

高等学校教材

柴油机

上海铁道学院 戚文星 主编
大连铁道学院 曹福南 主审

中国铁道出版社

1992年·北京

前 言

本书是热能动力机械与装置(内燃机车)专业教学用书。根据本专业教学计划,本课程(包括柴油机原理和柴油机结构)的讲授时数为80学时,但在学习本课程前,教学计划规定,应安排20学时的柴油机概论性质的认识性实践环节。

本书是根据1985年内燃机车专业教材编委会上海会议的精神,在原版《柴油机》教材的基础上进行修订的。本书大力压缩了篇幅,着重于柴油机基本原理、基本性能、基本结构三方面的内容。原理和结构的学时分配基本对半,即教材的涉及面广些,但点上不宜过深。此外,考虑到本专业的特点,本教材以四冲程、大功率中速、高增压机车柴油机为主要叙述对象,同时亦兼容小型高速柴油机。

全书共分“柴油机原理”和“柴油机结构”两篇。第一篇第一章及第二章的第一、二、三节由陈鸿奎编写;第二章的第三、五、六节由戚文星编写;第三章由金永亮编写;第四章由戚文星、毛惊杰编写。第二篇第一章及第五章由徐起发编写;第二章、第三章、第六章由姜恩沪编写;第四章由毛惊杰编写。

全书由上海铁道学院戚文星主编,大连铁道学院曹福南主审。在编写过程中,大连铁道学院张善荣、陈志显、吴昌华、王明珠、刘全林等同志曾审阅部分章节并热情指导,提出了不少修改意见,在此深表谢意。

编 者

一九八八年五月

(京)新登字063号

内 容 简 介

本书分柴油机原理和柴油机结构两篇。内容包括：柴油机的基本概念，柴油机的实际工作过程，柴油机的增压，柴油机的特性与调节，柴油机曲柄连杆机构的运动学和动力学，柴油机轴系扭转振动的基本概念，柴油机运动件、固定件、配气机构以及辅助系统的结构和作用原理，机车柴油机实例。

本书除可作为高等学校热能动力机械与装置（内燃机车）专业教学用书外，也可供柴油机设计人员及有关专业的师生、工程技术人员参考。

高等学校教材

柴 油 机

上海铁道学院 戚文星 主编

大连铁道学院 曹福南 主审

中国铁道出版社出版、发行
(北京市东单三条14号)

责任编辑 陆维真 封面设计 王毓平

北京市顺义燕华印刷厂印

开本：787×1092 毫米 1/16 印张：18.25 字数：145千

1989年11月第1版 1992年12月 第2次印刷

印数：2001—3500册

ISBN 7-113-00518-7/U·160 定价：4.75元

目 录

第一篇 柴油机原理

第一章 柴油机的基本概念.....	1
第一节 柴油机的分类.....	1
第二节 柴油机工作的基本概念.....	6
第三节 柴油机的基本组成.....	11
第二章 柴油机的实际工作过程.....	13
第一节 柴油机实际循环与近似热计算.....	13
第二节 柴油机的供油和雾化.....	37
第三节 柴油机混合气的形成及燃烧室.....	54
第四节 柴油机的燃烧过程.....	58
第五节 柴油机的机械损失及热平衡.....	73
第三章 柴油机增压.....	79
第一节 柴油机增压技术的发展.....	79
第二节 废气涡轮增压器的主要结构.....	82
第三节 离心式压气机的工作原理.....	84
第四节 废气涡轮的基本工作原理.....	95
第五节 柴油机的增压系统.....	100
第六节 废气涡轮增压器和柴油机的匹配.....	106
第七节 增压柴油机的特点.....	110
第四章 柴油机的特性和调节.....	114
第一节 柴油机的特性.....	114
第二节 柴油机的调节.....	120

第二篇 柴油机结构

第一章 柴油机动力学.....	143
第一节 曲柄连杆机构的运动学.....	143
第二节 曲柄连杆机构的受力分析.....	148
第三节 曲轴轴颈和轴承的载荷.....	158
第四节 主副连杆机构的特点.....	164
第五节 柴油机平衡分析及平衡法.....	166
第六节 柴油机轴系扭转振动的基本概念.....	180
第二章 柴油机的运动件.....	193

第一节 曲轴组	193
第二节 连杆组	203
第三节 活塞组	212
第三章 柴油机的固定件	223
第一节 气缸盖	223
第二节 气缸套	231
第三节 机体	236
第四章 配气机构	241
第一节 配气机构的布置	241
第二节 凸轮型线与配气机构运动学	247
第三节 配气机构的主要零部件	255
第五章 柴油机的辅助系统	265
第一节 润滑系统	265
第二节 冷却系统	270
第六章 机车柴油机实例	273

第一篇 柴油机原理

第一章 柴油机的基本概念

第一节 柴油机的分类

柴油机因其热效率高，用途十分广泛。有汽车用柴油机，拖拉机用柴油机，还有船用、内燃机车用和工程机械用柴油机等等，功率大小不一，型式繁多。但如按其工作的基本特征来分，可有以下几种类型。

一、按工作循环特点分

构成柴油机工作的基本单元是曲柄连杆机构（图 1—1—1）。曲柄每转一转，活塞就沿气缸中心线上下往返一次。活塞在气缸中运动的最上端位置也就是活塞离曲轴中心线最远的位置，通常称为上止点。活塞在气缸中运动的最下端位置，即活塞离曲轴中心线最近的位置称为下止点。

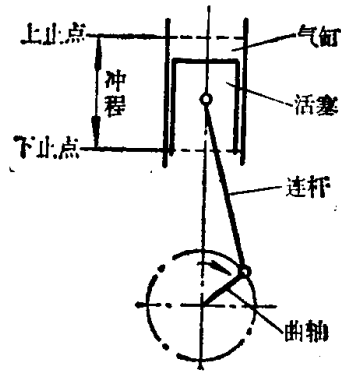


图 1—1—1 柴油机曲柄连杆机构

活塞从上止点到下止点间的直线距离，称作冲程或行程。

柴油机的工作循环由进气、压缩、燃烧膨胀和排气四个工作过程组成。

因此，柴油机每四个冲程（即曲轴回转二转）完成一个工作循环的称为四冲程柴油机。柴油机每二个冲程（即曲轴回转一转）完成一个工作循环的称为二冲程柴油机。

四冲程柴油机和二冲程柴油机的基本工作原理分述于下：

（一）四冲程柴油机的工作循环

图 1—1—2 表示了四冲程柴油机四个冲程进行的情况和活塞等零件的有关动作示意图。

1. 进气过程

四冲程柴油机的进气过程，从活塞在上止点时开始。当活塞从上止点向下止点运动时，由凸轮机构控制的进气门就被打开。由于活塞下行而使缸内造成部分真空，这时，外界的新鲜空气就经过气缸盖上的进气门进入气缸（图 1—1—2 a），直到活塞运动到下止点时，气缸内已充满了空气，进气门才被关闭。至此，进气过程就告结束。这一冲程就称为进气冲程。

2. 压缩过程

进气过程结束时，活塞处于下止点位置。曲轴继续旋转，活塞便转向上行。这时，由于进气门已关闭而排气门尚未开启，因而气缸内的空气因活塞上移而逐渐被压缩（图 1—1—2 b）。当活塞运动到上止点位置时，气缸内空气的温度和压力都已达到相当高的水平，这

时，压缩过程也就结束。这一冲程称为压缩冲程。

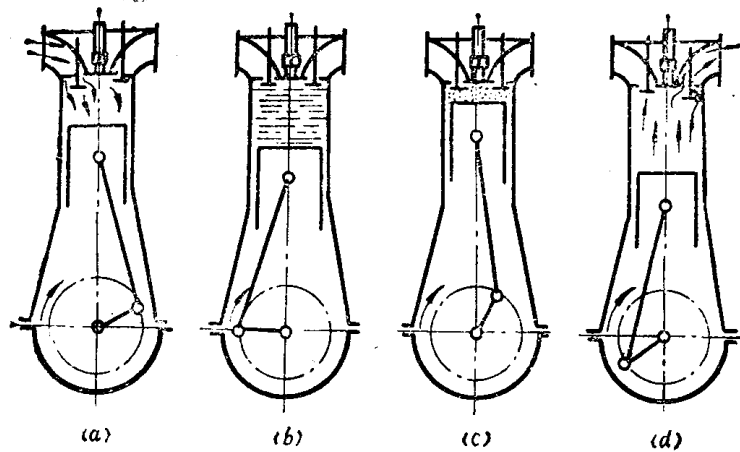


图 1—1—2 四冲程柴油机的工作循环

3. 燃烧膨胀过程

当压缩过程结束后，具有很高压力的燃油（柴油）从喷油器喷入气缸（图 1—1—2 c），与气缸内高温高压的空气相遇而立即燃烧。燃烧后气体的压力和温度急剧上升，气体膨胀推动活塞下行做功。这一过程直至活塞再回到下止点时结束。这个冲程称为膨胀冲程，也叫工作冲程。

4. 排气过程

在膨胀过程结束活塞到达下止点时，由凸轮机构控制的排气门即被打开，这样，活塞再由下止点向上止点运动时，气缸内的废气就被活塞推出气缸（图 1—1—2 d）。活塞到达上止点时，排气门关闭，排气过程也就结束。这个冲程称为排气冲程。

由上可知，四冲程柴油机是活塞每四个冲程（即相当于曲轴转两转，共 720°CA ）完成一个工作循环的。在这四个冲程中，只有膨胀冲程是产生动力的，其余三个冲程都是为膨胀冲程做准备的。

（二）二冲程柴油机的工作循环

在讨论二冲程柴油机工作循环之前，应先对二冲程柴油机的结构特点有一概括了解。

图 1—1—3 是一种结构比较简单的称作横流换气的二冲程柴油机示意图。二冲程柴油机与四冲程柴油机相比，在结构上最显著的区别就是进排气机构。由图 1—1—3 可知，这种二冲程柴油机的气缸盖上没有进气门和排气门，而在气缸的下部开设了扫气口（就是进气口）和排气口。排气口做得比扫气口高些。扫气口和排气口的启闭都由活塞的运动来控制。此外，在二冲程柴油机扫气口的前面，还专门有一个由曲轴（通过齿轮）驱动的扫气泵，以产生有一定压力的新鲜空气，用来将废气清扫出气缸。

图 1—1—4 为二冲程柴油机循环的工作原理示意图。为讨论方便，可从燃烧膨胀过程开始。

1. 燃烧膨胀过程

图 1—1—4 a 表示活塞正离开上止点而向下运动，工质开始燃烧膨胀，同时推动活塞做功。活塞下行到当其顶面开始把排气口打开时（图上点“1”），膨胀过程就告结束。这是与四冲程柴油机的不同之处。

2. 排气过程和进气过程

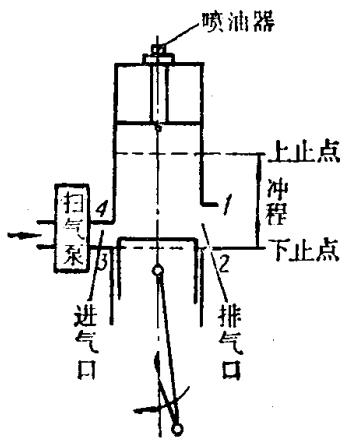


图 1-1-3 二冲程柴油机

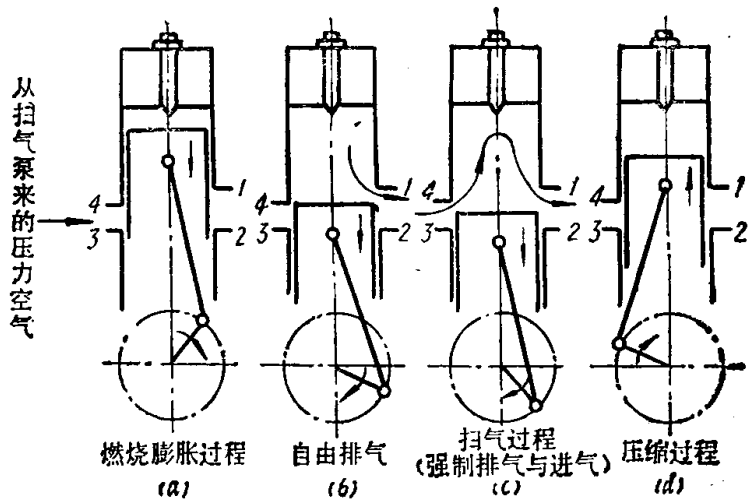


图 1-1-4 二冲程柴油机的工作循环

当活塞到达“1”后，紧接着就进行排气。因为这时气缸内废气仍有较高压力，气缸与排气管之间具有相当的压差，故气缸里的废气能以很高的速度流经排气口进入排气管。这种利用废气的压差自行排气的现象称为自由排气。当活塞继续向下运动到“4”点将扫气孔打开，这时气缸压力已经下降到低于扫气泵的扫气压力，因而扫气空气立即进入气缸对自由排气结束时尚残留在气缸里的废气进行强制排气（图 1-1-4 c）。随着活塞的继续下移，扫气口和排气口开始不断增大，便有更多的扫气空气进入气缸清扫废气。这种清扫作用一直要延续到活塞从下止点返向上行将扫气口关闭（“4”点）为止。在后一阶段中，随着被扫除的废气逐渐减少，而充入气缸的新鲜空气则逐渐增多，故转而成为二冲程柴油机的进气过程。由此可见，在二冲程柴油机中，排气过程和进气过程，二者在时间上有相当一部分是重叠进行的，且没有明确的界限可以划分。

这里还可看到，当进气过程结束，活塞处在“4”点时，排气口仍然开启着。因此，当活塞继续上行时，原先已进入气缸的空气，还会有一部分从排气口漏掉，直到排气口完全被关闭为止（“1”）。这是该种型式的二冲程柴油机在结构上的一个缺陷。

活塞从“1”点开始把排气口打开，直到从下止点再度返回把排气口关闭而回到“1”点为止，其间完成了充量的更换任务，这个过程总称为换气过程。

由此可见，二冲程柴油机换气过程只经历了相当于活塞移动两个排气口高度的距离，加起来还不到一个冲程，时间很短。它比四冲程柴油机换气过程（经历了两个冲程）要少得多。

3. 压缩过程

从排气口全部关闭起，缸内空气的压缩过程就开始了。（见图中 d）。压缩过程当活塞移动到上止点时结束。在压缩过程中，活塞移动的距离要比四冲程少去相当于一个排气口的高度。

由上可知，二冲程柴油机是活塞移动两个冲程（相当于曲轴转一转，即 360°CA ）完成一个工作循环的。

四冲程柴油机和二冲程柴油机各有特点。因而也各有其适用的场合。在我国，二冲程柴油机目前主要应用在船舶运输方面，在铁路运输中，除东风₁、东风₂和东风₃型内燃机车外，其余机车都使用四冲程柴油机。

二、按燃烧室结构型式分

活塞处于压缩冲程上止点时的气缸容积就是压缩容积。也就是燃烧室容积。因此，燃烧室的容积是由活塞顶面、气缸盖底面和气缸壁面所组成的空间。

根据柴油机的燃烧室型式，现有柴油机基本上可以分为两大类：直喷式燃烧室柴油机和分隔式燃烧室柴油机。

(一) 直接喷射式燃烧室

直接喷射式燃烧室的特点是：整个燃烧室是一个统一的空间，活塞顶上开有深浅不同、形状各异的凹坑。其中凹坑浅的、开口大的叫做开式燃烧室（图 1—1—5 a）；凹坑深的、开口小的叫做半分开式燃烧室（图 1—1—5 b）。

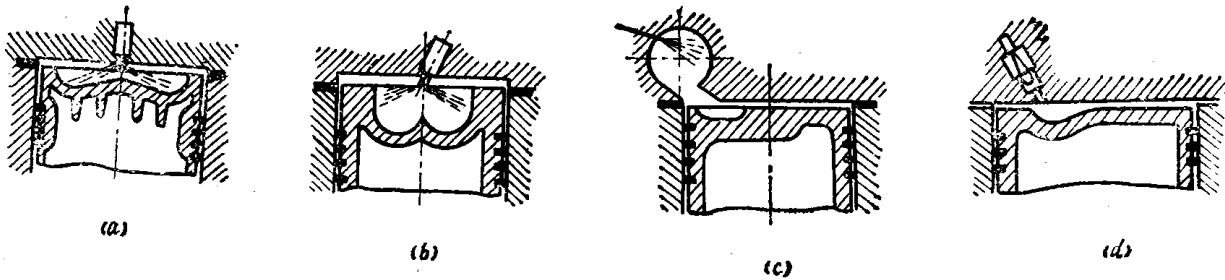


图 1—1—5 各种燃烧室简图

在这种燃烧室中，因从喷油器喷出的燃油直接喷到这个统一的燃烧室，故名直接喷射式燃烧室。

(二) 分隔式燃烧室

整个燃烧室分隔为两个空间，主燃烧室设于活塞顶上，副燃烧室设在气缸盖内，其间用通道相连。这类燃烧室又有涡流室式燃烧室（图 1—1—5 c）和预燃室式燃烧室（图 1—1—5 d）两种，从喷油器喷出的燃油都喷到副燃烧室中。燃烧先在副室中开始，然后延及主室。

三、按柴油机进气方式分

有自然吸气式柴油机和增压柴油机两种。

(一) 自然吸气式柴油机

自然吸气式柴油机，气缸的进气是利用活塞本身的运动所造成的真空，将大气空气吸入而充满气缸的，即如图 1—1—2 所示。自然吸气式柴油机又称非增压柴油机。

(二) 增压柴油机

在增压柴油机中，进入气缸的空气是被专设的增压器将压力提高后泵入柴油机的。其目的是增加每循环进入气缸的空气量和相应的喷油量，以提高柴油机功率。

最常见的增压器是废气涡轮增压器。装有这种增压器的柴油机又称废气涡轮增压柴油机，其基本工作原理如下（图 1—1—6）。图的右面是废气涡轮增压器，它由废气涡轮 1 和离心式压气机 2 组成。离心式压气机的工作轮与废气涡轮同轴并由废气涡轮带动旋转。当压气机工作轮高速旋转时，大气空气就沿轴向进入工作轮，在离心力作用下，压力空气沿压

气机的工作轮径向流出而进入柴油机进气管道。这样，柴油机在运转时，具有一定压力的增压空气就在进气过程中进入气缸。增压柴油机的压缩过程和工作过程的进行方式与非增压柴油机无异，但在排气过程时，被活塞推出的废气不是直接排入大气，而是沿排气管导入废气涡轮，使废气在涡轮中膨胀做功带动同轴的压气机工作轮一起转动。由此可见，装有废气涡轮增压器的柴油机不仅能够提高柴油机功率，同时还由于利用了废气能量而提高了热效率，所以这是一种用得极为普遍的增压方式。

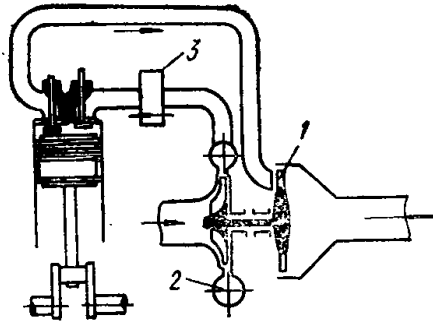


图 1-1-6 废气涡轮增压柴油机
1——废气涡轮；2——压气机；3——中间冷却器。

应当指出，某些柴油机由于增压压力较高，增压空气的温度也有相应提高，这样，增压空气密度的增长率就随之下降，因此为了提高增压效果，往往在增压器和柴油机进气管之间装有增压空气中间冷却器(简称中冷器，图 1-1-6 中 3)，目的是提高增压空气的密度。

根据增压程度不同，柴油机有低增压，中增压和高增压之分。增压器出口压力 p_K 与大气压力 p_0 之比称为增压器的增压比 π_K 。一般：

低增压柴油机 增压比 $\pi_K < 1.8$

中增压柴油机 增压比 $\pi_K = 1.8 \sim 2.5$

高增压柴油机 增压比 $\pi_K > 2.5$

一般低增压柴油机不装中冷器，而中、高增压柴油机都带有中冷器。

四、按柴油机转速和活塞平均速度分

根据柴油机曲轴转速的不同，通常可将柴油机分为低速、中速和高速三种类型。但具体界限又与用途有关。一般情况下，柴油机转速小于 750r/min 的称为低速柴油机；转速在 750~1350r/min 之间的，称为中速柴油机；转速大于 1350r/min 的称为高速柴油机。机车柴油机一般都采用中、高速柴油机。

考虑到柴油机摩擦损失与活塞平均速度 V_m 有关，因此常常又根据活塞平均速度对柴油机进行分类：

低速柴油机 $V_m < 6\text{m/s}$

中速柴油机 $6\text{m/s} < V_m < 11\text{m/s}$

高速柴油机 $V_m > 11\text{m/s}$

柴油机的活塞平均速度可由下式计算：

$$V_m = \frac{sn}{30} \text{ (m/s)}$$

式中 n ——柴油机转速，r/min；

s ——活塞的冲程，m。

五、按气缸中心线位置分

直立式柴油机 气缸中心线垂直布置

V型柴油机 气缸中心线排列为“V”字型

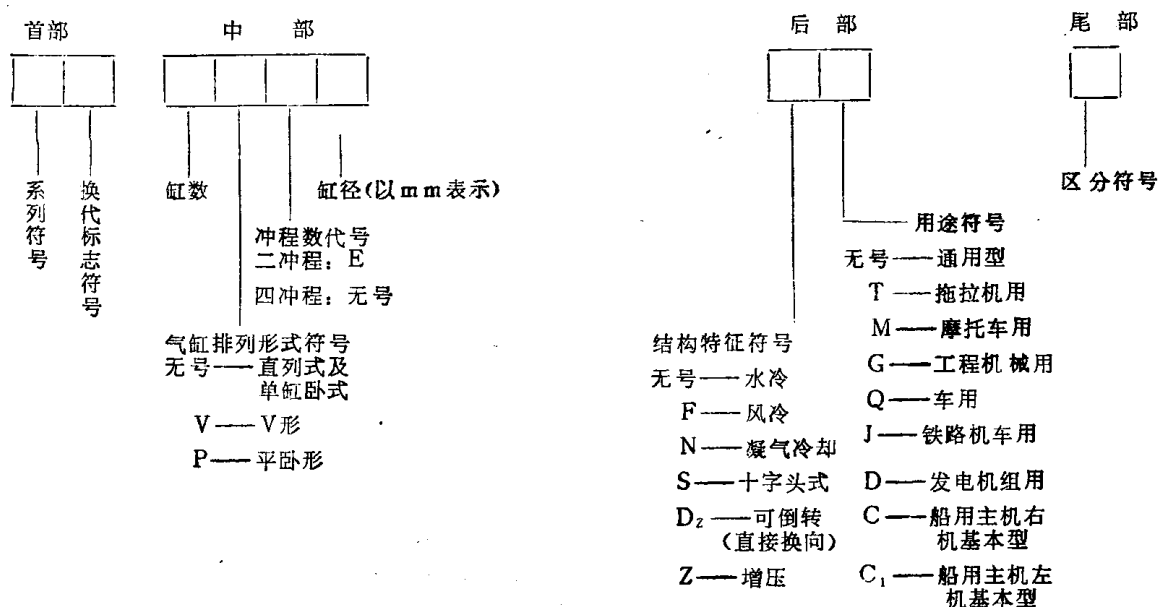
其它类型柴油机 气缸中心线排列呈水平(卧式)、H型、 Δ 型、X型及星型柴油机

一般常见的柴油机为直立式和V型柴油机。

根据国家标准GB·725-82，柴油机型号表示规定如下表1-1-1。

柴油机型号表示规定

表 1-1-1



例如，16V240ZJB为16缸V型四冲程，缸径为240mm水冷增压机车用柴油机，变形结构B型。

12V135ZG为12缸V型四冲程缸径135mm，水冷增压工程机械用柴油机。

第二节 柴油机工作的基本概念

本节以非增压四冲程柴油机作为讨论对象。

一、柴油机工作循环的基本参数

如果把进气过程和排气过程的能量损失作为柴油机的一种机械损失来考虑，则柴油机在一个工作循环内活塞所做的净功即循环功可用 $p-V$ 图图形面积大小 (图 1-1-7) 来表示。

因示功图都用示功装置测示，所以按图形所得的循环功称为指示功 W_i 。

设气缸工作容积是 V_h ，相当于指示功 W_i 的图形面积可以用同样大小的矩形面积 $p_i V_h$ 来表示，即 $W_i = p_i V_h$ 。因 V_h 是固定值，所以 W_i 可以用一个想象的在一个冲程中不变的平均指示压力 p_i 来表示。即：

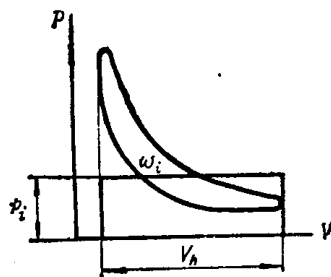


图 1-1-7 示功图和平均指示压力

$$p_i = \frac{W_i}{V_h}$$

根据热力学基本知识，我们有 $W_i = Q_i \eta_i$ 的关系，式中 Q_i 为循环加热量， η_i 为指示热效率。因此可有下式：

$$p_i = \frac{Q_i \eta_i}{V_h} \quad (1-1-1)$$

从上式可以看出, 当指示热效率 η_i 不变时, 反映循环指示功 W_i 大小的 P_i 值与循环加热量 Q_i 成正比。加热量 Q_i 越多, 则循环指示功 W_i 越大, p_i 越高。

对一台实际柴油机来说, 所谓每循环加热量 Q_i 就是每循环中从喷油器喷入气缸的柴油燃烧放热量。我们又从化学常识可知, 一定数量的燃料要完全燃烧总是需要配以一定数量的空气。如果空气量不足, 燃料将不能完全燃烧, 也就不能释放出应有的燃烧热量。在以后的讨论中将会知道, 完全燃烧1kg柴油, 在理论上大约需要14.3kg的空气量。也就是说, 如按质量计, 柴油与空气之比应为1:14.3。但考虑到柴油在实际柴油机中燃烧的特点, 即喷入的柴油不可能在极短时间内十分均匀地与压缩终了的空气得到充分混合, 因而, 在柴油机的设计中, 总是要保证提供出比理论上为多的空气数量。也就是说, 保证燃料完全燃烧的柴油空气比, 实际上应为1:14.3 α , α 是一个大于1的系数, 叫做过量空气系数。不同的柴油机具有不同的 α 值, 它主要取决于结构设计上能够达到的柴油和空气混合的均匀程度。显然, 使燃料和空气混合愈均匀的柴油机, 它们所具有的 α 值就愈小。

那么对于一台具体的柴油机来说, 它的每循环加热量 Q_i 究竟是多大呢?

因对具体的柴油机来说, 气缸工作容积 V_h 已为定值, 因此, 每循环在进气过程中能够进入气缸的空气量理论上应是 $V_h \rho_0$ (ρ_0 为大气空气的密度)。不难理解, 实际上由于气流流经柴油机进气系统时遇有阻力, 故进入气缸时的空气压力总是要比大气压力低些, 所以实际进入气缸的空气量就要比理论上的少, 即 $\eta_v V_h \rho_0$ ($\eta_v < 1$, 叫做充气效率, 也称充气系数)。因此, 每循环进入气缸的空气量

$$g_a = \eta_v V_h \rho_0 = \text{常数} \times \eta_v \quad (1-1-2)$$

既然循环空气量已经确定, 那末对于一定结构的柴油机来说, 要求柴油能够获得完全燃烧的每循环喷油量也就必须按照1:14.3 α 的比例关系加以限定, 即

每循环允许喷入的燃料量

$$g_b = \frac{\eta_v V_h \rho_0}{14.3\alpha} = \text{常数} \times \frac{\eta_v}{\alpha} \quad (1-1-3)$$

设每kg柴油的热值为 H_u kJ/kg ($H_u = 42697$ kJ/kg), 即可得到每循环的加热量为:

$$Q_i = \frac{\eta_v V_h \rho_0}{14.3\alpha} \times H_u = \text{常数} \times \frac{\eta_v}{\alpha} \quad (1-1-4)$$

如将上式代入(1-1-1)式便得

$$p_i = \frac{\eta_v V_h \rho_0}{14.3\alpha} \times H_u \frac{\eta_i}{V_h} = \text{常数} \times \frac{\eta_v}{\alpha} \times \eta_i \quad (1-1-5)$$

上式是用基本循环参数 η_v 、 α 、 η_i 表示的代表循环指示功大小的最后形式。

比较(1-1-5)式和(1-1-1)式可知, 当指示热效率 η_i 一定时, 代表实际柴油机循环指示功的 p_i 值与表征加热量的 $\frac{\eta_v}{\alpha}$ 之间具有正比关系。在热力学理想循环中, 加热量 Q_i 完全是抽象的, 臆想的, 但在柴油机的实际循环中, $\frac{\eta_v}{\alpha}$ 则是具体的、实际的。 η_v 反映了空气量的多少, $\frac{\eta_v}{\alpha}$ 则表示这么多的空气量能够满足完全燃烧的燃料量。 α 是一个保证完全燃烧的空气和柴油的最小比例数。前已述及, 它同柴油与空气的混合质量有关, 取决于柴油机的结构设计因素。显而易见, 如果一台柴油机的 η_v 值越大, 而允许采用的 α 值又越小, 则这台柴油机就能在相同的 V_h 下, 在保证完全燃烧的前提下, 喷入的柴油量就越多。也就是说循

环加热量越多。 p_i 也就越高。不言而喻，这台柴油机的设计制造水平也就越先进。

在这里还必须特别强调的是在实际柴油机中，影响 p_i 大小的三个参数 η_v 、 α 、 η_i 之间的关系，它们不是彼此孤立的，而是互相联系的。

譬如说， p_i 与代表循环喷油量的 $\frac{\eta_v}{\alpha}$ 值成比例，这是在 η_i 值保持一定条件下成立的，如果喷油量过多，而使实际 α 值低于某一最小容许值的话，则就因燃料不能完全燃烧而使 η_i 值下降，这时 p_i 与 $\frac{\eta_v}{\alpha}$ 直接成正比的关系就不再存在；其次， $\frac{\eta_v}{\alpha}$ 只能反映由气缸空气量所限定的燃料数量，而不能表明这些燃料进入气缸时雾化质量，以及进入气缸后同缸内空气的混合质量，或者说这些燃料在气缸里最终的燃烧完善程度。而这些条件在实际柴油机中正是达到一定 η_i 值的前提。

这里所谓燃烧的完善程度实际上包含了燃料燃烧的完全程度和燃烧适时性两个概念。燃烧适时性就是希望燃料的燃烧过程应在活塞运动到上止点附近时进行。从热力学观点看，在此时，工质正处于压缩高温状态，燃料燃烧放热将具有较高的热量利用效率。在实际柴油机中要做到这一点，首先必须在结构设计上使喷油器的喷油过程和活塞的运动在时间上得到密切的配合。也就是说要保证燃料在规定的时间内以一定的规律喷入气缸，而且还必须考虑到燃料的实际燃烧过程与喷油过程在时间上的不一致性。因此，对燃烧的适时性要求最终就是通过取得合适的放热规律来体现的。综上所述，可以得到这样一个结论，就是为使燃料能够燃烧得完善，维持循环的应有指示热效率 η_i ，务必使燃料的雾化质量、喷油规律、燃烧室设计及缸内气体涡流运动的组织等诸方面都得到较好的配合和协调。任何一方面达不到要求都会影响循环指示热效率 η_i 值的大小。

通过上面对 η_v 、 α 、 η_i 三个基本参数的讨论，我们已经可以看到当前提高柴油机动力性能指标（通过 p_i 反映）和经济性能指标（通过 η_i 反映）的基本途径。柴油机指标的先进与否都是通过这些参数得到反映的。

（一）提高充气系数 η_v 。

应提高进气系统的流体动力性能，减少流动阻力，改进配气机构和凸轮廓线设计，使在相同 V_h 和大气密度 ρ_0 条件下，充入更多的空气，以提高 p_i 。

（二）采用废气涡轮增压技术，提高空气密度 ρ_K

通过提高 η_v 来增加循环空气量毕竟是有限度的。采用废气涡轮增压可以提高进入气缸中的空气密度 ρ_K ，因为循环空气量 $g_a = \eta_v V_h \rho_K$ ，随着增压程度的不同，可以获得不同的 ρ_K 值，从而可使空气量得到成倍的增长。这样，在保持相同的 α 值下可以成倍地增加循环喷油量，最后使 p_i 获得成倍的提高。所以该技术在柴油机上已获得广泛应用，并将有更进一步的发展。

（三）合理组织燃烧过程，提高 η_i 值，最大限度地利用气缸内的空气（即允许喷入尽可能多的燃料以最小的 α 值工作）——即采用新型燃烧系统

这就要求进一步改善燃料和空气的混合质量，提高燃烧完善程度。这些都与燃烧室结构、供油系统（喷油器和喷油泵）和进气系统的设计有关。此外，目前国内外由于对环境保护的要求，所以对柴油机废气中的有害成分必须严格控制在规定限度内，这就必须对柴油机的排放问题给予进一步的研究。

二、柴油机的性能特点及其工作范围

柴油机在单位时间内所作的指示功称为指示功率。设柴油机的气缸数目为 i ，转速为 n ，

气缸容积为 V_h ，平均指示压力为 p_i ，则对于四冲程柴油机不难写出

$$N_i = \frac{p_i V_h i n}{120} \times 10^{-3} (\text{kW}) \quad (1-1-6)$$

式中所使用的单位为： $V_h(\text{m}^3)$ ； $p_i(\text{Pa})$ ； $n(\text{r}/\text{min})$ 。

对既定结构的柴油机， V_h 和 i 是定值，因此上式可以写成

$$N_i = \text{常数} \times p_i \times n \quad (1-1-7)$$

N_i 是根据气缸的指示功计算出来的气缸功率，但从柴油机的使用角度看，我们需要的是从曲轴输出的有用功率或通称有效功率 N_e 。显然 N_i 是大于 N_e 的，因为功率在从活塞到曲轴的传递过程中存在着机械损失。机械损失功率包括：柴油机内部各运动零件间（如活塞同气缸壁面、曲轴同主轴承等）的摩擦损失，柴油机为维持独立运转所必需消耗的驱动内部机构（如配气机构等）和附属设备（如冷却水泵、滑油泵等）的功率，以及消耗于进、排气过程的泵气损失等等。如果用一个机械效率 η_m 来概括这些机械损失，那末曲轴上的有效功率可以表达为 $N_e = N_i \eta_m$ 。

据此，对 N_e 同样可以写成

$$N_e = \text{常数} \times p_e \times n \times \eta_m$$

令 $p_i \eta_m = p_e$ ， p_e 叫做平均有效压力。它同 p_i 一样也可以理解为是一个想象的在一个冲程中不变的平均压力，它同 p_i 的关系如图（1-1-8）表示。

最后，我们也可将 N_e 写成如同式（1-1-6）、（1-1-7）一样形式

$$N_e = \frac{p_e V_h i n}{120} \times 10^{-3} (\text{kW}) \quad (1-1-8)$$

$$N_e = \text{常数} \times p_e \times n \quad (1-1-9)$$

从（1-1-9）式明显可见， p_e 或 n 的改变都可导致柴油机功率的改变，现在分别来讨论如下两种情况：

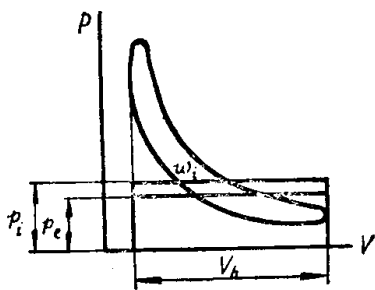


图 1-1-8 平均有效压力

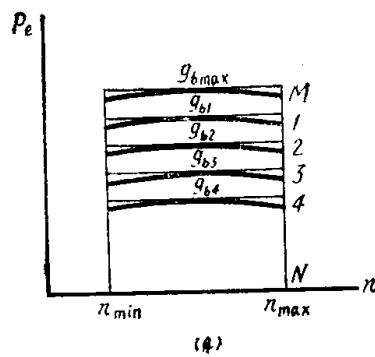
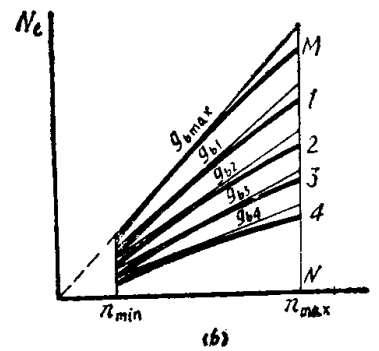


图 1-1-9 柴油机基本特性与工作范围



保持 p_e 一定，而改变 n ，或保持 n 一定，而改变 p_e 。

首先，如果 p_e 确能保持不变，如图 1-1-9 a 中最上面一根细实线所示，那末，柴油机的 $N_e = f(n)$ 特性在坐标上将是一根通过原点的直线（图 1-1-9 b 最上面一根细实线）。但事实上，在以后的讨论中将会知道，在公式 $p_e = \text{常数} \times \frac{\eta_v \eta_i \eta_m}{\alpha}$ 中， η_v 、 α 、 η_i 、 η_m 虽随转速 n 的变化而变化，但其变化量是不大的，而且它们合起来随转速 n 的变化也较小，故真正的 $p_e = f(n)$ 曲线，就如图 1-1-9 a 最上面一条粗实线所示。其形态呈向下微凹状。其变化是比较平坦的。因此，实际的柴油机 $N_e = f(n)$ 也为一条接近直线的曲线（图 1-1-9 b 最上面一根粗实线）。其次，还可看到柴油机的正常工作转速只能在 n_{min} 和 n_{max} 之

间变化。 n_{min} 是柴油机能够正常工作的最低稳定转速， n_{max} 是受到工作零件机械负荷和热负荷限制的最高转速，通常就是标定转速。

柴油机的供油系统设计总是使其每循环的喷油量 g_b 可以调节。就是说，要使 g_b 可以在 $g_{bmax} \rightarrow g_{bmin} \rightarrow 0$ 范围内变化。我们已经知道，指示功同 g_b 是成正比的，所以 g_{bmax} 就相当于柴油机能够取得最大指示功 W_i ，或最大 p_i 时的循环喷油量。通常图1—1—9的 $p_e = f(n)$ 和 $N_e = f(n)$ 坐标上最上面的粗实线，就是在 g_{bmax} 情况下得到的。也就是说，在 g_{bmax} 喷油量下能够使柴油机在标定转速下（即 n_{max} ）发出标定功率。图上 M 点称为标定工况点。 g_{bmax} 就是标定喷油量。通过 M 点的 $p_e = f(n)$ 和 $N_e = f(n)$ 曲线叫做标定速度特性。也称外特性。

如果减少喷油量 g_{bmax} 到 g_{b1} ，则可根据上述同样理由，相应得到低于标定功率速度特性而又几乎与它平行的 $p_e = f(n)$ 和 $N_e = f(n)$ 曲线。它们叫做部分负荷速度特性（图1—1—9上曲线1）。如果喷油量进一步减少，则依次类推可以得到许多相互接近平行的 $p_e = f(n)$ 和 $N_e = f(n)$ 曲线，它们都称为部分速度特性。

当 $g_b = g_{bmin}$ 时，柴油机的工作点就将落在 n_{min} 和 n_{max} 之间的 n 坐标轴上，这时， $p_e = 0$ ， $N_e = 0$ ，柴油机处于空车运转状态，喷油量很少，气缸指示功只能用来克服机械损失。举例来说，汽车遇上红灯时，司机停车而不停机，就是这种情况。如果 $g_b = 0$ ，那就是停机了。

综上所述，可以看到，当 p_e 一定时（比较严格地说，应该是每循环喷油量一定时），柴油机的功率 N_e 是随转速 n 的增加而接近直线地增加的。

现在再来看当 n 保持一定而改变 p_e 的情况。如果使 $n = n_{max}$ 保持不变，则从图1—1—9可知，随着喷油量 g_b 不断增加， p_e 就随着增加，因而 N_e 也将会成正比地增加，直到标定功率 M 点为止。如果柴油机是沿着这条 n 不变而 p_e 改变的 NM 垂直线上下地工作，则它所具有的特性就叫作负荷特性。因为柴油机的转速有一定的变化范围，所以相应于每个转速就有一个负荷特性。

通过以上讨论可以清楚地看到，每台柴油机都有一定的工作范围。这个工作范围的界限是由标定功率速度特性曲线、 n 坐标轴，以及 $n = n_{min}$ 和 n_{max} 时的负荷特性线所构成。这个工作范围，可以把它看成是由许许多多的部分速度特性和负荷特性交织而成。工作范围内的任何一点都有一个确定的循环喷油量和柴油机转速。柴油机在正常运转时，其工作点必定在此范围之内。

最后，还必须弄清楚一个概念，即柴油机在工作范围内运转时，气缸内过量空气系数 α 的变化情况。在前面讨论中已经知道 $g_b = \text{常数} \times \frac{\eta_v}{\alpha}$ ，所以 $\alpha = \text{常数} \times \frac{\eta_v}{g_b}$ 。举例来说，当柴油机转速 n 一定，（如为 n_{max} 时），则 η_v 也可认为不变，如柴油机沿负荷特性工作时，如 g_b 从 g_{b1} 逐步增加到 g_{bmax} （图1—1—9），由于 g_b 的不断增加，则由 $\alpha = \text{常数} \times \frac{\eta_v}{g_b}$ 可知，相应各点的 α 值的关系将是 $\alpha_4 > \alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$ ，即 g_b 越增加， α 值就越小。直到 $g_b = g_{bmax}$ （点 M 时） α 达最小值。 M 点的 α 值就是柴油机发出标定功率时的 α 值，此时，柴油机气缸指示功达到最大值。也就是该柴油机在正常工作情况下可能达到的最小 α 值。 α 值的大小，正如前面所说，取决于这台柴油机混合气体的形成质量，或者说取决于这台柴油机燃烧室和供油系统的设计。

如果使柴油机在另一个转速下沿负荷特性工作，则随着喷油量的增加 α 值也将变小，大致有着与 $n = n_{max}$ 时相近的变化规律。

第三节 柴油机的基本组成

现以机车用16V240ZJ型柴油机为例，说明增压四冲程柴油机的基本结构。图1—1—10、图1—1—11分别为该柴油机的纵、横剖面的结构示意图。

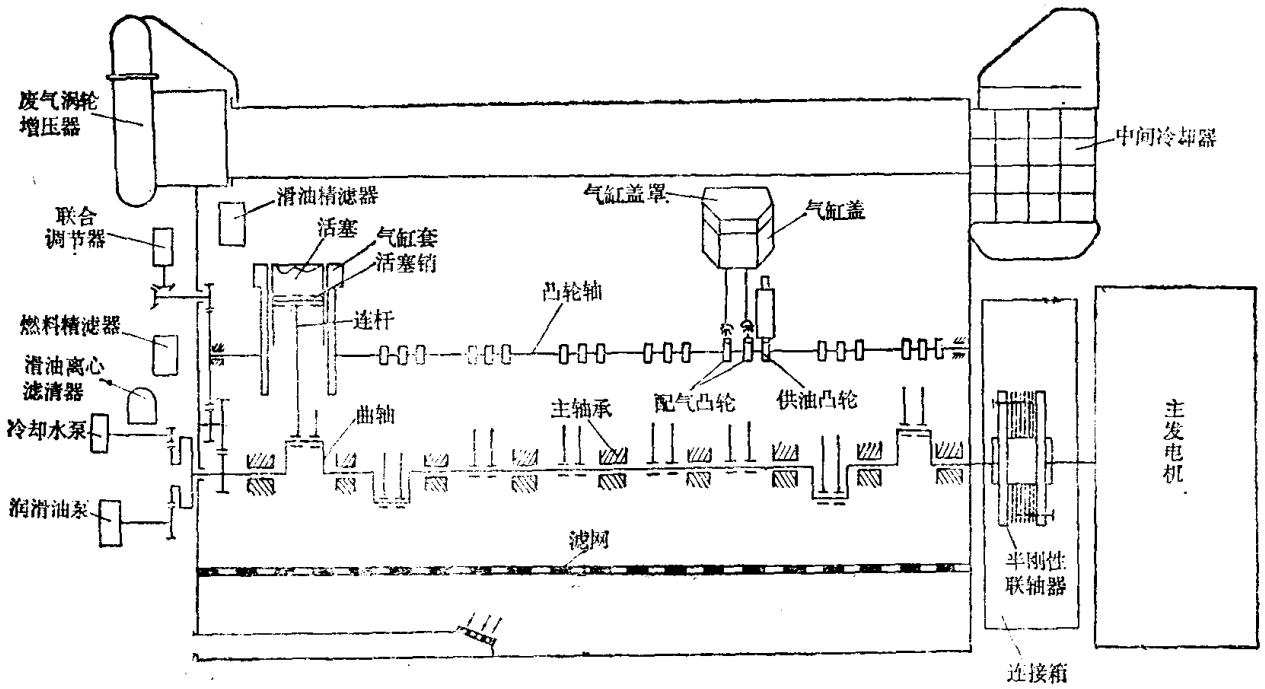


图1—1—10 16V240ZJ纵剖面示意图

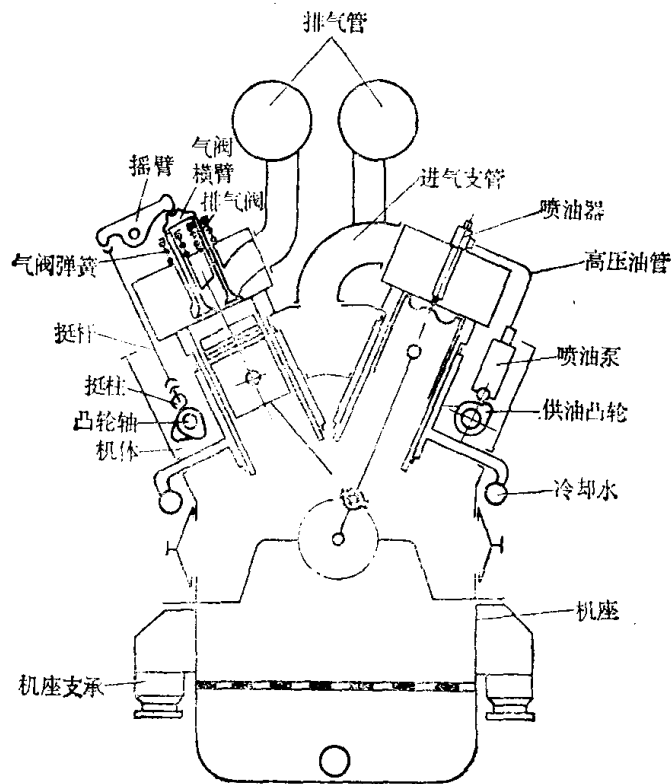


图1—1—11 16V240ZJ 横剖面示意图

增压四冲程柴油机的主要部件有：

(一) 固定部件

机座、机体、主轴承、气缸套、气缸盖等。

(二) 运动部件

活塞、活塞销、连杆、曲轴等。

(三) 配气机构

凸轮轴、挺柱、挺杆、摇臂、进气门、排气门、气门弹簧等。

(四) 燃油系统

喷油泵、高压油管、喷油器以及燃料滤清器等。

(五) 增压系统

废气涡轮增压器、中间冷却器、进气管、排气管等。

(六) 润滑系统

机油泵、机油滤清器等。

(七) 冷却系统

冷却水泵等。

此外，柴油机还必须具备操纵控制、调节器（或调速器）、传动机构等系统的零部件。