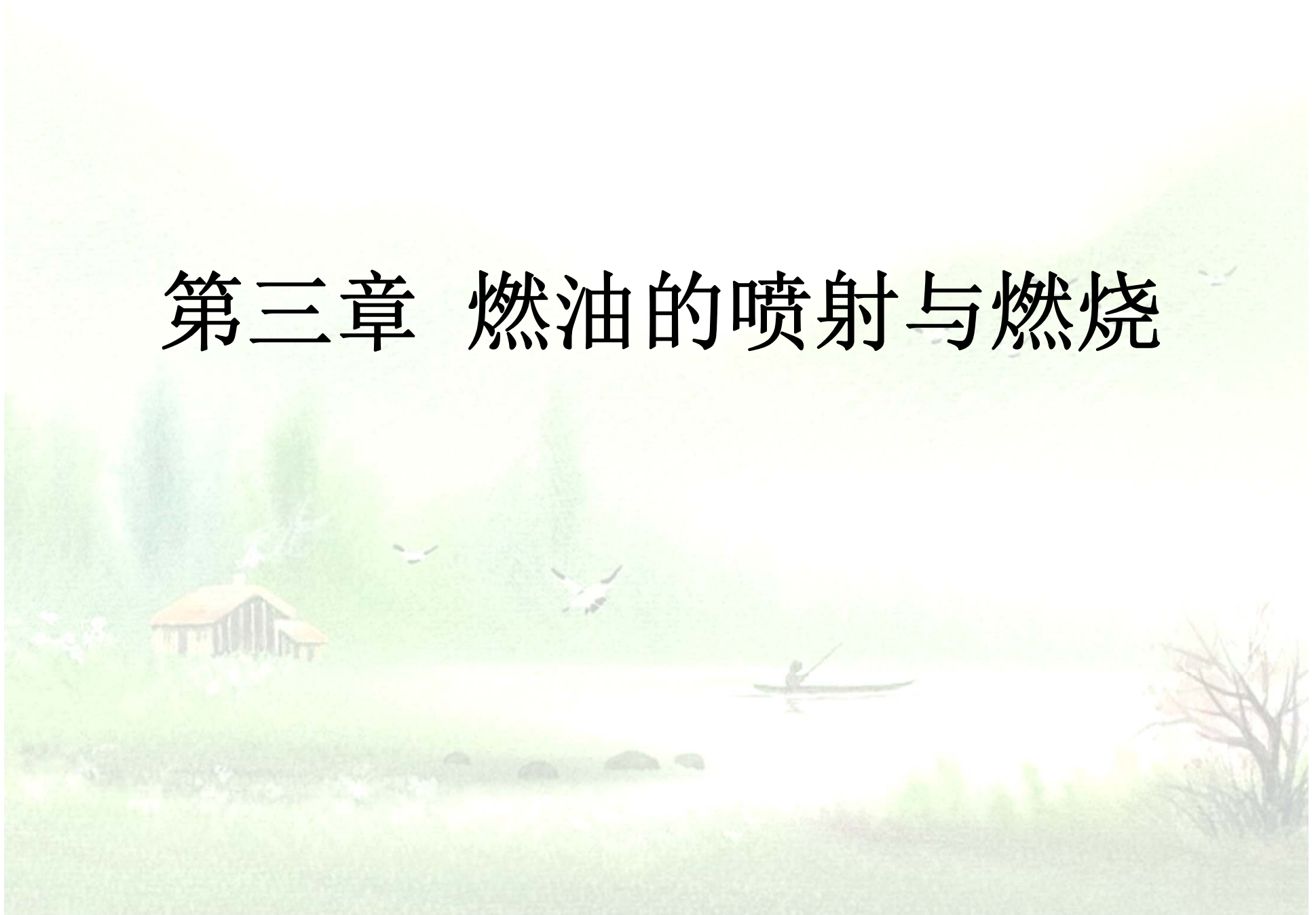


# 第三章 燃油的喷射与燃烧



## 本章主要内容

3.1 燃油

3.2 燃油的喷射

3.3 可燃混合气的形成

3.4 燃油的燃烧

3.5 柴油机的有害废气排放

3.6 喷油设备

## 3.1 燃油

### 一、燃油的化学成分

#### ❖ 柴油机使用的燃油

- 轻柴油
- 重柴油
- 燃料油

蒸馏法是根据石油的不同组分有不同的沸点，在不同温度下分馏出不同的油品。

## 二、燃油的理化性能指标

### 1. 自燃温度

在无外源点火条件下，燃料空气混合气能自行着火的性质叫做自燃性，使其自行着火的最低温度称为自燃温度。

柴油能自行着火的最低温度为473~493K。

柴油的自燃性用十六烷值来衡量，十六烷值高，自燃性好，反之亦然。



### ❖ 柴油十六烷值的评定

用两种自燃性截然不同的标准燃料作比较。一种是正十六烷 $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ ，自燃性很好，将其十六烷值定为100；另一种是 $\alpha$ —甲基萘 $\text{C}_{11}\text{H}_{10}$ ，自燃性很差，将其十六烷值定为0。

将所测试的柴油和两种标准燃料混合液的自燃性作比较，当两者相同时，混合液中正十六烷含量的容积百分比，即为所测试柴油的十六烷值。

## ❖ 柴油十六烷值的选择

### ● 十六烷值过低

——燃烧粗暴，起动或低速运转时难以发火

### ● 十六烷值过高

——燃油费用高，发火过快使燃油产生高温裂解，生成游离碳，排气冒黑烟，经济性下降

高速柴油机：40-60

中低速柴油机：40-50

燃用重油的大型低速柴油机：不低于25

## 2. 粘度

粘度表示燃料分子之间的内部摩擦特性。

粘度影响燃料的过滤性，油管中的流动性及气缸中的雾化质量与燃烧质量。

- a. 粘度低，喷雾的平均油粒直径小，分散度好，可以加快混合及燃烧过程。
- b. 粘度过低，精密偶件润滑条件恶化，柴油泄露多，稀释润滑油，零件磨损增加。
- c. 粘度过高，摩擦阻力增大，喷油泵排吸量会减少。柴油在喷油系统中的流动阻力、滤清阻力增加。

### 3. 凝点

柴油的低温流动性用凝点来表示。

当环境温度由浊点温度继续降低时，使柴油开始固化而失去流动性时的温度叫凝点。柴油达到凝点后，必须加热，才能使柴油机正常工作。

我国柴油以凝点确定牌号，如-35， -20， -10， 0号轻柴油的凝点分别为不高于-35℃， -20℃， -10℃， 0℃。 10， 20， 30号重柴油的凝点分别为不高于10℃， 20℃， 30℃。



## 3.2 燃油的喷射

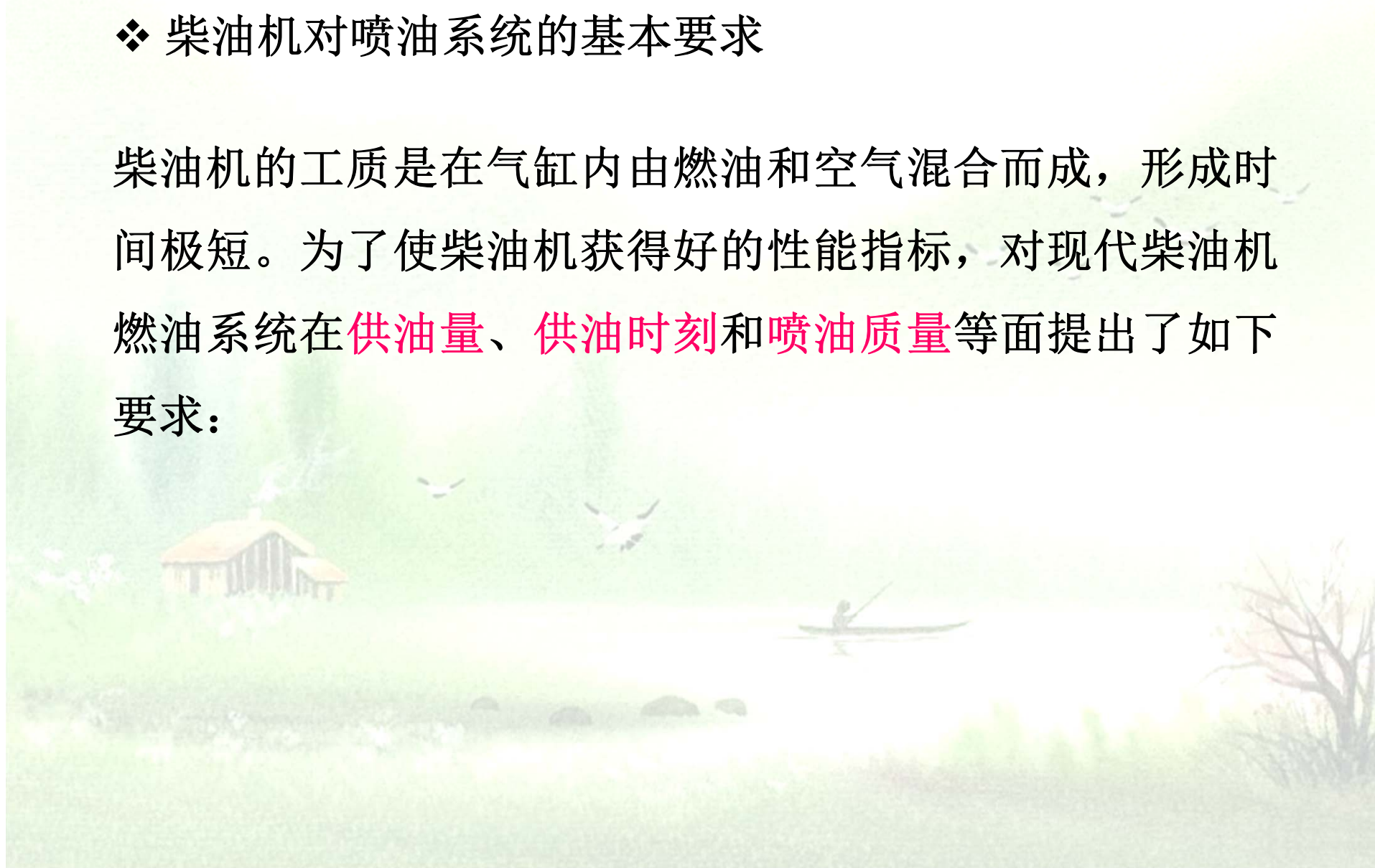
### 一、燃油喷射系统

#### ❖ 影响燃油燃烧的因素

- 液体燃油是不能直接燃烧的，只有蒸发成油气并与空气混合成可燃混合气后才能燃烧
- 可燃混合气的形成质量是影响燃油燃烧的重要因素  
—— 燃油喷射、空气涡流、缸内热工状态

### ❖ 柴油机对喷油系统的基本要求

柴油机的工质是在气缸内由燃油和空气混合而成，形成时间极短。为了使柴油机获得好的性能指标，对现代柴油机燃油系统在供油量、供油时刻和喷油质量等面提出了如下要求：



- 供油量（定量供油）

- 在柴油机不同转速、负荷下，能够精确的供给所需燃油；

- 当负荷不变时，各循环之间保持相同的供油量，使柴油机能稳定运转；

- 对多缸柴油机，还应保持各气缸间供油量一致，以使各缸发出的功率相等。

- 供油时刻（定时供油）

—— 在柴油机运行的整个负荷和转速下，应具有最佳的供油正时，包括**最佳喷油开始**及**喷油持续时间**；

—— **供油规律**能满足燃烧过程的要求，以使柴油机不仅能获得良好的经济性、运转平稳性，而且燃烧噪声小、烟度低、废气中有害成分少。



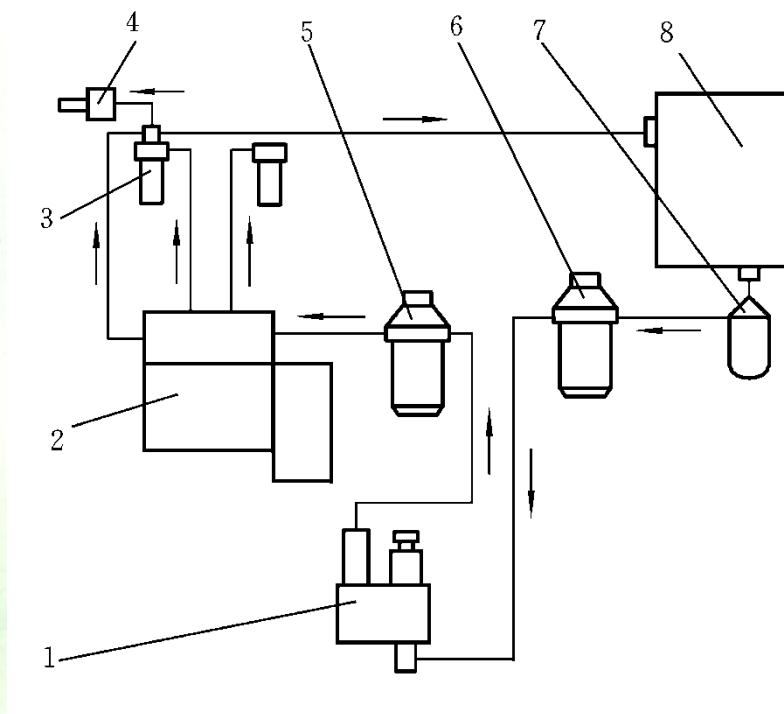
- 喷油质量（定质供油）

- 喷入气缸燃油要具有高的喷射压力，以保证燃油的雾化粒度、贯穿距离。

- 油束形状及分布应与燃烧室形状和空气运动相配合，以利于可燃混合气的形成。

- 喷油开始及结束都应干脆利落，无滴油或其他不正常喷射现象。

### ❖ 柴油机机械喷油系统的工作原理



柴油机燃油喷射系统

1—输油泵；2—高压油泵；3—喷油器；4—预热器；

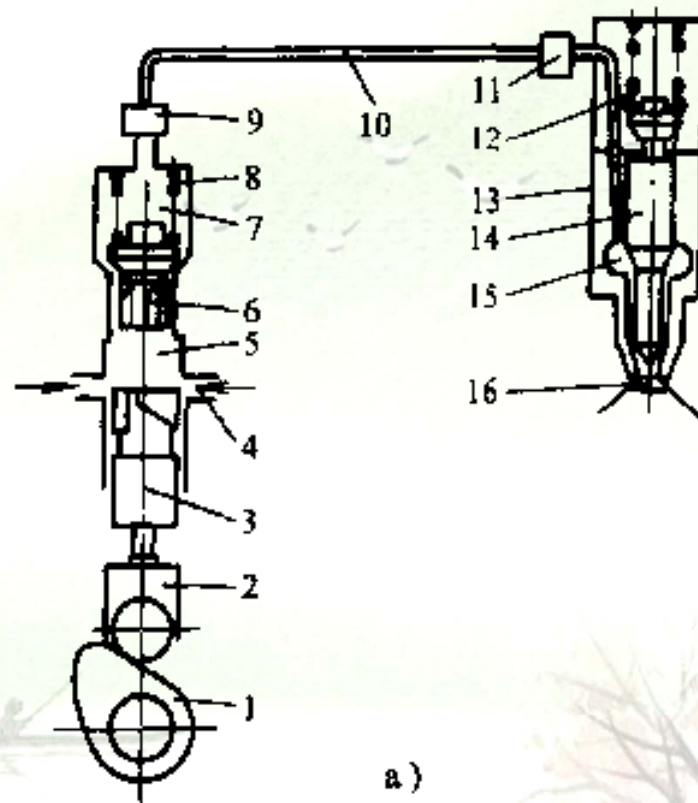
5—二级滤清器；6—一级滤清器；7—沉淀杯；8—油箱

## ❖ 几种主要喷油系统

### ● 柱塞泵式喷油系统

结构：高压油泵布置在柴油机的侧面或前端，由正时齿轮系统传动，喷油器安装在气缸盖上，由高压油管将喷油泵输出的高压燃油分别送到各缸的喷油器，经喷油器喷入燃烧室。

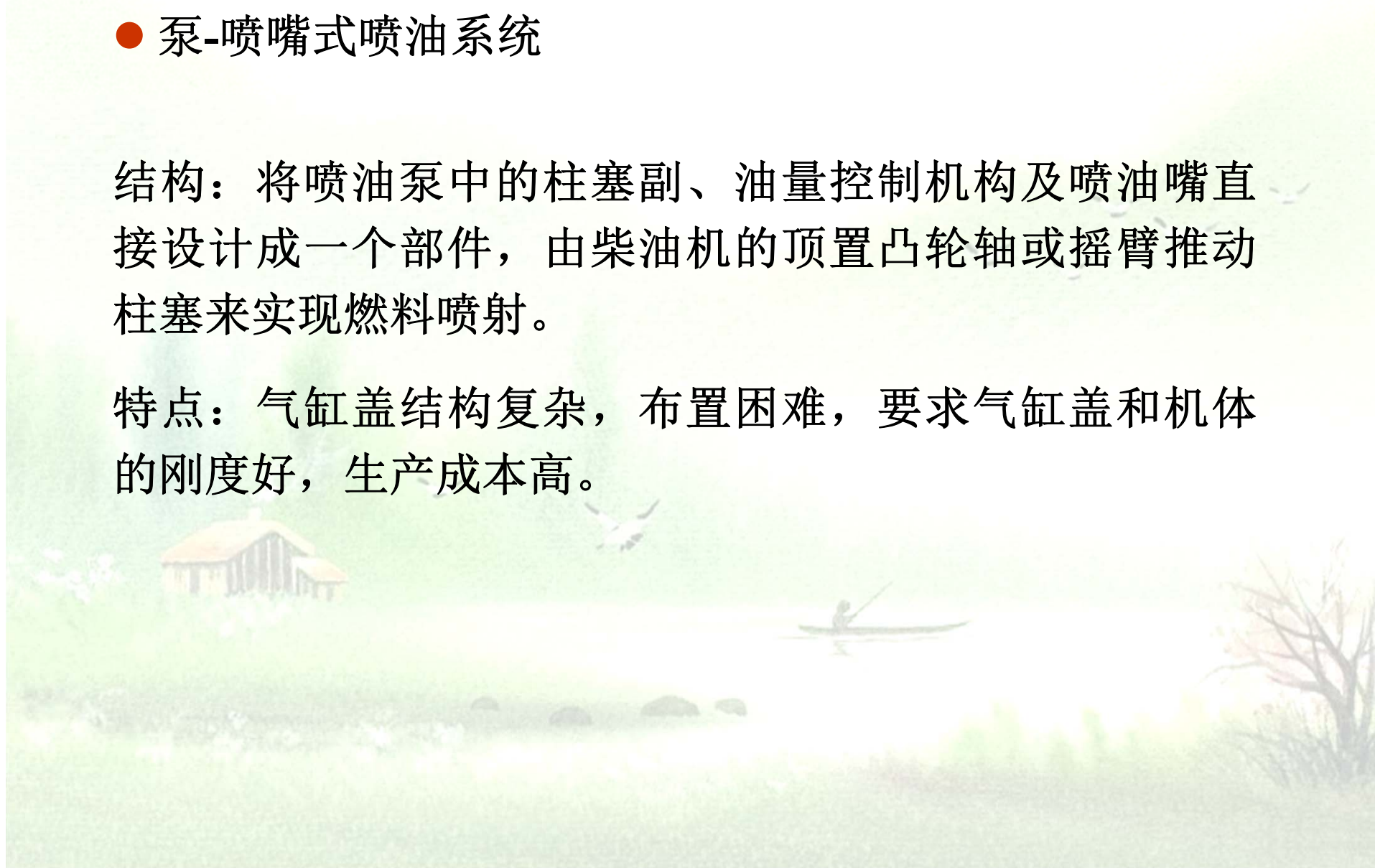
特点：结构紧凑，布置方便。  
但高压容积大，喷油规律不易控制。



## ● 泵-喷嘴式喷油系统

结构：将喷油泵中的柱塞副、油量控制机构及喷油嘴直接设计成一个部件，由柴油机的顶置凸轮轴或摇臂推动柱塞来实现燃料喷射。

特点：气缸盖结构复杂，布置困难，要求气缸盖和机体的刚度好，生产成本低。

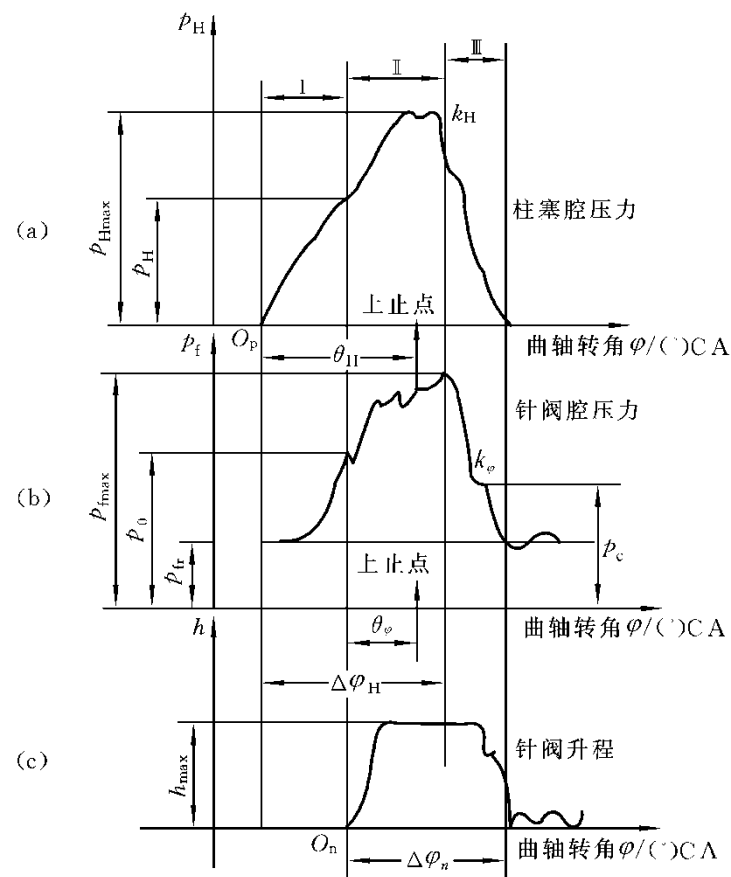




## 二、燃油喷射过程

### ❖ 燃油喷射过程的三个阶段

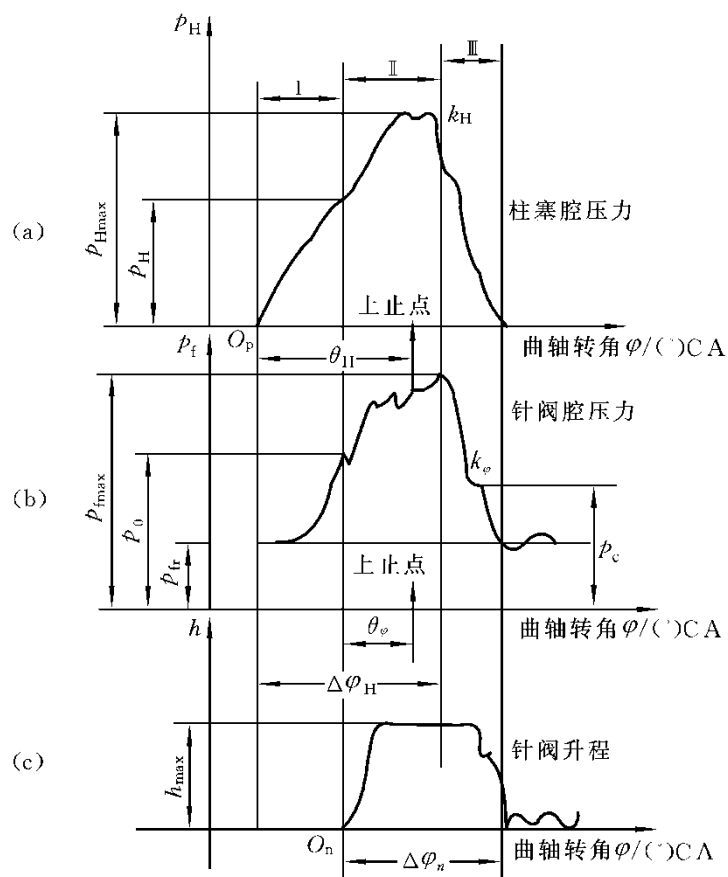
- 喷油滞后阶段
- 主喷射阶段
- 自由膨胀阶段



喷油泵和喷油器压力变化曲线及  
针阀升程变化图

## ● 喷油滞后阶段

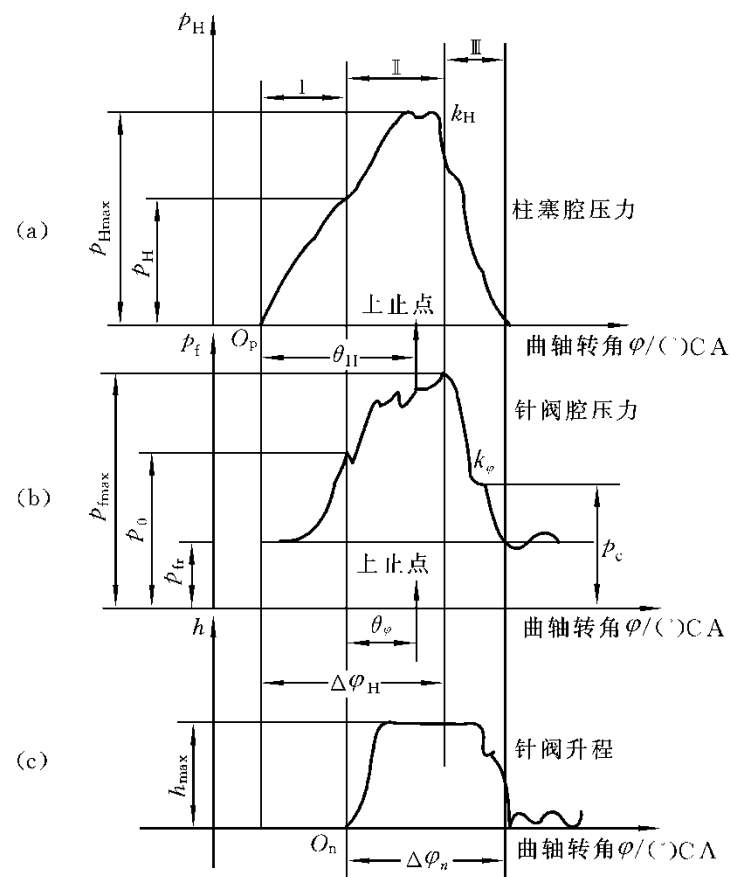
时间：从 $O_p$ 点（泵油始点）→ $O_n$ 点（喷油始点）



## ● 主喷射阶段

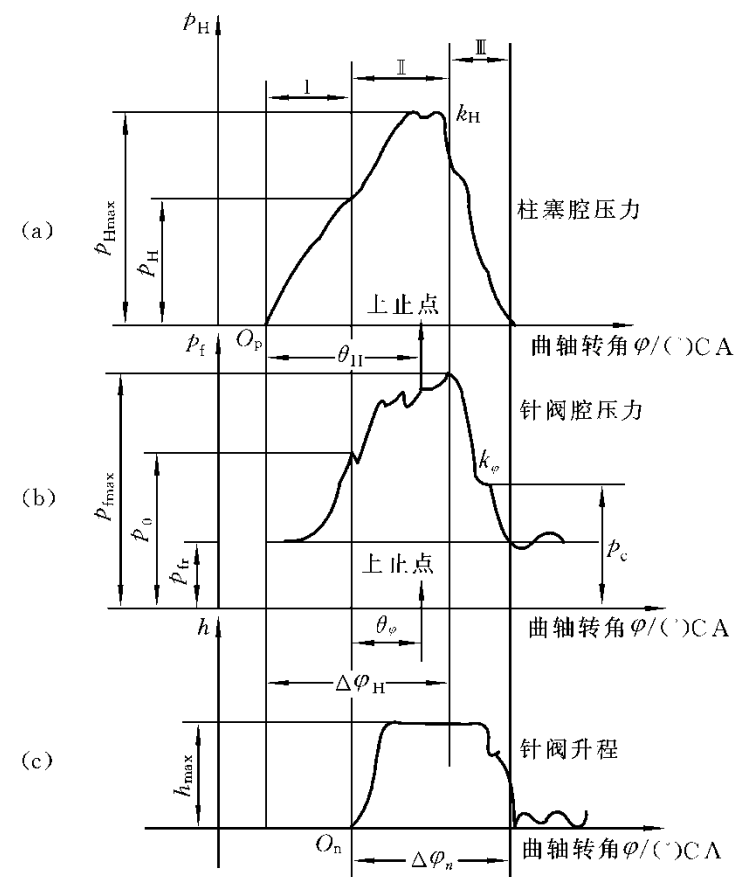
时间：从 $O_n$ （针阀开启点或喷油始点） $\rightarrow K_H$ （回油孔开始打开，停止供油点）。

特点：每循环的大部分油量在该阶段喷入燃烧室。



## ● 自由膨胀阶段

时间：从 $K_H$ （停止供油点）→  
针阀落座（喷油终点）止。





### 三、供油规律和喷油规律

#### ❖ 几何供油规律和喷油规律的定义

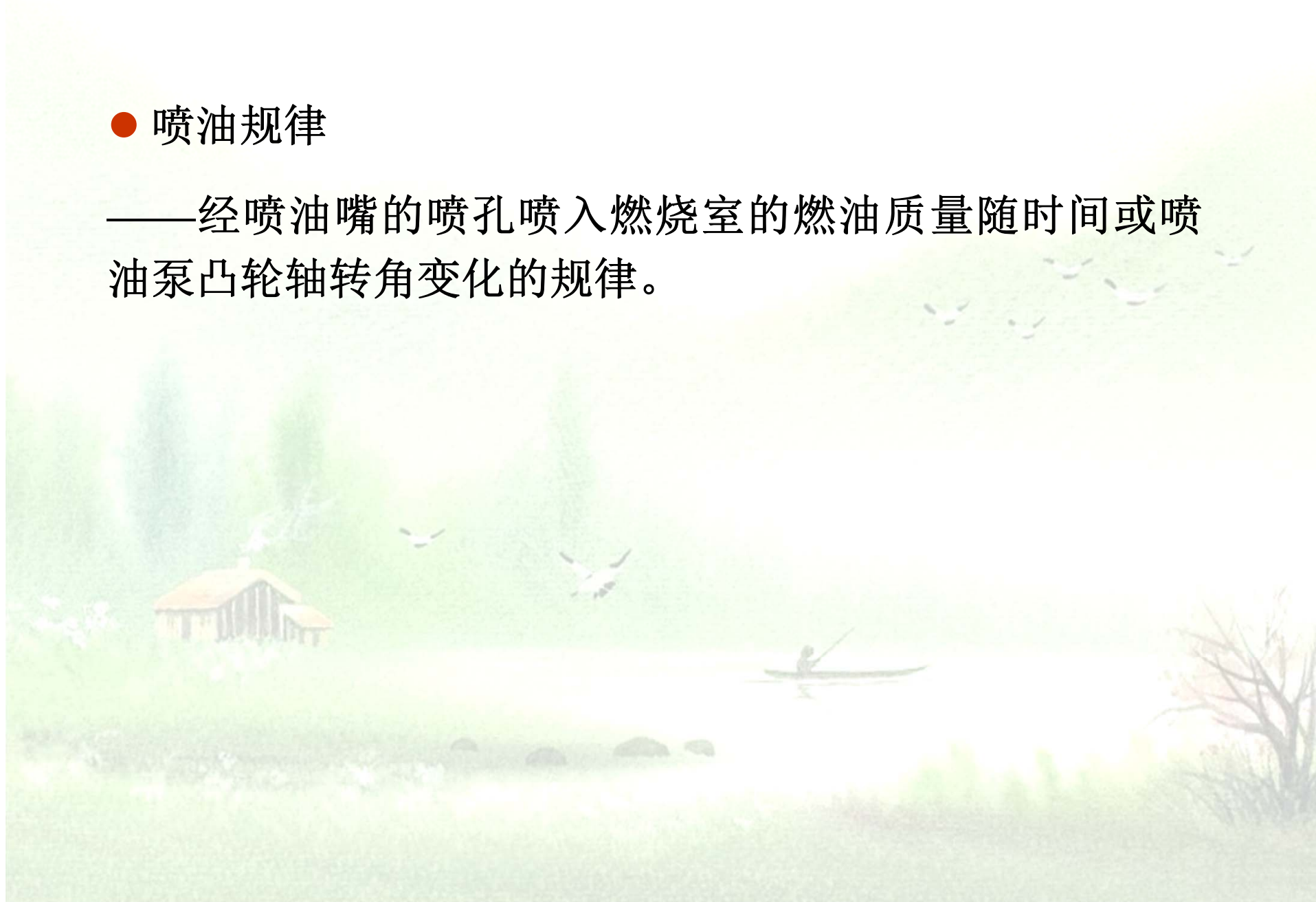
##### ● 几何供油规律

——喷油泵供入高压油路系统的燃油质量随时间或凸轮轴转角变化而变化的规律。

它是由供油凸轮与油泵相互间的几何关系决定的，只要知道柱塞的运动规律即可求得。

## ● 喷油规律

——经喷油嘴的喷孔喷入燃烧室的燃油质量随时间或喷油泵凸轮轴转角变化的规律。



### ❖ 供油规律与喷油规律的比较

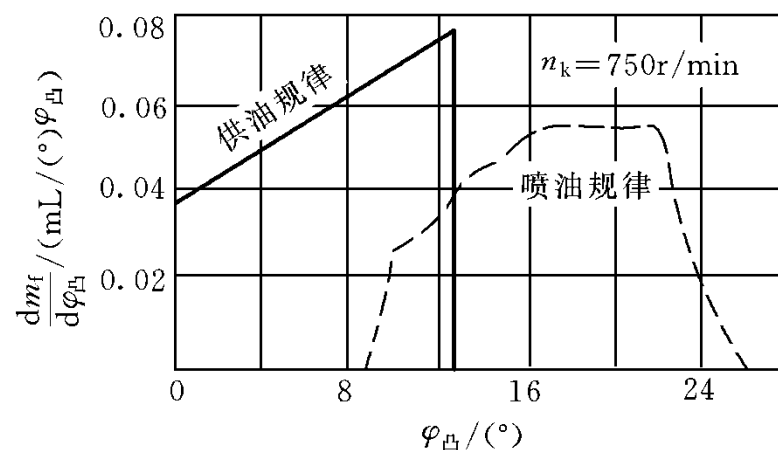
a.  $\varphi_{\text{凸喷}}$  始点滞后  $\varphi_{\text{凸供}}$  始点约9度凸轮转角。

b. 喷油持续时间比供油持续时间延长约4度凸轮轴转角。

c. 两者曲线形状差别较大。

a、b→燃油的可压缩性和油管的弹性膨胀引起的；

c→燃油可压缩性、油管的弹性膨胀和油管压力波三者作用。



供油规律与喷油规律的比较

## 四、异常喷射及其消除方法

### ❖ 异常喷射产生的原因

在燃油喷射过程中，由于供油系统存在高压容积，特别是压力波的往复传播，当供油系统各参数之间配合不当时，有可能产生异常喷射现象。

常见的异常喷射现象主要有：二次喷射，穴蚀，滴油，断续喷射和间歇喷射等。



## 1. 二次喷射

——喷射終了针阀落座后又第二次升起形成再次喷射的现象，称二次喷射。

产生原因：当针阀关闭后，因压力波在油管中传播，当喷嘴端压力大于针阀开启压力时，针阀再次打开。

后果：二次喷射是在很低的压力下喷入气缸，会导致雾化不良，排烟增加，延长喷油持续期，后燃加重，比油耗增加，排温升高。

判断方法：测量针阀升程。

## 2. 穴蚀

出现部位：低压系统和高压系统与燃油接触的金属表面上，如面向回油孔的柱塞表面、回油孔的表面、高压油管内壁、针阀锥体表面和针阀体座表面上。

形成原因：燃油在系统中形成的空穴气泡在破裂时所产生的负压区造成的。

消除措施：由于消除二次喷射的措施有可能引起穴蚀，所以应综合考虑。为了满足上述条件，可采用等压卸载出油阀，保持油管压力为一较佳值，可以避免二次喷射和穴蚀。

### 3.滴油现象

——滴油现象是针阀副密封正常的情况下，喷油終了仍有燃油自喷孔喷出。

产生原因：由于出油阀卸载容积过小，高压油管压力下降较慢，使针阀以小的落座速度缓慢关闭引起。

后果：流出的燃油速度和压力均很低，导致雾化不良，且燃油会集结在喷孔处，容易积碳，使喷孔堵塞。

消除方法：应加快针阀落座速度，减小落座时间。如减小针阀质量，增加针阀弹簧预紧力和弹簧刚度，减小针阀直径，加大出油阀卸载容积，减小针阀压力室容积等。



## 4. 断续喷射

——应一次喷入气缸的燃油分成多次喷入气缸。

现象：喷油时间没延长，但针阀对阀座的撞击次数增多，容易产生过度磨损，降低针阀偶件寿命。

产生原因：针阀上升后，柱塞供油率小于喷嘴喷油率，发生喷油器喷出的油量多于柱塞供油量。



## 5. 间歇喷射

——多次柱塞有效行程的供油量才足以打开针阀一次。

现象：多个循环作一次功，一个循环燃烧几个循环的油，使发动机运转不稳定。

产生原因：出现在低速低负荷或怠速时，针阀开启压力较大，出油阀卸载容积也较大，柱塞一个有效行程供油量很少，不足以打开针阀。

### ❖ 断续喷射及间歇喷射的消除方法

- a. 使发动机在低负荷和怠速运行时，柱塞最小供油率大于喷嘴出现断续和间歇喷油的临界供油率；
- b. 尽可能减小高压容积，而不采取降低针阀开启压力的方法。

## 6. 断流现象

——在柴油机运行中燃油系统发生喷射中断的现象。

产生原因：出油阀卸载容积过大，出油阀卸载凸缘落座后，高压油管中的燃油膨胀，在高压油管中产生零压或者负压区，即形成空泡现象。空泡区充满可压缩的油气，阻止燃油通过，形成气阻，使供油中断。

消除方法：断流现象大部分发生在低速、低负荷工况且喷油泵供油率较小的情况下。保证低速、低负荷时有足够的供油量，可以消除断流现象。另外，有关防止穴蚀的措施也有利于消除断流现象。

## 五、燃油的雾化

### ❖ 燃油雾化机理

- 从喷嘴喷出的燃油油束，在气体介质中运动时，由于气体动力和燃油表面张力的作用，使其分裂成细小的油滴。
- 雾化增加了表面积，从而加速了从空气中吸热与油滴的汽化过程，这是促成混合气形成的重要因素。



## ❖ 油束的外形和特征

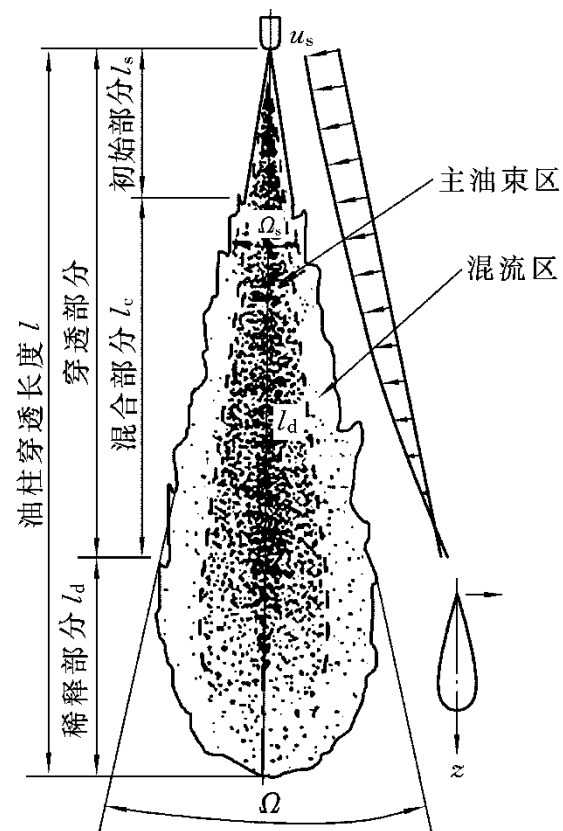
### ● 沿油束径向可分为：

#### a. 主油束区

处于油束中心，油粒密度大，速度快。

#### b. 混流区

处于油束外围，为分裂和蒸发后的**小油粒、燃油蒸气**与**周围空气**的混合过渡区。



单个油束结构与形状

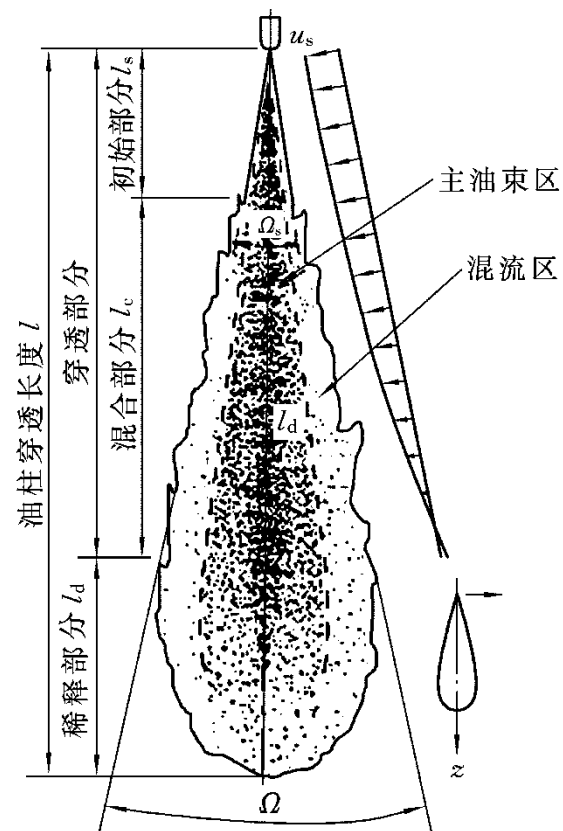
- 沿油束轴向可分为：

- a. 初始部分 ( $l_s$ )

轮廓明显，锥角 $\Omega_s$ ，燃油密集，随气体压力、温度的不同变化较小，主要由喷油系统的特征决定。

- b. 混合部分 ( $l_c$ )

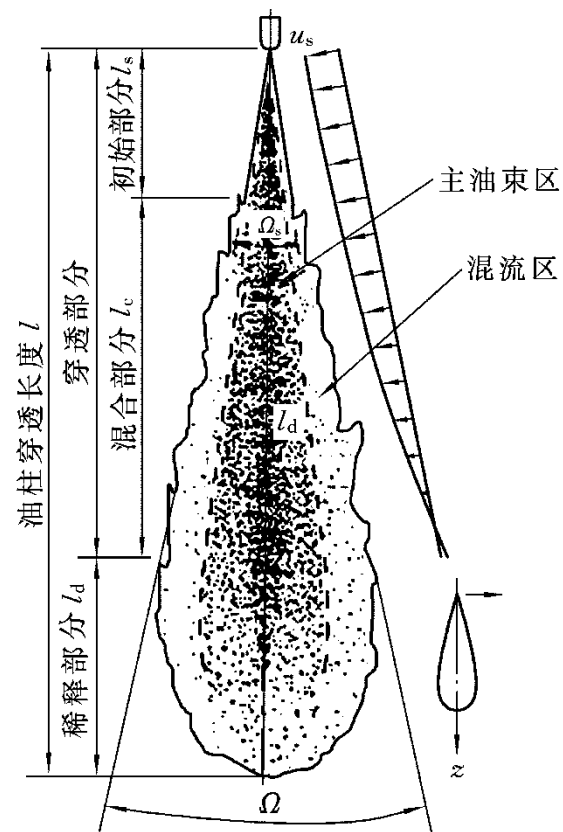
油束与周围空气的分界变得不规则。



单个油束结构与形状

### c. 稀释部分 ( $l_d$ )

由于油粒的蒸发、扩散和混合，油束与空气的界线更难以区分。周围空气温度越高，油束轮廓的明晰度越低。整个油束的锥角为 $\Omega$ 。



单个油束结构与形状

### ❖ 喷雾特性曲线

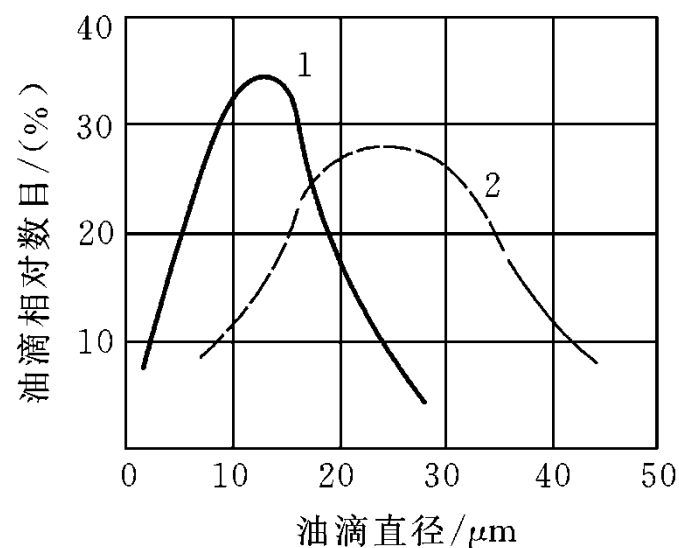
- 油束中油粒的大小及油粒直径的均匀性都会影响到油气的混合和燃烧。
- 喷射到缸内油粒直径一般为 $2\sim 50\mu\text{m}$ 。
- 喷雾粒度和均匀度，可用喷雾特性曲线来评定。



图中油粒相对数目等于某一直径的油滴数目比上总油滴数目。

曲线1：曲线峰值靠近纵坐标，说明油粒较细，雾化较好；曲线两侧陡然下降，表示油粒较均匀。

曲线2：雾化粒度与均匀性不如曲线1。



喷雾特性曲线

## 3.3 可燃混合气的形成

### 一、可燃混合气形成方法

#### ❖ 柴油机混合气的形成方式

- 燃料空间雾化混合方式（简称空间式）；
- 壁面油膜蒸发混合方式（油膜式）；
- 空间雾化——油膜混合方式（复合式）。

## 二、燃烧室

### ❖ 柴油机燃烧室的分类

根据混合气形成及燃烧室结构形式的特点，柴油机燃烧室可以分为两大类：

- a. 燃烧在一个空间中进行称**直接喷射式**（也叫开式或统一式）燃烧室；
- b. 燃烧在两个空间中进行的称**间接喷射式**（也叫分开式）燃烧室。

根据燃烧室的结构不同，混合气的形成也不同。

### ❖ 直喷式燃烧室的特点

- 与分开式燃烧室相比，直接喷射式燃烧室具有结构简单、燃油消耗低15~20%、启动容易等优点。
- 进气系统要求高，转速适应范围更小，噪声大，排放欠佳，喷射系统要求高等缺点。

### ❖ 直喷式燃烧室的分类

- 按其活塞顶部凹坑的深浅又可分为开式燃烧室（浅凹坑）和半开式燃烧室（深凹坑）；
- 按缸内气流运动情况，又可分为无涡流和有涡流两种。



### ❖ 分开式燃烧室的特点

- 分开式燃烧室柴油机的有效燃油消耗率高于直喷式柴油机。
- 具有高速性能好、噪声和排气污染小及对喷油系统要求低等优点。

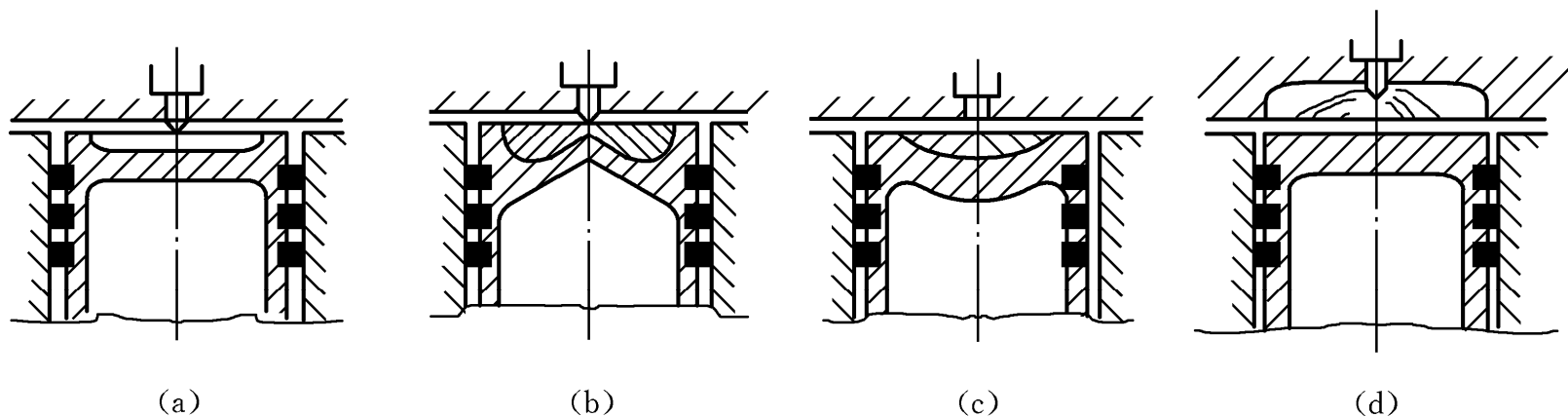
### ❖ 分开式燃烧室的分类

- 涡流室燃烧室
- 预燃室燃烧室

## 1. 开式燃烧室

### ❖ 开式燃烧室的结构特点

- 整个燃烧室是由气缸盖底面、活塞顶面及气缸壁所形成的统一空间。
- 开式燃烧室用于 $D > 200\text{mm}$ 的涡轮增压柴油机上较好，其燃油直接喷入气缸，混合气的形成属空间雾化混合方式。



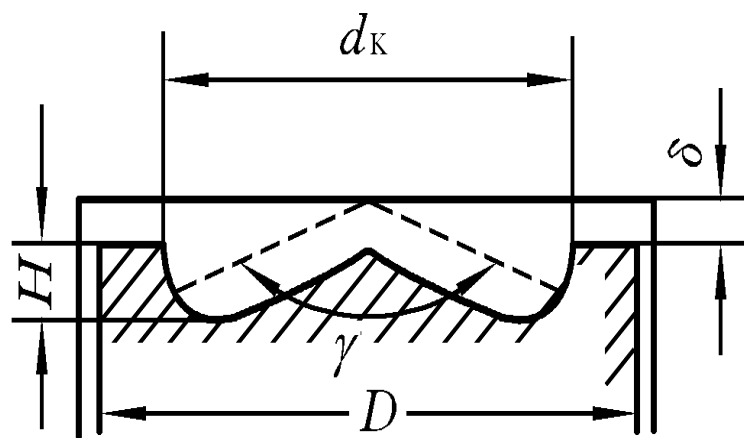
### ❖ 开式燃烧室的性能特点

- 开式燃烧室是**无空气涡流**或**弱空气涡流**的燃烧室，使用的进气道为直进气道或切向进气道。混合气的形成主要依靠**多孔喷嘴**及较高的**喷油压力**，以使燃油喷散雾化并均匀地分布于整个燃烧室中。

孔数为6~12个；孔径在0.25~0.8mm之间，大型低速二冲程柴油机喷孔孔径有的达到1.2mm。

组织高压喷射，针阀开启压力达到20~40MPa，最高喷油压力甚至高达100MPa以上。

- 为了充分利用燃烧室中的空气，并避免喷雾和火焰与冷的气缸壁直接接触，要求喷雾与燃烧室形状很好地配合。喷油夹角 $\gamma$ 应根据燃烧室形状及喷油嘴喷孔伸出气缸盖底面的程度而定。对于四冲程柴油机 $\gamma$ 一般在 $120^\circ\text{CA} \sim 160^\circ\text{CA}$ 之间。

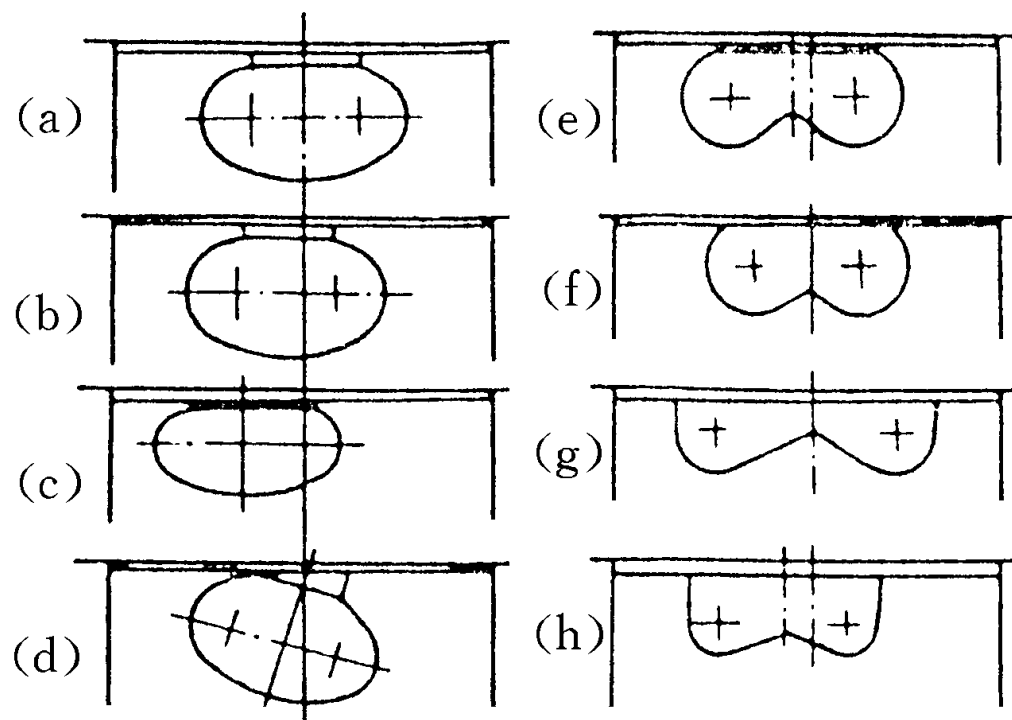


开式燃烧室主要结构尺寸



- 为了保证燃料充分燃烧，需要在较大的过量空气系数下工作，一般 $\alpha=1.6\sim2.2$ 。为了降低热负荷，也需要大量扫气空气来冷却受热零部件。
- 燃烧室结构紧凑，形状简单，相对散热面积面容比小，等容燃烧温度高，热损失小，燃油消耗率比半开式和分开式燃烧室都低，且容易启动。
- 由于燃油在空间雾化混合，在滞燃期内形成的可燃混合气较多，因此， $p_z/p_c$ 、 $dp/d\phi$ 都较高，工作较为粗暴，噪声大。另外燃烧温度高，易冒黑烟和产生较多的 $\text{NO}_x$ 。

## 2. 半开式燃烧室



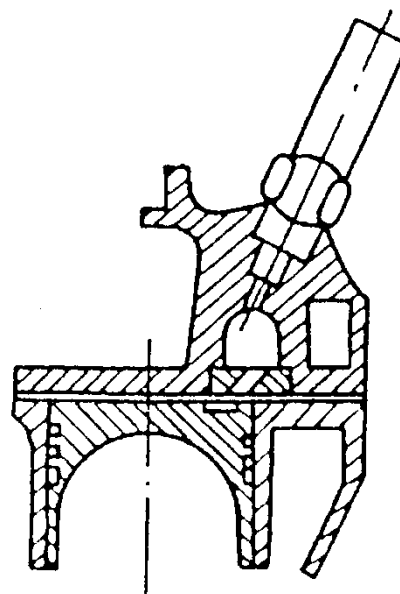
半开式燃烧室的形状

### ❖ 半开式燃烧室的结构特点

- 活塞顶凹坑部分的开口面积比开式燃烧室的要小，但比分开式燃烧室的通道面积大得多，燃烧室深度增加。
- 要求较强的进气涡流，混合气的形成以空间雾化为主，油膜蒸发为辅， $\alpha$ 在1.4~1.8之间（比开式1.6~2.2低）。
- 喷油孔一般为4~6孔。针阀开启压力17~21MPa，贯穿度为1.05较好， $\gamma=140\text{CA}\sim 160\text{CA}$ 。

### 3. 涡流室燃烧室（压缩涡流）

涡流室布置在气缸盖上，呈吊钟形。下部为绝热镶块，在镶块上有一个或多个通道使主、副燃烧室相连。通道方向与活塞顶成一定角度，并与涡流室相切。



95系列柴油机涡流室燃烧室



### ❖ 涡流室燃烧室混合气的形成

- 在压缩过程中，气流经通道进入涡流室，在副燃烧室内产生强烈的空气涡流运动。
- 喷油嘴安装在涡流室内，顺气流方向喷油，将一部分燃油铺于副室壁面，形成油膜燃烧，一部分燃油在空间雾化先行着火。燃油依靠这种强烈的压缩涡流与空气迅速完善地混合。
- 当着火燃烧后，涡流室内的压力和温度迅速升高，气流经通道流入主燃烧室，形成二次涡流，使燃油和主燃烧室中的空气进一步混合燃烧。

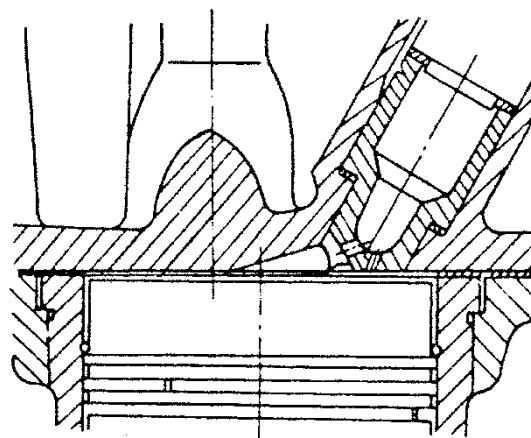
### ❖ 涡流室燃烧室的特点

- 由于混合气的形成好，速度快，能适应于较宽的转速范围变化（最高的柴油机转速 $n=5000\text{r/min}$ ），其高速性能比预燃室更佳，因为随着转速 $n$ 提高，副室中的压缩涡流就越强。
- 由于节流损失，主燃烧室的最高燃烧压力和压力升高率较低（这样排放较好），但是油耗比直喷式高10~15%，散热面积大，起动困难。

#### 4. 预燃室燃烧室（燃烧涡流）

● 对于小缸径的柴油机，为了保证足够的气阀通道面积，预燃室总是倾斜布置或移向一边。

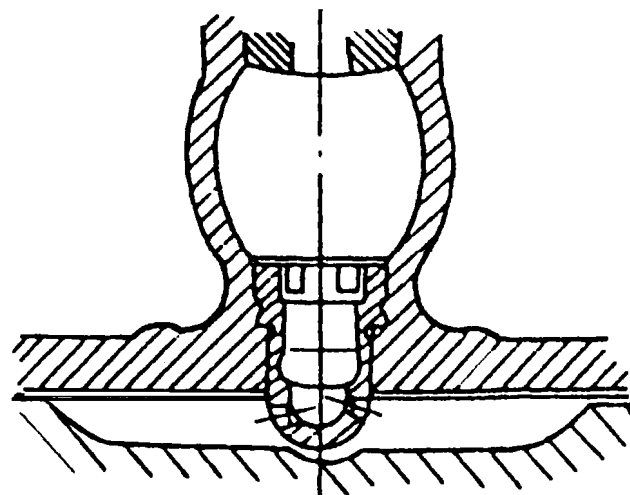
常用1~3个喷孔的通道与主室相通，其大孔轴线直接对着主燃烧室，以保证主燃烧室内的空气得到充分地利用。



195—2型柴油机的预燃室

● 对于大功率增压高速柴油机，一般使用四气阀或六气阀布置。为了既不影响气阀在气缸盖上的布置，又能满足气阀间鼻梁区远离燃烧室中心的要求，因此，预燃室布置在气缸盖正中的中心线上。

喷孔为4~8个，各喷孔的直径相同且均匀排列。



PA4—185型柴油机的预燃室



### ❖ 预燃式燃烧室的特点

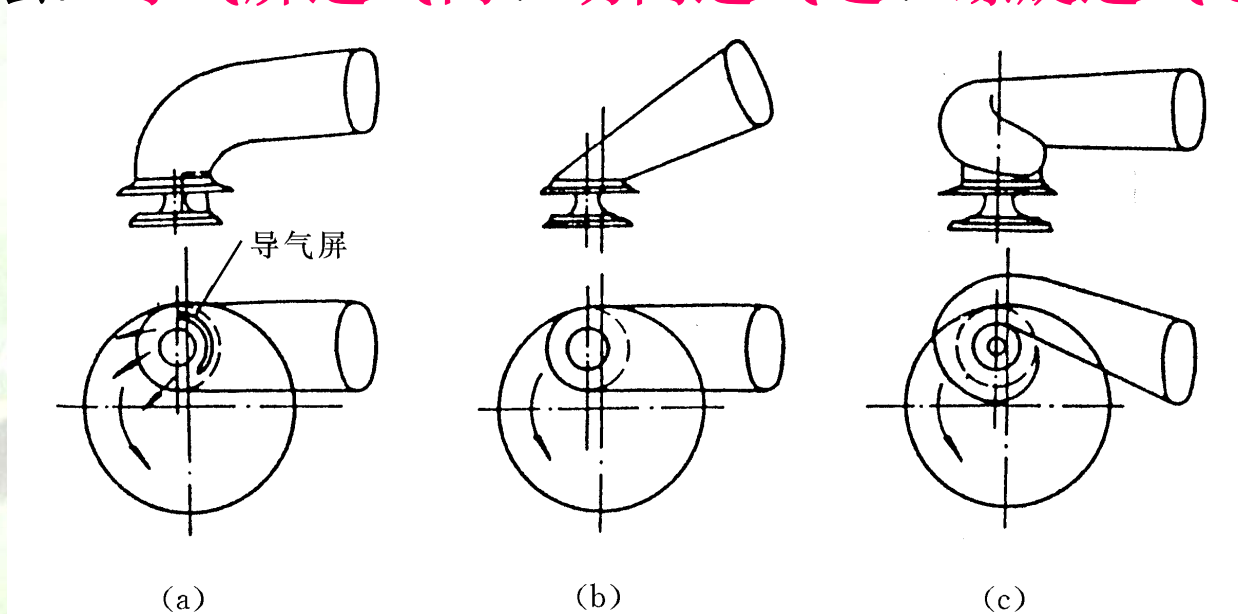
- 一般不组织有规律的涡流，只是在压缩行程，空气经小孔进入预燃室，形成无组织的紊流或组织微弱的压缩涡流。
- 主要依靠一部分燃油在预燃室中预先燃烧所产生的燃烧涡流的能量，自喷孔喷出与主室内空气混合燃烧。由于燃烧涡流较强，所以，它可在较小的过量空气系数（ $\alpha=1.2\sim1.6$ ）下工作。

- 对供油系统、进气系统要求不高，可以使用单孔轴针式喷嘴，可在较大的转速范围内获得良好的性能。
- 预燃室因通道面积小，产生气体节流，使压力升高率 $dp/d\phi$ 和最高燃烧压力 $p_z$ 较低，烟度及排气中有害气体（如 $NO_x$ ）的含量也较低。
- 由于存在着较大的气流损失和散热损失，经济性较差，燃油消耗率 $g_e$ 高，启动比较困难。

### 三、缸内空气涡流的形式与作用

#### 1. 进气涡流的形成

进气涡流是在四冲程内燃机的吸气行程中形成的，主要有三种方法：**导气屏进气门**、**切向进气道**、**螺旋进气道**。



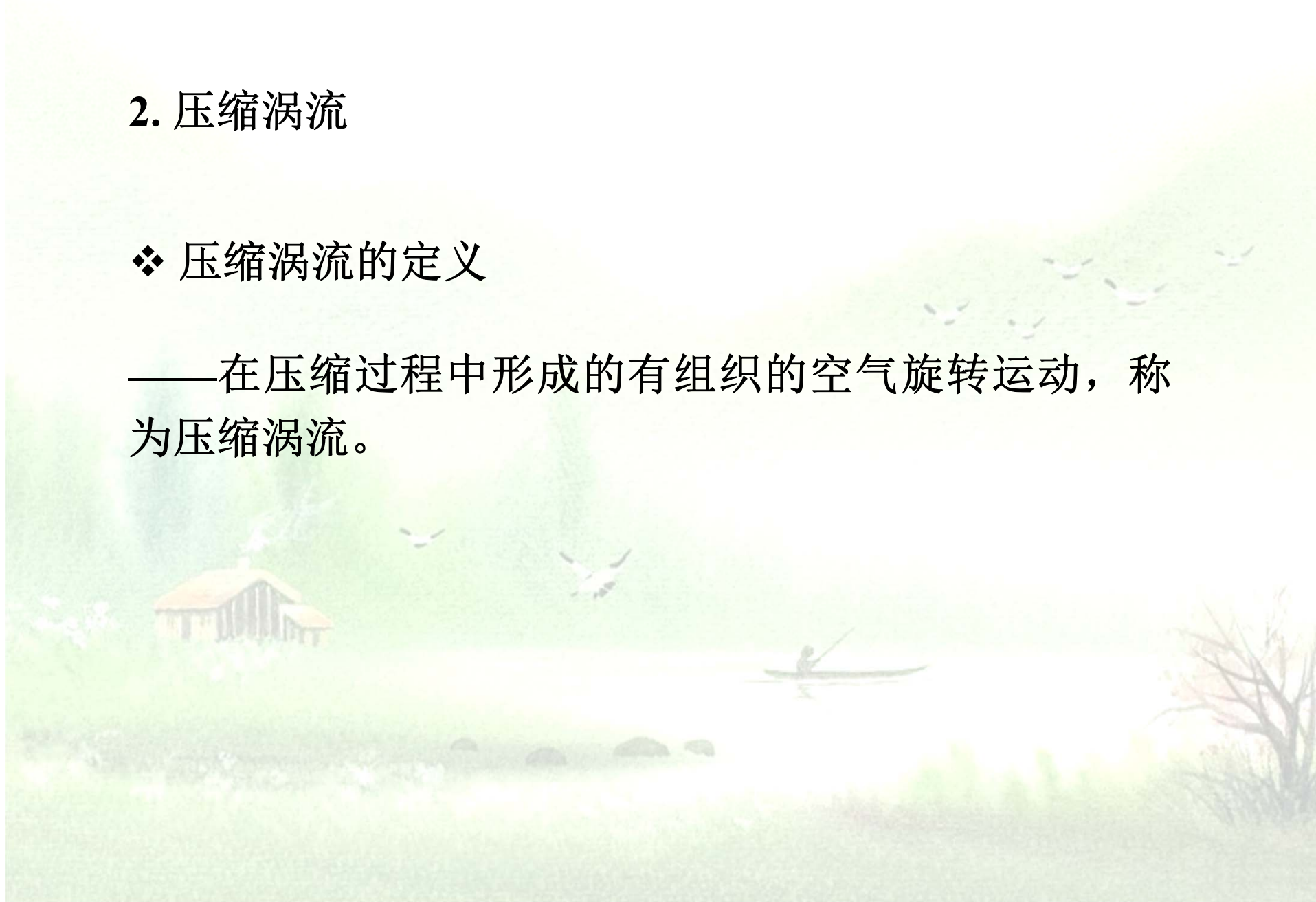
产生进气涡流的方法

(a) 导气屏进气门； (b) 切向进气道； (c) 螺旋进气道

## 2. 压缩涡流

### ❖ 压缩涡流的定义

——在压缩过程中形成的有组织的空气旋转运动，称为压缩涡流。



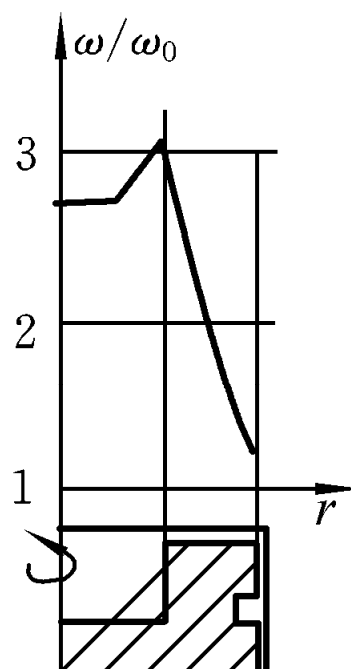


### ❖ 压缩涡流的形成及特点

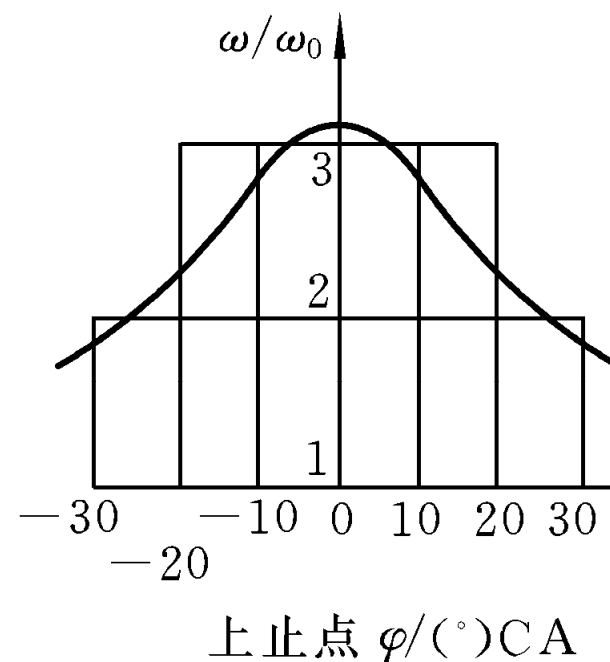
- 在压缩行程开始时，因缸内存在进气涡流，随着压缩行程的进行，缸内涡流被压入口径较小的燃烧室凹坑，形成沿凹坑旋转的压缩涡流。
- 由动量守恒，在进气涡流所具有的动量矩基本不变的情况下，气流旋转半径缩小，势必使燃烧室内的涡流角速度增大。

由图可知，在相应于燃料喷射和燃烧的一段时间内，涡流在燃烧室内被加速了。

与此同时，形成了燃烧室内速度较高而在其外围速度较低的涡流速度分布。



(a)



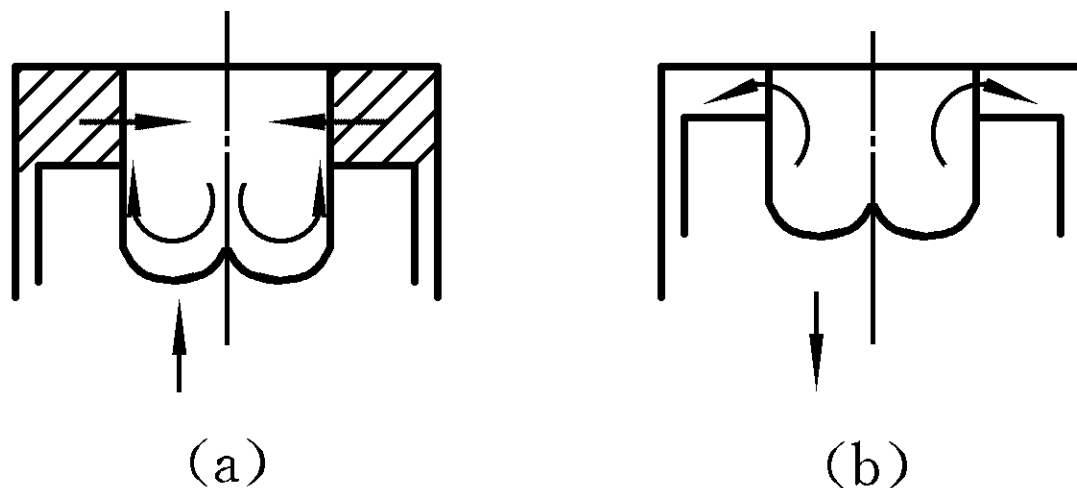
(b)

燃烧室的涡流增速比

燃烧室口径比 $\beta=0.35$ ；活塞顶间隙  $x=0.9\text{mm}$ ；压缩比16.4

### 3. 挤流

- 活塞上行时，除在凹坑里形成压缩涡流外，还存在一种径向的空气挤压流动，称为挤流。
- 活塞下行时，凹坑内的气体又向外流入环行空间，产生逆挤流。

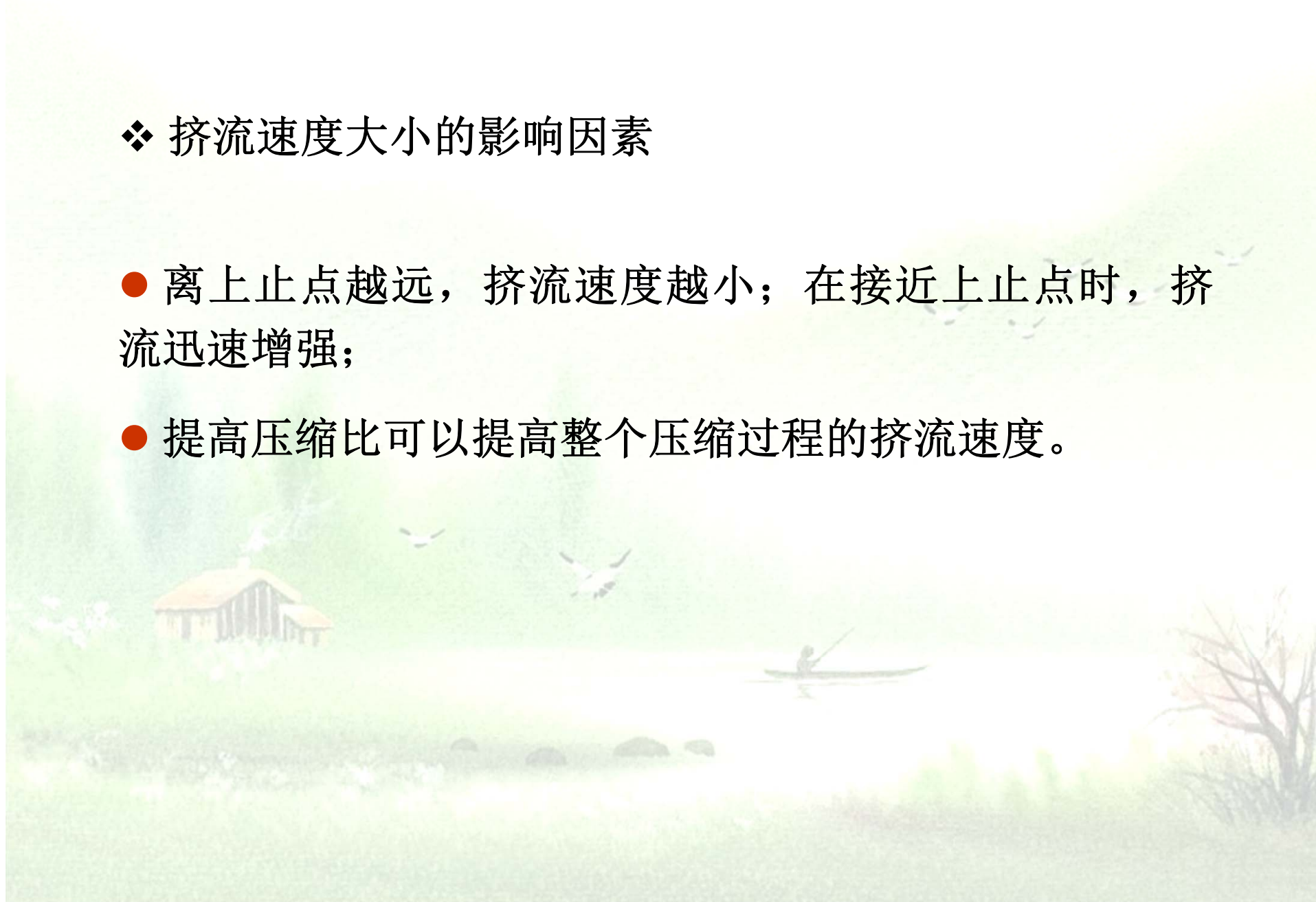


挤流与逆挤流

( a ) 挤流； ( b ) 逆挤流

### ❖ 挤流速度大小的影响因素

- 离上止点越远，挤流速度越小；在接近上止点时，挤流迅速增强；
- 提高压缩比可以提高整个压缩过程的挤流速度。





## 3.4 燃油的燃烧

### 一、可燃混合气的着火

#### ❖ 影响柴油机燃烧的重要因素

- 缸内混合气的形成
- 着火延迟及着火后的火焰传播

## 二、燃烧过程

### ❖ 燃烧过程的划分

柴油机的燃烧过程包括预混合燃烧和扩散燃烧两部分。

- 预混合燃烧是火焰到达前燃料与氧化剂已充分混合形成可燃混合气的燃烧过程。

柴油机滞燃期内形成的可燃混合气的燃烧属于预混合燃烧。

- 扩散燃烧是燃料和氧化剂未预先混合的燃烧过程。

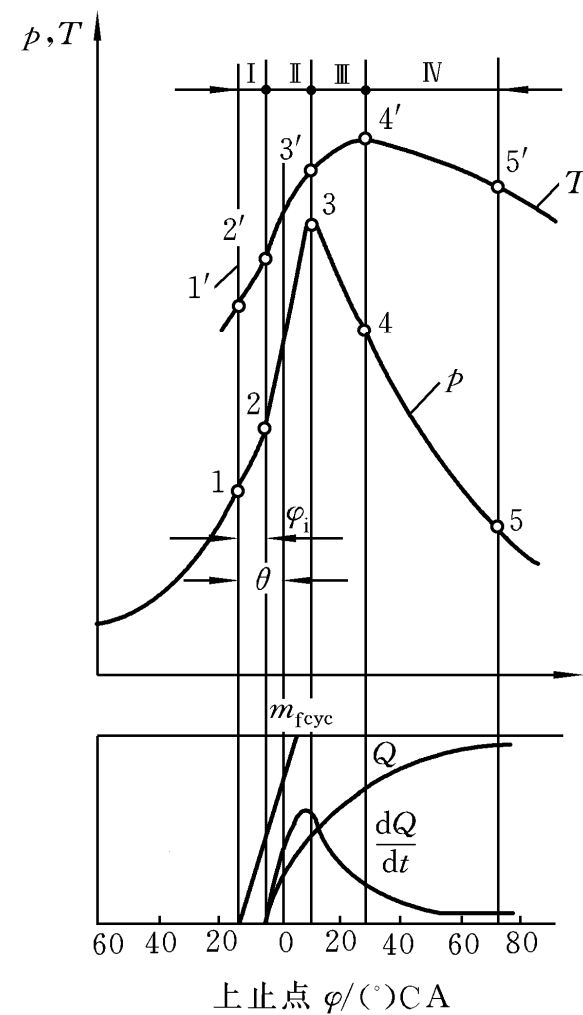
柴油机大部分燃料是在着火后喷入缸内的，处于边与空气混合边燃烧的情况下进行，可燃混合气形成的快慢控制其燃烧速率。

柴油机中的燃烧主要是**扩散燃烧**。

### ❖ 柴油机燃烧过程阶段的划分

柴油机的燃烧过程分为以下四个阶段：

- 滞燃期
- 急燃期
- 缓燃期
- 后燃期



柴油机燃烧过程四阶段的划分图

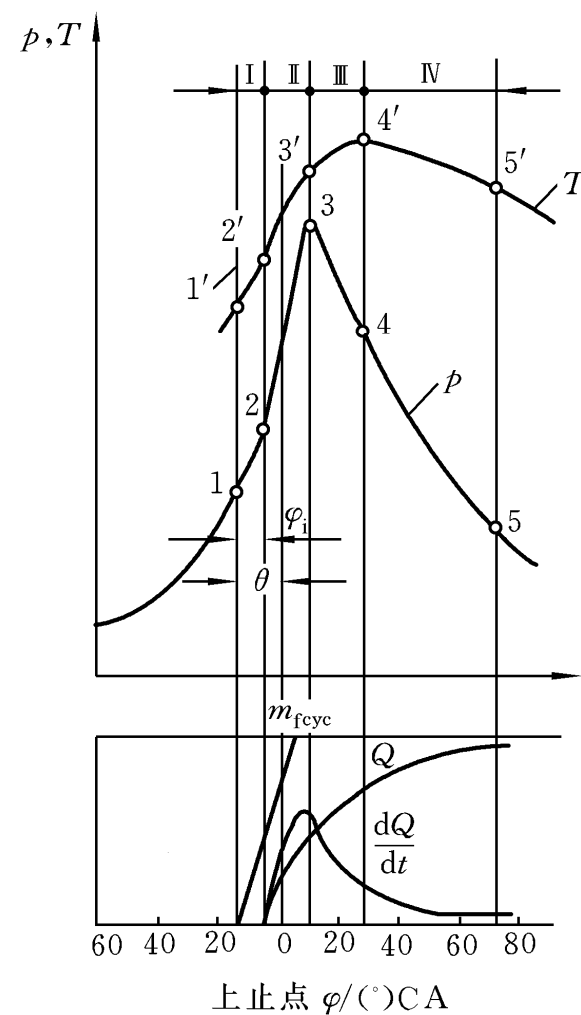


## 1. 着火延迟期（滞燃期）

自开始喷油到开始着火，或自开始喷油到缸内压力脱离纯压缩线开始急剧上升为止的一段时期，称为滞燃期。

滞燃期通常以曲轴转角 $\varphi_i$ 或滞燃时间 $\tau_i$ 表示为：

$$\tau_i = \frac{60\varphi_i}{360n} = \frac{\varphi_i}{6n}$$



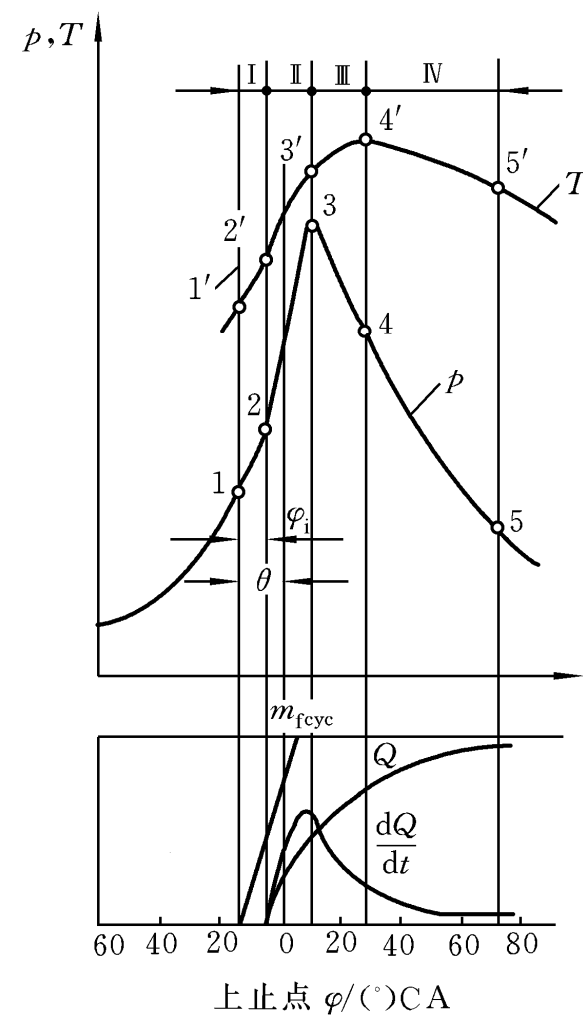
❖ 滞燃期对柴油机性能的影响

$\tau_i \uparrow \rightarrow$  喷入气缸的燃料量  $\uparrow \rightarrow$  形成的可燃混合气  $\uparrow \rightarrow$  急燃期  $p_z$ 、 $dp/d\phi \uparrow \rightarrow$  机械负荷、噪声  $\uparrow$

因此，控制  $\tau_i$ ，即控制  $p_z$  和  $dp/d\phi$ 。

## 2. 急燃期

从开始着火到缸内出现最高压力的阶段，称为急燃期。



### ❖ 急燃期的特点

- 火源迅速形成，将上一阶段喷入气缸的燃料几乎全部燃烧。
- 使急燃期进入气缸而又完成燃烧准备的部分燃料进行燃烧。
- 活塞已靠近上止点，气缸容积较小，气缸中压力升高极快。

一般用压力升高率 $dp/d\phi$ 来表示压力升高的急剧程度，也采用整个急燃期的平均压力升高率 $\omega_m$ 表示，即：

$$\omega_m = \frac{p_3 - p_2}{\phi_3 - \phi_2}$$



### ❖ 急燃期对柴油机性能的影响

a. 压力升高率决定柴油机工作的平稳性。

$dp/d\phi \uparrow \rightarrow$  柴油机工作粗暴  $\rightarrow$  产生较大的金属敲击声和强烈震动。当敲击声太大时，就称该柴油机“敲缸”或“爆燃”。

b. 当  $p_z$  和  $dp/d\phi$  较大时  $\uparrow \rightarrow$  燃烧等容度  $\uparrow \rightarrow g_e \downarrow$

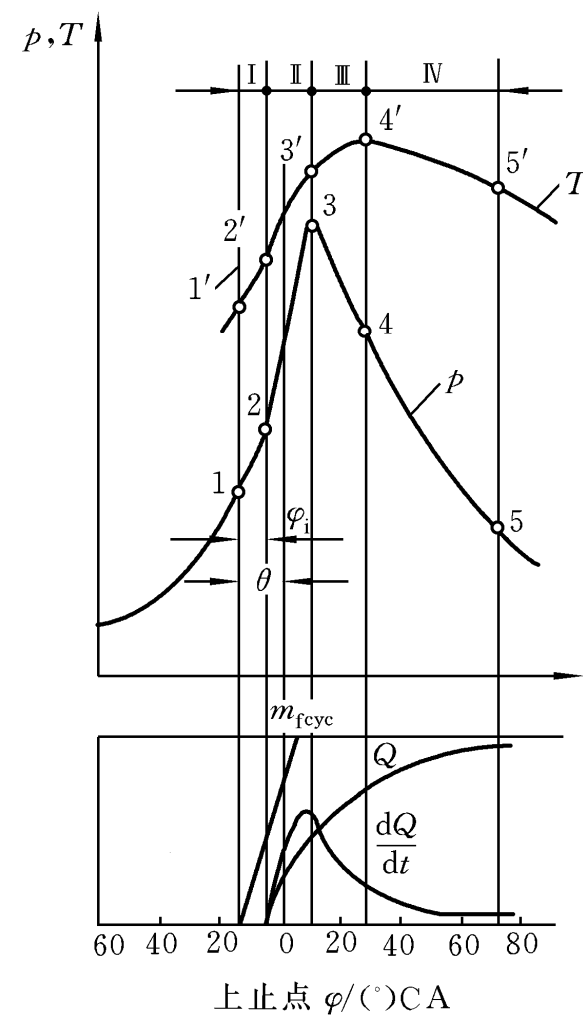
但  $dp/d\phi$  过大会使燃烧噪声增大，燃烧温度也会提高，从而使  $NO_x$  的排放增加。

### ❖ 控制方法

- 为了保证柴油机运转的平稳性并兼顾其良好的经济性， $\omega_m$ 不宜超过 $0.4\text{MPa/CA}$ 。
- 由于 $p_z$ 、 $dp/d\phi$ 取决于滞燃期内形成的可燃混合气的多少，所以控制滞燃期 $\tau_i$ 是控制急燃期内 $p_z$ 、 $dp/d\phi$ 的重要手段。

### 3. 缓燃期

从最高压力开始到出现最高温度的阶段，称为缓燃期。



### ❖ 缓燃期对柴油机性能的影响

有些柴油机在此阶段还有燃油喷入。

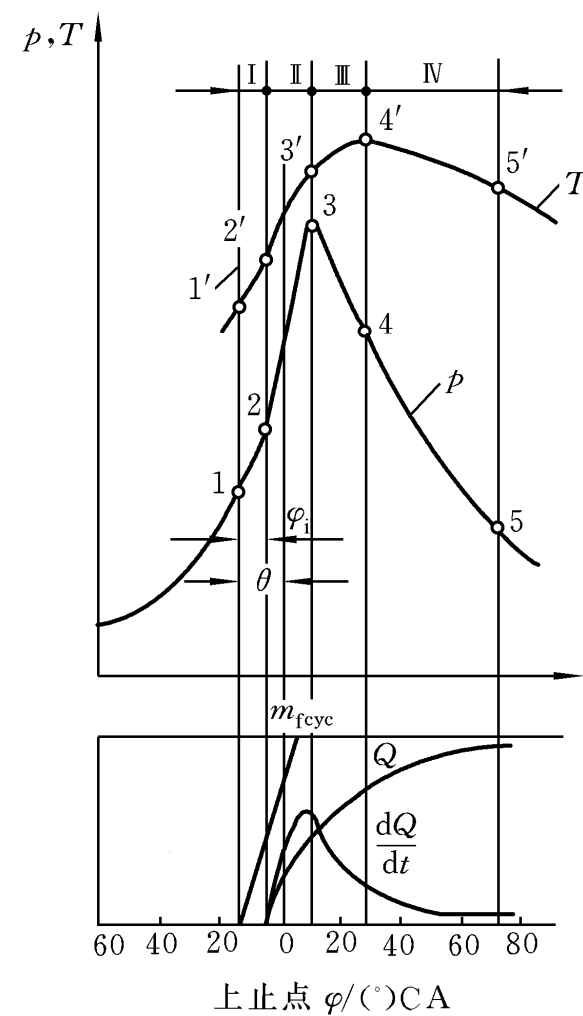
- a. 如果所喷入的燃料处于高温废气区，则燃料因缺少氧气，而裂解产生碳烟；
- b. 如果燃料喷到有氧气的地方，则因燃烧室中温度很高， $\tau_i$ 大为缩短，若此时混合速度较低，氧气的输送不及时，则过浓的混合气易裂解生成碳烟。

改善此阶段的燃烧主要是加强空气运动，以改善空气混合气的形成质量，达到改善发动机性能的目的。



## 4. 后燃期

从最高温度点开始到燃料基本燃烧完毕为止，称为后燃期。



### ❖ 后燃期对柴油机性能的影响

- a. 由于此阶段 $\alpha$ 小，又是在**较低的膨胀比**下放热（活塞下移较多），所放出的热量难于有效地利用，使柴油机热负荷增加， $g_e \uparrow$ 、 $t_r \uparrow$ 、 $Q_w \uparrow$ ，所以后燃期应尽可能地缩短。
- b. 缩短柴油机后燃的主要措施是加强燃烧室内的气流运动，加速混合气的形成，减少缓燃期内的喷油量，并提高缓燃阶段的燃烧速度，使燃烧尽可能在上止点附近基本完成。

## 四、柴油机的热平衡

### ❖ 热平衡方程式

$$Q_T = Q_e + Q_w + Q_r + Q_b + Q_s \quad \text{KJ/h}$$

$Q_T$ : 燃料在气缸中完全燃烧发出的总热量;

$Q_e$ : 转变为有效功的热量;

$Q_w$ : 冷却介质带走的热量;

$Q_r$ : 排气带走的热量;

$Q_b$ : 燃料不完全燃烧带走的热量（约为1%）;

$Q_s$ : 其它损失的热量。

## ❖ 热平衡图

主要有三个流向：

a. 指示功的热量 $Q_i$

➤有效功热量 $Q_e$

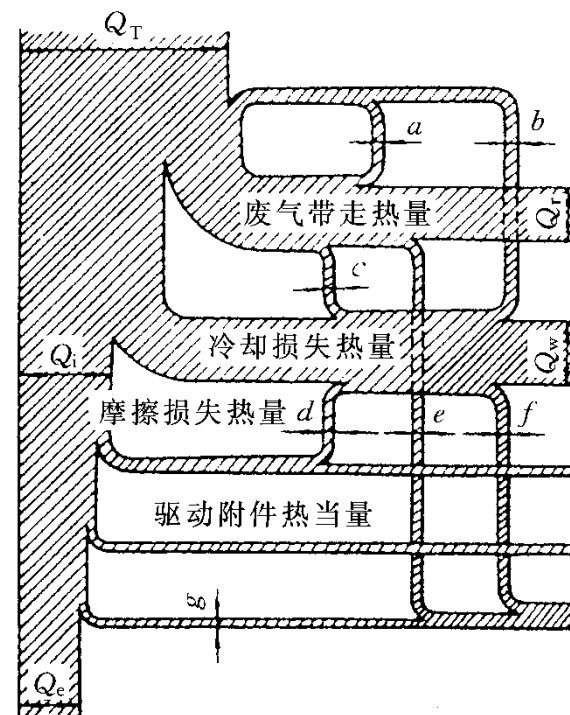
➤机械摩擦损失的热量 $Q_m$

➤驱动附件的热量

➤因辐射而散失到大气中的热量

b. 冷却水带走的热量 $Q_w$

c. 排气带走的热量 $Q_r$



内燃机的热流图



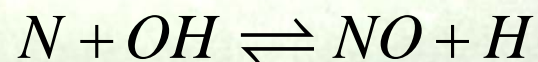
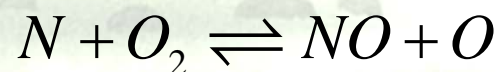
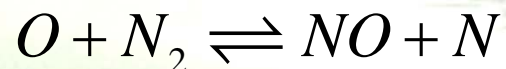
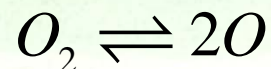
## 3.5 柴油机的有害废气排放

### 一、柴油机排气污染物生成机理及控制措施

#### 1. 氮氧化物（NO<sub>x</sub>）

##### ❖ NO<sub>x</sub>的生成

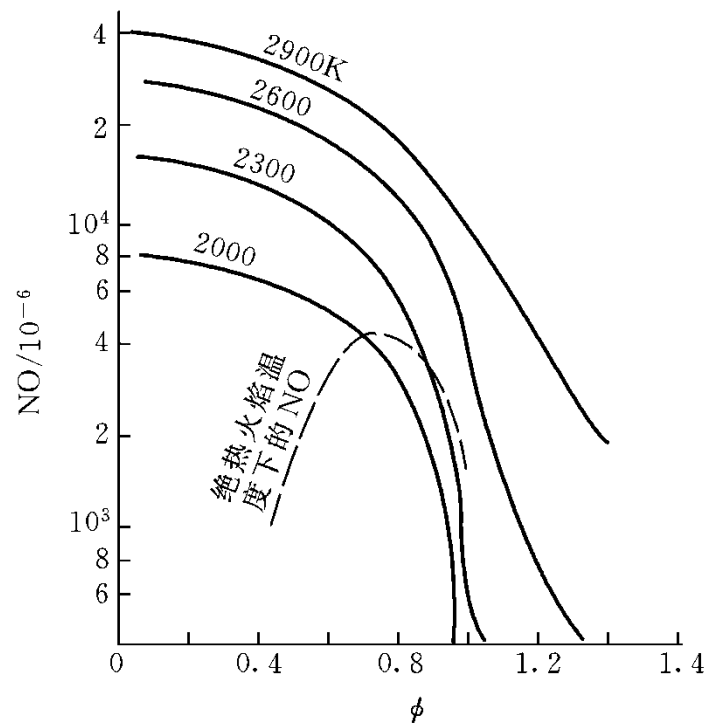
内燃机排气中含有的氮氧化物种类较多，其中对环境造成严重危害的主要是NO和NO<sub>2</sub>，统称为氮氧化物NO<sub>x</sub>。



### ❖ NO生成的影响因素

NO的生成量主要取决于反应温度和混合气的浓度。

- a. 混合气稀的区域，NO的生成量随温度增加而迅速增大；
- b. 在一定的温度下，NO的浓度随混合气的加浓而减少。



NO的平衡浓度

### ❖ 燃烧方式对NO生成的影响

a. 在柴油机中，预混合燃烧速度很快，又发生在上止点附近，有最长的焰后反应时间和最高的气体温度，对NO的生成极为有利。

b. 扩散燃烧速度受混合速率或燃油气化速率的限制，又发生在预混合燃烧之后，此时活塞已下行，故无论从气体燃烧温度还是焰后反应时间来说都不如预混火焰。

因此，柴油机中NO的生成量与参加预混燃烧的燃油比例有很大关系。如果参与预混合燃烧的燃油量多，NO的生成量就会增加。

### ❖ NO的生成条件

- a. 高的绝热火焰温度，这是生成NO的重要因素，在氧气充足的情况下，温度越高，NO的生成速率也越大，最大值出现于略低于理论混合比的焰后区。
- b. 大的氧气浓度，这是生成NO的必要条件，即使在高温下，氧气不够富裕，NO的生成反应也会受到抑制。
- c. 较长的滞留时间，由于NO的生成反应比燃烧反应缓慢，所以即使在高温、富氧的条件下，如果燃烧产物滞留时间很短，NO的生成量也会受到限制。

**高温、富氧、停留时间长**是NO生成量增长的主要原因。



## 2. 颗粒 (PM)

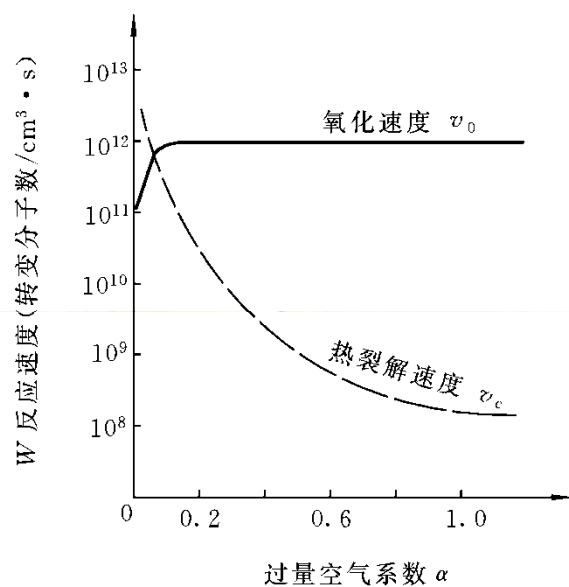
### ❖ 排气颗粒的定义

所谓内燃机的排气颗粒是指接近于大气条件下存在于排气中除水以外的任何分散物质。

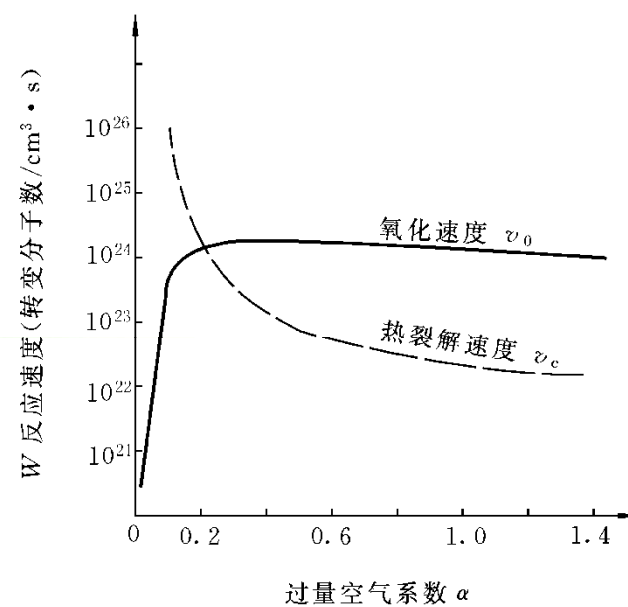
这种物质可能是固态的，也可能是液态的，包括原始的和二次生成的颗粒物。

## ❖ 柴油机排气碳粒的生成

燃料燃烧从开始就同时存在热裂解和氧化两种反应。



$p = 7840 \text{ kPa}, T = 600 \text{ K}$



$p = 7840 \text{ kPa}, T = 2000 \text{ K}$

十二烷的氧化、热裂解速率与 $\alpha$ 的关系

### ❖ 柴油机碳粒形成的原因

- a. 柴油机燃油燃烧属非均相燃烧，大量碳粒是在扩散火焰中生成的，其生成与混合气形成质量与燃烧过程的组织有密切的关系。
- b. 在烃燃料和空气混合不均匀，尤其是在高温缺氧的条件下，烃燃料燃烧最容易生成碳烟。

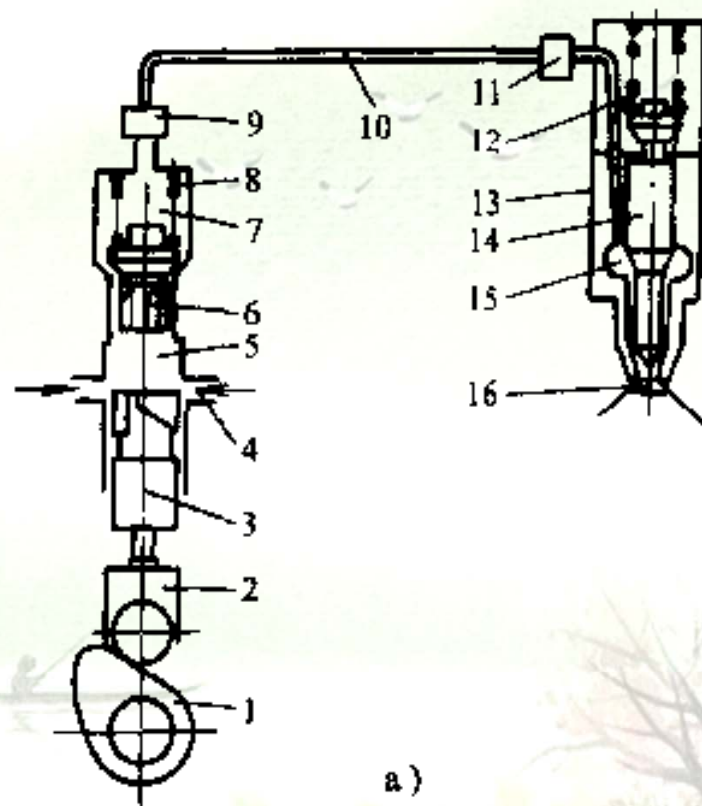
高温缺氧（混合气浓）、混合气混合速率低是碳烟产生的主要原因。

### 3.6 喷油设备

## 一、喷油泵

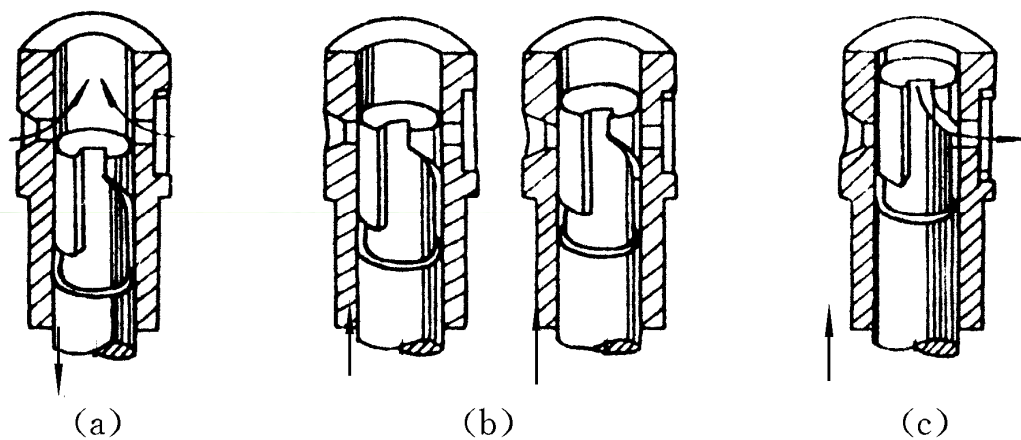
## ❖ 柱塞式喷油泵的工作原理

柱塞式喷油泵由泵体、柱塞副（柱塞和柱塞套偶件）、出油阀副（出油阀和阀座偶件）及附属零件组成。





工作时油泵凸轮旋转，推动柱塞上下运动，完成进油和压油，燃油压力超过限定值时，在油压作用下出油阀开启，燃油流入高压油管。

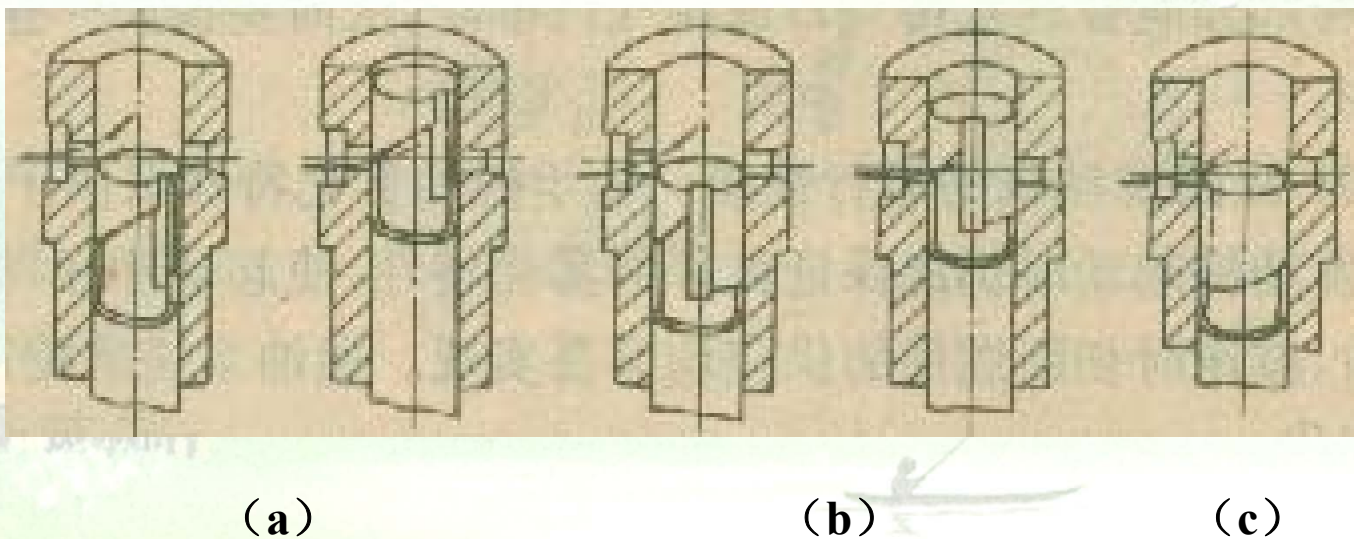


柱塞式喷油泵工作原理

(a) 进油； (b) 供油过程； (c) 终止供油

### ❖ 柱塞式喷油泵的油量调节

柱塞副集压油、油量计量和供油正时功能于一身，是喷油泵的核心部件。



柱塞式喷油泵油量调节原理

(a) 最大供油位置； (b) 正常供油位置； (c) 停止供油

### ❖ 出油阀的作用

作为泵腔和高压油管之间的单向止回阀具有如下作用：

- a. 出油阀将柱塞上部泵腔容积与到喷油器的油路系统分开，便于从油路系统中排除空气。
- b. 在柱塞吸油行程时，能防止油管中的燃油倒流入泵腔，使得喷油后高压油管内的压力不致过分下降，否则将减少下一循环的供油量和推迟喷油时刻。
- c. 利用出油阀的卸载作用，控制高压油管中的剩余压力，防止二次喷射和滴油等。

## ❖ 出油阀的分类

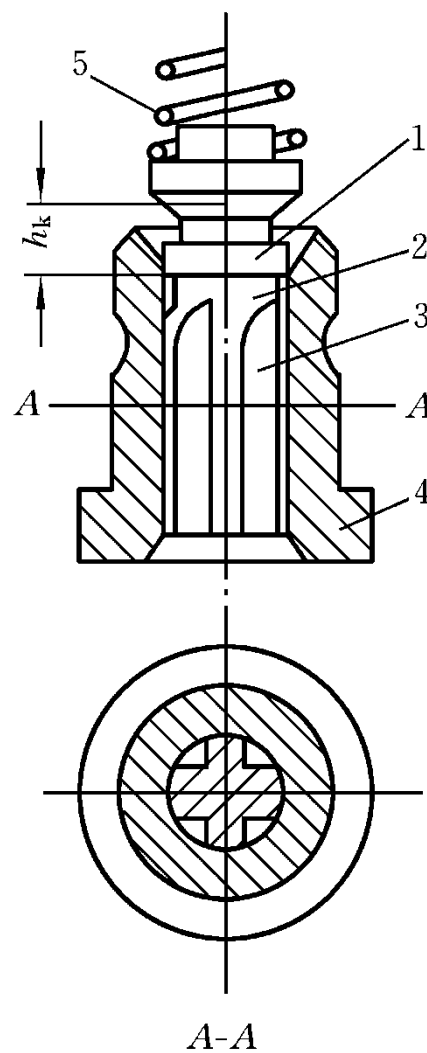
出油阀的结构很多，目前常用的是：

- 等容卸载出油阀
- 等压卸载出油阀

等容卸载出油阀是使用最多的一种出油阀。



❖ 等容卸载出油阀



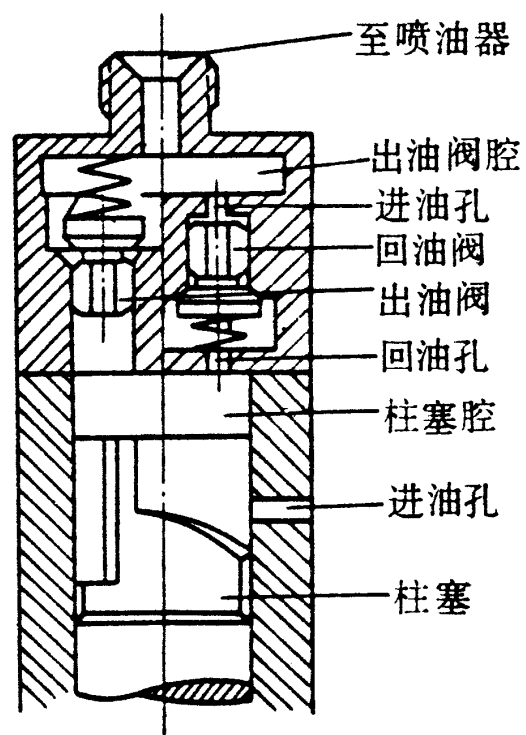
等容卸载出油阀

❖ 减压带高度 $h_k$ 的合理选择

a.  $h_k$ 太小，高压油管中残余压力过大，针阀关不死，产生二次喷射和滴油。

b.  $h_k$ 太大，高压油管中残余压力过小，使下循环喷油更加滞后，减少下循环供油量。使高压管中的燃油减压过急，会在油管中形成零压或负压区，导致油管内壁穴蚀。

❖ 等压卸载出油阀



等压卸载出油阀原理图

### ❖ 等压卸载出油阀的特点

- a. 剩余压力大小可通过回油阀弹簧预紧力和刚度进行调节。
- b. 此种出油阀可以使管内剩余压力保持一个较佳值，避免二次喷射和油管穴蚀。



## 二、喷油嘴

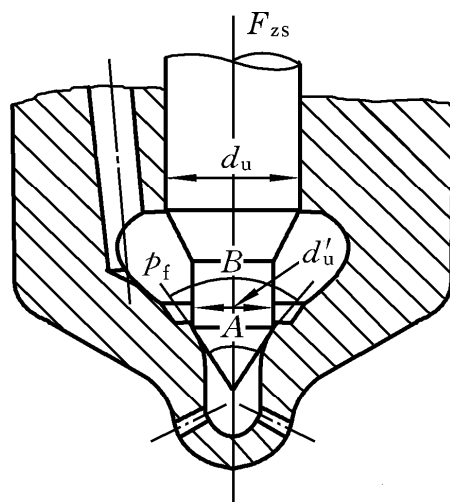
### ❖ 喷油嘴的分类

按照柴油机燃烧室的要求，喷油嘴可分为：

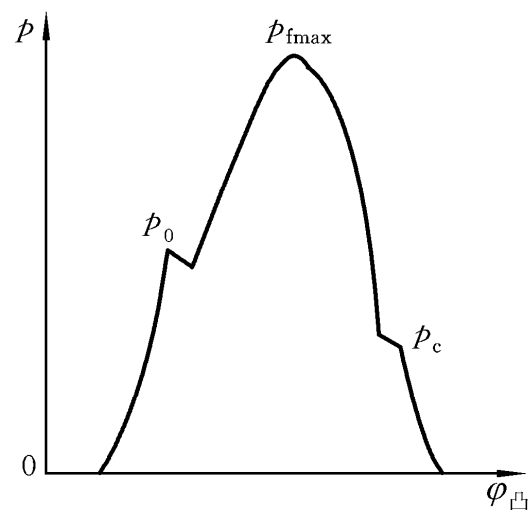
- 多孔式
- 轴针式

### ❖ 多孔式喷油嘴

结构特点：多孔式喷油嘴的喷孔数为1~10个，分布在针阀体的下端球头上，针阀座面下面的容积称为压力室，上面的容积称为针阀室。



(a)

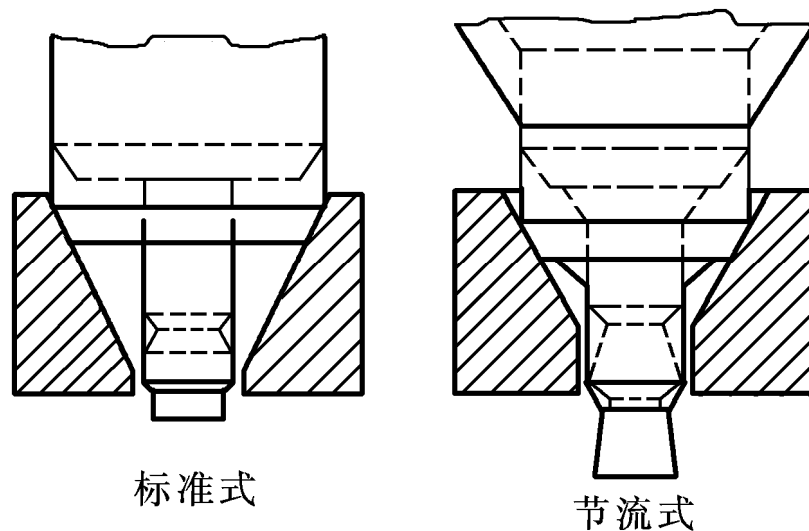


(b)

多孔喷嘴及其压力变化图

### ❖ 轴针式喷油嘴

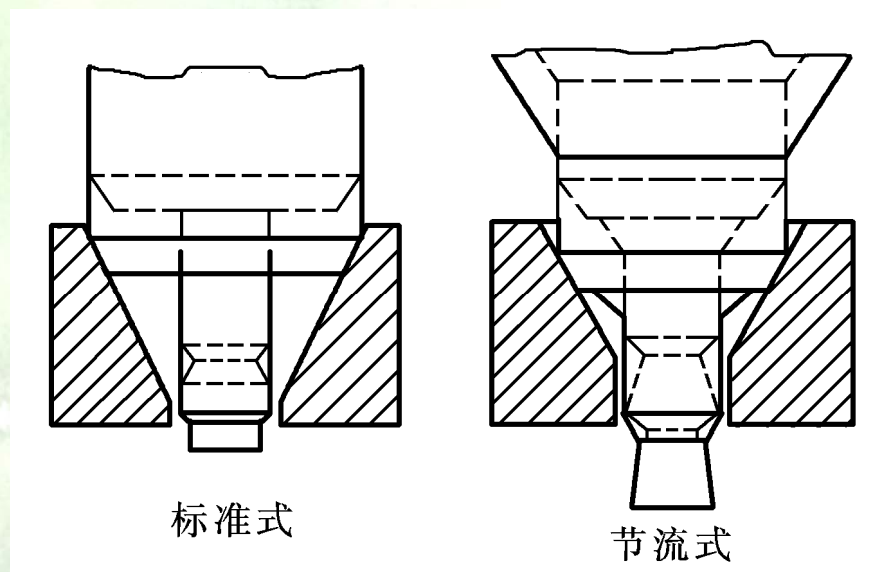
结构：轴针式喷油嘴针阀前端有一细长圆柱形的轴针伸入针阀体的喷孔内。



标准及节流式喷油嘴

工作原理：

- a. 当针阀腔内的燃油压力达到针阀开启压力时，针阀开启，燃油通过轴针和喷孔之间的**环形空隙**，形成中空的**圆锥形油束**，喷入燃烧室。
- b. 改变轴针的几何尺寸和外形可以改变喷孔流通面积随针阀升程的变化规律，影响喷油规律和油束锥角。





- c. 轴针式喷油嘴的针阀开启压力也大于针阀关闭压力。
- d. 轴针在喷孔中的上下运动，对喷孔有自洁作用，可防止孔口的积碳堵塞喷孔。

