

146665

TK403
311(2)

高等学校教材

内 燃 机 构 造

(第 2 版)

江苏工学院 谭正三 主编

机械工业出版社

再 版 前 言

本书于1981年出版以来，已重印8次，不仅得到全国各内燃机专业师生的欢迎与肯定，也被许多有关专业如拖拉机、农业机械类、工程机械等选作教材。广大读者在教学和工作中，在肯定本书基本满足教学要求的同时，也提出不少宝贵意见。特别是近10年来，内燃机的新技术和新结构不断涌现。原来编写中引用的一些内燃机机型，有的已经淘汰，有的即将被新机型取而代之。编者在广泛征求意见的基础上，根据“加强基础、更新内容、删繁就简、有教材特色”的总要求，着手进行本书的修订更新工作。本书的修订大纲是通过原全国内燃机专业教材编审委员会第二次会议认真讨论修改后确定的。

本书所有计量单位和符号、各专业名词术语、整机及部件的型号编制方法、燃油和润滑油的质量指标等均采用最新国家标准和部颁标准。

本书由江苏工学院内燃机教研室谭正三主编。全书共十一章，由李树德（第一章、第六章、第九章、第十一章）、谭正三（第二章、第三章、第四章、第五章）、贝石颖（第七章、第八章、第十章）执笔修订。初稿完成后，上海工程技术大学葛贤康教授进行了认真细致的审阅，提出了大量宝贵的意见，编者在此对葛贤康教授为本书所付出的辛勤劳动表示深切的感谢。

限于编者的水平，书中不足和错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者
1989年4月

目 录

第一章 内燃机的工作原理和总体构造	1	第六章 汽油机燃料供给系	146
§ 1-1 内燃机的基本名词定义及一般分类	1	§ 6-1 汽油的性能及其代用燃料	146
§ 1-2 四冲程内燃机工作原理	4	§ 6-2 汽油机燃料供给系的组成	148
§ 1-3 二冲程内燃机工作原理	11	§ 6-3 简单化油器及可燃混合气的形成	153
§ 1-4 内燃机性能指标	14	§ 6-4 可燃混合气浓度及汽油机各种工况对其浓度的要求	157
§ 1-5 多缸内燃机工作顺序	17	§ 6-5 化油器各供油装置的工作原理	159
§ 1-6 内燃机特性	18	§ 6-6 化油器的分类及产品型号	165
§ 1-7 内燃机名称和型号编制规则	20	§ 6-7 典型化油器的构造及其应用	168
§ 1-8 内燃机总体构造	24	§ 6-8 汽油喷射系统	181
第二章 曲柄连杆机构	30	第七章 润滑系	190
§ 2-1 曲柄连杆机构的运动与受力	30	§ 7-1 内燃机的润滑油	191
§ 2-2 内燃机平衡	32	§ 7-2 润滑方式和润滑系的组成	195
§ 2-3 活塞组	35	§ 7-3 润滑系主要部件的构造	201
§ 2-4 连杆组	49	§ 7-4 曲轴箱通风	210
§ 2-5 曲轴飞轮组	55	第八章 冷却系	212
第三章 机体及气缸盖	62	§ 8-1 水冷系	212
§ 3-1 机体	62	§ 8-2 风冷系	225
§ 3-2 气缸盖和气缸垫	65	§ 8-3 内燃机冷却系介绍	228
§ 3-3 风冷式内燃机的气缸体和气缸盖	69	第九章 起动系统	232
第四章 配气机构	73	§ 9-1 概述	232
§ 4-1 配气机构的功用与组成	73	§ 9-2 电起动系统	233
§ 4-2 气门组	76	§ 9-3 压缩空气起动系统	237
§ 4-3 气门传动组	82	§ 9-4 手起动装置	239
§ 4-4 配气相位与气门间隙	87	§ 9-5 起动辅助装置	240
第五章 柴油机燃料供给系	91	第十章 汽油机点火系	244
§ 5-1 柴油的主要性能与选用	91	§ 10-1 点火系的功用和要求	244
§ 5-2 柴油机燃料供给系的功用和组成	93	§ 10-2 蓄电池点火系	245
§ 5-3 柴油机中混合气的形成和燃烧	95	§ 10-3 磁电机点火系	257
§ 5-4 喷油泵	99	§ 10-4 晶体管点火装置	262
§ 5-5 供油提前角调节器	120	第十一章 电源及电气设备	268
§ 5-6 喷油器	123	§ 11-1 蓄电池	268
§ 5-7 调速器	125	§ 11-2 直流发电机	270
§ 5-8 PT燃油系统	138	§ 11-3 直流发电机调节器	272
§ 5-9 柴油机燃料供给系低压油路组件	143	§ 11-4 硅整流发电机及其调节器	276
		§ 11-5 内燃机用电气仪表	280
		主要参考文献	286

第一章 内燃机的工作原理和总体构造

§ 1-1 内燃机的基本名词定义及一般分类

一、内燃机简介

内燃机是将燃料（汽油、柴油、煤气等）在其燃烧室中燃烧所产生的热能直接转化为机械能的一种动力机械。内燃机分为旋转式和活塞式两大类；旋转式内燃机，又称为燃气轮机，主要用于航空方面；燃气直接作用在活塞上，动力由输出轴输出，称为活塞式内燃机。活塞式内燃机又分为往复活塞式和旋转活塞式两种；活塞在气缸中作往复直线运动的，称为往复活塞式内燃机；活塞在气缸中作旋转运动的，称为旋转活塞式内燃机，常见的是旋转三角活塞式内燃机。

往复活塞式内燃机广泛应用在交通运输、工程机械、农业机械、小型发电设备等方面。由于往复活塞式内燃机应用最广，因此又将往复活塞式内燃机简称为内燃机。本书仅介绍往复活塞式内燃机的工作原理和构造。根据使用的燃料不同，往复活塞式内燃机又分为柴油机、汽油机和煤气机等。

单缸柴油机总体构造如图 1-1 所示。圆柱形的活塞 8 装在圆筒形的气缸 11 中，活塞通过活塞销 9 与连杆 10 的小头相连，连杆大头套装在曲轴 12 的曲柄销上，曲轴的轴颈装在曲轴箱 13 的轴承内。活塞、活塞销、连杆及曲轴组成了曲柄连杆机构，曲柄连杆机构将活塞在气缸中的直线运动转化为旋转运动。曲轴的一端装有飞轮 14，用来帮助活塞越过运动的上止点和下止点。活塞顶与气缸 11 及气缸盖 4 组成了密闭的空间，称为气缸容积。气缸盖上设有进气管 1、进气门 7 和排气管 5、排气门 6，组成了进、排气系统，定时更换新鲜空气和排除燃烧后的废气。气缸盖上还装有进油管 2 和喷油器，定时和定量地向燃烧室内喷入柴油。

汽油机的构造与柴油机的构造基本相同，不同的是燃油供给系统和点火装置。如图 1-2 所示，

在进气管 20 上装有化油器 23，汽油在化油器中与空气混合组成可燃混合气。当进气门 21 打开，活塞 5 下行时，化油器中的可燃混合气被吸进气缸 4。当活塞上行将可燃混合气压缩到上止点时，装在气缸盖上的火花塞 1 定时点燃可燃混合气。燃烧后的废气经排气门 22、

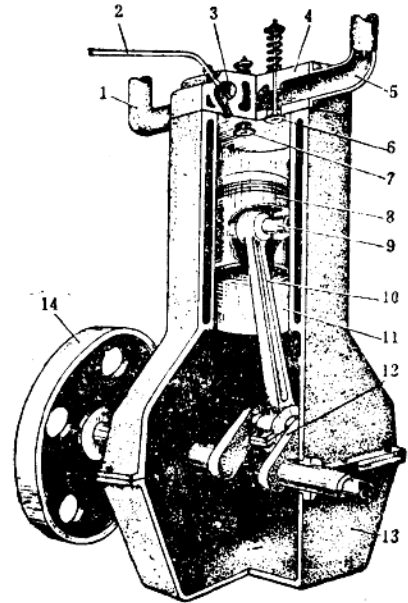


图 1-1 单缸柴油机构造简图

- 1—进气管 2—进油管 3—燃烧室 4—气缸盖
- 5—排气管 6—排气门 7—进气门 8—活塞
- 9—活塞销 10—连杆 11—气缸 12—曲轴
- 13—曲轴箱 14—飞轮

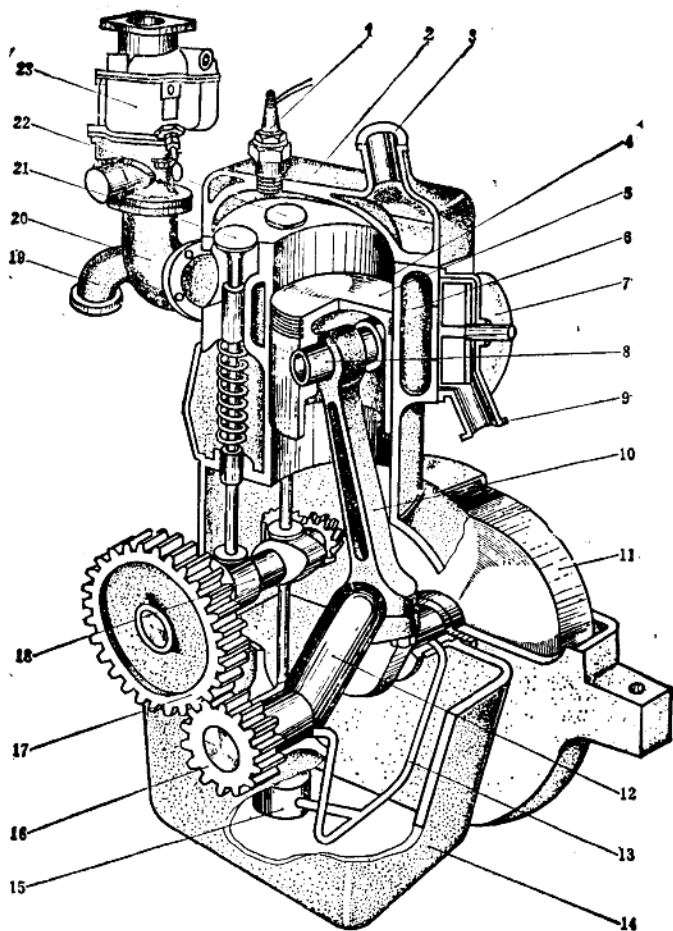


图1-2 单缸汽油机构造简图

1—火花塞 2—气缸盖 3—出水口 4—气缸 5—活塞 6—水套 7—水泵 8—活塞销 9—进水管
 10—连杆 11—飞轮 12—曲轴 13—机油管 14—曲轴箱 15—机油泵 16—曲轴正时齿轮 17—凸
 轮轴正时齿轮 18—凸轮轴 19—排气管 20—进气管 21—进气门 22—排气门 23—化油器

排气管 19 排出。进气门和排气门的开启和关闭，由曲轴正时齿轮和凸轮轴正时齿轮控制。

二、内燃机的基本名词定义

内燃机的基本名词定义如图 1-3 所示。

- (1) 上止点 活塞离曲轴旋转中心最远的位置。
- (2) 下止点 活塞离曲轴旋转中心最近的位置。
- (3) 活塞行程 上、下止点之间的距离，用符号 s 表示，单位为 mm 。
- (4) 曲柄半径 曲轴旋转中心到曲柄销中心的距离，用符号 r 表示，单位为 mm ，

则

$$s = 2r$$

(1-1)

(5) 气缸工作容积 活塞由上止点运动到下止点, 活塞顶部所扫过的容积, 用符号 V_s 表示, 单位为 L, 则

$$V_s = \frac{\pi}{4} d^2 s \times 10^{-6} \quad (1-2)$$

式中 d ——气缸直径, 单位为 mm。

s ——活塞行程, 单位为 mm。

(6) 燃烧室容积 (余隙容积) 活塞位于上止点时, 活塞顶部上方的容积, 用符号 V_c 表示。

(7) 气缸最大容积 活塞位于下止点时, 活塞顶部上方的容积, 用符号 V_i 表示, 则

$$V_i = V_s + V_c \quad (1-3)$$

(8) 内燃机排量 气缸工作容积 V_s 与内燃机气缸数 i 的乘积, 用符号 V_{si} 表示, 则

$$\begin{aligned} V_{si} &= i V_s \\ &= \frac{\pi}{4} i d^2 s \times 10^{-6} \quad (1-4) \end{aligned}$$

(9) 压缩比 气缸最大容积 V_i 与燃烧室容积 V_c 之比, 用符号 ϵ_c 表示, 则

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= \frac{V_i}{V_c} \\ &= 1 + \frac{V_s}{V_c} \quad (1-5) \end{aligned}$$

从热力学的观点来看, 压缩比越大, 内燃机的循环热效率 η_i 越高, 如以等容加热循环为例 (图 1-4), 压缩比低于 10 时, 随着压缩比的提高, 循环热效率提高得越快; 压缩比大于 10 时, 随着压缩比的提高, 循环热效率提高得较慢。目前车用汽油机采用的压缩比一般在 7~9, 高速柴油机的压缩比一般在 18~22。

三、内燃机的分类

前面已按所用燃料分成柴油机、汽油机和煤气机。此外, 还可按往复内燃机其它特征进行分类, 例如:

按冲程数可分为四冲程和二冲程内燃机。四冲程内燃机由四个冲程 (曲轴旋转两周) 完

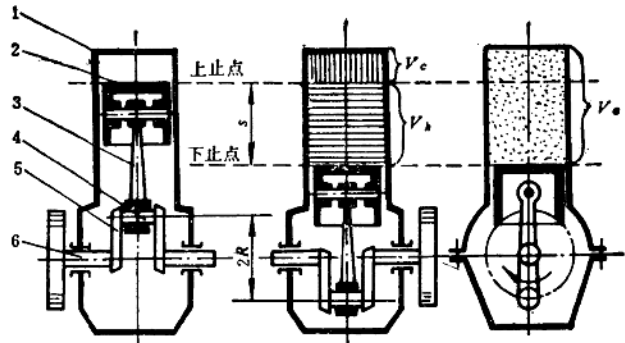


图 1-3 内燃机基本名词的定义

1—气缸 2—活塞 3—连杆 4—曲柄销 5—曲柄 6—曲轴

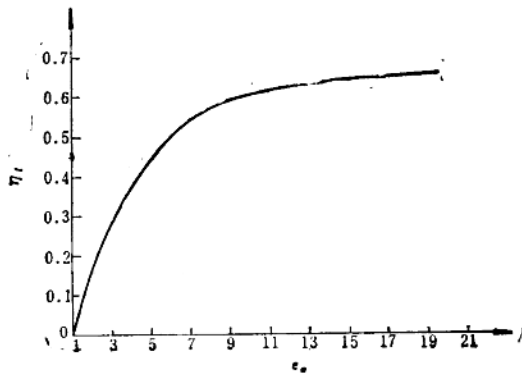


图 1-4 等容加热循环热效率与压缩比的关系

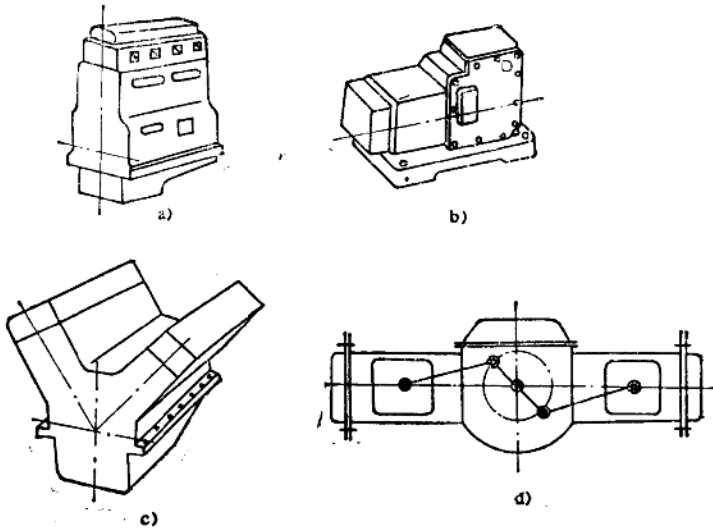


图1-5 气缸排列形式

a) 直列立式 b) 直列卧式 c) V型 d) 对置式

成一个工作循环，二冲程内燃机由两个冲程（曲轴旋转一周）完成一个工作循环。

按气缸数可分为单缸和多缸内燃机。

按气缸排列可分为直列立式（图1-5 a）、直列卧式（图1-5 b）和V型（图1-5 c）内燃机。V型布置是为了缩短内燃机的长度，将多缸内燃机分为两排，并用同一根曲轴，两排气缸中心线相交呈V型，常见的有V型8缸和V型12缸内燃机。对置式（图1-5 d）是V型的一种特例。

按冷却方式可分为水冷式和风冷式内燃机。水冷式是用水作冷却介质，风冷式是用空气作冷却介质。

按进气方式可分为增压式和非增压式内燃机。增压式内燃机在进气系统中装有增压器，非增压式内燃机则不装。

按着火方式可分为压燃式和点燃式内燃机。压燃式内燃机是利用空气被压缩后温度升高的原理，使压缩空气的温度超过燃油着火温度，燃油喷入燃烧室内即能自行着火；点燃式内燃机是利用火花塞放电火花，点燃可燃混合气。柴油机均采用压燃式，汽油机和煤气机多采用点燃式。

按用途可分为固定式和移动式内燃机。固定式内燃机的特点是稳定在一定的转速下工作，可作为发电机、水泵、脱粒机等动力；移动式内燃机的特点是工况（转速和功率）变化范围较广，可作为船舶、工程机械、机车、汽车及拖拉机等动力。

§ 1-2 四冲程内燃机工作原理

一、四冲程内燃机工作循环

四冲程内燃机工作循环如图1-6所示，由进气冲程、压缩冲程、作功冲程和排气冲程组

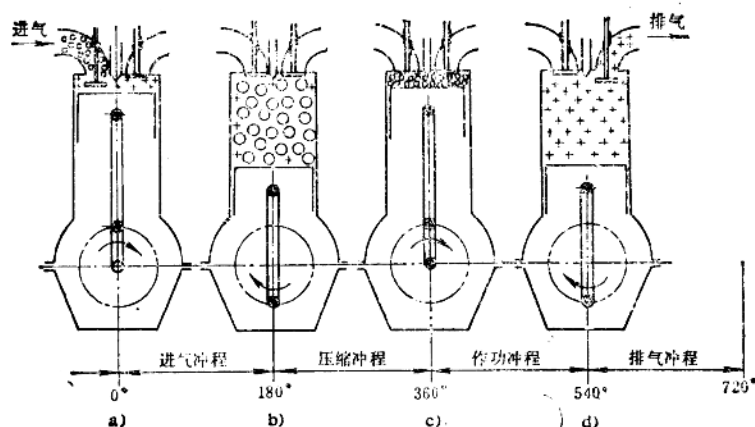


图1-6 四冲程内燃机工作循环示意图

成一个工作循环。

第一冲程 活塞由上止点移动到下止点，即曲轴的曲柄由 0° 转到 180° （活塞位于第一冲程上止点时，曲轴的曲柄位置定为 0° ）。在这个冲程中，进气门打开，新鲜空气被吸入气缸。因此，第一冲程又称为进气冲程。

第二冲程 活塞由下止点移动到上止点，即曲柄由 180° 转到 360° 。在这个冲程中，气缸内的气体被压缩，故称为压缩冲程。

第三冲程 活塞再由上止点移动到下止点，即曲柄由 360° 转到 540° 。在这个冲程中燃气膨胀做功，所以又称为工作冲程或做功冲程。

第四冲程 活塞再由下止点移动到上止点，即曲柄由 540° 转到 720° 。在这个冲程中，排气门打开，燃烧后的废气经排气门排出气缸，又称为排气冲程。

四冲程内燃机由上述四个冲程组成了一个工作循环，但是在内燃机的工作循环分析研究中，常对其工作过程进行探讨。为了便于讲解，现对四冲程柴油机和四冲程汽油机的工作过程分别进行阐述。

二、四冲程柴油机工作过程

四冲程柴油机的工作过程包括进气过程、压缩过程、燃烧过程、膨胀做功过程和排气过程（见图1-7）。

1. 进气过程

进气过程是由进气门开始开启到进气门关闭为止。为了获得较多的充气量，活塞到达上止点前进气门就开始开启。当活塞到达上止点时，进气门和进气门座之间已有一定的通道面积。活塞由上止点下行不久，气缸内的压力很快低于大气压力，形成了真空，空气在大气压力作用下经空气滤清器、进气管道、进气门充入气缸（图1-7 a）。当活塞到达下止点时，空气还具有较大的流动惯性继续向气缸内充气，为了充分利用气体流动的动量，使更多的空气充入气缸，进气门在下止点之后才关闭。

在进气门关闭之前，由于气体流动惯性的作用使气缸内的气体压力有所回升，但由于气

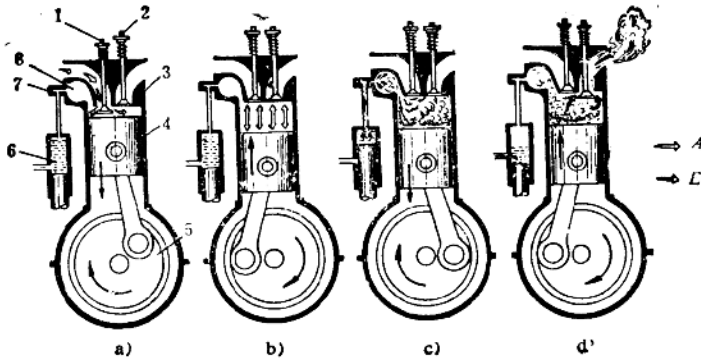


图1-7 四冲程柴油机工作过程示意图

1—进气门 2—排气门 3—气缸盖 4—活塞 5—曲轴 6—高压油泵 7—喷油器
8—燃烧室 A—进气 E—排气

体流动的节流损失，气缸内的压力仍低于外界大气压力 p_0 ，进气终点压力 p_i 约为 $(0.8 \sim 0.95)p_0$ 。充入气缸的空气与燃烧室壁及活塞顶等高温机件的接触，以及与上一循环没有排净而留在气缸内残余废气的混合，使进气温度升高。进气终点温度 T_i 可达 $300 \sim 340 \text{ K}$ 。

2. 压缩过程

压缩过程是由进气门关闭到活塞移动到上止点（称为压缩上止点）为止。进气门关闭之后，随着活塞向上移动，气缸内气体被压缩，使气体的压力和温度上升（图1-7 b）。在压缩过程初期，气缸内的气体温度低于气缸壁的温度，气缸壁向气体传热。随着压缩过程的进行，气体的压力和温度逐步升高，当气体温度高于气缸壁的温度时，气体开始向气缸壁传热。因此压缩过程存在着热交换过程。

柴油机的压缩比较高，因此压缩终了的压力和温度较高。压缩终了的压力 p_c 达 $3 \sim 5 \text{ MPa}$ ，压缩温度 T_c 为 $750 \sim 950 \text{ K}$ 。

3. 燃烧过程

在活塞到达压缩上止点前 $(10^\circ \sim 35^\circ) \text{ CA}$ （曲柄转角）时，柴油在高压 $10 \sim 20 \text{ MPa}$ 作用下，由喷油器喷入燃烧室，并与运动着的压缩气体迅速混合，组成了可燃混合气。由于此时压缩气体的温度已超过了柴油的自然温度（约 600 K ），柴油与空气中的氧在高温作用下，经过化学反应形成第一个火焰中心。火焰从着火中心向尚未燃烧的可燃混合气传播，使之迅速燃烧，燃烧室内的压力和温度急剧升高。在活塞运动到上止点之后，气缸内达到最高压力（最大爆发压力） p_e 约为 $6 \sim 9 \text{ MPa}$ ，最高温度 T_e 约为 $1800 \sim 2200 \text{ K}$ 。由于形成的混合气不太均匀，尚有少数柴油没有氧化燃烧，将在膨胀过程中继续混合燃烧，并在膨胀过程中某点结束。燃烧过程是从柴油喷入燃烧室开始，到燃料燃烧结束为止。因此，燃烧开始和压缩终了是同时进行的。

4. 膨胀作功过程

活塞到达压缩上止点时，随着曲轴的旋转，活塞下移，燃气开始膨胀作功（图1-7 c）。因此，燃烧过程和膨胀作功过程也是同时进行的。在气缸内达到最大爆发压力时，还有少数部

气机叶轮后被压缩，再经扩压器7和压气机涡壳9送到柴油机进气管。压缩气体在经扩压器和涡壳时，其流速降低，压力继续提高。

四冲程增压柴油机工作过程和非增压柴油机基本相同，不再重述。不同点在于进入气缸的气体是压缩空气，一般增压压力 $p_s = 0.16 \sim 0.2 \text{ MPa}$ ，高增压的 p_s 值还要高。因此，在整个进气过程中，气缸内的压力都高于排气管的压力 p_r ，也就是说增压器压缩空气时所消耗的功，在进气过程中又被活塞吸收了一部分。废气涡轮增压器所消耗的功来源于废气所具有的能量，并且增压本身也提高了热效率。所以，采用废气涡轮增压的柴油机不仅能提高功率，而且还能降低燃油消耗率。

四冲程增压柴油机要求具有较大的气门重叠角，用压缩空气扫清燃烧室中的废气，使留在燃烧室内的废气达到最少的程度，同时又起到冷却燃烧室和排气门的作用，使每工作循环的充气量增加。

有的增压柴油机为了获得更多的充气量，在压气机出口处装有冷却器，对压缩空气进行

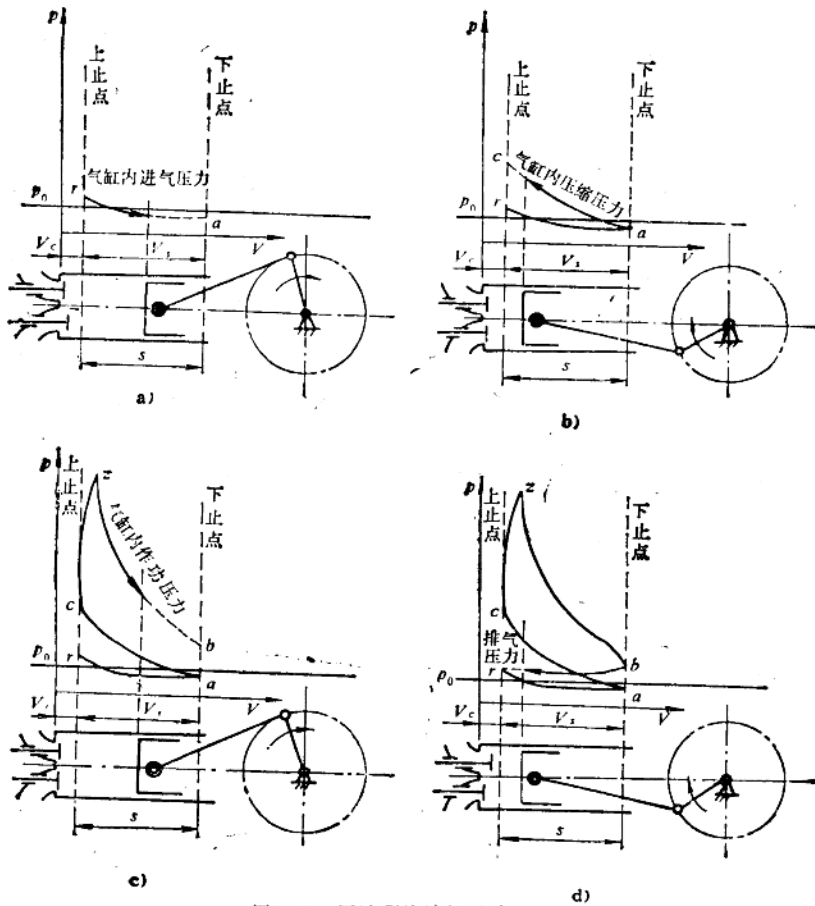


图1-10 四冲程汽油机示功图

a) 进气冲程 b) 压缩冲程 c) 膨胀冲程 d) 排气冲程

冷却，提高压缩空气的密度。

柴油机增压后，其机械负荷和热负荷有所增加，排气管和进气管的结构也要作相应改变。

五、四冲程内燃机示功图

内燃机示功图表示在每个工作循环中活塞所作的指示功。以气缸压力 P 为纵坐标，气缸容积 V 为横坐标的示功图，称为内燃机的 $P-V$ 示功图。以下介绍的均为 $P-V$ 示功图。

图 1-10 为四冲程汽油机 $P-V$ 示功图。在进气冲程中，活塞由进气上止点移向下止点（曲轴旋转 180° ）时，在 $P-V$ 示功图上绘出气缸内的压力 P 随气缸容积 V 变化的进气压力曲线 ra （图 1-10 a）。曲轴继续由 180° 旋转至 720° 时，在示功图上连续绘出压缩冲程、膨胀冲程和排气冲程的压力曲线 ac 、膨胀压力曲线 czb 和排气压力曲线 br 。

图 1-11 为四冲程柴油机 $P-V$ 示功图， ra ——进气压力曲线， $ac'c$ ——压缩压力曲线， $czz'b$ ——膨胀压力曲线， br ——排气压力曲线。

在汽油机示功图中，在 cz 段期间，燃料燃烧放出的热量，几乎是在气缸容积不变的情况下加热于气体，被称为等容加热过程。汽油机的工作循环，称为等容加热循环。在柴油机示功图中，除了等容加热过程的 cz 段（图 1-11）外，燃料燃烧所放出的热量还在 zz' 段期间，几乎是在最高爆发压力不变的情况下加热于气体，即存在着等压加热过程。因此，柴油机是混合加热过程，其工作循环称为混合加热循环。热力学中已经证明，在相同的压缩比之下，等容加热循环的热效率最高，混合加热循环其次，等压加热循环最差。柴油机虽然采用混合加热循环，但由于柴油机的压缩比远高于汽油机，因此柴油机的热效率还是高于汽油机。

在四冲程内燃机工作循环中，活塞由上止点向下止点移动时，所作的功为正功；活塞由下止点向上止点移动时，则为负功。

对四冲程非增压内燃机，示功图中的面积 $aczba$ 为正功，用符号 W_i 表示；面积 $brab$ 为负

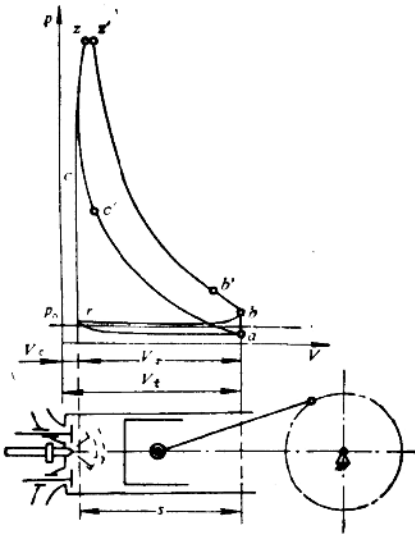


图1-11 四冲程柴油机示功图

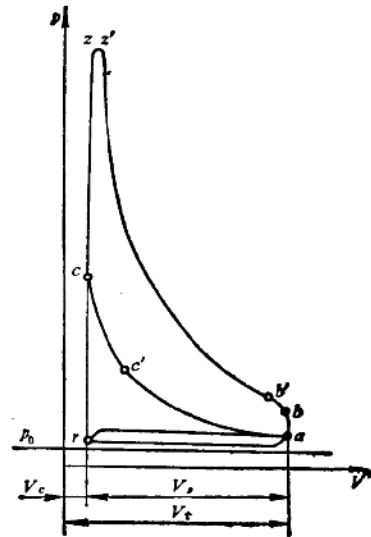


图1-12 四冲程增压柴油机示功图

功, 用符号 W_2 表示。每个工作循环活塞所作的指示功为 W_i , 其单位为 $N \cdot m$ 或 J , 则

$$W_i = W_1 - W_2 \quad (1-6)$$

对四冲程增压柴油机, 如图 1-12 四冲程增压柴油机示功图所示, 图中的面积 $aczba$ 为正功 W_1 , 面积 $brab$ 也为正功 W_2 , 则每个工作循环活塞所作的指示功 W_i 为:

$$W_i = W_1 + W_2 \quad (1-7)$$

四冲程内燃机示功图中特征点的压力和温度列入表 1-1。

表 1-1 四冲程内燃机示功图特征点的热力参数

示功图特征点		进气冲程终点 a	压缩冲程终点 c	最高压力点 #	膨胀冲程终点 b	排气冲程终点 r
柴油机	压力 P MPa	0.08~0.095	3~5	6~9	0.3~0.4	0.105~0.12
	温度 T K	300~340	750~950	1800~2200	1000~1200	700~900
汽油机	压力 P MPa	0.075~0.09	0.8~1.4	3~5	0.4~0.5	0.105~0.12
	温度 T K	370~400	600~700	2200~2700	1200~1500	800~1100
增压柴油机	压力 P MPa	0.13~0.25	5~9	9~16	0.5~0.8	0.12~0.13
	温度 T K	320~450	1200~1400	2300~2600	1300~1500	1000~1100

§ 1-3 二冲程内燃机工作原理

活塞上、下两个冲程或曲轴旋转 360° 完成一个工作循环的内燃机, 称为二冲程内燃机。活塞由下止点移到上止点为第一冲程, 活塞由上止点移到下止点为第二冲程。

一、二冲程柴油机工作原理

图 1-13 为二冲程柴油机工作原理示意图。二冲程柴油机装有扫气泵 5, 将空气进行压缩, 使压力提高到 $0.12 \sim 0.14 \text{ MPa}$ 。在气缸套的中部开有扫气孔 6, 扫气孔的开启和关闭由活塞控制。

在第一冲程中, 由活塞将扫气孔 6 关闭 (图 1-13 b) 起, 到第二冲程的排气门开始开启 (图 1-13 d) 为止, 气缸内将进行压缩过程、燃烧过程和膨胀过程, 与四冲程柴油机相应的工作过程完全相同。不同之处在于换气过程。

活塞由上止点下移到约 $2/3$ 冲程时, 排气门开始开启, 气缸内的废气经排气门开始排出, 气缸内的气体压力迅速下降。当活塞下降到将扫气孔打开时, 贮存在空气室 2 中的压缩空气开始从扫气孔进入气缸。当活塞到达下止点时, 扫气孔通道面积开启最大 (图 1-13 a), 此时大量扫气空气进入气缸, 将废气从气缸内驱出, 称为扫气过程。排气门的关闭时刻定在扫气孔关闭之前, 目的是使进气终了时, 气缸内具有较高的充气量。二冲程柴油机的进气过程和排气过程交错的时间较长, 一般将二冲程内燃机的进、排气过程通称为换气过程。

二、二冲程汽油机工作原理

图 1-14 为曲轴箱换气的二冲程汽油机工作原理示意图。在汽油机的气缸套上开有进气

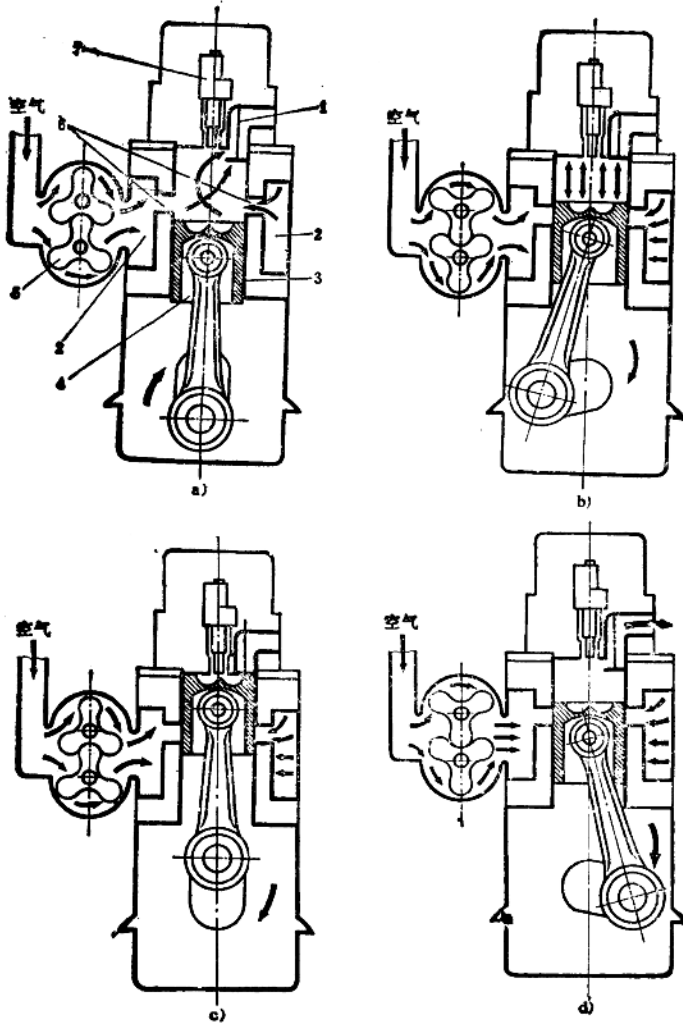


图1-13 二冲程柴油机工作原理示意图

1—排气门 2—空气室 3—气缸 4—活塞 5—扫气泵 6—扫气孔 7—喷油器

孔1、排气孔2和扫气孔3。进气孔与化油器相连通，排气孔连接排气管道，扫气孔与曲轴箱相通。

在第一冲程中，活塞上行，使曲轴箱内形成了真空（曲轴箱是密闭的），当活塞底部将进气孔打开（图1-14 b）时，化油器中的可燃混合气即从进气孔流入曲轴箱。

在第二冲程中，活塞下行，活塞底部将进气孔关闭。随着活塞的下移，曲轴箱内的可燃混合气被压缩，使之压力升高。当活塞下移到由活塞顶部将排气孔打开时，气缸内的废气从排气孔排出，缸内的压力迅速下降。活塞继续下移，活塞顶将扫气孔打开（图1-14 d），被

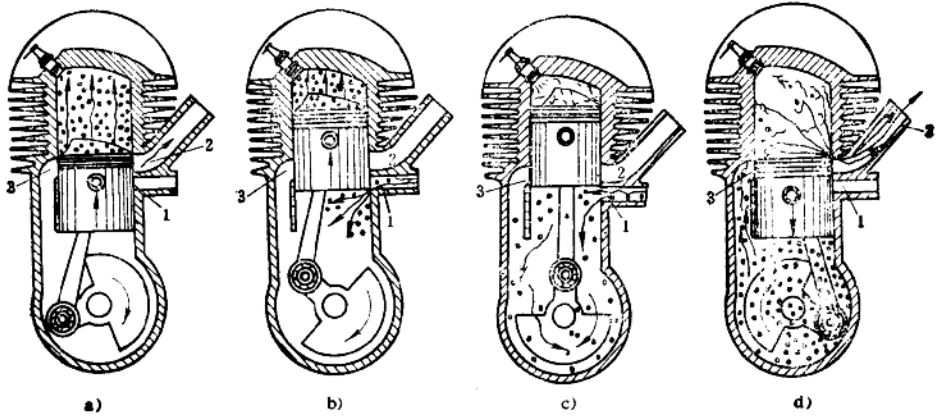


图1-14 二冲程汽油机工作原理示意图

1—进气孔 2—排气孔 3—扫气孔

压缩的可燃混合气从曲轴箱经扫气孔流入气缸。活塞移到下止点时，扫气孔全开，大量的可燃混合气充入气缸，并将留在气缸内的废气从排气孔驱出，即进行换气过程。

由于结构的关系，在第一冲程中，活塞上行，活塞顶部先将扫气孔关闭，再关闭排气孔。排气孔关闭后，二冲程汽油机开始进行压缩过程、燃烧过程和膨胀作功过程，与四冲程汽油机相应的工作过程完全相同。当活塞顶部再次将排气孔打开时，二冲程汽油机完成了一个工作循环。

为了防止可燃混合气与废气混合并一起排出气缸，必须适当选择排气孔和扫气孔的关闭时刻。此外将活塞顶部作成导流形状，使可燃混合气与废气形成隔层，尽可能使最少的可燃混合气随废气排出气缸。

三、二冲程内燃机示功图

二冲程内燃机有两种最基本的换气方案，气孔—气门直换方案（图 1-13）和气孔—气孔横流换气方案（图 1-14）。前者被广泛采用于中、低速柴油机，后者多用于小型汽油机，特别是摩托车用二冲程汽油机。

图 1-15 为横流换气的二冲程汽油机示功图。示功图中的特征点： b 点和 a 点分别为排气孔开始开启和关闭时刻； f 点和 h 点分别为扫气孔开始开启和关闭时刻； d 点为下止点； c' 点为火花塞点火时刻； z 点为气缸最高压力点。示功图中的曲线：曲线 $bf d h a$ 为换气过程的气缸压力曲线；曲线 ac 为压缩过程的气缸压力曲线；曲线 $cz b$ 为膨胀过程的气缸压力曲线。气缸容积， V_c 为几何工作容积； V'_1 为有效工作容积； V''_1 为工作容积损失。示功图的面积 $ac z b$ 为每个工作循

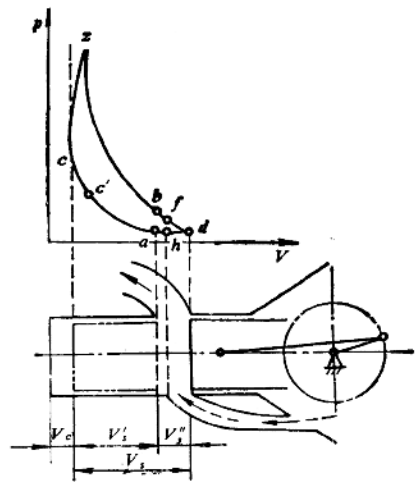


图1-15 二冲程内燃机示功图

环中，活塞在有效工作容积内所作的功 W_1 ，面积 $bfdha$ 为每个工作循环中，活塞在换气过程中所作的功 W_2 ， W_2 一般为正值。因此，二冲程内燃机活塞在每个工作循环所作的指示功 W_i 为：

$$W_i = W_1 + W_2 \quad (1-8)$$

二冲程内燃机在 360°CA 完成一个工作循环，而四冲程内燃机在 720°CA 完成一个工作循环，因此在相同的工作容积和转速情况下，二冲程内燃机的功率理应为四冲程的两倍。但是，由于二冲程内燃机工作容积损失较大〔换气过程占 $(130 \sim 150)^\circ \text{CA}$ 〕，换气品质较差（特别是曲轴箱换气的二冲程汽油机），所以对于相同工作容积和转速的二冲程内燃机，其功率实际上只为四冲程内燃机的 $1.5 \sim 1.6$ 倍。

§ 1-4 内燃机性能指标

内燃机的性能包括动力性能（功率、转矩、转速）、经济性能（燃油消耗率等）和使用性能（起动性、可靠性）等，本节主要对表征内燃机的动力性和经济性的指示指标和有效指标加以介绍。

一、内燃机的指示指标

内燃机的指示指标是指气缸内的气体对活塞作功后所获得的性能参数。

1. 指示功 W_i

指示功 W_i 表示气缸内的气体完成一个工作循环时对活塞所作的功。内燃机的示功图可用示功仪器测出，再用面积仪或计算方法求出示功图的面积 F_i ，可按下式计算出内燃机的指示功 W_i （单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ 或 J ）：

$$W_i = \frac{F_i a b}{100} \quad (1-9)$$

式中 F_i ——示功图面积，单位为 cm^2 ；

a ——示功图纵坐标比例尺，单位为 $[(\text{N} \cdot \text{cm}^{-2}) \cdot \text{cm}^{-1}]$ ；

b ——示功图横坐标比例尺，单位为 $(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1})$ 。

2. 平均指示压力 p_{ni}

平均指示压力 p_{ni} 表示在每个工作循环中，单位气缸工作容积所作的指示功 W_i ，单位为 Pa 或 $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ ，按定义可列出下式：

$$p_{ni} = 10^5 \frac{W_i}{V_i} \quad (1-10)$$

式中 W_i ——每个工作循环的指示功，单位为 $(\text{N} \cdot \text{m})$ 或 J ；

V_i ——气缸工作容积，单位为 L 。

平均指示压力的物理意义是将 p_{ni} 值视为一个不变的压力作用在活塞上，使活塞由上止点到下止点所作的功等于一个工作循环的指示功 W_i ，因此将 p_{ni} 值称为平均指示压力。

3. 指示功率 P_i

指示功率 P_i 表示单位时间内所作的指示功，单位为 kW 。

每缸每个工作循环活塞所作的指示功 W_i （单位为 J ）：

$$W_i = 10^3 p_{ni} V_i$$

式中 p_{mi} ——平均指示压力，单位为 MPa；

V_c ——气缸工作容积，单位为 L。

每缸每转所发出的指示功（单位为 kJ/r）：

$$W_{ir} = \frac{1}{10^3} W_i \frac{2}{\tau} = p_{mi} V_c \frac{2}{\tau}$$

式中 τ ——冲程数，对四冲程内燃机， $\tau = 4$ ；对二冲程内燃机， $\tau = 2$ 。

每缸每分钟所发出的指示功（单位为 kJ/min）：

$$P_{i_{min}} = p_{mi} V_c \frac{2}{\tau} n$$

式中 n ——内燃机的曲轴转速，单位为 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 。

每缸每秒钟所发出的指示功（单位为 $\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$ ）：

$$P_{is} = p_{mi} V_c \frac{2}{\tau} \frac{n}{60}$$

i 只气缸每秒钟所发出的指示功（单位为 kW）

$$P_i = p_{mi} V_c \frac{2}{\tau} \frac{n}{60} i$$

式中 i ——气缸数。

则内燃机的指示功率（单位为 kW）为：

$$P_i = \frac{p_{mi} V_c n i}{30 \tau} \quad (1-11)$$

四冲程内燃机的指示功率：

$$P_i = \frac{p_{mi} V_c n i}{120} \quad (1-12)$$

二冲程内燃机的指示功率（ V_c 改为气缸有效工作容积 V'_c ）：

$$P_i = \frac{p_{mi} V'_c n i}{60} \quad (1-13)$$

4. 指示燃油消耗率 b_i

指示燃油消耗率〔单位为 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 〕表示单位指示功的耗油量，以指示功率每千瓦小时的耗油量表示：

$$b_i = \frac{B}{P_i} \times 10^3 \quad (1-14)$$

式中 B ——每小时内燃机的耗油量，单位为 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

二、内燃机的有效指标

内燃机的有效指标是从内燃机输出轴上所获得的性能指标，指示指标与有效指标之差为机械损失。机械损失包括内燃机运动件的摩擦损失，驱动附属设备（如配气机构、喷油泵、机油泵及扫气泵等）的功率消耗，这些消耗在内燃机自身的损失功率的总和称为机械损失功率。

1. 有效功率 P_e

从内燃机输出轴上所获得的功率，称为有效功率（单位为 kW），其关系式如下：

$$P_e = P_i - P_m \quad (1-15)$$

式中 P_i ——指示功率，单位为 kW；

P_m ——机械损失功率，单位为 kW。

$$\text{则} \quad P_e = P_i - P_m \quad (1-16)$$

2. 机械效率 η_m

有效功率和指示功率之比称为机械效率。

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \quad (1-17)$$

$$\text{则} \quad P_e = \eta_m P_i \quad (1-18)$$

3. 输出转矩 T_{tq}

内燃机的有效功率，通常不是从所测的示功图上换算过来的，而是从内燃机输出轴上测得的输出转矩和转速中计算出来的。内燃机输出轴的扭转力矩称为输出转矩 T_{tq} ，简称为转矩，单位为 $N \cdot m$ 或 J ，可由专用的水力或电力测功器测出。取所测某工况下的转矩和转速，应用下列公式计算该工况下的内燃机有效功率 P_e (单位为 kW)：

$$P_e = T_{tq} \frac{2\pi n}{60} \times 10^{-3}$$

$$P_e = \frac{T_{tq} n}{9550} \quad (1-19)$$

$$\text{则} \quad T_{tq} = 9550 \frac{P_e}{n} \quad (1-20)$$

式中 n ——内燃机输出轴转速，单位为 $r \cdot \min^{-1}$ 。

4. 平均有效压力 p_{me}

在评价内燃机有效指标时，常用平均有效压力 p_{me} ，它是折合到单位气缸工作容积的参数，其物理概念与平均指示压力 p_{mi} 值相对应。平均有效压力的定义为单位气缸工作容积所发出的有效功，按式 (1-11) 表示 P_e 和 p_{mi} 关系那样列出 P_e 和 p_{me} 的关系式：

$$P_e = \frac{p_{me} V_c n i}{30 \tau} \quad (1-21)$$

$$p_{me} = \frac{30 \tau P_e}{V_c n i} \quad (1-22)$$

5. 有效燃油消耗率 b_e

单位有效功的耗油量称为有效燃油消耗率，通常以每千瓦小时所消耗的燃料重量来表示，其单位为 $g/(kW \cdot h)$

$$b_e = \frac{B}{P_e} \times 10^3 \quad (1-23)$$

式中 B ——每小时内燃机燃油耗量，单位为 $kg \cdot h^{-1}$ ；

P_e ——内燃机的有效功率，单位为 kW。

表 1-2 为标定工况下有效指标的大致范围。

三、内燃机功率的标定

在内燃机产品的铭牌上和使用说明书中，都明确规定有效使用功率和最大功率及其相应的转速。在铭牌上标注的有效使用功率和相应的转速，称为标定功率和标定转速，统称为标定工况。内燃机功率的标定是根据内燃机的特性、使用特点、寿命和可靠性要求而综合确定