5. 在建立温标时,是否必须规定:热的物体具有较高的温度;冷的物体具有较低的温度? 是否可作相反的规定?

6. 在建立温标时,是否必须规定用来标志温度的物理量随温度作线性变化?

7. 理想气体温标是否依赖于气体的性质? 在实现理想气体温标时,是否有一种气体比其他气体更优越?

8. 用 p_{tr}表示定容气体温度计的测温泡在水的三相点时其中气体的压强值.有三个定容气体温度计:第一个用氧作测温物质,$p_{tr}=20\ \mathrm{cmHg}$;第二个也用氧,但 $p_{tr}=40\ \mathrm{cmHg}$;第三个用氢,$p_{tr}=30\ \mathrm{cmHg}$.

(1) 设用这三个温度计测量同一对象时其中气体的压强值分别为 p_1、p_2、p_3,则它们所确定的待测温度的近似值分别为

$$T_1=273.16\ \mathrm{K}\frac{p_1}{20\ \mathrm{cmHg}};T_2=273.16\ \mathrm{K}\frac{p_2}{40\ \mathrm{cmHg}};T_3=273.16\ \mathrm{K}\frac{p_3}{30\ \mathrm{cmHg}}.$$

试判断下列几种说法是否正确:

(a) 按上述方法,用三个温度计确定的温度值都相同;

(b) 两个氧温度计确定的温度值相同,但与氢温度计确定的温度值不相同;

(c) 用三个温度计确定的温度值都不相同.

(2) 若用三个温度计确定的温度值都不相同,试说明怎样改进测量方法才能使之相同.

9. 理想气体的状态方程 $pV=\nu RT$ 是根据哪些实验定律导出的? 这些定律的成立各有什么条件?

10. 在一个封闭容器中装有某种理想气体.

(1) 使气体的温度升高同时体积减小,是否可能?

(2) 使气体的温度升高同时压强增大,是否可能?

(3) 使气体的温度保持不变,但压强和体积同时增大,是否可能?

11. 若使下列参量增大一倍,而其他参量保持不变,则理想气体的压强将如何变化?

(1) 温度 T;

(2) 体积 V;

(3) 物质的量 $\nu=\dfrac{m}{M}$.

12. 当一定质量理想气体的压强 p 保持不变时,它的体积 V 如何随温度 T 变化? 当一定质量理想气体的体积 V 保持不变时,它的压强 p 如何随温度 T 变化?

13. 盖吕萨克(Gay - Lussac)定律:当一定质量的气体的压强保持不变时,

其体积随温度作线性变化：

$$V = V_0(1 + \alpha_V t),$$

式中 V 和 V_0 分别表示温度为 t ℃和 0 ℃时气体的体积，α_V 叫做气体的体膨胀系数.

查理(Charles)定律：当一定质量气体的体积保持不变时，其压强随温度作线性变化：

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

式中 p 和 p_0 分别表示温度为 t ℃和 0 ℃时气体的压强，α_p 叫做气体的压强系数.

试由理想气体的物态方程推证以上二定律，并求出 α_V 和 α_p 的值.

14. 试由玻意耳定律、盖吕萨克定律(或查理定律)和阿伏伽德罗定律导出理想气体物态方程.

15. 试解释下列现象：

(1) 自行车的内胎会晒爆；

(2) 热水瓶的塞子有时会自动跳出来；

(3) 乒乓球挤瘪后，放在热水里泡一会儿会重新鼓起来.

16. 两筒温度相同的压缩氧气，从压强计指示出的压强不相同，问如何判断哪一筒氧气的密度大.

17. 人坐在橡皮艇里，艇浸入水中一定的深度，到夜晚温度降低了，但大气压强不变，问艇浸入水中的深度将怎样变化.

18. 把汽车胎打气，使其达到所需要的压强，问在夏天和冬天，打入胎内的空气的质量是否相同.

19. 一个氢气球可以自由膨胀(即球内外压强保持相等)，随着气球的不断升高，大气压强不断减小，氢气就不断膨胀. 如果忽略掉大气温度和相对分子质量随高度的变化，试问气球在上升过程中所受的浮力是否变化. 说明理由.

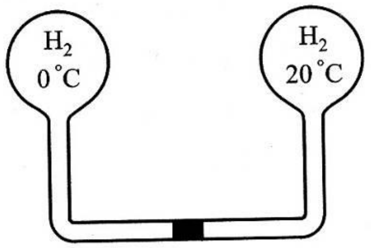

图 1-11

20. 两个相同的容器都装有氢气，以一玻璃管相通，管中用一水银滴作活塞. 当左边容器的温度为 0 ℃而右边为 20 ℃时，水银滴刚好在玻璃管的中央而维持平衡(见图 1-11).

(1) 若左边容器的温度由 0 ℃升到 10 ℃时，水银滴是否会移动？怎样移动？

(2) 如果左边升到 10 ℃，而右边升到30 ℃，水银滴是否会移动？

21. 试证明：当气体的摩尔体积增大时，范德瓦耳斯方程将趋近于理想气

体物态方程.

第一章习题

1. 定容气体温度计的测温泡浸在水的三相点管内时,其中气体的压强为 50 mmHg.

(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 68 mmHg 时,待测温度是多少?

2. 用定容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水在三相点时压强之比的极限值.

3. 用定容气体温度计测量某种物质的沸点. 原来测温泡在水的三相点时,其中气体的压强 $p_{tr}=500$ mmHg;当测温泡浸入待测物质中时,测得的压强值为 $p=734$ mmHg. 当从测温泡中抽出一些气体,使 p_{tr} 减为 200 mmHg 时,重新测得 $p=293.4$ mmHg,当再抽出一些气体使 p_{tr} 减为 100 mmHg 时,测得 $p=146.68$ mmHg,试确定待测沸点的理想气体温度.

4. 铂电阻温度计的测温泡浸在水的三相点管内时,铂电阻的阻值为 90.35 Ω. 当温度计的测温泡与待测物体接触时,铂电阻的阻值为 90.28 Ω,试求待测物体的温度. 假设温度与铂电阻的阻值成正比,并规定水的三相点为 273.16 K.

5. 在历史上,对摄氏温标是这样规定的;假设测温属性 X 随温度 t 作线性变化,即

$$t = aX + b,$$

并规定冰点为 $t=0$ ℃,汽点为 $t=100$ ℃.

设 X_i 和 X_s 分别表示在冰点和汽点时 X 的值,试求上式中的常数 a 和 b.

6. 水银温度计浸在冰水中时,水银柱的长度为 4.0 cm;温度计浸在沸水中时,水银柱的长度为 24.0 cm.

(1) 在室温 22.0 ℃时,水银柱的长度为多少?

(2) 温度计浸在某种沸腾的化学溶液中时,水银柱的长度为 25.4 cm,试求溶液的温度.

7. 设一定容气体温度计是按摄氏温标刻度的,它在冰点和汽点时,其中气体的压强分别为 0.400 atm 和 0.546 atm.

(1) 当气体的压强为 0.100 atm 时,待测温度是多少?

(2) 当温度计在沸腾的硫中时(硫的沸点为 444.60 ℃),气体的压强是多少?

8. 当热电偶的一个触点保持在冰点,另一个触点保持任一摄氏温度 t 时,其

热电动势由下式确定：

$$\mathscr{E} = \alpha t + \beta t^2,$$

式中 $\alpha = 0.20\ \mathrm{mV/℃}$，$\beta = -5.0 \times 10^{-4}\ \mathrm{mV/℃^2}$.

（1）试计算当 $t = -100$ ℃，200 ℃，400 ℃和 500 ℃时热电动势$\mathscr{E}$的值，并在此温度范围内作$\mathscr{E}-t$图.

（2）设用$\mathscr{E}$为测温属性，用下列线性方程来定义温标 t^*：

$$t^* = a\mathscr{E} + b,$$

并规定冰点为 $t^* = 0°$，汽点为 $t^* = 100°$，试求出 a 和 b 的值，并画$\mathscr{E}-t^*$图.

（3）求出与 $t = -100$ ℃，200 ℃，400 ℃和 500 ℃对应的 t^* 值，并画出$t-t^*$图.

（4）试比较温标 t 和温标 t^*.

9. 用 L 表示液体温度计中液柱的长度. 定义温标 t^* 与 L 之间的关系为

$$t^* = a\ln L + b,$$

式中 a、b 为常数，规定冰点为 $t_i^* = 0°$，汽点为 $t_s^* = 100°$. 设在冰点时液柱的长度为 $L_i = 5.0$ cm，在汽点时液柱的长度 $L_s = 25.0$ cm. 试求 $t^* = 0°$到 $t^* = 10°$之间液柱的长度差以及 $t^* = 90°$到 $t^* = 100°$之间液柱的长度差.

10. 定义温标 t^* 与测温属性 X 之间的关系为

$$t^* = \ln(kX),$$

式中 k 为常数.

（1）设 X 为定容稀薄气体的压强，并假定在水的三相点为 $t^* = 273.16°$，试确定温标 t^* 与热力学温标之间的关系.

（2）在温标 t^* 中，冰点和汽点各为多少度？

（3）在温标 t^* 中，是否存在 0 度？

11. 一立方容器，每边长 20 cm，其中贮有 1.0 atm，300 K 的气体. 当把气体加热到 400 K 时，容器每个壁所受的压力为多大？

12. 一定质量的气体在压强保持不变的情况下，温度由 50 ℃升到 100 ℃时，其体积将改变百分之几？

13. 一氧气瓶的容积是 32 L，其中氧气的压强是 130 atm. 规定瓶内氧气压强降到 10 atm 时就得充气，以免混入其他气体而需洗瓶. 今有一玻璃室，每天需用 1.0 atm 氧气 400 L，问一瓶氧气能用几天.

14. 水银压强计中混进了一个空气泡，因此它的读数比实际的气压小. 当精确的压强计的读数为 768 mmHg 时，它的读数只有 748 mmHg，此时管内水银面到管顶的距离为 80 mm. 问当此压强计的读数为 734 mmHg 时，实际气压应是多少. 设空气的温度保持不变.

15. 截面积为 $1.0\ \mathrm{cm}^2$ 的粗细均匀的 U 形管，其中贮有水银，高度如图 1 -

12 所示.今将左侧的上端封闭,将其右侧与真空泵相接,问左侧的水银将下降多少?设空气的温度保持不变,压强 75 cmHg.

16. 图 1－13 所示为一粗细均匀的 J 形管,其左端是封闭的,右侧和大气相通.已知大气压强为 75 cmHg,$h_1 = 80$ cm,$h_2 = 200$ cm,今从 J 形管右侧灌入水银,问当右侧灌满水银时,左侧的水银柱有多高.设温度保持不变,空气可看作理想气体.设图中 J 形管水平部分的容积可以忽略.

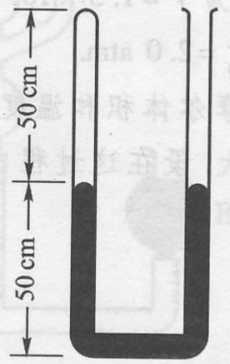

图 1－12

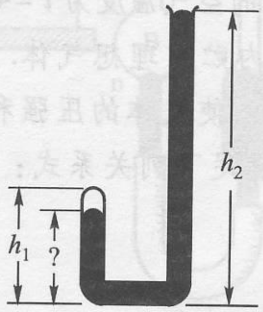

图 1－13

17. 如图 1－14 所示,两个截面积相同的连通管,一为开管,一为闭管,原来两管内的水银面等高.今打开活塞使水银漏掉一些,因此开管内水银下降了 h,问闭管内水银面下降了多少?设原来闭管内水银面上空气柱的高度 k 和大气压强为 p_0,是已知的.

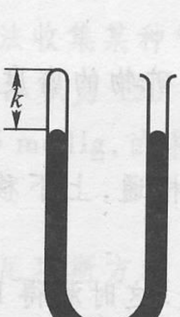

图 1－14

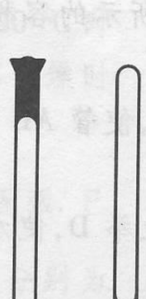
图 1－15

18. 一端封闭的玻璃管长 $l = 70.0$ cm,贮有空气,气柱上面有一段长为 $h = 20.0$ cm 的水银柱,将气柱封住,水银面与管口对齐.今将玻璃管的开口端用玻

璃片盖住，轻轻倒转后再除去玻璃片，因而使一部分水银漏出. 当大气压为 75.0 cmHg 时，留在管内的水银柱有多长？

19. 求氧气在压强为 10.0 atm、温度为 27 ℃时的密度.

20. 容积为 10 L 的瓶内贮有氢气，因开关损坏而漏气，在温度为 7.0 ℃时，压强计的读数为 50 atm. 过了些时候，温度上升为 17.0 ℃，压强计的读数未变，问漏去了多少质量的氢.

21. 一打气筒，每打一次气可将原来压强为 $p_0=1.0$ atm，温度为 $t_0=-3.0$ ℃，体积 $V_0=4.0$ L 的空气压缩到容器内. 设容器的容积为 $V=1.5\times10^3$ L，问需要打几次气，才能使容器内的空气温度为 $t=45$ ℃，压强为 $p_0=2.0$ atm.

22. 一汽缸内贮有理想气体. 气体的压强、摩尔体积和温度分别为 p_1，V_m 和 T_1. 现将汽缸加热，使气体的压强和体积同时增大. 设在这过程中，气体的压强 p 和摩尔体积 V_m 满足下列关系式：

$$p = kV_m,$$

其中 k 为常量.

(1) 求常量 k，将结果用 p_1、T_1 和普适气体常量 R 表示.

(2) 设 $T_1=200$ K，当摩尔体积增大到 $2V_{m1}$ 时，气体的温度是多高？

23. 图 1-16 为测量低气压的麦克劳压强计的示意图. 使压强计与待测容器相连，把贮有水银的瓶 R 缓缓上提，水银进入容器 B，将 B 中的气体与待测容器中的气体隔开. 继续上提瓶 R，水银就进入两根相同的毛细管 k_1 和 k_2 内. 当 k_2 中水银面与 k_1 的顶端对齐时，停止上提瓶 R，这时测得两根毛细管内水银面的高度差 $h=23$ mm. 设容器 B 的容积为 $V_B=130\ \text{cm}^3$，毛细管的直径 $d=1.1$ mm，求待测容器中的气压.

24. 用图 1-17 所示的容积计测量某种轻矿物的密度，操作步骤和实验数据如下：

(1) 打开活栓 K，使管 AB 及罩 C 与大气相通，上下移动 D，使水银面在 n 处.

(2) 关闭 K，往上举 D，使水银面达到 m 处. 这时测得 B、D 两管内水银面的高度差 $h_1=12.5$ cm.

(3) 打开 K，把 400 g 的矿物投入 C 中使水银面重新与 n 对齐，关闭 K.

(4) 往上举 D，使水银面重新到达 m 处，这时测得 B、D 两管内水银面的高度差 $h_2=23.7$ cm.

已知罩 C 和 Am 管的容积共为 1 000 cm^3，求矿物的密度.

25. 一抽气机转速 $\omega=400$ r/min，抽气机每分钟能够抽出气体 20 L，设容器的容积 $V=2.0$ L，问经过多少时间后才能使容器的压强由

$$p_0 = 760\ \text{mmHg}$$

降到 $p_t = 1.0$ mmHg.

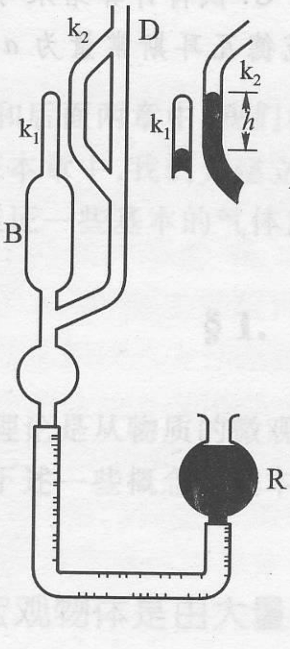

图 1-16

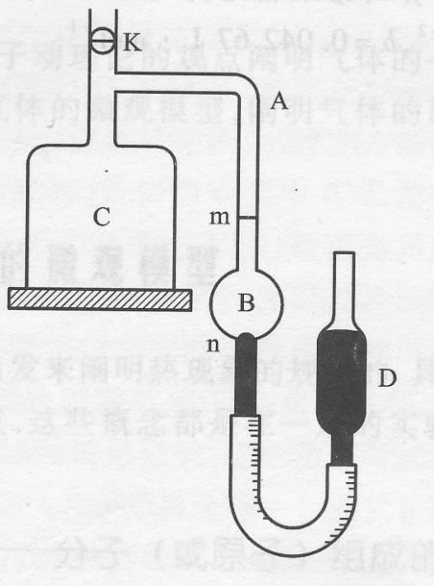

图 1-17

26. 按重量计，空气是由76%的氮、23%的氧、约1%的氩组成的（其余组分很少，可以忽略），试计算空气的平均相对分子质量及在标准状态下的密度.

27. 把 20 ℃，1.0 atm，500 cm^3 的氮气压入一容积为 200 cm^3 的容器，容器中原来已充满同温同压的氧气. 试求混合气体的压强和各种气体的分压强，假定容器中气体的温度保持不变.

28. 用排水取气法收集某种气体（见图 1-18）. 气体在温度为 20 ℃，压强为 767.5 mmHg 时的体积为 150 cm^3，已知水在 20 ℃ 时的饱和蒸气压为 17.5 mmHg，试求此气体在 20 ℃ 干燥时的体积.

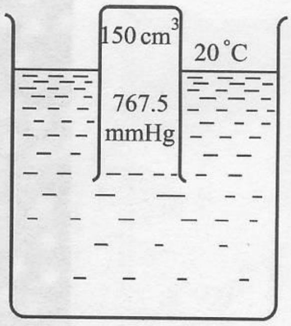

图 1-18

29. 通常称范德瓦耳斯方程中 $\frac{a}{V_m^2}$ 一项为内压强. 已知范德瓦耳斯方程中的常量 a，对二氧化碳和氢分别为 3.592 atm · L^2 · mol^{-2} 和 0.244 4 atm · L^2 · mol^{-2}，试计算这两种气体在 $\frac{V_m}{V_{m0}} = 1, 0.01$ 和 0.001 时的内压强，$V_{m,0} = 22.4 L \cdot mol^{-1}$.

30. 一摩尔氧气，压强为 1 000 atm，体积为 0.050 L，其温度是多少？

31. 试计算压强为 100 atm、密度为 100 g/L 的氧气的温度，已知氧气的范德

瓦耳斯常量为 $a=1.360\ \mathrm{atm}\cdot\mathrm{L}^2\cdot\mathrm{mol}^{-2}$, $b=0.031\ 83\ \mathrm{L}\cdot\mathrm{mol}^{-1}$.

32. 用范德瓦耳斯方程计算密闭于容器内质量 $m=1.1\ \mathrm{kg}$ 的二氧化碳的压强. 已知容器的容积 $V=20\ \mathrm{L}$, 气体的温度 $t=13\ ℃$. 试将计算结果与用理想气体物态方程计算的结果相比较. 已知二氧化碳的范德瓦耳斯常量为 $a=3.592\ \mathrm{atm}\cdot\mathrm{L}^2\cdot\mathrm{mol}^{-2}$, $b=0.042\ 67\ \mathrm{L}\cdot\mathrm{mol}^{-1}$.

的效果.但是实际情况并不如此,器壁分子向外的吸力对压强并无影响.

理解这个问题的关键就在于必须注意到,在器壁吸引气体分子的同时,气体分子也在吸引器壁.这就是说,在这种情况下来计算器壁所受的压强时,除了应考虑气体分子在碰壁的一瞬间施于器壁的冲量外,还需考虑气体分子在靠近器壁时对器壁的向内的吸引力的冲量.

假设气体分子在进入靠近器壁的、厚度为s'的区域内时就受到器壁的吸力F'.如果向器壁运动的分子通过这个区域所需的时间为δt,则由于器壁的吸力,气体分子在垂直于器壁方向上的动量增加量就是$\delta k=\overline{F'}\delta t$(因$F'$是变力,所以需引入平均力$\overline{F'}$).显然,根据牛顿第三定律,在这接近器壁的过程中,气体分子也施于器壁一个同样大小的、向内的冲量$\overline{F'}\delta t$.由于动量的增大,气体分子在碰壁时施于器壁的冲量相应地增加了$2\delta k=2\overline{F'}\delta t$.然后,气体分子在离开器壁通过厚度为$s'$的区域时,又与接近器壁时一样,受到器壁向外的吸力,同时气体分子又施于器壁一向内的冲量$\overline{F'}\delta t$.总起来讲,由于气体分子与器壁的相互吸引作用,每个分子在碰壁时施于器壁的向外的冲量确实增大了$2\overline{F'}\delta t$,但是这个分子在接近与离开器壁的两段过程中,每次都因它对器壁有吸引作用而施于器壁一向内的冲量$\overline{F'}\delta t$,合起来正好抵消掉碰壁时向外的冲量的增加.因此,器壁与气体分子间的相互吸引作用虽然确实改变了气体分子在靠近器壁时的运动情况,但并不改变气体分子施于器壁的总冲量,因而就不影响压强.

第二章思考题

1. 何谓理想气体?这个概念是怎样在实验的基础上抽象出来的?从微观结构来看,它与实际气体有何区别?

2. 在推导理想气体压强公式的过程中,什么地方用到了理想气体的假设?什么地方用到了平衡态的条件?什么地方用到了统计平均的概念?

3. 设气体的温度为273 K,压强为1.0 atm.设想每个分子都处在相同的一个小立方体的中心,试用阿伏伽德罗常量求这些小立方体的边长.取分子的直径为3.0×10^{-10} m,试将小立方体的边长与分子的直径相比较.

1 mol水的体积为$1.8\times10^{-5}\ \mathrm{m^3}$,重复上述计算,求出每个水分子所占的小立方体的边长,再将这个边长与分子的直径(3.0×10^{-10} m)相比较.

4. 温度为273 K的氧气贮在边长为0.30 m的立方容器里,当一个分子下降的高度等于容器的边长时,其重力势能改变多少?试将重力势能的改变与其平均平动能相比较.

5. 气体处于平衡态时,其分子的平均速度为多大?平均动量为多大?

6. 气体处于平衡态时,按统计规律性有

$$\overline{v_x^2}=\overline{v_y^2}=\overline{v_z^2}.$$

(1) 如果气体处于非平衡态,上式是否成立?

(2) 如果考虑重力的作用,上式是否成立?

(3) 当气体整体沿一定方向运动时,上式是否成立?

7. 在推导理想气体的压强公式时,为什么可以不考虑分子间的相互碰撞?

8. 在推导理想气体的压强公式时,曾假设分子与器壁间的碰撞是完全弹性的.实际上,器壁可以是非弹性的,只要器壁和气体的温度相同,弹性和非弹性的效果并没有什么不同.试解释之.

9. 设想在理想气体内部取一小截面 dA,则两边气体将通过 dA 互施压力.试从分子动理论的观点阐明这个压力是怎样产生的,并证明压强同样为 $p=\frac{2}{3}n\bar{\varepsilon}$.

10. 保持气体的压强恒定,使其温度升高一倍,则每秒与器壁碰撞的气体分子数以及每个分子在碰撞时施于器壁的冲量将如何变化?

11. 温度的实质是什么?对于单个分子能说它的温度有多高吗?为什么?

12. 从分子动理论的观点说明大气中氢含量极少的原因.

13. 一瓶氧气,在高速运输的过程中突然被迫停止下来,瓶内氧气的压强和温度会有什么变化?

14. 一定质量的气体,当温度保持恒定时,其压强随体积的减小而增大;当体积保持恒定时,其压强随温度的升高而增大.从微观的角度看来,这两种使压强增大的过程有何区别?

15. 从分子动理论的观点说明:当气体的温度升高时,只要适当地增大容器的容积,就可使气体的压强保持不变.

16. 两瓶不同种类的气体,它们的温度和压强相同,但体积不同,问:

(1) 单位体积内的分子数是否相同?

(2) 单位体积内的气体质量是否相同?

(3) 单位体积内气体分子的总平动能是否相同?

17. 范德瓦耳斯方程中$\left(p+\frac{a}{V_m^2}\right)$和$(V_m-b)$两项各有什么物理意义?其中 p 表示的是理想气体的压强还是范氏气体的压强?

18. 在一定的温度和体积下,由理想气体物态方程和范德瓦耳斯方程算出的压强哪个大?为什么?

19. 范德瓦耳斯气体和理想气体内部压强产生的原因是否相同?

第二章习题

1. 目前可获得的极限真空度为 10^{-13} mmHg 的数量级,问在此真空度下每立方厘米内有多少个空气分子.设空气的温度为 27 ℃.

2. 钠黄光的波长为 5 893 Å，即 5.893×10^{-7} m. 设想一立方体每边长 5.893×10^{-7} m，试问在标准状态下，其中有多少个空气分子.

3. 一容积为 11.2 L 的真空系统已被抽到 1.0×10^{-5} mmHg 的真空. 为了提高其真空度，将它放在 300 ℃ 的烘箱内烘烤，使器壁释放出所吸附的气体. 若烘烤后压强增为 1.0×10^{-2} mmHg，问器壁原来吸附了多少个气体分子.

4. 容积为 2 500 cm^3 的烧瓶内有 1.0×10^{15} 个氧分子，有 4.0×10^{15} 个氮分子和 3.3×10^{-7} g 的氩气. 设混合气体的温度为 150 ℃，求混合气体的压强.

5. 一容器内贮有氧气，其压强为 $p=1.0$ atm，温度为 $t=27$ ℃，求：

(1) 单位体积内的分子数；

(2) 氧气的密度；

(3) 氧分子的质量；

(4) 分子间的平均距离；

(5) 分子的平均平动能.

6. 在常温下(例如 27 ℃)，气体分子的平均平动能等于多少 eV？在多高的温度下，气体分子的平均平动能等于1 000 eV？

7. 1 mol 氦气，其分子热运动动能的总和为 3.75×10^3 J，求氦气的温度.

8. 质量为 10 g 的氮气，当压强为 1.0 atm，体积为 7 700 cm^3 时，其分子的平均平动能是多少？

9. 质量为 50.0 g、温度为 18.0 ℃的氦气装在容积为 10.0 L 的封闭容器内，容器以 $v=200$ m/s 的速率做匀速直线运动. 若容器突然停止，定向运动的动能全部转化为分子热运动的动能，则平衡后氦气的温度和压强将各增大多少？

10. 有六个微粒，试就下列几种情形计算它们的方均根速率：

(1) 六个的速率均为 10 m/s；

(2) 三个的速率为 5 m/s，另三个的为 10 m/s；

(3) 三个静止，另三个的速率为 10 m/s.

11. 试计算氢气、氧气和汞蒸气分子的方均根速率，设气体的温度为300 K. 已知氢气、氧气和汞蒸气的相对分子质量分别为 2.02、32.0 和 201.

12. 气体的温度为 $T=273$ K，压强为 $p=1.00\times10^{-2}$ atm，密度为

$$\rho = 1.29\times10^{-5}\ \mathrm{g/cm^3}.$$

(1) 求气体分子的方均根速率.

(2) 求气体的相对分子质量，并确定它是什么气体.

13. 若使氢分子和氧分子的方均根速率等于它们在地球表面上的逃逸速率，各需多高的温度？

若使氢分子和氧分子的方均根速率等于它们在月球表面上的逃逸速率，各需多高的温度？

14. 一立方容器，每边长 1.0 m，其中贮有标准状态下的氧气，试计算容器一壁每秒受到的氧分子碰撞的次数. 设分子的平均速率和方均根速率的差别可以忽略.

15. 估算空气分子每秒与 1.0 cm^2 墙壁相碰的次数，已知空气的温度为 300 K、压强为 1.0 atm，平均相对分子质量为 29. 设分子的平均速率和方均根速率的差别可以忽略.

16. 一密闭容器中贮有水及其饱和蒸汽，水汽的温度为 100 ℃，压强为 1.0 atm. 已知在这种状态下每克水汽所占的体积为 1 670 cm^3，水的汽化热为 2 250 J/g.

(1) 每立方厘米水汽中含有多少个分子?

(2) 每秒有多少个水汽分子碰到水面上(单位面积)?

(3) 设所有碰到水面上的水汽分子都凝聚为水，则每秒有多少分子从单位面积水面逸出?

(4) 试将水汽分子的平均平动能与每个水分子逸出所需的能量相比较.

17. 当液体与其饱和蒸气共存时，汽化率与凝结率相等. 设所有碰到液面上的蒸气分子都能凝聚为液体，并假定当把液面上的蒸气迅速抽去时液体的汽化率与存在饱和蒸气时的汽化率相同. 已知水银在 0 ℃ 时的饱和蒸气压为 185×10^{-6} mmHg，汽化热为 80.5 cal/g，问每秒通过每平方厘米液面有多少克水银向真空中汽化.

18. 已知对于氧气，范德瓦耳斯方程中的常量 $b = 0.031\ 83\ \mathrm{L \cdot mol^{-1}}$，设 b 等于 1 mol 氧气分子体积总和的四倍，试计算氧分子的直径.

19. 把标准状态下 22.4 L 的氮气不断压缩，它的体积将趋近多少升? 设此时氮分子是一个挨着一个紧密排列的，试计算氮分子的直径. 此时由分子间引力所产生的内压强约为多大? 已知对于氮气，范德瓦耳斯方程中的常量 $a = 1.390\ \mathrm{atm \cdot L^2 \cdot mol^{-2}}$，$b = 0.039\ 13\ \mathrm{L \cdot mol^{-1}}$.

20. 一立方容器的容积为 V，其中贮有 1 mol 气体. 设把分子看作直径为 d 的刚体，并设想分子是一个一个地放入容器的，问:

(1) 第一个分子放入容器后，其中心能够自由活动的空间体积是多大?

(2) 第二个分子放入容器后，其中心能够自由活动的空间体积是多大?

(3) 第 N_A 个分子放入容器后，其中心能够自由活动的空间体积是多大?

(4) 平均地讲，每个分子的中心能够自由活动的空间体积是多大?

由此证明，范德瓦耳斯方程中的改正量 b 约等于 1 mol 气体所有分子体积总和的四倍.

附录3-1 积分表

$$f(n)=\int_0^{\infty}x^n e^{-\lambda x^2}\,dx.$$

n	$f(n)$	n	$f(n)$
0	$\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{\lambda}}$	1	$\frac{1}{2\lambda}$
2	$\frac{1}{4}\sqrt{\frac{\pi}{\lambda^3}}$	3	$\frac{1}{2\lambda^2}$
4	$\frac{3}{8}\sqrt{\frac{\pi}{\lambda^5}}$	5	$\frac{1}{\lambda^3}$
6	$\frac{15}{16}\sqrt{\frac{\pi}{\lambda^7}}$	7	$\frac{3}{\lambda^4}$

若 n 为偶数，$\int_{-\infty}^{+\infty}x^n e^{-\lambda x^2}\,dx=2f(n)$.

若 n 为奇数，$\int_{-\infty}^{+\infty}x^n e^{-\lambda x^2}\,dx=0$.

附录3-2 误差函数简表

$$\operatorname{erf}(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-x^2}\,dx.$$

x	$\operatorname{erf}(x)$	x	$\operatorname{erf}(x)$
0	0	1.6	0.976 3
0.2	0.222 7	1.8	0.989 1
0.4	0.428 4	2.0	0.995 3
0.6	0.603 9	2.2	0.998 1
0.8	0.742 1	2.4	0.999 3
1.0	0.842 7	2.6	0.999 8
1.2	0.910 3	2.8	0.999 9
1.4	0.952 3		

当 x 大于表中所给的数时，$\operatorname{erf}(x)$ 的值可用下列级数算出：

$$\operatorname{erf}(x)=1-\frac{e^{-x}}{x\sqrt{\pi}}\left(1-\frac{1}{2x^2}+\frac{1\cdot 3}{(2x^2)^2}-\frac{1\cdot 3\cdot 5}{(2x^2)^3}+\cdots\right).$$

第三章思考题

1. 是否可以说“具有某一速率的分子有多少个”？为什么？速率刚好为最概然速率的分子数与总分子数之比是多少？

2. 速率分布函数的物理意义是什么？试说明下列各量的意义：

(1) $f(v)\mathrm{d}v$；　(2) $Nf(v)\mathrm{d}v$；　(3) $\int_{v_1}^{v_2} f(v)\mathrm{d}v$；

(4) $\int_{v_1}^{v_2} Nf(v)\mathrm{d}v$；(5) $\int_{v_1}^{v_2} vf(v)\mathrm{d}v$；　(6) $\int_{v_1}^{v_2} Nvf(v)\mathrm{d}v$.

3. 两容器分别贮有氢气和氧气，如果压强、体积和温度都相同，则它们的分子的速率分布是否相同？

4. 两容器分别贮有气体 A 和 B，温度和体积都相同，试说明在下列各种情况下它们的分子的速率分布是否相同：

(1) A 为氮，B 为氢，而且氮和氢的质量相等，即 $m_A = m_B$.

(2) A 和 B 均为氢，但 $m_A \neq m_B$.

(3) A 和 B 均为氢，而且 $m_A = m_B$，但使 A 的体积等温地膨胀到原体积的一倍.

5. 恒温器中放有氢气瓶，现将氧气通入瓶内. 某些速率大的氢分子具备与氧分子化合的条件（如速率大于某一数值 v_1）而化合成水，问瓶内剩余的氢分子的速率分布有何改变.

6. 图 3－13 所示为麦克斯韦速率分布曲线. 图中 A、B 两部分面积相等，试说明图中 v_0 的意义.

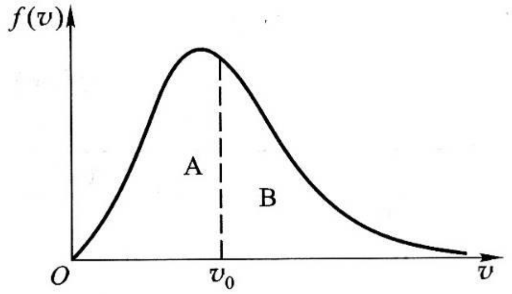

图 3－13

7. 气体分子的最概然速率、平均速率和方均根速率各是怎样定义的？它们的大小各由哪些因素决定？

8. 空气中含有氮分子和氧分子，平均地讲，哪种分子的速率较大？这个结论是否对空气中的任一个氮分子和氧分子都适用？

9. 处于热平衡状态下的气体，其中分子是否有一半速率大于最概然速率？平均速率？方均根速率？

10. 试说明：混合气体处于热平衡状态时，每种气体分子的速率分布情况与该种气体单独存在时分子的速率分布情况完全相同.

11. 试说明：分布在方均根速率附近一固定小速率区间 dv 内的分子数，随

气体温度的升高而减少.

12. 设分子的速率分布曲线如图 3－14 所示,试在横坐标轴上大致标出最概然速率、平均速率和方均根速率的位置.

13. 某种气体由 N 个粒子组成

(1) 证明:不论这些粒子的速率如何分布,其方均根速率恒大于或等于平均速率,即 $\sqrt{\overline{v^2}} \geqslant \bar{v}$.

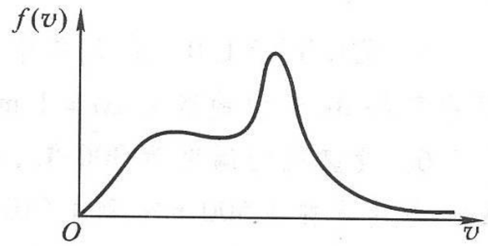

图 3－14

(2) 在什么情况下 $\sqrt{\overline{v^2}} = \bar{v}$?

14. 何谓统计规律? 何谓涨落现象? 二者有何联系?

15. 举几个实例(自然现象或社会现象)说明,大量的偶然事件整体遵从一定的统计规律.

16. 何谓自由度? 单原子分子和双原子分子各有几个自由度? 它们是否随温度而变?

17. 试确定下列物体的自由度数:

(1) 小球沿长度一定的杆运动,而杆又以一定的角速度在平面内转动.

(2) 小球沿一固定的弹簧运动,弹簧的半径和节距固定不变.

(3) 长度不变的棒在平面内运动.

(4) 在三度空间里运动的任意物体.

18. 能均分定理中的能量指的是动能还是动能和势能的总和? 与每一个振动自由度对应的平均能量是多少? 为什么?

19. 何谓内能? 怎样计算理想气体的内能? 单原子理想气体和双原子理想气体的内能有何不同? 一定量理想气体的内能是由哪些因素决定的?

20. 一容器内贮有某种气体,如果容器漏气,则容器内气体分子的平均动能是否会变化? 气体的内能是否会变化?

第三章习题

1. 设有一群粒子按速率分布如下:

粒子数 N_i	2	4	6	8	2
速率 $v_i/(\mathrm{m\cdot s^{-1}})$	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00

试求:(1) 平均速率 $\bar{v}$;(2) 方均根速率 $\sqrt{\overline{v^2}}$;(3) 最概然速率 v_p.

2. 计算 300 K 时,氧分子的最概然速率、平均速率和方均根速率.

3. 计算氧分子的最概然速率,设氧气的温度为 100 K,1 000 K 和 10 000 K.

4. 某种气体分子在温度 T_1 时的方均根速率等于温度 T_2 时的平均速率，求 $\frac{T_2}{T_1}$.

5. 求 0 ℃时 1.0 cm³ 氮气中速率在 500 m/s 到 501 m/s 之间的分子数(在计算中可将 $\mathrm{d}v$ 近似地取为 $\Delta v = 1$ m/s).

6. 设氢气的温度为 300 ℃，求速率在 3 000 m/s 到 3 010 m/s 之间的分子数 ΔN_1 与速率在 1 500 m/s 到 1 510 m/s 之间的分子数 ΔN_2 之比.

7. 试就下列几种情况，求气体分子数占总分子数的比率：

(1) 速率在区间 $v_p \sim 1.01v_p$ 内；

(2) 速度分量 v_x 在区间 $v_p \sim 1.01v_p$ 内；

(3) 速度分量 v_x, v_y 和 v_z 同时在区间 $v_p \sim 1.01v_p$ 内.

8. 根据麦克斯韦速率分布函数，计算足够多的点，以 $\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}v}$ 为纵坐标，v 为横坐标，作 1 mol 氧气在 100 K 和 400 K 时的分子速率分布曲线.

9. 根据麦克斯韦速率分布律，求速率倒数的平均值 $\overline{\frac{1}{v}}$.

10. 一容器的器壁上开有一直径为 0.20 mm 的小圆孔，容器贮有 100 ℃的水银，容器外被抽成真空，已知水银在此温度下的蒸气压为 0.28 mmHg.

(1) 求容器内水银蒸气分子的平均速率.

(2) 每小时有多少克水银从小孔逸出？

11. 如图 3－15 所示，一容器被一隔板分成两部分，其中气体的压强，分子数密度分别为 p_1、n_1；p_2、n_2. 两部分气体的温度相同，都等于 T，摩尔质量也相同，均为 M. 试证明：如隔板上有一面积为 A 的小孔，则每秒通过小孔的气体质量为

$$m = \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}}A(p_1 - p_2).$$

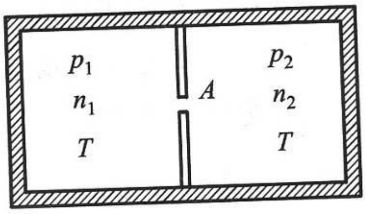

图 3－15

12. 有 N 个粒子，其速率分布函数为

$$f(v) = \frac{\mathrm{d}N}{N\mathrm{d}v} = C, (v_0 > v > 0)$$

$$f(v) = 0, (v > v_0)$$

(1) 作速率分布曲线.

(2) 由 N 和 v_0 求常数 C.

(3) 求粒子的平均速率.

13. N 个假想的气体分子，其速率分布如图 3－16 所示(当 $v > 2v_0$ 时，粒子数为零).

(1) 由 N 和 v_0 求 a.

(2) 求速率在 $1.5v_0$ 到 $2.0v_0$ 之间的分子数.

(3) 求分子的平均速率.

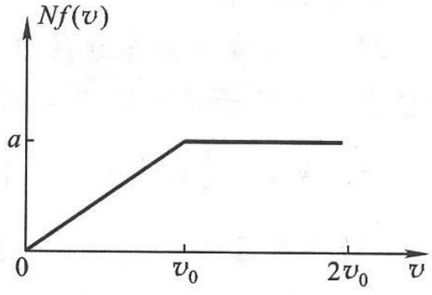

图 3 - 16

14. 证明:麦克斯韦速率分布函数可以写作

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}x}=F(x^2),$$

其中 $x=\dfrac{v}{v_{\mathrm{p}}}, v_{\mathrm{p}}=\sqrt{\dfrac{2kT}{m}}, F(x^2)=\dfrac{4N}{\sqrt{\pi}}x^2\mathrm{e}^{-x^2}$.

*15. 设气体分子的总数为 N,试证明速度的 x 分量大于某一给定值 v_x 的分子数为

$$\Delta N_{v_x\sim\infty}=\frac{N}{2}[1-\mathrm{erf}(x)].$$

$\left(\text{提示:速度的 } x \text{ 分量在 0 到 } \infty \text{ 之间的分子数为} \dfrac{N}{2}.\right)$

*16. 设气体分子的总数为 N,试证明速率在 0 到任一给定值 v 之间的分子数为

$$\Delta N_{0\sim v}=N\left[\mathrm{erf}(x)-\frac{2}{\sqrt{\pi}}x\mathrm{e}^{-x^2}\right],$$

其中 $x=\dfrac{v}{v_{\mathrm{p}}}$, v_{p} 为最概然速率.

[提示:$\mathrm{d}(x\mathrm{e}^{-x^2})=\mathrm{e}^{-x^2}\mathrm{d}x-2x^2\mathrm{e}^{-x^2}\mathrm{d}x$.]

*17. 求速度分量 v_x 大于 $2v_{\mathrm{p}}$ 的分子数占总分子数的比率.

*18. 设气体分子的总数为 N,求速率大于某一给定值 v 的分子数. 设(1) $v=v_{\mathrm{p}}$;(2) $v=2v_{\mathrm{p}}$,具体算出结果来.

*19. 求速率大于任一给定值 v 的气体分子每秒与单位面积器壁的碰撞次数.

20. 在图 3 - 6 所示的实验装置中,设铋蒸气的温度为 $T=827$ K,转筒的直径为 $D=10$ cm,转速为 $\omega=200\pi$ rad/s,试求铋原子 Bi 和分子铋 Bi_2 的沉积点 P' 到 P 点(正对着狭缝 S_3)的距离 s. 设 Bi 原子和 Bi_2 分子都以平均速率运动.

21. 飞机的起飞前机舱中的压强计指示为 1.0 atm,温度为 27 ℃;起飞后,压强计指示为 0.80 atm,温度仍为 27 ℃,试计算飞机距地面的高度.

22. 上升到什么高度处大气压强减为地面的 75%? 设空气的温度为 0 ℃.

23. 设地球大气是等温的,温度为 $t=5.0$ ℃,海平面上的气压为 $p_0=750$ mmHg,今测得某山顶的气压 $p=590$ mmHg,求山高. 已知空气的平均相对分

子质量为28.97.

24. 根据麦克斯韦速度分布律,求气体分子速度分量v_x的平方平均值,并由此推出气体分子每一个平动自由度所具有的平动能.

25. 令$\varepsilon=\frac{1}{2}mv^2$表示气体分子的平动能.试根据麦克斯韦速率分布律证明,平动能在区间$\varepsilon\sim\varepsilon+\mathrm{d}\varepsilon$内分子数占总分子数的比率为

$$f(\varepsilon)\mathrm{d}\varepsilon=\frac{2}{\sqrt{\pi}}(kT)^{-3/2}\varepsilon^{1/2}\mathrm{e}^{\varepsilon/kT}\mathrm{d}\varepsilon.$$

根据上式求分子平动能ε的最概然值.

26. 温度为27 ℃时,1 mol氧气具有多少平动动能? 多少转动动能?

27. 在室温300 K下,1 mol氢和1 mol氮的内能各是多少? 1 g氢和1 g氮的内能各是多少?

28. 求常温下质量为$m_1=3.00$ g的水蒸气与$m_2=3.00$ g的氢气的混合气体的比定容热容.

29. 气体分子的质量可以由比定容热容算出来,试推导由比定容热容计算分子质量的公式.设氩的比定容热容$c_V=75$ cal·kg^{-1}·K^{-1},求氩原子的质量和氩的相对原子质量.

30. 某种气体的分子由四个原子组成,它们分别处在正四面体的四个顶点.

(1) 求这种分子的平动、转动和振动自由度数.

(2) 根据能均分定理求这种气体的摩尔定容热容.

态气体.

附录 4-1 分子通过 dS 面前最后一次受碰处与 dS 间的平均距离

先考虑 dS 面上方 B 部向下运动的分子. 为简单计,取 $z_0=0$,B 部的分子就是 z 为 $0\sim+\infty$ 的空间内的分子. 设在坐标 z 处取一底面积为 dS 高度为 dz 的体积元,则在该体积元内的分子数应为 $ndSdz$. 由于每个分子的碰撞频率为 $\bar{v}/\lambda$,所以该体积元中在时间 dt 内先后有 $(ndSdz)(\bar{v}/\lambda)dt$ 个分子与其他分子碰撞.

分子在碰撞后向各个方向运动. 平均地讲,只有其中 1/6 的分子沿 z 轴负方向朝 dS 面运动,即有 $\frac{1}{6}(ndSdz)(\bar{v}/\lambda)dt$ 个分子向下通过 dS.

在离开该体积元后能无碰撞地向下通过 dS 的分子,只可能是自由程大于 z 的. 因此,在时间 dt 内在 z 处的体积元 $dSdz$ 内受碰,而后再无碰撞地通过 dS 的分子数,根据(4.6)式,应为 $\frac{1}{6}(ndSdz)(\bar{v}/\lambda)dte^{-z/\lambda}$.

因此,从 $z>0$ 的 B 部各处出发,在时间 dt 内无碰撞地向下通过 dS 的分子的总和应为

$$\int_0^\infty \frac{1}{6}n(\bar{v}/\lambda)e^{-z/\lambda}dSdzdt = \frac{1}{6}n\bar{v}dSdt.$$

这与简化假设(4.12)式所给出的 dN 一致.

由上面的分析已知,在时间 dt 内向下通过 dS 前在 z 处受碰的分子数为

$$\frac{1}{6}n(\bar{v}/\lambda)e^{-z/\lambda}dSdzdt.$$

它们在通过 dS 前,最后一次受碰处与 dS 间的距离之和为

$$z\cdot\frac{1}{6}n(\bar{v}/\lambda)e^{-z/\lambda}dSdzdt.$$

所以这些分子通过 dS 前最后一次受磁处与 dS 间的平均距离就是

$$\bar{z} = \int_0^\infty \frac{1}{6}n(\bar{v}/\lambda)ze^{-z/\lambda}dSdzdt/(\frac{1}{6}n\bar{v}dSdt) = \lambda$$

同样可求出,A 部的分子向上通过 dS 面前最后一次受磁处与 dS 间的平均距离也是 λ.

第四章思考题

1. 何谓自由程和平均自由程? 平均自由程与气体的状态以及分子本身的

性质有何关系？在计算平均自由程时，哪里体现了统计平均？

2. 容器内贮有一定量的气体，保持容积不变，使气体的温度升高，则分子的碰撞频率和平均自由程各怎样变化？

3. 理想气体定压膨胀时，分子的平均自由程和碰撞频率与温度的关系如何？

4. 用哪些办法可以使气体分子的碰撞频率减小？

5. 容器内贮有 1 mol 的气体，设分子的碰撞频率为 Z，问容器内所有分子在一秒内总共相碰多少次？

6. 如果认为两个分子在离开一定距离时，相互间存在一有心力作用，则这时分子的有效直径、碰撞截面和平均自由程等概念是否还有意义？

7. 如果把分子看作相互间有引力作用的刚球(苏则朗模型)，则分子的碰撞截面和平均自由程如何随温度变化？

8. 混合气体由两种分子组成，其有效直径分别为 d_1 和 d_2. 如果考虑这两种分子的相互碰撞，则碰撞截面为多大？平均自由程为多大？

9. 三种输运过程遵从怎样的宏观规律？它们有哪些共同的特征？阐明三个梯度和三个输运系数的物理意义.

10. 在讨论三种输运过程的微观理论时，我们作了哪些简化假设？提出这些假设的根据是什么？

11. 分子热运动和分子间的碰撞在输运过程中各起什么作用？哪些物理量体现了它们的作用？

12. 考虑分子间的碰撞，设平均自由程 λ. 在任一时刻 t 考察某个分子 A，问：

(1) 平均地讲，分子 A 需通过多长的路程才会与另一分子相碰？

(2) 自上一次受碰到时刻 t，平均地讲，分子 A 通过了多长的路程？

(3) 如果在时刻 t，分子 A 刚好与其他分子碰过一次，则平均地讲，分子 A 需通过多长的路程才会与另一分子相碰？

13. 有一空心的圆柱体，内外表面温度不同，问在柱层中不同半径处的温度梯度是否相同.

14. η、κ 和 D 与气体的压强各有什么关系？试从物理道理上说明这些关系？

15. 一定量气体先经过等体过程，使其温度升高一倍，再经过等温过程使其体积膨胀为原来的二倍. 问后来的 λ、η、κ、D(平均自由程、黏性系数、导热系数、扩散系数)各为原来的多少倍？

第四章习题

1. 氢气在 1.0 atm, 15 ℃时的平均自由程为 1.18×10^{-7} m,求氢分子的有效直径.

2. 氮分子的有效直径为 3.8×10^{-10} m,求其在标准状态下的平均自由程和连续两次碰撞间的平均时间.

3. 氧分子的有效直径为 3.6×10^{-10} m,求其碰撞频率. 已知:

(1) 氧气的温度为 300 K,压强为 1.0 atm;

(2) 氧气的温度为 300 K,压强为 1.0×10^{-6} atm.

4. 某种气体分子在 25 ℃时的平均自由程为 2.63×10^{-7} m.

(1) 已知分子的有效直径为 2.6×10^{-10} m,求气体的压强.

(2) 求分子在 1.0 m 的路程上与其他分子的碰撞次数.

5. 若在 1.0 atm 下,氧分子的平均自由程为 6.8×10^{-8} m,在什么压强下,其平均自由程为 1.0 mm? 设温度保持不变.

6. 电子管的真空度约为 1.0×10^{-5} mmHg,设气体分子的有效直径为 3.0×10^{-10} m,求 27 ℃时单位体积内的分子数、平均自由程和碰撞频率.

7. 今测得温度为 15 ℃、压强为 76 cmHg 时氩分子和氖分子的平均自由程分别为 $\lambda_{Ar}=6.7\times10^{-8}$ m 和 $\lambda_{Ne}=13.2\times10^{-8}$ m,问:

(1) 氩分子和氖分子的有效直径之比是多少?

(2) $t=20$ ℃, $p=15$ cmHg 时, λ_{Ar}为多大?

(3) $t=-40$ ℃, $p=75$ cmHg 时, λ_{Ne}为多大?

8. 在气体放电管中,电子不断与气体分子相碰. 因电子的速率远远大于气体分子的平均速率,所以后者可认为是静止不动的. 设电子的"有效直径"比起气体分子的有效直径 d 来可以忽略不计.

(1) 电子与气体分子的碰撞截面 σ 为多大?

(2) 证明:电子与气体分子碰撞的平均自由程为

$$\lambda_e=\frac{1}{\sigma n},$$

n 为气体分子的数密度.

*9. 设气体分子的平均自由程为 λ,试证明:一个分子在连续两次碰撞之间所走路程至少为 x 的概率是 $e^{-x/\lambda}$.

*10. 某种气体分子的平均自由程为 10 cm. 在 10 000 段自由程中,

(1) 有多少段长于 10 cm?

(2) 有多少段长于 50 cm?

(3) 有多少段长于 5 cm 而短于10 cm?

(4) 有多少段长度在 9.9 cm 到 10 cm 之间?

(5) 有多少段长度刚好为10 cm?

*11. 某一时刻氧气中有一组分子都刚与其他分子碰撞过. 问经多长时间后其中还能保留一半未与其他分子相碰. 设氧分子都以平均速率运动,氧气的温度为 300 K,在给定的压强下氧分子的平均自由程为 2.0 cm.

*12. 需将阴极射线管抽到多高的真空度(用 mmHg 表示),才能保证从阴极发射出来的电子有 90% 能达到 20 cm 远处的阳极,而在途中不与空气分子相碰?

*13. 由电子枪发出一束电子射入压强为 p 的气体. 在电子枪前相距 x 处放置一收集电极,用来测定能自由通过(即不与气体分子相碰)这段距离的电子数. 已知电子枪发射的电子流强度为 100 μA(微安),当气压 $p=100\ \mathrm{N/m^2}$,$x=10$ cm 时,到达收集极的电子流强度为 37 μA.

(1) 电子的平均自由程为多大?

(2) 当气压降到 50 $\mathrm{N/m^2}$ 时,到达收集极的电子流强度为多大?

14. 今测得氮气在 0 ℃时的黏性系数为 $16.6\times10^{-6}\ \mathrm{N\cdot s\cdot m^{-2}}$,计算氮分子的有效直径. 已知氮的相对分子质量为 28.

15. 今测得氮气在 0 ℃时的导热系数为 $23.7\times10^{-3}\ \mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$,摩尔定容热容为 $20.9\ \mathrm{J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}}$,试计算氮分子的有效直径.

16. 氧气在标准状态下的扩散系数为 $1.0\times10^{-5}\ \mathrm{m^2\cdot s^{-1}}$,求氧分子的平均自由程.

17. 已知氦气和氩气的相对原子质量分别为 4 和 40,它们在标准状态下的黏性系数分别为 $\eta_{\mathrm{He}}=18.8\times10^{-6}\ \mathrm{N\cdot s\cdot m^{-2}}$ 和 $\eta_{\mathrm{Ar}}=21.0\times10^{-6}\ \mathrm{N\cdot s\cdot m^{-2}}$,求:

(1) 氩分子与氦分子的碰撞截面之比 $\sigma_{\mathrm{Ar}}/\sigma_{\mathrm{He}}$;

(2) 氩气与氦气的导热系数之比 $\kappa_{\mathrm{Ar}}/\kappa_{\mathrm{He}}$;

(3) 氩气与氦气的扩散系数之比 $D_{\mathrm{Ar}}/D_{\mathrm{He}}$.

18. 一长为 2 m、截面积为 $10^{-4}\ \mathrm{m^2}$ 的管子里贮有标准状态下的 CO_2 气体,一半 CO_2 分子中的 C 原子是放射性同位素 ^{14}C. 在 $t=0$ 时,放射性分子密集在管子的左端,其分子数密度沿着管子均匀地减小,到右端减为零.

(1) 开始时,放射性气体的密度梯度是多大?

(2) 开始时,每秒有多少个放射性分子通过管子中点的横截面从左侧移往右侧?

(3) 有多少个从右侧移往左侧?

(4) 开始时,每秒通过管子横截面扩散的放射性气体为多少克?

19. 将一圆柱体沿轴悬挂在金属丝上，在圆柱体外面套上一个共轴的圆筒，两者之间充以空气. 当圆筒以一定的角速度转动时，由于空气的黏性作用，圆柱体将受到一力矩 M. 由悬丝的扭转程度可测定此力矩，从而求出空气的黏性系数. 设圆柱体的半径为 R，圆筒的内半径为 $R+\delta(\delta << R)$，两者的长度均为 L，圆筒的角速度为 ω，试证明：

$$M = 2\pi\eta R^3 L\omega/\delta,$$

η 是待测的黏性系数.

20. 两个长为 100 cm、半径分别为 10.0 cm 和 10.5 cm 的共轴圆筒套在一起，其间充满氢气. 若氢气的黏性系数为 $\eta = 8.7\times10^{-6}\ \mathrm{N\cdot s\cdot m^{-2}}$，问外筒的转速多大时才能使不动的内筒受到 1.07×10^{-3} N 的作用力.

*21. 两个长圆筒共轴套在一起，两筒的长度均为 L，内筒和外筒的半径分别为 R_1 和 R_2. 内筒和外筒分别保持在恒定的温度 T_1 和 T_2，且 $T_1 > T_2$. 已知两筒间空气的导热系数为 κ，试证明：每秒由内筒通过空气传到外筒的热量为

$$Q = \frac{2\pi\kappa L}{\ln\dfrac{R_2}{R_1}}(T_1 - T_2).$$

由以上结果可见，柴油机的绝热压缩比 r 越大，效率就越高.

［**例题 10**］ 一定量的理想气体经过下列准静态循环过程：

（1）等温压缩，由 V_1、T_1 到 V_2、T_1；

（2）等体降温，由 V_2、T_1 到 V_2、T_2；

（3）等温膨胀，由 V_2、T_2 到 V_1、T_2；

（4）等体升温，由 V_1、T_2 到 V_1、T_1.

试求这个制冷循环的制冷系数。

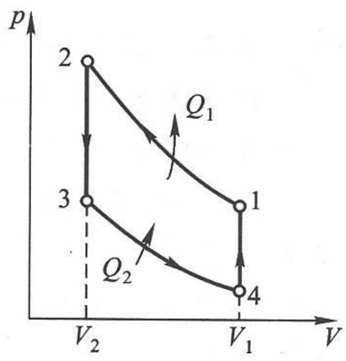

图 5－31

［**解**］ 图 5－31 画出了这一制冷循环，它叫做逆向斯特林循环，是回热式制冷机中的工作循环. 在这循环过程中，气体在两个等体过程中与外界交换的热量的代数和为零. 所以工作物质在等温膨胀过程 3—4 中从低温吸收热量

$$Q_2 = \nu R T_2 \ln \frac{V_1}{V_2},$$

而在等温压缩过程 1—2 中向外界放出热量

$$Q_1 = \nu R T_1 \ln \frac{V_1}{V_2}.$$

根据热力学第一定律，在整个制冷循环中外界对工作物质做功

$$A = Q_1 - Q_2 = \nu R (T_1 - T_2) \ln \frac{V_1}{V_2}.$$

由此根据(5.43)式，可得制冷系数为

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

这结果表明，逆向斯特林循环的制冷系数与逆向卡诺循环相一致，因此回热式制冷机具有较高的制冷效率.

第五章思考题

1. 一定量的气体在体积不变的非静态过程中，外界对它所做的体积功为多少？

2. 有人说："任何没有体积变化的过程就一定不对外做功". 对吗？

3. 能否说"系统含有热量"？能否说"系统含有功"？

4. 说明焦耳热功当量实验在建立热力学第一定律过程中所起的作用.

5. 有人声称他设计了一个机器. 当燃料供给 2.5×10^7 cal 的热量时，这机器对外做30 kW · h的功，而有 7.5×10^6 cal 的热量放走. 这机器可能吗？

6. 对于由 p、V、T 状态参量描写的系统，在很小的准静态过程中，热力学第一定律数学表达式为

$$đQ = dU + pdV,$$

其中 U 是两个独立参量的函数（可取 p、V；T、V；或 T、p）.

试对液体薄膜系统（状态参量是 α、S、T）写出相应的第一定律表达式.

对可逆电池（状态参量是 $\mathscr{E}$、q、T）写出相应的表达式.

7. 接上题. 若可逆电池中除有功 $\mathscr{E}\,dq$ 外还有功 $-pdV$，试写出热力学第一定律的数学表达式.

8. 设某种电离化的气体由彼此排斥的离子组成. 当这气体经历一绝热自由膨胀时，气体的温度将如何变化？为什么？

9. 如图 5－32 所示，有一个很大的盛水容器，水温为 T，其中放置一个装有压缩气体的汽缸. 在汽缸的活塞连杆上装有平台 A，A 上置有许多极小的砝码. 设一个个逐次地将小砝码移去，问汽缸内的气体将经历一个什么过程？设活塞与汽缸壁之间无摩擦.

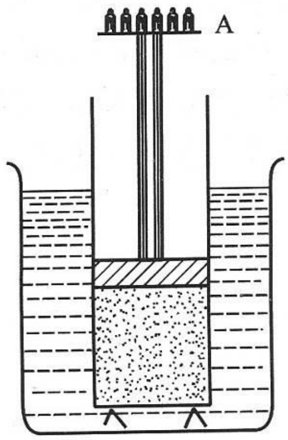

图 5－32

10. 分别在 $p-V$ 图、$p-T$ 图和 $T-V$ 图上画出下列过程曲线：(1) 等体；(2) 等压；(3) 等温；(4) 绝热.

11. 由 p、V、T 描写的理想气体、在等体、等压、等温和绝热过程中能独立改变的状态参量数目是多少？

12. $pV^{\gamma}=C$ 公式在什么条件下成立？

13. 理想气体等温过程的过程方程是什么？试由此证明：在等温过程中理想气体的压缩系数（即等温压缩率，见 §2 例题 2）等于 $\frac{1}{p}$. p 是气体压强.

14. 将上题的结果与弹簧的劲度系数相对比，说明气胎中气体好像一个劲度系数可变的弹簧. 在压缩开始时，很易使它屈服，以后越来越困难.

15. 设在图 5－32 所示的大容器中盛的是冰水平衡共存的混合物. 先用外力迅速向下推动活塞，使汽缸内气体的体积减小；然后让活塞停止在末位置，使汽缸内气体温度恢复为 0 ℃；最后再设法使活塞缓慢地回到初位置. 试分析气体所经历的过程. 能在 $p-V$ 图上画出气体经历的过程吗？

16. 试说明 $\oint đA \neq 0$，$\oint đQ \neq 0$. $\oint$ 表示在 $p-V$ 图上沿任一闭合曲线的积分.

*17. 说明：根据能量转化与守恒定律可以把“第一种永动机不可能造成”的表述改为：“对任何物体不可能有一个循环过程，使得经过这个过程后，外界的影响与不等于零的正的或负的功值相当”（注意，这里所说的外界的影响是指功

与热量之和,而把热量换算为功值).

*18. 说明上题说法的数学表达式为 $\oint(\text{đ}Q + \text{đ}A) = 0$. 并由这式论证存在一态函数(即态函数内能).

第五章习题

1. 0.020 kg 的氦气温度由 17 ℃升为 27 ℃. 若在升温过程中:(1) 体积保持不变;(2) 压强保持不变;(3) 不与外界交换热量,试分别求出气体内能的改变,吸收的热量,外界对气体所做的功. 设氦气可看作理想气体,且 $C_{V,\mathrm{m}}=\frac{3}{2}R$.

2. 分别通过下列过程把标准状态下的 0.014 kg 氮气压缩为原体积的一半:(1) 等温过程;(2) 绝热过程;(3) 等压过程. 试分别求出在这些过程中气体内能的改变,传递的热量和外界对气体所做的功. 设氮气可看作理想气体,且 $C_{V,\mathrm{m}}=\frac{5}{2}R$.

3. 在标准状态下的 0.016 kg 的氧气,分别经过下列过程从外界吸收了 80 cal的热量. (1) 若为等温过程,求终态体积. (2) 若为等体过程,求终态压强. (3) 若为等压过程,求气体内能的变化. 设氧气可看作理想气体,且 $C_{V,\mathrm{m}}=\frac{5}{2}R$.

4. 为确定多方过程方程 $pV^n=C$ 中的指数 n,通常取 $\ln p$ 为纵坐标,$\ln V$ 为横坐标作图. 试讨论在这种图中多方过程曲线的形状,并说明如何确定 n.

5. 室温下一定量理想气体氧的体积为 2.3 L,压强为 1.0 atm,经过一多方过程后体积变为 4.1 L,压强为 0.5 atm. 试求:(1) 多方指数 n;(2) 内能的变化;(3) 吸收的热量; (4) 氧膨胀时对外界所做的功. 设氧的 $C_{V,\mathrm{m}}=\frac{5}{2}R$.

6. 1 mol 理想气体氦,原来的体积为 8.0 L,温度为 27 ℃,设经过准静态绝热过程体积被压缩为 1.0 L,求在压缩过程中,外界对系统所做的功. 设氦气的 $C_{V,\mathrm{m}}=\frac{3}{2}R$.

7. 在标准状态下的 0.016 kg 氧气,经过一绝热过程对外界做功 80 J. 求终态的压强、体积和温度. 设氧气为理想气体,且 $C_{V,\mathrm{m}}=\frac{5}{2}R$,$\gamma=1.4$.

8. 0.008 0 kg 氧气,原来温度为 27 ℃,体积为 0.41 L 若:

(1) 经过绝热膨胀体积增为 4.1 L;

(2) 先经过等温过程再经过等体过程达到与(1)同样的终态.

试分别计算在以上两种过程中外界对气体所做的功. 设氧气可看作理想气体,且 $C_{V,\mathrm{m}}=\dfrac{5}{2}R$.

9. 在标准状态下,1 mol 的单原子理想气体先经过一绝热过程,再经过一等温过程,最后压强和体积均增为原来的两倍,求整个过程中系统吸收的热量. 若先经过等温过程再经过绝热过程而达到同样的状态,则结果是否相同?

10. 一定量的氧气在标准状态下体积为 10.0 L,求下列过程中气体所吸收的热量;

(1) 等温膨胀到 20.0 L;

(2) 先等体冷却再等压膨胀到(1)中所达到的终态. 设氧气可看作理想气体,且 $C_{V,\mathrm{m}}=\dfrac{5}{2}R$.

11. 图 5-33 中的实线表示一任意形状系统的界面. 设当系统的界面由实线膨胀到虚线的微元过程中,系统总体积增加 $\mathrm{d}V$,而在这过程界面上各处均受到与界面垂直的外界均匀压强 p_e. 试证明:外界对系统所做体积功为 $-p_e\mathrm{d}V$;若过程为准静态的. 则此功又可表示为 $-p\mathrm{d}V$,其中 p 表示系统内部均匀压强.

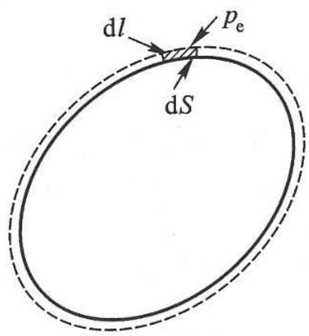

图 5-33

*12. 证明:当 γ 为常数时,若理想气体在某一过程中的热容也是常量,则这个过程一定是多方过程.

13. 1 mol 某气体服从状态方程 $p(V_\mathrm{m}-b)=RT$,内能为

$$U_\mathrm{m}=C_{V,\mathrm{m}}T+U_{\mathrm{m}0},$$

$C_{V,\mathrm{m}}$、$U_{\mathrm{m}0}$ 为常量. 试证明,在准静态绝热过程中,这气体满足方程:

$$p(V_\mathrm{m}-b)^\gamma=\text{常量},$$

其中 $\gamma=C_{p,\mathrm{m}}/C_{V,\mathrm{m}}$.

14. 在 24 ℃时水蒸气的饱和气压为 0.029 824 bar. 若已知在这条件下水蒸气的焓是2 545.0 $\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$,水的焓是 100.59 $\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$,求在这条件下水蒸气的凝结热.

15. 分析实验数据表明,在 1 atm 下,从 300 K 到 1 200 K 范围内,铜的摩尔定压热容 $C_{p,\mathrm{m}}$ 可表示为

$$C_{p,\mathrm{m}}=a+bT,$$

其中 $a=2.3\times10^4$, $b=5.92$, $C_{p,\mathrm{m}}$ 单位是 $\mathrm{J\cdot mol^{-1}K^{-1}}$. 试由此计算在 1 atm 下,当温度从 300 K 增到 1 200 K 时铜的焓的改变.

16. 设 1 mol 固体的物态方程可写作

$$V_m = V_{m0} + aT + bp;$$

内能可表示为

$$U_m = cT - apT,$$

其中 a、b、c 和 V_{m0} 均是常量. 试求:

(1) 摩尔焓的表达式;

(2) 摩尔热容 $C_{p,m}$ 和 $C_{V,m}$.

17. 若把氮气、氢气和氨气都看作理想气体($p\to0$),由气体热力学性质表[9]可查到它们在 298 K 的焓值分别为 8 669 J · mol^{-1}, 8 468 J · mol^{-1} 和 −29 154 J · mol^{-1}. 试求在定压下氨的合成热. 氨的合成反应为

$$\frac{1}{2}N_2 + \frac{3}{2}H_2 \longrightarrow NH_3.$$

18. 燃料电池是把化学能直接转化为电能的装置. 图 5 − 34 所示是燃料电池一例. 把氢气和氧气连续通入多孔 Ni 电极, Ni 电极是浸在 KOH 电解液中的. 在两极进行的化学反应如图所示. 这燃料电池反应的总效果是

$$H_2(\text{气}) + \frac{1}{2}O_2(\text{气}) \longrightarrow H_2O(\text{液})$$

若一燃料电池工作于 298 K 定压下,在反应前后焓的改变为

$$\Delta H = -285.8\ \mathrm{kJ \cdot mol^{-1}},$$

两极电压为 1.229 V. 试求这燃料电池的效率.

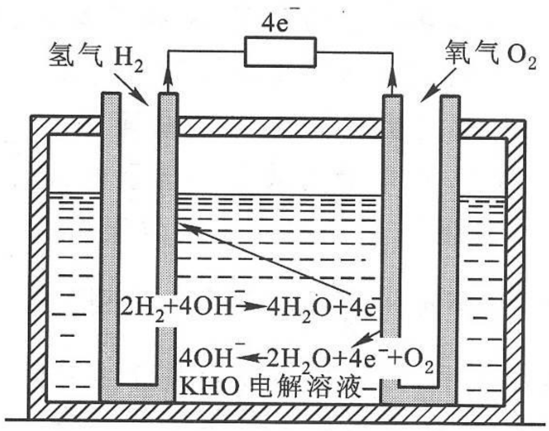

图 5 − 34

19. 大气温度随高度 z 降低的主要原因是,低处与高处各层间不断发生空气交换. 由于空气的导热性能不好,所以空气在升高时的膨胀(及下降时的压缩)可认为是绝热过程. 若假设过程是准静态的,并注意到大气达到稳定机械平衡时压强差与高度差的关系,证明空气的温度梯度为

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{\gamma-1}{\gamma}\frac{T}{p}\rho g.$$

其中 p 为空气压强,ρ、T 分别为密度与温度、γ 是空气的 $C_{p,\mathrm{m}}/C_{V,\mathrm{m}}$.

20. 利用大气压随高度变化的微分公式

$$\mathrm{d}p = -\frac{Mgp}{RT}\mathrm{d}z,$$

证明:

$$h = \frac{C_{p,\mathrm{m}}T_0}{Mg}\left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right],$$

其中 T_0 和 p_0 为地面的温度和压强,p 是高度 h 处的压强. 假设上升空气的膨胀是准静态绝热过程.

21. 图 5-35 有一除底部外都是绝热的气筒,被一位置固定的导热板隔成相等的两部分 A 和 B,其中各盛有 1 mol 的理想气体氮. 今将 80.0 cal 的热量缓慢地由底部供给气体,设活塞上的压强始终保持为 1.00 atm,求 A 部和 B 部温度的改变以及各吸收的热量(导热板的热容可以忽略).

若将位置固定的导热板换成可以自由滑动的绝热隔板,重复上述讨论.

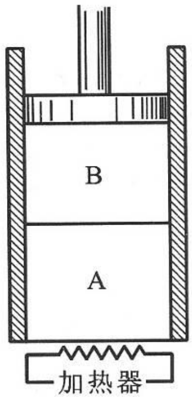

图 5-35

22. 图 5-36 所示是一种测定 γ 的装置. 经活塞 B 将气体压入容器 A 中,使压强略高于大气压(设为 p_1). 然后迅速开启再关闭活塞 C,此时气体绝热膨胀到大气压强 p_0. 经过一段时间,容器中气体的温度又恢复到与室温相同,压强变为 p_2,假设开启 C 后关闭 C 前气体经历的是准静态绝热过程,试定出求 γ 的表达式.

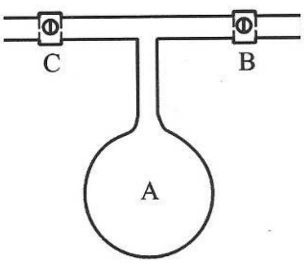

图 5-36

23. 如图 5-37 所示,瓶内盛有气体,一横截面为 A 的玻璃管通过瓶塞插入瓶内. 玻璃管内放有一质量为 m 的光滑金属小球(像一个活塞). 设小球在平衡位置时,气体的体积为 V,压强为 $p = p_0 + \dfrac{mg}{A}$(p_0 为大气压强). 再将小球稍向下移,然后放手,则小球将以周期 T 在平衡位置附近做简谐振动. 假定在小球上下振动的过程中,瓶内气体进行的过程可看作准静态绝热过程,试证明:

(1) 使小球进行简谐振动的准弹性力为

$$F = -\frac{\gamma p A^2}{V}y,$$

这里 $\gamma = C_{p,\mathrm{m}}/C_{V,\mathrm{m}}$,$y$ 为位移.

(2) 小球进行简谐振动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{mV}{\gamma p A^2}}.$$

(3) 由此说明如何利用这现象测定 γ.

24. 仍如前题装置,设开始实验时,维持小球所在的位置正好使得瓶内气体压强为大气压强 p_0. 然后让小球在其重力作用下下落,它下落一段距离 L 后又开始上升.

(1) 证明:在这过程中小球克服准弹性力所做的功为

$$\frac{\gamma p_0 A^2 L^2}{2V}.$$

(2) 上述的功由小球重力势能转化而来,试由此证明:

$$\gamma = \frac{2mgV}{p_0 A^2 L}.$$

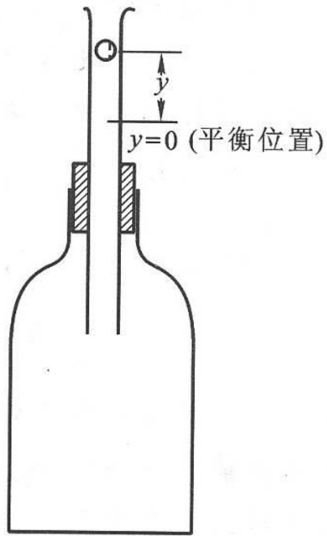

图 5-37

25. 如图 5-38 所示,用绝热壁作成一圆柱形的容器. 在容器中间放置一无摩擦的、绝热的可动活塞. 活塞两侧各有 n mol 的理想气体,开始状态均为 p_0、V_0、T_0. 设气体摩尔定容热容 $C_{V,m}$ 为常量,$\gamma = 1.5$.

将一通电线圈放到活塞左侧气体中,对气体缓慢地加热,左侧气体膨胀同时通过活塞压缩右方气体,最后使右方气体压强增为 $\frac{27}{8}p_0$. 问:

(1) 对活塞右侧气体做了多少功?

(2) 右侧气体的终温是多少?

(3) 左侧气体的终温是多少?

(4) 左侧气体吸收了多少热量?

*26. 图 5-39 中方框表示一能对外输出机械功的设备,在这设备中有流体做稳定流动. 在设备入口处取一小块流体,其压强为 p_1、体积为 V_1,流速为 v_1,离地面的高度为 z_1. 在出口时该流块的相应各量变为 p_2、V_2、v_2 和 z_2.

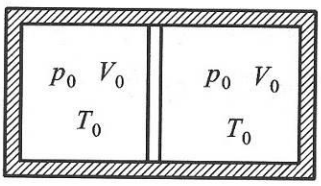

图 5-38

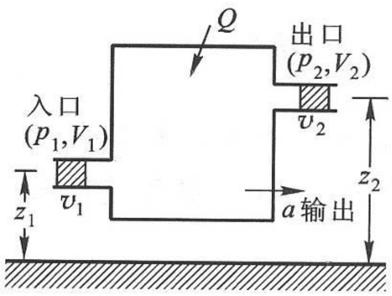

图 5-39