

需要注意的是,测压计测出的是压差,不是工质的真实压力。

温度是决定一系统是否可与其他系统处于热平衡的物理量。热力学第零定律为温度概念的建立以及温度的测量提供了依据。在国际单位制中,使用热力学温标,其单位为开[尔文](K),它与摄氏温标之间的关系是:

$$T = t + 273.15$$

显然有

$$\Delta T(K) = \Delta t(^{\circ}C)$$

要想实现热能和机械能之间的相互转换,必须通过热力过程来实现。准平衡过程和可逆过程是经典热力学中的两个重要概念。由一系列平衡态所组成的过程称为准平衡过程,准平衡过程可以利用系统的状态参数来描述和分析,为研究热力过程提供了可能。在准平衡过程的基础上,若过程中无耗散效应,就实现了可逆过程。可逆过程是一切实际过程的理想化极限模型,给热力学的研究带来的极大方便,同时也可作为实际过程能量转换效果比较的标准和极限。

功量和热量是系统与外界分别在压差和温差不平衡势差的作用下,借助于宏观的有序运动和微观的无序运动进行能量交换的两种不同方式。它们是过程量,与状态量不同,不仅与过程的初终态有关,还与过程的性质有关。可逆过程的功量和热量可用系统的状态参数,利用下列公式计算:

$$w_{re} = \int p dv$$

$$q_{re} = \int T ds$$

工质经过封闭的热力过程称为循环。衡量循环能量利用的经济性用工作系数表示

$$\text{工作系数} = \frac{\text{得到的收益}}{\text{花费的代价}}$$

对于动力循环,这一系数称为热效率 η_t ; 对于制冷循环,称为制冷系数 ϵ ; 对于热泵循环,称为热泵系数 ϵ' 。 ϵ 与 ϵ' 又常称为性能系数 COP。

思考题

【思考题 1.1】 引入平衡态解决了热力分析中的什么问题? 准平衡过程如何处理“平衡状态”与“状态变化”的矛盾? 准平衡过程的概念为什么不能完全表达可逆过程的概念?

【思考题 1.2】 “平衡”和“均匀”有什么区别和联系?

【思考题 1.3】 “过程量”和“状态量”有什么不同?

【思考题 1.4】 如果容器中气体的压力保持不变,那么压力表的读数一定也保持不变,对吗?

【思考题 1.5】 $w = \int p dv, q = \int T ds$ 可以用于不可逆过程吗? 为什么?

习题

【习题 1.1】 锅炉烟道中的烟气压力常用上部开口的斜管测量,如图 1.11 所示。若已知斜管倾角 $\alpha = 30^{\circ}$, 压力计中使用 $\rho = 0.8 \text{ g/cm}^3$ 的煤油, 斜管中液柱长度 $L = 200 \text{ mm}$, 当地大气压力 $p_b = 0.1 \text{ MPa}$ 。求烟气的绝对压力(用 MPa 表示)。

【习题 1.2】 如果气压计压力为 83 kPa, 试完成以下计算:

- ① 绝对压力为 0.15 MPa 时的表压力; $p_g = p - p_b = 150 - 83 = 67 \text{ kPa}$ 。
- ② 真空计上读数为 70 kPa 时气体的绝对压力; $p = p_b - p_v = 13 \text{ kPa}$ 。
- ③ 绝对压力为 50 kPa 时的相应真空度(kPa); $p_v = p_b - p = 83 - 50 = 33 \text{ kPa}$ 。
- ④ 表压力为 0.25 MPa 时的绝对压力(kPa)。 $p = p_g + p_b = 250 + 83 = 333 \text{ kPa}$ 。

【习题 1.3】 摄氏温标取水在标准大气压下的冰点和沸点分别为 0°C 和 100°C , 而华氏温标则相应地取为 32°F 和 212°F 。试导出华氏温标和摄氏温标之间的换算关系, 并求出绝对零度(0K 或 -273.15°C) 所对应的华氏温度。

【习题 1.4】 判断下列过程中, 哪些是可逆的? 哪些是不可逆的? 哪些可以是可逆的? 并扼要说明不可逆的原因。

- ① 定质量的空气在无摩擦、不导热的气缸和活塞中被慢慢压缩。
- ② 100°C 的蒸汽流与 25°C 的水流绝热混合。

$$1.3: \frac{t(^{\circ}\text{F}) - 32}{212 - 32} = \frac{t(^{\circ}\text{C}) - 0}{100 - 0}$$

$$t(^{\circ}\text{F}) = 1.8 t(^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$\text{当 } t(^{\circ}\text{C}) = -273.15^{\circ}\text{C 时}$$

$$t(^{\circ}\text{F}) = -459.67^{\circ}\text{F}$$

$$1.1: p_v = \rho g h = 784 \text{ Pa}$$

$$p = p_b - p_v = 0.1 - 0.000784 = 0.099216 = 9.9216 \times 10^{-2} \text{ MPa}$$

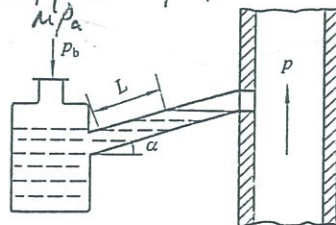


图 1.11 习题 1.1 图

$$\textcircled{1} P_I = P_{\text{空}} + P_{g,A} = 2.3 \text{ kPa} + 360 \text{ kPa} = 362.3 \text{ kPa} = P_{II} + P_{g,B}$$

$$\therefore P_{II} = P_I - P_{g,B} = 362.3 - 170 = 192.3 \text{ kPa}$$

③ 在水冷摩托发动机气缸中的热燃气随活塞迅速移动而膨胀。

④ 气缸中充有水，水上面有无摩擦的活塞，缓慢地对水加热使之汽化。

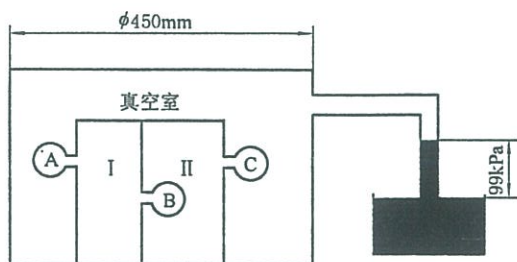


图 1.12 习题 1.5 图

【习题 1.5】如图 1.12 所示的一圆筒容器，表 A 的读数为 360 kPa；表 B 的读数为 170 kPa，表示室 I 压力高于室 II 的压力。大气压力为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。试求：

① 真空室及 I 室和 II 室的绝对压力；

② 表 C 的读数；

③ 圆筒顶面所受的作用力。

【习题 1.6】气缸内的气体由容积 0.4 m^3 可逆压缩到 0.1 m^3 ，其内部压力和容积的关系式为 $p = 0.3V + 0.04$ ，式中 p 的单位为 MPa， V 的单位为 m^3 。试求：

① 气缸作功量；

② 若活塞与气缸间的摩擦力为 1000 N，活塞面积为 0.2 m^2 时，实际耗功为多少？

【习题 1.7】一蒸汽动力厂，锅炉的蒸汽量 $D = 180 \times 10^3 \text{ kg/h}$ ，输出功率 $P = 55000 \text{ kW}$ ，全厂耗煤 $G = 19.5 \text{ t/h}$ ，煤的发热量 $Q_H = 30 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ 。蒸汽在锅炉中吸热量 $q = 2680 \text{ kJ/kg}$ 。

① 求该动力厂的热效率 η_t ；

② 锅炉的效率 η_B (蒸汽总吸热量/煤的总发热量)。

$$1.6. \textcircled{1} W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} (0.3V + 0.04) dV = (0.15V^2 + 0.04V) \Big|_{V_1=0.4}^{V_2=0.1}$$

$$= 0.15(V_2^2 - V_1^2) + 0.04(V_2 - V_1) = -0.0345 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3 = -34.5 \text{ kJ}$$

$$\textcircled{2} l = \frac{V_1 - V_2}{A} = \frac{0.4 - 0.1}{0.2} = 1.5 \text{ m}$$

$$W_{fs} = F_s \times l = 1000 \text{ N} \cdot 1.5 \text{ m} = 1.5 \text{ kJ}$$

$$W = 34.5 + 1.5 = 36 \text{ kJ}$$

$$1.7. \text{ 1小时: 做功 } W = P \times 3600 \text{ s} = 55000 \times 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 1.98 \times 10^8 \text{ kJ}$$

$$\text{蒸汽总吸热量: } Q_1 = 1 \text{ h} \times D \times q$$

$$= 1 \text{ h} \times 180 \times 10^3 \text{ kg/h} \times 2680 \text{ kJ/kg}$$

$$= 4.824 \times 10^8 \text{ kJ}$$

$$\text{煤的总发热量: } Q_2 = 1 \text{ h} \times G \times Q_H$$

$$= 1 \text{ h} \times 19.5 \text{ t/h} \times 30 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$$

$$= 5.85 \times 10^8 \text{ kJ}$$

$$\therefore \eta_t = W / Q_2 = 33.85\%$$

$$\eta_B = Q_1 / Q_2 = 82.46\%$$

表 2.2 热力参数熵

项 目	数学表达式	意义或表述
定 义	$dS = \frac{\delta Q_{re}}{T}$	熵的变化等于系统可逆过程中与外界交换的热量除以热源的热力学温度所得的商
性 质	$\oint dS = 0$	熵是状态参数, 且为广延参数
熵增原理	$dS_{iso} \geq 0$	孤立系的熵只增不减, 可逆过程中不变
熵 流	$dS_f = \frac{\delta Q}{T} + s_1 \delta m_1 - s_2 \delta m_2$	系统与外界之间发生热量交换和质量交换引起的熵变
熵 产	$dS_g = dS - dS_f \geq 0$	系统内及系统与外界间由于不可逆因素产生的熵变, 也是引起作功能力损失产生的熵
有效能损失	$I = T_0 \Delta S_g = T_0 \Delta S_{iso}$	熵产是有效能损失的
系统熵变化	$dS = \sum dS_i$	熵是广延参数, 系统熵的变化等于系统中各物体熵变化的代数和

思 考 题

- 【思考题 2.1】 热力系与外界的能量交换, 除功交换、热交换和质量交换三条途径之外, 是否还有其他途径?
- 【思考题 2.2】 热力学能、焓、熵和功量、热量有何区别, 它们与过程所经过的路径有何关系?
- 【思考题 2.3】 为什么在开口系的情况下, $q = \Delta u + w$ 仍是正确的?
- 【思考题 2.4】 体积功、流动功、轴功和技术功有何异同?
- 【思考题 2.5】 热力学能和焓都可以代表工质的能量, 它们有何区别?
- 【思考题 2.6】 由式(2.22)可知, 体积功为技术功与流动功之和, 那么是否可以说体积功一定大于技术功? 为什么?
- 【思考题 2.7】 循环热效率公式 $\eta = 1 - \frac{q_2}{q_1}$ 和 $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 有何区别? 各适用于什么场合?
- 【思考题 2.8】 热力学第二定律是否可表述为: 功可以完全变为热, 但热不能完全变为功。这种说法有何不妥?
- 【思考题 2.9】 下列说法是否正确, 为什么?
- (1) 在任何情况下, 向气体加热, 熵一定增加; 气体放热, 熵总减少。
 - (2) 熵增大的过程必为不可逆过程。
 - (3) 熵减小的过程是不可能实现的。
 - (4) 卡诺循环是理想循环, 一切循环的热效率都比卡诺循环的热效率低。
 - (5) 若从某一初态经可逆与不可逆两条途径到达同一终态, 则不可逆途径的 ΔS 必大于可逆途径的 ΔS 。
 - (6) 工质经历不可逆循环后 $\Delta S > 0$ 。
- 【思考题 2.10】 与大气温度相同的压缩气体可以从大气中吸热而膨胀作功(依靠单一热源作功), 这是否违背热力学第二定律?
- 【思考题 2.11】 闭口系统经历一个不可逆过程, 作功 15 kJ 放热 15 kJ, 系统熵变为正、为负或不能确定?
- 【思考题 2.12】 既然能量是守恒的, 那还有什么能量损失?

$$Q = \Delta u + w. \quad w = Q - \Delta u = 50 - 384 = -334 \text{ kJ. (压)}$$

【习题 2.1】 气体在某一过程中吸收了 50 kJ 的热量, 同时热力学能增加 384 kJ。问此过程所交换的功量是多少? 是膨胀功还是压缩功?

【习题 2.2】 在冬季, 某车间每小时经墙壁门窗向外散热 3×10^6 kJ, 车间里工作机器消耗的动力中有 360 kW 变成热, 另外室内点着 50 个 100 W 的电灯。为保持车间温度不变, 问每小时需另外向车间加入多少热量? $Q = \Delta u + w. \quad w = 0. \quad Q = 0. \quad \Delta u = 0.$

【习题 2.3】 闭口系统经过一热力过程, 工质由状态 1 膨胀到状态 2, 过程中系统吸收热量 50 kJ, 对外作功 35 kJ。若将工质由不同的路径从状态 2 压缩到状态 1, 外界对系统作功为 40 kJ, 则工质与外界热量交换是多少? $\Delta u = Q_1 - W_1 = 15 \text{ kJ} \quad Q_2 = \Delta u + W_2 = -15 - 40 = -55 \text{ kJ}$

【习题 2.4】 如图 2.22 所示, 系统从状态 a 沿图中路径 acb 变化到状态 b 时, 吸热 80 kJ, 对外作功 30 kJ, 试问:

(1) 系统从 a 经 d 到达 b, 若对外作功 10 kJ, 则吸热量为多少?

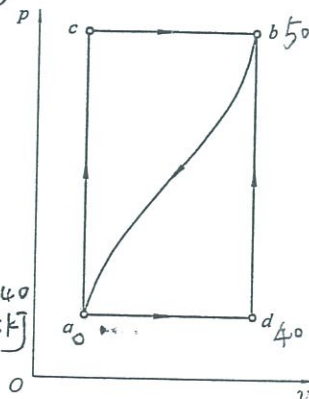


图 2.22 习题 2.4 图

$$2.2: 360 \text{ kW} \times 1 \text{ h} + 100 \text{ W} \times 1 \text{ h} \times 50 + Q_1 - 3 \times 10^6 \text{ kJ} = 0$$

$$(1). \Delta u = Q_1 - W_1 = Q_2 - W_2$$

$$Q_2 = Q_1 - W_1 + W_2 = 80 \text{ kJ} - 30 \text{ kJ} + 10 \text{ kJ} = 60 \text{ kJ}$$

$$\Delta u = 50 \text{ kJ}$$

$$Q_1 = 1.686 \times 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q = \Delta U + W = -30 \text{ kJ} + (-20 \text{ kJ}) = -70 \text{ kJ}$$

$$(3) \Delta U = U_b - U_a = 50 \text{ kJ} \therefore U_b = 50 \text{ kJ}$$

$$W_{db} = 0$$

$$\therefore Q_{db} = \Delta U_{db} + W_{db} = 10 \text{ kJ}$$

$$\Delta U_{ad} = 40 \text{ kJ}$$

$$\therefore Q_{ad} = \Delta U_{ad} + W_{ad} = 50 \text{ kJ}$$

(2) 系统由 b 经曲线所示过程返回 a, 若外界对系统做功 20 kJ, 与外界热量交换多少?

(3) 设 $U_a = 0, U_d = 40 \text{ kJ}$, 那么 ad, db 过程吸热量各为多少?

【习题 2.5】一气缸, 上端有活塞, 活塞上放置重物。气缸中有 0.8 kg 气体, 压力为 0.3 MPa。如果气体进行可逆过程并保持压力不变, 体积由 0.1 m³ 减少到 0.03 m³。这时比热力学能减少 60 kJ/kg, 试求:

(1) 气体做功多少?

(2) 气体放热多少?

(3) 气体焓的变化为多少?

【习题 2.6】密度为 $\rho = 1.13 \text{ kg/m}^3$ 的空气, 以 4 m/s 的速度在进口截面积为 0.2 m² 的管道中稳定流动。出口处密度为 2.84 kg/m³, 试求:

(1) 出口处气流的质量流量 (用 kg/s 表示);

(2) 出口速度为 6 m/s 时, 出口截面面积为多少 (以 m² 表示)。

$$m_1 = m_2 = \dot{m} = \rho_1 c_1 A_1 = \rho_2 c_2 A_2$$

$$\dot{m} = 0.904 \text{ kg/s} \quad A_2 = 0.053 \text{ m}^2$$

【习题 2.7】一台蒸汽轮机, 水蒸气进口压力为 4 MPa, 温度为 500°C, 这时焓为 3445 kJ/kg, 比体积为 0.08636 m³/kg, 进口速度为 50 m/s。水蒸气在汽轮机中绝热膨胀, 出口压力为 0.01 MPa, 温度为 160°C, 这时焓为 2796 kJ/kg, 比体积为 1.984 m³/kg。若出口速度为 120 m/s, 当质量流量为 45 t/h 时, 试求:

(1) 汽轮机的输出功率 (以 kW 表示);

(2) 进出口管道直径比;

(3) 当略去动能变化时, 功率增加 (或减少) 的百分数; $\frac{1}{2} \Delta c^2 = 5.95 \text{ kJ/kg}$

(4) 当汽轮机散热 $50 \times 10^3 \text{ kJ/h}$ 时, 功率增加 (或减少) 的百分数。13.89 kW

$P \uparrow 0.93\%$

$P \downarrow 0.173\%$

【习题 2.8】某冷凝器内有蒸汽压力为 5 kPa。蒸汽以 100 m/s 的速度进入冷凝器, 其焓为 2430.2 kJ/kg, 蒸汽冷却成水以后其焓为 137.8 kJ/kg, 流出冷凝器时的速度为 10 m/s。求每千克蒸汽在冷凝器中放出的热量 (以 kJ 表示)。

【习题 2.9】一汽车发动机的热效率是 18%, 燃气温度为 950°C, 周围环境温度为 25°C, 这个发动机的工作有没有违反热力学第二定律?

【习题 2.10】某热机循环中, 工质从热源 ($T_H = 2000 \text{ K}$) 得到热量 Q_H , 并将热量 Q_L 排至冷源 ($T_L = 300 \text{ K}$)。在下列条件下, 试确定此热机循环是可逆、不可逆或不可能:

(1) $Q_H = 1000 \text{ J}, W = 900 \text{ J}; Q_L = 100 \text{ J}$

(2) $Q_H = 2000 \text{ J}, Q_L = 300 \text{ J}; W = 1700 \text{ J}$

(3) $W = 1500 \text{ J}, Q_L = 500 \text{ J}, Q_H = 2000 \text{ J}$

$$\eta_{t,c} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 85\%$$

$$\eta_t = \frac{W}{Q_H} = \begin{cases} 90\% > \eta_{t,c} & \text{不可能} \\ 85\% = \eta_{t,c} & \text{可逆} \\ 75\% < \eta_{t,c} & \text{可能, 不可逆} \end{cases}$$

【习题 2.11】温度为 T_1, T_2 的两个热源间有两个卡诺机 A 与 B 串联工作 (即中间热源接受 A 机的放热同时向 B 机供给等量热)。试证这种串联工作的卡诺热机总效率与工作于同一 T_1, T_2 热源间的单个卡诺机效率相同。

【习题 2.12】某可逆热机工作在温度为 150°C 的高温热源和温度为 10°C 的低温热源之间, 试求:

(1) 热机的循环效率为多少? $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{283.15}{423.15} = 33.1\%$

(2) 当热机输出的功为 2.7 kJ 时, 从高温热源吸收的热量及向低温热源放出的热量各为多少? $Q_H = \frac{W}{\eta} = 8.16 \text{ kJ}, Q_L = 5.46 \text{ kJ}$

(3) 如将该热机逆向作为热泵运行在两个热源之间, 热泵的性能系数为多少? 当工质从温度为 10°C 的低温热源吸收 4.5 kJ/s 的热量时, 需要输入的功率为多少? $\varepsilon' = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = 3.0225 = \frac{Q_H}{W} = \frac{W + Q_L}{W}, Q_L = 4.5, W = \frac{4.5}{2.0225} \text{ kJ/s}$

【习题 2.13】已知 A、B、C 三个热源的溫度分别为 500 K、400 K 和 300 K, 有可逆机在这 3 个热源间工作。若可逆机从 A 热源吸入 3000 kJ 热量, 输出净功 400 kJ, 试求可逆机与 B、C 两热源的换热量, 并指明其方向。

【习题 2.14】两个质量相等、比热容相同且为定值的物体, A 物体初温为 T_A , B 物体初温为 T_B , 用它们作可逆热机的有限热源和有限冷源, 热机工作到两物体温度相等时为止。

(1) 证明平衡时的温度 $T_m = \sqrt{T_A T_B}$;

(2) 求热机作出的最大功量;

(3) 如果两物体直接接触进行热交换至温度相等时, 求平衡温度及两物体总熵的变化量。

【习题 2.15】气体在气缸中被压缩, 气体的热力学能变化为 55.9 kJ/kg, 熵变化为 -0.293 kJ/(kg·K), 输给气体的功为 186 kJ/kg。温度为 20°C 的环境可与气体发生热交换, 试确定每压缩 1 kg 气体时的熵产。0.151 kJ/(kg·K)

【习题 2.16】将 10 kg、50°C 的水与 60 kg、90°C 的水在绝热容器中混合, 求混合后体系的熵增及混合过程引起的作功能力的损失。已知水的比热容为 4.1868 kJ/(kg·K), 环境温度为 300 K。

$$2.13: \oint \frac{\delta Q}{T} = 0 \quad \frac{Q_A}{T_A} + \frac{Q_B}{T_B} + \frac{Q_C}{T_C} = 0$$

$$\begin{cases} Q_A + Q_B + Q_C - W = 0 \\ Q_A = 3000 \text{ kJ} \quad (1/2) \quad 500 \text{ K} \\ Q_B = -3200 \text{ kJ} \quad (3/2) \quad 400 \text{ K} \\ Q_C = 600 \text{ kJ} \quad (1/2) \quad 300 \text{ K} \end{cases}$$

38

$$2.15: Q = \Delta U + W$$

$$\Delta U = 55.9, W = -186$$

$$\therefore Q = -130.1$$

$$\Delta S = \Delta S_g + \Delta S_f$$

$$\Delta S_g = \Delta S - \Delta S_f$$

$$= -0.293 - \frac{-130.1}{\frac{20 + 273.15}{2}} = 0.151 \text{ kJ/(kg·K)}$$

$$2.16: t_m = 84.3^\circ \text{C}$$

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$$

$$= \int_{50+273.15}^{84.3+273.15} \frac{10 \times C}{T} dT$$

$$+ \int_{90+273.15}^{84.3+273.15} \frac{60 \times C}{T} dT$$

$$= 0.25 \text{ kJ/K}$$

$$I = T_0 \Delta S_{iso} = 75 \text{ kJ}$$

空气在干燥箱内经历的是绝热加湿过程,有 $h_3=h_2$,由 h_3 及 $t_3=40^\circ\text{C}$ 查得

$$d_3=0.016 \text{ kg/kg(干空气)}$$

根据上述各点状态参数,可计算得每千克空气吸收的水分和所消耗热量为

$$\Delta d=d_3-d_2=d_3-d_1=0.016-0.012=0.004 \text{ kg/kg(干空气)}$$

$$q=h_2-h_1=82-56=26 \text{ kJ/kg(干空气)}$$

蒸发 1 kg 水蒸气所需干空气量和消耗的热量为

$$m_a=\frac{1}{\Delta d}=\frac{1}{0.004}=250 \text{ kg(干空气)}$$

$$Q=m_a q=250 \times 26=6.5 \times 10^3 \text{ kJ}$$

本章小结

本章重点介绍了各种工质的热力性质。其中包括理想气体的热力性质、水蒸气的热力性质和理想气体混合物的热力性质。

通过本章的学习,应重点掌握下列内容:

- (1) 理想气体的性质及其状态方程,状态方程的几种形式及其应用。
- (2) 理想气体比热容的定义及与温度的单值函数关系,理想气体真实比热容、平均比热容和定值比热容的计算公式及其应用。
- (3) 熟练掌握在不同比热容的情况下,理想气体热力学能、焓和熵的变化量的计算方法。
- (4) 了解定压下水蒸气发生过程所经历的几个阶段及其状态变化。熟练掌握水蒸气 $p-v$ 图和 $T-s$ 图中的一点、两线、三区 and 五态。熟悉水蒸气热力性质图表并能用于解决工程实际问题。
- (5) 熟练掌握理想气体混合物的成分表示法,混合物的折合气体常数、比热容以及热力学能、焓和熵变的计算。
- (6) 理解湿空气状态参数和有关概念,如分压力、饱和压力、露点温度、绝对湿度、相对湿度、含湿量和比焓。熟悉湿空气的 $h-d$ 图及其在湿空气热力过程中的应用。

思考题

- 【思考题 3.1】 什么是理想气体? 将工质按理想气体处理,在计算上有什么方便?
- 【思考题 3.2】 比热容有哪些种类? 它们之间有何区别和联系,实际工程计算中如何应用?
- 【思考题 3.3】 比热容值的大小与吸热或放热过程的途径有关, c_p 及 c_v 分别代表测量热量时两种不同的途径,它们好似都是过程量;但 c_p 及 c_v 的热力学定义明确地指出了它们都是状态量。它们究竟是过程量还是状态量? 这个问题,你是如何理解的?
- 【思考题 3.4】 为什么气体常数与气体的种类有关,而通用气体常数与气体的种类无关?
- 【思考题 3.5】 试写出计算理想气体(定值比热容)熵值变化的三个基本公式,它们是在可逆过程条件下导出的,为什么可以适用理想气体的任何过程?
- 【思考题 3.6】 为什么水蒸气不能当作理想气体处理? 掌握水蒸气的热力性质有何重要意义?
- 【思考题 3.7】 定压下水蒸气的产生过程可分为哪几个阶段、经历哪几种状态? 请将它们的名称写出来。
- 【思考题 3.8】 能否用饱和温度和饱和压力作为两个状态参数来确定湿饱和蒸汽的状态? 为什么?
- 【思考题 3.9】 对于水蒸气的热力过程与理想气体的热力过程,在分析方法上有何异同?
- 【思考题 3.10】 夏季时,室内自来水管的外表面常出现水珠,冬季时,玻璃窗靠近室内的一侧常出现结冰,试说明其原因。
- 【思考题 3.11】 未饱和湿空气的干球温度、湿球温度和露点,哪个最大? 哪个最小? 对于饱和湿空气三者大小关系又将如何?
- 【思考题 3.12】 理想气体混合物各组元气体的实际体积与其分体积的区别何在?

习题

【习题 3.1】 已知压气站排出的空气温度为 150°C , 压力为 0.7 MPa (表压), 每分钟排出的空气体积为 80 m^3 。当地大气压力为 0.1 MPa , 温度为 20°C , 求压气机每分钟排出的以大气状态下的体积计算的空气量。

66 3.1: $p_1=0.8 \text{ MPa}$, $T_1=423.15 \text{ K}$, $V_1=80 \text{ m}^3$
 $p_2=0.1 \text{ MPa}$, $T_2=293.15 \text{ K}$
 $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \therefore V_2=443.38 \text{ m}^3$

3.2: $p_1 = 130 \text{ kPa}$, $p_2 = 400 \text{ kPa}$
 $T_1 = 318.15 \text{ K}$, $T_2 = 343.15 \text{ K}$
 $p_1 \cdot \frac{V}{m_1} = R_g T_1$, $p_2 \cdot \frac{V}{m_1 + m_2} = R_g T_2$
 $m_1 = 6.486 \text{ kg}$, $m_2 = 12 \text{ kg}$
 【习题 3.2】把 CO_2 压送到体积为 3 m^3 的储气罐内, 初态表压力为 $p_{s1} = 30 \text{ kPa}$, 终态表压力为 300 kPa , 温度由 $t_1 = 45^\circ\text{C}$ 增加到 $t_2 = 70^\circ\text{C}$, 试求被压入的 CO_2 的质量。大气压力 $p_0 = 100 \text{ kPa}$ 。

【习题 3.3】氧气瓶的体积为 $V = 0.30 \text{ m}^3$, 瓶中氧气的表压力为 $p_{s1} = 1.4 \text{ MPa}$, $t_1 = 30^\circ\text{C}$ 。问瓶中盛有多少氧气? 若气焊时用去一半氧气, 温度降为 $t_2 = 20^\circ\text{C}$, 试问此时氧气瓶的表压力为多少(当地大气压力 $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$)?

【习题 3.4】已知 N_2 , H_2 , O_2 的相对分子质量分别为 28.016, 2.016, 32, 求它们的气体常数。

【习题 3.5】在体积为 0.3 m^3 的封闭容器内装有氧气, 其压力为 300 kPa , 温度为 15°C , 问加入多少热量才能使氧气温度上升到 800°C ?

(1) 按定值比热容计算; (2) 按平均比热容计算。

【习题 3.6】根据氮气的热力性质表中 25°C 及 327°C 时氮的焓的数值, 试求 25°C 到 327°C 间氮气的平均比定压热容 $c_{p,m}$ 的数值。

【习题 3.7】将 1 kg 空气由 $t_1 = 30^\circ\text{C}$ 定压加热到 $t_2 = 400^\circ\text{C}$, 分别用定值比热容、平均比热容计算其热力学能和焓的变化。

【习题 3.8】 1 mol 氧气, 其温度由 300 K 增加到 600 K , 且压力由 0.2 MPa 降低到 0.15 MPa , 试求其熵的变化。

(1) 按氧气的热力性质表计算;

(2) 按定值比热容计算。

【习题 3.9】 2 kg 的 CO_2 , 由 $p_1 = 800 \text{ kPa}$, $t_1 = 900^\circ\text{C}$ 膨胀到 $p_2 = 120 \text{ kPa}$, $t_2 = 600^\circ\text{C}$, 试利用定值比热容求其热力学能、焓和熵的变化。

【习题 3.10】试根据水蒸气的 $h-s$ 图, 求下列已知条件下各状态的其他状态参数 p, v, t, h, s 及 x 。已知

(1) $p = 0.5 \text{ MPa}$, $t = 500^\circ\text{C}$;

(2) $p = 0.3 \text{ MPa}$, $h = 2550 \text{ kJ/kg}$;

(3) $t = 180^\circ\text{C}$, $s = 6.0 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$;

(4) $p = 0.01 \text{ MPa}$, $x = 0.90$ 。

【习题 3.11】已知过热蒸汽的 $p_1 = 3.0 \text{ MPa}$, $t = 425^\circ\text{C}$, 试根据水蒸气表求 v, h, s, u 和过热度, 再利用 $h-s$ 图求上述参数。

【习题 3.12】已知水蒸气的压力为 1.6 MPa , 干度为 0.9 , 试分别用水蒸气热力性质表和 $h-s$ 图确定该状态的其他参数 t, v, h 和 s 。

【习题 3.13】水蒸气的初始压力为 $p_1 = 2.0 \text{ MPa}$, 温度为 $t_1 = 300^\circ\text{C}$, 可逆绝热膨胀到 $p_2 = 0.04 \text{ MPa}$, 求过程膨胀功。

【习题 3.14】汽轮机进口蒸汽参数为 $p_1 = 3.0 \text{ MPa}$, $t_1 = 435^\circ\text{C}$, 经可逆绝热膨胀至 $p_2 = 0.005 \text{ MPa}$ 。蒸汽流量为 4.0 kg/s , 求蒸汽机的理想功率为多少千瓦?

【习题 3.15】湿蒸汽经历一个焓不变的过程, 初态压力 $p_1 = 2.0 \text{ MPa}$, 终态的压力 $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$, 温度 $t_2 = 120^\circ\text{C}$, 求初态的干度 x_1 。

【习题 3.16】由氧气、氮气和二氧化碳组成的混合气体, 各组元的物质的量为 $n_{\text{O}_2} = 0.08 \text{ kmol}$, $n_{\text{N}_2} = 0.65 \text{ kmol}$, $n_{\text{CO}_2} = 0.3 \text{ kmol}$, 求混合气体的体积分数和质量分数。

【习题 3.17】混合气体的体积分数为 $\varphi_{\text{CO}_2} = 12.3\%$, $\varphi_{\text{N}_2} = 80.5\%$, $\varphi_{\text{O}_2} = 7.2\%$ 。试求将标准状态下的 1 m^3 混合气体在定压下由 200°C 加热到 1000°C 所需的热量。按平均比热容计算。

【习题 3.18】混合气体的体积分数为 $\varphi_{\text{O}_2} = 0.14$, $\varphi_{\text{N}_2} = 0.25$, $\varphi_{\text{CO}_2} = 0.61$ 。要使 N_2 的分压力 $p_{\text{N}_2} = 120 \text{ kPa}$, 问混合气体的压力应为多少? 此时 CO_2 的分压力是多少?

【习题 3.19】设大气压力为 0.1 MPa , 温度为 25°C , 相对湿度为 $\varphi = 55\%$, 试用分析法求湿空气的露点温度、含湿量和比焓。并查 $h-d$ 图校核之。

【习题 3.20】将 $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$, $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 30\%$ 的空气加热到 $t_2 = 85^\circ\text{C}$ 后送入烘箱烘干物体, 从烘箱出来时空气 $t_2 = 35^\circ\text{C}$, 试求从烘干物体中吸收 1 kg 水分所消耗的干空气质量和热量。

3.9: $C_v = 661.34 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, $C_p = 1.3 C_v = 859.74 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$
 $\Delta U = C_v \cdot \Delta t \cdot m = -396.8 \text{ kJ} \cdot \checkmark$
 $\Delta H = C_p \cdot \Delta t \cdot m = -515.844 \text{ kJ} \cdot \checkmark$
 $\Delta S = (C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}) m$
 $= (-253.916 + 358.556) \times 2$
 $(R_g = 189 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) = 209.28 \text{ J/K} \cdot \checkmark$

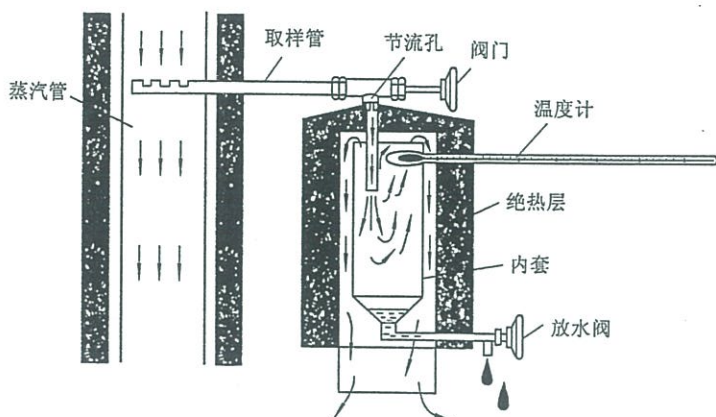


图 4.25 湿蒸汽干度测定示意图

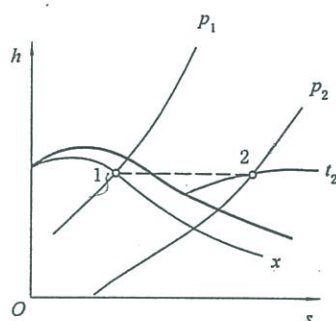


图 4.26 湿蒸汽的绝热节流过程

变,于是由点 2 出发,沿水平线(等焓线)与测得的节流前湿蒸汽的压力 p_1 线交于点 1,就可以从点 1 确定湿蒸汽的干度,如图 4.26 所示。

本章小结

本章研究了一些典型的热力过程。通过本章的学习,以下内容应较好地掌握。

(1) 对于理想气体的基本热力过程及多变过程,应掌握过程初、终态基本状态参数之间的关系,过程中系统与外界交换的热量、功量的计算,并能将过程表示在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上,正确应用 $p-v$ 图和 $T-s$ 图分析过程的性质。

(2) 对于气体和蒸气的压缩过程,应掌握活塞式压气机和叶轮式压气机的工作原理,能进行压气机的耗功分析和计算,了解多级压缩、中间冷却的工作情况,了解余隙容积对活塞式压气机工作的影响。

(3) 对于气体与蒸气的流动过程,弄清促使流速改变的力学条件和几何条件,以及这两个条件对流速的影响,理解气流截面面积变化的原因,能熟练地进行喷管的设计和校核两类计算。

(4) 对于绝热节流过程,了解节流前后参数的变化情况。

思考题

【思考题 4.1】 绝热过程是否必是定熵过程;定熵过程的过程方程式是否一定是 $p v^\gamma = \text{常量}$?

【思考题 4.2】 是否所有的热力过程都是多变过程?

【思考题 4.3】 压气机的余隙容积有何影响?

【思考题 4.4】 实际压气机的工作过程与理想压气机的工作过程有哪些不同?

【思考题 4.5】 多级压缩、中间冷却是如何省功的? 如果压气机的压缩过程为定温过程,采用多级压缩、中间冷却是否省功? 如果只采用多级压缩而无中间冷却又如何呢?

【思考题 4.6】 在给定的定熵流动中,流道各截面的滞止参数是否相同? 为什么?

【思考题 4.7】 渐缩喷管内的流动情况,在什么条件下不受背压变化的影响? 若进口压力有所改变(其余不变),则流动情况又将如何?

【思考题 4.8】 气体在喷管中流动加速时,为什么会出现喷管面积逐渐扩大的情况? 常见的河流和小溪,遇到流道狭窄处,水流速度明显上升,很少见到水流速度加快处,会是流道截面面积加大的地方,这是为什么?

习题

【习题 4.1】 压气机贮气罐内空气温度为 120°C , 压力为 0.9 MPa , 当贮气罐的进、排气停止后, 温度最终降到 20°C 。求贮气罐内空气的最终压力、 1 kg 空气放出的热量和空气比熵的变化。设空气比热容为定值。

【习题 4.2】 某理想气体的初始体积为 0.06 m^3 , 温度为 15°C , 在压力为 0.2 MPa 下定压膨胀到 0.12 m^3 , 设气体为三原子气体, 比热容为定值, 求最终温度、加于过程的热量和对外作的功。

【习题 4.3】 某理想气体的初始体积为 0.028 m^3 , 压力为 0.7 MPa , 在温度为 20°C 下等温膨胀到压力为 0.14 MPa , 求最终体积、过程的热量, 作出的功和总熵的变化。

$$98 \quad 4.3. \quad p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad \therefore V_2 = 0.14 \text{ m}^3$$

$$(W = Q = m \cdot R_g T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 V_1 \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = 31.545 \text{ kJ})$$

$$(S = Q/T = 107.61 \text{ J/K})$$

$$4.8: \frac{1}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n, n=1.26 \quad \left(\frac{T_1}{T_2}\right) = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad v_2 = \frac{1}{n-1} m(p_1 v_1 - p_2 v_2) = m \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot C_v (T_2 - T_1)$$

$$p_1 = 0.1 \text{ MPa}, p_2 = 1.4 \text{ MPa} \quad T_1 = 293.15 \text{ K} \quad = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{n-k}{n-1} \cdot \frac{1}{k-1} p_g \cdot m \cdot (T_2 - T_1)$$

$$v_1 = 0.1 \text{ m}^3, \therefore v_2 = 0.0123 \text{ m}^3 \quad \therefore T_2 = 170.0542 \text{ K} \quad = -27.841 \text{ kJ} \quad k=1.4$$

【习题 4.4】 1 kg 空气的温度为 200°C, 压力为 0.8 MPa, 等熵膨胀至压力为 0.16 MPa, 求最终温度, 产生的功和热力学能的变化。设比热容为定值。

【习题 4.5】 气体的压力为 0.1 MPa, 温度为 20°C, 体积为 0.1 m³, 多变压缩至压力为 1.4 MPa, 多变指数为 1.26。若气体为理想气体、双原子, 比热容为定值, 求最终体积、最终温度、过程的功和热量。

【习题 4.6】 试将满足以下要求的理想气体多变过程在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上表示出来(先画出四个基本热力过程):

- (1) 气体受压缩、又升温、又放热; *膨胀、降温、放热*
- (2) 气体又放热、又降温、又升压;
- (3) 气体受压缩、又降温、又升压。

【习题 4.7】 一单级活塞式压气机, 每小时吸入的空气量 $V_1 = 120 \text{ m}^3/\text{h}$, 吸入空气的温度 $t_1 = 17^\circ\text{C}$, 压力为 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$, 输出空气的压力为 $p_2 = 0.64 \text{ MPa}$ 。试按下列三种情况计算压气机所需的理想功率: (1) 定温压缩; (2) 绝热压缩; (3) 多变压缩 ($n=1.2$)。

【习题 4.8】 一台两级压气机, 进入压气机的空气温度 $t_1 = 17^\circ\text{C}$, 压力 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$, 压气机将空气压缩至 $p_2 = 2.5 \text{ MPa}$, 压气机的生产量为 $500 \text{ m}^3/\text{h}$ (标准状态), 两级压气机中的压缩过程均按多变指数 $n=1.25$ 进行。现以压气机耗功最小为条件, 试求: $p_g = 287 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$

- (1) 空气在低压缸中被压缩后的压力 p_x ;
- (2) 空气在压气机中压缩后的温度;
- (3) 压气机耗功量;
- (4) 空气在中间冷却器中放出的热量。

$$\begin{aligned} p_1, T_1, V_1 \\ p_x, T_x, V_x' \\ p_x, T_x', V_x' \\ p_2, T_2, V_2 \end{aligned}$$

$$T_2' = T_1 = 290.15 \text{ K}$$

【习题 4.9】 空气以 120 m/s 的速度在管道内流动, 用水银温度计测量空气的温度。若温度计的读数为 60°C , 试求空气的实际温度。

【习题 4.10】 燃烧室产生的燃气压力为 0.8 MPa、温度为 900°C , 让燃气通过一个喷管流入压力为 0.1 MPa 的空间, 以获得高速气流。流经喷管的燃气流量为 0.93 kg/s 。已知燃气的比定压热容 $c_p = 1.133 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, 比热容比 $\kappa = 1.34$ 。

- (1) 为使气体充分膨胀, 应选用何种形式的喷管? 能否获得超音速气流?
- (2) 求喷管出口处气流速度和出口截面面积。

【习题 4.11】 空气流经渐缩喷管作定熵流动。已知进口截面上空气参数为 $p_1 = 0.6 \text{ MPa}$, $t_1 = 700^\circ\text{C}$, $c_{f1} = 312 \text{ m/s}$, 出口截面面积 $A_2 = 30 \text{ cm}^2$ 。试求:

- (1) 喷管出口的流速和流量。
- (2) 若设计一喷管以充分利用压差, 应选何种形状? 喷管的出口流速为多少?

【习题 4.12】 水蒸气由初态 1.0 MPa、 300°C 定熵地流经渐缩喷管射入压力 $p_b = 0.5 \text{ MPa}$ 的空间。若喷管的出口截面面积为 30 cm^2 , 初速度可忽略不计。试求喷管出口处蒸汽的压力、温度、流速以及质量流量。

$$4.8: (1) p_x = \sqrt{p_1 p_2} = 0.5 \text{ MPa} \quad (4) q = c_p \Delta T \quad \text{附表 5: } C_{p10}^{17} = 1.00434$$

$$(2) T_2' = T_1 = 290.15 \text{ K} \quad 1004 = \frac{q}{T} \text{ J/(kg}\cdot\text{K)} \times \quad C_{p10}^{127} = 1.00762$$

$$\left(\frac{T_1}{T_2}\right) = \left(\frac{p_x}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad - (400.33 - 290.15) \text{ K} \quad q = C_{p10}^{17} \times (1) - C_{p10}^{127} \times (2)$$

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{p_2}{p_x}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (-110.6) = -79 \text{ kJ/kg} \quad = -111 \text{ kJ/kg} \quad \checkmark$$

$$\therefore T_1' = T_2 = 400.33 \text{ K} \quad 1 \text{ h: } Q = 5.1 \times 10^4 \text{ kJ} \quad \text{温差不大, 可用定值比热容}$$

$$(3) (W_s)_c = p_g T_1 \frac{n}{n-1} \left[2 - \left(\frac{p_x}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - \left(\frac{p_2}{p_x}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$= p_g T_1 \frac{n}{n-1} \cdot 2 [1 - 5^{0.2}]$$

$$= -316.2125 \text{ kJ/kg} \quad \checkmark$$

$$500 \text{ m}^3/\text{h} \quad p_0 = 101325 \text{ Pa}, T_0 = 273.15 \text{ K}$$

$$1 \text{ h: } m = \frac{p_0 V}{p_g T_0} = 646.254 \text{ kg}$$

$$\dot{m} = 0.18 \text{ kg/s}$$

$$P = (W_s)_c \cdot \dot{m} = 56.92 \text{ kW}$$

$$1 \text{ h: } W = 2.044 \times 10^5 \text{ kJ} \quad \checkmark$$

思考题

【思考题 5.1】 内燃机的理想循环有几种,从对理想循环的分析可以看出,哪些因素影响内燃机的热效率?

【思考题 5.2】 从理想循环的分析可知,提高内燃机的压缩比可提高内燃机的热效率。但实际内燃机的压缩比是不能任意提高的,受什么因素的限制?

【思考题 5.3】 为什么要将内燃机实际工作循环抽象、简化为理想工作循环来分析,这样抽象、理想化处理采用了哪些方法?

【思考题 5.4】 使用制冷装置可以获得低温。有人试图以制冷装置得到的低温物质作为热机循环中的低温热源,达到扩大温差、提高热机循环热效率的目的。这种作法是否有利?

【思考题 5.5】 如图 5.12(a)所示,若蒸汽压缩式制冷循环按 1-2-2'-3-5-1 运行,循环耗功量没有变化,仍为 h_2-h_1 ,而制冷量则由 h_1-h_4 增大为 h_1-h_5 ,可见这种循环的好处是明显的,但为什么没有被采用?

【思考题 5.6】 试分析在蒸汽压缩式制冷循环中,增加膨胀阀前液体制冷剂的过冷度为什么能提高制冷循环的制冷系数?

【思考题 5.7】 在图 5.11 中,有人企图不用冷凝器,而使状态 2 的工质直接进行绝热膨胀降温,然后去冷库吸热制冷,这是否可行?为什么?

【思考题 5.8】 吸收式制冷和蒸汽压缩式制冷相比有哪些主要区别?

【思考题 5.9】 热泵供热循环与制冷循环有何异同?试在 $T-s$ 图上把两者表示出来。

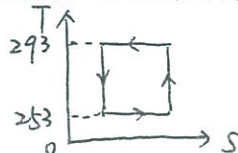
习 题

【习题 5.1】 一以空气为工质的定容加热理想循环,压缩开始时的压力为 0.1 MPa,温度为 $t_1=35^\circ\text{C}$,压缩比为 5,每公斤工质的加热量为 $q_1=1200\text{ kJ}$,求压缩终了、燃烧终了和膨胀终了的温度,并求 1 kg 工质的循环净功和循环的热效率。按定值比热容计算。

【习题 5.2】 活塞式内燃机混合加热理想循环的参数为 $p_1=0.1\text{ MPa}$, $t_1=17^\circ\text{C}$,压缩比 $\epsilon=16$,升压比 $\lambda=1.4$,预胀比为 $\rho=1.7$,假设工质为空气且比热容为定值,试求循环各点的状态参数、循环净功及循环热效率。

【习题 5.3】 某制冷装置的制冷量为 250000 kJ/h,冷藏室的温度保持在 -20°C ,周围环境的温度等于 20°C 。试求:

- (1) 此制冷循环制冷系数可能的最大值为多少? 6.33
- (2) 此装置所必须消耗的最小功率; $3.95 \times 10^4\text{ kJ/h}$
- (3) 每小时传给周围环境的热量是多少? $2.895 \times 10^5\text{ kJ}$
- (4) 将此制冷循环画在 $T-s$ 图上。



【习题 5.4】 某蒸汽压缩制冷装置用氨作制冷剂。制冷量为 10^5 kJ/h 。蒸发温度为 -20°C ,冷凝温度为 30°C ,冷凝器出口为饱和液体状态,压缩机进口为干饱和蒸气状态,压缩机的绝热效率 $\eta_{c,s}=0.75$ 。试求:

- (1) 每千克氨的制冷量;
- (2) 循环耗功量 w_c ;
- (3) 制冷系数 ϵ ;
- (4) 循环中每小时氨的质量流量;
- (5) 由于不可逆绝热压缩引起的作功能力损失。环境温度 $t_0=20^\circ\text{C}$ 。

【习题 5.5】 冬天室内取暖利用热泵。将氟里昂 134a 蒸汽压缩式制冷机改为热泵,此时蒸发器放在室外,冷凝器放在室内。设蒸发器中氟里昂 134a 的温度为 -10°C ,冷凝器中氟里昂 134a 蒸气的冷凝温度为 30°C 。试求:

- (1) 热泵的供热系数;
- (2) 室内供热 10^5 kJ/h 时,用以带动热泵所需的理论功率;
- (3) 当用电炉直接供热(热量亦为 10^5 kJ/h)时,电炉的功率应为多少?

$$5.2. R_g = 287\text{ J/kg}\cdot\text{K}, k = \gamma = 1.4.$$

$$C_p = 1004\text{ J/kg}\cdot\text{K}, C_v = 717\text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$p_1 v_1 = R_g T_1, p_1 = 0.1\text{ MPa}$$

$$T_1 = 290.15\text{ K}, v_1 = 0.8327305\text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \epsilon^k, \therefore p_2 = 4.85\text{ MPa}$$

112

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \epsilon^{k-1}, \therefore T_2 = 879.57\text{ K}$$

$$v_3 = v_2 = 0.0520456563\text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} = \lambda, \therefore p_3 = 6.79\text{ MPa}, T_3 = 1231.4\text{ K}$$

$$p_4 = p_3 = 6.79\text{ MPa}, \frac{T_4}{T_3} = \frac{v_4}{v_3} = \rho$$

$$\therefore v_4 = 0.0885\text{ m}^3/\text{kg}, T_4 = 2093.38\text{ K}$$

$$v_5 = v_1 = 0.8327305\text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\left(\frac{p_5}{p_4}\right) = \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^k, \therefore p_5 = 0.2944\text{ MPa}$$

$$\left(\frac{T_5}{T_4}\right) = \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^{k-1}, \therefore T_5 = 853.933\text{ K}$$

$$\text{吸热: } q_1 = q_{1v} + q_{1p}$$

$$= C_v(T_3 - T_2) + C_p(T_4 - T_3) = 1117.7\text{ kJ/kg}$$

$$\text{放热: } |q_2| = C_v(T_5 - T_1)$$

$$= 404.232\text{ kJ/kg}$$

$$\therefore w_{net} = q_1 - |q_2| = 713.468\text{ kJ/kg}$$

$$\therefore \eta_t = \frac{w_{net}}{q_1} = 63.83\%$$

或 p_{104} 公式 (5.4)