



# 21世纪高职船舶系列教材

SHIJI GAOZHI CHUANBO XILIE JIAOCAI

船舶动力专业

## 船舶柴油机 使用及维护

CHUANBO CHAIYOUJI  
SHIYONG JI WEIHU

主编 罗红英  
主审 熊仕涛



HEUP 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press



# 21世纪高职船舶系列教材

SHIJI GAOZHI CHUANBO XILIE JIAOCAI

船舶动力专业

## 船舶柴油机使用及维护

CHUANBO CHAIYOUJI

SHIYONG JI WEIHU

主 编 罗红英

主 审 熊仕涛

HEUP 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press

## 内 容 简 介

本书是为了适应国家示范性建设重点专业——轮机工程技术专业教学改革需要,按照《船舶柴油机使用及维护》课程标准而编写的。

本书共分十章,主要内容包括:船舶柴油机基本知识、柴油机主要机件、换气与增压、燃油喷射与燃烧、润滑与冷却、启动、换向和调速、柴油机特性及选型、示功图测录和分析、柴油机振动与减振、柴油机运行管理与应急处理等。

本书为船舶类高等职业教育三年制船舶内燃机及动力装置专业教学用书,二年制也可参考使用。同时,本书还适用于船员的考证培训、船舶修造厂工程技术人员的自学以及其他形式的职业教育。

## 图书在版编目(CIP)数据

船舶柴油机使用及维护/罗红英主编. —哈尔滨:  
哈尔滨工程大学出版社,2010.1(2011.8重印)  
ISBN 978-7-81133-678-8

I. ①船… II. ①罗… III. ①船用柴油机—使用②船用柴油机—维修 IV. ①U664.121

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 032867 号

---

出版发行 哈尔滨工程大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号  
邮政编码 150001  
发行电话 0451-82519328  
传 真 0451-82519699  
经 销 新华书店  
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂  
开 本 787mm×1 092mm 1/16  
印 张 19.75  
字 数 480 千字  
版 次 2010 年 3 月第 1 版  
印 次 2011 年 8 月第 2 次印刷  
定 价 36.00 元  
<http://press.hrbeu.edu.cn>  
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

---

## 21 世纪高职系列教材编委会

(按姓氏笔画排序)

|      |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|
| 主 任  | 孙元政 |     |     |     |
| 主任委员 | 丛培亭 | 刘 义 | 刘 勇 | 杨永明 |
|      | 张亦丁 | 季永青 | 罗东明 | 施祝斌 |
|      | 倪依纯 | 康 捷 | 曹志平 | 熊仕涛 |
| 委 员  | 丛培亭 | 刘 义 | 刘 勇 | 刘义菊 |
|      | 孙元政 | 闫世杰 | 杨永明 | 陈良政 |
|      | 沈苏海 | 肖锦清 | 周 涛 | 季永青 |
|      | 罗东明 | 俞舟平 | 胡启祥 | 胡适军 |
|      | 施祝斌 | 钟继雷 | 唐永刚 | 徐立华 |
|      | 郭江平 | 倪依纯 | 康 捷 | 曹志平 |
|      | 熊仕涛 | 潘汝良 | 蔡厚平 |     |

# 前言

船舶柴油机使用及维护 I

CHUANBOCHAIYOUJISHIYONGJIWEIHU

为深入贯彻《国务院关于大力发展职业教育的决定》，积极推进课程改革和教材建设，为职业教育教学和培训提供更加丰富、多样和实用的教材，更好地满足我国造船工业快速发展的需要。武汉船舶职业技术学院轮机工程技术专业作为全国示范性重点建设专业，在 2004 年度国家精品课程《船舶内燃机使用及维修》的基础上，率先进行了专业人才培养方案和课程的教学改革，结合近几年教改成果和船舶柴油机发展的最新技术，从应用的角度出发更新了教材内容，增加了最先进船用电控柴油机的新技术、新装备，如电控单元 ECU、VIT 机构、电子调速器，实现理论与实际、传统技术与高新技术的结合。本书以中、低速船舶柴油机为典型，系统地阐述船舶柴油机的工作原理、主要结构、系统及维护管理、柴油机特性和选型、示功图测录、振动与减振、运行管理和应急操作等，使学生具备对船舶柴油机进行使用、维护管理、保养、系统调整 and 性能分析的能力。

本书注重以就业为导向，以能力为本位，面向市场，面向社会，体现了职业教育的特色，满足了高素质的实用型、技能型船舶技术专业高等职业人才培养的需要。本教材在组织编写过程中，形成了以下特色：

1. 在对全国相关行业企业调研的基础上，以用人单位对本专业学生职业岗位的能力需求为出发点，适当精简了教学内容，代表性强，适用性广，充分体现了工学结合的原则；
2. 教材内容力求贯彻理论联系实际，突出职业教育特色，循序渐进和少而精的原则，并能反映出国内外船舶柴油机发展水平和最新的动向，具有较强的针对性；
3. 以培养学生职业能力为目标，以任务为驱动，在每章前都列出了知识目标和能力目标，每章结尾处归纳了思考与练习题，便于组织教学和学生学学习。

本书共分十章，由武汉船舶职业技术学院、宜昌船舶柴油机有限公司共同编写，罗红英教授任主编，黄政副教授、徐立华副教授任副主编。徐立华副教授编写第一、十章，刘江波高级工程师编写第二章，许昌高级工程师编写第三章，周庆玲副教授编写第四、五章，罗红英教授编写第六章，黄政副教授编写第七、八、九章。

武汉船舶职业技术学院熊仕涛教授担任本书的主审，并提出了宝贵的意见与建议，编者深表谢意。

限于编者经历和水平，衷心地期望使用本书的教师、工程技术人员及学生在阅读本书之后，不当之处恳请批评指正，及时提出修改意见和建议，以便修订再版，共同为提高该书的质量而努力，为此我们将不胜感激！

编者

2009 年 9 月

# 目 录

21世纪高职船舶系列教材  
SHIJI GAOZHI CHUANBO XILIE JIAOCAI

船舶柴油机使用及维护

## 第一章 柴油机的基本知识

- 第一节 柴油机概述
- 第二节 柴油机的热力循环
- 第三节 柴油机的工作原理
- 第四节 柴油机的性能指标和工作参数
- 第五节 船舶柴油机的类型和发展特点
- 思考与练习

1  
1  
3  
5  
13  
18  
22

## 第二章 柴油机主要机件

- 第一节 气缸套和气缸盖
- 第二节 活塞组件
- 第三节 十字头组件和导板
- 第四节 连杆组件
- 第五节 曲轴组件
- 第六节 机体、机座、轴承与贯穿螺栓
- 第七节 故障和维护管理
- 思考与练习

23  
24  
32  
43  
47  
54  
60  
72  
83

## 第三章 换气与增压

- 第一节 换气过程
- 第二节 换气机构
- 第三节 换气机构的故障与维护管理
- 第四节 废气涡轮增压系统
- 第五节 废气涡轮增压器
- 第六节 增压系统的常见故障与维护管理
- 思考与练习

85  
85  
88  
99  
104  
110  
120  
122

## 第四章 燃油喷射与燃烧

- 第一节 燃油简介
- 第二节 喷射系统的组成和要求
- 第三节 喷油设备
- 第四节 燃油的喷射过程和喷油规律
- 第五节 混合气的形成和燃烧
- 第六节 喷射系统的检查与调整
- 第七节 低质燃油的使用
- 第八节 柴油机排气污染与净化
- 思考与练习

124  
124  
129  
133  
145  
150  
158  
163  
166  
169

## 第五章 润滑与冷却

- 第一节 润滑和润滑油

170  
170



|                         |            |
|-------------------------|------------|
| 第二节 气缸润滑                | 176        |
| 第三节 柴油机的润滑              | 183        |
| 第四节 柴油机的冷却              | 189        |
| 第五节 维护管理                | 194        |
| 思考与练习                   | 198        |
| <b>第六章 启动、换向和调速</b>     | <b>199</b> |
| 第一节 启动装置                | 199        |
| 第二节 换向装置                | 207        |
| 第三节 柴油机的调速和机械调速器        | 213        |
| 第四节 液压调速器               | 218        |
| 第五节 电子调速器               | 233        |
| 第六节 操纵系统                | 237        |
| 思考与练习                   | 241        |
| <b>第七章 柴油机特性及选型</b>     | <b>242</b> |
| 第一节 柴油机的工况与特性           | 242        |
| 第二节 负荷特性                | 243        |
| 第三节 速度特性                | 246        |
| 第四节 调速特性和限制特性           | 249        |
| 第五节 推进特性                | 251        |
| 第六节 柴油机的选型区域和使用范围       | 255        |
| 思考与练习                   | 258        |
| <b>第八章 示功图测录和分析</b>     | <b>259</b> |
| 第一节 示功图的测录              | 259        |
| 第二节 示功图的分析 and 计算       | 266        |
| 思考与练习                   | 271        |
| <b>第九章 柴油机振动与减振</b>     | <b>273</b> |
| 第一节 曲柄连杆机构动力学分析         | 273        |
| 第二节 柴油机振动与平衡            | 277        |
| 第三节 轴系振动与减振             | 283        |
| 思考与练习                   | 289        |
| <b>第十章 柴油机运行管理与应急处理</b> | <b>290</b> |
| 第一节 柴油机运行管理             | 290        |
| 第二节 各种应急情况下的操作和管理       | 294        |
| 第三节 柴油机运动中常见故障及排除       | 304        |
| 思考与练习                   | 307        |



# 第一章 柴油机的基本知识

## 知识目标:

1. 正确描述柴油机的主要特点;
2. 简述柴油机的基本结构组成;
3. 简述柴油机实际循环和理论循环的差异;
4. 掌握四、二冲程柴油机的工作原理及二者的区别;
5. 正确描述柴油机增压的意义、增压的分类;
6. 熟悉柴油机各项性能指标和工作参数的定义和意义;
7. 熟悉现代船用柴油机发展的主要特点。

## 能力目标:

1. 能应用定时图说明四、二冲程柴油机的工作原理;
2. 判别二冲程柴油机的换气形式,掌握各种换气形式的特点;
3. 能准确解释柴油机铭牌上的型号及有关技术指标的含义。

## 第一节 柴油机概述

### 一、热机、内燃机、柴油机

柴油机是热机的一种。热机是把燃料的化学能通过燃烧转变为热能,再通过燃烧产物(亦称工质)的膨胀做功把热能转变为机械能的动力机械。

热机可根据燃料燃烧时所在的部位,分为外燃机和内燃机两种类型。外燃机的燃料燃烧在气缸的外部进行,工质膨胀做功在气缸内部进行,如蒸汽机和蒸汽轮机都属于外燃机。内燃机的燃料燃烧以及工质膨胀做功都在气缸内部进行,如柴油机、汽油机和燃气轮机等都属于内燃机;与外燃机相比,内燃机不存在因工质在气缸内外传递过程的热损失,具有较高的热效率。另外,内燃机在尺寸和质量方面也具有明显的优势,因而在与外燃机的竞争中已经取得显著的领先地位。

柴油机和汽油机同属于往复式内燃机,但又都具有各自的工作特点和相应的适用范围。汽油机使用挥发性好的汽油作燃料,采用外部混合法(汽油与空气在气缸外部进气管中的化油器内进行混合)形成可燃混合气,其燃烧为电火花塞点火式。这种工作特点使汽油机不能采用高压压缩比,因而限制了汽油机的经济性不能大幅度提高,也不允许作为船用发动机使用(汽油的火灾危险性大),但它工作柔和、噪音低、比质量轻,因而广泛用于轿车和轻型运输车辆。

柴油机是一种压缩发火的往复式内燃机。柴油机使用挥发性较差的柴油或劣质燃油作



燃料,采用内部混合法(燃油与空气的混合发生在气缸内部)形成可燃混合气,缸内燃烧靠缸内空气被压缩后形成的高温燃气自行发火。

通常,柴油机具有以下突出的优点:

- (1)具有较高的压缩比,因此热效率最高,可高达 55%,可燃用廉价的重油,经济性好;
- (2)功率范围广,从 0.6 kW 至 47 000 kW,可以适应不同动力设备的需要;
- (3)尺寸小,比质量(kg/kW)轻,便于机舱布置;
- (4)机动性好,启动方便,加速性能好,能直接反转,便于使用和管理。

同时,柴油机也存在某些缺点:

- (1)存在着较强的机身振动、轴系扭转振动及噪声;
- (2)某些零部件的工作条件恶劣,高温、高压并有冲击性载荷。

上述优点使柴油机被广泛地应用于各个领域。尤其柴油机自 1904 年首次用作船舶推进装置以来,经过不断地完善和发展,逐步形成了以经济性好、可靠性高和使用寿命长为主要特点的船舶柴油机系列。目前,在船舶主动力装置中,柴油机已占绝对的领先地位。

## 二、柴油机的基本结构

柴油机由固定部件、运动部件和一些系统组成。

图 1-1 为四冲程柴油机主要部件。

### 1. 固定部件

主要包括气缸盖、气缸套、机体、机座、主轴承等。它们构成柴油机本体,支承运动件,并由气缸盖、气缸套与活塞组件组成燃烧室和燃气工作的空间(气缸)。

### 2. 运动部件

主要包括活塞组件、连杆组件、曲轴飞轮组件等。它们组成“曲柄-连杆”机构,将活塞的往复运动转变成曲轴的回转运动,实现热能到机械能的转换。

### 3. 主要系统

主要系统有:配气系统(由换气机构的气阀组件、气阀传动组件、凸轮轴及其传动机构和进、排气管道等组成)、燃油系统(由供油系统的日用油柜、燃油滤清器和输油泵等和喷射系统的喷油泵、高压油管及喷油器组成)、冷却系统、润滑系统等。

此外,船舶柴油机还将启动、调速、换向等装置集中控制组成操纵系统。

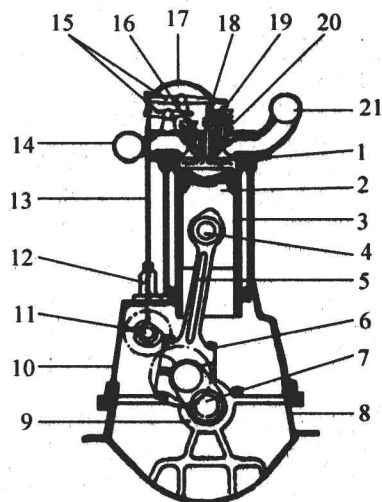


图 1-1 柴油机的主要部件

- 1—气缸盖;2—活塞;3—气缸套;4—活塞销;  
5—连杆;6—连杆螺栓;7—曲轴;8—机座;9—主轴承;10—机体;11—凸轮轴;12—喷油泵;  
13—顶杆;14—进气管;15—摇臂;16—气阀;  
17—高压油管;18—喷油器;19—排气阀;20—气阀弹簧;21—排气管

## 三、柴油机的常用几何术语

柴油机的常用几何术语如图 1-2 所示。

(1)上止点(TDC, Top Stroke Center):活塞在气缸中运动的最上端位置,即离曲轴中心线最远时的位置。

(2)下止点(BDC, Bottom Stroke Center):活塞在气缸中运动的最下端位置,即离曲轴中心



线最近时的位置。

(3)冲程( $S$ , Stroke):又称行程。活塞在上、下止点间移动的直线距离。活塞移动一个冲程相当于曲轴转动 $180^\circ$ 曲轴转角(CA),所以它等于曲柄回转半径(曲柄半径 $R$ )的两倍,即 $S = 2R$ 。

(4)气缸直径( $D$ , Diameter):气缸套的名义内径。

(5)压缩室容积( $V_c$ ):活塞位于上止点时,活塞顶与气缸盖底面之间的气缸容积,又称燃烧室容积。此时活塞最高顶面与气缸盖底平面之间的垂直距离称为余隙高度(顶隙)。

(6)气缸工作容积 $V_h$ :活塞从上止点到下止点所扫过的气缸容积。

$$V_h = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot S \quad (1-1)$$

(7)气缸总容积 $V_a$ :活塞位于下止点时,活塞顶以上的全部气缸容积。显然,它是压缩室容积和工作容积之和,即 $V_a = V_c + V_h$ 。

(8)压缩比 $\epsilon$ :气缸总容积与压缩室容积的比值,亦称几何压缩比,即

$$\epsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_c + V_h}{V_c} = 1 + \frac{V_h}{V_c} \quad (1-2)$$

压缩比表明压缩过程中进入缸内的空气被压缩的程度,它是柴油机的主要性能参数之一。压缩比越大,压缩终点的温度和压力就越高,对燃油的发火、柴油机启动有利,而且热效率也越高。但压缩比过高会使柴油机工作粗暴,机件机械负荷增加,磨损加剧。因此柴油机要有合适的压缩比,一般为 $12 \sim 22$ ,中、高速柴油机的压缩比高于低速机。

当气缸直径与活塞冲程确定后,气缸工作容积 $V_h$ 也随着确定了,所以若要调整压缩比,可通过改变压缩容积 $V_c$ 来实现。

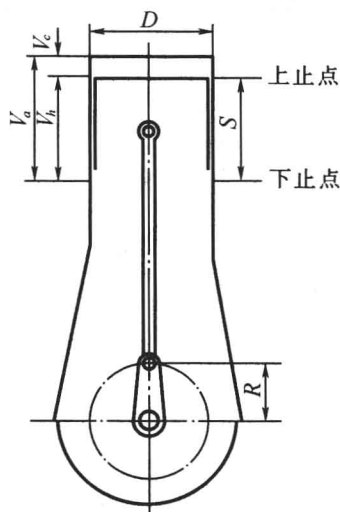


图 1-2 柴油机的常用几何术语

## 第二节 柴油机的热力循环

### 一、柴油机的理论循环

柴油机的每一个工作循环是燃料的热能转换为机械功的热力循环,是由多个实际热力过程组成的。为了便于分析研究,需借助于理论循环。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如下。

①用比较简单的理论公式说明循环中各基本热力参数的关系,找出提高理论循环热效率的有效途径;

②确定循环热效率的理论极限,以判断柴油机循环的完善程度;

③有利于比较各种热力循环的经济性和动力性。

由热力学可知,按加热方式的不同假设,可以得到三种内燃机的理论循环,分别是等容加热循环(Otto 循环)、等压加热循环(Diesel 循环)和混合加热循环(Sabathe 循环),图 1-3 是



三种理论循环的  $p-V$  示意图。

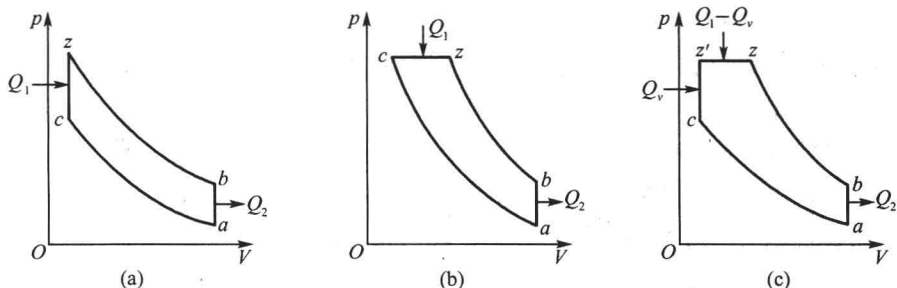


图 1-3 典型的理论循环  $p-V$  示意图

(a) 等容加热循环; (b) 等压加热循环; (c) 混合加热循环

(1) 等容加热循环 由绝热压缩过程  $a-c$ 、等容加热过程  $c-z$  (加热量  $Q_1$ )、绝热膨胀过程  $z-b$  及等容放热过程  $b-a$  (放热量  $Q_2$ ) 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。现代高压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  $c-z'$  (加热量  $Q_v$ )、等压加热过程  $z'-z$  (加热量  $Q_1 - Q_v$ )、绝热膨胀过程  $z-b$  及等容放热过程  $b-a$  所组成。一般柴油机都按此循环工作。

混合加热循环的热效率  $\eta_i$  的计算公式为

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\epsilon^k - 1} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)} \quad (1-3)$$

式中  $k$ ——绝热指数;

$\epsilon$ ——压缩比,  $\epsilon = V_a/V_c$ ;

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

$\rho$ ——初期膨胀比,  $\rho = V_z/V_{z'}$ 。

由上式可知,混合加热循环的理论热效率  $\eta_i$  随压缩比  $\epsilon$ 、压力升高比  $\lambda$  和绝热指数  $k$  的增加而提高,随初期膨胀比  $\rho$  的增大而降低。从理论循环所得到的结论是不考虑柴油机实际工作条件的约束,但在指导实践时,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。

## 二、柴油机的实际循环

工质是实际混合气,以燃烧加热和排气放热,并存在各种热力损失的实际工作循环称为实际循环。柴油机的实际循环与理论循环相比,存在许多不可避免的损失(如机械摩擦、散热、燃烧不完全等),使它不可能达到理论循环的热效率  $\eta_i$ ,分析实际循环与理论循环之间的损失,有助于掌握两者之间的差异,为提高柴油机工作过程的完善程度指明方向。柴油机实际循环和理论循环之间的主要差异如下。



### 1. 工质的影响

理论循环中的工质是理想气体,而实际循环中的工质是空气和燃烧产物的混合物。工质成分、比热、分子数的变化以及高温分解等综合因素会使燃烧阶段的压力、温度较理论循环降低,使实际循环的热效率和做功能力下降。

### 2. 气缸壁的传热损失

在实际循环中,柴油机的工质与缸壁之间始终存在着热量交换,并非绝热过程。在压缩过程初期,气缸内气体被气缸壁加热;而在后期,由于气体温度超过了缸壁温度,气体通过缸壁向外传递热量,实际压缩过程总趋势是工质向缸壁放热,因此实际压缩终点压力低于理想循环的绝热压缩终点压力。

膨胀过程更为复杂多变。在膨胀初期由于后燃现象以及原在高温时已分解的燃烧产物的重新复合反应,使缸内工质加热膨胀;在膨胀后期,由于后燃结束及复合反应的减弱使工质为散热膨胀。膨胀过程是一个工质被加热的多变过程,膨胀终点气缸内压力高于绝热膨胀压力。

### 3. 换气损失

理论循环是一个闭口循环,混合加热和定容放热,无须进行工质的替换,而实际循环必须排出废气和吸入新鲜空气。在排气过程中,为了减少排气消耗的功,其排气阀总是提前开启,让废气在下止点前某点就开始排出,由此减少了一部分有用功,称为膨胀损失功;在排气和吸气过程中,不可避免存在流动阻力损失,活塞推出废气的排气耗功和将空气吸入的进气耗功,也要消耗一部分有用功,称为泵气功。膨胀损失功与泵气功之和为实际循环的换气损失。

### 4. 燃烧损失

燃烧损失是指燃烧不及时、后燃和不完全燃烧等因素综合造成的损失。

在理论循环中,全部热量是由高温热源吸入热量,无燃烧过程。但在实际循环中是靠燃油燃烧放出热量,燃烧过程需要有足够的时间,必然存在着燃烧速度有限性所形成的燃烧不及时,以及部分燃油在膨胀中仍继续燃烧的后燃现象。另外,由于空气不足、混合物形成不良造成的不完全燃烧,使燃料的热值未充分利用,产生不完全燃烧损失。

### 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,以及活塞运动速度与燃烧速度不匹配而偏离定容、定压加热过程所产生的时间损失等。

由于上述各项损失的存在,使实际循环的热效率明显下降。如一台非增压四冲程柴油机的压缩比  $\epsilon = 13$ ,过量空气系数  $\alpha = 2$ ,最高燃烧压力  $p_z = 5 \text{ MPa}$ ,其理论循环热效率  $\eta_t = 61\%$ ,而实际循环热效率降低到  $45\%$ ,仅为理论循环热效率的  $74\%$ 。

## 第三节 柴油机的工作原理

### 一、柴油机的工作原理

柴油机是一种压缩发火的往复式内燃机。它的基本工作原理是使燃油直接在发动机的气缸中燃烧,将燃油的化学能转变成热能,从而生成高温高压的燃气,推动活塞运动,通过曲柄连杆机构对外做功,将热能转变为机械能。

柴油机每做一次功,必须经过进气、压缩、燃烧、膨胀和排气五个过程才能实行,进行了



这五个过程就完成了一个工作循环。然后不断重复进行这些过程,使柴油机持续工作。柴油机可通过四个冲程(即曲轴回转两周)或两个冲程完成一个工作循环,分别称为四冲程或二冲程柴油机。

### 1. 四冲程柴油机基本工作原理

图 1-4 中的四个简图分别表示柴油机工作循环五个过程进行的情况以及活塞、曲轴、气阀等部件的有关动作位置。

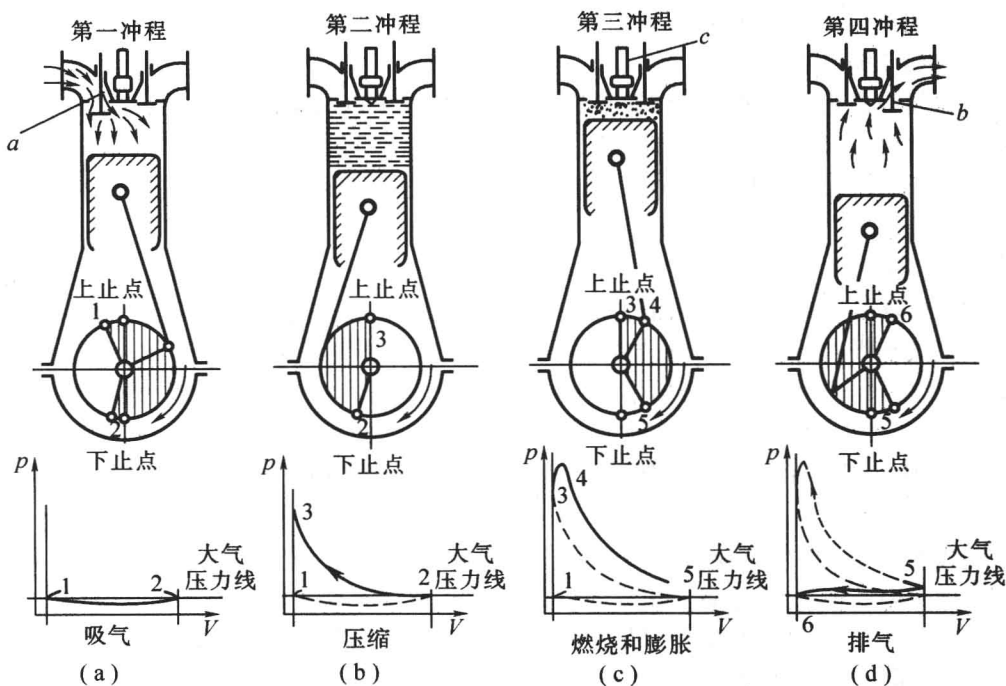


图 1-4 四冲程柴油机工作原理

第一冲程——进气冲程:使气缸内充满新鲜空气,如图 1-4(a)所示。

活塞由上止点下行,进气阀  $a$  已打开,由于气缸容积不断增大,缸内气体压力下降,依靠气缸内外的压差作用,新鲜空气通过进气阀被吸人气缸。由于受进气系统阻力的影响,气缸内压力低于大气压力,进气终了时缸内气压  $p_a$  约为  $0.08 \sim 0.095$  MPa,  $t_a$  温度约为  $30 \sim 70$  °C。实际上,进气阀一般在活塞到达上止点前即提前打开(曲柄位于点 1),下止点后延迟关闭(曲柄位于点 2)。曲柄转角  $\varphi_{1-2}$ (图中阴影线所示的角度)表示进气持续角,约为  $220^\circ \sim 250^\circ$  CA(曲柄转角)。

第二冲程——压缩冲程:为燃料燃烧及工质膨胀做功创造条件,如图 1-4(b)所示。

活塞从下止点向上运动,自进气阀  $a$  关闭(点 2)开始压缩缸内新鲜空气,一直到活塞到达上止点(点 3)为止。压缩终了时,终点压力  $p_c$  升高到  $3 \sim 6$  MPa,终点温度  $t_c$  升至  $600 \sim 700$  °C(燃油的自燃温度约为  $210 \sim 270$  °C)。曲柄转角  $\varphi_{2-3}$  表示压缩过程持续角,约为  $140^\circ \sim 160^\circ$  CA。

第三冲程——燃烧和膨胀冲程:完成两次能量转换,如图 1-4(c)所示。



活塞在上止点附近,喷入气缸的燃油急剧燃烧,使缸内工质的压力和温度迅速升高,最高爆发压力(最高燃烧压力) $p_z$ 增高到5~8 MPa,甚至15 MPa以上。最高温度 $t_z$ 上升到1400~1800℃或更高些。高温高压工质膨胀推动活塞下行做功。在上止点后的某一时刻(点4)燃烧基本结束,工质继续膨胀,到下止点前(点5)排气阀 $b$ 在开启时膨胀过程结束。膨胀终了时缸内气体压力 $p_b$ 约为0.25~0.45 MPa,温度 $t_b$ 约为600~700℃。曲柄转角 $\varphi_{3-4-5}$ 表示燃烧和膨胀过程持续角,约为130°~160°CA。

第四冲程——排气冲程:将废气排出气缸外,为下一循环作准备,如图1-4(d)所示。

排气阀 $b$ 开启时,活塞尚在下行,废气靠气缸内外压力差进行自由排气。当活塞从下止点上行时,废气被活塞强制推出气缸,此时排气过程是在略高于大气压力(约1.05~1.1大气压),且在压力基本不变的情况下进行的。实际上,排气阀一直延迟到上止点之后(点6)才关闭。曲柄转角 $\varphi_{5-6}$ 表示排气持续角,约为230°~260°CA。

经过上述四个冲程,柴油机就完成了一个工作循环。活塞继续运动,另一个新的循环又按同样顺序重复进行,以维持柴油机的连续运转。

四冲程柴油机每完成一个工作循环,曲轴要转两转(720°CA),每个工作循环中只有膨胀冲程是做功的,其他三个冲程都是为膨胀冲程服务,都消耗功。柴油机常做成多缸的,这样进气、压缩、排气冲程消耗的能量可由正在做功的气缸供给,单缸柴油机就要由较大的飞轮供给能量。

一个工作循环结束后,在 $p-V$ 坐标上,各个过程曲线已组成一个闭合图形,如图1-4(d)所示。它既可用于研究柴油机工作过程进行的情况,又可用图中压缩过程曲线和燃烧与膨胀过程曲线所包围的面积来计算一个工作循环气缸中所做功(称为指示功)的大小,所以该图形被称为 $p-V$ 示功图。

## 2. 四冲程柴油机的定时及定时图

在四冲程柴油机的工作循环中,各过程的始点和终点都不正好在上、下止点,而是在上、下止点前、后的某一时刻。进、排气阀在上、下止点前、后开启或关闭的时刻称为气阀定时(同样喷油器开启的时刻称为喷油定时)。气阀定时通常用与相应的上、下止点间的曲柄转角来表示。这个用曲柄转角表示定时的圆图称为定时图,如图1-5所示。

在图1-5中,进气阀在上止点前点1开启,在下止点后点2关闭,分别与上止点和下止点形成 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 角, $\varphi_1$ 称进气提前角, $\varphi_2$ 称进气延迟角。排气阀在下止点前点5开启,在上止点后点6关闭,分别与下止点和上止点形成 $\varphi_3$ 和 $\varphi_4$ 角, $\varphi_3$ 称排气提前角, $\varphi_4$ 称排气延迟角。气阀提前开启与延迟关闭是为了将废气排除得干净并增加空气的吸入量,以利于燃油的燃烧,另外还可减小强制排气时活塞的背压。

从图1-5中可以看出,在换气上止点前后,进气阀与排气阀是同时开启的。进气阀与排气阀同时开启所对应的曲柄转角称为气阀重叠角。在气阀重叠开启期间,进气管、气缸、排气管连通,此时废气因流动惯性,可避免废气倒流入进气管内,同时还可抽吸新鲜空气进入气缸。新鲜空气进缸后又将废气扫出,实现所谓燃烧室扫气,还可冷却燃烧室部件。

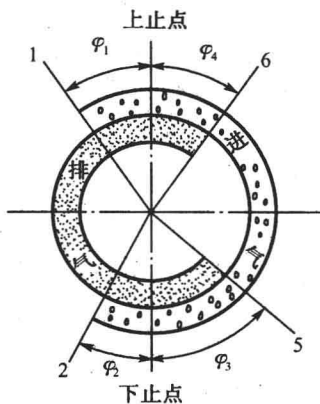


图1-5 四冲程柴油机定时图



各种柴油机的定时是不同的,其大小范围如表 1-1 所示。

表 1-1 四冲程柴油机气阀定时及进、排气阀重叠角( $^{\circ}\text{CA}$ )

| 名 称 | 非增压机              |                   | 增压机               |                   |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|     | 开 启               | 关 闭               | 开 启               | 关 闭               |
| 进气阀 | 上止点前 $15 \sim 30$ | 下止点后 $10 \sim 30$ | 上止点前 $40 \sim 80$ | 下止点后 $20 \sim 40$ |
| 排气阀 | 下止点前 $35 \sim 45$ | 上止点后 $10 \sim 20$ | 下止点前 $40 \sim 55$ | 上止点后 $40 \sim 50$ |
| 重叠角 | $25 \sim 50$      |                   | $80 \sim 130$     |                   |

## 二、二冲程柴油机工作原理

### 1. 二冲程柴油机基本工作原理

与四冲程柴油机相比,二冲程柴油机没有单独的进气与排气过程,其进气与排气过程几乎重叠在下止点前后约  $120^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{CA}$  内同时进行。因此,在结构上二冲程柴油机采用缸套下部设扫气口、排气口,或缸套下部设扫气口、气缸盖上设排气阀的换气结构,而且还必须设置一个专门的扫气泵以提高进气压力,使进气能从扫气口进入气缸,并用新鲜空气驱赶废气排出气缸,即扫气。

采用扫气口-排气口换气形式的二冲程柴油机的工作原理,如图 1-6(a)所示。罗茨式扫气泵  $b$  设在柴油机的一侧,由柴油机带动。空气从泵的吸口  $a$  吸入,经压缩排至大容积的扫气箱  $d$  中,并保持一定的压力。

#### 第一冲程——扫气及压缩

活塞由下止点(点 0)向上移动,活塞在遮住扫气口  $e$  之前,由扫气泵供给储存在扫气箱内的空气,通过扫气口进入气缸,气缸中的残存废气被进入气缸的空气通过排气口  $f$  扫出气缸。当活塞继续上行完全遮住扫气口后(点 3),空气停止充入,便排气还在进行,这阶段称

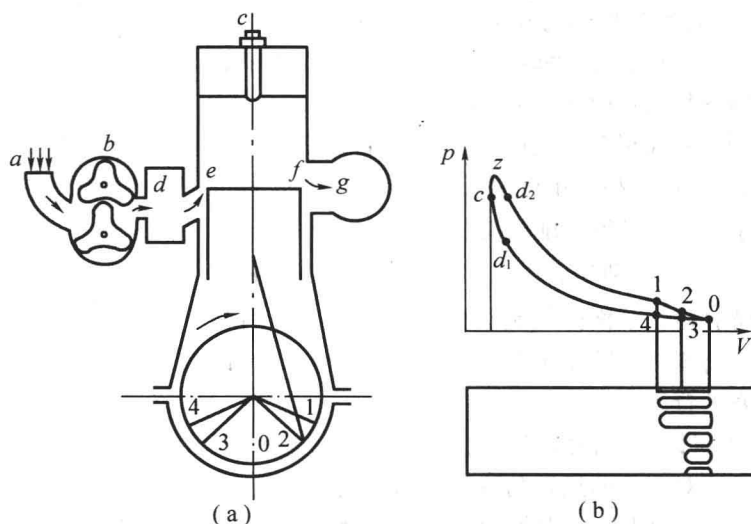


图 1-6 二冲程柴油机工作原理图



为“过后排气阶段”(3-4)。从排气口关闭时(点4)起,气缸中的空气开始被压缩。当压缩至上止点前  $d_1$  点时,喷油器将燃油喷入气缸,与高温高压的空气相混合后发火燃烧。

### 第二冲程——燃烧膨胀及排气

活塞在高温高压燃气的推动下,由上止点下行膨胀做功,直至排气口  $f$  打开(点1),膨胀做功结束,气缸内废气靠气缸内外压力差排入到排气管  $g$ 。当气缸内的压力降至接近扫气压力时(0.105~0.140 MPa),活塞打开扫气口  $e$ (点2),扫气空气进入气缸,同时将气缸内的废气经排气口  $f$  赶出气缸。这一过程一直要延续到活塞越过下止点再次上行遮住扫气口  $e$ (点4)为止,称为“扫气过程”。

此外,从图1-4(b)的二冲程柴油机  $p-V$  示功图上也可以看出它的工作过程,示功图尾部1-2-0-3-4为换气过程,是在膨胀行程末和压缩行程初这一较短的时间内完成的。在上止点前  $d_1$  开始喷油,在点  $c$  开始燃烧,到点  $d_2$  时燃烧结束,与四冲程柴油机基本相同。

与四冲程柴油机一样,二冲程柴油机也可以用定时图来表示它的定时时刻。图1-7是某二冲程柴油机定时图。

由上述可知,柴油机的实际压缩始点并非在下止点。而是在四冲程柴油机的进气阀或二冲程柴油机的排气口(阀)全部关闭的时刻。通常将进气阀或排气口(阀)完全关闭瞬时的气缸容积与压缩室容积之比值称为有效压缩比  $\epsilon_e$ 。

对于二冲程柴油机

$$\epsilon_e = \frac{V_c + (1 - \varphi_s) \cdot V_h}{V_c} = 1 + (1 - \varphi_s) \frac{V_h}{V_c} \quad (1-4)$$

式中  $\varphi_s$ ——冲程损失系数,  $\varphi_s = \text{扫气口高度 } h / \text{冲程 } S$ 。

### 2. 二冲程与四冲程柴油机的比较

二冲程柴油机与四冲程柴油机相比具有如下优点:

(1)二冲程柴油机每两个冲程即曲轴转一转完成一个工作循环。由此可以提高柴油机功率。在气缸直径、活塞行程及转速相同时,理论上的功率是四冲程的两倍。但由于二冲程柴油机存在气缸上气口形成的冲程损失和扫气损失,实际上二冲程柴油机的功率仅是四冲程柴油机功率的1.6~1.8倍。

(2)由于二冲程柴油机曲轴每一转完成一个工作循环,因此回转比四冲程柴油机均匀,可使用较小的飞轮。

(3)二冲程柴油机结构简单,便于维护保养。

二冲程柴油机也有不足之处:

(1)二冲程柴油机换气质量较四冲程柴油机差;

(2)在相同转速下,二冲程柴油机工作循环比四冲程柴油机多一倍,所以二冲程柴油机的热负荷比四冲程柴油机高。

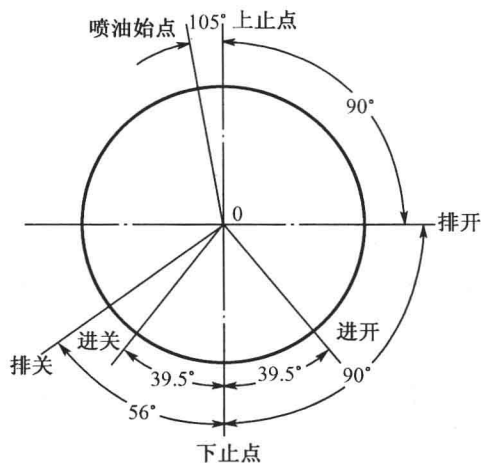


图1-7 二冲程柴油机定时图



### 三、二冲程柴油机的换气形式

二冲程柴油机不同的换气形式对换气质量有重要影响。根据气流在气缸中的流动路线,二冲程柴油机的换气形式可分为弯流(扫气空气由下而上,然后由上而下清扫废气)与直流(气流在气缸内呈直线由下而上清扫废气)两大类,每一大类中又有不同的换气形式。表 1-2 列出了目前二冲程柴油机中常见的换气形式。

表 1-2 二冲程柴油机的换气形式

| 弯流 | 横流       | 简单横流      |
|----|----------|-----------|
|    |          | 扫气口装有单向阀  |
|    | 回流       | 半回流(新型横流) |
|    | 简单半回流    | 扫气口有阀控制   |
|    |          | 排气口有阀控制   |
| 直流 | 排气阀-扫气口式 |           |
|    | 排气口-扫气口式 |           |

#### 1. 直流扫气

气缸下部均匀分布一圈进气口,在气缸盖上有排气阀。空气从气缸下部扫气口端流入气缸,沿气缸中心线上行,驱赶废气从气缸盖上的排气阀排出气缸,如图 1-8 所示。显然,气流在缸内的流动方向是自下而上的直线流动。进气口在纵向(与气缸轴线成角度)和横向(与气缸半径成角度)两个方向均有倾斜角,使扫气空气进入气缸后有向上和绕气缸轴线旋转的运动。这一旋转的气流形成“气垫”,使空气与废气不易掺混,扫气效果较好。同时排气阀的启闭由排气凸轮控制而不受活塞运动的限制,所以排气阀可以与进气口同时关闭,也可以提前关闭,在船用柴油机中 MAN B&W 机型是传统的排气阀-扫气口直流扫气式柴油机。现代船用超长行程柴油机 MAN B&W MC 系列、Sulzer RTA 系列机型都采用排气阀-扫气口直流扫气形式。

#### 2. 弯流扫气

弯流扫气根据气口的布置和结构特点主要分为横流、回流和半回流等,其主要特点见表 1-3。它们的突出优点是:气缸盖上无气阀机构,结构简单,维护管理方便。但也都存在共同的缺陷:气流流动路线长(通常都大于  $2S$ ),且流动路线是弯曲的,新鲜空气与废气容易掺混且存在死角与气流短路,因此换气质量较差,同时缸套下部的进气口两侧受热不均匀,容易产生变形。目前,在行程缸径比  $S/D > 2.2$  的船用大型柴油机中,弯流扫气形式已逐渐被淘汰。弯流扫气主要结构如图 1-9 所示。

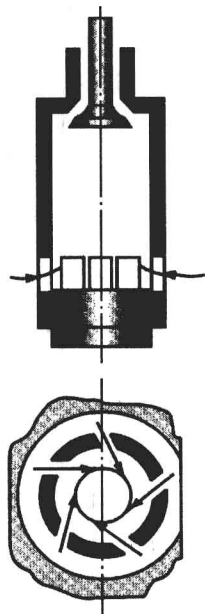


图 1-8 直流扫流示意图