



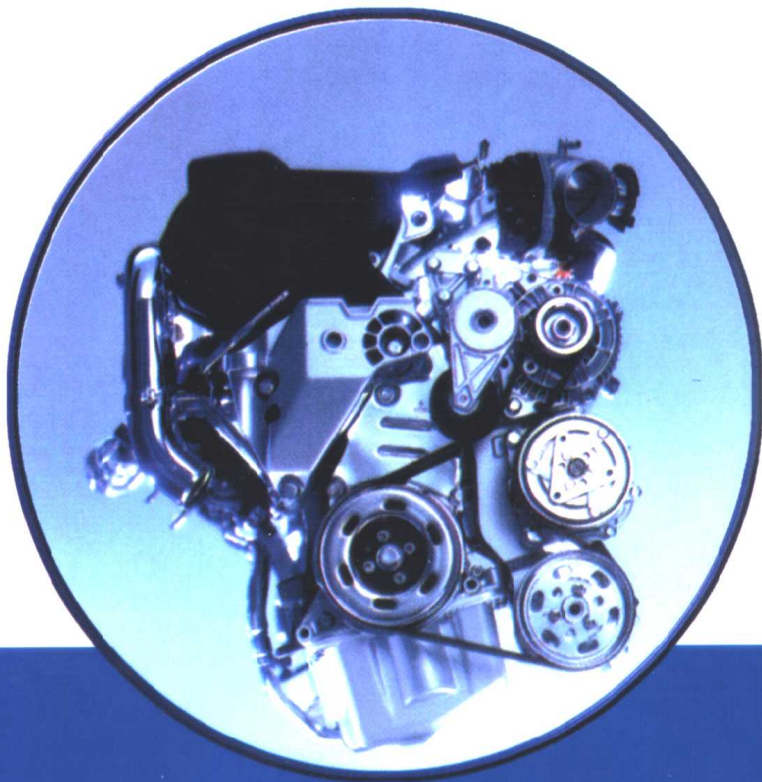
高等职业教育港口机械专业规划教材（试用）

内燃机构造与原理

NEIRANJI GOUZAOU YU YUANLI

■ 孙建新 主编

■ 马乔林 主审



人民交通出版社

China Communications Press

高等职业教育港口机械专业规划教材(试用)

Neiranji Gouzao Yu Yuanli

内 燃 机 构 造 与 原 理

孙建新 主编

马乔林 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书的主要内容包括:内燃机基本工作原理,曲柄连杆机构,换气过程和配气机构,汽油机、柴油机燃烧过程和燃油供给系,汽油机点火系,冷却系,润滑系,起动系,内燃机增压,内燃机特性以及内燃机的污染与控制。

本书为高等职业教育港口机械专业规划教材,也可供技术培训和有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机构造与原理/孙建新主编. —北京:人民交通出版社, 2004.5

ISBN 7-114-05014-3

I.内... II.孙... III.①内燃机-构造-高等学校:技术学校-教材②内燃机-理论-高等学校:技术学校-教材 IV.TK40

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第022030号

高等职业教育港口机械专业规划教材(试用)

内燃机构造与原理

孙建新 主编

马乔林 主审

正文设计:孙立宁 责任校对:宿秀英 责任印制:杨柏力

人民交通出版社出版

(100011 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号 010-85285990)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷有限公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:322千

2004年5月 第1版

2004年5月 第1版 第1次印刷

印数:0001—3000册 定价:26.00元

ISBN 7-114-05014-3

前言

交通职业教育教学指导委员会交通工程机械学科委员会自1992年成立以来,对本学科港口机械、筑路机械两个专业的教材编写工作一直十分重视,把教材建设工作作为学科委员会工作的重中之重,在“八五”和“九五”期间,先后组织人员编写了十多种专业急需教材,供港口机械和筑路机械两个专业内部使用,解决了各学校专业教材短缺的困难。

随着港口和公路建设事业的不断发展,港口机械和公路施工机械的更新换代速度加快,各种新工艺、新技术、新设备不断出现,对本学科的人才培养提出了更高的要求。另外,根据目前职业教育的发展形势,多数重点中专学校已改制为高等职业技术学院,中专学校一般同时招收中专和高职学生,本学科教材使用对象的主体已经发生了变化。为适应这一形势,交通工程机械学科委员会于2000年5月在云南交通学校召开了二届二次会议,制定了“十五”教材编写出版规划,并确定了“十五”教材编写的原则为:

1. 拓宽教材的使用范围。本套教材主要面向高职,也可用于相关专业的职业资格培训和各类在职培训,亦可供有关技术人员参考。
2. 教材内容难易适度,改变了以往教材偏多、偏深、偏难的现象,注重理论联系实际,便于学生自学。
3. 在教材内容的取舍和主次的选择方面,照顾广度,控制深度,力求针对专业,服务专业,对与本专业密切相关的内容予以足够的重视。
4. 教材编写立足于国内工程机械使用的实际情况,结合典型机型,系统介绍工程机械设备的基本结构和工作原理,同时,有选择地介绍一些国外的新技术、新设备,以便拓宽学生的视野,为学生进一步深造打下基础。

“十五”期间公开出版的港口机械专业教材共6种,包括《内燃机构造与原理》、《港口机械修理》、《计算机绘图基础教程》、《港口起重机械》和《港口输送机械与集装箱机械》。

《内燃机构造与原理》是高等职业教育港口机械专业规划教材之一,主要内容包括:内燃机基本工作原理,曲柄连杆机构,换气过程和配气机构,汽油机、柴油机燃烧过程和燃油供给系,汽油机点火系,冷却系,润滑系,起动系,内燃机增压,内燃机特性以及内燃机的污染与控制。

参加本书编写工作的有:江苏海事职业技术学院孙建新(编写第一、二、三、四、六、九、十二章)、刘琦(编写第五、七、八、十、十一章),全书由孙建新主编,南通航运职业技术学院马乔林主审。

本教材在编写过程中得到交通系统各院(校)领导和教师的大力支持,在此表示感谢!

编写高职教材,我们尚缺少经验,书中不妥和疏漏之处,敬请读者指正。

交通职业教育教学指导委员会
交通工程机械学科委员会
2004年3月

目录

第一章 内燃机基本工作原理	1
第一节 内燃机概述.....	1
第二节 内燃机的工作原理.....	6
第三节 内燃机的性能指标.....	11
第四节 内燃机的热力循环.....	15
第五节 内燃机的分类和型号.....	19
第二章 曲柄连杆机构	21
第一节 曲柄连杆机构的工作条件.....	21
第二节 机体组.....	22
第三节 活塞连杆组.....	25
第四节 曲轴飞轮组.....	34
第三章 换气过程和配气机构	40
第一节 换气过程.....	40
第二节 配气机构的功用、类型.....	42
第三节 配气机构的主要零件.....	43
第四章 汽油机燃烧过程和燃油供给系	51
第一节 概述.....	51
第二节 汽油机的燃烧过程.....	53
第三节 汽油机的燃烧室.....	56
第四节 简单化油器与可燃混合气的形成.....	58
第五节 可燃混合气成分与汽油机性能的关系.....	60
第六节 现代化油器.....	61
第七节 现代化油器的类型、附属装置和操纵机构.....	65
第八节 典型化油器构造实例.....	71
第九节 汽油供给装置.....	74
第十节 进、排气装置.....	76
第十一节 汽油喷射式燃油供给系.....	78
第五章 柴油机燃烧过程和燃油供给系	87
第一节 概述.....	87
第二节 柴油机混合气的形成与燃烧室.....	90
第三节 柴油机的燃烧过程.....	95

第四节	输油泵	97
第五节	喷油器	98
第六节	喷油泵	101
第七节	喷油泵的驱动与供油正时	111
第八节	调速器	114
第九节	转子式分配泵	120
第十节	柴油机电控高压喷射系统	124
第六章	汽油机点火系	128
第一节	概述	128
第二节	蓄电池点火系的组成与工作原理	128
第三节	蓄电池点火系的主要部件	130
第四节	电子点火系统	135
第五节	车用电源	139
第七章	冷却系	145
第一节	概述	145
第二节	水冷系的组成及循环水路	145
第三节	冷却系的主要机件	147
第四节	冷却系统的调节和冷却液	150
第五节	风冷系	153
第八章	润滑系	155
第一节	概述	155
第二节	润滑方式和润滑剂	155
第三节	润滑系的组成和润滑油路	158
第四节	润滑系的主要机件	160
第五节	曲轴箱通风	166
第九章	起动系	167
第一节	概述	167
第二节	电动机起动	167
第三节	改善起动性能的措施	170
第十章	内燃机增压	172
第一节	概述	172
第二节	内燃机增压	172
第三节	废气涡轮增压器	174
第四节	增压内燃机的结构特点	177
第十一章	内燃机特性	178
第一节	概述	178
第二节	内燃机速度特性	179
第三节	内燃机负荷特性	184
第四节	万有特性	186
第五节	内燃机的功率标定及大气修正	187

第十二章	内燃机的污染与控制	189
第一节	概述.....	189
第二节	影响汽油机排放的因素.....	190
第三节	汽油机排气污染的机内净化措施.....	191
第四节	汽油机排气污染的机外净化措施.....	193
参考文献	201

第一章 内燃机基本工作原理

第一节 内燃机概述

一、概述

内燃机是热机的一种,是将燃料的化学能经过燃烧释放的热能转变为机械功的机器。

热机可分为外燃机和内燃机两种类型。在外燃机中,燃料的燃烧发生在气缸的外部,而工质(燃气)膨胀做功是在气缸内部进行的,如蒸汽机、汽轮机等。因此外燃机存在着工质传递过程的热损失。在内燃机中,燃料的燃烧和工质的膨胀做功均在气缸内部进行,因而内燃机能量损失较小,具有较高的热效率。

按活塞的运动规律分,内燃机有往复运动式和旋转活塞式两类。其中,往复运动式内燃机性能更为完善,使用最广泛,是本课程学习的内容。

内燃机的基本工作过程是完成两次能量转换,即燃料在气缸中燃烧,将化学能转变为热能,燃烧产生的高温高压燃气作为工质在气缸内膨胀,推动活塞运动,将热能转变为机械功。活塞的往复运动通过曲柄连杆机构转变为曲轴的回转运动,驱动机械工作。

内燃机具有下列突出优点:

- (1)经济性好,热效率在热机中最高,一般为 30% ~ 50%。
- (2)尺寸小、质量轻、结构紧凑,便于安装布置。
- (3)功率范围广。单机功率在 $(0.6 \sim 6.8) \times 10^4 \text{kW}$,适用范围广。
- (4)机动性好。起动方便、迅速,加速性能好,正常起动只需要几秒钟,并能很快达到全负荷工况。

内燃机也存在如下一些缺点:

- (1)运转时噪声大;
- (2)废气中有害成分对大气污染较严重。

内燃机的优点使其作为发动机,在交通运输、港口机械、工程机械及矿山机械等方面,得到极其广泛的应用。

二、内燃机总体构造

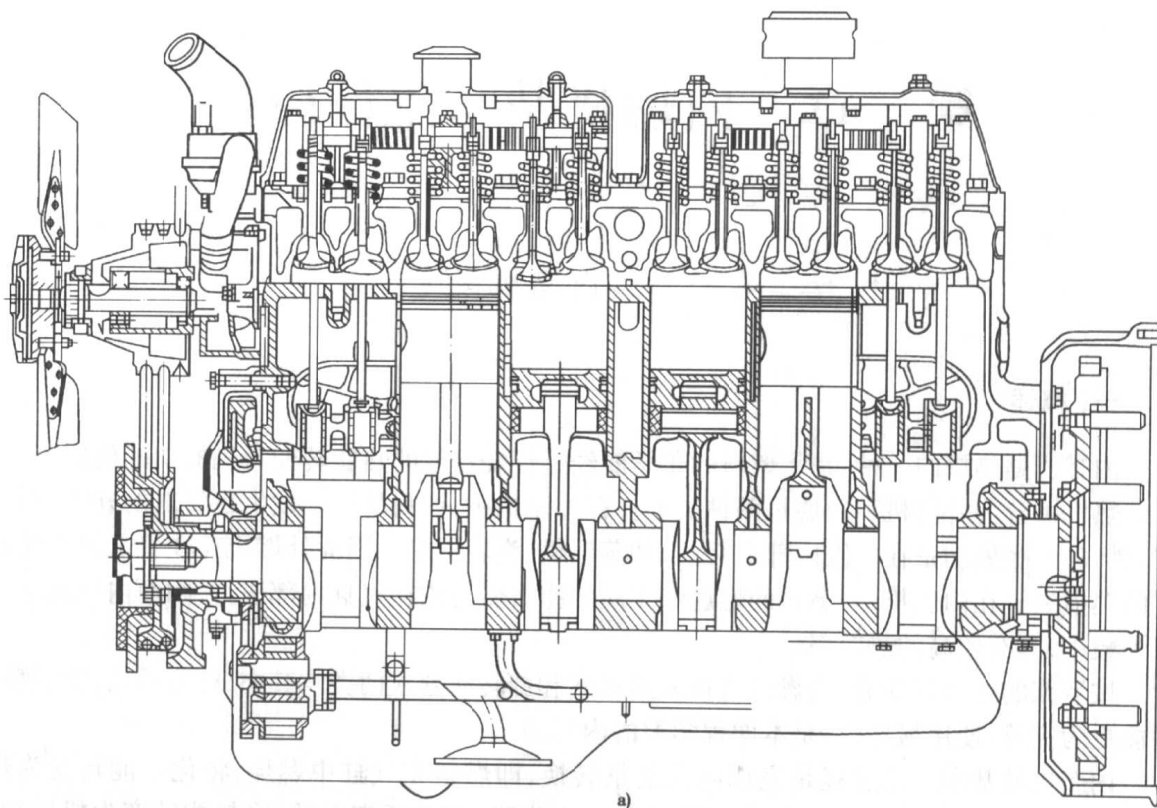
内燃机主要由曲柄连杆机构、配气机构、燃料供给系、汽油机点火系、润滑系、冷却系及起动系等组成,如图 1-1 所示。这些机构和系统保证了内燃机连续不断地正常工作。

1. 曲柄连杆机构

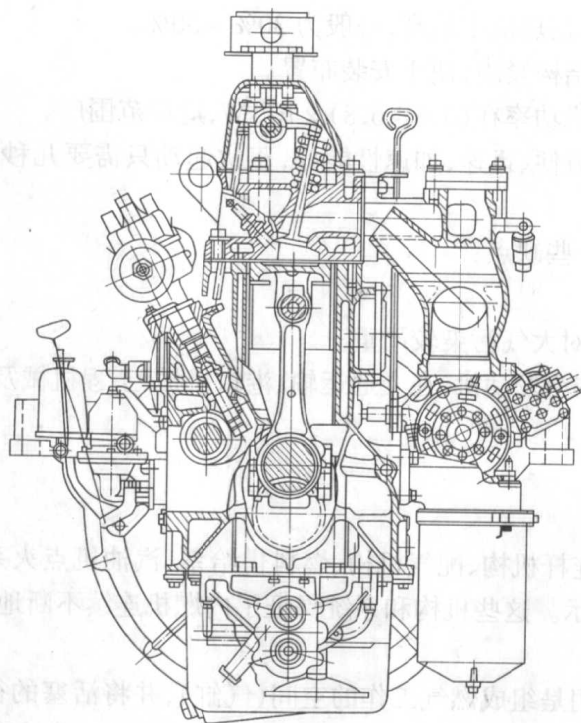
曲柄连杆机构的功用是组成燃气工作的空间(气缸),并将活塞的往复运动转换成曲轴的回转运动。其组成主要有气缸体、气缸盖、活塞组件、连杆组件和曲轴飞轮组件等。

2. 配气机构

配气机构的功用是按工作循环的要求,定时地启闭进、排气门,排出气缸内的废气,吸入新

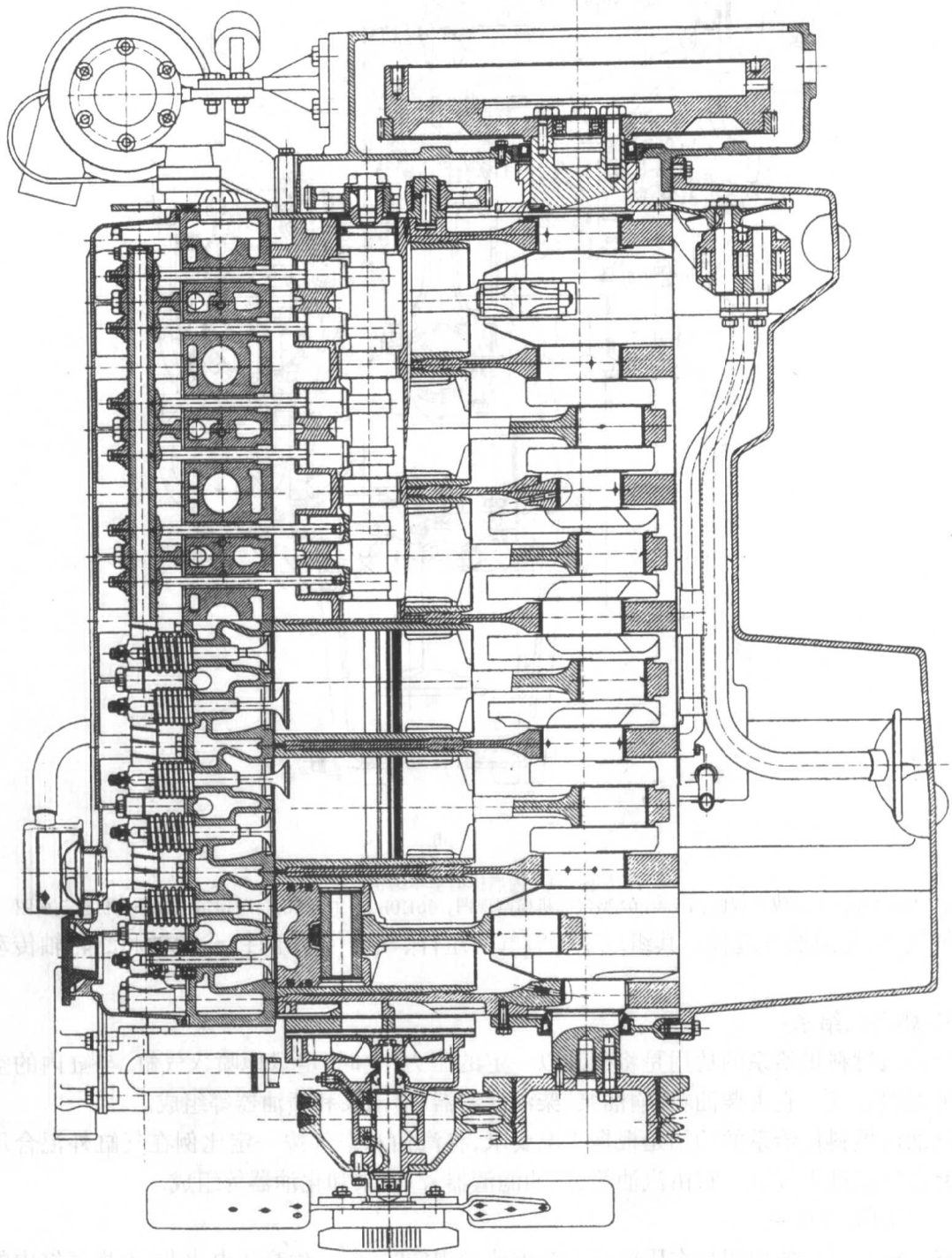


a)



b)

图 1-1



c)

图 1-1

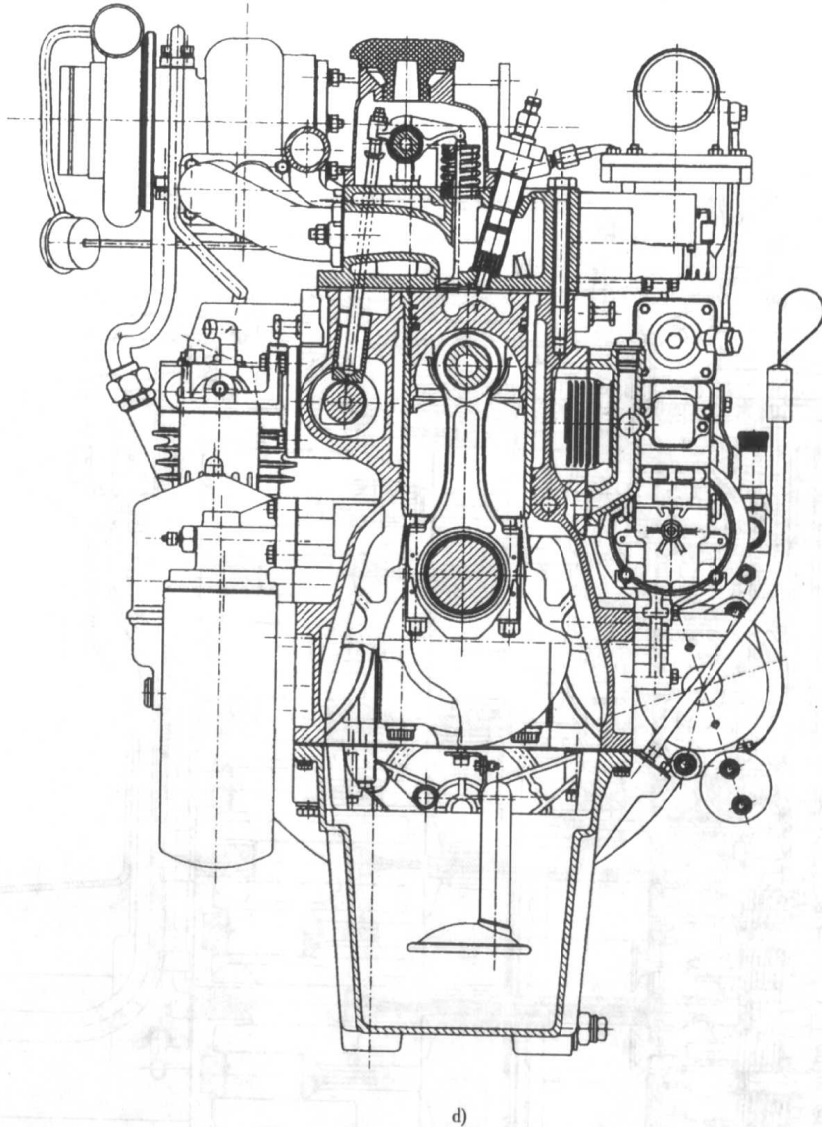


图 1-1 内燃机的基本结构

a)CA6102 型汽油机纵剖视图;b)CA6102 型汽油机横剖视图;c)6110B 柴油机纵剖面图;d)6110B 柴油机横剖面图

鲜气体,完成换气过程。其组成主要有气门组件、气门传动组件、凸轮轴和凸轮轴传动机构等。

3. 燃料供给系

柴油机燃料供给系的功用是将柴油以一定的压力,定时、定量地喷入气缸,与缸内的空气形成可燃混合气。它由柴油箱、输油泵、柴油滤清器、喷油泵和喷油器等组成。

汽油机燃料供给系的功用是根据工况要求,将汽油和空气按一定比例在气缸外混合形成可燃混合气后进入气缸。它由汽油箱、汽油滤清器、汽油泵和化油器等组成。

4. 汽油机点火系

汽油机点火系的功用是在压缩行程终点前的规定时刻,产生高压电火花,点燃气缸内的可燃混合气。它由蓄电池、点火线圈、分电器和火花塞等组成。

5. 润滑系

润滑系的功用是在发动机运转时,连续不断地将机油输送到各摩擦表面,以减小零件的磨

损和摩擦阻力。其组成主要有机油泵、机油滤清器和机油冷却器等。

6. 冷却系

冷却系的功用是将内燃机受热机件的热量散发出去,以保证内燃机正常的工作温度。它由散热器、水泵和风扇等组成。

7. 起动系统

起动系统的功用是使静止的发动机起动运转。它主要由起动电机等组成。

三、内燃机基本术语

图 1-2 为单缸内燃机简图。表示内燃机工作过程的基本术语有:

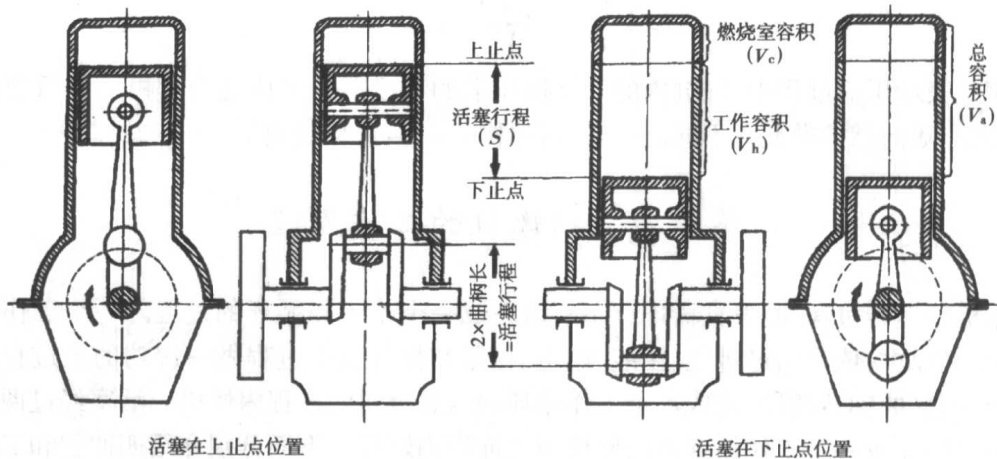


图 1-2 内燃机基本术语图

1. 上止点

活塞离曲轴的回转中心最远处,通常即活塞上行的最高位置。

2. 下止点

活塞离曲轴的回转中心最近处,通常即活塞下行的最低位置。

3. 活塞行程 S

活塞行程也称为活塞冲程,指上、下止点之间的距离。

4. 曲柄半径 R

曲轴旋转中心线与曲柄销中心线的距离。由图 1-2 可见,活塞行程与曲柄半径之间的关系为: $S = 2R$ 。

5. 燃烧室容积 V_c

活塞在上止点时其顶面与缸盖之间的空间容积。

6. 气缸工作容积 V_h

活塞从上止点运动到下止点顶面所扫过的气缸容积。其大小为:

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S \times 10^{-6} \quad (1-1)$$

式中: D ——气缸直径(mm);

S ——活塞行程(mm);

V_h ——气缸工作容积(L)。

内燃机所有气缸工作容积之和,称为内燃机的排量,记为 V_H 。

$$V_H = V_h \cdot i = \frac{\pi D^4}{4} \cdot S \cdot i \times 10^{-6} \quad (1-2)$$

式中： i ——气缸数。

7. 气缸总容积 V_a

活塞在下止点时,其顶部与缸盖之间的空间容积。它等于燃烧室容积与气缸工作容积之和,即

$$V_a = V_c + V_h \quad (1-3)$$

8. 压缩比 ϵ

气缸总容积 V_a 与燃烧室容积 V_c 之比,称为压缩比,用 ϵ 表示,即

$$\epsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_c + V_h}{V_c} = 1 + \frac{V_h}{V_c} \quad (1-4)$$

压缩比表示压缩过程中,气缸内的气体被压缩的程度。压缩比是内燃机一个重要的结构参数,其大小随内燃机类型而不同。一般,汽油机 $\epsilon = 6 \sim 9$; 柴油机 $\epsilon = 13 \sim 22$ 。

第二节 内燃机的工作原理

内燃机的运转过程,是气缸内连续不断地完成一个个工作循环的过程。一个工作循环是指内燃机的气缸内依次通过进气、压缩、燃烧、膨胀和排气五个过程做一次功的全过程。活塞经过四个冲程(曲轴转两周)完成一个工作循环的内燃机叫四冲程内燃机。活塞经过两个冲程(曲轴转一周)完成一个工作循环的内燃机叫二冲程内燃机。下面分别介绍四冲程和二冲程内燃机的工作原理。

一、四冲程内燃机工作原理

1. 四冲程汽油机工作原理

图 1-3 为单缸四冲程汽油机工作原理示意图。

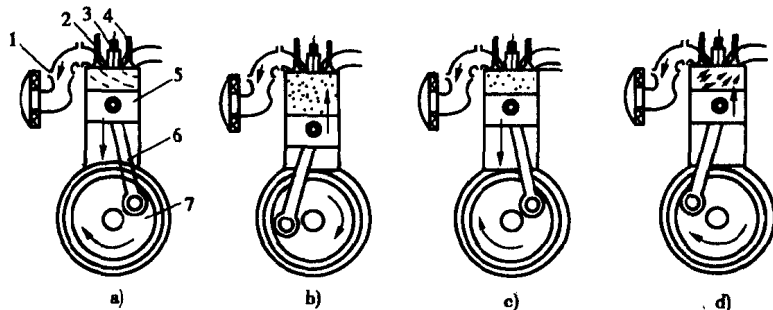


图 1-3 单缸四冲程汽油机工作原理图

1-化油器;2-进气门;3-火花塞;4-排气门;5-活塞;6-连杆;7-曲轴

1) 进气冲程

在进气冲程中,活塞由曲轴带动从上止点向下止点运动,进气门开启,排气门关闭。随气缸内容积的增大,产生真空度,在大气的压差作用下,新鲜空气被吸入进气管,先经过化油器与汽油混合,形成可燃混合气后再进入气缸(图 1-3a)。由于进气系统阻力的影响,因此进气终了时缸内气体压力低于大气压,约为 $75 \sim 90\text{kPa}$ 。同时,由于受到高温机件以及缸内残余废气散热的影响,进缸的新鲜气体温度约为 $370 \sim 440\text{K}$ 。

实际上,为了尽量多进气,进气门都在活塞到达上止点前提前开启,活塞越过下止点后延迟关闭。

2)压缩冲程

进气冲程结束后,活塞在曲轴带动下,由下止点向上止点运动,此时进、排气门均关闭。随气缸容积减小,可燃混合气被压缩,其压力和温度不断升高,为燃烧准备条件(图 1-3b)。压缩冲程终了时,气体的压力约为 $0.85 \sim 2\text{MPa}$,气体的温度约为 $600 \sim 800\text{K}$,远高于汽油的点燃温度(约 263K),因而很容易点燃。

3)燃烧膨胀冲程

在压缩冲程末期,活塞接近上止点时,火花塞发出电火花点燃可燃混合气。混合气迅速燃烧,放出大量热量,气体压力和温度急剧升高,最高压力约为 $3 \sim 5\text{MPa}$,最高温度约为 $2200 \sim 2800\text{K}$ 。高温高压的工质膨胀,推动活塞下行,并通过连杆驱动曲轴转动对外做功(图 1-3c)。随着活塞的下行,气缸内容积增大,气体的压力和温度下降。膨胀末期,气体的压力约为 $0.3 \sim 0.5\text{MPa}$,温度约为 $1500 \sim 1700\text{K}$ 。

4)排气冲程

在膨胀冲程终了时,排气门开启,活塞在曲轴带动下,由下止点向上止点运动。废气靠气缸内外的压力差和活塞的驱赶作用排出气缸(图 1-3d)。排气终了时,由于排气阻力的影响,缸内废气的压力约为 $105 \sim 125\text{kPa}$,温度约为 $900 \sim 1200\text{K}$ 。

实际工作中,为了尽量彻底地排出废气,排气门都在下止点前提前开启,在上止点后延迟关闭。

2. 四冲程柴油机工作原理

四冲程柴油机工作过程与四冲程汽油机基本相同,每个工作循环也都是通过四个冲程完成的。但由于柴油与汽油的性质不同,使混合气的形成和着火方式有很大差异。下面主要介绍柴油机相对于汽油机工作循环的不同之处。

1)进气冲程

柴油机进气冲程中进入气缸的是新鲜空气(图 1-4a)。由于进气阻力比汽油机小,上一循

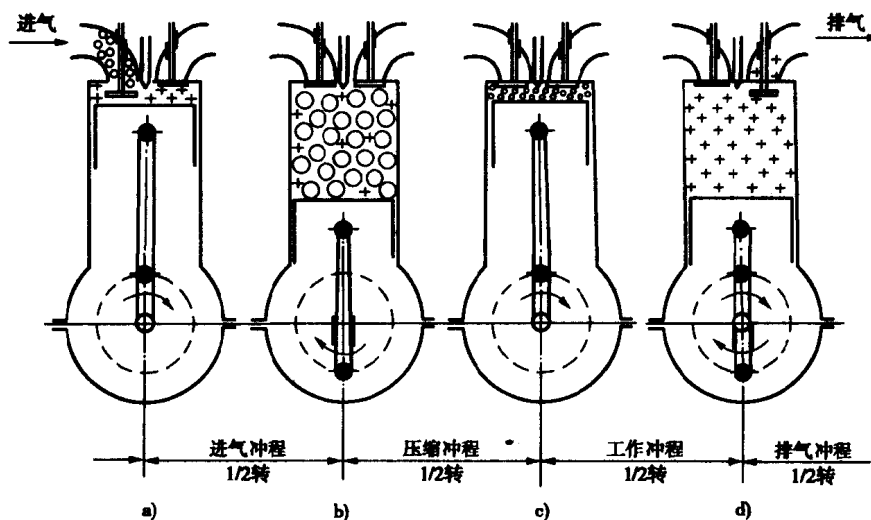


图 1-4 单缸四冲程柴油机工作原理图

环残留的废气温度比较低,所以进气终了时,缸内气体压力约为 $80 \sim 95\text{kPa}$, 温度约为 $310 \sim 340\text{K}$ 。

2) 压缩冲程

柴油机的压缩比大,压缩终了时,气缸内空气的压力和温度都比汽油机高,压力可达 $3 \sim 5\text{MPa}$, 温度达 $800 \sim 1000\text{K}$, 远高于柴油的自然温度(约 500K 左右, 图 1-4b)。

3) 燃烧和膨胀冲程

在压缩冲程末期,活塞接近上止点时,喷油器将燃油以良好的雾化状态喷入气缸,并与空气迅速混合,形成可燃混合气后并发火燃烧,缸内气体的最高压力可达 $6 \sim 9\text{MPa}$, 最高温度可达 $1800 \sim 2200\text{K}$ 。高温高压工质推动活塞下行做功。由于柴油机的压缩比大,膨胀过程充分,膨胀终了时,缸内气体的压力和温度都低于汽油机,压力为 $0.2 \sim 0.4\text{MPa}$, 温度为 $1000 \sim 1400\text{K}$ (图 1-4c)。

4) 排气冲程

由于存在排气阻力,排气终了时,缸内废气压力约为 $0.105 \sim 0.12\text{MPa}$, 温度约为 $700 \sim 900\text{K}$ (图 1-4d)。

3. 四冲程内燃机的配气相位及相位图

四冲程内燃机在实际工作中,为使气缸尽量多地吸入新鲜气体,并尽可能彻底地排出废气,进、排气门均相对于上、下止点提前开启,延迟关闭。气门的启、闭时刻通常用该缸的曲柄所在位置相对于上、下止点之间的曲柄转角($^{\circ}\text{CA}$)来表示,称为配气相位。用曲柄转角表示配气相位的几何圆图称为配气相位图,如图 1-5 所示。

图中,进气门开启时刻曲柄位置距上止点的曲柄转角称为进气提前角,用 α 表示。一般,内燃机的 α 角为 $0 \sim 40^{\circ}\text{CA}$ 。下止点距进气门关闭时刻曲柄位置的曲柄转角称为进气延迟角,用 β 表示。一般 β 角为 $20 \sim 60^{\circ}\text{CA}$ 。进气过程持续角为 $(180 + \alpha + \beta)^{\circ}\text{CA}$ 。排气门开启时刻曲柄位置距下止点的曲柄转角称为排气提前角,用 γ 表示。一般 γ 角为 $30 \sim 80^{\circ}\text{CA}$ 。上止点距排气门关闭时刻曲柄位置的曲柄转角称为排气延迟角,用 δ 表示。一般 δ 角为 $10 \sim 35^{\circ}\text{CA}$ 。排气过程持续角为 $(180 + \gamma + \delta)^{\circ}\text{CA}$ 。

由图中还可以看出,当活塞处于换气上止点时,进、排气门同时开启着,对应这段时间的曲柄转角叫进排气重叠角(其大小为 $\alpha + \delta$)。适当大小的进排气重叠角不会影响废气和进缸气体原来的流动惯性。因此,一般不会影响换气过程的完善性。

不同类型的内燃机,由于结构形式和转速的不同,对配气相位的要求也不同,需要经过实验确定,并由说明书给出。

4. 四冲程汽油机与四冲程柴油机的比较

1) 两种内燃机工作循环的基本相同之处

(1) 每完成一个工作循环都需要曲轴转两转(720°CA)。在四个冲程中,只有燃烧膨胀冲程对外做功,其他三个冲程都是为燃烧膨胀冲程服务的,要消耗功。因此,单缸内燃机必须有一个质量较大的飞轮供给这三个冲程所需要的能量;而多缸内燃机则利用其他气缸膨胀做功来供给能量。

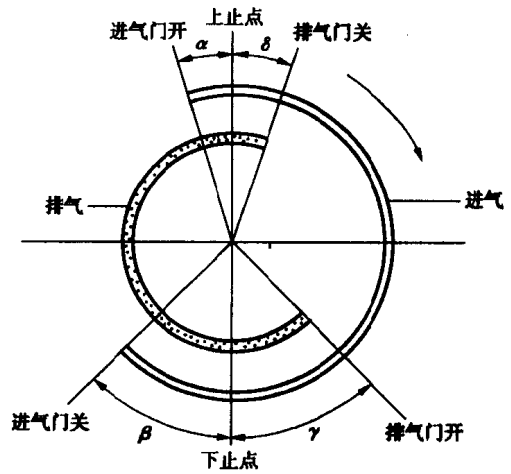


图 1-5 配气相位图

(2)内燃机由停车状态进入工作状态,必须借助外力转动曲轴完成第一个工作循环,才能使内燃机工作循环周而复始,自行运转下去。

2)两种内燃机的不同之处

(1)因为燃油的性质不同,可燃混合气形成的方式也就不同。汽油机采用外部混合方式,即汽油和空气在化油器内混合,形成可燃混合气;而柴油机采用内部混合方式,即燃油在压缩冲程终点前直接喷入缸内的空气中,形成可燃混合气。

(2)着火方式不同。汽油机利用电火花在压缩冲程终点前点燃可燃混合气,属于点燃式;柴油机是通过将燃油在压缩冲程终点前高压喷入缸内空气中,使之自行着火燃烧,属于压燃式。

由于柴油机的压缩比高,热效率比汽油机要高得多,一般柴油机燃油消耗率比汽油机低约20%~30%,所以在港口机械、工程机械和载货车上多以柴油机作为发动机。

二、二冲程内燃机工作原理

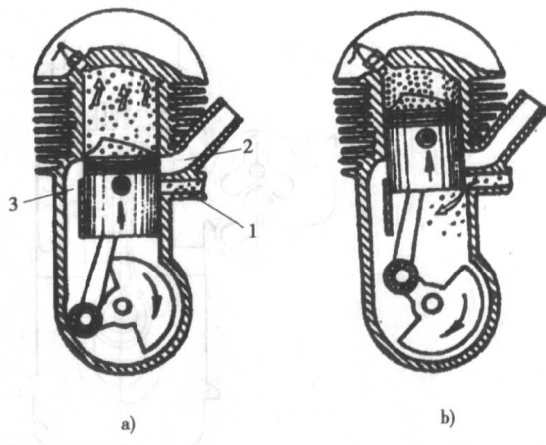
二冲程内燃机与四冲程内燃机的主要区别是换气方式不同。二冲程内燃机没有专门的排气过程和进气过程,它利用活塞的运动来控制开设在气缸下部的进、排气口的开启或关闭,使具有一定压力的新鲜气体充入气缸,同时将废气驱赶出去,从而实现换气过程。

1. 二冲程汽油机工作原理

图 1-6 是一种曲轴箱换气的单缸二冲程汽油机工作原理图。

(1)第一冲程(扫气-压缩冲程)

活塞从下止点向上止点运动,当活塞上行至关闭换气口和排气口时(图 1-6a),开始对缸内的新鲜混合气进行压缩,直至上止点,压缩过程结束。活塞上行的同时,其下方的曲轴箱内形成一定的真空度,当进气口开启时(图 1-6b)可燃混合气经化油器被吸入曲轴箱中。



(2)第二冲程(膨胀-扫气冲程)

在活塞上行接近上止点时,火花塞产生电火花,点燃混合气,形成高温高压燃气推动活塞下行做功(图 1-6c)。当活塞下行至关闭进气口时,活塞下方曲轴箱内的可燃混合气被预压。活塞继续下行至排气口开启时(图 1-6d),膨胀过程结束,缸内废气利用自身压力排出缸外。随后换气口开启,曲轴箱内被压缩的可燃混合气充入气缸,同时驱除缸内残余废气进行扫气,其过程一直延续到活塞越过下止点上行,再次先后关闭换气口和排气口为止。

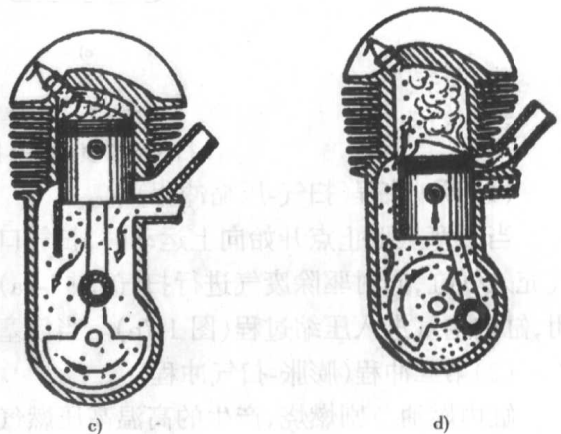


图 1-6 二冲程汽油机工作原理图

1-进气孔;2-排气孔;3-换气孔

为提高换气质量,活塞顶往往做成特殊

形状,引导进缸可燃混合气的流向,尽量减少与废气掺混的损失。

2. 二冲程柴油机工作原理

图 1-7 为带有扫气泵的二冲程柴油机工作原理图。扫气泵由柴油机曲轴驱动,可以提高进气压力(0.12~0.14MPa)。气缸下部只设有由活塞控制的扫(进)气口,废气由专设的排气门排出。

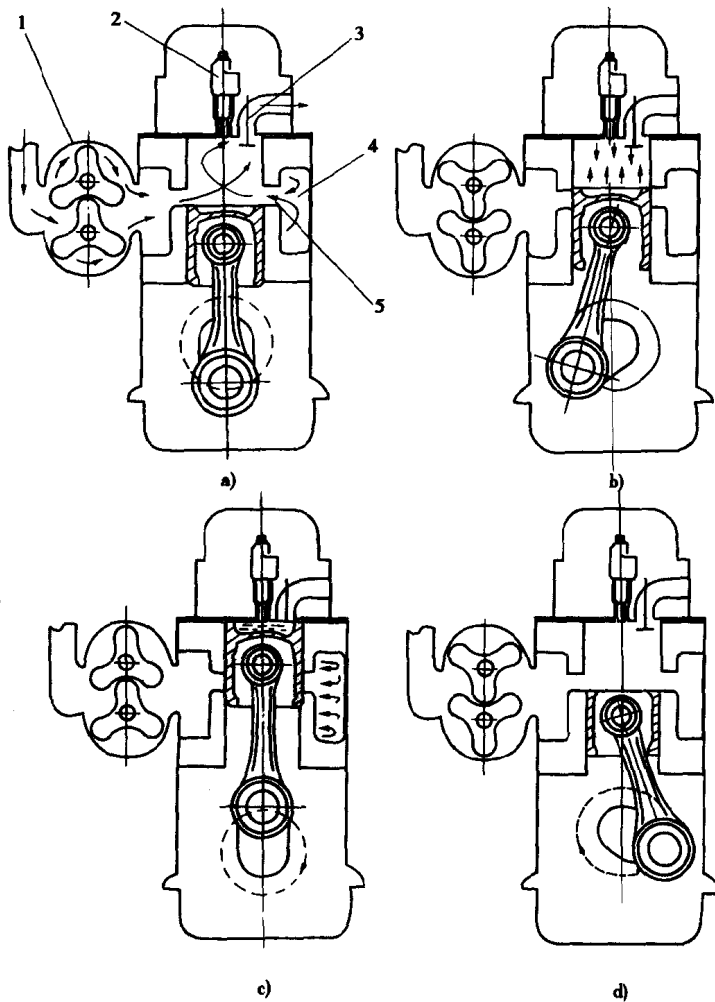


图 1-7 二冲程柴油机工作原理图

1-扫气泵;2-喷油器;3-排气门;4-空气室;5-扫气口

(1)第一冲程(扫气-压缩冲程)

当活塞从下止点开始向上运动时,扫气口与排气门均为开启状态,由扫气泵提供的压力空气充入气缸,同时驱除废气进行扫气(图 1-7a)。活塞继续上行使进气口关闭,同时排气门也关闭,缸内空气进入压缩过程(图 1-7b)。当活塞接近上止点时,柴油喷入气缸。

(2)第二冲程(膨胀-扫气冲程)

缸内燃油急剧燃烧,产生的高温高压燃气推动活塞下行做功(图 1-7c)。当活塞下行接近扫气口时,排气门提前开启,利用废气压力形成自由排气。当缸内压力降至等于或低于扫气压力时,扫气口开启,压力空气充入气缸进行扫气(图 1-7d)。此过程延续到活塞越过下止点进入第一冲程。