

# 汽车发动机与汽车理论

(汽车运用与修理专业用)

广东交通学校等 编

人民交通出版社

交通系统中等专业学校试用教材

# 汽车发动机与汽车理论

(汽车运用与修理专业用)

广东交通学校等编

人民交通出版社

---

## 内 容 提 要

本书包括两篇，第一篇为汽车发动机理论，分十章；第二篇为汽车理论，分七章。

本书供交通系统中等专业学校“汽车运用与修理”专业师生教学用，亦可供汽车使用单位的工人和技术人员参考。

交通系统中等专业学校试用教材

汽车发动机与汽车理论

(汽车运用与修理专业用)

广东交通学校等 编

人民交通出版社出版

(北京市安定门外和平里)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 006 号

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

江苏省如东县印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{4}$  印张：14 $\frac{1}{2}$  字数：360 千

1979年7月 第1版

1981年6月 第1版 第2次印刷

印数：110,601—132,400册 定价：1.20元

# 前 言

本书是交通系统中等专业学校“汽车运用与修理”专业的一种试用专业课教材，是根据交通部教育局一九七八年一月在长沙召开的教材编写会议所审定的编写大纲编写的。

本书分两篇，第一篇（第一章至第十章）为“汽车发动机理论”，第二篇（第十一章至第十七章）为“汽车理论”。

发动机理论部分的重点内容为发动机的工作循环、发动机的性能指标和发动机的特性等，其中对在各种运转和使用条件下发动机工作性能的变化情况作了较多的阐述。因本专业的课程设置关系和阐述发动机理论的需要，在第一篇首先扼要介绍了有关工程热力学的基础知识和燃料的一般知识、燃烧理论等。

汽车理论部分着重介绍汽车动力学和汽车的牵引性能、制动性能、燃料经济性、操纵性和稳定性、转向特性、通过性与平顺性等主要使用性能。考虑到发展拖挂运输是我国当前汽车运输企业多快好省地完成运输任务的重要措施，本书对汽车列车的运行性能有专章论述。

本书由广东交通学校主编，参加编写的有：广州市交通运输中等专业学校（编写第一章至第五章）、江西省交通学校（编写第十一章至第十三章）、广西南宁交通学校（编写第十四章至第十七章）。在编写过程中，曾得到有关省、自治区交通局和兄弟院校的帮助和支持，在此谨表谢意。

由于编写时间仓促，加之编写人员水平有限，本书难免存在缺点，欢迎使用本书教学的师生和其他方面读者批评指正，以便将来修订。

AP93/02

# 目 录

## 第一篇 汽车发动机理论

第一章 工程热力学基础知识 .....	1	第二节 发动机的有效指标 .....	46
第一节 热功转换的基本概念 .....	1	第三节 机械损失 .....	48
一、热的本质与比热 .....	1	一、机械损失的组成 .....	48
二、工质的基本状态参数 .....	3	二、机械损失的影响因素 .....	48
三、理想气体状态方程式 .....	6	第四节 发动机的热平衡 .....	49
第二节 热力学基本定律 .....	9	第五章 发动机的换气 .....	51
一、热力学第一定律 .....	9	第一节 充气量与充气系数 .....	51
二、能量方程 .....	9	一、充气量 .....	51
三、热力学第二定律 .....	10	二、充气系数 .....	52
第三节 热力过程分析 .....	11	第二节 影响充气系数的因素 .....	53
一、等容过程 .....	11	一、进气压力 .....	53
二、等压过程 .....	11	二、进气温度 .....	54
三、等温过程 .....	13	三、废气 .....	55
四、绝热过程 .....	14	四、转速 .....	55
五、多变过程 .....	15	五、压缩比 .....	55
六、多变过程的特性与指数的关系 .....	17	第三节 提高充气系数的措施 .....	55
第二章 发动机燃料的一般知识与		一、减小进气阻力 .....	55
燃料的燃烧 .....	18	二、合理选择配气定时 .....	57
第一节 汽油与柴油的		三、提高发动机的转速 .....	58
一般知识 .....	18	四、增压 .....	59
一、燃油组分的概述 .....	18	第六章 汽油机的燃烧 .....	60
二、汽油的使用性能 .....	19	第一节 汽油机的正常	
三、柴油的使用性能 .....	22	燃烧过程 .....	60
第二节 燃料的燃烧 .....	24	一、概述 .....	60
一、理论空气量 .....	24	二、燃烧过程的基本情况 .....	60
二、过量空气系数 .....	26	三、对燃烧过程的要求 .....	62
三、燃料燃烧反应后摩尔数的改变 .....	27	第二节 汽油机的不正常燃烧 .....	63
四、燃料的热值 .....	28	一、爆震燃烧 .....	63
第三章 发动机的工作循环 .....	30	二、表面点火 .....	65
第一节 发动机的理论循环 .....	31	第三节 影响汽油机燃烧	
一、理论循环 .....	32	过程的主要因素 .....	66
二、理论循环的分析 .....	34	一、点火时刻 .....	66
三、研究理论循环的意义 .....	35	二、使用情况 .....	67
第二节 发动机的工作过程 .....	36	三、汽油机的结构 .....	67
一、换气过程 .....	36	第四节 汽油机的燃烧室 .....	68
二、压缩过程 .....	38	一、对燃烧室结构的要求 .....	68
三、燃烧过程 .....	40	二、典型燃烧室结构的分析 .....	69
四、膨胀过程 .....	43	第五节 发动机的排气	
第四章 发动机的性能指标 .....	44	污染与净化 .....	71
第一节 发动机的指示指标 .....	44	一、发动机污染大气的有害气体 .....	71

二、发动机排出有害气体的情况.....	71	对柴油机性能的影响 .....	90
三、有害气体的净化措施.....	72	一、燃料的喷雾.....	90
<b>第七章 汽油机可燃混合气的</b>		二、喷油泵及喷油器.....	92
<b>形成与化油器 .....</b>	<b>72</b>	三、调速器与调速特性.....	94
<b>第一节 燃料的雾化与蒸发 .....</b>	<b>72</b>	<b>第四节 柴油机燃烧室对混合气</b>	
<b>第二节 不同混合气成分对</b>		<b>形成及燃烧的影响 .....</b>	<b>96</b>
<b>燃烧过程的影响 .....</b>	<b>73</b>	一、直接喷射燃烧室.....	96
<b>第三节 理想化油器的特性 .....</b>	<b>74</b>	二、分隔式燃烧室.....	98
<b>第四节 简单化油器的</b>		<b>第五节 多种燃料发动机.....</b>	<b>100</b>
<b>构造与特性分析 .....</b>	<b>75</b>	<b>第九章 发动机的特性 .....</b>	<b>101</b>
一、简单化油器的构造 .....	75	<b>第一节 汽油机的特性.....</b>	<b>101</b>
二、简单化油器的特性分析 .....	76	一、点火调整特性.....	101
<b>第五节 稳定工况下的供油系 .....</b>	<b>78</b>	二、燃料调整特性.....	102
一、化油器的主供油系 .....	78	三、速度特性.....	104
二、辅助供油装置 .....	80	四、负荷特性.....	108
三、化油器的主要参数 .....	82	<b>第二节 柴油机的特性.....</b>	<b>109</b>
<b>第六节 多腔化油器 .....</b>	<b>83</b>	一、喷油提前角调整特性.....	109
<b>第八章 柴油机混合气的</b>		二、燃料调整特性.....	109
<b>形成与燃烧 .....</b>	<b>85</b>	三、速度特性.....	110
<b>第一节 柴油机的燃烧过程 .....</b>	<b>85</b>	四、负荷特性.....	112
一、柴油机混合气形成的特点 .....	85	<b>第三节 发动机的万有特性 .....</b>	<b>114</b>
二、柴油机燃烧过程的分析 .....	85	<b>第十章 发动机的试验 .....</b>	<b>115</b>
<b>第二节 影响柴油机燃烧</b>		<b>第一节 发动机的试验项目 .....</b>	<b>115</b>
<b>过程的主要因素 .....</b>	<b>88</b>	一、有效功率(扭矩)的测定.....	116
一、燃料的品质 .....	88	二、燃料消耗量的测定 .....	117
二、压缩比 .....	88	三、各种特性的测定 .....	117
三、喷油规律 .....	88	<b>第二节 发动机台架试验</b>	
四、喷油提前角 .....	89	<b>常用设备及仪表.....</b>	<b>120</b>
五、转速与负荷 .....	89	一、水力测功器.....	120
<b>第三节 柴油机燃料供给系统及其</b>		二、燃油消耗量的测量装置.....	124
		三、测速器 .....	126

## 第二篇 汽车理论

<b>第十一章 汽车动力学 .....</b>	<b>129</b>	<b>第十二章 汽车的牵引性能.....</b>	<b>152</b>
<b>第一节 汽车驱动轮上的</b>		<b>第一节 汽车的牵引平衡.....</b>	<b>152</b>
<b>牵引力 .....</b>	<b>130</b>	<b>第二节 汽车的动力特性.....</b>	<b>156</b>
一、驱动轮上的扭矩 .....	130	<b>第三节 汽车的加速性能.....</b>	<b>159</b>
二、传动机构的机械效率 .....	131	一、加速度 .....	159
三、车轮的工作半径 .....	133	二、加速时间 .....	160
<b>第二节 汽车行驶阻力 .....</b>	<b>135</b>	三、加速行程 .....	162
一、滚动阻力 .....	135	<b>第四节 汽车的功率平衡.....</b>	<b>163</b>
二、空气阻力 .....	138	<b>第五节 影响汽车牵引性的</b>	
三、坡度阻力 .....	141	<b>主要因素 .....</b>	<b>166</b>
四、加速阻力 .....	142	一、发动机参数对汽车牵引	
<b>第三节 驱动轮的附着力.....</b>	<b>145</b>	性的影响.....	166
一、驱动轮的径向反作用力.....	145	二、主传动器的速比对汽车	
二、驱动轮的附着力 .....	149		

牵引性的影响	167
三、变速器的档数及速比对 汽车牵引性的影响	168
四、汽车的流线型对汽车 牵引性的影响	170
五、汽车总重对汽车牵引性的影响	171
六、轮胎的尺寸与型式对 汽车牵引性的影响	172
七、使用因素对汽车牵引性的影响	173
第六节 汽车牵引性试验	173
一、转鼓试验	173
二、滑行试验	174
三、测定附着系数	175
<b>第十三章 汽车的制动性能</b>	175
第一节 汽车制动的动力学	176
一、作用在车轮上的制动力	176
二、制动力与附着力的关系	177
第二节 制动性能的评价指标	178
一、制动减速度	178
二、制动时间	179
三、制动距离	180
第三节 影响制动性的 主要因素	181
一、轴间负荷的分配	181
二、汽车的载重量	182
三、利用发动机制动	182
四、道路情况	182
五、车轮制动器	183
六、制动初速度	184
七、驾驶技术	184
第四节 汽车制动性的试验	185
一、道路试验	185
二、试验台试验	186
<b>第十四章 汽车的燃料经济性</b>	188
第一节 汽车燃料经济特性	188
一、燃料经济性评价指标	188
二、汽车的燃料经济特性	189
第二节 影响汽车燃料经济性的 主要因素	191
一、发动机方面对燃料 经济性的影响	191
二、汽车方面对燃料经济性的影响	192
三、使用方面对燃料经济性的影响	192
<b>第十五章 汽车的操纵性与稳定性</b>	193
第一节 汽车纵向和	

横向稳定性	194
一、汽车的纵向倾覆	194
二、汽车的侧翻和侧滑	195
三、汽车单轴侧滑 对稳定性的影响	198
第二节 汽车的转向特性	199
一、汽车转向时的几何关系	199
二、车轮侧向弹性对汽车 转向运动的影响	200
三、车轮弹性偏离对 汽车转向的影响	201
第三节 汽车转向轮的 振动及其防止	204
一、车轮的振动形式	204
二、汽车转向轮振动的防止	205
第四节 前轮定位角与 转向轮的稳定效应	207
一、主销内倾形成的稳定力矩	207
二、主销后倾形成的稳定力矩	208
三、轮胎弹性变形的影响	208
<b>第十六章 汽车的通过性与平顺性</b>	209
第一节 汽车的通过性	209
一、汽车通过性的评价指标	209
二、影响汽车通过性的主要因素	212
第二节 汽车行驶平顺性	214
一、汽车行驶平顺性的评价指标	214
二、使用因素对汽车行驶 平顺性的影响	215
<b>第十七章 汽车列车的运行性能</b>	216
第一节 汽车列车的动力性 与燃料经济性	216
一、汽车列车的动力性	216
二、汽车合理拖挂总重量的确定	217
三、汽车拖挂最大总重量的确定	218
四、汽车列车的燃料经济性	220
第二节 汽车列车的运动学	220
一、汽车拖带轴转向式 双轴挂车的运动	220
二、汽车拖带单轴挂车及 半挂车的运动	221
第三节 挂车的稳定性	222
一、挂车车身在垂直平面内的振动	223
二、挂车车身在水平面内的振动	224
附录 本书常用计量单位换算表	225

# 第一篇 汽车发动机理论

汽车发动机理论是研究发动机工作过程的基本理论的一门科学，它牵涉的知识面很广。本篇的编写原则是在叙述时，力求做到理论密切联系实际，内容安排上是由浅入深，首先扼要复习工程热力学的基础知识，介绍燃料的一般知识和燃烧理论，然后阐明和分析四行程发动机工作循环的原理，希望学生通过对本篇内容的学习，能了解提高发动机动力性、经济性和可靠耐久性的途径，为发展我国内燃机科学技术做出贡献，并为学好汽车运用与修理专业的后续课打下良好的基础。

## 第一章 工程热力学基础知识

工程热力学是热力学的一个部分，它主要是研究热能和机械功的互相转换，特别是热能转变为机械功的规律。它的任务是从理论上摸索出使热能以更大的百分率转变为机械功的途径。

工程热力学是以热力学第一定律和第二定律为基础，从能量转换的观点来研究各种热机共性的分支学科。

要把热能转变为机械功，必须借助一套设备和某种媒介物质。这些设备通常称为热机，汽车上的发动机便是热机的一种。汽车发动机是通过燃料的燃烧变热为功的，在整个转变过程中，总是以气体作为媒介物质，简称为工质。燃料燃烧前，工质为空气（柴油机）或空气和汽油的混合气（汽油机）。燃烧后，工质主要是二氧化碳和水蒸气等。因此，对工质的热性质进行分析和研究也是工程热力学的任务之一。

我们从工程热力学的内容中，把与汽车发动机有关的主要部分作为发动机的工程热力学基础来进行介绍。

### 第一节 热功转换的基本概念

#### 一、热的本质与比热

##### （一）热的本质

热是物体内部分子和原子不规则运动的总能。这种运动的剧烈程度就决定了物体的冷热程度，对外表现为温度的高低。也就是说，物体内部分子运动的平均速度越高，则物体的受热程度越大，表现出来的温度就越高。热能可以由工质通过传导、对流或辐射等方式来进行传递。例如，当热物体和冷物体接触或物体的一端被加热时，运动比较剧烈的分子，由于它们之间的不断碰撞，就影响了邻近的分子，这时，受热较高的物体传热至受热较低的物体，前者温度降低，后者温度升高，直至两物体达到同一温度时，传热也就停止了，这种现象称为传热。



综上所述，“热”是物质运动的一种表现形式，也是能量传播的形式，这就是“热”的本质。

热量的基本导出单位是焦耳。但在工程热力学的计算中，这个单位太小，为了计算方便，本教材采用千焦耳（1千焦耳=0.2389千卡），在计算时，常取工质吸热为正值，放热为负值。

## (二)比热

使物体温度升高  $1\text{K}(1^\circ\text{C})$  所需加入的热量，称为热容量。使质量为 1 千克的物体温度升高  $1\text{K}(1^\circ\text{C})$  所需加入的热量称为比热（旧教材中称它为重量比热，单位为千卡/公斤度），常用符号  $C$  表示，单位为千焦耳/千克度。如果质量为 1 摩尔的物体，温度升高  $1\text{K}(1^\circ\text{C})$  所需加入的热量称为摩尔比热，常用符号  $\mu C$  表示，单位为千焦耳/摩尔度。

气体的比热一般是随着温度的升高而增大的，如图 1-1 所示。在不同的温度，其比热的数值也不同。在每一个温度下所对应的比热称为真实比热。气体在某一温度下的真实比热为：

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

式中： $dq$ ——在某一温度下给 1 千克气体所加入的微小的热量；  
 $dT$ ——气体温度升高的微量。

如果气体的温度从  $T_1$  上升到  $T_2$ ，则加给气体的热量为：

$$q = \int_{T_1}^{T_2} C dT$$

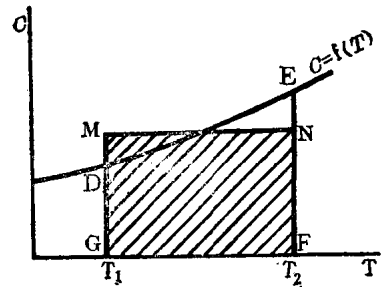


图1-1 气体的比热随温度而变化的关系

在工程上为了计算方便，往往不考虑气体的比热随温度而变化的关系，常用平均比热，即在一定的温度变化范围内，单位质量气体所吸入或放出的热量与温度差的比值。由图1-1可知：

$$q = \int_{T_1}^{T_2} C dT = \text{面积 } GDEFG = \text{面积 } GMNFG = GM(T_2 - T_1)$$

式中矩形  $GMNFG$  的高  $GM$  就是在温度为  $T_1$  到  $T_2$  范围内的平均比值。

若用符号  $C \Big|_T^{T_2}$  表示  $GM$ ，则上式可写为：

$$q = C \Big|_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$$

气体的比热还与加热过程有关。在不同的过程中，使单位质量的气体温度升高  $1\text{K}(1^\circ\text{C})$  所需加入的热量是不同的。因此，比热的数值也视气体变化过程的特征而定。在工程热力学中，常遇到等压加热过程和等容加热过程。

等压加热过程是气体在加热过程中，压力保持不变的过程。其比热称为等压比热，用符号  $C_p$  表示。

等容加热过程是气体在加热过程中，容积保持不变的过程。其比热称为等容比热，用符号  $C_v$  表示。

在工程热力学的计算中，还常遇到一个重要的比值，即等压比热与等容比热之比，其比值以  $k$  表示。即

$$C_p/C_v = k$$

从等容加热过程和等压加热过程的定义可知，在等容加热过程中，气体没有膨胀做功，所加入的热量将完全用来增加气体分子运动的动能，使气体的温度升高。在等压加热过程中，气体可以膨胀做功。因而所加入的热量除了用来增加气体分子运动的动能外，还可以克服外力做功。对同样质量的气体而言，如果要对气体加热到某一温度，则在等压加热过程中所加入的热量比等容加热过程所加入的热量要多，即等压比热大于等容比热。例如，空气的等压比热  $C_p$  为 1.0046 千焦耳/千克度，等容比热  $C_v$  为 0.7158 千焦耳/千克度， $k$  为 1.4。此外， $k$  也可以表示为：

$$\frac{\mu C_p}{\mu C_v} = k$$

式中： $\mu C_p$ ——等压摩尔比热，千焦耳/摩尔度；

$\mu C_v$ ——等容摩尔比热，千焦耳/摩尔度。

## 二、工质的基本状态参数

说明工质状态特征的数量，称为工质的状态参数。汽车上的发动机变热为功的整个过程中，工质的状态总是不断地变化着，可以用压力、温度、比容和内能这四个基本参数来描述。

**压力** 工质在单位面积容器壁上所作用的垂直力，称为压力。对于作为工质的气体来说，则是由大量的气体分子在紊乱的运动中对容器壁碰撞的结果。假定，由于大量气体分子的碰撞，在容器壁的垂直方向上产生总的作用力为  $N$ ，而容器壁的总面积为  $A$ ，则作用在容器壁上的压力为：

$$P = \frac{N}{A}$$

压力的基本导出单位是帕，

$$1 \text{帕} = 1 \text{牛顿/米}^2$$

在工程上，帕的单位太小，为了计算方便，本教材中采用千帕，即：

$$1 \text{千帕} = 1000 \text{帕}$$

$$1 \text{物理大气压} = 101.36673 \text{千帕}$$

压力也可以用液柱的高度来表示：

$$1 \text{千帕} = 0.102 \text{米水柱}$$

$$1 \text{物理大气压} = 0.76 \text{米汞柱} = 10.333 \text{米水柱}$$

工程上，过去习惯使用的压力单位与现在使用的国际单位制压力单位之间的换算关系为：

$$1 \text{工程大气压} = 1 \text{公斤/厘米}^2 = 10^4 \text{公斤/米}^2 = 98.1 \text{千帕}$$

$$10333 \text{公斤/米}^2 = 101.36673 \text{千帕} = 1 \text{物理大气压}$$

在工程上，压力的表示方法有两种，一种叫绝对压力，记作  $P_{ab}$ ，它的数值是指工质作用于容器壁上的实际压力。另一种叫表压力，它的数值是用压力表测量出来的读数，记作  $P_g$ 。但表压力不是工质对容器壁的实际压力，它只是测量工质真实压力的辅助读数，因为压力表是处于大气压力作用下，所以测出压力  $P_g$ ，都是绝对压力  $P_{ab}$  与大气压力  $P_0$  的差值。如图 1-2 中，是用液柱高度来表示容器内工质的压力的相对值。

在图 1-2a) 中, 容器内气体压力高于大气压力, 液柱高度差  $h$  表示容器内气体压力超过大气压力的读数, 容器内的气体压力可用下式求出:

$$p_{ab} = p_0 + \rho g h \times 10^{-3} \text{ 千帕} \quad (1-2)$$

式中:  $\rho$ ——液体的密度 (千克/米<sup>3</sup>);

$h$ ——液柱高度 (米);

$g$ ——重力加速度 (米/秒<sup>2</sup>)。

当容器内气体压力低于大气压力时, 在图 1-2b) 中, 液柱高度差  $h$  表示容器内气体压力低于大气压力的读数, 称为真空度。此时, 容器内气体的压力可由下式求出:

$$p_{ab} = p_0 - \rho g h \times 10^{-3} \text{ 千帕} \quad (1-3)$$

但应注意, 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, 而大气压力是随地区和气候的不同而变化的。所以, 只有绝对压力才能表示工质的真实状态, 绝对压力才是工质的状态参数。

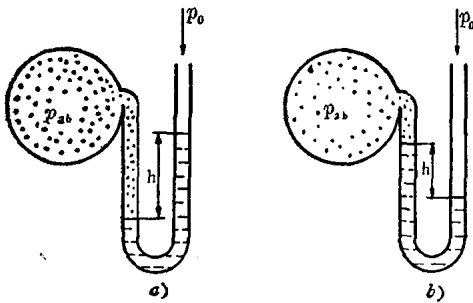


图 1-2 液柱压力表和真空度

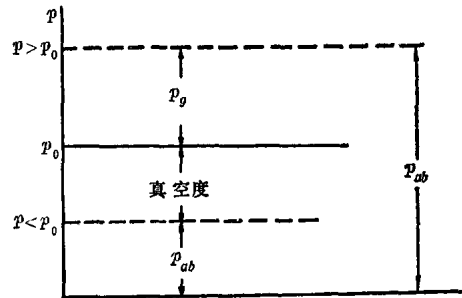


图 1-3 绝对压力表压力及真空度的相互关系

绝对压力与表压力和真空度之间的关系可以用图 1-3 表示出来。从图中可以看出, 表压力和真空度都是相对于大气压力的相对值。当绝对压力高于大气压力时, 它们的差值称为表压力。当绝对压力低于大气压力时, 它们的差值称为真空度。所以, 从压力表和真空表得出的读数加上当时当地的大气压力或被当时当地的大气压力减去, 才是绝对压力。

**温度** 工质的温度表示工质的冷热程度。对于作为工质的气体而言, 从分子运动学的观点来看, 温度是气体分子运动强弱的一种量度。气体分子运动速度越高, 其温度也越高。

在热力学中, 温度用开氏温标 (或称绝对温标) 来量度, 用符号  $T$  和单位  $K$  表示。这温标是选定水在三相点时的温度为  $273.16K$ , 在大气压力下, 水的沸腾温度为  $373.16K$ , 在这两点温度间, 将温标标尺均匀地分为 100 份, 每一份称为  $1K$ , 其大小为水在三相点时的

温度的  $\frac{1}{273.16}$ 。开氏温标的零度, 称为绝对零度。

在工程上, 温度也可以用摄氏温标来量度, 用符号  $t$  和单位  $^{\circ}C$  表示。在摄氏温标中, 每一度的大小与开氏温标相同, 只是温标的零点不同。水在三相点时的温度, 定为摄氏温标的零度, 在大气压力下, 水的沸腾温度定为摄氏温标的  $100$  度。所以, 开氏温标和摄氏温标之间的关系为:

$$t = T - 273.16 \quad (1-4)$$

在工程上可近似地取为:

$$t = T - 273$$

**比容** 单位质量工质所占的容积称为比容, 用符号  $\nu$  表示, 单位为米<sup>3</sup>/千克。设气体的质量为  $G$  千克, 容积为  $V$  米<sup>3</sup>, 则气体的比容为:

$$\nu = \frac{V}{G} \quad \text{米}^3/\text{千克} \quad (1-5)$$

比容的倒数称为密度, 即单位容积中气体的质量, 用  $\rho$  表示:

$$\rho = \frac{1}{\nu} = \frac{G}{V} \quad \text{千克/米}^3 \quad (1-6)$$

**内能** 在工程热力学中, 内能是指工质内部所具有的总能量。对于作为工质的气体来说, 由于其分子是处于紊乱的运动状态中, 气体分子除了具有直线运动的动能外, 还具有旋转运动的动能。同时, 由于组成分子的原子处于振动的运动中, 使分子内部也具有振动能。这三种动能称为气体的内动能。根据分子运动学说可知, 气体分子直线运动的平均动能是与气体的温度成正比的, 温度越高, 气体分子的平均速度越大, 其平均动能也越大。与此同时, 气体分子的旋转动能和原子振动的动能也是随着温度的升高而增大的。在实际气体中, 分子之间存在吸引力, 所以除上述的三种动能外, 还具有由分子间吸引力而引起的内位能。如果气体分子间的距离越远, 则相互作用的力就越小, 那么, 内位能也越小。而气体分子间的距离远近又可以用比容  $\nu$  表示, 因此, 气体的位能与气体的比容有关。

上述四种能量的总和就组成了气体的内能。通常用  $u$  表示 1 千克气体所具有的内能, 单位为千焦耳/千克, 用  $U$  表示  $G$  千克或  $M$  摩尔气体的内能, 单位为千焦耳。

从上述分析可知, 气体的内能取决于它的温度和比容, 用函数形式可表示为  $u = f(T, \nu)$ , 由此可知, 气体的内能与气体的状态有关。

如果把组成气体内能的内位能忽略不计, 则气体的内能仅由内动能组成, 它只取决于气体的温度, 用函数形式可表示为  $u = f(T)$ , 这种气体称为理想气体 (详细概念下节介绍)。所以, 理想气体的内能只取决于气体温度的高低, 而与比容和压力无关, 无论从什么状态变化到另一个状态, 只要它的温度是从初温  $T_1$  变化到终温  $T_2$ , 内能的变化都一样。如果温度不变, 理想气体的内能也不会改变。所以, 理想气体的内能只是温度的单值函数。

例如, 对质量为 1 千克的理想气体在等容过程中进行加热, 由于它的比容没有改变, 对外不作功, 所以加入的热量全部用来增加理想气体的内能, 其内能的变化为:

$$u_2 - u_1 = C_v(T_2 - T_1)$$

或

$$\Delta u = C_v(T_2 - T_1) \quad (1-7)$$

式中:  $u_2$ 、 $T_2$ ——终态时理想气体的内能和温度;

$u_1$ 、 $T_1$ ——初态时理想气体的内能和温度;

$\Delta u$ ——内能的改变量。

由于理想气体的内能与过程无关, 只与温度有关, 所以对于其他热力过程, 不管它是怎样进行, 只要理想气体的初温和终温仍是  $T_1$  和  $T_2$ , 则内能的变化仍用式 1-7 来计算。若将式 1-7 改写为微分形式, 则为:

$$du = C_v dT \quad (1-8)$$

在工程热力学中, 为了方便计算某一状态下工质的内能数值, 可以规定在标准状态下 ( $p = 101.36673$  千帕、 $T = 273.16K$ ) 工质的内能为零, 所以某一状态下工质的内能的数值

仅仅是相对于这个基准而言的。例如，有1千克理想气体从 $0^{\circ}\text{C}$ 变化至 $t^{\circ}\text{C}$ ，而且 $C_v$ 等于相应的平均值，不随温度而变化，则在 $t^{\circ}\text{C}$ 时，其内能为：

$$u = \int_{273}^{t+273} C_v dT = C_v \int_{273}^{t+273} d(t+273) = C_v t \quad (1-9)$$

对于 $G$ 千克的理想气体，其内能为：

$$U = GC_v t \quad (1-10)$$

### 三、理想气体状态方程式

#### (一) 真实气体与理想气体

气体分子间的平均距离通常比液体和固体要大得多，气体分子本身的体积比气体所占的容积要小得多，气体分子间的互相吸引力（或内聚力）也很小，气体分子运动所受的约束微小，因此，分子运动非常活泼。运动形式除了分子本身的直线运动和旋转运动外，组成分子的原子还处于振动中，处于高温的多原子分子的气体，其振动尤其激烈。所以，气体具有良好的膨胀性和流动性。综上所述，气体的分子是具有体积的，并且分子之间存在吸引力。

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。

理想气体是：假设有一种这样的气体，它的分子间没有吸引力，分子本身不占有体积，可以看成是由大量不互相吸引的质点所组成。这种气体在自然界中是不存在的，这只不过是便于分析和计算而抽象出来的一种概念。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，所以在工程热力学的研究和计算所要求的精确度范围内，都可以把它们当作理想气体处理。

当气体的压力越低，温度越高时，它的密度就越小，这样的气体就越接近理想气体。如汽车发动机中的工质，完全可以当作理想气体处理。在以后的叙述中，如不作说明，一般所提到的气体，都是指理想气体。

#### (二) 理想气体的状态方程式

人们通过长期的实践，发现当气体状态发生变化时，气体参数 $p$ 、 $v$ 、 $T$ 之间存在一定的关系，对于质量为1千克的某种气体而言，这关系为：

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = \frac{p_3 v_3}{T_3} \quad (1-11)$$

式中： $p_1$ 、 $v_1$ 、 $T_1$ ——第一状态时的参数；

$p_2$ 、 $v_2$ 、 $T_2$ ——第二状态时的参数；

$p_3$ 、 $v_3$ 、 $T_3$ ——第三状态时的参数。

式1-11表明，任何状态下的某种气体，它的压力和容积的乘积与绝对温度的比值都等于一个常数，即：

$$\frac{pv}{T} = \text{常数} = R \quad (1-12)$$

式中： $R$ ——气体常数，千焦耳/千克度。

对于同一种气体，常数 $R$ 值是一定的，但对于不同种类的气体，常数 $R$ 值是不同的，列举如下：

氧气                      0.26千焦耳/千克度 (26.49公斤米/公斤度)

氮气	0.30千焦耳/千克度 (30.26公斤米/公斤度)
空气	0.29千焦耳/千克度 (29.27公斤米/公斤度)

式1-12也可改写为:

$$p\nu = RT \quad (1-13)$$

式1-13是对1千克气体而言的, 如果是  $G$  千克气体, 则式1-13两边同乘以  $G$  得:

$$Gp\nu = GRT \quad (1-14)$$

因

$$G\nu = V$$

故式1-14可改写为:

$$pV = GRT \quad (1-15)$$

式1-13和1-15称为理想气体状态方程式。式1-13适用于1千克气体, 式1-15适用于  $G$  千克气体。

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

### (三) 摩尔状态方程式

不同的气体, 气体常数也不相同, 这给使用理想气体状态方程式带来不便。如果某种气体的气体常数  $R$  不知道, 则无法利用这方程式来求出该气体的状态参数。而摩尔状态方程式就能解决以上的不足, 因为摩尔状态方程式的气体常数不随气体种类的不同而变化, 即对于任何气体, 气体常数都相同, 这给计算带来很大的方便。

**摩尔** 摩尔是物质的量的单位。第十四届国际计量大会通过的定义是: 摩尔——一物系的物质的量, 该物系所包含的结构粒子数与 0.012 千克碳<sup>12</sup> 的原子数目相等。本教材在使用这一单位时, 物系所包含的结构粒子是指分子, 以 1 千克作为单位, 例如气体的分子量用  $\mu$  代表, 则  $\mu$  千克的气体称为 1 摩尔气体。

所以, 气体的摩尔数是等于气体的千克重量除以气体的分子量所得的商。例如, 氧气的分子量为 32, 则 32 千克的氧便是 1 摩尔氧, 64 千克的氧便是 2 摩尔氧。若气体的质量是  $G$  千克, 气体的分子量是  $\mu$ , 则气体的摩尔数  $M$  可由下式求出:

$$M = \frac{G}{\mu} \quad (1-16)$$

**摩尔容积** 1 摩尔气体所占的容积称为摩尔容积, 用符号  $V_\mu$  表示, 并且  $V_\mu = \mu\nu$ 。

根据无数的实验证明: 在相同的温度和压力下, 各种气体的摩尔容积  $V_\mu$  都相等, 并且在标准状态下 ( $p = 101.36673$  千帕,  $T = 273.16$  K), 各种气体的摩尔容积为:

$$V_\mu = \mu\nu = 22.4 \text{ 标准米}^3/\text{摩尔}$$

**摩尔状态方程式** 将式1-12两边乘以  $\mu$  得:

$$\mu R = \frac{p\nu\mu}{T}$$

或

$$\mu R = \frac{pV_\mu}{T} \quad (1-17)$$

用标准状态下的数值  $p = 101.36673$  千帕,  $T = 273.16$  K,  $V_\mu = 22.4$  标准米<sup>3</sup>/摩尔 代入式 1-17 得:

$$\mu R = \frac{101.36673 \times 22.4}{273.16} = 8.31 \text{ 千焦耳/摩尔 K} \quad (1-18)$$

将  $\mu R$  的值代入式 1-17 得:

$$pV_{\mu} = 8.31 T \quad (1-19)$$

将式 1-19 两边乘以摩尔数  $M$ , 并根据摩尔容积的定义:  $V = MV_{\mu}$  (摩尔数与摩尔容积的乘积等于容积) 得:

$$\begin{aligned} pV_{\mu}M &= 8.31MT \\ pV &= 8.31MT \end{aligned} \quad (1-20)$$

式 1-19 和 1-20 称为理想气体摩尔状态方程式, 前式适用于 1 摩尔气体, 后式适用于  $M$  摩尔气体。  $\mu R = 8.31$  (千焦耳/摩尔 K) 称为通用气体常数。对于质量为  $G$  千克的任何气体, 只要按  $M = \frac{G}{\mu}$  算出摩尔数后便可以按式 1-20 来计算。

**气体的功量** 假定在 (如图 1-4 中所示的) 气缸中装有 1 千克气体, 气体的比容为  $v$ , 压力为  $p$ 。若气体的压力等于外界的压力时, 则气缸内的气体容积保持不变。若气体的压力比外界压力大了一个微量  $dp$ , 那么气体就会推动活塞向右移, 气体的容积便增大, 这时气体对活塞作了功, 称为膨胀功。假定, 如果是推动活塞向左移, 气缸内的气体容积便缩小, 这时外界通过活塞对气体作了功, 称为压缩功。

若有 1 千克气体在气缸内进行膨胀过程, 如图 1-4 中由 1 膨胀到 2, 气体压力将不断地变化, 并逐渐下降。假若把膨胀过程分为许多个无穷小的过程, 则在每一个无穷小的过程中, 可以认为压力是不变的。活塞在每一个微小的过程中, 移动的距离为  $ds$ , 若活塞的面积为  $A$ , 则气体完成的微量膨胀功为:

$$dw = pA ds \quad (1-21)$$

式中:  $pA$ ——力;

$ds$ ——距离。

由于  $A ds = dv$  为体积的变化, 所以:

$$dw = p dv \quad (1-22)$$

若 1 千克气体在容积由  $v_1$  变为  $v_2$  时, 则气体所作膨胀功为:

$$w = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad \text{千焦耳/千克} \quad (1-23)$$

如果不是 1 千克的气体, 而是  $G$  千克气体进行膨胀, 这些气体所占的容积为  $V$ , 因  $V = Gv$ , 则  $G$  千克气体所作的膨胀功为:

$$W = Gw$$

或

$$W = \int_{v_1}^{v_2} Gp dv$$

即

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad \text{千焦耳} \quad (1-24)$$

式 1-23 是计算气体膨胀功的一般公式, 用这一公式来计算气体的膨胀功时, 除了知道气体的初态和终态外, 还必须知道这一膨胀作功过程中, 气体的压力  $p$  发生变化的规律, 就是说,  $p = f(v)$  的函数关系必须知道。

当气体不是膨胀而是受到外界压缩时, 就不是气体对外界作功, 而是外界对气体作功。

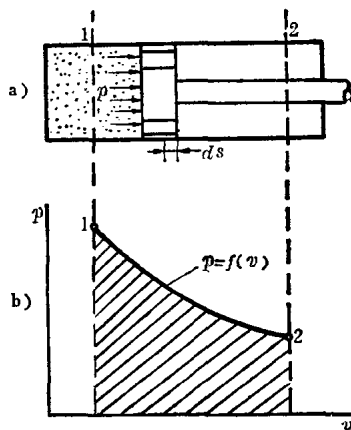


图 1-4 气体在气缸中所作的功

接受外界所作的功的数量也同样可以用式1-23来计算，但算出来的 $w$ 的数值将为负值。也就是说，如果膨胀功是负值，就表明了气体接受了外界的压缩功。

上述气体的某一初状态1到另一个终状态2所进行的一个状态变化过程，在工程热力学中称为一个热力过程。热力过程进行的情况，可以在 $p-v$ 图（或称压容图）上形象地表示出来。 $p-v$ 图是以比容 $v$ 为横坐标，以压力 $p$ 为纵坐标的一个直角坐标图。气体的状态可以用图上的一点代表，因此， $p-v$ 图上的一条曲线代表气体所进行的一个热力过程。图1-4b)所示的就是一个 $p-v$ 图，图中曲线1-2代表的就是同图a)中所示的气体膨胀过程，这条曲线的本身也就反映了 $p$ 是 $v$ 的某一函数，即 $p=f(v)$ 。根据微积分原理可知，曲线下面所包围的面积，就代表 $\int_{v_1}^{v_2} p dV$ 这一积分的数值。这样，在 $p-v$ 图上，不仅一个点可以表示气体的某一状态，一条曲线可以表示某一热力过程，而且，气体在这过程中所作的功也能用曲线下面的一块面积来表示。基于这种特点， $p-v$ 图也叫“示功图”。

## 第二节 热力学基本定律

### 一、热力学第一定律

各种形式的能量之间都可以互相转换，这种现象是普遍存在于自然界中的。人们经过长期实践总结出这样的规律：各种不同形式的能量可以互相转换，但它们的总量保持不变，这一规律称为能量守恒与转换定律，这一定律应用在热力学上，便是热力学第一定律。热力学第一定律可叙述为：当一定量的热消失时，必定产生数量与之相当的一定量的机械功；当一定量的机械功消失时，必定产生数量与之相当的一定量的热。或者说：功可以转变为热，热可以转变为功，但能量的总和是恒定不变的。若用 $Q$ 表示转变为功的热量， $W$ 表示转换过来的功，热量和功的单位均为千焦耳，则热力学第一定律以数学形式表示为：

$$Q = W \quad \text{千焦耳} \quad (1-25)$$

根据这个关系可知：1千焦耳的热量全部转换为功时，可得1千焦耳的功；1千焦耳的功全部变为热时，可得1千焦耳的热。

### 二、能量方程

热力学第一定律只是阐述热和功之间的互相转换的关系，至于在热力过程中，由于气体状态变化而产生的能量平衡关系，则由能量方程表示。

假设在一个带有活塞的气缸里装有1千克气体（如图1-5所示），从外界吸入热量 $dq$ 后，气体膨胀推动活塞移动了一个距离 $ds$ 并作了 $dw$ 的功。同时，气体的温度也升高了 $dT$ 。由于温度升高，所以气体的内能也有所改变，改变量为 $du$ 。因此，气体吸收热量 $dq$ 后，除了用于增加气体的内能外，全部变为功。根据热力学第一定律，可得：

$$\begin{aligned} dq - du &= dw \\ dq &= du + dw \end{aligned} \quad (1-26)$$



图1-5 热力过程示意解析图



或

$$dq = C_v dT + p dv \quad (1-27)$$

式 1-26 和 1-27 称为热力过程的能量方程式，可以理解为：所加给气体的一定热量是用于增加气体的内能和使气体作一定量的膨胀功。

上两式是对无穷小的状态变化而言的，对于一定过程来说，能量方程式可写为：

$$q = \Delta u + w = u_2 - u_1 + w \quad (1-28)$$

对于  $G$  千克或  $M$  摩尔气体，方程式为：

$$Q = \Delta U + W = U_2 - U_1 + W \quad (1-29)$$

在能量方程式 1-28 和 1-29 中，每一项都可以是正值、零或负值，根据实际情况而定。习惯上规定：气体向外界放出热量，则  $Q(q)$  为负值，反之为正值；气体接受了外界的压缩功，则  $W(w)$  为负值，反之为正值；气体的内能减小， $\Delta U(\Delta u)$  为负值，反之为正值。

关于内能的计算，前面已论述，即理想气体的内能只取决于气体的温度，因此内能的改变量可按式 1-7 来计算。

### 三、热力学第二定律

热力学第一定律阐明了各种能量可以互相转换，其数量关系是守恒的。但并不是所有不违反热力学第一定律的过程都能实现。例如，机械功通过摩擦可以毫无限制地全部转换成热，但通过热机就不能把热全部转换为机械功。这说明：热全部转换为机械功虽然并不违反热力学第一定律，但实际上是不可能做到的。又例如，一件烧红的锻件放在温度较低的大气中，锻件便把热量传给周围的空气而使自己的温度逐渐下降。但是，已经冷却了的锻件却不能从周围的空气中吸收回所散失的热量而重新使自己赤热起来。这说明热只能自发地从温度较高的物体传给温度较低的物体，而不能自发地、无条件地从温度较低的物体传热给温度较高的物体。

上述例子说明，热功转换过程的进行是有方向性和不可逆性的。同时也说明了热和功的转换，有些是有条件的，有些是没有条件的。这些都是自然界中存在的客观规律。根据这一客观规律，人们通过长期实践总结出热力学第二定律。由于对自然界中不同的热现象进行观察的结果，热力学第二定律常有如下说法：

“热不可能自发地、不付代价地从一个低温物体传至另一个高温物体。”

“使热能全部而且连续地转变为机械功是不可能的。”

“只吸热、不放热的单热源热机是不可能实现的。”

以上说法虽然不同，但其实质都是一样的。如果仅从热机理论的需要来理解热力学第二定律，可以认为是：只有热源而不传热给冷源的热机是不可能实现的。

热机的热效率反映了热力学第二定律的基本内容。设热机的工质接受热源的热量为  $Q_1$  千焦耳，工质对外做功为  $W$  千焦耳，对冷源放热为  $Q_2$  千焦耳，由能量平衡关系可得出：

$$Q_1 - Q_2 = W$$

热机的热效率  $\eta$  为：

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

如果  $Q_2 = 0$ ，则  $\eta = 1$ 。实际上， $Q_2$  不可能等于零，所以， $\eta$  的数值一定是小于 1 的。

所谓热源和冷源，是根据各种热机工作时所具有的共性而抽象出来的概念。不论是那种热机循环，工质都要吸热和放热。在循环中，把热传给工质的物体称为热源；接受工质传出