

热工基础与应用

CH1. 1. P_1 . 表压力、真空度: $P = P_g + P_b$; $P = P_b - P_0$.

2. P_2 . $P-V$ 示功图: $W = \int P dV$. $T-S$ 示热图: $Q = \int T ds$

$$3. P_3$$
. 热效率: $\eta_t = \frac{W_0}{Q_H}$, $\varepsilon = \frac{Q_L}{W_0}$, $\varepsilon' = \frac{Q_H}{W_0}$

CP2. 1. P_3 . 热力学能 $U(T, V)$. 总储存能: $E = U + E_k + E_p = U + \frac{1}{2}mC_v^2 + mgz$

2. P_3 . 热-功的表示: $(\delta Q + e_1 \delta m_1) - W_{tot} - e_2 \delta m_2 = (E + dE)_{sy} - E_{sy}$

3. P_3 . 可口的流量: $Q - \Delta U = W$; Q : 正, W : 负.

4. P_3 . 稳定流动系统: 1. 工质流量 2. 工质状态 3. 能量交换.

5. P_3 . 流动功. 推进功: $W_f = W_{push1} + W_{push2} = -P_1 V_1 + P_2 V_2 = \Delta(PV)$

6. P_3 : 稳定流动的能量方程. $W_{tot} = W_{sh} + W_f$

$$\begin{aligned} Q &= \Delta E_{sy} + \int_T (e_2 \delta m_2 - e_1 \delta m_1) + W_{tot} \\ &= 0 + (E_2 - E_1) + W_{sh} + W_f \quad (m_1 = m_2 = m) \\ &= (U_2 + \frac{1}{2}m_2 C_2^2 + mgz_2) - (U_1 + \frac{1}{2}m_1 C_1^2 + mgz_1) + W_{sh} + (P_2 V_2 - P_1 V_1) \end{aligned}$$

$$Q = \Delta H + \frac{1}{2}m \Delta C^2 + mg \Delta z + W_{sh}.$$

7. P_3 : 技术功 $W_t = \frac{1}{2}m \Delta C^2 + mg \Delta z + W_{sh}$ $Q = \Delta H + W_t = \Delta U + W_f + W_t$

$$\therefore W = W_t + W_f. \quad \text{往一过程} \quad W_t = W - W_f = \int_{T_1}^{T_2} P dt - \int_{V_1}^{V_2} dP V = - \int_{V_1}^{V_2} V dp$$

$$\therefore Q = \Delta H - \int_{V_1}^{V_2} V dp. \quad \text{可逆过程中: } W = \int_{V_1}^{V_2} P dV.$$

8. P_3 . 1). 叶轮式机械: $W_{sh} = h_1 - h_2$ ($\Delta H + W_{sh} = 0$)

2). 热交换器: $W_{sh} = 0$, $Q = \Delta H$

3). 绝热节流: $Q = 0$, $W_{sh} = 0$, $\Delta H = 0$, $H_1 = H_2$.

CH3. 热力学第一定律.

1. P46 自发、非自发

2. P47. 热力学表述

3. P48. 卡诺循环: 两等温、两绝热可逆。

$$\eta_C = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

概括性的卡诺循环: 两等温、两可逆

4. 附. 卡诺定理: 1. 同温度下可逆循环的 η_C . 2. 可逆 > 不可逆

5. P50. 热㶲: 能转变成有用功的最大份额: $E_{x, \text{㶲}} = Q(1 - \frac{T_0}{T})$

热㶲: 不能转变成机械功而排向大气的热量: $A_{n, \text{㶲}} = Q \frac{T_0}{T}$

6. P50. 多度温热源的可逆循环

$$\overline{T_H} = \frac{Q_H}{\Delta S} = \frac{\int_{T_0}^{T_H} T dS}{\Delta S} \quad \overline{T_L} = \frac{Q_L}{\Delta S} = \frac{\int_{T_0}^{\overline{T_L}} T dS}{\Delta S} \quad \eta_C = 1 - \frac{\overline{T_L}}{\overline{T_H}}$$

7. 状态参数熵: $dS = \frac{\delta Q_{re}}{T}$ $\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q_{re}}{T}$

8. $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$: < 0 不可逆循环 $= 0$ 可逆 > 0 不可能发生

9. 熵产: $\delta S_g = S - \frac{SQ}{T}$ 由不可逆因素导致: $Sg > 0$

熵流: $\delta S_f = \frac{\delta Q}{T}$ 正于小于此, 由热交换导致.

10. 熵增原理: 存在于 $\Delta S = Sg \geq 0$

$$\Delta S_{iso} = \sum_{j=1}^n \Delta S_{sub,j}$$

$$\begin{aligned} 11. \text{ 烟损失: } I &= E_{x, QA} - E_{x, QB} = Q(1 - \frac{T_0}{T_A}) - Q(1 - \frac{T_0}{T_B}) \\ &= T_0 Q (\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_A}) \\ &= T_0 \Delta S_{iso} \end{aligned}$$

CH. 4. 理想气体的热力学性质及热力学过程

1. P88: $PV = R_g T$. $PV = m R_g T = n R T$. $R_g = \frac{R}{m} = \frac{R}{M}$

2. P70: 比热容: $C = \frac{C}{m} = \frac{8Q}{m dT} = \frac{8q}{dT}$, $C_m = \frac{C}{n}$ (摩尔)

3. P71: $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$. $C_P = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P$. $C_P - C_V = R_g$. $C_{PM} - C_{Vm} = R$

4. P72: 真实比热容: $C = C(T) = a_0 + a_1 T + \dots$

平均比热: $C|_{T_1}^{T_2} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C dt}{T_2 - T_1} = \frac{T_2 C|_{T_0}^{T_2} - T_1 C|_{T_0}^{T_1}}{T_2 - T_1}$

平均比热直读式: $C = a + b' T$. $C|_{T_1}^{T_2} = a + b t$, $b = \frac{b'}{2}$, $t = \frac{T_1 + T_2}{2}$

定值比热容: $C_P = \frac{5}{2}, \frac{7}{2}, \frac{9}{2}$ $C_V = \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}$

5. P75. $dU = C_V dT$. $\Delta U = \int C_V dT$; $dh = C_P dT$. $\Delta h = \int C_P dT$

6. P76. $ds = \frac{dq_{re}}{T} = \frac{\delta U + PdV}{T} = \frac{C_V dT + PdV}{T}$, $\cancel{PV = TR_g}$

$$\therefore ds = C_V \frac{dT}{T} + R_g \frac{dV}{V}$$

$$ds = C_P \frac{dT}{T} - R_g \frac{dP}{P}$$

7. P86. 定温过程: $\Delta U = 0$. $q = \Delta U + w$. $q = w = w_t$

8. P87. $\lambda = \gamma = \frac{C_P}{C_V}$. $PV^k = \text{定值}$: 定熵(绝热)过程

9. P90. $PV^n = \text{const}$: $n=0$: 等压. $n=1$: 等温. $n=k$: 等熵. $n=\infty$: 等压.

10. P92. P-V. T-S图.

11. P93. 功量计算

$$1. P_{100}, q_1 = h' - h_0 \text{ (液体热)}$$

$$r = h'' - h' = T_s(s'' - s') \text{ (汽化热)}$$

$$q_{su} = h - h'' \text{ (过热热)} \quad D = t - t_s \text{ 过热度.}$$

$$2. 沸和温度 \quad t_s = t_s(P_s), \quad P_s = P_s(t_s)$$

$$3. 临界状态: \quad v'' = v', \quad s'' = s' \quad : P_c, v_c, t_c.$$

$t > t_c$: 永久气体

$$4. 干度 x: \quad x = \frac{m_f}{m_f + m_g}$$

$$5. 热力学性质: \quad v = v''x + v'(1-x) \quad h = xh'' + (1-x)h' \quad \Rightarrow s = xs'' + (1-x)s'$$

CH 9. 非稳态导热

1. P147. 非正规阶段与正规阶段

与热流方向垂直的截面上热流量处处相等.

2. P148. 无限大平壁的分析解: 1) 条件齐次化 2) 引离散量法.

$$\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0} = f_1(F_0, B_i, \frac{x}{\delta}) \quad \text{壁厚}\delta, \text{初温}\theta_0, \text{外流温}\theta_f$$

$$F_0 = \frac{\alpha\tau}{\delta^2} \rightarrow \text{对比时间: 热扰动通过平壁的时间.}$$

$$B_i = \frac{(h/\lambda)}{(1/\lambda)} \rightarrow \text{对比热阻, } \lambda \text{为固体的导热系数}$$

3. P151: 中心面的绝热面. \therefore 可用于求的一侧绝热另一侧换热的无限大平壁

4. P157. 集总参数法: $B_i \ll 1$ ($B_i < 0.1$)

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} \tau\right) = \exp(-B_i v \cdot F_{0v})$$

$$B_i v = h(V/A)/\lambda \quad F_{0v} = [\lambda / (\rho c v)] \tau / (V/A)^2 = (\alpha\tau) / (V/A)^2$$

$$(B_i = \frac{hs}{\lambda}, \quad F_0 = \frac{\alpha\tau}{\delta^2})$$

$$\cdot \text{时间常数} \quad \frac{\rho c v}{hA} \quad \therefore \frac{\theta}{\theta_0} = \exp\left(-\frac{\tau}{\text{时间常数}}\right)$$

5. P153. 无限大圆柱体: 特征长度为 R .

6. P153. 岩漠圆板据 $F_0 > 0.2$ 的近似解绘制.

1. P123. 热传导：不同温，直接接触，不发生位移，依靠热运动而产生的热量传递

$$q = \frac{\phi}{A} = \lambda \frac{\Delta t}{L}$$

2. P123. 热对流：温度不同部分之间发生相对位移引起传热 [沸腾，湍流]

自然冷却公式 $q = \frac{\phi}{n} = h \Delta t$. h : 表面传热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)

水 > 空气 > 有机物 > 无相变 > 强制 > 自然

3. P124. 热辐射：物体通过电磁波传递能量 → 辐射。

→ 因热的原因发出辐射能的现象

$$\phi = A \sigma T^4, \quad \phi = \epsilon A \sigma T^4, \quad \epsilon \text{ 为黑度 (发射率)}$$

4. P125. 复合传热：对流与辐射同时存在的传热过程。($h = h_c + h_r$)

$$\phi_r = h_r A \Delta t, \quad \phi = \phi_c + \phi_r = h_c A \Delta t + h_r A \Delta t = h A \Delta t$$

5. P126. 传热过程：热量由固体壁一侧的流体通过固体壁传递给另一侧流体

CM8. 热传导与对流、传热学

1. P27. 温度场: $t = f(x, y, z, t)$

2. P27. 导热叶导热定律: $\vec{q} = -\lambda \vec{n} \frac{\partial t}{\partial n}$ 解: 热流密度指向温度降低的方向

$$\text{导热系数} \lambda = -\frac{q}{\frac{\partial t}{\partial n}}.$$

3. P29. 导热微分方程: $PC \frac{\partial t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial t}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial t}{\partial z}) + \dot{q}$

$$[\text{常物性}] \quad \frac{\partial t}{\partial t} = \frac{\lambda}{PC} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}}{PC}$$

$\alpha = \frac{\lambda}{PC}$: (m²/s) 热扩散系数: $\alpha \uparrow$, 变温快

$$\text{无内热源且稳态导热时: } \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$$

4. P30. 定解条件: $\begin{cases} t_w = f_1(t) \\ -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = q_w = f_2(t) \\ -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = h(t_w - t_f) \end{cases}$

5. P31. 一维稳态导热 (无限大平面)

1) $\frac{d^2 t}{dx^2} = 0 \quad 2) q = -\lambda \frac{dt}{dx}, q = \text{const}$ 两种解题手段.

$$\hookrightarrow t = \frac{t_{w2} - t_{w1}}{\delta} x + t_{w2} \quad q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}$$

6. P32. 热阻: $R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda A}, R_C = \frac{1}{h_c A}, R_r = \frac{1}{h_r A} \quad \begin{cases} \phi = \frac{\Delta t}{R} \\ q = \frac{\Delta t}{r} \end{cases}$

7. P33. 复合壁 $\begin{cases} q = \frac{t_{w1} - t_{w,n+1}}{\sum_{i=1}^n X_i} \\ t_{w,i+1} = t_{w,i} - q (r_{\lambda,1} + r_{\lambda,2} + \dots + r_{\lambda,i}) \end{cases}$

CH11. 对流传热

1. 影响 h_c 的因素：流动起因、流速与形态、相变、传热面尺寸几何、流体性质

2. Pr3：流速、热边界层：

3. Pr4： h 不大的流体，主要热阻在层流底层

4. Pr4： $Pr = \frac{\delta v}{\delta t} = \frac{\eta C_p}{\lambda}$ 表征热-流速比

$$Pr = \frac{\eta v}{\alpha} = \frac{\eta C_p}{\lambda}$$

动力粘度 $\eta = \text{运动粘度 } \nu \cdot \rho$ 热扩散率 $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C}$

$\delta_t \uparrow, h \downarrow \therefore \text{减小 } \delta_t$: 短板换热 > 长板

5. Pr5. $Nu = \frac{h l}{\lambda}$ 表征对流传热的强弱。

$$Re = \frac{\rho u l}{\eta} = \frac{u l}{\nu} = (\text{强制对流时}) \frac{\text{惯性力}}{\text{粘性力}}$$

$$Gr = \alpha g \Delta t l^3 / \nu^2 = (\text{自然对流时}) \frac{\text{浮力}}{\text{粘性力}}$$

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

$$Nu = C Gr^m Pr^n$$

$$Nu = C Re^m Pr^n$$

6. 强制对流：管内：流动、传热特征：流动入口；流动充分发展段

湍流传热： P_{179} (11-12) - 3 个修正

层流传热： P_{180} ()

纵掠平板： $\left\{ \begin{array}{l} \text{层流} (Re < 5 \times 10^5), P_{183}, \text{式} (11-16) \quad (11-17) \\ \text{湍流} (Re = 5 \times 10^5 \sim 10^7) \quad P_{183}, (11-18) \end{array} \right.$

端流 ($Re = 5 \times 10^5 \sim 10^7$) $P_{183}, (11-18)$

混合 (实际) () $(11-19) \quad (11-19a) \quad (11-19b)$

外掠、横掠管道： $\left\{ \begin{array}{l} \text{脱体: 0 次, 1 次, "2 次" (Nu 跳变)} \\ \text{计算: } P_{184}, (11-20) \end{array} \right.$

计算: $P_{184}, (11-20)$

横掠管系： P_{185} (11-21) 又推的 h 大，但阻力损失大

1. 1188. 自然对流换热：由自然对流形成的压力驱动

· 大空间、有限空间 · 受热：由下向上增厚边界层（冷却相反）

$$\cdot N_u = C(Gr \cdot Pr)^n \quad \text{层流 } h_{\text{层}} \downarrow, \text{ 湍流 } h_{\text{层}} \text{ 不变}$$

2. P190：膜状凝结： $\theta < 90^\circ$. 露状凝结： $\theta > 90^\circ$. $h_{\text{膜}} = 5 \sim 10 h_{\text{膜}}$

3. P192：改变凝结换热：不凝性气体、液膜排出、流速流向、尖峰表面、表面活性剂

4. P193：自然对流；核态沸腾区（饱和沸腾）、过渡沸腾、稳定膜态沸腾。

CH16. 压缩机

§1 单级活塞式压气机

一、工作原理：

1. 1-2进气，1-2压缩，2-3排气。增压比 $\pi = \frac{P_2}{P_1}$

二、耗功计算： $Q = \Delta H + W_t$ $W_C = -W_{sh} = -W_t = \int_1^2 V dp$

过程：快：绝热；慢：定温。 $w_{c,s} > w_{c,n} > w_{c,t}$, $T_{2T} < T_{2n} < T_{2s}$

∴理想过程：定温：充分冷却、多级压缩、级间冷却；实际：变度。
↳ 耗功少，终温低，易于润滑

§2. 叶轮式压气机。

1. 绝热过程。 $w_c = -W_t = -(-\Delta h) = h_2 - h_1$

2. 不可逆的功耗： $w_c' = h_2' - h_1$ $\eta_{CS} = \frac{w_c}{w_c'} = \frac{h_2 - h_1}{h_2' - h_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_2' - T_1}$

工质为理想气体，无热容改变值

§3. 多级压缩、级间冷却

$$1. \pi_{opt} = \sqrt[N]{\frac{P_N}{P_1}}$$

2. 各级压缩耗功相等，各级压缩升温和各级冷却发热相等

↳ 对压气机的设计、运行有利的措施

CH16 工作物的装置

1. P27. 燃气轮机=叶轮式压气机、燃烧室、燃气轮机本体

压缩 → 定压燃烧 → 混合降温 → 膨胀做功

2. P27. 布莱顿循环：绝热压缩-定压吸热-绝热膨胀-定压放热

$$\cdot \eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{1}{k}}} \rightarrow \text{循环热效率}$$

$$3. P27. \eta_T = \frac{W_T^2}{W_T} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_4} \text{ 相对内效率. (16-7).}$$

4. P27. 提高热效率的方式：1) 回热：吸、放热J. 功率不变.

2) 分压级压缩，级间冷却 3) 改善膨胀过程

CH17. 回热

CH18.

$$1. \varepsilon = \frac{q_L}{w_0} = \frac{q_L}{q_H - q_L} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \text{ (逆卡诺循环)}$$

$\varepsilon' = 1 + \varepsilon$. 逆循环.

2. P292: 1→2: 绝热压缩.

$$q_H = h_2 - h_3$$

2→3: 定压冷却

$$w_0 = h_2 - h_1$$

3→4: 绝热节流: $h_3 = h_4$

$$q_L = h_1 - h_4$$

4→1: 定温(压)吸热

$$\varepsilon = \frac{q_L}{w_0} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1}$$

CH12. 热力学第一定律

1. P198. 热辐射.

2. P199. $\alpha + \rho + \tau = 1$. $\alpha = 1$. 黑体. $\rho = 1$. 白体. $\tau = 1$. 透明体.

3. P199. 辐射力: E : 单位时间、单位面积物体投射的辐射量的总和. (W/m^2)

$$E_b = \sigma T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4. \quad C_0 = 5.67 \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}$$

$$\epsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)}. \quad E(T) = \epsilon E_b(T) = \epsilon C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4$$

4. P200. 灰体: $\alpha = \rho = \text{const.} \therefore \epsilon, \alpha$ 体现了辐射吸收率上的差距

5. P201. $\frac{E}{\alpha} = E_b$ 1) 黑体辐射模型. 2) $\alpha = \epsilon$ 3) 与黑辐射 $\sim \sim \sim$

· α, ϵ 为物理参数 $\therefore \epsilon = \alpha$ 无条件 \rightarrow 黑辐射体与太阳时误差大

二. 角系数: $X_{1,2}$: 表面1发出的辐射能落在表面2上百分比 · 绝几何因子

1. 特性: 1) $A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$. 2) $\sum_{j=1}^n X_{i,j} = 1$ 3) $X_{1,2+3} = X_{1,2} + X_{1,3};$
 $A_{2+3} X_{(2+3),1} = A_2 X_{2,1} + A_3 X_{3,1}$

2. 确定: 1) 大平行平板: $X_{1,2} = X_{2,1} = 1$ 2) 包围: $X_{1,2} = 1, X_{2,1} = \frac{A_1}{A_2}$

3) 三个非凹封闭表面

4) 2个可以看作非凹表面

三. 黑体间的辐射传热:

$$\psi_{1,2} = E_{b,1} A_1 X_{1,2} - E_{b,2} A_2 X_{2,1}. \quad \text{平衡时: } \psi_{1,2} = A_1 X_{1,2} (E_{b,1} - E_{b,2}) = 0$$

$$\text{一般: } \psi_{1,2} = A_1 X_{1,2} (E_{b,1} - E_{b,2}) = \frac{E_{b,1} - E_{b,2}}{A_1 X_{1,2}}. \quad \nearrow \text{空间辐射热阻}$$

四. 两体表面辐射传热.

1. 有效辐射 J . 投入辐射 G . $J_1 = E_1 + PG_{11} = E_1 + (1-\alpha)G_{11}$

$$q_1 = J_1 - G_{11}, \quad \therefore q_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{1-\epsilon_1} \quad Q \cdot \bar{\Psi}_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{1-\epsilon_1} \quad \frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A} = \text{辐射率}$$

2. P₂₀₈: 两个物体表面: $\psi_1 = -\psi_2$.

$$\psi_{1,2} = \psi_1 = -\psi_2 = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\epsilon_1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_1 X_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{A_2 \epsilon_2}}$$

· 四种特例 (1) 黑体 (2) $A_1 \approx A_2$ (3) 包围 (4) 包围且 $A_1 \ll A_2$.

3. P₂₁₂. 遮热板: 增加了两个表面辐射传热阻及一个空间辐射传热阻

五. 气体辐射.

1. 气体只吸收某特定波长范围的能量. \rightarrow 光带

2. 固液辐射. 吸收仅在表面进行.

气体在整个容积内进行.