

高等学校交流讲义

内 燃 机 原 理

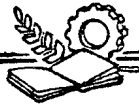
西安交通大学内燃机教研组编译

只限学校内部使用



中国工业出版社

高等学校交流讲义



內 燃 机 原 理

西安交通大学內燃机教研組編譯

中国工业出版社

本书是根据苏联专家罗網諾夫同志在上海交通大学讲学时的讲稿編譯而成的。原书于1958年出版，經過試用，其內容基本上符合我国高等学校[內燃机原理]課程的教學大綱的要求，可作为教材使用。

书中除介紹了內燃机的分类、发展史及发展远景外，还詳細地敘述了內燃机各过程的进行情况；燃料供給系統的工作原理，以及分析了內燃机的特性、調节和提高其功效及經濟性的方法。

本书在这次出版前，曾由西安交通大学內燃机教研組，結合我国目前的教學情况，对原书的某些章节进行了刪改和补充。由于考慮到这次教材出版任务較大，時間亦緊迫，为不悞学校开学用书起見，对本书采取了借用原版加附录的办法进行再版。因而对一些修改較小的地方即未作更动；其中重新編写的第三章[內燃机的燃料]及第四章中增加的比热表則作附录印在书的后面。对原书的第二篇[煤气发生炉]，考虑到已有单行本，这次亦就刪去了，特作說明。

內 燃 机 原 理

西安交通大学內燃机教研組編譯

*

中国工业出版社出版 (北京徐家疔 郵政10号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第110号)

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印張 $12 \frac{3}{8}$ · 字数 339,000

1961年8月北京第一版·1961年8月北京第一次印刷

印数 00,001—03,037 · 定价(10-6)1.75元

統一书号: 15165·706(-机-107)

再版序言

本书自 1958 年出版以来，曾被国内某些高等学校内燃机专业采用作为“内燃机原理”课程的教材，试用结果认为基本上符合教学大纲的要求；所以在今年 3 月召开的内燃机教材会议上被推荐为交流讲义。为了适应目前教学上的要求，在此次出版前，曾对初版的某些章节进行了一些修改和补充。

对初版某些内容的修改是在会议期间，由天津大学、西安交通大学和山东工学院的代表们共同进行的。其中除对第三章“内燃机的燃料”进行了重新编写外，还在第四章第三节内增添了比热表，因为用表来进行热计算比较准确方便。

最后，全书由天津大学内燃机教研室作了详细的审阅和校对，在这里表示深切的感谢。

西安交通大学内燃机教研组

1961年 4 月

序 言

本书是苏联专家罗綱諾夫 (С. Г. Роганов) 同志在上海交通大学內燃机教研組讲学的讲稿，是由張滋偉同志翻譯的。內容符合于目前高等工业学校內燃机专业的教学計劃。在教学計劃中，除〔內燃机原理〕外，尚有〔內燃机构造与計算〕、〔內燃机供油系統与調節〕等等課程；为了避免重复，这讲义中凡与上述課程有关的章节，只討論与〔內燃机原理〕有联系的部分。

从符合現行教学計劃上看，这讲义是可以作为內燃机专业的教本之用；但因当时专家讲课对象是教研組教师和研究生，所以份量上可能是多了一些。

虽然我們对于这份讲义的出版力求完善，但限于時間及人力；恐在翻譯上、校閱上，以及其他等方面难免仍有錯誤。为对专家工作負責起見，我們决定以讲义名义出版，并請讀者指正是幸。

交通大学內燃机教研組

1957年7月于上海。

目 录

再版序言	3
序言	4
第一章 緒論	7
1 內燃机的一般概念	7
2 內燃机的分类	14
3 內燃机的发展史及其远景	20
第二章 內燃机的理想循环	29
1 等容加热循环	30
2 等压加热循环	37
3 混合加热循环	40
4 完全膨胀循环	45
第三章 內燃机中应用的燃料	49
1 內燃机用燃料的概念	49
2 液体燃料的生产及其种类	51
3 燃料的化学成分	53
4 汽油的特性规格及使用	57
5 柴油的特性规格及使用	63
6 其他燃料	68
第四章 燃燒过程的热化学	71
1 热化学	71
2 燃料与可燃混合气的热值	86
3 可燃混合气与燃燒产物的比热	92
第五章 內燃机的实际循环和工作过程	95
1 四冲程发动机的进气过程和排气过程	96
2 二冲程发动机的换气过程	116
3 压缩过程	155
4 混合气形成过程	164
I 气体燃料和空气在外部形成混合气	168

II 气体燃料和空气在内部形成混合气.....	174
III 液体燃料和空气在外部形成可燃混合气(燃料的汽化).....	175
IV 液体燃料和空气在内部形成可燃混合气.....	202
5 内燃机中的燃烧过程.....	236
I 电火花点火发动机中的燃烧过程.....	237
II 压燃式发动机中燃料的燃烧.....	269
III 燃烧方程式.....	287
6 膨胀过程.....	292
7 标志工作循环的参数.....	297
8 标志整个发动机工作的参数.....	307
9 内燃机的热平衡.....	316
第六章 内燃机的特性及调节.....	320
1 内燃机的工作条件.....	320
2 内燃机的特性.....	322
3 内燃机的调节.....	347
4 内燃机中应用的调速器.....	350
第七章 内燃机单位马力和经济性的提高.....	359
附录 内燃机的燃料.....	372
● 气体的平均分子比热表.....	394
参考文献.....	395

第一篇 內燃机原理

第一章 緒論

1 內燃机的一般概念

首先我們必須闡明內燃机是怎樣的機器。

在目前，人類所利用的主要能量來源是熱機，而水力發電站、風力發動機、以及直接利用太陽能的裝置等，它們所占的比例不大，按生產的能量來說小於百分之十。

不久以前曾經有人說過，人類在不久的將來，將不得不開始停止利用熱能，而過渡到較廣泛利用水的能量、風的能量，以及直接利用太陽光的能量；因為地球上蘊藏的燃料將很快地被消耗完。

但是現在，特別是當蘇聯創造的第一個工業用原子能發電站出現後，事情就明顯了，在今後人類所利用的主要能量型式，將是原子反應堆中得到的熱能。

所有目前應用的熱機，都是按下列原理工作的。

燃料借助於特殊的設備放出化學能，化學能同時就轉變為熱能，熱能儲存在某種介質（蒸汽、燃氣）中；這種介質就稱為工質。然後，這些工質被送入發動機中，在那裡熱能就轉變為機械能。機械能可以直接傳遞給功率消費者（工作機械），也可以間接地轉變為電能，再傳遞給功率消耗者。

這一原理也適用於第一個原子能裝置。

由於燃料中化學能轉變為熱能的處所及準備工質的處所不同，所有的熱機可以分成下列兩大類：

1 外部燃燒及外部準備工質的發動機 在這一類發動機中包括蒸汽機、汽輪機；有時還包括燃氣輪機。這一類發動機中的工質（蒸汽或燃

气)是在特殊的,与发动机工作室分开的装置(蒸汽锅炉或燃烧室)中准备的。在那里工质吸收热能,即加热到一定温度。

燃料中化学能的放出和转变为热能是在专门的炉子、燃烧室或原子反应堆中完成的。

2 内部燃烧的发动机 在这类发动机中燃料的燃烧是直接在工作室中进行的,而工质就是燃料的燃烧产物。

由于燃料是在工作气缸中放出化学能,而工质就是燃料的燃烧产物,因此,这种机器就称为内燃机。

到目前为止,已经创造了很多不同型式的内燃机。让我们来看一下内燃机主要型式的构造及其作用原理。

气缸是用生铁或钢做的(图1),气缸中放入一个称为活塞的零件,活塞通过活塞销和连杆与曲轴相连,曲轴放在发动机的曲轴箱中。

气缸的上部用气缸盖或有时用气缸头来封闭。在气缸盖上(或在气缸旁边)安放着重气阀。气阀用特殊的机构与曲轴相连。曲轴在一定的

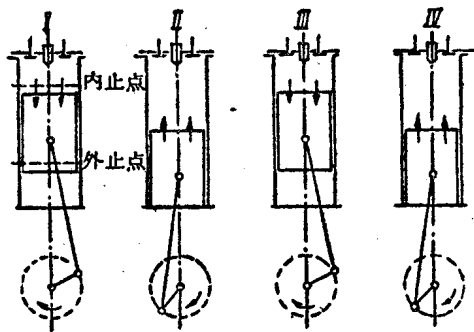


图1 四冲程发动机工作图。

中的一个打开或关闭一定的时期。假定当活塞在上面的极端位置时,一个气阀处于开启或稍微开启的位置。活塞的上面极端位置称为上止点或内止点(称做内止点将更为明确,因为气缸的位置可以相对曲轴轴线转到任何角度,当转到 180° 时,“上止点”事实上在下面了)。

现在开始按照箭头所指的方向转动曲轴。这时,活塞就开始从内止点向外移动,活塞上面的容积也就增加了。这一过程就称为充气过程或进气过程,实现这一过程所通过的气阀称为进气阀。

吸入气缸的将是什么呢?如果进气阀通过某些管子(或称为进气系统)与大气相连,则吸入气缸的将是空气。

在进气系統中也可能安放一个准备空气与燃料的混合气的器具。这时吸入气缸的将是空气和燃料的混合气。燃料可以是气体的，也可以是液体的。如果是用液体燃料，混合的器具就称为汽化器或噴油器。如果是用气体燃料，混合的器具就称为混合器。

在活塞到达另一極端位置（这个位置称为下止点，更正确些称为外止点）时，进气閥关闭，进气过程也就結束了。活塞自內止点向外止点运动，同时并进行着进气过程，这一阶段即称为进气冲程或充气冲程。

当曲軸繼續旋轉时，活塞重新自外止点回到內止点。在这段时间中两个閥門都关闭着，这时气缸中的充量就开始被活塞所压缩。为了使气缸中的充量不致通过活塞与气缸壁之間間隙流进曲軸箱，在活塞上的槽中安放一些彈性的环。压紧在气缸壁上的环，将会密封气缸，减少气缸到曲軸箱的漏气，但并不妨碍活塞的运动。

压缩过程将在活塞到达內止点以前都一直进行着，活塞的这一冲程即称为压缩冲程。

此后，一种被称为火花塞的特殊器具，在一定的時間發出电火花，使已压缩的空气燃料混合气着火。混合气着火并燃燒后就放出一定的热量，因此燃燒产物的溫度及压力与压缩过程終了时气缸內充量的溫度及压力相比，是显著地提高了。

当曲軸繼續旋轉时，活塞就离开內止点，并在燃气的高压作用下开始向外止点移动，同时把能量傳給曲軸。这一过程就称为活塞的工作冲程或膨脹冲程。在这一冲程中，燃燒产物中的热能將轉变为机械能，并等于活塞移动时气体所做的功。

現在开啓第二个閥門。当活塞自外止点向內止点移动时，燃燒产物就自气缸中通过排气閥及排气系統排到大气中去，这样就結束了工作循环。以后这些循环將不断重复下去。

在气缸中吸入空气与燃料的混合气（这种混合气称为可燃混合气或工作混合气）的發动机就是这样工作的。

那么气缸中吸入純空气的發动机又將是怎样工作的呢？

在这种发动机的汽缸中，在压缩过程終了时，靠一种特殊的燃料设备喷入某些燃料。这些燃料喷散成细滴，遇到压缩后的炽热空气就着火并燃烧。

此后与上述的发动机一样，进行着膨胀与排气过程。

上述这些发动机的工作循环是在四个活塞行程或四个冲程中完成的。工作循环在四个冲程或者曲轴二转中完成的发动机，即称为四冲程发动机。

另一种发动机，他的工作循环只占二个活塞冲程，即在曲轴一转中，完全结束。这种发动机称为二冲程发动机。二冲程发动机的工作循环是以下列方法进行的。在汽缸的下部，有不同高度的气孔（圖 2），曲轴转动到某一位置时，活塞的頂先打开较高的气孔，然后再打开较低的气孔。

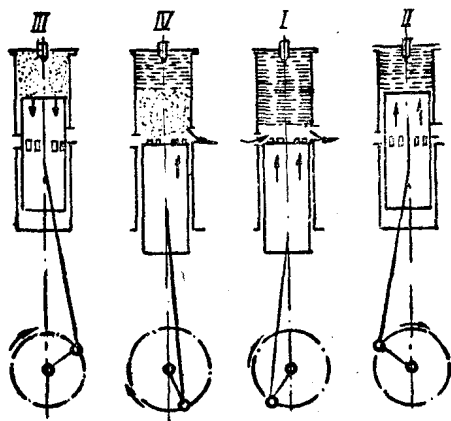


圖 2 二冲程发动机工作圖。

在低孔的附近充滿了某些容积的空气或可燃混合气，它們是处在某些压力下的，一当低孔开启后，空气或可燃混合气就开始进入汽缸，并部分的自高孔中流出，这个过程將一直繼續到活塞作相反运动，并先后关闭低孔和高孔时为止。

此后即与四冲程发动机中一样，进行压缩、燃料的燃烧和膨胀过程。当膨胀过程结束活塞开始打开高孔时，废气即开始自发动机的排气系统中排出。此后当活塞打开低孔，而汽缸内的压力低于进气系统中的压力时，新鲜充量即开始流入汽缸，同时挤出燃烧产物，并在一定程度上互相混合，一起自排气系统中排出。当高孔关闭而这一过程结束时，在汽缸中就留下新鲜充量与某些燃烧产物的混合物。此后工作过程將重复循环进行。在二冲程发动机中，汽缸上面的低孔即称为换气孔或进气孔，而高孔即称为排气孔。

熟悉了四冲程及二冲程發動机工作过程的原理后，我們来熟悉一下發動机的構造型式。現在我們知道了，主要的工作機構是气缸与活塞，活塞在气缸中的往复运动是靠曲柄連杆機構轉变为發動机曲軸的旋轉运动的。

現在我們也知道了，气体进入或排出發動机气缸是靠特殊的配气機構来实现的。配气機構中不可缺少的机件，在四冲程發動机中是气閥，而在二冲程發動机中則是气孔。为了起動發動机，首先必須轉動發動机的曲軸，为此發動机必須裝有特殊的設備。

現在我們已知道，發動机必須具有在气缸外面准备可燃混合气，或者把燃料送入气缸所必需的設備。在某些型式的發動机中，還必須具有使可燃混合气在气缸中点火的設備。

此外，還必須加上下列一些設備。

發動机的气缸壁、活塞及其他零件都承受着强烈的加热。假使不采取措施来冷却，不从它們那里拿走热量，那末它們可以被加热到材料熔化的溫度，或者加热到使材料的性能（如机械强度及耐蝕性）显著恶化的溫度；因此，所有發動机都具有强制冷却气缸头、气缸、有时还有活塞、气閥、以及其他零件的設備。这些設備即称为發動机的冷却系統。在冷却系統中，作为冷却介質的是液体（最普通是水）或空气。按照冷却介質的类别，發動机可分为液（水）冷式或气冷式。此外，我們也看到，在發動机中有許多运动着的零件。为了增加發動机的耐磨性，为了减少零件摩擦表面的磨損，必須潤滑它們。在所有型式的發動机中，一定要潤滑曲軸軸承、連杆与活塞銷的摩擦表面、气缸壁、配气機構零件、供油系統、点火設備和冷却系統的运动零件。

为了保證發動机的潤滑，它装备着特殊的、称为發動机潤滑系統的設備。

这就是最常用發動机的工作过程及構造型式簡短的介紹。上面所述的發動机的型式、它的工作原理和構造，远未說完所有多种多样的內燃机。

在很多現代的發動机中应用着压气机。空气或可燃混合气在进入

气缸前，先由压气机压缩一下。这样在气缸中每一工作循环燃烧的燃料数量就增加了，从而也增加了发动机的马力。

自气缸中排出的废气，其中还包含很多的能量。因此某些现代发动机装备着特殊的、利用这些能量的设备。应用得最广的利用废气能量的设备是燃气轮机。

因此，发动机工作者必须知道压气机和燃气轮机的工作过程、特性及其构造。

至此我们已经讲了燃烧产物推动活塞运动的内燃机，但是还有无活塞的发动机。例如，航空用喷气式发动机（缩写B. P. Д. К.）的创造与应用。

发动机有一外壳（图3），里面装置着压缩空气的压气机（轴流式或离心式）。压气机的转子由燃气轮机驱动。空气自入口孔进入发动机，并

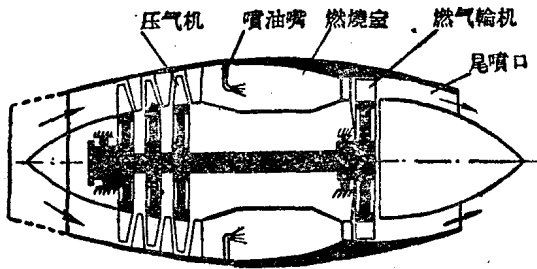


图3 航空喷气式发动机。

为压气机所压缩。供油设备把燃料喷入压缩空气，燃料就在燃烧室中燃烧。炽热的燃烧产物在燃气轮机中膨胀产生一部分机械功，然后在排气喷管中使气体质量加速而又产生一部分机械功。因为气体质量在喷管中的加速运动，就创造了与气体运动相反方向的反作用力，这就是发动机的牵引力。

从上述的内燃机工作原理与它的型式和构造中，我们很清楚地知道，在发动机工作气缸中要进行燃料的燃烧过程和工质的准备过程，因而使得内燃机比蒸汽机复杂得多。所以这样做是由于下列原因：

1) 内燃机具有高的经济性。蒸汽动力装置的经济性是以经济效率来估价的，经济效率等于所得有效功 L_e 的相当热量与在这段时间中加入动力装置的所有热量 Q_1 的比例：

$$\eta_e = \frac{AL_e}{Q_1}$$

在用蒸汽机的蒸汽动力装置中， $\eta_s = 0.09 \sim 0.14$ ，在用蒸汽轮机的动力装置中， $\eta_s = 0.15 \sim 0.25$ 。

内燃机的经济性以有效效率来估价，他等于 $\eta_e = \frac{A L_e}{Q}$ 。对不同的内燃机而言 $\eta_e = 0.2 \sim 0.45$ ；即是二倍于蒸汽动力装置的经济性。

2) 内燃机紧凑和重量低。这些品质以下列数值来估价：

a) 单位重量——每一有效马力所占的重量

$$g = \frac{G}{N_e} \text{ (公斤/马力)}。$$

6) 单位马力——单位工作容积发出的马力

$$N_v = \frac{N_e}{V_h} \text{ (马力/公升)}。$$

现代活塞式内燃机的单位重量是在下列范围内：0.37~30 (公斤/马力)。而单位马力是在下列范围内：1.5~50 (马力/公升)，并可高达200 (马力/公升)。这些数字标志着很高的构造指标。

蒸汽动力装置以另外一些参数表示。但是假使以某些运输式蒸汽动力装置与同类的内燃机(汽车、机车、船舶)的数据来比较，那末可以得到结论：蒸汽动力装置的上述一些指标大了四倍以上。

3) 起动的很快。在任何条件下起动的任何型式的内燃机只要几秒钟到几分钟就足够了，任何最大马力的发动机可以在30~40分钟之间起动的并转变到全负荷。蒸汽动力装置起动的并转变到全负荷有时需要几昼夜，只有应用液体燃料工作的运输式蒸汽动力装置可以在几十分钟之内转变到工作情况(汽车用蒸汽动力装置)。

4) 水耗量不大。内燃机可以不消耗水或只要储备很少的水。蒸汽动力装置，甚至在有冷凝设备时还需要大量的水。在某种条件下内燃机的这一优点，是具有特殊价值的。

5) 维护简单和方便。在这方面，甚至最简单的蒸汽动力装置都不可能与内燃机相比。

用一个人来维护蒸汽动力装置到目前为止还是很少见到的，而内燃机照例总是一个人维护的。

具有这些优点的同时，内燃机也存在着很大的缺点。这些缺点就

限制了它的应用范围。它的缺点是：

1. 在气缸中不可能直接燃烧劣质的固体燃料。

在这方面蒸汽动力装置比起内燃机来具有巨大的优点。

2. 在一个装置中马力受到限制。在这方面带有汽轮机的蒸汽动力装置比内燃机优越得多。内燃机功率大于 20000 马力时就很复杂，并失去工作能力，而现代汽轮机的功率可达到 100000 千瓦以上。

3. 在陆上运输机械中，发动机的轴不可能与从动器直接连接。这是由于受内燃机特性的限制。因此在这些机械的传动中必须装置可分的接合器，和广泛改变从动器轴上扭矩的设备。

4. 比起蒸汽动力装置来，内燃机工作时具有较高的声音。内燃机工作时的声音可以用特殊的设备来防止，即是在排气系统中装上消声器（主要的声音是废气从气缸中排出时发生的）。但是这种装置将显著地降低发动机的优点，例如高的单位马力和经济性。因此内燃机的这个缺点，虽然不是决定性的，但还是不得不考虑的。

由于前面所指出的内燃机的优点，因而使它获得广泛的发展。

在目前它被应用于工业、农业、和运输业中。

在野外无线电站和科学研究考察团的能源中，它获得了广泛的发展。它不仅在和平时业中运用，并且在任何国家的军事技术装备中也获得很广泛的发展。

内燃机不仅与其他型式的热机并行使用，并且还具有自己特殊的区域，这些区域目前其他发动机还不能使用。例如在汽车和拖拉机中、航空及潜水艇中、在轻型移动式的动力装置中，到目前为止，内燃机是唯一的发动机型式。

因此，内燃机制造工业作为任何机械制造和国民经济发展中不可分割的一部分，这不是偶然的。

正如上面所说的，内燃机是复杂的机器，在它里面进行着各种不同的过程——化学的、热力学的、机械的和电气的过程。它的所以复杂是由于保证这些过程进行的机构复杂。它在制造上也是复杂的，因为它的零件具有很复杂的形状和很大的尺寸，它们的制造需要各种不

同的材料，要求复杂的設備，和高的精确性。最后，內燃机的維護要求有丰富的和各种不同的知識。

因此在所有的国家中对培养一定数量和一定質量的內燃机專家都給以極大的注意。例如在苏联，仅仅在大学中就有十几个教研組在培养着發动机的工程师，在中华人民共和国，發动机專家的培养也給予很大的注意。

今后我們將开始學習下列一系列的課程：

1 內燃机工作过程的原理，或簡称內燃机原理 这个課程包括內燃机的一般構造、主要型式、內燃机主要組件及机件的作用原理和用途。此外，將詳細地研究化学过程与热力过程，學習进行內燃机的热計算，熟悉标志發动机工作性能的热力参数。最后还将熟悉決定發动机運轉条件的特性，并熟悉發动机的試驗方法。

2 內燃机構造及計算 這門課程是熟悉發动机及其組件和零件的設計。熟悉作用力的決定方法、發动机零件的強度与磨損計算方法。在上述二門課的基础上，来完成發动机的課程設計，并做必要的热計算与強度計算。

3 燃料与滑油 这一課程中將熟悉發动机所用燃料与滑油的主要性質与类别，他們制取与試驗的方法。

4 內燃机制造工艺学 這門課是熟悉內燃机的生产制造。

5 內燃机动力裝置 這門課是熟悉發动机運轉的主要規則与条件，發动机安裝与修理的方法。

6 汽車和拖拉机、船舶和內燃机車 这些課程的目的是要了解用內燃机驅动的那些主要運輸机械。

7 內燃机供油設備及調节、压气机与鼓風机、燃气輪机、內燃机的电气設備 这些課程是了解現代內燃机上面的組件及設備，以及他們的工作过程、構造及特性。

2 內燃机的分类

大家知道，当特地設計任何机器时，这些机器必須要能够最好地

适应一定的工作条件和一定的用途。

由于内燃机必须在不同的工作条件下工作，以及必须利用不同种类的燃料，因而出现了很多不同型式的内燃机。

为了便于设计发动机，并使设计的速度加快，为了改善发动机的运转，同时也为了易于培养内燃机的干部，把内燃机分成一定的类别是很恰当的。

但是，在内燃机制造业的范围内，要创造一个统一的、具有一定精确性与严格性的分类系统是很困难的；因为很多不同型式的内燃机却具有很多相同的特征，同时内燃机制造业发展很快，不断出现着新型的、而已很熟悉的构造，却停止制造了。

因此，到目前为止，尚存在着几种不同的分类系统。这些系统反映了不同程度的精确性、严格性和普遍性。但还没有一个普遍采用的分类系统。现在来介绍一下莫斯科高等工业学校所创造的最一般性的分类系统。在这个系统中，内燃机是根据最重要的特征来分类的。

1 按内燃机中进行的过程分类

首先我们来研究一下在不同程度上属于任何型式内燃机的最一般的过程。并用图案来表示这过程（图4）。

有了这张图，我们就能进行发动机按过程分类。

1) 发动机按照燃料分类：

液体燃料 重油和轻油。所有型式的活塞式发动机，以及几乎所有型式的无活塞式发动机都可以用液体燃料工作。

气体燃料 活塞式内燃机和燃气轮机。

固体燃料 火药—反作用式的发动机、粉状燃料的活塞式发动机、燃气轮机。

混合燃料 按所谓气体—液体过程工作的发动机。在这种发动机的气缸中充满可燃气体与空气的混合气，而充量的点火则是靠将少量液体燃料喷入气缸中来实现的。液体燃料的着火是靠压缩充量的热量。

2) 发动机按照氧化剂分类：按照氧化剂发动机可以分成空气的、