

高等学校教学讲义

內燃机原理

罗網諾夫編著



机械工业出版社

內 燃 机 原 理

交通大学內燃机教研組編



机械工业出版社

1958

出版者的話

这份讲义是根据苏联专家罗網諾夫同志在上海交通大学內燃机教研組講学的講稿翻譯編写而成的。

讲义內容符合于高等工業学校〔內燃机原理〕一課程的教学大綱。讲义中介绍了內燃机的分类、發展史及其远景。詳細叙述了內燃机中各过程的进行。介绍了燃料供給系統的工作原理。分析了內燃机的特性、調节及其馬力和經濟性提高的方法。

本讲义可以作为高等工業学校內燃机專業学生及研究生的教材，也可供工程技術人員参考。

NO. 1785

1958年12月第一版 1958年12月第一版第一次印刷

850×1168 $1/32$ 字数 413 千字 印張 $15\frac{1}{16}$ 0,001— 5,500 册

机械工業出版社(北京阜成門外百万庄)出版

机械工業出版社印刷厂印刷 新华書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 号 定价(11) 3.05 元

序 言

本書是苏联專家羅綱諾夫 (С. Г. Роганов) 同志在上海交通大學內燃機教研組講學的講稿，是由張滋偉同志翻譯出來的。內容符合于目前高等工業學校內燃機專業的教學計劃。在教學計劃中，除〔內燃機原理〕外，尚有〔內燃機構造與計算〕、〔內燃機供油系統與調節〕等等課程；為了避免重複，這講義中凡與上述課程有關的章節，只討論與〔內燃機原理〕有聯繫的部分。

本講義的第二篇〔煤氣發生爐〕是張滋偉同志在專家指導下，根據教學大綱編寫的。這本講義在講授過程中，教研組全體教師均參加听课，並經過討論修正。

從符合現行教學計劃上看，這講義是可以作為內燃機專業的教本之用；但因當時專家講課對象是教研組教師和研究生，所以份量上可能是多了一些。

雖然我們對於這份講義的出版力求完善，但限於時間及人力，恐在翻譯上、校閱上，以及其他等方面難免仍有錯誤。為對專家工作負責起見，我們決定以講義名義出版，並請讀者指正。是幸。

交通大學內燃機教研組

一九五七年七月於上海。

目 次

序言	3
----------	---

第一篇 內燃机原理

第一章 緒論	7
1 內燃机的一般概念	7
2 內燃机的分类	15
3 內燃机的發展史及其远景	22
第二章 內燃机的理想循环	30
1 等容加热循环	31
2 等压加热循环	38
3 混合加热循环	41
4 完全膨脹循环	46
第三章 內燃机中应用的燃料	50
第四章 燃燒过程的热化学	60
1 热化学	60
2 燃料与可燃混合气的热值	75
3 可燃混合气与燃燒产物的比热	81
第五章 內燃机的实际循环和工作过程	84
1 四冲程發動机的进气过程和排气过程	85
2 二冲程發動机的换气过程	105
3 压缩过程	144
4 混合气形成过程	153
I 气体燃料和空气在外部形成混合气	157
II 气体燃料和空气在内部形成混合气	163
III 液体燃料和空气在外部形成可燃混合气(燃料的汽化)	164
IV 液体燃料和空气在内部形成可燃混合气	191
5 內燃机中的燃燒过程	225
I 电火花点火发动机中的燃燒过程	226
II 压燃式发动机中燃料的燃燒	258
III 燃燒方程式	276

6 膨胀过程.....	281
7 标志工作循环的参数.....	286
8 标志整个发动机工作的参数.....	296
9 内燃机的热平衡.....	305
第六章 内燃机的特性及调节	309
1 内燃机的工作条件.....	309
2 内燃机的特性.....	311
3 内燃机的调节.....	316
4 内燃机中应用的调速器.....	339
第七章 内燃机单位马力和经济性的提高	348

第二篇 煤气发生炉

第一章 煤气发生炉的一般概念	372
1 气体燃料在内燃机中的应用.....	372
2 气体燃料的分类.....	375
3 发生炉煤气的工作过程及其分类.....	377
第二章 固体燃料的气化原理	382
1 煤气发生过程中的化学反应.....	382
2 化学反应的热效应.....	385
3 可逆反应与平衡常数的概念.....	387
4 各种因素对化学反应的影响.....	390
5 蒸汽耗量与各种因素的关系及蒸汽加入的方法.....	395
6 影响气化指标的因素.....	402
7 气化效率及其提高的途径.....	411
8 气化强度及发生炉产量.....	414
9 燃料层的高度.....	418
第三章 煤气发生炉中应用的燃料	422
1 气化对燃料提出的要求.....	422
2 煤气发生炉中应用燃料的分类.....	424
3 几种典型燃料的特性和它们得到的方法.....	426
第四章 煤气发生炉的构造	432
1 煤气发生炉按构造特征分类.....	432

2 煤气發生爐的構造.....	433
第五章 煤气發生过程主要指标的計算	452
1 气化过程計算的目的与方法.....	452
2 泥煤气化指标的計算例題.....	456
第六章 煤气的加工	468
1 煤气加工的目的与要求.....	468
2 煤气的冷却与干燥設備.....	469
3 煤气的清潔設備.....	473
4 各种煤气發生爐的典型布置.....	479
参考文献	481

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样的机器。

在目前，人类所利用的主要能量来源是热机，而水力發电站、風力發动机，以及直接利用太陽能的裝置等，它們所占的比例不大，按生产的能量來說小于百分之十。

不久以前曾經有人說過，人类在不久的將來，將不得不开始停止利用热能，而过渡到較广泛利用水的能量、風的能量、以及直接利用太陽光的能量；因为地球上蘊藏的燃料將很快地被消耗完。

但是現在，特別是当苏联創造的第一个工業用原子能發电站出現后，事情就明显了，在今后人类所利用的主要能量型式，將是原子反应堆中得到的热能。

所有目前应用的热机，都是按下列原理工作的。

燃料借助于特殊的設備放出化学能，化学能同时就轉变为热能，热能儲存在某种介質（蒸汽、燃气）中；这种介質就称为工質。然后，这些工質被送入發动机中，在那里热能就轉变为机械能。机械能可以直接傳遞給功率消费者（工作机械），也可以間接地轉变为电能，再傳遞給功率消费者。

这一原理也适用于第一个原子能裝置。

由于燃料中化学能轉变为热能的处所及准备工質的处所不同，所有的热机可以分成下列兩大类：

1 外部燃燒及外部准备工質的發动机 在这类發动机中包括蒸汽机、汽輪机，有时还包括燃气輪机。这类發动机中的工質（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)安放着气阀。气阀用特殊的机构与曲轴相连。曲轴在一定的位

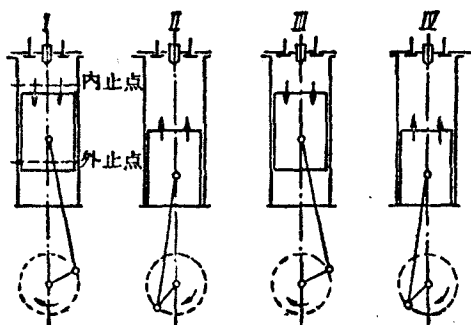


图1 四冲程发动机工作图。

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旋转任何角度,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。活塞自内止点向外止点运动，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内止点。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内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。混合气着火并燃烧后就放出一定的热量，因此燃烧产物的溫度及压力与压缩过程終了时气缸内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，活塞就离开内止点，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胀冲程。在这一冲程中，燃烧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。当活塞自外止点向内止点移动时，燃烧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？

在这种发动机的气缸中，在压缩过程終了时，靠一种特殊的燃料设备噴入某些燃料。这些燃料噴散成細滴，遇到压缩后的熾热空气就着火并燃燒。

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軸二轉中完成的发动机，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，即在曲軸一轉中完全結束。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。在气缸的下部，有不同高度的气孔（圖 2），曲軸轉动到某一位置时，活塞的頂先打开較高的气孔，然后再打开較低的气孔。

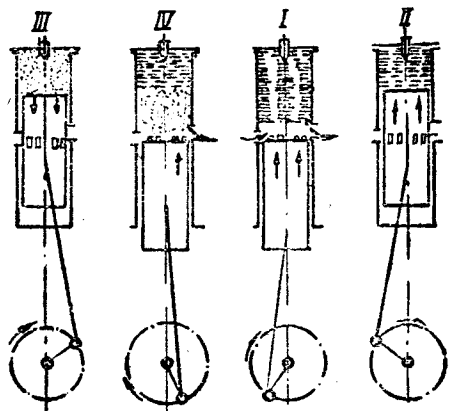


圖 2 二冲程发动机工作圖。

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气缸，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、燃料的燃燒和膨胀过程。当膨胀过程結束活塞开始打开高孔时，廢气即开始自发动机的排气系統中排出。此后当活塞打开低孔，而气缸內的压力低于进气系統中的压力时，新鮮充量即开始流入气缸，同时挤出燃燒产物，并在一定程度上互相混合，一起自排气系統中排出。当高孔关闭而这一过程結束时，在气缸中就留下新鮮充量与某些燃燒产物的混合物。此后工作过程將重复循环进行。在二冲程发动机中，气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，首先必須轉动發動机的曲軸，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。

为了保証發動机的潤滑，它装备着特殊的、称为發動机潤滑系統的设备。

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

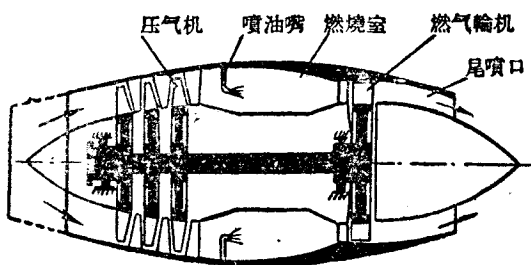


图3 航空喷气式发动机。

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：

$$\eta_j = \frac{AL_e}{Q_1}。$$

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 $\eta_e = \frac{AL_e}{Q}$ 。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經濟性。

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——每一有效馬力所占的重量

$$g = \frac{G}{N_e} (\text{公斤/馬力})。$$

6) 单位馬力——单位工作容积發出的馬力

$$N_s = \frac{N_e}{V_h} (\text{馬力/公升})。$$

現代活塞式內燃机的单位重量是在下列范围内: $0.37 \sim 30$ (公斤/馬力)。而单位馬力是在下列范围内: $1.5 \sim 50$ (馬力/公升), 并可高达 200 (馬力/公升)。这些数字标志着很高的構造指标。

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 (汽車、機車、船舶) 的数据来比較, 那末可以得到結論: 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。在任何条件下起动任何型式的內燃机只要几秒钟到几分钟就足够了, 任何最大馬力的發动机可以在 $30 \sim 40$ 分钟之間起动并轉变到全載荷。蒸汽动力装置起动并轉变到全載荷有时需要几晝夜, 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內轉变到工作情况 (汽車用蒸汽动力装置)。

4) 水耗量不大。內燃机可以不消耗水或只要儲备很少的水。蒸汽动力装置, 甚至在有冷凝設備时还需要大量的水。在某种条件下內燃机的这一优点, 是具有特殊价值的。

5) 维护簡單和方便。在这方面, 甚至最簡單的蒸汽动力装置都不可能与內燃机相比。

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

具有这些优点的同时, 內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。它不仅在和平时事业中运用，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動机的工程师，在中华人民共和国，發動机專家的培养也給予很大的注意。

今后我們將开始学习下列一系列的課程：

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，学习进行內燃机的热計算，熟悉标志發動机工作性能的热力参数。最后还将熟悉决定發動机运轉条件的特性，并熟悉發動机的試驗方法。

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

3 燃料与滑油 这一課程中將熟悉發動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 这門課是熟悉內燃机的生产制造。

5 內燃机动力装置 这門課是熟悉發動机运轉的主要規則与条件，發動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运输机械。

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。

由于内燃机必須在不同的工作条件下工作，以及必須利用不同种类的燃料，因而出現了很多不同型式的内燃机。

为了便于設計發动机，并使設計的速度加快，为了改善發动机的運轉，同时也为了易于培养內燃机的干部，把內燃机分成一定的类别是很恰当的。

但是，在內燃机制造業的範圍內，要創造一个統一的、具有一定精确性与严格性的分类系統是很困难的；因为很多不同型式的內燃机却具有很多相同的特征，同时內燃机制造業發展很快，不斷出現着新型的內燃机，而已很熟悉的構造，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統。这些系統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統。現在来介紹一下莫斯科高等工業学校所創造的最一般性的分类系統。在这个系統中，內燃机是根据最重要的特征来分类的。

1 按內燃机中进行的过程分类

首先我們来研究一下在不同程度上屬於任何型式內燃机的最一般的过程。并用圖案来表示这过程（圖4）。

有了这張圖，我們就能进行發动机按过程分类。

1) 發动机按照燃料分类：

液体燃料 重油和輕油。所有型式的活塞式發动机，以及几乎所有型式的無活塞式發动机都可以用液体燃料工作。

气体燃料 活塞式內燃机和燃气輪机。

固体燃料 火藥—反作用式的發动机、粉狀燃料的活塞式發动机、燃气輪机。

混合燃料 按所謂气体—液体过程工作的發动机。在这种發动机的气缸中充滿可燃气体与空气的混合气，而充量的点火則是靠將少量液体燃料噴入气缸中来实现的。液体燃料的着火是靠压缩充量的热量。

2) 發动机按照氧化剂分类：按照氧化剂發动机可以分成空气的、