

## 第 13 章 热力学基础

### 思考题

**13-1** 内能和热量有什么区别？

**[提示]** 内能是热力学系统具有的能量。内能反映系统状态特征，它是个状态量，是系统状态的单值函数。理想气体的内能只是温度的单值函数。功与热量是系统与外界转移能量的两种方式，它们是过程量，是被转移的能量的量度，是系统内能变化的量度。

**13-2** 对一定量的某种理想气体在下列变化过程中，内能有何变化？

(1) 压强不变，体积膨胀；(2) 体积不变，气体吸热，压强增大；(3) 温度不变，体积压缩。

**[提示]** 在同一  $p-V$  图上示意画出上述三种过程，容易判别；过程 (1) 内能增加；过程 (2) 内能增加；过程 (3) 内能不变。

**13-3** 一定量的理想气体，从  $p-V$  图上同一初态  $A$  开始，分别经历三种不同的过程到达不同的末态，末态的温度相同，如图所示。其中  $A \rightarrow C$  是绝热过程。

(1) 在  $A \rightarrow B$  过程中气体是吸热还是放热，为什么？

(2) 在  $A \rightarrow D$  过程中气体是吸热还是放热，为什么？

**[提示]** 图中  $A \rightarrow B$ ， $A \rightarrow C$ ， $A \rightarrow D$  三个过程，始末两态的温度相同，则内能增量  $\Delta E$  相同。由于始态  $A$  的温度高于各过程末态的温度，所以三个过程均有  $\Delta T < 0$ ， $\Delta E < 0$ 。

(1)  $A \rightarrow B$  过程：过程曲线比绝热线陡，该过程对外做功比绝热过程少，即  $W_{AB} < W_{AC}$ 。

根据热力学第一定律比较  $A \rightarrow B$  过程与绝热过程，有

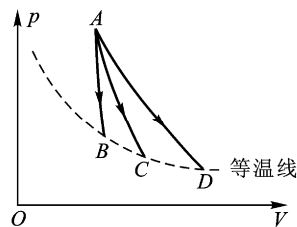
$$A \rightarrow B \text{ 过程: } Q_{AB} = \Delta E + W_{AB}$$

$$\text{绝热过程: } 0 = \Delta E + W_{AC}$$

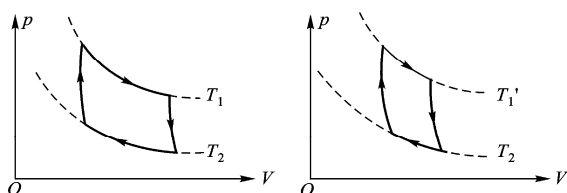
两过程的  $\Delta E$  相同，由于  $W_{AB} < W_{AC}$ ，可知  $A \rightarrow B$  过程  $Q_{AB} < 0$ ，系统放热。

(2) 类似上面的分析可得  $A \rightarrow D$  过程  $Q_{AD} > 0$ ，系统吸热。

**13-4** 两台卡诺热机，使用同一低温热源，不同高温热源，在  $p-V$  图上它们的循环曲线所包围的面积相等，如图所示。问它们对外做的净功是否相同，效率是否相同？



思考题 13-3 图



思考题 13-4 图

**[提示]** 净功在数值上等于循环曲线所包围的面积的大小, 根据题意, 两台热机的循环曲线所包围的面积相等, 所以它们对外做的净功相同; 又因为卡诺热机的效率  $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$  只与两热源的温度有关, 两台卡诺热机的低温热源温度  $T_2$  相同, 但  $T_1' \neq T_1$ , 所以两台卡诺热机的效率不相同。

**13-5** 从理论上讲, 提高卡诺热机的效率有哪些途径? 在实际中采用什么办法?

**[提示]** 从理论上讲, 提高卡诺热机的效率可采取: (1) 提高高温热源的温度  $T_1$ ; (2) 降低低温热源的温度  $T_2$ ; (3) 二者并举。实际中, 除了减少损耗提高热机效率外, 常用提高高温热源的温度, 而低温热源多采用大气。

**13-6** 根据热力学第二定律判断下列说法是否正确?

- (1) 功可以全部转化为热, 但热不能全部转化为功;
- (2) 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;
- (3) 理想气体作等温膨胀时, 所吸收的热量完全转化为功是违反热力学第二定律的。

**[提示]** (1) 不正确。热力学第二定律指出的是: 功热转换的不可逆性, 即在不引起其它变化的条件下, 功可以全部转化为热, 热不能全部转化为功, 如果取消“不引起其它变化”的限制, 热是可以全部转变为功的, 例如等温膨胀过程, 系统所吸收的热全部用来对外作功, 只是在此过程中, 系统状态发生了变化。

(2) 不正确。热力学第二定律并非指热量在高温物体与低温物体之间的流向问题。两种相反方向的流动都可能进行。而是指出热量流动的不可逆性。热量从高温物体流向低温物体的过程可以自发地进行, 相反的流动必须在其它过程伴随下才能进行 (如致冷机从物体中提取热量放到高温环境中去的过程必须有功转变为热的过程相伴)。

(3) 不违反。热力学第二定律是对作循环动作的热机而言, 不能把吸收的热量完全转化为功。等温膨胀不是循环过程, 系统没有恢复原来状态, 因而不违反热力学第二定律。

**13-7** 可逆过程是否一定是准静态过程? 准静态过程是否一定是可逆的? 不可逆过程是否一定是非静态过程? 非静态过程是否一定是不可逆的?

**[提示]** 可逆过程和准静态过程是两个不同的概念。准静态过程不一定可逆, 因为它还需要“没有摩擦”的条件, 有摩擦的准静态过程是不可逆过程。反之, 准静态过程只是热力学的概念, 没有热现象参与的纯力学过程、电磁过程及基本粒子的基元过程可以是可逆过程, 但与准静态无关。不过, 如有热现象参与的可逆过程, 其热现象必须是准静态的。

不可逆过程不一定是非静态过程, 因为有摩擦的过程也可能是不可逆的。非静态过程一

定是不可逆过程。

**13-8** 为什么热力学第二定律可以有多种不同的表述？

**[提示]** 因为热力学第二定律的实质是说明了自发过程的不可逆性。所有有关热力学过程的不可逆性的表述都是等价的。都可作为热力学第二定律的表述，所以原则上可以有无限多种表述。

## 习 题 13

### 选择题

13-1 B    13-2 C    13-3 A    13-4 D    13-5 B    13-6 A

13-7 B    13-8 C

### 填空题

13-9  $\frac{a}{V_1} - \frac{a}{V_2}$

13-10 AM, AM、BM

13-11 等压,  $\frac{1}{2}RT_0$

13-12 90 J

13-13 (略)

### 计算题

13-14 一定量的理想气体，从 A 态出发，经 p-V 图中所示的过程到达 B 态，试求在整个过程中，该气体吸收的热量。

**[分析]** 用热力学第一定律求解。注意内能是状态量，功和热量都是过程量。

**[解]** 右图可得

A 态:  $p_A V_A = 8 \times 10^5 \text{ J}$

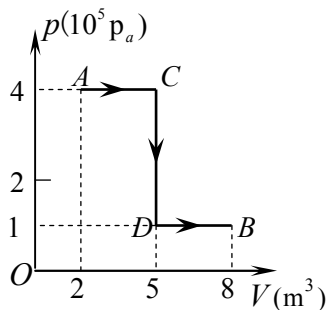
B 态:  $p_B V_B = 8 \times 10^5 \text{ J}$

因为  $p_A V_A = p_B V_B$ ，根据理想气体状态方程，有

$$T_A = T_B, \text{ 因而 } \Delta E = 0$$

根据热力学第一定律得

$$Q = W = p_A(V_C - V_A) + p_B(V_B - V_D) = 1.5 \times 10^6 \text{ J}$$



习题 13-14 图

13-15 一系统由图中的 a 态沿 abc 到达 c 态时，吸热 350 J，同时对外做功 126 J。(1) 如果沿 adc 进行，则系统做功 42 J。问这时系统吸收了多少热量？(2) 当系统由 c 态沿曲线 ca 返回到 a 态时，如果外界对系统做功 84 J，问这时系统是吸热还是放热？热量传递是多少？

**[分析]** 用热力学第一定律求解。注意内能是状态量, 功和热量都是过程量。

**[解]** (1) 热力学第一定律应用于  $abc$  过程, 有

$$\begin{aligned}\Delta E_{abc} &= E_c - E_a = \Delta Q - \Delta W \\ &= 350 - 126 = 266 \text{ J}\end{aligned}$$

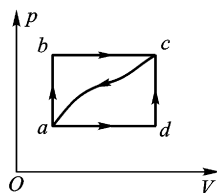
因为内能是状态量,  $\Delta E_{abc} = \Delta E_{adc}$ , 对  $adc$  过程, 有

$$Q_{adc} = \Delta W_{adc} + \Delta E_{adc} = 42 + 224 = 266 \text{ J}$$

(2)  $ca$  过程:

$$\text{因为 } \Delta W_{ca} = -84 \text{ J}, \quad \Delta E_{ca} = E_a - E_c = -224 \text{ J}$$

$$\text{所以 } \Delta Q_{ca} = \Delta E_{ca} + \Delta W_{ca} = -224 - 84 = -308 \text{ J}$$



习题 13-15 图

13-16 1 mol 单原子分子理想气体, 盛于气缸内, 此气缸装有可活动的活塞。已知气体的初压强为  $10^5 \text{ Pa}$ , 体积为  $10^{-3} \text{ m}^3$ 。现将该气体在等压下加热, 直到体积为原来的 2 倍, 然后再在等容下加热, 到压强为原来的 2 倍, 最后作绝热膨胀, 使温度降为起始温度。(1) 将整个过程在  $p$ - $V$  图上表示出来; (2) 整个过程气体内能的改变量; (3) 整个过程气体对外做的功。

**[分析]** 热力学第一定律在等压、等体和绝热过程中的应用。注意各等值过程的特征, 内能是状态量, 功和热量都是过程量。

**[解]** (1) 按题意作出整个过程的  $p$ - $V$  图如解 13-16 图所示。图中虚线为等温线。

$$(2) \text{ 因为 } T_1 = T_4,$$

所以整个过程气体内能的改变量  $\Delta E = 0$

(3) 整个过程气体对外做的功, 有两种解法:

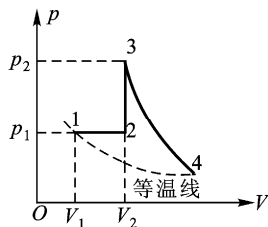
$$\text{解 1: } W = W_{12} + W_{23} + W_{34}$$

等压过程的功

$$\begin{aligned}W_{12} &= \int_{V_1}^{V_2} p dV = p_1(V_2 - V_1) \\ &= 10^5 \times (2 - 1) \times 10^{-3} = 1.0 \times 10^2 \text{ J}\end{aligned}$$

$$\text{等体过程的功 } W_{23} = 0$$

$$\text{绝热过程的功 } W_{34} = \int_{V_3}^{V_4} p dV = \frac{p_3 V_3 - p_4 V_4}{\gamma - 1}$$



解 13-16 图

因为  $p_4 V_4 = p_1 V_1$ , 而  $p_3 = 2p_1$ ,  $V_3 = 2V_1$ ,  $\gamma = \frac{i+2}{i} = \frac{5}{3}$

所以 
$$W_{34} = \frac{4p_1 V_1 - p_1 V_1}{\frac{5}{3} - 1} = \frac{9p_1 V_1}{2} = \frac{9 \times 10^5 \times 10^{-3}}{2} = 4.5 \times 10^2 \text{ J}$$

整个过程的功  $W = W_{12} + W_{23} + W_{34}$

$$= (1.0 + 0 + 4.5) \times 10^2 = 5.5 \times 10^2 \text{ J}$$

**解 2:** 因为整个过程  $\Delta E = 0$ , 由热力学第一定律, 有

$$W = Q = Q_{12} + Q_{23}$$

其中  $Q_{12} = C_{p,m}(T_2 - T_1) = \frac{5}{2} R(T_2 - T_1) = \frac{5}{2} p_1 (V_2 - V_1) = \frac{5}{2} p_1 V_1$

$$Q_{23} = C_{V,m}(T_3 - T_2) = \frac{3}{2} R(T_3 - T_2) = \frac{3}{2} V_2 (p_3 - p_2) = 3 p_1 V_1$$

$$\therefore W = Q = Q_{12} + Q_{23}$$

$$= \frac{5}{2} p_1 V_1 + 3 p_1 V_1 = \frac{11}{2} \times 10^5 \times 10^{-3} = 5.5 \times 10^2 \text{ J}$$

13-17 1mol 双原子理想气体, 从状态  $A$  沿  $p$ - $V$  图所示的直线变化到状态  $B$ , 试求: (1) 气体内能的增量  $\Delta E$ ; (2) 气体对外界所做的功  $W$ ; (3) 气体吸收的热量  $Q$ ; (4) 此过程的摩尔热容量  $C_m$ 。

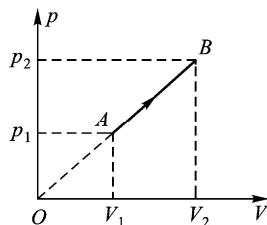
**[分析]**  $A \rightarrow B$  过程是一个任意过程。内能只与  $A$ 、 $B$  状态的温度有关; 功在数值上等于过程曲线与  $V$  轴所围面积的大小; 由热力学第一定律可求得热量, 再由摩尔热容的定义求此过程的摩尔热容量。

**[解]** (1) 内能的增量

$$\Delta E = \frac{m}{M} \frac{i}{2} R(T_2 - T_1) = \frac{5}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

(2) 气体对外做的功  $W$  数值上等于过程曲线与  $V$  轴所围面积的大小

$$W = \frac{1}{2} (p_1 + p_2) (V_2 - V_1)$$



因为  $\frac{p_2}{V_2} = \frac{p_1}{V_1}$ , 即  $p_2 V_1 = p_1 V_2$

习题 13-17 图

所以 
$$W = \frac{1}{2}(p_2V_2 - p_1V_1)$$

(3) 气体吸收的热量  $Q$

$$Q = \Delta E + W = 3(p_2V_2 - p_1V_1) = 3R(T_2 - T_1)$$

(4) 此过程的摩尔热容量  $C_m$

$$C_m = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{3R(T_2 - T_1)}{T_2 - T_1} = 3R$$

13-18 1mol 理想气体在  $T_1 = 400\text{ K}$  的高温热源与  $T_2 = 300\text{ K}$  的低温热源之间作卡诺循环, 在 400K 的等温线上起始体积为  $V_1 = 0.001\text{ m}^3$ , 终止体积为  $V_2 = 0.005\text{ m}^3$ 。试求此气体在每一循环中: (1) 从高温热源吸取的热量  $Q_1$ ; (2) 气体对外做的净功  $W$ ; (3) 气体传给低温热源的热量  $Q_2$ 。

**[分析]**  $Q_1$  可以根据气体等温膨胀吸热的公式求得; 由于卡诺热机的效率仅与高低温热源的温度有关, 知道  $T_1$ 、 $T_2$  即可求得效率, 再根据效率的定义式就可求得净功; 又因为净功等于净热, 据此便可求得  $Q_2$ 。

**[解]** (1)  $Q_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 8.31 \times 400 \times \ln \frac{0.005}{0.001} = 5.35 \times 10^3\text{ J}$

(2) 因为卡诺热机的效率  $\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{400} = 0.25$

所以每一循环气体对外做的净功

$$W = \eta Q_1 = 0.25 \times 5.35 \times 10^3 = 1.34 \times 10^3\text{ J}$$

(3) 因为  $W = Q_1 - Q_2$

所以  $Q_2 = Q_1 - W = (5.35 - 1.34) \times 10^3 = 4.01 \times 10^3\text{ J}$

13-19 如图所示,  $AB$ 、 $DC$  是两绝热过程,  $CQA$  是等温过程。已知系统在  $CQA$  过程中放热 100 J,  $Q_{AB}$  的面积是 30 J,  $Q_{DC}$  的面积为 70 J。试问在  $BQD$  过程中系统是吸热还是放热? 热量是多少?

**[分析]**  $Q_{DC}$  包围的面积所对应的净功值大于 0, 而  $Q_{AB}$  为逆循环, 其包围的面积所对应的净功值小于 0, 即外界对系统做功。热力学第一定律应用于整个循环, 并注意到整个循环  $\Delta E = 0$ , 便可求得整个循环系统从外界吸收的热量。又因为  $AB$ 、 $DC$  是两绝热过程,  $CQA$  过程放热, 故  $BQD$  过程系统必吸热。

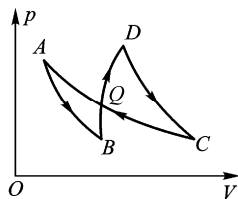
**[解]** 整个循环  $\Delta E = 0$

整个循环系统对外做的净功

$$W = 70 - 30 = 40 \text{ J}$$

热力学第一定律应用于整个循环, 得整个循环系统从外界吸收的净热量

$$Q = W - \Delta E = W = 40 \text{ J}$$



习题 13-19 图

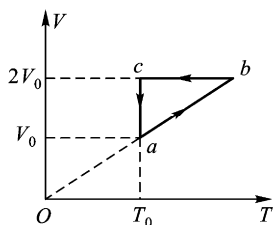
由于  $AB$ 、 $DC$  绝热,  $CQA$  过程放热  $Q_2 = 100 \text{ J}$ , 故  $BQD$  过程系统必吸热, 设为  $Q_1$ , 则

因为 
$$Q = Q_1 - Q_2$$

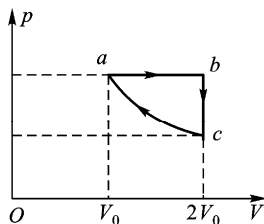
所以 
$$Q_1 = Q + Q_2 = 40 + 100 = 140 \text{ J}$$

13-20 1mol 单原子分子理想气体的循环过程的  $V-T$  图如图所示。图中  $T_0 = 300 \text{ K}$ 。(1)

在  $p-V$  图上表示该循环过程;(2)  $ab$ 、 $bc$ 、 $ca$  各个过程系统吸收的热量;(3) 每一循环系统对外做的净功  $W$ ;(4) 循环效率  $\eta$ 。



习题 13-20 图



解 13-20

**[分析]** 先把  $V-T$  图转换成  $p-V$  图, 由热力学第一定律求各等值过程吸收的热量; 净功等于净热; 最后由效率的定义求循环效率。

**[解]** (1) 该循环过程对应的  $p-V$  图如解 13-20 图所示。

(2) 单原子分子的自由度  $i = 3$

$ab$  是等压过程 
$$\frac{V_a}{T_0} = \frac{V_b}{T_b}, \quad T_b = \frac{2V_0}{V_0} T_0 = 2T_0 = 600 \text{ K}$$

所以 
$$Q_{ab} = C_p (T_b - T_a)$$

$$= \frac{i+2}{2} R(T_b - T_0) = \frac{5}{2} RT_0 = \frac{5}{2} \times 8.31 \times 300 = 6232.5 \text{ J}$$

$$Q_{bc} = C_v (T_c - T_b) = \frac{i}{2} R(T_0 - 2T_0) = -\frac{3}{2} \times 8.31 \times 300 = -3739.5 \text{ J}$$

$$Q_{ca} = RT_0 \ln \frac{V_a}{V_c} = -RT_0 \ln 2 = -8.31 \times 300 \times 0.693 = -1727.6 \text{ J}$$

(3) 因为净功等于净热

所以 
$$W = Q_{ab} - (|Q_{bc}| + |Q_{ca}|) = RT_0(1 - \ln 2)$$

$$= 8.31 \times 300 \times (1 - 0.693) = 765.4 \text{ J}$$

(4) 循环效率

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{W}{Q_{ab}} = \frac{765.4}{6232.5} = 12.3 \%$$