

第八章 压气机的热力过程

8-1 某单级活塞式压气机每小时吸入的空气量 $V_1 = 140\text{m}^3$ ，吸入空气的状态参数是 $p_1 = 0.1\text{MPa}$ 、 $t_1 = 27^\circ\text{C}$ ，输出空气的压力 $p_2 = 0.6\text{MPa}$ 。试按下列三种情况计算压气机所需要的理想功率（以 kW 表示）：（1）定温压缩；（2）绝热压缩（设 $\kappa = 1.4$ ）；（3）多变压缩（设 $n = 1.2$ ）。

提示和答案： 据定义 $W_c = -W_t$ ， $P_T = q_m p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = 6.97\text{kW}$ 、

$$P_s = q_m \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right] = 9.11\text{kW}、 P_s = q_m \frac{n}{n - 1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n - 1}{n}} - 1 \right] = 8.12\text{kW}。$$

8-2 某单级活塞式压气机吸入空气参数为 $p_1 = 0.1\text{MPa}$ 、 $t_1 = 50^\circ\text{C}$ 、 $V_1 = 0.032\text{m}^3$ ，经多变压缩 $p_2 = 0.32\text{MPa}$ 、 $V_2 = 0.012\text{m}^3$ 。求：（1）压缩过程的多变指数；（2）压缩终了空气温度；（3）所需压缩功；（4）压缩过程中传出的热量。

提示和答案： 压缩功只是体积变化功。 $n = \frac{\ln(p_2 / p_1)}{\ln(V_1 / V_2)} = 1.186$ 、

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n - 1}{n}} = 387.82\text{K}、 W_n = \frac{1}{n - 1} p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n - 1}{n}} - 1 \right] = 3.443\text{kJ}、$$

$$c_n = \frac{n - \kappa}{n - 1} c_v = -0.826\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})、 Q_n = m c_n \Delta T = -1.84\text{kJ}。$$

8-3 压气机中气体压缩后的温度不宜过高，若取极限值为 150°C 。某单缸压气机吸入空气的压力和温度为 $p_1 = 0.1\text{MPa}$ 、 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ，吸气量为 $250\text{m}^3/\text{h}$ ，若压气机中缸套流过冷却水 $465\text{kg}/\text{h}$ ，温升为 14°C 。求：（1）空气可能达到的最高压力；（2）压气机必需的功率。

提示和答案： 空气在可逆多变过程可能达到最高压力，故须求多变指数。压缩过程冷却水吸热量 $Q_w = q_{m,w} c \Delta t = 7.5715\text{kW}$ ，压气机产气量 $q_{m,a} = \frac{p_1 q_{V,a}}{R_g T_1} = 0.08254\text{kg}/\text{s}$ ，利用气

体放热等于冷却水吸热，可确定 $q = \frac{Q_w}{q_{m,a}} = -91.73\text{kJ}/\text{kg}$ ，由 $q = \frac{n - \kappa}{n - 1} c_v (T_2 - T_1)$ ，解得

$$n = 1.20, \text{ 所以 } p_{2, \max} = p_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 0.90 \text{ MPa}, \quad P = q_{m,a} w_c = 18.4 \text{ kW}。$$

8-4 三台空气压缩机的余隙容积比均为 6%，进气状态均为 0.1MPa、27°C，出口压力为 0.5MPa，但压缩过程的指数分别为： $n_1 = 1.4$ 、 $n_2 = 1.25$ 、 $n_3 = 1$ ，试求各压气机的容积效率（假设膨胀过程的指数和压缩过程相同）。

$$\text{提示和答案: } \eta_v = 1 - \frac{V_c}{V_h} (\pi^{\frac{1}{n}} - 1), \quad \eta_{v,1} = 0.871, \quad \eta_{v,2} = 0.843, \quad \eta_{v,3} = 0.76。$$

8-5 某单级活塞式压气机，其增压比为 7，活塞排量为 0.009m³，余容比为 0.06，转速为 750r/min，压缩过程多变指数为 1.3。求（1）容积效率；（2）生产量（kg/h）；（3）理论消耗功率；（4）压缩过程中放出的热量。已知吸入空气参数为 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 20^\circ \text{C}$ 。

提示和答案： 活塞式压气机曲轴每转一圈完成一次吸气压缩排气过程。容积效率

$$\eta_v = 1 - \frac{V_c}{V_h} (\pi^n - 1) = 0.792, \quad \text{每转有效吸气 } V = \eta_v V_h = 0.00713 \text{ m}^3, \quad \text{故每小时的生产量}$$

$$q_m = \frac{750 \times 60 V}{v_1} = 381.37 \text{ kg/h}, \quad \text{理论耗功 } P = q_m w_c = 21.9 \text{ kW}, \quad T_2 = T_1 \pi^{\frac{n-1}{n}} = 459.32 \text{ K},$$

$$\text{放热量, } q_Q = q_m \frac{n-\kappa}{n-1} c_v \Delta T = -4.21 \text{ kW}。$$

8-6 利用单缸活塞式压气机制备 0.8MPa 的压缩空气，已知气缸直径 $D = 300 \text{ mm}$ ，活塞行程 $S = 200 \text{ mm}$ ，余隙容积比为 0.05，机轴转速为 400r/min。压气机吸入空气的参数是 $t_1 = 20^\circ \text{C}$ 、 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ ，压缩过程多变指数 $n = 1.25$ 。若压气机的定温效率为 $\eta_{c,T} = 0.77$ ，试计算压气机生产量（kg/h）及带动该压气机所需的原动机的功率（压气机的外部摩擦损失忽略不计）。

提示和答案： 余隙容积存在并不影响压气机理论耗功。 $\eta_v = 1 - \sigma (\pi^{\frac{1}{n}} - 1) = 0.786,$

$$q_m = N \frac{p_1 \eta_v V_h}{R_g T_1} = 0.088 \text{ kg/s}, \quad \text{可逆定温功压缩功率 } P_{c,T} = -p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = 15.4 \text{ kW}, \quad \text{压气机}$$

$$\text{所需的功率 } P_c = \frac{P_{c,T}}{\eta_{c,T}} = 20.0 \text{ kW}。$$

8-7 空气初态为 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 20^\circ \text{C}$ ，经过三级活塞式压气机后，压力提高到

12.5MPa，假定各级压力比相同，各级压缩过程的多变指数 $n=1.3$ 。试求：（1）生产 1kg 压缩空气理论上应消耗的功；（2）各级气缸出口的温度；（3）如果不用中间冷却器，压气机消耗的功及各级气缸出口温度；（4）若采用单级压缩，压气机消耗的功及气缸出口温度。

提示和答案： 按耗功最小原则， $\pi_1 = \pi_2 = \pi_3 = 5$ ， $w_c = 3w_{c,L} = 492.0 \text{ kJ/kg}$ ；各级气缸出口的温度相同， $T_2 = T_3 = T_4 = 425 \text{ K}$ ；若不用中间冷却器 $T_2 = 425.0 \text{ K}$ 、 $T_3 = 616.25 \text{ K}$ 、 $T_4 = 893.56 \text{ K}$ 、 $w_c = 746.4 \text{ kJ/kg}$ ；若单级压缩， $T_2 = 893.56 \text{ K}$ 、 $w_c = 746.4 \text{ kJ/kg}$ 。

8-8 一台两级压气机，示功图如图 8-1 所示，若此压气机吸入空气的温度是 $t_1 = 17^\circ\text{C}$ 、 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ ，压气机将空气压缩到 $p_3 = 2.5 \text{ MPa}$ 。压气机的生产量为 $500 \text{ m}^3/\text{h}$ （标准状态下），两个气缸中的压缩过程均按多变指数 $n=1.25$ 进行。以压气机所需要的功量最小作为条件，试求：（1）空气在低压气缸中被压缩后所达到的压力 p_2 ；（2）压气机中气体被压缩后的最高温度 t_2 和 t_3 ；（3）设压气机转速为 250 r/min ，每个气缸在每个进气冲程中吸入的空气体积 V_1 和 V_2 ；（4）每级压气机中每小时所消耗的功 W_1 和 W_2 ，以及压气所消耗的总功 W ；（5）空气在中间冷却器及两级气缸中每小时放出的热量。

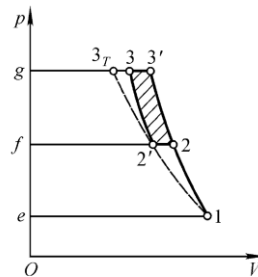


图 8-1

提示和答案： 通常压气机的生产量指标准状态下的体积，常常不同于进口。中间压力 $p_2 = \sqrt{p_1 p_3} = 0.5 \text{ MPa}$ ，空气被压缩后最高温度 $T_2 = T_3 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 400.33 \text{ K}$ ，每一冲程吸入空气体积 $V_1 = 0.03590 \text{ m}^3$ 、 $V_2 = 0.00718 \text{ m}^3$ ，每级压气机耗功 $W_1 = W_2 = 1.022 \times 10^5 \text{ kJ/h}$ ，压气消耗总功率 $P = 56.8 \text{ kW}$ ，空气在两级气缸中放热量相等 $Q = H_2 - H_1 - W_c = -3.07 \times 10^4 \text{ kJ/h}$ ，在中间冷却器放热量 $Q = H_2 - H_1 = 7.15 \times 10^4 \text{ kJ/h}$ 。

8-9 某活塞式空气压缩机容积效率为 $\eta_v = 0.95$ ，每分钟吸进 $p = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $t = 21^\circ\text{C}$ 的空气 14 m^3 ，压缩到 0.52 MPa 输出，设压缩过程可视为等熵压缩，求：（1）余隙容积比；（2）所需输出功率。

提示和答案： 据题意 $\pi = \frac{p_2}{p_1} = 5.132$ ， $n = 1.4$ ，求得 $\sigma = \frac{V_c}{V_h} = \frac{1 - \eta_v}{\pi^n - 1} = 0.023$ ，

516.6m³/min，绝热压缩到 $p_2 = 1\text{MPa}$ 。由于磨擦作用，使出口气温度达到 350°C。求：(1) 该压气机的绝热效率；(2) 因磨擦引起的熵产；(3) 拖动压气机所需的功率。

提示和答案： $T_{2s} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 579.50 \text{ K}$ ，压气机的绝热效率 $\eta_{Cs} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} = 0.865$ ；

由绝热过程熵方程，熵产率 $\dot{S}_g = \dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \frac{p_1 q_{v1}}{R_g T_1} c_p \ln \frac{T_2}{T_{2s}} = 0.729 \text{ kJ}/(\text{K} \cdot \text{s})$ ，压气机功率

$P_C = \frac{p_1 q_{v1}}{R_g T_1} c_p (T_2 - T_1) = 3241.3 \text{ kW}$ 。本题为不可逆绝热压缩，不是可逆多变过程，因此不能由初、终态参数求多变指数。

8-13 某次对轴流压气机的实例数据如下：压气机进口处空气压力 $p_1 = 0.1\text{MPa}$ ，温度 $t_1 = 17^\circ\text{C}$ ，出口处温度 $t_2 = 207^\circ\text{C}$ ，压力 $p_2 = 0.4\text{MPa}$ ，气体流量是 60kg/min；消耗功率 185kW，若压缩过程绝热，分析测试的可靠性。

提示和答案：从出口温度和耗功比较分析。若过程可逆，则 $T_{2s} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 431.15 \text{ K}$ ，

$t_{2s} = 158^\circ\text{C}$ ， $t_{2s} < t_2$ 合理。从耗功分析 $P_{Cs} = q_m (h_{2s} - h_1) = 151.6 \text{ kW} < 185 \text{ kW}$ ，考虑到实际存在的少量散热和不可逆性， P_C 应大于可逆绝热耗功 P_{Cs} 测试具有一定合理性。实测

温度校核功率数据 $P_C = q_m (h_2 - h_1) = 190.7 \text{ kW} > 185 \text{ kW}$ ， $\frac{(190.76 - 185)\text{kW}}{185 \text{ kW}} = 3.1\%$ ，其

误差尚在可允许范围内，所以实测基本合理。

8-14 以 R134a 为工质的制冷循环装置中，蒸发器温度为 -15°C ，进入压缩机工质的干度近似为 1，压缩后的压力为 1160.5 kPa，若压缩机的绝热效率为 0.95，求压缩机出口处工质的焓值。

提示和答案：由 $t_1 = -15^\circ\text{C}$ ， $x = 1$ ，查 R134a 热力性质表： $h_1 = 389.6\text{kJ/kg}$ 、 $s_1 = 1.737\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；由 $s_{2s} = s_1$ 、 $p_2 = 1160.5 \text{ kPa}$ ，查同表得 $h_{2s} = 430.5\text{kJ/kg}$ 。

$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{Cs}} = 432.7\text{kJ/kg}$ 。

8-15 以 R134a 为工质的制冷装置循环的制冷工质进入压缩机的状态为 $t_1 = -10^\circ\text{C}$ 、

$x_1 = 0.99$ ，压缩后压力 $p_2 = 10\text{MPa}$ 、温度 $t_2 = 60^\circ\text{C}$ 。求：压缩机耗功和压缩机的绝热效率。

提示和答案：据 t_1 和 x_1 ，查 R134a 热力性质表可算得 h_1 和 s_1 ， $s_{2_s} = s_1$ ，进而查表得 h_{2_s}

和 h_2 ，即可求得 $\eta_{cs} = \frac{h_{2_s} - h_1}{h_2 - h_1} = 0.646$ 、 $w_c = h_2 - h_1 = 50.9 \text{ kJ/kg}$ 。

8-16 某两级气体压缩机进气参数为 100kPa 、 300K ，每级压力比为 5，绝热效率为 0.82，从中间冷却器排出的气体温度是 330K 。若空气的比热容可取定值，计算每级压气机的排气温度和生产 1kg 压缩空气压气机消耗的功。

提示和答案： $T_{2_s} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 475.13\text{K}$ ，据绝热效率得 $T_2 = T_1 + \frac{T_{2_s} - T_1}{\eta_{cs}} = 513.57\text{K}$ 。

$p_3 = p_2 = 500\text{kPa}$ 、 $T_3 = 330\text{K}$ ； $p_4 = \pi p_3 = 2500\text{kPa}$ ， $T_{4_s} = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 522.65\text{K}$ 。同理求得， $T_4 = T_3 + \frac{T_{4_s} - T_3}{\eta_{cs}} = 564.94\text{K}$ 。压气机耗功： $w_c = (h_2 - h_1) + (h_4 - h_3) = 450.7\text{kJ/kg}$ 。

本题虽然各级压力比相同，但进入高压级气缸的气体温度比进入低压级气缸温度高，所以各级消耗的功不相等。

8-17 某高校实验室需要压力为 6.0MPa 的压缩空气。有两人分别提出下述两个方案：A 方案采用绝热效率为 0.9 的轴流式压气机；B 方案采用活塞式气机，二级压缩，中间冷却，两缸压缩多变指数均为 1.25。试述上述两个方案的优劣。（设 $p_0 = 0.1\text{MPa}$ 、 $t_0 = 27^\circ\text{C}$ ）

提示和答案： A 方案： $T_{2_s} = T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 966.84 \text{ K}$ 、 $T_2 = T_1 + \frac{T_{2_s} - T_1}{\eta_{cs}} = 1042.92 \text{ K}$ ，

$t_2 = 767.77^\circ\text{C}$ ， $w_c = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1) = 743.7 \text{ kJ/kg}$ 。

B 方案：按耗功最小选择中间压力 $\pi_L = \pi_h = \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} = 7.746$ ， $t_a = t_b = 178.87^\circ\text{C}$ ，

$w_c = 2 \times \frac{nR_g T_1}{n-1} \times (\pi^n - 1) = 435.8 \text{ kJ/kg}$ 。比较方案： $T_{2,A} \gg T_{2,B}$ ； $w_{c,A} > w_{c,B}$ ，所以从人

身安全、设备安全角度看 B 方案优于 A 方案。比外 A 方案实施需多级压气机故较困难，而且实验室未必需要大流量的高压空气，但 A 案可提供稳定气流可能是某些场合需要的。