

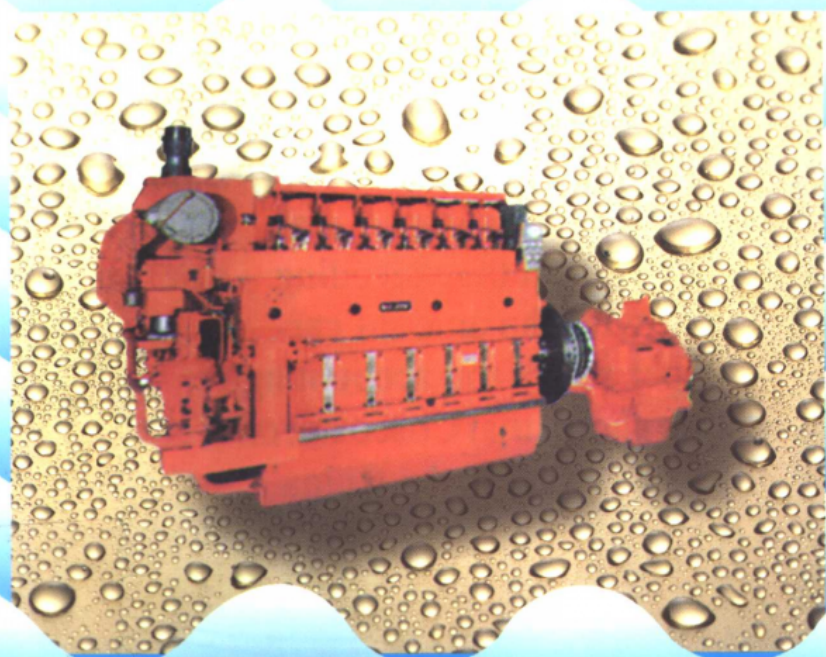
海船船员适任考试培训用书



船舶主推进动力装置

船舶柴油机

杜荣铭 主编 孙培廷 主审



大连海事大学出版社

海船船员适任考试培训用书

- 轮机长业务
- 船舶柴油机 / 船舶主推进动力装置
- 船舶辅机
- 船舶电气
- 轮机自动化
- 轮机维护与修理
- 船舶管理
- 轮机工程基础
- 轮机英语
- 机工业务

ISBN 7-5632-1313-9



9 787563 213139 >

ISBN 7-5632-1313-9
U·322 定价: 42.80 元

海船船员适任考试培训用书

船舶主推进动力装置

船舶柴油机

杜荣铭 主编
孙培廷 主审

大连海事大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

船舶柴油机/杜荣铭主编. - 大连:大连海事大学出版社, 1999

ISBN 7-5632-1313-9

I. 船… II. 杜 III. 船用柴油机 IV. U664.121

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 37949 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 4727996)

大连海事大学印刷厂印刷 大连海事大学出版社发行

1999 年 11 月第 1 版 1999 年 11 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:23.75

字数:593 千 印数:0001~5000 册

责任编辑:程策群 封面设计:王 艳

责任校对:陈崇铨

定价:42.80 元

内 容 提 要

本书是按照1998年2月中华人民共和国港务监督局下发的“海船船员适任考试和评估大纲”(以下简称“考试大纲”)中对主推进动力装置柴油机部分的考试要求编写的。内容覆盖了考试大纲中对二、三管轮(750kW~3000kW、3000kW及以上)及轮机长/大管轮(750kW~3000kW、3000kW及以上)的不同层次要求。根据我校近年来多次编写高级船员培训教材及进行高级船员培训教学的经验,在有关内容的取舍、论述深度及广度方面进行优化,力求做到理论联系实际,通俗易懂,便于自学,符合培训教学规律。

本书共十三章,以近代船用大型低速二冲程柴油机装置及中速四冲程柴油机装置为主要机型,介绍了它们的工作原理、结构特点、动力系统、使用管理等。在内容上力求简洁明了,结合新型船用柴油机讲述其使用、调整、故障与处理。对燃油的处理与燃烧、系统润滑与冷却、增压与喘振、调速装置调整、柴油机特性及起动、换向与操纵、示功图测录与分析、运转管理与应急处理等进行了较详细的叙述。此外,还对柴油机及轴系的振动与消减、船舶推进装置等进行了简要介绍。

在书后附有考试大纲(1998.2)中有关柴油机考试的内容摘要,供在学习中参考。

本书主要供参加海船船员适任考试者学习使用,同时也可作轮机长/大管轮及二、三管轮培训教材或船员业务学习使用。

序

在世纪之交,中国航海学会船舶机电专业委员会,又一次不失时机地积极倡导、精心组织轮机界的学者和专家推出这套《海船船员适任考试培训用书》,将它奉献给 21 世纪以及日夜奋战在海洋运输战线上的广大船员,这是一件令人称道的大好事。

《海船船员适任考试培训用书》符合经 1995 年修正案修正的《1978 年海员培训、发证和值班标准国际公约》(STCW 78/95 年公约),满足中华人民共和国海事局于 1998 年颁布的《海船船员适任考试和评估大纲》(简称“新大纲”)的要求,由具有丰富教学经验和实践经验的教授、专家所撰写。应该说,这套系列丛书已是第三版了,它的前两版《高级船员适任证书考试用轮机培训教材》,分别在 1989 年和 1993 年出版,先后在数十次的轮机员培训中使用,深受广大船员及考试、发证单位的欢迎和赞许,许多分册一经问世即被购买一空,以致多次重印。几年中,各分册先后印刷 1.3 万册至 2.6 万多册,平均每分册印刷 2 万余册,全书总印量约 18 万册之巨。

作为第三版的《海船船员适任考试培训用书》正是在前两版的基础上,以原作者为主体编写而成。它由 10 个分册组成,分别是:轮机长业务、船舶主推进动力装置(船舶柴油机)、船舶辅机、船舶电气、轮机自动化、轮机维护与修理、船舶管理、轮机工程基础、轮机英语和机工业务。与前两版比较,在丛书的组成上做了这些变更:将原先的《轮机管理》一书分成两册,即《轮机长业务》和《船舶管理》,借以增强轮机长所需知识的广度和深度;新增了《轮机维护与修理》和《机工业务》两书;删去了《造船大意》一书。

调整改编后的这套培训用书,充分保持了前两版教材的较好的针对性、适用性、系统性和篇幅适中、简明易懂,以及理论与实际密切结合的特点,并根据近年来轮机技术和轮机管理的发展变化及以往教学中发现的问题和不足,对全书的内容进行精选、调整、充实和更新,对篇章结构进行推敲和雕琢,做到了有一定的深度而不艰涩,有必要的广度而不琐乱,主次分明,详略得宜。使得这套培训用书,在整体上更好地体现了“新大纲”的要求,在知识体系上更具针对性,在内容上更具适用性和先进性,因而也就更具科学性、实用性和易读性。它无论是对海船轮机人员的考试培训,还是对考试、发证单位的命题,以及对船员的业务学习和提高都是大有裨益的。

在本书出版之际,我作为该书前两版的编委会主任委员,对此额手称庆,相信它一定会像前两版一样,受到广大船员和读者的关心、爱护和支持,并期望成为大家的良师益友。

钱耀鹏

1999 年 8 月

海船船员适任考试培训用书编委会

(以下按姓氏笔画为序)

主任委员 吕登有

副主任委员 刘德洪 刘福生 孙培廷 林建清 陈鹏 殷佩海

委	员	毛道彬	卢庆丰	史际昌	刘建军	刘宗德	许乐平
		朱峰	陆卫东	李玉平	李凯	李忠华	李明昌
		李成玉	吴树雄	吴恒	杜荣铭	金以铨	郑为民
		郑风阁	徐正兴	钱耀鹏	钱闵	郭祖平	顾宣炎
		费千	袁林新	黄海波	韩秀廷	谢群威	满一新
		詹玉龙	蔡振雄				

前 言

为适应经 1995 年修正案修正的《1978 年海员培训、发证和值班公约》(STCW 78/95 公约)及中华人民共和国海事局 1998 年颁布的《海船船员适任考试和评估大纲》的实施和要求,中国航海学会船舶机电专业委员会组建了海船船员适任考试培训用书编写委员会,选聘有丰富教学经验和实践经验的教授、专家为各本书的主编。编委会对各本书的编写大纲进行了审定。

这套船员考试培训用书有较强的针对性、适用性、先进性,符合船员考试和评估大纲要求,篇幅适中,取材切题,联系实际,简明扼要,适合于海船轮机人员适任考试培训用,对船员的业务学习也有参考价值。

这套系列丛书共分十册:轮机长业务、船舶主推进动力装置(船舶柴油机)、轮机工程基础、船舶辅机、船舶电气、轮机自动化、轮机维护与修理、船舶管理、机工业务、轮机英语。

本套系列丛书在编审、出版征订工作中得到中华人民共和国海事局、各航运企业、大连海事大学出版社等单位的关心和大力支持,特致谢意。

海船船员适任考试培训用书编写委员会

编者的话

根据“中华人民共和国海船船员适任考试、评估和发证规则”(下称“发证规则”)的规定,中华人民共和国港务监督局于1998年2月下发了“海船船员适任考试和评估大纲”(下称“考试大纲”),并决定自2000年1月1日开始与“发证规则”配套实施。鉴于“考试大纲”中对海船船员考试科目与内容均有较大调整,原船员培训教材已无法满足要求,因而根据“考试大纲”的相应要求,以及多年来进行高级船员培训教学的经验,重新编写了《船舶柴油机》培训教材。

本书共十三章,在内容上可满足二、三管轮及轮机长/大管轮对柴油机考试内容的要求。

本书由杜荣铭教授主编,孙培廷教授主审。第一、二、三、六、八章由杜荣铭、辛颖编写;第四、七、九、十、十二章由李斌副教授编写;第五、十一、十三章由黄连中讲师编写。

在本书编写过程中,承蒙港监局、远洋公司、轮船公司及兄弟院校有关专家与同行热心帮助与支持,在此致以诚挚的谢意。

由于教材内容广泛,时间短促,编者水平有限,不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

1999年5月

编者

目 录

第一章 柴油机基本知识	1
第一节 柴油机热力循环.....	1
第二节 柴油机工作原理.....	6
第三节 柴油机的性能指标.....	13
第四节 船舶柴油机的类型和发展特点.....	20
第二章 柴油机结构、结构分析及主要部件	26
第一节 燃烧室部件.....	26
第二节 曲柄连杆机构.....	49
第三节 机架、机座和贯穿螺栓.....	68
第三章 燃油喷射与燃烧	72
第一节 燃油.....	72
第二节 燃油的喷射和雾化.....	83
第三节 可燃混合气的形成.....	89
第四节 燃油的燃烧.....	93
第五节 柴油机的排气污染与净化.....	99
第六节 喷油设备.....	102
第四章 柴油机换气、换气机构与增压	119
第一节 柴油机的换气过程及换气质量评定参数.....	119
第二节 换气机构.....	124
第三节 废气涡轮增压.....	133
第四节 废气涡轮增压器.....	140
第五节 柴油机废气涡轮增压系统.....	145
第六节 增压系统的维护管理及故障排除.....	150
第五章 柴油机系统	154
第一节 燃油系统.....	154
第二节 低质燃油的使用和降速运行.....	157
第三节 分油机.....	161
第四节 润滑系统.....	167
第五节 冷却系统.....	172
第六章 润滑与冷却	177
第一节 润滑和润滑油的性质.....	177

第二节	气缸润滑	183
第三节	曲轴箱油润滑	193
第四节	柴油机的冷却	199
第七章	柴油机特性	202
第一节	概述	202
第二节	速度特性	203
第三节	负荷特性	207
第四节	推进特性	208
第五节	调速特性	211
第六节	限制特性和柴油机的使用范围	212
第七节	柴油机与螺旋桨的配合	214
第八章	柴油机的调速装置	219
第一节	柴油机的调速	219
第二节	机械式调速器	221
第三节	液压调速器	224
第四节	电子调速器	237
第五节	调速器的故障与管理	240
第九章	起动、换向和操纵系统	243
第一节	起动装置	243
第二节	换向装置	252
第三节	柴油机的操纵系统	256
第十章	示功图测录与分析	261
第一节	示功图的测录	261
第二节	示功图的分析 and 计算	268
第十一章	船舶推进装置	276
第一节	船舶推进装置的组成及传动方式	276
第二节	传动轴系的布置和中心线状态检查	279
第三节	中间齿轮减速箱和联轴器	285
第四节	传动轴系的结构和管理	290
第五节	定距螺旋桨和可调螺距螺旋桨装置	297
第十二章	柴油机及推进轴系的振动	303
第一节	活塞、连杆的运动及其作用力	303
第二节	柴油机的振动与平衡	309
第三节	轴系的扭转振动特性	317
第四节	轴系扭转振动的减振措施	326
第五节	轴系的纵向振动与消减	331
第十三章	柴油机运转管理和应急处理	336
第一节	备车和机动操纵	336
第二节	运转中的管理与完车	338

第三节	封缸运行	342
第四节	停增压器运转	344
第五节	拉缸	345
第六节	敲缸	347
第七节	扫气箱着火	348
第八节	曲轴箱爆炸	349
第九节	烟囱冒火	351
第十节	连杆螺栓断裂	353
第十一节	紧急刹车	354
附录		356

第一章 柴油机基本知识

第一节 柴油机热力循环

一、柴油机的基本概念

1. 热机

柴油机是内燃机的一种,而内燃机又是热机的一种。所谓热机是指把热能转换成机械能的动力机械。蒸汽机、蒸汽轮机以及柴油机、汽油机等是热机中较典型的机型。

蒸汽机与蒸汽轮机同属外燃机。在该类机械中,燃烧(燃料的化学能转变成热能)发生在汽缸外部(锅炉),热能转变成机械能发生在汽缸内部。在动力机械中此类机器称外燃机。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,况且整个动力装置十分笨重。在能源问题十分突出的当前,它无法与内燃机竞争,因而已经在船舶动力装置中消失。

2. 内燃机

汽油机、柴油机以及燃气轮机同属内燃机。虽然它们的机械运动形式(往复、回转)不同,但具有相同的工作特点——都是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。可见在内燃机中,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。在动力机械中此类发动机统称内燃机。显然,从能量转换观点,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(例如,燃气轮机在热机中具有最轻的装置重量),因而在与外燃机竞争中已经取得明显的领先地位。

在内燃机中根据所用燃料不同,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,但又都具有各自的工作特点。由于这些各自不同的特点使它们在工作原理、工作经济性以及使用范围上均存在一定差异。如汽油机使用挥发性好的汽油做燃料,采用外部混合法(汽油与空气在气缸外部进气管中的汽化器进行混合)形成可燃混合气。缸内燃烧为电点火式(电火花塞点火)。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,而且也不允许作为船用发动机使用(汽油的火灾危险性大)。但它广泛应用于运输车辆。

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(燃油与空气的混合发生在气缸内部)形成可燃混合气;缸内燃烧采用压缩式(靠缸内空气压缩形成的高温自行发火)。这种工作特点使柴油机在热机领域内具有最高的热效率(已达到55%左右),而且允许作为船用发动机使用。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年全世界制造的船舶中(2000t以上)以柴油机作为推进装置者占99.89%,而到1987年100%为柴油机船。

通常,柴油机具有以下突出优点:

(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)功率范围宽广,单机功率从 0.6kW~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。

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。

4. 柴油机的基本结构参数

(1)上止点(T.D.C.) 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.) 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°CA (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) 活塞在气缸内上止点时,活塞顶上的全部空间(活塞顶、气缸盖底面与气缸套表面之间所包围的空间)容积。如图 1-1 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) 活塞在气缸中从上止点移动到下止点时所扫过的容积。见图 1-2。显然

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

(8)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,亦称气缸最大容积。见图 1-1。显然

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

(9)压缩比(ϵ) 气缸总容积与压缩室容积之比值,亦称几何压缩比。

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

压缩比表示缸内工质压缩程度。柴油机压缩比约为 12~22。中、高速机压缩比高于低速机。

二、柴油机理论循环

在柴油机的实际循环中,燃料的化学能转变为机械功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。在能量转变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。

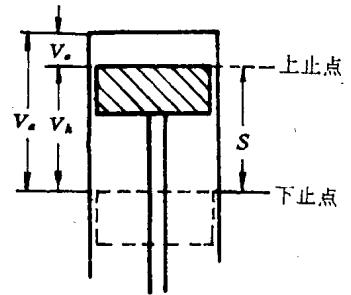


图 1-1 气缸容积

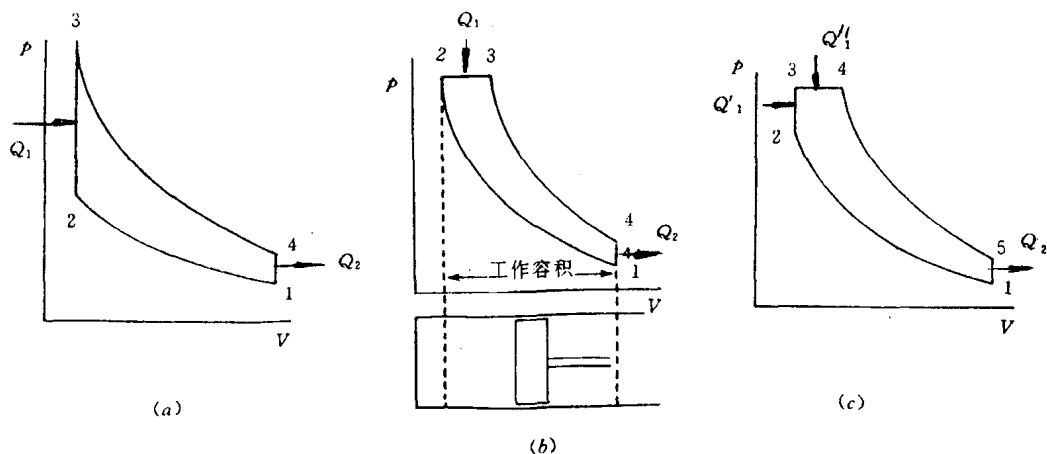


图 1-2 理论循环示意图

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循环的特征,进行适当简化和抽象化。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,将其概括为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:

- (1)用简单的公式说明循环中各基本热力参数的关系,以明确提高理论循环热效率 η_t 和平均压力 p_t 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。

根据加热方式的不同,内燃机的理论循环有三种基本形式。如图 1-2 所示。

(1)定容加热循环——Otto 循环(图 a) 由绝热压缩 1-2、定容加热 2-3(加热量 Q_1)、绝热膨胀 3-4 及定容放热 4-1(放热量 Q_2)等过程组成。点燃式内燃机(如汽油机)按此循环工作。

(2)定压加热循环——Diesel 循环(图 b) 与定容循环不同之处仅在于是在定压条件 2-3 下加入热量 Q_1 。早期的空气喷射式柴油机按此循环工作,现代高增压柴油机亦有向此循环发展的趋势。

(3)混合加热循环——Sabathe 循环(图 c) 是在定容加热 2-3 与定压加热 3-4 混合加热条件下加入热量 $Q_1(Q'_1 + Q''_1 = Q_1)$ 。一般的无气喷射(airless inzection)柴油机按此循环工作。

由工程热力学可知,理论循环示功图所包围的面积如图 1-2(c)所示,1-2-3-4-5-1 即为一个循环所作的理论功 W_{th} 。该理论循环的热效率 η_t 与平均压力 p_t 的计算公式为

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{\epsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]} \quad (1-4)$$

$$p_t = \frac{W_{th}}{V_h} = \frac{p_a \cdot q_l}{RT_a} \cdot \eta_t \quad (1-5)$$

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_l ——单位质量工质吸入热量;
- R ——气体常数。

由式(1-4)和式(1-5)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 的减小而提高。理论循环的平均压力 p_t 随 p_a 、 q_l 、 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,一直指导着柴油机的发展。

由上述三种理论循环热效率的比较可知,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;若 Q_1 与 ϵ 相同,则定容加热循环的热效率最高,混合加热循环次之。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 15MPa),显然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。

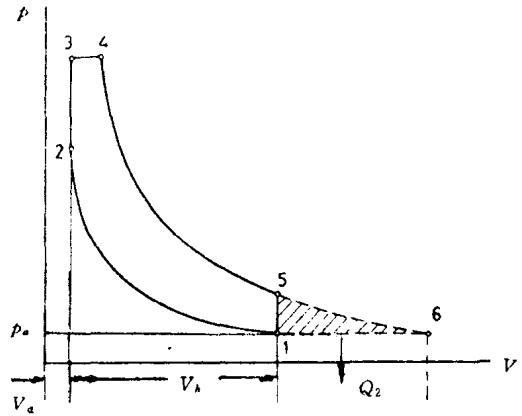


图 1-3 继续膨胀混合加热循环

上述三种理论循环中,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(如图 1-3 所示),然后定压放热 $Q_2(6-1)$,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。

三、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_t 和平均压力 p_t 。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:

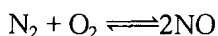
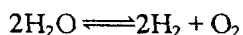
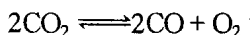
1. 工质的影响

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,所以产生如下影响:

(1)工质成分的变化。在柴油机中,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,工质成为燃烧产物,其各个时期的成分也是变化着的,不仅与燃烧成分有关,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具有随温度上升而增大的特性。而多原子气体(CO₂、H₂O、SO₂)的比热值又要比双原子气体(O₂、N₂、空气)大。在实际循环中,由于燃料燃烧后工质成分的明显变化,使三原子气体量增加,再加上最高燃烧温度很高(可达1 800 K~2 000 K),故实际循环中,工质的比热必然随温度的升高而增大。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影响显著。

(3)工质的高温分解。当温度超过1 000℃时,实际工质的燃烧产物将陆续以一定的数值发生高温分解,与此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



高温分解的程度与压力和温度有关。在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。燃油在气缸中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是有利的,但影响极小。

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)。实际压缩过程的热量交换总趋势是缸内工质向缸壁散热。因此,压缩终点压力低于绝热压缩终点压力。

膨胀过程是一个更加复杂的多变膨胀过程。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。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

理论循环中是混合加热和定容放热,无需进行工质的替换。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,则促使燃烧膨胀线的位置下移,产生不完全燃烧损失。