



润滑油颗粒杂质对发动机 关键运动副润滑与磨损的影响

杨晓京 著



科学出版社

润滑油颗粒杂质对发动机关键运动 副润滑与磨损的影响

杨晓京 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

发动机关键运动副的润滑与磨损对发动机的动力性、经济性和可靠性有决定性的影响。活塞环-缸套是发动机中最重要、最关键的运动副,本书以发动机的活塞环-缸套运动副为对象,全面系统地研究润滑油中固体颗粒杂质对发动机活塞环-缸套润滑与磨损的影响,着重分析润滑油中固体颗粒杂质的两相流效应、机械效应和热效应对发动机活塞环-缸套润滑与磨损的影响。

本书适用于从事机械工程、机械设备润滑、发动机润滑与磨损等方面研究和技術开发的科研人员及相关专业的研究生和高年级本科生使用,也可供相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

润滑油颗粒杂质对发动机关键运动副润滑与磨损的影响/杨晓京著.
—北京:科学出版社,2016.12

ISBN 978-7-03-051432-5

I. ①润… II. ①杨… III. ①发动机润滑油—杂质—磨损—研究
IV. ①TH117.1②TE626.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第316766号

责任编辑:郭勇斌 邓新平 / 责任校对:高明虎

责任印制:张伟 / 封面设计:众轩企划

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年1月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:292 000

定价:78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

发动机作为一种常用的动力设备,广泛应用于交通运输、工程机械、农业机械、发电等行业。发动机结构复杂,系统中存在多种形式的运动摩擦副,包括活塞环-缸套运动摩擦副、主轴承运动摩擦副、曲柄销运动摩擦副、活塞销运动摩擦副及凸轮轴运动摩擦副等。这些运动摩擦副的摩擦润滑性能和磨损,不但影响内燃机的工作性能,而且影响内燃机的工作可靠性与寿命。

活塞环-缸套是发动机中最重要、最关键的运动副,本书以发动机的活塞环-缸套运动副为对象,全面系统地研究了润滑油中固体颗粒杂质对发动机活塞环-缸套润滑与磨损的影响。

本书首先简要介绍了发动机的结构与工作原理、发动机关键运动副与主要零部件、发动机润滑系统和发动机润滑油的种类和作用,阐述了发动机关键运动副活塞环-缸套的润滑与磨损、固体颗粒杂质对活塞环-缸套润滑与磨损的影响、固体颗粒杂质检测系统等研究现状与发展。

本书分析了润滑油中固体颗粒杂质形成原因,研究固体颗粒杂质几何形态特征参数描述,得到与固体颗粒实际形态比较符合且便于使用的几何形态描述参数,以润滑油中常见的固体颗粒杂质为分析对象,进行几何形状参数测定实验。采用铁谱分析技术观察和分析发动机润滑油中的颗粒杂质,研究润滑油颗粒杂质的数量特征描述、检测方法及浓度平衡理论,分析了固体颗粒杂质数量变化规律建模方法。

本书研究了固体颗粒对表面的作用数学模型。根据润滑油中颗粒含量关系,建立多个固体颗粒条件下的作用模型,实现多个颗粒宏观作用的量化表达。然后,对固体颗粒与摩擦副表面作用进行数值模拟,从不同视角反映固体颗粒与运动副表面作用的变化过程和变化状态。

本书从固体颗粒的存在而使润滑油变成了固-液两相流的角度出发,通过实验,研究了固体颗粒杂质引起润滑油黏度、闪点和燃点变化的两相流效应。讨论了活塞环-缸套润滑理论,在此基础上,建立考虑颗粒杂质影响的活塞环-缸套润滑数学模型,分析非线性二阶偏微分润滑模型的求解方法,为解决由于考虑颗粒影响造成求解收敛更困难的难题,提出解析解形式的活塞环-缸套润滑简化实用模型。对发动机在进气、压缩、做功和排气整个实际工作行程中活塞环-缸套的润滑特性受颗粒杂质影响的情况进行了定量理论计算与分析。

本书分析了微切削作用机制和表面塑性变形机制的固体颗粒杂质机械效应。

综合两种机制建立了固体颗粒对活塞环-缸套磨损的数学模型,并应用所建立的模型对发动机活塞环-缸套摩擦副进行了磨损量的理论计算分析,得到了发动机在给定运行时间及颗粒条件下,活塞环、缸套的磨损量及缸套不同位置的磨损量变化。

本书分析了固体颗粒杂质热效应及其可能引发黏着磨损的机制,建立了固体颗粒与缸套表面、固体颗粒与活塞环表面的瞬时温度数学模型及热效应作用下活塞环-缸套发生黏着磨损的数学模型,并应用所建立的模型对发动机活塞环-缸套摩擦副进行了由于固体颗粒热效应而产生的局部温升的理论计算和黏着磨损的理论计算,得到了发动机在给定运行时间及颗粒条件下,缸套表面不同位置处的颗粒因热效应在压缩行程和膨胀做功行程中而产生的瞬时温度变化量,得到了缸套表面不同位置处因固体颗粒热效应而产生的黏着磨损量。

本书模拟发动机活塞环-缸套的实际运动形式,进行了润滑油含固体颗粒和不含固体颗粒时活塞环-缸套的摩擦磨损比较实验,研究了活塞环-缸套的摩擦力、磨损量、摩擦功耗等摩擦学特性及与载荷、速度、时间等因素的关系,揭示了它们之间的相互关系规律和影响程度大小。然后根据固体颗粒影响活塞环-缸套润滑的理论研究,分别对试验机活塞环-缸套摩擦副试件在不同实验条件下应用理论模型计算润滑性能和活塞环、缸套试件的磨损量,与相应的实验数据进行对比分析,验证了理论的有效性和可信性。

本书最后介绍了发动机润滑油合理使用与发动机维护,阐述了发动机润滑油的合理使用、润滑系统的保养、发动机磨损与维护等问题。

本书相关的研究和试验工作,得到了浙江大学机械工程学院陈子辰教授、傅建中教授等各位老师的悉心指导,还得到了昆明理工大学机电工程学院樊瑜瑾教授、李浙昆教授及交通工程学院沈颖刚教授、申立中教授的大力帮助。在此,谨向指导和帮助过本书工作的各位人员致以深深的敬意和表示衷心的感谢!

科学技术正在迅速发展,而作者学识水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,诚恳希望广大读者给予批评指正。

杨晓京

2016年6月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 发动机的结构与工作原理	1
1.2 发动机关键运动副与主要零部件	10
1.3 发动机润滑系统	14
1.4 发动机润滑油的基础知识	16
1.5 内燃机摩擦学问题研究的目的和意义	23
1.6 固体颗粒杂质对润滑和磨损的影响	26
1.7 发动机关键运动副活塞环-缸套的润滑与磨损	29
1.8 固体颗粒杂质对活塞环-缸套润滑与磨损的影响	33
1.9 固体颗粒杂质检测系统	34
1.10 发动机活塞环-缸套运动副润滑与磨损试验机	37
第 2 章 润滑油固体颗粒杂质的特性	40
2.1 润滑油固体颗粒杂质的成因分析	40
2.2 固体颗粒杂质几何形态特征的描述	41
2.3 基于铁谱技术的润滑油固体颗粒杂质分析	51
2.4 固体颗粒杂质的数量特征描述	59
第 3 章 固体颗粒与摩擦副表面作用模型的研究	74
3.1 固体颗粒接触模型	74
3.2 多个颗粒条件下的固体颗粒承载模型	77
3.3 固体颗粒与摩擦副表面作用过程的数值模拟	81
第 4 章 固体颗粒杂质对活塞环-缸套润滑的影响	103
4.1 固体颗粒杂质的二相流效应	104
4.2 固体颗粒杂质影响活塞环-缸套润滑的理论研究	107
4.3 含颗粒和不含颗粒润滑理论计算及分析比较	112
第 5 章 固体颗粒机械效应与活塞环-缸套磨损的研究	129
5.1 固体颗粒的机械效应	129

5.2	固体颗粒机械效应下活塞环-缸套磨损的数学模型	129
5.3	固体颗粒杂质影响活塞环-缸套磨损的理论计算	137
第 6 章	固体颗粒热效应与活塞环-缸套黏着磨损的研究	143
6.1	固体颗粒杂质的热效应	143
6.2	固体颗粒热效应引发活塞环-缸套黏着磨损的数学模型	145
6.3	固体颗粒与活塞环-缸套接触表面热效应与磨损的理论计算	150
第 7 章	颗粒杂质对活塞环-缸套润滑与磨损影响的实验研究	159
7.1	活塞环-缸套润滑磨损试验机	159
7.2	润滑油含固体颗粒和不含固体颗粒时活塞环-缸套的 摩擦磨损比较实验	177
7.3	固体颗粒对活塞环-缸套润滑影响的实验研究	185
7.4	固体颗粒对活塞环-缸套磨损影响的实验	189
7.5	温度变化条件下的颗粒影响实验	198
第 8 章	发动机润滑油的合理使用与发动机维护	202
8.1	发动机润滑油的合理使用	202
8.2	润滑系统的保养	206
8.3	发动机运行中的磨损	208
8.4	发动机的维护	209
8.5	发动机气缸套的磨损与维护	212
参考文献		215

第 1 章 绪 论

发动机作为一种常用的动力设备，自 19 世纪中期间世以来，经过一个多世纪的发展，已广泛应用于交通运输、工程机械、农业机械、发电等行业。广义上，发动机（Engine）是一种能够把其他形式的能量转化为机械能的机器，包括内燃机（汽油发动机等）、外燃机（斯特林发动机、蒸汽机等）、电动机等。发动机最早诞生在英国，所以，发动机的名称也源于英语，它的本义是“产生动力的机械装置”。

回顾发动机产生和发展的历史，它经历了蒸汽机、外燃机和内燃机三个发展阶段。

外燃机的燃料在发动机的外部燃烧，1816 年由苏格兰的斯特林发明，故又称斯特林发动机。发动机将燃烧产生的热能转化成机械能。瓦特改良的蒸汽机就是一种典型的外燃机，当大量的煤燃烧产生热能把水加热变成大量的水蒸气时，产生了高压水蒸气，然后这种高压水蒸气又推动机械做功，从而完成了热能向动能的转变。

内燃机与外燃机的最大不同在于它的燃料在其内部燃烧。内燃机的种类繁多，常见的汽油机、柴油机是典型的内燃机，火箭发动机和飞机上装配的喷气式发动机也属于内燃机。不过，由于动力输出方式不同，前两者和后两者存在巨大的差异。

此外还有燃气轮机，这种发动机的工作特点是燃烧产生高压燃气，利用燃气的高压推动燃气轮机的叶片旋转，从而输出动力。但由于很难精细地调节输出的功率，所以汽车很少使用燃气轮机，只有部分赛车装用过燃气轮机。

1.1 发动机的结构与工作原理

1.1.1 发动机的结构

广泛应用在各种车辆上的发动机主要是内燃机。对于汽车，发动机是汽车的核心部件，通常被称为汽车的“心脏”。汽车通常由发动机、底盘、车身和电气设备四部分组成。发动机的作用是使输进气缸的燃料燃烧而产生动力。现代汽车广泛应

用往复活塞式内燃机，它一般由机体、曲柄连杆机构、配气机构、燃料供给系统、冷却系统、点火系统（汽油发动机）、润滑系统等部件组成。往复活塞式内燃机的基本结构如图 1-1 所示。

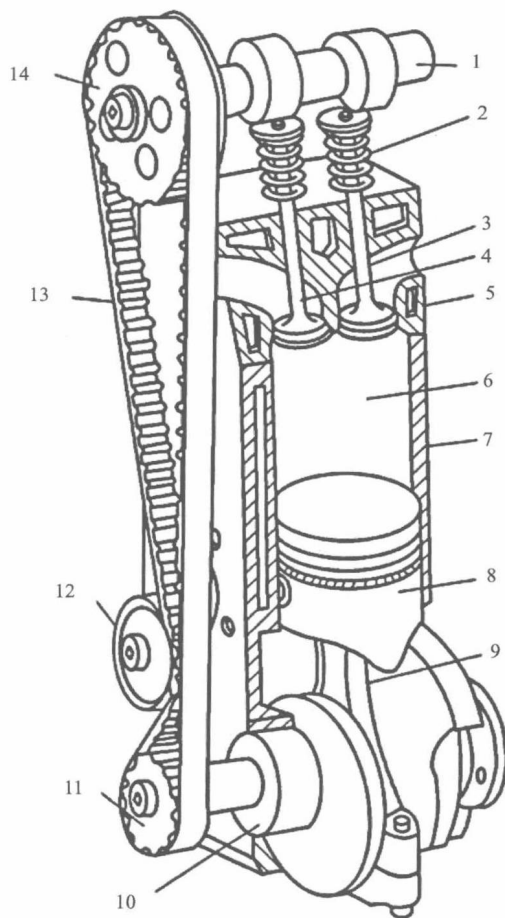


图 1-1 往复活塞式内燃机的基本结构

1. 凸轮轴；2. 气门弹簧；3. 进气门；4. 排气门；5. 气缸盖；6. 气缸；7. 机体；8. 活塞；9. 连杆；
10. 曲轴；11. 曲轴齿形带轮；12. 张紧轮；13. 齿形带；14. 凸轮轴齿形带轮

发动机是一种复杂的机器。为了实现热能到机械能的转换，同时也为了达到优异的性能指标，发动机的构造和组成随着发动机的用途、生产厂家的不同而有所区别，但就其基本结构而言，都是相同的。当然，汽油机还包括点火系统；增压发动机，则还应有增压系统。发动机内部运动如图 1-2 所示，发动机的总体结

构如图 1-3 所示。

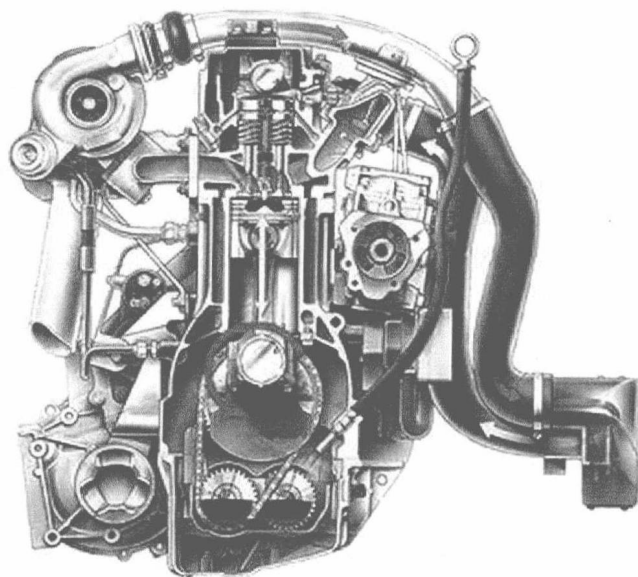


图 1-2 发动机内部运动示意图

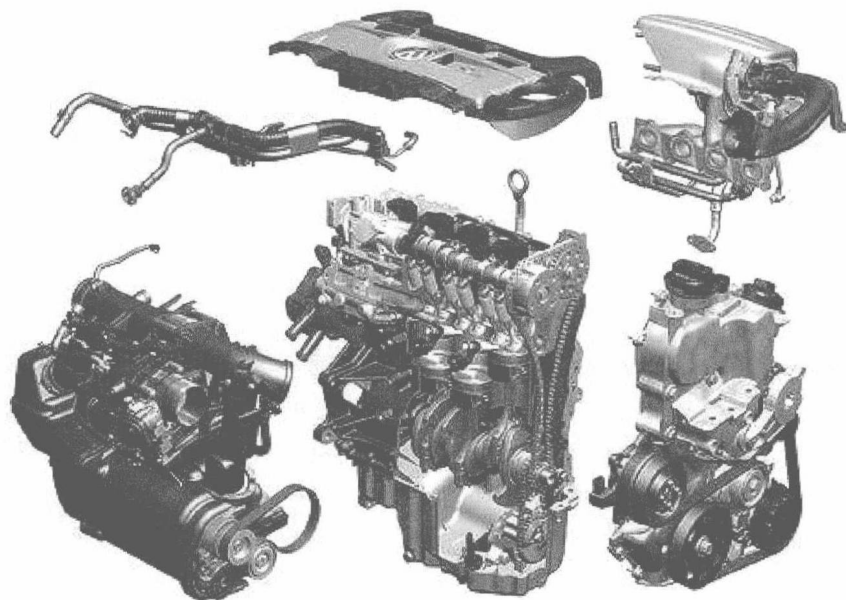


图 1-3 发动机的总体结构

1. 曲柄连杆机构

曲柄连杆机构由气缸体、气缸盖、活塞、连杆曲轴和飞轮等组成。

曲柄连杆机构是发动机实现工作循环，完成能量转换的主要运动零件。它由机体组、活塞连杆组和曲轴飞轮组等组成。在做功行程中，活塞承受燃气压力在气缸内做直线运动，通过连杆转换成曲轴的旋转运动，并通过曲轴对外输出动力。而在进气、压缩和排气行程中，飞轮释放能量又把曲轴的旋转运动转化成活塞的直线运动。

2. 配气机构

配气机构由气门、气门弹簧、凸轮轴、挺杆、凸轮轴传动机构等组成。

配气机构的功能是根据发动机的工作顺序和工作过程。定时开启和关闭进气门和排气门，使可燃混合气或空气进入气缸，并使废气从气缸内排出，实现换气过程。进、排气门的开闭由凸轮轴控制，凸轮轴由曲轴通过齿形带或齿轮或链条驱动。进、排气门和凸轮轴及其他一些零件共同组成配气机构。

3. 燃料供给系统

燃料供给系统有化油器式和电控燃油喷射式。化油器式由汽油箱、汽油泵、汽油滤清器等组成。电控燃油喷射式由空气供给系统、燃油供给系统和电子控制系统组成。

汽油机燃料供给系统的功能是根据发动机的要求，配制出一定数量和浓度的混合气，供入气缸，并将燃烧后的废气从气缸内排出；柴油机燃料供给系统的功能是把柴油和空气分别供入气缸，在燃烧室内形成混合气并燃烧，最后将燃烧后的废气排出。

4. 点火系统

传统式点火系统由蓄电池、发电机、点火线圈、继电器、火花塞等组成。普通式和传统式点火系统类似，只是用电子元件取代了继电器。电子点火式是全电子点火系统，完全取消了机械装置，由电子系统控制点火时刻，包括蓄电池、发电机、点火线圈、火花塞和电子控制系统等。

在汽油机中，气缸内的可燃混合气是靠电火花点燃的。因此，在汽油机的气缸盖上装有火花塞，火花塞头部伸入燃烧室内。点火系统能够按时在火花塞电极间产生电火花。

5. 冷却系统

冷却系统有水冷式和风冷式。水冷式由水套、水泵、散热器、风扇、节温器等组成。风冷式由风扇和散热片等组成。

冷却系统的功用是将受热零件吸收的部分热量及时散发出去，保证发动机在最适宜的温度状态下工作。

6. 润滑系统

润滑系统由机油泵、集滤器、限压阀、油道、机油滤清器等组成。

润滑系统的功能是向做相对运动的零件表面输送定量的清洁润滑油，以实现液体摩擦，减小摩擦阻力，减轻机件的磨损，并对零件表面进行清洗和冷却。

7. 起动系统

起动系统由起动机及其附属装置组成。

要使发动机由静止状态过渡到工作状态，必须先用外力转动发动机的曲轴，使活塞做往复运动，气缸内的可燃混合气燃烧膨胀做功，推动活塞向下运动使曲轴旋转，发动机才能自行运转，工作循环才能自动进行。因此，曲轴在外力作用下开始转动到发动机开始自动地怠速运转的全过程，称为发动机的起动。完成起动过程所需的装置，称为发动机的起动系统。

1.1.2 发动机的工作原理

本节以单缸汽油发动机为例，说明汽油机的工作原理。汽油发动机结构如图 1-4 所示，气缸内装有活塞，活塞通过活塞销、连杆与曲轴相连接。活塞在气缸内做往复运动，通过连杆推动曲轴转动。为了吸入新鲜气体和排出废气，设有进气门和排气门。活塞顶离曲轴中心最远处，即活塞最高位置，称为上止点。活塞顶部离曲轴中心最近处，即活塞最低位置，称为下止点。上、下止点间的距离称为活塞行程，曲轴与连杆下端的连接中心至曲轴中心的距离称为曲轴半径。活塞每走一个行程相应于曲轴转角 180° 。对于气缸中心线通过曲轴中心线的发动机，活塞行程等于曲柄半径的两倍。

发动机是汽车的动力源，是汽车的心脏。发动机是一个能量转换机构，即将汽油（柴油）的热能，通过在密封气缸内燃烧气体膨胀时，推动活塞做功，转变为机械能，这是发动机最基本的原理。

往复式活塞式内燃机所用的燃料主要是汽油或柴油。汽油和柴油具有不同的性

质，因而发动机的工作原理和结构会有差异。

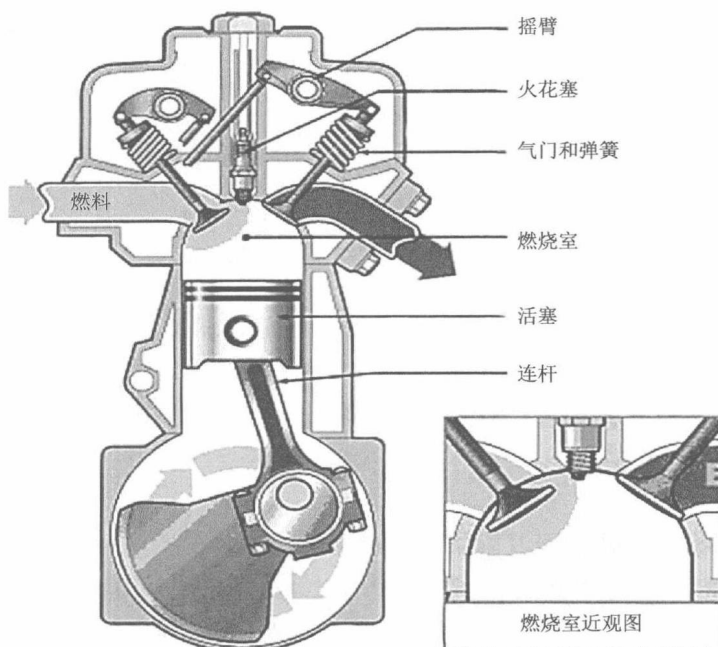


图 1-4 汽油发动机结构

1. 四冲程汽油机的工作原理

汽油机是将空气与汽油以一定的比例混合成良好的混合气，在吸气行程被吸入气缸，混合气经压缩点火燃烧而产生热能，高温高压的气体作用于活塞顶部，推动活塞做往复直线运动，通过连杆、曲轴飞轮机构对外输出机械能。四冲程汽油机在进气行程、压缩行程、做功行程和排气行程内完成一个工作循环（图 1-5）。

1) 吸气行程

活塞在曲轴的带动下由上止点移至下止点。此时进气门开启，排气门关闭，曲轴转动 180° 。在活塞移动过程中，气缸容积逐渐增大，气缸内气体压力逐渐降低，气缸内形成一定的真空度，空气和汽油的混合气通过进气门被吸入气缸，并在气缸内进一步混合形成可燃混合气。进入气缸内的可燃混合气的温度，由于进气管、气缸壁、活塞顶、气门和燃烧室壁等高温零件的加热，以及与残余废气的混合而升高到 $340\sim 400\text{ K}$ 。

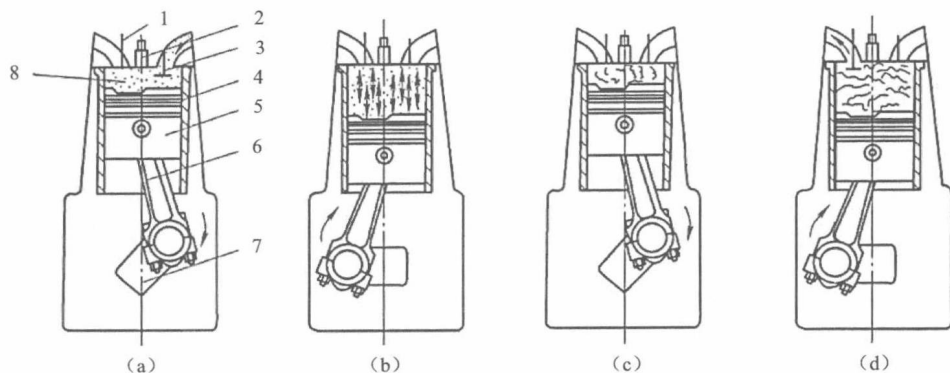


图 1-5 四冲程汽油机工作循环

1. 排气门; 2. 火花塞; 3. 进气门; 4. 气缸; 5. 活塞; 6. 连杆; 7. 曲轴; 8. 可燃混合气

2) 压缩行程

压缩行程时, 进、排气门同时关闭。活塞从下止点向上止点运动, 曲轴转动 180° 。活塞上移时, 工作容积逐渐缩小, 缸内混合气受压缩后压力和温度不断升高, 到达压缩终点时, 其压力可达 $800\sim 2000\text{ kPa}$, 温度达 $600\sim 750\text{ K}$ 。

为使吸入气缸内可燃混合气迅速燃烧, 以产生较大的压力, 从而使发动机输出较大功率, 必须在燃烧前将可燃混合气压缩, 使其容积缩小、密度加大、温度升高, 即需要有压缩过程。在这个过程中, 进、排气门全部关闭, 曲轴推动活塞由下止点向上止点移动一个行程称为压缩行程。

压缩终了时, 活塞到达上止点, 活塞上方形成很小空间, 称为燃烧室。压缩前气缸中气体的最大容积与压缩后的最小容积之比称为压缩比。压缩比越大, 在压缩终了时混合气的压力和温度便越高, 燃烧速度也越快, 因而发动机的输出功率越大, 经济性越好。但压缩比过大时, 不仅不能进一步改善燃烧情况, 反而会出现爆燃和表面点火等不正常燃烧现象。

3) 做功行程

当活塞接近上止点时, 由火花塞点燃可燃混合气, 混合气燃烧释放出大量的热能, 使气缸内气体的压力和温度迅速提高。燃烧最高压力达 $3000\sim 6000\text{ kPa}$, 温度达 $2200\sim 2800\text{ K}$ 。高温高压的燃气推动活塞从上止点向下止点运动, 并通过曲柄连杆机构对外输出机械能。随着活塞下移, 气缸容积增加, 气体压力和温度逐渐下降, 压力降至 $300\sim 500\text{ kPa}$, 温度降至 $1200\sim 1500\text{ K}$ 。在做功行程, 进气门、排气门均关闭, 曲轴转动 180° 。在这个行程中, 进、排气门仍旧关闭。当活塞接近上止点时, 装在气缸盖上的火花塞即发出电火花, 点燃被压缩的可燃混合气。可燃混合气被燃烧后, 放出大量的热能, 因此, 燃气的压力和温度迅速增加, 所能达到

的最高压力为 3~5 MPa, 相应的温度则为 2200~2800 K。高温高压的燃气推动活塞从上止点向下止点运动, 通过连杆使曲轴旋转并输出机械能, 除了用于维持发动机本身继续运转而外, 其余的用于对外做功。

4) 排气行程

可燃混合气燃烧后生成的废气, 必须从气缸中排除, 以便进行下一个进气行程。

排气行程时, 排气门开启, 进气门仍然关闭, 活塞从下止点向上止点运动, 曲轴转动 180°。排气门开启时, 燃烧后的废气一方面在气缸内外压差作用下向缸外排出, 另一方面通过活塞的排挤作用向缸外排气。活塞运动到上止点时, 燃烧室中仍留有一定容积的废气无法排出, 这部分废气叫残余废气。

2. 四冲程柴油机的工作原理

四冲程柴油机和汽油机一样, 每个工作循环也是由进气行程、压缩行程、做功行程和排气行程组成。由于柴油机以柴油作燃料, 与汽油相比, 柴油自燃温度低、黏度大、不易蒸发, 因而柴油机采用压缩终点压燃着火, 也叫压燃式点火, 其工作过程及系统结构与汽油机有所不同。

1) 进气行程

进入气缸的工作介质是纯空气。由于柴油机进气系统阻力较小, 进气终点压力比汽油机高, 进气终点温度比汽油机低。

2) 压缩行程

因为压缩的工作介质是纯空气, 所以柴油机的压缩比比汽油机高。压缩终点的压力为 3000~5000 kPa, 压缩终点的温度为 750~1000 K, 大大超过柴油的自燃温度 520 K。

3) 做功行程

当压缩行程接近终了时, 在高压油泵作用下, 将柴油以 10 MPa 左右的高压通过喷油器喷入气缸燃烧室中, 在很短的时间内与空气混合后立即自行着火燃烧, 气缸内气体的压力急速上升, 最高达 5000~9000 kPa, 最高温度达 1800~2000 K。由于柴油机是靠压缩自行着火燃烧, 故称柴油机为压燃式发动机。

4) 排气行程

柴油机的排气与汽油机基本相同, 只是排气温度比汽油机低。对于单缸发动机来说, 其转速不均匀, 发动机工作不平稳, 振动大。这是因为四个行程中只有一个行程是做功的, 其他三个行程是消耗动力为做功作准备的行程。为了解决这个问题, 飞轮必须具有足够大的转动惯量, 这样又会导致整个发动机质量和尺寸增加。采用多缸发动机可以弥补上述不足。现代汽车多采用四缸、六缸和八缸发动机。

3. 二冲程汽油机的工作原理

二冲程发动机工作循环也包括进气、压缩、做功和排气四个过程，但它是在活塞往复两个行程内完成的（图 1-6）。

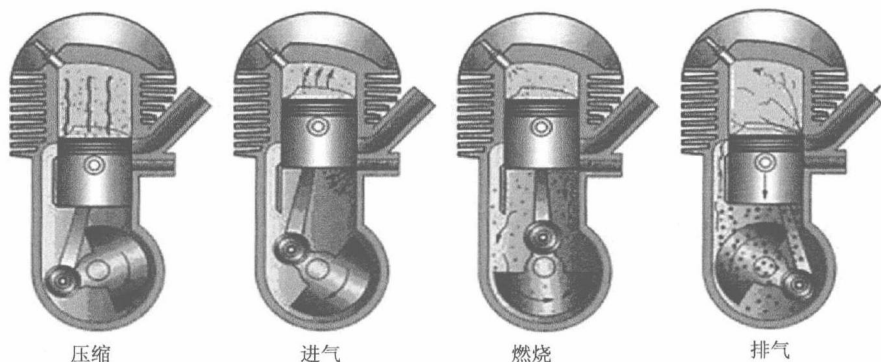


图 1-6 二冲程汽油机的工作原理

（1）第一行程。活塞从下止点向上止点移动，当活塞上行至关闭换气孔和排气孔时，已进入气缸的可燃混合气被压缩，活塞继续上移至上止点时，压缩结束。与此同时，活塞上行时，其下方曲轴箱内形成一定真空度。当活塞上行至进气孔开启时，新鲜的可燃混合气被吸入曲轴箱，至此，第一行程结束。

（2）第二行程。活塞接近上止点时，火花塞产生电火花点燃被压缩的可燃混合气。燃烧形成的高温、高压气体推动活塞下行做功。当活塞下行到关闭进气孔后，曲轴箱内的混合气被预压缩；活塞继续下行至排气孔开启时，燃烧后废气靠自身压力经排气孔排出；紧接着，换气孔开启，曲轴箱内经预压的混合气进入气缸，并排除气缸内残余废气。这一过程称为换气过程，它将一直延续到下一行程活塞再上行关闭换气孔和排气孔为止。活塞下行到下止点时，第二行程结束。

由以上两个行程可知：第一行程时，活塞上方进行换气、压缩，活塞下方进行进气；第二行程时，活塞上方进行做功、换气，活塞下方预压混合气。换气过程跨越两个行程。

4. 二冲程柴油机的工作原理

二冲程柴油机和二冲程汽油机工作类似，所不同的是，柴油机进入气缸的不是可燃混合气，而是纯空气。例如，带有扫气泵的二冲程柴油机工作过程如下。

第一行程：活塞从下止点向上止点运动，行程开始前不久，进气孔和排气门均已开启，利用从扫气泵流出的空气使气缸换气。当活塞继续向上运动，进气孔被关闭，排气门也关闭，空气受到压缩；当活塞接近上止点时，喷油器将高压柴

油以雾状喷入燃烧室,燃油和空气混合后燃烧,使气缸内压力增大。

第二行程:活塞从上止点向下止点运动,开始时气体膨胀,推动活塞向下运动,对外做功,当活塞下行到大约 2/3 行程时,排气门开启,排出废气,气缸内压力降低,进气孔开启,进行换气,换气一直延续到活塞向上运动 1/3 行程进气孔关闭结束。

1.2 发动机关键运动副与主要零部件

1.2.1 发动机关键运动副

发动机结构复杂,系统中存在多种形式的运动摩擦副,包括活塞环-缸套运动摩擦副、主轴承运动摩擦副、曲柄销运动摩擦副、活塞销运动摩擦副及凸轮轴运动摩擦副等。这些运动摩擦副的摩擦润滑性能,不但影响内燃机的工作性能,而且影响内燃机的工作可靠性与寿命。

发动机关键运动副有活塞环-缸套运动摩擦副、主轴承运动摩擦副等,例如,曲轴主轴承是内燃机摩擦副中的重要部分。发动机曲轴轴承在工作时承受交变压力,动态载荷驱使轴承的工作表面产生交变应力导致变形,不但影响到主轴承的润滑性能,而且严重时将导致曲轴失效。曲轴的动力学与摩擦学行为能够严重影响发动机的工作可靠性。曲轴与机体的载荷传递通过润滑油膜,同时曲轴与机体的弹性变形又能影响润滑油膜的形成,因而曲轴主轴承的润滑需要与机体-曲轴系统的动力学耦合计算分析。

活塞环-缸套运动摩擦副是内燃机的典型摩擦副,该摩擦副的性能直接影响内燃机整机的工作性能。已有的研究表明,内燃机工作过程中的机械损失,有一半左右来自活塞环-缸套运动摩擦副;降低活塞环-缸套摩擦副间的摩擦功耗,能够有效提高内燃机的工作效率;如果活塞环-缸套摩擦副润滑不良,将造成固体材料的直接接触,导致摩擦功耗增大、零件材料失效等。实践证明,内燃机工作过程中产生的故障在很大程度上来自于摩擦副的失效,而活塞环-缸套摩擦副又是这些摩擦副中的典型。除了润滑性能,摩擦副的磨损性能也很重要,气缸套的磨损将影响发动机的正常运转,导致故障,甚至可以说,缸套的磨损从某种程度上决定了内燃机的使用寿命,内燃机的燃油经济性相当程度上与摩擦损失有关。因此深入研究内燃机活塞环-缸套的润滑与磨损问题,对提高发动机整机工作的可靠性具有重要意义。