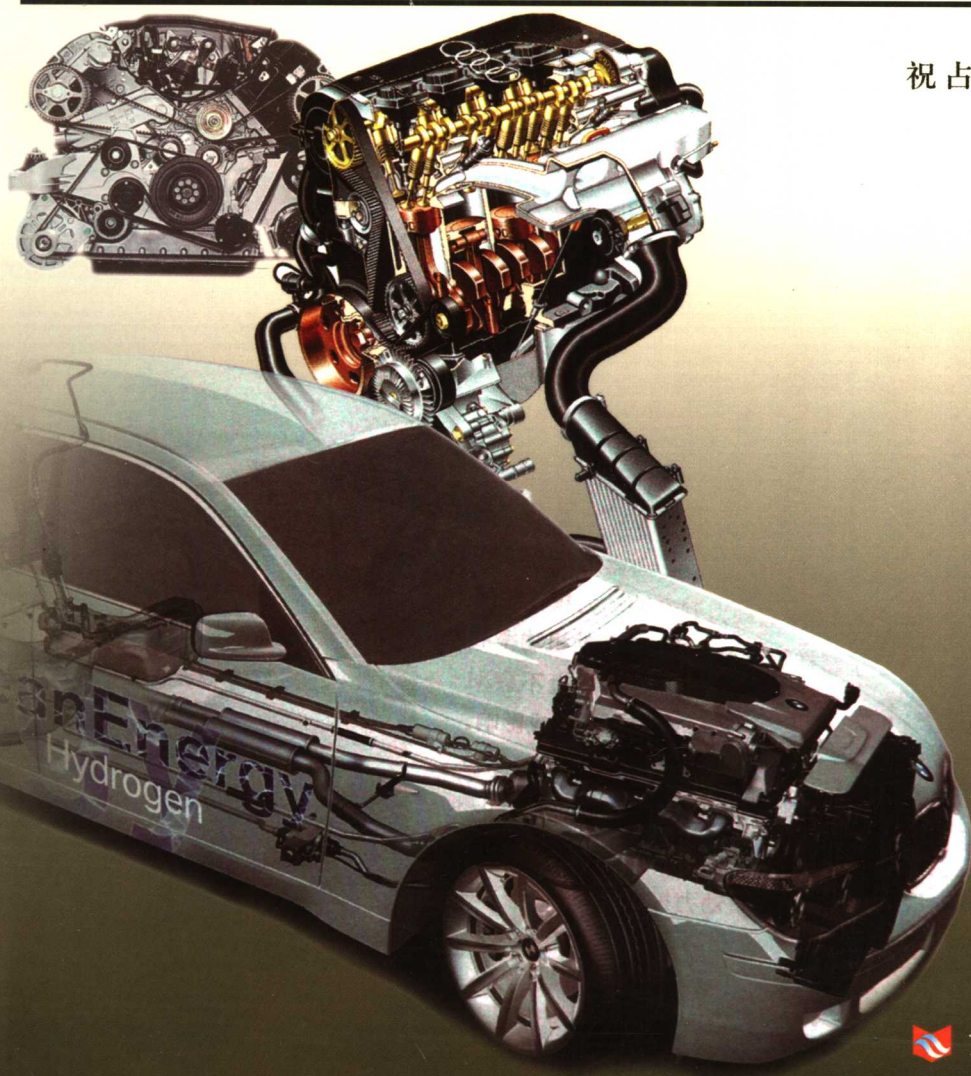


21 世纪 高 等 教 育 规 划 教 材

QICHE FADONGJI YUANLI

汽车发动机原理

祝占元 主 编



黄河水利出版社

21 世纪高等教育规划教材

汽车发动机原理

主 编 祝占元
主 审 王守智

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书主要内容包括发动机工程热力学基础知识,气体的热力性质和热力过程,发动机的热力循环、性能指标及换气过程,汽油机、柴油机、燃气机的燃烧过程、特性曲线,环境保护及节能策略,发动机多元化的发展技术等。可作为高职高专汽车类专业的专业理论基础教材,也可供从事内燃机制造、管理与维修的技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车发动机原理/祝占元主编. — 郑州:黄河水利出版社,
2007.8

21世纪高等教育规划教材

ISBN 978-7-80734-250-2

I.汽… II.祝… III.汽车-发动机-理论-高等
学校-教材 IV.U464

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第126129号

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路11号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslcbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:14.5

字数:335千字

印数:1—3 100

版次:2007年8月第1版

印次:2007年8月第1次印刷

书号:ISBN 978-7-80734-250-2/U·23

定价:24.00元

郑州交通职业学院 教材编纂委员会

顾 问 蒋正华 张殿业 李文成

主 任 李顺兴

副主任 李国法 潘洪亮

编 委 (按姓氏音序排列)

郭 建 李子健 李洪涛

路志宏 王全升 徐春华

于 福 杨世英 张昶琳

前 言

本书是按照汽车运用工程专业高职高专的培养目标与基本要求,根据《汽车发动机原理》课程教学大纲的要求而编写的。本书为贯彻落实“国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定”精神,紧紧围绕着高职高专应用型技术人才培养目标,在编写过程中注重理论联系实际,遵循学习者认知规律,力求内容精新,理论够用,充分体现“实用性、应用性、综合性、先进性”原则。

本书以工程热力学基础理论为主线,用热力学第一、第二定律作工具来认识气体热力性质、热力过程、热力循环;以发动机热功转换、汽车空调能量变换为研究对象,认识发动机换气过程、燃烧理论、环境影响及热效率提高的途径;以汽油机、柴油机、燃气机为实例认识发动机节能降耗、限制排放有害物的重要性,了解并掌握节能降排新技术。

为了使学生更好地理解 and 掌握所学内容,抓住各章节重点,章前均列出重点和难点,章后有小结、复习题,部分章节有例题。为了满足学生的求知要求,有些章节选写了拓展内容,教师也可根据学生的就业需求酌情选讲。

本书由祝占元主编,王守智主审,并得到张梅红、王运超、祝鹏辉、杜少杰、曹琳琳、魏冬至、孙迎春、王爱芳、聂瑾、房颖等热情帮助,参与资料收集、整理、制图、编务、校审等工作,这里深表感谢。

限于编者水平,书中难免有不足和错误之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2007年6月8日

目 录

前 言

第 1 章 汽车热力学基础	(1)
1.1 气体的热力性质	(1)
1.2 燃烧基础知识.....	(11)
1.3 热力学第一定律.....	(16)
1.4 气体的热力过程.....	(25)
1.5 热力学第二定律.....	(35)
自学内容	(44)
小 结	(48)
复习思考题	(50)
第 2 章 汽车发动机实际热循环和性能指标	(52)
2.1 汽车发动机实际热力循环和热平衡.....	(52)
2.2 发动机性能指标体系.....	(54)
2.3 发动机机械效率.....	(62)
自学内容	(64)
小 结	(64)
复习思考题	(66)
第 3 章 发动机的换气过程	(67)
3.1 四冲程发动机的换气过程.....	(67)
3.2 四冲程汽车发动机换气过程评价指标.....	(70)
3.3 二冲程发动机的换气过程.....	(76)
小 结	(79)
复习思考题	(80)
第 4 章 汽油机可燃混合气形成和燃烧	(81)
4.1 汽油的使用性能.....	(81)
4.2 汽油发动机混合气的形成.....	(85)
4.3 汽油机燃烧过程.....	(90)
4.4 汽油发动机的不正常燃烧.....	(93)
4.5 影响燃烧的主要因素.....	(95)
自学内容	(97)
小 结	(98)
复习思考题	(99)

第 5 章 柴油发动机混合气形成和燃烧	(100)
5.1 柴油的使用性能	(100)
5.2 柴油混合气的形成	(104)
5.3 柴油机的燃烧过程	(106)
5.4 柱塞泵喷油规律	(108)
5.5 调速装置	(109)
5.6 电子控制柴油喷射系统	(110)
自学内容.....	(115)
小 结	(116)
复习思考题.....	(116)
第 6 章 燃气发动机混合气形成和燃烧过程	(118)
6.1 燃气的使用性能	(118)
6.2 燃气发动机混合气的形成	(121)
6.3 燃气发动机的燃烧过程	(128)
自学内容.....	(130)
小 结	(133)
复习思考题.....	(133)
第 7 章 发动机特性	(134)
7.1 发动机工况及特性基本概念	(134)
7.2 发动机速度特性	(137)
7.3 发动机的负荷特性	(143)
7.4 发动机的万有特性	(145)
自学内容.....	(147)
小 结	(154)
复习思考题.....	(154)
第 8 章 汽车发动机排放污染及对策	(155)
8.1 汽车发动机的排放物	(155)
8.2 汽车发动机噪声污染	(159)
8.3 发动机尾气排放和噪声的环保对策	(165)
自学内容.....	(176)
小 结	(178)
复习思考题.....	(179)
第 9 章 四冲程汽车发动机增压技术	(180)
9.1 发动机增压技术概念	(180)
9.2 谐波增压控制系统	(184)
9.3 发动机排气涡轮增压	(185)
小 结	(190)
复习思考题.....	(190)

第 10 章 汽车发动机展望	(191)
10.1 汽车发动机多样性	(191)
10.2 汽油、柴油发动机适用新技术	(193)
10.3 低排放车用发动机	(197)
10.4 零排放汽车发动机	(203)
小 结	(214)
复习思考题	(214)
附录	(215)
参考文献	(219)

第 1 章 汽车热力学基础

学习目的与要求

- * 掌握汽车热力学的基本概念。
- * 掌握热力学第一定律和第二定律。
- * 理解理想气体状态方程和多变过程方程。
- * 了解混合气体的比热、热力学性质。
- * 了解传热学的基本概念和逆循环。

学习重点

- * 热力系统、热力过程及热力状态的基本概念,热力学第一定律。
- * 多变过程方程。
- * 燃烧基本知识。
- * 热效率的计算及影响因素。

学习难点

- * 热力过程方程,功、能、热的异同点。
- * 焓、熵的热力概念。

1.1 气体的热力性质

现代汽车上用的动力主流机型是点燃式和压燃式往复式活塞式发动机,它是热机的一种型式。汽车发动机原理就是从工程热力学出发,分析发动机工作过程,研究发动机性能的一般规律的一门专业理论课。本章主要学习与汽车发动机有关的工程热力学基本理论和概念,研究如何提高热能效率的经济性。通过学习,应掌握热能与机械能相互转换的规律和方法,理解热能的传递形式及传递规律。

1.1.1 基本概念

1.1.1.1 工质

在热力学中,能实现热能与机械能相互转换的工作物质叫工质。汽车发动机,不论是四冲程发动机、二冲程发动机或转子发动机,都是通过发动机的吸气、压缩、燃烧、膨胀和排气的工作过程,由工质将燃料(油、气)的热能转变为机械能的。常用的汽油发动机、柴油发动机的工质就是大气。气体具有良好的流动性和膨胀性,潜热较小,理想气体状态与实际气体状态变化规律相似,完全可以将实际气体工质简化后作为理想气体来研究。内

燃式发动机的实际工质由空气、少量油雾、水蒸气和燃烧的废气、烟气所组成。空气是一种混合气体,主要成分是氮气、氧气、氩气和二氧化碳,不含水分的空气称为干气,干气在0℃,标准气压条件下的密度为1.292g/L,运动黏度和声速随空气温度的增加而增加。如0℃时的运动黏度为0.136m/s,声速为331.4m/s;100℃时运动黏度为0.238m/s,声速为386.9m/s。干气的组分见表1-1。空气的比热比为1.4。

表 1-1 干气组分表(基准状态下)

成分	氧气(O ₂)	氮气(N ₂)	氩气(Ar)	二氧化碳(CO ₂)
体积比(%)	20.95	78.09	0.93	0.03
质量比(%)	23.14	75.53	1.28	0.05

蒸汽机所使用的工质是水蒸气,锅炉的工质为烟气。另外,如空调机、冰箱等一类装置是把机械能(电能)转化为热能的,被人们称为逆循环,常把这类机器叫“冷机”,这类工质多数为气体,也有液体的(如氨水)。

1.1.1.2 热力系统

在热力学中,将作为研究对象的某一空间域的工质称为热力系统,简称系统。或者说把工质的某一部分拿出来作为研究对象的工质称为热力系统。热力系统是有域界的,即有边界。边界之外称为环境,边界可以是有形的,能直观感觉到,如发动机气缸中的工质,作为一个热力系统,它是有具体的边界域的,它的边界域就是气缸内壁,内壁之外即为热力系统环境;边界也可以是无形的,如把大气某一部分作为一热力系统时,其边界是无形的、抽象的,正如几何学中把点和线作为几何元素一样,有点但点无大小,有线但线无粗细,有平面但平面无厚薄的概念一样,热力系统与外界即环境之间可以发生联系,互相作用,既可以进行能量传递,又可以使物质从界面流进流出。再如一真空容器与外界连通的阀门打开时,外界的气体在大气压差下流入容器直到充满空气量与大气压系统平衡时,如果把大气中流入容器的那部分气体用一个假想的边界从大气中划出来,则容器壁与假想的球体表面所包围的空气就是我们研究的热力系统(见图1-1)。根据系统与外界发生联系的不同情况,热力系统可分为封闭系统、开口(放)系统、绝热系统和孤立系统等多种。

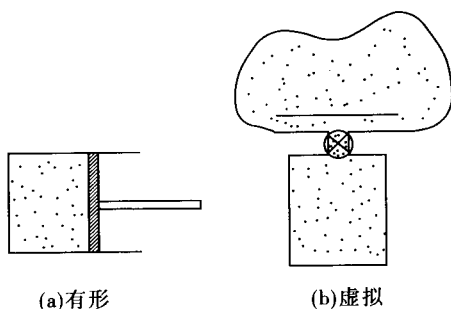


图 1-1 热力系统

1. 封闭系统

不与外界进行物质交换的系统称为封闭系统。如汽油机当进排气门关闭,活塞上升压缩到膨胀过程排气门开启之前,把气缸内的工质作为一热力系统时即为封闭系统。封闭系统中,与环境可以进行热量交换,如斯特林发动机,气缸中的工质(氢和氦),虽然不与环境进行物质交换,但可以在环境中吸收热量,吸收的热量有一部分转换为机械功。

封闭系统亦称闭口系统、控制质量系统。

在选取系统时,应该把所研究的工质全部包括在边界内,如斯特林发动机的工质为一封闭

系统,有人把这种发动机称为外燃机。

2. 开口(放)系统

与外界环境进行物质交换的系统称为开口系统,或称开放系统、流动系统。把发动机热力系统扩大到一个热力循环,则工质与环境进行了物质交换,把废气排出系统,用新鲜工质填充补充,实际上点燃式和压燃式发动机热力系统就属于开放系统。开放系统的选取,只需把所研究的空间范围用边界分隔开来即可。从这个意义上说,开放系统与闭口系统相比,也叫控制体积系统,或简称控制体,其界面称为控制界面。热力过程中遇到的开口系统多数都有确定的空间界面,界面上可以有一股或多股工质流过。如排(废)气涡轮增压器,图 1-2 为排气涡轮增压器开口系统工作原理示意图。

封闭系统和开口系统都可以通过边界与外界发生能量及功量的交换。

3. 绝热系统

不与环境进行热量交换的系统叫绝热系统。

4. 孤立系统

不与环境进行物质和热量交换的热力系统称为孤立系统。绝热系统与孤立系统只是作为一种研究对象的处理方法,实际上绝热系统和孤立系统在现有技术条件下不能实现,只是在某些条件下可以将系统作为绝热系统或孤立系统来处理,如把用陶瓷材料制成的发动机的燃烧过程作为绝热过程来处理。

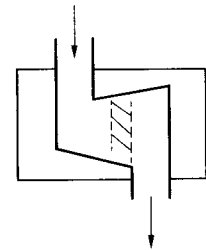


图 1-2 排气涡轮增压器
开口系统工作原理示意

1.1.1.3 热力状态

由分子运动学知道,物质内部分子在不停地运动着,发动机的工质也不例外,工质分子也在不断地变化着。这种大量分子热运动的平均特性的外在表征用工质的温度、压力和容积,以及密度的变化来表示。在热力学中,把工质在某一瞬间所表现的热力性质的总特征称为工质的热力状态,简称状态。为便于说明气体的状态变化和特性,可以选用一些物理量来描述气体所处的状态,这些用来描述工质热力状态的物理量称为气体的状态参数。状态参数是气体状态的表征,每一种状态都有一些确定的数值(状态参数)来表示,即参数与状态有一一对应关系。工质的状态变化时,状态参数的变化值仅与初、终状态有关,而与状态变化的过程无关,用数学式表达为 $\oint dx = x_2 - x_1, \oint dx = 0, x$ 为状态参数,属于点函数。热力学中常见的状态参数有温度 T 、压力 p 、比容 v 、密度 ρ 、内能 u 、熵 S 和焓 H , 其中 p 、 T 、 v 可以直接借助仪器仪表测量出来,称为基本状态参数。

热力学中另一个基本概念是平衡,所谓平衡就是热力系统在不受外界作用条件下,如果系统宏观热力性质不再随时间而发生变化,系统内外同时建立了热和力的平衡,这种状态称为热力学的平衡状态,简称平衡态。处于平衡态时,系统工质的状态参数都有确定的数值,只要知道两个独立的状态参数就可以确定气体所处的状态。但平衡态是一个理想的概念,在日常进行热力过程计算时,为使分析计算尽可能简化,对于偏离热力平衡不远的系统也作为平衡状态处理。

1.1.1.4 基本状态参数

1. 温度

在日常生活中,人们用来表示物体、天气(大气)的冷热程度的度量就是温度,常用温度计来测量温度。热的物体温度高,冷的物体温度低,如果两物体互相接触,经过一定时间,两物体的温度会一致,没有温度差,这说明热物体把比冷物体多余的热量传给了冷物体。由此可见,温度是描述系统或工质是否处于热平衡的客观物理量。

分子运动学理论认为温度是描述物体内部大量分子不规则热运动剧烈程度的标志。用公式表示为

$$\frac{1}{2} m \omega^2 = KT \quad (1-1)$$

式中 m ——分子的质量;

ω ——分子的均方根速度;

K ——玻尔兹曼常数;

T ——气体的热力温度(绝对温度)。

公式(1-1)说明气体的温度与分子的平均动能有关,分子平均动能越大,温度就越高。式中的 T 就是热力学中的温度符号,是状态参数,单位为 K,在国际单位制(SI)中称为理想温度。K 是国际单位制(SI)的基本单位,它是这样规定的,把水的三相态共存时的温度作为定义热力学的温度基准,严格规定水的三相点温度为 273.16K,而热力学温度 1K 等于三相点温度的 $1/273.16$ 。

工程上和日常生活中所用的温度为摄氏,记作 t ,叫摄氏温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。热力学的温度是开氏,称为热力学温度,又称绝对温度。开氏温度与摄氏温度的换算关系为 $t = T - 273.15$,由此可见摄氏温度零点($t = 0^{\circ}\text{C}$)与水的三相点并不严格相等。三相点 273.16K 相当于摄氏温度 0.01°C ,开氏温度零度相当于摄氏温度的 -273.15°C 。

工程上为了简化计算,常把上述的换算关系式近似地写为

$$t(^{\circ}\text{C}) = T - 273 \quad \text{或} \quad T(\text{K}) = t + 273$$

但要强调说明,在研究发动机的热力性质时只有热力学温度才是状态参数。如汽油发动机气缸燃烧的混合气的温度可以达到 1 300K,或者气缸中混合气的状态参数 $T = 1\,300\text{K}$,而不能说状态参数 $t = 1\,007^{\circ}\text{C}$ 。

2. 压力

在日常工作生活中经常会体会到热量传递和功能转换的实例,如汽车发动机中的工质吸收燃料燃烧时所放出的热量变为具有一定压力和温度的工质,或者说工质吸收热量将改变工质的状态并通过膨胀推动活塞而做功,之所以能做功是因为缸内外之间存在着压力、温度的差异。在物理学中已知,单位面积上所受的垂直作用力称为压力。气体的压力就是气体对单位面积的容器壁所施加的垂直作用力。按分子运动学说,气体的压力实质就是大量分子无规则运动而碰撞容器壁所产生的平均作用力。它的定义宏观表达式为

$$p = \frac{F}{f} \quad (1-2)$$

式中 p ——压力,Pa;

F ——工质施加于系统边界上的垂直作用力, N;
 f ——系统边界承压总面积, m^2 。

另

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m}{2} \omega^2 = \frac{2}{3} nBT \quad (1-3)$$

式中 n ——分子密度, 单位容积内所含的分子数;
 B ——转换系数;
 T ——热力学温度。

式(1-3)把压力的宏观量与微观量联系起来, 阐明了气体压力的本质, 并揭示了气体压力与温度之间的内在联系。

热力学中的压力是指气体分子对单位容器壁所产生的实际作用力, 称为绝对压力, 用符号 p 表示, 计量单位是帕斯卡(Pa), 简称帕。在应用中常用 kPa 或 MPa 作为压力单位, 分别读做千帕和兆帕。

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

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

在工程和日常生活中也有用其他压力单位的, 如巴(bar)、大气压(Pat)、标准大气压(Patm)、汞柱(mmHg)、水柱(mmH₂O)等, 它们之间的单位换算见本书附录。

只有绝对压力才能称为状态参数, 通常生活中压力表测出的为视在压力, 是相对于大气压力与绝对压力的压差值 p_b 。 p_b 称为相对压力, 或叫表压力。绝对压力用下式表示

$$p = p_0 + p_b \quad (p > p_0 \text{ 时})$$

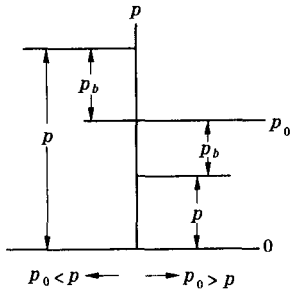
$$p = p_0 - p_b \quad (p < p_0 \text{ 时})$$

或

$$p_b = p - p_0 \quad (p > p_0 \text{ 时})$$

$$p_v = p_0 - p \quad (p < p_0 \text{ 时})$$

p_b 表示压差为正值时称为正压, p_v 表示压差为负值时称为负压或真空度。如果用图表示这种关系, 则更加直观(见图 1-3)。图 1-4 为汽车配气系统进气喉管处压力关系。



p ·绝对压力; p_b ·表压力

图 1-3 压力关系

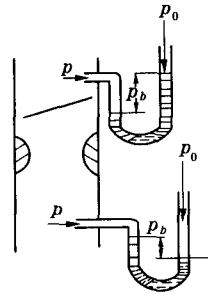


图 1-4 汽车配气系统
进气喉管处压力关系

【例 1-1】 如图 1-5 所示, 有一刚性密封容器中间用一不变形隔板将其分成两部分, A 压力表显示 99kPa, B 表显示 190kPa, 大气压力为 $p_{at} = 97\text{kPa}$, 求 C 表视在压力是多少?

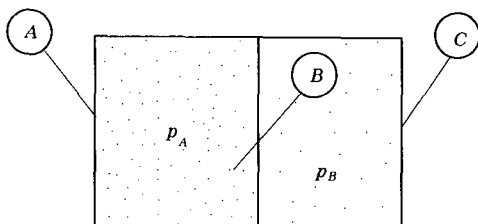


图 1-5 例 1-1 图

解:已知 A 表压力 $p_{bA} = 99\text{kPa}$, B 表压力 $p_{bB} = 190\text{kPa}$, 大气压力 $p_{at} = 97\text{kPa}$

计算 A 表绝对压力 $p_A = p_{bA} + p_{at} = 99 + 97 = 196(\text{kPa})$

B 表绝对压力 $p_B = p_A - p_{bB} = 196 - 190 = 6(\text{kPa})$

C 表压力 $p_{bC} = p_B - p_{at} = 6 - 97 = -91$

(kPa)

或真空度 $p_v = 91(\text{kPa})$

3. 比容

单位质量的气体所占的容积称为气体的比容,也叫比体积,用符号 v 表示,单位为 m^3/kg , 则

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-4)$$

式中 V ——气体的总体积, m^3 ;

m ——气体的质量, kg 。

比容的倒数称为密度 ρ , 是指单位容积的物质所具有的质量:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}$$

比容和密度都是工质的状态参数,但两者不相互独立。

【例 1-2】某锅炉压力表的读数为 1.25MPa , 水泵吸入口真空度表的读数为 90kPa 。若大气压为 101.325kPa 。试求锅炉水泵吸入口处的绝对压力和炉胆内的绝对压力。

解:炉内绝对压力 $p_l = p_{at} + p_b = 101.325 + 1.25 \times 10^3 = 1.35(\text{MPa})$

水泵吸入口处绝对压力 $p = 101.325 - 90 = 11.325(\text{kPa})$

【例 1-3】在标准大气压下, 1m^3 的 CNG 的质量为 0.78kg , 求比容。

解: $v = \frac{1}{0.78} = 1.28(\text{m}^3/\text{kg})$

1.1.1.5 工质的比热

工质的比热就是单位物量的物体当温度变化 1 温度单位时所吸收(或放出)的热量,用符号 C 表示。即

$$C = \frac{\delta q}{dT} \quad (1-5)$$

式中 δq ——某工质在某一状态下温度变化 dT 时所吸收(或发出)的热量, J (焦)或 kJ (千焦)。

比热是物质的一个重要热力性质,在分析热力过程中,经常涉及气体的功、能、焓、熵及热量的计算,这些计算离不开比热这个参数。气体的比热与气体的性质、气体的热力过程以及物质所处的状态有关。因为气体的加热或冷却、压缩或膨胀总是在一定热力过程中进行的,同一种气体在初、终态相同的情况下,经历不同的加热或冷却过程,所发生的热

量传递方式是不同的。

1.1.1.6 比热与物量单位的关系

因为工质的计量单位可以是质量(kg)、摩尔(mol)和体积(m^3)或标准容积 ρ_0 (m^3)，所以比热可以用三种形式来表达。

1. 质量比热 C_m

质量比热就是 1kg 质量的物体温度变化 1K 时物体吸收或放出的热量，单位为 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

2. 摩尔比热 C_{mol}

摩尔比热就是 1kmol 的物体温度变化 1K 时物体吸收或放出的热量，单位为 $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 。

3. 容积比热 C_{v_0}

容积比热就是在标准状态下 1m^3 的物体温度变化 1K 时物体吸收或放出的热量，单位为 $\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ 。

质量比热(C_m)、摩尔比热(C_{mol})、容积比热(C_{v_0})三者之间的单位换算关系为

$C_{\text{mol}} = 22.4C_{v_0}$ ，即一单位摩尔比热等于 22.4 倍容积比热；

$C_{v_0} = \rho_0 C_m$ ，即一单位容积比热等于标准密度和质量比热的乘积；

$C_m = C_{v_0}$ ，即一单位质量比热等于比容与容积比热的乘积。

【例 1-4】 一润滑油的质量比热为 $C_m = 1.796\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ， $\rho_0 = 899\text{kg}/\text{m}^3$ ，求润滑油的容积比热。

解： $C_{v_0} = \rho_0 \times C_m = 899 \times 1.796 = 1\ 614.6(\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K}))$ 。

1.1.1.7 定压比热、定容比热

1. 定压比热

单位物量的物体在压力保持一定的情况下，温度升高或降低 1°C ，所吸收或放出的热量叫该物体的定压比热，用 C_p 表示。如图 1-6(a)所示，气体被加热，在压力不变的情况下加入的热量，一部分用来增加气体的内能，另一部分用来推动活塞移动而对外做膨胀功，即

$$C_p = \frac{\delta q_p}{dT} \quad (1-6)$$

定压比热随物量单位不同，也有定压容积比热(C_{pV})和定压摩尔比热(C_{pm})。

2. 定容比热

在容积不变的情况下，单位物量的物体，温度变化 1°C 时所吸收或放出的热量，用 C_v 表示。如图 1-6(b)所示，气体被加热，是在容积不变的情况下进行的，热量全部用于增加物体的内能，使气体温度升高，即

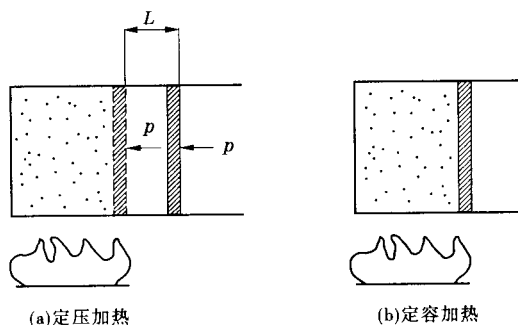


图 1-6 工质被加热过程

$$C_v = \frac{\delta q_v}{dT} \quad (1-7)$$

同理,也有定容容积比热、定容摩尔比热和定容质量比热(C_v 、 C_{vm} 、 C_{vp})

1.1.1.8 定容比热与定压比热的关系

气体的加热或冷却总是在一定热力过程中进行的,由于同一种气体在初、终态相同的情况下,经历不同的加热或冷却过程,如定容、定压的加热过程不同,所发生的热量传递是不同的,一个对外做功,一个对外不做功。

假设 1kg 理想气体,温度变化为 dT ,吸收或放出的热量为 δq ,则

$$\delta q_v = C_v dT \quad (\text{定容过程})$$

$$\delta q_p = C_p dT \quad (\text{定压过程})$$

由图 1-6 知

$$\begin{aligned} \delta q_p &= C_p dT \\ &= \delta q_v + p dV \\ &= C_v dT + p dV \\ &= C_v dT + dp_v \\ &= C_v dT + R dT \end{aligned}$$

因为

$$\begin{aligned} p_v &= RT \\ \delta q_p - \delta q_v &= R dT \end{aligned}$$

所以

$$\begin{cases} C_p = R + C_v \\ C_p - C_v = R \end{cases} \quad (R \text{ 是气体状态常数})$$

由上述分析推理可知,定压比热和定容比热在一定条件下两者之差为常数。它们之间的内在关系同样可以用摩尔比热和容积比热来表述:

$$\begin{cases} C_{pm} - C_{vm} = R \\ C_{pv} - C_{vv} = R\rho_0 \end{cases} \quad (1-8)$$

上述表达式称为迈耶公式,它揭示了理想气体的热力学性质。

1.1.1.9 比热比(绝热指数)

定压比热与定容比热之比称为比热比,又叫绝热指数,或等熵指数,用 κ 来表示。

$$\kappa = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_{pv}}{C_{vv}} = \frac{C_{pm}}{C_{vm}} \quad (1-9)$$

因为 $C_p = R + C_v$,两边同除以 C_v ,得

$$C_v = \frac{1}{\kappa - 1} R$$

同理可得

$$C_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R$$

对于固体而言,由于其热膨胀很小,所以在热工程计算中,常把 C_p 约等于 C_v 进行处

理。在研究发动机的热力过程时把工质作为近似理想气体处理,所以常把比热看做是不变的常数,实际上它们是温度的函数,随气体的种类、性质和热力过程的不同而不同。

1.1.1.10 定比热

在实际应用中,当温度变化不大或不要求很高的精确度计算时,常忽略温度的影响而把理想气体的比热当做是以气体的原子数的多少来确定气体的比热,这种以气体分子组成的原子数来确定气体比热称为定比热,或叫定值比热。理想气体定比热见表 1-2。

表 1-2 理想气体定比热

理想气体原子数	定容 C_{vm} (kJ/(kmol·K))	定压 C_{pm} (kJ/(kmol·K))
单原子气体	3×4.1868	5×4.1868
双原子气体	5×4.1868	7×4.1868
多原子气体	7×4.1868	9×4.1868

理想气体的比热实际上不是定值,而是温度的函数,对于理想气体的比热,称为气体的真实比热,其表达式为 $C = f(T)$,理想气体定值摩尔比热和比热比见表 1-3。

表 1-3 理想气体定值摩尔比热和比热比 κ

摩尔比热	单原子气体	双原子气体	多原子气体
C_{vm}	$\frac{2}{3} R_0$	$\frac{2}{3} R_0$	$\frac{2}{3} R_0$
C_{pm}	$\frac{2}{3} R_0$	$\frac{2}{3} R_0$	$\frac{2}{3} R_0$
比热比 κ	1.66	1.4	1.29

1.1.2 理想气体和状态方程

理想气体仅是热力学中的一种理想(假想)的气体模型。所谓理想气体,就是假设气体分子本身是不占体积的一个点,分子之间也没有吸引力的气体。这个模型在气体所处的压力不太大、温度不太低的时候,实际气体与理想气体的性质基本符合,可以用理想气体的性质来表达实际气体的有关性质,这样就使问题大大简化。在实际工程中,有不少常用的气体如空调工程中的空气、热机的工质、锅炉烟道中的烟气,在常温常压下,均能较好地符合理想气体的假定,进行一般数学分析时可被认为是理想气体。

理想气体的状态参数 p 、 v 、 T 三者之间的关系式,称为理想气体状态方程。即:

对 1kg 理想气体来说,其状态方程为

$$pv = RT \quad (1-10)$$

式中 p 、 v 、 T ——气体状态参数;

R ——气体常数。

对 m kg 的理想气体,其方程式为

$$pV = mRT \quad (\text{因为 } V = mv) \quad (1-11)$$

式中 V —— m kg 理想气体的总体积, m^3 。