

FLUID FLOW IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

内燃机中的流体运动

宋金瓯 吕刚 宋崇林 编著
王天友 主审

内燃机中的流体运动

Fluid Flow in Internal Combustion Engines

宋金瓯 吕 刚 宋崇林 编著
王天友 主审



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书运用流体力学基本原理分析了内燃机进排气过程,缸内流体运动、燃油喷射及混合气形成过程;运用流体力学基本概念、理论与方法分析了内燃机进排气系统的结构特征与管内压力波动的关系及对进排气过程、增压器、消声器和后处理器的影响;介绍了内燃机缸内湍流模型的最新研究进展以及缸内流动从进气、压缩到膨胀冲程的演变过程;论述了高压燃油在油管内的水击现象和在喷油孔内的空化现象,燃油初次雾化和二次雾化的机理和强化方法,喷雾场热力学、动力学特性和内燃机缸内混合气制备过程。本书力图反映当前国内外内燃机流体运动领域的研究成就和全貌,以帮助读者迅速进入该学科的研究前沿。

本书可作为内燃机动力工程专业研究生和高年级本科生的教材,也可作为从事内燃机设计生产以及与此相关专业人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机中的流体运动/宋金瓯,吕刚,宋崇林编著. —天津:天津大学出版社,2015.4

ISBN 978-7-5618-5295-8

I. ①内… II. ①宋… ②吕… ③宋… III. ①内燃机—流体流动 IV. ①TK401

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 078097 号

出版发行 天津大学出版社

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部:022-27403647

网 址 publish.tju.edu.cn

印 刷 河间市新城印刷有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 185mm×260mm

印 张 8.5

字 数 212 千

版 次 2015 年 5 月第 1 版

印 次 2015 年 5 月第 1 次

定 价 19.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

本书是根据天津大学动力机械及工程专业硕士研究生“内燃机中的流体运动”讲义,经过多年研究生教学实践,在内容不断更新和完善的基础上编撰而成的。本书总结了近20年来内燃机进排气系统流动、缸内流动及燃油喷射方面的研究成果,并试图以流体力学理论为基础,实现体系的系统性。内燃机研究领域一直十分活跃,新概念、新理论和新方法不断涌现,研究文献“汗牛充栋”。本书力求以有限的篇幅来反映当前国内外内燃机流体运动领域的研究成就和全貌,试图把值得关注的新成果介绍给读者,帮助读者了解和掌握该领域的最新成就和发展方向,尽快进入该学科的研究前沿。

全书共分4章,第1章主要介绍了内燃机的特点及其与其他形式热机的区别和关系;第2章以一维非定常流体理论为基础分析了进排气系统中的气流运动,主要讲述了进气管道压力波动对充气效率的影响,排气能的利用及后处理系统内的流动不均匀性等方面内容;第3章介绍了湍流的基本概念、理论以及内燃机缸内流动数值模型的研究现状,分析了内燃机缸内流动的演变过程及燃烧室结构形状对缸内流动的影响规律;第4章主要介绍了现代内燃机燃油喷射理论,内容涉及高压油管内水击现象、喷孔内空化现象以及初次雾化和二次雾化机理,讨论了喷雾强化措施及雾场发展的描述方法,并简要分析了现代内燃机缸内混合气制备的基本要求。总体来说,本书较系统地总结了迄今为止前人在该学科领域的成果与经验,也反映了编者的研究成果和体会。

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室王天友教授审阅了全书并提出了大量宝贵意见,作者谨致热忱谢意。研究生马鹏、陈朝旭、俞瑶、陈科、张许扬在资料收集、文字整理和图形制作方面做了大量工作,在此一并表示感谢。

本书得到了天津大学研究生院“研究生创新人才培养项目”(YCX12030)和国家自然科学基金项目(51276126)的资助。在此,谨向上述部门表示诚挚的谢意。

限于作者知识范围和水平,书中错误和疏漏在所难免,诚恳期望同行专家学者和广大读者提出宝贵意见。

编著者

2014年11月于天津大学

目 录

第1章 热机循环概述	1
1.1 外燃机热力循环	1
1.2 内燃机热力循环	4
1.3 本书讨论内容	9
参考文献	11
第2章 进排气系统中的气流运动	12
2.1 热力学基本概念	12
2.2 流体力学方程	14
2.3 声波和有限波	17
2.4 波的相互作用	21
2.5 特征线法基本概念	24
2.6 发动机进排气系统压力波运动	29
2.7 发动机进气增压	36
2.8 发动机排气消声器	44
2.9 发动机排气后处理装置	51
参考文献	68
第3章 缸内气流运动	70
3.1 湍流基础知识	70
3.2 湍流数学模型	77
3.3 内燃机缸内流动的描述	89
3.4 内燃机缸内流动的演变	95
参考文献	104
第4章 燃油喷射、雾化与混合气形成	106
4.1 内燃机燃油供给系统	106
4.2 高压油管内的燃油流动	107
4.3 柴油机喷嘴内部的空化现象	111
4.4 喷雾与雾化	115
4.5 喷雾场动力学和热力学特性	123
4.6 内燃机缸内混合气制备	128
参考文献	129

第1章 热机循环概述

凡是利用热能产生动力的机械都可称为热机(Heat Engine),热机又分内燃机与外燃机。如果燃料在热机内部燃烧产生热能并转变为机械动力,这个热机就称为内燃机(Internal Combustion Engine, ICE),如汽油机(Gasoline Engine)、柴油机(Diesel Engine)、燃气轮机(Gas Turbine Engine)、喷射发动机(Jet Engine)等,内燃机都是由燃气直接做功;如果燃料在热机外部燃烧,燃气不作为做功介质,这个热机就称为外燃机(External Combustion Engine, ECE),如蒸汽机(Steam Engine)、蒸汽涡轮机(汽轮机)(Steam Turbine Engine)、斯特林发动机(Stirling Engine)等。

1.1 外燃机热力循环

外燃机燃料广泛,可使用各种固体、液体、气体燃料及核燃料,可使用劣质煤,还可利用太阳能和地热等能源,但它的热效率低,此外还需要配备笨重的锅炉(如蒸汽机、汽轮机),故常用于固定且大功率输出场合,如发电厂。蒸汽机和汽轮机工作原理如图 1-1 和图 1-2 所示,机外燃料燃烧加热锅炉中的水产生蒸汽,蒸汽推动活塞(蒸汽机)或涡轮(汽轮机)运动。图 1-1 所示的蒸汽机有一个可左右滑动的滑动阀,蒸汽首先由左方 A 口进入汽缸左端,推动活塞向右运动,同时滑动阀向左移动封住 A 口,蒸汽转由右方 B 口进入汽缸右端,推动活塞向左运动,活塞往复运动经连杆和曲轴转换成旋转运动。蒸汽机在工业革命期间广泛用于工厂及机车。图 1-2 所示的汽轮机利用蒸汽(如核能发电厂利用核能将水加热成蒸汽)推动涡轮叶片,引起涡轮旋转并输出功率(如带动发电机发电)。小功率(如单机功率 400 kW 以上)情况下,蒸汽机热效率高于汽轮机。在需要变速和逆向运转条件下,蒸汽机也优于汽轮机,但逊于内燃机。

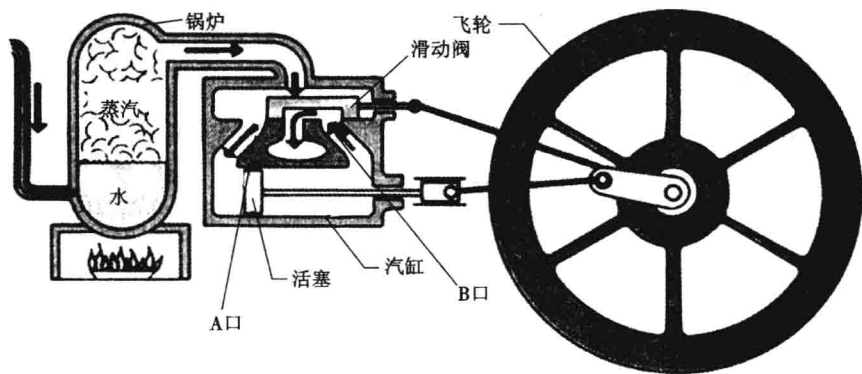


图 1-1 蒸汽机工作原理图

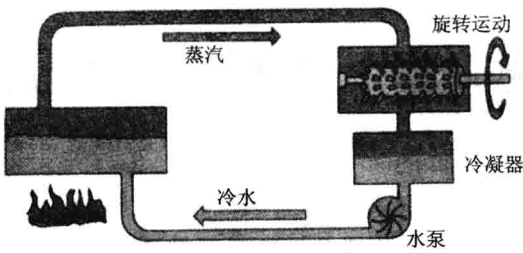


图 1-2 汽轮机工作原理图

蒸汽动力装置以水蒸气作为工作介质(简称工质)的卡诺循环(Carnot Cycle)(图 1-3)在实际应用中存在以下不足:汽水混合物压缩过程 $c-5$ 耗功过大且对压缩机不利,难以实现;Carnot 循环的热效率 $\eta_t = 1 - T_2/T_1$, 由于 Carnot 循环局限于饱和区,上限温度受限于水的临界温度(374 °C),温差较小,效率低;做功冲程末期(接近 2 点)水分过多,不利于动力装置做功。

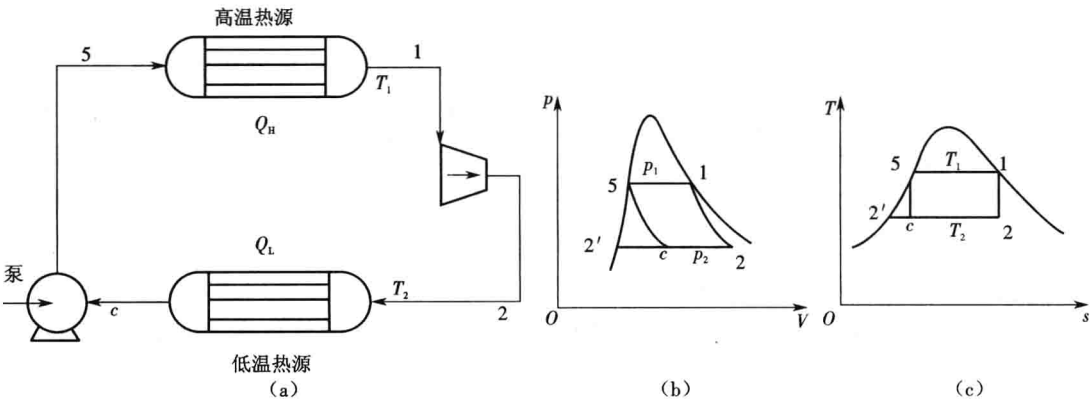


图 1-3 Carnot 循环示意图

(a) 循环工作原理 (b) 循环 $p-V$ 图 (c) 循环 $T-s$ 图

英国科学家 W. J. M. Rankine (1820—1872 年) 对汽轮机进行了以下改进:将汽轮机出口的低压湿蒸汽完全凝结为水,用水泵来完成压缩过程;为提高循环热效率,采用过热蒸汽作为汽轮机的进口蒸汽,以提高平均吸热温度(过热蒸汽温度可高于水的临界温度),此即朗肯循环(Rankine Cycle)。一切以水蒸气作为工质的动力循环都以 Rankine 循环为基础。理想 Rankine 循环如图 1-4 所示,过程 1—2 为汽轮机中绝热膨胀,过程 2—3 为冷凝器中定压冷凝,过程 3—4 为给水泵中绝热压缩,过程 4—5—6 为锅炉中定压加热,过程 6—1 为过热器中定压加热。理想 Rankine 循环热效率可近似表示为

$$\eta_t \approx \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$

另外一种外燃机热力循环是 1816 年斯特林(Stirling)提出的由两个等温过程和两个等容过程组成的闭式热力学循环,即斯特林循环(Stirling Cycle)。图 1-5 所示是采用 Stirling

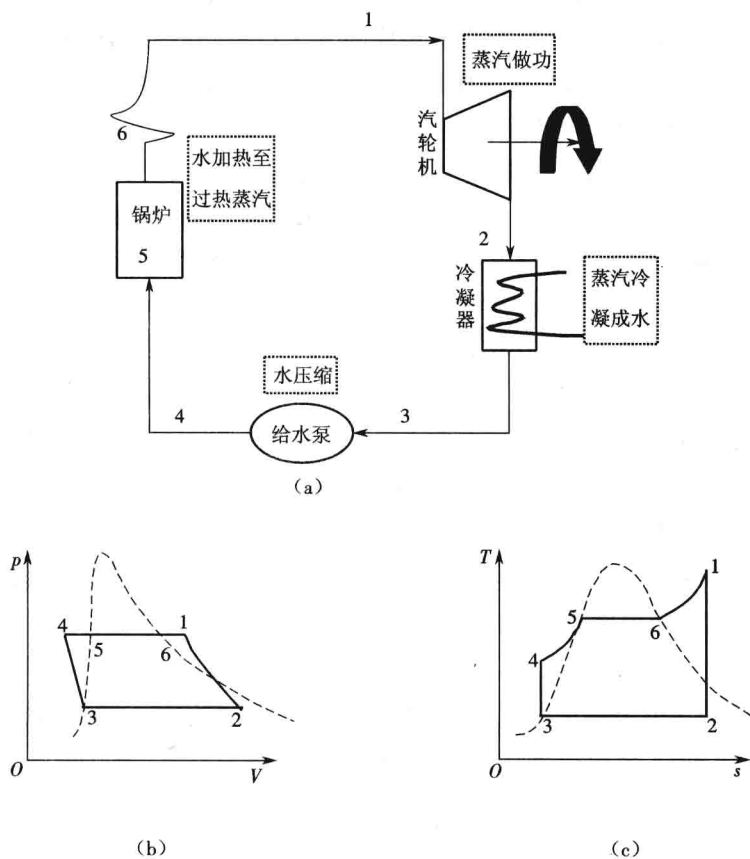


图 1-4 Rankine 循环示意图

(a) 循环工作原理 (b) 循环 p - V 图 (c) 循环 T - s 图

循环的一台制冷机示意图以及制冷机 Stirling 循环工作示意图。

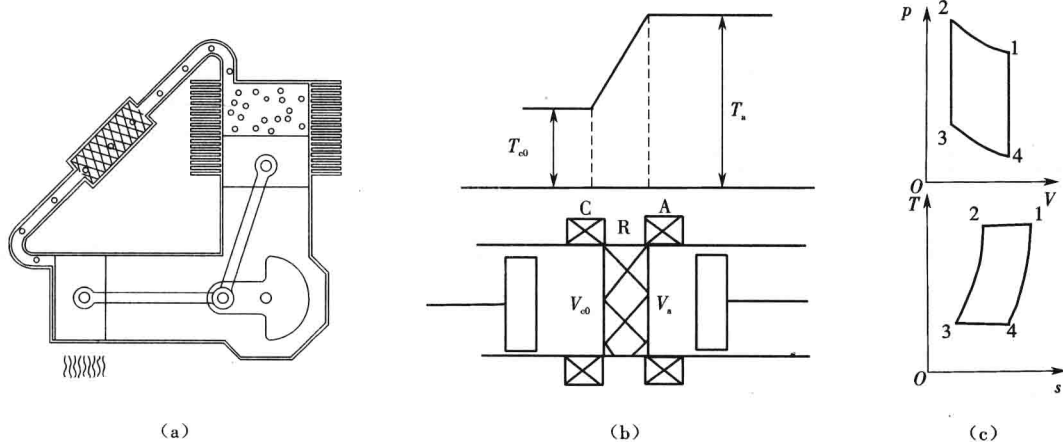


图 1-5 制冷机及其 Stirling 循环示意图

(a) 结构示意图 (b) 活塞运动示意图 (c) 压容图与温熵图

制冷机由回热器 R、冷却器 A、冷量换热器 C 及两个汽缸和两个活塞组成。左面为膨胀活塞,右面为压缩活塞。两个汽缸与活塞形成两个工作腔,即冷腔(膨胀腔) V_{c0} 和室温(压缩)腔 V_a ,由回热器 R 连通,两个活塞作折线式间断运动。假设在稳定工况下,回热器中已经形成了温度梯度,冷腔保持温度 T_{c0} ,室温腔保持温度 T_a 。从状态 1 开始,压缩活塞和膨胀活塞均处于右止点。汽缸内有一定量的气体,压力为 p_1 ,容积为 V_1 ,循环所经历的过程如下。

等温压缩过程 1—2:压缩活塞向左移动,而膨胀活塞不动,气体被等温压缩,压缩热经冷却器 A 传给冷却介质(水或空气),温度保持恒值 T_a ,压力升高到 p_2 ,容积减小到 V_2 。

定容放热过程 2—3:两个活塞同时向左移动,气体的容积保持不变,直至压缩活塞到达左止点。当气体通过回热器 R 时,将热量传给填料,因而温度由 T_a 降低到 T_{c0} ,同时压力由 p_2 降低到 p_3 。

等温膨胀过程 3—4:压缩活塞停在左止点,而膨胀活塞继续向左移动直至左止点,温度为 T_{c0} 的气体进行等温膨胀,通过冷量换热器 C 从低温热源(冷却对象)吸收一定的热量 Q_{c0} (制冷量),容积增大到 V_4 ,而压力降低到 p_4 。

定容吸热过程 4—1:两个活塞同时向右移动直至右止点,气体容积保持不变,即 $V_1 = V_4$,回复到起始位置,当温度为 T_{c0} 的气体流经回热器 R 时从填料吸热,温度升高到 T_1 ,同时压力增加到 p_1 。

4—1 过程气体吸收的热量等于 2—3 过程气体所放出的热量。制冷机 Stirling 循环的理想热力学效率与 Carnot 逆循环热力学效率相同,即

$$\eta_i \approx \frac{T_{c0}}{T_a - T_{c0}}$$

Stirling 发动机通过工质在冷热环境转换时的热胀冷缩做功,其工作过程是 Stirling 制冷机工作过程的逆循环,热效率与 Carnot 循环相同,即

$$\eta_i \approx \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$

在相同温度范围内,与 Carnot 循环有相同热效率的一类理想循环常称为概括性卡诺循环。Stirling 循环是实际中可实现的概括性 Carnot 循环,热效率可达 40%。

1.2 内燃机热力循环

外燃机循环是闭式循环,而内燃机循环是开式循环。为简便起见,对内燃机循环的分析仍采用理想化的闭式循环。根据运转形式不同,内燃机可分为往复式(如柴油机、汽油机)、回转式(如燃气轮机)和喷射式。

1.2.1 喷射式发动机

喷射式发动机根据牛顿第三定律利用大量高速空气排出时的反推力作为动力,又可分为冲压喷射发动机、脉冲喷射发动机、火箭发动机和涡轮喷射发动机。冲压喷射发动机(Ram Jet Engine)为一空气热动力导管(aero-thermodynamic-duct),启动时由外加动力使其

达到工作速度,这时从前端进口冲入的空气在燃烧室与燃料燃烧,温度、压力提高后,经后端出口喷出,从而为发动机提供动力。只有在超声速运行条件下,冲压喷射发动机才有优势,它通常作为火箭、靶机或导弹的巡航动力来源,不适合一般飞机使用。脉冲喷射发动机(Pulse Jet Engine)为一空气动力导管(aerodynamic duct),但在导管前端进口设有弹簧控制的进气阀,进气阀开启,空气进入燃烧室与喷入的燃油燃烧,此时因压力增加使前端进气阀关闭,燃气自后端喷嘴喷出为发动机提供推力,同时因压力减小使前端进气阀重新开启,又进行下一次进气,如此周而复始。脉冲喷射发动机可以自启动,但耗油量大,常用于模型飞机。火箭发动机(Rocket Engine)不使用大气作为助燃气体以及推进气流,而是使用自身携带的液态或固态燃料燃烧产生推进气流,所以可以在地球大气层外工作。

图1-6所示为涡轮喷射发动机示意图。当它以一定飞行速度前进时,空气就以相同的速度进入喷气发动机。高速空气流首先在发动机前端的扩压管中降低流速提高压力,然后进入压气机,在其中经绝热压缩进一步提高压力。压缩后的空气在燃烧室中和喷入的燃料一起进行定压燃烧。燃烧产生的高温燃气首先在燃气轮机中绝热膨胀产生轴功用于带动压气机,然后进入尾部喷管中并在其中继续膨胀获得高速,最后从尾部喷向大气。

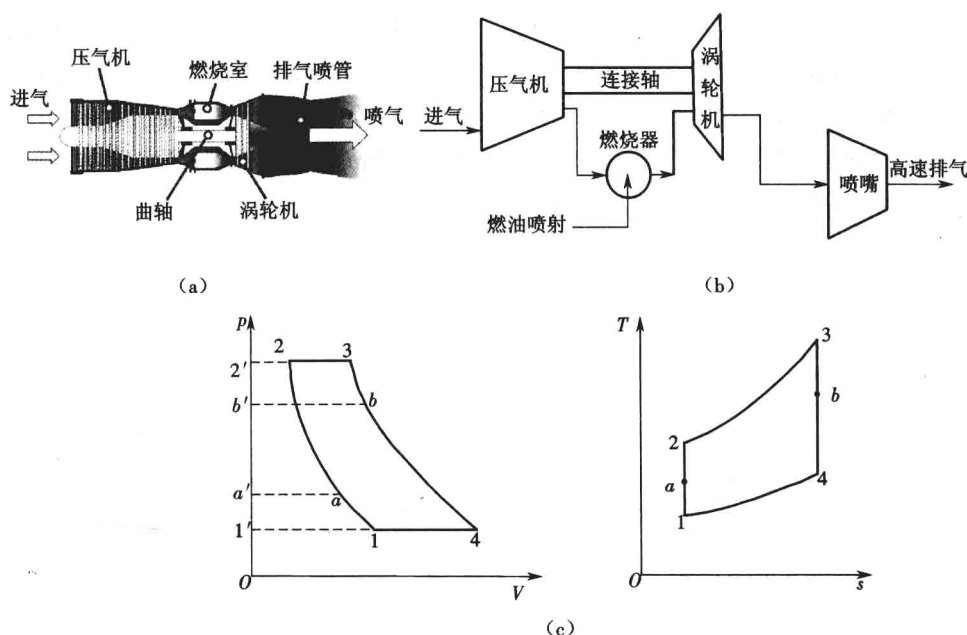


图1-6 涡轮喷射发动机示意图

(a)结构示意图 (b)工作示意图 (c) $p-V$ 图和 $T-s$ 图

涡轮喷射发动机理想循环如图1-6(c)所示。其中,过程1— a 为扩压管中的绝热压缩过程,过程 a —2为压气机中的绝热压缩过程,过程2—3为燃烧室中的定压吸热过程,过程3— b 为燃气轮机中的绝热膨胀过程,过程 b —4为尾部喷管中的绝热膨胀过程,过程4—1为在大气中放热的定压放热过程。在 $p-V$ 图上,面积1— a — a' —1'—1代表压气机所消耗的轴功,面积3— b — b' —2'—2—3代表燃气轮机所输出的轴功,按喷射发动机的工作原理,

两轴功的数值相等,故两面积相等。

若忽略压气机、燃烧室和涡轮进出口气体速度的变化,认为发动机内部各截面速度基本相等,涡轮喷射发动机循环功可表示为

$$W_0 = \frac{1}{2}(c_{\text{B}}^2 - c_{\text{R}}^2)$$

其中, c_{B} 为尾部喷管喷出气流速度, c_{R} 为飞机速度。

循环功并不能完全用于推动飞机前进,由功的定义可知只有飞机受到的推力与飞机速度之积才是飞机所获得的推力功,即

$$W_{\text{p}} = (c_{\text{B}} - c_{\text{R}})c_{\text{R}}$$

飞机获得的推力功与发动机输出的循环功之比称为推进效率,即

$$\eta_{\text{t}} = \frac{W_{\text{p}}}{W_0} = \frac{2}{c_{\text{B}}/c_{\text{R}} + 1}$$

1.2.2 燃气轮机

燃气轮机是一种利用燃油燃烧产生的高温气体混合物直接推动燃气涡轮产生旋转运动的动力机械。它的单机功率可达 280 MW,功率密度(power to weight ratio)在所有发动机中最大。燃气轮机是一个由多个部件组成的装置或系统,其压缩、燃烧和膨胀做功分别在压气机、燃烧室、燃气涡轮三个不同部件中进行,如图 1-7 所示。因其直接利用燃气做功,所以它归属于内燃式热机。燃气轮机理想热力循环是 Brayton 循环,由等熵压缩、等压加热、等熵膨胀和等压放热四个过程组成,其循环热效率

$$\eta_{\text{t}} = 1 - \frac{1}{(p_2/p_1)^{(\kappa-1)/\kappa}}$$

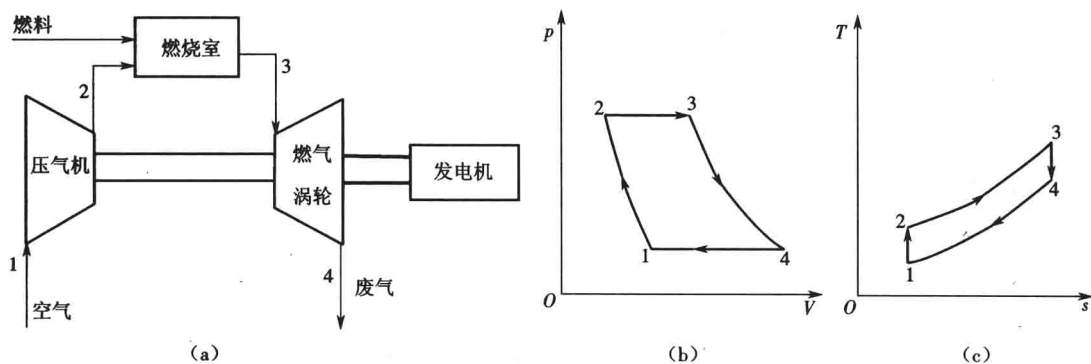


图 1-7 燃气轮机工作循环

(a) 工作示意图 (b) 循环 $p-V$ 图 (c) 循环 $T-s$ 图

燃气轮机的进气压缩可由自由活塞发动机完成,由此形成自由活塞式燃气轮机装置。自由活塞发动机可以燃用价格低廉且不易挥发的燃油,压缩比可达 50:1,工作热效率高。如图 1-8(a) 所示,当自由活塞发动机气缸内的气体燃烧后进行膨胀时,推动两活塞分别向两端外移,并压缩两端气垫气缸 7 内的空气,将发动机所输出的全部有效功储存在空气中;

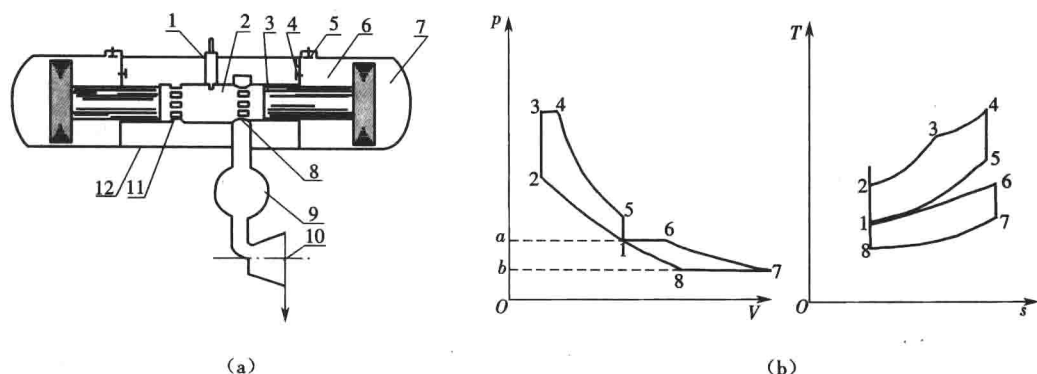


图 1-8 自由活塞式燃气轮机示意图

(a) 装置示意图 (b) 循环 $p-V$ 图与 $T-s$ 图

1—喷油器;2—燃烧室;3—压气机;4—输气阀;5—进气阀;

6,7—气缸;8—排气孔;9—储气罐;10—燃气轮机;11—扫气孔;12—扫气箱

在活塞外移的过程中,随着压气机气缸6容积的增大,压气机通过进气阀5从大气中吸进空气;当活塞外移接近端部时,右边的活塞首先把气缸上的排气孔8打开,气缸中的高温燃气立即经排气孔流入储气罐9,接着左边的活塞又把气缸上的扫气孔11打开,扫气箱12内压缩空气进入气缸,把残留在气缸中的燃气驱入燃气储气罐9,并使气缸内充满新鲜的压缩空气。由于这时发动机气缸内压力较低,因而在两端气垫气缸内高压空气的推动下,活塞由两端向气缸中间内移。当两个活塞分别把排气孔及扫气孔关闭后,发动机气缸内的空气即在绝热条件下进行压缩。同时压气机气缸6内的空气也被压缩而压力升高,当其压力达到扫气箱内压力时,输气阀4打开,压缩空气在活塞推动下进入扫气箱12。当两个活塞移动到接近中间位置时,由喷油器1把燃料喷入发动机气缸中进行燃烧。燃烧结束后就又开始膨胀过程,进行新的工作循环。储气罐9中的高温高压燃气不断进入燃气轮机10,在其中绝热膨胀推动叶轮输出轴功。由于自由活塞发动机中燃气膨胀所做的功全部通过活塞用于压气机的压缩,所以燃气轮机所输出的功也就是整个装置唯一对外输出的功。

自由活塞式燃气轮机装置的理想循环如图1-8(b)所示,1—2—3—4—5—1为自由活塞发动机气缸中工质所完成的混合加热循环,1—6为定压下向储气罐充气的过程,6—7为燃气在燃气轮机中的绝热膨胀过程,7—8为废气在大气中的定压放热过程,8—1则为空气在压气机气缸中的绝热压缩过程。根据自由活塞发动机中的能量平衡,压气机消耗的轴功等于自由活塞发动机的循环净功,所以 $p-V$ 图上循环1—2—3—4—5—1的面积应和压气机压气过程8—1左侧面积8—1— a — b —8相等。而整个装置输出的功,也就是燃气轮机输出的轴功,可用燃气轮机中绝热膨胀过程6—7左侧的面积6—7— b — a —6表示。自由活塞式燃气轮机装置理想闭式循环的热效率

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \gamma^{\kappa} - 1}{\varepsilon_{\text{总}}^{\kappa-1} [(\lambda - 1) + \lambda \kappa (\gamma - 1)]}$$

其中, $\gamma = V_4/V_3$, $\lambda = p_3/p_2$, $\kappa = c_p/c_v$, $\varepsilon_{\text{总}}$ 为自由活塞式燃气轮机装置总压缩比。

1.2.3 往复式活塞式内燃机

往复式活塞式内燃机对燃料要求高,不能直接燃用劣质液体燃料和固体燃料。由于往复运动速度的限制和制造上的困难,往复式活塞式内燃机转速不高,单机功率较低,内燃机低速运转时输出扭矩下降较多,故在许多场合需设置离合器和变速机构,系统复杂。

四冲程往复式活塞式内燃机工作过程如图 1-9 所示,其中 0—1 为大气压力下的定压进气过程(活塞从上止点运行到下止点),1—2 为绝热压缩过程(活塞从下止点向上运动),2—3 为定容燃烧过程(3 为活塞运行的上止点),3—4 为定压燃烧过程(活塞从上止点向下运动),4—5 为绝热膨胀过程,5—1 为定容下气缸排气而气缸中压力下降的过程(1 为活塞运行的下止点),1—0 为在大气压力下的定压排气过程(活塞从下止点运行到上止点),从而完成一个工作循环。

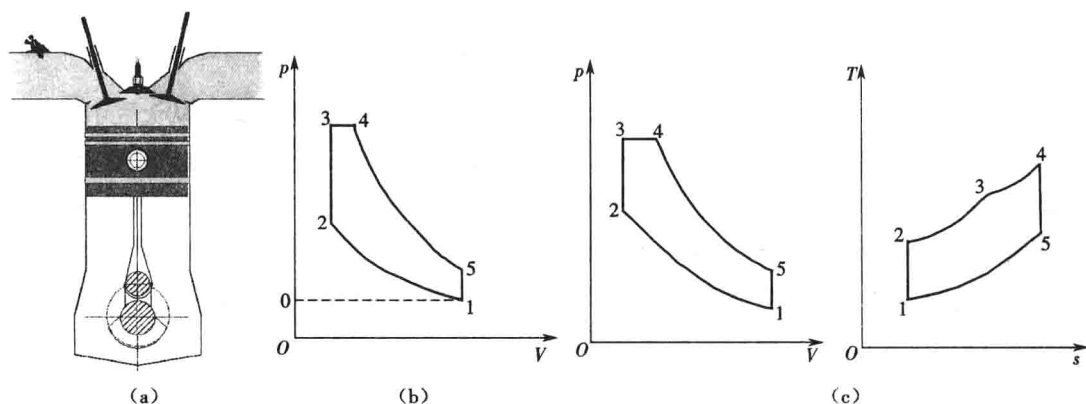


图 1-9 四冲程往复式活塞式内燃机示意图

(a) 结构简图 (b) 循环示意图 (c) Sabathé 循环 $p-V$ 图和 $T-s$ 图

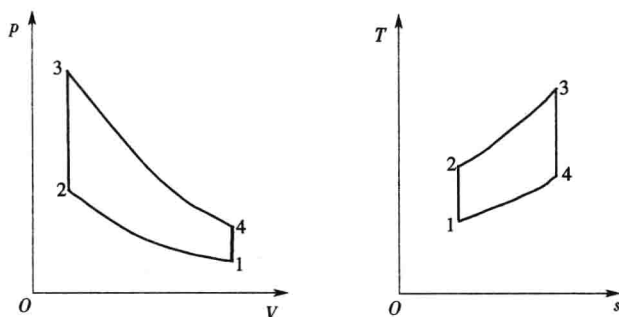
根据活塞式内燃机的工作过程,就可确定相应的理想热力循环,如图 1-9(c)所示。由于定压进气过程 0—1 与定压排气过程 1—0 的功量相互抵消而对整个循环没有影响,因此在对热力循环进行分析时可不考虑这两个过程。该循环称为混合加热循环,也称萨巴特循环(Sabathé Cycle)。理想闭式 Sabathé 循环由五个可逆过程组成:绝热压缩过程 1—2、定容加热过程 2—3、定压加热过程 3—4、绝热膨胀过程 4—5 及定容放热过程 5—1。循环热效率

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \gamma^{\kappa} - 1}{\varepsilon^{\kappa-1} [(\lambda - 1) + \lambda \kappa (\gamma - 1)]}$$

其中, $\gamma = V_4/V_3$, $\lambda = p_3/p_2$, $\varepsilon = V_1/V_2$, $\kappa = c_p/c_v$ 。

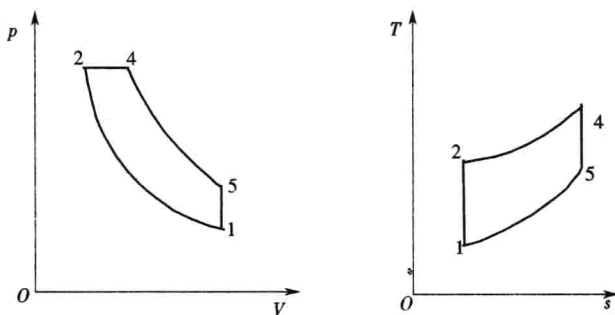
点燃式内燃机缸内可燃混合气在压缩接近终了时被点燃,可以认为是在定容下完成全部燃烧过程,如图 1-10 所示。定容加热循环(Otto Cycle)可以看作是 Sabathé 循环 $\gamma = 1$ 时的一个特例,循环热效率

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

图 1-10 Otto 循环 $p-V$ 图和 $T-s$ 图

有些增压柴油机及汽车用高速柴油机的燃烧过程,主要在活塞离开上止点后的一段行程中进行,可以认为是一个定压燃烧过程,如图 1-11 所示。定压加热循环(Diesel Cycle)可以看作是 Sabathé 循环 $\lambda = 1$ 时的一个特例,循环热效率

$$\eta_t = 1 - \frac{\gamma^\kappa - 1}{\varepsilon^{\kappa-1} \kappa (\gamma - 1)}$$

图 1-11 Diesel 循环 $p-V$ 图和 $T-s$ 图

初始状态和压缩比相同时, Otto 循环的热效率最高, Diesel 循环的热效率最低。对于高增压柴油机,因受机件强度的限制,必须控制其最高压力及最高温度。在相同初始状态和最高温度及最高压力条件下, Diesel 循环的热效率最高, Otto 循环的热效率最低。在这两种情况下, Sabathé 循环热效率均处于中间。

1.3 本书讨论内容

本书重点讨论往复活塞式内燃机中的流体流动问题。往复活塞式内燃机热效率高,数值上远远超过任何其他形式的原动机。绝大多数汽车、铁路机车、船舶、轻型飞机以及一些电站等都采用往复活塞式内燃机。它们的形式多种多样,排量从几毫升的航空模型用单缸机到每缸排量达几立方米的船用机,功率从 100 W 左右到上万千瓦。与稳定吸气、连续燃烧的旋转式发动机(燃气轮机)不同,往复式发动机因为往复运动而产生振动,所以人们设计了没有固有振动的断续做功的转子(Wankel)发动机。Wankel 发动机的结构与往复式内

燃机不同,但工作循环的基本过程仍与往复式发动机相同。往复式内燃机的理论同样适用于 Wankel 发动机或其他形式的断续做功的发动机。

凡是用空气氧化燃料的发动机,其输出的功率归根到底取决于空气吸入、空气与燃料混合以及排气流出的速率。燃料燃烧发出的部分能量必须用来吸进空气和排出已燃气体。这部分能量越多,发动机输出的能量越少。此外,排气也含有能量,且一般直接排出气缸,如果能充分利用排气能量,也可提高有用功输出以及发动机效率。往复式内燃机工作过程是断续的,每个气缸“吸一口气”,使燃料在其中燃烧,然后排出燃烧产物,再吸“下一口气”,因而流出、流入发动机的气流是脉动的。脉动气流带有能量,对此需要了解、分析和利用。否则,脉动能量有可能阻挠充量流动,降低发动机输出功率和效率。因此,需要设计良好的进排气系统。此外,进排气系统还有很多附属装置,例如在进排气系统中采用消声器抑制噪声(噪声是气流脉动的另一种表现形式);安装空气滤清器过滤吸入的空气,以排除对发动机摩擦表面有害的灰尘;安装排气后处理装置消除排气中许多对环境有害的物质。第2章将在分析管道系统气流脉动的基础上,对上述问题进行讨论。

按点火方式不同,往复式内燃机可分为压燃式和点火式两类。这两类发动机在混合气形成及燃烧方面存在着明显差别,因而对缸内气流运动的作用也有不同的要求。点火式发动机,混合气在点燃前已经形成,缸内气流运动对混合气形成和混合气燃烧分别进行作用。而压燃式发动机,部分混合气形成之后就开始燃烧,缸内气流运动对缸内混合气的形成和燃烧同时进行作用,此外缸内流动还影响传热以及产生流动损失。通常采用在缸内组织强大涡流、滚流或挤流的方式,来强化流动的影响。滚流、涡流需要在进气过程中产生,并会引起附加能量消耗,涡流或滚流越强,能量消耗越大;进气机构结构过于流线型,附加能量耗散减少,但涡流强度可能降低,燃烧缓慢或不完全,输出功率下降。挤流和滚流主要与活塞凹坑性状、缸盖形状有关。此外,缸内气流运动还随活塞运动而不断发展变化。这些内容将在第3章中讨论。

对于直喷发动机,燃油沿高压油管输送到喷油器,通过喷油器小孔射入燃烧室进行雾化和燃烧。由高压油泵、高压油管和喷油器组成的燃油供给系统决定着每个工作循环的供油量、供油时间和供油规律。液态燃油喷入燃烧室后,形成一个由液柱、油滴、油蒸气和空气组成的喷雾场,它的发展变化取决于燃油供给系统以及燃烧室内的流场。内燃机缸内喷雾场在动力学和热力学上都是瞬变而又极不均匀的,并且对燃烧过程存在直接影响。第4章将主要讨论燃油输送过程及喷射与雾化的基本概念和基本理论,并附带介绍发动机内可燃混合气的形成过程。

四冲程发动机依靠活塞的强制作用完成新鲜空气充量的吸入和燃烧产物的排出,而且这些过程占总循环时间的一半以上。虽然排气结束,气缸内通常有残余气体,但要得到足够大的新鲜空气充量与残余气体之比,没有多大困难。二冲程发动机换气过程占总循环时间的很小一部分,换气过程发生在活塞处于外止点附近处,这时进排气口都开着,活塞运动对换气过程影响很小。换气过程依赖进气流的流向以及所供给的空气状态,所以一般二冲程发动机的换气过程又称扫气过程。由于二冲程发动机的扫气过程的特殊性,本书对这一问题不予讨论。

这里主要讨论内燃机中的流体流动问题,离开数学,论述将会变得冗长、繁杂。但作为以应用为主的工程技术工作者,又要求尽量避免涉及太多、太深的数学知识。另外,当前计算技术的发展,使得一些复杂的数学问题都可应用专用软件来处理。所以,本书正文尽量设法减少数学推导,并避免论述数学方程的求解过程,把重点放在分析各个因素在方程中的意义及作用上,帮助读者了解有关因素对性能的影响趋势,以便在利用计算机软件进行分析设计时,对计算结果进行初步判断。

参考文献

- [1] 沈维道,郑佩芝,蒋淡安. 工程热力学[M]. 北京:高等教育出版社,1983.
- [2] W. J. D. 安南德, G. E. 罗埃. 内燃机中的气体流动:动力、特性、环境污染管理与消减噪声[M]. 王景祜,徐守义,译. 北京:中国农业机械出版社,1981.
- [3] A. S. 坎贝尔. 燃烧发动机热力学分析[M]. 葛贤康,张正举,曾利权,译. 北京:中国农业机械出版社,1983.
- [4] 陈大燮. 动力循环分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1981.

第2章 进排气系统中的气流运动

2.1 热力学基本概念

求解气体流动问题,就是在一定初始条件与边界条件下,求出流体质点的压力 p 、比容 τ 、温度 T 以及运动速度 u 与时间 t 和位置 (x, y, z) 的函数关系。所以,研究流体运动问题就是研究流体每个质点在任一时刻、任一位置的运动学状态和热力学状态。

2.1.1 流体状态的变化过程

在流体流动过程中,如果流体的每个质点的密度 ρ (或比容 τ) 不变,则称其为不可压缩流体,否则就称为可压缩流体。对不可压缩流体,有

$$\frac{d\rho}{dt} = 0$$

由于 $\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + u \frac{\partial\rho}{\partial x} + v \frac{\partial\rho}{\partial y} + w \frac{\partial\rho}{\partial z}$, 所以对不可压缩流体,空间点的流体密度是可以随时间变化的,并且同一时刻空间点的密度也可以不同。

在流体流动过程中,如果每个空间点上流体的物理量不随时间变化,即

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0$$

则该运动称为定常流动,否则就称为不定常流动。

在流体流动过程中,若考虑流体质点间的摩擦,则称流体为粘性流体;若不考虑流体质点间的摩擦,则称流体为无粘流体或理想流体。

当系统完成某一过程之后,如果有可能使工质沿相同的路径逆行而回复到原来状态,并使相互作用中所涉及的外界亦回复到原来状态而不留下任何改变,则这个过程称为可逆过程。可逆过程的特点是静态(状态变化时变化速率为零)、平衡(与外界在等温情况下进行热交换,在力平衡状态下进行容积变化的功量交换)和无耗散(无任何摩擦)。只有可逆过程才可以在坐标图中用连续曲线表示以及利用热力学方法进行分析。

如果系统在状态变化的任一微元过程中,工质与外界都不发生热量交换,那么这个过程就称为绝热过程。在绝热过程中,系统质点之间可以存在热交换。绝对隔热的物质并不存在,理想的绝热过程并不能实现。对于一个实际过程,如果它变化很快,工质来不及与外界进行热交换,可以近似为绝热过程。这样的绝热过程是不可逆过程。

2.1.2 热力学定律

热力学第一定律可以表述为流体内能的增加等于从外界吸收的热量 dq 与外界对流体