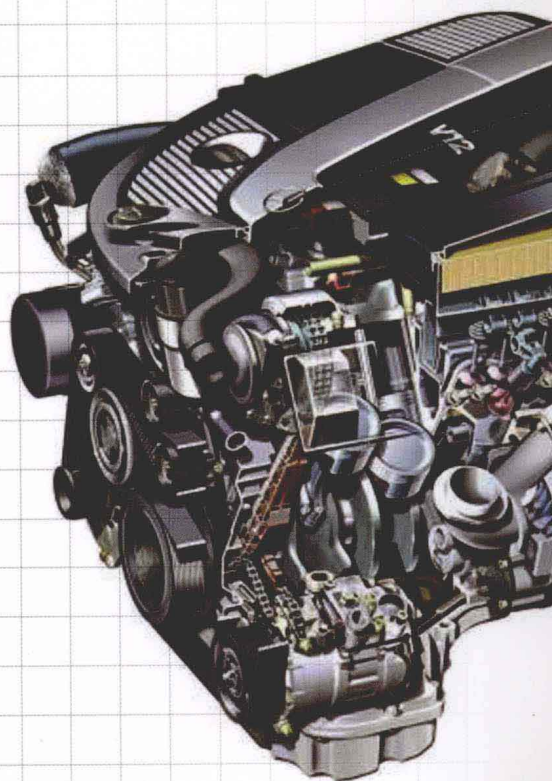


高等学校国家级特色专业  
——车辆工程专业系列教材



# QI CHE FA DONG JI YUAN LI

程晓章 主 审◎孙 军

# 汽车发动机原理

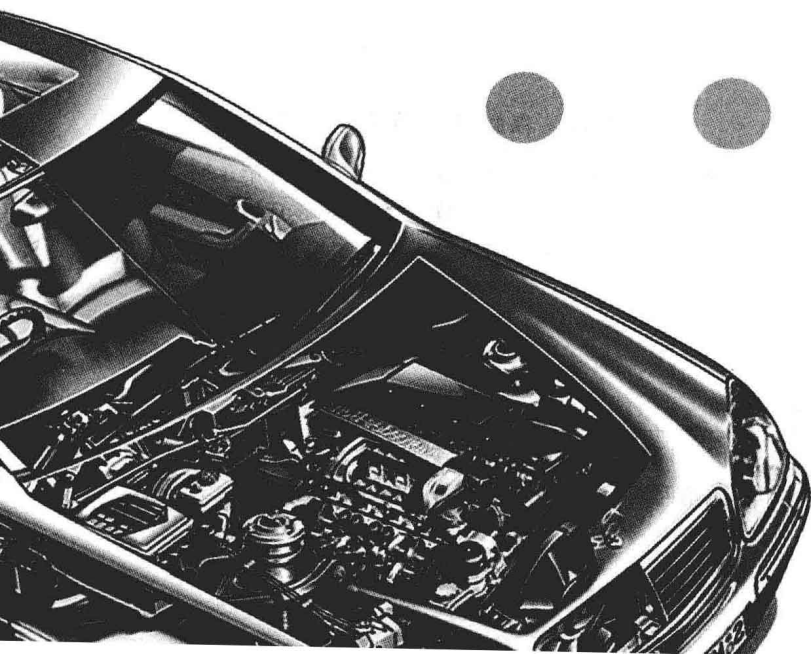


合肥工业大学出版社  
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

高等学校国家级特色专业——车辆工程专业系列教材

# 汽车发动机原理

主 编◎程晓章  
参 编◎钱叶剑 汪春梅  
主 审◎孙 军



合肥工业大学出版社

# 《高等学校国家级特色专业——车辆工程专业系列教材》

## 审读委员会

主 任 陈朝阳

副主任 张代胜

委 员 (排名不分先后)



陈无畏 王其东 冯能莲

孙 军 刘昭度 王启瑞

左承基 范迪彬 羊拯民

钱立军 石 琴 卢剑伟

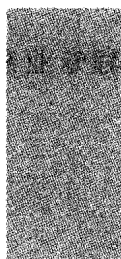
方锡邦

# 《高等学校国家级特色专业——车辆工程专业系列教材》

## 编 委 会

主 任 张代胜

编 委 (排名不分先后)



张炳力 卢剑伟 钱叶剑

程晓章 尹安东 孙 骏

张 良 陈黎卿 李志超

祝安定 姜 康 刘 俊

本系列教材在编写过程中,曾得到以下学校和企业给予各种形式的支持及无私的帮助,在此对它们谨致以真诚的谢意!

清华大学

湖南大学

北京工业大学

西南交通大学

同济大学

山东理工大学

辽宁工业大学

福州大学

厦门理工学院

长安大学

湖北汽车工业学院

安徽工业大学

安徽工程大学

奇瑞汽车股份有限公司

北京理工大学

武汉理工大学

吉林大学

华东交通大学

重庆理工大学

兰州交通大学

大连交通大学

河南科技大学

江苏大学

西华大学

合肥工业大学

安徽理工大学

安徽江淮汽车集团有限公司

《高等学校国家级特色专业——车辆工程专业系列教材》编委会



# 序

在我国经济发展转型升级与全面提高国际竞争力的关键时期,培养和造就一大批创新能力强,适应我国经济和社会发展需要的工程技术型人才是增强我国核心竞争力、建设创新型国家、走新型工业化道路的必要条件。“高等工科教育回归工程”和“强化能力导向原则”等基于按社会需求培养人才和教学需要改革的教育理念,是《中华人民共和国高等教育法》提出的“高等教育教学改革务必根据不同类型、不同层次高等学校自身实际”要求和《高等学校本科教学质量与教学改革工程项目管理暂行办法》所坚持的“分类指导、注重特色”原则的创新成果和实践载体。

高等学校应按照“质量工程”的要求对人才培养目标进行合理定位,对教学过程进行科学创新,发挥自身优势,形成各自特色,从而满足社会对多样化的人才需求。人才培养目标的差异性,要求教学内容、教学方法和教材建设具有针对性。《中华人民共和国高等教育法》明确规定:“高等学校根据教学需要,自主制订教学计划、选编教材、组织实施教学活动。”教育部实施本科教育、教学“质量工程”,鼓励和支持高等学校在教学理念等方面进行创新,以形成有利于多样化人才成长的培养体系,满足国家和社会对紧缺人才的需要。

合肥工业大学车辆工程专业于2007年经教育部审批被列为国家级特色专业建设点。也就在同一时间,合肥工业大学成立了《高等学校国家级特色专业——车辆工程专业系列教材》编审委员会,以“打造特色精品教材,促进专业教育发展”的理念规划出版“高等学校汽车类特色专业规划教材”,抓紧对“质量工程”中所要求的“重点规划、建设多样基础教程和专业课程教材,促进高等学校教学内容更新、教材建设多样化”工作的落实。



在教材选题开始设计时,编审委员会便贯彻教育部关于人才培养适应行业经济和社会发展的需要精神,要求突出教材建设与办学定位、教学目标的一致性和适应性。最终确立了教材编写的指导思想:加强工程意识的培养、加强理论与实践的结合、加强实践教学和工程训练,培养在汽车行业第一线从事车辆研发、试验、营销及管理等工作并能解决实际问题的高等应用型人才。

本系列教材在编写过程中,既严格遵守学科体系的知识构成和教材编写的一般规律,又针对本科人才培养目标和与之相适应的教学特点,科学安排知识内容,注重解决现行教材中部分内容陈旧、特色不明显和学生自主学习无趣等问题,充分体现了“工程基础厚、工作作风实、创业能力强”的合肥工业大学人才培养特色及对国家级特色专业教材的内涵和尺度的准确把握。

本系列教材的出版是所有参与该项工作的人们集体智慧的结晶,也是高等学校进行教学改革、落实“质量工程”要求的成果,相信随着教学改革的深入推进,该系列教材会不断得到丰富和完善。

中国高等学校教学指导委员会委员  
中国机械工业教育协会高校教学委员会车辆专业组副组长

陈朝阳

# 前 言

近年来,我国的汽车工业发展迅速,汽车发动机新技术获得了充分地应用,使得发动机行业步入了快速发展通道,社会对从事发动机开发、研制工作的人才需求随之不断增加,因此,设置车辆工程、交通运输、汽车运用等专业的高等院校越来越多。但是,以往上述专业在学习发动机原理课程之前都要先开设工程热力学等专业基础课程,现在由于实行教学改革,要求课时压缩,因此使得不少学校无法单独开设工程热力学等专业基础课程。如果学生在前期对有关热学知识掌握不足,则必然影响后期对发动机原理课程的学习。基于此,根据编者多年的教学经验,本书在编写时增加了热工基础方面的知识,即将两门课程合二为一,使之相辅相成。在热工基础部分中,本书主要介绍了能量与能源基础、热力学第一定律与第二定律、理想气体的性质与热力过程等内容;在汽车发动机原理部分中,本书主要介绍了内燃机循环及性能评价指标、发动机的换气过程、内燃机的燃料与燃烧、汽油机混合气的形成与燃烧、柴油机混合气的形成与燃烧、发动机的特性、发动机与汽车整车性能匹配等内容。因此,本书在体现先进性、系统性和实用性的同时,力求使内容更符合实际教学要求。

本书由合肥工业大学车辆工程系编写,由程晓章老师担任主编。参加具体编写的老师有:汪春梅编写第一章至第四章,钱叶剑编写第五章、第六章及第十二章,程晓章编写第七章至第十一章。

衷心感谢合肥工业大学孙军教授对本书进行认真细致的审阅。

本书为高等院校车辆工程、交通运输工程等专业的教材,也可作为汽车及相关行业的科研人员和其他工程技术人员的参考资料。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中错误和疏漏之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者



# 目 录

## 第一篇 热工基础

|                      |      |
|----------------------|------|
| 第一章 能量与能源概述          | (3)  |
| 第一节 能 量              | (3)  |
| 第二节 能 源              | (3)  |
| 第三节 能量的转换与利用         | (5)  |
| 第二章 基本概念             | (6)  |
| 第一节 热力系统             | (6)  |
| 第二节 平衡状态及状态参数        | (7)  |
| 第三节 状态方程与状态参数坐标图     | (9)  |
| 第四节 准平衡过程和可逆过程       | (10) |
| 第五节 功与热量             | (11) |
| 第三章 热力学第一定律          | (15) |
| 第一节 热力系统的储存能         | (15) |
| 第二节 热力学第一定律的实质       | (16) |
| 第三节 闭口系统的热力学第一定律表达式  | (16) |
| 第四节 开口系统的稳定流动能量方程    | (17) |
| 第五节 稳定流动能量方程的应用      | (21) |
| 第四章 理想气体的性质与热力过程     | (23) |
| 第一节 理想气体状态方程         | (23) |
| 第二节 理想气体的热容、热力学能、焓和熵 | (25) |
| 第三节 理想混合气体           | (30) |
| 第四节 理想气体的热力过程        | (36) |



|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 第五章 热力学第二定律 .....             | (48) |
| 第一节 自发过程的方向性与热力学第二定律的表述 ..... | (48) |
| 第二节 卡诺循环与卡诺定理 .....           | (49) |
| 第三节 熵 .....                   | (53) |

## 第二篇 汽车发动机原理

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 第六章 内燃机循环及性能评价指标 .....  | (65)  |
| 第一节 内燃机的理论循环 .....      | (65)  |
| 第二节 内燃机实际循环及其评价指标 ..... | (69)  |
| 第三节 内燃机有效性能指标 .....     | (72)  |
| 第四节 机械损失 .....          | (76)  |
| 第五节 热平衡 .....           | (79)  |
| 第七章 发动机的换气过程 .....      | (82)  |
| 第一节 四冲程发动机换气过程 .....    | (82)  |
| 第二节 充气效率及影响因素 .....     | (86)  |
| 第三节 提高充气效率的措施 .....     | (88)  |
| 第四节 增压技术 .....          | (101) |
| 第五节 废气再循环(EGR)系统 .....  | (119) |
| 第八章 内燃机的燃料与燃烧 .....     | (126) |
| 第一节 内燃机燃料 .....         | (126) |
| 第二节 传统燃料的现状及使用特性 .....  | (128) |
| 第三节 代用燃料及其特性 .....      | (135) |
| 第四节 燃烧热化学 .....         | (138) |
| 第五节 燃烧的基本知识 .....       | (141) |
| 第九章 汽油机混合气的形成和燃烧 .....  | (151) |
| 第一节 汽油机混合气形成 .....      | (151) |
| 第二节 汽油机燃烧过程 .....       | (155) |
| 第三节 汽油机燃料喷射量的控制 .....   | (166) |
| 第四节 汽油机的燃烧室 .....       | (181) |



|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| 第五节 汽油机的有害排放物及其控制·····        | (193)        |
| <b>第十章 柴油机混合气的形成和燃烧·····</b>  | <b>(201)</b> |
| 第一节 燃油喷射和雾化·····              | (201)        |
| 第二节 混合气的形成与燃烧室·····           | (217)        |
| 第三节 柴油机的燃烧过程·····             | (223)        |
| 第四节 燃烧过程的影响因素·····            | (234)        |
| 第五节 柴油机的排放控制技术·····           | (241)        |
| <b>第十一章 发动机的特性·····</b>       | <b>(250)</b> |
| 第一节 发动机工况和台架式试验·····          | (250)        |
| 第二节 发动机的负荷特性·····             | (258)        |
| 第三节 发动机的速度特性·····             | (261)        |
| 第四节 发动机的万有特性·····             | (267)        |
| <b>第十二章 发动机与汽车整车性能匹配·····</b> | <b>(271)</b> |
| 第一节 汽车行驶的基本原理及特性·····         | (271)        |
| 第二节 发动机与传动装置性能匹配·····         | (274)        |
| 第三节 整车性能的改进途径·····            | (280)        |
| <b>参考文献·····</b>              | <b>(284)</b> |

# 第一篇 热工基础

---





# 第一章 能量与能源概述

**内容提要:**本章主要介绍能量和能源的基本概念,能量的存在形式和分类,能量的转换和利用。

## 第一节 能 量

世界是由物质构成的,一切物质均处于运动状态。能量是物质运动、变化和相互作用的度量。一切物质都具有能量,如果没有能量,世界就会永远处于静止状态。

人类在日常生活和生产过程中需要各种形式的能量。随着社会发展,人们对能量的认识和利用水平不断提高。到目前为止,人类所认识的能量主要有以下六种形式。

(1)机械能:主要包括动能和势能,是人类最早认识和利用的能量。

(2)热能:是指物质分子的热运动动能和由于分子间相互作用而具有的势能的总和。其宏观表现是温度的高低,反映物质分子运动的强度。热能是人类较早认识和利用的能量。

(3)电能:是同电荷的运动与积蓄有关的一种能量。工业上和日常生活中所利用的电能通常是由其他形式的能量(如化学能,机械能等)转换而来的。

(4)化学能:化学能与物质的化学结构有关,是物质在原子核外进行化学反应所释放的能量。

(5)核能:核能蕴藏在物质原子核的内部,是通过核反应(裂变或聚变)释放的能量。

(6)辐射能:是物体以电磁波形式发射的能量。如投射到地球表面的太阳能就是一种辐射能。

## 第二节 能 源

能源是指能够直接或间接提供能量的物质资源。地球上存在各种形式的能源,通常按照以下几种方式对能源分类。

(1)根据初始来源:①地球本身蕴藏的能源,如核能、地热能等。②来自地球外天体的能源,如太阳能以及由太阳能转化而来的风能、水能、海洋能、生物能以及化石燃料(如煤、石油、天然气等)。③地球与其他天体的相互作用产生的能源,如潮汐能。



(2)根据开发步骤:①一次能源,即在自然界以自然形态存在可以直接开发利用的能源,如煤、石油、天然气、风能、水能、太阳能、地热能、海洋能等。②二次能源,即由一次能源直接或间接转化而来的能源,如电力、煤气、汽油、沼气、氢气、甲醇、酒精等。

(3)根据开发利用的情况及其在社会经济生活中的地位:①常规能源,指开发时间较长、技术比较成熟、被广泛利用的能源,如煤、石油、天然气、水能等。②新能源,指开发时间较短、技术不成熟、尚未被大规模开采利用的能源,如风能、水能、太阳能、地热能、海洋能、生物能以及核能等。

(4)按照能否再生:①可再生能源,指不会因被开发利用而减少,具有天然恢复能力的能源,如太阳能、风能、海洋能、生物能等。②非再生能源,指储量有限,随被开发利用而日益减少,最终将会枯竭的能源,如煤、石油、天然气等。

(5)根据开发利用过程中对环境的污染程度情况:①清洁能源,即对环境无污染或污染很小的能源,如太阳能、风能、水能、海洋能等。②非清洁能源,对环境污染较大的能源,如煤、石油等。

能源是人类生存的基础,能源的开发和利用是社会发展的动力,而能源开发和利用水平又是社会文明的重要标志之一。回顾人类的历史可以看出,能源与社会发展密切相关。从原始的人力、畜力、水力、柴薪燃料的使用到今天化石燃料(煤、石油、天然气)的大量开采以及核能和各种新能源的开发,能源的利用极大地促进了社会的发展。

世界各国的经济发展证明,正常情况下,每个国家能源消费总量及增长速度与其国民经济总产值及增长速度成正比,而能源的人均消耗量的多少则反映国民生活水平的高低。因此,能源问题是全世界关注的重大问题,从 20 世纪 70 年代起,能源问题成为世界 5 大问题(能源、人口、粮食、环境、资源)之一。

我国的能源建设面临的主要问题:

(1)人均能源储备量少,远低于世界水平。据 1994 年的统计数据表明,世界人均原煤储备量为 209t,而我国人均原煤储备量只有 95t;世界人均原油储备量为 28t,而我国人均原油储备量仅仅为 3t;世界人均天然气储备量为  $28400\text{m}^3$ ,而我国人均天然气储备量只有  $1416\text{m}^3$ 。

(2)能源开发利用设备和技术落后,能源利用率低,浪费严重。目前我国能源终端利用率仅为 33%,比发达国家约低 10%,单位产品的能耗比发达国家约高 40%;单位国民经济产值的能耗是日本的 6 倍,美国的 3 倍,韩国的 4.5 倍。

(3)环境污染严重。由于我国能源构成主要是以煤炭为主,约 75%的能源需求由煤炭提供,绝大多数的工业锅炉以煤为主,众多城市人口的生活和取暖还在用煤,加上农村人口的生活用能还是以燃烧薪柴和秸秆为主,烟气的排放使大气受到严重的污染。据世界银行研究表明,我国城市空气污染对人体健康和生产造成的损失估计每年超过 200 亿美元,酸雨使农作物每年减产损失达到 50 亿美元。目前我国的  $\text{CO}_2$  排放量仅次于美国,居世界第二位,占世界总排放量的 13.6%。

我国的能源建设要走可持续发展道路,一是要合理利用能源,提高能源利用率,包括从技术上改进现有的能源利用系统和设备,将可用能的损失降低到最小,并积极开发高效、低污染的能源利用系统和先进的节能设备;二是要大力开发对环境无污染或污染很小的新能源,如太阳能、风能、水能、地热能、海洋能、生物能等。



### 第三节 能量的转换与利用

能量的利用过程实质上是能量的传递与转换过程。在上述能源中,如风能、水能、海洋能可以通过风车、水轮机直接转换成机械能或者再通过发电机将机械能转换为电能;太阳能可以通过光合作用转换成生物能,也可以通过太阳能集热器转换成热能,还可以通过光电反应直接转换成电能;氢、酒精等一些二次能源中的化学能可通过燃料电池直接转换成电能。除此之外,其他能源的能量(如煤、石油、天然气中的化学能以及核燃料中的核能等)通常都是通过燃烧或核反应直接或间接加以利用。

据统计,目前通过热能形式被利用的能源在我国占总能源的 90% 以上,世界其他国家也平均超过 85%。由此可见,在能量转换和利用过程中,热能不仅是最常见的形式,而且具有特殊重要作用。热能的有效利用对解决我国的能源问题乃至对人类社会的发展有着重大意义。

热能的利用有两种基本形式:一是热利用,即将热能直接利用于加热物体,以满足烧饭、采暖、烘干、熔炼等需要,这种利用方式已具有几千年的历史;另一种是动力利用,通常是指通过各种热力发动机(热机)将热能转换成机械能或者再通过发电机转换成电能,为人类的日常生活、农业生产及交通运输提供动力。自从 18 世纪中叶发明蒸汽机以来,虽然只有 200 多年的历史,却开创了热能利用的新纪元,使得人类社会的生产力和科学技术获得突飞猛进的发展。然而,热能通过各种热机转换为机械能的有效利用率较低,早期的热机的热效率只有 1%~2%,现在燃气轮机装置的热效率约为 37%~42%,蒸汽电站的热效率也只有 40% 左右。如何更有效地实现热能和机械能之间的转换,提高热机的热效率,是当前十分重要的课题。

我国目前的热能利用率水平与发达国家水平相比差距很大,主要是热能利用系统落后,热能利用率低,经济性差。为了更有效合理地利用热能,促进国民经济发展,工程技术人员要熟悉和掌握提高热能利用率的先进方法。

#### 思考与练习

- 1-1 能量的表现形式有哪几种?
- 1-2 简述能源的分类,分析我国目前面临的主要能源问题。
- 1-3 试分析我国能源利用的基本情况。



## 第二章 基本概念

**内容提要:**本章主要介绍热力系统的基本概念,热力系统的平衡状态和状态参数,准平衡过程和可逆、不可逆过程,功和热量。

### 第一节 热力系统

凡是将热能转换为机械能的机器统称为热力发动机,简称热机。例如蒸汽机、蒸汽轮机、燃气轮机、内燃机、喷气式发动机皆为热机。

热能与机械能之间的转换是通过媒介物质在热机中的一系列变化过程来实现的,这种媒介物质称为工质。如空气、燃气、水蒸气、氨蒸汽等都是常用的工质。

在热力学中,通常把热容量很大,且在吸收或放出有限热量时自身温度及其他热力学参数没有明显改变的物体称为热源。

通常选取一定的工质或空间作为研究对象,称之为热力系统,简称系统。系统以外的物体称为外界或环境。系统与外界之间的分界面称为边界。边界可以是真实的,也可以是假想的;可以是固定的,也可以是移动的。

如图 2-1 所示,如果将气缸中的气体作为研究对象,则气缸壁和活塞内表面即构成该系统的真实边界,并且一部分边界随活塞移动。

系统通过边界与外界相互作用,进行物质和能量的交换。按照系统与外界之间相互作用的具体情况,系统可分为以下几类。

(1)闭口系统:系统与外界无物质交换,如图 2-1 所示。由于系统的质量始终保持不变,所以常称为控制质量系统。

(2)开口系统:系统与外界有物质交换,如图 2-2 所示。运行中的汽轮机可视为开口系统,其在运行过程中有蒸汽不断地流进流出。由于开口系统是一个划定的空间范围,所以开口系统又称为控制容积系统。

(3)绝热系统:系统与外界无热量交换。

(4)孤立系统:系统与外界既无能量交换又无物质交换。

严格地讲,自然界中不存在完全的绝热系统和孤立系统,但在工程上却存在接近于绝热或孤立的系统。用工程观点来处理问题时,只要抓住事物的本质,突出主要因素,就可以将这样的系统看成是绝热系统或孤立系统,从而得出有指导意义的结论。

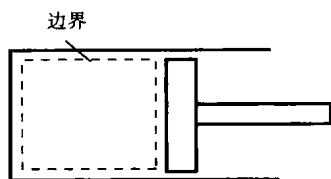


图 2-1 闭口系统示意图

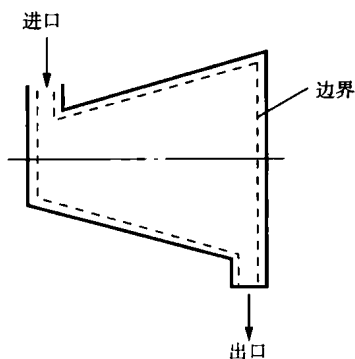


图 2-2 开口系统示意图

需指出的是,选取的热力系统必须具有足够大的尺度,即和物质的微观尺度相比可以认为无穷大,以满足宏观的假设。

## 第二节 平衡状态及状态参数

### 一、平衡状态

工质在膨胀或被压缩的过程中,它的压力、温度、体积等物理量会发生变化,或者说工质本身的状况会发生变化。工质在某一瞬间所呈现的物理状况称为工质的热力状态,简称状态。

在没有外界作用的情况下,工质的宏观性质不随时间而变化的状态称为平衡状态。当系统各部分的温度和压力不一致时,各部分将存在能量的转移和相对位移,其状态参数将随时间而改变,这种状态称为非平衡状态。非平衡状态如果没有外界影响,最后将过渡到平衡状态。

### 二、基本状态参数

在工程热力学中,常用的状态参数有压力、温度、比体积、热力学能、焓、熵等,其中压力、温度、比体积可以直接测量,称为基本状态参数。

#### 1. 压力

单位面积上所受到的垂直作用力称为压力(即压强),用符号  $p$  表示

$$p = \frac{F}{A}$$

$F$  为垂直于作用面面积  $A$  上的力。根据分子运动论,气体的压力是大量分子与容器壁面碰撞作用力的统计平均值。

在国际单位制中,压力单位为 Pa(帕),  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。工程上因单位 Pa 数值太小,常采用 kPa 和 MPa 作为压力的单位,它们之间的换算关系为

$$1 \text{ MPa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

其他单位制的压力单位有 bar、mmH<sub>2</sub>O、mmHg、atm(标准大气压)、at(工程大气压)等,并有  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ,  $1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.81 \text{ Pa}$ ,  $1 \text{ mmHg} = 133.3 \text{ Pa}$ ,  $1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $1 \text{ at} = 0.981 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。