

活塞式和复合式内燃机的构造及工作

「苏」 A. C. 奥尔林 M. I. 克鲁格洛夫 主编

机械工业出版社



HK43/28

活塞式和复合式内燃机 的构造及工作

[苏] A.C. 奥尔林 主编
M.Γ. 克鲁格洛夫

于连臣 赖彭年 译



机



社

C0188451

本书是苏联著名内燃机学者、科学院院士 А.С.奥尔林教授等主编，由苏联高等教育部审定为内燃机专业教科书以及有关专业教学参考书。

内容包括：内燃机作为动力的使用领域，它的工作原理，工作指标及各系统、机构、主要件的结构，空气供给装置，内燃机的各系统，活塞式和复合式内燃机的结构等。

本书对近年来成为迫切的一些新问题作了精辟的介绍，如内燃机的公害、内燃机的不拆卸预报和故障诊断方法等。对燃料、机油和冷却液给予了极大注意。

书中附有大量插图，便于读者了解各种内燃机重要零部件的结构。

本书不仅可作为内燃机专业的教材，而且对从事工程机械、矿山机械以及船舶机械等专业工程技术人员也是一本很有价值的参考书。

ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Устройство и работа поршневых

и комбинированных двигателей

А.С.ОРЛИН М.Г.КРУГЛОВ

МОСКВА 3-е ИЗД.

«МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1980

* * *

活塞式和复合式内燃机的

构造及工作

[苏] А.С.奥尔林 主编

М.Г.克鲁格洛夫

于连臣 赖彭年 译

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 13·字数 314 千字

1985 年 12 月北京第一版·1985 年 12 月北京第一次印刷

印数 0,001—2,000·定价 3.15 元

*

统一书号: 15033·5728

前 言

本教科书是根据内燃机专业教学大纲由莫斯科鲍曼高等技术学校内燃机教研室的教师集体编写的。教材的讲述方法以莫斯科鲍曼高等技术学校培养内燃机工程师方面七十多年的经验为基础。这一讲述方法是由 В. И. 格里涅外茨基开创的,并由 Н. Р. 布里连科, Е. К. 马金科, Д. Н. 维鲁包夫, А. С. 奥尔林, Г. Г. 加里谢, Б. Г. 李布洛维奇和教研室的其他教师成功地予以发展。

根据这一方法,在教科书中首先讲述内燃机及其各个系统的一般构造和工作原理,而后对发动机的具体结构进行分析。教材的内容对所有类型和用途的活塞式发动机都是适用的。

在这本第三版教科书中反映了近几年来生产实践中的最新成果,如内燃机的污染及其诊断方法等。对燃油、机油和冷却液给予很大的注意,因为对他们的要求显著地提高了。除此之外,还考虑了读者对本教科书第二版所提出的意见。

教科书中有很多工程图,这些工程图对未来的工程师们理解发动机的零部件是很有用的。在本书章节内,一些总结性的论点、参考资料和补充数据印在页边上(译出时都插在文中——译者)。

目 录

前言

第一章 内燃机是动力	1
§ 1 内燃机的特点	1
§ 2 内燃机制造业的发展史	3
§ 3 对内燃机作为动力的评价	4
§ 4 活塞式和复合式发动机的使用领域	5
第二章 活塞式和复合式内燃机的工作原理	7
§ 1 工作循环及其进行方法	7
§ 2 工作循环的特点	15
§ 3 复合式发动机的工作循环	16
§ 4 发动机的分类	17
第三章 表征发动机工作性能的指标	18
§ 1 发动机动力性指标	18
§ 2 经济性指标	19
§ 3 结构完善性指标	20
§ 4 排气污染指标	21
§ 5 发动机的特性	23
§ 6 功率和转速的调节原理	24
第四章 发动机的燃料、机油和冷却液	26
§ 1 燃料	26
§ 2 发动机机油	34
§ 3 冷却液	41
第五章 发动机的主要零件、机构和系统的结构	42
§ 1 发动机的主要机构和系统	42
§ 2 发动机工作时作用在其零件上的各种力	42
§ 3 发动机机体	44
§ 4 活塞组	54
§ 5 连杆组	58
§ 6 曲轴组	62
§ 7 配气机构	65
§ 8 配气机构的零件	67
第六章 空气供给装置	71
§ 1 概述	71
§ 2 压气机	71
§ 3 废气涡轮增压机	78
§ 4 涡轮增压器	79
§ 5 空气冷却器(中冷器)	83

第七章 内燃机的各系统	86
§ 1 进气和排气系统	86
§ 2 强制点火式内燃机的燃料系统	88
§ 3 柴油机的燃油系统	95
§ 4 煤气机燃料供给系统	107
§ 5 点火系统	110
§ 6 润滑系统	115
§ 7 冷却系统	120
§ 8 发动机的起动和换向	127
§ 9 空气的净化	130
§ 10 消除噪声	132
§ 11 排出气体的中和作用	135
§ 12 发动机的调节	138
§ 13 发动机的自动化	142
§ 14 发动机的技术诊断	145
第八章 活塞式和复合式发动机的结构	148
§ 1 汽车用化油器式四冲程发动机	148
§ 2 汽车用复合式四冲程发动机	153
§ 3 汽车用复合式二冲程发动机	157
§ 4 拖拉机用风冷四冲程发动机	159
§ 5 拖拉机用复合式四冲程发动机	162
§ 6 内燃机车用复合式四冲程发动机	166
§ 7 对置活塞复合式二冲程发动机	169
§ 8 船用中速复合式四冲程发动机	174
§ 9 船用低速复合式二冲程发动机	176
§ 10 摩托车用二冲程发动机	181
§ 11 小船用舷外二冲程发动机	183
§ 12 汽车用转子活塞式发动机	185
§ 13 自由活塞发动机	188
§ 14 气动二冲程马达压缩机	191
§ 15 柴油机打桩锤	195
§ 16 航空发动机	198

第一章 内燃机是动力

§ 1 内燃机的特点

内燃机是应用最广的一种热机，在这种热机中，燃料燃烧产生的热能变为机械能作功。热机可分为两大类：

1. 外燃机

蒸气机、蒸气轮机以及热气机等（这种类型的发动机在本教科书中不予研究）。

2. 内燃机

在内燃机中，燃料的燃烧过程产生热量，并将部分热量转变为机械功都是直接在发动机内部完成的。活塞式和复合式发动机、燃气轮机以及喷气式发动机都属于内燃机。

内燃机的原理示于图 1。

活塞式内燃机（图 1 a）的主要零件有气缸 2、气缸盖 5、曲轴箱 1、活塞 6、连杆 7、曲轴 8、进气门 3 和排气门 4。

燃料和燃料燃烧所必需的空气被导入发动机的气缸容积内，这个容积被气缸盖的底、气缸壁和活塞的顶所限定。在燃料燃烧时所产生的高温气体推压活塞并使活塞在气缸内移动。活塞的直线运动通过连杆传递给安装在曲轴箱内的曲轴，从而使曲轴作旋转运动。由于活塞作直线往复运动，所以在活塞式内燃机中燃料的燃烧只能是周期性的依次定量进行，而且在每一份额定量燃料燃烧之前要有一系列的准备过程。

燃气涡轮（图 1 b）燃料的燃烧在专门的燃烧室 10 内进行。油泵 9 将燃料通过喷油器供给燃烧室。供燃烧所用的空气通过压气机 13 压入燃烧室，这种压气机与燃气涡轮 12 的工作轮装在同一根轴上。燃烧产物通过导向装置 11 进入燃气涡轮 12 的工作轮叶片。

燃气涡轮具有特殊断面叶片状的工作元件，叶片安装在圆盘上并与圆盘一起组成旋转的工作轮，能够以高转速进行工作。在涡轮上连续布置多组叶片（多级涡轮）可以更完全的利用热气的能量。但是燃气涡轮目前在经济性方面不如活塞式发动机，尤其在部分负荷工作时更是如此。除此之外，工作轮叶片的热负荷也很大，所以叶片不得不在高温气体介质中连续工作。为提高叶片的可靠性，在降低进入涡轮的气温时，就会减小功率使燃气涡轮的经济性

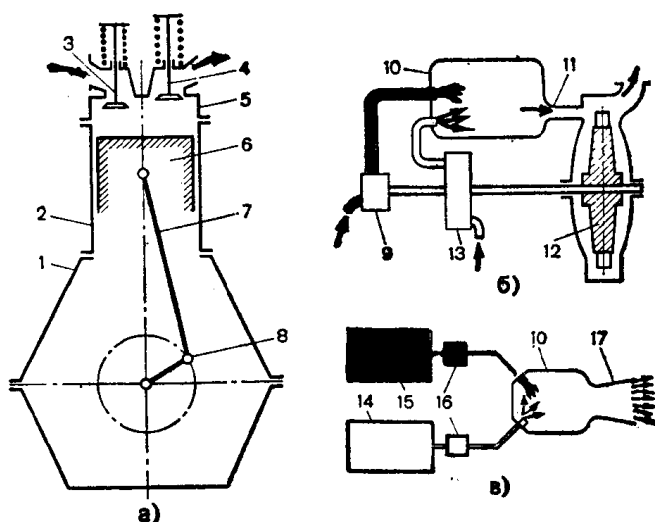


图 1 内燃机原理

- a) 活塞式发动机 b) 燃气轮机 B) 液体喷气发动机
1—曲轴箱 2—气缸 3—进气门 4—排气门 5—气缸盖 6—活塞
7—连杆 8—曲轴 9、16—泵 10—燃烧室 11—导向装置
12—涡轮 13—压气机 14、15—燃料箱 17—喷口

变坏。在活塞式和喷气式发动机广泛采用燃气涡轮作为辅助机组和独立的动力装置。采用耐热材料，对叶片进行冷却，改进燃气涡轮的热力系统可使燃气涡轮指标更加完善和扩大其使用领域。

在液体喷气发动机上（图 1 B）采用各种方法（如用泵 16）在压力作用下，从油箱 14 和 15 向燃烧室 10 供给液体燃料和氧化剂。燃烧产物在喷口 17 膨胀并以很大的速度流向外界。气体从喷口流出是发动机产生反作用力的原因（牵引力）。

喷气式发动机的特点是其牵引力几乎不取决于喷气装置的运动速度，但是喷气装置的功率是随着进入发动机的空气速度增大而增加，也即是随着运动速度的提高而增加。在航空上采用涡轮喷气发动机时就是利用这种性质。喷气式发动机的主要缺点是经济性较低和使用期限较短。

由活塞部分和一些压气机、膨胀机（或装置）以及彼此间以共同的工质工作的吸热和散热装置组成的发动机称为复合式内燃机。作为复合式内燃机的活塞部分是采用活塞式内燃机。

在这种装置上能量以活塞部分的轴或其它膨胀机械的轴或同时两根轴传递给从动装置。压气机和膨胀机的数目、类型和结构，它们与活塞部分以及彼此之间的关系是由复合式发动机的功用、它的系统和使用条件来确定的。

复合式发动机的主要优点是体积和比重量小（每千瓦的重量），以及经济性高，常常优于一般活塞式发动机的经济性。

复合式发动机的结构最紧凑和最经济，在发动机中，活塞部分排气膨胀的继续是在涡轮机内实现，而新鲜充量的预先压缩在径向或轴向压气机中进行（轴向的现在还未得到广泛的应用），而且功率通常是通过活塞部分的曲轴传递给从动装置。

作为活塞部分的活塞式发动机和作为膨胀机的燃气涡轮在复合式发动机的组成上成功的互相得到补充：第一，在高压下，气体体积小，热能可以最有效的转变为机械功；第二，在低压时，气体容积大是利用热能最好的方法。

广泛采用的复合式发动机方案图之一，如图 2 所示。这种发动机由活塞部分 1（利用活塞式内燃机来作为活塞部分），燃气涡轮 2 和压气机 3 组成。

活塞式内燃机排出的废气还具有高温和高压，将其自身的能量传给燃气涡轮工作轮的叶片，从而作用到压气机上。压气机从大气中吸入空气并在一定的压力下将其压向活塞式发动机的气缸。通过提高进气压力的途径来增加发动机气缸的充气量称为增压。在增压的情况下，空气的密度提高了，因此，在进气时填充气缸的新鲜充量与相同的非增压发动机的空气充量相比增大了。

为使供给气缸的燃油烧完，需要一定量的空气（对于完全燃烧 1 公斤液体燃料，在理论上约需 15 公斤的空气）。所以进入气缸的空气越多，在气缸内可以烧尽的燃油也越多，也即是可以得到大的功率。

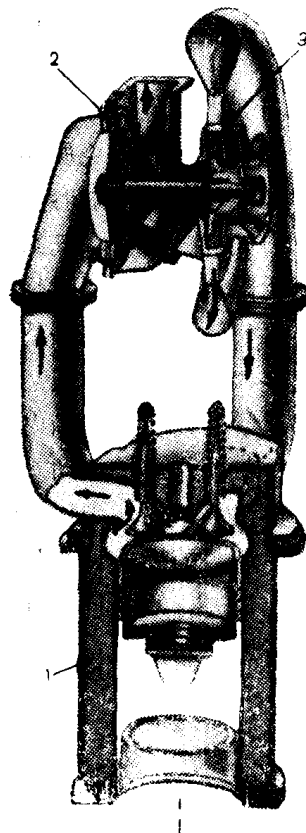


图 2 复合式发动机方案图

1—活塞部分 2—燃气
涡轮 3—压气机

活塞式和复合式内燃机是最经济的，因此，在运输和固定动力方面得到广泛的应用。这种内燃机使用期限足够大，外形尺寸较小和重量轻。可以认为，活塞的往复运动是这些发动机的主要缺点，由于曲柄连杆机构结构复杂，限制了提高转速的可能性，尤其在发动机尺寸大时，就更是如此。

在本教科书内，所研究分析的活塞式和复合式内燃机目前应用广泛。

§ 2 内燃机制造业的发展史

第一台工业内燃机于1860年在法国被雷诺制造成功。这台发动机为滑阀式配气的二冲程发动机，曾以灯用煤气作为燃料由电火花点火工作。1876年德国工程师奥托创造了四冲程煤气发动机，这种发动机所消耗的煤气比雷诺的发动机减少了一半。所以该发动机在工业上应用广泛。在发动机上使用了各种不同的气体燃料：灯用的、发生炉用的、高炉用的、天然的以及石油煤气等。

内燃机出现在19世纪后半叶，是由于工业和交通运输的发展而引起的，因为当时需要比蒸气机更完善的动力用于工业和交通运输。

在俄国煤气发动机的生产开始于1908年，首先在卡洛缅斯基工厂，而后又在另外的一些工厂生产煤气发动机。

在1884~1890年期间，在许多国家出现了用煤油和重质等级的油料工作的固定式发动机。在这些发动机中，可燃混合气的点火是通过与燃烧室相连通的点火室，这个点火室是一个空心块状球，燃油供向球的赤热表面。在俄国相类似的发动机从1890年开始生产（常常把这些发动机叫着“石油发动机”），它们应用广泛。这曾是个很不经济的发动机，有效比油耗高于 $0.4\text{公斤/千瓦}\cdot\text{小时}$ 。

Э. 诺别尔（现在“俄国柴油机”）工厂的二冲程点火室式发动机于1893年在美国芝加哥全世界展览会上声誉很高。在1899年还是那个工厂生产了第一台工业用的四冲程压燃点火的发动机，该机与1897年鲁道夫·狄塞尔发动机的区别在于不使用煤油而使用原油工作。由于其结构的独创性，发动机的比油耗为 $0.3\text{公斤/千瓦}\cdot\text{小时}$ ，比煤油发动机的燃料消耗几乎小30%。只是随着采用石油作燃料压燃点火的发动机（柴油机）才被认为是最经济的发动机，所以世界各国决定广泛地采用柴油机。

俄国开始生产柴油机时，国产独特结构方面的工作得到了发展。在1908年建造的功率为89千瓦的第一台换向船用四冲程发动机就属于其中之一。在同一年内卡洛缅斯基工厂建成卧式二冲程换向对置活塞式发动机大大地胜过德国的蓉克和菲尔·苯克·莫尔茨等公司，这些公司相当晚才开始生产这种类型的发动机。在1911年曾制成最轻便的V-型柴油机，功率为147千瓦，比重量为 13.6公斤/千瓦 。

随着苏联内燃机制造业的发展，带来了关于发动机的结构和工作过程理论问题的研讨。早在1906年В. И. 格里涅外茨基建议的工作循环热算法，确定了内燃机的各个过程现代理论基础，而后又被Н. П. 布里林格，Е. К. 马金格和В. С. 斯捷其金等人进一步发展了。

复合式发动机的工作过程理论基础和第一批结构设计方案图曾被В. И. 格里涅外茨基（1906年）和А. Н. 谢列斯特（1912年）详细研究过。

苏联内燃机制造业在伟大的十月革命之后开始发展的特别快。在苏联头几个五年计划的

年代曾组织生产了供国民经济各个领域用的内燃机：汽车制造、拖拉机制造、航空、航海和内河运输船只、铁路交通、建筑和公路的机械制造等。从1928到1941年各个工厂曾掌握了多种变型14种新型柴油机的生产。在这些柴油机中曾有功率为1470和3100千瓦的船用柴油机等。

曾建立了专门的科学研究院和工厂的设计部门，在这些部门里广泛地开展了研制内燃机新样机的设计和研究工作，其中包括复合式内燃机。B. Я. 克里莫夫，B. A. 甘斯坦金诺夫，A. A. 米古林，A. Д. 恰洛母斯基，A. Д. 什外佐夫和B. M. 雅格伏列夫等设计的复合式内燃机享有盛名。

在1945年之后曾建造了各种类型的活塞式和复合式内燃机。可以看到在最近的几年研制了空气冷却和水冷却的拖拉机柴油机族以及水冷却的汽车柴油机族、废气涡轮增压、其功率为890~4450千瓦的热力内燃机车柴油机、供高速船舶用的其功率为890~2225千瓦的发动机和很多其它的柴油机。

在最近20年，广泛地采用废气涡轮增压是发展内燃机制造业的特点之一，从而能显著改善发动机技术经济指标。在制订一系列涡轮增压器的规格种类和在工厂组织专业化生产方面，苏联中央柴油机研究所的工作起了很大的促进作用。

工作过程的理论得到了显著的发展。在理论上开辟了新领域，如复合式发动机本身组成元件、特性匹配、发动机气道上不稳定流的气体动力过程的计算、主要零件热负荷的诊断等。电子计算机领域的成就使有可能成功的利用数学模型来创制和改善复合式发动机。

§ 3 对内燃机作为动力的评价

在工业、交通运输、农业和固定动力上内燃机的高速发展由这种发动机的许多特点所决定。

内燃机的工作循环在一个气缸内（在一个空腔内）进行时，如在热源和冷却器之间具有很小的热损失和很大的温降，则可保证这些发动机有较高的经济性。较高的经济性是内燃机质量优良的指标之一。

在内燃机里，柴油机将燃料的化学能在广泛的功率变化范围内转变成具有最高效率的机械功。若考虑到石油燃料的储备是有限的，则柴油机的这种质量就显得特别重要。

内燃机实际上能够与任何能量从动装置连接起来，这也应该认为是内燃机的优点之一。因为这些发动机的功率和扭矩特性能相应的在广泛范围内变化。内燃机被成功地运用到汽车、拖拉机、农业机械、内燃机车、船舶和电站等方面，也即是内燃机对从动装置具有良好的适应性。

相对来说，内燃机的初置成本不高、结构紧凑和重量轻，这样就有可能在用途广而且发动机部分尺寸不大的动力装置中使内燃机得到广泛的运用。因此，建造比空气重的飞行器只有在内燃机出现之后才成为可能。带内燃机的装置是具有很大的独立性的。甚至装有内燃机的飞机无需补给燃料能够连续飞行10几个小时。AHT-25型飞机以B. И. 齐卡洛夫和M. M. 格勒莫夫为首的全体乘员从莫斯科经过北极到美国的勇敢飞行是一个最好的证明。装有内燃机的轮船能够驶过几万海涅无需中途停靠港口。在一般情况下能够快速起动是内燃机的重要优点。在低温下工作的发动机安装有专门的加速起动装置，目的是为了容易起动。在起

动后，发动机能够比较快的承受满负荷。在使用条件下，发动机不得不经常在不稳定工况和过渡工况下工作。在这些工况下工作发动机要具有良好的适应性。内燃机应具有大的制动力矩，这在运输情况下对发动机的使用是非常重要的。

在同一台发动机上可以使用多种燃料工作是柴油机的优点。就像大家所知的汽车多种燃料柴油机以及大功率船舶发动机，都能用各种燃料——由柴油到锅炉重油来工作。与其优点一样，内燃机也有许多缺点。其中与蒸气和燃气轮机相比，机组功率有限，噪音程度高，在起动时曲轴转速相对较高和不能与其从动装置的主动轮直接相联结，排出的废气有毒性，活塞的往复运动使转速受限制并且是产生不平衡惯性力和扭矩的原因。

§ 4 活塞式和复合式发动机的使用领域

在国民经济的各个部门中广泛采用生产功率从十分之几千瓦到几万千瓦的活塞式和复合式内燃机，这是因为内燃机具有前面所叙述的一些特点。

在运输装置和农业机械上，内燃机的应用最广泛。

在不同类型和用途的汽车上，内燃机是主要动力源。尽管其它类型发动机的发展也有一些成就，但它们的暂时被使用只是属于试验的性质。汽车内燃机的功率目前已超过 1500 千瓦。

在铁路运输上几乎到处都以电传动或内燃机传动来代替活塞式蒸气机。在苏联货物运输的一多半是通过具有内燃机的热力机车来实现的。采用燃气轮机来牵引机车的企图是众所周知的，但是它们得不到明显的推广。内燃机车发动机的单机功率达到 3000 千瓦。

目前，在内河运输方面所有重新开航的船舶上都安装着内燃机。在海运方面，对不大的船舶和功率达 20000 千瓦的动力装置的大部分船舶来说，内燃机也是主要动力源。在国外，在船舶上已安装有功率为 29400 千瓦的内燃机，将生产功率为 37500 千瓦的柴油机。这种状况促使在船舶上广泛采用柴油机。在目前大、中功率的柴油机可以用重质燃料工作，其价格在世界市场上显著低于一般柴油燃料的价格。因此，对船舶柴油机来说采用重质燃料将扩大起来。

内燃机的出现决定了航空事业的高速发展。国外曾制造复合式内燃机，其功率达 3750 千瓦。以后又出现了航空燃气涡轮发动机，这种发动机可大大提高飞机的速度。目前，活塞式和复合式内燃机只使用在不大的飞机上（教学、体育、特殊的、游玩和运输的）。

活塞式和复合式内燃机是农业机械化的基础。在拖拉机、自动联合收割机上和各种农业机械上现在只采用内燃机。苏联在农业机械上多采用柴油机（小型机械除外）。拖拉机发动机的功率在不断的增长，并已达到和超过 350 千瓦。

若没有内燃机，公路建筑机械制造业的发展是不可能的。内燃机被安装在推土机、铲运机、筑路机、挖掘机、自走起重机、混凝土货车、混凝土泵、焊接机组和压缩机等装置上。

在固定动力上内燃机被广泛地用在不大的电站上（其功率为几千瓦），发电列车上和急救发电装置上。由于燃料便宜，柴油电站可以建成大功率的，不仅为了满足峰值负荷，而且还为了基本电能的生产。

在气田和油田上，在钻孔打眼时为了驱动钻孔装置，在勘探工作的生产上沿管道输送煤气、石油和液体燃料等作为驱动压缩机和泵，内燃机也得到广泛的应用。

由此可见，内燃机在一个国家的国民经济上具有很重要的意义。

对内燃机的牌号采用规定的代号并由字母和数字组成。

字母表示：Ч—四冲程，Д—二冲程，р—可逆的，С—带换向离合器船用的，П—带减速传动的，К—十字头的，Н—带增压的。

数字表示：第一位数——气缸数，在横线上面的数字——气缸直径以厘米为单位，在横线下面的数字——活塞行程以厘米为单位，最后的数字表征发动机的变型（第一、第二等）。在箱式柴油机规定的代号上没有字母К，而在不可逆柴油机的代号上没有字母Р。

规定的代号实例：

8ЧН14/14——8个气缸、四冲程、不可逆、箱式、带增压、缸径为140毫米，活塞行程为140毫米的柴油机。

3ДСП19/30——3个气缸、二冲程、箱式、带换向离合器和减速传动船用的、气缸直径为190毫米、活塞行程为300毫米的柴油机。

8ДКРН55/120——8个气缸、二冲程、十字头、换向的、带增压、气缸直径为550毫米、活塞行程为1200毫米的柴油机。

第二章 活塞式和复合式内燃机的工作原理

§ 1 工作循环及其进行方法

像已经指出的，在活塞式内燃机中由于活塞作直线往复运动，燃料的燃烧只能用一定量的燃料按工作顺序依次进行。而且每一份额的定量燃料在燃烧之前要经过一系列的准备过程。

根据规定的顺序，在气缸中所发生的各种过程的总和称为工作循环。在发动机工作时，工作循环进行周期性的重复。

1. 工作循环示意图

任何活塞式内燃机的工作循环，可以按着下面两个示意图之一来进行，如图3所示。

根据图3 a，工作循环是通过以下方式来实现的。为了使燃料完全燃烧，则必须使燃料和空气有一定的混合比例，在发动机气缸外部很好的进行混合，并形成可燃混合气。

混合气进到气缸（吸气），然后，混合气被压缩。为了增加循环功必须压缩混合气，因为这时温度被提高，在提高的温度下进行工作。为了使空气与燃料混合燃烧创造有利的条件，事先还必须进行预压缩。当吸气和混合气压缩时，燃料与空气在气缸内发生进一步混合。

混合气的成分以过量空气系数 α 来表征，这个系数乃是实际的进气量与理论计算燃料完全燃烧所必须的空气量之比值。当系数 α 增大时，混合气的成分变稀，因为在其中的燃料量减少。与此相反，当系数 α 减小时，混合气成分开始变浓。

在气缸内已准备好的可燃混合气的点燃通常是用电火花。因为在气缸内混合气高速燃烧，剧烈提高温度和压力，因此，在压力作用下使气缸内的活塞移动。在膨胀过程中，被加热到高温的气体作有效功，这时，在气缸内的气体压力和温度都下降。膨胀完了之后，应该清除气缸内的燃烧产物（排气），此后，发动机的工作循环又开始重复进行，周而复始循环不息。

根据内燃机混合气形成方法可以分为外部形成混合气和内部形成混合气的发动机。

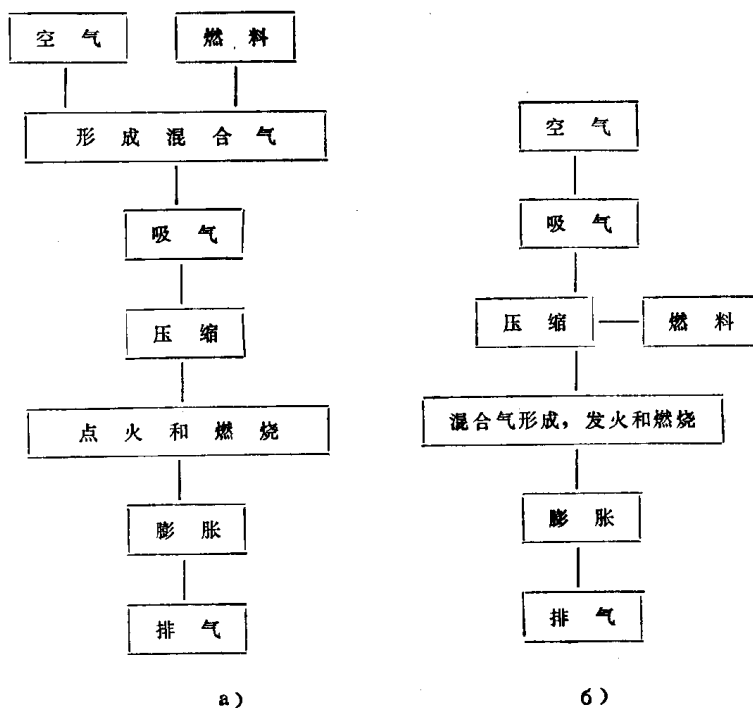


图3 发动机工作循环示意图

a) 外部形成混合气 b) 内部形成混合气

在所研究分析的图 3 a 上, 空气与燃料混合气的准备, 也即混合气的形成过程, 主要的在气缸外部发生, 而将准备好的可燃混合气充满气缸, 所以按这种示意图工作的发动机被称为外部形成混合气的发动机。用汽油工作的化油器式发动机、煤气发动机以及向进气管道喷射燃料的发动机, 也即在内燃机上采用易蒸发的燃料, 在一般条件下能与空气很好混合的发动机都属于外部形成混合气发动机的行列。

在外部形成混合气的发动机上, 在气缸内混合气的压缩应该是这样的, 就是要在压缩终点的压力和温度不要达到可能发生早燃的值或者过快的(爆震的)燃烧值。

根据所采用的燃料、混合气的成分、缸壁传热条件等的不同, 在外部形成混合气的发动机上, 压缩终点的压力处在1.2~2.0兆帕范围以内。

如果发动机的循环按图 3 a 描绘的示意图进行, 则便保证良好的混合气形成和气缸(过量空气系数 $\alpha = 0.8 \sim 1.1$) 工作容积较好的利用。但是受混合气压缩比的限制不可能改善发动机的经济性, 而在强制点火上使其结构复杂化这是必然的。

当根据图 3 b 指出的示意图来实现工作循环时, 混合气的形成的过程只在气缸的内部进行。在这种情况下, 工作气缸不是被混合气充满, 而是被空气充满(吸气), 所以在压缩时只是空气受到压缩。在压缩过程的终点, 在很大的压力作用下, 通过喷油器向气缸喷射燃料。在喷射时, 燃料在气缸内进行细碎雾化并与空气混合。与热空气相接触的燃料颗粒进行蒸发而形成燃料空气混合气。在内燃机工作时, 混合气的发火按着图 3 b 示意图进行, 这是由于空气被高度压缩达到混合气本身的自燃温度的结果。为了避免早燃, 燃料的喷射在压缩终点开始。到燃烧时刻, 一般燃料的喷射还没有结束。在喷射的过程中形成的燃料空气混合气是不均匀的, 因此, 燃料的完全燃烧只有在很大的过量空气下才有可能(在过量空气系数 α 不小于1.2~1.4的情况下)。发动机按着这种示意图工作时, 允许高压比来保证较高的热效率。

无论是外部形成混合气, 还是内部形成混合气, 活塞式发动机的工作循环均由以下过程组成: 吸气、压缩、燃烧及膨胀(工作行程)和排气。只有在燃烧和膨胀过程才作有效功。

在燃料燃烧后, 接着就是膨胀过程和清除气缸内的燃烧产物(排气)。

由此可见, 在按着第二个示意图(图 3 b)工作的发动机, 混合气形成的全过程和可燃混合气对燃烧的准备都在发动机气缸内部进行。所以这种发动机被称为内部形成混合气的发动机。

对于内部形成混合气的发动机来说能够采用各种液体和气体燃料。这种发动机用液体燃料工作占绝对优势。在发动机里燃料的燃烧是由于高度的压缩而产生, 这种发动机被称为压燃点火发动机或者称为柴油机。

于最近几年在制造具有混合形成混合气发动机方面进行了一些工作。在发动机上将少量的燃料喷射到进气管道(外部形成混合气), 而将主要的燃料量供给到气缸(内部形成混合气)。在这种混合气形成时, 将减少气缸内气体的最大压力和燃烧时的噪声。

轻质燃料(汽油)的喷射和强制点火(用电火花)的发动机也有在内部形成混合气的。

2. 基本概念和定义

在研究分析发动机工作过程之前, 我们要讨论内燃机所采用的一些基本概念和定义。

在图 4 的曲柄连杆机构的位置上, 连杆的轴线处在曲柄的平面上($\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 180^\circ$ 时, 气缸和曲轴的中心线相重合), 被称为止点, 因为在这种位置时, 作用到活塞上的力不能引起曲轴的旋转运动。就像图 4 所示的那样, 在气缸内活塞的极限位置对应于止点。活塞在极限位置时, 由活塞到曲轴的中心线距离达最大值($\varphi = 0$), 这时活塞的极限位置称为上止

点 $\ominus$ ，活塞在极限位置时，由活塞到曲轴中心线的距离最小($\varphi = 180^\circ$)，此时活塞的极限位置称为下止点。

当活塞从一个极限位置移到另一极限位置的距离称为活塞行程并对应曲轴半转。

在活塞一个行程（工作循环的一部分）的时间内所完成的工作过程称为冲程。

当活塞移动时，气缸内的容积相应的改变。在这种情况下取以下容积作为特征性容积：

活塞在上止点时，气缸内的容积称为燃烧室容积并以 V_c 来标记；

活塞在下止点时，气缸内的容积称为气缸的总容积并以 V_a 来标记；

在两个止点间被活塞所扫过的容积称为气缸的工作容积以 V_h 来标记，而且通常的测量单位为升。

由此可见，气缸的工作容积

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} S$$

式中 D ——气缸直径

一个气缸的总容积为

$$V_a = V_c + V_h$$

气缸的总容积对燃烧室容积的比值称为压缩比并表示为

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

压缩比表明，活塞上部的气缸容积被减少到多少倍，即当活塞从下止点移动到上止点时，气缸内的充量被压缩的程度。

新鲜充量充满气缸的程度可以用充量系数 η_v 来评价，在进气管道充量的温度 T_k 和压力 p_k 下，实际进到气缸的充量 G_1 与气缸工作容积 V_h 所能容纳的充量之比值称为充量系数，即

$$\eta_v = \frac{G_1}{\rho_k V_h}$$

式中 ρ_k ——在压力 p_k 和温度 T_k 时的充量密度。

当研究分析发动机的工作过程时，广泛采用在一个循环内根据活塞行程不同位置的气缸压力变化图 ($p-V$ 图)——就是所谓的指示示功图。在发动机试验时，借助于专门的仪器——指示示功器或根据工作循环理论计算的结果来绘制而得到这种示功图。

在指示示功图上（放在图4下面的曲线）纵坐标表示气缸内的气体压力 p 的值，横坐标表示活塞行程所对应的气缸容积 V （都按确定的比例 R ）。示功图上的水平细线表征进气管道的压力 p_k ，活塞位置的极限点（上，下止点）以垂直线标出。

内燃机气缸内的工作循环的完成可以有4个冲程或者2个冲程。在第一种情况下的循环称为四冲程（循环），而在第二种情况下的循环称为二冲程（循环）。

3. 四冲程循环

首先分析一个工作循环在4个冲程内完成的或曲轴在2圈内完成的发动机。

这种发动机的气缸上面封盖着气缸盖，在缸盖内布置供吸进新鲜充量和排出燃烧产物（排出废气）用的气门。气门通过弹簧保持着关闭状态，除此之外，还在压缩、燃烧和膨胀

$\ominus$ 原文称内止点和外止点。——译者

过程时, 气缸内的压力也使气门保持关闭。在需要的时刻打开气门由配气机构来实现。

配气机构一般由摇臂、推杆和固定在凸轮轴上的凸轮作用在挺柱上等零件组成。凸轮轴由发动机曲轴驱动, 而曲轴的转速小一倍。每一个气门在曲轴转两圈时打开一次。

四冲程发动机的工作循环以如下的方式(图4)进行。

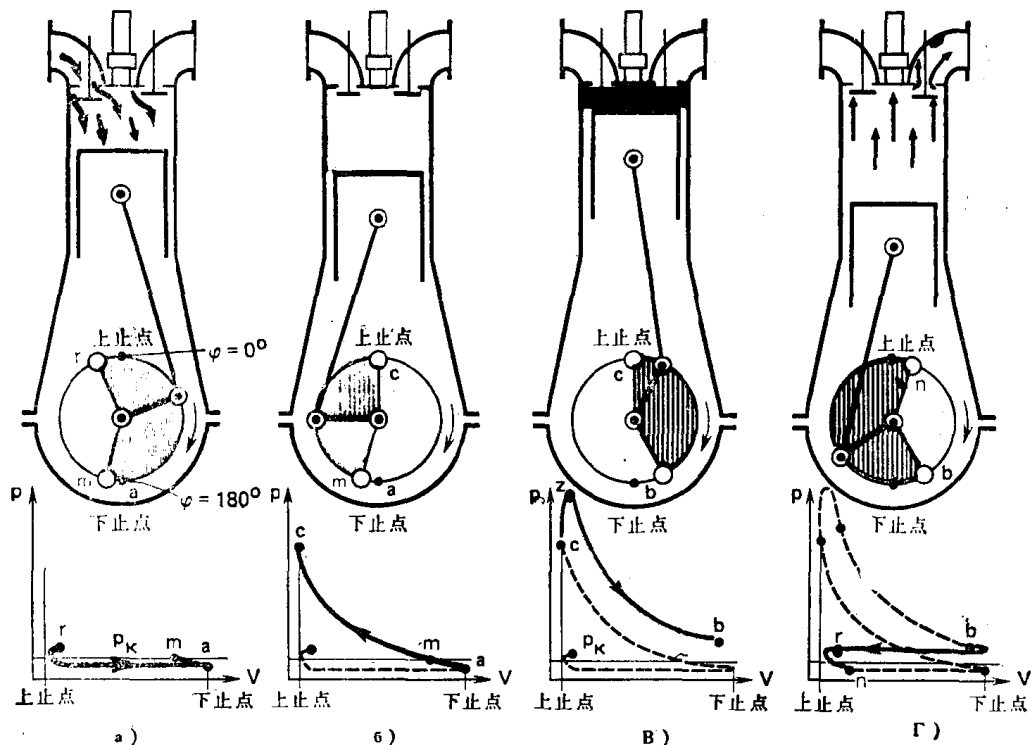


图4 四冲程发动机工作示意图和指示功图

a) 第一冲程——吸气 b) 第二冲程——压缩 B) 第三冲程——燃烧和膨胀
(工作行程) r) 第四冲程——排气

第一冲程——吸气。在第一冲程开始, 活塞处在接近上止点位置。燃烧室充满了上一循环剩下的燃烧产物, 其压力比大气稍大。在指示功图上, 点 r (图4 a) 对应着活塞开始位置。在曲轴旋转时(顺时针方向) 连杆使活塞移动到下止点, 而配气机构打开进气门, 并使进气管道与发动机气缸的活塞上部空间相通。由于活塞运动到下止点, 气缸充满了新鲜充量(空气或可燃混合气)。在这种情况下, 由于进气系统和进气门的阻力使气缸内的压力开始变成比进气管道压力 p_k 小 $0.01 \sim 0.03$ 兆帕。在指示功图上 ra 线对应着进气冲程。

在非增压的发动机上进气管道的压力有可能接近于大气压力或者在增压发动机上高于大气压力这取决于增压度($p_k = 0.13 \sim 0.45$ 兆帕)。在增压时, 随着气缸内充量的增加, 可提高循环功和发动机的功率, 但在这种情况下, 循环的压力和温度也随之增加。

在增压发动机的进气过程中, 新鲜充量可作有效功。

第二冲程——压缩。在活塞反向流动到上止点时(图4 b), 进到气缸的充量被压缩。这时, 在被压缩充量的压力和温度都被提高。当活塞从下止点开始向上有某些移动时, 气缸内的压力变成与进气压力 p_k 相同(示功图 m 点)。为了改善以新鲜充量充满气缸, 进气门在压缩行程开始时, 仍旧开着延续一定时间(到 m 点)。进气门落后关闭使有可能利用气缸内的真

空度以及利用沿进气管道运动的空气流的惯性，向气缸内多进一些充量。

气门关闭后，活塞再继续移动时，气缸内的压力和温度继续提高。压缩终点的压力值（在点 c 处的压力 p_c ）将与压缩比、工作腔的密封性、向气缸壁的散热以及压缩的开始压力值 p_a 有关。

对燃料的发火和燃烧过程无论是在外部，还是在内部形成混合气都需要一定的时间，尽管这个时间是不很大的。

为了更好的利用燃烧放出来的热量，必须要活塞尽可能在接近上止点位置时，期望燃料燃烧结束。所以在外部形成混合气的发动机上用电火花点燃工作混合气（以及在向气缸喷射汽油的发动机上），或燃料直接喷射到气缸在气缸内部形成混合气的发动机，一般活塞快到达上止点时进行喷射发火。

由此可见，在气缸内进行第二冲程时，主要地是对充量进行压缩。除此之外，在冲程的开始，气缸的进气充量延续着，而在冲程的终点燃料开始燃烧。在指示示功图上 ac 线对应着第二冲程。

在冲程和过程之间的对应是有条件的，因为过程和冲程的多数情况，通常在时间方面是不重合的。

第三冲程——燃烧和膨胀。第三冲程是活塞行程从上止点到下止点时进行(图4 b)。

在冲程开始，进入气缸和在第二冲程终点已准备好的燃料进行强烈燃烧。由于放出大量的热，尽管气缸内部容积（在指示示功图 cz 段上）有一定的增大，但缸内的温度和压力剧烈提高。在燃烧压力作用下继续使活塞向下止点移动和气体进一步膨胀。在气体膨胀时间作有效功，所以第三冲程也称着工作行程。在示功图上 czb 线对应着第三冲程。

第四冲程——排气。在第四冲程时间内进行清除气缸内的废气(图4 r)。活塞从下止点向上止点移动，通过打开着的排气门把气缸内的气体挤出。排气门打开的时刻是在活塞到达下止点前 $40^\circ \sim 60^\circ$ （曲轴转角）；在这时，缸内的气体压力往往还是足够高的。因此，在排气冲程时，能降低活塞运动阻力和改善气缸的净化。在指示示功图上 bn 线对应着第四冲程。

工作循环结束在第四冲程。当活塞再继续运动时，以同样的连续不断的重复着循环的全部过程。

只有燃烧和膨胀冲程才工作，而剩下的三个冲程是靠旋转着的曲轴和飞轮的惯性和其它缸的工作来实现的。

气缸废气清除得越完全和进入气缸的新鲜充量越多，则在一个循环内能够得到的有效功就越大。

为了改善气缸的净化和充气量，排气门不在排气冲程终点（在上止点）关闭，而有某些落后（按曲轴转角在上止点后 $5^\circ \sim 30^\circ$ ）即在第一冲程开始。根据相同的理由，进气门的打开时间要提前（在上止点前 $10 \sim 40^\circ$ ，即在第四冲程终点）。由此可见，在第四冲程的终点，在某一时期内两个气门（进、排气门）都开着。气门的这种位置称为气门重叠时期。由于在排气管道内废气流的抽吸作用，气门重叠能促进进气充量的改善。

在气门重叠时期，在外部形成混合气的发动机上，部分可燃混合气通过排气机构能够从气缸流出。

4. 二冲程循环

从研究分析四冲程的工作循环可以看到，四冲程发动机消耗到一个循环上只有一半时间