



高职高专交通运输类“十五”规划教材



汽车性能与使用技术

孙凤英 主编



机械工业出版社
China Machine Press

高职高专交通运输类“十五”规划教材

汽车性能与使用技术

主 编 孙凤英
副主编 纪峻岭 金正兴
主 审 郎全栋 李兴虎



机械工业出版社

本书介绍了工程热力学基础知识、内燃机原理、汽车理论及汽车运用知识,全书共分16章,每章后附有复习思考题。编写时重视理论与实际相结合,在介绍一般原理的基础上,分析影响汽车主要使用性能的各种因素,讨论车辆使用中具有实际意义的问题。

本书作为汽车运用工程和汽车检测与维修专业高职高专通用教材,也可供相关人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车性能与使用技术/孙凤英主编.——北京:机械工业出版社,2002.8

高职高专交通运输类“十五”规划教材

ISBN 7-111-10043-3

I. 汽… II. ①孙…②纪… III. ①汽车—性能—高等学校:技术学校教材②汽车—使用—高等学校:技术学校—教材 IV. U461

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第031157号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:蓝伙金 蒋有彩 版式设计:张世琴 责任校对:韩晶

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京市樱花印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002年7月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16 13印张·312千字

0001~4000册

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话:(010)68993821、68326677 2527

封面无防伪标均为盗版

前 言

本教材是经全国高等学校汽车运用工程专业教学指导委员会第二届六次会议审定的，供汽车运用工程专业和汽车检测与维修专业高职高专通用教材。

本教材按照高职高专人才培养目标的要求，打破了传统《内燃机原理》、《汽车理论》和《汽车使用技术》等课程相互独立，课程内容彼此交叉、重复过多的模式，充分体现针对性、应用性、整合性、先进性和实践性，力求体现高职高专特色，注重理论与实际相结合。在一般原理的基础上，分析影响汽车主要使用性能的各种因素，讨论在车辆使用中具有实际意义的问题，为正确使用和提高汽车维修质量打好基础。为了学习方便，每章后有复习思考题。

教材共分十六章，由黑龙江工程学院（原黑龙江交通高等专科学校）孙凤英任主编，纪峻岭、金正兴任副主编。参加编写的有：孙凤英、纪峻岭、林海音、宋伟、宋年秀、金正兴、岳邦贤、李建斌、臧杰。

教材由东北林业大学郎全栋、北京工业大学李兴虎两位教授主审，并提出了许多宝贵意见和建议，在此表示感谢。教材编写过程中，曾参考了许多相关文献资料，对文献的作者及为我们提供资料的朋友和同仁一并表示谢意。

由于编者水平所限，书中可能存在一些不足之处或疏漏，恳请使用本教材的单位或个人提出宝贵意见，以便更正。

编 者

目 录

前言	
第一章 工程热力学基础知识	1
第一节 热力系统及气体的热力状态	1
第二节 功和热量	4
第三节 热力学第一定律	7
第四节 理想气体的热力过程	10
第五节 热力学第二定律	16
复习思考题	19
第二章 内燃机循环与性能指标	21
第一节 四冲程内燃机的实际循环	21
第二节 内燃机的理想循环	23
第三节 内燃机性能指标	29
第四节 机械效率	32
第五节 内燃机的热平衡	35
复习思考题	36
第三章 内燃机的换气过程	37
第一节 四冲程内燃机的换气过程	37
第二节 充量与充量系数	39
第三节 影响充量系数的因素	41
第四节 提高充量系数的措施	44
复习思考题	47
第四章 常用燃料与燃烧	48
第一节 常用燃料	48
第二节 燃烧化学	50
复习思考题	52
第五章 汽油机混合气形成和燃烧	53
第一节 汽油机混合气形成	53
第二节 汽油机正常燃烧	56
第三节 汽油机不正常燃烧	58
第四节 影响燃烧过程的因素	60
第五节 汽油机的燃烧室	64
第六节 汽油喷射与控制	67
复习思考题	68
第六章 柴油机混合气形成和燃烧	69
第一节 柴油机混合气形成与燃烧室	69
第二节 柴油机的喷射与雾化	74
第三节 柴油机的燃烧过程	77
第四节 影响燃烧过程的因素	79
第五节 柴油机电控技术	83
复习思考题	87
第七章 内燃机排放污染与噪声	88
第一节 排放污染及法规	88
第二节 内燃机噪声及控制	96
复习思考题	99
第八章 废气涡轮增压	100
第一节 内燃机增压概述	100
第二节 废气涡轮增压系统构造及特性	103
第三节 增压的特点及与内燃机匹配	106
第四节 车用内燃机增压的特殊问题及改善措施	107
复习思考题	109
第九章 内燃机特性	110
第一节 内燃机负荷特性	110
第二节 内燃机速度特性	112
第三节 柴油机的调速特性	115
第四节 内燃机的万有特性	118
复习思考题	120
第十章 汽车的动力性	121
第一节 汽车动力性指标	121
第二节 汽车的驱动力	122
第三节 汽车的行驶阻力	124
第四节 汽车的行驶方程式与汽车行驶条件	128
第五节 汽车驱动力-行驶阻力平衡图	132
第六节 汽车动力特性图	134
第七节 汽车的功率平衡	135
复习思考题	137
第十一章 汽车的燃油经济性	138
第一节 汽车燃油经济性的评价指标	138
第二节 汽车燃油经济性的计算	138
第三节 汽车燃油经济性的影响因素	141
复习思考题	144
第十二章 汽车的制动性	145
第一节 制动时车轮受力	145

第二节 汽车的制动效能及其恒定性	147	复习思考题	176
第三节 制动时汽车的方向稳定性	149	第十五章 汽车使用寿命	177
第四节 制动力分配	150	第一节 汽车使用寿命概述	177
第五节 制动力的调节和车轮防抱死	156	第二节 汽车更新理论	178
复习思考题	158	第三节 更新时刻的确定	179
第十三章 汽车的操纵稳定性	159	复习思考题	185
第一节 汽车行驶的横向稳定性	159	第十六章 汽车在特殊条件下的使用 ...	186
第二节 轮胎的侧偏特性	160	第一节 汽车在走合期的使用	186
第三节 汽车的转向特性	164	第二节 汽车在低温条件下的使用	187
第四节 汽车转向轮的振动	168	第三节 汽车在高温条件下的使用	192
复习思考题	169	第四节 汽车在高原、山区条件下的使用 ...	194
第十四章 汽车的通过性和行驶		第五节 汽车在坏路或无路条件下	
平顺性	170	的使用	197
第一节 汽车的通过性	170	复习思考题	199
第二节 汽车的行驶平顺性	173	参考文献	200

第一章 工程热力学基础知识

热力学是研究热能性质及其转换规律的科学。工程热力学是热力学的一个分支。它着重研究与热力工程有关的热能和机械能相互转换的规律。在阐明两条基本定律的基础上,分析热力工程有关热力过程及热力循环,从理论上研究提高热工转换的有效途径。

本章仅就工程热力学基础知识作简要阐述,为学习汽车发动机原理提供必要的理论基础和分析计算方法。

第一节 热力系统及气体的热力状态

一、热力系统

热力学中研究热功转换时,总是研究固定的一些物体或固定空间中的一些物质,在热功转换过程中的行为和它们的变化。热力学中把主要研究对象的物体总称为热力系统;把热力系统外面和热功转换过程有关的其他物体称为外界;热力系统和外界的分界固称为边界。通常把实现热功转换的工作物质称为工质。把供给工质热量的高温物质称为高温热源;而把吸收工质放出热量的冷却介质或环境称为低温热源。热力系统通常就是由热力设备中的工质所组成,而高温热源、低温热源和其他物体等则组成外界。

若一个热力系统和外界只可能有能量(热能、机械功等)交换而无物质交换,称为闭口系统。若一个热力系统和外界既可能有能量交换,同时又有物质交换,称为开口系统。

二、气体的热力状态及其状态参数

热力学中把工质所处的宏观状态称为工质的热力状态。工质的状态常用物理量来描述,这些物理量称为状态参数。常用的状态参数有6个,即压力 p 、温度 T 、比体积 V 、热力学 U 、焓 H 、熵 S 。其中 p 、 T 、 V 三个可以测量的物理量称为基本状态参数。

1. 压力 p

气体对单位面积容器壁所施加的垂直作用力称为压力 p 。按照分子运动论,气体的压力是大量分子向容器壁面撞击的统计量。压力的单位为Pa,工程上常用kPa与MPa。

容器内气体压力的大小有两种不同的表示方法:一种是描明气体施于器壁上压力的实际数值,叫绝对压力,符号为 p ;另一种是测量时压力计的读数,叫表压力,符号为 p_g 。由图1-1可知,表压力是绝对压力高出于当时当地的大气压力 p_a 的数值。其关系式为

$$p = p_a + p_g \tag{1-1}$$

如果容器内气体的绝对压力低于外界大气压力时,表压力为负值,仅取其数值,称为真空度,记作 p_v ,即

$$p = p_a - p_v \tag{1-2}$$

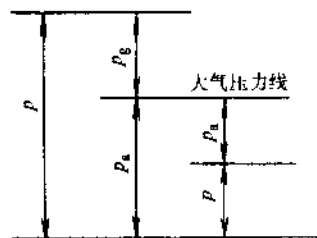


图1-1 表压力、真空度与绝对压力的关系

真空度的数值越大，说明越接近绝对真空。

表压力、真空度都只是相对于当时当地的大气压力而言的。显然，只有绝对压力才是真正说明气体状态的状态参数。

2. 温度 T

温度表示气体冷热的程度。按照分子运动论，气体的温度是气体内部分子不规则运动激烈程度的量度，是与气体分子平均速度有关的一个统计量。气体的温度越高，表明气体分子的平均动能越大。

热力学温度 T 的单位为 K，是国际单位制 SI 中的基本单位。选取水的三相点温度为基本定点温度，规定其温度为 273.16K，1K 等于水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。国际单位制 (SI) 容许使用摄氏温度 t ，并定义

$$t = T - T_0 \quad (1-3)$$

$$T_0 = 273.15\text{K}$$

在一般工程计算中，把 T_0 取作 273K 已足够精确。摄氏温度每一度间隔与热力学温度每一度间隔相等，但摄氏温度的零点比热力学温度的零点高 273.15K。热力学温度不可能有负值。必须指出，只有热力学温度才是状态参数。

3. 比体积 v

比体积是单位质量的物质所占有的容积，即

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

式中 v ——比体积；

V ——容积；

m ——质量。

比体积的倒数称为密度 ρ 。密度是指单位容积的物质所具有的质量：

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-5)$$

比体积的单位为 m^3/kg ；密度的单位为 kg/m^3 。

三、平衡状态

描述热力系统的状态时，如果整个系统的状态均匀一致，在系统内到处有相同的温度和相同的压力，且不随时间而变化，这样的状态称为热力学平衡状态，简称平衡状态。处于平衡状态时，气体的所有状态参数都有确定的数值。如果外界条件不变，系统的状态始终保持不变。如果受到外界作用，引起系统内温度和压力的变化，破坏了系统平衡状态，则当外界作用停止后，系统将自发地发生机械和热作用，最后系统达到新的平衡状态。

热力系统从一个状态向另一个状态变化时，所经历的全部状态的总和，称为热力过程。

热力系统从一个平衡（均匀）状态，连续经历一系列（无数个）平衡的中间状态，过渡到另一个平衡状态，这样的过程称为内平衡过程。否则便是内不平衡过程。

在热力学中，常用两个彼此独立的状态参数构成坐标图，例如以 p 为纵坐标、 v 为横坐标组成的坐标图，简称压容图，用来进行热力学分析。图 1-2 中，1、2 两点分别代表 p_1 、 V_1 和 p_2 、 V_2 两个独立的状态参数所确定的两个平衡状态；1-2 曲线代表一个内平衡过程。如果工质由 1' 变化到状态 2' 所经历的不是一个内平衡过程，则该过程无法在 $p-v$

图上表示, 仅可标出 1'、2' 两个平衡态, 其过程用虚线表示。

在图 1-2 中, 假设系统经历平衡过程 1-2, 由状态 1 变化到状态 2, 并对外作膨胀功 W , 如果外界给以同样大小的压缩功 W , 使系统从状态 2 反向循着原来的过程曲线, 经历完全相同的中间状态, 恢复到原来的状态 1, 外界也回复到原来的状态, 既没有得到功, 也没有消耗功, 这样的平衡过程称为可逆过程。

只有无摩擦、无温差的平衡过程才有可逆性, 即可逆过程就是无摩擦、无温差的平衡过程。

可逆过程是没有任何损失的理想过程, 实际的热力过程既不可能是绝对的平衡过程, 又不可避免地会有摩擦。因此, 可逆过程是实际过程的理想极限。

四、理想气体状态方程式

所谓理想气体, 就是假设在气体内部, 其分子不占体积, 分子间又没有吸引力的气体。在热力计算和分析中, 常常把空气、燃气、烟气等气体都近似地看作理想气体。因为气体分子之间的平均距离通常要比液体和固体的大得多, 所以, 气体分子本身的体积比气体所占的容积小得多, 气体之间的吸引力也很小。通常把实际气体近似地看作理想气体来进行各种热力计算, 其结果极其相似。所以, 对理想气体性质的研究, 在理论上和实际上都是很重要的。

极据分子运动论和对理想气体的假定, 结合实验所得的一些气体定律, 并综合表示成理想气体状态方程式 (或称克拉贝隆方程式)。对于 1kg 理想气体, 其状态方程为

$$pv = RT \quad (1-6)$$

对于 m kg 理想气体, 总容积 $V = mv$, 其状态方程为

$$pV = mRT \quad (1-6b)$$

式中 R ——某种气体常数 [$J/(kg \cdot K)$], 它的数值决定于气体的种类。

对于摩尔质量的理想气体, 其状态方程为

$$R_m = \frac{RV_m}{T} \quad (1-7)$$

式中 R_m ——摩尔气体常数 [$J/(mol \cdot K)$];

V_m ——摩尔体积 (m^3/mol)。

对于任何理想气体, R_m 的数值都相同, 并称为普通比例常数。

理想气体状态方程式反映了理想气体三个基本状态参数间的内在联系, 即 $F(p, V, T) = 0$, 只要知道其中两个参数, 就可以通过该方程求出第三个参数。

五、工质的比热容 (质量热容)

在热力过程中, 热量的计算常利用比热容。工质的比热容就是热容除以质量。比热容的物理量符号为 c 表示, 单位符号为 $J/(kg \cdot K)$ 。按定义

$$c = \frac{dq}{dT} \quad (1-8)$$

式中 dq ——某工质在某一状态下温度变化 dT 时所吸收或放出的热量 (J)。

比热容是物质的一个重要的热力学性质。气体比热容数值与气体的性质、热力过程的性

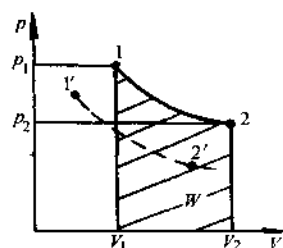


图 1-2 内平衡过程在 $p-V$ 图上的表示

质和加热的状态等有关。

1. 单位工质的热容与物理量单位的关系

因为单位工质可用 kg、mol、m³ 表示，因此单位工质的热容有如下三种：

- 1) 比热容（质量热容） c ，单位 J/(kg·K)
- 2) 摩尔热容 C_m ，单位 J/(mol·K)。
- 3) 标准状态下的体积热容 C_v ，单位 J/(m³·K)

2. 比定压热容和比定容热容

气体在压力不变或容积不变的条件下被加热时的比热容，分别叫作比定压热容和比定容热容，通常用脚标 p 和 V 来识别，定义比热比 $\gamma = c_p/c_v$ 。

气体在定压下受热时，由于在温度升高的同时，还要克服外界抵抗力而膨胀作功，所以同样升高 1℃，比在定容下受热时需要更多的热量。实验表明，理想气体的比定压热容和比定容热容的差是一个常数，即

$$c_p - c_v = R \quad (\text{梅耶公式}) \quad (1-9a)$$

对于理想气体，等熵指数 κ 为

$$\kappa = \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

等熵指数在工程热力学中有很重要的作用。如果以 κ 和 R 来表示 c_p 、 c_v ，由梅耶公式可得：

$$\begin{aligned} c_v &= \frac{1}{\kappa - 1} R \\ c_p &= \frac{\kappa}{\kappa - 1} R \end{aligned} \quad (1-9b)$$

3. 常量比热容

在实际应用中，当温度变化不大或不要求很精确的计算时，常忽略温度的影响，把理想气体的比热容当作常量，只按理想气体的原子数确定比热容，称为定比热容，如表 1-1 所示。

表 1-1 理想气体的定比热容

理想气体原子数	摩尔定容热容 $c_{v,m}/[J/(mol \cdot K)]$	摩尔定压热容 $c_{p,m}/[J/(mol \cdot K)]$
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

第二节 功 和 热 量

一、功

力学中把物体所受到的力 F 和物体在力的作用方向上的位移 x 两者的乘积，定义为力所作的功，并用符号 W 表示即

$$W = Fx$$

热力学中，功就是当系统和外界之间存在压差时，系统通过边界和外界之间相互传递的

能量。

图 1-3 表示 1kg 工质封闭在气缸内, 进行一个可逆过程的膨胀做功情况。设活塞截面积为 A (m^2), 工质作用在活塞上的压力为 p , 活塞被推进一微小距离 dx , 在这期间, 工质的膨胀极小, 工质的压力近乎不变, 因而工质对活塞作的功为

$$dW = pAdx = p dV = m p dv \quad (1-10)$$

对可逆过程 1-2, 单位工质由状态 1 膨胀到状态 2 所作的膨胀功为

$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (1-11)$$

如果已知工质的初、终态参数, 以及过程 1-2 的函数关系 $p = f(v)$, 则可求得单位工质的膨胀功 w , 其数值等于 $p-v$ 图上过程曲线 1-2 下面所包围的面积。因此, $p-v$ 图也叫示功图。由图可见, 膨胀功不仅与状态的改变有关, 而且与状态变化所经历的过程有关。

若气缸中的工质为 $m \text{ kg}$, 其总容积为 $V = mv$, 膨胀功为

$$W = mw = m \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (1-12)$$

当工质不是膨胀, 而是受到外界压缩时, 则是外界对工质做功。这时 dV 为负值, 由式 (1-12) 算出的 W 也是负值, 负的膨胀功实际上表明工质接受了外界的压缩功。

二、热量

热量是由温度的不同, 系统和外界间穿越边界而传递的能量。热量和功一样不是热力状态的参数, 而是工质状态改变时对外的效应, 但热量不可能把它的全部能量表现为使物体改变宏观运动的状态。

热量和功的根本区别在于: 功是两物体间通过宏观运动发生相互作用而传递的能量; 热量则是两物体间通过微观的分子运动发生相互作用而传递的能量。

按习惯, 规定外界加给系统的热量为正, 而系统传给外界的热量为负。国际单位制规定功 W 和热量 Q 的单位都用焦耳 (J)。

三、熵

功和热量都是工质与外界间传递的能量, 故两者具有许多共同的特征。功是工质与外界发生机械作用时传递的能量。工质的压力 p 是工质对外界做功的推动力。比容 v 的变化则是衡量工质对外界做功与否的标志。用类比的方法, 既然热量是工质与外界发生热交换时起推动“力”的作用, 于是作为衡量工质对外界做功与否的标志, 必然也应是工质的某种状态参数的变化。这种状态参数就是熵, 用符号 S 表示, 单位为 J/k 。1kg 工质的熵称为比熵, 符号为 s , 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。类比于功的关系式, 可以得到

$$dq = T ds \quad (1-13)$$

比熵的定义式为

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (1-14)$$

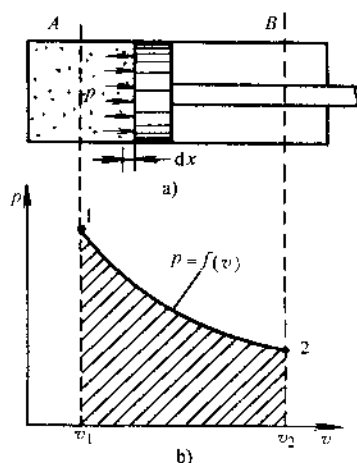


图 1-3 可逆过程的膨胀功

式中 dq ——可逆过程中系统与外界交换的微元热量；

T ——可逆过程的温度（可逆过程系统与外界的温度随时保持相等）。

熵的增量等于系统在可逆过程中交换的热量，除以传热时的绝对温度所得商。熵是工质的一个状态参数。对于工质的每个给定的状态，熵有确定的数值。

同功量的图示相似，也可用每个独立的状态参数 T 、 s 构成的状态图来表示热量。在 $T-s$ 图上的一点表示一个平衡状态，一条曲线表示一个可逆过程。

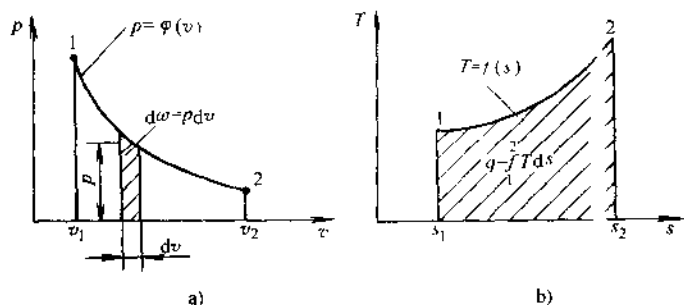


图 1-4 可逆过程的 $p-v$ 图和 $T-s$ 图

a) $p-v$ 图 b) $T-s$ 图

$$q = \int_1^2 T ds = \text{面积 } 12s_2s_1$$

因此 $T-s$ 图上曲线 1-2 下的面积，表示该过程中的传热量 q 的大小，故 $T-s$ 图又称为“示热图”，它在热工计算中有重要的功用。

对于 $m \text{ kg}$ 工质的热量 Q ，可按式计算：

$$Q = m \int_1^2 T ds = \int_1^2 T dS \quad (1-15)$$

从表 1-2 的对比中，可以清楚地看到熵与比容是相互对应的一个状态参数。熵有如下性质：

表 1-2 热力学的功与热

	功量	热量
表达式	$dw = p dv, w = \int_1^2 p dv$	$dq = T ds, q = \int_1^2 T ds$
动力	p	T
能力传递方式	$dv > 0, dw > 0$ 对外作功 $dv = 0, dw = 0$ 不作功 $dv < 0, dw < 0$ 对内作功	$ds > 0, dq > 0$ 工质吸热 $ds = 0, dq = 0$ 绝热 $ds < 0, dq < 0$ 工质放热
图示	$p-v$ 图	$T-s$ 图

- 1) 熵是一个状态参数，如已知系统两个独立的状态参数，即可求出熵的值。
- 2) 只有在平衡状态下，熵才有确定的值。
- 3) 通常只需求熵的变化量 ΔS ，而不必求熵的绝对值。
- 4) 熵是可加性的量， $m \text{ kg}$ 工质的熵是 1 kg 工质熵的 m 倍， $S = ms$ 。
- 5) 在可逆过程中，从熵的变化中可以判断热量的传递方向： $ds > 0$ 系统吸热； $ds = 0$ 系

统绝热； $ds < 0$ 系统放热。

第三节 热力学第一定律

热力学第一定律是能量转换与守恒定律在热力学中的一种表述。根据热力学第一定律，建立了闭口系统和开口系统的能量方程式，它们是进行热力分析和热力计算的主要基础。

一、热力学第一定律

热力学第一定律：热和功可以相互转换，为了要获得一定量的功，必须消耗一定量的热；反之，消耗一定量的功，必会产生一定量的热。

工质经历受热做功的热力过程时，工质从外界接受的热量、工质因受热膨胀而对外所作的功、同时间内工质所储存或付出的能量三者之间，必须保持收支上的平衡，否则就不符合能量守恒的原则。

二、工质的热力学能

工质内部所具有的各种能量，总称为工质的热力学能（内能）。由于工程热力学主要讨论热能和机械能之间的相互转换，不考虑化学能变化和原子核反应的热力过程，故可以认为这两部分能量保持不变，认为工质热力学能是分子热运动的动能和克服分子间作用力的分子位能的总和。分子动能是由分子直线运动动能、旋转运动动能、分子内原子振动能、原子内的电子振动能等组成。由于工质内的动能与位能都与热能有关，故也称作工质内部的热能。分子热运动动能是温度 T 的函数，分子间的位能是比体积 v 的函数。因此，工质的热力学能取决于工质的温度和比体积，即与工质的热力状态有关。一旦工质的状态发生变化，热力学能也就跟着改变。单位质量工质的热力学能（比热力学能） u 也是一个状态参数，其单位是 J/kg 或 kJ/kg 。 $m kg$ 工质的总热力学能 $U = mu$ ，单位是 J 或 kJ 。

工质热力学能变化值 $\Delta U = U_2 - U_1$ ，只与工质的初、终状态有关，而与工质由状态 1 到状态 2 所经历的过程无关。在热工计算中，通常只需计算热力学能变化值，对热力学能在某一状态下的值不感兴趣。

对于理想气体，因假设其分子间没有引力，故理想气体分子间的位能为零，其比热力学能 u 仅是温度的单值函数。

三、闭口系统能量方程

热力学第一定律应用到不同热力系统的能量转换过程中去，可得到不同的能量平衡方程式。现在讨论最单能的封闭系统的能量转换情况。

封闭在气缸中的定量工质，可作为封闭系统的典型例子。假定气缸中的 $1 kg$ 工质，热力学第一定律可以表达为

$$q = \Delta u + w \quad (1-16a)$$

式中 q ——外界加给每 $1 kg$ 工质的热量 (J/kg)；

w ——每 $1 kg$ 工质对外界所作的功 (J/kg)；

Δu ——每 $1 kg$ 工质热力学能的增加 (J/kg)。

对于 $m kg$ 工质来说，则其总热量 Q 为

$$Q = \Delta U + W \quad (1-16b)$$

式 (1-16) 叫做热力学第一定律解析式或封闭系统能量方程式。式中各项可以是正数、

零或负数。若 q 为负, 表明工质对外界传出热量; w 为负, 表明工质接受了外界的压缩功; Δu 为负, 表明工质的热力学能减少。

以上公式是从热力学第一定律直接用于闭口系统而导出的, 所以它们对任何工质和任何过程都是适用的。

式 (1-16) 清楚地表明热量和功的转换要通过工质来完成。如果让热机工质定期回到它的初状态, 周而复始, 循环不息, 就可不断地使热量转换为功。此时每完成一个闭合的热力过程 (热力循环), 工质的热力学能不变, 即 $\oint du = 0$ 。根据式 (1-16), 在该周期内, 工质实际所得到的热量, 将全部转变为当量的功。这正是热机工作的根本道理。由此可见, 不消耗热量或少消耗热量而连续作出超额机械功的热机是不存在的。热力学第一定律直接否定了这种创造能量的“第一类永动机”。

由闭口系统能量方程, 还可以证明理想气体的熵是状态参数。证明如下:

$$ds = \frac{dq}{T}$$

1kg 理想气体在可逆过程中的能量平衡为 $q = du - dw$, 因为 $du = c_v dT$; $dw = p dv$ 所以 $dq = c_v dT + p dv$

又

$$pv = RT$$

$$\text{则} \quad ds = \frac{dq}{T} = \frac{c_v dT + p dv}{T} = \frac{c_v dT}{T} + \frac{R dv}{v}$$

当理想气体由状态 1, p_1 、 v_1 、 T_1 , s_1 , 经历可逆过程变化到状态 2, p_2 、 v_2 、 T_2 、 s_2 时, 积分上式得

$$\Delta s_{1-2} = s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

其中, 第二项只与初、终状态的比体积 v_1 、 v_2 有关而与过程无关; 第一项中 c_v 是温度的函数, 故该项积分也仅与初终状态的温度 T_1 、 T_2 有关而与过程性质无关。

如取 c_v 为比定容热容, 则上式更简化为

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (1-17)$$

既然参数 s 从状态 1 到状态 2 的变化, 只与初态 1 和终态 2 有关, 而与中间所经历的过程无关, 这就说明 s 是状态参数。

在所讨论的封闭系统的能量平衡方程中, 如果系统经历的是比体积不变的定容过程, 由式 (1-11) 得 $dw = p dv = 0$; 由式 (1-16) 得 $dq = du + dw = du$

即工质在等容过程中的加热或放热量, 全部变为工质热力学能的增加或减少。

同时根据比定容热容的定义:

$$dq = c_v dT$$

故

$$dq = c_v dT = du$$

即证明了对于理想气体, 比热力学能 u 仅是温度的单值函数。

四、闭口系统稳定流动能量方程式与焓

实际上, 许多热机工作时, 工质通常都不是永远被封闭在热机中, 而是连续地 (汽轮机、燃气轮机) 或周期地 (内燃机、蒸汽机) 将已作功的工质排出, 并重新吸入新工质, 工

质的热力循环要在整个动力装置内完成。对于有工质流入流出的热力设备，作为开口系统分析研究比较方便。

工质在开口系统中的流动，又可分为稳定流动和不稳定流动。对工程上常见的各种热力设备来说，在正常运行（稳定工况）时，工质的连续流动情况将不随时间变化，表现为流动工质在各个截面上的状态和对热量和功量的交换都不随时间变动，并且同时期内流过任何截面上的工质流量均保持相同。此工况就叫稳定流动。严格地讲，工质出入内燃机的气缸并不是连续的，而是重复着循环变化，每一循环周期出入气缸的工质数量相同，也可以按稳定流动的情况分析。

如图 1-5 所示，1kg 工质在开口系统中作稳定流动，设系统在过程中从外界吸取热量 q ，并对外输出可被利用的机械功 w_{sh} （技术功）。由图可知：1kg 工质流进界面 I—I 所携带进去的能量为动能 $\frac{c_1^2}{2}$ （ c_1 为流速）；位能 gZ_1 （ Z_1 为高度）；比热力学能 u_1 ；流动功 $p_1 v_1$ 。系统从外界吸入的热量为 q 。

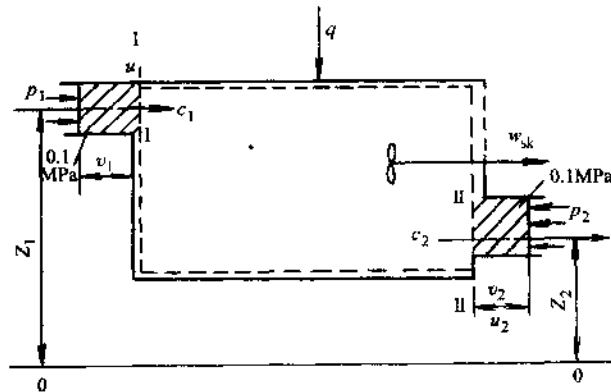


图 1-5 开口系统工质流过进、出口时的情况

1kg 工质流出界面 II—II 所携带的能量为 $\frac{c_2^2}{2}$ 、 gZ_2 、 u_2 、 $p_2 v_2$ ，对外输出的功 w_{sh} 。

根据能量转换与守恒定律，输入能量等于输出能量，即

$$q + gZ_1 + \frac{c_1^2}{2} + u_1 + p_1 v_1 = w_{sh} + gZ_2 + \frac{c_2^2}{2} + u_2 + p_2 v_2$$

经整理后得

$$q = (u_2 + p_2 v_2) - (u_1 + p_1 v_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + q(Z_2 - Z_1) + w_{sh} \quad (1-18)$$

或

$$q = \Delta u = \Delta(pv) + \frac{1}{2}(\Delta c)^2 + g\Delta Z + w_{sh}$$

式 (1-18) 就是开口系统稳定流动能量方程式，它广泛应用于汽轮机、燃气轮机、喷管、锅炉，泵、压缩机以及节流装置等热力设备的热工计算中。

由于单位流动工质除了自身比热力学能 u 之外，总随带推进功 pv 一起转移，热力学中令两者之和为比焓 h (J/kg)，即

$$h = u + pv \quad (1-19)$$

m kg 工质的焓用 H (J) 表示，即

$$H = U + PV \quad (1-19b)$$

既然 p 、 v 、 u 都是工质的状态参数，因此，由 p 、 v 、 u 所决定的比焓 h 也是工质的状态参数。比焓被称为复合状态参数。将式 (1-19) 代入式 (1-18)，得

$$\begin{aligned} q &= h_2 - h_1 + (c_2^2 - c_1^2) + g(Z_2 - Z_1) + w_{sh} \\ &= \Delta h + \frac{1}{2}\Delta c^2 + g\Delta Z + w_{sh} \end{aligned}$$

由于热力设备的进出口标高相差很小， $g\Delta Z$ 可忽略不计；工质流速在 50m/s 以下时， $\frac{1}{2}\Delta c^2 < 1.25 \text{ kJ/kg}$ ，也可忽略不计。则得简化后的开口系统能量方程式为

$$q = \Delta h + w_{sh} \quad (1-20)$$

第四节 理想气体的热力过程

工程热力学中，把热机的工作循环概括为工质的热力循环，把整个热力循环分成几个典型的热力过程，并对热力过程进行分析，确定过程中气体状态参数的变化规律，揭示出热力过程能量转换的特性。在这个基础上，总结出整个热力循环的热功转换规律。

分析过程的方法是首先研究理想气体的可逆过程，导出过程方程式，利用过程方程和理想气体状态方程，求出过程的初、终态参数的变化关系，按热力学第一定律研究热力过程中气体吸收或放出的热量、热力学能的变化，以及对外所作的功；然后将这种可逆过程的分析结果，换算成实际气体的不可逆过程，并引进各种有关的经验修正系数。

本节先讨论理想气体的基本热力过程，然后讨论理想气体的一般过程，即多变过程。为了分析计算方便，假定工质是 1kg 理想气体，其比热容视为定值，即不随温度而变化。

一、定容过程

图 1-6 所示为定容加热过程，其中活塞不动。

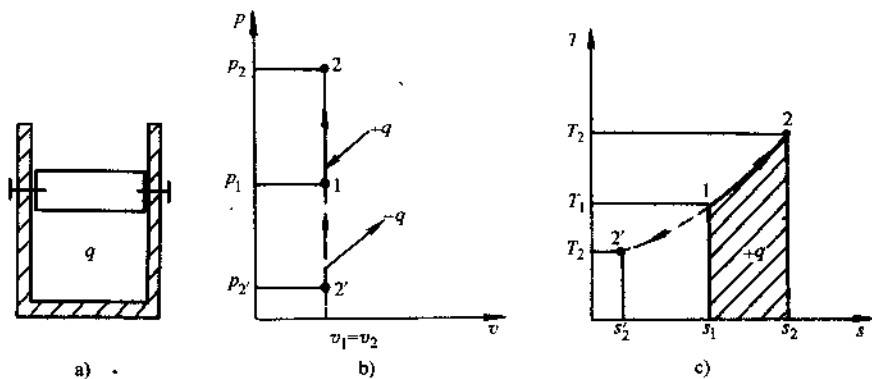


图 1-6 定容加热过程 $p-v$ 和 $T-s$ 图

a) 定容加热过程 b) $p-v$ 图 c) $T-s$ 图

1. 定容过程方程式

定容过程中，工质的容积不变，即比体积 v 保持不变，其过程方程式为

$$v = \text{常数}$$

气体由状态 1 变化到状态 2 的过程曲线 1-2 (或 1-2')，在 $p-v$ 图上是一条垂直于 v

轴的铅垂线，在 $T-s$ 图上是一条对数曲线。

2. 气体状态参数的变化

根据状态方程 $pv = RT$ ，气体由状态按照状态 1 变化到状态 2 时，初、终状态参数之间的关系为

$$v_1 = v_2 \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1-21)$$

即在定容过程中，气体的绝对压力与温度成正比。

3. 能量变化

定容过程的膨胀功 $w = \int_{v_1}^{v_2} p dv$ ，因为 $dv = 0$ ，所以 $w = 0$ 。

根据比热容的定义 $c_v = \frac{dq}{dT}$ ，可得 $q = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT$ ，若假定 c_v 为定值，故定容过程中工质吸入(或放出)的热量为

$$q = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = c_v(T_2 - T_1) \quad (1-22)$$

根据式 (1-16)，可求得定容过程中比热力学能的变量为

$$q = \Delta u = u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1) \quad (1-23)$$

即定容过程中工质吸入(或放出)热量，全部转变为工质比热力学能的增加(或减少)。

4. 熵的变化

根据熵的定义式 $ds = \frac{dq}{T}$ ，又 c_v 为定值，故熵的变量 Δs 为

$$\Delta s = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{c_v dT}{T} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$$

在图 1-6c 的 $T-s$ 图上，过程 1-2 或 1-2' 为一条对数曲线。

二、定压过程

图 1-7a 所示为定压加热过程，活塞上的载重量 mg 保持不变。

1. 定压过程方程式

在定压过程中，压力 p 保持不变，其过程方程为

$$p = \text{常数}$$

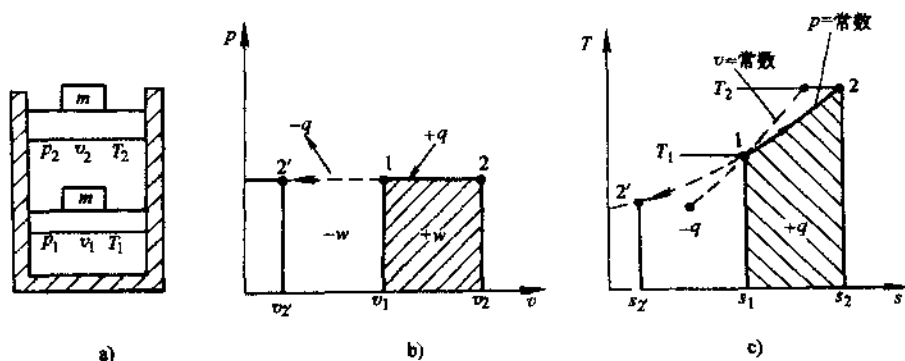


图 1-7 定压加热过程 $p-v$ 图和 $T-s$ 图

a) 定压加热 b) $p-v$ 图 c) $T-s$ 图