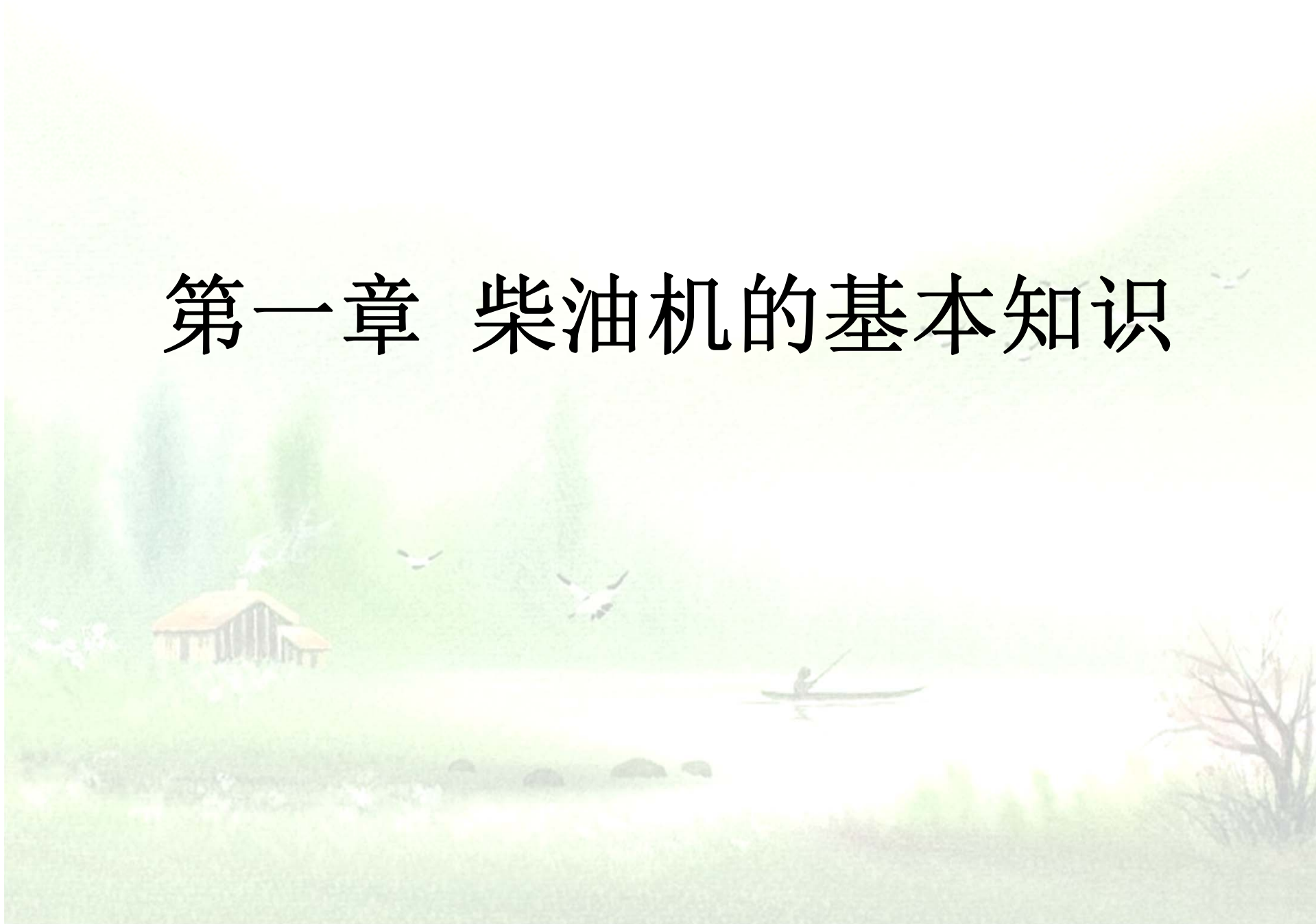


# 第一章 柴油机的基本知识



## 本章主要内容

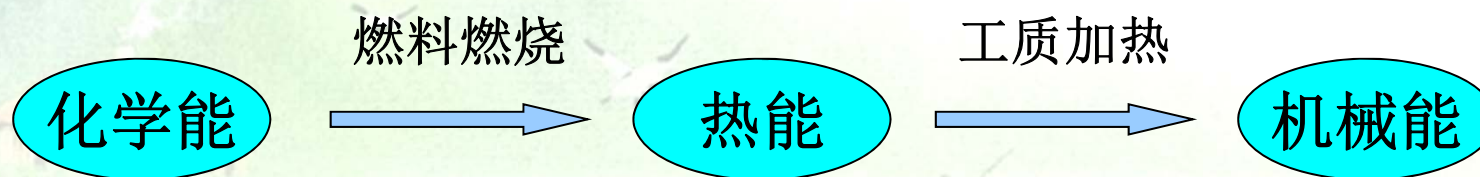
- 1.1 柴油机的工作原理
- 1.2 柴油机的热力循环
- 1.3 柴油机的性能指标
- 1.4 柴油机的分类和发展

## 1.1 柴油机的工作原理

### 一、基本概念

#### ❖ 热机、外燃机及内燃机的定义及关系

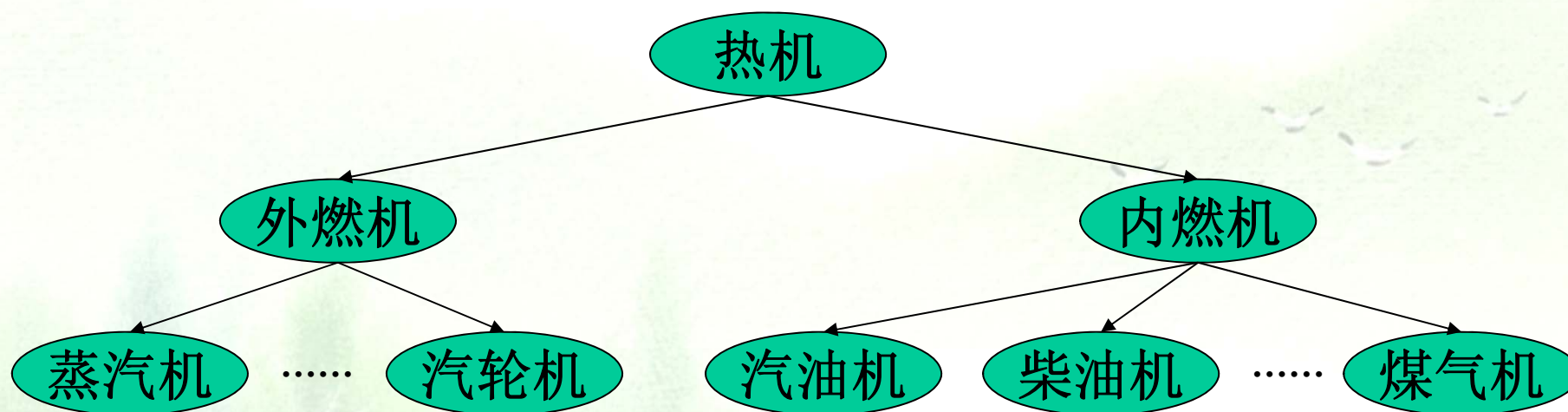
- 热机——将燃料燃烧所产生的热能转变为机械能的装置



根据燃料燃烧过程所处地点不同，热机又分为外燃机和内燃机两大类。

- 外燃机——燃料的燃烧和热能的释放都在发动机气缸外部发生，水蒸气被用来作为热能转为机械能的工质的热机，如蒸汽机、汽轮机等。
- 内燃机——燃料直接在发动机气缸内部进行燃烧，且发动机的工质就是燃料燃烧产物的热机，如汽油机、柴油机、煤气机及燃气轮机等。





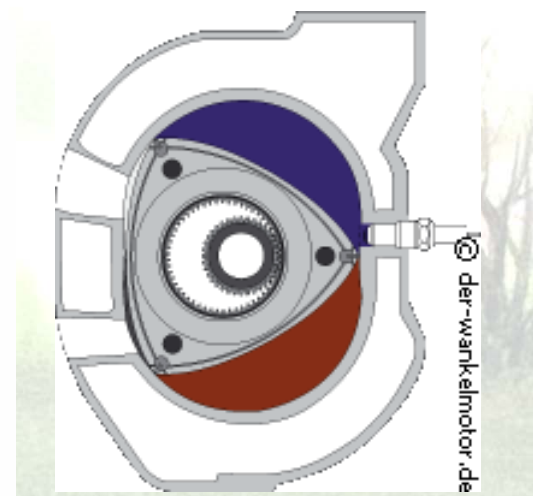
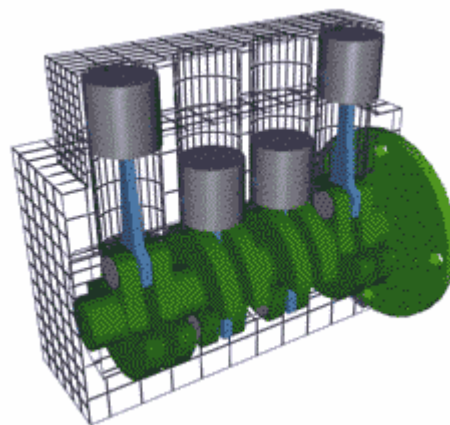
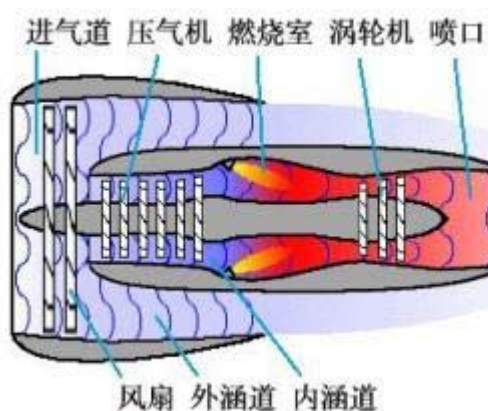
## ❖ 内燃机的分类

a. 内燃机结构型式很多，根据基本工作原理可分为：

活塞式内燃机和燃气轮机两大类

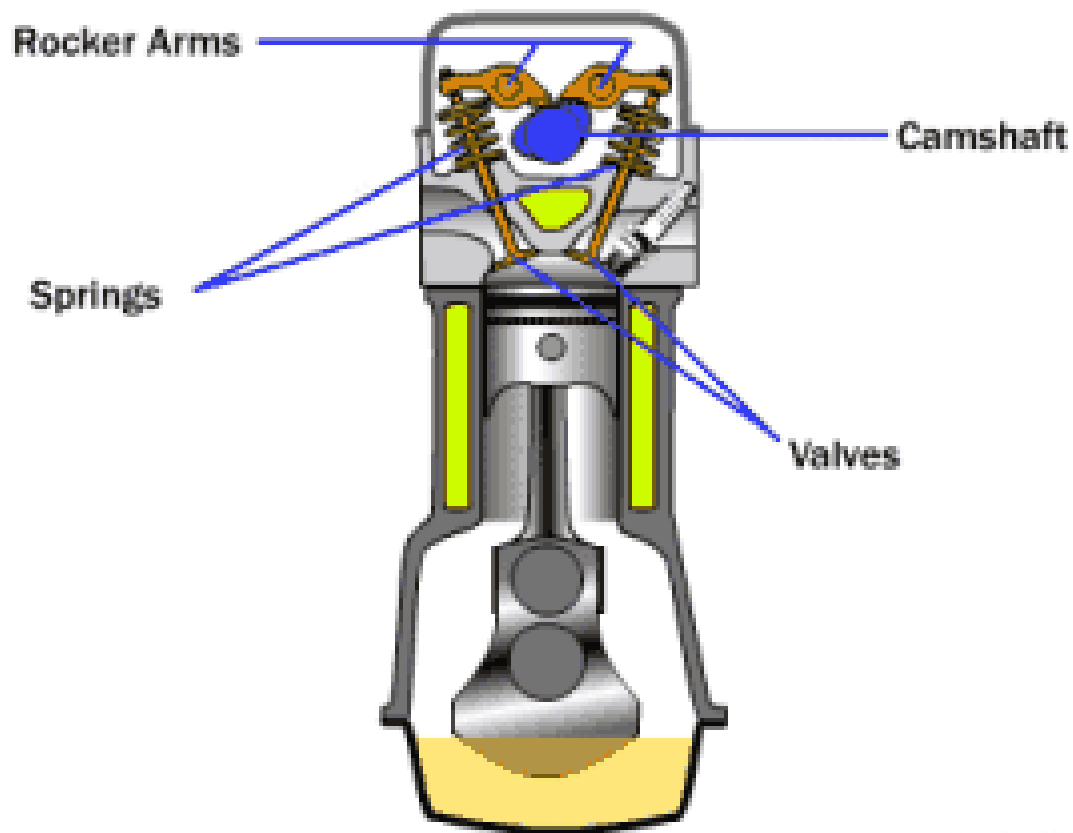
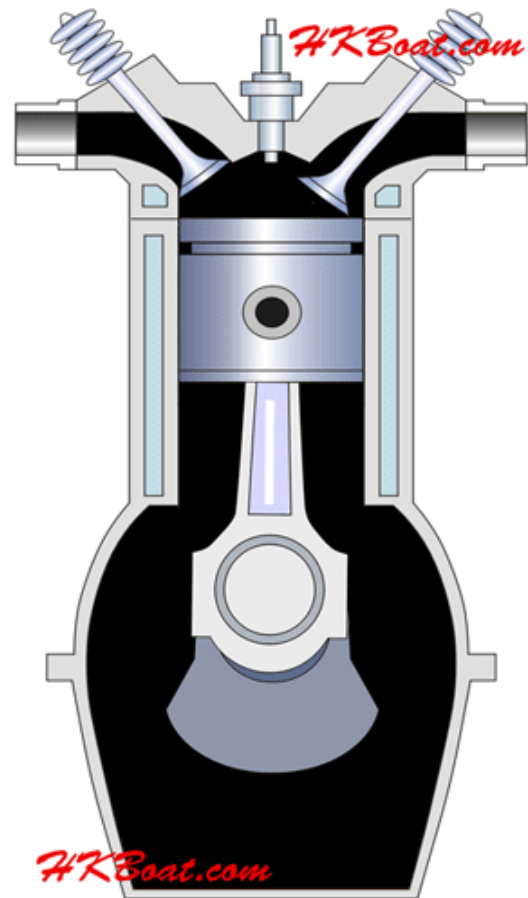
活塞式内燃机按活塞运动方式又可分为往复活塞式内燃机和旋转活塞式内燃机。

其中，以往复活塞式内燃机的使用最为广泛，所以常讲的“内燃机”系指这种形式。



b. 按着火方式可分为:

压燃式内燃机与点燃式内燃机

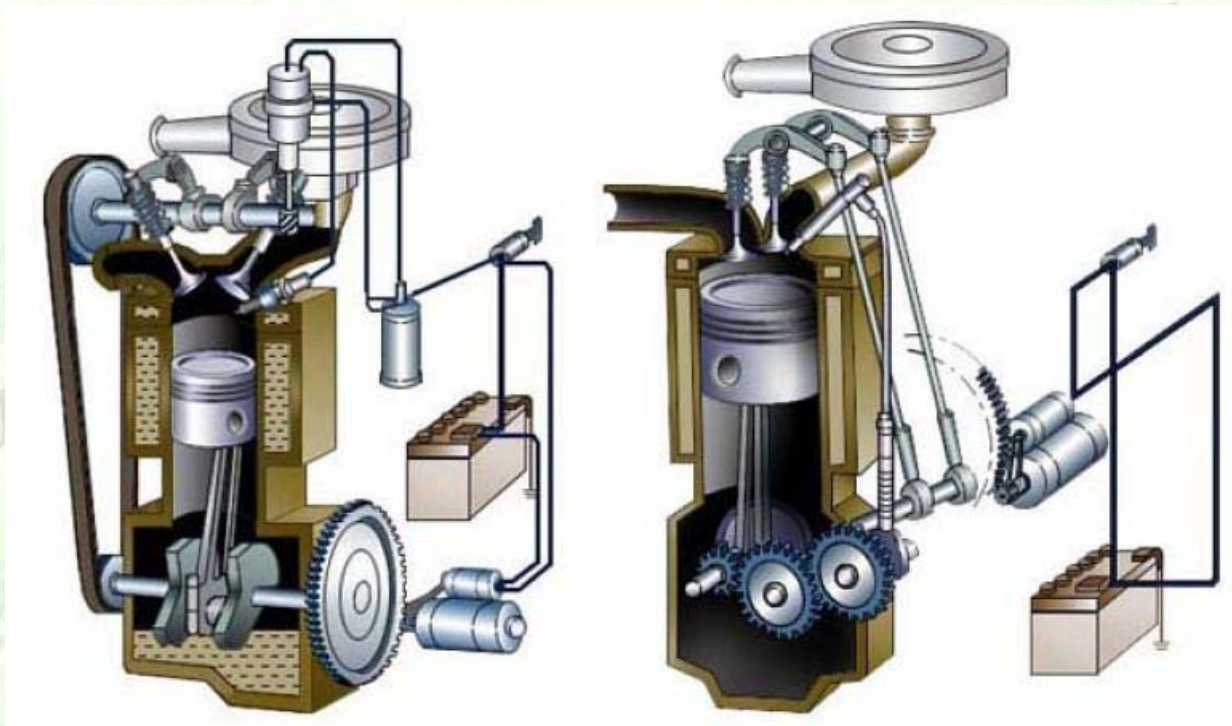


c. 按使用燃料的不同又可分为：

汽油机、柴油机、煤气机、多种燃料发动机.....

汽油机：转速高，质量轻，噪音小，启动容易，制造成本低

柴油机：压缩比大，热效率高，经济性和排放性都比汽油机好

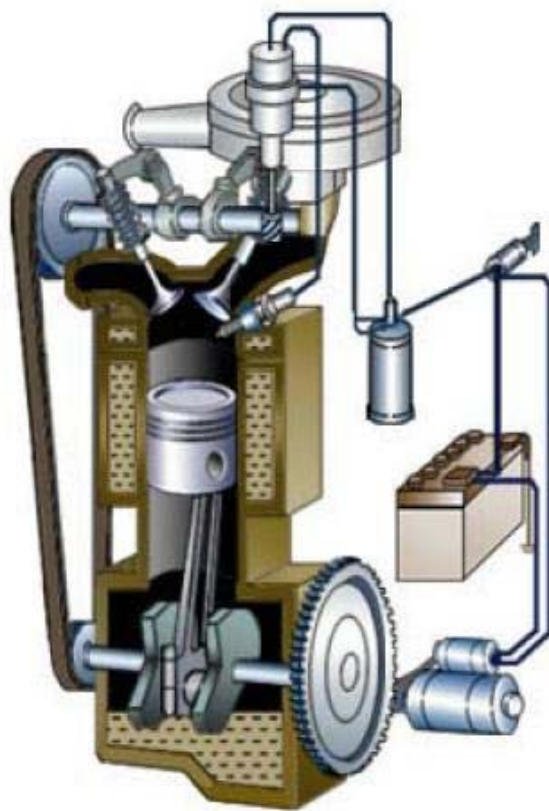


汽油机

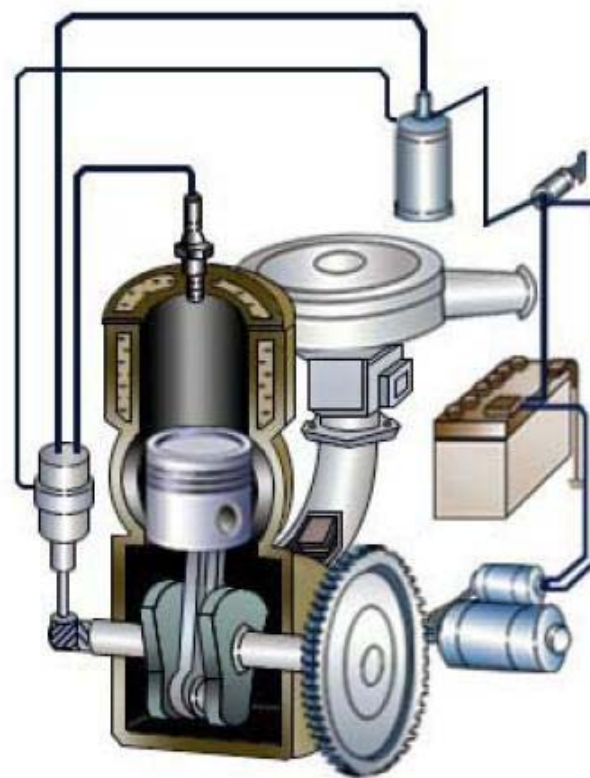
柴油机



d. 按工作循环的冲程数分为：  
四冲程内燃机和二冲程内燃机



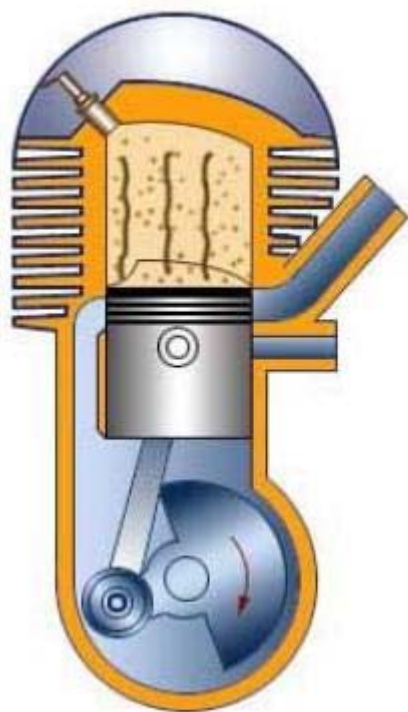
四冲程



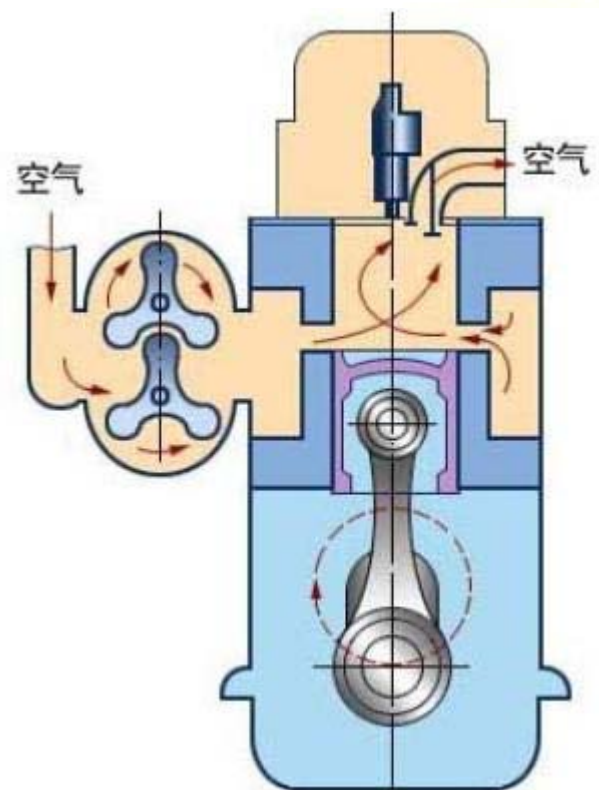
二冲程

e. 按进气状态的不同可分为：

增压内燃机和非增压（自然吸气式）内燃机



自然吸气



增压

f. 按照气缸数分为：  
单缸机和多缸机



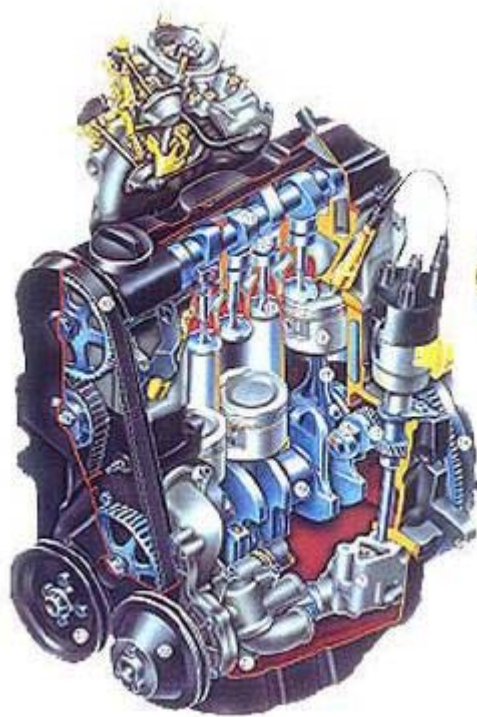
单缸



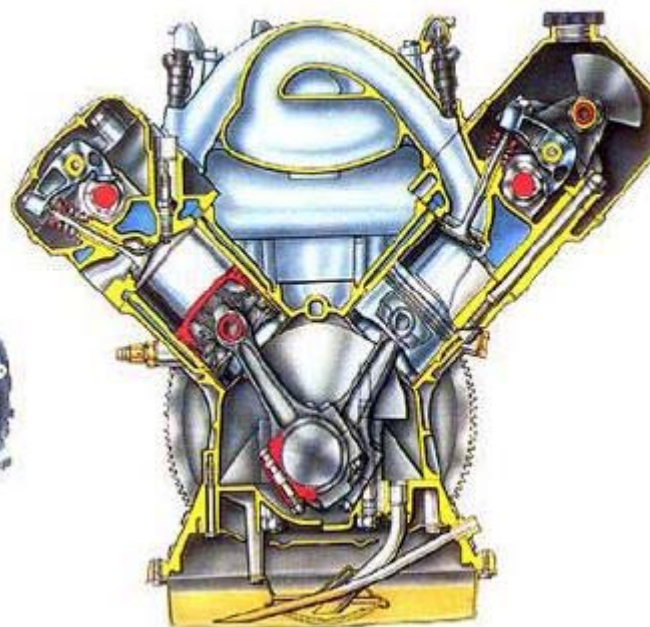
多缸



g. 按照气缸排列方式分为：  
单行直列式、双行V型式...



直列



V型

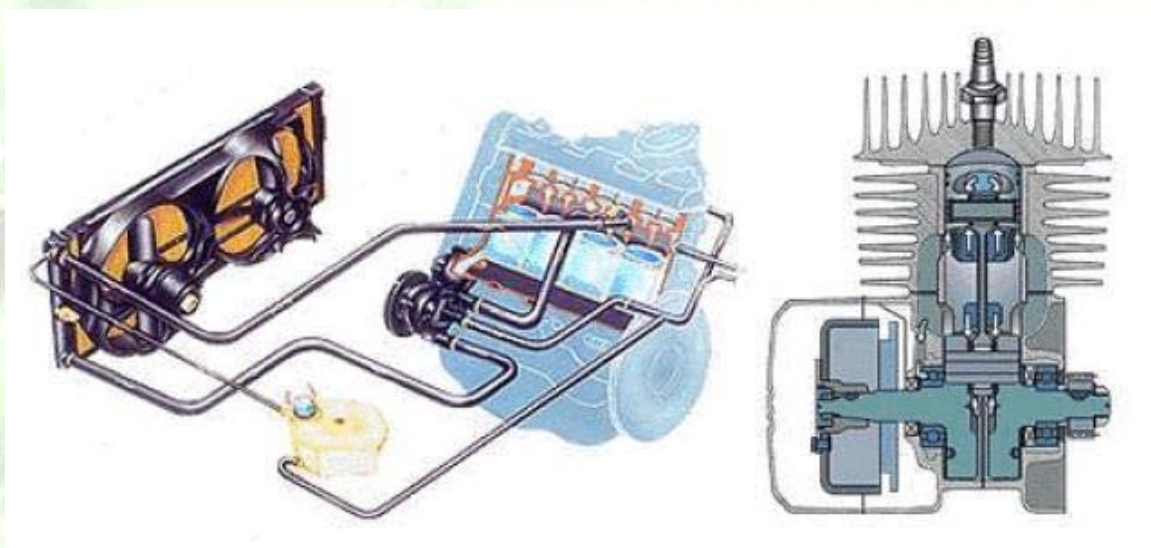


## h. 按照冷却方式分为：水冷式内燃机和风冷式内燃机

水冷式发动机是利用气缸体和气缸盖冷却水套中进行循环的冷却液作为冷却介质进行冷却的；

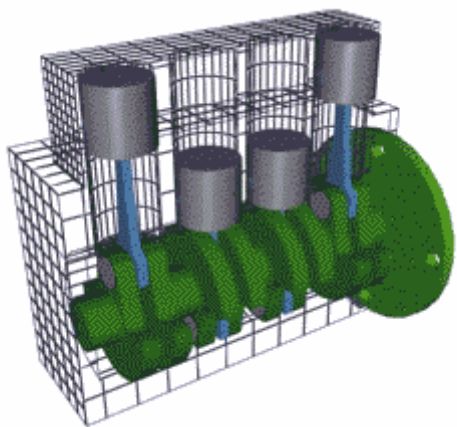
风冷式发动机是利用流动于气缸体与气缸盖外表面散热片之间的空气作为冷却介质进行冷却的。

水冷式发动机冷却均匀，工作可靠，冷却效果好。

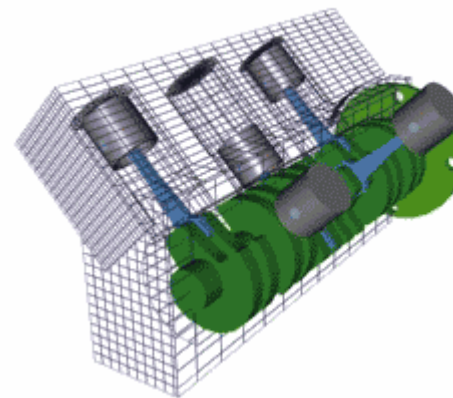


水冷

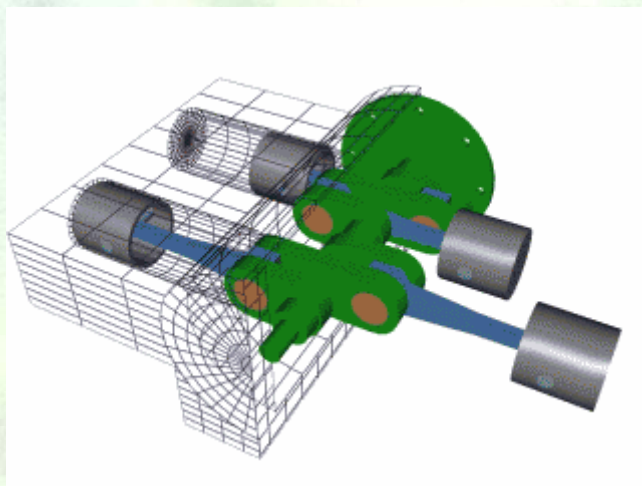
风冷



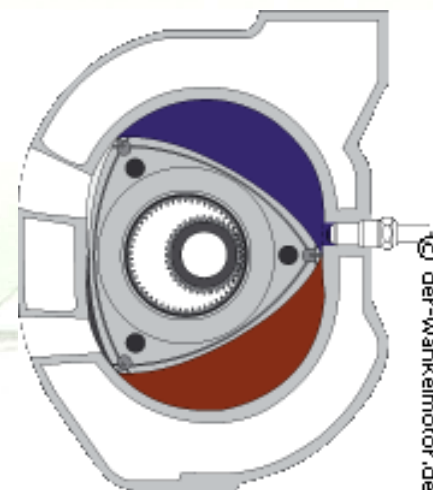
直列发动机



V型发动机



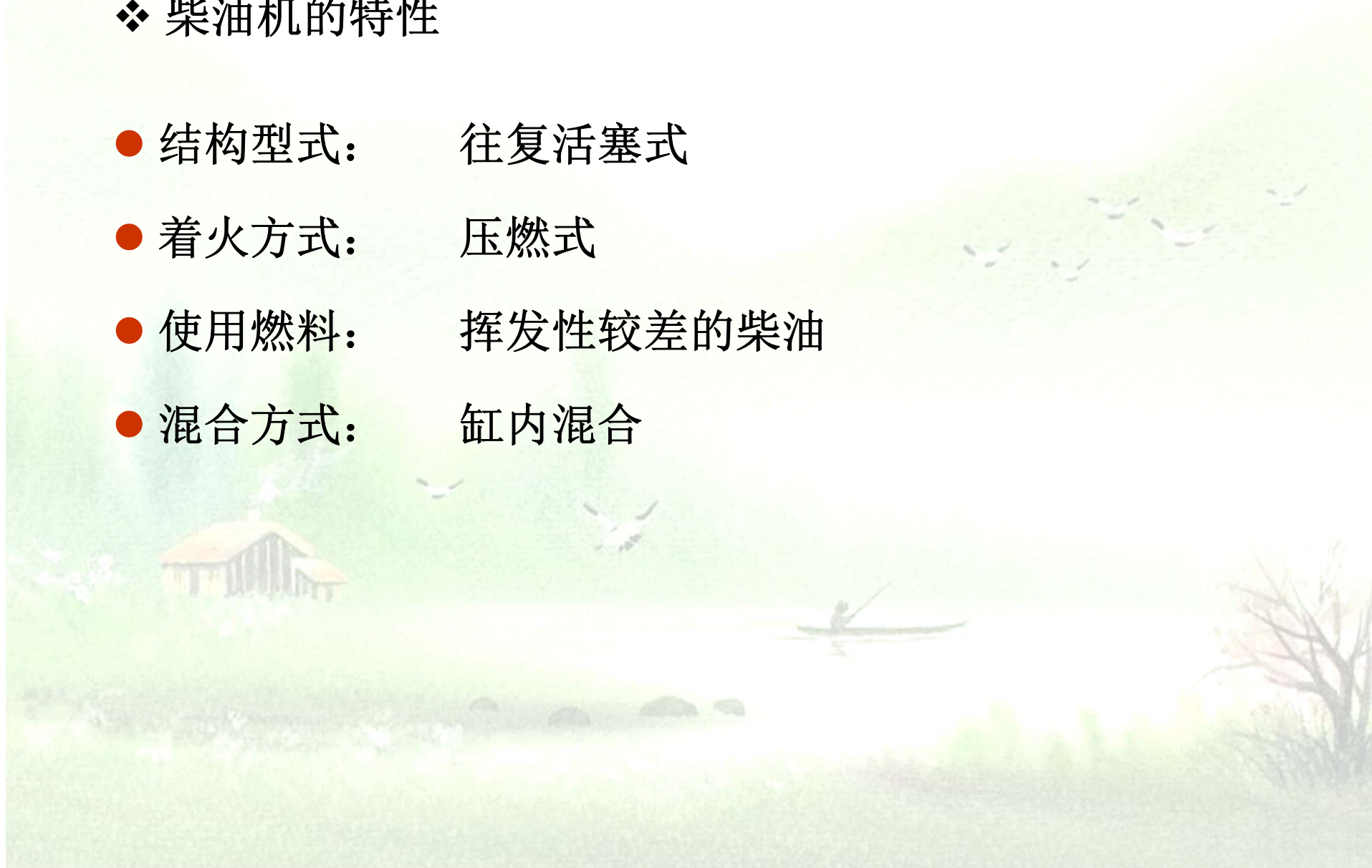
水平对置发动机



转子发动机

## ❖ 柴油机的特性

- 结构型式： 往复活塞式
- 着火方式： 压燃式
- 使用燃料： 挥发性较差的柴油
- 混合方式： 缸内混合





### ❖ 柴油机的优点

- 经济性好——有效热效率达**50%**以上
- 功率范围广——单机功率**0.6 ~ 45600kW**
- 尺寸小，重量轻
- 机动性好——启动方便，加速性能好，转速范围宽

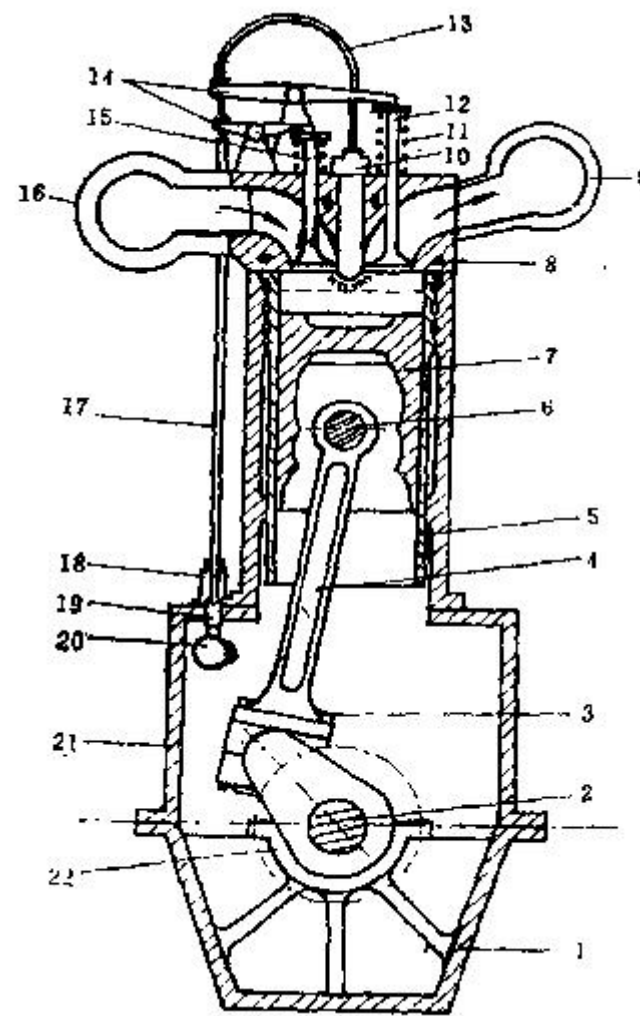
### ❖ 柴油机的缺点

- 机身振动，轴系扭转振动和噪声
- 工作条件恶劣，承受高温、高压并具有冲击性负荷



## ❖ 柴油机的基本组成

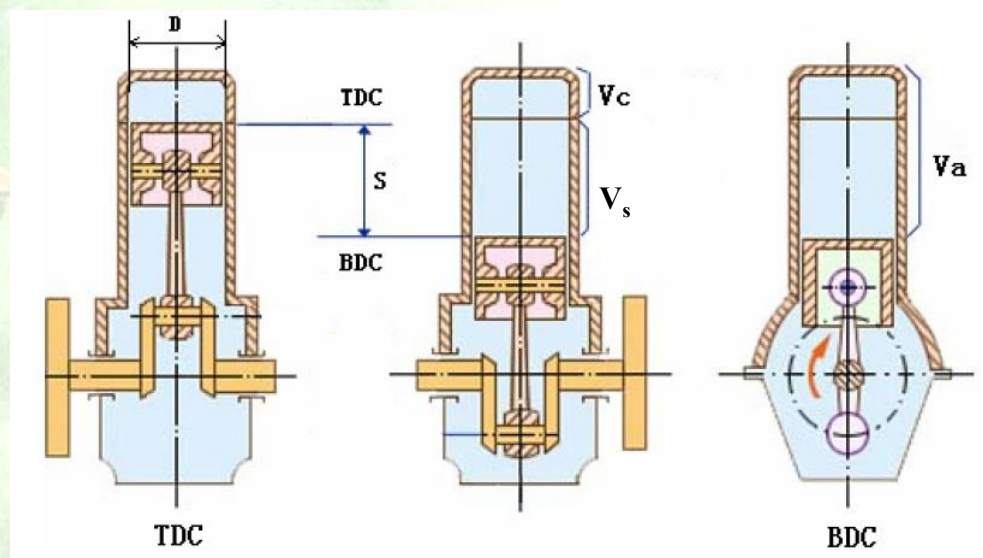
- 固定件——气缸盖、气缸体、气缸套、机身、机座、主轴承等
- 运动件——活塞组、连杆、曲轴
- 辅助机构——进气阀、排气阀、凸轮轴及传动机构等
- 辅助系统——燃油系统、冷却系统、润滑系统、操纵系统



箱式柴油机基本构造

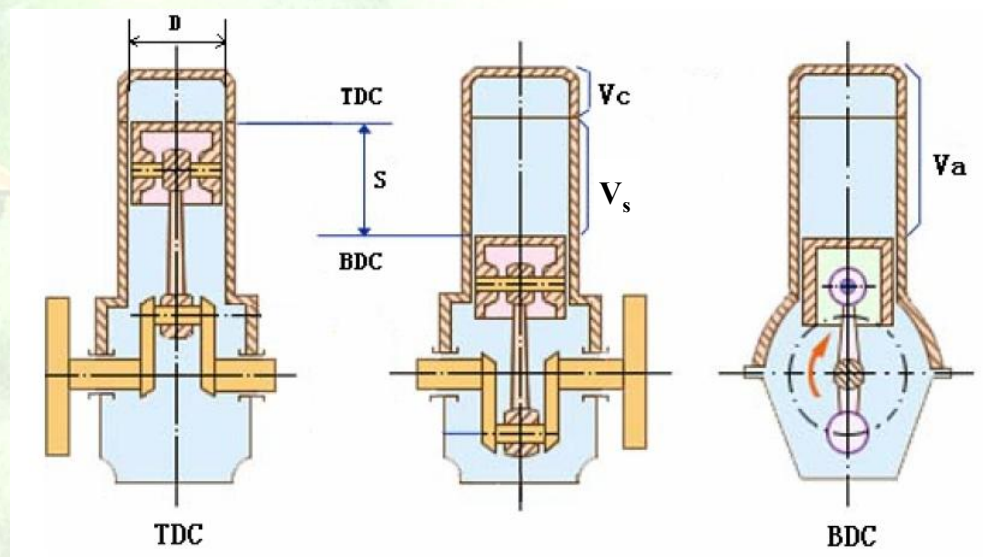
## ❖ 柴油机基本结构参数

1. 上止点：活塞能到达的最高位置（即离曲轴旋转中心最大距离时的位置），称为上止点（**TDC**）。
2. 下止点：活塞能到达的最低位置（即离曲轴旋转中心最小距离时的位置），称为下止点（**BDC**）。



3. 曲轴转角：曲柄绕曲轴旋转，离开上止点位置的角度，称为曲轴转角，以 $\phi$ 表示。

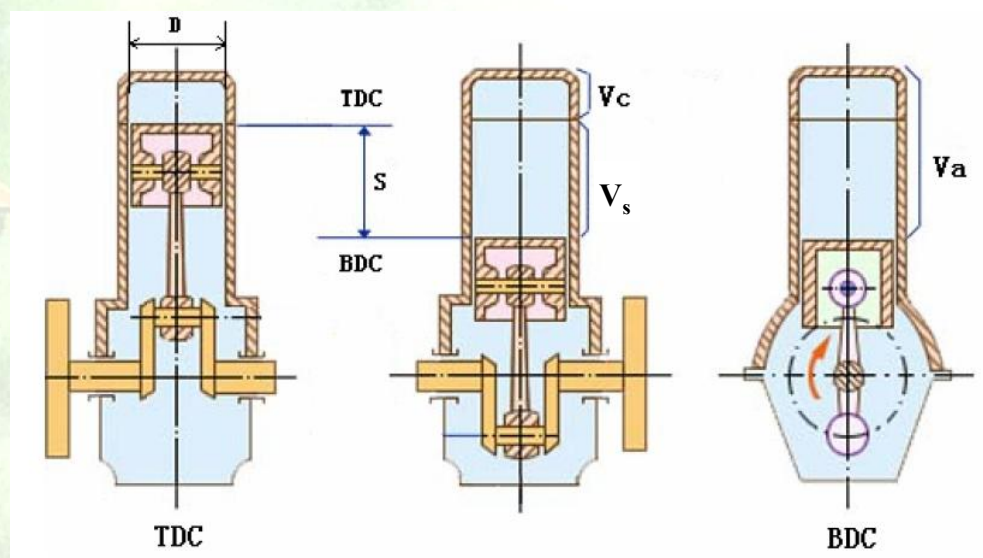
4. 缸径：气缸的内径，以 $D$ 表示。





- 5. 曲柄半径：从曲轴中心线至曲柄销中心线的距离，以**R**表示。
- 6. 连杆长度：连杆大小端轴承孔中心线之间的距离，以**L**表示。
- 7. 活塞行程：活塞上下止点之间的距离，称为活塞行程，以**S**表示。活塞行程长度为曲轴半径的两倍，即：

$$S=2R$$

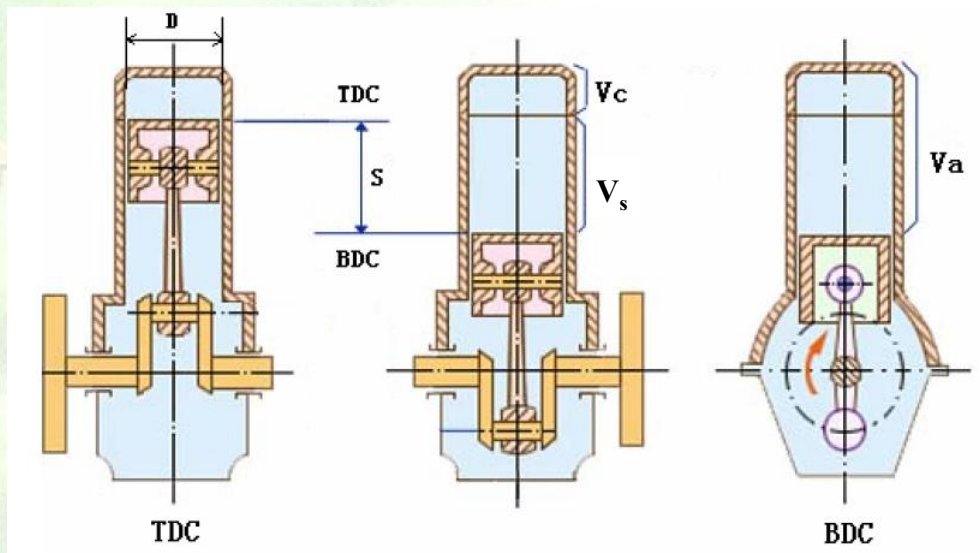




8. 压缩容积：活塞位于上止点时，活塞上顶面与气缸盖底面之间的气缸容积，称为压缩容积，以 $V_c$ 表示。由于燃料在这个容积内燃烧，所以 $V_c$ 又称为燃烧室容积。

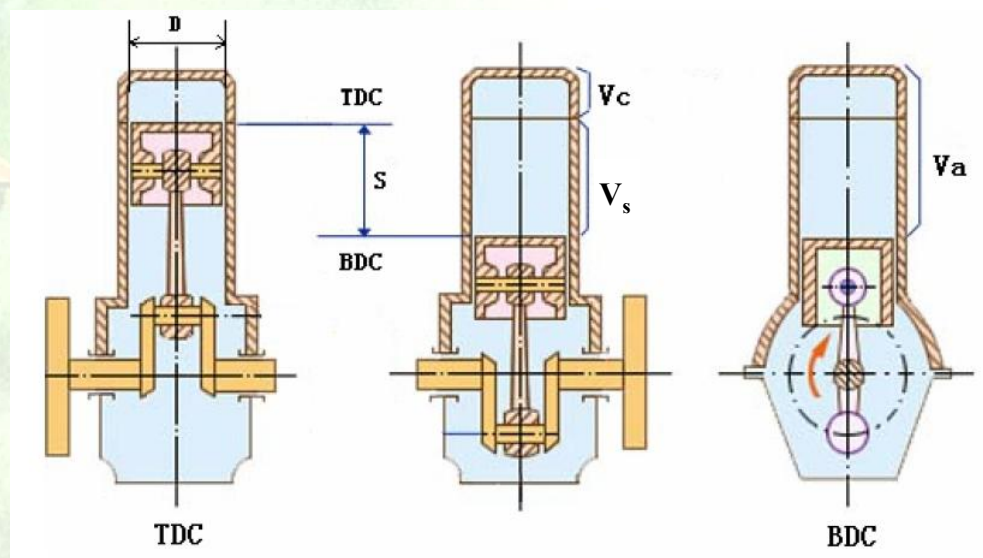
9. 工作容积：活塞从上止点移动到下止点，所扫过的空间容积，称为气缸工作容积，以 $V_s$ 表示，也可称为活塞排量。

$$V_s = \frac{\pi}{4} D^2 S$$



**10. 气缸总容积：**活塞位于下止点时，活塞上顶表面到气缸盖下底面之间的气缸容积，称为气缸总容积，以 $V_a$ 表示，也称为气缸最大容积，它等于燃烧室容积和气缸工作容积之和，即：

$$V_a = V_c + V_s$$

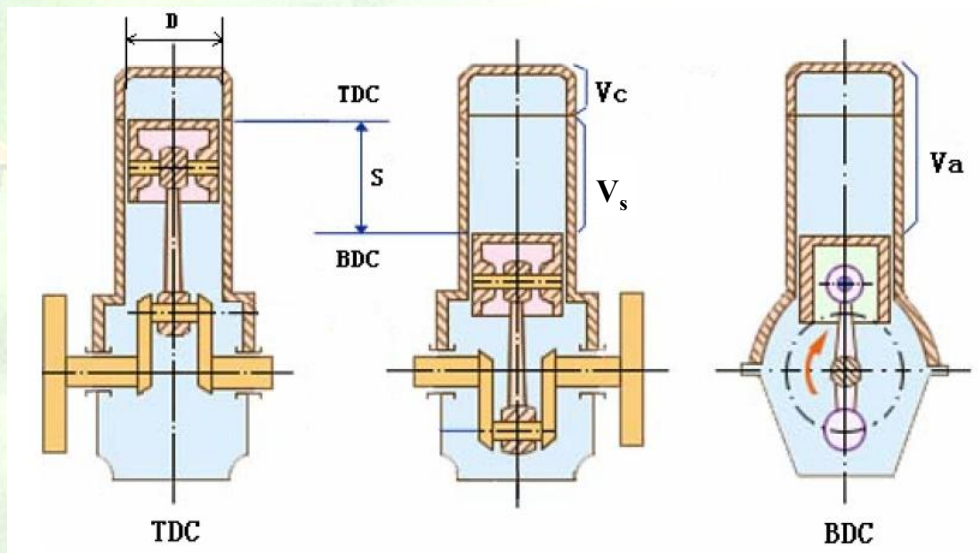


11. 压缩比：气缸总容积与压缩容积的比值称为压缩比，也称为几何压缩比，以 $\varepsilon$ 表示，即

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_c + V_s}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c}$$

12. 活塞平均速度：活塞在气缸中往复运动的平均速度，以 $C_m$ 表示，即：

$$C_m = \frac{Sn}{30}$$





## 二、四冲程柴油机工作原理

### ❖ 示功图的定义

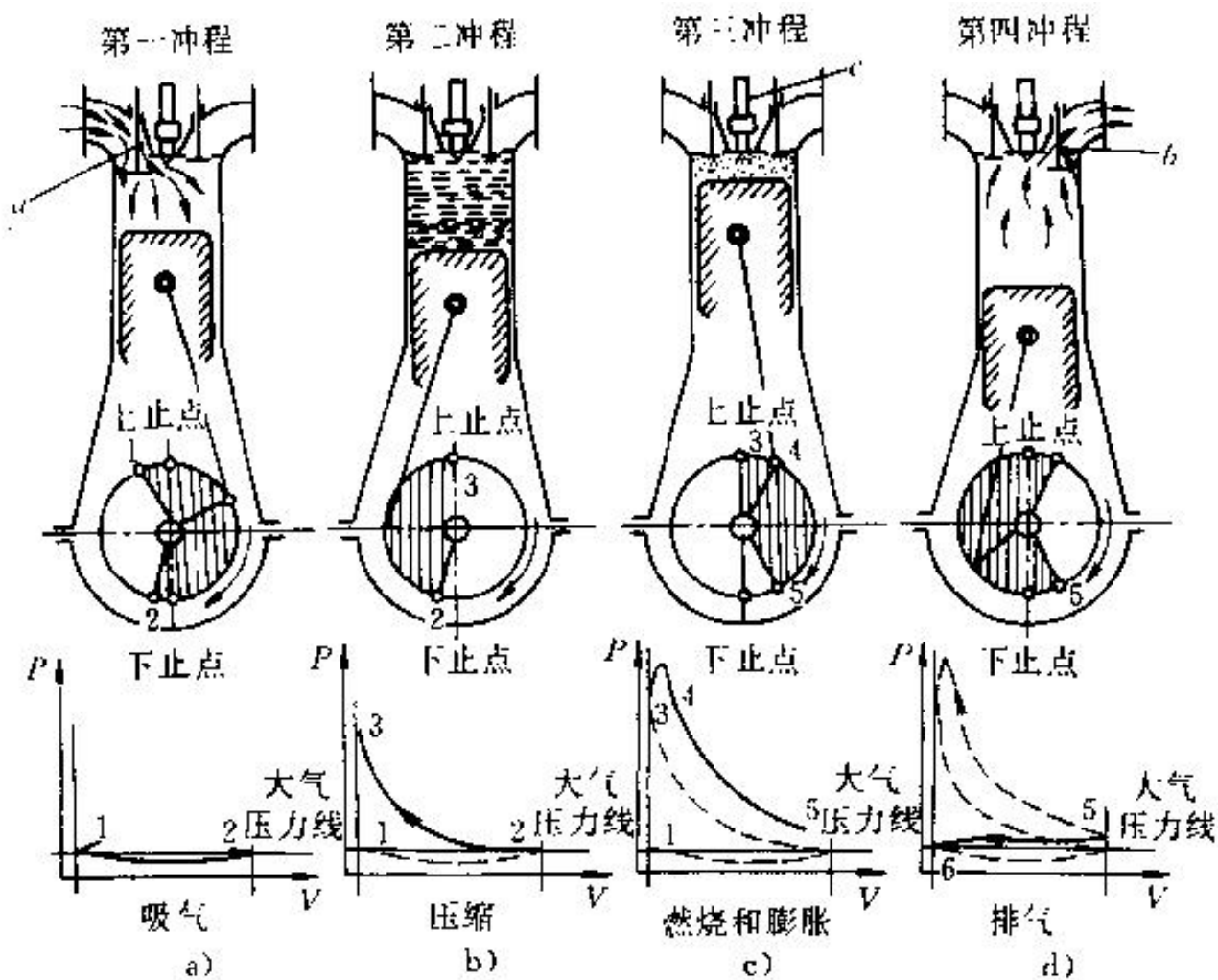
——把内燃机在1个循环中气缸工质状态的变化，表示为压力与容积的关系图（ $p$ - $V$ 图）或压力与曲轴转角的关系图（ $p$ - $\phi$ 图）称为示功图。

——其图形面积则为1个工作循环内燃机所作的功，称为指示功。直接反应了内燃机做功的大小，是评价分析内燃机性能的主要手段。



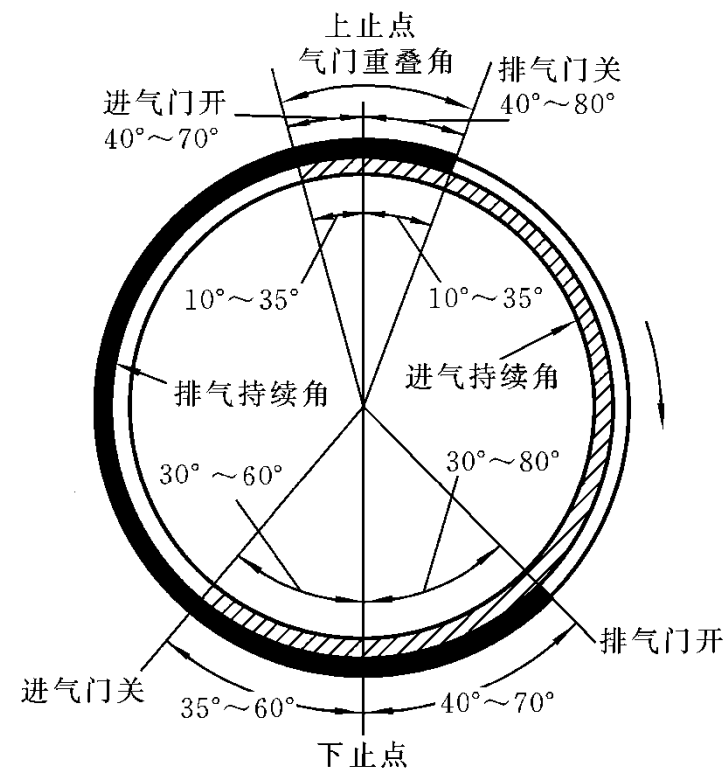
### ❖ 示功图的测量

- 示功图可用机械式弹簧示功器、压电示功器或气电示功器测录出来。
- 目前常用压电示功器（燃烧分析仪）测录 $p-\phi$ 图，并可转换成 $p-V$ 图。



动画

四冲程内燃机工作原理

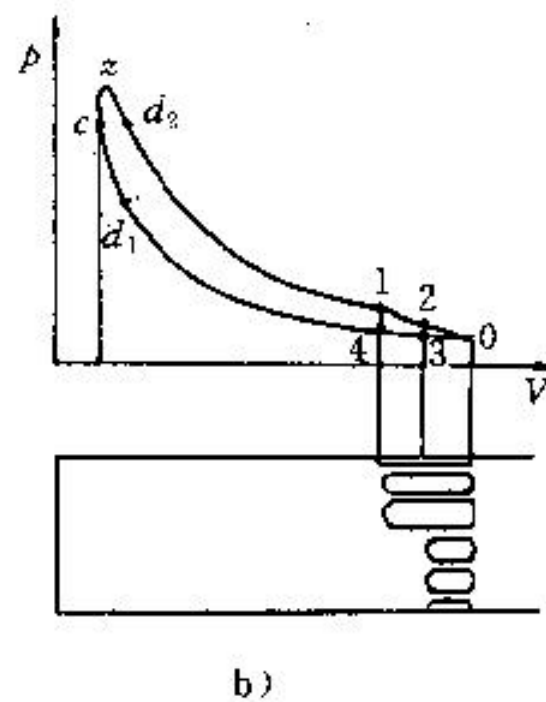
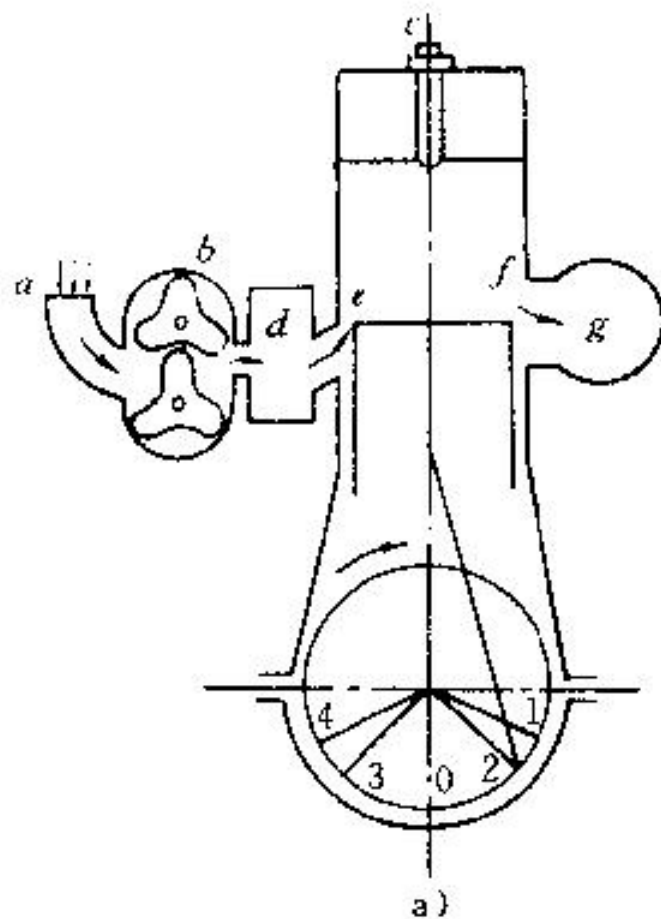


四冲程内燃机的配气定时图

(内圈数字—非增压内燃机, 外圈数字—增压内燃机)

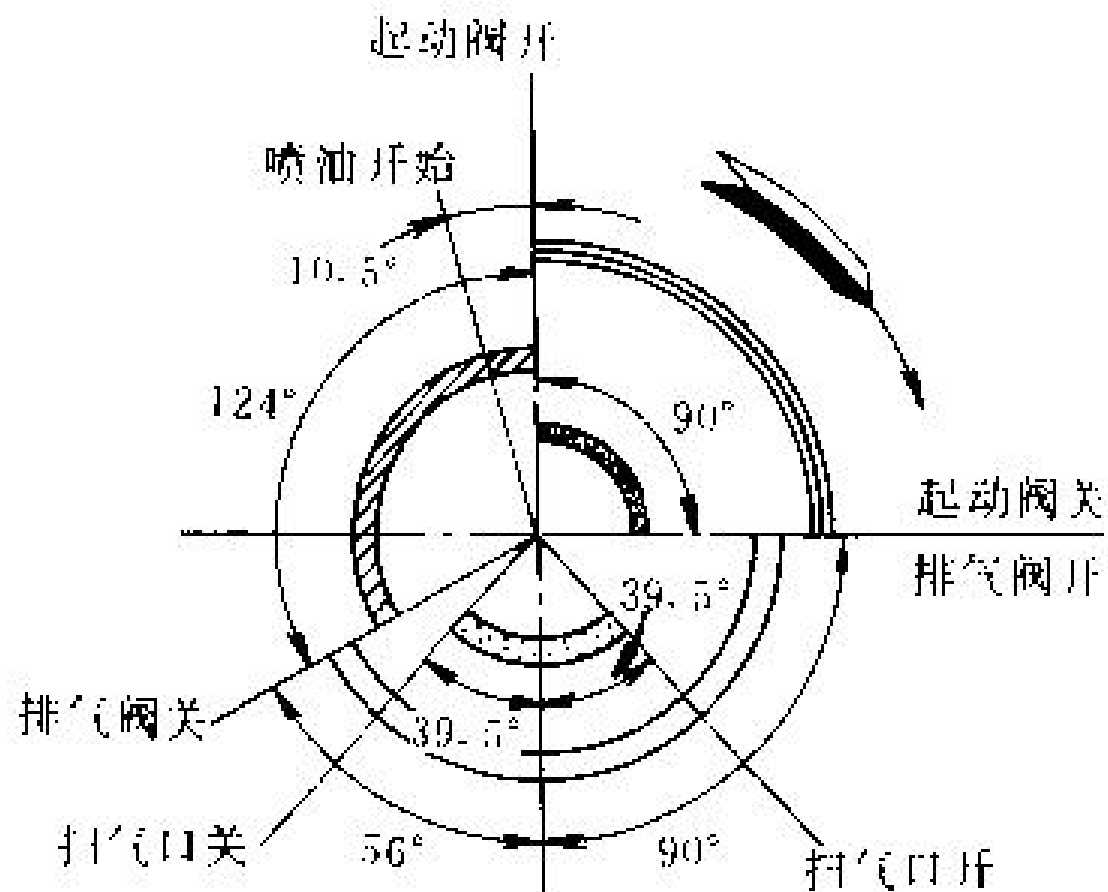


### 三、二冲程柴油机工作原理



动画

二冲程柴油机工作原理



ESDZ43/82B型二冲程柴油机的配气定时图

### ❖ 有效压缩比 $\varepsilon_e$

——进、排气阀（口）全部关闭瞬时的气缸容积与压缩容积之比。

$$\varepsilon_e = 1 + \frac{(1 - \varphi_s)V_s}{V_c}$$

$\varphi_s$ ——行程失效系数；

$\varphi_s = \text{损失容积} \Delta V_s / \text{气缸工作容积}$



## ❖ 二冲程柴油机与四冲程柴油机的比较

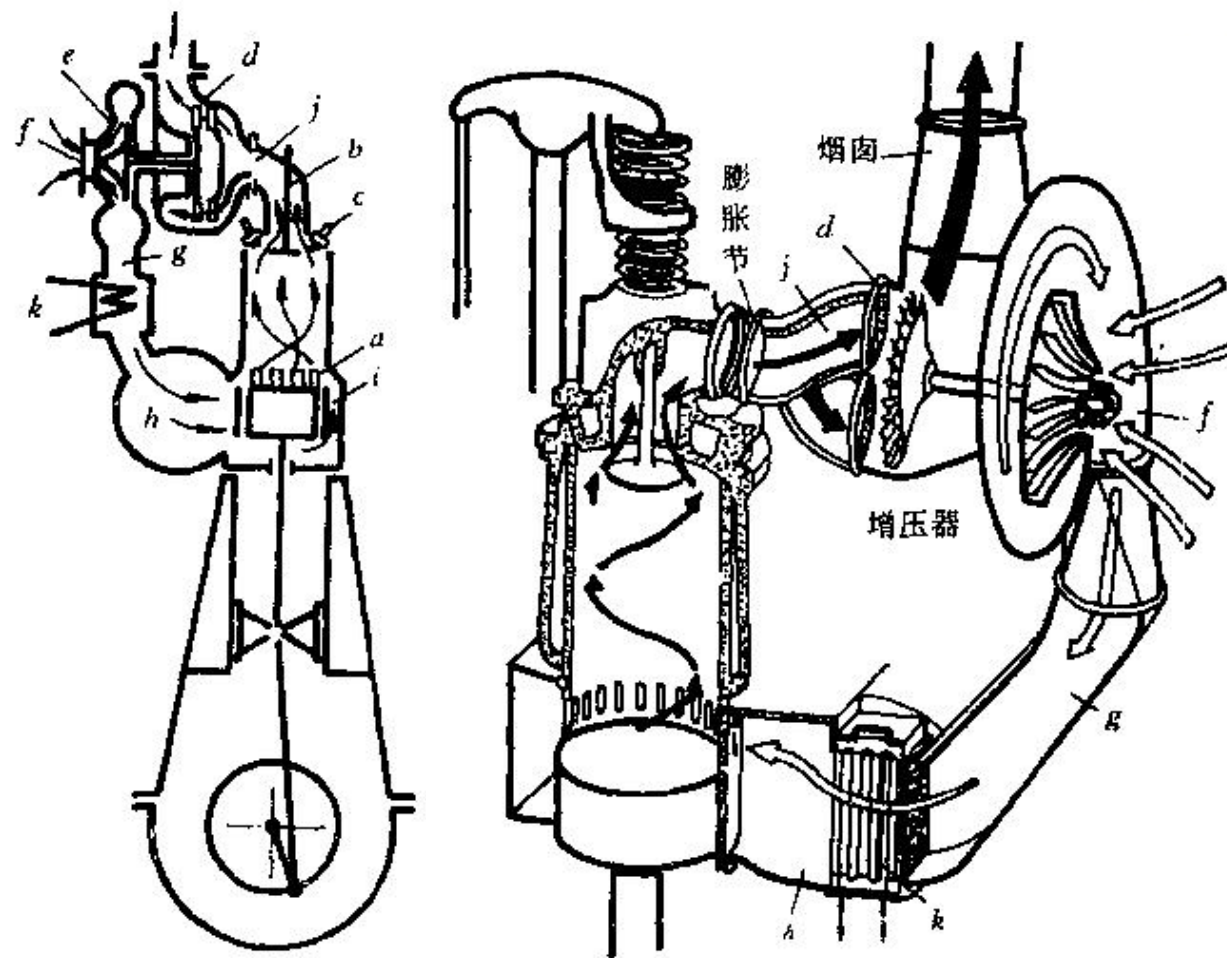
优点：

- 提高了柴油机的作功能力
- 改善了柴油机的动力性
- 简化了柴油机的结构

缺点：

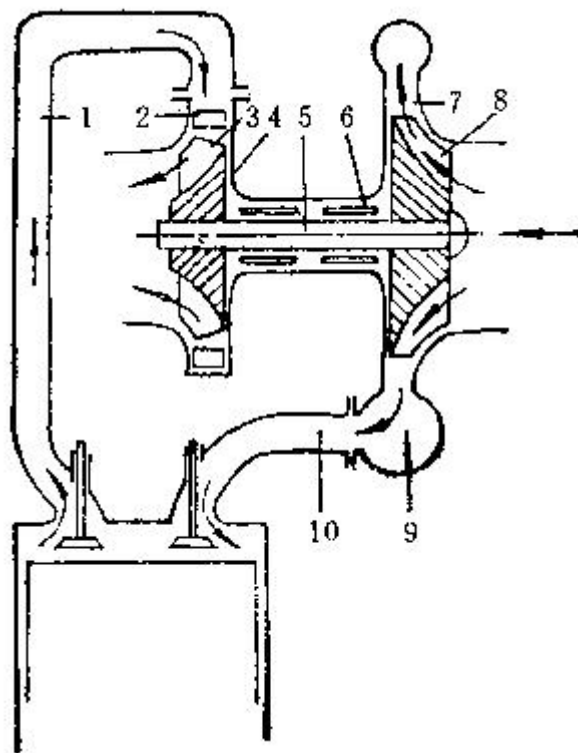
- 换气质量差、热效率低
- 热负荷较高

## 四、增压柴油机工作原理



二冲程废气涡轮增压柴油机工作原理

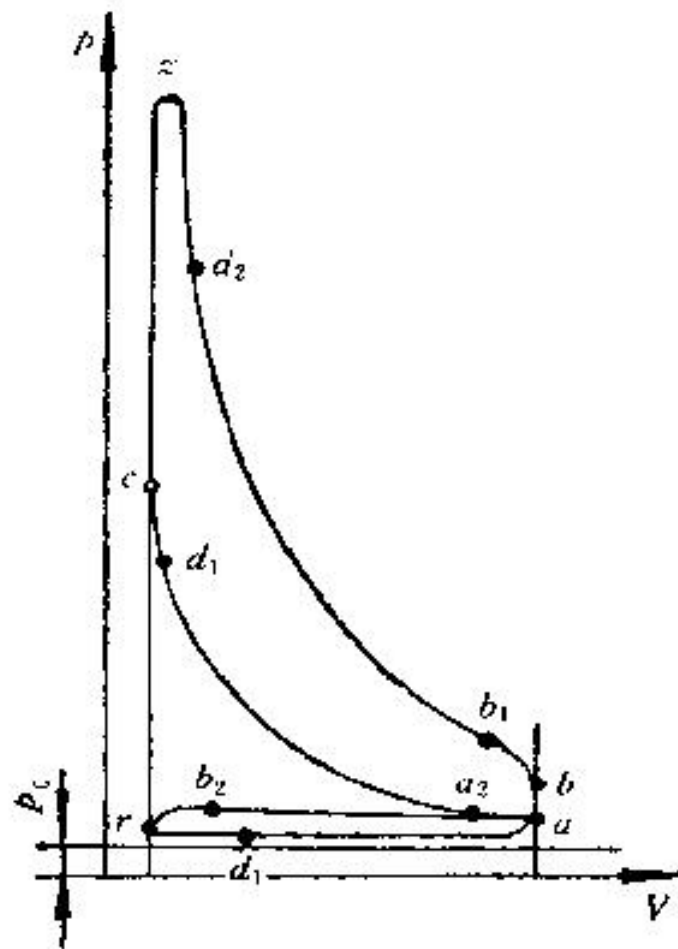
a-扫气口；b-排气阀；c-喷油器；d-废气涡轮；e-压气机；f-空气吸入口；  
g-导管；h-扫气箱；i-扫气室；j-排气管；k-空冷器



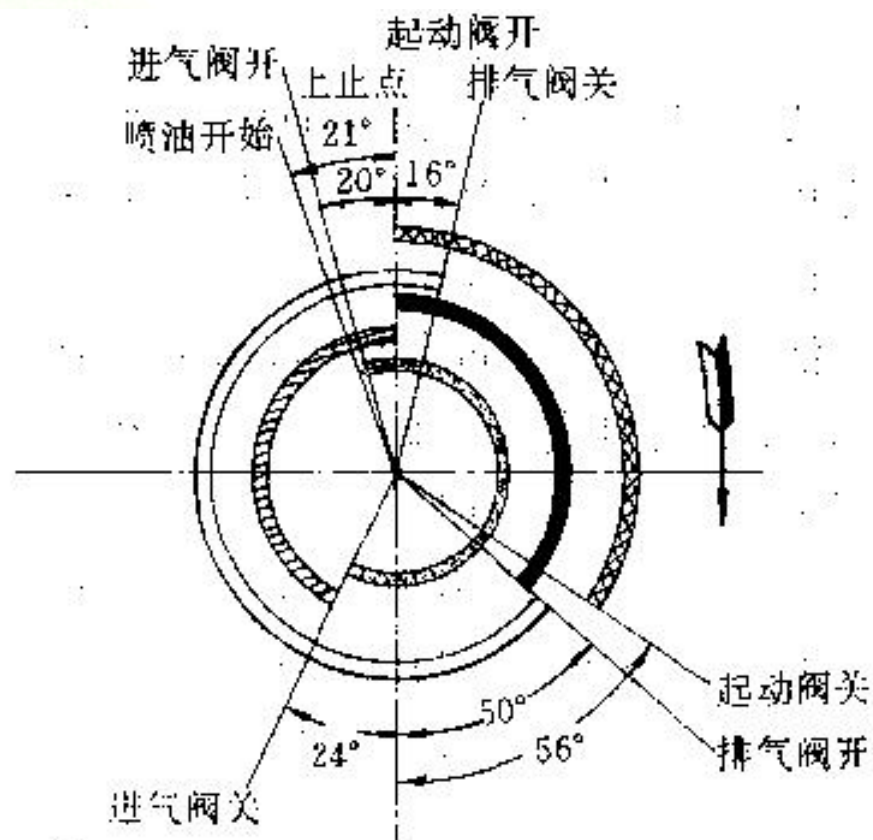
四冲程废气涡轮增压柴油机工作原理

1-排气管；2-喷嘴环；3-涡轮；4-涡轮壳；5-转子轴；6-轴承；  
7-扩压器；8-压气机叶轮；9-压气机壳；10-进气管

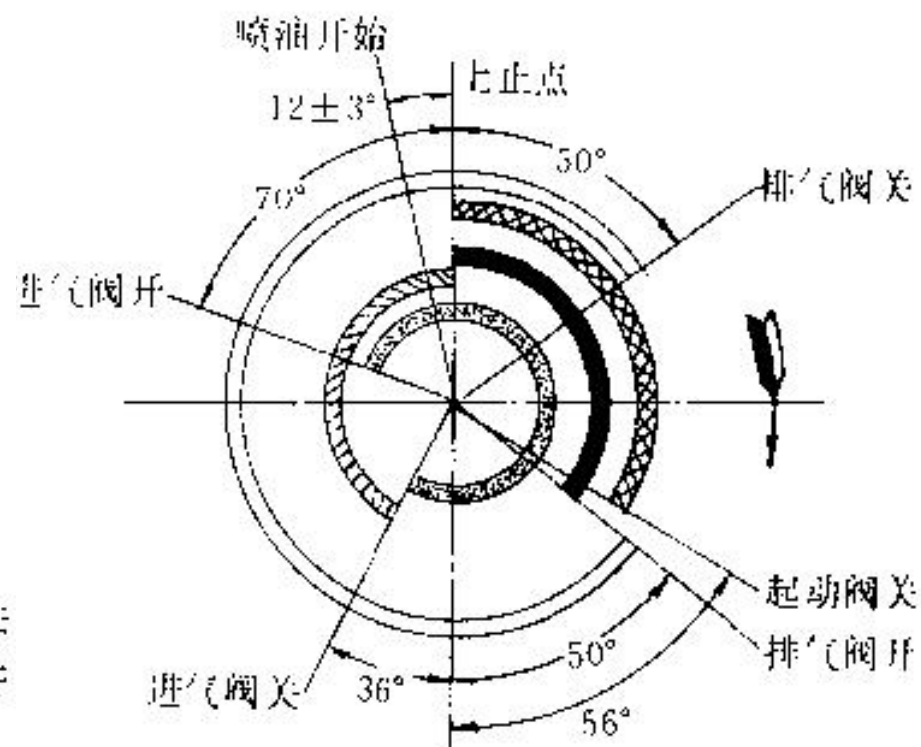




四冲程增压柴油机示功图



6350C型柴油机配气定时图



6350ZC型增压柴油机配气定时图

## 1.2 柴油机的热力循环

### 一、内燃机的理论循环

#### ❖ 循环的定义

——在热机中，确定质量工质所经历的过程通常称为循环



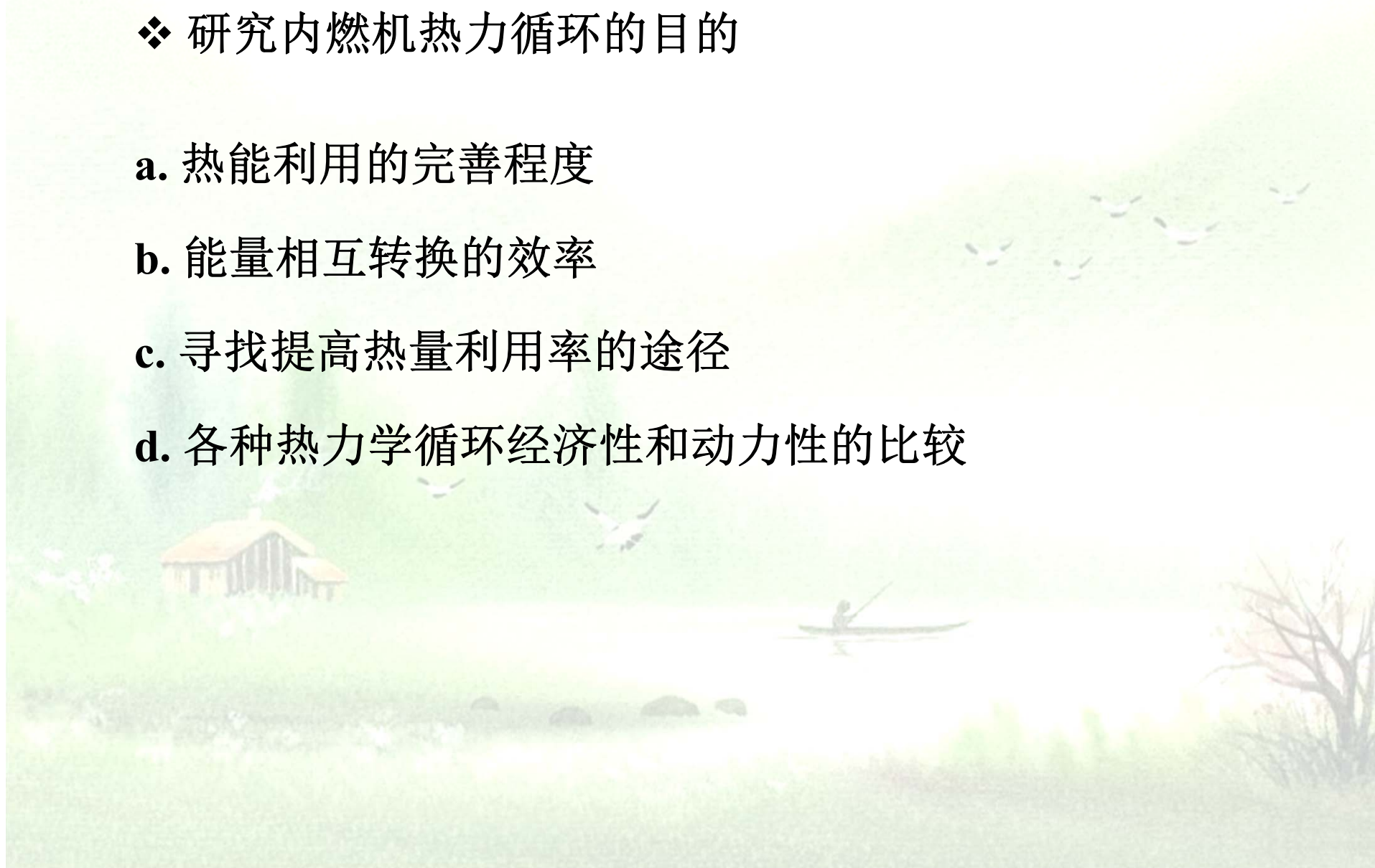
## ❖ 内燃机中的实际热力循环

a. 内燃机实际热力循环是由进气、压缩、燃烧、膨胀和排气等多个过程所组成的。循环中工质存在着质和量的变化，整个过程是不可逆的。

b. 在能量的转变过程中，实际循环还存在着机械摩擦、换气、散热、燃烧等一系列不可避免的损失，其物理、化学过程十分复杂，如要确切地描述在内燃机中实际进行的热力过程，在目前条件下还是非常困难的。

❖ 研究内燃机热力循环的目的

- a. 热能利用的完善程度
- b. 能量相互转换的效率
- c. 寻找提高热量利用率的途径
- d. 各种热力学循环经济性和动力性的比较



### ❖ 内燃机实际循环进行简化的要求

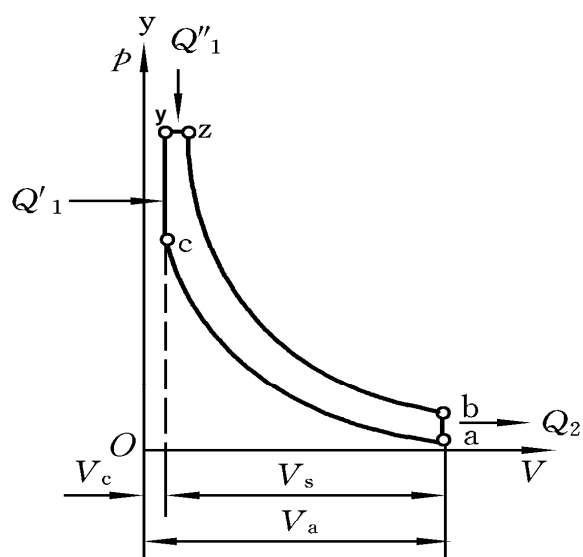
- a. 在不失基本物理、化学过程特征的前提下，将内燃机的实际循环进行若干简化；
- b. 使其既近似于所讨论的实际循环，而又简化了实际上变化纷繁的物理、化学过程，从而提出一种便于作定量分析的假想循环，这种假想循环就称为“理想循环”；
- c. 利用假想循环能够清楚的比较说明影响内燃机热能利用完善程度的主要因素。



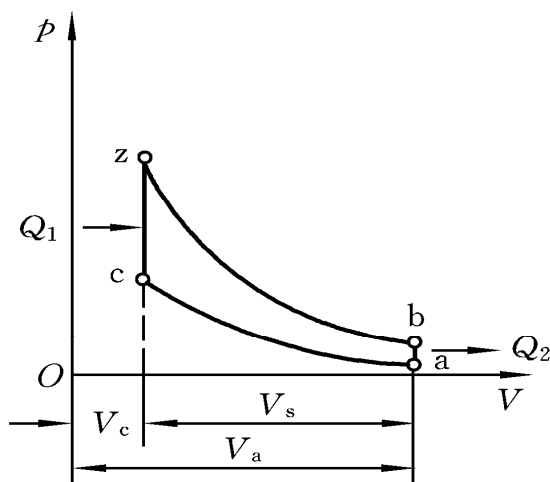
### ❖ 理想循环的简化假定

- a. 工质是一种理想的完全气体，在整个循环中保持物理及化学性质不变，其状态参量的变化遵守气体状态方程  $pV=mRT$ 。
- b. 不考虑实际存在的工质更换以及漏气损失，工质数量保持不变，循环是在定量工质下进行的。
- c. 把气缸内工质的压缩和膨胀看成是完全理想的绝热等熵过程，工质与外界不进行热交换，无摩擦、流动损失，工质比热容为常数。
- d. 用假想的定容或定压加热来代替实际的燃烧过程，用定容放热代替实际换气带走的热量。

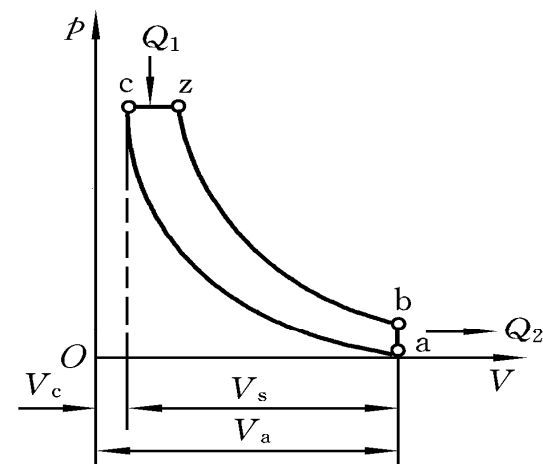
根据加热方式的不同，理想循环有三种形式可供分析选择：



(a)



(b)



(c)

理论循环示意图

(a) 混合循环； (b) 等容循环； (c) 等压循环

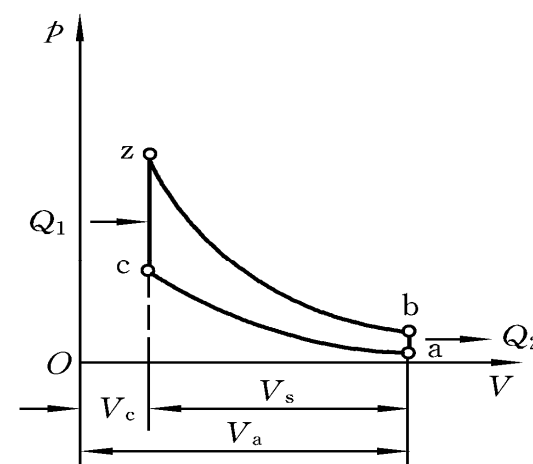
图（b）为等容循环（也称奥托循环）

**a--c** 为绝热压缩；

**c--z** 为等容加入热量 $Q_1$ ；

**z--b** 为绝热膨胀；

**b--a** 为等容释放热量 $Q_2$ 。



(b)

在压缩、膨胀过程，工质状态用  $pV^k = C$  表示。

压缩过程的容积变化用压缩比  $\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_s + V_c}{V_c}$  表示。

膨胀过程的容积变化用后膨胀比  $\delta = \frac{V_b}{V_z}$  表示。

定容加热的压力升高，以压力升高比  $\lambda = \frac{p_z}{p_c}$  表示。

对于强制点火的内燃机，其工作过程均近似于等容循环。

依等容循环方式工作的主要有汽油机、煤气机等。

### ❖ 等容循环的热效率

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

- a. 等容循环的热效率只随压缩比 $\varepsilon$ 与绝热指数 $k$ 的变化而变化；
- b. 由于绝热指数 $k$ 在实际循环中变化不大，因此， $\eta_t$ 主要随压缩比 $\varepsilon$ 的增加而增加；
- c. 压缩比的提高在实际循环下是有一定限制的。



### ❖ 等容循环压缩比上限取值的限制

a. 当 $\varepsilon$ 提高到超过一定限度（如 $\varepsilon=10\sim13$ ）时， $\eta_t$ 的增加速率已很小，但循环的最高压力 $p_z$ 却增加很多，作用在活塞上的力随之加大，内燃机零件所承受的机械负荷和摩擦损失加剧。在实际内燃机中，当 $\varepsilon>10\sim13$ 时热效率并不见得增加。

b. 依等容循环方式工作的内燃机都是压缩已经混合好了的可燃工质，为防止先燃与爆燃，实际使用的压缩比将更小。

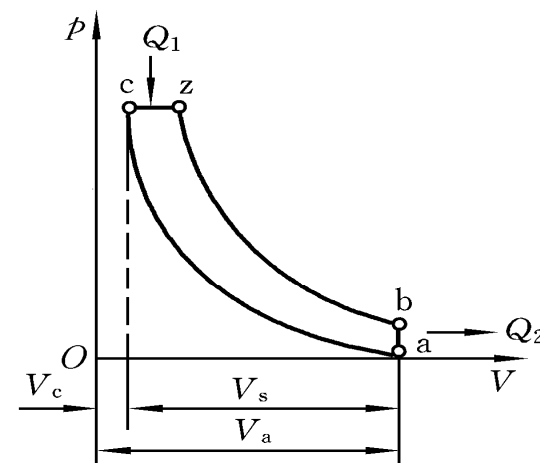
图（c）为等压循环（也称狄赛尔循环）

**a--c** 为绝热压缩；

**c--z** 为定压加入热量 $Q_1$ ；

**z--b** 为绝热膨胀；

**b--a** 为等容释放热量 $Q_2$ 。



(c)

定压加热过程的容积变化用初膨胀比  $\rho = \frac{V_z}{V_c}$  表示，  
其它同等容循环。

依等压循环方式工作的有低速柴油机和空气喷射式柴油机等。

### ❖ 等压循环的热效率

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

- a.  $\eta_t$ 是随着 $\varepsilon$ 、 $k$ 和 $\rho$ 的变化而变化的， $\varepsilon$ 和 $k$ 对 $\eta_t$ 的影响与等容循环中的情况相同。
- b.  $\rho$ 增大将使 $\eta_t$ 下降，而 $\rho$ 的大小标志着内燃机负荷的大小，因此，按等压循环工作的内燃机，其负荷增加将会使热效率下降。

图 (a) 为混合循环

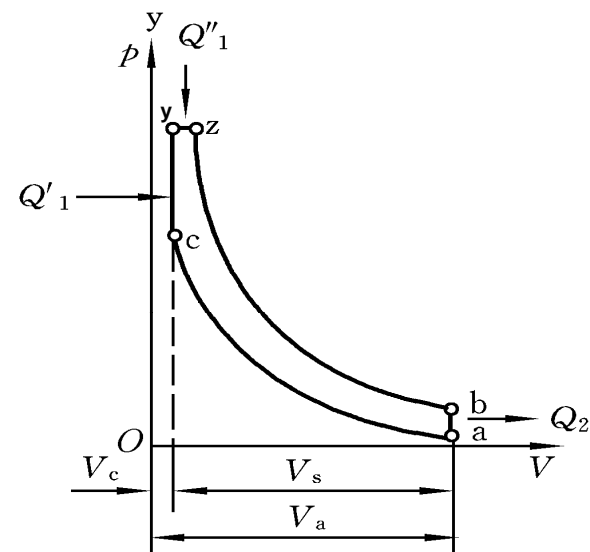
**a--c** 为绝热压缩;

**c--y** 为定容加入热量 $Q'_1$ ;

**y--z** 为定压加热量 $Q''_1$ ;

**z--b** 为绝热膨胀;

**b--a** 为等容释放热量 $Q_2$ 。



(a)



## ❖ 混合循环热效率

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

$\eta_t$ 随 $\varepsilon$ 、 $k$ 、 $\rho$ 和 $\lambda$ 的变化而变化，即在混合循环条件下，内燃机热效率除了与压缩比 $\varepsilon$ 与绝热系数 $k$ 有关外，还与其负荷及在等容和等压条件下加入热量的分配有关。

### ❖ 三种循环热效率的比较

非增压内燃机混合循环热效率的公式：

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

等容循环中，因 $V_z = V_c$ ，所以初膨胀比 $\rho = 1$ ，代入得等容循环热效率公式：

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

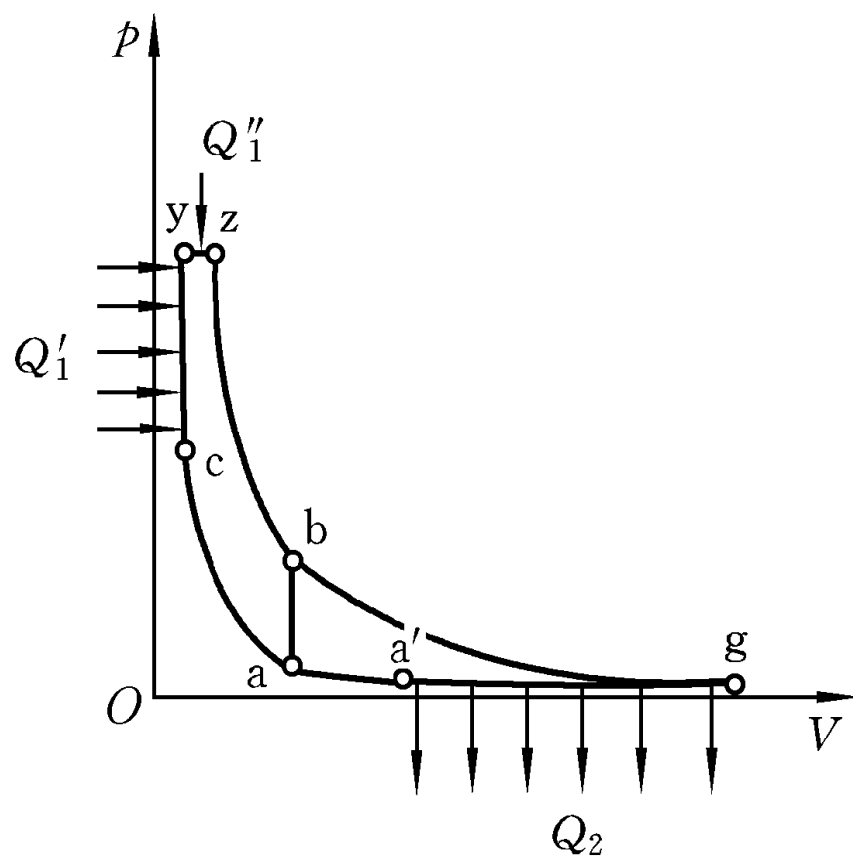
等压循环中，因 $p_z = p_c$ ，所以压力升高比 $\lambda = 1$ ，代入得等压循环热效率公式：

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

分析上面式子可知：

- (1)  $\varepsilon \uparrow$ ，则 $\eta_t \uparrow$ ，但随 $\varepsilon$ 不断增大， $\eta_t$ 提高幅度逐渐降低。
- (2)  $\lambda \uparrow$ ，则混合循环中等容加热量 $\uparrow$ ， $\eta_t \uparrow$ 。
- (3)  $\rho \uparrow$ ，则负荷 $\uparrow$ ，但 $\eta_t$ 下降，因此，按等压循环的发动机，负荷 $\uparrow$ ，则 $\eta_t$ 下降。
- (4)  $k \uparrow$ ，则 $\eta_t \uparrow$ ，但在发动机中 $k$ 变化不大。
- (5) 当 $\varepsilon$ 相同时： $\eta_{t,v} > \eta_{t,vp} > \eta_{t,p}$
- (6) 当 $p_z$ 相同， $Q_1$ 相同， $\varepsilon$ 不相同， $\eta_{t,p} > \eta_{t,vp} > \eta_{t,v}$   
因 $p_z$ 不变时，等压循环的 $\varepsilon$ 最大，而等容循环的 $\varepsilon$ 最小。

❖ 继续膨胀循环的定义



无中冷脉冲涡轮增压内燃机的理想循环



❖ 继续膨胀循环不能在内燃机气缸内实现的原因

- a. 这种继续膨胀循环如在内燃机气缸中实现，将使内燃机气缸加长，容积增大，使得平均压力 $p_t$ 降低，发动机重量增加。
- b. 由于气缸长度（容积）的增加，使得摩擦损失也大大增加，反而得不偿失。

## ❖ 涡轮增压器的工作方式

### a. 脉冲涡轮增压

从气缸排出的废气沿绝热膨胀线继续膨胀，将各缸排出的废气直接引入涡轮，在涡轮喷嘴中形成脉冲气流，排气管做成有利于使涡轮进口气体压力幅度达到最大，以充分利用废气的脉冲能量在涡轮中做功。

特点：

- 充分利用了废气的脉冲能量在涡轮中做功。
- 供给涡轮的能量变化大，涡轮效率较低，当 $\pi_k < 2.5$ 时使用。

## b. 定压涡轮增压

将各缸中排出的废气导入一根容积很大的排气总管，使涡轮前的压力保持恒定，在涡轮喷嘴中形成连续稳定气流。

特点：

- 废气的脉冲能量在涡轮中就不能加以利用，但在涡轮中废气能量转换是稳定的，涡轮效率较高。
- 当 $\pi_k > 2.5$ 时，定压的效率高于脉冲的效率，此时常采用定压涡轮增压方式。

### ❖ 无中冷脉冲涡轮增压内燃机理想循环

**a'--a** 压气机中的绝热压缩过程

**a--c** 气缸中的绝热压缩过程

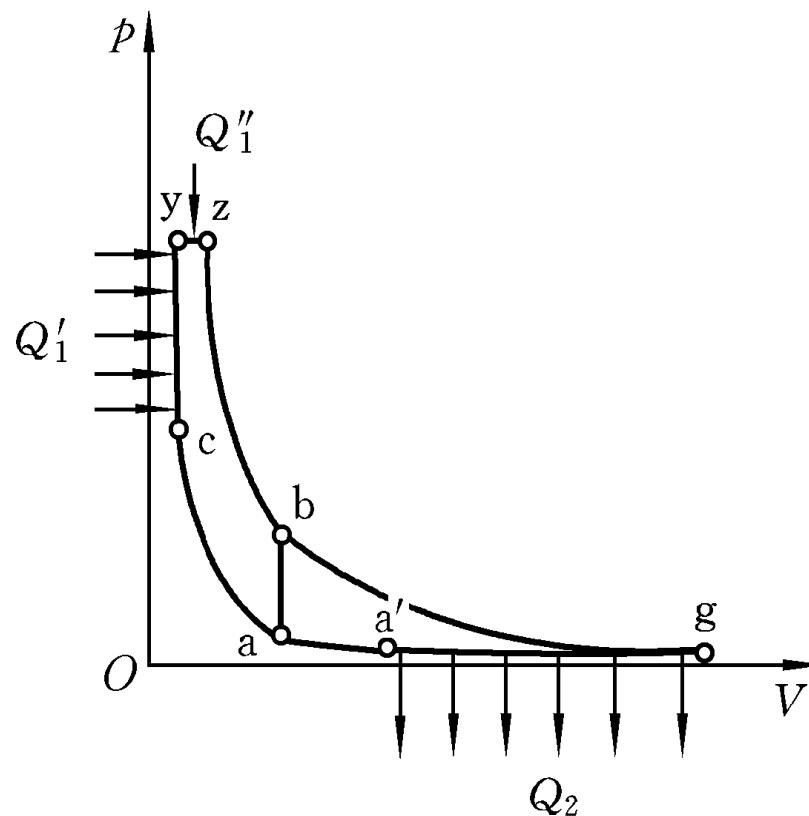
**c--y** 气缸中的定容加热过程

**y--z** 气缸中的定压加热过程

**z--b** 气缸中的绝热膨胀过程

**b--g** 涡轮中的绝热膨胀过程

**g--a'** 涡轮中的定压放热过程

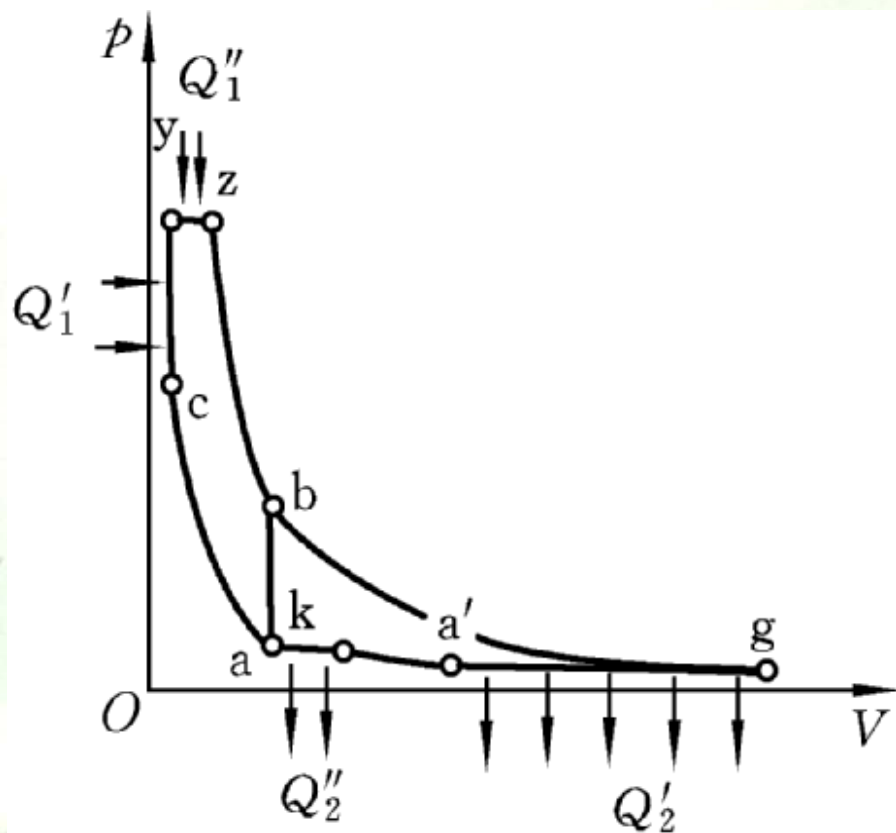


无中冷脉冲涡轮增压内燃机的理想循环



## ❖ 带中冷脉冲涡轮增压内燃机理想循环

为了加大进气量，提高进气密度，通常对增压器后的进缸空气进行冷却。其工作循环只是比无中冷的多了一个等压条件下向冷却器放热过程 $k-a$ 。



带中冷脉冲涡轮增压内燃机的理想循环

## ❖ 无中冷定压涡轮增压内燃机的理想循环

**a'--a** 压气机中的绝热压缩过程

**a--c** 气缸中的绝热压缩过程

**c--y** 气缸中的定容加热过程

**y--z** 气缸中的定压加热过程

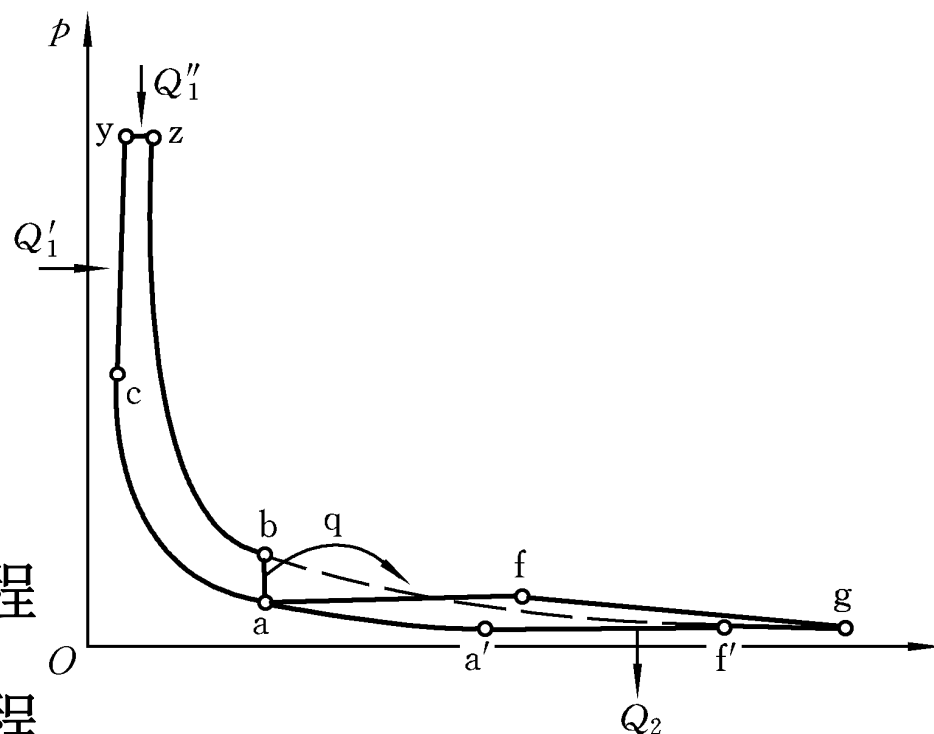
**z--b** 气缸中的绝热膨胀过程

**b--a** 排气管中的定容放热过程

**a--f** 排气管中的定压加热过程

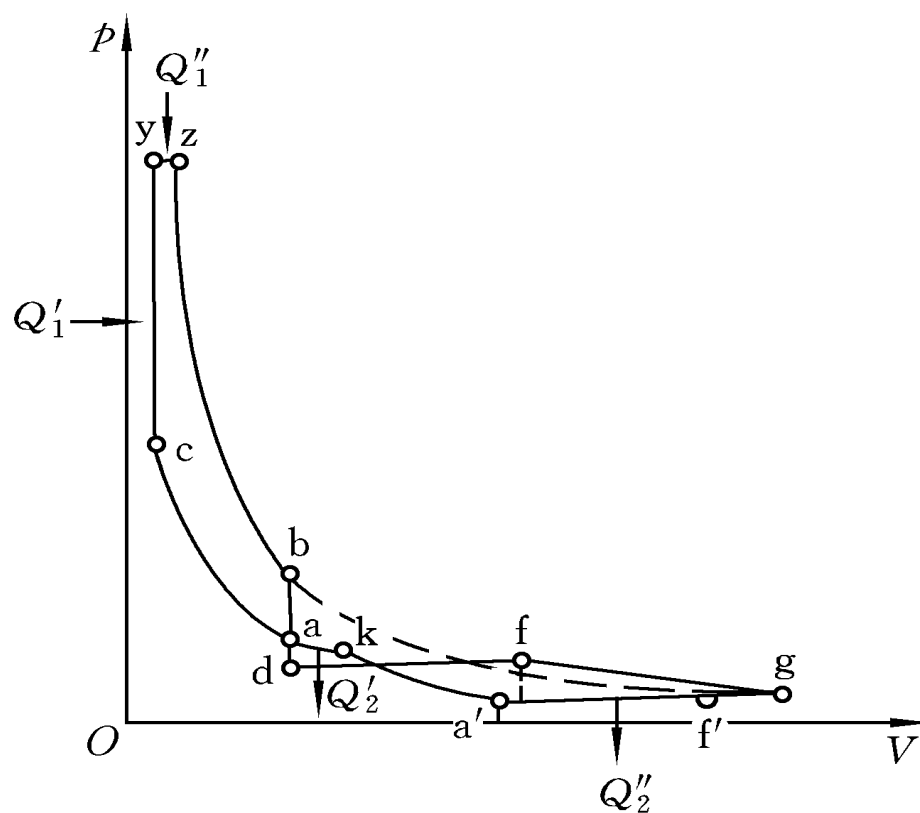
**f--g** 涡轮中的绝热膨胀过程

**g--a'** 涡轮中的定压放热过程



定压涡轮增压内燃机的理想循环

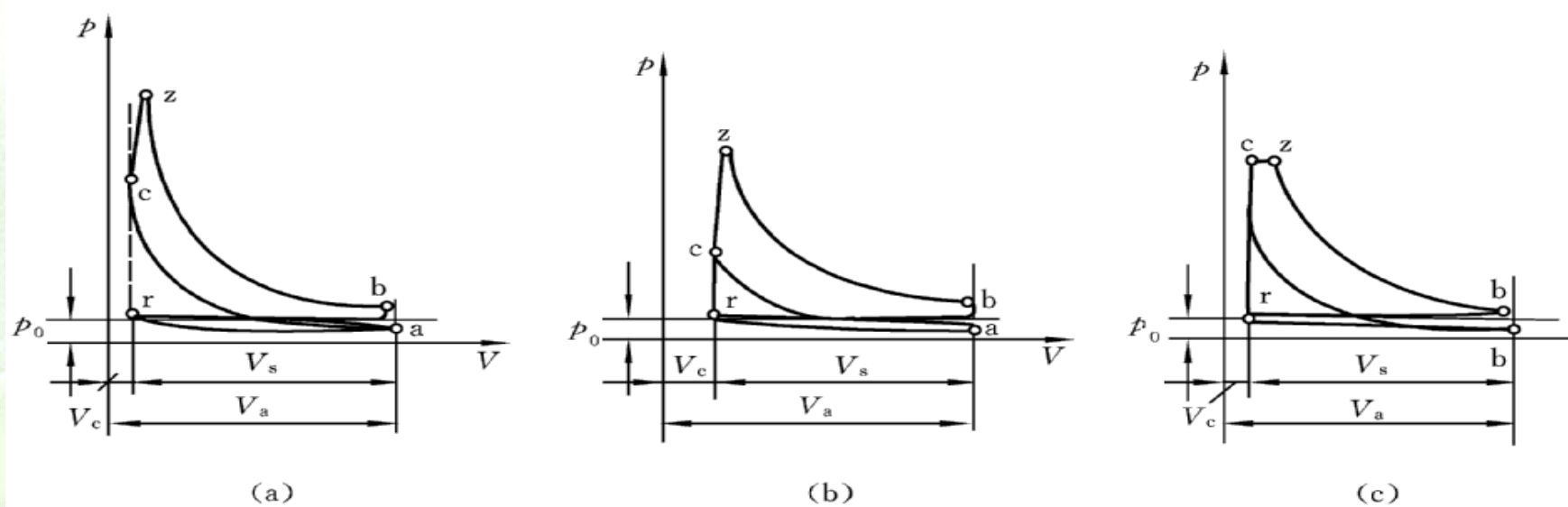
## ❖ 带中冷定压涡轮增压内燃机理想循环



带中冷脉冲涡轮增压内燃机的理想循环

## 二、柴油机实际循环

内燃机实际循环有着许多不可避免的损失，它的热效率和循环功比理论循环的要小。



四冲程内燃机实际循环的p-V示功图

(a) 无气喷射柴油机 (b) 汽油机 (c) 空气喷射柴油机



## ❖ 实际循环与理论循环的区别

### 1. 工质不同→ $\eta_t \downarrow$

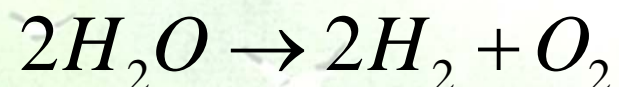
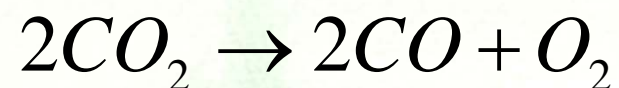
#### a. 工质成分变化→ $\eta_t \downarrow$

理想循环的工质是理想气体，它的物理及化学性质在整个循环中是不变的。

实际循环中，燃烧前的工质是新鲜空气与上循环的残留废气的混合物，燃烧过程中和燃烧后，工质成分为燃烧产物，不仅成分发生变化，物质的量也发生了改变。

**b. 工质高温分解→ $\eta_t \downarrow$** 

在1300k温度以上，燃烧产物会发生高温分解的现象，分解吸收热量，这会降低最高燃烧温度，使循环热效率下降。



c. 工质比热变化 $\rightarrow \eta_t \downarrow$

理想循环工质的比热是不随温度变化的，实际工质的比热随温度上升而上升。

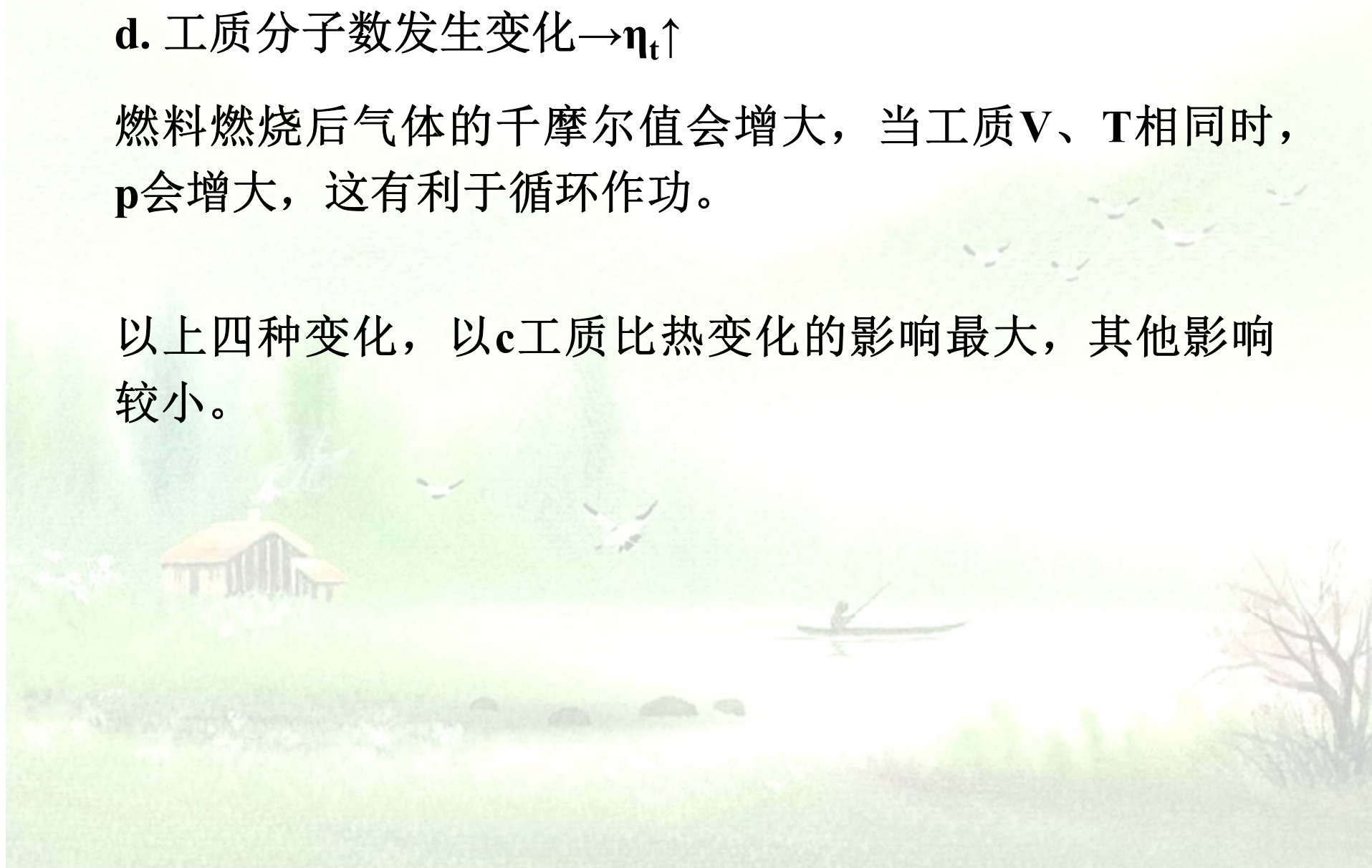
理想气体是双原子气体（ $O_2$ ， $N_2$ ，空气等），比热比实际的多原子燃气（ $CO_2$ ， $H_2O$ ， $SO_2$ 等）的比热小。

如加热量相同，实际循环能达到的最高温度较理想循环的为低，循环热效率小些，循环所作功减少了。

d. 工质分子数发生变化 $\rightarrow \eta_t \uparrow$

燃料燃烧后气体的千摩尔值会增大，当工质 $V$ 、 $T$ 相同时， $p$ 会增大，这有利于循环做功。

以上四种变化，以 $c$ 工质比热变化的影响最大，其他影响较小。



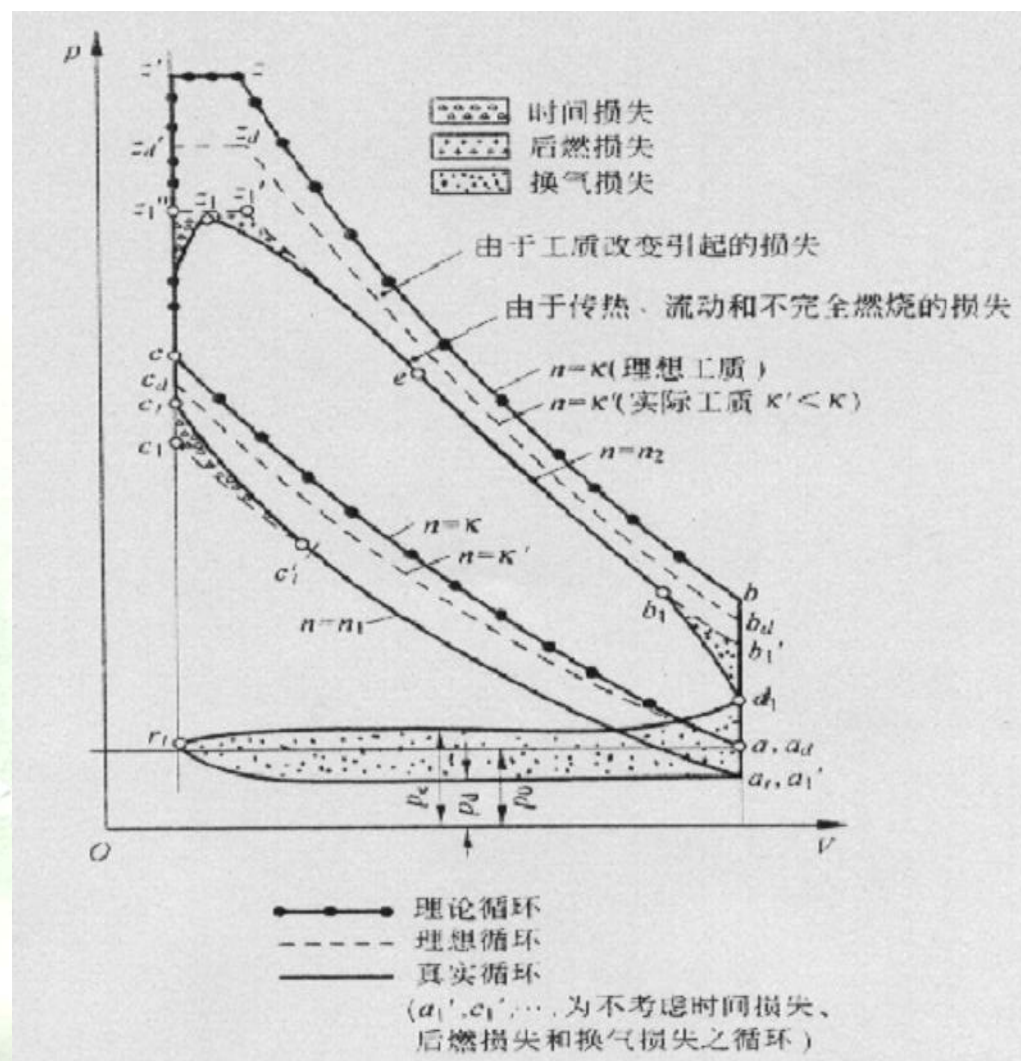


## 2. 换气损失 $\rightarrow \eta_t \downarrow$

理想循环是闭式循环，  
无工质更换，无流动损失。

在实际循环中，每个循环的工质必须更换。

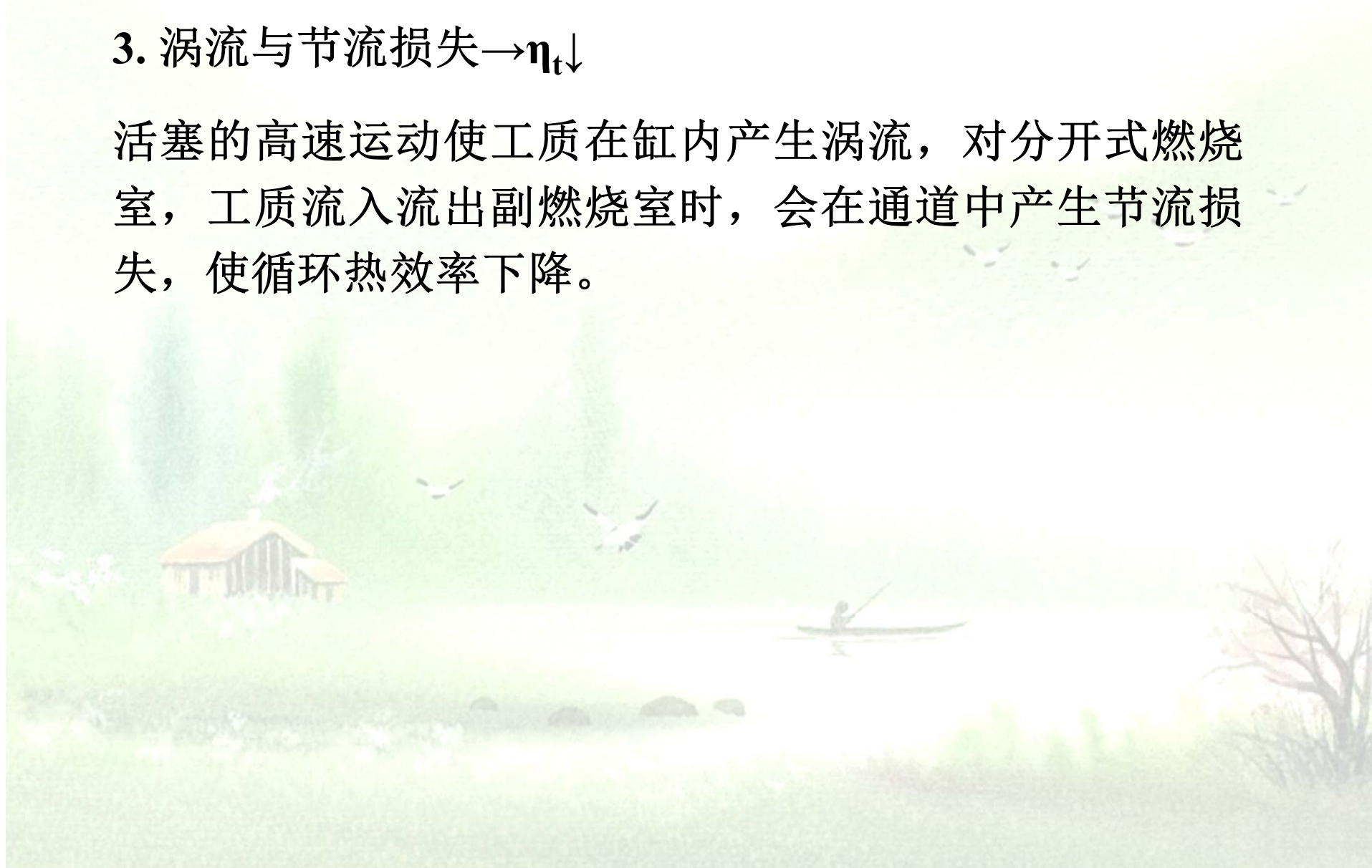
图中  $b_1b_1'd_1b_1$  和  $d_1r_1a_1d_1$  面积为换气损失。



非增压柴油机理论循环和实际循环p-V图的比较

### 3. 涡流与节流损失→ $\eta_t \downarrow$

活塞的高速运动使工质在缸内产生涡流，对分开式燃烧室，工质流入流出副燃烧室时，会在通道中产生节流损失，使循环热效率下降。



#### 4. 传热损失→ $\eta_t \downarrow$

理想循环时假设工质与气缸盖、活塞顶、气缸壁、进、排气门等受热零件无热交换。

实际循环中，必须对这些受热部件进行冷却，才能保证内燃机的正常运行，部分热量从冷却系统中传出，使循环热效率和循环比功率都有所下降。

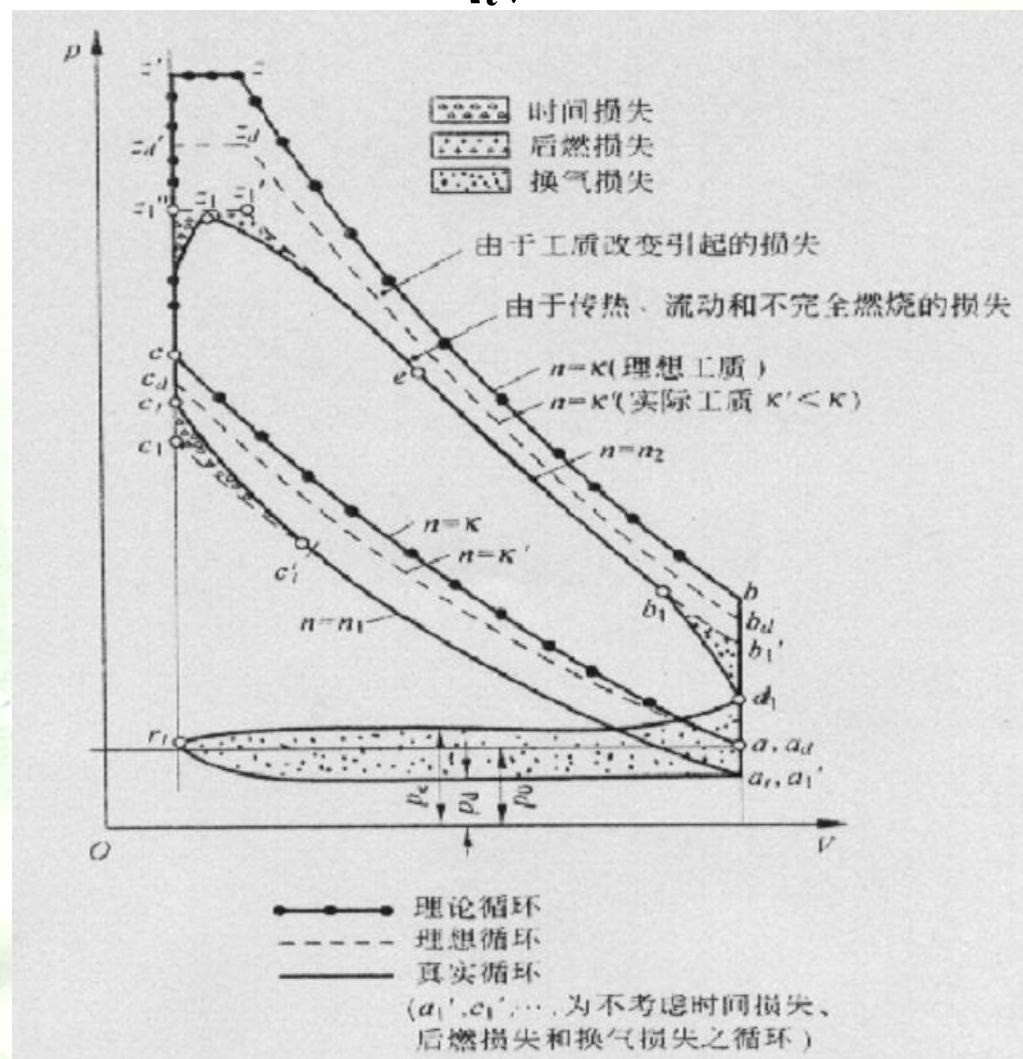


## 5. 燃烧不及时，后燃及不完全燃烧损失→ $\eta_t \downarrow$

### a. 燃烧不及时→ $\eta_t \downarrow$

理想循环假定定容加热是瞬间完成的，而定压加热是在 $z'z$ 阶段内完成的。

实际循环时，燃烧需要一定时间。



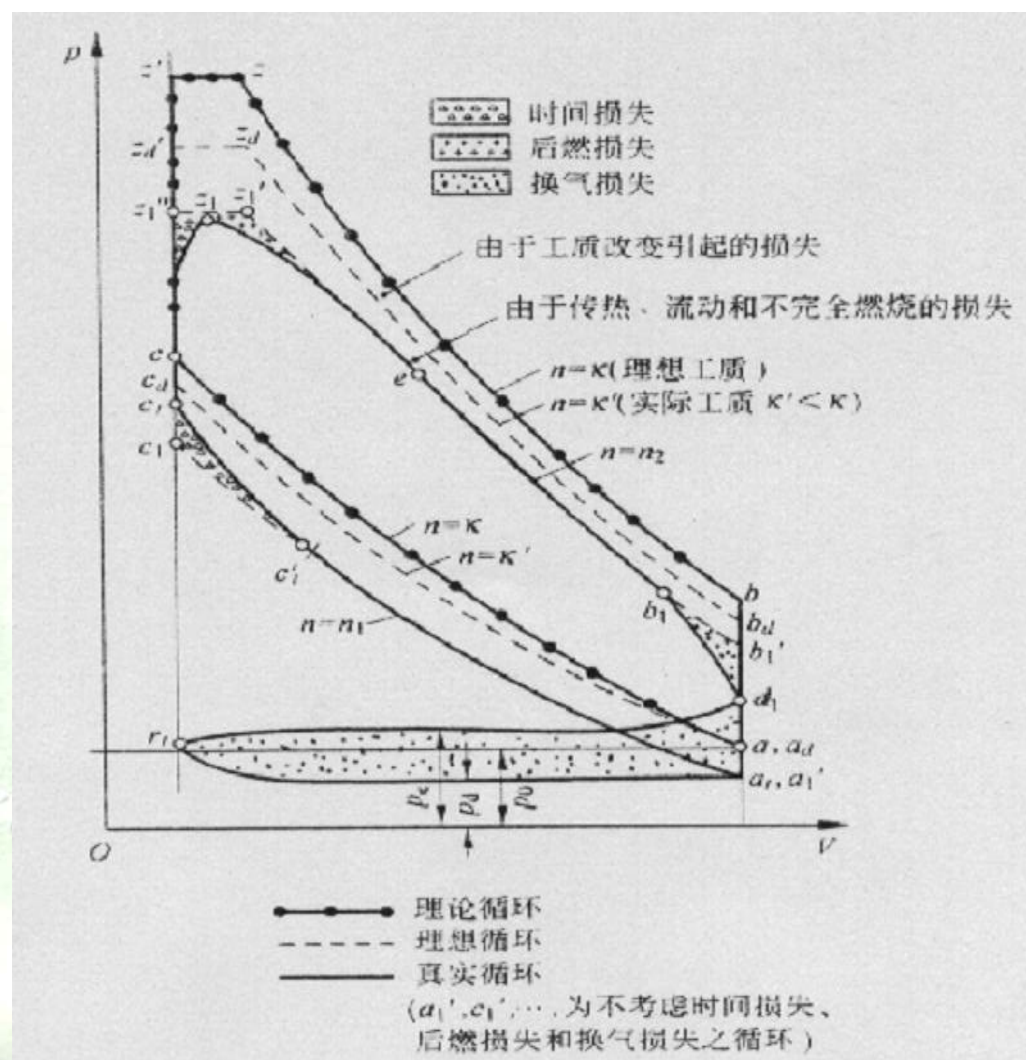
非增压柴油机理论循环和实际循环 $p$ - $V$ 图的比较



**压缩消耗功增加：**由于喷油常提前，使着火在上止点以前开始，增加了压缩负功 $c_t'c_1c_tc_t'$ 。

**最高燃烧压力 $p_z$ 下降：**由于燃烧速度有限、传热损失及在燃烧过程中活塞离开上止点的运动，使压力增长 $c_tz_1'' < cz'$ 。

**初膨胀比 $\rho$ 减少：**由于传热、不完全燃烧和活塞运动，使初膨胀比 $\rho$ 减少，损失了 $cz_1''z_1c$ 。



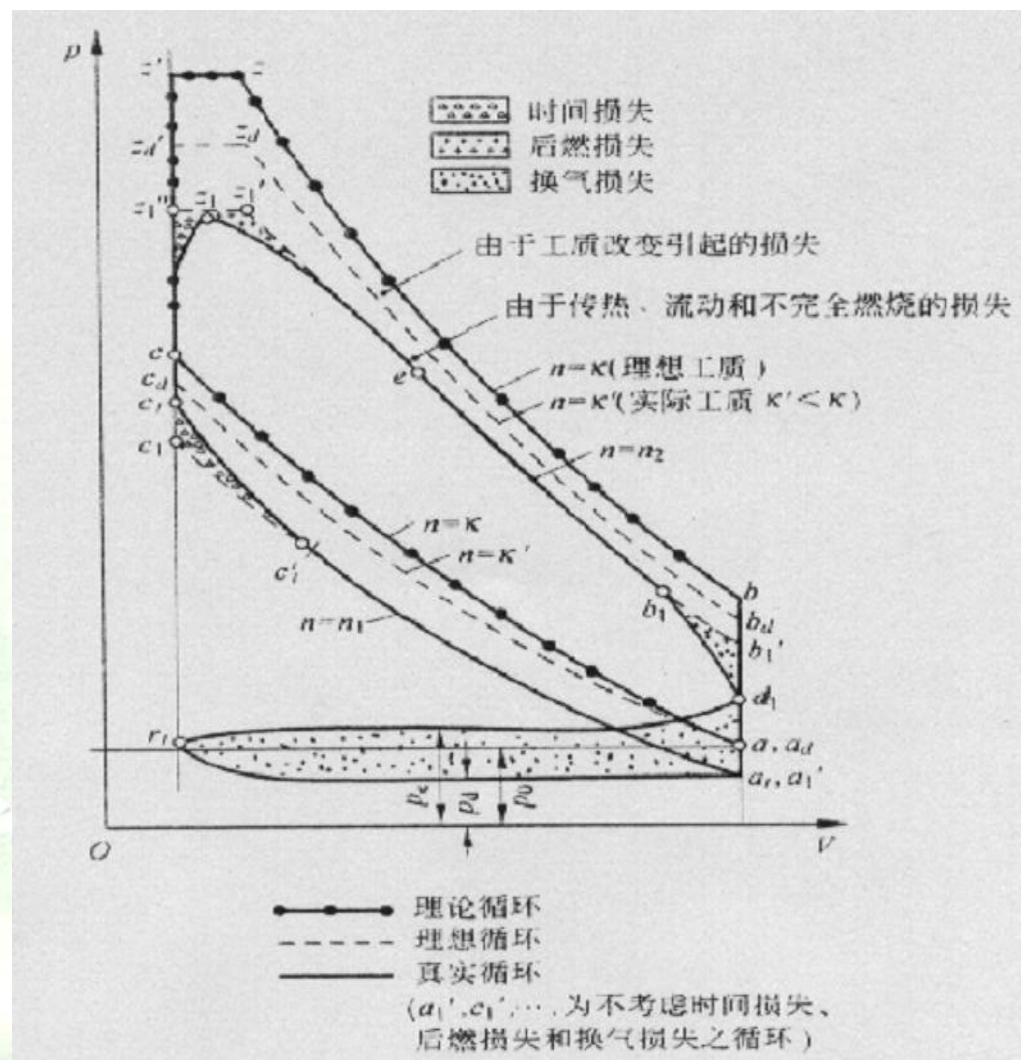
非增压柴油机理论循环和实际循环 $p$ - $V$ 图的比较

b. 后燃  $\rightarrow \eta_t \downarrow$ 

当接近 $z_1$ 点时，氧浓度降低，使燃烧速度下降，在膨胀线 $e$ 点还在燃烧。这就是后燃现象。

后燃是在后膨胀比较小的情况下进行，所以损失了 $z_1 z_1' e z_1$ ，导致热效率下降。

$e$ 点的位置取决于混合气形成的完善程度，供油规律，过量空气系数的大小及发动机的转速等因素。

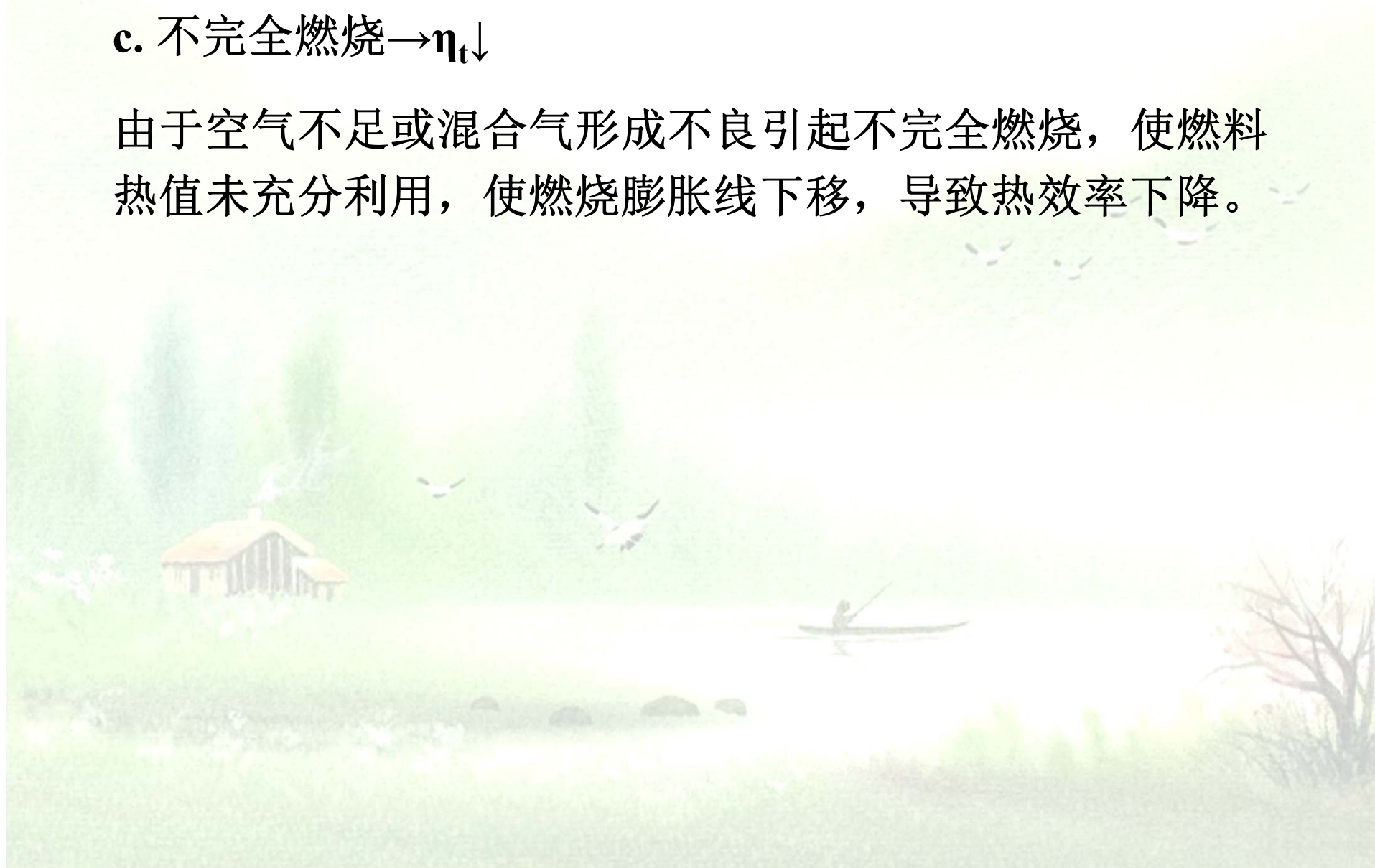


非增压柴油机理论循环和实际循环 $p$ - $V$ 图的比较



c. 不完全燃烧→ $\eta_t \downarrow$

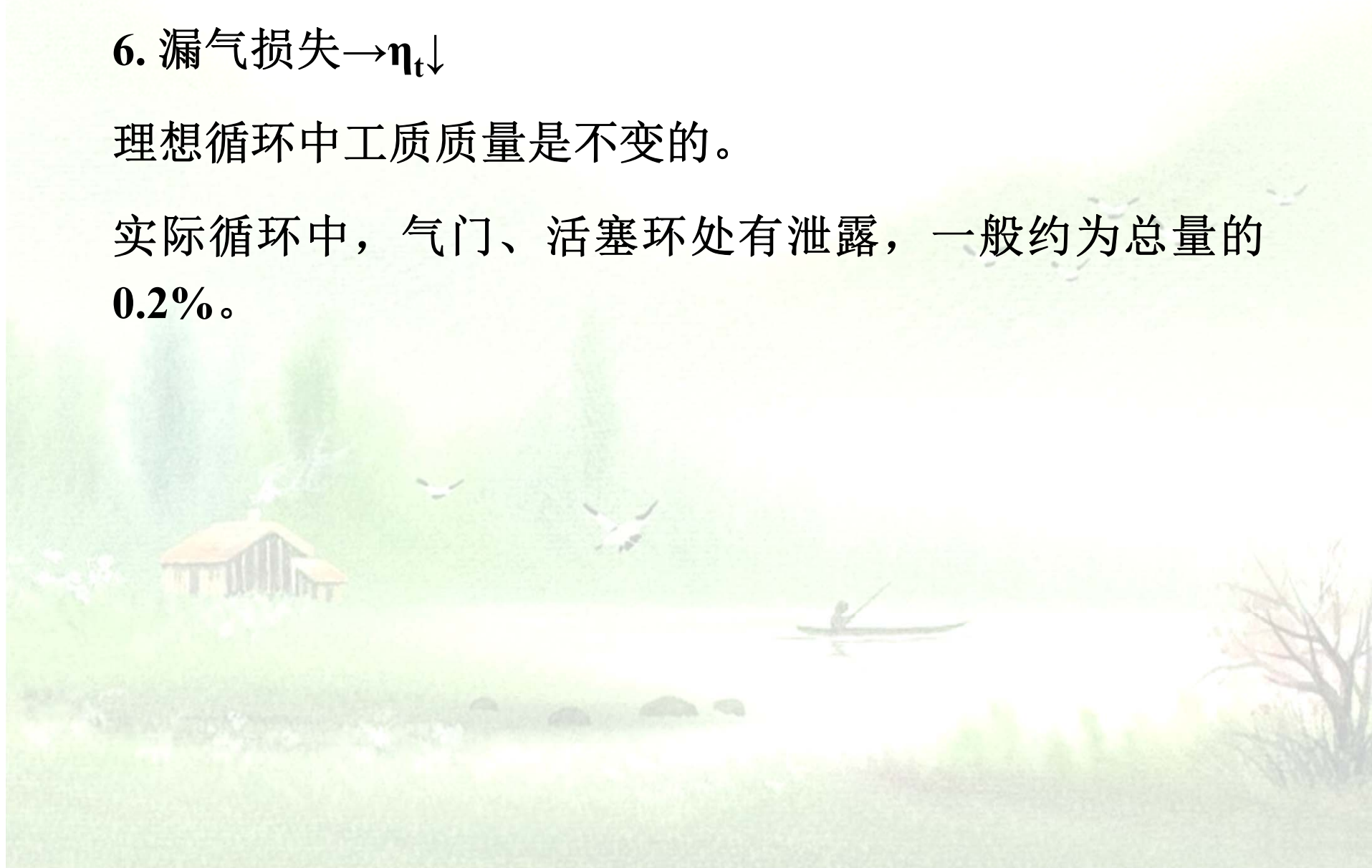
由于空气不足或混合气形成不良引起不完全燃烧，使燃料热值未充分利用，使燃烧膨胀线下移，导致热效率下降。



## 6. 漏气损失→ $\eta_t \downarrow$

理想循环中工质质量是不变的。

实际循环中，气门、活塞环处有泄露，一般约为总量的  
**0.2%。**





## 1.3 柴油机的性能指标

### 一、柴油机指示参数

#### ❖ 内燃机指示参数的定义

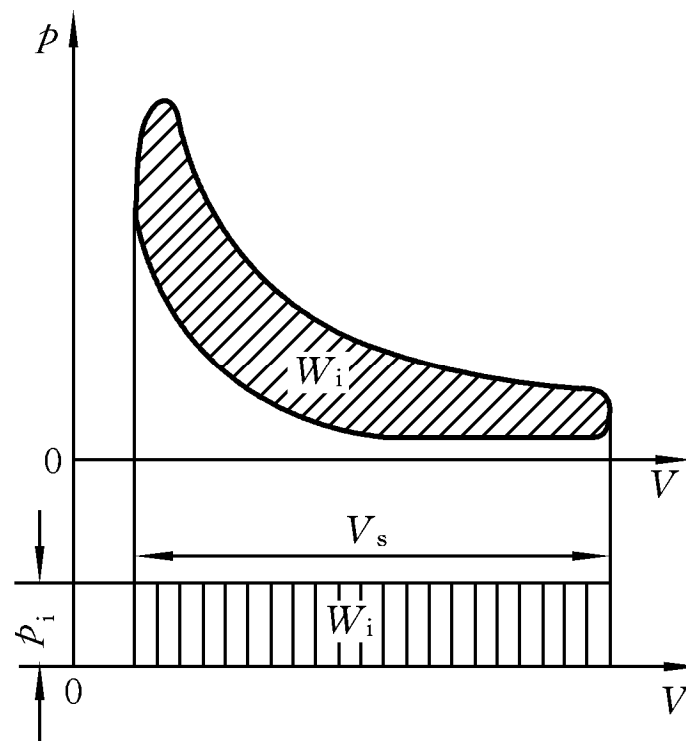
a. 内燃机的指示参数是用以表征燃料燃烧释放出来的热能转变为机械能完善程度的一组参数，只考虑了气缸内因燃烧不完全和传热等方面所引起的热量损失，而没有考虑各运动副间所存在的摩擦损失、泵气损失和辅助机械损失等。

b. 由于指示参数主要是从实测示功图计算得到的，所以有时将指示参数又称为示功参数。

c. 内燃机的指示参数主要包括内燃机的平均指示压力 $p_i$ 、指示功率 $N_i$ 、指示效率 $\eta_i$ 以及指示油耗率 $g_i$ 。

### ❖ 平均指示压力 $p_i$

以一个假想的数值不变的气体压力作用在活塞上，在一个膨胀行程内所获得的功与一个工作循环的指示功 $W_i$ 相等，这个假想的压力就称为平均指示压力 $p_i$ 。



平均指示压力 $p_i$ 的示意图

### ❖ 平均指示压力的表达式

$$p_i = \frac{W_i}{V_s} \times 10^{-3} \quad (MP_a)$$

a. 平均指示压力就是内燃机在一个工作循环中每单位气缸工作容积，活塞所获得的指示功。这样，平均指示压力 $p_i$ 就与气缸的容积大小无关了，成为衡量内燃机气缸工作容积 $V_s$ 利用率高低的一个参数。

b. 平均指示压力 $p_i$ 也是衡量内燃机实际作功能力大小的一个很重要的性能参数，基本上表征了内燃机的强化程度和工作循环各阶段进行的完善程度。



## ❖ 内燃机平均指示压力 $p_i$ 的影响因素

### 1. 增压度 $p_k$

当 $\alpha$ 一定时， $p_k \uparrow \rightarrow p_s \uparrow \rightarrow \rho_s \uparrow \rightarrow p_i \uparrow$ ，可见 $p_{i,增} > p_{i,非}$ 。对特定的发动机，因受热负荷与机械负荷的限制，用提高 $p_k$ 来提高 $p_i$ 也有一个限度。

## 2. 过量空气系数 $\alpha$

当每循环供油量不变时,  $p_k \uparrow \rightarrow \alpha \uparrow \rightarrow A/F \uparrow$

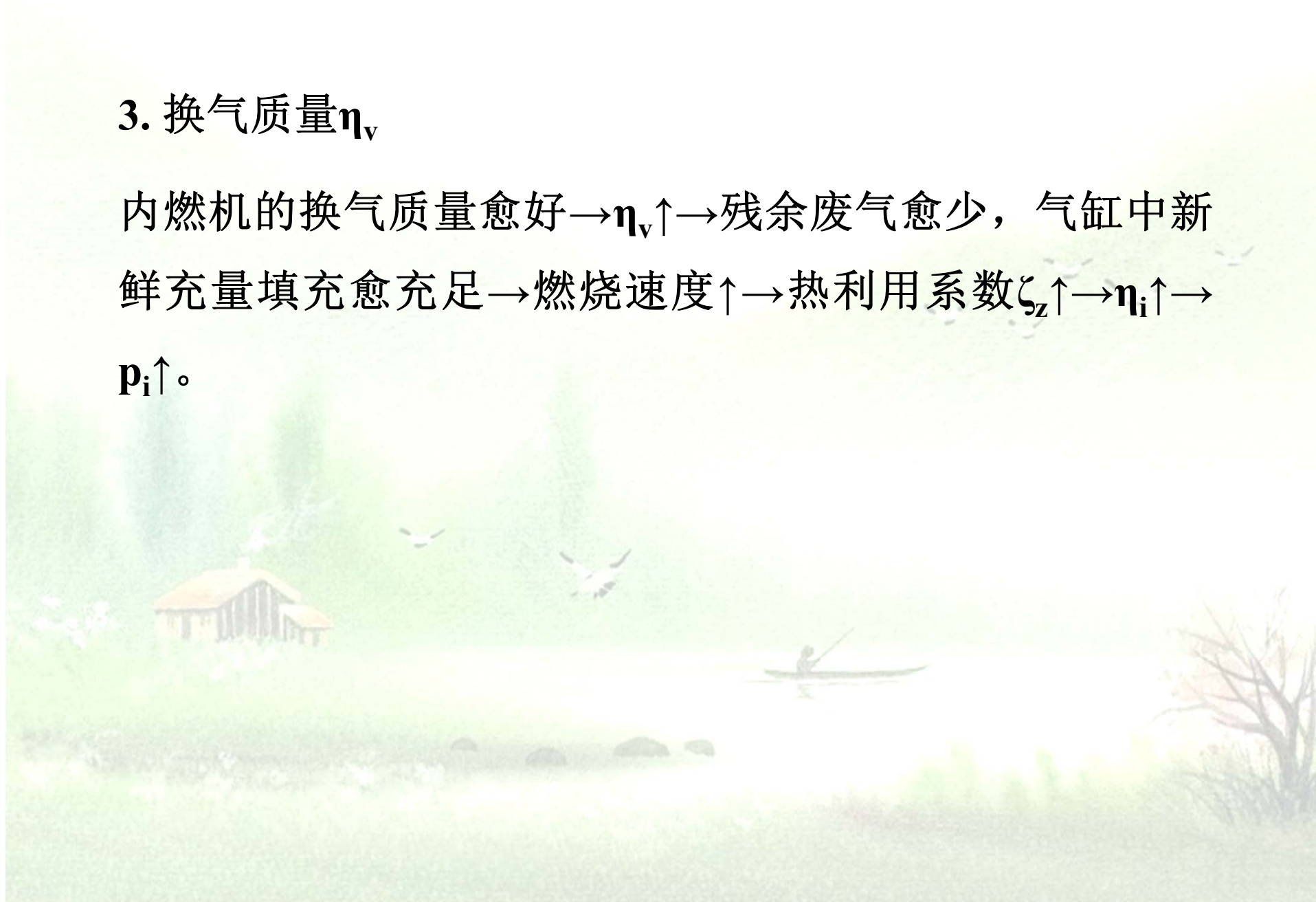
a. 在 $\alpha \leq 2$ 以前, 随着 $\alpha$ 的增大, 混合气中的氧气成分增加, 可促进燃烧的改善,  $p_i$ 值也随着 $\alpha$ 值的提高而有所提高。

b. 当 $2.6 \geq \alpha > 2$ 时, 随着 $\alpha$ 的提高, 混合气逐渐变得比较稀薄,  $p_i$ 的增加就变得很缓慢。

c. 到 $\alpha > 2.6$ 后,  $\alpha \uparrow \rightarrow \text{燃烧速度} \downarrow \rightarrow \text{后燃} \uparrow \rightarrow \eta_i \downarrow \rightarrow p_i \downarrow$

### 3. 换气质量 $\eta_v$

内燃机的换气质量愈好 $\rightarrow \eta_v \uparrow \rightarrow$ 残余废气愈少，气缸中新鲜充量填充愈充足 $\rightarrow$ 燃烧速度 $\uparrow \rightarrow$ 热利用系数 $\zeta_z \uparrow \rightarrow \eta_i \uparrow \rightarrow p_i \uparrow$ 。



#### 4. 油气混合的完善程度

柴油机燃油空气混合完善程度愈高，完全燃烧所需的 $\alpha \downarrow \rightarrow p_i \uparrow$ 。但 $\alpha$ 值也不能太小，太小使气缸热负荷 $\uparrow$ ， $g_e \uparrow$ 。

#### 5. 燃烧完善的程度 $\eta_i$

燃烧完善 $\rightarrow$ 燃烧速度 $\uparrow \rightarrow$ 放热持续期 $\downarrow \rightarrow$ 等容度 $\uparrow \rightarrow$ 热利用系数 $\zeta_z \uparrow \rightarrow \eta_i \uparrow \rightarrow p_i \uparrow$ 。



### ❖ 指示功率 $N_i$

每单位时间内作用于活塞上的指示功称为内燃机的指示功率 $N_i$ ，即：

$$N_i = \frac{W_i n i}{60 \frac{z}{2}} = \frac{10^3 p_i V_s n i}{60 \frac{z}{2}} = \frac{p_i V_s n i}{3z} 10^2 \quad (kW)$$

从上式可见，加大 $p_i$ 、 $V_s$ 、 $n$ 、 $i$ ，减小 $z$ ，皆可达到提高内燃机指示功率 $N_i$ 的目的。

### ❖ 指示效率 $\eta_i$

指示效率是评价内燃机工作循环的一个经济性参数，也是衡量气缸内燃料燃烧应释放出的热能有效转化为指示功的程度的一个尺度。根据指示效率的定义，可得：

$$\eta_i = \frac{W_i}{m_{fcyc} H_u}$$

### ❖ 指示油耗率 $g_i$

指示油耗率是指内燃机每小时发出**1kW**指示功率时所消耗的燃油量，即：

$$g_i = \frac{\dot{m}_f}{N_i} \times 10^3 \quad (g/kW \cdot h)$$

或者

$$g_i = \frac{3600 \times 10^3}{\eta_i H_u} \quad (g/kW \cdot h)$$

由上式可以清楚看出 $g_i$ 与 $\eta_i$ 反比， $\eta_i$ 越高， $g_i$ 越少，反之亦然。

### ❖ 机械损失功率 $N_m$

在内燃机工作过程中，经曲轴输出的有效功率 $N_e$ 总小于活塞所获得的指示功率 $N_i$ ，其差值为机械损失功率 $N_m$ ，即：

$$N_m = N_i - N_e$$

而有效功率与指示功率之比即定义为机械效率  $\eta_m$ ，即：

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_i - N_m}{N_i} = 1 - \frac{N_m}{N_i}$$



## ❖ 机械损失功率的组成

以柴油机为例，机械损失功率主要由下面几部分组成：

$$N_m = N_{mf} + N_p + N_k + N_{au}$$

$N_{mf}$ ：摩擦损失功率；

$N_p$ ：泵气损失功率， $p_k > p_r$ 为正， $p_k < p_r$ 为负；

$N_k$ ：机械增压压气机或扫气泵消耗的功率；

$N_{au}$ ：辅助机械损失功率（包含：燃油泵、机油泵、水泵、发电机等）。

对应于机械损失功率 $N_m$ 引入平均机械损失压力 $p_m$ ，在数值上它等于各部分机械损失压力的总和。

## ❖ 内燃机有效参数的定义

- a. 内燃机有效参数与指示参数的不同之处就是除指示参数考虑的热力损失外，还考虑了机械损失。
- b. 内燃机的有效参数包括平均有效压力 $p_e$ 、有效功率 $N_e$ 、有效效率 $\eta_e$ 及有效油耗率 $g_e$ 。

### ❖ 平均有效压力 $p_e$

平均有效压力 $p_e$ 是一个假想的不变的压力。用 $p_e$ 作用在活塞上，在一个活塞行程内所做的功等于一个循环中经内燃机曲轴所输出的有效功。

$$p_e = p_i - p_m = p_i \eta_m$$

### ❖ 有效功率 $N_e$

有效功率 $N_e$ 是内燃机实际输出的功率，即：

$$N_e = N_i - N_m = N_i \eta_m$$

有效功率 $N_e$ 一般可以直接用测功器测出。



### ❖ 有效效率 $\eta_e$

内燃机的有效效率 $\eta_e$ 和有效油耗率 $g_e$ 统称为内燃机的经济性参数，用这两个参数可以比较不同内燃机或不同工况的经济性。

有效效率 $\eta_e$ 是曲轴上输出有效功与消耗相应的燃料热能的比，即：

$$\eta_e = W_e / Q_{\text{吸入}} = \eta_i \eta_m$$

所以， $\eta_e$ 是内燃机输出功的总效率，包括了内燃机的一切热力损失和机械损失。

❖ 有效油耗率 $g_e$

有效油耗率 $g_e$ 是内燃机曲轴每输出 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 有效功所消耗的燃料量，即：

$$g_e = g_i / \eta_m$$

有效油耗率 $g_e$ 也是包括了内燃机一切损失在内的油耗率。

影响有效参数的因素除包括影响指示参数的因素外，还应加上影响机械效率的因素。