

# 第十章

## 蒸汽动力循环



# 第十章 蒸汽动力循环

水蒸气：火力发电、核电

低沸点工质：氨、氟里昂

太阳能、余热、地热发电

动力循环：以获得功为目的

# 大型坑口电站(陕西韩城电厂)



# 首台国产20万千瓦机组(辽宁朝阳电厂)



# 石横发电厂30万千瓦机组集控室



# 火电厂系统图

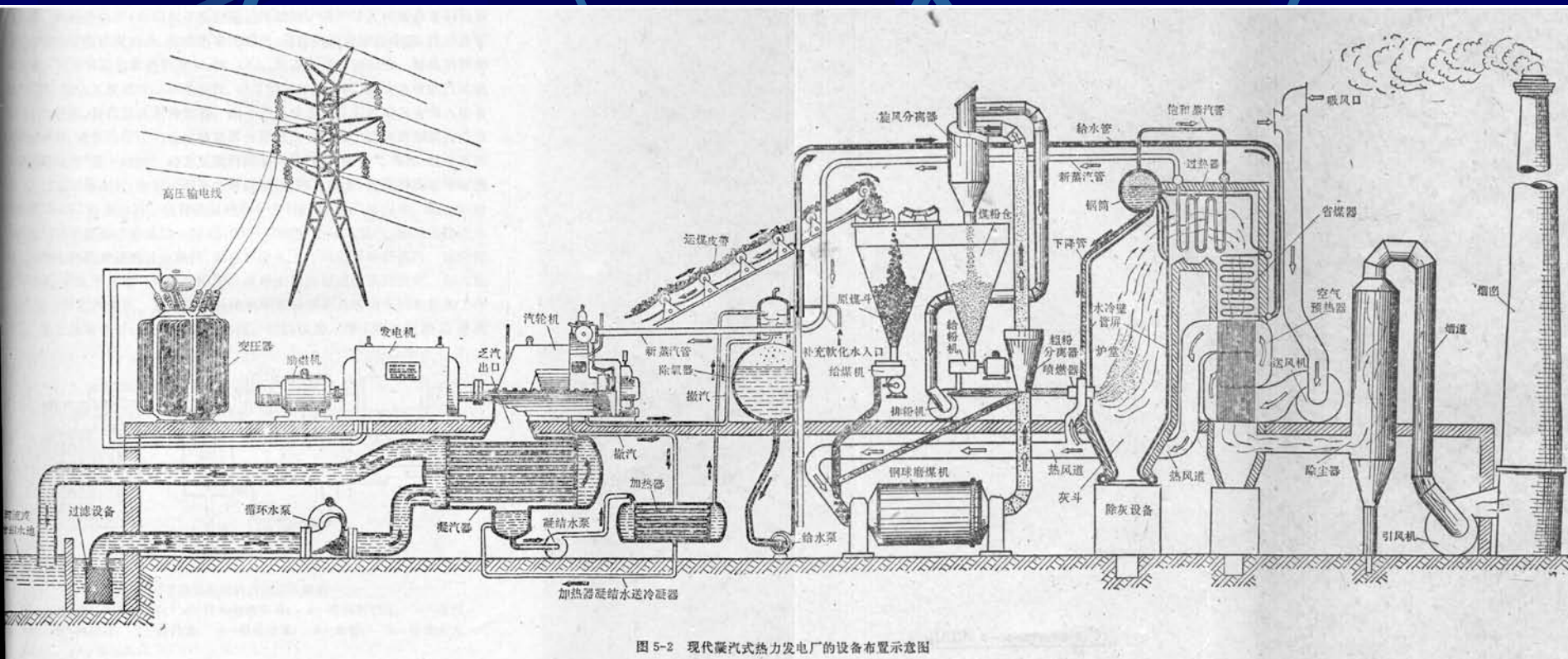
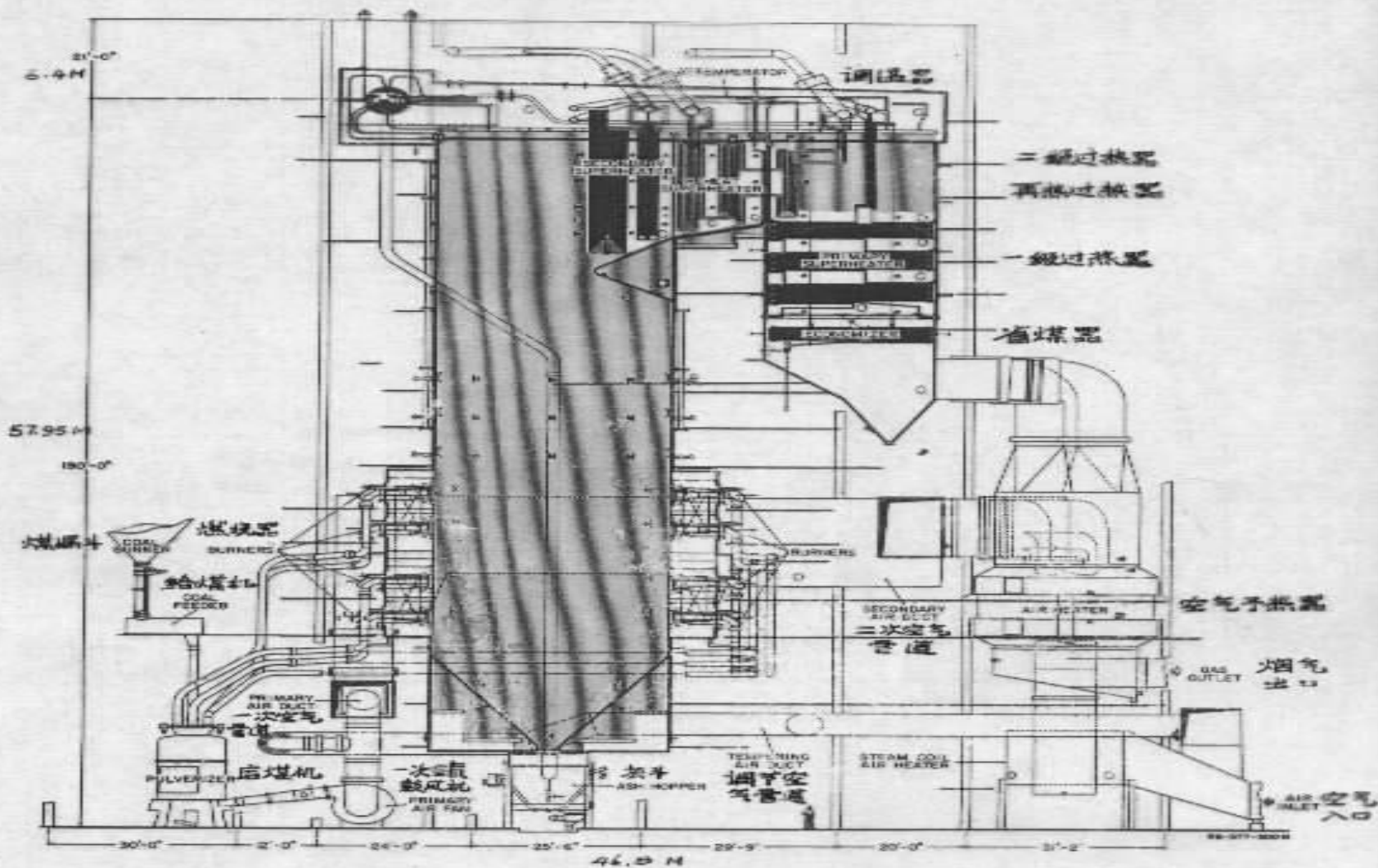


图 5-2 现代蒸汽式热力发电厂的设备布置示意图



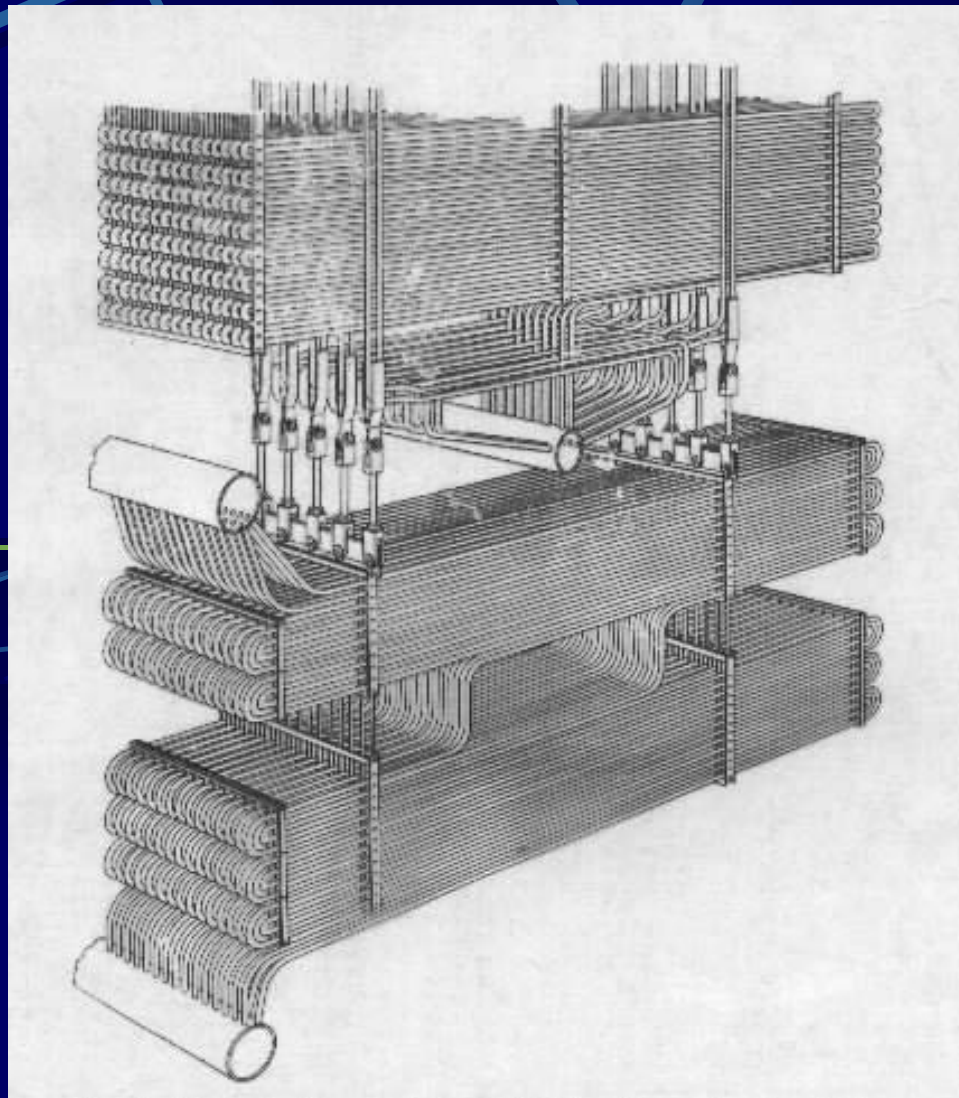
# 锅炉设备图



BOARD OF MUNICIPAL UTILITIES  
 SIKESTON POWER STATION UNIT NO. 1  
 SIKESTON, MISSOURI  
 B & W CONTRACT NO. 88-577

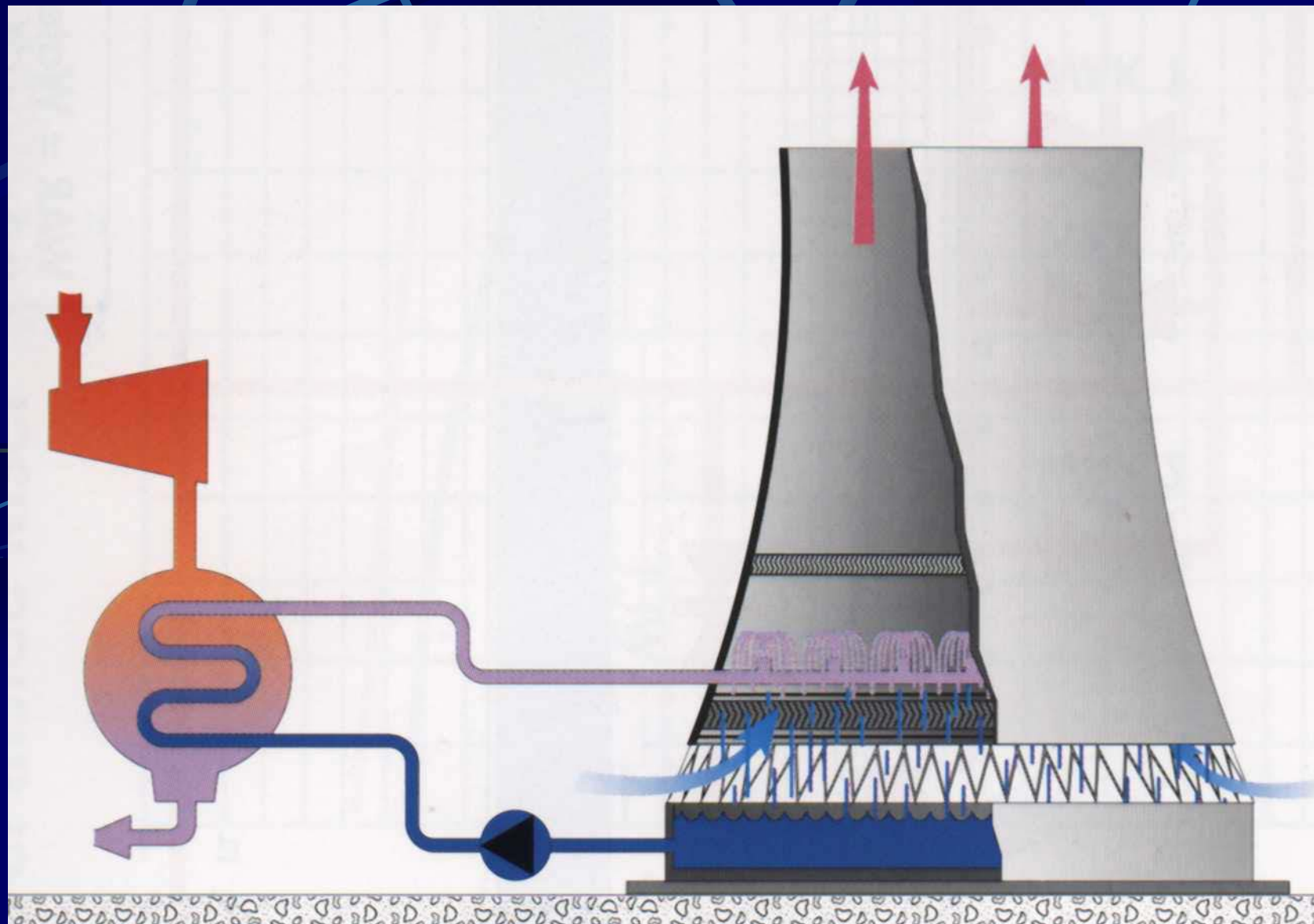
Plate 13 Sectional sideview of a natural circulation boiler. (Courtesy of the Babcock and Wilcox Company.)

# 锅炉内部结构图

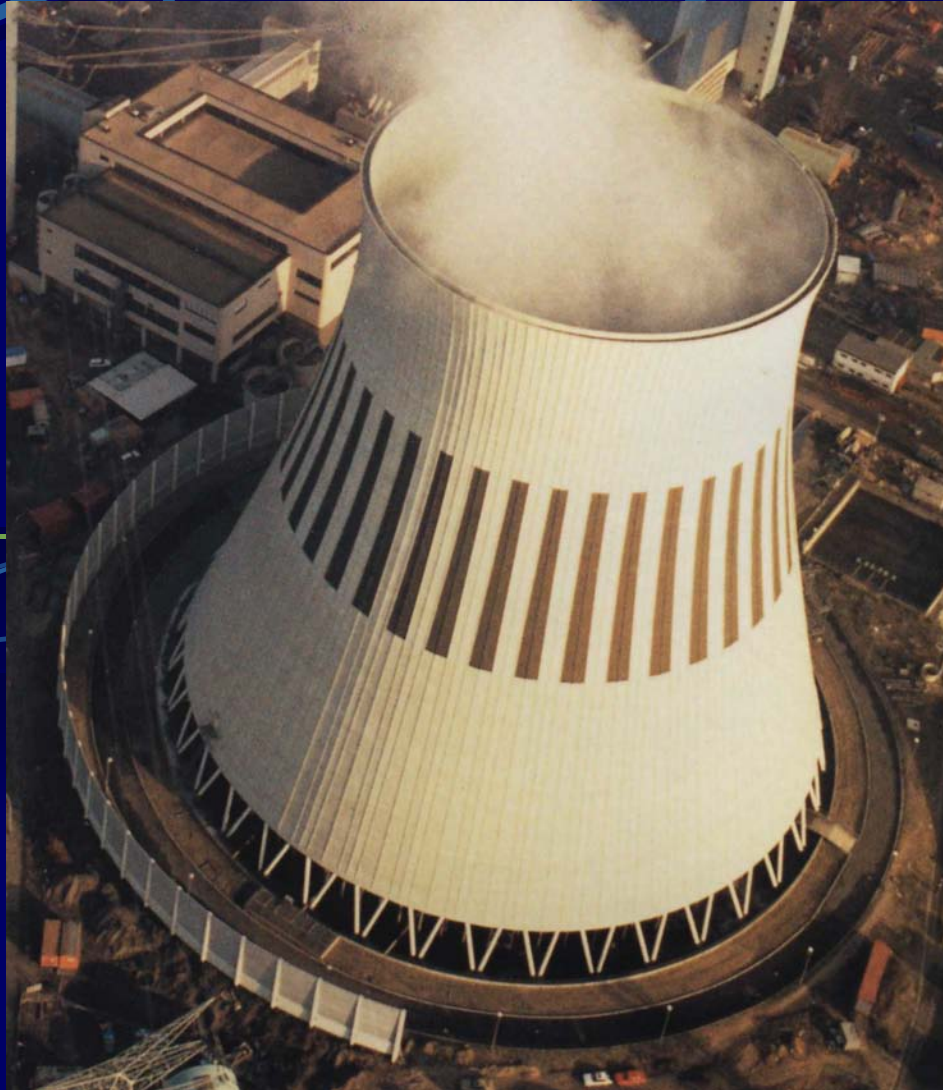




# 凝汽器和冷却塔系统图

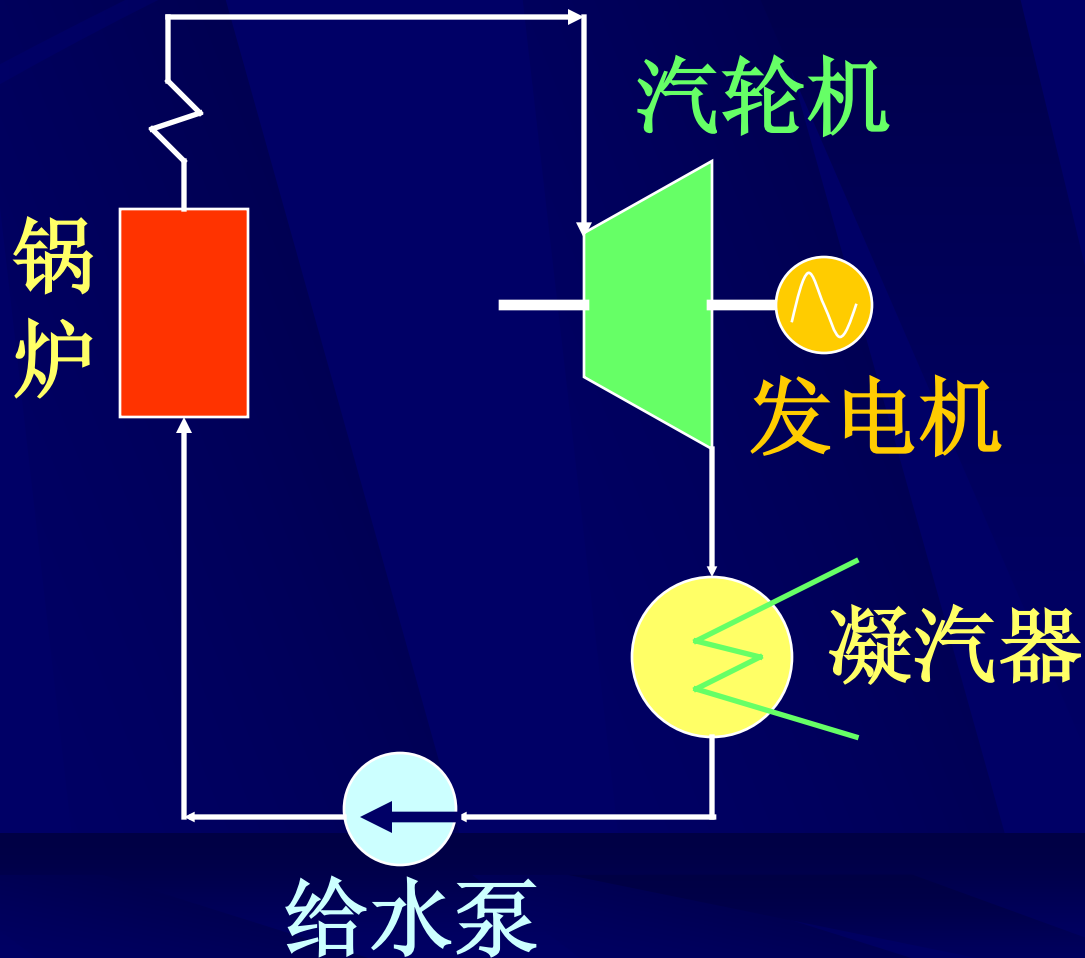


# 冷却塔实体图



# § 10-1 郎肯循环

## 水蒸气动力循环系统



四个主要装置:

锅炉

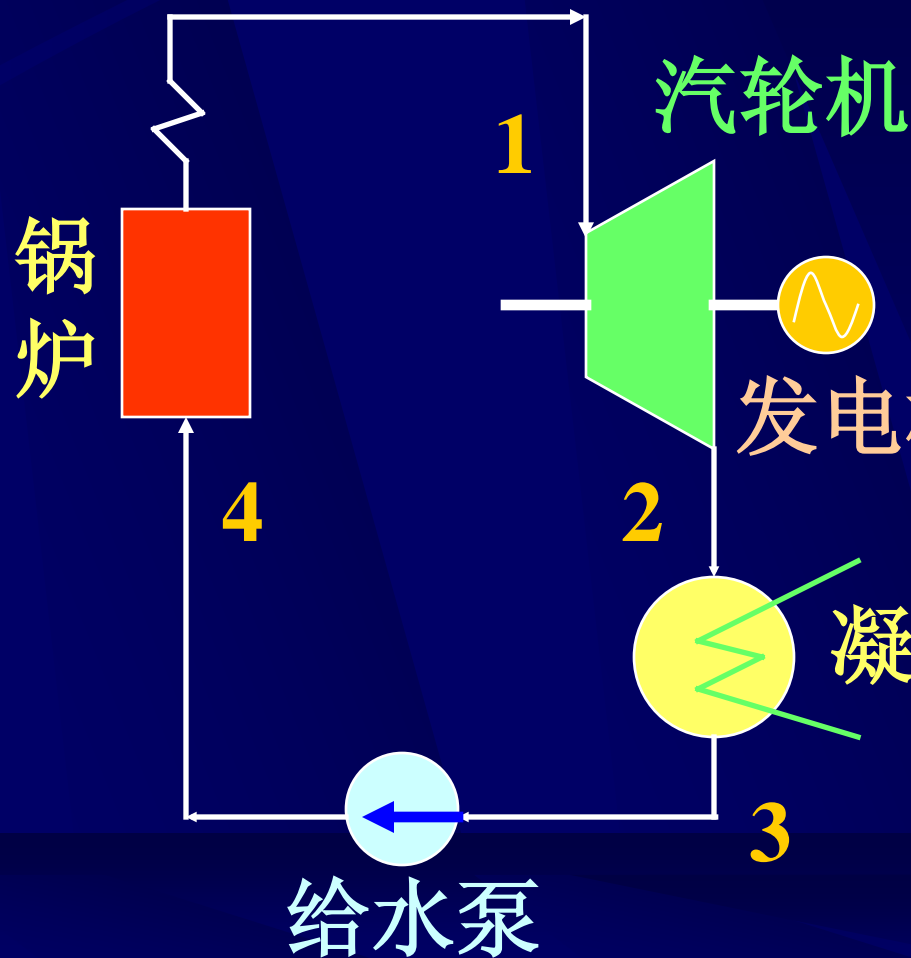
汽轮机

凝汽器

给水泵

# 水蒸气动力循环系统的简化

简化（理想化）：



1→2 汽轮机 (s) 膨胀

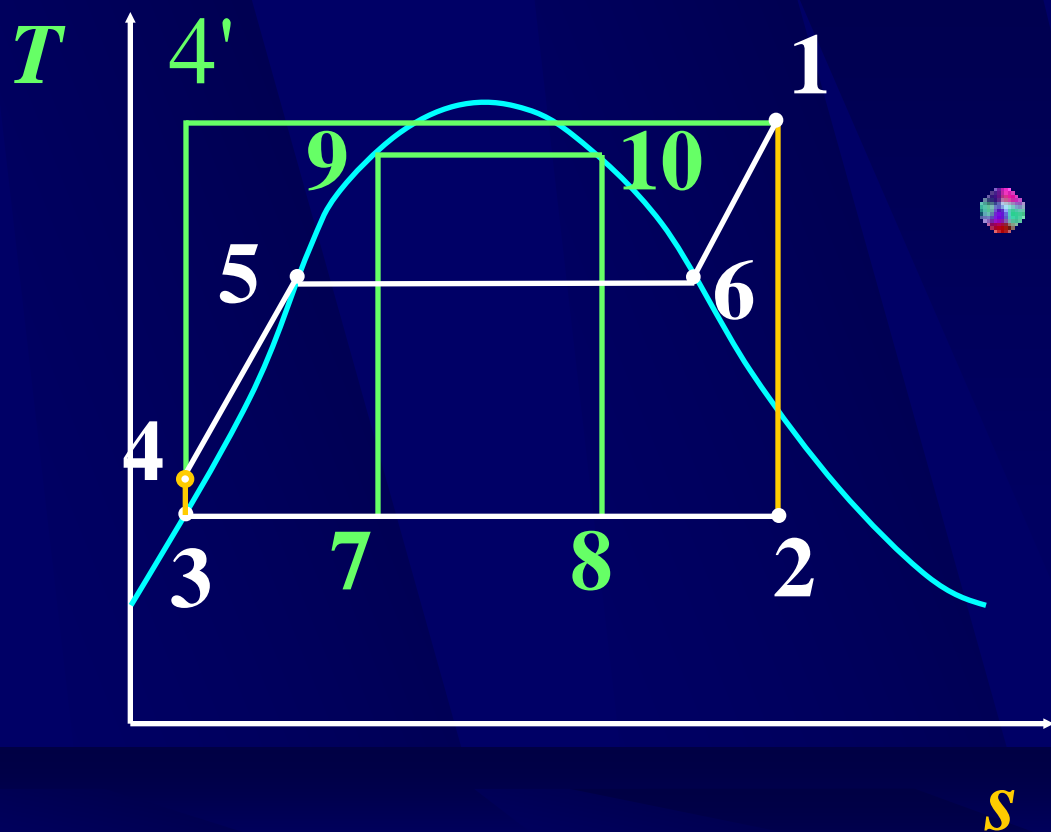
2→3 凝汽器 (p) 放热

3→4 给水泵 (s) 压缩

4→1 锅炉 (p) 吸热

郎肯循环

# 郎肯循环与卡诺循环比较



- 对比同温限1234'

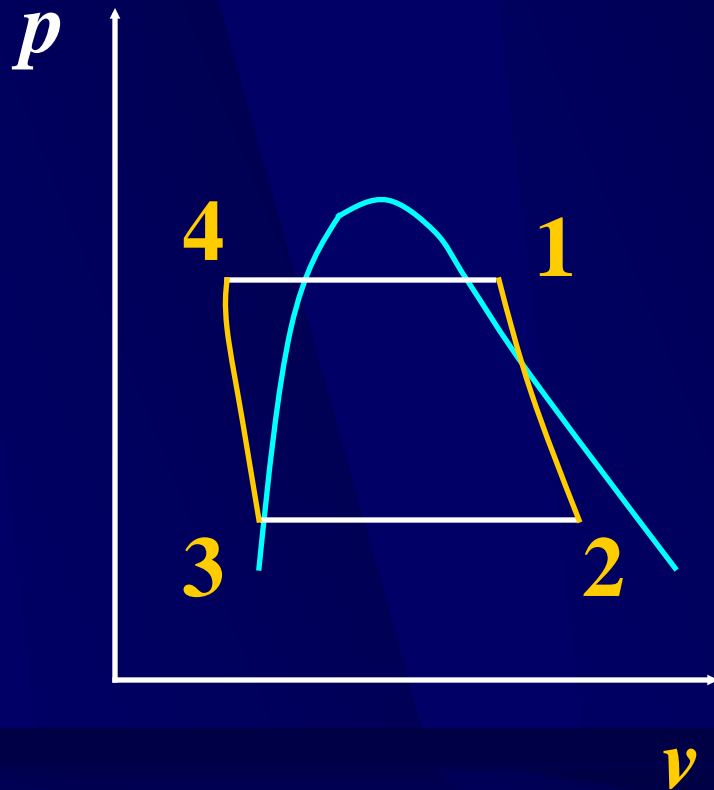
- $q_2$ 相同;
- $q_{1\text{卡诺}} > q_{1\text{朗肯}}$
- $\eta_{\text{卡诺}} > \eta_{\text{朗肯}}$
- 等温吸热4'1难实现

- 对比7-8-9-10

- 8点 $x$ 太小,产生汽蚀不利于汽机度;
- 7-9两相区难缩;
- $w_{\text{net卡诺}}$ 小



# 郎肯循环 $p-v$ 图



1→2 汽轮机 (s) 膨胀

2→3 凝汽器 (p) 放热

3→4 给水泵 (s) 压缩

4→1 锅炉 (p) 吸热

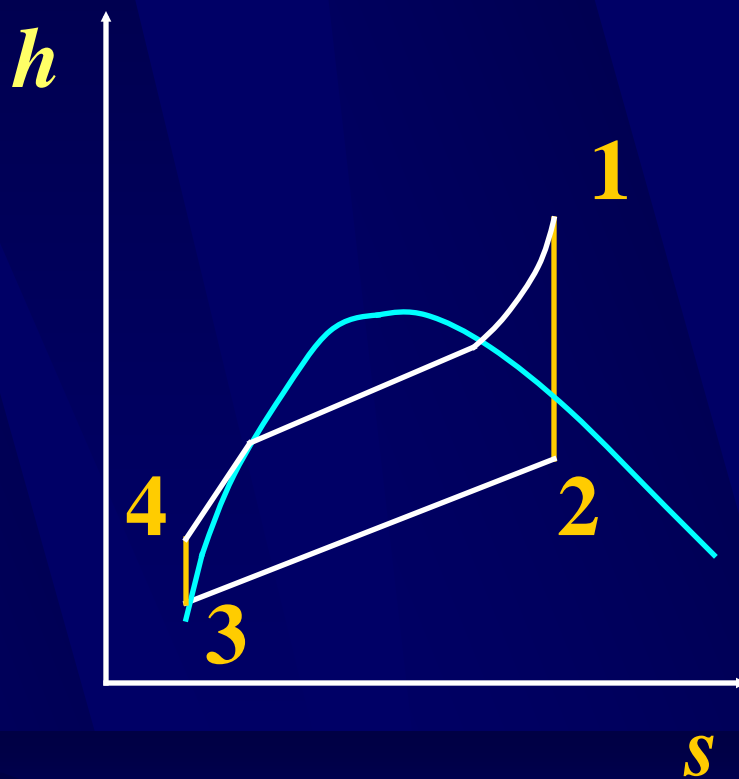
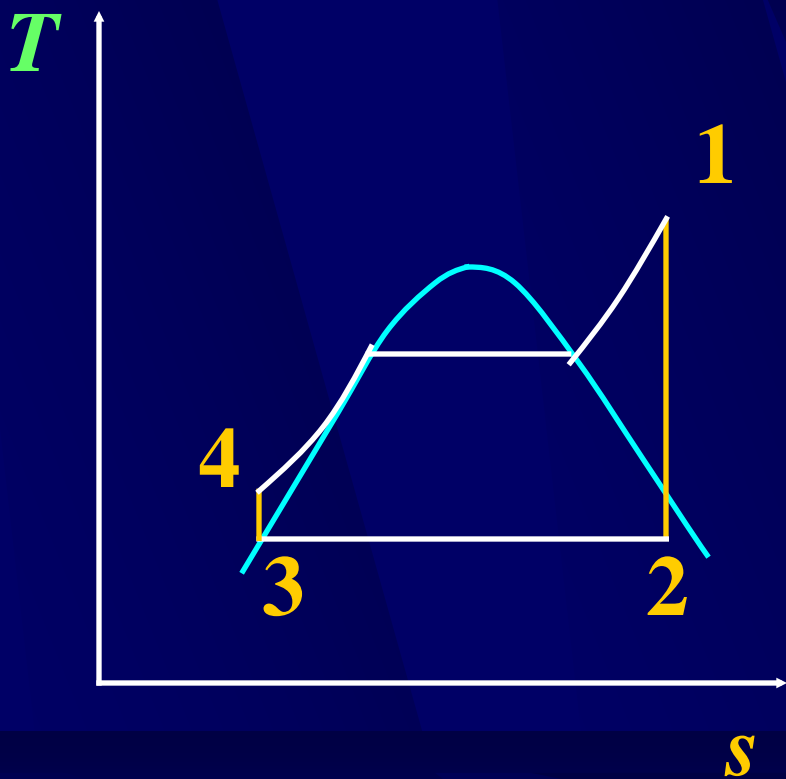
# 郎肯循环Ts和hs图

1→2 汽轮机 (s) 膨胀

2→3 凝汽器 (p) 放热

3→4 给水泵 (s) 压缩

4→1 锅炉 (p) 吸热



# 郎肯循环功和热的计算

汽轮机做功:  $w_{s,1-2} = h_1 - h_2$

凝汽器中的定压放热量:

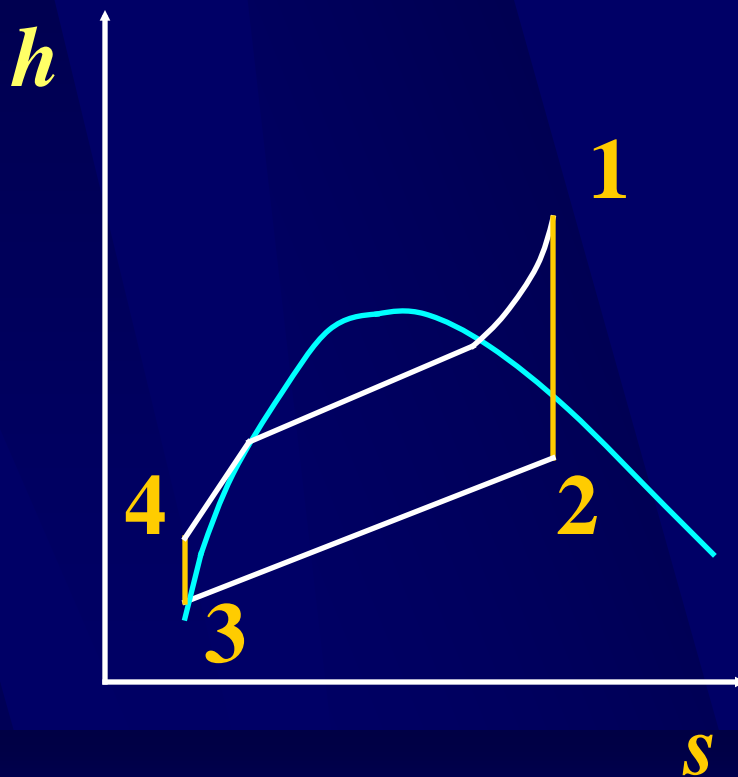
$$q_2 = h_2 - h_3$$

水泵绝热压缩耗功:

$$w_{s,3-4} = h_4 - h_3$$

锅炉中的定压吸热量:

$$q_1 = h_1 - h_4$$

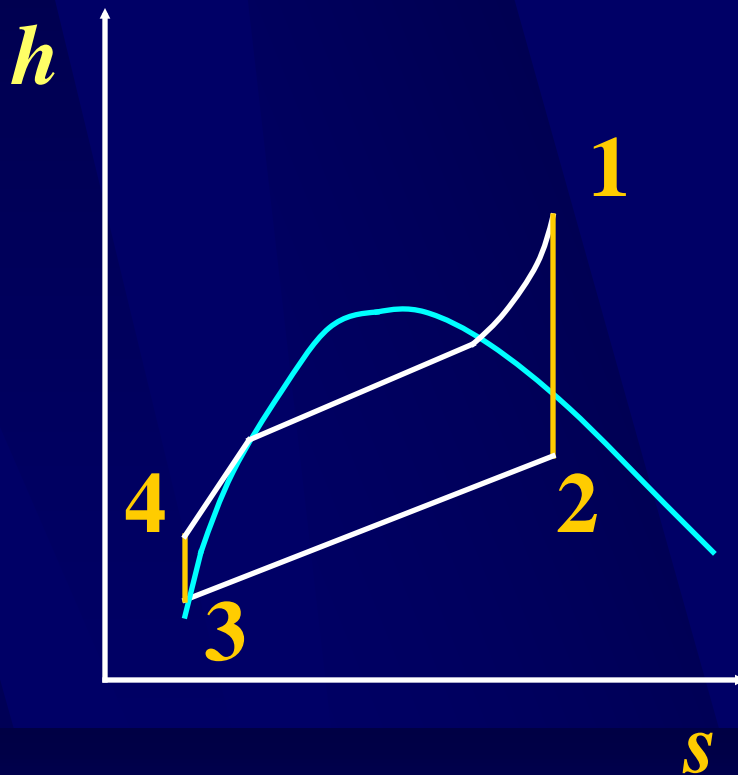


# 郎肯循环热效率的计算

$$\eta_t = \frac{w_{\text{net}}}{q_1} = \frac{w_{s,1-2} - w_{s,3-4}}{q_1}$$

一般很小，  
占**0.8~1%**，  
忽略泵功

$$\eta_t \approx \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$



# 汽耗率的概念

工程上常用**汽耗率**, 反映装置经济性, 设备尺寸

**汽耗率**: 蒸汽动力装置每输出**1kW.h**功量所消耗的蒸汽量**kg**

$$d = \frac{3600}{w_{\text{net}}}$$

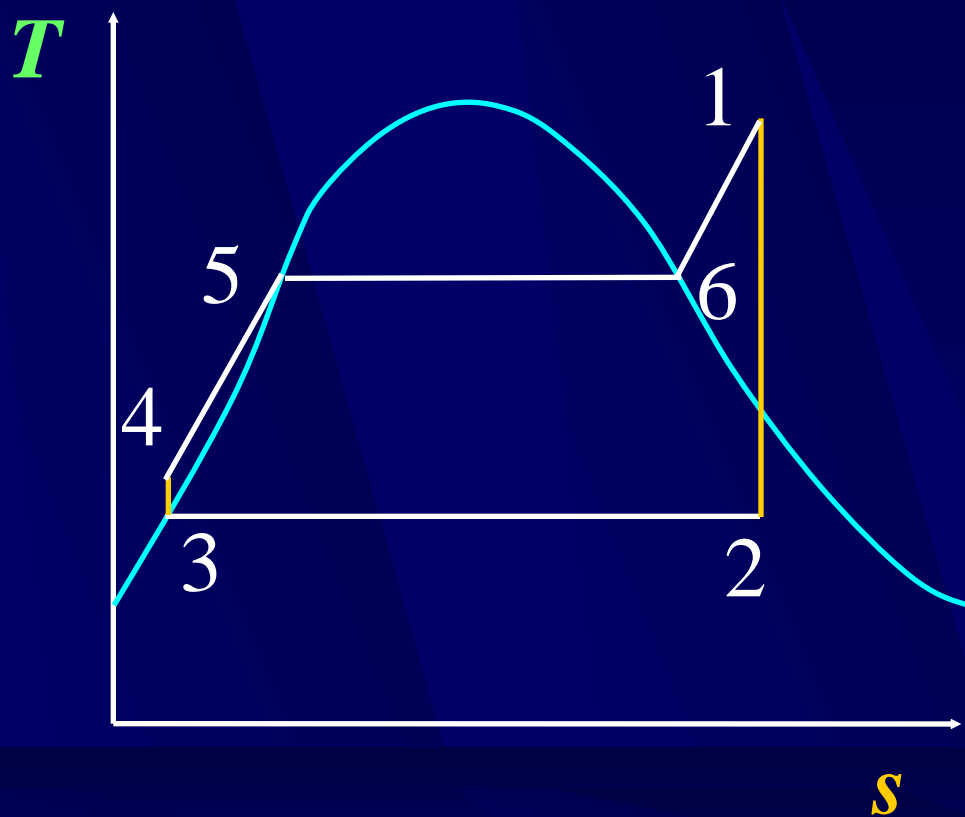
$w_{\text{net}}$  的单位是**kJ/kg**      **1kW=1 kJ/s**

$$d \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kW} \times \text{h}} \right] = \left[ \frac{\text{kg}}{\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \times \text{h}} \right] = \left[ \frac{\text{kg}}{\frac{1}{3600} \text{h}} \times \text{h} \right] = \left[ \frac{3600 \text{kg}}{\text{kJ}} \right] = \frac{3600}{w_{\text{net}}}$$



# 如何提高郎肯循环的热效率

$$\eta_t \approx \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$



影响热效率的参数？

$p_1$     $t_1$     $p_2$

# 蒸汽初压对郎肯循环热效率的影响

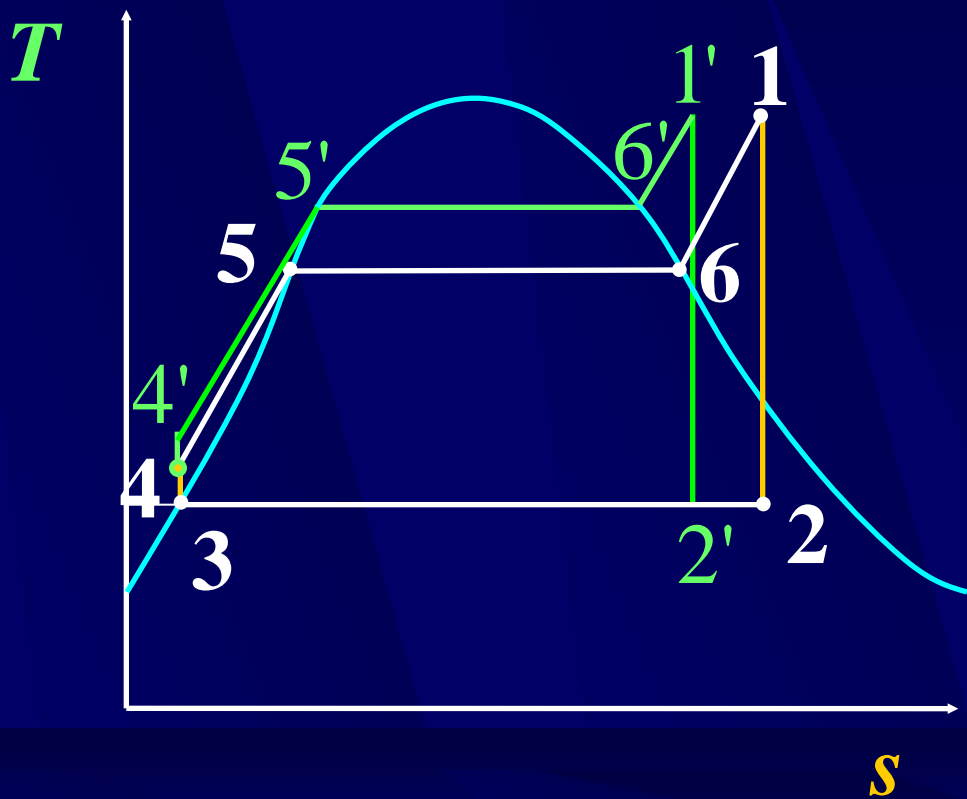
$t_1, p_2$  不变,  $p_1 \uparrow$

优点:

- $\bar{T}_1 \uparrow$   $\eta_t \uparrow$
- $v_{2'} \downarrow$ , 汽轮机出口尺寸小

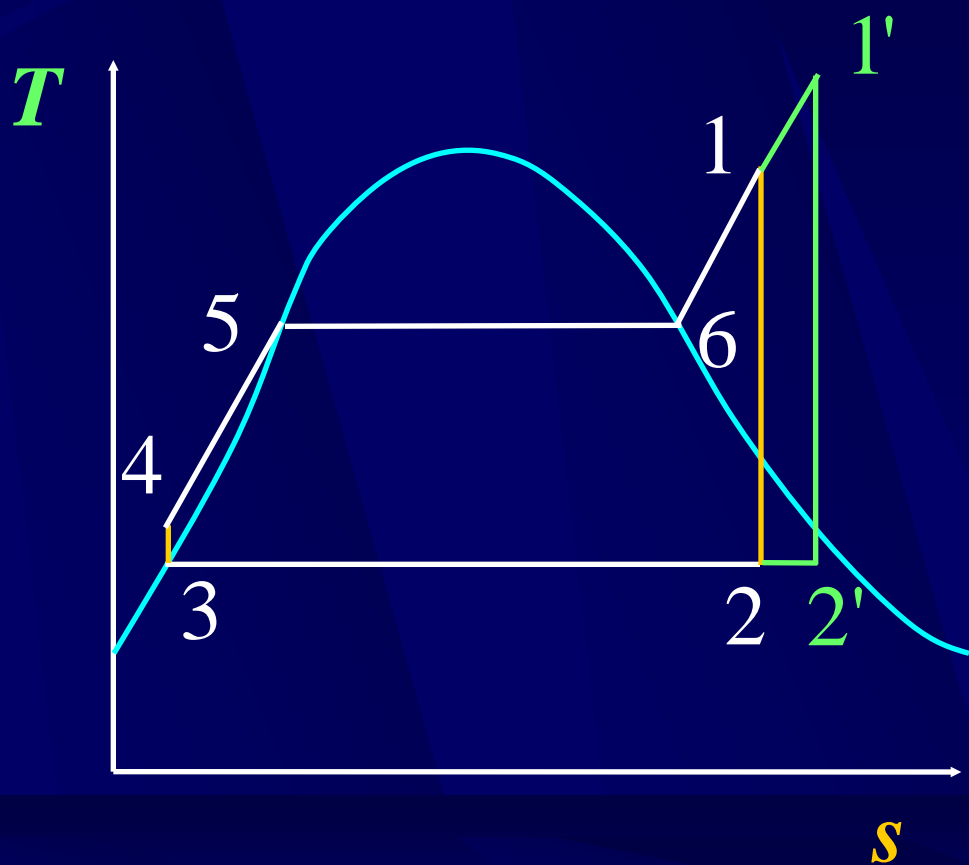
缺点:

- 对强度要求高
- $x_{2'} \downarrow$  不利于汽轮机安全。一般要求出口干度大于0.85~0.88



# 蒸汽初温对郎肯循环热效率的影响

$p_1, p_2$  不变,  $t_1 \uparrow$



优点:

- $\bar{T}_1 \uparrow$   $\eta_t \uparrow$
- $x_{2'} \uparrow$ , 有利于汽机安全。

缺点:

- 对耐热及强度要求高, 目前初温一般在  $550^\circ\text{C}$  左右
- $v_{2'} \uparrow$  汽机出口尺寸大

# 乏汽压力对朗肯循环热效率的影响

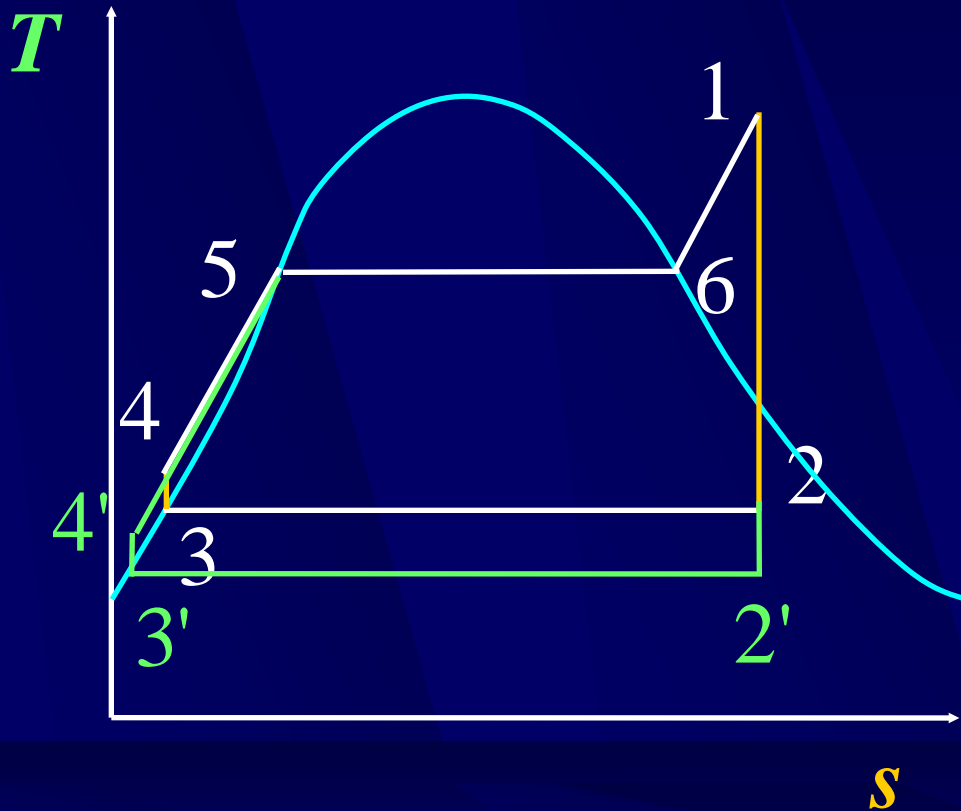
$p_1, t_1$  不变,  $p_2 \downarrow$

优点:

•  $\overline{T}_2 \downarrow \quad \eta_t \uparrow$

缺点:

• 受环境温度限制, 现在大型机组  $p_2$  为  $0.0035 \sim 0.005 \text{ MPa}$ , 相应的饱和温度约为  $27 \sim 33^\circ\text{C}$ , 已接近事实上可能达到的最低限度。冬天热效率高



# 国产锅炉、汽轮机发电机组的 初参数简表

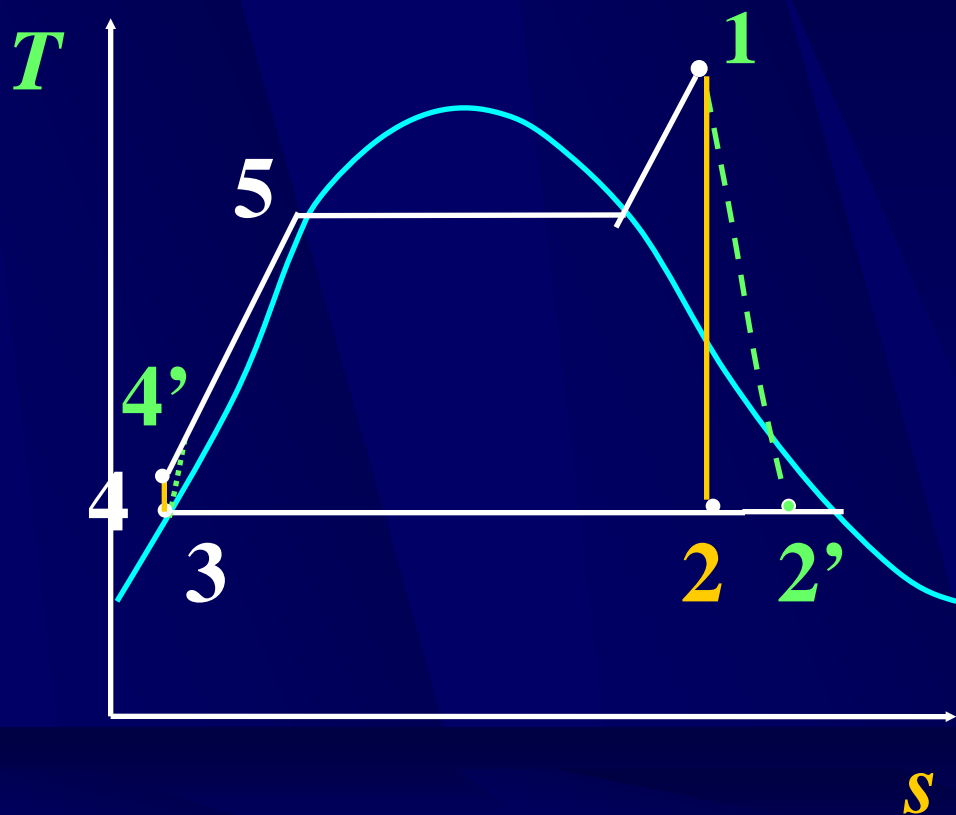
	低参数	中参数	高参数	超高参数	亚临界参数
汽轮机进 汽压力 MPa	1.3	3.5	9.0	13.5	16.5
汽轮机进 汽温度℃	340	435	535	550, 535	550, 535
发电机功 率 P/ kW	1500~ 3000	6000~ 25000	5~10万	12.5万, 20 万	20万, 30 万, 60万



# 实际蒸汽动力循环分析

## 非理想因素:

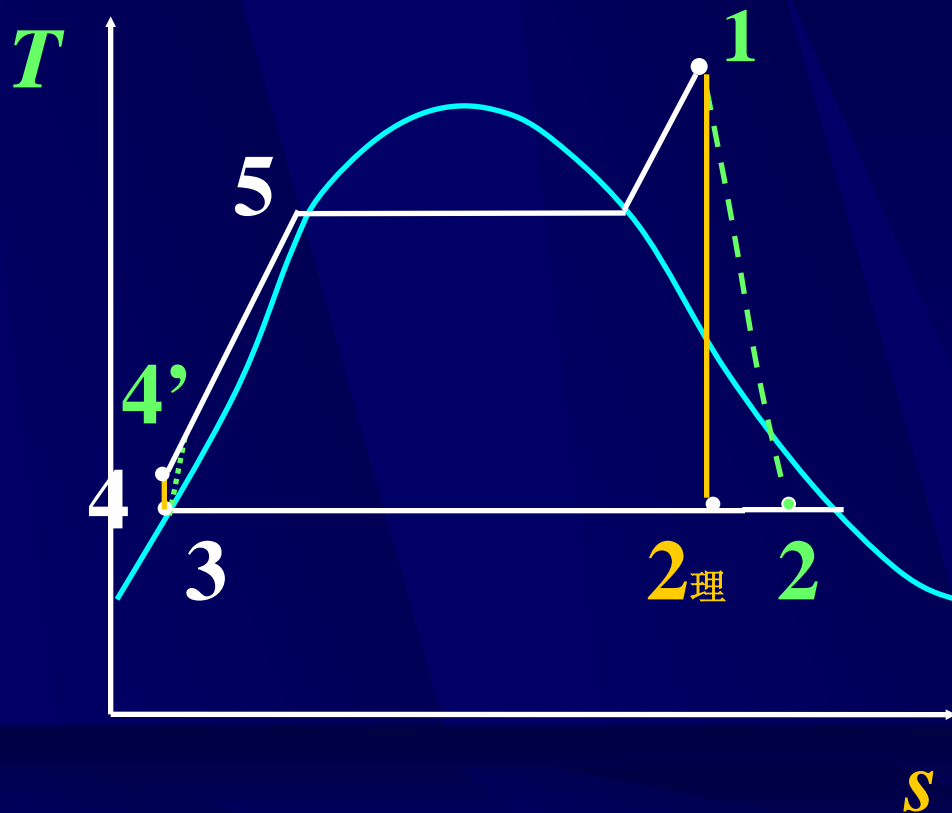
- 蒸汽管道摩擦降压, 散热
- 汽机汽门节流
- 汽机不可逆(1 2')
- 给水泵不可逆(3 4')



# 实际蒸汽动力循环分析

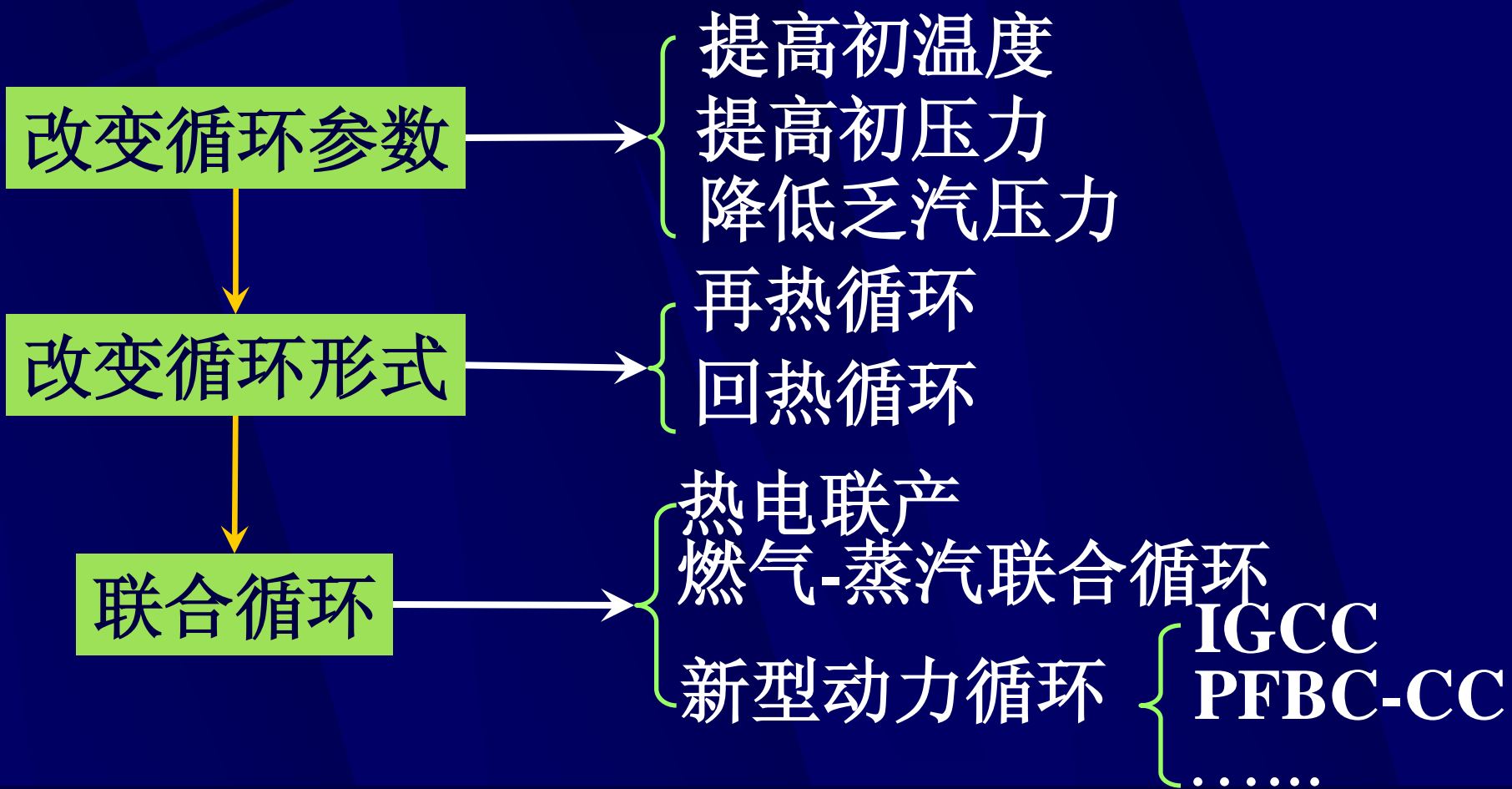
忽略泵功

实际循环效率

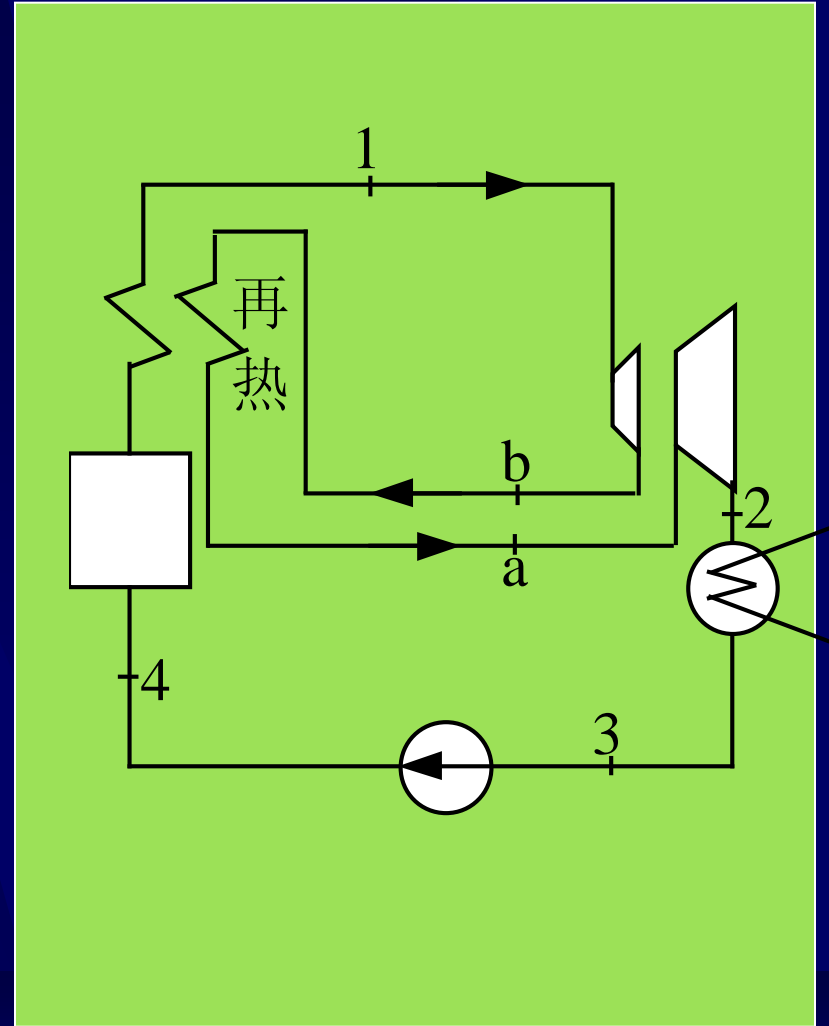
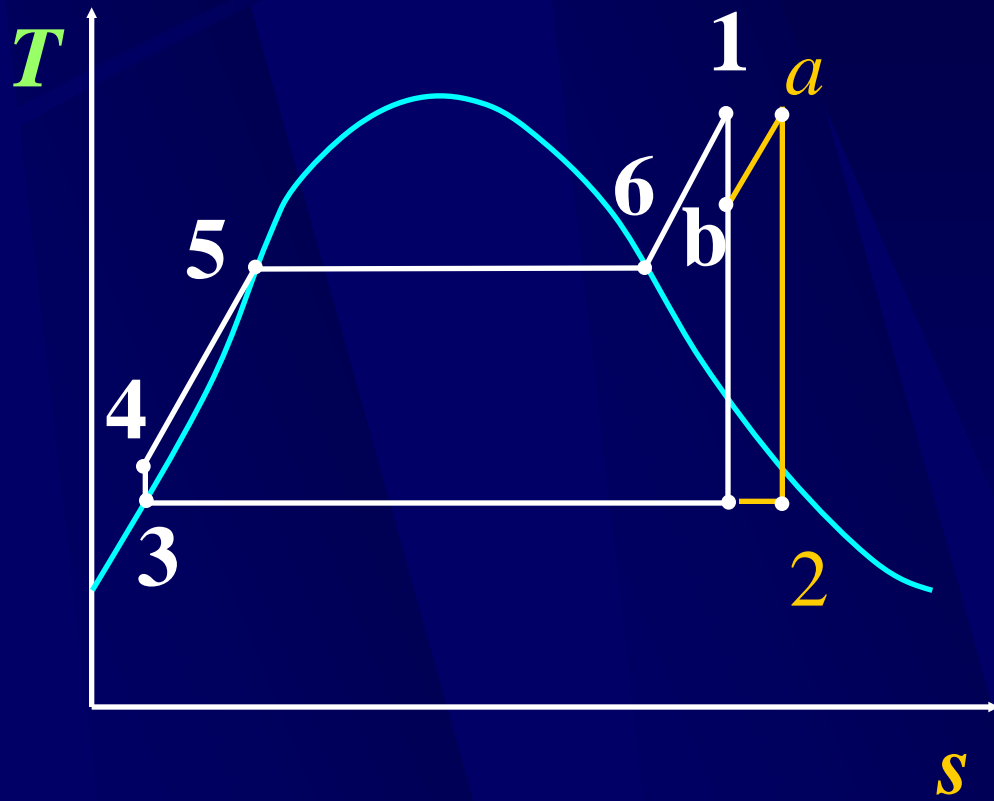


$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$

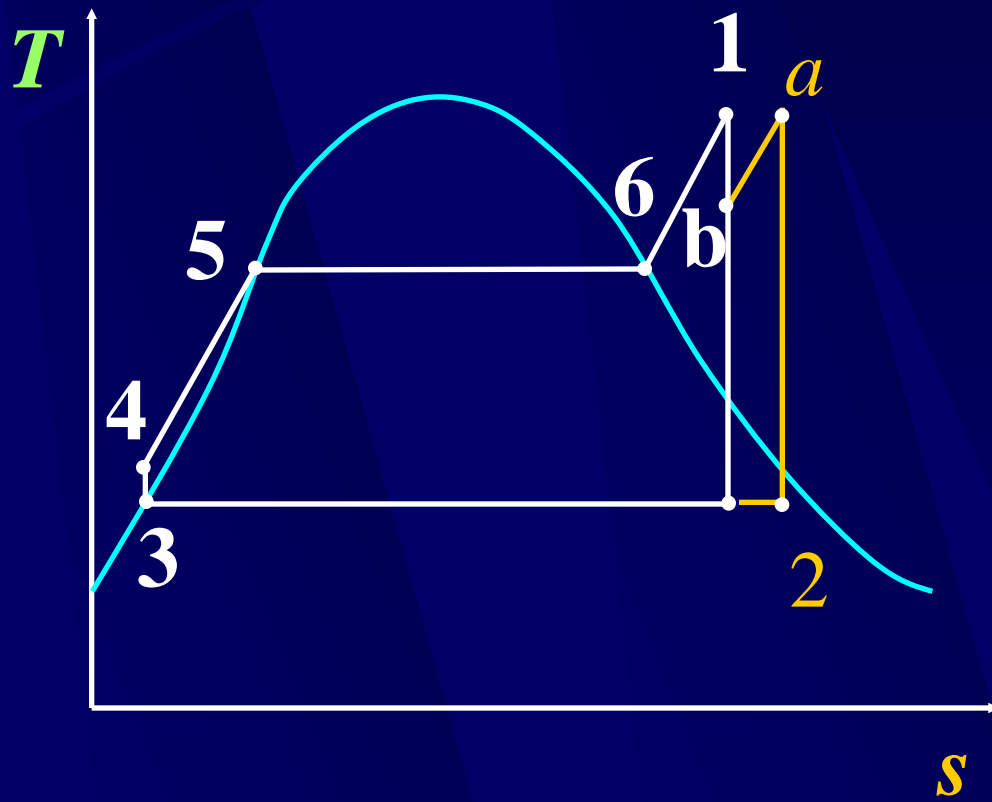
# 提高循环热效率的途径



# § 10-2 蒸汽再热循环(reheat)



# 蒸汽再热循环的热效率

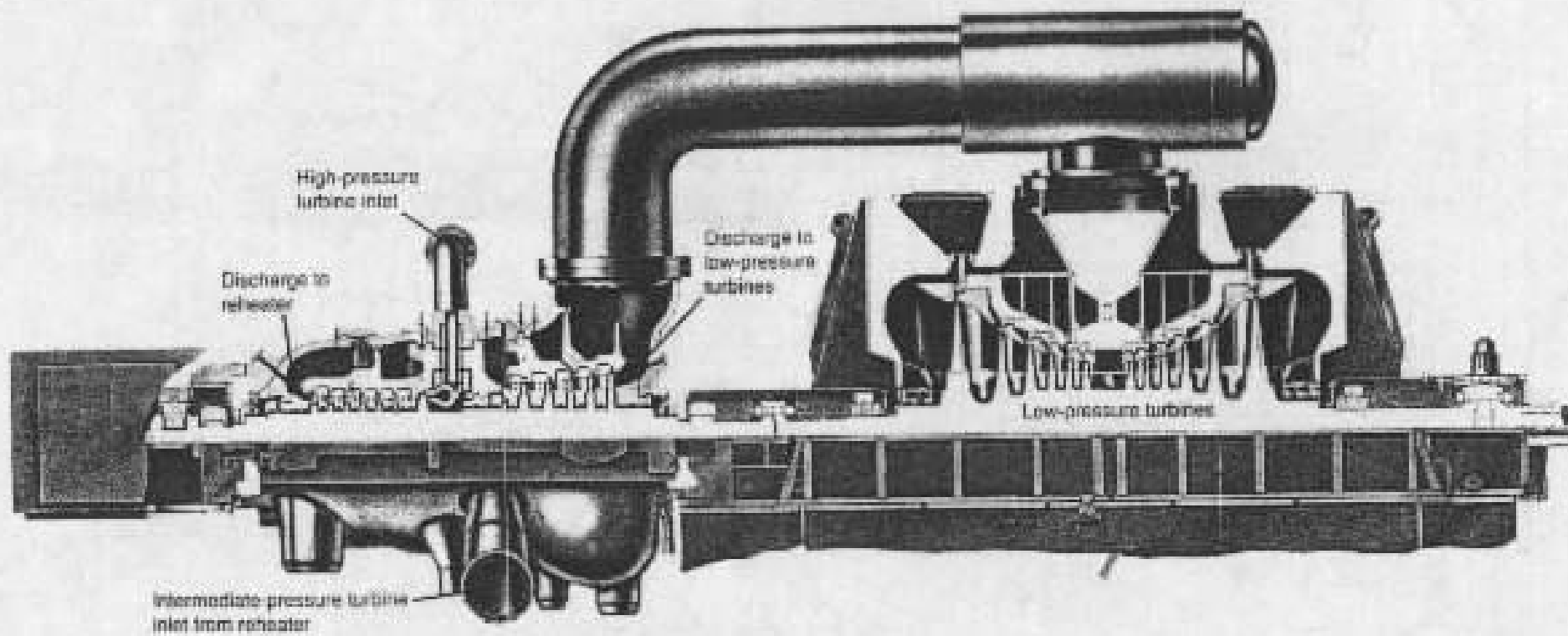


- 再热循环本身不一定提高循环热效率
- 与再热压力有关
- $x_2$ 降低,给提高初压创造了条件,选取再热压力合适,一般采用一次再热可使热效率提高2%~3.5%。

# 蒸汽再热循环的实践

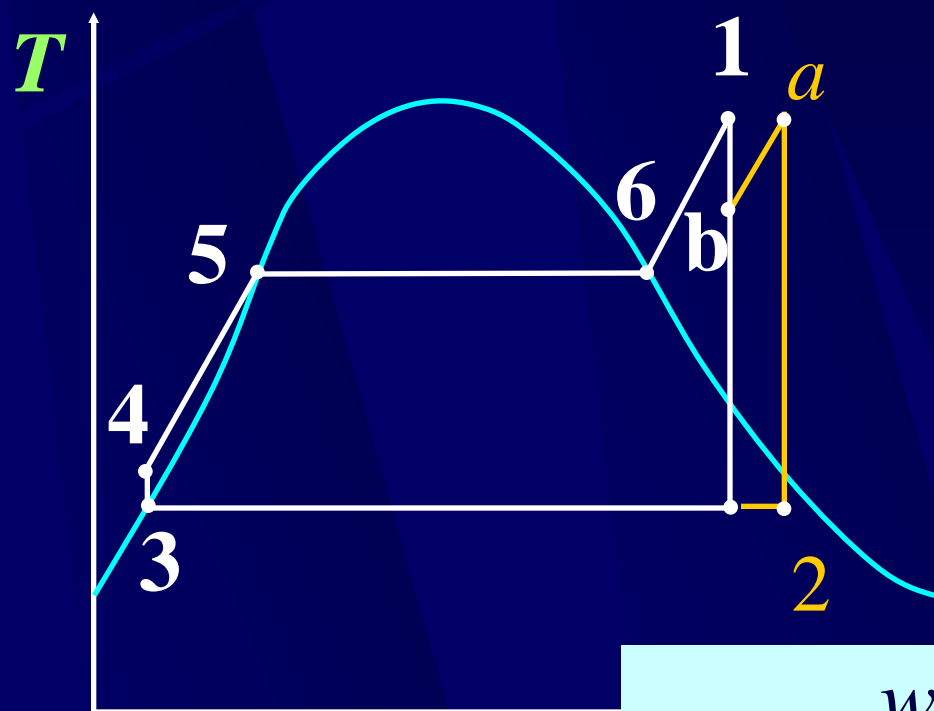
- 再热压力  $p_b=p_a\approx 0.2\sim 0.3p_1$
- $p_1<10\text{MPa}$ ，一般不采用再热
- 我国常见机组，10、12.5、20、30万机组， $p_1>13.5\text{MPa}$ ，一次再热
- 超临界机组， $t_1>600^\circ\text{C}$ ， $p_1>25\text{MPa}$ ，二次再热

# 蒸汽再热循环实体照片





# 蒸汽再热循环的定量计算



吸热量:

$$q_1 = (h_1 - h_4) + (h_a - h_b)$$

放热量:

$$q_2 = h_2 - h_3$$

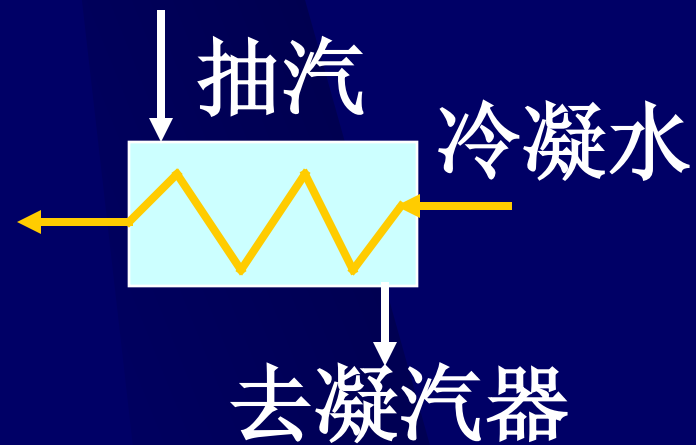
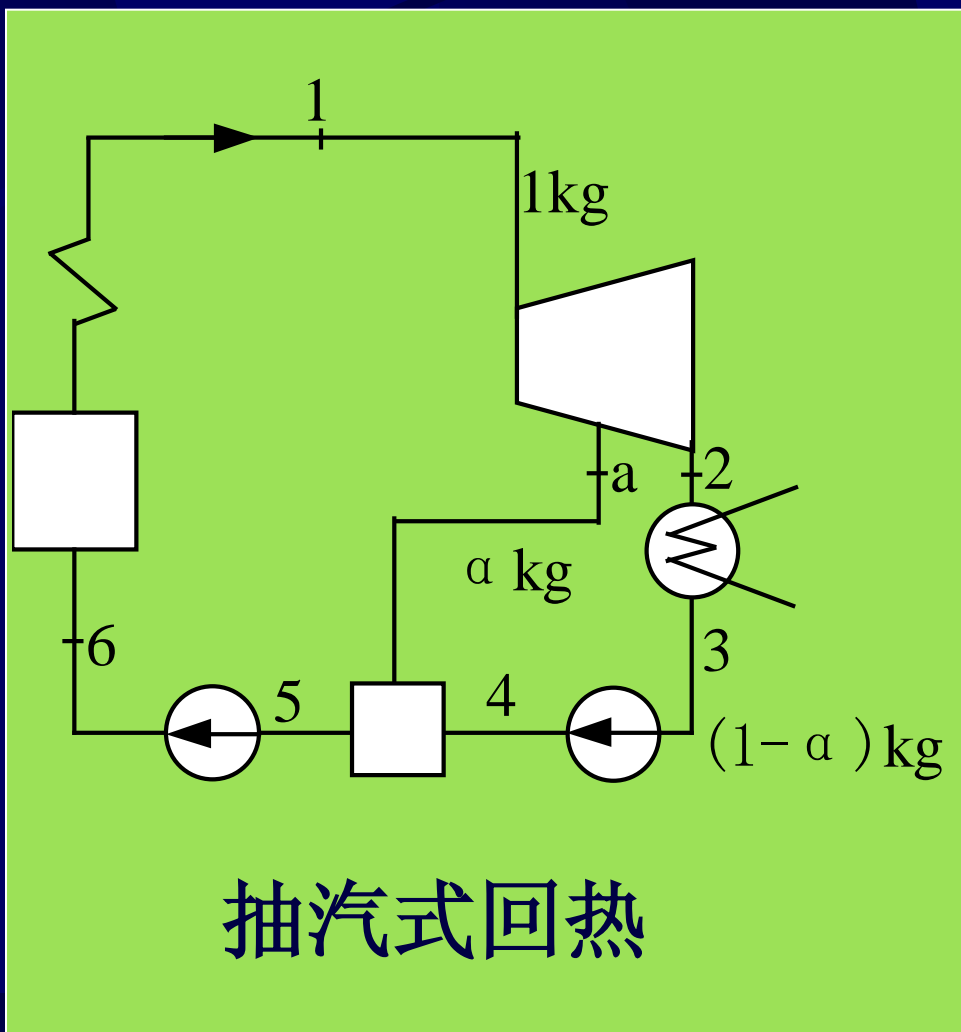
净功 (忽略泵功):

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

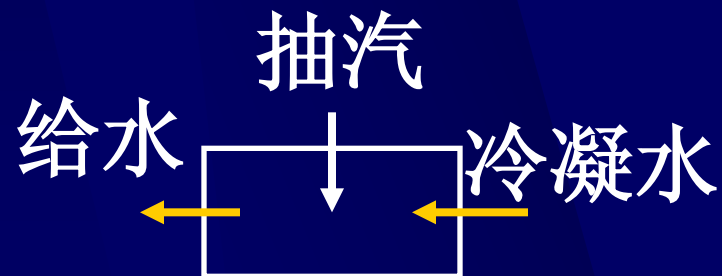
热效率:

$$\eta_{t,\text{RH}} = \frac{w_{\text{net}}}{q_1} = \frac{(h_1 - h_b) + (h_a - h_2)}{(h_1 - h_4) + (h_a - h_b)}$$

# § 10-3 蒸汽回热循环(regenerative)

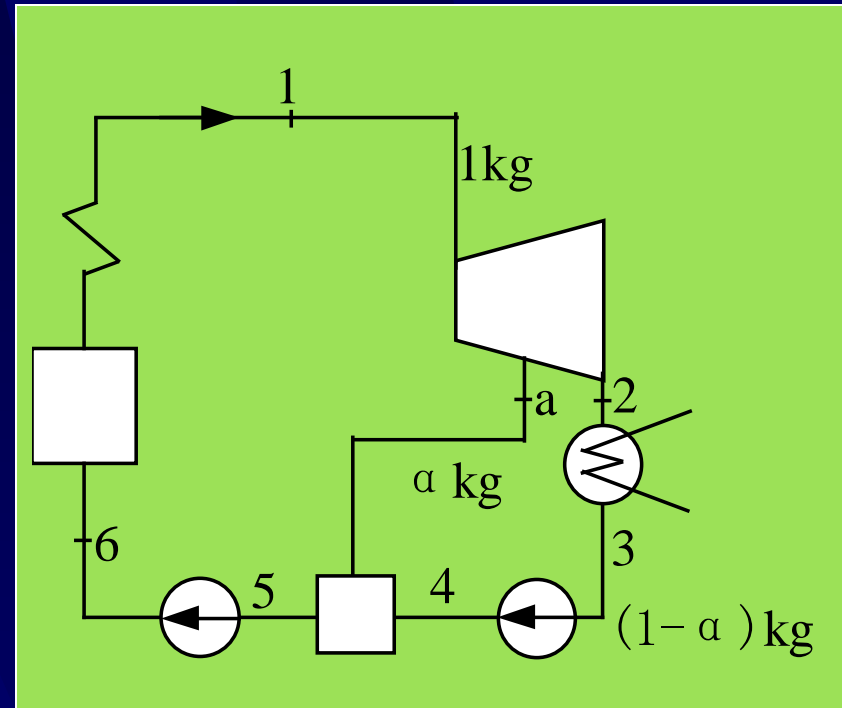
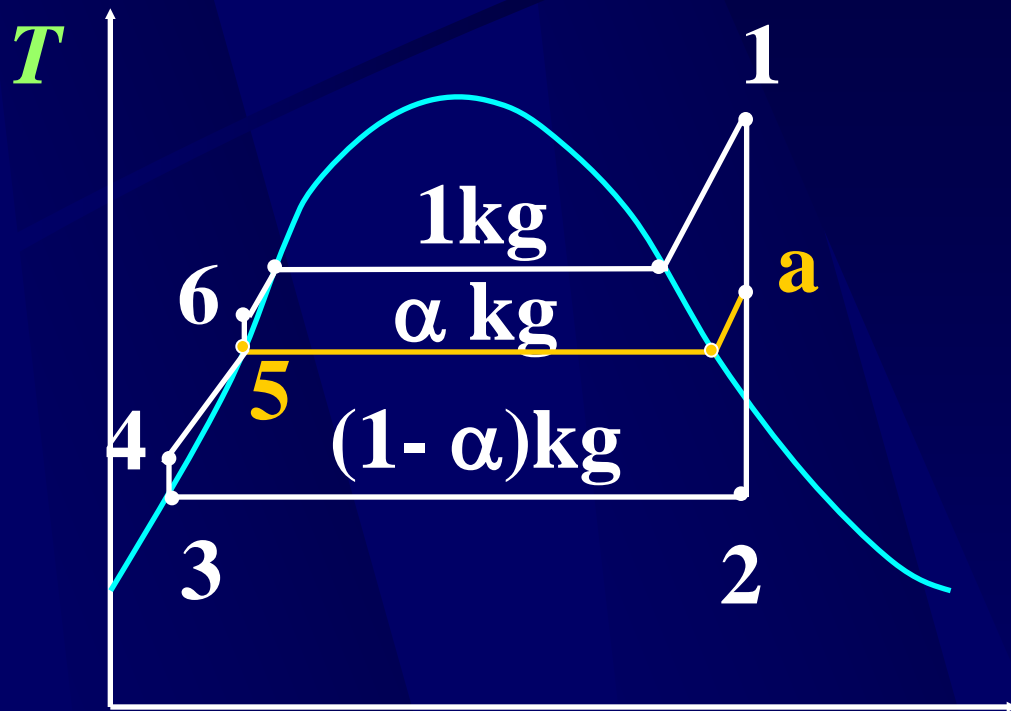


表面式回热器

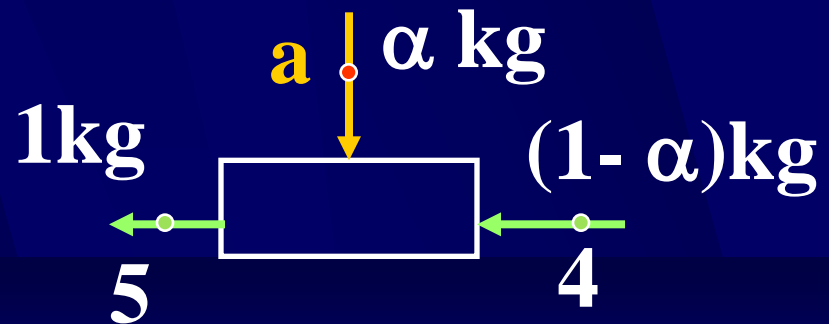


混合式回热器

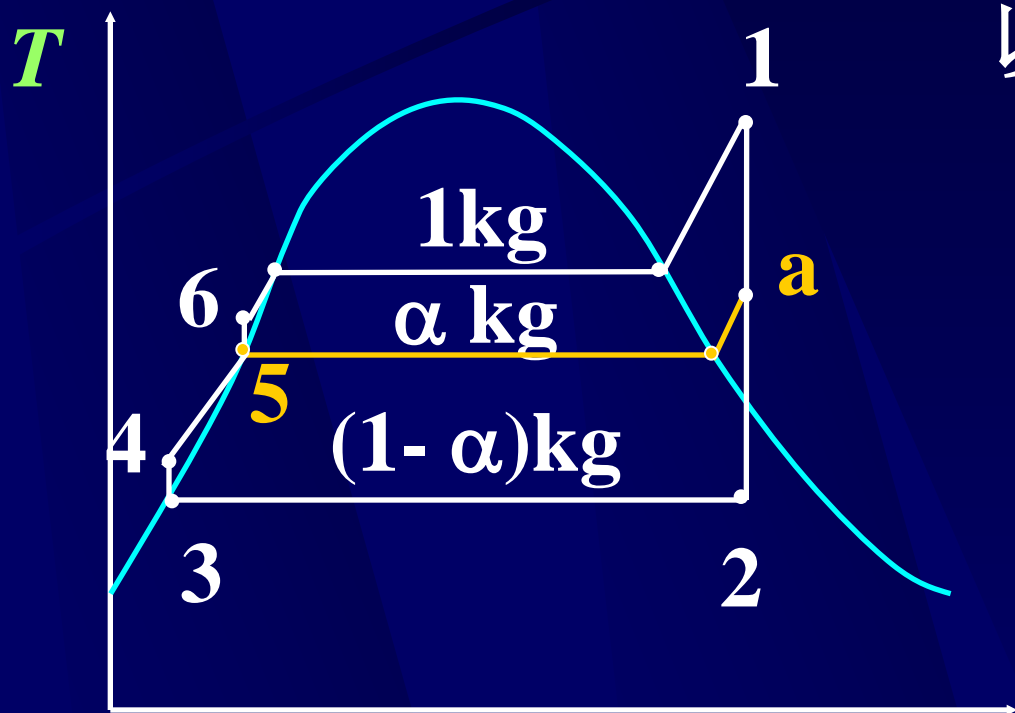
# 蒸汽抽汽回热循环



由于 $T-s$ 图上各点质量不同，面积不再直接代表热和功



# 抽汽回热循环的抽汽量计算



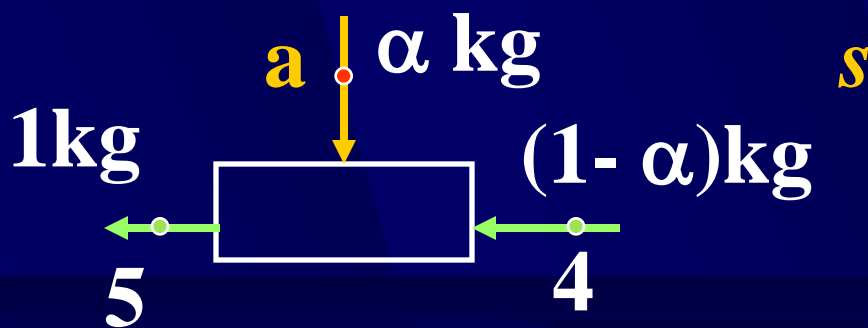
以混合式回热器为例  
热一律

$$\alpha h_a + (1 - \alpha) h_4 = 1 \times h_5$$

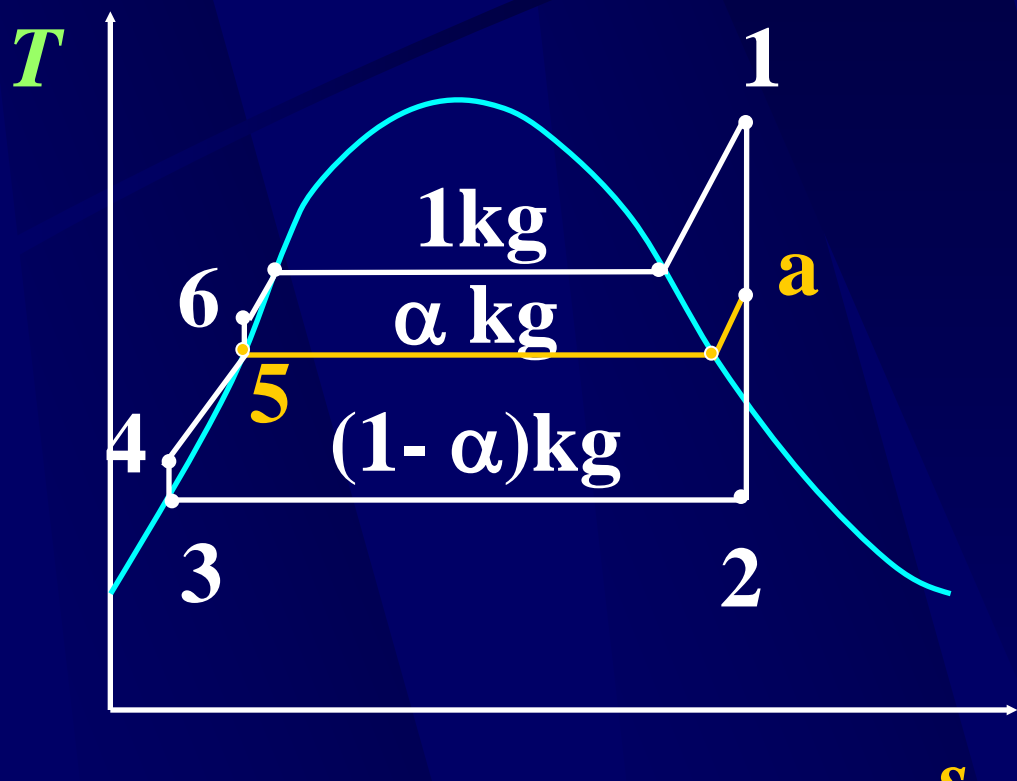
$$\alpha = \frac{h_5 - h_4}{h_a - h_4}$$

忽略泵功

$$\alpha = \frac{h'_a - h'_2}{h_a - h'_2}$$



# 抽汽回热循环热效率的计算



吸热量:

$$q_{1, \text{RG}} = h_1 - h_5 = h_1 - h'_a$$

放热量:

$$q_{2, \text{RG}} = (1 - \alpha)(h_2 - h'_2)$$

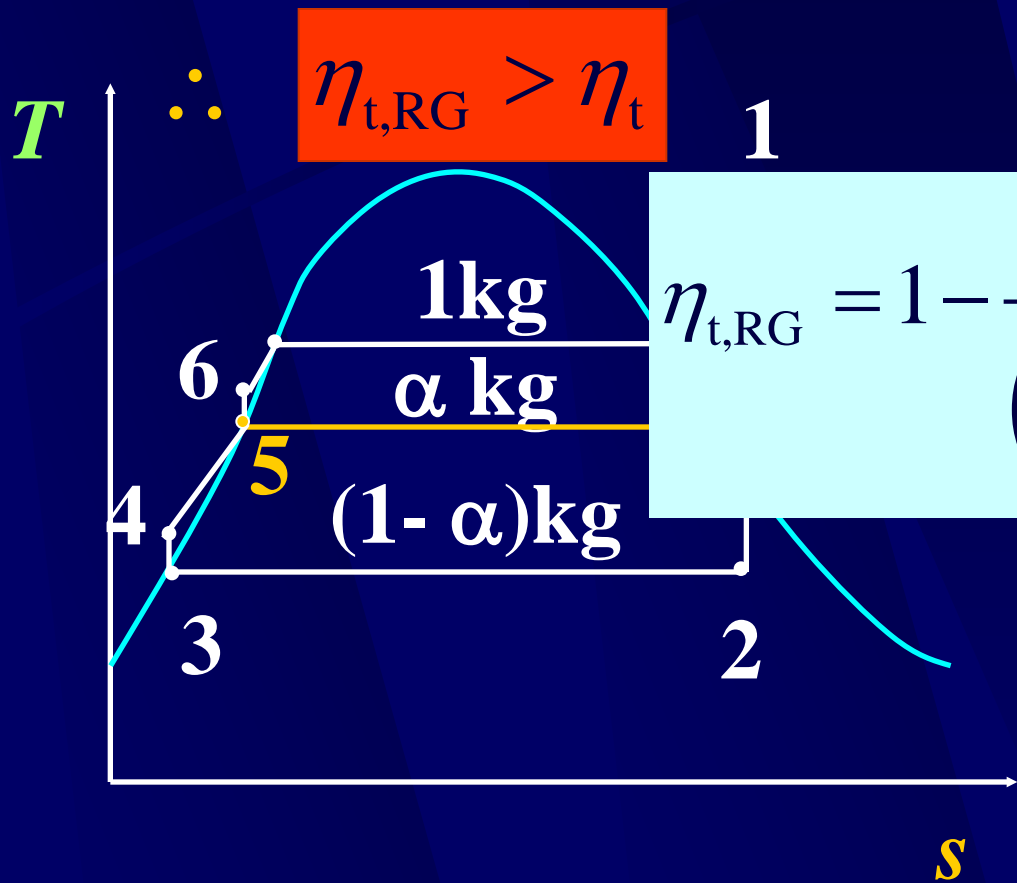
净功:

$$w_{\text{RG}} = (h_1 - h_a) + (1 - \alpha)(h_a - h_2)$$

热效率:

$$\eta_{t, \text{RG}} = \frac{(h_1 - h_a) + (1 - \alpha)(h_a - h_2)}{h_1 - h'_a}$$

# 为什么抽汽回热热效率提高?



$$\therefore \eta_{t, \text{RG}} > \eta_t$$

教材P. 330推导

$$\eta_{t, \text{RG}} = 1 - \frac{h_2 - h_2'}{(h_1 - h_2') + \frac{\alpha}{1 - \alpha} (h_1 - h_a)}$$

简单朗肯循环:

$$\eta_t = 1 - \frac{h_2 - h_2'}{h_1 - h_2'}$$

$$\frac{\alpha}{1 - \alpha} (h_1 - h_a) > 0$$

物理意义:  $\alpha$  kg工质100%利用  
 $1 - \alpha$  kg工质效率未变

# 蒸汽抽汽回热循环的特点

## • 优点 > 缺点

- 提高热效率
- 减小汽轮机低压缸尺寸，末级叶片变短
- 减小凝汽器尺寸，减小锅炉受热面
- 可兼作除氧器

## • 缺点

- 循环比功减小，汽耗率增加
- 增加设备复杂性
- 回热器投资

小型火力发电厂回热级数一般为**1~3级**  
中大型火力发电厂一般为**4~8级**。



# 蒸汽回热示意图

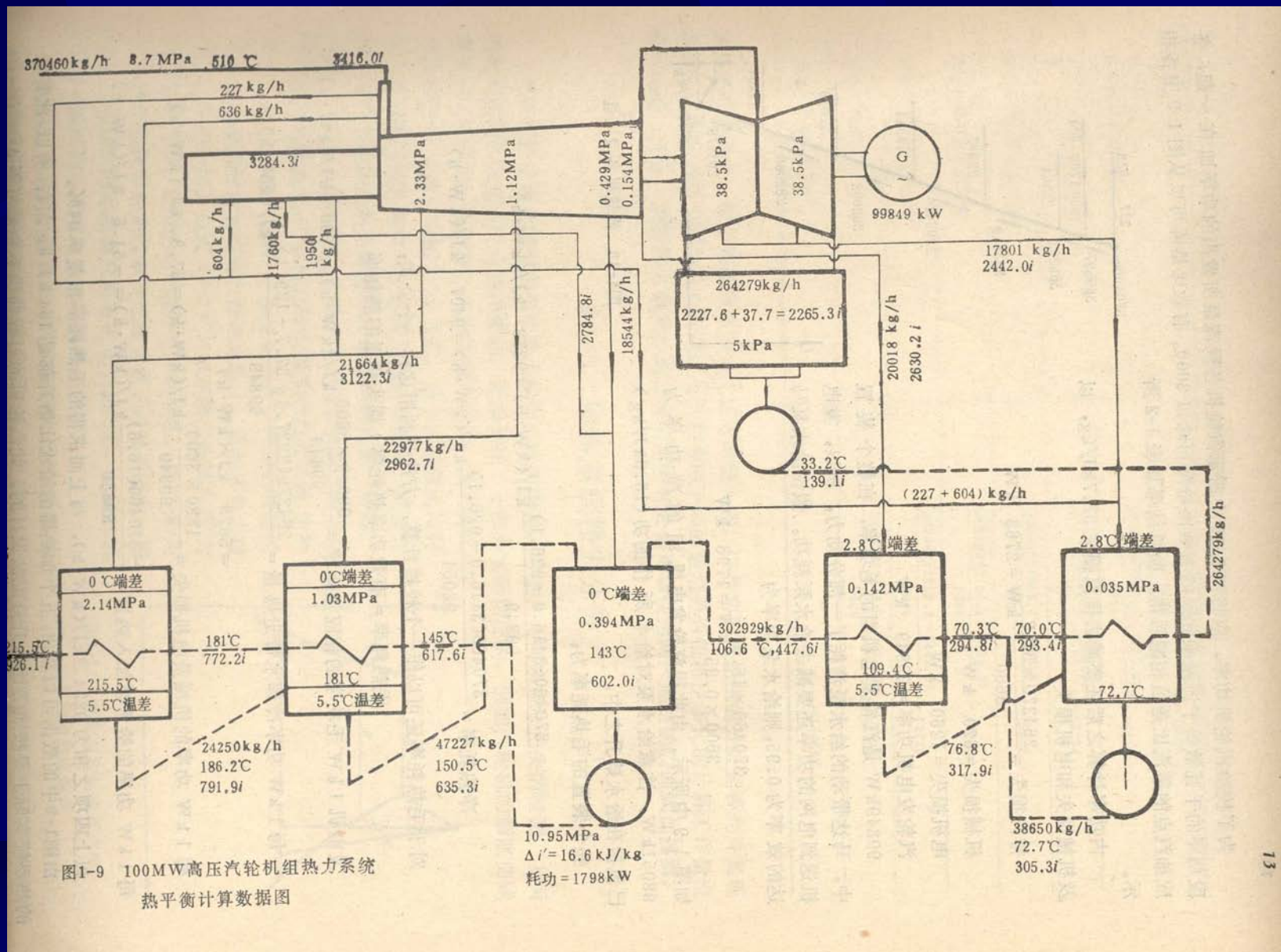
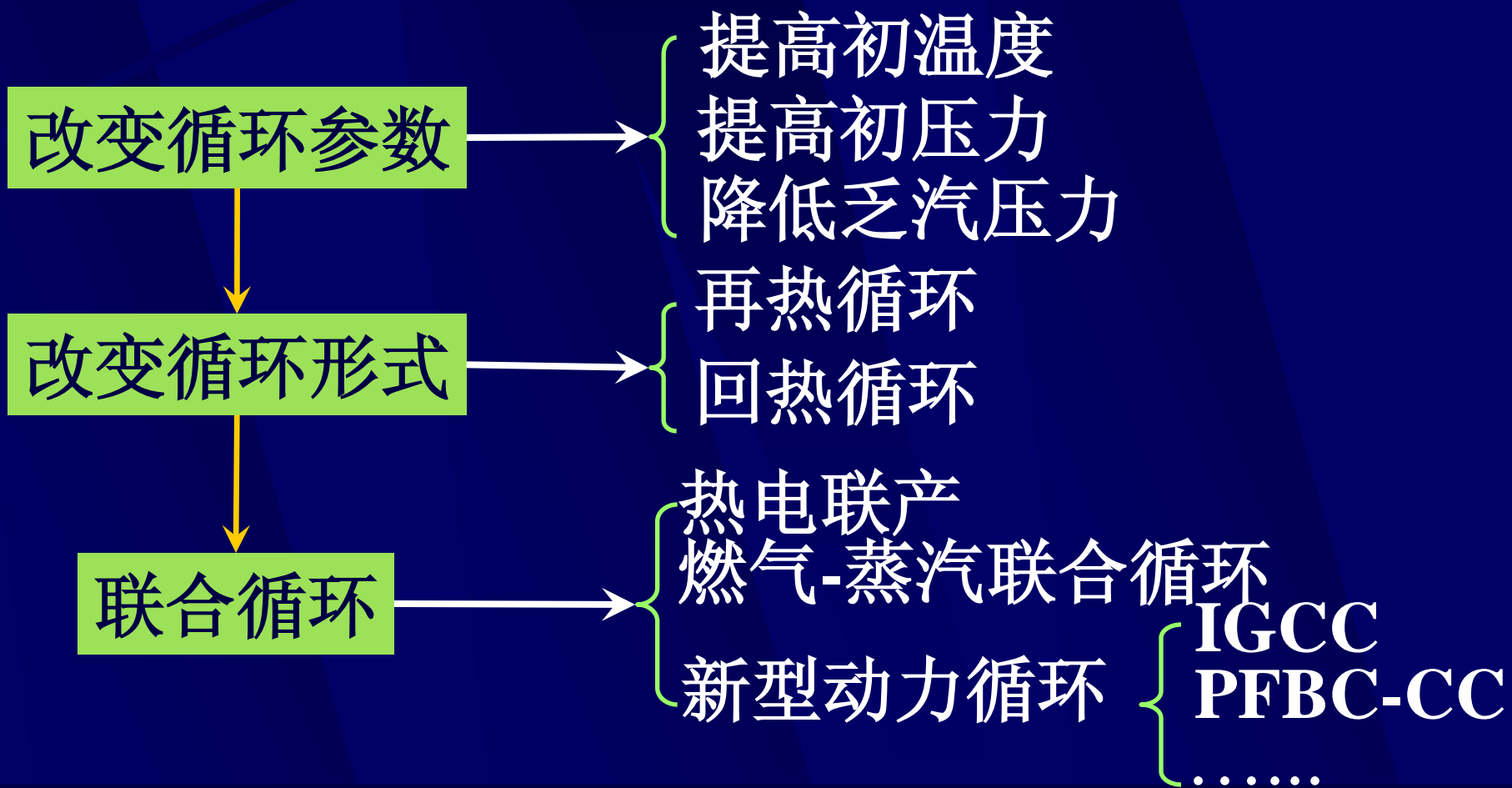


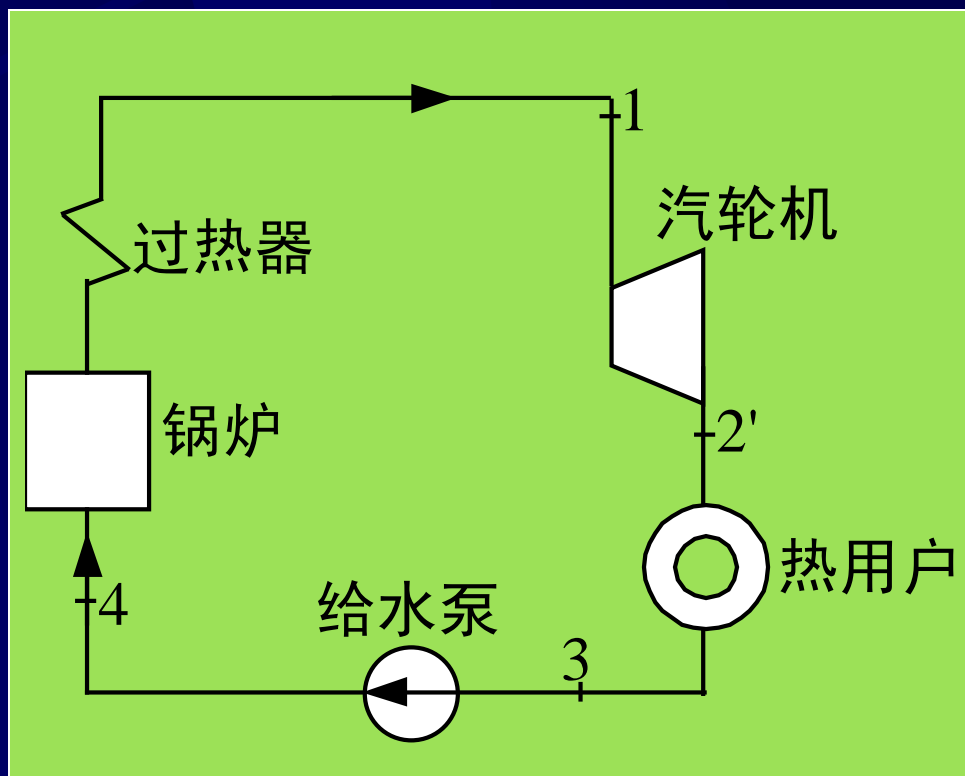
图1-9 100MW高压汽轮机组热力系统  
热平衡计算数据图

# 提高循环热效率的途径



## § 10-4 热电联产(供)循环

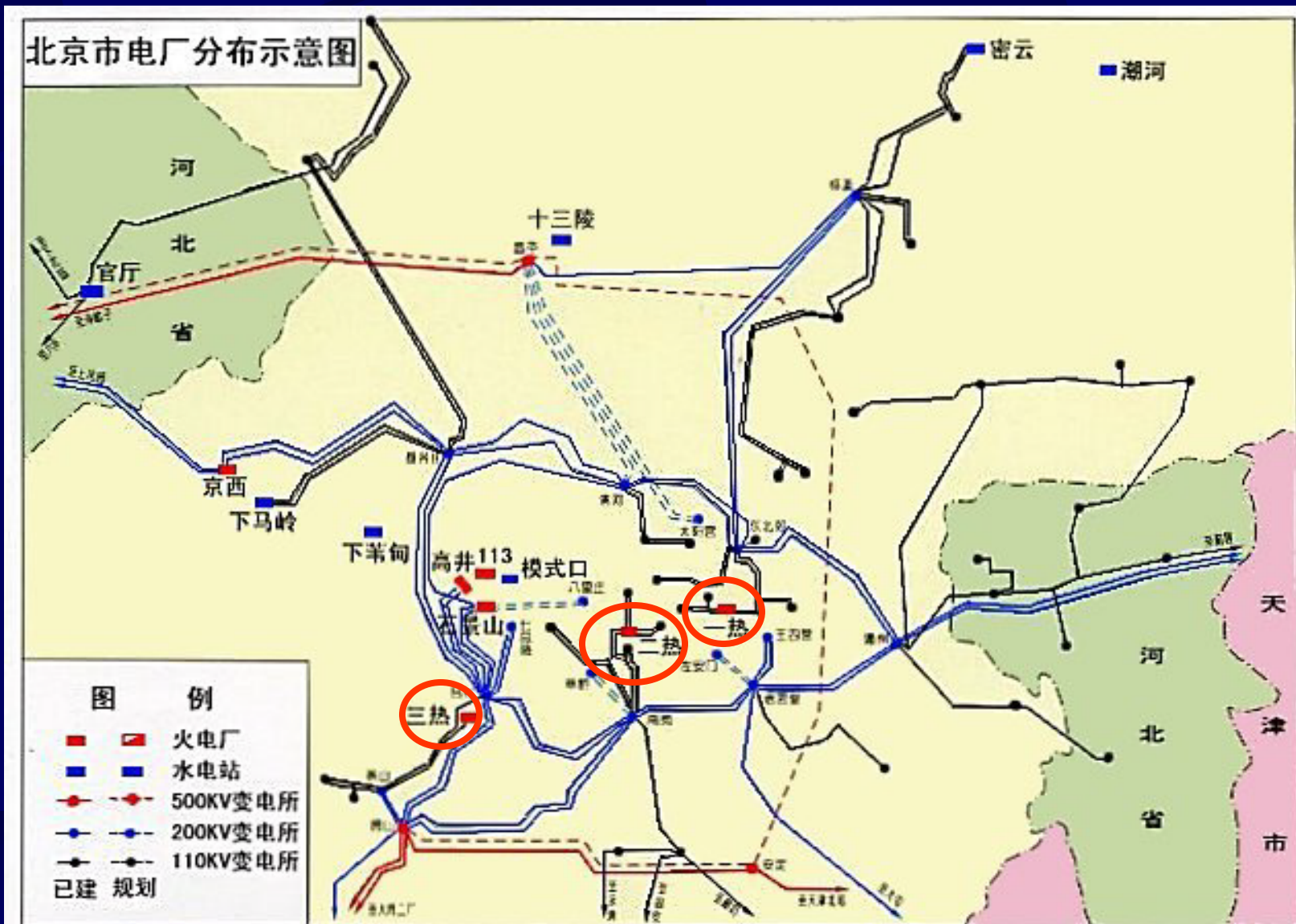
背压式机组(背压 $>0.1\text{MPa}$ )



用发电厂作了功的蒸汽的余热来满足热用户的需要，这种作法称为**热电联(产)供**。

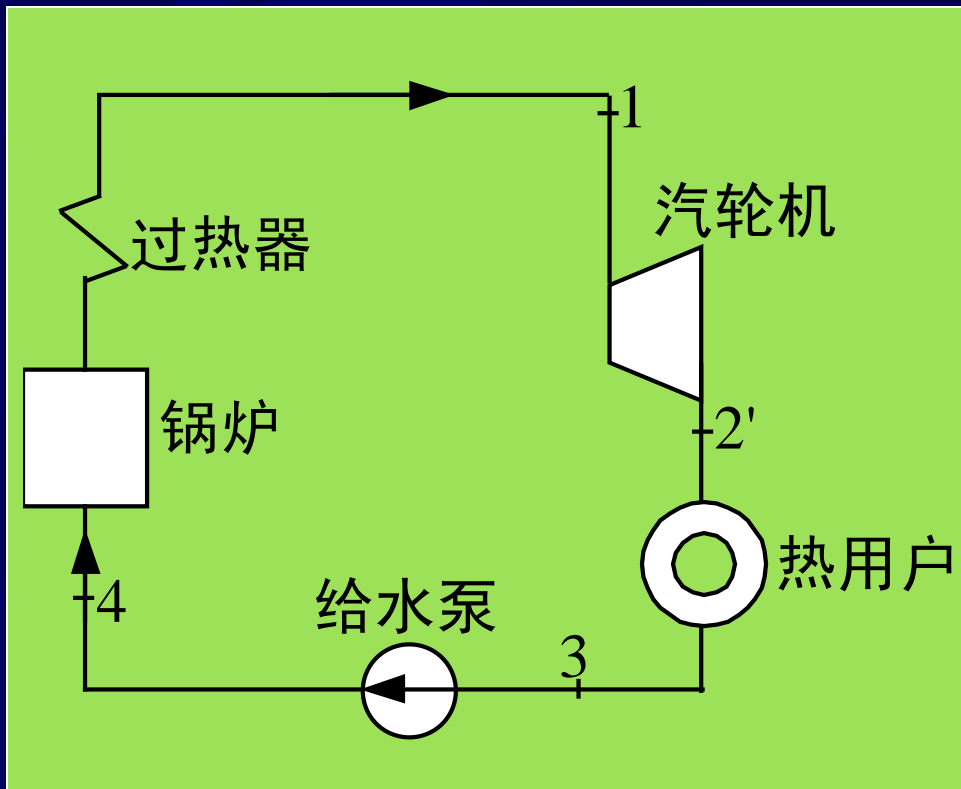
热用户为什么要用换热器而不直接用热力循环的水？

# 北京市电厂分布示意图





# 背压式热电联产(供)循环

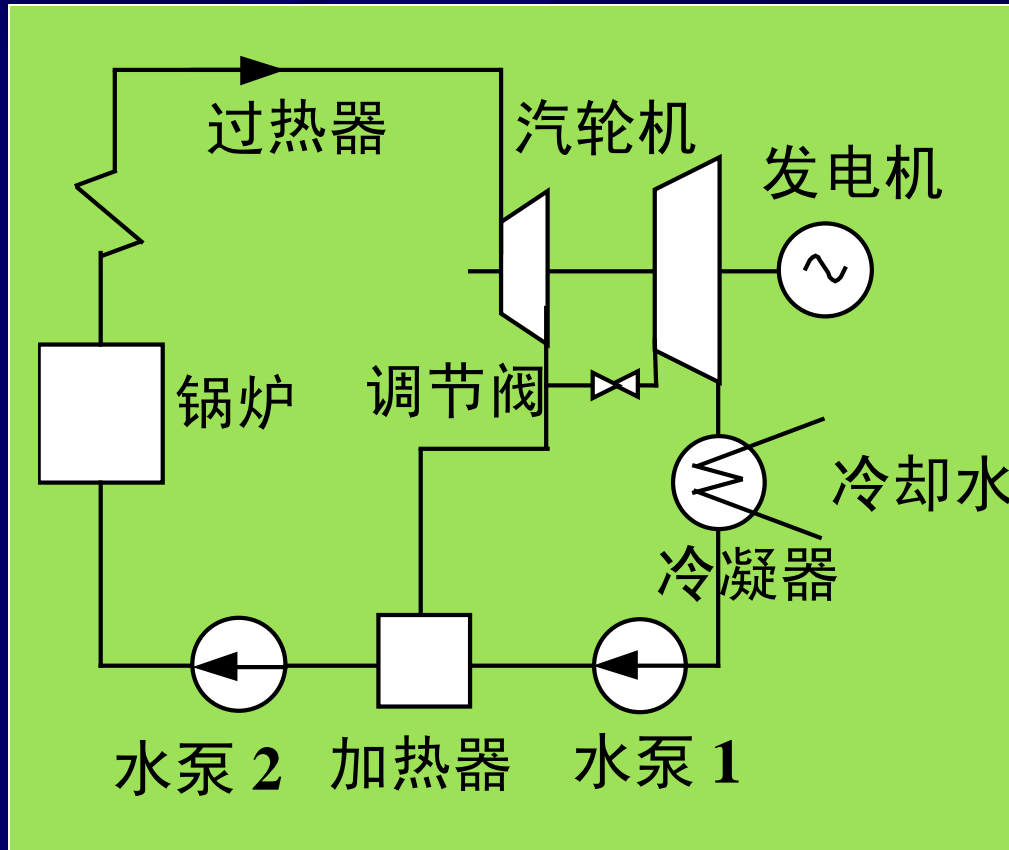


清华北门外2台  
背压式，  
5000kW电负荷

背压式缺点：

- 热电互相影响
- 供热参数单一

# 抽汽调节式热电联产(供)循环



抽汽式热电联供循环，可以自动调节热、电供应比例，以满足不同用户的需要。

# 热电联产(供)循环的经济性评价

- 只采用热效率  $\eta_t = \frac{W_{\text{net}}}{q_1}$  显然不够全面
- 能量利用系数，但未考虑热和电的品位不同

$$K = \frac{\text{已被利用的能量}}{\text{工质从热源得到的能量}} = \frac{q_{\text{供热}} + w_{\text{net}}}{q_1}$$

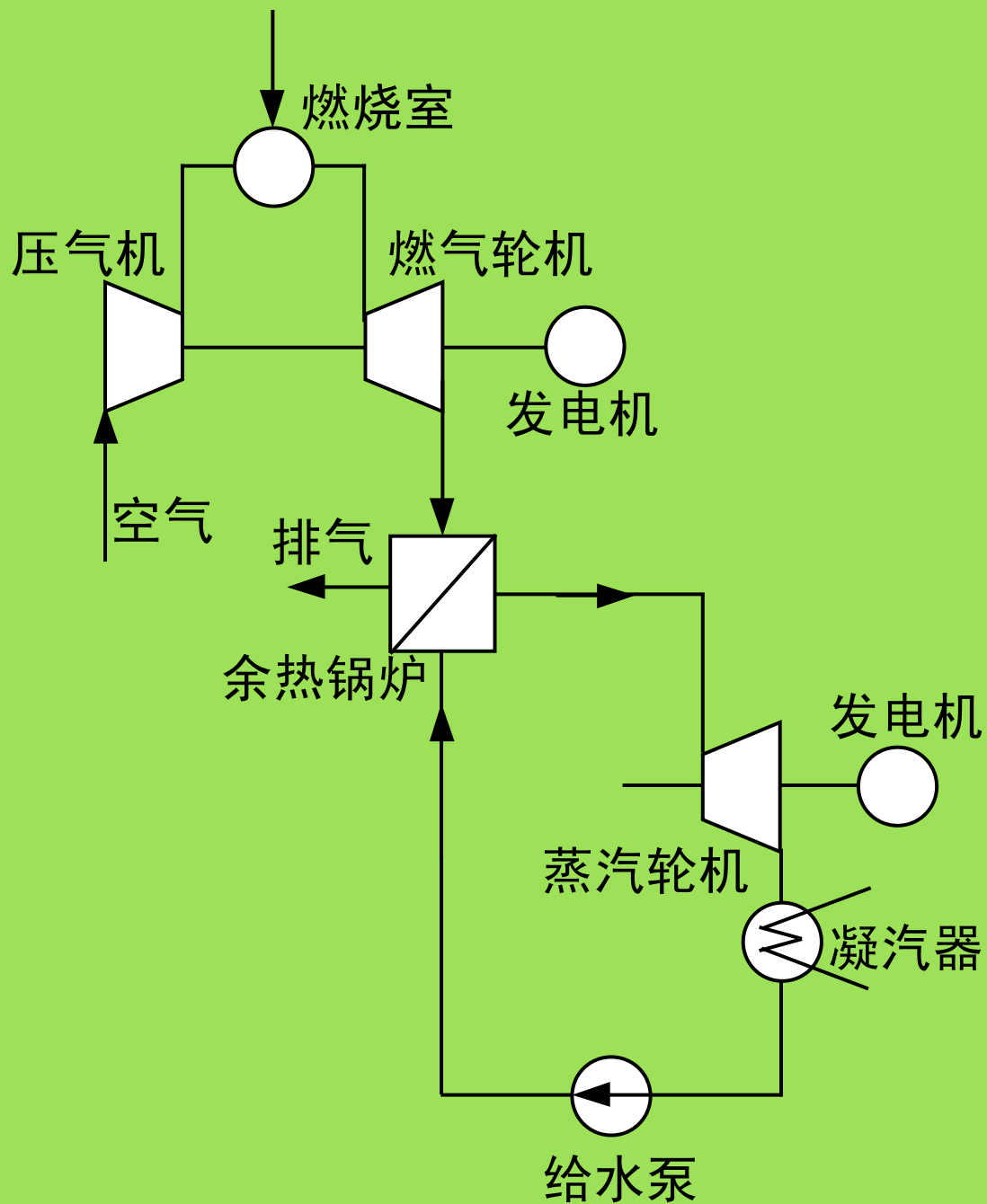
- *Ex*经济学评价
- 热电联产、集中供热是发展方向，经济环保



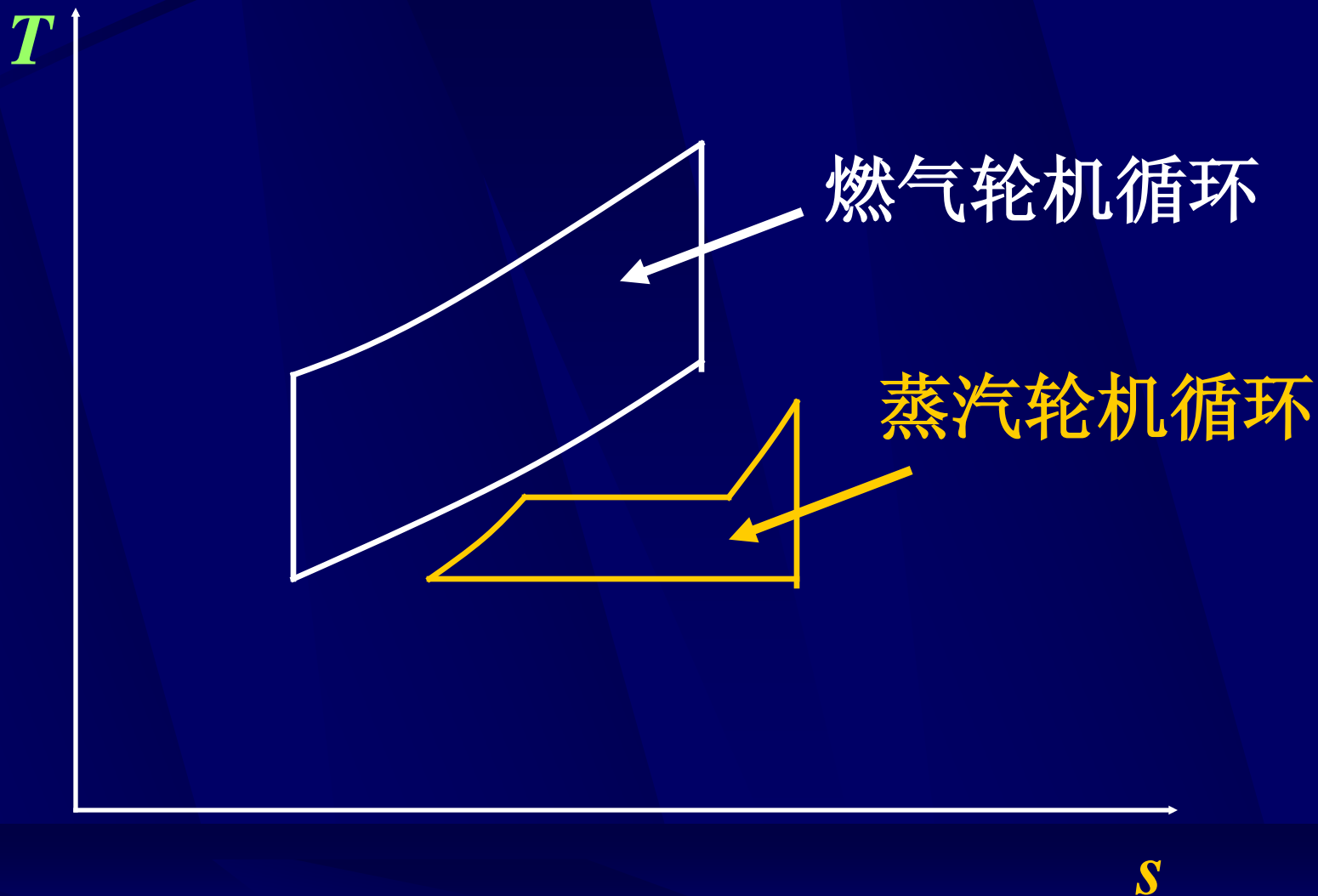
# 10-5 燃气-蒸汽联合循环

- 燃气轮机的发展
  - 热力参数与单机容量逐步提高，达  $W > 200\text{MW}$ ，热效率  $35\sim 41\%$ ；
  - 可靠性  $95\sim 98.5\%$ ，可作为基本负荷电站；
- 联合循环的现实可行性
  - 燃气轮机排气温度  $t_4 = 400\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ ；
  - 大功率机组排气量  $300\text{kg/s}$  以上；
  - 利用排气能量加热蒸汽轮机给水（取代锅炉），大大提高供电效率，极限效率（烧气）约  $58\%$ 。

# 燃气蒸汽联合循环



# 燃气蒸汽联合循环



# 燃气蒸汽联合循环

法国GEC Alsthom公司的联合循环电站

燃气轮机: **227.2 MW**

蒸汽轮机: **128.3 MW**

燃料: 天然气

热效率: **54.5%**

# 10-6 实际蒸汽动力装置的 $Ex$ 分析法

对于稳定流动

焓  $Ex$

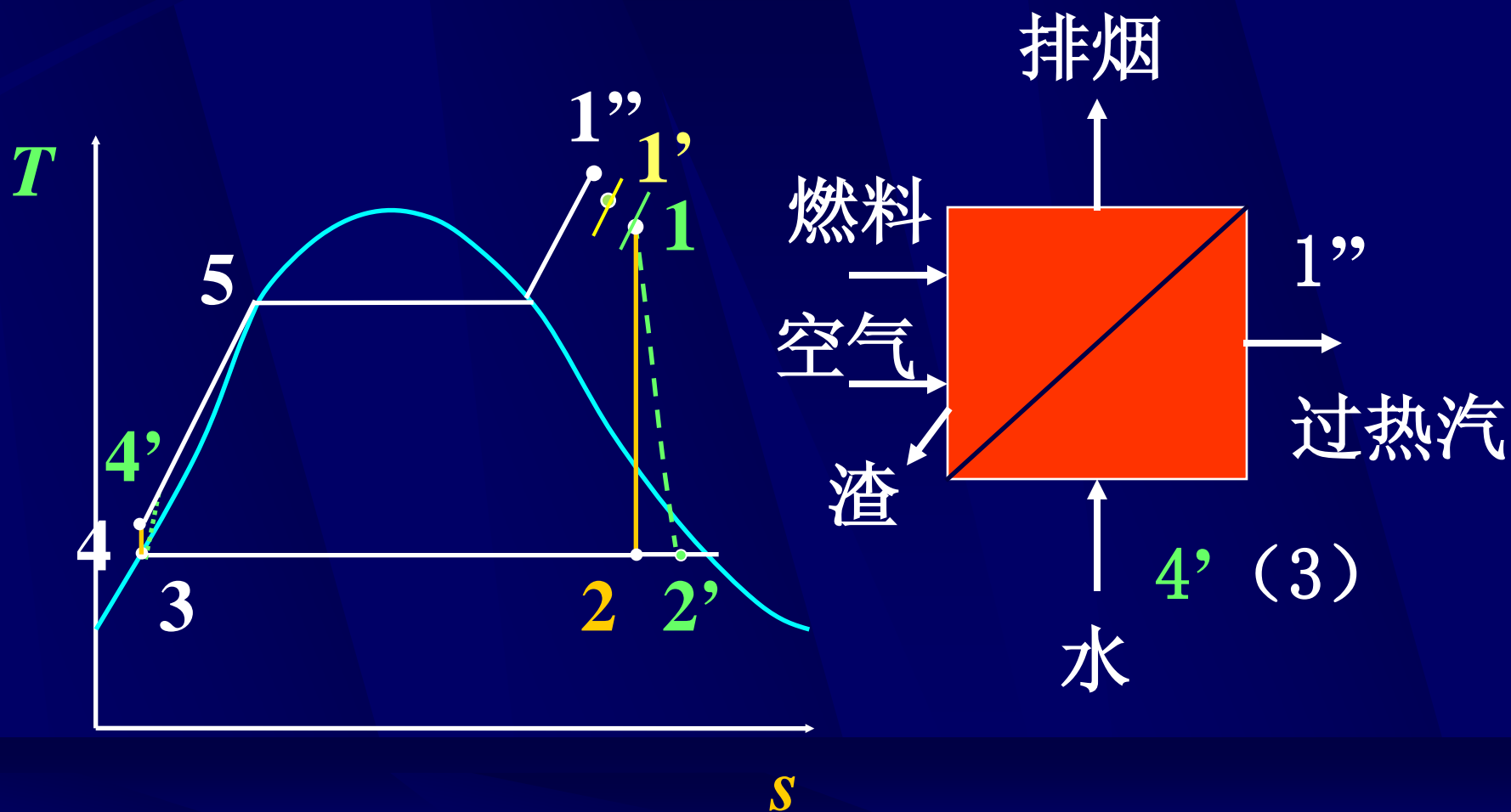
$$\sum Ex_{in} = \sum Ex_{out} + \sum \Pi_i$$

进入设备的  
 $Ex$  总和

离开设备的  
 $Ex$  总和

$Ex$  损失之和

# 锅炉的 $Ex$ 分析



# 锅炉的 $Ex$ 分析（燃烧）

空气

$$Ex = 0$$

以环境为基准

燃料

$$ex_{q_f} = q_f$$

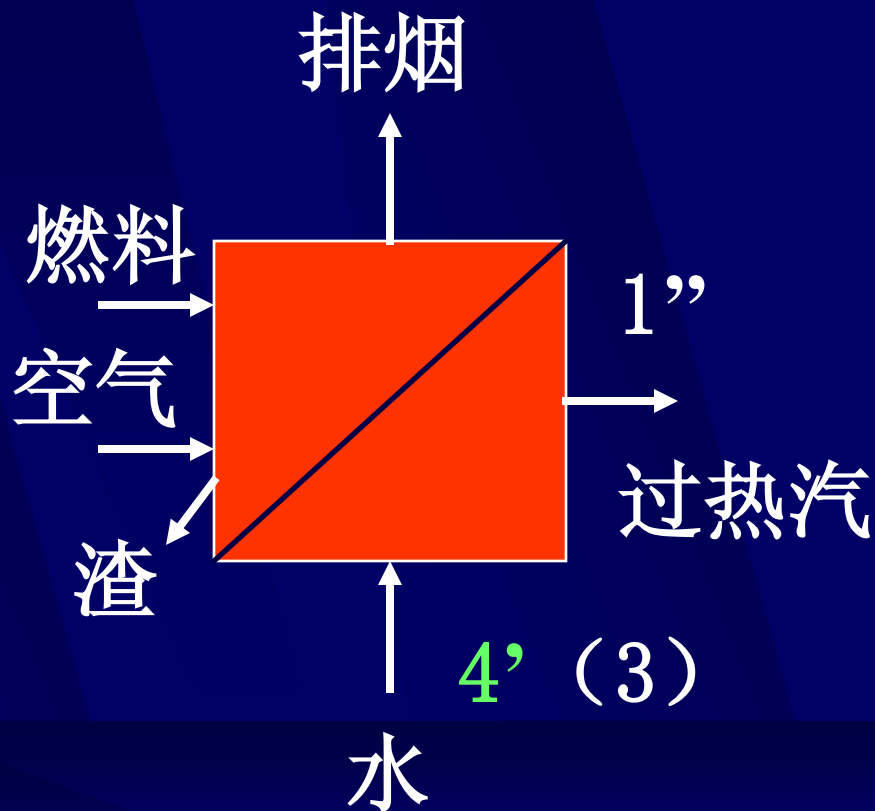
设燃料完全是 $Ex$

## (1) 燃烧，烟气热量

$$ex_{\text{燃烧}} = q_f \left( 1 - \frac{T_0}{T_B} \right)$$

平均燃烧温度

$$\pi_{\text{燃烧}} = q_f - q_f \left( 1 - \frac{T_0}{T_B} \right)$$



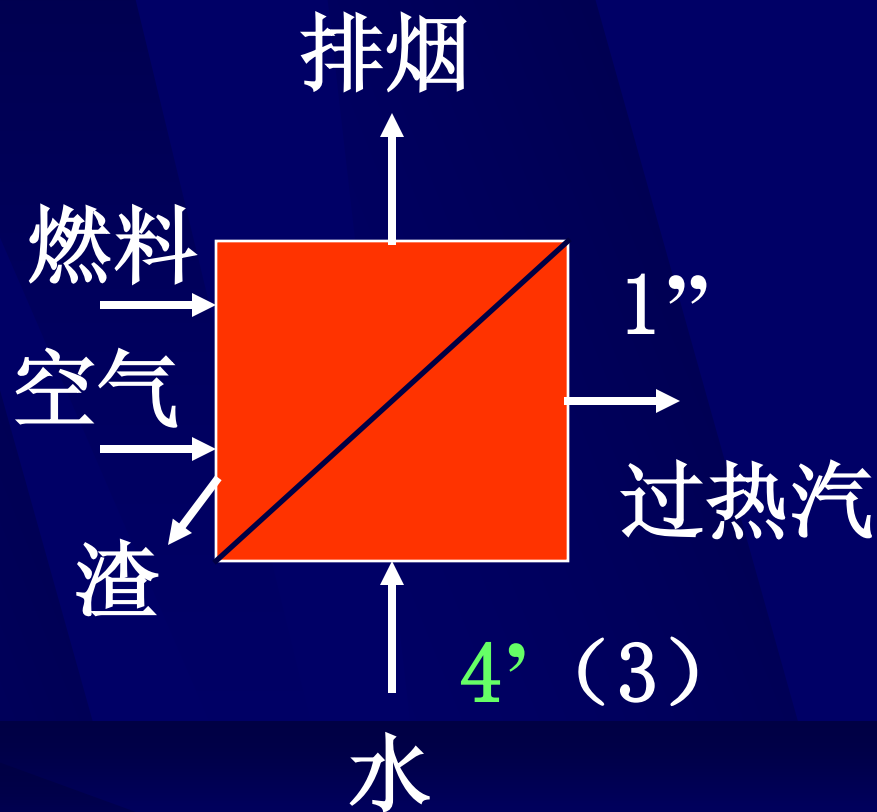


# 锅炉的 $Ex$ 分析（散热）

(2) 排烟，渣，散热后，可传给水的是 $ex$

$$ex_{\text{散热后}} = q_f \left( 1 - \frac{T_0}{T_B} \right) \eta_B$$

$$\pi_{\text{散热}} = q_f \left( 1 - \frac{T_0}{T_B} \right) - q_f \left( 1 - \frac{T_0}{T_B} \right) \eta_B$$



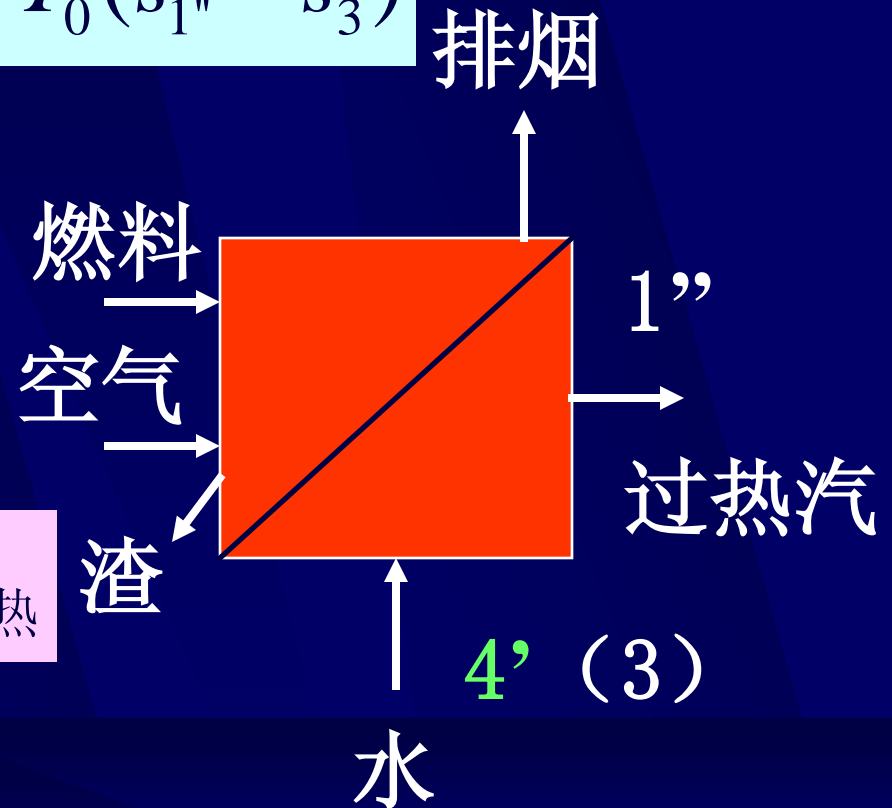
# 锅炉的 $Ex$ 分析（传热）

(3) 传热，水的温度远比燃气低，温差传热  
水得到的 $ex$

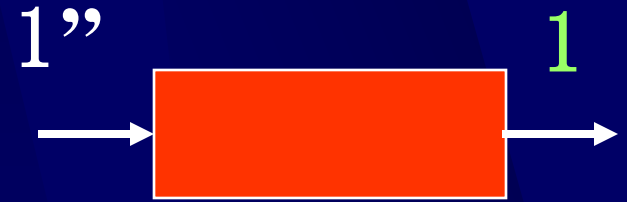
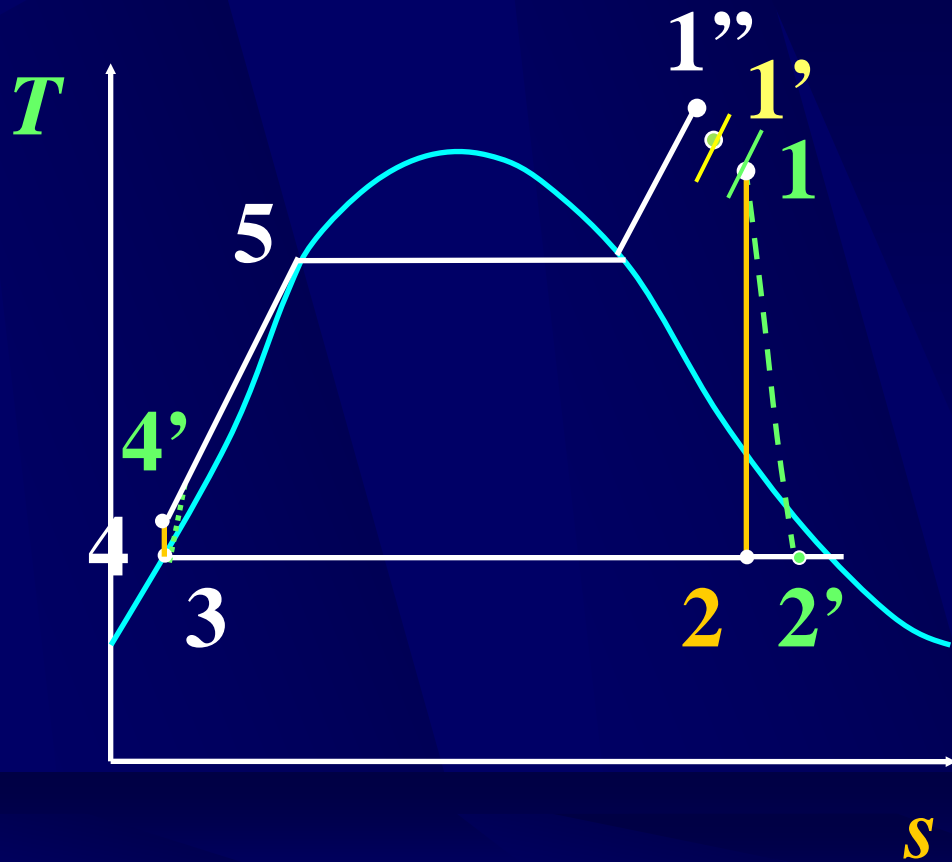
$$ex_{h_1''} - ex_{h_3} = (h_1'' - h_3) - T_0(s_1'' - s_3)$$

$$\pi_{\text{传热}} = q_f \left( 1 - \frac{T_0}{T_B} \right) \eta_B - [(h_1'' - h_3) - T_0(s_1'' - s_3)]$$

$$\pi_{\text{锅炉}} = \pi_{\text{燃烧}} + \pi_{\text{散热}} + \pi_{\text{传热}}$$



# 管道和汽机主汽门节流的 $Ex$ 分析



# 管道和汽机主汽门节流的 $Ex$ 分析

汽机入口 $ex$

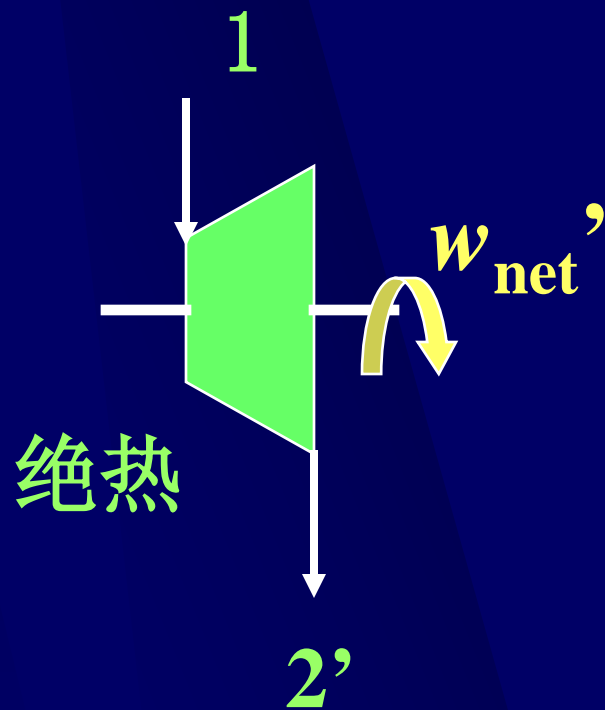
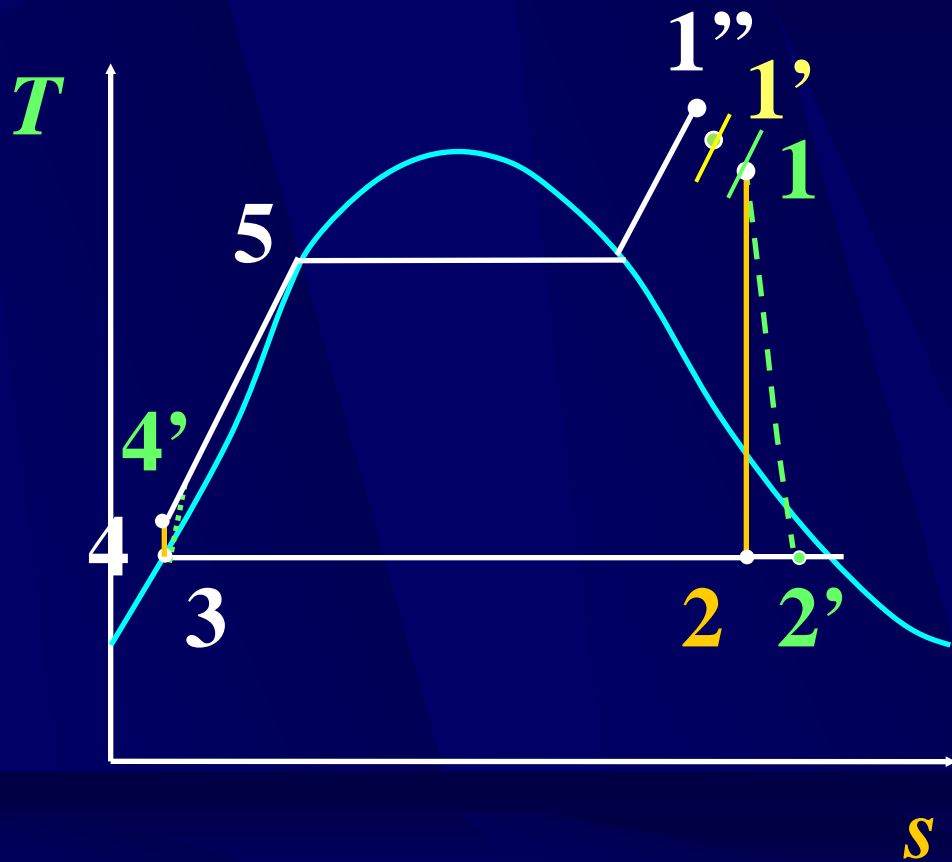
$$ex_{h_1} = (h_1 - h_0) - T_0(s_1 - s_0)$$

管道和主汽门的 $ex$ 损失

$$\pi_{\text{管道}} = (h_{1''} - h_1) - T_0(s_{1''} - s_1)$$



# 汽轮机的Ex分析



# 汽轮机的 $Ex$ 分析

## 汽轮机最大可能做功

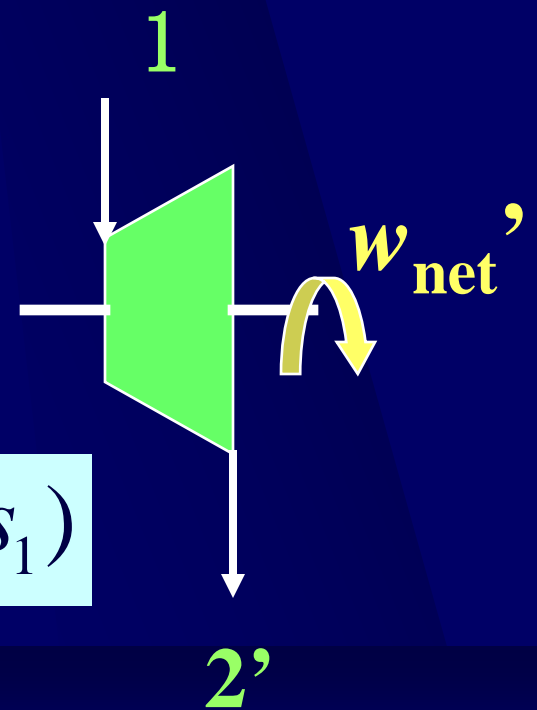
$$w_{\text{net}} = ex_{h_1} - ex_{h_2'} = (h_1 - h_2') - T_0(s_1 - s_2')$$

## 汽轮机实际输出功

$$w_{\text{net}}' = h_1 - h_2'$$

## 汽轮机的 $ex$ 损失

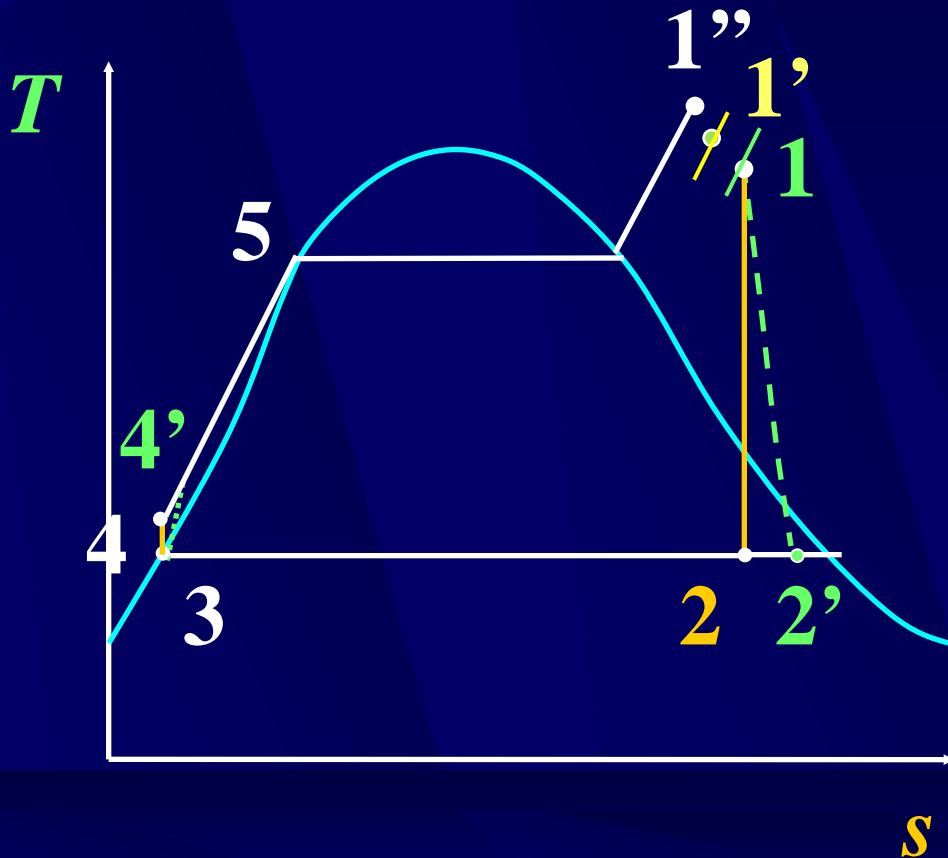
$$\pi_{\text{汽机}} = w_{\text{net}} - w_{\text{net}}' = T_0(s_2' - s_1)$$



# 冷凝器的 $Ex$ 分析

## 冷凝器的 $ex$ 损失

$$\pi_{\text{冷凝器}} = ex_{2'} - ex_3 = (h_{2'} - h_3) - T_0 (s_{2'} - s_3)$$



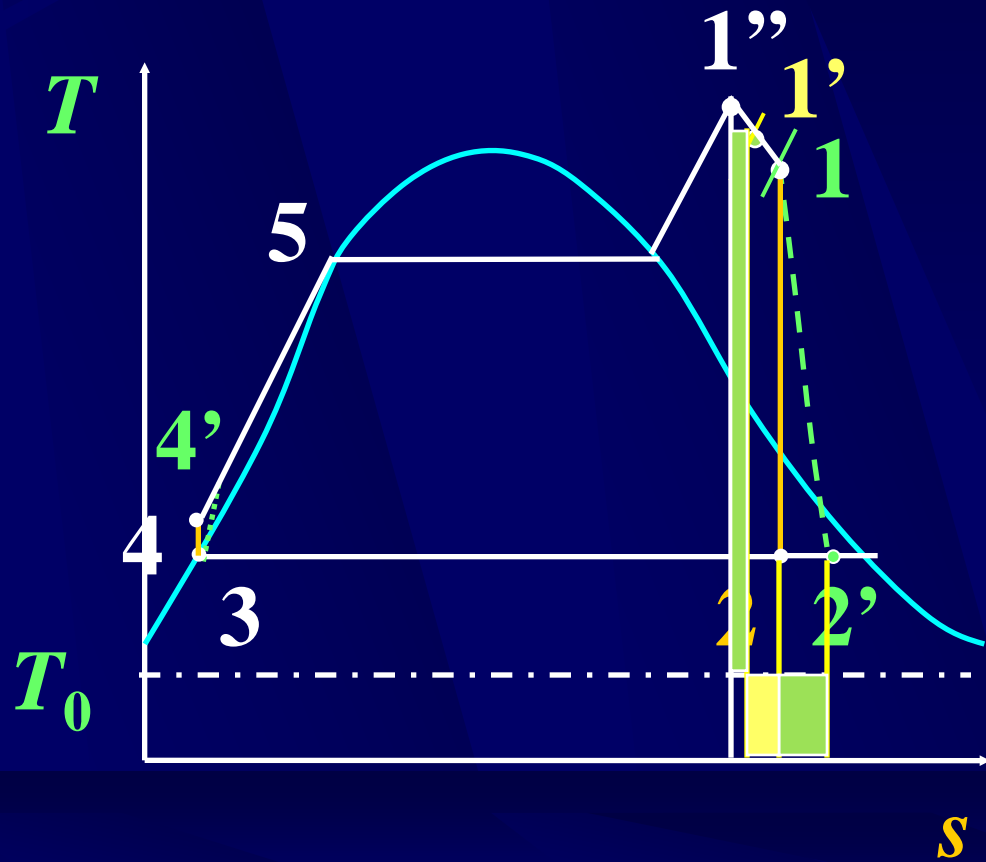
# 两种分析方法的比较

	热效率法	$Ex$ 分析法
锅炉	$q_B/q_f=10\%$	$\pi_B/ex_{,qf}=56.7\%$ (燃烧14.1%排烟及散热 8.6%传热34%)
管道	$q_{tu}/q_f=0.6\%$	$\pi_{tu}/ex_{,qf}=0.5\%$
汽轮机	$q_t/q_f=0$	$\pi_t/ex_{,qf}=5.6\%$
凝汽器	$q_c/q_f=55.7\%$	$\pi_c/ex_{,qf}=3.5\%$

$Ex$  经济学分析方法



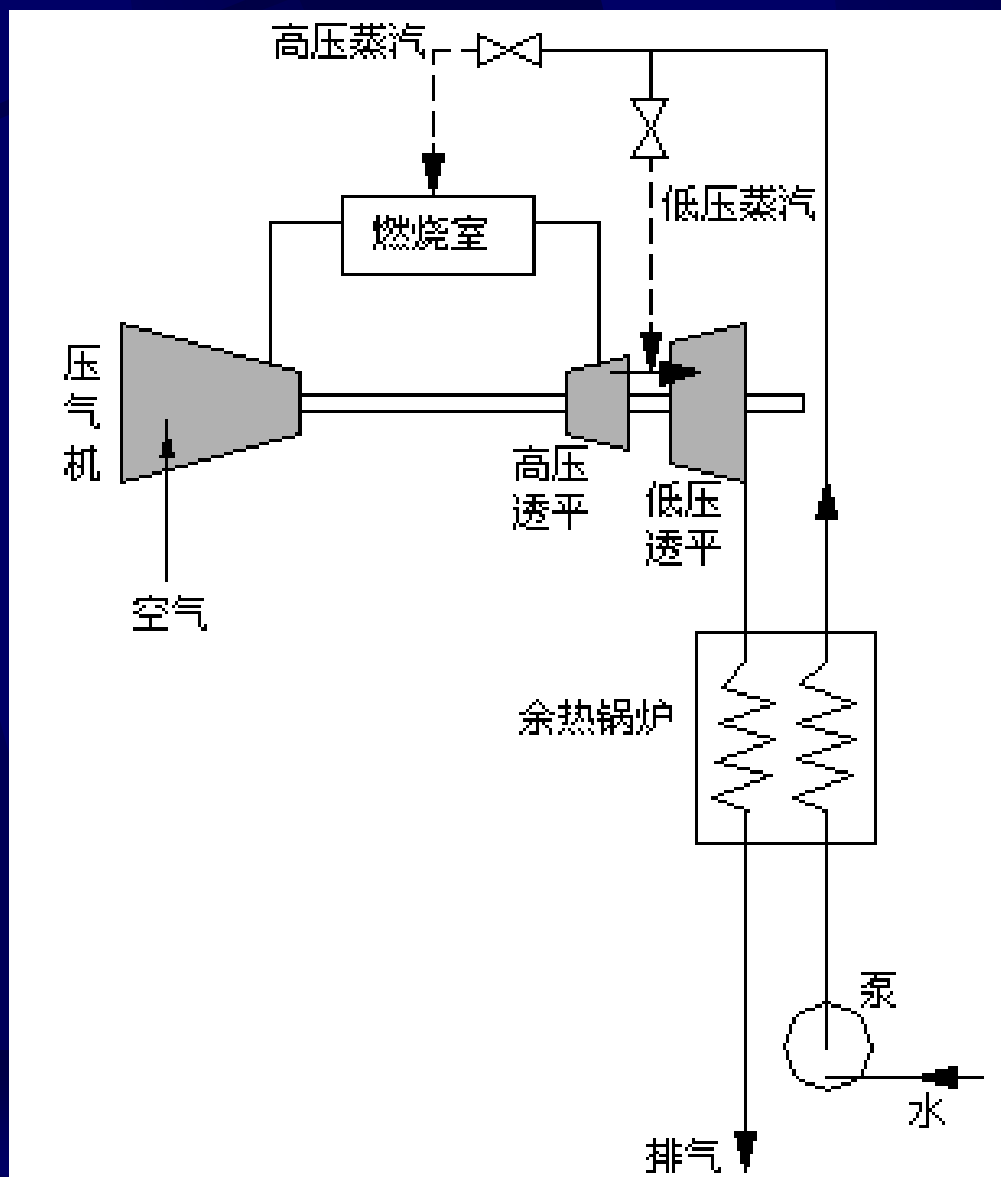
# Ex损失的表示



# § 10-7 现代新型动力循环

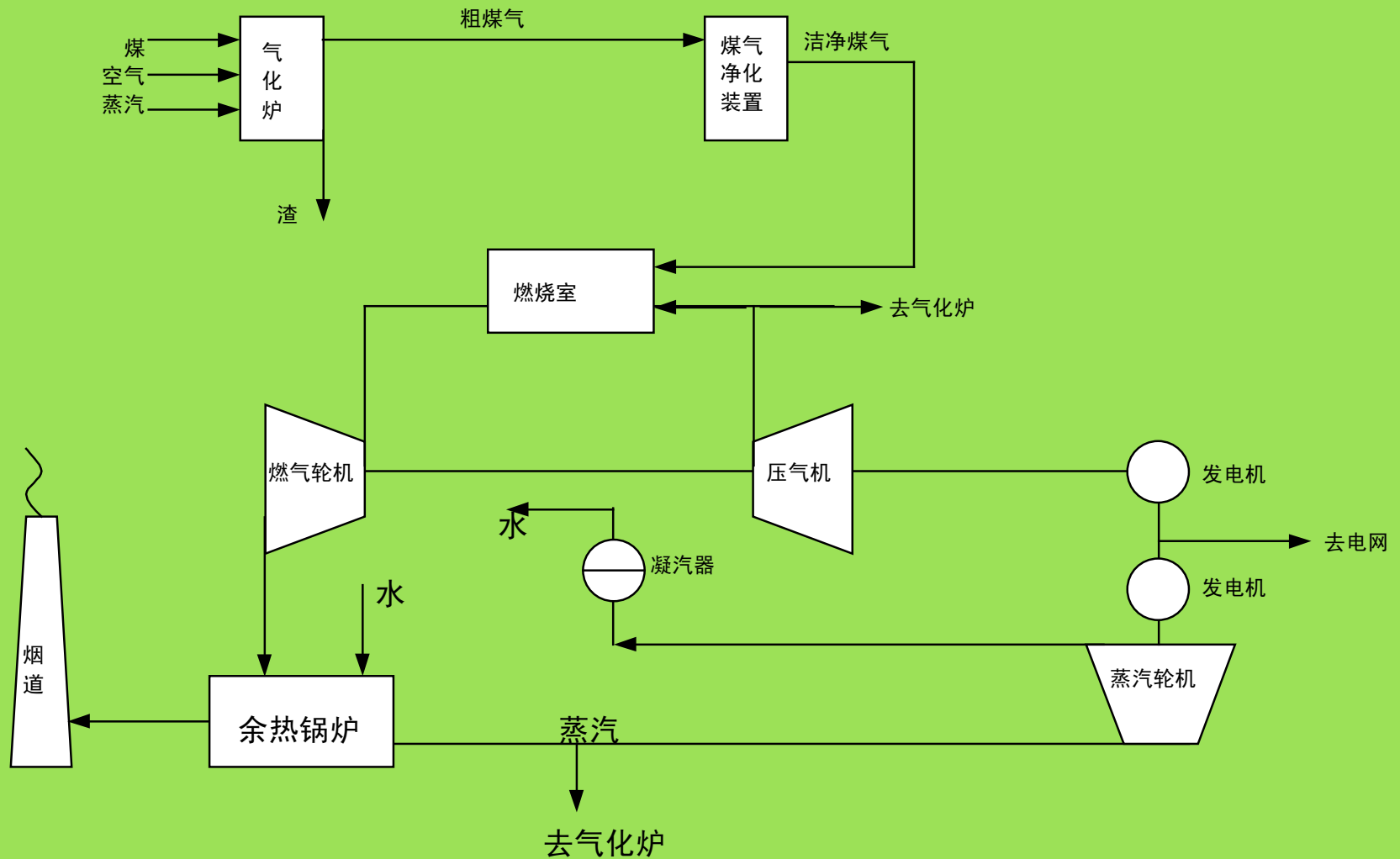
- 蒸汽电站提高电厂供电效率的措施：
  - 提高初参数，向亚临界和超临界发展；
  - 采用大功率机组，降低厂用电率；
  - 采用热电联供。
- 火电厂发展现状
  - 占总装机容量的80%左右，效率37~40%；
  - 耗煤占总产量30%，油占10%左右；
  - 提高供电效率和改善环境有重要意义。

# 注蒸汽燃气循环(陈式循环)



# 整体煤气化联合循环

(IGCC---Integrated Gasification Combined Cycle)



# 整体煤气化联合循环(IGCC)

- 工作流程
  - 气化炉中煤→煤气；
  - 煤气的净化；
  - 燃气轮机循环；
  - 余热锅炉回收排气热量；
  - 蒸汽轮机循环

# 整体煤气化联合循环(IGCC)

## • 优点

- 热效率高，目前**40~46%**，预计可**52%**；
- 环保性能好，**SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>**，粉尘排放低，可燃用高硫煤；
- 可实现煤化工综合利用，生产硫、硫酸、甲醇、尿素等；
- 单机功率可达**300~400MW**

## • 缺点

- 目前煤气化和净化的热损失还偏大；
- 初期投资大。

# 整体煤气化联合循环(IGCC)

## 应用

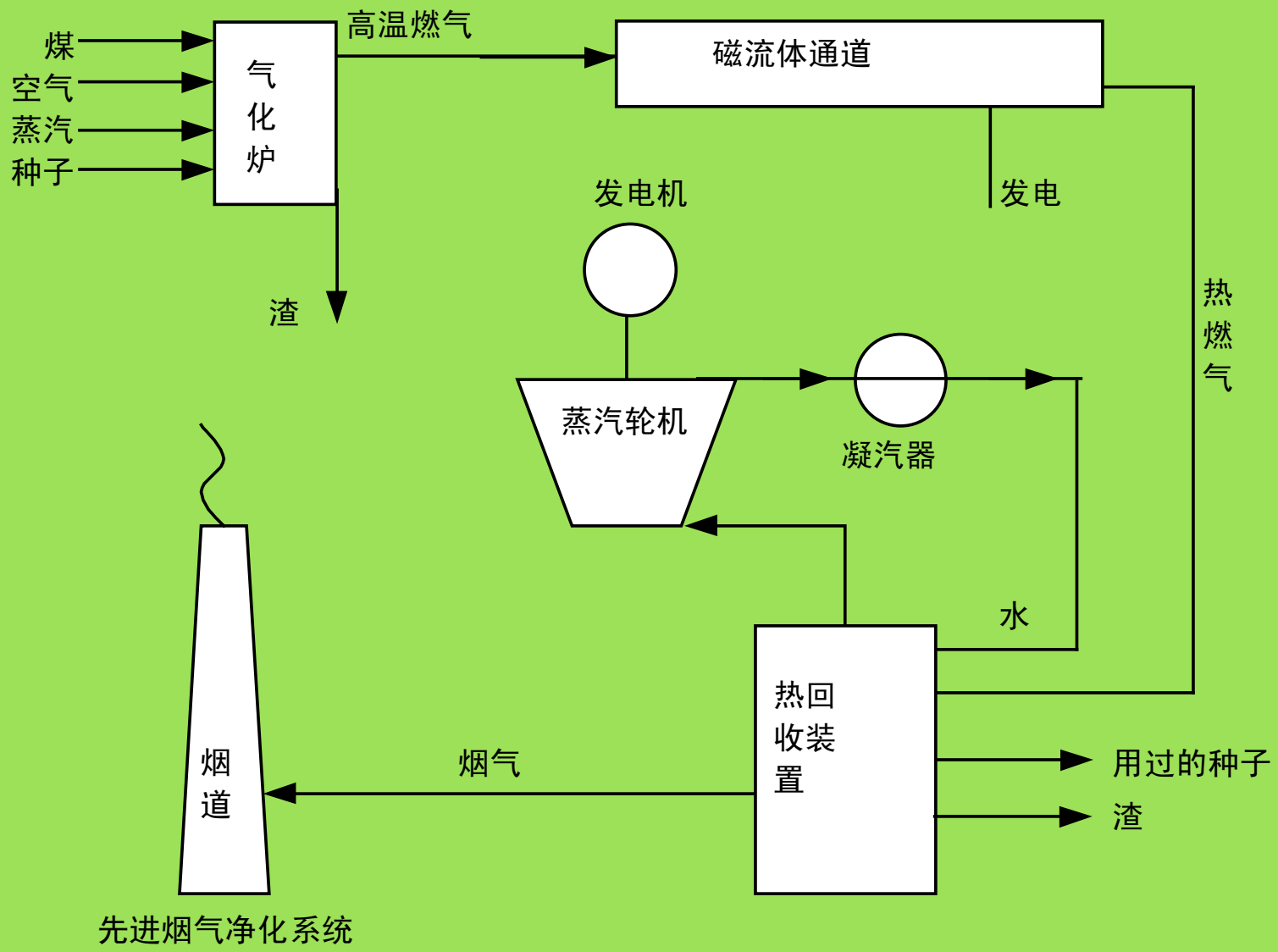
- 目前已建成或拟建的IGCC电站10余座，美国预测，2030年IGCC市场份额达35%左右
- 如美国加州有一个电站，“世界上最洁净的燃煤火电站，脱硫98-99%，产生元素硫，排渣中主要是Al、Si、Fe、Ca等无害元素，用于绝缘材料和筑路材料

# 其它新型煤气化联合循环

- 增压流化床燃烧联合循环 (**PFBC-CC**)  
(Fluidized Bed Combustion Cycle)
- 外燃式燃煤联合循环 (**EFCC**)  
(Externally Coal-Fired Combined Cycle)
- 直接燃煤联合循环 (**DFCC**)  
(Directly Coal-Fired Combined Cycle)



# 磁流体发电联合循环



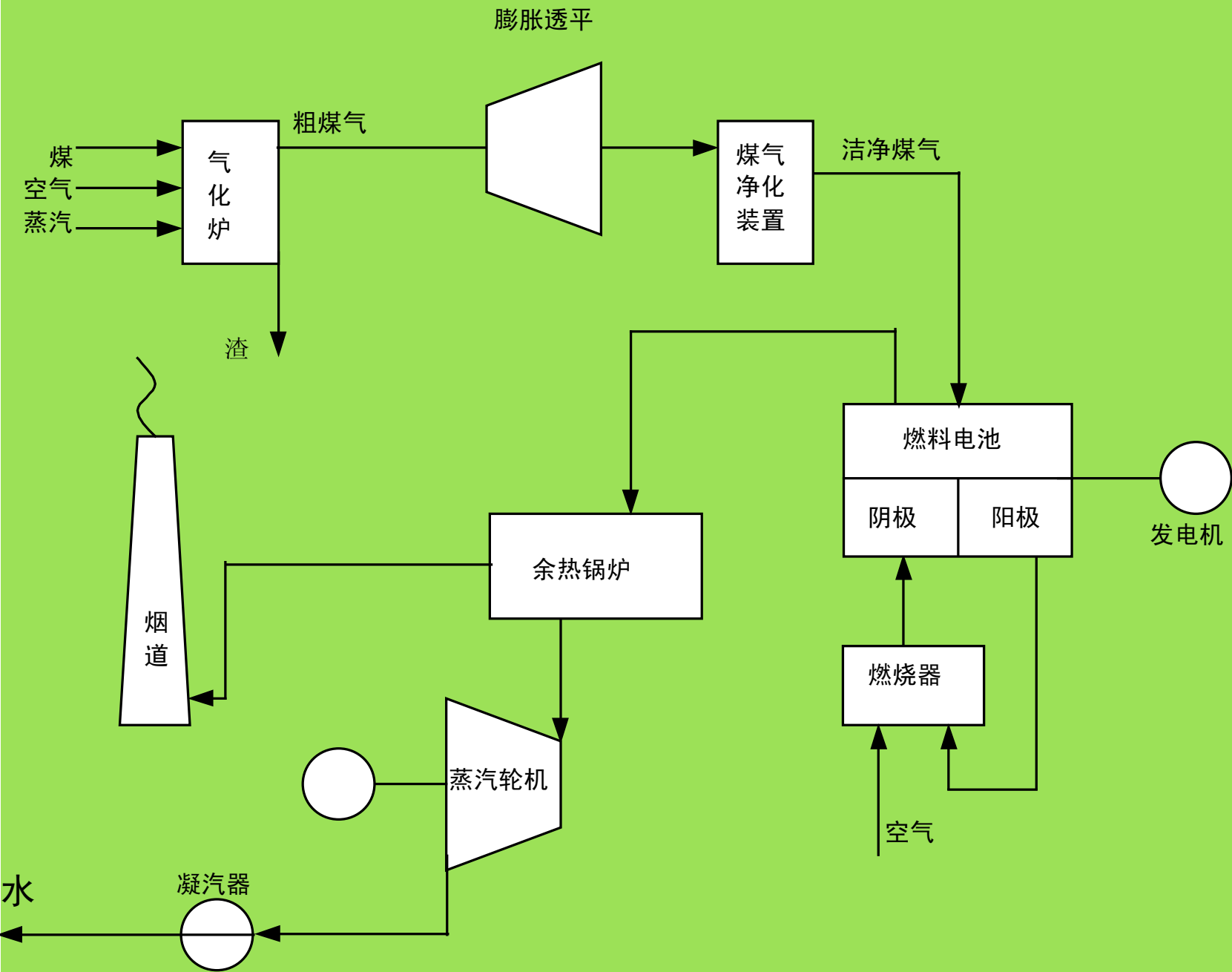
# 磁流体发电联合循环(MHD-CC)

(Magnetohydrodynamics  
Combined Cycle)

## 特点:

- 1、无运动机械，热转变为电不经机械能
- 2、温度**3000K**，热效率可达**60%**
- 3、污染小、种子（钾、铯化合物）有脱硫作用
- 4、目前实验室阶段

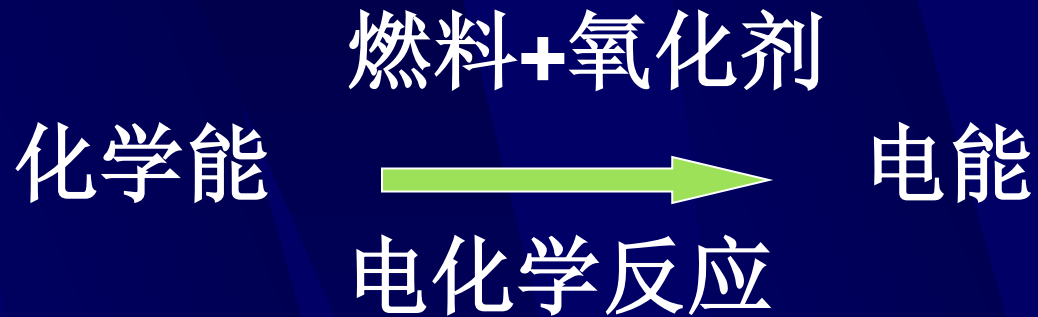
# 整体煤气化燃料电池联合循环



# 整体煤气化燃料电池联合循环 (IGFC-CC)

## Integrated Gasification Fuel Cell Combined Cycle

燃料电池:

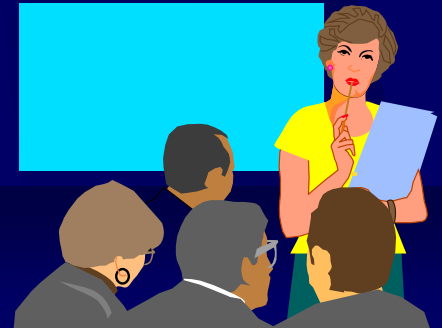


分类: 熔融碳酸盐型(MCFC)  
磷酸盐型 (PAFC)  
固体氧化剂型(SOFC)

特点: 高效60%、洁净、排放接近0  
目前试验室阶段

# 第七章 小结

- 1、熟悉郎肯循环图示与计算
- 2、郎肯循环与卡诺循环
- 3、蒸汽参数对朗肯循环热效率的影响
- 4、再热、回热原理及计算



# 第十一章 完

