

# 内 燃 机 原 理

[日] 长尾不二夫 著  
胡国栋 李约上 周 海等译

大 连 工 学 院



## 内 燃 机 原 理

---

著 者 (日)长尾不二夫

译 者 胡国栋 李约上 周海

出 版 大 连 工 学 院

印 刷 大 连 工 学 院 印 刷 厂

发 行 大 工 印 刷 厂 发 行 组

1981年5月出版 1981年6月印刷

787·1092·1/16 印数 1900 册

## 译 者 的 话

“内燃机关讲义”一书是日本著名内燃机专家，京都大学名誉教授，工学博士长尾不二夫的主要著作。该书第一版于 1942 年发行，经过 1949，1956，1966 年三次改编。本译本系根据 1977 年第三次改编的 19 版本翻译的。该书从创刊以来，在日本每年平均再版两次，日本高等学校内燃机专业普遍采用它作为教材或教学参考书。

长尾不二夫多年来从事内燃机工作过程方面的研究工作，特别是在混合气形成，燃烧及增压方面造诣较深，另外结合教学、科研的需要，所以本译本只是“内燃机关讲义”上卷的原理部分。

作者在书中叙述了在内燃机中如何应用热力学，传热学，流体力学等基础知识，重视对基本概念和基本理论的说明，并且又善于总结生产实践知识和科学研究的成果。正如作者所说：“内容不局限在作者所研究的范围，而是广泛的搜集了国内外的文献，对于从事内燃机工作和研究人员所必需的内容，做了简明的叙述……”。所以该书可供从事于内燃机方面的教学、科研和生产有关的技术人员参考，也可做为高等院校内燃机专业的学生和研究生的教学参考书。

鉴于译者的水平，不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

1980 年 12 月

# 符 号

$A$	热功当量 (kcal/kgm)
$b_e$	有效耗油率 (g/psh)
$c$	活塞平均速度 (m/s)
$c_p$	定压比热
$c_v$	定容比热
$D$	气缸直径 (cm, mm)
$g$	重力加速度 ( $m/s^2$ )
$H_u$	低发热量 (kcal/kg, kcal/Nm <sup>3</sup> )
$L_0$	燃烧一公斤燃料所必须的理论空气量 (kg/kg)
$L_{0v}$	同上 (Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> )
$l_0$	给气比 (以外界状态为基准)
$n$	每分钟转速 (rpm)
$N_e$	有效功率 (PS)PSe
$N_i$	指示功率 (PS)PSi
$N_r$	摩擦功率 (PS)
$P$	力 (kg), 压力 (kg/m <sup>2</sup> )
$p$	压力 (kg/cm <sup>2</sup> , at)
$p_e$	平均有效压力
$p_i$	平均指示压力
$p_r$	平均摩擦压力
$p_{th}$	平均理论压力
$Q$	热量 (kcal)
$R$	气体常数 (kgm/kg <sup>o</sup> K)
$s$	活塞行程 (cm, mm)
$T$	绝对温度 (°k)
$t$	时间, 温度 (°C)
$v$	比容 (m <sup>3</sup> /kg)
$V_c$	余隙容积
$V_h$	行程容积
$z$	气缸数
$r$	比重 (kg/m <sup>3</sup> )
$\varepsilon$	压缩比
$\theta$	曲柄角度
$K$	$c_p/c_v$

$\alpha$	过量空气系数
$\mu$	流量系数
$\eta_e$	有效热效率
$\eta_g$	示功图系数
$\eta_t$	指示热效率
$\eta_m$	机械效率
$\eta_{th}$	理论热效率
$\eta_c$	充气效率
$\eta_s$	扫气效率
$\eta_{tr}$	给气效率
$\eta_v$	容积效率

## 单 位

长度	m 米	重量	t 吨
	cm 厘米		kg 公斤
	mm 毫米		g 克
	$\mu$ 微米		
时间	h 小时	压力	kg/cm <sup>2</sup> , at (气压)
	mn 分		ata 绝对压力
	s 秒		at <sub>w</sub> 表压
	ms 1/1000 秒	温度	°C 摄氏温度
体积	m <sup>3</sup> 立方米		°k 绝对温度
	l 升	热量	kcal 大卡
	cc cm <sup>3</sup>	动力	PS 公制马力

# 目 录

符号、单位	
<b>第一章 绪 论</b>	
1.1	热机的分类和内燃机的特点..... ( 1 )
1.2	内燃机的主要结构和工作原理..... ( 2 )
1.3	内燃机的种类..... ( 3 )
1.4	内然机发展史..... ( 7 )
<b>第二章 热力学的性能分析</b>	
2.1	效率和平均有效压力的定义..... ( 11 )
2.2	空气循环的热效率..... ( 13 )
2.3	燃料空气循环的热效率..... ( 16 )
2.4	各种循环热效率的比较..... ( 20 )
2.5	指示热效率与示功图系数..... ( 23 )
2.6	气缸壁散热损失..... ( 24 )
2.7	机械摩擦与机械效率..... ( 28 )
2.8	有效热效率及热平衡..... ( 31 )
2.9	示功图及其分析..... ( 33 )
2.10	平均有效压力..... ( 39 )
2.11	影响燃料消耗率及平均有效压力的因素..... ( 41 )
2.12	功率及气缸容积计算..... ( 45 )
<b>第三章 气缸内的换气</b>	
3.1	四冲程发动机的换气..... ( 48 )
3.2	换气中气缸内压力的变化..... ( 50 )
3.3	四冲程发动机的换气损失..... ( 52 )
3.4	四冲程发动机的容积效率..... ( 55 )
3.5	二冲程发动机的扫气方法..... ( 62 )
3.6	二冲程发动机的扫气效率..... ( 67 )
3.7	二冲程发动机的扫、排气口..... ( 75 )
3.8	扫气泵..... ( 81 )
3.9	机械增压..... ( 85 )
3.10	废气涡轮增压..... ( 91 )
<b>第四章 燃 烧</b>	
4.1	燃料的发热量..... ( 103 )
4.2	燃烧需要的空气量..... ( 105 )
4.3	燃烧温度..... ( 107 )

4.4	燃烧的形态与自燃·····	( 111 )
4.5	火焰传播速度与燃烧范围·····	( 116 )
4.6	火花打火机中正常燃烧·····	( 124 )
4.7	爆燃·····	( 130 )
4.8	防止爆燃的方法·····	( 134 )
4.9	表面着火·····	( 138 )
4.10	柴油机的燃烧·····	( 143 )
4.11	柴油机敲缸·····	( 148 )
<b>第 五 章</b>	<b>柴油机混合气形成</b>	
5.1	燃油喷射·····	( 152 )
5.2	燃油喷射装置·····	( 157 )
5.3	燃油喷射过程·····	( 164 )
5.4	燃油喷射系统的特性及设计·····	( 173 )
5.5	直接喷射式燃烧室·····	( 177 )
5.6	付室式燃烧室·····	( 184 )

# 第一章 绪 论

## 1.1 热机的分类和內燃机的特点

把热能转变为机械功的装置叫做热机，通常是通过燃烧燃料来获得热能，但也有利用化学反应中所产生的热能，也可以利用存在于自然界的地热和太阳能，最近，还有利用由核反应所产生的能。

为了把用各种各样方法获得的热能在热机中转变为机械功，必须有流体即工质作为媒介。工质从高热源受热，使它产生高温、高压，然后膨胀作功，一直到温度和压力下降到不能作功的状态。为了使其连续不断地作功，必须用适当的方法使其恢复原来的状态。所以，在热机中，为了把热连续地转变为机械功，就必须使工质进行循环变化，这种循环变化叫做热机循环。从热力学观点看，热机可以分类如下。

### (a) 按工质分类

在整个循环中工质始终是气态的叫做气体循环发动机，液体和汽体两相作为工质的叫做蒸汽机。

### (b) 按供热方法分类

按工质受热方法可以分为外燃机和內燃机。前者如蒸汽机，是把燃烧所产生的热通过锅炉壁传给水产生蒸汽，由蒸汽的压力来作功，因而工质和燃气完全分开。后者如汽油机，是让汽油在汽缸內燃烧，产生高温高压的燃气，直接作功，因而工质就是燃烧产物本身。由于內燃机没有把热从燃烧产物传给工质的问题，所以没有外燃机那种固有的传热损失，但是直接使用固体燃料是困难的。

### (c) 按放热方法分类

把作功的工质恢复到原来的状态有两种方法。一种象蒸汽机中的回水器那样，把作完功的废蒸汽冷凝到原来的状态，反复使用同一工质，这种叫做闭式循环。另一种象內燃机那样，工质向低热源放热，并且在一个循环內更换一次工质，这种叫开式循环。

在开式循环中，每个循环终了工质被排出，故不需要冷却工质的装置，但工质必须是大量存在于自然界的，如水或空气。另外，循环的最低压力一般是大气压。尽管开式循环所排出的工质是靠大自然效果冷却到原来的状态，但从热力学观点看，两者没有什么差别。

### (d) 按能量转换方法分类

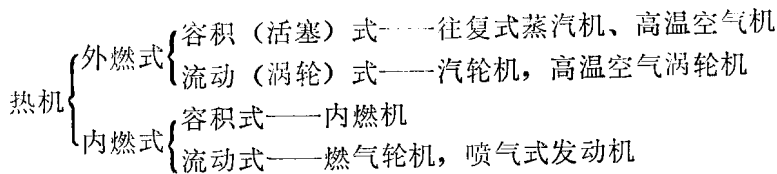
根据把工质所具有的热能转化为机械功的方法不同，可以分为容积式（活塞式）发动机（piston engine）和流动式（涡轮式）发动机（turbo engine）。前者，如往复活塞发动机，让一定量的工质在汽缸內膨胀，利用它的静压；与此相反，后者，象汽轮机那样，把工质的热能几乎都变成动能，以高速的气流冲击叶轮，或者利用它的反冲力来获得机械功，即利用它的动压。

容积式发动机的工作过程是间断的，而且转速也受到限制，所以不适合于大容量，还有由往复质量造成振动的缺点，但小容积可得到较好的效率。

### (e) 內燃机的特点

综合以上分类，实际使用的热机有如下几种：





内燃机都是开式，而外燃式既有闭式，也有开式。

内燃机是内燃容积式发动机，因为这种发动机的所有部件都不必在循环的最高温度下连续工作，所以，可以提高循环的最高温度，而不受材料的限制。现在的内燃机，循环的最高温度高达 2500℃，可是在这种发动机中，即使温度最高的排气伐，也很少有超过 800℃。根据卡诺循环的原理可知，循环的最高温度越高，热效率就越高，这就是内燃机是热机中效率最高的主要原因。

以现代的设计水平，把内燃机和汽轮机作一比较，由于有上述的本质差别，因而它具有如下优点：

1. 热效率高。
2. 冷却系统损失的热量少。
3. 发动机单位马力的重量（或体积）小。
4. 构造简单。

以上优点在小型发动机上更加显著。和汽轮机相比，它有如下缺点：

1. 不能消除往复质量，所以振动大。
2. 内燃机须靠外力起动，因而低速的扭矩小。
3. 不能直接使用固体燃料。
4. 一到大功率范围，对安装场地的要求以及重量方面就不如流动（涡轮）式。

使用内燃式流动型发动机——燃气轮机就没有 1 和 4 的缺点。

## 1.2 内燃机的主要结构和工作原理

### (a) 主要结构

内燃机主要部件的构造如图 1.1 所示，活塞气密地安装在被加工得很光滑的气缸内，并在其中滑动，通过连杆把它的滑动传给曲轴，使曲轴转动。也有用凸轮或斜板把活塞的往复运动转变为回转运动，近来，正在研究一种使用旋转活塞的旋转式发动机，但都没有被广泛采用。

活塞从上端滑动到下端，或其长度叫做行程，在行程的始点和终点，当活塞与连杆成为一条直线时，分别称之为上止点和下止点。

气缸的上端用气缸盖（气缸头）封闭，在气缸盖上设有进气伐和排气伐。在进气行程时，进气伐打开，通过活塞的吸气作用，吸入燃烧所需的空气或混合气；在排气行程时，排气伐打开，排出燃烧膨胀后的废气。所有这些气阀都是靠固定在凸轮轴上的凸轮，经过顶杆来开闭的。

当气体在气缸内反复几次燃烧，气缸和气缸盖可能过热，材料受不了，同时，润滑油也会烧掉，所以在其外部设有水套进行冷却，或者用空气冷却。

在气缸的下部有曲柄箱，它的作用是安装曲轴，并支撑发动机的整个机构，使之固定在一定的位置。曲柄箱下面有底座或油底壳，积蓄润滑油，通过油泵给摩擦付输油。根据发动

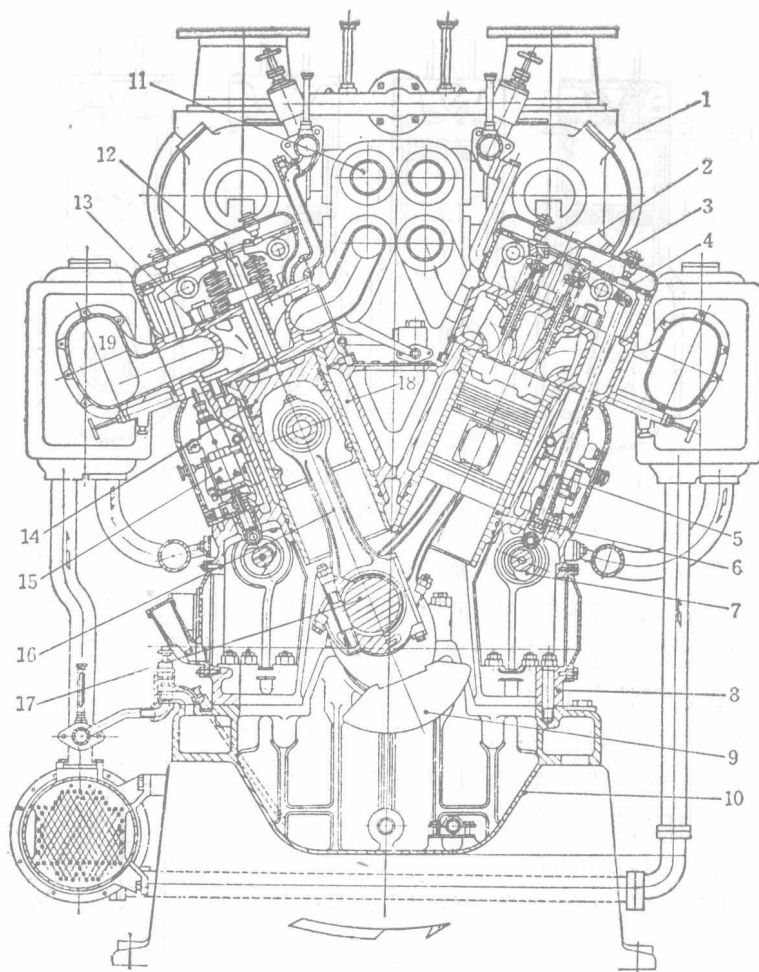


图 1·1 内燃机主要部件名称 (洋马柴油机, 12MAL—HT, 200Φmm×240mm)

1. 废气涡轮增压器, 2. 排气阀, 3. 进气阀, 4. 摇臂, 5. 顶杆, 6. 气缸套,
7. 凸轮, 8. 曲柄箱, 9. 平衡块, 10. 底座 (油底壳), 11. 排气管, 12. 喷油嘴,
13. 气缸盖, 14. 活塞, 15. 高压燃油泵, 16. 连杆, 17. 曲轴, 18. 水套, 19. 进气管。

机的类型, 还分别设有供给燃料用的燃油喷射泵、喷油器、汽化器、气体混合阀、点火装置、起动装置和调速器等等。

在内燃机中, 进行一个工作循环, 活塞需要有四个行程 (即曲轴转两转), 或者需要二个行程 (即曲轴转一转), 前者叫四冲程, 后者叫二冲程。

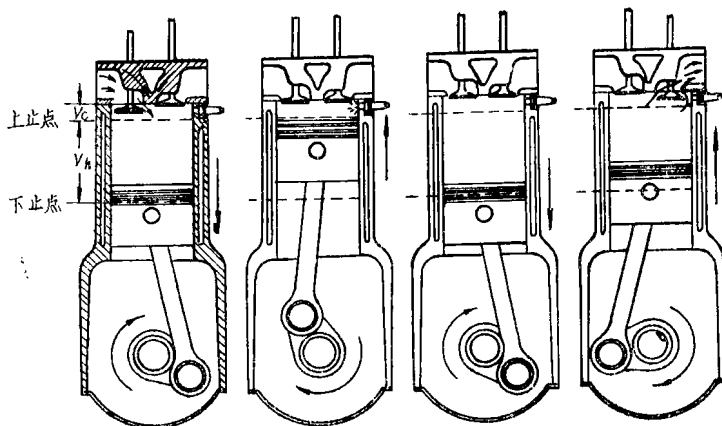
#### (b) 四冲程发动机的工作原理

图 1·2 表示四冲程汽油机的工作顺序。

(i) 进气行程 如 (A) 所示, 排气阀关闭, 随着活塞下行气缸内产生低压, 从进气阀吸入空气和汽油的混合气。在柴油机中, 吸入的仅是新鲜空气。

(ii) 压缩行程 如 (B) 所示, 进排气阀都关闭, 活塞上行压缩气缸内的气体。在柴油机中, 把空气压缩到燃料自燃温度以上。

(iii) 作功行程 (膨胀行程) 当活塞快到上止点时, 用火花塞点燃混合气使之燃烧。在柴油机中, 此时把燃料以雾化状态, 喷射到气缸内, 和高温空气接触而自行发火燃烧。燃烧所产生的高压气体, 把活塞往下推动而作功, 如 (C) 所示。



(A) 进气行程, (B) 压缩行程, (C) 作功行程 (D) 排气行程

图 1-2 四冲程发动机的工作顺序

(iv) 排气行程 当活塞到下止点稍前一些时, 排气阀开启, 废气溢出, 气缸内压力下降, 接着, 如 (D) 所示, 活塞上行把膨胀完的废气排出气缸外。这样就完成一个循环, 然后又重复以上过程, 使机器连续不断地运转。在四冲程发动机中, 只有一个行程作功, 其余三个行程是依靠飞轮的惯性来工作。

把一个循环内气缸里的状态变化, 表示为压力和体积的关系, 即压力和活塞行程的关系, 反映这种关系的图叫做示功图。示功图的面积表示 1 个循环所作的功, 把它叫做指示功。图 1-3 是四冲程汽油机的示功图, 它的指示功是  $W_i = W_1 - W_2$ 。 $W_2$  叫做泵气损失, 是进排气过程损失的功。

图中的  $a-b$  表示进气行程的压力变化, 由于气阀和进气管的阻力, 使其略低于大气压力线。 $b-c$ 、 $c-d$  和  $d-e-f$  分别表示压缩行程、燃烧和作功行程的压力变化, 在  $e$  点排气阀打开,  $e-f$  废气开始溢出。 $f-a$  是排气行程, 由于气阀和排气管等的阻力, 它的压力略高于大气压力。

$V_h$  是在一个行程中活塞所扫过的体积, 称为行程容积。当活塞到达上止点时, 气缸内仍有容积  $V_c$ , 这个容积叫做余隙容积, 把压缩始点的容积和它的比值叫做压缩比

$$\epsilon = (V_h + V_c) / V_c \quad (1.1)$$

### (c) 二冲程发动机的工作原理

在热力学上, 它和四冲程没有什么不同, 只不过在实现工作过程上有差别。它没有四冲程所具有的进排气行程, 仅仅反复地进行压缩和膨胀行程, 燃烧气体的排出和新鲜气体的吸入, 是借用下止点附近的部份作功行程和压缩行程来实现的。图 1-4 表示二冲程汽油机的工作顺序, 开始如 (A) 所示, 在压缩行程中, 由于活塞下部产生低压, 从  $E$  把混合气吸到曲柄箱内。接着, 如 (B) 所示, 在作功行程将结束时, 当活塞越过排气口  $A$ , 燃烧气体

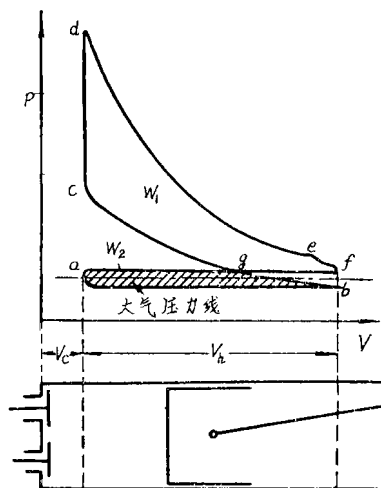


图 1-3 四冲程发动机的示功图

被排出，然后，如 (C) 所示，活塞继续下行，扫气口  $S$  与曲柄箱经通道  $O$  相通，此时在曲柄箱内已被压缩的混合气流入气缸，把气缸内的废气扫出并取而代之。把它叫做扫气作用，这种作用一直继续到压缩行程，活塞先后把扫气口和排气口遮堵为止。在大型发动机中，不用曲柄箱来压缩扫气空气，而另外设置叫做扫气泵的压缩机。

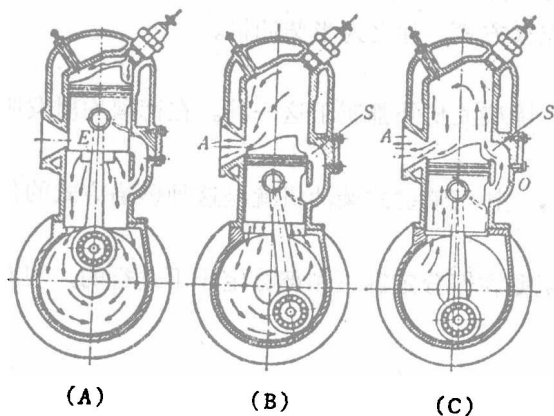


图 1-4 二冲程发动机的工作顺序

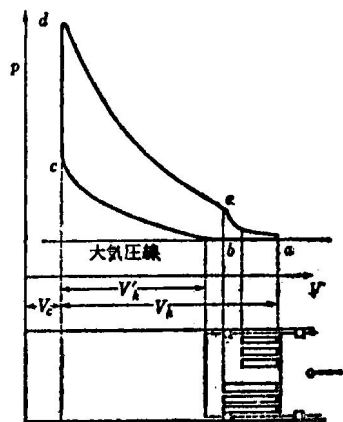


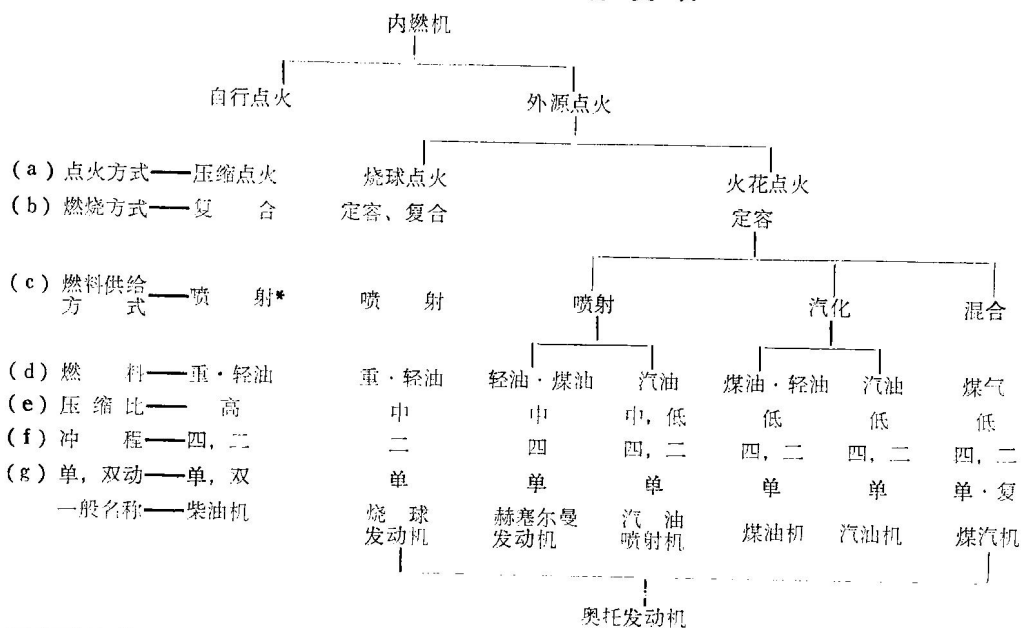
图 1-5 二冲程发动机的示功图

二冲程发动机的示功图如图 1-5 所示，它没有进排气部分，只有压缩行程  $a-c$ ，燃烧过程  $c-d$ ，做功行程  $d-e-a$  和起扫气作用的  $e-a-b$ 。

### 1.3 内燃机的种类

根据对内燃机的各种见解，可以如表 1-1 那样进行分类

表 1-1 内燃机分类表



\*: 在小型机上也有用汽化器的

### (a) 点火方式

外源点火 靠电火花点火，所以叫火花点火发动机。

自行点火 不用其它的点火设备，依靠压缩热量自行着火燃烧，所以也叫作压燃式发动机，柴油机就是这种类型的发动机。

烧球式发动机 依靠燃烧室壁面的高温部分来点火，虽然起动时用外源点火，可是在正常运转中靠压缩点火，所以也有把它归到自行点火方式，称之为半柴油机。

### (b) 燃烧方式

定容燃烧发动机 在一定容积下进行燃烧，除柴油机外都属于这一种。在德国均用发明者的名字命名，叫做奥托 (Otto) 发动机。

定压燃烧发动机 在一定压力下进行燃烧，空气喷射式柴油机就是这种燃烧方式的代表，但现在已完全废弃了。

复合燃烧发动机 介于上述二者之间，燃烧是在部分定容下和部分定压下进行的，现有的柴油机属于这种类型。

### (c) 供给燃料的方法

汽化器式发动机 象汽油机那样，通过汽化器把燃料随着空气一起吸入。

喷射式发动机 依靠泵把燃料喷射到气缸或进气管内。

把燃料喷射到气缸内的叫做内部混合气形成，把燃料喷射到进气管，或者依靠汽化器或气体混合阀在气缸外部形成混合气的，叫做外部混合气形成，或者叫做混合气吸入式发动机。

### (d) 燃料

根据所用的燃料有煤气机、汽油机、煤油机……等名称，使用二种以上燃料的叫做多种燃料发动机。

### (e) 压缩比

奥托发动机的压缩比一般比较低，所以叫低压缩发动机；而柴油机的压缩比较高，所以叫做高压缩发动机。烧球式发动机的压缩比居两者之间，叫做中压缩发动机，最近，奥托发动机的压缩比也有所提高。

### (f) 冲程数

有四冲程和二冲程发动机。

### (g) 构造

根据燃烧是在活塞的一端或两端进行，可以分为单作用发动机和双作用发动机。后者过去曾用在大型柴油机或煤气机上，最近几乎见不到了。

根据气缸排列或曲轴数分为

立式	卧式	倒立式
直列式	星形	串联式
多列式……V形、W形、X形		对向气缸式
多轴式……H形、U形、双重V形		对向活塞式
	多角形 (▽形、□形)	

特殊型——樽式 逆 U 字形

根据转速有高速发动机、低速发动机。汽车用一般属于高速，普通的陆用和船舶用多属

低速。

按冷却方法分，有空气冷却、水冷却和蒸发冷却等等。

### (h) 进气方法

自然吸气发动机 由活塞吸入空气或混合气的普通发动机属于这种类型。

增压发动机 为了增大功率，把压缩的空气供给气缸，叫做增压发动机，多用于中大型柴油机。

## 1.4 内燃机发展史

### (a) 初期发展史

内燃机的起源还不清楚，Hautefeuille 在 1678 年，C. Huygens 在 1680 年，分别开始利用火药爆炸来获得动力，D. Papin 于 1688 年进行试验，但没有成功。英国人 Robert Street 于 1794 年最早企图利用燃料燃烧来获得动力，其后，法国人 Lebon 于 1799 年，英国人 W. Cecil 于 1820 年也先后进行研究，直到 1823 年间才由 Samuel Brown 制造出最初的实用发动机。但是，直到这时的发动机，还是利用冷却燃烧产生的高温气体，从而得到低压，即利用强烈真空 (explosion Vacuum) 来运转。

英国人 W. L. Wright 于 1833 年最早设计出直接利用燃烧压力来运转的发动机，这种发动机和今日的发动机的结构大体相似。随后，英国人 William Barnett 于 1838 年发现在点火前压缩混合气是有利的，从而发明了今日一般所使用的压缩式发动机。他同时还设计了火焰点火装置。美国人 A. Drake 于 1842 年，英国人 A. W. Newton 于 1855 年又制作了用热管点火的发动机。

到了这个时候，发动机才实验成功，才认识到它的实用价值，Lenoir 于 1860 年首次制造的实用煤气机出现在市场上。这种发动机采用无压缩的电点火方式，热效率只不过 4.5%，但能完满顺利地运转，当时在英法等国广泛地使用。Hugon 于 1865 年也制造了同样的发动机，不同之处是它采用火焰点火法。

从这个时候开始，才比较好地认识到 William Barnett 所提倡的在着火前压缩混合气的优点，1861 年，德国人 Gustav Schmidt 和 Million 法国人在他们的论文中强调了压缩的效果。法国人 M. Alph. Beau de Rochas 于 1862 年发表了提高内燃机效率的 4 个条件，并且提出了满足这些条件的工作原理。这样才完全明确表现出现代用的四冲程式，采用压缩行程是一个巨大的进步，对内燃机的发展作出了伟大的贡献。

1867 年，德国人 Otto 和 Langen 改进了 Barsanti 和意大利人 Matteucci 于 1857 年发明的自由活塞发动机，使之完善。这种发动机和现在的内燃机在结构上完全不同，它靠燃烧压力使活塞自由地跳起，在它落下时，依靠重力的作用，通过齿条和齿轮机构使轴回转。点火采用火焰式，热效率达到 10%，排挤 Lenoir 及 Hugon 的发动机，在此后的十年间独占了市场。

在美国，Brayton 于 1872 年获得了用煤气作燃料的发动机的专利，又于 1874 年得到使用液体燃料的发动机的专利。该发动机的特点是一边供给燃料一边燃烧，企图得到定压燃烧。但它的热效率不超过 6%，看不出能发展得比这个效率再高。

### (b) 四冲程煤气机 (图 1.6, 图 1.7)



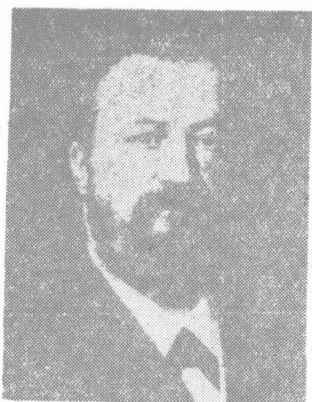


图 1-6 Nicolaus August Otto(1832—1891)

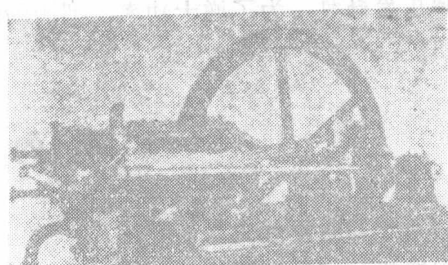


图 1-7 最早的研究用四冲程奥托发动机 (1876年)

德国人 N. A. Otto 于 1876 年根据法国人 Beao de Rochas 以前提出的原理，制造了四冲程煤气机。最初采用电点火，后改为火焰点火，运转极为平稳，接近于比较完善，无论是功率还是效率，在当时比其它任何热机都优越，为煤气机获得了稳定的地位。最初压缩比 2.5 左右，热效率不超过 10~12%，以后，压缩比逐渐提高，到 1886 年，试验结果效率达 15.5%，到 1894 年达到 20~26%。

### (c) 二冲程煤气机

四冲程发动机的缺点是在四个活塞行程中只有一个或不到一个作功行程。所以在很早以前就曾考虑过，希望制造出每一转都能有作功行程的二冲程发动机。在奥托发动机诞生不久，英国人 Dugald Clerk 就开始研究二冲程煤气机，于 1881 年制成了二冲程发动机，可看作是今日的二冲程发动机的始祖，并在巴黎博览会上展出。

### (d) 汽 油 机

Lenor, Brayton 等已经进行过使用容易汽化燃料的试验，但首先完成这个试验的是德国人 G. Daimler。他在 1883 年制成了带有表面汽化器的用热管点火的立式发动机。当时的内燃机，即使是高速机也只不过是 200rpm，而他的发动机竟一跃为每分钟 1000 转的惊人的高速，1887 年装在汽车上行驶，接着，又用在小船上。在同一时期，德国人 K. Benz 也开始对高速发动机进行研究，在 1900 年间制出了电点火的，和现在汽车发动机大体相近的汽油机。从此以后就迅速地发展，到现在，4000~5000rpm 是很平常的，最高可达 12000rpm。

### (e) 煤 油 机

1890 年英国人 Priestman 制成了以难以汽化的煤油作为燃料的发动机。这种发动机具有喷雾式蒸发器和电点火装置，是现在用于工农业的煤油机的原型。

### (f) 烧球式发动机

略后于 Priestman，英国人 Stuart Akroyd 设计制造了把煤油喷到燃烧室内赤热的壁上，使之蒸发燃烧的煤油机。随后，又使用低质的重油，这就是今天仍然可看到的小型渔船用的烧球式发动机。

### (g) 柴油机 (图 1-8, 图 1-9)



图 1-8 Rudolf Diesel (1858—1913)

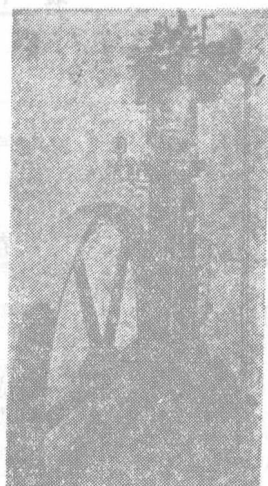


图 1-9 最初研究用的柴油机 (1895年)

1898 年，德国人 Rudolf Diesel 制成了向气缸内吸入纯空气，并把它压缩到温度高于燃料的自燃点，然后借助于高压空气把燃料以雾化状态一边喷射到气缸中，一边燃烧的柴油机。他的目的是实现等温燃烧，但实际上出现了接近于定压燃烧。其后，由于改用高压油泵喷射燃料，成为无气喷射式，所以变成复合燃烧，而在高速发动机中接近于定容燃烧。柴油机也以使用低级燃料为目的，最初曾企图燃烧碳粉，但后来只是在燃烧重油方面获得成功。柴油机不管在四冲程还是在二冲程都取得很大的进展，热效率达到 46%，是热机中效率最高的。

#### (h) 喷射点火式发动机

前面已经讲过，Brayton 在 1873 年曾试验过不用汽化器，直接把汽油喷射到气缸内，在他之后，还试验过向进气管内喷射的方法，但后来由于汽化器迅速进步，这些试验都被放弃，然而，由于它们具有不需汽化器的优点，所以，美、德等国于 1925 年，日本于 1930 年又对它们进行了研究，并用在了航空上。

瑞典人 K. J. H. Hesselman 在 1930 年从另外一个角度，曾设计一种把诸如轻、重油这样不易汽化的燃料直接喷入气缸，并采用电点火的多燃料发动机，这种发动机已经在使用。

#### (i) 增压发动机

1926 年，瑞士人 Alfred J. Büchi 设计了利用废气能量来压缩进气空气的废气涡轮增压发动机，但由于没有制造出性能良好的增压器，所以长时期内没能普及。战后，随着对废气涡轮的研究，耐热材料和压气机有了显著的进步，另一方面，由于迫切要求增大发动机的功率，所以从 1950 年开始在柴油机中采用，现在，实现了功率达到非增压时的三倍的增压柴油机。这对柴油机性能的提高作出了巨大的贡献。

如上所述，长期来发明了各种各样的内燃机，其中最发达的是依据奥托 (Otto) 原理的汽油机和 Diesel 发明的柴油机。前者的特点是小型重量轻，作为象汽车和航空用的发动机，单位马力重量小是很有必要的；后者的特点是热效率高，它被用于那些重视燃料经济性的船用和发电用上。现在也已制造出尺寸小重量轻，而且燃料消耗率低的高速柴油机，被用在各种车辆上。表 1-2 是内燃机的发展年代表。

表 1.2 内燃机发展一览表

人 名	研 究 内 容	研究或样品发表的大概期间							
		1800	'20	'40	'60	'80	1900	'20	'40年
Robert Street	煤气机最早的研究	94							
Lebon	煤 气 机	99							
W. Cecil	世界上最早运转的煤气真空机		20 —						
Samuel Brown	煤气真空发动机		23 —						
W. L. Wright	完成煤气爆发发动机设计			33					
William Barnett	煤气机火焰点火法			38	—————				
A. W. Newton	烧球式发动机				55				
Barsanti, Matteucci	电点火, 自由活塞发动机				57				
Lenoir	电点火无压缩煤气机				60 —				
Million	压缩式发动机				61				
Beau de Rochas	提出四冲程发动机原理				62				
Hugon	火焰点火, 无压缩发动机				65 —				
N. Otto, Langen	火焰点火, 自由活塞发动机				67 —				
Brayton	永久火焰点火, 压缩式发动机				72 —				
Otto	火焰点火, 四冲程爆发式发动机				76	—————→			
Dowson	压力式煤气发生器				78	—————			
Clerk	二冲程发动机					81	—————→		
Daimler	汽化器, 汽油机					87	—————→		
Priestman	电点火, 煤油机					88	—————→		
Akroyd	烧球式发动机					90	—————→		
Benier	吸入式煤气发生器					94	—————		
Thwaite	高炉煤气机					95	—————		
R. Diesel	压燃式发动机					98	—————→		
Hesselman	喷射点火式发动机					(93年发表研究方案)		30	—————→