

第二章 热力学第一定律

2-1 一汽车在 1h 内消耗汽油 34.1L, 已知汽油的发热量为 44 000kJ/kg, 汽油密度为 750kg/m³。测得该车通过车轮输出的功率为 64kW, 试求汽车通过排气、水箱散热等各种途径所放出的热量。

提示和答案: 汽车输出功率等于净换热率, $Q_{\text{out}} = Q - W \times 3600 = 894\,900\text{kJ/h}$ 。

2-2 质量为 1 275 kg 的汽车在以 60 000 m/h 的速度行驶时被踩刹车止动, 速度降至 20 000 m/h, 假定刹车过程中 0.5kg 的刹车带和 4kg 钢刹车鼓均匀加热, 但与外界没有传热, 已知刹车带和钢刹车鼓的比热容分别是 1.1 kJ/(kg·K) 和 0.46 kJ/(kg·K), 求刹车带和刹车鼓的温升。

提示和答案: 没有传热, 也没有做功, 速度降低, 动能转化为刹车带和刹车鼓的热力学能, $\frac{m_{\text{car}}(c_2^2 - c_1^2)}{2} - (m_s c_{V,s} + m_b c_{V,b})(t_2 - t_1) = 0$, $(t_2 - t_1) = 65.9^\circ\text{C}$ 。

2-3 1 kg 氧气置于图 2-1 所示气缸内, 缸壁能充分导热, 且活塞与缸壁无摩擦。初始时氧气压为 0.5MPa, 温度为 27°C。若气缸长度为 2 l, 活塞质量为 10kg, 试计算拔除销钉后, 活塞可能达到的最大速度。

提示和答案: 气体可逆膨胀对外界做功最大, 与排斥大气功的差转化为活塞动能, 达到最大速度, $c_2 = 87.7\text{m/s}$ 。

2-4 气体在某一过程中吸收了 50J 的热量, 同时热力学能增加了 84J, 问此过程是膨胀过程还是压缩过程? 对外做功是多少 J?

提示和答案: 取气体为闭口系, 据能量方程式 $W = Q - \Delta U = -34\text{J}$, 是压缩过程。

2-5 在冬季, 某加工车间每小时经过墙壁和玻璃等处损失热量 $3 \times 10^6\text{kJ}$, 车间中各种机床的总功率是 375kW, 且全部动力最终变成了热能。另外, 室内经常点着 50 盏 100W 的电灯。为使该车间温度保持不变, 问每小时需另外加入多少热量?

提示和答案: 车间内产生的热量等散失的热量, 即保持温度不变, $Q_{\text{补}} = -Q_{\text{loss}} - Q_m - Q_E = 1632000\text{kJ}$ 。

2-6 夏日为避免阳光直射, 密闭门窗, 用电风扇取凉, 电风扇功率为 60W。假定房间内初温为 28°C, 压力为 0.1MPa; 太阳照射传入的热量为 0.1kW, 通过墙壁向外散热 1800 kJ/h。若室内有 3 人, 每人每小时向环境散发的热量为 418.7kJ, 试求面积为 15m², 高度为 3.0m

的室内每小时温度的升高值。已知空气的热力学能与温度的关系为 $\Delta u = 0.72 \{ \Delta T \}_K$ kJ/kg。

提示和答案：取室内空气为系统，考虑到 $W = 0$ 并 $m = \frac{pV}{R_g T}$ ， $\Delta T = \frac{Q}{0.72m} = 0.86K$ 。

2-7 一飞机的弹射装置如图 2-15 所示，在气缸内装有压缩空气，初始体积为 $0.28m^3$ ，终了体积为 $0.99m^3$ ，飞机的发射速度为 $61m/s$ ，活塞、连杆和飞机的总质量为 $2722kg$ 。设发射过程进行很快，压缩空气和外界间无传热现象，若不计摩擦损耗，求发射过程中压缩空气热力学能的变化量。

提示和答案：取压缩空气为系统， $Q = \Delta U + W$ ，考虑到绝热及排斥大气功， $\Delta U = -p_0(V_2 - V_1) - \frac{m}{2}c_2^2 = -5135 \times 10^3 J$ 。

2-8 如图 2-16 所示，气缸内空气的体积为 $0.008 m^3$ ，温度为 $17^\circ C$ 。初始时空气压力为 $0.1013 MPa$ ，弹簧处于自由状态。现向空气加热，使其压力升高，并推动活塞上升而压缩弹簧。已知活塞面积为 $0.08 m^2$ ，弹簧刚度 $k = 400 N/cm$ ，空气热力学能变化关系式为 $\Delta u = 0.718 \{ \Delta T \}_K$ kJ/kg。环境大气压力 $p_b = 0.1 MPa$ ，试求使气缸内的空气压力达到 $0.15 MPa$ 所需的热量。

提示和答案：先求活塞质量及初终态参数。初始时弹簧呈自由状态， $m_{\text{活}}g + p_b A = p_1 A$ ， $m_{\text{活}} = \frac{(p_1 - p_b)A}{g} = 10.61kg$ 。空气质量 $m_a = \frac{p_1 V_1}{R_g T_1} = 9.73 \times 10^{-3} kg$ ， $h = \frac{V_1}{A} = 0.1m$ ；终态时，据力平衡 $(p_2 - p_b)A - m_{\text{活}}g = kx_2$ ，求得 $x_2 = 0.0974m$ ， $V_2 = 0.0158m^3$ ， $T_2 = 848.26K$ ， $\Delta U = 3.90kJ$ 。取空气为系统， $W = \int_1^2 p dV = \int_1^2 \left[p_b + \frac{(m_{\text{活}}g + kx)}{A} \right] d(Ax) = 0.98kJ$ ， $Q = \Delta U + W = 4.88kJ$ 。

2-9 有一橡皮气球，当其内部气体的压力和大气压相同并为 $0.1MPa$ 时呈自由状态，体积为 $0.3m^3$ 。气球受火焰照射，体积膨胀 1 倍，压力上升为 $0.15MPa$ ，设气球内的压力变化和体积成正比。试求：(1) 该过程中气体作的功；(2) 用于克服橡皮气球弹力所作的功；(3) 若初始时气体温度为 $17^\circ C$ ，求球内气体的吸热量。已知该气体的常数 $R_g = 287J/(kg \cdot K)$ ，热力学能 $\Delta u = 0.72 \{ \Delta T \}_K$ kJ/kg。

提示和答案：令 $\Delta p = (p - p_0) = kV + b$ ，据 $V_1 = 0.3m^3$ ， $\Delta p = 0$ ； $V_2 = 0.6m^3$ ，

$\Delta p = 0.05 \text{ MPa}$ 。解得 $b = -0.05$ 、 $k = 0.166$ 。所以 $\Delta p = 0.1667V - 0.05$ 。

$$(1) W = \int_1^2 p dV = \int_{V_1}^{V_2} (\Delta p + p_0) dV = 37.5 \text{ kJ};$$

$$(2) W_{\text{斥}} = p_0(V_2 - V_1) = 30 \text{ kJ}, \quad W_{\text{弹}} = W - W_{\text{斥}} = 7.5 \text{ kJ};$$

$$(3) Q = m(u_2 - u_1) + W = 188.1 \text{ kJ}。$$

2-10 空气在压气机中被压缩，压缩前空气的参数是： $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $v_1 = 0.845 \text{ m}^3/\text{kg}$ ；压缩后的参数是 $p_2 = 0.8 \text{ MPa}$ 、 $v_2 = 0.175 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。设在压缩过程中 1 kg 空气的热力学能增加 139.0 kJ ，同时向外放出热量 50 kJ 。压气机每分钟产生压缩空气 10 kg 。试求：(1) 压缩过程中对 1 kg 空气作的功；(2) 每生产 1 kg 压缩空气所需的功（技术功）；(3) 带动此压气机要用多大功率的电动机？

提示和答案：(1) 压缩过程气缸内气体质量不变，闭口系能量方程， $w = q - \Delta u = -189.5 \text{ kJ/kg}$ ；(2) 压气机吸进低压气体排出高压气体，是开口热力系，生产 1 kg 空气需要的是技术功 w_t ， $w_t = q - \Delta h = -244.5 \text{ kJ/kg}$ ；(3) $N = q_m w_t = 40.8 \text{ kW}$ 。

2-11 某建筑物的排气扇每秒能把 2.5 kg/s 压力为 98 kPa ，温度为 20°C 的空气通过直径为 0.4 m 的排气孔排出，经过排气扇后气体压力升高 $50 \text{ mmH}_2\text{O}$ ，但温度近似不变，试求排气扇的功率和排气速度。

提示和答案：由 $q_m = \frac{q_v}{v} = \frac{q_v}{R_g T / p_2} = \frac{A c_{f2}}{R_g T / p_2}$ 求得排气速度 $c_{f2} = \frac{4 q_m R_g T}{\pi p_2 D^2} = 17.0 \text{ m/s}$ 。

本题稳态稳流能量方程可简化为 $P = q_m \left(\frac{c_{f2}^2}{2} + p_2 v_2 - p_1 v_1 \right)$ ，得 $P = 0.365 \text{ kW}$ 。

2-12 进入蒸汽发生器中内径为 30 mm 管子的压力水的参数为 10 MPa 、 30°C ，从管子输出时参数为 9 MPa 、 400°C ，若入口体积流量为 3 L/s ，求加热率。已知初态时 $h = 134.8 \text{ kJ/kg}$ 、 $v = 0.0010 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，终态时 $h = 3117.5 \text{ kJ/kg}$ 、 $v = 0.0299 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

提示和答案：由初态（即入口）参数及质量守恒 $c_{f1} = \frac{q_{v1}}{A} = 4.244 \text{ m/s}$ ， $q_m = \frac{q_{v1}}{v_1} = 3 \text{ kg/s}$ ，

$$c_{f2} = \frac{q_{v2}}{A} = 126.9 \text{ m/s}。据稳流开口系能量方程 $\Phi = q_m [h_2 - h_1 + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2)] = 8972.2 \text{ kW}$ 。$$

2-13 某蒸汽动力厂中锅炉以 40 T/h 蒸汽供入蒸汽轮机。蒸汽轮机进口处压力表上读数是 9 MPa ，蒸汽的焓是 3441 kJ/kg ；出口处真空表上的读数是 0.0974 MPa ，出口蒸汽的焓是 2248 kJ/kg 。汽轮机对环境散热为 $6.81 \times 10^5 \text{ kJ/h}$ 。求：(1) 进出口处蒸汽的绝对压力（当场

大气压力是 101 325 Pa); (2) 不计进出口动能差和位能差时汽轮机的功率; (3) 进口处蒸汽速度为 70m/s、出口处速度为 140 m/s 时对汽轮机的功率有多大影响? (4) 蒸汽进、出口高度差为 1.6m 时对汽轮机的功率又有多大影响?

提示和答案: (1) $p_1 = p_{e,1} + p_b = 9.1\text{MPa}$, $p_2 = p_b - p_{v,2} = 0.3925 \times 10^{-2}\text{MPa}$;

(2) 据稳流能量方程, $\Phi = \Delta\dot{H} + P$, $P = \Phi - \Delta\dot{H} = \Phi - q_m \Delta h = 13066.7\text{kW}$;

(3) 计及进出口动能差, 则 $P_i' = (\Phi - q_m \Delta h) - \frac{q_m}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) = 12985\text{kW}$

(4) 计及位能差, 则 $P_i'' = (\Phi - q_m \Delta h) - q_m g \Delta z = 13066.9\text{kW}$

2-14 500 kPa 的饱和液氨进入锅炉加热成干饱和氨蒸气, 然后进入压力同为 500 kPa 的过热器加热到 283 K, 若氨的质量流量为 0.005 kg/s, 求锅炉和过热器中的换热率。已知: 氨进入和离开锅炉时的焓分别为 $h_1 = 199.3\text{kJ/kg}$ 、 $h_2 = 1446.4\text{kJ/kg}$, 氨离开过热器时的焓为 $h_3 = 1470.7\text{kJ/kg}$ 。

提示和答案: 锅炉: $\Phi_b = q_m(h_2 - h_1) = 6.236\text{kW}$; 换热器: $\Phi_s = q_m(h_3 - h_2) = 0.122\text{kW}$ 。

2-15 向大厦供水的主管线在地下 5m 进入时管内压力为 600kPa。经水泵加压, 在距地面 150m 高处的大厦顶层水压仍有 200kPa。假定水温为 10°C, 流量为 10kg/s, 忽略水热力学能差和动能差, 假设水的比体积为 0.001m³/kg, 求水泵消耗的功率。

提示和答案: 水管系统能量方程 $q + \left(h_1 + \frac{c_{f1}^2}{2} + gz_1 \right) - \left(h_2 + \frac{c_{f2}^2}{2} + gz_2 \right) - w_s = 0$, 据

题意, $q = 0$ 、 $t_1 = t_2$ 、 $u_1 = u_2$, 所以 $P = q_m w_s = -[(p_2 v_2 - p_1 v_1) + g \Delta z] q_m = -11.2\text{kW}$ 。

2-16 用一台水泵将井水从 6m 深的井里泵到比地面高 30m 的水塔中 (见图 2-4), 水流量为 25m³/h。水泵消耗功率为 12kW。冬天井水的温度为 3.5°C。为防止冬天结冰, 要求进入水塔的水温不低于 4°C。整个系统及管道均包有一定厚度的保温材料, 问是否有必要在管道中设置一加热器? 如有必要的话, 需加入多少热量? 设管道中水进出口的动能差可忽略不计; 水的比热容取定值并为 $c_p = 4.187\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 水的焓差 $\Delta h = c_p \Delta t$; 水的密度取 1 000 kg/m³。

提示和答案: 据能量方程计算热量后进行判断。忽略管道中水进出口动能差, 能量方程 $\Phi = \Delta\dot{H} + q_m g(z_2 - z_1) + P_s = q_m [c_p(t_2 - t_1) + g(z_2 - z_1)] + P_s = 4.99\text{kJ/s} = 1.8 \times 10^4\text{kJ/h}$, 有必

要加入加热器，加热量最小为 $1.8 \times 10^4 \text{ kJ/h}$ 。

2-17 一种工具，利用从喷嘴射出的高速水流进行切割，供水压力为 200 kPa 、温度为 20°C ，喷嘴内径为 0.002 m ，射出水流温度为 20°C ，流速为 1000 m/s ，假定喷嘴两侧水的热力学能变化可略去不计，求水泵功率。已知 200 kPa 、 20°C 时水的比体积 $v = 0.001002 \text{ m}^3/\text{kg}$

提示和答案： 能量方程 $q + \left(h_1 + \frac{c_{f1}^2}{2} + gz_1 \right) - \left(h_2 + \frac{c_{f2}^2}{2} + gz_2 \right) - w_s = 0$ 。据题意，

$q = 0$ 、 $t_1 = t_2$ 、 $u_1 = u_2$ 、 $z_2 = z_1$ ， $q_m = \frac{q_v}{v} = \frac{c_f A}{v} = 3.135 \text{ kg/s}$ 。忽略水比体积变化，射出水流

压力与大气压平衡，所以 $w_s = - \left[\frac{c_{f2}^2}{2} + (p_2 v_2 - p_1 v_1) \right] = - \left[\frac{c_{f2}^2}{2} + (p_2 - p_1) v \right] = -500.0 \text{ kJ/kg}$ ，

$P = q_m w_s = -1567.2 \text{ kW}$ 。

2-18 一刚性绝热容器，容积 $V = 0.028 \text{ m}^3$ ，原先装有压力为 0.1 MPa ，温度为 21°C 的空气。现将连接此容器与输气管道的阀门打开，向容器内快速充气。设输气管道内气体的状态参数保持 $p = 0.7 \text{ MPa}$ 、 $t = 21^\circ\text{C}$ 不变。当容器中压力达到 0.2 MPa 时阀门关闭，求容器内气体可能达到最高温度。设空气可视为理想气体，其热力学能与温度的关系为 $u = 0.72 \{T\}_K \text{ kJ/kg}$ ，焓与温度的关系为 $h = 1.005 \{T\}_K \text{ kJ/kg}$

提示和答案： 容器内原有气体质量 $m_1 = \frac{p_1 V_1}{R_g T_1} = 0.0332 \text{ kg}$ 。取刚性容器为控制体，则

$\delta Q = dE_{CV} + (h_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + gz_2) \delta m_2 - (h_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 + gz_1) \delta m_1 + \delta W_1$ 。据题意， $\delta Q = 0$ 、 $\delta W_1 = 0$ 、

$\delta m_2 = 0$ 、 $\frac{c_{f1}^2}{2}$ 和 $g(z_2 - z_1)$ 可忽略不计，所以 $dE_{CV} = h_1 \delta m_1 = h_{in} dm_{in}$ ，积分有 $\Delta E_{CV} = h_{in} m_{in}$ 。

而 $\Delta E_{CV} = \Delta U = m_2 u_2 - m_1 u_1$ ， $m_{in} = m_2 - m_1$ ，所以 $m_2 u_2 - m_1 u_1 = (m_2 - m_1) h_{in}$ ，

$$T_2 = \frac{h_{in} (m_2 - m_1) + m_1 u_1}{m_2 c_v} = \frac{c_p T_{in} (m_2 - m_1) + m_1 c_v T_1}{m_2 c_v} \quad (\text{a})$$

充气后容器内气体质量

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{R_g T_2} = \frac{0.2 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0.028 \text{ m}^3}{287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \times \{T_2\}_K} = \frac{19.5}{\{T_2\}_K} \quad (\text{b})$$

联立求解式 (a)、(b) 得 $m_2 = 0.0571 \text{ kg}$ ， $T_2 = 342.69 \text{ K}$ 。

2-19 医用氧气袋中空时呈扁平状态，内部容积为零。接在压力为 14 MPa，温度为 17 °C 的钢质氧气瓶上充气。充气后氧气袋隆起，体积为 0.008 m³，压力为 0.15 MPa，由于充气过程很快，氧气袋与大气换热可以忽略不计，同时因充入氧气袋内的气体质量与钢瓶内的气体质量相比甚少，故可以认为钢瓶内氧气参数不变。设氧气可视为理想气体，其热力学能可表示为 $u = 0.657\{T\}_K$ kJ/kg，焓与温度的关系为 $h = 0.917\{T\}_K$ kJ/kg，求充入氧气袋内氧气的质量？

提示和答案：与题 2-18 同为非稳态问题，但氧气袋体积变化。能量方程

$$\delta Q = dE_{cv} + (h + \frac{c_f^2}{2} + gz)\delta m_{out} - (h + \frac{c_f^2}{2} + gz)\delta m_{in} + \delta W_i$$

据题意， $\delta Q = 0$ ， $\delta m_{out} = 0$ ， $dE_{cv} = dU$ ，忽略 $\frac{c_{f,in}^2}{2}$ 及 gz_{in} ，则

$$dU - h_{in}\delta m_{in} + \delta W_i = 0$$

因 $\delta W_i = p_0 dV$ ，且氧气袋内氧气质量即充入氧气的质量，所以积分后

$$m_2 u_2 - h_{in} m_2 + p_0 (V_2 - V_1) = 0$$

$$m_2 (u_2 - h_{in}) + p_0 V_2 = 0 \quad (a)$$

又

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{R_g T_2} \quad (b)$$

据题意， $p_2 = 0.15\text{MPa}$ ， $V_2 = 0.008\text{m}^3$ ， $R_g = 260\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ， $u_2 = 0.657T_2$ ， $h_{in} = 0.917T_{in}$

代入式 (a) 和 (b)，解得 $T_2 = 313.20\text{K}$ ， $m_2 = 0.0147\text{kg}$ 。

2-20 两个体重都是 80 kg 的男子每天吃同样的食物，完成相同的工作，但 A 每天上下班步行 60 min，而 B 则每天驾驶汽车 20 min 上下班，另 40 min 用于看电视，试确定 100 个工作日后这两人的体重差。

提示和答案：查工程热力学第 5 版表 2-3，每个工作日男子 A 比 B 多消耗能量 $Q = 1598.0\text{kJ}$ ，少消耗的能量转化为脂肪 $\Delta m = 4.04\text{kg}$ 。

2-21 一间教室通过门窗散发热量 25 000 kJ/h，教室内有 30 名师生，15 台计算机，若平均每人散发的热量是 180 W，每台计算机的功率 120W，问为了保持室内温度是否有必要打开取暖器？

提示和答案:取室内空气为系统, $\Delta U = 0$, $W = 0$, $\sum Q = 0$, $Q = Q_1 + Q_2 = -0.26\text{kW}$

2-22 一位 55 kg 的女士经不住美味的诱惑多吃了 0.25 L 的冰激凌。为了消耗这些额外的冰激凌的能量,她决定以 7.2 km/h 的速度步行 5.5 km 回家,试确定她能否达到预期目的?

提示和答案:冰激凌提供的热量 $Q = 1150\text{kJ}$, 与步行消耗的热量 $Q' = 1118.3\text{kJ}$ 相当,基本上可以达到预期目的。