

# 工程热力学

习题答案·大作业·模拟试卷

◎ 李永 宋健 编著



# 工程热力学学习题答案·大作业·模拟试卷

李 永 宋 健 编著



机 械 工 业 出 版 社

# 目 录

|      |                                        |    |
|------|----------------------------------------|----|
| 第一部分 | 习题总览与方法实践 .....                        | 1  |
| 第一章  | 基本概念 .....                             | 1  |
| 第二章  | 热力学第一定律及其应用 .....                      | 4  |
| 第三章  | 理想气体的性质 .....                          | 10 |
| 第四章  | 理想气体的热力过程 .....                        | 14 |
| 第五章  | 热力学第二定律 .....                          | 26 |
| 第六章  | 水蒸气性质和蒸气动力循环 .....                     | 38 |
| 第七章  | 实际空气性质和过程 .....                        | 49 |
| 第二部分 | 大作业 .....                              | 51 |
| 第一组  | .....                                  | 51 |
| 第二组  | .....                                  | 54 |
| 第三组  | .....                                  | 57 |
| 第四组  | .....                                  | 65 |
| 第三部分 | 北京理工大学 2011—2016 年工程热力学模拟试题与要点提示 ..... | 70 |
|      | 2011 年模拟期末试题与要点提示 .....                | 70 |
|      | 2012 年模拟期末试题与要点提示 .....                | 72 |
|      | 2013 年模拟期末试题与要点提示 .....                | 74 |
|      | 2014 年模拟期末试题与要点提示 .....                | 77 |
|      | 2015 年模拟期末试题与要点提示 .....                | 81 |
|      | 2016 年模拟期末试题与要点提示 .....                | 84 |

# 第一部分

## 习题总览与方法实践

### 第一章 基本概念



#### 思考题答案

【思考题 1-1】答：不对。因为压力表的读数取决于容器中气体的压力和压力表所处环境的大气压力两个因素。因此，即使容器中的气体压力保持不变，当大气压力变化时，压力表的读数也会随之变化，而不能保持不变。

【思考题 1-2】答：平衡（状态）指的是热力系统在没有外界作用（即热力系统与外界没有能量和物质交换，但不排除有恒定的外场如重力场作用）的情况下，宏观性质不随时间变化，即热力系统在没有外界作用时的时间特征与时间无关。因此两者是不同的。如对气-液两相平衡的状态，尽管气-液两相的温度、压力都相同，但两者的密度差别很大，是非均匀系统。反之，均匀系统也不一定处于平衡状态。

但是在某些特殊情况下，“平衡”与“均匀”又可能是统一的。如对于处于平衡状态下的单相流体（气体或者液体），如果忽略重力的影响，又没有其他外场（电、磁场等）作用，则内部各处的各种性质都是均匀一致的。

【思考题 1-3】答：“平衡”意味着宏观静止，无变化，而“过程”意味着变化运动，意味着平衡被破坏，所以二者是有矛盾的。对一个热力系统来说，或是平衡，静止不动，或是运动，变化，二者必居其一。但是二者也有结合点，内部平衡过程恰恰将这两个矛盾的东西有条件地统一在一起了。这个条件就是：在内部平衡过程中，当外界对热力系统的作用缓慢得足以使热力系统内部能量及时恢复不断被破坏的平衡。

【思考题 1-4】答：状态量是热力状态的单值函数，其数学特性是点函数。状态量的微分可以改成全微分，这个全微分的循环积分恒为零；而过程量不是热力状态的单值函数，即使在初、终态完全相同的情况下，其大小也与其中间经历的具体路径有关。过程量的微分不能写成全微分，它的循环积分不是零而是一个确定的数值。

【思考题 1-5】答：是。热力分析首先应明确研究对象，根据所研究的问题人为地划定一个或多个任意几何面所围成的空间，目的是确定空间内物质的总和。

【思考题 1-6】答：若系统处于热力平衡状态，对于整个系统就可以用一组统一的并具有确定数值的状态参数来描述其状态，使得热力分析大为简化。

【思考题 1-7】答：平衡状态和稳定状态具有相同的外在表现，即系统状态参数不随时间变化；两者的差别在于平衡状态的本质是不平衡势差为零，而稳定状态允许不平衡势差的存在，如稳定导热。可见，平衡

必稳定；反之，稳定未必平衡。根据平衡状态的定义，不受外界影响的系统，其稳定状态就是平衡状态。在不受外界影响（重力场除外）的条件下，如果系统的状态参数不随时间变化，则该系统所处的状态称为平衡状态。

【思考题 1-8】答：由于表压力和真空度都是相对压力，而只有绝对压力才是工质的压力。表压力  $p_g$  和真空度  $p_v$  与绝对压力的关系如下：

$$p = p_b + p_g$$

$$p = p_b - p_v$$

式中， $p_b$  为测量当地的大气压力。

工质的压力不变化，相当于绝对压力不变化，但随着各地的纬度、高度和气候条件的不同，测量当地的大气压值也会不同。根据上面两个关系式可以看出，虽然绝对压力不变化，但由于测量地点的大气压值不同，当地测量的压力表或真空表的读数也会不同。

【思考题 1-9】答：准静态过程是指系统状态改变的不平衡势差无限小，以至于该系统在任意时刻均无限接近于某个平衡状态。准静态过程允许系统状态发生变化，但是要求状态变化的每一步，系统都要处在平衡状态。

【思考题 1-10】答：可逆过程的充分必要条件包括：① 过程进行中，系统内部以及系统与外界之间不存在不平衡势差，或过程应为准静态的；② 过程中不存在耗散效应，即“无耗散”的准静态过程才是可逆过程。因此准静态过程的概念不能完全表达可逆过程的概念。

【思考题 1-11】答：不对。系统经历不可逆过程后是可以恢复到起始状态的，只不过系统恢复到起始状态后，外界却无法同时恢复到起始状态，即外界的状态必将发生变化。

【思考题 1-12】答： $w = \int p dv$  计算得到的是准静态过程的容积变化功，因此仅适用于准静态过程或可逆过程；对于非准静态过程，其过程曲线无法在  $p-v$  图上表达，因此也就无法用上面的公式进行计算。

$q = \int T ds$  禁用于不可逆过程。根据熵的定义式，有  $ds = \frac{\delta q_{rev}}{T}$ 。对于可逆过程， $q = \int T ds$  计算出的是传热量，此时  $ds$  仅表示熵流  $ds_f$ ；对于不可逆过程，熵的变化不仅包括熵流，还包括熵产，即  $ds = ds_g + ds_f$ ，因此  $q = \int T ds$  中的  $ds$  不仅包括由于传热产生的熵流，还包括由于不可逆导致的熵产，因此上式不适用于不可逆过程。例如：绝热过程中，系统由于经历了不可逆过程，熵增  $ds > 0$ ，但此时传热量为零。

【思考题 1-13】答：不一定，稳定流动系统内的质量也保持恒定。

【思考题 1-14】答：不对，绝热系统的绝热是指热能单独通过系统边界进行传递（传热量），随物质进入的热能（准确地说是热力学能）不在其中。

【思考题 1-15】答：平衡状态一定是稳定状态，稳定状态则不一定是平衡状态。

【思考题 1-16】答：当地大气压  $p_b$  改变，压力表读数就会改变。当地大气压  $p_b$  不一定是环境大气压。

【思考题 1-17】答：热力学第零定律。

【思考题 1-18】答：不同测温物质的测温结果有较大的误差，因为测温结果依赖于测温物质的性质。

【思考题 1-19】答：有势差（温度差、压力差、浓度差、电位差等）存在。

【思考题 1-20】答：参加公路自行车赛的运动员是开口系统，运动手枪中的压缩空气是闭口绝热系统，杯子里的热水是开口系统（忽略蒸发时为闭口系统），正在运行的电视机是闭口系统。

【思考题 1-21】答：不包括电加热器为开口（不绝热）系统（图 a）。包括电加热器则为开口绝热系统（图 b）。

将能量传递和质量传递（冷水源、热水源、热源、电源等）全部包括在内，构成孤立系统。或者说，孤立系统把所有发生相互作用的部分均包括在内。

【思考题 1-22】答：吸入空气，排出烟气，输出动力（机械能）以克服阻力，发动机散热器还要大量散热。系统不考虑燃烧时，燃料燃烧是热源，燃气工质吸热；系统考虑燃烧时，油料发生减少。

【思考题 1-23】答：经历一个不可逆过程后，系统可以恢复原来状态，它将导致外界发生变化，包括系统和外界整个大系统不能恢复原来状态。

【思考题 1-24】答：（1）不做功。

（2）不做功。

（3）前者不行，后者可以。

【思考题 1-25】答：不同意。过程  $1 \rightarrow a \rightarrow 2$  的做功量是确定的，而过程  $1 \rightarrow b \rightarrow 2$  的做功量不确定，因而无法比较。

【思考题 1-26】答：系统经历一可逆正向循环及其逆向可逆循环后，系统和外界没有变化。若上述正向循环及逆向循环中有不可逆因素，则系统恢复原来状态，外界则留下了变化（外界的熵增加）。

【思考题 1-27】答：不需要。做功过程中排斥大气功在压缩过程中被回收回来了（大气推动活塞做功）。



## 习题答案

【题 1-1】解：（1） $p_v = p_b - p = (0.1 \times 10^6 - 1000) / 133.3224 = 742.56 \text{ (mmHg)}$

（2） $F = A\Delta P = A(p_b - p) = 1 \times (0.1 \times 10^6 - 1000) = 99000 \text{ (N)}$

【题 1-2】解：由式（1-6）， $p_g = \rho g \Delta z$ ，得到  $\Delta z = \frac{p_g}{g}$

（1） $\Delta z_{\text{水}} = \frac{p_g}{\rho_{\text{水}} g} = \frac{0.01 \times 10^6}{10^3 \times 9.80665} = 1.0197 \text{ (m)} = 1019.7 \text{ (mm)}$

（2） $\Delta z_{\text{酒精}} = \frac{p_g}{\rho_{\text{酒精}} g} = \frac{0.01 \times 10^6}{789 \times 9.80665} = 1.2924 \text{ (m)} = 1292.4 \text{ (mm)}$

【题 1-3】解：水柱高、汞柱高及大气压力之和即为容器中气体的绝对压力，但各种压力单位要经过换算。

$$\begin{aligned} p &= p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{Hg}} + p_b \\ &= 850 \times 9.806375 + (520 + 755) \times 133.3224 \\ &\approx 178320 \text{ (Pa)} = 1.7832 \text{ (bar)} \end{aligned}$$

【题 1-4】解： $p = 1025 \text{ mbar} = 1.025 \text{ bar} = 1.025 \times 750.062 = 768.81 \text{ (mmHg)}$

$\Delta p = p - p_{\text{标准}} = 768.81 - 760 = 8.81 \text{ (mmHg)} = 8.81 / 0.750062 = 11.75 \text{ (mbar)}$

或  $\Delta p = p - p_{\text{标准}} = 1.025 \text{ bar} - 1.01325 \text{ bar} = 0.01175 \text{ (bar)} = 11.75 \text{ (mbar)}$

\*此题的目的是练习压力单位换算。

【题 1-5】解：

$$\begin{aligned} p_A &= p_B + p_{g1} = 745 \times 133.3224 \times 10^{-6} + 9.82 \times 0.0098 \\ &= 0.0993 + 0.963 = 1.0623 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

因为  $p_A = p_{g2} + p_B$

所以  $p_B = p_A - p_{g2} = 1.0623 - 4.24 \times 0.10325 = 0.6245 \text{ (MPa)}$

【题 1-6】解：在国际单位制中，这时水蒸气的压力为  $p = 100 \times 9.80665 \times 10^4 = 9806650 \text{ (Pa)} = 9.80665 \text{ (MPa)}$



由焓的表达式可知  $h = u + apv$ , 得  $u = h - apv = 806.6 - 100 \times 10^4 \times 0.03347 / 426.936 = 728.20$  (kcal/kg) =  $728.20 \times 4.1868$  (kJ/kg) = 3048.83 (kJ/kg)

【题 1-7】解: 设以  $t_C$  表示摄氏温度,  $t_F$  表示华氏温度。

根据摄氏和华氏两种温标的冰点和沸点的取法, 可知两者温度之间存在着线性换算关系。

假设  $t_F = at_C + b$ , 则对冰点可得  $32 = 0 + b$ ; 对沸点可得  $212 = a \times 100 + b$ 。所以有  $t_F = \frac{9}{5}t_C + 32$  或  $t_C = \frac{5}{9}(t_F - 32)$

当  $t_C = -273.15^\circ\text{C}$  (即 0K) 时,  $t_F = \frac{9}{5} \times (-273.15) + 32 = -459.67$  ( $^\circ\text{F}$ )

【题 1-8】解: 由题可知, 外部大气压强为 760mmHg (1mmHg =  $pgh = 133.322\text{Pa}$ )

$$p_0 = 0.760\rho_{\text{Hg}}g \approx 133.322 \times 760 = 101.325 \text{ (kPa)}$$

真空室的真空度为 760mmHg

$$p_v = 0.745\rho_{\text{Hg}}g \approx 133.322 \times 745 = 99.325 \text{ (kPa)}$$

$$(1) p_{\text{真空}} = p_0 - p_v = 2\text{kPa}$$

表 A 的读数为 360kPa, 表示 I 室对真空室的相对压力为  $p_{\text{I-真空}} = 360\text{kPa}$

$$(2) p_{\text{I}} = p_{\text{真空}} + p_{\text{I-真空}} = 362\text{kPa}$$

表 B 的读数为 170kPa, 表示 I 室对 II 室的相对压力为  $p_{\text{I-II}} = 170\text{kPa}$

$$(3) p_{\text{II}} = p_{\text{I}} - p_{\text{I-II}} = 362 - 170 = 192 \text{ (kPa)}$$

表 C 的读数表示 II 室对真空室的相对压力  $p_{\text{II-真空}} = p_{\text{II}} - p_{\text{真空}} = 190\text{kPa}$

(4) 表 C 的读数为 190kPa。圆筒顶部两侧分别为真空室和大气环境。

$$(5) F_{\text{顶}} = (p_0 - p_{\text{真空}}) \times S_{\text{顶}} = p_v \times S_{\text{顶}} = p_v \times \frac{\pi\phi^2}{4} = 15.797 \text{ (kN)}$$

【题 1-9】解: 根据公式  $W = \int_1^2 p dV$ , 对于系统内质量为 1kg 的工质, 系统所做的功为  $w = \int_1^2 p dv$ 。

(1) 若循环为  $A-B-C-A$ , 则净功量  $w$  为  $A-B$ 、 $B-C$ 、 $C-A$  三个功的总和,  $w = w_{AB} + w_{BC} + w_{CA}$ , 即为图中  $\triangle ABC$  的面积:

$$w_{\text{正}} = \frac{1}{2}(p_2 - p_1)(v_2 - v_1), w \text{ 为正数, 表示系统对外做功。}$$

(2) 若循环为  $A-C-B-A$ , 则净功量  $w$  为  $A-C$ 、 $C-B$ 、 $B-A$  三个过程功的总和。

$$w_{\text{正}} = w_{AC} + w_{CB} + w_{BA}, \text{ 即为图中 } \triangle ABC \text{ 面积的相反数。}$$

$$w_{\text{逆}} = -\frac{1}{2}(p_2 - p_1)(v_1 - v_2), w \text{ 为负数, 表示外界对系统做功。}$$

综上所述, 两个循环为互逆循环, 两个循环的净功量为相反数, 即  $w_{\text{正}} = -w_{\text{逆}}$ 。

表示循环的正逆过程, 做功的量不变, 只是做功者与被做功者互换。

## 第二章 热力学第一定律及其应用



### 思考题答案

【思考题 2-1】答: 热量和热力学能是有明显区别的两个概念: 热量指的是热力系统通过界面与外界进

行的热能交换量,是与热力过程有关的过程量。热力系统经历不同的过程与外界交换的热量是不同的;而热力学能指的是热力系统内部大量微观粒子本身所具有的能量的总和,是与热力过程无关而与热力系统所处的热力状态有关的状态量。简而言之,热量是热能的传输量,热力学能是能量的储存量。二者的联系可由热力学第一定律表达式  $\delta q = du + p dv$  看出;热量的传输除了可能引起做功或者消耗功外,还会引起热力学能的变化。

【思考题 2-2】答:二式均适用于任意工质组成的闭口系统所进行的无摩擦的内部平衡过程。因为  $u = h - pv$ ,  $du = d(h - pv) = dh - p dv - v dp$ 。对闭口系统,将  $du$  代入第一式得  $\delta q = dh - p dv - v dp + p dv$ , 即  $\delta q = dh - v dp$ 。

【思考题 2-3】答:尽管能量方程  $\delta q = du + p dv$  与焓的微分式  $dh = du + d(pv)$  (变大) 似乎相像,但两者的数学本质不同,前者不是全微分的形式,而后者是全微分的形式。是否状态参数的数学检验就是,看该参数的循环积分是否为零。对焓的微分式来说,其循环积分为  $\oint dh = \oint du + \oint d(pv)$ 。因为  $\oint du = 0$ ,  $\oint d(pv) = 0$ , 所以  $\oint dh = 0$ 。因此焓是状态参数。而对于能量方程来说,其循环积分为  $\oint \delta q = \oint du + \oint p dv$ , 虽然  $\oint du = 0$ , 但是,  $\oint p dv \neq 0$ , 所以  $\oint \delta q \neq 0$ 。因此热量  $q$  不是状态参数。

【思考题 2-4】答:这是一个有摩擦的自由膨胀过程,相应的第一定律表达式为  $\delta q = du + dw$ 。又因为容器为绝热、刚性,所以  $\delta q = 0$ ,  $\delta w = 0$ , 因而  $du = 0$ , 即  $u_2 = u_1$ , 所以气体的热力学能在膨胀前后没有变化。

如果用  $\delta q = du + p dv$  来分析这一过程,因为  $\delta q = 0$ , 必有  $du = -p dv$ , 又因为是膨胀过程,  $dv > 0$ , 所以  $du < 0$ , 即  $u_2 < u_1$ 。这与前面的分析得出的  $u_2 = u_1$  矛盾。得出这一错误结论的原因是自由膨胀是一个非平衡过程,不能采用  $\delta q = du + p dv$  这个式子来进行分析,否则会得到错误的结论。

【思考题 2-5】答:(1) 不正确:由  $\delta q = du + p dv$  可知,当气体吸热全部变成对外做出的膨胀功时,热力学能就不增加,即当  $\delta q = p dv$  时,  $du = 0$ ;当气体吸热全部用来增加其热力学能时,即当  $\delta q = du$  时,气体也不膨胀,因为此时,  $p dv = 0$ , 而  $p > 0$ , 所以  $dv = 0$ 。

(2) 不正确:思考题 2-4 就是气体膨胀而不对外做功的实例。

(3) 正确:无摩擦时  $\delta w = p dv$ ,  $p > 0$ , 压缩时  $dv < 0$ , 故  $\delta w < 0$  消耗外功;有摩擦时,  $\delta w < p dv$ ,  $p > 0$ , 压缩时  $dv < 0$ , 故  $\delta w < 0$  消耗更多的外功。所以无论有无摩擦,也不论是否吸热或放热,气体压缩时一定消耗外功的。

【思考题 2-6】答:不是。热力学能是工质的状态参数,是工质的性质,是工质内部储存能量,是与状态变化过程无关的物理量。热量是工质状态发生变化时通过系统边界传递的热能,其大小与变化过程有关。热量不是状态参数。

【思考题 2-7】答:无论参考坐标建立在何处,工质的总能中始终包括外部储存能,只不过参考坐标建立合适,工质的宏观动能、宏观势能的值等于零,便于计算。

氢氧燃料电池中化学能变化是主要的能量变化,因而不可忽略。

【思考题 2-8】答:不能。基本能量方程式仅仅说明且充分说明功、热量和热力学能都是能量,都是能量存在的一种形式,在能量的数量上它们是有等价关系的,而不涉及功、热量和热力学能的其他属性,也表明功、热量和热力学能的其他属性与能量本质无关。

【思考题 2-9】答:  $q = \Delta u + w$ 。  $q = 0$ ,  $\Delta u$  为负值 ( $u$  减少), 转化为气体的动能。动能在 B 中经内部摩擦耗散为热能被气体重新吸收,热力学能增加,最终  $\Delta u = 0$ 。

【思考题 2-10】答:不可以。 $w$  不可能等于  $pv$ ,  $w$  是过程量,  $pv$  则是状态参数。因为  $q$  和  $w$  都是过程





量, 所以不会有  $q_2 - q_1$  和  $w_2 - w_1$ 。

【思考题 2-11】答: 前者适用于任意系统、任意工质和任意过程。后者适用于任意系统、任意工质和可逆过程。

【思考题 2-12】答: 推动功的定义为, 工质在流动时, 推动它下游工质时所做的功。开口系统工质流动, 而闭口系统工质不流动, 因此推动功出现在开口系统能量方程中, 而不出现在闭口系统能量方程式中。

【思考题 2-13】答: 作为工质的状态参数, 闭口系统工质也有焓值, 但是因为工质不流动, 所以其焓值没有什么意义。

焓 = 热力学能 + 占位能

【思考题 2-14】答: 推动功的定义为, 工质在流动时, 推动它下游工质时所做的功。下游无工质, 故不需要推动功。利用开口系统的一般能量方程式推导的最终结果也是如此。

【思考题 2-15】答: 可以。热力系统的选取有很大的自由度。一般把活塞式压气机取为闭口系统, 是考察其一个行程内的热力变化过程。如果考虑一段时间内活塞式压气机的工作状况和能量转换情况, 就需要把它当成稳定流动系统处理, 包括进排气都认为是连续的。

【思考题 2-16】答: 控制体的  $\Delta U_{CV} = 0$ 、 $\Delta H_{CV} = 0$ 、 $\Delta S_{CV} = 0$  是指过程进行时间前后的变化值, 稳定流动系统在不同时间内各点的状态参数都不发生变化, 因此  $\Delta U_{CV} = 0$ 、 $\Delta H_{CV} = 0$ 、 $\Delta S_{CV} = 0$ 。稳定流动开口系统内不同部分工质的比热力学能、比焓、比熵等的改变仅仅是依坐标的改变。

【思考题 2-17】答: 都满足。  $\delta W = d(pV) + \delta W_i = d(pV) + \frac{m}{2} d(c_f^2) + mgdz + \delta W_i$

$$\delta W_i = \frac{m}{2} d(c_f^2) + mgdz + \delta W_i$$

【思考题 2-18】答: 进入系统的能量 - 离开系统的能量 = 系统储存能量的变化  
系统储存能量的变化: 不变。

进入系统的能量:  $q_{m1}$  带入的和  $q_{m2}$  带入的, 没有热量输入。

$$q_{m1}(h_1 + c_{f1}^2/2 + gz_1) + q_{m2}(h_2 + c_{f2}^2/2 + gz_2)$$

离开系统的能量:  $q_{m3}$  带出的, 没有机械能(轴功)输出。

$$q_{m3}(h_3 + c_{f3}^2/2 + gz_3)$$

如果合流前后流速变化不太大, 且势能变化一般可以忽略, 则能量方程为

$$q_{m1}h_1 + q_{m2}h_2 = q_{m3}h_3$$

出口截面上焓值  $h_3$  的计算式

$$h_3 = (q_{m1}h_1 + q_{m2}h_2)/q_{m3}$$

本题中, 如果流体反向流动就是分流问题, 分流与合流问题的能量方程式是一样的, 一般习惯前后反过来写。

$$q_{m1}h_1 = q_{m2}h_2 + q_{m3}h_3$$



## 习题答案

【题 2-1】解: 为了维持车间里温度不变, 必须满足能量平衡即

$$\sum \dot{Q}_{\text{出}} = \sum \dot{Q}_{\text{进}}$$

所以有

$$\sum \dot{Q}_{\text{散}} = \dot{Q}_{\text{动}} + \dot{Q}_{\text{电灯}} + \dot{Q}_{\text{加入}}$$

$$\dot{Q}_{\text{加入}} = \sum \dot{Q}_{\text{散}} - \dot{Q}_{\text{动}} - \dot{Q}_{\text{电灯}}$$

因而

$$\begin{aligned} &= (0.7 \times 10^6 - 500 \times 632.415 - 50 \times 0.1 \times 859.854) \times 4.1868 \\ &= 1.5889 \times 10^6 \text{ (kJ/h)} \end{aligned}$$

\*此题目的目的是练习能量平衡概念及有关能量单位的换算。

【题 2-2】解：摩擦引起的功率损失就等于摩擦热，故有

$$\begin{aligned} \dot{P} = \dot{Q}_{\text{摩擦}} &= C_{\text{钢}} m \Delta t = 0.461 \times 150 \times 50 / (30 \times 60) \\ &= 1.9208 \text{ (kJ/s)} = 1.9208 \text{ (kW)} \end{aligned}$$

\*此题目的目的是练习能量平衡。

【题 2-3】解：由闭口系统能量方程有  $Q = \Delta U + W$ ，又不考虑摩擦，故有  $Q = \Delta U + \int_1^2 P dv$ ，所以  $\int_1^2 P dv = Q - \Delta U = 12 - 20 = -8 \text{ (kW)}$ 。因为  $P > 0$ ，所以  $dV < 0$ 。因此，这一过程是压缩过程，外界需消耗功 8kW。

【题 2-4】解：关键在于确定过程 1—2 的热力学能变化，再根据热力学能变化的绝对值不随过程而变，对三个过程而言是相同的，所不同的只是符号有正、负之差，进而逐个求所缺值可求。

根据闭口系统能量方程的积分形式，有  $Q = \Delta U + W$ 。

2—b—1：  $\Delta U = Q - W = -7 - (-4) = -3 \text{ (kJ)}$ ； 1—a—2：  $W = Q - \Delta U = 10 - 3 = 7 \text{ (kJ)}$ ； 1—c—2：  $Q = \Delta U + W = 3 + 8 = 11 \text{ (kJ)}$  将所得各值填入上表空中即可。

※ 此题可以看出几点：

- ① 热力过程不同，闭口系统的热量  $Q$  和功  $W$  也是不同的，则说明热量与功是与过程有关的物理量。
- ② 热力学能是不随过程变化的，只与热力状态有关。

【题 2-5】解：

(1) 因为液体是不可压缩的，所以外界对流体所做的功为零：  $W = 0$ 。

(2) 由闭口系统能量方程可知  $Q = \Delta U + W$ 。因为绝热，有  $Q = 0$ ，又不做功，有  $W = 0$ ，所以有  $\Delta U = 0$ 。即液体的热力学能没有变化。

(3) 虽然液体热力学能未变，但是因为其压力提高了，而容积不变，所以焓增加了：

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(pV) = 0 + 0.002(4 - 0.2) \times 10^6 = 7.6 \text{ (kJ)}。$$

【题 2-6】解：  $W_1 = -7.6 \text{ kJ}$ ，外界消耗功  $\Delta U = 0$ ，  $\Delta H = 7.6 \text{ kJ}$ 。

【题 2-7】解：(1) 不考虑汽轮机散热以及进出口气流的动能差和位能差时，因为  $q = 0$ ，  $\Delta c^2 / 2 = 0$ ，  $\Delta z g = 0$ ，根据开口系统稳定流动的能量方程，即式 (2-11)，可知汽轮机对外做的功等于蒸汽经过汽轮机后的焓降为  $W_{\text{sh}} = -\Delta h = h_1 - h_2 = 3442 - 2448 = 994 \text{ (kJ/kg)}$ ；

汽轮机功率为  $P = W_{\text{sh}} \dot{m} = 994 \times 40 \times 10^3 / 3600 = 11044.44 \text{ (kW)}$ 。

(2) 考虑汽轮机散热以及进出口气流的动能和位能差，每千克蒸汽的散热量为  $q = \frac{\dot{Q}_{\text{散}}}{\dot{m}} = \frac{5 \times 10^5}{40 \times 10^3} =$

$12.5 \text{ (kJ/kg)}$ ，有  $-q = \Delta h + \frac{\Delta c^2}{2} + \Delta z g + W_{\text{sh}}$ 。



蒸汽做功为  $W_{sh} = h_1 - h_2 - q - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - (z_1 - z_2)g = 3442 - 2448 - (120^2 - 70^2) / (2 \times 10^3) + 1.6 \times 9.81 / 10^3 -$

12.5 = 976.76 (kJ/kg)。

功率为  $P = W_{sh} \dot{m} = 976.76 \times 40 \times 10^3 / 3600 = 10852.95$  (kW)。

各种损失及所占比例:

汽轮机散热损失为 12.5 kJ/kg, 占  $12.5 / 994 = 1.26\%$ 。

蒸汽的进出动能差:  $\frac{1}{2 \times 10^3} (120^2 - 70^2) = 4.75$  (kJ/kg), 占  $4.75 / 994 = 0.48\%$ 。

蒸汽的进出位能差:  $1.6 \times 9.81 / 10^3 = 0.0156$  (kJ/kg), 占  $0.0156 / 994 = 0.002\%$ 。

三项合计 17.2656 kJ/kg 占 1.74% (不超过 2%), 一般计算不考虑这三个因素也是足够精确的。

※此题的目的是练习使用开口系统稳定流动的能量方程及其在汽轮机功率计算中的应用, 了解汽轮机有关损失的大致的数量级。

【题 2-8】解: 根据能量平衡, 汽车所消耗的汽油所发出的热量等于其车轮轴输出的功率和通过排气和水箱散出的热量之和, 即有  $\dot{Q}_{散} = \dot{Q}_{汽油} - P_{sh} = 3.41 \times 10^{-3} \times 0.75 \times 10^{-3} \times 44000 - 87 \times 612.415 \times 4.1868 = 11253000 - 230358.18 = 894941.82$  (kJ/h)

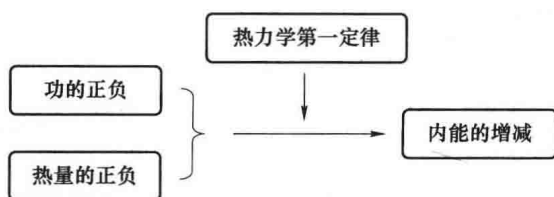
※此题目练习是能量平衡及能量单位的换算。

【题 2-9】解: 根据能量平衡, 有  $\sum E_{in} = \sum E_{out}$  故有  $Q_{吸} + W_{t,压缩} = Q_{放} + W_{t,膨胀}$ , 所以  $W_{t,膨胀} = Q_{吸} + W_{t,压缩} - Q_{放} = 1800 + 700 - 1080 = 1420$  (J)。

【题 2-10】解: 过程 1—2:  $W_t = -18$  kJ/kg; 过程 2—3:  $q = 3218$  kJ/kg,  $\Delta H = 3218$  kJ/kg;

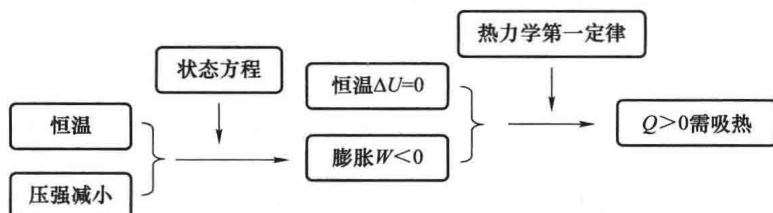
过程 3—4:  $W_t = 1142$  kJ/kg; 过程 4—1:  $q = -2049$  kJ/kg。

【题 2-11】分析:



解:  $W = -100$  J,  $Q = 120$  J。由热力学第一定律得:  $\Delta U = W + Q = (-100) + 120 = 20$  (J)。故气体内能增加 20 J, 选项 B 正确。

【题 2-12】分析:



解：气泡从恒温水槽的底部缓慢向上浮起，则气泡内气体温度不变，内能不变，分子平均动能不变，这时选项 A 正确。气泡上升，气体压强减小，根据玻意耳定律，气泡体积增大，气体膨胀，对外做功，根据热力学第一定律，要保持气体内能不变，必须从外界吸收热量。选项 D 正确。

【题 2-13】解：由题意 A→B 过程  $Q_V = 416\text{J} = \Delta E$ , A→C 过程  $Q_p = \Delta E_2 + A = 582\text{J}$

因为 B、C 在同一直线上，所以  $\Delta E_1 = \Delta E_2$ ,  $Q_p = \Delta E_1 + A = Q_V + A$

所以在等压过程中系统对外做功  $A = Q_p - Q_V = 582 - 416 = 166\text{J}$ 。

【题 2-14】解：对于等压过程，吸热  $Q = \frac{M}{\mu} \frac{i+2}{2} R\Delta T = \frac{i+2}{2} P\Delta V$ ，对外做功  $A = p\Delta V$ ，内能增量为

$$\frac{A}{Q} = \frac{P\Delta V}{\frac{i+2}{2} P\Delta V} = \frac{2}{i+2}, \quad \Delta E = \frac{M}{\mu} \frac{i}{2} R\Delta T = \frac{i}{2} p\Delta V, \quad \text{所以有 } \frac{\Delta E}{Q} = \frac{\frac{i}{2} P\Delta V}{\frac{i+2}{2} P\Delta V} = \frac{i}{i+2}.$$

【题 2-15】解：双原子分子  $i=5$ ，等压膨胀对外做功  $A = p\Delta V$ ，吸热  $Q = \frac{i+2}{2} p\Delta V = \frac{7}{2} p\Delta V$ ，所以  $Q = \frac{7}{2} A$ 。

【题 2-16】解：对外做功等于过程曲线下梯形 I II  $V_2 V_1$  的面积，即  $A = \frac{1}{2} (p_1 + p_2) (V_2 - V_1)$ 。

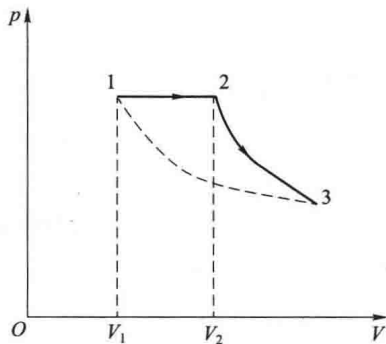
内能增量  $\Delta E = \frac{3}{2} R(T_2 - T_1)$ ，由热力学第一定律，气体吸热为  $Q = \Delta E + A = \frac{3}{2} R(T_2 - T_1) + \frac{1}{2} (p_1 + p_2) (V_2 - V_1)$

【题 2-17】解：(1)  $p-V$  图如图。

(2)  $T_1 = (273 + 27)\text{K} = 300\text{K}$ ,  $V_1/T_1 = V_2/T_2$ ,  $T_2 = V_2 T_1 / V_1 = 600\text{K}$ ,  $Q = C_p(T_2 - T_1) = 1.25 \times 10^4\text{J}$ 。

(3)  $E = 0$ 。

(4) 据  $Q = W + E$  得  $W = Q = 1.25 \times 10^4\text{J}$ 。



【题 2-18】解：氦气为单原子分子理想气体， $i=3$ 。

(1) 等体积过程， $V = \text{常量}$ ,  $W = 0$

据  $Q = E + W$  可知  $Q = \Delta E = \frac{M}{M_{\text{mol}}} C_V (T_2 - T_1) = 623\text{J}$

(2) 定压过程， $p = \text{常量}$ ,  $Q = \frac{M}{M_{\text{mol}}} C_p (T_2 - T_1) = 1.04 \times 10^3\text{J}$   $E$  与 (1) 相同， $W = Q$ ,  $E = 417\text{J}$ 。

(3)  $Q = 0$ ,  $E$  与 (1) 同， $W \approx E \approx 623\text{J}$  (负号表示外界做功)。

【题 2-19】解：等温线  $pV = p_0 V_0$ ,  $\left(\frac{dp}{dV}\right)_{V_0} = -\frac{p_0}{V_0}$ , 绝热线  $pV^\gamma = p_0 V_0^\gamma$ ,  $\left(\frac{dp}{dV}\right)_{V_0} = -\gamma \frac{p_0}{V_0}$ 。

$$\text{由题意 } \frac{-P_0/V_0}{-\gamma P_0/V_0} = \frac{1}{\gamma} = 0.714, \text{ 有 } \gamma = \frac{1}{0.714} = 1.4, \text{ 又 } \gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C_v + R}{C_v} = 1.4$$

$$\text{所以定容摩尔热容为 } C_v = \frac{R}{\gamma - 1} = \frac{8.31}{1.4 - 1} = 20.8 \text{ [J/(mol} \cdot \text{K)]}$$

### 第三章 理想气体的性质



#### 思考题答案

【思考题 3-1】答：前一问很含混，关于“理想气体”的说法有很多。例如，理想气体，是一种假想的实际上不存在的气体，其分子是一些有弹性的、不占体积的质点，分子间无相互作用力；理想气体是实际气体的压力趋近于零时极限状况；还可以讨论什么情况下，把气体按照理想气体处理，这已经是后一个问题了。后一问，当气体距离液态比较远时（此时分子间的距离相对于分子的大小非常大），气体的性质与理想气体相去不远，可以当作理想气体。理想气体是实际气体在低压高温时的抽象。

【思考题 3-2】答：气体的摩尔体积  $V_m$  不因气体的种类而异。所处状态发生变化，气体的摩尔体积也随之发生变化。任何气体在标准状态（ $p = 101325\text{Pa}$ ,  $T = 273.15\text{K}$ ）下摩尔体积是  $0.022414\text{m}^3/\text{mol}$ 。在其他状态下，摩尔体积将发生变化。

【思考题 3-3】答：摩尔气体常数  $R$  是基本物理常数，它与气体的种类、状态等均无关。

【思考题 3-4】答：其热力学能、焓都仅仅是温度的函数。比定压热容和比定容热容也仅仅是温度的函数。

【思考题 3-5】答： $c_p - c_v = R_g$ ，等于定值，不随温度变化。 $c_p/c_v$  不是定值，将随温度发生变化。

【思考题 3-6】答：不适用于前者，一定条件下近似地适用于后者。

【思考题 3-7】答：不矛盾。 $pv = R_g T$ 。热力学能（或焓）与温度已经相当于一个状态参数，它们都可以表示为独立参数  $p$  和  $v$  的函数。

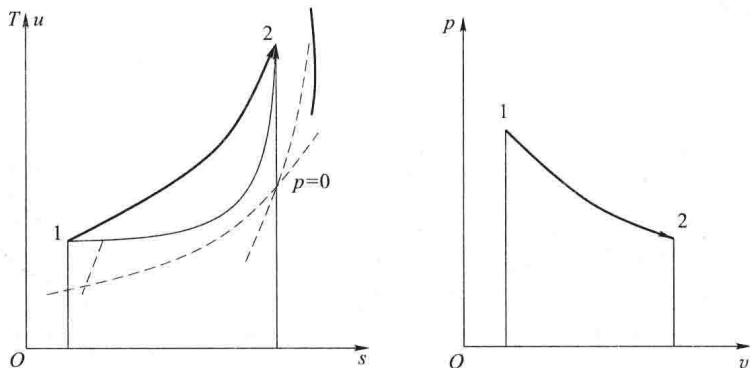
【思考题 3-8】答：我们经常关注的是工质的热力学能、焓和熵的变化量，热力学能、焓和熵的绝对量对变化量没有影响，因此可以任选工质的热力学能、焓和熵为零的基准。所有情况下工质的热力学能、焓和熵为零的基准都可以任选吗？不那么绝对，但是在工程热力学范围内，可以这么说。工质的热力学能、焓和熵的绝对零点均为绝对零度（0K），但是目前物理学研究成果表明，即使绝对零度，工质的热力学能、焓和熵也不准确为零，在绝对零度，物质仍有零点能，由海森堡测不准关系确定。（热力学第三定律可以表述为，绝对零度可以无限接近，但永远不可能达到。）

标准状态（固态冰， $p = 101325\text{Pa}$ ,  $T = 273.15\text{K}$ ）。（液态水， $p = 101325\text{Pa}$ ,  $T = 293.15\text{K}$ ）、（水蒸气， $p = 101325\text{Pa}$ ,  $T = 298.15\text{K}$ ），水的三相点，等等。

【思考题 3-9】答：一般是以标准状态为基准（书中是以水的三相点液体为焓和熵的基准点）、以绝对零度（0K）为基准的。

【思考题 3-10】答：曲线 1-2 下的曲边梯形面积就是任意可逆过程 1-2 的热量。 $dq = Tds$  沿过程的积分。 $q = \Delta u + w$ ，所以  $\Delta u = q - w$ 。不可逆过程传热量不能用曲边梯形面积表达，但是热力学能和焓还可以用原

方式表达, 因为热力学能和焓都是状态参数, 其变化与过程路径无关。



【思考题 3-11】答: 可以。熵是状态参数, 其变化与过程路径无关。

【思考题 3-12】答: 不正确。错在  $c$  不是状态参数, 与过程有关。

【思考题 3-13】答: (1) 正确; (2) 不正确; (3) 不正确; (4) 正确; (5) 正确。

【思考题 3-14】答: 是的。几乎所有的纯物质 (非混合物) 都有饱和状态的概念, 也存在临界状态。此外的物质性质更为复杂。

【思考题 3-15】答: 水的三相点的状态参数是唯一确定的, 这一点由吉布斯相律确认: 对于多元 (如  $k$  个组元) 多相 (如  $f$  个相) 无化学反应的热力系统, 其独立参数, 即自由度  $n = k - f + 2$ 。三相点:  $k = 1, f = 3$ , 故  $n = 0$ 。

三相点是三相共存点, 在该点发生的相变都具有相变潜热。临界点两相归一, 差别消失, 相变是连续相变, 没有相变潜热。三相点各相保持各自的物性参数没有巨大的变化, 临界点的物性参数会产生巨大的峰值变化。三相点和临界点是蒸汽压曲线的两个端点。三相点容易实现, 临界点不容易实现。

【思考题 3-16】答: 水的汽化潜热不是常数, 三相点汽化潜热最大, 随着温度和压力的提高, 汽化潜热逐渐减小, 临界点处汽化潜热等于零。

【思考题 3-17】答: 不对。  $\Delta u = c_v \Delta T$  是对单相理想气体而言的。水既不是理想气体, 汽化又不是单相变化, 所以  $q = w$  的结论是错的。

【思考题 3-18】答:  $c = \frac{\delta q}{dT}$  是针对单相工质的, 不适用于相变过程。



## 习题答案

【题 3-1】答: 其间没有矛盾, 因为对理想气体来说, 由其状态方程  $pV = RT$  可知, 如果给定了压力和比容, 也就给定了温度, 就可以确定热力学能和焓了。

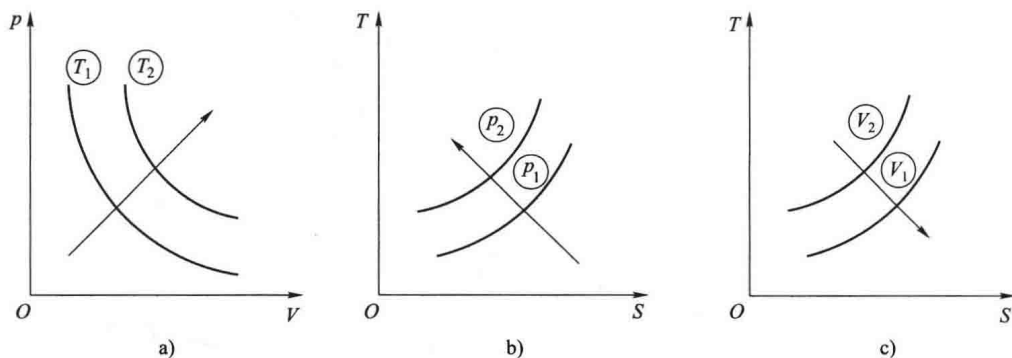
【题 3-2】答: 迈耶公式  $c_{p0} - c_{v0} = R$  是在理想气体基础上推导出来的, 因此不管比热容是否变化, 只要是理想气体就适用, 而对实际气体则是不适用的。

【题 3-3】答: 对理想气体来说, 其状态方程为  $pV = RT$ , 因此,  $T$  越高,  $pV$  值越大, 定温线离  $p-v$  图的原点越远。如图 a 中所示,  $T_2 > T_1$ 。实际气体定温线的相对位置也大致是这样。

由定比热理想气体温度与熵的关系式  $T = \exp \frac{S + R \ln P + C_2}{c_{p0}}$  可知, 当  $S$  一定时 ( $C_2$ 、 $R$ 、 $c_{p0}$  都是常数),

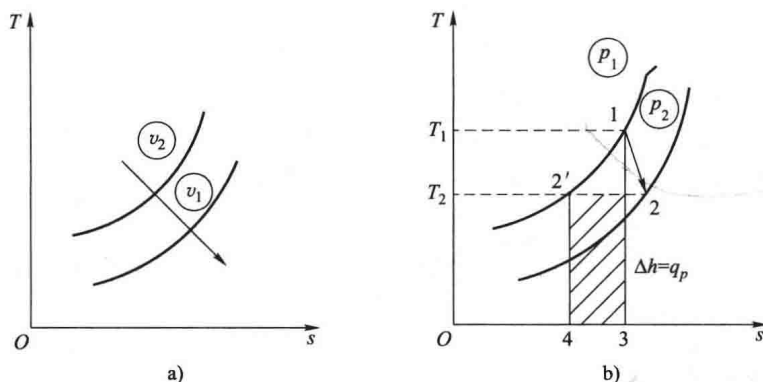


压力越高,温度也越高,所以在  $T-S$  图中高压的定压线位于低压的定压线上,如图 b 所示,  $p_2 > p_1$ 。实际气体的定压线也类似的相对位置。



由定比热理想气体温度与熵的关系式  $T = \exp \frac{S - R \ln V + C_1}{c_{v0}}$  可知,当  $S$  一定时 ( $C_1$ 、 $R$ 、 $c_{v0}$  都是常数),比热容越大,温度越低,因此在  $T-S$  图中大比热容的定容线位于小比热容的定容线下方,如图 c 所示,  $v_2 < v_1$ 。实际气体的定容线也有类似的位置关系。

【题 3-4】答:对理想气体,任意两状态间内能变化  $\Delta u_{1-2} = \int_1^2 c_{v0} dT = q_v$ , 因此在温熵图中可用同样温度变化范围内定容过程所吸收的热量表示出来。



如图 b 所示,定容线  $12'$  下的面积  $1342'1$  即表示 1、2 在状态间的热力学能变化  $\Delta u_{1-2}$ 。

对理想气体来说,任意状态间的焓的变化  $\Delta h_{1-2} = \int_1^2 c_{p0} dT = q_p$ , 因此可用同样温度变化范围内定压过程所吸收的热量来表示。

如图 b 所示,定压线  $12'$  下的面积  $1342'1$  即表示 1、2 在状态间的焓的变化  $\Delta h_{1-2}$ 。

【题 3-5】答:定压过程和不做技术功的过程的区别在于:

1) 定压过程是以热力系统在过程中的内部特征(压力不变)来定义热力过程的;不做技术功的过程则是从热力系统整体与外界之间没有技术功的传递来定义热力过程的。

2) 如果存在摩擦,则  $-vdp = \delta w_t + \delta w_L$ 。对定压过程  $dp = 0$ ,  $\delta w_t = -\delta w_L < 0$ , 因此要消耗技术功,所消耗的技术功转变为摩擦热;对不做技术功的过程,  $\delta w_t = 0$ ,  $-vdp = \delta w_L > 0$ , 由于  $v > 0$ , 所以  $dp < 0$ , 一定伴随有压降。正如流体在各种管道中的有摩擦流动,虽无技术功的输出,却有压力的损失(记住:无功有摩擦压必降)。

3) 两个过程热量与焓的关系不同。定压过程只有在无摩擦的情况下, 其热量才等于焓的变化, 因为  $q_p = h_2 - h_1 + w_p$ 。当无摩擦时,  $w_p = -\int v dp$ , 又定压时,  $dp = 0$ ,  $w_p = 0$ , 所以有  $q_p = \Delta h$ 。而不做技术功的过程, 不管有无摩擦, 其热量却总等于焓的变化。由热力学第一定律的能量方程,  $\delta q = dh + \delta w_t$  可知, 当  $\delta w_t = 0$  时,  $\delta q = dh$ , 即  $q = \Delta h$ 。

定压过程与不做技术功的过程的联系在于当无摩擦时, 二者就是完全一致的, 即定压无摩擦的过程必定不做技术功, 不做技术功的无摩擦过程是定压的, 即  $w_p = -\int_1^2 v dp = 0$ 。

【题 3-6】答: 定熵过程与绝热过程两者区别在于:

1) 定熵过程是以热力系统在过程中内部特征(熵不变)来定义热力过程的, 绝热过程则是从热力系统整体与外界之间没有热量交换来定义热力过程的。

2) 如果存在摩擦,  $Tds = du + pdv = du + \delta w + \delta w_t = \delta q + \delta q_g > \delta q = 0$  即  $Tds > 0$ , 而  $T > 0$ , 则  $ds > 0$ , 所以对绝热过程必有熵增。正如流体(蒸汽或燃气)在汽轮机和燃气轮机流过时, 虽然均可以看成是绝热的, 但因为有摩擦存在, 所以总伴随着有熵增。对定熵过程来说,  $ds = 0$ , 熵是不变的。

3) 如果没有摩擦, 二者是一致的, 即等熵必绝热无摩, 而绝热无摩必等熵, 这便是二者的联系。若无摩擦,  $\delta q = du + pdv = Tds$ , 再绝热  $\delta q = 0$ , 那么  $Tds = 0$ , 而  $T > 0$ , 所以  $ds = 0$ ; 若定熵  $ds = 0$ , 必无摩又绝热,  $\delta q + \delta q_g = \delta q = Tds = 0$ 。

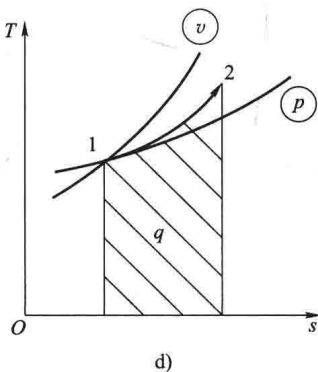
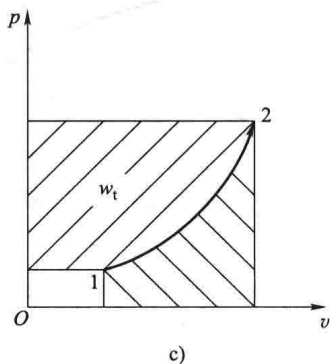
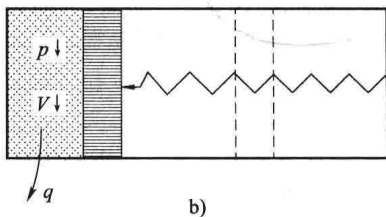
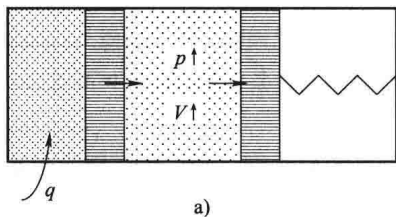
【题 3-7】答: 第一个公式适用于任意工质的不做技术功的过程和无摩擦的定压过程。

第二个公式适用于任意工质的绝热过程。

第三个公式适用于定比热理想气体的定熵膨胀过程。

【题 3-8】

答: 图 a 和图 b 所示的就是比容和压力同时增大或减小的过程, 如果不考虑摩擦, 内部又是平衡的话, 则所做功和吸热情况如图 c 和图 d 所示。

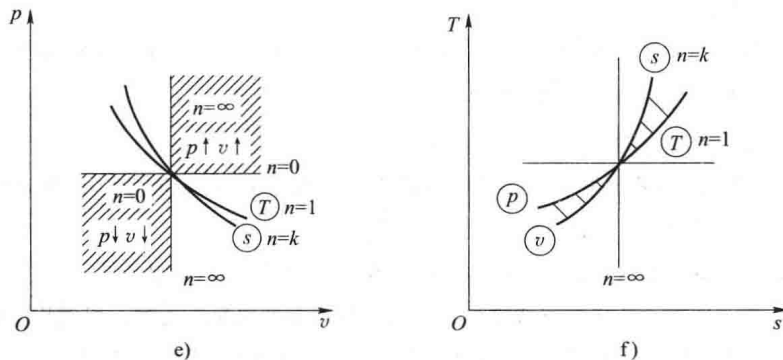






技术功:  $w_t = -\int_1^2 V dp$  膨胀功:  $w = \int_1^2 p dV$ 。热量:  $q = \int_1^2 T ds$ 。

这些过程是多变指数  $-\infty < \eta < 0$  范围内的多变过程, 在  $p-v$  图及  $T-s$  图中所处区域如图 e 和图 f 阴影部分所示。



【题 3-9】答: 用气管给自行车轮胎打气需要外界做功, 管内空气被压缩, 压力升高, 温度也升高, 金属气管发热。空气经过气管出口嘴和轮胎气门芯时都有节流效应, 这也会使空气的温度进一步升高, 这些温度较高的空气进入轮胎后导致轮胎也发热了。

## 第四章 理想气体的热力过程



### 思考题答案

【思考题 4-1】答: 要解决的问题是揭示过程中状态参数的变化规律, 揭示热能与机械能之间的转换情况, 找出其内在规律及影响转化的因素。在一定工质热力性质的基本条件下, 研究外界条件对能量转换的影响, 从而加以利用。

使用的方法: 分析典型的过程。分析理想气体的定值的可逆过程, 即过程进行时限定某一参数不发生变化。

分析步骤:

- ① 建立过程方程式。
- ② 找出(基本)状态参数的变化规律, 确定不同状态下参数之间的关系。
- ③ 求出能量参数的变化(过程功、技术功、热力学能、焓、熵、传热量等)。
- ④ 画出过程变化曲线(在  $T-s$  图、 $p-v$  图上)。

【思考题 4-2】答: 第一组都适用, 第二组不适用。第二组第一式只适用于定容过程, 第二式只适用于定压过程。

【思考题 4-3】答: 需要加入热量。  $q = \Delta u + w$ , 对于理想气体,  $q = w = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$  或  $q = \Delta h + w_t$ , 对于理想气体,  $q = w_t = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$ 。

【思考题 4-4】答: “可逆定温过程”已经把途径规定好了, 此时谈与途径的关系没有意义。再强调一遍, 过程热量  $q$  和过程功  $w$  都是过程量, 都和过程的途径有关。