




第九章

气体动力循环

能源与动力工程学院 新能源科学与工程系

吉恒松



活塞式内燃机 { 混和加热循环
定容加热循环
定压加热循环

燃气轮机装置 { 定压加热燃气轮机循环
回热循环
采用多级压缩中间冷却的回热循环

目的 { 按照循环过程性质，确定参数间的关系
写出循环热效率关系式
分析参数变化对循环热效率的影响



9-1 活塞式内燃机的理想循环

一、混合加热循环（萨巴特循环 Sabath'e Cycle）

1、实际循环过程：

0—1进气过程：由于管路阻力，气缸内气体压力稍低于环境压力。

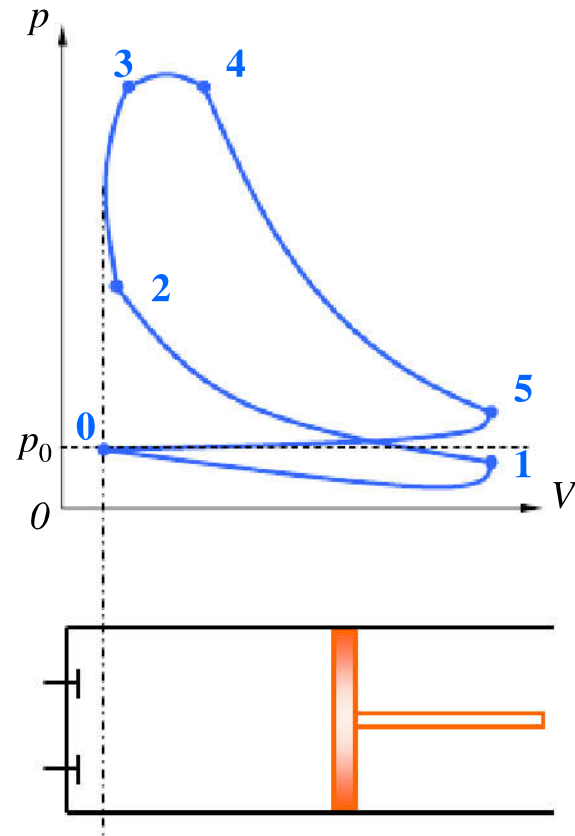
1—2压缩过程：随着活塞推进，气缸容积减小，气体压力提高。

2—3燃烧过程：活塞处于上死点位置附近，燃料在气缸中开始燃烧，压力急剧升高，而体积无显著变化。

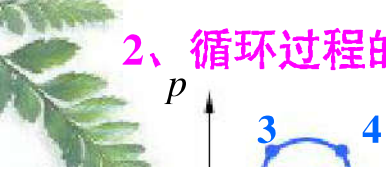
3—4燃烧过程：活塞开始向下死点移动，燃料继续在气缸中燃烧，压力无显著变化。

4—5膨胀过程：高温高压燃气推动活塞移动做功。

5—0排气过程：活塞位于下死点位置附近，废气压力较高，开始时容积变化缓慢，随着废气已大量排入大气，**压力迅速降低，接近环境压力**。随着活塞移动，容积减小，继续把气体排出气缸。



2、循环过程的理想化：



(1) 工质看作为理想气体（空气）

过程

过程

加热过程

加热过程

过程

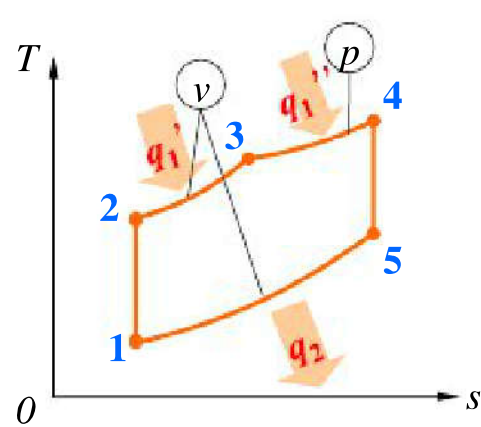
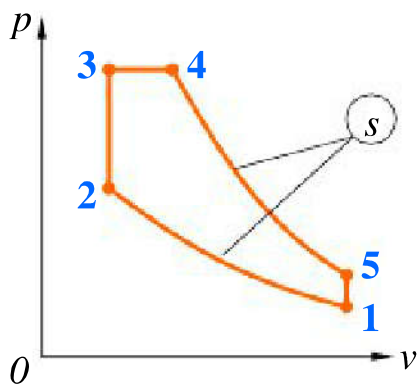
过程

(过程)

过程

排气、排
气可省略





3、理论循环热效率：

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{|q_2|}{q_1' + q_1''} = 1 - \frac{c_{v0}(T_5 - T_1)}{c_{v0}(T_3 - T_2) + c_{p0}(T_4 - T_3)}$$

压缩比 $\varepsilon = v_1/v_2$

升压比 $\lambda = p_3/p_2$

预胀比 $\rho = v_4/v_3$

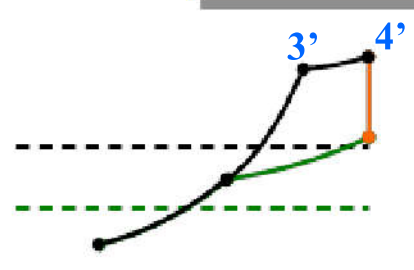
$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = T_1 \varepsilon^{k-1} \quad T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_2} = T_2 \lambda = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda$$

$$T_4 = T_3 \frac{v_4}{v_3} = T_3 \rho = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda \rho$$

$$T_5 = T_4 \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^{k-1} = T_4 \left(\frac{v_3}{v_1}\right)^{k-1} = T_4 \left(\frac{\rho}{\varepsilon}\right)^{k-1} = T_1 \lambda \rho^k$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k \lambda (\rho - 1)}$$

✓ 压缩比 $\varepsilon = v_1/v_2$
 ✓ 升压比 $\lambda = p_3/p_2$
 预胀比 $\rho = v_4/v_3$



T_{m2} -----

T_{m2} -----

升压比 $\lambda = Const$
 预胀比 $\rho = Const$
 压缩比 $\varepsilon \uparrow$

$\varepsilon = 14 \sim 20$

$\eta_t \uparrow$

$Tds = c_v dT + pdv$

$\eta_t = 1 - \frac{T_{m2}}{T_{m1}}$



压缩比 $\varepsilon = v_1/v_2$
 升压比 $\lambda = p_3/p_2$
 预胀比 $\rho = v_4/v_3$

4、混合加热循环的循环净功

$$w_0 = q_1 - |q_2| = c_{v0}(T_3 - T_2) + c_{p0}(T_4 - T_3) - c_{v0}(T_5 - T_1)$$

$$w_0 = c_{v0} \{ \varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)] - (\lambda\rho^k - 1) \}$$

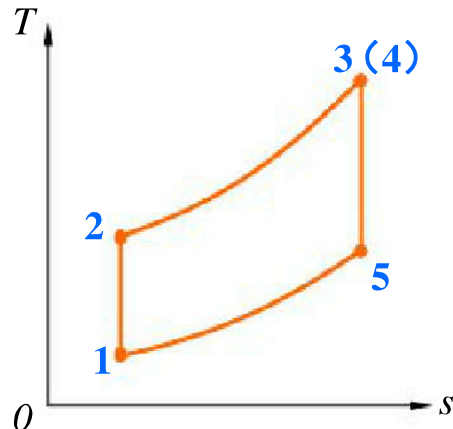
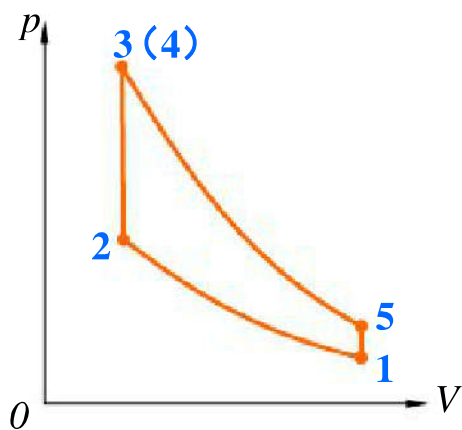
$$= \frac{p_1 v_1}{k-1} \{ \varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)] - (\lambda\rho^k - 1) \}$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{压缩比 } \varepsilon = v_1/v_2 \uparrow \\
 \text{升压比 } \lambda = p_3/p_2 \uparrow \\
 \text{预胀比 } \rho = v_4/v_3 \uparrow
 \end{array} \right\} w_0 \uparrow$$



二、定容加热循环（奥图循环 Otto Cycle）

——无定压加热过程3-4的混合加热循环。 $\rho = v_4/v_3 = 1$



$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

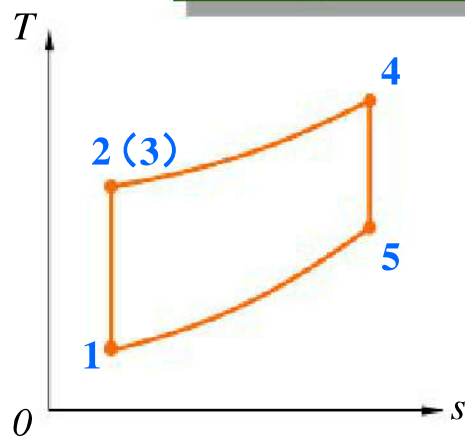
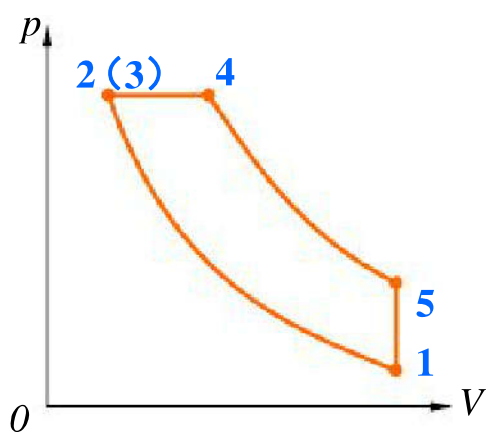
压缩比 $\varepsilon \uparrow$ $\eta_t \uparrow$

$$w_0 = \frac{p_1 v_1}{k-1} (\lambda - 1) (\varepsilon^{k-1} - 1)$$

压缩比 $\varepsilon \uparrow$ } $w_0 \uparrow$
 升压比 $\lambda \uparrow$ }

三、定压加热循环（笛塞尔循环 Diesel Cycle）

——无定容加热过程2-3的混合加热循环。 $\lambda = p_3/p_2 = 1$



$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}$$

压缩比 $\varepsilon \uparrow$
预胀比 $\rho \downarrow$ } $\eta_t \uparrow$

$$w_0 = \frac{p_1 v_1}{k-1} [k \varepsilon^{k-1} (\rho - 1) - (\rho^k - 1)]$$

压缩比 $\varepsilon \uparrow$
预胀比 $\rho \uparrow$ } $w_0 \uparrow$

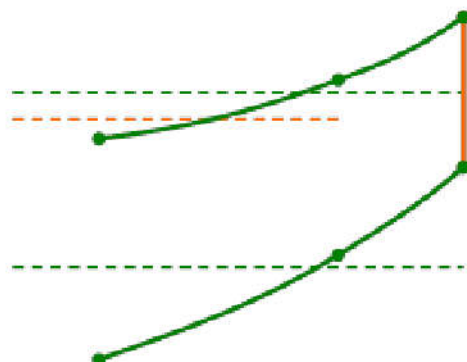


$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}$$

压缩比 $\varepsilon \uparrow$
 预胀比 $\rho \downarrow \Rightarrow \eta_t \uparrow$

压缩比 $\varepsilon = v_1/v_2$
 升压比 $\lambda = p_3/p_2$
 预胀比 $\rho = v_4/v_3$

} / }



$T_{m1}' > T_{m1}$ $T_{m2}' > T_{m2}$ } $\eta_t \downarrow$

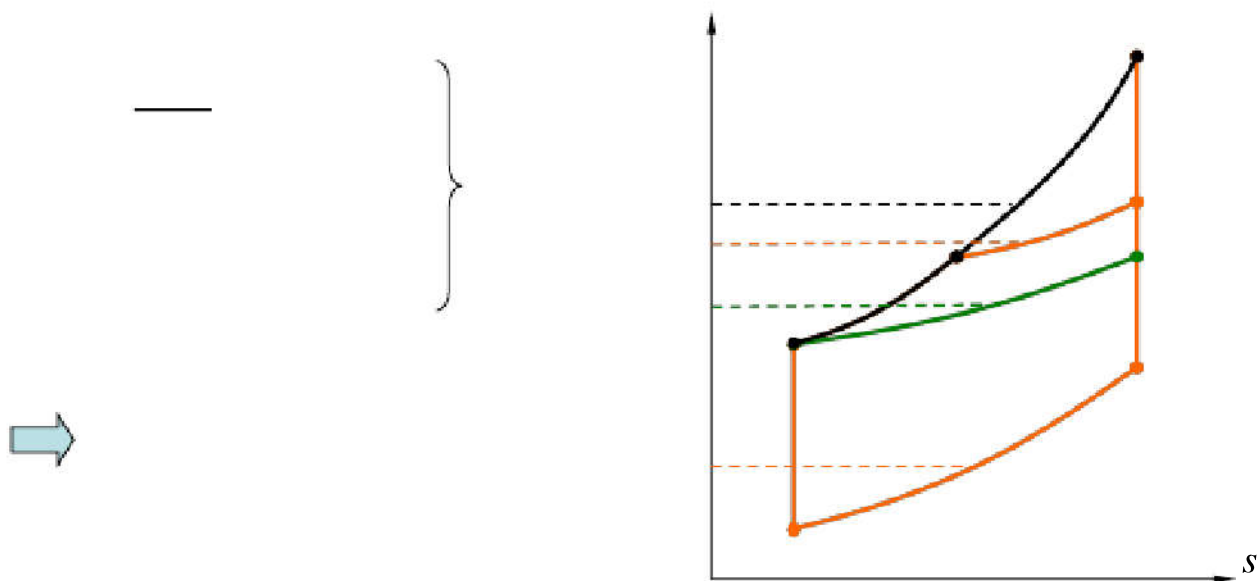
T_{m1} 增加得慢, T_{m2} 增加得快 }
 (24'是定压过程, 5'1是定容过程)

$$T_4 = T_3 \frac{v_4}{v_3} = T_3 \rho = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda \rho$$

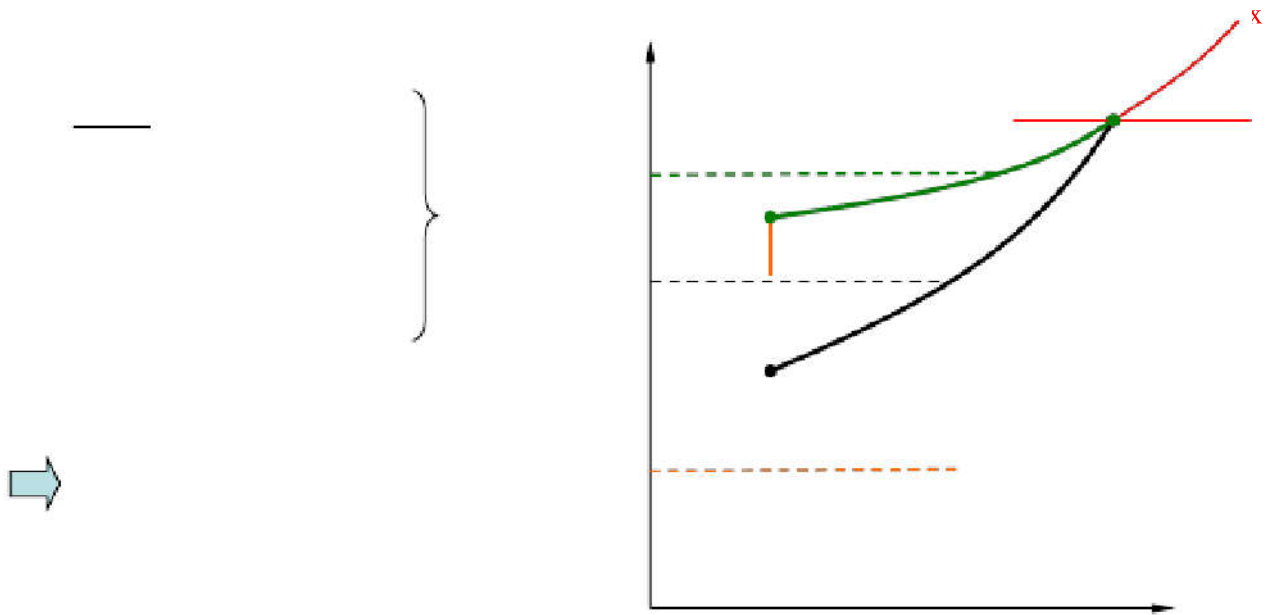


四、活塞式内燃机各种理想循环（热效率）的比较

1、对于**点燃式内燃机（汽油机）**，燃料确定时，相应允许的**最高压缩比就基本确定了**。因此常以**一定的压缩比 ϵ** 作为

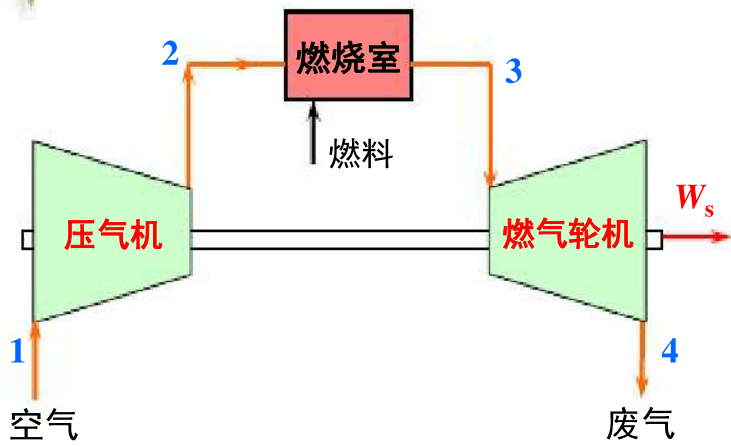


2、对于高增压的压燃式内燃机（柴油机），由于受到机件强度的限制，必须限制其最高温度及最高压力。因此常以一定的

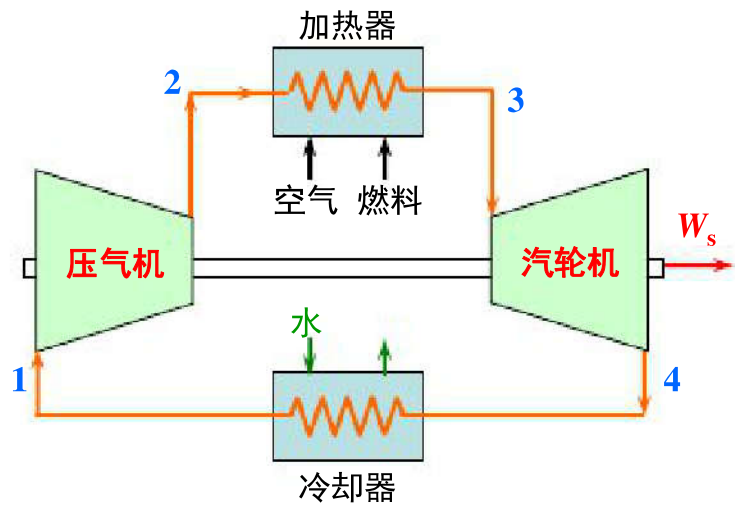


9-2 燃气轮机装置循环

一、定压加热燃气轮机循环



燃气轮机装置示意图



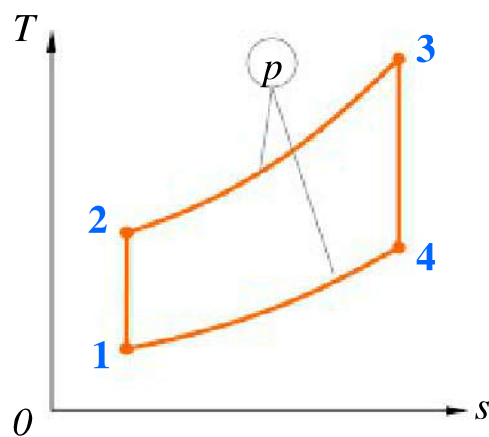
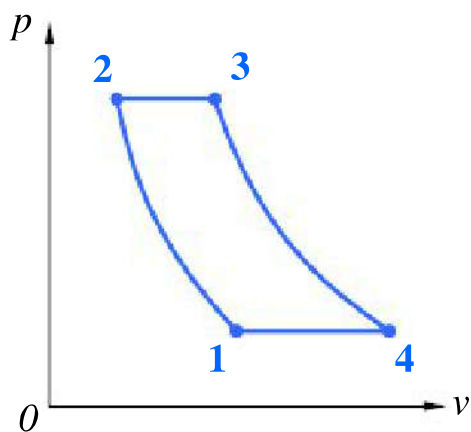
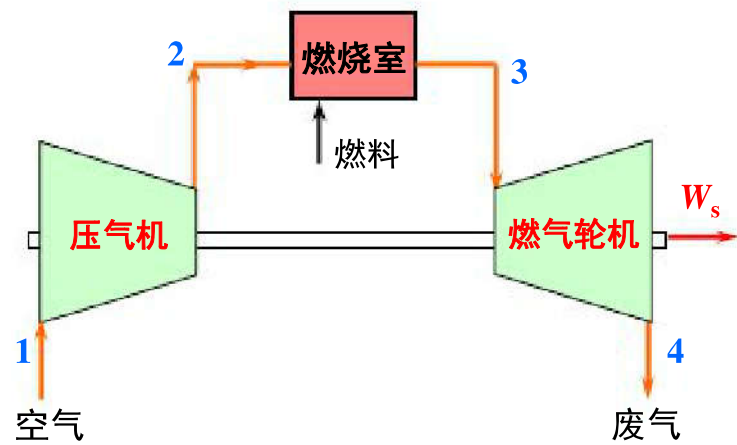
闭式燃气轮机装置示意图



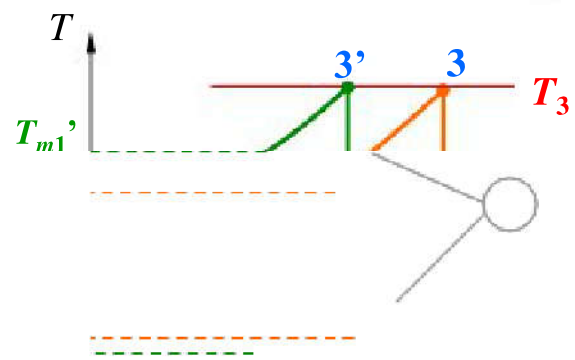
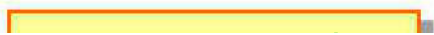
一、定压加热燃气轮机循环

1、循环的四个过程

- ①可逆绝热压缩过程1-2 (压气机)
- ②可逆定压加热过程2-3 (燃烧室)
- ③可逆绝热膨胀过程3-4 (燃气轮机)
- ④可逆定压放热过程4-1 (大气中)



2、循环热效率



s



3、循环净功

压气机**消耗的轴功**为：

$$|(w_s)_c| = h_2 - h_1 = c_{p0}(T_2 - T_1)$$

燃气轮机**对外所作轴功**为：

$$(w_s)_T = h_3 - h_4 = c_{p0}(T_3 - T_4)$$

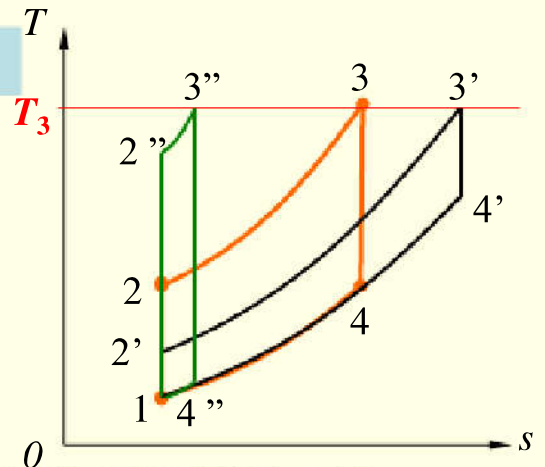
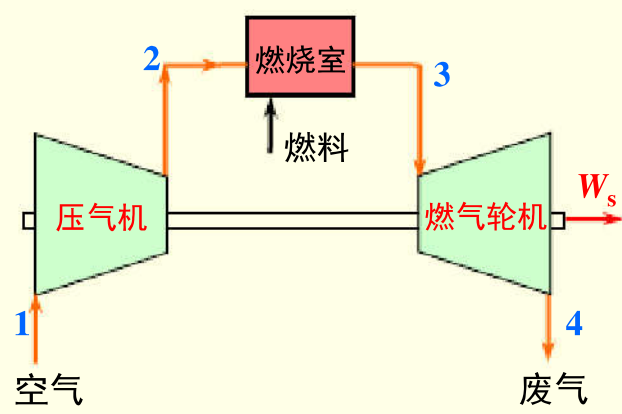
$$\begin{aligned} w_0 &= (w_s)_T - |(w_s)_c| = c_{p0}(T_3 - T_4) - c_{p0}(T_2 - T_1) \\ &= c_{p0} \left[T_3 \left(1 - \frac{1}{\pi^{(k-1)/k}} \right) - T_1 (\pi^{(k-1)/k} - 1) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pi &= p_2 / p_1 \\ \tau &= T_3 / T_1 \end{aligned}$$

最高温度 T_3 一定时，循环净功取决于增压比！

$$\pi_{\max, w_0} = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{k}{2(k-1)}} \quad \text{时 } w_0 \text{ 取得最大值!}$$

$$\begin{aligned} \pi < \pi_{\max, w_0} & \quad \pi \uparrow \quad w_0 \uparrow \\ \pi > \pi_{\max, w_0} & \quad \pi \uparrow \quad w_0 \downarrow \end{aligned}$$



例题：对于燃气轮机装置理想循环，当循环净功取得最大值时，是否意味着可同时获得最高的循环热效率，试分析之？

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\pi^{(k-1)/k}}$$

二、燃气轮机装置的实际循环

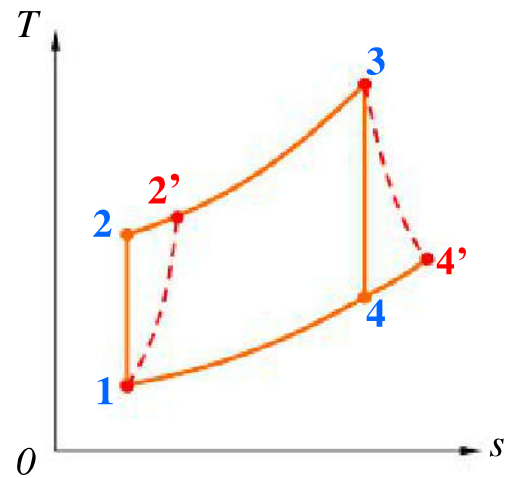
1、实际燃气轮机装置循环：

不可逆绝热压缩过程 1-2'

可逆定压加热过程 2'-3

不可逆绝热膨胀过程 3-4'

可逆定压放热过程 4'-1



2、燃气轮机装置实际循环的热效率

$$1-2' \text{ 压气机消耗的轴功 } |(w_s)_c| = \frac{h_2 - h_1}{\eta_{c,s}}$$

$$3-4' \text{ 燃气轮机所作轴功 } (w_s)_T = \eta_T (h_3 - h_4)$$

$\eta_{c,s}$ ：压气机绝热效率

η_T ：涡轮机效率

燃气轮机相对内效率



$$\eta_t = \frac{w_0}{q_1} = \frac{(w_s)_T - |(w_s)_c|}{q_1} = \frac{(h_3 - h_4)\eta_T - (h_2 - h_1)/\eta_{c,s}}{h_3 - h_2} = \frac{(h_3 - h_4)\eta_T - (h_2 - h_1)/\eta_{c,s}}{(h_3 - h_1) - (h_2 - h_1)/\eta_{c,s}}$$

$$\Rightarrow \eta_t = \frac{c_{p0}(T_3 - T_4)\eta_T - c_{p0}(T_2 - T_1)/\eta_{c,s}}{c_{p0}(T_3 - T_1) - c_{p0}(T_2 - T_1)/\eta_{c,s}} \Rightarrow \eta_t = \frac{\frac{\tau}{\pi^{(k-1)/k}}\eta_T - \frac{1}{\eta_{c,s}}}{\frac{\tau - 1}{\pi^{(k-1)/k}} - 1} - \frac{1}{\eta_{c,s}}$$

$$\pi = p_2 / p_1$$

$$\tau = T_3 / T_1$$

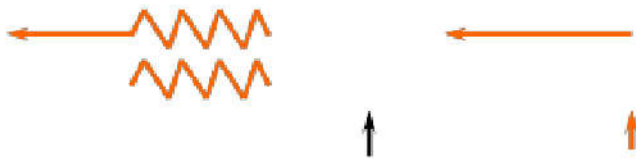
提高循环热效率的主要方向

- (1) 增大升温比 τ , 可提高热效率
- (2) 当 τ 、 $\eta_{c,s}$ 、 η_T 一定时, 随着 $\pi \uparrow$, η_t 有最大值
- (3) $\eta_{c,s} \uparrow$ 、 $\eta_T \uparrow$, 则 η_t 增加



三、提高燃气轮机装置热效率的措施

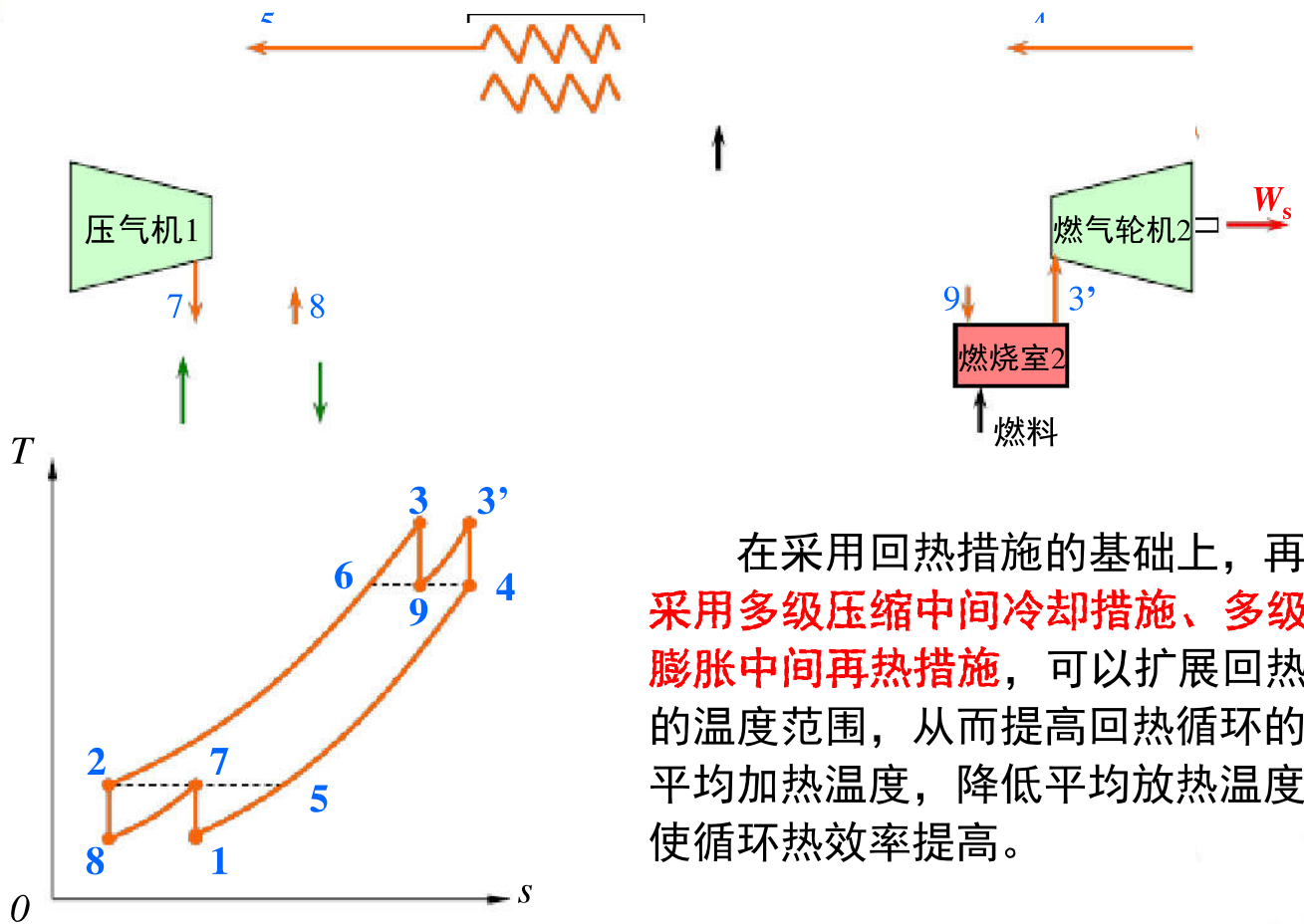
注意热效率计算!



回热度



2、采用多级压缩中间冷却和再热的回热循环



在采用回热措施的基础上，再采用多级压缩中间冷却措施、多级膨胀中间再热措施，可以扩展回热的温度范围，从而提高回热循环的平均加热温度，降低平均放热温度。使循环热效率提高。

