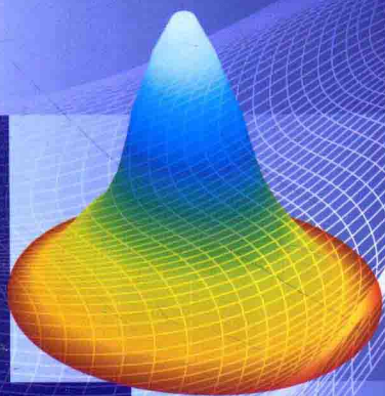




普通高等教育“十二五”规划教材

# 热力学与传热学基础

郑宏飞 编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

# 热力学与传热学基础

郑宏飞 编

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书依照教育部最新颁布的热工课程基本要求编写,对热力学和传热学相关理论进行了系统阐述,并介绍了两方面内容的联系与区别。本书在论述过程中,吸收了大量国际一流大学的教学成果,并结合编者长期的教学经验,力图在内容和体系上有较大的改革和创新。在编写风格上,深入浅出、简洁流畅,特别在语言上力求清新易懂,将基本原理与课程内容紧密结合起来,做到章节有度。在本书的大部分章节的难点处均设置有二维码,方便学生扫描获得动画、视频和演示实验等资料,以便加深对知识点的理解,拓展大学热工课程的教学内容,培养学生的探索精神和创新意识。

本书可作为非动力能源类专业本科生和动力能源类专业专科生的教材和教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

热力学与传热学基础 / 郑宏飞编. —北京: 科学出版社, 2016.3  
ISBN 978-7-03-047202-1

I. ①热… II. ①郑… III. ①热力学—高等学校—教材②传热学—高等学校—教材 IV. ①O414.1②TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 012805 号

责任编辑: 昌盛 罗吉 / 责任校对: 李影

责任印制: 霍兵 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码: 100717  
<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 18 3/4

字数: 378 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言



热能利用历史

任何生命个体或种群都离不开对能量的利用，人类作为地球上最大的高等生物种群更是离不开对能量资源的开发和利用。回顾人类的发展史不难发现，人类利用能量的每一次变革都代表了人类的巨大进步。可以说，人类对能量资源的利用水平正是衡量社会发展水平和社会物质文明的重要标志。

在人类蒙昧的初期，人类只能被动地适应环境的变化，被动地承受着夏季的炎热和冬季的寒冷。在这一时期，人类对能量的利用处在完全没有意识的状态。经历发展，人类发明了钻木取火，实现了对火的利用，开创了人类物质文明生活的新局面。火的利用是人类主动利用热能的第一步，极大地促进了人类社会的发展，使人类的平均寿命整整提高了十岁。进入封建社会时期，人类又进一步拓展了对火的利用，实现了利用火中的热能冶炼矿石、制造金属工具，使社会生产力又得到了空前发展。到 18 世纪中叶，人类发明了蒸汽机，再次提升了人类利用能量特别是热能的水平，实现了热能的间接利用，改变了人类的用能方式，实现了机械能的自主生产和利用，将人类社会推向了现代文明。

回顾人类历史的发展可以发现，在很长的历史时期，除了食物人类能够主动利用的能量只有热能，而且人类利用热能的方式都是直接利用，并没有改变热能的形式，如用来冶炼、取暖、蒸煮和烘干等。蒸汽机发明之后，实现了热能向机械能的转变，而且这种转变或转换是可以人为控制的，打开了人类间接利用热能的大门，从此拉开了世界工业革命的序幕。此后，热能的间接利用得到了广泛和深入的研究，例如，如何提高热能转化的效率，如何提高热机系统的各项性能。为此，人们以追求最大热功效果为目标，对热的本质、热能和机械能之间转换的基本规律和其他与热问题相关的最基本问题进行了不懈的探求，从而导致与热能间接利用的相关理论不断成熟，形成了被世人广泛接受的热功理论。比较正式的热力学研究起源于 19 世纪初期，那时的科学家主要考虑热的动力性和热物体中的储热产生功的比例。19 世纪 50 年代，出现了热力学第一和第二定律，朗肯 (Willian Rankine)，克劳修斯 (Rudolph Clausius) 和开尔文 (Lord Kelvin) 为此做了大量基础性工作。1859 年，朗肯 (Willian Rankine) 撰写了人类历史上第一部热力学教科书。

总结传统的热力学理论不难发现，热力学中有两大定律、三大原理及一大定

理. 热力学第一定律和第二定律是热力学理论的基石, 围绕着这两大定律并为其提供保障的是三大原理, 它们分别是能量守恒原理、熵增原理和焓衰变原理. 能量守恒定律在热力学中的具体应用就是热力学第一定律. 熵增原理在热力学中的应用就是第二定律. 而焓衰变原理是熵增原理的反面表述, 代表的是同一个意思, 也是热力学第二定律的一种描述. 剩下的一个定理即是卡诺定理, 它表述的是所有可逆热机的效率都相等, 与工质无关, 只决定于高温热源和低温热源的温度.

如今, 热能的利用涉及人类生产与生活的各个方面, 有些地方需要强化热的传递过程, 有的地方恰恰相反, 需要弱化热的传递过程. 即使在热功转化过程中, 人们也发现, 热的传递过程也是引起热损失或阻碍热机效率提高的重要原因, 于是迫切需要对热量传递过程的基本规律进行深入探索, 以便更有效地利用热能. 这样导致了传热学的出现和发展. 在传热学的产生和发展过程中, 许多科学家为此做出了卓越贡献, 其中有傅里叶 (Joseph Fourier), 牛顿 (Isaac Newton), 雷诺 (Kevin Reynolds), 普朗特 (Ludwig Prandtl), 斯特藩 (Stefan), 玻尔兹曼 (Lattice Boltzmann) 和维恩 (Franz Wien) 等. 众多科学家的努力, 终于建立起以傅里叶热传导定律、牛顿冷却热对流定律和斯特藩-玻尔兹曼热辐射定律为核心的传热学基本理论.

热力学和传热学都是物理学的重要分支, 但它们又都融合了工程科学的重要内容, 更专注系统与环境的相互作用关系. 热力学最初是基于大量宏观热功转换的实践经验而总结出来的. 传热学也是在对大量热过程测量的结果总结之后提出来的, 所以两者既互相联系又互相区别. 热力学是一门状态科学, 它的基础是平衡状态, 不计时间. 而传热学是一门过程科学, 它研究的是热的传递速度和方式. 因此, 我们学习热力学和传热学, 需要时刻把握这两门课程的显著特点和区别, 以便掌握它们的精髓.

编者

2016年1月

# 目 录

## 前言

第 1 章 热能转换的基本概念	1
1.1 热力系统 环境 边界	1
1.1.1 热力系统	1
1.1.2 环境	2
1.1.3 边界	2
1.2 状态 状态参数 状态方程	3
1.2.1 状态	3
1.2.2 状态参数	4
1.2.3 状态方程	6
1.3 热力过程与热力循环	7
1.3.1 热力过程	7
1.3.2 可逆过程	9
1.3.3 流动过程与非流动过程	11
1.3.4 循环过程与热力循环	11
1.4 热力学中的基本单位与量纲	12
本章小结	13
习题	14
第 2 章 能量与热力学第一定律	16
2.1 功及功量的计算	17
2.1.1 机械功	17
2.1.2 可逆膨胀功	18
2.1.3 示功图	19
2.2 热量及热量的传递过程	21
2.3 系统储存能及其性质	23
2.4 热力学第一定律	26
2.5 闭口系统的能量分析	27
2.6 开口系统的能量分析	30
2.6.1 控制容积系统的质量守恒	30
2.6.2 控制容积系统的能量守恒	31

2.6.3	稳定流动系统的能量方程	33
2.6.4	技术功及在 $p-v$ 图上的表示	33
2.7	稳定流动方程的应用	34
2.7.1	喷管	35
2.7.2	透平式机械	35
2.7.3	压气机	36
2.7.4	绝热节流	37
2.7.5	自由膨胀过程	38
2.7.6	绝热混合过程	39
	本章小结	42
	习题	42
第3章	熵与热力学第二定律	49
3.1	自发过程及能量传递与转换的方向性	49
3.1.1	自发过程	49
3.1.2	能量传递与转换的方向性	50
3.2	热力学第二定律的表述	51
3.3	卡诺循环与卡诺定理	53
3.4	状态参数熵	55
3.5	第一和第二 $TdS$ 方程	57
3.6	熵变、熵流与熵产	58
3.7	系统的熵平衡计算	60
3.8	熵增原理	61
3.9	能量的可用性与能量的贬值原理	63
	本章小结	66
	习题	67
第4章	理想气体热力过程与气体动力循环	71
4.1	理想气体性质及状态方程	71
4.1.1	理想气体的内能和焓	72
4.1.2	理想气体的比热容	72
4.1.3	定容比热容和定压比热容的关系	75
4.1.4	理想气体的内能、焓和熵的计算	76
4.2	理想气体混合物	78
4.2.1	道尔顿定律	78
4.2.2	亚美盖特定律	79
4.2.3	理想气体混合物的成分	79

4.2.4	混合气体的折合摩尔质量及折合气体常数	80
4.2.5	混合气体的比热容	81
4.2.6	混合气体的热力学能、焓及熵	81
4.3	理想气体的基本热力过程	82
4.3.1	定容过程	83
4.3.2	定压过程	84
4.3.3	定温过程	87
4.3.4	定熵过程	88
4.3.5	多变过程	90
4.4	典型理想气体动力循环	92
4.4.1	奥托循环	93
4.4.2	狄塞尔循环	94
4.4.3	沙巴泽循环	97
	本章小结	99
	习题	103
第5章	水蒸气及蒸汽动力循环	107
5.1	纯物质的相变过程	107
5.2	定压下水蒸气的发生过程	108
5.3	水蒸气的 $T-v$ 图和 $p-v$ 图	111
5.4	湿蒸汽的干度及状态参数计算	113
5.5	水蒸气的热力性质表	115
5.6	蒸汽动力循环的基本过程	119
5.6.1	基本的蒸汽动力循环	119
5.6.2	朗肯循环的能量平衡核算	120
5.6.3	朗肯循环的改进	122
	本章小结	123
	习题	125
第6章	湿空气及空气调节过程	128
6.1	湿空气的组成和状态参数	128
6.2	湿空气的绝对湿度和相对湿度	131
6.3	露点温度与干湿球温度	133
6.4	湿空气焓湿图( $h-d$ 图)	135
6.5	空气调节的基本过程	138
6.5.1	加热或冷却过程	139
6.5.2	加热加湿过程	139



6.5.3	冷却去湿过程	140
6.5.4	绝热加湿过程	142
6.6	湿空气的混合过程	143
6.7	冷却塔	144
	本章小结	146
	习题	148
第7章	传热学的基本概念与基本定律	150
7.1	传热过程及传热的基本方式	150
7.2	传热的基本定律	151
7.2.1	热传导	151
7.2.2	热对流	152
7.2.3	热辐射	154
7.2.4	复合换热过程	155
7.2.5	流体中的纯导热过程	155
7.2.6	能量守恒定律的要求	156
	本章小结	158
	习题	159
第8章	热传导过程与傅里叶定律	160
8.1	傅里叶定律与传热速率方程	160
8.2	热扩散方程	162
8.3	一维稳态导热	167
8.3.1	通过平壁的导热	167
8.3.2	传热热阻	169
8.3.3	多层平壁的导热	170
8.3.4	通过长圆筒壁的导热	172
8.3.5	管道保温层厚度的选择	175
8.3.6	球体中的导热	176
8.3.7	通过变截面物体的导热	177
8.4	有内热源的一维稳态导热	178
8.4.1	有内热源的平壁导热问题	178
8.4.2	有内热源的径向导热问题	179
8.5	扩展表面的稳态传热	182
8.5.1	一般扩展表面的传热问题	183
8.5.2	等截面扩展表面的传热	184
8.6	集总热容法求解非稳态传热问题	185

本章小结	190
习题	192
<b>第9章 对流换热与牛顿冷却定律</b>	<b>197</b>
9.1 局部和平均对流换热系数	197
9.2 层流和湍流	198
9.2.1 层流和湍流速度边界层	199
9.2.2 热边界层	201
9.3 边界层方程	202
9.4 无量纲参数的物理意义	206
9.5 管内强迫对流换热	208
9.5.1 管内流动状态及特征	208
9.5.2 管内平均流速与速度分布特征	208
9.5.3 对流换热系数的变化特点	209
9.5.4 管内平均温度及传热速率的确定	210
9.5.5 管内对流换热的经验关联式	211
9.6 纵掠平板的对流换热	214
9.6.1 纵掠平壁时的层流换热	215
9.6.2 纵掠平壁时的湍流换热	216
9.7 横掠单管和管束的对流换热	218
9.7.1 横掠单管的对流换热	218
9.7.2 横掠管束的对流换热	220
9.8 自然对流换热及其实验关联式	222
本章小结	227
习题	229
<b>第10章 辐射换热与斯特藩-玻尔兹曼定律</b>	<b>232</b>
10.1 黑体表面的辐射与斯特藩-玻尔兹曼定律	232
10.2 实际表面的辐射与基尔霍夫定律	233
10.3 黑体表面间的辐射换热与角系数	237
10.3.1 角系数的定义	237
10.3.2 角系数的性质与计算	238
10.3.3 黑体表面间的辐射换热	243
10.4 灰体表面间的辐射换热	244
10.4.1 投入辐射与有效辐射	244
10.4.2 表面辐射热阻	245
10.4.3 灰体表面之间的辐射换热	245

10.4.4 防辐射屏 .....	248
本章小结 .....	249
习题 .....	250
<b>第 11 章 换热器及其设计计算 .....</b>	<b>253</b>
11.1 换热器中的基本流动形式 .....	253
11.2 换热器中传热速率的计算 .....	254
11.3 换热器对数平均温差的确定 .....	256
11.3.1 顺流换热器的对数平均温差 .....	257
11.3.2 逆流换热器的对数平均温差 .....	259
11.4 换热器的有效度分析 .....	261
本章小结 .....	263
习题 .....	264
<b>参考文献 .....</b>	<b>266</b>
<b>附录 .....</b>	<b>267</b>
附录 A .....	267
附录 B .....	289

# 第1章 热能转换的基本概念

热力学的建立经历了漫长的过程,在此过程中涌现了诸多基本的概念和术语,掌握这些基本的概念和术语,有助于我们更深入地认识热力学的基本规律.热力学在对热现象、热过程进行研究时,首先要对研究对象进行抽象,建立能够描述研究对象特点的必要的参数,这些参数不但能在宏观上表达研究对象的特点,还能在定量上描绘研究对象与环境或与其他研究对象之间关系的特点.然后,采用能够反映事物本质特征的研究方法,特别是现代数学方法,建立起这些基本参数之间的简明的相互变化关系.热力学的许多概念或术语正是在这一过程中产生的.

## 1.1 热力系统 环境 边界



热力学系统涉及的领域

### 1.1.1 热力系统

简单来说,热力系统就是我们要研究的对象.它可以是一个简单的自由物体,也可以是一座非常复杂的化学炼油厂,还可以是封闭在刚性罐子里的一定量的物质.总之,它是一定边界范围内的特定物质或是几种物质的组合,是我们想要了解的对象.当然,这个对象是可以变化的,包括它的质量、形状和容积,因此产生了具有各种特点的热力系统.

一般来说,系统总是处在变化发展过程中,它要通过边界与环境发生作用,产生质能的交换.根据系统与环境交换质能的特点或系统状态变化的特点,可以大致对系统进行分类,方便理解或称呼.

**闭口系统** 与环境没有物质交换的系统称为闭口系统.此时,系统的边界是封闭的,没有物质穿越边界与环境交换,因此系统的内部始终保持相同的物质质量.闭口系统不与环境交换物质,但可以交换其他能量,如功和热.由于系统内部质量不变,有时也把封闭系统称为控制质量系统,通常用控制质量的方法研究.

**开口系统** 与环境有物质交换的系统称为开口系统.它与闭口系统对应,此时系统的边界是开放的,物质可以穿越边界与环境交换,系统内部的物质质量不能保持恒定.为了研究方便,这时一般选择对某一区域内的物质进行研究,所以常称为控制容积系统,用控制容积方法进行研究.开口系统除了可以与环境交换物质外,还可以交换其他能量,如功和热.

**孤立系统** 不与环境交换任何物质和能量的系统。它是一种特殊的封闭系统，不与环境发生任何相互作用。

**绝热系统** 不与环境交换热量的系统。它可以是闭口系统或者开口系统，只是不允许热量越过边界与环境交换。

**热源或冷源** 仅与外界发生热量交换，而且与外界交换有限热量时，不引起内部温度变化。热源或冷源可以认为是一个热容无限大的热力系统，根据温度的高低不同，分为高温热源或低温热源。低温热源有时也称为冷源。

上述热力系统的归类与划分，特别是对闭口系统和开口系统的划分是最有意义的，整个基础热力学研究都是围绕这两类系统展开的。在基础热力学中，系统中用来实现能量相互转化的物质，称为工质。一般的工质有空气、水蒸气和水等。例如，在内燃机中，空气接受燃料燃烧释放的热能，通过膨胀将热转化为功，受热空气就是工质。根据系统发生变化的过程特点，还可以将系统分为定容系统、定压系统和定温系统等，这些都是为了描述方便。对于由多种工质组成的系统，也可以称为多元系。

### 1.1.2 环境

任何系统都不可能孤立存在于世界上，它总是处于某个环境中。因此把系统以外的空间或物质统称为环境，有时也称为外界。

在热力学研究过程中，为了简化研究过程，一般都把环境当做是一个巨大的冷源或热源，它的温度、压力和比容等参数都不随时间变化，也不因为与系统发生了热功交换而产生变化。总之，可以把环境参数假定为常数。

### 1.1.3 边界

系统与环境的交界面即为系统的边界。一般来说，边界以方便研究的原则进行划定，它是包围热力系的控制面。

由于实际系统千差万别，也随时间或位置的变化而变化，所以边界的划分也是随着系统的变化而变化的。边界可以是固定的，也可以是移动的，甚至可以是假设的。根据是否有质量或能量穿越边界，还可以将边界分为闭口边界、开口边界和绝热边界等。如果系统在运动变化过程中，始终没有质量越过边界，则称为闭口边界。如果有质量越过边界，则称为开口边界。如果不允许热量越过边界，则称为绝热边界。图 1.1 介绍了几种典型边界。

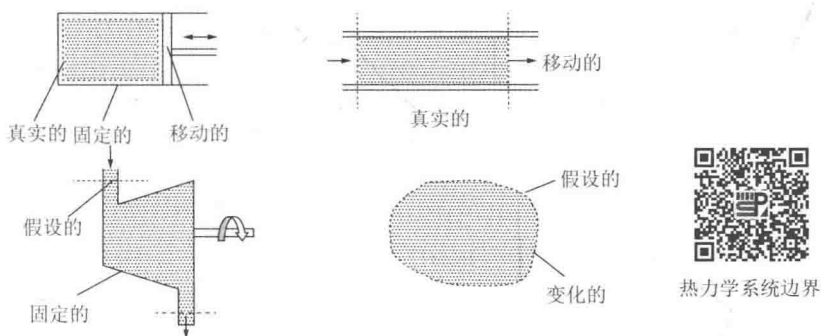


图 1.1 系统、边界和外界的示意图

## 1.2 状态 状态参数 状态方程

### 1.2.1 状态

热力系统在某一瞬间表现出来的宏观物理状况称为系统的热力状态，简称为状态。构成系统的物质，一般有气态、液态和固态等形式，在某一瞬间，系统内部的力、热和流动状况等，就表现为系统的状态。

热力系可能呈现各种不同的状态，其中特别有意义的是平衡状态。因为处于平衡状态的系统有均匀完整的特性，可以用一些可以测量的指标对它进行描述。所谓平衡状态是指系统在不外界影响的条件下，系统宏观性质不随时间改变的状态。严格来说，这种平衡状态必须是系统内部各部分之间、系统与外界之间的平衡，也称稳定平衡，其特点是系统的各项指标处处相同而且长时间维持不变。一般来说，系统整体处于稳定平衡状态必须满足四个条件：系统内部各处、系统与外界之间都处于力平衡、热平衡、相平衡和化学平衡。

处于平衡状态的热力系，各处应该有均匀一致的温度和压力等参数，对于有可变或化学反应的系统，还必须处处具有相同的化学浓度和化学势。如果系统内部存在温差，则必然存在热量从高温物体流向低温物体，系统不可能维持状态不变，因此它不可能处于平衡状态。只有当温差消失，这种驱动热量传递的热不平衡势消除，系统才能达到热平衡。同样，如果系统内部存在力差，则必然存在引起物体产生宏观位移的趋势，系统内部也不可能实现平衡，只有消除这种力差，系统才能达到力平衡。对于化学反应系统，内部还必须消除相差和化学势差，系统才能完全实现平衡状态。

### 1.2.2 状态参数

如果一个系统处于平衡态，那么它的宏观状况将在长时间内不发生变化，此时就可以用一些物理指标对它进行描述，而这些用于描述热力系宏观物理状况的量就称为状态参数。不同的状态参数描述热力系在特定方面的性质，因此不同的状态参数有不同的功能和性质，总的来说，可以分为强度量和尺度量（又称广延量）两大类。凡与物质质量多少无关的物理量称为强度量，如压力 $p$ 、温度 $T$ 和化学势 $\mu$ 等。与物质质量大小成正比的物理量称为尺度量，如体积 $V$ 、热力学能 $U$ 、焓 $H$ 和熵 $S$ 等。单位质量的尺度量也可以看做强度量，这类强度量在尺度量前面冠以“比”字，代表 1kg 物质对应的参数值，并用小写字母表示，如比容（有时也叫比体积） $v$ 、比热力学能 $u$ 、比焓 $h$ 和比熵 $s$ 等。值得指出的是，在系统处于平衡态时，系统各部分的强度量是相等的。

在基础热力学中，常用的热力学状态参数有六个，即压力、温度、比容、热力学能、焓和熵。这六个状态参数都是只与状态有关的单值函数，它们的大小只决定于给定的状态，而与到达这一状态的路径和过程无关。亦即是说，状态参数的变化只决定于系统的起始和终了状态，变化量的大小等于终态的数值减去初态的数值，而与系统变化过程中所经历的一切中间过程无关。例如，熵是一个状态参数，当系统从 1 状态变化到 2 状态，并已知 1 状态时的熵为 $S_1$ ，2 状态时的熵为 $S_2$ ，那么熵变即为 $\Delta S = S_2 - S_1$ 。

虽然，常用的热力学状态参数有六个，但只有比容 $v$ 、压力 $p$ 和温度 $T$ 是可以直接或容易用仪表测量到的，因此把它们当做基本的热力学参数。其他三个，热力学能 $U$ 、焓 $H$ 和熵 $S$ 由于需要确定参考点，不容易直接测量到，只能利用可测参数计算得到。

#### 1. 比容

单位质量的物质所占有的体积称为比体积，也称为比容，用符号 $v$ 表示，单位为 $\text{m}^3/\text{kg}$ 。比容越大，表明物质的分子密度越低，分子之间的距离越大。在热力过程中，如果比容增加，表明工质在膨胀，特别对于气体工质，在热力过程中，比容将有较大变化。

#### 2. 压力

单位面积上承受的垂直作用力称为压力，用符号 $p$ 表示，单位为 $\text{N}/\text{m}^2$ ，国际单位制中也把这个单位称为帕斯卡，简称帕（Pa），即 $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ 。由于帕（Pa）这个单位过小，工程上常用千帕（kPa）或兆帕（MPa）作为压力单位， $1\text{kPa}=10^3\text{Pa}$ ， $1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$ 。压力是热力系的内部属性，是与功交换有关的强度状态参数。微观上，气体的压力是组成气体的大量分子对热力系边界碰撞的统计平均效果，见图 1.2。

特别值得指出的是，热力学中涉及的所有压力均指物质承受的真正压力，即俗称的绝对压力。在工程中常用压力表或真空表来测定系统压力，但压力表或真空表

的读数并不是系统的真正压力，它需要考虑环境的压力。系统的真正压力应该是

$$p = p_g + p_b \quad (\text{对系统是正压})$$

$$p = p_b - p_v \quad (\text{对系统是负压})$$

这里， $p_g$ 是压力表的读数， $p_v$ 是真空表的读数， $p_b$ 是环境的压力。

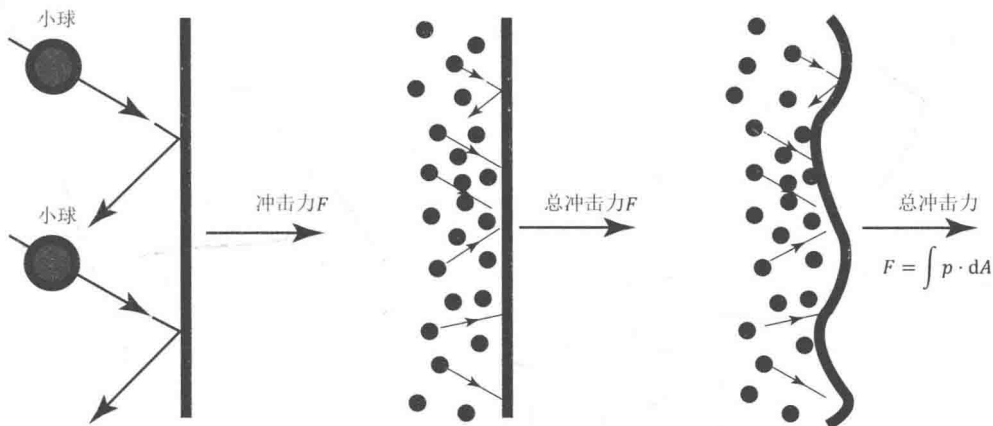


图 1.2 气体分子碰撞器壁的平均效果

### 3. 温度

温度可以理解为是物质分子热运动激烈程度的量度，用符号 $T$ 表示，单位为 $K$ 。温度是确定一个系统与其他系统是否处于热平衡的共同特征参数，所有处于热平衡的系统具有相同的温度数值。

温度概念的建立，以热力学第零定律为基础，第零定律指出：处于热平衡的两个物体，如果分别与第三个物体处于热平衡，则这三个物体之间必定处于热平衡。热力学第零定律是一条公理，它给出了比较温度的方法，成为测量温度的理论依据。

国际单位制中，温度采用热力学温度，也叫开尔文温度，单位 $K$ 。热力学温标的建立，最初是以理想气体温标为基础的。人们发现，在定容条件下，理想气体的温度与压力呈线性关系。而当压力非常低时，实际气体将近似于理想气体。在低压下，人们对多种实际气体压力与温度的关系进行了测量，发现不同气体的实验连线的斜率虽然不同，但当压力趋近于零时，所有连线都指向了一个点，如图 1.3 所示，即得到理想气体温标为

$$T = 273.16 \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p}{p_{tr}} \quad (1.1)$$

此时，参考压力 $p_{tr} \rightarrow 0$ 。基于此，热力学温标取水的三相点为基准点，并定义其温度为 $273.16K$ 。



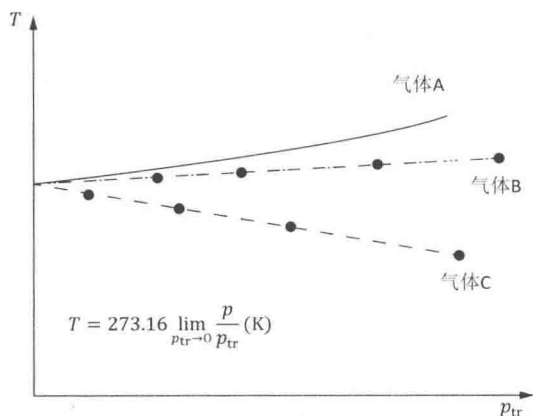


图 1.3 不同气体温度与压力的关系

在科学或生活领域,与热力学温标并用的还有其他温标,特别重要的是摄氏温标,用符号 $t$ 表示,单位为 $^{\circ}\text{C}$ .摄氏度以一个大气压下水的冰点为零度,沸点为 $100^{\circ}\text{C}$ ,其间分为100个均匀刻度.因此,热力学温度与摄氏温度的定量关系可以表示为

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (1.2)$$

即规定了热力学温度 $273.15\text{K}$ 是摄氏温度的零点,同时规定了以 $^{\circ}\text{C}$ 和 $\text{K}$ 为单位的两种温度间隔相同.但需要注意,在热力学领域,必须使用热力学温标.

### 1.2.3 状态方程

平衡状态下,热力系统表现出不同的热力性质,不同的状态参数可以从不同的角度描述系统的某一宏观特性.当然,也有一些特性是与热力过程没有关系的,如电阻参数等.在基础热力学中,我们知道最重要的状态参数有六个,即温度 $T$ 、压力 $p$ 、比容 $v$ 、比热力学能 $u$ 、比焓 $h$ 和比熵 $s$ .然而,对于一个由纯物质组成的热力学系统或简单可压缩系统,仅仅需要两个独立的状态参数即可确定系统的平衡态.那么,剩余的四个状态参数可以由这两个参数表达出来.例如,一定量的气体在固定容器中被加热,气体压力会随着温度的升高而增大,但温度和容积确定之后,气体压力也随之确定,系统状态亦即被确定.

简单地说,状态参数之间的数学关系就是状态方程.状态参数之间并不完全独立而产生的状态方程,是通过已知的热力系统性能探究未知热力性能的重要手段,也是利用可测量的参数计算不易测量参数的重要方法.例如,对简单可压缩系统的基本状态参数,可以列出以下几种形式的状态方程:

$$f(p, v, T) = 0, \quad p = p(v, T), \quad T = T(p, v), \quad v = v(T, p) \quad (1.3)$$

对于理想气体,其状态方程比较简单,即