第八章 压气机的热力过程





- 8-1活塞式压气机的工作原理和理论耗功量
 - 8-2 余隙容积的影响
 - 8-3多级压缩、中间冷却
- 8-4 叶轮式压气机工作原理

本章重点内容



- > 掌握活塞式压气机的工作原理和耗功分析;
- > 掌握余隙容积对压气机性能的影响;
- > 掌握多级压缩、级间冷却的特点;
- > 掌握叶轮式压气机工作原理和耗功分析。

8-0、概述



1. 压气机

用来提高气体压力的设备称为压气机。

生活中: 自行车打气、吹风机。

工业中:

制冷:压缩机

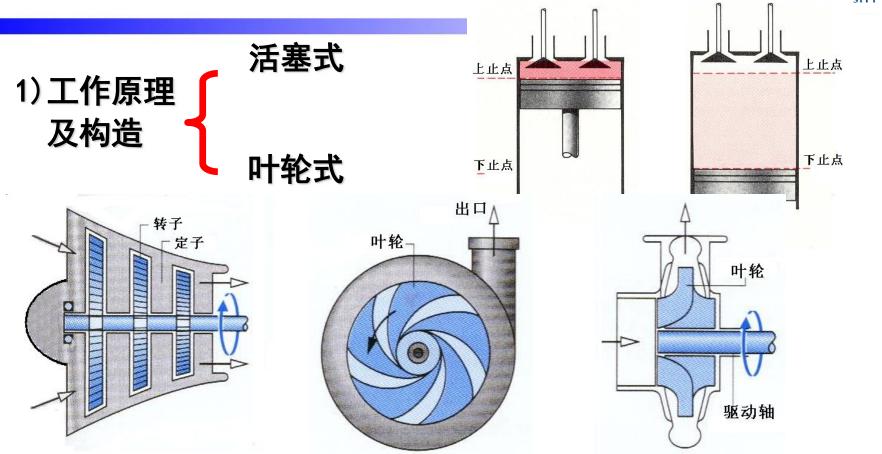
电厂:锅炉供风

汽车:车闸,气动开、关门

涡轮机:空气压缩



2. 压气机分类



西安交通大學

活塞式一压力高,流量小, 间隙生产 叶轮式一压力低,流量大, 连续生产



通风机 —表压0.01MPa以下

2) 压力范围

鼓风机 —表压0.1~0.3MPa

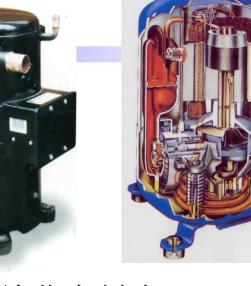
压缩机 —表压0.3MPa 以上





空分、空气制冷





压缩蒸汽制冷



工业通风机、鼓风机





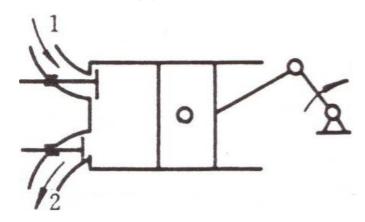
3. 压气机热力分析的任务

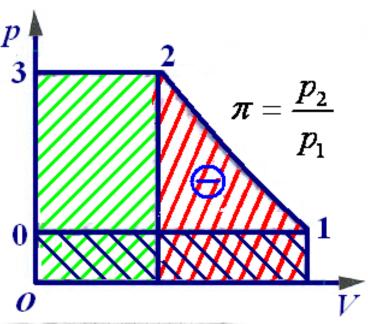
- 分析并计算定量气体自相同的初态经不同途径压缩到预定的终压时,压气机所耗的功;
- 探讨省功的途径。



8-1、单级活塞式压气机的工作原理和理论耗功量

一、工作原理





- 0-1: 吸气过程,状态不变, 获得推动功 p_1v_1
- 1-2: 压缩过程,压力升高, 体积减小,耗外功

$$w_{1-2} = -\int_{1}^{2} p dv$$

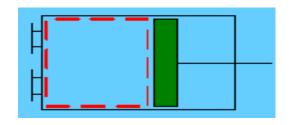
2-3: 排气过程,状态不变, 消耗推动功 p_2v_2

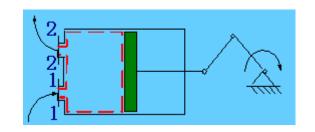
增压比: $\pi = \frac{p_2}{p_1}$

目的:分析耗功、探讨省功途径



区分耗功是指什么功?





压缩过程耗功

$$W_{1-2} = -\int_{1-2} pdV$$

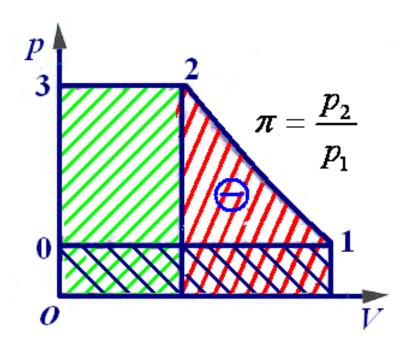


压气机耗功

$$Q = \Delta H + W_{t}$$

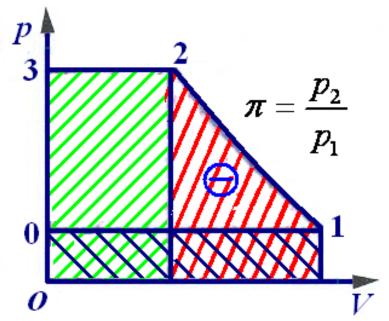
$$W_C = -W_t$$

$$W_{t} = -\int_{1}^{2} V dp$$





压气机耗功:



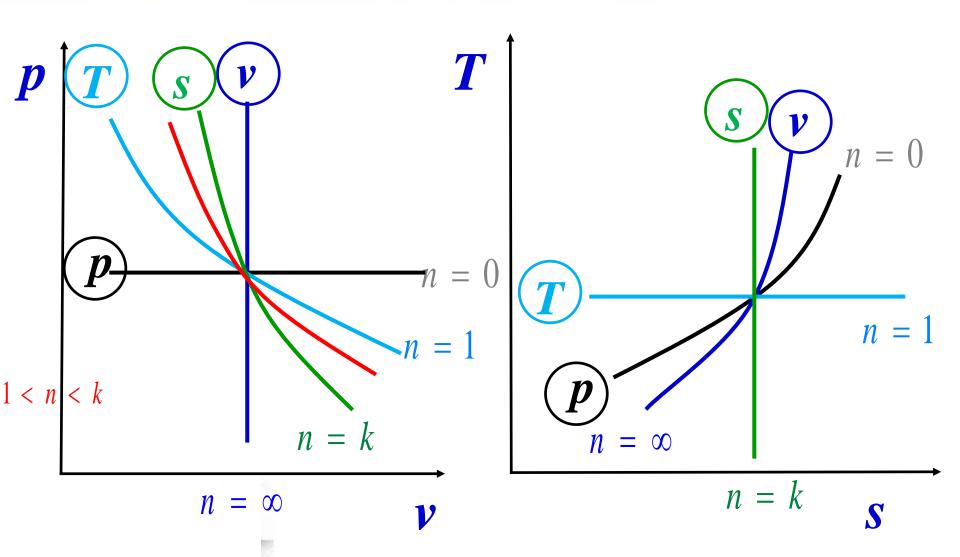
$$W_{\rm C} = p_2 V_2 - p_1 V_1 - \int_1^2 p \, dV$$

$$= \int_{1}^{2} V \mathrm{d}p = -W_{t}$$

 $w_{\rm C}$ 取决于初、终态压力及过程特征,过程不同,压缩机耗功也不同。

理想气体热力过程的p-v,T-s图





可能的压气过程



(1)特别快,来不及换热

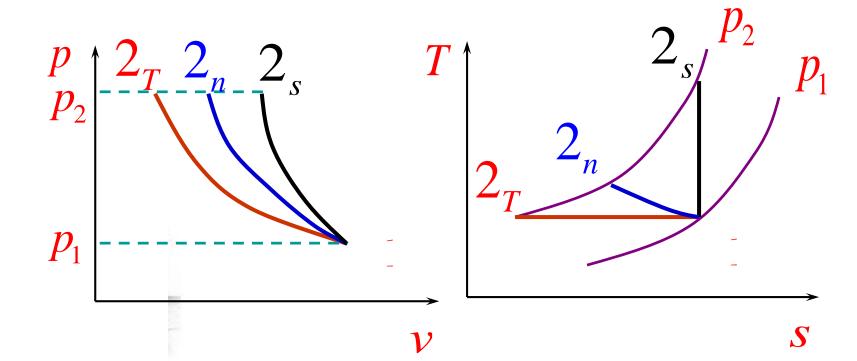
$$(s)n = k$$

(2)特别慢,热全散走

$$(T) n = 1$$

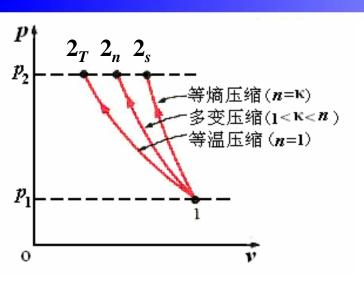
(3)实际压气过程

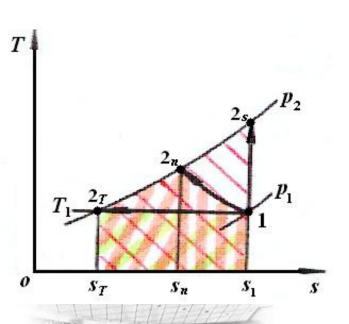




二、理论耗功







1.绝热压缩—过程进行的非常快,产生的热量来不及传出

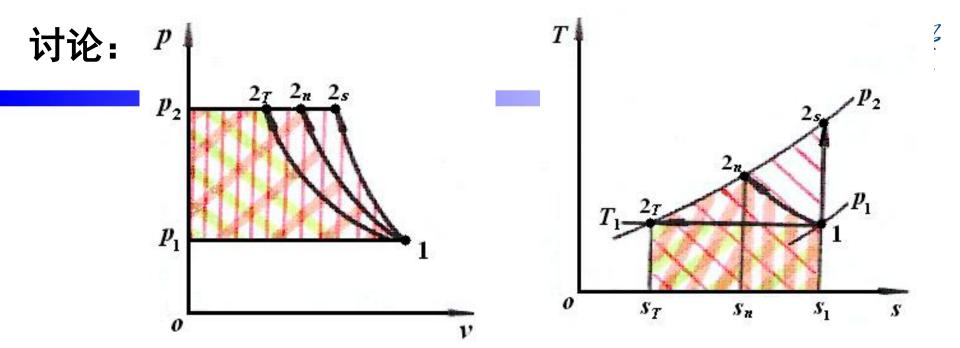
$$W_{C,s} = h_{2s} - h_1 = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_g T_1 \left(\pi^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right)$$

2.等温压缩—压缩过程进行的非常慢,或者冷却措施非常好,产生的热量可以及时排出

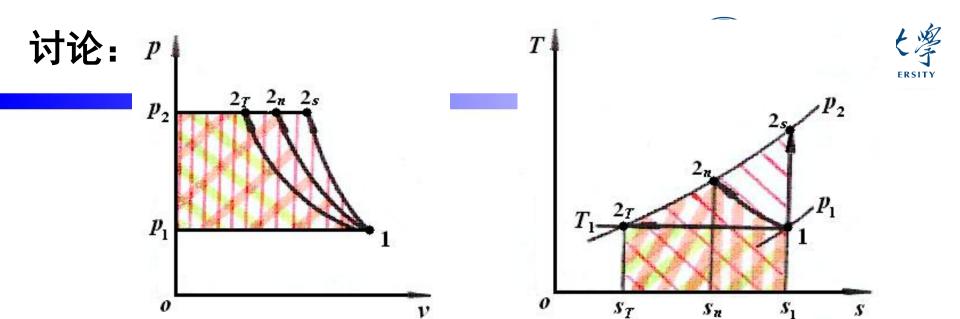
$$W_{\mathrm{C},T} = R_{\mathrm{g}} T_{1} \ln \pi$$

3.多变压缩—居于上述两种极端情况之间,工程上常见的压缩过程,都属于多变过程 $n = \frac{n-1}{2}$

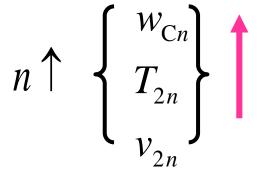
$$W_{C,n} = \frac{n}{n-1} R_g T_1 \left(\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$



理想压缩过程是等温压缩!



b) 通常为多变压缩, $1 < n < \kappa$

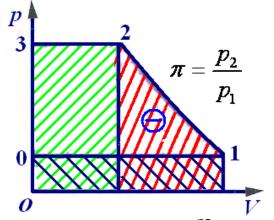


压气机工作过程改进方向:使工作过程尽可能接近等温压缩。

上节课内容回顾



、活塞式压气机工作原理



增压比:
$$\pi=rac{p_2}{p_1}$$

0-1: 吸气过程,状态不变,获得推动功 p_1v_1

1-2: 压缩过程,压力升高,体积减小,耗

外功
$$w_{1-2} = -\int_{1}^{2} p \, \mathrm{d}v$$

增压比: $\pi = \frac{p_2}{n}$ 2-3:排气过程,状态不变,消耗推动功 p_2v_2

二、活塞式压气机的耗功分析

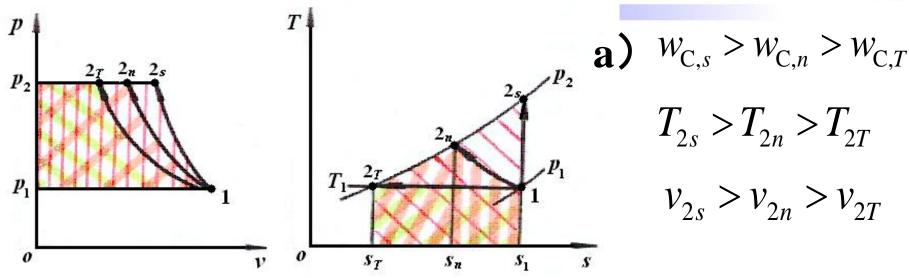
压缩过程耗功

压气机耗功

$$W_{1-2} = -\int_{1-2} p \, dV \qquad W_{C} = -W_{t} = \int_{1}^{2} V \, dp$$

活塞式压气机的三种工作过程





等温压缩最省功;出口温度最低,有利于设备安全;出口比体积最小,有利于设备小型化。理想压缩过程是等温压缩!

b) 通常为多变压缩, $1 < n < \kappa$

$$n \uparrow \left\{ \begin{array}{c} w_{\mathrm{C}n} \\ T_{2n} \\ v_{2n} \end{array} \right\} \uparrow$$

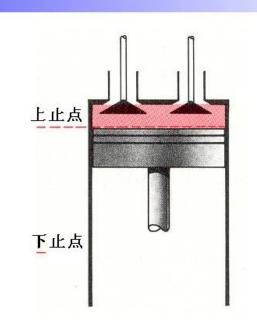
压气机工作过程改进方向: 使工作过程尽可能接近等温压缩。

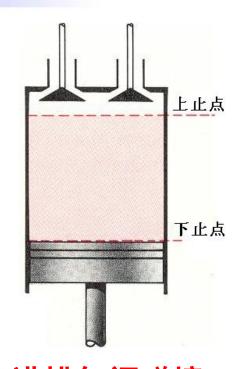
8-2、 余隙容积的影响



余隙容积:

活塞运行到上止点时,活 塞顶部与气缸盖间的空隙 容积。





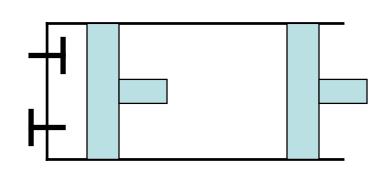
布置进、排气结构,避免活塞与进排气阀碰撞留有空隙

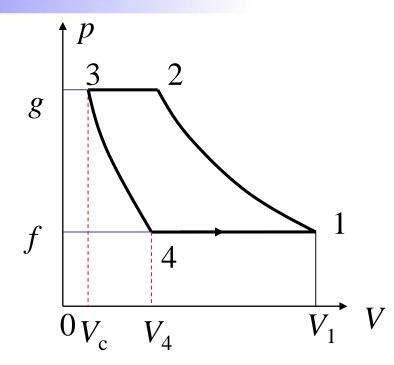
产生原因

部件热膨胀

制造公差







- 1 ⇒ 2 压缩过程
- $2 \Rightarrow 3$ 排气,状态未变
- 3 ⇒ 4 残留气体膨胀
- 4 → 1 进新气, 状态未变



余隙容积 $V_C = V_3$

气缸排量
$$V_h = V_1 - V_3$$

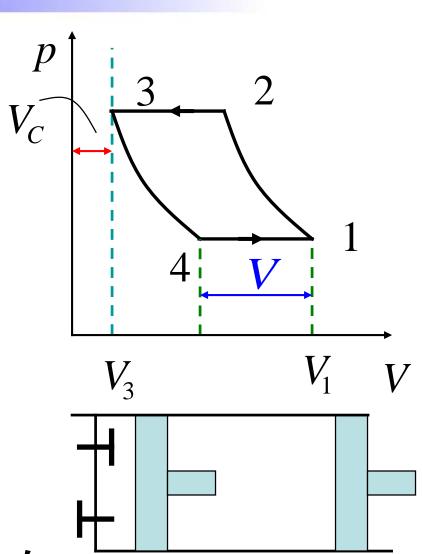
有效吸气容积 $V = V_1 - V_2$

$$p_1V = mRT_1$$
 新气量

生产量(每周期):

$$m_{\pm} = m_1 \frac{V}{V_1} = m_1 \frac{V_1 - V_4}{V_1}$$

研究Vc对产气量和耗功的影响



一、余隙容积对生产量的影响



定义容积效率

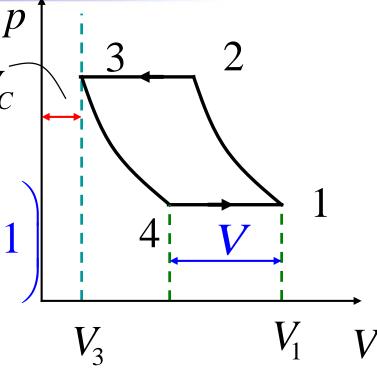
$$\eta_{V} = \frac{V}{V_{h}} = \frac{V_{1} - V_{4}}{V_{1} - V_{3}} + V_{3} - V_{3}$$

$$=1-\frac{V_4-V_3}{V_1-V_3}=1-\frac{V_3}{V_1-V_3}\left(\frac{V_4}{V_3}-1\right)$$



工程上一般=0.03~0.08

$$\eta_{V} = 1 - \sigma \left[\frac{V_4}{V_3} - 1 \right]$$



假设: 压缩过程1-2和余隙容积中气体膨胀过程3-4均为多变过程。

$$\eta_{V} = 1 - \sigma \left[\left(\frac{p_{3}}{p_{4}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] = 1 - \sigma \left[\left(\frac{p_{2}}{p_{1}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] = 1 - \sigma \left[\pi^{\frac{1}{n}} - 1 \right]$$

$$\sigma = \frac{V_{\rm C}}{V_{\rm h}}$$

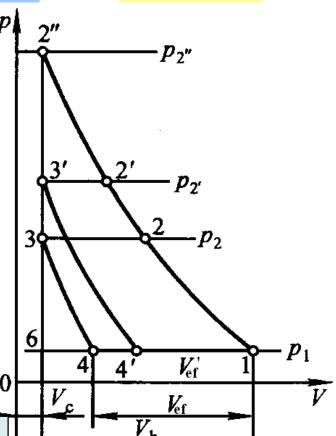
$$\eta_{V} = \frac{V}{V_{h}} = 1 - \sigma \left[\pi^{\frac{1}{n}} - 1 \right]$$

$$m_{$$
生产量 $}=m_{1}\frac{V}{V_{1}}=m_{1}\eta_{V}V_{h}/V_{1}$

讨论: a) σ 确定 π^{\uparrow} $\eta_{V} \downarrow m_{\underline{+r}\underline{+}} \downarrow$

极限 $\eta_{V} = 0$

b)
$$\pi$$
一定 $\sigma \uparrow \eta_V \downarrow m_{\pm \hat{r} \pm 1}$



余隙容积造成生产量降低!

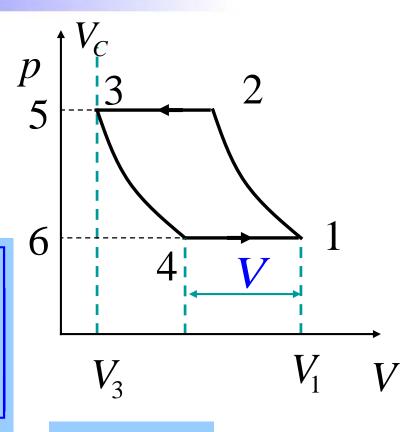
余隙容积对理论耗功的影响



功 = 面积12341 **一面积12561**一面积43564 设 $1\rightarrow 2$ 和 $3\rightarrow 4$ 两过程n相同

$$W_{t} = \frac{n}{n-1} p_{1} V_{1} \left[1 - \left(\frac{p_{2}}{p_{1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$-\frac{n}{n-1} p_{1} V_{4} \left| 1 - \left(\frac{p_{2}}{p_{1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right|$$



$$p_2 = p_3$$

$$p_1 = p_2$$

$$p_1V = mR_gT_1$$

$$= \frac{n}{n-1} p_1(V_1 - V_4) \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$= \frac{n}{n-1} p_1 V \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$w_{t} = \frac{W_{t}}{m} = \frac{n}{n-1} R_{g} T_{1} \left[1 - \left(\frac{p_{2}}{p_{1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$w_c = \frac{n}{n-1} R_g T_1 \left[\pi^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

余隙容积对单位产气量 的理论耗功无影响

讨论:



- 1、虽然余隙容积对理论耗功无影响,但实际上由于余隙容积 会造成容积效率减小,使得生产相同质量气体所需要的活塞行 程增多(考虑摩擦阻力的存在,还是使实际耗功增大)或设备 体积增大。
- 2、余隙存在使 1) 生产量下降
 - 2) 实际耗功增大或设备体积增大

可见余隙容积是有害容积。

减小余隙容积影响的两种方法:

- 1)设计时,尽可能减小余隙容积比;
- 2) 使用时,尽可能减小压缩比。

8-3、多级压缩和级间冷却



- 1) 夹层冷却(外部冷却)
- 2) 喷水冷却(内部冷却)
- 3)多级压缩,中间冷却

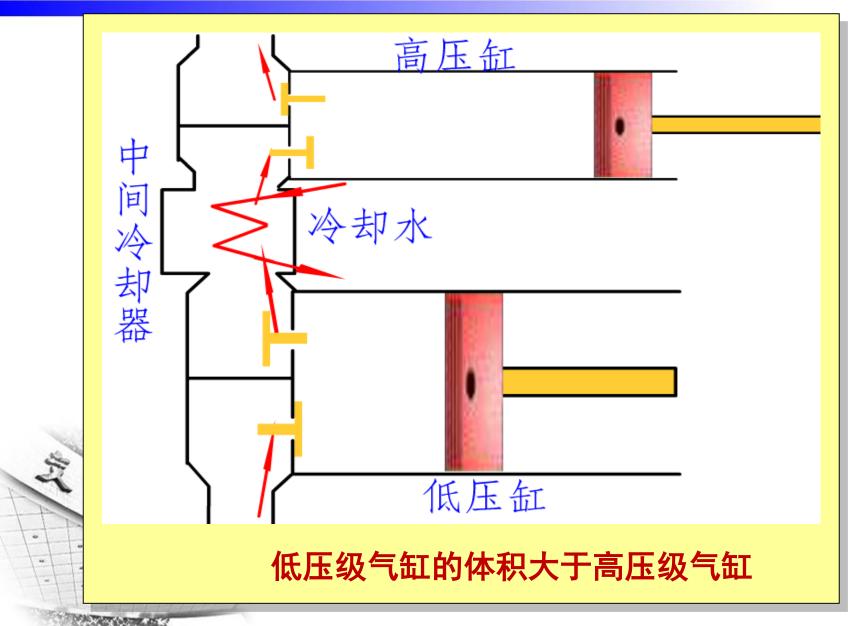
工程上需要高压气体,但压缩过程中随p升高,T升高,耗功增大。为此采取:

多级压缩

级间冷却

两级压缩中间冷却过程

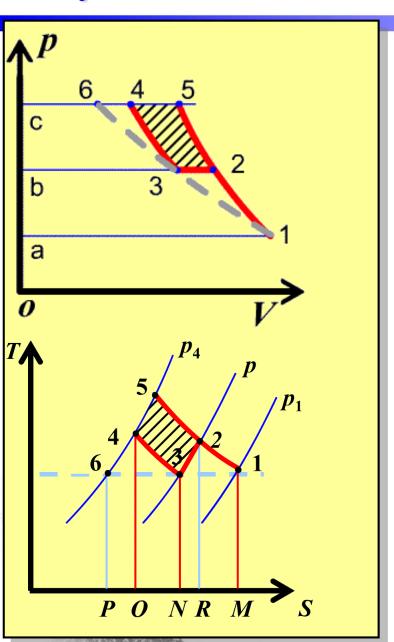


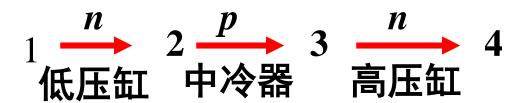


=,

理论耗功分析





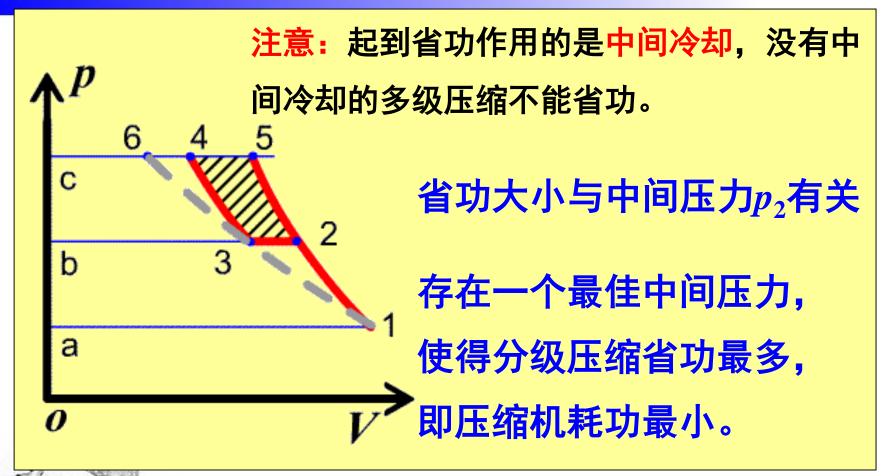


1. 定性分析

- 1) 省功
- 2) 降低了排气温度

即为等温压缩过程





问题:中间压力应如何确定?

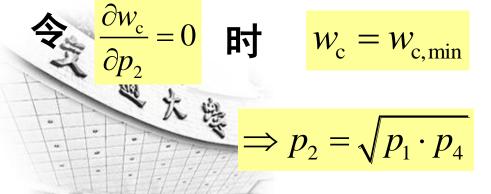
2. 最佳中间压力的分析

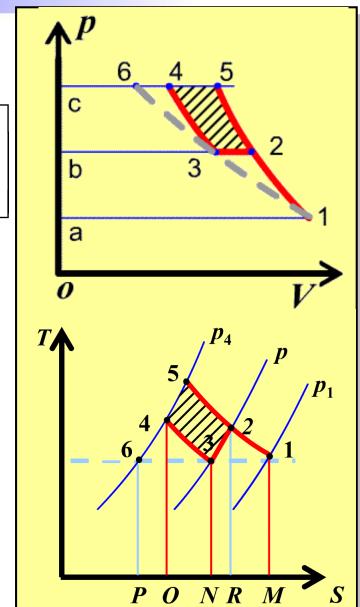


每生产1 kg压缩气体: $W_{\rm C}=W_{{\rm C},l}+W_{{\rm C},h}$

$$w_{c} = \frac{n}{n-1} R_{g} T_{1} \left[\left(\frac{p_{2}}{p_{1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + \frac{n}{n-1} R_{g} T_{3} \left[\left(\frac{p_{4}}{p_{3}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

$$= \frac{n}{n-1} R_g T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{p_4}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right]$$







$$\pi_1 = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_2} = \pi_h$$
 $w_c = w_{c,min}$

$$W_{\rm c} = W_{\rm c, min}$$

推广: 若N级

$$\pi_1 \times \pi_2 \times \cdots \times \pi_N = \frac{p_2}{p_1} \times \frac{p_3}{p_2} \cdots \frac{p_N}{p_{N-1}} = \frac{p_{\text{SE}}}{p_{\text{NE}}}$$

$$\pi_1 = \pi_2 = \cdots = \pi_N = \sqrt[N]{rac{p_{eta E}}{p_{ar{\eta} E}}}$$
 时, $w_{
m c} = w_{
m c,min}$

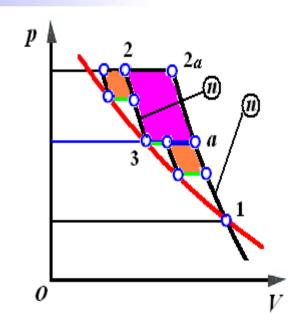
讨论



- 1)接 $\pi_i = \sqrt[N]{\frac{p_{\text{Ale}}}{p_{\text{Ale}}}}$ 选择各级中间压力,优点:耗功最少
- a) 各级耗功相等 $w_{c,i} = \frac{n}{n-1} R_{g} T_{1} \left(\pi_{i}^{\frac{n-1}{n}} 1 \right)$, $w_{c} = N w_{c,i}$ 有利于曲轴平衡。
- b)各缸终温相同 $T_2 = T_1 \pi_i^{\frac{n-1}{n}}$ 有利于润滑油工作,使可靠性增加。
- c)各级散热相同 $q_i = c_n \Delta T = \frac{n \kappa}{n 1} c_V \Delta T$
- d) 各中冷器散热相等 $q_{+,i} = \Delta h = c_p \Delta T$



2)若分级 $m\to\infty$,则趋于定温压缩,但由于体积庞大,系统复杂,可靠性下降,一般2-4级。



3) 定温效率(isothermal efficiency)

$$\eta_{C,T} = \frac{$$
等温压缩过程耗功 $= \frac{w_{C,T}}{$ 实际压缩过程耗功 $= \frac{w_{C,T}}{w_{C}}$

课后思考题



思考题:

1. 如果采用气缸冷却水套以及其他冷却措施, 使气体在压气机中已经能够按等温压缩过程进行, 这时是不还需要采用多级压缩, 为什么?



需要,虽然实现等温压缩后耗功最小,但由于余隙容积的存在,若压比过大, η_{ν} 会很小,分级后有助于提高 η_{ν} 。

以 p_1 =0.1MPa, p_2 =2.5MPa, σ =0.04 计算。

单级压缩

$$\eta_V = 1 - \sigma \left(\pi^{\frac{1}{n}} - 1 \right) = 1 - 0.04 \times \left(25^{\frac{1}{1}} - 1 \right) = 0.04$$

二级压缩

$$\pi_{l} = \pi_{h} = \sqrt{\frac{p_{2}}{p_{1}}} = 5$$

$$\eta_V = \eta_{V,l} \eta_{V,h} = \left[1 - 0.04 \times \left(5^{\frac{1}{1}} - 1 \right) \right]^2 = 0.706$$

例题1



活塞式压气机把0.1MPa, 298K的空气加压到2.5MPa。 试分别按单级压缩和二级压缩、中间冷却,计算压气机容积效率及各缸终温。已知 $\sigma = \frac{V_c}{V_b} = 0.04$ n = 1.25

解:单级压缩

$$T_{2} = T_{1}\pi^{\frac{n-1}{n}} = 298\text{K} \times \left(\frac{2.5 \text{ MPa}}{0.1 \text{ MPa}}\right)^{\frac{1.25-1}{1.25}} = 567.3 \text{ K} = 294.3 ^{\circ}\text{C}$$

$$\eta_{V} = 1 - \sigma \left(\pi^{\frac{1}{n}} - 1\right) = 1 - 0.04 \times \left[\left(\frac{2.5 \text{ MPa}}{0.1 \text{ MPa}}\right)^{\frac{1}{1.25}} - 1\right] = 0.525$$

二级压缩,中间冷却

若取
$$p_a = 0.2$$
MPa $\pi_l = \frac{p_a}{p_1} = \frac{0.2 \text{ MPa}}{0.1 \text{ MPa}} = 2 \cdot \pi_h = \frac{2.5 \text{ MPa}}{0.2 \text{ MPa}} = 12.5$



$$T_a = T_1 \pi_l^{\frac{n-1}{n}} = 342.3 \text{ K} = 69.3 ^{\circ}\text{C}$$
 $T_2 = T_1 \pi_h^{\frac{n-1}{n}} = 493.8 \text{ K} = 220.8 ^{\circ}\text{C}$
 $\eta_{V,L} = 1 - \sigma \left(\pi_l^{\frac{1}{n}} - 1\right) = 0.970$ $\eta_{V,H} = 1 - \sigma \left(\pi_h^{\frac{1}{n}} - 1\right) = 0.738$

$$\eta_V = \eta_{V,L} \eta_{V,H} = 0.716$$

若取
$$p_a = 0.5$$
MPa $\pi_l = \pi_h = \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} = \sqrt{\frac{2.5\text{MPa}}{0.1\text{MPa}}} = 5$

$$T_a = T_2 = T_1 \pi_l^{\frac{n-1}{n}} = 411.1 \text{ K} = 138.1 ^{\circ}\text{C}$$

$$\eta_{V,L} = \eta_{V,H} = 1 - \sigma \left(\pi_l^{\frac{1}{n}} - 1 \right) = 0.895$$

$$\eta_V = \eta_{V,L} \eta_{V,H} = 0.801$$



	容积效率	排气温度
单级压缩 π=25	0.525	T ₂ =567.3K
两级压缩	0.716	$T_{\rm a}$ =342.3K
$\pi_l = 2 \cdot \pi_h = 12.5$		T ₂ =493.8K
两级压缩	0.801	$T_{\rm a} = T_2 = 411.1 {\rm K}$
$\pi_l = \pi_h = 5$		

可见分级压缩,可以有效提高容积效率,同时减小排气温度;而且按最佳中间压力设置的分级压缩方案地的效果最好。

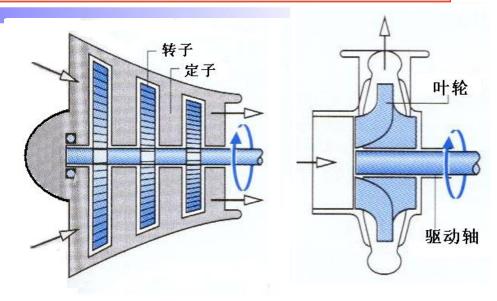
8-4 叶轮式压气机工作原理和理论耗功量



一、简介

叶轮式压气机:

根据工质流动方向分为轴流式和离心式两种。



轴流式

离心式

原理:入口初步加速、导向叶片扩压、叶片加速,再扩压,

...逐级升压

优点:转速高;吸、排气过程连续,运转平稳;排气量大,没有

余隙影响;

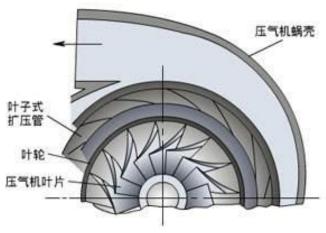
缺点: 每级压比不高。



轴流式压气机

Axial flow compressor for a gas generator unit.

离心式压气机



离心式压气机示意图

二、叶轮式压气机热力学分析



由于排量大,运转快,难冷却,可作绝热压缩考虑。

绝热压缩过程
$$W_c = \int_1^2 v dp = -W_t$$
 $q = \Delta h + W_t$

理论耗功

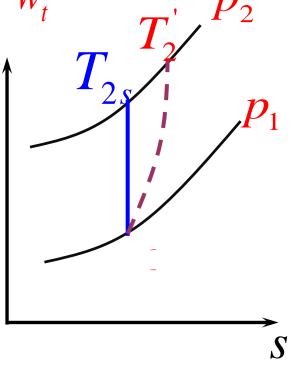
$$W_{c,s} = h_{2s} - h_1$$

由于流速高,摩擦的影响不可忽略,因此实 际上是不可逆过程,引入压气机绝热效率:

实际耗功
$$w_{c}' = h_{2}' - h_{1}$$

$$\eta_{C,s} = \frac{w_{C,s}}{w_{C}'} = \frac{h_{2s} - h_{1}}{h_{2}' - h_{1}}$$

$$\eta_{\text{C,s}} = \frac{T_{2\text{s}} - T_1}{T_2' - T_1}$$
 $T_2' = T_1 + \frac{T_{2\text{s}} - T_1}{\eta_{\text{C,s}}}$



历步交通大学 (P2)



实际耗功
$$w_{\rm C}' = h_2' - h_1$$

$I = T_0 \Delta S$

实际多耗功

$$\Delta w_{\rm C} = h_2' - h_{2s} = c_p(T_{2'} - T_{2s}) = \overline{\text{m}} Rmn2'2_s m$$

有效能损失

$$i = T_0 \Delta s_g = T_0 \times (s_{2'} - s_1) = T_0 \times (s_{2'} - s_{2s}) = \overline{\square} + \overline{\square} + \overline{\square} + \overline{\square}$$

实际多消耗的功,并不等于有效能损失。

例题2



叶轮式压缩机,氮气进口参数 $p_1 = 0.0972$ MPa, $t_1 = 20$ °C, 出口压力 $p_2 = 311.11$ kPa,进口处氮气流量 $q_V = 113.3$ m³/min 。

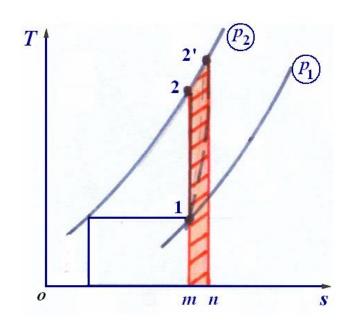
压气机绝热效率 $\eta_{C,s}=0.80$,略去进出口动能差和位能差,

- 求: 1) 压气机定熵压缩的耗功量;
 - 2) 实际耗功量;
 - 3) 由于不可逆而多耗功∆w;;
 - 4) 作功能力损失 *I*。 *t*₀=20 ℃。

已知氮气:

$$c_p = 1.038 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$R_g = 0.297 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$
 $\kappa = 1.4$

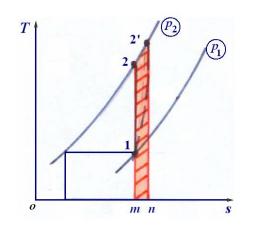


1) 压气机定熵压缩的耗功量



解:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = (20 + 273.15) \text{ K} \times \left(\frac{311.11 \text{ kPa}}{97.2 \text{ kPa}}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 408.5 \text{ K}$$



$$v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{297 \text{ J/(kg} \cdot \text{K}) \times 293 \text{ K}}{97.2 \text{ kPa}} = 0.895 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$q_m = \frac{q_V}{v_1} = \frac{113.3 \text{ m}^3/\text{min}}{0.895 \text{ m}^3/\text{kg}} = 126.6 \text{ kg/min}$$

$$P_{\rm s} = q_m c_p (t_1 - t_2) = 126.6 \text{ kg/min} \times 1.038 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \times (293 - 408.5) ^{\circ}\text{C}$$

= -15 178 kJ/min = -252.97 kW



2) 求实际耗功量

$$P' = \frac{P_s}{\eta_{C,s}} = \frac{-15\ 178\ \text{kJ/min}}{0.8} = -18\ 972.5\ \text{kJ/min} = -316.21\ \text{kW}$$

3) 由于不可逆而多耗功

$$\Delta P = P' - P_s$$

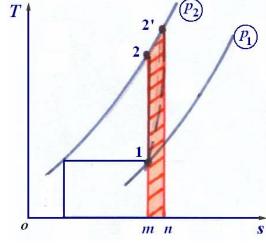
= -18 972.5 kJ/min +15 178 kJ/min
= -3 794.5 kJ/min = -63.24 kW

4) 作功能力损失



$$T_2' = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_{C,s}} = 293 \text{ K} + \frac{408.5 \text{ K} - 293 \text{ K}}{0.8} = 437.4 \text{ K}$$

$$\Delta \dot{s}_{N_2} = q_m \left[c_p \ln \frac{T_2'}{T_2} - R_g \ln \frac{p_2'}{p_2} \right] = q_m c_p \ln \frac{T_2'}{T_2}$$



=126.6 kg/min×1.038 kJ/(kg·K)×ln
$$\frac{437.4 \text{ K}}{408.5 \text{ K}}$$

 $= 8.983 \text{ kJ/(K} \cdot \text{min)}$

$$\dot{I} = T_0 \Delta S_{\text{iso}} = T_0 \left(\Delta \dot{s}_{N_2} + \Delta \dot{s}_0 \right)$$

 $= 293 \text{ K} \times 8.983 \text{ kJ/(K} \cdot \text{min}) = 2 631.9 \text{ kJ/(K} \cdot \text{min}) = 43.87 \text{ kW}$

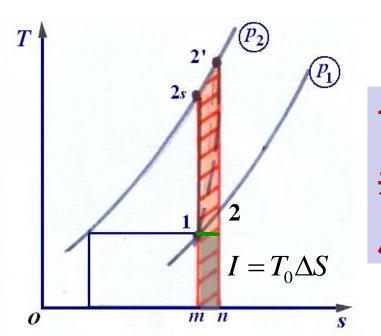


由于不可逆而多耗功

$$\Delta P = P' - P_{\rm s} = 63.24 \text{ kW}$$

作功能力损失

$$\dot{I} = T_0 \Delta S_{\text{iso}} = T_0 \left(\Delta \dot{s}_{N_2} + \Delta \dot{s}_0 \right) = 43.87 \text{ kW}$$



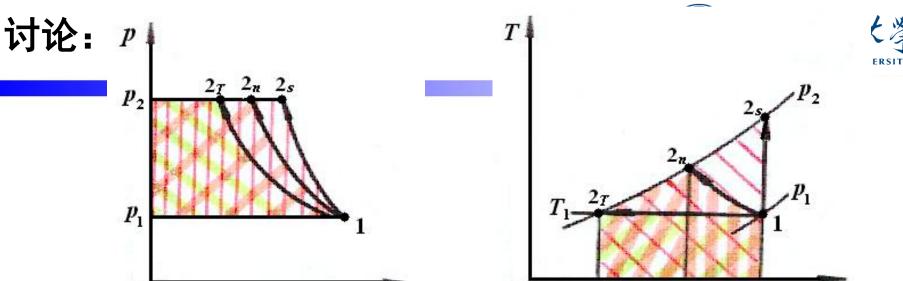
可见由于实际不可逆过程多消耗的功,并不等于有效能损失,因为不可逆过程 产生的热量,仍旧具有一定的有效能。

课后思考题



思考题:

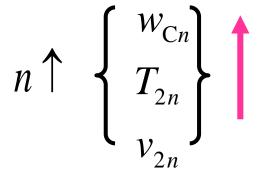
- 2. 对于活塞式压气机, 分级压缩级间冷却可以有效提高压气机的性能。那么, 却可以有效提高压气机的性能。那么, 这一方案是否也适用于叶轮式压气机呢? 为什么?
- 3. 活塞式压气机的理想工作过程等温过程, 那么叶轮式压气机呢?



ST

Sn

b) 通常为多变压缩, $1 < n < \kappa$



压气机工作过程改进方向:使工作过程尽可能接近等温压缩。





1. 压气机耗功

1) 绝热及多变过程

$$w_{C,s} = h_2 - h_1$$

$$= c_p (T_2 - T_1)$$

$$= \frac{\kappa}{\kappa - 1} (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$= \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_g T_1 \left(\pi^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right)$$

适用于任何工质、绝热过程。

适用于理想气体、绝热过程。

适用于理想气体、可逆绝热过程。

当用于多变过程时,只需将绝热指数k改为多变指数n即可



2)等温过程

$$w_{\mathrm{C},T} = \Delta h - q$$
 适用于任何工质、等温过程。
$$= R_{\mathrm{g}} T_{1} \ln \pi$$
 适用于理想气体、可逆等温过程。

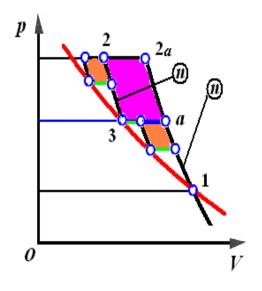
2. 多级压缩、中间冷却

由总耗功最小可得,各最佳中间压力应满足:

$$\pi_1=\pi_2=\cdots=\pi_N=\sqrt[N]{rac{p_{oldsymbol{eta}oldsymbol{\mathbb{E}}}}{p_{oldsymbol{\eta}oldsymbol{\mathbb{E}}}}}$$

- a)各级耗功相等
- c)各级散热相同

b)各缸终温相同



d)各中冷器散热相等



3. 活塞式压气机余隙容积的影响

余隙容积对容积效率及生产量的影响:

$$a)$$
 $V_{\rm c}$, $V_{\rm h}$ 确定 $\pi \uparrow \eta_{\rm V} \downarrow V_{\rm es} \downarrow m_{\rm \pm p \pm} \downarrow$

$$b)$$
 π 一定 $\sigma \cap \eta_V \downarrow m_{\pm \neq \pm} \downarrow$



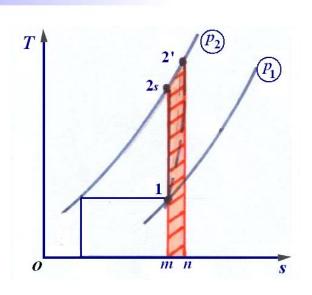
减小余隙容积影响的两种方法:

- 1)设计时,尽可能减小余隙容积比;
- 2) 使用时,尽可能减小压缩比。



4. 叶轮式压气机的工作过程

等温压缩是压气机的理想工作过程,不论是活塞式还是叶轮式压气机都适用; 分级压缩级间冷却的方法同样适用于叶轮式压气机。



绝热效率
$$\eta_{CS} = \frac{\overline{\text{可逆绝热压缩过程耗功}}}{\overline{\text{实际绝热压缩过程耗功}}} = \frac{w_{Cs}}{w_{C}} = \frac{h_{2s} - h_{1}}{h_{2} - h_{1}}$$

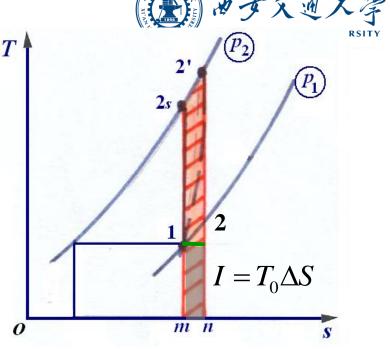
理想气体:
$$\eta_{\text{Cs}} = \frac{T_{2\text{s}} - T_1}{T_2 - T_1}$$
 $T_2 = T_1 + \frac{T_{2\text{s}} - T_1}{\eta_{\text{Cs}}}$



实际多耗功

$$\Delta w_{\rm C} = h_2' - h_{2s} = c_p (T_{2'} - T_{2s})$$

$$= \overline{m} Rmn2' 2_s m$$



有效能损失

$$i = T_0 \Delta s_g = T_0 \times (s_{2'} - s_1) = T_0 \times (s_{2'} - s_{2s})$$
$$= \overrightarrow{\text{III}} + 21m$$

实际多消耗的功 > 有效能损失。

作业



8-3、8-8、8-11

