



银领工程

制冷与空调技术专业领域

热工基础

陈礼 编著

12

D00340313



高等教育出版社

内容提要

本书是新世纪高职高专教改项目成果教材,是制冷空调专业系列教材之一。本书以能量的转换和传递作为主线,将相关知识根据其内在联系自然地融为一体。全书共分两篇。第一篇阐述了热能与机械能相互转换过程中的能量守恒原理,以及转换的方向、条件和限度。在此基础上介绍了水蒸气、制冷循环、动力循环和湿空气。第二篇在讲述热能传递的三大基本方式之后,介绍了传热过程和换热器。

全书简化甚至舍去了部分繁琐的推导,强调从物理概念入手,加深对知识的理解 and 应用,突出工程计算方法。书中提供了较多的例题,每章之前有学习导引,每章之后有思考题和习题,以使学习者对内容的脉络有清晰的了解,也有利于自学。

本书可作为高职高专制冷空调专业和热能工程专业的教材,也可供有关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热工基础/陈礼编著. —北京:高等教育出版社,
2005.6

ISBN 7-04-016713-1

I. 热... II. 陈... III. 热工学 - 高等学校: 技术
学校 - 教材 IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 036315 号

策划编辑	赵 亮	责任编辑	胡 纯	封面设计	于 涛	责任绘图	朱 静
版式设计	张 岚	责任校对	王效珍	责任印制	杨 明		

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100011

总 机 010-58581000

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司

印 刷 国防工业出版社印刷厂

购书热线 010-58581118

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>

<http://www.landaco.com.cn>

开 本 787×960 1/16

印 张 15.25

字 数 340 000

插 页 1

版 次 2005 年 6 月第 1 版

印 次 2005 年 6 月第 1 次印刷

定 价 19.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 16713-00

出版说明

为了认真贯彻《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》，落实《2003—2007 年教育振兴行动计划》，缓解国内劳动力市场技能型人才紧缺现状，为我国走新型工业化道路服务，自 2001 年 10 月以来，教育部在永州、武汉和无锡连续三次召开全国高等职业教育产学研经验交流会，明确了高等职业教育要“以服务为宗旨，以就业为导向，走产学研结合的发展道路”，同时明确了高等职业教育的主要任务是培养高技能人才。这类人才，既要能动脑，更要能动手，他们既不是白领，也不是蓝领，而是应用型白领，是“银领”。从而为我国高等职业教育的进一步发展指明了方向。

培养目标的变化直接带来了高等职业教育办学宗旨、教学内容和课程体系、教学方法与手段、教学管理等诸多方面的改变。与之相应，也产生了若干值得关注与研究的新课题。对此，我们组织有关高等职业院校进行了多次探讨，并从中遴选出一一些较为成熟的成果，组织编写了“银领工程”丛书。本丛书围绕培养符合社会主义市场经济和全面建设小康社会发展要求的“银领”人才的这一宗旨，结合最新的教改成果，反映了最新的职业教育工作思路和发展方向，有益于固化并更好地推广这些经验和成果，很值得广大高等职业院校借鉴。我们的这一想法和做法也得到了教育部领导的肯定，教育部副部长吴启迪专门为首批“银领工程”丛书提笔作序。

我社出版的高等职业教育各专业领域技能型紧缺人才培养培训工程系列教材也将陆续纳入“银领工程”丛书系列。

“银领工程”丛书适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

高等教育出版社

2004 年 9 月

前 言

作为高等教育的重要部分,高等职业技术教育旨在培养在管理、服务、生产第一线工作的高等技术应用性专门人才,其显著特征是具有应用多种知识和技能解决现场实际问题的能力,即技术应用能力。为了实现这一宏观培养目标,专业课程设置需要作出相应的调整,课程内容的优化、组合和重构也势在必行。而教材建设无疑是一个重要的支撑条件。

许多高职高专的制冷空调专业在分析人才知识、能力和素质结构,制订培养方案时都设置了“热工基础”这门课程,本教材就是根据上述需要编写的。

本书以能量的转换和传递作为主线,根据相关知识的内在联系,将其自然地融为一体。热能是人类最早利用的能源,也是使用最为广泛的能源。热能与机械能的转换是制冷工程和热能工程中的重要内容。本书第一篇首先阐述了热能与机械能相互转换过程中的能量守恒原理,以及转换的方向、条件和限度。在此基础上介绍了水蒸气、制冷循环、动力循环和湿空气。第二篇的重点是热能的传递,在分别讲述热能传递的三大基本方式——导热、对流和辐射之后,介绍了热能传递方式的组合形式——传热过程,以及实用的换热器。本书实际上是将工程热力学和传热学的经典内容及最新成果,按照知识、能力、素质的内在联系和人的认识规律,按照教学的科学性、自然适应性、可接受性和循序渐进性等教育教学规律优化组合而成。

在编写方面,本书注意了如下几点:

1. 内容力求精炼;文字追求深入浅出,易于理解。
2. 突出基本理论、基本概念和基本方法。
3. 简化甚至舍去部分繁琐的推导;强调从物理概念入手,加深对基本定理的理解和应用;突出工程计算方法。
4. 编制了较多的例题,以引导学习者理论联系实际,培养分析问题和解决问题的能力。
5. 每章之前有学习导引,每章之后附有思考题和习题,以使学习者对各部分内容的脉络有一个清晰的了解,同时也有利于学生的自主学习。

此外,本书内容包含了蒸汽动力循环,扩大了使用范围。因此本书不仅可以用于制冷空调专业,也可用于热能工程专业;不仅可用于高职高专教学,也可供工程技术人员参考。

本书采用我国法定计量单位,物理量名称和符号遵守国家标准的统一规定。

本书由顺德职业技术学院陈礼编写。

本书的编写得到了顺德职业技术学院很多朋友的关心、支持和帮助,在此致以诚挚的谢意。由于编者水平所限,疏漏之处敬请批评指正。

编 者

2004.8

于广东顺德

主要符号

英文字母

a	热扩散率, m^2/s
A	面积, m^2
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_f	流体速度, m/s
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C_m	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
$C_{p,m}$	摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
$C_{v,m}$	摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
d	直径, m ; 含湿量, kg/kg (干空气)
d_e	当量直径, m
e	比总能量, J/kg
E	总能量, J ; 辐射力, W/m^2
E_b	黑体辐射力, W/m^2
E_k	宏观动能, J
E_p	宏观位能, J
g	重力加速度, m/s^2
G	辐射能, J
G_ρ	反射辐射能, J
G_a	吸收辐射能, J
G_τ	透射辐射能, J
h	比焓, J/kg ; 表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
H	焓, J ; 高度, m
J	有效辐射, W/m^2
K	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
l	长度, m ; 特征长度, m
m	质量, kg
M	摩尔质量, kg/mol
n	多变指数

p	压力, Pa
p_b	大气压力, Pa
p_g	表压, Pa
p_v	真空度, Pa ; 水蒸气分压力, Pa
p_s	饱和压力, Pa
q	比热量, J/kg ; 热流密度, W/m^2
q_m	质量流量, kg/s
q_v	体积流量, m^3/s
Q	热量, J
r	半径, m ; 气化潜热, J/kg
R	摩尔(通用)气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; 半径, 水力半径, m ;
R_g	气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
R_t	热阻, K/W
s	比熵, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 管间节距, m
S	熵, J/K
t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
t_d	露点温度, $^{\circ}\text{C}$
t_w	湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
t_s	饱和温度, $^{\circ}\text{C}$
T	热力学温度, K
u	比热力学能, J/kg
U	热力学能, J
v	比体积, m^3/kg ; 速度, 平均速度, m/s
V	体积, m^3
V_m	摩尔体积, m^3/mol
w	比膨胀功, J/kg
w_s	比轴功, J/kg

W	膨胀功, J
W_s	轴功, J
x	干度; 笛卡儿坐标
X	角系数
y, z	笛卡儿坐标

希腊字母

α	吸收比
α_v	体胀系数, K^{-1}
χ	湿周
δ	厚度, m
ε	压缩比; 制冷系数; 发射率
ε'	供热系数
φ	相对湿度
Φ	热流量, W
Φ_l	单位长度圆筒壁传递的热流量, W/m
γ	比热容比
η	效率; 动力粘度, $Pa \cdot s$

η_t	肋片效率
κ	绝热指数
λ	热导率, $W/(m \cdot K)$
ν	运动粘度, m^2/s
ρ	密度, kg/m^3
σ	斯忒藩-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$

特征数

$Gr = \frac{g\alpha_v \Delta t l^3}{\nu^2}$	格拉晓夫数
$Ga = \frac{gl^3}{\nu^2}$	伽利略数
$Nu = \frac{hl}{\lambda}$	努塞尔数
$Pr = \frac{\nu}{a}$	普朗特数
$Re = \frac{vl}{\nu}$	雷诺数

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E-mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118



目 录

主要符号	I
------------	---

第一篇 工程热力学

第1章 热力学基本概念	3	第4章 蒸汽动力循环	60
1.1 热力系统	4	4.1 朗肯循环	61
1.2 平衡状态与状态参数	5	4.2 再热循环	66
1.3 理想气体状态方程	8	4.3 回热循环	69
1.4 准平衡过程与可逆过程	11	4.4 热电联供	73
1.5 功量和热量	13	思考题	74
1.6 气体的比热容	16	习题	75
思考题	19	第5章 制冷循环	76
习题	19	5.1 空气压缩制冷循环	77
第2章 热力学基本定律	21	5.2 蒸气压缩制冷循环	79
2.1 热力学第一定律	22	5.3 吸收式制冷循环	84
2.2 稳定流动能量方程式	25	5.4 热泵循环	85
2.3 理想气体的热力过程	31	思考题	86
2.4 热力学第二定律和热力循环	38	习题	86
思考题	46	第6章 湿空气	88
习题	47	6.1 湿空气的性质	89
第3章 水蒸气	49	6.2 湿空气的焓湿图	95
3.1 水蒸气的产生过程	50	6.3 湿空气的热力过程	98
3.2 蒸汽图表及应用	53	思考题	102
思考题	58	习题	102
习题	59		

第二篇 传热学

第7章 导热	107	习题	153
7.1 导热的基本概念和基本定律	108	第9章 辐射换热	155
7.2 平壁的稳态导热	112	9.1 热辐射的基本概念	155
7.3 圆筒壁的稳态导热	117	9.2 物体表面间的辐射换热	158
思考题	122	思考题	169
习题	122	习题	169
第8章 对流换热	125	第10章 传热过程与换热器	171
8.1 对流换热基本概念与基本公式	126	10.1 传热过程分析	171
8.2 利用特征数关联式计算表面 传热系数	129	10.2 传热的强化	177
8.3 管内强制对流换热	133	10.3 通过肋壁的传热	180
8.4 流体外掠物体强制对流换热	140	10.4 传热的削弱	184
8.5 自然对流换热	145	10.5 换热器	185
8.6 相变对流换热	147	思考题	194
思考题	153	习题	195
附表1 常用气体的平均比定压 热容 $c_p _0^t$	197	附录	
附表2 常用气体的平均比定容 热容 $c_v _0^t$	198	附表7 氟利昂 12(CCl_2F_2)饱和液与 饱和蒸气的热力性质	215
附表3 饱和水与饱和水蒸气的热力 性质(按温度排列)	199	附表8 HFC134a 饱和液与饱和蒸气的 热力性质(按温度排列)	215
附表4 饱和水与饱和水蒸气的热力 性质(按压力排列)	202	附表9 金属材料的密度、比热容和热 导率	217
附表5 未饱和水与过热水蒸气的热力 性质	206	附表10 保温、建筑及其他材料的密度 和热导率	220
附表6 氨(NH_3)饱和液与饱和蒸气的 热力性质	213	附表11 几种保温、耐火材料的热导率 与温度的关系	221
		附表12 干空气的热物理性质 ($p = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$)	222

第一篇 工程热力学

自然界的各种能源中,热能的利用最为普遍,热能利用的历史与人类社会发展的历史息息相关。

人类从学会取火之后就利用热能烧饭、取暖、烘干。随着社会的发展,热能也被用来烧制陶瓷、砖瓦,用于冶炼和大规模的供暖。这些都属于热能的热利用或直接利用,是热能利用的第一个阶段,也是早期热能利用的唯一途径。

二百多年前蒸汽机的出现所引发的工业革命改变了整个世界。这场革命对于解放生产力、促进社会文明发展的巨大作用使人类感到震惊。蒸汽机的应用开创了热能利用的新纪元,揭示了热能利用的第二种途径:通过蒸汽机将热能转换为机械能再加以利用。从而证实了一个事实:热能可以推动机器做功,成为一种动力。这就是热能的动力利用,或称为间接利用。这是热能利用的第二阶段,热能的动力利用为工业生产提供了动力。对于工业生产,这是一种价值更高、前景更为广阔的有效利用途径,而机械能又可以转换为电能或者其他形式的能量加以利用。

自然界可产生动力的能源除了热能之外还有风能、水能、海洋能、太阳能、地热能等。风能、水能可以通过风车、水轮机等机械转变为机械能;太阳能可以通过光合作用转换为生物能,或通过太阳能集热器转换为热能,也可以通过光电效应直接转换为电能,但人类对这些能源利用的规模远不能和对热能的利用相比。大量的能源往往只能通过燃烧或核反应直接、间接地提供热能,热能是目前人类社会利用最为广泛的能源。据统计,目前通过热能形式被利用的能源在我国占总能源利用的90%以上,世界上其他国家也平均超过85%。由此可见,热能的利用具有极为重大的意义。

热能的动力利用涉及与其他能量形式的转换。实现热能与机械能转换的机械设备称为热机。蒸汽机是最早的热机。二百多年来热机的种类已从简单的蒸汽机发展到蒸汽轮机、内燃机、喷气发动机等,热能动力利用的价值也越来越高。然而,无论何种热机,在实现热能与机械能的转换过程中,总有较大份额的能量不能被转换而损失,或者说热机的热效率较低。早期蒸汽机的热效率只有1%~2%,现代燃气轮机的热效率约为37%~42%。为了合

理地利用热能,更有效地实现热能与机械能的转换,提高热机的热效率,工程技术人员就必须熟悉、掌握和研究能量转换的规律。

现代社会的生产和生活中都会用到制冷装置,如空调和冰箱等,其工作过程正好与热机相反。应用最为普遍的蒸汽压缩制冷方式以消耗机械功为代价,将热量从低温物体(如房间)转移到高温物体(如室外),以实现人工制冷。这就会涉及机械能与热能的转换,制冷装置工作效率的提高也需要进行分析和研究。

热力学是分析和研究与热现象有关的能量转换规律的一门科学,工程热力学是从工程的角度出发,分析和研究热能与机械能之间相互转换规律的学科。工程热力学的主要内容包括基本概念、基本定律,如热力系统、状态参数、热力学第一定律和第二定律等,这些内容构成了工程热力学的理论基础。热能与机械能的转换通常是通过工质(即某种载能物质)在热机或制冷装置中的状态变化过程,以及由这些过程所组成的循环来实现的。因此,工质的性质、过程和循环的分析研究及其计算也是工程热力学研究的重要方面。

工程热力学采用经典热力学的宏观研究方法,不涉及物质的微观结构和微观行为。在工程热力学中普遍采用抽象、概括、理想化和简化的方法。比如将夏天的室外环境简化为具有较高温度的高温热源,而把室内环境简化为温度较低的低温热源。又比如将锅炉中的烟气、内燃机的燃气、空气等气体简化为理想气体,以便于计算,同时又维持了工程计算中必要的精度。所谓简化和抽象化通常是抽出共性,忽略细节,以突出本质和主要矛盾。科学的抽象能够更深刻,更完全地反映客观事物,同时又便于研究。通过具体实例理解和适应这种研究方法,不仅有助于工程热力学的研究,也将在方法论的掌握和应用方面有所收获。

工程热力学采用经典热力学的宏观研究方法,不涉及物质的微观结构和微观行为。在工程热力学中普遍采用抽象、概括、理想化和简化的方法。比如将夏天的室外环境简化为具有较高温度的高温热源,而把室内环境简化为温度较低的低温热源。又比如将锅炉中的烟气、内燃机的燃气、空气等气体简化为理想气体,以便于计算,同时又维持了工程计算中必要的精度。所谓简化和抽象化通常是抽出共性,忽略细节,以突出本质和主要矛盾。科学的抽象能够更深刻,更完全地反映客观事物,同时又便于研究。通过具体实例理解和适应这种研究方法,不仅有助于工程热力学的研究,也将在方法论的掌握和应用方面有所收获。

工程热力学采用经典热力学的宏观研究方法,不涉及物质的微观结构和微观行为。在工程热力学中普遍采用抽象、概括、理想化和简化的方法。比如将夏天的室外环境简化为具有较高温度的高温热源,而把室内环境简化为温度较低的低温热源。又比如将锅炉中的烟气、内燃机的燃气、空气等气体简化为理想气体,以便于计算,同时又维持了工程计算中必要的精度。所谓简化和抽象化通常是抽出共性,忽略细节,以突出本质和主要矛盾。科学的抽象能够更深刻,更完全地反映客观事物,同时又便于研究。通过具体实例理解和适应这种研究方法,不仅有助于工程热力学的研究,也将在方法论的掌握和应用方面有所收获。

工程热力学采用经典热力学的宏观研究方法,不涉及物质的微观结构和微观行为。在工程热力学中普遍采用抽象、概括、理想化和简化的方法。比如将夏天的室外环境简化为具有较高温度的高温热源,而把室内环境简化为温度较低的低温热源。又比如将锅炉中的烟气、内燃机的燃气、空气等气体简化为理想气体,以便于计算,同时又维持了工程计算中必要的精度。所谓简化和抽象化通常是抽出共性,忽略细节,以突出本质和主要矛盾。科学的抽象能够更深刻,更完全地反映客观事物,同时又便于研究。通过具体实例理解和适应这种研究方法,不仅有助于工程热力学的研究,也将在方法论的掌握和应用方面有所收获。

热力学基本概念

学习导引

本章是工程热力学部分开篇第一章,介绍了许多重要的概念,对于后续内容的学习十分重要。在本章的学习过程中,应能把相关的概念串接起来,既有整体的认识,又对单个概念的物理意义有较深刻的理解。比如从工质的概念入手,引出了系统、环境,再深入到各种不同的系统,这是一条线索。从状态到状态参数、状态方程、状态参数坐标图和理想气体,是另一条线索。类似的,从状态到过程、准平衡过程、可逆过程,再到热力循环,其间都有着有机的联系。了解这种联系对于知识的掌握和计算能力的形成大有裨益。

一、学习目标

1. 理解工质、热源、系统、状态、平衡状态及状态参数的物理意义。
2. 温度、压力和比体积是三个基本状态参数,应重点掌握绝对压力、表压力和真空度的关系。
3. 在认识状态参数的基础上深刻理解状态方程、理想气体的含义,以及从实际气体中抽象出理想气体这种研究方法的可行性和科学性。
4. 理解过程、准平衡过程与可逆过程的意义与联系,对不可逆因素应有足够的认识。
5. 理解循环的意义、作用以及状态、过程和循环之间的联系。
6. 理解功和热的定义,对功和热是过程量而非状态参数应有深刻的理解。
7. 熟练使用 $p-v$ 图和 $T-s$ 图,能在图上标出状态、过程和循环。
8. 理解比热容的物理意义以及比定压热容和比定容热容的关系;理解真实比热容以及平均比热容的含义能正确使用平均比热容计算热量。

二、本章难点

1. 本章的许多概念比较抽象,难于理解。但若将抽象的概念与具体的物理量或图形联系起来,就容易理解一些。比如,用温度、压力和比体积来描述状态,就不难理解状态的意义;将 $p-v$ 图的点、线与状态和过程联系起来,对过程也会有一个形象的概念。
2. 热力学常用到抽象和简化的方法,比如系统、可逆过程、理想气体等等,对于初学者可能有一定难度。为此,应对研究方法的实用性和科学依据有比较深刻的理解。

1.1 热力系统

1.1.1 工质和热源

无论是动力装置还是制冷装置,在实现热能与机械能相互转换的过程中都要借助于某种媒介物质。动力装置用的水蒸气、燃气,制冷装置用的氨蒸气、其他制冷剂蒸气等都是常用的媒介物质。在热力学中,这些媒介物质称为工质。工质一般具有良好的流动性能和与其工作任务相适应的热力性能。

工程热力学中通常把具有无限大热容量的系统称为热源。所谓无限大热容量,是指系统在放出或吸收有限热量时自身温度没有明显的改变。温度较高的热源称为高温热源,温度较低的热源称为低温热源。夏天利用空调装置制冷时,维持较低温度的室内环境是低温热源,而温度较高的室外环境是高温热源。所谓制冷,就是人为地将热量从低温热源转移到高温热源,以实现和维持低温热源较低的温度环境。

1.1.2 热力系统

工程热力学中,常常选取某一特定的空间作为研究对象。该空间内所包含的物质,即工质的总和,称为热力系统,简称为系统,如图 1-1 所示。系统是为了研究的需要而人为定义的某种范围的物质。系统之外的物质统称为外界或环境。热力系统与外界的分界面称为边界或界面。热力系统与外界之间的分界面可以是真实的,也可以是假想的;可以是固定不变的,也可以是移动的。图 1-1 所示虚线为系统边界。图 1-1(a)取活塞与气缸之间的空腔所包容的气体工质为系统,气缸内壁和活塞内表面则是真实存在的界面。当活塞静止不动时该系统的边界也固定不动;当活塞运动时,系统的部分边界随着活塞移动,形成移动的边界。

一般而言,热力系统与外界总是处于相互作用之中,彼此之间可以通过边界进行能量和质量交换。按热力系统与外界进行能量和质量交换的情况可将热力系统分为以下几种类型:

闭口系统 系统与外界无物质交换,或者说没有物质穿过边界,系统内的物质总量保持恒定不变。图 1-1(a)所示气缸内的工质就是闭口系统。

开口系统 系统与外界有物质交换,或者说有物质穿过边界,系统内的物质总量可以保持恒定或发生变化。图 1-1(b)所示汽轮机为开口系统,运行中蒸汽不断地流进流出。

绝热系统 系统与外界无热量交换,但可以有功量和质量的交换。

孤立系统 系统与外界既无能量(包括功量和热量)交换又无质量交换。

自然界中的物质都是相互联系、相互制约和相互作用的,绝对的绝热系统和孤立系统并不存在。但若系统与外界的热量、功量、质量的交换甚小,其影响可忽略不计,则可视作绝热系统或孤立系统。

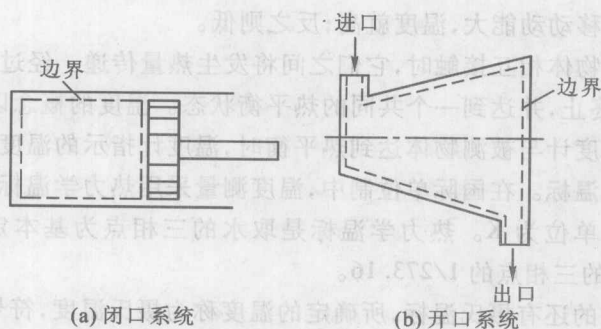


图 1-1 热力系统

1.2 平衡状态与状态参数

1.2.1 平衡状态

热力系统在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为系统的**热力状态**,简称**状态**。用以描述系统状态的宏观物理量,如温度、压力等,称为**状态参数**。系统是由工质组成的,系统的状态也就是工质的状态,系统的状态参数实质上也就是工质的状态参数。

状态和状态参数是紧密相关的概念。状态参数一旦完全确定,工质的状态也就确定了;状态参数的全部或一部分发生变化,即表明工质的状态发生了变化。

在没有外界作用(重力场除外)的条件下,若系统的状态参数不随时间变化,则该系统所处的状态称为**平衡状态**。无外界作用是指系统和外界相互之间没有热量和功量的交换。系统的平衡包括了热平衡和力平衡两个方面,如系统存在化学反应,还应包括化学平衡。系统处于热平衡时,各部分温度均匀,相互间没有热量的传递。系统处于力平衡时,各部分压力均匀,工质不发生相对位移。无外界作用和状态参数不随时间变化是平衡状态必须同时满足的两个基本条件。在外界作用下,系统的状态参数也可能不随时间变化,比如平壁的稳态导热,这时系统处于稳定状态,而不是平衡状态。稳定的含义是动态平衡。当然,平衡必然稳定,稳定却未必平衡。

1.2.2 状态参数

当系统处于非平衡状态时,由于各部分温度、压力不等,无法用统一的状态参数进行表述。只有系统处于平衡状态时才能用统一的状态参数进行描述。热力学常用的状态参数有温度、压力、比体积、热力学能、焓、熵等。而温度、压力、比体积这三个可以直接测量的物理量称为**基本状态参数**。

1. 温度

温度是物体冷热程度的标志。按分子热运动学说,气体温度是大量气体分子平均移动动能

的量度。气体分子平均移动动能大,温度就高;反之则低。

当两个温度不同的物体相互接触时,它们之间将发生热量传递。经过一段时间,两者温度相等之后,热量传递就会终止,并达到一个共同的热平衡状态。温度的概念以及温度的测定都是以热平衡为依据的。当温度计与被测物体达到热平衡时,温度计指示的温度就是被测物体的温度。

衡量温度的标尺叫温标。在国际单位制中,温度测量采用热力学温标,所确定的温度称为热力学温度,其符号为 T ,单位为 K 。热力学温标是取水的三相点为基本定点,并定义其温度为 $273.16 K$ 。 $1 K$ 等于水的三相点的 $1/273.16$ 。

与热力学温度并用的还有摄氏温标,所确定的温度称为摄氏温度,符号为 t ,单位为 $^{\circ}C$ 。摄氏温标每 $1^{\circ}C$ 与热力学温标每 $1 K$ 的大小相等,但两者的起始点不同,摄氏温标的 $0^{\circ}C$ 是在一个标准大气压下纯水的冰点,其热力学温度为 $273.15 K$,比水的三相点的热力学温度低 $0.01 K$ 。

摄氏温度与热力学温度之间的关系为

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

2. 压力

垂直作用在单位面积上的力称为压力,以符号 p 表示。按分子热运动学说,气体的压力是气体的大量分子向容器壁面撞击所产生的平均结果。若气体作用在面积为 A 的容器壁面上的垂直作用力为 F ,那么该壁面上的压力为

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

在国际单位制中,压力的单位为 Pa (帕), $1 Pa = 1 N/m^2$ 。工程上 Pa 的单位太小,常采用 kPa 和 MPa 作为压力单位,它们之间的换算关系为

$$1 kPa = 10^3 Pa$$

$$1 MPa = 10^6 Pa$$

工程中有时也用到其他单位制的压力单位,如 bar (巴)、 mmH_2O 、 $mmHg$ 、 atm (标准大气压)、 at (工程大气压)等。它们的换算关系为

$$1 mmH_2O = 9.81 Pa$$

$$1 mmHg = 133.3 Pa$$

$$1 bar = 10^5 Pa = 0.1 MPa$$

$$1 at = 0.980 67 bar = 735.6 mmHg$$

$$1 atm = 1.013 25 bar = 1.033 2 at = 760 mmHg$$

压力通常用各种压力计来测定。而压力计本身处于大气压力 p_b 作用下,如图 1-2 所示。当容器内气体的压力大于大气压力 p_b 时,压力计测得的压力是容器内的压力高出外界大气压力 p_b 的差值,是一个相对压力,称为表压力,用符号 p_e 表示。而容器内工质的实际压力称为绝对压力,用符号 p 表示,则表压力应为

$$p_e = p - p_b \quad (1-3)$$

当容器内气体实际压力低于大气压力 p_b 时,压力计上测得的压力是容器压力低于大气压 p_b