v_{cr}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 660.7\text{K}、c_{f2} = \sqrt{\kappa R_g T_2} = 515.2\text{m/s}。$$

7-6 空气流经渐缩喷管。在喷管某一截面处，压力为 0.5MPa ，温度为 540°C ，流速为 200m/s ，截面积为 0.005m^2 。试求：（1）气流的滞止压力及滞止温度；（2）该截面处的音速及马赫数；（3）若喷管出口处的马赫数等于1，求出口截面积、出口温度、压力及速度。

提示和答案： $T_0 = T + \frac{c_f^2}{2c_p} = 832.9\text{K}$ 、 $p_0 = p \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0.544\text{MPa}$ ；

$$c = \sqrt{\kappa R_g T} = 571.5\text{m/s}、Ma = \frac{c_f}{c} = 0.350、q_m = \frac{Ac_f p}{v} = \frac{Ac_f p}{R_g T} = 2.143\text{kg/s}；\text{出口截面 } Ma_2 = 1，$$

即说明出口截面为临界截面，所以 $p_2 = p_{cr} = p_0 v_{cr} = 0.2872\text{MPa}$ 、 $T_2 = T_0 v_{cr}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 694.0\text{K}$ 、

$$c_{f2} = \sqrt{\kappa R_g T_2} = 528.1\text{m/s}、v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = 0.6935\text{m}^3/\text{kg}，\text{稳定工况下喷管各截面流量相等}$$

$$A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{f2}} = 28.1 \times 10^{-4} \text{m}^2。$$

7-7 燃气经过燃气轮机中渐缩喷管形的通道绝热膨胀，燃气的初参数为 $p_1 = 0.7\text{MPa}$ 、 $t_1 = 75^\circ\text{C}$ ，燃气在通道出口截面上的压力 $p_2 = 0.5\text{MPa}$ ，经过通道的流量 $q_m = 0.6\text{kg/s}$ ，若通道进口处流速及通道中的磨擦损失均可忽略不计，求燃气外射速度及通道出口截面积。（燃气比热容按变值计算，设燃气的热力性质近似地和空气相同。）

提示和答案： 据 t_1 查附表 8， $p_{r1} = 126.984$ ， $h_1 = 1074.28\text{kJ/kg}$ ，故 $p_2 = p \frac{p_2}{p_1} = 90.703$ ，

再查同表，得 $T_2 = 939.73$ ， $h_2 = 979.56\text{kJ/kg}$ 。算得 $c_{f2} = \sqrt{2(h_1 - h_2)} = 435.25$ ，

$$v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = 0.5394 \text{ m}^3 / \text{kg}, \quad A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{f2}} = 7.44 \times 10^{-4} \text{ m}^2。$$

7-8 有一玩具火箭装满空气，其参数为： $p = 13.8 \text{ MPa}$ 、 $t = 43.3^\circ \text{C}$ 。空气经缩放喷管排向大气产生推力。已知：喷管喉部截面积为 1 mm^2 ，出口上截面压力与喉部压力之比为 $\frac{1}{10}$ ，试求稳定情况下火箭的净推力。（ $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ ）

提示和答案： 据缩放喷管喉部特性及截面积可得 $p_{\text{cr}} = v_{\text{cr}} p_1 = 7.2864 \text{ MPa}$ 、

$$T_{\text{cr}} = T_1 \left(\frac{p_{\text{cr}}}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 263.67 \text{ K}, \quad v_{\text{cr}} = \frac{R_g T_{\text{cr}}}{p_{\text{cr}}} = 0.0104 \text{ m}^3 / \text{kg}, \quad c_{\text{cr}} = c = \sqrt{\kappa R_g T_{\text{cr}}} = 325.49 \text{ m/s},$$

$$q_m = \frac{A_{\text{cr}} c_{\text{cr}}}{v_{\text{cr}}} = 0.0313 \text{ kg/s}。 \text{ 而 } p_{\text{cr}} : p_2 = 10:1, \text{ 故 } p_2 = 0.72864 \text{ MPa}, \text{ 进而求得 } T_2 = 136.57 \text{ K},$$

$$v_2 = 0.0538 \text{ m}^3 / \text{kg}, \quad c_{f2} = 601.0 \text{ m/s}, \quad A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{f2}} = 2.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2, \text{ 稳定情况下火箭的净推力}$$

为喷气动量和出口截面两侧作用力差： $F = q_m c_{f2} + \Delta p A_2 = q_m c_{f2} + (p_2 - p_0) A_2 = 20.6 \text{ N}$ 。

7-9 滞止压力为 0.65 MPa ，滞止温度为 350 K 的空气可逆绝热流经收缩喷管，在截面积为 $2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 处气流马赫数为 0.6 。若喷管背压力为 0.28 MPa ，试求喷管出口截面积。

提示和答案： 在该截面上， $c_f = \sqrt{c_p(T_0 - T)}$ ，而声速 $c = \sqrt{\kappa R_g T}$ ， $Ma = \frac{c_f}{c}$ ，所以已

知 Ma 即可确定截面上气流温度、流量等参数。 $T = \frac{2c_p T_0}{\kappa R_g Ma^2 + 2c_p} = 326.5 \text{ C}$ ，

$$p = p_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0.510 \text{ MPa}, \quad v = \frac{R_g T}{p} = 0.1839 \text{ m}^3 / \text{kg}, \quad c_f = 217.34 \text{ m/s},$$

$$q_m = \frac{A c_f}{v} = 3.07 \text{ kg/s}。 \quad p_{\text{cr}} = v_{\text{cr}} p_0 = 0.3432 \text{ MPa} > p_b, \text{ 所以, } p_2 = p_{\text{cr}} = 0.3432 \text{ MPa}, \text{ 而出}$$

$$\text{口截面即为临界截面, } T_2 = T_{\text{cr}} = T_0 v_{\text{cr}}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 291.62 \text{ K}, \quad v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = 0.2439 \text{ m}^3 / \text{kg},$$

$$c_{f2} = \sqrt{2(h_0 - h_2)} = 342.55 \text{ m/s}, \text{ 解得 } A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{f2}} = 2.19 \times 10^{-3} \text{ m}^2。$$

7-10 空气等熵流经缩放喷管，进口截面上压力和温度分别为 0.58 MPa 、 440 K ，出口截

面压力 $p_2 = 0.14\text{MPa}$ 。已知喷管进口截面积为 $2.6 \times 10^{-3}\text{m}^2$ ，空气质量流量为 1.5kg/s ，试求喷管喉部及出口截面积和出口流速。空气取定值比热容， $c_p = 1005\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

提示和答案：本题没有给出初始速度，故须求得进口截面流速后确定是否可用进口截面

参数取代滞止参数。 $v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = 0.2177\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $c_{f1} = \frac{q_m v_1}{A_1} = 125.61\text{m/s}$ ，应考虑初速的影响。

$$T_0 = T_1 + \frac{c_{f1}^2}{2c_p} = 447.85\text{K}, \quad p_0 = p_1 \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0.617\text{MPa}。 \quad p_{cr} = p_{th} = v_{cr} p_0 = 0.3258\text{MPa},$$

$$T_{th} = T_0 v_{cr}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 373.15\text{K}, \quad v_{th} = \frac{R_g T_{cr}}{p_{cr}} = 0.3287\text{m}^3/\text{kg}, \quad c = \sqrt{\kappa R_g T_{cr}} = 387.21\text{m/s},$$

$$A_{th} = \frac{q_m v_{cr}}{c_{f,cr}} = 1.27 \times 10^{-3}\text{m}^2。 \quad T_2 = 293.15\text{K}, \quad v_2 = 0.6010\text{m}^3/\text{kg},$$

$$c_{f2} = \sqrt{2(h_1 - h_2) + c_{f1}^2} = 557.63\text{m/s}, \quad A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{f2}} = 1.62 \times 10^{-3}\text{m}^2。$$

7-11 流入绝热喷管的过热氨蒸气压力为 800kPa ，温度为 20°C ，喷管出口截面上压力为 300kPa ，流速达 450m/s 。若喷管中质量流量为 0.01kg/s ，试求喷管出口截面积。

提示和答案：蒸气（如水蒸气、氨蒸气等）在喷管内流动膨胀其参数变化只能采用据第一定律、第二定律直接导出的公式，不能采用经简化仅理想气体适用的公式。同时还要注意判定蒸气的状态。本题由入口氨压力、温度，查氨热力性质（附表8），得 $h_1 = 1485.0\text{kJ/kg}$ ，

据能量方程，忽略入口流速，由出口截面求得 $h_2 = h_1 - \frac{c_{f2}^2}{2} = 1387.75\text{kJ/kg}$ 。 $h' < h_2 < h''$ 判

定出口截面上氨为湿饱和蒸气，压力查得饱和参数，计算得 $x_2 = \frac{h_2 - h'}{h'' - h'} = 0.95$ ，

$$v_2 = v' + x_2(v'' - v') = 0.3861\text{m}^3/\text{kg}, \quad A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{f2}} = 8.58 \times 10^{-6}\text{m}^2。$$

7-12 压力 $p_1 = 2\text{MPa}$ ，温度 $t_1 = 500^\circ\text{C}$ 的蒸汽，经收缩喷管射入压力为 $p_b = 0.1\text{MPa}$ 的空间中，若喷管出口截面积 $A_2 = 200\text{mm}^2$ ，试确定：（1）喷管出口截面上蒸汽的温度、比体积、焓；（2）蒸汽射出速度；（3）蒸汽的质量流量。

提示和答案: 据临界压力与背压关系 $p_{cr} = v_{cr} p_1 = 1.092 \text{MPa} > p_b$, 确定出口截面上压力, $p_2 = p_{cr} = 1.092 \text{MPa}$, 再由 p_1 、 t_1 及 p_2 、 $s_2 = s_1$, 查 $h-s$ 图或水蒸汽表, 如上题解得 $h_1 = 3468 \text{kJ/kg}$ 、 $h_2 = 3275 \text{kJ/kg}$ 、 $t_2 = 406^\circ \text{C}$ 、 $v_2 = 0.245 \text{m}^3/\text{kg}$; $c_{f2} = 621.3 \text{m/s}$;
 $q_m = 0.51 \text{kg/s}$ 。

7-13 压力 $p_1 = 2 \text{MPa}$, 温度 $t_1 = 500^\circ \text{C}$ 的蒸汽, 经拉伐尔喷管流入压力为 $p_b = 0.1 \text{MPa}$ 的大空间中, 若喷管出口截面积 $A_2 = 200 \text{mm}^2$, 试求: 临界速度、出口速度、喷管质量流量及喉部截面积。

提示和答案: 同上题。过热蒸汽, 取 $v_{cr} = 0.546$, $p_2 = p_b = 0.1 \text{MPa}$, $h_1 = 3468 \text{kJ/kg}$ 、 $h_{cr} = 3275 \text{kJ/kg}$ 、 $v_{cr} = 0.245 \text{m}^3/\text{kg}$; $h_2 = 27.2 \text{kJ/kg}$, $v_2 = 1.79 \text{m}^3/\text{kg}$ 。 $c_{cr} = 621.3 \text{m/s}$ 、 $c_{f2} = 1237.7 \text{m/s}$ 、 $q_m = 0.1383 \text{kg/s}$ 、 $A_{cr} = 0.545 \times 10^{-4} \text{m}^2$ 。

7-14 压力 $p_1 = 3 \text{MPa}$, 温度 $t_1 = 24^\circ \text{C}$ 的空气, 经喷管射入压力为 0.157MPa 的空间中, 应采用何种喷管? 若空气质量流量为 $q_m = 4 \text{kg/s}$, 则喷管最小截面积应为多少?

提示和答案: 据背压与临界压力的关系 $p_{cr} = p_1 v_{cr} = 0.157 \text{MPa} = p_b$ 及几何条件确定应采用收缩喷管。气流出口截面压力为临界压力, 出口截面为临界截面。 $p_2 = 0.157 \text{MPa}$,

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 247.5 \text{K}, \quad c_{f2} = \sqrt{\kappa R_g T_2} = 315.3 \text{m/s}, \quad v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = 0.4527 \text{m}^3/\text{kg},$$

$$A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{f2}} = 57.43 \times 10^{-4} \text{m}^2。$$

7-15 内燃机排出的废气压力为 0.2MPa , 温度为 550°C , 流速为 110m/s , 若将之引入背压为 0.1MPa 的渐缩喷管, (1) 试求废气通过喷管出口截面的流速, 并分析若忽略进口流速时引起的误差; (2) 若喷管速度系数 $\varphi = 0.96$, 再计算喷管出口截面的流速及熵产。

提示和答案: (1) $T_0 = T_1 + \frac{c_{f1}^2}{2c_p} = 829.17 \text{K}$, $p_0 = p_1 \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0.205 \text{MPa}$,

$p_{cr} = v_{cr} p_0 = 0.108 \text{MPa} > p_b$, 收缩喷管出口截面压力最低是临界压力, 所以, $p_2 = p_{cr}$ 。

$T_2 = T_{cr} = T_0 v_{cr}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 690.88\text{K}$, $c_{f2} = \sqrt{\kappa R_g T_{cr}} = 526.87\text{m/s}$ 。若忽略初流速 ,
 $p'_{cr} = v_{cr} p_1 = 0.105\text{MPa} > p_b$, 仍得 $p_2 = p_{cr}$, $T'_2 = T'_{cr} = T_1 v_{cr}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 685.86\text{K}$,
 $c'_{f2} = \sqrt{\kappa R_g T'_{cr}} = 524.96\text{m/s}$, $\frac{c_{f2} - c'_{f2}}{c_{f2}} = 0.36\%$ 。(2) 流动不可逆 $c_{f2,act} = \varphi c_{f2} = 505.80\text{m/s}$,

$T_{2act} = T_0 - \frac{c_{f2,act}^2}{2c_p} = 701.88\text{K}$, 过程熵变 $\Delta s = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-2act}$, 因 $\Delta s_{1-2} = 0$, 而过程 2-2act 压

力相等, 且过程 1-2act 绝热, 熵流为零所以 $s_g = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-2act} = c_p \ln \frac{T_{2act}}{T_2} = 15.89\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

7-16 初态为 3.5MPa、450°C 的水蒸气以初速 100m/s 进入喷管, 在喷管中绝热膨胀到 2.5MPa, 已知流经喷管的质量流量为 10kg/min。(1) 忽略磨擦损失, 试确定喷管的型式和尺寸; (2) 若存在磨擦损失, 且已知速度系数 $\varphi = 0.94$, 确定上述喷管实际流量。

提示和答案: 初速较高, 应考虑滞止。据 3.5MPa、450°C 查 $h-s$ 图, 并计算得

$h_0 = h_1 + \frac{c_{f1}^2}{2} = 3344\text{kJ/kg}$, 由 h_0 和 $s_0 = s_1$, 在 $h-s$ 图, 得 $t_0 = 461.5^\circ\text{C}$ 、 $p_0 = 3.6\text{MPa}$ 。(1)

$p_{cr} = v_{cr} p_0 = 1.966\text{MPa} < p_2$, 所以采用收缩喷管。由 $s_2 = s_1$ 及 p_2 查 $h-s$ 图得: h_2 、 v_2 ,

$c_{f2} = \sqrt{2(h_0 - h_2)} = 471.17\text{m/s}$, $A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{f2}} = 0.424 \times 10^{-4}\text{m}^2$ 。(2) 若存在磨擦, 利用速度系

数修正出口速度, $c'_{f2} = \varphi c_{f2} = 442.09\text{m/s}$, $h'_2 = h_0 - \frac{c_{f2}^2}{2} = 3245.9\text{kJ/kg}$, 同时应对比体积进

行修正, 由 p_2 及 h'_2 查 $h-s$ 图, 得 $v'_2 = 0.122\text{m}^3/\text{kg}$, $q'_m = \frac{A_2 c'_{f2}}{v'_2} = 9.24\text{kg/min}$ 。

7-17 压力为 0.1MPa, 温度 27°C 的空气流经扩压管, 压力升高到 0.18MPa, 试问空气进入扩压管时的初速至少有多大?

提示和答案: 空气流经扩压管同样服从能量守恒和绝热变化的规律。设扩压管内过程

可逆绝热, $T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 355.03\text{K}$, 据能量方程 $h_1 + \frac{c_{f1}^2}{2} = h_2 + \frac{c_{f2}^2}{2}$, 最小初速发生在

流动可逆且 $c_{f2} = 0$, 所以 $c_{f1} \geq \sqrt{2(h_2 - h_1)} = \sqrt{2c_p(T_2 - T_1)} = 332.0\text{m/s}$ 。

7-18 试证明理想气体的绝热节流微分效应 μ_j 恒等于零。

提示: 对理想气体状态方程求导, 得 $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{v}{T}$, 代入 $\mu_j = \frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p}$ 即证。

7-19 1.2MPa、20°C的氦气经节流阀后压力降至 100kPa, 为了使节流前后速度相等, 求节流阀前后的管径比。

提示和答案: 氦气可作理想气体, 节流前后 $h_1 = h_2$ 、 $T_1 = T_2$, 据质量守恒 $\frac{A_1 c_{f1}}{v_1} = \frac{A_2 c_{f2}}{v_2}$,

因节流前后流速相等, 所以 $\frac{A_2}{A_1} = \frac{v_2}{v_1}$ 求得 $\frac{D_2}{D_1} = 3.464$ 。

7-20 通过测量节流前后蒸汽的压力及节流后蒸汽的温度可推得节流前蒸汽的干度。现有压力 $p_1 = 2\text{MPa}$ 的湿蒸汽被引入节流式干度计, 蒸汽被节流到 $p_2 = 0.1\text{MPa}$, 测得 $t_2 = 130^\circ\text{C}$, 试确定蒸汽最初的干度 x_1 。

提示和答案: 由 $p_2 = 0.1\text{MPa}$, $t_2 = 130^\circ\text{C}$ 查过热蒸汽表得 $h_2 = 2736.3\text{ kJ/kg}$, 节流过程,

$h_1 = h_2$, 于是 $x_1 = \frac{h_1 - h'}{h'' - h'} = 0.967$ 。

7-21 750kPa、25°C的 R134a 经节流阀后压力降至 165kPa, 求节流后 R134a 的温度和为了使节流前后速度相等, 节流阀前后的管径比。

提示和答案: 据节流过程 $h_1 = h_2$, 确定节流后氨蒸气状态。查R134a热力性质表,

$h' < h_2 < h''$, 所以出口截面上氨为湿饱和蒸气状态, $x_2 = \frac{h_2 - h'}{h'' - h'} = 0.2588$,

$v_2 = v' + x_2(v'' - v') = 0.03157\text{m}^3/\text{kg}$, 据质量守恒并节流前后流速相等, 所以得 $\frac{A_2}{A_1} = \frac{v_2}{v_1}$,

$\frac{D_2}{D_1} = \sqrt{\frac{v_2}{v_1}} = 6.28$ 。

7-22 压力 $p_1 = 2\text{MPa}$, 温度 $t_1 = 400^\circ\text{C}$ 的蒸汽, 经节流阀后, 压力降为 $p_1' = 1.6\text{MPa}$, 再经喷管可逆绝热膨胀后射入压力为 $p_b = 1.2\text{MPa}$ 的大容器中, 若喷管出口截面积 $A_2 = 200\text{mm}^2$ 。求: (1) 节流过程熵增; (2) 应采用何种喷管? 其出口截面上的流速及喷

管质量流量是多少？（3）若喷管内流动不可逆，速度系数 $\varphi = 0.94$ ，试确定喷管内不可逆流动引起的熵增。

提示和答案：据节流过程 $h_1 = h_1'$ ，由 h_2 、 p_1 确定节流后状态，即喷管进口截面状态。

$s_g = s_1 - s_1 = 0.1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； $p_{\text{cr}} = p_1 v_{\text{cr}} < p_b = 1.2 \text{ MPa}$ ，采用收缩喷管， $p_2 = p_b = 1.2 \text{ MPa}$ ，

查 $h-s$ 图，得 h_2 ， s_2 ， v_2 各参数。 $c_{f2} = \sqrt{2(h_1 - h_2)} = 414.7 \text{ m/s}$ 、 $q_m = \frac{A_2 c_{f2}}{v_2} = 0.35 \text{ kg/s}$ ，

$I = T_0 s_g = T_0 (S_1 - S_1) = 30 \text{ kJ/kg}$ 。 $c_{f2\text{act}} = \varphi c_{f2} = 389.8 \text{ m/s}$ ， $h_2 = h_1 - \frac{c_{f2\text{act}}^2}{2} = 3174.0 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，

据 $p_2 = p_b$ ， h_2 ，查 $h-s$ 图， $s_{2\text{act}} = 7.245 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $t_{2\text{act}} = 360^\circ \text{C}$ ， $\Delta s = 0.021 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

7-23 压力为 6.0 MPa ，温度为 490°C 的蒸汽，经节流后压力为 2.5 MPa ，然后定熵膨胀到 0.04 MPa 。求（1）绝热节流后蒸汽温度及节流过程蒸汽的熵增；（2）若蒸汽节流前后分别膨胀到相同的终压力，求由于节流而造成的技术功减少量和作功能力损失。（ $T_0 = 300 \text{ K}$ ）

提示和答案：（1） $t_2 = 471^\circ \text{C}$ 、 $\Delta s = s_2 - s_1 = 0.395 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；（2）节流而造成的技术

功减少是焓差， $\Delta w_t = h_b - h_a = 140 \text{ kJ/kg}$ 。因绝热变化， $s_f = 0$ ， $s_g = \Delta s$ ，

$I = T_0 s_g = 118.5 \text{ kJ/kg}$ ，由于节流后膨胀比节流前膨胀到相同的压力的温度高，故减少的技术功并不完全是作功能力损失。

7-24 1 kg 温度 $T_1 = 330.15 \text{ K}$ 、压力 $p_1 = 1.1 \text{ MPa}$ 的空气，经绝热节流压力降至 0.1 MPa 。

（1）计算节流引起的熵增量。（2）上述空气不经节流而是在气轮机内作可逆绝热膨胀到 0.1 MPa ，气轮机能输出多少功？（3）上述功是否即为空气绝热节流的作功能力损失，为什么？取环境大气 $T_0 = 300.15 \text{ K}$ 、 $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ 。

提示和答案：设题给条件空气满足理想气体假设，理想气体节流前后温度不变，节流熵

增 $\Delta s_{12} = R_g \ln \frac{p_1}{p_2} = 0.6882 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，可逆绝热膨胀， $T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 166.41 \text{ K}$ ，气轮机

能输出 $w_t = c_p (T_1 - T_2) = 164.39 \text{ kJ/kg}$ 。绝热节流过程， $I = T_0 s_g = T_0 \Delta s_{12} = 206.56 \text{ kJ/kg}$ 。因气

轮机排气温度低于环境大气温度，任何与环境有温差的物系均有作功能力故 $I \neq w_t$ 。

7-25 用管子输送压力为 1 MPa ，温度为 300°C 的水蒸气，若管中容许的最大流速为

100m/s, 水蒸气的质量流量为 12 000 kg/h 时管子直径最小要多大?

提示和答案: $q_m v \leq \frac{\pi}{4} D^2 c_f$, $D \geq 0.105\text{m}$ 。

7-26 两输送管送来两种蒸汽进行绝热混合, 一管的蒸汽流量为 $q_{m1} = 60\text{kg/s}$, 状态 $p_1 = 0.5\text{MPa}$, $x = 0.95$; 另一管蒸汽流量为 $q_{m2} = 20\text{kg/s}$, 其状态为 $p_2 = 8\text{MPa}$, $t_2 = 500^\circ\text{C}$ 。如经混合后蒸汽压力为 0.8MPa , 求混合后蒸汽的状态。

提示和答案: 混合前后质量守恒、能量守恒, 列出混合过程质量方程和能量方程解出 h_3 , 即可和压力确定其他参数。 $h_3 = 2831.64\text{kJ/kg}$ 、 $t_3 = 196.7^\circ\text{C}$ 、 $v_3 = 0.2586\text{m}^3/\text{kg}$ 。

7-27* 在绝热稳态过程中, 20MPa 、 -20°C 的氮被节流降压到 2MPa , 确定节流后氮的温度。

提示和答案: 氮 $p_{cr} = 3.39\text{MPa}$, $T_{cr} = 126\text{K}$, 所以

$$p_{r1} = \frac{p_1}{p_{cr}} = 5.9、T_{r1} = \frac{T_1}{T_{cr}} = 1.61、p_{r2} = \frac{p_2}{p_{cr}} = 0.59。查通$$

用焓图得 $\left(\frac{H_m^* - H_m}{RT_{cr}}\right)_1 = 1.79$,

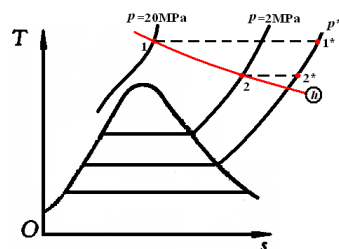


图 7-1

$(H_m^* - H_m)_1 = 1.79RT_{cr} = 1875.3\text{J/mol}$ 。采用试差法, 假设 $T_2 = 140\text{K}$, 则 $T_{r2} = \frac{T_2}{T_{cr}} = 1.11$ 、

$$\left(\frac{H_m^* - H_m}{RT_{cr}}\right)_2 = 0.57, (H_m^* - H_m)_2 = 0.57RT_{cr} = 597.1\text{J/mol}。据绝热节流特征 $H_{m1} = H_{m2}$,$$

但 $H_{m2} - H_{m1} = (H_{m1}^* - H_{m1}) - (H_{m2}^* - H_{m2}) + C_{pm}(T_2 - T_1) = -555.1\text{J/mol}$, 误差较大, 故再设

$T_2 = 145\text{K}$, 重复上述过程, $T_2 = 155\text{K}$ 时 $H_{m1} \cong H_{m2}$, 所以取 $T_2 = 155\text{K}$ 。

7-28 试证明任意气体的状态方程可用 $\frac{v}{T} = \int_T \frac{\mu_j(p,T)c_p(p,T)}{T^2} dT + \frac{R_g}{p}$ 表示, 其中

$\mu_j = \mu_j(p,T)$ 和 $c_p = c_p(p,T)$ 为实验测得的该气体关系式。

提示: 节流的微分效应 $\mu_j = \frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p}$, 改写为 $\mu_j = \frac{T^2\left[\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{v}{T}\right)\right]_p}{c_p}$, 移项可得

$\left[\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{v}{T} \right) \right]_p = \frac{\mu_1 c_p}{T^2}$ 在定压下对 T 积分, 得 $\frac{v}{T} = \int_T \frac{\mu_1(p, T) c_p(p, T)}{T^2} dT + \varphi(p)$ 。式中, $\varphi(p)$ 为

积分待定项。在 $p \rightarrow 0$ 时, 所有实际气体趋近于理想气体, 而对于理想气体, $\mu_1 = 0$, 所以

$$\varphi(p) = \frac{R_g}{p}, \quad \text{即证} \quad \frac{v}{T} = \int_T \frac{\mu_1(p, T) c_p(p, T)}{T^2} dT + \frac{R_g}{p}。$$