

王宪成 张更云 韩树 张志远 孙志新 编

车用内燃机学

CHEYONGNEIRANJIXUE

兵器工业出版社



车用内燃机学

王宪成 张更云 韩树 编
张志远 孙志新

江苏工业学院图书馆
藏书章

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书讲述车用内燃机工作过程的基本理论、概念、设计、技术及试验。全书共分十一章,内容包括绪论、工程热力学基础、内燃机工作循环、内燃机性能指标、内燃机换气过程、内燃机混合气形成和燃烧、内燃机燃料供给与调节、内燃机特性与匹配、车用柴油机增压、车用内燃机设计和内燃机实验技术等。

本书主要供大专院校车辆工程、动力工程、机械工程及自动化专业本科生作为必修课教材使用,也可供从事装备车辆技术工作的人员及研究生作为参考资料使用。

图书在版编目(CIP)数据

车用内燃机学/王宪成等编. —北京:兵器工业出版社, 2006. 4

ISBN 7 - 80172 - 698 - 7

I. 车... II. 王... III. 汽车—内燃机—高等学校—教材 IV. U464

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 069454 号

出版发行:兵器工业出版社
发行电话:010-68962596, 68962591
邮 编:100089
社 址:北京市海淀区车道沟10号
经 销:各地新华书店
印 刷:北京银祥福利印刷厂
版 次:2006年4月第1版第1次印刷
印 数:1-1050

责任编辑:赵成森
封面设计:李 晖
责任校对:全 静
责任印制:赵春云
开 本:787×1092 1/16
印 张:17
字 数:432千字
定 价:42.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

《车用内燃机学》是为了满足军队高校的内燃机教学而编，内容涉及面广，具有技术先进，理论与实际联系紧密，实用性强的特点。

本书共分十一章，内容包括绪论、工程热力学基础、内燃机工作循环、内燃机性能指标、内燃机换气过程、内燃机混合气形成和燃烧、内燃机燃料供给与调节、内燃机特性与匹配、车用柴油机增压、车用内燃机设计概述和内燃机试验技术。

本书主要供大专院校车辆工程、动力工程、机械工程及其自动化专业本科生作为必修课教材使用，也可供从事装备车辆技术工作的人员及研究生作为参考资料使用。

本书由装甲兵工程学院机械工程系动力工程室王宪成主编。参加编写的有王宪成（第四、六、七章），张更云（第十、十一章），韩树（第二、八章），张志远（第五、九章），孙志新（第一、三章）。全书由胡望平审阅。

在本书编写过程中，参考了国内外有关文献、教材，在此对这些著作的作者表示衷心的感谢。由于编者水平有限，疏漏谬误之处在所难免，谨请读者批评指正。

编者

2006年2月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 内燃机的发展	(1)
第二节 内燃机的分类	(3)
第三节 车用内燃机的特点及要求	(4)
思考题	(6)
第二章 工程热力学基础	(7)
第一节 基本概念	(7)
第二节 热力学第一定律	(12)
第三节 理想气体的热力过程	(16)
第四节 热力学第二定律	(26)
第五节 活塞式内燃机理想循环	(30)
思考题	(37)
第三章 内燃机工作循环	(39)
第一节 四行程发动机的实际循环	(39)
第二节 内燃机的燃料及燃烧热化学	(41)
第三节 内燃机工作过程热力学模型	(50)
思考题	(58)
第四章 内燃机性能指标	(59)
第一节 指示指标	(59)
第二节 机械损失和机械效率	(62)
第三节 有效指标	(66)
第四节 各指标和有关参数之间的联系	(69)
第五节 影响功率 P_e 的因素	(71)
思考题	(74)
第五章 内燃机换气过程	(75)
第一节 四冲程内燃机的换气过程	(75)
第二节 四冲程内燃机的换气损失	(77)
第三节 内燃机换气过程影响因素	(80)
思考题	(84)
第六章 内燃机混合气形成和燃烧	(85)
第一节 缸内气体流动	(85)

第二节	柴油机的混合气形成	(88)
第三节	柴油机燃烧室	(91)
第四节	柴油机的燃烧	(96)
第五节	汽油机的燃烧	(105)
思考题	.....	( 109)
第七章	内燃机燃料供给与调节	(110)
第一节	概述	(110)
第二节	柴油机“泵 - 管 - 嘴”燃油供给系统的燃油喷射	(111)
第三节	柴油机“泵 - 管 - 嘴”燃油供给系统的主要参数	(115)
第四节	柴油机机械调速器工作特性	(120)
第五节	柴油机电子控制喷油系统	(125)
第六节	汽油机燃油供给电子控制系统	(132)
思考题	.....	( 138)
第八章	内燃机特性与匹配	(140)
第一节	内燃机的工况	(140)
第二节	负荷特性	(141)
第三节	速度特性	(145)
第四节	万有特性	(151)
第五节	内燃机的功率标定及大气校正	(153)
第六节	内燃机与车辆的性能匹配	(154)
思考题	.....	( 160)
第九章	车用柴油机增压	(162)
第一节	增压系统的分类	(163)
第二节	离心式压气机	(164)
第三节	废气涡轮	(169)
第四节	柴油机废气涡轮增压	(172)
第五节	增压柴油机的特点	(180)
第六节	柴油机与涡轮增压器的配合	(184)
第七节	改善涡轮增压柴油机特性的措施	(187)
思考题	.....	( 189)
第十章	车用内燃机设计概述	(191)
第一节	车用内燃机设计的一般过程	(191)
第二节	车用内燃机的结构选型	(194)
第三节	内燃机基本参数的选择	(196)
第四节	内燃机主要零件设计要点	(198)

第五节	配气机构设计要点	(215)
第六节	润滑系、冷却系与启动系	(225)
思考题	.....	(240)
第十一章	内燃机实验技术	(242)
第一节	概述	(242)
第二节	功率、转速和油耗的测量	(244)
第三节	常规参数测量简介	(254)
思考题	.....	(261)
符号表	.....	(262)
参考文献	.....	(264)

第一章 绪 论

凡是能将热能转变为机械能的机器统称为热机。蒸汽机、汽轮机、燃气轮机、内燃机、火箭喷气发动机等都属于热机。它们是工农业和交通运输业中动力的重要来源。其中内燃机又占有特殊重要的地位。

一般所说的内燃机都是指往复式内燃机。在这种发动机中，燃料在气缸内燃烧，产生高温高压气体直接推动活塞作往复运动，通过连杆、曲轴对外输出动力。如煤气机、汽油机、柴油机等。习惯上称往复式内燃机为发动机。

第一节 内燃机的发展

一、早期发展概况

18世纪60年代出现了以蒸汽机的广泛使用为标志的工业革命。到了19世纪60年代，又出现了效率更高，并且更为轻便的动力——内燃机。

1876年德国人奥托（Nicolaus August Otto）按罗沙的理论制出第一台四冲程煤气机，功率为2.94 kW，压缩比为2.5:1左右，效率为10%~12%。奥托机是内燃机发展史上的第一次重大技术突破。

1883年德国人G.戴姆勒（Gottlieb Daimler）研制成功了带表面蒸发型化油器的电火花点火的立式汽油机。

汽油机的出现为内燃机在交通运输车辆上的应用提供了条件。因为它的功率大、质量轻、体积小、热效率高，特别适应交通运输业的要求。1886年戴姆勒和奔驰分别成功地把他们制造的高速汽油机装在车辆上运行。现在，1886年被公认为汽车的诞生年。

1893年德国人鲁·笛塞尔（Rudolf Diesel）发表了压燃式内燃机的工作原理。在1898年研制出带冷却水套的、基本上按等压过程燃烧的、以煤油为燃料、用压缩空气将煤油喷入气缸的压燃式内燃机。压燃式内燃机的热效率比电火花点火式内燃机的热效率大大提高。压燃式笛塞尔机的研制成功是内燃机发展史上的第二次重大技术突破。

1914~1915年出现了结构简单、外形尺寸小的精密机械式喷油装置。1925年在德国建成了专业化生产喷油泵的工厂（Bosch），此后便停止使用带压气机的喷油装置，并使压燃式内燃机（柴油机）用于车辆上成为可能。

二、军用车辆内燃机的发展

1916年，汽车往复式发动机已历经近30年的发展，技术日趋成熟。以汽车汽油机为动力并带有装甲防护的车辆——坦克，出现在1916年的战场上。

第一次世界大战期间，坦克选用了汽车用直列 4 缸或 6 缸水冷汽油机，功率为 26 ~ 110 kW。例如，1916 年英国生产的第一批 I 型坦克，安装了直列 6 缸水冷汽油机，功率为 77 kW；法国坦克采用的是直列 4 缸水冷汽油机。在大战结束后 10 年左右的时间里，坦克装甲车辆迅速发展。一些国家研制、装备了多种坦克，从而使得多种型号的发动机在坦克上竞相得到选用，功率为 66 ~ 298 kW，主要是汽油机，少数采用了柴油机。它们有直列水冷汽车发动机和 V 型 12 缸水冷航空发动机，美国采用了星型风冷发动机。

随着对坦克性能要求的提高，选用当时生产的发动机，无论从功率、结构型式和车内布置等方面都不能适应坦克的需要。因此，在 20 世纪 20 年代后期，一些国家开始研制专用的坦克发动机。

英国于 1928 年研制了坦克汽油机和 66 kW 的坦克柴油机。

德国于 30 年代初期研制了 V 型 12 缸水冷坦克汽油机。

1932 年，美国泰里达因大陆发动机公司 (Teledyne continental Motors) 研制了星型、7 缸坦克风冷汽油机。1940 年末，“大陆”公司同时发展了 AV-1790V 型 12 缸风冷坦克汽油机。

苏联于 1932 年在哈尔科夫机车车辆厂开始研制坦克高速柴油机，1939 年定型；在 2 000 r/min 时功率为 368 kW，命名为 B₂，装于著名的 T-34 坦克。

第二次世界大战期间，仅苏联在其大多数坦克上安装 B₂ 系列柴油机；其他各国则以采用汽油机为主，而且种类、型号繁杂。发动机功率在 88 ~ 515 kW 之间。

三、20 世纪 50 ~ 60 年代

20 世纪 50 年代，苏联、联邦德国先后在其重型坦克 T-10、豹 II 上安装使用了功率为 552 kW、610 kW 的机械增压柴油机。美国则在 AV-1790 汽油机基础上发展成 AVI 1790-8 汽油喷射式发动机，装于 M46、M48 坦克，功率为 646 kW，转速 2 800 r/min。英国在奇伏坦坦克上安装了 515 kW 的二冲程柴油机。苏联于 1955 年开始设计二冲程 5TД 坦克柴油机。

第二次世界大战后的 10 ~ 15 年间，坦克主要使用 V 型 12 缸、四冲程水冷柴油机和 V 型 12 缸、四冲程风冷汽油机，功率 176 ~ 596 kW。由于柴油机的燃油消耗率较汽油机低约 20% ~ 30%，所以，在相同的燃料容积条件下，坦克行程储备大；柴油运输、储存、使用比较安全，火灾危险小。因此，20 世纪 50 年代各国坦克动力发展的主要趋势是柴油机化，装机功率略有提高。

四、20 世纪 70 ~ 90 年代

20 世纪 70 年代以后，涡轮增压技术、中冷技术继续发展，坦克发动机一方面通过提高增压度和对增压空气冷却等途径，大幅度提高柴油机功率；同时改善发动机扭矩特性，并使其结构更加紧凑、可靠，油耗率进一步降低。到 20 世纪 70 年代末，已装备的涡轮增压中冷机型有：联邦德国豹 II 坦克的 MB873 Ka-500 发动机，功率为 1 103 kW；英国挑战者坦克的 CV12TCA 发动机，功率为 883 kW。

20 世纪 80 年代以来，由于微电子控制、燃油喷射、涡轮增压可调技术的发展，使车辆柴油机性能获得突破性进展。由于采用了高燃油喷射压力 (98 ~ 118 MPa)、高燃烧峰值压

力 (11.77 ~ 14.71 MPa) 技术和使用高压比增压器 (压比 3 以上), 使柴油机平均有效压力大幅度提高 (达 1.667 ~ 2.158 MPa)、燃油消耗率降低 (达 195 ~ 210 g / (kW · h))、排气烟度下降, 并且气体排放明显改善。典型的机型是德国的 MT883Ka - 500, 美国的 XAV28 - 1450 可变截面增压中冷、低散热坦克柴油机。

20 世纪 90 年代以后, 超高增压旁通补燃发动机 UDV8X1500, 装于法国“勒克莱尔”主战坦克投入现役。

MT883 Ka - 500 发动机, 通过扩大缸径、行程, 发展成 MT883 Ka - 501 发动机, 功率达 1 200 kW。以 MT883 Ka - 501 为基础, 采用顺序增压并提高转速和压比, 研制出 MT883 Ka - 512 发动机, 功率为 1 660 kW; 采用两级增压、中冷和顺序增压研制出 MT883 Ka - 523, 功率达 1 920 kW, 后者用于高航速两栖车辆。

第二节 内燃机的分类

内燃机种类很多, 它们可以按如下不同方式分类:

一、按所用燃料分

1. 汽油机: 燃用汽油。
2. 柴油机: 燃用重质燃料, 如轻柴油、重柴油等。
3. 天然气发动机: 以天然气为主要燃料。
4. 液化石油气发动机: 包括液化天然气和压缩天然气。
5. 酒精发动机: 燃料为甲醇或乙醇。
6. 双燃料发动机: 如吸入天然气、喷入柴油点火等。
7. 灵活燃料发动机: 如汽油与醇类燃料可以切换等。
8. 二甲醚发动机: 主要燃料为二甲醚。

二、按缸内着火方式分

1. 压燃式: 燃料靠压缩行程接近终点, 气缸内气体的高温使其自燃着火, 这种发动机又称压燃式发动机。柴油机采用这一着火方式。
2. 点燃式: 燃料的燃烧以火花塞发出的火花为火源对混合气点火燃烧, 故这种发动机又称点燃式发动机。汽油机即采用这一着火方式。

三、按冲程数分

1. 四冲程发动机: 活塞运行四个行程 (曲轴旋转二周完成) 对外作一次功。
2. 二冲程发动机: 活塞运行两个行程 (曲轴旋转一周完成) 对外作一次功。

四、按活塞运动方式分

1. 往复式: 发动机对外做功时, 活塞作往复运动。
2. 旋转式: 发动机对外做功时, 活塞作旋转运动。

五、按冷却方式分

1. 流体冷却。
2. 空气冷却。
3. 复合冷却。

六、按气缸数目分

1. 单缸。
2. 多缸（2缸以上）。

七、按增压程度分

1. 非增压（自然进气）。
2. 增压：低增压（ $\pi_b < 1.8$ ）。
 中增压（ $\pi_b = 1.8 \sim 2.5$ ）。
 高增压（ $\pi_b = 2.5 \sim 3.6$ ）。
 超高增压（ $\pi_b > 3.6$ ）。

八、按气缸排列分

立式、卧式、直列式、V型、W型。

对置气缸或对置活塞式。

H型、王字型、X型、星型。

九、按用途分

农用、船用、汽车用、飞机用、拖拉机用、工程机械用、发电用、内燃机车用、军用。

第三节 车用内燃机的特点及要求

活塞式内燃机的应用范围十分广泛。地面上的各种运输车辆（如汽车、拖拉机、内燃机车）、发电站、农业机械、矿山、石油、建筑工程机械等方面都大量使用内燃机作为源动力。在水上运输方面，很多船舶的主机或辅机亦使用内燃机。航空方面，一些小型飞机也使用内燃机作为动力。

内燃机在国防中的地位十分重要，使用范围也非常广泛。我军各种战斗车辆（如坦克、步兵战车、装甲输送车、自行火炮、导弹发射车、装甲指挥车等）、运输车辆、火炮牵引车辆、工程机械都大量使用内燃机作为动力。

内燃机获得如此广泛的应用是由于它具有以下的特点：

1. 热效率高。热效率高表明燃烧同样的燃料能获得更多的功，因此经济性好。尤其柴油机，是热效率最高的热机，目前最高热效率已接近50%。
2. 外型尺寸小，质量轻，便于移动。
3. 功率范围广，适应性好。单机功率可从零点几千瓦到数万千瓦，可以适应各种用途

的需要,这是其他热机难以达到的。

4. 启动迅速。正常情况下仅需几秒钟,而且能很快地达到全功率状态。
5. 维护简单,操作方便。

内燃机存在的主要缺点是:

1. 燃料限制。只能使用液体燃料或气体燃料。如使用固体燃料时,则要准备笨重的煤气发生器,先把固体燃料转变为气体燃料才能使用。
2. 废气中的有害成分造成大气污染。主要是 NO_x 、碳烟和 HC、CO 等。
3. 低转速时难于发出最大扭矩。因此以内燃机为动力的车辆,都必须装有变速机构。

坦克发动机属于车用内燃机的一类,一般对车用内燃机的要求也适用于坦克发动机。例如功率大、体积小、质量轻、启动性好、维修方便、经济性好、寿命长等等。但是一台发动机要同时满足各项要求是十分困难的,例如质量轻与寿命长往往是矛盾的。因此,不同用途的内燃机,往往只能侧重一些主要要求加以满足。

根据坦克的用途及工作条件,对其发动机的主要要求如下:

1. 足够的功率

现代战争的特点之一是“快”。为适应这种特点,坦克应具有良好的机动性,包括较高的行驶速度和良好的加速性。为此坦克发动机应具有足够大的功率。

通常用每吨坦克自重所具有的功率数来评价。现代坦克此数据已达 20 kW/T 左右。

2. 外廓尺寸小

发动机的外廓尺寸直接影响其在坦克内的总体布置。外廓尺寸小,特别是降低高度,将有利于减小坦克高度,提高坦克的防护性能。从另一方面看,发动机尺寸减小,可相应地增大坦克内战斗部分的空间,可携带更多的弹药或油料,以提高坦克的总体性能。

3. 工作可靠性好

作为战斗车辆的坦克,工作可靠是其最基本的要求之一。发动机的可靠性包括结构可靠、故障率低、保险期长,也包括燃料的安全可靠、战时失火的危险性小。

4. 燃料和机油的比油耗低,经济性好

比油耗低,不仅具有经济意义,也具有战术意义。因为坦克上所携带的油料有限,比油耗低,可增加坦克的行驶半径,提高坦克的战术性能。或者在保持行驶半径一定的条件下,减小油箱的容积,从而增加携带的弹药数量。此外,比油耗低还可减轻战时后勤补给的负担。

5. 工作适应性强

发动机的工作适应性包括:

- (1) 对外界负荷变化的适应性,即适应性系数应较大(详见第八章),加速性好。
- (2) 对外界环境变化的适应性,如海拔高度、环境温差、丘陵沙漠地形等等。在高温地区不致过热,在严寒地区能迅速启动,在沙漠地区能可靠工作等等。
- (3) 对多种燃料的适应能力。

6. 启动性好

坦克发动机的启动性能好坏,直接影响坦克投入战斗的准备时间的长短,因此要求坦克发动机在任何条件下(包括零下 40℃ 的严寒区)都要能迅速、可靠地启动。

7. 使用、维护简便

由于坦克乘员受服役年限的限制，加之坦克使用和维护是在比较困难的条件下进行，因此坦克发动机的使用、维护应尽可能简单、方便。如需经常检查、维护的部件，应能方便接近，减少拆卸机件的数量，以减轻乘员不必要的体力消耗。

思 考 题

1. 内燃机的分类。
2. 对坦克用发动机的要求有哪些？

第二章 工程热力学基础

工程热力学是热力学的一个分支，它研究热能和机械能相互转换（即热功转换）的过程及其规律，并着重于研究这些规律在热力设备上的应用。

本章就学习内燃机原理所必需的热力学基本知识作一扼要的叙述，从而为学习内燃机原理提供必要的理论基础和计算方法。

第一节 基本概念

一、工质、热源和热力系统

工程热力学不深入研究各种热力设备的具体构造和工作特性，它只着重分析存在于热力设备中的共同性问题。例如在活塞式内燃机中，是通过燃料与空气相混合，在气缸内燃烧而获得高温高压的燃气，燃气再推动活塞带动曲轴旋转而对外做功，最后废气排入大气中。蒸汽动力装置却是使水从燃气中吸收热量而获得高温高压的水蒸气，用水蒸汽推动蒸汽机的活塞或蒸汽轮机叶轮而对外做功，最后乏汽被排入大气或冷凝器中凝结。其他热机的工作方式也都不尽相同。但是概括起来，这些热力设备总是用一种工作物质，从某一能源中获取热能后使它具有高能而对机器做功，最后又把余下的热能排入大气或冷却水中。这个过程是任何热动力设备共同性的、本质的过程。

通常，我们把实现热能和机械能之间相互转化的工作物质叫做工质，把供给工质热量的高温物质叫做热源（或高温热源），把吸收工质放出的热量的冷却介质或环境叫做冷源（或低温热源）。这样，任何热动力设备的工作就被概括为：工质从热源吸收热能，将其中一部分转化为机械能而做功，并把余下的一部分传给冷源。

为分析问题方便起见，和力学中取分离体一样，热力学中常把分析的对象从周围物体中分割出来，研究它通过分界面与周围物体之间的热能和机械能的传递。这些作为研究对象的物体总称为热力系统，而把热力系统外面和热功转换过程有关的其他物体总称为外界。系统和外界之间的分界面可以是实际存在的，也可以是假想的，通常，我们都称之为边界。

热力系统可以分为闭口系统和开口系统。若一个热力系统和外界之间只可能有热量和机械功等能量交换而无物质交换，这种系统就称为闭口系统，如图 2-1 所示。若一个热力系统和外界间既可有热量和机械功等能量交换，同时又有物质的交换，这种系统就称为开口系统，如图 2-2 所示。

在热力学中还常使用到绝热系统和孤立系统这两个重要概念。绝热系统是指和外界没有热量传递的热力系统，孤立系统是指和外界没有任何形式的能量传递（主要指热量和功）的热力系统。显然，绝对来说，这两种系统是不存在的。它们只是一些实际过程忽略不计某

些因素时的理想化模型。

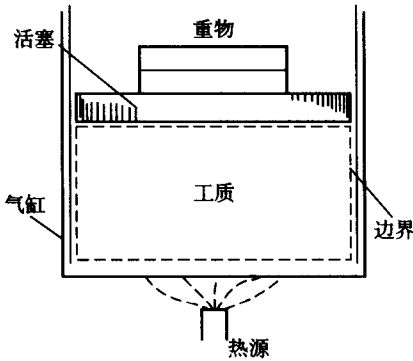


图 2-1 闭口系统

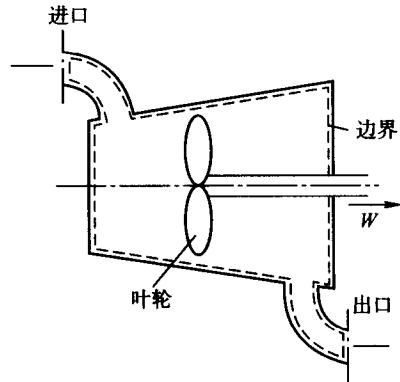


图 2-2 开口系统

二、状态与状态参数

状态，是在某一定瞬间，用以表示物质物理特性的总标志，用来描述物质的状态特征的物理量就是状态参数。

从物理性质上来看，由于气体便于流动、压缩和膨胀，因此在热力设备中往往都使用气体作为工质。在热力学中常用的气体状态参数共有六个，即温度 (T)，压力 (p)，比体积 (v)，热力学能 (U)，焓 (H) 和熵 (S)。其中可以直接测量的 p 、 v 、 T 称为基本状态参数。实际上，气体的状态只要用两个彼此独立的参数就可以确定，其他的状态参数可以表示为这两个参数的函数。

1. 温度 T

温度表示物体的冷热程度。分子运动学说认为，气体的温度与分子运动的平均移动动能成正比。

在法定计量单位中，温度的单位为开尔文，代号为 K。它选取水的固相、液相、气相三相平衡状态下的温度，作为定义热力学温标的单一固定点，并规定水的三相点温度为 273.16 K，而热力学温标中温度单位开尔文为三相点温度的 $1/273.16$ 。

为了实用上方便，在法定计量单位中也规定了一种实用温标，即摄氏温标，符号为 t ，单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)。两种温标起点不同，它们两者间的关系为

$$t = T - T_0 \quad (2-1)$$

式中 $T_0 = 273.15 \text{ K}$ ，为冰点的热力学温度。

2. 压力 p

单位面积上受到的垂直作用力称为压力，分子运动学说认为，气体对容器壁的压力是气体分子撞击容器壁的结果，它与分子浓度及分子平均移动动能成正比。

在法定计量单位中，压力的单位是帕斯卡 (Pa)，因工程应用中 Pa 单位太小，有时以 10^6 Pa 和 10^3 Pa 作单位，称为兆帕 (MPa) 和千帕 (kPa)。

流体的压力用压力计测量，工程上常应用的压力计有弹簧管式和 U 形管式两类。压力计测得的压力为绝对压力与当地大气压力之差，称为表压力。

3. 比体积 v

单位质量的气体所占的容积称为气体的比体积, 用符号 v 表示。在法定计量单位中, 比体积的单位是 m^3/kg , 如气体的质量为 $m\text{kg}$, 容积为 $V\text{m}^3$, 则

$$v = \frac{V}{m} \quad (2-2)$$

比体积的倒数称为密度, 用 ρ 表示。在法定计量单位中, 密度的单位为 kg/m^3 。

密度和比体积反映了气体分子聚集疏密的程度。

4. 热力学能 U

在工程热力学中, 气体的内热能称为热力学能或内能, 它包括气体的内动能和内位能。

根据分子运动学说的理论, 分子在不断地作不规则的平移运动, 其动能可由温度来反映, 如果是多原子分子, 则分子还有旋转运动和振动, 这些能量也是与温度有关的。此外, 由于分子间作用力的存在, 分子还具有位能。能量的大小决定于分子间的平均距离, 即决定于比体积。因此, 热力学能是温度和比体积的函数。

热力学能用符号 U 表示, 单位为焦耳 (J)。1 kg 气体具有的热力学能用符号 u 表示, 叫做比热力学能, 单位为 J/kg , 即

$$u = \frac{U}{m} \quad (2-3)$$

5. 焓 H

设有 1 kg 状态为 p_1 、 v_1 、 u_1 的工质从大气中进入气缸, 如图 2-3。此时工质以压力 p_1 推动活塞占有等于 v_1 的气缸容积而做功, 其值为 $p_1 v_1$ 。此时工质的状态没有变化, 其热力学能仍为 u_1 。对这个系统 (气缸) 来说, 由于进入 1 kg 工质而带进系统的总能量, 则为 $u_1 + p_1 v_1$ 。我们把这一能量称为比焓 h_1 。同样, 当 1 kg 工质在状态 p_2 、 v_2 、 u_2 下离开气缸时, 它带走的总能量为比焓 $h_2 = u_2 + p_2 v_2$, 即有

$$h = u + pv \quad (2-4a)$$

对于 $m\text{kg}$ 工质

$$H = U + pV \quad (2-4b)$$

其中, H 叫做焓, 它的单位是焦耳 (J)。比焓 h 的单位是 J/kg 。根据它们的定义式, 显然有

$$h = \frac{H}{m} \quad (2-5)$$

比焓 h 是 1 kg 工质的热力学能 u 和工质在流动时, 由机械移动而携带的功 pv 的总和, 其中 pv 又称为流动功或推进功。既然 p 、 v 、 u 都是工质的状态参数, 由它们所决定的 h 也是工质的状态参数。

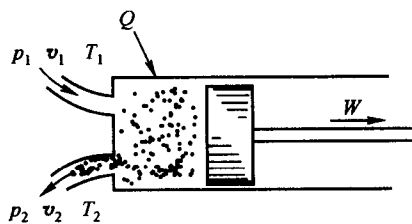


图 2-3 工质焓的示意图

6. 熵 S

在可逆过程（见下文）中，工质熵的增量等于在过程中工质所接受的热量除以工质的温度所得到的商。

熵用符号 S 表示，单位为 J/K 。1 kg 工质所具有的熵用符号 s 表示，叫做比熵，单位为 $J/kg \cdot K$ ，因此有

$$dS = \frac{dQ}{T} \tag{2-6a}$$

及

$$ds = \frac{dq}{T} \tag{2-6b}$$

其中， Q 表示过程中吸收的热量， q 表示过程中每 kg 工质吸收的热量。

三、可逆过程与不可逆过程

1. 平衡状态与准静态过程

热力系统的平衡状态，是指系统内各部分的温度、压力等都相同时的状态。显然，它应包括热的平衡与力的平衡两个方面。

由于独立的状态参数只有两个，因而可以利用任意两个独立状态参数组成二维平面坐标系。坐标图上任一点就代表了气体的某一确定的平衡状态。通常用得最多的是 $p-v$ 图（图 2-4）和 $T-s$ 图（图 2-5）。由于系统处于平衡状态时，系统内各处温度和压力都相等，即它有确定的状态参数，所以只有平衡状态才能在坐标图上表示。今后我们讲的状态都是指的平衡状态。

系统由一个状态变到另一个状态叫做系统经历了一个过程。例如热力机械中的压缩、膨胀等都是一个过程。在实际的设备中所经历的过程都是很复杂的。由于一切过程都是平衡被破坏的结果，即只有系统与外界有了力或热的不平衡之后，才能促使系统向新的状态变化，因此实际的过程都是不平衡的。但是某些情况下系统在平衡被破坏之后能自动回复到平衡状态，而且回复所需的时间又很短，如果过程进行得很缓慢，过程经历的时间与回复的时间比较起来相当大，则可以认为每一个中间状态，系统都来得及在全部容积中建立起同一温度和同一压力，即每一个中间状态都是平衡状态。这样的过程叫做准静态过程。

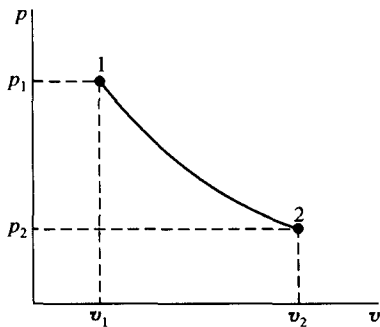


图 2-4 $p-v$ 图

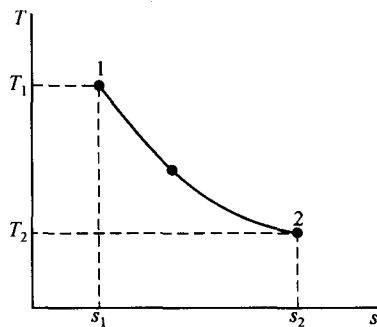


图 2-5 $T-s$ 图