



SHIYOU

中等专业学校教学用书

内 燃 机

(第二版)

廖佩金 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书分为三篇(二十一章)。其主要内容包括热工学基础知识,内燃机原理、构造及使用技术。书中以石油矿场使用的大功率柴油机为主,对内燃机各系统的组成及工作作了较系统的分析,对于同运用与维修有密切关联的内容(如润滑、冷却、调整、装配、事故分析判断要领等)作了详细介绍。并对引进柴油机的典型结构和新技术也作了简要介绍。

本书可作为石油系统高等职业技术学校、中等专业学校“矿场机械”、“钻井”专业的教材,亦可作为汽车、内燃机专业的参考教材,还可供现场有关技术人员和工人参考。

内 燃 机

(第二版)

廖佩金 主编

*

石油天然气总公司教材编译室编辑(北京902信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京顺义燕华营印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 22¹/₂印张 564千字 印1—4,000

1990年8月北京第1版 1990年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0346-5/TE·336(课)

定价: 3.95元

前 言

本书是根据石油天然气总公司人事教育部（原石油工业部教育司）1986年11月制订的中等专业学校石油钻井专业“内燃机教学大纲”修订的。《内燃机》自1982年出版以来，已重印四次，受到广大读者的欢迎和关切，并热情地提出了宝贵意见。本版在原有的基础上，更新充实了内容，加强了基础理论，着重技术应用，并增写了内燃机原理的基础理论、曲柄连杆机构运动及受力分析、内燃机技术使用及引进柴油机的先进技术等内容。为了帮助学生复习以及培养分析问题、解决问题的能力，每章均有思考题与习题。

全书内容层次亦作了一些调整，共分为三篇。第一篇为热工学基础知识，第二篇为内燃机原理与构造，第三篇为内燃机技术使用。此外，书中对转子式喷油泵、PT泵、泵-喷油器等典型的新技术也作了扼要介绍。

本书在编写过程中，遵循理论联系实际的原则。在内容安排上力图通过典型实例的分析阐述，掌握内燃机结构的一般规律，以便为内燃机的使用维修打下一定的基础。

对内燃机的技术使用也作了一定阐述，供现场工作者参考。

书中的计量单位，采用了国际单位制，考虑目前情况，亦编有换算表。

本书由重庆石油学校廖佩金同志主编。参加编写工作的有郑炳方同志（编写第十二、第十四章）、林在犁同志（编写第十、第十三章）、廖佩金同志（编写第一至第九、十一及第十五至二十一章）。全书承蒙西南石油学院张世康同志主审，并提出修改意见。在编写过程中曾得到兄弟院校及有关现场工程技术人员的帮助和支持，在此一并表示感谢。

由于我们水平有限，书中定有不少缺点，欢迎读者批评指正。

编者

1987年10月

目 录

绪论	(1)
第一篇 热力学基础知识	(2)
第一章 气体状态参数和基本定律	(2)
第一节 气体的基本状态参数	(2)
第二节 理想气体状态方程式	(5)
第二章 热力学第一定律	(11)
第一节 基本概念	(11)
第二节 气体的膨胀功和压缩功	(12)
第三节 气体的比热和热量计算	(13)
第四节 热力学第一定律	(19)
第三章 气体的热力过程	(26)
第一节 定容过程	(27)
第二节 定压过程	(28)
第三节 定温过程	(29)
第四节 绝热过程	(30)
第五节 多变过程	(32)
第六节 多变过程的特性	(34)
第四章 热力学第二定律	(37)
第一节 循环及循环热效率	(37)
第二节 卡诺循环及其在热力学中的意义	(38)
第三节 热力学第二定律	(40)
第四节 制冷原理	(41)
第五章 传热学基础知识	(43)
第一节 导热——固体的热传导	(43)
第二节 对流换热	(48)
第三节 热辐射	(52)
第四节 传热	(55)
第五节 换热器	(57)
第二篇 内燃机原理及构造	(61)
第六章 内燃机工作原理	(61)
第一节 概述	(61)
第二节 内燃机的工作循环	(65)
第三节 四冲程柴油机的工作原理	(72)
第四节 柴油机实际工作过程	(74)
第五节 汽油机的燃烧过程	(90)
第六节 二冲程内燃机的工作原理	(94)
第七章 内燃机的性能指标	(97)
第一节 内燃机的指示指标	(97)

第二节	内燃机的有效指标	(99)
第三节	机械损失	(101)
第四节	发动机的热平衡	(102)
第八章	内燃机的特性及其试验	(103)
第一节	柴油机的特性	(104)
第二节	汽油机的特性	(110)
第三节	发动机的试验	(112)
第九章	曲柄连杆机构与机体	(118)
第一节	曲柄连杆机构的运动与受力分析	(118)
第二节	内燃机的运转平稳性与惯性力的平衡	(122)
第三节	活塞组	(125)
第四节	连杆组	(134)
第五节	曲轴飞轮组	(139)
第六节	曲轴扭振与减振器	(149)
第七节	机体组	(150)
第十章	配气机构	(161)
第一节	配气机构的组成及工作	(161)
第二节	配气机构的主要零部件	(163)
第三节	配气相位与气门间隙	(176)
第四节	进、排气系统	(178)
第五节	配气机构的故障及排除	(180)
第十一章	柴油机燃料系统	(181)
第一节	柴油机燃料系统的组成	(181)
第二节	柴油的性能、规格及选用	(182)
第三节	柴油机混合气形成特点与燃烧室	(183)
第四节	输油泵的结构及工作原理	(185)
第五节	喷油泵	(188)
第六节	喷油器	(199)
第七节	调速器	(203)
第八节	柴油机燃料供给系统的使用与维护保养	(214)
第十二章	内燃机润滑系统	(215)
第一节	内燃机润滑理论基础	(215)
第二节	润滑系统的功用及组成	(216)
第三节	润滑系统的主要部件	(217)
第四节	机油的主要性能及选用	(225)
第五节	润滑系统的保养	(227)
第十三章	内燃机冷却系统	(228)
第一节	冷却系统的作用及冷却方式	(228)
第二节	水冷却系统的组成及工作	(228)
第三节	水冷却系统的主要部件	(229)
第四节	冷却水及冷却系统的使用维护	(234)
第五节	空气冷却系统	(236)
第十四章	内燃机启动系统	(237)

第一节	启动系统功用及启动方法	(237)
第二节	电启动	(238)
第三节	压缩空气启动	(239)
第四节	辅助汽油机启动	(242)
第五节	柴油机的辅助启动装置	(247)
第十五章	汽油机燃料系统	(248)
第一节	汽油	(248)
第二节	汽油-空气混合气的成分	(250)
第三节	简单汽化器	(251)
第四节	完善汽化器的基本结构及工作原理	(252)
第五节	燃料系统的使用、保养及故障	(259)
第十六章	汽油机的点火系统	(261)
第一节	可燃混合气的点燃	(261)
第二节	蓄电池点火系统	(261)
第三节	磁电机点火系统	(268)
第四节	点火系统的维护保养	(270)
第五节	晶体管点火系统	(273)
第十七章	增压柴油机	(274)
第一节	增压柴油机概述	(274)
第二节	废气涡轮增压器的工作原理及构造	(277)
第三节	涡轮增压器与柴油机的匹配	(282)
第四节	增压器的使用和维护保养	(285)
第十八章	主要机型简介	(286)
第一节	MB-820Bb型柴油机	(286)
第二节	D399型柴油机	(295)
第三节	NTA-855-G360型柴油机	(299)
第四节	Z12V190B型柴油机	(307)
第五节	B2-300型(12V150型) 柴油机	(311)
第六节	12V135型柴油机	(313)
第三篇	内燃机技术使用	(319)
第十九章	内燃机的使用	(319)
第一节	柴油机的启动、运转和停车	(319)
第二节	内燃机的维护保养	(320)
第三节	内燃机在特殊条件下的使用	(321)
第二十章	内燃机故障诊断与调整	(323)
第一节	曲柄连杆机构与配气机构的故障诊断	(323)
第二节	柴油机燃料系的检查与调整	(330)
第三节	汽油机燃料系的故障检查与调整	(337)
第四节	内燃机常见故障及其排除	(338)
第二十一章	内燃机技术保养制度	(349)
第一节	评定内燃机技术状况的指标	(349)
第二节	内燃机技术保养制度的建立	(350)

结 论

把热能转变为机械功的装置叫做热机。而燃料在气缸内燃烧，将产生的热能直接转变为机械能的装置叫内燃机。内燃机在固定设备、船舶、汽车、航空等各方面已得到了普遍的应用。除规模巨大的发电站、超大型船舶外，当前工农业生产中所使用的原动机多数是内燃机。石油勘探工作地处野外，流动性大，它对于动力设备既要求足够大的功率，又要求结构紧凑、轻巧、便于安装、搬运，因此柴油机是当前石油勘探的主要动力。然而，任何事物的发展都不是偶然的，而是有一定的必然规律。从有内燃机的设想开始直到被创造出来并供生产实际所应用，经历了一段相当长的时间（约200年），它主要是解决了为实现内部燃烧所必须解决的一系列理论和技术问题，例如怎样加入燃料以进行高效率的燃烧，怎样点燃，废气如何排出，新鲜空气如何充入以实现不断的循环工作，怎样控制燃烧温度，怎样使工作可靠等。以上问题现在看来似乎简单，但在当时的确是作出了很大努力才逐步得到解决的。

1878年，鄂托（Otto）研制成功了煤气机，这一成就被认为是内燃机发展史上的里程碑。此后又有人提出了利用气缸里压缩空气的高温来点燃喷射进去的燃料的燃烧原理，并由狄塞尔（Diesel）在1897年研制成功，这类发动机通常以柴油为燃料，故习惯上叫“柴油机”，又可称“压燃式”或“自燃式”发动机。由于柴油机燃用价格较低的柴油，热效率又较高，故发展特别迅速，在某些领域里已占主要地位。如日本柴油机汽车的产量达到世界第一位，大轿车中以柴油机作动力的正在增加。

我国柴油机生产也迅速发展，每年生产的柴油机的总功率已达解放前的几千倍（解放前每年生产的柴油机总功率不超过8000千瓦），产品类型也有几百种，单机最大功率达7500千瓦以上。石油部门也有专厂生产钻井用的大功率柴油机，如12V190B、8V190型等，这些柴油机在动力性能及经济性能方面都达到一定的先进水平。

第一篇 热力学基础知识

石油矿场使用的柴油机，其工作原理是以热力过程和热力学定律为基础的。工程热力学就是讲述由热能转变为机械能的客观规律，同时寻找进行这种转变的最有利的条件。内燃机是一种热动力机械，很多零件将受到燃烧气体压力的作用，同时还要受到高温燃气的不断加热，因此伴随发生复杂的传热过程。为了学习和掌握内燃机的工作原理、结构和使用维修等内容，首先必须学好与内燃机有关的热工学基础知识，以便从理论上了解使热能更有效地转变为机械能的途径。

第一章 气体状态参数和基本定律

第一节 气体的基本状态参数

要把热能转变为机械功，必须借助一套设备和某种媒界物质。这些设备通常称为热机。汽车上的发动机及钻井用的柴油机便是热机的一种。这些发动机是通过燃料的燃烧变热为功的，在整个转变过程中总是以气体作为媒界物质，这种媒界物质简称为工质。燃料燃烧前，在柴油机内工质是空气，在汽油机内工质是空气和汽油的混合物。燃烧以后，工质主要是二氧化碳和水蒸气。因此要对工质的热性质进行分析和研究。

在内燃机工作时，热能向机械能的转换是通过气体的状态的变化来实现的。在气缸内，气体不断经历着压缩、吸热、膨胀、放热等热力过程，气体热运动情况在不断变化，尤其是当燃料在气缸内燃烧时，气体的温度、比容、压力变化很大。

由此可知，内燃机对外做功必须依靠空气和燃气这样一些工质的压力、温度和比容的变化来实现。当工质的压力和温度这些热力参数一定时，我们就称工质处于一定的状态之中。也就是说，工质的状态以及状态的变化，是通过压力、温度这样一些热力参数以及这些参数的变化来表示的。这些描写工质状态特征的物理量，称为工质的状态参数。每个状态参数都是从某一方面来描写气体所处的状态。在工程热力学中，常用的状态参数有六个，即：压力 p 、比容 v 、温度 T 、内能 U 、焓 h 、熵 S 。其中，压力、温度、比容这三个参数是可以测量得到的，叫基本状态参数。

一、压力

在日常生活中可以看到，用打气筒向自行车轮胎里打气，轮胎会逐渐的胀起来，用手去按一下轮胎，就会感觉到轮胎里具有一定的压力，气打得越足，压力就会越高。气体为什么会产生压力呢？这是因为气体是由数目非常多的自由运动着的分子组成，这些分子不断地撞击着轮胎内壁，这样就对轮胎内壁产生了一个冲击力，虽然每个气体分子对内壁的碰撞是不连续的而且作用力也很小，但由于气体分子是大量的，它们总是不停地交替与内壁碰撞，这样就产生了一个持续的、数值相当大的压力。随着空气数量的增加，压力也会增加，如果充入空气量不变，使温度升高则压力也会上升，夏天汽车轮胎气打得太足，轮胎容易爆破的原因就在这里。

压力就是工质对单位面积容器壁面的垂直作用力（物理学上称之为压强），通常用符号

p 表示。

在工程上压力的度量单位有：

(1) 国际单位制压力单位，是我国的法定单位，称为帕，符号 Pa。它的物理意义是指在1米²面积的垂直方向上，有一牛顿的作用力，即

$$1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$$

在工程上，Pa的单位太小，为了计算方便，一般用千帕(kPa)或兆帕(MPa)。

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

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

(2) 标准大气压，又称物理大气压。代号 atm。它的物理意义是指在1厘米²面积的垂直方向上，有1.033公斤力的作用力。

$$1\text{atm}=1.033\text{kgf}/\text{cm}^2=101325\text{Pa}$$

也有用巴(代号 bar)为单位的：

$$1\text{bar}=10^5\text{Pa}$$

压力也可用液柱高度来表示：

$$1\text{kPa}=0.102\text{mH}_2\text{O}$$

$$\begin{aligned} 1\text{物理大气压}&=0.760\text{mHg} \\ &=10.33\text{mH}_2\text{O} \end{aligned}$$

工程上，过去习惯使用的压力度量单位为工程单位制：

$$1\text{工程大气压}=1\text{kgf}/\text{cm}^2$$

压力单位换算如表1-1。

表1-1 压力单位换算表

帕 Pa (N/m ²)	工程大气压 kgf/cm ²	标准大气压 atm	毫米汞柱 mmHg	毫米水柱 mmH ₂ O
1	1.0197×10^{-5}	0.9869×10^{-5}	0.7510×10^{-2}	0.10197
0.9807×10^5	1	0.9678	735.56	1.00003×10^4
1.0133×10^5	1.03323	1	760.00	1.0333×10^4
9.806	0.9997×10^{-4}	0.9678×10^{-4}	7.3554×10^{-2}	1
1.3332×10^2	1.3595×10^{-3}	1.3158×10^{-3}	1	13.5955

在热力工程中，压力的表示方法有两种。一种叫绝对压力，所谓绝对压力就是气体分子作用于容器壁的真实压力。另一种叫表压力，就是用测压仪器(即压力表)测得的压力读数。但表压力不是工质对容器壁的实际压力，是真实压力的辅助读数，因为一般常用的压力表本身都处在大气压力作用下，所以测出的表压力都是绝对压力与大气压力的差值。绝对压力、表压力、大气压力之间的关系可以从U形管压力计测量气压时加以说明。图1-1 (a) 是被测气体的压力大于大气压时的情况，图1-1 (b) 是被测气体的压力低于大气压时的情况。

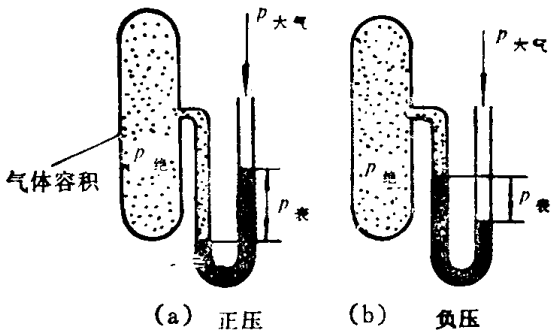


图1-1 液柱压力计和真空度

如汽油机进气过程中，由于进气管、气门等对气体的流动产生阻力，使进气终了气缸内压力低于大气压力，一般73.5~83.3kPa。汽油机进入气缸内的可燃混合气在压缩过程终了

气体压力为490.5~1177.2kPa。

当被测气体压力高于大气压力时，气体的绝对压力（即实际压力）为当地的大气压力和表压力之和，即

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{大气}} + p_{\text{表}} \quad (1-1)$$

当被测气体的压力低于大气压力时，这个低于大气压力的表压力称为真空度。因而这时气体的绝对压力为大气压与真空度（表压力）之差，即

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{大气}} - p_{\text{真空}} \quad (1-2)$$

$$p_{\text{真空}} = p_{\text{大气}} - p_{\text{绝}}$$

“真空度”表示气体的绝对压力与大气压力的差值，它的大小说明真空程度。比如汽油

机在工作时，空气经过汽化器喉管处，由于流速增大，压力降低，出现了真空度，把汽油从汽化器浮子室中吸出，使汽油与空气混合进入气缸，组成可燃混合气，如图1-2所示。

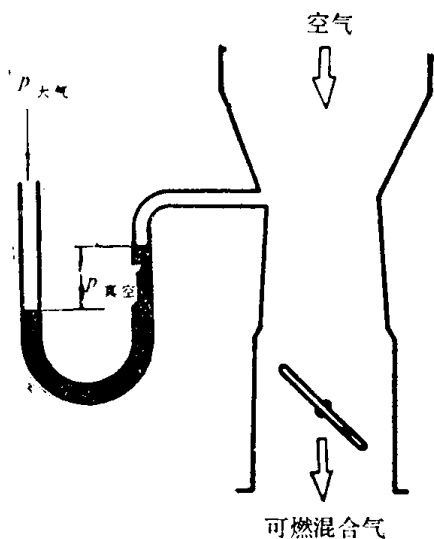


图1-2 喉管处真空度

气体的压力一般可用压力表来测定，如柴油机中的压缩压力、最大爆炸压力（燃烧压力）等。在压力较低的场合，还可以用U形管测定，因为U形管可用水银柱或水柱的高度来表示压力，使测量较精确，但在这种情况下测得的数据要进行换算。

用水柱高度来测定极小的压力差时特别方便，因为同样的压力差，水柱的高度是水银柱的13.595倍。

显然表压力或真空度都不能表示容器内工质的真实状态。表压力和真空度（又称相对压力）是以大气压力为基准的，它表示被测量的工质的绝对压力高于或低于大气压力的数值。因此，工质在同样的状态下，表压力和真空度的数值可以是不同的，视大气压力的数值而定。大气压力发生变化时，表压力和真空度也是要变的。因此，只有绝对压力才能真正说明气体的真实状态。绝对压力才是工质的状态参数。故在工程热力学的计算中必须采用绝对压力。

二、温度

温度是一种衡量物体冷热程度的参数，它可以用温度计测量。要精确的控制温度，就必须有一定的测量手段，同时还要规定出一个统一的标准。在日常生活中最常用的温度标准称为摄氏温标，它规定在标准大气压下，水的冰点为零度，水的沸点为100度，用符号 $t^{\circ}\text{C}$ 表示。

在热力学中，温度用热力学温度量度。用 T 表示，单位为开尔文，用 K 表示。热力学温度又叫绝对温度。

摄氏温度 t 与绝对温度 T 之间的关系是

$$T (K) = 273 + t (^{\circ}\text{C}) \quad (1-3)$$

热力工程中为什么采用绝对温度呢？因为对气体而言，温度是表明气体分子热运动的强弱程度。气体是分子组成的，而分子都处在不停地无规则地自由运动中，分子运动的速度高，动能就大，表现出物体的温度就高；反之，物体内部分子运动速度低，动能小，物体的温度就低。假如分子停止了运动，速度为零，此时的物体温度就是绝对零度。所以，只有热力学温度才是气体的状态参数。绝对温标和摄氏温标的起点不同，但采用相同的间隔。绝对温标

起点 ($T=0\text{K}$) 相当于摄氏温标的零下 273°C (即 $0\text{K}=-273^{\circ}\text{C}$, $0^{\circ}\text{C}=273\text{K}$) ●

必须指出, 绝对零度在实践中是达不到的, 任何物质总是处在运动之中, 所以物体的分子运动是不可能停止的, 在科学技术上只能做到逐步接近于绝对零度而永远也不可能达到。

三、比容

比容就是单位质量气体所占有的容积, 以符号 v 表示。工程上质量的单位是千克, 容积的单位是 m^3 , 所以比容的单位为 m^3/kg 。国际单位制中和工程单位制中都用 m^3/kg 作为单位。

设气体的质量 $m\text{kg}$, 容积为 $V\text{m}^3$, 显然其比容为

$$v = \frac{V}{m} \text{ m}^3/\text{kg} \quad (1-4)$$

单位容积气体的质量称为密度, 用 ρ 表示:

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \text{ kg/m}^3$$

显然比容 v 与密度 ρ 互成倒数关系。

$$v \times \rho = 1$$

在研究内燃机工作循环时, 常以 $p-v$ 图来说明各过程的性质, 而这个“ v ”是一千克气体所占的容积, 即为比容。气体处于不同的压力温度情况下, 比容数值也不相同。

例1-1 今有 100kg 空气, 占有容积 25m^3 , 试问其比容为多少?

解 应用公式

$$\text{比容 } v = \frac{V}{m} = \frac{25}{100} = 0.25 \text{ m}^3/\text{kg}$$

比容同温度和压力一样, 是同物质数量 (总量) 无关的没有相加性的物理量。例如在 1atm 和 0°C 时 (标准状态), 1kg 氢气的比容是 $11.2\text{m}^3/\text{kg}$, 2kg 氢气的比容也是这个数。因为在同样温度、压力下, 质量变化, 总体积亦变化, 则比容不变。容积 V 则不然, 它与物质数量有关, 具有加合性。如 1kg 水的体积是 1 升, 2kg 水的体积便是 2 升, 如果只给物质的容积数不说明物质的量, 就不能说明状态。故比容是状态参数, 而不能把容积作为状态参数。

注意, 因为同一气体在不同的条件下会有不同的比容数值, 所以在叙述气体比容时必须说明气体所处的压力和温度。

第二节 理想气体状态方程式

一、理想气体定律

在热力学中, 为了便于研究气体的性质, 往往从实际气体的共性中抽象出一种称为理想气体的概念。

所谓理想气体是指分子本身不占体积, 分子之间也不存在吸引力的这样一种假想气体。实际上理想气体是不存在的, 这只不过是为了便于分析和计算而抽象出来的一种概念。但是在热力工程上, 一般常用的气体如氧、氢、一氧化碳、二氧化碳等, 以及由这些气体所组成的混合气体的性质, 都与理想气体十分接近。一般情况下都可当作理想气体来处理。但是对于水蒸气来说, 由于它很接近液态, 分子间距离较小, 分子本身体积和分子间的吸引力都不

● 在英制的度量标准中, 经常用华氏温标来度量温度的高低, 它以符号 $^{\circ}\text{F}$ 来表示。华氏温度 $t^{\circ}\text{F}$ 与摄氏温度 $t^{\circ}\text{C}$ 之间的换算关系如下

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{t^{\circ}\text{F} - 32}{1.8}$$

容忽略，因而不能看成是理想气体。这种要考虑分子本身体积和分子间引力的气体叫做实际气体。对于这类气体，理想气体的一些定律和公式仍可应用，但要考虑分子本身体积和相互吸力的影响，加以修正。一般解决实际气体的问题是应用图表法。

在物理学中对气体状态变化的基本规律即压力、温度和比容三者之间的关系已进行了讨论，现将这些定律简述如下：

1. 波义耳-马略特定律

英国科学家波义耳和法国科学家马略特通过实验各自独立地发现了下面的定律：

温度不变时，理想气体的比容与它的绝对压力成反比，可写成

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \quad (1-5)$$

或

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (1-6)$$

2. 盖·吕萨克定律

法国科学家盖·吕萨克经实验得出：

压力不变时，理想气体的比容和其绝对温度成正比，可写成

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-7)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1-8)$$

3. 查理定律

法国科学家查理最先研究发现：比容不变时，理想气体的绝对温度和绝对压力成正比，可写成

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-9)$$

例1-2 一定质量的气体的体积等于15 l时，压强是75cmHg，求它的体积是12 l时压强有多大？气体的温度不变。

解 按题意 $V_1=15 \text{ l}$, $p_1=75 \text{ cmHg}$

$$V_2=12 \text{ l}$$

根据波义耳-马略特定律

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}, \quad (\text{因为 } m_1=m_2, \text{ 所以可用比容代入})$$

$$\text{所以 } p_2 = \frac{p_1 v_1}{v_2} = \frac{75 \times 15}{12} = 93.75 \text{ cmHg} = 937.5 \text{ mmHg}$$

例1-3 一个足球的容积是2.5l，用打气筒给这个足球打气时，每一次把1大气压的空气打进去125cm³，如果在打气以前足球里是没有空气的，那么打了40次以后，足球内部空气的压强有多大？（假定空气温度不变）。

解 按题意

空气在打进球以前的总体积 $V_1=40 \times 125$

$$=5000 \text{ cm}^3$$

压强 $p_1=1$ 大气压，打进球以后的体积 V_2

$$V_2=2.5 \text{ 升} = 2500 \text{ cm}^3$$

根据公式

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$
$$p_2 = \frac{p_1 V_1}{V_2} = \frac{1 \times 0.9807 \times 10^5 \times 5000}{2500} = 1.9614 \times 10^5 \text{ Pa}$$

二、理想气体状态方程式

如前所述, 在内燃机中要使燃料的热能部分地转化为机械功, 需要依靠工质状态发生一系列有规律的变化, 并使它完成一个循环后才能实现, 而工质的状态则是用压力 p 、温度 T 和比容 v 这三个基本参数来描写的。这三个参数彼此之间并不是孤立的, 而是有着内在的联系。譬如, 一定量的气体在开始时的状态, 我们可以用 p_1 、 v_1 、 T_1 来表示, 当经过一系列状态变化以后, 气体的状态参数为 p_2 、 v_2 、 T_2 。将前述三个实验定律综合起来可以得到:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = R \quad (1-10)$$

或 $p v = R T \quad (1-11)$

由于 $V = m v$, 因而对于 m 千克的气体来说, 上式可写成

$$p V = m R T \quad (1-12)$$

式 (1-11) 和 (1-12) 称为理想气体状态方程式。前者适用于 1 千克气体, 后者适用于 m 千克气体。

式中 p ——绝对压力, N/m^2 (牛顿/米²);

v ——比容, m^3/kg (米³/千克);

T ——绝对温度, K ;

m ——气体质量, kg ;

R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ (焦耳/千克·开)。

理想气体状态方程式表明, 如果任意两个状态参数已知, 则第三个参数就可确定, 因而气体状态也就确定了。

国际单位制规定, 物质的量的单位为摩尔 (代号 mol), 因此状态方程也应作相应的变更。

摩尔是物质的量的单位, 是以气体中所含的分子数与 0.012kg 碳-12 原子数目相等时气体的量称为 1 摩尔 (mol), 热力学计算中常用千摩尔为单位。1 千摩尔气体的质量称为千摩质量, 其符号为 M , 其单位为 kg/kmol 。

1 kmol 气体所具有的容积称为千摩容积用 V_m 表示。 $V_m = 22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}$

因为 1 kmol 气体具有质量 M 公斤, 所以根据 $pV = mRT$ 可以得出 1 kmol 理想气体的状态方程式为

$$p V_m = R_{\text{mol}} T \quad (1-13)$$

式中 R_{mol} 叫通用气体常数, 单位为 $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ [焦耳/千摩尔·开]。

在应用理想气体状态方程式时, 需要知道常数 R 和 R_{mol} 的值。

根据阿佛加德罗定律, 即“在同温同压下, 相同容积的各种理想气体具有相同的分子数”。由此可以推论“在同温同压下, 分子数相同的各种气体, 它们的容积应该相等”。

根据摩尔的定义, 则可知 1 摩尔任何气体, 其所包含的分子数都是相等的。显然, 在同温同压下任何气体的摩尔容积相等。若取标准状态, 即压力 $p_0 = 101325 \text{ Pa}$, 温度 $T_0 = 273.15$

K, 则标准状态下各种气体的摩尔容积为 $V_{k\text{ mol}} = 22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}$ (标准米³/千摩尔)。将上述数值代入 (1-13) 式中, 得:

$$R_{\text{mol}} = \frac{pV_{k\text{ mol}}}{T} = \frac{101325 \times 22.4}{273.15} \approx 8314 (\text{N} \cdot \text{m}/\text{kmol} \cdot \text{K})$$

$$\approx 8314 (\text{J}/\text{kmol} \cdot \text{K}) \quad (1-14)$$

显然, 各种气体其 R_{mol} 值是相等的, 它和气体的种类无关。又因 $R_{\text{mol}} = \mu R$, 而 μ 和 R 本身都与气体状态无关。因此 R_{mol} 既与气体种类无关, 又与气体的状态无关, 对所有理想气体来说都相等的一个通用常数, 所以把它叫做通用气体常数。

因 $R_{\text{mol}} = \mu R$ 故

$$R = \frac{R_{\text{mol}}}{\mu}$$

$$= \frac{8314}{\mu} \quad \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (1-15)$$

不同气体的 R 值因分子量 μ 不同而异, 故它与气体特性有关, 为区别于通用气体常数 R_{mol} , 故把它叫做特性气体常数。

如果状态方程中各参数用工程单位时, $R_{\text{mol}} = 848 (\text{kgf} \cdot \text{m})/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ (公斤力·米/千摩尔开) 则

$$R = \frac{848}{\mu} \text{kgf} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad [\text{公斤力} \cdot \text{米}/(\text{公斤} \cdot \text{开})] \quad (1-16)$$

例 1-4 如某柴油机气缸直径 $D = 95 \text{ mm}$, 活塞行程 $S = 115 \text{ mm}$, 压缩冲程开始时气缸内空气压力 $p_a = 0.85$ 绝对大气压, 温度 $t_a = 30^\circ \text{C}$, 柴油机的压缩比 $\varepsilon = 22$, 压缩终点压力 $p_c = 42$ 绝对大气压, 试问在进气冲程结束时气缸内吸入了多少空气? 并分析在压缩终点时能否保证喷入气缸的柴油自行发火燃烧。假如保证柴油良好自行发火燃烧的温度必须达到 550 K 以上。

解 压缩比 ε 是指柴油机在压缩冲程开始时气缸的容积 V_a 和压缩冲程结束时气缸容积 V_c 的比值。

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}, \quad V_a = V_h + V_c$$

式中 V_h ——气缸工作容积。

$$V_h = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot S = \frac{3.14}{4} \times 9.5^2 \times 11.5 = 815 \text{ cm}^3$$

因为

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_h + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_h}{V_c}$$

所以

$$V_c = \frac{V_h}{\varepsilon - 1} = \frac{815}{22 - 1} = 38.8 \text{ cm}^3$$

所以

$$V_a = V_h + V_c = 815 + 38.8 = 853.8 \text{ cm}^3$$

求进气冲程结束时气缸内吸入的空气量 m_a 。

由状态方程式得

$$m_a = \frac{p_a V_a}{RT_a} = \frac{0.85 \times 0.9807 \times 10^5 \times 853.8 \times 10^{-6}}{\frac{8314}{29.27} \times (273 + 30)} = 0.000817 \text{ kg}$$

求压缩终点气缸内的空气温度 T_c 。

因为

$$\frac{p_a v_a}{T_a} = \frac{p_c v_c}{T_c}$$

所以

$$T_c = \frac{p_c v_c T_a}{p_a v_a} = \frac{p_c}{p_a} \cdot \frac{V_c/m_c}{V_a/m_a} \cdot T_a$$

假定在压缩过程中没有漏气, 则 $m_c = m_a$ 。

则

$$T_c = \frac{p_c v_c}{p_a v_a} T_a = \frac{42 \times 0.9807 \times 10^5 \times 38.8}{0.85 \times 0.9807 \times 10^5 \times 853.8} \times 303 = 680\text{K} > 550\text{K}$$

说明压缩终点能保证柴油良好的自行发火。

例1-5 搁置在室内的某氧气瓶容积为25升, 表压力为5大气压, 如果室内温度为20°C, 大气压力为1大气压, 试求瓶内储存的氧气重量。

解 根据 $pV = mRT$

$$m = \frac{pV}{RT}$$

$$p = (5+1) \times 0.9807 \times 10^5 \text{Pa}$$

$$T = 20 + 273 = 293\text{K}$$

$$V = 25 \times \frac{1}{1000} = 0.025\text{m}^3$$

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{32} = 259.8 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

所以

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{6 \times 0.9807 \times 10^5 \times 0.025}{259.8 \times 293} = 0.193 \text{ kg}$$

三、混合气体

内燃机的工质通常都是由几种气体组成的混合气体。由于各组成气体在混合的时候不发生化学变化, 因此由各理想气体组成的混合气体仍然是理想气体, 有关理想气体的公式和定律对理想混合气体也都适用。如:

$$pv = R_{\text{mix}} T$$

$$\mu_{\text{mix}} R_{\text{mix}} = 8314$$

式中 R_{mix} ——混合气体的气体常数;

μ_{mix} ——混合气体的假想分子量(混合气体的平均分子量)。

对混合气体运算时, 首先需求出 R_{mix} 或 μ_{mix} 。 R_{mix} 和 μ_{mix} 与组成气体的性质和成分有关。但要注意, 混合气体中不同种类分子的质量大小不一, μ_{mix} 已失去了分子量原有的物理意义, 它只是为了计算方便引入的假想分子量。

混合气体的气体常数 R_{mix} 和分子量 μ_{mix} 可按下述方法计算:

1. 据混合气体的质量成分 g_i 计算 R_{mix} 、 μ_{mix}

质量成分是组成气体的质量 m_i 与混合气体总质量 m_{mix} 的百分比, 用 g_i 表示。

即

$$g_i = \frac{m_i}{m_{\text{mix}}}; \quad \sum_i m_i = m_{\text{mix}}; \quad \sum_i g_i = 1 \quad (1-17)$$

$$R_{\text{mix}} = \sum_i g_i R_i \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \quad (1-18)$$

$$\mu_{\text{mix}} = \frac{\mu R}{R_{\text{mix}}} \quad (1-19)$$

2. 据混合气体的容积成分 r_i 计算 R_{mix} 、 μ_{mix}

容积成分是组成气体的分容积 V_i 与混合气体总容积 V_{mix} 的百分比,用 r_i 表示。

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{mix}}}; \quad \sum_i V_i = V_{\text{mix}}; \quad \sum_i r_i = 1 \quad (1-20)$$

$$\mu_{\text{mix}} = \sum_i \mu_i r_i \quad (1-21)$$

g_i 、 r_i 的换算关系:

$$g_i = r_i \frac{M_i}{M_{\text{mix}}} \quad (1-22)$$

容积成分等于摩尔成分,即

$$r_i = x_i \quad (1-23)$$

例1-5 空气由21%容积的氧气和79%容积的氮气组成,求此混合气体的 M_{mix} 和 R_{mix} 以及质量成分 g_i

解

已知

$$r_{\text{O}_2} = 0.21, \quad r_{\text{N}_2} = 0.79$$

查表得

$$M_{\text{O}_2} = 32, \quad M_{\text{N}_2} = 28$$

$$M_{\text{mix}} = \sum_i M_i r_i = 32 \times 0.21 + 28 \times 0.79 = 28.84$$

$$R_{\text{mix}} = \frac{R_{\text{mol}}}{M_{\text{mix}}} = \frac{8314}{28.8} = 288.7 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$g_{\text{O}_2} = r_{\text{O}_2} \cdot \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{mix}}} = 0.21 \times \frac{32}{28.8} = 0.233$$

$$g_{\text{N}_2} = r_{\text{N}_2} \cdot \frac{M_{\text{N}_2}}{M_{\text{mix}}} = 0.79 \times \frac{28}{28.8} = 0.768$$

思考题与习题

1. 什么叫状态参数? 内燃机工质的基本状态参数有哪些?
2. 工程上度量压力常用哪几种单位? 它们之间有何关系?
3. 倘若容器中气体的压力没有改变, 试问压力表上读数会改变吗?
4. 通用气体常数 μR (R_{mol}) 的数值是否随气体的种类不同或所处的状态不同而不同?
5. 某增压柴油机气缸中燃料燃烧时, 燃烧最高压力达120大气压(绝对)。如果气缸直径为190mm, 试求此时作用在活塞上的力(用kgf和N表示)。

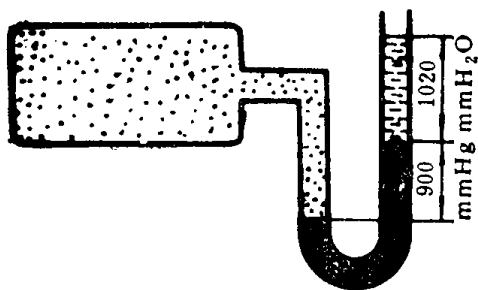


图1-3 U管压差计(题6)

6. 用水银压力计测量容器中的压力, 为避免水银蒸发散发毒气, 在水银柱上加一段水, 结果水柱高1020mm, 水银柱高900mm如图1-3。若当时当地气压计上水银柱高度为758mm, 试求容器内的压力? 分别以at (kgf/cm²) 和kN表示。

7. 某柴油机用压缩空气启动, 在发动前容积为40升的储气瓶中应具有2.8kg空气。假

定压缩站当地温度为10°C, 试求储气瓶在压气站充气时达到的压力? 若将储气瓶运往柴油机机房, 机房温度为30°C, 试问该气瓶压力应增加到多少? (空气 $R=0.29\text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$)。

8. 空气压缩机每分钟从大气中吸取温度为 $t_1=17^\circ\text{C}$ 的空气 0.2m^3 (当地大气压为 750mm 汞柱)。充入容积为 1m^3 的储气瓶中, 储气瓶原温 $t_2=17^\circ\text{C}$, 表压力为 49kN/m^2 。问经过多少分钟才能将储气瓶中的压力提高到 $p_2=686\text{kN/m}^2$ (绝对), 温度为 50°C ?

9. 已知空气瓶的容量为 220 升, 机房温度 (也即为气瓶温度) 为 35°C , 启动前瓶内压力为 2.26MN/m^2 (表压), 启动后降为 1.86MN/m^2 (表压)。问启动柴油机时用掉多少空气?

第二章 热力学第一定律

第一节 基本概念

一、气体的平衡状态

平衡状态包括热平衡和力平衡两个方面。即气体的各部分的温度和压力处处相等, 且不随时间而变化, 在没有“外界”作用的情况下可以长久保持的状态称平衡状态。气体的一个平衡状态对应有一组唯一的参数 (如 p 、 v 、 T 等)。只要知道一个状态参数发生了变化, 就足以说明气体的状态发生了变化。

气体的平衡状态可以由两个独立的状态参数来确定, 其余所有的状态参数可以通过这两个已知的独立的状态参数计算确定。今后我们所讲的状态都是指平衡状态, $p-v$ 图上任意一点都相应于气体的某一平衡状态。如图 2-1。

1、2 两点分别代表 p_1 、 v_1 和 p_2 、 v_2 两个独立状态参数所确定的两个平衡状态。

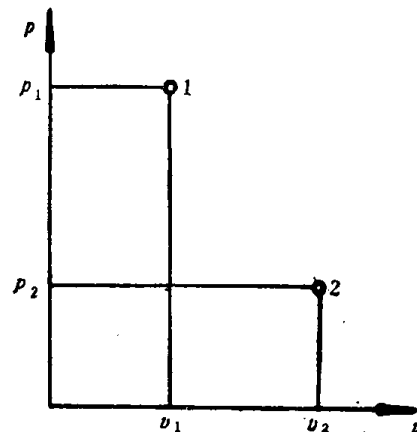


图2-1 平衡状态

二、热力系统

在内燃机中, 能量的转换是通过工质在气缸内的状态变化来实现的。为研究方便, 与力学

中取分离体一样, 把要分析研究的对象假设从周围物体中 (如气缸内的气体) 分割出来。这种人为分割出来的作为热力学分析研究对象的那部分事物 (如工质) 叫做热力系统, 简称热力系。而系统以外与系统密切相关的物体称为外界 (如气缸)。它们之间有“分界面”, 根据分界面上能量交换时有无质量交换, 把系统分为:

1. 开口系统: 和外界有质量交换的系统;
2. 闭口系统: 和外界无质量交换的系统。

和外界既无质量交换又无能量交换的系统被称为孤立系统, 它是闭口系统的特例。凡和外界无热量交换的系统又统称为绝热系统。

如讨论空气和燃油从进入内燃机起, 到工作后又从排气管排出止的整个过程, 把整台内燃机选作系统, 是开口系统。若只研究气门关闭时工质受热膨胀做功的情况, 就视工质为系统, 是闭口系统。

三、热力过程

热力过程是指系统在外界条件作用下从某一状态变化到另一状态所经历的全部状态变化过程。内燃机做功时就是通过工质的状态改变即热力过程来实现的。先介绍平衡过程和可逆过程。

平衡过程: 如果热力过程进行得非常缓慢, 每一瞬间都在无限小的温度差和压力差以及