

符合 STCW78 / 95 公约要求

航海高等教育与培训教材



# 主推进动力装置

上海海运学院组织编写

傅克阳 主编

应启光 主审



U664.121  
2247

符合 STCW78/95 公约要求

航海高等教育与培训教材

# 主推进动力装置

上海海运学院组织编写

傅克阳 主编

袁启光 主审

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书共十二章,讲述船舶主推进动力装置——柴油机动力装置的基本工况、特性和管理,主要论述近代船用大型低速二冲程柴油机和低速四冲程柴油机的构造、原理、特性和管理,结合典型柴油机讨论其使用、调整和故障处理方法,并对燃油处理与燃烧、润滑与冷却、增压与喘振、调速器及调整、柴油机性能、起动换向与操纵、运转管理及应急处理、船舶推进轴系和螺旋桨等作了较详细的叙述。此外还对柴油机及轴系的振动与减振做了简要介绍。

本书主要供参加轮机长、轮机员职务适任证书考试的船员学习使用,也可作为轮机长、轮机员培训班或船员业务学习的教材。

### 图书在版编目(C I P)数据

高级船员培训教材/上海海运学院组织编写. —北京:  
人民交通出版社, 2000. 7  
ISBN 7-114-03695-7

I. 高… II. 上… III. 船员-技术培训-教材  
IV. U676. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 63434 号

符合 STCW78 / 95 公约要求

航海高等教育与培训教材

Zhutuijin Dongli Zhuangzhi

主推进动力装置

上海海运学院组织编写

傅克阳 主编

应启光 主审

版式设计:刘晓方 责任校对:刘高彤 责任印制:张 凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:448 千

2000 年 8 月 第 1 版

2000 年 8 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001-3100 册 定价:35.00 元

ISBN 7-114-03695-7

U · 02674

# 前 言

本书是根据 1998 年 6 月出版的《中华人民共和国港务监督局“海船船员适任考试和评估大纲”》中二类船员职务、三种船舶吨位的六个《主推进动力装置》考试大纲的要求,并结合编者多年海船船员培训的教学经验编写的。

本书共十二章,讲述船舶主推进动力装置——柴油机动力装置的基本工况、特性和管理,主要论述近代船用大型低速二冲程柴油机和中速四冲程柴油机的构造、原理、特性和管理,结合典型柴油机讨论其使用、调整和故障处理方法,并对燃油处理与燃烧、润滑与冷却、增压与喘振、调速器及调整、柴油机性能、起动换向与操纵、运转管理及应急处理、船舶推进轴系和螺旋桨等作了较详细的叙述。此外还对柴油机及轴系的振动与减振作了简要介绍。

本书主要供参加轮机长、轮机员职务适任证书考试的船员学习使用,也可作为轮机长、轮机员培训班或船员业务学习的教材。

本书由傅克阳主编,应启光教授主审。第一至四章由周美荣编写;第五至十二章由傅克阳编写。

编 者

2000 年 3 月

# 目 录

<b>第一章 柴油机的基本知识</b> .....	1
第一节 柴油机的基本概念.....	1
第二节 柴油机的热力循环.....	2
第三节 柴油机的工作原理.....	4
第四节 柴油机的主要性能指标 .....	11
第五节 柴油机的类型和分类 .....	16
第六节 船用柴油机的发展 .....	19
<b>第二章 柴油机主要零部件</b> .....	23
第一节 燃烧室部件承受的负荷 .....	23
第二节 活塞、气缸、气缸盖的构造 .....	28
第三节 曲柄连杆机构 .....	40
第四节 机架、机座和贯穿螺栓.....	55
第五节 主要部件的故障与管理 .....	59
<b>第三章 燃油喷射与燃烧</b> .....	68
第一节 燃油 .....	68
第二节 燃油的喷射 .....	73
第三节 可燃混合气的形成 .....	79
第四节 燃油的燃烧 .....	82
第五节 柴油机的排放与净化 .....	88
第六节 喷油设备 .....	92
第七节 喷油设备的检查与调整.....	104
<b>第四章 柴油机的换气与增压</b> .....	108
第一节 换气过程.....	108
第二节 换气机构.....	112
第三节 废气涡轮增压 .....	119
第四节 废气涡轮增压器 .....	126
第五节 增压器的喘振和消除.....	132
第六节 增压系统的故障和维护管理.....	135
<b>第五章 柴油机的润滑与冷却</b> .....	139
第一节 润滑油和润滑油添加剂.....	139
第二节 润滑.....	143
第三节 气缸润滑 .....	145
第四节 曲柄箱油润滑 .....	148
第五节 冷却.....	150

<b>第六章 柴油机油水系统</b> .....	152
第一节 燃油系统.....	152
第二节 低质燃油的使用与管理中的技术要点.....	155
第三节 分油机.....	156
第四节 润滑系统.....	162
第五节 冷却系统.....	165
<b>第七章 柴油机的起动、换向、调速和操纵</b> .....	168
第一节 起动装置.....	168
第二节 换向装置.....	174
第三节 调速和机械调速器.....	178
第四节 液压调速器.....	181
第五节 电子调速器.....	189
第六节 调速器的故障与管理.....	192
第七节 柴油机的操纵系统.....	194
<b>第八章 柴油机的特性</b> .....	198
第一节 概述.....	198
第二节 速度特性和负荷特性.....	199
第三节 推进特性.....	204
第四节 调速特性与限制特性.....	207
第五节 柴油机与螺旋桨的配合.....	209
第六节 柴油机功率和转速使用范围.....	212
<b>第九章 示功图的测量与计算</b> .....	214
第一节 示功器与示功图测录.....	214
第二节 示功图的种类及分析.....	218
第三节 $p-V$ 示功图功率计算.....	223
<b>第十章 船舶推进装置</b> .....	225
第一节 推进装置的传动方式.....	225
第二节 传动轴系的组成、布置和检查.....	226
第三节 传动轴系的结构.....	230
第四节 齿轮减速器和联轴节.....	235
第五节 螺旋桨.....	241
第六节 传动轴系的管理.....	243
<b>第十一章 柴油机及推进轴系的振动</b> .....	244
第一节 运动和动力分析.....	244
第二节 柴油机振动与平衡.....	247
第三节 轴系扭转振动和减振.....	253
第四节 轴系纵向振动简介.....	260
<b>第十二章 柴油机运转管理及应急处理</b> .....	263
第一节 柴油机运转管理.....	263
第二节 柴油机应急处理.....	266

# 第一章 柴油机的基本知识

## 第一节 柴油机的基本概念

### 一、内燃机与外燃机比较

#### 1. 热机

所谓热机是指把热能转换成机械能的动力机械。它的基本工作原理是:燃料在一个特设的装置中燃烧,将化学能转变为热能以加热工质,然后把工质的热能转变为机械能,这种具有两次能量转换的机械称为热机。根据能量转换方式的不同,热机又可分为外燃机和内燃机两大类。柴油机、汽油机、蒸汽轮机以及蒸汽机是热机中较典型的机型。

#### 2. 外燃机与内燃机

外燃机如蒸汽机(往复式蒸汽机、蒸汽轮机等)。在蒸汽机中,燃料的燃烧是在机器外部特设的锅炉中进行的,燃料燃烧时放出的热能加热水,使水变成蒸汽,再将蒸汽引入蒸汽机内膨胀作功,推动机械运动。

内燃机有柴油机、汽油机、燃气轮机等。在内燃机中,燃料的燃烧是在工质内部进行的,直接加热空气成燃烧产物(即燃气),工质被加热后压力和温度急剧上升具有了作功的能力,从而推动机械运动。

外燃机由于燃烧(将燃料的化学能转变成热能即第一次能量转换)发生在工质的外部(锅炉),热能需经工质(蒸汽)传递,必然存在热损失,而在内燃机中,两次能量转换都发生在工质内部,由于采用内部燃烧,从能量转换观点看,内燃机能量损失小,具有较高的热效率。另外,在尺寸和重量等方面也均具有优越性,因而在与外燃机的竞争中处于有利地位。

### 二、柴油机与汽油机比较

在内燃机中根据所用燃料的不同,大致可分为汽油机、柴油机、煤气机、燃气轮机等。它们都具有内燃机区别于外燃机的基本特点,但又都具有各自的工作特点,因而它们在工作原理、工作经济性以及使用范围上均有差异,表 1-1 即为柴油机与汽油机的比较。

柴油机与汽油机的比较

表 1-1

	柴 油 机	汽 油 机
燃料(燃烧工质)	柴油或劣质燃油	汽油
点火方式	压缩自行燃烧	电火花塞点燃
混合气形成方式	气缸内混合	气缸外混合
压缩比	12~22	6~10
有效热效率	0.30~0.55	0.15~0.40

由此可以看出,柴油机是一种压缩发火的往复式内燃机。它与汽油机相比除了所用燃料

的性质不同外,在结构上的主要差异在于供油系统的不同或者说是混合气形成的方式不同,而在工作原理上的最大区别在于发火方式的不同,采用压缩发火的点火方式是柴油机不同于其他内燃机的本质特征。由于柴油机采用的是压缩发火,再加之内部燃烧,使得它在内燃机中的热效率最高。柴油机除了经济性好外,还具有功率范围大、机动性好、尺寸小、重量轻等优点,因而柴油机在工程界应用十分广泛。尤其在船用发动机中,柴油机取得了绝对优势地位。

## 第二节 柴油机的热力循环

### 一、内燃机的理论循环

内燃机实际循环在进行中所产生的一系列物理化学变化过程是非常复杂的。因而,若一开始就直接对实际循环作全面研究,那必然容易被种种变化万千的现象所困惑,以致茫然失措,无从着手。这时,则需要借助于理论循环,而这些理论循环是人们根据内燃机实际工作过程所表现的特征,予以科学抽象,经过适当的假定和简化而建立起来的。

#### 1. 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,从而找出提高理论循环热效率和理论循环平均压力的基本途径。

(2) 确定极限的循环热效率,以用来判断实际内燃机的经济性和工作过程的完善程度。

(3) 有利于比较各种热力学循环的经济性和动力性。

#### 2. 对内燃机的理想循环作的简化假定

(1) 工质为一理想气体(标准状态的纯空气)。在整个循环中工质的物理、化学性质保持不变。

(2) 在整个循环中,工质数量保持不变,不更换,故无进、排气过程及漏气损失。

(3) 压缩与膨胀过程为绝热过程,与外界没有热交换,也不存在摩擦。

(4) 不考虑燃烧过程,用假想的定容放热和定容或定压加热来代替实际的换气和燃烧过程。

#### 3. 内燃机的三种理论循环

在内燃机的理论循环中,工质的放热过程一般都是在等容方式下进行的,而吸热过程则有三种不同的方式,因而形成了三种理论循环:

(1) 等容加热循环(图 1-1 a))。等容循环也叫奥托(Otto)循环,是各种汽油机、煤气机的

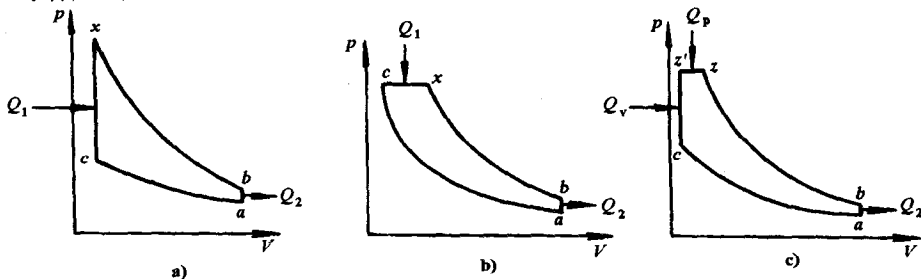


图 1-1 理论循环  $p$ - $V$  示功图

a) 等容加热循环; b) 等压加热循环; c) 混合加热循环



热力学计算基础(某些高速柴油机也近似按此循环工作)。

(2)等压加热循环(图 1-1 b))。等压循环也叫狄塞尔(Diesel)循环,早期的空气喷射式柴油机即近似按此循环工作。

(3)混合加热循环(图 1-1 c))。混合循环也叫塞巴斯(Sabathe)循环,现代柴油机基本都是按混合加热循环工作的。

废气涡轮增压柴油机由于气缸排出的废气不是流入大气,而是流入涡轮继续膨胀做功,其理想循环近似于继续膨胀混合加热循环。

根据热力学理论可知,理论循环的  $p-V$  图面积即表示一个循环对外所作理论功的大小。理论循环的热效率  $\eta_{th}$ 可写成:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\epsilon^{k-1}[(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]}$$

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

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

$\rho$ ——预膨胀比,  $\rho = V_z/V_c$ ;

$k$ ——绝热指数。

#### 4. 三种理想循环热效率 $\eta_{th}$ 的比较

在加热量  $Q_1$  相同的情况下,对三种加热循环的  $\eta_{th}$  进行比较:

(1) 如压缩比  $\epsilon$  和循环加热量  $Q_1$  相同的话,则可以从图 1-2 a) 的温熵图来进行比较,该图是压缩比  $\epsilon$  为 14 时绘制的。从三种循环的曲线来分析可知,等容加热循环( $\rho = 1$ )的热效率  $\eta_{th}$  最高;等压加热循环( $\lambda = 1$ )的热效率最低;而混合加热循环的热效率则位于中间区域。

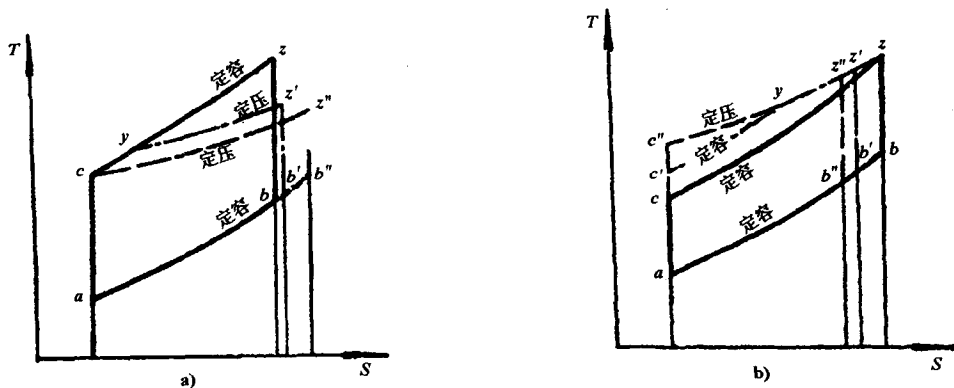


图 1-2 加热量  $Q_1$  相同时,三种理想循环  $\eta_{th}$  的比较

a) 压缩比  $\epsilon$  相同; b) 最高爆发压力  $p_{max}$  相同

(2) 如最高爆发压力  $p_{max}$  和循环加热量  $Q_1$  相同的话,则可以从图 1-2a) 的温熵图来进行比较,在相同的  $Q_1$  及  $p_{max}$  下,等容加热循环的压缩比较低,放热量较大,而等压加热循环的压缩比较高,放热量少。因此这时等压加热循环的热效率最高,等容加热循环的热效率最低,而混合循环的热效率则介于二者之间。

#### 5. 理论循环热效率 $\eta_{th}$ 的分析结论

(1) 增加压缩比  $\epsilon$  可提高工质的最高温度,提高膨胀比,因而可提高热效率  $\eta_{th}$ ,但其提高率随  $\epsilon$  的增加而降低;

(2) 增大压力升高比  $\lambda$  可增加等容加热量,因而可提高  $\eta_{th}$ ;

(3) 增大  $\epsilon$  和  $\lambda$  同时将提高最高循环压力  $p_z$ ;

(4) 增大预膨胀比  $\rho$ , 由于等容加热量在膨胀比逐渐降低的情况下加入, 使等容放热量增大(即工质膨胀不充分, 膨胀终点压力、温度均升高), 因而使  $\eta_{th}$  降低, 但可提高理论循环的平均压力  $p_{th}$ ;

(5) 增大绝热指数  $k$  可提高  $\eta_{th}$ 。

以上各点结论虽然是从研究理论循环中导出, 但至今仍具有指导意义和实用价值。

## 二、柴油机的实际循环

在柴油机的实际工作循环中存在着许多理论循环中不曾考虑的损失, 使实际工作循环无论如何也达不到理论循环那样高的工作指标。为了改善实际循环, 减少与理论循环指标的差异, 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。由于空气和燃烧产物在循环中成分的变化、比热的变化及在高温下的分解等因素的影响, 将使燃烧压力和温度降低, 使得在同样加热量下, 实际循环的作功能力和热效率明显下降。但这一因素对实际循环的影响很难在管理中加以改变。

### 2. 燃烧损失

理论循环中工质的高温、高压是由从高温热源吸入热量  $Q_1$  达到, 而在实际循环中是由燃料的燃烧达到, 由此必然存在着在膨胀中仍进行燃烧的后燃现象, 以及因供气不足而存在的燃烧不完全现象。

### 3. 气缸壁的传热损失

理论循环中不计工质与气缸壁间的热交换而简化为绝热压缩和绝热膨胀。实际循环中无论在压缩过程或膨胀过程, 缸内工质与缸壁之间均存在着复杂的热交换过程, 均为多变过程, 压缩或膨胀初期(考虑后燃)工质吸热, 压缩或膨胀后期工质向外散热, 而且其总趋势均向缸壁散热。

### 4. 换气损失

理论循环是由热源混合加热和向冷源等容放热, 无需进行工质替换。而实际循环必须排出废气并吸入新鲜空气。在排气中由于排气阀提前开启而使膨胀终点温度提高, 膨胀功减少, 再加上进、排气过程所消耗的功, 使得换气损失在柴油机的各项损失中影响较大, 而且是不可避免的, 它也降低了实际循环的作功能力。

### 5. 其他损失

如工质漏泄损失、工质的涡动损失, 以及因实际燃烧速度与活塞高速运动间的配合不当而偏离理论的等压加热、等容加热过程等, 均造成实际循环作功能力下降。

## 第三节 柴油机的工作原理

### 一、柴油机基本参数

柴油机的主要几何术语介绍如下(参见图 1-3)。

#### 1. 上止点(TDC)

立式柴油机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(BDC)

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. 活塞行程 $S$

活塞从上止点运行到下止点间的直线距离,简称行程。它等于曲轴曲柄半径  $R$  的 2 倍。活塞运行一个行程时曲轴转动  $180^\circ$ 。

## 4. 气缸直径 $D$

气缸的内径,简称缸径。

## 5. 压缩容积 $V_c$

活塞在气缸内位于上止点时,在活塞顶上方的全部空间容积。

## 6. 气缸工作容积 $V_h$

活塞在气缸中从上止点运行到下止点时所扫过的容积。显然,

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

## 7. 气缸总容积 $V_a$

活塞在气缸内位于下止点时,活塞顶以上的气缸全部容积。显然,

$$V_a = V_h + V_c$$

## 8. 压缩比 $\epsilon$

气缸总容积  $V_a$  与压缩容积  $V_c$  之比值,亦称几何压缩比,即:

$$\epsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_h + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_h}{V_c}$$

目前柴油机的压缩比  $\epsilon$  的一般选用范围见表 1-2。

柴油机压缩比  $\epsilon$  的选用范围

表 1-2

低速机	中速机	高速直喷式	高速分开式	增压机	非增压机
12~13	14~15	14~18	18~22	12~15	15~22

## 二、四冲程柴油机的工作原理

燃油在柴油机气缸中燃烧作功必须通过进气、压缩、燃烧、膨胀和排气五个过程。包括上述五个过程的全部热力循环过程称为柴油机工作过程,包括上述五个过程的周而复始的循环叫工作循环。对往复式柴油机还可用  $p-V$  示功图清楚地描绘其工作循环中各过程的进行情况。现将每一工作循环按活塞行程分为四个阶段来讨论(参见图 1-4)。

### 1. 进气行程

活塞从上止点下行,进气阀  $a$  已打开。由于活塞下行的抽吸作用,新鲜空气充入气缸。为了能充入更多的空气,进气阀一般在上止点前提前开启(曲柄位于点 1),在下止点后延迟关闭(曲柄位于点 2),进气阀开启的延续角度  $\varphi_{1-2}$ (图中阴影线部分)约为  $220^\circ \sim 250^\circ$ 。

### 2. 压缩行程

活塞从下止点向上运动,自进气阀  $a$  关闭(曲柄到达点 2)开始压缩,一直到活塞到达上止

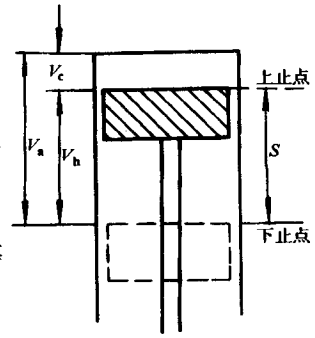


图 1-3 柴油机主要几何术语

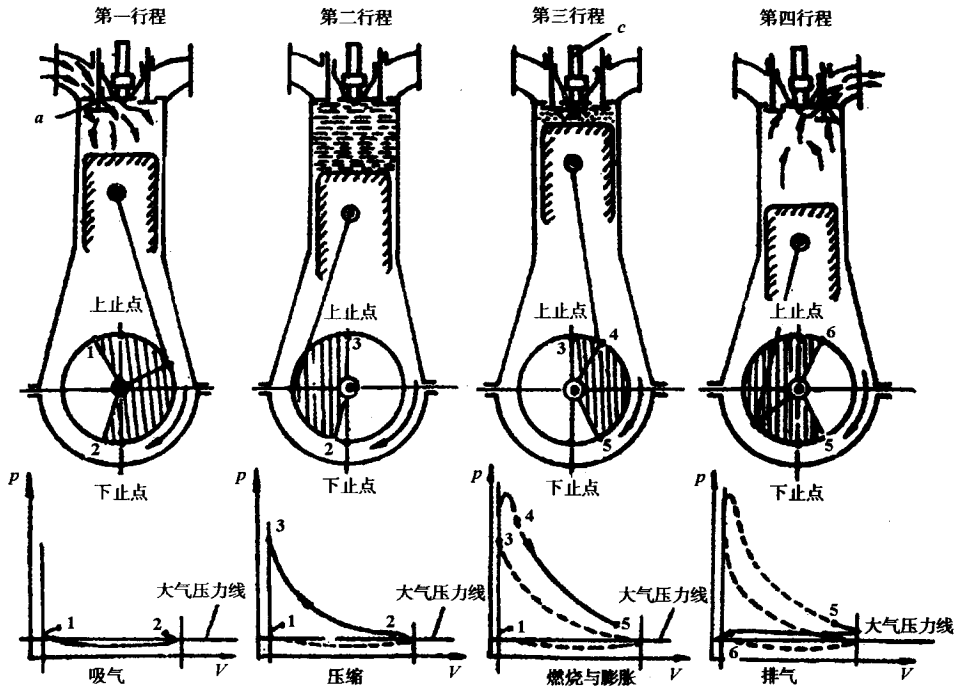


图 1-4 四冲程柴油机工作原理

点(曲柄到达点 3)为止。第一行程吸入的新鲜空气经压缩后,压力增高到 3~6MPa,温度升至 600℃~700℃(燃油的自燃温度为 210℃~270℃)。将压缩终点时的压力和温度分别用符号  $p_c$  和  $t_c$  表示。影响  $p_c$  和  $t_c$  的主要因素为压缩比  $\epsilon$ ,压缩比  $\epsilon$  愈大, $p_c$  和  $t_c$  愈高。在压缩过程的后期由喷油器  $c$  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°~160°。

### 3. 燃烧和膨胀行程

活塞在上止点附近,由于燃油猛烈燃烧,使气缸内的压力和温度急剧升高,压力约达 5~8MPa,甚至 13MPa 以上,温度约为 1400℃~1800℃或更高些。将燃烧产生的最高压力称最高爆发压力,用  $p_z$  表示,最高温度用  $t_z$  表示。高温高压的燃气(即工质)膨胀推动活塞下行而做功。由于气缸容积逐渐增大使压力下降,在上止点后的某一时刻(曲柄位于点 4)燃烧基本结束。膨胀一直到排气阀  $b$  开启时结束。与进气阀相同,排气阀  $b$  总是在活塞到达下止点前提早开启(曲柄位于点 5),曲轴转角  $\varphi_{3,4,5}$  表示燃烧和膨胀过程。

### 4. 排气行程

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,排气阀一直延迟到活塞到达上止点后(曲柄位于点 6)才关闭。排气过程用曲轴转角  $\varphi_{5,6}$  表示,约为 230°~260°。

在上止点之前,排气阀还没有关闭,进气阀再次打开,又重复第一行程,开始第二个工作循环,以维持柴油机的持续稳定的运转。虽然进气阀在上止点之前 1 点打开,但由于此时缸内的气体压力仍高于外界大气压力,气缸内无法进气,只有当缸内气体压力降低到等于或低于外界大气压力时,气缸才开始进气,由此可见,四冲程非增压柴油机的实际进气始点不是在上止点

前而是在上止点后的某一时刻。四冲程柴油机每完成一个循环,活塞上下运动4次,曲轴转2转,凸轮轴转1转。

将四冲程柴油机的工作过程按曲柄所在的位置及旋转的角度依次绘在一个圆图上,则可得到柴油机的“定时圆图”,如图1-5所示。

由图1-5可见,为了提高进排气量,进排气阀的开启和关闭均不在上下止点,而是提前开启、延后关闭,进气阀在点1开启、点2关闭;排气阀在点5开启、点6关闭。进气阀开启瞬时,曲柄位置与上止点之间的曲轴转角称为进气提前角,如图中的 $\varphi_1$ ;进气阀关闭瞬时,曲柄位置与下止点之间的曲轴转角称为进气滞后角,如图中的 $\varphi_2$ ;依此类推,排气提前角为 $\varphi_3$ ,排气滞后角为 $\varphi_4$ 。进气持续角为 $\varphi_1 + 180^\circ + \varphi_2$ ,排气持续角为 $\varphi_3 + 180^\circ + \varphi_4$ ,显然,四冲程柴油机的进排气行程所占曲轴转角均大于 $180^\circ$ ,换气总曲轴转角角度一般为 $450^\circ \sim 500^\circ$ ,而压缩与膨胀行程所占曲轴转角均小于 $180^\circ$ 。凸轮作用角为相应各过程持续角的1/2。

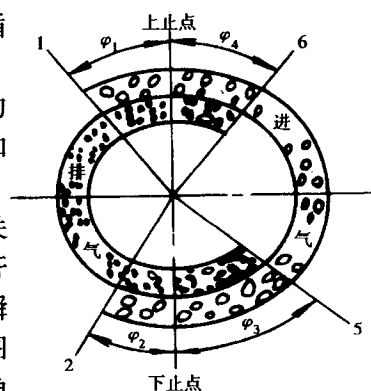


图1-5 气阀定时圆图

由图1-5还可看到:在上止点前后的一段曲轴转角内,进、排气阀有一个同时打开的角度,称为进、排气重叠角(气阀重叠角),它等于进气提前角加排气滞后角即 $\varphi_1 + \varphi_4$ 。在气阀叠开期间,进、排气管与气缸相通,此时利用废气的流动惯性,除可避免废气倒冲入进气管外,尚可抽吸新鲜空气进入气缸。增压柴油机还可实现所谓的“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的有关部件。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柴油机。

气阀正时不仅取决于柴油机类型、转速、进排气阀凸轮的形状,在实际运转中还由于磨损、间隙以及震动等原因而发生改变,轮机管理人员必须定时的进行测量和调整。柴油机气阀正时和气阀重叠角的范围列于表1-3。

四冲程柴油机气阀重叠角度

表1-3

名称	非 增 压		增 压	
	开 启	关 闭	开 启	关 闭
进气阀	上止点前 $15^\circ \sim 30^\circ$	下止点后 $10^\circ \sim 30^\circ$	上止点前 $40^\circ \sim 80^\circ$	下止点后 $20^\circ \sim 40^\circ$
排气阀	下止点前 $35^\circ \sim 45^\circ$	上止点后 $10^\circ \sim 20^\circ$	下止点前 $40^\circ \sim 50^\circ$	上止点后 $40^\circ \sim 50^\circ$
重叠角	$25^\circ \sim 50^\circ$		$80^\circ \sim 130^\circ$	

### 三、二冲程柴油机的工作原理

二冲程柴油机把进气、压缩、燃烧、膨胀、排气过程紧缩在活塞的两个行程内完成,即曲轴角旋转一周就完成一个循环。

二冲程柴油机与四冲程柴油机不同,其气缸上设有气口,图1-6中气缸右侧为排气口,左侧为进气口。排气口比进气口略高,气口的开关均由活塞控制。此外,二冲程柴油机设有扫气泵,扫气泵预先将空气压缩并送入扫气箱中,扫气箱中的空气压力(扫气压力)要比大气压力稍高。

#### 1. 换气—压缩行程

活塞由下止点向上运动。在活塞遮住进气口之前,新鲜空气通过进气口继续充入气缸并将气缸内的废气经排气口驱除出去。当活塞上行到将进气口全部遮闭时(点1),新鲜空气就停

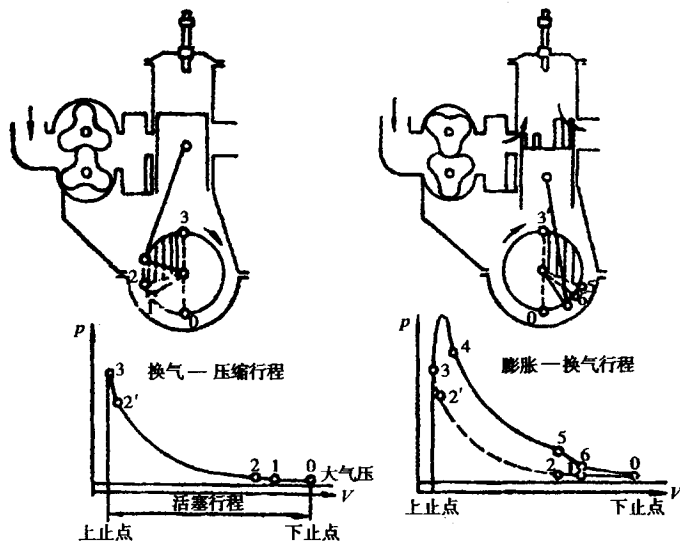


图 1-6 二冲程柴油机工作原理

止进入气缸。当排气口被活塞遮闭后(点 2),气缸内的空气就被上行的活塞压缩,压力和温度亦随之升高。在活塞到达上止点前的某一时刻(点 2'),柴油经喷油器喷入气缸,并与高温高压空气混合后着火燃烧。

在这一行程中,进行了换气(曲线 0—1—2)、压缩(曲线 2—3)和喷油着火燃烧诸过程。

## 2. 膨胀—换气行程

活塞由上止点向下运动。在此行程的初期,燃烧仍在继续猛烈地进行,到点 4 才基本结束。高温高压的燃气膨胀推动活塞下行做功。当活塞下行将排气口打开时(点 5),由于此时缸内的燃气的压力和温度仍较高,分别为  $0.5 \sim 0.6\text{MPa}$  和  $600^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ ,因而气缸内燃气借助于气缸内外的压差经排气口高速排出,缸内的压力也随之下降,当缸内压力下降到接近扫气压力时,下行的活塞将进气口打开。新鲜空气便通过进气口充入气缸,并对气缸内进行扫气,将气缸内的废气经排气口驱除出去。这个过程一直要延续到下一个循环活塞再次上行将进气口关闭时为止。

在这一行程中,进行了燃烧与膨胀(曲线 3—4—5)、排气(曲线 5—6)和部分扫气(曲线 6—0)过程。

通常情况下,二冲程柴油机的燃烧和膨胀行程约占  $90^\circ \sim 120^\circ$  曲轴转角;换气过程约占  $130^\circ \sim 150^\circ$  曲轴转角;压缩行程约占  $120^\circ$  曲轴转角。图 1-7 为 ESDZ43/82B 型二冲程柴油机正时圆图。

由此可见,二冲程柴油机是将进气和排气过程合并到压缩与膨胀行程中进行,从而省略两个行程。在换气过程中,活塞不作有效功,相应这部分活塞行程容积  $\Delta V_s$  称为损失容积(与排气口高相对的容积),换气过程容积损失的多少通常用损失容积  $\Delta V_s$  对几何工作容积  $V_s$  的比值表示,成为行程损失系数,用  $\Psi_s$  表示:

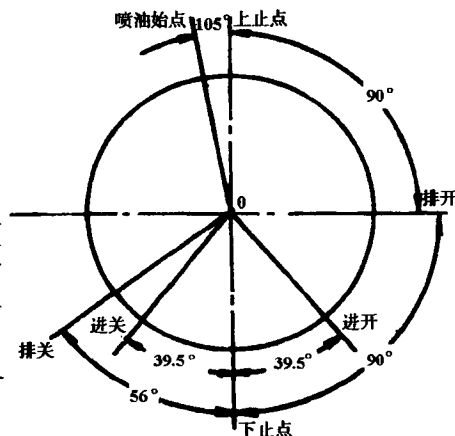


图 1-7 ESDZ43/82B 型二冲程柴油机正时圆图

$$\Psi_s = \frac{\Delta V_s}{V_s}$$

故对于二冲程柴油机,其有效压缩比  $\epsilon_e$  为:

$$\epsilon_e = \frac{V_s'}{V_c} = \frac{V_s(1 - \Psi_s) + V_c}{V_c} = \frac{V_s}{V_c}(1 - \Psi_s) + 1$$

有效压缩比与几何压缩比之间存在下列关系:

$$\epsilon_e = (\epsilon - 1)(1 - \Psi_s) + 1 = \epsilon(1 - \Psi_s) + \Psi_s$$

### 3. 二冲程柴油机的换气形式

在二冲程柴油机中,不同的换气形式对换气质量有重要影响。至今已出现多种换气形式。

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:弯流包括横流(简单横流和扫气口装有单向阀)、回流和半回流(简单半回流、扫气口有阀控制和排气口有阀控制);直流包括排气阀—扫气口式和排气口—扫气口式。

#### 1) 简单横流扫气

进、排气口位于气缸中心线的两侧,空气从进气门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一侧,再沿气缸中心线向下把废气从排气口清扫出气缸。通常,为了使扫气进行得完善,扫气口与排气口沿水平和垂直方向均有倾斜角以控制气流方向,防止进气直接流向排气口。

#### 2) 回流式扫气

进、排气口在气缸下部同一侧且排气口在进气口的上方。进气流沿活塞顶面相对侧的缸壁流动并沿缸壁向上流动,到气缸盖再转向下流动,把废气从排气口中清扫出气缸。气流在缸内作“回线”流动。在船用大型机中,MAN、KZ 型柴油机即为回流扫气形式。

#### 3) 半回流扫气

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。某些早期的半回流扫气形式,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。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

气缸下部均布一圈进气口,在气缸盖上有排气阀(1~6个)。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。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。在船用柴油机中 B&W 公司的 K-EF、K-GF 等机型是传统的排气阀—扫气口直流扫气式柴油机。在现代船用超长行程柴油机中,MAN/B&W 公司的 MC/MCE 机型和 Sulzer 公司的 RTA 机型也是排气阀—扫气口直流扫气式柴油机。

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 公司的 RTA 型柴油机。

#### 4. 二冲程柴油机的特点

从四冲程柴油机和二冲程柴油机的基本工作原理出发,可以得到以下结论:

(1) 二冲程由于换气时间短(换气角度仅为四冲程机的  $1/3$ )、新旧气体易掺混,所以二冲程机换气质量较四冲程机差,耗气量也大。

(2) 二冲程机曲轴转一转就有一个工作过程,因而在相同工作条件下它的回转要比四冲程机均匀,飞轮尺寸小,输出功率较四冲程机大;但由于工作频繁,燃烧室周围部件的热负荷比四冲程的高,并给高压带来困难。

(3) 在相同功率条件下,二冲程机的尺寸与重量比四冲程机小。

(4) 对于两台气缸尺寸及转速相同的非增压柴油机,理论上二冲程的作功能力为四冲程的 2 倍,但由于二冲程机缸套上气口的存在,使有效膨胀行程缩短,再加上换气质量差及扫气泵消耗曲轴的有效功,使得二冲程机的功率约为四冲程的 1.6~1.7 倍。

(5) 在同样转速下,由于二冲程机每一转供油一次,凸轮轴转速高,因此喷油泵柱塞速度较高,喷油嘴热负荷也较高,容易引起喷孔堵塞。

### 四、增压柴油机的工作原理

提高柴油机的进气压力,可使进气的密度增加,从而达到在同样的气缸容积中充进更多的空气量,以便喷入更多的燃油,作出更多的功来。这种用提高进气压力来提高柴油机功率的方法称为“增压”。增压是提高柴油机功率的主要途径。

预先对新鲜空气进行压缩的压气机,有直接由柴油机的曲轴通过齿轮等机械驱动的方式,这种增压方式称机械增压;也有用柴油机气缸排出的废气的能量在涡轮机中膨胀做功,由涡轮机来驱动的方式,称废气涡轮增压。采用机械增压方法后,在保持柴油机原结构尺寸的情况下,功率可提高 20%~70%,但由于增压器要消耗曲轴的有效输出功,则经济性下降,效率较低,故目前已不采用;而废气涡轮增压既能提高柴油机平均有效压力  $p_e$  和功率  $P_e$ (单位重量功率提高,单位功率重量降低),同时又可降低油耗率,提高柴油机的经济性,所以说它是一种最好的柴油机增压方式。

图 1-8 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。它的特点如下:

新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。进、排气管道上分别安装了离心式压

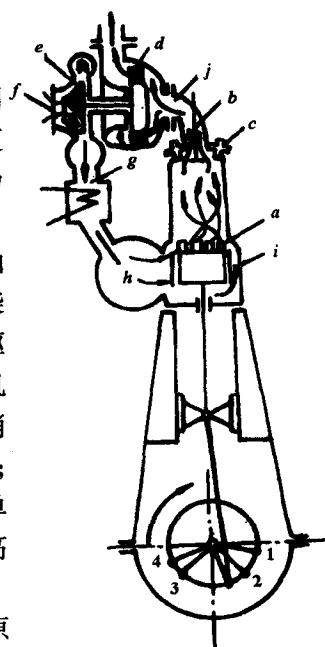


图 1-8 废气涡轮增压二冲程柴油机工作原理图



气机  $e$  和废气涡轮增压机  $d$ , 废气涡轮从废气中获得能量而带动压气机高速回转。新鲜空气经压气机压缩后压力和温度升高, 然后由管  $g$  经冷却器  $k$  冷却后进入进气管  $h$  和扫气箱  $i$ , 准备进入气缸。

气缸内工作循环的各主要过程—压缩、燃烧和膨胀的进行情况与非增压柴油机一样, 只是由于采取了增压, 使各过程的压力和温度有所增高。至于换气过程, 则与非增压的二冲程柴油机相似。

四冲程增压柴油机的工作原理和二冲程基本相同, 只是四冲程柴油机没有扫气箱, 增压空气直接通过进气阀进入气缸。

## 第四节 柴油机的主要性能指标

柴油机的性能指标, 包括动力性指标、经济性指标、重量和外形尺寸指标、排气污染指标等。

### 一、动力性指标

#### 1. 平均指示压力 $p_i$

##### 1) 定义

平均指示压力是气缸中假定的一个不变的平均压力, 它推动活塞在一个行程内所作的功与一个工作循环的指示功  $L_i$  相等, 把这个假定不变的压力称为平均指示压力, 如图 1-9 所示。

则平均指示压力  $p_i$  的计算方法如下:

因为  $L_i = p_i F_p S$  (N·m) 或 (J)

所以  $p_i = \frac{L_i}{F_p \cdot S} = \frac{L_i}{V_h}$  (Pa)

式中:  $p_i$ ——平均指示压力(Pa);

$F_p$ ——活塞面积( $m^2$ );

$S$ ——活塞行程(m);

$V_h$ ——气缸工作容积( $m^3$ )。

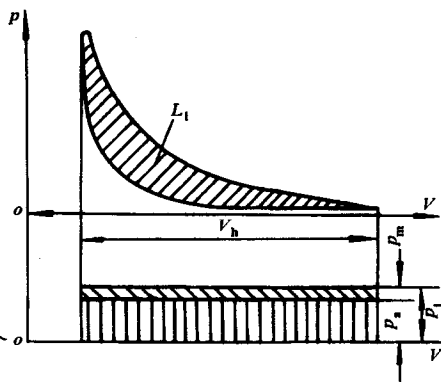


图 1-9 平均指示压力示意图

从公式可以看出平均指示压力  $p_i$  就是发动机一个工作循环中每单位气缸工作容积所具有的指示功  $L_i$ 。这样, 平均指示压力  $p_i$  的大小就与气缸的容积大小无关了。它排除了指示功  $L_i$  那种依赖气缸容积大小的因素, 使之成了从发动机实际工作循环的角度来衡量气缸工作容积  $V_h$  利用率高低的一个参数。因此, 可以用  $p_i$  值来比较不同类型或不同气缸容积的柴油机的作功能力。很显然,  $p_i$  值大, 说明其单位气缸容积的作功能力大, 表明其工作循环进行得比较完善。所以, 平均指示压力  $p_i$  直接反映出气缸中工质在一个循环中作功能力的大小, 它是衡量发动机实际循环动力性能的一个很重要的参数。

平均指示压力可以说明柴油机的强化程度。目前各类船用柴油机的平均指示压力  $p_i$  的数值如下:

四冲程非增压柴油机

$p_i = 0.65 \sim 1.05 \text{MPa}$

四冲程增压柴油机

$p_i = 0.90 \sim 3.0 \text{MPa}$