



全 纳 教 育 丛 书

荣誉物理：热学、光学、近代物理学

写给未来科学家和工程师的高中物理学教程

（第3版）

陆天明 · 编著

RONGGUWU



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS



全纳教育丛书

荣誉物理：热学、光学和近代物理学

写给未来科学家和工程师的高中物理学教程

(第3版)

陆天明 编著

东南大学出版社

· 南京 ·

图书在版编目(CIP)数据

荣誉物理：写给未来科学家和工程师的高中物理学教程. 热学、光学和近代物理学 / 陆天明编著. — 3版.

— 南京：东南大学出版社，2019.1

(全纳教育丛书)

ISBN 978-7-5641-8162-8

I. ①荣… II. ①陆… III. ①中学物理课—高中—教学参考资料 IV. ①G634.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 281253 号

荣誉物理：热学、光学和近代物理学——写给未来科学家和工程师的高中物理学教程(第3版)

编 著 陆天明
责任编辑 宋华莉
编辑邮箱 52145104@qq.com
出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江建中
社 址 南京市四牌楼2号
邮 编 210096
网 址 <http://www.seupress.com>
经 销 全国各地新华书店
印 刷 南京玉河印刷厂
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 19.5
字 数 463 千字
版 次 2019年1月第3版
印 次 2019年1月第3版第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-8162-8
定 价 48.00 元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系,电话:025-83791830)

前 言

为什么中国的古代文明没有发展出现代科学技术？为什么我们的学校总是培养不出杰出人才？李约瑟之惑和钱学森之问重重地敲打着中国的教育，也深深地刺痛了国人的教育良心。

这里所说的杰出人才可以理解为拔尖创新人才，这种人才应具备创造性人格特质，即：丰富的想象力、浓烈的好奇心、广泛的兴趣和优秀的思维品质。当下对拔尖创新人才的培养，通常采用行政化的办法，开设“重点班”、“实验班”，让学业成绩好的学生进入这些班学习。不可否认，这种做法简单而且容易操作，也的确培养出了一批学业上非常优秀的学生。但是，不同人的学习时间不同，不同人的学习风格不同，整齐划一的教学要求，忽视个性心理特征与心理倾向的教育方式，不符合心理学和教育学的基本规律，容易对学生的创造性人格特质造成伤害。教育不应抹杀个性，而应尊重个性，适应个性，张扬个性。要培养具有创造性人格特质的人，必须进行个性化教育。

个性化教育是全纳教育的一种途径。全纳教育是一种没有排斥、没有歧视、没有分类、人人参与、合作共享的教育。全纳教育作为一种教育理念，主张进行个性化教育。

全纳教育是江苏省“十二五”重点资助项目。“荣誉物理”作为全纳教育课程体系课程之一，是为那些在中学阶段就显现出理科特长，并对物理特别感兴趣，立志成为科学家或工程师的学生而设计的。本教材对中学物理教学内容进行了拓展和加深，结构完整，自成体系，很大程度上弥补了当前物理教材的不足。《荣誉物理》系列丛书包含了当前高中物理竞赛考纲所规定的全部内容，所以本丛书不仅可以作为那些对物理学感兴趣的学生的课外拓展阅读材料，还可以作为一套系统的竞赛教程使用。

《荣誉物理》自出版以来得到了广大师生的认可，本版次根据考纲和近几年的考点变化进行了修订并再版。鉴于高中物理竞赛对数学的要求有所提高，根据实际需要，在丛书第2册即《电学分册》中，以附录形式加入了高等数学内容，以便于老师和学生们学习参考。感谢2015级曾许翌秋同学为这部分内容付出的时间和精力！

陆天明

2018年12月于九龙湖

目 录

| | |
|-----------------------------|-----|
| 第十三章 分子运动论和气体状态方程 | 1 |
| § 13.1 分子运动论 | 1 |
| § 13.2 气体实验定律 | 6 |
| § 13.3 气体分子动理论 | 18 |
| § 13.4 麦克斯韦速率分布律 | 24 |
| § 13.5 本章总结与能力提升训练 | 31 |
| 第十四章 热力学定律 | 43 |
| § 14.1 热力学第一定律 | 43 |
| § 14.2 热力学定律对理想气体的应用 | 50 |
| § 14.3 循环过程和热力学第二定律 | 57 |
| § 14.4 本章总结与能力提升训练 | 64 |
| 第十五章 固体和液体 | 76 |
| § 15.1 固体的性质 | 76 |
| § 15.2 液体的性质 | 82 |
| § 15.3 本章总结与能力提升训练 | 91 |
| 第十六章 物态变化 | 97 |
| § 16.1 相变与液气相变 | 97 |
| § 16.2 固液相变与固气相变 | 109 |
| § 16.3 本章总结与能力提升训练 | 114 |
| 第十七章 光线光学 | 121 |
| § 17.1 光线光学的基本概念和基本规律 | 121 |
| § 17.2 棱镜与折射成像 | 130 |
| § 17.3 球面镜 | 140 |
| § 17.4 薄透镜 | 146 |
| § 17.5 共轴光具组 | 153 |
| § 17.6 眼睛和助视镜 | 161 |

| | |
|----------------------------|-----|
| § 17.7 本章总结与能力提升训练 | 171 |
| 第十八章 波动光学 | 180 |
| § 18.1 光的干涉 | 180 |
| § 18.2 光的衍射和偏振 | 193 |
| § 18.3 本章总结与能力提升训练 | 205 |
| 第十九章 量子论 | 210 |
| § 19.1 黑体辐射和光电效应 | 210 |
| § 19.2 康普顿效应 | 220 |
| § 19.3 波粒二象性 | 225 |
| § 19.4 测不准关系 | 231 |
| § 19.5 氢光谱与原子模型 | 235 |
| § 19.6 原子核和粒子 | 243 |
| § 19.7 本章总结与能力提升训练 | 257 |
| 第二十章 狭义相对论 | 267 |
| § 20.1 狭义相对论的建立 | 267 |
| § 20.2 时间的相对性和同时的相对性 | 273 |
| § 20.3 长度的相对性 | 277 |
| § 20.4 相对论动力学 | 285 |
| § 20.5 本章总结与能力提升训练 | 293 |
| 后记 | 304 |

第十三章 分子运动论和气体状态方程

§ 13.1 分子运动论

13.1.1 分子动理论

1. 分子运动论的内容

物质是由大量分子组成的,分子大小的数量级一般为 10^{-10} m,分子质量的数量级为 10^{-27} kg,可用油膜法加以测量.

布朗运动和扩散现象说明分子在做永不停息的无规则的热运动.实验表明扩散的快慢和布朗运动的激烈程度与温度的高低有明显的关系.由此常把大量分子的无规则运动称为热运动,热运动是物质运动的一种基本形式,热现象是它的宏观表现.常温下气体分子热运动的平均速率 $v \approx 10^2$ m/s.

物体不容易被压缩和拉伸说明分子间存在作用力,分子间同时存在引力和斥力,我们平时讲的分子力是二者的合力,如图 13-1 所示,当分子间距离变化时,分子斥力变化快,分子引力变化慢,引力和斥力相等时的位置我们称其为平衡位置,这时的距离用 r_0 表示,一般为 10^{-10} m,当分子间距离较小时($r < r_0$),分子力表现为斥力,当分子间距离较大时($r > r_0$),分子力表现为引力,当分子间距离为 $r \geq 10r_0$ 时,分子间的作用力已非常小,可以忽略,一般情况下气体分子间的距离就满足这种条件.分子力是保守力,存在着由分子和分子间相对位置所决定的势能称为分子力势能.

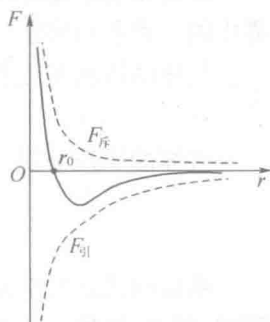


图 13-1

分子力和热运动是决定物体宏观性质的基本因素.分子力作用倾向于使分子聚集一起,在空间形成某种有序排列;热运动却力图造成混乱,存在向外扩散的趋势.

物质是由大量分子组成的,分子在做永不停息的无规则的热运动,分子间存在着相互作用的引力和斥力.

2. 内能

(1) 分子动能

由于分子在做永不停息的无规则的热运动,所以分子有动能,我们称其为分子动能.温度越高,分子动能越大.

(2) 分子势能

由于分子间存在相互作用力,所以分子间有势能,这就是分子势能.分子间距离 r_0 为分子力为零的位置,分子势能最小,而 $r \geq 10r_0$ 时,由于分子间的作用力可忽略,故分子势能变为零,如以无穷远处为势能的零点,定性的分子势能曲线可用图 13-2 表示.

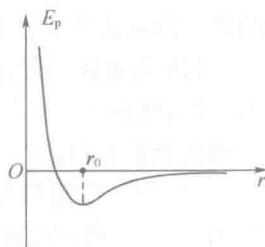


图 13-2



内能就是大量分子的分子动能和分子势能之和. 以上的分子动能包括平动动能、转动动能和多原子分子内部的振动动能, 分子势能包括分子间的势能和多原子分子内部的原子间的势能.

13.1.2 状态参量和平衡态

热学是研究热现象规律的科学. 热学研究的对象都是由大量分子组成的宏观物体或物体系统, 这种物体或物体系统即为热力学系统.

要研究一个系统的性质及其变化规律, 首先要对它的状态加以描述. 我们不妨考虑某一容器中一定质量的某种气体, 经验告诉我们, 关于它的状态, 我们可以问的是: 压强是多少, 它的体积有多大, 温度有多高. 因此它的状态可以用压强 p 、体积 V 、温度 T 来描述. 这是一种从系统的整体上对其状态进行的描述, 所用的物理量如 p 、 V 、 T 等, 称为宏观量. 当然, 我们也可以用位置、位移、速度、能量等作为微观量来描述某一个分子的状态. 这样, 我们研究热力学系统的方法就有宏观和微观两种, 前者称为热力学方法, 后者称为分子运动论的方法(也称为统计物理方法).

在不受外界影响的条件下, 系统的宏观性质不再随时间变化的状态称为平衡态, 否则就称为非平衡态.

系统处于平衡态, 所有宏观物理量都具有确定的值, 我们就可以选择其中几个物理量来描述平衡态, 这几个量称为状态参量. 压强 p 、体积 V 、温度 T 就是气体的状态参量.

温度是表示物体冷热程度的物理量. 凡是跟温度有关的现象均称为热现象. 热现象是自然界中的一种普遍现象.

气体的体积 V 是指盛放气体的容器的容积, 国际单位制中, 体积的单位是 m^3 .

$$1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ L} = 10^6 \text{ cm}^3$$

气体的压强 p 是气体作用在容器的单位面积器壁上的平均压力, 单位是 Pa.

$$1 \text{ atm} = 76 \text{ cmHg} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133.3 \text{ Pa}$$

系统的状态发生改变时, 某些参量必然会发生变化, 显然系统平衡态的改变依赖于外界的影响(做功、传热). 如果气体从一个平衡态到另一个平衡态的时间足够长, 则每一个时刻都可以把此系统看成是处于平衡态. 我们把任一时刻都可以看成是平衡态的状态变化过程称为准静态过程. 我们所研究的状态变化过程一般都是准静态过程.

13.1.3 温标

温度的数值表示法称为温标. 建立温标的三要素是:

(1) 选择某种物质的一个随温度改变发生单调显著变化的属性来标志温度, 制作温度计. 例如液体温度计 $T(V)$, 电阻温度计 $T(R)$, 气体温度计 $T(p)$ 、 $T(V)$ 等. 这种选用某种测温物质的某一测温属性建立的温标称为经验温标.

(2) 规定固定点, 即选定某一易于复现的特定平衡态指定其温度值. 1954 年以前, 规定冰点为 0°C , 气点为 100°C , 其间等分 100 份, 从而构成旧摄氏温标. 1954 年以后, 国际上选定水的三相点为基本固定点(温度值规定为 273.16 K).

(3) 规定测温属性随温度变化的函数关系. 如果某种温标(例如气体温度计)选定为线性关系, 由于不同物质的同一属性或者同一物质的不同属性随温度变化的函数关系不会相同, 因而其他的温标就会出现非线性的函数关系.

例如,我们利用水银和酒精的热胀冷缩的性质,可以制成两种温度计,可以一大气压水的冰点定为 0°C ,一大气压水的沸点定为 100°C ,并都把 0 刻度与 100 刻度之间均匀等分成同数量的刻度,若用这两种温度计去测量同一环境的温度(大于 0°C 小于 100°C),这两个的温度计的示数也不一定相同。

国际上规定热力学温标为基本温标,它完全不依赖于任何测温物质的性质,能在整个测温范围内采用,具有“绝对”的意义,有时称它为绝对温度。

摄氏温标和热力学温标关系: $t = T - 273.15$

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 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,已测出薄层的面积为 0.2 m^2 .由此可估测油酸分子的直径为多少?

【解析】先算出 1 滴油酸酒精溶液中所含油酸的体积 V_0 ,再以单分子薄层的厚度与薄层面积的乘积为这滴油酸的体积 $V_0 = Sd$,这时单分子薄层的厚度 d 即为所求油酸分子的直径。

每滴油酸酒精溶液中所含油酸的体积:

$$V_0 = \frac{1 \times 10^{-6}}{50 \times 200} \text{ m}^3$$

又 $V_0 = Sd$,则单分子薄层的厚度:

$$d = \frac{V_0}{S} = \frac{1 \times 10^{-6}}{50 \times 200 \times 0.2} \text{ m} = 5 \times 10^{-10} \text{ m}$$

此即为所求油酸分子的直径。

【点评】本题介绍了测油酸分子直径的具体方法——油膜法.这也是另外一种估算液体分子直径的思路。

例 2 试估算地球大气的总质量 M 和总分子数 N .

【解析】作为近似计算,可以建立这样的模型:地球表面的大气压强来源于空气的重力,由此结合地球表面的面积便可估算出地球大气的总质量 $M = \frac{F}{g} = \frac{p_0 S}{g}$.由地球大气的总质量及空气的摩尔质量可知地球大气的总摩尔数,乘以阿伏伽德罗常数即得地球大气总分子数, $N = \frac{M}{\mu} N_0$.

地面上的标准大气压强 $p_0 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$,地球半径 $r = 6.4 \times 10^6 \text{ m}$.所以地球表面积 $S = 4\pi r^2$,地球表面所受大气总的压力 $F = p_0 S$,它应等于地球大气的重力:

$$M = \frac{p_0 S}{g} = \frac{1.01 \times 10^5 \times 4 \times 3.14 \times (6.4 \times 10^6)^2}{9.8} \text{ kg} = 5.3 \times 10^{18} \text{ kg}$$

空气的摩尔质量约为 $\mu = 29 \text{ g/mol}$,地球大气的总摩尔数为 M/μ .因此地球大气的总分子数:

$$N = \frac{M}{\mu} N_0 = \frac{5.3 \times 10^{18} \times 6.0 \times 10^{23}}{29 \times 10^{-3}} = 1.1 \times 10^{44}$$

【点评】本题把所学的物理知识与实际问题联系起来,是一道典型的估算问题。

● 强化训练 ●

1. 设某人的肺活量为 $4\ 000\text{ mL}$,试估算在此人一次吸气过程中,有多少个分子是他在一年

前的一次呼气过程中呼出的?

【解析】因大气压强可以看成是由大气重量产生,故地球大气层的总质量:

$$m = \frac{G}{g} = \frac{p_0 \cdot 4\pi R^2}{g} = 10^5 \times \frac{4\pi \times (6.4 \times 10^6)^2}{10} = 5.14 \times 10^{18} \text{ kg}$$

标准状况下,大气层占据的总体积:

$$V = \frac{mV_0}{\mu} = 5.14 \times 10^{18} \times \frac{22.4 \times 10^3}{0.029} \text{ mL} = 4 \times 10^{24} \text{ mL}$$

人呼出的一口气经一年时间在大气层中占据的比率为:

$$n = \frac{V'}{V} = 1 \times 10^{-21}$$

一年后吸一口气中有:

$$n' = 1 \times 10^{-21} \times 4 \times 6.02 \times 10^{23} / 22.4 \approx 107.5 \approx 107$$

即有约 107 个分子是他一年前呼出的.

【点评】初看本题似乎根本无从下手,但仔细揣摩题意可知一年时间内可认为原来呼出的那口气已充分混合于大气层中,算出这口气在整个大气层中所占的比例,即可求出问题的结果.解本题的关键是要合理地建立起模型,并将实际问题理想化.

2. 一滴体积为 V 的油酸,配制成体积比为 $1:k(k \gg 1)$ 的油酸溶液,现取该油酸溶液一滴滴在水面上,在水面上形成面积为 S 的单分子油膜,已知油酸的密度为 ρ ,摩尔质量为 M . 请据此推算阿伏伽德罗常数的表达式.

【解析】设油酸分子的直径为 d $\frac{1}{k} \cdot V = Sd$ (1)

油酸分子的体积为 $V_0 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3$ (2)

1 mol 油酸中的分子数 $N_A = \frac{M}{\rho V_0}$ (3)

由(1)、(2)、(3)得:

$$N_A = \frac{6k^3 S^3 M}{\pi \rho V^3}$$

3. 气体分子的直径约为 $2 \times 10^{-10} \text{ m}$,试估算标准状况下邻近气体分子间的平均距离 L 与分子直径 d 的比值(取两位有效数字)($N_0 = 6.0 \times 10^{23} / \text{mol}$).

【解析】气体分子间的平均距离比各气体分子本身的大小大得多,它们不是一个挨一个地排列的,中间有较大的空隙,可以把气体分子在体积 V 中平均占据的小立方体体积看成为一个气体分子的体积,气体分子占据此小立方体中心,所以相邻气体分子间的平均距离即为该小立方体的边长 l . 解题的关键是求出体积 V 中每个分子占据的小立方体体积.

标准状况下,1 mol 气体体积 $V = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,每个分子平均占有体积 $\frac{V}{N_0}$,所以邻近分子间平均距离:

$$l = \left(\frac{V}{N_0}\right)^{\frac{1}{3}}$$

气体分子直径 $d = 2 \times 10^{-10} \text{ m}$,所以分子间的平均距离与分子直径之比为:

$$\frac{l}{d} = \frac{(V/N_0)^{1/3}}{d} = \frac{[22.4 \times 10^{-3} / (6.0 \times 10^{23})]^{\frac{1}{3}}}{2 \times 10^{-10}} = 17$$

【点评】估算题可以培养和提高学生思维能力和分析能力,估算不纯粹是一种数学方法,而是充分利用物理知识,把握问题的本质,抓住主要数量关系,忽略次要因素进行的快速数量级的计算。

4. 用放大倍数为 600 倍的显微镜观察布朗运动. 估计放大后的小颗粒(碳)体积为 $0.1 \times 10^{-9} \text{ m}^3$, 碳的密度是 $2.25 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 摩尔质量是 $1.2 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$, 阿伏伽德罗常数为 $6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, 则该小碳粒含分子数约为多少个? (取一位有效数字)

【解析】设小颗粒边长为 a , 放大 600 倍后, 则其体积为 $(600a)^3 = 0.1 \times 10^{-9} \text{ m}^3$, 所以小颗粒的实际体积:

$$V = a^3 = 0.1 \times 10^{-9} / (600)^3 \text{ m}^3 = 10^{-16} / 216 \text{ m}^3$$

则颗粒实际质量为:

$$m = \rho V = 2.25 \times 10^3 \times 10^{-16} / 216 \text{ kg} = \frac{25}{24} \times 10^{-15} \text{ kg}$$

摩尔数 $n = \frac{m}{M}$, 所以小颗粒所含分子数:

$$N = nN_A = \frac{\frac{25}{24} \times 10^{-15}}{1.2 \times 10^{-2}} \times 6.0 \times 10^{23} = 5 \times 10^{10} \text{ (个)}$$

5. 如果白银原子具有动能 $E_k = 10^{-17} \text{ J}$, 大量银原子以此动能撞向容器壁时对器壁产生的压强为 $p = 0.1 \text{ Pa}$, 试问器壁的白银覆盖的厚度将以多大速率增长? 白银的相对原子质量 $A = 108$, 密度 $\rho = 10.5 \text{ g/cm}^3$. (银原子撞向器壁后不再弹回)

【解析】在 Δt 时间内撞击器壁单位面积 ΔS 上的粒子数 $N = v\Delta t \cdot \Delta S \cdot n_0$, n_0 是粒子数密度, v 为银原子定向运动速率, 压强:

$$p = \frac{Nf}{\Delta S} = \frac{N}{\Delta S} \cdot \frac{mv}{\Delta t} = n_0 mv^2$$

m 为每个银原子质量, 银质量:

$$M = N \cdot m = v\Delta t \Delta S \cdot n_0 \cdot m$$

设白银覆盖层增厚速率为 v' ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 则:

$$M = v' \cdot \Delta t \cdot \Delta S \cdot \rho$$

由: $v' \cdot \Delta t \cdot \Delta S \cdot \rho = v\Delta t \Delta S n_0 m$

得

$$\begin{aligned} v' &= \frac{m}{\rho} n_0 v = \frac{mv}{\rho} \cdot \frac{p}{mv^2} = \frac{p}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{m}{2E_k}} \\ &= \frac{p}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{A}{2E_k \cdot N_A}} = 9 \times 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

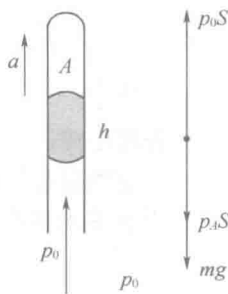
6. 如图所示, 试管以加速度 a 向上做匀加速直线运动时, 水银柱与试管保持相对静止, 水银柱的长度为 h , 大气压为 p_0 . 求试管中气体 A 的压强.

【解析】我们依然采用受力分析的方法, 通过求力之间的关系来确定压强之间的关系.

以水银柱为研究对象, 其受力如图所示, 根据牛顿第二定律得:

$$p_0 S - (p_A S + mg) = ma$$

利用 $V = Sh$, $m = \rho V$ 得



$$p_A = p_0 - \rho(g+a)h$$

如果以厘米汞柱为单位,则可写为:

$$p_A = p_0 - h(g+a)/g$$

§ 13.2 气体实验定律

13.2.1 玻意耳定律

一定质量的气体,当温度保持不变时,它的压强和体积的乘积是一个常数.这就是玻意耳定律.

用 p 表示气体的压强,用 V 表示气体的体积,有:

$$pV = C$$

上式中常数 C 由气体的种类、质量和温度决定.

玻意耳定律是一个实验定律,其适用的范围是温度不太低,压强不太高.当压强为 p_1 时的体积为 V_1 ,压强为 p_2 时的体积为 V_2 ,则有:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

13.2.2 盖-吕萨克定律

一定质量的气体,当压强保持不变时,温度每升高 1°C ,其体积的增加量等于 0°C 时体积的 $\frac{1}{273}$.这就是盖-吕萨克定律.

若用 V_0 表示 0°C 时气体的体积, V 表示 $t^\circ\text{C}$ 的体积,则 $V = V_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right)$.若采用热力学温标,则 $273+t$ 为 $t^\circ\text{C}$ 所对应的热力学温度 T , 273 为 0°C 所对应的热力学温度 T_0 .于是,盖-吕萨克定律可写成 $\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}$.若温度为 T 时,体积为 V_1 ;温度为 T_2 时,体积为 V_2 ,则有:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \text{ 或 } \frac{V}{T} = C.$$

故盖-吕萨克定律也可表达为:

一定质量的气体,当压强保持不变时,它的体积与热力学温标成正比.

13.2.3 查理定律

一定质量的气体,当体积保持不变时,温度每升高 1°C ,其压强的增加量等于 0°C 时压强的 $\frac{1}{273}$.这就是查理定律.

若用 p_0 表示 0°C 时气体的压强, p 表示 $t^\circ\text{C}$ 的压强,则 $p = p_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right)$.

查理定律还可以表述为:

一定质量的气体,当体积保持不变时,它的压强与热力学温度成正比.

用 p 表示压强, T 表示热力学温度,则有:

$$\frac{p}{T} = C$$

上式中常数 C 由气体的种类、质量和体积决定。

三个实验定律,即:玻意耳定律、盖-吕萨克定律、查理定律只能反映实验范围内的客观事实,它们都具有一定的近似性和局限性。对于一般的气体,只有当压强不太大,温度不太低时,用三个定律求出的结果与实验数据才符合得很好。如果压强很大或温度很低时,用这三个定律求出的结果与实验结果就会有很大偏差。

能严格遵守三个气体实验定律的气体的理论模型称为理想气体。

13.2.4 理想气体温标

对于实际气体:

设 p 和 p_0 分别表示 t °C 和 0 °C 时气体压强,由查理定律:

$$p = p_0(1 + \alpha_p t)$$

$$\alpha_p \approx \frac{1}{273.15 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

设 V 和 V_0 分别表示 t °C 和 0 °C 时气体的体积,由盖-吕萨克定律:

$$V = V_0(1 + \alpha_v t)$$

$$\alpha_v \approx \frac{1}{273.15 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

对于理想气体,有:

$$\alpha_p = \alpha_v = \frac{1}{273.15 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

定容气体温度计是利用其测温泡内气体压强的大小来标志温度的高低的。

$$T(p) = \alpha p$$

α 是比例系数,对水的三相点(我们将在第十五章对三相点作更详细的研究)有:

$$T_3 = \alpha p_3 = 273.15 \text{ K}$$

p_3 是 273.15 K 时定容测温泡内气体的压强,于是:

$$T(p) = 273.15 \frac{p}{p_3} \quad (1)$$

同样,对于定压气体温度计有:

$$T(V) = 273.15 \frac{V}{V_3} \quad (2)$$

V_3 是 273.15 K 时定压测温泡内气体的体积。

用不同温度计测量同一物体的温度,除固定点温度外,其值并不相等。对于气体温度计也有 $T(p) \neq T(V)$ 。但是当测温泡内气体的压强趋于零时,所有气体温度计,无论用什么气体,无论是定容式的还是定压式的,所测温度值的差别消失而趋于一个共同的极限值,这个极限值就是理想气体温标的值,单位为 K,定义式为:

$$T = \lim_{p \rightarrow 0} T(V) = \lim_{p \rightarrow 0} T(p) = 273.15 \text{ K} \lim_{p \rightarrow 0} \frac{V}{V_3} = 273.15 \text{ K} \lim_{p \rightarrow 0} \frac{p}{p_3} \quad (3)$$

13.2.5 热力学温标

理想气体温标虽与气体个性无关,但它依赖于气体共性即理想气体的性质。利用气体温度计通过实验与外推相结合的方法可以实现理想气体温标。但其测温范围有限(1 K ~ 1 273.15 K), $T < 1 \text{ K}$, 气体早都已液化,理想气体温标也就失去意义。国际上规定热力学温标为基本温标,它

完全不依赖于任何测温物质的性质,能在整个测温范围内采用,具有“绝对”的意义,有时称它为绝对温度.在理想气体温标适用的范围内,热力学温标与理想气体温标是一致的,因而可以不去区分它们,统一用 $T(\text{K})$ 表示.

国际上还规定摄氏温标由热力学温标导出.其关系式是:

$$t = T - 273.15 \quad (4)$$

这样,摄氏温标也与测温物质性质无关,能在整个测温范围内使用.目前已达到的最低温度为 $5 \times 10^{-8} \text{ K}$,但是绝对零度是不可能达到的.

13.2.6 理想气体状态方程及其推论

反映气体在平衡态下状态参量之间规律性联系的关系式称为气态方程.我们知道,理想气体状态方程可在气体实验定律的基础上得到,一定质量的理想气体的两平衡参量之间的关系式为:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (5)$$

在标准状态($p_0 = 1 \text{ atm}$, $T_0 = 273.15 \text{ K}$), 1 mol 任何气体的体积 $V_0 = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$. 因此 $\nu \text{ mol}$ 气体在标准状态下的体积为 $V = \nu V_0$, 由(5)式可以得出:

$$\frac{pV}{T} = \nu \frac{p_0 V_0}{T_0} = \nu R$$

由此得到理想气体状态方程或称克拉珀龙方程:

$$pV = \nu RT = \frac{m}{M} RT$$

式中 R 称为摩尔气体恒量,它表示 1 mol 气体在标准状况的 $\frac{pV}{T}$ 的值,其值为:

$$R = \frac{p_0 V_0}{T_0} = 8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

推论 1: 理想气体的压强公式: $p = nkT$ (6)

上式中 n 为气体分子数密度, k 为玻尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

证明如下:

理想气体状态方程: $pV = \nu RT = \frac{N}{N_A} RT = NkT$

得: $p = \frac{N}{V} kT$

上式中的 k 为玻尔兹曼常数:

$$k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

k 的物理意义: 1 个分子的 $\frac{pV}{T}$.

推论 2: 理想气体的密度方程: $\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2}$ (7)

证明如下:

由理想气体状态方程: $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M} R$

得:

$$\frac{p_1 V_1}{m T_1} = \frac{p_2 V_2}{m T_2}$$

所以

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2}$$

推论 3: 混合气体的状态方程:如果有 n 种理想气体,分开时的状态分别为 (p_1, V_1, T_1) , $(p_2, V_2, T_2), \dots, (p_n, V_n, T_n)$, 将它们混合起来后的状态为 p, V, T , 那么有:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2} + \dots + \frac{p_n V_n}{T_n} = \frac{p V}{T} \quad (8)$$

证明如下:

显然有混合气体的压强等于各组分的分压强之和,即:

$$p = \sum p_i \quad (9)$$

这实际上也叫做道尔顿分压原理.

对于其中的任一种气体,初状态为 (p_i, V_i, T_i) , 末状态为 (p_i, V, T) 气态方程为:

$$\sum \frac{p_i V_i}{T_i} = \sum \frac{p_i V}{T} \quad (10)$$

由(9)、(10)两式可得(8)式

$$\frac{p V}{T} = \sum \frac{p_i V_i}{T_i}$$

无论是同种还是异种理想气体,上式均成立.

如果是仅有两部分气体混合后再分成,则有:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{p'_1 V'_1}{T'_1} + \frac{p'_2 V'_2}{T'_2}$$

例 3 氧气瓶容积为 $3.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3$, 其中氧气压强为 $1.3 \times 10^7 \text{ Pa}$. 氧气厂规定压强降到 10^6 Pa 时就要重新充气. 设某实验室每天用 1 atm 的氧气 0.2 m^3 , 问在温度不变的情况下, 一瓶氧气能用多少天?

【解析】 设使用前前后瓶中氧气质量分别为 m_1, m_2 , 每天使用氧气质量为 m_3 . 则有

$$m_1 = \frac{M_{\text{mol}} p_1 V}{RT}$$

$$m_2 = \frac{M_{\text{mol}} p_2 V}{RT}$$

$$m_3 = \frac{M_{\text{mol}} p_3 V_3}{RT}$$

$$\text{可用天数: } N = \frac{m_1 - m_2}{m_3} = \frac{(p_1 - p_2)V}{p_3 V_3} = 19 \text{ 天}$$

例 4 一根两端封闭、粗细均匀的石英管, 竖直放置(图 13-3). 内有一段水银柱, 将管隔成上下两部分. 下方为空气, 上方为一种可分解的双原子分子气体. 该双原子分子气体的性质为: 当 $T > T_0$ 时, 其分子开始分解为单原子分子(仍为气体). 用 n_0 表示 T_0 时的双原子分子数, $\Delta \nu$ 表示 $T_0 + \Delta T$ 时分解了的双原子分子数, 其分解规律为当 ΔT 很小时, 有如下关系: $\frac{\Delta \nu}{\nu_0} = \frac{\Delta T}{T_0}$. 已知初始温度为 T_0 , 此时下方的气柱长度为 $2l_0$, 上方气柱长度为 l_0 , 水银柱产生的压强为下方气压的 α 倍 ($0 < \alpha < 1$). 试讨论当温



图 13-3

度由 T_0 开始缓慢上升时,水银柱将上升还是下降.

【解析】假设水银柱不动.当温度为 T_0 时,水银柱压强为 αp_0 ,故当 $T=T_0$ 时,上方气体压强为 $(1-\alpha)p_0$.下方气体压强为 p_0 ,温度升至 $T_0+\Delta T$,下方气体压强 $p_1=p_0\left(1+\frac{\Delta T}{T_0}\right)$.

对于上方气体: $(1-\alpha)p_0 l_0 S = \nu_0 RT$ (1)

当温度升至 $T_0+\Delta T$,有 $\Delta\nu$ 个双原子气体分子分解为 $2\Delta\nu$ 个单原子气体分子,故气体分子数由 ν_0 增至 $\nu_0+\Delta\nu$ 个.令此时压强为 p_2 ,管横截面积为 S ,则有:

$$p_2 l_0 S = (\nu_0 + \Delta\nu) R (T_0 + \Delta T) \quad (2)$$

解得: $p_2 = (1-\alpha)p_0 \left(1 + \frac{\Delta\nu}{\nu_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0}\right) = (1-\alpha)p_0 \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0}\right)^2$

上方气体压强增量: $\Delta p_2 = (1-\alpha)p_0 \left(2 + \frac{\Delta T}{T_0}\right) \cdot \frac{\Delta T}{T_0}$

下方气体压强增量: $\Delta p_1 = p_1 - p_0 = p_0 \cdot \frac{\Delta T}{T_0}$

$$\Delta p = \Delta p_2 - \Delta p_1 = (1-2\alpha)p_0 \cdot \frac{\Delta T}{T_0} + (1-\alpha)p_0 \left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)^2$$

因 ΔT 很小,故 $\frac{\Delta T}{T_0}$ 项起主导作用,而 $\left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)^2$ 项的影响较之第一项要小得多,故分析如下:

① 当 $\frac{1}{2} < \alpha < 1$ 时, $\Delta p < 0$ 时,水银柱上升.

② 当 $0 < \alpha < \frac{1}{2}$, $\Delta p > 0$ 时,水银柱下降.

③ 当 $\alpha = \frac{1}{2}$, $\Delta p > 0$ 时,水银柱下降.

例 5 一球形热气球,其隔热很好的球皮连同吊篮等装载物的总质量为 300 kg.经加热后,气球膨胀到最大体积,此时它的直径为 18 m,球内外气体成分相同,而球内气体压强与大气压近似相等,试估算刚好能使热气球上升时球内空气的温度.已知此时大气温度为 27°C ,压强为 1 atm,在标准状况下空气的密度为 1.3 kg/m^3 .

【解析】设热气球的容积为 V , $T_1=27^\circ\text{C}$ 时的空气密度为 ρ_1 ,到刚好能使热气球上升的温度为 T_2 时的空气的密度为 ρ_2 ,则

$$(\rho_1 - \rho_2)Vg = mg$$

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_0}{\rho_0 T_0}$$

$$\frac{p_2}{\rho_2 T_2} = \frac{p_0}{\rho_0 T_0}$$

由以上各式可以解得:

$$T_2 = 54^\circ\text{C}$$

例 6 简单抽气机的构造如图 13-4 所示,它由一个活塞和两个阀门组成.当活塞向上提升时,a 阀门打开,贮气筒与抽气机相通,气体膨胀减压,此时 b 阀门被关闭.当活塞向下压缩时,b 阀门打开,a 阀门关闭,抽气机内的气体被压出抽气机,完成一次抽气.贮气筒被抽气的过程,贮气筒内气体质量不断在减小,气体压强也不断减小.已知贮气筒的容积为 V ,筒内的压强为 p ,抽气机的容积

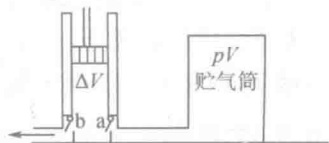


图 13-4

为 ΔV , 求经过 n 次抽气后的压强.

【解析】 设第一次抽气后贮气筒内气压为 p_1 , 第 n 次抽气后贮气筒内气压为 p_n .

则有:

$$pV = p_1(V + \Delta V)$$

$$p_1V = p_2(V + \Delta V)$$

$$p_{n-1}V = p_n(V + \Delta V)$$

整理得

$$p_n = \left(\frac{V}{V + \Delta V} \right)^n p$$

【总结】 简单压气机与抽气机的结构相似, 但作用相反, 如图 13-5 所示.

当活塞上提时, b 阀门打开, a 阀门关闭, 外界空气进入压气机中, 活塞下压时, 压气机内空气被压入贮气筒, 而此时阀门 b 是关闭的, 这就完成了一次压气过程. 每次压气机压入贮气筒的气体是 $p_0\Delta V$.

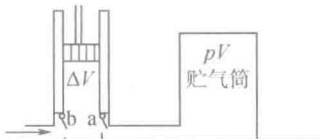


图 13-5

故
$$p_n = p + \frac{\nu p_0 \Delta V}{V}$$

例 7 一根一端封闭的玻璃管长 96 cm, 内有一段 20 cm 的水银柱. 当温度为 27°C 且开口端向上时, 被封闭的气柱长 60 cm. 试问温度至少为多少度, 水银柱才可从管中全部溢出.

【解析】 设气体温度为 T 时, 管内的水银柱高度为 x , $x < 20$ cm, 大气压强 $p_0 = 76$ cmHg.

$$\frac{(76+20) \times 60}{300} = \frac{(76+x)(96-x)}{T_2} \quad (1)$$

得到:
$$x^2 - 20x - \left(76 \times 96 - \frac{96}{5} T_2 \right) = 0 \quad (2)$$

其中 p 以“cmHg”为单位, 长度以“cm”为单位.

要求 x 有实数解的条件:

$$400 + 4 \times \left(76 \times 96 - \frac{96}{5} T_2 \right) \geq 0$$

可见 $T_2 \leq 385.2$ K, $x \geq 10$ cm 时, 管内气体可以形成平衡状态. 反之, $T > T_2$ 因而 $x < 10$ cm 时, 管内气体压强总是 $(76+x)$ cmHg, (1) 式不再成立, 平衡态无法建立而导致非平衡状态, 水银柱将全部溢出.

● 强化训练 ●

7. 估算在室温下, 真空度达到 1×10^{-8} mm 汞柱高时, 容器内空气分子间的平均距离(取一位有效数字即可).

【解析】 本题给出的条件为“室温”, 取值可在常规范围内任选, 故可选室温为 0°C , 分子数量设为 1 mol. 则在一大气压下, 有 $V_0 = 22.4 \times 10^{-3}$ m³ 的体积. 所以在压强为 $p = 10^{-8}$ mmHg 时, 它应有体积 $V = \frac{p_0 V_0}{p}$, 则每个分子所占的体积为:

$$V_x = \frac{V}{N_A} = \frac{p_0 V_0}{p N_A} = \frac{760 \times 22.4 \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-8} \times 6.0 \times 10^{23}} \text{ m}^3 = 2.84 \times 10^{-15} \text{ m}^3$$

分子间距离为
$$l = (V_x)^{\frac{1}{3}} = 1 \times 10^{-5} \text{ m}$$