

工程热力学

武俊梅

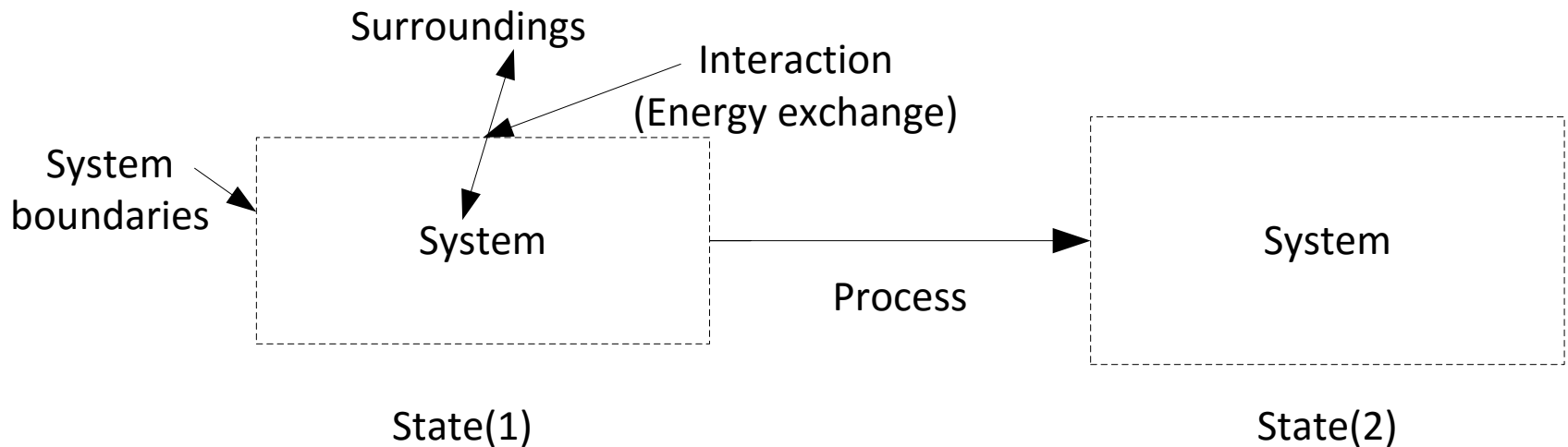


能量守恒与转化定律

——自然界的三大基本定律之一

自然界一切物质都具有能量，能量既不能被创造，也不能被消灭，它只能从一种形式转换成另一种形式，或从一个系统转移到另一个系统，而其总量保持恒定。

用于热力系统——描述系统与外界交换能量时在数量上的关系。



能量传递方式：传热和做功



第二章 热力学第一定律

- ◆ 2-1 热力学第一定律的实质
- ◆ 2-2 热力学能
- ◆ 2-3 热力学第一定律的基本能量方程式
- ◆ 2-4 开口系统能量方程式
- ◆ 2-5 能量方程式的应用



2-1 热力学第一定律的实质

能量守恒与转化定律在热现象中的应用。

热能和机械能在传递或转换时，能量的总量必定守恒——**热力学第一定律**。 一般关系式：

进入系统的能量－离开系统的能量＝系统中储存能量的增量

具体说明及意义：

- 1) 对热力系统进行分析时，约束各种能量在数量上的关系；
- 2) 没有对热量和功在品质上进行区分；
- 3) 热力过程中能量传递或转化必然伴随系统状态的变化；
- 4) 用于热力循环， $\int \delta Q = \int \delta W$ 否定了**第一类永动机**的存在。

第一类永动机：不消耗任何能量而连续做功的动力装置。

第一类永动机在实践中没有成功，证明了热力学第一定律的正确性。

焦耳热功当量实验



James Prescott Joule
英国著名物理学家

重物下降带动搅拌机做功，搅拌机与水摩擦功转变为热量，热量被水吸收，水温升高。

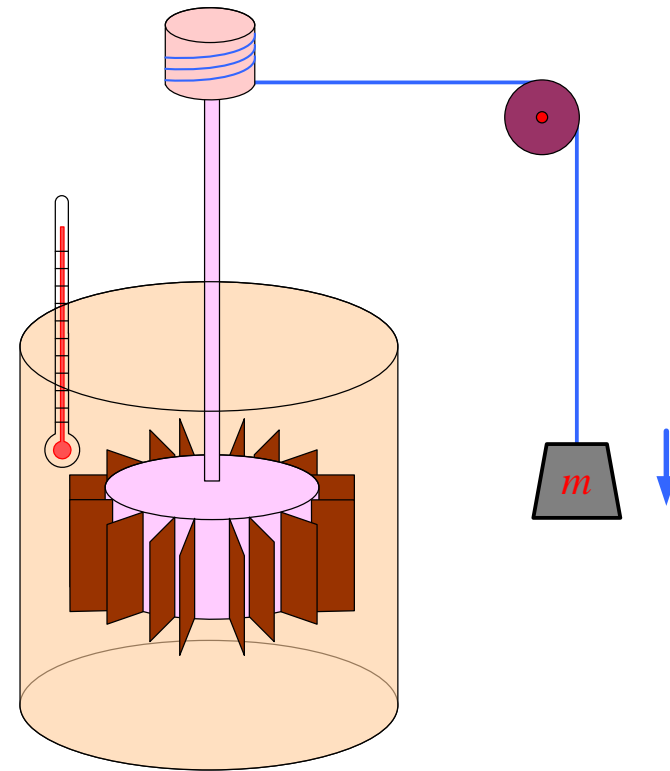
通过重物下降距离可测得功
通过温度计测水温升高可测得热量

Mechanical equivalent of heat

热功当量： $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$

意义：

功和热量都属于能量，可以相互转化。
奠定了热力学第一定律



2-2 热力学能

进入系统的能量－离开系统的能量＝系统中储存能量的增量

系统
存储
的能

- 取决于系统本身的微观状态，**内部存储能**。
- 取决于系统工质与外力场的相互作用及以外界为参考坐标的系统宏观运动所具有的能量，**外部储存能**。

一、热力学能——内部存储能U

热力系处于宏观静止状态时系统内所有微观粒子所具有的能量之和。用U表示。

它取决于系统本身的状态，与系统内工质的**分子结构**及**微观运动形式**有关。

包括：内动能、内位能（分子尺度上）及维持一定分子结构的化学能（原子尺度上）、原子核内部的原子能（原子尺度以下）、电磁场作用下的**电磁能**。

二、外部储存能——动能、位能

1 宏观动能:
$$E_k = \frac{1}{2}mc_f^2$$

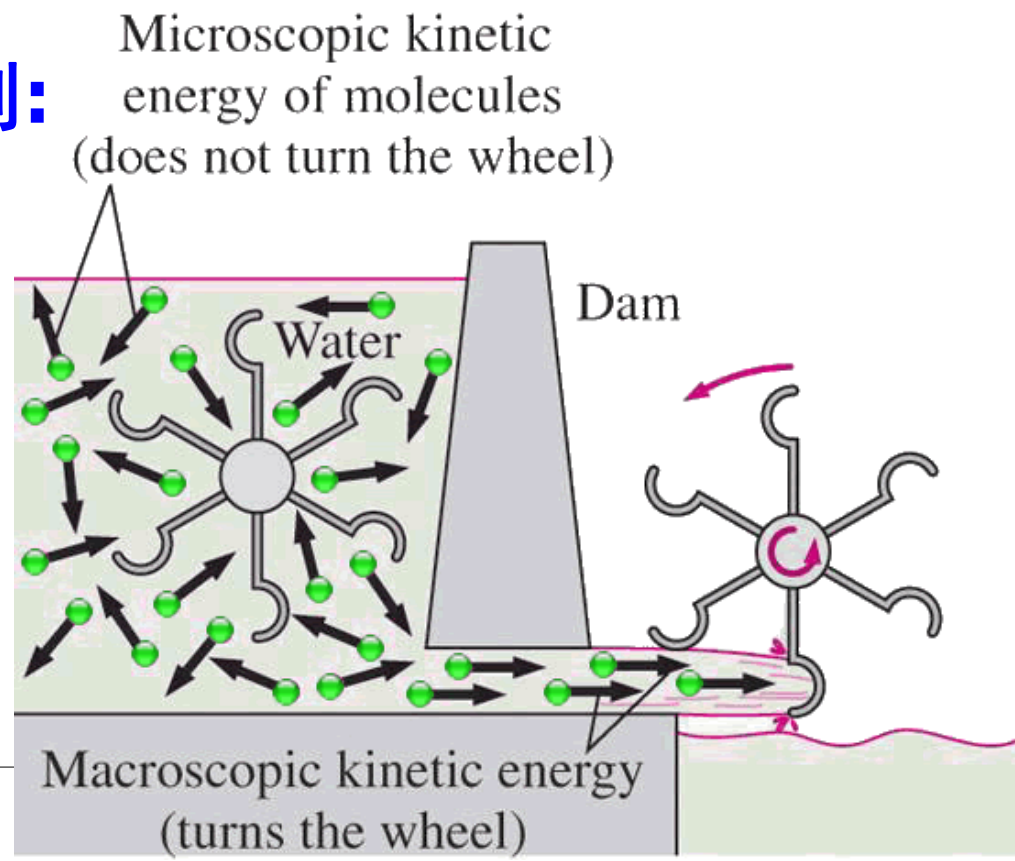
2 重力位能:
$$E_p = mgz$$

c_f 、 z 是力学参数，处于同一热力状态的物体可以有不同的值。

动能、位能是宏观状态参数。

宏观动能与内动能的区别:

宏观动能是一种有序能量，
内动能是一种无序能量，
宏观动能可以直接转换为功输出，因此其品质高于内动能。

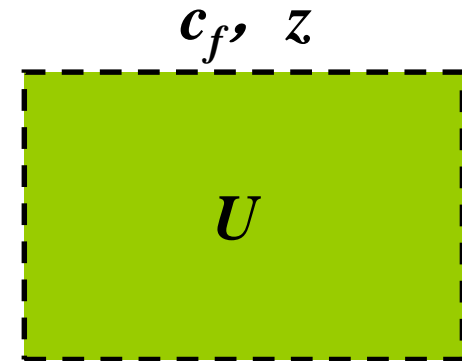


三、系统总能

总能 E 为内部储存能与外部储存能之和：

$$E = U + E_k + E_p$$

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



单位质量工质 (1kg) :

比热力学能： u

比总能：
$$e = u + \frac{1}{2}c_f^2 + gz$$

对于没有宏观运动，
位置高度为零的系统：

$$E = U \quad \text{或} \quad e = u$$



四、系统与外界传递和转换的能量的描述（回顾）

| | 热量 | 功 |
|------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1 定义 | 在温差推动下，系统与外界传递的能量 | 在压差推动下，系统与外界传递的能量 |
| 2 借助运动的方式 | 微观无序 | 宏观有序 |
| 3 推动力 | 温差 | 压力差 |
| 4 变量类型 | 熵 | 体积 |
| 5 正负号 | 吸热+，放热- | 对外做功+，耗功- |
| 6 计算（可逆过程） | $Q_{\text{rev}} = \int mTds$ | $W_{\text{rev}} = \int pdV$ |



2-3 热力学第一定律的基本方能量方程式

一、闭口系统（控制质量）能量方程

与外界没有物质交换，传递的能量只有热量和功量；忽略系统的宏观动能和位能，系统总能的变化，等于系统热力学能的变化。

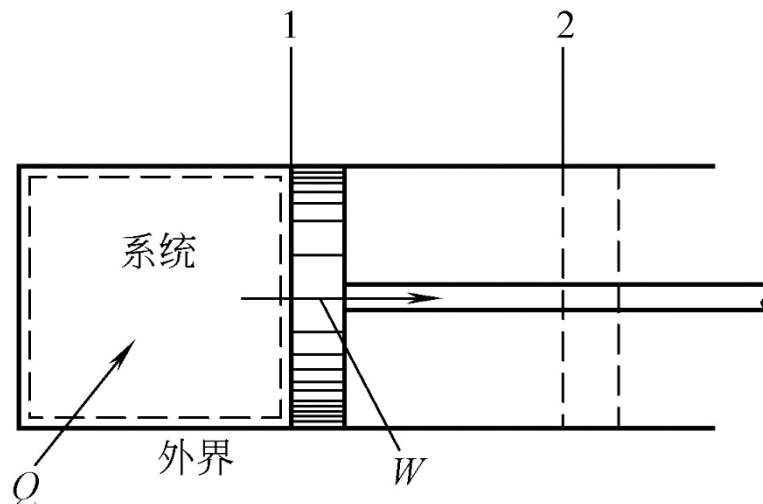
$$\Delta E = \Delta U = U_2 - U_1$$

系统从外界吸收热量 Q

系统对外做膨胀功 W

$$Q - W = \Delta U = U_2 - U_1$$

$$Q = \Delta U + W$$



不同形式

系统有限热力过程： $Q = \Delta U + W$

系统微元热力过程： $\delta Q = dU + \delta W$

1kg工质有限热力过程： $q = \Delta u + w$

1kg工质微元热力过程： $\delta q = du + \delta w$

热力学第一定律适用于任意工质，任意过程。

闭口系统能量方程反映了热、功转换的实质——它表明要把工质从外界获得的热量和工质的热力学能（内热能）转变为机械能（功），必须通过工质的体积膨胀（膨胀功）才能实现。是热力学第一定律的基本的能量方程式。



可逆过程：

$$\delta W = p dV$$

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

$$Q = \Delta U + \int_1^2 p dV$$

$$\delta q = du + p dv$$

$$q = \Delta u + \int_1^2 p dv$$

对于循环：

$$\oint dU = 0$$

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$

$$Q_{net} = W_{net}$$

$$q_{net} = w_{net}$$

循环净功等于净热。



特别注意：

$$q - \Delta u = w$$

- 💡 (1) 初终状态应是平衡态。
- 💡 (2) 公式中热量、功量是代数值，带入数值时要注意符号。
- 💡 (3) 单位要统一。
- 💡 (4) 物理本质。

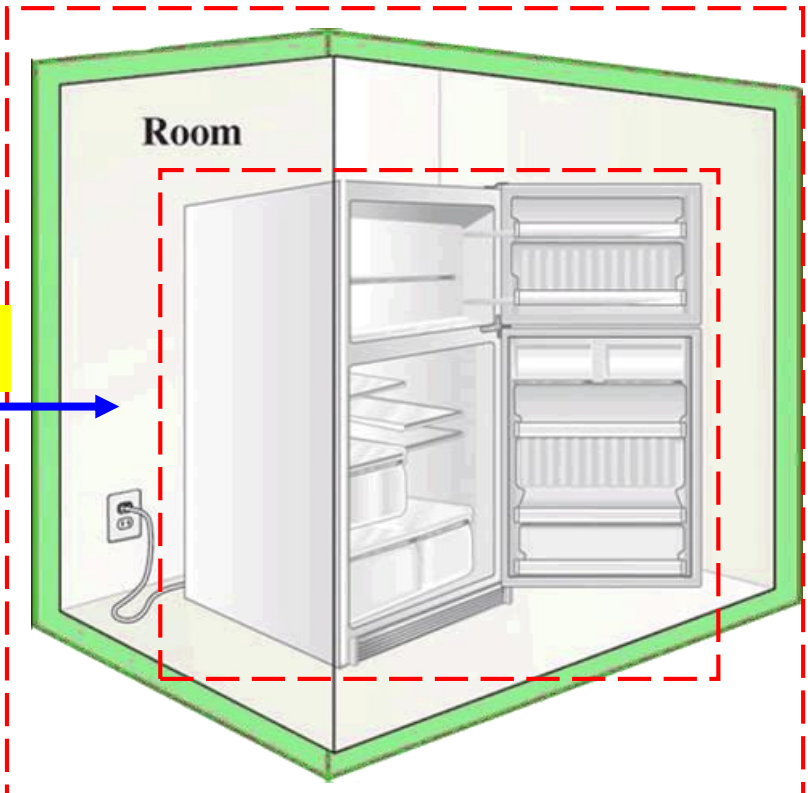


二、应用举例：

例1

工作在绝热、密封房间内的冰箱，如果把冰箱门打开，能否使房间内温度降低？

$W_{\text{电}}$



(1) 房间+冰箱为研究对象

$$-W = \Delta U = U_2 - U_1$$

消耗功，热力学能增加，温度只会越来越高。

(2) 冰箱为研究对象

$$Q - W = \Delta U = U_2 - U_1 = 0$$

消耗功，对房间散热，房间温度越来越高，
冰箱内温度也会越来越高。

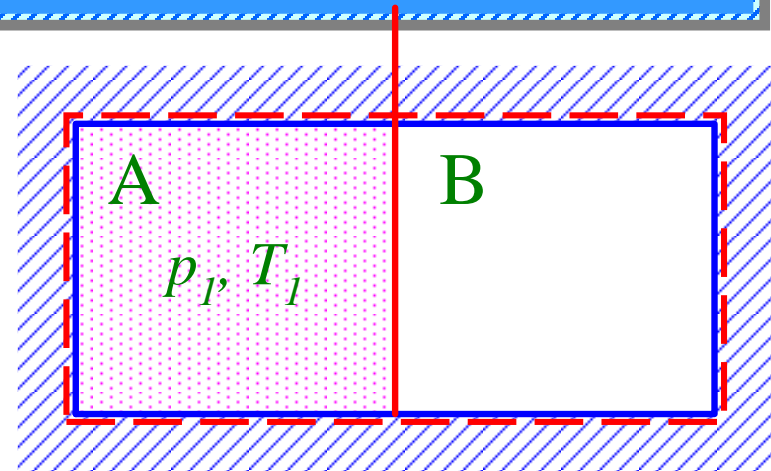
例2 一绝热刚性容器内，A部分充满气体，B部分为真空，如抽去隔板，气体发生自由膨胀，达到新的热力平衡时，分析 ΔU

取整个A+B为系统

——闭口系

$$\cancel{Q} = \Delta U + \cancel{W}$$

$$\Delta U = 0 \quad \text{即 } U_1 = U_2$$



能量传递和转换问题的第一步，也是关键的一步是正确合理的选取研究对象（系统）。



例3：一闭口系从状态1沿1-2-3途径到状态3，传递给外界的热量为47.5kJ，而系统对外做功为30kJ。

- ① 若沿1-4-3途径变化时，系统对外做功15kJ，求过程中系统与外界传递的热量。

经1-2-3过程，系统热力学能变化：

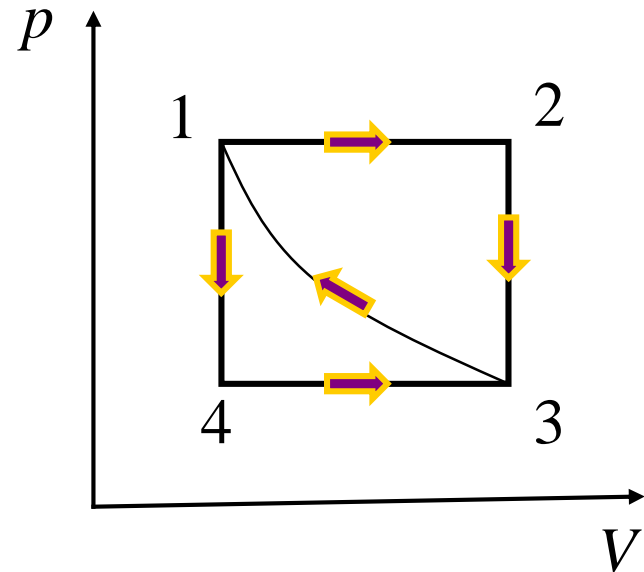
$$Q_{123} - W_{123} = \Delta U_{13} = U_3 - U_1$$

$$U_3 - U_1 = -47.5 - 30 = -77.5 \text{ kJ}$$

经1-4-3过程，系统热力学能变化：

$$Q_{143} - W_{143} = \Delta U = U_3 - U_1$$

$$Q_{143} = W_{143} + (U_3 - U_1) = 15 - 77.5 = -62.5 \text{ kJ}$$



系统放热62.5kJ。



例3：一闭口系从状态1沿1-2-3途径到状态3，传递给外界的热量为47.5kJ，而系统对外做功为30kJ。

- ② 若系统从状态3沿图示曲线途径到达状态1，外界对系统做功6kJ，求系统与外界传递的热量。

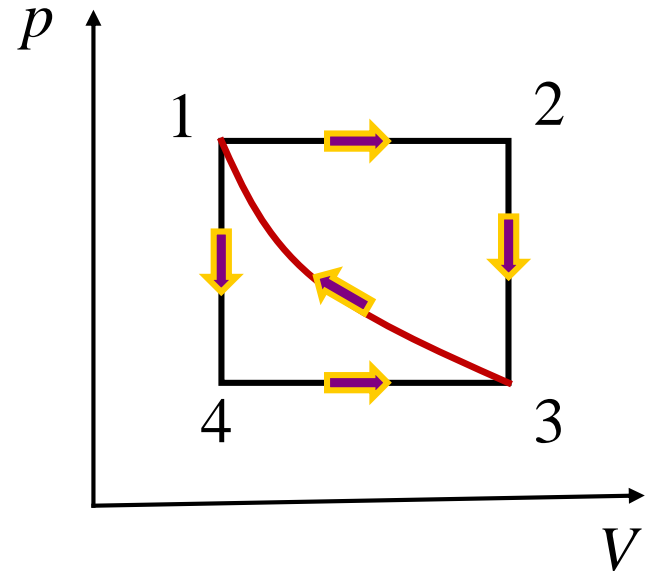
经图示曲线，从3到1状态：

$$Q_{31} - W_{31} = \Delta U = U_1 - U_3$$

$$Q_{31} - (-6) = 77.5$$

$$Q_{31} = 71.5\text{kJ}$$

系统吸热71.5kJ。



例3：一闭口系从状态1沿1-2-3途径到状态3，传递给外界的热量为47.5kJ，而系统对外做功为30kJ。

- ③ 若 $U_2=175\text{kJ}$ ， $U_3=87.5\text{kJ}$ ，求过程2-3传递的热量及状态1的热力学能。

过程2-3中系统热力学能变化：

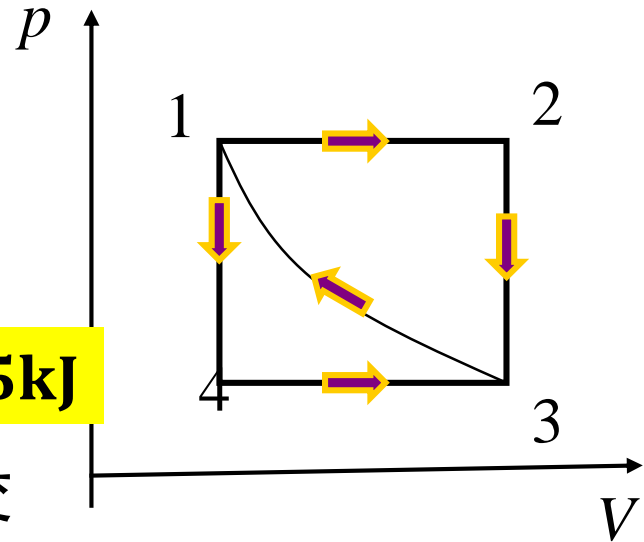
$$\Delta U_{23} = U_3 - U_2 = 87.5 - 175 = -87.5\text{kJ}$$

过程2-3系统体积不变，与外界没有功交换，与外界交换的热量：

$$Q_{23} - W_{23} = U_3 - U_2 = -87.5\text{kJ} \quad \text{系统放热}87.5\text{kJ}。$$

状态1的热力学能：

$$\Delta U_{13} = U_3 - U_1 = -77.5\text{kJ} \quad U_1 = 87.5 + 77.5 = 165\text{kJ}$$



热力学第一定律解题思路：

- 💡 (1) 选取热力系（研究对象），**非常关键**；
- 💡 (2) 列出能量方程； $Q = \Delta U + W$
- 💡 (3) 根据已知条件对能量方程进行简化：
 - 💡 绝热系（绝热过程）： $Q=0$
 - 💡 绝功系（定容过程）： $W=0$
 - 💡 循 环： $\Delta U=0$
- 💡 (4) 确定初始、终了末状态，计算过程中的热量、功量（**注意正负号**）或热力学能变化量（**过程终了参数减去初始参数**）。



2-4 开口系统能量方程式

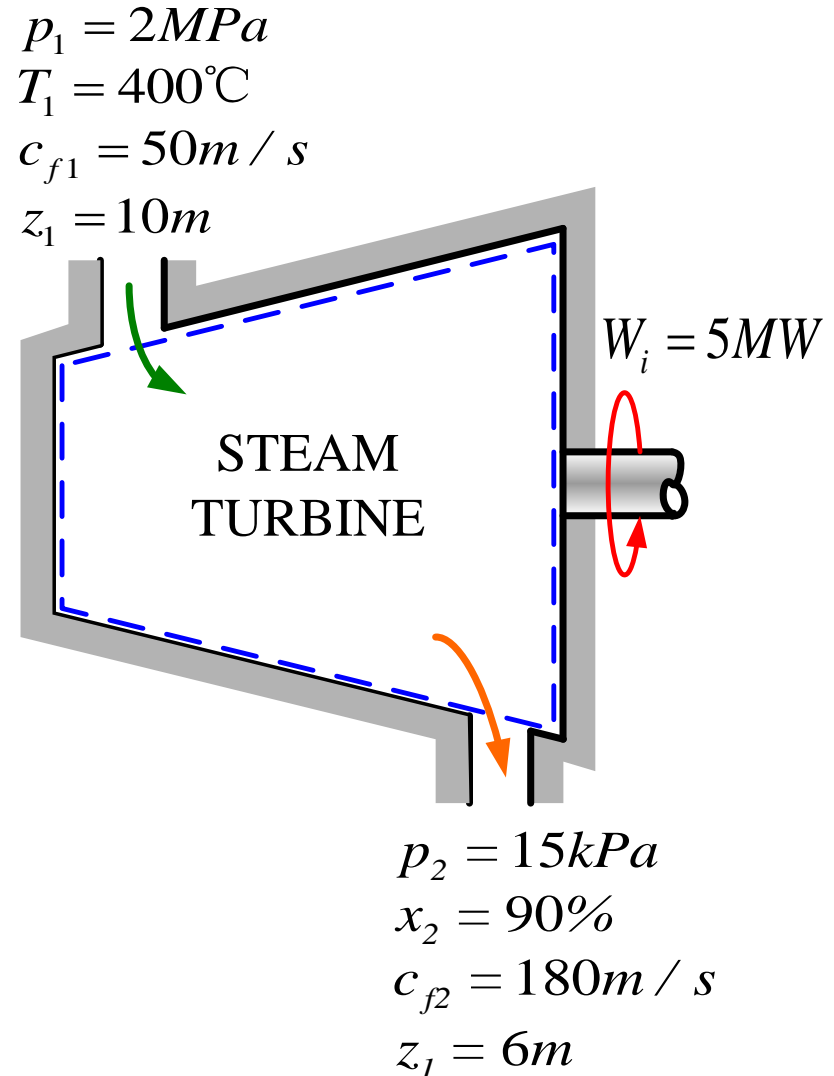
特征：

系统容积不变，称为**控制容积**；

进、出口界面参数不同；
进、出口截面上，参数分布均匀；

W_i ——轴功：系统通过机械轴与外界传递的机械功。

规定：系统输出轴功为正，
外界输入轴功为负。



一、推动功和流动功

开口系统和外界在进、出口边界上所传递的功——**推动功**。

功 = 力 × 位移

进口边界上:

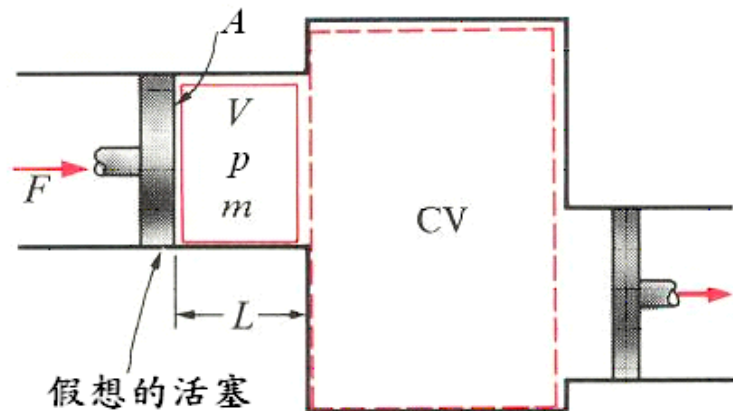
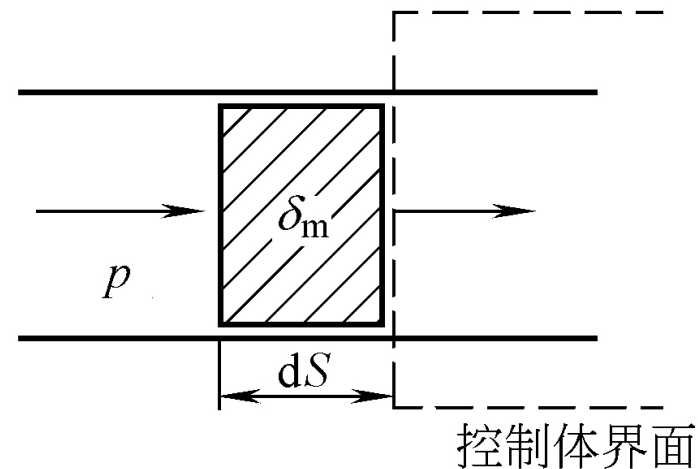
微段 $d\tau$ 时间内, δm 的工质流入系统时, 相当于上游工质把 δm 的工质推动、使其位置移动了 dS 的距离而进入系统:

$$\delta W_{\text{推}} = pAdS = p \cdot dV = pv \cdot \delta m$$

流入1kg工质:

$$w_{\text{推}} = \frac{\delta W_{\text{推}}}{\delta m} = pv$$

推动功



开口系统进口推动功: $p_1 v_1$;

出口推动功: $p_2 v_2$;

关于推动功的说明:

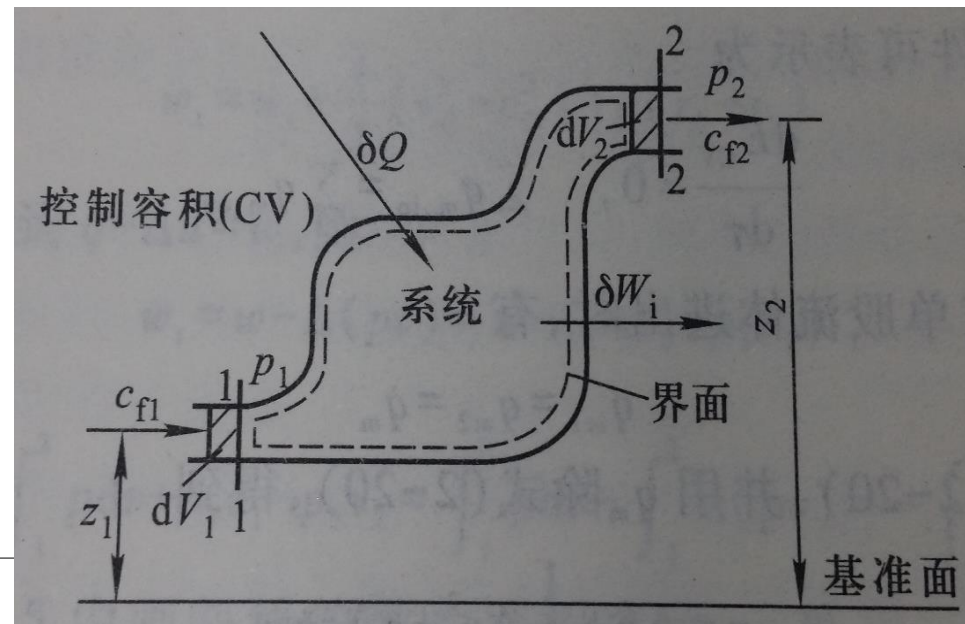
1) 推动功取决于进口或出口工质的微观热力状态, 是状态参数。

2) 推动功是指开口系统中伴随工质的流进、流出, 系统与外界在进、出口边界上传递的一种取决于微观状态的能量, 体现为一种机械功。

流动功:

开口系统伴随工质流进、流出与外界传递的净推动功:

$$w_f = p_2 v_2 - p_1 v_1$$



二、焓 (Enthalpy)

流动工质在进口或出口界面带入、带出系统的总能量中，取决于**工质热力状态**的那部分能量，用H表示：

mkg工质的焓： $H = U + pV$ (J)

1kg工质的焓： $h = u + pv$ (J/kg)

u 、 p 、 v 均是状态参数，则焓 **h 也是状态参数**。

状态参数变化只与初、终状态有关、与路径无关。

$$\Delta h_{1-a-2} = \Delta h_{1-b-2} = h_2 - h_1$$

理想气体的焓：

$$h = u + R_g T = f(T).$$



热力系统中，工质流动是普遍的，所以焓的应用更为普遍。

关于焓的说明

- 1) 焓是状态参数；
- 2) 焓是广延参数 $H = U + pV = m(u + pv) = mh$
 h 为比焓，比参数；
- 3) 对流动工质，焓代表取决于微观热力状态的能量
 (热力学能+推动功)
 对静止工质，焓不代表能量，只是一个合成的状态参数；
- 4) 物理意义：开口系中随工质流动而携带的、取决于工质热力状态的能量。



三、开口系能量方程

$d\tau$ 微元过程，按质量守恒定理：

进入控制体的质量 δm_1 - 离开控制体的质量 δm_2 = 控制体中质量的增量

按能量守恒定理：

进入控制体的能量 - 离开控制体的能量 = 控制体中能量的增量 dE_{cv}

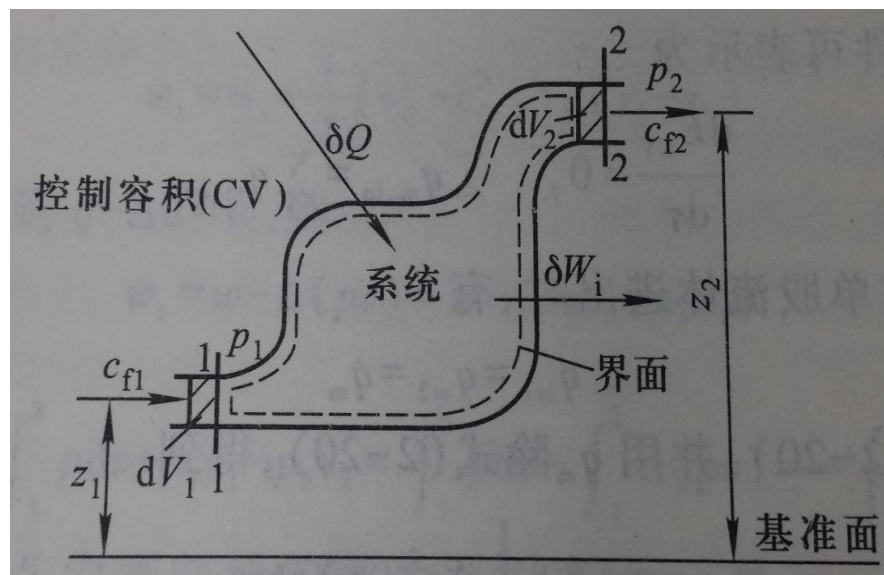
$$dV = \delta m \cdot v$$

$$h = u + pv$$

$$\frac{1}{2} c_f^2, gz$$

$$E = me$$

$$e = u + \frac{1}{2} c_f^2 + gz$$

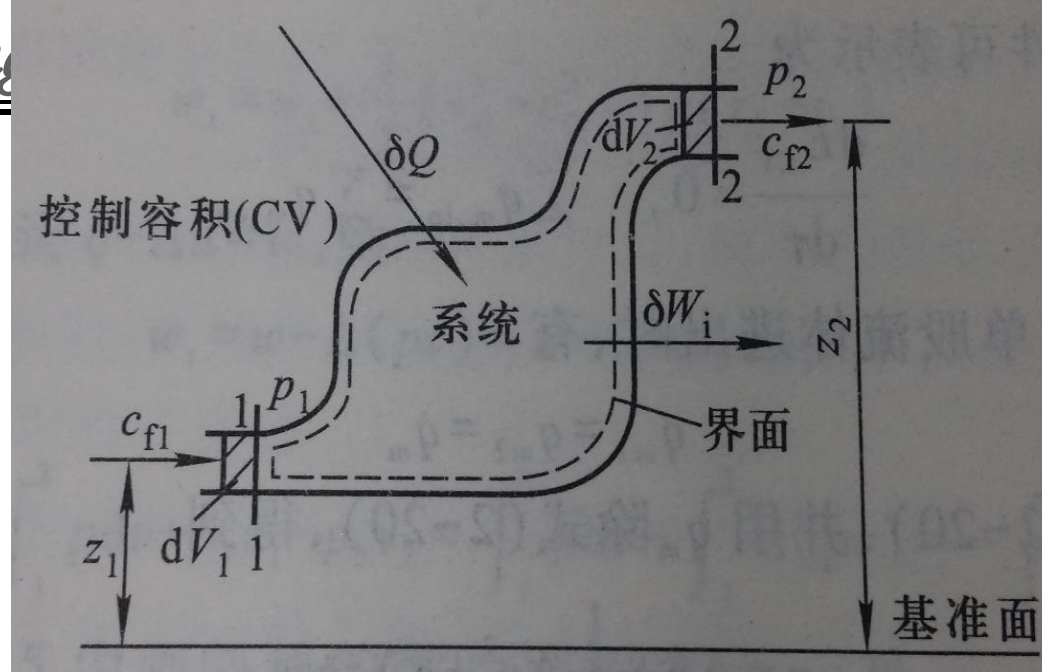


$$E = me$$

$$e = u + \frac{1}{2}c_f^2 + gz$$

$$dV = \delta m \cdot v$$

$$h = u + pv$$



进入控制体能量:

$$dE_1 + p_1 dV_1 + \delta Q$$

离开控制体能量:

$$dE_2 + p_2 dV_2 + \delta W_i$$

$$\delta Q + dE_1 + p_1 dV_1 - (\delta W_i + dE_2 + p_2 dV_2) = dE_{CV}$$

$$\delta Q = dE_{CV} + \left(u_2 + \frac{1}{2}c_{f2}^2 + gz_2 + p_2 v_2 \right) \delta m_2 - \left(u_1 + \frac{1}{2}c_{f1}^2 + gz_1 + p_1 v_1 \right) \delta m_1 + \delta W_i$$



$$\delta Q = dE_{cv} + \left(u_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + gz_2 + p_2 v_2 \right) \delta m_2 - \left(u_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 + gz_1 + p_1 v_1 \right) \delta m_1 + \delta W_i$$

多个进口、多个出口：

$$\delta Q = dE_{cv} + \sum_j \left(h + \frac{1}{2} c_f^2 + gz \right)_j \delta m_j - \sum_i \left(h + \frac{1}{2} c_f^2 + gz \right)_i \delta m_i + \delta W_i$$

工程上常用流率——单位时间内：

$$\Phi = \frac{\delta Q}{d\tau} \quad q_{m,j} = \frac{\delta m_j}{d\tau} \quad q_{m,i} = \frac{\delta m_i}{d\tau} \quad P_i = \frac{\delta W_i}{d\tau}$$

热流率，W

质量流率，kg/s

内部功率，W

则单位时间内，系统能量的收支平衡：



$$\Phi = \frac{dE_{cv}}{d\tau} + \sum_j (h + \frac{1}{2}c_f^2 + gz)_j q_{m,j} - \sum_i (h + \frac{1}{2}c_f^2 + gz)_i q_{m,i} + P_i$$

注意：适用于任何工质（理想气体或实际气体）、任意流动（不稳定流动或稳态稳流）、任过过程（可逆或不可逆）。

四、稳态稳流能量方程

稳态稳流过程：开口系统内部及边界上所有热力参数和运动参数都不随时间而变。（**稳态与平衡态的区别**）

1. 进、出控制体界面的质量流率均相等。

$$\sum_j q_{m,j} = \sum_i q_{m,i} \quad q_{m,1} = q_{m,2} = q_m$$

一进口
一出口

2. 控制体内能量不变。 $dE_{cv} = 0$



一进口一出口稳态稳流系统

$$\delta Q = dE_{CV} + (h + \frac{1}{2}c_f^2 + gz)_2\delta m - (h + \frac{1}{2}c_f^2 + gz)_1\delta m + \delta W_i$$



1kg工质、有限过程：

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

1kg工质微元过程：

$$\delta q = dh + \frac{1}{2}dc_f^2 + gdz + \delta w_i$$

mkg工质有限过程：

$$Q = \Delta H + \frac{1}{2}m\Delta c_f^2 + mg\Delta z + W_i$$

mkg工质微元过程：

$$\delta Q = dH + \frac{1}{2}mdc_f^2 + mgdz + \delta W_i$$



注意：稳态稳流能量方程应用条件：

- (1) 适用于任何工质(理想或实际气体),
任何过程（可逆或不可逆），稳态稳流。
- (2) q, w_i 是代数值，注意正负号。
- (3) $\Delta u, \Delta h, \Delta c_f^2$ 等不是系统不同时刻的变化量，是出口、进口状态参数差。
- (4) 注意单位统一。



五、稳态稳流能量方程的分析

$$\Delta h = \Delta u + \Delta(pv)$$

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g\Delta z + w_i \quad \longrightarrow \quad q - \Delta u = \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g\Delta z + \Delta(pv) + w_i$$

功的说明:

1. 轴功 w_i : 开口系统与外界交换的功一般通过轴来传递, 所以称为轴功。

2. 技术功

$$w_t = \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g\Delta z + w_i$$

稳态稳流能量方程中, 动能变化、位能变化及轴功都属于机械能, **技术上都可以被直接利用的机械能**, 统称为技术功。



技术功

$$w_t = \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g\Delta z + w_i$$

$$q - \Delta u = \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g\Delta z + \Delta(pv) + w_i$$



能量方程变为：

$$q - \Delta u = w_t + \Delta(pv)$$



$$q - \Delta u = w$$

体积膨胀功

则：

$$w_t = w - (p_2 v_2 - p_1 v_1) = w - w_f$$

技术功等于膨胀功与流动功之差。

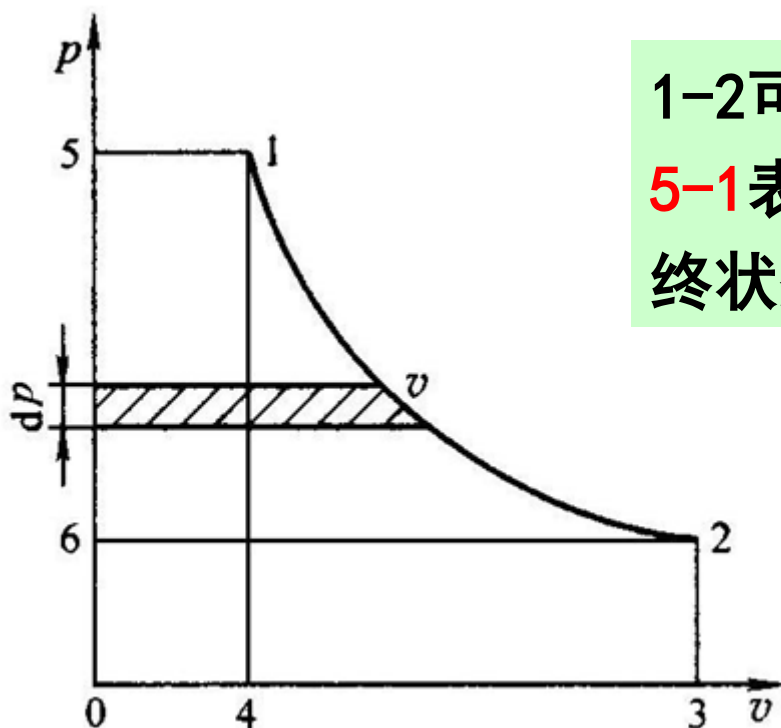


对于稳态稳流的可逆过程，技术功为：

可逆过程1-2的技术功为：

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

$$\begin{aligned}\delta w_t &= \delta w - d(pv) \\ &= p dv - (p dv + v dp) \\ &= -v dp\end{aligned}$$



1-2可逆过程技术功可以用面积1-2-6-5-1表示，是过程量，其值取决于初、终状态及过程特性。

过程中压力降低，对外做功；如燃气轮机。

过程中压力升高，消耗外界功，如叶轮式压气机。



总结：1) 稳态温流能量方程形式：

微元过程：

$$\delta q = dh + \delta w_t$$

1kg工质：

$$q = \Delta h + w_t$$

mkg工质：

$$Q = \Delta H + W_t$$

任意工质、任意过程

可逆过程：

$$\delta q = dh - vdp, \quad q = \Delta h - \int_1^2 vdp$$

由： $\delta q = du + p dv = du + d(pv) - vdp = d(u + pv) - vdp$

得： $\delta q = dh - vdp$

最基本能量方程！

可知： 热力学第一定律的各种能量方程式在本质上是一致的：
热转变为功需要工质体积膨胀，压力降低。



总结：2) 各种功的区别：

膨胀功：工质体积膨胀对外所做的功

$$w = q - \Delta u$$

轴功：开口系统通过轴与外界传递的功

$$w_i$$

流动功：开口系统中维持工质流进、流出的推动功差

$$w_f = p_2 v_2 - p_1 v_1$$

技术功：技术上都可以被直接利用的机械能。

$$w_t = q - \Delta h$$

$$w_t = \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_i$$

$$w_t = w - w_f$$

可逆过程

$$w = p dv$$

$$w_t = -v dp$$



掌握以下功的定义、物理意义及相互关系
(课后作业)

体积膨胀功

体积压缩功

轴功

技术功

推动功

流动功

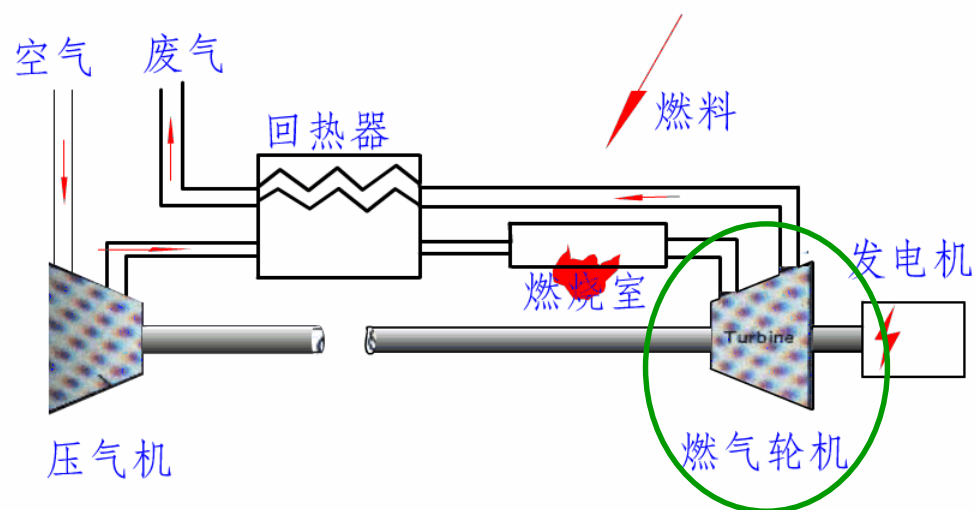
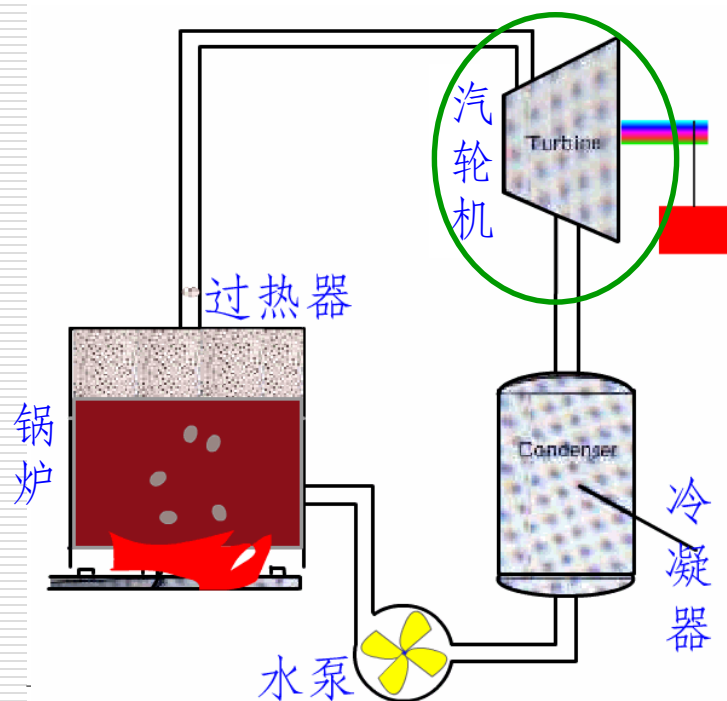


2-5 能量方程式的应用

一、动力机

动力机：利用工质在机器中膨胀获得机械功的设备。

汽轮机、燃气轮机等。



2-5 能量方程式的应用

一、动力机

以汽轮机为例，稳态稳流能量方程：

$$q = \Delta h + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g(z_2 - z_1) + w_i$$

转速很高，工质与外界换热很少，可忽略

速度变化不大，忽略

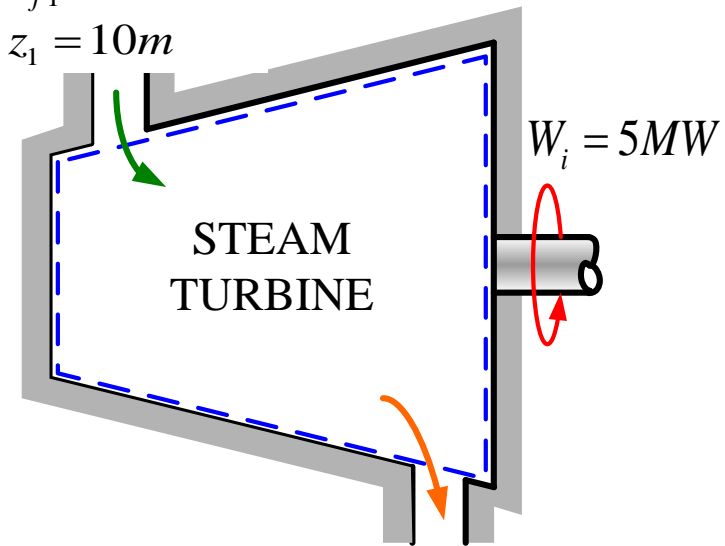
高度差很小，忽略

汽轮机的轴功：

$$w_i = h_1 - h_2 = w_t$$

即汽轮机中所作的轴功等于工质的焓降。

$$\begin{aligned} p_1 &= 2\text{MPa} \\ T_1 &= 400^\circ\text{C} \\ c_{f1} &= 50\text{m/s} \\ z_1 &= 10\text{m} \end{aligned}$$



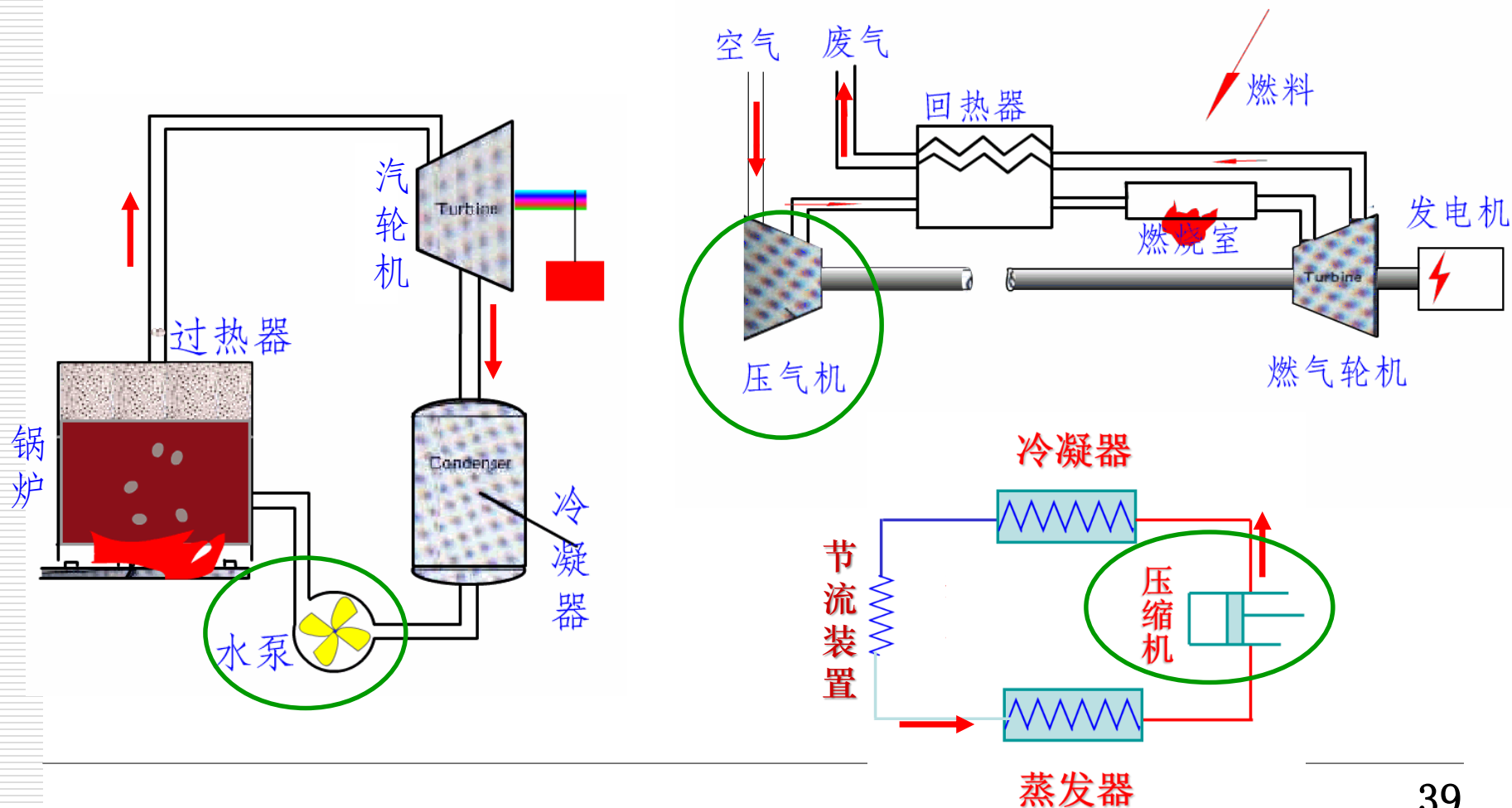
$$\begin{aligned} p_2 &= 15\text{kPa} \\ x_2 &= 90\% \\ c_{f2} &= 180\text{m/s} \\ z_2 &= 6\text{m} \end{aligned}$$



二、压气机

消耗外界功，使工质压力升高。

给水泵、叶轮式压气机、制冷压缩机。



二、压气机

叶轮式压气机类似于动力机的反过程，一般伴随放热：

$$q = \Delta h + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g(z_2 - z_1) + w_i$$

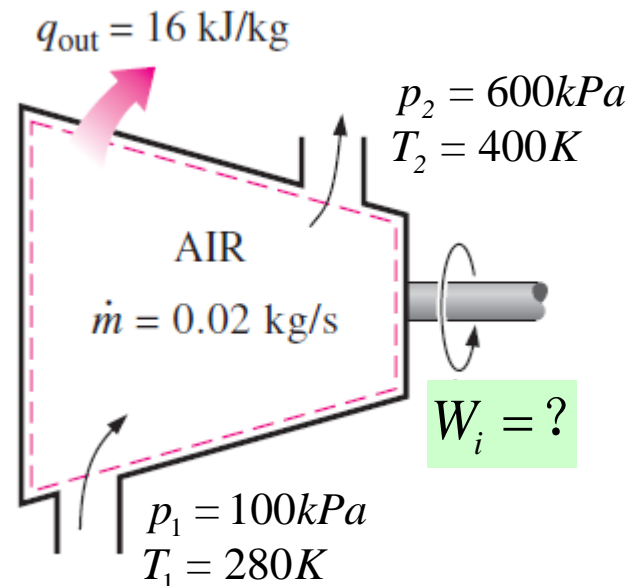
$$-w_i = (h_2 - h_1) + (-q) = w_c$$

w_c ：称为压缩功，J/kg

忽略传热，即压气机绝热压缩过程：

$$w_c = h_2 - h_1$$

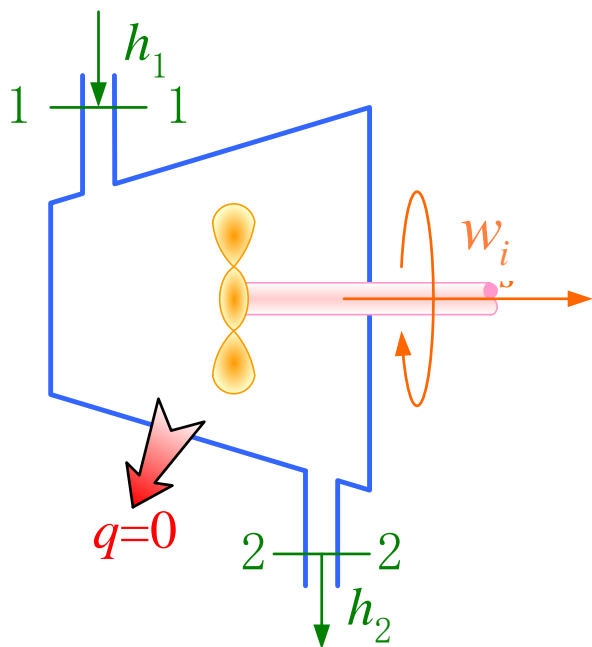
绝热压缩过程消耗的轴功等于压缩气体焓的增加。



不计热交换，叶轮机械能量方程可表示为：

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

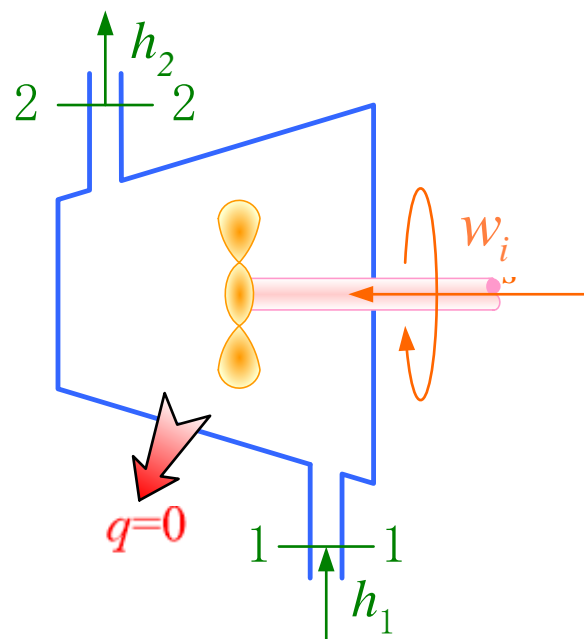
动力机



$$h_1 > h_2$$

$$w_i > 0$$

压气机



$$h_1 < h_2$$

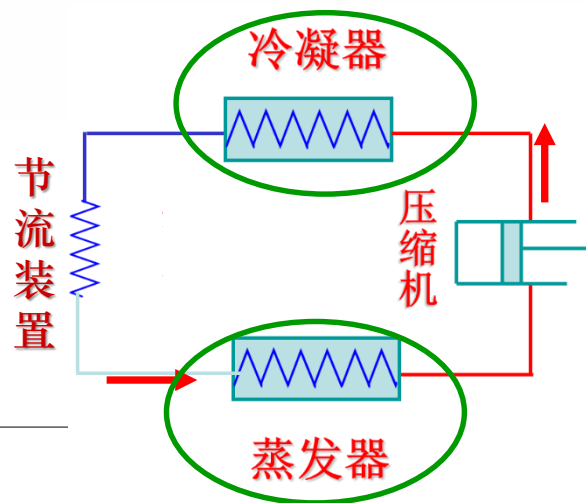
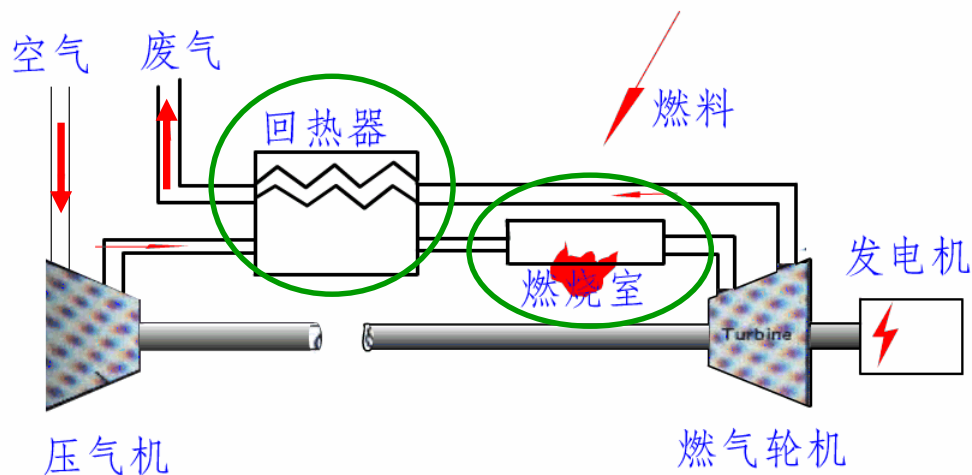
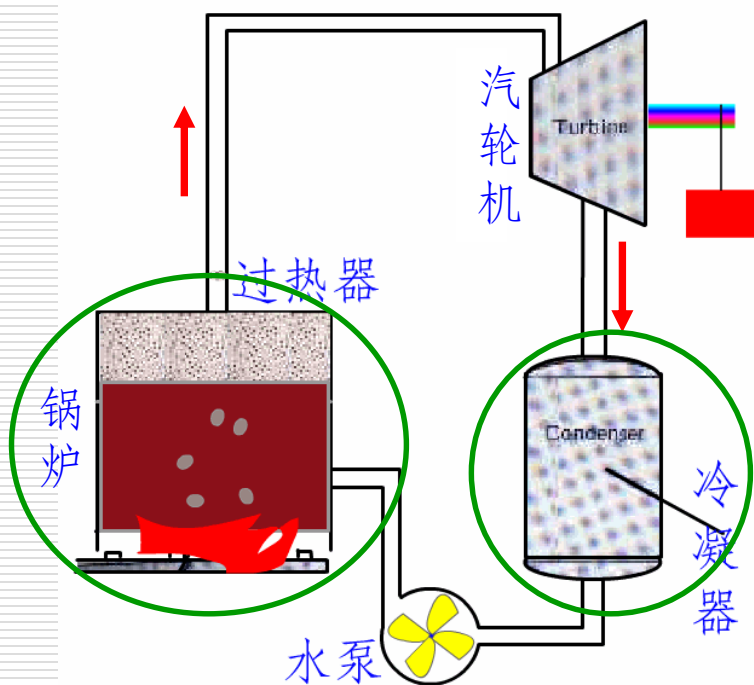
$$w_i < 0$$



三、热交换器

完成热量传递的设备。

锅炉、凝汽器、回热器、燃烧室、冷凝器、蒸发器。



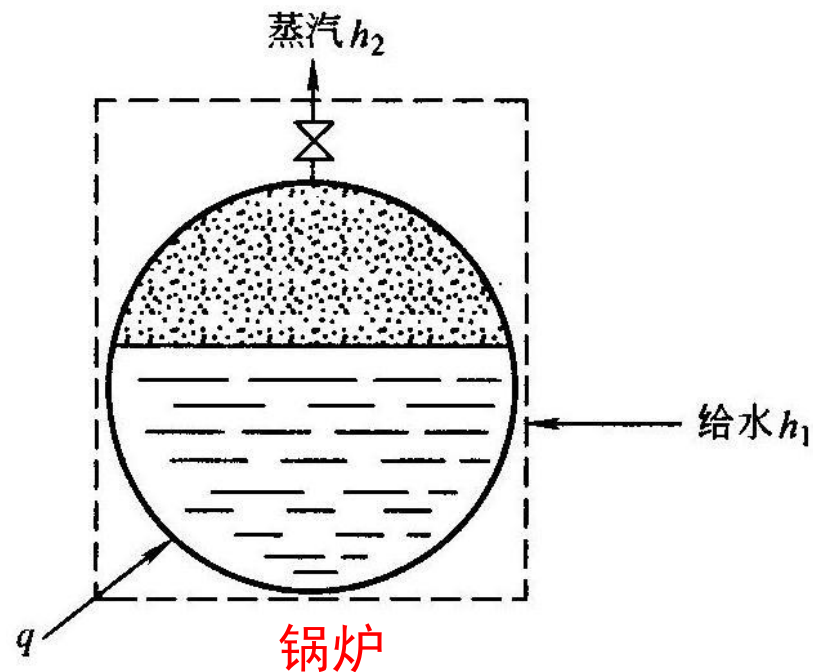
三、热交换器

$$q = \Delta h + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g(z_2 - z_1) + w_i$$

工质流经各种热交换器，完成与环境（或另一种工质）之间的热量交换，工质与外界没有功量交换，忽略动能、位能变化。

$$q = h_2 - h_1$$

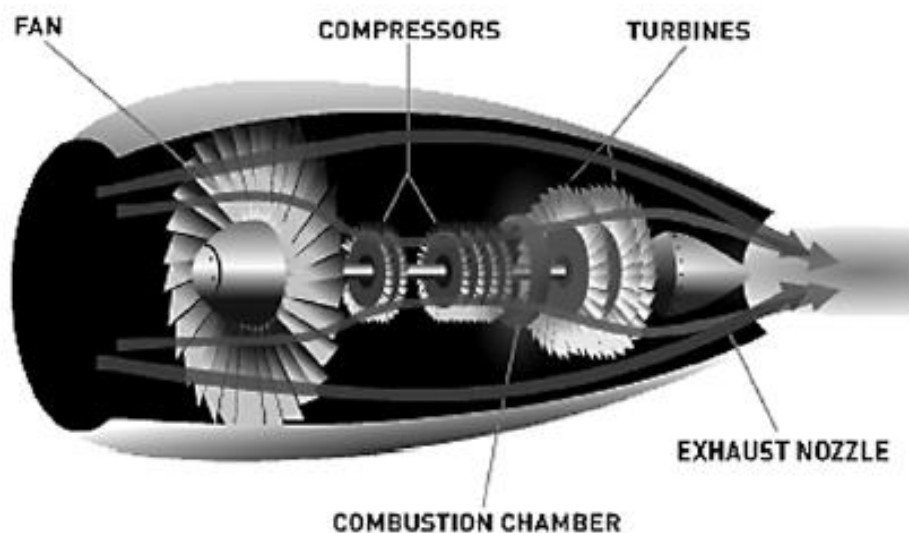
工质吸热，焓增加；
工质放热，焓减小。



四、喷管/扩压管

喷管：通过管道断面积的变化，使气流加速的部件。

扩压管：通过管道断面积的变化，使气流压力升高的部件。



四、喷管/扩压管——详细知识要在第七章中深入学习

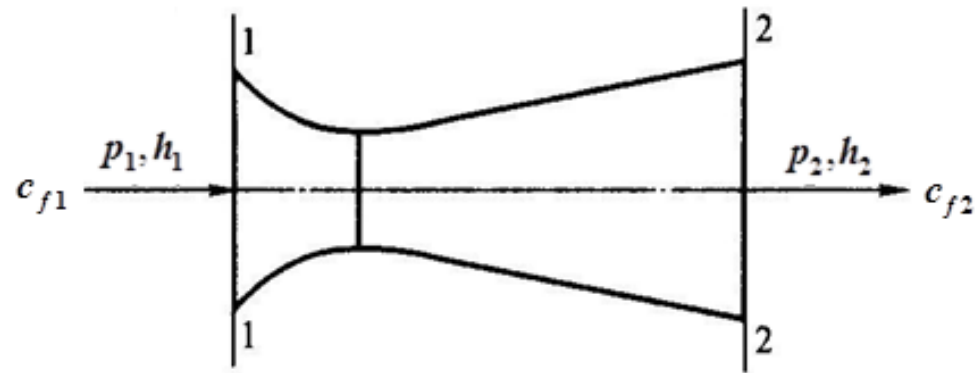
$$\cancel{q} = \Delta h + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g(z_2 - z_1) + \cancel{w_i}$$

工质流速快、喷管长度小，换热量小，忽略

高度差很小，忽略 没有功交换

$$\frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) = h_1 - h_2$$

喷管中气流动能的增量等于工质的焓降。



扩压管：与喷管相反，一种使气流减速、增压的部件。

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2}(c_{f1}^2 - c_{f2}^2)$$

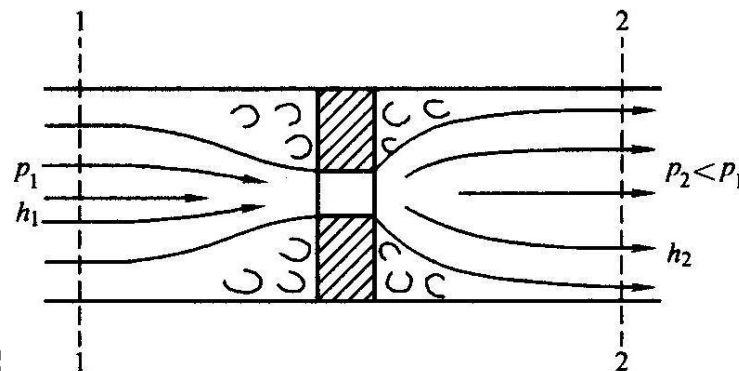
速度降低、焓增大，温度、压力均提高。



五、绝热节流

工质流经阀门等设备，截面突然缩小，压力下降。

阀门前后两个断面之间区域作为系统：



$$\cancel{q} = \Delta h + \frac{1}{2} \cancel{(c_{f2}^2 - c_{f1}^2)} + \cancel{g(z_2 - z_1)} + \cancel{w_i}$$

瞬间节流、
来不及换
热，忽略

节流前后
速度变化
小，忽略

高度差很
小，忽略

没有功
交换

$h_2 = h_1$ 绝热节流前后焓值相等。

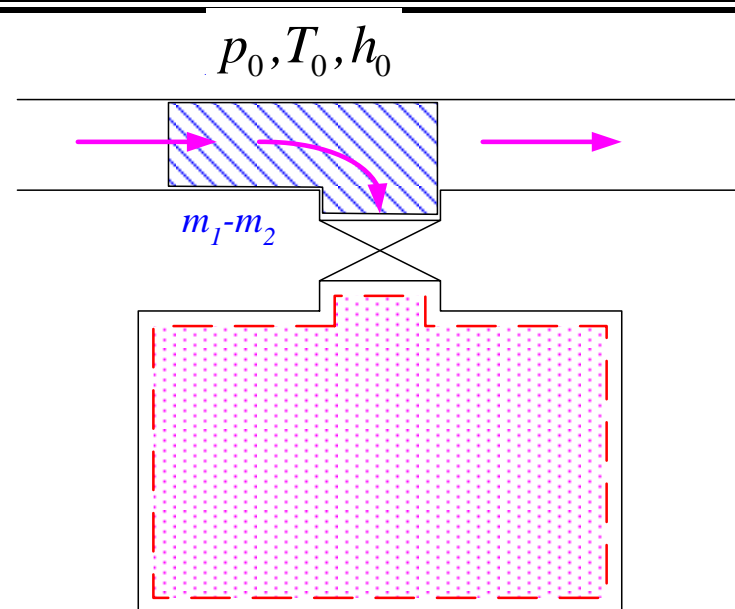
- 注意：**
- 1) 节流过程伴随强烈的涡流和摩擦损失，过程不可逆；
 - 2) 由于节流孔口附近流体的流速变化很大，焓值并不处处相等，不能把整个节流过程看作是定焓过程。



六、充、放气问题

高压管路给容器充气、高压设备通过管路放气问题都可以利用非稳态稳流能量方程来分析求解。

绝热容器充气为例（气源参数带脚标0）



$$\cancel{\delta Q} = dE_{CV} + \left(h_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + gz_2 \right) \delta m_2 - \left(h_0 + \frac{1}{2} c_{f0}^2 + gz_0 \right) \delta m_0 + \cancel{\delta W_i}$$

绝热 只进不出 忽略进口速度、没有功交换高度的影响

$$dE_{CV} = h_0 \cdot \delta m_0$$

充气结束：

$$\int_1^2 dE_{CV} = \int_1^2 h_0 \delta m_0 \Rightarrow U_2 - U_1 = h_0 \Delta m$$



$$U_2 - U_1 = m_2 u_2 - m_1 u_1 = h_0 \Delta m, \quad \Delta m = m_2 - m_1$$

u_2, m_2 取决于充气结束后容器内工质的状态，一般已知充气参数、充气前容器内工质参数，同时给定充气结束时容器内气体压力 p_2 、容积 V_2 ，温度 T_2 待求。

u 、 h 与温度之间的关系也已知（理想气体 $u = c_v T$ ）。

1) 若充气前容器真空： $m_1 = 0 \Rightarrow u_2 = h_0$ T_2 可解。

2) 若充气前容器内已经有一定量的气体，状态 p_1, T_1, V_1 已知：

$$m_1 = \frac{p_1 V_1}{R_g T_1}$$

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{R_g T_2}$$

$$m_2 u_2 - m_1 u_1 = h_0 (m_2 - m_1)$$

只有 T_2 一个未知数，可解。

$$u = c_v T$$



例4 一叶轮式压气机，将 $p_1=100\text{kPa}$ ， $T_1=280\text{K}$ 的空气压缩到 $p_2=600\text{kPa}$ ， $T_2=400\text{K}$ ，空气稳定流动，质量流量 0.02kg/s ，过程中向外散热量为 16kJ/kg 。忽略空气进出口动能变化和位能变化，假定空气的焓与温度的关系 $h=1.002T\text{kJ/kg}$ 。

求：压缩空气所需要输入的功率。

$$q = \Delta h + w_i$$

$$q_m = 0.02\text{kg/s} \quad q = -16\text{kJ/kg}$$

$$\Delta h = 1.002(T_2 - T_1) = 1.002(400 - 280) = 120.24\text{kJ/kg}$$

$$w_i = q - \Delta h = -16 - 120.24 = -136.24\text{kJ/kg}$$

$$P_i = q_m w_i = 0.02 \times (-136.24) = -2.725\text{kW}$$

p52-53，例2-3，例2-4



本章重点内容：

- 热力学第一定律的实质；
- 储存能，热力学能和焓的定义及物理意义；
- 各种功的含义及相互关系；
- 可逆过程膨胀功、技术功的计算及在 p - v 图上的表达；
- 闭口系的能量方程及应用；
- 稳态稳流能量方程及应用
- 充放气问题求解。



作 业:

P61-62, 2-4

2-7

2-10

2-13

2-18

