



项目引领 任务驱动

示范性高等职业院校课改规划教材



# 船舶柴油机

(轮机工程技术专业)

于敬来 卢恒荣 编著 陈永芳 主审

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

013035490

U664.1

15

# 船舶柴油机

(轮机工程技术专业)

编 著 于敬来 卢恒荣  
主 审 陈永芳



哈尔滨工程大学出版社

U664.1

15

013032480

## 内容简介

本书以培养学生正确地操作和维护船舶柴油机为目标,为确保船舶柴油机的安全运行打下一定的基础。内容包括船舶柴油机的工作原理、结构特点、工作系统、运行管理以及维护等方面。全书共分八个学习情境:认识船舶柴油机、吊缸检查、曲轴箱检查、燃油喷射系统的维护、换气机构和增压系统的维护、船舶柴油机油水系统的维护、船舶柴油机操纵系统的维护和船舶柴油机的运行管理等。

本书适合高职院校轮机工程专业师生教学使用,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

船舶柴油机 / 于敬来, 卢恒荣编著. —哈尔滨:  
哈尔滨工程大学出版社, 2011. 12  
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0302 - 4

I. ①船… II. ①于… ②卢… III. ①船用柴油机 -  
高等学校 - 教材 IV. ①U664. 121

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 003125 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 哈尔滨市石桥印务有限公司  
开 本 787mm × 1 092mm 1/16  
印 张 31. 25  
字 数 780 千字  
版 次 2012 年 6 月第 1 版  
印 次 2012 年 6 月第 1 次印刷  
定 价 65. 00 元  
<http://press.hrbeu.edu.cn>  
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

---

# 前 言

本书是根据航海类专业教学指导委员会制订的《轮机工程技术指导性教学计划》中的《船舶柴油机》教学大纲要求,同时参考中华人民共和国海事局下发的《海船船员适任考试和评估大纲》中对主推进动力装置——船舶柴油机部分的考试要求,以及多年来我们对该课程的研究,在完成了“基于工作过程船舶柴油机课程的重构”的基础上结合教学经验编写而成的。

编著者在策划和编写过程中,进行了深入的调研,听取了航运业专家的意见,收集了大量的船舶柴油机使用和维护方面的经验和案例,将企业工作任务和学校中的学习任务进行集成,从而构成了本课程的八个学习情境。

本书具有如下的特色与创新:

(1)将本专业职业活动,分解成若干典型的工作任务,按完成工作任务的需要和岗位操作规程,结合职业技能证书考证要求,同时考虑到职业发展的需要来组织本书内容。

(2)通过典型工作过程,引入必须的理论知识,加强实操内容,强调理论在实践过程中的应用。

(3)充分体现以项目或任务引领、实践导向课程的设计思想。教学活动设计的内容具体,并具有可操作性,特别适合于一体化教室内的教学和学习。

(4)本书图文并列,文字表达精炼、准确、科学,从而提高了可读性和易理解性。

(5)本书内容体现先进性、通用性、实用性,将本专业新技术、新设备及时地纳入教材,使其更贴近本专业的发展和实际需要。

本书由于敬来、卢恒荣、王雪峰、董红专、董挺等人编撰,全书由于敬来负责统稿。在编著过程中得到许多航运公司同行们特别是香港东方海外货柜有限公司(OOCL)的轮机长董红专、董挺等的支持和帮助。我校的黄华、袁对、徐惠华等老师提供了大量的资料,陈永芳副教授对本书进行了主审,并提出了许多宝贵的建议,刘秀辉教授对基于工作过程课程的结构进行了全面的指导,同时在编写过程中参考或引用了国内外一些专家学者的论著,在此表示衷心的感谢!

由于教材内容的广泛和现代柴油机技术的迅速发展,编者学识水平有限,书中难免存在不当之处,恳请读者批评指正。

编著者

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 学习情境1 认识船舶柴油机 .....          | 1   |
| 项目1 认识柴油机的工作过程 .....         | 1   |
| 项目2 认识柴油机结构和性能参数 .....       | 12  |
| 学习情境2 吊缸检查 .....             | 27  |
| 预备知识1 柴油机的受力分析 .....         | 27  |
| 预备知识2 燃烧室部件的机械负荷和热负荷 .....   | 30  |
| 项目1 筒形活塞式柴油机的吊缸检查 .....      | 34  |
| 项目2 十字头式柴油机的吊缸检查 .....       | 81  |
| 项目3 吊缸后的管理 .....             | 106 |
| 学习情境3 曲轴箱检查 .....            | 109 |
| 项目1 筒形活塞式柴油机的曲轴箱检查 .....     | 109 |
| 项目2 十字头式柴油机的曲轴箱检查 .....      | 134 |
| 学习情境4 燃油喷射系统的维护 .....        | 159 |
| 预备知识 燃油喷射和燃烧理论 .....         | 159 |
| 项目1 四冲程筒形机的喷油设备维护 .....      | 191 |
| 项目2 大型低速柴油机的喷油设备维护 .....     | 209 |
| 学习情境5 换气机构和增压系统的维护 .....     | 242 |
| 预备知识 换气过程和评定换气过程质量的参数 .....  | 242 |
| 项目1 四冲程筒形活塞式柴油机换气机构的维护 ..... | 248 |
| 项目2 十字头式柴油机换气机构的维护 .....     | 268 |
| 项目3 废气涡轮增压系统的维护 .....        | 288 |
| 学习情境6 船舶柴油机油水系统的维护 .....     | 319 |
| 项目1 柴油机燃油系统的维护 .....         | 319 |
| 项目2 柴油机润滑系统的维护 .....         | 328 |
| 项目3 船用分油机和滤器的维护 .....        | 350 |
| 项目4 柴油机冷却系统的维护 .....         | 375 |
| 学习情境7 柴油机操纵系统的维护 .....       | 383 |
| 项目1 认识柴油机特性及使用范围 .....       | 383 |
| 项目2 调速器的调节与维护 .....          | 396 |
| 项目3 启动和换向装置的维护 .....         | 420 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 学习情境 8 船舶柴油机的运行管理 .....  | 442 |
| 项目 1 船舶主柴油机的操作 .....     | 442 |
| 项目 2 发电柴油机的操作 .....      | 456 |
| 项目 3 柴油机运行参数的测录与分析 ..... | 463 |
| 项目 4 柴油机的应急处理 .....      | 479 |
| 参考文献 .....               | 494 |

# 学习情境 1 认识船舶柴油机

## 【情境描述】

柴油机自 1897 年由 Rudolf Diesel 发明以来,经历了百年的发展,具有燃料廉价且耗油量少、热效率较高以及在尺寸和质量方面的明显优势,是目前最安全、最可靠和最经济的船舶动力机械,是一种最合理的商用船舶动力装置,在交通运输业中应用极为广泛。柴油机在船舶上主要用作驱动船舶螺旋桨和发电机的动力。

本学习情境安排了认识柴油机的工作过程、柴油机类型和结构等项目。

## 【学习目标】

具备柴油机基本知识和柴油机工作过程知识的能力;具有认识各类船舶柴油机及在船上应用特点的能力。

## 项目 1 认识柴油机的工作过程

### 任务 1 认识柴油机动力装置的特点

#### 一、船舶动力装置

动力机械和工作机械通常是在工程上使用的两大类机械设备。动力机械是将其他形式的能量,如热能、电能、风能等转化为机械能,而工作机械则是利用机械能来完成所需的工作。把热能转换成机械能的动力机械称为热机。热机是最重要的动力机械,蒸汽机、蒸汽轮机以及柴油机、汽油机等都是热机中较典型的机型。

热机在工作过程中需要完成两次能量转换过程。第一次能量转换过程是将燃料的化学能通过燃烧转换为热能,第二次能量转换过程是将热能通过工质膨胀转换为机械能。如果两次能量转换过程是在同一机械设备的内部完成的,则称之为内燃机。如汽油机、柴油机以及燃气轮机都属于内燃机。由于在内燃机中,两次能量转换均发生在气缸内部,从能量转换角度来看,此类机械能量损失小,具有较高的热效率。另外,在尺寸和质量等方面也具有明显优势(例如,燃气轮机在热机中的单位质量功率最大)。如果两次能量转换过程分别在两个不同的机械设备内部完成,则称之为外燃机。如蒸汽机和蒸汽轮机等都属于外燃机。在该类机械中,化学能转变成热能的过程(燃烧)发生在锅炉中,热能转变成机械能的过程发生在汽缸内部。此种机械由于热能需经某中间工质(水蒸气)传递,必然存在热损失,所以它的热效率不高,整个动力装置也十分笨重。内燃机在与外燃机竞争中已经取得明显的领先地位。

动力机械的运动机构基本上有两种运动形式,一种为往复式,另一种为回转式。在往复式发动机中,工质的膨胀做功是通过活塞的往复运动实现的;而回转式发动机则是利用

高速流动的工质在工作叶轮内膨胀,推动叶轮转动而工作的。往复式发动机是间歇工作的,其工质的最高温度较高,而回转式发动机是连续工作的,由于受材料热强度的限制,其工质的最高温度不能太高,这就限制了其热效率的进一步提高。

柴油机和汽油机同属往复式内燃机,但又都具有各自的工作特点。在船用发动机中,柴油机已经取得了绝对的统治地位,如表 1-1-1 所示。

表 1-1-1 柴油机与汽油机的区别与比较

|           | 柴 油 机                   | 汽 油 机               |
|-----------|-------------------------|---------------------|
| 使用燃料不同    | 使用柴油或劣质燃料油              | 使用挥发性好的汽油           |
| 可燃混合气形成不同 | 采用内部混合法                 | 采用外部混合法             |
| 发火方式不同    | 缸内燃烧采用压缩式               | 缸内燃烧为点火式            |
| 压缩比不同     | 压缩比较高,因此经济性较高;一般为 12~22 | 压缩比较低;一般为 6~10      |
| 启动性能不同    | 低温启动性能差,工作粗暴,噪音大        | 低温启动性能好,工作柔和,噪音低    |
| 应用场合不同    | 柴油火灾危险性小,陆地海上均可         | 汽油有火灾的危险,汽油机只用于陆地   |
| 有效热效率不同   | 热效率较高,一般为 0.30~0.55     | 热效率较低,一般为 0.15~0.40 |

各类型船舶因其用途和吨位不同,所采用的动力装置型式也不同。一般根据其所采用的发动机类型、动力传递方式和推进器的种类加以区分。按发动机的类型可分为柴油机动力装置、汽轮机动力装置、燃气轮机动力装置、联合动力装置和核动力装置等。民用船舶一般都选用柴油机作为主动力装置(简称主机)。同时,发电机也用柴油机来驱动(常称为副机)。

二、船舶柴油机的特点

通常,柴油机动力装置具有以下突出优点:

- (1) 经济性好。有效热效率一般可达 40% 以上,大型柴油机可高达 55%;可使用价廉的重油,燃油费用低。
- (2) 功率范围宽广。单机功率从 0.6~97 300 kW,适用的领域广,基本可满足各种不同类型船舶的要求。
- (3) 尺寸小,质量轻。有利于船舶机舱布置。
- (4) 机动性好。柴油机启动方便,加速性能好。有较宽的转速和负荷调节范围,可直接反转,能适应船舶航行的各种工况要求。
- (5) 可靠性高,寿命长,维修方便。

同时,柴油机也具有以下缺点:

- (1) 存在机身振动、轴系扭转振动和噪音。
- (2) 某些部件的工作条件恶劣,承受高温、高压并具有冲击性负荷。

三、柴油机的基本结构术语及参数

- (1) 上止点(T. D. C. ——Top Dead Center)。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。
- (2) 下止点(B. D. C. ——Bottom Dead Center)。活塞在气缸中运动的最下端位置,也就是活塞离曲轴中心线最近的位置。

(3) 行程( $S$ )。指活塞从上止点移动到下止点间的直线距离,它等于曲轴曲柄半径 $R$ 的两倍( $S=2R$ )。活塞移动一个行程,相当于曲轴转动 $180^\circ\text{CA}$ (Crank Angle, 曲轴转角)。

(4) 缸径( $D$ —Diameter)。气缸的内径。

(5) 气缸余隙容积( $V_c$ )。活塞在上止点时,活塞顶上的全部空间容积(活塞顶、气缸盖底面与气缸套表面之间所包围的空间),又称压缩室容积,如图 1-1-1 所示。

(6) 余隙高度( $h_c$ )。上止点时活塞最高顶面与气缸盖底平面之垂直距离,又称顶隙。

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

$$V_s = \frac{\pi D^2}{4} S$$

(8) 气缸总容积( $V_a$ )。活塞位于下止点时,活塞顶以上的气缸全部容积,亦称气缸最大容积。显然:

$$V_a = V_s + V_c$$

(9) 压缩比( $\varepsilon$ )。气缸总容积与压缩室容积之比值,亦称几何压缩比。

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_c + V_s}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c}$$

压缩比表示缸内工质压缩程度。一般大型低速机 $\varepsilon=12\sim13$ ;中速机 $\varepsilon=14\sim15$ ;高速机 $\varepsilon=14\sim21$ 。总之,柴油机压缩比约为 $12\sim21$ ,中、高速机的压缩比高于低速机。

#### 四、活塞上止点的校正

固定于机身上的指针是柴油机各种定时具体观察的标志。当盘车时,指针指示出飞轮轮缘上的各种定时刻线,但当指针被碰歪或紧固松动而移位时就会发生指针所指的刻度与活塞或曲柄的实际位置不符的现象。在调整或检查柴油机的各种定时前,特别是经检修后的柴油机,应首先校正指针位置。校正方法如下,如图 1-1-2 所示。

(1) 拆除第一缸的缸盖,用百分表触头纵向对准活塞顶部的某一平整部分,并预紧一定值,以便测量活塞位移。

(2) 顺车(顺时针)方向盘车,当活塞由下止点上行至上止点前约 $10^\circ\sim15^\circ$ 曲柄转角的任一位置时停止盘车,此时百分表指针被压至某一读数值(如 $H_1$ ),记下该读数,并在指针所对的飞轮轮缘上作上记号“Ⅰ”。

(3) 倒车(逆时针)方向盘车,使活塞下行越过下止点后又上行。当百分表被压到与第一次读数值 $H_1$ 相同时停止盘车,在飞轮轮缘上作记号“Ⅱ”。

(4) 作出“Ⅰ”与“Ⅱ”圆弧间的中点,记为“Ⅲ”。记号“Ⅲ”就是第一缸的 $0^\circ$ 位置,即第一缸活塞的上止点位置。

(5) 检查指针是否对准位置“Ⅲ”。若未对准,则应移动指针使其对准位置“Ⅲ”。

注意:盘车前,应打开示功阀,并知会其他人员,确定柴油机周围无障碍物后,才可进行盘车。为使测量准确,操作步骤(2)~(4)应多做几次。

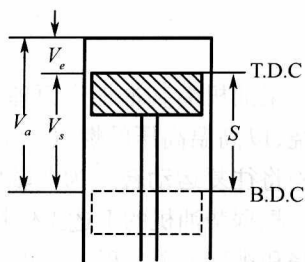


图 1-1-1

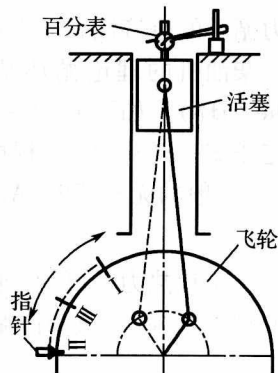


图 1-1-2

## 任务2 认识柴油机的工作过程

柴油机的基本工作原理是采用压缩发火方式使燃料在缸内燃烧,以高温高压的燃气工质在气缸中膨胀推动活塞往复运动,并通过活塞—连杆—曲柄机构将往复运动转变为曲轴的回转运动,从而带动工作机械。

根据柴油机的上述工作特点,燃油在柴油机气缸中燃烧做功,必须通过进气、压缩、燃烧、膨胀和排气五个过程才能实现,这五个过程称为柴油机的基本工作过程,如图 1-1-3 所示。

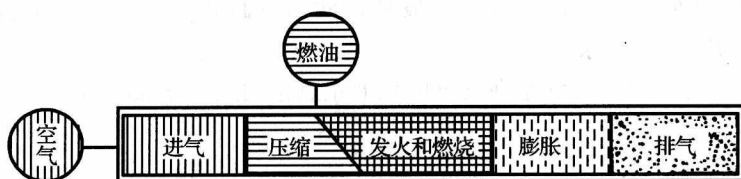


图 1-1-3

进行了这五个过程就完成了个工作循环,接着又重复进行下一个工作循环。如此不断地周而复始,实现柴油机的连续工作。在柴油机中可用活塞的两个行程或四个行程完成一个工作循环,相应称为二冲程或四冲程柴油机。

### 一、柴油机的工作循环

#### 1. 柴油机的理论循环

在柴油机的实际循环中,燃料的化学能转变为机械能的过程是十分复杂的。例如,在整个循环中工质的质和量不断变化,整个过程是不可逆的。在能量转换中还存在着机械摩擦、泵气、散热及燃烧不完全等一系列必不可免的损失,使确切地描述其实际热力过程变得十分困难。为了能利用工程热力学的基本理论与公式进行研究,就应根据柴油机实际适当地简化和抽象化。这种基于工程热力学的基本理论把实际过程加以抽象和简化,将其概括成由几个基本热力过程所组成的循环叫做理论循环或理想循环。

通过研究这些理论循环可以用简单的公式说明循环中的基本热力参数的关系,以明确提高理论循环热效率和平均压力的有效途径;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;有利于比较各种热力循环的经济性和动力性。

柴油机的理论循环基本上为混合加热循环(Sabathe 循环)。如图 1-1-4 所示,在定容  $c-z'$  (2-3) 与定压  $z'-z$  (3-4) 过程中加入热量  $Q_1$  ( $Q'_1 + Q''_1 = Q_1$ )。一般的无气喷射(Airless Injection)柴油机按此循环工作。

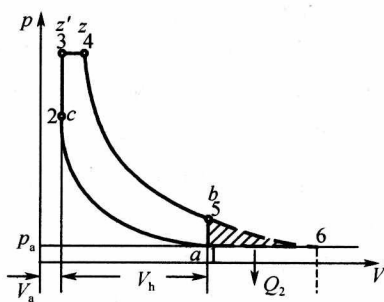


图 1-1-4

由工程热力学可知,理论循环示功图所包围的面积 1—2—3—4—5—1 即为一个循环所做的理论功  $W_{th}$ 。该理论循环的热效率  $\eta_i$  的计算公式为

$$\eta_i = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]}$$

式中  $\varepsilon$ ——压缩比,  $\varepsilon = V_a/V_c$ ;

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

$\rho$ ——初期膨胀比,  $\rho = V_z/V_c$ ;

$k$ ——工质绝热指数。

在极端的条件下,当  $\lambda = 1$  时为定压加热循环,也称 Diesel 循环,是在定压条件(3—4)下加入热量  $Q_1$ ,早期的空气喷射式柴油机按此循环工作。现代船用低速柴油机由于  $S/D$  值的提高,转速下降和压缩压力的提高,其工作循环基本属于定压加热循环。由热效率公式可看出,定压加热循环的热效率  $\eta_t$  只随压缩比  $\varepsilon$ 、绝热指数  $k$  和初期膨胀比  $\rho$  变化而变化。由于这类内燃机最高压力  $p_z$  就是压缩终点压力,而且压缩的是纯空气,其压缩比可以大大提高,使这类内燃机的热效率  $\eta_t$  提高。 $\rho$  增大表示柴油机的负荷增加,会使热效率  $\eta_t$  下降。

当  $\rho = 1$  时为定容加热循环,也称为 Otto 循环,点燃式内燃机(如汽油机)按此循环工作。由热效率公式可知,定容加热循环的热效率只随压缩比  $\varepsilon$  与绝热指数  $k$  的变化而变化。由于绝热指数  $k$  在实际循环中变化不大,因此热效率主要随压缩比  $\varepsilon$  的增加而增加。但当压缩比  $\varepsilon$  提高到一定程度时( $\varepsilon = 12 \sim 13$ ),热效率几乎不再增加,而最高压力  $p_z$  却增加很多,使内燃机的机械负荷大大增加。另外,这类内燃机是压缩已经混合好了的可燃工质,为了防止出现爆燃,实际使用的压缩比  $\varepsilon$  更小,所以这类内燃机的热效率不会很高。

混合加热循环的理论热效率  $\eta_t$  随压缩比  $\varepsilon$ 、压力升高比  $\lambda$  和绝热指数  $k$  的增加而提高,随初期膨胀比  $\rho$  的减小而提高。在混合加热循环条件下,内燃机的热效率  $\eta_t$  除了和压缩比  $\varepsilon$  及绝热指数  $k$  有关外,还与其负荷以及在定容与定压条件下加入的热量分配有关。其热效率  $\eta_t$  处于定压加热循环和定容加热循环之间。

由上述理论循环热效率公式可知,若循环加热量  $Q_1$  与循环最高压力  $p_z$  相同,则定压加热循环的热效率最高,混合加热循环次之,定容加热循环的热效率最低。限制内燃机的机械负荷的一种基本方法是限制最高爆发压力,为了使柴油机的工作循环进行得更加完善,现代高增压柴油机有向定压加热循环发展的趋势。

上述理论循环中,工质只绝热膨胀到 5 点,然后定容放热(相当于排入大气),由此必然损失部分排气能量。若使工质由  $p_z$  一直膨胀到进气压力  $p_a$ ,即在 5 点以后继续绝热膨胀到 6 点,然后定压放热  $Q_2$ (6—1),这种循环称继续膨胀混合加热循环。显然此种循环比上述循环更完善。此循环即为涡轮增压柴油机理论循环(相当于柴油机与燃气轮机联合工作),称修正阿特金森(Atkinson)循环。在柴油机气缸内如实现此种循环,气缸必须做得很长。采用柴油机与燃气涡轮联合工作可合理解决此问题:气缸内膨胀 4—5,燃气涡轮内膨胀 5—6。

## 2. 柴油机的实际循环

柴油机的实际循环存在着许多不可避免的损失,使它不可能达到理论循环的热效率  $\eta_t$  和平均压力  $p_1$ 。工质是实际混合气,以燃烧加热和排气放热,并计及各种热力损失的实际工作循环称实际循环。

为了改善实际循环,减少与理论循环指标上的差距,应分析两种循环之间的差异和引起各项损失的原因。一般地说,两者之间的差异如下:

### (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。工质成分的变化、工质比热的变化、工质的高温分解以及工质分子数的变化,会使燃烧阶段的压力、温度增加值减小,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。例如在压缩过程初期,气缸壁温度较高使空气被加热;而在后期,由于气体温度超过了缸壁温度,便发生从气体到缸壁的热量传递。因此,实际压缩终点压力低于绝热压缩终点压力。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,使缸内工质为加热膨胀;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。膨胀终点,缸内压力高于绝热膨胀压力。

### (3) 换气损失

理论循环中是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逸出,由此减少了一部分有用功,称膨胀损失功。另外,实际循环的进气过程与排气过程均消耗轴功,称泵气功。膨胀损失功与泵气功之和即为实际循环的换气损失。

### (4) 燃烧损失

燃烧损失是指后燃和不完全燃烧所引起的损失。在理论循环中,全部热量是由高温热源吸入的热量  $Q_1$ ,无燃烧过程,但在实际循环中是由燃油的燃烧得到的,必然存在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,或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,促使燃烧膨胀线的位置下移,产生不完全燃烧损失。

### (5) 泄漏损失

气阀处的泄漏可以完全防止,但活塞环处的泄漏却无法避免。不过在良好的磨合状态下,其泄漏量约为气缸内工质总量的 0.2%。通常,漏气损失可并入热交换损失中。

### (6) 其他损失

如工质的涡动损失以及活塞运动速度与燃烧速度不相配合而偏离定容、定压加热过程的时间损失等。

在上述各项损失中,工质影响是不可避免的。对实际循环损失影响较大的还有传热损失、换气损失和燃烧损失。

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  $\varepsilon = 13$ ,过量空气系数  $\alpha = 2$ ,最高爆发压力  $p_z = 5 \text{ MPa}$ ,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%。

## 二、四冲程柴油机工作过程

### 1. 四冲程柴油机工作过程

下面的四个简图分别表示四个活塞行程的进行情况以及活塞、曲轴、气阀等部件的有关动作位置。

(1) 第一行程——进气行程,空气进入气缸时相应的活塞行程,如图 1-1-5 所示。

活塞从止点下行,进气阀  $a$  打开。由于气缸容积不断增大,缸内压力下降,依靠气缸内与大气的压差(低于大气压力  $p_0$ ),新鲜空气经进气阀被吸入气缸。进气阀一般在活塞到达止点前即提前打开(曲柄位于点 1),下止点后延迟关闭(曲柄位于点 2)。

曲轴转角  $\varphi_{1-2}$ (图中阴影线所占的角度)表示进气持续角  $\Delta\theta_i$ ,约为  $220 \sim 250^\circ \text{CA}$ 。

(2) 第二行程——压缩行程,工质在气缸内被压缩时相应的活塞行程,如图 1-1-6 所示。

活塞从下止点向上运动,自进气阀  $a$  关闭(点 2)才开始压缩,一直到上止点(点 3)为

止。第一行程吸入的新气经压缩后,压力增高到 $3 \sim 6 \text{ MPa}$ ,温度升高到 $600 \sim 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (燃油的自燃温度为 $210 \sim 270 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )。压缩终点的压力和温度分别用符号 $p_c$ 和 $t_c$ 表示。在压缩过程的后期由喷油器喷入气缸的燃油,与高温空气混合、加热,并自行发火燃烧。曲轴转角 $\varphi_{2-3}$ 表示压缩过程,约为 $140 \sim 160 \text{ }^{\circ}\text{A}$ 。

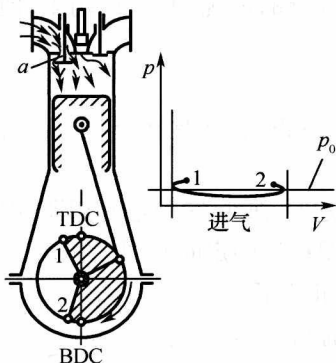


图 1-1-5

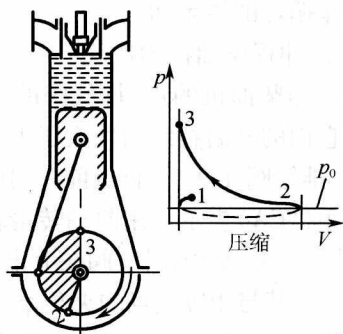


图 1-1-6

(3) 第三行程——燃烧和膨胀行程,工质在气缸内燃烧膨胀时相应的活塞行程,如图 1-1-7 所示。

活塞在上止点附近,由于燃油强烈燃烧,使气缸内的压力和温度急剧上升,压力达到 $5 \sim 8 \text{ MPa}$ ,甚至高达 $15 \text{ MPa}$ 以上,温度达 $1400 \sim 1800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 或更高。燃烧的最高压力和温度分别用符号 $p_z$ 和 $t_z$ 表示。高温高压的燃气(工质)膨胀推动活塞下行做功。由于气缸容积逐渐增大,压力下降,在上止点后某一时刻(点 4)燃烧基本完成。膨胀过程一直到排气阀 $b$ 开启时结束,膨胀终了时的气缸内压力 $p_b$ 为 $250 \sim 450 \text{ kPa}$ ,气体温度 $t_b$ 为 $600 \sim 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与进气阀相似,排气阀 $b$ 是在下止点前开启(点 5)的。曲轴转角 $\varphi_{3-4-5}$ 表示燃烧和膨胀过程。

(4) 第四行程——排气行程,废气从气缸内排出时相应的活塞行程,如图 1-1-8 所示。

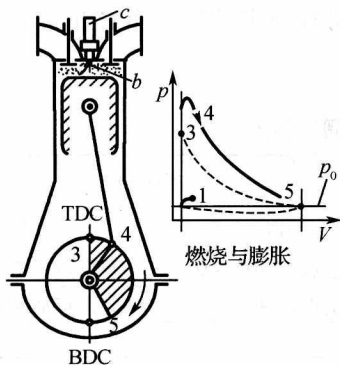


图 1-1-7

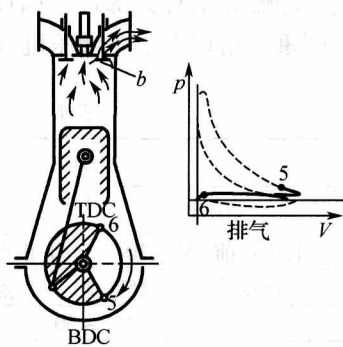


图 1-1-8

在上一行程末,排气阀 $b$ 开启时活塞尚在下行,废气靠气缸内外压力差经排气阀排出。当活塞由下止点上行时,废气被活塞推出气缸,此时的排气过程是在略高于大气压力(约 $1.05$ 至 $1$ 个大气压)且在压力基本不变的情况下进行的。排气阀一直延迟到上止点后(点 6)才关闭。曲轴转角 $\varphi_{5-6}$ 表示排气持续角 $\Delta\theta_e$ ,约为 $230 \sim 260 \text{ }^{\circ}\text{A}$ 。

进行了上述的四个行程,完成了五个工作过程,柴油机就实现了一个工作循环。当活塞继续运动时,另一个新的循环又按同样的顺序重复进行。

四冲程柴油机每完成一个工作循环,曲轴要回转两转(720 °CA)。每个工作循环中只有第三行程(膨胀行程)是做功的,其他三个行程都是为膨胀行程服务的,都需要外界供给能量。柴油机常做成多缸的,这样,进气、压缩、排气行程的能量可由其他正在做功的气缸供给。如果是单缸柴油机,那就由较大的飞轮惯性力供给。

图中的  $p-V$  示功图可用来研究柴油机工作过程进行的情况,并且可用来计算柴油机一个工作循环的指示功。

## 2. 四冲程柴油机的换气

四冲程柴油机的进、排气阀的启闭都不正好在上、下止点,而是在上、下止点前后某一时刻。它们的开启持续角均大于 180 °CA。

进、排气阀在上、下止点前后启闭的时刻称为气阀定时,通常气阀定时用距相应止点的曲轴转角(°CA)表示。用曲轴转角表示气阀定时的圆图称气阀定时圆图。

在图 1-1-9 中,进气阀在上止点前点 1 开启,在下止点后点 2 关闭。其与相应止点的夹角  $\varphi_1, \varphi_2$  分别称进气提前角、进气滞后角。排气阀在下止点前点 5 开启,在上止点后点 6 关闭,其与相应止点的夹角  $\varphi_3, \varphi_4$  分别称为排气提前角、排气滞后角。

气阀提前开启与延后关闭是为了将废气排除干净并增加空气的吸入量,以利于燃油的燃烧,另外还可减少排气耗功。所以,气阀定时是影响四冲程柴油机做功的重要因素。

由图 1-1-9 尚可看出,在上止点前后,进气阀与排气阀同时开启着(叠开)。同一气缸的进、排气阀在上止点前后同时开启的曲轴转角称为气阀重叠角。在气阀叠开期间,进气管、气缸、排气管连通,此时利用废气的流动惯性,除可避免废气倒冲入进气管外,还可抽吸新鲜空气进入气缸,并利用此压力差在将新气吸入气缸的同时将燃烧室内的废气扫出气缸,实现所谓的燃烧室扫气。此时不但可提高换气质量,还可利用进气冷却燃烧室有关部件。因而,四冲程柴油机均有一定的气阀重叠角,而且增压柴油机的气阀重叠角均大于非增压机,如表 1-1-2 所示。

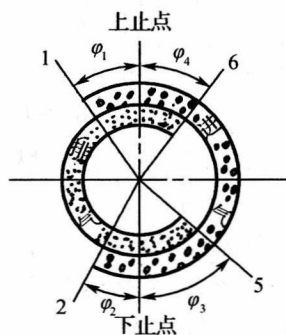


图 1-1-9

表 1-1-2 四冲程柴油机气阀重叠角

| 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°~30° | 下止点后 10°~30° | 上止点前 40°~80° | 下止点后 20°~40° |
| 排气阀 | 下止点前 35°~45° | 上止点后 10°~20° | 下止点前 40°~55° | 上止点后 40°~50° |
| 重叠角 | 25°~50°      |              | 80°~130°     |              |

## 三、二冲程柴油机工作过程

### 1. 二冲程柴油机工作过程

活塞在两个行程内完成一个工作循环的柴油机叫做二冲程柴油机。在四冲程柴油机中,新气的吸入与废气的排出是靠活塞的抽吸与推挤作用完成的。在二冲程柴油机中没有单独的进气与排气过程,其进气与排气过程几乎在下止点前后约 120~150 °CA 同时进行。因此在结构上,二冲程柴油机必须在气缸套下部开设气口,采用气缸套扫气口—排气口或

采用气缸套下部扫气口—气缸盖上排气阀的换气机构,而且还必须提高进气压力,使进气能从扫气口进入气缸并将废气扫出气缸。提高进气压力可以由机械驱动的扫气泵或由废气涡轮驱动的增压器来实现。这样,进、排气过程(换气过程)就可以缩减到下止点前后的部分行程中完成。

目前,船用二冲程低速柴油机都采用废气涡轮增压的方式提高进气压力,图1-1-10所示为一种具有废气涡轮增压的二冲程柴油机工作原理图。它的工作过程具有如下特点:新鲜空气通过气缸下部的进气口  $a$  进入气缸,而废气则通过气缸盖上的排气阀  $b$  排出气缸。在进、排气管道上分别安装了离心式压气机  $e$  和废气涡轮机  $d$  (两者组合成废气涡轮增压器),废气涡轮从废气中获得能量而带动压气机一起转动。新鲜空气则从大气通过吸入口  $f$  吸入压气机,经压缩后,压力和温度升高。然后由管  $g$  经冷却器  $k$  冷却后导入进气管  $h$  和扫气箱  $i$ ,准备进入气缸。当活塞下行还没有打开进气口  $a$  之前,排气阀  $b$  首先被气阀机构打开(曲柄在点1位置),废气大量排出气缸,并经排气阀和排气管  $j$  进入废气涡轮  $d$  中。当活塞继续下行使气缸内的压力降低到接近于增压压力时,活塞将扫气口  $a$  打开(曲柄在点2位置),等候在扫气口外边的增压空气即进入气缸,并把废气扫出。当活塞运动到下止点并转而上行时,扫气口  $a$  被关闭(曲柄在点3位置),接着排气阀关闭(曲柄在点4位置),换气过程结束,开始进行压缩、燃烧和膨胀过程。

二冲程柴油机也可用定时圆图来表示它的各项定时时刻。如图1-1-11所示为国产ESDZ43/82B型二冲程柴油机的定时圆图。

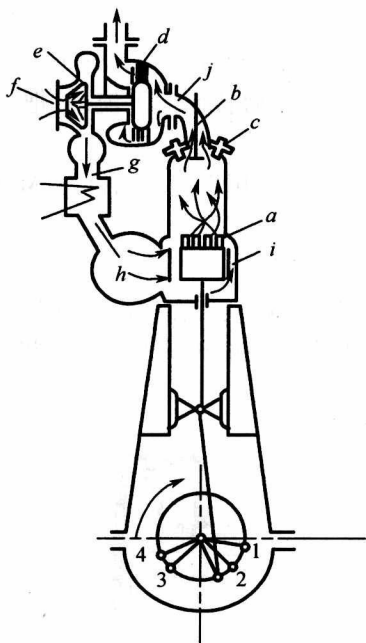


图 1-1-10

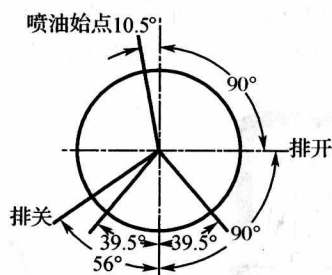


图 1-1-11

由上述可知,无论四冲程还是二冲程柴油机,它们真正压缩的始点均不在下止点而在进气阀或排气阀(口)全部关闭时刻。通常将进或排气阀(口)全部关闭瞬时的气缸容积与压缩室容积之比值称有效压缩比  $\varepsilon_e$ 。

$$\varepsilon_e = 1 + \frac{(1 - \varphi_s) V_s}{V_c}$$

式中  $\varphi_s$ ——行程失效系数,  $\varphi_s = \frac{\text{失效高度}}{\text{行程}}$ ;

$V_s$ ——失效高度/行程。

## 2. 二冲程柴油机的换气形式

在二冲程柴油机中,目前普遍采用气口—气阀直流扫气,但在 20 世纪 80 年代以前,出现过多种换气形式。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,即:

- 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 {
  - 排气口——扫气口式
  - 排气阀——扫气口式

### (1) 简单横流扫气

如图 1-1-12 所示,进、排气口位于气缸中心线的两侧,空气从进气口一侧沿气缸中心线向上,然后在靠近燃烧室部位回转到排气口的另一侧,再沿着气缸中心线向下,把废气从排气口清扫出气缸。

### (2) 回流式扫气

如图 1-1-13 所示,进、排气口在气缸下部同一侧且排气口在进气口的上方。进气流沿活塞顶面向对侧的缸壁流动并沿缸壁向上流动,到气缸盖后转而向下流动,把废气从排气口中清扫出气缸。气流在缸内“回线”流动。

这种扫气形式是 MAN 公司大型柴油机的传统形式。在船用大型柴油机中,MAN-KZ, KSZ 型柴油机即为回流扫气形式,现存已不多。

### (3) 半回流扫气

如图 1-1-14 所示,进气口布置在排气口的下方及两侧,气流在气缸内的流动特征兼有横流与回流的特点。这种扫气形式是 Sulzer 公司大型柴油机的传统形式。某些早期的半

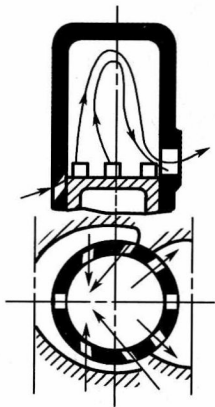


图 1-1-12

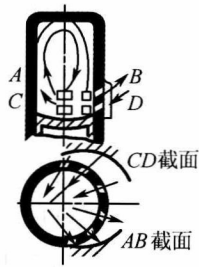


图 1-1-13

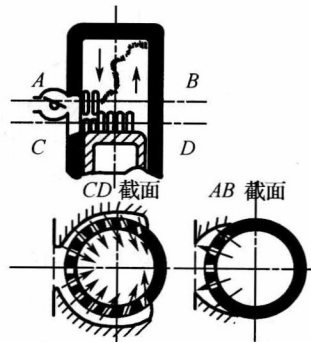


图 1-1-14

回流扫气形式(RD机),在排气管中装有回转控制阀,该回转阀可在活塞上行活塞裙开启排气口前关闭排气管,防止新鲜空气经排气口流失。RND型柴油机不再使用回转阀控制,改用长裙活塞,当活塞上行至上止点时,活塞裙仍能挡住排气口。

在船用大型柴油机中,Sulzer RD,RND,RLA,RLB等型柴油机均为半回流扫气形式。

#### (4) 排气阀—扫气口直流扫气

如图1-1-15所示,气缸下部均布一圈进气口,在气缸盖上有排气阀。空气从气缸下部进气口端进入气缸,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。气流在缸内的流动方向是自下而上的直线流动,所以称为直流扫气。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,不受活塞运动的限制,所以排气阀可以与进气口同时关闭,也可以提早关闭。直流扫气排气阀的启闭定时可设计在最佳点,使柴油机性能更优。

在船用柴油机中,B&W,UEC等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。

上述弯流扫气柴油机气流在缸内流动路线长(通常均大于2S),新气与废气易掺混且存在死角与气流短路现象,因而换气质量较差。尤其在横流扫气中,缸套下部的进、排气口两侧受热不同,容易产生变形。但弯流扫气的结构简单,维修较方便,因而在行程缸径比 $S/D < 2.2$ 的短行程的船用大型柴油机中,因行程较短尚可保证较满意的换气质量而曾经得到普遍使用。

直流扫气则相反,气流在缸内流动路线短(约为S),新气与废气不易掺混,因而换气质量较好,同时缸套下方受热均匀。但其结构复杂,维修较困难。现代船用大型柴油机随着行程缸径比 $S/D$ 的增加,发展了长行程( $S/D > 2.5$ )和超长行程( $S/D > 3$ )柴油机。在这种情况下,弯流扫气的换气质量无法与直流扫气相比,因而直流式(气阀—气口式)扫气成为现代船用大型柴油机的主要换气形式。某些传统的弯流扫气式柴油机已改为排气阀—扫气口直流扫气形式,如Sulzer RTA系列柴油机。

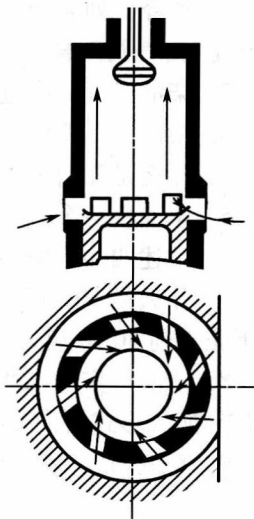


图1-1-15

### 四、四冲程柴油机与二冲程柴油机的比较

从上述四冲程与二冲程柴油机的工作过程中,可看出两者有以下特点:

(1) 二冲程柴油机两个行程即曲轴一转完成一个工作循环,由此可提高柴油机功率。两台气缸尺寸与转速相同的四冲程与二冲程柴油机,计及气口行程损失和扫气损失,则二冲程柴油机的功率约为四冲程机的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,因而它的回转要比四冲程机均匀,可使用较小的飞轮。

(3) 二冲程柴油机的换气机构较简单,便于维修保养。

(4) 二冲程柴油机的换气质量较四冲程机差。

(5) 二冲程柴油机的工作循环比四冲程机多一倍,所以二冲程机的热负荷比四冲程