

第一章 基本概念

习 题

1-1 英制系统中采用华氏温标，它规定在标准大气压（101 325 Pa）下纯水的冰点是 32°F，汽点是 212°F，试推导华氏温度与摄氏温度的换算关系。

提示和答案：华氏温标和摄氏温标定点不同，但分度规律相同，可得， $\{t\}_{\text{°F}} = \frac{9}{5}\{t\}_{\text{°C}} + 32$ 。

1-2 英制系统中朗肯温度与华氏温度的关系为 $\{T\}_{\text{°R}} = \{t\}_{\text{°F}} + 459.67$ 。已知热力学绝对温标及朗肯温标在纯水冰点的读数分别是 273.15K 和 491.67°R；汽点的读数分别是 373.15K 和 671.67°R。(1) 导出朗肯温度和开尔文温度的关系式；(2) 开尔文温标上绝对零度在朗肯温标上是多少度？

提示和答案：朗肯温标和华氏温标的关系与摄氏温标和热力学温标的关系相仿，故朗肯温度和热力学温度也成比例，解得 $T\{\text{°R}\} = 1.8T\{\text{K}\}$ ， $T\{\text{K}\} = 0 \text{ K}$ 时 $T\{\text{°R}\} = 0\text{°R}$ 。

1-3 设一新温标，用符号 °N 表示温度单位（它的绝对温标是用 °Q 表示温度单位）。规定纯水的冰点和汽点 100°N 和 1000°N。试求：(1) 该新温标与摄氏温标的关系；(2) 若该温标的绝对零度与热力学温标零度相同，则该温标读数为 0°N 时，其绝对温标读数是多少 °Q？

提示和答案：(1) $\frac{\{t\}_{\text{°N}} - 100}{1000 - 100} = \frac{\{t\}_{\text{°C}} - 0}{100 - 0} \quad \{t\}_{\text{°N}} = 9\{t\}_{\text{°C}} + 100$

(2) $\{T\}_{\text{°Q}} = \{t\}_{\text{°N}} + \text{常数} = 9\{t\}_{\text{°C}} + 100 + \text{常数} = 9[T\{\text{K}\} - 273.15] + 100 + \text{常数}$

据题意，当 $T\{\text{K}\} = 0 \text{ K}$ 时， $T\{\text{°Q}\} = 0\text{°Q}$ 故解得上式中常数 = 2358.35 代入原式得

$$\{T\}_{\text{°Q}} = \{t\}_{\text{°N}} + 2358.35 \quad T\{\text{°N}\} = 0 \text{ 时} \quad T\{\text{°Q}\} = 2358.385\text{°N}$$

1-4 直径为 1m 的球形刚性容器，抽气后真空度为 752.5mmHg，若当地大气为 0.101MPa，求 (1) 容器内绝对压力为多少 Pa；(2) 容器表面受力多少 N？

提示和答案：容器表面力为两侧压力差与表面积的乘积。可解得 $p = 691.75\text{Pa}$ ，

$$F = 1.261 \times 10^6 \text{ N}。$$

1-5 用 U 型压力计测量容器中气体的压力，在水银柱上加一段水，则得水柱高 1020mm，水银柱高 900mm，如图 1-24 所示，若当地大气压为 755mmHg，求容器中气体的压力为多少 MPa？

提示和答案：表压力为水柱和汞柱之和，解得

$$p = 2.306 \times 10^5 \text{ Pa} = 0.231 \text{ MPa}。$$

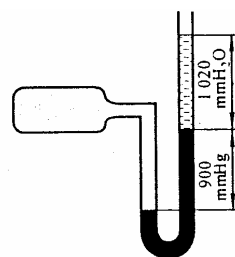


图 1-24 题 1-5 附图

1-6 容器中的真空度为 $p_v = 600\text{mmHg}$ ，气压计上水银柱高度为 $p_b = 755\text{mm}$ ，求容器中的绝对压力（以 MPa 表示）。如果容器中的绝对压力不变，而气压计上水银柱高度为 $p'_b = 770\text{mm}$ ，求此时真空表上的读数（以 mmHg 表示）是多少？

提示和答案：容器中气体绝对压力是当地大气压与真空度的差，故 $p = 0.0207\text{MPa}$ ；大气压力改变后真空表上的读数为 $p'_v = 615\text{mmHg}$ 。

1-7 用斜管压力计测量锅炉烟道烟气的真空度（如图 1-24）管子的倾斜角 $\alpha = 30^\circ$ ，压力计中使用密度 $\rho = 0.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 的煤油，斜管中液柱长度 $l = 200\text{mm}$ 。当地大气压力 $p_v = 745\text{mmHg}$ 。求烟气的真空度（以 mmH_2O 表示）及绝对压力（以 Pa 表示）。

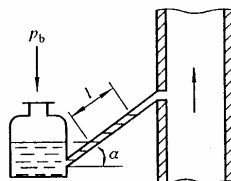


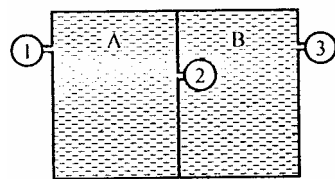
图 1-25 斜管压力计

提示和答案：倾斜式压力计上读数即烟气的真空度 $p_v = l \sin \alpha \rho g = 80 \times 9.81\text{Pa}$ ，故 $p_v = 80\text{mmH}_2\text{O}$ ；烟气绝对压力 $p = p_b - p_v = 10048.3\text{mmH}_2\text{O} = 0.9857 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

1-8 压力锅因其内部压力和温度比普通锅高而缩短了蒸煮食物的时间。压力锅的盖子密封良好，蒸汽只能从盖子中间的缝隙逸出，在缝隙的上方有一个可移动的小柱塞，所以只有锅内蒸汽的压力超过了柱塞的压力后蒸汽才能逸出。蒸汽周期性逸出使锅内压力近似可认为恒定，也防止了锅内压力过高产生的危险。若蒸汽逸出时压力锅内压力应达到 201kPa ，压力锅盖缝隙的横截面积为 4mm^2 ，当地大气压力平均为 101kPa ，试求小柱塞的质量。

提示和答案：蒸汽逸出时锅内表压力即为由柱塞产生的压力，柱塞质量 $m = 0.0408\text{kg}$ 。

1-9 容器被分隔成 AB 两室，如图 1-27 所示，已知当场大气压 $p_b = 0.1013\text{MPa}$ ，气压表 2 读为 $p_{e2} = 0.04\text{MPa}$ ，气压表 1 的读数 $p_{e1} = 0.294\text{MPa}$ ，求气压表 3 的读数（用 MPa 表示）。



提示和答案：气压表 2 处于 B 室内，故其当地大气压为 B 室的压力，解得 $p_{e3} = 0.254\text{MPa}$ 。

图 1-27 题 1-8 附图

1-10 起重机以每秒 2m 的恒速提升总质量为 450kg 的水泥块，试求所需功率。

提示和答案：功率等于力与速度的乘积，恒速提升，加速度为零，解得。 $P = 8.83\text{kW}$ 。

1-11 电阻加热器的电阻 15Ω ，现有 10A 的电流流经电阻丝，求功率。

提示和答案：电功率等于电阻和电流平方乘积 $P = 1.5\text{kW}$ 。

1-12 气缸中密封有空气，初态为 $p_1 = 0.2\text{MPa}$ ， $V_1 = 0.4\text{m}^3$ ，缓慢胀到 $V_2 = 0.8\text{m}^3$ 。（1）过程中 pV 保持不变；（2）过程中气体先循 $\{p\}_{\text{MPa}} = 0.4 - 0.5\{V\}_{\text{m}^3}$ 膨胀到 $V_m = 0.6\text{m}^3$ ，再维

持压力不变，膨胀到 $V_2 = 0.8\text{m}^3$ 。分别求出两过程中气体作出的膨胀功。

提示和答案：过程可近似为可逆， $W = \int_1^2 p dV$ ，(1) $W = 5.54 \times 10^4 \text{J}$ 、(2) $W = 0.15 \times 10^5 \text{J}$ 。

1-13 某种理想气体在其状态变化过程中服从 $pv^n = \text{常数}$ 的规律，其中 n 是定值， p 是压

力； v 是比体积。试据 $w = \int_1^2 p dv$ 导出气体在该过程中做功为 $w = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[1 - (p_2 / p_1)^{\frac{n-1}{n}} \right]$

提示和答案： $w = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{pv^n}{v^n} dv = p_1 v_1^n \int_1^2 \frac{dv}{v^n} = \dots = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$ 。

1-14 测得某汽油机气缸内燃气的压力与容积对应值如下表所示，求燃气在该膨胀过程中所作的功。

p/MPa	1.655	1.069	0.724	0.500	0.396	0.317	0.245	0.193	0.103
V/cm^3	114.71	163.87	245.81	327.74	409.68	491.61	573.55	655.48	704.64

提示和答案：膨胀过程的功可用过程线下的面积表示，该面积近似等于若干矩形面积累加，即， $W = \int_1^2 p dV \cong \Sigma \bar{p} \Delta V$ ，解得 $W = 304.7 \text{J}$ 。

1-15 有一绝对真空的钢瓶，当阀门的打开时，在大气压 $p_0 = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 的作用下体积为 0.1m^3 的空气被输入钢瓶，求大气对输入钢瓶的空气所作功为多少？

提示和答案：设想体积为 0.1m^3 的空气系统边界上压力恒为大气压力，故 $W = 10.13 \text{kJ}$ 。

1-16 某种气体在气缸中进行一缓慢膨胀过程。其体积由 0.1m^3 增加到 0.25m^3 。过程中气体压力循 $\{p\}_{\text{MPa}} = 0.24 - 0.4 \{V\}_{\text{m}^3}$ 变化。若过程中气缸与活塞的摩擦保持为 1200N ；当地大气压力为 0.1MPa ；气缸截面积为 0.1m^2 ，试求：(1) 气体所作的膨胀功 W ；(2) 系统输出的有用功 W_u ；(3) 若活塞与气缸无摩擦，系统输出的有用功 $W_{u, \text{re}}$ 。

提示和答案：活塞移动距离 $L = \frac{V_2 - V_1}{A} = 1.5\text{m}$ 。(1) 气体膨胀做功 $W = \int_1^2 p dV = \int_1^2 (0.24 - 0.4V) dV = 0.0255 \times 10^6 \text{J}$ 、摩擦耗功 $W'' = FL = 1800 \text{J}$ 、气体膨胀排拆大气功 $W' = p_0(V_2 - V_1) = 0.015 \times 10^6 \text{J}$ ；(2) 有用功 $W_u = W - W' - W'' = 8700 \text{J}$ ；(3) 有用功 $W_{u, \text{re}} = W - W' = 10500 \text{J}$ 。

1-17 某蒸汽动力厂加入锅炉的每 1MW 能量要从冷凝器排出 0.58MW 能量，同时水泵要

消耗 0.02MW 功，求汽轮机输出功率和电厂的热效率。

提示和答案： 汽轮机输出功率为循环净功加水泵消耗的功率 $P_T = 0.44\text{MW}$ ；电厂的热效率为循环净功与循环吸热量之比， $\eta_t = 0.42$ 。

1-18 汽车发动机的热效率为 35%，车内空调器的工作性能系数为 3，求每从车内排除 1kJ 热量消耗燃油能量。

提示和答案： 空调器耗功 $W = Q_c / \varepsilon$ 由汽车发动机输出功 $W = Q_1 \eta_t$ ，解得 $Q_1 = 0.952\text{kJ}$ 。

1-19 据统计资料，某地各发电厂平均发 1 kW·h 的电耗标煤 372g，若标煤的热值是 29308kJ/kg，试求电厂平均热效率 η_t 是多少？

提示和答案： 电厂平均热效率为循环净功与循环吸热量之比， $\eta_t = 33.0\%$ 。

1-20 某空调器输入功率 1.5kW 需向环境介质输出热量 5.1kW，求空调器的制冷系数。

提示和答案： 制冷系数为单位时间制冷量与输入功率的比值， $\varepsilon = 2.4$ 。

1-21 某房间冬季通过墙壁和窗子向外散热 70 000 kJ/h，房内有 2 只 40W 电灯照明，其他家电耗电约 100W，为维持房内温度不变，房主购买供暖系数为 5 的热泵，求热泵最小功率。

提示和答案： 家电耗电转化为热能，故热泵单位时间供暖为通过墙壁和窗子向外散热和所有家电耗电之差，解得 $P = 3.85\text{kW}$ 。

1-22 一所房子利用供暖系数为 2.1 热泵供暖维持 20℃，据估算室外大气温度每低于房内温度 1℃，房子向外散热为 0.8kW，若室外温度为 -10℃，求驱动热泵所需的功率。

提示和答案： 为维持房子内温度需使散热与热泵供热平衡，所以 $P = 11.43\text{kW}$ 。

1-23 若某种气体的状态方程为 $pv = R_g T$ ，现取质量 1kg 的该种气体分别作两次循环，如图 1-28 中循环 1-2-3-1 和循环 4-5-6-4 所示，设过程 1-2 和过程 4-5 中温度不变都等于 T_a ，过程 2-3 和 5-6 中压力不变，过程 3-1 和 4-6 中体积不变。又设状态 3 和状态 6 温度相等，都等于 T_b 。试证明两个循环中 1kg 气体对外界所作的循环净功相同。

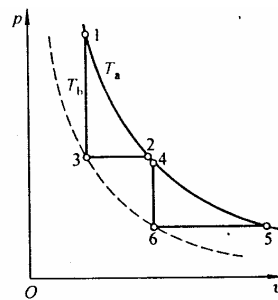


图 1-28 习题 1-25 附图

提示和答案： 循环 1231 和循环 4564 中过程 1-2 和 4-5 都是等温过程， $T = T_a$ ，据理想气体状态方程， $pv = R_g T$ ，

$$\text{可知 } p = \frac{R_g T}{v} = \frac{R_g T_a}{v}, \quad w_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} \frac{R_g T_a}{v} dv = R_g T_a \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad \text{同理 } w_{4-5} = R_g T_a \ln \frac{v_5}{v_4}.$$

根据已知条件： $v_1 = v_3$ ， $v_4 = v_6$ ， $p_3 = p_2$ ， $p_6 = p_5$ ， $T_2 = T_5 = T_a$ ， $T_3 = T_6 = T_b$ 得

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_2}{v_3} = \frac{R_g T_2}{p_2 \frac{p_3}{R_g T_3}} = \frac{T_a}{T_b}; \text{ 同理 } \frac{v_5}{v_4} = \frac{T_a}{T_b}, \text{ 即 } \frac{v_2}{v_1} = \frac{v_5}{v_4}, w_{12} = w_{45}。 \text{ 表明 } 1\text{kg 工质在 } 1-2 \text{ 和 } 4-5 \text{ 过程中作出的膨胀功相同。过程 } 2-3 \text{ 和 } 5-6 \text{ 都是等压过程，}$$

$$w_{2-3} = p_2(v_3 - v_2) = p_3 v_3 - p_2 v_2 = R_g(T_b - T_a), \text{ 同样, } w_{5-6} = R_g(T_b - T_a), \text{ 即 } w_{2-3} = w_{5-6}。$$

过程 3-1 和 6-4 中 v 不变，故功为零。综上两循环的净功相等，即

$$W_{\text{net},1231} = W_{12} + W_{23} + W_{31} = W_{45} + W_{56} + W_{64} = W_{\text{net},4564}。$$

第二章 热力学第一定律

习 题

2-1 一辆汽车 1 小时消耗汽油 34.1 升，已知汽油发热量为 44 000 kJ/kg，汽油密度 0.75g/cm^3 。测得该车通过车轮出的功率为 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：汽车通过排气，水箱散热等散发热量为汽油总发热量与通过车轮出的功率之差，解得 $Q_{\text{out}} = 894\,900\text{ kJ/h}$ 。

2-2 质量为 1275 kg 的汽车在以 60 000 m/h 速度行驶时被踩刹车止动，速度降止 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 $1.1\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 和 $0.46\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，求刹车带和刹车鼓的温升。

提示和答案：汽车速度降低，动能转化为刹车带和刹车鼓的热力学能， $t_2 - t_1 = 65.9^\circ\text{C}$ 。

2-3 1kg 氧气置于图 2-14 所示气缸内，缸壁能充分导热，且活塞与缸壁无摩擦。初始时氧气压力为 0.5MPa，温度为 27°C ，若气缸长度 $2l$ ，活塞质量为 10kg。试计算拔除钉后，活塞可能达到最大速度。

提示和答案：气体输出的有用功转化为活塞动能，可逆过程对外界作功最大，故按可逆定温膨胀计算功， $c_2 = 87.7\text{m/s}$ 。

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

提示和答案：取气体为系统，据闭口系能量方程式 $Q = \Delta U + W$ ，解得外界对气体作功 34J。

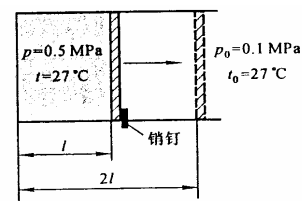


图 2-14 习题 2-3 附图

2-5 在冬季，工厂车间每一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，且最终全部变成热能，另外，室内经常点着 50 盏 100W 的电灯，若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车间保持温度不变，解得 $Q_{\text{补}} = 1\,632\,000\text{ kJ}$ 。

2-6 夏日，为避免阳光直射，密闭门窗，用电扇取凉，若假定房间内初温为 28°C ，压力为 0.1MPa，电扇的功率为 0.06kW，太阳直射传入的热量为 0.1kW，若室内有三人，每人每小时向环境散发的热量为 418.7kJ，通过墙壁向外散热 1800kJ/h，试求面积为 15m^2 ，高度为 3.0m 的室内空气每小时温度的升高值，已知空气的热力学能与温度关系为

$$\Delta u = 0.72 \{ \Delta T \}_K \text{ kJ/kg}。$$

提示和答案： 室内门窗密闭，近似假定空气总质量不变，据能量守恒，解得 $\Delta T = 0.86\text{K}$ 。

2-7 有一飞机的弹射装置，如图 2-15，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，若不计摩擦力，求发射过程中压缩空气的热力学能变化。

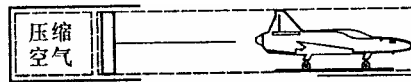


图 2-15 习题 2-7 附图

提示和答案： 取压缩空气为系统，且 $W = p_0(V_2 - V_1) + \frac{m}{2}c_2^2$ ，解得 $\Delta U = -5135 \times 10^3 \text{ J}$ 。

2-8 如图 2-16 所示，气缸内空气的体积为 0.008m^3 ，温度为 17°C 。初始时空气压力为 0.1013MPa ，环境大气压力 $p_b = 0.1\text{MPa}$ ，弹簧呈自由状态。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 0.08m^2 ，弹簧刚度为 $k = 40\,000 \text{ N/m}$ ，空气热力学能变化关系式为 $\Delta \{u\}_{\text{kJ/kg}} = 0.718 \Delta \{T\}_K$ 。试求，使气缸内空气压力达到 0.15MPa 所需的热量。

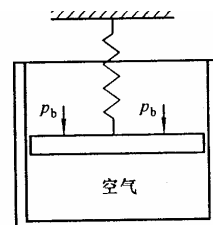


图 2-16 习题 2-8 附图

提示和答案： 初始时弹簧呈自由状态，利用力平衡求得活塞质量 $m_{\text{活}} = \frac{(p_1 - p_b)A}{g} = 10.61\text{kg}$ 。

据空气质量 $m_a = 9.73 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 进而得 $h = \frac{V_1}{A} = 0.1\text{m}$ 。终态时的力平衡

$(p_2 - p_b)A - m_{\text{活}}g = Kx_2$ 解得， $x_2 = 0.0974\text{m}$ ，于是解得 $V_2 = A(h + x_2) = 0.0158\text{m}^3$ 、

$T_2 = \frac{p_2 V_2}{m_a R_g} = 848.26\text{K}$ ， $\Delta U = mc_v(T_2 - T_1) = 3.90\text{kJ}$ 。因 $p = p_b + \frac{(m_{\text{活}}g + Kx)}{A}$ ，所以

$$W = \int_{A_1}^{A_2} \left[p_b + \frac{(m_{\text{活}}g + Kx)}{A} \right] d(Ax) = 0.98\text{kJ}，Q = \Delta U + W = 4.88\text{kJ}。$$

2-9 有一橡皮球，当其内部气体的压力和大气压相同，为 0.1MPa 时呈自由状态，体积为 0.3m^3 。气球受火焰照射而受热，其体积膨胀一倍，压力上升为 0.15MPa ，设气球的压力与体积成正比。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，若初始时气体温度为 17°C ，求球内气体吸热量。已知该气体的气体常数 $R_g = 287\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，

其热力学能 $\{u\}_{\text{kJ/kg}} = 0.72\{T\}_{\text{K}}$ 。

提示和答案： 据题意 $\Delta p = (p - p_0) = kV + b$ ，初、终态压力及体积确定 $p = p(V)$ ，

利用 $W = \int_1^2 p dv$ 解得 $W = 37.5\text{kJ}$ ；克服橡皮气球弹力所作的功和排斥大气功等于过程中气

体作的功，得 $W_{\text{弹}} = 7.5\text{kJ}$ ；据闭口系能量方程解得 $Q = 188.1\text{kJ}$ 。

2-10 空气在某压气机中被压缩，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 $p_2 = 0.1\text{MPa}$ ， $v_2 = 0.175\text{m}^3/\text{kg}$ 。设在压缩过程中每 kg 空气的热力学能增加 146.5kJ 同时向外放出热量 50kJ 。压气机每分钟产生压缩空气 10kg 。求：
(1) 压缩过程中对每 kg 气体所作的体积变化功；(2) 每生产 1kg 的压缩空气所需的功（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) 压缩过程中气体为闭口系，据能量方程求得 $w = -196.5\text{kJ/kg}$ ；(2) 压气机是开口系，生产 1kg 空气需要的是技术功 w_t 。由开口系能量方程得 $w_t = -252\text{kJ/kg}$ ；

(3) 压气机生产压缩空气 $\frac{1}{6}\text{kg/s}$ ，故带动压气机的电机功率为 $P = 42\text{kW}$ 。

2-11 某建筑物的排气扇每秒能把 2.5kg/s 压力为 98kPa ，温度为 20°C 的空气通过直径为 0.4m 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： 排气扇前后质量流量相同，但比体积变化，故流速改变，列稳定流动能量方程 $q_Q + q_m \left(h_1 + \frac{c_{f1}^2}{2} + gz_1 \right) - q_m \left(h_2 + \frac{c_{f2}^2}{2} + gz_2 \right) + P = 0$ 解得 $P = 0.365\text{ kW}$ 。

2-12 进入蒸汽发生器中内径为 30mm 管子的压力水参数为 10MPa 、 30°C ，从管子输出时参数为 9MPa 、 400°C ，若入口体积流量为 3L/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： 管截面积 $A = \frac{\pi D^2}{4} = 7.069 \times 10^{-4}\text{m}^2$ ，据质量流量相等可得进出口流速，

而 $\Phi = q_m [h_2 - h_1 + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2)] = 8972.2\text{kW}$ 。

2-13 某蒸汽动力厂中锅炉以 40T/h 的蒸汽供入蒸汽轮机。进口处压力表上读数是 9MPa ，蒸汽的焓是 3441kJ/kg 。蒸汽轮机出口处真空表上的读数是 0.0974MPa ，出口蒸汽的焓是 2248kJ/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，（当场大气压是 101325Pa ）；(2) 不计进、出口动能差和位能差时汽轮机的功率；(3)

进口处蒸汽为 70m/s，出口处速度为 140m/s 时对汽轮机的功率有多大的影响；(4) 蒸汽进出口高度并差是 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)

功率 $P = \frac{W_t}{3600} = 13066.7\text{kW}$ ；(3) 计及动能差 $P_i' = (\Phi - q_m \Delta h) - \frac{q_m}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) = 12985\text{kW}$ ；

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

2-14 500 kPa 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 275 K，若氨的质量流量为 0.005 kg/s，求：锅炉和过热器中的换热量。已知：氨进入和离开锅炉时的焓分别为 $h_1 = h' = -396.2\text{kJ/kg}$ 、 $h_2 = h'' = -223.2\text{kJ/kg}$ ，氨离开过热器时的焓为 $h = -25.1\text{kJ/kg}$ 。

提示和答案：氨在锅炉和过热器中过程均近似为定压过程，换热量等于焓差。

$\Phi_g = 0.865\text{kW}$ ， $\Phi_s = 0.991\text{kW}$ 。

2-15 向大厦供水的主管线在地下 5m 进入时，管内压力 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℃，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：对整个水管系统列稳定流动能量方程，由于水的密度较大，且有较大的高差，不能忽略位能的变化，得 $P = -11.2\text{kW}$ 。

2-16 用一台水泵将井水从 6 m 深的井里泵到比地面高 30 m 的水塔中，水流量为 25m³/h，水泵耗功是 12kW。冬天井水温度为 3.5℃，为防止冬天结冰，要求进入水塔的水温不低于 4℃。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加热器？如有必要的话需加入多少热量？设管道中水进、出口动能差可忽略不计；水的比热容取定值 $c_p = 4.187\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 且水的焓差 $\Delta h \cong c_p \Delta t$ ，水的密度取 1000kg/m³。

提示和答案：同题 2-19，有必要加入加热器，加热量最小为 $Q = 1.8 \times 10^4\text{kJ}$ 。

2-17 一种工具利用从喷嘴射出的高速水流进行切割，若供水压力 200kPa、温度 20℃，喷嘴内径为 0.002 m，射出水流温度 20℃，流速 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，在 200kPa、20℃ 时水的比体积 $v = 0.001002\text{m}^3/\text{kg}$ 。

提示和答案：水流的质量流量 $q_m = \frac{q_v}{v} = \frac{c_f A}{v} = 3.135\text{kg/s}$ ，稳定流动能量方程

$$q + \left(h_1 + \frac{c_{f1}^2}{2} + gz_1 \right) - \left(h_2 + \frac{c_{f2}^2}{2} + gz_2 \right) - w_s = 0$$

据题意, $q=0$ 、 $t_1=t_2$ 、 $u_1=u_2$ 、 $z_2=z_1$, 所以 $w_s = -\left[\frac{c_{f2}^2}{2} + (p_2v_2 - p_1v_1)\right] = -500\text{kJ/kg}$, 于是

$P = q_m w_s = -1567.2\text{kW}$ 。

2-18 一刚性绝热容器, 容积为 $V = 0.028\text{m}^3$, 原先装有压力为 0.1MPa 、温度为 21°C 的空气。现将与此容器连接的输气管道阀门打开, 向容器充气。设输气管道内气体的状态参数保持不变, $p = 0.7\text{MPa}$, $t = 21^\circ\text{C}$ 。当容器中压力达到 0.2MPa 时, 阀门关闭。求容器内气体到平衡时的温度。设空气可视为理想气体, 其热力学能与温度的关系为 $\{u\}_{\text{kJ/kg}} = 0.72\{T\}_{\text{K}}$; 焓与温度的关系为 $\{h\}_{\text{kJ/kg}} = 1.005\{T\}_{\text{K}}$ 。

提示和答案: 取刚性容器为控制体, 则

$$\delta Q = dE_{\text{CV}} + (h_{f2} + \frac{1}{2}c_{f2}^2 + gz_2)\delta m_2 - (h_1 + \frac{1}{2}c_{f1}^2 + gz_1)\delta m_1 + \delta W_i$$

据题意 $\delta Q = 0$ 、 $\delta W_i = 0$ 、 $\delta m_2 = 0$ 、 $\frac{c_{f1}^2}{2}$ 和 $g(z_2 - z_1)$ 可忽略不计, 积分有 $\Delta E_{\text{CV}} = h_{\text{in}}m_{\text{in}}$,

而 $\Delta E_{\text{CV}} = \Delta U$ 、 $m_{\text{in}} = m_2 - m_1$ 、所以 $m_2u_2 - m_1u_1 = h_{\text{in}}(m_2 - m_1)$

$$T_2 = \frac{h_{\text{in}}(m_2 - m_1) + m_1u_1}{m_2c_v} = \frac{c_pT_{\text{in}}(m_2 - m_1) + m_1c_vT_1}{m_2c_v} \quad (\text{a})$$

$$\text{且} \quad m_2 = \frac{p_2V_2}{R_gT_2} = \frac{19.5}{T_2} \quad (\text{b})$$

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

2-19 医用氧气袋中空时是扁平状态, 内部容积为零。接在压力为 14MPa 、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 0.008m^3 , 压力为 0.15MPa 。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气体质量与钢瓶气体质量相比甚少, 故可以认为钢瓶内氧气参数不变。设氧气可作为理想气体, 其热力学能和焓可表示为 $\{u\}_{\text{kJ/kg}} = 0.657\{T\}_{\text{K}}$, $\{h\}_{\text{kJ/kg}} = 0.917\{T\}_{\text{K}}$, 理想气体服从 $pV = mR_gT$ 。求充入氧气袋内氧气的质量?

提示和答案: 开系能量方程 $\delta Q = dE_{\text{CV}} + (h + \frac{c_f^2}{2} + gz)\delta m_{\text{out}} - (h + \frac{c_f^2}{2} + gz)\delta m_{\text{in}} + \delta W_i$,

简化为 $dU - h_{\text{in}}\delta m_{\text{in}} + \delta W_i = 0$ 。因 $\delta W_i = p_0dV$ 且氧气袋内氧气质量即充入氧气的质量, 积分整理得 $m_2(u_2 - h_{\text{in}}) + p_0V_2 = 0$, 结合 $p_2V_2 = m_2R_gT_2$ 解得 $T_2 = 313.20\text{K}$ 、 $m_2 = 0.0147\text{kg}$ 。

2-20 两个体重都是 80kg 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 工作日后这两人的体重差。

提示和答案： 比较 A 比 B 多消耗能量，得 100 工作日后两人的体重差 $\Delta m = 4.04\text{kg}$ 。

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 套电子计算机，若每人散发的热量是 100 W，每台计算机功率 120 W，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， $W = 0$ ，为保持温度不变需打开取暖器补充热量 $Q = -2.14\text{kW}$ 。

2-22 一位 55kg 的女士经不住美味的诱惑多吃了 0.25 L 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： 步行消耗的热量 $Q' = 1118.3\text{kJ}$ 与冰激凌提供的热量 $Q = 1150\text{kJ}$ 相当，所以她基本上能达到预期目的。

第三章 气体和蒸气的性质

习 题

3-1 已知氮气的摩尔质量 $M = 28.1 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$ ，求(1) N_2 的气体常数 R_g ；(2)标准状态下 N_2 的比体积 v_0 和密度 ρ_0 ；(3)标准状态 $1 \text{ m}^3 \text{ N}_2$ 的质量 m_0 ；(4) $p = 0.1 \text{ MPa}$, $t = 500^\circ\text{C}$ 时 N_2 的比体积 v 和密度 ρ ；(5)上述状态下的摩尔体积 V_m 。

提示和答案： $R = MR_g$ ，标准状态时气体体积为 $22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$ 。解得 $R_{g,\text{N}_2} = 0.297 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ；标准状态下 $v_{\text{N}_2} = 0.8 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $\rho_{\text{N}_2} = 1.25 \text{ kg/m}^3$ 、 $m_0 = 1.25 \text{ kg}$ ； $p = 0.1 \text{ MPa}$, $t = 500^\circ\text{C}$ 时 $v = 2.296 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $\rho = 0.435 \text{ kg/m}^3$ ； $V_{m,\text{N}_2} = 64.29 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$ 。

3-2 压力表测得储气罐中丙烷 C_3H_8 的压力为 4.4 MPa ，丙烷的温度为 120°C ，问这时比体积多大？若要储气罐存 1000 kg 这种状态的丙烷，问储气罐的体积需多大？

提示和答案： 假设题示状态满足理想气体状态方程式求得 $V = 16.88 \text{ m}^3$ 。

3-3 供热系统矩形风管的边长为 $100 \times 175 \text{ mm}$ ， 40°C 、 102 kPa 的空气在管内流动，其体积流量是 $0.0185 \text{ m}^3/\text{s}$ ，求空气流速和质量流量。

提示和答案： 处于平衡态的气体在流动状态下同样满足理想气体的状态方程，此时状态方程形式为 $p q_v = q_m R_g T$ ，解得 $c_f = 1.06 \text{ m/s}$ 、 0.020 kg/s 。

3-4 一些大中型柴油机采用压缩空气启动，若启动柴油机用的空气瓶体积 $V = 0.3 \text{ m}^3$ ，内装有 $p_1 = 8 \text{ MPa}$ ， $T_1 = 303 \text{ K}$ 的压缩空气，启动后瓶中空气压力降低为 $p_2 = 0.46 \text{ MPa}$ ， $T_2 = 303 \text{ K}$ ，求用去空气的质量。

提示和答案： 使用前后瓶中空气满足理想气体状态方程，用去空气 $m_1 - m_2 = 11.73 \text{ kg}$ 。

3-5 空气压缩机每分钟从大气中吸入温度 $t_b = 17^\circ\text{C}$ ，压力等于当地大气压力 $p_b = 750 \text{ mmHg}$ 的空气 0.2 m^3 ，充入体积为 $V = 1 \text{ m}^3$ 的储气罐中。储气罐中原有空气的温度 $t_1 = 17^\circ\text{C}$ ，表压力 $p_{e1} = 0.05 \text{ MPa}$ ，参见图 3-16。问经过多长时间储气罐内气体压力才能提高到 $p_2 = 0.7 \text{ MPa}$ ，温度 $t_2 = 50^\circ\text{C}$ ？

提示和答案： 利用气体的状态方程式 $pV = mR_g T$ 得充气前后储气罐里空气质量

$$m_1 = \frac{p_1 v}{R_g T_1} = \frac{517.21}{R_g}, \quad m_2 = \frac{p_2 v}{R_g T_2} = \frac{2167.18}{R_g}$$

压气机吸入空气的质量流量可由体积流率计算，

$$q_{m_{in}} = \frac{p_b q_{v_{in}}}{R_g T_{in}} = \frac{68.96}{R_g} \quad \text{。由质量守恒得充气时间}$$

$$q_{m_{in}} \tau = m_2 - m_1, \quad \tau = 23.93 \text{ min} \quad \text{。}$$

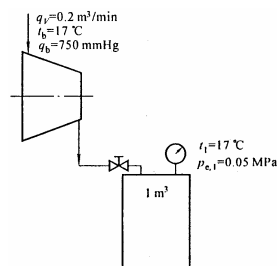


图 3-16 习题 3-5 附图

3-6 锅炉燃烧需要的空气量折合标准状态为 $5000 \text{ m}^3/\text{h}$ ，鼓风机实际送入的是温度为 250°C 、表压力为 150 mmHg 的热空气。已知当地大气压力为 $p_b = 756 \text{ mmHg}$ 。设煤燃烧后产生的烟气量与空气量近似相同，烟气通过烟囱排入上空，已知烟囱出口处烟气压力为 $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$ 温度 $T_2 = 480 \text{ K}$ 。要求烟气流速为 $c_f = 3 \text{ m/s}$ 。求(1) 热空气实际状态的体积流量 $q_{v_{in}}$ ；(2) 烟囱出口内直径的设计尺寸，

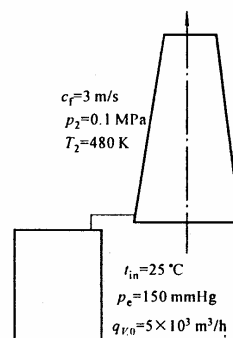


图 3-17 习题 3-6 附图

参见图 3-17。

提示和答案： 鼓风机实际送入的空气并非标准状态，故须利用质量守恒折合为相应的气体状态，解得热空气实际状态的体积流量 $q_{v_{in}} = 7962.7 \text{ m}^3/\text{h}$ ，烟囱出口截面积为 $D = 1.025 \text{ m}$ 。

3-7 烟囱底部烟气的温度为 250°C ，顶部烟气的温度为 100°C ，若不考虑顶、底部两截面间压力微小的差异，欲使烟气以同样的速度流经此两截面，求顶、底部两截面面积之比。

提示和答案： 利用烟囱顶、底部两截面上质量流量相同得到两截面上体积流量关系，进而解得 $A_2 : A_1 = 1 : 1.4$ 。

3-8 截面积 $A = 100 \text{ cm}^2$ 的气缸内充有空气，活塞距底面高度 $h = 10 \text{ cm}$ ，活塞及负载的总质量是 195 kg （见图 3-20）。已知当地大气压力 $p_0 = 771 \text{ mmHg}$ ，环境温度为 $t_0 = 27^\circ\text{C}$ ，气缸内空气外界处于热力平衡状态，现将其负载取去 100 kg ，活塞将上升，最后与环境重新达到热力平衡。设空气可以通过气缸壁充分与外界换热，达到热力平衡时，空气的温度等于环境大气的温度。求活塞上升的距离，

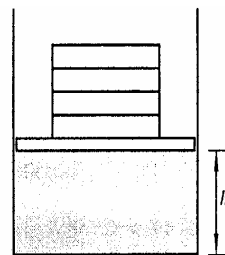


图 3-18 习题 3-8 附图

空气对外作出的功以及与环境的换热量。

提示和答案： 负载取走前气缸内气体的初始状态为： $p_1 = p_b + \frac{m_1 g}{A} = 0.294 \text{ MPa}$ 、
 $V_1 = 10^{-3} \text{ m}^3$ 。取走负载后，重新建立热力平衡时，气缸内压力与温度等于外界的压力与温
 度， $p_2 = p_b + \frac{m_2 g}{A} = 0.196 \text{ MPa}$ 、 $V_2 = \frac{p_1}{p_2} V_1 = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，上升距离 $\Delta H = 5 \text{ cm}$ 。气缸内
 气体由状态 1 到状态 2，其间经过的是非准平衡过程，所以不能用 $w = \int_1^2 p dv$ 求解过程功，
 但气缸内气体所做的功等于克服外力的功，故 $W = p_2 A \Delta H = 98 \text{ J}$ 。因为是理想气体， $T_2 = T_1$
 必有 $U_2 = U_1$ ，所以 $Q = W = 98 \text{ J}$ 。

3-9 空气初态时 $T_1 = 480 \text{ K}$ ， $p_1 = 0.2 \text{ MPa}$ ，经某一状态变化过程被加热到
 $T_2 = 1100 \text{ K}$ ，这时 $p_2 = 0.5 \text{ MPa}$ 。求 1 kg 空气的 u_1 、 u_2 、 Δu 、 h_1 、 h_2 、 Δh 。(1) 按平均质
 量热容表；(2) 按空气的热力性质表；(3) 若上述过程为定压过程，即 $T_1 = 480 \text{ K}$ ，
 $T_2 = 1100 \text{ K}$ ， $p_1 = p_2 = 0.2 \text{ MPa}$ ，问这时的 u_1 、 u_2 、 Δu 、 h_1 、 h_2 、 Δh 有何改变？(4) 对计算
 结果进行简单的讨论：为什么由气体性质表得出的 u 、 h 与平均质量热容表得出的 u 、 h 不
 同？两种方法得出的 Δu 、 Δh 是否相同？为什么？

提示和答案： (1) 由附表查出 $c_p \Big|_{0^\circ\text{C}}^{207^\circ\text{C}} = 1.0125 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $c_p \Big|_{0^\circ\text{C}}^{827^\circ\text{C}} = 1.0737 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。
 故 $c_v \Big|_{0^\circ\text{C}}^{207^\circ\text{C}} = c_p \Big|_{0^\circ\text{C}}^{207^\circ\text{C}} - R_g = 0.7255 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $c_v \Big|_{0^\circ\text{C}}^{827^\circ\text{C}} = c_p \Big|_{0^\circ\text{C}}^{827^\circ\text{C}} - R_g = 0.7867 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。
 $u_1 = c_v \Big|_{0^\circ\text{C}}^{207^\circ\text{C}} t_1 = 150.2 \text{ kJ/kg}$ 、 $u_2 = c_v \Big|_{0^\circ\text{C}}^{827^\circ\text{C}} t_2 = 650.6 \text{ kJ/kg}$ ， $\Delta u = 500.4 \text{ kJ/kg}$
 $h_1 = c_p \Big|_{0^\circ\text{C}}^{207^\circ\text{C}} t_1 = 209.6 \text{ kJ/kg}$ 、 $h_2 = c_p \Big|_{0^\circ\text{C}}^{827^\circ\text{C}} t_2 = 887.9 \text{ kJ/kg}$ ， $\Delta h = 678.3 \text{ kJ/kg}$

(2) 利用空气的热力性质表查得 $h_1 = 484.49 \text{ kJ/kg}$ ， $h_2 = 1162.95 \text{ kJ/kg}$ ，由定义，
 $u_1 = h_1 - R_g T_1 = 346.73 \text{ kJ/kg}$ 、 $u_2 = 847.25 \text{ kJ/kg}$ ， $\Delta u = 500.52 \text{ kJ/kg}$ 、 $\Delta h = 678.46 \text{ kJ/kg}$ 。

(3) 理想气体的 u 、 h 只是温度的函数，与压力的大小无关，所以 Δu 、 Δh 不会改变；
 (4) 用气体性质表得出的 u 、 h 是以 0 K 为计算起点，用比热容表求得的 u 、 h 是以 0°C
 为计算起点，故 u 、 h 值不同，但两种方法得出的 Δu 、 Δh 相同。

3-10 体积 $V = 0.5 \text{ m}^3$ 的密闭容器中装有 27°C 、 0.6 MPa 的氧气，加热后温度升高到

327 °C，求加热量 Q_v ：(1) 按定值比热容；(2) 按平均热容表；(3) 按理想气体状态的比热容式；(4) 按平均比热容直线关系式；(5) 按气体热力性质表。

提示和答案：参见题 3-10。(1) $Q_v = 808.27 \text{ kJ}$ 、(2) $Q_v = 805.59 \text{ kJ}$ 、(3) $Q_v = 805.95 \text{ kJ}$ 、(4) $Q_v = 805.34 \text{ kJ}$ 。

3-11 某种理想气体初态时 $p_1 = 520 \text{ kPa}$ ， $V_1 = 0.1419 \text{ m}^3$ 经过放热膨胀过程，终态 $p_2 = 170 \text{ kPa}$ ， $V_2 = 0.2744 \text{ m}^3$ ，过程焓值变化 $\Delta H = -67.95 \text{ kJ}$ ，已知该气体的质量定压热容 $c_p = 5.20 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ，且为定值。求：(1) 热力学能变化量；(2) 比定容热容和气体常数 R_g 。

提示和答案：(1) $\Delta U = \Delta H - \Delta(pV) = 40.81 \text{ kJ}$ ；(2) 定值热容时 $\Delta U = mc_v \Delta T$ ，

$$\Delta H = mc_p \Delta T, \text{ 所以 } c_v = \frac{c_p}{\Delta H / \Delta U} = 3.123 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}、R_g = c_p - c_v = 2.077 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}。$$

3-12 2 kg 理想气体，定容下吸热量 $Q_v = 367.6 \text{ kJ}$ 同时输入搅拌功 468.3 kJ (见附图)。该过程中气体的平均比热容为 $c_p = 1124 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ， $c_v = 934 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ，已知初态温度为 $t_1 = 280^\circ \text{C}$ ，求：(1) 终态温度 t_2 ；(2) 热力学能、焓、熵的变化量 ΔU 、 ΔH 、 ΔS 。

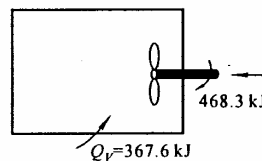


图 3-19 习题 3-12 附图

提示和答案：气体吸入的热量和输入的功转换为气体的热力学能。(1) $t_2 = 727.48^\circ \text{C}$ ，

(2) $\Delta H = 1005.94 \text{ kJ}$ 、 $\Delta S = 1.1075 \text{ kJ/K}$ 。

3-13 5g 氩气初始状态 $p_1 = 0.6 \text{ MPa}$ ， $T_1 = 600 \text{ K}$ ，经历一个热力学能不变的过程膨胀到体积 $V_2 = 3V_1$ ，氩气可作为理想气体，且热容可看作为定值，求终温 T_2 、终压 p_2 及总熵变 ΔS 。

提示和答案：氩气可看为理想气体，热力学能只是温度的函数，故 $T_2 = 600 \text{ K}$ 、 $p_2 = 0.2 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、 $\Delta S = 1.14 \times 10^{-3} \text{ kJ/K}$ 。

3-14 1 kmol 氮气由 $p_1 = 1 \text{ MPa}$ ， $T_1 = 400 \text{ K}$ 变化到 $p_2 = 0.4 \text{ MPa}$ ， $T_2 = 900 \text{ K}$ ，试求摩尔熵变量 ΔS_m 。(1) 比热容可近似为定值；(2) 借助气体热力表计算。

提示和答案：（1）氮为双原子气体 $C_{p,m} = \frac{7}{2}R = 29.10 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ ，

$\Delta S = n\Delta S_m = 31.22 \text{ kJ/K}$ ；（2）热容为变值时， $\Delta S_m = S_{m,2}^0 - S_{m,1}^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1}$ 。由附表查得

$S_{m,1}^0 = 200.179 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ 、 $S_{m,2}^0 = 224.756 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ ， $\Delta S_m = 32.20 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ ，

$\Delta S = 32.20 \text{ kJ/K}$ 。

3-15 初始状态 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ ， $t_1 = 27^\circ \text{C}$ 的 CO_2 ， $V_2 = 0.8 \text{ m}^3$ ，经历某种状态变化过程，其熵变 $\Delta S = 0.242 \text{ kJ/K}$ （精确值），终压 $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$ ，求终态温度 t_2 。

提示和答案：利用 $\Delta S = n(S_{m,2}^0 - S_{m,1}^0 - R \ln p_2 / p_1)$ 求得， $S_{m,2}^0 = 234.953 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$

由表查得 $t_2 = 227.47^\circ \text{C}$ 。

3-16 绝热刚性容器中间有隔板将容器一分为二，左侧 0.05 kmol 的 300 K 、 2.8 MPa 的高压空气，右侧为真空。若抽出隔板，求容器中空气的熵变。

提示和答案：熵是状态参数， $\Delta S = n \left(C_{v,m} \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right) = 288.2 \text{ J/K}$ 。

3-17 CO_2 按定压过程流经冷却器， $p_1 = p_2 = 0.105 \text{ MPa}$ ，温度由 600 K 冷却到 366 K ，试分别使用（1）真实热容经验式、（2）比热容算术平均值，计算 1 kg CO_2 的热力学能变化量、焓变化量及熵变化量。

提示和答案：（1）查得 CO_2 的摩尔定压热容为

$$C_{p,m} / R = 2.401 + 8.735 \times 10^{-3} \{T\}_K - 6.607 \times 10^{-6} \{T\}_K^2 + 2.002 \times 10^{-9} \{T\}_K^3$$

$$\Delta h = \frac{R}{M} \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_{p,m}}{R} dT = -233.74 \text{ kJ/kg} \quad \Delta u = \Delta h - R_g \Delta T = -189.54 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta s = \frac{R}{M} \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_{p,m}}{RT} dT - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} = -0.4903 \text{ kJ/kg}$$

（2）查得 $c_{p1} = 1.075 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ， $c_{v1} = 0.886 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ； $c_{p2} = 0.90908 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ，

$c_{v2} = 0.72018 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。 T_1 到 T_2 之间的比热容算术平均值 $c_{p,av} = 0.99204 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 、

$c_{v,av} = 0.80309 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。 $\Delta u = c_{v,av} (T_2 - T_1) = -187.92 \text{ kJ/kg}$ 、 $\Delta h = -232.14 \text{ kJ/kg}$ 、

$$\Delta s = c_{p,\text{av}} \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} = -0.4904 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}。$$

讨论：对照例题 3-4 得 (1) 利用气体热力性质表直接查取 h (或 H_m) 的方法是一种既精确又简便的方法，各种方法的计算结果，以及与此相比得出的相对误差见下表。利用平均比热容表也是精确的计算方法。真实摩尔经验式和比热容算术平均值这两种方法的误差也都能满足工程计算的要求。若按定值比热容计算， $C_{p,m} = 9 \times R/2$ ，可得 $\Delta u = -154.73 \text{ kJ/kg}$ ， $\Delta h = -198.94 \text{ kJ/kg}$ ， $\Delta s = -0.4202 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ，误差分别为 18.1%、14.5%、15.2%，显然误差过大。

方法	$\Delta u / (\text{kJ/kg})$ 误差 / %	$\Delta h / (\text{kJ/kg})$ 误差 / %	$\Delta s / (\text{kJ/kg} \cdot \text{K})$ 误差 / %
1	-188.88 0.19	-233.10 0.16	-0.4924 0.63
2	-188.52	-232.72	-0.4955
3	-189.54 0.56	-233.74 0.46	-0.4903 1.06
4	-187.92 0.32	-232.14 0.24	-0.4904 1.03

(2) 理想气体的熵不是温度的单值函数，比熵变为 $\Delta s_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$ ，摩尔熵变

$$\Delta S_m = S_{m2}^0 - S_{m1}^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1}。 \text{ 本题为定压过程，与压力相关量 } R \ln \frac{p_2}{p_1} \text{ 为零，熵变量也只与温}$$

度项 $\int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T}$ 有关。

3-18 氮气流入绝热收缩喷管时压力 $p_1 = 300 \text{ kPa}$ ，温度 $T_1 = 400 \text{ K}$ ，速度 $c_{f1} = 30 \text{ m/s}$ ，流出喷管时压力 $p_2 = 100 \text{ kPa}$ ，温度 $T_2 = 330 \text{ K}$ 。若位能可忽略不计，求出口截面上气体流速。氮气比热容可取定值， $c_p = 1042 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

提示和答案： 取喷管为控制体积，列能量方程，忽略位能差，得 $c_{f2} = 383.1 \text{ m/s}$ 。

3-19 刚性绝热容器用隔板分成 A、B 两室，A 室的容积 0.5 m^3 ，其中空气压力 250 kPa 、温度 300 K 。B 室容积 1 m^3 ，其中空气压力 150 kPa 、温度 1000 K 。抽去隔板，A、B 两室的空气混合，最终达到均匀一致，求平衡后的空气的温度和压力过程熵变。空气比热容取定值 $c_p = 1005 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

提示和答案： 先求初态时 A 室和 B 室空气质量，再取容器内全部气体位系统，列能量方程，解得 $T_2 = 485.4 \text{ K}$ 、 $p_2 = 183.4 \text{ kPa}$ 、 $\Delta S = 0.223 \text{ kJ/K}$ 。

3-20 气缸活塞系统内有 3 kg 压力为 1 MPa 、温度为 27°C 的 O_2 。缸内气体被加热到

327 °C，此时压力为 1 500 kPa。由于活塞外弹簧的作用，缸内压力与体积变化成线性关系。

若O₂的比热容可取定值， $R_g = 0.260 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $c_v = 0.658 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。求过程换热量。

提示和答案： $V_1 = \frac{mR_g T_1}{p_1} = 0.234 \text{ m}^3$ 、 $V_2 = 0.312 \text{ m}^3$ 。 $W = \int_1^2 p dV = \int_1^2 kV dV = 97.5 \text{ kJ}$ ，

$$Q = \Delta U + W = mc_v(T_2 - T_1) + W = 689.7 \text{ kJ}。$$

3-21 利用蒸汽图表，填充下列空白并用计算机软件计算校核

	p / MPa	$t / ^\circ\text{C}$	$h / \text{kJ/kg}$	$s / \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	x	过热度 $^\circ\text{C}$
1	3	500	3457	7.226		266
2	0.5	392	3244	7.764		239
3	3	360	3140	6.780		126
4	0.02	61	2375	7.210	0.90	

3-22 湿饱和蒸汽， $x = 0.95$ 、 $p = 1 \text{ MPa}$ ，应用水蒸汽表求 t_s 、 h 、 u 、 v 、 s ，再用 $h-s$

图求上述参数并用计算机软件计算校核。

提示和答案：利用饱和水和饱和水蒸汽表求取饱和参数，再与干度一起求得湿蒸汽

参数： $h = 2676.9 \text{ kJ/kg}$ 、 $v = 0.18472 \text{ m}^3 / \text{kg}$ 、 $s = 6.3635 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $u = 2492.2 \text{ kJ/kg}$ 。

3-23 过热蒸汽， $p = 3 \text{ MPa}$ 、 $t = 400^\circ\text{C}$ ，根据水蒸汽表求 h 、 u 、 v 、 s 和过热度，再用 $h-s$ 图求上述参数。

提示和答案：据水蒸汽表： $t_s = 233.893^\circ\text{C}$ 、 $h = 3230.1 \text{ kJ/kg}$ 、 $s = 6.9199 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、

$v = 0.099352 \text{ m}^3 / \text{kg}$ 、 $D = t - t_s = 166.1^\circ\text{C}$ 。利用 $h-s$ 图 $t_s = 234^\circ\text{C}$ 、 $h = 3233 \text{ kJ/kg}$ 、

$v = 0.1 \text{ m}^3 / \text{kg}$ 、 $s = 6.92 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $D = t - t_s = 166^\circ\text{C}$ 。

3-24 已知水蒸气的压力为 $p = 0.5 \text{ MPa}$ ，比体积 $v = 0.35 \text{ m}^3 / \text{kg}$ ，问这是不是过热蒸汽？如果不是，那是饱和蒸汽还是湿蒸汽？用水蒸汽表求出其它参数。

提示和答案： $p = 0.5 \text{ MPa}$ 时， $v' = 0.0010925 \text{ m}^3 / \text{kg}$ 、 $v'' = 0.37486 \text{ m}^3 / \text{kg}$ 。因

$v' < v < v''$ 所以是饱和湿蒸汽。 $x = \frac{v - v'}{v'' - v'} = 0.9335$ ， $h = h' + x(h'' - h') = 2608.4 \text{ kJ/kg}$ ，

$s = s' + x(s'' - s') = 6.4915 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $u = h - pv = 2433.4 \text{ kJ/kg}$ 。

3-25 我国南方某核电厂蒸汽发生器内产生的新蒸汽压力 6.53 MPa，干度为 0.9956，蒸汽的流量为 608.47 kg/s，若蒸汽发生器主蒸汽管内流速不大于 20 m/s，求：新蒸汽的焓及蒸汽发生器主蒸汽管内径。

提示和答案: $h = h' + x(h'' - h') = 2771.0 \text{ kJ/kg}$, $v = v' + x(v'' - v') = 0.02948 \text{ m}^3/\text{kg}$,

$$q_m = \frac{Ac_f}{v} = \frac{\pi d_i^2 c_f}{4v}, \text{ 故 } d_i = \sqrt{\frac{4vq_m}{\pi c_f}} = 1.07 \text{ m}.$$

3-26 容器内有氟利昂 134a 过热蒸气 1 kg, 参数为 300 kPa、100℃, 定压冷却成为干度为 0.75 的气液两相混合物, 求过程中氟利昂 134a 的热力学能变化量。

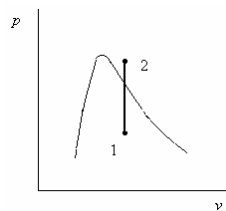
提示和答案: 水蒸气性质的研究适用于其他工质, 取容器中 R134a 为闭口系, 查 R134a 热力性质表获取有关数据, $v_2 = v' + x_2(v'' - v') = 0.050214 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $u_2 = 333.92 \text{ kJ/kg}$, $\Delta U = m\Delta u = -15.06 \text{ kJ}$ 。

3-27 干度为 0.6、温度为 0℃ 的氨在容积为 200 L 的刚性容器内被加热到压力 $p_2 = 1 \text{ MPa}$, 求加热量。

提示和答案: 0℃ 时容器内 NH_3 的 $p = 429.6 \text{ kPa}$ 、 $h = 957.3 \text{ kJ/kg}$ 、 $v = 0.1741 \text{ m}^3/\text{kg}$, $m = V/v = 1.149 \text{ kg}$, $u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 882.5 \text{ kJ/kg}$ 。

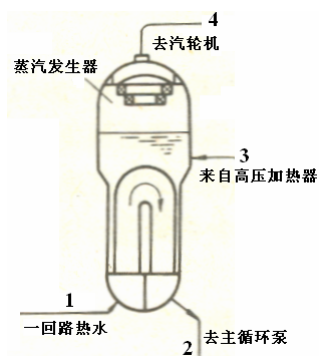
因容器刚性, 所以在过程中氨的比体积不变, $p_2 = 1 \text{ MPa}$ 时, $v'' = 0.1285 \text{ m}^3/\text{kg} < v_2$, 所以终态为过热蒸气。查 NH_3 热力性质表,

$h = 1684.4 \text{ kJ/kg}$, $u_2 = 1510.3 \text{ kJ/kg}$, $Q = \Delta U + W = 721.3 \text{ kJ}$



习题 3-26 附图

3-28 某压水堆核电厂蒸汽发生器 (见附图) 产生的新蒸汽是压力 6.53 MPa, 干度为 0.9956 的湿饱和蒸汽, 进入蒸汽发生器的水压力为 7.08 MPa, 温度为 221.3℃。反应堆冷却剂 (一回路压力水) 进入反应堆时的平均温度为 290℃, 吸热离开反应堆进入蒸汽发生器时的温度为 330℃, 反应堆内平均压力为 15.5 MPa, 冷却剂流量为 17550 t/h。蒸汽发生器向环境大气散热量可忽略, 不计工质的动能差和为能差, 求蒸汽发生器的蒸汽产量。



提示和答案: 取蒸汽发生器为控制体积, 忽略向环境大气散热量, 不计工质的动能差和为能差, 能量方程 $q_{m1}(h_1 - h_2) = q_{m3}(h_4 - h_3)$, 解得蒸汽流量 $q_{m3} = 608.47 \text{ kg/s}$ 。

3-29 垂直放置的气缸活塞系统的活塞质量为 90 kg, 气缸的横截面积为 0.006 m^2 。内有 10℃ 的干度为 0.9 的 R407c (一种在空调中应用的制冷工质) 蒸气 10 L。外界大气压 100 kPa,

活塞用销钉卡住。拔去销钉，活塞移动，最终活塞静止，且R407c温度达到 10°C 。求终态工质压力、体积及所作的功。已知： 10°C 时 R407c 饱和参数为 $v' = 0.0008\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $v'' = 0.0381\text{m}^3/\text{kg}$ ；终态时比体积 $v = 0.1059\text{m}^3/\text{kg}$ 。

提示和答案：状态 1 $v_1 = v' + x(v'' + v') = 0.03437\text{m}^3/\text{kg}$ ， $m = V_1 / v_1 = 0.291\text{kg}$ ；状态 2， $p_2 = p_0 + \frac{mg}{A} = 247.1\text{kPa}$ ，由 T_2 和 p_2 查得 v ， $V_2 = mv_2 = 30.8\text{L}$ ， $W = p_2(V_2 - V_1) = 5.14\text{kJ}$ 。

第四章 气体和蒸汽的热力过程

习 题

4-1 有 2.3kg 的 CO，初态 $T_1 = 477\text{ K}$ ， $p_1 = 0.32\text{ MPa}$ ，经可逆定容加热，终温 $T_2 = 600\text{ K}$ ，设 CO 为理想气体，求 ΔU 、 ΔH 、 ΔS ，过程功及过程热量。设：（1）比热容为定值；（2）比热容为变值，按气体性质表计算。

提示和答案：无论比热容是否定值，理想气体热力学能和焓只是温度的函数，定容过程功为零。定值比热容： $\Delta U = 209.94\text{ kJ}$ 、 $\Delta H = 293.92\text{ kJ}$ 、 $\Delta S = 0.3916\text{ kJ/K}$ 、 $W = 0$ 、 $Q = \Delta U = 209.94\text{ kJ}$ ；变比热容： $\Delta U = 219.10 \times 10^3\text{ J}$ 、 $\Delta H = 303.08 \times 10^3\text{ J}$ 、 $W = 0$ 、 $\Delta S = 0.4186\text{ kJ/K}$ 、 $Q = \Delta U = 219.10\text{ kJ}$ 。

4-2 甲烷 CH_4 的初始状态 $p_1 = 0.47\text{ MPa}$ ， $T_1 = 393\text{ K}$ ，经可逆定压冷却对外放出热量 4110.76 J/mol ，试确定其终温及 1 mol CH_4 的热力学能变化量 ΔU_m 、焓变化量 ΔH_m 。设甲烷的比热容近似为定值， $c_p = 2.3298\text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

提示和答案：压力不高，甲烷处于理想气体状态，热力学能和焓只是温度的函数。 $T_2 = 283\text{ K}$ 、 $\Delta U_m = -3196.11\text{ J/mol}$ 、 $\Delta H_m = -4110.76\text{ J/mol}$ 。

4-3 试由 $w = \int_1^2 p dv$ ， $w_t = -\int_1^2 v dp$ 导出理想气体进行可逆绝热过程时过程功和技术功的计算式。

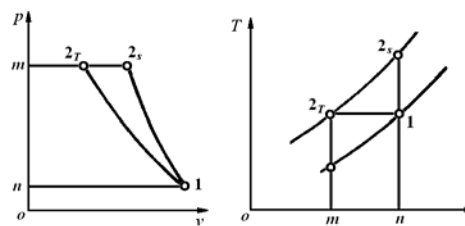
提示和答案：可逆过程的过程功 $w = \int_1^2 p dv$ ，将绝热过程方式 $p = \frac{p_1 v_1^\kappa}{v^\kappa}$ 代入积分即可得 $w = \frac{1}{\kappa - 1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) = R_g \frac{1}{\kappa - 1}(T_1 - T_2)$ ，进而 $w = \frac{R_g T_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]$ 。可逆过程的技术功 $w_t = -\int_{p_1}^{p_2} v dp = \int_{v_1}^{v_2} p dv + (p_1 v_1 - p_2 v_2)$ ，将过程功 $\int_{v_1}^{v_2} p dv$ 的各关系式代入，经整理可得 $w_t = \kappa w$ 。

4-4 氧气由 $t_1 = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ， $p_1 = 0.1\text{ MPa}$ 被压缩到 $p_2 = 0.4\text{ MPa}$ ，试计算压缩 1 kg 氧气消耗的技术功。（1）按定温压缩计算；（2）按绝热压缩计算，设为定值比热容；（3）将它们

表示 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上, 试比较两种情况技术功大小。

提示和答案: 理想气体定温压缩技术功等于膨胀功 绝热压缩技术功等于焓差

$w_{t,T} = -112.82 \text{ J/kg}$ 、 $w_{t,s} = -138.34 \text{ kJ/kg}$; 在



$p-v$ 图上定温压缩和绝热压缩技术功分别以面积

习题 4-4 附图

$1-2_T-m-n-1$ 和 $1-2_s-m-n-1$ 表示 $w_{t,T} < w_{t,s}$, 在 $T-s$ 图上, 定温过程 $w_{t,T} = q_T$, 用面

积 $1-2_T-m-n-1$ 表示, 绝热过程 $w_{t,s} = h_1 - h_2 = h_{2_T} - h_{2_s}$, 用面积 $1-2_s-2_T-m-n-1$ 表

示, 显见 $w_{t,T} < w_{t,s}$ 。

4-5 同上题, 若比热容为变值, 试按气体热力性质表计算绝热压缩 1 kg 氧气消耗的技术功。

提示和答案: 由附表查得氧气的 H_m 、 S_m^0

T / K	$H_m / \text{J/mol}$	$S_m^0 / \text{J/(mol} \cdot \text{K)}$
300	8737.3	205.329
400	11708.9	213.872
500	14767.3	220.693

插值求出 $T_1 = 313 \text{ K}$ 时, $H_{m,1} = 9123.608 \text{ J/mol}$ 、 $S_{m,1}^0 = 206.44 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ 。定熵过程

$$\Delta S = S_{m,2}^0 - S_{m,1}^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1} = 0, \quad \text{所以} \quad S_{m,2}^0 = S_{m,1}^0 + R \ln \frac{p_2}{p_1} = 217.97 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}。 \quad \text{因}$$

$S_{m,400\text{K}}^0 < S_{m,2}^0 < S_{m,500\text{K}}^0$, 故 $400 \text{ K} < T_2 < 500 \text{ K}$ 。求得 $T_2 = 460.08 \text{ K}$, $H_{m,2} = 13546.39 \text{ J/mol}$,

$$w_{t,s} = \frac{1}{M} (H_{m,1} - H_{m,2}) = -138.21 \times 10^3 \text{ J/kg}。$$

4-6 3 kg 空气从 $p_1 = 1 \text{ MPa}$ 、 $T_1 = 900 \text{ K}$, 可逆绝热膨胀到 $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$ 。设比热容为定值, 绝热指数 $\kappa = 1.4$, 求: (1) 终态参数 T_2 和 v_2 ; (2) 过程功和技术功; (3) ΔU 和 ΔH 。

提示和答案: 绝热过程过程功和技术功分别等于热力学能减少量和焓减少量。

$T_2 = 466.15 \text{ K}$ 、 $v_2 = 1.3379 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $W = 933.21 \text{ kJ}$ 、 $W_t = 1306.50 \text{ kJ}$ 、 $\Delta U = -933.21 \text{ kJ}$ 、

$\Delta H = -1306.50 \text{ kJ}$ 。

4-7 同上题, 比热容为变值, 按空气热力性质表重新进行计算。

提示和答案：利用 $p_{r2} = \frac{p_2}{p_1} p_{r1}$ 查出 T_2 ，进而查得 h_2 ，不论比热容是否取定值，绝热过程过程功和技术功分别等于热力学能减少量和焓减少量。 $W = 983.22\text{kJ}$ 、 $W_t = 1336.82\text{kJ}$ 。

4-8 1 kg 空气初态为 $p_1 = 0.5\text{ MPa}$ ， $T_1 = 1\ 000\text{ K}$ ，按定熵过程：（1）变化到 $T_2 = 500\text{ K}$ ，试确定 p_2 ；（2）变化到 $p_2 = 0.1\text{ MPa}$ 确定 T_2 。空气的 c_p 可由空气真实热容确定：

$$\frac{C_{p,m}}{R} = 3.653 - 1.337 \times 10^{-3} \{T\}_K + 3.294 \times 10^{-6} \{T\}_K^2 - 1.913 \times 10^{-9} \{T\}_K^3 + 0.2763 \times 10^{-12} \{T\}_K^4$$

将计算结果与利用气体性质表求出的值进行比较。

提示和答案：（1）将 $C_{p,m}$ 代入 $\Delta S = \int C_{p,m} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = 0$ ，解得 $p_2 = 0.037\text{MPa}$ ；

（2）同理有 $\int_{1000\text{K}}^{T_2} C_{p,m} \frac{dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = 0$ ，用迭代法得出 $T_2 = 657.4\text{ K}$ 。（a）根据 T_1 、 T_2 ，

查得 $p_{r1} = 115.97$ ， $p_{r2} = 8.5558$ ，所以 $p_2 = \frac{p_{r2}}{p_{r1}} p_1 = 0.03689\text{MPa}$ ；（b）已知 p_1 、 T_1 、 p_2 得

$p_{r2} = 23.194$ 根据 p_{r2} ，查得 $T_2 = 657.419\text{K}$ ，表明用真实比热容式积分所得的结果与气体性质表得出的结果是一致的，但后一方法更方便。

4-9 某气缸中空气初始参数 $p_1 = 8\text{ MPa}$ ， $t_1 = 1\ 300\text{ }^\circ\text{C}$ ，进行了一个可逆多变过程后，终态 $p_2 = 0.4\text{ MPa}$ ， $t_2 = 400\text{ }^\circ\text{C}$ ，空气的气体常数 $R_g = 0.287\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，试按下列两种方法计算空气该过程是放热还是吸热？（1）按定值热容， $c_v = 0.718\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；（2）比热容是温度的线性函数 $\{c_v\}_{\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})} = 0.7088 + 0.000186\{t\}_C$ 。

提示和答案：由 p_1 、 T_1 、 p_2 、 T_2 确定多变指数 $n = 1.3955$ 。（1）

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1) = -646.2\text{kJ/kg}、w = \frac{1}{n-1} R_g(T_1 - T_2) = 653.1\text{kJ/kg}、q = \Delta u + w = 6.9\text{kJ/kg}$$

所以是吸热过程。（2） $\Delta u = \int_1^2 c_v dt = \int_{1300^\circ\text{C}}^{400^\circ\text{C}} (0.7088 + 0.000186t) dt = -780.21\text{kJ/kg}$ 、

$$w = \frac{1}{n-1} R_g(T_1 - T_2) = 653.1\text{kJ/kg}、q = \Delta u + w = -127.1\text{kJ/kg} \text{ 是放热过程。}$$

可见温度变化范围很大时按定值比热容计算误差太大。

4-10 一体积为 0.15 m^3 的气罐，内装有 $p_1 = 0.55 \text{ MPa}$ ， $t_1 = 38^\circ\text{C}$ 的氧气，今对氧气加热，其温度、压力都将升高，罐上装有压力控制阀，当压力超过 0.7 MPa 时阀门自动打开，放走部分氧气，使罐中维持最大压力 0.7 MPa 。问当罐中氧气温度的 285°C 时，共加入多少热量？设氧气的比热容为定值， $c_v = 0.667 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ， $c_p = 0.917 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

提示和答案： 初终态氧气的质量 $m_1 = \frac{p_1 V}{R_g T_1} = 1.02 \text{ kg}$ 、 $m_3 = \frac{p_3 V}{R_g T_3} = 0.72 \text{ kg}$ 。据题

意 1-2 是定容加热过程， $T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = 395.8 \text{ K}$ ， $Q_v = m_1 c_v (T_2 - T_1) = 56.83 \text{ kJ}$ 。2-3 是边加热，

边放气的吸热放气过程，过程中维持容器中氧气压力不变，恒为 0.7 MPa 。罐中气体由 $m_2 (= m_1)$ 减少到 m_3 ，温度由 T_2 升高到 T_3 ，任何中间状态都满足 $p_3 V = m R_g T$ 。

$$Q_p = \int_{T_2}^{T_3} m c_p dT = c_p \int \frac{p_3 V}{R_g T} dT = 127.19 \text{ kJ}, \quad Q = Q_v + Q_p = 184.02 \text{ kJ}。$$

4-11 某理想气体在 $T-s$ 图上的四种过程如图所示，试在 $p-v$ 图上画出相应的四个过程，并对每个过程说明 n 的范围，是吸热还是放热，是膨胀还是压缩过程？

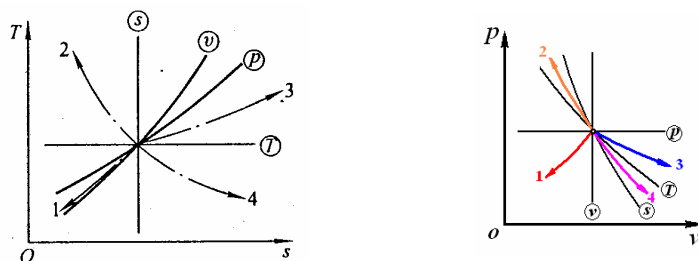
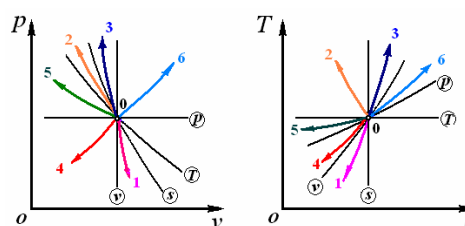


图 4-19 题 4-11 附图

提示和答案： (1) $-\infty < n_1 < 0$ ，压缩、放热；(2) $1 < n_2 < \kappa$ ，压缩、放热；(3) $0 < n_3 < 1$ ，

膨胀、吸热；(4) $1 < n_4 < \kappa$ ，膨胀、吸热。

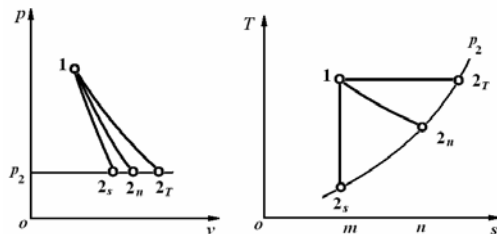
4-12 试将满足以下要求的多变过程表示在 $p-v$ 和 $T-s$ 图上（先标出四个基本热力过程）：(1) 工质膨胀、吸热且降温；(2) 工质压缩、放热且升温；(3) 工质压缩，吸热，且升温；(4) 工质压缩、降温且降压；(5) 工质放热、降温且升压；(6) 工质膨胀，且升压。



题 4-12 附图

提示和答案: 据顺时针移动 n 增大及 $p-v$ 图上温度和熵变化方向和 $T-s$ 图上压力和比体积变化的方向确定。

4-13 有 1kg 空气, 初始状态为 $p_1 = 0.5 \text{ MPa}$, $t_1 = 500^\circ\text{C}$, (1) 绝热膨胀到 $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$; (2) 定温膨胀到 $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$; (3) 多变膨胀到 $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$, 多变指数 $n = 1.2$ 。试将各过程画在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上, 并计算 Δs_{12} 。设过程可逆, 且比热容 $c_v = 718 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。



题 4-12 附图

提示和答案: 在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上, 随顺时针移动, n 增大。可逆绝热膨胀 $\Delta s_{1-2s} = 0$, 定温膨胀 $\Delta s = 0.462 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$, 多变膨胀 $\Delta s = 0.1923 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

4-14 试证明理想气体在 $T-s$ 图 (如图 4-20) 上的任意两条定压线 (或定容线) 之间的水平距离相等, 即求证: $\overline{14} = \overline{23}$ 。

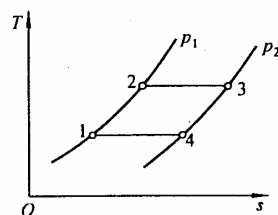


图 4-20 习题 4-14 附图

提示和答案: 线段 $\overline{14} = s_4 - s_1$, 线段 $\overline{23} = s_3 - s_2$ 。

4-15 1 mol 理想气体, 从状态 1 经定压过程达状态 2, 再经定容过程达状态 3, 另一途径为经 1-3 直接到达 3 (图 4-21)。已知 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$, $T_1 = 300 \text{ K}$, $v_2 = 3v_1$, $p_3 = 2p_2$, 试证明: (1) $Q_{12} + Q_{23} \neq Q_{13}$; (2) $\Delta S_{12} + \Delta S_{23} = \Delta S_{13}$ 。

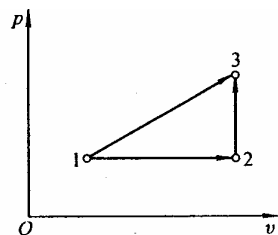


图 4-21 习题 4-15 附图

提示和答案: (1) 分别列出两条途径的热力学第一定律表达式, 由于热力学能只是温度的函数, 故证明他们的功不等 (如从过程线与 v 轴包围的面积) 即可; (2) 求出定压过程和定容过程熵变相加与 ΔS_{1-3} 比较。

4-16 试导出理想气体定值比热容时多变过程熵差的计算式为

$$s_2 - s_1 = \frac{n - \kappa}{n(\kappa - 1)} R_g \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (\text{a})$$

或

$$s_2 - s_1 = \frac{(n - \kappa) R_g}{(n - 1)(\kappa - 1)} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (n \neq 1) \quad (\text{b})$$

并根据式 (a) 对图 4-22 中三种过程进行分析, 它们的 n 是大于、等于 κ , 还是小于 κ ? 它们各是吸热、绝热、还放热过程?

提示和答案: 将多变过程比热容 $c_n = \frac{n-\kappa}{n-1} c_v (n \neq 1)$ 代入

$$\Delta s = \int \frac{\delta q}{T} = \int \frac{c_n dT}{T}, \text{ 并注意到 } c_v = \frac{1}{\kappa-1} R_g \text{ 和 } \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \text{ 即}$$

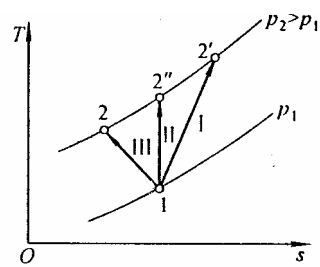
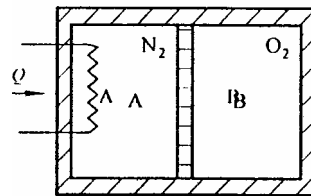


图 4-22 习题 4-16 附图

证。过程线与 s 轴所夹的面积代表热量, 由图分析熵变, 过程 I 是吸热过程, $n > \kappa$ 或 $n < 0$; 过程 II 与 s 轴垂直, 是可逆绝热过程, $n = \kappa$; 过程 III 是放热过程, 多变指数应满足 $0 < n < \kappa$ 。

4-17 气缸活塞系统的缸壁和活塞均为刚性绝热材料制成, A 侧为 N_2 , B 侧为 O_2 , 两侧温度、压力、体积均相同: $T_{A1} = T_{B1} = 300 \text{ K}$, $p_{A1} = p_{B1} = 0.1 \text{ MPa}$, $V_{A1} = V_{B1} = 0.5 \text{ m}^3$ 。

活塞可在气缸中无摩擦地自由移动。A 侧的电加热器通电后缓缓和对 N_2 加热, 直到 $p_{A2} = 0.22 \text{ MPa}$, 设 O_2 和 N_2 均为理想气体,



试按定值比热容计算: (1) T_{B2} 和 V_{B2} ; (2) V_{A2} 和 T_{A2} ; (3) Q

和 W_A (A 侧 N_2 对 B 侧 O_2 作出的过程功); (4) ΔS_{O_2} 和 ΔS_{N_2} ; 图 4-23 题 4-17 附图

(5) 在 $p-v$ 图及 $T-s$ 图上定性地表示 A、B 两侧气体所进行的过程; (6) A 侧进行的是否是多变过程, 为什么?

提示和答案: (1) 活塞是自由的, 故 $p_{B2} = p_{A2}$ 。B 内可逆绝热过程, $T_{B,2} = 375.8 \text{ K}$ 、 $V_{B,2} = 0.2847 \text{ m}^3$; (2) 总体积不变, $V_{A,2} = 0.7153 \text{ m}^3$ 、 $T_{A2} = 944.15 \text{ K}$; (3) 取 A+B 为热力系, 系统不作功 $Q = 299.99 \text{ kJ}$, 取 B 为热力系, 绝热, $W_B = -\Delta U_B = -31.58 \text{ kJ}$ 且 $W_A = -W_B = 31.58 \text{ kJ}$; (4) $\Delta S_{O_2} = 0$ 、 $\Delta S_{N_2} = 74 \text{ kJ/K}$; (5)(6)略。

4-18 空气装在如附图所示的绝热刚性气缸活塞装置内, 气缸中间有一块带有小孔的导热隔板, 两活塞联动, 故活塞移动时装置内总体积不变。

设活塞移动时外界机器以对系统作功 40 kJ , 活塞与隔板静止后, 系统恢复平衡。已知初始状态, $p_1 = 2.0 \text{ MPa}$,

$T_1 = 400 \text{ K}$, 空气总质量 $m = 2 \text{ kg}$ 。设比热容为定值,

$c_v = 0.718 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。求: (1) 终态空气的温度 T_2 和压

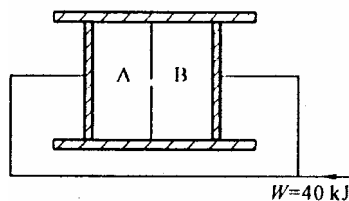


图 4-24 习题 4-18 附图

力 p_2 ; (2) 系统的熵变 ΔS_{12} , 是定熵过程吗? (3) 在 $T-s$ 图上示意画出该过程。

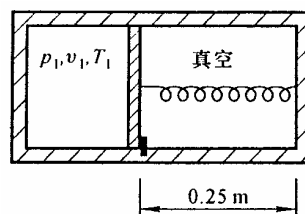
提示和答案: (1) $V_{A1} = V_{B1} = 0.0574 \text{ m}^3$ 。取 A+B 为系统, $W = -(\Delta U_A + \Delta U_B) = 2c_v(T_1 - T_2)$,

$$T_2 = T_1 + \frac{W}{mc_v} = 427.9 \text{ K}, \quad p_2 = \frac{mR_g T_2}{2V_A} = 2.139 \text{ MPa}。 (2) 过程中系统$$

$$\Delta S = m \left(c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{V_2}{V_1} \right) = mc_v \ln \frac{T_2}{T_1} = 0.0968 \text{ kJ/K} > 0, \text{ 所以不是定熵过程。} (3) \text{ 略。}$$

4-19 一孤立系统由带有隔板的气缸组成, 隔板将气缸两部分, 一侧装有理想气体氦, 气体常数 $R_g = 2077 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 比热容 $c_v = 3116 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 另

一侧完全真空, 内装有一弹簧, 弹性系数 $k = 900 \text{ N/m}$, 弹簧的自由长度为 0.3 m , 弹性力 $F = kx$, x 表示伸长或压缩的长度, 初始位置如图 4-27 所示。初态为 $t_1 = 40^\circ \text{C}$, $V_1 = 10^{-4} \text{ m}^3$,



$p_1 = 0.14 \text{ MPa}$, 弹簧长度为 0.25 m 。开始时隔板由销子固定, 现

图 4-25 题 4-19 附图

拔去销子, 则气体和弹簧达到新的力平衡。假定不计隔板质量, 且隔板是绝热的, 面积 $A = 0.001 \text{ m}^2$, 且不计移动摩擦阻力。求: 力平衡时气体的压力和温度, 状态变化前后气体的熵变, 是否是定熵过程? 试在 $T-s$ 图上示意画出该过程。

提示和答案: $x_1 = 0.3 \text{ m} - 0.25 \text{ m} = 0.05 \text{ m}$, $m = \frac{p_1 V_1}{R_g T_1} = 0.2154 \times 10^{-4} \text{ kg}$ 。初态弹簧压力

$$p_0 = \frac{F_1}{A} = \frac{kx_1}{A} = 0.045 \text{ MPa} < p_1。 \text{ 设中间状态氦气体积为 } V, \quad p = \frac{F}{A} = \frac{kx}{A} = \frac{k}{A} \left(\frac{V - V_1}{A} + x_1 \right),$$

代入数据得

$$\{p\}_{\text{Pa}} = 9 \times 10^8 \{V\}_{\text{m}^3} - 4.5 \times 10^4 \quad (\text{a})$$

取氦气为热力系, 是绝热系, 能量方程 $\delta W = -dU$ 即 $p dV = -mc_v dT$ 。中间状态

$p = 9 \times 10^8 V - 4.5 \times 10^4$, 所以代入后两边积分后得:

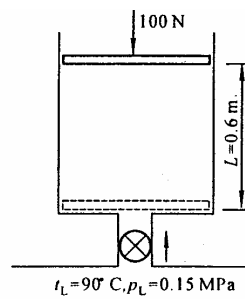
$$T_2 = 313 - 67.064 \times 10^8 V_2^2 + 67.064 \times 10^4 V_2 \quad (\text{b})$$

将式(a)、(b)代入 $\frac{p_2 V_2}{R_g T_2} = m$, 经整理可解得 $V_2 = 1.4369 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, 代入式(a)、(b)得

$$p_2 = 0.0843 \text{ MPa}、T_2 = 270.89 \text{ K}、\Delta S_{1-2} = m \left[c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{V_2}{V_1} \right] = 0.0652 \times 10^{-4} \text{ kJ/K} > 0,$$

是非定熵绝热过程。

4-20 一竖直气缸截面积 $A = 6450 \text{ mm}^2$ ，内置一重 100 N 活塞，通过管道、阀门与气源相通。如附图，起初活塞在气缸底部，打开阀门空气缓缓流入，当活塞上移至 $L = 0.6 \text{ m}$ 时阀门关闭，这时气缸内空气温度为 30°C ，已知输气管中空气参数保持一定， $p_L = 0.15 \text{ MPa}$ ， $t_L = 90^\circ \text{C}$ 。



活塞与缸壁间无摩擦损失，大气压力 $p_0 = 0.1013 \text{ MPa}$ ，求：(1) 活塞上升过程中气缸内气体压力 p ；(2) 对外作出的功 W ；(3) 过程中气体对外作出的有用功 W_u ；(4) 吸热量 Q 。已知 $c_v = 718 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ，图 4-26 题 4-20 附图

$c_p = 1005 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

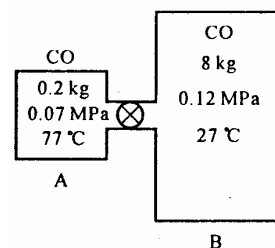
提示和答案：(1) 气缸内气体压力 $p = p_0 + \frac{F}{A} = 0.1168 \text{ MPa}$ ；(2) 空气对外做功，

$W = \int_1^2 p dV = 0.452 \text{ kJ}$ ；(3) 输出的有用功 $W_u = FL = 0.06 \text{ kJ}$ ；(4) 由非稳定流动能量方程

$$\delta Q = dU + h_{in} \delta m_{in} + \delta W_i, \text{ 考虑到 } \delta m_{in} = dm, m_2 = m_{in}, m_2 = \frac{p_2 V_2}{R_g T_2} \doteq 0.0052 \text{ kg},$$

$Q = -0.313 \text{ kJ}$ 。

4-21 容器 A 中装有 0.2 kg 的一氧化碳 CO ，压力为 0.07 MPa 、温度为 77°C 。容器 B 中装有 0.8 kg 压力、温度为 0.12 MPa 、温度为 27°C 的 CO 见附图。A 和 B 的壁面均为透热壁面，之间用管道和阀门相通，现打开阀门， CO 气体由 B 流向 A，若压力平衡时温度同为 $t_2 = 42^\circ \text{C}$ ， CO 为理想气体，过程中平均比热容



$c_v = 0.745 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。试求：(1) 平衡时终压 p_2 ；(2) 吸热量 Q 。图 4-27 习题 4-21 附图

提示和答案：取 A+B 为热力系，总质量和总容积不变，对终态写出状态方程，得 $p_2 = 0.105 \text{ MPa}$ ；由闭口系能量方程求得 $Q = 3.725 \text{ kJ}$ 。

4-22 有一刚性绝热容器被绝热隔板一分为二， $V_A = V_B = 28 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，A 中装有 0.7 MPa 、 65°C 的氧气，B 为真空，见图 4-30。打开安装在隔板上的阀门，氧气自 A 流向

B, 两侧压力相同时关闭阀门。试求: (1) 终压 p_2 和两侧终温 T_{A2} 和 T_{B2} ; (2) 过程前后氧气的熵变 ΔS_{12} , 设氧气的 $c_p = 0.920 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

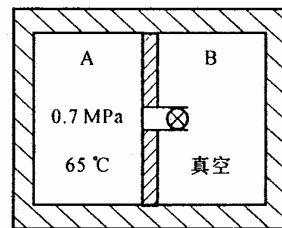


图 4-28 习题 4-22 附图

提示和答案: 终态时两侧 O_2 质量即初态 A 侧质量, 考虑到终态压力 $p_{A2} = p_{B2}$, 所以

$$p_{A2} = \left(\frac{1}{T_{A2}} + \frac{1}{T_{B2}} \right) = 2.07 \times 10^3 \quad (\text{a})$$

A 侧为绝热放气, 其中气体经历等比熵过程, 参数变化规律

$$p_{A2} = \left(\frac{T_{A2}}{T_{A1}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} p_{A1} = 0.9860 \times 10^{-3} T_{A2}^{3.5} \quad (\text{b})$$

取 A 和 B 为热力系, 是不作外功的绝热闭口系

$$4.48 m_{A2} (T_{A2} - T_{B2}) + T_{B2} = 338 \quad (\text{c})$$

而

$$m_{A2} = 0.10627 \times 10^{-6} T_{A2}^{2.5} \quad (\text{d})$$

采用迭代方法 (a) (b) (c) (d) 四式联解求得 $p_{A2} = 0.35 \text{ MPa}$; $T_{A2} = 277.3 \text{ K}$, $T_{B2} = 432.72 \text{ K}$ 。

熵变 $\Delta S_{12} = 0.0352 \text{ kJ/K}$ 。

4-23 大容器内水蒸气 $p_b = 1.5 \text{ MPa}$, $t_b = 320^\circ \text{C}$, 其比焓 $h_b = 3080.9 \text{ kJ/kg}$, 通过阀门与汽轮机连接, 汽轮机排汽流入 $V = 0.6 \text{ m}^3$ 的小容器, 如附图所示。初始时小容器内真空。打开阀门向小容器充入蒸汽, 直到终压终温分别为 $p_2 = 1.5 \text{ MPa}$, $t_2 = 400^\circ \text{C}$ 后关闭阀门, 这时 $v_2 = 0.229 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $u_2 = 2911.5 \text{ kJ/kg}$, 充气过程为绝热的, 汽轮机中也按绝热膨胀, 且不计动能差, 位能差的影响。设大容器内蒸汽参数保持不变, 终态时汽轮机和连接管道内蒸汽质量可不计。求:

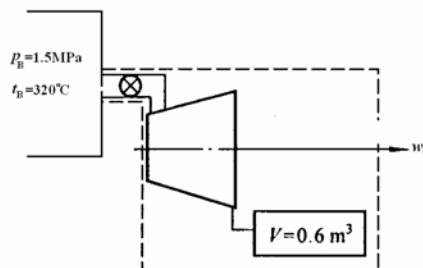


图 4-29 习题 4-23 附图

(1) 汽轮机作出的功 W_t ; (2) 移走汽轮机, 蒸汽直接

充入小容器, 问当小容器内蒸汽压力为 1.5 MPa 时终温是否仍为 400°C ?

提示和答案: 取图中虚线为控制体积, 能量守恒式可简化为 $\delta W_t = dU - h_{in} dm$, 积分并

因小容器内初态为真空，求得 $W_i = 443.84 \text{ kJ}$ ；移走汽轮机，蒸汽直接流入小容器，控制体积不作功，这时能量方程可简化得 $u_2 = h_b = 3080.9 \text{ kJ/kg}$ ，小容器内蒸汽终温约为 504°C 。

4-24 空气瓶内装有 $p_1 = 3.0 \text{ MPa}$ ， $T_1 = 296 \text{ K}$ 的高压空气，可驱动一台小型气轮机，用作发动机的起动装置，如图 4-30 所示。要求该气轮机能产生 5 kW 的平均输出功率，并持续半分钟而瓶内空气压力不得低于 0.3 MPa 。设气轮机中进行的是可逆绝热膨胀过程，气轮机出口排气压力保持一定 $p_b = 0.1 \text{ MPa}$ 。空气瓶是绝热的，不计算管路和阀门的摩阻损失。问空气瓶的体积 V 至少要多大？

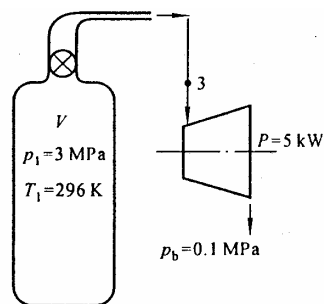


图 4-30 习题 4-24 附图

提示和答案：初态气瓶内空气质量 $m_1 = \frac{p_1 V}{R_g T_1} = 35.314V$ 。

打开阀门绝热放气，瓶中剩余气体的参数按等比熵过程变化，

$$T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_1 = 153.31 \text{ K}$$

终态气瓶内空气质量
$$m_2 = \frac{p_2 V}{R_g T_2} = 6.818V$$

流出的空气
$$-\Delta m = m_1 - m_2 = 35.314V - 6.818V = 28.496V$$

放气过程气瓶内任何中间状态 p_2 、 T_2 都有 $T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} T_1$ ，若不计摩擦损失，气轮机入口

参数与气瓶内放气参数 p_2 、 T_2 时刻相同。任一时刻气轮机内， $T_4 = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ ，气轮机入

口参数为 p_2 、 T_2 ，气轮机出口参数为 $p_4 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 T_4 ，

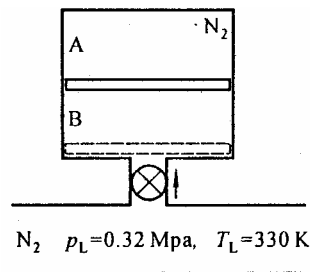
$$T_4 = T_3 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_2 \left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1 \left(\frac{p_4}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 112.01 \text{ K}$$

整个放气过程气轮机出口压力、温度保持为 0.1 MPa 、 112.01 K 。

取气瓶和涡轮机一起为热力系，能量方程 $\delta Q = dU + h_{\text{out}} \delta m_{\text{out}} - h_{\text{in}} \delta m_{\text{in}} + \delta W_i$ ，积分得

$$m_2 T_2 - m_1 T_1 - \kappa T_4 \Delta m + \frac{W_i}{c_v} = 0。据题意解得，V \approx 0.043 \text{ m}^3。$$

4-25 绝热刚性容器内有一绝热的不计重量的自由活塞，初态活塞在容器底部，A 中装有 $p_{A1} = 0.1 \text{ MPa}$ ， $T_{A1} = 290 \text{ K}$ 的氮气，体积 $V_{A1} = 0.12 \text{ m}^3$ ，见附图。打开阀门， N_2 缓缓充入，活塞上升到压力平衡的位置，此时 $p_{A2} = p_{B2} = p_L$ 然后关闭阀门，输气管中 N_2 参数保持一定，为 $p_L = 0.32 \text{ MPa}$ ， $T_L = 330 \text{ K}$ 。求：（1）终温 T_{A2} 、 T_{B2} ；



A 的体积 V_{A2} ；及充入的氮气的量 m_{B2} 。

图 4-31 习题 4-25 附图

提示和答案：取 A 为热力系，经历可逆绝热压缩 $T_{A2} = 404.3 \text{ K}$ 、 $V_{A2} = 0.0523 \text{ m}^3$ 。再取 B 为控制体积，是变质量系系统，其能量方程 $\delta Q = dU - h_{in} \delta m_{in} + \delta W_B$ ，据题意简化整理后得 $T_{B,2} = 379.22 \text{ K}$ 、 $m_{B,2} = 0.1924 \text{ kg}$ 。

4-26 $V = 8 \text{ m}^3$ 的刚性容器中装有 0.64 MPa 、 48°C 的 N_2 ，容器上方的阀门设计成使 N_2 以固定的质量流量排出， $q_m = 0.032 \text{ kg/s}$ ，见图 4-34。已知热流量 $q_0 = 5.6 \text{ kJ/s}$ ，且保持恒定。设 N_2 按理想气体，比热容为 $c_v = 0.743 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ， $c_p = 1.040 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。试求：

（1）10 min 后容器内 N_2 的温度 T_2 和压力 p_2 ；（2）容器内空气温度达 120°C 所需的时间（min）？

提示和答案：以 τ 表示时间，则留在容器内氧气质量：

$$m = m_1 - q_m \tau = 53.70 - 0.032 \tau \quad (\text{a})$$

取容器为控制体积，因 $\delta W_i = 0$ 、 $\delta m_{in} = 0$ ，能量方程为 $\delta Q = dU_{cv} + h_{out} \delta m_{out}$ ，据题意可得

$$5.6 = (53.70 - 0.032 \tau) 0.743 \frac{dT}{d\tau} + 0.297 \times 0.032 T \quad (\text{b})$$

$$\text{分离变量} \quad \frac{d\tau}{39.8991 - 0.023776 \tau} = \frac{dT}{5.6 - 0.009504 T} \quad (\text{c})$$

积分解得， $T_2 = 364.48 \text{ K}$ ， $p_2 = 0.467 \text{ MPa}$ 、 $\tau = 15.17 \text{ min}$ 。

4-27 某锅炉每小时生产 $10\,000 \text{ kg}$ 的蒸汽，蒸汽的表压力为 $p_e = 1.9 \text{ MPa}$ ，温度 $t_1 = 350^\circ \text{C}$ 。设锅炉给水的温度为 $t_2 = 40^\circ \text{C}$ ，锅炉的效率 $\eta_b = 0.78$ 。煤的发热量（热值）

为 $Q_p = 2.97 \times 10^4 \text{ kJ/kg}$ 。求每小时锅炉的煤耗量是多少？汽锅内水的加热和汽化、以及蒸汽的过热都在定压下进行。锅炉效率 η_B 的定义为：

$$\eta_B = \frac{\text{水和蒸汽所吸的热量}}{\text{燃料燃烧时所在发出的热量}}$$

（未被水和蒸汽所吸收的热量是锅炉的热损失，其中主要是烟囱出口处排烟所带走的热量。）

提示和答案： 生产蒸汽需要吸入热量 $q_Q = q_m q$ 则每小时锅炉耗煤

$$m = \frac{q_Q}{\eta_B Q_p} = 1281 \text{ kg/h}。$$

4-28 1 kg 蒸汽， $p_1 = 3 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 450^\circ\text{C}$ ，绝热膨胀至 $p_2 = 0.004 \text{ MPa}$ ，试用 $h-s$ 图求终点状态参数 t_2 、 v_2 、 h_2 、 s_2 并求膨胀功和技术功 w_t 。

提示和答案： 由 $h-s$ 图查得： $h_1 = 3345 \text{ kJ/kg}$ 、 $v_1 = 0.108 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $s_1 = 7.082 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；
 $h_2 = 2132 \text{ kJ/kg}$ 、 $v_2 = 28 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $s_2 = s_1 = 7.082 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $t_2 = 29.4^\circ\text{C}$ 。绝热过程膨胀功等于热力学能差， $w = 1001 \text{ kJ/kg}$ ，技术功等于焓差， $w_t = 1214 \text{ kJ/kg}$ 。

4-29 1 kg 蒸汽，由初态 $p_1 = 2 \text{ MPa}$ ， $x_1 = 0.95$ ，定温膨胀到 $p_2 = 1 \text{ MPa}$ ，求终态参数 t_2 、 v_2 、 h_2 、 s_2 及过程中对蒸汽所加入的热量 q_T 和过程中蒸汽对外界所作的膨胀功 w 。

提示和答案： 由 $h-s$ 图查得 h_1 、 v_1 、 s_1 及 $h_2 = 2861 \text{ kJ/kg}$ 、 $t_2 = 212.5^\circ\text{C}$ 、 $v_2 = 0.215 \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $s_2 = 6.760 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，据第一定律解析式，分别求出热量和热力学能差即可求得功，而定温过程 $q_T = T(s_2 - s_1) = 299.2 \text{ kJ/kg}$ 、 $w = q_T - \Delta u = 169.2 \text{ kJ/kg}$ 。

4-30 一台功率为 20 000 kW 的汽轮机，其耗汽率为 $d = 1.32 \times 10^{-6} \text{ kg/J}$ 。从汽轮机排出的乏气参数为 $p_2 = 0.004 \text{ MPa}$ 、 $x_2 = 0.9$ 。乏汽进入冷凝器后，在其中凝结为冷凝水。冷凝器中的压力设为 0.004 MPa，即等于乏汽压力。冷凝水的温度等于乏汽压力下的饱和温度，乏汽在凝结时放出热量。这些热量为冷却水所吸，因此冷却水离开冷凝器时的温度高于进入时的温度。设冷却水进入冷凝器时的温

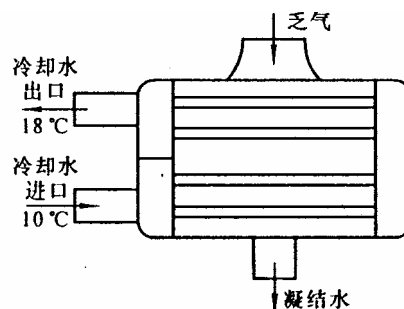


图 4-33 冷凝器示意图

度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，离开时温度为 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，求冷却水每小时的流量 (t/h)。冷却水在管内流动，乏汽在管壁外凝结。如图所示。管子通常用黄铜管，大型冷凝器中装有数千根黄铜管。

提示和答案： 已知功率及汽耗率可得每小时耗汽量，由乏汽状态查表得汽化潜热，得乏汽凝结为饱和水时放热量，再以冷凝器为体系，列能量方程解得冷却水流 $q_m = 6221.4\text{ t/h}$ 。

4-31 给水在温度 $t_1 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和压力 $p_1 = 3.5\text{ MPa}$ 下进入蒸汽锅炉的省煤器中，在锅炉中加热而成 $t_2 = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过热蒸汽。试把过程表示在 $T-s$ 图上，并求出加热过程中水的平均吸热温度。

提示和答案： 由未饱和水与过热蒸汽表查得：

		$h / \text{kJ/kg}$	$s / \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$p=3.5\text{ MPa}$	$t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	254.08	0.8294
	$t = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$	3102.95	6.6610

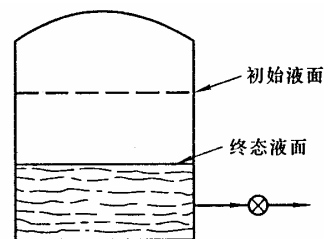
水的加热过程可看作定压过程，所以

$$q_p = h_2 - h_1 = 3102.95\text{ kJ/kg} - 254.08\text{ kJ/kg} = 2848.9\text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}\Delta s_{12} &= s_2 - s_1 = 6.6610\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) - 0.8294\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \\ &= 5.8316\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})\end{aligned}$$

$$\bar{T} = \frac{q_p}{\Delta s_{12}} = \frac{2848.9\text{ kJ/kg}}{5.8316\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})} = 488.53\text{ K} = 215.4\text{ }^{\circ}\text{C}。$$

4-32 附图所示的刚性容器容积为 3 m^3 ，内贮压力 3.5 MPa 的饱和水和饱和蒸汽，其中汽和水的质量之比为 $1:9$ 。将饱和水通过阀门排出容器，使容器内蒸汽和水的总质量减为原来的一半。若要保持容器内温度不变，试求需从外界传入多少热量。



提示和答案： 由饱和水和饱和水蒸气表查得：

$p = 3.5\text{ MPa}$ 时的饱和参数，并据 $V = 3\text{ m}^3$ ，汽水质量为

图 4-34 习题 4-32 附图

$1:9$ ，即干度 $x_1 = 0.1$ ，得 $v_1 = 0.0068167\text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $h_1 = 1224.89\text{ kJ/kg}$ 、 $s_1 = 3.06488\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

初态质量 $m_1 = \frac{V}{v_1} = 440.10\text{ kg}$ ，其中饱和水 $m_l = 396.09\text{ kg}$ ，饱和蒸汽 $m_v = 44.01\text{ kg}$ 。

据题意，自阀门排出饱和水 $m_{\text{out}} = 220.05\text{ kg}$ ，容器内终态质量 $m_2 = 220.05\text{ kg}$ 。

排出过程容器内温度不变, 故蒸汽压力维持 3.5MPa 不变, $v_2 = \frac{V}{m_2} = 0.0136333 \text{ m}^3/\text{kg}$,

$$x_2 = \frac{v_2 - v'}{v'' - v'} = 0.2221, \quad h_2 = 1438.95 \text{ kJ/kg}。$$

取容器为系统, 立能量方程, 则 $Q - H_{\text{out}} = U_2 - U_1$, 解得 $Q = 8531.3 \text{ kJ}$ 。

4-33 绝热良好的圆筒内装置自由活动无磨擦的活塞, 活塞下有压力为 0.8MPa, 干度为 0.9 的蒸汽 0.5kg, 活塞上方有空气保持压力, 吹空气入活塞上方空间, 下压活塞使蒸汽压力上升并使蒸汽干度变为 1。(1) 求终态 ($x=1$) 的蒸汽压力; (2) 压缩中对蒸汽作功多少?

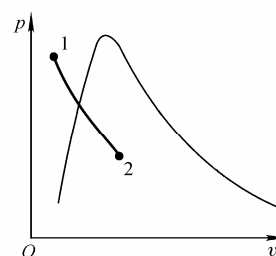
提示和答案: 由 $p=0.8\text{MPa}$ 时饱和参数, 计算得 $v_1 = 0.2164 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $h_1 = 2564.09 \text{ kJ/kg}$ 、 $s_1 = 6.20089 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。(1) 活塞下压, 可认为是等熵过程, 查饱和水蒸气表, 经插值, 得 $p_2 = 2.88 \text{ MPa}$ (2) 因 $p_2 = 2.88 \text{ MPa}$ 、 $v'' = 0.069449 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $h'' = 1805.5 \text{ kJ/kg}$, $w = u_1 - u_2 = h_1 - p_1 v_1 - (h_2 - p_2 v_2) = 785.48 \text{ kJ/kg}$, $W = mw = 392.7 \text{ kJ}$ 。

4-34 压力维持 200 kPa 恒定的汽缸内有 0.25 kg 饱和水蒸气。加热使水温度升高到 200 °C, 试求初、终态水蒸气的热力学能和过程的加热量。

提示和答案: 由状态 1, 查饱和水和饱和水蒸气表得 $t_s = 120.2^\circ \text{C}$ 、 $h'' = 2706.5 \text{ kJ/kg}$ 、 $v'' = 0.8865 \text{ m}^3/\text{kg}$, 故 $u'' = 2529.2 \text{ kJ/kg}$ 。由状态 2 查水蒸气热力性质表, $h_2 = 3112.4 \text{ kJ/kg}$ 、 $v_2 = 1.3634 \text{ m}^3/\text{kg}$, 计算 $u_2 = 2839.7 \text{ kJ/kg}$, 取水蒸气为闭口系, 据能量方程有 $Q = m(\Delta u + w) = m[(u_2 - u_1) + p(v_2 - v_1)] = 101.5 \text{ kJ}$ 。

4-35 反应堆容积 1 m^3 , 其中充满 20 MPa、360 °C 的水。反应堆置于密封、绝热的良好压力壳内, 初始时压力壳抽空。在反应堆烧毁事故中, 水充满压力壳, 为了使终态压力壳内压力不超过 200 kPa, 确定包壳的最小体积。

提示和答案: 取水为闭口系, 由于壳内体积可以认为不变, 所以事故中热量和功均为零, $u_1 = u_2$ 。初态: 由 20MPa、360



题 4-35 附图

°C 查得 h_1 , v_1 , 计算得 $u_1 = 1703.7 \text{ kJ/kg}$, $m = \frac{V_1}{v_1} = 548.5 \text{ kg}$ 。

终态：由 200kPa，查表得饱和参数后计算 $u' = h' - p_s v' = 504.5 \text{ kJ/kg}$ ，

$u'' = h'' - p_s v'' = 2529.2 \text{ kJ/kg}$ 。因 $u' < u_2 < u''$ ，所以终态为湿蒸汽状态，

$$x_2 = \frac{u_2 - u'}{u'' - u'} = 0.592, \quad v_2 = 0.5253 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad V_2 = 288.2 \text{ m}^3。$$

4-36 容积为 100L 的刚性透热容器内含 30℃ 的 R134a 饱和蒸气，容器 A 和气缸 B 用阀门管道相通（见图 35），B 中通过活塞传递的压力恒定为 200kPa。打开阀门，R134a 缓慢流入 B，直至容器 A 内压力也为 200kPa，过程中容器 A 和 B 内工质温度保持 30℃ 不变，求过程的热量。

提示和答案： 取全部 R134a 为闭口系。终态时容器 A 和气缸 B 内 R134a 的状态相同。确定初、终态热力学能及过程中通过活塞作的功即可求得热量。利用初态温度及中态压力温度，查 R134a 热力性质表得其他

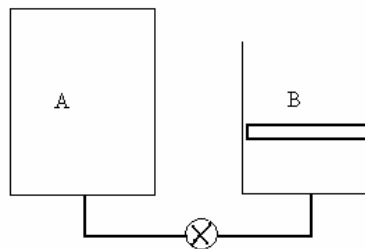
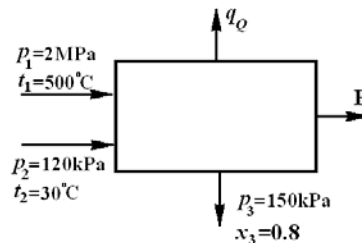


图 4-35 习题 4-36 附图

初、终态参数并算得质量及热力学能并确定在气缸 B 内 R134a 的体积，求得

$$Q = \Delta U + W = m(u_2 - u_1) + p_2 \Delta V_B = 103.1 \text{ kJ}。$$

4-37 某大型蒸汽膨胀发动机有两股流体流入，一股是参数为 $p_1 = 2 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 500^\circ\text{C}$ 的蒸汽，质量流量 $q_{m1} = 2.0 \text{ kg/s}$ ；另一股是 $p_2 = 120 \text{ kPa}$ 、 $t_2 = 30^\circ\text{C}$ 的冷却水，质量流量为 $q_{m2} = 0.5 \text{ kg/s}$ 。两股流体汇合成一股流出设备时 $p_3 = 150 \text{ kPa}$ 、干度 $x_3 = 80\%$ ，流出管的直径是 0.15 m。若过程中的热损失是 300 kW，试求工质通过管道排出时的速度和发动机输出功率。



题 4-37 附图

提示和答案： 查饱和水和饱和水蒸气表后算得： $v_3 = v_3' + x_3(v_3'' - v_3') = 0.09277 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，

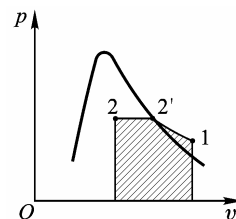
$h_3 = h_3' + x_3(h_3'' - h_3') = 2248.3 \text{ kJ/kg}$ 。取发动机为控制体积，据质量守恒

$q_{m3} = q_{m1} + q_{m2} = 2.5 \text{ kg/s}$ ， $c = \frac{q_{m3} v_3}{A} = 131.2 \text{ m/s}$ 。据稳态稳流能量方程可得

$$P = q_{m1} h_1 + q_{m2} h_2 - q_{m3} \left(h_3 + \frac{c^2}{2} \right) - q_Q = 1056 \text{ kW}。$$

4-38 气缸活塞系统的缸内含有 5 kg R134a 过热蒸气，参数为 20℃、0.5 MPa。在温度维持常数的条件下冷却到干度为 0.5 的终态。过程中系统放热 500 kJ，求过程初终态的体积和过程功。

提示和答案： 工质在缸内的过程如附图所示。首先确定初、终态参数。初态为过热蒸汽查表，得 h_1 和 v_1 计算 u_1 及 $V_1 = 0.211\text{m}^3$ ，终态为湿蒸汽，由 20°C 查表，得饱和参数，结合干度得 $V_2 = 0.092\text{m}^3$ 。再由闭口系能量方程解得 $W = -87.5\text{kJ/kg}$ 。



题 4-38 附图

4-39 体积均为 1m^3 的两个刚性容器A和B用管道阀门相连，初始时容器 A 内干度为 0.15，温度为 20°C 的氟利昂 R134a，容器 B 为真空。打开阀门，氟利昂 R134a 蒸气缓缓流入容器 B，直至容器 A 和 B 内压力相等，过程进行足够缓慢，使过程中温度保持 20°C 不变，求过程中的换热量。

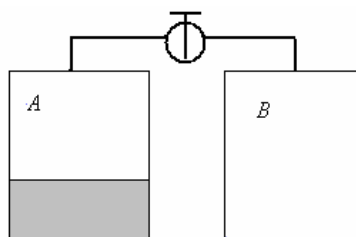


图 4-36 习题 4-39 附图

提示和答案： 取全部氟利昂 R134a 为控制质量。

初态： $v_1 = 0.00608\text{m}^3/\text{kg}$ ， $m = \frac{V_A}{v_1} = 164.5\text{kg}$ ， $h_1 = h' + x_1(h'' - h') = 254.8\text{kJ/kg}$ ，

$u_1 = 251.3\text{kJ/kg}$ ；**终态：** $v_2 = \frac{V_A + V_B}{m} = 0.0122\text{m}^3/\text{kg}$ ， $v' < v_2 < v''$ ，所以终态仍是湿蒸气

状态。 $x_2 = \frac{v_2 - v'}{v'' - v'} = 0.323$ ， $h_2 = h' + x_2(h'' - h') = 286.3\text{kJ/kg}$ ， $u_2 = h_2 - p_s v_2 = 279.3\text{kJ/kg}$ ，

$Q = \Delta U + W = m(u_2 - u_1) = 4603.7\text{kJ}$ 。

第五章 热力学第二定律

习 题

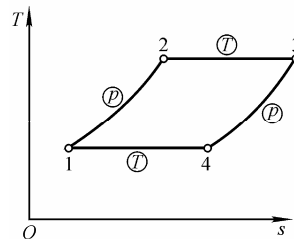
5-1 利用逆向卡诺机作为热泵向房间供热，设室外温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，室内温度为保持 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。要求每小时向室内供热 $2.5 \times 10^4\text{ kJ}$ ，试问：（1）每小时从室外吸多少热量？（2）此循环的供暖系数多大？（3）热泵由电机驱动，设电机效率为 95% ，求电机功率多大？（4）如果直接用电炉取暖，问每小时耗电几度（ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ）？

提示和答案： 用电炉取暖，则热能全部由电能供给。每小时从室外吸热 $q_{Q_2} = 2.287 \times 10^4\text{ kJ/h}$ ，循环供暖系数 $\varepsilon' = 11.72$ ，电机功率 $P = 0.623\text{ kW}$ ，直接用电炉取暖每小时耗电 6.94 度。

5-2 一种固体蓄热器利用太阳能加热岩石块蓄热，岩石块的温度可达 400 K 。现有体积为 2 m^3 的岩石床，其中的岩石密度为 $\rho = 2\text{ }750\text{ kg/m}^3$ ，比热容 $c = 0.89\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，求岩石块降温到环境温度 290 K 时其释放的热量转换成功的最大值。

提示和答案： 岩石块从 290 K 被加热到 400 K 蓄积的热量的可用能与岩石块平均温度 T_m 有关，且在 T_m 和 T_0 之间运行的热机最高热效率 $\eta_{t,\max} = 1 - T_0/T_m$ ，可以求得最大功 $W_{\max} = 81946.0\text{ kJ}$ 。

5-3 设有一由两个定温过程和两个定压过程组成的热力循环，如图 5-35 所示。工质加热前的状态为 $p_1 = 0.1\text{ MPa}$ ， $T_1 = 300\text{ K}$ ，定压加热到 $T_2 = 1\text{ }000\text{ K}$ ，再在定温下每千克工质吸热 400 kJ 。试分别计算不采用回热和采用极限回热循环的热效率，并比较它们的大小。设工质比热容为定值， $c_p = 1.004\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。



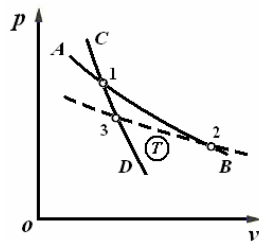
题 5-3 附图

提示和答案： （1）不回热时 $q_1 = q_{1-2} + q_{2-3}$ 、 $q_2 = q_{3-4} + q_{4-1}$ ， $\eta_t = 0.254$ ；（2）采用极限回热时，1-2 过程所需热量由 3-4 过程供给， $q_1 = q_{2-3}$ 、 $q_2 = q_{4-1}$ ， $\eta_t = \eta_c = 0.70$ 。

5-4 试证明：同一种工质在参数坐标图上（例如 $p-v$ 图上）的两条绝热线不可能相

交（提示：若相交的话，将违反热力学第二定律）。

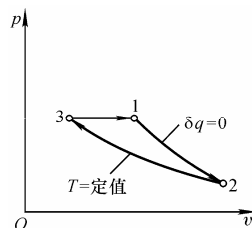
提示： 假设 AB 和 CD 两条可逆绝热线可能相交，设另一条等温线分别与二条绝热线相交构成热力循环，此循环自单一热源吸热，全部转化为机械能而不引起任何其他变化，违反热力学第二定律。



题 5-4 $p-v$ 图

5-5 设有 1 kmol 某种理想气体进行图 5-36 所示循环 $1-2-3-1$ 。且已知： $T_1 = 1500\text{ K}$ 、 $T_2 = 300\text{ K}$ 、 $p_2 = 0.1\text{ MPa}$ 。设比热容为定值，取绝热指数 $\kappa = 1.4$ 。

- (1) 求初态压力；
- (2) 在 $T-s$ 图上画出该循环；
- (3) 求循环热效率；
- (4) 该循环的放热很理想， T_1 也较高，但热效率不很高，问原因何在？（提示：算出平均温度）

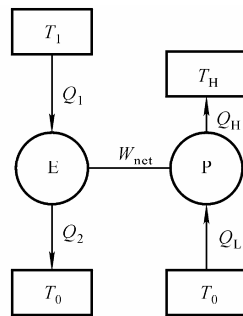


题 5-5 附图

提示和答案： 循环吸热过程为定压过程，吸热量 $Q_1 = C_{p,m}(T_1 - T_3)$ ，放热过程为等温过程，放热量 $Q_2 = Q_{2-3} = RT_3 \ln \frac{p_3}{p_2}$ ，计算平均吸热温度，观察与放热温度的差距。①

$$p_1 = 27.951\text{ MPa}; \text{ ②略}; \text{ ③ } \eta_t = 0.598; \text{ ④ } \bar{T}_1 \square T_1, \eta_t = 1 - T_2 / \bar{T}_1。$$

5-6 如图 5-37 所示，在恒温热源 T_1 和 T_0 之间工作的热机作出的循环净功 W_{net} 正好带动工作于 T_H 和 T_0 之间的热泵，热泵的供热量 Q_H 用于谷物烘干。已知 $T_1 = 1000\text{ K}$ 、 $T_H = 360\text{ K}$ 、 $T_0 = 290\text{ K}$ 、 $Q_1 = 100\text{ kJ}$ ，(1) 若热机效率 $\eta_t = 40\%$ ，热泵供暖系数 $\varepsilon' = 3.5$ ，求 Q_H ；(2) 设 E 和 P 都以可逆机代替，求此时的 Q_H ；(3) 计算结果 $Q_H > Q_1$ ，表示冷源中有部分热量传入温度为 T_H 的热源，此复合系统并未消耗机械功，将热量由 T_0 传给了 T_H ，是否违背了第二定律？为什么？



题 5-6 附图

提示和答案： ① 热泵向热源 T_H 输送热量 $Q_H = \varepsilon' W_{\text{net}} = 3.5 \times 40\text{ kJ} = 140\text{ kJ}$ ；② 若是可逆机， $Q_{H,\text{rev}} = \varepsilon'_{p,\text{rev}} W_{\text{net,rev}} = 5.14 \times 71\text{ kJ} = 364.94\text{ kJ}$ ；③ 上述两种情况 Q_H 均大于 Q_1 ，

但这并不违背热力学第二定律，以（1）为例，包括温度为 T_1 、 T_H 、 T_0 的诸热源和冷源，以及热机 E，热泵 P 在内的一个大热力系统并不消耗外功，但是 $Q_2 = Q_R - W_{net} = 100\text{kJ} - 40\text{kJ} = 60\text{kJ}$ ， $Q_1 = Q_H - W_{net} = 140\text{kJ} - 40\text{kJ} = 100\text{kJ}$ ，即经过每一循环，冷源 T_0 净传出热量 40kJ 给 T_H 的热源，但同时有 100kJ 热量自高温热源 T_1 传给低温 T_H 的热源，所以 40kJ 热量自低温传给高温热源的代价是 100kJ 热量自高温传给了低温热源，所以不违力学第二定律。

5-7 某热机工作于 $T_1 = 2\,000\text{ K}$ 、 $T_2 = 300\text{ K}$ 的两个恒温热源之间，试问下列几种情况能否实现？是否是可逆循环？（1） $Q_1 = 1\text{ kJ}$ ， $W_{net} = 0.9\text{ kJ}$ ；（2） $Q_1 = 2\text{ kJ}$ ， $Q_2 = 0.3\text{ kJ}$ ；（3） $Q_2 = 0.5\text{ kJ}$ ， $W_{net} = 1.5\text{ kJ}$ 。

提示和答案：方法一，在 T_1 、 T_2 间工作的可逆循环热效率最高，等于卡诺循环热效率，比较 $\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ 与 $\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 的关系，① $\eta_t > \eta_c$ ，不可能实现；② $\eta_t = \eta_c$ 是可逆循环；③ $\eta_t < \eta_c$ 是不可逆循环。方法二，利用克劳修斯积分，注意热量的符号。

5-8 有人设计了一台热机，工质分别从温度为 $T_1 = 800\text{ K}$ 、 $T_2 = 500\text{ K}$ 的两个高温热源吸热 $Q_1 = 1\,500\text{ kJ}$ 和 $Q_2 = 500\text{ kJ}$ ，以 $T_0 = 300\text{ K}$ 的环境为冷源，放热 Q_3 ，问：（1）要求热机作出循环净功 $W_{net} = 1\,000\text{ kJ}$ ，该循环能否实现？（2）最大循环净功 $W_{net,max}$ 为多少？

提示和答案：（1）先据能量守恒求得循环放热量，再利用克劳修斯积分，得 $\oint \frac{\delta Q}{T_r} < 0$ ，所以可以实现；（2）最大循环净功只有在可逆循环时才能获得，即 $\oint \frac{\delta Q}{T_r} = 0$ 求得放热量，据循环能量守恒得 $W_{net,max} = 1137.5\text{ kJ}$

5-9 试判别下列几种情况的熵变是：（a）正；（b）负；（c）可正可负：

- （1）闭口系中理想气体经历一可逆过程，系统与外界交换功量 20 kJ，热量 20 kJ；
- （2）闭口系经历一不可逆过程，系统与外界交换功量 20 kJ，热量 -20 kJ；
- （3）工质稳定流经开口系，经历一可逆过程，开口系作功 20 kJ，换热 -5 kJ，工

质流在进出口的熵变；

(4) 工质稳定流经开口系，按不可逆绝热变化，系统对外作功 10 kJ，系统的熵变。

提示和答案： 据闭口系及稳定流动开口系的熵方程，注意熵流的符号及稳定流动的特征。(1) 正；(2) 可正，可负，可为零；(3) 负；(4) 零。

5-10 燃气经过燃气轮机，由 0.8 MPa、420 °C 绝热膨胀到 0.1 MPa，130 °C。

设比热容 $c_p = 1.01 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $c_v = 0.732 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，问：(1) 该过程能否实现？过程是否可逆？(2) 若能实现，计算 1 kg 燃气作出的技术功 w_t ，设进、出口的动能差、位能差忽略不计。

提示和答案： 据绝热过程的比熵变大于、等于及小于零或比较可逆绝热膨胀温度 T_{2s} 与终态温度 T_2 确定，该绝热过程是不可逆绝热过程； $w_t = 292.9 \text{ kJ/kg}$ 。

5-11 0.25 kg 的 CO 在闭口系中由 $p_1 = 0.25 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 120 \text{ °C}$ 膨胀到 $t_2 = 25 \text{ °C}$ ， $p_2 = 0.125 \text{ MPa}$ 、作出膨胀功 $W = 8.0 \text{ kJ}$ ，已知环境温度 $t_0 = 25 \text{ °C}$ ，CO 的 $R_g = 0.297 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $c_v = 0.747 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，试计算过程热量，并判断该过程是否可逆。

提示和答案： 由闭口系能量方程确定换热量 $Q = -9.74 \text{ kJ}$ ，再据孤立系统熵原理判别该过程为不可逆膨胀过程。

5-12 某太阳能供暖的房屋用 $5 \times 8 \times 0.3 \text{ m}$ 的大块混凝土板作为蓄热材料，该混凝土的密度为 2300 kg/m^3 ，比热容 $0.65 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。若在 18 °C 的房子内的混凝土板在晚上从 23 °C 冷却到 18 °C ，求此过程的熵产。

提示和答案： 求得混凝土板的质量和释热量后按混凝土板和环境介质组成的孤立系统熵增即为熵产或利用混凝土板的熵方程，由混凝土板的熵变和熵流计算熵产，注意在熵方程中热量的符号及温度。 $S_g = 2.62 \text{ kJ/K}$ 。

5-13 将一根 $m = 0.36 \text{ kg}$ 的金属棒投入 $m_w = 9 \text{ kg}$ 的水中，初始时金属棒的温度 $T_{m,1} = 1060 \text{ K}$ ，水的温度 $T_w = 295 \text{ K}$ 。比热容分别为 $c_m = 0.42 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，和 $c_w = 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，求：终温 T_f 和金属棒、水以及它们组成的孤立系的熵变。设容器

为绝热。

提示和答案： 由闭口系能量方程 $\Delta U = Q - W$ ，求得 $T_f = 298.1\text{K}$ ；再求由金属棒和水组成的孤立系的熵变 $\Delta S_{\text{iso}} = 0.2021\text{kJ/K}$ 。

5-14 刚性密闭容器中有 1 kg 压力 $p_1 = 0.1013\text{ MPa}$ 的空气，可以通过叶轮搅拌，或由 $t_r = 283^\circ\text{C}$ 的热源加热及搅拌联合作用，而使空气温度由 $t_1 = 7^\circ\text{C}$ 上升到 $t_2 = 317^\circ\text{C}$ 。求：(1) 联合作用下系统的熵产 s_g ；(2) 系统的最小熵产 $s_{g,\min}$ ；(3) 系统的最大熵产 $s_{g,\max}$ 。

提示和答案： 容器中空气进行的是定容过程。(1) 由 T_1 、 T_2 查气体的热力性质表，得 h_1 、 s_1^0 、 h_2 、 s_2^0 。过程中气体的热力学能差 $\Delta u = \Delta h - \Delta(pv) = \Delta h - R_g \Delta T = 227.33\text{kJ/kg}$ ，据闭口系量方程 $q = \Delta u + w$

$$\{q\}_{\text{kJ/kg}} = 227.33 + \{w\}_{\text{kJ/kg}}$$

(a)

由闭口系熵方程

$$s_2 - s_1 = s_f + s_g$$

(b)

$$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} = 0.5445\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$\{s_f\}_{\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}} = \frac{q}{T_r} = \frac{227.33 + \{w\}_{\text{kJ/kg}}}{556}$$

(c)

将上述结果代入式(b)，则 $\{s_g\}_{\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}} = 0.5445 - \frac{227.33 + \{w\}_{\text{kJ/kg}}}{556}$

注意：式中 w 为负值，可见系统熵产与搅拌功的大小有关，搅拌功越大，则 s_g 越大。

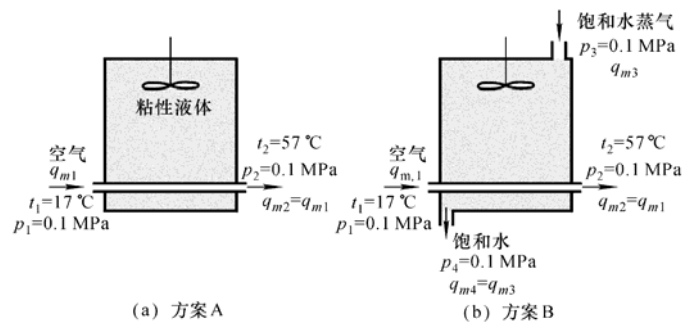
(2) 为使系统的熵产最小，应尽可能多利用加热，减小搅拌功。据题意，热源加热至多可加热到 $T_a = T_r = 556\text{K}$ ， $T_a \rightarrow T_2$ 这一段温升只是由于叶轮搅拌而产生。故将过程分成两个阶段：由 T_1 到 T_2 靠热源加热，由 T_a 到 T_2 靠搅拌。由附表查得 h_a 、 s_a^0 ，算得

$\Delta u_{1a} = 201.57 \text{ kJ/kg}$ ，而 $q_{1-a} = \Delta u_{1a}$ 、 $w_{\min} = -\Delta u_{a2}$ ，考虑到空气初终态不变，所以 $s_2 - s_1$ 与 (1) 的相同，于是可得 $s_{g,\min} = s_2 - s_1 - s_f = 0.18196 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

(3) 最大熵产发生在全部由搅拌而升温， $S_f = 0$ ，

$$s_{g,\max} = s_2 - s_1 = 0.5445 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})。$$

5-15 要求将绝热容器内管道中流动着的空气由 $t_1 = 17^\circ \text{C}$ 在定压 ($p_1 = p_2 = 0.1 \text{ MPa}$) 下加热到 $t_2 = 57^\circ \text{C}$ 。有两种方案。方案 A：叶轮搅拌容器内的粘性液体，通过粘性液体加热空气；方案 B 容器中通入 $p_3 = 0.1 \text{ MPa}$ 的饱和水蒸气，加热空气后冷却为饱和水，见图 5-38。设两系统均为稳态工作，且不计动能、位能影响。试分别计算两种方案流过 1 kg 空气时系统的熵产并从热力学角度分析哪一种方案更合理。已知水蒸气进、出口的焓值及熵值分别为 $s_3 = 7.3589 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $s_4 = 1.3028 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 和 $h_3 = 2673.14 \text{ kJ/kg}$ 、 $h_4 = 417.52 \text{ kJ/kg}$ 。



题 5-15 附图

提示和答案： 低压下空气作为理想气体。方案 I：稳定流动系空气的熵方程为

$s_2 - s_1 = s_f + s_g$ ，控制体积绝热，故

$$s_g = s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} = s_2^0 - s_1^0$$

根据 T_1 、 T_2 由附表中查得 s_1^0 、 s_2^0 ， $s_g = s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 = 0.1297 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

方案 II：空气和水蒸汽均为稳定流动，根据稳定流动热力系的熵方程

$$q_{m1}(s_2 - s_1) + q_{m3}(s_4 - s_3) = \dot{S}_f + \dot{S}_g$$

绝热
$$s_g = \frac{\dot{S}_g}{q_{m1}} = (s_2 - s_1) + \frac{q_{m3}}{q_{m1}}(s_4 - s_3) \quad (a)$$

式中 $\frac{q_{m3}}{q_{m1}}$ 可由稳定流动能量方程确定, 不计动能, 位能差时 $\frac{q_{m3}}{q_{m1}} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_4}$ 。由附表, 根据

T_1 、 T_2 查得 h_1 、 h_2 和 s_1 、 s_2 , 得 $s_g = 0.022 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

计算结果表明, 系统 2 的熵产远小于系统 1 的, 从热力学角度分析方案 II 更合理。

5-16 某小型运动气手枪射击前枪管内空气压力 250kPa、温度 27°C, 容积 1cm³, 被扳机锁住的子弹像活塞, 封住压缩空气。扣动扳机, 子弹被释放。若子弹离开枪管时枪管内空气压力为 100kPa、温度为 235K, 求此时空气的体积、过程中空气作的功及单位质量空气的熵产。

提示和答案: 射击前枪管内空气和子弹离开枪管时枪管内空气质量不变, 且都满足状态方程; 射击过程近似绝热, 熵变即熵产。 $V_2 = 1.96 \text{ cm}^3$ 、 $W = 0.135 \text{ J}$ 、 $s_g = 17.7 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

5-17 $m = 1 \times 10^6 \text{ kg}$, 温度 $t = 45^\circ \text{C}$ 的水向环境放热, 温度降低到环境温度 $t_0 = 10^\circ \text{C}$, 试确定其热量 $E_{x,Q}$ 和热量 $A_{n,Q}$ 。已知水的比热容 $c_w = 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

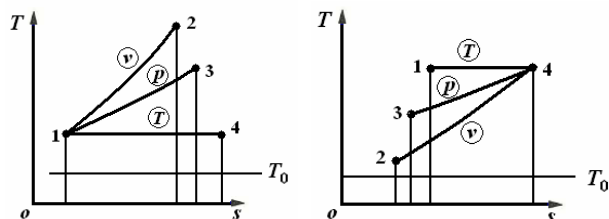
提示和答案: 温度为 318K 的水放热, 温度降低到 283K 过程的平均温度为

$$\bar{T} = \frac{Q}{\Delta s} = \frac{c_w(T_1 - T_0)}{c_w \ln \frac{T_1}{T_0}} = 300.16 \text{ K}, \quad \text{热量 } E_{x,Q} = \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}}\right) Q = 8.38 \times 10^6 \text{ kJ}; \quad \text{热量}$$

$$A_{n,Q} = Q - E_{x,Q} = \frac{T_0}{\bar{T}} Q = 138.16 \times 10^6 \text{ kJ}。$$

5-18 根据熵增与热量 的关系来讨论对气体: (1) 定容加热、(2) 定压加热、(3) 定温加热, 哪一种加热方式较为有利?

比较的基础分两种情况: (1) 从相同的初温出发; (2) 达到相同的终温 (提示: 比较时取同样的热量 Q_1)



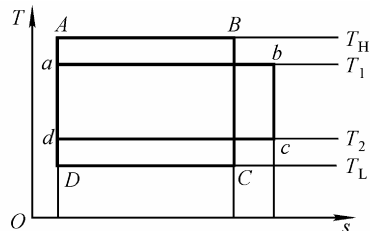
提示和答案: ①加热量 Q_1 相同,

题 5-18 附图

即三条过程线下面积相等，此时 $\Delta s_{1-2} < \Delta s_{1-3} < \Delta s_{1-4}$ ，而熵增与热量成正比，故定容过程中 Δs_{1-2} 最小，最有利；定压次之；定温最不利。②到达相同的终温，加热量 Q_1 相同，三条线下面积相等，此时， $\Delta s_{3-4} > \Delta s_{2-4} > \Delta s_{1-4}$ ，定容最不利，定压次之，定温最有利。

5-19 设工质在1 000 K的恒温热源和300 K的恒温冷源间按循环 $a-b-c-d-a$

工作（见图 5-8），工质从热源吸热和向冷源放热都存在 50 K 的温差。（1）计算循环的热效率；（2）设体系的最低温度即环境温度， $T_0 = 300 \text{ K}$ ，求热源每供给 1 000 kJ



题 5-19 附图

热量时, 两处不可逆传热引起的 损失 I_1 和 I_2 , 及总 损失。

提示和答案：(1) 循环 $a-b-c-d-a$ 可看作是在中间热源 T_1 、 T_2 之间工作的内可逆循环， $\eta_t = 0.632$ ；(2) 分别取高温热源与工质级低温热源与工质组成孤立系，其熵增即为熵产，求得由于不等温传热引起的损失 $I_1 = 15.78\text{kJ}$ 、 $I_2 = 52.56\text{kJ}$ 和总损失 $I = 68.34\text{kJ}$ 。

5-20 将 100 kg 温度为 20 °C 的水与 200 kg 温度为 80 °C 的水在绝热容器中混合, 求混合前后水的熵变及 损失。设水的比热容为定值, $c_w = 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 环境温度 $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

提示和答案: 据闭口系能量方程求得混合后水温为 $t = 60^\circ\text{C}$, 水的熵变

$$\Delta S_{1-2} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = m_1 c_w \ln \frac{T}{T_1} + m_2 c_w \ln \frac{T}{T_2} = 4.7392 \text{ kJ/K}$$

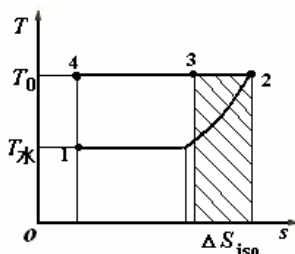
绝热过程熵变等于熵产 $\Delta S_{1-2} = S_g$ ， 损失 $I = T_0 S_g = 1388.6 \text{kJ}$ 。

5-21 100 kg 温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰，在大气环境中融化为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水，已知冰的溶解热为 335 kJ/kg ，设环境温度 $T_0 = 293\text{ K}$ ，求冰化为水的熵变，过程中的熵流和熵产，及损失。

提示和答案：参见上题，注意冰融解过程温度不变，热源温度即为环境温度。

$$\Delta S_{1-2} = 122.71 \text{ kJ/K}, S_f = 114.33 \text{ kJ/K}, S_g = 8.38 \text{ kJ/K}, I = 2455.34 \text{ kJ}。$$

5-22 100 kg 温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰, 在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中融化



为水后升温至 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。已知冰的溶解热为 335 kJ/kg ，水的比热容为 $c_w = 4.187\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ，求：(1) 冰融化为水，并升温到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的熵变量；(2) 包括相关环境在内的孤立系统的熵变；(3) 损失，并将其示于 $T-s$ 图上。

提示和答案：过程由冰融化和升温组成，所需热量是两者之和，水的熵变可分两段求出，由冰和水与环境组成的孤立系，并据之可求得 损失。 $\Delta S_{1-2} = 152.313\text{ kJ/K}$ 、 $\Delta S_{\text{iso}} = 9.398\text{ kJ/K}$ 、 $I = 2753.71\text{ kJ}$ ， I 在 $T-s$ 图中以阴影面积表示。习题 5-22 $T-s$ 图

5-23 两物体 A 和 B 质量及比热容相同，即 $m_1 = m_2 = m$ ， $c_{p1} = c_{p2} = c_p$ ，温度各为 T_1 和 T_2 ，且 $T_1 > T_2$ ，设环境温度为 T_0 。按一系列微元卡诺循环工作的可逆机，以 A 为热源，以 B 为冷源，循环运行后，A 物体温度逐渐降低，B 物体温度逐渐升高，直至两物体温度相等，为 T_f 为止，试证明：(1) $T_f = \sqrt{T_1 T_2}$ ，以及最大循环净功 $W_{\text{max}} = mc_p(T_1 + T_2 - 2T_f)$ ；(2) 若 A 和 B 直接传热，热平衡时温度为 T_m ，求 T_m 及不等温传热引起的 损失。

提示：(1) 根据题意，在变温热源 A、B 间工作的最大循环净功，一定是可逆循环。设过程中，A、B 温度分别为 $T_{1,x}$ 、 $T_{2,x}$ 时的微元卡诺循环，自 A 热源吸热 $\delta Q_{1,x}$ ，向 B 冷源放

热 $\delta Q_{2,x}$ ，循环净功为 δW_{net} ，则热源 A 的熵变 $ds_1 = \frac{\delta Q_{1,x}}{T_{1,x}} = \frac{mc_p dT_{1,x}}{T_{1,x}}$ 、冷源 B 的熵变

$ds_2 = \frac{\delta Q_{2,x}}{T_{2,x}} = \frac{mc_p dT_{2,x}}{T_{2,x}}$ 。经过一系列微元卡诺循环，热源 A 温度由 T_1 变化到 T_f ，冷源 B

的温度由 T_2 变化到 T_f 。A 的总熵变 $\Delta S_1 = \int_{T_1}^{T_f} mc_p \frac{dT_{1,x}}{T_{1,x}} = mc_p \ln \frac{T_f}{T_1}$ 、B 的总熵变

$\Delta S_2 = \int_{T_2}^{T_f} mc_p \frac{dT_{2,x}}{T_{2,x}} = mc_p \ln \frac{T_f}{T_2}$ 。由热源、冷源、工质组成孤立系，孤立系中进行的可逆

循环，故 $\Delta S_{\text{iso}} = 0$ ，所以， $mc_p \ln \frac{T_f}{T_1} + mc_p \ln \frac{T_f}{T_2} = 0$ 即可得 $T_f = \sqrt{T_1 \cdot T_2}$ 。微元循环的

循环净功 $\delta w_{\text{max}} = |\delta Q_{1,x}| - |\delta Q_{2,x}|$ ，全部微元循环累加得

$W_{\text{max}} = mc_p(T_1 + T_2 - 2T_f)$ 。

(2) 两物体 A 和 B 直接接触，则热物体放出的热量等于冷物体吸入的热 $|\delta Q_{1,x}| = |\delta Q_{2,x}|$ ，可得

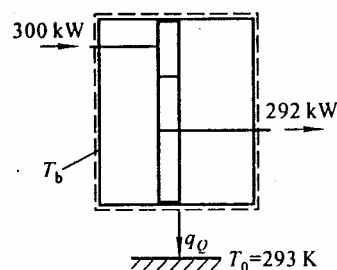
$T_m = \frac{1}{2}(T_1 + T_2)$ 。 损失的计算有二种方法。一是利用 $I = T_0 \Delta S_{\text{iso}} = 2mc_p T_0 \ln \frac{T_m}{T_f}$ ；二

是分别求出 A 物体放出热量中的热量 $E_{x,Q_A} = Q_A - A_{n,Q_A} = mc_p \left(T_1 - T_m - T_0 \ln \frac{T_1}{T_m} \right)$ 和

B 物体吸收 A 物体放出热量的热量 $E_{x,Q_B} = mc_p \left(T_m - T_2 - T_0 \ln \frac{T_m}{T_2} \right)$ ，两者的差即为

损失 $I = E_{x,Q_A} - E_{x,Q_B} = 2T_0 mc_p \ln \frac{T_m}{T_f}$ 。

5-24 稳定工作的齿轮箱，由高速轴输入功率 300 kW，由于磨擦损耗和其它不可逆损失，从低速驱动轴输出功率 292 kW，齿轮箱的外表面被环境空气冷却，冷却量 $q_Q = -hA(T_b - T_0)$ 。式中表面传热系数 $h = 0.17 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，齿轮箱外表面积 $A = 1.2 \text{ m}^2$ 。 T_b 为外壁面平均温度。已知环境温度 $T_0 = 293 \text{ K}$ 。试求：（1）齿轮箱系统的熵产和 损失；（2）齿轮箱及相关环境组成的孤立系熵增（kW/K）和 损失（kW）。



习题 5-24 示意图

提示和答案：齿轮箱在稳定情况下工作，齿轮箱内部存在磨擦不可逆因素； T_b 温度的齿轮箱和 T_0 环境间存在有限温差传热引起的不可逆损失。假设齿轮箱外表面温度均匀。（1）取齿轮箱为热力系，列闭口系能量守恒，由于稳定得 $q_Q = \Delta P = -8 \text{ kW}$ ，负号表示放

热。由 $q_Q = -hA(T_b - T_0)$ 确定 $T_b = \frac{-q_Q}{hA} + T_0 = 332.2 \text{ K}$ 。闭口系的熵方程

$dS = \delta S_f + \delta S_g$ 。由于稳定 $\frac{dS}{d\tau} = 0$ $\dot{S}_{g1} = -\dot{S}_{f1} = 0.0241 \text{ kW/K}$ 。故 损失

$\dot{I}_1 = T_0 \dot{S}_{g1} = 7.056 \text{ kW}$ 。（2）包括齿轮箱和环境在内的复合系统，是孤立系， $\Delta S_{\text{iso}} = S_g$ 。

对齿轮箱写出熵方程，同样由于稳定得 $\dot{S}_g = -\dot{S}_f = 0.0273 \text{ kW/K}$ ，故 损失

$\dot{I} = T_0 \dot{S}_g = 8 \text{ kW}$ 。 \dot{S}_g 和 \dot{I} 分别为总熵产和总 损失。由于齿轮箱外壳与环境间不等温传

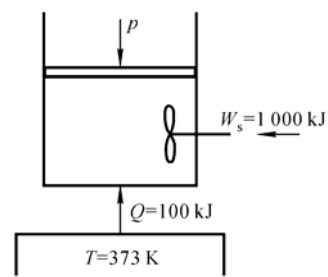
起的熵产和 损失为 $S_{g,2} = S_g - S_{g,1} = 0.0032 \text{ kW/K}$ ， $\dot{I}_2 = \dot{I} - \dot{I}_1 = 0.944 \text{ kW}$ 。

5-25 有一热交换器用干饱和蒸汽加热空气，已知蒸汽压力为 0.1 MPa，空气出入口温

度分别为 $66\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，环境温度为 $t_0 = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。若热交换器与外界完全绝热，求稳流状态下 1 kg 蒸汽凝结时，(1) 空气的质流量；(2) 整个系统不可逆作功能力损失。

提示和答案： 稳定状态下蒸汽凝结放出能量为空气吸收的能量，由能量守恒得 $m_a = 49.92\text{ kg}$ ；取换热器为控制容积，列熵方程考虑到 $S_f = 0$ ，即可计算 S_g ，由此 $I = 318.3\text{ kJ}$ 。

5-26 垂直放置的气缸活塞系统内含有 100 kg 水，初温为 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，外界通过螺旋桨向系统输入功 $W_s = 1\,000\text{ kJ}$ ，同时温度为 373 K 的热源向系统内水传热 100 kJ ，如图 5-39 所示。若加热过程中水维持定压，且水的比热容取定值， $c_w = 4.187\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，环境参数为 $T_0 = 300\text{ K}$ 、 $p_0 = 0.1\text{ MPa}$ 。求：(1) 过程中水的熵变及热源熵变；(2) 过程中作功能力损失。



习题 5-26 附图

提示和答案： 据能量守恒，因温升较小，忽略其体积变化，则 $\Delta t_w = (W_s + Q)/(c_w m_w)$ 确定水的终温，进而求得熵变 $\Delta S_w = 3.652\,8\text{ kJ/K}$ 、 $\Delta S_r = -0.268\,1\text{ kJ/K}$ 。取水和热源为系统，为闭口绝热系，列熵方程，计算熵产及作功能力损失 $I = 1015.9\text{ kJ}$ 。

5-27 在一台蒸汽锅炉中，烟气定压放热，温度从 $1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。所放出的热量用以生产水蒸气。压力为 9.0 MPa 、温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的锅炉给水被加热、汽化、过热成 $p_1 = 9.0\text{ MPa}$ 、 $t_1 = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过热蒸汽。将烟气近似为空气，取比热容为定值、且 $c_p = 1.079\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。试求：(1) 产生 1 kg 过热蒸汽的烟气 (kg)；(2) 生产 1 kg 过热蒸汽时，烟气熵的减小以及过热蒸汽熵的增大；(3) 将烟气和水蒸气作为孤立系时生产 1 kg 过热蒸汽孤立系熵的增大为多少；(4) 环境温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时作功能力的损失。

提示和答案： 由热平衡方程： $m_g c_p (t_{g,1} - t_{g,2}) = m(h_2 - h_1)$ 求得烟气量 $m_g = 2.315\text{ kg}$ 。并计算得 $\Delta S_g = -3.0488\text{ kJ/K}$ ， $\Delta S_{\text{H}_2\text{O}} = 6.0497\text{ kJ/K}$ ， $\Delta S_{\text{iso}} = 3.0009\text{ kJ/K}$ 及 $I = 879.7\text{ kJ}$ 。

5-28 上题中加热，汽化，过热过程若在电热锅炉内完成，试求生产 1 kg 过热蒸汽的

(1) 耗电量; (2) 整个系统作功能力损失; (3) 蒸汽获得的可用能。

提示和答案: (1) 耗电量即 H_2O 获得的能量 $Q_E = 3122.14\text{kJ}$; (2) 电热锅炉散热不计, 熵流为零, 据熵方程熵产即为水的熵变可得 $I = 1773.5\text{kJ/kg}$; (3) 蒸汽获得的可用能是其焓 值增量或电能全部是 , 减去 损失即为蒸汽获得的可用能 $\Delta e_{x,H} = 1348.67\text{kJ/kg}$ 。

5-29 分别求例 4-10 两种情况的作功能力损失。

提示和答案: 例 4-10 已求得气缸内 80%的水蒸发需输入能量 1761.4kJ 。(1) 取缸内水为系统, 是闭口绝热系, $S_f = 0$, 据闭口系熵方程 $S_g = \Delta S = m(s'' - s') = 4.4775\text{kJ/K}$ 、 $I = T_0 S_g = 1311.9\text{kJ}$ 。(2) 直接加热, 系统熵变与 (1) 相同, 所以 $S_g = \Delta S - S_f = 0.5633\text{kJ/K}$ 、 $I = T_0 S_g = 165.0\text{kJ}$ 。

5-30 体积 $V = 0.1\text{m}^3$ 的刚性真空容器, 打开阀门, $p_0 = 10^5\text{Pa}$ 、 $T_0 = 303\text{K}$ 的大气环境空气充入, 充气终了 $p_2 = 10^5\text{Pa}$ 。分别按绝热充气和等温充气两种情况, 求: (1) 终温 T_2 和充气量 m_i ; (2) 充气过程的熵产 S_g ; (3) 充气 损失 I 。已知空气的 $R_g = 0.287\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, $c_p = 1.004\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, $\kappa = 1.4$ 。

提示和答案: 取容器内空间为控制体积, 其能量方程为 $\delta Q = dU_{CV} + h_e \delta m_e - h_i \delta m_i + \delta W_i$, 熵方程为 $dS_{CV} = \frac{\delta Q}{T_r} + s_i \delta m_i - s_e \delta m_e + \delta S_g$ 。据已知条件能量方程简化为 $\delta Q = dU_{CV} - h_0 dm$, 几分渴求出终态温度, 进而求解。(1) $T_2 = 424.2\text{K}$ 、 $m_i = 0.8214\text{kg}$ 、 $S_g = 0.2775\text{kJ/K}$ 、 $I = 84.08\text{kJ}$; (2) $T_2 = 303\text{K}$ 、 $m_i = 1.1499\text{kg}$ 、 $S_g = 0.0330\text{kJ/K}$ 、 $I = 10\text{kJ}$ 。

5-31 一刚性密封容器体积为 V , 其中装有状态 (p_0, T_0) 的空气, 这时环境大气的状态为 (p_0, T_0) , 不计系统的动能和位能, 试证明其热力学能 为:

$$E_{x,U} = p_0 V \left(1 - \frac{p}{p_0} + \frac{p}{p_0} \ln \frac{p}{p_0} \right)。$$

提示: 空气可作为理想气体, 有 $U - U_0 = mc_v(T - T_0)$ 代入热力学能 的定义式,

考虑到 $U - U_0 = 0$, $V_0/V = p/p_0$, $S - S_0 = -mR_g \ln(p/p_0)$, 即可证。

5-32 活塞—气缸系统的容积 $V = 2.45 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, 内有 $p_1 = 0.7 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 867 \text{ }^\circ\text{C}$ 的燃气, 已知环境温度、压力分别为 $t_0 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $p_0 = 0.1013 \text{ MPa}$, 燃气的 $R_g = 0.296 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$, $c_p = 1.04 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$, 求: (1) 燃气的热力学能 ; (2) 除环境外无其它热源的情况下, 燃气膨胀到 $p_2 = 0.3 \text{ MPa}$ 、 $t_2 = 637 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的最大有用功 $W_{u,\max}$ 。

提示和答案: 据理想气体的性质可求得燃气的 c_v 、 m 、 V_0 等参数而计算其热力学能 $E_{x,U_1} = 1.7277 \text{ kJ}$; 除环境外无其它热源的情况下, 燃气膨胀的最大有用功 $W_{u,\max}$ 即为两状态之间热力学能的差 $W_{1-2,\max} = 0.6803 \text{ kJ}$ 。

5-33 试证明理想气体状态下比热容为定值的稳定流动气体流的无量纲焓的表达式为: $\frac{e_{x,H}}{c_p T_0} = \frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} + \ln \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$, 式中 c_p 为气体的比定压热容, T_0 和 p_0 分别为环境的温度和压力, 单位分别为 K 和 MPa; p 为气体的压力, MPa, T 为温度 K。

提示: 将理想气体定值热容的焓变及熵变代入稳流的焓式 $e_{x,H} = h - h_0 - T_0(s - s_0)$, 考虑到 $c_p = \frac{\kappa}{\kappa-1} R_g$ 即可证明。

5-34 空气稳定流经绝热气轮机, 由 $p_1 = 0.4 \text{ MPa}$ 、 $T_1 = 450 \text{ K}$ 、 $c_{f1} = 30 \text{ m/s}$ 、膨胀到 $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $T_2 = 330 \text{ K}$ 、 $c_{f2} = 130 \text{ m/s}$, 这时环境参数 $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $T_0 = 293 \text{ K}$, 设空气的 $R_g = 0.287 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$, $c_p = 1.004 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$, 不计位能变化。求: (1) 工质稳定流经气轮机时进、出口处的比焓 e_{x,H_1} 、 e_{x,H_2} , 以及比物流 e_{x_1} 、 e_{x_2} ; (2) 每千克空气从状态变 1 化到状态 2 的最大有用功 $W_{u,\max}$; (3) 实际有用功。

提示和答案: 气体工质比焓和比物流相差宏观动能项, 进出口处工质的比焓和比物流分别为 $e_{x,H_1} = 148.48 \text{ kJ/kg}$, $e_{x,H_2} = 2.165 \text{ kJ/kg}$; $e_{x_1} = 148.93 \text{ kJ/kg}$, $e_{x_2} = 10.62 \text{ kJ/kg}$ 。除环境外无其他热源时的最大有用功等于比物流的变化量

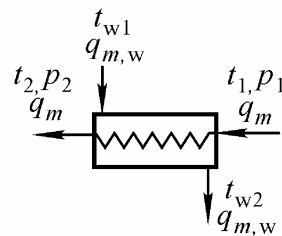
$w_{1-2,\max} = 138.31 \text{ kJ/kg}$ 。稳流过程的实际有用功 w_u 和轴功 w_s 相同，

$w_u = w_s = 112.48 \text{ kJ/kg}$ ，因不可逆而小于 $w_{1-2,\max}$ 。

5-35 刚性绝热器内装有 0.5 kg ， $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 、 $p_1 = 200 \text{ kPa}$ 的空气，由于叶轮搅拌使空气压力升高到 $p_2 = 220 \text{ kPa}$ ，空气的比定容热容 $c_v = 0.717 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ，设环境参数为 $p_0 = 98 \text{ kPa}$ 、 $t_0 = 20^\circ\text{C}$ 。求：（1）实际过程的过程功（即消耗的搅拌功）；（2）状态 1 变化到状态 2 的最大可用功 $W_{u,\max}$ ；（3）过程损失。

提示和答案：根据闭口绝热系能量方程 $W = U_1 - U_2$ 及理想气体性质 $U_1 - U_2 = mc_v(T_1 - T_2)$ ，求得终态温度即可求得过程功 $W = -10.504 \text{ kJ}$ ；状态 1 和状态 2 间最大可用功即为热力学能的 $W_{u,\max} = -0.493 \text{ kJ}$ ；损失 $I = T_0 \Delta S_{\text{iso}}$ ，由于是绝热系， $\Delta S_{\text{iso}} = \Delta S_{1-2}$ ，得 $I = 10.011 \text{ kJ}$ 。或根据闭口系平衡方程，除环境外无其他的热源时， $I = W_{1-2,\max} - W_u = 10.011 \text{ kJ}$ 。

5-36 表面式换热器中用热水加热空气。空气进、出口参数为 $p_1 = 0.13 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ， $p_2 = 0.12 \text{ MPa}$ 、 $t_2 = 60^\circ\text{C}$ ，空气流量 $q_m = 1 \text{ kg/s}$ ，热水进口温度 $t_{w1} = 80^\circ\text{C}$ ，流量 $q_{m,w} = 0.8 \text{ kg/s}$ ，压力几乎不变。水和空气的动能差、位能差也可不计。见附图，已知环境温度 $t_0 = 10^\circ\text{C}$ 、压力 $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ ，空气和水的比



习题 5-36 附图

热容为 $c_p = 1.004 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ， $c_w = 4.187 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ，空气的气体常数 $R_g = 0.287 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ，换热器的散热损失可忽略不计，用平衡方程确定损失。

提示和答案：首先据第一定律，热水放出热量等于空气吸入热量，确定出口水的温度， $t_{w2} = 68^\circ\text{C}$ 然后可计算空气和水的进、出口的比焓，再据稳定流动系的平衡方程，考虑到该换热器无散热损失，不作功， $E_{x,Q} = 0$ 、 $W_i = 0$ ，可算得 $I = 10.12 \text{ kW}$ 。

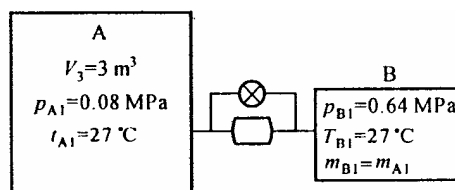
5-37 空气稳定地流经气轮机，由 $p_1 = 0.75 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 750^\circ\text{C}$ ，绝热膨胀到 $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $t_2 = 320^\circ\text{C}$ ，不计动能，位能变化。若环境参数

$p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $T_0 = 298 \text{ K}$ ，已知空气 $R_g = 0.287 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ， $c_p = 1.004 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

针对流入 1 kg 空气，计算：（1）实际过程输出的内部功 w_i ，过程是否可逆？（2）1 到 2 的最大有用功 $w_{u,\max}$ ；（3）损失 I ；（4）若不可逆，试计算经可逆绝热过程膨胀到 $p_2 = 0.1 \text{ MPa}$ 时的理论内部功 $w_{i,\text{rev}}$ ，并讨论 I 与 $(w_{i,\text{rev}} - w_i)$ 为何不相同？

提示和答案：（1）由稳定流动能量方程，据条件简化后算得 $w_i = 431.72 \text{ kJ/kg}$ 、据熵变 $\Delta S_{12} = 0.031 \text{ kJ/kg} > 0$ 判定过程不可逆；（2） $w_{u,\max} = e_{x,H_1} - e_{x,H_2} = 440.897 \text{ kJ/kg}$ ；（3）损失 $I = 9.177 \text{ kJ/kg}$ ；（4） $w_{i,\text{rev}} = 449.54 \text{ kJ/kg}$ 。 $w_{i,s} - w_i \neq I$ ，是因两者终态不同。

5-38 容器 A 的体积为 3 m^3 ，内装 0.08 MPa 、 27°C 的空气，容器 B 中空气的质量和温度与 A 中相同，但压力为 0.64 MPa ，用空气压缩机将容器 A 中空气全部抽空送到容器 B，见图 5-41。设抽气过程 A 和 B 的温度保持不变。已知环境温度为 27°C ，压力为 0.1 MPa ，求：（1）空气压缩机消耗的最小有用功；（2）容器 A 抽空后，打开旁通阀门，使两容器内空气压力平衡，空气温度仍保持 27°C ，求该不可逆过程造成的损失。



习题 5-38 附图

器内空气压力平衡，空气温度仍保持 27°C ，求该不可逆过程造成的损失。

提示和答案：（1）取容器 A 和容器 B 以及压缩机共同组成闭口热力系，除环境外无其它热源，若过程可逆，则压缩消耗最小有用功，这时， $E_{x,Q} = 0$ ， $I = 0$ ，闭口系平衡方程可写作：

$$\begin{aligned} W_{1-2,\min} &= E_{x,U_2} - E_{x,U_1} = U_2 - U_1 - T_0(S_2 - S_1) + p_0(V_2 - V_1) \\ &= (m_{A1} + m_{B1})c_v T_{B2} - (m_{A1}c_v T_{A1} + m_{B1}c_v T_{B1}) + p_0(V_2 - V_1) \\ &\quad - T_0 \left[m_{A1} \left(c_p \ln \frac{T_{B2}}{T_{A1}} - R_g \ln \frac{p_{B2}}{p_{A1}} \right) + m_{B1} \left(c_p \ln \frac{T_{B2}}{T_{B1}} - R_g \ln \frac{p_{B2}}{p_{B1}} \right) \right] \end{aligned}$$

$$T_{A1} = T_{B1} = T_{B2} \quad , \quad \text{终态 A 真空} \quad , \quad V_2 = V_B \quad , \quad V_1 = V_A + V_B \quad ,$$

$$p_{B2} = \frac{(m_{A1} + m_{B1})}{V_B} R_g T_{B2} = 1.28 \times 10^6 \text{ Pa} \quad ,$$

$$W_{1-2,\min} = T_0 m_{A1} R_g \ln \frac{p_{B2}^2}{p_{A1} p_{B1}} - p_0 V_A = 531.79 \text{ kJ}; \quad (2) \text{ 打开旁通阀, 关闭压缩机后, 取 A、}$$

$$\text{B 和旁通阀构成热力系。因 } T_{A3} = T_{A1}, \text{ 故压力为 } p_3 = \frac{2m_{A1} R_g T_{A3}}{V_A + V_B} = 0.142 \times 10^6 \text{ Pa}。 \text{ 对 2-3}$$

写出 平衡方程 $I = E_{x,Q} + E_{x,U_2} - E_{x,U_3} - E_{x,w}$ 。除环境外无热源换热, 故 $E_{x,Q} = 0$; 不作

功 $E_{x,w} = 0$, 所以 $I = E_{x,U_2} - E_{x,U_3}$ 。考虑到 $T_{A3} = T_{B3} = T_{B2}$, $U_2 - U_3 = 0$, 且 $V_2 = V_B$,

$$V_3 = V_A + V_B, \quad p_{A3} = p_{B3}, \text{ 且 } m_{A3} = \frac{p_{A3} V_A}{R_g T_{A3}} = 4.954 \text{ kg}、m_{B3} = 2m_{A1} - m_{A3} = 0.621 \text{ kg},$$

得 $I = 754.76 \text{ kJ}$ 。

第六章 实际气体的性质和热力学一般关系

习 题

6-1 试推导范德瓦耳气体在定温膨胀时所作功的计算式。

提示和答案： 将范德瓦耳气体状态方程可写成 $p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2}$ ，代入 $W = \int_1^2 p dV$

积分，在等温过程中， $T = \text{常数}$ ，得：
$$W = RT \ln \frac{V_{m,1} - b}{V_{m,2} - b} + a \left(\frac{1}{V_{m,2}} - \frac{1}{V_{m,1}} \right)。$$

6-2 NH_3 气体的压力 $p = 10.13 \text{ MPa}$ ，温度 $T = 633 \text{ K}$ 。试根据通用压缩因子图求其密度，并和由理想气体状态方程计算的密度加以比较。

提示和答案： 由附录表查得 NH_3 临界参数计算 p_r 和 T_r ，查通用压缩因子图得 Z 。得 $\rho = 34.9 \text{ kg/m}^3$ ，若按理想气体计算 $\rho_{\text{id}} = 32.8 \text{ kg/m}^3$ ， $\rho / \rho_{\text{id}} = 1.064$ 。

6-3 一容积为 3 m^3 的容器中储有状态为 $p = 4 \text{ MPa}$ ， $t = -113^\circ\text{C}$ 的氧气，试求容器内氧气的质量，(1) 用理想气体状态方程；(2) 用压缩因子图。

提示和答案： 同题 6-2。按理想气体状态方程 $m = 288.4 \text{ kg}$ ，查通用压缩因子图得 Z 后算得 $m = 900 \text{ kg}$ 。

6-4 容积为 0.425 m^3 的容器内充满氮气，压力为 16.21 MPa ，温度为 189 K ，计算容器中氮气的质量。利用 (1) 理想气体状态方程；(2) 范德瓦耳方程；(3) 通用压缩因子图；(4) R-K 方程。

提示和答案：(1) 利用理想气体状态方程 $m = 122.80 \text{ kg}$ ；(2) 范德瓦耳方程中氮气的范德瓦耳常数可查表 6-1，将 a 、 b 值代入范德瓦耳方程，可解得 $m = 147.0 \text{ kg}$ ；(3) 查通用压缩因子图 $Z = 0.84$ ， $m = 146.2 \text{ kg}$ ；(4) 用临界参数求取 R-K 方程中常数 a 和 b ，代入 R-K 方程迭代后解得 $m = 148.84 \text{ kg}$ 。(本例中，因范氏方程常数采用实验数据拟合值，故计算 O_2 质量误差较小。)

6-5 试用下述方法求压力为 5 MPa ，温度为 450°C 的水蒸气的比体积。(1) 理想气体状态方程；(2) 压缩因子图。已知此状态时水蒸气的比体积是 $0.063291 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，以此比较上

述计算结果的误差。

提示和答案：(1) 利用理想气体状态方程 $v_{id} = 0.066733 \text{ m}^3/\text{kg}$,

$$\frac{|v - v_{id}|}{v} \times 100\% = 5.44\% ; (2) \text{利用通用压缩因子图, 查得 } Z = 0.95, \text{ 故 } v' = 0.063340 \text{ m}^3/\text{kg} ,$$

$$\frac{|v - v_{id}|}{v} \times 100\% = 0.11\%$$

6-6* 在一容积为 $3.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 的球形钢罐中储有 0.5 kg 甲烷 (CH_4) , 若甲烷由 25°C 上升到 33°C , 用 R-K 方程求其压力变化。

提示和答案：用临界参数求取 R-K 方程中常数 a 和 b , 代入 R-K 方程求得 $\Delta p = 0.071 \text{ MPa}$ 。

6-7* 迭特里希状态方程为 $p = \frac{nRT}{V - nb} \exp\left(-\frac{na}{RTV}\right)$, 式中 V 为体积, p 为压力, n 为物

质的量, a 、 b 为物性常数。试说明符合迭特里希状态方程的气体的临界参数分别为

$$p_{cr} = \frac{a}{4n^2b^2}, \quad V_{cr} = 2nb, \quad T_{cr} = \frac{a}{4Rb} \text{ 并将此状态方程改写成对比态方程。}$$

提示和答案：对迭特里希状态方程求导, 据临界等温线特征, 在临界点令 $\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T = 0$

$$\text{及 } \left(\frac{\partial^2 p}{\partial V^2}\right)_T = 0 \text{ 得, } \frac{na}{RT_{cr}V_{cr}^2} - \frac{1}{V_{cr} - nb} = 0 \text{ 和}$$

$$\frac{2nRT_{cr}}{(V_{cr} - nb)^3} - \frac{n^2a}{(V_{cr} - nb)^2V_{cr}^2} - \left[\frac{n^2a(3V_{cr} - 2nb)V_{cr}}{(V_{cr} - nb)^2V_{cr}^4} - \frac{n^3a^2}{(V_{cr} - nb)RT_{cr}V_{cr}^4} \right] = 0$$

联立求解得 $V_{cr} = 2nb$ 、 $T_{cr} = \frac{a}{4Rb}$, 代入迭特里希状态方程, 得 $p_{cr} = \frac{a}{4n^2b^2}$ 。代回原方程

$$\text{整理后可得 } p_r = \frac{n^2T_r}{2V_r - 1} \exp\left(-\frac{2}{T_rV_r}\right)。$$

6-8 29°C 、 15 atm 的某种理想气体从 1 m^3 等温可逆膨胀到 10 m^3 , 求过程能得到的最大功。

提示和答案：可逆等温过程中, 其自由能的减少量等于所得到的最大功, 因等温

$dF = dU - TdS$ 。据第一定律, 可逆过程, $dU = TdS - pdV$, 所以 $dF = -pdV$ 。于是

$$W_{\max} = F_1 - F_2 = \int_1^2 p dV = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = 3\,499\,692 \text{ J}。 \text{注意气体的摩尔数不等于 1。}$$

6-9 试证明理想气体的体积膨胀系数 $\alpha_v = \frac{1}{T}$ 。

提示：对理想气体的状态方程 $pv=R_gT$ 求导，代入体积膨胀系数定义 $\alpha_v = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ ，即

可证。

6-10 试证在 $h-s$ 图上定温线的斜率 $\left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_T = T - \frac{1}{\alpha_v}$

提示： $dh = Tds + vdp$ ， $\left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_T = T + v \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)_T = T + v \frac{1}{(\partial s / \partial p)_T}$ ，利用麦克斯韦关系，

用 $(\partial v / \partial T)_p$ 置换 $(\partial s / \partial p)_T$ 即可得 $\left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_T = T - \frac{1}{\alpha_v}$

6-11 刚性容器中充满 0.1MPa 的饱和水，温度为 99.634℃。将其加热到 120℃，求其压力。已知：在 100℃ 到 120℃ 内，水的平均 $\alpha_v = 80.8 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$ ；0.1MPa，120℃ 时水的 κ_T 值为 $4.93 \times 10^{-4} \text{ 1/MPa}$ ，假设其不随压力而变。

提示和答案： $dv = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T dp$ ，据热系数定义可求得 $\frac{dv}{v} = \alpha_v dT - \kappa_T dp$ 。

积分得 $\ln \frac{v_2}{v_1} = \int_1^2 \alpha_v dT - \int_1^2 \kappa_T dp = 0$ ，因在积分区间内 α_v 和 κ_T 都是常数，所以

$$\alpha_v (T_2 - T_1) = \kappa_T (p_2 - p_1)，解得 p_2 = 33.4 \text{ MPa}。$$

虽然水的温度仅升高 20℃，但容器内的压力是初态压力的 334 倍，因此进行定容过程相对于定压过程困难得多。

6-12 试证状态方程为 $p(v-b) = R_g T$ （其中 b 为常数）的气体（1）热力学能 $du = c_v dT$ ；

（2）焓 $dh = c_p dT + b dp$ ；（3） $c_p - c_v$ 为常数；（4）其可逆绝热过程的过程方程为

$$p(v-b)^\kappa = \text{常数}。$$

提示：对 $p(v-b) = R_g T$ 求导，分别代入热力学能的一般关系式和焓的一般关系式

$$du = c_v dT + \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv, \quad dh = c_p dT + \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp \quad \text{即得} \quad du = c_v dT,$$

$$dh = c_p dT + b dp; \text{代入 } c_p - c_v = T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v, \text{可得 } c_p - c_v = R_g; \text{对 } p(v-b) = R_g T$$

$$\text{取对数后求导 } \frac{dp}{p} + \frac{dv}{v-b} = \frac{dT}{T}, \text{代入 } ds = \frac{du}{T} + \frac{pdv}{T} = 0, \text{移项整理得 } \frac{dp}{p} = -\kappa \frac{d(v-b)}{v-b}.$$

取 κ 为定值, 积分得 $p(v-b)^\kappa = \text{常数}$ 。

6-13 证明下列等式

$$(1) \quad \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v = \frac{c_v}{T}, \quad \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p = \frac{c_p}{T}$$

$$(2) \quad \frac{\partial^2 u}{\partial T \partial v} = T \frac{\partial^2 s}{\partial T \partial v}, \quad \frac{\partial^2 u}{\partial T \partial p} = T \frac{\partial^2 s}{\partial T \partial p}$$

$$\text{提示: (1) } ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T dv, \text{对照第一 } ds \text{ 方程式 } ds = \frac{c_v}{T} dT + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv,$$

$$\text{即得 } \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v = \frac{c_v}{T}; \text{取 } s = s(p, T), \quad ds = \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T dp, \text{对照第二 } ds \text{ 方程式}$$

$$ds = \frac{c_p}{T} dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp, \text{得 } \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p = \frac{c_p}{T}. (2) \text{由 } du = Tds - pdv, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v \text{故}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial T \partial v} = \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \frac{\partial}{\partial v} \left[T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v \right] = T \frac{\partial^2 s}{\partial v \partial T} = T \frac{\partial^2 s}{\partial T \partial v}; \text{同理, 由 } dh = Tds + vdp,$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p \text{得 } \frac{\partial^2 h}{\partial T \partial p} = T \frac{\partial^2 s}{\partial T \partial p}.$$

6-14 试证范德瓦耳气体

$$(1) \quad du = c_v dT + \frac{a}{v^2} dv; \quad (2) \quad c_p - c_v = \frac{R_g}{1 - \frac{2a(v-b)^2}{R_g T v^3}};$$

$$(3) \quad \text{定温过程焓差为 } (h_2 - h_1)_T = p_2 v_2 - p_1 v_1 + a \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right);$$

$$(4) \quad \text{定温过程熵差为 } (s_2 - s_1)_T = R_g \ln \frac{v_2 - b}{v_1 - b}$$

提示: (1) 由范氏方程得 $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R_g}{v-b}$ 、 $T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p = \frac{R_g T}{v-b} - \left(\frac{R_g T}{v-b} - \frac{a}{v^2}\right) = \frac{a}{v^2}$ 代

入 du 第一关系式 $du = c_v dT + \left[T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p\right] dv$ ，即得 $du = c_v dT + \frac{a}{v^2} dv$ ；代入

$$c_p - c_v = T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \text{ 并利用循环关系式转化 } \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \text{ 得 } \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = -\frac{\frac{R_g}{v-b}}{\frac{-R_g T}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3}}, \text{ 解}$$

$$\text{得 } c_p - c_v = \frac{R_g}{1 - \frac{2a(v-b)^2}{R_g T v^3}}; (3) \text{ 由 (1) 已得 } du = c_v dT + \frac{a}{v^2} dv \text{ 考虑等温过程 } dT=0, \text{ 所以,}$$

$$(h_2 - h_1)_T = (u_2 - u_1)_T + p_2 v_2 - p_1 v_1 = a\left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2}\right) + p_2 v_2 - p_1 v_1; (4) \text{ 由第一 } ds \text{ 方程式}$$

$$ds = \frac{c_v}{T} dT + \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dv, \text{ 所以, 范德瓦耳气体经历等温过程 } ds = \frac{R_g}{v-b} dv, \text{ 积分}$$

$$(s_2 - s_1)_T = R_g \ln \frac{v_2 - b}{v_1 - b}。$$

***6-15** 利用通用焓图求甲烷 (CH_4) 由 6.5MPa 、 70°C 定压冷却到 -6°C 时放出的热量。

已知甲烷在理想气体状态下的摩尔定压热容为 $\left\{C_{pm}^*\right\}_{\text{J/(mol}\cdot\text{K)}} = 18.9 + 0.055\{T\}_{\text{K}}$ 。

提示和答案: 查得甲烷 p_{cr} 、 T_{cr} 计算得 $p_{r1} = p_{r2} = 1.40$ 、 $T_{r1} = 1.80$ 、 $T_{r2} = 1.40$ 。分

别查通用焓图, 有 $\frac{(H_m^* - H_m)_1}{RT_{\text{cr}}} = 0.39$, $\frac{(H_m^* - H_m)_2}{RT_{\text{cr}}} = 0.80$, 即得

$$H_{m,2} - H_{m1} = RT_{\text{cr}} \left[\frac{(H_m^* - H_m)_1}{RT_{\text{cr}}} - \frac{(H_m^* - H_m)_2}{RT_{\text{cr}}} \right] + \int_1^2 C_{p,m}^* dT = -2069.2\text{J/mol}。$$

***6-16** 8MPa 、 150K 的氮节流到 0.5MPa 后流经一短管, 测得温度为 125K , 利用通用图求换热量及过程熵变。

提示和答案: 查得氮 p_{cr} 和 T_{cr} , 计算 p_{r1} 、 p_{r2} 和 T_{r1} 、 T_{r2} 。取节流阀及短管为系统, 列能量方程

$$Q = H_{m2} - H_{m1} = (H_{m1}^* - H_{m1}) + (H_{m2}^* - H_{m1}^*) - (H_{m2}^* - H_{m2})$$

其中： $H_{m2}^* - H_{m1}^* = C_{pm}(T_2 - T_1) = -727.5\text{J/mol}$ ；查通用焓图， $\left(\frac{H_m^* - H_m}{RT_{cr}}\right)_1 = 2.42$ 、

$$\left(\frac{H_m^* - H_m}{RT_{cr}}\right)_2 = 0.20, \text{ 于是}$$

$$(H_m^* - H_m)_1 = 2.42RT_{cr} = 2535.3\text{J/mol} ; (H_m^* - H_m)_2 = 0.20RT_{cr} = 209.5\text{J/mol}$$

$$Q = 2535.3\text{J/mol} - 727.5\text{J/mol} - 209.5\text{J/mol} = 1598.3\text{J/mol}$$

熵变： $S_{m2} - S_{m1} = (S_{m1}^* - S_{m1}) + (S_{m2}^* - S_{m1}^*) - (S_{m2}^* - S_{m2})$

利用对比压力 and 对比温度，查通用熵图 $\frac{S_{m1}^* - S_{m1}}{R} = 1.44$ 、 $\frac{S_{m2}^* - S_{m2}}{R} = 0.146$

$$S_{m1}^* - S_{m1} = 11.973\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) ; S_{m2}^* - S_{m2} = 1.214\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) ;$$

$$S_{m2}^* - S_{m1}^* = C_{pm} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = 17.75\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

$$S_{m2} - S_{m1} = 28.494\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

6-17 某理想气体的变化过程中比热容 c_n 为常数，试证其过程方程为 $pv^n = \text{常数}$ 。式中，

$$n = \frac{c_x - c_p}{c_x - c_v}, \quad p \text{ 为压力, } c_p, c_v \text{ 为比定压热容和比定容热容, 取定值。}$$

提示：将理想气体 $du = c_v dT$ ； $dT = d(pv/R_g)$ 代入 $\delta q = du + pdv$ ； $\delta q = c_x dT$ ，

移项可得 $(c_v - c_x)dT + pdv = 0$ ，即导得 $(c_v - c_x + R_g)pdv + (c_v - c_x)vdp = 0$ ，因

$R_g = c_p - c_v$ ，所以 $(c_p - c_x)pdv + (c_v - c_x)vdp = 0$ ，比热容取常数，积分得

$$pv^{\frac{c_p - c_x}{c_v - c_x}} = \text{常数, 即 } pv^n = \text{常数。}$$

6-18 某一气体的体积膨胀系数和等温压缩率分别为

$$\alpha_v = \frac{nR}{pV}, \quad \kappa_T = \frac{1}{p} + \frac{a}{V}$$

式中， a 为常数， n 为物质的量， R 为通用气体常数。试求此气体的状态方程。

提示和答案：取 $V = V(T, p)$ ，则

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T dp = \alpha_v V dT - \kappa_T V dp = \frac{nR}{pV} V dT - \left(\frac{1}{p} + \frac{a}{V} \right) V dp \quad (a)$$

整理后积分得 $pV = -\frac{a}{2} p^2 + nRT + C$ ，当 $p=0$ 时气体应服从理想气体方程 $pV = nRT$ ，

所以积分常数 $C=0$ ，因此状态方程为 $pV = -\frac{a}{2} p^2 + nRT$ 。

6-19 气体的体积膨胀系数和定容压力温度系数分别为

$$\alpha_v = \frac{R}{pV_m}, \quad \alpha = \frac{1}{T}$$

试求此气体的状态方程。（ R 为通用气体常数）

提示和答案：据 $\left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p = -1$ ， $\left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = -\frac{\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p}{\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v} = -\frac{\alpha_v v}{p\alpha} = -\frac{R_g T}{p^2}$ ，

积分， $v = \frac{R_g T}{p} + \varphi(T)$ ，当 $p \rightarrow 0$ 时气体趋近于理想气体，服从 $v = \frac{R_g T}{p}$ ，故 $\varphi(T) = 0$ ，

因此状态方程为 $pV_m = RT$ 。

***6-20** 水的三相点温度 $T = 273.16 \text{ K}$ ，压力 $p = 611.2 \text{ Pa}$ ，汽化潜热 $\gamma = 2501.3 \text{ kJ/kg}$ 。按蒸气压力方程计算 $t_2 = 10^\circ \text{C}$ 时饱和蒸汽压（假定在本题范围内水的汽化潜热近似为常数）。

提示和答案：将三相点汽化潜热代入饱和蒸汽压力方程： $\ln p_s = -\frac{\gamma}{R_g T_s} + A$ ，解得

$p_{s,10^\circ \text{C}} = 1231 \text{ Pa}$ ，蒸汽表提供的 10°C 的 $p_s = 1227.9 \text{ Pa}$ 。

***6-21** 在二氧化碳的三相点状态， $T_{\text{tp}} = 216.55 \text{ K}$ ， $p_{\text{tp}} = 0.518 \text{ MPa}$ ，固态、液态和气态比体积分别为 $v_s = 0.661 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ， $v_l = 0.894 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ， $v_g = 722 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，升华潜热 $\gamma_{\text{sg}} = 542.76 \text{ kJ/kg}$ ，汽化潜热 $\gamma_{\text{lg}} = 347.85 \text{ kJ/kg}$ 。计算：（1）在三相点上升华线，熔解线和气化线的斜率各为多少；（2）按蒸气压方程计算 $t_2 = -80^\circ \text{C}$ 时饱和蒸汽压力（查表数据为 0.0602 MPa ）。

提示和答案：（1）据状态参数特性及相变潜热为焓差， $\gamma_{\text{sl}} = \gamma_{\text{sg}} - \gamma_{\text{lg}} = 194.91 \text{ kJ/kg}$ ，

代入 $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_s = \frac{\gamma}{T_s(v^\beta - v^\alpha)}$ 即可得汽化线斜率 $\left.\frac{dp}{dT}\right|_{\text{汽化}} = \frac{\gamma_{\text{lg}}}{T_s(v'' - v')} = 2.23 \times 10^3 \text{ Pa/K}$ 、熔解

线斜率 $\left.\frac{dp}{dT}\right|_{\text{熔解}} = 4787.6 \times 10^3 \text{ Pa/K}$ ；升华线斜率、 $\left.\frac{dp}{dT}\right|_{\text{升华}} = 3.47 \times 10^3 \text{ Pa/K}$ ；(2) 三相点

时 $\ln p_s = -\frac{\gamma_{\text{lg}}}{R_g T_s} + A$ ，代入现有数据， $A = 21.66$ 。所以 -80°C 时饱和蒸汽压

$$p_{s, -80^\circ\text{C}} = \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{lg}}}{R_g T_s} + A\right) = 184915 \text{ Pa}。$$

6-22 利用水蒸气下述数据计算 200°C 时水的气化潜热。

$t / ^\circ\text{C}$	p_s / kPa	$v'' / \text{m}^3/\text{kg}$	$v' / \text{m}^3/\text{kg}$	$h'' / \text{kJ/kg}$	$h' / \text{kJ/kg}$
190	1254.2	0.1565	0.0011	2785.8	807.6
195	1397.6	0.1410	0.0011	2789.4	829.9
200	1551.6	0.1273	0.0012	2792.5	854.0
205	1722.9	0.1152	0.0012	2795.3	875.0
210	1906.2	0.1044	0.0012	2797.7	897.7

提示和答案：据克拉贝隆-克劳修斯方程 $\left.\frac{dp}{dT}\right|_{\text{sat}} = \frac{h'' - h'}{T_s(v'' - v')}$ ，

$$h'' - h' = T_s(v'' - v') \left.\frac{dp}{dT}\right|_{\text{sat}} \cong T_s(v'' - v') \frac{\Delta p}{\Delta T} = 1940.3 \text{ kJ}。同表数据显示$$

$$h'' - h' = 1938.5 \text{ kJ/kg}。$$

6-23 制冷剂 R134a 在 20°C 时饱和压力和气化潜热分别是 571.6 kPa 和 182.4 kJ/kg ，仅利用这些数据估算 R134a 在 0°C 时的饱和压力。

提示和答案：据克拉贝隆方程 $\left.\frac{dp}{dT}\right|_{\text{sat}} = \frac{h'' - h'}{T_s(v'' - v')}$ ，分离变量，假定 $v'' \gg v'$ 、R134a

蒸气近似服从理想气体规律，且由于温度变化范围不大，气化潜热为常数，积分得

$$p_2 = 326.5 \text{ kPa}。$$

第七章 气体和蒸汽的流动

习 题

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 ，假定气流通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： $T^* = T_1 + c_f^2 / (2c_p)$ ，注意比热容的单位。 $t_1 = 53.88^\circ\text{C}$

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。 $T_0 = 979.1\text{K}$ 、 $p_0 = 1.014\text{MPa}$ 。

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： 流动过程中理想气体也满足状态方程，扩压段内过程可近似为等熵过程，且各截面的质量流量相等。 $T_2 = 296.06\text{K}$ 、 $p_2 = 215.7\text{kPa}$ 。

7-4 进出口截面积 $A_2 = 10\text{cm}^2$ 的渐缩喷管空气初参数为 $p_1 = 2 \times 10^6\text{Pa}$ 、 $t_1 = 27^\circ\text{C}$ ，初速度很小可忽略不计。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， $c_p = 1005\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $\kappa = 1.4$ ，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，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 $p_b = 1.5\text{MPa}$ 时， $t_2 = 3.32^\circ\text{C}$ 、 $v_2 = 0.0529\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $c_{f2} = 218.2\text{m/s}$ 、 $q_m = 4.12\text{kg/s}$ ；背压 $p_b = 1\text{MPa}$ 时， $t_2 = -23.06^\circ\text{C}$ 、 $v_2 = 0.0680\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $c_{f2} = 317.2\text{m/s}$ 、 $q_m = 4.66\text{kg/s}$ 。

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：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。 $p_2 = 0.5771\text{MPa}$ 、 $T_2 = 660.7\text{K}$ 、 $c_2 = 515.2\text{m/s}$ 。

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：稳定工况下喷管各截面流量相等，利用已知参数截面上的参数求出滞止参数可解得 $T_0 = 832.9\text{K}$ 、 $p_0 = 0.544\text{MPa}$ ； $c = 571.5\text{m/s}$ 、 $Ma = 0.350$ ； $p_2 = 0.2872\text{MPa}$ 、 $T_2 = 694.0\text{K}$ 、 $c_{f2} = 528.1\text{m/s}$ 、 $v_2 = 0.6935\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $A_2 = 28.1 \times 10^{-4}\text{m}^2$ 。

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，其热焓可查附表）

提示和答案：据 t_1 查附表得 p_{r1} 及 h_1 ，再由 $p_{r2} = p_{r1} \frac{p_2}{p_1}$ ，查附表得 T_2 及 h_2 ，解得 $c_{f2} = 435.25\text{m/s}$ ， $A_2 = 7.44 \times 10^{-4}\text{m}^2$ 。

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 1mm^2 ，出口上截面压力与喉部压力之比为 $1:10$ ，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 $p_{cr} = 7.2864\text{MPa}$ 、 $T_{cr} = 263.67\text{K}$ 、 $v_{cr} = 0.0104\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $c_{cr} = 325.49\text{m/s}$ 、 $q_m = \frac{A_{cr} c_{cr}}{v_{cr}} = 0.0313\text{kg/s}$ 。而 $p_{cr} : p_2 = 10:1$ ，故 $p_2 = 0.72864\text{MPa}$ ，进而求得 $T_2 = 136.57\text{K}$ 、 $v_2 = 0.0538\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $c_{f2} = 601.0\text{m/s}$ 、 $A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{f2}} = 2.8 \times 10^{-6}\text{m}^2$ ，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：

$$F = q_m c_{f2} + \Delta p A_2 = 20.6\text{N}。$$

7-9 内燃机排出的废气压力为 0.2MPa，温度为 550℃，流速为 110m/s，若将之引入渐缩喷管，试确定当背压为 0.1MPa 时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。

提示和答案：收缩喷管出口截面压力最低是临界压力，当背压为 0.1MPa 时废气通过喷管出口截面的流速 $c_{f2} = 526.87\text{m/s}$ ；若忽略初流速，则 $c'_{f2} = 524.96\text{m/s}$ ；

$$\frac{c_{f2} - c'_{f2}}{c_{f2}} = 0.36\%。$$

7-10 滞止压力为 0.65MPa，滞止温度为 350K 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 0.28MPa，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 $c = \sqrt{\kappa R_g T}$ ，所以已知 Ma 即可确定截面上气流温度、流量等参数，进而解得 $A_2 = 2.19 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 。

7-11 空气等熵流经缩放喷管，进口截面上压力和温度分别为 0.58MPa、440K，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。
 $A_{cr} = 1.27 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 、 $A_2 = 1.62 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 、 $c_{f2} = 557.63\text{m/s}$ 。

7-12 流入绝热喷管的过热氨蒸气压力为 800kPa，温度为 20℃，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。本题查氨热力性质表，得 h_1 和 v_2 ，据能量方程，求得 h_2 ，发现 $h' < h_2 < h''$ ，判定出口截面上氨为湿饱和蒸气，计算 x_2 和 v_2 后，求得 $A_2 = 8.58 \times 10^{-6}\text{m}^2$ 。

7-13 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确定出口截面上的压力，再如上题解得 $h_2 = 3275\text{kJ/kg}$ 、 $t_2 = 406^\circ\text{C}$ 、 $v_2 = 0.245\text{m}^3/\text{kg}$ ； $c_{f2} = 621.3\text{m/s}$ ； $q_m = 0.51\text{kg/s}$ 。

7-14 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。 $c_{cr}=621.3\text{m/s}$ 、 $c_{f2}=1237.7\text{m/s}$ 、 $q_m=0.1383\text{kg/s}$ 、 $A_{cr}=0.545\times 10^{-4}\text{m}^2$ 。

7-15 压力 $p_1=0.3\text{MPa}$, 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及几何条件确定喷管形状, 应采用收缩喷管。气流出口截面为临界截面, $A_2=57.43\times 10^{-4}\text{m}^2$ 。

7-16 初态为 3.5MPa 和 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; 利用速度系数修正出口速度, 同时应对比体积进行修正。(1) 收缩喷管, $A_2=0.424\times 10^{-4}\text{m}^2$; (2) $q'_m=9.24\text{kg/min}$ 。

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 $c_{f1}\geq 332.0\text{m/s}$ 。

7-18 试证明理想气体的绝热节流微分效应 μ_J 恒等于零。

提示和答案: 对理想气体状态方程求导, 得 $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$, 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 $h_1=h_2$ 、 $T_1=T_2$, 据质量守恒求得 $D_2/D_1=3.464$ 。

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: 节流过程, $h_1 = h_2$, 得 $x_1 = 0.967$ 。

7-21 750kPa、25℃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, 由质量守恒求得 $D_2/D_1 = 6.28$ 。

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?

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。

$s'-s = 0.1\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 采用收缩喷管, $c_{f2} = 414.7\text{m/s}$ 、 $q_m = 0.35\text{kg/s}$ 。

7-23 压力为 6.0MPa, 温度为 490℃的蒸汽, 经节流后压力为 2.5MPa, 然后定熵膨胀到 0.04MPa。求 (1) 绝热节流后蒸汽温度及节流过程蒸汽的熵增; (2) 若节流前后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的损失。($T_0=300\text{K}$)

提示和答案: 节流而造成的技术功减少是焓差, 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。 $\Delta s = 0.395\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $t_2 = 471^\circ\text{C}$; $\Delta w_t = 140\text{kJ/kg}$ 、 $I = 118.5\text{kJ/kg}$ 。

7-24 1kg温度 $T_1=330.15\text{K}$ 、压力 $p_1=7.1\text{MPa}$ 的空气, 经绝热节流压力降至 0.1MPa。(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 0.1MPa, 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: 理想气体节流前后温度不变, 但可逆绝热膨胀后温度降低, 任何与环境有温差的物系均有作功能力。 $\Delta s_{12} = 1.223\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $w_t = 233.400\text{kJ/kg}$ 、 $T_2 = 97.68\text{K}$ 、 $I = 367.08\text{kJ/kg}$ 。

7-25 用管子输送压力为 1MPa, 温度为 300℃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 12000kg/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 $p_1 = 0.5\text{MPa}$, $x=0.95$; 另一管的蒸汽流量为 $q_{m2} = 20\text{kg/s}$, 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: 混合前后能量守恒, 列出混合过程能量方程解出 h_3 , 即可和压力确定其他

参数。 $h_3 = 2831.64\text{kJ/kg}$ 、 $t_3 = 196.7^\circ\text{C}$ 、 $v_3 = 0.2586\text{m}^3/\text{kg}$ 。

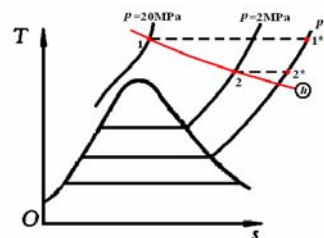
7-27* 在绝热稳态过程中 20MPa , -20°C 的氮被节流降压到 2MPa , 确定节流后氮的温度。

提示和答案: 查有关资料, 氮 $p_{\text{cr}} = 3.39\text{MPa}$, $T_{\text{cr}} = 126\text{K}$, 所以 $p_{r1} = \frac{p_1}{p_{\text{cr}}} = 5.9$ 、

$$T_{r1} = \frac{T_1}{T_{\text{cr}}} = 1.61, \quad p_{r2} = \frac{p_2}{p_{\text{cr}}} = 0.59。 \text{查通用焓图得}$$

$$\left(\frac{H_m^* - H_m}{RT_{\text{cr}}} \right)_1 = 1.79$$

$$(H_m^* - H_m)_1 = 1.79 RT_{\text{cr}} = 1875.3\text{J/mol}$$



题 7-27 附图

采用试差法, 假设 $T_2 = 140\text{K}$, 则 $T_{r2} = \frac{T_2}{T_{\text{cr}}} = \frac{140\text{K}}{126\text{K}} = 1.11$, $\left(\frac{H_m^* - H_m}{RT_{\text{cr}}} \right)_2 = 0.57$

$$(H_m^* - H_m)_2 = 0.57 RT_{\text{cr}} = 597.1\text{J/mol}$$

据绝热节流特征 $H_{m1} = H_{m2}$

$$\begin{aligned} H_{m2} - H_{m1} &= (H_{m1}^* - H_{m1}) + (H_{m2}^* - H_{m1}^*) - (H_{m2}^* - H_{m2}) \\ &= (H_{m1}^* - H_{m1}) - (H_{m2}^* - H_{m2}) + C_{pm}(T_2 - T_1) \\ &= -555.1\text{J/mol} \end{aligned}$$

误差较大, 故再设 $T_2 = 145\text{K}$, 重复上述过程, 如下表所示:

T_2 / K	T_{r2}	$(H_m^* - H_m)_2 / RT_{\text{cr}}$	$(H_m^* - H_m)_2 / \text{J/mol}$	$H_{m2} - H_{m1} / \text{J/mol}$
140	1.11	0.57	597.1	-555.1
145	1.15	0.54	565.7	-378.2
150	1.19	0.49	513.3	-180.0
152	1.21	0.48	502.9	-111.7
155	1.23	0.47	492.4	-13.9

$T_2 = 155\text{K}$ 时 $H_{m1} \cong H_{m2}$, 所以取 $T_2 = 155\text{K}$ 。

7-28* 1.5 MPa、150 °C 的水经节流阀绝热节流压力降至 200 kPa，进入节流阀的速度是 5 m/s，节流阀前后的管径相等，求节流后工质的状态和速度。

提示和答案：查水蒸气热力性质表：150 °C、1.5 MPa 时 $h = 632.9 \text{ kJ/kg}$ 、 $v = 0.0011 \text{ m}^3/\text{kg}$ ；200 kPa 时 $h'' = 2706.5 \text{ kJ/kg}$ 、 $h' = 504.7 \text{ kJ/kg}$ ； $v'' = 0.8865 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $v' = 0.0011 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。取节流阀为控制体积，列绝热节流前后能量方程和质量守恒方程：

$$h_1 + \frac{c_{f1}^2}{2} = h_2 + \frac{c_{f2}^2}{2}, \quad q_m = \frac{A_1 c_{f1}}{v_1} = \frac{A_2 c_{f2}}{v_2}。其中：h_2 = h' + x_2(h'' - h'), \quad v_2 = v' + x_2(v'' - v')。$$

解得： $h_2 = 614.79 \text{ kJ/kg}$ ， $x_2 = 0.050$ 。所以 $v_2 = v' + x_2(v'' - v') = 0.0454 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，

$$c_{f2} = c_{f1} \frac{A_1 v_2}{A_2 v_1} = c_{f1} \frac{v_2}{v_1} = 206.4 \text{ m/s}。$$

通常，节流前后工质流速接近相等，所以由能量方程得出节流前后焓相等，但本题节流前后工质有液态水改变为湿蒸汽，比体积极大地增大，导致节流后流速远大于节流前，必须考虑动能变化，所以与绝热节流“特征” $h_1 = h_2$ 有“矛盾”。

第八章 压气机的热力过程

习 题

8-1 某单级活塞式压气机每小时吸入的空气量 $V_1 = 140\text{m}^3/\text{h}$ ，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： $W_c = -W_t$ ， $P_T = 6.97\text{KW}$ 、 $P_s = 9.11\text{kW}$ 、 $P_n = 8.12\text{kW}$ 。

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。 $n = 1.186$ 、 $T_2 = 387.82\text{K}$ 、 $W_n = 3.443\text{kJ}$ 、 $Q_n = mq = -1.84\text{kJ}$ 。

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 465kg/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：空气只有在可逆多变过程才可能达到最高压力，故须求多变指数。利用气体放热等于冷却水吸热可确定 $n = 1.20$ ， $p_{2,\max} = 0.90\text{MPa}$ ， $P = 18.3\text{kW}$ 。

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）。

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

8-5 某单级活塞式压气机，其增压比为 7 ，活塞排量为 0.009m^3 ，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（ kW ）；（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，故每小时有效吸气容积 $V = 750 \times 60 \times \eta_v V_h$ 。 $\eta_v = 0.792$ ， $q_m = 3\,813.56\text{ kg/h}$ ， $P = 13.4\text{ kW}$ ， $q_Q = 42.13\text{ kW}$ 。

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 $p_1 = 0.1\text{MPa}$ 、 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ，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 (压气机的外部磨擦损失忽略不计)。

提示和答案：余隙容积存在并不影响压气机理论耗功， $q_m = 0.088\text{ kg/s}$ 、 $P_c = 20.0\text{ kW}$ 。

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， $\pi_1 = \pi_2 = \pi_3$ ， $w_c = 3w_{c,L} = 492.0\text{ kJ/kg}$ ；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 8-7 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 250r/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。

提示和答案：注意压气机的生产量所指的状态，并考虑可否利用 $Q = H_3 - H_1 - W_C$ 求解空气在中间冷却器及两级气缸中放热量。 $p_2 = 0.5 \text{ MPa}$ ； $T_2 = T_3 = 400.33 \text{ K}$ ； $V_1 = 0.03590 \text{ m}^3$ 、 $V_2 = 0.00718 \text{ m}^3$ ； $P_C = 56.8 \text{ kW}$ ； $Q = -1.33 \times 10^5 \text{ kJ/h}$ 。

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 $p = 1 \text{ atm}$ 、 $t = 21^\circ\text{C}$ 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 $\pi = 5.132$ $n = 1.4$ ，求得 $\sigma = 0.023$ ， $P = 49.3 \text{ kW}$ 。

8-10 一台单缸活塞式压气机（其示功图见图 8-5），气缸直径 $D = 200 \text{ mm}$ ，活塞行程 $S = 300 \text{ mm}$ 。从大气中吸入空气，空气初态为 $p_1 = 97 \text{ kPa}$ 、 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ，经多变压缩到 $p_2 = 0.55 \text{ MPa}$ ，若多变指数为 $n = 1.3$ ，机轴转速为 500 r/min ，压气机余隙容积比 $\sigma = 0.05$ ，求：（1）压气机有效吸气容积及容积效率；（2）压气机的排气温度；（3）压气机的生产量；（4）拖动压气机所需的功率。

提示和答案：气缸排量即活塞扫过的容积。有效吸气容积 $V = 0.008106 \text{ m}^3$ ， $\eta_V = 0.86$ ，排气温度 $t_2 = 164.37^\circ\text{C}$ ，生产量 $q_m = 280.4 \text{ kg/h}$ ，功率 $P_C = 14.0 \text{ kW}$ 。

8-11 轴流式压气机每分钟吸入 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 的空气 1200 kg ，经绝热压缩到 $p_2 = 0.6 \text{ MPa}$ ，该压气机的绝热效率为 0.85 ，求出口处气体的温度及压气机所消耗的功率；（2）过程的熵产率及作功能力的损失（ $T_0 = 293.15 \text{ K}$ ）。

提示和答案：据绝热稳流系统熵方程， $(s_2 - s_1) = s_g$ ，作功能力损失 $\dot{I} = T_0 \dot{S}_g$ 。
 $T_2 = 523.70 \text{ K}$ 、 $P_C = 4630.0 \text{ kW}$ ， $\dot{I} = 402.1 \text{ kJ/s}$ 。

8-12 某轴流式压气机从大气环境吸入 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 27^\circ\text{C}$ 的空气，其中体积流量为 $516.6 \text{ m}^3/\text{min}$ ，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：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。压气机的绝热效率 $\eta_{cs} = 0.865$ ，熵产率 $\dot{S}_g = 0.729 \text{ kJ}/(\text{K} \cdot \text{s})$ ，压气机需功率 $P_c = 3\,241.3 \text{ kW}$ 。

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 $60 \text{ kg}/\text{min}$ ；消耗功率 185 kW ，若压缩过程绝热，分析测试的可靠性。

提示和答案：可从出口温度和耗功比较分析。若过程可逆，则

$$T_{2s} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 431.15 \text{ K}, \quad t_{2s} = 158^\circ\text{C}, \quad t_{2s} < t_2 \text{ 合理。}$$

从耗功分析

$$P_c = q_m(h_2 - h_1) = 190.7 \text{ kW} > 185 \text{ kW}$$

考虑到实际存在的少量散热和不可逆性， P_c 应略大于 185 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 $1\,160.5 \text{ kPa}$ ，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： $h_1 = 389.6 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、 $s_1 = 1.737 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。由 $s_{2s} = s_1$ 、 $p_2 = 1160.5 \text{ kPa}$ ，查同表 $h_{2s} = 430.5 \text{ kJ}/\text{kg}$

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

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 ， $s_{2s} = s_1$ ，进而查表得 h_{2s} 和 h_2 ，即可求得 $\eta_{cs} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = 0.646$ 、 $w_c = h_2 - h_1 = 50.9 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。

8-16 某两级气体压缩机进气参数为 100 kPa 、 300 K ，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 330 K 。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: 由状态 1 压力和温度计算可逆压缩到 p_2 温度 $T_{2s} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 475.13\text{K}$,

再据绝热效率得 $T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_{Cs}} = 513.57\text{K}$ 。状态 3: $p_2 = p_3 = 500\text{kPa}$ 、 $T_3 = 330\text{K}$;

状态 4: $p_4 = \pi p_3 = 2500\text{kPa}$, 同理求得, $T_{4s} = 522.65\text{K}$ 、 $T_4 = 564.94\text{K}$ 。生产 1kg 压

缩空气压气机耗功: $w_c = (h_2 - h_1) + (h_4 - h_3) = 450.7\text{kJ/kg}$ 。

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: $T_{2s} = T_1 \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 966.84\text{K}$ 、 $T_2 = T_1 + \frac{T_{2s} - T_1}{\eta_{Cs}} = 1042.92\text{K}$,

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

B 方案: 按耗功最小选择中间压力 $\pi_L = \pi_h = \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} = 7.746$, $t_a = t_2 = 178.87^\circ\text{C}$,

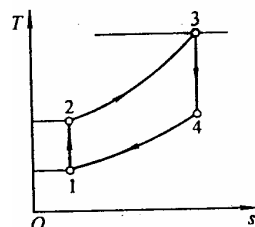
$w_c = 2 \times \frac{nR_g T_1}{n-1} \times (\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1) = 435.8\text{kJ/kg}$ 。比较方案: $T_{2,A} \gg T_{2,B}$; $w_{c,A} > w_{c,B}$, 所以

从人身安全、设备安全角度看 B 方案优于 A 方案。此外 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。

第九章 气体动力循环

习 题

9-1 某活塞式内燃机定容加热理想循环, 压缩 $\varepsilon = 10$, 气体在压缩中程的起点状态是 $p_1 = 100 \text{ kPa}$ 、 $t_1 = 35^\circ\text{C}$, 加热过程中气体吸热 650 kJ/kg 。假定比热容为定值且 $c_p = 1.005 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $\kappa = 1.4$, 求 (1) 循环中各点的温度和压力; (2) 循环热效率, 并与同温度限的卡诺循环热效率作比较; (3) 平均有效压力。

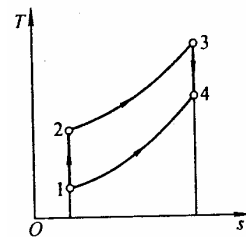


提示和答案: 注意压缩比定义。 $p_2 = 2.512 \text{ MPa}$ 、 $T_2 = 774.05 \text{ K}$ 、 $T_3 = 1\,679.52 \text{ K}$ 、 $p_3 = 5.450 \text{ MPa}$ 、 $p_4 = 0.217 \text{ MPa}$ 、 $T_4 = 668.60 \text{ K}$; $\eta_t = 0.602$ 、 $\eta_{tc} = 0.817$; $\text{MEP} = 491.6 \text{ kPa}$ 。

9-2 利用空气标准的奥托循环模拟实际火花点火活塞式汽油机的循环。循环的压缩比为 7, 循环加热量为 $1\,000 \text{ kJ/kg}$, 压缩起始时空气压力为 90 kPa , 温度 10°C , 假定空气的比热容可取定值, 求循环的最高温度、最高压力、循环热效率和平均有效压力。

提示和答案: 同题 9-1。 $T_3 = T_{\max} = 2\,009.43 \text{ K}$ 、 $p_3 = p_{\max} = 4\,470.6 \text{ kPa}$ 、 $\eta_t = 54.1\%$ 、 $\text{MEP} = 699.1 \text{ kPa}$ 。

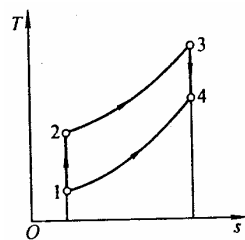
9-3 某狄塞尔循环的压缩比是 19:1, 输入每千克空气的热量 $q_1 = 800 \text{ kJ/kg}$ 。若压缩起始时状态是 $t_1 = 25^\circ\text{C}$ 、 $p_1 = 100 \text{ kPa}$, 计算: (1) 循环中各点的压力、温度和比体积; (2) 预胀比; (3) 循环热效率, 并与同温限的卡诺循环热效率作比较; (4) 平均有效压力。假定气体的比热容为定值, 且 $c_p = 1\,005 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $c_v = 718 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。



提示和答案: 同题 9-1, 加热过程为定压。 $v_1 = 0.855\,7 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $v_2 = 0.045\,0 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $p_2 = 6\,169.6 \text{ kPa}$ 、 $T_2 = 967.35 \text{ K}$ 、 $T_3 = 1\,763.37 \text{ K}$ 、 $p_3 = p_2$ 、 $v_3 = 0.082\,0 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $v_4 = v_1$ 、 $p_4 = 231.5 \text{ kPa}$ 、 $T_4 = 690.25 \text{ K}$; $\rho = 1.82$; $\eta_t = 0.648$ 、 $\eta_{tc} = 0.848$; $\text{MEP} = 639.4 \text{ kPa}$ 。

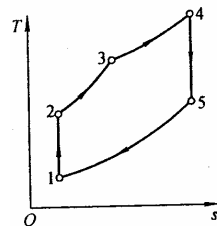
9-4 某内燃机狄塞尔循环的压缩比是 17:1, 压缩起始时工质状态为 $p_1 = 95 \text{ kPa}$ 、 $t_1 = 10^\circ\text{C}$ 。若循环最高温度为 $1\,900 \text{ K}$, 假定气体比热容为定值 $c_p = 1.005 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $\kappa = 1.4$ 。试确定 (1) 循环各点温度, 压力及比体积; (2) 预胀比; (3) 循环热效率。

提示和答案： 同题 9-3。 $v_1 = 0.8554 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、
 $v_2 = 0.0503 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $p_2 = 5015.94 \text{ kPa}$ 、 $T_2 = 879.10 \text{ K}$ 、
 $T_3 = T_{\max} = 1900 \text{ K}$ 、 $p_3 = p_2 = 5015.94 \text{ kPa}$ 、
 $v_3 = 0.1087 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $v_4 = v_1$ 、 $p_4 = 279.28 \text{ kPa}$ 、
 $T_4 = 832.38 \text{ K}$ ； $\rho = 2.16$ ； $\eta_t = 61.6\%$ 。



题 9-4 附图

9-5 已知某活塞式内燃机混合加热理想循环 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 60^\circ\text{C}$ ，压缩比 $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = 15$ ，定容升压比 $\lambda = \frac{p_3}{p_2} = 1.4$ ，定压预胀比 $\rho = \frac{v_4}{v_3} = 1.45$ ，试分析计算循环各点温度、压力、比体积及循环热效率。设工质比热容取定值， $c_p = 1.005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $c_v = 0.718 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。



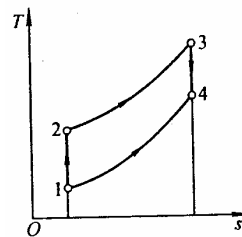
提示和答案： 利用比定压热容和比定容热容求得气体常数，注意用 题 9-5 附图

不同的计算式校核热效率 η_t 。 $v_1 = 0.9557 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $v_2 = 0.0637 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、
 $p_2 = 4.431 \text{ MPa}$ 、 $T_2 = 983.52 \text{ K}$ 、 $v_3 = v_2$ 、 $p_3 = 6.203 \text{ MPa}$ 、 $T_3 = 1376.8 \text{ K}$ 、
 $p_4 = p_3$ 、 $v_4 = 0.0924 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $T_4 = 1996.3 \text{ K}$ 、 $p_5 = 0.236 \text{ MPa}$ 、 $T_5 = 784.39 \text{ K}$ 、
 $v_5 = v_1$ 、 $\eta_t = 0.642$ 。

9-6 有一定压加热理想循环的压缩比 $\varepsilon = 20$ ，工质取空气，比热容取定值， $\kappa = 1.4$ ，循环作功冲程的4%为定压加热过程，压缩冲程的初始状态为 $p_1 = 100 \text{ kPa}$ ， $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 。求：(1)循环中每个过程的初始压力和温度；(2)循环热效率。

提示和答案： 定压加热过程占作功冲程的4%，即 $\frac{v_3 - v_2}{v_1 - v_2} = 0.04$ ，可得 $v_3 = 1.76v_2$ ，进而求得 $\rho = 1.76$ 。 $T_2 = 971.63 \text{ K}$ 、 $p_2 = 6628.9 \text{ kPa}$ 、 $p_3 = p_2$ 、 $T_3 = 1710 \text{ K}$ 、
 $T_4 = 646.8 \text{ K}$ 、 $p_4 = 220.6 \text{ kPa}$ 、 $\eta_t = 0.658$ 。

9-7 某柴油机定压加热循环气体压缩前的参数为 290 K 、 100 kPa ，燃烧完成后气体循环最高温度和压力分别是 2400 K 、 6 MPa ，利用空气的热力性质表，求循环的压缩比和循环的热效率。



提示和答案： 状态 1: $v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = 0.8323 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，查由空

气热力性质表， $h_1 = 292.25 \text{ kJ/kg}$ 、 $p_{r1} = 1.2531$ 、 $v_{r1} = 231.43$ 。 题 9-7 附图

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = h_1 - R_g T_1 = 209.02 \text{ kJ/kg}$$

状态 2: $p_2 = p_3 = 6 \text{ MPa}$, $s_2 = s_1$ 。 $p_{r2} = p_{r1} \frac{p_2}{p_1} = 75.186$, 由空气热力性质表,

$$h_2 = 930.1 \text{ kJ/kg}, \quad v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = 0.04285 \text{ m}^3/\text{kg}。 \quad \varepsilon = v_1 / v_2 = 19.4$$

状态 3: 查空气热力性质表, $h_3 = 2756.75 \text{ kJ/kg}$ 、 $p_{r3} = 4667.4$ 、 $v_{r3} = 0.51420$,

$$v_3 = v_2 \frac{T_3}{T_2} = 0.1148 \text{ m}^3/\text{kg}。$$

状态 4: $v_4 = v_1$, $v_{r4} = v_{r3} \frac{v_4}{v_3} = v_{r3} \frac{v_1}{v_3} = 3.7280$, 由空气热力性质表,

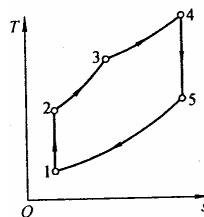
$$T_4 = 1315.27 \text{ K}, \quad h_4 = 1415.71 \text{ kJ/kg}, \quad u_4 = h_4 - p_4 v_4 = 1038.23 \text{ kJ/kg},$$

$$p_4 = \frac{R_g T_4}{v_4} = 453.5 \text{ kPa}。$$

$$q_2 = u_4 - u_1 = 829.2 \text{ kJ/kg}, \quad q_1 = h_3 - h_2 = 1826.65 \text{ kJ/kg}, \quad \eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 54.6\%。$$

注意: $p_2 v_2^\kappa = p_1 v_1^\kappa$ 及 $T_2 v_2^{\kappa-1} = T_1 v_1^{\kappa-1}$ 等公式是在比热容取常数下得到的, 本题不能利用这些公式求得温度或压力再查表求焓、热力学能。

9-8 内燃机混合加热循环, 如附图所示。已知 $t_1 = 90^\circ\text{C}$ 、 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$; $t_2 = 400^\circ\text{C}$, $t_3 = 590^\circ\text{C}$, $t_5 = 300^\circ\text{C}$ 。若比热容按变值考虑, 试利用气体性质表计算各点状态参数, 循环热效率及循环功并与按定值比热容计算作比较。



题 9-8 附图

提示和答案: 参照题 9-4, 注意 $v_3 = v_2$ 、 $p_4 = p_3$ 、 $v_5 = v_1$, 求得 p_5 。 $p_2 = 0.918 \text{ MPa}$ 、 $p_3 = 1.177 \text{ MPa}$ 、 $v_1 = 1.042 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $v_2 = 0.210 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $p_5 = 157.86 \text{ kPa}$ 、 $T_4 = 974.7 \text{ K}$ 、 $\eta_t = 44.3\%$ 。定值比热容 $T_4 = 1001.2 \text{ K}$ 、 $\eta_t = 45.2\%$ 、 $\eta_{tc} = 63.7\%$ 。

9-9 若某内可逆奥托循环压缩比为 $\varepsilon = 8$, 工质自 1000°C 高温热源定容吸热, 向 20°C 的环境介质定容放热。工质在定熵压缩前压力为 110 kPa , 温度为 50°C ; 吸热过程结束后温度为 900°C , 假定气体比热容可取定值, 且 $c_p = 1005 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $\kappa = 1.4$, 环境大气压 $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$, 求 (1) 循环中各状态点的压力和温度; (2) 循环热效率; (3) 吸、放热过程作能力损失和循环效率。

提示和答案: (1) $v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = 0.8431 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = 0.1054 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、

$$p_2 = p_1 \varepsilon^\kappa = 2\,021.71 \text{ kPa} \quad , \quad T_2 = \frac{p_2 v_2}{R_g} = 724.47 \text{ K} \quad , \quad v_3 = v_2 \quad ,$$

$$p_3 = p_2 \frac{T_3}{T_2} = 3\,194.44 \text{ kPa} \quad , \quad v_4 = v_1 \quad , \quad p_4 = p_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^\kappa = 173.81 \text{ kPa} \quad ,$$

$$T_4 = \frac{p_4 v_4}{R_g} = 510.59 \text{ K} ; \quad (2) \quad \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = 56.5 \% ; \quad (3) \text{ 吸热过程: } s_g = \Delta s - s_f ,$$

$$\Delta s_1 = c_v \ln \frac{T_3}{T_2} + R_g \ln \frac{v_3}{v_2} = 0.328\,5 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} , \quad s_{f1} = \int_2^3 \frac{\delta q}{T_r} = \frac{q_{2-3}}{T_r} = 0.242\,9 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} ,$$

$$s_{g1} = \Delta s_1 - s_{f1} = 0.085\,6 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \quad , \quad i_1 = T_0 s_{g1} = 25.1 \text{ kJ/kg} ; \quad \text{放热过程} ,$$

$$\Delta s_2 = c_v \ln \frac{T_1}{T_4} + R_g \ln \frac{v_1}{v_4} = -0.398\,4 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} , \quad s_{f2} = \int_4^1 \frac{\delta q}{T_r} = \frac{q_{4-1}}{T_0} = -0.459\,1 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} ,$$

$$s_{g2} = \Delta s_2 - s_{f2} = 0.060\,7 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} , \quad i_2 = T_0 s_{g2} = 17.8 \text{ kJ/kg} .$$

循环后工质复原态，故就工质而言，不存在作功能力损失。

$$\text{热源放热的可用能 } e_{x,Q} = \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \right) q_{2-3} = 238.0 \text{ kJ/kg} \quad , \quad \text{循环净功}$$

$$w_{\text{net}} = q_1 - q_2 = 174.6 \text{ kJ/kg} , \quad \text{排向环境的热量可用能为零, 所以 } \eta_{e_x} = \frac{w_{\text{net}}}{e_{x,Q}} = 0.734 .$$

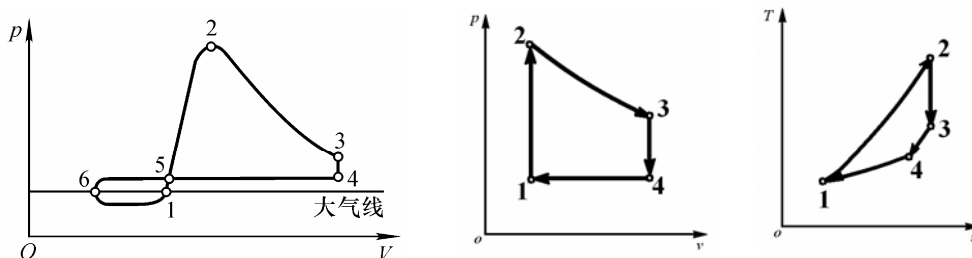
9-10 某内可逆狄塞尔循环压缩比 $\varepsilon = 17$ ，定压预胀比 $\rho = 2$ ，定熵压缩前 $t = 40^\circ\text{C}$ ， $p = 100 \text{ kPa}$ ，定压加热过程中工质从 $1\,800^\circ\text{C}$ 的热源吸热；定容放热过程中气体向 $t_0 = 25^\circ\text{C}$ 、 $p_0 = 100 \text{ kPa}$ 的大气放热，若工质为空气，比热容可取定值， $c_p = 1.005 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 、 $R_g = 0.287 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ，计算：(1) 定熵压缩过程终点的压力和温度及循环最高温度和最高压力；(2) 循环热效率和效率；(3) 吸、放热过程的作功能力损失；(4) 在给定热源间工作的热机的最高效率。

提示和答案：同上题。 $p_2 = 5\,279.9 \text{ kPa}$ 、 $T_2 = 973.20 \text{ K}$ 、 $p_{\text{max}} = 5.280 \text{ MPa}$ 、 $T_{\text{max}} = 1\,946.4 \text{ K}$ 、 $\eta_t = 62.3\%$ 、 $\eta_{e_x} = 72.8\%$ 、 $i_1 = 67.0 \text{ kJ/kg}$ 、 $i_2 = 161.1 \text{ kJ/kg}$ 、 $\eta_{t,\text{max}} = 85.6\%$ 。

9-11 内燃机中最早出现的是煤气机，煤气机最初发明时无燃烧前的压缩。设这种煤气机的示功图如图 9-31 所示。图中：6-1 为进气线，这时活塞向右移动，进气阀开启，空气与煤气的混合物进入气缸。活塞到达位置 1 时，进气阀关闭，火花塞点火。1-2 为接近定容的燃烧过程，2-3 为膨胀线，3-4 为排气阀开启后，部分废气排出，气缸中压力降低。4-5-6 为排气线，这时活塞向左移动，排净废气。(1) 试画出这一内燃机循环的理想循环

的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图；(2) 分析这一循环热效率不高的原因；(3) 设 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 50^\circ\text{C}$ 、 $t_2 = 1200^\circ\text{C}$ 、 $v_4/v_2 = 2$ ，求此循环热效率。

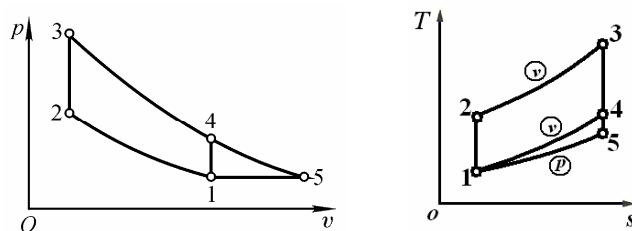
提示和答案：由 $T-s$ 图分析平均温差， $\eta_t = 19.8\%$ 。



题 9-11 附图

9-12 如图 9-32 所示，在定容加热理想循环中，如果绝热膨胀不在点 4 停止，而使其继续进行一直进行到点 5，使 $p_5 = p_1$ 。试在 $T-s$ 图上表示循环 1-2-3-5-1，并根据 $T-s$ 图上这两个循环的图形比较它们的热效率哪一个较高。

设 1、2、3 各点上的参数与例 9-1 所点给出的相同，求循环 1-2-3-5-1 的热效率。



题 9-12 附图

提示和答案：根据 $T-s$ 图分析 q_1 和 q_2 变化情况， $\eta_{t123451} > \eta_{t12341}$ ， $\eta_t = 59.0\%$ 。

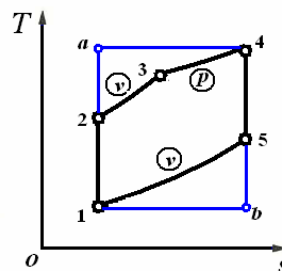
9-13 若使活塞式内燃机按卡诺循环进行，并设其温度界限和例 9-2 中混合加热循环相同，试求循环各特性点的状态参数和循环热效率。把循环表示在 $p-v$ 图和 $T-s$ 图上。分别从热力学理论角度和工程实用角度比较两个循环。

提示和答案：为便于比较，卡诺循环与混合加热循环的 $T-s$ 图画在一起 ($p-v$ 图略)。

$$a \text{ 点参数: } p_a = p_1 \left(\frac{T_a}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = p_1 \left(\frac{T_4}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 88.15 \text{ MPa},$$

$$T_a = T_4 = 1987.4 \text{ K}, v_a = \frac{R_g T_a}{p_a} = 0.00647 \text{ m}^3/\text{kg}。b \text{ 点参}$$

$$\text{数: } T_b = T_1 = 333.15 \text{ K}, p_b = p_4 \left(\frac{T_b}{T_4} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 0.0199 \text{ MPa}, v_b = \frac{R_g T_b}{p_b} = 4.81 \text{ m}^3/\text{kg}。$$



题 9-13 附图

$$\text{循环热效率 } \eta_{t,c} = 1 - \frac{T_b}{T_a} = 1 - \frac{333.15 \text{ K}}{1987.4 \text{ K}} = 83.2 \%。$$

讨论比较：从热力学理论角度看，混合加热理想循环 123451 的热效率 $\eta_t = 63.9 \%$ ， $\eta_{t1a4b1} > \eta_{t123451}$ 。卡诺循环的热效率高。但从工程角度来看，采用卡诺循环 1-a-4-b-1 不适宜，有如下几点原因：

1. 因 $p_a = 88.15 \text{ MPa}$ ，压力太高，通常气缸强度难以承受；
2. $p_b = 0.0199 \text{ MPa}$ ，压力太低，即真空度太高，要保证空气不渗入是困难的；
3. $v_b = 4.81 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，比混合加热循环时 v_5 ，大得多， $\frac{v_b}{v_a} = 743$ 倍，气缸长度过长，刚度不能满足要求。

4. 循环净功 $w_{\text{net}} = \eta_{t,c} q_1 = \eta_{t,c} R_g T_a \ln \frac{v_4}{v_a} = 1019.1 \text{ kJ/kg}$ ，仅是混合循环功 580 kJ/kg 的 1.75 倍，而气缸容积却是它的 8.55 倍 ($v_b / v_5 = 8.55$)，因而机件笨重，机械损失大，实际可得的有效功比理想卡诺循环功会小得多。

综上所述，从工程实用观点考察，内燃机不宜采用卡诺循环。

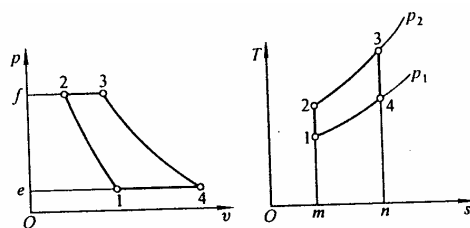
9-14 试分析斯特林循环并计算循环热效率及循环放热量 q_2 。已知：循环吸热温度 $t_H = 527^\circ\text{C}$ 。放热温度 $t_L = 27^\circ\text{C}$ （见图 9-14）。从外界热源吸热量 $q_1 = 200 \text{ kJ/kg}$ 。设工质为理想气体，比热容为定值。

提示和答案：斯特林循环是概括性卡诺循环， $\eta_t = 0.625$ 。

9-15 某定压加热燃气轮机装置理想循环，参数如下： $p_1 = 101150 \text{ Pa}$ 、 $T_1 = 300 \text{ K}$ 、

$T_3 = 923 \text{ K}$ ， $\pi = \frac{p_2}{p_1} = 6$ 。循环的 $p-v$ 图和

$T-s$ 图如附图所示。试求：(1) q_1 、 q_2 ；(2) 循环功 w_{net} ；(3) 循环热效率；(4) 平均吸热温度和平均放热温度。假定工质为空气，且设比热为定值，并取 $c_p = 1.03 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。



题 9-15 附图

提示和答案：平均温度并非算术平均。 $q_1 = 432.1 \text{ kJ/kg}$ 、 $q_2 = 260.8 \text{ kJ/kg}$ 、 $w_{\text{net}} = 174.3 \text{ kJ/kg}$ 、 $\eta_t = 40.1 \%$ 、 $\bar{T}_1 = 690.4 \text{ K}$ 、 $\bar{T}_2 = 413.8 \text{ K}$ 。

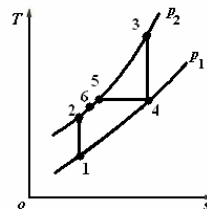
9-16 同上题，若燃气的比热容是变值，试利用空气热力性质表求出上题各项。

提示和答案：燃气的比热容是变值，故 $q_1 \neq c_p(T_3 - T_2)$ ， $q_1 = 457.3 \text{ kJ/kg}$ 、

$$q_2 = 280.0 \text{ kJ/kg} \quad w_{\text{net}} = 177.3 \text{ kJ/kg} \quad \eta_t = 38.8 \% \quad \bar{T}_1 = \frac{q_1}{s_3^0 - s_2^0} = 692.6 \text{ K}$$

$$\bar{T}_2 = \frac{q_2}{s_1^0 - s_4^0} = 423.4 \text{ K}.$$

9-17 某采用回热的大型陆上燃气轮机装置定压加热理想循环输出净功率为 100 MW，循环的最高温度为 1 600 K，最低温度为 300 K，循环最低压力 100 kPa，压气机中的压比 $\pi = 14$ ，若回热度为 0.75，空气比热容可取定值，求：循环空气的流量和循环的热效率。

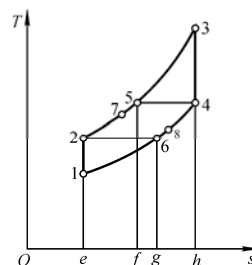


提示和答案： 本题，回热度 $\sigma = (h_6 - h_2) / (h_5 - h_2)$ 。

$$q_m = P / w_{\text{net}} = 195.3 \text{ kg/s} \quad \eta_t = 0.582.$$

题 9-17 附图

9-18 若例 9-3 燃气轮机装置的布雷顿循环配置一回热器，回热度 $\sigma = 70\%$ ，空气比热容 $c_p = 1.005 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ， $\kappa = 1.4$ ，试求：(1) 循环净功及净热量；(2) 循环热效率及效率。

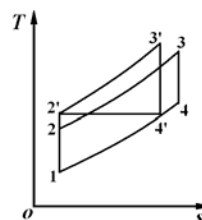


提示和答案： 由回热度求得 7、8 点的温度。

$$q_{\text{net}} = w_{\text{net}} = 477.9 \text{ kJ/kg} \quad \eta_t = 56.75 \% \quad \eta_{\text{ex}} = 85.2 \%$$

题 9-18 附图

9-19 某极限回热的简单定压加热燃气轮机装置理想循环，已知参数： $T_1 = 300 \text{ K}$ ， $T_3 = 1\,200 \text{ K}$ ， $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ ， $p_2 = 1.0 \text{ MPa}$ ， $\kappa = 1.37$ 。求：(1) 循环热效率；(2) 设 T_1 、 T_3 、 p_1 各维持不变，问 p_2 增大到何值时就不可能再采用回热？



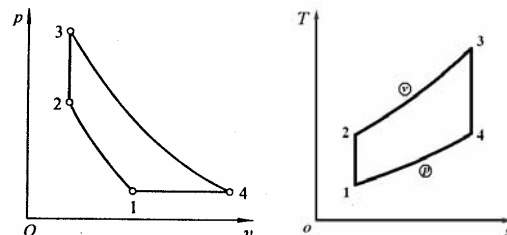
提示和答案： p_2 增大到 p_2' ，使 $T_{4'} = T_{2'}$ 时，回热将无效。

$$\eta_t = 53.4 \% \quad p_2' = 1.30 \text{ MPa}.$$

题 9-19 附图

9-20 燃气轮机装置发展初期曾采用定容燃烧，这种燃烧室配置有进、排气阀门和燃油阀门。当压缩空气与燃料进入燃烧室混合后，全部阀门都关闭，混合气体借电火花点火定容燃烧，燃气的压力、温度瞬间迅速提高。然后，排气阀门打开，燃气流入燃气轮机膨胀做功。这种装置理想循环的 $p-v$ 图如附图所示。图中 1-2 为绝热压缩，2-3 为定容加热，

3-4 为绝热膨胀，4-1 为定压放热。(1) 画出理想循环的 $T-s$ 图；(2) 设 $\pi = \frac{p_2}{p_1}$ ，



$\theta = \frac{T_3}{T_2}$ ，并假定气体的绝热指数 κ 为定值，求

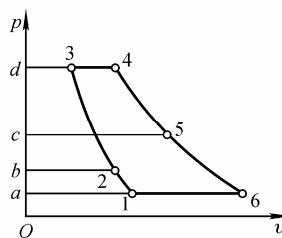
循环热效率 $\eta_t = f(\pi, \theta)$ 。

题 9-20 附图

提示和答案： $\frac{T_3}{T_2} = \theta$ 、 $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$ 、 $\frac{T_4}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} \frac{T_3}{T_2} = \frac{\theta^{\frac{1}{\kappa}}}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$ ，代入 η_t 式，整理

可得 $\eta_t = 1 - \frac{\kappa(\theta^{\frac{1}{\kappa}} - 1)}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}(\theta - 1)}$ 。

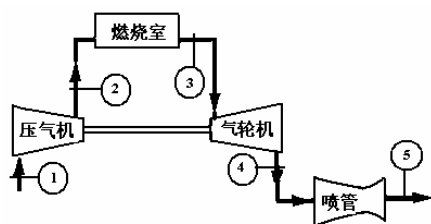
9-21 一架喷气式飞机以每秒 200 m 速度在某高度上飞行，该高度的空气温度为 -33°C 、压力为 50 kPa。飞机的涡轮喷气发动机（图 9-27）的进、出口面积分别为 0.6 m^2 、 0.4 m^2 。压气机的增压为 9，燃气轮机的进口温度是 847°C 。空气在扩压管中压力提高 30 kPa，在尾喷管内压力降低 200 kPa。假定发动机进行理想循环，燃气轮机产生的功恰好用于带动压气机。若气体比热容 $c_p = 1.005\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $c_v = 0.718\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，试计算：（1）压气机出口温度；（2）空气离开发动机时温度及速度；（3）发动机产生的推力；（4）循环效率。



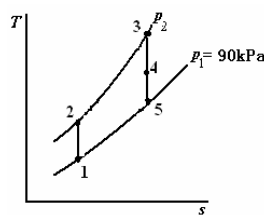
题 9-21 附图

提示和答案： 扩压管内过程近似作等熵过程。 $T_3 = 514.55\text{ K}$ 、 $T_6 = 654.4\text{ K}$ 、 $c_{f6} = 673.78\text{ m/s}$ 、 $F = q_m \Delta c_f = 4.12 \times 10^4\text{ N}$ 、 $\eta_t = 31.6\%$ 。

9-22 某涡轮喷气推进装置见附图，燃气轮机输出功用于驱动压气机。工质的性质与空气近似相同，装置进气压力 90 kPa，温度 290 K，压气机的压力比是 14:1，气体进入气轮机时的温度为 1 500 K，排出气轮机的气体进入喷管膨胀到 90 kPa，若空气比热容为 $c_p = 1.005\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $c_v = 0.718\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，试求进入喷管时气体的压力及离开喷管时气流的速度。



题 9-22 附图



提示和答案： 见图，燃气轮机输出功用于驱动压气机，所以 $h_2 - h_1 = h_3 - h_4$ 。

$p_4 = 533.8\text{ kPa}$ 、 $c_f = 969.8\text{ m/s}$ 。

9-23 某电厂以燃气轮机装置为动力，输向发电机的能量为 20 MW。循环简图如附图，循环最低温度 290 K，最高为 1 500 K；循环最低压力为 95 kPa，最高压力 950 kPa，循

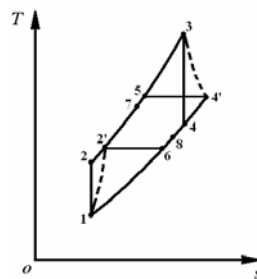
环中设一回热器，回热度为 75 %。压气机绝热效率 $\eta_{c,s} = 0.85$ ，气轮机相对内部效率为

$\eta_t = 0.87$ 。试求（1）气轮机输出的总功率及压气机消耗的功率；

（2）循环热效率；（3）假设循环中工质向 1 800 K 的高温热源吸热，向 290 K 的低温热源放热，求每一过程的不可逆损失

（ $T_0 = 290 \text{ K}$ ）

提示和答案： $\dot{I}_i = q_m T_0 s_{g,i}$ ，注意用输出功率加 损和与吸热



题 9-23 附图

的热量 或其他方法验算计算的正确性。 $P_T = 40.4 \times 10^3 \text{ kW}$ 、

$P_C = 20.4 \times 10^3 \text{ kW}$ 、 $\eta_t = 44.8 \%$ 、压缩 $\dot{I}_1 = 1\,520.0 \text{ kJ/s}$ 、吸热 $\dot{I}_2 = 4\,397.5 \text{ kJ/s}$ 、膨

胀 $\dot{I}_3 = 2\,126.1 \text{ kJ/s}$ 、

放热 $\dot{I}_4 = 8\,929.0 \text{ kJ/s}$ 、换热器 $\dot{I}_5 = 452.6 \text{ kJ/s}$ 。

第十章 蒸汽动力装置循环

习 题

10-1 简单蒸汽动力装置循环（即朗肯循环），蒸汽的初压 $p_1 = 3 \text{ MPa}$ ，终压 $p_2 = 6 \text{ kPa}$ ，初温如下所示，试求在各种不同初温时循环的热效率 η_t ，耗汽率 d 及蒸汽的终干度 x_2 ，并将所求得各值填写入表内，以比较所求得的结果。

提示和答案：

$t_1 / ^\circ\text{C}$	300	500
η_t	0.3476	0.3716
$d / \text{kg/J}$	1.009×10^{-6}	8.15×10^{-7}
x_2	0.761	0.859

10-2 简单蒸汽动力装置循环，蒸汽初温 $t_1 = 500 ^\circ\text{C}$ ，终压 $p_2 = 0.006 \text{ MPa}$ ，初压 p_1 如下表所示，试求在各种不同的初压下循环的热效率 η_t ，耗汽率 d 、及蒸汽终干度 x_2 ，并将所求得的数值真入下表内，以比较所求得的结果。

提示和答案：

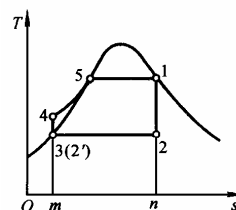
p_1 / MPa	3.0	15.0
η_t	0.3716	0.4287
$d / \text{kg/J}$	8.15×10^{-7}	6.05×10^{-7}
x_2	0.859	0.746

10-3 某蒸汽动力装置朗肯循环的最高运行压力是 5 MPa ，最低压力是 15 kPa ，若蒸汽轮机的排汽干度不能低于 0.95 ，输出功率不小于 7.5 MW ，忽略水泵功，试确定锅炉输出蒸汽必须的温度和质量流量。

提示和答案：由最低压力和蒸汽轮机的排汽干度确定蒸汽终态的熵，再据 $s_1 = s_2$ 及初压——循环的最高运行压力确定初态参数。 $t_1 = 756 ^\circ\text{C}$ 、 $q_m = 4.831 \text{ kg/s}$ 。

10-4 利用地热水作为热源，R134a 作为工质的朗肯循环（ $T-s$ 图如附图），在 R134a 离开锅炉时状态为 85°C 的干饱和蒸汽，在气轮机内膨胀后进入冷凝器时的温度是 40°C ，计算循环热效率。

提示和答案：R134a 作为工质的朗肯循环与以水蒸气为工质朗肯循环的热力学分析是一致的。注意比较本题中泵耗功与汽轮机输出功。



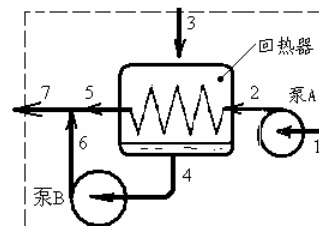
题 10-4 附图

$$\eta_t = 10.0\%$$

10-5 某项 R134a 为工质的朗肯循环利用当地海水为热源。已知 R134a 的流量为 1 000 kg/s, 当地表层海水的温度 25 °C, 深层海水的温度为 5 °C。若加热和冷却过程中海水和工质的温差为 5 °C, 试计算循环的功率和热效率。

提示和答案: 循环为内可逆的朗肯循环, 循环 $T-s$ 图同上题工质 (R134a) 的最高温度和最低温度分别是 20 °C 和 10 °C。 $\eta_t = 3.3\%$, $P = 6\,474\text{ kW}$ 。

10-6 某抽汽回热循环采用间壁式回热器, 见附图。该循环最高压力 5 MPa, 锅炉输出蒸汽温度为 650 °C, 抽汽压力 1 MPa, 冷凝器工作温度 45 °C, 送入锅炉的给水温度为 200 °C。求: 循环抽汽量和水泵 A、B 的耗功。



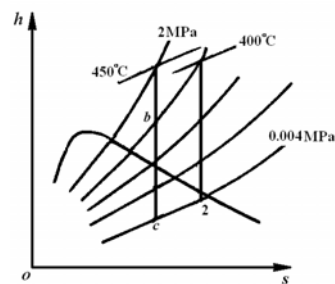
题 10-6 附图

提示和答案: 取图示虚线为控制体积, 列能量方程, 解得

$$w_{P1} = v_1(p_2 - p_1) = 4.99\text{ kJ/kg}, \quad w_{P2} = v_4(p_7 - p_4) = 4.4\text{ kJ/kg}$$

$$\alpha = \frac{h_7 - h_1 - w_{P1} - w_{P2}}{h_3 - h_1} = 0.217$$

10-7 设有两个蒸汽再热动力装置循环, 蒸汽的初参数都为 $p_1 = 12.0\text{ MPa}$, $t_1 = 450\text{ °C}$, 终压都为 $p_2 = 0.004\text{ MPa}$, 第一个再热循环再热时压力为 2.4 MPa, 另一个再热时的压力为 0.5 MPa, 两个循环再热后蒸汽的温度都为 400 °C。试确定这两个再热循环的热效率和终湿度, 将所得的热效率、终湿度和朗肯循环作比较, 以说明再热时压力的选择对循环热效率和终湿度的影响。



题 10-7 附图

注: 湿度是指 1 kg 湿蒸汽中所含和水的质量, 即 $(1-x)$ 。

提示和答案: 注意再热循环的加热量及功的计算。

	$\eta_t / \%$	y_2
无再热 (朗肯循环)	42.55	0.27
再热压力 2.4 MPa	43.25	0.18
再热压力 0.5 MPa	40.02	0.084

再热压力高, 可提高循环效率, 但提高干度的作用不显著, 再热压较低, 提高干度作用较大, 但可能引起循环热效率下降。

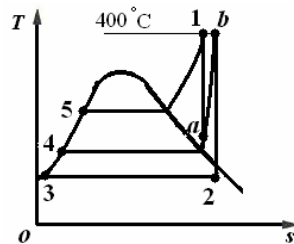
10-8 具有两次抽汽加热给水的蒸汽动力装置回热循环。其装置示意图如教材图 10-16

所示。已知：第一次抽气压力 $p_{0_1} = 0.3 \text{ MPa}$ ，第二次抽汽压力 $p_{0_2} = 0.12 \text{ MPa}$ ，蒸汽初温 $t_1 = 450^\circ\text{C}$ ，压 $p_1 = 3.0 \text{ MPa}$ 。冷凝器中压力 $p_2 = 0.005 \text{ MPa}$ 。试求：(1) 抽汽量 α_1 、 α_2 ；(2) 循环热率 η_t ；(3) 耗汽率 d ；(4) 平均吸热温度；(5) 与朗肯循环的热效率 η_t 、耗汽率 d 和平均吸热温度作比较、并说明耗汽率为什么反而增大？

提示和答案：分析两个回热器与外界的质能交换情况，列能量平衡方程式；注意平均温度为积分平均。 $\alpha_1 = 0.0525 \text{ kg}$ 、 $\alpha_2 = 0.1159 \text{ kg}$ 、 $\eta_t = 39.6\%$ 、 $d = 9.08 \times 10^{-7} \text{ kg/J}$ 、 $\bar{T}_1 = 514.3 \text{ K}$ ；与朗肯循环比较， $\eta'_t = 37.0\%$ 、 $d' = 8.44 \times 10^{-7} \text{ J/kg}$ 、 $\bar{T}'_1 = 485.4 \text{ K}$ 。

采用抽汽回热后，热效率较简单朗肯循环有所提高，而耗汽率有所增大，这是因为抽汽使每千克新蒸汽作出的功减小，故 d 增大，但由于回热，吸热量减少，平均吸热温度升高，放热温度不变，故 η_t 提高。

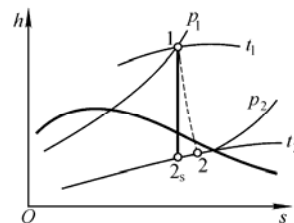
10-9 某蒸汽循环进入汽轮机的蒸汽温度 400°C 、压力 3 MPa ，绝热膨胀到 0.8 MPa 后，抽出部分蒸汽进入回热器，其余蒸汽在再热器中加热到 400°C 后进入低压汽轮机继续膨胀到 10 kPa 排向冷凝器，忽略水泵功，求循环热效率。



题 10-9 附图

提示和答案：本题循环与单纯回热循环差异在于抽出部分蒸汽后的蒸汽进行了再热。 $\eta_t = 0.369$ 。

10-10 某发电厂采用的蒸汽动力装置，蒸汽以 $p_1 = 9.0 \text{ MPa}$ ， $t_1 = 480^\circ\text{C}$ 的初态进入汽轮机。汽轮机的 $\eta_T = 0.88$ 。冷凝器的压力与冷却水的温度有关。设夏天冷凝器温度保持 35°C 。假定按朗肯循环工作。求汽轮机理想耗汽率 d_0 与实际耗汽率 d_1 。若冬天冷却水水温降低。使冷凝器的温度保持 15°C ，试比较冬、夏两季因冷凝器温度不同所导致的以下各项的差别：(1) 汽轮机做功；(2) 加热量；(3) 热效率（略去水泵功）。



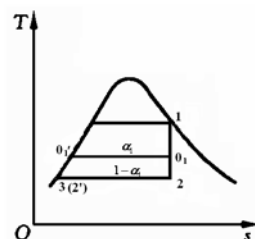
题 10-10 附图

提示和答案：冷凝器温度不同，意味背压改变。列表比较

	$w_t / (\text{kJ/kg})$	$q_1 / (\text{kJ/kg})$	$\eta_t / \%$
夏天	1161.1	3189.4	36.4
冬天	1273.36	3281.05	38.8

10-11 某压水堆二回路循环采用一次抽汽加热给水，循环抽象简化为附图所示，若新蒸汽的 $p = 6.69 \text{ MPa}$ 、 $t = 282.2^\circ\text{C}$ ，抽气压力 $p_{01} = 0.782 \text{ MPa}$ ，凝汽器维持 0.009 MPa ，忽略水泵功，试求：（1）抽汽量 α ；（2）循环热率；（3）耗汽率 d 。（4）与朗肯循环的热效率 η_t 、耗汽率 d 作比较，并说明耗汽率为什么反而增大？

提示和答案：压水堆二回路循环新蒸汽通常为饱和蒸汽，循环热力学分析与新蒸汽为过热蒸汽循环相同。 $\alpha = 0.248$ 、 $\eta_t = 39.8\%$ 、 $d = 1.22 \times 10^{-6} \text{ kg/J}$ ；与朗肯循环比较， $\eta'_t = 36.9\%$ 、 $d' = 1.04 \times 10^{-6} \text{ J/kg}$ 。



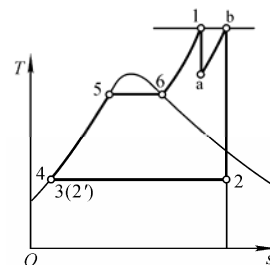
题 10-11 附图

采用抽汽回热后，热效率提高，耗汽率增大，理由也与通常抽汽回热循环（题 10-11）相同。

10-12 某朗肯循环，蒸汽初压 $p_1 = 6 \text{ MPa}$ ，初温 $t_1 = 600^\circ\text{C}$ ，冷凝器内维持压力 10 kPa ，蒸汽质流量是 80 kg/s ，假定锅炉内传热过程是在 1400 K 的热源和水之间进行；冷凝器内冷却水平均温度为 25°C 。试求：（1）水泵功；（2）锅炉烟气对水的加热率；（3）汽轮机做功；（4）冷凝器内乏汽的放热率；（5）循环热效率；（6）各过程及循环不可逆作功能力损失。已知 $T_0 = 290.15 \text{ K}$ 。

提示和答案：因膨胀及压缩均按等熵过程计算，故不可逆损失表现在烟气向水放热及乏汽向冷却水放热的过程中， $\dot{I} = q_m T_0 \Delta s_{\text{iso}} = q_m T_0 s_g$ 。 $P_p = 484.1 \text{ kW}$ 、 $q_{Q_1} = 2.767 \times 10^5 \text{ kW}$ 、 $P_T = 1.105 \times 10^5 \text{ kW}$ 、 $q_{Q_2} = 1.667 \times 10^5 \text{ kW}$ 、 $\eta_t = 39.75\%$ 、 $\dot{I}_B = 9.38 \times 10^4 \text{ kW}$ 、 $\dot{I}_C = 1.11 \times 10^4 \text{ kW}$ 、 $\dot{I} = 10.49 \times 10^4 \text{ kW}$ 。

10-13 题 10-12 循环改成再热循环，从高压汽轮机排出的蒸汽压力为 0.5 MPa ，加热到 500°C 后再进入低压汽轮机，若所有其它条件均不变，假定循环总加热量也不变（即上题中锅炉内加热量）。试求：（1）在低压汽轮机末端蒸汽的干度；（2）锅炉及再热器内单位质量的加热量；（3）高压汽轮机和低压汽轮机产生的总功率；（4）循环热效率；（5）各过程和循环不可逆作功能力损失。



题 10-13 附图

提示和答案：再热后 1 kg 蒸汽吸热量增加，因总加热量未变，所以蒸汽流量减少。

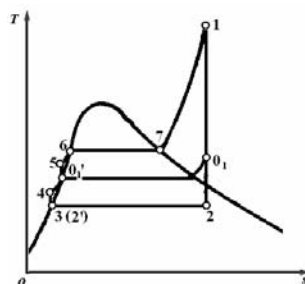
$x_2 = 0.991$ 、 $q_{Q_B} = 2.371 \times 10^5 \text{ kW}$ 、 $q_{Q_R} = 0.397 \times 10^5 \text{ kW}$ 、

$$P_T = P_{T,H} + P_{T,L} = 1.147 \times 10^5 \text{ kW} \quad , \quad \eta_t = 41.28 \% \quad , \quad I'_B = 8.92 \times 10^4 \text{ kW} \quad ,$$

$$\dot{I}'_C = 1.03 \times 10^4 \text{ kW} \quad , \quad \dot{I}' = 9.95 \times 10^5 \text{ kW} \quad .$$

10-14 题 10-12 循环改成一级抽汽回热循环，抽汽压力为 0.5 MPa ，若其它条件均不变，假定锅炉总加热量不变，试求：（1）锅炉内水的质量流量；（2）两台水泵总耗功；（3）汽轮机作功；（4）冷凝器内放热量；（5）循环热效率；（6）各过程及循环不可逆做功能力损失。

提示和答案：同样是总加热量未变，但抽汽回热后 1 kg 蒸汽吸热量减少，所以蒸汽流量增加。 $q_m = 91.9 \text{ kg/s}$ 、



$$P_p = 590.7 \text{ kW} \quad , \quad P_T = 1.174 \times 10^5 \text{ kW} \quad , \quad q_{Qc} = 1.595 \times 10^5 \text{ kW} \quad , \quad \text{题 10-14 附图}$$

$$\eta_t = 42.2 \% \quad , \quad \dot{I}_B = 8.62 \times 10^4 \text{ kW} \quad , \quad \dot{I}_R = 0.767 \times 10^4 \text{ kW} \quad , \quad \dot{I}_C = 1.066 \times 10^4 \text{ kW} \quad ,$$

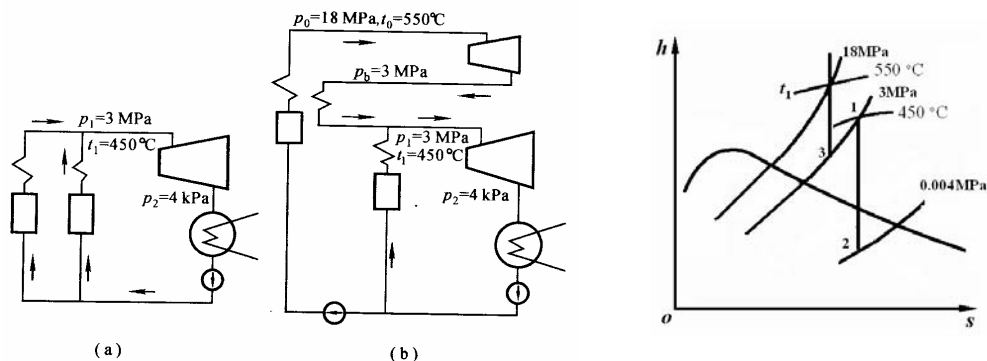
$$\dot{I} = 10.05 \times 10^4 \text{ kW} \quad .$$

10-15 某热电厂（或称热电站）以背压式汽轮机的乏汽供热，其新汽参数为 3 MPa 、 400°C 。背压为 0.12 MPa 。乏汽被送入用热系统，作加热蒸汽用。放出热量后凝结为同一压力的饱和水，再经水泵返回锅炉。设用热系统中热量消费为 $1.06 \times 10^7 \text{ kJ/h}$ ，问理论上此背压式汽轮机的电功率输出为多少（kW）？

提示和答案：通过系统消费热量的数量确定水蒸气的流量， $P = 970 \text{ kW}$ 。

10-16 某台蒸汽轮机由两台中压锅炉供给新蒸汽，这两台锅炉每小时的蒸汽生产量相同，新蒸汽参数 $p_1 = 3.0 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 450^\circ\text{C}$ ，设备示意图如附图 a 所示。后来因所需要的动力增大，同时为了提高动力设备的热效率，将原设备加以改装。将其中一台中压锅炉拆走，同时原址安装一台同容量（即每小时蒸汽生产量相同）的高压锅炉。并在汽轮机间增设了一台背压式的高压汽轮机（前置汽轮机）。高压锅炉所生产的蒸汽参数为 $p_0 = 18.0 \text{ MPa}$ 、 $t_0 = 550^\circ\text{C}$ 。高压锅炉的新蒸汽进入高压汽轮机工作。高压汽轮机的排汽背压 $p_b = 3.0 \text{ MPa}$ ，这排汽进入炉内再热。再热后蒸汽参数与另一台中压锅炉的新蒸汽参数相同，即 $p_1 = 3.0 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 450^\circ\text{C}$ ，这蒸汽与另一台中压锅炉的新蒸汽会合进入原来的中压汽轮机工作，改装后设备示意图如附图 b 所示。求改装前动力装置的理想热效率。以及改

装后动力装置理想效率，改装后理想热效率比改装前增大百分之几？



题 10-16 附图

提示和答案：改装前：由 $h-s$ 图查得 $h_1 = 3345 \text{ kJ/kg}$ ， $h_2 = 2131 \text{ kJ/kg}$ ；由表中查出 $h_{2'} = 121.30 \text{ kJ/kg}$ 。 $\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2'}} = 37.7\%$ 。改装后：一台中压锅炉，参数同上，另一台高压锅炉，生产蒸汽量同中压锅炉，按新蒸汽参数由 $h-s$ 图上查得： $h_0 = 3418 \text{ kJ/kg}$ 、 $h_3 = 2928 \text{ kJ/kg}$ 。

若以再热循环和中压锅炉朗肯循环各 1 kg 蒸汽考虑，全装置所作的功=再热循环功+朗肯循环功， $W_{\text{net}} = m_1(h_0 - h_3) + (m_1 + m_2)(h_1 - h_2) = 2918 \text{ kJ}$ 。全装置所吸热量=再热循环吸热量 + 朗肯循环吸热量 $q_1 = (h_0 - h_{2'}) + (h_1 - h_3) + (h_1 - h_{2'}) = 6937.4 \text{ kJ/kg}$ 。

$\eta_t = \frac{W_{\text{net}}}{Q_1} = 42.1\%$ ，理想效率由 37.1% 增大到 42.1% ，改装后功率增大百分比 20.2% 。

第十一章 制冷循环

习 题

11-1 一制冷机在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热源间工作，若其吸热为 10 kW ，循环制冷系数是同温限间逆向卡诺循环的 75% ，试计算：（1）散热量；（2）循环净耗功量；（3）循环制冷量折合多少“冷吨”？

提示和答案： $\varepsilon_{\text{act}} = \frac{q_{Q_c}}{q_Q - q_{Q_c}}$ ， $q_Q = 12.63\text{ kW}$ ； $P_{\text{net}} = 2.63\text{ kW}$ ； **2.59 冷吨**。

11-2 一逆向卡诺制冷循环，其性能系数为 4 ，（1）问高温热源与低温热源温度之比是多少？（2）若输入功率为 1.5 kW 。试问制冷量为多少“冷吨”？（3）如果将此系统改作热泵循环，高、低温热源温度及输入功率维持不变。试求循环的性能系数及能提供的热量。

提示和答案： $\varepsilon_c = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$ ， $\frac{T_H}{T_L} = 1.25$ ； **0.486 冷吨**； $\varepsilon'_c = 5$ ， $q'_Q = 6\text{ kW}$ 。

11-3 压缩空气制冷循环运行温度 $T_c = 290\text{ K}$ ， $T_0 = 300\text{ K}$ ，如果循环增压比分别为 3 和 6 ，分别计算它们的循环性能系数和每千克工质的制冷量。假定空气为理想气体，比热容取定值 $c_p = 1.005\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $\kappa = 1.4$ 。

提示和答案： $\varepsilon = \frac{1}{\pi_1^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}$ 。 $\varepsilon_a = 2.712$ 、 $\varepsilon_b = 1.496$ ； $q_{c,a} = 71.2\text{ kJ/kg}$ 、

$q_{c,b} = 110.7\text{ kJ/kg}$ 。

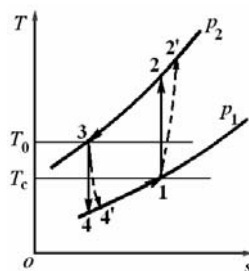
11-4 若题 11-3 中压气机绝热效率 $\eta_{c,s} = 0.82$ ，膨胀机相对内效率 $\eta_T = 0.85$ ，分别计算 1 kg 工质的制冷量，循环净功及循环性能系数。

提示和答案： $T'_4 = T_3 - \eta_T(T_3 - T_4)$ 、 $T_{2'} = T_1 + (T_2 - T_1)/\eta_{c,s}$ 。

$q_{c,a} = 54.93\text{ kJ/kg}$ 、 $q_{c,b} = 86.58\text{ kJ/kg}$ 、 $w_{\text{net},a} = -66.1\text{ kJ/kg}$ 、

$w_{\text{net},b} = -141.0\text{ kJ/kg}$ 、 $\varepsilon_a = 0.831$ 、 $\varepsilon_b = 0.614$ 。考虑能否利用

$$\varepsilon = \frac{1}{\pi_1^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1} ?$$

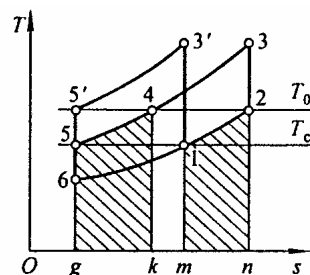


题 11-4 附图

11-5 若例 11-1 中压气机的绝热效率 $\eta_{cs} = 0.90$ 、膨胀机的相对内效率 $\eta_T = 0.92$ ，其他条件不变，再求无回热时的制冷系数 ε 、每千克空气的制冷量 q_c 及压缩过程的作功能力损失。

提示和答案： $I = T_0 s_g$ 。 $q_c = 59.79 \text{ kJ/kg}$ 、 $\varepsilon = 0.916$ 、 $I = 11.83 \text{ kJ/kg}$ 。考虑 I 是否等于 $w'_c - w_{cs}$ 。

11-6 某采用理想回热的压缩气体制冷装置，工质为某种理想气体，循环增压比为 $\pi = 5$ ，冷库温度 $T_c = -40^\circ\text{C}$ ，环境温度为 300 K ，若输入功率为 3 kW ，试计算：（1）循环制冷量；（2）循环制冷系数；（3）若循环制冷系数及制冷量不变，但不用回热措施。此时，循环的增压比应该是多少？该气体热可取定值， $c_p = 0.85 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $\kappa = 1.3$ 。



题 11-6 附图

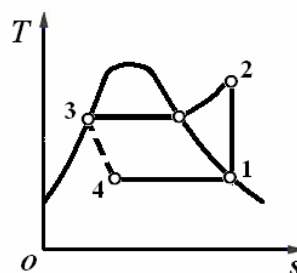
提示和答案： $\varepsilon_{1234561} = \varepsilon_{13'5'6} = 1.156$ 、 $q_{Qc} = 3.47 \text{ kW}$ 、 $\pi' = 14.9$ 。

11-7 某压缩气体制冷循环中空气进入压气机时 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ ， $t_1 = t_c = -23.15^\circ\text{C}$ ，在压气机内定熵压缩到 $p_2 = 0.4 \text{ MPa}$ ，然后进入冷却器。离开冷却器时空气温度 $t_3 = t_0 = 26.85^\circ\text{C}$ 。取空气比热容是温度的函数，试求制冷系数 ε 及每千克空气的制冷量 q_c 。

提示和答案： 据 $\frac{p_{r2}}{p_{r1}} = \frac{p_2}{p_1}$ 查空气热力性质表确定 T_2 和 h_2 及 T_4 和 h_4 。 $\varepsilon = 2.07$ 、

$q_c = h_1 - h_4 = 48.46 \text{ kJ/kg}$ 。

11-8 氟里昂 134a 是对环境较安全的制冷剂，用来替代对大气臭氧层有较大破坏作用的氟里昂 12。今有以氟里昂 134a 为工质的制冷循环，其冷凝温度为 40°C ，蒸发器温度为 -20°C ，求：（1）蒸发器和冷凝器的压力；（2）循环的制冷系数。

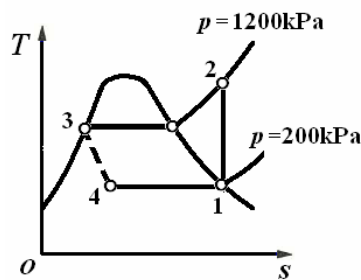


题 11-8 附图

提示和答案： 若非特别说明制冷剂离开蒸发器进入压缩机时的状态可近似为温度为蒸发器内温度的干饱和蒸气，离开冷凝器时的状态为冷凝器内温度的饱和液；节流过程焓值不变。

$p_1 = 133.8 \text{ kPa}$ 、 $p_2 = p_3 = 1016.32 \text{ kPa}$ ； $\varepsilon = 3.06$ 。

11-9 一台汽车空调器使用氟里昂 134a 为制冷工质，向空调器的压缩机输入功率 2 kW，把工质自 200 kPa 压缩到 1200 kPa，车外的空气流过空调器的蒸发器盘管从 33 °C 的降温到 15 °C 吹进车厢，假定制冷循环为理想循环，求制冷系统内氟里昂 134a 的流量和吹进车厢时的空气体积流量。车厢内压力为 100 kPa。

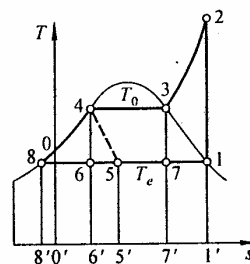


题 11-9 附图

提示和答案： 同题 11-8，且 $s_2 = s_1$ 。循环制冷量等于空气放热量。注意制冷剂流量和循环制冷量关系和空气体积

流量应折合到车厢内状态。 $q_m = 0.054 \text{ kg/s}$ 、 $q_v = 0.211 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

11-10 某压缩蒸汽制冷装置采用氨 (NH_3) 为制冷剂，参看图 11-5 和图 11-6，从蒸发器中出来的氨气的状态是 $t_1 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $x_1 = 0.95$ 。进入压机升温升压后进入冷凝器。在冷凝器中冷凝成饱和氨液，温度为 $t_4 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。从点 4 经节流阀，降温降压成干度较小的湿蒸气状态，再进入蒸发器气化吸热。(1) 求蒸发器管子中氨的压力 p_1 及冷凝器管子中的氨的压力 p_2 ；(2) 求 q_c 、 w_{net} 和制冷系数 ε ，并在 $T-s$ 图上表示 q_c ；(3) 设该装置的制冷量 $q_Q = 4.2 \times 10^4 \text{ kJ/h}$ ，求氨的流量 q_m ；(4) 求该装置的效率。

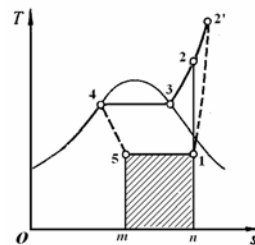


题 11-10 附图

提示和答案： 参照题 11-8、11-9，但本题 $x_1 = 0.95$ ；装置效率可定义为冷量与循环净功的比值。 $p_1 = 0.236 \text{ MPa}$ 、 $p_2 = 1.003 \text{ MPa}$ 、 q_c 可用 $T-s$ 图上面积，155'1'1 表示、 $q_c = 1060.7 \text{ kJ/kg}$ 、 $w_{\text{net}} = 184.0 \text{ kJ/kg}$ 、 $\varepsilon = 5.77$ 、 $q_m = 0.11 \text{ kg/s}$ 、 $\eta_{e_x} = 0.893$ 。

11-11 上题中若氨压缩机的绝热效率 $\eta_{C,s} = 0.80$ ，其它参数同上题，求循环的 w'_{net} 、 ε 及效率 η_{e_x} 。

提示和答案： 本题与题 1-10 差异仅在于 $w'_{\text{net}} = \frac{w_{\text{net}}}{\eta_{C,s}}$ 。



题 11-11 附图

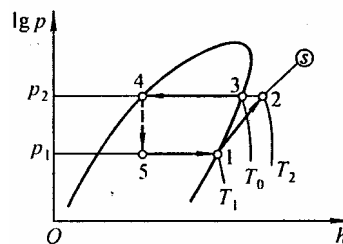
$w'_{\text{net}} = 230 \text{ kJ/kg}$ 、 $\varepsilon = 4.61$ 、 $\eta_{e_x} = 0.715$ 。

11-12 若 11-10 题中制冷剂改为氟里昂 134a (HCFC134a)，求 (1) 蒸发压力 p_1 和冷凝压力 p_2 ；(2) q_c 、 w_{net} 和 ε ；(3) HCFC134a 的流量；(4) 装置效率 η_{e_x} 。

提示和答案：参照题 11-10。 $p_1 = 164.36 \text{ kPa}$ 、

$p_2 = 665.49 \text{ kPa}$ 、 $q_c = 150 \text{ kJ/kg}$ 、 $w_{\text{net}} = 26 \text{ kJ/kg}$ 、

$\varepsilon = 5.77$ 、 $q_m = 0.778 \text{ kg/s}$ 、 $\eta_{e_x} = 0.894$ 。



题 11-12 附图

11-13 某热泵装置用氨为工质，设蒸发器中氨的温度

为 -10°C ，进入压缩机时氨蒸气的干度为 $x_1 = 0.95$ ，冷凝器

中饱和氨的温度为 35°C 。求：(1) 工质在蒸发器中吸收的热量 q_2 ，在冷凝器中的散向室内空

气的热量 q_1 和循环供暖系数 ε' ；(2) 设该装置每小时向室内空气供热量 $Q_1 = 8 \times 10^4 \text{ kJ}$ ，求用

以带动该热泵的最小功率是多少？若改用电炉供热，则电炉功率应是多少？两者比较，可得出什么样的结论？

提示和答案：逆向可逆循环运行的热泵消耗功率最小。 $q_2 = 1019.2 \text{ kJ/kg}$ 、

$q_1 = 1203.7 \text{ kJ/kg}$ 、 $\varepsilon' = 6.52$ 、 $P = 3.41 \text{ kW}$ 、 $P_E = 22.2 \text{ kW}$ 、热泵供暖是一种节能措施。

11-14 某热泵型空调器用氟里昂 134a 为工质，设蒸发器中氟里昂 134a 的温度为 -10°C ，

进压机时蒸气干度 $x_1 = 0.98$ ，冷凝器中饱和液温度为 35°C 。求热泵耗功和循环供暖系数。

提示和答案： $w_p = 32 \text{ kJ/kg}$ 、 $\varepsilon' = 5.31$ 。

11-15 有一台空调系统，采用蒸汽喷射压缩制冷机，制取 $p_3 = 1 \text{ kPa}$ 的饱和水

($t_s = 6.949^\circ\text{C}$)，来降低室温，如教材图 11-13。在

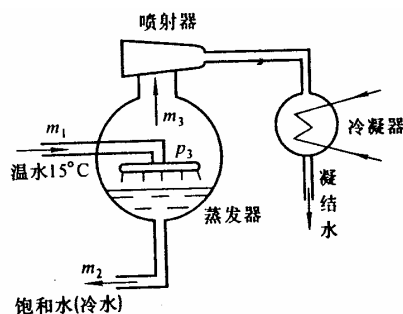
室内吸热升温到 15°C 的水被送入蒸发器内，部分汽化，

其余变为 1 kPa 的饱和水，蒸发器内产生的蒸汽干度为

0.95，被喷射器内流过的蒸汽抽送到冷凝器中，在 30°C

下凝结成水，若制冷量为 32000 kJ/h ，试求所需冷水

流量及蒸发器中被抽走蒸汽的量。



蒸汽喷射压缩制冷示意图

提示和答案：取蒸发器为控制容积，列出质量守恒及能量守恒方程，求得

$q_{m_3} = 0.00372 \text{ kg/s}$ ， $q_{m_2} = 0.258 \text{ kg/s}$ 。

11-16 某冷库制冷机组利用氨 (NH_3) 为制冷工质，由一台小型天然气动力的燃气轮机

机组为制冷机组提供动力。制冷机组的冷凝温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，蒸发温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。燃气轮机装置的热效率是 30% 。试求：（1）制冷循环中每千克制冷剂的吸热量、放热量及制冷系数；（2）整个系统的能量利用率。

提示和答案：装置运行的目的是制冷剂从冷库吸热，代价为燃气轮机装置燃烧室内燃料燃烧放出的热量，故能量利用率可定义为制冷系统 1 kg 制冷剂从冷库吸热量和燃气轮机装置中工质吸热量之比。 $q_c = 1\,047.1\text{ kJ/kg}$ 、 $q_0 = 1\,366.8\text{ kJ/kg}$ 、 $\varepsilon = 3.28$ 、 $\zeta = 0.984$ 。

11-17 在氨-水吸收式制冷装置中，利用压力为 0.3 MPa ，干度为 0.88 的湿饱和蒸汽的冷凝热，作为蒸汽发生器的外热源，如果保持冷藏库的温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而周围环境温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，试计算：（1）吸收式制冷装置的 COP_{\max} ；（2）如果实际的热量利用系数为 0.4COP_{\max} ，而要达到制冷能力为 $2.8 \times 10^5\text{ kJ/h}$ ，求需提供湿饱和蒸汽的质量流率 q_m 多少。

提示和答案：根据压力从饱和水蒸气表中查得饱和温度 $t_s \approx 133.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，求得汽化潜热 $\gamma = h'' - h' = 2\,163.7\text{ kJ/kg}$ 、 $T_H = T_s = 133.5\text{ }^{\circ}\text{C} = 406.7\text{ K}$ 。1 kg 湿蒸汽的冷凝热为：

$q_x = x\gamma = 1\,904.1\text{ kJ/kg}$ 。故冷藏库 $\text{COP}_{\max} = \frac{T_H - T_0}{T_0 - T_L} \left(\frac{T_L}{T_H} \right) = 1.68$ 。吸收式制冷装置的实际热

量利用系数 COP 为： $\text{COP} = 0.4\text{COP}_{\max} = 0.672$ ，所需的供热能力 Q_H 可表示为：

$Q_H = \frac{Q_L}{\text{COP}} = 115.7\text{ kW}$ ，需要提供的湿饱和蒸汽的质量流率为： $q_m = \frac{Q_H}{q_x} = 0.061\text{ kg/s}$ 。

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°C ，流出时温度为 800°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 N_2 。

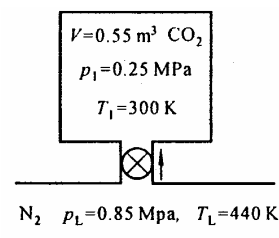
提示和答案： $x_i = \varphi_i$ ，混合气体的热容 $C_{p,m} = \sum x_i C_{p,m,i}$ ， $Q_p = -149.76\text{kJ}$ 。

12-4 流量为 3mol/s 的 CO_2 ，2mol/s 的 N_2 和 4.5mol/s 的 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°C ， 0.7MPa ，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 ΔH 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 CO_2 ， 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 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， $c_{v, \text{N}_2} = 751 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ，

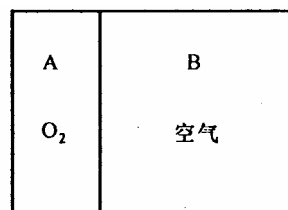
$c_{p, \text{N}_2} = 1048 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ； $c_{v, \text{CO}_2} = 657 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ， $c_{p, \text{CO}_2} = 846 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

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_{O_2} 、 x_{N_2} ；(3) 渗透前后系统熵变 ΔS 。

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O₂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O₂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O₂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 O₂与 31.27 mol N₂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O₂，渗透

到B内的O₂，B中原有的O₂，B中原有的N₂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) φ 和 d ; (2) 在海拔 1500 米处, 大气压力 $p = 0.084\text{MPa}$, 求这时 φ 和 d 。

提示和答案: 从 $h-d$ 图虽可查得总压力 $p = 0.10133\text{MPa}$ 时 φ 和 d , 但不能用同表查取 $p = 0.084\text{MPa}$ 时的 φ 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 1.2kPa 增至 2.4kPa , 求含湿量相对变化率 $\Delta d/d_1$ 。(2) $p = 0.1\text{MPa}$, p_v 由 13.5kPa 增大到 27.0kPa , 求 $\Delta d/d_1$ 。(3) $p_v = 1.2\text{kPa}$, 但 p 由 0.1MPa 变为 0.061MPa , 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 , φ_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 φ_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°C 的饱和湿空气离开。求每秒钟的凝水量 $q_{m,w}$ 及放热量 Φ 。

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°C , 压力为 100 kPa , 测得露点温度为 22°C , 计算其相对湿度及含湿量。

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

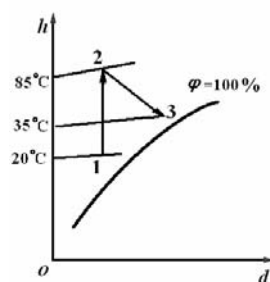
12-16 压力为 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$, 温度为 $t_1 = 30^\circ \text{C}$, 相对湿度 $\varphi_1 = 0.6$ 的湿空气在活塞式压气机内压缩后, 压力升至 $p_2 = 0.2 \text{ MPa}$, (1) 若压缩过程绝热; (2) 若压缩过程等温, 分别求压缩后湿空气的相对湿度 φ_2 , 含湿量 d_2 。

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 1kg 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 kg 干空气吸收水分 $\Delta d = d_3 - d_1$, 每吸收 1kg 水分需要干空气量

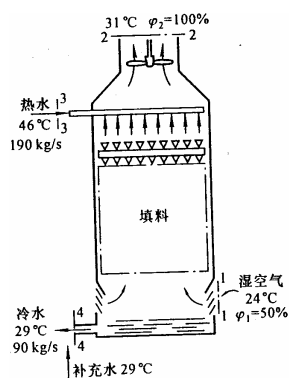


$m_a = 51.3 \text{ kg(干空气)}$, 每 kg 干空气需加热量

$q = 64.9 \text{ kJ/kg(干空气)}$, 每吸收 1kg 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 190kg/s , 温度为 40°C , 设计出口处冷水水温为 29°C , 流率为 190kg/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°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 $\phi_3 = 40\%$ 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 Φ_{1-2} 及加热

器中吸热量 Φ_{2-3} ；(3) 凝水流率 $q_{m,w}$ 。

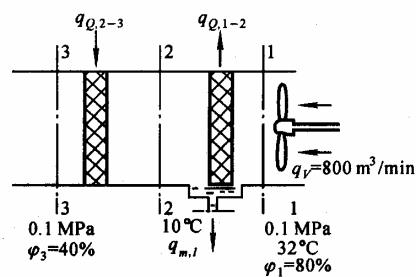


图 12-26 空调系统示意图

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 、 ϕ 、 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 、 ϕ 、 t_d 、 v 。

提示：解题思路和公式

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

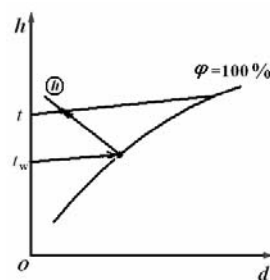
$$\{p_s\}_{\text{kPa}} = \frac{2}{15} \exp \left[18.5916 - 3991.11 / (\{t\}_{^{\circ}\text{C}} + 233.84) \right] \quad d = 0.622 \frac{\phi p_s}{p_b - \phi p_s}$$

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

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

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

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



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 、 φ 、 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 Φ_{1-2} 和

加热量 Φ_{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 、 φ_1 、 $\varphi_2 (=1)$ 、 φ_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 、 φ_1 、 φ_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： Φ_{1-2} 、 Φ_{2-3} 、 $q_{m,w}$ 。

第十三章 化学热力学基础

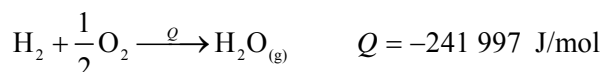
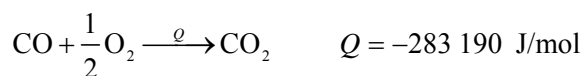
习 题

13-1 已知反应 $\text{C} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CO}$ 在 298 K 的定压热效应为 $-110\,603\text{ J/mol}$ ，求同温度下的定容热效应。

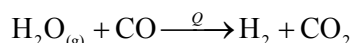
提示和答案： 利用定压热效应与定容热效应与反应前后物质的量变化的关系。

$$Q_V = 111\,841.9\text{ J}。$$

13-2 已知定温（298 K）定压（101 325 Pa）下，

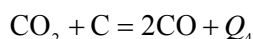


试确定下列反应的热效应

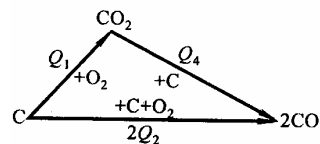


提示和答案： 据赫斯定律 $Q_3 = Q_1 + Q_2 = -41\,193\text{ J/mol}$ 。

13-3 在煤气发生炉的还原反应层中二氧化碳的还原反应为：



据 $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + Q_1 \quad Q_1 = -393\,791\text{ J/mol}$



题 13-3 附图

参见图 13-8 利用赫斯定律，求反应热效应。

提示和答案： $Q_4 = 172\,589\text{ J/mol}$ 。

13-4 在 298K、1atm 下反应 $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CO}_2$ 的定压热效应为 $Q_p = -283\,190\text{ J/mol}$ ，试求在 2 000 K 和 1atm 下，这一反应的定压热效应。

提示和答案： 应用基尔希霍夫定律

$$Q_T = \Delta H^0 + \left[\sum n_k (H_{m,k} - H_{m,k}^0) \right]_{pr} - \left[\sum n_k (H_{m,k} - H_{m,k}^0) \right]_{re}$$

其中 $\Delta H^0 = \Delta H_{f,\text{CO}_2}^0 - \Delta H_{f,\text{CO}}^0 - \frac{1}{2}\Delta H_{f,\text{O}_2}^0$ ，查表得相关数据算得 $Q_T = -277\,908.0\text{ J}$ 。

13-5 利用下述方法计算水蒸气在 3.5MPa，300℃时的焓（相对于 0.1MPa，25℃）。

（1）假定水蒸气为理想气体，其比定压热容为

$$c_{p,0} = 1.79 + 0.107\theta + 0.586\theta^2 - 0.20\theta^3, \text{ 其中 } \theta = \bar{T}/1000$$

(2) 假定水蒸气为理想气体, 利用气体热力性质表;

(3) 利用通用余焓图。

提示和答案: 工质在状态 (p, T) 的焓是标准生成焓和从标准状态到指定状态的焓差之和, 即 $H_m = \Delta H_f^0 + (H_{p,T} - H^0)$, 因此上述各种途径的差异仅在于 $(H_{p,T} - H^0)$ 的不同。查标准生成焓表, 水的 $\Delta H_{f(g)}^0 = -241\,826 \text{ J/mol}$ 。(1) $H_{p,T} - H^0 = 9\,571 \text{ J/mol}$, $H_m = -232\,255 \text{ J/mol}$; (2) $H_m = \Delta H_f^0 + (H_{p,T} - H^0) = -232\,284 \text{ J/mol}$; (3) 据余焓概念

$$H_m = \Delta H_f^0 + (H_{p,T} - H^0) = \Delta H_f^0 + RT_{cr} \left[\frac{(H_m^* - H_m)_1}{RT_{cr}} - \frac{(H_m^* - H_m)_2}{RT_{cr}} \right] + (H_{m,2}^* - H_{m,1}^*)$$

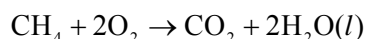
因 0.1 MPa , 25°C 即为标准状态, 所以 $(H_m^* - H_m)_1 = 0$, $H_{m,2}^* - H_{m,1}^*$ 即上述(2)的 $H_{p,T} - H^0$:

$$H_{m,2}^* - H_{m,1}^* = 19\,445.8 \text{ J/mol} - 9\,904.0 \text{ J/mol} = 9\,541.8 \text{ J/mol}$$

利用通用余焓图查得 $(H_m^* - H_m)_2 / RT_{cr} = 0.24$, 所以, $(H_m^* - H_m)_2 = 1\,291.7 \text{ J/mol}$,

$$H_m = \Delta H_f^0 + (H_{m,2}^* - H_{m,1}^*) - \frac{(H_m^* - H_m)_2}{RT_{cr}} = -233\,576 \text{ J/mol}。$$

13-6 甲烷稳态稳流在燃烧室内燃烧, 反应式如下



若反应物和产物均为 0.1 MPa 、 25°C , 确定进入燃烧室的甲烷在燃烧过程中的放热量。

提示和答案: 取燃烧室为控制体积, 反应在标准状态下进行

$$Q_p^0 = \Delta H^0 = \Delta H_{f,\text{CO}_2}^0 + 2\Delta H_{f,\text{H}_2\text{O}(l)}^0 - (\Delta H_{f,\text{CH}_4}^0 + 2\Delta H_{f,\text{O}_2}^0)$$

氧的标准生成焓为零, 查得有关物质的标准生成焓代入上式, 得 $Q_p^0 = -890\,309 \text{ J/mol}$ 。

13-7 1 mol 气态乙烯和 3 mol 氧的混合物在 25°C 下刚性容器内反应, 试确定产物冷却到 600 K 时系统放热量。

提示和答案: 乙烯和氧的化学反应式为 $\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}(g)$, 由于容器刚性,

$W = 0$, 据热力学第一定律 $Q = U_{pr} - U_{re}$ 。查得相关参数, 并考虑到反应温度为标准状态的温度 (25°C) 及氧的标准生成焓为零, 故

$$U_{pr} = \left[n(\Delta H_f^0 + \Delta H_m - RT) \right]_{\text{H}_2\text{O}} + \left[n(\Delta H_f^0 + \Delta H_m - RT) \right]_{\text{CO}_2} = -1\,243\,835 \text{ J}$$

$$U_{\text{Re}} = \left[n(\Delta H_f^0 + \Delta H_m - RT) \right]_{\text{C}_2\text{H}_4} + \left[n(\Delta H_f^0 + \Delta H_m - RT) \right]_{\text{O}_2} = 42\,551 \text{ J}$$

$$Q = U_{\text{Re}} + U_{\text{Pr}} = 1\,286\,386 \text{ J}。$$

13-8 计算气态丙烷 500K 时的燃烧焓。燃烧过程中形成的水为气态，298K 到 500K 间丙烷的平均比定压热容为 2.1 kJ/(kg·K)。

提示和答案：燃烧方程 $\text{C}_3\text{H}_{8(\text{g})} + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{C}} = & n_{\text{CO}_2} \left[\Delta H_f^0 + (H_{\text{m},500} - H_{\text{m}}^0) \right]_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} \left[\Delta H_f^0 + (H_{\text{m},500} - H_{\text{m}}^0) \right]_{\text{H}_2\text{O}} \\ & - n_{\text{C}_3\text{H}_8} \left[\Delta H_f^0 + (H_{\text{m},500} - H_{\text{m}}^0) \right]_{\text{C}_3\text{H}_8} - n_{\text{O}_2} (H_{\text{m},500} - H_{\text{m}}^0)_{\text{O}_2} \end{aligned}$$

查得 25℃ 时的生成焓及各物质从 298 K 到 500 K 的焓差 $\Delta H_{\text{C}} = -2\,041\,387 \text{ J/mol}$ 。注意，水为气态。

13-9 试确定初温为 400 K 的甲烷气，过量空气系数为 2.5，在 1atm 下定压完全燃烧时的绝热理论燃烧温度。

提示和答案：过量空气系数为 2.50 时，甲烷的燃烧反应方程式

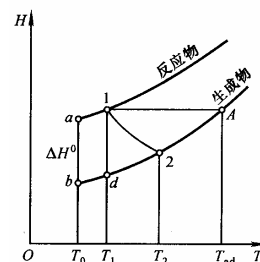


据式 (13-11) $-\Delta H^0 = (H_{\text{ad}} - H_{\text{b}}) - (H_1 - H_{\text{a}})$

查附表，可得甲烷的燃烧焓及各生成物在 298.15K 和 400K 时的焓，

故 ΔH^0 、 H_{b} 、 $H_1 - H_{\text{a}}$ 均可求得，进而得

$$H_{\text{ad}} = (H_1 - H_{\text{a}}) + H_{\text{b}} - \Delta H^0 = 1\,095\,366.1 \text{ J}$$



题 13-9 附图

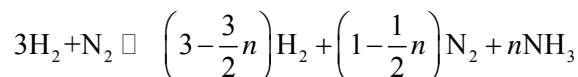
由于 $H_{\text{ad}} = n_{\text{CO}_2} H_{\text{m},\text{CO}_2,T_{\text{ad}}} + n_{\text{H}_2\text{O}} H_{\text{m},\text{H}_2\text{O},T_{\text{ad}}} + n_{\text{O}_2} H_{\text{m},\text{O}_2,T_{\text{ad}}} + n_{\text{N}_2} H_{\text{m},\text{N}_2,T_{\text{ad}}}$ ，而 H_{m,CO_2} 等与 T_{ad} 有关，故需采用试算法，可解得 $T_{\text{ad}} = 1\,405 \text{ K}$ 。

13-10 用三分氢气和一分氮气组成的混合气生产氨，在 400℃、10atm 下化学平衡时产生 3.85% 的氨（体积百分比）。求：

- (1) 反应 $3\text{H}_2 + \text{N}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$ 在 400℃ 时的平衡常数 K_p ；
- (2) 相同温度下要得到 5% 氨时的反应总压力；
- (3) 在 400℃、压力为 50 atm 下达到化学平衡时求氨的体积比（认为 K_p 不随压力而变）。

提示和答案：对反应 $3\text{H}_2 + \text{N}_2 \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$ ，则每 mol NH_3 中需 $\frac{3}{2}$ mol H_2 和 $\frac{1}{2}$ mol N_2 。

(1) 若设平衡时 NH_3 物质的量为 n , 则 H_2 为 $3 - \frac{3}{2}n$, N_2 为 $1 - \frac{1}{2}n$ 。反应式应为



平衡时总物质的量的数: $N = 3 - \frac{3}{2}n + 1 - \frac{1}{2}n + n = 4 - n$

据题意 NH_3 的体积比为 3.85%, 按理想气体性质即为摩尔分数, 所以

$$x_{\text{NH}_3} = \frac{n}{4 - n} = 0.0385 \quad \text{即 } n = 0.1483; N = 3.8517$$

$$x_{\text{H}_2} = \frac{3 - \frac{3}{2} \times 0.1483}{3.8517} = 0.7211; \quad x_{\text{N}_2} = \frac{1 - \frac{1}{2} \times 0.1483}{3.8517} = 0.2404$$

$$p_{\text{NH}_3} = x_{\text{NH}_3} p = 0.385 p; \quad p_{\text{H}_2} = x_{\text{H}_2} p = 0.7211 p; \quad p_{\text{N}_2} = x_{\text{N}_2} p = 0.2404 p$$

$$K_p = \frac{p_{\text{NH}_3}^2}{p_{\text{H}_2}^3 p_{\text{N}_2}} = \frac{(0.0385 p)^2}{(0.7211 p)^3 \times 0.2404 p} = 1.664 \times 10^{-4}$$

(2) 由 (1) 若 NH_3 的体积比为 5%, 则 据 $\frac{n}{4 - n} = 0.05$ 可得 $n = 0.190$, $N = 3.810$

此时 $x_{\text{H}_2} = \frac{3 - \frac{3}{2} \times 0.19}{3.810} = 0.7127 \quad x_{\text{N}_2} = 0.2373$

$$n_{\text{H}_2} = 3 - \frac{3}{2} \times 0.190 = 2.715 \quad n_{\text{N}_2} = 1 - \frac{1}{2}n = 0.905$$

$$K_p = \frac{p_{\text{NH}_3}^2}{p_{\text{H}_2}^3 p_{\text{N}_2}} = \frac{n_{\text{NH}_3}^2}{n_{\text{H}_2}^3 n_{\text{N}_2}} \left(\frac{p}{n}\right)^{2-3-1} = \frac{0.19^2}{2.715^3 \times 0.905} \left(\frac{p}{3.81}\right)^{-2}$$

$$p = \sqrt{\frac{0.19^2 \times 3.81^2}{2.715^3 \times 0.905 \times 1.644 \times 10^{-4}}} = 13.27 \text{ atm}$$

(3) 由 $K_p = \frac{n_{\text{NH}_3}^2}{\left(3 - \frac{3}{2}n_{\text{NH}_3}\right)^3 \left(1 - \frac{1}{2}n_{\text{NH}_3}\right)} \left(\frac{p}{4 - n_{\text{NH}_3}}\right)^{-2}$

将 $p = 50 \text{ atm}$ 、 $K_p = 1.664 \times 10^{-4}$ 代入解得: $n_{\text{NH}_3} = 0.5228$

$$x_{\text{NH}_3} = \frac{n_{\text{NH}_3}}{4 - n_{\text{NH}_3}} = \frac{0.5228}{4 - 0.5228} = 0.1504 \quad \text{即体积比。}$$

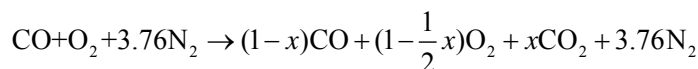
13-11 1mol CO 和 4.76mol 的空气反应, 在 1atm、3 000 K 下达到化学平衡。试求平衡时各种气体的组成。

提示和答案：CO和O₂的反应式为 $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$ 。设平衡时CO₂的摩尔数为

$n_{\text{CO}_2} = x$ ，据C、O、N原子平衡可得：

$$n_{\text{CO}} = 1 - x; \quad n_{\text{O}_2} = 1 - \frac{1}{2}x; \quad n_{\text{N}_2} = 3.76$$

因 4.76mol 的空气由 1mol O₂ 和 3.76mol N₂ 构成，故实际反应方程为



平衡时总摩尔数 $N = 1 - x + (1 - \frac{1}{2}x) + x + 3.76 = 5.76 - \frac{1}{2}x$

所以 $p_{\text{CO}} = \frac{1-x}{5.76-0.5x}; \quad p_{\text{O}_2} = \frac{1-0.5x}{5.76-0.5x}; \quad p_{\text{CO}_2} = \frac{x}{5.76-0.5x}。$

反应平衡常数 $K_p = \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}} p_{\text{O}_2}^{0.5}} = \frac{x(5.76-0.5x)^{0.5}}{(1-x)(1-0.5x)^{0.5}}$

查得 3000K 时，该反应 $K_p = 3.06$ ，代入上式解得 $x = 0.495$ 。

$$n_{\text{CO}_2} = x = 0.495, \quad n_{\text{CO}} = 1 - x = 0.505, \quad n_{\text{O}_2} = 1 - \frac{1}{2}x = 0.7525, \quad n_{\text{N}_2} = 3.76, \quad N = \sum n_i = 5.5125。$$

故 $x_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2}}{N} = \frac{0.495}{5.5125} = 8.98\%, \quad x_{\text{CO}} = \frac{n_{\text{CO}}}{N} = \frac{0.505}{5.5125} = 9.16\%, \quad x_{\text{O}_2} = 13.65\%, \quad x_{\text{N}_2} = 68.21\%。$

13-12 以碳为“燃料”的电池中，碳完全反应 $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ ，求此反应在标准状态下的最大有用功，且说明它与CO₂的标准生成焓不同的原因。

提示和答案：可逆定温定压反应的最大有用功

$$\begin{aligned} W_{u,\max} &= -\Delta G = G_{\text{Re}} - G_{\text{Pr}} \\ &= \left[\sum_{\text{Re}} (n \Delta G_f^0) - \sum_{\text{Pr}} (n \Delta G_f^0) \right] + \sum_{\text{Re}} n \left[(H_m - H_m^0) - (TS_m - 298.15 S_m^0) \right] \\ &\quad - \sum_{\text{Pr}} n \left[(H_m - H_m^0) - (TS_m - 298.15 S_m^0) \right] \end{aligned}$$

故标准状态下的最大有用功

$$W_{u,\max} = \left[\sum_{\text{Re}} (n \Delta G_f^0) - \sum_{\text{Pr}} (n \Delta G_f^0) \right] = \Delta G_{\text{f,C}}^0 + \Delta G_{\text{f,O}_2}^0 - \Delta G_{\text{f,CO}_2}^0$$

元素及稳定单质 $\Delta G_f^0 = 0$ ，由附表 $\Delta G_{\text{f,CO}_2}^0 = -394\,398 \text{ J/mol}$ ，所以

$$W_{u,\max} = 394\,398 \text{ J/mol}$$

再由附表 $\Delta H_{\text{f,CO}_2}^0 = -393\,522 \text{ J/mol}$

$$G = H + TS \quad G_{\text{Re}} - G_{\text{Pr}} = H_{\text{Re}} - H_{\text{Pr}} - [(TS)_{\text{Re}} - (TS)_{\text{Pr}}]$$

标准状态下

$$G_{\text{Re}} - G_{\text{Pr}} = \sum \Delta G_{\text{f,Re}}^0 - \sum \Delta G_{\text{f,Pr}}^0; H_{\text{Re}} - H_{\text{Pr}} = \sum \Delta H_{\text{f,Re}}^0 - \sum \Delta H_{\text{f,Pr}}^0$$

所以最大有用功与标准生成焓两者差

$$\Delta G_{\text{f,CO}_2}^0 - \Delta H_{\text{f,CO}_2}^0 = -394\,398 \text{ J/mol} - (-393\,522 \text{ J/mol}) = 867 \text{ J/mol}$$

即为

$$T_0(S_{\text{Re}} - S_{\text{Pr}}) = 298.15 \text{ K} \times [213.795 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)} - 5.740 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)} - 205.14 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}] = 867.02 \text{ J/mol}$$

13-13 反应 $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$ 在 $2\,800 \text{ K}$ 、 1atm 下达到平衡，平衡常数

$$K_p = \frac{p_{\text{CO}_2}^2}{p_{\text{CO}}^2 \cdot p_{\text{O}_2}} = 44.67。求 (1) 这时 \text{CO}_2 的离解度及各气体的分压力；(2) 相同温度下，$$

下列二反应各自的平衡常数：



提示和答案：(1) 对反应 $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}_2$ ，设 CO_2 的离解度为 x ，则平衡时各组分摩

尔数为 $n_{\text{CO}_2} = 2(1-x)$ ； $n_{\text{CO}} = 2x$ ； $n_{\text{O}_2} = x$ ，可得各成分的分压力，由 $K_p = \frac{p_{\text{CO}_2}^2}{p_{\text{CO}}^2 p_{\text{O}_2}} = 44.67$

解得 $x = 0.295$ ，所以， $p_{\text{CO}_2} = 0.614\text{atm}$ 、 $p_{\text{CO}} = 0.257\text{atm}$ 、 $p_{\text{O}_2} = 0.129\text{atm}$ ；(2) 查附表

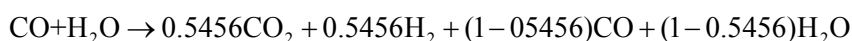
可得 $2\,800 \text{ K}$ 时反应 $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$ 的， K_p ，而反应 $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$ 是逆反应，故同温度下 $K'_p = \frac{1}{K_p} = 6.667。$

13-14 相同摩尔数的一氧化碳和水蒸汽在 400 K 、 1 atm 下发生水煤气反应，最后达到 1000K 。若在 $1\,000\text{K}$ 下达到化学平衡时反应物中 CO 为 1mol ，试计算此反应的反应热。（生成水煤气的反应： $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2。$ ）

提示和答案：反应 $\text{CO} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{g})} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ 在 1000K 时 K_p 是 $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$ 的反应 K'_p 的倒数，查附表， $\log K'_p = -0.159$ ，所以 $K_p = 1/K'_p = 1.442$ 。 1mol CO 和 $1\text{mol H}_2\text{O}$ 参与反应，设平衡时 CO_2 和 H_2 均为 $x \text{ mol}$ ，则 CO 为 $1-x \text{ mol}$ ， H_2O 为 $1-x \text{ mol}$ ，于是

$$K_p = \frac{xx}{(1-x)(1-x)} = 1.442 \quad x = 0.5456$$

故平衡时：



查得

$$H_{f,CO_2}^0 = -393\,522\text{ J/mol}, \quad H_{f,CO}^0 = -110\,527\text{ J/mol}, \quad H_{f,H_2O}^0 = -241\,826\text{ J/mol}$$

因此，标准状态下 $CO + H_2O_{(g)} \rightleftharpoons CO_2 + H_2$ 完全反应生成 1mol CO_2 时反应热效应

$$\begin{aligned} Q^0 &= \Delta H^0 = \left[\sum n_k H_{f,k}^0 \right]_{Pr} - \left[\sum n_k H_{f,k}^0 \right]_{Re} \\ &= 1\text{mol} \times (-393\,522\text{ J/mol}) + 0 - 1\text{mol} \times (-110\,527\text{ J/mol}) \\ &\quad - 1\text{mol} \times (-241\,826\text{ J/mol}) = -41\,169\text{ J} \end{aligned}$$

因未完全反应，故反应热效应为

$$n_{CO_2} Q^0 = 0.545\,6 \times (-41\,169\text{ J}) = -22\,461.8\text{ J}$$

由附表可查得相关温度的摩尔焓 (J/mol)，故 $T = 1\,000\text{ K}$ 时反应热效应为

$$Q'_T = n_{CO_2} Q^0 + \left[\sum n_k (H_{m,1000K} - H_{m,298.15K}) \right]_{Pr} - \left[\sum n_k (H_{m,1000K} - H_{m,298.15K}) \right]_{Re} = 22285.4\text{ J}$$

平衡时 CO 为 1 mol，故参与反应的 CO 为 $n_{CO} = \frac{1\text{mol}}{0.4544} = 2.2\text{mol}$ ，所以

$$Q_T = n_{CO} Q'_T = 2.2\text{mol} \times 22\,285.4\text{ J/mol} = 49\,027.9\text{ J}。$$

13-15 已知反应 $CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2$ 在 $3\,000\text{K}$ 时平衡常数 $K_p = 3.06$ 。求 1mol 一氧化碳和 1mol 氧气反应在 $3\,000\text{K}$ 和 5atm 平衡时混和物的组成。

提示和答案：1mol CO 和 1mol O_2 参与反应，起反应式为



据碳和氧的质量守恒 $z = 1 - x$ ， $y = \frac{1}{2}(1 + x)$

平衡时总摩尔数 $n = x + y + z = x + \frac{1}{2}(1 + x) + 1 - x = \frac{1}{2}(3 + x)$

$$K_p = \frac{n_{CO_2}}{n_{CO} n_{O_2}} \left(\frac{p}{n} \right)^{1-1-1/2} = \frac{z}{xy^{1/2}} \left(\frac{5}{x + y + z} \right)^{-1/2} = 3.06$$

用试差法求得： $x = 0.193\text{ mol}$ 、 $y = 0.597\text{ mol}$ 、 $z = 0.807\text{ mol}$ 。

同一反应在 $3\,000\text{K}$ ， 1atm 平衡时 $x = 0.34$ ，压力对这一反应平衡常数的影响显而易见。

13-16 已知反应 $CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2$ 在 $3\,000\text{K}$ 时平衡常数 $K_p = 3.06$ 。求 1mol 一氧化碳和 1mol 空气中氧气反应在 $3\,000\text{K}$ 和 5atm 平衡时混和物的组成。

提示和答案：由于空气由 3.76mol N_2 和 1mol O_2 组成，故反应式为



据质量守恒 $z = 1 - x$ ， $y = \frac{1}{2}(1 + x)$

平衡时总摩尔数

$$n = x + y + z + 3.76 = x + \frac{1}{2}(1+x) + (1-x) + 3.76 = \frac{1}{2}(10.52 + x)$$

$$K_p = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{CO}} n_{\text{O}_2}} \left(\frac{p}{n} \right)^{1-1-1/2} = 3.06$$

用试差法求得： $x = 0.47 \text{ mol}$ 、 $y = 0.74 \text{ mol}$ 、 $z = 0.53 \text{ mol}$ 。

与题 13-15 比较，由于不参与反应的氮气，同一反应在 3000K，1atm 平衡时，即初始 1mol CO 可形成的 CO₂ 从 0.66mol 降到 0.53mol，因此在计算反应平衡时组成时必须考虑惰性气体的存在。

13-17 3 000 K 时气相反应 $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$ 平衡常数 $K_p = 3.055$ ，求反应在 2 000 K 时平衡常数值。已知 2 000 K 时反应焓 $\Delta H = -277\,950 \text{ J/mol}$ ，3 000 K 时反应焓 $\Delta H = -272\,690 \text{ J/mol}$ 。

提示和答案：

$$\ln \frac{K_{p2}}{K_{p1}} = \frac{\Delta H^0}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \approx \frac{(\Delta H/R)(T_2 - T_1)}{T_1 T_2}$$

标准状态下题示反应的反应焓为 $-283\,190 \text{ J/mol}$ 与 2 000 K 和 3 000 K 时的反应焓有较大出入，但在 2 000 K 到 3 000 K 时反应焓的变化相对较小，式中 ΔH 可近似取反应焓平均值，故

$$\Delta H = \frac{1}{2}(-277\,950 - 272\,690) \text{ J/mol} = -275\,320 \text{ J/mol}$$

所以

$$\ln \frac{K_{p2}}{K_{p1}} = \frac{275\,320 \text{ J/mol}}{8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}} \left(\frac{1}{2\,000 \text{ K}} - \frac{1}{3\,000 \text{ K}} \right) = 5.52$$

$$\frac{K_{p2}}{K_{p1}} = 252, \quad K_{p2} = 252 \times 3.055 = 769.9。$$