

普通高中课程标准实验教科书

物 理

选修 3—3

教师教学用书

人民教育出版社 课程教材研究所
物理课程教材研究中心 编著

人民教育出版社

主 编：杜 敏
副 主 编：刘建成 张 颖
编写人员：朱 琦 徐 锐 刘建成 陈连余
付荣兴 张 颖 苗元秀
责任编辑：付荣兴 金新喜
绘 图：郭 威
版式设计：张万红

图书在版编目 (CIP) 数据

普通高中课程标准实验教科书物理选修 3-3 教师教学用书 / 人民教育出版社, 课程教材研究所物理课程教材研究开发中心编著. —4 版. —北京: 人民教育出版社, 2010. 5 (2019. 7 重印)

ISBN 978-7-107-19090-2

I. ①普… II. ①人…②课… III. ①中学物理课—高中—教学参考资料 IV. ①G633. 73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 035568 号

普通高中课程标准实验教科书 物理 选修 3-3 教师教学用书

出版发行 人民教育出版社

(北京市海淀区中关村南大街 17 号院 1 号楼 邮编: 100081)

网 址 <http://www.pep.com.cn>

经 销 全国新华书店

印 刷 山东德州新华印务有限责任公司

版 次 2010 年 5 月第 4 版

印 次 2019 年 7 月第 26 次印刷

开 本 890 毫米×1240 毫米 1/16

印 张 9.5

字 数 240 千字

定 价 20.00 元

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或本产品任何部分·违者必究
如发现内容质量问题、印装质量问题, 请与本社联系。电话: 400-810-5788

说 明

本书是在《普通高中课程标准实验教科书物理选修3—3教师教学用书》的基础上,根据几年来实验地区的一些反映,修订而成的,旨在帮助教师更好地使用《普通高中课程标准实验教科书物理选修3—3》,为教学提供一些参考。

本书介绍了教科书的特色,新的教学理念和一些新的教学方式、方法,与教科书采取“紧密配合”的方式,逐章逐节进行分析说明。本书的主要结构如下:

课程标准的要求 摘录了《普通高中物理课程标准(实验)》(以下简称《课程标准》)的相关内容,作为教学的依据。

本章教材概述 主要介绍本章教科书的编写意图,主要内容和教材结构的特点,以及在选择内容和讲述方法上的考虑。

教材分析与教学建议 根据课程标准及教科书,对每一节教学内容提出了具体的教学目标,并且对教材内容提出了比较详细的建议,包括教学过程中可能遇到的问题,供选择的教学方法,怎样发展学生的非智力因素,怎样使用教科书中的栏目、插图,怎样以课程理念处理教学问题,如何发展教师自身的教学能力,如何处理数字化教学,如何帮助学生进行探究等。

问题与练习 从练习题“内容分析”和“解答与说明”两部分对教科书“问题与练习”中的问题给出了较为详细的解答。

教学设计案例 主要目的是给实验地区的教师提供一些教学设计方面的参考,包括一些重点难点的分析、把握、处理,整堂课的设计思想、具体安排等。

教学资源库 是与教学内容相关的教学资源,包括“概念、规律和背景资料”“联系生活、科技和社会资料”“实验参考资料”三个部分。课程新理念需要教师进一步提高职业素质,需要教师尽早进入终身学习的轨道,我们在这里围绕教学的需要选择了一些拓展性的内容,为教师的素质发展提供一些线索。

补充习题 教科书由于篇幅所限,不可能编写太多的习题。我们在这里补充了一些习题,供教师们在教学中选用。

本书原编写者还有:张京文、唐掣、王琦、汪维澄。

本书在编写过程中得到北京市、浙江省、江苏省、山东省、重庆市、天津市、安徽省、江西省、辽宁省等全国各地教研室的热情支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

对于书中存在的缺点和错误,欢迎教师和物理教育工作者们及时批评、指正。来函请寄:100081 北京海淀区中关村南大街17号院1号楼 人民教育出版社物理室 收。

人民教育出版社 物理室
2008年4月

目 录

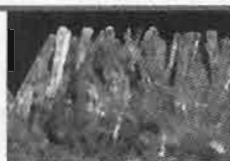
第七章 分子动理论	1
一、本章教材概述	1
二、教材分析与教学建议	3
第1节 物体是由大量分子组成的	3
第2节 分子的热运动	8
第3节 分子间的作用力	11
第4节 温度和温标	13
第5节 内能	16
三、教学设计案例	19
分子间的作用力	19
四、教学资源库	22
(一) 概念、规律和背景资料	22
(二) 联系生活、科技和社会资料	29
(三) 实验参考资料	31
五、补充习题	33



第八章 气体	37
一、本章教材概述	37
二、教材分析与教学建议	39
第1节 气体的等温变化	39
第2节 气体的等容变化和等压变化	43
第3节 理想气体的状态方程	45
第4节 气体热现象的微观意义	47
三、教学设计案例	51
气体的等温变化	51
四、教学资源库	54
(一) 概念、规律和背景资料	54
(二) 实验参考资料	57
五、补充习题	60



第九章 固体、液体和物态变化	67
一、本章教材概述	67
二、教材分析与教学建议	69
第1节 固体	69
第2节 液体	73
第3节 饱和汽与饱和汽压	76
第4节 物态变化中的能量交换	80
三、教学设计案例	82
液体	82
四、教学资源库	85
(一) 概念、规律和背景资料	85
(二) 联系生活、科技和社会资料	90
(三) 实验参考资料	92
五、补充习题	93



第十章 热力学定律	96
一、本章教材概述	96
二、教材分析与教学建议	100
第1节 功和内能	100
第2节 热和内能	104
第3节 热力学第一定律 能量守恒定律	105
第4节 热力学第二定律	110
第5节 热力学第二定律的微观解释	115
第6节 能源和可持续发展	117
三、教学设计案例	118
热力学第二定律的微观解释	118
四、教学资源库	122
(一) 概念、规律和背景资料	122
(二) 联系生活、科技和社会资料	134
(三) 实验参考资料	138
五、补充习题	141



第七章 分子动理论

课程标准的要求

1. 认识分子动理论的基本观点，知道其实验依据。知道阿伏加德罗常数的意义。
2. 理解内能的概念。

一、本章教材概述

本章介绍分子动理论的基本观点，它的主要内容是：物体是由大量分子组成的，分子在做永不停息的无规则运动，分子之间存在着引力和斥力。

热学研究的内容包括两个方面，一方面是关于热现象的宏观理论，它研究热现象的一般规律；另一方面是关于热现象的微观理论，从分子运动的角度研究宏观热现象的规律。分子动理论是热现象微观理论的基础。

分子动理论的观点贯穿在本模块的各章之中。在第八章，认识大量分子的运动遵从一定的统计规律之后，用分子动理论的基本观点对气体的温度、体积、压强及其相互关系进行了微观解释；在第九章，用物质的微观结构解释晶体和非晶体的性质，根据分子间的相互作用力的特点解释液体的表面张力现象，用分子的运动说明液体饱和汽的形成；在第十章，根据分子的无规则运动，对热力学第二定律进行了微观解释。因此，本章是学习第八、九、十章的基础。

本章内容可以分为两个单元：第一单元为分子动理论的基本内容，由前三节组成；第二单元介绍温度和内能的概念，由后两节组成。分子动理论是对热现象进行微观分析的基础；而温度和内能，是热学的基础概念。本章的内容对整个热学模块的学习起基础性作用。

在编写本章时，有以下思考。

1. “实验”栏目重视对实验思路和方法的陈述

实验“用油膜法估测分子的大小”，教科书对其陈述，没有采用以实验操作步骤作为行文线索的做法，而是按照该实验的思路从设计逻辑上概括为几个需要解决的问题。

●怎样估算油酸分子的大小？

油酸分子直径等于单分子油膜的厚度

$$\text{油膜厚度 } d = \frac{1 \text{ 滴极小油酸的体积 } V}{\text{该单分子油膜的面积 } S}$$

●如何获得很小的 1 滴油酸？怎样测量它的体积？

●如何测量油膜的面积？

教科书以这三个问题作为行文的线索，不仅有利于学生理解这个实验的原理，而且让学生看到了本实验的具体方案是怎样构思出来的，有利于培养学生设计实验的能力。

在课堂教学时，教师在介绍用测量油膜厚度的办法来估算油酸分子直径的思路之后，“如



何获得很小的1滴油酸”“怎样测量它的体积”以及“怎样测量该滴油酸的单分子油膜面积”这三个问题,可以让学生自主思考和讨论。教科书把实验原理和步骤融入在几个需要解决的问题中,为学生自主学习和相互交流创造了条件。

2. 让学生经历分析问题和解决问题的过程

为在课堂教学中实现“过程与方法”目标,促进学生在课堂中自主学习,教科书设计了一系列让学生分析问题和解决问题的活动,为教师设计教案提供了思路。教学中,教师可以借鉴教科书上的实例对教学过程进行再创造。

学生通过实验了解分子的大小是可以估测的及其数量级之后,教科书安排了让学生自己估算阿伏加德罗常数的过程。估算所需要的知识基础都是学生所具备的,学生经历了这一过程之后,增强了对阿伏加德罗常数的理解,也就不会觉得它很神秘了。

在“分子间的作用力”这节,教科书分析了分子间的斥力和引力随分子间距离增大而减小的不同特点后,让学生在分子间斥力、引力与分子距离关系的图象(教科书图7.3-2)中,作出分子间的合力随分子距离关系的图象。学生在作出这条曲线的过程中,不仅知道了分子间的相互作用力在分子间距离的不同范围内具有不同变化特点这一结论,重要的是加深了对分子间相互作用力(合力)的理解,学会如何用图象来表示某个变化的量,这对提高学生用函数图象表达、分析物理问题的能力是很有帮助的。让学生亲自作出分子间合力与分子间距离的关系图象主要是让学生更好地领会该图象的物理含义,精确的图象将在教科书第5节图7.5-1中给出。

3. 进一步认识初中学过的物理概念

应该说,选修本模块的学生不仅具有一定的物理学基础知识,而且有兴趣和能力学习较深的物理知识。在这种情况下,本章就有条件比较系统、准确地建立相关物理学概念。在“温度和温标”这一节中,教科书引入了系统、状态参量、平衡态、热平衡等一系列概念,并根据热平衡来定义温度。此时学生对温度这个物理量的理解就比初中“冷热的程度”这一说法深刻了很多,但又与初中的说法是一致的。学生在初中学习中知道用温度计测量温度的操作过程,而现在根据热平衡定律,明确了这一操作过程的物理原理。初中学习的许多热学现象,现在都可以用新的概念来重新认识。例如,教科书第4节后面练习题的第1题,学生用“平衡态”“热平衡”的概念来认识“测定金属块的比热容”的实验过程,可以对实验过程的理解上升一个层次。

4. 重视联系学生生活、联系现代科技

本章所研究的“分子动理论”比较抽象,教科书注意把抽象的理论跟学生的生活进行联系。例如,在介绍扩散现象时,教科书中放了一幅酱油在熟鸡蛋中扩散的彩色照片,把生活中经常见到的现象形象地展示在学生的面前,不仅能使学生对抽象的理论产生亲近感,而且有利于增强学生理论联系实际意识。在学习“温度计与温标”之后,教科书安排了一个“科学漫步”栏目,设置了“形形色色的温度计”这个主题,把生活中的玻璃—水银温度计、玻璃—酒精温度计,生产中的双金属温度计、压力表温度计、半导体热敏温度计、热电偶温度计,科学研究中的铂电阻温度计,以及学生倍感新鲜的磁温度计、声速温度计、频率温度计等各种温度计,以测温物质的相关性质为线索,对各种温度计的制作原理和特点简要地做了介绍。从这个栏目的内容中,学生不但可以知道温度计总是根据物质某种跟温度有关的性质来制作的,同时还感受到物理学跟现实生活、现代科技的紧密联系。



5. 利用练习题来解读教科书

练习题通常被认为是用来巩固、检测所学知识的。本章教科书中的练习题，有的还肩负着解读教科书的功能。本章第1节实验“用油膜法估测分子的大小”，由于强调实验的原理和思路，行文是按照实验需解决问题的逻辑关系展开的。为了让学生经历一次按实验步骤进行思考的过程，并且以具体的操作方法和实验数据来理解实验的原理和思路，教科书在本节内容中设计了一个练习题（第2题），通过这个练习题，达到解读教科书的目的。

又例如，在第2节“分子的热运动”中，教科书阐述布朗当时观察悬浮在水中的花粉时，认为花粉的无规则运动不是外界因素引起的，但教科书并没有对该结论的判断根据作进一步说明。在本节的练习题中，教科书设计了一个题目（第3题），让学生根据实验现象自己分析出布朗运动并不是因为环境温度的变化、实验场所振动等外部因素引起的，这个题目，除了可以发展学生的分析、判断能力，也起到了解读教科书的作用。

课时安排建议

第1节	物体是由大量分子组成的	2课时
第2节	分子的热运动	1课时
第3节	分子的作用力	1课时
第4节	温度和温标	1课时
第5节	内能	1课时

二、教材分析与教学建议

第1节 物体是由大量分子组成的

1. 教学目标

- (1) 知道物体是由大量分子组成的。
- (2) 知道油膜法测分子大小的原理，并能进行测量和计算。通过油膜法实验使学生知道科学研究中的一种方法：利用宏观量求微观量。
- (3) 知道分子的球形模型，知道分子直径的数量级。初步认识到微观世界是可以认知的，人类探究微观世界经历了漫长的过程，而且意识到这种探索还将持续下去。
- (4) 知道阿伏加德罗常数的物理意义、数值和单位。

2. 教材分析与教学建议

教科书对“物体是由大量分子组成的”这一知识，是从组成物体的分子数目的“大量”和分子的“微小”两个角度来说的。通过阿伏加德罗常数的计算，使学生体会组成物体的分子数的“巨大”。通过用油膜法估测分子的直径，利用对宏观量的测定求出微观量分子的大小，并进一步体会每个分子的“微小”。

(1) 分子的大小

分子大小的数量级是本节教学的重点之一，教学中可以给一个能够让学生想象的实例：跟

细菌差不多的 $1\text{ }\mu\text{m}$ 大小的水珠中含有的分子数为地球人口的好几倍，这么小的一滴水却含有如此之大数量的分子，可以想象分子有多小。通过这个实例使学生初步了解我们现在研究的是极小的分子。有兴趣的学生由此也可以估算一下分子大小的数量级。还可以通过投影叶子在放大不同倍数情况下的图片（见图 7-1），让学生体会组成物质的分子是很小的，不但用肉眼不能直接看到它们，就是用光学显微镜也看不到它们。

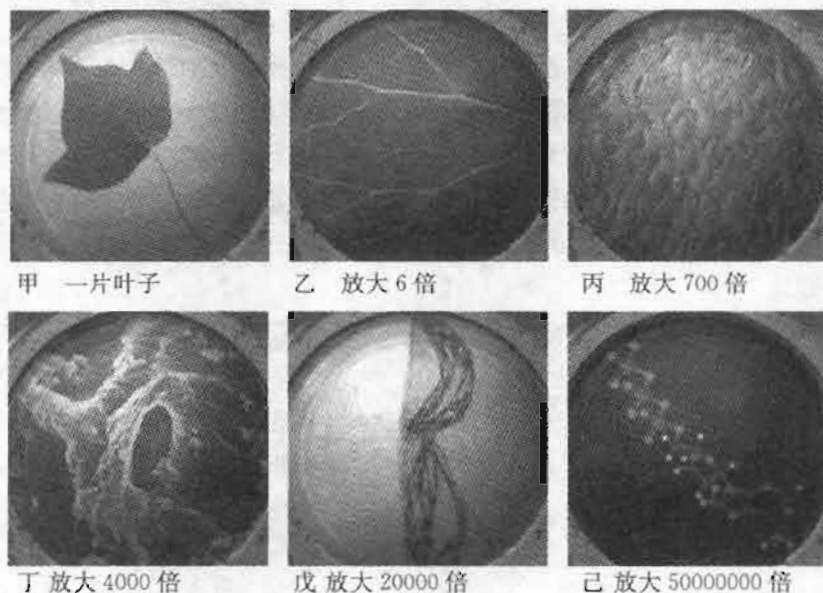


图 7-1

然后展示教科书图 7.1-3 用扫描隧道显微镜拍摄的石墨表面原子的照片。通过这幅照片，学生看到客观存在的分子（原子），为形成科学的物质观和后续热学的学习打下一定的基础。教学时，让学生了解图上亮斑是碳原子的像就可以了。关于扫描隧道显微镜的工作原理不必给学生做过多介绍，但可以告诉学生扫描隧道显微镜不仅可以拍摄分子、原子的照片，它在当前许多科技领域都起着重要的作用，受到科学工作者的密切关注。通过照片，学生会清楚地看到，分子（原子）并不是一个个的小球。把分子看做小球，是对分子建立的一种简化模型。在教学中注意说明模型在物理学中的意义，使学生理解模型都是人们根据研究的问题建立的，理想模型是在一定场合、一定条件下突出客观事物的某种主要因素，忽略次要因素而建立的。将分子看做小球，与力学中的质点、电学中的点电荷一样，都是理想化模型。实际上分子的结构是很复杂的，分子并不真是小球，分子间也存在着空隙，因此，我们所计算出的分子直径、分子大小，只是一个粗略的数量级概念，反映了分子所占的空间大小。在研究分子内部结构和运动时，则需要较复杂的分子结构模型了。

（2）油膜法测分子直径

油膜法测分子直径是早期测定分子大小的方法，是高中阶段学生第一次利用对宏观量的测定求出微量大小的实验。用单分子油膜法测定分子大小的原理，理解和学会用单分子油膜法估算分子大小（直径）的方法是本节的重点与难点。我们在讲油膜法估测分子大小的实验之前，可以引导学生想办法估测 1 粒绿豆的直径。教师在学生所设计的方法基础上，引导出如下方法：应先用量筒测出一定量绿豆的体积 V ，将这些绿豆平摊在水平桌面上，不要重叠，测出所占的面积 S ，则绿豆的直径 $d = \frac{V}{S}$ ，并引导学生总结出“测绿豆直径的办法是通过测量较大量来研究较小量”。这种油膜法估测分子大小的实验方法有利于学生的科学思维方法的培养；

有利于学生深化对微观世界的认识,提高学生的实验技能、技巧。因此,可以充分利用这一教学资源,引导学生大胆设想,提出各种实验方案,筛选出最佳方案,理清实验的设计思想,把握住关键步骤进行实验探究,收集实验数据,得出实验结论。让学生在学习物理知识与技能的同时,提高科学探究的能力。

油酸分子的特性为用油膜法测分子直径奠定了基础。油酸的分子式为 $C_{17}H_{33}COOH$, 在常温下为液态, 它的分子是长形的, 一端是具有亲水性的羧基 $COOH$, 另一端是具有憎水性的烃基 $C_{17}H_{33}$ 。当油酸在水面上形成有自由边界的油膜时, 每个分子都是直立的, 羟基在油膜表面, 成为一个单分子层, 如图 7-2 所示。通过实验测出油膜的体积和面积, 可以算出膜的厚度, 就是单个油酸分子的长度 d 。教师在介绍这个方法时要注意一些细节问题, 如: 油酸的特性、体积的测量、油膜的扩散(油酸滴下之前, 用嘴轻轻把粉层吹开, 再滴油酸, 油滴扩散效果比较好)、散开后的面积测量等。

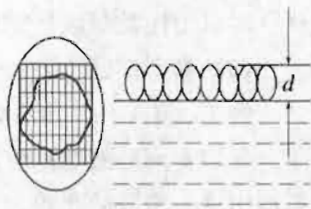


图 7-2

在用油膜法测出分子直径后指出: 分子间有空隙, 认为分子是球形是一种近似模型, 是为了简化地处理问题。实际分子结构很复杂, 但通过估算分子大小的数量级, 对分子的大小会有较深入的认识。

用油膜法估测分子大小的实验误差主要来自: ①油酸酒精溶液的实际浓度和理论值间存在偏差; ②一滴油酸酒精溶液的实际体积和理论值间存在偏差; ③油酸在水面上的实际分布情况和理想中的“均匀”“单分子纯油酸层”间存在偏差; ④采用“互补法(即不足半个舍去, 多于半个的算一个)”计算获得的油膜面积与实际的油膜面积间存在偏差。

本实验的操作要领: ①油酸酒精溶液配制比例恰当; ②量取 1 mL 油酸酒精溶液后计量滴数时应尽量使每滴大小相同; ③往水面上洒滑石粉时要适量、均匀; ④要在滴入溶液稳定后再画轮廓; ⑤计数面积时要耐心细致。

(3) 阿伏加德罗常数

阿伏加德罗常数是联系微观量和宏观量的桥梁, 是一个重要的常数。通过用阿伏加德罗常数计算每个分子的大小和质量, 可以使学生对一个分子大小和质量的数量级有大概的认识, 同时也使学生进一步理解这个常数的意义。用阿伏加德罗常数进行有关计算或估算的方法是本节教学的重点。在化学课中, 学生已经学过, 1 mol 物质所含有的分子数都是相同的, 用阿伏加德罗常数 N_A 来表示。为了得到更精确的阿伏加德罗常数, 科学家用各种方法测量它, 1986 年用 X 射线法测得的阿伏加德罗常数 $N_A = 6.0221367 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。通常可取 $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, 在粗略计算中可取 $N_A = 6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。

为了帮助学生理解阿伏加德罗常数是一个很大的量, 可举出下列事例: ① 1 cm^3 水中含有的分子数约为 3.3×10^{22} 个。假如全世界 60 亿人不分男女老少都来数这些分子, 每人每秒数 1 个, 也需要将近 17 万年的时间才能数完; ② 1 cm^3 的酒精滴入 100 亿立方米的水库中, 分布均匀后, 每立方厘米水中仍有 100 万个以上的酒精分子; 等等。

在利用阿伏加德罗常数进行有关计算或估算时, 常常用到“数量级”的概念。记住一些特殊的数量级对考虑问题或粗略检查自己估算是否出现了错误有一定的帮助。例如, 记住分子直径的数量级、记住分子质量的数量级, 等等。应注意, 我们书中说的分子直径的数量级是 10^{-10} m , 主要是指无机物分子, 有些有机物分子比 10^{-10} m 大得多。

(4) 关于“思考与讨论”

教科书“思考与讨论”栏目中的问题要给学生一定的时间，尽量让学生独立思考完成。既然是估算，算出数量级就可以了。例如，每个水分子的体积可以按照边长为水分子直径的正方体计算，与用球体积公式算出的数量级是一样的，估算出阿伏加德罗常数的误差也不大，所以估算时只关注数量级是完全可以的。

(5) 参考例题

例1 将 1 cm^3 的油酸溶于酒精，制成 200 cm^3 的油酸酒精溶液，已知 1 cm^3 的溶液有 50 滴。现取 1 滴油酸酒精溶液滴到水面上，随着酒精溶于水，油酸在水面上形成一单分子薄层，已测出这一薄层的面积为 0.2 m^2 ，由此估测油酸分子的大小。

解析：设油酸分子为球形。根据题目知道， 1 cm^3 油酸酒精溶液中油酸的体积

$$V = \frac{1}{200} \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

1 滴油酸酒精溶液中油酸体积

$$V_{\text{油酸}} = \frac{V}{50} = \frac{10^{-6}}{200 \times 50} \text{ m}^3$$

则油酸分子的直径

$$d = \frac{V_{\text{油酸}}}{S} = \frac{10^{-6}}{200 \times 50 \times 0.2} \text{ m} = 5 \times 10^{-10} \text{ m}$$

点评：本题的关键是知道分子的球形模型，理解用油膜法测分子直径的原理，运用公式 $d = \frac{V}{S}$ 进行计算，并注意单位的统一。

例2 已知金刚石的密度为 $\rho = 3.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，现有一小块体积为 $4.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ 的金刚石，它含有多少个碳原子？假如金刚石中的碳原子是紧密地挨在一起，试估算碳原子的直径。（保留两位有效数字）

解析：这块金刚石的质量

$$m = \rho V = 3.5 \times 10^3 \times 4.0 \times 10^{-8} \text{ kg} = 1.4 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

这块金刚石所含的碳原子数

$$n = \frac{m}{M} N_A = \frac{1.4 \times 10^{-4}}{12 \times 10^{-3}} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ 个} = 7.0 \times 10^{21} \text{ 个}$$

一个碳原子的体积为

$$V_0 = \frac{V}{n} = \frac{4.0 \times 10^{-8}}{7.0 \times 10^{21}} \text{ m}^3 = 5.7 \times 10^{-30} \text{ m}^3$$

分子直径大约为

$$d = \sqrt[3]{V_0} = \sqrt[3]{5.7 \times 10^{-30}} \text{ m} = 1.8 \times 10^{-10} \text{ m}$$

点评：由宏观量去计算微观量，或由微观量去计算宏观量，都要通过阿伏加德罗常数建立联系。所以说，阿伏加德罗常数是联系宏观量与微观量的桥梁。由物体体积计算分子的大小，可视分子为立方体。这是估算分子大小通用的方法。

例3 水的相对分子质量是 18，水的密度 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，阿伏加德罗常数 $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。在标准状况下，水蒸气的摩尔体积是 $22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$ ，则水蒸气分子的平均间距大约是水分子直径的（ ）

- A. 1 倍 B. 10 倍 C. 100 倍 D. 1 000 倍

解析：水的摩尔体积

$$V_{\text{mol}} = \frac{M}{\rho} = \frac{18 \times 10^{-3}}{1.0 \times 10^3} = 18 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$$

一个水分子的体积为 $V_{\text{水}} = \frac{V_{\text{mol}}}{N_A}$ 。

把水分子看成一个紧挨一个排列的球体，其直径大约为 $d_{\text{水}} = \sqrt[3]{V_{\text{水}}}$ 。

水蒸气是气体，在标准状况下的摩尔体积是 $V_{\text{mol}} = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$ ，每个水分子所占体积（包括水分子和它的周围空间的体积）为 $V_{\text{气}} = \frac{V_{\text{mol}}}{N_A}$ 。

把每个分子和它所占空间看成一个小立方体，分子间距等于每个立方体的边长，水蒸气的分子间距为 $d_{\text{气}} = \sqrt[3]{V_{\text{气}}}$ 。

$$\frac{d_{\text{气}}}{d_{\text{水}}} = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{气}}}{V_{\text{水}}}} = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{mol}}}{V_{\text{mol}}}} = \sqrt[3]{\frac{22.4 \times 10^{-3}}{18 \times 10^{-6}}} \approx 10$$

即水蒸气分子的平均间距大约为水分子直径的 10 倍。

答案：B。

点评：固体和液体分子是紧密排列的，分子间距可看成分子直径；而气体分子间的距离远大于分子直径，在标准状况下，用摩尔体积除以阿伏加德罗常数，得到的是一个分子占有周围空间的体积，而不是一个分子的体积。分割气体空间时必须分割成紧密相连的立方体，而不应该是球体。

3. 问题与练习

1. 内容分析

本题通过计算塑料薄膜的厚度让学生体会用单分子油膜法估算分子大小（直径）的思维方法。

解答与说明

设薄膜的质量为 m 、密度为 ρ_1 、面积为 S 、厚度为 d ，盐水的密度为 ρ_2 ，薄膜在盐水中悬浮，表明薄膜和盐水的密度相等， $\rho_1 = \rho_2$ 。又因为 $\rho_1 = \frac{m}{V} = \frac{m}{Sd}$ ，所以

$$d = \frac{m}{\rho_1 S} = \frac{36 \times 10^{-3}}{1.2 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-2} \times 20 \times 10^{-2}} \text{ m} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

2. 内容分析

通过本题的计算，帮助学生进一步理解用单分子油膜法估算分子大小（直径）的原理与实验方法。

解答与说明

(1) 设一滴油酸酒精溶液中所含纯油酸的体积为 V ，则

$$V = \frac{1}{75} \times \frac{6}{10^4} \text{ mL} = 8 \times 10^{-6} \text{ mL}$$

(2) 由教科书图 7.1-4 中可知，油酸大约占 108 个小格，故油酸面积

$$S = 108 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 1.08 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

(3) 油酸分子的直径

$$d = \frac{V}{S} = \frac{8 \times 10^{-6} \times 10^{-6}}{1.08 \times 10^{-2}} \text{ m} \approx 7.4 \times 10^{-10} \text{ m}$$



3. 内容分析

通过用阿伏加德罗常数计算每个分子的大小,使学生对一个分子大小的数量级有进一步认识,同时也使学生进一步理解这个常数的意义。体会用阿伏加德罗常数进行有关估算的方法。培养学生的科学素养。

解答与说明

根据铜的密度 $\rho = 8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 铜的摩尔质量为 $6.4 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$, 可知 1 m^3 铜的分子数是

$$n = \frac{m}{M} N_A = \frac{8.9 \times 10^3 \text{ kg}}{6.4 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} = 8.37 \times 10^{28}$$

假设铜原子为球形,其直径为 d , 则1个铜原子所占的体积大约为 d^3 。此有 $nd^3 = 1$, 铜原子直径

$$d = \sqrt[3]{\frac{1}{n}} = \sqrt[3]{\frac{1}{8.37 \times 10^{28}}} \text{ m} \approx 2.3 \times 10^{-10} \text{ m}$$

4. 内容分析

通过用阿伏加德罗常数计算分子间的距离,使学生进一步认识分子间有间距,同时也使学生进一步理解阿伏加德罗常数的意义。体会用阿伏加德罗常数进行有关估算的方法。培养学生的科学素养。

解答与说明

设在标准状态下, 1 mol 氧气所占的空间为 V , 分子间的平均距离为 r 。所以,一个氧气分子所占的空间

$$V_0 = \frac{V}{N_A}$$

分子间的平均距离

$$r = \sqrt[3]{V_0} = \sqrt[3]{\frac{V}{N_A}} = \sqrt[3]{\frac{2.24 \times 10^{-2}}{6.02 \times 10^{23}}} \text{ m} \approx 3.34 \times 10^{-9} \text{ m}$$

第2节 分子的热运动

1. 教学目标

- (1) 了解扩散现象是由于分子的热运动产生的。
- (2) 知道什么是布朗运动,理解布朗运动产生的原因。通过实验和分析、逻辑推理的过程,使学生知道扩散现象与布朗运动,理解布朗运动的成因。培养学生注重理论联系实际、勤于观察、勇于探究、善于思考的良好学习习惯。
- (3) 知道什么是热运动及决定热运动激烈程度的因素。

2. 教材分析与教学建议

“分子永不停息地做无规则的热运动”是分子动理论的核心内容。本节是通过一些生活中的实例和实验来说明这一观点的。本节实验和逻辑推理的过程比较多,但是学生对所涉及的内容并不陌生,可以采取在学生阅读的基础上,教师指导讨论的教学方式。教师要抓住教科书中



的关键词句使学生展开讨论,让学生体会到自然科学书籍该如何阅读,培养学生的表达能力和逻辑思维能力。本节课也可以设计成探究性的课型,首先设计一些研究固体、液体、气体的扩散现象以及影响它们的因素的实验,例如:①将一个装有无色空气的广口瓶倒扣在装有红棕色二氧化氮气体的广口瓶上,抽去中间玻璃板,过一段时间发现上面瓶中气体变成了淡红棕色,下面气体的颜色变浅了,最后上下两瓶气体颜色一致;②放在房间一角落里的香水,打开瓶塞后,房间中任何位置的人都能嗅到香味。

教学时还可以向冷水和热水中各滴入一滴红墨水,会观察到热水很快变成红色,而冷水变成红色稍慢。让学生从对客观现象的认识中,体会分子的无规则运动与温度的关系。

(1) 扩散现象

扩散现象是本节的重点之一。通过实例说明:①物质处于固态、液态和气态时均能发生扩散现象,只是在短时间内,气态物质的扩散现象最显著,固态物质的扩散现象非常不明显。②在两种物质一定的前提下,扩散现象发生的显著程度与物质的温度有关,温度越高,扩散现象越显著。这表明温度越高,分子无规则运动得越剧烈。③扩散现象发生的显著程度还受到“已进入对方”的分子浓度的限制,当进入对方的分子浓度较低时,扩散现象较为显著;当进入对方的分子浓度较高时,扩散现象发生得就较缓慢。教学时应强调扩散现象不是外界作用引起的,而是分子无规则运动的直接结果,是分子无规则运动的宏观反映。

(2) 布朗运动

布朗运动是本节另一重点。布朗运动虽然不是分子的运动,但它却是分子运动的宏观反映。分析布朗运动产生的原因是本节的重点之一,让学生看懂教科书中图 7.2-6 很重要。布朗运动的成因也可以用仪器模拟或计算机软件模拟。显微镜下看到的微小悬浮颗粒是固体,而液体分子是看不到的,因为液体分子太小了。液体中许许多多做无规则运动的分子不断地撞击微小悬浮颗粒,当颗粒足够小时,受到来自各个方向的液体分子的撞击作用是不平衡的,而且温度越高,分子无规则运动得越剧烈,对悬浮微粒撞击的频率及强度越高,微粒无规则运动得越剧烈。因此布朗运动看到的是固体颗粒无规则的运动,它是液体分子的无规则运动引起的。因此,布朗运动间接地证实了液体分子的无规则运动。

在布朗那个年代,对悬浮在液体中的固体微粒做永不停息的无规则运动,是不能解释其原因的。但布朗精于观察和实验,肯定了这种运动的客观存在。他发现问题,并把观察到的现象做了详尽的记录,为后人的进一步研究做出了开拓性的贡献。在 70 多年后,即 20 世纪初,爱因斯坦发表了论文《热分子运动论所要求的静液体中悬浮粒子的运动》,从能量均分定理出发,得出了布朗运动的完整理论,同一时期法国物理学家佩兰完成了布朗运动的定量实验,他们的工作把原来看不见的微观运动和可以看见的宏观运动联系了起来,为研究物理现象提供了一个重要的、科学的方法。

(3) 分子在永不停息地做无规则运动

分子永不停息地做无规则运动也是教学的重点之一。对它的理解,应从两个方面展开,一是“永不停息”,二是“无规则”。

“永不停息”是从对实验现象的推理来认识的。通过对布朗运动的观察可以发现,只要液体不干涸,这种运动就不会停下来。这种运动不分白天和黑夜,不分季节永远进行着。

所谓分子的“无规则运动”,是指由于分子之间的相互碰撞,每个分子的运动速度无论是方向还是大小都在不断地变化。标准状况下,一个气体分子在 1 s 内与其他气体分子的碰撞达到 65 亿次之多,这种频繁的碰撞运动是无规则的。

“无规则”不是“无规律”。在任一时刻，物体内既具有速率大的分子，也具有速率小的分子。速率很大和速率很小的分子的个数所占的比例相对较少，大多数分子的速率和某一平均速率相差很小。通常所说分子运动的速率，均指它们的平均速率而言。分子的平均速率是很大的，且和物体的温度以及分子的种类有关。通常情况下，气体分子热运动的平均速率的数量级为 10^2 m/s。单个分子的运动是无规则的，但大量分子的运动是有规律性的，体现在大量分子的运动遵循统计规律。

(4) 参考例题

例 关于布朗运动的正确说法是 ()

- A. 因为布朗运动的激烈程度跟温度有关，所以布朗运动也可以叫做热运动
- B. 布朗运动反映了分子的热运动
- C. 在室内看到的尘埃不停地运动是布朗运动
- D. 用显微镜观察悬浮在水中的小炭粒，小炭粒在不停地做无规则运动

解析：布朗运动是悬浮在液体中的小颗粒受到液体分子的作用而做的无规则运动，它反映了液体分子的无规则运动，所以不能说它就是热运动，所以 A 错误而 B 正确。能在液体或气体中做布朗运动的微粒都是很小的，一般数量级在 10^{-6} m，这种微粒用肉眼不能直接观察到，必须借助于显微镜。室内尘埃的运动不是布朗运动，而是尘埃在空气气流作用下所做的宏观运动，因为它的运动并不是无规则运动。只有悬浮的微小的颗粒（肉眼看不到）才能做布朗运动。综上所述，正确答案为 B、D。

点评：弄清什么是布朗运动、布朗运动的特点以及布朗运动产生的条件和原因，是分析判断此类问题的关键。

3. 问题与练习

1. 内容分析

本题要求学生善于观察生活中的物理现象，并能对所看到的现象进行归纳总结，使学生进一步理解扩散现象的特点：温度越高，扩散现象越明显。

解答与说明

将 1 滴红墨水分别滴入等量的冷水和热水中，你会发现，热水变为一杯均匀的红水的速度快。也可向等量的冷水和热水中加入等量的红糖，如不加搅动，热水会较快变甜。这些现象说明温度越高，分子运动越激烈。

2. 内容分析

本题考查学生对布朗运动、布朗运动的特点以及布朗运动产生的条件和原因的理解。

解答与说明

(1) 错误。

解析：布朗运动是固体微粒在流体（液体或气体）分子的频繁碰撞下所做的一种无规则运动。这些固体微粒虽然要在光学显微镜下才能看到，但它们也是由大量分子组成的，属于宏观粒子，通过固体微粒的无规则运动可反映出液体分子运动的无规则性，但布朗运动本身不是分子运动，在光学显微镜下是看不到分子的运动的。

(2) 错误。

解析：布朗运动是固体小颗粒的运动，做布朗运动的每个固体小颗粒是由大量分子组成的，这些小颗粒在液体分子的频繁碰撞下做无规则运动，通过小颗粒的无规则运动间接反映了

液体分子的无规则运动。根据分子动理论可以知道, 尽管组成固体小颗粒的分子在做无规则运动, 但是, 通过布朗运动我们无法推断出组成固体小颗粒的分子是否在做无规则运动。

(3) 错误。

解析: 胡椒粉是由于热水的对流而运动的, 而对流是靠宏观流动而实现的热传递过程, 在对流过程中伴有大量分子的定向运动。胡椒粉的翻滚是有一定规律的, 它不是布朗运动。因此, 此例不能说明温度越高, 布朗运动越明显。

(4) 正确。

解析: 在显微镜下观察到煤油中小粒灰尘的布朗运动, 是小粒灰尘受到煤油分子不停地碰撞的结果。通过小粒灰尘运动的无规则性可以推知, 煤油分子在做无规则运动。

3. 内容分析

本题进一步考查学生对布朗运动的理解, 以及图中折线的产生原因。深入理解分子热运动。

解答与说明

解析: 小李的观点是错误的。教科书图 7.2-7 中的折线, 并非细微粉笔颗粒的运动轨迹, 而是每隔一定时间细微粉笔颗粒所在位置的连线, 即使在这段时间内, 细微粉笔颗粒的运动也是极不规则的, 绝不是沿折线运动的, 我们根本不能画出细微粉笔颗粒运动的轨迹。正因为细微粉笔颗粒在水分子不停的碰撞下所做的运动是无规则的, 才能使我们认识到水分子运动的无规则性。

第 3 节 分子间的作用力

1. 教学目标

- (1) 知道分子间存在空隙。
- (2) 知道分子之间同时存在着引力和斥力, 其大小与分子间距离有关。
- (3) 知道分子间的距离 $r < r_0$ 时, 实际表现的分子力为斥力, 这个斥力随 r 的减小而迅速增大。知道分子间的距离 $r > r_0$ 时, 实际表现的分子力为引力, 这个引力随 r 的增大而减小。

2. 教材分析与教学建议

(1) 分子间的作用力

学生很难理解大量分子的相互作用是什么样子的, 所以做好教科书中的两个实验很重要, 可以使学生体会分子之间有空隙、分子间有相互作用力, 而且相互作用力的大小与分子间的距离有关。教学中还可以把“问题与练习”的第 4 题设计为一个学生分组实验。为了便于实验, 可以用吸盘吸在玻璃板的中心位置, 用弹簧测力计的挂钩钩住吸盘的挂钩来替代教科书中描述的“玻璃板吊在橡皮筋的下端”。还应让学生举出生活中的实例。根据所学分子力的有关知识, 结合实际, 勤于观察、善于思考, 能解释一些实际现象。如固、液体难以被压缩, 常温下破碎玻璃难以复原, 再如高温铸造、电焊等, 生活中这样的例子不胜枚举。

在做“酒精和水混合”的实验时, 先把红色的水灌进试管中, 而后将酒精沿管壁缓慢注入, 在试管上用红线做个记号。将它们混合之后发现, 混合后的体积明显变小。混合前酒精与水的体积之比为 52 : 48, 实验效果较好, 水和酒精混合后体积小于原来的体积之和, 就是由

于分子重新分布，原来的分子空隙有一部分被另一种分子占据的缘故。

在做“把两块纯净的铅块压紧”的实验时，要注意一定要保证接触面的纯净，一要刮掉铅块表面的氧化膜，二要保证接触面的平整，使足够多的分子达到相互吸引的距离。所以，不要破坏铅块表面的平整度，轻轻用刀刮去一层就可以了。若有水龙头中的陶瓷片，可以用陶瓷片代替铅块，由于陶瓷片表面非常平整，实验效果比较好。

理解分子间存在相互作用并认识分子间相互作用力的基本规律是本节教学的重点。

教科书用弹簧两端连接的两个小球间的相互作用力类比分子间的作用。当小球处于平衡位置时，小球间的相互作用力为0；而当小球间的距离改变时，弹力把它们推向平衡位置。用这个模型来类比分子间的作用力的合力是非常形象的：当分子间的距离小于平衡位置的距离时，相互作用的合力为斥力；当分子间的距离大于平衡位置的距离时，分子间的作用力为引力。固体的分子就是在这种力的作用下在平衡位置附近做无规则振动。但是应该注意，这个模型只是用类比的方式近似反映了分子在平衡位置附近作用力的情景，它不能说明分子间的相互作用既有斥力又有引力，更不能表示分子间位置发生变化时的斥力和引力的复杂变化情况。

本节教材的意图：在客观实验的基础上，让学生认识分子间存在相互作用力，再借助合理的图象解释，进一步使学生认识分子间的相互作用力的基本规律。让学生看懂图象是培养学生阅读自然科学书籍能力的重要环节。带领学生看教科书图7.3-2时，让学生利用图中给出的信息，讨论 $F_{斥}$ 和 $F_{引}$ 是怎样随分子间距变化的，图中如何表示出 $F_{斥}$ 比 $F_{引}$ 变化得更快。通过充分讨论，学生可以明白 $F_{斥}$ 比 $F_{引}$ 减小得更快，是指当分子间距离变化相同时，分子间的斥力变化量大于引力的变化量，在一定范围内，斥力曲线上的各点切线的斜率比引力曲线上各点切线的斜率大。

在“思考与讨论”栏目中，分子间相互作用力的合力图线是让学生自己来完成的，一定要让学生自己动手去做并且说一说分子间何时表现为斥力，何时表现为引力。

需要说明的是，分子之间可以发生相互作用的距离很短，当分子之间的距离超过分子直径的10倍，即1 nm的数量级时，可认为分子之间的作用力为0，所以气体分子间的作用力可忽略不计。

(2) 分子动理论

教师要将统计规律渗透在分子动理论的教学过程中。统计规律是对大量的偶发事件整体起作用的规律。统计规律表现这些偶发事件整体的和必然的联系，而个别事件的特征和偶然联系已经不是研究的重点了。例如，气体分子在无序运动中不断发生频繁碰撞，每个分子的运动速率不断地发生变化。在某一特定时刻，某个特定分子究竟具有多大的速度完全是偶然的，不能预知。但对大量分子的整体，在一定条件下，实验和理论都证明它们的速率分布遵从一定的统计规律。

教学时，可使用伽尔顿板做实验。本实验的现象可以让学生体会，由小球运动是不规则的，来理解每个分子的运动都是不规则的、带有偶然性，但大量分子的运动有一定的规律。也可以通过生活中的一些事例，说明统计规律的普遍性。

3. 问题与练习

1. 内容分析

本题考查学生对分子间的引力、斥力及合力随分子间距离变化的理解。

解答与说明

本题可借助分子力随分子间距离的变化图线来描述。

由图 7-3 中的曲线可以看出, 两个分子间的距离由小于 r_0 , 逐渐增大, 直至远大于 r_0 , 这个过程可分成三个阶段。第一阶段, 由小于 r_0 逐渐增大到等于 r_0 的过程, 引力和斥力均减小, 斥力比引力减小得快。由于斥力大于引力, 斥力和引力的合力表现为斥力。第二阶段, 由 r_0 逐渐增大到合力中引力最大所对应的分子间距离的过程, 引力和斥力均减小, 斥力小于引力, 斥力和引力的合力表现为引力而且合力值逐渐增大。第三阶段, 由合力为引力最大值时两分子间的距离到 $10r_0$ 的过程, 斥力和引力均减小, 斥力仍比引力减小得快, 斥力小于引力, 斥力和引力的合力为引力但合力值逐渐减小。

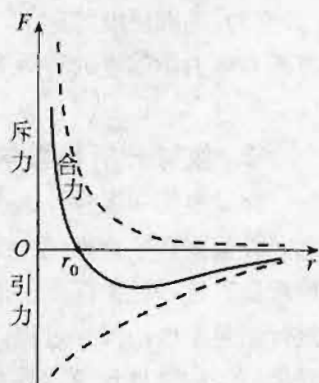


图 7-3

2. 内容分析

本题进一步考查学生对分子间的引力、斥力及合力随分子间距离变化的理解, 能应用分子力的知识联系实际, 解释生活现象。

解答与说明

当两个分子间的距离 r_0 逐渐增大时, 分子间相互作用力的合力即分子力会出现一个极大值, 而后, 随着分子间距离的逐渐增大, 分子力越来越小, 直至为 0。生活中这样的例子不少: 在拉断一根铅丝的过程中, 所用的力必须达到一定限度, 小于这个限度就不能把铅丝拉断。

3. 内容分析

本题进一步要求学生能认识分子间的相互作用力的基本规律, 培养学生发现问题和推理的能力。

解答与说明

组成物体的分子之间是有空隙的, 用力压物体, 物体内分子间的距离缩小, 表现出物体具有可压缩性。随着分子间距离的缩小, 分子间的斥力会迅速增大, 当压缩到一定程度时, 斥力与外力平衡, 进一步压缩就很困难了。

4. 内容分析

应用分子力的知识, 解释生活中的现象, 培养学生发现问题、分析现象的能力。

解答与说明

拉力大于玻璃板受到的重力。如果你观察一下玻璃板朝下的表面, 就会发现该面是湿的, 说明玻璃板离开水面时水层发生了断裂。为了使玻璃板离开水面, 除了克服板的重力, 还要克服分子间的引力, 因此拉力就大于玻璃板的重力了。

第 4 节 温度和温标

1. 教学目标

- (1) 知道什么是状态参量, 什么是平衡态。
- (2) 理解热平衡的概念及热平衡定律, 体会生活中的热平衡现象。了解热力学温度的应用。
- (3) 理解温度的意义。

(4) 知道常见温度计的构造, 会使用常见的温度计。

(5) 掌握温度的定义, 知道什么是温标、热力学温标, 以及热力学温度的表示。理解摄氏温度与热力学温度的转换关系。

2. 教材分析与教学建议

在“温度和温标”这节中, 教科书引入了系统、状态参量、平衡态、热平衡等一系列概念, 并根据热平衡来定义温度。这样定义温度, 使学生对温度这个物理量的理解比初中“冷热的程度”这一说法深刻了很多, 但又和初中的说法是一致的。初中物理学习中, 学生知道用温度计测量温度的操作过程, 而现在根据热平衡定律明确了这一操作过程的物理原理。对许多与温度有关的物理现象, 现在都可以用新的概念来重新认识。例如, 这一节中的“问题与练习题”的第1题, 如果用“平衡态”“热平衡”的概念来认识“测定金属块的比热容”的实验过程, 可以对实验过程的理解上升一个层次。

(1) 平衡态和非平衡态

平衡态和非平衡态的概念是本教科书新加的内容, 但是要求并不高, 学生只要知道就可以。比如: 把不同压强、不同温度的气体混在同一容器中, 如果容器与外界没有能量交换, 经过一段时间后, 容器内温度、压强就会变得相同, 系统达到平衡态。教学中应该注意三点: ①在外界影响下, 系统也可以处于一种宏观性质不随时间变化的状态, 但这不是平衡态。比如: 一根长铁丝, 一端插入 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的沸水中, 另一端放在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温源中, 经过足够长时间, 温度随铁丝有一定的分布, 而且不随时间变化, 这种状态不是平衡态, 只是一种稳定状态, 因为存在外界的影响, 当撤去外界影响, 系统各部分的状态参量就会变化。②热力学系统的平衡态是一种动态平衡, 组成系统的分子仍在不停地做无规则运动, 只是分子运动的平均效果不随时间变化, 表现为系统的宏观性质不随时间变化。而力学中的平衡是指物体的运动状态处于静止或匀速直线运动。③平衡态是一种理想情况, 因为任何系统完全不受外界影响是不可能的。系统处于平衡态时, 由于涨落, 仍可能发生偏离平衡状态的微小变化。

(2) 热平衡定律

热平衡定律又叫热力学第零定律, 是本节教学的重点。热力学第零定律给出了温度的宏观定义, 也为温度的测量提供了理论依据。此定律也是温度计测量物体温度的原理, 因为互为热平衡的物体具有相同的温度, 所以比较各物体时, 不需要将各个物体直接接触, 只须将作为标准物体的温度计分别与各个物体接触, 即可比较各物体温度的高低。

(3) 温度的概念

在初中物理中, 将温度意义为“表示物体冷热程度的物理量”, 这是对温度的一个通俗解释。这个定义带有主观性, 因为冷热是由人的感觉器官经比较得到的, 往往是不准确的。温度的严格定义及测量原理是建立在热平衡定律基础上的。

两个系统处于热平衡时, 它们具有一个“共同的热学性质”, 我们就把表征这一“共同的热学性质”的物理量定义为温度。这样定义温度的科学性, 在于它是建立在热平衡基础上的。热平衡定律表明, 两个物体相互处于热平衡时, 存在一个数值相等的态函数, 这个态函数就是温度。温度是标志一个物体与其他物体是否处于热平衡状态的物理量, 一切互为热平衡的物体都具有相同的数值。教学中, 教师应举出一些实例, 引导学生体会那个“共同的热学性质”指的是什么。例如: 在一个绝热系统中, 有一块烧烫的铁块, 还有一些较冷的沙土。使两者接触, 铁块会慢慢变冷, 沙土会慢慢变热, 后来它们变得一样“热”了, 就不再变了。这种“冷



热程度相同”就是它们的“共同的热学性质”。结合初中物理学习过的温度定义，可以进一步理解为什么把表征这一“共同的热学性质”的物理量定义为温度。

(4) 温度计与温标

实验室里常用温度计的原理是：一切互为热平衡的系统都具有相同的温度。温度计就是我们选择的标准物体，温度计与待测物体接触，使它们达到热平衡，标准物体所表示的就是待测物体的温度。温度计的热容量必须很小，以便它与待测物体接触并进行热交换时，几乎不改变待测物体的状态。

为了表示出物体温度的数值，对温度零点、分度方法所做的规定，就是温标。生活中常见的有摄氏温标、华氏温标等。不同的温标都包含三个要素：第一，选择某种具有测温属性的测温物质；第二，了解测温物质随温度变化的函数关系；第三，确定温度零点和分度的方法。1848年开尔文建立了热力学温标，它不依赖于测温物质的具体性质。由热力学温标定义的温度叫热力学温度，热力学温度的单位开尔文是国际单位制中七个基本单位之一。教科书图7.4-1介绍了伽利略的温度计的构造，感兴趣的同学可以自己动手做一做。教学中，可以用图示的玻璃壶，也可以用烧杯代替。烧瓶上用单孔橡皮塞插一根长玻璃管，先用双手捂住烧瓶，使其中的空气膨胀，然后倒插入烧杯的水中，水会被吸入玻璃管中。固定烧瓶，可以检测温度的变化。

3. 问题与练习

1. 内容分析

通过本题的训练，使学生能够进一步理解“平衡态”“热平衡”的概念。体会生活中的热平衡现象，感受平衡态与热平衡的区别。

解答与说明

在以上叙述中，有两个地方涉及“平衡态”。第一处是金属块放在沸水中，经过一段时间后，这时金属块和沸水组成的系统温度相同，处于平衡态，这一系统也达到了热平衡。第二处是将金属块放入质量已知、温度已知的水中，并用温度计测水温，当水温不再升高，这时金属块、水和温度计组成的系统温度相同，处于平衡态，这一系统也达到了热平衡。

2. 内容分析

通过本题的训练，使学生进一步掌握温度与温标的定义以及热力学温度的表示。理解摄氏温标和热力学温标的转换关系。

解答与说明

因为 $T = t + 273.15$ ，所以对应于 $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， $T = (273.15 + 27)\text{ K} = 300.15\text{ K} \approx 300\text{ K}$ 。

对应于 2.5 K ， $t = (2.5 - 273.15)\text{ }^{\circ}\text{C} = -270.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3. 内容分析

通过本题的训练，使学生进一步理解什么是温标，如何来确定一个温标。

解答与说明

$$X = kT$$

用摄氏温度表示为 $X = k(273.15 + t)$ 。

4. 内容分析

通过实际的温度计，体会温标所包含的三个要素：第一，选择某种具有测温属性的测温物质；第二，了解测温物质随温度变化的函数关系；第三，确定温度零点和分度的方法。本题需

要运用闭合电路欧姆定律,可训练学生综合运用物理知识解决问题的能力。

解答与说明

t_1 点标在电流较大的刻度上。因为在 t_1 点时电阻较小,由于电路的电动势和内电阻不变,根据闭合电路欧姆定律,电流较大。

第5节 内能

1. 教学目标

(1) 知道分子热运动的动能跟温度有关。知道温度是分子热运动平均动能的标志。渗透统计的方法。

(2) 知道什么是分子势能,改变分子间的距离必须克服分子力做功。知道分子势能跟物体体积有关。

(3) 知道什么是内能,知道物体的内能跟温度和体积有关。

(4) 能够区别内能和机械能。

2. 教材分析与教学建议

一种运动形式对应一种能量的形式。机械能与机械运动相对应,内能与大量分子的热运动相对应。每当我们了解了一种运动形式的特点后,都要从能量的角度去认识这种运动。我们已经了解了组成物体的分子在永不停息地做着无规则运动,本节就是从能量的角度来认识热运动的。这节课是概念性很强的课,又是不能从物理实验或物理现象直接得出结论的课。对于概念要知道引入的目的、确切含义、与其他概念的区别和联系。所以课上要讲分子热运动平均动能、内能、热量等概念的意义,并且要通过实际例题,让学生通过判断、推理来加深对这些概念的认识。

(1) 分子动能

物体是由分子组成的,组成物体的大量分子在不停息地做无规则热运动,所以每个分子都有分子动能。由于物体内分子是大量的,各个分子的速率大小不同,因此,每个分子的动能大小不同。由于热现象是大量分子无规则运动的结果,因此研究个别分子运动的动能是没有意义的。而研究大量分子热运动的动能,需要将所有分子热运动动能的平均值求出来,这个平均值叫做分子热运动的平均动能。学习布朗运动和扩散现象时,我们知道二者都与温度有关系,温度越高,布朗运动越剧烈,扩散也越快。依照分子动理论,这说明温度升高后分子无规则运动加剧。用分子热运动的平均动能可以说明,温度升高,分子热运动的平均动能增大。如果温度降低,说明分子热运动的平均动能减小。从分子动理论的观点来看,温度是大量分子无规则热运动的宏观表现,具有统计的意义。温度升高,分子的平均动能增大,但不是每一个分子的动能都增大,存在个别的分子动能反而减小的可能,个别分子或几十个、几百个分子热运动的动能大小与温度是没有关系的。温度只与物体内大量分子热运动的统计意义上的平均动能相对应。因此从分子动理论观点来看,温度是物体分子热运动的平均动能的标志。“标志”这一说法比较模糊,确切地说温度是分子平均平动动能的量度,但是在教科书中没有提到平均平动动能,所以不必深入解释。理想气体的分子平均动能大小只由温度决定,与物质的种类、质量、压强、体积等无关。也就是说,只要处于同一温度下,任何理想气体的分子做热运动的平均动能都相同。由于不同物质分子的质量不尽相同,因此,在同一温度下,不同物质分子运动的平

均速率大小也不相同。

(2) 分子势能

教学中,使学生理解分子势能随分子间距离变化的势能曲线,是教学上的一个难点。分子势能是由分子间相对位置决定的能量。由于分子间既存在着引力,又存在着斥力,所以,分子间距离变化时,既要考虑引力做功,又要考虑斥力做功。为简化起见,教科书中用分子间的合力做功来分析分子势能变化,并进一步采用弹簧小球模型来比喻,学生理解起来容易些。从图 7-4 中看到分子间距离在 r_0 处,分子势能最小。在教科书图 7.5-2 中,通过对弹簧小球模型的分析,我们知道:当弹簧为原长时,两小球处于平衡位置,

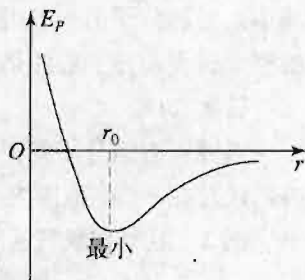


图 7-4

组成小球和弹簧的系统具有的弹性势能最小。综合教材中的分析,分子间距离以 r_0 为数值基准, r 不论减小或增大,分子势能都增大。所以说,分子在平衡位置处是分子势能最低点。

换一个角度,如果分子间距离无限远时,取分子势能为 0,应该如何分析呢? 分子间距离从无限远逐渐减小至 r_0 以前的过程,分子间的合力为引力,合力做正功,分子势能不断减小,其数值将比 0 还小,为负值。当分子间距离到达 r_0 以后再继续减小,分子间作用的合力为斥力,在分子间距离减小的过程中,合力做负功,分子势能增大。

“思考与讨论”是为了帮助学生理解分子势能随分子间距离变化的势能曲线,尽量让学生通过问题的台阶和学生已有的知识,自己独立思考完成。通过此项活动,培养学生对物理概念和规律的理解能力及综合宏观量来分析微观量的方法和能力。体会在分子间势能与分子间距离的关系上所渗透的归纳推理方法,在分子势能和弹性势能的类比上所渗透的类比分析法。

需要注意的是:①由于分子距离的变化,在宏观上表现为物体的体积变化,所以微观的分子势能变化对应于宏观的物体体积变化。但是,同样是物体体积增大,有时体现为分子势能增大(在 $r > r_0$ 范围内),有时体现为分子势能减小(在 $r < r_0$ 范围内)。②分子势能与物体体积有关,但不能简单理解成物体体积越大,分子势能就越大;体积越小,分子势能就越小。如 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水变成 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰后,体积变大,但分子势能减少。所以一般来说,物体体积变化了,其对应的分子势能也将发生变化。具体怎么变化,关键要看变化过程中分子力做正功还是负功。

(3) 内能

在教学过程中要注意内能与机械能的区别。①物体的机械运动对应着机械能,热运动对应着内能。内能和机械能是两种不同形式的能量。②内能是由物体内大量分子的热运动和分子间的相对位置决定的能量,是所有分子热运动动能和分子势能之总和,而不是分子定向移动的动能。它与物体的温度、体积等因素有关;而机械能是由物体做机械运动和物体形变决定的能量,它是对宏观物体整体来说的。③物体具有内能的同时又可以具有机械能。物体的机械能增加时,内能不一定增加,但机械能与内能之间可以相互转化。比如,一个静止在地面上的物体,如果以地面作为零势能点,那么这个物体的机械能为 0,但是这个物体里的分子却始终处在永不停息的热运动中,所以它的内能绝不 0。

(4) 参考例题

例 1 有甲、乙两个分子,甲分子固定不动,乙分子由无穷远处逐渐向甲靠近,直到不再靠近为止,在这整个过程中,分子势能的变化情况是 ()

- A. 不断增大
- B. 不断减小
- C. 先增大后减小
- D. 先减小后增大

解析：分子力做功与分子势能变化的关系和弹簧相似，即分子力做正功时分子势能减小，分子力做负功时分子势能增加。当乙分子由无穷远处向 r_0 移动时，分子力做正功，分子势能减小；当乙分子由 r_0 向甲分子继续靠近时，要克服分子斥力做功，分子势能增大。所以移动的整个过程，分子势能是先减小、后增大。也可知当分子间的距离为 r_0 时，分子势能最小。

答案：D。

点评：有随分子间距离的变化来判定分子势能变化的问题，首先要明确是在 $r > r_0$ 范围内，还是在 $r < r_0$ 范围内变化的。

例2 氢气和氧气的质量、温度都相同，在不计分子势能的情况下，下列说法正确的是（ ）

- A. 氧气的内能较大 B. 氢气的内能较大
C. 两者的内能相等 D. 氢气分子的平均速率较大

解析：氢气与氧气的温度相同，分子的平均动能相同，由于氧分子质量比氢分子质量大，所以氢分子的平均速率更大。又因为两种气体的总质量相等，氢分子质量比氧分子质量小，所以氢分子数大于氧分子数，氢气的分子动能总和大于氧气的分子动能总和，由于气体分子间距离比较大，不计分子势能，所以氢气的内能更大。

答案：BD。

点评：本题在不考虑分子间势能的条件下，物体的内能等于所有的分子动能之和，仅由温度决定。

3. 问题与练习

1. 内容分析

本题要求学生分析弹簧拉长放开、弹簧压缩释放的过程，知道弹力做功引起的弹性势能的变化。通过本题的训练，渗透类比的思维方法，进一步体会分子势能与分子力的关系。

解答与说明

①弹簧无压缩也无伸长时，即弹簧无形变时，系统的弹性势能最小。

②如果把弹簧拉长，放开时弹力做正功，小球的运动使系统的势能减小。如果把弹簧压缩，放开时弹力做正功，小球的运动使系统的势能也减小。因为不论弹簧被拉长释放还是压缩释放，弹簧都要恢复原长的状态（即势能最小的状态）。如果系统不受外力，处于“稳定”状态，则系统的势能可以任意指定，一般定为0。

③分子间的距离由大于 r_0 到等于 r_0 时，分子力做正功，分子势能减小；分子间的距离由等于 r_0 到小于 r_0 时，分子力做负功，分子势能增大。

2. 内容分析

本题要求学生分析两个同种电荷由无穷远处逐渐靠近，两个异种电荷由无穷远处逐渐靠近的过程，两电荷间的库仑力做功对电势能变化的影响，通过本题的训练，进一步体会分子势能与分子力做功的关系。

解答与说明

如果以无穷远处的电势能为0，当两个同种电荷由无穷远处逐渐靠近的过程中，电荷要克服两者间斥力做功，即电场力做负功，电势能逐渐增大，由于以无穷远处的电势能为0，因此，当两个同种电荷的距离为 r 时，电势能是正值，它们的运动趋势将使系统的势能变小。

如果以无穷远处的电势能为0，当两个异种电荷由无穷远处逐渐靠近的过程中，两电荷间



引力要做功,电势能逐渐变小,因此,当两个异种电荷的距离为 r 时,电势能是负值。由于异种电荷之间具有引力,它们具有相互靠近的趋势,它们运动的趋势将使系统的势能变小。

3. 内容分析

通过实例分析,要求学生能够区分内能与机械能。

解答与说明

物体的内能是物体内部所有分子具有的动能和势能的和,而不是宏观物体具有的动能和势能的和。物体的内能仅与分子热运动的快慢和分子间的相对位置有关。在这段时间内,飞机中乘客的势能、动能确实都增大了,但他的所有分子的动能和势能并不一定有变化。这是因为,首先,人的体温基本是恒定的,分子的平均动能基本不变,并不因飞机高速航行而改变;其次,乘客的体积无论在地面上还是在飞机中也基本相同。

三、教学设计案例

分子间的作用力

【教学设计说明】

分子之间的作用力,是微观领域的力,学生很难理解大量分子的相互作用是什么样子的,设计好教科书中的实验显得尤为重要。可让学生举出生活中的事例,体会分子间的作用力。知道分子间同时存在引力和斥力,知道分子间的引力和斥力都随分子间距离的变化而变化,而分子力是引力和斥力的合力。能正确理解分子间作用力与距离关系的曲线的物理意义,是本节的教学重点。分子间的作用力是复杂的,但在研究分子间相互作用时往往采用简单的模型来描述。因此教学中将分子间的作用用弹簧两端连接的两个小球间的相互作用力的模型来类比,可以形象地说明分子间作用力的合力。但该模型不能说明分子间相互作用既有斥力又有引力,更不能表示分子间距离发生变化时的斥力和引力的复杂变化情况。因此需要借助合理的图象解释,进一步使学生认识分子间的相互作用力的基本规律。本节课的设计:(1)提出问题(2)推理分析(3)比较讨论(4)归纳总结。通过不断激发学生思维,最终达到学生在认识问题的同时,提高发现问题和分析问题能力的目的。

【教学过程】

(一) 引入新课

通过前面的学习,我们知道:物体是由大量分子构成的,分子做永不停息的无规则运动。那么,为什么由大量分子构成的固体有一定的形状,液体还有一定的体积呢?

分子间相互作用力有什么特点?这是今天要解决的问题。

(二) 新课教学部分

1. 分子之间存在作用力

(已知的实验事实分析、推理得出分子之间存在着引力)

首先我们回顾一下:哪些实验说明了构成物质的分子在做永不停息的无规则运动?你觉得同时还说明了什么?为什么?你能设计一些实验说明这个问题吗?(然后展示石墨彩图)

(1) 演示实验:

①向长玻璃管内分别注入水和酒精,混合后总体积减小。

②U形管两臂内盛有一定量的水(不注满)。将右管上端用橡皮塞堵住,左管继续注入水,可以看到:右管水面上方的空气被压缩。

教师提问:这两个实验说明了什么问题?

布朗运动和扩散现象不但说明分子不停地做无规则运动,同时也说明分子间有空隙——如果分子之间没有空隙,分子便不能运动了。

在前面讨论分子的大小时,认为固体和液体分子是一个挨一个排列的,那只是估算分子直径的数量级而做的设想,实际上分子大小比估算值要小,中间存在着空隙,但数量级还是正确的。

(2) 推理:

一方面分子间有空隙,另一方面,固体、液体内大量分子能聚集在一起有固定的形状和固定的体积。这两方面的事实,使我们推理出分子之间可能存在着相互吸引力。

(3) 演示实验:

①用两个水龙头上的陶瓷片,让它们端面紧压在一起,合起来后,它们不分开,而且悬挂起来后,下面还可以吊起一定量的重物。

②实验事实说明,分子之间存在吸引力。

人们用力拉伸物体时,物体不易被拉断。

(4) 根据实验事实,推理得出分子之间可能还存在着斥力。

教师提问:由哪些实验事实,判断得出分子之间有斥力?

学生答。

综合学生的回答,总结出:固体和液体很难被压缩,即使是气体压缩到了一定程度后再压缩也是很困难的;用力压缩固体(或液体)时,物体内会产生反抗压缩的力。这些事实都是分子之间存在斥力的表现。

运用反证法推理,如果分子之间只存在着引力,分子之间又存在着空隙,那么物体内部分子都吸引到一起,造成所有物体都是很紧密的物质。但事实不是这样的,说明必然还有斥力存在着。然后让学生举出斥力存在的事例,比如,固体、液体很难被压缩,破碎的玻璃很难再粘合在一起等。

前面学习的内容是对初中物理已学过的分子动理论的加深和扩展。总结起来,分子动理论的内容是:物体是由大量分子组成的,分子做永不停息的无规则热运动,分子之间存在着引力和斥力。分子动理论是建立在大量实验事实基础上的,是解释、分析热现象的基本理论。

2. 分子间引力和斥力的大小跟分子间距离的关系

(1) 概念陈述

师:由于分子是由原子组成的,原子内部有带正电的原子核和带负电的电子,因此分子间的相互作用力十分复杂。研究表明,分子间同时存在着引力和斥力,宏观上表现为它们的合力,且都与分子间的距离有关。

(2) 比较讨论

师:请同学们思考:

结合教科书图7.3-2,分析图上的曲线,说一说分子间的斥力和引力与分子间距离 r 有怎样的关系?学生从教科书图7.3-2上找出关于分子力大小与分子间距离的信息。教师引导,找出图上的关键点 r_0 ,以及 r_0 点上、 r_0 点左、右位置上分子引力、斥力大小及其合力大小的变

化。用图 7-5 简要表达出来。

通过讨论由学生得出：

①当分子间距离 $r=r_0$ 时 (r_0 约为 10^{-10} m)，分子间的引力和斥力相互平衡，此时分子间的作用力为 0 (甲图)。

②当分子之间距离 $r<r_0$ 时，随着分子之间距离的减小，引力和斥力同时增大，但斥力增大得更快一些，故斥力大于引力，此时分子之间的作用力表现为斥力 (此时引力仍然存在，乙图)。

③当分子之间距离 r 稍大于 r_0 时，随着分子之间距离的增大，引力和斥力同时减小，但斥力减小得更快一些，故引力大于斥力，此时分子之间的作用力表现为引力 (此时斥力仍然存在，丙图)。

教师陈述：分子之间的引力和斥力总是同时存在的，且当分子之间距离变化时，引力和斥力同时发生变化，只是斥力的变化往往更快一些。

师：合力图应怎样求得？(要求学生就教科书的“思考与讨论”画出合力曲线图。)

师：合力随分子间距离怎样变化？

生：(讨论后)

- 分子间的斥力和引力随分子间距离 r 增大而减小，且斥力往往减小得更快。
- 合力图由斥力和引力二者合成而得。
- 合力有时表现为斥力，有时表现为引力。以 $r=r_0$ 为界， $r<r_0$ 为斥力， $r>r_0$ 为引力。

师：很好！我们把 r_0 称为平衡位置，此时， $F_{\text{引}} = F_{\text{斥}}$ ， $F_{\text{合}} = 0$ 这是一个重要的位置，以后讨论分子力 (即合力) 与 r 的关系都要参照 r 与 r_0 的关系，通常 r_0 的数量级为 10^{-10} m。

举出弹簧连接两个小球的作用力的模型。帮助学生理解分子间的作用有时表现为引力，有时表现为斥力。

(3) 归纳小结

师：如果把两个分子当成质点，请同学们画出当 $r=r_0$ ， $r<r_0$ ， $r>r_0$ 三种情况下它们之间的斥力、引力和合力的受力示意图。

生：(自主活动并完成图示)

师：(展示同学们的图示) 请同学们判断指出这几幅图是否正确。

说明：要求学生正确作出斥力、引力都随分子间距离减小，及合力与 r 的关系，以进一步掌握分子力的基本规律。

3. 组成物体的各个分子运动的无规律和大量分子的运动有规律

师：组成物体的单个分子运动有一定的规律吗？

学生通过扩散、布朗运动及分子动理论的“分子在永不停息地做无规则运动”得出组成物体的各个分子运动的无规律。

师：大量分子的运动有一定规律吗？

演示：伽尔顿板实验。

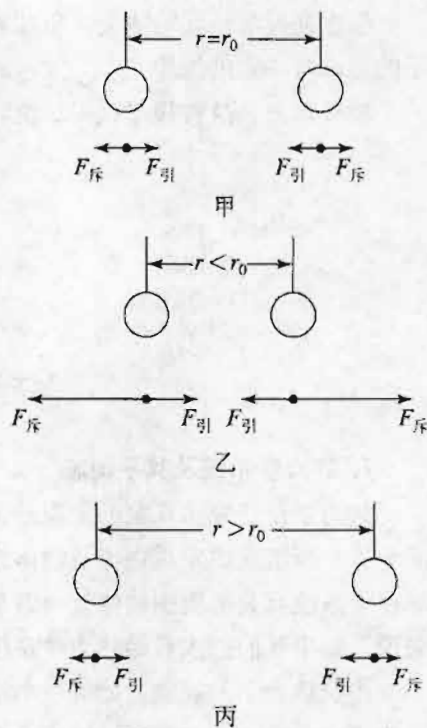


图 7-5

学生通过演示实验体会：单独看，各个分子的运动都是不规则的，带有偶然性，但大量分子的运动有一定的规律。

教师指出：这种规律就叫做统计规律。大量分子的集体行为受到统计规律的支配。

四、教学资源库

（一）概念、规律和背景资料

1. 热力学系统及其平衡态

热力学是研究热现象的宏观理论。它的研究对象主要是一些由大量的微观粒子（如分子、原子等）所组成的宏观物体及物体系，这些物体或物体系叫做热力学系统，或简称为系统；而那些与系统有关的周围物体就叫做系统的外界，或简称为外界。例如，对于盛有水的开口容器来说，如果我们把水看做热力学系统的话，那么，容器及周围大气就可以认做外界。

按照热力学的规定，如果一个系统与外界既无能量的交换，又无物质的交换，这样的系统就叫孤立系统。在上面所谈的例子中，如果容器是由某些特殊材料所构成，当它封闭时可使水既不与外界交换能量，也不与外界交换物质，那么，这时的水就可以看成是一个孤立系统。不过，在自然界中，像上面所说的那种能使水与外界绝对不发生物质及能量交换的容器是不存在的。换句话说，自然界中找不到绝对孤立的系统，只是在某些条件下，当系统与外界的相互作用（或交换物质，或交换能量）小到可以忽略时，我们才可近似地把系统看成是一个孤立系统。

如果系统与外界只有能量交换，而无物质交换，这样的系统就叫做封闭系统。密闭于玻璃器皿中的水就是一个封闭系统。

如果系统与外界既有能量交换，又有物质交换这样的系统就叫开放系统。对于置于空气中的一杯水来说（假设杯子是无盖的），水就是一个开放系统。此外，地球上的所有生物，都属于典型的开放系统。

在物理学中，常把系统中物理性质均匀且与其他部分之间存在分界面的部分叫做相，把系统中的每一种化学成分叫做组元。

如果系统只由一相物质组成，也就是说，系统各部分的物理性质是均匀的，那么，这样的系统就叫做单相系或均匀系，否则就叫做多相系或非均匀系。例如，由水蒸气组成的系统就是一个单相系，而由水和水蒸气所组成的系统则是一个两相系，其中水为一个相，水蒸气为另外一个相。

在热力学的研究对象中，经常碰到组成系统的物质只含一种化学成分的情况，这样的系统就叫做单元系，否则就叫做多元系，例如，由氧气或氢气单独构成的系统就是单元系，而由氧气和氢气的混合物所构成的系统则是二元系，其中氧气与氢气分别为一个组元。

一般地说，系统的状态是随着系统内外条件的变化而变化的。如图7-6所示，将两个冷热不同的物体A、B放在一起，并将它们孤立起来，经过一段时间后发现，它们的冷热达到了一致，此后，不管经过多长时

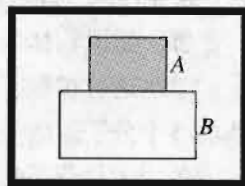


图 7-6



间, 它们的冷热均不再变化。象这种在没有外界影响(既不与外界交换物质, 也不与外界交换能量)下, 系统的宏观性质不随时间而改变的状态就叫做热力学平衡态, 或简称为平衡态; 反之就叫非平衡态。应该指出, 平衡态是热力学中一个十分重要的概念, 几乎所有的热力学函数都是在平衡态的情况下定义的。实验表明, 任何系统, 只要没有外界影响, 它总是可以达到平衡态的, 而这种平衡态一旦达到, 则系统的宏观性质便不会再改变, 除非它又受到了外界的影响。还应指出, 热力学平衡与通常所说的力学平衡是有区别的。热力学平衡是指系统中大量微观粒子的平均宏观效果不随时间而改变, 但从微观上看, 其中的每一个粒子却仍然处在一种无规则的热运动中。例如, 处于热力学平衡的气体, 虽然它的宏观性质(如冷热)不随时间而变动, 但它的每个分子都在不断地、无规则地运动着。因此, 热力学平衡是一种动态平衡。而我们知道, 力学平衡则是一种相对静止的平衡。其次, 系统达到热力学平衡后, 仍可能出现离开这种平衡的偏差(这种现象叫做涨落, 它是统计物理学所研究的课题); 而力学系统一旦达到了平衡, 便会保持这种状态, 而绝不出现离开这种状态的偏差。

热力学系统的平衡态是由状态参量来描述的。状态参量是一些用来表示系统固有特性的变量。依据系统特性的不同, 状态参量可以分为四大类别。第一类是几何参量, 它表示系统的几何特性, 如体积等; 第二类是力学参量, 用来描述系统的力学特性, 如压强等; 第三类是化学参量, 用来说明系统的化学特性, 如组元浓度等; 第四类是电磁参量, 用来反映系统的电磁特性, 如电场强度、磁场强度等。在具体的描述中, 究竟要用几种参量以及用哪几种参量, 主要以恰能完全地确定系统的状态而定。例如, 当我们所讨论的系统是一种化学纯的气体时, 就只需使用体积和压力参量。因为这两种参量一确定, 则气体的状态也就相应确定了。根据同样的道理, 对于混合气体之类的系统, 除了使用体积和压力参量外, 还必须添加一个反映混合气体各组元配比性质的化学参量——浓度; 而对于处在电场或磁场中的电介质或磁介质系统来说, 除了使用体积和压强参量外, 则还须添加一个电磁参量, 如电场强度、磁场强度等。

(选自《温度与熵》, 廖耀发 编, 高等教育出版社 1989 年 9 月第 1 版, 有改动)

2. 温度的概念

从前面的分析可以看出, 四类参量都不能直接地反映出物体的冷热程度, 因此, 我们还须引进一个新的物理量。这个新的物理量就是温度。

简单地说, 温度就是物体冷热程度的表征: 人们感觉越热, 就说温度越高; 感觉越冷, 就说温度越低。但是这样以人的主观感觉来表征温度是不科学的, 因为这不利于定量地来表示物体的温度, 而且有时还会导致一些错误的结论。例如, 冬天当我们用手分别去摸放在一起的木头和铁块时, 则会感到铁块比木头冷。按照上面的说法, 就应该是铁块的温度比木头的低。但事实上, 只要我们用仪器去测量一下就会发现, 它们的温度是一样的。因此, 我们有必要给温度下一个更加科学的定义。

温度的科学定义是建立在热力学第零定律的基础上的。在具体介绍热力学第零定律之前, 让我们先来简单地引进几个有关的概念。

如果一个器壁将 A 系统与 B 系统隔开, 只要器壁的位置不变, 则不管 A 系统的状态如何变化, 均不会影响 B 系统的状态, 那么, 这样的器壁就叫绝热壁, 否则就叫透热壁。一个制作精良的杜瓦瓶, 其器壁就可近似地认为是个绝热壁; 而任何金属薄片所做的器壁, 则可认为是个透热壁。显然, 如果物体间通过透热壁相互接触, 则必将会彼此影响对方的状态及其变化。这种状态的变化通常就叫做过程。在热力学中, 常把那种通过透热壁进行的相互接触叫热接触。如果我们将两个分别处在不同平衡态下的物体进行热接触, 实验表明, 它们各自的平衡

态均会发生改变。经过足够长的时间后，这两个物体便会达到一种新的、共同的平衡状态。这种在热接触的情况下所达到的平衡就叫做热平衡。

下面，让我们用一个小实验来说明什么是热力学第零定律。

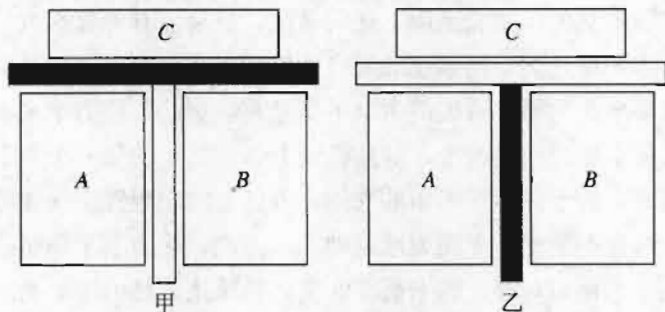


图 7-7

如图 7-7 甲所示，A、B、C 为三个平衡状态各异的物体，用一绝热壁将 A 与 B 隔开，并使它们同时与 C 进行热接触。这样，经过一定的时间后，A 与 B 便会同时与 C 达到热平衡。这时，如果我们迅速地将 A、B 间的绝热壁换成透热壁，将 A、B 与 C 之间的透热壁换成绝热壁，如图 7-7 乙所示，那么，我们会发现，A、B 的状态没有任何变化，换句话说，物体 A 与物体 B 也达到了热平衡。这种与第三个物体达到热平衡的两个物体之间也必定热平衡的事实就叫做热力学第零定律，它反映了热平衡的传递性。所以，有的教科书又称它为热平衡定律。这个定律告诉我们，一切互为热平衡的物体都有一种与该平衡态有关的共同的宏观性质，这种宏观性质，我们就定义它为温度。换句话说，温度就是决定诸物体是否能够达到热平衡的一种宏观属性。因此，当诸物体达到热平衡时，它们必定具有相同的温度。从上面的分析可以看出，温度的科学定义不仅包含了反映物体冷热程度的成分，而且还为人们定量地表示物体的温度提供了科学依据。

按照物理学的规定，一切物理量，只要它们是状态参量的单值函数，就都统称为态函数。态函数是热力学中经常使用的一种函数，它在热力学中占有重要的位置。热力学第零定律证明，温度又是一种反映物体达到平衡状态的态函数。

为了简便起见，我们假定所讨论的对象为 A、B、C 三个物体，并假定它们都是化学成分单一的气体。这样，根据前述，它们的平衡态便可用压强 p 和体积 V 来描述。一般地说，如果没有什么条件限制，则各物体的状态参量都是可以独立变化的；但是，如果物体之间达到了热平衡，那么其状态参量的变化就必定要受到相互热平衡条件的制约。用数学语言来说，就是当 A、C 两物体达到热平衡时，其状态参量之间会存在有如下的关系：

$$F_{AC}(p_A, V_A, p_C, V_C) = 0 \quad (1)$$

式中 p_A 、 p_C 和 V_A 、 V_C 分别代表 A、C 两物体的压强和体积。同理，当 B、C 两物体达到热平衡时也有

$$F_{BC}(p_B, V_B, p_C, V_C) = 0 \quad (2)$$

式中 p_B 、 V_B 代表的是 B 物体的压强和体积。由于 A、B 同时与 C 达到热平衡，所以，根据热力学第零定律可知，此时 A、B 两物体也必定会达到热平衡，因而也必定有

$$F_{AB}(p_A, V_A, p_B, V_B) = 0 \quad (3)$$

由式 (1) 及式 (2) 可以解得

$$p_C = \Phi_{AC}(p_A, V_A, V_C) = \Phi_{BC}(p_B, V_B, V_C) \quad (4)$$

显然, 式 (4) 也是 A, B 热平衡的一种表达形式, 从物理意义上讲, 它与式 (3) 应该是等价的。由于式 (3) 不含参量 V_C , 因此, 式 (4) 中的 V_C 必定可以消掉。这就要求 Φ_A 与 Φ_B 必须具有如下的形式:

$$\Phi_A = \varphi(V_C) [g(V_C) + f_A(p_A, V_A)]$$

$$\Phi_B = \varphi(V_C) [g(V_C) + f_B(p_B, V_B)]$$

以此代入 (4) 式, 得

$$f_A(p_A, V_A) = f_B(p_B, V_B) \quad (5)$$

利用 (2) 及 (3) 式, 同法可得

$$f_A(p_A, V_A) = f_C(p_C, V_C) \quad (6)$$

由式 (5) 及式 (6) 可得

$$f_A(p_A, V_A) = f_B(p_B, V_B) = f_C(p_C, V_C) \quad (7)$$

这就是说, 一切处在平衡态下的物体, 确实存在有一个反映这种平衡态属性的态函数 f , 当诸物体处于相互平衡时, 这些态函数的值彼此相等。这样的态函数, 喀喇氏就将它定义为温度, 并用 θ 来表示, 于是便有

$$\theta = f(p, V) \quad (8)$$

也就是说, 温度确实又可表示为物体达到平衡态时的一种态函数。它实际上也就是物体处在平衡态下的一种状态方程。

现在, 从微观的角度来看一看温度代表着什么。

我们在普通物理学中得到了公式

$$\bar{E} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} k T$$

式中 $\bar{E}$ 代表气体分子的平均平动动能, k 为玻耳兹曼常数, T 为气体温度。由此可见, 气体的温度与气体分子的平均平动动能成正比, 而气体分子平均平动动能的大小反映了分子无规则热运动的剧烈程度。所以, 从微观上看, 温度又是系统内部分子热运动剧烈程度的量度, 温度越高, 内部分子热运动就越剧烈。由于分子平均平动动能是对大量分子而言的, 具有统计性, 因此, 温度又是一个具有统计意义的物理量。换句话说, 温度是大量分子热运动的集体表现, 属于整个系统集体所固有, 因此, 说某一个分子具有多高的温度是没有意义的。

从上面的分析可以看出, 热力学第零定律不仅给出了温度的科学概念, 而且还指出了温度的测量方法, 那就是事先选择一个物体作标准 (这个被选作标准的物体就叫温度计), 然后将它与待测物体分别进行比较, 当它与待测物体达到热平衡时, 则标准物体所表示的温度就是待测物体的温度。不过, 热力学第零定律只是原则上给出了测量温度的方法, 而对于待测物体温度的精确数值表示却并未直接给出。在工农业生产、科学研究和实际生活中, 人们不仅需要知道温度的高低, 还需要知道温度的具体数值。这就好像我们要了解一个物体的长度一样, 不仅要知道它是长、是短, 而且还要知道它长多少、短多少, 也就是说, 要知道它的具体数值。这个工作是靠一个测量长度数值的标准尺子来完成的。与长度测量的情况一样, 我们要想具体地测量物体的温度数值, 需要有一把能够度量温度数值的“标准尺子”, 也就是温标。

(选自《温度与熵》, 廖耀发 编, 高等教育出版社 1989 年 9 月第 1 版, 有改动)

3. 温标

简单地讲, 温标就是温度的数值标度方法。由于人们对温度数值标度方法的不同, 因此, 世界上曾经产生过好几种不同的温标。下面先择要地介绍两种比较有影响的早期温标: 华氏温



标和摄氏温标。

华氏温标是华伦海特于 1714 年创立的。他选用水银作为测量温度的标准物体,利用水银的体积随温度而变化的性质来标度温度值。起初,华伦海特以冰和氯化铵的混合物所达到的热平衡温度为一固定点,规定它的温度为 0 度;以人的体温为另一固定点,规定它的温度为 100 度。后来,他又改用冰和水的混合物所达到的热平衡温度作为一个固定点(即冰点),用水的沸点(即汽点)作为另一固定点,并规定它们的温度分别为 32 度和 212 度,然后再在冰点和汽点之间均匀地划分出 180 个等份,其中的每一等份就叫一个华氏度。华氏度是华氏温标的单位,常用符号 $^{\circ}\text{F}$ 来表示。由华氏温标所标度的温度叫做华氏温度,以符号 t_{F} 示之。

摄氏温标是摄尔修斯于 1742 年创立的。当初,摄尔修斯也采用了冰点和汽点这样两个固定点来定标。但是,摄尔修斯却把冰点规定为 100 度,而把汽点规定为 0 度。这样一来,就与人们早已习惯了的“较热的物体对应着较高的温度”的心理状态不协调,因此,使用起来不大方便。后来,摄尔修斯的助手托墨把它们的数值倒了过来,即将冰点规定为 0 度,将汽点规定为 100 度,并在其间均匀地划分出 100 个等份,其中的每一个等份就是一个摄氏度。摄氏度是摄氏温标的单位,常用符号 $^{\circ}\text{C}$ 来表示。由摄氏温标定出的温度叫做摄氏温度,常用符号 t 来表示。

从摄氏温标与华氏温标的定义可知,它们之间存在有如下的关系:

$$t_{\text{F}} = \frac{9}{5}t + 32$$

$$1^{\circ}\text{C} = \frac{9}{5}^{\circ}\text{F}$$

纵观上述两种温标的情况可知,要建立温标,大致需要做四件事情。第一是选择适当的物质作为测量温度的标准物体,这种物质就叫做测温物质。通常用得最多的测温物质是水银、酒精、氢气、金属丝等。第二是选择测温物质随温度而变化的性质,通常多用体积、压力、电阻、电动势及辐射强度等。第三是规定测温物质的性质随温度而变化的关系,通常多假设它们为线性关系。第四是选取固定温度点作为计温的基准点,并对一定的冷热间隔实行分度。

早期温标在当时的历史条件下对发展工农业生产及科学研究起过不少积极作用。但也应该指出,早期温标的缺点主要表现在如下三个方面:第一是温标的定义太随便,例如,对于同一个冰点,华氏温标定义为 32°F ,而摄氏温标起初将它定义为 100°C ,后来又改为 0°C ;第二是温度测量范围小,一般在几百度之间;第三是温标标度不科学,不管利用什么测温物质的什么测温性质,都一律认为温度与测温性质呈线性关系而实行等间距分度。但是,实验指出,对于不同的测温物质,或者是对于同种测温物质的不同测温性质所建立的同种温标,除了固定点按规定相同外,其余温度的数值并不完全一致。

当我们规定了测温物质在某种情况下的测温性质与温度变化呈线性关系后,对其他测温物质就不再呈线性关系了。因此利用它们所测得的温度数值除了固定的冰点和汽点按规定相同外,其余各对应点的温度值均有差别,多时竟达 0.3°C 以上。

这种温度数值与所选取的测温物质密切相关的温标叫做经验温标。显然,华氏温标和摄氏温标都是经验温标。要想使各经验温标所测得的温度值尽量接近统一,就得用一种与测温物质的性质无关的标准温标去校验各经验温标。理论分析指出,建立在热力学第二定律基础上的热力学温标是最理想的标准温标,它是开尔文于 1884 年创立的,所以这种温标又叫做开尔文温标。

(选自《温度与熵》,廖耀发 编,高等教育出版社 1989 年 9 月第 1 版,有改动)

4. 热力学温标

按照卡诺定理,在相同温度 T_1 和 T_2 间运行的所有卡诺热机的效率都是相同的,不论工

质种类如何, 所以, 这些效率必然仅是这两个温度的函数。因此由热效率的定义我们可以写出

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \phi(T_1, T_2) \quad (1)$$

式中 ϕ 表示某一函数。为了确定函数 ϕ 的性质, 考虑三个卡诺热机 A、B 和 C, 它们分别运行在温度 (T_1, T_2) 、 (T_1, T_m) 和 (T_m, T_2) 之间, 如图 7-8 所示。对于这三个热机, 方程 (1) 变为

$$\text{对于热机 A, } \frac{Q_1}{Q_2} = \phi(T_1, T_2)$$

$$\text{对于热机 B, } \frac{Q_1}{Q_m} = \phi(T_1, T_m)$$

$$\text{对于热机 C, } \frac{Q_m}{Q_2} = \phi(T_m, T_2)$$

因为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{Q_1}{Q_m} \frac{Q_m}{Q_2}$$

所以

$$\phi(T_1, T_2) = \phi(T_1, T_m) \times \phi(T_m, T_2)$$

因为 T_1 、 T_m 和 T_2 是独立的, 所以仅当函数形如

$$\phi(T_1, T_2) = \frac{f(T_1)}{f(T_2)} \quad (2)$$

时, 上边的方程才能满足 (老师们可以自己证明)。式中 f 表示另一种函数, 从而

$$\frac{f(T_1)}{f(T_2)} = \frac{f(T_1)}{f(T_m)} \times \frac{f(T_m)}{f(T_2)}$$

将方程 (1) 和 (2) 合并, 我们得到

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{f(T_1)}{f(T_2)} \quad (3)$$

$f(T)$ 的数学形式完全是任意的, 可以作无限多的选择。

显然, 最简单的选择是令 $f(T) = T$, 因此方程 (3) 变为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (4)$$

方程 (4) 是由开尔文为了确定温标而提出的, 这种温标叫做热力学温标或绝对温标。它是根据传入或传出卡诺热机的热量建立的, 并且与测温物质的性质无关。开氏温标是这样建立的: 指定水的三相点温度数值为 273.16, 因此可以写出

$$T = 273.16 \frac{Q}{Q_{TP}} \quad (5)$$

式中 Q 和 Q_{TP} 分别表示两个热源的换热量, 这两个热源的开氏温度分别为 T 和水的三相点温度。当 $Q=0$ 时, 方程 (5) 引进绝对零度的概念, 即 $T=0$ 的概念, 这是一个在物理上不能实现的条件, 尽管它作为极限情况可以被趋近。

(选自《热力学原理》, [美] 谢锐生 著, 人民教育出版社 1980 年 12 月第 1 版, 有改动)

5. 理想气体温标

热力学温标是一种理想温标, 实际中无法直接实现, 只能通过理想气体温标来无限趋近它。

理想气体温标简称气体温标, 它所使用的测温物质是理想气体, 因此, 它也是一种经验温标。不过, 与其他经验温标不同, 理想气体温标利用的是理想气体的共同性质, 而其他经验温

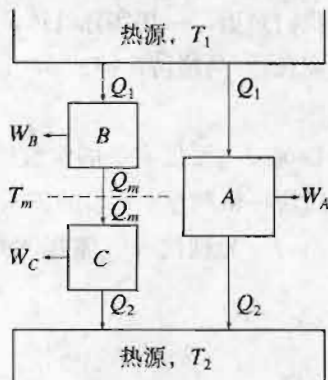


图 7-8 利用卡诺热机建立热力学温标

标利用的则是个别物质的个别性质。所以，理想气体温标要比其他的经验温标优越得多。

我们知道，一切实际气体只要压强不太高、温度不太低时都可看做是理想气体，它们共同遵守玻意耳-马略特定律

$$pV=C \quad (1)$$

式中 C 为一与温度有关的常数。如果保持气体的体积不变，并且用 θ 来表示上式中的温度，则从上式便可得到 $p=f(\theta)$ 的关系式。若再假设 p 与 θ 呈线性关系，并采用摄氏温标的分度法，用 $p_{\text{冰}}$ 、 $p_{\text{汽}}$ 分别代表气体在冰点和汽点的压强，用 $\theta_{\text{冰}}$ 、 $\theta_{\text{汽}}$ 分别代表冰点和汽点的温度值，则有

$$\frac{p-p_{\text{冰}}}{\theta-\theta_{\text{冰}}}=\frac{p_{\text{汽}}-p_{\text{冰}}}{\theta_{\text{汽}}-\theta_{\text{冰}}}=\frac{p_{\text{汽}}-p_{\text{冰}}}{100}$$

即

$$\frac{1}{\theta}\left(\frac{p}{p_{\text{冰}}}-1\right)=\left(\frac{p_{\text{汽}}}{p_{\text{冰}}}-1\right)/100$$

令 $\beta=\left(\frac{p_{\text{汽}}}{p_{\text{冰}}}-1\right)/100$ ，于是上式又可写成

$$\frac{p_{\text{汽}}}{p_{\text{冰}}}=1+\beta\theta$$

实验测得，理想气体在压强较低的情况下 $\beta=\frac{1}{273.15}^{\circ}\text{C}^{-1}=0.003\,661\,0\,^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。以此代入上式，得

$$p=p_{\text{冰}}\frac{273.15+\theta}{273.15}$$

这里，如果我们引入一种新的温标 T ，并令其零点取在 $-273.15\,^{\circ}\text{C}$ 的位置上，那么，用这种温标所表示的冰点温度就是 $273.15\,\text{K}$ ，即 $T_{\text{冰}}=T_0=273.15\,\text{K}$ 。 K 是一种度量温度的基本单位，其大小与摄氏度相同，符号为 K 。像这种零点取在 $-273.15\,^{\circ}\text{C}$ 上的温标，通常又叫做绝对温标。采用这样的新温标后，上式便可简化成

$$\frac{p}{p_{\text{冰}}}=\frac{T}{T_0}$$

改用 p_0 代替 $p_{\text{冰}}$ 后，上式又可写成

$$T=\frac{T_0}{p_0}p \quad (2)$$

这就是定容气体温标的计温关系式，它所标定的温度通常就叫做气体温度。(2) 式告诉我们，当气体的体积不变时，其温度与压强成正比。

当气体的压强固定时，我们也可用推导式 (2) 的类似方法得到关系式

$$T=\frac{T_0}{V_0}V \quad (3)$$

这就是定压气体温标的计温关系式，式中 V_0 代表系统处在冰点时的体积， T_0 代表系统处在冰点时的温度。不过，这种测温关系式在实际中用得不多。

从上面的分析可以看出，早期的气体温标也是用两个固定点来定标的。由于冰点按规定必须是在一个标准大气压下纯冰和溶有空气且达到饱和的水之间的平衡温度，条件极难满足，因而不易精确测定。于是在 1954 年的国际计量大会上决定将它废除，并摒弃采用两个固定点的定标法而只用一个固定点来定标。这个固定点就是水的三相点，它是指纯冰、纯水和冰蒸气三相平衡共存的温度，其值规定为 $273.16\,\text{K}$ 。如果我们用 T_3 及 p_3 来表示水在三相点状态时的

温度及压力,于是便可得到

$$T = \frac{T_3}{p_3} p \quad (4)$$

这就是采用三相点定标后的定容气体温标的测温关系式。由于在三相点状态时的温度、压强都是常数,所以当气体定容时,它的温度与压强成正比。因此,我们便可通过测定压强的大小来标定气体温度的高低。

(选自《温度与熵》,廖耀发 编,高等教育出版社 1989 年 9 月第 1 版,有改动)

(二) 联系生活、科技和社会资料

1. 纳米科学与技术

20 世纪末,诞生了一门崭新的学科——纳米科技,它的主要任务是研究纳米材料的性质和应用。其新颖独特的研究思路和首批研究成果的问世,在科技界引起巨大反响,受到广泛关注。专家预言,纳米科技将彻底改变目前的产业结构,成为未来信息时代的核心。许多国家已纷纷制定相关战略和计划,投入巨资抢占纳米技术战略高地。美国、日本、德国等国家均已把纳米技术列入国家科技战略开发重点。我国也将其列入国家“攀登计划”“863 计划”和“火炬计划”。

纳米技术包含下列四个主要方面。

第一方面是纳米材料(或称超微粒子),包括材料的制备和表征。在纳米尺度下,物质中电子的波动性以及原子的相互作用将受到尺寸大小的影响。如能得到纳米尺度的结构,就可能在不改变物质化学成分的情况下控制材料的基本性质,如熔点、磁性、电容甚至颜色等。纳米材料具有异乎寻常的性能。用超微粒子烧成的陶瓷,硬度可以更高,但不脆裂;无机超微粒子加入橡胶中后,将粘在聚合物分子的端点上,由此做成的轮胎将大大减少磨损、延长寿命。

第二方面是纳米动力学(nanodynamics),主要是微机械和微电机,或总称为微型电动机械系统(MEMS)。这主要用于有传动机械的微型传感器和执行器、光纤通信系统、特种电子设备、医疗和诊断仪器等。MEMS 用的是一种类似于集成电路设计和制造的新工艺。特点是部件很小,刻蚀的深度往往要求数百微米,而宽度误差只允许万分之一。这种工艺还可用于制作转子直径为 $400\ \mu\text{m}$ 的三相电动机,用空气作轴承,转速可达 $10^6\ \text{rad/min} \sim 10^7\ \text{rad/min}$,调向时间小于 $1\ \mu\text{s}$,用于超快速离心机或陀螺仪等。这方面的研究还要相应地检测准原子尺度的微变形和微摩擦等。虽然此研究目前尚未真正进入纳米尺度,但有很大的潜在科学价值和经济价值。

第三方面是纳米生物学和纳米药理学。有了纳米技术,可以研究生物分子之间的相互作用,研究磷脂、脂肪酸双层平面生物膜和 DNA 的精细结构等,还可用自组装方法在细胞内放入零件或组件构成新的组织或器官。新的药物,即使是微米粒子的细粉,也大约有半数不溶于水,但如粒子为纳米尺度,则可溶于水。

第四方面是纳米电子学(nanoelectronics),包括基于量子效应的纳米电子器件、纳米电子材料的表征以及原子操纵和原子组装等。

当前电子技术的发展趋势要求器件和系统更小、更快、更冷。“更小”是指器件和电路的尺寸更小,对集成电路来说就是集成度更高;“更快”是指响应速度更快;“更冷”是指单个器件的功耗要更小,否则很多器件堆积在一起时,既耗能源,又造成温升。但是,“更小”并非

没有限度。以硅集成电路而言,线宽如果小于 $0.1\ \mu\text{m}$ ($100\ \text{nm}$),则量子效应就要显现出来,常用的电路设计方法就不再适用,常用技术也可能会很快达到它们的极限,因此需要迅速更新。这就形成了一个被称为“纳米电子器件”的新领域。

所有的纳米电子器件都将具有更小、更快、更冷的特点。可能的早期突破,是在超高密度存储器、超灵敏传感器、医疗诊断用元件、数码信息的高速输入和输出以及平板显示器用的微小电子源阵列等方面。中期目标则为 10^{12} 位存储器及 10^{12} 次/秒的运算器、共振隧道器件以及实时语音识别系统、自主决策系统、虚拟实感训练系统等。

解决纳米电子器件的思路目前可分为两种类型。一种是制备最小线宽为 $50\ \text{nm}$ 左右的集成电路,大体上仍沿用目前的基本设计制造和测试的思想,但完全不能使用目前常用的光刻、掺杂等集成电路工艺。在材料方面也要进行新的准备,除了需要半导体作为功能材料外,还需要纳米尺寸的导体和介质,细分之要有高阻、低阻,高介电常数、低介电常数,高反射率、低反射率等区别。它们大多也不能用常规的方法制备。

另一种是与经典集成电路完全不同的、利用量子效应构成的全新的量子结构系统(简称“量子器件”)。目前已在试验各种可能的器件模式,如量子点(零维)、量子线(一维)、量子阱(二维)、单电子晶体管、单原子开关等。所用的技术除在线实时控制的分子束外延(MBE)外,还包括纳米级的刻蚀技术、掺杂元素的定位技术以及寻找更高结构分辨率的成像和分析技术。以上两种方案,都需要用扫描隧道显微镜作为观察和加工的工具。

纳米技术不纯粹是材料科学的问题,获益的也不仅仅局限在材料科学方面。下列各个领域将因纳米技术的发展而得益。

电子和通信 如用纳米薄层和纳米点记录的全媒体存储器、平板显示器和其他全频道通信工程和计算机用的器件等。对此,美国军方提出的初期指标是:在室温下,比现有的器件运算速度快 $10\sim 100$ 倍,信息存储密度大 $5\sim 100$ 倍,能耗小 50 倍。将来则要求存储密度和运算速度都要比现在大或快 $3\sim 6$ 个数量级,且廉价而节能。

纳米医疗 如新的纳米结构药物、基因和药物的传送系统(可到达身体的指定部位)、有生物相容性的器官和血液代用品、家用早期病情自诊系统、生物传感器、骨头和组织的自生长材料。

化学和材料 如催化剂(提高化工厂燃烧效率,减少汽车的污染)、超硬但不脆裂的钻头及切削工具、用于真空封接和润滑的智能磁性液体、化学或生物载体的探测器和解毒剂等。

能源 这方面的应用有新型电池、使用人工光合作用的清洁能源、量子阱式太阳能电池、氢燃料的安全贮存,等等。

制造工业 主要用于微细加工(基于新的显微镜和测量仪器)、新的操纵原子的工具和方法、掺有纳米粒子的块状材料和使用纳米粒子的化学、机械磨削等。

飞机和汽车 如由纳米粒子加强的轻质材料、由纳米粒子加强的轮胎(耐磨且可直接再生)、无须洗涤的外壳油漆、廉价的不燃塑料以及有自修补功能的涂层和纤维等。

航天 如轻型航天器、经济的能量发生器和控制器以及微型机器人等方面的应用。

环境保护 主要用于工业废料污水处理、制备廉价的海水除盐膜等。特别要指出,“从原子或分子做起的”由小变大(bottom-up)的工艺(与现有从大块材料开始的制造工艺不同)因无切削、无化学处理,可减少材料消耗和环境污染。

2. 原子的观测与操纵

纳米(nanometer)是长度单位,就是 $10^{-9}\ \text{m}$,用符号 nm 表示。纳米科技的研究对象结



构尺寸在 $1\text{ nm}\sim 100\text{ nm}$ 范围内, 这远小于常规材料中基本颗粒的直径。要在这个尺度上进行观测, 就要用到扫描隧道显微镜。

扫描隧道显微镜 (Scanning Tunneling Microscope, STM, 图 7-10) 是 20 世纪 80 年代初发展起来的一种显微镜, 其分辨本领是目前各种显微镜中最高的: 横向分辨本领为 $0.1\text{ nm}\sim 0.2\text{ nm}$, 深度分辨本领为 0.01 nm 。它的高分辨本领可以清晰地展示直径大约为 10^{-10} m 尺度的单个原子 (或分子), 使得人类实现了看到微小的原子的理想。

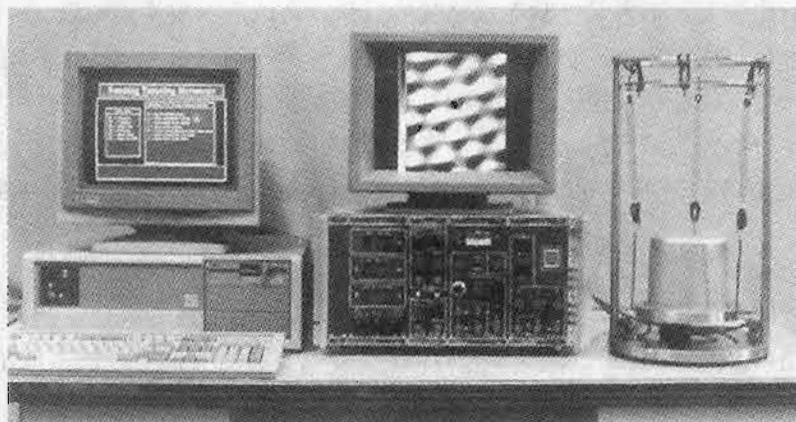


图 7-9 扫描隧道显微镜外貌

扫描隧道显微镜的工作原理与通常光学显微放大的原理截然不同。它是应用量子力学中的“隧道效应”来观察物质的原子 (分子) 的。

我们知道, 当两个导体之间有一个绝缘体时, 如果在这两个导体之间加一定的电压, 一般是不会形成电流的。这是因为导体中的自由电子不能穿过绝缘体运动到另一个导体上, 也就是在两个导体之间存在势垒。经典物理学认为, 只有电压增大到能把绝缘层击穿, 也就是势垒被击穿时, 电子才会通过绝缘体。

量子力学认为, 微观粒子在空间的运动是按一定的几率密度分布的。根据量子力学的计算知道, 如果势垒厚度非常小, 小到只有几个 10^{-10} m 时, 电子可能穿过势垒, 即从势垒的这边到达势垒的另一边, 形成电流。也就是说, 在势垒相当窄的情况下, 电子可能在势垒上打通一条道路, 穿过势垒到达势垒的另一侧, 形成电流。在势垒相当窄的情况下电子能穿过势垒的现象, 在量子力学中叫做隧道效应, 这样形成的电流叫做隧道电流。隧道电流的强度对探测针尖与样品表面之间的距离 z 非常敏感, 这个距离每减小 $1\times 10^{-10}\text{ m}$, 隧道电流就增加一个数量级。也就是说, 当探测针尖与样品靠得很近时, 在探测针尖与被测样品之间的绝缘层中能形成隧道电流。而且绝缘层越薄势垒越小, 形成隧道电流的机会越多; 否则形成隧道电流的机会少。用扫描隧道显微镜探测时得到的隧道电流的大小, 可以直接反映样品表面的凹凸情况, 所以记录了隧道电流的大小, 也就记录了样品表面的情况。

(三) 实验参考资料

1. 用油膜法估测分子的大小

教科书中举例说明油酸酒精溶液配制浓度, 取 1 mL 油酸加入到无水酒精中得到 500 mL 油酸酒精溶液, 配制成 $1:500$ 的溶液。但是实验时所用的溶液只有一滴或两滴, 实际配制的

溶液数量可以少一些。

实验注意事项：

(1) 用5~10 mL的注射器取50 mL的无水酒精置于烧杯中，用0.2 mL的有刻度的滴管（其最小刻度为0.01 mL），吸出0.1 mL的酒精，烧杯中留有49.9 mL酒精。再用0.2 mL的滴管吸取油酸，将0.1 mL油酸滴入49.9 mL的酒精中，配制成1:500的油酸酒精溶液。油酸酒精溶液的浓度配制准确是实验成功的关键。

滴管的胶头比较大，不容易控制吸取油酸的数量，可以取下胶头用一段3~4 cm长的乳胶管（乳胶管的直径与滴管相当）套在滴管上，将乳胶管另一端弯过来用线捆紧不漏气。乳胶管的弹性好，管内空气体积小，便于控制吸取油酸的数量。

(2) 由于注射器针头不可能完全一致，各组所取一滴溶液体积不一定相同。以本组实验为准。成品油膜实验器附带的5 mL注射器及针头，1 mL大约可滴240滴。1滴溶液的体积 $V = \frac{1 \text{ mL}}{1 \text{ cm}^3 \text{ 溶液的滴数}}$ 。1滴油酸酒精溶液中含有的油酸体积 $V' = V \times \text{溶液浓度}$ 。

油酸酒精溶液要现用现配，用注射器计数1 cm³油酸酒精溶液的滴数，滴到烧杯中的油酸酒精溶液要倒掉，不要倒回溶液瓶中，因为计数过程中，酒精要挥发，使溶液浓度发生变化。注射器中剩余的溶液可以放回溶液瓶中。保存油酸酒精溶液的瓶子用研口瓶塞，防止酒精挥发影响溶液浓度。

(3) 在水面上撒痱子粉的方法：痱子粉装在纱布口袋内，用手指轻轻敲击口袋，同时不断移动位置，水面上包括水面边缘都要均匀撒到。这样当油酸溶液滴到水面时，油膜容易形成一个整体，不会裂成条状。如果痱子粉层的厚度较大，形成的油膜容易裂口。当油膜裂口和水盘边接上时，一部分油酸会吸附到水盘上，使油膜面积的计算发生误差，导致面积测量值不正确。这时要倒掉水盘中的水，并用洗衣粉将水盘中的油酸清洗干净，重新实验。如果不清洗水盘，则水盘边残留的油酸会影响再次测量，增加误差。

(4) 油酸溶液要滴在水面中央，滴完一滴过一段时间油膜面积不再增大。如果油膜面积S太小，可以再滴一滴。因为油膜面积过小，会增加面积测量误差。油膜面积 $S > 120 \text{ cm}^2$ ，根据1 mL油酸溶液的滴数，视情况大约滴1~2滴。

(5) 描绘油膜边界时，眼睛的视线、笔尖与油膜边界要在同一竖直线上，以减小油膜面积的测量误差。在描绘油膜边界时注意不要振动或移动水盘，以免油膜形状发生变化，影响面积的测量。

$$(6) \text{ 计算公式: 油酸分子直径 } D = \frac{V'}{S} = \frac{\frac{1}{1 \text{ cm}^3 \text{ 溶液的滴数}} \times \text{溶液浓度}}{S}$$

油酸分子直径数量级为 10^{-9} m ，公认值 $D = 1.12 \times 10^{-9} \text{ m}$ ，实测值在 $0.8 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-9} \text{ m}$ 之间可以通过。

(7) 成品实验仪器的玻璃板上画有边长为 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 的方格。如果没有成品仪器，可以在一张白纸上画 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 的方格，在玻璃板上描绘出油膜边界线后，将玻璃板放到方格纸上再数出油膜的格数，计算油膜面积。

2. 布朗运动

悬浊液的配制：教科书中用“墨汁”稀释，一般用于毛笔书写的墨汁中所含的炭颗粒比较大而且颗粒大小不均匀。可以用碳素墨水（不是绘图笔用的黑墨水，这种黑墨水是溶液），其中的炭颗粒较小且大小比较均匀。用30~40倍的水稀释，放在试管中静置一段时间，取中

间部分的悬浊液做实验。也可以用毛笔蘸一点水彩黄颜料用水稀释,使水稍呈浑浊状即可,不宜太浓。

放置悬浊液的玻璃片的制备:在玻璃片中间涂一层约1 mm厚的热石蜡,厚度要均匀。冷却后用小刀在石蜡中央挖出一个直径约5 mm的圆形槽即可。也可用橡皮泥围成一个环形槽,在槽中装满悬浊液,盖上盖玻片,里面不要有气泡。

显微镜用600或675倍效果较好,适当调整照射光的亮度。

用来观察布朗运动的载玻片中的悬浊液,时间长了其中的固体悬浮颗粒会沉积到玻璃片的下面,使观察效果变差。实验时玻璃片上的悬浊液现装现用。

3. 分子间的相互作用力

演示1:取内径约1 cm、长0.8~1 m的玻璃管,下端用胶塞塞紧。先把染成红色的水灌入玻璃管中,将玻璃管倾斜而后将酒精沿管壁缓慢注入,玻璃管的外壁用橡皮筋在酒精的上界面处做个记号,将玻璃管颠倒使水和酒精相互混合之后会发现,混合后的体积明显减小。混合前酒精与水的体积比为52:48(大致相等),实验效果较好。

演示2:教科书图7.3-1压紧的铅块会“粘”在一起的演示实验用的是实心铅柱,可以完成实验。但是实心铅柱的两个端面不容易削得很平整,用刨刀刨时在铅柱的中心处可能会出现微小突起的铅粒,使两个铅柱不容易压紧。

现在介绍一种专用仪器,它由两个空心铅柱和压紧用的支架组成(图7-10)。



图 7-10



图 7-11

实验时,铅柱的端面用刨刀刨平,避免了中心突起的问题。刨平端面后将两个铅柱侧面的红线对齐,如图7-11所示。然后将两个铅柱放到支架上,用螺旋压紧(图7-12)。再按教科书中的图7.3-1所示的装置实验。一般情况可以挂几千克的重物。

实验时要注意安全。铅柱挂上重物后,与桌面的距离要尽可能小;桌面上要有泡沫塑料或沙盘,防止重物落在桌上;下面的铅柱要有保险绳挂在支架上,防止铅柱落下,碰伤铅柱的端面。



图 7-12

五、补充习题

A 组

1. 已知铜的摩尔质量为 M (kg/mol), 铜的密度为 ρ (kg/m³), 阿伏加德罗常数为 N_A (mol⁻¹)。

1 kg 铜所含的原子数为_____

1 m³ 铜所含的原子数为_____

1 个铜原子的质量为_____

1 个铜原子所占的体积为_____

2. 只要知道下列哪一组物理量, 就可以估算出气体分子间的平均距离 ()
- A. 阿伏加德罗常数, 该气体的摩尔质量和质量
 - B. 阿伏加德罗常数, 该气体的摩尔质量和密度
 - C. 阿伏加德罗常数, 该气体的质量和体积
 - D. 该气体的密度、体积和摩尔质量
3. 关于分子间的作用力, 下列说法正确的是 ()
- A. 当两个分子相互吸引时, 分子间没有斥力
 - B. 当两个分子间距离大于分子直径的 10 倍以上时, 分子间的相互作用力就小到可以忽略
 - C. 分子间距离越小, 引力越大, 斥力越小
 - D. 两个分子从相距很远处到逐渐靠近的过程中, 分子间的相互作用力逐渐变大
4. 固体和液体都很难被压缩的本质原因是 ()
- A. 分子都做无规则运动
 - B. 分子间间隙较小
 - C. 分子本身不能被压缩
 - D. 分子间斥力随距离减小而剧增
5. 关于分子势能, 下列说法中正确的是 (设两分子相距无穷远时的分子势能为 0) ()
- A. 体积增大, 分子势能增大, 体积缩小, 分子势能减小
 - B. 当分子间距离 $r=r_0$ 时, 分子间合力为 0, 所以分子势能为 0
 - C. 当分子间作用力的合力为引力时, 体积越大, 分子势能越大
 - D. 当分子间作用力的合力为斥力时, 体积越大, 分子势能越大
6. 关于内能, 下列说法正确的是 ()
- A. 温度高的物体具有内能, 温度低的物体没有内能
 - B. 温度高的物体具有的内能一定比温度低的物体具有的内能多
 - C. $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的物体内能为 0
 - D. 同一个物体的温度降低时, 其内能减小
7. 下列说法正确的是 ()
- A. 平均速度大的物体的温度高
 - B. $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的氮气分子和 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的氩气分子的平均动能相同
 - C. 物体的体积变大, 其内能一定变大
 - D. 温度升高, 所有的分子的动能都变大
8. 下列说法正确的是 ()
- A. 水的体积很难被压缩, 这是分子间存在斥力的宏观表现
 - B. 气体总是很容易充满容器, 这是分子间存在斥力的宏观表现
 - C. 两个相同的半球壳吻合接触, 中间抽成真空, 用力很难拉开, 这是分子间存在引力的宏观表现
 - D. 用力拉铁棒的两端, 铁棒没有断, 这是分子间存在引力的宏观表现
9. 分子之间既有引力也有斥力, 它们与分子间距离 (设合力为 0 时分子间的距离为 r_0) 的关系有以下说法, 其中正确的是 ()
- A. 随着分子间距离的减小, 分子间的引力减小, 分子间的斥力增加, 合力表现为斥力
 - B. 随着分子间距离的增大, 分子间的引力和斥力都减小, 合力有时表现为斥力, 有时表

现为引力

- C. 分子间的距离小于 r_0 时, 距离越小, 分子之间的势能越大
D. 分子间的距离大于 r_0 时, 距离越小, 分子之间的势能越大

10. 关于热力学温度的下列说法中, 正确的是 ()

- A. 热力学温度与摄氏温度的每一度的大小是相同的
B. 热力学温度的 0 度等于 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$
C. 热力学温度的 0 度是不可能达到的
D. 气体温度趋近于绝对零度时, 其体积趋近于 0

11. 在标准状态下, 有体积为 V 的水和体积为 V 的可认为是理想气体的水蒸气, 已知水的密度为 ρ , 阿伏加德罗常数为 N_A , 水的摩尔质量为 M , 在标准状态下水蒸气的摩尔体积为 V_m , 求:

- (1) 它们中各有多少个水分子?
(2) 它们中相邻两个水分子之间的平均距离是多大?

12. 铜的摩尔质量为 $6.4 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$, 密度为 $8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 阿伏加德罗常数为 $6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, 若每个铜原子提供一个自由电子, 求 1 m^3 铜导体中有多少个自由电子? (保留两位有效数字)

B 组

13. 如图 7-13 所示, 甲分子固定在坐标原点 O 上, 乙分子位于 r 轴上距原点为 r_3 的位置。虚线分别表示分子间斥力 $F_{\text{斥}}$ 和引力 $F_{\text{引}}$ 的变化情况, 实线表示分子间的斥力与引力的合力 F 的变化情况。若把乙分子由静止释放, 则乙分子 ()

- A. 从 r_3 到 r_1 做加速运动, 从 r_1 向 O 做减速运动
B. 从 r_3 到 r_2 做加速运动, 从 r_2 到 r_1 做减速运动
C. 从 r_3 到 r_1 , 分子势能先减少后增加
D. 从 r_3 到 r_1 , 分子势能先增加后减少

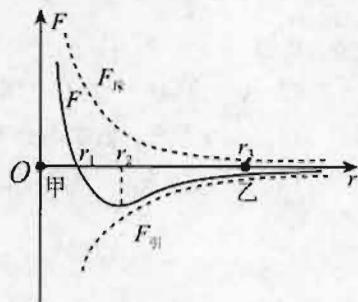


图 7-13

14. 在标准状态下, 任何气体的摩尔体积均为 22.4 L/mol , 水的摩尔体积为 18 mL/mol , 则水蒸气分子间的距离约是水分子直径的 _____ 倍。

15. 假如全世界 60 亿人同时数 1 g 水中的分子个数, 每人每小时可以数 5 000 个, 不间断地数, 则完成任务所需时间最接近 (阿伏加德罗常数 N_A 取 $6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) ()

- A. 10 年 B. 1 千年 C. 10 万年 D. 1 千万年

16. 某同学在用油膜法估测分子直径的实验中, 计算结果明显偏大, 可能是由于 ()

- A. 油酸未完全散开
B. 油酸中含有大量的酒精
C. 计算油膜面积时舍去了所有不足一格的方格
D. 求每滴体积时, 1 mL 的溶液的滴数多记了 10 滴

17. 在做“用油膜法估测分子大小”的实验时, 油酸酒精溶液的浓度为每 $1\,000 \text{ mL}$ 溶液中有纯油酸 1 mL , 用注射器测得 1 mL 上述溶液有 200 滴, 把一滴该溶液滴入盛水的表面撒有痼子粉的浅盘里, 待水面稳定后, 测得油膜的近似轮廓如图 7-14 所示, 图中正方形小方格的边长为

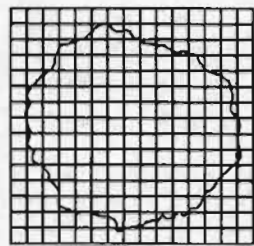


图 7-14

1 cm, 则每一滴油酸酒精溶液中含有纯油酸的体积是_____ mL, 油膜的面积是_____ cm^2 。根据上述数据, 估测出油酸分子的直径是_____ nm。

18. 已知金刚石的密度是 $3.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 在一块体积为 $6.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ 的金刚石里含有多少个碳原子? 一个碳原子的质量是多少? (碳的摩尔质量 $M = 1.2 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$, 结果保留两位有效数字)

19. 一个房间的地面面积是 15 m^2 , 高 3 m 。已知空气的平均摩尔质量是 $2.9 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$, 摩尔体积 $V_m = 22.4 \text{ L/mol}$ 。在标准状态下, 若房间内所有水蒸气凝结成水后的体积为 10 cm^3 , 已知水的密度为 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 水的摩尔质量为 $1.8 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$ 。求:

- (1) 房间内空气的质量有多少?
- (2) 房间内有多少个水分子?
- (3) 估算一个水分子的直径约是多大? (保留两位有效数字)

参考答案

A 组

1. $\frac{N_A}{M}$; $\frac{\rho N_A}{M}$; $\frac{M}{N_A}$; $\frac{M}{\rho N_A}$ 2. B 3. B 4. D 5. C 6. D 7. B 8. AD 9. BC 10. ABC

11. (1) $N = \frac{\rho V N_A}{M}$; $N' = \frac{V}{V_m} N_A$ (2) $d = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}}$; $d' = \sqrt[3]{\frac{V_m}{N_A}}$

12. 8.3×10^{28} 个

B 组

13. A 14. 10 15. C 16. AC 17. 5×10^{-6} ; 40; 0.125

18. 1.1×10^{22} ; $2.0 \times 10^{-26} \text{ kg}$

19. (1) 58 kg (2) 3.3×10^{23} (3) $3.1 \times 10^{-10} \text{ m}$



课程标准的要求

1. 通过调查,了解日常生活中表现统计规律的事例。
2. 了解分子运动速率的统计分布规律。认识温度是分子平均动能的标志。
3. 通过实验,了解气体实验定律,知道理想气体模型。用分子动理论和统计观点解释气体压强和气体实验定律。

一、本章教材概述

学生在第七章中学习了分子动理论的基本知识,但并没有应用分子动理论和统计的观点来系统、深入分析具体的物理问题,本章为此提供了机会。学生在本章通过实验第一次认识大量物体的行为将遵从一定的统计规律。以此为基础,学生将了解温度和气体压强的微观含义,进而理解气体实验定律的微观解释。本章的学习内容,是分子动理论和统计观点的一次具体应用。

本章学习气体的性质,下一章将学习固体和液体的性质。本章对气体宏观性质和微观结构特点的认识,将为下一章学习固体、液体的宏观性质及其微观解释带来很好的借鉴。本章通过学习气体实验定律,为下一章学习饱和汽和饱和汽压奠定了一定的知识基础。

课程标准对气体的教学要求比原教学大纲有一定的提高。本章教材先通过实验了解气体的实验定律,再引出理想气体的状态方程,最后用分子动理论和统计观点对气体实验定律进行具体和比较详细的解释。本章教材“实验→规律→微观解释”的教学线索跟原教材线索有很大的不同。

本章第1节“气体的等温变化”,通过实验探究引出玻意耳定律,并以一定质量气体的等温变化过程介绍气体的 p - V 图象和等温线;第2节“气体的等容变化和等压变化”,介绍查理定律、气体的 p - T 图象和盖—吕萨克定律、气体的 V - T 图象;第3节“理想气体的状态方程”,在说明理想气体的含义后,引导学生用学过的知识推导一定质量的某种气体在 p 、 V 、 T 都发生变化时状态参量之间的关系式,即理想气体的状态方程;第4节“气体热现象的微观意义”,在通过掷硬币实验理解大量事物的出现遵从一定统计规律的基础上,介绍气体分子运动的特点和气体分子速率分布的特点,对气体压强和气体实验定律进行具体解释。教科书在上述安排中,先经历探究实验、后介绍物理结论;先讨论有一个状态参量不变的特殊情况、后推导三个状态参量都变的普遍情况;先弄清宏观事实、后进行微观解释;先用公式概括相关物理规律;再用不同图象描述这些规律。这种安排,符合认知规律,有利于实现课程标准的要求。

在编写本章时,还有以下思考。

1. 让学生在自主解决问题的过程中建构新知识

让学生通过自己解决问题来建构新的知识,有利于形成学生的探究意识,发展学生的探究能力,本章第3节就采用了这种学习过程。在这之前,学生已学习了一定质量某种气体的等

温、等容和等压变化规律，利用这三种过程中的任意两种都可以推导出理想气体的状态方程，再加上两种过程还可以先后次序对换，因此推导状态方程的过程设计有6种。教科书在“思考与讨论”栏目中，设计了一个状态 $A \rightarrow$ 状态 $B \rightarrow$ 状态 C 的物理情景， $A \rightarrow B$ 是等温的， $B \rightarrow C$ 是等容的，即采用先等温、后等容的方式。实际上，设计为其他的两个过程也是可以的。

由于前面已有一系列铺垫，学生在课堂上解答“思考与讨论”所提出的问题，进行自主推导，基本上不会有太大问题，如果能启发学生绘制草图，形象地表示出三个状态的体积、压强、温度关系，就更有利于问题的解答。学生所解答问题的答案，就是学生需要学习的新知识——理想气体的状态方程，学生解决这一问题的过程，就是建构自己新知识的过程。

2. “大量事物出现的机会遵从统计规律”实验的设计满足学生认知要求

热现象与大量分子热运动的统计规律有关。为了说明这一结论，需要让学生经历一个实验活动，说明大量事物出现的机会是遵从统计规律的，然后根据实验呈现的结果，理解气体分子运动的特点。因此，该实验活动的内容，应具有两方面的要求：一是实验应表明大量事物出现的机会具有一定的统计规律；二是实验所呈现的结果跟气体分子热运动的特点具有较多的相似处。

要通过实验证明大量事物出现的机会遵从统计规律，一般来说，都会选择投币实验，因为实验条件简单、结果明确。但究竟应该如何投掷，这就有不同的考虑。实验可以用1个硬币，也可以用2个或多个硬币，下面列出了各种不同数量的硬币在投掷时正面朝上出现次数百分比的柱状图：

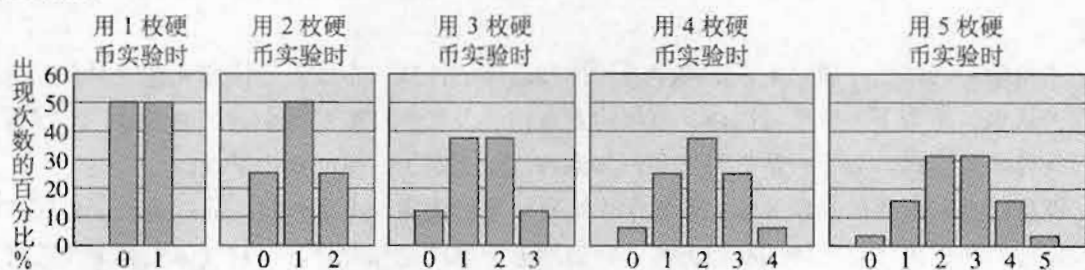


图8-1 实验时正面朝上的硬币枚个数

如果用1枚硬币实验，正面朝上次数的概率是50%，这是学生已经熟知的常识，实验需要探究的结论，对学生来说没有丝毫悬念，用1枚硬币实验，难以激发学生旺盛的探究欲望。如果用5枚以上的硬币实验，不同数量硬币正面朝上的分布百分比，其规律有一定的复杂性，需要实验的数据量也比较大，又会为探究过程带来一定的困难。教科书选择了用4枚硬币做实验，不仅做到了两者优点的兼顾，而且不同数量硬币正面朝上次数百分比的柱状图（图中用4枚硬币实验所对应的图）跟气体不同速率分子数量百分比的柱状图相比，其含义和形状都很相似，对学生正确理解气体分子运动的特点有益。

在本实验的后面，教科书还设计了一个“说一说”，让学生想象一下：如果在每枚硬币背面（反面）都贴上一片相同的圆铅片，实验结果会有什么不同？学生应该想象到由于铅片重力的原因，贴有铅片的一面紧贴桌面的可能性增大了，正面朝上的百分比增加，柱状图的右侧柱高将升高，左侧柱高将降低。这里实际上在为学生理解气体温度变化时其不同速率分子数量百分比会有相应变化这一统计规律埋下伏笔，因为两个图象的形状都会随着某一条件作出相应的变化，而且该变化所反映的都是统计规律。

3. 让学生经历交流与合作的学习过程

投掷硬币的实验，如何收集数据？为了提高实验效率，更重要的是让学生经历一次交流与



合作的学习过程,以获得一次合作研究的体验,增强合作意识,教科书设计了以全班学生为研究总体进行合作研究的实验方式。

按照一个班分3~4个大组,每个大组分3~4个实验小组,每个实验小组由3~4名学生组成,这样,只要做3次加法,就可以把 $3^3 \sim 4^3$ 名学生的实验数据统计出来,每人投掷10次,就能统计出几百份实验数据的结果。学生在这种信息共享的研究中,不仅体验到了合作的意义,也学到了合作的方法。

课时安排建议

第1节	气体的等温变化	2课时
第2节	气体的等容变化和等压变化	1课时
第3节	理想气体的状态方程	2课时
第4节	气体热现象的微观意义	2课时

二、教材分析与教学建议

第1节 气体的等温变化

1. 教学目标

- (1) 理解一定质量的气体,在温度不变的情况下压强与体积的关系。
- (2) 会通过实验的手段研究问题,探究物理规律,学习用电子表格与图象对实验数据进行处理与分析,体验科学探究过程。
- (3) 通过对实验数据的分析与评估,培养学生严谨的科学态度与实事求是的科学精神。
- (4) 在实验探究过程中,培养学生相互协作的精神。

2. 教材分析与教学建议

(1) 探究气体等温变化的规律

本节课的教学要求是“探究气体等温变化的规律”,这是课程目标中尝试用科学探究的方法研究物理问题的一个具体实施过程。在前面的学习中,学生对探究式教学已有一定的基础,并了解科学探究的一般方法与探究程序。因此,在实施教学的过程中,教师可以引导学生进行自主探究,通过鼓励学生自己完成探究的每一个过程,如提出问题、猜想与假设、实验设计、实验数据采集与处理、实验结论的分析与评估,从而进一步培养学生的科学探究能力和创新精神。

教科书通过打足气的自行车胎在烈日下曝晒常常会爆胎这样一个生活中的实际问题,引出了描述气体状态的三个状态参量。这样做的目的是培养学生善于观察,从生活现象中发现并提出问题的能力。由此建议教师在教学开始时,让学生列举生活实例,并通过有目的的演示实验,让学生在观察中提出问题,从而引出在质量一定的情况下,气体的温度、压强与体积之间存在着什么关系的问题。

教师可以提出:夏日给自行车胎打气,应注意什么?从学生的生活实例引发学生的思考。

也可以通过课堂活动激发学生的求知欲望,如取一只凹进的乒乓球,问学生能否将它恢复原样?由学生讨论,想出方法,并动手实践。当学生看到将凹进的乒乓球放入热水中而恢复原样时,学生一定会去思考其原因,从而提出气体的温度、压强与体积之间遵循的规律,激发学生的探究热情。

提出问题后,发现有三个物理量,要研究它们的关系,就需要用控制变量法。如先保持温度不变,研究一定质量的气体的体积与压强的关系。这也是本节要研究的问题。

在设计探究实验之前,教师要启发学生提出猜想,即一定质量的气体在温度保持不变的情况下,压强与体积之间可能是什么关系。猜想并不是胡思乱想,引导学生根据自己的生活经验或演示实验得出合理的猜想和假设。这里可以假设压强与体积成反比,因大量实例告诉我们,气体的体积减小时,压强在增加。告诉学生,这里为什么不假设压强与体积的平方成反比,因为一次方最简单,一般假设往往从简单开始,如果这里通过实验发现压强并不是与体积的一次方成反比,那可以根据对测量数据的分析,提出新的假设。

实验设计对学生来说比较困难,教师应该与学生共同设计,在设计中不断地提出问题。

a. 如图 8-2 所示的实验装置是由注射器与气压计组成的。它的操作简单,但误差比较大。为了减小误差,要注意一些问题。在实验前,在活塞上涂油。因为我们研究的对象是一定质量的气体,因此,必须保持在体积变化过程中,活塞不漏气。活塞涂油的一个主要作用就是防止漏气。注意,这里并不是为了减小摩擦,该装置即使有摩擦,也不会影响实验结果。用该实验装置进行探究,压强计的读数误差较大,所以效果不好。

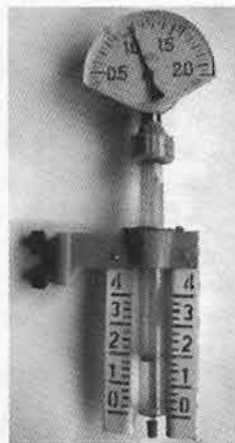


图 8-2

b. 图 8-3 是传统的实验装置,中间的液体用水银,在右管上升与下降过程中,左管中气体的体积发生明显的变化而压强的测量精度相对较高。但水银的毒性比较大,一般不宜使用。

教师还可以用其他方法完成这一实验,如用注射器研究气体压强与体积的关系,还可以用传感器采集数据和计算机处理数据描绘图象(参见本章实验参考资料)。

(2) 玻意耳定律

前面探究了气体等温变化的规律,目的是学习科学的探究方法与体验科学的探究过程。教科书在实验探究后安排了“玻意耳定律”,并对等温过程的 $p-V$ 图进行讨论。利用图象来分析问题,对学生来说比较抽象,有一定的难度。这里建议通过例题的分析帮助学生进行讨论研究。

例 在 A、B 两个注射器中分别封闭 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 300 mL 与 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 400 mL 的空气,在相同的环境温度下,将它们的体积缓慢地压缩一半,其压强分别为多少?

解析: 对 A 系统, $p_A = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_A = 300 \text{ mL}$; $V_A' = 150 \text{ mL}$, 根据玻意耳定律得

$$p_A V_A = p_A' V_A'$$

$$p_A' = \frac{p_A V_A}{V_A'} = \frac{1 \times 10^5 \times 300}{150} \text{ Pa} = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$$

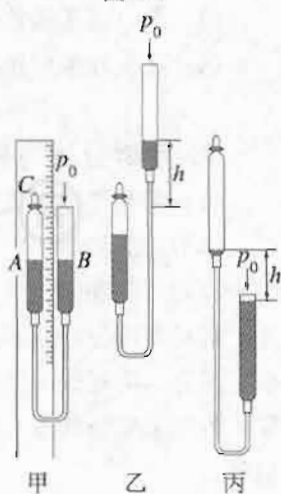


图 8-3

对 B 系统, $p_B = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_B = 400 \text{ mL}$; $V_B' = 200 \text{ mL}$, 再根据玻意耳定律得

$$p_B V_B = p_B' V_B'$$

$$p_B' = \frac{p_B V_B}{V_B'} = \frac{1 \times 10^5 \times 400}{200} \text{ Pa} = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$$

在分析例题并讨论结果的基础上, 进一步提出问题: 请用玻意耳定律, 计算不同体积气体的压强, 完成下列表格后, 在同一个 p - V 坐标中分别作出 A 与 B 的 p - V 图象, 并解释图线不同的原因。

V_A/mL	300	250	200	150	100
$p_A/\times 10^5 \text{ Pa}$	1	1.5	1.2	2	3
V_B/mL	400	300	200	150	100
$p_B/\times 10^5 \text{ Pa}$	1	1.3	2	2.7	4

分析: A、B 气体初始压强、温度均相同, A 体积小于 B 体积, 所以 A 气体的质量小于 B 气体的质量。在相同温度下的等温变化, 所得到的 p - V 图象不同, 就是因为封闭气体的质量不同, 质量越大, pV 的乘积越大。

在教科书“思考与讨论”栏目的教学中, 最好让学生比较不同实验小组的 p - V 图线, 由此讨论图线不同的原因。并进一步提出问题, 对同一组的实验, 如果在不同温度下进行等温过程所描绘的 p - V 图线是否相同? 在分析图象时, 首先应使学生明确, 不同组的 p - V 图线是在相同温

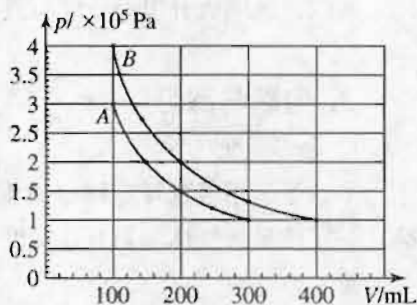


图 8-4

度下得出的, 对图上的一点表示什么, 图上的线又表示什么。学生得出结论的过程可能是不同的, 但要尽量让学生表达出来。例如: 可以画出平行于 p 轴的辅助线, 说明在相同温度下, 体积相同而压强不同, 说明压强越大的系统所封闭的气体质量越大; 而对教科书图 8.1-5 中的两条等温线是对同一研究对象而言, 同样可以画出平行于 p 轴的辅助线, 说明在相同体积下压强大的气体温度高。建议学生用课外的时间根据实验进行验证。

(3) 参考例题

例 1 某容器的容积是 5 L, 里面所装气体的压强为 $1 \times 10^6 \text{ Pa}$, 如果温度保持不变, 把容器开关打开以后, 容器里剩下的气体是原来的百分之几? (已知外界大气压强为 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$)

解析: 开关打开后, 气体做等温变化, 根据玻意耳定律 $p_1 V_1 = p_2 V_2$, 在压强为 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 情况下, 这些气体的体积

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{1 \times 10^6 \times 5}{1 \times 10^5} \text{ L} = 50 \text{ L}$$

容器开关打开以后, 气体的体积膨胀到 50 L。膨胀后容器中剩余的气体仍有 5 L, 则

$$\eta = \frac{V_1}{V_2} \times 100\% = \frac{5}{50} \times 100\% = 10\%$$

即容器里剩下的气体是原来的 10%。

例 2 如图 8-5 所示, 水银柱长度为 19 cm, 大气压强为 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ (相当于 76 cm 高的水银柱产生的压强), 玻璃管是粗细均匀的。玻璃管开口向上竖直放置时, 被封闭的气柱长

15 cm, 当开口竖直向下放置时(水银没有溢出管外), 被封闭的气柱的长度是多少?

解析: 玻璃管开口向上竖直放置时, 封闭气体的压强为大气压强加上由水银柱产生的压强

$$p_1 = p_0 + \rho gh_{\text{水银}}$$

封闭气体的体积 $V_1 = h_1 S$ (S 为玻璃管的横截面积)。

玻璃管开口向下竖直放置时, 封闭气体的压强为大气压强减去由水银柱产生的压强

$$p_2 = p_0 - \rho gh_{\text{水银}}$$

由于气体的温度不变, 根据玻意耳定律 $p_1 V_1 = p_2 V_2$ 有

$$(p_0 + \rho gh_{\text{水银}}) \times h_1 S = (p_0 - \rho gh_{\text{水银}}) \times h_2 S$$

$$h_2 = \frac{p_0 + \rho gh_{\text{水银}}}{p_0 - \rho gh_{\text{水银}}} h_1 = \frac{76 + 19}{76 - 19} \times 15 \text{ cm} = 25 \text{ cm}$$

所以, 玻璃管开口向下竖直放置时, 气柱的长度为 25 cm。

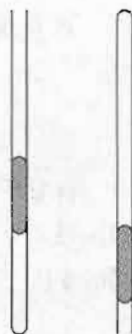


图 8-5

3. 问题与练习

1. 内容分析

本题是运用玻意耳定律解决生活中的实际问题。在解决此问题的过程中, 要求学生能明确, 一定质量的气体, 只有在温度保持不变的情况下, 玻意耳定律才能成立。

解答与说明

此题研究的系统是足球内 2.5 L 与 20 个 0.125 L 压强为当时大气压强的气体。在实际打气过程中, 由于压缩气体时对气体做功, 温度会升高, 严格讲不能运用玻意耳定律研究此题, 所以题目中专门提出了这样的问题“你在得出此结论时考虑到什么前提?”, 这提示学生必须明确玻意耳定律的适用条件。

设大气压强为 p_0 , 根据玻意耳定律 $p_0 V_1 = p_2 V_2$ 有

$$p_0 (2.5 + 20 \times 0.125) = 2.5 p$$

$$p = 2p_0$$

得出此结论的前提是打气过程中温度保持不变, 实际打气时由于压缩气体做功, 气体的温度会升高。

2. 内容分析

水银气压计是一种常见测定大气压的仪器, 水银柱的上方是真空。如果上方进入了空气或水汽, 气压计的读数与实际气体会存在一定的误差。此题目的目的是让学生了解水银气压计的原理, 并会通过玻意耳定律分析在水银气压计上方混入气体时所产生的误差。

解答与说明

以水银柱上方的空气为研究对象, 当气压计的读数为 740 mm 水银柱时, 水银面到管顶的距离为 90 cm, 这时实际的气压相当于高度为 h 的水银柱产生的压强。

根据玻意耳定律 $p_1 V_1 = p_2 V_2$ 。设水银气压计的横截面积为 S , 则

$$80 \times S \times (768 \rho g - 750 \rho g) = 90 \times S \times (\rho gh - 740 \rho g)$$

$$h = 756 \text{ mm}$$

即此时的大气压相当于 756 mm 高的水银柱产生的压强, 约为 $1.008 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。



第2节 气体的等容变化和等压变化

1. 教学目标

- (1) 知道什么是等容变化，知道查理定律的内容和公式。
- (2) 了解等容变化的 p - T 图线及其物理意义。
- (3) 知道什么是等压过程，知道盖—吕萨克定律的内容和公式。
- (4) 了解等压变化的 V - T 图线及其物理意义。

2. 教材分析与教学建议

本节先介绍查理定律，要使学生了解一定质量气体在体积保持不变时温度与压强的关系，知道通过对等容变化的 p - T 图线“外推”所得到气体在压强为 0 时对应温度的意义，了解“外推”也是一种科学研究方法。有条件的学校可以通过实验研究，让学生得到真实的感受。

本节没有对热力学温度做过多的解释与说明，而在本模块的第七章《分子动理论》的第4节“温度和温标”中做了一些介绍。教学中，建议对热力学温度不做过多详细的介绍，只是让学生了解其物理意义。对教材中“可以证明，气体的压强不太大，温度不太低时，坐标原点代表的温度就是热力学温度的零度”，建议不做过多的解释，有关什么是理想气体的概念放到第4节进行处理。但要告诉学生，这里的“可以证明”是通过大量的“压强不太大，温度不太低”的不同气体做等容变化的实验数据进行分析而得出的结论。

对查理定律与盖—吕萨克定律，教学时只作为一般了解，不要求用它去解决复杂的问题。

在教学方法上，可以通过演示实验，得出一定质量气体在体积不变情况下的 p - T 图线，从而探究压强与温度的关系，不一定要学生再次进行自主探究。

(1) 关于热力学温度

查理定律的建立与热力学温标是结合在一起叙述的，这里用到“外推”。应使学生明确，这里的“外推”并不表示查理定律的适用范围的扩展，只是为了引入新的温标。

在建立热力学温标之前，人们已经建立了华氏、摄氏等温标，但这些温标都与测温物质的热学性质有关。当采用不同的测温物质去测量同一温度时会产生一定的差异，这种差异是不能克服的。而由热力学温标定出的温度数值与测温物质无关，因此热力学温标是一种理论的温标，而且热力学温度的单位开尔文是国际单位制中七个基本单位之一。

(2) 气体的等压变化

气体在等温条件下的体积与压强的关系、等容条件下的压强与温度的关系，均是用实验的方法进行探究，其目的并不是真正探究其规律，而是让学生学会研究问题的方法，体验探究过程。对气体在压强不变的情况下体积与温度的关系，可以向学生介绍其探究方法，或启发学生设计探究实验方案，不一定都要让学生进行实验探究。一是实验条件可能不允许，二是教学时间不允许。但气体在等压下的体积与温度的关系要告诉学生，并能解释相关物理现象与解决相关问题。

(3) 参考例题

例1 一定质量的氢气在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的压强是 $9 \times 10^4\text{ Pa}$ ，保持氢气的体积不变，它在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的压强是多大？

解析：这是一定质量的理想气体的等容变化，在应用查理定律时，应该将温度的单位转换

成热力学温度。

$$T_1 = 273 \text{ K}, T_2 = (273 + 30) \text{ K} = 303 \text{ K}.$$

根据查理定律得 $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$, 故

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1 = \frac{303}{273} \times 9 \times 10^4 \text{ Pa} = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$$

例2 冬季, 装有半瓶水的暖瓶经过一个夜晚, 第二天拔瓶口的软木塞时会觉得很紧, 不易拔出来, 这是什么原因?

解析: 因装有半瓶水, 在瓶中有一定量的气体, 在塞上瓶塞时, 由于水温较高, 气体的温度高。经过一夜的时间后, 瓶中气体的温度降低, 根据查理定律, 一定质量的气体, 在体积一定的情况下, 温度降低, 压强减小, 这样在瓶塞内外形成了一定的压力差。因此要将瓶塞拔出比较困难。

3. 问题与练习

1. 内容分析

本题运用查理定律解决实验问题。查理定律适用于一定质量的气体, 如果氧气钢瓶不漏气, 在两个状态时的压强与温度(用热力学温度)的比值应该相等, 否则说明钢瓶漏气。

解答与说明

$$\text{解法一: } \frac{p_1}{T_1} = \frac{9.31 \times 10^6 \text{ Pa}}{(273 + 17) \text{ K}} = 3.21 \times 10^4 \text{ Pa/K}$$

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{8.15 \times 10^6 \text{ Pa}}{(273 - 13) \text{ K}} = 3.13 \times 10^4 \text{ Pa/K}$$

$\frac{p_1}{T_1} \neq \frac{p_2}{T_2}$, 说明钢瓶漏气。

解法二: 根据查理定律 $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$, 如果不漏气, 压强应为

$$p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1} = \frac{9.31 \times 10^6 \times (273 - 13)}{(273 + 17)} \text{ Pa} = 8.35 \times 10^6 \text{ Pa}$$

而瓶中氧气的实际压强为 $8.15 \times 10^6 \text{ Pa}$, 说明钢瓶漏气。

2. 内容分析

这是通过等压变化的原理所设计的温度计。液体温度计是根据液体的膨胀原理设计而成的, 但液体膨胀并不一定与温度成正比。而运用等压变化的原理所设计的温度计, 根据计算分析, 气体体积膨胀与温度成正比。

解答与说明

(1) 根据盖-吕萨克定律 $\frac{V}{T} = C$, 故

$$C = \frac{V_1}{T_1} = \frac{(360 + 10 \times 0.2) \text{ cm}^3}{(273 + 25) \text{ K}} = \frac{362}{298} \text{ cm}^3/\text{K}$$

所以, $\Delta V = C \Delta T = \frac{362}{298} \Delta T$, 即体积的变化量与温度的变化量成正比, 吸管上标的刻度是均匀的。

(2) 因为 $\Delta V = \frac{362}{298} \Delta T$, 所以, $\Delta T = \frac{298}{362} \Delta V = \frac{298}{362} \times 0.2 \times (20 - 10) \text{ K} = 1.6 \text{ K}$ 。

这个气温计可以测量的温度 $t = (25 \pm 1.6)^\circ\text{C}$ ，即这个气温计测量的范围是 $23.4 \sim 26.6^\circ\text{C}$ 。

第3节 理想气体的状态方程

1. 教学目标

- (1) 了解理想气体的模型，并知道实际气体在什么情况下可以看成理想气体。
- (2) 能够从气体定律推出理想气体的状态方程。
- (3) 掌握理想气体状态方程的内容和表达式，并能应用方程解决实际问题。
- (4) 通过由气体的实验定律推出理想气体的状态方程，培养学生的推理能力和抽象思维能力。

2. 教材分析与教学建议

(1) 理想气体

理想气体是为了研究问题方便而提出的一种理想模型，是实际气体的一种近似，就像在力学中提出的质点、电学中提出的点电荷等模型一样。理想模型的方法突出问题的主要方面，忽略次要方面，从而认识物理现象的本质，是物理学中一种常用的方法。

理想气体严格遵从三个实验定律。实验表明，实际气体只是近似地遵从玻意耳定律、查理定律和盖—吕萨克定律。当气体压强不太大（与大气压比较）、温度不太低（与室温比较）时，实际测量的结果与上述定律得出的结果相差不大；当压强很大、温度很低时，实际测量结果和由上述定律得出的结果有很大的差异。引起这种差异的原因是因为分子力的影响，在压强太大或温度太低时，分子力作用所带来的影响不能忽略不计。理想气体是不存在的，但在常温常压下，大多数实际气体，尤其是那些不易液化的气体，如氢气、氧气、氩气、氦气以及水蒸气含量不大的空气都可以近似地看成理想气体。

(2) 理想气体状态方程

教科书通过“思考与讨论”，引导学生根据已学过的气体实验定律推导理想气体状态方程。

在教科书图 8.3-1 中，从 A 到 B 是等温过程，从 B 到 C 是等容过程，状态参量如图 8-6 所示。

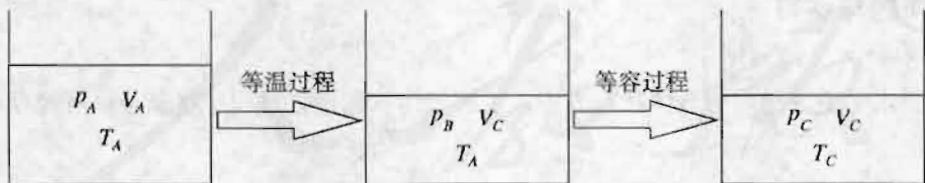


图 8-6

从状态 A 到状态 B，根据玻意耳定律， $p_A V_A = p_B V_B$ ，

从状态 B 到状态 C，根据查理定律， $\frac{p_B}{T_A} = \frac{p_C}{T_C}$ 。

由上面两式可得： $\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_C V_C}{T_C}$ 。

教学中还可以用其他方法得出这个结果。例如，引入一个中间状态 B，从状态 A 到状态 B 是等压过程，从状态 B 到状态 C 是等容过程，状态参量如图 8-7 所示。

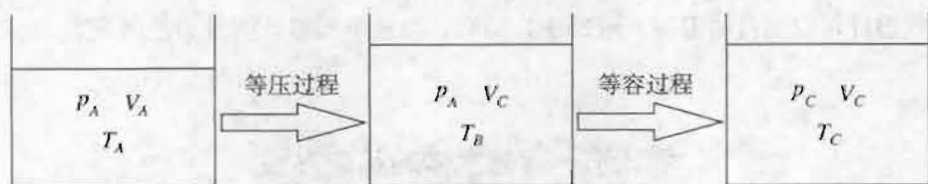


图 8-7

从状态 A 到状态 B, 根据盖—吕萨克定律得 $\frac{V_A}{T_A} = \frac{V_C}{T_B}$,

从状态 B 到状态 C, 根据查理定律得 $\frac{p_A}{T_B} = \frac{p_C}{T_C}$ 。

由上面两式可得 $\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_C V_C}{T_C}$ 。

用不同方法推导, 得到同样的结果, 这也说明了 A 与 C 状态参量之间的关系, 只跟这两个状态有关, 与中间过程无关。中间过程只是为了研究 A、C 状态参量之间存在关系的一种手段而已。

上述理论推导本身就是建立在实验的基础上, 推出的结论同样能反映气体状态量变化的客观规律, 它也是一种科学研究方法。

这里要说明的是, 有学生可能会想到用实验的方法, 使三个状态参量都变化, 这种想法很正常, 但三个量同时变化, 我们很难从采集的数据中找出它们的数学关系, 只能用实验作为验证。

(3) 参考例题

例 在容积为 20 L 的圆筒内装有氧气, 温度是 17 °C 时, 它的压强是 1.0×10^6 Pa。在标准状态下, 这些氧气的体积是多大?

解析: 标准状态是指温度为 0 °C, 压强为 1 个标准大气压, 大约为 1.0×10^5 Pa。这些氧气是从 $V_1 = 20$ L、 $p_1 = 1.0 \times 10^6$ Pa、 $T_1 = 300$ K 到 $p_2 = 1.0 \times 10^5$ Pa、 $T_2 = 273$ K, 求体积 V_2 。

根据理想气体状态方程 $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ 得

$$V_2 = \frac{p_1 V_1 T_2}{p_2 T_1} = \frac{1.0 \times 10^6 \times 20 \times 273}{1.0 \times 10^5 \times 300} \text{ L} = 91 \text{ L}$$

3. 问题与练习

1. 内容分析

该题要求学生通过理想气体状态方程, 了解气体状态变化过程中状态参量可能存在的变化情况。

解答与说明

根据 $\frac{pV}{T} = C$, 可知一定质量的理想气体, 不可能压强与体积不变而温度发生变化, 所以

(1) 不可能; 压强不变, 而温度升高, 体积只能增加, 不可能减小, 所以 (2) 不可能; 而温度不变, 体积增加, 压强减小, 方程可能成立, 则 (3) 是正确的; 同样, 体积不变, 增加压强, 温度必升高, 所以 (4) 不可能。答案: C。

2. 内容分析

本题是应用理想气体状态方程研究柴油机的压缩冲程。根据题目中给定的条件, 通过理想气体状态方程可以近似求得压缩后气体的温度要比柴油自燃的温度高很多, 足以保证喷入汽缸

的燃油自行着火燃烧。在应用理想气体状态方程时,对压强与体积这两个状态量只要在方程两边单位统一即可,但对温度一定要统一成国际单位(即开尔文)。

解答与说明

根据理想气体状态方程: $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$, 有

$$T_2 = \frac{p_2 V_2 T_1}{p_1 V_1} = \frac{40 \times 10^5 \times \frac{1}{17} \times 0.83 \times 10^{-3} \times (273 + 47)}{0.8 \times 10^5 \times 0.83 \times 10^{-3}} \text{ K} = 941 \text{ K}$$

换算成摄氏温度 $t_2 = T_2 - 273 = 668 \text{ }^\circ\text{C}$, 即汽缸中的压缩空气的温度约为 $668 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3. 解答与说明

由于外界大气压不变,玻璃管内空气含量较少,对压强影响不是很大。因此,当玻璃管竖直向上提起时,管内水银柱的高度变化不会很大,管内空气柱长度增加,体积增大。我们可以把这个过程看做等温过程,由于体积增大,玻璃管内空气压强会减小,水银柱的长度会增加。

也可以利用理想气体状态方程,通过定量计算玻璃管内空气柱的体积和压强的变化得出结果。

第4节 气体热现象的微观意义

1. 教学目标

- (1) 初步了解什么是“统计规律”。
- (2) 理解气体分子运动的特点:分子沿各个方向运动的机会均等,分子速率按一定规律分布。
- (3) 能用气体分子动理论解释气体压强的微观意义,知道气体的压强、温度、体积与所对应的微观物理量间的相关联系。
- (4) 能用气体分子动理论解释三个气体实验定律。

2. 教材分析与教学建议

本教科书比起以前的教科书,更重视统计规律的应用,在气体热现象的微观意义上有所加深。教科书开始就提出“随机事件的出现是不是就没有什么规律呢”,之后要求学生通过投掷硬币的实践活动,体会某个事件的出现具有偶然性,但大量随机事件的整体表现出一定的规律性,即统计规律。在实际教学过程中,教师可以先让学生课前完成“抛硬币实验”,然后进行全班交流与评价,让学生充分发表自己的看法,从而使学生亲身体验“统计规律”意义构建过程。教学时,还应要求学生从实际生活与社会现象中列举大量具有“统计规律”的生活实验与社会现象,进一步加深对“统计规律”的理解,从中领略到自然与社会的奇妙与和谐,增加对科学的好奇心与求知欲,体验探索自然规律的艰辛与喜悦。

(1) 掷硬币实验

“掷硬币实验”探究的是统计规律。可取4枚硬币同时掷出,实验10次,记录每次投掷时正面朝上的硬币枚数,统计总共10次投掷中有0、1、2、3、4枚硬币正面朝上的次数各是多少,把结果填入下表中。将全班同学的数据按下表要求进行统计,进行分析对比。



次数 统计对象	统计项目	总共投掷 的次数	4枚硬币中正面朝上的硬币枚数				
			0	1	2	3	4
1人(自己的数据)		10					
5人(在自己课桌周围)		50					
10人(自己所在的小组)		100					
全班							

说明：在进行掷硬币的实验时，要控制实验条件相同，如：每次的下落高度相同（高度不宜太低），选择硬币的大小、材料要相同，抛出的方法要相同。

以上实验说明了，某一事件的出现纯粹是偶然的，但大量的偶然事件却会表现一定的规律。这种大量偶然事件表现出来的整体规律为统计规律。

为了说明个别分子运动的不确定性，与大量分子的统计规律，可以从伽尔顿板实验与生活中的实例引入。

伽尔顿板——统计规律演示。如图8-8所示，腔内分为储存室、钉阵和狭槽三部分。粒子储存室位于腔的上部，称为漏斗；钉阵位于腔的中部，由铁钉组成；钉阵下方有狭槽。

实验原理（如图8-8所示）：小球从漏斗口落下，在到达底部前，与钉子发生碰撞。对于单个的小球，落到底部的哪一条狭槽完全是随机的，不确定的。但如果不断地从漏斗口放入小球，当小球数量较多时，在板的底部各狭槽内都有一定的小球，且中间狭槽的小球最多，两边狭槽的小球较少。也就是说，对于少量的小球，从漏斗口落下，到达哪一条狭槽完全是随机的，但对于大量的小球，在各狭槽的分布满足一定的统计规律。

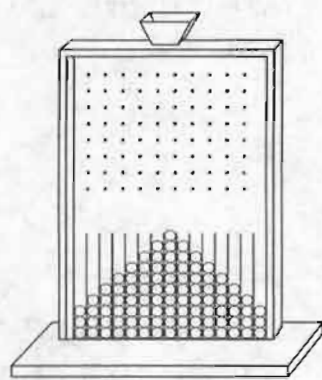


图8-8

实验操作与现象：

①拔出插片，将伽尔顿板倒置，待小球全部流入储存室后，再将插片插入漏斗口处，将伽尔顿板正过来，置于水平桌面上。

②拔出插片，大量小球下落，观察小球在底部的分布状态，解释其现象。

③重复实验多次，可观察到大量偶然事件所服从的统计规律。

例：学生成绩统计。某班50人，在某学期的期中考试中平均成绩为81.5分，各分数段人数的统计结果如图8-9所示。

到期末考试时，该班的平均成绩上升到84分，各分数段的统计结果如图8-10所示。

期中考试时班级平均分为81.5分，对一个人来讲，他的成绩偶然性很大，但对全班同学，大多数人的成绩集中分布在80分左右。期末考试时全班的成绩上升了，对任意一位同学来说，成绩不一定上升，但对全班来讲，大部分同学的成绩提高了，这是必然的。

(2) 气体分子运动的特点

通过对上述的演示实验与例子的分析，有利于帮助学生理解气体分子运动的特点：对个别分子在某一时刻速度的大小与方向有偶然性，因大量分子频繁碰撞，对大量分子来说它们向各个方向运动的几率是相等的，分子速率呈现“中间多，两头少”。当温度升高时，对某一分子

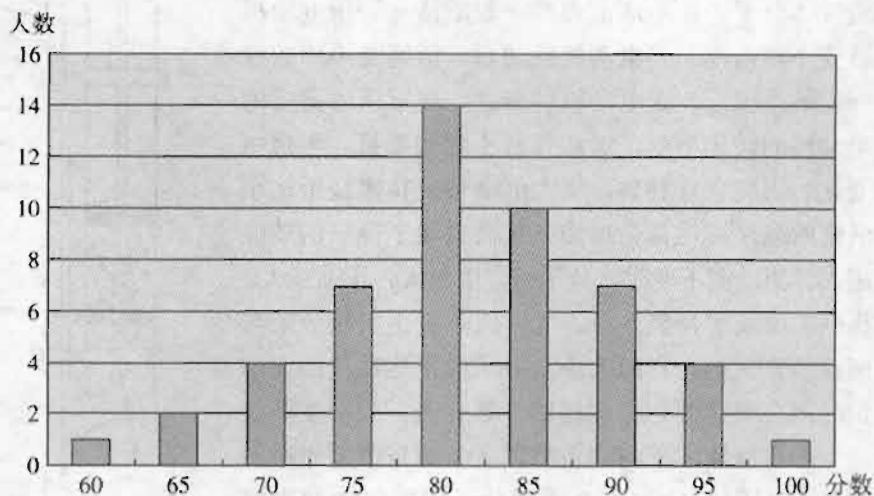


图 8-9

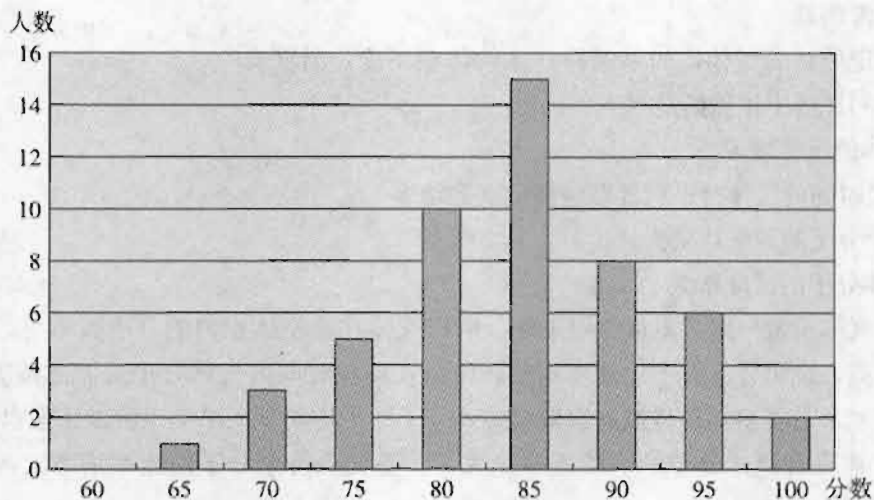


图 8-10

在某一时刻它的速率不一定增加,但大量分子的平均速率一定增加,而且“中间多”的分子速率值在增加(参见教科书图 8.4-2)。

(3) 气体温度的微观意义

教材通过氧气分子在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的速率分布图象,使学生更具体并定量化地理解“温度越高,分子热运动越激烈”的定性解释。之后给出了 $T = a \bar{E}_k$ 的公式,说明理想气体的温度 T 与分子平均动能 $\bar{E}_k$ 成正比。实际上, $\bar{E}_k$ 应为分子的平均平动动能,但在高中阶段,不考虑分子的振动与转动,所以教材就把 $\bar{E}_k$ 表示为动能。

(4) 气体压强的微观意义

理想气体对器壁的压强是大量分子与器壁频繁碰撞的结果,对于单个分子或少量分子是没有意义的。教科书没有给出理想气体压强的公式推导,但用了“大量雨点的撞击使雨伞受到持续的作用”这一生活经验和向电子秤上倒小钢球的实验,形象地演示了气体压强产生的原因。

①对小钢球实验的改进:用小钢球做实验操作比较困难,而且大量钢球比较难找。可以改用豌豆做此实验,效果是相同的。

②还可以用下列装置来模拟气体压强的产生,如图 8-11,在玻璃筒内装入一些塑料小球,

这些小球代表气体分子。在小球上面放一轻质活塞，用电动机带动一振动器使小球运动。当电动机启动后，活塞受小球的撞击，悬浮在一定的高度。改变电动机的转速，观察活塞高度的变化。保持电动机的转速不变，增加塑料小球的数目，再观察活塞高度的变化。实验中观察到，增大电动机的转速或增加小球的数目，活塞的悬浮高度都会增加。从而说明了分子的动能越大，压强越大。当动能不变时，分子的密度越大，压强越大。

对气体压强的微观解释要注意：气体压强是由大量分子与器壁的频繁碰撞所产生的，它的大小与分子的平均动量的大小有关，与单位时间在单位面积上碰撞的个数有关。当密度不变时，温度升高，不仅碰撞的平均动量增加了，而且由于速率的增加，器壁在单位时间单位面积上受到分子碰撞的次数也增加了。

(5) 参考例题

例 一定质量的气体，如果保持气体的体积不变，温度升高，那么下列说法中正确的是（ ）

- A. 气体的压强增大
- B. 单位时间内气体分子对器壁碰撞的次数增多
- C. 每个分子的速率均增大
- D. 气体分子的密度增大

解析：气体质量一定，而且体积未变，所以气体在单位体积内的分子数不变，故 D 不正确。温度升高，说明分子的平均速率增加，所以在单位时间内气体分子对器壁碰撞的次数增多，故 B 正确。分子对器壁碰撞的次数增多，分子的平均动量又增加，所以压强也一定增大，故 A 正确。温度升高，分子的平均速率变大，并不代表每个分子的速率均增大，所以 C 不正确。

3. 问题与练习

1. 内容分析

为进一步理解统计规律，要求学生列举生活中的事例，从而使学生能意识到我们生活中看起来是偶然的事件，它也遵循一定的统计规律。

例如：①某地区的超市每天新鲜牛奶销售量就是一个统计平均值。超市是根据该地区消费人群的平均消费量来进货的，每天去买牛奶的人不一定是同样的人，但每天该地区牛奶的销售量基本上是不变的。有时也会出现小幅度的涨落，或多或少，但牛奶需求量大致不变。②城市交通，在交叉路口不同方向红绿灯的时间分配是根据长时间对车流量的统计来设定的。但有时也会出现偏差，如遇到大型活动或突发事件。③对肺癌病例统计，发现与生活习惯、生活环境等因素有关，从而可以通过统计数据指导人们如何改变不良的生活习惯、保护生活环境。④交纳养老保险的保费一般根据人的年龄与地区人的平均寿命来计算，这里的平均就是大量的统计的结果。

2. 内容分析

要求学生了解压强和温度的微观意义。

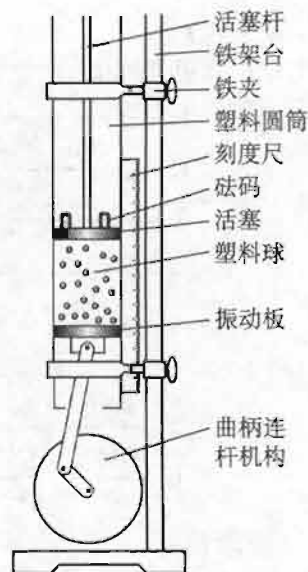


图 8-11

解答与说明

根据理想气体状态方程得, 压强变为原来的 0.5 倍。

温度升高为原来的 1.5 倍, 说明气体分子的平均动能增加为原来的 1.5 倍, 分子在单位面积上撞击器壁的平均作用力增加为原来的 1.5 倍。而体积增大为原来的 3 倍, 说明分子在单位面积上撞击器壁的分子数平均变为原来的 $1/3$, 所以压强变为原来的 0.5 倍。

三、教学设计案例

气体的等温变化

教学目标

- (1) 理解一定质量的气体在温度不变情况下压强与体积的关系。
- (2) 学会通过实验的手段研究问题, 探究物理规律, 学习用电子表格与图象分析处理实验数据, 体验科学探究过程。
- (3) 通过对实验数据的分析与评估, 培养学生严谨的科学态度与实事求是的科学精神。
- (4) 在实验探究过程中, 培养学生相互协作的精神。

课堂组织形式

组织教学与学生实验探究相结合。

教学过程设计

(一) 观察现象, 提出问题

1. 分析生活中的物理现象:

教师首先提出问题: 在炎热的夏天, 给自行车胎打气应注意什么? 让学生进行讨论, 得到一定质量的气体在温度升高后, 胎内气体压强要增大的结论。要求学生列举生活中类似的实例, 如夏天的啤酒瓶易爆破, 氧气罐不宜放在强烈的太阳光下……

2. 课堂活动:

活动 1 展示一个有块凹陷的乒乓球, 如图 8-12。

提出问题: 用什么方法可以使其恢复原状?

当学生提出放入热水中可使其恢复原状的方法, 由两个同学合作对全班同学进行演示。

提问: 能说明这样做的道理吗?

说明: 乒乓球内的气体, 在温度升高时, 内部气体的压强增大, 气体的体积也增大。

活动 2 在有机玻璃筒内封存一定质量的气体与浸有乙醚的脱脂棉球 (参见本书第十章实验参考资料), 快速压下活塞 (学生在教师的指导下上台操作), 使浸有乙醚的棉球被点燃。

提问: 能解释这个现象吗?

说明: 压下活塞时, 气体的体积减小, 压强增大, 温度升高。

通过列举的生活现象、课堂活动, 让学生在观察后思考, 进行质疑 (提出问题)。这里不仅



图 8-12



培养学生观察问题的能力,还培养提出问题的能力。在学生提出问题后,教师根据学生所提出的问题,从学生对问题的描述、问题的科学价值等方面进行客观的评价,并鼓励学生大胆质疑。

问题:一定质量的气体,它的温度、压强、体积之间将存在着一个什么定量关系?

(二) 实验设计

1. 实验原理

在研究两个以上物理量的关系时,一般采用控制变量法,学生对用控制变量法研究问题有一定的了解,但这里最好还是通过回忆以前牛顿第二定律的探究方法,启发学生思考,得出用控制变量的方法来研究气体温度、压强、体积之间的关系。即保持三个量中某一个量不变,研究其余两个物理量的关系。

让学生明确本节课的要求,是保持温度不变,探究气体的压强与体积的关系。

要特别强调的是,除温度不变之外,一定要保持气体的质量不变。

2. 实验设备

本课选用压强传感器进行实验,要向学生介绍压强传感器的特点、使用,以及数据采集与处理平台的使用。

实验器材:注射器、压强传感器、数据采集器、计算机。

器材简介:压强传感器,将压强量转变为电学量。数据采集器,将压强传感器输入的模拟信号转变为数字信号,并将数字信号输入计算机,计算机记录数据、分析数据。实验装置如图8-13所示。



图 8-13

(三) 实验步骤与数据采集

1. 将压强传感器与数据采集器相连接,数据采集器与计算机连接;
2. 打开 DIS 数字实验平台,在表格中设定压强、体积两个量;
3. 将注射器活塞开始置于 10 mL 的位置,并与压强传感器相连接;
4. 在表格的体积列中分别输入 20 mL、18 mL、16 mL、14 mL、12 mL、10 mL、8 mL;
5. 将注射器分别调到 20 mL、18 mL、16 mL、14 mL、12 mL、10 mL、8 mL,测出对应的压强值,如下表:

测量序号	体积 V/mL	压强 $p/\times 10^5 \text{ Pa}$	$\frac{1}{V}$
1	20	58.1	0.05
2	18	63.3	0.056
3	16	70.1	0.063
4	14	78.3	0.071
5	12	89.7	0.083
6	10	106.1	0.1
7	8	129.4	0.125

注意：由于气体在体积变化的过程中温度会发生改变，要有足够的时间使注射器中的气体与外界形成热交换至平衡，应缓慢拉动活塞这样才能尽量保持研究对象恒温。

（四）数据处理与分析

用平台的作图功能画出 p - V 图象，将得到如图 8-14 所示的曲线图，从图中不能说明压强与体积之间的函数关系，可以进一步向学生提出问题，由图线可猜测它们之间可能存在什么定量关系？

注意：用图象探究两个量之间的关系，如果是曲线，往往并不能说明它们之间一定存在着什么关系，因为我们无法判断它是什么样的函数曲线。如从图 8-14 的曲线中，不能说压强与体积是反比关系。此曲线可能是抛物线的某一段，也可能是椭圆的某一段，但可以启发我们进行猜测：它们可能是双曲线，即压强与体积可能成反比。

如何通过数据证明我们的猜测？即如果它们成反比，压强与体积的倒数成正比。因此在表格中加一列 $\frac{1}{V}$ ，并通过计算机计算，作出 p - $\frac{1}{V}$ 的函数图象（如图 8-15 所示）。

比较不同实验小组的 p - $\frac{1}{V}$ 图象，

p - $\frac{1}{V}$ 函数图象均为直线，但均不通过坐标原点。

进一步提出问题，如果是正比，应该通过原点。不通过原点是说明压强与体积的倒数就是一次函数关系，并不是正比关系；还可能是实验中存在误差，以致直线不通过坐标原点。

理论分析：在气体的体积为无穷大时， $\frac{1}{V}=0$ ，气体为近似真空，压强应该为 0，所以直线不通过原点说明是实验误差。

误差的来源？是注射器与传感器相连部分的体积没有考虑。

减小误差的方法：应用容积较大的注射器，在实验过程中，气体的体积不宜压得太小，这样使那一部分的体积可以忽略不计。

（五）归纳总结

问题：根据对实验数据的分析，能否得出这样的结论，“一定质量的任何气体，在温度保持不变的情况下，气体的压强与体积成反比”。

本实验探究的目的是学习科学探究方法，体验科学探究过程，提高科学探究能力。有限的几组实验数据，要得出一个普遍规律是不够的。而且我们研究的只是空气，其他气体是否也有这样的规律，还得进一步研究。

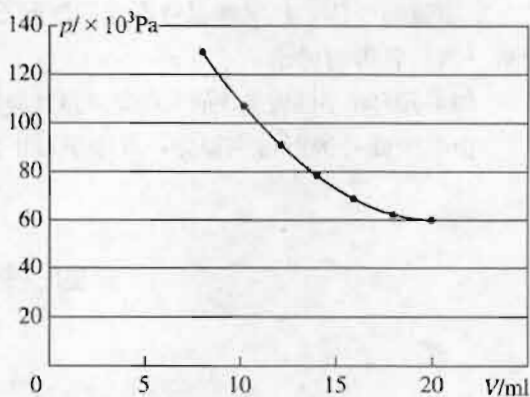


图 8-14

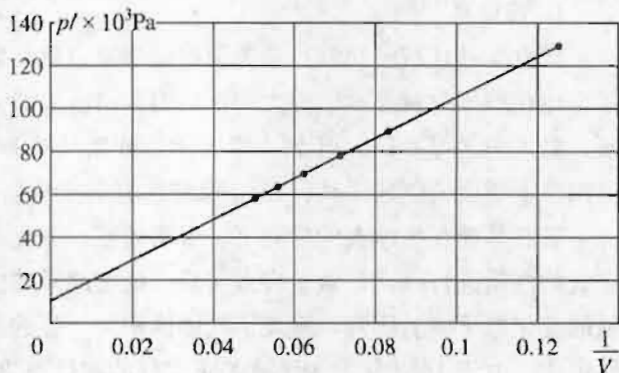


图 8-15



玻意耳定律：科学家们经过大量的事实证明，一定质量的气体，在温度保持不变的情况下，它的压强与体积成反比。

数学表达式为 $p_1V_1 = p_2V_2$ 或 $pV = C$ ，其中 C 为常量。即玻意耳定律的另一种描述，“一定质量的气体，在温度保持不变的情况下，压强与体积的乘积为常量。”

（六）思考与讨论

如果我们在不同温度下研究一定质量气体恒温下的压强与体积的关系，得到的图象有何不同？由学生课外进行自主探究，并要求写出实验报告。

四、教学资源库

（一）概念、规律和背景资料

1. 玻意耳

玻意耳（1627—1691）是英国物理学家、化学家，1627年1月25日生于爱尔兰的利斯莫尔。他在幼年时就显示出惊人的记忆力和语言才能。他八岁在伊顿公学读书，以后在瑞士、法国、意大利学习。1654年到牛津大学后开始从事系统的物理和化学的研究工作，积极参加了英国皇家学会的创建活动，1680年被选为皇家学会会长。1691年12月30日在伦敦逝世。

玻意耳曾在牛津大学建立了一个实验室，并在1659年利用胡克研制成的真空泵，开始对空气的性质进行研究，做了许多实验。他在助手的协助下，对一端封闭的弯管内气体体积随压强的变化做了实验研究，发现了气体体积与压强的反比关系，这是在力学运动以外的第一个自然定律。他于1662年发表了《关于空气的弹性与重量学说的答辩》一书，在书中介绍了他做的实验。1676年，法国物理学家马略特也独立总结出在温度恒定时气体的压强与体积成反比的定律，他的工作虽然比玻意耳晚14年，但在表述上更完整。

玻意耳在物理学上的成就还有：主张热是分子的运动，首先提出色光是白光的变种，观察到静电感应现象，指出化学发光现象是冷光等。

玻意耳是近代化学的开拓者之一。他主张物质的微粒学说，提出了接近于近代的化学元素的概念，区分了化合物和混合物。玻意耳强调实验的重要意义。他研究的面很广，在流体静力学、热学、声学、医学、生物学、生理学等方面也做过许多实验，为以后实验物理学的发展作出了贡献。

2. 查理

查理（1746—1823）是法国物理学家。他成年之后，最初在法国政府财政部当小职员。后来，他被美国物理学家富兰克林在费城雷雨中冒着生命危险研究雷电现象，勇敢探索自然界奥秘的精神所打动，对科学实验产生了浓厚的兴趣。于是，他动手制作和大量收集各种物理仪器，致力于科学实验，验证了富兰克林做过的许多实验。他举办各种物理讲座，当众出色地进行物理实验演示，在学术界赢得了很高的声誉。他经过不懈地努力，后来成为巴黎工艺学院的物理学教授，并于1795年被选为法国科学院院士。

查理在1783年首先将氢气装入气球，进行充氢气球升空实验。他随后又改进了气球的充气装置及吊起吊篮的方法，改进了测量空气流速的仪表。他与罗伯特兄弟合作，第一次实现了



充氢气球升天，他和小罗伯特第一次乘这种气球上天，后来他又独自一人乘氢气球上升到三千米的高空。他们的实验在巴黎引起了很大的轰动。

查理研究了气体的膨胀问题，发现了气体的压强随温度而改变的规律，即一定质量的气体，当体积不变时，它的压强和绝对温度成正比，这就是查理定律。他进一步发现，对于一定质量的气体，当体积不变的时候，温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，压强就增加它在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时压强的 $1/273$ 。查理还用它作根据，推算出气体在恒定压力下的膨胀率是个常数。这个预言后来由盖-吕萨克的实验所证实。

3. 实际气体不能严格遵守气体实验定律的原因

玻意耳定律、查理定律和盖-吕萨克定律，都是在压强不太大（和大气压强比较）、温度不太低（和室温比较）的条件下根据实验总结出来的。当压强很大、温度很低时，由上述气体定律得出的结果就和实际测量的结果有很大的差别。为了研究的方便，人们设想一种严格遵守实验定律的气体，这样的气体叫做理想气体。理想气体是不存在的，它只是实际气体在一定程度上的近似。有许多实际气体，特别是那些不易液化的气体，如氢气、氧气、氮气、空气、氦气等，在通常的温度和压强下，它们的性质很近似于理想气体的性质，可以把它们看成理想气体。这样处理的结果，误差很小，处理起来也简便多了。

那么，为什么实际气体不能严格遵守气体实验定律呢？下面就气体的等温变化来研究这一问题。下表列举了几种常见气体在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和不同压强下，压强和体积的乘积 pV 的实验值。实验所取的气体在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1.013\times 10^5\text{ Pa}$ 时的体积为 1 L 。

$p(1.013\times 10^5\text{ Pa})$	$pV(1.013\times 10^5\text{ Pa}\cdot\text{L})$			
	H_2	N_2	O_2	空气
1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
100	1.069 0	0.994 1	0.926 5	0.973 0
200	1.138 0	1.048 3	0.914 0	1.010 0
500	1.356 5	1.390 0	1.156 0	1.340 0
1 000	1.720 0	2.068 5	1.735 5	1.992 0

从上表可以看出，在气体压强在 $1.013\times 10^5\text{ Pa}$ 至 $1.013\times 10^7\text{ Pa}$ 之间时，实验结果与玻意耳定律相差不大；压强超过 $1.013\times 10^7\text{ Pa}$ 时，实验值与理论值之间已有显著偏离；当压强达到 $1.013\times 10^8\text{ Pa}$ 时，玻意耳定律已完全不能适用了。

实际气体在压强很大时不能遵守玻意耳定律的原因，从分子运动论的观点来分析，有下述两个方面。

(1) 分子本身占有一定的体积

分子半径的数量级为 10^{-10} m ，把它看成小球，每个分子的固有体积大约是 $4\times 10^{-30}\text{ m}^3$ 。在标准状态下， 1 m^3 气体中的分子数 $n_0\approx 3\times 10^{25}$ 。分子本身总的体积为 $n_0V\approx 1.2\times 10^{-4}\text{ m}^3$ ，跟气体的体积比较，约为它的万分之一，可以忽略不计。

当压强较小时，由于分子本身的体积可以忽略不计，因此实际气体的性质近似于理想气体，能遵守玻意耳定律。当压强很大时，例如 $p=1\times 10^8\text{ Pa}$ ，假定玻意耳定律仍能适用，气体

的体积将缩小为原来的千分之一,分子本身的总体积约占气体体积的 $\frac{1}{10}$ 。在这种情况下,分子本身的体积就不能忽略不计了。由于气体能压缩的体积只是分子和分子之间的空隙,分子本身的体积是不能压缩的,就是说气体的可以压缩的体积比它的实际体积小。由于这个原因,当压强很大时,实测实际气体的 pV 值比由玻意耳定律计算出来的理论值偏大。

(2) 分子间有相互作用力

实际气体的分子间都有相互作用,除了分子相距很近表现为斥力外,相距稍远时则表现为引力,距离再大,超过几十纳米($1\text{ nm}=10^{-9}\text{ m}$)时,则相互作用力趋于0。

当压强较小时,气体分子间距离较大,分子间相互作用力可以不计,因此实际气体的性质近似于理想气体。但当压强很大时,分子间的距离变小,分子间的相互吸引力增大。于是,靠近器壁的气体分子受到指向气体内部的引力,使分子对器壁的压力减小。因而气体对器壁的压强比不存在分子引力时的压强要小。因此,当压强很大时,实际气体的实测 pV 值比由玻意耳定律计算出来的理论值偏小。

上述两个原因中,一个是使气体的 pV 实验值偏大,一个是使气体的 pV 实验值偏小。在这两个原因中,哪一个原因占优势,就向哪一方面发生偏离。这就是实际气体在压强很大时不能严格遵守玻意耳定律的原因。同样,把盖-吕萨克定律和查理定律用于实际气体也有偏差。

4. 大气压是空气分子对器壁碰撞的宏观表现

气体的微观结构、气体分子的运动状态,与固体、液体都不一样。固体分子的位置基本上固定,分子只在一个很小的范围内以某个固定点为中心做振动;液体分子的位置不固定,分子不停地振动,其振动中心位置不断随时间变化,为“远程无序”;气体的各分子间距很大,分子之间的相互作用可以忽略不计,分子无规则热运动速度较大,分子间距离较远,只有当两个分子相碰、分子与器壁相碰时,才有相互作用。气体的压强,是气体分子不断撞击器壁,使器壁受到作用的宏观表现。

气体对器壁产生压强的物理图景是:气体分子处于无规则的热运动之中,每个时刻都有大量的气体分子撞击在器壁上;气体分子与器壁碰撞的结果,使气体分子的动量发生了变化,同时也使器壁受到了一个冲击力;所有分子对器壁碰撞所产生的冲击力之和,就是器壁受到的压力;单位面积器壁受到的压力,就是气体对器壁的压强。

由于气体分子的热运动是无规则的,单个分子的运动状态、何时与器壁碰撞、碰撞时动量的大小和方向等都具有相当大的偶然性。大量分子在较长时间内,对器壁的碰撞服从统计规律。

在中学阶段所讨论的气体,都可以认为是“理想气体”。理想气体中的各气体分子间距很大,分子之间没有相互作用,分子与其他分子碰撞、分子与器壁的碰撞都是弹性碰撞。气体处于稳定状态时密度是均匀的,各点的压强、温度都相同。可以证明,质量为 m 、摩尔质量为 M 、体积为 V 、温度为 T 的理想气体,满足气体状态方程

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (8.1)$$

式中 R 为普适气体恒量, $R=8.31\text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

大气是多种气体的混合物。大气中的每一种气体都遵从气态方程。若各种气体单独存在时产生的压强分别为 p_1 、 p_2 ……在它们均匀混合后,产生的总压强为 p ,则

$$p = p_1 + p_2 + \dots \quad (8.2)$$

处于平衡状态的理想气体,在重力场中,分子在空间的分布不均匀。如果选取地面为坐标

原点, 竖直向上的方向为 z 轴方向, 用 n 表示单位体积内的分子个数, 称为分子数密度, 则

$$n = n_0 e^{-\frac{mgz}{kT}} \quad (8.3)$$

(8.3) 式中的 n_0 为地面处 ($z=0$) 的分子数密度, n 为高度为 z 处的分子数密度。分子数密度与气体的温度 T 、摩尔质量 M 、高度 z 有关, 分子数密度随高度增加按指数规律衰减。

引入分子数密度后, 可以用分子数密度表示压强。在 (8.1) 式中, $\frac{m}{M}$ 为气体的摩尔数。

1 mol 气体有 $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ 个分子, $\frac{m}{M} N_A$ 为质量为 m 的气体内的分子个数。 $\frac{m N_A}{MV}$ 为气体的分子数密度。(8.1) 式可改写为

$$p = \frac{m}{VM} RT = \frac{m N_A}{VM} \frac{RT}{N_A} = \frac{n}{N_A} RT \quad (8.4)$$

若引入玻尔兹曼常数 $k = \frac{R}{N_A}$, 可将 (8.4) 式改写为

$$p = nkT$$

设地面处的大气压为 p_0 , 则

$$p_0 = \frac{n_0}{N_A} RT \quad (8.5)$$

将 (8.5) 式代入 (8.4) 式, 并考虑 n 、 n_0 的关系 (8.3) 式, 得

$$p = p_0 e^{-\frac{mgz}{kT}} \quad (8.6)$$

这表明, 在重力场中大气压强随高度的变化, 也是按指数衰减的。

严格、精确地求解大气压时, 应当分别讨论大气中每一种气体所产生的压强 p_i , 再根据 (8.2) 式, 将各种气体的压强加在一起, 得出大气的压强

$$p = \sum p_i$$

粗略地讨论大气压时, 可以用单一的“等效分子”代替均匀混合的实际分子。即认为大气中没有氮气、氧气等各种各样的气体, 只存在一种“等效分子”组成的气体。将实际各种气体的摩尔质量, 在大气中所占比例等值代入, 可求出这种等效分子的摩尔质量为 $2.8966 \times 10^{-2} \text{ kg}$, 将等效分子及所研究区域的有关数据代入 (8.6) 式, 就可以得知空间各点的大气压强。

(选自初中物理专题分析《液体和气体》, 教育部师范教育司组织编写,

人民教育出版社 2000 年 3 月第 1 版)

(二) 实验参考资料

1. 利用注射器验证玻意耳定律

气体定律实验器: 如图 8-16 所示, 这是一种专用的仪器, 形状类似注射器, 但活塞内部灌有硅油, 可由其下部的几个小孔流出起润滑和密封的作用, 并在高温时仍有良好的性能。活塞上部装有金属框架供挂钩码和连接测力计用。夹持它的外筒时最好能垫一层橡皮来增加摩擦。但夹持力不应太大, 否则外筒变形严重, 活塞受到的阻力就要增大。如果没有这种仪器, 可以用注射器代替, 5 mL 的比较适用, 在不太大的力作用下注射器内封闭的空气体积就可以发生明显的变化。要用白乳胶(聚醋酸乙烯)在活塞上端粘一块小木板用来支持槽码, 木板两侧对称

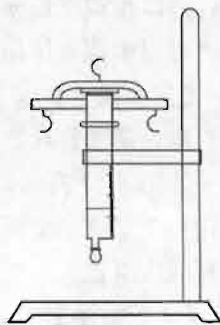


图 8-16

地拴上细绳供悬挂钩码，木板中央拴上细绳供弹簧测力计向上拉。买来的注射器要挑选一下，活塞与外筒的间隙既不太大又不太小的才好用，实验时在它们之间加一点缝纫机用的5号机油，不要提前加油，否则沾上尘土就拉不动了或者摩擦力反而加大，用毕要立即擦洗干净。检查密封时可将活塞放在最大刻度值一半的地方，封闭出气口，然后把活塞拉到最大刻度处放开，看能否回到原处，再用压缩的办法进行检查。

实验时，注射器要竖直，两侧挂的钩码要对称，向上拉活塞时也不要偏斜，使活塞受的力通过其轴线，否则会增加摩擦。为保持恒温，不要用手去握外筒。为了减小误差，还应使几次的体积变化尽可能大一些。改变体积后，可轻轻震动或用手将活塞上下拉动少许再释放，以便减小活塞所受的静摩擦力。应封入干燥的空气，才近似为理想气体。用气压计测出的外界大气压 p_0 的值要以帕为单位，只需三位有效数字。

这种方法不用水银，比较安全，但误差较大。

2. 利用压强传感器验证玻意耳定律

注射器和压强传感器如图8-17所示，压强传感器与数据采集器相连，再接入计算机。

气体的初始体积由注射器设定，体积改变的大小从注射器刻度读出。气体压强的对应值由压强传感器通过软件直接显示在计算机的屏幕上。取得各组数据后，可以列表显示，并可画出 p - V 图线或 p - $\frac{1}{V}$ 图线。软件分为通用软件和专用软件，如果作为演示，可采用通用软件，如果是学生分组实验可采用专用软件。各厂家生产的这一系统一般都具有相同的功能，效果都很好。



图 8-17

压强传感器的量程可在 $0 \sim 200$ kPa，灵敏度高而且准确。用压强传感器做实验时，注射器活塞的摩擦力不会影响气体压强的测量数据，因为气体压强直接作用在传感器上，与活塞有无摩擦力没有关系。这是用传感器实验的优点。

3. 模拟气体产生压强的机理

【实验目的】模拟气体产生压强的机理。

方案①

【实验原理】从电子秤上方不同高度处把许多粒钢珠（或绿豆）连续倒在电子秤上。用小钢珠模拟气体分子；倾倒时高度越高钢珠撞击秤盘时的动能越大，可以模拟气体分子平均动能越大。把等量的钢珠在不同时间内倒完，所用时间越短，说明单位时间内撞击秤盘的钢珠越多，可以模拟单位时间内撞击器壁上的分子数越多。电子秤的示数显示钢珠对秤盘的冲击力大小，可以模拟气体压强的大小。

【实验器材】电子秤，直径3 mm的钢珠（或绿豆），塑料饮料瓶，薄塑料尺，塑料盆，秒表，直尺。

如图8-18所示，用钢锯在靠近瓶口的瓶颈处，平行瓶口锯开一个窄缝，缝深约为瓶颈的一半，用塑料尺插入窄缝中，控制钢珠流量。

【实验方法】

(1) 把电子秤放进塑料盆内，在电子秤旁竖直放置直尺，



图 8-18

打开电子秤工作电源。

(2) 把钢珠装入饮料瓶内，调整好薄塑料尺对瓶口的遮挡比例，用手掌堵住瓶口。

(3) 让瓶口朝下，瓶身竖直在电子秤的正上方，使瓶口对齐直尺的某一刻度(图 8-19)，放开手掌，使钢珠倒出落在电子秤上，同时用秒表记录倾倒时间，在电子秤示数比较稳定时读出示数。

(4) 记录瓶口跟电子秤之间的高度、倾倒时间、电子秤示数。

(5) 改变瓶口高度，或塑料尺对瓶口的遮挡比例，重复实验。

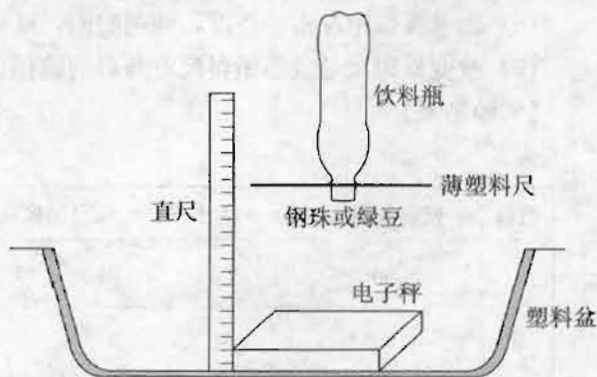


图 8-19

【实验结果】

表 1

实验物品：钢珠

组数	读数稳定时瓶口的高度/m	倾倒时间/s	电子秤示数/g	瓶口遮挡情况
1	10	5.3	92.5	不遮挡
2	20	5.3	104.0	不遮挡
3	10	17.0	29.5	挡一半
4	20	17.0	34.0	挡一半

表 2

实验物品：绿豆

组数	读数稳定时瓶口的高度/m	倾倒时间/s	电子秤示数/g	瓶口遮挡情况
1	20	8.3	19.5	不遮挡
2	40	8.3	23.0	不遮挡
3	20	5.0	25.5	挡一半
4	40	5.0	35.5	挡一半

分别对比表中的 1 组和 2 组，3 组和 4 组，说明在倾倒时间相同的条件下，倾倒高度越高，钢珠对秤盘的冲击力越大，可以模拟气体温度越高时气体分子平均动能越大，气体压强越大。

分别对比表 1 或表 2 中的 1 组和 3 组，2 组和 4 组，均说明在倾倒高度相同的条件下，倾倒时间越短，钢珠对秤盘的冲击力越大，可以模拟气体分子越密集，气体压强越大。

方案②

【实验原理】用改装后的托盘天平代替方案①中的电子秤，其他仪器及原理与方案①相同。

【实验方法】

(1) 先将托盘天平(量程 500 g)作如下改装：拿下托盘，把托盘的十字架展成平面形，把两块相同的塑料板分别用双面胶粘在支架上，调节天平平衡(图 8-20)。

(2) 仿照方案①进行实验。



图 8-20

(3) 在天平右板上放适量砝码，在左板上放连续倾倒钢珠，缓慢调节瓶口距左盘的高度，直到天平平衡。此时钢珠对左板的冲击力等于右板砝码所受的重力。

(4) 记录瓶口距左板的高度，倾倒时间，砝码质量。

(5) 改变砝码质量或薄塑料尺对瓶口的遮挡比例，重复试验。

【实验结果】

表 3

实验物品：钢珠

组数	砝码质量/g	天平平衡时瓶口高度/cm	倾倒时间/s	瓶口遮挡情况
1	50	21	10.2	不遮挡
2	60	32	10.2	不遮挡
3	30	21	17.8	挡一半
4	35	32	17.8	挡一半

表 4

实验物品：绿豆

组数	砝码质量/g	天平平衡时瓶口高度/cm	倾倒时间/s	瓶口遮挡情况
1	18	21.2	15.8	挡一半
2	20	32	15.8	挡一半
3	30	31.5	11.5	挡 2/5

可以像方案①那样进行数据对比分析。在模拟气体压强与分子平均动能关系时，可以把定量实验改为定性观察：在使天平平衡时的倾倒高度附近，上下移动瓶子，同时观察指针的摆动方向，指针向左偏，表明钢珠对左板的冲击力增加，向下移动瓶子，指针向右偏，表明钢珠对左板的冲击力变小。

【注意事项】倾倒时瓶口高度要适中，不要发生钢珠或绿豆在板上堆积的现象，并且使其落在盆内，以便于收集，最好把电子秤或天平放在盆中进行实验。

河北正定中学物理组

五、补充习题

A 组

1. 如图 8-21 所示，竖直放置的弯曲管 A 端开口，B 端封闭，密度为 ρ 的液体将两段空气封闭在管内，管内液面高度差分别为 h_1 、 h_2 和 h_3 ，则 B 端气体的压强为 () (已知大气压强为 p_0)

- A. $p_0 - \rho g(h_1 + h_2 - h_3)$
- B. $p_0 - \rho g(h_1 + h_3)$
- C. $p_0 - \rho g(h_1 + h_3 - h_2)$
- D. $p_0 - \rho g(h_1 + h_2)$

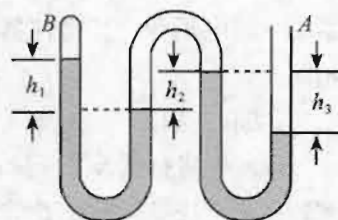


图 8-21

2. 医院急诊室给病人输液的装置如图 8-22 所示, 在输液过程中 ()

- A. a 部分气体压强不变, b 处药液下滴速度不变
 B. a 部分气体压强减小, b 处药液下滴速度减小
 C. a 部分气体压强增大, b 处药液下滴速度变快
 D. a 部分气体压强增大, b 处药液下滴速度不变

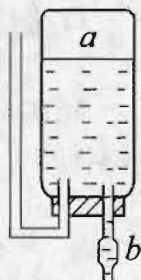


图 8-22

3. 如图 8-23 甲所示, 一定质量的理想气体的状态沿 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ 的顺序作循环变化, 若用 $p-V$ 或 $V-T$ 图象表示这一循环, 图 8-23 乙图中表示正确的是 ()

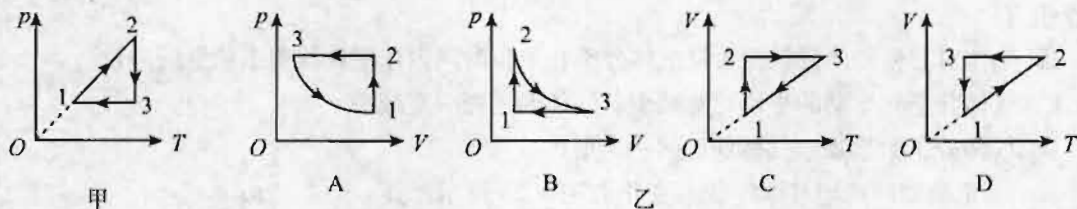


图 8-23

4. 有一个氢气瓶, 由于压强不大, 可以把其中的氢气看做理想气体。它的 $p-T$ 图线如图 8-24 所示, 如果瓶中氢气经历了过程 $1 \rightarrow 2$, 则它 ()

- A. 正在充气
 B. 正在用气
 C. 内部气体质量没有变化
 D. 无法确定

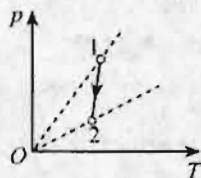


图 8-24

5. 一端封闭的玻璃管竖直放置, 开口向上, 管内有一截水银柱把一部分封闭在管的下部。当玻璃管静止时, 气柱长为 l , 压强为 p , 大气压强为 p_0 。当它开口向上, 竖直自由落下时, 气柱长为 l' , 压强为 p' , 若气体温度不变, 则 ()

- A. $p' > p, l' > l$
 B. $p > p' > p_0, l' > l$
 C. $p' = p_0, l' > l$
 D. $p' = p_0, l' < l$

6. 如图 8-25 所示, 光滑活塞把一定质量的气体封闭在汽缸里, 活塞面积为 10 cm^2 。汽缸内温度为 27°C 时, 弹簧测力计的读数为 10 N , 已知汽缸内气体压强比外界大气压强大 $2 \times 10^4 \text{ Pa}$, 则活塞的重为 ()

- A. 10 N
 B. 20 N
 C. 40 N
 D. 30 N

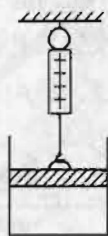


图 8-25

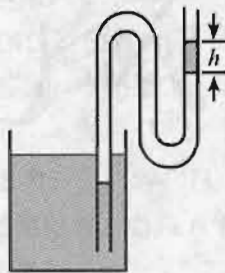


图 8-26

7. 如图 8-26 所示, 两端开口的弯管, 左管插入水银槽中, 右管有一段高为 h 的水银柱, 中间封有一段空气, 则 ()

- A. 弯管左管内外水银面的高度差为 h
 B. 若把弯管向上移动少许, 则管内气体体积增大

C. 若把弯管向下移动少许, 则右管内的水银柱沿管壁上升

D. 若环境温度升高, 则右管内的水银柱沿管壁上升

8. 图 8-27 为一定质量的理想气体在 p - V 图中的等温变化图线, A 、 B 是双曲线上的两点, $\triangle OAD$ 和 $\triangle OBC$ 的面积分别为 S_1 、 S_2 , 则 ()

A. $S_1 < S_2$

B. $S_1 = S_2$

C. $S_1 > S_2$

D. S_1 与 S_2 的大小关系无法确定

9. 下列说法正确的是 ()

A. 气体对器壁的压强就是大量气体分子作用在器壁单位面积上的平均作用力

B. 气体对器壁的压强就是大量气体分子在单位时间内作用在器壁上的平均冲量

C. 气体分子热运动的平均动能减少, 气体的压强一定减小

D. 气体分子数增加, 气体的压强一定增大

10. 一定质量的理想气体, 状态变化如图 8-28 所示, 其中 AB 段与 t 轴平行, 已知在状态 A 时气体的体积为 10 L, 那么变到状态 B 时气体的体积为 _____ L, 从状态 B 到状态 C , 气体做 _____ 变化。

11. 两个半球壳拼成的球形容器内部已抽成真空, 球形容器的半径为 R , 大气压强为 p_0 , 为使两个球壳沿图 8-29 中所示的箭头方向分离, 则应施加的拉力 F 至少为 _____。

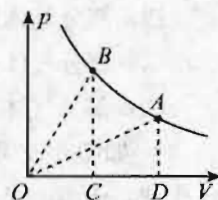


图 8-27

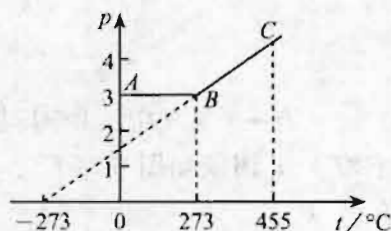


图 8-28

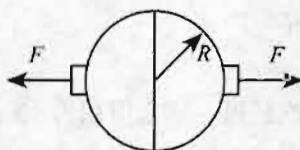


图 8-29

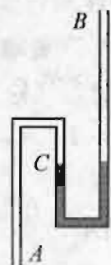


图 8-30

12. 如图 8-30 所示, 粗细均匀的弯曲玻璃管 A 、 B 两端开口, 管内有一段水银柱, 右管内气体柱长为 39 cm, 管内 C 处的水银面与管口 A 之间的水银柱长为 40 cm。先将 B 端封闭, 再将左管竖直插入水银槽中, 设整个过程温度不变, 稳定后右管内水银面比管内 C 处的水银面高 2 cm, 已知大气压强为 p_0 , 相当于 76 cm 高的水银柱产生的压强。求:

(1) 稳定后右管内的气体压强 p ;

(2) 左管 A 端插入水银槽的深度 h 。

13. 如图 8-31 所示, 喷雾器内有 10 L 水, 上部封闭有 2 L 的空气, 压强为 1.01×10^5 Pa。关闭喷雾阀门, 用打气筒向喷雾器内再充入 3 L、压强也为 1.01×10^5 Pa 的空气 (设外界环境温度一定, 空气可看做理想气体)。当水面上方气体温度与外界温度相等时, 求气体的压强, 并从微观上解释气体压强变化的原因。

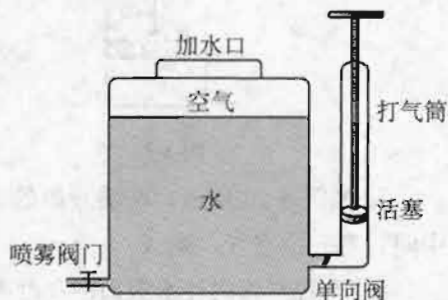


图 8-31

14. 一定质量的理想气体由状态A经状态B变为状态C, 其中从A到B的过程为等压变化, 从B到C的过程为等容变化。已知 $V_A = 0.3 \text{ m}^3$, $T_A = T_C = 300 \text{ K}$, $T_B = 400 \text{ K}$ 。

(1) 求气体在状态B时的体积。

(2) 从微观的角度解释从B到C过程, 气体压强变化的原因。

15. 如图8-32所示, 一定质量的理想气体被活塞封闭在可导热的汽缸内, 活塞相对于底部的高度为 h , 可沿汽缸无摩擦地滑动。取一小盒沙子缓慢地倒在活塞的上表面上。沙子倒完时, 活塞下降了 $\frac{h}{4}$ 。再取相同质量的一小盒沙子缓慢地倒在活塞的上表面上。外界大气的压强和温度始终保持不变, 求此次沙子倒完时活塞距汽缸底部的高度。

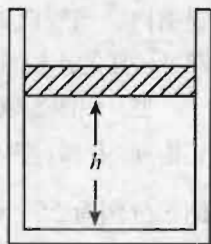


图 8-32

B 组

16. 如图8-33所示, 在一竖直放置的上细下粗的密闭细管内, 水银柱将气体分隔成A、B两部分, 初始温度相同。使A、B升高相同温度达到稳定后, 体积变化量为 ΔV_A 、 ΔV_B , 压强变化量为 Δp_A 、 Δp_B , 对液面压力的变化量为 ΔF_A 、 ΔF_B , 则()

A. 水银柱向上移动了一段距离

B. $\Delta V_A < \Delta V_B$

C. $\Delta p_A > \Delta p_B$

D. $\Delta F_A = \Delta F_B$



图 8-33

17. 如图8-34所示, 在U形管的右侧封闭了一定的理想气体, 当它处于图中的a、b、c三种状态时, 请比较温度 T_a 、 T_b 、 T_c 的高低()

A. $T_b > T_a > T_c$

B. $T_b > T_c > T_a$

C. $T_a > T_b > T_c$

D. $T_c > T_a > T_b$

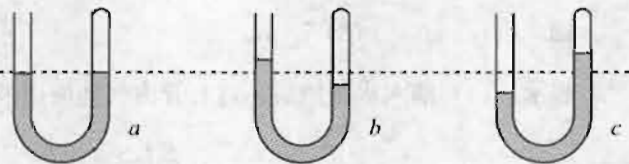


图 8-34

18. 两端封闭的竖直放置的玻璃管的中段有一段水银, 水银柱的上、下方存有密闭气体, 当它在竖直方向运动时, 发现水银柱相对玻璃管向上移动, 则下列说法正确的是()

A. 玻璃管做匀速运动, 环境温度升高

B. 温度不变, 玻璃管向下做减速运动

C. 温度不变, 玻璃管向下做加速运动

D. 温度降低, 玻璃管向下做减速运动

19. 汽车行驶时轮胎的胎压太高容易造成爆胎事故, 太低又会造成油耗上升。已知某型号轮胎能在 $-40^\circ\text{C} \sim 90^\circ\text{C}$ 的环境中正常工作, 为使轮胎在此温度范围内工作时的最高胎压不超过标准大气压的3.5倍, 最低胎压不低于标准大气压的1.6倍, 那么在 $t = 20^\circ\text{C}$ 时给该轮胎充气, 充气后的胎压在什么范围内比较合适?(设轮胎的容积不变)

20. 如图8-35所示, 一根粗细均匀、内壁光滑、竖直放置的玻璃管下端密封, 上端封闭但留有一抽气孔。管内下部被活塞封住一定量的气体(可视为理想气体), 气体温度为 T_1 。开始时, 将活塞上方的气体缓慢抽出, 当活塞上方的压强达到 p_0 时, 活塞下方气体的体积为 V_1 , 活塞上方玻璃管的容积为 $2.6V_1$, 活塞因重力而产生的压强为 $0.5p_0$ 。继续将活塞上方抽成真空并密封,



图 8-35

且整个抽气过程中管内气体温度始终保持不变，最后将密封的气体缓慢加热，求：

- (1) 活塞刚碰到玻璃管顶部时气体的温度；
- (2) 当气体温度达到 $1.8 T_1$ 时，气体的压强。

21. 在温度不变的条件下，把一根长为 100 cm，上端封闭的玻璃管竖直插入一个较深的水银槽内，当管口到管外的距离恰好是管长的一半时，玻璃管保持静止。若当时的大气压相当于 75 cm 高的水银柱产生的压强，求水银进入管内的高度 h 是多少？

22. 如图 8-36 所示，在大气中有一水平放置的固定圆筒，它由 a 、 b 和 c 三个粗细不同的部分连接而成，各部分的横截面积分别为 $2S$ 、 $\frac{1}{2}S$ 和 S 。已知大气压强为 p_0 ，温度为 T_0 ，两活塞 A 和 B 用一根长为 $4l$ 的不可伸长的轻线相连，把温度为 T_0 的空气密封在两活塞之间，此时两活塞的位置如图所示。现对被密封的气体加热，使其温度缓慢上升到 T 。若活塞与圆筒壁之间的摩擦可忽略，此时两活塞之间气体的压强可能为多少？

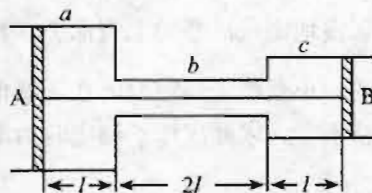


图 8-36

参考答案

A 组

1. B 2. D 3. B 4. B 5. C 6. D 7. ACD 8. B 9. A

10. 20；等容 11. $\pi R^2 p_0$

12. (1) $\frac{39}{38} p_0$ (2) 7 cm

提示：(1) 插入水银槽后，对右管内气体应用波意耳定律得

$$p_0 l_0 S = p(l_0 - \frac{\Delta h}{2}) S$$

代入数值，解得 $p = \frac{39}{38} p_0$ 。

(2) 插入水银槽后，左管内气体的压强 $p' = p + \rho g \Delta h$ ，左管内、外水银面高度差 $h_1 = \frac{p' - p_0}{\rho g} = 4$ cm，对中、左管内气体有 $p_0 l S = p' l' S$ ， $l' = 38$ cm，由此解得左管插入水银槽的深度

$$h = l + \frac{\Delta h}{2} - l' + h_1 = 7 \text{ cm}$$

13. 气体的压强为 2.53×10^5 Pa。温度不变，分子的平均动能不变，但单位体积内分子数增加，所以压强增加。

14. (1) 0.4 m^3

(2) 气体体积不变，分子密集程度不变。温度降低，气体分子平均动能减小，导致气体压强减小。

15. $\frac{3}{5} h$

B 组

16. AC

解析: 首先假设液柱不动, 则 A、B 两部分气体发生等容变化, 它们的初始温度相同, 由查理定律可知, 对 A 中的气体有 $\frac{p_A}{T_A} = \frac{p'_A}{T'_A}$; 对 B 中的气体有 $\frac{p_B}{T_A} = \frac{p'_B}{T'_A}$ 。又因为初始状态满足 $p_A = p_B + \rho gh$, 可见要使 A、B 中的气体升高相同温度, 应有 $p'_A = \frac{T'_A}{T_A} p_A = \frac{T'_A}{T_A} (p_B + \rho gh)$, $p'_B = \frac{T'_A}{T_A} p_B$ 。因此 $\Delta p_A > \Delta p_B$, $\Delta F_A > \Delta F_B$, 液柱将向上移动, A 正确, C 正确; 由于气体的总体积不变, 因此 $\Delta V_A = \Delta V_B$, 所以 B、D 错误。

17. A

提示: 根据理想气体状态方程可知, $\frac{pV}{T} = C$ 。b 比 a 的体积大, 压强又大, 所以 $T_b > T_a$; 同理可得, $T_c < T_a$ 。

18. AC

19. 设标准大气压为 p_0 , 范围在 $2.01 p_0$ 到 $2.83 p_0$ 之间。

解析: 由于轮胎容积不变, 轮胎内气体做等容变化。设大气压为 p_0 , 充气后的最小胎压为 $p_{\min}$, 最大胎压为 $p_{\max}$ 。依题意, 当 $T_1 = 233 \text{ K}$ 时胎压为 $p_1 = 1.6 p_0$ 。根据查理定律, $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_{\min}}{T_0}$, 即 $\frac{1.6 p_0}{233} = \frac{p_{\min}}{293}$, 解得 $p_{\min} = 2.01 p_0$ 。

当 $T_2 = 363 \text{ K}$ 时, 胎压为 $p_2 = 3.5 p_0$ 。根据查理定律, $\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_{\max}}{T_0}$, 即 $\frac{3.5 p_0}{363} = \frac{p_{\max}}{293}$, 解得 $p_{\max} = 2.83 p_0$ 。

20. (1) $1.2 T_1$ (2) $0.75 p_0$

解析: (1) 活塞上方气体的压强为 p_0 时, 活塞下方气体的体积为 V , 抽气过程为等温过程, 活塞上方抽成真空时, 下方气体的压强为 $0.5 p_0$ 。由玻意耳定律得

$$\frac{V}{V_1} = \frac{p_0 + 0.5 p_0}{0.5 p_0}$$

式中 V 是抽成真空后活塞下方气体的体积。此后, 气体等压膨胀, 由盖—吕萨克定律有

$$\frac{2.6 V_1 + V_1}{V} = \frac{T'}{T_1}$$

解得 $T' = 1.2 T_1$ 。

(2) 活塞碰到顶部后的过程是等容升温过程, 由查理定律得

$$\frac{1.8 T_1}{T'} = \frac{p_2}{0.5 p_0}$$

代入数值, 解得 $p_2 = 0.75 p_0$ 。

21. 25 cm

提示: 设进入管中的水银柱高度为 h , 管的横截面积为 S , 根据玻意耳定律有 $p_1 V_1 = p_2 V_2$, 再考虑题目中给的数据可知, $75 \times 100 S = (75 + 50 - h) \times (100 - h) S$, 代入数值, 解得 $h = 25 \text{ cm}$ 。

22. 当 $T \leq \frac{5}{4} T_0$ 时, $p = p_0$; 当 $T > \frac{5}{4} T_0$ 时, $p = \frac{4T}{5T_0} p_0$

解析: 设加热前, 被密封气体的压强为 p_1 , 轻线的张力为 F , 根据平衡条件, 对活塞 A 有

$$2 p_0 S - 2 p_1 S + F = 0$$

对活塞B有

$$p_1 S - p_0 S - F = 0$$

解得 $p_1 = p_0$, $F = 0$ 。即被密封气体的压强与大气压强相等, 轻线处在拉直的松弛状态, 这时气体的体积为 $V_1 = 2Sl + Sl + Sl = 4Sl$ 。对气体加热时, 被密封气体的温度缓慢升高, 两活塞一起向左缓慢移动, 气体体积增大, 压强保持 p_1 不变, 若持续加热, 此过程会一直持续到活塞向左移动的距离等于 l 为止, 这时气体的体积为 $V_2 = 4Sl + Sl = 5Sl$, 根据盖—吕萨克定律得 $\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_1}{T_0}$, 解得 $T_2 = \frac{5}{4}T_0$ 。

由此可知, 当 $T \leq T_2 = \frac{5}{4}T_0$ 时, 气体的压强为 $p = p_0$; 当 $T > T_2$ 时, 活塞已无法移动, 被密封气体的体积保持 V_2 不变, 由查理定律得 $\frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_2}$, 解得 $p = \frac{4T}{5T_0}p_0$ 。即当 $T > \frac{5}{4}T_0$ 时, 气体的压强为 $\frac{4T}{5T_0}p_0$ 。

人教版®

第九章

固体、液体和物态变化

课程标准的要求

1. 了解固体的微观结构。会区别晶体和非晶体，列举生活中常见的晶体和非晶体。
2. 了解材料科学技术的有关知识及应用，体会它们的发展对人类生活和社会发展的影响。
3. 了解液晶的微观结构。通过实例了解液晶的主要性质及其在显示技术中的应用。
4. 通过实验，观察液体的表面张力现象，解释表面张力产生的原因，交流日常生活中表面张力现象的实例。
5. 知道饱和汽、未饱和汽和饱和汽压。了解相对湿度。举例说明空气的相对湿度对人的生活和植物的生长的影响。

一、本章教材概述

物体是由数量极多的分子组成的。分子永不停息地做无规则运动，分子间存在相互作用的引力与斥力。这些因素决定了分子的不同聚集状态，也就决定了物质的结构。当分子的无规则运动起主要作用时，物质将呈气体状态，这在第八章已经学习到；当分子力起主要作用时，物质将呈固体状态；当分子无规则运动与分子力这一对矛盾旗鼓相当时，物质将呈液体状态。物质的不同结构，自然表现出不同的物理性质。这一章的主要任务就是学习不同物态下物质的一些物理性质。

本章知识内容共4节，大致可以划分为两个单元。

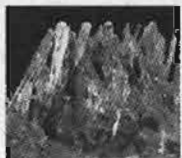
第一单元包括第1、2节，即“固体”和“液体”，讲述固体和液体的性质。这部分内容，可以看成是第七章“分子动理论”的具体应用。关于固体，介绍晶体及其微观结构；关于液体，主要介绍液体的表面现象。

第二单元包括第3、4节，即“饱和汽与饱和汽压”和“物态变化中的能量交换”，通过讲述汽化过程的一些知识，再扩展到物态变化过程中的能量交换。这部分内容是对初中学过的物态变化知识的扩展与加深。

本章讲授的知识在生产和生活中有一定的实用意义，对于学习分子物理学的研究方法、培养观察能力和抽象思维能力也是有好处的。

关于晶体的各向异性，教科书只就导热性进行了说明。虽然提到了晶体的电学性质、光学性质也是各向异性的，但不要求具体讲解，只要学生知道就可以了。

关于空间点阵，只要求学生知道组成晶体的物质微粒在空间中依照一定的规则排成整齐的行列就可以了。至于用点阵概念来解释晶体的规则外形和各向异性，只要求学生有个大体的了解，不要求做进一步的解释。为了说明液体表面的收缩趋势，教科书提出了表面层的概念。这里不要求讲解表面层的形成，只要学生知道表面层里的分子比液体内部稀疏即可。为了说明浸



润和不浸润，教科书提出了附着层的概念。这里也不要求讲解附着层的形成，只要求学生知道附着层里分子比液体内部密或稀是形成浸润或不浸润的原因就可以了。至于为什么固体分子的吸引比较弱（或强），附着层里分子就比较稀（或密），则不要求加以解释。毛细现象的教学，要求学生能够利用浸润现象和表面张力的知识对毛细现象的产生做出解释，但不要求对液柱上升或下降的高度进行定量的计算。饱和汽的知识是讲解空气湿度的基础，理解饱和汽的知识，关键在于对动态平衡过程的理解。教科书对汽化热也用分子动理论和能量转化的知识作了说明。液体汽化时用于克服外界压强所做的功不能忽略，沸点变化时汽化热差别较大，这些与溶解热的不同点，也要让学生有所了解。讲述这一章，应该使学生多了解一些物理现象，有利于学好物理。通过这一章的学习，要注意使学生体会到，分子动理论不但能从微观上研究气体，而且能够研究固体和液体；人们的研究从宏观领域进入微观领域，使人类对自然界的认识前进了一大步。

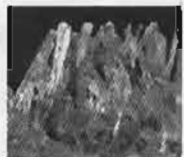
在编写本章内容时有以下一些思考。

1. 从宏观特征入手，认识晶体的微观结构

人类对物质的认识是从宏观到微观不断深入的过程。在对物质的属性具有一定认识的基础上，人们才能对自然界中的各种物质加以区分、识别和利用。在初中阶段，学生通过对声、光、热、电、磁、力与物质的相互作用的学习，初步认识了物质的形态和变化、物质的属性、物质的结构与物体的尺度等，这些知识为进一步认识物质的宏观特征和微观结构奠定了基础。我们说物质有三态——固态、液态、气态，这是一种粗略的分类。高中物理的学习要求能从物质内部结构加以分析。教科书以分子动理论为基础，定性地研究了晶体的结构特点。应该注意到，决定物态的基本因素是微观粒子，物质的任何形态都是由大量微观粒子聚集而成的。微粒作为物质结构的最基本单元，其物理性质或化学性质是构成物态的内在根据，而外界温度、压力或外场（电场、磁场等）则是物态存在和转化的条件。晶体和非晶体在物理性质上的差别是由于它们内部物质微粒的排列不同造成的，教科书正是从晶体所具有的三个宏观特征加以说明的。其一，外观上两对应的晶面夹角恒等（这个特征教科书的处理是隐含的）。教科书以“两类固体物质的外表有什么特征？”这一“思考与讨论”问题开始，通过照片和图示来呈现晶体的几何形状是规则的外形特征。其二，物态变化时有确定的熔点（适当复习初中的相关内容）。其三，物理性质表现为各向异性。注意，并非每种晶体都能在各种物理性质上表现出各向异性。教科书以云母片上蜂蜡熔化区域形状的不对称性来表现晶体在导热性上的各向异性。另外，方解石容易产生双折射现象，这是晶体在光学特性方面表现的各向异性；方铅矿在导电性上表现出显著的各向异性，等等，教科书没有一一列举。这三个方面既是鉴别晶体与非晶体的标志，也是区分不同类型晶体的基本条件。另外，教科书提到晶体的多形性以及同一种物质既能以晶体的形式存在，又能以非晶体的形式存在，目的是避免学生在物质存在的形式上产生片面的、绝对化的错误认识。

2. 用分子动理论解释液体的性质

怎样认识液态物质的性质呢？教科书首先从分子动理论的观点出发，分析构成气体、液体、固体的分子间相互作用力的差异，引出液体的微观结构的特点。随后，主要围绕表面张力、浸润和不浸润、毛细现象三个问题展开讨论。第一，表面张力是液体表面层各个部分之间相互作用的吸引力，它是由于液体表面层的分子分布比液体内部稀疏产生的，具有对液体表面层的收缩趋势。教科书从观察实验入手，并通过观察思考定性地给出解释，其中实验栏目的行文没有描述实验结果，但给出了图示，目的是通过实验，引导学生观察现象，深入思考，发现问题。在该实验中学生可能会产生下面一些疑问。如“为什么用热针能刺破肥皂膜、用冷针则刺不破？”这是因为液体的表面张力跟温度有关，温度升高时表面张力会减小。另外，对液体



表面层的收缩趋势的解释不做硬性要求。如,“当用热针刺破棉线圈内肥皂膜时,为什么圈外薄膜收缩会将线圈张紧成圆形?”这是因为周长相同时,以圆形面积为最大。同理,在体积相等的各种形状的物体中,球形物体的表面积最小,所以,液滴就要呈球形。而且液滴越小,形状就越接近球形。第二,浸润和不浸润现象的产生是由附着层的性质决定的。液体的附着层里的分子一方面受到液体内部分子的作用,另一方面受到器壁固体分子的作用。因此,附着层分子的分布,比液体表面层总要密一些(固体分子的作用比气体分子作用要强),与液体内部相比是疏还是密,就要看固体分子的作用强弱了。教科书仍以观察实验入手,并通过观察思考定性给出解释。第三,毛细现象是由附着层的收缩力或排斥力共同作用的结果。同样,教科书从观察实验入手,并通过观察思考给出了初步定性的解释。目的是引导学生运用已经学过的表面张力、浸润和不浸润的知识对现象产生的原因进行解释。

3. 从“动”的角度认识现象,理解“动态平衡”的思想

汽化和液化是气、液两种物态变化的互逆过程。教科书“思考与讨论”栏目提出“难道密闭容器里液体的分子不再飞离液面了吗?”的问题,这就要求从“动”的角度思考这个问题。密闭容器中同时存在着蒸发和液化两种过程,蒸发的快慢受到液体温度的制约,液化的快慢受到液面上气体密度的制约。当单位时间内从液体里逸出的分子数等于回到液体里的分子数,液面上方的气体密度不再改变时,气体和液体之间就达到了“动态平衡”。这种从“动”的角度来认识物理现象,学生往往不太习惯,但却十分重要,在以后的学习中还会遇到。学生理解“动态平衡”也是学习饱和汽内容的关键,对后面学习空气的湿度以及有关气象的知识都是有帮助的。

4. 从分子动理论认识物态变化中的能量交换

学生在初中已经形成了“蒸发吸热”“液化放热”“熔化吸热”“凝固放热”的认识,这也就是他们对物态变化中的能量交换的初步认识。高中阶段要求能从物质内部结构加以分析。教科书从固体、液体的微观结构入手,分析了物质发生物态变化时,其分子结构发生的改变,目的是使学生对初中学习的晶体熔化、液体汽化时的温度变化曲线有更深入的理解。

课时分配建议

第1节 固体	1课时
第2节 液体	1课时
第3节 饱和汽与饱和汽压	1课时
第4节 物态变化中的能量交换	1课时

二、教材分析与教学建议

第1节 固体

1. 教学目标

- (1) 知道固体分为晶体和非晶体两大类。
- (2) 知道晶体和非晶体在外形上和物理性质上的区别。

- (3) 知道晶体分为单晶体和多晶体。
- (4) 了解固体材料在生活、生产、科学研究等方面的应用。

2. 教材分析与教学建议

教科书对这部分知识要求较低,只简要讲述晶体的特征,晶体与非晶体的区别,以及固体的微观结构,而不涉及固体的其他性质。教学时要注意把握深度和广度,不宜讲得太多、太深。

为了扩展学生的眼界,引起他们对研究固体性质的兴趣和求知欲望,在本单元教学开始,可以简述一下有关固体材料和固体物理的发展概况,简单介绍学生感兴趣的纳米和纳米技术,使学生对固体的学习产生浓厚的兴趣。

固体材料在科研、生产和日常生活中都有广泛应用,固体在材料科学技术中占有非常重要的地位,按指定的性能设计新的固体材料已成为固体物理的重要研究内容。固体物理已发展成为一门独立的综合性学科,是物理学的重要分支。由于各种尖端技术对固体材料提出多种多样的要求,因此固体物理同现代尖端技术的发展有非常密切的联系。例如,原子能技术需要耐放射性辐射的固体材料;高速飞行的火箭、导弹需要耐高温、耐辐射、强度高、质地轻的合金材料;电子技术需要满足不同要求的半导体材料,等等。在科研和生产需要的推动下,新理论和新技术相互促进、相辅相成,使固体物理在近代原子理论的基础上得到了巨大的发展。

有条件的学校,可以让学生通过网络、图书馆,或走访研究固体物理的科研工作者,了解我国在固体材料研究方面的成果。

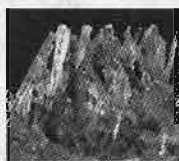
(1) 晶体与非晶体

在教学过程中,首先让学生通过对固体、液体、气体不同性质的讨论,根据自己平时的观察与经验对三种不同的物态性质进行归纳,形成一个初步的认识,随后再突出对固体的研究。在对固体的研究中,为了激发学生的学习热情可简单介绍固体材料,从古代的陶器到现代的纳米技术,从日常生活到高端科技中各种固体材料的应用。

本节的重点、难点是学生认识晶体与非晶体的区别以及能够分辨出常见的晶体与非晶体。因此建议教师在讲授固体的分类时,除了给出生活中的一些晶体与非晶体的例子外,还应该通过放大镜或显微镜去观察晶体与非晶体的外形,如晶体有食盐、冰糖、味精、明矾等,非晶体有玻璃、石蜡等。通过引导学生的实际观察,从而使学生获得对晶体与非晶体在外形上的感性认识。教学中还可以借助于挂图、模型、视频,以及准确的语言、数据来进一步深入展示晶体规则的外形特征。

为了进一步让学生了解晶体的物理性质,建议教师通过各种实验活动进行对比,使学生理解单晶体与非晶体、单晶体与多晶体的区别。如用云母片、玻璃片、金属片研究导热的性质,了解云母片导热的各向异性,玻璃片与金属片的各向同性;用方铅矿研究导电的各向异性。从而说明,晶体具有各向异性,并不是只有导热的各向异性,还有导电性质、对光的折射性质、力的性质等表现为各向异性。同时需要特别强调,并不是每种晶体在各种物理性质上都会表现出各向异性,如云母导热的各向异性,方铅矿导电的各向异性,方解石在光的折射上表现出各向异性,铜晶体在弹性上会表现出显著的各向异性,等等。在这部分教学过程中,教师还可以提出新的研究课题,让学生去发现其他晶体不同的物理特性。

可以让学生通过显微镜去观察多晶体(金属材料),使他们能直观感受到多晶体是由无数个有规则外形的小晶体杂乱无章排列而成的,因此,整体就没有规则的外形,同时也不具有物理性质的各向异性。对多晶体与非晶体,因为它们都存在各向同性,那么如何区别它们呢?建议教师通过对晶体与非晶体在熔化过程上的差异,通过实验数据的图表分阶段进行描述,从而



加深学生对其区别的认识。

在学生了解晶体与非晶体在外形、物理性质上区别之后。可以指导学生查阅相关资料,去进一步了解晶体与非晶体的其他知识,如晶体与非晶体的相互转化、人工晶体的形成以及晶体的用途,等等。

教学中要注意以下问题。

第一,单晶体具有以下特性:

①具有天然的规则外形。这种规则的外形不是人工造成的,是晶体本身具有的。

②物理性质各向异性。规则的几何形状和各向异性都是晶体区别于非晶体的性质。但晶体有时不完整,它的外形也容易受到破坏,使外部特征不显著,所以各向异性就成为判断晶体和非晶体的一个基本特征。

③具有一定的熔点。根据初中学过的知识,可以告诉学生,晶体的另一个基本特征是具有一定的熔点。同时指出,这是从宏观上区分晶体和非晶体的重要依据。当不能从外形及各向异性来鉴别物体是否是晶体时,只有根据有无一定熔点才能作出准确判断。

第二,多晶体虽无规则的几何形状,物理性质又各向同性,但是组成多晶体的晶粒却有规则的几何形状,物理性质呈各向异性。这是多晶体和非晶体在内部结构上的区别。多晶体与非晶体的区别还在于,多晶体跟单晶体一样具有一定的熔点,非晶体则没有。

本节“实验”栏目的教学需要注意,热源用 30 W 电烙铁顶端缠绕直径 1 mm 的铜丝,要从云母的背面加热。详细的实验注意事项,可参考本书“教学参考资料”(三)中实验参考资料部分的相关内容。

(2) 晶体的微观结构

本节内容是从固体的宏观性质不同入手,提出组成晶体的微粒有规则排列的假说,并介绍了用不同的方法证明了组成晶体微粒的有序排列的科学历程。其目的是让学生学习研究问题的科学方法与严谨的科学态度。教科书再从微观的结构模型解释宏观的物理性质。人们可以根据需要改变物质的微观结构,从而改变物质的基本属性,使得固体材料在生活、生产、科学研究等方面得到充分应用。

建议教师收集“劳厄与晶体 X 射线衍射实验”的相关资料,让学生了解劳厄等科学家研究固体的微观结构的科学方法。

要强调晶体的宏观性质是由晶体的微观结构决定的。可以通过晶体的微观结构初步解释晶体外形的规则性和物理性质的各向异性。教科书对此要求并不高,重点在于让学生体会到晶体外形的规则性和物理性质各向异性与物质的结构有关,使学生从微观的晶体结构去解释宏观外形与物理性质的差异。

教学中要注意几个问题:

①讲明同一物质的微粒能够形成不同的空间结构,即物质的同分异构体。教学中可以使用碳的不同空间结构来说明这一点。

②晶体的微观结构模型并不代表晶体结构的真实情况,它只是组成晶体的物质微粒有规则排列的示意图。

③使学生认识到物质是晶体还是非晶体并不是绝对的,以便扩大学生眼界,避免出现片面的、绝对化的错误认识。

(3) 关于“科学漫步”

让学生通过小组之间的交流与讨论,了解固体材料在应用方面的发展,激发学生参与科技

活动的热情,培养学生将物理知识应用于生活和生产实践的意识。

也可以让学生通过阅读“科学漫步”,上网查阅资料,写一篇读后感,内容可以是“面对固体材料在生活中的应用,我想……”“面对我国在固体材料研究领域的工作,我想……”,等等。可以通过板报的形式,交流同学们的心得体会。

老师也可以准备一些材料。搞一次科普讲座“新材料在生活中的应用”,让学生了解当前材料科学的发展。

3. 问题与练习

内容分析

第1题的目的是要求学生了解晶体物理性质的各向异性,有的在导热方面,有的在导电方面,有的在力学性质方面,而有的在光的折射方面,等等。但并不是只要是晶体,任何物理性质均能表现为各向异性。多晶体并不能表现各向异性。

第2题是通过食盐的空间点阵,建立微观粒子的空间模型,并通过阿伏加德罗常数,建立宏观量与微观量之间的关系。

第3题设计的目的是使同学们进一步了解晶体在敲碎后为什么还有规则的外形。

解答与说明

1. 解答:犯了“以偏概全”的错误。并不是所有的晶体在导热方面均是各向异性,另外对于所有的多晶体并不存在导热的各向异性。

2. 解答:还需知道食盐的摩尔质量 M 和阿伏加德罗常数 N_A 。在每一个小立方体内有 4 个 Na^+ , 而每个 Na^+ 又为 8 个小立方体共有, 所以每个小立方体对应 $\frac{1}{2}$ 个 NaCl 。设每个小立方体的边长为 a , 则

$$\rho a^3 N_A = \frac{1}{2} M$$

即 $a = \sqrt[3]{\frac{M}{2\rho N_A}}$, 相邻两个 Na^+ 之间的距离为

$$d = \sqrt{2}a = 1.41 \sqrt[3]{\frac{M}{2\rho N_A}}$$

3. 在选修 3-1 中有一个题目, 要求计算氢的原子核与核外电子间的相互作用力。得到的结果是: $\frac{F_1}{F_2} = 2.3 \times 10^{39}$, F_1 表示静电力, F_2 表示万有引力。因此, 在分析氯、钠离子间的作用力时, 应主要考虑氯、钠离子间的静电力作用。

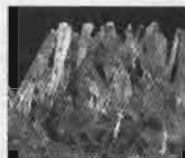
解答: (1) 设每个正方形的边长为 a , 相距 r 的两个离子之间的相互作用力为 $F = \frac{A}{r^2}$ 。则 M 受力为

$$F_M = 2 \times \frac{A}{a^2} \times \cos 45^\circ - \frac{A}{(\sqrt{2}a)^2} = 0.91 \frac{A}{a^2}$$

N 受力为

$$F_N = \frac{A}{a^2} - 2 \times \frac{A}{(\sqrt{2}a)^2} \times \cos 45^\circ = 0.29 \frac{A}{a^2}$$

(2) 由于 $F_M > F_N$, 且相差较大。所以在岩盐受到敲击时, 在平行于正方形一边的方向上容易断裂。



第2节 液体

1. 教学目标

- (1) 了解液体的基本性质。
- (2) 知道液体的表面张力，了解表面张力形成的原因。
- (3) 用对比的方法去理解液体的微观特性，并体验探究过程，学习科学探究方法，培养独立思考的能力。

2. 教材分析与教学建议

教科书从生活现象、实验演示切入，再从分子动理论角度研究其产生的原因。如观察叶面上的露珠、玻璃板上的小水银滴、水面上的昆虫等生活现象，然后通过实验观察液体表面的收缩现象，从而引发学生的思考，再从分子动理论的观点来剖析液体的微观结构，解释液体表面张力产生的原因。同样，从观察浸润与不浸润现象与毛细现象入手，认识附着层分子间的微观特性及其现象产生的原因。这样，从分子动理论的角度认识液体与气体、固体接触的薄层所表现出的某些现象的本质。

建议教师在教学中应突出教科书的这一思路，使学生能对这部分知识从整体上有所认识。本节的特点是偏重实验现象的分析，因此，需要加强演示实验，注意培养学生的实验观察能力和对实验现象的抽象概括能力。

(1) 液体的微观结构

尽管教科书对这部分讲述较少，但在教学中，可以联系第七章、第八章的知识，将分子动理论与物态变化适当结合。建议在教学中注意以下问题：

①重视新旧知识的联系。先引导学生回顾第七章学过的分子动理论的基本观点，对固、液、气体的分子运动特点加以分析。

②液体的性质介于固体和气体之间，但更接近固体，因此，应对比固体微观结构与液体微观结构的大致图景，并注意用液体微观结构的特点去认识液体的性质：具有一定体积，不易压缩，具有流动性，比固体的扩散速度快等。

③非晶体的微观结构跟液体非常类似。跟液体中小区域杂乱无章的结构非常相似，非晶体的分子也是处于杂乱无章的结构中，所以非晶体可以看做是黏滞性极大的液体。因此，严格说来，只有晶体才是真正的固体。教科书中“做一做”栏目的目的也在于此。

(2) 液体的表面张力

从吹肥皂泡，观察荷叶上的小水滴、草叶上的露珠及演示玻璃板上的小水银滴等实验活动，可以看到这些液滴外形都呈球状，从而引发学生猜想液体与空气接触的表面有收缩的趋势。得出猜想后建议教师指导学生通过实验证实自己的猜想。

教科书设计了两个观察肥皂膜和棉线变化的实验。实验1是通过棉线的形状，来说明液体表面存在收缩的趋势。实验2通过棉线圈的周长一定时，所围面积最大的几何图形是圆，说明只有棉线圈被张紧成圆形时肥皂膜面积才会最小。

教学中，还可以设计其他一些说明表面张力现象的演示实验。例如：

如图9-1所示利用表面张力悬挂重物的实验。也可以将重物取掉，用手往下拉活动杆，然

后放手，可以看到活动杆在液面作用下，向上运动；缝衣针轻放在水面上不下沉；硬币浮在水面上不下沉；等等。

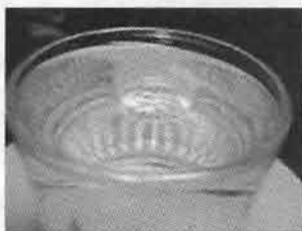
关于液体表面张力形成的原因，只要求学生知道表面张力是表面层分子间的分子力为引力的宏观表现。至于表面层分子间为什么表现为引力，可以不作解释。

要注意凡液体与气体接触的表面都存在表面张力。例如对一层液膜来说，无论其厚薄程度如何，都存在两个表面，每个表面都存在表面张力。应当提醒学生，教科书中图 9.2-6 中液面的分界线是任意选取的，但不论分界线怎样选，分别作用在分界线两侧液面的表面张力 F_1 和 F_2 总是一对作用力和反作用力。至于表面张力的方向，即表面张力跟液面相切、跟液面分界线垂直，只要求学生知道，不要求作进一步解释。

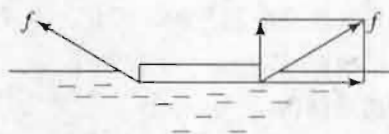
教学中要多做一些实验，加强学生对表面张力的认识。下面提供一些供参考：

①水面浮针或浮硬币

由于经常和手接触，针和硬币表面有一层油脂，使水不浸润。实验时，如果再用油脂涂一下更易成功，将硬币轻轻地平放在水面上即可。漂浮时液面情况如图 9-2 甲所示，硬币周围水的表面张力的合力方向向上（图 9-2 乙），使硬币浮在水面上。



甲



乙

图 9-2

②水超过杯口不溢出

向玻璃杯中小心地注满水，使水面恰好与杯口相平，注意杯口原来应当是干燥的。然后把大头针或小钉逐个地放入水杯，要从水的中间投放，尽量减轻水面的扰动。可以看到水面逐渐凸起，且高于杯口但不溢出，以此说明水的表面张力的作用。

③表面张力的变化

●表面活性剂能改变水的表面张力。在水盆中央漂浮几根火柴棍，排成图 9-3 所示的形状。然后向它们中间 A 点的水面上滴一些肥皂水或洗衣粉溶液等表面活性剂，就会看到火柴棍迅速向四周散开。这说明表面活性剂使 A 处水面的张力变小了，四周的水面收缩而使火柴棍移动。

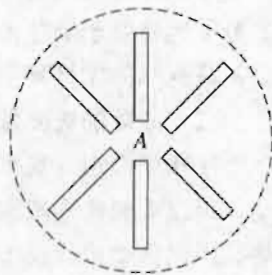
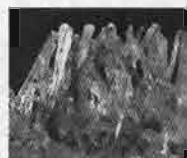


图 9-3

●温度变化使表面张力变化。在培养皿（或透明水槽）的水面上撒一层痱子粉（或粉笔灰），然后将一根烧热的铁丝接触水面，可以看到痱子粉从铁丝接触处向四周散开。这表明温度升高使水的表面张力变小。可以用投影仪放大观察现象。

(3) 浸润和不浸润

这部分内容研究液体与固体接触时发生的现象。教科书从附着层内分子作用力的不同特征



来解释浸润和不浸润现象。在教学中要抓好以下两个环节。

首先是做好演示实验，让学生从直观上认识“浸润和不浸润”现象。其次是让学生懂得怎样以附着层内分子比液体内部稀或密为依据，解释浸润和不浸润现象。要结合分子力的特点来分析。

讲解浸润和不浸润现象时，应对什么是浸润和不浸润现象作适当概括，便于学生掌握。应当强调，同一种液体对某些固体浸润，对另一些固体可能不浸润。因此讲某种液体是浸润的或不浸润的，一定要指明相应的固体。对此可演示水能浸润玻璃但不能浸润石蜡，水银不能浸润玻璃但能浸润锌板（表面用稀硫酸擦拭）的实验，加深学生的认识。

讲解附着层的性质时，可与液体表面层的性质进行对比，要引导学生掌握分析问题的思路。附着层的液体分子除受液体内部分子的吸引外，还受到固体分子的吸引。固体分子吸引作用的强弱决定着附着层内液体分子比液体内部分子稀疏或稠密，也就决定着附着层内分子间表现为引力或斥力，进而决定着附着层是收缩趋势还是扩张趋势。附着层有收缩趋势，就表现为液体不浸润固体；附着层有扩张趋势，就表现为液体浸润固体。

有了前面的基础，讲解“浸润与不浸润”现象所呈现“弯月面”的形成就水到渠成了。建议有条件的学校可以让学生自己分析“弯月面”的形成，这也是为毛细现象的学习做准备。

做好此演示实验的关键在于提高器材的洁净程度。实验中所用的水要洁净，玻璃应洗涤洁净。为增大可见度，可用投影。

（4）毛细现象

毛细现象的发生是附着层的引力或斥力与表面张力共同作用的结果。由于学生已学过上述两方面知识，建议通过指导学生讨论和阅读的方式进行教学，这样做有利于培养学生的能力。首先演示教科书中表面张力对液体形成向上拉力的实验，可通过投影仪放大实验现象以便全体学生观察。让学生观察并思考从中能得出什么结论？再由教师概括说明什么是毛细现象。

为什么会出现上述现象呢？可引导学生思考、讨论以下问题。

- ①浸润液体在毛细管内，液面为何成凹弯月面？
- ②是什么原因使液体上升？
- ③上升的高度可能与哪些因素有关？

然后让学生思考，分组讨论并阐述自己的观点，教师再根据具体情况适当归纳。对第③个问题可以让学生课外进行自主探究，也可以在课堂中与学生共同探究。通过控制变量的方式进行探究，如用不同粗细、不同材料的毛细管，用不同的液体进行研究。在此基础上，让学生观察不浸润液体在毛细管内会下降的现象，并让学生经过讨论去解释这种现象。

教科书“说一说”栏目列举了毛细现象的实际应用，可以组织学生讨论并回答。此外还可以组织学生发现生活中其他一些毛细现象的应用例子，例如：

- ①为什么棉灯芯能吸油？是否可用丝线做灯芯？
- ②为什么可以用粉笔来吸干纸上的墨水迹？
-

本节的习题中，有一些联系实际的题目，可以让学生在课堂上讨论回答。

（5）液晶

近年来液晶获得了广泛的应用，因此教科书把它安排为一个教学内容。教学时可要求学生阅读，并总结液晶的特点，让学生寻找液晶在生活中的应用，以及使用液晶产品的优缺点，从而激发他们学习的兴趣。

3. 问题与练习

内容分析

本节配置的习题是让学生了解表面张力，会用表面张力知识去解释一些日常生活中观察到的现象，以及尝试用所学知识去解决一些实际问题。

解答与说明

1. 玻璃烧熔后，它的表面层在表面张力作用下收缩到最小表面积，从而使玻璃管尖端变钝。

2. 处于失重状态的宇宙飞船中，由于消除了重力的影响，一大滴水银的表面将收缩到最小面积——球面，水银滴成为球形。

3. 因为水能浸润纱线，在纱线孔隙中形成向下弯曲的水面，弯曲水面的表面张力，承受住孔隙内水所受的重力，使得雨水不致漏下。

4. 由于针的表面有油脂，不能被水浸润，当针放在水面上，并把水面压弯时，仍处在水的表面层之上。而水面的表面张力使被压弯的水面收缩，以恢复原来的水平液面，从而对针产生一个向上托的力。这个力与水对针的向上的压力一起跟针所受的重力平衡，使针不致下沉。

5. 放在衣料上、下的吸墨纸内有许多细小的孔道起着毛细管的作用。当蜡或油脂受热熔解成液体后，由于毛细现象，它们就会被吸墨纸吸掉。

6. 应该选用黄色材料。

第3节 饱和汽与饱和汽压

1. 教学目标

- (1) 知道饱和汽、未饱和汽和饱和汽压这些概念的含义。
- (2) 了解相对湿度概念的含义以及它对人的生活和植物生长等方面的影响。
- (3) 运用所学的物理知识尝试思考一些与生产和生活相关的实际问题。

2. 教材分析与教学建议

本节讲解的知识，是对初中学过的物态变化知识的扩展和加深，与生产、科研和日常生活实际有着密切的联系。

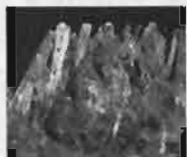
饱和汽的知识是理解液体的沸腾、气体的液化、空气的湿度等许多现象的基础，需要重点讲解。它又是学生新接触的理论性较强的内容，也是教学的难点。理解饱和汽的知识，关键在于讲好动态平衡的概念。

空气的湿度在生产和生活实际中常常用到，教科书讲解这些知识，就是为了给学生解释一些实际现象打下一个初步基础。

这一节内容涉及的现象多、概念多，讲述时除了加强实验、增加感性知识外，还要多举生活中的实例，帮助学生理解。

(1) 饱和汽与饱和汽压

教科书从初中学过的“汽化”现象入手，让学生通过自己日常的生活经验感悟液体汽化的方式，进一步理解液体汽化的两种方式——蒸发与沸腾。再通过实验观察水的沸点与气压的关系（这里不一定需要定量研究），从而了解液体的沸点与压强有关。然后通过“思考与讨论”



小栏目,提出了对“汽化”现象的另一种形式——蒸发的思考,从而引出对蒸发现象动态过程的分析。

第一,正确理解动态平衡的意义是掌握饱和汽概念的关键。可通过水池中供水口流入的水量与出水口流出的水量的关系决定液面的升降来体会动态平衡,也可以通过动画模拟来形象描述动态平衡。继而让学生想象密闭容器内分子逸出液面和返回液面的运动状况,着重让学生理解这两种运动宏观上达到平衡时(即气体的密度不变,液体不再减少),并非意味着分子运动的停止,而是单位时间内逸出液面的分子数与回到液面内的分子数相等,即处于动态平衡。在此基础上讲清什么是饱和汽和未饱和汽,以及“在一定温度下,未饱和汽密度小于饱和汽密度”的道理。

第二,要说明动态平衡是有条件的。由于外界条件变化的影响,原来的动态平衡状态被破坏,经过一段时间才能达到新的平衡。比如,温度升高时,分子平均动能增大,单位时间内逸出液面的分子数增多。于是原有的动态平衡状况被破坏,空间气态分子密度逐渐增大,导致单位时间内返回液面的分子数增多,从而达到新条件下的动态平衡。由此得出,饱和汽的密度随着温度的升高而增大。掌握了动态平衡状态变化的条件,才能更好地理解饱和汽的性质。

第三,要正确理解饱和汽压。饱和汽的压强叫做饱和汽压,而且饱和汽压与蒸汽占的体积、空间有无其他气体没有关系。

这里实际上说明了两点:

①往一个真空容器中注入液体,液体表面上方形成饱和蒸汽时,表面上方空间的气压就是饱和汽压;

②往一个密闭的原来有空气的容器中注入液体,表面上方形成饱和蒸汽时,表面上方空间的气压不等于饱和汽压,而是饱和汽压与空气压强的总和。

第四,根据学生的接受程度,也可以从微观上讲述饱和汽压。从微观上讲,饱和汽压仍然决定于单位体积内的分子数和分子的平均速率。讲清这一点,能帮助学生认识饱和汽压的实质。还可以做测定饱和汽压值的实验,这能使学生对饱和汽压获得感性认识。还可以利用压强传感器研究饱和汽压跟温度和体积的关系。

(2) 空气的湿度

不管是在我们日常生活还是生产与科学技术中,湿度均有重要的意义,因此有必要让学生了解湿度的概念。了解绝对湿度与相对湿度的意义以及它们的区别,了解相对湿度的测量方法,知道湿度计的原理。这一部分围绕湿度和湿度的测定,讲解了绝对湿度、相对湿度的概念,介绍了几种湿度计的原理和使用方法,是已学基础知识的应用,与实际有紧密的联系。由于又引入了一些新概念。教师要注意引导启发学生用已学知识去理解新知识。

空气的湿度的教学要联系生活事例,说明空气的干湿程度是经常变化的,再讲解绝对湿度的定义。教科书中直接给出绝对湿度的定义——“空气中所含水蒸气的压强,叫空气的绝对湿度”。学生理解这个定义有一定的难度,教学中可以从以下几个层次来理解:

①空气中所含水蒸气越多,空气的湿度越大;

②空气中所含水蒸气的多少,应该指在体积一定的情况下,空气中水蒸气的质量的多少;

③在体积一定的情况下,空气中水蒸气的质量的多少,就是空气中所含水蒸气的密度;空气中所含水蒸气的密度,与单位体积中所含水蒸气分子的数量成正比;

④决定水蒸气的压强的微观因素是单位体积中所含水分子的数量和分子运动的平均速率。所以，在温度一定时，气体压强与单位体积中所含水分子的数量成正比。

再通过实例和教科书列举的数据，说明湿度的影响取决于空气中的水蒸气的压强与饱和汽压的差距。可以从动态平衡的角度来解释空气中的水蒸气的压强离饱和汽压越远，越有利于水的蒸发，人们感觉越干爽。

在此基础上引入相对湿度的概念。可以通过对露点的测定，根据下列提供的不同温度下水的饱和汽压表确定绝对湿度，并计算出相对湿度。提高学生对相对湿度的理解与认识。

不同温度下水的饱和汽压

$t/^\circ\text{C}$	p/Pa	$t/^\circ\text{C}$	p/Pa	$t/^\circ\text{C}$	p/Pa	$t/^\circ\text{C}$	p/Pa
-15	1.92×10^2	3	7.58×10^2	21	2.486×10^3	39	6.990×10^3
-14	2.08×10^2	4	8.13×10^2	22	2.643×10^3	40	7.374×10^3
-13	2.25×10^2	5	8.72×10^2	23	2.809×10^3	41	7.777×10^3
-12	2.44×10^2	6	9.34×10^2	24	2.983×10^3	42	8.198×10^3
-11	2.65×10^2	7	1.001×10^3	25	3.167×10^3	43	8.638×10^3
-10	2.87×10^2	8	1.073×10^3	26	3.361×10^3	44	9.099×10^3
-9	3.11×10^2	9	1.148×10^3	27	3.564×10^3	45	9.582×10^3
-8	3.35×10^2	10	1.228×10^3	28	3.779×10^3	50	1.233×10^4
-7	3.63×10^2	11	1.312×10^3	29	4.004×10^3	60	1.991×10^4
-6	3.91×10^2	12	1.402×10^3	30	4.242×10^3	70	3.115×10^4
-5	4.21×10^2	13	1.497×10^3	31	4.492×10^3	80	4.733×10^4
-4	4.55×10^2	14	1.598×10^3	32	4.753×10^3	90	7.009×10^4
-3	4.89×10^2	15	1.705×10^3	33	5.032×10^3	100	1.013×10^5
-2	5.28×10^2	16	1.817×10^3	34	5.319×10^3	150	4.759×10^5
-1	5.68×10^2	17	1.937×10^3	35	5.623×10^3	200	1.554×10^6
0	6.11×10^2	18	2.604×10^3	36	5.940×10^3	250	3.975×10^6
1	6.57×10^2	19	2.197×10^3	37	6.274×10^3	300	8.589×10^6
2	7.05×10^2	20	2.333×10^3	38	6.625×10^3	350	1.653×10^7

(3) 相对湿度的测量方法

【实验仪器】露点测定器，温度计（0~100℃），水（约100 mL），碎冰块 50 g，软布，镊子，装水和冰的小烧杯 2 只，附有橡皮球的滴管，若露点接近或低于 0℃，备一些食盐。也可用乙醚。

【实验装置】如图 9-4 所示，圆柱形金属盒有一个十分光亮的底面。上侧面有开口，开口旁边有一小孔，用来插入温度计。环形金属片套在金属盒上，它的一面也十分光亮，并与金属盒的光亮面在同—边。金属盒和环形片用胶水垫圈隔开，防止相互间的热传导。搅拌器插在开口中。

【实验步骤】

1. 实验前，记录当时的室温 t_1 。
2. 用呢绒（或软皮）把金属盒和环形金属片的表面仔细擦净，向金属盒里注入约半盒室温的水，先测出室温，再向水里投入适量碎冰块，然后插入温度计，温度计的玻璃泡应浸没在水中，温度计的刻度要向着金属环的光亮面，以便读数。
3. 用搅拌器搅动冰块，观察温度计，看到水温迅速下降。
4. 观察环形金属片和金属盒的表面，通过对比，可以看到，当温度计的示数降到某一值时，金属盒附近的空气中的未饱和水蒸气达到饱和，在金属盒表面形成细小的露滴。由于金属盒薄壁的导热性能好，可以认为金属盒表面附近空气的温度与盒内水的温度相等，记下开始出现露滴时的温度 t_2 ，并停止搅拌。

数据分析：通过《不同温度下水的饱和汽压》表查出 t_1 与 t_2 所对应的压强值 p_1 与 p_2 ，则可算出当时空气的相对湿度：

$$\text{相对湿度} = \frac{p_2}{p_1} \times 100\%。$$

湿度计的教学，教师可以对干湿泡湿度计的使用做演示和示范讲解，再让学生阅读教科书，了解它的构造、原理和优缺点。阅读前可以提出一些思考题，如：

- ①为什么湿泡温度计的示数要低于干泡温度计的示数？
- ②使用时要读出哪些数据？
- ③怎样才能得出相对湿度？

课后可以让学生利用湿度计测量一天中室内湿度的变化情况。

3. 问题与练习

内容分析

本节配置的习题是让学生进一步了解饱和汽压和湿度的概念，会用所学知识去解释一些日常生活中观察到的现象。

解答与说明

1. 在潮湿的天气里，空气的相对湿度较大。空气里的水蒸气压强接近饱和汽压值，衣服上的水蒸发较难进行，所以湿衣服不容易干。
2. 液面上的蒸汽达到饱和时，依然有液体分子从液面飞出。只是单位时间内，进入液体内的分子数与从液面飞出的分子数相等，所以从宏观上看，液体不再蒸发。

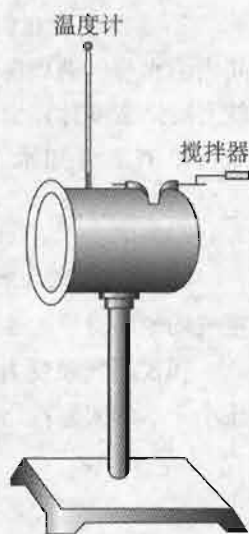


图 9-4



3. 在瓶中的水形成饱和汽后,降低温度,瓶中的饱和汽将变成过饱和汽,即此时的实际水蒸气气压大于降低后的温度对应的饱和汽压,此时原有的动态平衡被打破,单位时间内进入液体内部的水分子数多于从液面飞出的分子数,直到达到新的平衡。此时液面上方的空间中水分子的总数将减少,即饱和汽的密度减小。

4. 雾珠出现在窗户的内表面。在严寒的冬天,户外的温度比房间内的温度低许多,当房间内的水蒸气遇到窗户的玻璃时,温度降低,水蒸气将变成饱和汽,当温度再降低时,饱和汽就会凝结成液体,出现在窗户的内表面。

5. 查表可知水在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的饱和汽压为 $3.167\times 10^3\text{ Pa}$,所以此时空气的相对湿度为 $\frac{3\times 10^3}{3.167\times 10^3}=94.7\%$ 。

6. 根据题意, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,水的饱和汽压为 $4.242\times 10^3\text{ Pa}$,当此时的相对湿度为 60% 时,空气的绝对湿度为 $4.242\times 10^3\times 60\%\text{ Pa}=2.545\times 10^3\text{ Pa}$ 。

当夜间气温变为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,由于水在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的饱和汽压为 $2.333\times 10^3\text{ Pa}$,而此时的饱和汽压小于水的实际汽压,所以水蒸气会成为饱和汽。

第4节 物态变化中的能量交换

1. 教学目标

- (1) 了解固体的熔化热,并知道不同固体有不同熔化热。
- (2) 了解液体的汽化热;了解液体变为气体时吸收热量是为了克服分子引力做功与克服大气压力做功。
- (3) 了解气体液化在生产、生活与科学技术中的应用。

2. 教材分析与教学建议

教科书主要从物质分子间相互作用力做功的情况,来分析物态变化中的能量交换。具体分析了晶体与非晶体的熔化、液体的汽化过程中的能量交换情况。

这部分内容对知识的要求不高,在初中学习的基础上,只要求学生能够定性地从分子动理论的角度分析物态变化中的能量交换。

(1) 熔化热

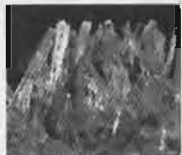
教学中要注意以下几点。

① 熔化过程中吸收的热量,用于克服分子力做功,破坏晶体的空间点阵,增加物质的分子势能,所以晶体的熔化热是一定的。

② 由于不同晶体的空间点阵不同,单位质量的不同物质溶解时吸收的热量也不同,为表征物质的这一性质,引入熔化热的概念。

③ 可以把熔化热跟质量热容、热量等概念从物理意义、定义、单位等方面加以对比区别,加深对熔化热的认识。

④ 组织学生就“说一说”小栏目的内容进行讨论,让学生理解熔化热与凝固时单位质量的物质放出的热量相等,是能量守恒定律的必然结果。



(2) 汽化热

教学中要注意以下几点。

①先通过蒸发时致冷的现象、沸腾时液体继续吸热而温度不变的现象，让学生从现象中体会液体汽化时要从周围吸收热量。

②要让学生从能量方面了解，固体熔化时，由于体积变化较小，吸收的热量主要用来克服分子间的引力做功。而液体汽化时，由于体积明显增大，吸收的热量，一部分用来克服分子间的引力做功，另一部分用来克服外界压强做功。这是熔化过程和汽化过程的不同之处。

③关于汽化热，可以对照熔化热，讲清它的定义、公式和单位，再要求学生观察教科书图 9.4-1，并阅读表 9.4-2，思考图和表格说明了什么问题。然后通过讨论，了解不同物质在同一压强下汽化热不同，同种物质在不同温度下汽化热不同。

④有条件的学校，可以让学生思考，怎样用分子动理论解释图和表格中的现象。不同物质分子间的距离和作用力的性质、大小不同，汽化时分子逸出液体所做的功不同，因而汽化热不同。

⑤用分子动理论和能量转化的知识，说明在某一温度下气体凝结为液体放出的热量，与同一温度下汽化过程中吸收的热量是相等的，这也是能量守恒定律的必然结果。

(3) 科学漫步——气体的液化

在密闭的玻璃管内充入适量的饱和汽，管内的饱和汽在温度不变，体积变小时，要凝为液滴，管内积存的液体增多。应该让学生体会到，气体液化的关键是把未饱和汽变为饱和汽。

关于把未饱和汽变为饱和汽的方法，可以先让学生思考两个问题：

- 相同温度下，饱和汽与未饱和汽的密度有何不同？
- 在温度不变时可否采取改变体积的办法来使未饱和汽转变为饱和汽？

组织学生讨论得出：在温度不变时，减小未饱和汽的体积，使它的密度增大到这个温度下饱和汽的密度，未饱和汽就变成饱和汽了。

再让学生思考以下问题：

- 不同温度的饱和汽的密度相同吗？饱和汽的密度与温度有何关系？
- 把高温下的未饱和汽的温度降低，能使它变为某个低温下的饱和汽吗？

组织学生讨论得出：降低温度可以使未饱和汽变为饱和汽。在这个过程中，容器内未饱和汽的密度没有发生变化，只是高温下的未饱和汽密度等于某个低温下的饱和汽密度。

概括起来，把未饱和汽变为饱和汽的方法：一是减小体积（增大压强），二是降低温度。

使饱和汽凝结为液体，仍可采取减小体积和降低温度的方法。那么，只采用增加压强（减小体积）的办法能否使所有的气体都液化呢？由此引入临界温度的概念。要强调在这个温度以上，物质只能处于气态，不能单纯用增大压强的方法来使它液化。

临界温度是每种气体都具有的一个特殊温度，它的物理含义是：临界温度是物质以液态存在的最高温度，也是物质以气态存在的最低温度。

还可以通过临界管实验观察乙醚、水等物质的临界状态，再通过物质的临界温度的表，弄懂氢、氧、氮等气体在历史上为什么会被当成“永久气体”的原因。要重视液态气体和低温技术的应用的介绍，讲清楚一两个典型例子，以使学生眼界开阔、思维活跃。

3. 问题与练习

内容分析

本节配置的习题是让学生从能量的角度了解物态变化的特性，会用能量知识去解释一些日常生活中观察到的物态变化现象。

解答与说明

1. 晶体在熔化时，吸收的热量全部用来“破坏”晶体的结构、增加晶体的分子势能。

2. 0.5 kg 的汗水汽化时“带走”的热量为 $Q=0.5 \times 2.4 \times 10^6 \text{ J}=1.2 \times 10^6 \text{ J}$

假设这些热量的“散失”可使人体温度降低 Δt ，则： $Q=cm\Delta t$

$$\Delta t = \frac{Q}{cm} = \frac{1.2 \times 10^6}{4.2 \times 10^3 \times 60} \text{ } ^\circ\text{C} = 4.76 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3. 1 s 内因吸收太阳的辐射能而熔化的冰的质量为

$$m = \frac{\frac{3.49}{9.8}}{40 \times 60} \text{ kg} = 1.48 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

1 s 内冰吸收太阳的辐射能

$$E = 1.48 \times 10^{-4} \times 3.35 \times 10^5 \text{ J} = 49.58 \text{ J}$$

太阳光垂直照射在单位面积上的辐射功率为

$$P = \frac{49.58}{3.14 \times 0.1^2} \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) = 1.58 \times 10^3 \text{ W}/\text{m}^2$$

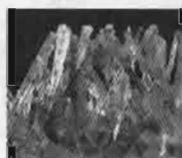
三、教学设计案例

液 体

课题名称	第九章 第2节 液体	课型	新授课
教学目标	1. 知识与技能 (1) 了解液体的基本性质。 (2) 知道液体的表面张力。 (3) 了解表面张力形成的原因。 2. 过程与方法 (1) 用对比的方法去理解液体的微观特性。 (2) 体验探究过程，学习科学探究方法，培养独立思考的能力。 (3) 培养学生获取信息，处理与加工信息的能力，培养自主学习的能力。 3. 情感态度与价值观 了解科学探究的一般方法，培养科学研究的严谨态度，提高学生的科学素养。体会科学技术进步在促进社会发展中的重大作用。		

续表

教学重点	液体的表面张力现象。	
教学难点	表面张力的微观分析。	
教 具	肥皂液、表面张力演示器材、烧杯、硬币（一角硬币）、酒精灯、铁丝。	
教学流程		
<pre> graph TD A[自主活动] --> B{观察现象 思考分析} B --> C((提出问题)) C --> D{提出猜想与假设} D --> E((设计探究 实验方案)) E --> F((共同处理 实验问题)) F --> G[对实验结果 的评估] G --> H{逻辑推理} H --> I((探究规律)) I --> J{创设情景 激疑生趣} J --> K((知识的应用)) K --> L[自主学习 互相交流] L --> A </pre> 图例 ○ 师生共同活动 ◇ 学生活动 □ 教师活动		
教学过程		
教学进程	教学过程与师生互动	教学设计思想
复习知识 提出问题	1. 固体有哪些基本特点与性质，与它的微观结构有什么关系？ 2. 液体有哪些基本特点与性质，能猜想它的微观结构与固体有什么相似之处？又有什么不同？	用对比方法研究新问题。
科学类比 归纳总结	1. 固体有固定的体积，液体有固定的体积。它们分子间的距离均比较小。 2. 固体有固体的形状，液体没有固体的外形。组成固体的分子在一个固定的平衡位置附近振动；液体分子没有固定的平衡位置，所以液体易发生扩散现象。	交流互动、合作学习。



续表

组织活动 激疑生趣	组织学生吹肥皂泡, 观察吹出的肥皂泡, 并要求学生通过观察提出自己的问题。进一步观察叶片上的露珠的外形, 等等。	组织活动, 激发学习热情。培养观察与提问能力。
归纳问题 大胆猜想	1. 为什么肥皂泡的形状总是球形的? 2. 为什么叶片上的露珠也是球形的? 3. 球形的表面积最小, 是不是液体的表面有收缩趋势? 4. 通过各种现象的分析, 猜想液体的表面应该有收缩力。	鼓励学生大胆猜想, 但同时指导猜想的方法。
设计实验 充分论证	教科书中观察肥皂膜和棉线变化的实验。	用实验的方法证明假设, 学习科学探究的方法。
评估与分析	1. 实验现象 (如教科书图 9.2-3、图 9.2-4) 2. 论证分析 (1) 液体与气体接触的表面存在一个薄层, 叫表面层 (如教科书图 9.2-5 所示)。 (2) 表面层的分子比液体内部可能要稀疏, 只有这样分子间才表现为引力。 (3) 相邻分子间的引力与斥力相等, 分子力为 0。非相邻的分子之间存在着引力, 在液体内部的分子受到各个方向的引力相等, 但液体表面薄层的分子受到不平衡的引力 (如图 9-5 所示), 则薄层分子受到一个指向液体内部的引力, 即表面宏观表现为一种收缩的趋势。这就是表面张力形成的原因。 图 9-5	分析产生表面张力的原因。
创建情景 质疑生趣	1. 组织学生活动, 如硬币、缝衣针浮在水面上, 装满水的杯中还能加多少块硬币, 等等。(其目的是用表面张力解释其现象, 加深对表面张力的认识) 2. 会开动的“军舰”。为什么在“军舰”后面加上肥皂液“军舰”会运动? 说明不同液体的表面张力是不同的。	通过活动, 不仅加深对液体表面张力的认识, 而且会进一步提出问题。

续表

知识归纳	1. 液体的表面存在一种收缩的趋势,称为表面张力。 2. 表面张力与分界线垂直。 3. 不同的液体的表面张力不同。 4. 表面张力说明液体表面层分子距离比液体内部要大,表现为引力。 5. 表面张力与分子引力的宏观表现。 6. 表面引力总是要让自己的表面积收缩到最小。	形成一个完整的知识体系。
拓展延伸 自主学习	1. 液晶的发展与应用。 2. 材料的应用与社会的发展。	课后布置给学生,由学生自己通过各种渠道进行自主学习,并组织交流与讨论。

四、教学资源库

(一) 概念、规律和背景资料

1. 空间点阵

组成晶体的粒子(原子、离子或分子)在三维空间中会形成有规律的某种对称排列,如果用点来代表组成晶体的粒子,这些点的总体就称为空间点阵。点阵中的各个点,称为阵点。

空间点阵的基本特征,就是它的排列具有周期性。也就是说,从点阵中的任一阵点出发,无论向哪个方向延伸,如果经过一定距离后遇到另一个阵点,那么再经过相同的距离,必然遇到第三个阵点,如此等等(图9-6)。这种距离称为平移周期。在不同方向上,有不同的平移周期。取一个阵点做顶点,以不同方向上的平移周期 a 、 b 、 c 为棱长,做一个平行六面体。这样的平行六面体叫做晶胞。如果只要求反映空间点阵的周期性,就可以取体积最小的晶胞,叫做原胞。原胞的重复排列,可以形成整个点阵。

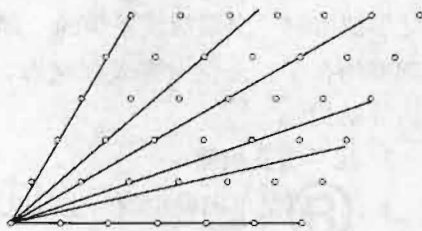


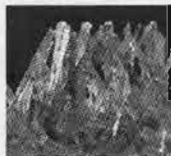
图 9-6

原胞的三个棱,可以选作描写点阵的基本矢量,用 a 、 b 、 c 来表示。选择任一阵点做原点,点阵中任何一个阵点的矢径都可以用方程

$$\mathbf{r} = m\mathbf{a} + n\mathbf{b} + p\mathbf{c}$$

来表示,式中的 m 、 n 、 p 都是整数。由 a 、 b 、 c 的大小和方向决定的六个参量: a 、 b 、 c 、 $\alpha = \angle b, c$ 、 $\beta = \angle c, a$ 、 $\gamma = \angle a, b$, 可以确定整个点阵,所以叫做点阵常数。根据布喇菲(1811~1863)的研究,晶体的构造可分为七大晶系,共有 14 种不同的点阵。

应该注意的是空间点阵是一种数学上的抽象。理想的晶体,它的结构单元是单个原子。但是,大多数晶体的结构单元不是单个原子,而是由多个原子组成的原子群。我们把这种原子或



原子群叫做基元。把基元置于阵点上就形成了晶体结构。可见，晶体结构和空间点阵，尽管有着密切的联系，仍然是两个不同的概念，不能混淆。二者之间的关系是：

$$\text{点阵} + \text{基元} = \text{晶体结构}$$

图 9-7 可以说明这种关系。



图 9-7

2. 相的概念

物质有气、液、固三种状态^①，人们有时也将气态、液态、固态称为气相、液相、固相。其实，相与物态不完全相同。在讨论热力学系统分类的时候，我们根据研究对象的物质组成的均匀性把热力学系统分为单相系和复相系。这表明，“相”概念的要点在于“物质性质的均匀性”。例如，通常的气态只有一个相，通常的液态也只有一个相。但能呈液晶的纯液态却有两个相（液相和液晶相）。低温下的液氦更复杂，⁴He 有氦 I 和氦 II 两个相，³He 有三个相（A 相、B 相和正常液相）。固体却可以有多个相，例如，冰有七个相（七种晶体结构），铁有四个相（在标准大气压下将铁液逐步降温，1 808 K 时结晶出体心立方 δ 铁，1 673 K 时结晶出面心立方 γ 铁，1 183 K 时结晶出体心立方 β 铁，1 059 K 时结晶出有铁磁性的体心立方 α 铁），碳有三个相（金刚石、石墨和通常的无定形碳）。由此可见，在具体考察物质的性质时，相是一个十分重要的概念。严格地，在没有外界影响下，被一定边界包围的，具有确定并且均匀的物理和化学性质的一个系统或系统的一部分称为物质的一个相。由此定义和上述实例可知，相与态的差别在于：态仅考虑表观状态，而相考虑物理和化学性质的均匀性，也就是考虑物质的内部结构。

3. 相平衡及相图

相变可以是单向发生的，也可以是双向发生的，并且多数是可以双向进行并达到平衡的。所谓相平衡就是在相变过程中达到的一相及其物质的量不因另一相的变化而变化的状态。如果尚未达到上述状态则称其为未达到相平衡。显然，单向发生的相变实质是尚未达到相平衡的相变。

相平衡是一个动态平衡。所谓一相及其物质的量不因另一相的变化而变化，实质上是说，如果存在一相到另一相的变化，则必然存在从另一相到该相的变化，如果原变化中使一相的物质的量减少，则必然存在从另一相到该相的变化，以抵消该相物质的量的减少，从而两相物质的物质的量在宏观上都保持不变，不随另一相的变化而变化。例如，对封闭在容器中的液体加热，液体就会蒸发。随着蒸发过程的进行，蒸汽密度越来越大，返回液体的蒸汽分子数也越来越多，最后达到动态平衡，使得单位时间内从液体表面逸出的分子的数目与返回液体的分子的数目相等，从而处于液相和处于气相的物质的量在宏观上不再发生变化。

^① 目前也常认为物质有气、液、固、等离子体、细小粉尘和玻色-爱因斯坦凝聚体六种状态。

相平衡时,描述不同相的某些状态参量的数值不能区分。例如,对有体积跃变的一级相变,处于不同相的物质的压强和温度的差别会消失。那么在 p - T 图上不同的相及其间的平衡就可以由一条曲线图示出来。这种把一物质的相、相变及相平衡以其状态参量作为变量所作的图示称为该物质的相图(phase diagram)。例如,图9-8所示的 p - T 图上的I、II、III三条曲线把整个 p - T 空间分为三个部分,曲线I表示该物质的气相、液相间发生相变,并达到相平衡时该两相间状态参量 p - T 间的关系,其两侧分别对应液相、气相,故称之为汽化曲线。同理,曲线II表示固、液两相的分界及相变和达到相平衡时该物质的固相和液相的状态参量 p - T 都应满足的关系,称为熔解曲线,曲线III表示固、气两相共存时状态参量 p - T 间的关系,称为升华曲线。由图可知,存在一个临界点 K (critical point),对应温度 T_c 为临界温度(critical temperature),当温度 $T > T_c$ 时不存在液气共存的状态。此外,还存在一个表示该物质固、液、气三相共存的点,对应的温度 T_0 就是三相点温度。

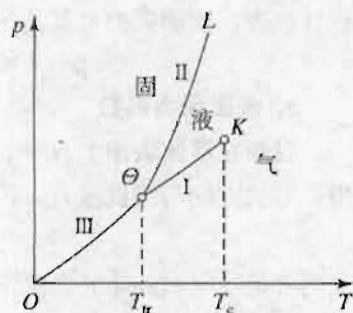


图9-8 常见物质的相图

(选自《大学物理通用教程——热学》,刘玉鑫 编著,北京大学出版社2002年2月第1版)

4. 表面张力的由来

我们试从分子理论对表面张力的由来作些解释。

我们暂时先假定液体表面附近分子的密度和内部一样,它们的间距大体上对应势能曲线的最低点,即相互处在平衡位置上。从平衡位置拉开时,分子间的吸引力先加大后减小,这里只涉及吸引力加大的一段。如图9-9甲所示,设想内部某个分子A欲向表面迁徙,它必须排开分子1、2,并克服两侧分子3、4和后面分子5对它的吸引力。用势能的概念来说明,就是它处在图9-9甲左边的势阱中,需要有大小为 E_d 的激活能才能越过势垒,跑到表面上去。然而表面某个分子B要想挤向内部,它只需排开分子1'、2'和克服两侧分子3'、4'的吸引力即可,后面没有其他分子拉它。所以它所处的势阱(图9-9甲中右边的那个)较浅,只要较小的激活能 E_d' 就可越过势垒,潜入液体内部。这样一来,由于表面分子向内扩散比内部分子向表面扩散来得容易,表面分子会变得稀疏了,其后果是它们之间的距离从平衡位置稍微拉开了一些,于是相互之间产生的吸引力加大了,这就是图9-9乙所示的情况。此时分子B需克服分子3'、4'对它的吸引力比刚才大,从而它的势阱也变深了,直到 E_d' 变得和 E_d 一样时,内外扩散达到平衡。所以在平衡状态下液体表面层内的分子略为稀疏,分子间距比平衡位置稍大,在它们之间存在切向的吸引力。这便是表面张力的由来。

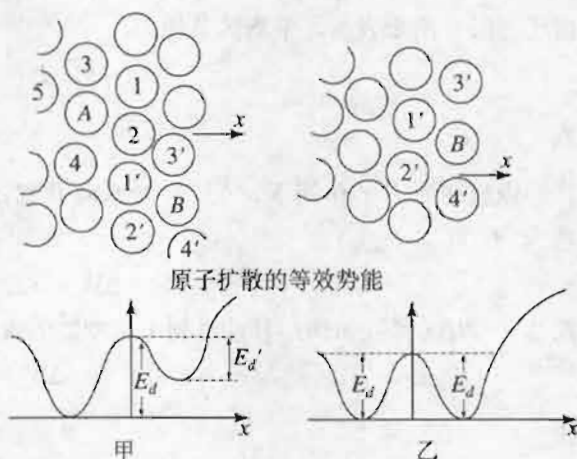


图9-9 表面张力的由来

在刚才的讨论中未考虑液面外是否有气体。如果有,则分子B背后有气体的分子拉它,这显然会使上述差距减小,从而减小表面张力。事实也确实如此。如果液面外只是它的饱和蒸汽,当温度逐步上升到临界点时,饱和蒸汽的密度增大到与液态的密度相等,液面两侧的不对

称性消失, 表面张力也就消失了。

(选自《新概念物理教程·热学》, 赵凯华著, 高等教育出版社1998年2月第1版)

5. 表面张力系数

设想在液体表面上有一长度为 l 的线段 AB , 则线段两侧的表面以一定的拉力 F 相互作用, 它的方向与线段垂直, F 的大小与线段长 l 成正比, 令 α 表示比例常量, 则

$$F = \alpha l$$

比例常量 α 叫做液体的表面张力系数。它表示液体表面每单位长度上所受表面张力的大小。表面张力系数随液体性质和温度而定。在国际单位制中, 它的单位是 N/m 。

温度升高时, 液体的表面张力系数减小, 由实验发现其变化规律为

$$\alpha = \alpha_0 - \beta T$$

式中 α 、 α_0 分别表示温度为 T 和 0°C 时的表面张力系数, β 表示温度升高 1°C 时表面张力系数减小的值, 叫做表面张力的温度系数。

要想测定某种液体的表面张力系数, 可用细金属丝弯成如图9-10所示的框, 框的一边 AB 可自由移动。把框放入液体中浸一下, 框架上就留下了液体的薄膜, AB 边在薄膜的表面张力的收缩作用下会发生移动。要想取得平衡, 必须在 AB 上施加一个外力 F 。由于薄膜有两个表面, 平衡的条件为

$$F = 2\alpha l$$

或

$$\alpha = \frac{F}{2l}$$

设想在力 F 的作用下, AB 边匀速向右移动一段距离 Δx , 在这个过程中外力 F 所做的功为

$$\Delta W = F\Delta x = 2\alpha l\Delta x$$

设 $\Delta S = 2l\Delta x$ 是在 AB 边移动过程中所增加的液面面积, 则有

$$\Delta W = \alpha\Delta S$$

或

$$\alpha = \frac{\Delta W}{\Delta S}$$

上式表示, 表面张力系数在数值上等于在恒温情况下, 液体表面增加单位面积时外力所做的功。

还可以从能量的角度给出表面张力系数的定义。由于在移动过程中, 外力 F 所做的功完全用来克服表面张力, 从而转变为液面的表面势能 (简称表面能), 设 ΔE 为在力 F 作用下增加的表面能, 则

$$\Delta E = \alpha\Delta S$$

或

$$\alpha = \frac{\Delta E}{\Delta S}$$

上式表示, 表面张力系数在数值上等于在恒温情况下, 液体表面增加单位面积时所增加的表面能。

6. 饱和蒸汽压与沸点的关系

饱和汽的压强称饱和蒸汽压, 或简称饱和汽压。饱和蒸汽压的数值与液体的种类及温度有关, 而与饱和蒸汽的体积无关。下面的表格列出几种常见物质在不同的温度下的饱和蒸汽压的数值。

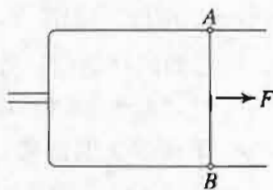


图 9-10

不同温度下几种常见物质的饱和蒸汽压 p/Pa

物质 温度($^{\circ}\text{C}$)	乙醚	酒精	水	水银
-20	8.80×10^3	4.40×10^2	1.07×10^2	
0	2.47×10^4	1.60×10^3	6.13×10^2	5.33×10^{-2}
20	5.87×10^4	5.87×10^3	2.33×10^3	2.40×10^{-1}
40	1.23×10^5	1.79×10^4	7.33×10^3	1.07×10^0
60	2.31×10^5	4.67×10^4	1.99×10^4	3.33×10^0
80	3.96×10^5	1.08×10^5	4.73×10^4	1.20×10^1
100	6.47×10^5	2.26×10^5	1.01×10^5	3.73×10^1
120	1.00×10^6	4.31×10^5	1.98×10^5	1.01×10^2
140	1.47×10^6	7.55×10^5	3.61×10^5	2.52×10^2
160	2.10×10^6	1.25×10^6	6.18×10^5	5.73×10^2
180	2.90×10^6	1.97×10^6	1.00×10^6	1.19×10^3
200		2.95×10^6	1.55×10^6	2.40×10^3

请注意表中水的一栏, 里面有一行下面画横线的数字, 它等于 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, 恰好是标准大气压的数值, 而它对应的温度又恰好是一个大气压下水的沸点 100°C 。再看看表中的其他三种液体, 它们在一个大气压下的沸点分别是: 乙醚约 35°C , 酒精约 78°C , 水银约 357°C , 它们在沸点时的饱和蒸汽压的数值都等于一个大气压, 虽然我们这个表没有列出这些温度时的饱和蒸汽压值, 但从表中画有横线的几行数字还是可以看出这个规律的, 即液体的饱和蒸汽压的数值等于外界大气压强的数值时所对应的温度就是此压强下的沸点。

把上表所列的数据, 制成 $p-t$ (或 $p-T$) 图象, 则可作为气液两相平衡曲线, 或汽化曲线。图 9-11 中的 OC 就是按表中数据制成的水的汽化曲线, 线上每一点都表示可处于气、液两相平衡的压强和温度值, 该温度就是该压强下水的沸点的数值。图上的另一条曲线 (虚线) OL 则为冰的熔化曲线, 二者的交点就是水的三相点。

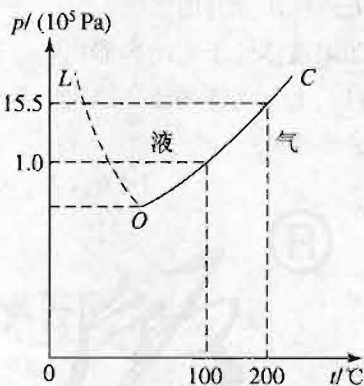


图 9-11

为什么当饱和蒸汽压等于大气压时液体就可以沸腾呢? 让我们分析一下敞口容器中液体温度逐渐升高的情况: 如果一个敞口容器中盛有水, 在温度较低时水要蒸发, 由于是敞口, 蒸发出来的水蒸气分子不断向外扩散, 上方不可能出现水蒸气饱和的情况, 蒸发将一直进行下去。蒸发是从液体表面进行的汽化, 从分子运动的观点去解释, 是液体分子中总有一些动能较大的分子能够挣脱液体分子的引力作用而从液面跑到大气中去。由于同一时间内跑出去的分子多而跑回来的分子少, 从宏观上讲, 蒸发过程继续进行。随着温度逐渐升高, 蒸发也逐渐加快。以上讨论的是液面的情况, 此外, 还要注意到液体内部特别是器壁上总是会附有一些很小的气泡, 在液体沸腾之前的加热过程中, 下面的小气泡受热会逐渐胀大, 液体分子在向液面外蒸发的同时, 也会有分子向内部的小气泡内蒸发, 使得小气泡内也含有液体的蒸汽, 并且达到饱和。随着温度逐渐升高, 饱和蒸汽压数值增大, 气泡体积也逐渐增大, 当

气泡体积胀大到一定程度,由于浮力的作用,气泡将离开器壁而上升,这时还会出现“噼啪”的响声。气泡上升的过程中,由于液体上部的温度总是略低于下面的温度,气泡内的饱和蒸汽会有一部分重新液化,气泡体积又逐渐缩小并下沉。气泡回到下部,再继续蒸发胀大,再上升……如此上上下下往复交替,液体的温度逐渐升高。当整个液体的温度升高到某一数值,小气泡在上升的过程中体积不再缩小,大量水蒸气不断进入气泡内,气泡体积迅速膨胀,直到到达液面而破裂,释放出内部的大量水蒸气,这就是沸腾。可见,液体内的气泡在沸腾过程中的作用非常重要,它是液体内部汽化的“汽化核”。液体沸腾时还有一个必要条件,那就是饱和蒸汽压值等于液面外气体的压强,这还是忽略液体本身压强的说法。如果考虑液体本身的压强,则沸腾时饱和蒸汽压值还要稍大于液面外气体的压强。例如,在一个大气压的情况下,敞口容器里的水要沸腾,下部水的温度要稍高于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,这时水的饱和蒸汽压稍大于一个大气压,气泡内的气体压强等于液体对它的压强(液体对气泡的压强,等于大气压强加上液体本身的压强),气泡就可以达到平衡。当平衡被破坏而气泡上升时,气泡内部压强大于气泡外部液体压强,气泡将继续胀大,同时又会有更多的蒸汽进入气泡内,直到到达液面而破裂,这样整个液体的沸腾就可以继续进行了。由于一小段水柱本身的压强相对于大气压强来说,完全可以忽略(以高为 10 cm 的水柱为例,它的压强大约是 10^3 Pa ,与一个大气压 10^5 Pa 相比,相差两个数量级),因此我们说液体的饱和蒸汽压的数值等于外界大气压强的数值时所对应的温度就是此压强下的沸点。

当液体表面外大气压强发生变化时,液体沸腾的温度随之变化,大气压强减小,则液体的沸点降低;大气压强增大,则液体的沸点升高。以水为例,大气压强的变化相当于 27 mm 水银柱的压强,水的沸点就随之变化约 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 9-11 中汽化线 OC 的斜率的倒数就反映沸点随压强变化的变化率, OC 的斜率比 OL 的斜率小,表明沸点随压强的变化比熔点随压强的变化更为显著。

更一般的情况,液体表面外可以不是大气。总结成规律应该说,沸点就是饱和蒸汽压等于液面处外部压强时的温度。

如果液体处于密闭容器内,由于液面上方原来总有一些气体,再加上液体蒸发后形成的饱和蒸汽,上方气体的压强总大于饱和蒸汽压,因此无论温度升到多高,处于密闭容器内的液体也不会沸腾。

(选自《热现象》,洪安生编著,人民教育出版社 2000 年 4 月第 1 版,有改动)

(二) 联系生活、科技和社会资料

1. 晶体的种类和应用

晶体的性能通常分为固有物性和功能物性。晶体常按功能物性进行分类,主要有以下 9 种。

①压电晶体:在外力作用下发生变形时,其表面产生电荷效应的晶体。可制成换能器、传声器、振子以及传感器。最初采用酒石酸钾钠一类水溶性晶体,现已为性能优良的人造水晶、四硼酸锂($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)、铌酸锂(LiNbO_3)、钽酸锂(LiTaO_3)等取代。

②激光晶体:已获得有激光输出的晶体有数百种以上,但真正成为激光工作物质的主要是红宝石($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}$, 激光波长为 $0.6943\text{ }\mu\text{m}$)、钇铝石榴石($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}$, 激光波长为 $1.065\text{ }\mu\text{m}$)。

③电光晶体：在外加电场作用下折射率发生变化，从而使通过晶体的一束激光分解为两束偏振方向相互垂直的偏振光，并产生一相位差效应的晶体。适用于激光的调制和偏振。常用的电光晶体有铌酸锂、钽酸锂以及磷酸二氢钾（KDP）类晶体。

④声光晶体：具有声光效应的晶体。主要有二氧化碲（ TeO_2 ）和钼酸铅（ PbMoO_4 ）。适用于激光的偏振和调制。

⑤非线性光学晶体：组成晶体的原子因外层电子在光作用下偏离其平衡位置而发生极化。常用的有磷酸二氢钾类晶体、铌酸锂、铌酸钾以及偏硼酸钡（ BaB_2O_4 ）、三硼酸锂（ LiB_3O_6 ）晶体。

⑥光折变晶体：在光的作用下可引起折射率变化的晶体。主要有钛酸钡（ BaTiO_3 ）、硅酸铋（ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ）、铌酸锂、铌酸钡钠（ $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ ）等。

⑦热释电晶体：在外界温度变化时由其自发极化引起表面电荷效应的晶体。可用于制备热释电探测器。主要有铌酸锂、钽酸锂等。

⑧闪烁晶体：具有闪烁效应的晶体。广泛用于测量核辐射能量。20 世纪 80 年代中，用坩埚下降法生长的大尺寸锗酸铋（ $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ）晶体，取代掺铊的碘化钠（ $\text{NaI}:\text{Tl}$ ）晶体，成为性能最佳的闪烁晶体。其他如氟化钡（ BaF_2 ）、氟化铈（ CeF_3 ）、氟化铅（ PbF_2 ）等正在研制中。

⑨磁光晶体：具有较大的纯法拉第效应，对使用波长的吸收系数低，磁化强度和磁导率高。用于制作光隔离器、磁光存储器及磁光调制器等。

此外，晶体材料按来源又分为天然晶体和人工晶体，后者应用较多。广泛使用的晶体材料主要有天然水晶、磷酸钛氧钾晶体、铌酸锂晶体、锗酸铋晶体、四硼酸锂晶体、磷酸二氢钾晶体、钇铝石榴石、合成云母和氟化钡等。处于研究阶段的还有 C_{60} 及其化合物。晶体材料广泛用于激光技术、电子技术、生物医学、高能物理及家用电器等方面。

（选自《材料科学百科全书》，中国大百科全书出版社 1995 年 11 月第 1 版）

2. 毛细管内外液面的高度差

将毛细管插入能浸润管壁的液体，管内的液面会升高（图 9-12）。设管内的弯月面是球面的一部分，曲率半径为 R ，则曲面下 A 点的压强为

$$p = p_0 - \frac{2\alpha}{R} \quad (1)$$

式中的 p_0 为大气压强， α 为液体的表面张力系数。这时，管内与管外水平面同高度的 B 点的压强为 $p + \rho gh$ 。其中 ρ 为液体密度， h 为管内外液柱高度差， g 为重力加速度。根据流体静力学的原理， B 点的压强应与管外水平面上的压强相等，所以有

$$p_0 = p + \rho gh \quad (2)$$

由 (1)、(2) 得

$$h = \frac{p_0 - p}{\rho g} = \frac{2\alpha}{\rho g R} \quad (3)$$

由图 9-12 可知

$$R \cos \theta = r$$

式中的 r 为毛细管的内径， θ 为接触角（在液体与固体接触处，作液体表面的切线与固体表面的切线，这两条切线通过液体内部所成的角度，叫接触角）。把这个式子变形得 $R = \frac{r}{\cos \theta}$ ，代入 (3) 式得

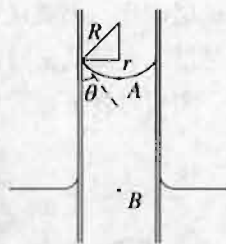
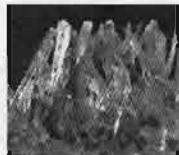


图 9-12



$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g r} \quad (4)$$

如果将毛细管插入不浸润管壁的液体，管内液面会下降。用同样的方法可以证明，公式(4)对于液面下降的情况也是适用的。

(三) 实验参考资料

1. 晶体的各向异性

(1) 器材：玻璃片的厚度要薄，可以用生物实验中显微镜所用的厚度为1.5 mm的载玻片。云母片要揭开成单层薄片，将一块边长为20 cm左右的方形（或长方形）三合板中间挖去一部分，其形状、大小与云母片的形状相同、面积略小于云母片，用胶条将云母片固定在三合板上。

(2) 涂蜡的方法：用洁净的布将玻璃片和云母片擦拭干净，将小块蜂蜡或石蜡放在玻璃片和云母片上，将25~30 W电烙铁烧热，用电烙铁的外壳烫化蜂蜡，来回移动几次，使蜡层薄而均匀。

(3) 教科书中说明用“缝衣针烧热，然后用针尖接触蜂蜡层”。因为缝衣针的热容量太小，温度很快下降，实验现象不明显。可改为直径4~5 mm的铁钉，用钢锉将铁钉的尖头锉成圆头，因为铁钉的热容量远大于缝衣针，实验效果较好。还可以在25 W电烙铁头上用直径1~2 mm的铜丝缠4~5圈，再留出10~20 mm长作为加热用，铜丝的头部锉成圆头，通电后，温度不会下降。

烧热的铁钉或电烙铁要从玻璃片、云母片的背面加热，通过玻璃和云母将热量传递过去使蜂蜡层熔化。不要从涂蜡的一面加热，因为蜡层首先与热源接触而熔化，熔化后的蜂蜡也能传递热量，会降低云母的传热效果，影响实验现象。

实验时将云母片水平放置，涂蜡的一面向上，热源在上方与云母片接触，避免热源对云母片的烘烤。可以将玻璃片和云母片放在投影仪上架起，进行实验并放大观察。



图 9-13

云母虽然有各向异性的性质，但是蜂蜡熔化形成的椭圆，其离心率并不太大，难以有教科书中图9.1-5乙所示那样显著，但是与玻璃相比还是有区别的。

除导热性外，某些晶体的光学性质也表现为各向异性。透明的冰洲石、石英在不同方向的折射率不相同，会产生双折射现象。图9-13为冰洲石的实物照片。从照片可以清楚地看到由于冰洲石两个方向的折射率不相同，而形成两个虚像（字和横线）。

（照片由中国地质博物馆郭立毅、吕林素提供）

2. 表面张力实验

(1) 肥皂液的配制：肥皂和洁净的水的体积比为1:150左右，肥皂液的温度要低于或接近室温，温度高则肥皂液的表面张力就会相对减小。肥皂液的表面张力小于水，这里主要利用

其黏滞性较大的特点。为增加其黏滞性可以在肥皂液中加一些食糖和几滴甘油。

(2) 如果没有成品的表面张力实验器材, 可以用直径 1 mm 左右的铁丝自制成铁丝圈, 将接头处用焊锡焊上, 焊点如有毛刺可用小刀刮平, 这样处理后, 肥皂膜不容易破。

(3) 其他实验方法。

①用塑料吸管吹出一个肥皂泡后, 放开吹气口, 肥皂泡自行缩小, 表明液面有收缩趋势。

②用细金属丝做成图 9-14 所示的圆环, 环下焊接 3 根金属丝作支架, 插入一个小玻璃瓶(装药片用的)上端的软木塞上, 瓶中装适量的沙子, 使整体能竖直地漂浮在水中, 并只有环和支架露出水面, 如图 9-14 甲所示。然后竖直向下压圆环使它浸入水中, 轻轻释放后可看到圆环被水的表面层所阻挡而不能浮出水面, 如图 9-14 乙所示。

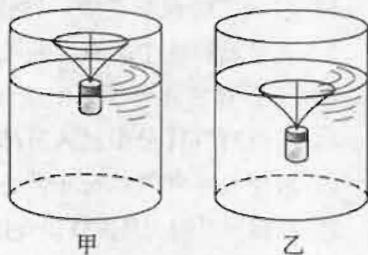


图 9-14

③用水和酒精配制成与橄榄油密度相同的液体, 用吸管将少许橄榄油注入这种液体中间, 可看到橄榄油滴呈现球形, 并悬浮。如果将苯胺注入盐水中也可看到类似的现象。

3. 毛细现象

取两块 80 mm×60 mm 的玻璃片, 将它们长的一边并拢, 在另一个长边间夹一根厚约 1 mm 的薄木片(火柴棍), 上下两边用橡皮筋扎紧, 做成一个透明楔形夹板, 把它放在一只大的培养皿内。演示时, 向培养皿内倒入有色水, 就会看到有色水沿狭缝上升。可以看出水对容器壁浸润, 和器壁接触处都向上弯曲, 缝越狭窄, 有色水上升得越高。这种演示器可看做由许多粗细不同的毛细管连续排列而成。可投影在屏幕上观察。

五、补充习题

A 组

- 判断物质是晶体还是非晶体, 比较可靠的方法是 ()
 - 从外形上判断
 - 从导电性能来判断
 - 从各向异性或各向同性来判断
 - 从有无确定的熔点来判断
- 下列各组物质全部为晶体的是 ()
 - 石英、雪花、玻璃
 - 食盐、橡胶、沥青
 - 食盐、雪花、金刚石
 - 雪花、橡胶、石英
- 关于液体表面的收缩趋势, 正确的说法是 ()
 - 因为液体表面分子分布比内部密, 所以有收缩趋势
 - 液体表面分子分布和内部相同, 所以有收缩趋势
 - 因为液体表面分子受到内部分子的作用, 分布比内部稀, 所以有收缩趋势
 - 液体表面分子受到与其接触的气体分子的斥力作用, 使液体表面有收缩趋势
- 关于浸润和不浸润, 下面说法正确的是 ()
 - 水与任何固体均是浸润的
 - 在内径小的容器里, 如果液体能浸润器壁, 液面呈凸形
 - 如果附着层分子受到固体分子的作用力小于液体内部分子的作用力, 该液体与物体之

间是不浸润的

D. 鸭的羽毛上有一层很薄的脂肪, 使羽毛不被水浸润

5. 下列现象中哪个不是由表面张力引起的 ()

A. 布伞有孔, 但不漏水

B. 小船浮在水中

C. 硬币浮在水面上

D. 玻璃细杆顶端被烧熔后变钝

6. 一个玻璃瓶中装有半瓶液体, 拧紧瓶盖后, 放置一段时间, 则 ()

A. 不再有液体分子飞出液面

B. 不再有气体分子进入液体

C. 液体分子和气体分子停止运动, 达到平衡

D. 在相同时间内从液体里飞出的分子数等于返回液体的分子数, 液体和气体达到了动态平衡

7. 关于干湿泡湿度计, 下列说法正确的是 ()

A. 湿泡所显示的温度都高于干泡所显示的温度

B. 干泡所显示的温度都高于湿泡所显示的温度

C. 在同等温度下, 干湿泡温度差别越大, 说明该环境越干燥

D. 在同等温度下, 干湿泡温度差别越大, 说明该环境越潮湿

8. 当空气中水蒸气的压强是 $1.38 \times 10^3 \text{ Pa}$ 、气温是 20°C 时, 空气的相对湿度是 ()
(20°C 时水蒸气的饱和汽压是 $2.30 \times 10^3 \text{ Pa}$)

A. $1.38 \times 10^3 \text{ Pa}$

B. $0.92 \times 10^3 \text{ Pa}$

C. 60%

D. 40%

9. 已知液态氧的沸点是 -183°C , 液态氮的沸点是 -196°C , 液态氦的沸点是 -268°C , 利用液态空气提取这些气体, 随温度升高而先后分离出来的次序是 ()

A. 氧、氮、氦

B. 氧、氦、氮

C. 氦、氧、氮

D. 氦、氮、氧

10. 有一句民间说法叫做“水缸‘穿裙子’, 老天要下雨”。所谓“水缸穿裙子”是指在盛水的水缸外表面, 水面所在的位置往下出现了一层小水珠。请简要说明这一民间说法的科学道理。

11. 把水或油灌入小口瓶时, 常在瓶口插入一根竹筷或玻璃棒, 水或油就沿着竹筷或玻璃棒流入瓶中, 而不会流到瓶子外面。这是什么道理? 如果要将水银灌入小口瓶中, 能否采用竹筷或玻璃棒? 你能想出其他的方法吗?

12. 一种聚乙烯材料可在 $15^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 范围内熔化或凝固。把这种材料制成小颗粒, 掺在水泥中制成储热地板或墙板, 可以用来调节室内的温度。它的道理是什么?

B 组

13. 将不同材料做成的两根很细的管子 A 和 B 插入同一种液体中, A 管内的液面比管外液面高, B 管内的液面比管外液面低, 那么 ()

A. 该液体对 A 管壁是浸润的, 对 B 管壁是不浸润的

B. 该液体对 B 管壁是浸润的, 对 A 管壁是不浸润的

C. A 管内发生的是毛细现象, B 管内发生的不是毛细现象

D. A 管和 B 管内发生的都是毛细现象

14. 下列现象中, 哪些是毛细现象 ()



- A. 粉笔把纸上的墨水吸干
- B. 车轮在潮湿的地上滚过之后, 车辙中会渗出水
- C. 托里拆利实验管内的水银面高于管外的水银面
- D. 用较细的吸管喝饮料

15. 下列现象或事例不可能存在的是 ()

- A. $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水正在沸腾
- B. 水的温度达到 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而不沸腾
- C. 沥青加热到一定温度时才能溶解
- D. 温度升高到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰并不溶解

参考答案

A 组

1. D

提示: 晶体有单晶体与多晶体之分, 多晶体没有确定的几何形状与各向异性, 所以通过外形与各向异性无法判断。而不管是多晶体还是单晶体, 固定的熔点是它们的共同性质。

2. C 3. C 4. CD 5. B 6. D 7. BC 8. C 9. D

10. 由于水缸中的水蒸发, 水和水缸外表面的温度比周围的空气温度低, 空气中的水蒸气遇到水缸外表面就会发生液化现象。当空气中水蒸气含量较少时, 虽有水蒸气在水缸表面液化, 但很快又蒸发了, 不能形成水珠。当空气中的水蒸气含量较大时, 水蒸气在水缸外表面的液化强于水的蒸发, 形成一层小水珠。而空气中水蒸气的含量大是降雨的一个重要条件, 所以水缸外表面出现了一层小水珠, 就说明降雨的可能性大了。

11. 水和油对竹筷或玻璃棒是浸润的; 不行, 因为水银对竹筷或玻璃棒是不浸润的。如果用铅棒就可以灌水银, 因为水银浸润铅。

12. 当室内温度升高时, 这种材料要熔化, 从而吸收热量; 当室内温度降低时, 材料开始凝固, 会放出热量。

B 组

13. AD 14. AB 15. C

第十章 热力学定律

课程标准的要求

- (1) 通过有关史实,了解热力学第一定律和能量守恒定律的发现过程,体会科学探索中的挫折和失败对科学发现的意义。
- (2) 认识热力学第一定律。理解能量守恒定律。用能量守恒的观点解释自然现象。体会能量守恒定律是最基本、最普遍的自然规律之一。
- (3) 通过自然界中宏观过程的方向性,了解热力学第二定律,初步了解熵是反映系统无序程度的物理量。
- (4) 认识能源和环境与人类生存的关系,知道可持续发展的重大意义。
- (5) 讨论能源的开发和利用带来的问题及应该采取的对策。具有保护环境意识。
- (6) 尝试估计一些厂矿、交通工具及家用电器的能源消耗。具有可持续发展的责任感和主动节约能源的意识,注意自然资源的循环利用。

一、本章教材概述

本章是选修3-3模块的最后一章,也是整个中学物理课程讲述热学的最后一章。这一章以两个基本的热力学定律为核心,从能量转化过程中能量的守恒和与热现象有关的宏观过程的方向性两个方面对中学物理涉及的热学问题作了一个总结。

作为从宏观途径研究热现象的热力学,其基本构建途径是观察、实验和对观察、实验中的大量信息进行分析、归纳和概括。从这个意义上讲,实验和观察对于热力学具有更加突出、更加直接的意义。正是基于这样的认识,教科书在介绍热力学第一定律(第3节)之前特地安排了两节课文介绍其实验基础。特别是在第1节“功和内能”里浓墨重彩地介绍“焦耳实验”。焦耳的热功当量实验在物理学史上具有里程碑意义,它“精确地测量了做功与系统状态变化之间的关系,也就是精确地测量了做功与传热之间的等价关系”,从而为热力学第一定律,也为更加广义的能量守恒定律奠定了坚实的实验基础。本章第2节“热和内能”内容极其简洁,其主要内容在小学科学和初中物理中出现过,本节主要介绍热和内能的关系。有了1、2两节的铺垫,第3节得出热力学第一定律也就水到渠成了。在第3节中,编者用较大篇幅介绍了看似常识性的“能量守恒定律”,这一方面是鉴于能量守恒定律本身的丰富内涵以及它在科学、哲学发展上的重要意义(恩格斯将它与细胞学说、生物进化论一起列为十九世纪的三大发现),另一方面也是新课程三维目标,特别是“过程与方法”“情感态度与价值观”目标的突出体现。教学中要充分重视这部分课程资源,充分发挥其教育价值。

教科书第4、第5两节分别从宏观、微观两个方面介绍热力学另一核心定律——热力学第二定律,这两节特别是第5节“热力学第二定律的微观解释”与原来的教科书相比,内容丰富



得多,反映的物理思想也深刻得多。我们说本章是中学阶段热学的“总结”,还包括了对热学研究方法——宏观的热力学方法和微观的统计力学方法的总结。从物质的微观结构出发,利用统计规律来导出宏观的热学规律的统计方法在3-3模块中多次出现:第七章第3节首先提出了“统计规律”,接着在第八章“气体热现象的微观意义”进一步提出“大量分子的运动情况会遵从一定的统计规律”,并用统计方法去研究分子热运动的特点,进而指出气体温度、气体压强的微观意义,并对气体实验定律作出微观解释。到本章第5节,则大量地用统计方法介绍有序无序、宏观态、微观态以及自发过程的进行方向(即热力学第二定律的微观解释)。编者期望让学生对比较陌生然而却是探索微观世界的基本方法——统计方法有较多的体验,留下较深的印象。

本章的第6节从更宽阔的视野对本章进行总结和拓展。课文首先承接热力学第二定律的思路,提出能量在转换过程中的“耗散和品质降低”问题,提出“节约能源”的必要性。接着教科书介绍“能源与人类社会发展”、“能源与环境”和“开发新能源”,并安排了一个STS内容“汽车和能源”,引导学生关注身边有关能源、节能等社会热点问题。教科书提出这样的问题让学生思考、讨论,并不追求得到某种共识,更不是有一个标准答案。学生关注它了,并用所学的知识去分析、去思考、去讨论甚至去争辩了,也就践行了新课程的追求。

本章末附有一个课题研究:如何提高燃气灶的烧水效率,给学生提供了一个开展研究性学习的范例。这个案例与本章所学知识联系紧密,所需控制的变量较少且容易测量,所以操作性强,绝大多数学生都有条件去完成这项探究。应该引导尽量多的学生去实践,去开展这项探究活动。

在编写本章时还有以下思考。

1. 注重热学基础知识体系的建构

就“从生活走向物理,从物理走进社会”这个理念而言,热学这部分内容与人类生活联系是非常紧密的。热学知识在生活和科学实践中都有着重要的应用。在远古时代,人类的祖先发现了火、使用了火,从而开创了人类的文明历史;科学技术高度发展的现代,各种热机和制冷设备的研制,化工、冶金、气象的研究,都离不开热学知识。有鉴于此,在新的高中物理课程中,这部分内容有所加强,并且形成了基本完整的知识体系。

热学体系的建构,从科学史上来考察,是从两条途径进行的。一条是从宏观上建立温度、热量等概念并根据大量实验事实总结出关于热现象的宏观理论——热力学。热力学的核心内容是两个基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律(本书也介绍了第零、第三定律),这些定律都有坚实的实验基础,具有高度的普遍性和可靠性。但它们还只是说明了“是什么”和“怎么样”,还没能从物理本质层面回答“为什么”的问题,仍然属于唯象理论。

对热现象研究的另一途径是从物质的微观结构出发,以每个微观粒子遵循的力学定律为基础,利用统计方法来导出宏观的热学规律。这样形成的理论称为统计物理学或统计力学。统计力学不仅使人们对自然界的认识深入了一大步,而且由于了解了物质的宏观性质和微观因素的关系,也使得人们在实践中,例如在控制材料的性能以及制取新材料的研究方面,大大提高了自觉性。因此,统计力学在近代物理各个领域都起着极其重要的作用。热力学和统计力学一起,构成了现代热学的科学体系。

在传统高中课程里,这个重要的理论体系是很不完整的,特别是缺少热力学第二定律及其微观解释这一重要部分。在新的高中物理课程选修3系列3-3模块的内容标准中,就明确要求“学生将从宏观和微观两个角度认识热现象的规律,应用统计思想和能量转化与守恒规律解释

现象、处理问题”。正是基于这样的认识，才形成了本书的第4、5节，并且写得比较丰满，以期让学生形成一个比较全面系统的热学图景。

2. 注重热学核心概念的形成

在本章中，先后呈现了一系列重要概念，比如功、内能、系统（热力学系统）、绝热过程、状态（热力学状态）、热量、两类永动机、不可逆过程、有序、无序、宏观态、微观态、熵、能量耗散、能量品质、能源……其中，功、内能和熵是物理学中的一些“核心概念”。学生通过必修模块的学习，对功已有了较深入的理解。学生初次接触熵，只要求“初步了解”，教科书遵从可接受原则，尽量深入浅出地作一些介绍。内能是本章着力关注的一个核心概念。

热力学第二定律及其微观解释所涉及的统计思想和引入的“熵”概念，在物理学发展和研究中有非常重要的地位。事实上，热力学第二定律在物理学中的确是一条很特殊的定律。正如本章教科书首页所引用德国物理学家埃姆登的话：“在自然过程的庞大工厂里，熵的原理（热力学第二定律）起着经理的作用，因为它规定整个企业的经营方式和方法；而能的原理（能量守恒原理）仅充当了簿记员，平衡着贷方和借方。”为什么呢？因为在物理学中，牛顿定律、哈密顿方程等基本定律对时间都是对称的，而热力学第二定律（熵增加原理）却提示出在宏观过程中运动的转化对于时间的增加方向和减少方向具有质的不对称性。也就是说，热力学第二定律提示了涉及热现象的一切宏观的自发过程都只能在一个方向上发生，而不会可逆地在相反的方向上出现，它指出在能量得以平衡的众多过程中，哪些可能发生，哪些不可能发生。自然界涉及热现象的一切宏观过程都是不可逆的，宏观自发过程的这种方向性（熵增加的方向），也就成为时间的方向性。所以，“熵”又常常被称为“时间箭头”。正是基于这些原因，在本章中教科书用了较大的篇幅予以讨论，以期让学生对这些重要的物理思想有一些初步了解。

从热学发展史来看，把热视为一种运动，一种能量，是一种里程碑式的进步。因此，在有的热学教科书中就说“把热视为一种能量，以唯动论为基础的热学理论，就是热力学”、“热力学的主要研究内容就是在物态变化过程中的能量转换”。而国家计量名词也规定，内能就叫“热力学能”。这些都说明内能的确是热学也是整个物理学的核心概念。对于内能，学生并不陌生，在初中物理中，已经涉及“内能”，初中教材把内能界定为：“物体内部所有分子热运动的动能与分子势能的总和”。在选修3-3第七章中，再次提出“我们把系统中所有分子热运动的动能和分子间相互作用的势能的总和叫做系统的内能”。提法基本一致，但已有所提升，把物体提升为更为科学的“系统”，对分子势能也指出是“分子间相互作用的势能”。初高中的这两次内能定义都是从物体的微观结构出发的，但却未从宏观上回答什么是内能。特别是在讲述热力学第一定律时，以往的阐述方式还不能让学生体会到为什么说热力学第一定律是一个实验定律，为什么科学史学那么推崇焦耳测量热功当量的实验。本章尝试着从焦耳实验着手，再通过与重力势能类比引出内能概念，并为最终导出热力学第一定律埋下伏笔。

教科书处理这个问题的思路是：首先介绍测量热功当量的焦耳实验，然后指出：“焦耳的这些实验表明，在各种不同的绝热过程中，如果使系统从状态1变化到状态2，外界所需做的功是相同的。也就是说系统通过绝热过程发生变化，做功的数量只由过程始末两个状态1和2决定，而与做功的方式无关。”得出这个实验结论后，再和重力势能类比，就使我们认识到“任何一个热力学系统都必定存在一个只依赖于系统自身状态的物理量”，而“这个物理量在两个状态之间的差别与外界在绝热过程中所做的功联系”。鉴于功是能量变化的量度，所以提出：“这个物理量必定是系统的一种能量，我们把它称为系统的内能。”这样，就从宏观上界定了内



能，认识到内能是由系统的热力学状态（即系统由包含物质的多少、体积、压强、温度、物态等决定的状态）所决定的一种能量。这种定义内能的方法，也是对必修2中势能、动能引入方式的一种回应，在定义内能的基础上，进而得出 $\Delta U=W$ 。这样处理，我们认为可以反映出 $\Delta U=W$ （热力学第一定律的重要组成部分）是在焦耳实验的基础上导出的这个科学事实，让学生体会到，热力学第一定律的确有其坚实的实验基础。紧接着，教科书再回应内能的微观解释，使内能这个核心概念显得比较丰满。

3. 宏观、微观有机整合，深入浅出地介绍热力学第二定律、熵和统计思想

热学理论所研究的系统是由大量微观粒子组成的。单个粒子（如分子）的运动是遵循力学规律的，即动力学规律性；但大量粒子运动使得概率的因素突显出来，使系统呈现出一种新的规律性，即统计规律性。

在热现象中，系统内部每个粒子由于受到其他粒子的作用十分复杂，使得在某一时刻以多大速度、沿什么方向运动，都呈现出偶然性，而且随时间变化，不同时刻可能有很大的差别。这种特点使得个别粒子的行为（虽然它仍然是遵从力学规律的）对系统整体的宏观性质不再具有决定性意义。研究具有这些特点的物理系统，必须考虑概率的因素，即必须考虑个别特性和各种运动状态在整个系统中占有多大的比重；根据所有这些特性和状态的概率分布，就可以运用统计方法得出决定系统整体宏观性质的物理量的变化规律。

用概率和统计方法求得的宏观物理量是微观量的统计平均值，如系统的温度、压强等。这种平均值代表的是大量微观粒子特性和运动状态的平均结果。概括地说，统计规律性就是在确定的初始条件和边界条件下，能够对系统整体在某一时刻所处的最可几状态作出预言的一种规律性。

物理系统所包含的个别事件的大量性，是产生统计规律性的必要条件。例如，假设系统只有单个气体分子存在，那么谈论气体的密度、压强或温度，就毫无意义。在我们进行热现象研究的时候以及再进一步深入到原子、亚原子层次时，我们面临的都是数目极其巨大的粒子群体，因而必须也只能用统计方法对其进行研究。因此，统计思想和方法是近现代物理研究的最重要的思想和方法之一。对于学习选修3系列物理的学生，是必须有所了解的。

虽然统计、概率思想和方法对于物理研究非常重要，但对于高中学生甚至是对高中物理教师，都是不大熟悉的，这就要求教科书应以尽可能简明的方式呈现这些内容。对此，教科书的主要做法是：

- 由宏观的实验、观察事实入手建立概念，再从物质的微观结构上作出解释。内能、热力学第一定律是这样，不可逆过程、有序与无序、热力学第二定律以及熵，也按这个思路安排的。

- 由简单的理想模型建立概念，再扩大到复杂的实际状态。比如，由4个分子组成的简单理想模型出发，让学生初步了解宏观态、微观态、宏观状态的有序、无序程度等比较抽象的概念，再将其推广到一般的实际状态。

- 尽量由生活现象着手引入对深奥的物理规律的思考。比如，在“热力学第二定律”里，首先设置“思考与讨论”栏目，连续列出四个学生熟悉的生活现象，让他们注意到“并不是所有符合能量守恒的宏观过程都能真的发生”“一切与热现象有关的宏观自然过程都是不可逆的”。

- 安排一些开放性的问题引发有兴趣的学生作进一步的探索，而不至于在整体上加大教科书的难度。比如教科书中概括得出结论：“可以证明，热力学第二定律的上述两种表述是等价

的,可以从其中任一种表述推导出另一种表述。其实,宏观过程的不可逆性都是相互关联的,由一种不可逆性可以通过推理得知另一种过程的不可逆性”。但并没有举例去“证明”这个结论。教学中可以把它作为“研究性学习”的一个小课题留待有兴趣的同学解决。同样,对于“第二类永动机”,教科书也做了类似的处理。

本章共有6节,大致可分为三个单元。第1~3节为第1单元,着重介绍热力学第一定律及其实验基础;第4、5节为第二单元,分别从宏观、微观两个方面阐释热力学第二定律和熵;第6节为第三单元,讲能源的开发和节能。

对课堂教学设计来说,本章有的节的内容多一些(如第4、5节),有的节的内容少一些(如第2节)。教师设计教学时,应根据具体情况(教材内容的难易程度、生源、教学资源等),有效地进行实际课堂教学的课时分配。

课时分配建议

1. 功和内能	1 课时
2. 热和内能	1 课时
3. 热力学第一定律 能量守恒定律	1 课时
4. 热力学第二定律	1 课时
5. 热力学第二定律的微观解释	1 课时
6. 能源和可持续发展	1 课时

二、教材分析与教学建议

第1节 功和内能

1. 教学目标

- (1) 了解焦耳的两个实验的原理。
- (2) 知道做功和传热是改变内能的两种方式。
- (3) 通过焦耳实验的探究,培养学生的科学探索精神。

2. 教材分析与教学建议

本节从演示实验出发,追溯到19世纪30年代的焦耳所做的研究功和内能关系的实验,引入系统内能的概念,最终得出做功与系统内能变化之间的关系。在本节内容中,演示实验以及正文中介绍的两个焦耳实验,都是在绝热条件下完成的,都达到了使系统内能发生改变的共同结果。所以,我们说“做功改变系统的内能”。本节的重点和难点在于:建立内能概念。根据绝热过程中做功的数量仅由过程的始末两个状态决定,不依赖于做功的具体过程和方式,采用类比法引入内能的宏观操作性定义。

本节的主要线索如下:

- 第一,做好教科书图10.1-1的演示实验。从实验得出结论:做功使得物体温度升高。
- 第二,介绍绝热过程。



第三,通过对焦耳实验的分析得出:在绝热过程中,只要做功的数值相同,则系统温度上升的数值相同,即系统的状态变化相同。

第四,启发学生从力学中重力做功与物体重力势能之间的联系中,类比引入表征系统状态的能量——内能。

第五,区分和联系本节的内能定义与第七章中的内能定义。

这样对于内能的认识就经历了从第七章中微观揭示到本节中宏观定义的过程,完整且又缜密,意义重大。横向看,内能的宏观定义使它与“功是能量变化的量度”的普遍观点保持一致,使得我们对于能量与功的理解更加深化;纵向看,内能与温度、压强等其他热学物理量一样,都具有宏观意义和微观解释,使得学生在对热学量的认识方面具有了一致性、相关性和迁移性。

(1) 焦耳实验

如果有条件,建议做一做焦耳的两个代表性的实验;没有条件,也可以用其他的实验替代完成,如钻木取火、两冰块相互摩擦后融化、搓手后手心发烫等。还可以启发学生列举生活实例。也可以借助于多媒体进行模拟实验,帮助学生弄清实验原理。

从1840~1878年的近40年中,焦耳共进行了400多次实验。焦耳把毕生的精力都贡献给了科学事业,堪称后人的楷模。今天,尽管已经统一使用国际单位制中的焦耳来表示各种能量的大小,但热与功的当量关系并非只是一种历史陈迹来供我们欣赏。焦耳当年以实验说明了热运动与机械运动的等价性,以精确的数值无可辩驳地为热力学第一定律和能量守恒定律奠定了实验基础。通过焦耳实验的学习,建立热学中的功能关系,体验科学家实事求是、坚持真理的科学态度以及不畏艰辛、坚持不懈、勇于探索的科学精神。

教学重点是焦耳的两个代表性实验。首先要强调实验条件,在两个实验装置中容器及其中的水组成的系统与外界是绝热的,这样在引起系统温度升高的原因中就排除了外界与系统间传热的可能。其次,认识两个实验中的做功方式。虽然两个实验都是通过做功使液体温度升高,但是做功的方式却有所不同。第一个实验是通过重物下落带动叶片搅拌水,由于叶片与水之间的摩擦而使水温升高。对水而言,是摩擦使其升温,通过机械功实现能量的转化。而第二个实验则是通过重物下落使发电机发电,电流通过电阻丝做功发热使水温升高,通过电功实现能量的转化。这样,种类不同、过程不同以及做功方式也不同的功却导致了同样的结果,充分说明在热力学系统中做功与系统内能变化之间的必然联系。最后,认识不同实验中的共性。尽管在第一个实验中各次悬挂重物质量、下落高度可能不同,在第二个实验中各次通电时间、电流大小可能不同,做功方式以及做功的具体过程也不同,但是只要外界对系统做功的数值相同,系统上升的温度数值就一定相同。

在力学中我们学习过机械功,在电学中我们学习过电功,实际上还有许许多多的功,它们并不能简单地用力和位移的乘积表示,有时我们可能还找不出具体的力和位移,如电极化功、磁化功等,这些功我们称之为广义功。广义功指能使系统与外界交换能量的所有相互作用形式的总称。功的本质意义在于表示能量从一种形式转化为另一种形式的数量。各种能量之间的转化都以功作为共同的量度标准。

(2) 内能

与传统教学不同的是,本教科书给出了内能的宏观操作性定义。这不仅使得内能的概念更加准确、完整,更重要的是强调和突出了“功是能量变化的量度”的普遍观点。而内能的宏观操作性定义的基础是实验事实,因此,演示实验和焦耳的两个代表性实验是后续学习的重要基础。

①“系统”概念

在第七章中已经定义“在物理学中，通常把所研究的对象称为系统”。热学研究对象称为热力学系统，简称为系统。从系统与外界环境的关系出发，往往将系统分为三类：

孤立系统 与外界既没有物质交换又没有能量交换的系统。在该系统中，能量既不能进也不能出。

封闭系统 与外界只有能量交换但无物质交换的系统。在该系统中，物质不能进出，但可以同外界交换能量。

开放系统 与外界可以自由进行物质和能量交换的系统。

热力学系统是含有大量原子、分子或其他微观粒子、体积有限的宏观物体。例如，汽缸中的气体，一定体积的液体、一块固体以及一个生物体等。热力学系统周围，对此系统起作用的物体称为外界。热力学系统有一封闭曲面包围着，把系统和外界分隔开来。这个曲面随系统的形状而定，它可以是实的，也可以是假想的。例如：汽缸壁是实的，而讨论大气的一部分时，这部分曲面就是虚的。当这部分气体流动或变动时，可以想象这曲面也随之相应地发生变化。所以选取的系统不同，改变内能的方式也可能就会不一样。如在焦耳的第二个代表性实验中，选择以水和电热丝等组成的系统为研究对象，改变内能的方式为发电机输出的电流做功。选择以水为研究对象，改变内能的方式为电热丝向水传热。

②“内能”概念

在第七章中已经给出了内能的微观定义，在本节又给出了内能的宏观操作性定义。

根据内能的宏观操作性定义，我们并不能确定系统处在某一状态时内能的绝对值，而只能确定两个平衡态的内能差。在实际问题中，要确定的往往也是系统两个平衡态之间的内能差，而不必知道系统状态内能的绝对值。

③“系统状态”

在第七章中将“描述系统状态的物理量叫做系统的状态参量”。这里的“状态”是指热平衡态，除了已经学过的宏观状态参量如压强、体积、温度等，还有表征系统状态能量的物理量——内能等。

④内能和机械能

内能和机械能是截然不同的，不能混为一谈。内能是由大量分子的热运动和分子间相对位置所决定的能量，机械能是物体做机械运动和物体形变所决定的能量。物体可以同时具有内能和机械能（如在空中飞行的炮弹）。两种形式能量之间可以相互转化。机械能可以为0，而内能是不可能为0的。

(3) 关于演示实验

虽然教科书图10.1-1的实验，不少学生已经见过，但是该实验在本节课中的地位是不言而喻的，所以要认真做好该实验，确保实验成功。

实验成功的要领有四点：①取下活塞，用吹气球或打气筒将有机玻璃筒中的剩余气体置换掉，注入新鲜空气。注意不能用嘴吹，因为嘴吹出的气体中含有较多的二氧化碳和水蒸气，所含氧气较少。②放入的棉花量要少，且要处于蓬松状态。③向下压活塞的动作要快。④活塞与筒壁之间的密封性要好。可以在活塞上涂上蓖麻油，以增强密封性。

(4) 关于“做一做”实验

实验内容：观察瓶塞跳出时瓶内的变化。

实验器材：500 mL圆底烧瓶、三角瓶或无色透明塑料瓶，单孔塞，胶管，两用气筒。



实验观察：瓶中放少许酒精或水，摇一摇瓶子使酒精或水充分挥发。实验时注意观察瓶塞跳起时气体出现的现象。应该看到乳白色雾状物，但是时间很短（不足1 s），稍纵即逝。

实验解释：实验研究的对象是瓶中气体与气筒中的气体所组成的系统。在瓶塞未跳出时，瓶内气体体积 V 一定。当用打气筒向瓶内打气时，外界通过活塞对系统做了功，使得系统的内能增加，即温度升高，压强增大，使瓶塞从瓶口喷出。看到乳白色雾状物的原因在于，在塞子突然跳起时气体绝热膨胀对外做功，内能减少，温度下降，所以瓶内气体中所含有的水蒸气或酒精蒸气成分有一部分被液化，成为细小的液滴悬浮在空气中而呈雾状。

3. 问题与练习

1. 内容分析

内能是一个抽象概念，在本节课的学习中，学生对内能的了解仅仅是以焦耳实验为基础的。如果仅仅局限于此，学生对内能的认识显得过于单薄，需要抓住“功是能量转化的量度”这一关键，在具体的生活实例中加以体会，从而加深对系统内能及其变化的认识。

解答与说明

例1. 在水平公路上行驶的汽车，发动机熄火之后，速度越来越小，最后停止。汽车克服阻力做功，将机械能转化为内能。

例2. 在阻尼振动中，单摆的振幅越来越小，最后停下来。单摆克服阻力做功，机械能转化为内能。

例3. 在电磁感应中，将线框的机械能转化为线框中的电能，电能再转化为内能，使线框发热。

2. 内容分析

在焦耳实验中，最重要的物理思想是“功是能量转化的量度”。同时，需要弄清楚是哪几种能量之间的转化，为后面将要学习的能量转化和守恒的思想做好准备工作，也为认识焦耳是能量转化和守恒定律的奠基人之一提供了有力证据。

解答与说明

在教科书图10.1-2的实验中，重物的重力势能转化为水的内能；在教科书图10.1-3的实验中，重物的机械能转化为电能，电能再转化为液体的内能。

3. 内容分析

绝热过程是本节学习的新知识。焦耳的两个代表性实验前提就是绝热。所以弄懂绝热过程对于学好本节内容至关重要，同时也为热力学第一定律中绝热变化过程提供一些定性和半定量的佐证。

解答与说明

(1) 气体在真空绝热膨胀的过程中，不受阻力，所以气体不做功。

(2) 气体在大气中绝热膨胀时，气体对外界做功，所需能量来自气体的内能，因此在此过程中，气体的内能要减少。

第2节 热和内能

1. 教学目标

- (1) 知道传热是改变系统内能的一种方式。
- (2) 会区分热量和内能的概念。
- (3) 知道做功与传热在改变系统内能上的区别。

2. 教材分析与教学建议

本节讲述另一类热力学过程——传热与改变内能的关系。教科书首先分析系统在单纯的传热过程中系统内能的变化，自然引出热量与系统内能概念的区别和联系，最后研究做功与传热在改变系统内能上的异同。

在进行本节教学时，建议采用下面的方法入手：让学生自己想办法将一段铁丝的温度升高。有的学生会想到通过做功的办法，将铁丝来回多次弯折，最终使得铁丝发烫。有的学生想到直接将铁丝放在火上烧，或与高温物体（如锅炉壁）直接接触，等等。还可以让学生列举熟悉的生活事例，自己举例，自己归类，从而进一步把握改变系统内能的方法。

(1) 热量

在19世纪以前，关于热（热现象或热量）的本质，存在着两种不同的观点，即热动说和热质说。在“科学足迹”栏目中，对历史上关于热的本质之争进行了介绍，通过这一栏目的学习使学生体会到，这个理论的建立经过了曲折的过程。伦福德（和戴维）的实验论据是充分的，但是并没有被同时代的多数人接受，这不妨碍伦福德和戴维的科学观点超前于他们同时代的人，他们对发现能量转化和守恒定律作出贡献。

对应于前节功与内能的定量关系，在没有做功的热力学过程中系统内能变化的量度用热量来表示。也就是说，系统由状态1经过不做功的过程变化到状态2，所吸收的热量 $Q=U_2-U_1$ 。根据这个关系，热量的单位与能量的单位自然是相同的，在国际单位制中是焦耳。在历史上的热质说时期，人们曾给热量统一了单位——卡。正因为这个有别于能量单位的卡，才有了热功当量的问题。现在，虽然“卡”这个单位已经废弃，但由于沿用很久了，要想把以卡为单位的许多资料、条文规定都改成以焦耳为单位，还需要一段时间，特别是在医学和营养学方面，“卡”用得比较多。

(2) 热量和内能

内能是指热力学系统在某一状态下，内部各种运动形态能量的总和，它表示系统本身内在的一种性质，由系统的状态单值地决定，是系统的状态量。状态确定，内能确定。要使系统的内能发生变化，可以通过做功或传热两种过程来完成。而热量是在传热过程中，量度系统内能变化的物理量。热量只是反映物体在状态变化过程中所迁移的能量，是用来衡量物体内能变化的。有过程才有变化，离开过程谈热量是毫无意义的。就某一状态而言，只有内能不存在热量，因此我们不能说系统中含有多少热量。

(3) 做功与传热

虽然传热与做功都能引起系统内能的改变，但是它们还是有着很大的区别：传热只在系统与外界存在温度差时才发生，而做功在任意温度下均可发生；在本质上，传热过程是不同物体（或一个物体的不同部分）之间内能的转移，在这类过程中发生的只是内能的传递，不发生热



运动形式之间的转化,所发生的相互作用是通过热交换或物质交换进行的。热量就是为了量度传热过程中所传递的能量的多少而引入的概念。做功过程总是伴随着其他形式的能与内能之间的转化,如机械能与内能、电能与内能之间的转化。同时,一定会伴随着其他运动形式与热运动之间的转化,如机械功伴随着机械运动与热运动之间的转化,电功伴随着电磁运动与热运动之间的转化。

(4) 关于“科学足迹”

这是一篇阅读材料,学生了解即可。关于“热质说”,教师应给予正确的评价。整个量热学是在热质说的基础上建立起来的,它为热平衡方程的建立奠定了基础。可以说,对“热质说”逐渐否定的过程就是能量转化和守恒定律的发现和建立的过程。

3. 问题与练习

1. 内容分析

通过具体问题使学生体会传热与内能改变的关系。

解答与说明

(1) 壶里的水被加热,其他物体的内能通过传热将热量传给了壶里的水,所以水的内能增加。

(2) 烧红的铁棒比周围温度要高,所以要将热量传递给周围环境,而自身的内能减少。

2. 内容分析

通过本题研究做功与物体内能改变之间的关系。因为做功过程总是伴随着其他形式的能与内能,如机械能与内能之间的转化。同时,一定会伴随着其他运动形式与热运动之间的转化,如机械功是机械运动与热运动之间的转化。在本问题中,铅弹的动能通过铅弹与木块之间的摩擦力做功转化成木块的内能,铅弹的机械运动最终转化为热运动,动能转化为内能。

解答与说明

铅弹的动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 转化为木块和铅弹的内能,其中 80% 使铅弹内能增加,有下面的关系式成立:

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right) \times 80\% = cm\Delta t$$

其中 $c=1.3 \times 10^2 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 是铅的质量热容,所以

$$\Delta t = \frac{0.8v^2}{2c} = \frac{0.8 \times 200^2}{2 \times 1.3 \times 10^2} ^\circ\text{C} = 123 ^\circ\text{C}$$

第3节 热力学第一定律 能量守恒定律

1. 教学目标

- (1) 理解热力学第一定律。
- (2) 能运用热力学第一定律解释自然界能量的转化、转移问题。
- (3) 理解能量守恒定律,知道能量守恒是自然界普遍遵从的基本规律。
- (4) 通过能量守恒定律的学习,认识自然规律的多样性和统一性。
- (5) 知道第一类永动机是不可能实现的。

2. 教材分析与教学建议

焦耳实验结果表明,在系统状态发生改变时,只要始末状态确定了,做功的数量或者传热的数量就是确定的。而且,热功当量的测定结果表明,做功和传热在改变系统的内能上等价,一定数量的功与确定数量的热相对应。所以,当外界既对系统做功又对系统传热时,内能的增量就应该满足 $\Delta U = Q + W$, 这就是热力学第一定律的数学表达式。教科书又通过实例对表达式中物理量取值的正负意义进行了讨论。在从热力学第一定律到普遍的能量守恒定律的教学中,需要特别指出的是:能量守恒定律的确立,说明了不同运动形式在相互转化中有量的共同性,从而把各种自然现象用定量的规律联系了起来,突破了人们对物质运动的机械观念的范围,第一次在极其广阔的领域里把自然界各种物质运动联系了起来,具有重大的理论意义;另一方面,能量守恒定律的确立,也具有重要的实践意义,它对于制造永动机的设想,给予了科学上的最后否决。

(1) 功、热量、内能

这三个概念在前面已经分别学习过,第一节中学习了做功与内能,第二节中学习了传热与内能。但是既有做功又有传热时,内能将会怎样变化呢?内能的变化与功和热量的普遍联系,被定量地反映在热力学第一定律中。其中,内能的概念是热力学第一定律的核心。做功和传热是改变内能的两条途径,即它们在改变物体的内能上是等价的;功与热量都与能量有相同的单位;这两个量不是表征系统状态的量,而是表征系统由于和外界相互作用,从一个状态变到另一个状态的热力学过程的量,在该过程中讨论热量和功才有明确意义。“系统处于某一状态时具有多少功”,或者“系统处于某一状态时具有多少热量”,这些说法都是错误的。

(2) 热力学第一定律

前两节内容的教学表明,使系统的热运动状态发生变化,既可以通过做功的方式,也可以通过传热的方式。而自然界实际发生的热力学过程往往是上述两种基本过程的综合,即系统既有做功的过程发生,又由于存在温度差而与外界交换热量,所以我们有必要将单纯绝热过程和单纯传热过程中系统内能变化的定量表达式推广到一般情况,也就是得出普遍适用的热力学第一定律。

在热力学第一定律 $\Delta U = Q + W$ 中, ΔU 是内能的增量, W 表示外界对系统所做的功, Q 表示系统从外界吸收的热量。对气体来说,要求学生明确,压缩气体时外界对气体做功,气体膨胀时气体对外界做功。对于正、负符号,教学时应结合实例引导学生自主认识、归纳总结。系统内能增加为正,即 $\Delta U > 0$; 反之为负,即 $\Delta U < 0$ 。外界对系统做功为正,即 $W > 0$; 反之为负,即 $W < 0$ 。系统从外界吸热为正,即 $Q > 0$; 反之为负,即 $Q < 0$ 。具体的符号用法如下表所示。

	+(系统内能增加)	-(系统内能减少)
功 W	外界对系统做功	系统对外界做功
热量 Q	系统吸热	系统放热
内能改变 ΔU	内能增加	内能减少

(3) 参考例题

例1 一定量的气体,从外界吸收热量 $2.7 \times 10^5 \text{ J}$, 内能增加 $4.3 \times 10^5 \text{ J}$ 。在这一过程中,是气体对外界做功,还是外界对气体做功? 做了多少功?

解析: 根据 $\Delta U = Q + W$, 即 $4.3 \times 10^5 \text{ J} = 2.7 \times 10^5 \text{ J} + W$, $W = 1.6 \times 10^5 \text{ J}$. $W > 0$, 说明外界对气体做功。

例2 如图 10-1 所示, 固定容器及可动活塞 P 都是绝热的, 中间有一导热的固定隔板 B , B 的两边分别盛有气体甲和气体乙。现将活塞 P 缓慢地向 B 移动一段距离, 已知气体的温度随其内能的增加而升高, 则在移动 P 的过程中 ()

- A. 外力对乙做功, 甲的内能不变
- B. 外力对乙做功, 乙的内能不变
- C. 乙传递热量给甲, 乙的内能增加
- D. 乙的内能增加, 甲的内能不变

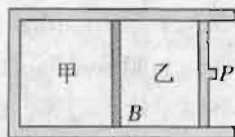


图 10-1

解析: 将活塞 P 缓慢地向 B 移动一段距离, 外界对气体乙做功, 使得乙的内能增加, 温度升高。而中间固定隔板 B 是导热的, 所以热量通过隔板传递给甲, 使得甲的内能增加, 最终甲、乙两种气体达到热平衡, 温度相等。从整体看, 外界对绝热系统做功, 系统内能增加, 所以本题的答案为选项 C。

例3 图 10-2 中活塞将汽缸分成两室, 汽缸、活塞 (连同拉杆) 是绝热的, 且不漏气, 以 $U_{\text{甲}}$ 、 $U_{\text{乙}}$ 分别表示甲、乙两室中气体的内能, 则在将拉杆缓慢向外拉的过程中 ()

- A. $U_{\text{甲}}$ 不变, $U_{\text{乙}}$ 减小
- B. $U_{\text{甲}}$ 增大, $U_{\text{乙}}$ 不变
- C. $U_{\text{甲}}$ 增大, $U_{\text{乙}}$ 减小
- D. $U_{\text{甲}}$ 不变, $U_{\text{乙}}$ 减小

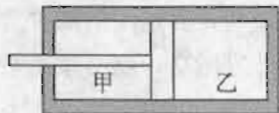


图 10-2

解析: 将拉杆缓慢向外拉的过程中, 乙室中气体对外做功, $W < 0$ 。而汽缸、活塞 (连同拉杆) 是绝热的, 即 $Q = 0$ 。根据 $\Delta U = Q + W$, 得出 $U_{\text{乙}}$ 减少。同时, 甲室中, 外界对气体做功, $W > 0$ 。而 $Q = 0$, 所以 $U_{\text{甲}}$ 增大。答案为 C。

(4) 能量守恒定律

自然界存在着不同形式的能量。对应于不同的运动形式, 能量也有不同的形式, 如机械运动中有动能和势能, 热运动中有内能等, 它们分别以各种运动形式特定的状态参量来表示。当运动形式发生变化或运动量发生转移时, 能量也从一种形式转化为另一种形式, 从一个系统传递给另一个系统, 在转化和传递中总能量始终不变。

能量守恒定律的确立, 具有重大的理论意义。一方面找到了各种自然现象的公共量度——能量, 从而把各种自然现象用定量规律联系了起来。另一方面, 这个定律的确立, 突破了人们关于物质运动的机械观念的范围, 从本质上表明了各种物质运动形式之间相互转化的可能性。这样, 能量转化定律就第一次在极其广阔的领域里把自然界的各种物质运动联系了起来。焦耳实验测量热功当量的定量的结果, 对于能量守恒定律的发现起着至关重要的作用。

(5) 热力学第一定律与能量守恒定律

热力学第一定律是能量守恒定律在热现象范围内的具体体现。如果不仅仅涉及系统的内能, U 所表示的就是系统所含的一切形式的能量, 如机械能、内能、电磁能、化学能等; W 也表示各种形式的功, 如机械的、电磁的、化学的功, 那么就可以将热力学第一定律理解为普遍的能量守恒定律。事实上, 在历史的进程中热力学第一定律和能量守恒定律差不多是同时被发现的。

但是, 两个定律之间还是有着许多的不同之处。例如, 能量守恒定律对宏观运动和微观现象均适用, 而热力学第一定律只是在热现象中运用。又如, 热力学第一定律能够给出具体的定

量形式，而能量守恒定律却给不出。这是由于我们还不知道世界上有多少种能量形式，例如，暗能量问题。

(6) 自然规律的多样性和统一性

“认识自然规律的多样性和统一性”是物理科学的重要使命，也是课程标准的要求。能量守恒定律说明了不同运动形式在相互转化中有量的对应关系，从而把各种自然现象用定量的规律联系了起来，揭示了自然规律的多样性和统一性。在物理学中，多样性对于学生来说比较熟悉。比如能量守恒定律在热运动中可以表现为热力学第一定律；在机械运动中可以表现为机械能守恒定律，等等。而统一性在电磁学的学习中，已经有所涉及。比如奥斯特发现电生磁现象后，法拉第就是在“自然规律具有统一性”的哲学思想指导下去探索磁生电的方法，从而发现了电磁感应现象。

(7) 第一类永动机

能量守恒定律的确立，还有其重大的实践意义。它指出，如果没有外界热源供给热量，则有

$$U_2 - U_1 = W$$

就是说，如果系统的内能减少，即 $U_2 < U_1$ ，则 $W < 0$ ，说明系统对外界做功。所以对外界做功是以内能的减少为代价的，而不是无中生有创生出来的。但是，若想使系统源源不断地对外界做功，就必须使系统回到初始状态，以便在循环中周而复始地不断工作。这样，就会有 $U_2 = U_1$ ，而 $W = 0$ 。这就表明，在无外界能量供给的情况下要使系统不断地对外界做功，是不可能的。这个结论彻底粉碎了永动机的幻想。

为了使学生理解这一点，教学中可以带领学生分析教科书图 10.3-1 的方案。这是最早的永动机之一，在 13 世纪由一个叫奥恩库尔的法国人提出来的。从图中可以看出，在一个轮子的边缘上，装了一些可以活动的短杆，每根杆的末端装了一个铁球。设计者说，无论轮子处在什么位置，右边的铁球总比左边的铁球距离轮轴远一些。根据杠杆原理，右边的铁球总要向下压轮子，使它沿着顺时针的方向永远旋转不息。问题在于，轮子右边的铁球距离轮轴虽然总是比较远，但是它们的总数却总比左边的少，结果左右两边旋转轮子的作用刚好相等，互相平衡。于是轮子不会持续转动下去，只会摆动几下就停下来了。所以设计者的想法不会实现。这种想法是不科学的，因为它违反了能量守恒定律。

在实际教学过程中，可以让学生在读图的基础上，按下面的思路思考后展开讨论。

- ①弄清图中所示永动机的各部件及其相互联系。
- ②设计者设想的能量转化过程是怎样的？
- ③你认为设计者哪部分设想不符合能量守恒定律。

教师也可以列举其他永动机的例子，例如：

①文艺复兴时期意大利的达·芬奇早在 15 世纪就提出过永动机不可能的思想。他曾设计过一种转轮（图 10-3），利用隔板的特殊形状，使一边重球滚到比另一边的距离轮心远些的地方，本以为在两边重球的作用下会使轮子失去平衡而转动不息，但试验的结果却是是否定的。他从许多类似的设计方案中认识到永动机的尝试是注定要失败的。他写道：“永恒运动的幻想家们！你们的探索何等徒劳无功！还是去做淘金者吧！”

②流水的落差可以推动水轮机对外提供动力，能否用流水来

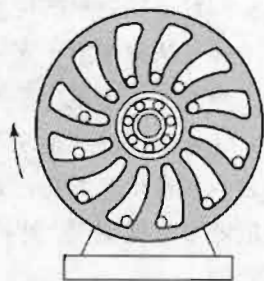


图 10-3 达·芬奇设想的永动机

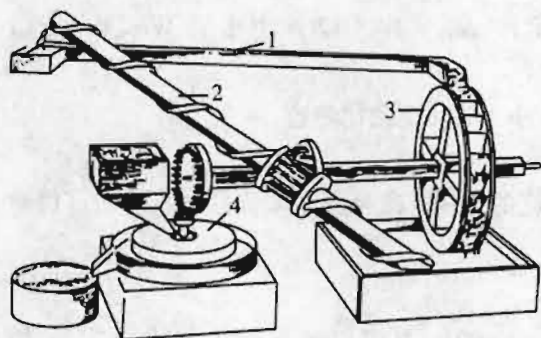


图 10-4

机也就停止了转动。

③大约在 1570 年,意大利有一位教授叫泰斯尼尔斯,提出用磁石的吸力可以实现永动机,名叫磁力永动机。他的设计如图 10-5 所示, A 是一个磁石, 铁球 C 受磁石吸引可沿斜面滚上去, 滚到上端的 E 处, 从小洞 B 落下, 经曲面 BFC 返回, 复又被磁石吸引, 铁球就可以沿螺旋途径连续运动下去。大概他那时不知道磁力大小是与距离的平方成反比变化的, 只要认真想一想, 其荒谬处就一目了然了。

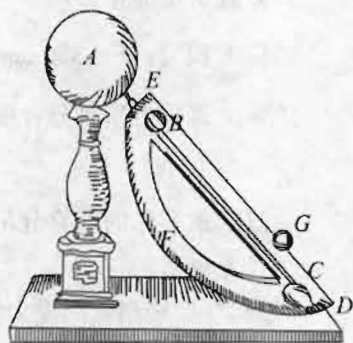


图 10-5 磁力永动机

此外,人们还提出过利用轮子的惯性,细管子的毛细作用,电磁力等获得有效动力的种种永动机设计方案,但都无一例外地失败了。其实,在所有的永动机设计中,我们总可以找出一个平衡位置来,在这个位置上,各个力恰好相互抵消掉,不再有任何推动力使它运动。所有永动机必然会在这个平衡位置上静止下来,变成不动机。

层出不穷的永动机设计方案,都在科学的严格审查和实践的无情检验下一一失败了。1775 年,法国科学院宣布“本科学院以后不再审查有关永动机的一切设计”。这说明在当时科学界,已经从长期所积累的经验中,认识到制造永动机的企图是没有成功希望的。永动机设计者的无数次失败使人们在更深层次上考虑问题,促进了能量守恒定律的建立。

3. 问题与练习

1. 内容分析

通过习题练习运用热力学第一定律 $\Delta U = W + Q$ 。

解答与说明

活塞对空气做 900 J 的功, 即 $W = 900 \text{ J}$; 汽缸向外散热 210 J, 即 $Q = -210 \text{ J}$, 根据热力学第一定律: $\Delta U = W + Q = 900 \text{ J} + (-210 \text{ J}) = 690 \text{ J}$, 即内能增加了 690 J。

2. 内容分析

练习运用热力学第一定律, 使学生明确气体在升高相同温度时, 对外是否做功, 吸收热量不同。

解答与说明

(1) 活塞固定时: 缸内气体的体积不变, 没有做功过程发生, 空气吸收的热量 Q_1 全部用于增加气体的内能, 即有 $Q_1 = \Delta U$; 活塞不固定时: 温度升高, 气体再次达到平衡时, 气体压强仍等于大气压, 所以气体体积增大, 气体对外做功。由于温度升高相同的值, 内能的增加量

与前一过程相同, 也为 Q_1 。根据热力学第一定律 $\Delta U = W + Q_2$, 由于有 $W < 0$, 所以有 $Q_2 > Q_1$ 。

(2) 根据上一问的分析可知, 定容下的比热容小于定压下的比热容。

3. 内容分析

热力学第一定律 $\Delta U = W + Q$ 在生活中有着广泛的应用, 通过联系实际的计算分析可以对理论知识有更好的认识。

解答与说明

圆筒内的水经过 2 min 增加的内能为: $\Delta U = Q = cm\Delta t$, 其中 $c = 4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 所以, $\Delta U = 4.2 \times 10^3 \times 0.6 \times 1 \text{ J} = 2.52 \times 10^3 \text{ J}$ 。

每分钟获得能量为: $\frac{2.52 \times 10^3}{2} \text{ J} = 1.26 \times 10^3 \text{ J}$ 。

圆筒面积为: $S = 300 \text{ cm}^2 = 3 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 。

地面上每平方米每分钟接受到的太阳能为: $\frac{1.26 \times 10^3}{3 \times 10^{-2}} \text{ J} = 4.2 \times 10^4 \text{ J}$ 。

4. 内容分析

通过联系实际的计算分析可以对理论知识有更好的认识, 同时激发起学生强烈的求知欲。

解答与说明

假设 20 层楼高处的重力势能全部转化为水的内能, 每层楼高约为 3 m, 则

$$mgh = \Delta U = cm\Delta t$$

$$\Delta t = \frac{gh}{c} = \frac{10 \times 20 \times 3}{4.2 \times 10^3} ^\circ\text{C} = 0.14 ^\circ\text{C}$$

5. 内容分析

在本题中做了一个近似, 可以认为奶牛体内绝大部分为水。这种处理手法在物理学中是很常见的。在中学物理课堂中所研究的问题往往是真实问题的提炼和简化。

解答与说明

要维持奶牛的内能不变, 每小时至少要为它提供的热量为

$$Q_0 = cm\Delta t = 4.2 \times 10^3 \times 400 \times (37 - 33.5) \text{ J} = 5.9 \times 10^6 \text{ J}$$

6. 内容分析

热力学第一定律可以有不同的数学表达式。教科书中的讲法突出了做功和传热是改变内能的两种不同的形式, 人们可以通过做功和被传递的热量来量度系统内能的变化。

解答与说明

$Q = \Delta U + W$ 的含义是: 系统从外界吸收的热量 Q 等于系统对外界做的功与系统内能增量之和。与教科书表述相比, 这种表述是从热机的效率角度考虑, 外界传递给系统的热量, 一部分用来增加系统的内能, 另一部分就是系统对外所做的功。

第4节 热力学第二定律

1. 教学目标

(1) 通过自然界中热传导的方向性等实例, 初步了解热力学第二定律, 并能用热力学第二定律解释第二类永动机不能制造成功的原因。

- (2) 能运用热力学第二定律解释自然界中的能量转化、转移以及方向性问题。
- (3) 尝试运用热力学第二定律解决一些实际问题, 培养将物理知识应用于现实生活的能力。

2. 教材分析与教学建议

教科书从学生比较熟悉的热传导过程的方向性入手, 研究与分子热运动有关的过程的方向性问题, 以引起学生的思考: 热力学第一定律告诉人们热力学过程中能量不会无中生有或消失, 但是对于自然过程没有任何限制, 那么是不是任何过程都可以发生? 热力学第二定律就是要解决哪些过程可以发生的问题。

一个系统, 由某一状态出发, 经过某一过程到另一状态, 如果存在另一过程, 它能使系统和外界完全复原(即系统回到原来的状态, 同时消除了原来的过程对外界引起的一切影响, 则原来的过程称为可逆过程; 反之, 如果用任何方法都不能使系统和外界完全复原, 则称为不可逆过程。

要注意引导学生从熟悉的实例出发, 思考自然界宏观过程中的可逆过程与不可逆过程。教科书首先在栏目“思考与讨论”中列举了四个现象: 第一个现象是将热鸡蛋置于冷水中, 揭示了“热量可以自发地从高温物体传到低温物体”的自然规律。其逆过程不可能自发地进行。如果要进行, 就要用专门的制冷设备, 并需要通过外界做功。可见这个过程是不可逆的。第二个现象是“墨水炭粒在清水中的扩散”, 以及列举的第四个现象“钢瓶中的压缩气体喷射到瓶外”, 都是揭示了“分子的扩散运动是从密度较大的区域向密度较小的区域”进行的规律, 其逆过程不可能发生。第三个现象是在平地上滚动的足球由快变慢的过程, 揭示了“内能与其他形式的能相互转化的过程是不可逆的”。我们还可以通过一些演示实验来增强学生的感性认识, 比如打开课前准备好的一小瓶香水的瓶盖, 不一会儿教室里的同学都闻到了香味儿。也可以让学生进行小组讨论, 并由代表汇报结果, 列举他们认识到的不可逆过程, 及时指出其中的可能错误, 帮助学生准确把握和认识不可逆过程。这些过程都不违背热力学第一定律, 但却是不可逆的。我们不可能穷举所有过程, 但是大量事实告诉我们, 一切与热现象有关的宏观过程都是不可逆的, 指出热力学第二定律就是解决宏观自然过程的方向性问题。最后得出“一切与热现象有关的宏观自然过程都是不可逆的”的结论, 而且特别要强调其中的定语“与热现象有关”。

关于热力学第二定律的表述, 认识的关键在于找出“其他影响”的含义。例如, 理想气体的准静态膨胀过程, 它可以从单一热库吸收热量而对外做功, 但是产生了影响——理想气体体积扩大了。再如, 制冷机循环工作的结果, 就是把热量从低温物体传送到高温物体, 但也产生了影响, 这就是外界做了功。

人们曾设想制造一种能从单一热库吸收热量使之完全变为功而不产生其他影响的热机, 这种空想出来的热机叫做第二类永动机。如果这种热机能制成, 就可以利用空气或海洋作为热源, 从它们那里不断吸收热量而做功, 这是最经济不过的, 因为海洋的热源实际上是取之不尽的。这种机器不违反热力学第一定律, 但违反了热力学第二定律。教学中可以以教科书中的“思考与讨论”中的海水降温发电为例, 还可以另举其他例子。

如: 用两种不同的金属丝组成一个回路, 接触点 1 插在热水中, 接触点 2 插在冷水中, 如图 10-6 所示, 电流计指针会发生偏转, 这就是温差发电现象。这一实验是否违反热力学第二定律? 热水和冷水的温度是否会发生变化? 简述这个过程中能的转化

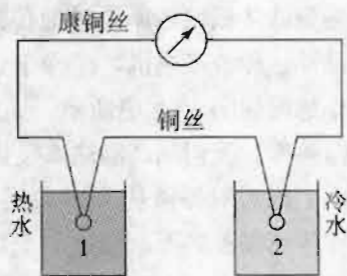


图 10-6

情况。答案是这一实验并不违反热力学第二定律，热水降温、冷水升温。热水部分内能转化成电能，部分电能又转化成冷水的内能。在电路中有电流时，康铜丝中有热效应会散热，将对外界产生影响。

(1) 热力学第二定律的表述

①关于克劳修斯表述与开尔文表述

热力学第二定律是阐述宏观自然过程的方向性问题的，教科书给出的两种表述，一种是按照传热过程的方向性表述，另一种是按照机械能与内能转化过程的方向性表述。

克劳修斯的表述相当于：不可能制造成这样一台机器，在一个循环动作后，只是将热量从低温物体传到高温物体而不产生其他影响。这种机器就是不用做功的制冷机。所以克劳修斯关于热力学第二定律的表述，是对制冷机工作的总结。其工作原理如图 10-7 甲所示， T_1 为高温热库， T_2 为低温热库， W 为外界所做的功， Q_2 为从低温热库吸收的热量， Q_1 为向高温热库放出的热量。如果 $W \rightarrow 0$ ，该机器在一个循环动作恢复原状后，外界也没有变化，唯一的结果是把热量 Q_2 从低温热库传送到高温热库，如图 10-7 乙所示。如果能够做成这种机器，那么它的作用就等于热量自动从低温热库传送到高温热库，而外界没有任何变化。

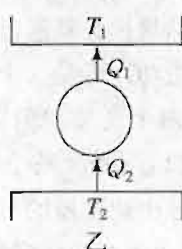
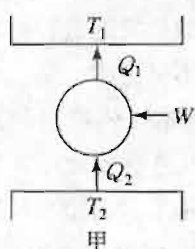


图 10-7

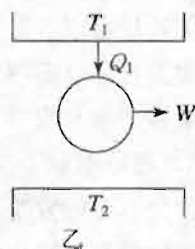
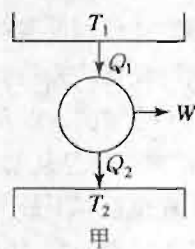


图 10-8

开尔文的表述相当于：不可能造成这样一种机器，在一个循环动作后，只是从单一热库吸收热量，使之完全变为功，而不产生其他影响。这是对热机工作的总结。其工作原理如图 10-8 甲所示。 T_1 为高温物体， T_2 为低温物体， W 为对外界所做的功， Q_2 为向低温热库散发的热量， Q_1 为从高温热库吸收的热量。如果 $Q_2 \rightarrow 0$ ，该机器在一个循环动作恢复原状后，外界也没有变化，唯一的结果是把热量 Q_1 从单一热库全部转变为功，如图 10-8 乙所示。这种效率达到百分百的热机是不可能的。

②两种表述是等价的

如果克劳修斯表述不成立，则开尔文表述也不成立。

证明：(反证法) 如果克劳修斯表述不成立，则热量能从低温热库自动地传到高温热库。因而可以设计一种卡诺热机，工作于这两个热库之间，其工作情况如图 10-9 甲所示。 T_1 为高温热库， T_2 为低温热库。我们从高温热库吸热 Q_1 ，向低温热库放热 Q_2 ，同时对外做功 W 。我们使 Q_2 自动地从低温热库传到高温热库。经过一个循环后，总的效果是从高温热库 T_1 吸取热量 $Q_1 - Q_2$ ，对外做功 $Q_1 - Q_2$ ，低温热库状态不变。这相当于是一台从单一热库吸取热量对外做功的机器，即如图 10-9 乙表示，因而违背了开尔文表述。所以如果克劳修斯表述不成立，则开尔文表述也不成立。

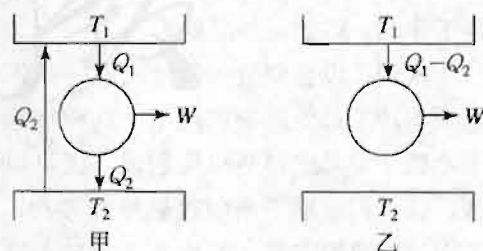
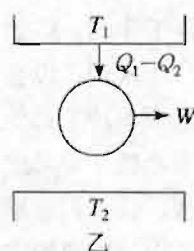


图 10-9



如果开尔文表述不成立，则克劳修斯也不成立。同样可以用“反证法”来证明。

③任何一种与热现象有关的宏观自发过程进行方向的说明,都是热力学第二定律的表述。例如:摩擦生热过程是不可逆过程;自由膨胀过程是不可逆的;扩散过程是不可逆的;等等。

(2) 热力学第二定律表述中的几个问题

①单一热库:指温度均匀并且恒定不变的系统。若一系统各部分温度不相同或者温度不稳定,则构成机器的工作物质可以在不同温度的两部分之间工作,从而可以对外做功。据报道,有些国家已在研究利用海水上下温度不同发电。

②其他影响:指除了从单一热库吸收的热量,以及所做的功以外的其他一切影响;或者除了从低温物体吸收热量、高温物体得到相同的热量外,其他一切影响和变化。不是不能从单一热库吸收热量而对外做功,而是这样做的结果,一定伴随着其他变化或影响。同样,也不是热量不能从低温物体传到高温物体,而是指不产生其他影响的从低温物体到高温物体的自发传热是不可能的。

③关于“不可能”:实际上热机或制冷机系统循环终了时,除了从单一热库吸收热量对外做功,以及热量从低温热库传到高温热库以外,过程所产生的其他一切影响,不论用任何曲折复杂的办法都不可能加以消除。

④适用条件:只能适用于由很大数目分子所构成的系统及有限范围内的宏观过程。而不适用于少量的微观体系,也不能把它扩展到无限的宇宙。

(3) 热力学第一定律与热力学第二定律

热力学第一定律是能量守恒定律在热力学中的表现。热力学第二定律是关于在有限空间和时间内,一切和热运动有关的物理过程、化学过程具有不可逆性的经验总结,它遵守能量守恒定律。第一定律否定了创造能量和消灭能量的可能性,从而否定了第一类永动机。第二定律阐明了过程进行的方向性,从而否定了第二类永动机。

两个定律都是热力学的基本定律。热力学第一定律和热力学第二定律从不同角度揭示了与热现象有关的物理过程所遵循的规律,二者相互独立,又相互补充,都是热力学的理论基础。

值得一提的是,违反热力学第二定律的过程,可以遵守热力学第一定律。如热力学第二定律的开尔文表述为“不可能从单一热库吸收热量,使之完全变成功,而不产生其他影响”,即不可能在不产生其他任何影响的情况下,使热百分之百地变为功。这样“高效率”的热机是不违背热力学第一定律的。

(4) 参考例题

例1 根据热力学第二定律,下列说法中正确的是()

- A. 热量能够从高温物体传到低温物体,但不能从低温物体传到高温物体
- B. 热量能够从高温物体传到低温物体,也可能从低温物体传到高温物体
- C. 机械能可以全部转化为内能,但内能不可能全部转化为机械能
- D. 机械能可以全部转化为内能,内能也可能全部转化为机械能

解析:根据热传递的规律可知热量能够从高温物体传到低温物体;当外界对系统做功时,可以使系统从低温物体吸取热量传到高温物体上去,制冷机(如冰箱和空调)就是这样的装置。但是热量不能自发地从低温物体传到高温物体。选项A错误,B正确。

一个运动的物体,克服摩擦阻力做功,最终停止,在这个过程中机械能全部转化为内能。外界条件发生变化时,内能也可以全部转化为机械能,如在等温膨胀过程中,系统吸收的热量全部转化为对外界做的功,选项C错误,D正确。

答案: BD。

例2 关于第二类永动机, 下列说法正确的是 ()

- A. 没有冷凝器, 只有单一的热源, 能将从单一热源吸收的热量全部用来做功, 而不引起其他变化的热机叫做第二类永动机
- B. 第二类永动机违反了能量守恒定律, 所以不可能制成
- C. 第二类永动机不可能制成, 说明机械能可以全部转化为内能, 内能却不可能全部转化为机械能
- D. 第二类永动机不可能制成, 说明机械能可以全部转化为内能, 内能却不可能全部转化为机械能, 同时不引起其他变化

解析: 根据第二类永动机的定义可知 A 选项正确, 第二类永动机不违反能量守恒定律, 而是违反第二定律, 所以 B 选项错误。机械能可以全部转化为内能, 内能在引起其他变化时可能全部转化为机械能, C 选项错误, D 选项正确。

答案: AD。

3. 问题与练习

1. 内容分析

其他形式的能向内能转化的过程中, 必定伴随着做功的过程。所以, 我们必须找出伴随着的几种形式的功。

解答与说明

汽油燃烧时释放的化学能推动活塞做功的过程中, 主要通过三个途径将化学能转化为内能: 一是活塞与缸体间有摩擦, 克服摩擦力做功, 产生热量, 缸体温度升高, 内能增加, 向周围空间散热。二是活塞压缩缸内气体做功, 缸内气体温度升高, 带动缸体温度升高, 由于与周围环境的热交换转化为环境的内能。三是排气冲程中喷出的热气, 会带走一部分热量。

2. 内容分析

运用热力学第二定律对物理过程进行分析, 可以更好地领会定律的内涵。

解答与说明

A. 不可能。因为是“自动”过程, 所以茶变热时的内能增量只能来源于周围环境, 即周围环境中的热量会自动地收集到茶中。所以, 这是不可能发生的现象。

B. 不可能。蒸汽的内能转化为机械能必定需要做功, 即热蒸汽推动活塞做功。这一过程中, 一方面由于活塞摩擦汽缸而产生热能, 另一方面热蒸汽与周围环境的温度差, 蒸汽机会向周围环境散热。所以, 蒸汽机把蒸汽的内能全部转化为机械能是不可能的。

C. 可能。浑水变清, 泥沙下沉, 重心下降, 总的重力势能减少, 最终转化为内能。而机械能百分百转化成内能是可能的。

D. 可能。冰箱通电后, 消耗电能, 将箱内低温物体的热量传到箱外。

3. 解答与说明

$\eta = \frac{Q_{\text{水}}}{Q_{\text{煤气}}} = \frac{c_{\text{水}} m_{\text{水}} \Delta t}{q m_{\text{煤气}}}$, 其中 q 是煤气的热值。煤气表示数显示的是燃烧气体的体积, 因此有: $m_{\text{煤气}} = \rho_{\text{煤气}} V$ 。因此他还需知道: 煤气的热值 $q(\text{J/kg})$ 、煤气的密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$ 、水的质量热容 $c(\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 表达式为

$$\eta = \frac{c_{\text{水}} \times 2.5 \times (100 - 15)}{q \times \rho_{\text{煤气}} \times (69.44 - 69.33)}$$

第5节 热力学第二定律的微观解释

1. 教学目标

- (1) 了解有序和无序是相对的。
- (2) 知道宏观态与微观态，知道宏观态对应的微观态的数目与无序程度的对应关系。
- (3) 知道熵的概念，初步了解熵是描述系统无序程度的物理量。了解熵增加原理，知道它是热力学第二定律的另一种表述。
- (4) 能用熵增加原理解释生活中的一些现象。

2. 教材分析与教学建议

热力学第二定律以宏观事实为基础，告诉我们热学现象和热学过程应该遵循的规律，本节要从微观的角度说明，为什么涉及热运动的宏观过程会有这样的方向性。

对于每一个具体的不可逆过程，人们往往在经验上寻找出一个特定的参量来判断自发过程进行的方向和限度。例如，对于热传导过程，可以以温度作为判断标准，热量总是从高温处自发地向低温处传递，直到温度相等为止；对气体的扩散过程，可以用密度作为判断标准，气体总是从密度较大的地方向密度较小的地方扩散，直到密度相等为止，等等。人们自然会提出这样一个问题：既然各种不可逆过程是相互关联、彼此一致的，那么能不能找出一个普适物理量作为共同的标准，来判断任何不可逆过程的方向和限度呢？而宏观表现总是源于微观统计规律，所以从微观上分析各种具体过程的特点，找出它们的共性是本节的目的所在。

本节内容首先从生活中熟悉的概念——“序”入手，引入有序和无序的概念。而为了说明有序和无序的程度，引入“宏观态”与“微观态”的概念。通过4个气体分子向真空的扩散所对应的可能微观态分析，得出结论：一切自发过程总是沿着分子热运动的无序性增大的方向进行。最后认识与微观态数目对应的物理量——熵。

(1) 有序、无序、宏观态和微观态

这些概念是建立“熵”的基础，所以教学中应注重这几个概念的讲解。讲解可以从几个层面上展开：

①什么是“有序”和“无序”？“无序”意味着各处都一样、平均、没有差别，而有序则正相反。教科书中列举了“学生排队”和“扑克牌排列”的例子，教师也可以自己补充例子说明。军训时学员休息时杂乱无章，集合哨一响，队员迅速归队，队伍立刻整齐划一。再如儿童玩具中的拼图积木，刚买回来时呈现出一幅完整的图画，每个积木块都有自己的固定位置，我们说积木块处于有序状态。当你把积木块倒出弄乱后，我们说这些积木块处于无序状态。

②我们说的“有序”和“无序”是相对而言的，是从有序程度上来讲的。

③深入了解“有序”和“无序”需要借助于统计物理学，为此还需引入“宏观态”和“微观态”的概念。通过实例说明什么是“宏观态”和“微观态”。

④“有序”表明对于一个确定的宏观态对应于较少的“微观态”，而“无序”表明对于一个确定的宏观态对应于较多的“微观态”。

举例：某个容器中装有两个红球和两个绿球。我们从容器中摸出两个小球，那么这两个小球的颜色可能全是红色的，可能全是绿色的，也可能是一红一绿。假如规定摸出两个小球的颜色为红色小球，这在统计物理学角度就是规定了一个确定的“宏观态”，与之对应的“微观态”



只有一种情况。如果规定一红一绿色球组成的系统为一个“宏观态”，那么能与之对应的“微观态”将会出现四种情况。从统计物理学角度看，一个确定的“宏观态”所对应的“微观态”越多，我们就说“宏观态”越无序。

(2) 热力学第二定律的微观意义

教科书以“气体向真空的扩散”为例，说明宏观自发过程的方向性，涉及数学中的排列组合知识。教师可以先提出问题，让学生运用已有知识对此进行分析讨论。在实例讨论中，学生要能明确教科书提供的图 10.5-1 中“宏观态”和“微观态”，以及与“宏观态”相对应的“微观态”个数。经过研究后发现，系统终态“左 2 右 2”的概率最大。此时各处平均，没有差别，是系统处于一种最为无序的状态。通过具体的实例分析，帮助学生认识某一具体事件发生的概率，同时注意到小概率事件的存在。从而得出结论：自发过程中事物的发展总是倾向于出现概率较大的宏观态。从而从微观角度解释了热力学第二定律。

关于“思考与讨论”：高温物体和低温物体中的分子都在做无规则的热运动，但是高温物体中分子热运动的平均速率要大于低温物体。所以在高温物体分子与低温物体分子的碰撞过程中，低温物体分子运动的剧烈程度会逐渐加剧，即低温物体的温度升高了。而高温物体分子运动的剧烈程度会减缓，即高温物体的温度降低了。所以从宏观热现象角度来看，传热具有方向性，总是从高温物体传给低温物体。换一种角度看，开始我们根据温度的高低来区分两个物体，而终了状态是两个物体上的温度处处相同，无法区别，我们就说系统的无序程度增加了。因此从微观上看，在热传导过程中，自发过程总是沿着使大量分子的运动向着更加无序的方向进行。

从实例分析中我们也会发现，热力学第二定律没有否认小概率事件的存在。而且在实际生活中，小概率事件也会偶有发生，如购买彩票中大奖等。

(3) 关于“熵”

熵是宏观态无序程度的量度。熵越高，意味着宏观态所对应的微观态数目越多，即越无序。熵越低，意味着宏观态所对应的微观态数目越少，即越有序。

对于自然界中的不可逆过程遵守熵增加原理，可举一些实例加以说明。例如：将一个玻璃杯摔碎了，玻璃碴散落一地，无序性增加，我们就说熵增加；将一滴红墨水滴到一杯清水中，红墨水分子迅速在清水中扩散，直至处处均匀、平均，无序性增加了，我们就说熵增加；等等。

至于书中的公式 $S = k \ln \Omega$ ，只是用来表达宏观态对应的微观态越多，它的熵越大，无需使用此公式进行数值计算。

3. 问题与练习

1. 内容分析

本题从宏观态及其对应微观态数目的分析计算，认识熵与微观态数目之间的关系。

解答与说明

(1) 每一个容器内的字能组成词的的概率为 $1/2$ 。所以三个容器中同时组成词的的概率为 $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$ 。

(2) 独立容器内的字能组成词的的概率仍旧为 $1/2$ 。抽去隔板的大容器内的四个字，同时成词只有两次机会，所以概率为 $\frac{2}{A_4^4} = \frac{2}{24} = \frac{1}{12}$ 。三个容器中同时组成词的的概率为 $\frac{1}{2} \times \frac{1}{12} = \frac{1}{24}$ 。

(3) 抽去隔板的大容器中六个字出现不同排列的机会为 A_6^6 。因为是两个字并在一起，六

个字能同时成词出现的机会为 A_3^3 ，所以六个字能同时成词出现的概率为 $\frac{A_3^3}{A_6^6} = \frac{1}{120}$ 。

(4) 以封闭系统为一个确定的宏观态，则隔板抽去后对应的微观态明显增多，即无序性增大了。

2. 内容分析

本题旨在通过一个确定宏观态对应微观态数目的变化，体会熵增加原理。

解答与说明

“覆水难收”是中国古代的一句成语，字面意思是泼出去的水无法收回，表示事已定局，不可挽回。盛在盆中的水，水分子分布情况受盆的容积、形状的限制，对应的微观态较少；而泼出去的水，水分子的分布受制约较少，对应的微观态较多。根据熵增加原理，自发过程进行的方向总是朝着熵增加，即无序性增大的方向进行，因此泼出去的水（无序性大）不可能自发地回到盆中（无序性小）。

第6节 能源和可持续发展

1. 教学目标

- (1) 能利用熵增加原理认识自然界中能量转化的方向性。
- (2) 能从熵增加的角度认识当前环境问题，增强环保意识和可持续发展意识。

2. 教材分析与教学建议

能源与环境是社会关注的两个问题。通过本节的学习，应使学生理解这两个社会问题产生的原因，深入理解热力学第一定律和热力学第二定律。使学生理解开发利用清洁能源的价值，让学生提高科学观念，提高社会责任感。

教学时，在课前布置学生预习和自学，分几个专题以学习小组为单位布置学生查找资料，在课堂上让学习小组的代表汇报自学情况以及查找资料的成果。结合学生交流所得的情况，引导学生思考：人类现在可用的清洁能源有哪些？21世纪人类利用能源的趋势是什么？在课后布置学生就清洁能源的利用和我们的未来生活写一篇小论文。

能源问题是当今世界的热点问题。本节教学应充分联系生产和生活实际，开展丰富多彩的社会活动，引导学生关注社会、关注人类的未来，并充分体现从生活走向物理、从物理走向社会的教学思想和教学理念。

(1) 热力学第一定律与热力学第二定律

热力学第一定律是能量守恒定律在热力学过程中的反映，而热力学第二定律则是从自然界中宏观过程的方向性说明了能量在转化过程中品质在降低，所以在生活中我们无法完全实现能量的循环利用。

(2) 熵与能量退降

“熵”与“能量”是具有同等重要地位的物理量。能量代表着能的“量”，而“熵”则代表着能的“质”。在人类利用能源的过程中，虽然能量总量不会减少，但是随着熵的增加，能量的品质在降低，做功的本领也在减小，我们称之为能量退降。能量退降从能量转化的角度反映出自然界中宏观过程的方向性。



(3) 清洁能源

目前,人类可开发利用的清洁能源主要有:太阳能、风能、水能、核能等。

3. 问题与练习

1. 内容分析

本题旨在关注一个热点问题——全球变暖。人们对“温室效应”加剧的原因已经比较清楚了,所以就可以采取一些针对性的措施逐步解决此问题。

解答与说明

A D 正确。

2. 内容分析

风能是新型的清洁能源。但是,真实问题如何提炼、简化,建立适用模型,需要理论联系实际的能力。

解答与说明

发电功率为

$$\begin{aligned} P &= \frac{W_{\text{电}}}{t} = \frac{20\% \times W_{\text{风}}}{t} = \frac{20\% \times \left(\frac{1}{2} \rho S v t \cdot v^2 \right)}{t} \\ &= 0.2 \times \frac{1}{2} \rho S v^3 = 0.1 \times 1.3 \times 400 \times 14^3 \text{ W} \\ &= 1.43 \times 10^5 \text{ W} \end{aligned}$$

3. 内容分析

太阳能是清洁能源,也是贴近学生生活的新能源。计算太阳能的使用效率有助于感受太阳能的价值。

解答与说明

每天太阳能转化为水的内能为: $E_0 S t \times 20\%$, 这部分能量全部用于使水的温度升高,则水温升高最多。此时有 $E_0 S t \times 20\% = c m \Delta t$, 所以

$$\Delta t = \frac{0.2 E_0 S t}{c m} = \frac{0.2 \times 7 \times 10^3 \times 2 \times 4 \times 3600}{4.2 \times 10^3 \times 500} \text{ } ^\circ\text{C} = 19.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

三、教学设计案例

热力学第二定律的微观解释

1. 教材内容和地位分析

热力学第二定律以宏观事实为基础告诉我们热学现象和热学过程应该遵循的规律,本节要从微观的角度说明为什么涉及热运动的宏观过程会有这样的方向性。

对于每一个具体的不可逆过程,人们往往在经验上寻找出一个特定的参量来判断自发过程进行的方向和限度。例如,对于热传导过程,可以以温度作为判断标准,热量总是从高温处自



发地向低温处传递，直到温度相等为止；对气体的扩散过程，可以用密度作为判断标准，气体总是从密度较大的地方向密度较小的地方扩散，直到密度相等为止，等等。人们自然会提出这样一个问题：既然各种不可逆过程是相互关联、彼此一致的，那么能不能找出一个普遍的物理量作为共同的标准，来判断任何不可逆过程的方向和限度呢？而宏观表现总是源于微观统计规律，所以从微观上分析各种具体过程的特点，找出它们的共性是本节的目的所在。

本节内容首先从生活中熟悉的概念——“序”入手，引入有序和无序的概念。而为了说明有序和无序的程度，引入“宏观态”与“微观态”的概念。通过4个气体分子向真空的扩散所对应的可能微观态分析，得出结论：自发过程总是沿着分子热运动无序性增大的方向进行。最后认识与微观态数目对应的物理量——熵。

2. 教学目标

- (1) 了解序的概念，区分有序和无序。
- (2) 知道宏观态与微观态，知道微观态的数目与无序程度的对应关系。
- (3) 知道熵的概念，初步了解熵是描述系统无序程度的物理量。了解熵增加原理，知道它是热力学第二定律的另一种表述。
- (4) 体会现实生活中的熵增加原理。

3. 教学重点和难点

熵的概念的建立、热力学第二定律的微观意义。

4. 教学方法

小组讨论，理论联系实际，演绎和归纳。

5. 教学过程

教学内容	教师活动	学生活动	预期目标
	(复习引入) 前面我们学习了热力学第二定律，知道了任何宏观自发过程的进行都具有方向性。那么，为什么涉及热运动的宏观过程会有这样的方向性呢？这是本节课研究的课题。	回忆、思考。	提出问题，引发思考。
1. 序	(问) 生活中我们常说到有序和无序这两个词，那么究竟什么叫序？举例说明有序和无序。	思考、作答。 (生1) 序就是次序，就是从事物的关联中找出的内在规律。 (生2) 玩扑克牌。 (生3) 排队。	建立概念。 将认识从抽象到具体。

续表

教学内容	教师活动	学生活动	预期目标
2. 宏观态和微观态	(讲) 如果规定一副扑克牌的花色顺序与号码顺序, 借用统计物理学的术语来说, 我们就是规定了一个“宏观态”。每张扑克牌的排列位置只有一种, 我们就说此时的微观态唯一。 如果我们规定花色的先后顺序, 而号码顺序任意, 我们就是规定了另一个“宏观态”。此时每张扑克牌的排列位置就会有多种, 我们就说此时“微观态”的数目比较多。 如果拿到一副扑克牌, 我们对花色顺序以及号码顺序不做任何规定, 那么与这个“宏观态”相对应, 每张扑克牌的排列位置就更多了, 我们就说此时“微观态”的数目更多。 (举例) 教科书中“气体向真空的扩散”。 (分析“宏观态”对应的“微观态”数目, 认识不同“微观态”的特征)	思考、建立概念。 在实例中消化概念、完善认识。	将认识从具体上升到理论。 将理论知识具体化。
	(提问) 请你列举别的事例说明“宏观态”和与之对应的“微观态”。	演绎、应用。 (生4) 容器中装有四个标记小球, 色彩为两红两绿。从容器中随机摸出两个小球, 两个小球的颜色可能全红, 可能全绿, 也可能是一红一绿。假如规定摸出两球颜色为红色, 即规定了一个确定的“宏观态”, 与之相对应的“微观态”只有一种情况。但是, 如果规定一红一绿色球组成的系统为确定的“宏观态”, 那么能与之对应的“微观态”有四种。	巩固运用。
3. 序与微观态	(提问) 从刚才的分析讨论中你能不能建立序和微观态之间的关系? (总结) “有序”和“无序”是相对的, 是从序的程度上来说的。自发的过程总是从有序向着无序发展的。一切自发过程总是沿着分子热运动的无序性增大的方向进行。这就是热力学第二定律的微观意义。	推理、分析、作答。 (生5) “有序”表明对于一个确定的宏观态对应于较少的“微观态”。而“无序”表明对于一个确定的宏观态对应于较多的“微观态”。 (生6) “序”与“微观态”数目相对应。微观态数目越多, 说明事物越无序。	建立概念间的联系, 提升认识。



续表

教学内容	教师活动	学生活动	预期目标
4. 熵	(讲述) 为了描述分子热运动的无序程度, 物理学中引入物理量“熵”, 用字母 S 表示。那么, “熵”就表示了宏观状态所对应的微观状态数目的多少, 标志着这个宏观态的无序程度。“熵”越高, 就意味着系统越无序; “熵”越低, 就意味着系统越有序。	分析、归纳、总结。	建立概念。
5. 熵增加原理	(讲述) 在“气体向真空的扩散”中, 微观态数目增多了, 即系统“熵”增加了。而且, 一切不可逆过程必然朝着熵不断增加的方向进行, 这就是熵增加原理。	分析、归纳、总结。	经过再次提炼, 得出新的理论知识。
	(设疑) 植物生长是通过光合作用将二氧化碳和水转化为葡萄糖, 显然是更为有序了, 即熵减少了。这与熵增加原理矛盾吗?	小组讨论、作答。 (生 7) 这个过程对于植物来说的确是熵减少。但是, 从太阳辐射出来的能量只有少部分转化为植物的化学能, 大部分辐射到周围环境中, 所增加的熵值要远大于减少的熵值。总体来看, 该过程中的熵还是增加了。	
6. 你我身边的熵增加现象	(提问) 结合生活中的事例, 说明自然界中的熵增加。	(生 8) 一个玻璃杯摔碎后, 玻璃碴散落一地, 无序性增加, 我们就说熵增加。 (生 9) 将一滴红墨水滴到一杯清水中, 红墨水分子迅速扩散, 直至均匀, 无序性增加了, 我们就说熵增加。	学以致用。
教学总结	本节课从认识“序”出发, 区别有序和无序, 引入描述系统无序程度的物理量——熵, 认识熵增加原理, 知道它是热力学第二定律的另一种表述, 体会了现实生活中的熵增加。现代生活与科学真是密不可分啊!	释疑、收获, 享受学习的快乐。	提高学生的科学素养。

四、教学资源库

(一) 概念、规律和背景资料

1. 克劳修斯 (Rudolph Clausius, 1822—1888)

德国物理学家，气体动理论和热力学的主要奠基人之一。1822年1月2日生于普鲁士的克斯林（今波兰科沙林）的一个知识分子家庭，曾就学于柏林大学，1847年在哈雷大学获得主修数学和物理学的哲学博士学位。从1850年起，曾先后任柏林炮兵工程学院、苏黎世工业大学、维尔茨堡大学、波恩大学物理学教授。他曾被法国科学院、英国皇家学会和彼得堡科学院选为院士或会员。

克劳修斯主要从事分子物理、热力学、蒸汽机理论、理论力学、数学等方面的研究，特别是在热力学理论、气体动理论方面建树卓著。他是历史上第一个精确表示热力学定律的科学家。1850年与兰金 (William John Macquorn Rankine, 1820—1872) 各自独立地表述了热与机械功的普遍关系——热力学第一定律，并且提出蒸汽机的理想的热力学循环（兰金-克劳修斯循环）。1850年克劳修斯发表《论热的动力以及由此推出的关于热学本身的诸定律》的论文，他从热是运动的观点对热机的工作过程进行了新的研究。论文首先从焦耳确立的热功当量出发，将热力学过程遵守的能量守恒定律归结为热力学第一定律，指出在热机做功的过程中一部分热量被消耗了，另一部分热量从热物体传到了冷物体。这两部分热量和所产生的功之间存在关系： $dQ = dU + dW$ 。式中 dQ 是传递给物体的热量， dW 表示所做的功， U 是克劳修斯第一次引入热力学的一个新函数，是体积和温度的函数。后来开尔文把 U 称为物体的能量，即热力学系统的内能。论文的第二部分，在卡诺定理的基础上研究了能量的转换和传递方向问题，提出了热力学第二定律的最著名的表述形式（克劳修斯表述）：热不能自发地从较冷的物体传到较热的物体。因此克劳修斯是热力学第二定律的两个主要奠基人之一（另一个是开尔文）。

在发现热力学第二定律的基础上，人们期望找到一个物理量，以建立一个普适的判据来判断自发过程的进行方向。克劳修斯首先找到了这样的物理量。1854年他发表《力学的热理论的第二定律的另一种形式》的论文，给出了可逆循环过程中热力学第二定律的数学表示形式： $\oint \frac{dQ}{T} = 0$ ，从而引入了一个新的后来定名为熵的状态参量。1865年他发表《力学的热理论的主要方程之便于应用的形式》的论文，把这一新的状态参量正式定名为熵，并将上述积分推广到更一般的循环过程，得出热力学第二定律的数学表示形式： $\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$ 。等号对应于可逆过程，不等号对应于不可逆过程。这就是著名的克劳修斯不等式。利用熵这个新函数，克劳修斯证明了，任何孤立系统中，系统的熵的总和永远不会减少，或者说自然界的自发过程是朝着熵增加的方向进行的。这就是“熵增加原理”，它是利用熵的概念表述的热力学第二定律。后来克劳修斯不恰当地把热力学第二定律推广到整个宇宙，提出所谓“热寂说”。



在气体动理论方面,克劳修斯作出了突出的贡献。克劳修斯、麦克斯韦、玻耳兹曼被称为气体动理论的三个主要奠基人。由于他们的一系列工作使气体动理论最终成为定量的系统理论。1857年克劳修斯发表《论热运动形式》的论文,以十分明晰的方式发展了气体动理论的基本思想。他假定气体中分子以同样大小的速度向各个方向随机地运动,气体分子同器壁的碰撞产生了气体的压强,第一次推导出著名的理想气体压强公式,并由此推证了玻意耳-马略特定律和盖-吕萨克定律,初步显示了气体动理论的成就。而且第一次明确提出了物理学中的统计概念,这个新概念对统计力学的发展起了开拓性的作用。1858年发表《关于气体分子的平均自由程》论文,从分析气体分子间的相互碰撞入手,引入单位时间内所发生的碰撞次数和气体分子的平均自由程的重要概念,解决了根据理论计算气体分子运动速度很大而气体扩散的传播速度很慢的矛盾,开辟了研究气体的输运过程的道路。

克劳修斯在其他方面贡献也很多。他从理论上论证了焦耳-楞次定律。1851年从热力学理论论证了克拉珀龙方程,故这个方程又称克拉珀龙-克劳修斯方程。1853年他发展了温差电现象的热力学理论。1857年他提出电解理论。1870年他创立了统计物理中的重要定理之一——位力定理。1879年他提出了电介质极化的理论,由此与莫索提各自独立地导出电介质的介电常数与其极化率之间的关系——克劳修斯-莫索提公式。主要著作有《力学的热理论》、《势函数与势》、《热理论的第二提议》等。

1888年8月24日克劳修斯在波恩逝世。

2. 开尔文 (Lord Kelvin, 1824—1907)

英国著名物理学家、发明家,原名 W. 汤姆孙 (William Thomson)。1824年6月26日出生于爱尔兰的贝尔法斯特。他从小聪慧好学,10岁时就进格拉斯哥大学预科学习。17岁时,曾赋诗言志:“科学领路到哪里,就在哪里攀登不息”。1845年毕业于剑桥大学,在大学学习期间曾获兰格勒奖金第二名,史密斯奖金第一名。毕业后他赴巴黎跟随物理学家和化学家 V. 勒尼奥从事实验工作一年,1846年受聘为格拉斯哥大学自然哲学(物理学当时的别名)教授,任职达53年之久。由于装设第一条大西洋海底电缆有功,英政府于1866年封他为爵士,并于1892年晋升为开尔文勋爵,开尔文这个名字就是从此开始的。1851年被选为伦敦皇家学会会员,1890~1895年任该会会长。1877年被选为法国科学院院士。1904年任格拉斯哥大学校长,直到1907年12月17日在苏格兰的内瑟霍尔逝世为止。

开尔文研究范围广泛,在热学、电磁学、流体力学、光学、地球物理、数学、工程应用等方面都作出了贡献。他一生发表论文多达600余篇,取得70种发明专利。他在当时科学界享有极高的名望,受到英国本国和欧美各国科学家、科学团体的推崇。他在热学、电磁学及它们的工程应用方面的研究最为出色。

开尔文是热力学的主要奠基人之一,在热力学的发展中作出了一系列的重大贡献。他根据盖-吕萨克、卡诺和克拉珀龙的理论于1848年创立了热力学温标。他指出:“这个温标的特点是它完全不依赖于任何特殊物质的物理性质。”这是现代科学上的标准温标。他是热力学第二定律的两个主要奠基人之一(另一个是克劳修斯),1851年他提出热力学第二定律:“不可能从单一热源吸热使之完全变为有用功而不产生其他影响。”这是公认的热力学第二定律的标准说法。并且指出,如果此定律不成立,就必须承认可以有一种永动机,它借助于使海水或土壤冷却而无限地得到机械功,即所谓的第二种永动机。他从热力学第二定律断言,能量耗散是普遍的趋势。1852年他与焦耳合作进一步研究气体的内能,对焦耳气体自由膨胀实验作了改进,进行气体膨胀的多孔塞实验,发现了焦耳-汤姆孙效应,即气体经多孔塞绝热膨胀后所引

起的温度的变化现象。这一发现成为获得低温的主要方法之一，广泛地应用到低温技术中。1856年他从理论研究上预言了一种新的温差电效应，即当电流在温度不均匀的导体中流过时，导体除产生不可逆的焦耳热之外，还要吸收或放出一定的热量（称为汤姆孙热）。这一现象后来叫做汤姆孙效应。

开尔文在电磁学理论和工程应用上研究成果卓著。1848年他发明了电像法，这是计算一定形状导体电荷分布所产生的静电场问题的有效方法。他深入研究了莱顿瓶的放电振荡特性，于1853年发表了《莱顿瓶的振荡放电》的论文，推算了振荡的频率，为电磁振荡理论研究作出了开拓性的贡献。他曾用数学方法对电磁场的性质作了有益的探讨，试图用数学公式把电力和磁力统一起来。1846年他成功地完成了电力、磁力和电流的“力的活动影像法”，这已经是电磁场理论的雏形了（如果再前进一步，就会深入到电磁波问题）。他曾在日记中写道：“假使我能把物体对于电磁和电流有关的状态重新作一番更特殊的考察，我肯定会超出我现在所知道的范围，不过那当然是以后的事了。”他的伟大之处，在于能把自己的全部研究成果，毫无保留地介绍给了麦克斯韦，并鼓励麦克斯韦建立电磁现象的统一理论，为麦克斯韦最后完成电磁场理论奠定了基础。

他十分重视理论联系实际，1875年预言了城市将采用电力照明，1879年又提出了远距离输电的可能性。他的这些设想以后都得以实现。1881年他对电动机进行了改造，大大提高了电动机的实用价值。在电工仪器方面，他的主要贡献是建立电磁量的精确单位标准和设计各种精密的测量仪器。他发明了镜式电流计（大大提高了测量灵敏度）、双臂电桥、虹吸记录器（可自动记录电报信号），等等，大大促进了电测量仪器的发展。根据他的建议，1861年英国科学协会设立了一个电学标准委员会，为近代电学量的单位标准奠定了基础。在工程技术中，1855年他研究了电缆中信号传播情况，解决了长距离海底电缆通信的一系列理论和技术问题，经过三次失败，历经两年的多方研究与试验，终于在1858年协助装设了第一条大西洋海底电缆，这是开尔文相当出名的一项工作。他善于把教学、科研、工业应用结合在一起，在教学上注意培养学生的实际工作能力。在格拉斯哥大学他组建了英国第一个为学生用的课外实验室。

开尔文一生谦虚勤奋，意志坚强，不怕失败，百折不挠。在对待困难问题上他讲：“我们都感到，对困难必须正视，不能回避；应当把它放在心里，希望能够解决它。无论如何，每个困难一定有解决的办法，虽然我们可能一生没有找到。”他这种终生不懈地为科学事业奋斗的精神，永远为后人敬仰。1896年在格拉斯哥大学庆祝他50周年教授生涯大会上，他说：“有两个字最能代表我50年内在科学研究上的奋斗，就是‘失败’两字。”这足以说明他的谦虚品德。为了纪念他在科学上的功绩，国际计量大会把热力学温标（即绝对温标）称为开尔文（开氏）温标，热力学温度以开尔文为单位，是现在国际单位制中七个基本单位之一。

3. 玻耳兹曼（Ludwig Boltzmann, 1844—1906）

奥地利物理学家。1844年2月20日出生于维也纳，从小受到很好的家庭教育，勤奋好学，读小学、中学时一直是班上的优等生。1863年以优异成绩考入著名的维也纳大学，受到J. 斯特藩、J. 洛喜密脱等著名学者的赞赏和栽培。1866年获博士学位后，在维也纳的物理学研究所任助理教授。此后他历任拉茨大学（1869~1873，1876~1889）、维也纳大学（1873~1876，1894~1900，1902~1906）、慕尼黑大学（1880~1894）和莱比锡大学（1900~1902）的教授。1899年被选为英国皇家学会会员。他还是维也纳、柏林、斯德哥尔摩、罗马、伦敦、巴黎、彼得堡等科学院院士。

玻耳兹曼主要从事气体动理论、热力学、统计物理学、电磁理论的研究。在这些方面他都



作出了重大的贡献。他是气体动理论三个主要奠基人之一（还有克劳修斯和麦克斯韦），由于他们三人的工作使气体动理论最终成为定量的系统理论。1868至1871年间，玻耳兹曼把麦克斯韦的气体速率分布律推广到有势力场作用的情况，得出了有势力场中处于热平衡态的分子按能量大小分布的规律。在推导过程中，他提出的假说后被称为“各态历经假说”，这样他就得到了经典统计的分布规律——玻耳兹曼分布律，又称麦克斯韦-玻耳兹曼分布律。并进而得出气体分子在重力场中按高度分布的规律，有效地说明了大气的密度和压强随高度的变化情况。

玻耳兹曼分布律只反映气体平衡态的情况，他并不满足，进一步研究气体从非平衡态过渡到平衡态的过程，于1872年建立了著名的玻耳兹曼微分积分方程。他引进了由分子分布函数定义的一个函数 H ，进一步证明得出分子相互碰撞下 H 随时间单调地减小——这就是著名的 H 定理，从而把 H 函数和熵函数紧密联系起来。 H 定理与熵增加原理相当，都表征着热力学过程由非平衡态向平衡态转化的不可逆性。 H 定理从微观粒子的运动上表征了自然过程的不可逆性，难于为当时科学家们所接受。1874年开尔文首先提出所谓“可逆性佯谬”：系统中单个微观粒子运动的可逆性与由大量微观粒子在相互作用中所表现出来的宏观热力学过程的不可逆性这两者是矛盾的，由单个粒子运动的可逆性如何会得出宏观过程的不可逆性这样的结论？玻耳兹曼继续潜心研究，1877年圆满地解决了这一佯谬，从而使自己的研究工作推向了一个新的高峰。他建立了熵 S 和系统宏观态所对应的可能的微观态数目 Ω （即热力学几率）的联系： $S \propto \ln \Omega$ 。1900年普朗克引进了比例系数 k ——称为玻耳兹曼常量，写出了玻耳兹曼-普朗克公式： $S = k \ln \Omega$ 。这样玻耳兹曼表明了函数 H 和 S 都是同热力学几率 Ω 相联系的，揭示了宏观态与微观态之间的联系，指出了热力学第二定律的统计本质： H 定理或熵增加原理所表示的孤立系统中热力学过程的方向性，正相应于系统从热力学几率小的状态向热力学几率大的状态过渡，平衡态热力学几率最大，对应于 S 取极大值或 H 取极小值的状态；熵自发地减小或 H 函数自发增加的过程不是绝对不可能的，不过几率非常小而已。

玻耳兹曼的工作是标志着气体动理论成熟和完善的里程碑，同时也为统计力学的建立奠定了坚实的基础，从而导致了热现象理论的长足进展。美国著名理论物理学家吉布斯（Josiah Willard Gibbs, 1839—1903）正是在玻耳兹曼和麦克斯韦工作的基础上建立起统计力学大厦。玻耳兹曼开创了非平衡态统计理论的研究，玻耳兹曼积分-微分方程对非平衡态统计物理起着奠基性的作用，无论从基础理论或实际应用上，它都显示出相当重要的作用。因此人们将公式 $S = k \ln \Omega$ 铭刻在他的墓碑上，以纪念他在科学上的不朽功绩。

玻耳兹曼把热力学理论和麦克斯韦电磁场理论相结合，运用于黑体辐射研究。1870年斯忒藩在总结实验观测的基础上提出热物体发射的总能量同物体绝对温度 T 的4次方成正比。1884年玻耳兹曼从理论上严格证明了空腔辐射的辐射密度 u 和绝对温度 T 的关系： $u = \sigma T^4$ ，式中 σ 是个普适常量，后来称为斯忒藩-玻耳兹曼常量，这个关系被称为斯忒藩-玻耳兹曼定律。它对后来普朗克的黑体辐射理论有很大的启示。在当时，科学家对麦克斯韦电磁场理论大多持不同看法，而玻耳兹曼最早认识到麦克斯韦电磁场理论的重要性。他通过实验研究，测定了许多物质的折射率，用实验证实了麦克斯韦的预言：媒质的光折射率等于其相对介电常数和磁导率乘积的算术平方根，并从实验证明在各向异性媒质中不同方向的光速是不同的。他用《浮士德》中的一句话“写出这些符号的是一个神吗？”来赞美麦克斯韦方程组。这些无疑是对麦克斯韦电磁理论的大力支持。

玻耳兹曼是位很好的老师，经常被邀请到国外去讲学。他学识渊博，对学生要求严格而从

不以权威自居。他讲课深入浅出、旁征博引、生动有趣，深受学生欢迎。他常常主持以科学最新成就为题的讨论班，带动学生进行研究。他对青年严格要求、热情帮助，培养了一大批物理学者。

玻耳兹曼是个唯物论者，是维护原子论的积极斗士。他一生同马赫的经验主义和奥斯特瓦尔德为首的唯能论者进行了不懈的斗争。他的统计力学的理论受到唯能论者们的猛烈攻击，长期被误解。这些损害了他的身心健康。可能由于在与马赫等人的论战中一时感到孤立而又疾病缠身，于1906年9月5日不幸自杀身亡。不过分子、原子的存在，分子、原子做热运动的真实性以及玻耳兹曼统计理论的正确性，则由原子物理学的实验观测以及爱因斯坦于1905年、佩兰于1908年对布朗运动的理论和实验研究成果直接证实了。

(1、2、3均选自《物理教师手册》，人民教育出版社物理室编，人民教育出版社1998年9月第1版)

4. 热量可以直接转变为机械功吗？

“功转变为热”及“热转变为功”这是常见的说法，但这种说法却十分不准确。

热量是系统与外界在传热过程中交换能量的量度，功是系统外参量变化的过程中系统与外界交换能量的量度。这是两个不同过程中的过程量。即使系统同时发生这两个过程，“热量”与“功”也仅仅与其中一个过程有关，互不关联。一个过程中的过程量是绝不能直接转变为另一个过程中的过程量的。“热量”绝不可能直接转变为“功”，“功”也绝不可能直接转变为“热量”。

那么，日常生活中经常观察到的“摩擦生热”以及加热膨胀做功又如何理解呢？我们通过一个例子来阐述这个问题。设有一理想气体系统，物质的量为 ν 摩尔，经可逆等温膨胀，系统状态从 (p_1, V_1, T) 变化为 (p_2, V_2, T) 。由计算可得：

$$\text{内能 } \Delta U = 0 \text{ (等温变化)}$$

$$\text{系统吸收热量 } Q = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\text{系统对外做功 } W' = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

似乎 $Q=W'$ ，系统吸收的热量全部变为功了。但不能说系统吸收的热量直接转变为功。从整体上看系统内能没有变化，没有参与等温膨胀过程，但在过程的每一微小的进程中内能始终参与变化，内能不断地改变。事实上系统等温膨胀过程不可能保持恒定温度 T ，系统从热源吸热的必要条件是： $T_{\text{热源}} > T_{\text{系统}}$ 。当热源温度 $T_{\text{热源}}$ 略高于系统温度 $T_{\text{系统}}$ 时，近似地认为是等温过程。这样，实际上等温膨胀过程是：(设热源与系统温度差 ΔT)

$$\begin{aligned} T &\xrightarrow{\text{吸热}} T + \Delta T \xrightarrow{\text{对外做功}} T \xrightarrow{\text{吸热}} T + \Delta T \rightarrow \dots \\ U &\xrightarrow{\text{吸热}} U + \Delta U \xrightarrow{\text{做功}} U \xrightarrow{\text{吸热}} U + \Delta U \rightarrow \dots \end{aligned}$$

由以上分析可知：理想气体等温膨胀过程包含了两个过程：吸收热量增加内能的过程与减少内能对外做功的过程。“热量” $\nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ 与功 $\nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ 是两个过程中能量交换的量度。因此不能说热量直接转变为功。通常所说的“热量转变为功”是一个宏观等效的说法，并不是实际发生的物理过程。“热量”与“功”是依赖于媒体(系统与外界)的变化而出现的物理量；“热量”与“功”之间的转换也一定间接发生于媒体的变化过程中。“热量”转变为“功”必须以媒体的状态变化为代价。即使在理想的热循环中系统经一循环回到原来状态，但媒体中的另一部分(外界)发生了变化。



还应指出的一点：通常所说的“功转变为热”，是指功转变为系统内能，系统变“热”了。这个“热”若理解为系统内能增加了，系统温度升高了，那么说“功转变为热”是与“热量”无关的。“功转变为热”或“热转变为功”讲得准确一些是系统或外界能量由于热传递而转移，再通过做功而转化。

(选自《高中物理专题分析》上册，战永杰、彭家骥 主编，人民教育出版社1993年3月第1版)

5. 关于能量守恒定律建立过程的补充介绍

除了课本详细介绍的几个人以外，在独立发现能量守恒定律的众多科学家中还有英国律师出身的电化学家格罗夫、丹麦工程师格尔丁、法国的工程师赫因以及德国化学家莫尔等。还有一个人值得具体提上两句，这就是法国工程师萨迪·卡诺，他是关于热机循环的卡诺定理的提出人。他早在1830年就已经认识到了“热不是别的什么东西，而是动力，或者说，它是改变了形式的运动”，并由此得到了一个普遍的命题：“自然界中存在的动力，在量上是不变的，准确地说，它既不能产生，也不能消灭。”他还给出了热功当量的数值。由上述内容看，卡诺应是世界上最早发现能量守恒定律的人。遗憾的是，1832年他死于霍乱，没有来得及发表自己的见解。直到1878年，他的一束遗稿被发现，这些见解才得到公开发表，可这时能量守恒定律早已确立多年了。

还有一点要提及的是，这些科学家在自己对定律的表述中，没有一个人用到“能量”这个词，都是用在当时含意比较混乱的“力”来表示能量。至于能量的概念，最早出现于英国物理学家托马斯·杨在1807年出版的《自然哲学讲义》一书中。书中谈到“在应用力学碰到的几乎所有情况中，对于产生运动所必要的功，并不是和力矩成正比，而是与这个功所引起的运动的能量成正比”；“应该用能量一词来表示物体的质量或重量与速度的平方的乘积”。不过，他的独创性见解并没有引起人们的注意，所以直到19世纪30~40年代，人们还是用“力”来表示能量，依然用“力的守恒”“活力守恒”来表示“能量守恒”。1853年，威廉·汤姆逊（即开尔文）重新提出了“能量”概念，并给予它一个精确的定义，“我们把给定状态中物质系统的能量表示为：当它从这个给定状态无论以什么方式过渡到任意一个固定的零态时在系统外所产生的用机械功单位来量度的各种运动的总和”，“能量守恒定律”的称谓才逐渐被普遍接受。

(选自《功、热量和能》，常利 编著，人民教育出版社2001年9月第1版)

6. 热力学第二定律的建立

热力学第二定律是由德国物理学家克劳修斯和英国物理学家开尔文（威廉·汤姆逊）建立的，它和热力学第一定律及热力学第三定律一起，成为研究热的动力理论的基本规律。

(1) 热力学第二定律建立的历史背景

19世纪初，蒸汽机已有很大发展，并广泛应用于工厂、矿山、交通运输，但当时对蒸汽机的理论研究还很缺乏，法国工程师卡诺在这方面做出了突出的贡献。

卡诺在1824年发表了《论火的动力》。他撇开一些次要的因素，由理想循环入手，研究了热机工作中的最基本因素，提出了以卡诺命名的有关热机效率的定理，明确指出：“凡是有温度差的地方，就能够发生动力”“动力不依赖于提供它的工作物质，动力的大小唯一地由热质在其间转移的一些物体的温度决定”。在证明这一定理时，他采用了热质守恒的思想和永动机不可能的原理。其实卡诺定理已内含了热力学第二定律的思想，但终究因为热质说的错误观点，没能作进一步的研究。不过可以说卡诺定理是建立热力学第二定律的先导。

1840~1847年间，热力学第一定律建立起来了。它说明热机提供的动力只依靠热质在冷、

热源之间重新分配的说法是不正确的。因此，非常需要对卡诺的理论作进一步审核，把他的原理建立在新的热学理论的基础上。

1848年，开尔文根据卡诺提出的“一切理想热机在同样的热源与冷源之间工作时，其效率相等，与使用的工作物质无关”的理论，建立了绝对温标的概念。这一温标具有一定的特点，例如，“这一温标系统中的每一度的间隔都有同样的数值”，“它完全不依赖于任何特殊物质的物理性质”，因此被称为绝对温标。这种热力学温标的建立，从理论上解决了各种经验温标不相一致的缺点，并为热力学第二定律的建立准备了条件。

(2) 热力学第二定律建立的过程

在上述历史背景和前提条件下，克劳修斯集中大部分时间，精心研究了热力学问题，从不同角度发表了多篇文章，提出并完善了著名的热力学第二定律的克劳修斯表述。

1850年，克劳修斯发表了《论热的动力以及由此推出的关于热学本身的诸定律》的论文，他从“热并不是一种物质，而是存在于物体的最小粒子的一种运动”的观点出发，重新考察了卡诺所提出的理论后指出：卡诺得出热量由热体向冷体传递时产生当量的功是正确的，而在由热体向冷体传递时没有热量损失是错误的。克劳修斯认为在由热做功的过程中，一部分热做了机械功，另一部分热通过从热体向冷体传递而耗散掉。克劳修斯通过一个假想的实验，得出热力学第二定律的初次表述：“在没有任何力消耗或其他变化的情况下，把任意多的热量从冷体传到热体是和热的惯常行为矛盾的。”在1854年发表的《力学的热理论的第二定律的另一形式》中，他将热力学第二定律的表述改变为：“热不可能由冷体传到热体，如果不因而同时引起其他关系的变化。”

克劳修斯在取得一定成就后，仍继续自己的研究工作，1865年他发表了《力学的热理论的主要方程之便于应用的形式》一文，明确地提出了熵的概念，并进一步提出了热力学第二定律的普遍表示式：

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$$

等号适用于可逆循环，不等号适用于不可逆过程。这个式子说明熵变具有方向性，对于绝热过程，系统的熵不可能减小，这就是所谓的熵增加原理。并规定熵增加的方向为正向，熵减少的方向为负向。

1867年，克劳修斯又发表了《关于热的动力理论的第二定律》一文，总结出一条原理：“负的转变只能在有补偿条件下发生，而正的转变即使没有补偿也能发生，或者简要地说，不需补偿的转变只能是正的转变。”

1875年，克劳修斯在《热的动力理论》一文中，对热力学第二定律提出了更精练的说法：“热不可能自动地从冷体传到热体”或“热从一冷体转向一热体不可能无补偿地发生”。这就是大家所公认的热力学第二定律的克劳修斯表述。

同时，对热力学第二定律作出贡献的还有开尔文，他用焦耳的热功当量实验和雷诺对蒸汽性质的观察，重新审查了卡诺定理，从热是一种粒子的运动而不是物质的观念出发，来认识热与功相互转化的过程。1851年他发表了《论热的动力理论》，提出了两个命题：“Ⅰ. 当不论借助于什么方法，从纯粹的热源得到等量的机械效应，或等量的机械效应变成纯粹的热效应而消失时，则有等量的热因之消耗或由此产生。”“Ⅱ. 如果有这样一部机器，当它反过来运转时，它的每一部分的物理的和力学的动作全部倒过来，那么，它将像具有相同温度的热源和冷凝器的任何热机一样，由一定量的热产生同样多的机械效应。”接着又提出证明第二命题的一个公



理：“借助无生命的物质机构，通过使物质的任何部分冷却到比周围最冷的物体的温度还要低的温度而得到机械效应，是不可能的。”他在对这一公理的注释中指出：如果公理在一切温度下都不成立，就必须承认可以有这样一种永动机存在，它借助于使海水或土壤冷却而无限地得到机械功，即第二类永动机。以上是开尔文对热力学第二定律的原始表述，后来才逐渐演变成现在教科书中出现的、更精练的说法：“不可能从单一热源取热使之完全变为有用的功，而不产生其他影响。”这就是公认的热力学第二定律的开尔文表述。在这一表述中，明确表示热机必须工作在两个热源之间，更指出了第二类永动机不可能实现，所以具有理论意义和实践意义。

克劳修斯和开尔文虽然从不同的角度表述了热力学第二定律，但是二者是等效的。因此，通过他们的工作，反映热力学过程方向性的热力学第二定律建立起来了。

(选自《物理教师手册》，人民教育出版社1998年9月第1版)

7. 热力学第二定律是关于实际不可逆过程进行方向的高度概括

自然界的变化过程都是不可逆的。所谓不可逆，指的是那些自发进行的变化，不可能自发地回到原来的状态，而对外界不发生任何影响。在物理学上对可逆与不可逆过程的定义是：一个系统由某一状态出发，经过某一过程达到另一状态，如果存在另一过程，它能使系统和外界完全复原（系统回到原来状态，同时消除了系统对外界的一切影响），则原来的过程称为可逆过程；反之，如果用任何方法都不可能使系统和外界完全复原，则原来的过程称为不可逆过程。河水能从高处流向低处，这就是不可逆过程，因为水不可能自发地再从低处回到高处。这里“自发地”三个字很重要，因为我们完全可以用抽水机把水从低处抽到高处，即需要外界对水做功，于是外界发生了变化，产生了影响，这种影响是不可能消除的。这样的例子可以举出很多很多：煤炭燃烧可以放出热量，而反过来则不可能把放出的热量完全收回再变回煤炭；生命的孕育、生长、衰老、死亡，都不可能逆向进行……

可逆过程是否存在呢？应该说它只在理论上存在，只有理想的无耗散的准静态过程才是可逆的。这里的条件是：①无耗散的过程，②准静态过程。

滑动摩擦力做功是典型的耗散过程，它要消耗机械能而生热，生成的热不可能全部再转化为机械功。其他能量转化为热的过程也是耗散过程，如电流通过电阻生热等。扩散过程也是典型的耗散过程，两种气体放到一个容器内，总会均匀地混合起来，但不会再自发地分离。

准静态过程是指那种充分缓慢的变化过程，过程中的每一个状态都是热平衡态，而从一个平衡态变为另一个平衡态所需的时间都比弛豫时间长得多。凡中间态是不平衡态的过程都是非准静态过程。例如，气体自由膨胀过程中各处的压强不均匀，是力学不平衡；从高温到低温的热传导过程中各处温度不均匀，是热学不平衡；断开电源而发生自感现象的过程中，各处的电场、磁场不均匀，是电学不平衡；燃料燃烧过程中化学势不均匀，是化学不平衡，等等。这些都是非准静态过程。各种生命现象则更是远离平衡态的复杂过程。一切非准静态过程都是不可逆过程。

无耗散的准静态过程，是一种纯理想的过程，实际过程都不可能完全满足这样的条件，因此实际过程都是不可逆过程。真正的可逆过程虽然在实际中并不存在，但在热力学的理论研究中却意义重大，卡诺循环就是可逆循环。

既然实际过程都是不可逆过程，这些不可逆过程向哪个方向进行呢？热力学第二定律正是关于实际不可逆过程进行方向的高度概括。一切不可逆过程都是向着熵增加的方向进行，也就是向着能的“贬值”的方向进行。

(选自《热现象》，洪安生 编著，人民教育出版社2000年4月第1版)

8. 从对称性的角度认识熵

对称的含义是很广泛的。对于一个选定的系统而言，它从一个状态变换到另一个状态，我们把这个过程称为“变换”，或者叫做给它一个“操作”。如果一个操作能使系统从一个状态变到另一个与它等价的状态，我们就说这个系统对于这一操作是“对称的”。这句话是数学上关于“对称性”的普遍定义，是由德国数学家魏尔首先提出来的，其中“等价”的含义是指不同的状态看上去没有区别。例如一个圆圈，以过它的圆心的直线为轴旋转任意角度，与原来的圆圈相比，从哪个方向看去都没有差别，这就称为等价；但如果圆圈上面有一个特殊的标记，那么只有旋转的角度是 2π 的整数倍时，才与原来的状态等价，旋转其他角度，则与原来状态不等价。

对称操作除了旋转以外，属于空间操作的还有平移、镜像反射、标度变换（即放大与缩小）等，属于时间操作的有时间平移、时间反演等，也可以包括上述各种时空操作的组合。此外，物理学上还有其他对称操作，如置换、规范变换、电荷共轭变换，等等。这里定性介绍一个基本概念，即怎样判别一个系统对称性的高低。仍以绕轴的旋转对称为例，一个正方形，绕过它的中心的直线旋转，每转 90° 为一次对称操作，转一周共出现四次等价状态，这个轴称为4次对称轴，正方形称为具有4次对称轴的物体；一个正六边形，同样以过它中心的直线为轴旋转，每转 60° 角即完成一次对称操作，正六边形称为具有6次对称轴的物体；一个圆，以过它圆心的直线为轴旋转，旋转任意角度都是对称操作，因此圆是具有无穷多次对称轴的物体。正六边形与正方形相比，前者的对称性要高于后者，而圆的对称性则更高。就是说，对于一个系统，可以进行的对称操作越多，它的对称性就越高。

无穷大空间内如果均匀分布着同样的微观粒子，对称性是非常高的，因为无论以哪条直线为轴旋转任何角度，都是对称操作。此外，在空间上的任意平移、对任意平面的镜像反射等，都是对称操作。而如果粒子的分布不均匀，则对称性就大大降低。现在我们来讨论气体真空膨胀的问题。开始时气体被隔板隔在汽缸的一侧，另一侧是真空，抽去隔板，经过一段时间，气体均匀分布到整个汽缸，可以说是从对称性较低的状态变到对称性较高的状态的过程。同样热传导过程是从温度不均匀变到温度均匀的过程，功可以全部变成热，即宏观物体机械能可以都变成微观粒子无规则运动的内能，也都是从对称性较低的状态向着对称性较高的状态变化的。一切由非平衡状态向着平衡状态变化的过程都是向着对称性较高的状态变化的过程。可以说，孤立系统内发生的过程都是向着对称性较高状态变化的方向进行的。我们说孤立系统内发生的过程都是向着熵增加的方向进行的，这就是说熵增加就是表示对称性增加，熵是表示系统对称性高低的物理量，这是对熵的意义的又一种理解。

（选自《热现象》，洪安生 编著，人民教育出版社2000年4月第1版，有改动）

9. 关于热力学第二定律的若干诘难和悖论

人们公认，热力学第二定律和熵的概念在物理学中是最难懂的部分，历史上围绕着它们有过不少疑虑和诘难。真理愈辩愈明，对这些问题的分析和澄清可以大大深化我们对热力学第二定律和熵的概念的理解。

（1）洛施密特的诘难

“君不见高堂明镜悲白发，朝如青丝暮成雪？”诗人哀叹韶华如流，人生易老，这反映的是宏观世界的命运和情感。组成生命的各个原子、分子绝不担心自己会老化，它们服从的运动规律是可逆的，对宏观世界里发生的一切漠不关心。

设想在一个容器里有 N 个分子，它们在不断地做热运动。假如上帝决定在某个 $t=t_0$ 的时



刻令所有分子一齐就地向后转, 速度反向, $v \rightarrow -v$, 按照微观运动的可逆性, 每个分子都将回溯原来的轨迹, 正像反演一部电影那样, 由它们表现出来的宏观历程也逆转了。如果原来熵在增加, 运动反演后熵不就在减少吗? 这是洛施密特 (L. Loschmidt) 于 1876 年对玻耳兹曼 H 定理, 或者说熵增加原理提出的诘难。

现在有很好的计算机可用来模拟分子的运动, 这时我们自己就是上帝, 随时能够命令所有分子的运动反向。图 10-10 显示了对 100 个硬球组成的系统进行模拟的结果^①, 横坐标是时间, 纵坐标是玻耳兹曼 H 函数 (即负熵)。严格的时间反演显然会向初始态回归, 违反 H 定理 (即熵增加原理)。但现实世界里不可能完全没有随机性, 引进极其少量的误差怎么样? 图 10-10 显示的是速度反转时分别引入 10^{-8} 、 10^{-5} 、 10^{-2} 随机误差的情形。空心圈代表原始 H 减少 (即熵增加) 的进程, 实心黑点代表发生 50 次和 100 次碰撞时速度反向后 H 的变化。可以看出, 开头 H 都回升了, 向初始态逼近, 尔后近似地重复原来 H 递减的历程。不过随着误差的加大和碰撞次数的增多, 系统对初始态的“记忆”愈来愈模糊, 上述回升过程愈来愈被抹平 (这与现代混沌理论中误差随时间指数式放大的观点是一致的)。这里体系内只有 100 个分子, 可以想见, 随着分子数目的增多和碰撞的频繁, 任何看来微不足道的误差都足以把 H 的回升过程荡平。

从上述模拟中我们看到, H 定理并非绝对不能违反, 只有从随机的初始条件出发, 才会得到符合 H 定理的结果。而某个时刻速度突然反转, 在分子的微观状态里保存了出发时初始条件的完全记忆, 它具有高度的相关性。以此作初始条件继续模拟, H 是会增加的。

洛施密特的诘难提醒了玻耳兹曼, 他对自己的观点作了调整: H 函数不是严格单调下降的, 不过对于宏观系统, 它下降的概率比增长的概率大得多。即使达到了热平衡态, H 围绕它的极小值也会有一定的涨落 (fluctuation), 不过这种涨落的幅度一般是非常小的, 涨落幅度愈大, 出现的概率愈小。

(2) 策尔梅洛的诘难

1892 年法国大数学家庞加莱 (H. Poincaré) 证明了一条定理: 孤立的、有限的保守动力学系统在有限的时间内回复到任意接近初始组态的组态。这便是他著名的始态复现定理 (Poincaré recurrence theorem)。

1896 年策尔梅洛 (E. Zermelo) 引用庞加莱这一定理对热力学第二定律进行了诘难, 认为

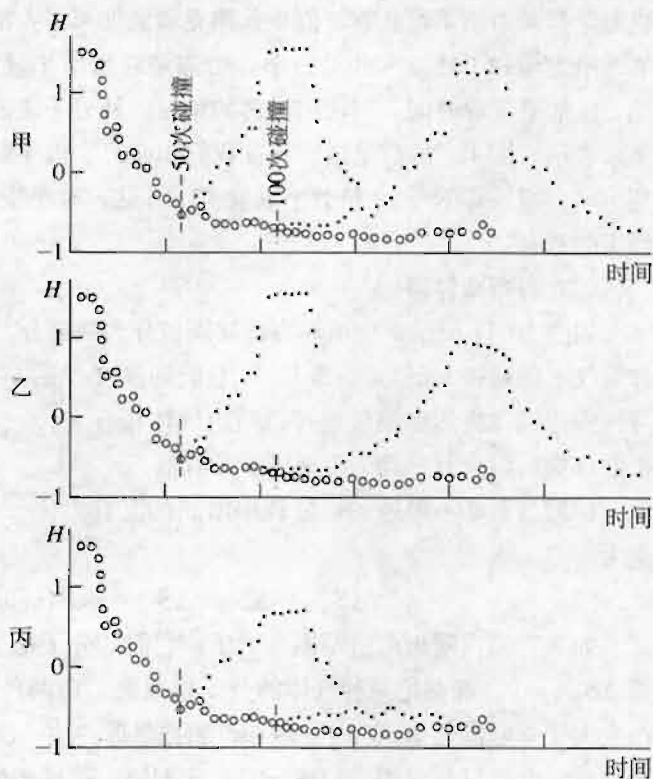


图 10-10 100 个硬球系统 H 值的计算机模拟

^① J. Orban, A. Bellemans, *Phys. Lett.*, 24A(1967), 620.

热力学与动力学不可兼容。似乎普朗克和庞加莱本人都同意策尔梅洛的观点。玻耳兹曼仍用涨落的概念调和了热力学和动力学，始态是靠涨落来复现的，据他估计，具有 10^{18} 个粒子的系统，庞加莱复现时间（用任何通常的单位，从分子碰撞时间、秒到年都差不多）要用 10^{18} 位数字来表示，即 10^{18} 的数量级。现在我们知道，宇宙年龄的数量级是 10^{10} 年，用秒来表示也不过是 10^{18} ，即只需 18~19 位数字就够了。可见，对于宏观系统庞加莱始态复现的理论没有任何现实的意义。

(3) 吉布斯佯谬

如图 10-11 所示，一绝热容器被隔板分为两部分，两边充以不同的气体 X 和 Y（譬如氮气和氧气）的量各 ν_X 和 ν_Y （摩尔），它们的温度与压强皆同。突然将隔板抽掉，两边气体相互扩散，最后混合起来均匀地充满整个容器。

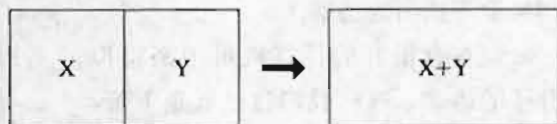


图 10-11 扩散过程

扩散过程是不可逆的，过程中增加的混合熵为

$$\Delta S_{\text{混合}} = \Delta S_X + \Delta S_Y = -\nu R(c_X \ln c_X + c_Y \ln c_Y) > 0$$

如果容器内隔板两边是同一物质，它们的分子是全同的，抽掉隔板后则无所谓扩散，混合熵 $\Delta S_{\text{混合}} = 0$ 。现在把两种气体的分子换成黑、白两种颜色的球，将它们混合起来的时候一定产生大于 0 的混合熵 $\Delta S_{\text{混合}}$ 。现在设想把黑球一次一次地漂白，使其颜色逐渐变浅，每次重新与白球混合。只要它们与白球还是有区别的，这样产生的混合熵并不因为黑球颜色的改变而改变。于是我们发现，当黑球的颜色无限变浅而趋于与白球不可分辨的过程中，混合熵 $\Delta S_{\text{混合}}$ 并不连续变化，而是起初一直不变，直到最后突然消失。这实在令人不可思议。如果说黑球白球是宏观物体，不能做到完全不可分辨，故可认为 $\Delta S_{\text{混合}}$ 始终没有消失，那么将相同的气体放在容器两边让它们相互扩散，究竟有没有混合熵？这便是著名的吉布斯佯谬。

我们知道，在微观世界里粒子的全同性是由物质结构的离散性来保证的。我们不可能设想如把黑球漂成白球那样，把氮分子连续地变成氧分子。所以不同种气体混合时存在混合熵，同种气体混合肯定没有混合熵，两种情况不能连续过渡，吉布斯佯谬不存在。

(4) 麦克斯韦妖与信息

麦克斯韦也给热力学第二定律出过一个难题。他设想有一个能观察到所有分子的轨迹和速度的小精灵把守着气体容器内隔板上一小孔的闸门，见到这边来了高速运动的分子就打开闸门让它到那边去，见到那边来了低速运动的分子就打开闸门让它到这边来（图 10-12）。设想闸门是完全没有摩擦的，于是这小精灵无需做功就可以使隔板两侧的气体这边愈来愈冷，那边愈来愈热。这样一来，系统的熵降低了，热力学第二定律受到了挑战。人们把这个小精灵称为麦克斯韦妖（Maxwell demon）。

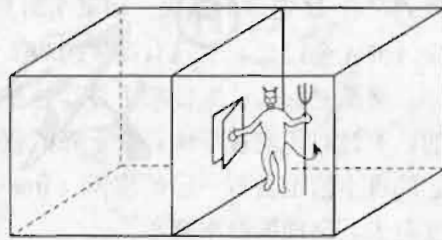


图 10-12 麦克斯韦妖

麦克斯韦妖可不是人们想象中的那种呼风唤雨魔法无边的精灵，它与普通人相比，除了具有非凡的微观分辨力之外，别无他长。也就是说，麦克斯韦妖小巧玲珑，是纯智能型的。可是只凭这一点，它就能干出惊人之举。尽管许多人想弄清这小妖精的来头，直到 1929 年它的底细才开始被匈牙利物理学家西拉德（L. Szilard）所戳穿。

麦克斯韦妖有获得和储存分子运动信息的能力，它靠信息来干预系统，使它逆着自然界的

自发方向行进。按现代的观点,信息就是负熵,麦克斯韦妖将负熵输入给系统,降低了它的熵。那么,麦克斯韦妖怎样才能获得所需的信息呢?它必须有一个温度与环境不同的微型光源去照亮分子,这就需要耗费一定的能量,产生额外的熵。麦克斯韦妖正是以此为代价才获得了所需信息(即负熵)的,这额外的熵产生补偿了系统里熵的减少。总起来说,即使真有麦克斯韦妖存在,它的工作方式也不违反热力学第二定律。

(选自《新概念物理教程·热学》,赵凯华 罗蔚茵 著,高等教育出版社2005年11月第2版)

10. 热寂说的终结

1850年克劳修斯建立了热力学,总结出热力学第一定律和第二定律。1854年他进一步引进“熵”的概念,重新表述了热力学第二定律。“热寂说”几乎从热力学第二定律诞生起就是伴随它的阴影。用克劳修斯自己的话说,热力学两条定律意味着:

(1) 宇宙的能量是常数;

(2) 宇宙的熵趋于一个极大值。

那就是说,全宇宙将达到热平衡,进入热寂(heat death)状态。宇宙热寂的结论固然令人懊恼,但曾经令人困惑的是,为什么现实的宇宙并没有达到热寂状态。长期以来人们认为宇宙基本上是静态,它在时间上无始无终,似乎它早就该处于热寂状态了。由于“热寂说”在感情上和理智上都给人以强烈的冲击,克劳修斯的同时代人就曾群起而攻之,但反对意见多被克劳修斯驳倒了。当时批判“热寂说”的观点中对后世影响较大的有两家之言。

1872年玻耳兹曼提出“涨落说”。我们知道,是他首先赋予了熵增加以统计的解释。按照这种解释,热平衡态总伴随着涨落现象,后者是不遵从热力学第二定律的。玻耳兹曼认为,在宇宙的某些局部可以偶然地出现巨大的涨落,在那里熵没有增加,甚至在减少。这种说法有一定的吸引力,但尚缺乏事实根据。

1875至1876年恩格斯在《自然辩证法》中写道:“运动的不灭不能仅仅从数量上去把握,而且还必须从质量上去理解。”根据这一原则,他有如下的信念:“放射到太空中去的热一定有可能通过某种途径(指明这一途径,将是以后自然科学的课题)转变为另一种运动形式,在这种运动形式中,它能够重新集结和活动起来。”

在苏联和我国以前的一些热学教科书中,除经常引用上面两种说法来批判“热寂说”外,还有过如下一些流行的论点。一种认为宇宙是无限的,不是封闭的,因而不能把热力学第二定律推广到全宇宙。另一种认为,这个问题的答案不可避免地要归到一种“原始推动力”,给“上帝创造世界”的说教以口实。

多少年来,人们总感到对“热寂说”的批判说服力不强,隔靴搔痒,未中要害。现在我们知道,“热寂说”的要害在于以下两点:一是宇宙在膨胀,二是引力系统乃具有负热容的不稳定系统。

我们知道,由于宇宙在膨胀,它的组分相互会脱耦,从热力学平衡态发展到不平衡态,从温度均匀到产生温差。这种现象在静态宇宙模型中不可能发生,也是克劳修斯和他的批判者们都没有想到的。

我们还讨论过金斯不稳定性怎样使密度均匀的宇宙产生了团块结构,形成各种天体。在《新概念物理教程·力学》第七章3.4节我们谈到自引力系统的负热容问题。具有负热容的系统是不稳定的,它没有平衡态,不能把通常的热力学第二定律用于其上。如果要在这一说到熵,我们欣赏泽尔多维奇(Ya. B. Zel'dovich)提出的看法,对于引力系统,密度均匀态并不是概率最高的。宇宙中均匀物质凝成团块(星系、恒星等)的过程中引力势能转化为动能。从



均匀到不均匀,位形空间里的分布概率减少了,但温度上升,速度空间里的分布概率增加了。两者相抵,总概率是增加了,而不是减少了。这就是说,天体的形成是引力系统中的自发过程,它的熵是增加的。由于不存在平衡态,熵没有极大值,它的增加是没有止境的。

总之,膨胀的宇宙和负热容的引力系统以出乎前人意料的方式冰释了“热寂”的疑团,展现了全新的一幅情景:宇宙早期是处于热平衡的高温高密“羹汤”,从这一单调的混沌状态开始,在膨胀的过程中一步步发展出愈来愈复杂的多样化结构。于是,在微观上形成了原子核、原子、分子(从较简单的无机分子到高级的生物大分子),在宏观上演化出星系团、星系、恒星、太阳系、地球、生命,直至人类这样的智慧生物和愈来愈发达的社会。古埃及神话中的凤凰鸟(phoenix)焚身于烈火之后,从自己的灰烬中青春焕发地再生,这是当代宇宙观的一幅精彩写照。宇宙不但不会死,反而从早期的“热寂”状态(热平衡态)下生机勃勃地复生。固然,当今的宇宙学尚不能准确地预卜宇宙的结局,但是折磨了物理学界和哲学界100多年的梦魇——热寂说,作为历史的一页,可以尽管放心地翻过去了。

(选自《新概念物理教程·热学》,赵凯华 罗蔚茵 著,高等教育出版社2005年11月第2版)

(二) 联系生活、科技和社会资料

1. 信息熵与遗传密码

大家都说,当代的社会是信息社会。什么是信息?早年间信息不过是消息的同义语,现代的社会里信息的概念甚广,不仅包含人类所有的文化知识,还概括我们五官所感受的一切。信息的内容既有量的差别,又有质的不同。短短的一首名诗和一本无聊的作品相比,所含信息的价值是无法比拟的。对信息价值的评估,显然超出了自然科学的范围,目前尚没有为大家所接受的客观准则。不得已求其次,采用电报计费的办法,只计字数不问内容,单在信息量的问题上下功夫,这正是当代“信息论”这门科学的出发点。

信息往往需要以语言文字或符号系统(如音符、数学公式、图表)为载体,比较不同载体传达的信息数量的多寡,是很困难的。1948年信息论的创始人香农(C. E. Shannon)从概率的角度给出信息量的定义。

平常说缺乏信息就是情况不明。譬如说,想找一个人,只知道他住在这幢宿舍楼里,但不知道房间号。如果这幢楼有50套房间,我们只能假定他住在每套房间的概率都是 $1/50$ 。若有人说,此人住在三层。如果这幢楼有5层,每层10套房,则此人住在三层每套房间的概率加大到 $1/10$,而住在其他层的概率减为0。若最后打听到此人的房间号码,则他住在这里的概率加大到1,在所有其他地方的概率都化为0。由此可见,信息的获得意味着在各种可能性中概率分布的集中。

通常的事物常具有多种可能性,最简单的情况是具有两种可能性,如是和否、黑和白、有和无、生和死等。现代计算机普遍采用二进制,数据的每一位非0即1,也是两种可能性,在没有信息的情况下每种可能性的概率都是 $1/2$ 。在信息论中,把从两种可能性中作出判断所需的信息量叫做1比特(bit, bit=binary information unit),这就是信息量的单位,那么,从四种可能性中作出判断需要多少信息量?

两人玩一种游戏,甲从一副扑克牌中随机地抽出一张,让乙猜它的花色,规则是允许乙提问题,甲只回答是与否,看乙能否在猜中之前提的问题最少。若乙问:是黑桃吗?如果是,他

提一个问题就猜中了。如果不是呢？则还剩下三种可能性，再提一个问题乙没有把握猜中。这种问法是不行的。乙应该提“是黑的吗”，如果是，再问“是黑桃吗”；如果不是，就问“是红心吗”。无论什么情况，他稳操胜券。因为得到一个问题的答案后，他只面临两种可能性，再一个问题就足以使他获得所需的全部信息。所以从四种可能性中作出判断需要 2 bit 的信息量。

如此类推，从八种可能性中作出判断需要 3 bit 的信息量，从十六种可能性中作出判断需要 4 bit 的信息量，等等。所以一般地说，从 N 种可能性中作出判断所需的比特数为 $n = \log_2 N$ ，换成自然对数，则有 $n = K \ln N$ ，式中 $K = 1/\ln 2 = 1.4427$ 。如果用概率来表达，在对 N 种可能性完全无知的情况下，我们只好假定，它们的概率 P 都是 $1/N$ ， $\ln P = -\ln N$ ，即这时为作出完全的判断所缺的信息量为

$$S = -K \ln P \quad (1)$$

香农把这叫做信息熵，它意味着信息量的缺损。

以上是各种可能性概率相等的情况。天气预报员说，明天有雨，这句话给了我们 1 bit 的信息量。如果她说有 80% 的概率下雨，这句话包含多少信息量？对于这种概率不等情况，信息论中给信息熵的定义是

$$S = -K \sum_{a=1}^N P_a \ln P_a \quad (2)$$

此式的意思是说，如果有 $a=1, 2, \dots, N$ 等 N 种可能性，各种可能性的概率是 P_a ，则信息熵等于各种情况的信息熵 $-K \ln P_a$ 按概率 P_a 的加权平均。如果所有的 $P_a = 1/N$ ，则上式归结为①式。

把②式运用到上述天气预报的问题上，令 $a=1$ 和 2 分别代表下雨和不下雨的情况，则 $P_1 = 0.80$ ， $P_2 = 0.20$ ，按②式信息熵为

$$S = -K(P_1 \ln P_1 + P_2 \ln P_2) = -\frac{1}{\ln 2}(0.80 \times \ln 0.8 + 0.2 \times \ln 0.2) = 0.722$$

即比全部所需信息 (1 bit) 还少 0.722 bit，所以预报员的话所含的信息量只有 0.278 bit。同理，若预报员的话改为明天有 90% 概率下雨，则依上式即可算出信息熵 $S = 0.469$ ，从而这句话含信息量 $I = 1 - S = 0.531$ bit。可见，信息熵 S 的减少意味着信息量 I 的增加。在一个过程中 $\Delta I = -\Delta S$ ，即信息量相当于负熵。

从信息熵的公式不难看出，它和玻耳兹曼的熵公式极为相似，只是比例系数和单位不同。热学里比例系数为 $k = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K，从而熵的单位为 J/K；信息论里比例系数为 $K = 1/\ln 2$ ，熵的单位为 bit。两者相比，有

$$1 \text{ bit} = k \ln 2 = 0.957 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

这换算关系有什么物理意义吗？热力学的熵增加原理告诉我们，要使计算机里的信息量存储增加一个 bit，它的熵减少 $k \ln 2$ J/K，这只能以环境的熵至少增加这么多为代价，即在温度 T 下处理每个 bit，计算机至少消耗能量 $kT \ln 2$ (焦耳)。这是能耗的理论下限，实际上当代最先进的微电子元件，每 bit 的能耗也在 $10^8 kT$ 的数量级以上。

“龙生龙，凤生凤，老鼠的儿子会打洞。”大自然最精彩的杰作莫过于物种的变异和遗传。早在 1944 年量子力学的创始人之一薛定谔 (E. Schrödinger) 就在他著名的小册子《生命是什么？》里预言：“生命的物质载体是非周期性晶体，遗传基因分子正是这种有大量原子秩序井然地结合起来的非周期性晶体；这种非周期性晶体的结构，可以有无限可能的排列，不同样式的排列相当于遗传的微型密码；……”他所说的这种“非周期性晶体”，就是存在于细胞核染色



体中的DNA分子。1953年沃森(J. D. Watson, 年轻的细菌遗传学博士)和克里克(F. H. C. Crick, 一位二战前受过传统物理学训练的人, 战后转为生物物理学研究生)共同发现了DNA分子的双螺旋结构, 它由两股互补的逆平行分子链组成(见图10-13)。分子链由四种核苷酸组成, 每种核苷酸有它特有的碱基, 所以也可以说分子链是由四种碱基组成的, 它们是腺嘌呤(A)、鸟嘌呤(G)、胸腺嘧啶(T)、胞嘧啶(C), 遗传信息就包含在A、G、T、C这四个字母编写的语言中。

英文有26个字母, 若干字母组成一个单词。遗传密码有4个字母, 多少个字母组成一个单词? 生物大多数的遗传性状都要通过各种蛋白质表现出来。蛋白质的种类繁多, 单就人体内有的就不下10万种, 但它们都由20种氨基酸组成, 只是排列结构不同。 $\log_2 20 = 4.322 \text{ bit}$, 决定一种氨基酸至少需要这么多的信息量。DNA含有的遗传信息指挥着蛋白质合成时的氨基酸顺序, 这密码中的一个字符只包含 $\log_2 4 = 2 \text{ bit}$ 的信息, 显然不足以决定一种氨基酸。两个字符 $\log_2 4^2 = 4 \text{ bit}$ 也不够, 三个字符 $\log_2 4^3 = 6 \text{ bit}$ 就有的多余了。20世纪50年代核物理学家伽莫夫(G. Gamow, 大爆炸宇宙论的创始人)用信息论的方法推测, 20种氨基酸取决于核苷酸三联密码, 即DNA这部分所用的语言中, 每个单词都是用三个字母组成的。这些推测相继得到实验证实, 20世纪60年代三联密码逐一被破译。

计算机程序可以拷贝, 遗传密码也需要转录和复制。据估计, DNA中复制每一bit的能耗仅 $100kT$, 这是当代最先进的微电子元件能耗的百万分之一。

DNA双螺旋每股都右向盘绕, 螺旋直径 $2 \times 10^{-7} \text{ cm}$, 每圈间距10个核苷酸对, 这相当于20 bit的信息量。 $1 \mu\text{m}$ 的DNA约有300圈, 即6 000 bit信息量。对于简单的生命, 如病毒, 其环状DNA长度为 $1.5 \sim 80 \mu\text{m}$, 信息量的数量级在 $10^4 \sim 10^5 \text{ bit}$ 之间; 细菌的DNA长度可达 1 mm , 含信息量 10^7 bit ; 对于人类, 46条染色体中DNA总长 2 m , 含信息量达 10^{10} bit 之多。像一本300多页的书约含 10^6 个字符, 若用来记载人体DNA密码, 每字符2 bit, 需要5 000册。这已经是汗牛充栋的巨帙了, 若想把自然界几十亿个物种的遗传密码都记录下来, 需要怎样大的图书馆才容得下呀!

地球的年龄为46亿年, 30多亿年前开始出现生命。从上述情况看, 生命从最简单的形式开始就采取了基因进化的方式, 信息的储存和传递在加速生物物种的进化方面起了不可估量的作用。

总之, DNA遗传密码历史之悠久, 信息量之巨大, 运作机制之精巧, 复制能耗之节省, 都令我们叹为观止。大自然的确是运用信息论最杰出的能手!

(选自《新概念物理教程·热学》, 赵凯华 罗蔚茵 著, 高等教育出版社2005年11月第2版)

2. 生命的热力学

地球上的生命起源于30多亿年前, 即地球形成后 $10 \sim 15$ 亿年间。按当代生物学的认识, 蛋白质与核酸是生命的主要物质基础, 其中蛋白质由20种氨基酸组成, 核酸分为核糖核酸(RNA)和脱氧核糖核酸(DNA)两类, 其结构单位是核苷酸。核酸控制蛋白质的合成, 蛋白质的催化作用又控制着核酸的代谢活动。构成生物所需的简单有机化合物, 以及较复杂的蛋白

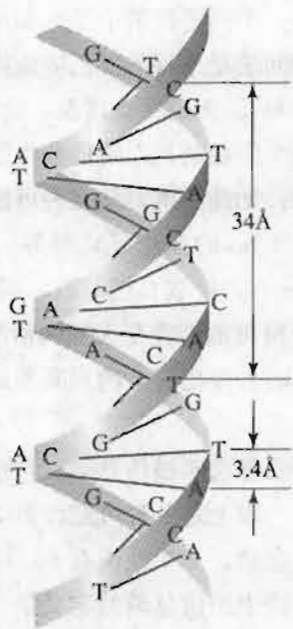


图10-13 DNA
双螺旋结构



质和核酸，都于生物出现前先后在原始大气和海洋中合成了。

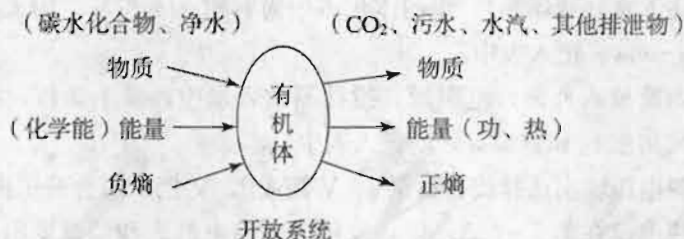
原始的单细胞生物在结构和功能方面逐步完善，大约到 10 亿年前开始向多细胞生物演变。海里先产生了无脊椎动物，4 亿年前有了鱼类，3.5 亿年前出现两栖类，动物开始从海洋向陆地进军。2 亿多年前以后是爬行类的世界，侏罗纪里不可一世的恐龙突然于 6 800 万年前灭绝了，哺乳动物兴旺起来，400 万年前有了原始人类。在这漫长的过程中，物种从低级进化到高级，从简单进化到复杂。可否量化地说明物种进化的进程？当代生物学告诉我们，物种的性状是靠基因来保持和传递的，基因的信息储存在 DNA 中。我们看到，生命一开始就采取了基因的形式进化，基因中所含信息量的增长可作为物种进化的一个标志。我们知道，熵的增加代表混乱程度的增加，熵的减少代表混乱程度的减少，或有序程度的增加。信息代表有序，所以信息量的增长意味着熵的减少。

生物个体发育时，在基因里密码的指令将氨基酸联结起来，合成蛋白质。所以，一个成长起来的生物体更为有序，熵进一步减少。

再者，从食品的发酵到人们的劳作，都要生热，生命的活动是耗散过程。在耗散过程中熵不断增加，高熵意味着混乱。熵达到最大值意味着热平衡态，对于生命来说，热平衡态就是死亡。所以，要活着，有机体必须使自己的身体保持低熵的状态。

热力学第二定律告诉我们，一个封闭系统的熵只增加，不减少。所以在很长一个时期里，人们认为生命现象是与热力学第二定律相矛盾的。量子力学的创始人之一薛定谔 1943 年写过一本小册子《生命是什么？》，里面有一段名言：“生命之所以能存在，就在于从环境中不断得到‘负熵’。”他还说：“有机体是依赖负熵为生的。”薛定谔的意思是说，有机体不可能是封闭系统，必须是开放系统，它一面不断向体外排熵，一面从外界汲取低熵的物质，以形成负熵流。

我们不妨把有机体的生命过程归结为下列图解：首先再次强调，有机体必须是开放系统，它们与周围环境之间不断地有物质和能量的交流。这还不够，物质和能量的进出必须能使有机体维持低熵的状态，这就要求摄入的是低熵物质，排出的是高熵物质，用薛定谔的话说，就是负熵进，正熵出。



对于动物来说，生命攸关的低熵物质有两类：低熵高能的食物（如碳水化合物）和低熵低能的净液态水，排出的高熵物质是 CO_2 、水汽、尿、汗和其他排泄物。先看碳水化合物，在地球上它们来自绿色植物的光合作用。以葡萄糖为例，它在光合作用中产生的化学反应式为



在 25 °C 时的熵变

$$\Delta S_{\text{mol}} = -585.8 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

$\Delta S_{\text{mol}} < 0$ 表示生成物（葡萄糖）是低熵的，故它可满足有机体负熵流的需求。所以阳光是地球生物圈负熵的来源。再看液态水，它具有较高的汽化热和对许多物质具有较高的溶解能力。在它蒸发或溶解了废物后变为高熵物质排出体外时，带走大量的熵。没有水就没有生命。

（选自《新概念高中物理读本》第 3 册，赵凯华 张维善 著，人民教育出版社 2007 年 2 月第 1 版）

(三) 实验参考资料

1. 热功当量的测定 (电热法)

【实验目的】

用电热法测定热功当量，以加深学生对热功当量物理意义的理解。

【仪器和器材】

量热器 (J 2251 型)，温度计 (0~100 °C)，学生电源 (J 1202 型或 J 1202-1 型)，直流电流表 (J 0407 型或 J 0407-1 型)，直流电压表 (J 0408 型或 J 0408-1 型)，滑动变阻器 (J 2354-1 型)，停表，学生天平 (J 0104 型)，电阻丝 (约 6 Ω)，液体 (水或煤油)，单刀开关 (J 2352 型)，导线若干。

【实验原理】

如图 10-14，设量热器内筒和搅拌器的总质量为 $m_{筒}$ (由同种材料制成)，内盛质量为 $m_{液}$ 的液体，初温为 t_1 。当对电阻丝通电一段时间 t 后，液体末温为 t_2 。设通电时电流表、电压表示数分别为 I 和 U ，则通电时间内电流做的功为

$$W = IUt \quad ①$$

量热器内筒 (含搅拌器) 及液体的吸热为

$$Q = (c_{筒} m_{筒} + c_{液} M_{液})(t_2 - t_1) \quad ②$$

I 、 U 、 t 、 $m_{筒}$ 、 $M_{液}$ 、 t_1 、 t_2 均可由实验测得，则热功当量

$$J = W/Q \quad ③$$

【实验方法】

(1) 用天平称量出量热器内筒及搅拌器的总质量 $m_{筒}$ 。

然后向量热器内筒注入水 (或煤油)，水的体积占内筒容积 3/4 左右。用天平称出筒和水的总质量 m ，则 $m_{水} = m - m_{筒}$ 。记入表中。

(2) 将量热器内筒放入外筒，电阻丝、搅拌器放入水中，盖上盖板，按图 10-14 连好电路。读出量热器系统初温 t_1 和室温 t_0 ，均记入表中。

(3) 将学生电源电压输出选择旋钮拨至 10 V 挡或 12 V 挡，闭合开关同时启动秒表计时，并迅速调节变阻器使电流在 1.5~2 A。以后要随时观察电流表和调整变阻器，使电流值保持稳定。通电过程中，不断轻微搅拌水，以加速热传导。读出电流表和电压表的示数，并记入表中。

(4) 当温度计示数高于室温 10~15 °C 时，断开开关，并同时停止计时。继续搅拌水并观察温度计示数，当其示数最高时，读出温度 t_2 。把通电时间 t 、末温 t_2 记入下表中。

室温 $t_0 =$

$m_{筒}/\text{kg}$	$m_{水}/\text{kg}$	$t_1/^\circ\text{C}$	$t_2/^\circ\text{C}$	t/s	I/A	U/V	W/J	Q/J
$J = W/Q =$							百分误差:	

(5) 利用①、②、③式和实验数据求出热功当量 (有关比热容查比热容表)，与公认值比

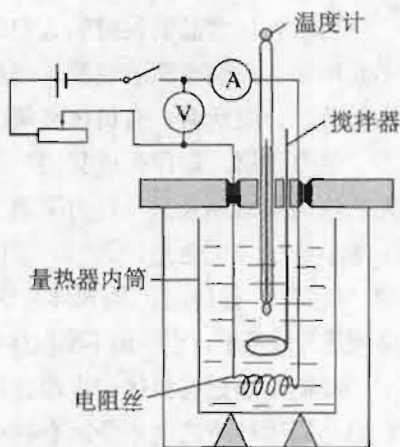


图 10-14

较, 求出百分误差。

【注意事项】

(1) 若实验前能将盛有水的量热器内筒置于冰上几分钟, 使水的初温低于室温 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 则可以减小因量热器与外界的热交换而产生的实验误差 (但在放入外筒前要擦干内筒外侧的水)。

(2) 若用水做实验, 水应清洁, 不含酸、碱、盐, 否则不易保持电流稳定。用煤油做则不存在这个问题。且煤油比热较小, 电流相应可小一些。

(3) 电阻丝未放入液体之前, 不应通电, 以免损坏电阻丝。

【思考题】

(1) 为什么实验中不在断开开关时, 读出末温 t_2 ?

(2) 如果水的初温为室温, 则实际测量的 J 值常常比公认值大, 主要原因是什么?

(选自《高中物理学生实验》, 教育部教学仪器研究所主编, 人民教育出版社 2003 年 6 月第 1 版)

2. 气体的绝热压缩

【实验目的】 演示空气被迅速压缩时温度升高, 说明机械能可以转化为内能。

【实验器材】 空气压缩引火仪, 硝化棉或其他燃烧剂, 橡皮吹气球等。

仪器由压缩活塞和活塞筒组成, 如图 10-15 所示, 压缩活塞包括压缩手柄和活塞。活塞筒由厚壁有机玻璃制成, 固定在底座上。

【实验方法】

(1) 将活塞壁涂上蓖麻油, 以保证压缩过程不漏气和润滑, 然后取一小片硝化棉, 用玻璃棒送到活塞筒底部, 再把活塞插入活塞筒上口。

(2) 将左手食指和中指分开, 把仪器底座夹在食指和中指中间压住。右手摊开手掌, 用手掌的大鱼际肌对准压缩手柄, 垂直向下用力一击, 把活塞迅速地压下去, 硝化棉就会在瞬间燃烧, 发出明亮的火光。

【注意事项】

(1) 活塞筒由有机玻璃制成, 不耐高温、高压。实验时, 硝化棉不宜放得过多 (大小如火柴头的团粒即可), 以免活塞筒炸裂或烧熔损坏。

(2) 如果第一次压缩后没有点燃, 切勿再加硝化棉。应取出未燃的硝化棉, 再换入新的。以防过多引起爆炸。用自制硝化棉效果较好, 自制方法见说明。

(3) 多次做实验时, 可用橡皮吹气球吹气, 将活塞筒底部的废气清除。待新的空气进入后再做实验。

(4) 使用完毕后, 将活塞涂上蓖麻油, 并把活塞拔出与活塞筒分别放置, 以免活塞长期受挤压, 以致弹性衰退, 发生漏气。

(5) 点燃物最好不用乙醚, 因乙醚对有机玻璃有溶解作用 (若活塞筒由玻璃制成, 则可用乙醚作点燃物)。

说明: 硝化棉的制法

(1) 取小圆玻璃缸两只, 一只放入半缸冷水, 一只放入半缸 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温水, 用来调节反应温度。

(2) 取 100 mL 小烧杯一只, 先倒入浓硝酸 10 mL, 再慢慢地倒入浓硫酸 30 mL, 然后把小烧杯浸在冷水缸里用玻璃棒搅拌, 将混合酸的温度调节到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

(3) 把 2.5 g 脱脂棉投入盛有 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的混合酸的小烧杯内, 再把小烧杯浸在冷水缸中用玻璃

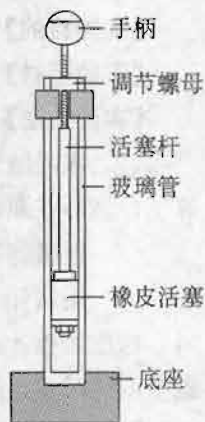


图 10-15

棒搅拌脱脂棉，使浸有混合酸的脱脂棉处在 30°C 的温度中反应，如果反应温度低于 30°C 时，则把盛有混合酸和脱脂棉的小烧杯移浸到 32°C 的温水缸中继续搅拌，经 15 min 后即制成硝化棉。

(4) 把制成的硝化棉用清水反复漂去余酸并沥干，再放在通风避光处晾干后放进有干燥剂的广口瓶里备用。应避免震动和高温，以防爆炸。

各种混合药棉的制法

(1) 简单混合药棉的制法 把脱脂棉浸在过饱和的氯酸钾溶液里，取出后放在通风避光处晾干，再放入生石灰箱中备用。

(2) 加料混合药棉的制法 临做实验时，在简单混合药棉中加入绿豆般大的赤磷，可增强引火效果。

(3) 多元混合药棉的制法 临做实验时，在加料混合药棉中加入少量铝银粉（细铝粉），可增强发光亮度。

上述各种混合药棉可以根据仪器的气密性能加以选择。

（选自《中学物理实验大全》，杨介信 张大同 主编，上海教育出版社 1995 年 12 月第 1 版）

3. 气体的绝热膨胀

【实验目的】 演示气体绝热膨胀做功时，内能减小。

【实验器材】 两用打气筒，吸滤瓶，橡皮塞，橡皮管，酒精（或水）等。

【实验方法】

(1) 在吸滤瓶内放入少量酒精，一般在瓶底有薄薄一层就足够了，然后在瓶口塞上橡皮塞。

(2) 把吸滤瓶与两用气筒用橡皮管连通，如图 10-16 所示。

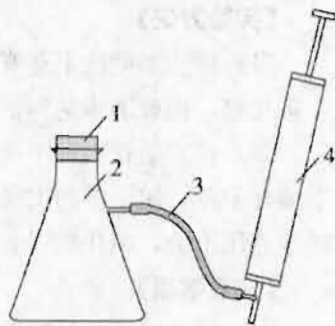
(3) 用两用气筒向吸滤瓶内打气。当瓶内气压达一定大小时，橡皮塞被冲出，瓶内立即出现一片白雾。这是因为气体膨胀做功内能减少，瓶内空气温度下降，酒精蒸气液化的结果。

【说明与建议】 瓶内出现白雾后，如果再在瓶口塞上橡皮塞，并向瓶内打气，可见白雾迅速消失。这是因为压缩空气做功，空气温度升高，酒精液滴迅速汽化的结果。因此本实验也能说明压缩气体做功，气体内能增加。

本实验亦可用一只盐水瓶，在盐水瓶的橡皮塞上加一只自行车内胎上的气门嘴（现成的气门嘴底帽直径较大，需用锉刀将其锉成直径约为 12 mm ）。演示时，在瓶内加入少许酒精（或水），塞上瓶塞（瓶塞上的翻边勿翻下），用普通打气筒打气，瓶内气压达到 $1.5 \times 10^5 \sim 2 \times 10^5\text{ Pa}$ 时，一旦顶起瓶塞，瓶内顷刻呈白色雾状，而且白雾从瓶口上冲成约半米高的白色雾柱。

【注意事项】 打气时勿将瓶塞对着人体，以防造成意外事故。

（选自《中学物理实验大全》，杨介信 张大同 主编，上海教育出版社 1995 年 12 月第 1 版）



1. 橡皮塞 2. 吸滤瓶
3. 橡皮管 4. 两用气筒

图 10-16

五、补充习题

A 组

1. 如图 10-17 所示的绝热容器, 把隔板抽掉, 让左侧理想气体自由膨胀到右侧直至平衡, 则下列说法正确的是 ()

- A. 气体对外做功, 内能减少, 温度降低
- B. 气体对外做功, 内能不变, 温度不变
- C. 气体不做功, 内能不变, 温度不变, 压强减小
- D. 气体不做功, 内能减少, 压强减小



图 10-17

2. 一定质量的理想气体从某一状态开始, 经过一系列变化后又回到初始状态, 用 W_1 表示外界对气体做的功, W_2 表示气体对外界做的功, Q_1 表示气体吸收的热量, Q_2 表示气体放出的热量, 则在整个过程中一定有 ()

- A. $Q_1 - Q_2 = W_2 - W_1$
- B. $Q_1 = Q_2$
- C. $W_1 = W_2$
- D. $Q_1 > Q_2$

3. 如图 10-18 所示, A、B 两装置, 均由一支一端封闭、一端开口且带有玻璃泡的管状容器和水银槽组成, 除玻璃泡在管上的位置不同外, 其他条件都相同。将两管抽成真空后, 开口向下竖直插入水银槽中 (插入过程没有空气进入管内), 水银柱上升至图中所示位置后停止。假设在这一过程中水银与外界没有热交换, 则下列说法正确的是 ()

- A. A 中水银的内能增量大于 B 中水银的内能增量
- B. B 中水银的内能增量大于 A 中水银的内能增量
- C. A 和 B 中水银体积保持不变, 故内能增量相同
- D. A 和 B 中水银温度始终相同, 故内能增量相同

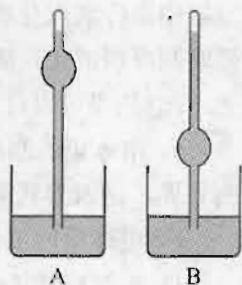


图 10-18

4. 如图 10-19 所示, 厚壁容器的一端通过胶塞插进一支灵敏温度计和一根气针, 另一端有个用卡子卡住的可移动胶塞。用打气筒慢慢向容器内打气, 使容器内的压强增大到一定程度, 这时读出温度计示数。打开卡子, 胶塞冲出容器口后 ()

- A. 温度计示数变大, 实验表明气体对外界做功, 内能减少
- B. 温度计示数变大, 实验表明外界对气体做功, 内能增加
- C. 温度计示数变小, 实验表明气体对外界做功, 内能减少
- D. 温度计示数变小, 实验表明外界对气体做功, 内能增加

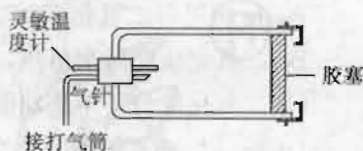


图 10-19

5. 如图 10-20 所示为一带活塞的汽缸, 缸内盛有气体, 缸外为恒温环境, 汽缸壁导热性能很好, 现用力将活塞向外拉动一段距离。在此过程中气体吸热, 对外做功, 此功的绝对值用 W_1 表示。然后, 设法将活塞和汽缸壁绝热, 推动活塞压缩气体回到开始的位置, 此过程中外界对气体做功用 W_2 表示, 则 ()

- A. 有可能使气体回到原来状态, 且 $W_1 < W_2$
- B. 有可能使气体回到原来状态, 且 $W_1 = W_2$
- C. 有可能使气体回到原来状态, 且 $W_1 > W_2$
- D. 不可能使气体回到原来状态, 且 $W_1 < W_2$

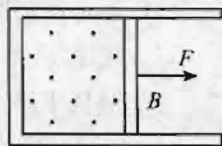


图 10-20

6. 下列说法正确的是 ()

- A. 热量不能由低温物体传到高温物体
- B. 外界对物体做功, 物体的内能必定增加
- C. 第二类永动机不可能制成, 是因为违反了能量守恒定律
- D. 不可能从单一热源吸收热量并把它全部用来做功, 而不引起其他变化

7. 下列对能量耗散的理解正确的有 ()

- A. 能量耗散说明能量在不断减少
- B. 能量耗散遵守能量守恒定律
- C. 能量耗散说明能量不能凭空产生, 但可以凭空消失
- D. 能量耗散从能量角度反映出自然界的宏观过程具有方向性

8. 在一个与外界没有热交换的房间内打开冰箱门, 冰箱正常工作, 过一段时间后房间内的温度将 ()

- A. 降低
- B. 升高
- C. 不变
- D. 无法确定

9. 图 10-21 为电冰箱的工作原理示意图。压缩机工作时, 强迫制冷剂在冰箱内外的管道中不断循环。在蒸发器中制冷剂汽化吸收箱体内部的热量, 经过箱体外部冷凝器时制冷剂液化, 放出热量。下列说法正确的是 ()

- A. 热量可以自发地从冰箱内传到冰箱外
- B. 电冰箱的制冷系统能够不断地把冰箱内部的热量传到外界, 是因为其消耗了电能
- C. 电冰箱的工作原理不违反热力学第一定律
- D. 电冰箱的工作原理不违反热力学第二定律

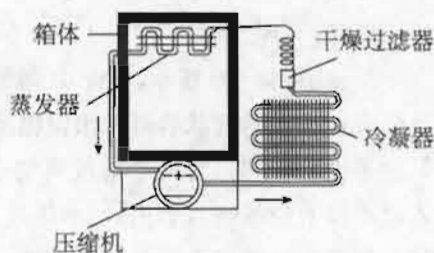


图 10-21

10. 温室效应严重威胁着人类生态环境的安全, 为了减少温室效应造成的负面影响, 有的科学家受到了啤酒在较高压强下能够溶解大量二氧化碳的启发, 设想了一个办法: 用压缩机将二氧化碳送入深海海底, 永久储存起来。在海底深处, 压强很大, 温度很低, 海底深水肯定能够溶解大量的二氧化碳, 这样就为温室气体二氧化碳找到了一个永远的“家”。在将二氧化碳送入海底的过程中, 以下说法正确的是 ()

- A. 压缩机对二氧化碳做功, 能够使其内能增大
- B. 二氧化碳向海水传热, 内能减少
- C. 二氧化碳分子平均动能会减少
- D. 每一个二氧化碳分子的动能都会减少

11. 关于“永动机”, 下列说法正确的是 ()

- A. 不消耗任何能量和燃料, 却能源源不断地对外做功的机器不可能制造出来
- B. 只要不违背能的转化和守恒定律的机器就能够制造出来
- C. 只从单一热源取热, 使之完全变为有用功而不产生其他影响的机器可以制造出来
- D. 不可能制造效率是百分之百的热机

12. 根据热力学第二定律, 下列判断中正确的是 ()

- A. 热机中燃气的内能不可能全部变成机械能
- B. 电流的能不可能全部变成内能
- C. 在火力发电机中, 燃气的内能不可能全部变成电能

D. 热量不可能自发地从低温物体传给高温物体

13. 某同学做了一个小实验：先把空的烧瓶放入冰箱冷冻，一小时后取出烧瓶，并迅速把一个气球紧密地套在瓶颈上，然后将烧瓶放进盛满热水的烧杯里，气球逐渐膨胀起来，如图 10-22 所示。这是因为烧瓶里的气体吸收了水的_____，温度_____，体积_____。



图 10-22

14. 若一气泡从湖底上升到湖面的过程中温度保持不变，将气泡内的气体视为理想气体，气泡从湖底上升到湖面的过程中，对外界做了 0.6 J 的功，则此过程中的气泡_____（填“吸收”或“放出”）的热量是_____J。气泡到达湖面后，在温度上升的过程中，又对外界做了 0.1 J 的功，同时吸收了 0.3 J 的热量，则此过程中，气泡内气体的内能增加了_____J。

15. 如图 10-23 所示的 p - V 图中，一定质量的理想气体由状态 A 经过程 I 变至状态 B 时，从外界吸收热量 420 J，同时膨胀对外做功 300 J。当气体从状态 B 经过程 II 回到状态 A 时，外界压缩气体做功 200 J，求此过程中气体_____（填“吸收”或“放出”）的热量是_____J。

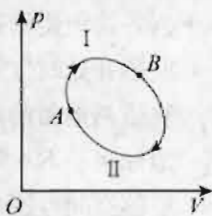


图 10-23

16. 某国际空间站的太阳能电池板长 $l=73$ m，宽 $d=12$ m，将太阳能转化为电能的转化率 η 为 20%，已知太阳的辐射总功率 P_0 为 3.83×10^{26} W，地日距离 R_0 为 1.5×10^{11} m，国际空间站离地面的高度 h 为 370 km，它绕地球做匀速圆周运动时约有一半时间在地球的阴影内，所以在它能发电的时间内将把所发电的一部分储存在蓄电池内。由以上数据，估算这个太阳能电池板能对国际空间站提供的平均功率是多少？

17. 热力学第二定律的开尔文表述指出了内能与机械能的转化具有方向性。结合热力学第二定律的微观意义加以解释。

B 组

18. 如图 10-24 所示，两相同容器装有相同体积的水和水银，A、B 两球完全相同，分别浸没在水和水银中的同一深度，A、B 两球用同一种特殊材料制成。当温度稍升高时，两球的体积均会明显变大。如果开始时水和水银的温度相同，两液体同时缓慢地升高到同一数值，两球膨胀后体积相等，则（ ）



图 10-24

- A. A 球吸收的热量较多 B. B 球吸收的热量较多
C. 两球吸收的热量一样多 D. 无法确定

19. 如图 10-25 所示，带有活塞的汽缸中封闭一定质量的气体（不考虑分子势能）。将一个热敏电阻（电阻值随温度升高而减小）置于汽缸中，在汽缸外用多用电表测热敏电阻的阻值，汽缸和活塞均具有良好的绝热性能。下列说法正确的是（ ）

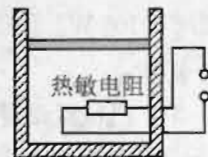


图 10-25

- A. 若发现阻值变大，则汽缸内气体内能一定减小
B. 若推动活塞使汽缸内气体体积减小，则汽缸内气体内能减小
C. 若推动活塞使汽缸内气体体积减小，则汽缸内气体压强减小
D. 若推动活塞使汽缸内气体体积减小，则阻值将变小

20. 如图 10-26 所示为伽利略设计的温度计的示意图，上部是一个球形容器，里面有一定质量的空气，下部是一根细管，细管插入有色液体中。制作时，先给球形容器微微加热，跑出一一些空气，然后插入液体，有色液体会上升到管内某一高度。测量时球形

容器与所测物质接触。已知外界大气压为 p ，并保持不变，所测温度为 t_1 时，管内液面在 a 位置，管内气体分子的平均动能为 E_{k1} ，气体压强为 p_1 ，气体内能为 E_1 ；所测温度为 t_2 时，管内液面在 b 位置，其他三个量分别为 E_{k2} 、 p_2 、 E_2 。由此可知（ ）

- A. $t_1 < t_2$ B. $p_1 < p_2$ C. $E_{k1} < E_{k2}$ D. $E_1 > E_2$

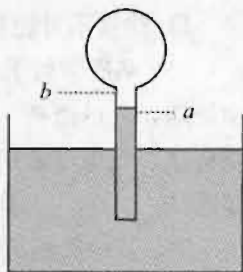


图 10-26

21. “和平号”空间站已于 2001 年 3 月 23 日成功地坠落在南太平洋海域，坠落过程可简化为从一个近圆轨道（可近似看做圆轨道）开始，经过与大气摩擦，空间站的绝大部分经过升温、熔化，最后汽化而销毁，剩下的残片坠入大海。此过程中，空间站原有的机械能除一部分用于销毁和一部分被残片带走外，还有一部分能量 E' 通过其他方式散失（不考虑坠落过程中化学反应的能量）。试导出以下列各物理量的符号表示散失能量 E' 的公式并计算出 E' 的数值。

坠落开始时空间站的质量 $m' = 1.17 \times 10^5 \text{ kg}$ ；

轨道离地面的高度为 $h = 146 \text{ km}$ ；

地球半径 $R = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ；

坠落空间范围内的重力加速度可看做 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ；

入海残片的质量 $m = 1.2 \times 10^4 \text{ kg}$ ；

入海残片的温度升高 $\Delta T = 3\,000 \text{ K}$ ；

入海残片的入海速度为声速 $v = 340 \text{ m/s}$ ；

空间站材料每千克升温 1K 平均所需能量 $c = 1.0 \times 10^3 \text{ J}$ ；

每销毁 1 kg 材料平均所需能量 $\mu = 1.0 \times 10^7 \text{ J}$ 。

参考答案

A 组

1. C 2. A 3. B 4. C 5. D 6. D 7. BD 8. B 9. BCD 10. ABC 11. AD
12. ACD
13. 热量；升高；增大
14. 吸收；0.6；0.2 15. 放出；320
16. 130 kW

解析：国际空间站离地面的高度仅约为地球半径的二十分之一，可认为是近地卫星， h 远小于 R_0 ，因此它离太阳的距离可认为基本不变，就是地日距离 R_0 。太阳的辐射功率可视为均匀分布在以太阳为圆心、地日距离为半径的球面上，由此可以算出每平方米接收到的太阳能功率 $I_0 = \frac{P_0}{4\pi R_0^2} = 1.35 \text{ kW/m}^2$ ，再由电池板的面积和转化率，可求出其发电时的功率 $P = I_0 L d \eta = 2.6 \times 10^5 \text{ W}$ 。由于每天只有一半时间可以发电，所以平均功率只是发电时功率的一半，即 130 kW。

17. 机械运动反映的是宏观情况下物体在空间位置上的变化，物体运动状态的变化遵循牛顿运动定律所反映的因果关系，这是一种有序的运动。热运动是大量分子的无规则运动，系统的一个宏观态包含着大量的微观态，这是一种无序的运动。机械运动向热运动的转化，属于从有序向无序的转化，会导致熵的增加，符合热力学的规律，因此机械能可以全部转化为内能。反之，热运动向机械运动的转化，属于从无序向有序的转化，因此内能不能全部转化为机械能。

**B 组**

18. B

解析：两球初末温度相同、体积相同，所以二者内能增量相同。水和水银升高到同一高度，但是水银密度大，增加的重力势能较大，所以 B 球对外做的功多，由热力学第一定律可知，B 球吸热较多。

19. AD

解析：因为热敏电阻值随温度升高而减小，故若阻值变大，说明气体温度降低，气体内能减小，选项 A 对。选项 B、C 显然错误。关于选项 D，气体体积减小，外界对气体做功，气体温度升高，电阻减小，该选项正确。

20. D

解析：管内液面从 a 位置到 b 位置时，气体压强减小，温度降低，选项 A、B、C 错误，选项 D 正确。

$$21. E' = E - (Q_{\text{汽}} + Q_{\text{残}} + E_{\text{残}}) = \frac{1}{2}m'g(R+3h) - (m' - m)\mu - \frac{1}{2}mv^2 - cm\Delta T; 2.9 \times 10^{12} \text{ J}$$

解析：空间站坠落前在地球的近圆轨道上做圆周运动，有 $\frac{m'v'^2}{R+h} = m'g$ 。

空间站坠落前具有的动能为 $\frac{1}{2}m'v'^2 = \frac{1}{2}m'g(R+h)$ ，重力势能为 $m'gh$ 。

空间站坠落前具有的机械能 $E = \frac{1}{2}m'g(R+3h)$ 。

用于升温、熔化、汽化到最后销毁所消耗的能量为 $Q_{\text{汽}} = (m' - m)\mu$ 。

残片升温需要的能量 $Q_{\text{残}} = cm\Delta T$ 。

残片坠落在海平面（重力势能为 0）具有的机械能为 $E_{\text{残}} = \frac{1}{2}mv^2$ 。

通过以上分析可知，通过其他方式散失的能量

$$\begin{aligned} E' &= E - (Q_{\text{汽}} + Q_{\text{残}} + E_{\text{残}}) \\ &= \frac{1}{2}m'g(R+3h) - (m' - m)\mu - \frac{1}{2}mv^2 - cm\Delta T \end{aligned}$$

代入数值得 $E' = 2.9 \times 10^{12} \text{ J}$ 。

