

高等学校教材

内燃机

GAODENGXUEXIAOJIAOCAI

李 刚 主编

NEIRANJI

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



内 容 简 介

本书重点介绍了内燃机的构造与原理。全书共分为十二章,分别介绍了内燃机的实际工作过程与性能指标、内燃机的充量变换、曲柄连杆机构、配气机构、汽油机燃烧、柴油机燃烧、汽油机点火系、冷却系、润滑系、起动系、内燃机增压、内燃机特性与调节。本书力求体现当前科技的新技术、新工艺、新材料。

本书可作为高等学校机械设计及自动化专业和车辆工程、内燃机工程专业本科生教材,也可供相关技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机/李刚主编. —北京:中国铁道出版社,2006. 12
ISBN 7-113-06717-4

I. 内… II. 李… III. 内燃机-高等学校-教材
IV. TK4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 155424 号

书 名:内 燃 机

作 者:李 刚 主 编

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:阙济存

编辑部电话:(010)51873133

封面设计:薛小卉

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787mm×960mm 1/16 印张:17.25 字数:341 千

版 本:2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~3000 册

书 号:ISBN 7-113-06717-4/TH·120

定 价:25.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

联系电话:(市电)010-51873124 (路电)021-73124

网址:<http://www.tdpress.com>

兰州交通大学“十五”规划教材

编审委员会

主 任:任恩恩

副主任:王晓明 盖宇仙

委 员:(按姓氏笔划排名)

王 兵 王起才 朱 琨

陈宜吉 吴庆记 谢瑞峰

主 编:李 刚

出版说明

近年来,兰州交通大学认真贯彻落实教育部有关文件精神,不断推进教育教学改革。学校先后出资数百万元,设立了教学改革、专业建设、重点课程(群)建设、教材建设等项基金,并制定了相应的教学改革与建设立项计划、项目管理及奖励办法等措施。根据培养“基础扎实、知识面宽、能力强、素质高”的高级专门人才的总体要求,学校各院(部)认真组织广大教师积极参加教学改革与建设,开展系统的研究与实践,取得了一系列教学改革与建设成果。

通过几年来的深化改革,各学科专业制定了新的人才培训目标和规格,构建了新的人才培养模式和知识、能力、素质结构,不断修订完善专业教学计划和教学大纲。教学内容和课程体系的改革是教学改革的重点和难点,学校投入力量最大,花费时间最长,投入精力最多,取得的成效也最为显著。突出反映在教材建设方面,学校在各学科专业课程整合、优选教材的基础上,制定了“十五”教材建设规划,积极组织教材编写工作,通过专家论证和推荐,优化选题,优选编者,以保证教材编写质量,最后由学校教材编审委员会审定出版,确保出版教材教育思想的正确性,内容的科学性和先进性、形式的新颖性以及面向使用专业的针对性和适用性,近年来,通过广大教师的努力,相继编著了一批高水平、高质量、有特色的教材(包括文字教材和电子教材),这些教材一般是一些学术造诣较深、教学水平较高、教学经验比较丰富的教师担任主编,骨干教师参编,同行专家主审而定稿的。在教材中凝聚了编著教师多年的教学、科研成果和心血,这是他们在教学改革和建设中对高等教育事业做出的重要贡献。

本教材为学校“十五”教材建设资助计划项目,并通过了学校教材编审委员会审定。希望该教材在教学实践过程中,广泛听取使用意见和建议,适时进一步修改、完善和提高。

兰州交通大学“十五”规划

教材编审委员会

2003年4月

前 言

从1860年,莱诺依尔(J. J. E. lenoir)发明了大气压力式内燃机到如今,内燃机经历了140多年的发展史。经过这些年的不断研究和改进,已发展到相当完善的程度,广泛应用于工业、农业、交通运输及国防等各个领域。

内燃机自发明以来,一直把提高动力性,改善经济性以及提高可靠性和耐久性作为主要研究目标。但是,随着内燃机的保有量及生产量的不断增加,对环境的污染越来越严重,而且由于石油危机导致原油价格成倍增长,这些严峻的问题给内燃机的研究提出了新的要求,使内燃机的研究目标发生了根本变化。除了提高动力性,改善经济性以及提高可靠性和耐久性外,影响内燃机设计和运行的主要因素是净化废气、降低噪声、降低燃油消耗率和采用多种燃料。

随着我国国民经济的不断发展,作为国民经济支柱产业之一的内燃机工业发展异常迅猛,针对内燃机发展的新特点,一些新技术的采用,新工艺、新材料的应用,使内燃机各方面性能有了较大的发展。为了反映内燃机领域新的成果和技术发展的方向,考虑到当前教学改革要求和学生专业面的拓宽,我们编写了这本《内燃机》教材。

本书重点介绍了内燃机的构造与原理。在编写中,注重更新内容,拓宽专业面,反映国内、外最新的技术和成果;同时,本书力求做到:重点突出,结构完整,通俗易懂,理论和实践相结合,力图使学生通过本书的学习在知其然的基础上知其所以然。

在此书中,我们将内燃机原理和构造并在一起编写。以理论为先导然后再深入探讨构造方面的问题,将原理和构造有机的结合在一起,便于理解。本书内容主要包括:内燃机发展及应用、内燃机原理、内燃机热力循环、内燃机性能指标、内燃机冲量更换、内燃机主要机构及系统原理及构造、内燃机增压、内燃机特性与调节等。

本书可作为高等学校机械设计及其自动化专业本科生教材,也可作为车辆工程、内燃机工程等专业的教学用书。同时也适合从事内燃机工作的专业人员阅读参考。

本书由兰州交通大学李刚副教授主编,并具体编写了第三、四、八、九、十一章。参加编写工作还有:兰州交通大学曹茹副教授(绪论、第一章、第二章、第五章);兰州交通大学徐永胜副教授(第六章、第七章、第十章、第十二章)。兰州交通大学姜国栋教授主审,提出了许多宝贵的意见,并一直关注和支持本书的编写和出版。在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,我们参考或引用了国内有关工厂、科研单位的相关资料和公开出版的书籍和文章,在此一并表示感谢。

本书编写时间紧迫,调查研究不够,再加上我们水平有限,书中难免有不妥和疏漏之处,敬请读者指正。

编 者

2006年5月

常用符号表

B ——每小时耗油量	p_e ——平均有效压力
b_e ——有效燃油消耗率	p_i ——平均指示压力
b_i ——指示燃油消耗率	p_o ——大气压力
c_p ——比定压热容	p_s ——进气终点压力
c_v ——比定容热容	p_b ——增压压力
D ——气缸直径	p_r ——残余废气压力
F_g ——气体作用力	p_s ——进气状态的压力
F_j ——往复运动惯性力	p_z ——最高燃烧压力
F_r ——旋转离心力	Q ——热量
ΣF ——总作用力	R ——曲柄半径
g_b ——每循环供油量	S ——活塞行程
H_u ——燃料的低热值	T_s ——进气终点温度
i ——气缸数	T_s ——进气状态温度
k ——等熵指数	V_c ——燃烧室容积
K_m ——转矩适应性系数	V_h ——气缸工作容积
K_n ——转速适应性系数	V_s ——气缸总容积
L ——连杆长度, 气缸中心距	V_H ——内燃机排量
L_o ——1kg 燃料完全燃烧所需的理论空气量	α ——空燃比
M ——扭矩	θ ——曲柄夹角
M_s ——平均进气马赫数	γ ——残余废气系数, 与气缸夹角
M_e ——内燃机有效转矩	ϵ ——压缩比
m ——质量	ω ——曲轴旋转角速度
m_j ——往复运动质量	η_{et} ——有效热效率
m_r ——旋转运动质量	η_{it} ——指示热效率
n ——发动机转速	η_m ——机械效率
P ——标定功率	η_s ——扫气效率
P_i ——指示功率	η_t ——循环热效率
P_e ——有效功率	η_v ——充气系数
P_L ——升功率	θ_{ij} ——喷油提前角
P_m ——机械损失功率	θ_{is} ——供油提前角
	θ_{ig} ——点火提前角

λ ——压力升高比, R/L (连杆比)

λ_k ——增压度

ρ ——初始膨胀比

ρ_s ——进气密度

τ ——冲程数

τ_i ——滞燃期(ms)

π_k ——增压比

ϕ_a ——过量空气系数

ϕ_c ——充量系数

ϕ_k ——过量扫气系数

φ ——曲轴转角

φ_i ——滞燃期($^{\circ}\text{CA}$)

80	绪论	1
701	第一节 内燃机的发展及应用	1
801	第二节 内燃机工作原理	4
111	第三节 内燃机的构造	12
	第四节 内燃机的标示与型号命名	14
	复习思考题	17
	第一章 内燃机的实际工作过程与性能指标	18
28	第一节 内燃机的理想循环	18
08	第二节 内燃机的燃料及其热化学	20
1	第三节 内燃机的实际循环	28
61	第四节 内燃机的性能指标	34
	第五节 机械损失与机械效率	40
51	复习思考题	44
	第二章 内燃机的换气过程	46
301	第一节 四冲程内燃机的换气过程	46
06	第二节 提高换气性能的措施	52
70	第三节 二冲程内燃机的换气	59
1	复习思考题	63
51	第三章 曲柄连杆机构	64
3	第一节 机构的工作条件	64
	第二节 曲柄连杆机构	65
05	第三节 曲柄连杆机构力与力矩	83
71	第四节 平衡与扭转振动	85
01	复习思考题	96
81	第四章 配气机构	97
71	第一节 配气机构的功用与组成	97

第二节	配气机构的结构	98
第三节	二冲程内燃机换气	107
第四节	驱动机构	108
第五节	进、排气系统	111
复习思考题		113

第五章 汽油机燃烧

第一节	汽油机混合气形成	114
第二节	汽油机的正常燃烧	119
第三节	汽油机的不正常燃烧	122
第四节	影响燃烧过程的因素	125
第五节	汽油机的燃烧室	130
第六节	汽油机的排放污染	135
第七节	汽油喷射与控制	139
复习思考题		144

第六章 柴油机燃烧

第一节	柴油机燃料供给与调节系统概述	145
第二节	柴油机的燃烧过程	151
第三节	柴油机的喷射与雾化	156
第四节	柴油机燃烧室	160
第五节	影响燃烧过程的因素	167
第六节	柴油机的排放污染	171
第七节	柴油机电控技术	172
复习思考题		175

第七章 汽油机的点火系

第一节	点火系与汽油机性能	176
第二节	点火系的类型与性能要求	177
第三节	蓄电池点火系统的主要部件	179
第四节	电子点火系	186
第五节	汽车电源	191
复习思考题		197

第八章 冷却系	198
第一节 冷却系的功能	198
第二节 水冷系	199
第三节 冷却系的调节	206
第四节 风冷系	208
复习思考题	209
第九章 润滑系	211
第一节 内燃机润滑系	211
第二节 润滑系的主要部件	215
第三节 曲轴箱通风	220
复习思考题	221
第十章 起动系	222
第一节 起动条件和起动方式	222
第二节 电动机起动	223
第三节 改善起动性能的措施	227
复习思考题	230
第十一章 内燃机增压	231
第一节 增压技术概述	231
第二节 废气涡轮增压器	234
第三节 废气涡轮增压系统	242
第四节 涡轮增压器与内燃机的匹配	246
复习思考题	250
第十二章 内燃机特性与调节	251
第一节 负荷特性	251
第二节 速度特性	253
第三节 万有特性	261
复习思考题	262
参考文献	263



绪 论

凡是将燃料燃烧所释放的热能通过一定的机构使之转变为机械功的装置称为热机。蒸汽机、汽轮机、热气机、活塞式内燃机、煤气轮机等都属于这个范畴。其中，燃料燃烧热能通过其他介质推动机械装置做功，这一类发动机称为外燃机，如蒸汽机、汽轮机都属于这一类。凡是燃料燃烧后的产物直接推动机械装置做功的发动机称为内燃机，如汽油机、柴油机、燃气轮机都属于这一类。通常所说的内燃机多指汽油机和柴油机。

第一节 内燃机的发展及应用

一、内燃机的出现和发展

1784年英国的瓦特(J. Watter)发明了蒸汽机，成功实现了热能向机械能的转变，极大的推动了工业革命的发展。内燃机出现于19世纪，由于其在经济性、动力性、比质量、寿命及可靠性方面具有蒸汽机无可比拟的优越性，从20世纪40年代开始全面进入内燃机时代。

内燃机的出现可以追溯到1860年，莱诺依尔(J. J. E. lenoir)首先发明了一种大气压力式内燃机，煤气和空气在活塞的上半个行程被吸入气缸，然后被火花点燃，后半个行程为膨胀行程，燃烧的煤气推动活塞下行膨胀做功，活塞上行时开始排气行程，这种发动机热效率低于5%，最大功率为4.5 kW。

为了克服莱诺依尔提出的这种大气压力式内燃机热效率低、质量大的缺点，奥托(Nicolaus A. Otto)提出了一种以煤气为燃料，用电火花点燃的四冲程内燃机，即进气、点火前的压缩、膨胀与排气，1876年投入运行，这种发动机的热效率提高到了12%~14%，这一成就被认为是内燃机发展史上的里程碑。在1890年前英国的克拉克(Dugald Clerk)和罗伯逊(James Robson)、德国的卡尔·奔驰(Karl Benz)成功地发明了二冲程内燃机，即在膨胀行程末期和压缩行程初期进行进气和排气行程。二冲程内燃机与四冲程内燃机相比，具有较高的单位容积功率和较均匀的转矩，并且结构简单、使用维修方便；但是它的燃油及润滑油消耗量较高，冷却较困难和耐用性较差。1892年德国的工程师鲁道夫·狄塞尔(Rudolf Diesel)提出了一种新型内燃机的工作原理，即在压缩终了将液体燃油喷入缸内，利用压缩终了气体的高温将燃油点燃，它可以采用大的压缩比和膨胀比，没有爆燃，热效率可以比当时其他的内燃机高一倍。在1897年他研制成第一台柴油机。

内燃机自发明以来一直把提高动力性、改善经济性以及提高可靠性及耐久性作为努力的目标,不断地进行研究改进。但是,随着车用内燃机生产量和保有量的迅速增加,汽车对环境的污染越来越严重,严重制约了经济的发展。20世纪40年代在洛杉矶出现汽车所造成的空气污染——光化学烟雾事件。内燃机排放中的氮氧化合物、一氧化碳、烟气微粒以及碳氢化合物对大气环境构成严重的污染。60年代在美国,接着在欧洲、日本相应确立了汽车排放标准。我国从20世纪80年代开始着手控制排放,先后颁布一系列排放法规,并不断修订排放限值及测试方法。到20世纪末,我国开始参照和等效采用欧盟的排放法规。为了适应日益严格的排放法规,促进了汽油喷射技术、三效催化技术、无铅汽油的应用,同时内燃机也是一个重要的噪声来源,70年代末,国际上开始制订车辆噪声法规,以降低噪声对环境的污染。

70年代初,由于石油危机导致原油价格成倍上涨,引起对发动机燃油经济性的重视,但由于要控制排气污染,因而增加了改进燃油经济性的困难。为了减少内燃机对日益短缺的石油基燃料的依赖,各国正在进行内燃机代用燃料的研究工作,以逐步取代汽油和柴油,如天然气、甲醇、乙醇、合成汽油、合成柴油以及二甲醚(CH_3OCH_3)等。

二、内燃机的分类

内燃机的分类方法很多,根据其所使用的燃料、点火方式、冲程数、进气方式、冷却方式大致可做以下分类。

(一) 按所使用燃料的分类

按所使用燃料的不同可分成汽油机、柴油机及多种燃料发动机等。以汽油为燃料的内燃机称为汽油机,以柴油为燃料的内燃机称为柴油机。

在现代车辆中,汽油机与柴油机都获得了广泛的使用。一般地说,重型载重汽车、拖拉机、工程机械及农用内燃机出于经济性的考虑,绝大多数都采用柴油机;小轿车由于考虑到要求尺寸、质量小,启动、加速性能好,舒适性好等条件,广泛地采用了汽油机;在中型载重汽车上,则是汽油机与柴油机并重。

目前,环保、节能的燃气汽车已经广泛投入使用,燃用天然气、液化石油气发动机,双燃料发动机正在引起人们的关注。

(二) 按点火方式的分类

按点火方式的不同可分成压缩点火(压燃式)和强制点火(点燃式)两类。

(三) 按冲程数分类

按冲程数的不同可以分成四冲程内燃机与二冲程内燃机。四冲程内燃机即曲轴旋转 720° ,活塞在气缸中往复四个行程,气缸中气体完成一个工作循环的内燃机。二冲程内燃机是曲轴旋转 360° ,活塞在气缸中往复两个行程,气缸中气体完成一个工作循环的内燃机。

二冲程内燃机由于其工作可靠性及经济性不如四冲程内燃机,其使用远不如四冲

程内燃机那么广泛。

(四) 按进气方式分类

按进气方式可分成自然进气内燃机(也称非增压内燃机)与增压(也称强制进气)内燃机。增压比小于 1.8 为低增压,增压比 1.8~2.5 为中增压,增压比 2.5~3.6 为高增压,增压比大于 3.6 为超高增压。在相同结构参数条件下,增压内燃机比非增压内燃机功率有更大的提高。增压柴油机已在大型载重汽车上得到广泛的采用,汽油机增压技术也已被广泛使用。

(五) 按冷却方式分类

按冷却方式可分成水冷内燃机和风冷内燃机。水冷内燃机是利用在气缸及气缸盖水套中进行循环的水作为冷却介质;风冷内燃机是利用流动于气缸与气缸盖外表面的散热片之间的空气作为冷却介质。目前车用内燃机上还是以水冷机居多。

此外,按内燃机气缸数目分为单缸机、多缸机;按内燃机的气缸排列形式可以分成单列式和多列式两大类,单列式多缸机各缸并排成一行,又称直列式,多列式多缸机各气缸的排列可以有 V 形、H 形等;按转数分为低速机(低于 300 r/min)、中速机(300~1 000 r/min)、高速机(高于 1 000 r/min);按燃烧室形式分为开式燃烧室(如浴盆形、楔形、半球形、碗形、 ω 形等)、分隔式燃烧室(具有辅助燃烧室,如涡流室、预燃室等)等。

三、内燃机的优缺点

往复活塞式内燃机(简称为内燃机)从产生到如今已有一百多年的历史,经过不断的改进和发展,已经达到相当完善的程度,在工作可靠性和经济性上比其他几种热机具有很大的优越性。

内燃机的主要优点是:

1. 经济性好。它是热效率最高的热机,现有各种热机的有效热效率 η_{et} 如下:

中型汽轮机 $\eta_{et} = 14\% \sim 20\%$ 大型汽轮机 $\eta_{et} = 18\% \sim 38\%$

燃气轮机 $\eta_{et} = 18\% \sim 32\%$ 内燃机 $\eta_{et} = 20\% \sim 46\%$

2. 结构紧凑、质量轻,比质量较小,便于移动。内燃机的比质量 G_D (单位有效功率所占有的质量, kg/kW) 小,表明内燃机的质量轻而功率大。一般内燃机的比质量为:

载重车用汽油机 $G_D = 1.8 \sim 2.7 \text{ kg/kW}$

载重车用柴油机 $G_D = 3 \sim 6 \text{ kg/kW}$

工程机械用柴油机 $G_D = 4 \sim 8 \text{ kg/kW}$

3. 功率范围广。单机功率可从零点几千瓦到上万千瓦,适用范围广。

4. 起动迅速。正常起动只需几秒钟,并能很快地达到全负荷。而蒸汽机从起动并转变到全负荷往往需要相当长的时间。

5. 维护简单,操作方便。

内燃机目前仍存在着如下一些缺点:

1. 燃料限制。在内燃机中只能直接使用液体燃料或气体燃料。若采用固体燃料煤,则必须加上煤气发生器,这将使整个动力装置的体积和质量大为增加,而且启动准备时间加长,效率也降低了。

2. 废气中的有害成分是大气污染的主要来源。

3. 运转时噪声大。内燃机噪声是城市噪声的重要来源。

4. 低速时难以获得大转矩。而且当内燃机转速低于标定转速 $1/3$ 时,就不能保证正常工作。因此以内燃机为动力的车辆,必须设置变速、传动机构才能满足要求。

内燃机的应用范围极其广泛,交通运输、工程机械、农业机械、矿山、石油、发电、船舶等国民经济重要部门与军用领域所需动力,绝大多数来自内燃机。

第二节 内燃机工作原理

一、内燃机常用的基本术语

图 0-1 为内燃机简图。内燃机常用的基本术语有以下一些:

1. 上止点——活塞在气缸中运动所达到的距离曲轴旋转中心最远的位置称上止点。

2. 下止点——活塞在气缸中运动所达到的距离曲轴旋转中心最近的位置称下止点。

3. 活塞行程——活塞上、下止点之间的距离称活塞行程,以 S 表示。对应一个活塞行程,曲轴旋转 180° 。

4. 曲柄半径——曲轴旋转中心到曲柄销中心之间的距离称为曲柄半径,以 R 表示。

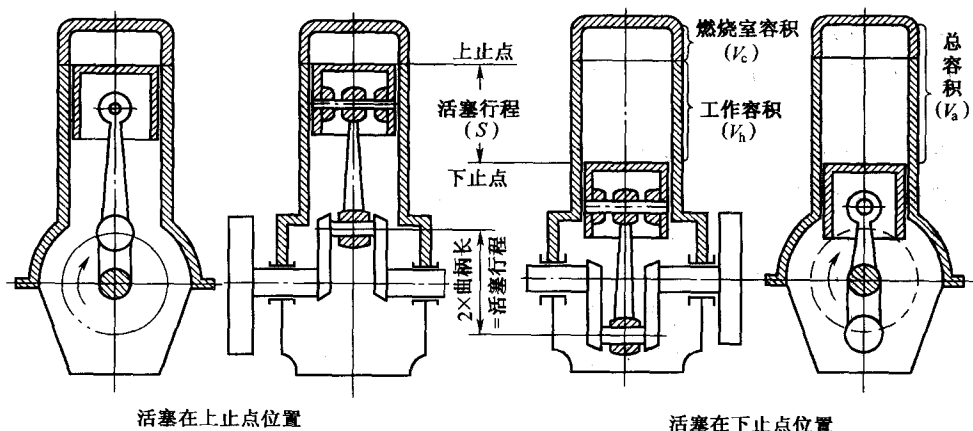


图 0-1 内燃机基本术语图

活塞行程 S 与曲柄半径 R 之间有如下关系:

$$S=2R \quad (0-1)$$

即活塞行程为曲柄半径的两倍。

5. 燃烧室容积——活塞在上止点时,其顶部以上与缸盖底平面之间的空间容积称燃烧室容积,以 V_c 表示。燃烧室容积是活塞在气缸中运动所能达到的最小容积。

6. 气缸总容积——活塞在下止点时,其顶部以上与缸盖底平面之间的空间容积称气缸总容积,以 V_a 表示。气缸总容积是活塞在气缸中运动所能达到的最大容积。

7. 气缸工作容积——活塞顶面在上止点运动到下止点(或由下止点运动到上止点)所扫过的容积称为气缸工作容积,以 V_h 表示。

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} S \times 10^{-4} (\text{L}) \quad (0-2)$$

式中 D ——气缸直径, mm;

S ——活塞行程, mm。

燃烧室容积 V_c 、气缸总容积 V_a 和气缸工作容积 V_h 之间存在着如下关系:

$$V_h = V_a - V_c \quad (0-3)$$

气缸总容积与燃烧室容积之间的差值就是气缸工作容积,或者说燃烧室容积与气缸工作容积之和即气缸总容积。

8. 内燃机排量——气缸工作容积与气缸数的乘积就是内燃机排量。以 V_H 表示:

$$V_H = V_h \times i = \frac{\pi D^2}{4} S i \times 10^{-6} (\text{L}) \quad (0-4)$$

式中 i ——气缸数。

9. 压缩比——气缸总容积与燃烧室容积的比值称为压缩比,以 ϵ 表示。

$$\epsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_h + V_c}{V_c} = \frac{V_h}{V_c} + 1 \quad (0-5)$$

压缩比表示气缸中气体被压缩后体积缩小的倍数。它对内燃机的性能指标有着举足轻重的影响。一般车用内燃机的 ϵ 值为:汽油机 7~10;非增压柴油机 15~22;增压柴油机 11~16。

二、四冲程内燃机的工作原理

1. 四冲程内燃机的工作过程

根据四冲程内燃机的工作循环的顺序:进气、压缩、燃烧膨胀做功及排气,分别分析如下:

(1) 进气行程。在此行程中进气门打开,排气门关闭。活塞在气缸中由曲轴通过连杆带动从上止点向下止点移动,随着活塞由上止点向下运动,活塞顶上面的气缸容积逐渐加大,气缸内气体压力逐渐下降,缸内气体压力低于进气管压力,压力差作用下,新鲜气体通过进气通道进入气缸。

(2) 压缩行程。在此行程中活塞由下止点向上止点移动。此时进气门、排气门均关闭。随着活塞上行,活塞顶、缸筒、气缸盖包围的容积不断减小,气缸中气体被压缩,气体的压力和温度不断上升。压缩行程终了,燃烧室容积中的气体的压力和温度达到了压缩过程中的最大值。

(3) 燃烧与膨胀做功行程。在压缩行程终了时,汽油机燃料在燃烧室中被点燃,柴油机的柴油以油雾的状态被喷油器喷入气缸。燃烧室中的气体压力与温度急剧上升,从而推动活塞由上止点向下运动,通过连杆推动曲轴旋转做功,直到活塞到达下止点。

(4) 排气行程。做功行程终了后,由于曲轴连续旋转而推动活塞上行,上行的活塞将气缸中的废气推入排气管,直到排气门关闭,排气过程终了。

随着曲轴旋转,活塞继续由上止点往下运动,开始下一次的进气行程,使工作循环连续不断进行。

2. 四冲程汽油机与柴油机

四冲程汽油机与柴油机的工作循环是相同的,都是由进气、压缩、燃烧、膨胀与排气等行程组成。但由于它们所使用的燃料(汽油与柴油)的物理、化学性质的差别,在燃料供给、燃料蒸气与空气的混合方式、燃料点火的方式上,都有着较大的区别,并逐步形成性能、结构上的特点,主要区别如下:

(1) 在使燃料雾化并与空气形成混合气的方式上。传统汽油机是将燃料与空气分别引入专门的装置——化油器中,在化油器中将燃料喷散、雾化并与空气进行混合,在进气过程中经进气管道将混合好的燃料与空气的混合气送入气缸。燃料的喷散、雾化及与空气的混合是由专门的装置来完成,或通过电控汽油喷射装置将汽油喷入进气管道或进气管中与吸入的空气混合形成。柴油机的混合气形成过程与此完全不同,柴油机所需要的空气在进气过程中由进气管道直接送入气缸,随着活塞的运动,空气在气缸中被压缩,在压缩过程终了时,气缸中空气的压力和温度达到了较大值($p_c = 3.5 \sim 4.5$ MPa, $T_c = 750 \sim 1000$ K),此时由燃料供给系通过喷油器将燃料喷入气缸,由于喷射压力很高,喷孔直径很小,喷入的油珠极细,在空气的高温下很快蒸发成燃料蒸气,并迅速与空气混合成混合气。柴油与空气形成混合气的时间很短(在压缩上止点附近很小的曲轴转角范围内),混合空间很小,因此柴油机混合气的混合质量比汽油机的要差,是很不均匀的。

(2) 在点火方法上。汽油机与柴油机在点火方法是完全不同的。汽油机有专门的点火系,在压缩终了时,点火系中的火花塞发出火花,点燃可燃混合气。而柴油机在压缩终了时,边喷油、边混合。由于柴油机压缩比大,压缩终点气缸里气体温度比汽油机高出许多,它已超出了柴油的自然温度,在气缸中某些区域(在此区域内燃料与空气的混合比最适合点火)就自行点火燃烧。

(3) 在一个工作循环中,汽油机气缸内的压力与温度与柴油机不同。

