

热工基础与应用

绪论

热能和机械能相互转换的过程

- 热机：热能转换为机械能的机器（或设备）。
- 热动力装置：从燃料燃烧中得到热能以及利用热能得到动力的整套设备。
- 热源：燃料
- 热机：内燃机
- 冷源：冷却液或者空气
- 工质：实现能量传递与转换的物质，又称工作介质
- 工质选择气态物质较好。

第1章 热能转换的基本概念

1.1 热力系统

- 外界：热力系统以外的一切物质和空间。
- 边界：热力系统与外界的交界处。

$$\text{系统与外界交换} \begin{cases} \text{质量} \\ \text{能量} \begin{cases} \text{热量} \\ \text{功量} \end{cases} \end{cases}$$

- 根据系统与外界质量交换情况：
 - 闭口系：与外界无质量交换
 - 开口系：与外界有质量交换（内部质量可恒定）
- 根据系统与外界质量和能量交换情况：
 - 绝热系：与外界无能量交换
 - 孤立系：与外界无能量、质量交换
 - 简单可压缩系：热力系和外界交换的功量只有一种体积变化功。

$$\text{容积变化功} \begin{cases} \text{膨胀功} \\ \text{压缩功} \end{cases}$$

$$\text{状态参数特征} \begin{cases} \text{单值性：状态与状态参数一一对应} \\ \text{积分特征：状态参数变化量与路径无关，只与初终态有关} \end{cases}$$

$$\text{状态参数数学特征} \begin{cases} \text{单值性: } \int_1^2 dx = x_2 - x_1 \\ \text{积分特征: } \oint dx = 0 \end{cases}$$

$$\text{状态参数} \begin{cases} \text{强度量: 与系统含有物质总量无关} & \text{如 } p, T \\ \text{广延量: 与系统含有物质总量有关} & \text{如 } V, U, S, H \end{cases}$$

广延量的比参数具有强度量的性质，不具有可加性。

基本状态参数：可以直接或容易测量的状态参数。如 p 、 v 和 T 。

1.2 工质的热力状态及其基本状态参数

温度

热力学第零定律：如果两个热力系统分别与第三个热力系统处于热平衡，则这两个热力系统也必然处于热平衡。

温标

摄氏温标

规定：1atm，纯水的凝固点为 0°C ，沸点为 100°C 。

华氏温标

热力学温标

规定：水的三相点温度 273.16K

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15$$

压力

压力测量：弹簧管压力计或U型管压力计

压力计所测得的压力是工质的真实压力 p （绝对压力）与环境压力 p_b 之差，叫做表压力 p_g 或真空度 p_v

$p > p_b$ 时，压力计称为压力表，读数称为表压力 p_g 。 $p = p_b + p_g$

$p < p_b$ 时，压力计称为真空表，读数称为真空度 p_v 。 $p = p_b - p_v$

比体积：密度的倒数

$$v = \frac{V}{m}$$

1.3 平衡状态，状态方程式，坐标图

实现平衡的充要条件：系统内部及系统与外界之间不存在势差

$$\text{热力平衡状态} \begin{cases} \text{热平衡} & \Delta T = 0 \\ \text{力平衡} & \Delta p = 0 \\ \text{相或化学平衡} & \Delta \mu = 0 \end{cases}$$

1.4 工质的状态变化过程

准平衡（静态）过程

可逆过程

实现条件：无耗散效应 + 准静态过程 = 可逆过程

与准静态过程区别是有无耗散效应

可逆过程意义 $\begin{cases} \text{可逆过程是最优过程。} \\ \text{易于数学计算。} \\ \text{是一切实际过程的理想化极限模型，可以作为实际过程中能量转换效果比较的标准。} \end{cases}$

1.5 过程功和热量

功

在可逆条件下有

$$\delta W = pAdx = pdV, \quad W = \int_1^2 pdV$$

热力学中约定：**系统对外界作功取为正，外界对系统作功取为负。**

功不是状态参数，是过程量。

过程量用 δ 来表示，状态参数为微增量，用 d 来表示。

热量

$$\delta Q = TdS$$

$$Q = \int_1^2 TdS$$

系统吸热为正，放热为负。

1.6 热力循环

$$\text{种类} \begin{cases} \begin{cases} \text{正循环} \\ \text{逆循环} \end{cases} \\ \begin{cases} \text{可逆循环} \\ \text{不可逆循环} \end{cases} \end{cases}$$

评价循环的指标：
经济性评价为

$$\frac{\text{收益}}{\text{代价}}$$

正循环
热效率

$$\eta_t = \frac{W}{Q_1}$$

制冷系数

$$\epsilon = \frac{Q_2}{W}$$

供热系数

$$\epsilon' = \frac{Q_1}{W}$$

第2章 热力学第一定律

本质：能量守恒与转换定律在热现象中的应用。
热力学能（状态参数）：储存在系统内部的能量。
热力学能 = 内动能 + 内位能
热力学能总以相对量出现，热力学能零点人为规定。
外部储存能 = 系统的宏观动能 + 重力位能
宏观动能

$$E_k = \frac{1}{2}mc_f^2$$

重力位能

$$E_p = mgz$$

总储存能

$$E = U + E_k + E_p = U + \frac{1}{2}mc_f^2 + mgz$$

热力学第一定律的数学表达式：

$$\delta Q = dE_{sy} + (e_2\delta m_2 - e_1\delta m_1) + \delta W_{tot}$$

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

基本表达式

$$Q = \Delta U + W$$

工质吸热 Q ，一部分增加热力学能 U ，另一部分以做功方式传递至外界。
适用于闭口系的一切过程 and 任何工质。

可逆过程

$$Q = \Delta U + \int p dV$$

$$\delta Q = dU + p dV$$

对于循环

$$\left. \begin{aligned} \oint \delta Q &= \oint dU + \oint \delta W \\ \oint dU &= 0 \end{aligned} \right\} \oint \delta Q = \oint \delta W$$

开口系统能量方程式

推动功

$$W_{push1} = (p_1 A_1) L_1 = p_1 (A_1 L_1) = p_1 V_1$$

同理

$$W_{push2} = p_2 V_2$$

与宏观流动有关，流动停止，推动功不存在。
并非工质本身的能量变化引起，而由外界做出。

流动功

$$W_f = p_2 V_2 - p_1 V_1 = W_{push1} + W_{push2}$$

流率

$$\Phi = \frac{\delta Q}{d\tau}$$

焓（状态参数）

$$H = U + pV$$

比焓（状态参数）

$$h = u + pv$$

式中， h 为比焓， $h = H/m$ 。

稳定流动能量方程

适用范围：任何流动工质，任何稳定流动过程。

技术功

将工程上可以直接利用的功称为技术功，用 W_t 来表示。

$$W_t = \frac{1}{2}m\Delta c^2 + mg\Delta z + W_s$$

$$Q = \Delta H + W_t$$

$$q = \Delta h + w_t$$

稳流系与闭口系的联系

$$w = \Delta(pv) + w_t = w_f + w_t$$

$$w \begin{cases} w_t \\ \Delta(pv) \end{cases} \begin{cases} \frac{1}{2}\Delta c^2 \\ g\Delta z \\ w_s \end{cases}$$

可逆过程

$$w_t = - \int_1^2 v dp$$

能量方程的应用

- 热力学问题经常可忽略动、位能变化。

动力机（汽轮机、燃气轮机）

- 稳定流动系统
- 绝热

$$q = \Delta h + w_s$$

$$q = 0$$

$$w_s = -\Delta h = h_1 - h_2$$

输出的轴功来源于工质从动力机进口到出口的焓降。

压气机（水泵、压缩机）

- 稳定流动系统

- 绝热

$$q = \Delta h + w_s$$

$$q = 0$$

$$w_c = -w_s = \Delta h = h_2 - h_1$$

热交换器（锅炉、冷凝器）

- 稳定流动系
- 有热量交换无功量交换

$$q = \Delta h + w_s$$

$$w_s = 0$$

$$q = \Delta h = h_2 - h_1$$

节流

- 稳定流动系
- 绝热

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_s$$

$$\Delta h = 0, \quad h_1 = h_2$$

第3章 热力学第二定律

热力过程的方向性

功→热

热力学第二定律实质：研究热力过程的方向性。

第二类永动机：设想的从单一热源取热并使之完全变为功的热机。

卡诺循环

卡诺循环：工作在高、低温两个热源间的可逆正循环，由两个定温和两个绝热可逆过程组成。

$$\eta_{t,C} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

概括性卡诺循环

由两个可逆定温过程和两个可逆多变过程（ n 相同）组成。

回热：循环中工质内部互相传递热量。

极限回热：可逆回热。

实质：双热源间的极限回热循环

回热可以提高循环的热效率，其热效率与卡诺循环热效率相等。

多热源可逆循环

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{\overline{T_2} \Delta S}{\overline{T_1} \Delta S} = 1 - \frac{\overline{T_2}}{\overline{T_1}}$$

卡诺定理

定理一：在相同温度的高温热源和相同温度的低温热源之间工作的一切可逆循环，其热效率都相等，与可逆循环的种类无关，与采用哪一种工质也无关。

定理二：在相同的高温热源和相同的低温热源间工作的不可逆循环的热效率必小于可逆循环的热效率。

- 焵：在环境条件下，能量中可转化为有用功的最高份额。
- 火无：在环境条件下不能转化为有用功的那部分能量。

热量焵

Ex_Q ： Q 中最大可能转换为功的部分。

$$Ex_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \times Q$$

$$An_Q = Q - Ex_Q$$

状态参数熵

可逆过程

$$\frac{\delta Q_1}{T_1} + \frac{\delta Q_2}{T_2} = 0$$

$$\oint \frac{\delta Q_{rev}}{T} = 0$$

$$\int_{1-A-2} \frac{\delta Q_{rev}}{T} = \int_{1-B-2} \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

熵

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

比熵

$$ds = \frac{\delta q_{rev}}{T}$$
$$\Delta S = \int_1^2 dS = \int_1^2 \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

不可逆过程

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

克劳修斯不等式

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

= 可逆循环, < 不可逆循环, > 不可能。用于判断循环方向性。

不可逆绝热过程

熵产：由不可逆因素引起的系统的熵的变化。 δs_g , δS_g (决定是否可逆)

熵流：系统与外界换热而引起的系统熵的变化。 δs_f , δS_f (决定是否绝热)

$$dS = \delta S_{f,Q} + \delta S_g$$
$$\delta S_g \geq 0$$

过程不可逆性越大，熵产越大。

$$\delta S_{f,Q} = \frac{\delta Q}{T}$$

吸热>0, 放热<0, 绝热=0。

熵增原理

对于孤立系,

$$\delta Q = 0$$
$$dS_{iso} \geq 0$$
$$\Delta S_{iso} \geq 0$$

其中, 可逆 = , 不可逆 >。

热量有效能损失

作功损失

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

其中, T_0 为环境温度。

取孤立系

$$\Delta S_{iso} = \Delta S_{HR} + \Delta S_m + \Delta S_{LR}$$

其中, ΔS_{HR} 是热源熵变, ΔS_m 是工质熵变, ΔS_{LR} 是冷源熵变。

第4章 理想气体的热力性质和热力过程

理想气体及其状态方程

工质 $\begin{cases} \text{理想气体(气体分子为不占体积的弹性质点且分子间无相对作用力)} \\ \text{实际气体} \end{cases}$

1 kg

$$pv = R_g T$$

m kg

$$pV = mR_g T$$

式中, R_g 为气体常数。

$$R = 8.3145 J / (mol \cdot K)$$

$$R_g = \frac{R}{M} J / (kg \cdot K)$$

$$R_{\text{空气}} = \frac{R}{M_{\text{空气}}} = \frac{8.3145}{28.97} = 0.287 kJ / (kg \cdot K)$$

理想气体的比热容

热容

$$C = \frac{\delta Q}{dT} J \cdot K^{-1}$$

比热容 (过程量)

$$c = \frac{C}{m} = \frac{\delta q}{dT} J / (kg \cdot K)$$

- 比定容热容: 定容过程的比热容 c_V
- 比定压热容: 定压过程的比热容 c_p

$$c_V = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_V$$

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

当偏导变为导数时只适用于理想气体。

- 对于理想气体， c_p 、 c_V 是关于温度的单值函数，是状态参数。

$$h = u + R_g T$$

$$\frac{dh}{dT} = \frac{du}{dT} + R_g$$

$$c_p = c_V + R_g$$

比热容比

$$\gamma = \frac{c_p}{c_V} = \kappa$$

$$c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_g$$

$$c_v = \frac{1}{\kappa - 1} R_g$$

平均比热容

$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c dt}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{0^\circ C}^{t_2} c dt - \int_{0^\circ C}^{t_1} c dt}{t_2 - t_1} = \frac{c \Big|_{0^\circ C}^{t_2} t_2 - c \Big|_{0^\circ C}^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}$$

唯一用摄氏度的地方。

理想气体的热力学能，焓和熵

$$\text{热力学能} \begin{cases} \text{内动能} \\ \text{内势能} \end{cases}$$

适用于理想气体。

$$ds = c_V \frac{dT}{T} + R_g \frac{dv}{v} = c_p \frac{dT}{T} - R_g \frac{dp}{p} = c_V \frac{dp}{p} + c_p \frac{dv}{v}$$

$$\Delta s = c_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$\Delta s = c_p \ln \frac{v_2}{v_1} + c_V \ln \frac{p_2}{p_1}$$

理想气体的基本热力过程

定容过程

定压过程

在 $T - s$ 图上，等压线比等容线平缓。

定温过程

定熵过程

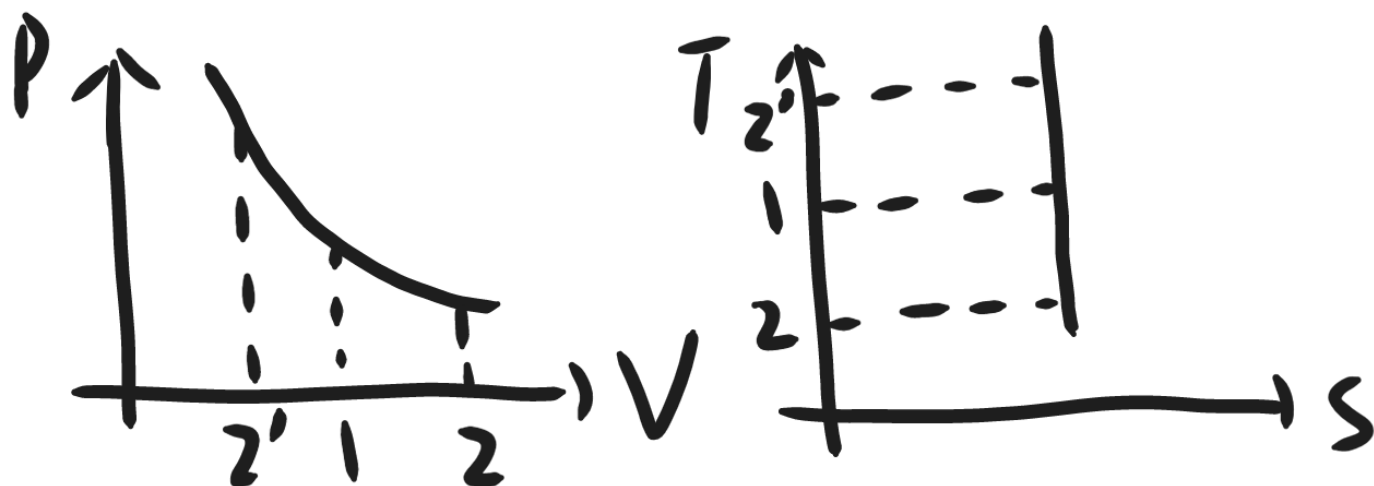
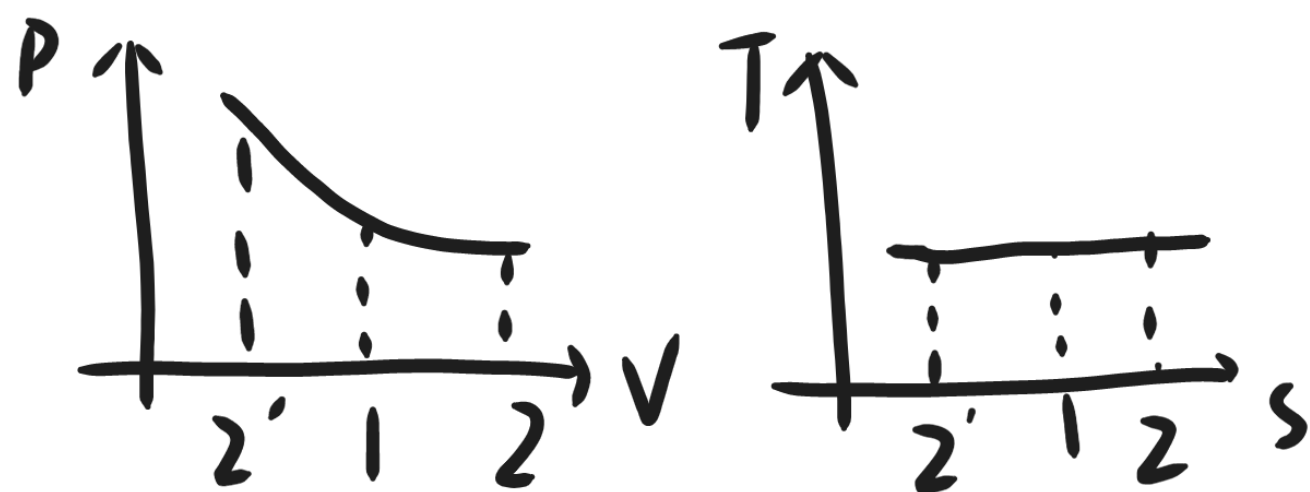
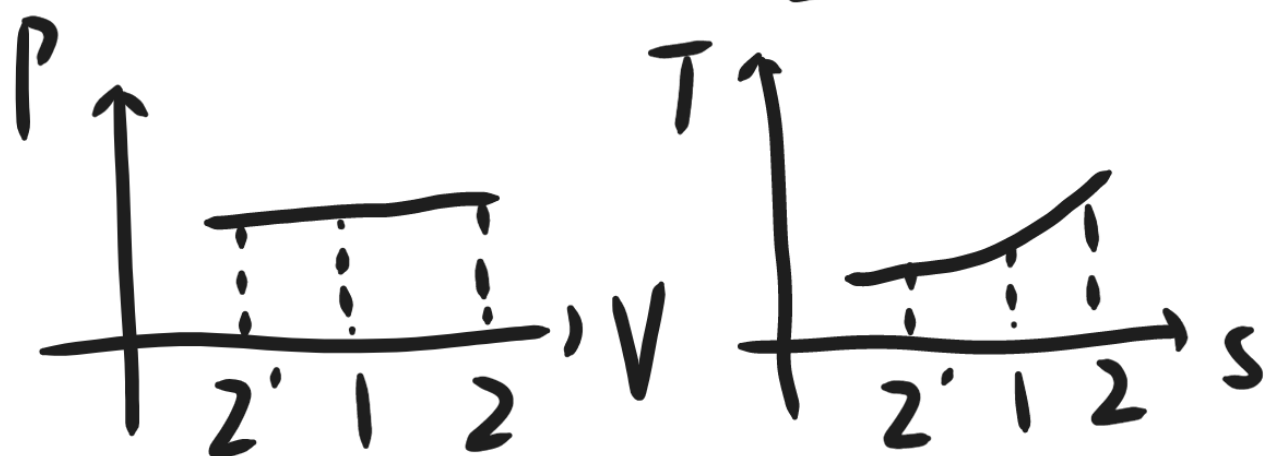
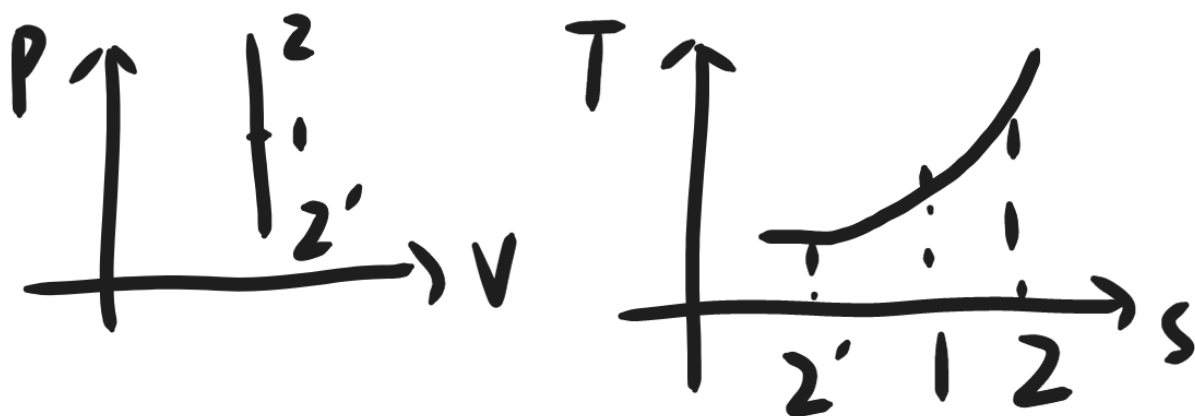
定熵过程 = 绝热过程 + 可逆过程

$$\gamma = \frac{c_p}{c_V} = - \frac{v dp}{p dv}$$

$$pv^\kappa = \text{const}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1}$$

在 $p - v$ 图上，等熵线比等温线陡峭。



理想气体的多变过程

$$pv^n = \text{const}$$

第5章 蒸气的热力性质和热力过程

定压下水蒸气的发生过程

- 饱和状态：液体分子脱离其表面的汽化速度 = 气体分子回到液体中的凝结速度
- 饱和温度 t_s ：处于饱和状态的气、液温度相同。
- 饱和压力 p_s ：蒸气的压力。
- t_s 与 p_s 成正比。

过冷（未饱和）水	饱和水	湿饱和蒸汽	干饱和蒸汽	过热蒸汽
$t < t_s$	$t = t_s$	$t = t_s$	$t = t_s$	$t > t_s$
$v < v'$	$v = v'$	$v' < v < v''$	$v = v''$	$v > v''$
$h < h'$	$h = h'$	$h' < h < h''$	$h = h''$	$h > h''$
$s < s'$	$s = s'$	$s' < s < s''$	$s = s''$	$s > s''$
$u < u'$	$u = u'$	$u' < u < u''$	$u = u''$	$u > u''$

蒸气热力性质图表

两相比例由干度 x 确定

$$x = \frac{\text{干饱和蒸汽质量}}{\text{湿饱和蒸汽质量}} = \frac{m_v}{m_v + m_f}$$

- $x = 0$, 饱和水; $x = 1$, 干饱和蒸汽
- $0 \leq x \leq 1$

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'}$$

$$v_x = xv'' + (1 - x)v'$$

- 在过冷水和过热蒸汽区域, x 无意义

蒸气的热力过程

$$q = \Delta u + w$$

$$q = \Delta h + w_t$$

对于水蒸气, 适用于等容过程

$$q_v = \Delta u$$

对于水蒸气，适用于等压过程

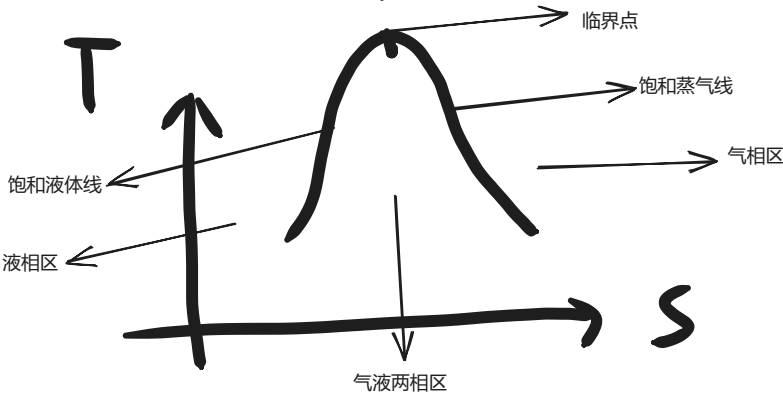
$$q_p = \Delta h$$

可逆过程

$$w = \int p dv$$

$$w_t = - \int v dp$$

$$q = \int T ds$$



第7章 热量传递的三种基本方式简介

热量传递的三种基本方式

- 热传导
- 热对流
- 热辐射

热传导

- 傅里叶定律

$$\Phi = -\lambda A \frac{t_2 - t_1}{\delta} = -\lambda A \frac{dt}{dx}$$

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

式中， Φ 为热流量，单位为W。 q 为热流密度，即通过单位面积的热流量，单位为W/m²。

热对流

- 流动起因
- 强制对流换热
 - 自然对流换热

是否相变 $\begin{cases} \text{相变对流换热} \\ \text{无相变对流换热} \end{cases}$

- 牛顿冷却公式

$$\Phi = hA\Delta t$$

$$q = \frac{\Phi}{A} = h\Delta t$$

式中, h 为表面传热系数。

⚠ Caution

约定对流换热量永远取正值。

流动方式: 强制 > 自然对流

介质: 水 > 空气

相变: 有相变 > 无相变 水蒸气凝结 > 有机蒸汽凝结

热辐射

- 黑体向外辐射热流量

$$\Phi = A\sigma T^4$$

式中, σ 为黑体辐射常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

- 实际物体向外辐射热流量

$$\Phi = \epsilon A\sigma T^4$$

式中, ϵ 为该物体的发射率, 其值总小于1, 表示物体辐射能力接近黑体辐射能力的程度。

- 物体被空腔所包围, 辐射换热

$$\Phi = \epsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

适用于 A_1 远小于 A_2 的情况。

- 辐射表面传热系数

$$\Phi_r = h_r A \Delta t$$

- 复合传热表面传热

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_r = (h_c + h_r) A \Delta t = h A \Delta t$$

式中, h 为包括对流与辐射在内的复合传热表面传热系数。

传热过程和传热系数

热量由壁面一侧的流体通过壁面传到另一侧流体中的过程称为传热过程。

- 传热方程式

$$\Phi = kA(t_{f1} - t_{f2})$$

式中， k 为传热系数。

- 过程：对流换热 - 导热 - 对流换热

- $$\begin{cases} \Phi = Ah_1(t_{f1} - t_{w2}) \\ \Phi = A\lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \\ \Phi = Ah_2(t_{w2} - t_{f2}) \end{cases}$$

在稳态情况下，由上面三个式子计算的热流量应是相等的。

- 稳态：温度不随时间变化。
- 三式相加

$$t_{f1} - t_{f2} = \Phi \left(\frac{1}{Ah_1} + \frac{\delta}{A\lambda} + \frac{1}{Ah_2} \right)$$
$$\Phi = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{Ah_1} + \frac{\delta}{A\lambda} + \frac{1}{Ah_2}}$$

- 导热热阻 $R_\lambda = \delta/\lambda A$
- 对流换热热阻 $1/Ah$
- 三个热阻串联

Hint

强化传热过程，从最大热阻入手。

第8章 导热的基本定律及稳态导热

导热基本定律

- 温度场：物体中各点温度值所组成的集合。

$$\begin{cases} \text{稳态温度场} & t = f(x, y, z) \\ \text{非稳态温度场} & t = f(x, y, z, \tau) \end{cases}$$

- 等温线：在同一瞬时，物体内温度相同的各点所连成的线。（不能相交）
- 温度梯度：某点所在等温线与相邻等温线之间的温差与其法线间距离之比取极限。

傅里叶定律

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \vec{n} \frac{\partial t}{\partial n} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \vec{i} - \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \vec{j} - \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \vec{k}$$

对于一维温度场，有

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \frac{dt}{dx} \vec{i}$$

- 负号的含义：热量传递方向指向温度降低方向，与温度升高方向相反。
- 梯度向量垂直于等温线方向。

导热系数

$$\lambda = \frac{|\vec{q}|}{|\text{grad}t|}$$

- 标量，单位 $W/(m \cdot K)$ 。
- 用来表征物体导热本领的大小。
- 常用物质的导热系数
金属 > 非金属 固相 > 液相 > 气相
- 空气的导热热阻很大，而一旦流动则导热热阻失效。

导热微分方程式及定解条件

热平衡方程：

导入微元体的总热流量 - 导出微元体的总热流量 + 微元体内热源的生成热 = 微元体热力学能的增量

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi}$$

简化为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{\Phi}}{\rho c} = a \nabla^2 t + \frac{\dot{\Phi}}{\rho c}$$

式中， $a = \lambda/\rho c$ 为热扩散率，单位为 m^2/s ，是一个物性参数。

通过无限大平壁的导热

第一类边界条件：给定边界上的温度值

$\tau > 0$ 时,

$$t_w = f_1(\tau)$$

第二类边界条件：给定边界上的热流密度值

$\tau > 0$ 时,

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = q_w = f_2(\tau)$$

第三类边界条件：给定边界上物体与周围流体间的对流传热表面传热系数 h 及周围流体的温度 t_f

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = h(t_w - t_f)$$

通过无限长圆筒壁的导热

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi}$$

工程上常用**线热流量** Φ_l ，它是单位管长的导热热流量，即

$$\Phi_l = \frac{\Phi}{l} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

通过等截面直肋的导热

- 肋片是指依附于基础表面上的扩展表面。
- 肋片顶端可以认为是绝热， $q = 0$ 。
- 过剩温度 $\theta = t - t_f$

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{hP\theta}{\lambda A_c}$$

式中， P 为参与传热的截面周长。

$$\theta = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx}$$

$$m = \sqrt{\frac{hP}{\lambda A_c}}$$

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{t - t_f}{t_0 - t_f} = \frac{\cosh[m(H - x)]}{\cosh(mH)}$$

肋根处热流量

$$\Phi = -\lambda A \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{x=0} = \lambda A \theta_0 m \tanh(mH)$$

肋端温度

$$\theta_H = \frac{\theta_0}{\cosh(mH)}$$

考虑端面散热

$$H_c = H + \frac{\delta}{2}$$

Seealso

减小套管温度计测温误差的措施

1. 管道外覆盖保温材料
2. 采用足够长的测温套管
3. 选用热导率小的材料做套管
4. 在强度允许的情况下，尽量采用薄壁套管
5. 强化套管与流体间的传热

第9章 非稳态导热

非稳态导热 $\begin{cases} \text{周期性} \\ \text{非周期性} \end{cases}$

温度分布阶段 $\begin{cases} \text{非正规状况} \\ \text{正规状况} \end{cases}$

- 在垂直于热量传递方向的每一个截面上，导热量处处不同。
- 导热体的内能随时间发生变化，导热体要储存或释放能量。
- 热扩散率

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

物性参数，单位为 m^2/s 。表征物体内部温度趋于均匀化的能力，或者说传递温度变化的能力。
导热能力/蓄热能力。

非稳态导热问题的求解及诺谟图

- 第三类边界下，非稳态导热是最常见的一种情况。
- 毕渥准则数（无量纲）

$$Bi = \frac{hl}{\lambda}$$

式中 l 为特征尺度，或

$$Bi = \frac{h\delta}{\lambda} = \frac{\delta/\lambda}{1/h}$$

意义为

$$\frac{\text{物体内部导热热阻}}{\text{物体表面对流换热热阻}}$$

1. $Bi \rightarrow 0$ ，任何时间物体内的温度都趋于一致。
2. $Bi \rightarrow \infty$ ，物体边界温度一开始就趋于 ∞ 。
3. 其他情况介于中间。

- 对称面就是绝热面。
- 傅里叶数（无量纲）

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$$

表征过程进行的深度。

•

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{\theta_m}{\theta_0} \cdot \frac{\theta}{\theta_m}$$

集总参数法

- 集总体：
- 特点：可以处理任意形状的物体。
- 方程

$$\rho V c \frac{dt}{d\tau} = -hA(t - t_{\infty})$$

热力学能增量 = 表面对流换热量

- 解

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

可作如下变化

$$\frac{hA}{\rho V c} \tau = \frac{h(V/A)}{\lambda} \cdot \frac{a\tau}{(V/A)^2} = \text{Bi}_V \text{Fo}_V$$

- 非稳态导热量计算

$$Q = \int_0^\tau \Phi(\tau) d\tau = \theta_0 \rho V c [1 - \exp(-\frac{hA}{\rho V c} \tau)]$$

- 符合集总体的判别条件

$$\text{Bi} = \frac{hl}{\lambda} < 0.1$$

过余温度最大偏差小于5%。 l 为特征长度，对厚为 2δ 的平板取 δ ，对长圆柱与球取半径 R ，对不规则物体，取 V/A 。

- 集总参数法为计算非稳态传热的首选方法。
- 时间常数 $\rho V c / (hA)$ ，越小响应越快。

第11章 对流传热

对流传热概述

- 约定对流换热量永远取正值

$$\Delta t = |t_f - t_w|$$

- 表面传热系数

$$h = \frac{\Phi}{A(t_w - t_\infty)}$$

影响对流换热的因素

1. 流动的起因 $\begin{cases} \text{强迫对流换热(单位时间换热量大)} \\ \text{自然对流换热} \end{cases}$
2. 流动的速度与形态 $\begin{cases} \text{层流} \\ \text{湍流(紊流)(单位时间换热量大)} \end{cases}$

3. 换热表面几何因素
- | | |
|---|--------|
| $\left\{ \begin{array}{l} \text{形状} \left\{ \begin{array}{l} \text{内流} \\ \text{外流} \end{array} \right. \\ \text{尺度} \\ \text{相对位置} \\ \text{表面粗糙情况} \end{array} \right.$ | 形状 |
| | 尺度 |
| | 相对位置 |
| | 表面粗糙情况 |

4. 流体有无相变 (有相变单位时间换热量大)

5. 流体的热物理性质

- 强迫对流传热, 雷诺数 (惯性力与黏性力之比)

$$Re = \frac{ul}{\nu} = \frac{ud_i}{\nu} = \frac{qd}{\rho A \nu}$$

式中, q 为质量流量, d 为特征长度, $d = 4A/P$, P 为润湿周长, 流体与固体接触的壁面, 不论参与传热与否。

二、特征长度 (水力直径)

对于内流问题, u 、 L 为通道内平均流速、通道直径; 对于外流问题, u 、 L 为远处来流速度、物体主要尺寸。

这里解释说明内流问题的特征长度, 也就是水力直径。通用公式: $4S/C$ (4倍面积÷周长)

1、对于圆管: $L = 4\pi r^2 / \pi r \cdot 2 = 2r$, 即直径

2、对于矩形管: $L = 4a \cdot b / (2a + 2b) = 2ab / (a + b)$

如果是正方形: $L = b \cdot a$

如果是微通道: $L = 2a$ (a 为短边)

3、椭圆管: $L = 4a \cdot b / (1.5(a + b) - (ab)^{0.5})$

4、套管:

设套管外管内直径为 D , 外管内可有多根内管, 内管根数为 N , 内管外直径为 d_o , 当流体在套管壳侧 (内管与外管之间的空间) 流动时, 其当量直径为:

$$L = (D^2 - Nd^2) / (D + Nd)$$

如果是同轴管: $L = D - d$

自然对流传热, 格拉晓夫数 (浮升力与黏性力之比)

$$Gr = \frac{\alpha g \Delta t l^3}{\nu^2}$$

式中， α 为流体的体膨胀系数，对于理想气体， $\alpha = 1/T$ ， T 为气体的热力学温度。

- 流体的热物理性质，运动黏度

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

式中， η 为动力黏度。

- $$h_x = - \frac{\lambda}{t_w - t_\infty} \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0,x}$$

- 温度边界层

$$(t - t_w) \Big|_{\delta_t} = 99\% (t_\infty - t_w)$$

- 普朗特数（黏度与热扩散率之比，流体动量扩散能力与热扩散能力之比）

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta c_p}{\lambda}$$

- 努赛尔数（流体在壁面处法向无量纲过余温度梯度）

$$Nu = \frac{hl}{\lambda}$$

- 无相变强制对流换热

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

- 自然对流换热

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

强制对流传热及其实验关联式

- 管内湍流换热计算

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^n (\epsilon_l) (\epsilon_t) (\epsilon_R)$$

式中，下标 f 表示采用流体的平均温度作为定性温度， $t_f = (t'_f + t''_f)/2$ 。流体被加热时， $n = 0.4$ ，流体被冷却时， $n = 0.3$ 。特征长度取管内径。 ϵ_l 为短管修正系数，适用于 $l/d \leq 60$ 的直管。

$$\epsilon_l = 1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{0.7}$$

ϵ_R 为弯管修正系数，式中 R 为弯管的曲率半径

$$\left. \begin{array}{l} \text{对于气体} \quad \epsilon_R = 1 + 1.77 \frac{d}{R} \\ \text{对于液体} \quad \epsilon_R = 1 + 10.3 \left(\frac{d}{R} \right)^3 \end{array} \right\}$$

ϵ_t 为温度修正系数， η_w 表示以壁面平均温度 t_w 作为定性温度时的流体黏度。

$$\left. \begin{array}{l} \text{液体被加热} \quad \epsilon_t = \left(\frac{\eta_f}{\eta_w} \right)^{0.11} \\ \text{液体被冷却} \quad \epsilon_t = \left(\frac{\eta_f}{\eta_w} \right)^{0.25} \\ \text{气体被加热} \quad \epsilon_t = \left(\frac{T_f}{T_w} \right)^{0.55} \\ \text{气体被冷却} \quad \epsilon_t = 1 \end{array} \right\}$$

外掠物体时的强制对流传热

- 纵掠平板

$$Nu_x = \frac{h_x x}{\lambda} = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$$

$$Nu_m = \frac{h_m l}{\lambda} = 0.664 Re_l^{1/2} Pr^{1/3}$$

式中，定性温度取流体与板的平均温度 $t_m = (t_f + t_w)/2$ ，特征长度分别为 x 和板长 l 。

- 横掠单管

$$Nu_m = C Re^n Pr^{1/3}$$

式中，定性温度为流体与壁面的平均温度 $t_m = (t_f + t_w)/2$ ，特征长度为圆管外径 d 。

- 外掠管束

$$Nu_f = C Re_{f,max}^m Pr_f^n \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^k \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^p \epsilon_z$$

式中，定性温度除 Pr_w 取壁温 t_w 外，其余都用流体在管束间的平均温度 t_f ，特征长度取管外径 d ， $Re_{f,max}$ 中的流速取流体的最大流速， ϵ_z 为管束排数修正系数。

顺排的最大流速为

$$u_{max} = u_f \frac{s_1}{s_1 - d}$$

叉排的最大流速为 $(s'_2 - d) > (s_1 - d)/2$

$$u_{max} = u_f \frac{s_1}{s_1 - d}$$

$$(s'_2 - d) < (s_1 - d)/2$$

$$u_{max} = u_f \frac{s_1}{2(s'_2 - d)}$$

自然对流传热及其实验关联式

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n$$

式中，定性温度为流体与壁面的平均温度 t_m 。特征长度为表面高度 H （竖平板及竖圆柱）、外径 d （横圆柱）。

凝结和沸腾时的相变对流传热

凝结

- 膜状凝结（设计依据）、珠状凝结（很难保持）。
- $h_{\text{珠}} > h_{\text{膜}}$
- 主要影响因素：**不凝性气体**

沸腾

- 自然对流区 - 核态沸腾区（ h 最大） - 过渡沸腾区 - 稳定膜态沸腾区
- 临界热流密度 q_{max} ，控制热负荷在 q_{max} 或DNB以下。

第12章 辐射传热

热辐射

- 物体由于热的原因而发射电磁波的现象。
- 辐射换热：物体之间通过热辐射交换热量的过程。
- 当系统达到热平衡时，辐射换热量为零，但热辐射仍然不断进行。

- 特点

{	可以在真空中传播 伴随能量形式的转变 具有强烈的方向性 辐射能与波长和温度有关
---	--

- 吸收比 $\alpha = Q_{\alpha}/Q$
- 反射比 $\rho = Q_{\rho}/Q$
- 透射比 $\tau = Q_{\tau}/Q$

- $\alpha + \rho + \tau = 1$

- 对于大多数的固体和液体, $\tau = 0$, $\alpha + \rho = 1$ (只涉及表面)
- 对于不含颗粒的气体, $\rho = 0$, $\alpha + \tau = 1$ (整个气体容积)
- 对于黑体, $\alpha = 1$
- 对于白体, $\rho = 1$
- 对于透明体, $\tau = 1$

热辐射的基本定律

- 辐射力 E : 单位时间内单位面积物体表面向其上半球空间所有方向发射的全部波长的辐射能的总值。

$$E_b = \sigma T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

式中, C_0 为黑体辐射系数, 其值为 $5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

- 发射率 (一般通过实验测定, 只取决于物体本身与外界无关)

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{E}{\sigma T^4}$$

- 投入辐射 G : 单位时间内从外界投射到单位表面积上的总辐射能。
- 吸收比 α : 物体对投入辐射所吸收的百分数。(不仅取决于物体本身, 还取决于投入辐射的特性)
- 光谱吸收比 α_λ : 物体对某一特定波长的辐射能所吸收的百分数。
- 灰体: 光谱吸收比 α_λ 与波长无关的物体

$$\alpha_\lambda = \alpha = \text{常数}$$

- 基尔霍夫定律

$$q = E - \alpha E_b$$

热平衡状态

$$\frac{E}{\alpha} = E_b$$

漫灰表面 $\alpha \equiv \epsilon$

平均角系数和黑体表面间的辐射传热

- 角系数: 把表面1发出的辐射能落在表面2上的百分数称为表面1对表面2的角系数 $X_{1,2}$ 。
- 角系数特性

1. 相对性

$$A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$$

2. 完整性 (对于由 n 个表面组成的封闭系统)

$$\sum_{j=1}^n X_{i,j} = 1$$

若表面1为非凹表面

$$X_{1,1} = 0$$

3. 分解性 (逗号后可分)

$$X_{1,2A+2B} = X_{1,2A} + X_{1,2B}$$

• 角系数的计算

黑体表面间的辐射换热

• 两个黑表面

$$\Phi_{1,2} = A_1 E_{b1} X_{1,2} - A_2 E_{b2} X_{21}$$

灰体表面间的辐射换热

- 投入辐射 G : 单位时间内从外界投射到单位表面积上的总辐射能, 单位 W/m^2 。
- 有效辐射 J : 单位时间内离开单位表面积的总辐射能, 单位 W/m^2 。

- $$J_1 = E_1 + \rho_1 G_1 = \epsilon_1 E_{b1} + (1 - \alpha_1) G_1$$
$$q_1 = J_1 - G_1$$

消去 G_1 , 得

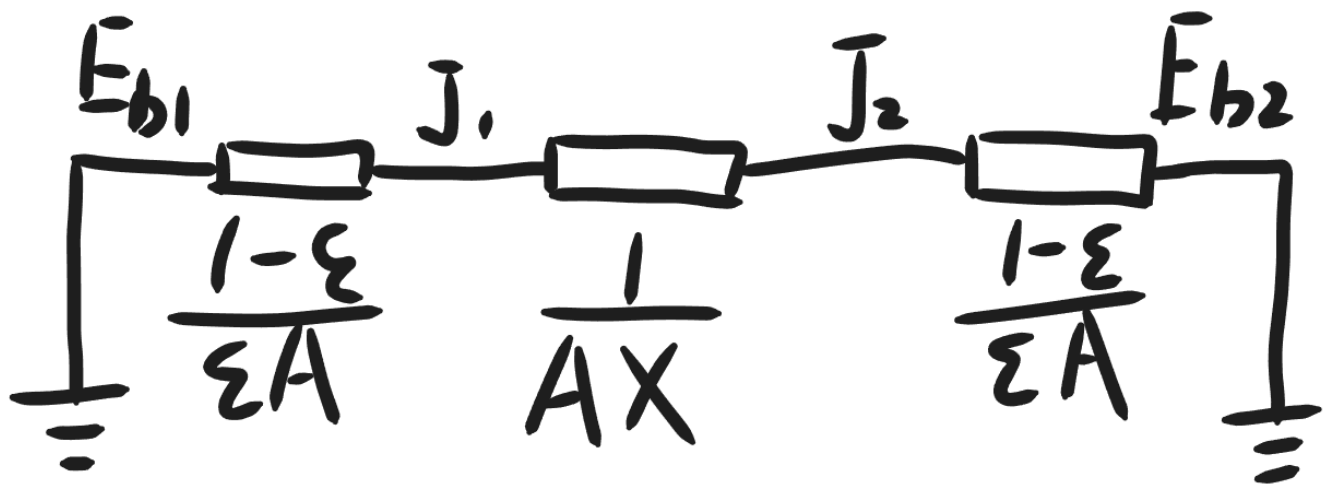
$$\Phi_1 = \frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1}}$$

空间辐射

$$\Phi_{1,2} = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}}$$

串联得

$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}}$$



强化辐射换热

改变表面辐射热阻

- 保温瓶胆镀银
- 夏季冬季服饰颜色

改变换热表面间的角系数

利用遮热板

遮热板

- 在相互辐射传热的物体之间增加一个相同的物体，使得热阻增加两个。
- 列式计算时可使用热流量相等简化计算。

第14章 换热器及其热计算

传热过程

- 传热过程：热量从壁面一侧的流体通过壁面传到另一侧流体中去的过程。

光滑壁面的总传热系数

- $$k = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}$$

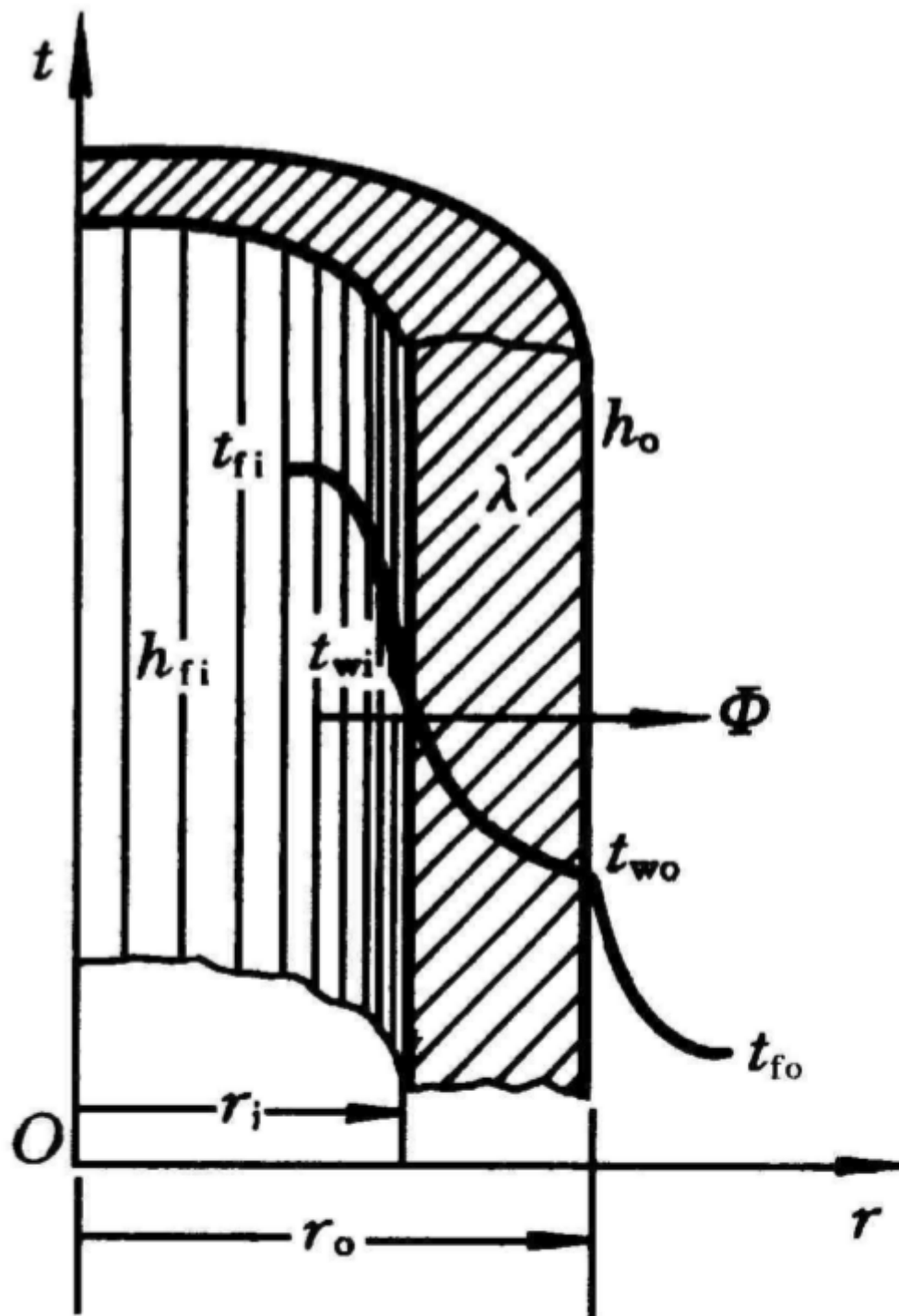
h 可以为复合换热表面传热系数，两侧面积相等。

- 可以通过在冷流体一侧加装肋片，以强化该侧传热的方式来降低壁温。（为强化传热，一般肋片加装在空气侧，但如果想要降低壁温偶尔会装在水侧）

通过圆筒壁的传热

- 一般以管外侧面积为基准

$$k = \frac{1}{\frac{d_2}{h_1 d_1} + \frac{d_2}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{h_2}}$$



换热器的型式及平均温差

$$\text{工作方式} \left\{ \begin{array}{l} \text{间壁式} \left\{ \begin{array}{l} \text{套管式(流量不大, 换热量不大)} \\ \text{管壳式} \\ \text{板式(组装方便)} \\ \text{螺旋板式} \end{array} \right. \\ \text{混合式} \\ \text{蓄热式} \end{array} \right.$$

间壁式

两种流体总体上平行流动且方向相同时称为顺流，方向相反时称为逆流，其他流动方式统称为复杂流。

管壳式

1 - 2型（前者壳程，后者管程）

2 - 4型（两个1 - 2型串联）

平均温差

假设

- 冷热流体的质量流量 q_{m1} 、 q_{m2} 以及比热容 c_1 、 c_2 是常数。
- 传热系数是常数。
- 换热器无散热损失。
- 换热面沿流动方向的导热可忽略不计。

顺流温差

$$d\Phi = k \cdot dA \cdot \Delta t$$

$$\Phi = -q_{m1}c_1 \cdot dt_1$$

$$\Phi = q_{m2}c_2 \cdot dt_2$$

$$d\Delta t = -\mu d\Phi = -\mu k \cdot dA \cdot \Delta t$$

$$\Delta t_x = \Delta t' \cdot e^{-\mu k A}$$

$$\Delta t_m = -\frac{1}{\mu k A} (\Delta t'' - \Delta t')$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t'' - \Delta t'}{\ln \frac{\Delta t''}{\Delta t'}}$$

逆流温差

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln \frac{\Delta t_{max}}{\Delta t_{min}}}$$

其它复杂流动布置的平均温差的计算

$$\Delta t_m = \psi(\Delta t_m)_{ctf}$$

- $(\Delta t_m)_{ctf}$ 是给定的冷热流体的进出口温度布置成逆流时的对数平均温差 (LMTD)
- ψ 是小于1的修正系数

各种流动形式的比较

- 顺流和逆流是两种极端情况，在相同的进出口温度下，逆流的平均温差最大，顺流的平均温差最小。
- 顺流时 $t_2'' < t_1''$ ，而逆流时， t_2'' 则可能大于 t_1'' ，可见，逆流布置时的换热最强。
- 逆流时，冷热流体的最高温度集中在换热器的同一侧，使得该处的壁温特别高。（缺点）
- 如果其中一种流体发生相变，此时没有顺流和逆流之分。
- 只要蛇形管内流体流动方向改变5次以上，此时可以作为顺流和逆流处理。

设计计算

$$\Phi = kA\Delta t_m$$

$$\Phi = q_{m1}c_1(t_1' - t_1'') = q_{m2}c_2(t_2'' - t_2')$$

1. 初步确定 k
2. 由热平衡式求出冷热流体进出口温度中的那个未知的温度
3. 确定平均温差
4. 计算所需的换热面积 A
5. 核算冷热流体的流动阻力

传热的强化和削弱

强化

- 散热
- 减小设备尺寸

削弱

- 保温
- 隔热

临界热绝缘直径

圆管

$$d_x = d_{cr} = \frac{2\lambda_a}{h_2}$$

- 如果外径大于临界绝缘直径，增加保温层厚度可以使散热量减小。
- 如果外径小于临界绝缘直径，增加保温层厚度可以使散热量增大。

第15章 压气机

- 压气机是生产压缩气体的设备。
- 不是动力机，而是消耗机械能（或电能）来得到压缩气体的设备。

压气机分类(按压力范围) $\left\{ \begin{array}{l} \text{通风机} \\ \text{鼓风机} \\ \text{压缩机} \end{array} \right.$

压气机分类(按工作原理) $\left\{ \begin{array}{l} \text{活塞式压气机} \\ \text{叶轮式压气机} \\ \text{特殊引射式压缩机} \end{array} \right.$

单级活塞式压气机的工作过程及耗功计算

- ☐ 4 - 1进气过程
- ☐ 1 - 2压缩过程
- ☐ 2 - 3排气过程

耗功是技术功
增压比

$$\pi = \frac{p_2}{p_1}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} w_s > w_n > w_T \\ T_{2s} > T_{2n} > T_{2T} \\ v_{2s} > v_{2n} > v_{2T} \end{array} \right.$$

等温压缩理想最佳

叶轮式压气机的工作原理及耗功计算

可逆

$$w_{c,s} = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

不可逆

$$w'_c = h_{2'} - h_1 = c_p(T_{2'} - T_1)$$

绝热效率

$$\eta_{c,s} = \frac{w_{c,s}}{w'_c} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$$

对于理想气体

$$\eta_{c,s} = \frac{w_{c,s}}{w'_c} = \frac{T_2 - T_1}{T_{2'} - T_1}$$

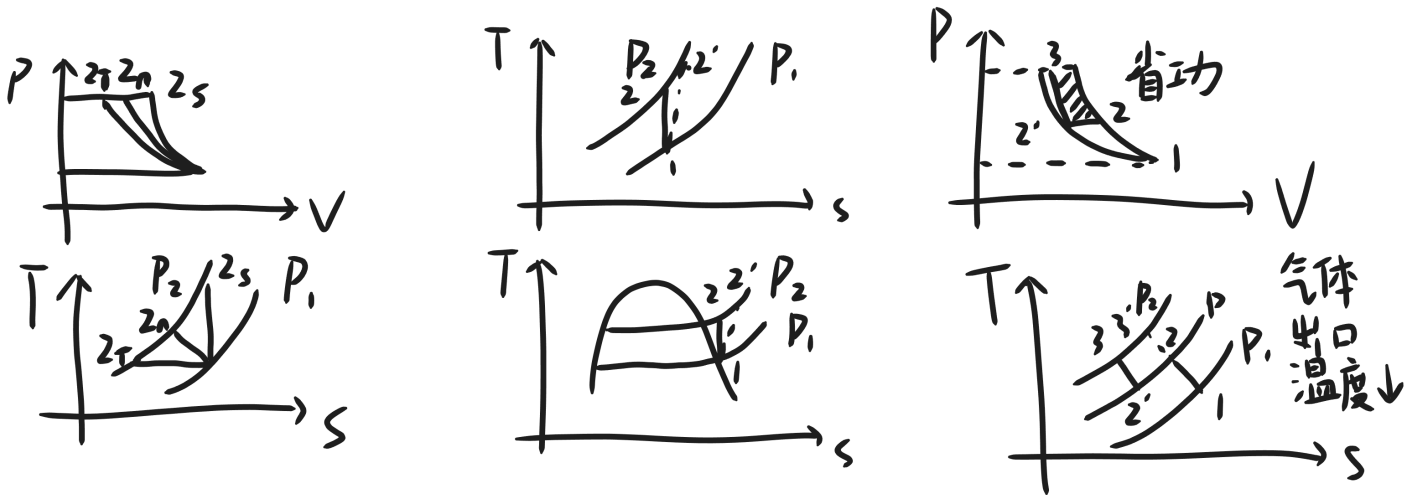
多级压缩、级间冷却

最佳增压比

$$p_2 = \sqrt{p_1 p_3}$$

若N级

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

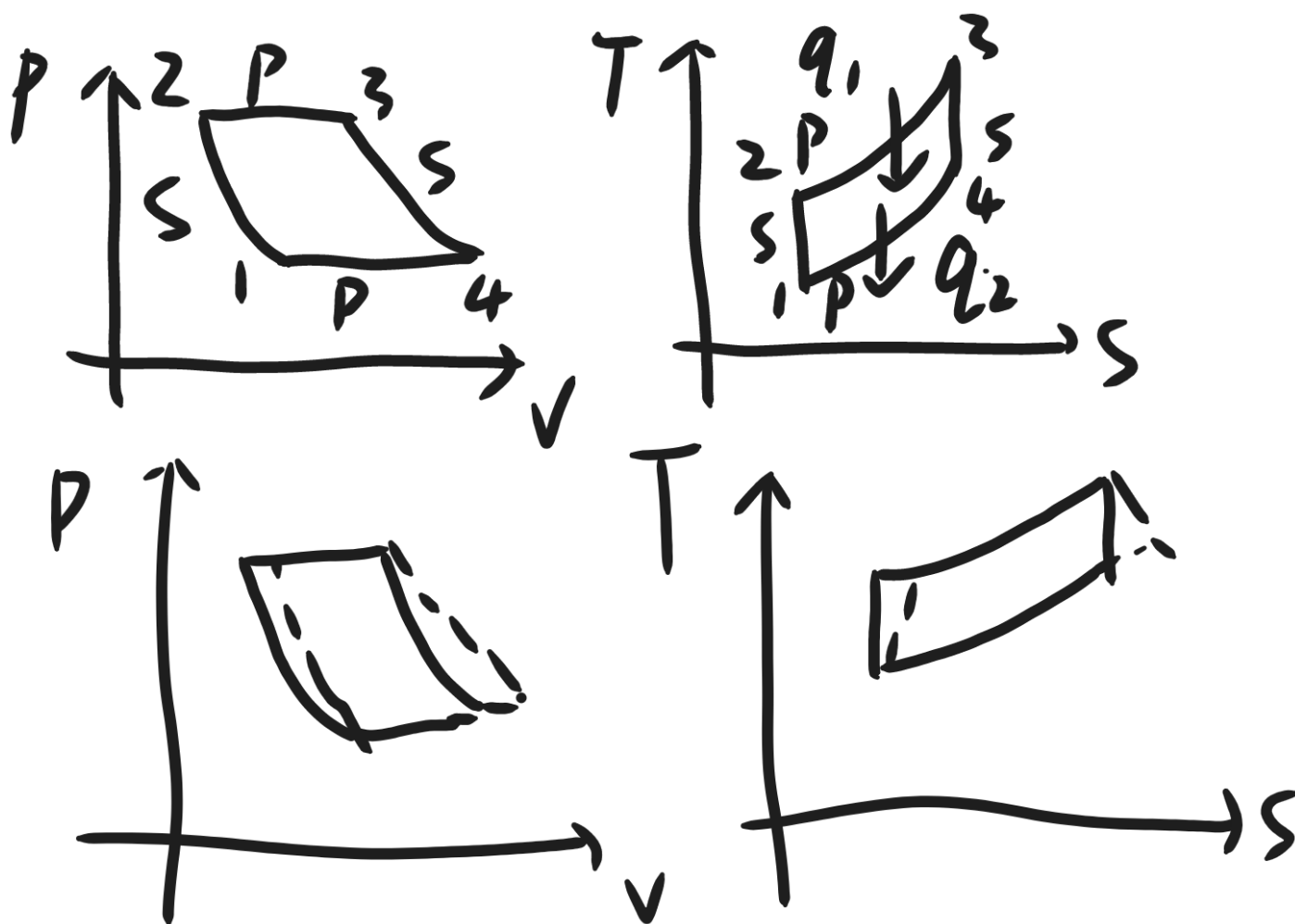


第16章 气体动力装置及循环

燃气轮机装置基本结构

- ☐ 4 - 1 换热器 - 定压放热
- ☐ 1 - 2 压气机 - 绝热压缩
- ☐ 2 - 3 燃烧室 - 定压吸热
- ☐ 3 - 4 燃气轮机 - 绝热膨胀

燃气轮机定压加热理想循环



吸热量

$$q_H = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

放热量

$$q_L = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1)$$

压气机所耗的功

$$w_c = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

燃气轮机理想膨胀过程所做的功

$$w_T = h_3 - h_4 = c_p(T_3 - T_4)$$

循环净功

$$w_0 = w_T - w_c = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$$

热效率

$$\eta_t = 1 - \frac{q_L}{q_H} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

有摩阻的燃气轮机实际循环

增压比 $\pi = p_2/p_1$

- 不可逆性表征：
压气机绝热效率

$$\eta_{c,s} = \frac{w_{c,s}}{w'_c} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_{2'} - T_1}$$

- 实际耗功

$$w'_c = h'_2 - h_1 = \frac{1}{\eta_{c,s}}(h_2 - h_1)$$

- 燃气轮机相对内效率

$$\eta_T = \frac{w'_T}{w_T} = \frac{h_3 - h_{4'}}{h_3 - h_4} = \frac{T_3 - T_{4'}}{T_3 - T_4}$$

- 实际作功

$$w'_T = h_3 - h_{4'} = \eta_T(h_3 - h_4)$$

- 净功

$$w_0 = h_3 - h_{4'} - (h_{2'} - h_1) = \eta_T(h_3 - h_4) - \frac{h_2 - h_1}{\eta_{c,s}}$$

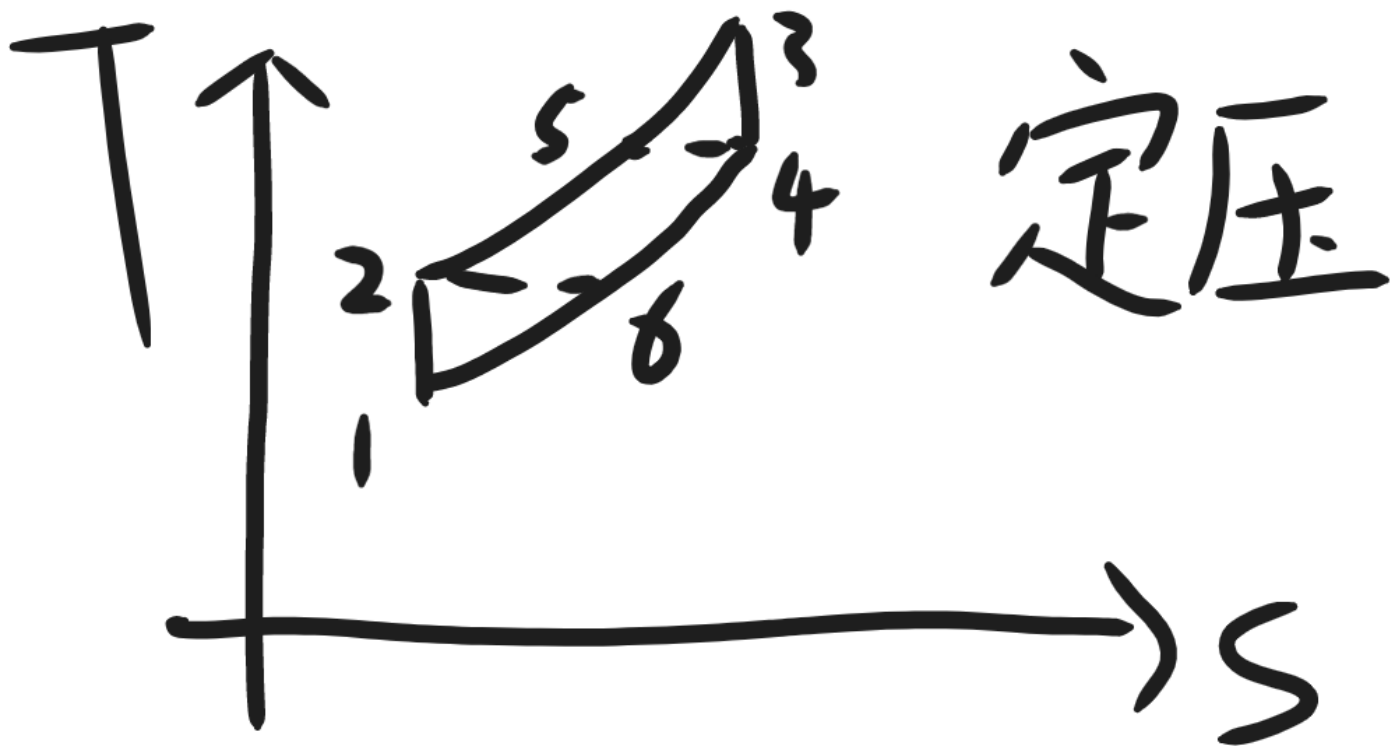
- 吸热量

$$q_H = h_3 - h_{2'} = (h_3 - h_1) - \frac{h_2 - h_1}{\eta_{c,s}}$$

- 热效率

$$\eta_t = \frac{w_0}{q_H} = \frac{(h_3 - h_4)\eta_T - (h_2 - h_1)/\eta_{c,s}}{(h_3 - h_1) - (h_2 - h_1)/\eta_{c,s}}$$

提高燃气轮机循环热效率的措施



- 回热条件: $T_4 > T_2$
- 极限回热:

$$\eta_T = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{h_6 - h_1}{h_3 - h_5} = 1 - \frac{T_6 - T_1}{T_3 - T_5}$$

- 在回热的基础上分级压缩，中间冷却和分级膨胀，中间再热。

第17章 蒸汽动力装置及循环

蒸汽动力装置

{ 汽轮机
 { 冷凝器
 { 泵
 { 锅炉

朗肯循环

等熵 - 等压 - 等熵 - 等压
吸热量

$$q_1 = h_1 - h_4$$

放热量

$$q_2 = h_2 - h_3$$

汽轮机做功

$$w_T = h_1 - h_2$$

水泵耗功

$$w_P = h_4 - h_3$$

循环净功

$$w_{net} = w_T - w_P$$

热效率

$$\eta_t = \frac{w_{net}}{q_1} = \frac{w_T - w_P}{q_1} = \frac{h_1 - h_2 - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$

泵功可忽略

初温的影响

提高初温，热效率增大，干度增大，有利于汽轮机。

初压的影响

提高初压，热效率增大，干度减小，不利于汽轮机。

背压的影响

降低背压，热效率增大，干度减小，不利于汽轮机。

- 综上，提高初温、提高初压、降低背压，均可提高循环热效率。

有摩阻的实际循环

不可逆表征，汽轮机相对内效率

$$\eta_T = \frac{w'_T}{w_T} = \frac{h_1 - h'_2}{h_1 - h_2}$$

再热循环



{ 改变循环参数
 { 改变循环形式 { 再热循环
 { 联合循环 { 回热循环

再热循环 { 高压汽轮机
 { 低压汽轮机
 { 冷凝器
 { 泵
 { 锅炉

吸热量

$$q_1 = (h_1 - h_3) + (h_a - h_b)$$

放热量

$$q_2 = h_2 - h_3$$

净功

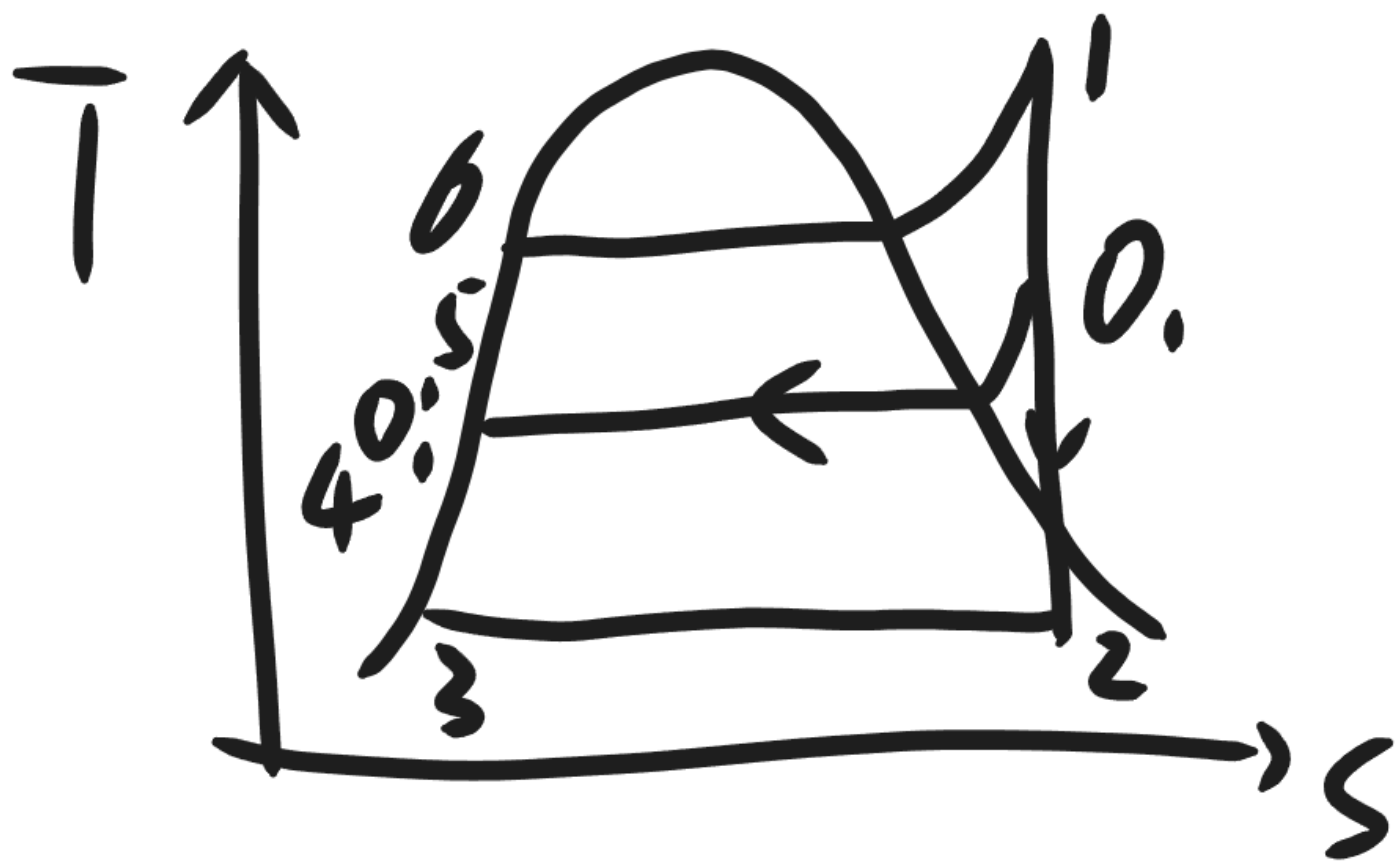
$$w_{net} = (h_1 - h_b) + (h_a - h_2)$$

热效率

$$\eta_t = \frac{w_{net}}{q_1} = \frac{(h_1 - h_b) + (h_a - h_2)}{(h_1 - h_3) + (h_a - h_b)}$$

再热循环不一定提高循环热效率，与再热压力有关。

抽汽回热循环



抽汽回热循环 { 汽轮机
 冷凝器
 回热器
 泵
 锅炉

抽汽率（能量守恒）

$$\alpha h_{0_1} + (1 - \alpha) h_4 = h_{0'_1}$$

吸热量

$$q_1 = h_1 - h_{0'_1}$$

放热量

$$q_2 = (1 - \alpha)(h_2 - h_3)$$

净功

$$w = (h_1 - h_{0'_1}) + (1 - \alpha)(h_2 - h_3)$$

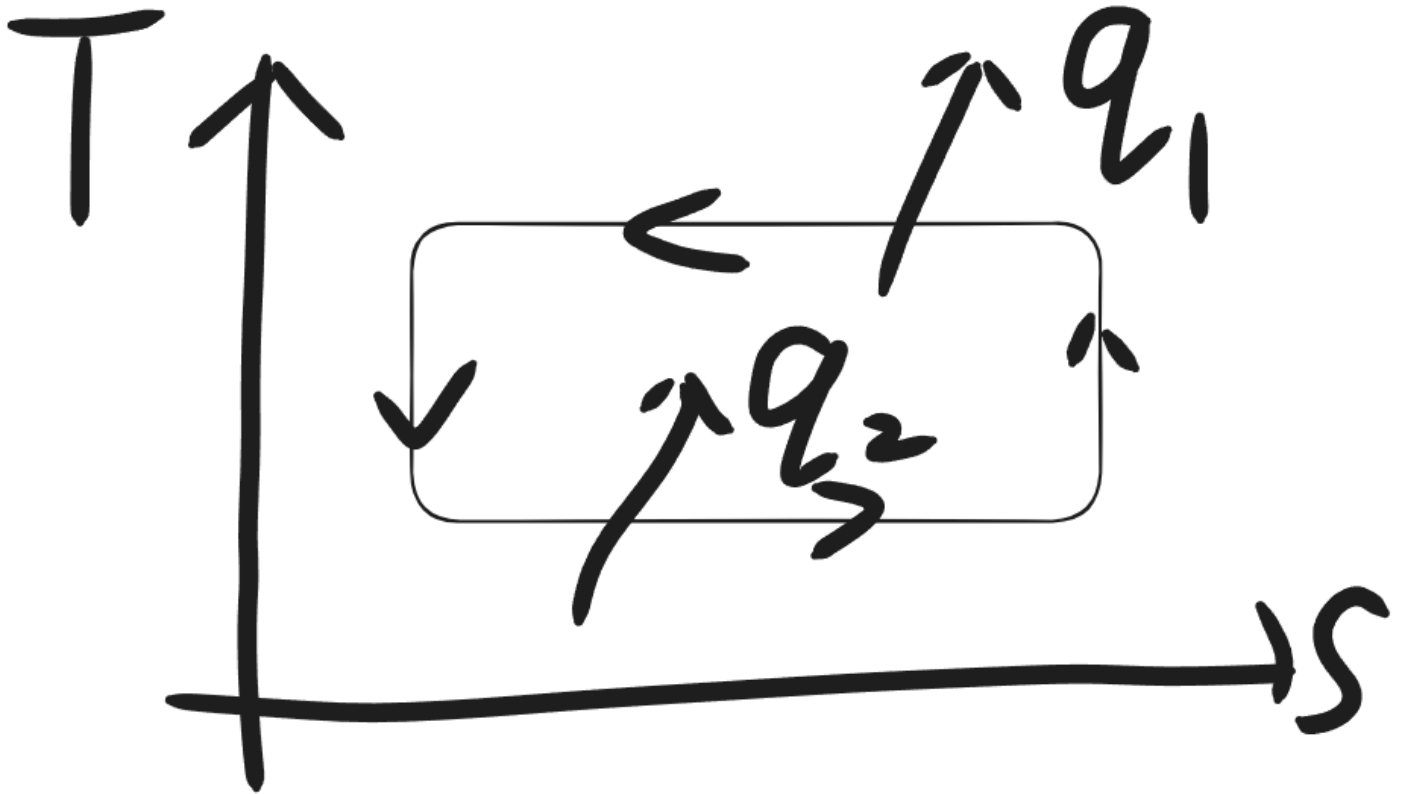
热效率

$$\eta_t = \frac{w_{net}}{q_1} = \frac{(h_1 - h'_{01}) + (1 - \alpha)(h_2 - h_3)}{h_1 - h'_{01}}$$

第18章 制冷装置及循环

冷凝器 - 压缩机 - 蒸发器 - 节流机构

逆卡诺循环



T_1 作为环境温度 T_0

制冷系数

$$\epsilon = \frac{q_2}{w_{net}} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

T_2 作为环境温度 T_0

热泵系数

$$\epsilon' = \frac{q_1}{w_{net}} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

压缩蒸气制冷装置及循环

- 1 - 2 绝热压缩
- 2 - 4 定压放热
- 4 - 5 绝热节流
- 5 - 1 定压吸热

• 缺点:

1. 损失功量
2. 少从冷库取走热量

• 优点:

1. 省掉膨胀机, 设备简化
2. 节流阀开度可调, 易调节蒸发温度

• 制冷量

$$q_c = h_1 - h_4$$

• 放热量

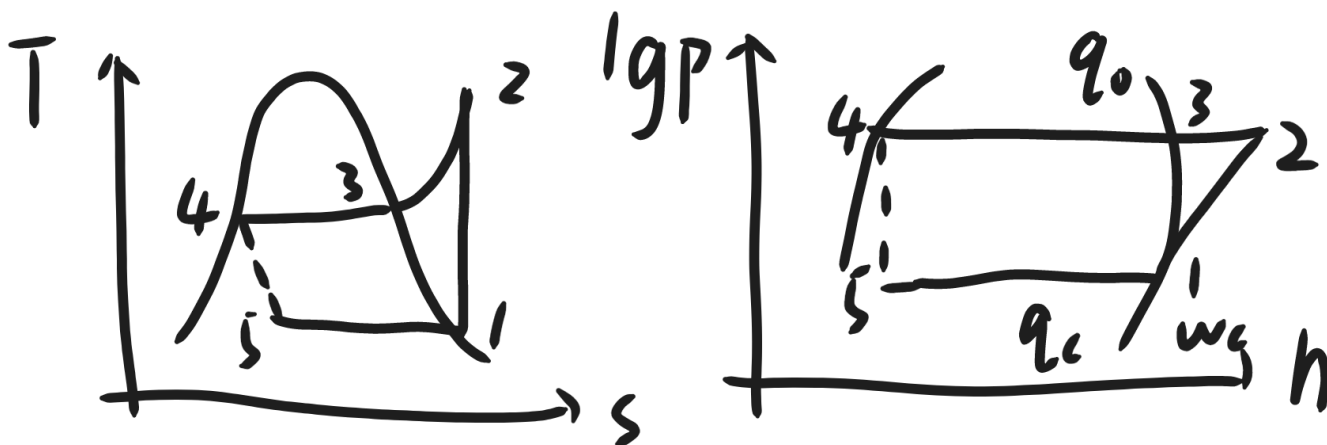
$$q_0 = h_2 - h_4$$

• 循环耗功

$$w_c = h_2 - h_1$$

• 制冷系数

$$\epsilon = \frac{q_c}{w_{net}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$



热泵

$$\epsilon' = \frac{q_1}{w_{net}} = \epsilon + 1$$