

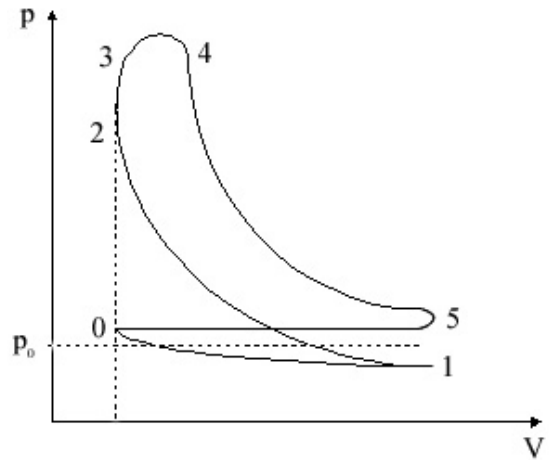
# 第一章 发动机工作循环及性能指标

## § 1-1 发动机理想循环概述

### 一 实际循环向理想循环的简化

#### (一) 实际循环 (以车用柴油机为例)

- 1 进气过程: 0~1 (  $p > p_0 \rightarrow p < p_0$  )
- 2 压缩过程: 1~2 (  $p \uparrow, T \uparrow$  )  
初期: 工质吸热; 后期: 工质放热。
- 3 燃烧过程: 2~3~4 (  $p \uparrow \uparrow, T \uparrow \uparrow$  )
- 4 膨胀过程: 4~5 (  $p \downarrow, T \downarrow$  )  
初期: 工质放热; 后期: 工质吸热。
- 5 排气过程: 5~0 (  $p > p_0$  )



#### (二) 实际循环的简化

- 1 忽略进、排气过程
- 2 压缩、膨胀过程 (复杂的多变过程) 简化为绝热过程
- 3 燃烧过程简化为定容加热过程 (2~3) 和定压加热过程 (3~4)
- 4 排气放热简化为定容放热过程
- 5 假定工质为定比热的理想气体

## 二 理想循环及其分析比较

### (一) 混合加热循环

#### — 车用柴油机的理想循环

#### 1 循环特征参数

##### (1) 压缩比

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

##### (2) 压力升高比

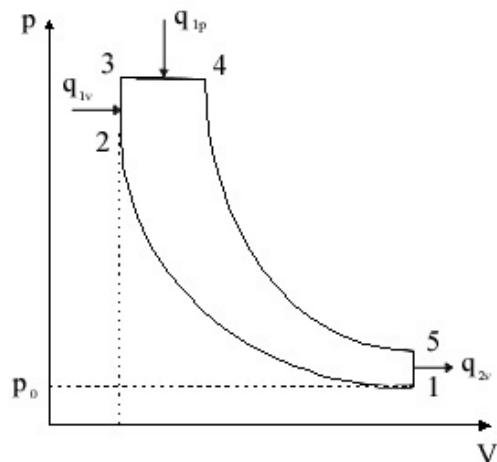
$$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$$

##### (3) 预胀比

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

#### 2 热效率

$$\eta_t = \frac{w_0}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_{2v}}{q_{1v} + q_{1p}}$$



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

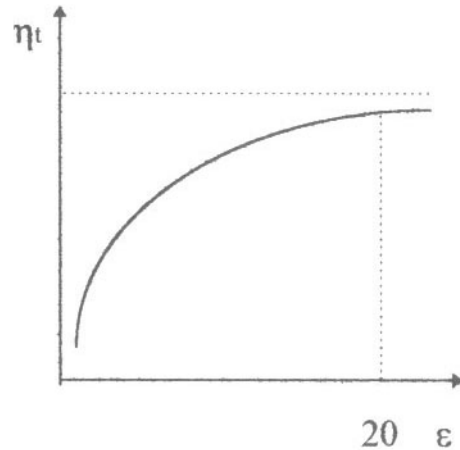
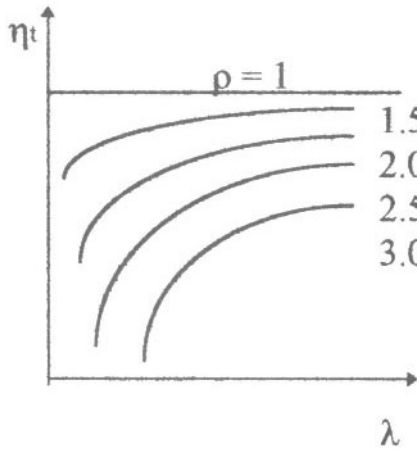
3 分析

(1)  $\varepsilon$  为定值

$\lambda \uparrow \rightarrow \eta_t \uparrow$  ;  $\rho \uparrow \rightarrow \eta_t \downarrow$  。  $\rho = 1 \rightarrow \eta_t = \text{const.}$  (汽油机, 定容加热循环)

(2)  $\varepsilon \uparrow \rightarrow \eta_t \uparrow$  ; 当  $\varepsilon = 20$  左右时,  $\varepsilon \uparrow \rightarrow \eta_t \uparrow$  不大

柴油机  $\varepsilon = 12 \sim 22$



(二) 定容加热循环 (奥托 OTTO 循环)

— 汽油机的理想循环

1 热效率

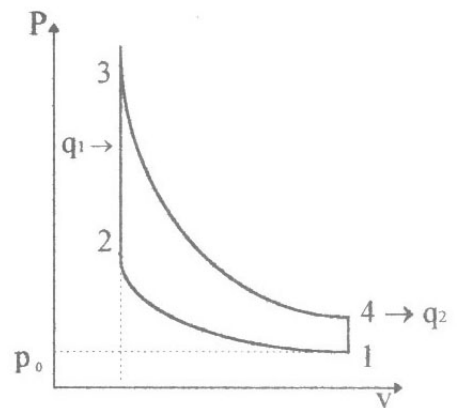
因为: 预胀比  $\rho = \frac{v_4}{v_3} = 1$

所以: 热效率  $\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$

2 分析

$\rho = 1 \rightarrow \eta_t = \text{const.}$

$\varepsilon \uparrow \rightarrow \eta_t \uparrow$  ; 当  $\varepsilon = 10$  左右时,  $\varepsilon \uparrow \rightarrow \eta_t \uparrow$  不大  
且汽油机容易爆燃, 因此, 汽油机  $\varepsilon = 6 \sim 10$



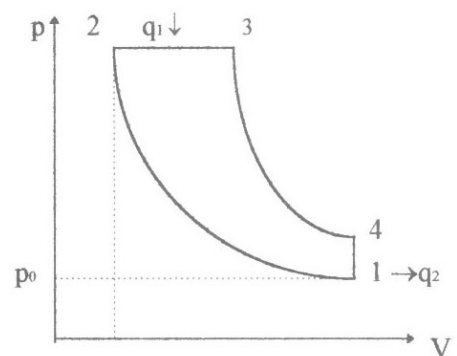
(三) 定压加热循环 (狄赛尔 DIESEL 循环)

— 船舶用大型低速柴油机的理想循环

1 热效率

因为: 压力升高比  $\lambda = \frac{p_3}{p_2} = 1$

所以: 热效率  $\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}$



## 2 分析

- (1)  $\epsilon$  为定值  $\rho \uparrow \rightarrow \eta_t \downarrow$
- (2)  $\rho$  为定值  $\epsilon \uparrow \rightarrow \eta_t \uparrow$

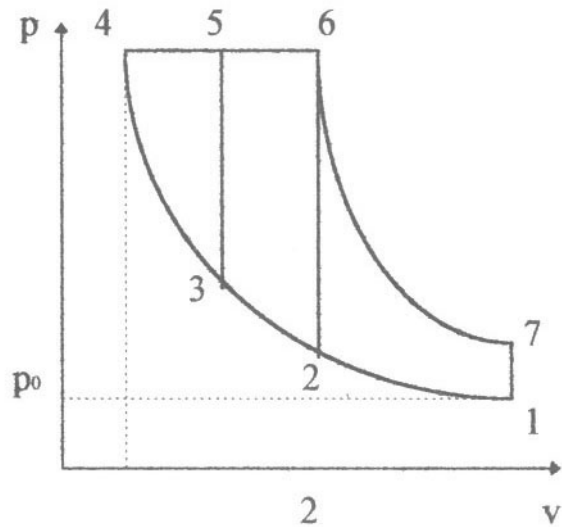
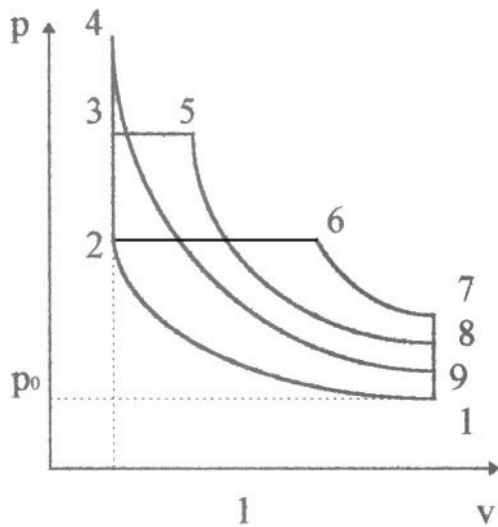
### (四) 三种理想循环热效率的比较

1 初态 1 相同，压缩比  $\epsilon$  相同，加热量  $q_1$  相同

$$\eta_{t,v} > \eta_{t,m} > \eta_{t,p}$$

2 初态 1 相同，最高压力  $p_{\max}$ 、最高温度  $T_{\max}$  相同，放热量  $q_2$  相同

$$\eta_{t,v} < \eta_{t,m} < \eta_{t,p}$$



## § 1-2 发动机实际循环

发动机理想循环加上各项损失后，即可分析发动机的实际循环。

### 一 工质改变损失

#### (一) 工质性质

理论上：理想气体，双原子气体。

实际上：燃烧前：燃料+空气；

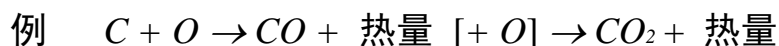
燃烧后：燃烧产物。

#### (二) 比热

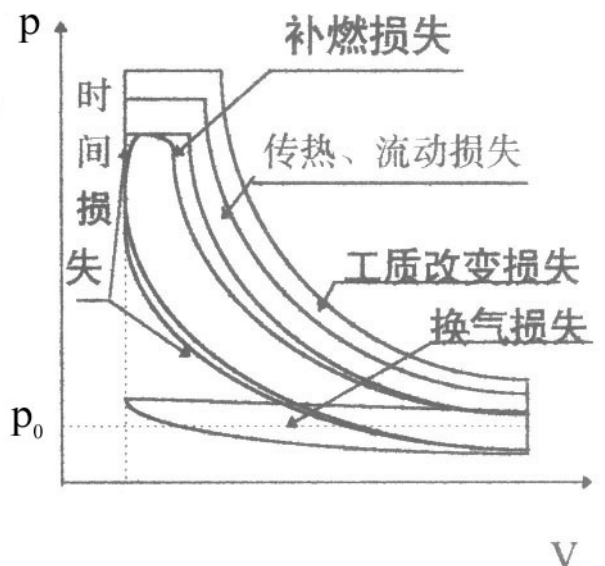
理论上：定比热

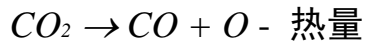
实际上：温度  $T \uparrow \rightarrow$  比热  $C \uparrow$

#### (三) 高温分解



其中 CO 为中间产物，CO<sub>2</sub> 为最终产物。若遇高温，则会发生复分解反应，即高温分解：





这部分热量虽然在膨胀过程中还可能会释放出来，但由于活塞已接近下止点，做功效果变差，热效率下降。

## 二 传热、流动损失

### (一) 传热损失

理论上: 压缩、膨胀过程为绝热过程。

实际上: 大量热量通过汽缸壁传给冷却水或空气。

传热损失是发动机中的最大损失，占总损失量的 30% 以上。因此，许多研究者致力于开发绝热发动机。

### (二) 流动损失

理论上: 闭口系统，没有气体流动损失。

实际上: 进、排气节流沿程损失，缸内进气、挤压、燃烧涡流损失。

## 三 换气损失

理论上: 忽略进、排气过程。

实际上: 进、排气门提前开启，迟后关闭。而且有流动阻力。

换气损失中逆向循环所包围的面积为泵气损失。泵气损失包含在换气损失之中。

## 四 时间损失

理论上: 定容加热瞬间完成，定压加热速度与活塞运行速度密切配合。

实际上: 燃烧需要时间。

## 五 补燃损失

理论上: 加热瞬间停止，膨胀过程无加热。

实际上: 虽然大部分 (80% 以上) 燃料在燃烧过程中燃烧掉，但仍有小部分燃

料会拖到膨胀线上才燃烧，做功效果变差，热效率下降。

## 六 泄漏损失

理论上: 闭口系统，无泄漏。

实际上: 活塞气环不会 100% 严密密封，总会有些气体窜到曲轴箱中，造成损失。

## § 1-3 热平衡

总热量:

$$Q_T = G_T h_u$$

分别转化为

### 一 有效功的热量 $Q_E$

$$Q_e = 3.6 \times 10^3 N_e \text{ [kJ/h]} \quad (1 \text{ kw/h} = 3.6 \times 10^3 \text{ kJ})$$

只有这部分热量做了功，是有用的，所以希望越大越好。一般

柴油机: 30~40% ; 汽油机: 20~30%。

$$\text{令 } q_e = \frac{Q_e}{Q_T}$$

## 二 传递给冷却介质的热量 $Q_S$

$$Q_S = G_S c_S (t_2 - t_1) \quad q_s = \frac{Q_S}{Q_T}$$

其中  $G_S$ —发动机冷却介质的每小时流量 [kg/h]

$c_S$ —冷却介质比热 [kJ/kg·°C]

$t_1, t_2$ —冷却介质的进、出口温度 [°C]

## 三 废气带走的热量 $Q_R$

$$Q_R = (G_r + G_k)(c_{pr}t_2 - c_p t_1) \quad q_r = \frac{Q_R}{Q_E}$$

其中  $G_r$ —燃料量 [kg/h]

$G_k$ —空气量 [kg/h]

$c_{pr}$ —废气比热 [kJ/kg·°C]

$c_p$ —空气比热 [kJ/kg·°C]

$t_1, t_2$ —进、排气温度 [°C]

## 四 燃料不完全燃烧的热损失 $Q_B$

$$Q_B = Q_T(1 - \eta_r) \quad q_b = \frac{Q_B}{Q_T}$$

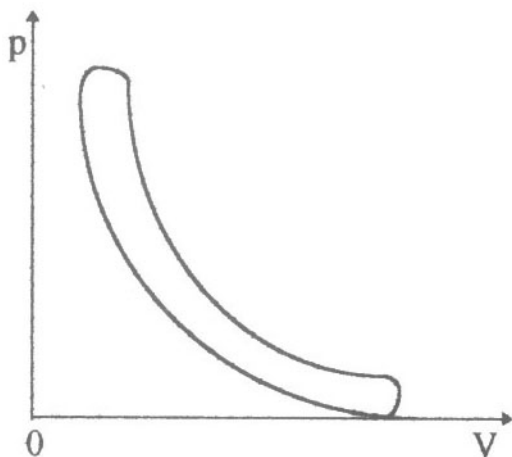
其中  $\eta_r$ —燃料效率

## 五 其它热量损失 $Q_L$

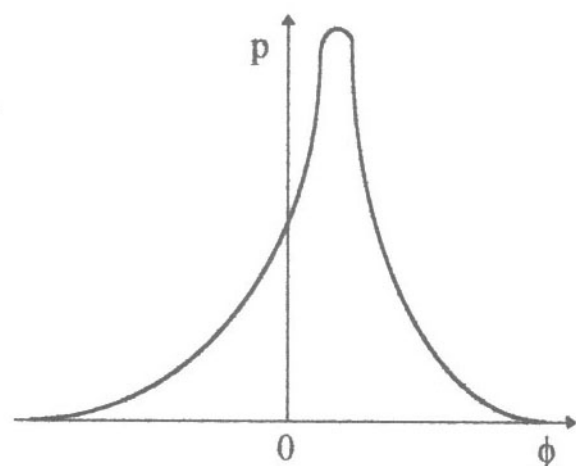
$$Q_L = Q_T - (Q_E + Q_S + Q_R + Q_B) \quad q_l = q_t - (q_e + q_s + q_r + q_b)$$

发动机热平衡方程式:  $q_e + q_s + q_r + q_b + q_l = 1$

### § 1-4 指示指标



p-V 图



p-phi 图

发动机性能指标: 指示指标, 有效指标

指示指标: 以工质在汽缸内对活塞做功为基础, 评价工作循环的质量。

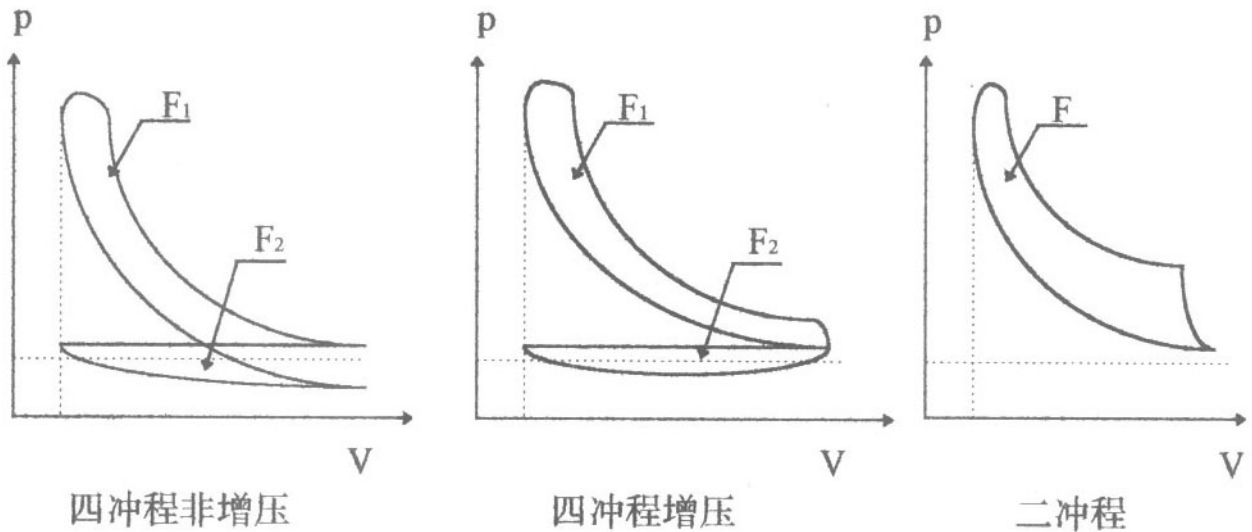
有效指标: 以曲轴上得到的净功率为基础, 评价整机性能。

示功图: 发动机缸内压力  $p$  随汽缸容积  $V$  ( $p$ - $V$  图) 或曲轴转角  $\phi$  ( $p$ - $\phi$ 图) 变化的图示。

### 一 指示功和平均指示压力

#### (一) 指示功 $W_i$

一个循环工质对活塞所做的有用功。



应该: 非增压:  $F_i = F_1 - F_2$     增压:  $F_i = F_1 + F_2$

因为:  $F_2$  不容易测量, 实际将  $F_2$  归到机械损失中考虑。

所以:  $F_i = F_1$

$$W_i = F_i \cdot a \cdot b \quad \text{其中 } a, b \text{ — 横、纵坐标比例尺}$$

指示功大, 说明 ○汽缸工作容积大 ○热功转换有效程度大。为突出后者, 比较不同大小发动机的热功转换有效程度, 引入平均有效压力的概念。

#### (二) 平均指示压力 $p_i$

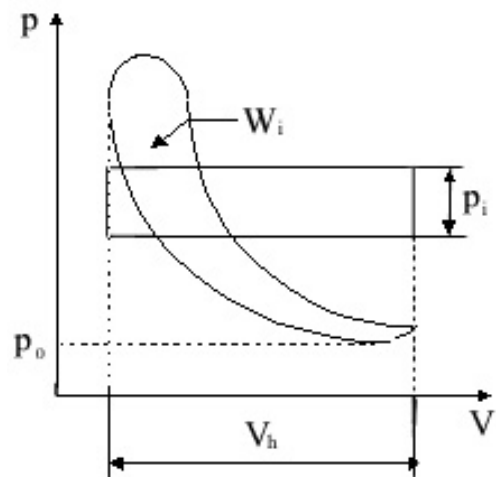
单位汽缸工作容积所做的指示功。

$$p_i = \frac{W_i}{V_h} \quad (\text{假想参数})$$

其中  $V_h$  — 每缸工作容积。

$$p_{i, \text{柴}} = 686 \sim 981 \text{ [ kpa ]}$$

$$p_{i, \text{汽}} = 784 \sim 1180 \text{ [ kpa ]}$$



### 二 指示功率 $N_i$

单位时间所做的指示功。

若: 缸数  $i$ , 每缸工作容积  $V_h$  [ $\text{m}^3$ ], 冲程数  $\tau$ , 平均指示压力  $p_i$  [ $\text{Pa}$ ], 转速  $n$  [ $\text{r/min}$ ]。则

$$N_i = W_i \cdot i \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{2}{\tau} = \frac{p_i V_h i n}{30 \tau} \quad [\text{W}]$$

$$= \frac{p_i V_h i n}{30 \tau} \times 10^{-3} \quad [\text{kW}]$$

若: 每缸工作容积  $V_h$  [ $\text{L}$ ], 平均指示压力  $p_i$  [ $\text{bar}$ ]。则

$$N_i = \frac{p_i V_h i n}{300 \tau} \quad [\text{kW}]$$

### 三 指示比油耗和指示热效率

#### (一) 指示比油耗 $g_i$

单位指示功率的耗油量。

$$g_i = \frac{G_T}{N_i} \times 10^3 \quad [\text{g/kW} \cdot \text{h}]$$

$G_T$ —每小时耗油量 [ $\text{kg/h}$ ]

#### (二) 指示热效率 $\eta_i$

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_i}$$

$Q_i$ —做  $W_i$  指示功所消耗的热量。

$$\eta_i = \frac{3.6 \times 10^6}{g_i h_u}$$

$h_u$ —燃料的低热值。

$$\eta_{i, \text{柴}} = 0.43 \sim 0.50 \quad g_{i, \text{柴}} = 170 \sim 200 \quad [\text{g/kW} \cdot \text{h}]$$

$$\eta_{i, \text{汽}} = 0.25 \sim 0.40 \quad g_{i, \text{汽}} = 230 \sim 340 \quad [\text{g/kW} \cdot \text{h}]$$

## § 1-5 有效指标

### 一 有效功率和机械损失功率

#### (一) 有效功率 $N_e$

单位时间所做的有效功。

$$N_e = \frac{p_e V_h i n}{30 \tau} \times 10^{-3} \quad [\text{kW}]$$

其中  $p_e$ —平均有效压力。

## (二) 机械损失功率 $N_m$

发动机内部损耗的功率。

机械损失包括：发动机内部摩擦损失；驱动附件损耗，如：机油泵、燃油泵、

扫气泵、冷却水泵、风扇、配气机构；和泵气损失等。

$$N_m = \frac{p_m V_h i n}{30 \tau} \times 10^{-3} \quad [\text{kw}]$$

$$N_e = N_i - N_m$$

其中  $p_m$ —平均机械损失压力。

## 二 有效扭矩 $M_e$

功率输出轴输出的扭矩。

$$\begin{aligned} N_e &= M_e \cdot \frac{2\pi n}{60} \quad [\text{w}] \\ &= M_e \cdot \frac{2\pi n}{60 \times 10^3} \quad [\text{kw}] \\ &\approx \frac{M_e n}{9550} \quad [\text{kw}] \end{aligned}$$

## 三 平均有效压力 $p_e$

单位汽缸工作容积所做的有效功。

由于 
$$N_e = \frac{p_e V_h i n}{30 \tau} \times 10^{-3} \quad [\text{kw}]$$

$$N_i = \frac{p_i V_h i n}{30 \tau} \times 10^{-3} \quad [\text{kw}]$$

所以 
$$\frac{p_e}{p_i} = \frac{N_e}{N_i} \quad p_e = p_i - p_m$$

$$p_e = 3.14 \frac{M_e \tau}{V_h i} \quad [\text{kpa}]$$

$$p_e \propto M_e$$

$$p_{e, \text{柴}} = 588 \sim 883 \quad [\text{kpa}]$$

$$p_{e, \text{汽}} = 588 \sim 981 \quad [\text{kpa}]$$

## 四 升功率和比重量

### (一) 升功率 $N_l$

单位汽缸工作容积所发出的功率。



$$N_l = \frac{N_e}{iV_h}$$

$$= \frac{p_e n}{30\tau} \times 10^{-3} \text{ [kw/l]}$$

## (二) 比重量 $G_e$

发动机净重量  $G$  与所发出有效功率  $N_e$  的比值。

$$G_e = \frac{G}{N_e} \text{ [kg/kw]}$$

$N_l \uparrow, G_e \downarrow \rightarrow$  发动机强化程度高。

$$N_{l, \text{车柴}} = 11 \sim 26 \text{ [kw/l]}$$

$$G_{e, \text{车柴}} = 4 \sim 9 \text{ [kg/kw]}$$

$$N_{l, \text{拖柴}} = 9 \sim 15 \text{ [kw/l]}$$

$$G_{e, \text{拖柴}} = 5.5 \sim 16 \text{ [kg/kw]}$$

$$N_{l, \text{汽}} = 22 \sim 55 \text{ [kw/l]}$$

$$G_{e, \text{汽}} = 1.35 \sim 4 \text{ [kg/kw]}$$

可见，汽油机的强化程度要比柴油机的高。

## 五 有效比油耗和有效热效率

### (一) 有效比油耗 $g_e$

单位有效功率的耗油量。

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} \times 10^3 \text{ [g/kw} \cdot \text{h]}$$

$G_T$  — 每小时耗油量 [kg/h]

### (二) 有效热效率 $\eta_e$

$$\eta_e = \frac{W_e}{Q_e}$$

$Q_e$  — 做  $W_e$  有效功所消耗的热量。

$$\eta_e = \frac{3.6 \times 10^6}{g_e h_u}$$

$$\eta_{e, \text{柴}} = 0.30 \sim 0.40$$

$$g_{e, \text{柴}} = 218 \sim 285 \text{ [g/kw} \cdot \text{h]}$$

$$\eta_{e, \text{汽}} = 0.20 \sim 0.30$$

$$g_{e, \text{汽}} = 285 \sim 380 \text{ [g/kw} \cdot \text{h]}$$

由此可见，柴油机的热效率比汽油机的高，经济性比汽油机好。

## § 1-6 机械损失

### 一 机械效率 $\eta_m$

对于不同类型的发动机，绝对损失大的，其相对损失却不一定也大。必须有

一个衡量标准，故引进机械效率的概念。

有效功率与指示功率的比值。

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

$N_e \Rightarrow N_i \rightarrow \eta_m \uparrow$  性能好，所以应尽量提高  $\eta_m$ 。

$$\eta_{m,柴} = 0.7 \sim 0.85 \quad \eta_{m,汽} = 0.7 \sim 0.9$$

## 二 机械损失的测定

### (一) 倒拖法—只能在电力测功机上试验

在压缩比不很高的汽油机上得到广泛应用。

发动机与电力测功机相连。起动发动机，冷却水温度、机油温度达正常值。然后使发动机在给定工况下稳定运转。切断发动机的供油 ( $N_i = 0, p_i = 0$ )。将电力测功机转换为电动机使用，在给定转速下倒拖发动机，并维持冷却水温度和机油温度不变。由于此时  $N_m = -N_e$ ，因此从电力测功机上所测得的倒拖功率  $N_e$  即为发动机在该工况下的机械损失功率  $N_m$ 。

### (二) 灭缸法—仅适用于多缸机

当发动机调整到以给定工况稳定运转后，先测出整个发动机的有效功率  $N_e$ 。之后，在柴油机油门拉杆或齿条位置、或汽油机节气门开度固定不动的情况下，停止向某一汽缸供油或点火。调整测功机，使发动机恢复到原来的转速，重新测定有效功率  $N_{e,1}$  (其余五个汽缸的有效功率)， $N_{e,1}$  必然小于  $N_e$  (一缸熄火)，两者之差即为灭掉缸的指示功率  $N_{i,1} = N_e - N_{e,1}$ 。因为

$$N_{i,1} = N_i - N_{i,x-1} = (N_e + N_m) - (N_{e,1} + N_{m,1}) = N_e - N_{e,1}。逐次灭缸，则$$

整台发动机的指示功率为  $N_i = \sum_{i=1}^x (N_e - N_{e,i})_x$ ，其中  $x$  为总缸数。

如果各缸负荷均匀，则仅测一个缸，即灭火一次即可， $N_i = x(N_e - N_{e,1})$ 。这样，整个发动机的机械损失功率为  $N_m = N_i - N_e$ ，机械效率为

$$\eta_m = N_e / N_i。$$

其它还有示功图法，油耗线法等。

## 三 影响机械效率的因素

### (一) 转速

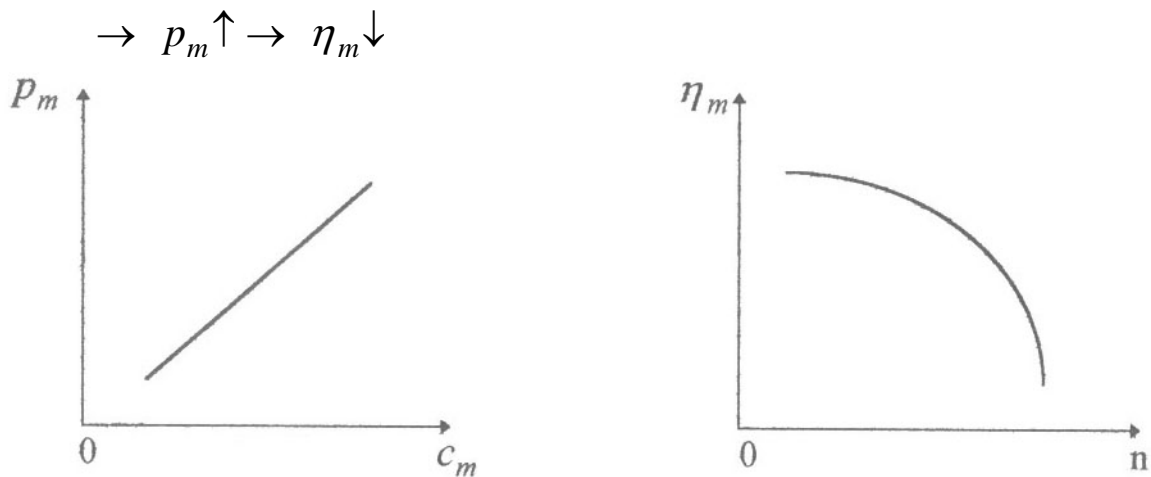
其中  $c_m$ —活塞平均运行速度。

$p_m$  与  $c_m$  几乎呈直线关系。 $\eta_m$  与  $n$  似呈二次方关系。

$n \uparrow \rightarrow \square$  惯性力  $\uparrow \rightarrow$  活塞对缸壁的侧压力  $\uparrow \rightarrow$  轴承负荷  $\uparrow$

$\square$  各摩擦副相对速度  $\uparrow \rightarrow$  摩擦损失  $\uparrow$

$\square$  泵气损失  $\uparrow$ ，驱动附件损耗  $\uparrow$



若要提高转速来强化发动机，则  $\eta_m$  将成为主要障碍之一。

## (二) 负荷

发动机的负荷  柴油机: 油门拉杆或齿条位置

汽油机: 节气门开度

转速  $n$  一定，负荷  $\downarrow$  时，发动机燃烧剧烈程度  $\downarrow$ ，平均指示压力  $p_i \downarrow$ ；而由于转速不变，平均机械损失压力  $p_m$  基本保持不变。则  $\eta_m = 1 - \frac{p_m}{p_i} \downarrow$ ，机械效率下降。

当发动机怠速运转时，有效功率  $N_e = 0$ ，指示功率  $N_i$  全部用来克服机械损失功率  $N_m$ 。即  $N_i = N_m$ ，因此， $\eta_m = 0$ 。

由于车用柴油机普遍在高转速、较低负荷下工作，机械效率下降严重。因此，机械效率对于车用柴油机尤为重要。

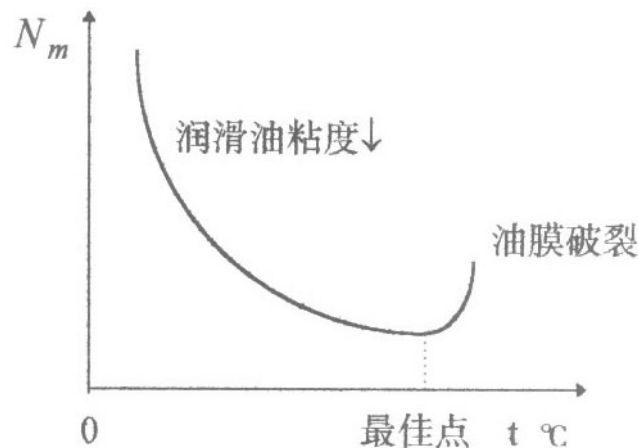
## (三) 润滑油品质和冷却水温度

润滑油粘度影响润滑效果

润滑油温度影响润滑油粘度

冷却水温度影响润滑油温度

即冷却水、润滑油温度通过润滑油粘度间接影响润滑效果。



- 1 润滑油粘度 (牌号)  $\downarrow$ ; 冷却水温度  $\uparrow \rightarrow$  润滑油温度  $\uparrow \rightarrow$  润滑油粘度  $\downarrow \rightarrow$  润滑效果  $\uparrow \rightarrow$  摩擦  $\downarrow \rightarrow N_m, p_m \downarrow \rightarrow \eta_m \uparrow$
- 2 润滑油粘度 (牌号)  $\downarrow\downarrow$ ; 冷却水温度  $\uparrow\uparrow \rightarrow$  润滑油温度  $\uparrow\uparrow \rightarrow$  润滑油粘度  $\downarrow\downarrow$  油膜破裂趋势  $\uparrow\uparrow \rightarrow$  摩擦  $\uparrow\uparrow \rightarrow N_m, p_m \uparrow\uparrow \rightarrow \eta_m \downarrow\downarrow$
- 3 润滑油中杂质  $\uparrow \rightarrow$  摩擦  $\uparrow \rightarrow N_m, p_m \uparrow \rightarrow \eta_m \downarrow$

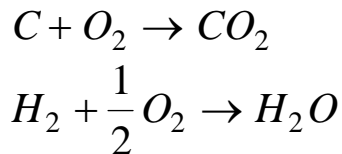
要求: 定期保养、清洗机油滤清器, 5000~10000 公里换机油。

## § 1-7 燃烧热化学

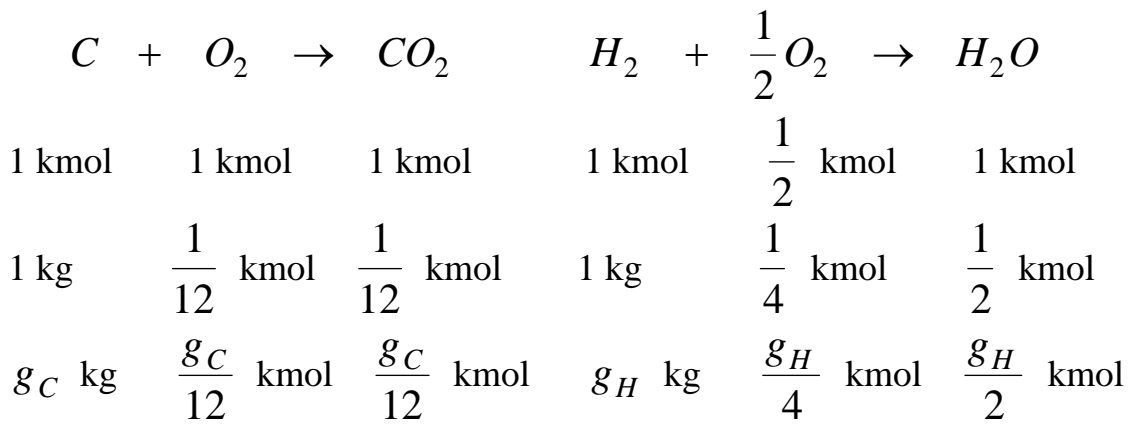
### 一 燃料的完全燃烧

#### (一) 理论空气量 $L_0$

- 1 目的: 1 kg 燃料完全燃烧所需要的空气量  $L_0$
- 2 已知条件: 1 kg 燃料中所含  $g_C$  kg 碳,  $g_H$  kg 氢气,  $g_O$  kg 氧气  
汽油:  $g_C = 0.855$  [kg/kg],  $g_H = 0.145$  [kg/kg],  $g_O = 0$  [kg/kg]  
柴油:  $g_C = 0.87$  [kg/kg],  $g_H = 0.126$  [kg/kg],  $g_O = 0.004$  [kg/kg]
- 3 化学反应方程式



#### 4 需要总的 $O_2$ 量



#### 5 燃料中所含的 $O_2$ 量

$$g_O \text{ [kg]} = \frac{g_O}{32} \text{ [kmol]}$$

#### 6 所需空气中的 $O_2$ 量 = 总的 $O_2$ 量 - 燃料中所含的 $O_2$ 量

#### 7 所需空气量 (目的)

##### (1) kmol

空气中氧气成分约占 21%, 所以

$$L_0 = \frac{1}{0.21} \left( \frac{g_C}{12} + \frac{g_H}{4} + \frac{g_O}{32} \right) \text{ [ kmol/kg ]}$$

(2) kg

空气的折合分子量为 28.95, 即 1 kmol 空气 = 28.95 kg 空气, 所以

$$L_0 = \frac{28.95}{0.21} \left( \frac{g_C}{12} + \frac{g_H}{4} + \frac{g_O}{32} \right) \text{ [ kg/kg ]}$$

(3)  $m^3$

1 kmol 空气 = 22.4  $m^3$  空气, 所以

$$L_0 = \frac{22.4}{0.21} \left( \frac{g_C}{12} + \frac{g_H}{4} + \frac{g_O}{32} \right) \text{ [ } m^3/\text{kg ]}$$

## (二) 过量空气系数和空燃比

### 1 过量空气系数 $\alpha$

$$\alpha = \frac{L}{L_0}$$

$$= \frac{\text{燃烧 } 1\text{kg 燃料实际供给的空气量}}{\text{完全燃烧 } 1\text{kg 燃料理论上所需要的空气量}}$$

表示混合气的浓稀程度。 $\alpha$  大  $\rightarrow$  混合气稀;  $\alpha$  小  $\rightarrow$  混合气浓  
一般, 柴油机:  $\alpha > 1$ ; 汽油机:  $\alpha \leq 1$ 。

### 2 空燃比 A/F

$$A/F = \alpha L_0$$

$$= \frac{\text{空气量}}{\text{燃料量}}$$

表示混合气的浓稀程度。A/F 大  $\rightarrow$  混合气稀; A/F 小  $\rightarrow$  混合气浓

## (三) 分子变更系数

### 1 理论分子变更系数 $\mu_0$

$$\mu_0 = \frac{M_2}{M_1}$$

$$= \frac{\text{燃烧后工质的摩尔数}}{\text{燃烧前工质的摩尔数}}$$

$\mu_0 \uparrow \rightarrow$  容积变化大  $\rightarrow$  膨胀做功好  $\rightarrow \eta_t \uparrow$

### (1) 完全燃烧:

$$\mu_0 = 1 + \frac{\frac{g_H}{4} + \frac{g_O}{32}}{\alpha L_0}$$

(2) 不完全燃烧:

$$\mu_0 = 1 + \frac{0.21(1-\alpha)L_0 + \frac{g_H}{4} + \frac{g_O}{32}}{\alpha L_0}$$

2 实际分子变更系数  $\mu$

$$\mu = \frac{M_2 + M_r}{M_1 + M_r} = \frac{\mu_0 + r}{1 + r}$$

其中  $M_r$ —1 kg 燃料燃烧后残余废气的摩尔数。  $r = M_r / \alpha L_0$ —残余废气系数。

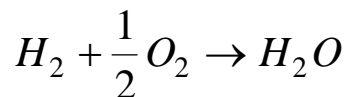
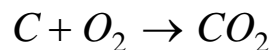
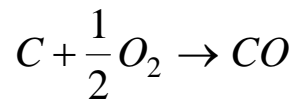
## 二 燃料的不完全燃烧

(一)  $\alpha \leq 1$ —汽油机

1 假设燃料中的 C 燃烧全部生成了 CO 和 CO<sub>2</sub>。其中 CO 是中间产物，即不完全燃烧产物。CO<sub>2</sub> 是最终产物，即完全燃烧产物。

$$g_C = g_{CO} + g_{CO_2}$$

2 化学反应方程式



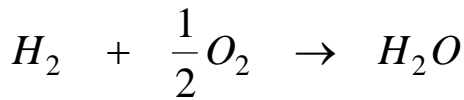
3 需要总的 O<sub>2</sub> 量



$$g_{CO} \text{ kg} \quad \frac{g_{CO}}{24} \text{ kmol} \quad \frac{g_{CO}}{12} \text{ kmol} \qquad g_{CO_2} \text{ kg} \quad \frac{g_{CO_2}}{12} \text{ kmol} \quad \frac{g_{CO_2}}{12}$$

kmol

$$g_{CO} \text{ kg} \quad \frac{g_C - g_{CO_2}}{24} \text{ kmol} \quad \frac{g_{CO}}{12} \text{ kmol}$$



$$g_H \text{ kg} \quad \frac{g_H}{4} \text{ kmol} \quad \frac{g_H}{2} \text{ kmol}$$

4 燃料中所含的  $O_2$  量

$$g_O \text{ [kg]} = \frac{g_O}{32} \text{ [kmol]}$$

5 空气中的  $O_2$  量 = 总的  $O_2$  量 - 燃料中所含的  $O_2$  量

$$0.21\alpha L_0 = \frac{1}{24}(g_C - g_{CO_2}) + \frac{g_{CO_2}}{12} + \frac{g_H}{4} - \frac{g_O}{32}$$

$$\begin{aligned} 0.21\alpha L_0 &= \left(\frac{g_C}{12} + \frac{g_H}{4} - \frac{g_O}{32}\right) - \frac{g_C}{24} + \frac{g_{CO_2}}{24} \\ &= 0.21L_0 - \frac{g_C}{24} + \frac{g_{CO_2}}{24} \quad [L_0 = \frac{1}{0.21}(\frac{g_C}{12} + \frac{g_H}{4} - \frac{g_O}{32})] \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned} g_{CO} &= 24 \times 0.21L_0(1 - \alpha) \\ g_{CO_2} &= g_C - 24 \times 0.21L_0(1 - \alpha) \\ g_C &= g_{CO} + g_{CO_2} \end{aligned}$$

6 分析

(1) 当  $L = L_0$  时,  $\alpha = 1$ ,  $A/F = L_0$

$$g_{CO} = 0, \quad g_{CO_2} = g_C$$

(2)  $\alpha \downarrow \rightarrow g_{CO} > 0$ ,  $g_{CO_2} < g_C$

(3)  $\alpha \downarrow \rightarrow$  使  $g_C = g_{CO}$  时

$g_{CO} = 0$ ,  $C$  全部生成  $CO$ 。此时的过量空气系数称为临界  $\alpha$  值。记为  $\alpha_{cr}$ 。

$$\text{所以 } \alpha_{cr} = 1 - \frac{g_C}{24 \times 0.21L_0}$$

(4)  $\alpha \downarrow \downarrow \rightarrow \alpha < \alpha_{cr}$

此时理论上  $g_C < g_{CO}$ , 析出炭粒。

一般柴油机的  $\alpha_{cr} = 0.6 \sim 0.72$ 。

(二)  $\alpha > 1$  - 柴油机

混合气混合不均匀, 局部过浓或过稀, 造成燃烧不完全。缸内情况十分复杂。

三 燃料和可燃混合气的热值

(一) 燃料的热值

1 kg 燃料完全燃烧所产生的热量 [kJ]。

加入水的汽化潜热的热值—高热值

不加入水的汽化潜热的热值—低热值  $h_u$

发动机缸内高温，水只能以气态存在，故应取不加入水的汽化潜热的热值，即低热值。

汽油:  $h_u = 44100$  [kJ/kg]; 柴油:  $h_u = 42500$  [kJ/kg]

## (二) 可燃混合气的热值

$$H_u = \frac{h_u}{M_1} \quad [\text{kJ/kmol}]$$

## § 1-8 发动机混合气的着火和燃烧方式 P

### 一 混合气的着火

#### (一) 柴油机—低温多级自燃

##### 1 $t_1$ 阶段—混合阶段

在压缩过程终了时，燃料喷入汽缸内形成可燃混合气。燃料遇到温度较高的空气，开始氧化，但速度缓慢，示功图上的压缩线没有明显的变化。混合阶段，为着火做准备。

##### 2 $t_2$ 阶段—第一级反应

燃烧的实质是燃料的氧化反应，当反应速度很快时，火焰就会出现。经过  $t_1$  时间后，反应加剧，出现冷火焰，缸内压力超过压缩压力。在这一阶段，反应生成醛类、过氧化物和一氧化碳等中间产物。要求混合气较浓， $\alpha = 0.4 \sim 0.5$ 。

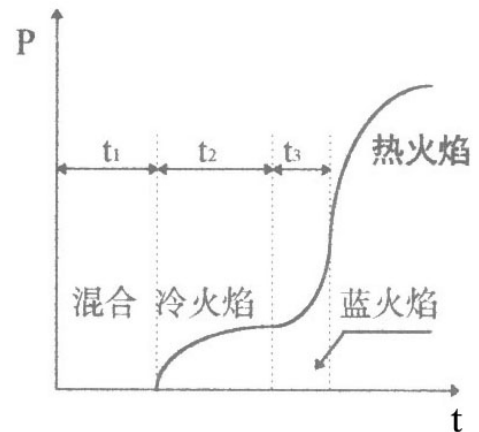
##### 3 $t_3$ 阶段—第二级反应

温度、压力升高较大，产生许多化学反应的活性中心，出现蓝火焰。混合气稀得多， $\alpha$  略小于 1。

##### 4 $t_1 + t_2 + t_3$ 时间后—第三级反应

活性中心剧增，化学反应加速，热积累剧烈，发生爆炸，出现热火焰。混合气更稀， $\alpha \approx 1$ 。

$t_1 + t_2 + t_3$ —着火延迟期



#### (二) 汽油机—高温单级点燃

1 压缩的是燃料与空气的混合气体，在此过程中，已经进行了一些化学反应。

2 火花点火，局部温度高达 20000℃ 以上，该处燃料分子直接分裂成大量的自由原子与自由基，迅速反应出现热火焰，瞬间扩大到整个燃烧室内。所以，汽油机着火过程：

压缩混合气 → 点火（经短暂着火延迟期） → 热火焰



### 三 燃烧方式

#### (一) 同时爆炸燃烧

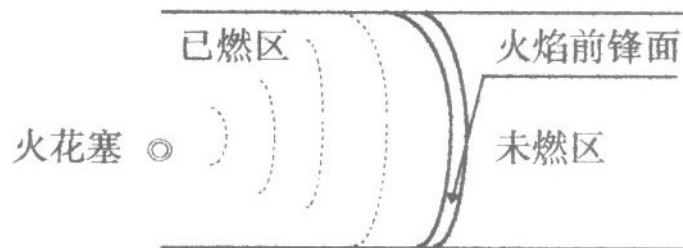
取某一部分为系统，着火前后整个系统各个部分的相完全均匀一致。即相只随  $t$ （时间）座标变化，而不随  $x$ （位移）座标变化，为单相系，均匀系。

柴油机上，由于混合气分配不是十分均匀，总有某一部分混合气最先着火（一般在喷油嘴附近），取这一部分为系统，则系统内实现的就是同时爆炸燃烧。

汽油机上，由于火焰有传播速度（虽然很快，但相对同时爆炸燃烧却很小），传播逐次进行，故显然不是同时爆炸燃烧。但火花塞间隙处的少量混合气在电火花作用下，可实现同时爆炸燃烧，从而形成火焰中心。

#### (二) 逐渐爆炸燃烧

汽油机—火焰传播。两相系—混合气相（未燃区），燃烧产物相（已燃区）。



加热从火花塞开始，紧靠火花塞的那一部分混合气首先被加热，使氧化或活性中心增多，发生燃烧。燃烧又加热下一层……，一层一层传播。燃烧主要在火焰前锋面内进行。火焰前锋面前方的未燃区中是混合气，火焰前锋面后方的已燃区中为燃烧产物和一小部分在火焰前锋面中没有燃烧掉的燃料继续燃烧。

#### (三) 扩散燃烧

柴油机的燃烧方式，三相—燃料相，空气相，燃烧产物相。

柴油燃点比汽油低，但在日常生活中汽油却比柴油易燃，原因就在于汽油的挥发性好，油与空气形成混合气较快，物理准备过程已经就绪，一点即燃。柴油机中燃烧的快慢却主要取决于物理准备过程进行的快慢。油滴遇热蒸发形成燃料蒸汽，然后才能燃烧，并非油滴与空气接触就可燃烧。为防止燃烧产物将油滴与空气隔开，将组织空气相对于油滴的气流运动，将燃烧产物抛在后面。

