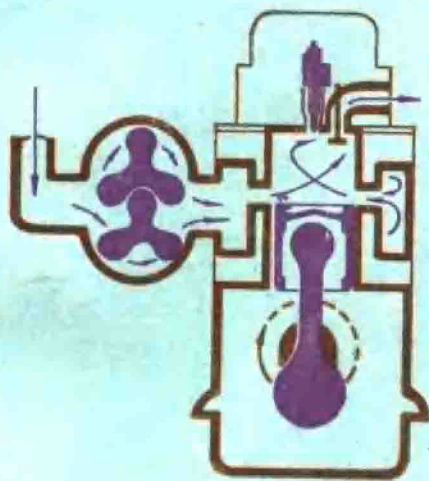


热工设备教学丛书

内 燃 机

乔启宇 张璧光 编



高等教育出版社

热工设备教学丛书

内 燃 机

乔启宇 张璧光 编

本书是根据 1982 年 12 月热工教材编审委员会通过的“内燃机编写大纲”编写的。

本书在概要介绍内燃机理论循环、工作过程和基本特性的基础上，系统地阐述了往复式内燃机的结构及各组成部分的作用原理，还简要介绍了内燃机的运行和污染控制等方面的内容。

本书是热工设备教学丛书之一。主要与王补宣主编的《热工基础》一书配套使用，也可单独作为非动力类各专业的教材，还可供有关工程技术人员参考。

热工设备教学丛书

内 燃 机

乔启宇 张壁光 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京房山南召印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 3.375 字数 78,000

1985 年 7 月第 1 版 1985 年 7 月第 1 次印刷

印数 00,001—13,650

书号 15010·0601 定价 0.72 元

前 言

本书是根据1982年12月热工教材编审委员会通过的“内燃机编写大纲”编写的。编写过程中参考了热工教材编审委员会审定的四年制非动力类专业“热工学教学大纲(参考性草案)”。

本书是“热工设备教学丛书”中专门讲述往复式内燃机的一个分册。在概要阐明内燃机理论循环、工作过程和基本特性的基础上,系统地介绍往复式内燃机各组成部分的作用原理、构造特征和适用条件,对涉及内燃机动力性和经济性的主要影响因素进行了必要的分析,书中还介绍了一些关于内燃机运行维护和污染控制方面的基本常识,以扩展知识面。本书主要与王补宣主编的《热工基础》一书配套使用;也可作为高等学校工科非动力类有关专业的教科书或教学参考书;还可供有关的工程技术人员参考。

本书承热工教材编审委员会委托吉林工业大学庄爱娣、蒋兴阁二位同志审稿。对书稿提出许多宝贵和有益的意见,谨向他们表示衷心的感谢。北京林学院汽车拖拉机教研室的同志们也提供了许多具体的帮助,在此一并致谢。

本书绪论、第二、三、五章及第四章第三、四节由乔启宇编写;第一章及第四章第一、二节由张璧光编写。

由于我们水平有限,书中难免出现错误或不妥之处,敬希读者批评指正。

编 者

1983年9月于北京林学院

目 录

绪论	1
第一章 内燃机的工作过程及性能	5
§ 1-1 内燃机的燃料	5
§ 1-2 内燃机的理论循环	10
§ 1-3 四冲程内燃机的工作过程	13
§ 1-4 二冲程内燃机的工作过程	17
§ 1-5 内燃机的增压	21
§ 1-6 内燃机的性能指标	24
§ 1-7 内燃机的特性	30
第二章 曲柄连杆机构与配气机构	34
§ 2-1 内燃机的总体构造	34
§ 2-2 机体-气缸盖组	38
§ 2-3 活塞连杆组与曲轴飞轮组	42
§ 2-4 配气机构	47
第三章 内燃机燃油供给系	52
§ 3-1 柴油机燃油供给系的组成	52
§ 3-2 柴油机的喷油泵	53
§ 3-3 柴油机的喷油器、调速器和燃烧室	60
§ 3-4 汽油机燃油供给系	65
第四章 冷却系、润滑系、起动系与点火系	73
§ 4-1 内燃机的冷却系	73
§ 4-2 内燃机的润滑系	76
§ 4-3 内燃机的起动系	79
§ 4-4 汽油机点火系	85

第五章 内燃机的运行与污染控制	90
§ 5-1 内燃机的运行.....	90
§ 5-2 内燃机常见故障的检查和处理.....	92
§ 5-3 内燃机的噪声控制与废气净化.....	95
主要参考文献	100

绪 论

将热能转化为机械能的装置统称为热力发动机（简称热机）。一切热机都要通过工作介质的状态变化实现能量形式的转换，热机中的工作介质称为工质，工质因吸热而提高作功能力，它膨胀时就能推动机件作出机械功。

按获得工质的方式不同，热机可分成内燃式与外燃式两类，前者采用燃料燃烧生成的一次介质——燃气作为工质，而后的工质是被燃气加热所生成的间接介质（一般是蒸汽）。活塞式蒸汽机和蒸汽轮机等蒸汽发动机属外燃式热机。

内燃机是将燃料和空气引入机体内部燃烧，利用燃气膨胀作出机械功的热力发动机。广义地说，内燃机包括活塞式内燃机、回转式燃气轮机、复合式发动机和喷气推进机，这些热机可以统称为内燃动力装置，而“内燃机”这一名词，习惯上专指活塞式内燃机。

与蒸汽发动机相比，内燃机的主要优点如下：内燃机的工质（燃气）在循环中的平均吸热温度远高于蒸汽发动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发动机，一般达到20—40%，甚至更高；内燃机不需要笨重的锅炉设备，所以结构紧凑，单位功率的重量（比重量）要轻得多；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。

内燃机的主要缺点是：对燃料要求高，不能直接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4万千瓦，而蒸汽轮机的单机功率可以高达数十万千瓦；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就显著优于内燃机;此外,一般热力发动机都存在所谓“公害性”,而内燃机的噪声和废气中有害成分对环境的污染尤其突出。

由于内燃机具有上述特点,使它在以下范围内得到了广泛应用:汽车、铁路机车、船舶、轻型飞机等交通运输机械;拖拉机及农业、林业机械;建筑机械、地质钻探机械、矿山及石油开发机械等工程机械;小型电站及舰艇、战车等等。一个世纪以来,内燃机的巨大生命力经久不衰,世界上内燃机的拥有量大大超过了任何其它的热力发动机,可见内燃机在国民经济中占有相当重要的地位。

内燃机发展至今,约有一百年的历史,同其它技术科学一样,内燃机的每一步进展都是人类生产实践经验的概括和总结。内燃机的发明始于对活塞式蒸汽机的研究和改进。在它的发展史中应当特别提到的是德国人奥托(Otto)于1877年创制成功的实用的定容燃烧四冲程煤气机,1883年左右在英国和德国也有人分别研制成功液体燃料的四冲程奥托循环内燃机;德国工程师狄塞尔(Diesel)自1893年起确立了压燃点火方式和定压燃烧理论,1897年,按照他的理论创制成柴油机。到十九世纪末,主要的几种活塞式内燃机大体上进入了实用阶段,并且很快显示出巨大的生命力。本世纪以来,内燃机在广泛应用中不断地得到改善和革新,特别是从三十年代开始,增压技术在柴油机上大量采用,显著地提高了动力性,通常经济性也得到改善。

目前内燃机在技术上日臻完善,各项指标达到了相当高的水平,例如柴油机的单机功率为1—36000 kW(千瓦),热效率最高达46%,燃油消耗率降低到204—252 g/(kW·h)[克/(千瓦·时)];汽油机的最低燃油消耗率达280—300 g/(kW·h),高速柴油机及车用汽油机的比重量都减少到1.3—2.7 kg/kW(公斤/千瓦)等

等。

△ 今后内燃机的主要发展趋势如下:

(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。

(4) 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。

往复活塞式内燃机的种类很多, 主要的分类方法和类别有这样一些: 按所用的燃料不同, 分为汽油机、柴油机、煤油机、煤气机(包括各种气体燃料内燃机)等; 按每个工作循环的行程数不同, 分为四冲程和二冲程; 按着火方式不同, 分为点燃式和压燃式; 按冷却方式不同, 分为水冷式和风冷式; 按气缸排列形式不同, 分为直列式、V型、对置式、星型等; 按气缸数不同, 分为单缸内燃机和多缸内燃机等; 按内燃机的用途不同, 分为汽车用、农用、机车用、船用以及固定用等等。

我国内燃机产品的名称和型号除专用内燃机外, 都按国家标准^①统一编制。按现行国家标准规定, 内燃机按所用燃料命名, 如汽油机、柴油机、煤油机、煤气机等。内燃机的型号由三部分组成, 首部用阿拉伯字母表示气缸数; 中部包括冲程符号和缸径两项, 四冲程内燃机省略冲程符号, 二冲程以拼音字母E表示, 以阿拉伯数字表示气缸内径的毫米数; 尾部以数字表示变型顺序, 中部与尾部之间用短横线相连。必要时, 在短横线之前用一个汉语拼音字母表示内燃机的特征, 特征代号为: Q(汽车用)、T(拖拉机用)、C(船

^① 见国家标准 GB725—65。

用)、J(铁路牵引用)、Z(增压)、K(复合)、F(风冷)。例如 1 E 56 F 汽油机表示该汽油机为单缸、二冲程、缸径 56 mm、风冷式；又如 6135 C-1 柴油机表示该柴油机为 6 缸、缸径 135 mm、四冲程、船用、第一种变型产品。

某些专用内燃机的型号中一般含有企业代号，型号编制方法也不一定符合上述标准，如 CA-10 B 汽油机(解放牌载重汽车发动机)、EQ 6100 汽油机(东风 140 型载重汽车发动机)等等。

本书运用工程热力学理论阐明内燃机的基本工作原理，在此基础上，分别讲述内燃机各主要机构和系统的组成、作用原理和构造特征。在讲述各部分内容时，对影响内燃机动力性、经济性、耐久性和可靠性的各种因素进行定性分析，以期通过本书的学习，对往复活塞式内燃机的工作原理、主要性能、总体构造和运行维护建立起比较系统和完整的概念。

第一章 内燃机的工作过程及性能

§ 1-1 内燃机的燃料

一、概说

目前内燃机直接燃用的燃料只限于气体燃料和液体燃料，并以液体燃料为主。煤、木炭、木柴等固体燃料燃烧后产生的灰分很多，故不宜直接用作内燃机的燃料，必要时可先将固体燃料在煤气发生炉内制成煤气，然后再供内燃机使用。

气体燃料主要指天然气、工业煤气(包括发生炉煤气和工业副产煤气)、石油气和从动植物废料中提取的甲烷(沼气)等。气体燃料的容积大，用于移动式内燃机时，需携带庞大的储气设备，因此气体燃料一般在燃料来源丰富的地区，用于固定式内燃机为宜。近年来为了使气体燃料便于移动式内燃机使用，采取了加压液化的办法，如液化石油气、液化沼气等，但有些气体燃料(如天然气)沸点极低，难于液化。

天然气的主要成分是甲烷(CH_4)。发生炉煤气的主要可燃成分是一氧化碳(CO)和氢气(H_2)。工业副产煤气的成分根据形成煤气的条件不同而有很大的差异，如高炉煤气的主要可燃成分为 CO (20—30%)和 H_2 (1—3%)；而炼焦炉煤气则含有大量的 H_2 (46—61%)和 CH_4 (21—30%)。

内燃机使用的液体燃料主要是汽油和柴油，也有采用甲醇、乙醇(酒精)、重油和某些动植物油等作代用燃料的，但这些代用燃料的使用效果往往比汽油、柴油差，因此一般不单独使用这些代用燃料。

迄今为止，汽油和柴油主要是从石油中提炼出来的。从油页

岩和液化煤中也可以提炼出汽油和柴油，但在液体燃料的总产量中所占的比重还很小。石油的主要成分是碳和氢两种元素，含量约占 97—98% (其中碳约占 85—87%，氢约占 11—14%)。石油中的碳和氢是以各种碳氢化合物(烃)的形式存在，由于各种烃类的沸点不同，所以可利用分馏的方法从石油中提取汽油、煤油及柴油等不同馏分的燃料。

汽油主要由沸点为 40—210°C 的烃类组成，当石油(指原油)加热到这一温度范围时，馏出的就是汽油；相应地加热到 140—240°C 时，馏出的是煤油；200—360°C 馏出的是柴油；350—500°C 时馏出的是润滑油；500°C 以上馏出的是重油；最后剩余的是难于挥发的沥青。

二、可燃混合气的形成及其着火方式

燃料的燃烧是剧烈的氧化反应，燃烧所需的氧来源于空气。由于内燃机的转速较高(每分钟几百到几千转)，燃料在气缸内的停留时间大约只有数百分之一秒，甚至更短，因此要使燃料的燃烧过程在这样短的时间内进行得迅速而又完全，必须使燃料与空气均匀地混合。

气体燃料的扩散能力很强，容易与空气均匀混合。汽油、甲醇、乙醇等液体燃料的挥发性很好，只要把它们喷散到空气中，悬浮在空气中的小液滴就能迅速地气化而与空气均匀混合，燃料与空气的均匀混合物称为可燃混合气。对于使用上述气体和液体燃料的内燃机(如图 1-1 所示)，通常在燃料进入气缸之前，通过专门装置使燃料与空气形成可燃混合气，这种专门装置对于气体燃料称为混合器，对于汽油称为化油器。这种形成可燃混合气的方式称为外部混合式。由于汽油的自然温度较高(10 bar^① 压力下的自然温度约为 260°C)，气缸内的混合气在压缩终了时的温度还不足

① 1bar(巴)=1.02at(工程气压)。

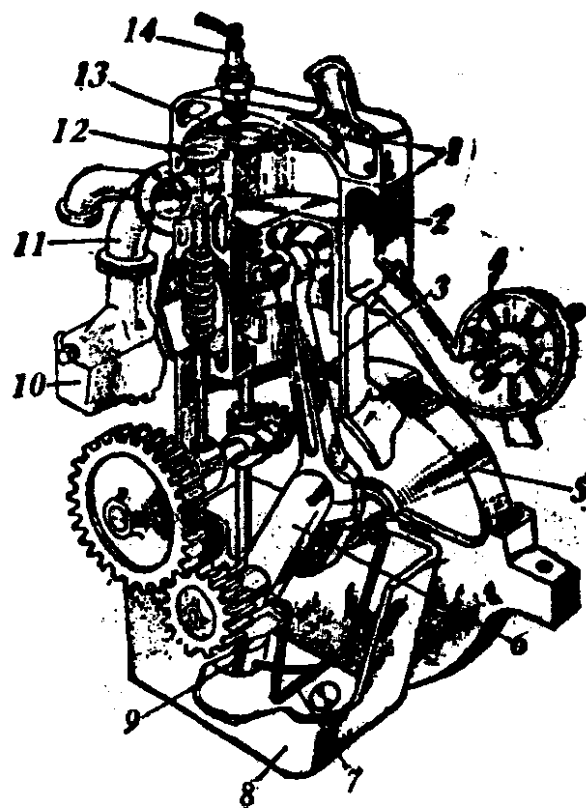


图 1-1 单缸汽油机结构示意图

1—气缸和气缸盖；2—活塞；3—连杆；4—水泵；5—飞轮；6—曲轴；7—润滑油管；8—油底壳；9—润滑油泵；10—化油器；11—进气管；12—进气门；13—排气门；14—火花塞

以发火燃烧，所以在气缸顶部装有专为点火用的火花塞。被压缩后的混合气一经电火花点燃，就能迅速地燃烧。象这种用电火花点火的燃烧方式称为点燃式。

柴油的挥发性比汽油差，而自燃温度比汽油低，采用点燃与外部混合式的工作方式已不适用，需要采用强制混合的方法，即让柴油经喷油泵加压到 80—500 bar 的压力，然后通过喷油器的细孔成雾状喷入气缸。在喷油前先将纯净空气吸入气缸，并压缩到 30—50 bar 的压力，压缩终了时空气的温度升高到 500°C 以上，大大地超过了柴油自燃温度（在 30 bar 压力下，柴油的自燃温度约为 205°C），柴油喷入气缸后与高温空气相遇，便迅速着火燃烧。柴油机的这种工作方式，称为内部混合式或压燃式。

三、汽油和柴油的使用特性

汽油的主要使用特性是**蒸发性和抗爆性**。

汽油的**蒸发性**是指在一定的温度和压力下汽油从液态转变为汽态的快慢程度。蒸发性强的汽油容易与空气形成良好的可燃混合气,有利于燃烧,一般说来对发动机的工作有利。但若蒸发性太强就有可能在供油管路上形成汽油蒸汽泡,使油流不畅,产生所谓“汽阻”现象,影响发动机的正常工作,因此汽油机对汽油的蒸发性有一定的要求。

汽油的蒸发性一般用馏分组成和一定温度下的饱和蒸汽压力来表征。在汽油蒸馏时,分别测出蒸发出10%、50%、90%(按容积百分比)馏分时的温度及终馏温度^①。因为这些馏分的馏出温度的高低分别对发动机的起动性、加速性、工作稳定性、动力性、经济性及工作可靠性有一定的影响。饱和蒸汽压力的指标,是用来限定汽油的蒸发性以防止“汽阻”现象的。因此我国汽油技术规范中规定各种汽油的10%、50%、90%馏出温度,和在38℃下,汽油和汽油蒸汽体积比为1:4时测得的饱和蒸汽压力作为蒸发性指标。

汽油的**抗爆性**是指阻止汽油在燃烧过程中发生“爆震”的能力。如果可燃混合气在压缩终了时的压力和温度过高,那么,当混合气由电火花引燃后,远离火焰中心的局部地区的未燃混合气,由于已燃气体的压缩和热辐射的影响,其温度将进一步增高,甚至大大超过燃料的自燃温度,从而在正常火焰尚未到达之前,便自燃着火,并以极快的速度燃烧,此时气体容积来不及膨胀,造成局部地区压力急剧升高,形成有害的“压力冲击波”,使气缸内发出金属撞击声并引起发动机震动,这种现象称为**爆震燃烧或爆燃**。爆震燃烧是点燃式内燃机的一种不正常的工况。由于爆震燃烧会降低内燃机的功率并影响发动机零件的寿命,因此点燃式内燃机对燃料

^① 指蒸馏终了的干点温度。

的抗爆性有一定的要求,对汽油机的压缩比(指压缩过程的终压与初压之比)也有一定的限制

汽油的抗爆性与它的化学组成有关。经试验证明,异辛烷(C_8H_{18})的抗爆性最好,用很大的压缩比也不发生爆震,而正庚烷(C_7H_{16})却最容易发生爆震。因此习惯上用辛烷值来表示汽油的抗爆性。令异辛烷的辛烷值为100,而正庚烷的辛烷值为0,在测定某种汽油的辛烷值时,将异辛烷和正庚烷以一定的比例(可调节)相混合,组成所谓标准燃料,当被测汽油的抗爆性与这种标准燃料的抗爆性相同时,该标准燃料中异辛烷所占的容积百分数即为被测汽油的辛烷值。我国规定用汽油的辛烷值作汽油的牌号,例如RQ 66 车用汽油,表示这种汽油的辛烷值为66,其抗爆性相当于66%的异辛烷和34%的正庚烷相混合的标准燃料。为提高燃料的辛烷值,增强抗爆性,最常用的方法是在汽油中添加抗爆剂,目前应用最广泛的抗爆剂是四乙铅 $[Pb(C_2H_5)_4]$,但四乙铅的毒性强,故常限制使用,凡含有四乙铅的汽油都加色(如染成红色、蓝色或黄色等)标明,使用这种带色的汽油时,操作人员必须严格遵守操作规程,确保人身安全。

柴油的主要使用特性是流动性与发火性。

柴油的流动性可用粘度和凝点来表示。液体的粘度体现了液体抵抗运动的阻力大小。柴油的粘度关系到柴油从喷油嘴喷出后,雾化程度的好坏,粘度较低时,容易雾化成极细的油滴,以便于和空气形成均匀的可燃混合气体,但粘度过低时会增加漏油量,并使有关部件的润滑条件变坏。一般轻柴油的恩氏粘度^①在 $E_{20}=1-2$ 之间,粘度随温度、压力而变化,当温度升高时粘度降低;而

^① 恩氏粘度是试液在某种温度下,从恩氏粘度计流出200ml(毫升)所需的时间与蒸馏水在相同温度下流出相同容积所需时间(s)之比。粘度与温度有关, E_{20} 表示20°C时的粘度。

压力增高时粘度增加。柴油发生凝固而失去流动性的温度称为凝点,一般要求柴油的凝点应比工作温度低 $3-5^{\circ}\text{C}$ 以上,尤其是冬季使用的柴油更应该注意它的凝点。我国规定用柴油的凝点作为轻柴油的牌号,例如 0 号柴油即表示它的凝点为 0°C 。

柴油发火性的好坏直接体现为滞燃期的长短,从柴油开始喷入燃烧室到着火燃烧,这段时期称为滞燃期。燃料的滞燃期越短,其发火性越好。若燃料的滞燃期长,则在此期间内燃烧室内将积聚较多的燃料,一旦着火后这些燃料同时燃烧,造成较大的压力增长率,会引起柴油机工作粗暴,使某些机件产生强烈的振动,气缸内发出金属敲击声,俗称敲缸,这也是柴油机的一种不正常工况。

柴油的发火性以十六烷值表示,正十六烷($\text{C}_{16}\text{H}_{34}$)的发火性最好,其十六烷值定为 100; α -甲基萘($\text{C}_{10}\text{H}_7\text{CH}_3$)的发火性最差,其十六烷值定为 0。将上述两种烃按不同的容积比例混合,便可得到十六烷值从 0 到 100 的各种标准燃料,当被测柴油的发火性与某一混合比例的标准燃料相同时,则标准燃料所含十六烷的容积百分比即为被测油的十六烷值。柴油的十六烷值越高,发火性越好,但十六烷值过高(>65)时,燃料的蒸发性太差,容易造成不完全燃烧而使油耗增加,因此一般高速柴油机使用十六烷值在 40—60 之间的柴油。

§ 1-2 内燃机的理论循环①

内燃机的实际工作循环是十分复杂的。为便于分析研究,一般先从经过抽象简化以后的理论循环开始,这是因为在理论循环中,除了热力学第二定律所指出的,不可避免的存在着排向冷源的

① 内燃机理论循环的分析和计算在工程热力学专著中有较详细的论述,这里只作简单介绍。

热损失外,不存在其它任何损失,因此理论循环是实际循环热能利用程度的极限。研究理论循环,不仅可以确定和比较各种循环的理论热效率,明确提高效率的途径,而且还可判断实际工作循环的完善程度,以便不断地改进内燃机。

理论循环的假设条件如下:

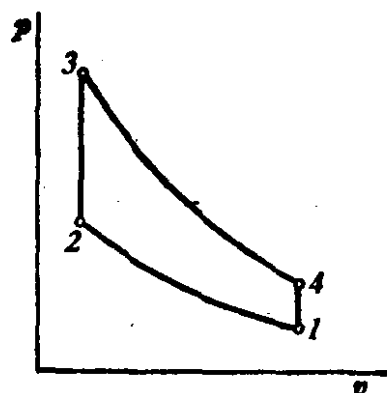
- (1) 理论循环是定量工质的闭口循环。不考虑进、排气过程。
- (2) 理论循环的工质是双原子气体(空气),并假定它是定比热理想气体。

(3) 理论循环中,以热源向工质的加热过程代替燃料在气缸中的燃烧过程;以工质向冷源的放热过程代替实际的排气过程。

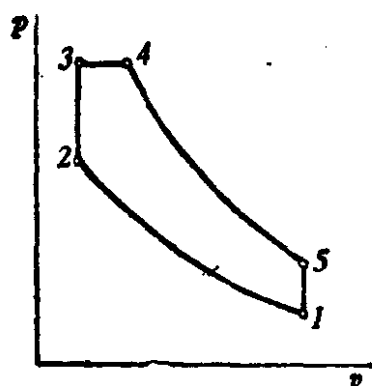
- (4) 理论循环的压缩与膨胀过程均为绝热过程。

把实际循环简化为理论循环时,必须使理论循环尽量符合实际循环的特点,首先是要符合加热过程的特点。通常将汽油机和柴油机的实际工作循环,分别简化为定容加热循环(又称奥托循环)和混合加热循环(又称萨巴德循环),图 1-2 中的 a 和 b ,分别表示这两种理论循环的 $p-v$ 图。

在定容加热循环中(见图 1-2 a), 2-3 为定容加热过程,每公斤工质在该过程中从热源吸收的热量为 q_1 ; 4-1 为定容放热过程,



(a) 定容加热循环



(b) 混合加热循环

图 1-2 内燃机的理论循环