

热工基础与应用

CH1. 1. P21. 表压力、真空度: $P = P_g + P_b$; $P = P_b - P_v$.

2. P26. P-V 示功图: $W = \int P dV$. T-S 示热图: $Q = \int T ds$

3. P27. 热效率: $\eta_t = \frac{W_o}{Q_H}$. $\varepsilon = \frac{Q_L}{W_o}$. $\varepsilon' = \frac{Q_H}{W_o}$

CH2. 1. P31. 热力学能 $U(T, V)$. 总储存能: $E = U + E_k + E_p = U + \frac{1}{2} m C^2 + mgz$

2. P32. 热一律一般表示: $(\delta Q + e_1 \delta m_1) - W_{tot} - e_2 \delta m_2 = (E + dE)_{sy} - E_{sy}$

3. P33. 闭口系的热量: $Q - \Delta U = W$: Q : 吸为正. W : 对外为正.

4. P35. 稳定流动系统: 1. 工质流量 2. 工质状态 3. 能量交换.

5. P35. 流动功, 推进功: $W_f = W_{push1} + W_{push2} = -P_1 V_1 + P_2 V_2 = \Delta(PV)$

6. P36. 稳定流动能量方程: $W_{tot} = W_{sh} + W_f$

$$Q = \Delta E_{sy} + \int_{\tau} (e_2 \delta m_2 - e_1 \delta m_1) + W_{tot}$$

$$= 0 + (E_2 - E_1) + W_{sh} + W_f \quad (m_1 = m_2 = m)$$

$$= (U_2 + \frac{1}{2} m C_2^2 + mgz_2) - (U_1 + \frac{1}{2} m C_1^2 + mgz_1) + W_{sh} + (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

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

7. P37. 技术功 $W_t = \frac{1}{2} m \Delta C^2 + mg \Delta z + W_{sh}$ $Q = \Delta H + W_t = \Delta U + W_f + W_t$

$$\therefore W = W_t + W_f. \quad \xrightarrow{\text{任一过程}} \quad (W_t = W - W_f) = \int_{v_1}^{v_2} P dv - \int_{\tau} d(PV) = - \int_{v_1}^{v_2} V dp$$

$$\therefore Q = \Delta H - \int_{v_1}^{v_2} V dp. \quad \hookrightarrow \text{可逆过程下: } W = \int_{v_1}^{v_2} P dv.$$

8. P38. 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: $Q = 0$. $W_{sh} = 0$. $\Delta H = 0$ $\therefore h_1 = h_2$.

CH3. 热力学第一定律.

1. P46 自发, 非自发

2. P47. 热二律的表述

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. P49. 卡诺定理: 1. 同温度下可逆循环均为 η_c . 2. 可逆 > 不可逆

5. P5. 热烟: 能转变为有用功的最大份额: $E_{x, Q} = Q(1 - \frac{T_0}{T})$

热耗: 不能转变为机械功而排向大气的热量: $A_{n, Q} = Q \frac{T_0}{T}$

6. P50. 多(变温)热源的可逆循环

$$\overline{T}_H = \frac{Q_H}{\Delta S} = \frac{\int_0^3 T ds}{\Delta S}$$

$$\overline{T}_L = \frac{Q_L}{\Delta S} = \frac{\int_0^2 T ds}{\Delta S} \quad \eta_c = 1 - \frac{\overline{T}_L}{\overline{T}_H}$$

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: $\delta S_g = S - \frac{\delta Q}{T}$ 由不可逆因素导致: $\delta g > 0$

熵流: $\delta S_f = \frac{\delta Q}{T}$ 可大于, 小于 0, 由热交换导致.

10. 熵增原理: 孤立系 $\Delta S = S_g \geq 0$

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

11. 烟损失: $I = E_{x, Q_A} - E_{x, Q_B} = Q(1 - \frac{T_0}{T_A}) - Q(1 - \frac{T_0}{T_B})$

$$= T_0 Q (\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_A})$$

$$= T_0 \Delta S_{iso}$$

CH 4. 理想气体的热力学性质及热力学过程

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

2. P70: 比热容: $C = \frac{C}{m} = \frac{\delta Q}{m dT} = \frac{\delta q}{dT}$, $C_m = \frac{C}{n}$ (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: 平均真实比热容: $C = c(T) = a_0 + a_1 T + \dots$

平均比热: $c|_{t_1}^{t_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c dt}{t_2 - t_1} = \frac{t_2 c|_{t_2} - c|_{t_1} t_1}{t_2 - t_1}$

平均比热直线: $C = a + b' t$. $c|_{t_1}^{t_2} = a + b t$, $b = \frac{b'}{2}$, $t = t_1 + t_2$

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: $ds = \frac{\delta q_{re}}{T} = \frac{\delta u + p dv}{T} = \frac{C_v dT + p dv}{T}$, 又 $pV = TR_g$

$\therefore ds = C_v \frac{dT}{T} + R_g \frac{dv}{v}$

$ds = C_p \frac{dT}{T} - R_g \frac{dp}{p}$

$ds = C_v \frac{dp}{p} + C_p \frac{dv}{v}$

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

8. P87: $\kappa = \gamma = \frac{C_p}{C_v}$. $pV^\kappa = \text{定值}$: 定熵(绝热)过程

9. P90: $pV^n = \text{const}$: $n=0$ 等压, $n=1$ 等温, $n=\kappa$ 等熵, $n=\infty$ 等容

10. P92: $p-v$, $T-s$ 图.

11. P93: 功量计算

1. P_{100} . $q_l = h' - h_0$ (液体热)

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

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

2. 饱和温度 $t_s = t_s(p_s)$. $p_s = p_s(t_s)$

3. 临界状态: $v'' = v'$, $s'' = s'$: p_c, v_c, t_c .

$$t > t_c: \text{永久气体}$$

4. 干度 x : $x = \frac{m_g}{m_f + m_g}$

5. 热力性质: $v = v''x + v'(1-x)$ $h = xh'' + (1-x)h'$ $s = xs'' + (1-x)s'$

CH9. 非稳态导热

1. P47. 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不等。

2. P48. 无限大平壁的分析解: 1) 分离变量法 2) 分离变量法

$$\frac{\theta(x, \tau)}{\theta_0} = f_1(F_0, Bi, \frac{x}{\delta}) \quad \text{壁厚 } \delta, \text{ 初温 } t_0, \text{ 对流温度 } t_f$$

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

$$Bi = \frac{(\delta/\lambda)}{(\tau/\lambda)} \rightarrow \text{对比热阻, } \lambda \text{ 为固体导热系数}$$

3. P51: 中心面为绝热面. \therefore 可用于求解一侧绝热另一侧换热的无限大平壁

4. P57. 集总参数法: $Bi \ll 1$ ($Bi < 0.1$)

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho c V} \tau\right) = \exp(-Bi \cdot F_0)$$

$$Bi \cdot V = h(V/A)/\lambda \quad F_0 = [\lambda/(\rho c)] \tau / (V/A)^2 = (\alpha \tau) / (V/A)^2$$

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

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

5. P53. 无限长圆柱体: 特征长度为 R .

6. P53. 诺模图根据 $F_0 \geq 0.2$ 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

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

{ 自然, 强制

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, 凝结

牛顿冷却公式 $q = \frac{\phi}{A} = h \Delta t$ h : 表面传热系数 ($W/(m^2 \cdot K)$)

水 > 空气, 有相变 > 无相变, 强制 > 自然

3. P124 热辐射: 物体通过电磁波传递能量 \rightarrow 辐射

\hookrightarrow 因热的原因发出辐射能的现象

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

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

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

5. P126 传热过程: 热量由固体壁一侧流体通过固体壁传递到另一侧流体

1. P17. 温度场: $t = f(x, y, z, \tau)$

2. P17. 傅里叶导热定律: $\vec{q} = -\lambda \vec{n} \frac{\partial t}{\partial n}$ 负号: 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. P19. 导热微分方程: $\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{q}$

$$\text{常物性: } \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}}{\rho c}$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} : (\text{m}^2/\text{s}) \text{ 热扩散系数} : a \uparrow \text{ 变温快}$$

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

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

5. P31. 一维稳态导热 (无限大平壁)

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

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

$$6. \text{P32. 热阻: } R_\lambda = \frac{b}{\lambda A} \quad R_c = \frac{1}{hcA} \quad R_r = \frac{1}{hrA} \quad \begin{cases} \psi = \frac{\Delta t}{R} \\ q = \frac{\Delta t}{r} \end{cases}$$
$$r_\lambda = \frac{\delta}{\lambda} \quad r_c = \frac{1}{hc} \quad r_r = \frac{1}{hr}$$

$$7. \text{P33. 复合壁} \quad q = \frac{t_{w1} - t_{w,n+1}}{\sum_{i=1}^n R_{\lambda i}}$$

$$t_{w,i+1} = t_{w1} - q(R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2} + \dots + R_{\lambda i})$$

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. P173: 流速, 热边界层:

3. P174: h 不大的流体, 主要热阻在层流底层

4. P174: Pr : 表征 $\frac{\delta}{\delta_t}$. $Pr=1$: 热~厚度 \approx 流动~厚度.

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

动力黏度 $\eta = \text{运动黏度 } \nu \cdot \rho$ 热扩散率 $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C}$

$\delta_t \uparrow, h \downarrow \therefore$ 减小 δ_t : 短板换热 > 长板

5. P175. $Nu = \frac{hL}{\lambda}$: 表征对流传热强弱.

$$Re = \frac{\rho u L}{\eta} = \frac{uL}{\nu}: \text{ (强制对流时) 惯性力与黏性力的相对大小.}$$

$$Gr = \frac{\alpha g \Delta t L^3}{\nu^2}: \text{ (自然对流时) 浮升力与 } \sim \sim \sim$$

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

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

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

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: P179 (11-12) · 3个修正

层流传热: P180 ()

纵掠平板: { 层流 ($Re < 5 \times 10^5$). P183. 式 (11-16) (11-17)

湍流 ($Re = 5 \times 10^5 \sim 10^7$) P183. (11-18)

混合 (实际) () (11-19) (11-19a) (11-19b)

外掠横掠单管: { 脱体: 0次, 1次, 2次 (Nu跃迁)

计算: P184. (11-20)

横掠管束: P185 (11-21)

又排数 h 大, 但阻力损失大

7. 1188. 自然对流换热: 由重力及密度变化引起流体运动

· 大空间、有限空间 · 受热: 由下向上增厚边界层, (冷却相反)

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

8. Pr_0 : 膜状凝结: $\theta < 90^\circ$, 珠状凝结: $\theta > 90^\circ$, $h_{\text{珠}} = 5 \sim 10 h_{\text{膜}}$

9. Pr_2 : 改变凝结换热: 不凝结气体, 液膜排出, 流速流向, 尖峰表面, 表面改性

10. Pr_3 : 自然对流; 核态沸腾区 (饱和沸腾), 过渡沸腾, 稳定膜态沸腾

CH15: 压气机

§1 单级活塞式压气机

一. 工作原理:

1. 1-1 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. $W_{c,s} > W_{c,n} > W_{c,T}$. $T_{2T} < T_{2n} < T_{2s}$

\therefore 理想过程: 定温: 充分冷却, 多级压缩, 级间冷却; 实际: 多变.

\hookrightarrow 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, 比热容为定值

§3. 多级压缩, 级间冷却

1. $\pi_{opt} = \sqrt[N]{\frac{p_{N+1}}{p_1}}$

2. 各级压缩耗功相等, 各级压缩升温相等, 各级冷却总放热相等

\hookrightarrow 对压气机的设计, 运行有利的措施

CH16 汽机的种类

1. P270. 燃气轮机 = 叶轮式压气机、燃烧室、燃气轮机本体

压缩 \rightarrow 定压燃烧 \rightarrow 混合降温 \rightarrow 膨胀做功

2. P271. 布雷顿循环: 绝热压缩 - 定压吸热 - 绝热膨胀 - 定压放热

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \rightarrow \text{循环的热效率}$$

3. P273. $\eta_T = \frac{W_T}{Q_T} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_4}$ 相对内效率 (16-7).

4. P275. 提高热效率的方式: 1). 回热: 吸放热 \downarrow , 净功不变.

2). 分压级压缩, 级间冷却 3). 改善膨胀过程

CH17. 略.

CH18.

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

$$\varepsilon' = 1 + \varepsilon \text{ 逆循环.}$$

2. P292: 1 \rightarrow 2: 绝热压缩.

$$q_H = h_2 - h_3$$

2 \rightarrow 3: 定压冷却

$$w_0 = h_2 - h_1$$

3 \rightarrow 4: 绝热节流: $h_3 = h_4$

$$q_L = h_1 - h_4$$

4 \rightarrow 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. 辐射传热. 一. 基本物理定律.

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)

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

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

4. P200. 灰体: $\alpha_\lambda = \alpha = \text{const.}$ $\therefore \varepsilon, \alpha$ 体现了辐射、吸收在数量上的差距

5. P201. $\frac{E}{\alpha} = E_b$ 1). 黑体辐射最强, 2) $\alpha = \varepsilon$ 3). 与热平衡

$\cdot \alpha, \varepsilon$ 为物性参数 $\therefore \varepsilon = \alpha$ 无条件 \rightarrow 但辐射体为太阳时误差大

二. 角系数: $X_{1,2}$: 表面1发出的辐射能落在表面2上的百分比. 纯几何因子

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). 三个非封闭表面

4). 2个可以看得见的非凹表面

三. 黑体间的辐射传热:

$$\phi_{1,2} = E_{b1} A_1 X_{1,2} - E_{b2} A_2 X_{2,1} \quad \text{平衡时: } \phi_{1,2} = A_1 X_{1,2} (E_{b1} - E_{b2}) = 0$$

$$\text{一般: } \phi_{1,2} = A_1 X_{1,2} (E_{b1} - E_{b2}) = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}} \quad \rightarrow \text{空间辐射热阻}$$

四. 灰体表面的辐射传热

1. 有效辐射 J_1 投入辐射 G_1 $J_1 = E_1 + \rho G_1 = E_1 + (1-\alpha)G_1$

$q_1 = J_1 - G_1$ $\therefore q_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1}}$ $\Phi_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1-\epsilon_1}{A\epsilon_1}}$ $\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A}$ 表面辐射热阻

2. P208: 两个灰体表面: $\psi_1 = -\psi_2$

$$\psi_{1,2} = \psi_1 = -\psi_2 = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\epsilon_1}{A_1\epsilon_1} + \frac{1}{A_1X_{1,2}} + \frac{1-\epsilon_2}{A_2\epsilon_2}}$$

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 2 个表面辐射热阻及一个空间辐射热阻

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. 固体的辐射仅在表面进行,

气体在整个容积内进行.