

船用柴油机实用手册

盛昕 周轶尘 程冲 合編



人民交通出版社

U664.12
S450

154354

船用柴油机实用手册

盛昕 周轶尘 程冲 合编

人民交通出版社

内 容 简 介

本书内容比较广泛，包括国产和国外主要机型的高、中、低速船用柴油机。

本书从实用出发，着重介绍各型船用柴油机的结构特点、技术规格和使用、管理、维修的常用技术参数，以及有关基本知识。另外，还附有常用单位的换算表和金属材料、油料的理化技术性能表等。

本书无繁杂的计算公式，较少的文字说明，大多采用图表说明，条理清楚、通俗易懂、查阅方便。凡具有初中以上文化水平的有关人员都能阅读和了解。

本书资料搜集比较全面、系统，除适合于船舶轮机管理人员和柴油机修理工人阅读使用外，也可供船舶科研、设计人员和技术管理部门的工作人员以及有关院校师生参考。

0442/109

船用柴油机实用手册

盛 昕 周轶尘 程 冲 合 编

人民交通出版社出版
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售
人民交通出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 印张：36.25 插页：1 字数：811千

1982年10月 第1版

1982年10月 第1版 第1次印刷

印数：0001—8,100册 定价：5.40元

前 言

随着科学技术的发展，材料和工艺的不断改进和提高，柴油机现已达到了比较完善和先进的水平。不论在国内外，当前柴油机装置都已成为船舶推进的最主要的动力装置形式。

建国以来，我国柴油机制造工业得到了迅速发展。新的机型不断涌现，老的机型不断改进和提高，有的达到了国际先进水平，在各种船舶上得到了广泛的使用，深受广大船员欢迎，大大改善了以前我国船队动力装置的落后面貌，推动了航运事业的发展。

目前，在我国船舶上使用的1000转/分以上的国产高速柴油机大致有85、90、95、100、105、110、120、135毫米等八种缸径十一个机型品种，功率大都在400马力以下，一般用作小型内河船舶推进主机或中、小船舶发电机的原动机；250~1000转/分的国产中速柴油机有135、140、150、160、180、200、230、250、260、270、280、300、320、350、390、400毫米等十六种缸径二十余种机型品种，功率大都在400~2000马力，一般用作沿海和内河中、小船推进主机或大型船舶发电机的原动机；250转/分以下的国产低速柴油机有430、440、560、580、680、750、760毫米等七种缸径八个机型品种，功率为2000~12000马力，均用作沿海、远洋船舶推进主机。

由于柴油机在船舶上的广泛使用，对于如何管好、用好、修好的问题，广大船员在实践中积累了丰富的经验。但是由于航运事业的不断发展，船舶保有量日益增多，柴油机也相应增加，且先进技术和先进工艺在柴油机上的广泛应用，这就要求我们能全面掌握和了解各种柴油机的基本情况和特点。为此，我们搜集了目前在船舶上广泛使用的国内外各型柴油机的主要技术资料，编成此书，供广大船员和工人参阅。

本书主要由盛昕负责编写并总校。在编写过程中得到了有关同志的大力支持，在此谨致谢忱。

由于编者水平有限，错误之处在所难免，对此，热情欢迎广大读者赐教。

编 者

目 录

前 言

第一章 柴油机的一般知识	1
第一节 柴油机工作原理浅说.....	1
第二节 四冲程柴油机的工作过程.....	2
第三节 二冲程柴油机的工作过程.....	5
第四节 柴油机的示功图.....	7
第五节 柴油机的增压原理.....	8
第六节 柴油机的高增压.....	14
第七节 柴油机和废气涡轮增压器的配合运行.....	17
第八节 船用柴油机及增压器型号的识别方法.....	19
第九节 船用柴油机的特点和要求.....	25
第十节 柴油机调速器.....	26
第二章 高速柴油机	32
第一节 85型柴油机.....	32
第二节 290型柴油机.....	45
第三节 95系列柴油机.....	51
第四节 100系列柴油机.....	65
第五节 2105、4105型柴油机.....	70
第六节 新105系列柴油机.....	84
第七节 E105C系列柴油机.....	93
第八节 110系列柴油机.....	104
第九节 120系列柴油机.....	111
第十节 135系列柴油机.....	119
第三章 中速柴油机	143
第一节 E135系列柴油机.....	143
第二节 4140、4140Z 型柴油机.....	156
第三节 E150C 系列柴油机.....	160
第四节 160A 系列柴油机.....	172
第五节 180系列柴油机.....	183
第六节 6200ZC 型柴油机.....	188
第七节 新6200(6200GZC)型柴油机.....	200
第八节 6200型柴油机.....	207
第九节 250系列柴油机.....	216
第十节 新6250Z 型柴油机.....	225

第十一节	6250Z型柴油机	234
第十二节	6260型柴油机	246
第十三节	6270型柴油机	257
第十四节	300系列柴油机	267
第十五节	新300系列柴油机	280
第十六节	ESDZ30/55型柴油机	288
第十七节	6320ZC型柴油机	297
第十八节	350系列柴油机	301
第十九节	E350ZCD系列柴油机	309
第二十节	6-390型柴油机	321
第二十一节	8NVD48A-2U型柴油机	331
第二十二节	6、8NVD36型柴油机	339
第二十三节	6L350PN型柴油机	350
第二十四节	B&W四冲程中速柴油机	352
第二十五节	MAN20/27型柴油机	370
第四章	低速柴油机	372
第一节	ESDZ43/82 B型柴油机	372
第二节	9ESDZ58/100型柴油机	392
第三节	6ESDZ75/160B型柴油机	405
第四节	6ESDZ76/160型柴油机	429
第五节	苏尔寿(Sulzer)低速船用柴油机	452
第六节	曼恩(MAN)低速船用柴油机	482
第七节	哥塔维根(Götaverken)低速船用柴油机	488
第八节	柏玛斯特——韦恩(B&W)低速船用柴油机	490
第五章	船用柴油机操作常识	501
第一节	短期停车后开车前的准备工作	501
第二节	正常运转中的注意事项	503
第三节	各种航行条件下主机的操纵	512
第四节	应急运转	518
第六章	船用柴油机运行中常见故障发生的原因及其排除方法	523
第七章	船用柴油机的试验	529
第一节	船用柴油机的台架试验	529
第二节	船舶系泊试验中柴油机的试验	529
第三节	船舶航行试验中柴油机的试验	530
第四节	柴油机零部件的试压	532
第八章	船用柴油机有关参数的名词解释及简易算法	533
第一节	指示参数	533
第二节	有效参数	536
第三节	柴油机的重量、尺寸及耐久性指标	540
第四节	柴油机的强化指标	542

第五节 增压柴油机的几个基本参数	544
第六节 柴油机的热量分配	548
附录	552
附表一 常用优质碳素结构钢和碳素工具钢的机械性能及热处理规范	552
附表二 高速工具钢的热处理规范	553
附表三 合金结构钢的机械性能	554
附表四 弹簧钢的机械性能	558
附表五 常用有色金属的机械性能	559
附表六 灰口铁的机械性能	559
附表七 球墨铸铁的机械性能	559
附表八 可锻铸铁的机械性能	560
附表九 主要元素的化学符号、原子量和比重	560
附表十 常用材料和油料的比重参考表	561
附表十一 长度单位换算表	562
附表十二 面积单位换算表	563
附表十三 体积和容积单位换算表	563
附表十四 重量单位换算表	563
附表十五 压力单位换算表	564
附表十六 功率单位换算表	564
附表十七 能及热量单位换算表	564
附表十八 速度单位换算表	564
附表十九 流量单位换算表	565
附表二十 力单位的换算表	565
附表二十一 密度单位换算表	565
附表二十二 油耗率换算表	565
附表二十三 温度换算表	565
附表二十四 国产轻柴油标准	566
附表二十五 国产重柴油标准	566
附表二十六 国产重油(燃料油)标准	566
附表二十七 国产柴油机润滑油标准	567
附表二十八 国产汽轮机油标准	567
附表二十九 国产高碱度气缸油	567
附表三十 国产高速船用柴油机主要技术规格简表	568
附表三十一 国产中速船用柴油机主要技术规格简表	570
附表三十二 国产低速船用柴油机主要技术规格简表	572
附图1 几种国外燃料油的粘温曲线	插页
附图2 润滑油的粘温曲线	插页
附图3 几种国产燃油的粘温曲线	573

第一章 柴油机的一般知识

柴油机是一种动力机械。动力机械又可叫做原动机，通过它把自然界的能源（水力、太阳、风力或各种燃料的化学能）转化为人类能直接利用的机械运动，使其它机械动作，如使船只航行，汽车行驶，飞机飞翔，发电机发电等等。

动力机械型式很多，目前用得比较广泛的是利用燃料（油或煤）中的化学能经燃烧后转变为热能，推动机械做功。根据能量转换方式的不同，发动机又可分为外燃机和内燃机两大类。

外燃机即为蒸汽机（如往复式蒸汽机、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做功，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，燃油的燃烧是在机器内部进行，直接加热空气成燃烧产物（即燃气），燃气被加热后压力和温度急剧上升具有了做功的能力，从而推动机械运动。

柴油机和汽油机虽同属于一种内燃机，外观也相仿，但由于所用燃料性质不同，一种是柴油，另一种是汽油，故其工作原理和结构细节上差别很大。由于汽油很不安全，船上用的基本上都是柴油机（除了少量的赛艇、游艇外）。

船用柴油机的类型很多，有四冲程和二冲程之分，增压和非增压之分，十字头和无十字头（箱式）之分。由于转速的不同有高速、中速及低速之分。由于气缸布置排列的不同有直列式、V型、W型及星型等之分。

第一节 柴油机工作原理浅说

要使燃料燃烧，首先要有空气。但光有空气和燃料若无火源（热源）还是不能燃烧，在柴油机中柴油的燃烧不是靠外源点火而是将吸入的空气进行高度压缩，使空气达到足够高的压力和温度。此时，将燃油喷入到高温高压的空气中去就会立刻自燃发火。由于柴油机中的燃油是靠压缩发火的，所以柴油机又称为压燃式内燃机（汽油机则是靠火花塞点火，即外源点火，故又名为点燃式内燃机）。

柴油机从周围大气中吸入的空气温度一般为 30°C 左右、压力为一个大气压。从大气中吸入的低温空气靠气缸中的活塞的运动进行压缩，此时在气缸内空气的温度和压力，由于容积的不断变小将按照下列基本关系而变化（如图1-1所示）。

设开始时气缸容积为 V_a 、压力为 P_a 、温度为 T_a 。压缩到终点后气缸容积为 V_c 、压力为 P_c 、温度为 T_c 。压缩后的温度和压力与压缩前的温度和压力有着下列关系：

$$P_c = P_a \cdot \left(\frac{V_a}{V_c} \right)^{\gamma_1}$$

$$T_c = T_a \cdot \frac{P_c V_c}{P_a V_a}$$

式中： n_1 为压缩指数，对柴油机来讲

$$n_1 = 1.30 \sim 1.42$$

T 为绝热温度，单位为 $^{\circ}\text{K}$ 。

$$T = t(^{\circ}\text{C}) + 273 \quad ^{\circ}\text{K}$$

为了表明空气被活塞压缩的程度，采用了压缩比 ε 这个参数。所谓压缩比，就是活塞在下死点时气缸总容积 V_a 与活塞在上止点时气缸容积（也称燃烧室容积） V_c 之比，它的计算式为：

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}$$

对船用增压柴油机， ε 在11~13之间。将它代入上式，得 $P_c = P_a \cdot \varepsilon^{n_1}$ 。

经过压缩后，气缸内空气压力 P_c 可达30~40大气压或更高，温度升至600~700 $^{\circ}\text{C}$ ，它大大的超过了柴油的自燃温度（250 $^{\circ}\text{C}$ 左右）。此时，通过高压油泵将柴油的压力提升到100个大气压以上，经特设的喷油咀以雾状喷入气缸与空气混合，经过一段极为短暂的时间后（滞燃期），燃油自行着火，并强烈燃烧。

燃油燃烧后放出大量热能，使气缸内空气（工质）的压力和温度急剧上升，此时气缸内最高压力可达60~100大气压，甚至更高，温度约为1600~1800 $^{\circ}\text{C}$ 。在高温高压气体推动下，活塞下行做功，输出能量。

当高温高压工质推动活塞下行做功的同时，气缸容积不断增大。根据前述热力学公式，工质的温度和压力将不断下降。当活塞运行到下死点附近，排气阀打开，膨胀做功过程结束。

为了能下次再做功，必须将燃烧膨胀后丧失了做功能力的废气排除干净，引入新鲜空气。

综上所述，为了保证燃油在柴油机中能不断燃烧做功，必须通过：

进气→压缩→喷油燃烧→膨胀做功→排气→进气

这样五个过程。进行了这五个过程，就完成了一个工作循环，以后再依次重复进行。

这五个过程是通过活塞、连杆、曲轴、进排气机构及燃油喷入系统等各部件之间按规定的顺序，有协调的动作来完成的。

柴油机中燃油的燃烧是靠经高度压缩后的高温高压的空气来点火。要使静止的柴油机开始工作，必须先有外力使它转动起来。仅仅使柴油机转起来还不能起动，还必须使它达到一定的转速。因为转速太低时，被压缩的空气通过活塞环将大量泄漏，燃油发火所需的最低空气温度难以达到。柴油机起动所要求的最低转速叫做起动转速。内燃机无自起动能力，这也是它和蒸汽机的不同之点。

柴油机的起动有多种方法，对一些小型单缸或双缸柴油机采用手摇方法；缸数较多的小、中型柴油机则利用蓄电池带动起动电机起动；对于中、大型柴油机则是用压力为15~30大气压力的压缩空气来起动。

第二节 四冲程柴油机的工作过程

图1-2所示为四冲程柴油机的构造原理。活塞3在气缸套2中作上下往复运动，它与气

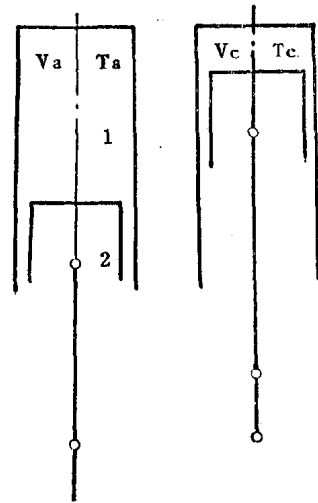


图 1-1
1-气缸；2-活塞

缸套、气缸盖1共同组成一个密闭的工作空间。连杆4把活塞的往复运动变成曲轴5的回转运动。气缸盖、气缸套、曲轴等部件由机架6和机座7支承，机座用螺栓固定在船体基座上。

当活塞从上死点往下运动时，设在气缸盖上的进气阀a被气阀传动机构顶开，空气被吸进气缸内，一直到活塞运动到下死点（相当于曲轴从 0° 转到 180° ），进气阀关闭，进气过程结束。活塞上行，压缩过程开始（相当于曲轴从 180° 转到 360° ），当活塞行至上死点附近，喷油器c将燃油喷入气缸，并开始燃烧膨胀，推动活塞下行并对外输出功能，这是工作过程，相当于曲轴从 360° 转到 540° 。当活塞行至下死点又开始转向上行时，排气阀b打开，开始排气，直到活塞行至上死点，排气结束，排气阀关闭，此时曲轴从 540° 转到了 720° （ 0° ）。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。

活塞在作往复运动时，从上行转向下行，或从下行转向上行，都要经过一个转向点，这个转向点分别称为上死点和下死点，活塞从上死点行至下死点（或相反）所走过的行程叫做冲程。曲轴转一转，活塞自上而下再自下而上走了两个冲程。

上述柴油机的一个工作循环分别在四个冲程（相应的曲轴从 0° 转到 720° ，转了两转）中完成，这种柴油机叫做四冲程柴油机。

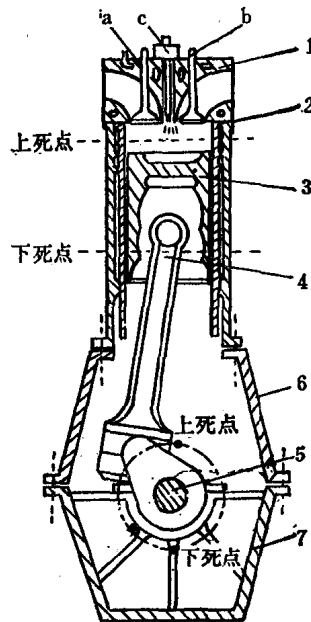


图1-2 四冲程柴油机构造原理
1-气缸盖；2-气缸；3-活塞；4-连杆；5-曲轴；6-机架；7-机座

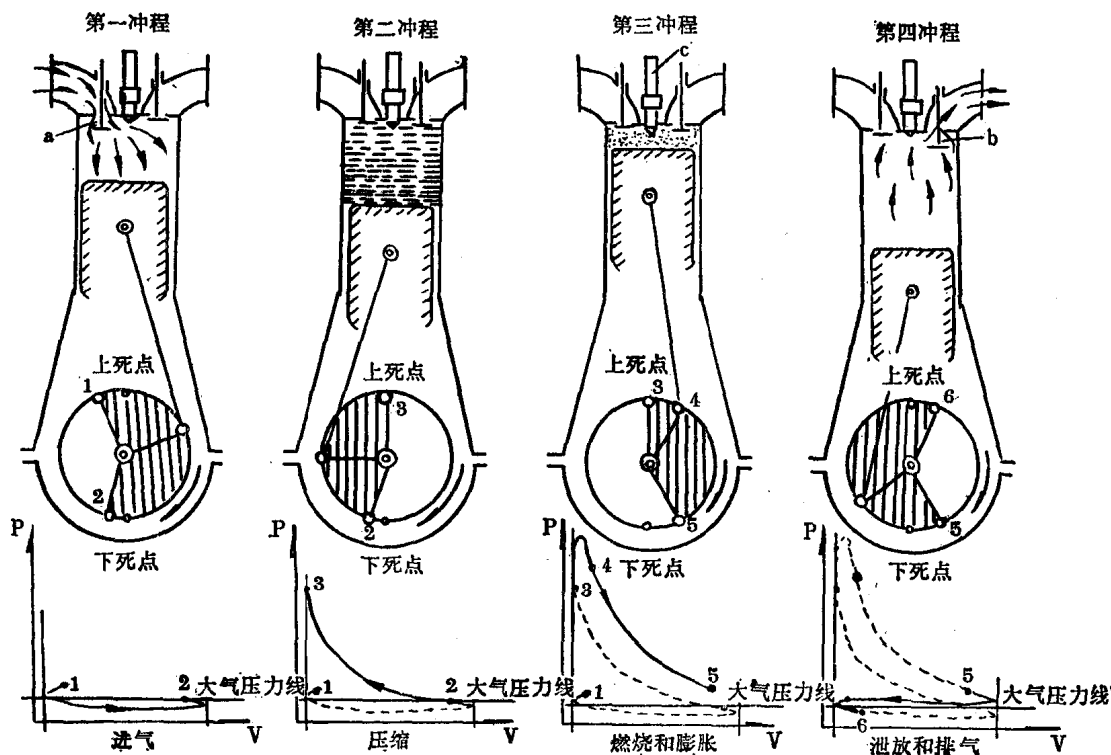


图1-3 四冲程柴油机工作原理

图1-3所示的四个简图分别表示五个过程进行的情况和活塞、曲轴等有关部件的动作位置。

第一冲程——进气冲程。活塞从上死点下行，进气阀 a 打开。由于活塞下行时的抽吸作用，气缸内压力比外界大气压力要低，新气通过进气阀被吸入气缸，此时气缸容积也不断增大。为了能多进些新鲜空气，进气阀一般在活塞到达上死点前已提早开启。同样的理由，进气阀关闭一般均在下死点后。气阀开启和关闭的时刻均用曲柄的转角位置来表示，如图所示。曲柄位于点1时，进气阀开，位于点2时，进气阀关，进气阀整个开启时间大于 180° 曲柄转角。

第二冲程——压缩冲程。此时，活塞从下死点往上运动，整个压缩过程从进气阀关闭（点2）开始，活塞到达上死点（点3）结束。在此期内，气缸容积由于活塞上行而不断减少，密闭在气缸内的新鲜空气被高度压缩，压力和温度上升。压缩终了的气体压力和温度用 p_c 和 t_c 表示。燃油在压缩过程的后期，即点3之前（与其相应的曲轴离上死点前的转角叫做喷油提前角），通过喷油器 c 以极高的速度成雾状喷入气缸和高温气体混合，经过短暂的时间后，在上死点或在上死点前几度曲轴转角自行发火燃烧。

第三冲程——工作冲程。在冲程之初，由于燃油强烈燃烧，气缸内的压力和温度急剧升高。燃烧的最高压力和最高温度用 p_z 和 t_z 表示。在燃气压力作用下，活塞被推向下行，通过曲柄连杆机构对外做功。由于气缸容积不断增大，燃烧逐渐变慢，燃气压力开始下降，在上死点后某一时刻（点4），燃烧基本结束。气缸中的压力和温度随着燃气的膨胀而逐渐下降，一直到排气阀 b 开启时膨胀结束。此时燃气压力约为3~5个大气压，温度为 $600\sim 750^\circ\text{C}$ 。为了将废气排除干净，减少排气时能量的消耗，与进气阀一样，排气阀总是提早在下死点前（点5）开启，因此在这一冲程末期，排气过程已经开始。

第四冲程——排气冲程。在上一冲程末，排气阀 b 已开启，由于气缸内废气压力大大超过外界大气压力，故废气以很高速度经排气阀流出，气缸内废气压力和温度迅速下降。当活塞经下死点再上行时，此时废气以略高于外界的压力被活塞推出气缸，这样可以减少排气时所消耗的能量。与进气阀一样，排气阀也一直延迟到上死点后（点6）才关闭。

进行了上述四个冲程后，柴油机完成了一个工作循环。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，曲轴要转两转。能对外做功的只有第三冲程（工作冲程）。在这个冲程里，完成了燃油从化学能转变为热能，又从热能转变为机械能的两次能量转换。其它三个冲程都是为工作冲程服务的，都需要供给能量。若为多缸柴油机，当其中几个缸在进气、排气、压缩消耗能量时，可由正在工作的另外几个缸供给。如果是缸数较少或单缸柴油机，那只能依靠飞轮。飞轮把工作冲程中的部分能量储存起来，而在其余三个冲程进行时再输出。故单缸机的飞轮要比多缸机的飞轮大得多。

四冲程柴油机的进气阀和排气阀的启闭都不是在上、下死点，而是在上、下死点的前后，它们开启的总时间大于 180° 曲轴转角。进、排气阀在上、下死点前后启闭的时刻叫做气阀定时。用曲轴转角表示气阀定时的圆图，即为气阀定时圆图，如图1-4所示。

从气阀定时圆图中不难看出，进气阀和排气阀在上死点前后

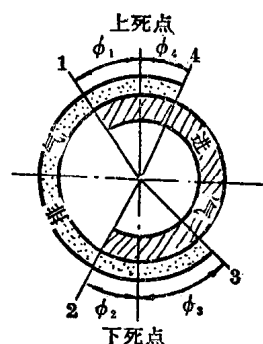


图1-4 定时圆图

的一段时间里同时开启。进气阀和排气阀同时开启时的相应的曲轴转角称为气阀重叠角。这样做的目的是为了为了更好的清除废气和更多的充入新鲜空气。因为在排气终了时，由于废气的流动惯性，虽然活塞已开始从上死点往下行，废气还继续经排气阀流出，在燃烧室内形成低压，为新气的吸入创造了有利的条件。而新气的充入又更有利于将废气扫出，实现了燃烧室扫气，使留在气缸里的废气尽可能地少。

合适的气阀定时和气阀重叠角随机型而异，都是通过实机试验后才最后确定。

第三节 二冲程柴油机的工作过程

分析四冲程柴油机的工作过程可以知道，在四冲程柴油机的四个冲程中，只有第三冲程才是作功的，而其余三个冲程都没有作功反而消耗了一部分能量。发动机要转两转才能完成一次工作循环，有没有可能转一转即发出一次有用功？这样在相同气缸容积、相同转速的条件下，由于作功的次数增加了一倍，相应的功率在理论上也可以增加一倍。

如前所述，任何一台柴油机为了完成一个工作循环，都必须经过五个工作过程。五个工作过程中的燃烧膨胀是作功过程，它必须占有一个冲程，而压缩又是一个必需的冲程，因为空气只有经过高度压缩才能达到必要的温度和压力，喷入的油才能自燃发火。进、排气这两个冲程是在低压下利用活塞上下运动产生的泵吸和推挤作用来完成的。因此若利用一个辅助泵（扫气泵），预先将外界空气压缩到比气缸内废气压力高，这时被压缩了的空气就可以自行流入气缸，同时把废气赶走，不再需要活塞的上下运动来吸入和赶出，把进、排气过程压缩在一个较短时间内完成。这样可以把四个冲程才能完成一次工作循环的四冲程发动机变成在两个冲程内完成一次工作循环的二冲程发动机。

图 1-5 所示为一种采用特设的活塞式扫气泵的二冲程柴油机的工作原理图。扫气泵附设在柴油机的一侧，它的活塞由柴油机的曲柄连杆机构带动。空气从泵的吸入阀 b 吸入气缸，经过压缩后由排出阀 c 排出，储存在具有较大容积的容器 d 中，并在其中保持一定的压力。在缸套下部的两侧开有高低不一样的两组气口，高的一组为排气口，低的一组为扫气口。在膨胀冲程中，活塞下行，排气孔先打开，缸内压力较高的废气从排气口大量流入排气管，气缸内废气压力不断降低，活塞继续下行把扫气口也打开，此时气缸内废气压力接近扫气压力，于是新鲜空气经扫气口不断流入，同时把废气驱出。当活塞行至下死点再向上运动时，先把扫气口关闭，扫气结束，气缸内基本上充满了新鲜空气。活塞继续上行，当把排气孔关闭后，压缩开始。

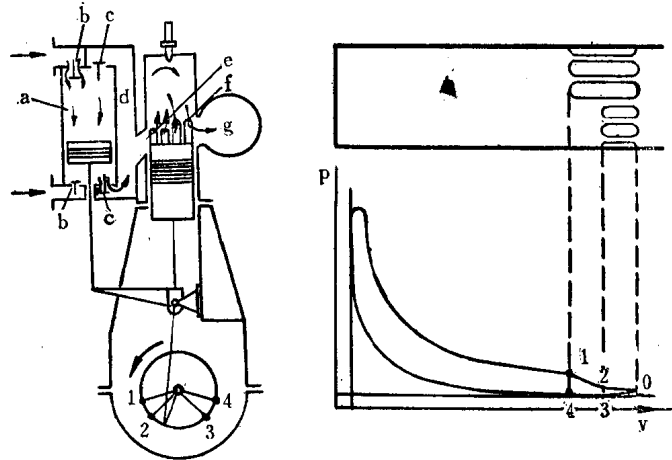


图 1-5 二冲程柴油机工作原理

图 1-5 中的右面是它的示功图，示功图尾部的 1-2-0-3-4 为扫气过程。

二冲程柴油机的进、排气过程是在膨胀冲程末和压缩冲程初的这段时间内完成的，它

仅占有整个冲程的1/3左右。

按理，在柴油机气缸容积和转速相同的条件下，二冲程柴油机发出的功率应为四冲程柴油机的两倍。但由于二冲程柴油机的进、排气过程占去了膨胀冲程的一部分，再加上带动扫气泵又要消耗一部分能量，因此实际上，二冲程柴油机的功率仅为四冲程柴油机的1.6~1.7倍。由于它在相同容积下能发出较大功率，故近代大型低速发动机都是用二冲程的。

二冲程柴油机的换气过程不是靠活塞排吸作用，而是利用空气和废气间的压力差来完成换气。如何控制气体按人们所要求的形式在气缸内流动，使废气尽量排除干净，而新气又能充入得多。这使二冲程柴油机出现了很多形式，不象四冲程机那么单一。根据气体在气缸中流动的方向不同，可以分为直流（单流）和弯流两类，弯流式又可分为回流和横流两种。

1. 直流换气

直流换气目前用得较多的是气口一气阀式，在气缸盖上装有排气阀（有单阀、双阀、三阀、四阀和六阀），在气缸套的下部均布着一圈扫气口，如图1-6所示。在活塞下行打开扫气口之前，通过专设的排气阀传动机构先把排气阀打开，气缸中的废气经排气阀排出。当气缸内的压力降低到可以进行扫气时，扫气口开启，新鲜空气一面旋转一面上升，把废气驱出。

它的主要优点是排气干净，换气质量好。但是它多了一套气阀机构，使结构复杂，维修量增多。

我国的6ESDZ43/82型（单阀）、6ESDZ75/160（六阀）以及国外丹麦的B&W型（单阀）、日本的UEC（三阀）等柴油机都是采用这种换气型式。

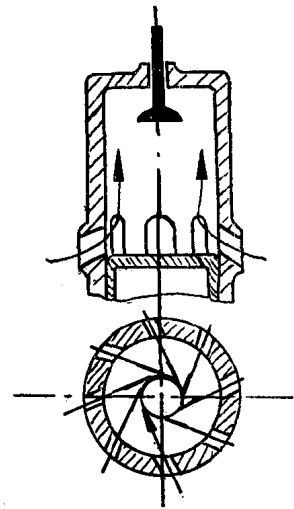


图1-6 直流换气

2. 横流换气

它的气缸盖上没有排气阀，而是将进、排气口布置在气缸套下部的两侧，排气口高于进气口，如图1-7所示。气口的开闭全靠活塞。当活塞下行时，先打开排气口，后打开进气口；活塞上行时，先关闭进气口，后关闭排气口。新鲜空气从气缸一侧沿倾斜的扫气口进入气缸并向上流动把废气推向上行，而后沿气缸盖转向下行，经气缸另一侧的排气口把废气赶出。由于气体在气缸中是横向流动，故称为横流换气。这种换气形式因没有排气阀机构，具有结构简单，管理方便的优点。我国的6ESDZ76/160及国外瑞士造的Sulzer型柴油机均采用这种换气型式。它的缺点是，与直流换气比较，气体在气缸内的流动路线长且要转弯，因而换气质量较差。

3. 回流换气

回流换气与横流换气一样，气缸盖上没有排气阀。进、排气口都位于气缸同一侧，排气口位于扫气口的上方，如图1-8所示。当进行换气时，新鲜空气从向下倾斜的扫气口进入气缸，流经活塞顶部，驱扫废气上行，在气缸顶部转向下行，最后由倾斜的排气口流出，在缸内气体的流动呈回线状，故称为回流换气。这种换气形式主要使用在西德MAN型柴油机上。

以上两种换气形式，气体均需在水缸内转向流动，因而都属于弯流式。它们的共同优点是结构简单，管理方便。它们的缺点也相同，即换气质量较直流换气差。但经过近年来多方的研究改进。还是能获得令人满意的换气质量。因而在大型低速柴油机中，弯流换气占主要的地位。

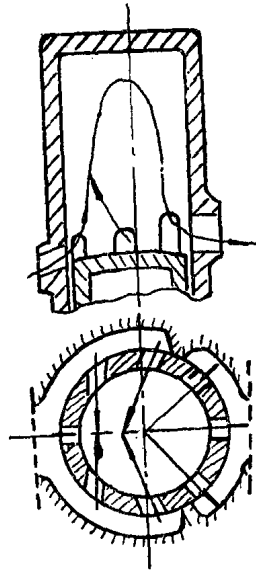


图1-7 横流换气

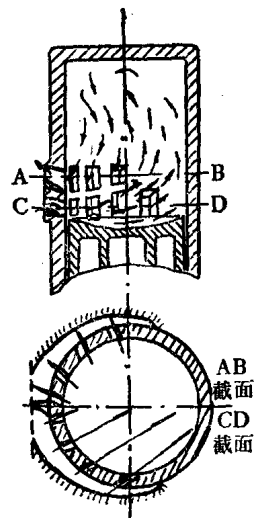


图1-8 回流换气

第四节 柴油机的示功图

将柴油机气缸内压力与容积的变化关系用直角坐标的方法表示出来即为示功图，亦名PV图。示功图可用专用仪器（示功仪），在柴油机工作时，经气缸盖上的特设通道（示功阀）直接测录出来，亦可以用理论计算获得。

图1-3中第四冲程下方的PV图，它将四冲程柴油机在进气、压缩、膨胀和排气四个过程汇总在一起，即为四冲程柴油机的示功图。由于进、排气间压差不大，基本上均接近大气压力，故用一般示功仪来测录时，进、排气两过程重叠成一根线。图1-5右方所示的为二冲程柴油机示功图。示功图的纵坐标代表气缸内气体的压力 P ，单位为公斤/厘米²，横坐标相当于气缸工作容积。

柴油机的气缸容积有

气缸工作容积——即活塞从上死点至下死点时的容积，用 V_s 表示即

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

式中： D ——气缸直径；

S ——冲程。

压缩室容积——即活塞在上死点时的气缸容积，也称燃烧室内积，用 V_c 表示；

气缸总容积——即活塞在下死点时的气缸容积，用 V_a 表示， $V_a = V_s + V_c$ 。

示功图所包含的面积代表了柴油机在一个工作循环中对外输出的功，它表示了热能转化成机械功的能力。此外，从示功图中还能检查出发动机气缸内工作状态是否正常，各缸的负担是否均匀等。因而在大型低速

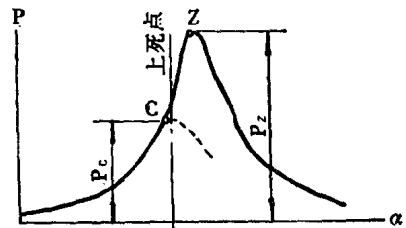


图1-9 $P-\alpha$ 图

柴油机中要定期用示功仪测录示功图，作为分析、判断柴油机工作是否正常的依据。

由于示功图的测录除了示功仪外，在柴油机上还要有一套行程缩小机构，因而在中、小型柴油机上一一般测录气缸压力随曲轴转角（用 α 表之）变化的 $P-\alpha$ 图，如图1-9所示。 $P-\alpha$ 图虽不能直接量出气缸发出的功率，但也能从中检查发动机气缸内的工作状况。

第五节 柴油机的增压原理

1. 为什么要采用增压

二冲程柴油机的出现，虽能把柴油机的功率提高1.6~1.7倍。但是随着船舶吨位的增加，航速的提高，要求柴油机能发出更多的功率，这就迫使人们继续寻找提高柴油机功率的途径。

在同样大小气缸工作容积的前提下，要它输出更多功率，就要多喷油。喷油量的增多必然要求空气量也进得多，这样才能把多喷入的燃油燃烧完全。一般燃烧一公斤柴油需要十四公斤的空气，若要求功率增加一倍，相应的进入空气量也要增加一倍或更多些。

若不采取有效措施，进入气缸内的空气量是不会自动增加的。因而若要其多进气，就要用一个专设的辅助泵把空气先予压缩以提高其密度。但这个辅助泵要消耗掉很大功率，若由柴油机直接去驱动，它虽能使柴油机发出的功率增加，但这部分功率要扣去驱动压气泵所消耗的功率，最后使输出的有用功率增加不多，到了某一极限时甚而会下降。

从柴油机中排出的废气温度还很高（300~500°C），里面含有大量的能量。近似的估计，一公斤燃油燃烧后放出的能量只有三分之一变成有用功，三分之一给冷却水带走，三分之一给废气带走，废气带走的能量基本上相当于柴油机的有用功率。这部分能量在柴油机气缸内是无法利用的，但可以把它引入一个专门设置的涡轮中，使涡轮高速转动达5,000~100,000转/分，再由它带动一个压气机，将进入气缸内的新鲜空气预压缩，提高压力，增加密度。目前可做到将空气预压缩到三个大气压左右，相应的进入气缸内的空气量也增加了两倍到三倍，从而在气缸容积、转速不变的前提下，柴油机的输出功率成倍增加。有这样一套装置的柴油机叫作废气涡轮增压柴油机或简称为增压柴油机。

图1-10为四冲程增压柴油机增压示意图。柴油机的排气管和废气涡轮进口相连，进气管与压气机出口相连，废气涡轮和压气机装在同一轴上，组成一整体，称之为废气涡轮增压器。当柴油机的排气吹动废气涡轮时，压气机叶轮也被驱动，从而将空气压缩，被压缩后的空气先经过一个中间冷却器，使进气温度降低，密度提高，而后进入柴油机气缸。

二冲程柴油机的增压过程原理上和四冲程基本相同，但二冲程柴油机采用废气涡轮增压，有以下不利之点：

1) 二冲程柴油机没有单独的吸气和排气冲程，而是靠扫气箱和排气管之间的压力差来完成换气过程的。由于二冲程柴油机换气时间短，而通过的扫气空气量又很大，故所需要的压差也较四冲程柴油机为大。所以压气机所消耗的压缩功也远较四冲程柴油机的大。

2) 为了保证换气过程的正常进行，提高扫气效率，二冲程柴油机所需要的扫气空气量是很大的。在扫气过程中，大量的温度很低的新鲜空气混入排气中，使排气温度降低。一般四冲

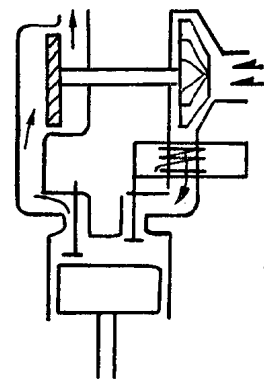


图1-10 四冲程增压柴油机增压示意图

程柴油机的排气温度可达 500°C 以上，而二冲程的则在 400°C 以下。废气温度低，废气中含有的能量少，废气涡轮发出的功能也随之降低，以致使压气机不能供应扫气所必需的压力和空气量。特别是在低负荷和起动时，废气能量更小，达不到扫气所必需的最低要求，从而使发动机在低负荷和起动时不能正常运转。四冲程柴油机则不同，即使在低负荷时废气涡轮所发出的功不能满足压气机的需要，造成进气压力比排气压力低，但是四冲程柴油机有进、排气冲程，依靠活塞的泵吸作用，换气仍然能进行，发动机还能正常运转。

综上所述，二冲程柴油机的废气能量较低，废气涡轮发出的功较小，而压气机所需能量较大，往往很难使二者功率平衡，特别是在起动和低负荷运转时，情况更为严重。为了解决这个矛盾，二冲程柴油机的增压系统不象四冲程的那么单一，而有多种型式。

2. 二冲程柴油机的主要增压系统

1) 纯废气涡轮增压

目前大多数大中型二冲程直流换气柴油机实现了纯废气涡轮增压。这是由于直流换气二冲程柴油机扫气效率高，过量扫气空气量可以少，而且气流在气缸中流动路线短，没有弯曲，流动阻力小。另一方面，与弯流换气相比，其排气管入口处直径可以较小，有利于废气能量的利用。随着增压器效率的不断提高，使得直流换气的二冲程柴油机不但在全负荷，而且在低负荷也可以实现涡轮与压气机间能量平衡。我国自行设计制造的低速机6ESDZ75/160B、9ESDZ43/82B，中速机6E390，国外丹麦的B&W系列，日本UED系列等均实现了直流换气纯废气涡轮增压。为了改善柴油机的起动性能以及当增压器出现故障时发动机仍能运转，在机舱中一般均设有一台并联的电动鼓风机作应急用。

2) 串联增压系统

串联增压系统是将涡轮增压器与由发动机本身驱动的辅助扫气泵串联，多数发动机把增压器作为第一级，而辅助扫气泵作为第二级，即进气空气先经增压器压缩，经过中间冷却后，再进入辅助扫气泵作第二次压缩，进一步提高扫气空气压力，而后进入柴油机。

图1-11为其系统示意图，辅助泵在大型柴油机中多用活塞泵，中小型柴油机则多用罗茨泵或离心泵。

我国自行设计制造的中速机8E350ZCD，国外意大利的Fiat、瑞典的Götaverken低速柴油机均采用串联增压系统。

这种系统由于其全部空气量都要通过辅助扫气泵，所以扫气泵的尺寸比较大。针对串联增压系统的缺点出现了串联旁通增压系统。它和串联增压系统的区别是只有部分涡轮增压器供给的增压空气经串联扫气泵作第二次压缩。我国设计制造的6ESDZ76/160和9ESDZ58/100以及国外瑞士Sulzer RD、RND系列柴油机均采用此种增压系统。

串联旁通增压系统示意图如图1-12所示。增压器供给的空气经过空气冷却器后进入前后贯通的扫气箱A，活塞上行时通过一组单向阀将扫气箱中的空气吸入活塞下部空间B。活塞下行，压缩此部分空气，通过另一组单向阀将空气驱入分隔开的扫气室C。在这里压缩空气产生一个压力高峰，有助于扫气阶段的扫气。当扫气口打开，扫气室C中的空气通过扫气

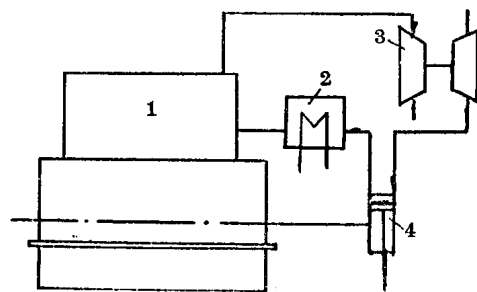


图1-11 串联增压系统示意图
1-柴油机；2-中间冷却器；3-增压器；4-扫气泵

口进入气缸，开始扫气，C室中的压力不断降低，当其等于前后贯通的扫气箱A中的压力时，扫气空气通过另一组单向阀由A室直接流入C室，直至扫气结束。这种增压系统，柴油机在低负荷时和增压器提供空气量较小的情况下，仍能稳定运转。

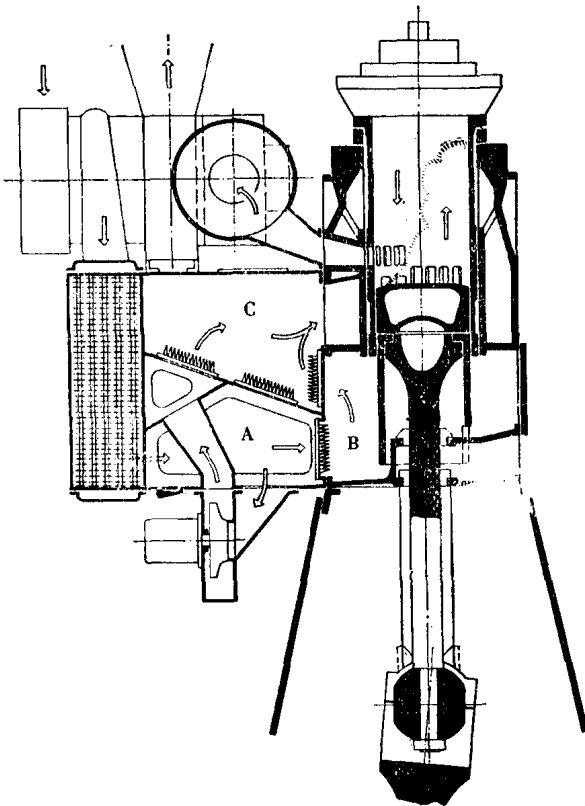


图1-12 串联旁通增压系统示意图

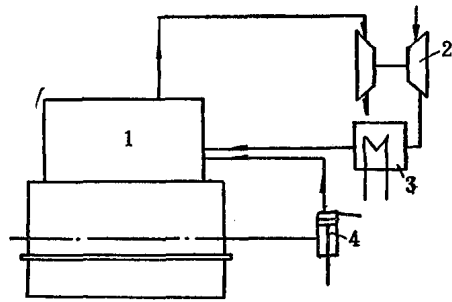


图1-13 并联增压系统示意图
1-柴油机；2-增压器；3-中间冷却器；4-扫气泵

3) 并联增压系统

图1-13为并联增压系统示意图。新鲜空气平行的通过废气涡轮增压器和由发动机驱动的扫气泵送入柴油机，由于每只增压器只通过一部分空气，它们的尺寸较小。

并联增压系统主要为国外西德MAN型柴油机采用。在并联系统中除涡轮增压器外，同时利用活塞下方空间作为扫气泵，一般并联上几个下活塞底泵作为扫气

泵。在全负荷时，下活塞扫气泵所供给的空气量约占全部空气量的10~30%。

MAN型柴油机在并联增压系统上作了很多变型设计，有所谓串并联增压系统、并联扫气泵驱动系统、并联喷射系统等，这里不作进一步解释。

在废气涡轮增压柴油机中，柴油机和废气涡轮增压器之间没有机械联系，只有“气力”联系。而废气涡轮和压气机则用同一根轴，由此所产生的一个特点是：在任何稳定运转工况下，废气涡轮所发出的功率必须和压气机所消耗的功率相等。即

$$N_T = N_K$$

N_T ——废气涡轮所发出的功率；

N_K ——压气机所消耗的功率。

为了使压气机获得足够的功率，以满足柴油机对增压压力和所必需的空气流量的要求，废气涡轮和压气机必须具有高的效率之外，废气涡轮还必须能从柴油机处获得足够的废气能量。如果废气能量不足，或增压器本身效率太低，都将使压气机功率不足，不能满足柴油机对增压压力和空气流量的要求，使柴油机没有足够的空气量供扫气和燃烧，此时将发不到额定功率，或者虽然勉强发到额定功率，却因排温过高或冒烟、油耗太高而不能长期运转。为了解决这个问题，在二冲程柴油机中必须由柴油机带动一压气机，补充空气量的不足，即采用所谓复合式增压系统。