

# 热工基础

● 童钧耕 卢万成 编

上海交通大学出版社

上海交通大学“九五”重点教材

# 热 工 基 础

童钧耕 卢万成 编

上海 交 通 大 学 出 版 社

## 内 容 简 介

本书是根据教育部热工课程教学指导委员会制定的高等工业学校《热工原理教学基本要求》的精神,并结合上海交通大学《热工基础》教学大纲编写的,适用于工科非能源动力类、非热工类各专业教学。

全书共分两部分,第一部分共七章,讲述工程热力学的基本内容,包括基本概念,热力学第一定律、第二定律,气体、蒸汽和湿空气的性质,气体的热力过程,热功转换设备和装置的热力分析及热能合理利用等。第二部分共四章,讨论传热学的基本内容,包括导热、对流换热、辐射换热、传热过程和换热器的基本概念及基本计算方法等。

书中附有例题和习题以及必要的热工图表。

本书也可供有关专业的学生及科技工作者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

热工基础/童钧耕,卢万成编. —上海:上海交通大学出版社,2001  
ISBN 7-313-02491-6

I. 热… II. ①童…②卢… III. 热力工程—基本知识 IV. TK12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 38527 号

## 热工基础

童钧耕 卢万成 编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市印刷二厂印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:13.75 插页:8 字数:338 千字

2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月第 1 次印刷

印数:1~1050

ISBN 7-313-02491-6/TK·065 定价:23.50 元

---

版权所有 侵权必究

# 前 言

本书是根据教育部热工课程教学指导委员会制定的高等工业学校《热工原理教学基本要求》的精神,并结合上海交通大学《热工基础》教学大纲编写的。全书共分两部分,第一部分为工程热力学,第二部分为传热学,适用于工科非能源动力类、非热工类各专业教学。

热工原理是讨论热功转换、热能的合理利用和热量传递规律的科学。我国虽然是能源资源的大国,但也是人均能源资源的小国,能源技术落后,利用率低,环境污染严重,极大地制约着国民经济的发展和人民生活水平的提高。因此,每一个高等工业学校的学生,即使不是动力和能源类专业的也应具备一定的热工基础知识,以便在将来的工作中面对与能源特别是热能有关的问题时能采取技术上先进、经济上合理的措施,为我国的能源和环境事业作出贡献。

全书环绕热能的传递、转换和利用提出了热工理论的基本概念、基本定律及热工问题分析计算的基本方法,加强了对能量中可用能、不可逆过程的熵产和作功能力损失等内容的阐述,并对能量传递、转换和利用过程的环境问题给予了一定的重视。编者结合长期教学实践经验,在体系上作了新的安排,并在内容上注意做到“提高起点,重心后移”。

本书第一章至第七章由童钧耕编写,第八章至第十一章由童钧耕与卢万成共同编写,全书由童钧耕统稿。编写过程中得到杨强生教授、蒋智敏教授和教研组许多同仁的帮助,在此深表谢意。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指教。

编 者

2000年4月

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 绪论                              | 1  |
| 第一章 热力学第一定律                     | 4  |
| § 1-1 基本概念                      | 4  |
| § 1-2 基本状态参数                    | 6  |
| § 1-3 气体的热力学能                   | 9  |
| § 1-4 功与热量                      | 10 |
| § 1-5 热力学第一定律及其解析式              | 13 |
| § 1-6 稳定流动能量方程式                 | 14 |
| 思考题                             | 18 |
| 习题                              | 18 |
| 第二章 气体的性质                       | 21 |
| § 2-1 理想气体及其状态方程式               | 21 |
| § 2-2 气体的比热容                    | 24 |
| § 2-3 理想气体的热力学能、焓和熵             | 29 |
| § 2-4 实际气体状态方程式及压缩因子 $Z$        | 32 |
| § 2-5 水蒸气的基本概念                  | 36 |
| § 2-6 水蒸气的产生过程                  | 38 |
| § 2-7 水和水蒸气热力性质表及水蒸气的焓熵图        | 40 |
| 思考题                             | 44 |
| 习题                              | 44 |
| 第三章 混合气体和湿空气                    | 47 |
| § 3-1 混合气体的分压力和分体积              | 47 |
| § 3-2 混合气体的成分表示法                | 48 |
| § 3-3 混合气体的比热容、热力学能、焓和熵         | 51 |
| § 3-4 湿空气                       | 54 |
| § 3-5 湿空气的比湿度和湿度( $\omega-t$ )图 | 56 |
| 思考题                             | 59 |
| 习题                              | 60 |
| 第四章 气体的热力过程                     | 61 |
| § 4-1 理想气体的基本热力过程               | 61 |
| § 4-2 气体热力过程的功及热量               | 65 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| § 4-3 压气机的热力过程 .....         | 70         |
| § 4-4 水蒸气的基本热力过程 .....       | 76         |
| § 4-5 湿空气的热力过程 .....         | 78         |
| 思考题 .....                    | 81         |
| 习题 .....                     | 82         |
| <b>第五章 热力学第二定律 .....</b>     | <b>85</b>  |
| § 5-1 热力学第二定律的表述 .....       | 85         |
| § 5-2 卡诺循环和卡诺定理 .....        | 87         |
| § 5-3 熵的导出 .....             | 89         |
| § 5-4 熵方程 .....              | 92         |
| § 5-5 作功能力与作功能力损失 .....      | 95         |
| 思考题 .....                    | 101        |
| 习题 .....                     | 101        |
| <b>第六章 气体与蒸汽的流动 .....</b>    | <b>103</b> |
| § 6-1 稳定流动的基本方程式 .....       | 103        |
| § 6-2 喷管内流速变化的条件 .....       | 105        |
| § 6-3 喷管的计算 .....            | 107        |
| § 6-4 绝热节流 .....             | 111        |
| 思考题 .....                    | 113        |
| 习题 .....                     | 114        |
| <b>第七章 循环 .....</b>          | <b>116</b> |
| § 7-1 活塞式内燃机循环 .....         | 116        |
| § 7-2 活塞式内燃机理想循环的比较 .....    | 121        |
| § 7-3 活塞式热气发动机及其循环 .....     | 122        |
| § 7-4 燃气轮机装置循环 .....         | 124        |
| § 7-5 基本蒸汽动力装置循环——朗肯循环 ..... | 128        |
| § 7-6 卡诺逆循环 .....            | 131        |
| § 7-7 压缩空气制冷循环 .....         | 132        |
| § 7-8 压缩蒸汽制冷循环 .....         | 135        |
| 思考题 .....                    | 140        |
| 习题 .....                     | 140        |
| <b>第八章 导热 .....</b>          | <b>143</b> |
| § 8-1 傅里叶定律和导热系数 .....       | 143        |
| § 8-2 稳态导热 .....             | 144        |
| § 8-3 非稳态导热 .....            | 148        |

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| § 8-4 导热问题的数值解法 .....                                           | 152 |
| 思考题 .....                                                       | 156 |
| 习题 .....                                                        | 156 |
| <b>第九章 对流换热</b> .....                                           | 158 |
| § 9-1 对流换热的基本概念 .....                                           | 158 |
| § 9-2 对流换热的基本方程组 .....                                          | 161 |
| § 9-3 对流换热的准则方程 .....                                           | 163 |
| § 9-4 相变换热 .....                                                | 166 |
| 思考题 .....                                                       | 171 |
| 习题 .....                                                        | 171 |
| <b>第十章 辐射换热</b> .....                                           | 173 |
| § 10-1 热辐射的基本概念 .....                                           | 173 |
| § 10-2 黑体辐射的基本定律 .....                                          | 174 |
| § 10-3 灰体和基尔霍夫定律 .....                                          | 177 |
| § 10-4 组成封闭空间的两灰体之间的辐射换热计算 .....                                | 179 |
| 思考题 .....                                                       | 181 |
| 习题 .....                                                        | 181 |
| <b>第十一章 传热过程和换热器热计算基础</b> .....                                 | 183 |
| § 11-1 传热过程 .....                                               | 183 |
| § 11-2 传热的增强和减弱 .....                                           | 184 |
| § 11-3 换热器的基本概念 .....                                           | 188 |
| 思考题 .....                                                       | 193 |
| 习题 .....                                                        | 193 |
| <b>附录</b> .....                                                 | 196 |
| 附表1-a 饱和水与饱和水蒸气表(按温度排列) .....                                   | 196 |
| 附表1-b 饱和水与饱和水蒸气表(按压力排列) .....                                   | 198 |
| 附表2 未饱和水与过热蒸汽表 .....                                            | 200 |
| 附表3 干空气热物理性质表( $p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ) .....      | 206 |
| 附表4 在大气压力( $p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ )下烟气热物理性质表 ..... | 207 |
| 附表5 未饱和水( $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ )与饱和水热物理性质表 .....       | 208 |
| 附表6 干饱和水蒸气热物理性质表 .....                                          | 209 |
| 附表7 几种饱和液体的热物理性质表 .....                                         | 210 |
| <b>参考文献</b> .....                                               | 211 |
| <b>附图 水蒸气焓熵图</b> .....                                          |     |

# 绪 论

## 一、热能与机械能的转换

能源是人类赖以生存的物质基础,人类社会的发展,离不开开发和利用自然界的各种能源。近代,能源的开发和利用已成为衡量社会物质文明的重要标志。自然界中蕴藏着各种不同形式的能,人类迄今已不同程度地开发和利用了自然界的风能、水能、太阳能、燃料的化学能及原子核能等。其中风能和水能是自然界以机械能形式提供的能量,其他能源主要以热能的形式或者转换为热能的形式供人们利用。但是人类在开发、利用能源,特别是在把化学能等转换成热能的同时,却污染了我们赖以生存的环境,例如矿石燃料的燃烧、原子废物的核辐射等等。因此,热能的利用和研究对人类文明发展和生态环境的保护有着巨大的意义。

热能的利用原则上有两种不同的方式:一种是直接利用,即把热能直接用于加热物体,诸如烘干、采暖、冶炼;另一种是动力利用,即把热能转换成机械能或电能,为生产及生活提供动力。这两种利用方式,均需要经过一定热工设备或过程才能实现。

把热能转换为机械能的整套设备称为热能动力装置。至今,热力工程所利用的热能主要来自矿物燃料所蕴藏的化学能。燃料在适当的燃烧设备中进行燃烧,产生热能,在热机中再将热能转变为机械能。热能动力装置可分为两大类:蒸汽动力装置和燃气动力装置。前者如火力发电厂的蒸汽动力装置及原子能动力装置等;后者如内燃机、燃气轮机装置及喷气发动机等。制冷、热泵和空气分离装置等原则上属于机械能转换为热能的设备,在热力学分析上与热能动力装置有很多相似的地方。

图0-1所示为蒸汽动力装置的系统简图。它是由锅炉、汽轮机、冷凝器、泵等组成的热力装置。燃料在锅炉中燃烧,把物质的化学能转变为热能,锅炉沸水管内的水吸热后变为蒸汽,并在过热器内过热,成为过热蒸汽。此时蒸汽的温度及压力比外界介质(空气)的温度及压力高,蒸汽具有做功的能力。它被导入汽轮机后,通过喷管,由于膨胀,压力降低,速度增大,具有一定动能的蒸汽推动叶片,使轴转动做功。做功后的排气(称为乏汽)从汽轮机进入冷凝器,被冷却水冷却,凝结成水,又由泵打入锅炉内加热。如此不断循环,不断产生蒸汽,汽轮机不断对外做功。

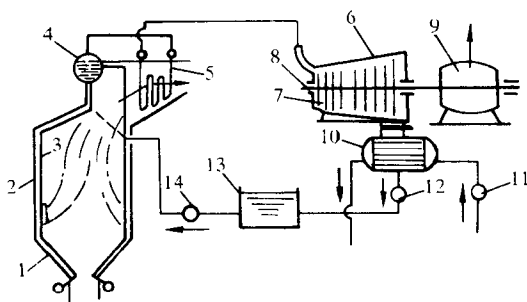


图0-1 蒸汽动力装置系统简图

1—炉子; 2—炉墙; 3—沸水管; 4—汽水筒; 5—过热器; 6—汽轮机; 7—叶轮; 8—轴; 9—发电机; 10—冷凝器; 11—冷却水泵; 12—冷凝水泵; 13—供水箱; 14—给水泵

图0-2为内燃机的示意图。它主要由气缸及气缸中的活塞所构成。当内燃机工作时,活塞作往复运动,并借助连杆和曲柄,使发动机的轴转动,以带动工作机器。用某种方法把空气和燃料所组成的可燃混合气体送入气缸中,并使其在气缸中燃烧,由于燃烧产生气体的压力和温

度大大高于周围介质的压力和温度,因此气体就在气缸中膨胀,向右推动活塞。这样燃烧气体的能量就可以机械功的形式,通过连杆和曲柄传给轴,变成了轴和飞轮的旋转动能。飞轮把所储存的能量中的一部分,用来使活塞做返回运动,并使做完功的废气排出缸外,又将新的可燃混合气体重新进入气缸中燃烧。这样一来,活塞就连续不停地做往复运动,内燃机的轴和飞轮也就不停地旋转,飞轮中所储存能量的剩余部分,在返回运动时也会继续传给工作机器,于是就实现了热变为功的过程。

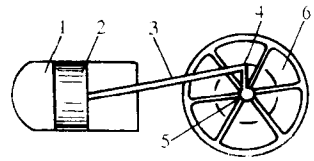


图0-2 内燃机示意图  
1—气缸; 2—活塞; 3—连杆; 4—曲柄; 5—轴; 6—飞轮

从蒸汽动力装置及内燃机工作过程的简单介绍可以看出,为使热能连续不断地转化为机械能,必须做到以下几点:

- (1) 凭借工质(蒸汽、燃气)作为中间媒介;
- (2) 工质源源不断地从热源吸取热量,并膨胀做功;
- (3) 工质热力状态发生循环往复的连续变化;
- (4) 向温度较低的物质系统(冷源)排出一部分热量。

热动力装置从原理上可进一步抽象为如图0-3(a)所示的形式。其中:  $T_{r_1}$  表示提供热量的热源;  $T_{r_2}$  表示吸收工质排出热量的低温热源(或称冷源); E 表示热机装置,工质在其中循环变化,吸热、膨胀、排热,把热能不断转换成机械功。

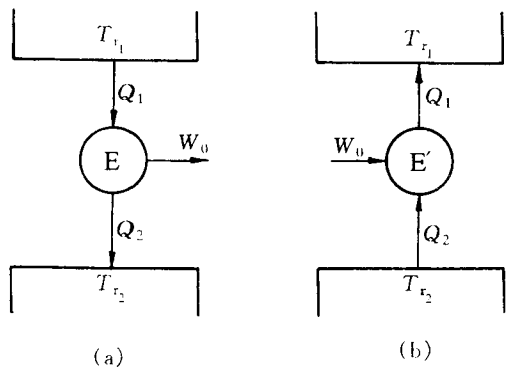


图0-3 热动力装置抽象图

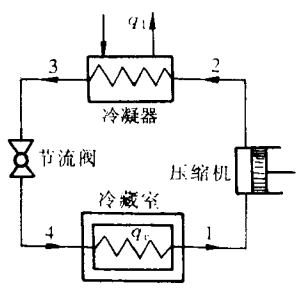


图0-4 制冷装置系统示意图

制冷装置的目的在于把低温物体的热量向高温物体转移,为此,需外界输入功。热泵是实施从低温物体吸热,向高温物体输送热量的装置,其原理与制冷装置相同。两种装置工作原理可抽象为如图0-3(b)所示的形式。以制冷装置工作过程(见图0-4)为例,工质在压缩机中被压缩,其压力、温度升高,接着工质在冷凝器中冷凝;然后,它通过节流阀,其温度降低到冷藏室温度以下;最后它在冷藏室中吸热汽化,返回压缩机完成循环。如同热动力装置一样,工质周而复始地吸热、压缩、放热,将热能从低温物体传向高温物体。

## 二、热工理论的研究对象和方法

热工理论包括工程热力学和传热学两部分。工程热力学主要是研究热能与机械能相互转换的规律及其在热动力工程中的应用;传热学主要研究热量传递的规律及其工程应用。热

工理论为研究热力设备的工作情况及提高转换效率提供必需的理论基础。

工程热力学的主要内容包括:基本概念、热力学第一定律和第二定律、气体和蒸汽的热力性质、热力过程和热力循环等。

传热学的主要内容有:热传导、对流换热、辐射换热和传热过程。

工程热力学中,主要应用热力学的宏观研究方法,把组成物质的大量分子、原子等微粒作为一个整体,研究它所表现出来的宏观性质和规律。它以归纳人类社会实践中无数事实得到的热力学第一定律和第二定律等为基础,通过物质系的压力、温度、比体积等宏观参数和受热、冷却、膨胀、收缩等整体行为,运用严密的逻辑推理,对宏观现象和热力过程进行研究,得出一系列有关能量转换,特别是热功转换的关系式。这种方法不需要对物质的微观结构作任何假设,而是把与物质内部结构有关的具体性质当作宏观真实存在的物性数据予以肯定,因此分析推理的结果具有高度可靠性和普遍适用性。有时为了解释一些热现象的本质,工程热力学也需引用气体分子运动学说和统计物理的基本观点及研究成果。

传热学的研究方法有解析法、实验研究法和数值法。解析法是对描述热传递的方程用数学分析的方法求解;实验研究法是通过实验对复杂的热传递过程进行测定的,并在传热理论的指导下建立经验性的方程求解;数值法是对难以用解析法求解的热传递方程利用电脑进行计算求解。这几种方法可以独立运用又可以相辅相成互相补充,尤其是电脑这一强有力的工具在传热领域的广泛应用,使关于热传递的研究进一步飞速发展。

### 三、热工理论发展简史

虽然古代人类早就学会了用火和救火,但到 17 世纪末对温度和热量这两个基本概念仍有错误的认识。直到 18 世纪末年朗福德观察到钻头钻炮筒时,机械功消耗的结果使钻头和筒身温度升高;戴维用两块冰相互摩擦,致使表面融化才对“热质说”给以致命的打击。19 世纪中叶迈耶提出了能量守恒理论,指出热是能的一种形式,可与机械能相互转化。1842 年焦耳用不同方式实测了热功当量。至此,科学界才彻底抛弃了“热质说”,建立起其实质为能量守恒和转换定律的热力学第一定律。

在建立第一定律的前后,基于当时生产实践迫切要求寻找大型、高效的热机,卡诺在 1824 年提出了著名的卡诺定理,指明工作在给定温度范围内热机所能达到的效率极限,这在实质上已建立了热力学第二定律。因卡诺受“热质说”的影响,其证明方法是错误的。1850 年和 1851 年克劳修斯和开尔文先后提出了热力学第二定律,并在此基础上重新证明了卡诺定理(热力学第二定律),提出能量有品质高低之分,从高品质的能转换为低品质的能的过程可自发进行。

热力学第一定律和第二定律奠定了热力学理论基础。1906 年能斯特根据低温下化学反应的许多实验事实,经归纳提出了热力学第三定律,指出绝对零度不能达到。第三定律的建立使热力学理论更臻完善。1942 年凯南提出了能量的有效能的概念,使对热能装置的分析从能量的数量方面伸展到能量的质量方面。

在人们探讨提高热机的功率及效率和更有效利用热能的过程中发现迫切需要对热量传递的基本规律进行深入研究,以便更有效地利用热能。这样就导致了“传热学”的出现和发展。在“传热学”的发展过程中傅里叶、牛顿、雷诺、努谢尔特、普朗特和施密特等作出了卓越的贡献。

# 第一章 热力学第一定律

任何形式的能量,既不能消灭也不能创造,只能从一种形式转换成另一种形式,在转换过程中能量的总量保持恒定,这就是能量守恒与转换定律。

能量守恒与转换定律是人类在长期的生产和科学实践中总结出的一条普遍的自然规律。热力学第一定律就是能量守恒与转换在热力系统中的应用。它说明了热能和其他形式的能量(特别是机械能)之间可以相互转换,在转换过程中总能量保持不变。它是热工计算的基础,也是热力学宏观分析法的主要依据。

## § 1-1 基本概念

### 一、系统

在工程热力学中,为了分析问题方便起见,与力学中取分离体的方法一样,通常把热力学分析的对象从周围物体中分割出来,称其为“热力系统”或简称为“系统”。与系统发生质量、能量交换的周围物质系统称“外界”。系统与外界的分界面(可以是假想的或实际的、固定的或移动的)称做边界。系统通过边界与外界进行质量的交换及热能和机械能或其他形式能量的传递。要实现热能的传递和把热能转化为机械能,需要借助于能够携带热能的工作物质才能实现,这种工作物质在热力工程中被称为“工质”。充当工质的最基本条件是:要有好的流动性和受热后有显著的膨胀性,并有较大的热容量及安全可靠,对环境无破坏性。工程中最适于充当工质的是:气体或由液态过渡为气态的蒸汽,如蒸汽轮机中的蒸汽、内燃机中的燃气和制冷装置中的氨蒸汽等。

与外界只有能量交换而无物质交换的热力系统,称为闭口(或封闭)系统。工程实践中有一类热机,如蒸汽机、内燃机等,当进气阀关闭后,排气阀尚未开启前,封闭在气缸内的气体,可看作闭口系统。这类热机利用工质受热后压力增加,于是向外膨胀推动活塞而作功。在热力工程中,还广泛采用另一类旋转式热机,如汽轮机、燃气轮机等,它们是利用高速气流的动能来作功的。在这类热机中,工质源源不断地流过热工设备,这种与外界不仅有能量交换又有物质交换的热力系统,称为开口系统。开口系统实际上只是空间的一个控制体积,而并不是一些确定的物质,例如,动物通过呼吸、进食、排污与外界交换物质,因此生物体是热力学意义上的开口系统。

若系统与外界无热量交换,则此系统称为绝热系;若系统与外界既无任何物质交换又无任何形式的能量交换,则该系统称为孤立系统。自然界中没有严格意义上的孤立系统,孤立系统是热力学的抽象概念,把系统和与之发生质、能交换的外界取作新的系统,则此大系统就是孤立系统。例如,把动物和环境作为系统,此系统即孤立系统。

## 二、平衡状态和状态参数

热力学中把系统所处的某种宏观状况称为工质的热力状态(简称状态)。所谓平衡状态系指在没有外界作用的情况下工质宏观性质可长久保持不变的状态。气体在平衡状态下,各部分的性质都均匀一致。一个系统,如果它的压力到处相同,并与外界平衡,则称之为达到力平衡或机械平衡;如果它的温度到处相同,并与外界平衡,则称之为达到热平衡。在无化学反应的条件下,如果一个系统同时处于力平衡和热平衡,则该系统就处于热力平衡状态(简称平衡状态)。一个平衡的热力系统,只要不受到外界的影响,它的状态就不会随时间而改变。如果受到外界作用,引起系统内压力不均匀或温度不均匀,破坏了系统的平衡状态,则当外界作用停止后,系统内压力不同及温度不同的各部分物质之间,将产生机械作用和热作用,并最终趋向新的平衡状态。

处于平衡状态的工质可用一组确定的宏观物理参数——状态参数描述。状态参数只是状态的函数,与如何达到该状态的过程无关。它在数学上表现为是点的函数,其微量是全微分,它沿闭合路径的积分为零。

状态参数可分为两类:一类称强度量,如温度和压力,它们的值与物质的量无关;另一类称广延量,它们的值正比于物质的量,如物质的体积和热力学能等。

若系统两平衡状态的状态参数均一一对应相等,称此两平衡状态相等;反之,相等的两状态则其状态参数必然一一对应相等。对于由可压缩物质构成、无化学反应的系统(称简单可压缩系统),只要两个独立的状态参数一一对应相等,就可判定该系统两平衡状态相等。

## 三、可逆过程

过程是指系统从一个平衡状态向另一个平衡状态变化时经历的全部状态的总合。过程是系统平衡被破坏的结果。若系统从一个平衡状态连续经过无数个中间的平衡状态过渡到另一个平衡状态,即过程中系统偏离平衡状态无限小并且随时恢复平衡状态,则这样的过程称为准平衡过程或准静态过程。气态系统进行准平衡过程的条件是促使系统平衡被破坏的压力差及温度差为无限小,过程进行的时间非常长。如果系统经历了一个过程后,系统可沿原过程的路线反向进行,回复到原状态,而且不在外界留下任何影响,则该过程称为可逆过程。判别系统是否经历了一个可逆过程的关键并不在于其是否能恢复到原状态,而在于是否系统在回复到原状态的同时不给外界留下任何影响。运动无摩擦,传热无温差的准平衡过程是可逆过程。自然界中一切过程均是不可逆的,可逆过程只是一种抽象概念,但对可逆过程的分析和计算,无论在理论上或是在实用上都有重要意义。本课程主要讨论可逆过程。

## 四、循环

循环是封闭的热力过程。系统进行循环后回复到原始状态,所有的状态参数全部回复到原值。若循环中全部过程都可逆,则该循环称为可逆循环;若循环中部分过程或全部过程都不可逆,则该循环称为不可逆循环。同样,可逆循环只是一种抽象概念。

通常,据循环的热力学特征,可把循环分为正向循环和逆向循环。正向循环的目的是输出功(如发电厂的蒸汽循环输出电力),故它又称动力循环。逆向循环是把热量自低温系统传向高温系统,具体应用又可分为排出低温冷库热量、保持低温冷库温度的制冷循环和利用排向高

温热源的热量加热的热泵循环。前者如冷库制冷剂进行的循环,后者如热泵型空调器内工质的循环。

衡量循环的完善程度的指标之一是循环的经济性指标。循环的经济性指标是循环的收益与其代价之比。动力循环的经济性指标称循环的热效率,是循环的净功与循环的吸热量之比,用  $\eta_t$  表示,定义为

$$\eta_t = \frac{W_{\text{net}}}{q_1} \quad (1-1)$$

式中:  $W_{\text{net}}$ ——循环输出的净功;  $q_1$ ——循环中工质自热源的吸热量。循环的热效率总是小于 1 的。制冷循环的经济性指标称循环的制冷系数,用  $\epsilon$  表示,定义为

$$\epsilon = \frac{q_c}{W_{\text{net}}} \quad (1-2)$$

式中:  $W_{\text{net}}$ ——循环输入的净功;  $q_c$ ——循环中工质自低温冷库的吸热量。循环的制冷系数可以大于 1 或小于、等于 1。热泵循环的经济性指标称循环的供暖系数,用  $\epsilon'$  表示,定义为

$$\epsilon' = \frac{q_1}{W_{\text{net}}} \quad (1-3)$$

式中:  $W_{\text{net}}$ ——循环输入的净功;  $q_1$ ——循环中工质向高温热源的放热量。热泵的供暖系数总是大于 1 的。

## § 1-2 基本状态参数

工质在进行热量传递和能量转换过程中将发生状态变化。在工程热力学中研究工质的状态时,为使问题简化,都假定工质处于平衡状态。工质在平衡状态下,各部分均匀一致,每个状态参数只有一个确定的数值。

工程热力学中,常用的状态参数有六个,即温度  $T$ 、压力  $p$ 、体积  $V$ 、热力学能  $U$ 、焓  $H$  和熵  $S$ 。其中压力  $p$ 、温度  $T$ 、体积  $V$  是可以直接或间接用仪器测出的量,是最常用的状态参数,称为基本状态参数;后三个参数,热力学能  $U$ 、焓  $H$ 、熵  $S$  可由基本状态参数导出,它们将于后述各章中陆续讲到。

### 一、温度

众所周知,当两个冷热不同的物体相互接触时,会有一股净能量——热量从热物体传向冷物体,使热物体变冷,冷物体变热,最后当两物体的冷热程度相同时,净能流的交换停止,此时称该两物体达到热平衡。可见,物体具有某种宏观性质,当该性质不同的两个物体接触时,会发生热量传递;当物体间达到热平衡时,它们的该项性质相同。我们把这种驱动热量传递的宏观性质称为温度。因此,温度表示了物体冷热程度,物体温度的高低确定了热量传递的方向:温度高的物体自发地把热量传递给温度低的物体。根据气体分子运动理论,组成气体的分子总是处于不停的运动之中,气体温度的高低与大量分子热运动的动能成正比,气体分子热运动的动能愈大,气体温度就愈高。由于气体各个分子平均运动速度的大小和方向各不相同,它们的动能也不相等,因此需要确定分子运动的平均动能来阐明大量分子热运动的情况。

气体分子平移运动平均速度可取其均方根速度,即

$$\bar{w} = \sqrt{\frac{w_1^2 + w_2^2 + \cdots + w_n^2}{n}} \quad (1-4)$$

式中： $n$ ——单位体积内气体分子的数目； $w_1, w_2, \cdots, w_n$ ——气体中各个分子平移运动的速度。

气体分子平移运动的平均动能与气体的绝对温度存在着下述的关系：

$$\frac{m\bar{w}^2}{2} = BT \quad (1-5)$$

式中： $\frac{m\bar{w}^2}{2}$ ——分子平移运动的平均动能； $m$ ——分子的平均质量； $\bar{w}$ ——分子平移运动的均方根速度； $B$ ——比例常数； $T$ ——气体的热力学温度。

分子运动学说揭示了温度的本质。

工程上用温度计或其他测温仪表测量物体的温度。处于热平衡的物体，都具有相同的温度。这一事实，是我们用温度计测量物体温度的依据。当温度计与被测物体达到热平衡时，温度计指示的温度就等于被测物体的温度。

为了进行温度测量，需建立温度的标尺，即温标。国际单位制（即 SI 制）中，以热力学温标作为基本温标。它所定义的温度称为热力学温度，其符号为  $T$ ，单位为开尔文，单位代号为 K。热力学温标以水的三相点，即水的固、液、气三态平衡共存时的温度为基本定点，并规定其温度为 273.16K。于是 1K 就是水的三相点热力学温度的  $\frac{1}{273.16}$ 。热力学温度也常沿用“绝对温度”的名称。由于热力学温标实施困难，故国际上定义了国际摄氏温标，与热力学温标并用，它所定义的温度称为摄氏温度，其符号为  $t$ ，单位为摄氏度，单位符号为  $^{\circ}\text{C}$ 。

绝对温标 1K 与国际摄氏温标  $1^{\circ}\text{C}$  的间隔是完全相同的。热力学温度与摄氏温度存在着下述的关系：

$$T = t + 273.15 \quad (1-6)$$

所以水的三相点的摄氏温度是  $0.01^{\circ}\text{C}$ 。

## 二、压力

压力是单位面积上所承受的垂直作用力（物理上称为压强）。其物理本质可根据气体分子运动论理解：装在容器中的大量分子，总是处于永远不停的热运动之中，它们除了相互碰撞之外，还不断地和容器壁碰撞。大量分子碰撞容器壁的总结果，形成了气体对容器壁的压力。根据分子运动论，可从理论上推导出作用于单位面积上压力与分子浓度及分子平移运动平均动能之间的关系式：

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m\bar{w}^2}{2} \quad (1-7)$$

式中： $p$ ——气体分子作用在单位面积上的绝对压力； $n = N/V$ ——分子浓度，即单位体积内含有气体的分子数； $N$ ——体积为  $V$  时，容器中气体的分子总数； $\frac{m\bar{w}^2}{2}$ ——每个分子作平移运动的平均动能。

由式(1-7)可以看出，气体的压力等于单位体积内所有分子平均动能的三分之二。若单位体积内所含的分子数目愈多，分子的平均动能愈大，则气体的压力也就愈大。式(1-7)从气体

分子运动论的观点,阐明了气体压力的本质。

前面提到,分子平移运动平均动能的大小,标志着物体温度的高低,由此揭示了气体压力与温度之间的内在联系,将式(1-5)代入式(1-7)可得:

$$p = \frac{2}{3} nBT \tag{1-8}$$

压力的单位为  $\text{N/m}^2$ ,称帕斯卡(简称帕),单位符号为 Pa,即  $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ ,工程上因帕作为单位太小,常用千帕、兆帕作单位,其符号分别为 kPa、MPa,  $1\text{kPa} = 1000\text{Pa}$ ,  $1\text{MPa} = 1 \times 10^6\text{Pa}$ 。

以前在工程上使用的压力单位还有巴和标准大气压等。它们与帕的换算关系见表1-1。

表1-1 各种压力单位与帕的换算关系

| 单位名称  | 单位符号               | 与帕的换算关系                        |
|-------|--------------------|--------------------------------|
| 巴     | bar                | 1 巴 = $10^5$ 帕或 0.1 兆帕         |
| 标准大气压 | atm                | 1 标准大气压 = 101325 帕 = 1.01325 巴 |
| 毫米水柱  | mmH <sub>2</sub> O | 1 毫米水柱 = 9.80665 帕             |
| 毫米汞柱  | mmHg               | 1 毫米汞柱 = 133.3224 帕            |
| 工程大气压 | at                 | 1 工程大气压 = 98066.5 帕            |

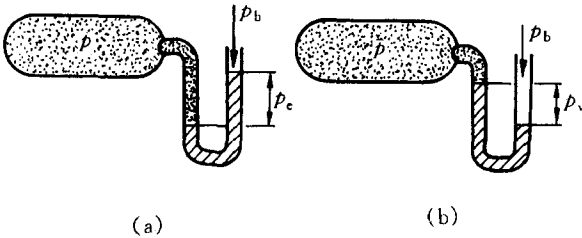


图1-1 表压力与真空度  
(a)  $p > p_b$       (b)  $p < p_b$

工程上测量压力时常采用弹簧管式压力表,当压力不高时也可用 U 形管压力计来测定。目前愈来愈多的采用电子技术的测压设备已进入工程领域。无论什么压力计,因为测压元件本身都处在当地大气压力的作用下,因此测得的压力值都是工质的真实压力与当地大气压力间的差,见图1-1。

工质的真实压力称为绝对压力,以  $p$  表示。当地大气压力以  $p_b$  表示,绝对压力大于当地大气压力时,压力表指示的压力值称为表压力,用  $p_e$  表示:

$$p = p_b + p_e \tag{1-9}$$

当绝对压力低于当地大气压力时,用真空表测得的数值,即绝对压力低于当地大气压力的数值,称真空度,用  $p_v$  表示:

$$p = p_b - p_v \tag{1-10}$$

当地大气压力的值可用气压计测定,其数值随所在地的纬度、高度和气候等条件而有所不同。所以,即使绝对压力不变,随着当地大气压的改变,表压力和真空度也要发生变化。因此,表示工质状态参数的压力只能用绝对压力。

### 三、比体积

一定质量工质的体积通常因所处的温度和压力的不同而不同,反映定量工质体积大小的状态参数是体积  $V$ 。比体积是指单位质量的工质所具有的体积,以符号  $v$  表示(工程热力学中约定用小写字母表示单位质量工质的参数),其单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。按定义可得:

$$v = V/m \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (1-11)$$

式中： $m$ ——工质的质量； $V$ ——工质的体积。

单位体积工质所具有的质量称为密度，以符号  $\rho$  表示，其单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。按定义可得：

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (1-12)$$

故比体积与密度互为倒数。

由于工质的比体积随温度和压力而变化，故实用中往往需要规定某一状况为标准状态。国际上把压力为  $101325\text{Pa}$ 、温度为  $0^\circ\text{C}$ （即  $273.15\text{K}$ ）的状态规定为标准状态。习惯把标准状态下的压力、温度、比体积分别记作  $p_0$ 、 $T_0$ 、 $v_0$ ，体积记作  $V_0$ 。

**【例1-1】** 某热电厂新蒸汽的表压力为  $100\text{at}$ （工程大气压），凝汽器的真空度为  $94620\text{Pa}$ ，送风机表压力为  $145\text{mmHg}$ ，当时气压计读数为  $755\text{mmHg}$ 。试问以  $\text{Pa}$  为单位的绝对压力为多少？

**【解】** 大气压力  $p_b = 755\text{mmHg} \times 133.322\text{Pa}/\text{mmHg} = 100660\text{Pa}$

新蒸汽的绝对压力

$$p_1 = p_b + p_e = 100660\text{Pa} + 100\text{at} \times 98066.5\text{Pa}/\text{at} = 9907300\text{Pa}$$

凝汽器中蒸汽的绝对压力

$$p_2 = p_b - p_v = 100660\text{Pa} - 94620\text{Pa} = 6040\text{Pa}$$

送风机送出的空气的绝对压力

$$\begin{aligned} p &= p_b + p_e = 100660\text{Pa} + 145\text{mmHg} \times 133.322\text{Pa}/\text{mmHg} \\ &= 119990\text{Pa} \end{aligned}$$

## § 1-3 气体的热力学能

### 一、热力学能

根据分子运动学说，组成气体的分子处于不断运动的状态中，不仅分子本身作直线运动、旋转运动和相对于其他分子的振动，并且构成分子的内部原子亦不断地振动，这些运动着的分子与原子都具有动能，称为气体的内动能，气体的温度越高，内动能越大。

气体分子之间存在着相互作用力，因此，气体内部就具有因克服分子之间的作用力而形成的分子位能，称为气体的内位能。内位能的大小与分子间的距离有关。因此，气体的内位能与气体的温度及比体积有关。

此外，还有与分子结构有关的化学能及与原子核结构有关的原子能。气体内部所具有的各种能量的总和，称为气体的热力学能。1 千克气体的热力学能称为比热力学能，以  $u$  表示； $m$  千克气体的热力学能以  $U$  表示， $U = mu$ 。

若不考虑化学能和原子核能的变化，气体的热力学能就等于气体的内动能和内位能之和，因两者都是与热能有关的能量，所以气体的内动能和内位能也可称为气体的内热能。

气体的热力学能既然决定于它的温度和比体积，也就决定于它的状态，因此，热力学能也是气体的状态参数。热力学能  $U$  的单位是焦耳，符号为  $\text{J}$ ，比热力学能  $u$  的单位符号为  $\text{J}/\text{kg}$ ，工程上常分别用  $\text{kJ}$  和  $\text{kJ}/\text{kg}$  表示。

既然气体的内动能决定于气体的温度,内位能决定于气体的温度和比体积,所以气体的热力学能是温度和比体积的函数,即  $u = f(T, v)$ 。

对理想气体来说,因分子之间不存在作用力,故也就没有内位能,因此,它的热力学能仅有内动能一项,与其比体积无关,所以理想气体的热力学能只是温度的单值函数,即  $u = f(T)$ 。

因为物质的运动是永恒的,要想找到一个没有运动而热力学能为绝对零值的基点是不可能的,因此热力学能的绝对值无法测定。但在工程计算中,关心的是热力学能的相对变化量  $\Delta U$ ,所以实际上可任意选取某一状态的热力学能为零值,作为计算基准。

## 二、总能量

在不考虑与分子结构有关的化学能和原子核内原子能的变化条件下,热力系统的总能量除应考虑物质分子的热运动而具有热力学能外,还应考虑系统在参考坐标系中作为一个整体,因有宏观运动速度而具有动能,因有不同高度而具有位能。前一种能量我们称它为内部储存能,后两种能量则称为外部储存能。热力学能是热能,而动能和位能则是机械能,这表明热力系统可以储存不同形式的能量。我们把内部储存能和外部储存能的总和,即热力学能与动能和位能的总和,叫做热力系统的总储存能,简称总能。若总能用  $E$  表示,动能和位能分别用  $E_K$  和  $E_p$  表示,则

$$E = U + E_K + E_p \quad (1-13)$$

对于定质量系统,由于质量保持恒定,当把系统作为一个整体来计算它的动能和位能时,可按力学上一个具有恒定质量的质点来处理。若系统的质量为  $m$ ,速度为  $c$ ,在重力场中的高度为  $z$ ,则宏观动能  $E_K = \frac{1}{2} mc^2$ ;重力位能  $E_p = mgz$ ,式中  $c$ 、 $z$  是力学变量。 $c$  和  $z$  相同的系统可以有不同的热力学状态, $c$ 、 $z$  只决定于系统在参考坐标系中的速度和高度,是点函数。

这样,对定质量系统的总能可写成

$$E = U + \frac{1}{2} mc^2 + mgz \quad (1-13')$$

1 千克工质的总能,即比总能  $e$ ,可写为

$$e = u + \frac{1}{2} c^2 + gz \quad (1-13'')$$

## § 1-4 功与热量

### 一、功的定义和体积变化功

能量的传递和相互转化必须通过热力系统中工质的状态变化过程才能实现。工质在它的状态变化过程中,与其周围的其他物质系统进行热量交换,也产生功交换的问题。工程热力学中把功定义为:通过边界传递的能量,其全部效果可表现为举起重物。所谓“举起重物”并非指一定要举起重物。因为举起重物时使重物的位能增加,所以举起重物是广义地指转变为机械能。由此,可以认为功是传递过程中的机械能。

前已述及,热能转变为机械能通常须通过工质的膨胀才能实现。考虑如图1-2气缸中的 1 千克气体。气缸一端装有可自由移动的活塞,不计活塞与气缸的摩擦,由外界向缸内气体加