

# 華東理工大學

EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



## 第十章 动力循环



# 主要内容

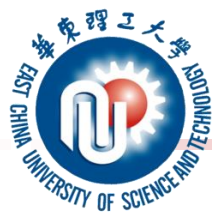
---



□ 10.4 **内燃机循环**

□ 10.5 **燃气轮机循环**





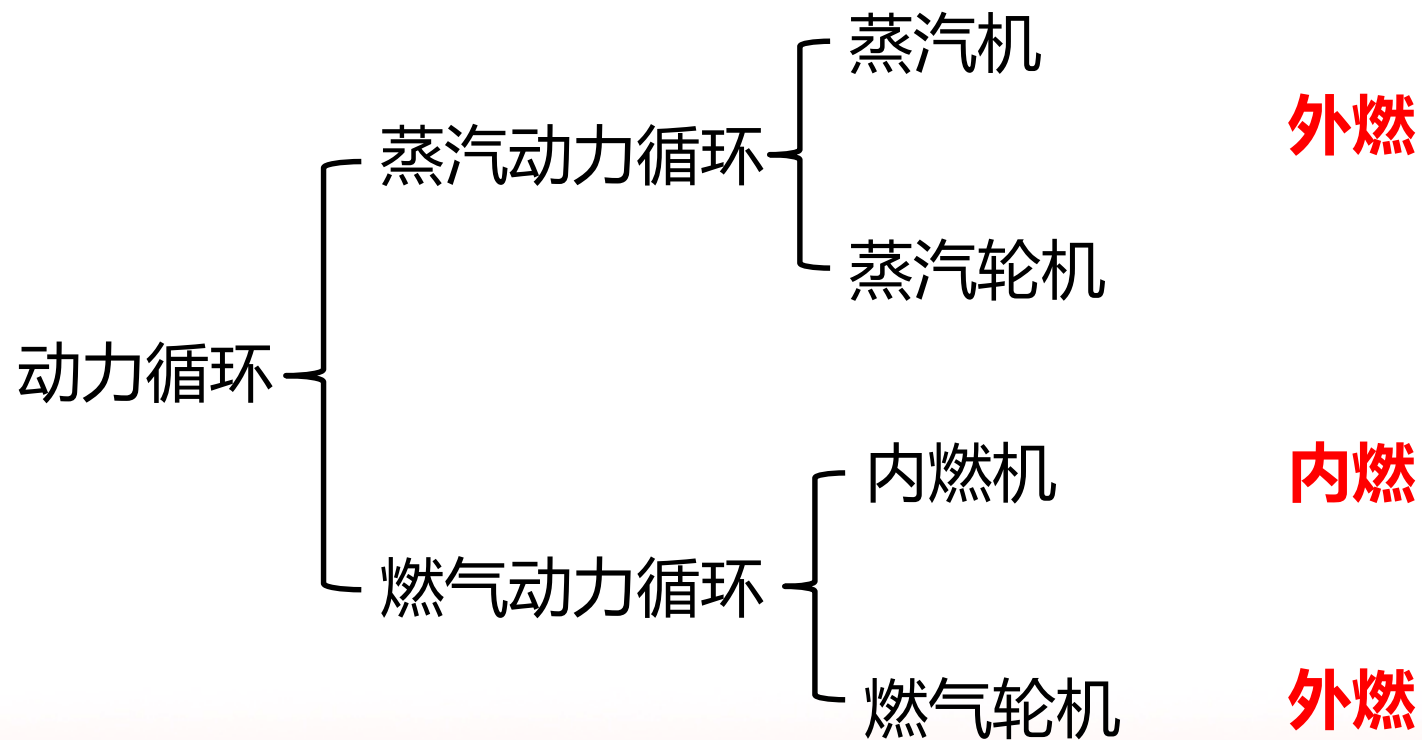
# 动力循环研究目的和分类

- **动力循环** (Gas Power Cycle): 工质连续不断地将从高温热源取得的热量的一部分转换成对外的净功
- 研究目的: 合理安排循环, **提高热效率**
- 按工质:
  - 气体动力循环**: 内燃机 (Internal Combustion Engine)  
空气为主的燃气  
按理想气体处理
  - 蒸汽动力循环**: 外燃机 (External Combustion Engine)  
水蒸气等实际气体

# 动力循环分类

## □ 基本概念

- ✓ 将热能转化为机械能的设备称为热机;
- ✓ 热机的工作循环称为动力循环。

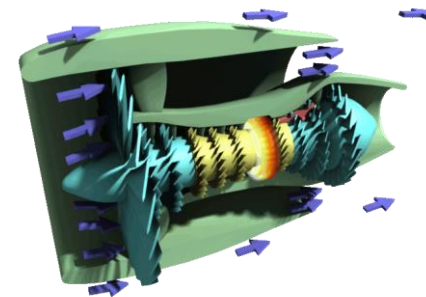
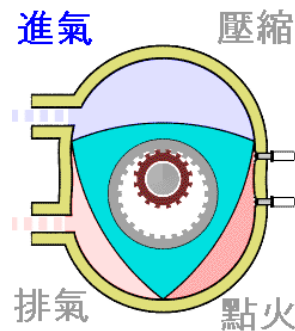


# 动力循环研究方法

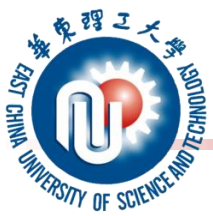
□ 实际动力循环非常复杂：

**不可逆，多变指数变化，燃烧等**

□ 工程热力学研究方法，先对实际动力循环进行**抽象和理想化**，形成各种理想循环进行**分析**；分析实际循环与理论循环的偏离程度，找出实际损失的部位、大小、原因及改进措施。







# 10.4 内燃机循环

## □ 按结构：

活塞式 (Piston Engine): 汽车, 摩托, 小型轮船

叶轮式 (Gas Turbine Cycle): 航空, 大型轮船, 移动电站

## □ 按燃料：

汽油机 (Petrol / Gasoline Engine): 小型汽车, 摩托

柴油机 (Diesel Engine): 中、大型汽车, 火车, 轮船, 移动电站

煤油机 (Kerosene Oil Engine): 航空

## □ 按点燃方式：

点燃式 (Spark Ignition)

压燃式 (Compression Ignition)

## □ 按冲程数：

四冲程 (Four-Stroke)

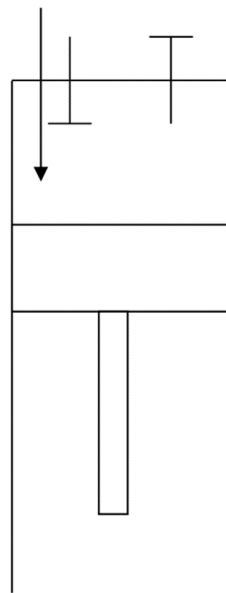
二冲程 (Two-Stroke)

# 10.4 内燃机循环

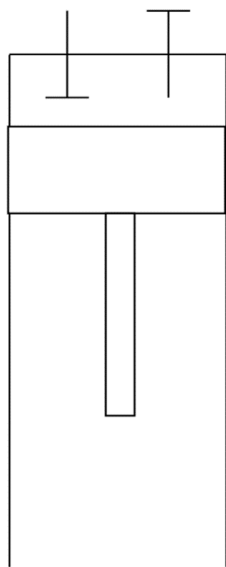
## □ 四冲程高速柴油 (high-speed diesel engine)

空气、油

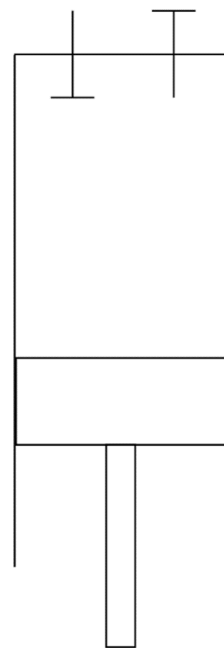
废气



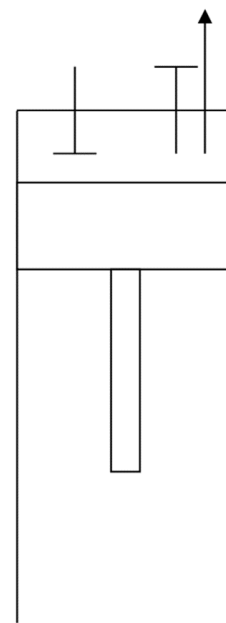
吸气



压燃



膨胀



排气

# 四冲程高速柴油机工作过程

□  $0 \rightarrow 1$  吸空气

□  $1 \rightarrow 2'$  多变压缩

一般  $n = 1.34 \sim 1.37$

$p_2' = 3 \sim 5 \text{ MPa}$

$t_2' = 600 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$

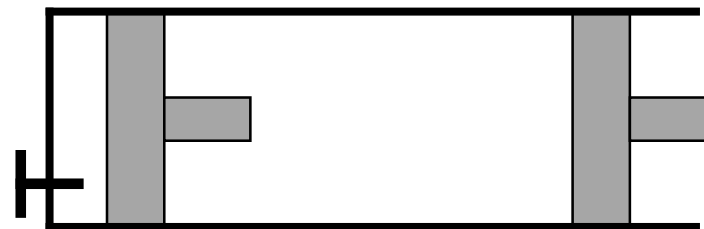
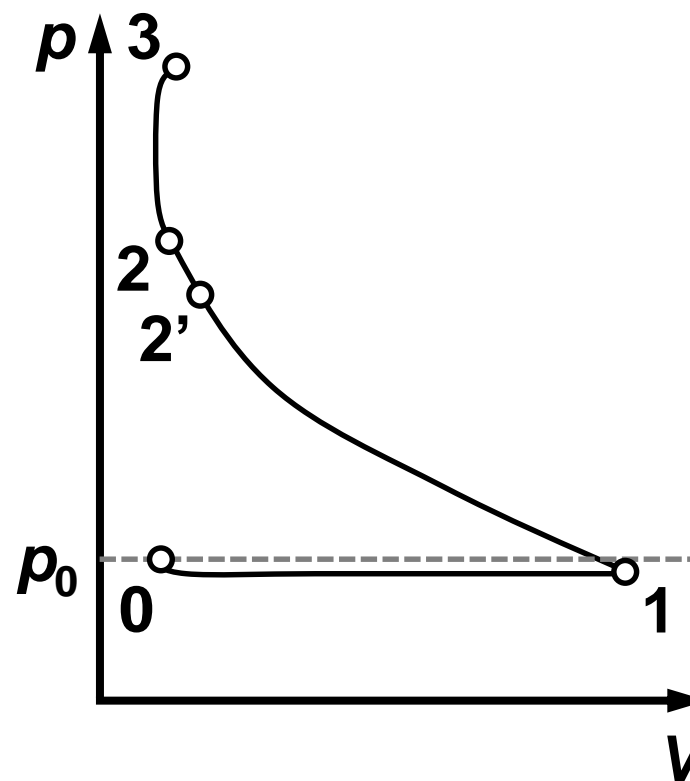
柴油自燃  $t = 335 \text{ }^\circ\text{C}$

□  $2'$  喷柴油 (存在滞燃期)

□  $2$  开始燃烧

□  $2 \rightarrow 3$  迅速燃烧, 近似  $(v)$

$p \uparrow 5 \sim 9 \text{ MPa}$





# 四冲程高速柴油机工作过程

□ 3→4 边喷油，边膨胀

近似( $p$ )膨胀

$t_4$  可达1700~1800 °C

□ 4 停止喷柴油

□ 4→5 多变膨胀

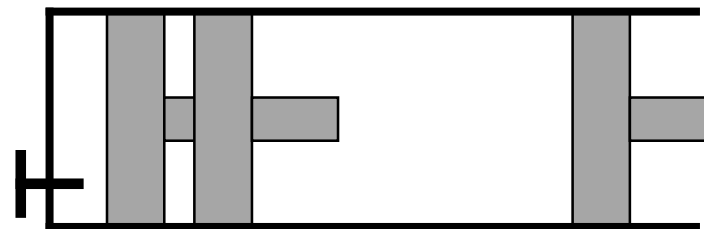
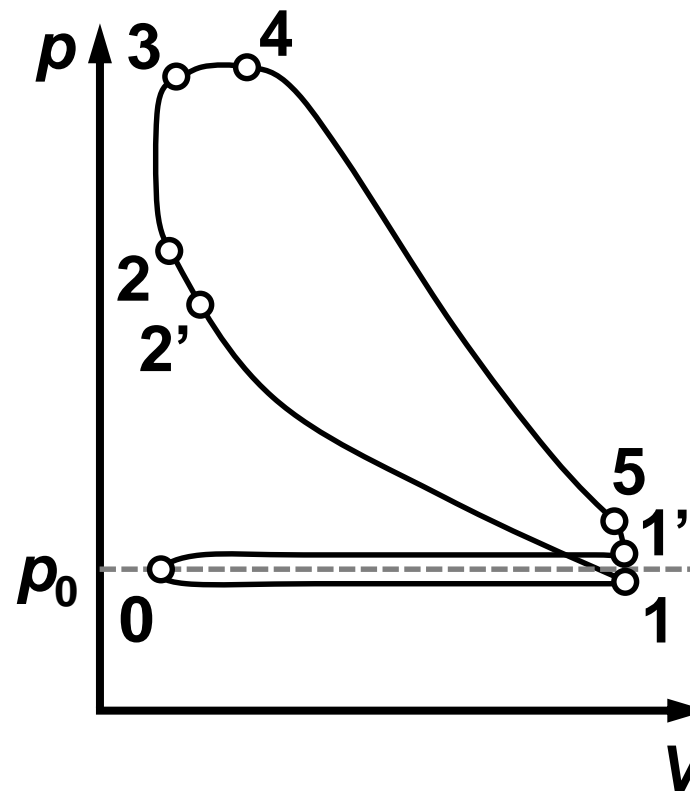
$p_5 = 0.3 \sim 0.5 \text{ MPa}$

$t_5 \approx 500 \text{ °C}$

□ 5→1' 开阀排气，降压

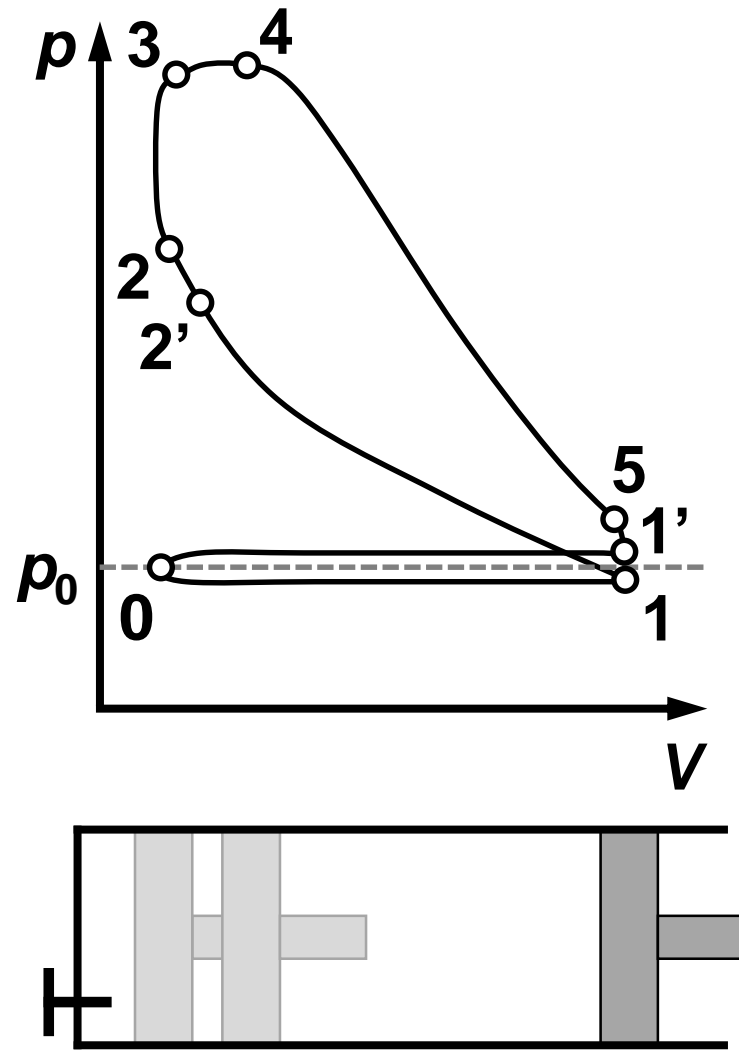
□ 1'→0 活塞推排气

完成循环

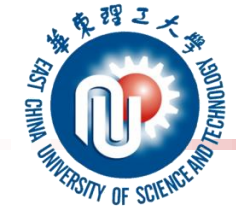


# 四冲程高速柴油机的理想化

- 工质：定比热理想气体
- 工质数量不变  
 $P$ - $V$ 图  $\rightarrow$   $p$ - $v$ 图
- 0-1 和 1'-0 抵消  
开口  $\rightarrow$  闭口循环
- 燃烧  $\rightarrow$  外界加热
- 排气  $\rightarrow$  向外界放热
- 多变  $\rightarrow$  绝热
- 不可逆  $\rightarrow$  可逆



实际过程理想化为空气为工质的混合加热内可逆理想循环（空气标准假设）。



# 循环特征参数

## □ 反映气缸容积

**压缩比** (Compression Ratio)

:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

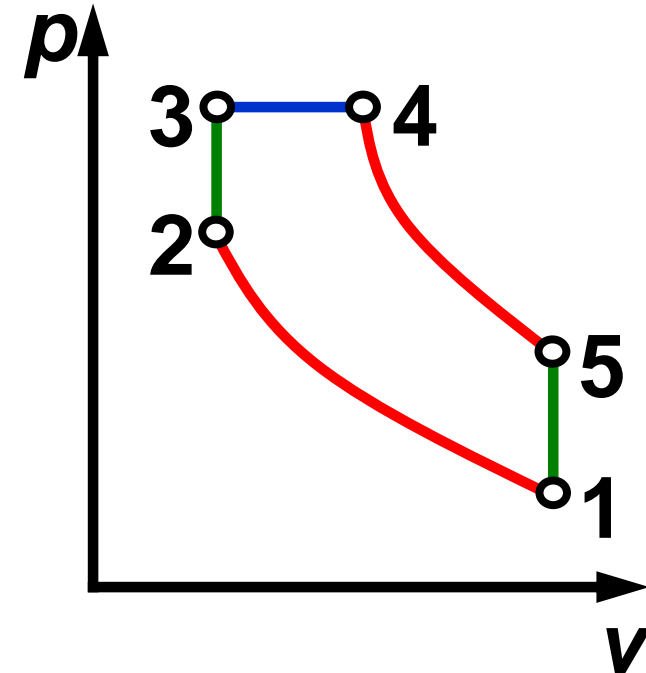
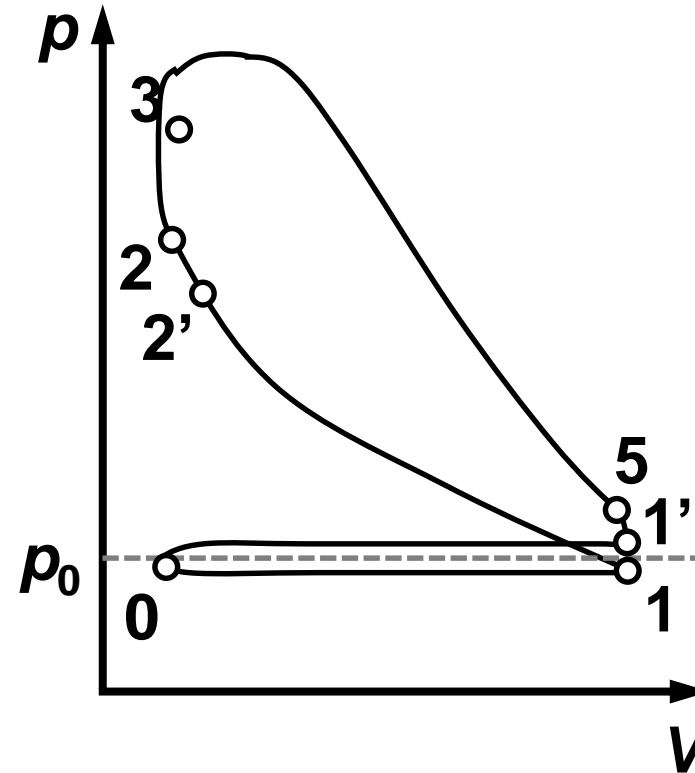
## □ 反映供油规律

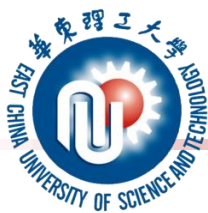
**定容增压比:**

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$$

**预胀比** (Cutoff Ratio):

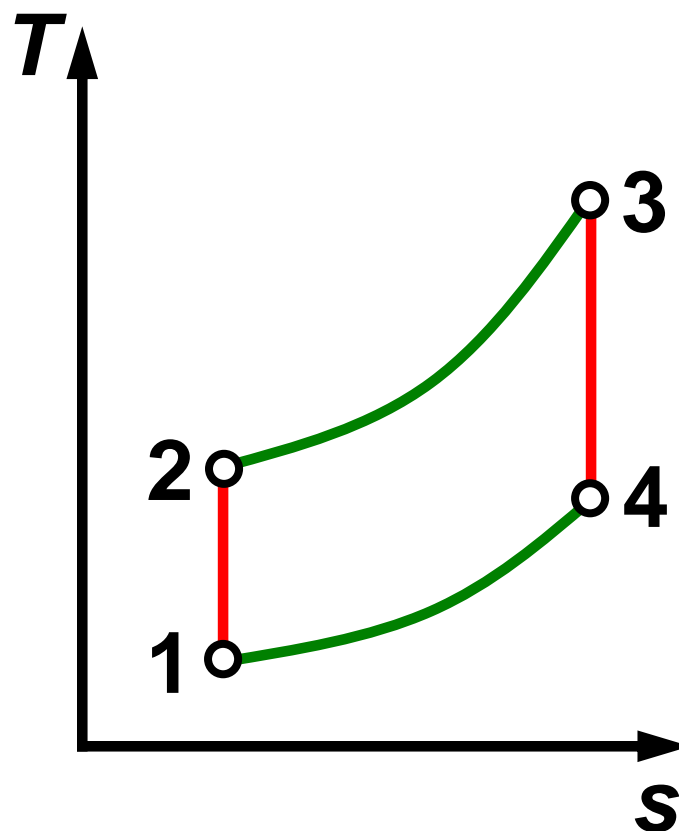
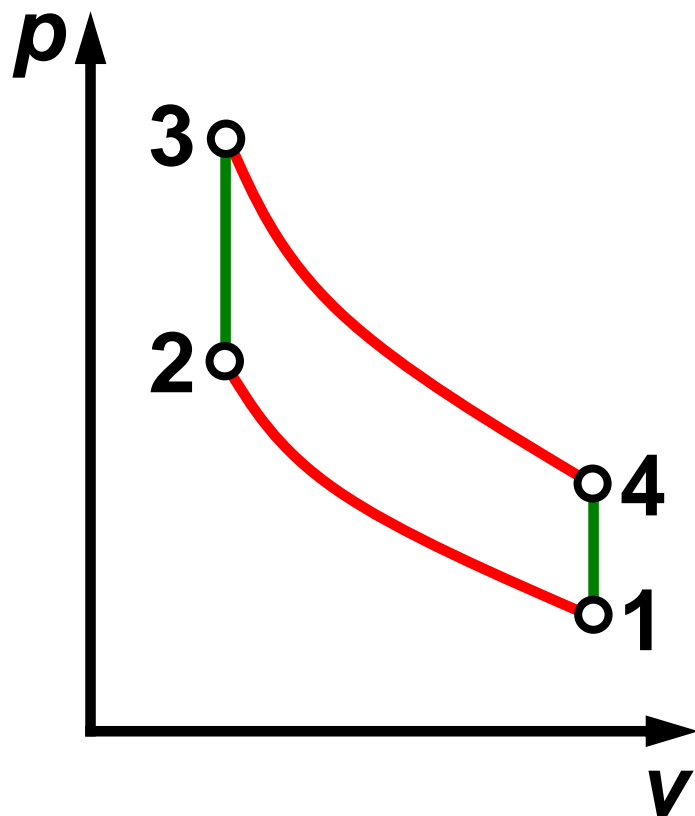
$$\rho = \frac{v_4}{v_3}$$





## 10.4.1 定容加热循环(奥托循环)

□ 奥托循环 (Otto Cycle): 汽油机、煤气机 (点燃式内燃机)



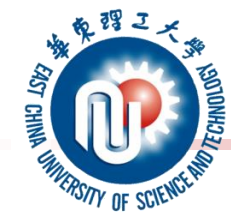
- 1→2 可逆绝热压缩
- 2→3 从热源定容吸热
- 3→4 可逆绝热膨胀
- 4→1 向冷源定容放热

汽油和空气混合物；火花塞点火；一个做功冲程；

2: 300-450°C, 0.7-1.5MPa;

3: 2000-2500°C, 3.0-4.0MPa;

4: 700-800°C



# 定容加热循环的计算

□ 吸热量:

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2)$$

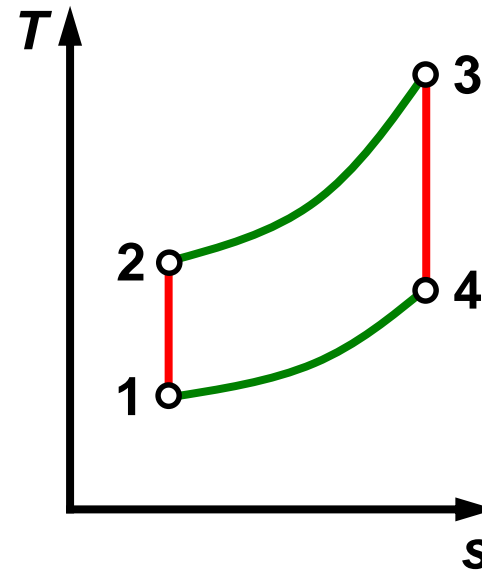
□ 放热量(取绝对值):

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1)$$

□ 热效率:

$$\begin{aligned}\eta_t &= \frac{w}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \\ &= 1 - \frac{T_1 \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left( \frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\end{aligned}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = \frac{T_3}{T_4}$$



$$\text{压缩比 } \varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\varepsilon = 7 \sim 11$$

燃用**汽油**的内燃机按  
**定容加热循环**的方式  
进行工作。

# 定容加热循环的计算

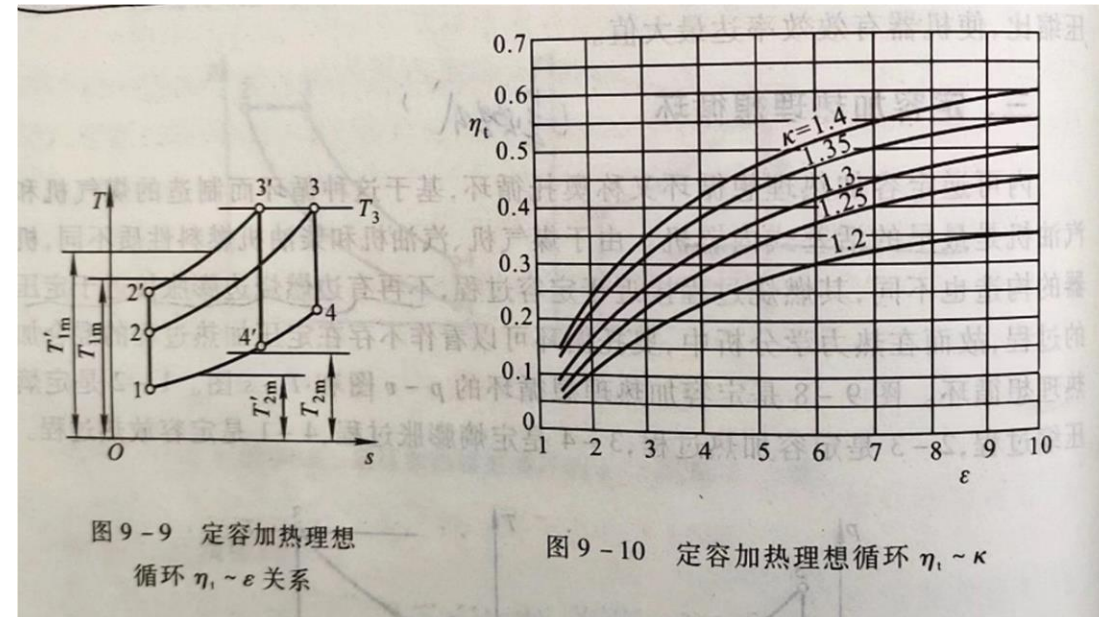
□ 定容加热效率:  $\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$

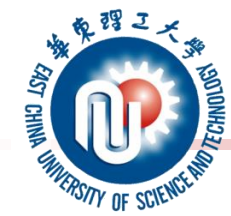
□  $\varepsilon \uparrow \rightarrow \eta_t \uparrow$

□ 汽油易爆燃, 一般汽油机  $\varepsilon = 7 \sim 11$

一般柴油机效率 ( $\varepsilon = 14 \sim 20$ ) 高于汽油机的效率  
但汽油机小巧;

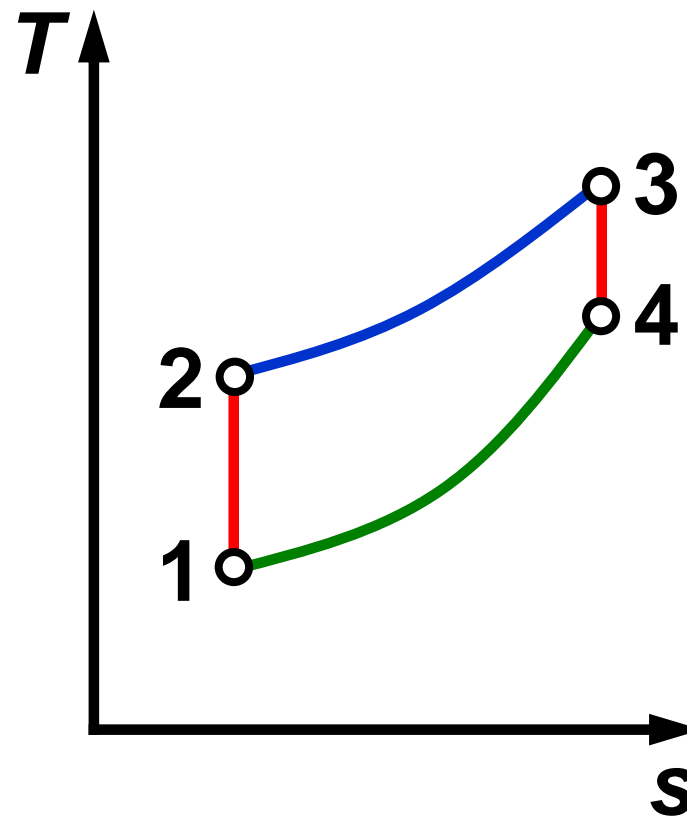
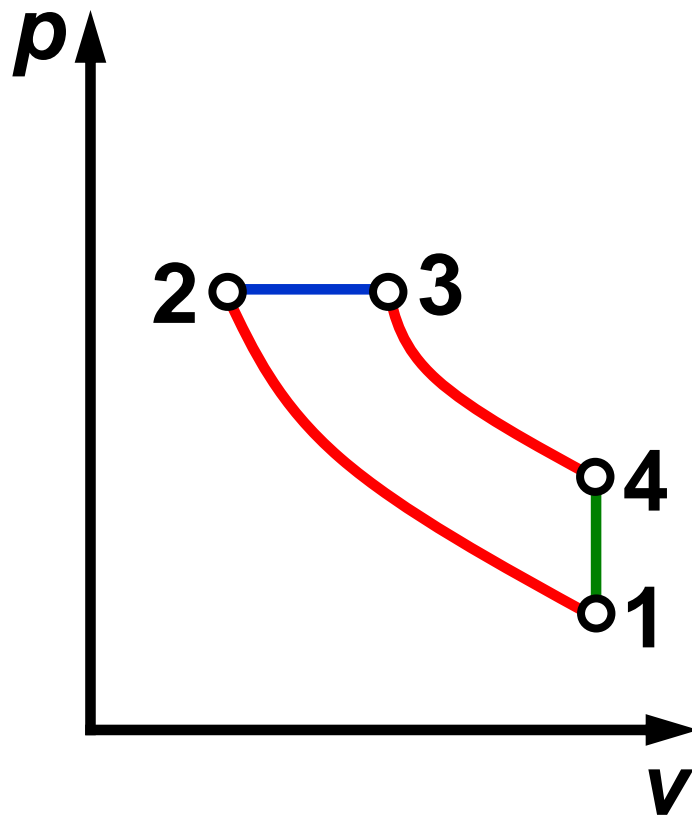
□ 比热容比  $k$  随着温度的升高而减小。





## 10.4.2 定压加热循环（狄塞尔循环）

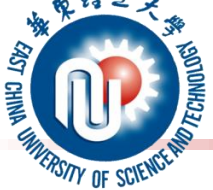
□ 狄塞尔循环 (Diesel Cycle): 柴油机 (压燃式内燃机)



- 1→2 可逆绝热压缩
- 2→3 定压吸热过程
- 3→4 可逆绝热膨胀
- 4→1 定容放热过程

柴油和空气分别进入；压燃点火；两个做功冲程；





# 定压加热循环的计算

□ 吸热量:

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2)$$

□ 放热量(取绝对值):

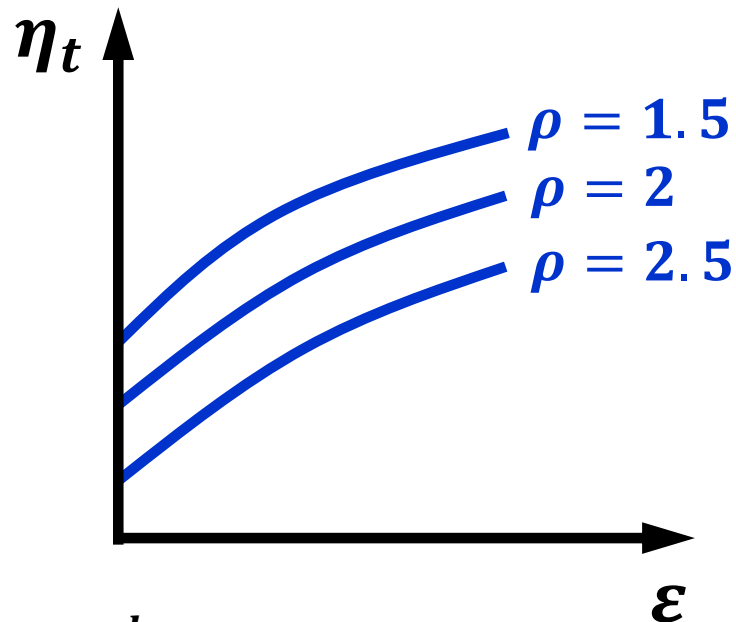
$$q_2 = c_v(T_4 - T_1)$$

□ 热效率:

$$\eta_t = \frac{w}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{\rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} k (\rho - 1)}$$

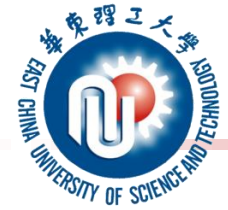
□ 当 $\rho$ 不变:  $\varepsilon \uparrow \rightarrow \eta_t \uparrow$

当 $\varepsilon$ 不变:  $\rho \downarrow \rightarrow \eta_t \uparrow$



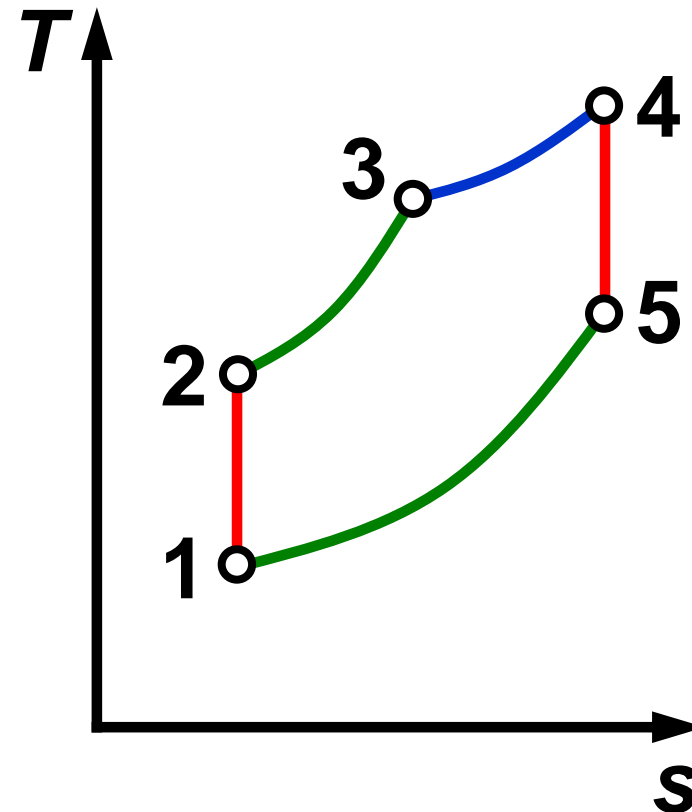
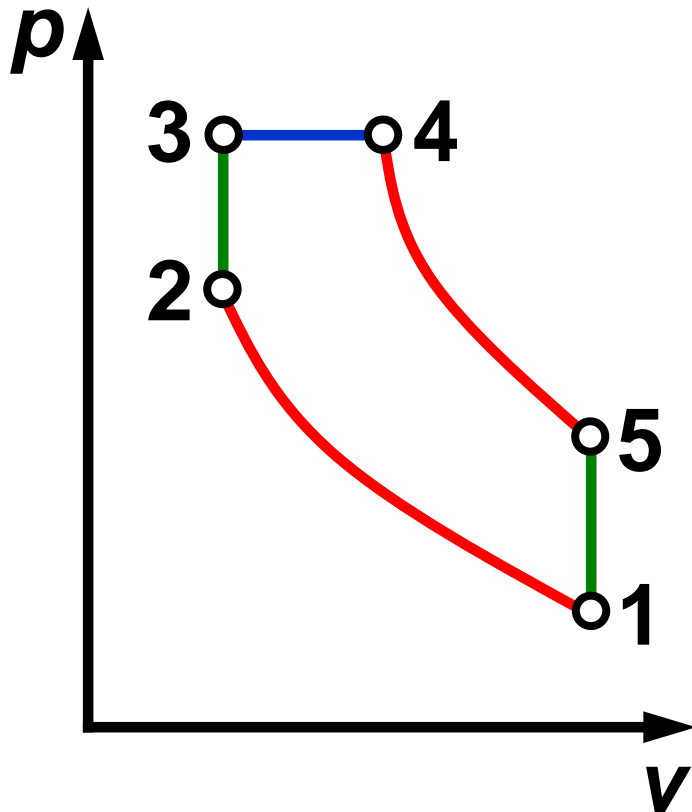
$$\rho = \frac{v_3}{v_2} \quad \text{定压预胀比 (注意)}$$

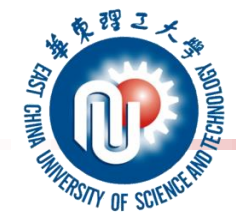
$$\varepsilon = 14 \sim 20$$



## 10.4.3 理想混合加热循环 (Dual Cycle)

- 萨巴德 (Sabathe) 循环：即有定压加热又有定容加热的混合加热循环
- 分析循环吸热量，放热量，热效率和功量





# 理想混合加热循环的计算

□ 吸热量:

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)$$

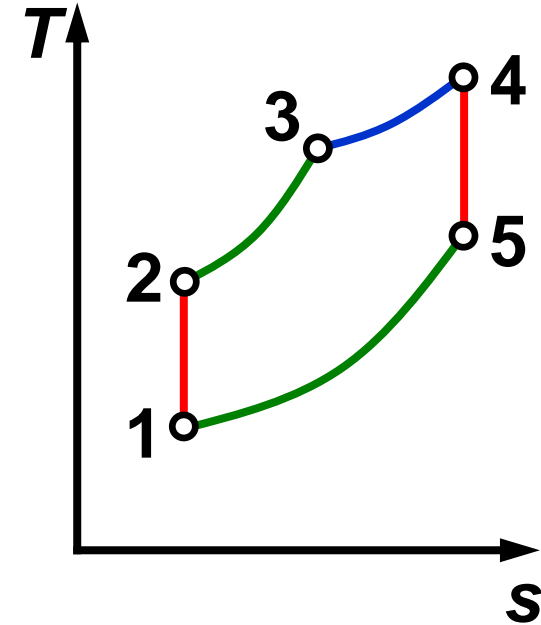
□ 放热量(取绝对值):

$$q_2 = c_v(T_5 - T_1)$$

□ 热效率:

$$\oint \delta q = \oint \delta w$$

$$\eta_t = \frac{w}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_5 - T_1}{T_3 - T_2 + k(T_4 - T_3)}$$





# 理想混合加热循环的计算

□ 热效率:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_5 - T_1}{T_3 - T_2 + k(T_4 - T_3)}$$

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

$$\square \quad T_3 = \frac{p_3}{p_2} T_2 = \lambda T_1 \varepsilon^{k-1}$$

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

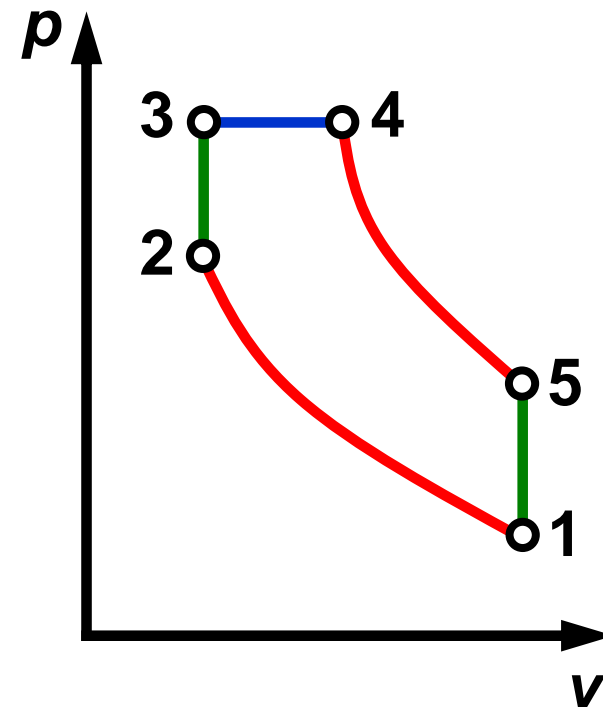
$$\square \quad T_5 = \left( \frac{v_4}{v_5} \right)^{k-1} T_4 = \frac{p_5}{p_1} T_1 = \rho^k \lambda T_1$$

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

压缩比:  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$

定容增压比:  $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$

预胀比:  $\rho = \frac{v_4}{v_3}$



# 各因素对混合加热循环的影响

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

□ 当 $\lambda$ 、 $\rho$ 不变:

$$\varepsilon \uparrow \lambda \uparrow \rightarrow \eta_t \uparrow$$

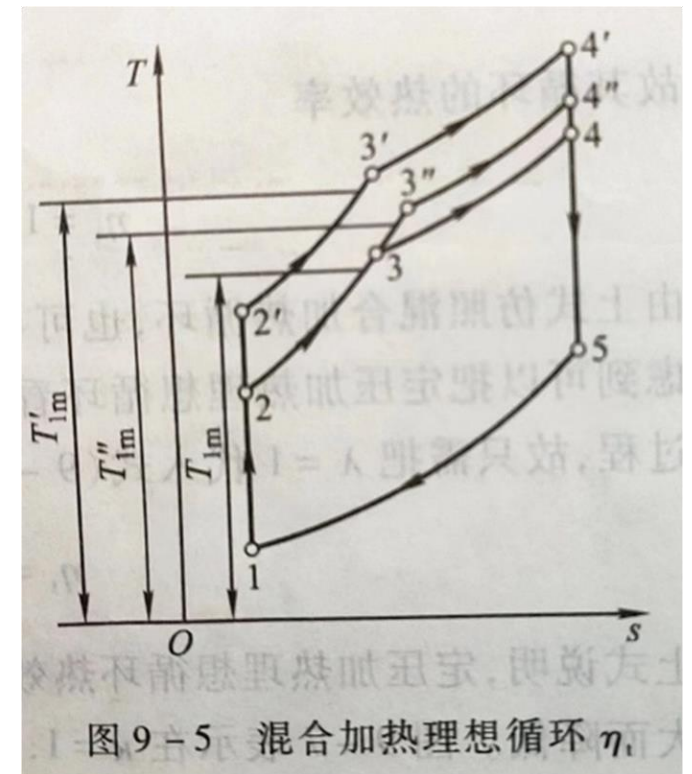
$$\rho \downarrow \rightarrow \eta_t \uparrow$$

定容线比定压线陡，故加大定压加热份额造成循环平均吸热温度增大不如循环平均放热温度增大快，故而热效率反而降低。

$$\text{压缩比: } \varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\text{定容增压比: } \lambda = \frac{p_3}{p_2}$$

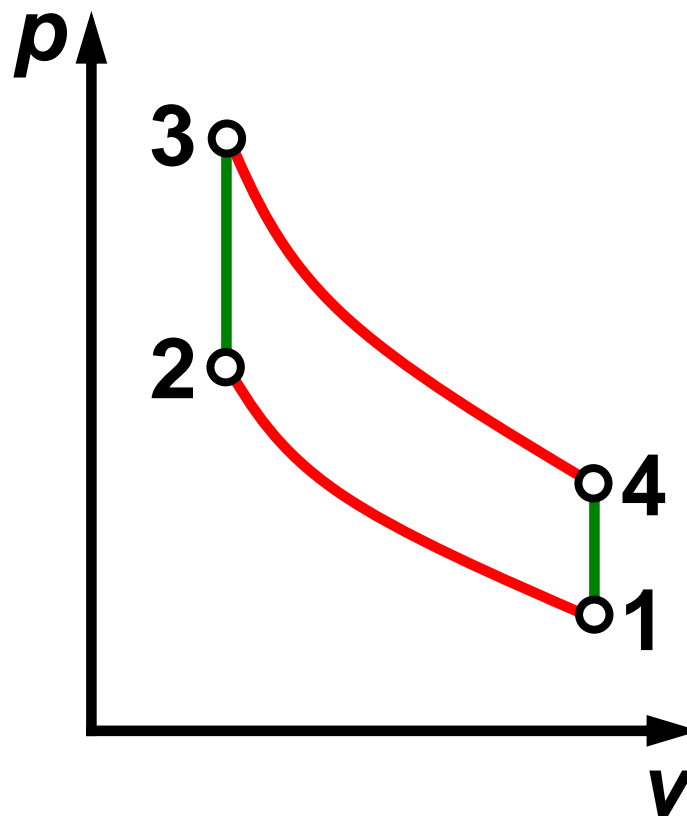
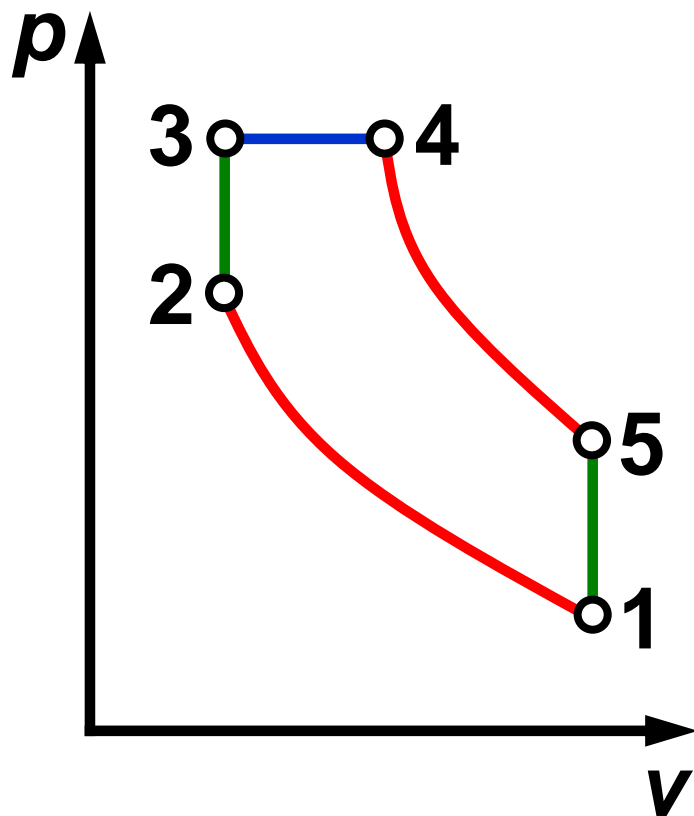
$$\text{预胀比: } \rho = \frac{v_4}{v_3}$$





# 柴油机与汽油机动力循环图示

□ 定压预胀比:  $\rho = 1$

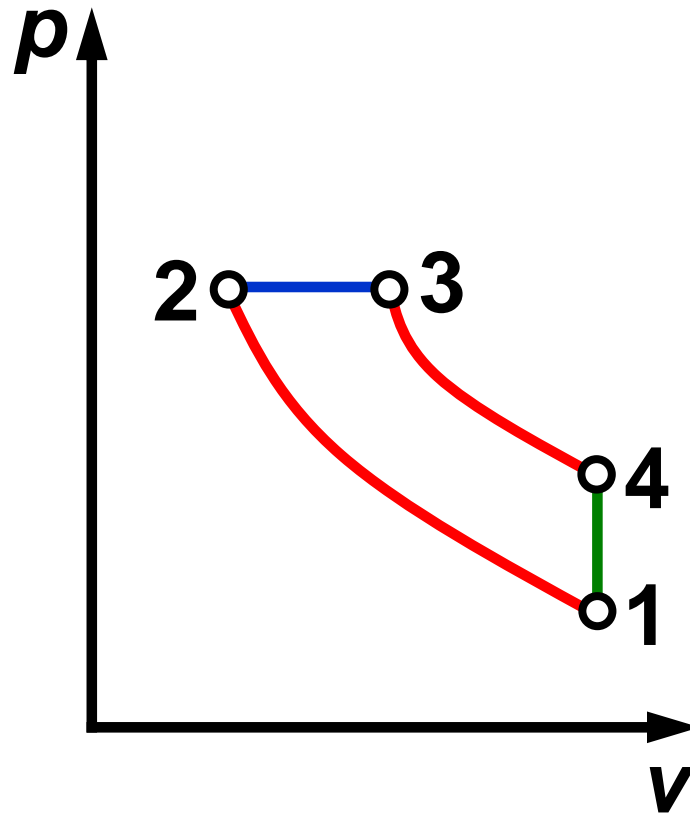
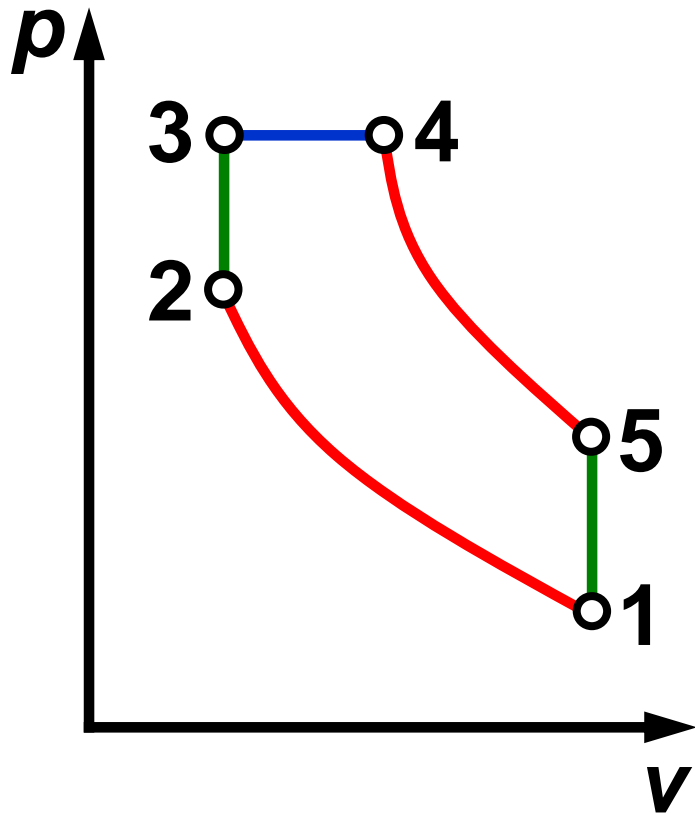


$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} [\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)]}$$

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

# 高速柴油机与低速柴油机循环图示

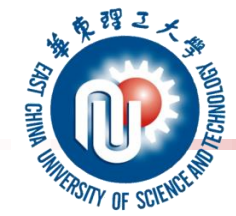
□ 定容增压比:  $\lambda = 1$



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

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





# 活塞式内燃机循环比较

## □ 比较的条件:

**压缩比 $\varepsilon$**  → 气缸结构尺寸、工艺材料

**吸热量 $q_1$**  → 反映作功量 (马力)

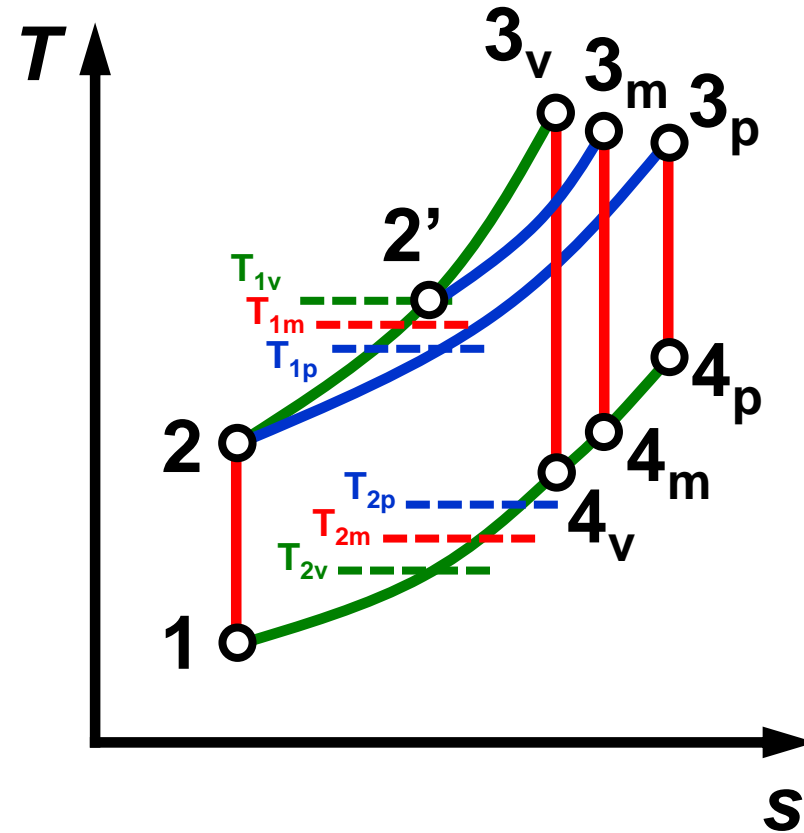
**最高压力 $p_{\max}$**  → 反映材料耐压、壁厚、成本

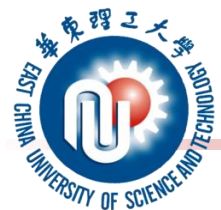
**最高压力 $T_{\max}$**  → 反映材料耐温

## □ 比较的对象: 混合加热, 定容加热, 定压加热

# $\varepsilon$ 和 $q_1$ 相同

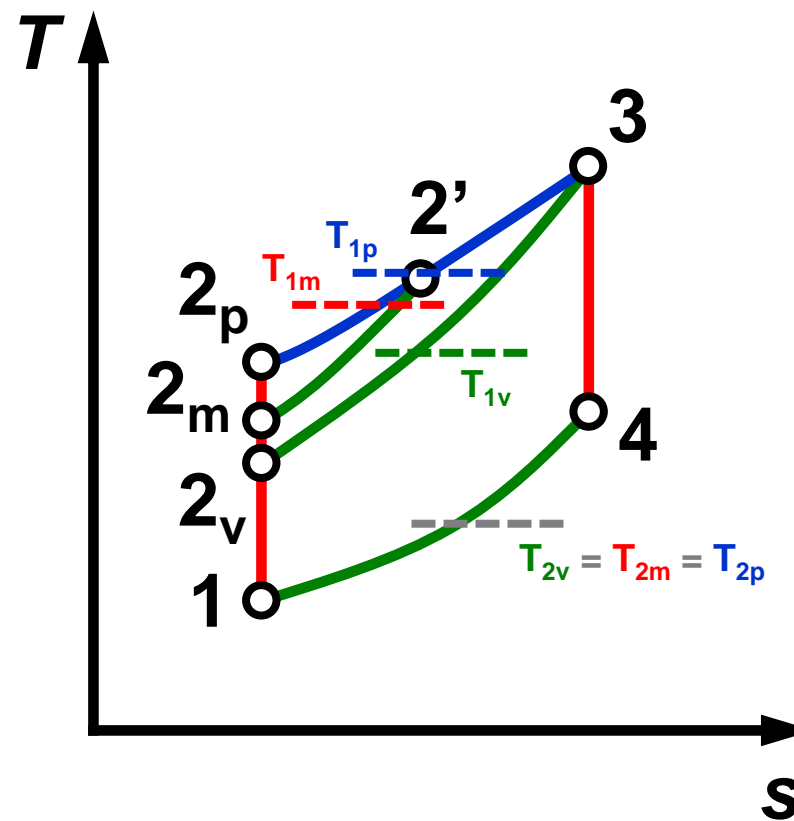
- $\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}$
- $q_{2v} < q_{2m} < q_{2p}$
- $\eta_{tv} > \eta_{tm} > \eta_{tp}$
- 平均温度法

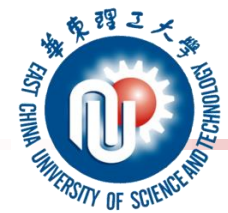




# $p_{\max}$ 和 $T_{\max}$ 相同

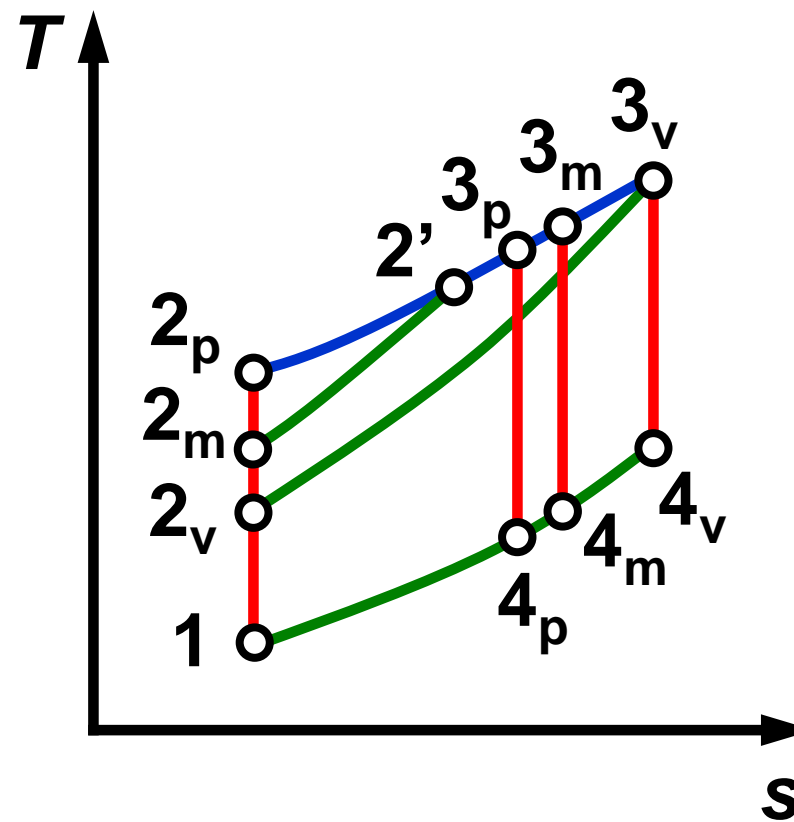
- $\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}$
- $q_2$  相等
- $q_{1p} > q_{1m} > q_{1v}$
- $\eta_{tp} > \eta_{tm} > \eta_{tv}$





# $p_{\max}$ 和 $q_1$ 相同

- $\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}$
- $q_{2p} < q_{1m} < q_{1v}$
- $\eta_{tp} > \eta_{tm} > \eta_{tv}$



- $T_{\max}$  和  $q_1$  相同,  $\eta_{tp}$ ,  $\eta_{tm}$ ,  $\eta_{tv}$  大小?



## □10.4 内燃机循环

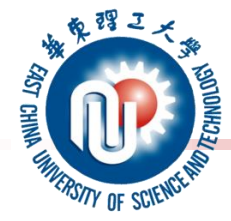
### 例10.1 教材例10-2

**例10.2** 一定压加热理想循环 $\varepsilon=20$ , 作功冲程4%为定压加热过程, 压缩冲程初始

$P_1=100\text{kPa}$ ,  $t_1=20$ , 求:

①每一点状态点的 $P, t, v$ ;

② $\eta_t$



## 10.5 燃气轮机循环（布雷顿循环）

□ 用途：

航空发动机

尖峰电站

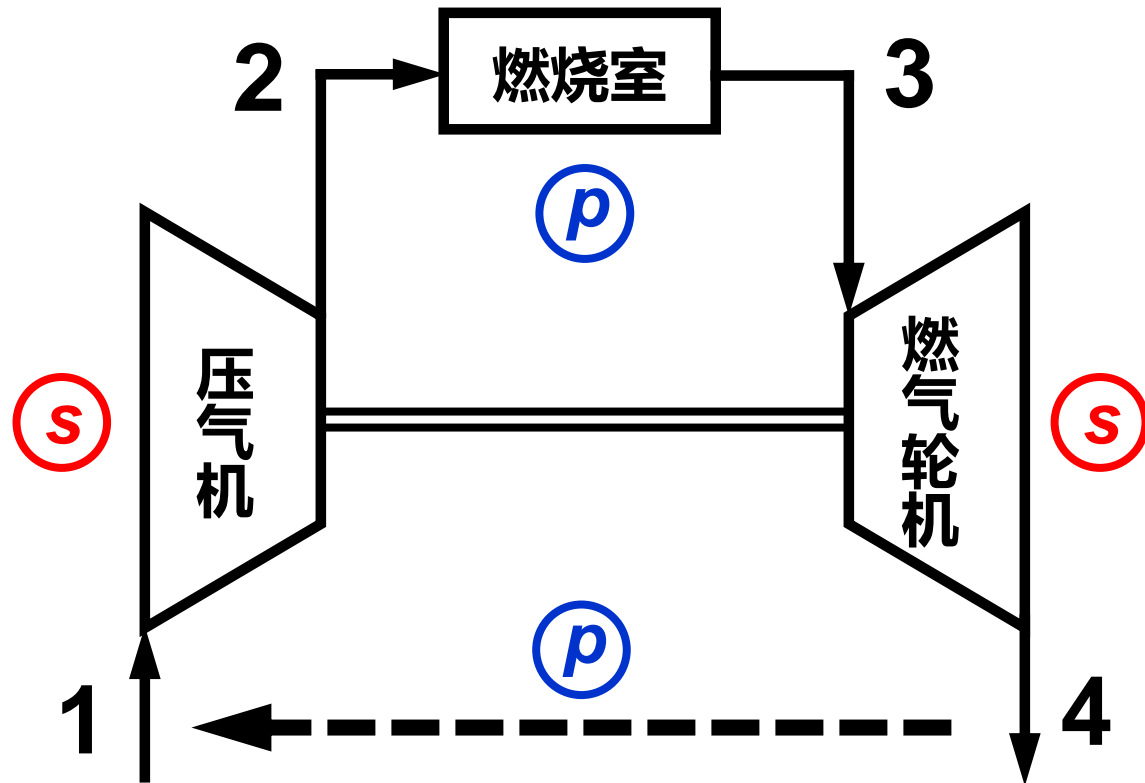
移动电站

大型轮船

联合循环的顶循环

## 10.5.1 布雷顿循环示意图和理想化

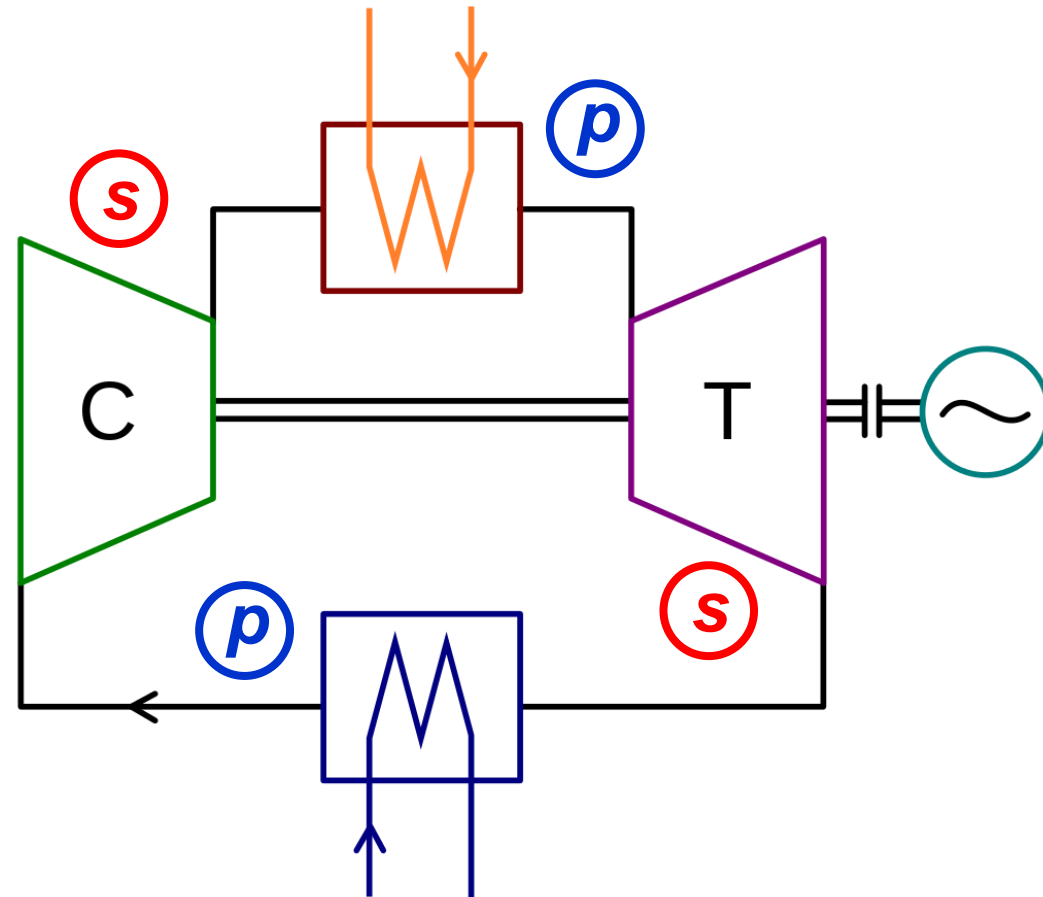
- 工质：数量不变，定比热理想气体
- 闭口  $\rightarrow$  循环
- 可逆过程

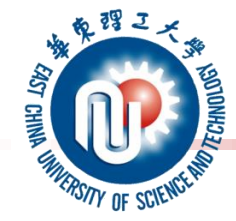




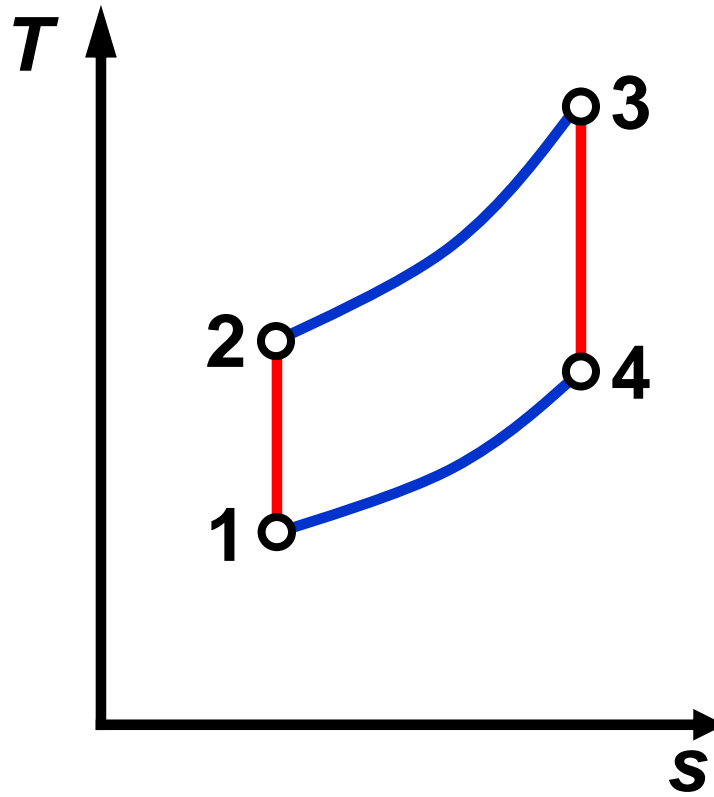
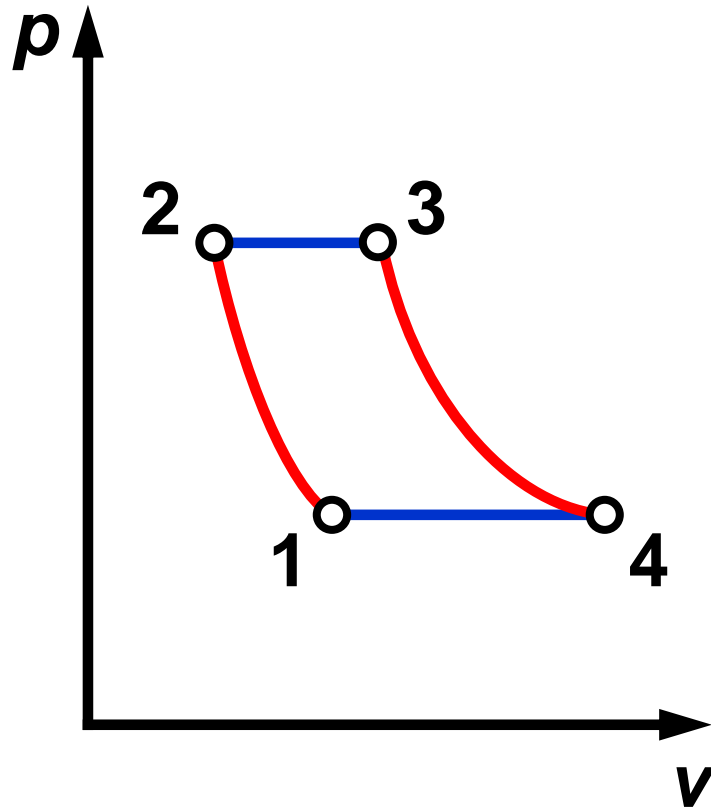
## 10.5.1 布雷顿循环示意图和理想化

- 工质：数量不变，定比热理想气体
- 闭口  $\rightarrow$  循环
- 可逆过程

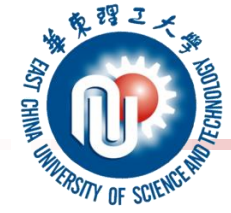




# 理想布雷顿循环的 $p$ - $v$ 和 $T$ - $s$ 图



- 1→2 工质在压气机中可逆绝热压缩；
- 2→3 燃烧室的定压加热过程；
- 3→4 工质在燃气轮机中可逆绝热膨胀；
- 4→1 工质在定压下放热。



# 布雷顿循环的计算

□ 吸热量:

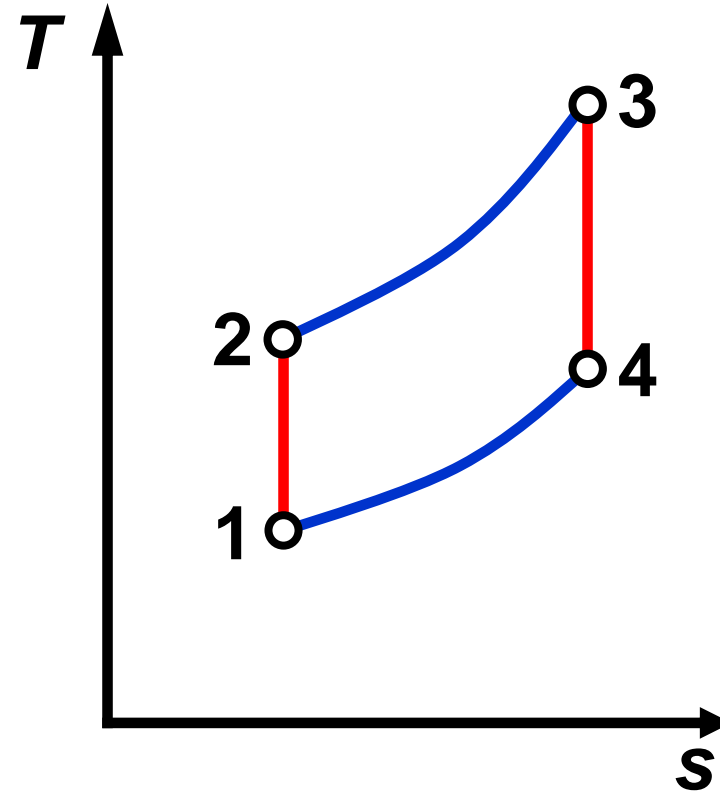
$$q_1 = c_p(T_3 - T_2)$$

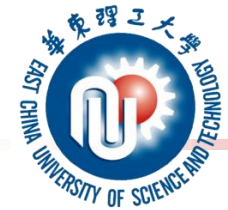
□ 放热量(取绝对值):

$$q_2 = c_p(T_4 - T_1)$$

□ 热效率:

$$\eta_t = \frac{w}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$



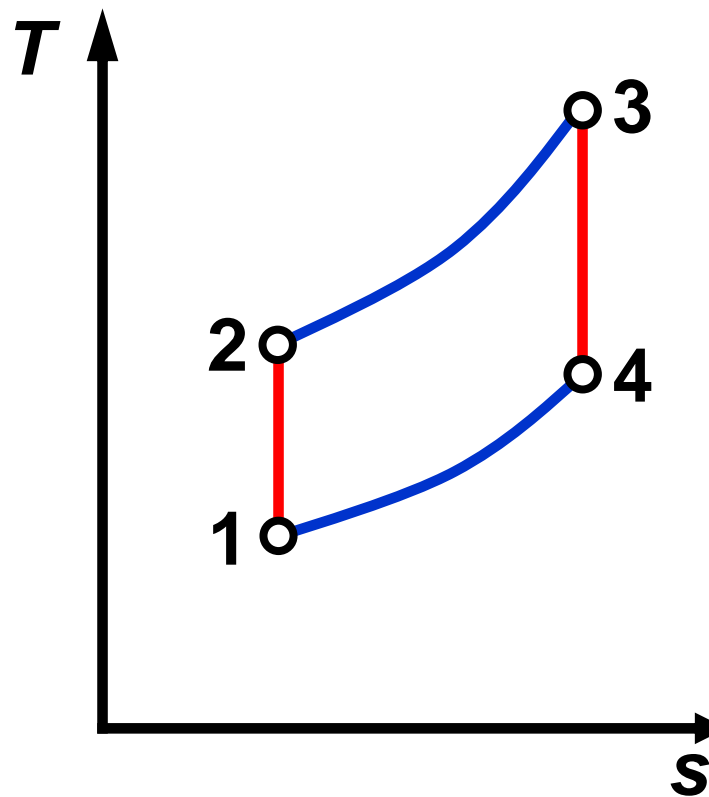


# 布雷顿循环热效率的计算

□ 热效率:

$$\begin{aligned}\eta_t &= 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \\ &= 1 - \frac{T_1 \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left( \frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \\ &= 1 - \frac{1}{\frac{T_2}{T_1}} = 1 - \frac{1}{\left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}}\end{aligned}$$

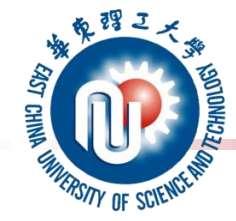
$$\frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_2}{T_1}$$



□ 类比卡诺循环?

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

采用定温压缩可减少所消耗的功，  
因而增加了循环净功？



# 布雷顿循环热效率的计算

□ 热效率:

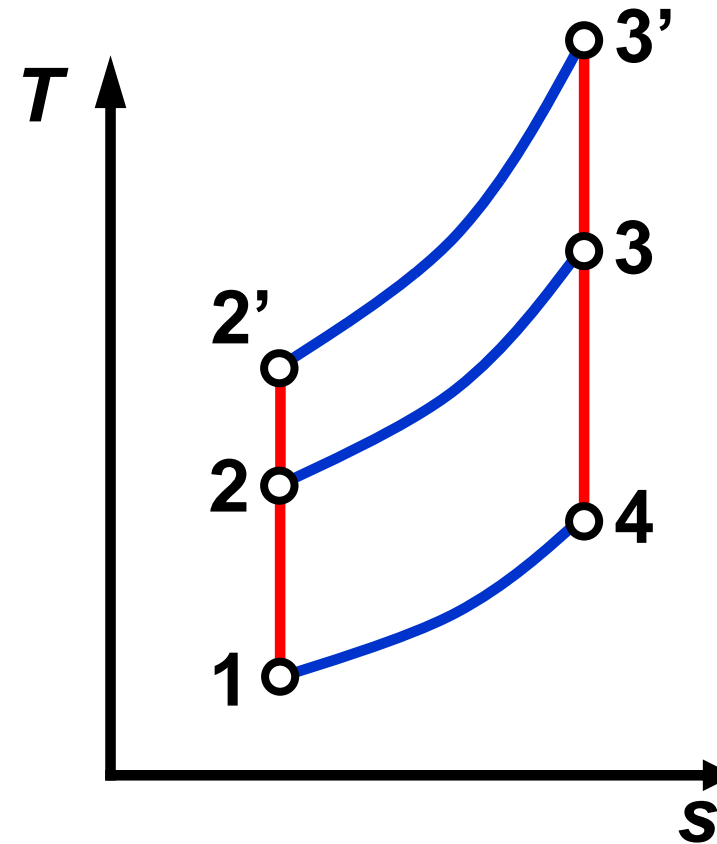
$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}$$

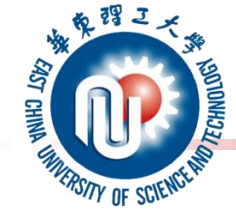
□ 压比 (Pressure Ratio):

$$\pi = \frac{p_2}{p_1} \quad (3-10)$$

□  $\pi \uparrow, \eta_t \uparrow$

$k \uparrow, \eta_t \uparrow$





# 布雷顿循环净功的计算

□ 净功:  $w_{net} = c_p(T_3 - T_2) - c_p(T_4 - T_1)$

$$= c_p T_1 \left( \frac{T_3}{T_1} - \frac{T_4}{T_1} - \frac{T_2}{T_1} + 1 \right)$$
$$= c_p T_1 \left( \tau - \tau \pi^{\frac{1-k}{k}} - \pi^{\frac{k-1}{k}} + 1 \right)$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left( \frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_2}{T_1}$$

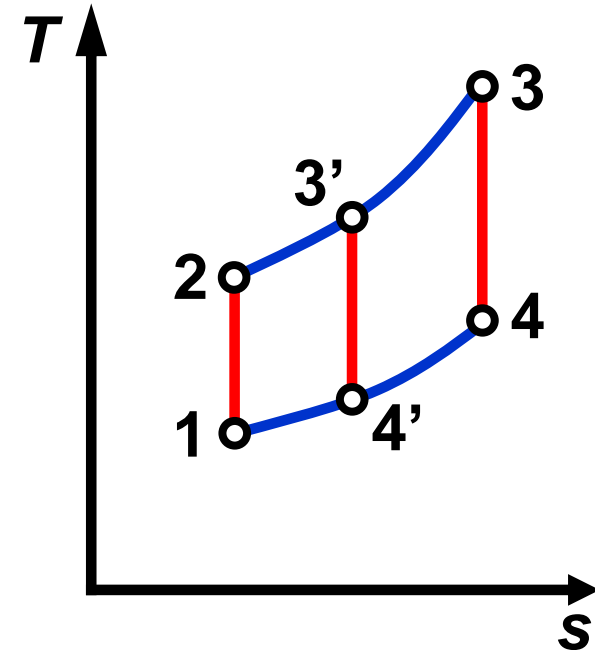
□ 循环增温比:  $\tau = \frac{T_3}{T_1}$

□ 压比:  $\pi = \frac{p_2}{p_1}$

□ 当 $\pi$ 不变:

$\tau \uparrow, w_{net} \uparrow, \text{但} \eta_t \text{ 不变}$

□  $T_3$ 受材料耐热限制



# $\pi$ 对净功的影响

$$\square w_{net} = c_p T_1 \left( \tau - \tau \pi^{\frac{1-k}{k}} - \pi^{\frac{k-1}{k}} + 1 \right)$$

□ 当 $\tau$ 不变时:

$\pi$  太小  $\rightarrow \eta_t \downarrow w_{net} \downarrow$

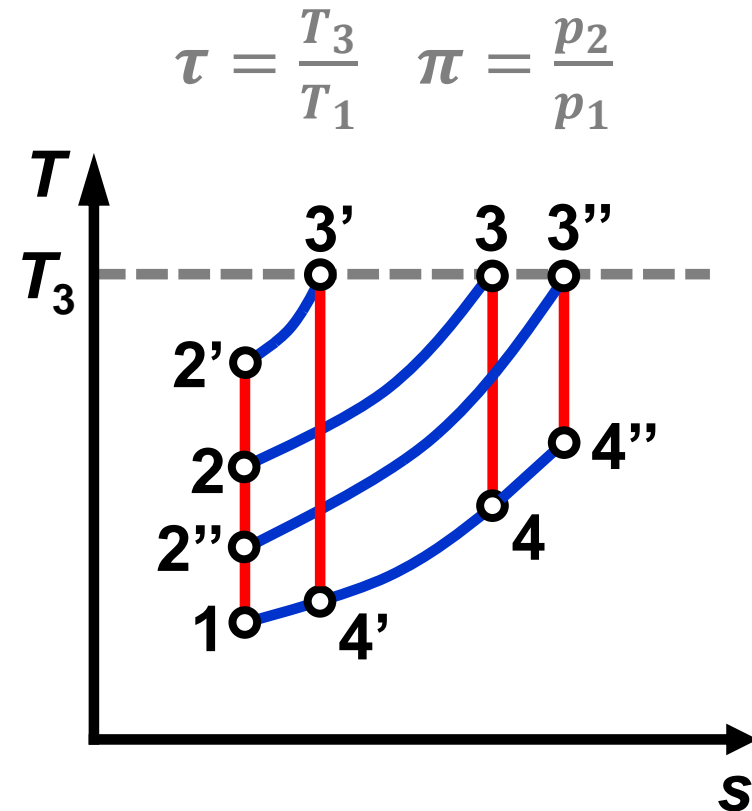
$\pi$  太大  $\rightarrow \eta_t \uparrow w_{net} \downarrow$

□ 存在最佳 $\pi$ , 使 $w_{net}$ 最大

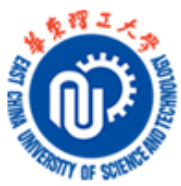
$$\pi_{opt}(w_{net})^{\frac{k-1}{k}} = \sqrt{\tau}$$

$$\rightarrow \pi_{opt}(w_{net}) = \tau^{\frac{k}{2(k-1)}}$$

$$w_{net.max} = c_p T_1 (\sqrt{\tau} - 1)^2$$







## □10.5 燃气轮机循环

**例10.3** 燃气轮机进气参数为 $P_1=0.1\text{MPa}$ ,  $t_1=17^\circ\text{C}$ ,  $\beta=8$ , 工质定压吸热终了温度 $t_3=600^\circ\text{C}$ , 设 $C_p=1.02\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,  $K=1.41$ , 求循环热效率, 压气机消耗的功及燃气轮机装置的轴功。



## □10.5 燃气轮机循环

□ 活塞式内燃机理论上能否利用回热来提高热效率？



□ 思考题 全部

□ 习题 9、10

