

内 燃 机 原 理 与 柴 油 机 设 计

〔日〕長尾不二夫

冯中 万欣 等译校

机 械 工 业 出 版 社

本书共分六章。第一章为绪论，第二至五章为内燃机原理部分，对有关热力学、汽缸换气过程、燃烧过程、柴油机中混合气形成过程等作了深入阐述。第六章为柴油机设计部分，讲述了柴油机总体设计及主要零部件的构造与设计计算，并对起动、润滑、冷却、增压等系统作了概括叙述。最后对各类柴油机的实例作了简要说明。

本书可作为大学内燃机专业的教学参考书，也可供从事于内燃机设计的工程技术人员用作设计参考手册。

内燃機関講義（上巻）

京都大学名誉教授

工学博士

長尾不二夫 著

日本養賢堂

1 9 8 1

* * *

内燃机原理与柴油机设计

京都大学名誉教授

工学博士

〔日〕長尾不二夫 著

冯中 万欣 等译校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $16^{7/8}$ · 字数 443 千字

1984 年 6 月北京第一版·1984 年 6 月北京第一次印刷

印数 00,001—8,000 · 定价 2.50 元

*

统一书号：15033·5585

译者序

自从出现世界性能源危机以来，节约能源已成为世界各国当务之急。内燃机是重要的能源消费者，所以各国都在大力改进内燃机的性能以节约能源。柴油机的燃料经济性比较好，因此近年来柴油机的应用领域日渐扩大，各国对柴油机的研究也日益加强，正是在这种情况下，我们开始了这本书的翻译工作。

本书著者長尾不二夫博士系日本京都大学名誉教授，多年来专门从事于内燃机的理论研究工作，发表过大量关系到内燃机许多方面的研究论文，是内燃机界国际知名的专家。所著《内燃機関講義》初版于1942年，1947和1956年进行过两次修订，1967年出版了上卷的第三次修订版，受到了内燃机界的欢迎，至1981年已发行至22版。

《内燃機関講義》分上下两卷，上卷主要讲述内燃机一般原理和柴油机设计，下卷讲述各类汽油机、气体燃料发动机以及燃气轮机的设计。本书即译自《内燃機関講義》上卷第三次修订版1981年第22版。

本书共分六章，第一章为绪论。二至四章讲述一般内燃机原理，主要内容有热力学及性能，汽缸换气以及燃烧理论。第五章专门讲述柴油机中混合气形成问题。第六章为柴油机设计部分，对柴油机的主要运动机构以及各系统各总成的设计进行了阐述。

本书的特点是取材突出重点，编排层次分明，论述简明扼要，讲解深入浅出。本书可用作大学有关专业的教学参考书，也可供内燃机工作者用作设计参考手册。

参加本书翻译工作的有吴关昌（第四、五章）以及李厚生、刘洁平、刘国田、王树奎、袁汉三、苏万华、程熙、刘桂莲、周启德等同志。参加本书校阅工作的有万欣（第五章）和冯中（其余各章）同志。

刘国田同志对全书所用名词术语进行了统一工作，并对译稿进行了整理。

序 言

内燃机在固定设备、船舶、汽车、航空等各种用途方面已取得了惊人的发展。除规模巨大的发电站、超大型船舶外，如果说当前所使用的原动机全部是内燃机，也不能算言过其实。在对内燃机的结构、设计的研究分工愈来愈细的情况下，各个专门领域中对提高性能和阐明各种现象正进行着坚持不懈的研究。但是，即使对一位从事于狭窄的专门领域的研究者来说，首先对内燃机有一个广泛的全面的了解，也是极为重要的。

本书以大学程度的读者为对象。目的是使读者最有成效地正确理解涉及内燃机全部领域的基础理论、结构和设计概要，并将本书当作自己进一步进行研究用的手册。为此，作者写作本书时没有局限于本人的研究领域，而是广泛收集国内外文献，把从事于内燃机业务和内燃机研究者所必需的内容作了简明扼要的叙述，并努力使本书尽量全面而不有所偏重。因此，当本书作为教科书时，可以充分加入教师的意见；作为参考书时，则在读者阅读本书而确实掌握基础知识后，为使其能够在自己感兴趣的领域进行开拓性研究，在书中，就各领域中问题所在之点列举了重要的参考文献。

内燃机是把机械工程所有学科进行综合应用的学科，特别需要有热力学、流体力学、材料力学、机械力学等基础知识。这些都应是读者已经学过的知识，这里仅介绍如何将这些基础知识应用于内燃机的研究。本书在设计、制图方面用了不少篇幅，结合主要部件的计算方法列举了许多结构例子。这部分对从事于工厂实际业务的工作者有较大的参考价值。

本书初版于1942年。虽然在1949年、1956年经过两次修订，但由于至今已经过十年之久。在此期间，内燃机有了很大的发

Ⅶ

展，发表了许多新的理论、新型设计的文章，这次修订把它们都收入了本版中。此外，各方面寄来的有益的建议和恳切的指正也在充分进行斟酌后收入了本书。

最后，对在本书修订过程中的计算、校对给予很大帮助的平子善夫博士以及对本书所引用文献的作者及提供图纸、资料的各公司一并致谢。

1966年9月

著者

符 号

A ——热功当量 (kcal/kgm)
 b_e ——有效燃料消耗率 (g/PSH)
 c ——活塞平均速度 (m/s)
 c_p ——定压比热
 c_v ——定容比热
 D ——汽缸直径 (cm, mm)
 g ——重力加速度 (m/s²)
 H_u ——低热值 (kcal/kg, kcal/Nm³)
 L_0 ——理论上燃烧一公斤燃料所需的空气量 (kg/kg)
 L_{0v} ——理论上燃烧一公斤燃料所需的空气量 (Nm³/Nm³)
 l_0 ——给气比 (以外界大气状态为标准)
 n ——转速 (rpm)
 N_e ——有效功率 (PS)
 N_i ——指示功率 (PS)
 N_f ——摩擦功率 (PS)
 P ——力 (kg), 压力 (kg/m²)
 p ——压力 (kg/cm², at)
 p_e ——平均有效压力
 p_i ——平均指示压力
 p_r ——平均机械摩擦损失压

力

p_{th} ——理论平均有效压力
 Q ——热量 (kcal)
 R ——气体常数 (kgm/kgK)
 s ——活塞行程 (cm, mm)
 T ——绝对温度 (K)
 t ——时间, 温度 (°C)
 v ——比容 (m³/kg)
 V_c ——压缩终点汽缸容积
 V_h ——汽缸工作容积
 z ——汽缸数
 γ ——重度 (kg/m³)
 ϵ ——压缩比
 θ ——曲轴转角
 κ —— c_p/c_v
 λ ——过量空气系数
 μ ——流量系数
 η_e ——有效热效率
 η_g ——示功图丰满系数
 η_i ——指示热效率
 η_m ——机械效率
 η_{th} ——理论热效率
 η_c ——填充效率
 η_s ——扫气效率
 η_{rr} ——给气效率
 η_v ——充量系数

单 位[⊖]

长度	m	米	体积	m ³	立方米
	cm	厘米		l	升
	mm	毫米		cc	cm ³ 立方厘米
	μ	微米	压力	kg/cm ² , at	(工程大气压)
重量	t	吨		ata	绝对压力
	kg	千克		atm	表压力
	g	克	温度	°C	摄氏温度
时间	h	时		K	绝对温度
	min	分 (简略为m)	热量	kcal	千卡
	s	秒	功率	PS	米制马力
	ms	1/1000秒			

⊖ 日文原书单位使用工程单位制，以长度、时间和力的单位作为基本单位，其分别以m，s和kg〔(kg相当于kgf，kg=9.80665N)表示，与我国国际单位制推行委员会颁发的“计量单位名称与符号方案(试行)〕不一致。但考虑到单位制与书中许多公式的形式有关，故本书仍使用原书的单位制，书中的kg均代表重量或力，与国际单位制中以kg代表质量不同，务请阅读时注意！——译者注。

目 录

第一章 绪论	4
1.1 热机的分类和内燃机的特征	7
1.2 内燃机的构造概要和工作方式	3
1.3 内燃机的种类	9
1.4 内燃机的发展史	11
第二章 热力学研究及性能	18
2.1 效率和平均有效压力的定义	18
2.2 空气循环的热效率	20
2.3 燃料空气循环的热效率	26
2.4 基本循环热效率的比较	33
2.5 指示热效率和示功图丰满系数	38
2.6 传向汽缸壁的热损失	42
2.7 机械摩擦和机械效率	48
2.8 有效热效率和热平衡	54
2.9 示功图及其分析	60
2.10 平均有效压力	70
2.11 影响燃料消耗率及平均有效压力的各种因素	73
2.12 输出功率及汽缸工作容积的计算	80
第三章 汽缸内的换气	85
3.1 四冲程发动机的换气	85
3.2 换气过程中汽缸内压力的变化	89
3.3 四冲程发动机的换气损失	92
3.4 四冲程发动机的充量系数	96
3.5 二冲程发动机的扫气方法	109
3.6 二冲程发动机的扫气效率	117
3.7 二冲程发动机的扫、排气口	131
3.8 扫气泵	139
3.9 机械增压	147
3.10 废气涡轮增压	156

X

第四章 燃烧	176
4.1 燃料的热值	176
4.2 燃烧所需的空气量	179
4.3 燃烧温度	182
4.4 燃烧的类型和自燃	188
4.5 火焰传播速度和可燃范围	196
4.6 火花点火发动机的正常燃烧	206
4.7 爆燃	218
4.8 防止爆燃的方法	225
4.9 表面点火	231
4.10 柴油机中的燃烧	239
4.11 柴油机的敲缸	249
第五章 柴油机中混合气的形成	254
5.1 燃料喷射	254
5.2 燃料喷射装置	263
5.3 燃料喷射过程	275
5.4 燃料喷射系统的特性和设计	289
5.5 直接喷射式燃烧室	296
5.6 分开式燃烧室	307
第六章 柴油机主要部分的构造和设计	325
6.1 构造和设计概述	325
6.2 活塞	336
6.3 活塞环	353
6.4 连杆	369
6.5 曲轴和飞轮	382
6.6 主轴承和连杆轴承	400
6.7 机座、曲轴箱、机架	408
6.8 汽缸体和汽缸盖	421
6.9 进、排气门	438
6.10 气门传动机构	447
6.11 起动和逆转装置	469
6.12 润滑系统	476

6.13 冷却系统	482
6.14 废气涡轮增压器和进、排气系统	485
6.15 柴油机的实例	492
6.16 热泡式发动机	508
参考文献	515

第一章 绪 论

1.1 热机的分类和内燃机的特征

把热能转变为机械功的装置叫做热机。虽然热机中的热能一般是由燃料燃烧产生的，但是，不论是化学过程中产生的热能还是象地热以及太阳能等这类自然界现存的热能，都能够用于热机。此外，最近还有人研究利用核反应产生的原子能。

要想用热机把由各种方法所产生的热能转变为功，必须有流体作为作功的媒介，即必须有工质存在。工质从高热源吸取热量而成为高温高压工质，依靠这种高温高压工质在热机内膨胀作功。膨胀后的工质其压力和温度下降，变为不能再作功的状态。为了再次使它连续作功，必须用适当的方法使它恢复到原来的状态。象这样用热机把热能连续地转变为功时，必须使工质进行循环变化，这种循环变化称之为热机的循环。从热力学的下述观点出发可将热机进行如下的分类。

(a) 按工质形式分类

工质在循环中常为气体的发动机称为气体循环发动机；工质在循环中呈液体和气体两相的发动机称为蒸汽循环发动机。

(b) 按供给热量的方式分类

按照对工质加热的方式可分为外燃机和内燃机。前者是象蒸汽机那样，燃烧所产生的热通过锅炉的壁传给水，使水受热蒸发而变成蒸汽，并且依靠蒸汽的压力作功。在这种发动机中，工质与燃烧气体是完全不同的物质。后者是象汽油机那样，在汽缸内燃烧汽油而产生高温高压气体，并且由这种燃气直接作功，在这种发动机中，工质就是燃烧产物。

由于内燃机不需要把热从燃烧产物传给工质，所以它没有外燃机所固有的热传导损失。但是这种发动机直接使用固体燃料有

困难。

(c) 按放热方式分类

使做功后的流体恢复到初始状态有两种方式：其中一种是象装有冷凝器的蒸汽机那样，将排汽冷却而回到原来的状态。由于这种发动机是重复使用同一工质，所以人们称它为闭式循环发动机。另外一种象内燃机那样，代替向低热源放热，在每个循环中都重新更换工质，这种放热方式的发动机称为开式循环发动机。

在开式循环发动机中，每个循环终了时把工质排出，因而它不需要冷却工质的装置。但是所用的工质必须象水和空气那样是大量存在于自然界的物质。另外，这种循环的最低压力通常是大气压。即使是开式循环，由于所排出的工质归根到底还是靠自然力进行冷却以回到原来的状态，所以在热力学上这两种循环没有什么不同。

(d) 按能量的转换方式分类

按照把工质所具有的热能转变为机械功的方式可分为容积式发动机和流动式发动机。前者是指象往复式活塞式发动机那样，让一定量的工质在汽缸内膨胀，利用其静压做功的发动机；与此相对照，后者是指象蒸汽轮机那样，将工质的热能先转变为动能，使高速喷流冲击叶轮，或者是利用喷流的反作用力而获得机械功，也就是利用动压做功的发动机。

由于容积式发动机的工作过程是间歇的，其转速也受到限制，因而这种发动机不适于处理大容量的气体。此外，这种发动机还具有由于往复质量而产生振动之缺点。但用它处理小容量的流体其效率较高。

(e) 内燃机的特征

如果把以上所述的分类进行组合，就会设想出各式各样的热机。但实用的热机只有以下几种：

热机	{	外燃式	{ 容积式 — 往复式蒸汽机，高温空气机
			{ 流动式 — 蒸汽轮机，高温空气轮机
	{	内燃式	{ 容积式 — 内燃机
			{ 流动式 — 燃气轮机，喷气发动机

内燃式的循环都是开式循环，而外燃式既可以采用开式循环，也可以采用闭式循环。

内燃机是内燃式中的容积式发动机。由于这种原动机的任何部分都不在循环的最高温度下工作，因而它不受结构材料的限制，可以提高其循环的最高温度。这就是说：虽然现代内燃机的循环最高温度甚至有的能达到 2500°C ，而在原动机中即使是温度最高的排气门这一部件也很少有温度超过 800°C 的。如果提高循环最高温度，就会使发动机效率提高，这一点已经由卡诺循环的原理所阐明，这也是在热机中内燃机的热效率最高的重要原因。

根据上述的本质的差别，在现代设计情况下将内燃机与蒸汽轮机进行比较，内燃机具有如下优点：

- (1) 总热效率高；
- (2) 损失到冷却系统中的热量少；
- (3) 原动机的重量或尺寸大小与输出功率之比值小；
- (4) 构造简单。

这些优点在较小的发动机中表现得更为显著。另一方面，它与蒸汽轮机相比有如下缺点：

- (1) 由于不能消除往复质量，因而振动较大；
- (2) 内燃机不能靠自己的力量起动，因此在低速时扭矩小；
- (3) 不能直接使用固体燃料；
- (4) 在组成大型动力系统时，在对场地的要求和重量方面要劣于流动式热机。

当采用内燃式中的流动式的燃气轮机时，就可以排除上述的 (1) 和 (4) 这两点缺点。

1.2 内燃机的构造概要和工作方式

(a) 构造概要

内燃机主要部分的构造如图 1.1 所示。在内表面经光整加工的汽缸中装有可以滑动的活塞，该活塞使汽缸保持密封而不漏气。

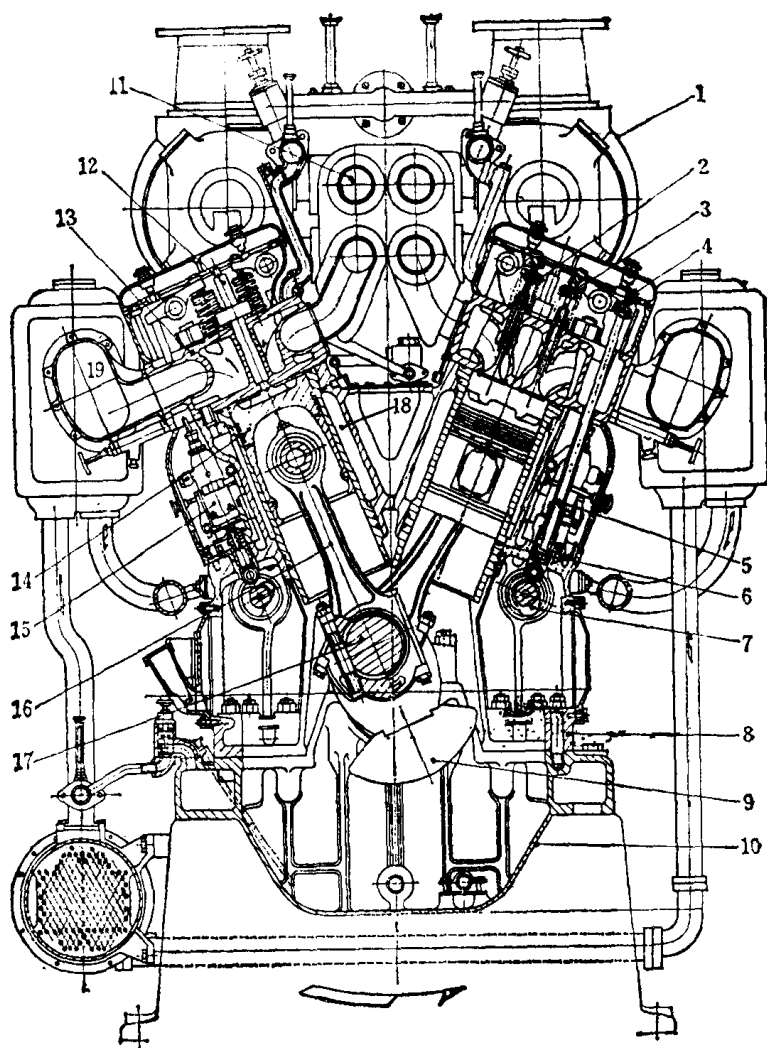


图1.1 内燃机主要部分名称(洋马一柴油机12MAL-HT型,
 $\phi 200\text{mm} \times 240\text{mm}$)

- 1—废气涡轮增压器 2—排气门 3—进气门 4—摇臂 5—推杆
 6—汽缸套 7—凸轮 8—曲轴箱 9—平衡重 10—机座 11—排
 气管 12—喷油器 13—汽缸盖 14—活塞 15—喷油泵 16—连
 杆 17—曲轴 18—水套 19—进气管

活塞的运动由连杆传给曲柄，从而使曲轴旋转。也有的用凸盘或斜盘等特殊机构把活塞的往复运动转变为回转运动。另外，最近正在研究采用旋转活塞的转子式发动机，但没有被广泛应用。

活塞由汽缸的上部移动到下部的动作或所移动的距离称为行程。在行程的开始和终了这两个位置时，连杆与活塞成一条直线，分别称为上止点和下止点。

在汽缸上盖有汽缸盖（或称汽缸头），汽缸盖上装有进气门和排气门。在进气行程中进气门打开，由活塞的吸气作用吸进燃烧所需要的空气或空气燃料混合气。在排气行程时排气门开启，从而把爆发膨胀过的废气排出。这些气门都是由固定在凸轮轴上的凸轮通过推杆进行开闭。

由于在汽缸内部总有气体重复进行燃烧，从而使汽缸和汽缸盖材料经受不住过热。此外由于部分润滑油也会被烧掉，所以为了防止高温部件的过热，需要设置水套进行冷却，或者靠散热片用空气进行冷却。

汽缸下部设有曲轴箱，其中装有曲轴。曲轴箱将发动机全部机构支承在一定的位置上。在曲轴箱的下部有底座或油池，其中贮存着机油，由机油泵把机油供向摩擦部位。根据发动机类型的不同还分别配备有为了供给燃料而设置的喷油泵、喷油器、化油器、气体混合阀，并装有点火装置、起动装置和调速器等。

在内燃机中，为了完成一个工作循环，有的需要四个活塞行程，即要求曲轴转两周；有的需要两个活塞行程，即要求曲轴转一周。前者称为四冲程发动机；后者称为二冲程发动机。

(b) 四冲程发动机的工作方式

图 1.2 所示是四冲程汽油机的工作顺序，结合该图对其工作过程介绍如下：

(i) 进气行程 如图中 a) 所示，此时排气门关闭，由于随着活塞下移在汽缸内产生低压，所以经由进气门把空气和汽油的混合气吸入汽缸。在柴油机中所吸入的只是空气。

(ii) 压缩行程 如图中 b) 所示，此时进、排气门均关闭，靠

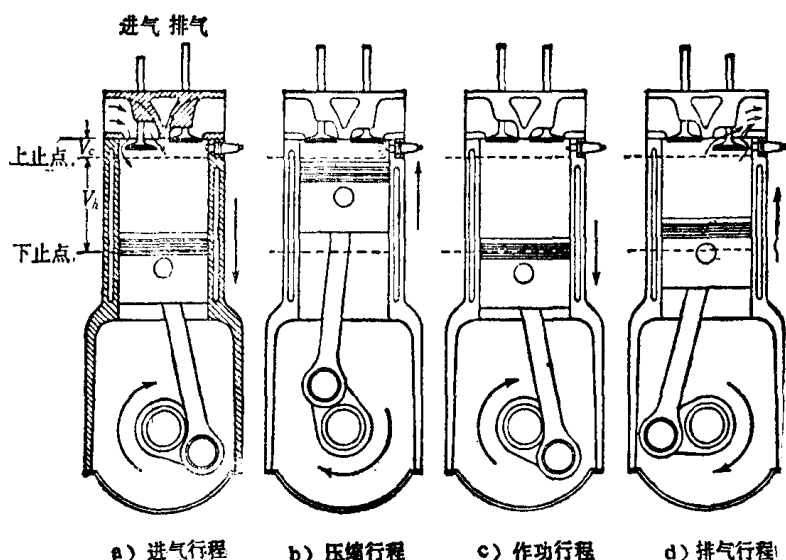


图1.2 四冲程发动机的工作顺序

活塞上行使汽缸内的气体压缩。在柴油机中，则要求把空气压缩到其温度达到燃料着火点以上。

(iii) 作功行程（膨胀行程） 当活塞到达上止点稍前时，利用火花塞将混合气点燃以使之燃烧。在柴油机中，在此时将燃料以微粒形式喷射到汽缸内，燃料接触到高温空气而自行着火燃烧。这样由燃烧所生成的高压气体将活塞向下推动而作功，如图中 c) 所示。

(iv) 排气行程 当活塞接近下止点时，使排气门打开而放出废气，汽缸内的压力随之下降。接着，如图中 d) 所示，膨胀过的气体被上行的活塞推出汽缸。这样便完成了一个循环，以后又重复这种循环，使发动机得以继续运转。在四冲程发动机中，活塞的四个行程中只有一个行程作功，其它三个行程靠飞轮惯性而继续回转。

用汽缸压力随气体体积的变化关系，即压力随活塞行程变化的关系来表示在一个循环中气体状态变化的图形叫做示功图。示功图中曲线所围成的面积表示燃气一个循环内所做的功，称为指

示功。图 1.3 表示四冲程汽油机的示功图，其指示功为 $W_i = W_1 - W_2$ 。这里的 W_2 称为泵气损失，它是为了进行进气和排气而损失掉的功。

在同一图中， $a-b$ 段曲线表示进气行程中的压力变化，由于气门和进气管等处的阻力，进气压力线比大气压力线稍微低一些。 $b-c$ 段曲线表示压缩行程中的压力变化。 $c-d$ 段曲线表示爆发。 $d-e-f$ 段曲线表示做功行程。在 e 点排气门被打开，在 $e-f$ 段进行自由排气，而 $f-a$ 段是排气行程。由于气门和排气管等的阻力，它的压力比大气压要稍高一些。

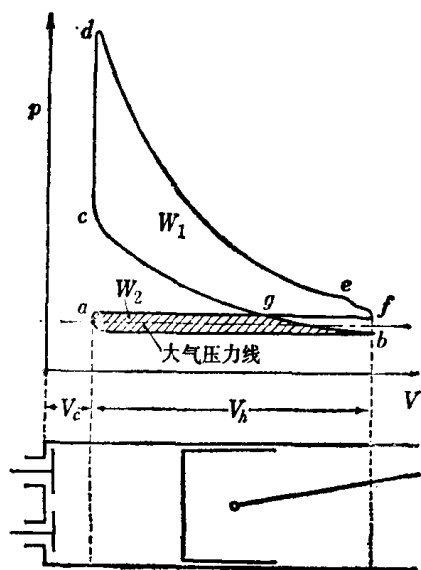


图1.3 四冲程发动机的示功图

V_h 是一个行程中活塞排除的容积，称为汽缸工作容积。活塞到达上止点时，在汽缸内仍剩余有容积 V_c ，这容积称为压缩终点汽缸容积。汽缸最大容积与最小容积（压缩终点汽缸容积）的比值称为压缩比，即

$$\text{压缩比} \quad \varepsilon = (V_h + V_c) / V_c \quad (1.1)$$

(c) 二冲程发动机的工作方式

在热力学上二冲程式与四冲程式没有什么不同，只不过是实施方法上的不同。即它没有四冲程式中那样的进、排气行程，仅只是交替重复压缩、膨胀行程，燃烧气体的排出和新鲜气体的供给是在下止点附近时借工作行程和压缩行程的一部分进行。图1.4以图表示出二冲程汽油机的工作顺序。首先如图 a) 所示，压缩行程时由于活塞的下面产生负压，混合气经由“E”被吸入曲轴箱内。接着如图 b) 所示，工作行程终了时，活塞越过排气口