



高等学校理工类课程学习辅导丛书



面向21世纪课程教材学习辅导书

普通物理学教程 热 学

第三版

习题思考题解题指导

秦允豪



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是面向 21 世纪课程教材、普通高等教育“十一五”国家级规划教材《普通物理学教程 热学（第三版）》（秦允豪编）的配套辅导书。全书共分为六章，每章由基本概念和基本要求、解题指导和习题解答、补充习题及其解答、思考题参考解答四部分组成，对主教材的全部习题和全部思考题给出了完整解答（除个别简单的习题仅给出答案）。本书还补充了一些比较难的习题及解答，不少习题选自美国、英国、苏联等国的一流大学以及国内高校的研究生入学试题，对学习“热学”课程和报考研究生的读者非常有实用价值。

本书可供学习“热学”课程的学生选用，也可供其他相关课程的师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

普通物理学教程 热学（第三版）习题思考题解题指导
/ 秦允豪编. — 北京：高等教育出版社，2012.2

ISBN 978-7-04-034108-9

I. ①普… II. ①秦… III. ①热学—高等学校—题解
IV. ①O551.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 000045 号

策划编辑 程福平
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 程福平
责任校对 陈旭颖

封面设计 杨立新
责任印制 田 甜

版式设计 范晓红

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京鑫海金澳胶印有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 17.75
字 数 320 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2012 年 2 月第 1 版
印 次 2012 年 2 月第 1 次印刷
定 价 26.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 34108-00

前言

本书是面向 21 世纪课程教材、普通高等教育“十一五”国家级规划教材《普通物理学教程 热学（第三版）》（秦允豪编）的配套辅导书。主教材第三版被评为“2011 年度普通高等教育精品教材”，其第一版是面向 21 世纪课程教材、“九五”国家级重点教材，曾获得国家级优秀教材二等奖。编者使用主教材第二版讲授的“热学”课程于 2005 年被评为国家精品课程。

该书既继承我国传统物理教学严谨扎实的传统，又注意避免传统教学深而窄、不太注重实际的短处，力求体现“实、新、宽、活”四大特点，受到冯端院士、赵凯华教授等知名专家和同行的认可，以及广大学生的好评。

本书的习题和思考题涉猎面广、生动活泼并且联系实际，这是该书的一大亮点。不少习题选自美国、英国、苏联等一流大学的博士生资格考试试题和国内大学的研究生入学试题。

书中大部分思考题是编者近 50 年来教学经验的总结与积累，其中很多都曾经在编者的课堂讨论中选为讨论题，书中对思考题的分析和参考解答实际上是多年来课堂讨论的结晶。它们能使学生针对一个个精心设计的问题进行深入而具体的思考，有的切中概念的误区及似是而非之处，目的是引导学生进行发散性思维，希望学生能针对所产生的分歧进行讨论。

我国传统教学模式主要是教师讲、学生听，教学中不太重视思考题，更不重视课堂讨论，缺乏充分发表个人见解及相互讨论的机会，不像美英等国的教育放得比较松，对于“胡思乱想”也统统鼓励。氢弹之父泰勒就是这样一个典型人物。杨振宁教授说：“泰勒的《物理学》有一个特点，他有许多直觉的见解，这些见解不一定是对的，恐怕 90% 是错的，不过没有关系，只需要 10% 是对的就行了。而他不怕他讲的见解是错的，这给我很深的印象”。讨论也必须在互相帮助、相互信任的气氛中自由地、无拘无束地进行。实际上学生对思考题进行深入思考并且讨论，不仅能使学生更深入地理解、牢固地掌握基本概念，也是培养学生分析和解决实际问题能力的十分有效的手段，同时十分有利于学生的创新能力的培养。在物理（特别是“热学”课程）教学中，思考题应该占据比较重要的地位。鉴于上述考虑，编者从 1984 年开始主讲的

“热学”课中均开设课堂讨论，每学期2~3次，每次2小时，教师再讲评2小时，讨论时不设组长，教师巡回于各小组之间启发引导。讨论题全部选自教材中思考题。以赵凯华教授为首的专家组对编者所主持的“热学课程改革与建设”成果所作的鉴定书中指出：“采用启发式、讨论式的教学方法，精心组织各教学环节，启发、引导学生独立思考，发挥学生科学想象力，针对学生长期形成的缺乏相互研讨习惯的弱点，精心设计课堂讨论。由于讨论课能启发学生积极思考，使学生能很快进入‘角色’，在讨论中又重视发挥教师启发引导作用，充分调动学生的主动性与积极性，不少学生写出了小论文。学生普遍反映，课堂讨论效果好、收获大、兴趣浓”。鉴定书中还指出：“热学课有利于学生从单纯的学习接受型向分析研究型的转变”。

本书的每一章基本上由四部分组成：(1)基本概念和基本要求；(2)解题指导和习题解答；(3)补充习题及其解答；(4)思考题参考解答。本书对主教材中的所有193道习题都给出了解答及分析和解题指导，同时补充了21个比较难的习题及其解答和解题指导。本书也对所有137道思考题给出了详细的参考解答。

本书可供学习“热学”课程的学生作为参考书，对于讲授和学习大学物理课程的教师和学生也有很好的参考价值。准备研究生入学考试的学生可选用本书作为备考指导。

由于本人学识能力有限，书中难免一些不当之处，特别是思考题，其解答往往见仁见智，故恳请读者多多批评指正。

本书在出版过程中得到高等教育出版社杨再石、钟金城、刘伟、程福平先生的帮助和支持，在此表示感谢！

秦允豪

2011年11月

郑重声明

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

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第一章 导论	1
§ 1.1 基本概念和基本要求	1
§ 1.2 解题指导和习题解答	3
§ 1.3 补充习题及其解答	24
§ 1.4 思考题参考解答	28
第二章 分子动理学理论的平衡态理论	42
§ 2.1 基本概念和基本要求	42
§ 2.2 解题指导和习题解答	43
§ 2.3 补充习题及其解答	73
§ 2.4 思考题参考解答	81
第三章 输运现象与分子动理学理论的非平衡态理论	98
§ 3.1 基本概念和基本要求	98
§ 3.2 解题指导和习题解答	98
§ 3.3 补充习题及其解答	124
§ 3.4 思考题参考解答	135
第四章 热力学第一定律	142
§ 4.1 基本概念和基本要求	142
§ 4.2 解题指导和习题解答	145
§ 4.3 补充习题及其解答	178
§ 4.4 思考题参考解答	182
第五章 热力学第二定律与熵	193
§ 5.1 基本概念和基本要求	193
§ 5.2 解题指导和习题解答	195
§ 5.3 补充习题及其解答	208
§ 5.4 思考题参考解答	212

第六章 物态与相变	226
§ 6.1 基本概念和基本要求	226
§ 6.2 解题指导和习题解答	228
§ 6.3 思考题参考解答	251

第一章 导 论

§ 1.1 基本概念和基本要求

(一) 宏观描述方法与微观描述方法

知道热力学是热物理学的宏观理论，统计物理学则是热物理学的微观理论。

(二) 热力学系统的平衡态

(1) 知道热力学与力学的区别。热物理学中一般不考虑把系统作为一个整体的宏观的机械运动。若系统在做整体运动，通常把坐标系建立在运动的物体上。

(2) 理解平衡态的定义：在不受外界条件影响下，经过足够长时间后系统必将达到一个宏观上看来不随时间变化的状态，这种状态称为平衡态。

(3) 掌握判别是否处于平衡态的方法——看系统中是否存在热流与粒子流，或者看是否同时满足力学平衡条件（即系统内部各部分之间、系统与外界之间应达到力学平衡）、热学平衡条件（即系统内部的温度处处相等）和化学平衡条件（即在无外场作用下系统各部分的化学组成也应处处相同）。

(三) 温度

(1) 知道热力学第零定律的物理意义——互为热平衡的物体之间必存在一个相同的特征（它们的温度是相同的）。

(2) 知道温标是温度的数值表示法。知道经验温标的三个要素。

(3) 了解摄氏温标、理想气体温标和热力学温标。

(4) 知道国际上规定热力学温标为基本温标，一切温度测量最终都以热力学温标为准。虽然热力学温标只是一种理想化的温标，但它与理想气体温标是一致的。只要在理想气体温标适用的范围内，热力学温标就可通过理想气体温标来实现。

(四) 物态方程

(1) 知道处于平衡态的某种物质的热力学参量（如压强、体积、温度）之

间所满足的函数关系称为这种物质的物态方程, 或称状态方程. 物态方程中一般都显含温度 T .

(2) 熟练掌握理想气体物态方程. 知道能严格满足理想气体物态方程的气体被称为理想气体, 这是从宏观上对什么是理想气体做出的定义.

(五) 物质的微观模型

(1) 理解物质的微观模型的基本内容: ① 物质由大量分子组成; ② 分子(或原子)处于不停的无规则热运动中; ③ 分子间存在吸引力与排斥力.

(2) 了解布朗运动是如何形成的. * 简单了解涨落现象.

(六) 理想气体微观描述的初级理论

(1) 理解理想气体微观模型: ① 分子线度比分子平均间距小得多因而可忽略不计; ② 除碰撞一瞬间外, 分子间相互作用力可忽略不计, 分子在两次碰撞之间做匀速直线运动; ③ 处于平衡态的理想气体, 分子之间及分子与器壁间的碰撞是完全弹性碰撞, 即气体分子动能不因碰撞而损失, 在碰撞中动量守恒、动能守恒.

(2) 掌握洛施密特常量——标准状况下 1 m^3 理想气体中的分子数

$$n_0 = 2.7 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}.$$

(3) 会对一些微观物理量(例如分子线度、分子质量、分子数密度等)进行数量级估计.

(4) 掌握单位时间内碰在单位面积器壁上的平均分子数(简称气体分子碰撞频率或气体分子碰壁数) $\Gamma \approx \frac{n\bar{v}}{6}$ 的推导过程和近似假定.

(5) 熟练掌握理想气体压强公式

$$p = \frac{1}{3}nm\overline{v^2} \quad \text{和} \quad p = nkT.$$

(6) 知道玻耳兹曼常量

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

(7) 熟练掌握理想气体分子热运动平均平动动能公式

$$\overline{\varepsilon_i} = \frac{m\overline{v^2}}{2} = \frac{3kT}{2}.$$

(8) 理解温度的微观意义——温度是平衡态系统中的微观粒子热运动程度强弱的量度.

(七) 分子间作用力势能与真实气体物态方程

(1) 了解分子间作用力曲线和分子间相互作用势能曲线. * 会利用它们来

简单分析分子间的对心碰撞等问题.

(2) 理解 1 mol 气体的范德瓦耳斯方程

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT.$$

知道它是在理想气体物态方程基础上对分子固有体积修正和分子吸引力修正以后得到的. 知道 1 mol 气体固有体积修正 b 是分子固有体积的 4 倍, 经过修正以后 b 前面取负号. 知道 1 mol 气体分子吸引力修正就是内压强 $\Delta p_i = \frac{a}{V_m^2}$, 经过修正以后 $\frac{a}{V_m^2}$ 前面取正号.

(3) 知道对于气体质量为 m , 气体摩尔质量为 M 的气体, 其范德瓦耳斯方程为

$$\left[p + \left(\frac{m}{M}\right)^2 \cdot \frac{a}{V_m^2}\right]\left(V_m - \frac{m}{M} \cdot b\right) = \frac{m}{M}RT.$$

§ 1.2 解题指导和习题解答

1.1.1 若可以通过高速计算机应用牛顿定律确定系统中一个分子的瞬时位置和瞬时速度, 假设计算一个分子所需要的时间是 10^{-6} s, 试估计若要计算出系统中所有的分子(10^{23} 个分子)的瞬时位置和瞬时速度需要多少年.

【答】 约 10^9 a(年).

【讨论】 我们看到, 计算系统中所有的分子(10^{23} 个分子)的瞬时位置和瞬时速度需要的时间的数量级仅比宇宙年龄的数量级小 1(宇宙的年龄大约是 1.6×10^{10} a), 可见微观系统中的粒子数非常多. 我们常把微观系统粒子数称为大数.

1.3.1 在什么温度下, 下列一对温标给出相同的读数(如果有的话):

(1) 华氏温标和摄氏温标; (2) 华氏温标和热力学温标; (3) 摄氏温标和热力学温标?

【提示】 利用 $t_F = \left(\frac{9}{5} \cdot \frac{t}{^\circ\text{C}} + 32\right) ^\circ\text{F}$, $t = \left(\frac{T}{\text{K}} - 273.15\right) ^\circ\text{C}$.

【答】 (1) $-40 ^\circ\text{C}$; (2) 575 K; (3) 没有.

1.3.2 定体气体温度计的测温泡浸在水的三相点槽内时, 其中气体的压强为 6.7×10^3 Pa.

(1) 用温度计测量 300 K 的温度时, 气体的压强是多少?

(2) 当气体的压强为 9.1×10^3 Pa 时, 待测温度是多少?

【提示】 $p_{tr} = 6.7 \times 10^3 \text{ Pa}$. 利用如下公式进行计算:

$$T(p) = \frac{p}{p_{tr}} \cdot 273.16 \text{ K} \quad (\text{体积不变}).$$

【答】 (1) $7.4 \times 10^3 \text{ Pa}$; (2) 371 K .

1.3.3 用定体气体温度计测得冰点的理想气体温度为 273.15 K , 试求温度计内的气体在冰点时的压强与该气体在水的三相点时的压强之比的极限值.

【解】 利用公式

$$T = 273.15 \text{ K} = \lim_{p_{tr} \rightarrow 0} \frac{p}{p_{tr}} \times 273.16 \text{ K},$$

可得
$$\lim_{p_{tr} \rightarrow 0} \frac{p}{p_{tr}} = \frac{273.15}{273.16} = 0.999\ 96.$$

1.3.4 有一支液体温度计, 在 $0.101\ 3 \text{ MPa}$ 下, 把它放在冰水混合物中的示数为 $t_0 = -0.3 \text{ }^\circ\text{C}$; 在沸腾的水中的示数为 $t_0 = 101.4 \text{ }^\circ\text{C}$. 试问放在真实温度为 $66.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 的沸腾的甲醇中的示数是多少? 若用这支温度计测得乙醚沸点时的示数为 $34.7 \text{ }^\circ\text{C}$, 则乙醚沸点的真实温度是多少? 在多大一个测量范围内, 这支温度计的读数可认为是准确的? (估读到 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$)

【解】 (1) 设该温度计在沸腾的甲醇中的示数为 t' , 则

$$\frac{t' + 0.3 \text{ }^\circ\text{C}}{(101.4 + 0.3) \text{ }^\circ\text{C}} = \frac{66.9 \text{ }^\circ\text{C}}{100.0 \text{ }^\circ\text{C}},$$

解得

$$t' = 67.7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

(2) 设乙醚的真实沸点是 t , 则有

$$\frac{34.7 + 0.3}{101.4 + 0.3} = \frac{t}{100.0 \text{ }^\circ\text{C}},$$

解得

$$t = 34.4 \text{ }^\circ\text{C},$$

(3) 若一待测物体的真实温度为 t , 而用这支没有校准的温度计测出的温度是 t' . t 和 t' 应满足如下关系

$$\frac{t' + 0.3 \text{ }^\circ\text{C}}{(101.4 + 0.3) \text{ }^\circ\text{C}} = \frac{t}{100.0 \text{ }^\circ\text{C}},$$

两边同减 $\frac{t}{101.7 \text{ }^\circ\text{C}}$, 有

$$\frac{t' - t}{101.7 \text{ }^\circ\text{C}} + \frac{0.3 \text{ }^\circ\text{C}}{101.7 \text{ }^\circ\text{C}} = t \left(\frac{1}{100.0 \text{ }^\circ\text{C}} - \frac{1}{101.7 \text{ }^\circ\text{C}} \right),$$

从而可化为

$$t' - t = t \left(\frac{101.7}{100.0} - 1 \right) - 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1)$$

由于本题要求温度计的读数准确的估读到 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，令

$$-0.1 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t' - t \leq 0.1 \text{ } ^\circ\text{C},$$

则有

$$t' - t = t \left(\frac{101.7}{100.0} - 1 \right) - 0.3 \text{ } ^\circ\text{C} \leq 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

$$-0.1 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t' - t = t \left(\frac{101.7}{100.0} - 1 \right) - 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3)$$

由(2)式、(3)式可以得到

$$11.8 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t \leq 23.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

该读数可认为准确。

1.3.5 国际实用温标(1990年)规定：用于 13.803 K (平衡氢的三相点)到 $961.78 \text{ } ^\circ\text{C}$ (银在 0.101 MPa 下的凝固点)的标准测量仪器是铂电阻温度计。

设铂电阻在 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 及温度为 t 时电阻的值分别为 R_0 及 $R(t)$ ，定义 $W(t) = \frac{R(t)}{R_0}$ ，

且在不同测温区内 $W(t)$ 对 t 的函数关系是不同的，在上述测温范围内大致有

$$W(t) = 1 + At + Bt^2.$$

若在 0.101 MPa 下，对应于冰的熔点、水的沸点、硫的沸点(温度为 $444.67 \text{ } ^\circ\text{C}$)电阻的阻值分别为 $11.000 \text{ } \Omega$ ， $15.247 \text{ } \Omega$ ， $28.887 \text{ } \Omega$ ，试确定上式中的常量 A 和 B 。

【分析】 本题所给方程中有 R_0 ， A 和 B 共三个未知量，但是已经给出了冰的熔点、水的沸点、硫的沸点三个温度下铂电阻温度计所测量出的电阻值，这样可以列出三个独立方程，从而解出 A 和 B 。

【答】 $A = 3.920 \times 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$ ， $B = -5.919 \times 10^{-7} (^\circ\text{C})^{-2}$ 。

1.3.6 某种碳电阻温度计的电阻 R' 满足下述方程：

$$\sqrt{\lg \frac{R'}{T}} = a + b \lg R',$$

其中 R' 的单位为 Ω ， T 的单位为 K ， $a = -1.16$ ， $b = 0.675$ 。若该电阻置于液氮恒温器中时所测出的阻值为 $1000 \text{ } \Omega$ ，试问恒温器中的温度是多少？

【解】 将上述数值代入可以得到 $T = 4.01 \text{ K}$ 。

1.4.1 要使一根钢棒在任何温度下都要比另一根铜棒长 5 cm ，试问它们在 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时的长度 l_{01} 及 l_{02} 分别是多少？已知钢棒及铜棒的线膨胀系数分别为 $\alpha_1 = 1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ， $\alpha_2 = 1.6 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。

【分析】 按照线膨胀公式，有

$$l_1 = l_{01}(1 + \alpha_1 t), \quad l_2 = l_{02}(1 + \alpha_2 t). \quad (1)$$

把(1)式中的两个式子相减, 得

$$l_1 - l_2 = (l_{01} - l_{02}) + (l_{01}\alpha_1 - l_{02}\alpha_2)t. \quad (2)$$

要使得(2)式和 t 无关, 应该有

$$l_{01}\alpha_1 - l_{02}\alpha_2 = 0.$$

【答】 $l_{01} = 20 \text{ cm}$, $l_{02} = 15 \text{ cm}$.

1.4.2 一个双金属片由线膨胀系数为 α_1 和 α_2 的两个金属片组成. 此两金属片的厚度均为 d , 在温度 T_0 时长度均为 L_0 . 当温度改变了 ΔT 时, 它们可以共同弯曲, 呈圆弧状, 证明此弧的曲率半径 R 近似为

$$R = \frac{d}{(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T}.$$

【解】 令

$$R_1 = R - \frac{d}{2} \quad (1)$$

$$R_2 = R + \frac{d}{2} \quad (2)$$

分别表示两个金属片的平均半径, 并令两个金属片弧所对应的公共圆心角为 θ , 则

$$L_0 = R\theta \quad (3)$$

$$L_1 = R_1\theta \quad (4)$$

$$L_2 = R_2\theta \quad (5)$$

设在温度 273 K 时两种金属的长度分别为 $L_1(0)$ 和 $L_2(0)$, 则在温度 T_0 时的长度均为 L_0 , 根据线膨胀公式, 有

$$L_0 = L_1(0)[1 + \alpha_1(T_0 - 273 \text{ K})] \quad (6)$$

$$L_0 = L_2(0)[1 + \alpha_2(T_0 - 273 \text{ K})]$$

我们知道, 在温度 $T_0 + \Delta T$ 时的二金属片长度分别为 L_1 , L_2 , 所以

$$L_1 = L_1(0)[1 + \alpha_1(T_0 + \Delta T - 273 \text{ K})] \quad (7)$$

$$L_2 = L_2(0)[1 + \alpha_2(T_0 + \Delta T - 273 \text{ K})] \quad (8)$$

上面总共有 8 个方程式, 其未知量有

$$R_1, R_2, R, \theta, L_1, L_2, L_1(0), L_2(0)$$

也是 8 个, 所以可以从中解出 R 为

$$R = \frac{d}{(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T}$$

1.4.3 试求氧气在压强为 0.1 MPa、温度为 27 °C 时的密度.

【解】 根据理想气体物态方程

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad (1)$$

利用(1)式可以把密度表示为

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (2)$$

把氧气的摩尔质量 $M = 0.032 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, $p = 0.1 \text{ MPa}$, $T = 273 \text{ K}$ 以及 R 的数值代入, 可以得到氧气的密度为

$$\rho = 1.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

1.4.4 一个带有塞子的烧瓶, 体积为 $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, 内盛 0.1 MPa 、 300 K 的氧气. 系统加热到 400 K 时塞子被顶开, 立即盖好塞子并且停止加热, 烧瓶又逐渐降温到 300 K . 设外界气体压强始终为 0.1 MPa . 试问: (1) 瓶中所剩氧气压强是多少? (2) 瓶中所剩氧气质量是多少?

【分析】 塞子被顶开之前, 气体经历的是定质量气体的等体升温过程. 从塞子被顶开到盖上塞子的很短时间内, 烧瓶中部分气体很快冲出, 在此过程中气体质量是减少的, 一直到气体压强和外界压强相等并且达到新的平衡态为止, 这个平衡态的温度是 400 K . 因为过程进行得非常迅速, 热量来不及向外界传递, 第二个过程是非平衡态绝热过程. 第三个过程是定质量气体的等体降温过程.

【解】 (1) 设开始时瓶中氧气状态为

$$p_1 = 0.1 \text{ MPa}, V = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3, T_1 = 300 \text{ K}$$

烧瓶被加热到 $T_2 = 400 \text{ K}$ 的温度时的压强为

$$p_2 = \frac{400}{300} \times 0.1 \text{ MPa} = 0.13 \text{ MPa}$$

在第二个过程中, 立即盖上塞子以后建立的新的平衡态的压强和外界压强相等 $p_3 = p_1 = 0.1 \text{ MPa}$, 其温度和该过程初态温度相等 $T_3 = T_2 = 400 \text{ K}$. 在第三个过程中, 烧瓶中的气体等体降温到 $T_4 = 300 \text{ K}$ 时建立的末态, 设其压强为 p_4

$$p_4 = \frac{T_4}{T_3} p_3 = 0.075 \text{ MPa}$$

(2) 设在第二个过程中烧瓶中所剩氧气质量为 $m_3 = m_4$, 氧气摩尔质量 $M = 0.032 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, 对于末态利用理想气体物态方程

$$p_4 V = \frac{m_4}{M} RT_4$$

$$m_4 = \frac{p_4 V}{RT_4} \times M = 0.0019 \text{ kg}$$

1.4.5 水银气压计 A 中混进了一个空气泡, 因此它的读数比实际的气压

小. 当精确的气压计的读数为 0.102 MPa 时, 它的读数只有 0.099 7 MPa, 此时管内水银面到管顶的距离为 80 mm. 问当此气压计的读数为 0.097 8 MPa 时, 实际气压应是多少? 设空气的温度保持不变.

【分析】 水银气压计中混进气泡以后, 管内流体的总压强等于管内气体压强和水银压强之和. 在外界大气压变化时, 管内气体满足等温条件.

【解】 设气压计管内横截面积为 S . 精确气压计管底到管顶间距离为 L , 当外界压强为 H , 温度为 T 时, 气压计中水银柱高度为 h_1 , 气柱体积为 $(L - h_1)S$, 该气柱内气体压强应该是 $H - h_1$ 汞柱高. 在外界温度不变, 但压强变为 p 时, 设水银柱高度变为 h , 这时气柱内气体压强应该是 $p - h$, 体积为 $(L - h)S$. 故按理想气体物态方程有

$$\frac{(H - h_1)(L - h_1) \cdot S}{T} = \frac{(p - h) \cdot (L - h) \cdot S}{T'},$$

$$p = (H - h_1) \cdot \frac{L - h_1}{L - h} + h. \quad (1)$$

现在

$$T = T',$$

$$H = \frac{0.102 \text{ MPa}}{133 \text{ Pa}} \text{ mm} = 767 \text{ mm}.$$

由于此时管内水银面到管顶的距离为 80 mm, 因而

$$L = 767 \text{ mm} + 80 \text{ mm} = 847 \text{ mm}.$$

同时, 有

$$h_1 = \frac{0.099 7 \text{ MPa}}{133 \text{ Pa}} \text{ mm} = 750 \text{ mm},$$

$$h = \frac{0.097 8 \text{ MPa}}{133 \text{ Pa}} \text{ mm} = 735 \text{ mm}.$$

把它们代入(1)式, 可得

$$p = 0.099 7 \text{ MPa}.$$

例 4.6 一抽气机转速 $\omega = 400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ (即转/分), 抽气机每分钟能抽出气体 20 L. 设容器的容积 $V = 2.0 \text{ L}$, 问经过多长时间后才能使容器内的压强由 0.101 MPa 降为 133 Pa, 设抽气过程中温度始终不变.

【分析】 抽气机每打开一次活门, 容器内气体的容积在等温条件下扩大了 ΔV , 因而压强有所降低. 活门关上以后容器内气体的容积仍然为 V . 下一次又如此变化, 从而建立递推关系.

【解】 因为抽气机转速 $\omega = 400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 每分钟能抽出气体 20 L, 所以每次抽出气体体积

$$\Delta V = \frac{20}{400} \text{ L} = 0.05 \text{ L}$$

而容器容积为 $V = 2.0 \text{ L}$, 设容器中气体的初始压强为 p_0 , 抽气体 n 次以后的气体压强为 p_n , 其中 $n = 1, 2, 3, \dots$. 由玻意耳定律得:

活塞运动第一次:

$$p_0 V = p_1 (V + \Delta V) \quad p_1 = \frac{V}{V + \Delta V} p_0$$

活塞运动第二次:

$$p_1 V = p_2 (V + \Delta V) \quad p_2 = \frac{V}{V + \Delta V} p_1 = \left(\frac{V}{V + \Delta V} \right)^2 p_0$$

以此类推可得活塞运动第 n 次:

$$p_{n-1} V = p_n (V + \Delta V) \quad p_n = p_0 \left(\frac{V}{V + \Delta V} \right)^n$$

则压强降低为 p_n 时的抽气次数

$$n = \frac{\ln \frac{p_n}{p_0}}{\ln \frac{V}{V + \Delta V}} \quad (1)$$

现在 $p_0 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, $p_n = 133 \text{ Pa}$, 将 V 和 ΔV 的数值代入(1)式, 可解得

$$n = 276.$$

而抽气时间

$$t = \left(\frac{276}{400} \right) \times 60 \text{ s} = 40 \text{ s}$$

1.4.7 在标准状态下给一气球充氢气. 此气球的体积可由外界压强的变化而改变. 充气完毕时该气球的体积为 566 m^3 , 而球皮体积可以忽略. (1) 若贮氢的气罐的体积为 $5.66 \times 10^{-2} \text{ m}^3$, 罐中氢气压强为 1.25 MPa , 且气罐与大气处于热平衡, 在充气过程中的温度变化可以不计, 试问要给上述气球充气需这样的贮气罐多少个? (2) 若球皮重量为 12.8 kg , 而某高度处的大气温度仍为 0°C , 试问气球上升到该高度时还能悬挂多重物品而不至坠下.

【分析】 (1) 按照给气球充气前后所充氢气的物质的量不变这一点列出方程. (2) 由于此气球的体积可由外界压强的变化而改变, 因而气球上升过程中可以自由膨胀, 始终维持气球内、外压强相等. 它所受到的浮力等于排开同体积空气的重量. 列出气球的力平衡方程.

【解】 (1) 设 $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$, $V_0 = 566 \text{ m}^3$,

$$p_1 = 1.25 \text{ MPa}, V_1 = 5.66 \times 10^{-2} \text{ m}^3,$$

贮气罐总共需要 n 个. 利用等温条件下的理想气体定律, 可以得到

$$p_1(nV_1) = p_0(V_0 + nV_1),$$

则

$$n = \frac{p_0 V_0}{(p_1 - p_0) V_1} = 870.$$

(2) 气球始终维持内、外压强相等. 它受到的浮力大小等于排开同体积空气所受到的重力

$$F = \frac{p_0 V_0 M_A g}{RT_0},$$

其中 M_A 是空气摩尔质量. 设气球中的氢气质量为 m_H , 则有

$$m_H = \frac{p_0 V_0 M_H}{RT_0},$$

其中 M_H 是氢气的摩尔质量.

设气球的球皮质量为 $m_{皮}$, 为不使气球坠下, 可挂重物的质量是

$$\begin{aligned} m_{重物} &= \frac{p_0 V_0 M_A}{RT_0} - m_{皮} - \frac{p_0 V_0 M_H}{RT_0} \\ &= \frac{p_0 V_0 (M_A - M_H)}{RT_0} - m_{皮} \\ &= 660.8 \text{ kg}. \end{aligned}$$

1.4.8 两个贮着空气的容器 A 和 B, 以备有活塞之细管相连接. 容器 A 浸入温度为 $t_1 = 100^\circ\text{C}$ 的水槽中, 容器 B 浸入温度为 $t_2 = -20^\circ\text{C}$ 的冷却剂中. 开始时, 两容器被细管中之活塞分隔开, 这时容器 A 及 B 中空气的压强分别为 $p_1 = 0.0533 \text{ MPa}$, $p_2 = 0.0200 \text{ MPa}$, 体积分别为 $V_1 = 0.25 \text{ L}$, $V_2 = 0.40 \text{ L}$. 试问把活塞打开后气体的压强是多少?

【分析】 把活塞打开后两容器中气体混合而达到新的力学平衡以后, A 和 B 中气体压强应该相等. 但是应注意到, 由于 A 和 B 的温度不相等, 所以整个系统仍然处于非平衡态. 我们不能把 A 和 B 气体的整体作为研究对象, 而应先把从 A 流入 B 的那部分气体作为研究对象, 求出它的物质的量, 然后按照混合前后 A 和 B 总的物质的量不变这一点列出方程.

【解】 设原容器 A 中有 ΔV 体积的气体进入容器 B, 且打开活塞后气体压强为 p . 对原容器 A 中剩下的 $V_1 - \Delta V$ 体积的气体进行研究, 它们将等温膨胀到体积 V_1 , 因而有

$$p_1(V_1 - \Delta V) = pV_1. \quad (1)$$

按照理想气体物态方程, 有 $\nu R = \frac{pV}{T}$ 关系, 对原容器 A 中 ΔV 体积的气体和原容