

第三編 热力設備

第一章往复式內燃机

1-1 內燃机的燃料及內燃机的分类

燃料直接在气缸里进行燃燒的往复式热力原动机称为內燃机。

內燃机的热能轉化过程直接在原动机里进行，和蒸汽原动机比較，損失小，效热率較高，結構也較輕便，使用灵活，起動容易，水耗量不大；因此，內燃机非常适于用作輕便的交通工具如汽車、飞机、船舶、汽車及坦克車与拖拉机等原动机，也同样适于用作常常移动的发电机、水泵、气压机械及鑽探机械等的原动机。

內燃机不能直接利用固体燃料，因为固体燃料燃燒后总有剩余的物質——灰份，而在机器運轉間期，很难想象在內燃机的內部可以連續除灰。因此，內燃机除采用天然煤气或工业上的副产品，例如煉焦爐煤气，高爐煤气等等外，就只能采用比較昂貴的高級液体燃料——汽油和輕級柴油，或者在一套笨重的煤气发生爐里用固体燃料（煤、炭、木柴等）所制备的煤气。

汽油是一种稀薄透明的液体，比重在0.76左右，发热量約为10,500 仟卡/公斤；輕級柴油比重在0.85~0.98左右，它是一种粘厚深色的液体，发热量在10,200 仟卡/公斤左右。汽油和柴油都是从石油中精煉出来的輕級油料；汽油容易气化，石油精煉时，首先蒸餾出来的就是汽油，其次才是柴油。

按照所使用的燃料来分，往复式內燃机可以分作煤气机，汽油机，柴油机，特种油机（例如我国曾經制造过的桐油机）等；此外，往复式內燃机还可以用酒精和笨作燃料。尽管如此，往复式內燃机基本上可以划分为煤气机，汽油机和柴油机等三类。

燃料的燃燒，不仅要和足够的空气接触，而且还和温度有密切的关系，不到一定温度，燃料不会起火。使燃料起火的方法有两种：点燃和自燃，前一种是用火焰，电火花，或其他点火器对燃料点火来引起燃料的燃燒；后一种则不用点火器，而用压缩或其他方法使燃料本身的温度增高到一定程度而自动起火。燃料利用点燃器而起火的温度称为燃燒点，不用点燃器而自行起火的温度则称为自燃点。汽油的燃燒点低，在通常的压力下只有 $-12^{\circ}\sim -6^{\circ}\text{C}$ 左右，这说明汽油非常容易气化而和周围空气混合成可燃气体，一經引火就可以立即燃燒。由此可见，用汽油或其他容易气化的液体为燃料时可以让它通过一种设备使在空气里气化，和空气組成可燃气体，然后引入气缸里压缩和点燃。这种使汽油气化的设备称为化油器，所以汽油机或其他輕油机又称化油器內燃机，或点燃机。使用煤气为燃料时，也完全一样，不过用混合器来代替化油器，使煤气在混合器里直接和空气相混合。在另一方面，柴油和其他重油都不易气化，只能在高压下把它成“雾化”地硬噴入气缸，使和缸内已被预先压缩的高温空气相混合，由于混合后的温度仍远超过柴油的自燃点（大約 300°C 左右）而自动点火，接着噴进去的就随噴随燃，所以，柴油机可以称为自燃机。当然，柴油机不需要化油器和点火器，而要一套精致复杂的噴油设备。在点燃机中，可燃气体是一次进入气缸的，所以，点火引燃后，燃燒非常猛烈，而无法控制，不过，起燃的时刻完全受点火的約束；在自燃机

中，开始向气缸喷油后，如果温度适宜，就自然起火，随喷随烧，燃烧的速度可以由喷油的速度加以控制。在自然机中，按燃料喷入气缸的方法的不同，还可分为风力和机力两种：前一种是利用高压的压缩空气把燃料送入气缸，而后一种是利用喷油器把燃料压入气缸。

此外，内燃机还可按其使用范围分为：固定装置发动机，船舶发动机，汽车发动机，拖拉机和航空发动机等；按冷却方法又可分为风冷式和水冷式；按内机气缸装置情况可分为立式、卧式、V型等等。

内燃机按其工质所进行的热力循环，可分为定容供热、定压供热和混合供热三种。按工质每进行一循环所需的活塞冲程数，可分为四冲程和二冲程，前者是工质每完成一热力循环，活塞须在气缸内进行四个冲程，也就是机轴转两转，而后者则工质每完成一热力循环，活塞只需进行两个冲程，也就是机轴只转一转。

1-2 四冲程内燃机的工作循环

图1-1示出四冲程内燃机的主要部分。图中：1为气缸；2为活塞；3和4分别表示进气阀和排气阀（由气缸外面的气阀机构控制，图中未示出）：

5和6为进气管和排气管；7所表示的，在汽油机或煤气机中应该是一个火花塞，在柴油机中应该是一个喷油咀。内燃机多半是单动式，所以连杆直接连接在活塞上，不必需要活塞杆。

内燃机气缸中工质工作的情况可以直接用示功器画出功图。图1-2示出三种四冲程内燃机的典型示功图。图中a称为定容供热循环；b称为定压供热循环；c称为混合循环，下面我们每种循环予以研究。

a) 定容供热循环：汽油机和煤气机工质所进行的循环属于这一种。当活塞由上静点第一次下行时，进气阀打开，把燃料和空气的可燃混合物吸入气缸，这一个冲程称为吸气冲程，如图1-2(a)中的1-2线所示。由于进气阀以及一些进气设备，例如空气虑清器，汽油机的化油器或煤气机的混合器，的阻塞作用，使吸气时气缸内压力永远低于大气压力，约0.8-0.95气压左右。

活塞在下静点附近时，进气阀关闭，当活塞由下静点上行，可燃混合物就密闭在气缸内而被压缩，这一个冲程称为压气冲程如图1-2(a)中2-3线所示，压气冲程终了时气缸内火花塞突然发生电火花，把压缩后的可燃物点燃，由于燃烧的动作十分迅速，气缸内压力陡然剧升到20-30气压，如图(a)中3-4线所示，很接近于定容燃烧，所以称为定容供热循环。

从4点以后，高压气体将作近似绝热过程的膨胀，推动活塞而产生动力，直至活塞又达到下静点5，这一个冲程称为动力冲程。

活塞在下静点附近时，排气阀打开，工作过的气体一部分立即通过排气阀冲出气缸，其余部分于活塞第二次由下静点上行时被排出气缸，这一个冲程称为排气冲程，如图1-2(a)中5-1线所示。由于排气管的阻塞作用，排气时气缸内压力也必然要大于大气的压力，约为1.05-1.2气压。在1点处，排气阀关闭，进气阀打开，活塞再下行，将重复吸气等冲程，因而再完成另一个工作循环。

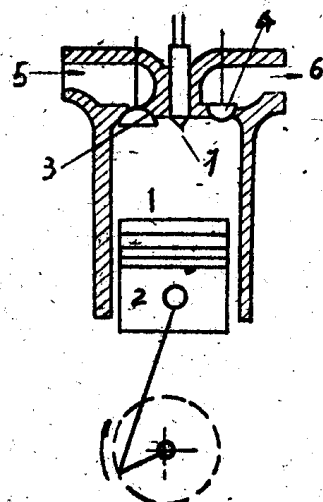


图1-1 内燃机基本构造的示意图

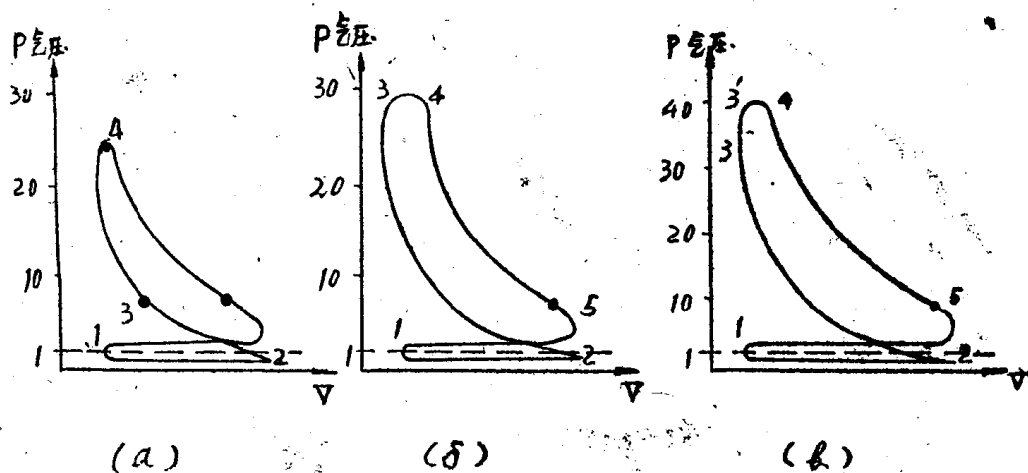


圖1-2 內燃機的典型示功圖

a) 定容供熱循環; b) 定壓供熱循環; c) 混合循環。

6) 定壓供熱循環：風力噴油柴油機屬於這一種，工質每完成一循環亦是 由吸氣沖程，壓縮沖程，動力沖程和排氣沖程組成，不過在吸氣沖程吸入的是純空氣，壓縮沖程所壓縮的也是純空氣，壓縮終了時，氣缸壓力將近 35—30 氣壓，空氣溫度達 600°C 左右。這時，燃料從缸外在高壓壓縮空氣伴隨下和高壓壓縮空氣組成霧狀的可燃物噴入氣缸。因柴油的自然點只有 $300—350^{\circ}\text{C}$ ，所以可燃物一進入氣缸就立即燃燒，而且隨噴隨燒，如圖(6)中 3—4 線所示，很接近於定壓燃燒，所以稱定壓供熱循環。

b) 混合循環：機力噴油柴油機屬這于一種，它與定壓供熱循環不同之點，在於當壓縮沖程將接近終了時，燃料不是利用高壓壓縮空氣壓入氣缸，而是利用噴油泵直接把柴油加壓而噴入氣缸。由於燃料噴入氣缸時尚是霧狀的液體，所以油料噴入氣缸後，不會馬上着火燃燒，而需要經過一段加熱氣化和混合的時間，最後方能燃燒，這稱為遲燃期。因此，燃燒開始時，氣缸內已經噴入相當數量的柴油，且這部分柴油的迅速燃燒就引起氣缸內壓力的突然升高，如圖(b)中的 3—3' 線所示。這一燃燒階段很接近於定容過程，壓力升高程度取決於開始噴油到起火燃燒期間所噴入氣缸的油量，而這一期間的長短是決定於燃料的化學性質和氣缸里柴油和空氣攪動的程度等等。燃料燃燒後，氣缸內的壓力，溫度和燃料反應速度都已很高，所以這時再噴入的燃料細滴幾乎沒有遲燃期，可即行燃料，接近於隨噴隨燒，如圖(b)中 3'—4 線所示，很接近於定壓燃燒。因此，整個燃混過程是由一個定容和一個定壓燃燒所組成，所以稱為混合循環。

從圖 1-3 還可以看到內燃機的实际功示圖表現為正負兩塊面積，這是因為吸氣時，氣缸內壓力低於大氣壓力，而排氣時，氣缸內壓力又高於大氣壓力，所以執行這兩個沖程時需要消耗一部分功量，也就是示功圖上負面積所表示的負功。內燃機每循環所發出的淨功應該是圖中正面積減去負面積後所代表的功量。

總之。在四沖程內燃機中，全循環的四個步驟——吸氣、壓氣、燃燒和膨脹、以及排氣，要在活塞往復兩次共四個沖程，亦即曲柄迴轉兩週的時期內完成。而且在活塞的四個沖程中，只有一個沖程產生動力，其餘三個沖程非但不產生功，還要消耗功。這種能量的波動，在單缸機中，就一定要依靠機軸上的飛輪來平衡；而在多缸機中，由於各缸的動作彼此間的配合，使得機軸具有更好的動平衡。

1-3 内燃机的理想循环

在内燃机的实际工作循环中，出现两个特点（1）工质在工作过程中进行化学变化——燃烧，因而改变了它的化学成分和物理性质；（2）工质不断进出气缸，整个循环是在流动体系中完成的。如果考虑这些特点，内燃机工作循环的分析就将异常复杂。在下面介绍的理論分析中，都不考虑气缸内工质数量的变动，假想一定量的工质（理想气体）在气缸里定期地发生膨胀和收缩，并且把实际工作循环中的燃烧过程和排气过程想象成通过气缸盖对工质加热的过程和从工质吸走热量的过程；同时，压缩过程和膨胀过程都假定是理想的绝热过程，这样所组成的热力循环就是所谓内燃机的理想循环。自然，内燃机的理想循环应该是根据相当的实际工作循环来建立。这样，理想循环的意义就在于给出按照相应循环工作的实际内燃机在理論上的热效率，提供研究和改进内燃机性能的主要途径。

直到目前为止，与已有内燃机的实际情况（参看图1-2a, 6, B）相接近的理想循环，有下列三种：

- 1) 定容供热循环（鄂图循环）——汽油机和煤气机所遵循的理想循环；
- 2) 定压供热循环（狄赛尔循环）——风力喷油柴油机所遵循的理想循环；
- 3) 混合循环（薩伯顿循环）——机力喷油柴油机所遵循的理想循环。

分析理想循环时，可以假想工质是纯空气，并且把空气处理成比热为常数的理想气体，这就是内燃机循环的所谓空气标准分析法。下面让我们来分别讨论这些循环的理想热力分析。

（一）定容供热循环：图1-3示出这一种理想循环的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图，相对应的实际示功图可以参看图1-2(a)。显然，在这种理想的示功图上已经不再出现实际示功图的负面积。由图：

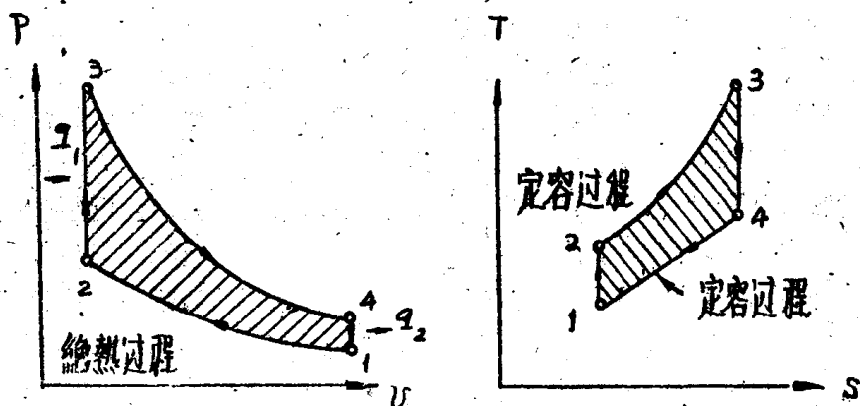


图1-3 定容供热循环

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2) \text{ 仟卡/公斤,}$$

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1) \text{ 仟卡/公斤.}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (1-1')$$

由于1-2, 3-4各为绝热过程，因此，

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}; \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{k-1},$$

但 $v_1 = v_4$; $v_3 = v_2$ 所以 $\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$ 或 $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$,

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

令 $\epsilon = \frac{v_1}{v_2}$, 代表压缩开始时和压缩终了时气缸内气体所佔容积的比值, 称为压缩比,

这样, 计算定容供热循环的热效率公式最后变为

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \quad (I-1)$$

上式表明, 定容供热循环的热效率, 对于一定的 k 值来说, 只和压缩比的大小有关: 压缩比愈大, 热效率就愈高。图 1-4 示出不同的压缩比和不同的 k 值下定容供热循环热效率的数值。应当留意, 在低压缩比时, 热效率跟随 ϵ 增加而升高的趋势比较为显著, 当 ϵ 接近于 10-12 时, 再增加压缩比, 热效率几乎不受影响。事实上, 当压缩比太高时压缩终了时可燃物的压力和温度已很高, 在点火后由于靠近火花塞的部份先行燃烧的结果, 常使还未燃烧的离火花塞较远的混合物受到压缩, 这种过度的压缩可促使可燃物温度上昇而超过其自燃点, 于是这部份可燃物可能就在火焰传到以前发生突然的燃烧(爆炸), 造成局部压力急剧地升高并形成高达 160 气压以上的压力波, 这种压力波对气缸壁的猛烈撞击, 就要造成能量的巨大损失, 因而使热效率下降, 我们把气缸内的这种现象称为爆震现象。

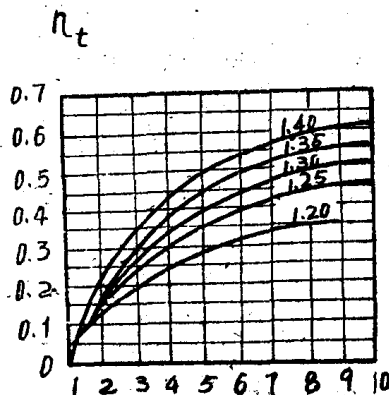


图1-4 定容供热循环的理想热效率

爆震现象使汽油机的运转失常, 发出刺耳的爆音, 而且还可能使个别机件遭受损伤。因此, 压缩比的最大限度要由燃料自燃点的限度来决定; 所以汽油机的压缩比一般不应超过 6-7。在这方面, 煤气的燃烧比较慢, 比较不易发生爆震, 所以压缩比可以比较高些。

(二) 定压供热循环: 参看图 1-5, 点 2 相当于开始喷油时的情况, 点 3 相当于停止喷油时的情况。由图:

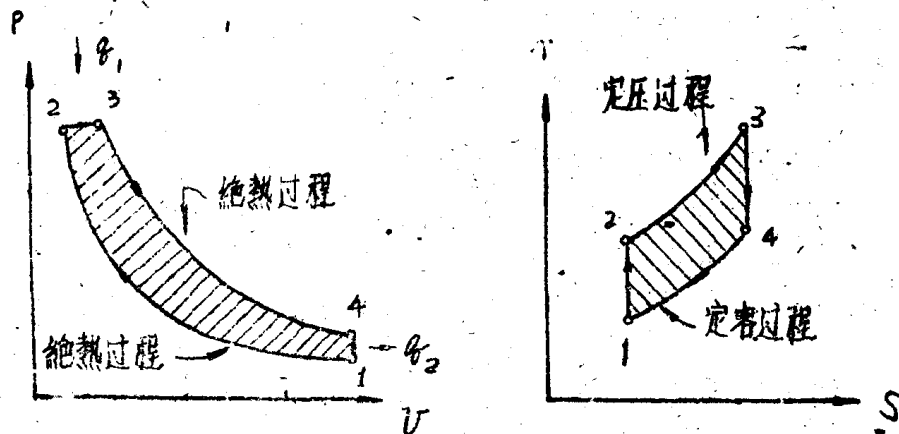


图1-5 定压供热循环

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2) \text{ 大卡/公斤;}$$

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1) \text{ 大卡/公斤,}$$

故
$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{c_p(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{k} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

$$= 1 - \frac{1}{k} \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \times \frac{T_1}{T_2} \quad (1-2')$$

4-1过程,

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{p_4}{p_1} \circ$$

3-4和2-1过程,

$$p_4 v_1^k = p_3 v_3^k;$$

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k,$$

$$\frac{p_4 v_1^k}{p_1 v_1^k} = \frac{p_3 v_3^k}{p_2 v_2^k} \circ$$

因为

$$p_3 = p_2; \quad v_4 = v_1,$$

$$\frac{p_4}{p_1} = \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^k,$$

或

$$\frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^k = \rho^k \circ$$

2-3过程,

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{v_3}{v_2} = \rho;$$

1-2过程,

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

代入式1-1'得:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \frac{\rho^k - 1}{k(\rho + 1)} \circ \quad (1-2)$$

这里, $\epsilon = \frac{v_1}{v_2}$ 仍为压缩比, $\rho = \frac{v_3}{v_2}$ 称为定压膨胀比。 ρ 的大小和喷油时间的长短亦

即和喷入油量的多少有关: ρ 越大表示喷油时间越长, 喷油量越大, 相当于实际风力喷油柴油机的负荷越大; ρ 小到等于1时, 表示截断油路, 不再喷入燃料, 因此, 柴油机将在运行而趋停顿。

从式(1-2)可以看到, 定压供热循环的热效率要由 ϵ , ρ 和 k 的数值来决定; 如果 k 和 ρ 的数值一定, 则压缩比愈大, 热效率也愈高; 如果 ρ 和 ϵ 一定, 则 k 愈大, 热效率愈大; 如果 ϵ 和 k 一定, 则 ρ 越小, 热效率越高, 但 ρ 减小, 表示同一柴油机的动力出力跟着减小, 同时, 气缸内空气和燃料的混合比增加到一定程度时, 混合物太稀, 又会影响燃烧的情况。

在柴油机中, 燃料的起火完全靠燃料和热空气相接触而引起自燃, 所以, 柴油机所采用的压缩比的最小数值须取决于燃料喷入气缸时能够随即产生自燃的空气温度, 而压缩比的最

高数值则限制于柴油机本身材料所承受的应力，也就是由气缸壁的厚度活塞等的结构，亦即柴油机的总重量来决定，一般说来，柴油机的压缩比常在12-18之间。正因为柴油机所使用的压缩比远超过汽油机和煤气机，所以，柴油机的热效率也要高得多。

(三) 混合循环：图1-6示出这一种循环的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图。由图可知：

$$q_1 = q'_1 + q''_1 = c_v(T_M - T_2) + c_p(T_3 - T_M) \text{ 仟卡/公斤；}$$

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1) \text{ 仟卡/公斤，}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1},$$

故
$$\eta_t = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_M - T_2) + c_p(T_3 - T_M)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{(T_M - T_2) + k(T_3 - T_M)}$$

$$= 1 - \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\left(\frac{T_M}{T_2} - 1\right) + k\left(\frac{T_3}{T_2} - \frac{T_M}{T_2}\right)} \times \frac{T_1}{T_2} \quad (1-3')$$

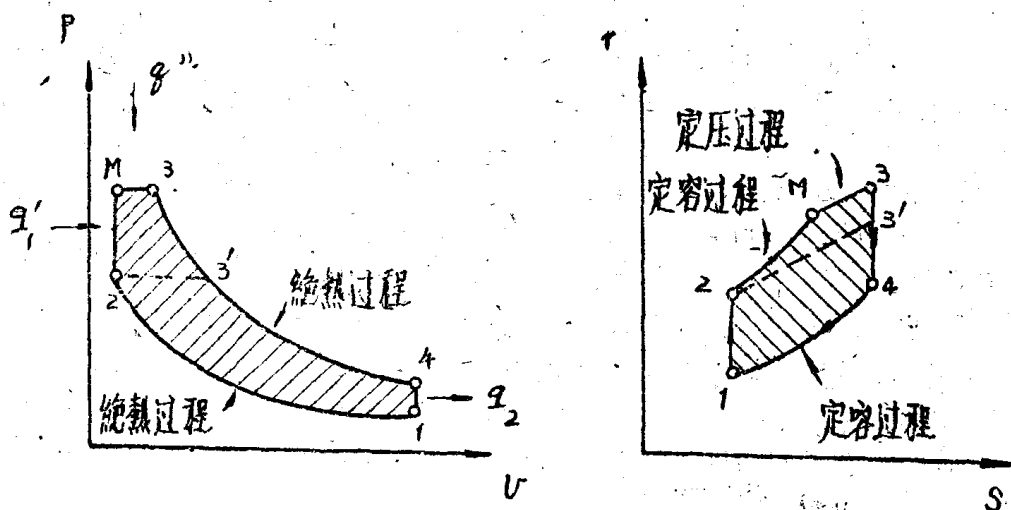


图1-6 混合循环

引用

$$\frac{p_M}{p_2} = \frac{p_3}{p_2} = \lambda; \quad \frac{v_3}{v_M} = \frac{v_3}{v_2} = \rho_o$$

4-1定容过程中，

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{p_4}{p_1} o$$

1-2和3-4绝热过程中，

$$p_4 v_4^k = p_3 v_3^k :$$

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k o$$

以上列第二式除第一式得：

$$\frac{p_4}{p_1} = \frac{p_3}{p_2} \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^k,$$

所以

$$\frac{p_4}{p_1} = \lambda \rho^k; \frac{T_4}{T_1} = \lambda \rho^k. \quad (a)$$

由于2-M过程,

$$\frac{T_M}{T_2} = \frac{p_M}{p_2} = \lambda; \quad (b)$$

3-M过程,

$$\frac{T_3}{T_M} = \frac{v_3}{v_M} = \rho,$$

则

$$\frac{T_3}{T_2} = \lambda \rho. \quad (c)$$

1-2过程,

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = \frac{1}{\epsilon^{k-1}}. \quad (d)$$

把式(a),(b),(c)和(d)之值代入式(1-3')得到:

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)}. \quad (1-3)$$

在这里, ϵ 和 ρ 仍表示压缩比和定压膨胀比。 $\lambda = \frac{p_M}{p_2} = \frac{p_3}{p_2}$, 称为定容压力比。 λ 的大小和燃料从开始向气缸喷射到起火自燃一段时间内所喷入燃料的多少, 亦即和燃料迟燃期的长短有关。迟燃期越长, 燃料开始燃烧时气缸内所积聚的燃料就越多, 因此 λ 也就愈大。

把图1-4、图1-5和图1-6对比, 可以看到定容供热循环和定压供热循环都是混合循环的特例。如果令式(1-3)中 $\lambda = 1$, 就得到定压供热循环的热效率公式(1-2); 如果令式(1-3)中 $\rho = 1$, 就得到定容供热循环的热效率公式(1-1)。

和前两种循环一样, 混合循环的热效率也将跟随压缩比的增加而提高。同时, 压缩比的最小数值要由燃料自燃点来确定而最大数值则取决于柴油机本身材料所能承受的应力, 一般在14-18之间。

参看图1-6的T-s图, 不难看出, 当压缩比相同时, 混合循环的热效率要比定压供热循环(图中123'41)的热效率高, 这是因为当两种循环放出同样多的热量 q_2 时, 混合循环可以得到更多的净功, 而机力喷油柴油机又可以免除风力喷油时所必需的笨重压气机部分, 所以现阶段的柴油机已很少制造风力喷油式。

1-4 二冲程内燃机的工作循环

在上述四冲程工作循环中, 在曲柄迴转两周的时间内只有一个冲程产生动力, 如果能够设法使内燃机的工作循环在两个冲程内完成, “则曲柄每迴转一周就可产生一次动力, 这样, 显然可以增加同时时间内内燃机所做的功量, 也就是提高内燃机所能发生的功率, 而且还可以使机轴的转动更为均匀。这样的工作循环就称为“二冲程工作循环”。显然, 如果没有其他因素的影响, 当同样大小的内燃机采用二冲程循环时, 理论上应比采用四冲程循环时功率大一倍。

图1-7示出一小型二冲程柴油机的纵剖面图, 当活塞到达上静点附近时, 燃料开始从喷嘴喷入气缸, 随即起火燃烧, 至停止喷油后, 仍继续膨胀, 推动活塞下行而产生动力。当活塞下行至让开气缸一侧的排气口时, 废气就先冲出去一部分, 随后活塞又让开气缸另一

侧的进气口，于是经过轻微压缩的空气由进气口进入气缸，并且帮助消除废气。当活塞由下静点上行时，相继盖住进气口和排气口，于是气缸里的空气开始受压缩，当活塞再次到达上静点附近时，又开始喷油，重复全循环。

由此可见，二冲程循环和四冲程循环的最大不同点，就在于进气和排气的情况。在二冲程循环中，排气和进气都挤在活塞处在下静点附近的一段很短时间内完成；而且一面进气，一面排气，利用新空气把前一循环中所已经工作过的废气挤出排气门，这就是二冲程循环中的所谓清扫（或称净气）过程，显然，在这种情况下，空气必须预先经过压缩到超过排气时气缸内废气的压力，约1.1—1.3气压，才能进入气缸。在四冲程机中，有整整一个冲程进行排气，除隙容中残留一部分外，废气的排除很彻底；而在二冲程机中排气时间非常短促，废气排除的干净程度完全要看清扫的好坏怎样；在另一方面，清扫时，总不可避免地会有一部份新气夹杂在废气里同时排出。对于汽油机和煤油机来说，这意味着在清扫过程中白白浪费掉一部分燃料，而在柴油机里，新气只是空气，没有燃料；所以，从经济观点出发，二冲程循环只适宜用于柴油机，不适宜用于汽油机或煤气机。

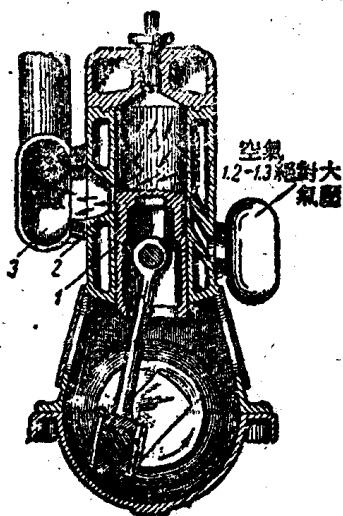


图1-7 二冲程柴油机

二冲程循环除不宜用于汽油机或煤气机外，对于柴油机来说，也会使效率低于四冲程机，因为它的燃料消耗率（亦即每发出1马力小时的功量所需消耗的柴油）是较高。这主要是由两方面所促成：首先，清扫风泵要消耗一部分功量，其次，废气不会清除的很彻底，因而燃烧时空气不够干净，就会使燃烧不完全。尽管如此，二冲程机的功率可以比同样大小、同样速度的四冲程机大60—80%；这就是说，采用二冲程循环时，发出同样大的马力，全机的容量和重量都将大大减小，并且可以减少气缸的数目，同时，由于二冲程机转矩比较均匀，运转时比四冲程机平稳得多，所以柴油机尤其是大型柴油机采用二冲程工作循环是相当普遍的。在一种特殊的场合下，也可以看到小型的二冲程汽油机，例如，摩托车上发的小发动机，主要是要求小巧玲珑，结构简单。

1-5 内燃机的功率、效率及燃料消耗率

内燃机实际工作循环中气缸内的容积和压力变化关系，可用示功器绘出的示功图来表示，如图1-2。根据示功图的面积就可以计算内燃机的功率：

设 f ——示图的面积，由测面积仪直接量出，毫米²；

s ——示功图沿横坐标的长度，在一定比例下相当于活塞的冲程，毫米；

m ——压力的比例尺（纵坐标的比例尺，弹簧的比例尺），公斤/厘米²/毫米，

则平均指示压力 p_i 为

$$p_i = \frac{f \times m}{s} \text{ 公斤/厘米}^2 \text{ (或折算成公斤米}^2 \text{)} \quad (1-4)$$

设气缸的直径为 D 米，活塞的冲程为 S 米，发动机的气缸数为 Z ，发动机轴每分钟转速为 n ，平均指示压力为 p_i 公斤/米²，则每个气缸在一循环中所作的功

$$L = p_i \times \frac{\pi}{4} D^2 \times S = p_i V_h \frac{\text{公斤-米}}{\text{循环}}, \quad (1-b)$$

式中 V_h ——气缸的工作容积，米³。

Z 个气缸的二冲程内燃机的指示功率

$$Z_i = \frac{p_i \times V_h \times n \times Z}{20 \times 75} \text{ 馬力}, \quad (1-6)$$

Z 个气缸的四冲程内燃机指示功率

$$N_i = \frac{p_i \times V_h \times n \times Z}{60 \times 75 \times 2} \text{ 馬力}。 \quad (1-7)$$

以上各式中的系指各个气缸内平均指示压力的平均值。

$V_h Z$ 之乘积如以公升数表示则称为内燃机的容量。

指示功率 N_i 经机械传动到机轴上对外发出的功率，称为有效功率 N_e 。

内燃机中表示效率的方法是以所得的功与所消耗的燃料完全燃烧时能发出的热量的比值来计算；根据指示功率 N_i 或有效功率 N_e 分别得到指示效率 η_i 和有效效率 η_e 。因此，

$$\eta_i = \frac{632 N_i}{C Q_H} \quad \text{而} \quad \eta_e = \frac{632 N_e}{C Q_H}, \quad (1-8)$$

式中 B ——燃料消耗量，公斤/小时或标准立方米/小时；

Q_H ——燃料的低发热量，仟卡/公斤或仟卡/标准立方米。

为简便起见，也常用产生单位功率的燃料消耗量（即燃料消耗率）的值来估计：

$$b_i = \frac{B}{N_i} \text{ 公斤/指示馬力小时或标准立方米/指示馬力小时},$$

$$b_e = \frac{B}{N_e} \text{ 公斤/有效馬力小时或标准立方米/有效馬力小时},$$

因而可写成

$$\eta_i = \frac{632}{b_i Q_H}; \quad \eta_e = \frac{632}{b_e Q_H}. \quad (1-9)$$

指示效率 η_i 用以说明内燃机循环的好坏和测知燃料所发出热量的利用程度，而有效效率则用以测知内燃机实际有效利用燃料热量的程度，两者之间的差别是在于机械的损失，即机械效率 η_m ，因此，

$$\eta_i \times \eta_m = \eta_e \quad \text{或} \quad N_i \times \eta_m = N_e, \quad (1-10)$$

指示功率和有效功率之差，可称为摩擦功率，它是克服内燃机运动部分摩擦阻力的消耗，并消耗于四冲程机的进气和排钢机构，二冲程机净气泵中空气的压缩，以及使内燃机运转的辅助机构的作用上，很显然，有效功率是真正能从发动机轴输出的功率。

图 1-8 示出自燃机的有效效率、指示效率和机械效率随负荷的变化情况。从图中可看出： η_i 是随负荷的增大而下降，这一方面是由于理想循环效率的降低（ ρ 的增大），而另一方面是由于气缸内过剩空气减少，工质比热增大，最后是由于在超负荷时燃料燃烧不完全。机械效率（ η_m ）在内燃机空转时突然下降为零。

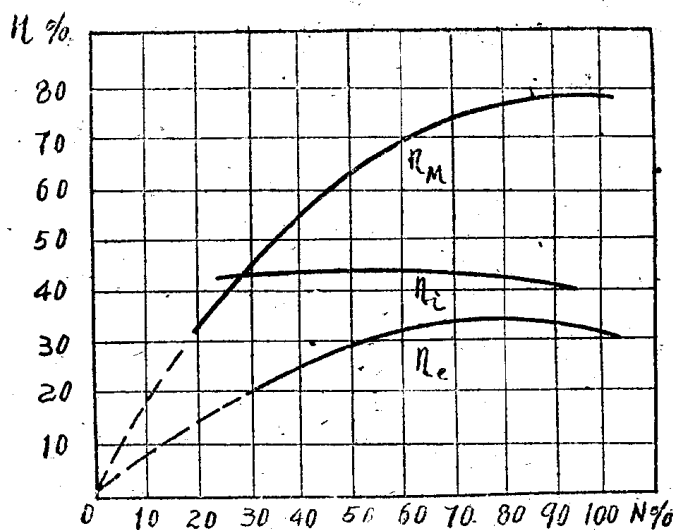


圖1-3、無壓氣机的柴油机的效率随负荷变化的情况

η_e —有效效率； η_i —指示效率； η_M —机械效率

根据 η_i 和 η_M 值的变化特性，有效效率通常有一最大值，此最大值与经济功率时最小燃料消耗率相对应，至于经济功率则为内燃机正常功率的80-90%。

各种类型内燃机在正常负荷下的效率之值列于表1中以供参考。

表1 各种类型内燃机的工作指标（在正常负荷时）

内 燃 机 的 类 型	ϵ	η_i %	η_e %	η_M %	b_e 克/有效马力小时
机力喷油的四冲程柴油机	13-16	42-48	32-39	78-85	160-185
机力喷油的二冲程柴油机	13-16	42-46	31-35	72-80	180-200
风力喷油的四冲程柴油机	13-14	40-45	30-35	74-78	135-170
煤气机和发生炉煤气机 (把煤气当作燃料)	6-9	25-32	20-27	78-82	—
汽车拖拉机的内燃机	4.5-0.6	22-29	15-24	80-90	250-350

在較好的内燃机中被利用成为淨功形式的热达90%，而同功率的蒸气装置只有5-15%。但是，利用廢热以提高经济性在蒸气装置中是很可能的，而在内燃机中則几乎是不可能，由于利用廢热的結果，制造电能和热能的联合蒸汽动力装置的经济性要比内燃机装置为高。

由以上所述，我們知道，柴油机的热效率比汽油机高，同时，柴油又比汽油价廉，所以，柴油机常常作为拖拉机和船舶的原动机，特別在軍用艦艇上更是如此。在产油丰富，水少，和严寒易冻的地区也时常用巨大功率（1000-5000馬力）的柴油機車来拖帶列車，在施工机械方面，在鑽采和勘探方面，柴油机的应用都很广泛，至于内燃机用来发电的，也多半是柴油机。我国上海公用水电公司裝有5,200馬力的柴油机六台，全部发电容量达到19,400瓩，这是远东最大的柴油机发电厂。不过，在輕便的小型发电方面，也常会看到几十瓩的汽油机发电设备。在另一方面，柴油机比汽油机笨重，轉速低，所以，对于航空发动机和小型汽

車來說，一般仍以汽油機為主。

煤氣的發熱量一般都比較低，因而對於相同的功率，煤氣機要比汽油機和柴油機龐大。煤氣的製備和儲運也不如液體燃料方便，而且煤氣的燃燒比較慢，機軸的轉速不宜很高，所以，煤氣機的应用受到很大的限制。但是製造煤氣的方法及設備比較容易簡單，我國廣大農村都可生產煤氣，因之，現在農村的排灌及農產品加工所用的動力機，仍以煤氣機為主。此外，煤氣機最重要的使用場所是冶金工廠，這是因為高爐或煉焦爐有大量副產品——煤氣，應加以利用的緣故。冶金工廠中的一些機器，如鼓風機、水泵等所需的巨大動力常由几百以至几千馬力的煤氣機來帶動。

1-6 內燃機的氣閥機構和配氣定時圖

和蒸機汽一樣，內燃機的氣閥也有一套機構來自動控制，按着嚴格規定了的時刻，准時啟閉。不過，內燃機的氣閥不是滑閥式，而是圖1-9所示出的瓣式。這種氣閥的特點是啟閉迅速。圖中：7為氣閥，5為氣閥桿，6為彈簧，它的力量使氣閥緊壓在閥座上。控制氣閥啟閉的凸輪1，凸輪軸由內燃機的機軸帶動，如果是四沖程機，機軸每轉兩周，凸輪軸迴轉一周，如果是二沖程機則機軸每轉一周，凸輪軸就迴轉一週。當凸輪轉動時，推桿3將在一定時刻被推起，經過搖桿4的作用，開啟氣閥，凸輪繼續輪過去，推桿落下時，彈簧6的力量就使氣閥重又關閉。

其實 實際內燃機的進氣、點火或向氣缸噴油、排氣和壓縮都不是在活塞到達上靜點或下靜點時完成或開始的，而是

(1) 排氣閥要早開，目的是使廢氣在還有相當壓力時就先沖出去一部分，使排氣沖程的氣缸中壓力盡量接近大氣的壓力，節省排氣所需消耗的功量；

(2) 排氣閥要晚關，目的在於盡量利用廢氣排出時的流動慣性，多排出一些廢氣；

(3) 進氣閥要早開，目的是使進氣時間加長，可以因此增加進氣量；

(4) 進氣閥要晚關，目的在於盡量利用新氣進入氣缸時的流動慣性，多接受一些新氣。

以上各項中以排氣閥的早開和進氣閥的晚關一般比較重要。

圖1-10為四沖程柴油機的配氣定時圖。由圖知：當這種柴油機的活塞上，行尚未到達上靜點一曲柄的位置在上靜點前的 α 角時，進氣閥即打開；活塞下行至下靜點，再上行一曲柄的位置在下靜點後的 β 角時，進氣閥才關閉。經過壓縮，燃燒、膨脹；活塞下行，尚未到下靜點一曲柄的位置在下靜點前的 ϕ 角時，排氣閥即打開，而排氣閥關閉時，曲柄的位置是在上靜點後的 δ 角。並由圖知：壓縮尚未終了，噴油咀開。提前噴油，膨脹某一定時間後，噴油咀才關閉。

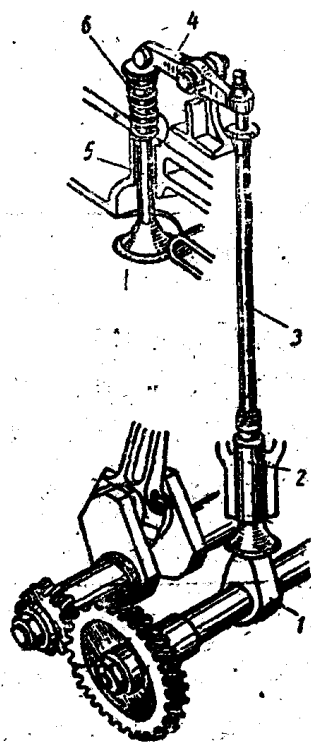


圖1-9

內燃機的氣閥機構

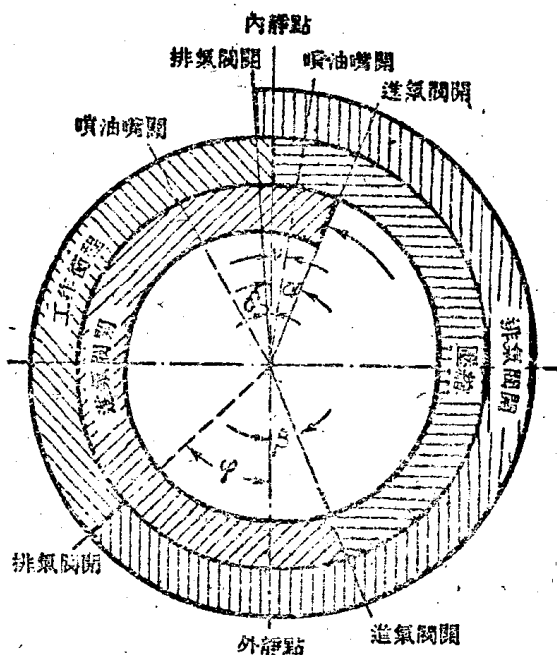


圖1-10 四冲程柴油机的配气定时图
 α —进气开始的前进角； β —进气终了的落后角；
 γ —燃料注入的前进角； δ —排气终了的落后角；
 φ —排气开始的前进角。

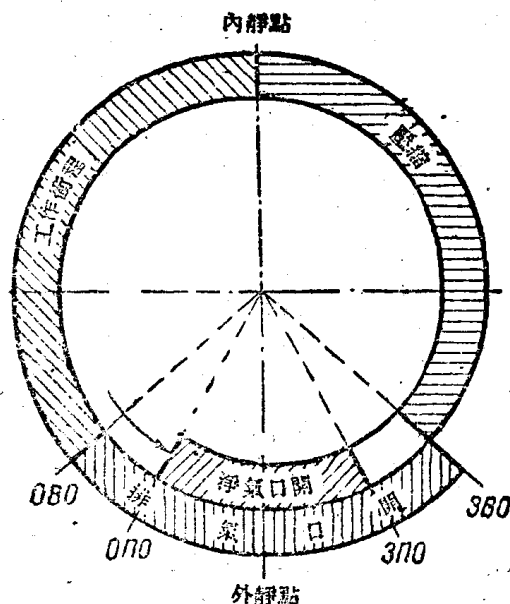


圖1-11 二冲程循環的配气定时图
 OBO排氣口開；3BO排氣口關；
 OPO進氣口開；3PO進氣口關。

圖1-11 为二冲程机的配气定时图。当活塞自上靜点下行，曲柄軸轉到OBO位置时，讓开排气口，曲柄軸轉到 OPO 位置时 讓开进气口；当活塞經過下靜点向上行，曲柄軸轉到 3PO 位置时，盖住进气口，轉至 3BO 位置，則盖住排气口，开始压缩。

1-7 柴油机的噴油設備及調速方法

柴油机和汽油机或煤汽机的主要不同点是所用燃料不同，因而燃燒的方法不同，燃料供应的系统也不同。

柴油机是缸內混合的高压缩自燃式內燃机。在柴油机中，不需要点火系統，但燃料供应的方法要比汽油机困难得多，必須在气缸內进行压气以后，把柴油一噴入气缸，就能立即霧化为极細的顆粒而和空气相混合，以保証燃燒的充分和安全。因此，柴油机中噴油情况的好坏將直接影响柴油机的工作性能。

为了使柴油噴入气缸且得到良好的霧化和分散作用，就必须用高压把柴油通过气缸盖上的噴油咀硬挤入气缸，而且因每次噴油要在适当的时刻精确地噴射数量很少的燃料。由于要求很高，柴油机的噴油设备制造和运用都要高度的技术水平。

柴油机的噴油設備，視噴油的方法而有所不同，基本上，可以分为兩大类，即：风力噴油式和机力噴油式，在前一种是用高压的压缩空气把油吹入气缸，后一种是用噴油泵直接把油在更高的压力下硬压进气缸中去。

风力噴油的最大缺点是必須附帶一套高压压缩机。这就使得整个柴油机加倍地复杂和龐

大。造价昂贵，而且空气压缩机工作时又要消耗柴油机所发出的一部分功量。因此，在机力喷油设备制造成功以后，风力喷油式已被逐渐淘汰，目前几乎很少再制造它。

在风力喷油柴油机中，因为有压气机所供给的高压空气帮助柴油雾化，所以不必需要很高的喷射压力；在机力喷油柴油机中，完全要依靠油泵的力量把柴油通过喷油咀更小的喷孔硬挤到气缸里去雾化，所以要极高的油压，常常要高到 200~500 气压（在少数特殊的柴油机中，有高到 2,000 气压者）。同时，在机力喷油柴油机中，燃料在气缸内首先要和空气混合，才能着火自燃，所以迟燃期要比风力喷油柴油机长，不能不提前向气缸内喷油，以便当活塞到达上静点时，可以确保燃烧已经开始。这种提前喷油的程度并且和机轴转速有关，速度高时更需要提前，一般的机力喷油柴油机大致在曲柄到达上静点位置前 15~30° 就开始喷油，而在风力喷油柴油机中，只须提前 4~12° 曲柄角。

在多缸的机力喷油柴油机中，多半是每一个气缸都由一个单独的油泵供给柴油，因此油泵的数目和气缸的数目相同，但这些油泵通常还合装在一起，用油管将它们和每一个气缸上的喷油咀联结起来。

此外，因柴油机适应负荷的情况是依靠于喷油量的调节，所以，喷油泵的任务，除供给高压油外，还应该精确地配合负荷的大小控制喷入气缸的油量。

图 1-12 示出一种最常用的机力喷油泵，这种喷油泵的特点是在柱塞 2 的表面上开成一条具有螺旋形曲面 8 和凹槽 7。凹槽由直槽 6 和柱塞上面相通，当柱塞向上移动至遮盖住油孔 3 和 5，油泵就开始压油，并在高压下冲开排油阀 4 向喷油咀送油，但当柱塞继续上行至螺旋形曲面 8 露出进油孔 5 时，泵筒内油压突然降低，排气阀 4 因受弹簧的力量被关闭，所喷出的柴油则由油管 5 流回油箱，柱塞下行至露出进油孔 3 时，油又进入油泵，接着又是下一次的喷油。如果转动柱塞至一新的位置，则油泵供油的有效冲程就不一样，所以，柴油机负荷改变时，可以由调速器的动作传到齿条 9，就利用它来转动齿轮 10 而改变柱塞的角位置。图 1-13 示出，喷油时柱塞的不同位置以及油泵不供油和最大供油量时柱塞的角位置。

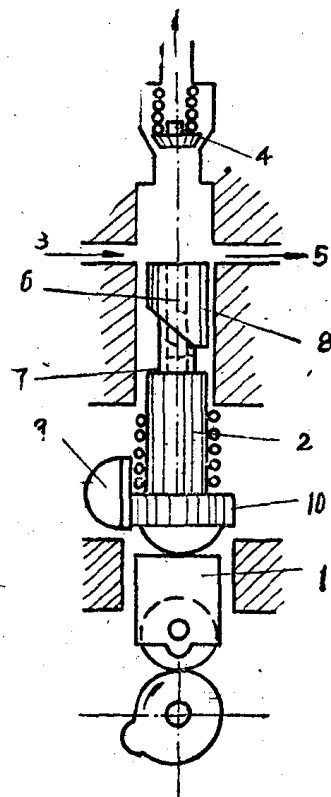


图 1-12 机力喷油泵简图

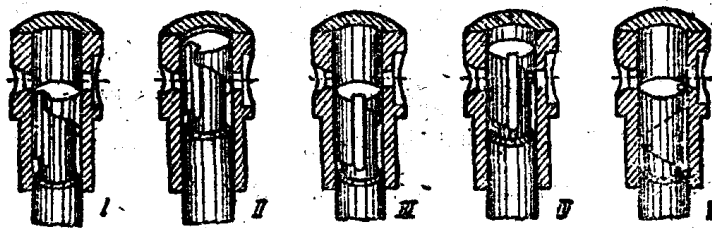


图 1-13 喷油泵柱塞的特性位置

I 和 II—最大供油量时的行程位置；III 和 IV—正常供油量时的行程位置；

V—停止供油时的行程位置；

与机力喷柴油油泵联系的一种常见的喷油咀的型式是如图1-14所示。由喷油泵所送的高压柴油从油路3，经过斜槽6到达空间7，油压不到一定的油压时，弹簧(图上未表示出)力量将通过推杆2传到针阀4，使它紧压在阀座5上，因而喷孔被密封。当喷油泵供油时，空间中的油压增高到一定程度，就顶开针阀，使高压油向气缸内喷射。当喷射将近終了，由于喷油泵不再供油，油压降低，弹簧的力量又迫使针阀关闭喷孔。图1-14示出喷油咀几种喷射的情况，通常，喷油咀上喷孔的数目可以只有一个，也可以有5~9个之多，喷孔的大小直接影响柴油的雾化，一般的直径都小到0.15~0.5毫米左右。

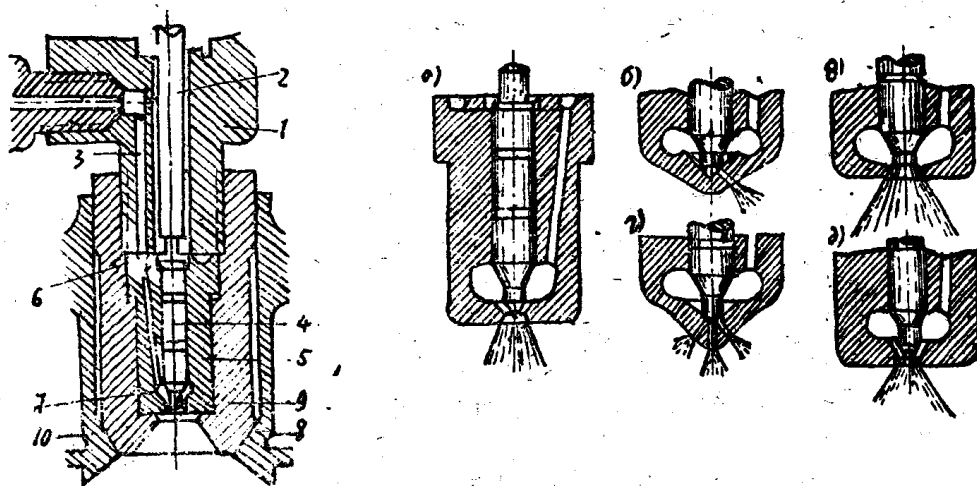


图1-14 机力喷油的喷油咀

喷油咀装在气缸盖上的位置(垂直、水平、或斜置、在气缸盖中心或偏置一边)要看燃烧室的形状而定，上面所介绍的喷油咀，由于喷孔不到一定油压不能喷油，所以保证了很高的喷油压力，得到较好的雾化结果，并且不会产生漏油现象，这种喷油咀习惯上就称为密闭式喷油咀。

1-8 柴油机的燃烧室

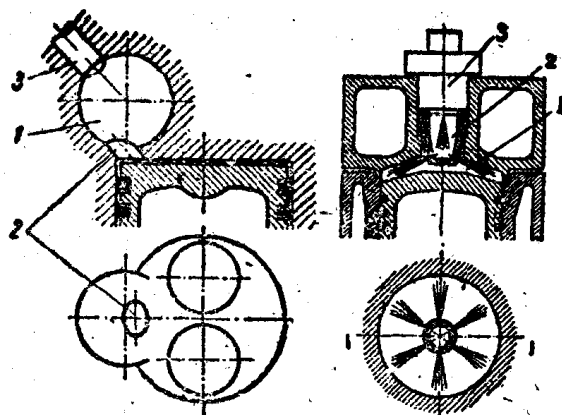
活塞在上静点时，气缸内活塞上方进行燃烧的空间称为燃烧室。如果柴油机的燃烧室整个造成一片柴油直接喷入这一燃烧空间进行燃烧，就是一般所谓直接喷射式，在这种柴油机里，需要很高的油压，大约300~700气压，方能得到柴油在气缸里充分雾化和分散的作用。如果利用燃烧室的特殊设计，使引起气缸内气体的剧烈涡流，则柴油喷入，就比较容易和空气混合得很好。用这种办法可协助喷油情况的改进。可以适当的减低喷油压力，降低对喷油泵和喷油咀的过高的要求，延长喷油咀的使用寿命。为了实现这个理想，不仅活塞顶端和气缸盖的形状时常会做成各种奇怪的型式，使空气被压缩时能够产生涡流，而且整个燃烧的空间也可能分割成不同的组合方式。图1-15示出二种不同设计的典型示例。

在所谓旋气式柴油机中，旋气室的大小约佔全部燃烧室的65~75%。压气时，空气依切出方向冲入旋气室，发生剧烈的旋涡，所以，喷油咀把油喷进旋气室后，就被旋涡所席卷而得到良好的混合，着火后，活塞下行，旋气室里的气体挟带尚未烧完的燃料又沿通路急速进入气缸，再一次引起涡流而使燃料能够充分燃烧。这种设计的优点是燃烧完全，不需要很多的过量空气，而且，气缸内涡流很强，可以在广泛的速度范围内运转，但在另一方面，由于

燃燒很猛，容易引起震音现象。

在所謂予燃式柴油机中，予燃室的大小約佔整个燃燒室的25~35%，予燃室和气缸內活塞上方的主燃室之間由若干小孔相貫通。当燃料被噴入予燃室后，因予燃室的容积不大，空气不多，而且还有上一循环中未排淨的廢气余留在內，所以，噴入的柴油只性有一部份燃燒，但由此而产生的高压气体足以把未曾燒掉的柴油經過小孔噴入主燃室，使柴油得到更好的霧化，並和主燃室里的空气混合得比較均匀，因而达到比較良好的燃燒效果。通常，在采用予燃室噴油时，油泵只要供給80~120气压就可以了。

不过，具有这种予燃室的柴油机从开始噴油，經過小孔，直接在主燃室里正式燃燒完全为止，需要的时间較長，所以不适宜在高速下运转。



1—旋气室；
2—切線方向的通道；
3—噴油咀。

1—主燃燒室；
2—予燃室；
3—噴油咀。

圖1-15 柴油机燃燒室的不同類型

1-9 汽油的化油器和点火設備

汽油是一种容易汽化，粘度不大的燃料，可是用化油器之類比較簡單的设备使汽油先在气缸外汽化，並且和空气充分混合成为可燃的混合物，然后引入气缸，再靠一套电火花的点火設備把它点燃。应该留意，汽油的自燃点反而比柴油高，大約是415°C左右，如果用汽油作为自燃机的燃料，則壓縮比應該要比柴油机的高一些，才能保証汽油噴入气缸和空气混合后仍超过自燃点而着火燃燒。这样，不难想象，噴油泵也需要在更高的压力下运行，可是，汽油的粘度很小。容易漏油，对于噴油咀的噴孔也沒有潤滑的作用，而且噴油设备要昂貴得多，所以，即使在理論上，也不主張把汽油机做成自燃的型式。

圖1-16示出一化油器的工作示意图，說明化油器工作的基本原理。图中，1为油池，其中貯有一定数量的汽油。油面高低由浮子2的升落控制进油管口上的針閥3而維持一定的高度。在吸气冲程中，活塞的下行动作把空气經過管7及已被打开的进气閥吸入气缸。空气在化油器中流过一段喉管8后流速增加而压力降低，于是把油池中的汽油从油管10的出口吸出，一同进入气缸，汽油从噴油管噴出时，由于管口很小，同时受空气冲击，因而化为极細的微滴。前面早就說过，汽油在常温常压下就已經可以汽化，而在进气管中压力較低但温度受傳热影响而比較高，所以这些微滴很容易蒸发，可以在进气缸以前，

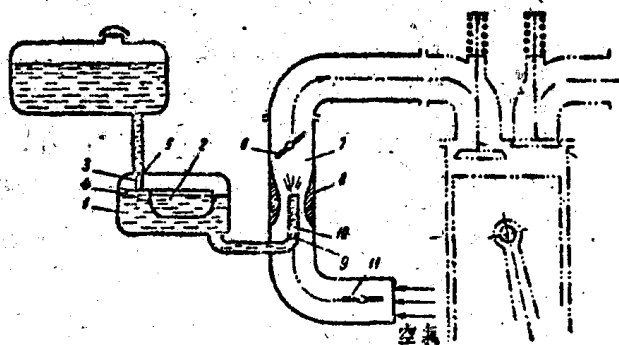


圖1-16 最簡單的化油器簡圖