



卓越系列 · 教育部高职高专油气工程类

教指委推荐教材

石油钻井柴油机

Shiyou Zuanjing Chaiyouji

主编 蓝富华

主审 崔树清



卓越系列

教育部高职高专油气工程类教指委推荐教材

-  钻井工程技术
-  钻井操作技术
-  钻井地质
-  油田化学技术
-  油田化学原理
-  油气层保护技术
-  石油地质基础
-  石油产品工艺概论
-  **石油钻井柴油机**
-  采油工程技术

组稿编辑 原继东
责任编辑 原继东
装帧设计 谷英卉

ISBN 978-7-5618-2489-4



9 787561 824894 >

定价: 23.00元

卓越系列

教育部高职高专油气工程类教指委推荐教材

石油钻井柴油机

主 编 蓝富华
副主编 毛建华 余 丽
编 者 郑志刚 王建云
主 审 崔树清



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书以 Z12V190B 型柴油机为主,系统地介绍了柴油机的结构、工作原理、技术性能以及柴油机各系统的组成、功用和工作原理。本书还详细介绍了 PZ12V190 系列(2000、3000 系列)柴油机、CAT3500 系列柴油机和 VOLVO 等柴油机的使用、维护与保养、常见故障的诊断与排除以及检修等相关知识。此外,由于目前柴油机广泛使用到自动控制技术,本书对柴油机的电子调速系统也做了简单介绍。

本书可作为石油类高职高专院校钻井技术等专业学生系统了解柴油机相关知识的教材,也可作为培训现场技术人员、石油矿场柴油机操作人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

石油钻井柴油机/蓝富华主编. —天津:天津大学出版社,

2007.9

ISBN 978-7-5618-2489-4

I. 石... II. 蓝... III. 油气钻井—柴油机—高等学校:
技术学校—教材 IV. TE924

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 126901 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
短信网址 发送“天大”至 916088
印 刷 昌黎太阳红彩色印刷有限责任公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 169mm × 239mm
印 张 16
字 数 332 千
版 次 2007 年 9 月第 1 版
印 次 2007 年 9 月第 1 次
印 数 1-3 000
定 价 23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

目前在石油勘探开发中,钻机发电机组的动力大都由柴油机提供。因此,柴油机在石油工业中占有十分重要的地位。对于一个石油钻井专业的技能型人才来说,系统地掌握柴油机及其相关知识十分必要。

本教材在编写过程中,力求突出技术性、应用性、针对性和职业教育特色,以钻井技术专业的职业能力和职业岗位要求为核心,以“必须、够用”为度,教材内容的选取以职业实践所需要的操作技能为重点,突出了实用性。

本书共分7章,详细地介绍了PZ12V190系列(2000、3000系列)柴油机、CAT 3500系列柴油机和VOLVO等柴油机的使用、维护与保养、常见故障的诊断与排除以及柴油机的检修等相关知识。此外,由于目前柴油机广泛使用到自动控制技术,本书对柴油机的电子调速系统也做了简单介绍。为了使读者更好地掌握重点内容,本书每章后都安排有一定数量的复习思考题。

本书可作为高职高专钻井技术专业学生的教材,也可作为现场柴油机操作人员的培训、技能鉴定参考书。

本教材第1章由余丽、郑志刚编写,第2、3、4和6章由蓝富华编写,第5章由王建云编写,第7章由毛建华编写,最后由余丽校对。由蓝富华任主编,毛建华、余丽任副主编,崔树清担任主审工作。

由于编写人员水平有限,书中难免有不妥之处,衷心希望广大师生和读者批评指正。

编 者

2007年5月

目 录

第1章 柴油机基本知识	1
1.1 概论	1
1.2 柴油机常用名词术语	7
1.3 单缸四冲程柴油机工作原理	8
1.4 二冲程柴油机工作原理	11
1.5 多缸柴油机工作过程	14
1.6 柴油机的主要性能	16
1.7 柴油机的机构和系统	19
第2章 柴油机构造	27
2.1 机体组件与曲柄连杆机构	27
2.2 配气机构	49
2.3 齿轮系和进排气系统	58
2.4 燃料供给系统	64
2.5 柴油机的电子调速系统	83
2.6 润滑系统	97
2.7 冷却系统	114
2.8 启动系统	127
2.9 柴油机增压系统	139
第3章 柴油机的使用	151
3.1 PZ12V190 系列(2000、3000 系列)柴油机的使用	151
3.2 CAT 3500 系列柴油发电机组的使用	155
3.3 VOLVO 柴油发电机组的使用	165
第4章 柴油机的维护保养	170
4.1 PZ12V190 系列(2000、3000 系列)柴油机的维护保养	170
4.2 CAT 3500 系列柴油发电机组的维护保养	174
4.3 VOLVO 柴油发电机组的维护保养	189
4.4 轻柴油	192
4.5 柴油机润滑油	193
4.6 柴油机冷却水	196
第5章 柴油机的检查与调整	200
5.1 柴油机气门间隙的检查及调整	200
5.2 柴油机供油提前角的检查及调整	201

5.3 柴油机配气定时的检查与调整	203
第6章 柴油机常见故障的诊断与排除	205
6.1 柴油机故障产生的原因	205
6.2 柴油机的故障现象及判断方法	207
6.3 柴油机的故障预防	209
6.4 PZ12V190 系列(2000、3000 系列)柴油机的故障诊断与排除	210
6.5 CAT3500 系列柴油发电机组的故障诊断与排除	221
6.6 VOLVO 柴油发电机组的故障诊断与排除	228
第7章 柴油机的检修	231
7.1 柴油机大修的工艺过程	231
7.2 柴油机零件的磨损	232
7.3 柴油机的解体与清洗	237
7.4 零件的检验与分类	248
7.5 零件的修理	245
参考文献	250

第1章 柴油机基本知识

1.1 概论

在人类历史的发展过程中,我们利用了自然界各种丰富的能量资源,如风力、水力、各种燃料(如煤、石油、天然气等)的热能、原子能等,并创造出了各种动力机械为人类服务,促进了工农业的迅速发展。动力机械根据能量来源不同有下列三种类型。

(1)热力机械 将燃料燃烧所产生的热能通过一定的方式转变为机械能,带动其他机械工作,如柴油机、汽油机等。

(2)水力和风力机械 利用水或风具有的能量,带动一定形式的机械做功,如水力机械和风力机械等。

(3)原子能机械 利用核反应使放射性元素释放出原子能,然后通过一定的方式转变为机械能,如原子能发电机等,这种方法所用的机械与热力机械有很多地方是相同的。

热力机械是将燃料燃烧所产生的热能转化为机械能的发动机,又称热机。热机的工作介质有蒸汽和燃气两种。前者是将燃料(如煤、木材等)燃烧,利用放出的热量将水加热,变成蒸汽后引入往复式机械(如蒸汽机)或旋转式机械(如蒸汽轮机)做功,因燃料在发动机外部燃烧,所以称外燃机。后者是用燃料(如柴油、汽油、天然气等)燃烧产生的燃气直接推动往复式机械(如柴油机)或旋转式机械(如燃气轮机)做功,因燃料是在发动机内部燃烧,所以又称内燃机。柴油机属于内燃机。

1.1.1 内燃机的优点

内燃机与外燃机相比较,具有如下优点。

(1)热效率高 目前柴油机的最高效率可达46%,而往复式蒸汽机只有11%。热效率高标志着内燃机的经济性能好,即燃料消耗少。

(2)结构紧凑,质量轻,尺寸小 内燃机不需要外燃机那样庞大的锅炉、冷凝器等辅助设备。目前柴油机气缸最小直径为55 mm,最大直径为1 060 mm。

(3)功率范围广,适应性能好 目前柴油机单机功率最小为1.1 kW,最大为35 300 kW。同一类的柴油机,稍加改变,就可以适应各种不同用途的需要。

(4)操作方便,启动快 在正常情况下,柴油机能在3~5 s内启动起来,在很短时间内达到最大功率。在正常的运行中,柴油机不需要进行复杂的操作。

(5)运行安全,不易引起火灾或爆炸事故 但是内燃机的构造比较复杂、精度高、造价高,对操作维护技能的要求也比较高。

1.1.2 内燃机的分类

内燃机的形式很多,根据工作原理不同可分为往复活塞式内燃机、旋转活塞式内燃机和燃气轮机等。其中以往复活塞式内燃机应用最广,我们平常讲的“内燃机”一般都是指这种形式的内燃机。

根据所采用的燃料、工作循环过程、机体结构形式和用途等的不同,内燃机又可分为以下几种类型。

1. 按照所用燃料不同分

按照燃料不同可分为柴油机、汽油机、煤气机、天然气机等。

2. 按照工作循环过程不同分

按照工作循环过程不同,内燃机可分为以下两种。

(1)二冲程 活塞移动两个冲程,完成一个工作循环。

(2)四冲程 活塞移动四个冲程,完成一个工作循环。

3. 按照机体结构形式不同分

内燃机按照机体结构形式不同可分为以下两种。

(1)单缸 一台内燃机只有一个汽缸。

(2)多缸 一台内燃机具有两个或两个以上的汽缸。

多缸机根据汽缸排列形式不同,又可分为以下几种类型。

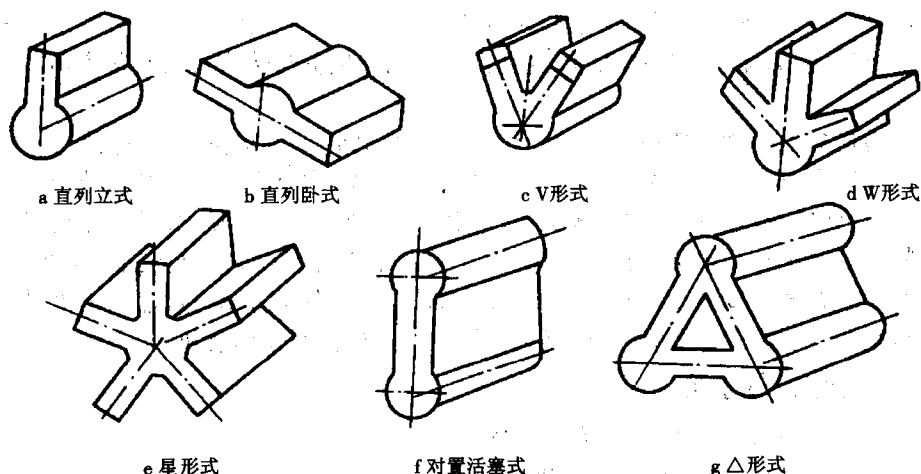


图 1.1 多缸机的机体结构形式

①直列立式,汽缸中心线垂直布置,如图 1.1a 所示。

②直列卧式,汽缸中心线水平布置,如图 1.1b 所示。

③V 形式,汽缸中心线分别在两个平面内,并且两个平面相交呈“V”形状,如图 1.1c 所示。

④W 形式,汽缸中心线排列成“W”形,如图 1.1d 所示。

⑤星形式,汽缸中心线排列成星状,如图 1.1e 所示。

⑥对置活塞式,一个汽缸内布置两个活塞作相对运动,如图 1.1f 所示。

⑦ Δ 形式,三组对置活塞式内燃机排列成“ Δ ”形,如图 1.1g 所示。

4. 按照冷却方式不同分

内燃机按照冷却方式不同可分为下面两种。

(1)风冷式 利用空气作冷却介质。

(2)水冷式 利用水作冷却介质。

5. 按照进气方式不同分

内燃机按进气方式不同可分为如下两种。

(1)非增压式 内燃机没有安装增压器,空气靠活塞抽吸作用进入汽缸。

(2)增压式 内燃机上安装有增压器,空气通过增压器提高压力后进入汽缸。

6. 按照点火方式不同分

按点火方式不同内燃机分为下面两种。

(1)压燃式 空气在汽缸内高度压缩后产生高温,使燃料自行着火燃烧,如柴油机等。

(2)点燃式 利用火花塞发出的火花点燃燃料,使其着火燃烧,如汽油机、天然气机等。

7. 按照额定转速不同分

按照额定转速不同可分为下面三种。

(1)高速柴油机 额定转速在 1 000 r/min 以上。

(2)中速柴油机 额定转速在 600 ~ 1 000 r/min 范围内。

(3)低速柴油机 额定转速在 600 r/min 以下。

8. 按照用途不同分

内燃机按照用途分为两种。

(1)固定式 作为固定式机械动力的内燃机,在一个固定不变的位置进行工作,如钻井发电机用的柴油机。

(2)移动式 作为移动式机械动力的内燃机,如汽车、拖拉机、船舶、内燃机车上用的柴油机。

1.1.3 内燃机的名称及型号

为了便于内燃机的生产管理和使用维修,国家对内燃机的名称和型号编制方法作了统一的规定(GB725—1991),其主要内容有以下几条。

1)内燃机产品名称均按所采用的燃料命名

例如柴油机、汽油机、煤气机、沼气机等。

2)内燃机型号由阿拉伯数字(以下简称数字)、汉语拼音字母(以下简称字母)和国家标准中关于汽缸布置所规定的象形字符号组成

内燃机型号依次包括下列四部分内容。

(1)首部 是产品特征代号,由制造厂根据需要自选相应字母表示,但须经行业标准化归口单位核准、备案。

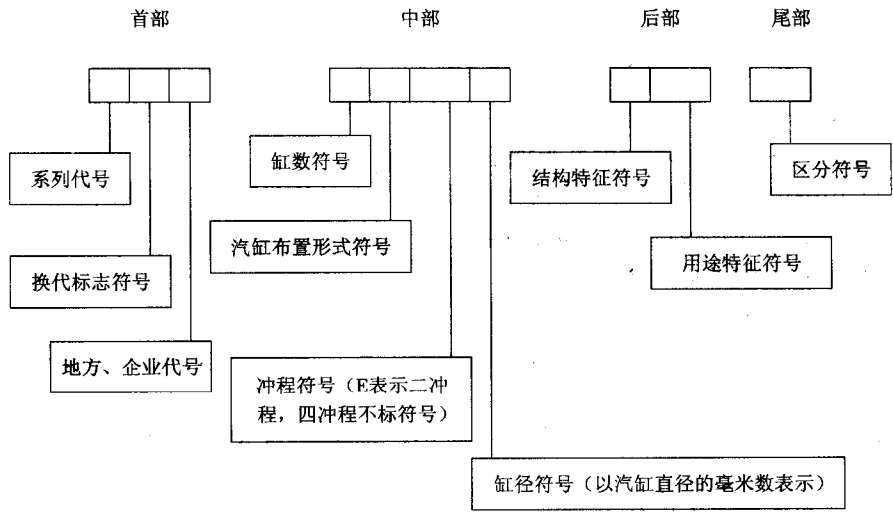
(2)中部 由缸数符号、汽缸布置形式符号、冲程符号和缸径符号组成。

(3)后部 由结构特征符号和用途特征符号组成。

(4)尾部 区分符号。

后部与尾部也可用“—”分隔开。

3)型号表示方法



说明:

①汽缸直径取整数。

②常见用途特征符号有:Q—汽车用;T—拖拉机用;K—复合式燃烧室;C—船用;D—发电机用;无符号—通用型;M—摩托车用;G—工程机械;J—铁路牵引用。

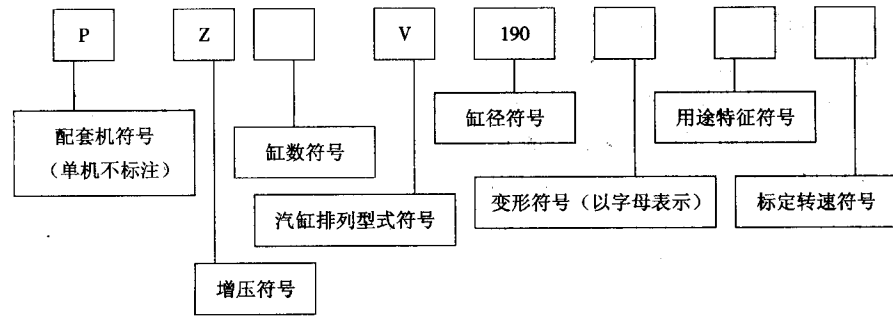
③汽缸排列形式符号有:无符号—直列及单缸卧式;V—V型排列;P—平卧型。

④结构特征符号有:无符号—水冷;F—风冷;N—凝气冷却;S—十字头式;D₂—可倒转(直接换向);Z—增压。

1.1.4 常见柴油机型号

1.190 系列柴油机

190 系列柴油机的型号是按照国家标准规定,并根据品种、规格发展的需要确定的。其型号编制规则如下。



说明:

①用途特征符号见表 1.1。

表 1.1 用途特征符号

符号	用途	符号	用途
无符号	基本型	C	船用
G	工程机械	Y	高原地区用
D	发电机组	M	沙漠地区用

②在 190 系列柴油机型号末端,增加标定转速符号,用数码表示不同标定转速的机型,标定转速符号见表 1.2。

表 1.2 标定转速符号

符号	标定转速/ $r \cdot \min^{-1}$	符号	标定转速/ $r \cdot \min^{-1}$
无符号	1 500	-2	1 000
-1	1 200	-3	1 300

③增压符号、缸数符号、汽缸排列形式符号和缸径符号均与国家标准规定相同,只是增压符号的标注位置移在前端。

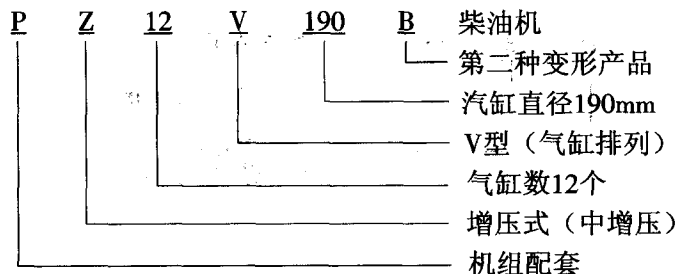
④变型符号是指该机型在结构、性能上有重大改进时,采用字母表示,以示区别。

⑤用途特征符号原则上按国家标准规定,由于用途范围的扩大,增加以下符号: G_1 —表示压裂车用; G_2 、 G_3 —表示与 F—320 钻机配套专用; Y—表示用于海拔 3 000 m 以上高原地区; M—表示用于沙漠地区及风沙较大环境。

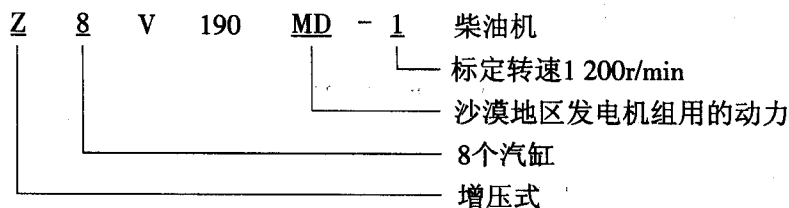
⑥配套机符号是表示产品供货范围,当不标注时表示为单机,即不带有底架、风扇和散热器等部件;当在单机机型前加注符号“P”时,表示带有底架、风扇和散热器的配套机组。

190 系列柴油机型号举例如下。

例 1.1:

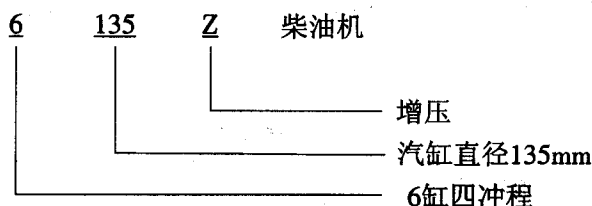


例 1.2:



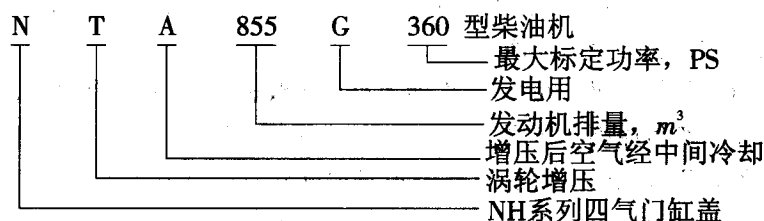
2. 135 系列柴油机

例 1.3:



3. 进口柴油机

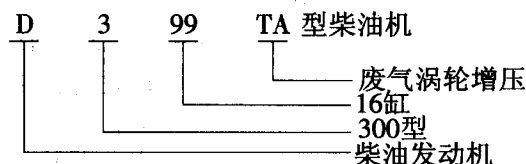
例 1.4:



说明:

康明斯 NTA-855-G360 型柴油机是由美国康明斯发动机公司与重庆汽车发动机厂联合生产,主要用于发电机组。N 系列机输出功率为 17.3 ~ 34.9 kW, K 系列机输出功率为 33.1 ~ 132.4 kW。

例 1.5:

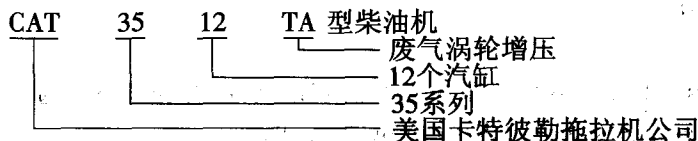


说明:

D399 型柴油机是美国卡特彼勒拖拉机公司设计制造,汽缸直径 × 活塞行程为 158.75 mm × 203.2mm。其型号含义为:左起第一个英文字母 D 或 G 表示发动机类

型,D代表柴油发动机,G代表天然气发动机;左起第一个数字“3”为发动机系列编号,称为“300”型;左起第二、三位数字本身无含义,仅区分发动机汽缸数目,即99代表16缸、98代表12缸、79代表8缸;数字后面英文字母“TA”或“NA”表示发动机充气方式,即“TA”代表废气涡轮增压,“NA”代表自然充气。

例 1.6:



1.2 柴油机常用名词术语

在往复式内燃机中,活塞的往复运动,通过曲柄连杆机构变成曲轴的旋转运动,以实现热能和机械能的相互转换。内燃机的往复运动如图 1.2 所示。根据柴油机活塞与曲轴的相对位置关系和运动规律及性能,柴油机的常用名词术语解释如下。

1. 上止点

上止点又叫上死点,是指活塞在汽缸内运动到最上端位置,即活塞离开曲轴中心最远的位置。

2. 下止点

下止点又叫下死点,是指活塞在汽缸内运动到最下端位置,即活塞距曲轴中心最近的位置。

3. 冲程

冲程也叫行程,是活塞从一个止点移动到另一个止点所经过的距离,用符号 S 表示。它等于曲柄半径的两倍,即

$$S = 2R$$

式中 S ——冲程;

R ——曲柄半径。

4. 缸径

缸径是指汽缸直径,通常用字母 D 表示,单位是毫米(mm)。

5. 汽缸工作容积

汽缸工作容积是指活塞从下止点移动到上止点或从上止点移动到下止点所扫过的空间容积,也叫活塞排量,通常用 V_s 表示,即

$$V_s = \frac{\pi}{4} D^2 S \times 10^{-6}$$

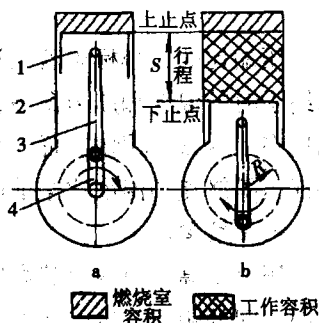


图 1.2 曲柄连杆机构原理

1—活塞;2—汽缸体;3—连杆;4—曲轴

式中 V_s ——活塞排量;

D ——汽缸直径;

S ——活塞行程。

6. 燃烧室容积

活塞位于上止点时,活塞顶上面的空间叫燃烧室。这个空间容积叫燃烧室容积,通常用 V_c 表示。

7. 汽缸总容积

汽缸总容积是指活塞位于下止点时活塞顶上方的汽缸容积,通常用字母 V_a 表示,它包括汽缸工作容积和燃烧室容积两部分,即

$$V_a = V_c + V_s$$

8. 压缩比

汽缸总容积与燃烧室容积之比称为压缩比,通常用字母 ϵ 表示。

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

压缩比的大小标志着柴油机工作时汽缸内气体被压缩的程度。压缩比愈大,压缩终了时的温度和压力愈高,燃油愈容易燃烧,易于柴油机的启动。一般柴油机的压缩比在 13~20 范围内,而汽油机的压缩比较低,一般为 6.5~10。压缩比的大小必须保证压缩终点的温度比柴油的自燃点温度高 200~300℃。

9. 压缩室高度

压缩室高度也叫余隙高度或上量,是活塞位于上止点时活塞顶平面与汽缸盖底平面之间的距离。装配柴油机时,这个数据常用来控制和调整柴油机的压缩比。

10. 爆发压力

爆发压力一般指燃料燃烧时产生的气体压力的最大值,即最大爆发压力,通常用字母 p_z 表示。

11. 平均有效压力

平均有效压力是柴油机性能的一个重要指标,通常用字母 p_e 表示。它的含义是假定有一个在整个活塞行程内大小不变的压力作用在活塞上,使活塞在一个行程内所做的功与整个工作循环所做的有效功相等。这个假定的压力就叫平均有效压力。一般四冲程柴油机平均有效压力为 0.69~2.4 MPa。

1.3 单缸四冲程柴油机工作原理

柴油机的工作过程,是按照一定的规律将燃料和空气送入汽缸,使之在汽缸内不断着火燃烧放出热能。这一系列作用可以分成四个过程,即进气、压缩、工作和排气。这四个过程是不断重复进行的,每完成上述四个过程称为一个工作循环。完成一个工作循环活塞要连续运行四个冲程(即曲轴转两圈)的柴油机称为四冲程柴油机。

下面以单缸非增压四冲程柴油机为例,说明其工作原理。

1.3.1 单缸四冲程柴油机工作过程

1. 第一冲程:进气冲程(图 1.3a~b)

活塞在旋转的曲轴带动下,从上止点移动到下止点,这时进气门打开,排气门关闭。由于汽缸内容积增大,使汽缸内的压力低于大气压,在汽缸内外压力差的作用下,外界新鲜空气通过进气门吸入汽缸。由于进气系统有阻力,空气进入汽缸后的压力低于大气压力。进气终了时汽缸内的压力为 $0.080 \sim 0.090 \text{ MPa}$,汽缸内空气的温度则高于大气温度,一般温度在 $40 \sim 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

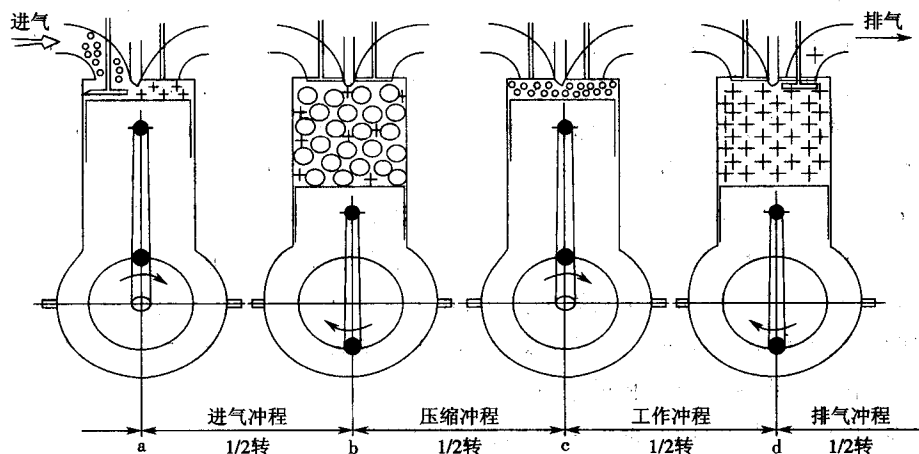


图 1.3 单缸四冲程柴油机工作过程示意图

进气过程对柴油机工作影响很大,进气冲程结束时,汽缸内充气量愈多,可以喷入的燃油量也愈多,燃烧过程放出的热量就愈多,柴油机发出的功率就愈大。

2. 第二冲程:压缩冲程(图 1.3b~c)

活塞从下止点移动到上止点,进、排气门都处于关闭状态,活塞便逐渐将第一冲程吸入的空气压缩在燃烧室内,使空气的温度和压力升高。压缩终了时,汽缸内空气温度约在 $500 \sim 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,压力为 $2.74 \sim 4.9 \text{ MPa}$ 。

3. 第三冲程:工作冲程(图 1.3c~d)

活塞从上止点移动到下止点,进、排气门仍然关闭。在压缩冲程接近终了时,喷油器将高压燃油喷入汽缸与高温高压空气混合,当超过柴油自燃点温度后,便自行着火燃烧,产生大量热能,使汽缸内温度和压力急剧升高。高温高压气体推动活塞下移,经连杆带动曲轴旋转,对外做功。这一冲程最高燃烧压力为 $6.0 \sim 9.0 \text{ MPa}$,温度最高可达 $1700 \sim 2000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随着膨胀作用的进行,热能变成了机械能,汽缸内气体的压力、温度急剧下降,到膨胀终了时,汽缸内的压力已下降到 $0.24 \sim 0.44 \text{ MPa}$,温度降到 $600 \sim 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4. 第四冲程:排气冲程(图 1.3d ~ a)

活塞从下止点移动到上止点,此时进气门关闭,排气门打开。膨胀终了的气体已失去做功的能力。变成了废气。为了使新鲜空气重新进入汽缸就必须排除废气。废气在活塞上行的排挤下,经排气门排出缸外。排气终了时,汽缸内的压力为 $0.103 \sim 0.108 \text{ MPa}$,温度为 $350 \sim 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

当排气终了时,活塞又回到上止点,活塞则经过四个冲程:进气、压缩、工作、排气。至此,单缸四冲程柴油机完成了一个工作循环。曲轴在这一工作循环中转动两圈,即曲轴转角为 720° 。

应当指出,以上阐述的只是柴油机的理论工作过程,而实际上柴油机工作过程更为复杂。例如,柴油的进排气门并不是上、下止点时打开或关闭。实际上,进气门在上止点前打开,在下止点后关闭。为了克服进气门处空气的惯性,并考虑到进气门开启需一定时间,所以进气门要提前打开(早开);为了利用空气流的惯性,使进气更充分,进气门要推迟关闭(晚关)。排气门也是在上止点前打开,在下止点后关闭。为了克服排气门的惯性,减轻排气门行程中活塞运动阻力,排气门要提前打开(早开),同样为了利用空气流惯性,使排气更彻底,排气门也要推迟关闭(晚关)。

另一方面,柴油机所发出功率的大小,在正常运转的情况下主要取决于喷入汽缸内的燃油数量和空气数量。进气量愈大,喷油量愈多,功率就愈大。为了提高进气量,除考虑进气系统的形状和尺寸等因素外,彻底清除燃烧后的废气是非常重要的,上面提到的气门提早打开、推迟关闭也有这个原因。

从上述四个工作过程中可以看出,只有第升个冲程,即工作冲程,是做功的,其他三个冲程全是辅助过程,是需要消耗能量的。这个问题在单缸柴油机上是利用飞轮储存的能量来解决,在多缸柴油机上则主要靠其他缸的做功冲程来供给。工作循环开始,即柴油机启动时,需要用外力先使曲轴转动,完成辅助过程,使柴油机着火燃烧,柴油机才能正常运转。

1.3.2 四冲程柴油机的换气过程

四冲程柴油机的换气过程可以分为三个阶段:自由排气、强制排气和进气。

1. 自由排气阶段

自由排气阶段是做功冲程后期进行的。这时燃气压力已降至 $0.3 \sim 0.4 \text{ MPa}$,对于膨胀做功已无多大作用,当活塞到下止点以前把排气门打开,就可以利用废气的压力向汽缸外排气。这段时间虽然很短,但因排气压力高,流速大,排出的废气量可达到 60% 以上。自由排气降低了汽缸内的压力,使活塞回行阻力减少,同时排气门提前开启,等到活塞经过下止点回行时,排气门已有较大开度,使排气通畅,可以提高排气效果。

2. 强制排气阶段

活塞达到下止点,自由排气阶段结束,汽缸内压力下降到 0.12 MPa 以下。此时排气门已经开大,活塞回行时便将剩下的废气进一步排出汽缸。在排气冲程将要结