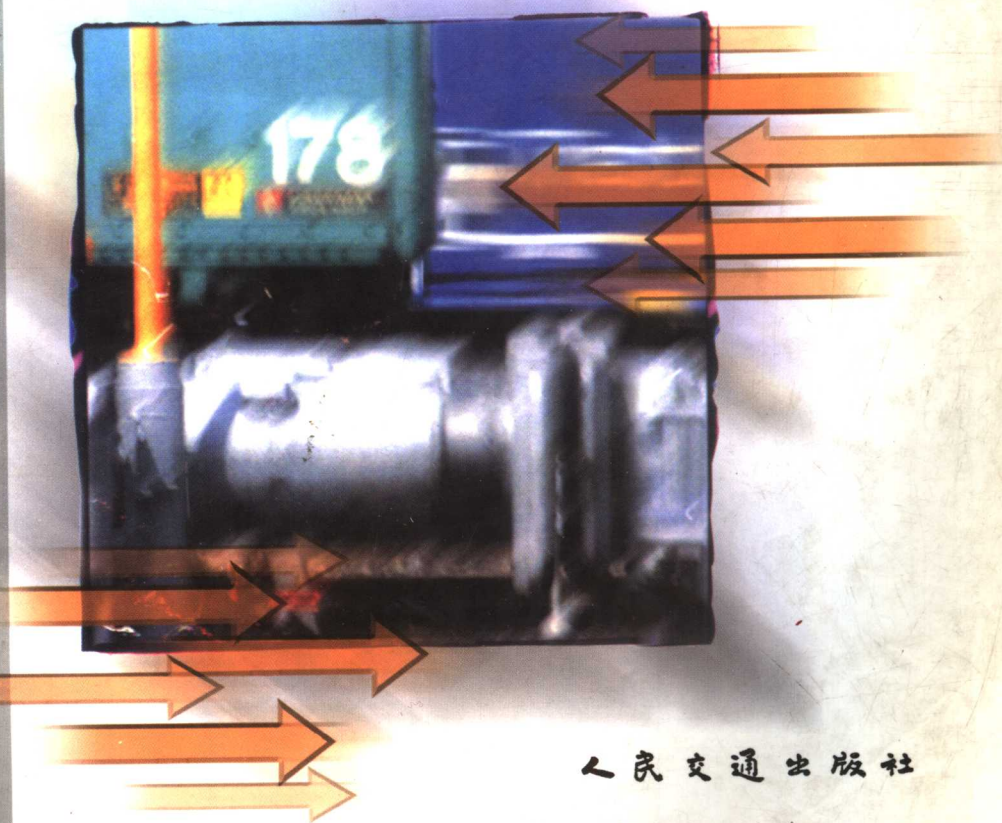


高等学校教材

CHUANBOCHAIYOUJI

船舶柴油机

■ 朱建元 主编



人民交通出版社

高等学校教材

Chuanbo Chaiyouji

船舶柴油机

朱建元 主编

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以近代船用大型低速二冲程柴油机装置和中速四冲程柴油机装置为主要典型,系统地论述船舶柴油机的结构、工作原理、运行特性、维护管理、柴油机和轴系的振动与减振,以及船舶推进装置的基本理论和管理知识。结合新型柴油机介绍其使用、调整、故障分析及其处理。对燃油的处理与喷射、燃烧与排放、换气与增压、润滑与冷却、调速器及其调整、起动换向与操纵、柴油机特性、示功图测录与分析、船舶推进轴系与螺旋桨、柴油机和轴系的振动与减振、运行管理及应急处理等进行了较为详细的阐述。

本书内容力求理论联系实际,阐述循序渐进,并能反映出国内外相关领域当前的发展动向和技术水平。

本书为海运院校轮机管理专业本科生的教材,也可供轮机管理人员职务适任证书培训及船机修造工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

船舶柴油机/朱建元主编. —北京:人民交通出版社,
2004.6

ISBN 7-114-05027-5

I. 船... II. 朱... III. 船舶柴油机
IV. U664.121

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第027532号

高等学校教材

船舶柴油机

朱建元 主编

正文设计:孙立宁 责任校对:张莹 责任印制:张 恺

人民交通出版社出版发行

(100011 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号 010 85285995)

各地新华书店经销

三河市宝日文龙印务有限公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张:24 字数:601千

2004年6月 第1版

2004年6月 第1版 第1次印刷

印数:0001—3000册 定价:42.00元

ISBN 7-114-05027-5

前 言

本书是根据全国高等学校航海类专业指导委员会制定的“轮机管理专业四年制本科生指导性教学计划”和“船舶柴油机教材大纲”,以及 STCW 78/95 公约和中华人民共和国海事局 1998 年制定的“中华人民共和国海船船员适任考试和评估大纲”的要求,并结合编者多年来本科生教学和海船船员培训教学的经验编写的。

本书以近代船用大型低速二冲程柴油机装置和中速四冲程柴油机装置为主要典型,系统地论述船舶柴油机的结构、工作原理、运行特性、维护管理、柴油机和轴系的振动与减振,以及船舶推进装置的基本理论和管理知识。结合新型柴油机介绍其使用、调整、故障分析及其处理。对燃油的处理与喷射、燃烧与排放、换气与增压、润滑与冷却、调速器及其调整、起动换向与操纵、柴油机特性、示功图测录与分析、船舶推进轴系与螺旋桨、柴油机和轴系的振动与减振、运行管理及应急处理等进行了较为详细的阐述。使学生具备对现代船舶柴油机进行维护管理、故障分析、调整和改进的知识与技能。

本书内容力求理论联系实际,阐述循序渐进,兼顾了本科生教学和船员适任考试培训的要求,并能反映出国内外相关领域当前的发展动向和技术水平。

本书为海运院校轮机管理专业的教材,也可供轮机管理人员职务适任证书培训及船机修造工程技术人员使用。

本书由上海海运学院朱建元教授主编,胡以怀教授副主编,参加编写工作的还有徐芝德讲师。全书由朱建元负责统稿。全书共十二章,其中,第一、三、四章由胡以怀编写;第二、五、六、七、九、十、十二章由朱建元编写;第八、十一章由徐芝德编写。

由于编者水平所限,不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

2004 年 1 月

目 录

第一章 柴油机的基本知识	1
第一节 柴油机的工作原理.....	1
第二节 柴油机的热力循环.....	8
第三节 柴油机的性能指标	12
第四节 柴油机的分类和发展	18
第二章 柴油机的结构和主要部件	23
第一节 燃烧室部件的工作条件和负荷	23
第二节 活塞、气缸、气缸盖的构造	31
第三节 曲柄连杆机构	50
第四节 机架、机座与贯穿螺栓.....	70
第三章 燃油的喷射与燃烧	76
第一节 燃油	76
第二节 燃油的喷射	83
第三节 可燃混合气的形成	93
第四节 燃油的燃烧	96
第五节 柴油机的有害废气排放.....	102
第六节 喷油设备.....	109
第七节 喷油设备的检查与调整.....	123
第四章 柴油机的换气与增压	132
第一节 柴油机的换气过程.....	132
第二节 换气机构.....	140
第三节 废气涡轮增压.....	150
第四节 废气涡轮增压系统.....	159
第五节 废气涡轮增压器.....	161
第六节 增压器的喘振与消除.....	168
第七节 增压系统的维护管理.....	172
第五章 润滑与冷却	176
第一节 润滑油.....	176
第二节 润滑的作用和分类.....	180
第三节 气缸的润滑.....	183
第四节 曲轴箱油润滑.....	189
第五节 柴油机的冷却.....	193
第六章 柴油机的油、水系统	197
第一节 燃油系统.....	197
第二节 低质燃油的使用技术要点和降速运行.....	201
第三节 分油机.....	204

第四节	润滑系统	213
第五节	冷却系统	220
第七章	柴油机的特性	225
第一节	概述	225
第二节	速度特性	227
第三节	推进特性	231
第四节	负荷特性	234
第五节	调速特性	236
第六节	柴油机的限制特性和工作范围	237
第七节	柴油机与螺旋桨的配合	239
第八章	示功图的测录与分析	245
第一节	示功图的测录仪器	245
第二节	示功图的种类、用途和测取	249
第三节	示功图分析计算	251
第九章	起动、换向、调速和操纵系统	259
第一节	起动装置	259
第二节	换向装置	267
第三节	柴油机的调速和机械调速器	272
第四节	液压调速器	277
第五节	电子调速器	290
第六节	调速器的维护管理	293
第七节	操纵系统	295
第十章	船舶推进装置	300
第一节	船舶推进装置概述	300
第二节	传动轴系的组成和检查	303
第三节	传动轴系的结构	309
第四节	齿轮减速箱和联轴节	316
第五节	螺旋桨装置	322
第六节	传动轴系的管理	328
第十一章	柴油机及轴系振动与平衡	330
第一节	曲柄连杆机构的运动学和动力学	330
第二节	柴油机的振动和平衡	335
第三节	轴系的扭转振动和减振	341
第四节	轴系的纵向振动和减振	350
第十二章	柴油机的运转管理与应急处理	356
第一节	备车和机动操纵	356
第二节	定速运行中的管理与完车	358
第三节	紧急停车和倒车	362
第四节	柴油机应急运行时的管理	364
第五节	柴油机运行主要故障和处理	366

第一章 柴油机的基本知识

第一节 柴油机的工作原理

利用自然界的能源产生动力是原动机的基本设想。水力、风力可以推动机械获得动力,燃料的热能、原子能等可以作为热力发动机(简称热机)的有效能源,产生更大的动力。柴油机即是热机的一种形式。

一、基本概念

1. 热机

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,完成两次能量的转换。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。

蒸汽机与蒸汽轮机都属外燃机。在该类机械中,燃料的燃烧和热量的放出发生在发动机外部的锅炉中,热能转变成机械能则发生在气缸内部。由于热能需经某中间工质(水蒸气)传递,必然存在热损失,故其热效率不高,整个装置也十分笨重。

2. 内燃机

汽油机、柴油机以及燃气轮机都属内燃机。其机械运动形式(往复、回转)不同,但具有相同的工作特点——燃料在发动机的气缸内燃烧并直接利用燃料燃烧产生的高温高压燃气在气缸中膨胀作功。可见内燃机中,燃料的化学能转变成热能(燃烧)以及热能转变成机械能(燃气膨胀)这两次能量转换均发生在气缸内部。从能量转换观点看,此类机械能量损失小,具有较高的热效率。另外,在尺寸和重量等方面,也具有明显优势(燃气轮机是热机中重量最轻的装置),因而在与外燃机竞争中已经明显领先。

根据所用燃料不同,内燃机可大致分为汽油机、煤气机、柴油机和燃气轮机,它们都具有内燃机的共同特点,但又具有各自的工作特点,柴油机与汽油机的比较如表 1-1 所示。汽油机的工作特点使其不能采用高压压缩比,因而限制了汽油机的经济性,也不允许作为船用发动机使用(汽油的火灾危险性大)。但由于它工作柔和平稳、噪声低、比重量轻,因而广泛应用于轿车

柴油机与汽油机的比较

表 1-1

机 型	柴 油 机	汽 油 机
特 性		
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(%)	30 ~ 55	15 ~ 40

和轻型运输车辆。

3. 柴油机

柴油机是一种压缩发火的往复式内燃机。它使用挥发性较差的柴油或劣质燃料油做燃料,采用内部混合法形成可燃混合气,缸内燃烧采用压缩式(靠缸内空气压缩形成的高温自燃发火)。这种特点使柴油机在热机中具有最高的热效率(达 55% 左右),因而应用十分广泛。尤其在船用发动机中,柴油机已经取得了绝对领先地位。根据英国劳氏船级社统计,1985 年全世界制造的商船中(2 000t 以上)以柴油机作为推进装置者占 99.89%,而到 1987 年则 100% 为柴油机船。

柴油机具有如下突出优点:

- (1)经济性好。有效热效率可达 50% 以上,可使用价廉的重油,燃油费用低。
- (2)功率范围广。单机功率 0.6 ~ 45 600kW,适用的领域广。
- (3)尺寸小,重量轻,有利于船舶机舱布置。
- (4)机动性好。起动方便,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。

但是,柴油机也具有以下缺点:

- (1)存在机身振动、轴系扭转振动和噪声。
- (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。

4. 柴油机的基本组成

柴油机的形式、机种很多,但基本结构可分为固定件、运动件、辅助机构和辅助系统四大部分。图 1-1 为一台箱式柴油机的基本构造简图。

固定件包括气缸盖、气缸体、气缸套、机身(机架)、机座、主轴承等。气缸盖、气缸套和活塞顶部形成一个封闭的空间,称为“燃烧室”。气缸固定在机身上,机身固定在机架上,机座连同它上面的一切零件都安装在属于船体结构一部分的基座上。机身与机座所包围的空间称为“曲柄箱”。

运动件包括活塞组(活塞体、活塞环)、连杆、曲轴,它们组成“曲柄-连杆”机构,将活塞的往复运动转变为曲轴的回转运动,并传递燃油燃烧所发出的有用功。

辅助机构包括进气阀、排气阀、凸轮轴及传动机构等,气阀由曲轴通过中间齿轮、凸轮、顶杆、摇臂控制,称为“配气机构”。这些机构控制柴油机的燃油喷射时刻、进排气阀开闭时刻、起动阀开闭时刻等。

辅助系统有燃油系统、冷却系统、润滑系统、操纵系统。燃油系统包括喷油器、喷油泵,它将高压燃油以雾状定时、定量喷入燃烧室。冷却系统对燃烧室周围承受高温的部件,用冷却液进行冷却,以防止烧坏。润滑系统是向有相对运动的零部件之间,供入润滑油以减少摩擦力和带走因摩擦产生的热量。操纵系统是进行柴油机起动、换向、调速、安全连锁和报警等操作的专门执行机构。

5. 柴油机的基本结构参数

(1)上止点(TDC)

活塞运动的最上端位置,亦即活塞离曲轴中心线最远的位置。

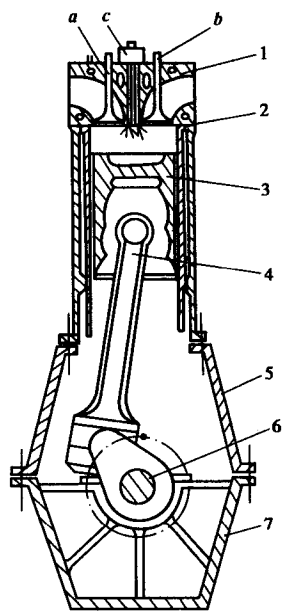


图 1-1 箱式柴油机基本构造

1-气缸盖;2-气缸;3-活塞;4-连杆;5-机架;6-曲轴;7-机座;a-进气阀;b-排气阀;c-喷油器

(2)下止点(BDC)

活塞运动的最下端位置,亦即活塞离曲轴中心线最近的位置。

(3)行程(S)

活塞从上止点移动到下止点间的直线距离,它等于曲轴曲柄半径 R 的两倍($S = 2R$)。活塞移动一个行程,相应于曲轴转动 180° (曲轴转角)。

(4)缸径(D)

气缸的内径。

(5)气缸余隙容积(压缩室容积, V_c)

活塞在上止点时,活塞顶上面的全部空间(活塞顶、气缸盖底面与气缸套表面之间所包围的空间),如图 1-2 所示。

(6)余隙高度(顶隙)

上止点时活塞最高顶面与气缸盖底平面之垂直距离。

(7)气缸工作容积(V_s)

活塞从上止点移动到下止点时所扫过的容积。如图 1-2 所示。

显然

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

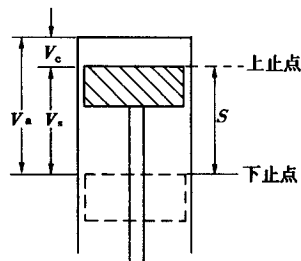


图 1-2 气缸容积

(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。见图 1-2。显然

$$V_a = V_s + V_c \quad (1-2)$$

(9)压缩比(ϵ)

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:

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

压缩比表示缸内工质的压缩程度。目前柴油机的压缩比 ϵ 一般为 $12 \sim 22$, 中、高速柴油机的 ϵ 高于低速机。

二、四冲程柴油机工作原理

柴油机的工作循环由进气、压缩、燃烧、膨胀和排气五个过程组成,包括进气、压缩、混合气形成、着火、燃烧与放热、膨胀作功和排气等在内的全部热力循环过程,称柴油机工作过程。

图 1-3 示出了四冲程柴油机各个行程的进行情况以及活塞、曲轴、气阀等部件的有关动作。

第一行程——进气行程

活塞从上止点下行,进气阀 α 打开。气缸容积不断增大,缸内压力下降,依靠缸内与大气的压差,新鲜空气经进气阀被吸入气缸。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)、曲轴转角 φ_{1-2} (图中阴影线所占的角度)表示进气持续角 $\Delta\theta_i$, 约为 $220 \sim 250^\circ$ 。

第二行程——压缩行程

活塞从下止点向上运动,自进气阀 α 关闭(点 2)开始压缩,直到上止点(点 3)为止。进气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 $600 \sim 700^\circ\text{C}$ (燃油的自燃温度为

210~270℃)。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 φ_{2-3} 表示压缩过程,约为 140~160 °CA。

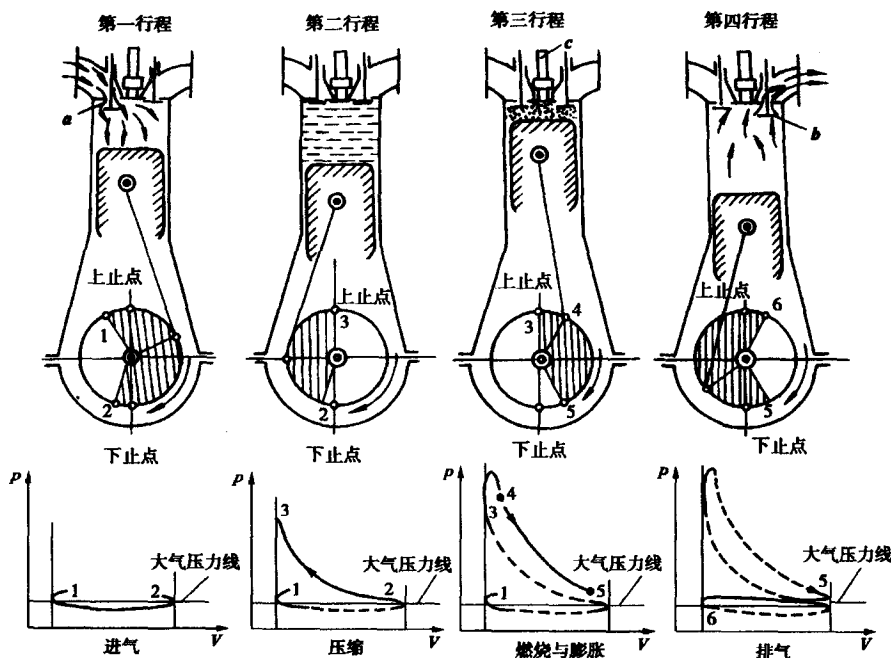


图 1-3 四冲程柴油机工作原理

第三行程——燃烧和膨胀行程

活塞在上止点附近,由于燃油强烈燃烧,气缸内的压力和温度急剧升高,压力约为 5~8MPa,甚至高达 15MPa 以上。温度约为 1400~1800℃或更高。燃烧的最高压力和最高温度分别用 p_z 和 t_z 表示,高温高压的燃气(作工的工质)膨胀并推动活塞下行而作功。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。膨胀一直到排气阀 b 开启时结束,膨胀终了时的气缸内气体压力 p_b 约为 250~450kPa,气体温度 t_b 约为 600~700℃。曲轴转角 φ_{3-4-5} 表示燃烧和膨胀过程。

第四行程——排气行程

在膨胀行程末,排气阀 b 开启时活塞尚在下行,废气依靠气缸内外压差经排气道排出。活塞由下止点上行时,废气被活塞进一步推出气缸,此时的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。与进气阀相同,排气阀 b 总是在下止点前提早开启(点 5),排气阀一直延迟到上止点后(点 6)才关闭。曲轴转角 φ_{5-6} 表示排气持续角 $\Delta\theta_e$,约为 230~260 °CA。

上述四个行程,完成了柴油机一个工作循环。当活塞再次下行时,重复第一行程,这样第二个工作循环又重复进行,以维持柴油机连续稳定运转。

四冲程柴油机的一个工作循环,曲轴要回转两转(720°曲轴转角)。每个工作循环中只有膨胀行程是作功的,其他三个行程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作功的气缸供给。如果是单缸柴油机,则就由较大的飞轮供给。

图 1-3 下方的 $p-V$ 表示出一个工作循环内气缸中气体压力随活塞位移(或气缸容积)而变化的情形。工作循环各过程压力曲线的综合构成了四冲程柴油机的示功图。在工作过程中,缸内气体的压力和容积是同时变化的。 $p-V$ 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。

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,称为气阀定时,通常用距上、下止点的曲轴转角($^{\circ}\text{CA}$)表示。将这些定时按曲柄所在的位置及旋转的角度,依次画在一个圆图上,即为气阀定时圆图,如图 1-4 所示,它反映了各工作过程的次序与规律。

在图 1-4 中,进气阀在上止点前点 1 开启,在下止点后点 2 关闭,其与相应上、下止点的夹角 φ_1 、 φ_2 分别称进气提前角 θ_{ia} 、进气滞后角 θ_{il} 。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 φ_3 、 φ_4 分别称为排气提前角 θ_{ea} 、排气滞后角 θ_{el} 。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,另外还可减少排气功耗。因此,气阀定时是影响四冲程柴油机作功的重要因素。

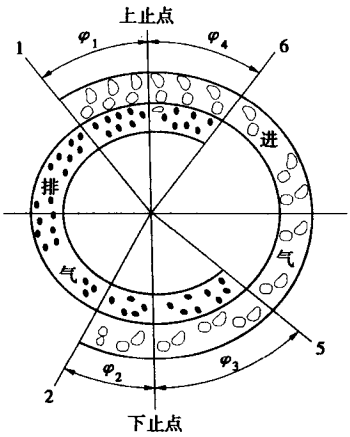


图 1-4 气阀正时圆图

由图 1-4 还可看出,在上止点前后的一段曲柄转角内,进气阀与排气阀有一个同时开启的曲轴转角,称为气阀重叠角。此时进气管、气缸、排气管连通,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,并利用进、排气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,实现燃烧室扫气。这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。一般来说,柴油机转速越高,则气阀开启提前角及关闭延迟角应越大,且增压柴油机的气阀重叠角均大于非增压机。如表 1-2 所示。

四冲程柴油机气阀定时及气阀重叠角

表 1-2

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 $40^{\circ} \sim 55^{\circ}$	上止点后 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$
气阀重叠角	$25^{\circ} \sim 50^{\circ}$		$80^{\circ} \sim 130^{\circ}$	

三、二冲程柴油机工作原理

四冲程柴油机只有膨胀行程是作功的,新气的吸入与废气的排出均依靠活塞的抽吸与推挤作用,各占有一个多的活塞行程,因而占用的时间长。如果取消气缸盖上的进、排气阀,代之以由活塞顶控制的,开在气缸套下部的进气口、排气口,另外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清扫废气出气缸。由此就把进、排气过程缩减到下止点前后的部分行程中完成,从而演变为二冲程柴油机,如图 1-5 所示。

第一行程——压缩行程

假定活塞原先在下止点,曲轴转动使活塞上行,活塞顶部先遮住较低的进气口,然后遮住排气口,再上行则气缸内新鲜空气受压缩,压力、温度上升。当活塞到达上止点时,压缩过程结束。该过程在示功图(见图 1-5)上以压缩曲线(4~c)表示。

第二行程——膨胀行程

因压缩终点的温度早已超过燃油在该压力下的自燃温度,故一旦燃油经喷油器喷入气缸,便立即自行着火燃烧,至图 1-5 中的 d_2 点,达到工作循环的最高温度,此后,燃气继续膨胀推动活塞下移向外输出有效功。

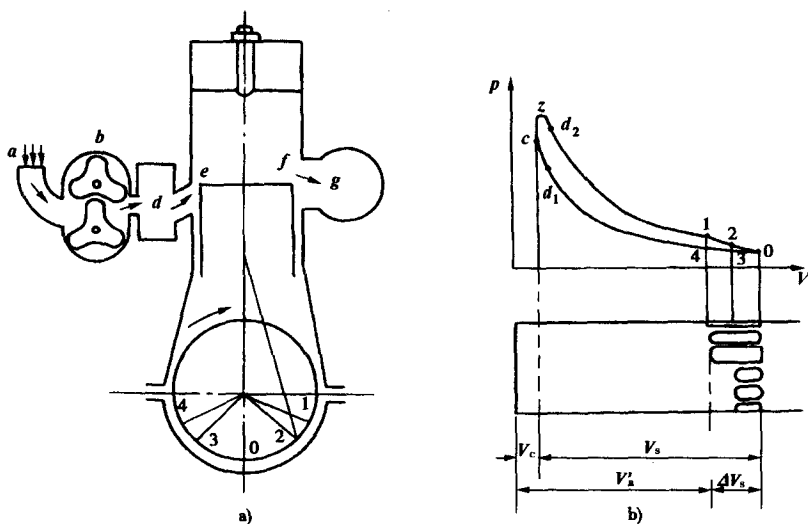


图 1-5 二冲程柴油机工作原理

换气过程——进、排气过程

由图 1-5 可见,活塞下行,先将排气口 f 打开(相对于曲柄在点 1 位置),此时气缸内压力为 $0.3 \sim 0.5\text{MPa}$ 。气缸内的废气依靠压差从排气口冲入到排气管 g (称为自由排气阶段)。当活塞下行把扫气口 e 打开(相当于曲柄在点 2 位置)时,气缸内压力降低至接近扫气压力(通常为 $105 \sim 140\text{kPa}$),但废气由于流动惯性而继续排出。其后扫气空气经扫气口进入气缸,同时依靠扫气压力清扫废气出气缸,于是进气与排气同时进行,一直到下止点(点 0)并转而上行把扫气口关闭为止(相当于点 3,称为强制排气阶段)。扫气结束,活塞继续上行把排气口关闭(点 4),此时在活塞推动下,气缸内的部分新气被挤出气缸(称为过后排气)。至此换气过程完成,又进入新的压缩、燃烧和膨胀过程循环。

换气过程是在膨胀行程终止后,压缩行程开始前一段极短的时间内完成的,因而不单独占有冲程数。另外是进、排气过程在较长的一段时间内同时进行,因而有时又称它为“扫气过程”。

从二冲程柴油机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 处开始喷油,在上止点前 c 开始燃烧,到点 d_2 时燃烧结束,都与四冲程柴油机基本相同。

二冲程柴油机也可以用定时圆图来表示它的各项定时时刻。图 1-6 为国产 ESDZ43/82B 型二冲程柴油机的定时圆图。

由上述可知,无论四冲程或二冲程柴油机,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

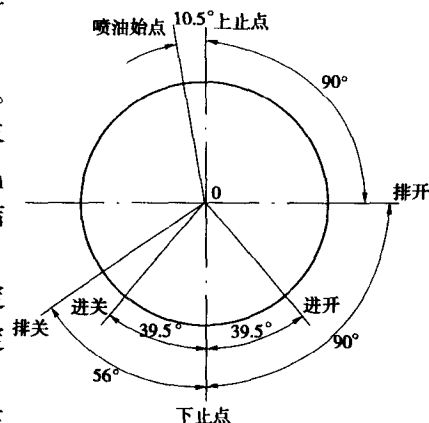


图 1-6 二冲程柴油机的定时圆图

关闭时刻。通常将进、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 ϵ_e 。

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

式中: φ_s ——行程失效系数;

φ_s = 损失容积 ΔV_s / 气缸工作容积

V_s = 气口高度 / 工作行程

与四冲程柴油机相比,有以下特点:

(1) 二冲程机由于换气时间短(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行程,因而在相同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机的高,并给高增压带来困难。

(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) 两台气缸尺寸及转速相同的柴油机,理论上二冲程机的作功能力为四冲程机的 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 1.6~1.8 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。

总之,在提高功率方面二冲程机比四冲程机优越,而在换气质量方面四冲程机较二冲程机优越。

四、二冲程增压柴油机的工作原理

用增加进气压力来提高功率的方法称为柴油机的增压。为此必须在柴油机上装设压气泵,若压气泵由柴油机曲轴直接带动则称机械增压。进气压力的提高会使柴油机消耗于压气泵的功增多,甚至当进气压力超过一定值时,柴油机因其所增加的功率几乎全部消耗在驱动压气泵上,所以机械增压柴油机的进气压力都较低,一般不超过 150kPa,否则将得不偿失。

考虑到柴油机的排气温度还很高(约为 400~500℃),约含燃油燃烧发出热量的 1/3。利用废气的能量,用来驱动涡轮增压器,则既可增加柴油机的功率,又可提高经济性。

图 1-7 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。

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。

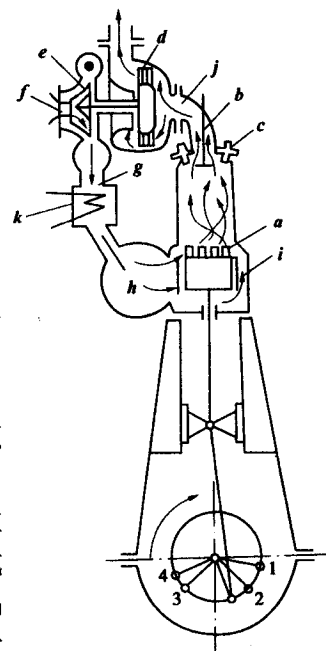


图 1-7 废气涡轮增压的二冲程柴油机工作原理

柴油机排出的废气送入涡轮机中,使涡轮机高速回转来带动离心式压气机,从而提高进入柴油机的空气压力以实现增压,这种增压方式称为废气涡轮增压。废气涡轮机和同轴安装的压气机合称为废气涡轮增压器。废气涡轮增压是柴油机在提高功率途径上的一次飞跃。

增压柴油机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。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),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),等待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向上行时,扫气口 a 被关闭(曲柄在点 3),接着排气阀关闭(曲柄在点 4),换气过程结束,进入压缩过程。

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

内燃机实际循环中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,那容易被种种变化万千的现象所困惑,为此需要借助于理论循环。理论循环是根据内燃机实际工作过程的特征,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,以明确提高理论循环热效率 η_t 和理论循环平均压力 p_t 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了如下的简化假定

(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 1-8a)。等容循环也叫奥托循环,是各种汽油机、煤气机的热力学计算基础(某些高速柴油机也近似按此循环工作)。

(2)等压加热循环(图 1-8b)。等压循环也叫狄塞尔循环,早期的空气喷射式和现代高增压柴油机即近似按此循环工作。

(3)混合加热循环(图 1-8c)。现代柴油机基本上都是按混合加热循环工作的。

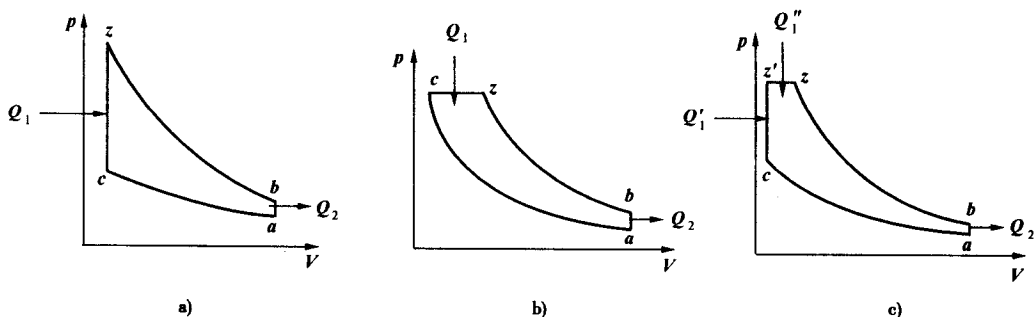


图 1-8 理论循环 p - V 示功图

a) 等容加热循环; b) 等压加热循环; c) 混合加热循环

根据热力学理论,理论循环的 p - V 图面积即表示一个循环对外作理论功的大小。理论循环的热效率 η_t 和平均压力 p_t 可写成:

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\epsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]} \quad (1-5)$$

$$p_t = \frac{W_{th}}{V_h} = \frac{p_a \cdot q_1}{RT_a} \cdot \eta_t \quad (1-6)$$

式中: ϵ ——压缩比, $\epsilon = V_a/V_c$;

λ ——压力升高比, $\lambda = p_z/p_c$;

ρ ——初期膨胀比, $\rho = V_z/V_c$;

k ——工质绝热指数;

p_a ——压缩始点压力;

T_a ——压缩始点温度;

q_1 ——单位质量工质吸入热量;

R ——气体常数。

由上式可知,混合加热循环的理论热效率 η_t 随压缩比 ϵ 、压力升高比 λ 和绝热指数 k 的增加而提高,随初期膨胀比 ρ 的减少而提高。理论循环的平均压力 p_t 随 p_a 、 q_1 、 η_t 的提高和 T_a 的降低而增加。这些结论对柴油机性能改进有重要意义,指导着柴油机的发展。当代高增压柴油机的最高爆发压力 p_z 已经达到了相当高的限度(如 15.0MPa),这种限制最高爆发压力的柴油机以定压燃烧循环的工作热效率最高。

上述三种理论循环中,工质只绝热膨胀到点 b ,然后定容放热(相当于排入大气),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 ,即在点 b 以后继续绝热膨胀到点 f (如图 1-9 所示),然后定压放热 $Q_2(f \sim a)$,这种循环称继续膨胀循环(图示为继续膨胀混合加热循环),显然此种循环比前述三种循环更完善。此循环即为涡轮增压柴油机的理论循环(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。如果在柴油机气缸内实现此种循环,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($z \sim b$),燃气涡轮内膨胀($b \sim f$)。

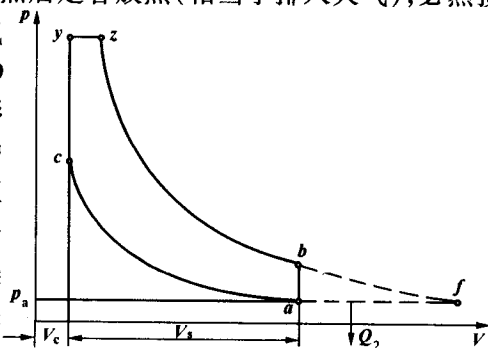


图 1-9 继续膨胀混合加热循环

4. 三种理想循环热效率 η_i 的比较

(1) 若压缩比和循环加热量 Q_1 相同, 则从图 1-10a) 的温熵图来进行比较, 该图是压缩比 ϵ 为 14 时绘制的。从三种循环的曲线分析可知, 等容加热循环 ($\rho = 1$) 的热效率 η_i 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。

(2) 若最高爆发压力 p_z 和循环加热量 Q_1 相同, 则可从图 1-10b) 来进行比较, 在相同的 Q_1 及 p_z 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。

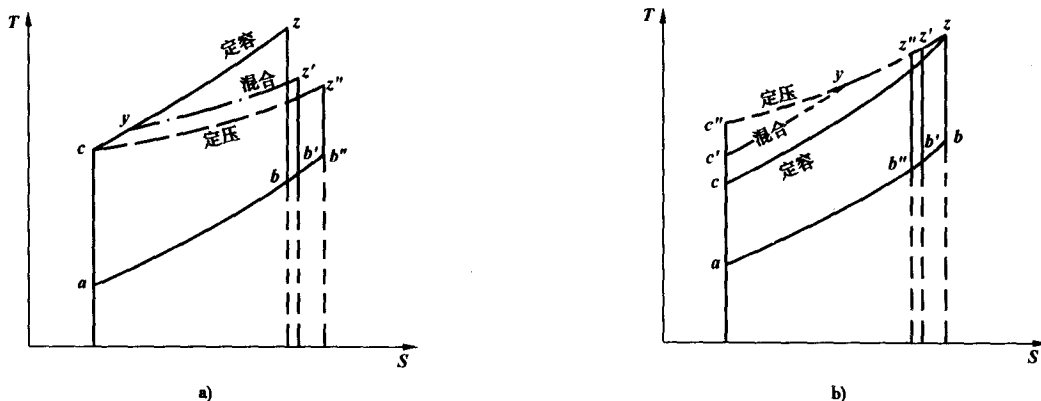


图 1-10 加热量 Q_1 相同时, 三种理想循环 η_i 的比较

a) 压缩比 ϵ 相同; b) 最高爆发压力 p_z 相同

$ac'yz'b'a$ -混合; $aczba$ -定容; $ac'z'b'a$ -定压

5. 从理论循环的 η_i 可得到以下结论

- (1) 增加压缩比 ϵ 可提高工质的最高温度, 提高膨胀比, 因而可提高热效率 η_i , 但其提高率随 ϵ 的增加而降低;
- (2) 增大 λ 可增加等容加热量, 因而可提高 η_i ;
- (3) 增大 ϵ 和 λ 的同时将提高最高爆发压力 p_z ;
- (4) 增大 ρ , 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 η_i 降低, 但可提高理论循环的平均压力 p_i ;
- (5) 增大绝热指数 k 可提高 η_i 。

二、柴油机实际循环

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 η_i 和平均压力 p_i 。一般地说, 两者之间的差异主要在于:

1. 工质的影响

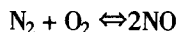
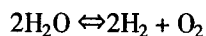
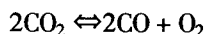
理论循环中工质是理想气体, 而实际循环中的工质是空气和燃烧产物的混合物, 影响如下:

(1) 工质成分的变化。柴油机中燃烧前的工质是新鲜空气和上一循环残留在压缩容积里的燃烧气体的混合物; 燃烧后工质为燃烧产物, 其各个时期的成分是变化的, 不仅与燃油成分有关, 而且还与过量空气系数和燃烧温度有关。

(2) 工质比热的变化。空气和燃气的比热都随温度上升而增大, 而多原子气体 (CO_2 、 H_2O 、

SO₂)的比热值又比双原子气体(O₂、N₂、空气)大。在实际循环中,三原子气体量增加,再加上最高燃烧温度很高,实际循环中工质的比热必然随温度升高而增大。这意味着在同样的加热量下,实际循环所引起的压力和温度的增长要比理论循环时低得多,其结果是实际循环的热效率低,作功能力下降。工质比热的变化对循环的热效率影响显著。

(3)工质的高温分解。温度超过 1 000℃时,燃烧产物将以一定的数量发生高温分解,同时吸收相当热量保持化学平衡,即在高温时引起如下的可逆反应



高温分解与压力和温度有关。高温低压时反应向右进行,并吸收热量;在膨胀行程中由于温度降低,反应向左进行而放出热量。高温分解需要吸收热量,使燃烧阶段的压力、温度增加较少,也使实际循环的热效率和作功能力下降。

(4)工质分子数的变化。燃油燃烧后使工质的分子数增加,不同柴油机在全负荷时的过量空气系数 α 在 1.2~2.0 之间,分子变更系数(工质燃烧后与燃烧前摩尔数的比值)约为 1.03~1.055,这对提高柴油机的效率有利,但影响极小。

2. 气缸壁的传热损失

实际循环中工质与缸壁之间始终存在热交换,并非绝热。在压缩过程初期,气缸壁温度较高使空气被加热;而在后期,由于气体温度超过缸壁温度,便发生从气体到缸壁相反的热量传递。实际压缩过程是一个多变过程,平均压缩多变指数 n_1 约为 1.32~1.37(低速增压柴油机)。实际压缩过程总趋势是工质向缸壁散热,因此压缩终点压力必然低于绝热压缩终点压力。

膨胀过程是一个更复杂的多变膨胀过程。膨胀初期由于后燃以及原来高温时已分解的燃烧产物的重新复合反应,使工质为加热膨胀;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。整个膨胀过程是一个以平均膨胀多变指数 n_2 为代表的多变膨胀过程,通常 n_2 约为 1.15~1.30,即整个膨胀过程是一个工质被加热的多变过程。膨胀终点缸内压力高于绝热膨胀压力。

3. 换气损失

理论循环为闭口循环,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,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

理论循环中,工质向热源吸热,但实际循环中工质的热量是由燃油的燃烧得到的,必然存在燃油在膨胀中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,产生不完全燃烧损失,则使燃烧膨胀线的位置下移。

5. 泄漏损失

活塞环处的泄漏无法避免。在良好的磨合状态下,其泄漏量约为气缸内工质总重的 0.2%。漏气损失可并入热交换损失中。

6. 其他损失