

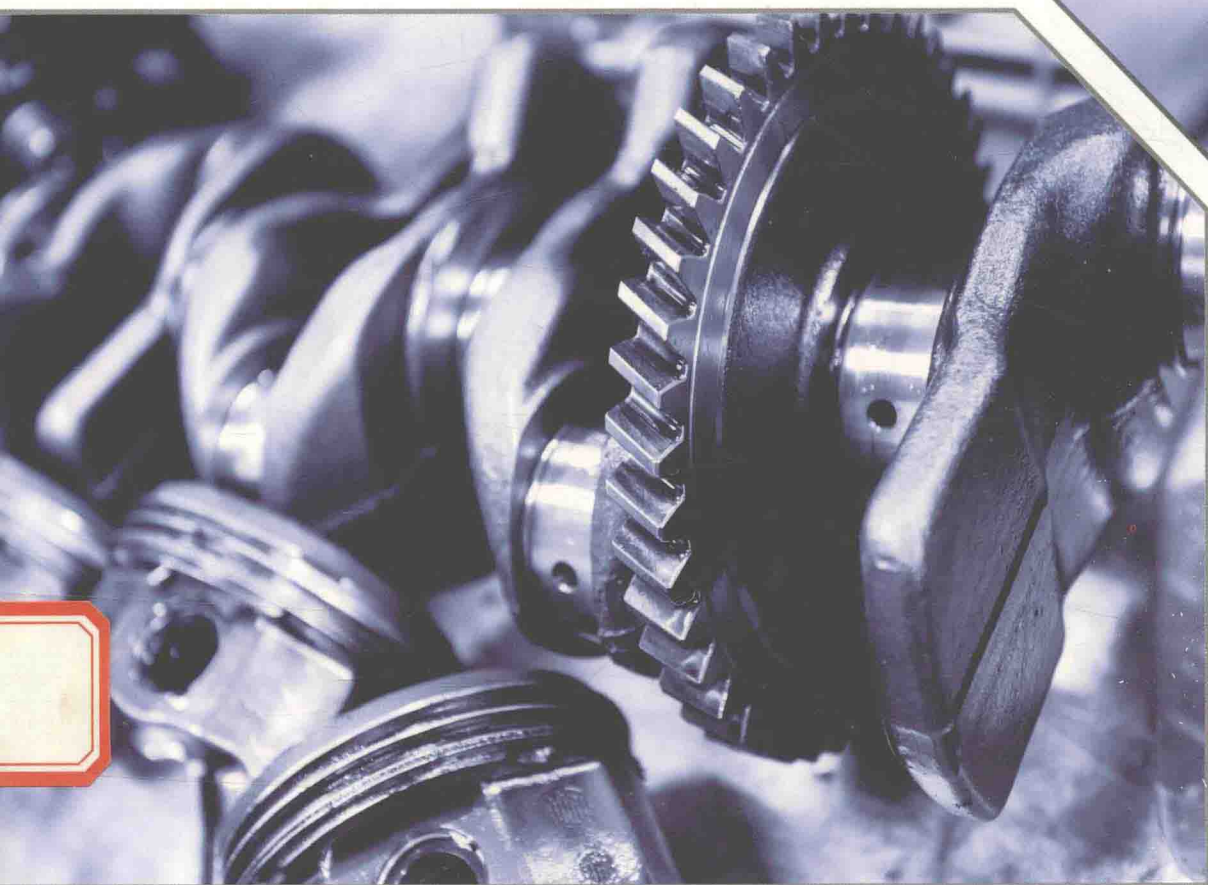


TEACHING MATERIALS  
FOR COLLEGE STUDENTS  
高等学校教材

# 内燃机构造与原理

| Internal Combustion Engine Construction and Fundamentals

冯洪庆 马 永 编



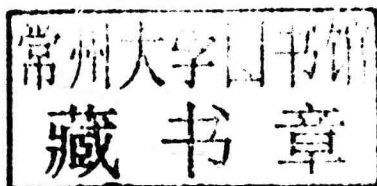
 中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



TEACHING MATERIALS  
FOR COLLEGE STUDENTS  
高等学校教材

# 内燃机构造与原理

冯洪庆 马 永 编



中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

## 图书在版编目(CIP)数据

内燃机构造与原理/冯洪庆,马永编. —东营:

中国石油大学出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-5636-5253-2

I. ①内… II. ①冯… ②马… III. ①内燃机—构造  
②内燃机—理论 IV. ①TK40

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 167441 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 内燃机构造与原理

作 者: 冯洪庆 马 永

---

责任编辑: 秦晓霞(电话 0532—86983567)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

---

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: [shiyoujiaoyu@126.com](mailto:shiyoujiaoyu@126.com)

排 版 者: 青岛友一广告传媒有限公司

印 刷 者: 青岛国彩印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 86983437)

开 本: 185 mm×260 mm 印张: 18.5 字数: 474 千字

版 次: 2016年9月第1版第1次印刷

定 价: 37.00 元

# 前 言

## PREFACE

本书系中国石油大学(华东)规划教材。近年来,我国内燃机工业发展迅速,内燃机保有量显著增加。随着发动机对燃油经济性和排放要求的不断提高,内燃机原理和构造都有了进一步的发展。本书编者结合汽车和工程机械内燃机的发展,在近年来为热能与动力工程、车辆工程等专业讲授发动机课程的基础上,编写了这部讲述内燃机构造和原理的教材,以方便相关专业学生使用。

本书主要包括内燃机构造和原理两部分内容。内燃机构造部分包括绪论、内燃机工作过程、机体组与曲柄连杆机构、配气机构、进排气系统、汽油机燃油供给系统及其点火系统、柴油机燃油供给系统、内燃机润滑系统、冷却系统和起动系统;内燃机原理部分包括内燃机工作指标和性能、内燃机燃料和热化学、内燃机换气过程与缸内气体流动、汽油机混合气的形成与燃烧、柴油机混合气的形成与燃烧、内燃机污染物生成与控制、内燃机使用特性和匹配等。

本书内燃机构造部分由马永编写,内燃机原理部分由冯洪庆编写。初稿完成后,天津大学的李志军教授和山东大学的程勇教授对本书进行了审阅,并提出了宝贵的修改意见。在图片整理和文字校对过程中,研究生王美英、孟祥丰、李会杰、张为文、安铭、张静等给予了帮助,在此一并表示感谢。

在本书编写过程中,我们参考或引用了国内部分学者的教材、文献资料和有关单位的技术资料,在此对这些著作的作者表示衷心感谢。

本书可作为高等院校热能与动力工程专业和车辆工程专业的本科生教材,也可作为从事汽车内燃机研究开发人员的参考书。

由于内燃机涉及面广,加之编者水平有限和时间仓促,书中错误和疏漏之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编者于青岛

2015年1月

# 目 录

## CONTENTS

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第1章 绪 论           | 1  |
| 1.1 热力发动机         | 1  |
| 1.2 内燃机的应用领域      | 2  |
| 1.3 内燃机的发展简史      | 3  |
| 1.4 现代内燃机的发展动向    | 4  |
| 小 结               | 4  |
| 习 题               | 4  |
| 第2章 内燃机概述         | 5  |
| 2.1 内燃机的基本结构和主要名词 | 5  |
| 2.2 四冲程汽油机的工作原理   | 6  |
| 2.3 四冲程柴油机的工作原理   | 7  |
| 2.4 二冲程汽油机的工作原理   | 8  |
| 2.5 二冲程柴油机的工作原理   | 9  |
| 2.6 内燃机分类         | 11 |
| 2.7 内燃机的编号        | 12 |
| 小 结               | 13 |
| 习 题               | 13 |
| 第3章 机体组与曲柄连杆机构    | 14 |
| 3.1 机体组           | 14 |
| 3.2 活塞连杆组         | 22 |
| 3.3 曲轴飞轮组         | 33 |
| 小 结               | 41 |
| 习 题               | 41 |
| 第4章 配气机构          | 42 |
| 4.1 配气机构的组成       | 42 |
| 4.2 配气定时与气门间隙     | 47 |
| 4.3 配气机构的主要零部件    | 48 |
| 小 结               | 60 |
| 习 题               | 60 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第 5 章 进、排气系统 .....           | 61  |
| 5.1 进气系统 .....               | 61  |
| 5.2 排气系统 .....               | 65  |
| 5.3 内燃机增压 .....              | 66  |
| 5.4 排气净化装置 .....             | 69  |
| 5.5 强制曲轴箱通风系统 .....          | 71  |
| 小 结 .....                    | 72  |
| 习 题 .....                    | 72  |
| 第 6 章 汽油机燃油供给系统及其点火系统 .....  | 73  |
| 6.1 汽油机及可燃混合气 .....          | 73  |
| 6.2 电子控制燃油喷射汽油机的燃料供给系统 ..... | 75  |
| 6.3 汽油机燃料供给系统的主要部件 .....     | 79  |
| 6.4 点火系统的工作原理及其分类 .....      | 94  |
| 6.5 半导体点火系统 .....            | 96  |
| 6.6 微机控制点火系统 .....           | 99  |
| 小 结 .....                    | 102 |
| 习 题 .....                    | 102 |
| 第 7 章 柴油机的燃料供给系统 .....       | 103 |
| 7.1 柴油机燃料供给系统的组成及柴油混合气 ..... | 103 |
| 7.2 低压油路部件 .....             | 106 |
| 7.3 喷油泵 .....                | 108 |
| 7.4 调速器 .....                | 113 |
| 7.5 喷油器 .....                | 118 |
| 7.6 电控柴油喷射系统 .....           | 120 |
| 小 结 .....                    | 123 |
| 习 题 .....                    | 123 |
| 第 8 章 内燃机冷却系统 .....          | 124 |
| 8.1 冷却系统的功用及组成 .....         | 124 |
| 8.2 冷却系统的主要零部件 .....         | 125 |
| 小 结 .....                    | 132 |
| 习 题 .....                    | 132 |
| 第 9 章 内燃机的润滑系统和起动系统 .....    | 133 |
| 9.1 内燃机的润滑系统 .....           | 133 |
| 9.2 内燃机起动系统 .....            | 143 |
| 小 结 .....                    | 152 |
| 习 题 .....                    | 152 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第 10 章 内燃机的循环与工作指标 .....     | 154 |
| 10.1 内燃机的理论循环 .....          | 154 |
| 10.2 内燃机的实际循环 .....          | 156 |
| 10.3 内燃机的工作指标 .....          | 159 |
| 10.4 机械效率与机械损失 .....         | 164 |
| 10.5 内燃机热平衡 .....            | 167 |
| 小 结 .....                    | 169 |
| 习 题 .....                    | 169 |
| 第 11 章 内燃机燃料和燃烧 .....        | 170 |
| 11.1 内燃机的常规燃料 .....          | 170 |
| 11.2 内燃机的代用燃料 .....          | 174 |
| 11.3 燃烧热化学与动力学基础 .....       | 177 |
| 小 结 .....                    | 182 |
| 习 题 .....                    | 182 |
| 第 12 章 内燃机换气过程与缸内气体流动 .....  | 183 |
| 12.1 四冲程内燃机的换气过程 .....       | 183 |
| 12.2 内燃机充量系数 .....           | 186 |
| 12.3 内燃机的增压 .....            | 191 |
| 12.4 内燃机缸内的气体流动 .....        | 194 |
| 小 结 .....                    | 197 |
| 习 题 .....                    | 197 |
| 第 13 章 汽油机混合气的形成和燃烧 .....    | 199 |
| 13.1 汽油机的燃烧过程 .....          | 199 |
| 13.2 汽油机混合气的形成 .....         | 205 |
| 13.3 汽油机燃烧室 .....            | 213 |
| 13.4 汽油机稀薄燃烧系统 .....         | 215 |
| 小 结 .....                    | 220 |
| 习 题 .....                    | 220 |
| 第 14 章 柴油机混合气的形成和燃烧 .....    | 221 |
| 14.1 燃烧过程 .....              | 221 |
| 14.2 燃油喷射和雾化 .....           | 226 |
| 14.3 柴油机燃料供给与调节系统的电子控制 ..... | 232 |
| 14.4 混合气的形成和燃烧室 .....        | 236 |
| 14.5 燃烧过程的影响因素 .....         | 240 |
| 14.6 柴油机燃烧技术的发展 .....        | 242 |
| 小 结 .....                    | 245 |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 习 题 .....                        | 245        |
| <b>第 15 章 内燃机污染物的生成与控制 .....</b> | <b>246</b> |
| 15.1 内燃机有害排放物的种类和危害 .....        | 246        |
| 15.2 内燃机污染物排放的生成机理 .....         | 247        |
| 15.3 内燃机排放的机内净化 .....            | 253        |
| 15.4 内燃机排气后处理 .....              | 261        |
| 小 结 .....                        | 271        |
| 习 题 .....                        | 271        |
| <b>第 16 章 内燃机使用特性与匹配 .....</b>   | <b>272</b> |
| 16.1 内燃机工况 .....                 | 272        |
| 16.2 发动机性能测试 .....               | 273        |
| 16.3 内燃机的使用特性 .....              | 276        |
| 16.4 内燃机的功率标定 .....              | 282        |
| 16.5 内燃机与工作机械的匹配 .....           | 282        |
| 小 结 .....                        | 285        |
| 习 题 .....                        | 286        |
| <b>参考文献 .....</b>                | <b>287</b> |



# 第 1 章

## 绪 论

内燃机属于热力发动机的一类,以其热效率高、结构紧凑、机动性强、运行维护简便的优点著称于世。100 多年来,内燃机的发展经久不衰,目前世界上内燃机的拥有量大大超过了任何其他类型的热力发动机,在国民经济中占有相当重要的地位。现代内燃机更是成为当今用量最大、用途最广的最重要的动力机械。

### 1.1 热力发动机

热力发动机是将热源的部分热能转化为机械能的机器,简称热机。热源可以是烧煤的蒸汽炉、汽车发动机的燃烧室,也可以是太阳能的蒸汽炉、地热和核反应堆。机械设备运行的动力绝大多数来源于热力发动机。

根据燃烧器安装位置的不同,热机可分为外燃机和内燃机两类。

(1) 外燃机是燃料在机器外部燃烧的发动机,包括蒸汽机、汽轮机和核动力装置等。

(2) 内燃机是燃料直接在机器内部燃烧的发动机,包括往复式活塞式柴油机、汽油机、燃气轮机和喷气式发动机等。

内燃机的主要优点:内燃机的工质在循环中的平均吸热温度远高于蒸汽机中蒸汽的平均吸热温度,因此内燃机的热效率通常高于蒸汽机,一般高 20% ~ 30%,甚至更高;内燃机起动迅速,中、小型内燃机通常在几十秒至几分钟内即能起动,并投入全负荷运转,机动性强;内燃机用水极少或根本不用水,运行维护比较简便。

内燃机的主要缺点:对燃料要求高,不能燃用劣质燃料和固体燃料;由于间歇换气以及制造上的困难,单机功率的提高受到限制,现代内燃机的最大功率一般小于 4 万 kW,而燃气轮机的单机功率可以达到数十万千瓦;内燃机低速运转时输出转矩下降较多,往往不能适应被带负荷的转矩特性;内燃机不能反转,故在许多场合下需设置离合器和变速机构,使系统复杂化,而活塞式蒸汽机的低速与反转性能显著优于内燃机;此外,一般热力发动机都存在所谓的“公害性”,而内燃机的噪声和废气中的有害成分对环境污染尤其突出。

在常规动力装置形式的基础上,经过不断的演变和改进,产生了一些新的动力装置类型,如 AIP(Air Independent Propulsion)系统。

AIP 系统,即不依赖空气推进系统,根据其工作原理不同又可分为:热气机(SE-AIP)、闭式循环柴油机(CCD-AIP)、燃料电池(FC-AIP)、闭式循环汽轮机(MESMA-AIP)等。AIP 系统的发展是常规潜艇发展史上的一次“动力革命”,经过较长时间的发展,AIP 系统目前已基本具备了如同核潜艇那样的长时间潜航能力,使诞生了百余年的常规潜艇又一次焕发了生机。

对于 AIP 系统,各国根据其国情发展各有侧重,其中热气机系统和燃料电池系统已经投入使用。

热气机 AIP 系统又称斯特林系统,主要由斯特林发动机、发电机、液氧系统、供油系统、工质系统及控制系统等组成。热气机的技术比较成熟,工作时噪音低、振动小,溶解在海水中的废气可直接排出艇外。

燃料电池系统是另一种发展较为成熟的 AIP 系统,由固态聚合物燃烧装置、液氧系统、氢系统、热交换器、海水冷却器、淡水冷却泵、冷却水箱、催化剂罐、造水箱等装置和燃料电池组件的电气设备构成。该系统的特点是装置中无转动机械部件,因而没有噪音;无机械能和电能损失,电能转化效率高达 70%;能量转换温度低,工作环境较安全。

## 1.2 内燃机的应用领域

内燃机热效率高、适应性好、功率范围广,已广泛应用于工农业、交通运输业和国防建设事业等方面。

由于内燃机的使用范围如此广泛,世界各国的需求量十分巨大并不断增长。在各国经济部门和国防工业中,内燃机都占有极其重要的地位。

### (1) 航空动力。

燃气轮机和喷气式发动机是航空中应用的主要动力装置。优点:重量轻,尺寸小,结构简单,扭矩特性好,振动小及排气中的有害气体少。缺点:热效率低,燃料消耗高。

### (2) 陆路交通。

内燃机的发展使得人类的陆路交通产生了一个质的飞跃,从此“以车代步”对许多人来说不再是一个不可企及的愿望。

### (3) 工程机械。

内燃机在工程机械、叉车起重机动力及推土机等方面由于其优越的扭矩特性也起着举足轻重的作用。

### (4) 船舶。

在内河船舶、远洋海轮方面由于经济性好,柴油机也是主要动力。

### (5) 军用舰艇。

虽然各国均在大力发展核能燃气轮机动力装置,但在轻型舰艇上,柴油机仍占优势。核潜艇、导弹快艇、鱼雷快艇、巡逻艇、扫雷艇、登陆艇及大部分常规潜艇和军辅船仍以柴油机为主要动力,只有少数水面舰艇采用柴-燃联合装置。

### (6) 备用电站。

“三遥”自动化柴油机组是指能用计算机对机组进行遥控、遥测、遥信的新型智能柴油发电机组。它的控制屏采用远程通信接口,可经 MODEN 和电话线与上位机实现“三遥”。机组采用闭式风扇水循环冷却系统,可在各种环境中可靠工作,特别适用于邮电系统和智能大厦作应急电源、部队战备无人值守电源。

(7) 农用机械。

内燃机在农业方面的应用是农业走向机械化、集约化的一个重要推动力,是农业现代化必不可少的一个环节。

## 1.3 内燃机的发展简史

内燃机的发展已有 100 多年的历史,通过长期的改进和提高,已经发展得比较完善。其发展历程简介如下:

1824 年,卡诺(法国工程师)发表了热力发动机的经典理论——卡诺原理。

1866 年,奥托(德国工程师)提出了四冲程内燃机的“奥托循环”理论。

1879 年,奔驰(德国工程师)首次研制成功火花塞点火内燃机。

1883 年,戈·戴姆勒(德国工程师)发明热管点火的立式汽油机。

1897 年,鲁道夫·狄塞尔(德国著名热机工程师)最早制成了柴油机。

1903 年,内燃机首先被装在船上,1907 年,用于潜艇的正反转的柴油机试验成功,1912 年,远洋货轮上的柴油机首次远航试验成功。

1926 年,有人设计出用排气能量将进气压缩的废气涡轮增压器。涡轮增压器利用发动机排出的废气能量,经过涡轮变为转子的回转机械能,从而带动压气机高速旋转,将新鲜空气压缩进气缸,从而提高发动机的功率。

内燃机增压的发展起源可追溯到 1885 年,戈·戴姆勒在发明、制造煤气机和汽油机时,已开始考虑利用内燃机增压。鲁道夫·狄塞尔在柴油机发明专利中也提出了安装增压泵以提高功率和热效率的想法。

20 世纪初,艾·比希申请专利,开创了涡轮增压的历史。最初他采用涡轮机、柴油机和压气机同轴连接,后改为涡轮单独驱动压气机的方法。

1923 年,德国客船上安装的涡轮增压四冲程柴油机把柴油机的功率从 1 288 kW 提高到 1 840 kW。

1925 年,艾·比希获得了脉冲增压专利,并在试验中获得了成功,功率可提高 50%~100%。

从 20 世纪 50 年代起,随着涡轮增压器效率的改进,柴油机采用涡轮增压技术后的功率和效率都得到了很大提高,从而被广泛地推广应用。

1936 年,梅塞德斯-奔驰公司制造了第一台装有柴油机的轿车。

从 1950 年起,开始在柴油机上采用增压方式。

如今,已经无机不增压,增压后,柴油机的功率能提高 1~3 倍。废气涡轮增压对提高柴油机性能做出了重大的贡献。增压器通过提高发动机的进气充气密度,提高平均有效压力来提高功率和改善经济性,主要用于柴油发动机。在汽车发动机中采用比较普遍的就是废气涡轮增压系统。

采用废气涡轮增压器不仅可以大大提高发动机功率,缩小外形尺寸,节约原材料,降低燃油消耗,而且可以使排烟浓度降低,减少废气中 CO, HC 以及 NO<sub>x</sub> 的含量,从而降低发动机废气排放。另外,由于燃烧压力升高率降低,发动机工作柔和,噪声也比较小。

## 1.4 现代内燃机的发展动向

### 1.4.1 内燃机的主要发展趋势

(1) 采取提高转速、增压等强化措施以及改善燃烧过程、提高机械效率等方法,进一步提高内燃机的动力性和经济性。

(2) 改进结构,采用新技术、新材料和新工艺,提高内燃机的耐久性和可靠性,并降低制造成本。

(3) 降低噪声、净化废气、减少振动,以控制内燃机对环境的污染,改善劳动条件。探求燃用重油及固体燃料的途径,以克服不能燃用劣质燃料的缺点。

(4) 现代船用柴油机的发展趋势:提高功率,降低油耗,提高可靠性,减少磨损,延长寿命,减少噪音和振动,降低重量和尺寸,实行自动监控等。

### 1.4.2 主要发展方向

(1) 广泛采用增压、中冷与多气门技术。

(2) 实现高压喷射与电控,优化喷油规律。

(3) 实现废气再循环(EGR)与排气后处理技术(机外净化)。废气再循环可降低  $\text{NO}_x$ ,但不利于燃油经济性,若能实现 EGR 冷却与电控,更有利于改善综合性能。

(4) 优化结构设计,减少摩擦与附件功率损失,提高机械效率及柴油机的有效效率。

目前,内燃机在技术上日臻完善,各项指标均达到了相当高的水平。例如,柴油机的单机功率为  $1 \sim 36\,000 \text{ kW}$ ,热效率最高达  $46\%$ ,燃油消耗率降低到  $204 \sim 252 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ;汽油机的最低燃油消耗率达  $280 \sim 300 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ;高速柴油机及车用汽油机的功率重量比都减小到  $1.3 \sim 2.7 \text{ kg}/\text{kW}$  等。

## 小 结

本章概括介绍了热力发动机和内燃机的概念、内燃机的应用领域、发展简史及其发展趋势。

内燃机是两类热机之一。内燃机历经几代人的不断改进,以其高效、轻便等特点,逐步取代了引发工业革命的蒸汽机,广泛应用于交通运输、工农业和军事领域。

## 习 题

1-1 什么是热机? 内燃机有哪些优缺点?

1-2 内燃机广泛应用于哪些领域?

# 第 2 章

## 内燃机概述

### 2.1 内燃机的基本结构和主要名词

#### 2.1.1 内燃机的基本结构

内燃机主要由气缸盖、气缸体、活塞、连杆、曲轴、排气门和进气门等组成。内燃机单缸往复活塞式内燃机基本结构如图 2-1 所示, 往复式内燃机示意图如图 2-2 所示。

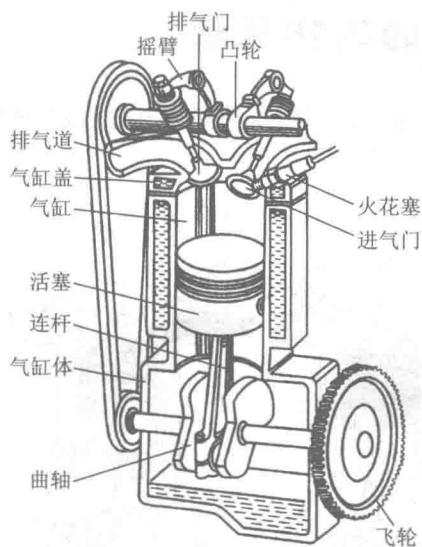


图 2-1 单缸往复活塞式内燃机基本结构

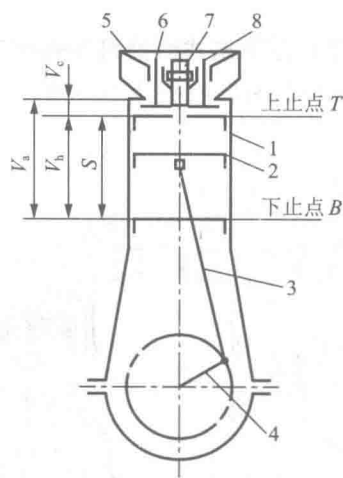


图 2-2 往复式内燃机示意图

1—气缸; 2—活塞; 3—连杆; 4—曲轴; 5—气缸盖;  
6—进气门; 7—火花塞或喷油嘴; 8—排气门

#### 2.1.2 内燃机的主要名词

(1) 上止点( $T$ ): 活塞距曲轴中心最远的位置。

(2) 下止点( $B$ ): 活塞距曲轴中心最近的位置。

(3) 活塞冲程( $S$ ): 上、下止点间的距离。

(4) 压缩室容积( $V_c$ ): 活塞位于上止点时, 活塞顶部与缸盖间的容积又称为燃烧室容积。

(5) 气缸工作容积( $V_h$ ): 活塞上、下止点之间的容积称为一个气缸的工作容积, 由下式表示:

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

式中,  $V_h$  为气缸工作容积, L;  $S$  为活塞冲程, mm;  $D$  为气缸直径, mm。

(6) 气缸的最大容积( $V_a$ ): 活塞在下止点时气缸的容积, 即气缸工作容积与压缩容积之和:

$$V_a = V_h + V_c$$

(7) 气缸的总工作容积  $V$ , 也称总排量, 是指内燃机所有气缸工作容积的总和。即

$$V = i V_h$$

式中,  $V$  为总工作容积, L;  $i$  为气缸数。

(8) 压缩比  $\varepsilon$ : 气缸最大容积与压缩室容积的比值。

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_h + V_c}{V_c} = \frac{V_h}{V_c} + 1$$

压缩比表示活塞由下止点移动到上止点过程中气缸中气体被压缩的程度。

## 2.2 四冲程汽油机的工作原理

四冲程往复式汽油机在四个活塞行程内进行进气、压缩、做功和排气过程, 完成燃料的化学能到曲轴旋转机械能的转换, 如图 2-3 所示。

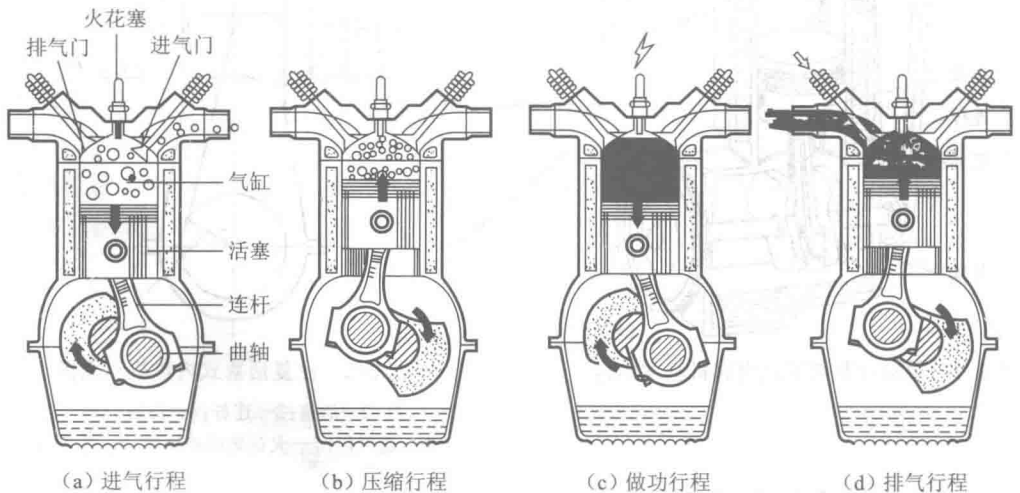


图 2-3 四冲程汽油机的工作原理示意图

### 2.2.1 进气冲程

活塞在曲轴的带动下由上止点移至下止点,此时排气门关闭,进气门开启。在活塞移动过程中,气缸容积逐渐增大,气缸内形成一定的真空吸力,空气和汽油的混合物通过进气门进入气缸,并在气缸内进一步混合均匀。

因为进气系统有阻力,所以在进气结束时气缸内的气体压力低于大气压力,为 $0.08 \sim 0.09 \text{ MPa}$ 。由于进气门、气缸壁、活塞等高温零件以及前一个排气过程残留在气缸内的高温废气对混合气的加热,致使在进气结束时气缸内的气体温度高于大气温度,通常达到 $320 \sim 380 \text{ K}$ 。

### 2.2.2 压缩冲程

进气行程结束后,曲轴带动活塞由下止点移向上止点,这时,进、排气门均关闭,随着活塞移动,气缸容积不断减小,气缸内的混合气被压缩,其压力和温度同时升高。当活塞到达上止点时,气缸内气体的压力为 $0.8 \sim 1.5 \text{ MPa}$ ,温度为 $600 \sim 750 \text{ K}$ 。

压缩气体有利于混合气的迅速燃烧并可提高内燃机的热效率。一般汽油机的压缩比 $\varepsilon = 7 \sim 10$ , $\varepsilon$ 太大汽油机容易发生不正常燃烧,如爆燃。

### 2.2.3 做功冲程(燃烧膨胀冲程)

当压缩行程结束时,安装在气缸盖上的火花塞产生电火花,将气缸内的可燃混合气点燃,火焰迅速传遍整个燃烧室,同时放出大量热能,这时,进、排气门仍然关闭,燃烧气体的压力和温度迅速升高,高压气体推动活塞由上止点移向下止点,并通过连杆推动曲轴旋转做功。

在做功行程中,燃烧气体的最大压力可达 $3.0 \sim 6.5 \text{ MPa}$ ,最高温度可达 $2\,200 \sim 2\,800 \text{ K}$ ,随着活塞向下止点移动,气缸容积不断增大,气体压力和温度逐渐降低。在做功行程结束时,压力为 $0.35 \sim 0.5 \text{ MPa}$ ,温度为 $1\,200 \sim 1\,500 \text{ K}$ 。

### 2.2.4 排气冲程

活塞到达下止点前后,排气门开启,进气门仍然关闭,燃烧后的废气靠其自身压力从排气道喷出,随后曲轴通过连杆带动活塞由下止点移向上止点,将废气继续挤出气缸。当活塞到达上止点时,排气行程结束,排气门关闭。

在排气行程结束时,在燃烧室内尚残留少量废气,称为残余废气。因为排气系统有阻力,所以残余废气的压力比大气压力略高,压差为 $0.105 \sim 0.120 \text{ MPa}$ ,温度为 $900 \sim 1\,100 \text{ K}$ 。

## 2.3 四冲程柴油机的工作原理

四冲程柴油机的工作循环同样包括进气、压缩、做功和排气四个过程。在活塞各个行程中,进、排气门的开闭和曲柄连杆机构的运动与汽油机完全相同,只是由于柴油和汽油使用性能的不同,柴油机和汽油机在混合气形成方法及着火方式上有着根本的差别,其工作原理如图2-4所示。因此,在叙述柴油机工作原理时只介绍它与汽油机的不同之处。

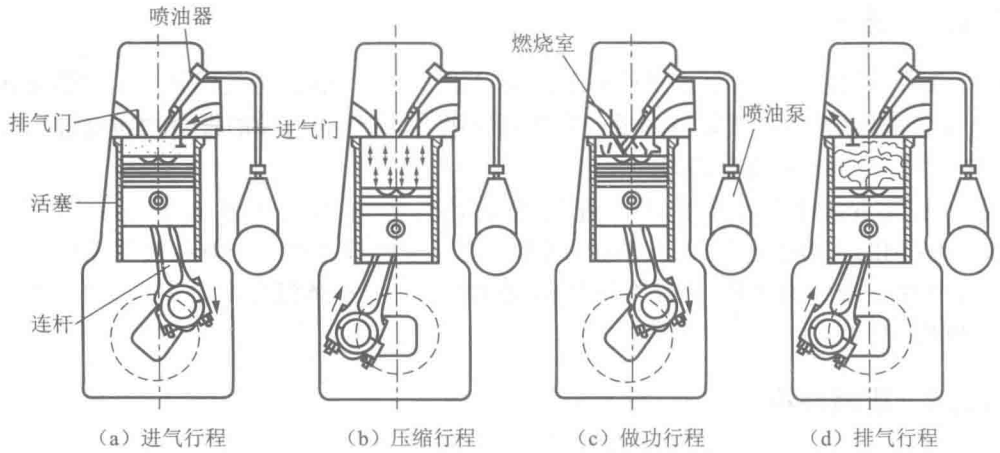


图 2-4 四冲程柴油机工作原理示意图

### 2.3.1 进气冲程

在柴油机进气行程中,吸入气缸的只是纯净的空气。由于柴油机进气系统的阻力较小,残余废气的温度较低,因此在进气行程结束时气缸内气体的压力较高,为  $0.085 \sim 0.095 \text{ MPa}$ ; 温度较低,为  $310 \sim 340 \text{ K}$ 。

### 2.3.2 压缩冲程

因为柴油机的压缩比大,所以在压缩行程结束时气体压力可高达  $3 \sim 5 \text{ MPa}$ , 温度可达  $750 \sim 1000 \text{ K}$ 。

### 2.3.3 做功行程(燃烧膨胀冲程)

在压缩行程结束时,喷油泵将高压柴油送入喷油器,并通过喷油器将其喷入燃烧室。因为喷油压力很高,喷孔直径很小,所以喷出的柴油呈细雾状,细微的油滴在炽热的空气中迅速蒸发汽化,并借助于空气的运动,与空气迅速混合,形成可燃混合气。由于气缸内的温度远高于柴油的自燃点,因此柴油随即自行着火燃烧。燃烧气体的压力、温度迅速升高,高压气体推动活塞做功,进而推动曲轴旋转。

在做功行程中,燃烧气体的最大压力可达  $6 \sim 9 \text{ MPa}$ , 最高温度可达  $1800 \sim 2200 \text{ K}$ 。当做功行程结束时,压力为  $0.2 \sim 0.5 \text{ MPa}$ , 温度为  $1000 \sim 1200 \text{ K}$ 。

### 2.3.4 排气冲程

在排气结束时气缸残余废气的压力为  $0.105 \sim 0.12 \text{ MPa}$ , 温度为  $700 \sim 900 \text{ K}$ 。

## 2.4 二冲程汽油机的工作原理

图 2-5 所示为曲轴箱换气式二冲程汽油机的工作原理示意图。由图可见,曲轴箱换气式二冲程汽油机不设进、排气门,而是在气缸的下部开设三个孔:进气孔、排气孔和扫气孔,并由活塞来控制三个孔的开闭,以实现换气过程。



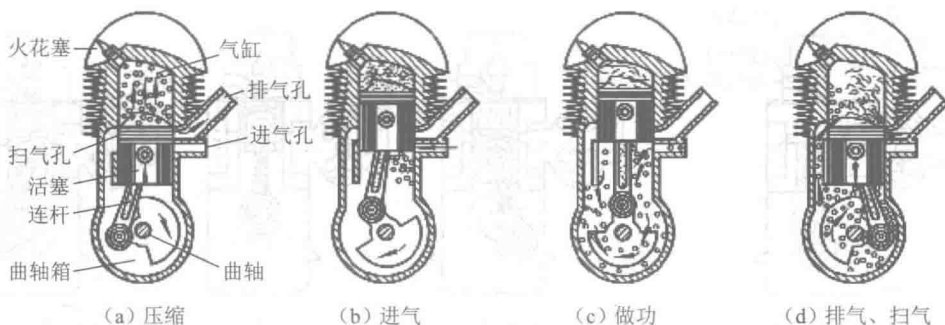


图 2-5 曲轴箱换气式二冲程汽油机的工作原理示意图

### 2.4.1 第一行程

活塞在曲轴带动下由下止点移至上止点。当活塞还处于下止点时,曲轴箱内的可燃混合气已被压缩。这时,进气孔被活塞封闭,排气孔和扫气孔开启,混合气靠自身压力经扫气孔进入气缸,并扫除其中的废气。随着活塞向上止点运动,活塞头部首先将扫气孔关闭,扫气终止,但此时排气孔尚未关闭,仍有部分废气和可燃混合气经排气孔继续排出,称为额外排气。当活塞将排气孔也关闭之后,气缸内的可燃混合气开始被压缩,如图 2-5(a)所示,直至活塞到达上止点为止,压缩过程结束。

在活塞到达上止点之前,随着活塞上移,曲轴箱的容积增大,在曲轴箱内形成一定的真空。当活塞裙部将进气孔开启时,空气和汽油的混合物被吸入曲轴箱,进气开始,如图 2-5(b)所示,空气和汽油的可燃混合气在曲轴箱内进一步混合,形成可燃混合气。

### 2.4.2 第二行程

活塞由上止点移至下止点。在压缩过程结束时,火花塞产生电火花,将气缸内的可燃混合气点燃,如图 2-5(c)所示,燃烧气体膨胀做功。此时,排气孔和扫气孔均被活塞关闭,唯有进气孔仍然开启,空气和汽油经进气孔继续流入曲轴箱,直至活塞裙部将进气孔关闭为止。随着活塞继续向下止点运动,曲轴箱容积不断缩小,其中的混合气被预压缩。

此后,活塞头部先将排气孔开启,膨胀后的燃烧气体已成废气,经排气孔排出,至此做功过程结束,开始先期排气。随后活塞又将扫气孔开启,经过预压缩的可燃混合气从曲轴箱经扫气孔进入气缸,如图 2-5(d)所示,扫除其中的废气,开始扫气过程,这一过程将持续到下一个活塞行程中扫气孔被关闭时为止。

## 2.5 二冲程柴油机的工作原理

图 2-6 所示为带扫气泵的气门-气孔式直流扫气二冲程柴油机的工作原理示意图。

### 2.5.1 第一行程

活塞由下止点移向上止点。当活塞还处于下止点位置时,进气孔和排气门均开启。扫气泵将纯净的空气增压到  $0.12 \sim 0.14 \text{ MPa}$ ,经空气室和进气孔送入气缸,扫除其中的废气。废气经气缸顶部的排气门排出,如图 2-6(a)所示。当活塞上移将进气孔关闭的同时,排气门也