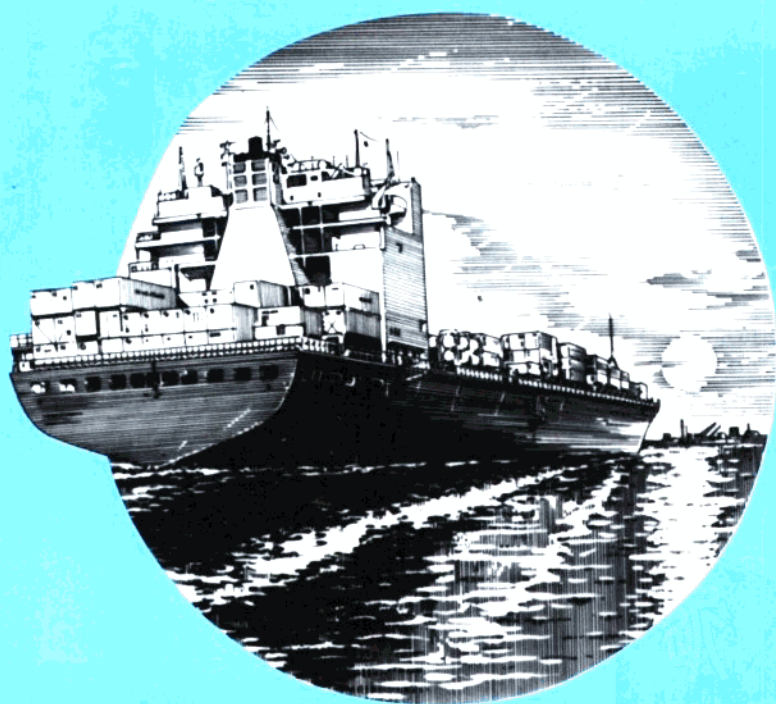


交通航海职业技术教育教材

符合 STCW 公约要求  
交通职业技术学校教学指导委员会  
航海类学科委员会推荐  
交通部科技教育司审定  
中华人民共和国海事局认可

# 船舶柴油机

赵宗雄 主编  
何文山 主审



大连海事大学出版社



交通航海职业技术教育教材

# 船舶柴油机

赵宗雄 主编

何文山 主审

大连海事大学出版社

## 内 容 提 要

本书是根据我国履行 STCW 78/95 公约中操纵无限航区 3 000 kW 以上船舶动力装置的轮机员对船舶柴油机知识的要求编写的。本书着重介绍了船舶柴油机的基本理论知识、构造、性能和维护管理,在内容的深度和广度上力求满足大管轮以上轮机员对船舶柴油机知识的需求。书中较详细地叙述了燃油的燃烧和喷油设备的调试与检验、柴油机增压、柴油机主要系统和装置、柴油机与螺旋桨配合以及主要部件的拆装、校中与检修等。此外,也简单介绍了柴油机和轴系的振动及减振方法。

本书主要供轮机工程专业的在校学生学习,也可作为大管轮以上的轮机员培训班、考证班使用,或作为轮机管理工作者的业务学习教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

船舶柴油机/赵宗雄主编. —大连:大连海事大学出版社, 2001.8  
(交通航海职业技术教育教材)  
ISBN 7-5632-1491-7

I. 船… II. 赵… III. 船用柴油机—技术教育—教材 IV. U664.121

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 043267 号

### 大连海事大学出版社出版

(大连市凌水桥 邮政编码 116026 电话 4728394 传真 4727996)

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连理工印刷有限公司印刷 大连海事大学出版社发行

2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

开本: 787 mm×1092 mm 1/16 印张: 17.5

字数: 426 千 印数: 0001—4 000 册

责任编辑: 程策群 封面设计: 王 艳

定价: 26.50 元

## 前 言

航海职业教育系列教材是交通部科教司为适应 STCW 78/95 公约和我国海事局颁发的《中华人民共和国海船船员适任考试、评估和发证规则》而组织编写的。编审人员是由交通职业技术学校教学指导委员会航海类学科委员会组织遴选的,都有较丰富的教学经验和实践经验。教材编写的依据是交通部科教司颁发的“航海职业教育教学计划 and 教学大纲”(高职教育),也融入了“中等职业教育教学计划 and 教学大纲”。本系列教材是针对三年高职教育和五年高职教育编写的,对于四年中等职业教育可根据考试大纲在满足操作级的要求上选用,也适用于海船驾驶员和轮机员考证培训和船员自学。

本系列教材包括职能理论和职能实践两部分,在内容上有严格的分割,但又相互补充。这套系列教材的特点是:

1.全面体现了 STCW 78/95 公约和《中华人民共和国海船船员适任考试、评估和发证规则》中强调的:教育必须遵守知识更新的原则,强调技能,培养能适应现代化船舶管理的复合型人才要求的精神。

2.始终贯穿“职业能力”作为培养目标的主线,根据“驾通合一”、“机电合一”及课程内容不能跨越功能块的原则,打破原有的学科体系,按功能块的要求对课程内容进行了全面的调整、删减,抓住基本要素重新组合。各课衔接紧凑,避免重复教学,并跟踪了现代科学技术,有较强的科学性和先进性。

3.编写始终围绕着职业教育的特点,内容以“必须和够用”为原则,紧扣大纲,深广度适中,不但体现了理论和实践的结合,也体现了加强能力教育和强化技能训练的力度。

4.编写过程中还把品格素质、知识素质和身心素质等素质教育的内容交融贯穿其中,体现了对海员素质能力培养的力度。

尽管本系列教材在编审过程中对编写大纲和教材都经过了集体或专家会审,也得到海事局和海运单位的大力支持,但可能还有不足之处,希望多提宝贵意见,以便再版修改并进一步完善。

交通职业技术学校教学指导委员会航海类学科委员会

1999.8

# 目 录

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 第一章 柴油机基本理论知识 .....          | (1)   |
| 第一节 概述 .....                 | (1)   |
| 第二节 四冲程柴油机工作原理 .....         | (5)   |
| 第三节 二冲程柴油机工作原理 .....         | (8)   |
| 第四节 柴油机主要工作指标和性能参数 .....     | (11)  |
| 第五节 柴油机的类型和型号 .....          | (16)  |
| 第二章 柴油机的结构和主要部件 .....        | (20)  |
| 第一节 燃烧室部件 .....              | (20)  |
| 第二节 曲柄连杆机构 .....             | (35)  |
| 第三节 机架、机座和贯穿螺栓 .....         | (46)  |
| 第四节 Sulzer RTA 型柴油机简介 .....  | (49)  |
| 第五节 主要部件的常见故障、检测、拆装及校中 ..... | (50)  |
| 第六节 主要部件及其管理 .....           | (70)  |
| 第三章 柴油机的换气和增压 .....          | (75)  |
| 第一节 柴油机的换气过程 .....           | (75)  |
| 第二节 换气机构 .....               | (78)  |
| 第三节 柴油机增压 .....              | (87)  |
| 第四节 柴油机增压系统 .....            | (93)  |
| 第五节 废气涡轮增压器的结构和工作原理 .....    | (96)  |
| 第六节 增压器喘振 .....              | (99)  |
| 第七节 增压器的故障和维护管理 .....        | (103) |
| 第四章 燃油的喷射与燃烧 .....           | (107) |
| 第一节 燃油 .....                 | (107) |
| 第二节 喷油设备 .....               | (112) |
| 第三节 燃油的喷射 .....              | (121) |
| 第四节 可燃混合气的形成 .....           | (126) |
| 第五节 燃油的燃烧 .....              | (130) |
| 第六节 可变喷油正时机构 .....           | (137) |
| 第七节 喷油设备的维护管理 .....          | (139) |
| 第五章 柴油机油水系统 .....            | (148) |
| 第一节 燃油系统 .....               | (148) |
| 第二节 滑油系统 .....               | (152) |
| 第三节 分油机 .....                | (162) |

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| 第四节 冷却系统·····               | (170)        |
| <b>第六章 柴油机调速装置·····</b>     | <b>(175)</b> |
| 第一节 柴油机的调速·····             | (175)        |
| 第二节 机械式调速器·····             | (176)        |
| 第三节 调速器的性能指标·····           | (177)        |
| 第四节 液压调速器·····              | (179)        |
| 第五节 液压调速器的常见故障与管理·····      | (192)        |
| 第六节 电子调速器简介·····            | (193)        |
| <b>第七章 柴油机起动与换向·····</b>    | <b>(195)</b> |
| 第一节 柴油机的起动·····             | (195)        |
| 第二节 柴油机的换向·····             | (201)        |
| 第三节 操纵系统·····               | (208)        |
| <b>第八章 柴油机特性·····</b>       | <b>(212)</b> |
| 第一节 概述·····                 | (212)        |
| 第二节 速度特性·····               | (213)        |
| 第三节 负荷特性·····               | (216)        |
| 第四节 推进特性·····               | (218)        |
| 第五节 调速特性·····               | (220)        |
| 第六节 限制特性·····               | (220)        |
| 第七节 柴油机和螺旋桨的配合·····         | (222)        |
| 第八节 船用柴油机的允许运转范围·····       | (228)        |
| <b>第九章 柴油机及推进轴系的振动·····</b> | <b>(230)</b> |
| 第一节 曲柄连杆机构的运动·····          | (230)        |
| 第二节 曲柄连杆机构的作用力·····         | (231)        |
| 第三节 柴油机的振动与平衡·····          | (233)        |
| 第四节 轴系的扭转振动·····            | (240)        |
| 第五节 轴系的强制扭转振动·····          | (245)        |
| 第六节 轴系扭转振动的减振措施·····        | (248)        |
| <b>第十章 柴油机的运行管理·····</b>    | <b>(253)</b> |
| 第一节 柴油机管理·····              | (253)        |
| 第二节 柴油机的故障及应急处理·····        | (257)        |
| 第三节 示功图的测试与分析·····          | (261)        |

# 第一章 柴油机基本理论知识

## 第一节 概述

### 一、热机

热机是可将热能转换成机械能的动力机械的总称。柴油机、汽油机、蒸汽轮机以及蒸汽机都是热机中典型的机型。这些动力机械的一个共同特性都是利用燃料燃烧将其中的化学能转变为热能(第一次能量转换),再将热能转变成机械能(第二次能量转换)使其他机械动作。热机按能量转换场所不同,可分为外燃机(如蒸汽轮机、蒸汽机)和内燃机(如柴油机、汽油机)。

外燃机(如蒸汽机)的基本工作原理是燃料在气缸外部专门设置的锅炉中燃烧,利用燃料燃烧时放出的热能将水加热并形成蒸汽,再将蒸汽引入气缸内膨胀做功,推动机械运动。外燃机由于热能需经中间工质(如蒸汽)传递,存在着较大的热损失,因此热效率不高。

内燃机的基本工作原理是燃料在气缸中燃烧,并直接利用燃烧产生的高温高压燃气在气缸内膨胀做功,推动机械运动。内燃机由于两次能量转换都在气缸中进行,能量损失小,因此具有较高的热效率。另外,它在尺寸、重量和起动等方面也具有优越性,因而在与外燃机的竞争中处于有利地位。

### 二、内燃机

在内燃机中为交通运输部门广泛应用的是汽油机和柴油机。它们由于使用的燃料不同,因此在工作原理、使用范围和结构上存在较大的差别。

汽油机使用挥发性好的汽油作燃料,通常在气缸外部设置汽化器使汽油蒸气和空气混合(外部混合法)形成可燃混合气,而缸内燃烧则采用电火花塞点火式。汽油机由于气缸内被压缩的是可燃混合气,为防止早燃或爆燃其压缩程度不能太高,因此它的热效率或经济性不能有很大的提高;另外,汽油易引起火灾,不适合在船舶上应用。汽油机被广泛应用于运输车辆。

柴油机是一种压缩发火的往复式内燃机。它使用柴油或劣质燃油作燃料,采用特设的喷油设备将燃油喷入气缸与空气混合(内部混合法)形成可燃混合气,并靠压缩缸内空气所形成的高温使燃料自行发火燃烧,即所谓压燃式。船舶动力装置普遍采用柴油机。

### 三、柴油机的优缺点

柴油机的工作特点使其应用范围不断扩大,结构和性能日趋完善。与其他热机相比,柴油机具有下列突出优点:

(1) 经济性好,有效热效率可达 50% 以上,是热机中热效率最高的,并可使用廉价的劣质燃油。

(2) 功率范围广,能适应各种不同用途,单机功率为 1.1~41 000 kW。

(3) 机动性好,起动方便,加速性能好,有较大的转速和负荷调节范围并可直接反转,能适应船舶航行的各种要求。

(4) 尺寸小、重量轻,有利于船舶机舱的布置。

柴油机也有以下缺点:

- (1) 工作时振动厉害, 噪音大, 管理人员容易疲劳。
- (2) 某些部件的工作条件恶劣: 高温、高压并有冲击性负荷。

#### 四、柴油机的热力循环

##### 1. 理论循环

内燃机的实际热力循环是一个非常复杂的物理化学变化过程, 为了便于分析研究, 需要借助于理论循环。所谓理论循环是根据内燃机实际工作过程的特征, 经科学抽象和简化, 将其概括为由几个基本热力过程所组成的循环。研究理论循环的目的:

- (1) 用比较简单的理论公式来说明各基本热力学参数间的关系, 找出提高循环热效率  $\eta_i$  和平均压力  $p_i$  的有效途径。
- (2) 确定循环热效率的理论极限, 以判断内燃机实际循环的完善程度。
- (3) 比较各种热力循环的经济性和动力性。

由热力学可知, 内燃机按加热方式不同有三种理论循环: 等容加热循环(奥托循环)、等压加热循环(狄塞尔循环)和混合加热循环。如图 1-1 所示。

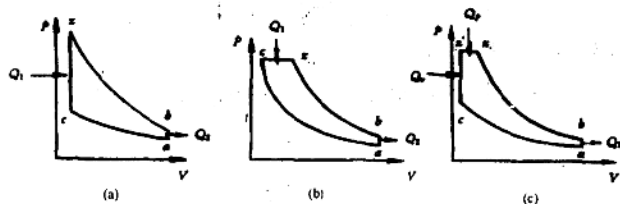


图 1-1 理论循环示意图

##### 1) 等容加热循环

由绝热压缩过程  $a-c$ 、等容加热过程  $c-z$  (加入热量  $Q_1$ )、绝热膨胀过程  $z-b$  及等容放热过程  $b-a$  (放出热量  $Q_2$ ) 所组成。汽油机按此循环工作。

##### 2) 等压加热循环

由绝热压缩过程  $a-c$ 、等压加热过程  $c-z$ 、绝热膨胀过程  $z-b$  及等容放热过程  $b-a$  所组成。现代高增压柴油机有向此循环发展的趋势。

##### 3) 混合加热循环

由绝热压缩过程  $a-c$ 、等容加热过程  $c-z'$  (加入热量  $Q_1$ )、等压加热过程  $z'-z$  (加入热量  $Q_2$ )、绝热膨胀过程  $z-b$  及等容放热过程  $b-a$  所组成。一般的柴油机都按此循环工作。混合加热循环的热效率  $\eta_i$  和平均压力  $p_i$  的公式为

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\epsilon^k - 1} \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)} \quad (1-1)$$

$$p_i = \frac{W_{th}}{V_h} = \frac{p_a q_1}{RT_a} \eta_i \quad (1-2)$$

式中:  $\epsilon$  —— 压缩比;

$k$  —— 绝热指数;

$\lambda$  —— 压力升高比,  $\lambda = p_z / p_c$ ;

$\rho$  —— 初期膨胀比,  $\rho = V_z / V_c$ ;

$W_{th}$  —— 一个循环所作的理论功;

$V_h$  —— 气缸工作容积;

$p_a$  —— 压缩始点缸内空气压力;

$q_1$  —— 单位质量工质吸入热量;



$R$ ——气体常数;

$T_a$ ——压缩始点缸内空气温度。

由上两式可知,该循环的热效率  $\eta_t$  随  $\varepsilon$ 、 $\lambda$  和  $k$  的增加而提高,随  $\rho$  的减小而提高。平均压力  $p_i$  随  $p_a$ 、 $q_1$  和  $\eta_t$  的提高而增加,随  $T_a$  的降低而增加。从理论循环所得到的这些结论,是不考虑柴油机实际工作条件的约束的。因此,在用以指导实践时,还必须考虑柴油机结构强度、机械效率和燃烧效率等多方面因素的限制。

## 2. 实际循环与理论循环的差别

由于在柴油机实际循环中存在许多不可避免的损失,因此无法取得理论循环所具有指标。理论循环可看做是实际循环所要趋近但无法取得的极限。为了改善实际循环,使之尽量向理论循环的指标靠拢,应分析比较两种循环的差异所在以及引起各种损失的原因。

### 1) 工质的影响

理论循环的工质是整个循环中物理和化学性质都不变的理想气体。实际循环中的工质是空气和燃气,它们会发生成分的变化、比热的变化、摩尔数的变化和高温分解。由于这些变化使得实际循环的热效率和作功能力明显下降。

### 2) 燃烧损失

理论循环中只从高温热源按等容、等压方式及时地吸入热量  $Q_1=Q_u+Q_p$ ,而在实际循环中要靠燃料燃烧放出热量。因此存在燃烧不及时、后燃和不完全燃烧几方面因素综合造成的燃烧损失。

### 3) 气缸壁的传热损失

理论循环中工质与气缸壁间不存在热交换。但在实际循环中,工质与气缸壁间存在复杂的热交换过程,其总趋势是向气缸壁散热。

### 4) 换气损失

理论循环中是从高温热源等容、等压吸热后向低温热源等容放热,不需要进行工质的更换。而事实上,要使实际循环周而复始地进行,必须排出废气和重新吸入新鲜空气。因此在实际循环的换气过程中存在排气阀提前开启所引起的膨胀功损失、活塞推出废气的排气耗功和真空下将空气吸入的进气耗功,即实际循环存在换气损失。

### 5) 其他损失

在实际循环中还存在工质泄漏损失和涡动损失,以及因燃烧的有限速度、活塞的高速运动和有一定的供油提前角而偏离理论的等容、等压加热过程所产生的损失等。

## 五、柴油机基本结构及其系统简介

柴油机的基本结构如图 1-2 所示。

### 1. 主要部件

柴油机的主要部件,按工作时所处状态不同,可分

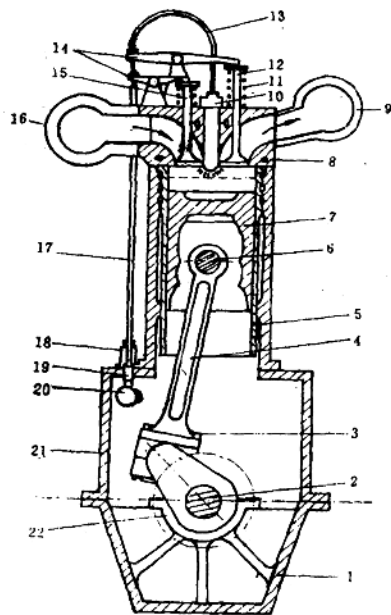


图 1-2 柴油机的基本结构组成

为固定部件和运动部件两大类。

固定部件包括机座 1、机体 21、气缸套 5、气缸盖 8 和主轴承 22 等。气缸套 5 压装在机体 21 上部相应孔内，主轴承 22 置于机座 1 上。机座、机体、气缸盖由下而上依次一个叠在一个上面并用螺栓紧固，从而组成一台柴油机的骨架。

运动部件包括活塞 7、活塞销 6、连杆 4 和曲轴 2 等。活塞 7 套装在气缸套 5 内，并能沿气缸套内壁作往复运动。连杆 4 的小端与装在活塞中的活塞销 6 铰接，而其大端与支撑在主轴承 22 上的曲轴 2 铰接。柴油机通过这样的机构(称曲柄连杆机构)将活塞的往复运动转变成曲轴的回转运动。

## 2. 换气系统

换气系统用于在规定时间内将新鲜空气充入气缸并将废气排出气缸，它包括进气系统和排气系统。下面以四冲程柴油机为例加以说明。

进气系统主要由空气滤清器、进气管 16、气缸盖内的进气道、进气阀、进气阀传动机构以及与排气系统共用的凸轮轴 20 和凸轮轴传动机构等组成。

排气系统除同进气系统共用的部分外，还包括排气阀、排气阀传动机构、气缸盖内的排气道和排气管 9 等。

## 3. 燃油系统和喷射设备

燃油系统的功用是将符合使用要求的燃油输送到喷油泵入口端。它是由油柜、净化设备、输送设备和加热设备等组成的。喷射设备用于在规定时间内将规定量的燃油以规定的雾化质量喷入气缸。它包括喷油泵、高压油管 13 和喷油器 10。

## 4. 润滑系统

润滑系统是使作相对运动机件的摩擦面得到润滑。工作时润滑泵经滤网从油柜吸入润滑油，依次压送至滑油滤清器、滑油冷却器，然后送入柴油机内的摩擦部位，润滑后流入机座油池并用循环油泵输回油柜。

## 5. 冷却系统

冷却系统是冷却高温机件使之工作在适宜的温度下。它包括淡水系统和海水系统。淡水由淡水泵压入柴油机，在冷却气缸套、气缸盖后排出，然后经淡水冷却器降温再被淡水泵压入柴油机，形成封闭的循环。为了保证封闭系统内充满淡水，在淡水系统中接一个高置的膨胀水箱。与此同时，海水泵从舷外吸入海水，并依次压送至滑油冷却器、淡水冷却器，冷却滑油和淡水后再排出舷外。

## 6. 压缩空气起动系统

为了实现柴油机的起动，柴油机都设置起动系统。船舶柴油机通常采用压缩空气起动。起动时打开空气瓶的出气阀和主起动阀后，起动空气经气缸起动阀进入气缸代替燃气膨胀对活塞做功，使柴油机转动并达到一定的起动转速，最终使缸内压燃发火而运转起来。

## 7. 调速装置和换向装置

调速装置能根据外界负荷变化而自动改变喷油泵的供油量，使柴油机转速稳定。换向装置用来改变柴油机的转向。

## 8. 增压系统

当今柴油机广泛应用废气涡轮增压技术。它是在柴油机进气系统和排气系统中串接一

台废气涡轮增压器，利用柴油机废气中的能量去驱动增压器的涡轮机，并带动同轴的离心式压气机叶轮高速回转，使流经压气机并进入气缸的新鲜空气的压力提高，增加充气量。与此同时，相应增加供油量并使之完全燃烧，最终达到提高柴油机功率的目的。

## 第二节 四冲程柴油机工作原理

### 一、柴油机常用术语

表示柴油机工作原理的常用术语有(见图 1-3):

(1) 上止点 活塞在气缸中运动的最上端位置，即活塞离曲轴回转中心最远的位置。

(2) 下止点 活塞在气缸中运动的最下端位置，即活塞离曲轴回转中心最近的位置。

(3) 曲柄半径( $R$ ) 曲轴的曲柄销轴线与主轴颈轴线间的距离。

(4) 行程( $S$ ) 活塞从上止点移动到下止点间的直线距离，它等于曲柄半径  $R$  的两倍( $S=2R$ )。活塞移动一个行程相当于曲轴转动  $180^\circ$ 。

(5) 缸径( $D$ ) 气缸的内径。

(6) 气缸工作容积( $V_h$ ) 活塞在气缸中从上止点移动到下止点时所扫过的容积。

(7) 燃烧室容积( $V_c$ ) 活塞在气缸内位于下止点时，活塞顶以上的全部容积(活塞顶、气缸盖底面与气缸套内表面所包围的空间)，亦称压缩容积。

(8) 气缸总容积( $V_a$ ) 活塞在气缸内位于上止点时，活塞顶以上的全部容积。显然

$$V_a = V_h + V_c$$

(9) 压缩比( $\epsilon$ ) 气缸总容积  $V_a$  与燃烧室容积  $V_c$  的比值，确切地应称为几何压缩比。

$$\epsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_c + V_h}{V_c} = 1 + \frac{V_h}{V_c} \quad (1-3)$$

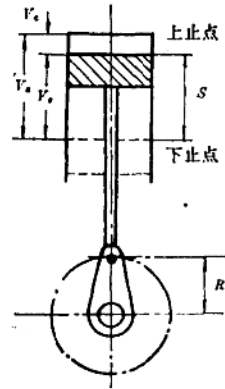


图 1-3 柴油机主要几何术语

压缩比是柴油机的主要性能参数之一，它表明缸内空气被活塞压缩的程度。压缩比越大，压缩终点的温度和压力就越高，对燃油的发火、柴油机起动有利，热效率也有提高。但压缩比过高会使柴油机工作粗暴，机件的机械负荷和热负荷过大。因此柴油机要有合适的压缩比，一般为  $12 \sim 18$ 。中、高速柴油机的压缩比高于低速机。

### 二、四冲程柴油机的工作原理

柴油机是一种压燃式内燃机。要使燃油实现压燃，首先要有保证燃油燃烧的足量空气，这就需要一个向气缸内充入新鲜空气的过程。其次，燃油的燃烧不是靠点燃，而是在高温高压下自行发火，这就要对缸内的空气进行压缩，使其达到足够高的温度和压力。此时，将雾化的燃油喷入就能发火燃烧。燃烧产生的大量热能，使缸内燃气的压力和温度急剧升高，并在气缸中膨胀推动活塞做功。膨胀终了时，气体失去做功能力变成废气被排出气缸。

综上所述，燃油在气缸中燃烧做功，必须通过进气、压缩、喷油燃烧、膨胀和排气这五个工作过程才能实现。依次进行了这五个工作过程就完成了一个工作循环。柴油机连续不停地运转，就是这个工作循环不断重复的结果。若将这五个工作过程放在活塞的四个行

程中完成，称为四冲程柴油机；将这五个工作过程放在活塞的两个行程中完成，则称为二冲程柴油机。

图 1-4 所示的四个简图，分别表示四冲程柴油机五个工作过程和活塞、曲轴、气阀等部件的有关动作，以及气缸中气体压力随气缸容积变化的  $p-V$  示功图。

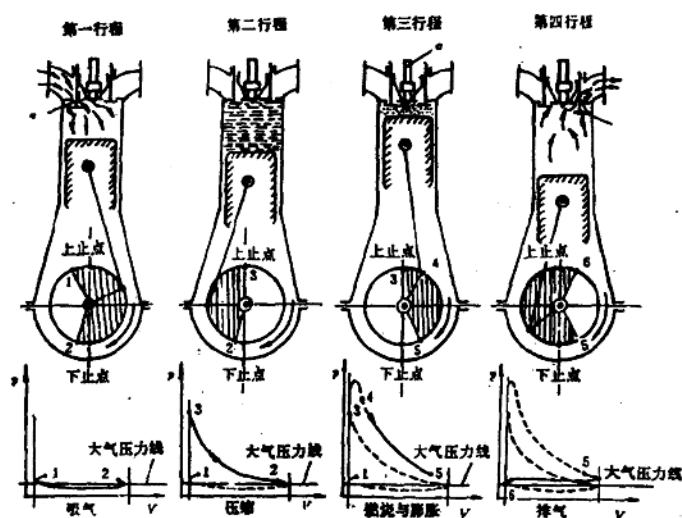


图 1-4 四冲程柴油机工作原理

**第一行程——进气行程：**活塞从上止点下行，进气阀  $a$  已开启。随着活塞下移气缸容积不断增大，缸内压力下降，依靠气缸内外的压差新鲜空气经进气阀被吸入气缸。在空气进入气缸的过程中，由于受空气滤清器、进气管路和进气阀等处阻力的影响，缸内压力始终低于大气压力。当活塞到达下止点时，缸内气体压力为  $(0.85 \sim 0.95) p_0$ 。此时，缸内空气温度也因从高温的燃烧室壁面和残余废气中吸收热量而提高至  $30 \sim 70^\circ\text{C}$ 。

为保证进气过程中气阀有较大的开度，减小流阻提高充气量，以及利用气流的惯性补充进气，进气阀均设计成早开迟闭，即在活塞到达上止点前的某一时刻（点 1）开启；在到达下止点后的某一时刻（点 2）关闭。进气过程对应的曲轴转角  $\phi_{1,2}$  为  $220^\circ \sim 250^\circ$ 。

**第二行程——压缩行程：**活塞从下止点向上移动，气缸容积逐渐减小。自进气阀  $a$  关闭时刻（点 2）起对空气进行压缩，一直到活塞到达上止点（点 3）为止。缸内空气经压缩后压力增高到  $3 \sim 6 \text{ MPa}$ ，温度升至  $600 \sim 700^\circ\text{C}$ （燃油的自然温度为  $210 \sim 270^\circ\text{C}$ ）。压缩终点的压力和温度分别用符号  $p_c$  和  $T_c$  表示。在压缩行程后期由喷油器  $c$  喷入并雾化的燃油与高温空气混合后自行发火燃烧。压缩过程对应的曲轴转角  $\phi_{2,3}$  为  $140^\circ \sim 160^\circ$ 。

**第三行程——燃烧和膨胀行程：**当活塞到达上止点附近时，由于燃油剧烈燃烧，使缸内的压力和温度急剧升高。瞬时达到的最高压力  $p_e$  称为最高爆发压力，为  $5 \sim 8 \text{ MPa}$ ；最高温度  $T_e$  为  $1400 \sim 1800^\circ\text{C}$  或更高些。高温高压燃气膨胀推动活塞下行做功。由于气缸容积逐渐增大，压力越过最高值后急速下降。燃烧在上止点后某一时刻（点 4）基本结束，

膨胀一直到下止点前(点5)排气阀  $b$  开启时结束。此时缸内气体压力  $p_b$  为  $0.25 \sim 0.45 \text{ MPa}$ ，温度  $T_b$  为  $600 \sim 700^\circ\text{C}$ 。燃烧和膨胀过程所对应的曲轴转角  $\varphi_{3,4,5}$  为  $130^\circ \sim 160^\circ$ 。

第四行程——排气行程：上一行程排气阀  $b$  开启时活塞还在下行，废气靠气缸内外压差经排气阀自由排出。当活塞由下止点上行时，废气被活塞强制推出气缸。在排气行程中缸内的压力始终高于大气压力，为  $(1.05 \sim 1.10) p_0$ 。

为了保证排气行程中气阀有较大的开度，减小流阻、减小活塞上行时的背压，以及实现惯性排气，排气阀也设计成早开迟闭，即在活塞到达下止点前的某一时刻(点5)开启，在到达上止点后某一时刻(点6)关闭。排气过程对应的曲轴转角  $\varphi_{5,6}$  为  $230^\circ \sim 260^\circ$ 。

### 三、柴油机的正时和四冲程柴油机正时图

#### 1. 柴油机的正时

在柴油机一个工作循环中，各过程的始、终点是偏离上、下止点一定角度的。以上、下止点为基准，用曲轴转角表示进、排气阀(扫、排气口)和喷油泵、气缸起动阀等开始开启和完全关闭的时刻，称为柴油机的正时，亦称定时。

柴油机的正时主要有换气正时(包括进气正时和排气正时)、供油正时和起动正时(用压缩空气起动时)。各种柴油机的正时是不同的，常用表格或正时图来表示。所谓正时图，就是将柴油机的各种正时按其转向、工作过程和冲程数，以上、下止点为基准，用曲轴转角的位置来表示的圆形图。

#### 2. 四冲程柴油机正时图

图 1-5 是 6350C 型柴油机的正时图。曲轴转向为顺时针(自飞轮端向自由端看)。从图中可以看出各种正时的数据(均为曲轴转角)：

- 进气阀开 上止点前  $20^\circ$ ；
- 进气阀关 下止点后  $24^\circ$ ；
- 排气阀开 下止点前  $50^\circ$ ；
- 排气阀关 上止点后  $16^\circ$ ；
- 供油提前角 上止点前  $21^\circ$ ；
- 气缸起动阀开 上止点；
- 气缸起动阀关 下止点前  $56^\circ$ 。

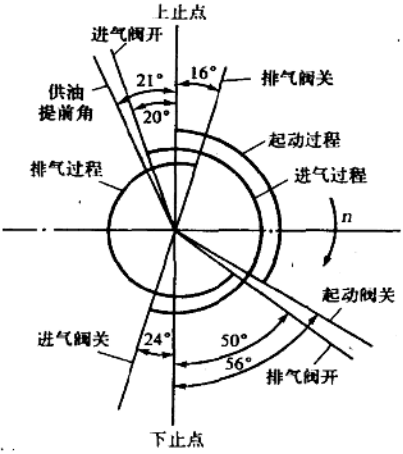


图 1-5 6350C 柴油机正时图

我们把进气阀开启时刻提前于上止点的夹角称为进气提前角；进气阀关闭时刻延后于下止点的夹角称为进气延迟角。同理，排气阀开启时刻提前于下止点的夹角称为排气提前角；排气阀关闭时刻延后于上止点的夹角称排气延迟角。该机供油开始于上止点前  $21^\circ$ ，表示喷油泵刚开始供油时活塞离上止点尚有  $21^\circ$  曲轴转角，这个角度称为供油提前角。另外，该机气缸起动阀开于上止点、关于下止点前  $56^\circ$ ，说明该机采用压缩空气起动，供气持续角度为  $124^\circ$ 。

该正时图中清楚地表明该机各工作过程所占的曲轴转角。其进气过程所占的曲轴转角

为  $224^\circ$ ，这个角度称为进气持续角，它等于  $180^\circ$  加上进气提前角与进气延迟角之和。排气过程为  $246^\circ$ ，称为排气持续角，它等于  $180^\circ$  加上排气提前角与排气延迟角之和。同理，压缩过程为  $156^\circ$ ，燃烧膨胀过程为  $130^\circ$ 。

从正时图中还可以看出，在换气过程上止点前后，进、排气阀同时开启着，这段重叠的曲轴转角称为气阀重叠角。气阀重叠角在数值上等于进气提前角加上排气延迟角。该机约为  $36^\circ$ 。合适的气阀重叠角有助于废气清除和新气充入，实现所谓燃烧室扫气，提高换气质量；同时还可利用进气来冷却燃烧室有关部件。因而，四冲程柴油机都有一定的气阀重叠角，且增压柴油机的气阀重叠角大于非增压柴油机。非增压机为  $25^\circ \sim 50^\circ$ ，增压机为  $80^\circ \sim 130^\circ$ 。

### 第三节 二冲程柴油机工作原理

#### 一、二冲程柴油机的工作原理

从四冲程柴油机的四个行程进行情况可知，压缩行程包含了为燃油燃烧提供足够压力和温度的压缩过程，燃烧膨胀行程包含了燃油燃烧并将热能转变为机械能的作功过程，这两个行程是必不可少的。而进气过程和排气过程只是为了保证压缩过程开始时气缸内有充足的空气和尽量少的废气。因此可不设专门的进气行程和排气行程，而将进、排气过程放在燃烧膨胀行程末期和压缩行程初期来进行，这就将四个行程完成一个工作循环的四冲程柴油机变成了两个行程完成一个工作循环的二冲程柴油机了。

由于二冲程柴油机没有专门的进气行程和排气行程，因此就不能像四冲程柴油机那样从容地靠活塞的抽吸充入新鲜空气和靠活塞的推挤排出废气。它的进、排气方式和结构与四冲程柴油机有较大的区别。在二冲程柴油机的气缸套下部开设扫、排气口，或只设扫气口而在气缸盖上设排气阀，并专设一个扫气泵和容积较大的扫气箱。将空气先经扫气泵压缩，然后储入扫气箱。待废气在压差作用下自由排放而压力降低后扫气口打开，具有一定扫气压力的空气充入气缸并将剩余废气扫出，完成气缸内的扫、排气过程。

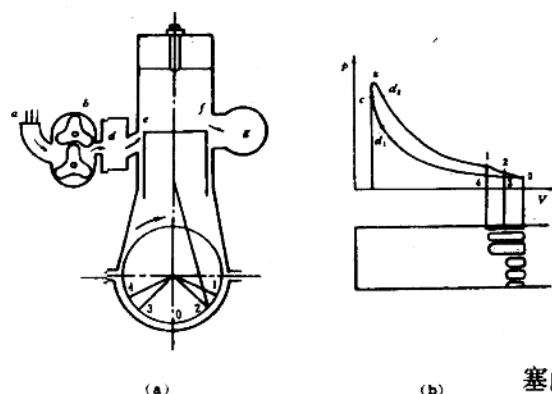


图 1-6 二冲程柴油机工作原理示意图

图 1-6 所示为横流扫气二冲程柴油机工作原理和  $p-v$  示功图。

柴油机左侧设置扫气泵  $b$  和扫气箱  $d$ ，右侧设置排气管  $g$ 。气缸套左、右下侧分别开有扫气口  $e$  和排气口  $f$ ，排气口高于扫气口，它们的开闭均由活塞顶控制。如图 1-6 (a) 所示。

二冲程柴油机的工作原理如下：

第一行程——扫气和压缩行程，活塞由下止点向上移动，在遮住扫气口之前，由于扫、排气口均开着，扫气箱内具有一定压力的空气经扫气口充入气缸，将残存的废气通过排气口排出。活塞上行到遮住扫气口时扫气结束，如图 1-6 (b) 中的点 0 至点 3。之后，由于气流流动的惯性，废气继续通过尚未关闭的排气口排出，至活塞上行到遮住排气口时

排气结束,如图 1-6 (b) 中的点 3 至点 4。此时扫、排气口均已关闭,活塞继续上移对缸内空气进行压缩,压力和温度升高。当活塞到达上止点时压缩过程结束。如图 1-6 (b) 中的点 4 至点 c。此时缸内的压力可达 3~6 MPa, 温度提高到 600~700℃。

第二行程——燃烧膨胀及排气行程,当活塞到达上止点前的某一时刻(点  $d_1$ ),通过喷油器 c 把雾化的燃油喷入气缸,与缸内空气混合形成可燃混合气。活塞到达上止点附近时燃油着火燃烧并迅速扩散,使缸内的压力和温度急剧升高,同时推动活塞下行做功。燃烧到点  $d_2$  时基本结束。在此期间,缸内瞬时达到的最高压力高达 5~8 MPa, 最高温度高达 1400~1800℃。以后活塞继续下行至排气口打开,燃烧膨胀过程结束,如图 1-6 (b) 中点 z 至点 1。排气口打开后,较高压力的废气依靠压差排入排气管,缸内压力迅速下降,当压力降到接近扫气压力时,扫气口被打开(点 2),具有一定压力的空气冲入气缸,同时把废气扫出。活塞到达下止点时这一行程中所进行的排气、扫气过程结束。如图 1-6 (b) 中点 1 至点 2 再至点 0。但整个循环的扫、排气过程一直延续到下止点后排气口关闭(点 4)为止。二冲程柴油机也可用正时图来表示其各工作过程的正时。图 1-7 为二冲程柴油机的正时图。

可以看出,二冲程柴油机的扫、排气过程几乎同时进行。下止点前后,扫气口和排气口(阀)同时开启所转过的曲轴转角称为扫排气重叠角。该机的扫排气重叠角为 79°。

由上述可知,二冲程柴油机实际压缩过程的始点不在下止点,而在扫气口及排气阀(口)全部关闭的时刻。通常将扫气口及排气阀(口)全部关闭瞬时的气缸工作容积与燃烧室容积的比值称为有效压缩比  $\varepsilon_e$ , 它可表示为

$$\varepsilon_e = \frac{V_h}{V_c} (1 + \psi_h) + 1 \quad (1-4)$$

式中:  $\psi_h$  为行程失效系数,它等于活塞从下止点移动到扫气口及排气阀(口)刚关闭时刻所扫过的容积与气缸工作容积之比。

有效压缩比与几何压缩比之间存在下列关系

$$\varepsilon_e = \varepsilon (1 - \psi_h) + \psi_h \quad (1-5)$$

## 二、二冲程柴油机的换气形式

根据气流在气缸中的流动路线,二冲程柴油机的换气形式分为弯流扫气和直流扫气。

### 1. 弯流扫气

弯流扫气可分为横流扫气、回流扫气以及综合了这两种优点的半回流(新型横流)扫气三种。弯流扫气的特点是扫、排气均用气口,气口布置在气缸套下部;扫气空气先从上往下流动,到气缸盖附近转为向下流动,形成弯曲的流动路线。

弯流扫气有结构简单、工作可靠、维护管理方便等优点。但扫气空气在缸内流动路线长,与废气掺混较多,存在扫气空气不能到达的死角和气流短路等现象,因而换气质量较差。此外,由于缸套下部受热不均,容易产生变形与偏磨损。

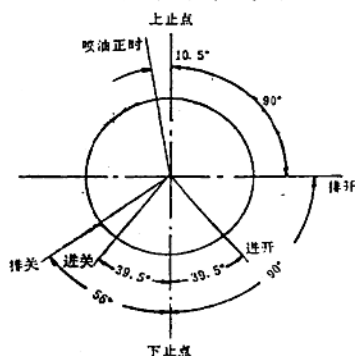


图 1-7 二冲程柴油机正时图

### 1) 横流扫气

这种扫气形式中扫、排气口布置在气缸套下部同一截面圆周的两对面，排气口开口位置比扫气口高。为了使扫气进行得完善，气口在水平和垂直方向均有倾斜角以控制气流方向。活塞下行时，先打开排气口，然后打开扫气口，实现排气和扫气；活塞上行时先关闭

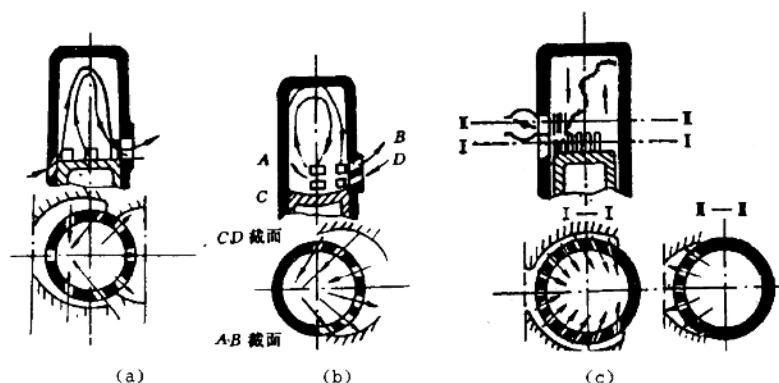


图 1-8 弯流扫气

扫气口，再关闭排气口，实现继续扫气和过后排气，如图 1-8 (a) 所示。横流扫气因气口分布在缸套两侧，不利于废气涡轮增压器的布置。

### 2) 回流扫气

这种扫气形式中扫、排气口布置在缸套下部同一侧且排气口在扫气口的上面。为了控制气流方向，气口在水平和垂直方向均有倾斜角。扫气时空气从向下倾斜的扫气口进入，流经凹顶活塞，再沿缸壁向上清扫废气，然后沿扫气口同侧缸壁下行，从排气口排出。如图 1-8 (b) 所示。与横流扫气相比，这种扫气形式有利于废气涡轮增压器的布置，但一个行程中被气口占用的长度较长，使有效行程缩短，过后排气较严重。

### 3) 半回流扫气

这种扫气形式中扫、排气口布置在缸套下部同一侧，扫气口在排气口的下面及两侧，并在排气管中装有随曲轴转动的排气转阀，使气缸和排气管的真正连通受排气转阀控制。这样，通过排气转阀的适时启闭，可避免过后排气损失和增加活塞的有效行程。但加装排气转阀后，使结构复杂，维护管理工作量增大。扫气时气流在缸内的流动兼有横流和回流的特点，它是弯流扫气中效果最好的一种。

### 2. 直流扫气

直流扫气可分为气口—气阀式和气口—气口式，目前广泛应用前者。图 1-9 为气口—气阀式直流扫气原理图。它的特点是在气缸盖上设置排气阀（1~6 个），在缸套下部均布一圈扫气口。扫气口在水平和垂直方向均有倾斜角。扫气时空气经扫气口进入气缸，形成绕气缸轴线旋转向上的“气垫”，自下而上将废气从排气阀排出。排气阀的启闭由排气凸轮控制。

这种直流扫气的优点是：气流在缸内的流动路线短，形成“气垫”不易与废气掺混，因而换气质量好；通过调整排气阀正时，可避免过后



图 1-9 直流扫气



排气或实现过后充气。它已成为现代船用大型长冲程和超长冲程柴油机的主要换气形式。其主要缺点是：排气阀机构比较复杂，管理维护麻烦。

### 三、二冲程柴油机与四冲程柴油机比较

与四冲程柴油机相比，二冲程柴油机有如下优点：

(1) 功率较大。因为四冲程柴油机曲轴转两转作一次功，二冲程柴油机转一转作一次功，故单位时间的作功次数二冲程机比四冲程机大一倍。但由于二冲程机气口布置造成有效行程减小、驱动扫气泵消耗功率以及换气质量差制约循环喷油量等的影响，在气缸尺寸及转速相同的情况下，二冲程柴油机的功率约为四冲程柴油机的 1.6~1.8 倍。显然，若两者功率相同，二冲程柴油机的尺寸较小，单位功率的重量较轻。

(2) 回转较均匀。因二冲程柴油机每转作功一次，其回转要比四冲程柴油机均匀，故可使用较小的飞轮（相对于整台柴油机讲）。

(3) 结构较简单。对采用弯流扫气的二冲程柴油机，由于不设置气阀及其传动机构，较四冲程机结构简单，维护管理工作量减少。

二冲程柴油机有下列缺点：

(1) 二冲程柴油机换气质量比四冲程柴油机差，且空气消耗量大。

(2) 在相同条件下，二冲程柴油机的燃烧次数比四冲程柴油机多一倍，燃烧室及周围部件的热负荷比四冲程机高。

目前船用大型低速柴油机大多采用二冲程机。一方面能获得较大的单缸功率，另一方面由于柴油机运转转速低使换气质量和喷射设备的工作条件得到改善。

## 第四节 柴油机主要工作指标和性能参数

衡量一台柴油机的质量需要从动力性、经济性、运转性、可靠性和耐久性、结构工艺性等方面予以综合评定。因此，表征柴油机性能的指标相应有力学指标、经济性指标、运转性指标、可靠性和耐久性指标以及结构指标等。本节着重介绍动力性和经济性指标。

动力性和经济性指标可分为指示指标和有效指标两种。

指示指标是建立在气缸内燃气对活塞作功基础上的指标，主要用来评定气缸内工作循环的完善程度。它只考虑气缸内的热能转换成机械能的转换程度，而不涉及柴油机本身的一系列机械损失。指示指标主要有平均指示压力  $p_i$ 、指示功率  $P_i$ 、指示燃油消耗率  $g_i$  和指示热效率  $\eta_i$ 。

有效指标是建立在柴油机输出轴所得到的有效功基础上的指标，它既考虑气缸内的热损失，又考虑柴油机的机械损失。有效指标是真正标志柴油机作功能力和经济性能的指标。有效指标主要有平均有效压力  $p_e$ 、有效功率  $P_e$ 、有效燃油消耗率  $g_e$  和有效热效率  $\eta_e$ 。

### 一、指示指标

#### 1. 平均指示压力 $p_i$

假设有一个恒定的压力作用在活塞上，推动活塞从上止点运动到下止点，所作的功  $L_i$  与一个工作循环的指示功相等，那么这个恒定的压力就称为平均指示压力  $p_i$ 。这个定义的几何意义是：某缸完成一个工作循环，在实测的  $p-V$  示功图上所描出的闭合曲线所围成的面积，与同一个图上具有相同横坐标宽度的长方形的面积相等，则这个长方形的纵坐标