

# 中国科学技术大学

## 2013--2014 学年第二学期考试试卷

考试科目: 工程热力学

得分: \_\_\_\_\_

学生所在系: \_\_\_\_\_ 姓名: \_\_\_\_\_ 学号: \_\_\_\_\_

### 一、 简答题 (每小题 5 分, 共 35 分)

- (1) 热与功有何异同?
- (2) 何谓膨胀功? 何谓流动功? 何谓技术功? 三者之间有何关系?
- (3) 何以在分析开口系统时用焓较为方便?
- (4) 什么是内能? 什么是可用能? 两者关系如何?
- (5) 什么是熵? 其主要性质是什么?
- (6) 什么是相对湿度? 什么是含湿量?
- (7) 一个热力学系统正经历一等温、等压不可逆变化, 试问用什么热力学函数可判断该过程进行的方向? 当该系统达到平衡时, 这个函数达到的极值是极大还是极小?

答: (1) 热和功均为系统与外界相互作用中所传递的能量, 它们都是过程量而不是状态量。

热为系统与外界相互作用通过微观自由度传递的(内)热能, 而功是系统与外界相互作用通过宏观自由度传递的机械能。

(2) 膨胀功: 系统因体积膨胀对外界所做的功。  $\delta w = p dV$

流动功: 系统付诸于质量迁移即维持流通从系统流入、流出所做的功。  $\delta w_f = d(pV)$

技术功: 系统给出的工程上可直接利用的机械能。

$$\delta w_t = \frac{1}{2} mdc^2 + mgdz + \delta w_i$$

对简单可压缩系统, 技术功等于膨胀功减去流动功。  $\delta w_t = \delta w - \delta w_f$

(3) 因焓是物质进出开口系统是带入或带出的内能与推动功之和, 即

是随物质一起转移的能量，故有在开口系其有明确的物理意义。

- (4) 内能即系统内部的储存能量，在热工分析时，主要指的是系统内部微观粒子热运动的能量。因而，宏观上，热力学以系统对外界所做的功与吸收的热量来定义内能  $U$ ， $dU = \delta Q - \delta W$ 。

可用能指的是系统的做功能力。由闭口系， $W_{\max} = -dF$ ， $F = U - T_0 S$  可见，

可用能只是内能中可用于做功的那部分能量， $T_0 S$  为内能中的不可用能。

- (5) 熵是一状态函数，其定义为  $dS = \frac{\delta Q_{\text{可逆}}}{T}$ 。对孤立系有  $dS_{\text{iso}} \geq 0$ ，若有任何的

不可逆因素，熵必增加，因而其可用于指示过程进行的方向。

- (6) 相对湿度为绝对湿度与相同温度下饱和空气的绝对湿度之比。

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_{v,s}} = \frac{p_v}{p_s} \quad 0 \leq \varphi \leq 1$$

$\varphi$  越小  $\rightarrow 0$ ，空气越干燥，吸湿能力越强。

$\varphi$  越大  $\rightarrow 1$ ，空气越潮湿，吸湿能力越弱。

含湿量为单位质量干空气所携带水蒸气的质量

$$d = \frac{m_v}{m_a} \quad \text{kg/kg(A)}$$

- (7) 自由焓或吉布斯函数，因  $(dG)_{T,p} \leq 0$ ，故取极小值。

## 二、分析题（每题 10 分，共 20 分）

1. 由实验测得某气体的焦-汤系数有如下关系式

$$\mu_J \equiv \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \frac{1}{c_p} \cdot \frac{a}{T^2}$$

式中  $a$  为常数，试求该气体的状态方程。

2. 证明满足范德瓦尔方程

$$\left( p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = R_g T$$

的气体作绝热自由膨胀时温度降为

$$T_1 - T_2 = \frac{a}{c_v} \frac{v_2 - v_1}{v_2 v_1}$$

解:

1. 由定义  $\mu_J \equiv \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h$ , 有  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \frac{1}{c_p} \cdot \frac{a}{T^2}$

又  $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = -\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T \left(\frac{\partial T}{\partial h}\right)_p = \frac{1}{c_p} \left[ T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v \right]$  (也可由第二 dh 方程得)

对比以上两式得

$$-v + T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{a}{T^2}$$

而

$$-v + T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = T^2 \left[ \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{v}{T} \right) \right]_p$$

则

$$T^2 \left[ \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{v}{T} \right) \right]_p = \frac{a}{T^2}$$

积分上式得:

$$\begin{aligned} \frac{v}{T} &= -\frac{1}{3} \frac{a}{T^3} + f(p) \\ v &= -\frac{1}{3} \frac{a}{T^2} + T f(p) \end{aligned}$$

当  $T$  趋于无穷大时有  $v = \frac{R}{p} T$

因此  $f(p) = \frac{R}{p}$

于是得该气体的状态方程为

$$pv = -\frac{1}{3} \frac{ap}{T^2} + RT$$

2. 证明: 气体作绝热自由膨胀时, 既不吸热, 也不做功, 故由热力学第一定律表达式得

$$\Delta u = q - w = 0$$

因此, 由第一  $du$  方程

$$du = c_v dT + \left[ T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv$$

$$\text{积分得} \quad 0 = c_v (T_2 - T_1) + \int_1^2 \left[ T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv$$

又由范德瓦尔方程式得

$$p = \frac{R_g}{v-b} T - \frac{a}{v^2}$$

$$\text{因而} \quad \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = \frac{R_g}{v-b}, \quad T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p = \frac{a}{v^2}$$

代入积分式，则可得

$$c_v (T_1 - T_2) = \int_1^2 \frac{a}{v^2} dv = a \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right)$$

$$\text{故} \quad T_1 - T_2 = \frac{a}{c_v} \frac{v_2 - v_1}{v_2 v_1}$$

### 三、 计算题 （每小题 15 分， 共 45 分）

1. 燃气轮机的进口参数为  $p_1 = 0.5 \text{ MPa}$ ，  $T_1 = 410 \text{ K}$ ，  $c_1 = 120 \text{ m/s}$ ， 出口参数为

$p_2 = 0.12 \text{ MPa}$ ，  $T_2 = 300 \text{ K}$ ，  $c_2 = 70 \text{ m/s}$ ， 当地大气环境参数  $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ ，

$T_0 = 290 \text{ K}$ 。假定燃气的性质与空气同，在流动中比热可视为定值，其对外散热与势能变化可忽略，试计算（1）每千克燃气流经涡轮机过程中实际完成的技术功和轴功；（2）每千克燃气由进口可逆过渡到出口状态，理论上所能完成的最大技术功和最大轴功。已知：空气的定压比热  $c_p = 1.01 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ，气体常数  $R_g = 287.13 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

解：（1）过程中实际的技术功和轴功

根据稳定流动能量方程  $w_t = q - \Delta h$ ，及假定  $q \approx 0$ ， $\Delta(gz) \approx 0$ ，可得

$$w_t = h_1 - h_2 = c_p (T_1 - T_2) = 1.01 \times (410 - 300) = 111.1 \text{ kJ/kg}$$

$$w_s = w_t - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) = 111.1 - \frac{1}{2}(70^2 - 120^2) \times 10^{-3} = 115.85 \text{ kJ/kg}$$

(2) 理论上最大的技术功和轴功

$$\begin{aligned} w_{t,\max} &= e_{x1} - e_{x2} = (h_1 - h_2) + T_0(s_2 - s_1) = (h_1 - h_2) + T_0(c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}) \\ &= 111.1 + 290 \times \left( 1.01 \ln \frac{300}{410} - 287.13 \times 10^{-3} \ln \frac{0.12}{0.5} \right) = 138.44 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$w_{s,\max} = w_{t,\max} - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) = 138.44 - \frac{1}{2}(70^2 - 120^2) \times 10^{-3} = 143.19 \text{ kJ/kg}$$

2. 在压缩空气输气管上接有一渐缩喷管，用阀门来调节喷管前空气的压力。已知喷管前空气的初速度很小，其温度  $t_1 = 27^\circ\text{C}$ ，喷管外的环境压力  $p_b = 0.1 \text{ MPa}$ 。设空气的物性同上题，求当压力  $p_1$  分别为  $0.15 \text{ MPa}$ ， $0.1894 \text{ MPa}$ ， $0.25 \text{ MPa}$  时，喷管出口截面上空气的压力及流速。

解：(1)  $p_1 = 0.15 \text{ MPa}$  时，由已知条件  $\frac{p_b}{p_1} = \frac{0.1}{0.15} = 0.667 > v_{cr} = 0.528$

气体在喷管内可实现完全膨胀， $p_2 = p_b = 0.1 \text{ MPa}$

$$\text{出口截面上的流速 } c_2 = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_g T_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} \quad (c_1 \approx 0)$$

$$\text{其中 } \kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p}{c_p - R_g} = \frac{1010}{1010 - 287.13} \approx 1.4$$

$$\text{故 } c_2 = \sqrt{2 \frac{1.4}{1.4 - 1} \times 287.13 \times (273.15 + 27) \left[ 1 - \left( \frac{0.1}{0.15} \right)^{\frac{1.4 - 1}{1.4}} \right]} \approx 256.89 \text{ m/s}$$

也可先由  $\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}$  求得  $T_2$ ，再由  $c_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)} = \sqrt{2c_p(T_1 - T_2)}$  求得  $c_2$ 。

$$(2) \quad p_1 = 0.1894 \text{ MPa 时}, \quad \frac{p_b}{p_1} = \frac{0.1}{0.1894} = 0.528 = v_{cr}$$

气体在喷管内也可实现完全膨胀， $p_2 = p_b = 0.1 \text{ MPa}$

出口截面上的流速等于临界流速

$$c_2 = c_{cr} = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa+1} R_g T_1} = \sqrt{2 \frac{1.4}{1.4+1} \times 287.13 \times 300} = 317.01 \text{ m/s}$$

$$(3) \quad p_1 = 0.25 \text{ MPa} \text{ 时, 由已知条件 } \frac{p_b}{p_1} = \frac{0.1}{0.25} = 0.4 < v_{cr} = 0.528$$

$$\text{对于渐缩喷管, 其最大的膨胀能力 } v_2 = v_{cr}, \text{ 即 } \frac{p_2}{p_1} = 0.528$$

$$\text{故 } p_2 = 0.528 p_1 = 0.528 \times 0.25 = 0.132 \text{ MPa}$$

而  $p_b = 0.1 \text{ MPa}$ , 可见  $p_2 \neq p_b$ , 则空气流出喷管后的过程是自由膨胀。

这样, 相应出口截面上的流速也等于临界流速

$$c_2 = c_{cr} = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa+1} R_g T_1} = \sqrt{2 \frac{1.4}{1.4+1} \times 287.13 \times 300} = 317.01 \text{ m/s}。$$

3. 为便于运输和储藏, 天然气在开采出来后, 常常被冷却成液化天然气 (LNG)。在供给用户时, 液态天然气需要重新汽化成气体。在这个过程中, 有大量可用冷能被释放。若储存罐中 LNG 初始状态为  $0.4 \text{ MPa}$ ,  $-141.75^\circ\text{C}$ , 以  $25^\circ\text{C}$  的海水作为热源来汽化天然气, 供给用户时的状态为  $1 \text{ MPa}$ ,  $20^\circ\text{C}$ 。假定: 液化天然气由纯甲烷组成, 其状态参数如下:

$$p_1 = 0.4 \text{ MPa}, \quad t_1 = -141.75^\circ\text{C} \text{ 时: } h_1 = -840.11 \text{ kJ/kg}, \quad s_1 = -6.1004 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K};$$

$$p_2 = 1 \text{ MPa}, \quad t_2 = 20^\circ\text{C} \text{ 时: } h_2 = -20.97 \text{ kJ/kg}, \quad s_2 = -1.2485 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}。$$

试问:

- (1) 每千克液化天然气汽化过程中需要吸收多少热量?
- (2) 其最大可用冷能是多少?
- (3) 可否构想一种回收 LNG 可用冷能的方案?

解:

(1) 由开口流热力学第一定律第二解析式  $q = \Delta h + w_t$ , 因单位质量天然气由储存罐向用户供气管输运汽化过程中无功的输入输出, 故其吸收的热量

$$q = h_2 - h_1 = -20.97 - (-840.11) = 819.14 \text{ kJ/kg}$$

(2) 最大可用冷能为:

$$\begin{aligned}
W_{\max} &= (h_1 - T_0 s_1) - (h_2 - T_0 s_2) \\
&= -\Delta h + T_0 \Delta s \\
&= -819.14 + (273.15 + 20)(-1.2485 + 6.1004) \\
&= 603.2 \text{ kJ / kg}
\end{aligned}$$

(3) 三种基本回收方法：

- (a) 直接膨胀法：即先压缩 LNG，然后利用海水加热提高温度后，将产生的高压气体通过涡轮机膨胀做功。
- (b) 利用中介介质的朗肯循环，即以海水作为热源，LNG 作为冷源，利用一种中间工质（如丙烷，R22 等）构建朗肯循环，对外做功。
- (c) 联合法：结合上述方法，可以回收更多的可用冷能。

中国科学技术大学  
2014-2015 学年第二学期考试试卷

考试科目: 工程热力学

得分: \_\_\_\_\_

学生所在系: \_\_\_\_\_ 姓名: \_\_\_\_\_ 学号: \_\_\_\_\_

一、简要比较下列各对概念 (每小题 5 分, 共 50 分)

- |                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| (1) 闭口系统与开口系统;  | (6) 三相点与临界点;    |
| (2) 准静态过程与可逆过程; | (7) 绝对湿度与相对湿度;  |
| (3) 熵流与熵产;      | (8) 过热与过冷;      |
| (4) 自由能与自由焓;    | (9) 回热与再热;      |
| (5) 理想气体与实际气体;  | (10) 制冷系数与供暖系数。 |

答: (1) 物质不能透过边界, 即与外界无质量交换只能有能量交换的热力系统, 称为闭口系统。

物质可以透过边界, 即与外界既可有质量交换又可有能量交换的热力系统, 称为开口系统。闭口系统控制质量。开口系统控制空间范围。

(2) 热力系所进行的状态变化无限缓慢因而无限接近于平衡状态的过程称为准静态过程或准平衡过程。可逆过程是指变化过程可以逆行即系统和外界均能复原的过程。准静态过程着眼于系统所经历的状态, 可逆过程着眼于过程所产生的效果。可逆过程一定是准静态过程, 而准静态过程不一定是可逆过程。

(3) 系统熵的变化  $dS$  有两个来源: 一是由外界与其换热的热流引起的称为熵流

$$\delta S_f = \frac{\delta Q}{T_r}, \text{ 一是由不可逆因素导致的称为熵产 } \delta S_g, \text{ 即 } dS = \delta S_f + \delta S_g。 \text{ 熵}$$

流只是一个物体的熵向另一个物体的迁移, 它不增加自然界的总熵; 而熵产则是自然界熵增加的真正来源。

(4)  $F = U - TS$  称为自由能, 它是定温-定容系统的内能中可用于做功的部分;  
 $G = H - TS$  称为自由焓, 它是定温-定压系统的焓中可用于做功的部分。

(5) 不考虑分子所占的体积及分子间的相互作用力的假想气体称为理想气体, 反之即为实际气体。

(6) 相图上工质三条相界线的交点为其气、液、固三相平衡共存的状态点, 称



为三相点。气化线随温度压力的升高有一上端点，称为临界点。它是饱和液线和饱和气线的交点，此处工质的液态和气态具有相同的状态参数，称为临界状态。

- (7) 湿空气的绝对湿度是指单位体积湿空气中包含的水蒸气的质量，也即水蒸气的密度  $\rho_v$ 。湿空气的绝对湿度  $\rho_v$  与同温度下饱和空气的绝对湿度  $\rho_s$  的比

值称为相对湿度  $\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_s} \approx \frac{p_v}{p_s}$ 。它更准确地反映了空气的潮湿程度即吸水

能力。

- (8) 物质两相平衡的状态称为饱和状态，其温度与压力是一一对应的。若物质的温度高于相应压力下的饱和温度或压力低于相应温度下的饱和压力称为过热。反之则称为过冷。
- (9) 将工质在热力循环末段的放热返用于其初段的加热这种以提高热效率为目的在工质内部交换热量的方法称为回热。若加热过的工质膨胀到某一中间压力时被引出再次加热则称为再热。再热不仅是要提高热效率，同时还有别的装置上的考虑，如提高干度。

- (10) 衡量制冷机工作性能的系数称为制冷系数，其定义  $\varepsilon = \frac{Q_2}{W}$ ，即从低温热源取出的热量与输入的功之比。衡量热泵工作性能的系数称为供暖系数，其定义  $\varepsilon' = \frac{Q_1}{W}$ ，即向高温热源输送的热量与输入的功之比。

## 二、试推导满足范德瓦尔方程

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = R_g T$$

气体的内能变化关系式

(10 分)

解：由热力学函数一般关系式之第一  $du$  方程

$$du = c_v dT - \left[ p - T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \right] dv$$

可得

$$\Delta u = \int_1^2 \left\{ c_v dT - \left[ p - T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \right] dv \right\}$$

对于范氏气体

$$p = \frac{R_g T}{v-b} - \frac{a}{v^2}, \quad \text{有} \quad \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = \frac{R_g}{v-b}, \quad \text{则} \quad p - T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = -\frac{a}{v^2}$$

故

$$\Delta u = \int_1^2 c_v dT + a \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right)$$

三、初速为亚音速的气流流过收缩喷管，若初压、背压及喷管尺寸均无变化，只是初温提高了，问喷管出口的气流速度及流量是否变化？为什么？（10分）

解：由 喷管能量方程  $h_1 + \frac{1}{2} c_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} c_2^2$

$$\begin{aligned} c_2^2 &= 2(h_1 - h_2) + c_1^2 = 2c_p(T_1 - T_2) + c_1^2 = 2c_p T_1 \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) + c_1^2 \\ &= 2c_p T_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] + c_1^2 \end{aligned}$$

得 初温  $T_1$  提高，出口速度  $c_2$  增加。

$$\text{由流量公式} \quad \dot{m}_2 = \frac{A_2 c_2}{v_2} = \dot{m}_1 = \frac{A_1 c_1}{v_1} = \frac{A_1 c_1}{\frac{R_g T_1}{p_1}} = \frac{A_1 c_1 p_1}{R_g T_1}$$

得 初温  $T_1$  提高，出口流量  $\dot{m}_2$  减小。

四、为开动鱼雷，在鱼雷中储存了压力  $p=150\text{bar}$  的压缩空气，其体积  $V=0.18\text{m}^3$ ，温度等于海水温度  $t=t_0=15^\circ\text{C}$ 。假定控制鱼雷在海面下  $5\text{m}$  深处运动，试求鱼雷的空气发动机所能做出的最大有用功。设海面上的大气压力  $p_b=1\text{bar}$ ，

$1\text{bar}=0.1\text{MPa}$ ， $1\text{mmH}_2\text{O}=9.81\text{Pa}$ 。（15分）

解：海面下  $5\text{m}$  处的压力  $p_0 = 10^5\text{Pa} + 5000 \times 9.81\text{Pa} = 1.491\text{bar}$

设鱼雷气瓶内压缩空气膨胀至与海水环境平衡时的体积  $V_0$ ，由

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}, \quad \text{及} \quad T = T_0 \quad \text{得} \quad V_0 = \frac{pV}{p_0} = \frac{150}{1.491} \times 0.18 = 18.11\text{m}^3$$

$$\text{空气质量 } m = \frac{pV}{R_g T}$$

则其可用能

$$\begin{aligned} E_x &= (U + p_0 V - T_0 S) - (U_0 + p_0 V_0 - T_0 S_0) = mc_v(T - T_0) + p_0(V - V_0) - mT_0(s - s_0) \\ &= m[c_v(T - T_0) - T_0(s - s_0)] + p_0(V - V_0) \\ &= p_0(V - V_0) + \frac{pV}{R_g T} \left\{ c_v(T - T_0) - T_0 \left[ (c_v + R_g) \ln \frac{T}{T_0} - R_g \ln \frac{p}{p_0} \right] \right\} \end{aligned}$$

由题给  $T = T_0$ ，故

$$\begin{aligned} E_x &= p_0(V - V_0) + pV \ln \frac{p}{p_0} \\ &= 1.491 \times 10^5 (0.18 - 18.11) + 150 \times 10^5 \times 0.18 \ln \frac{150}{1.491} = 97.77 \times 10^5 \text{ J} = 9777 \text{ kJ} \end{aligned}$$

故鱼雷的空气发动机所能做出的最大有用功为 9777 kJ。

五、 某理想气体动力循环，空气从初始参数  $p_1 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ， $t_1 = 15^\circ \text{C}$ ，

$V_1 = 0.014 \text{ m}^3$ ，绝热压缩到  $V_2 = 0.0028 \text{ m}^3$ ，再定容加热到  $p_3 = 18.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，

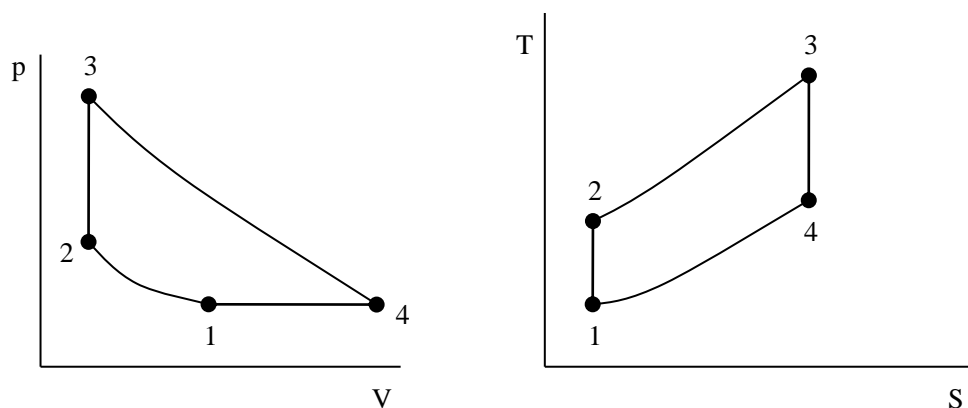
然后绝热膨胀到  $p_4 = p_1$ ，最后定压放热到初始状态完成循环。设空气的定压

比热  $c_p = 1.004 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ，定容比热  $c_v = 0.717 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ，气体常数

$R_g = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ，试计算：

- (1) 循环热效率；(2) 循环净功量；(3) 同温度范围卡诺循环热效率。  
(15 分)

解：循环的 p-V 图与 T-S 图



先确定各状态点温度

$$T_1 = 273 + 15 = 288K ;$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} = 288 \left( \frac{0.014}{0.0028} \right)^{1.4-1} = 548K ;$$

$$T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_2} , \quad \text{其中} \quad p_2 = p_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa} = 1.01 \times 10^5 \times 5^{1.4} = 9.61 \times 10^5 Pa ,$$

$$T_3 = 548 \times \frac{18.5}{9.61} = 1054K ; \quad T_4 = T_3 \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1054 \left( \frac{1.01}{18.5} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 459K .$$

(1) 循环热效率

$$\eta_t = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{\kappa(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1.4(459 - 288)}{1054 - 548} = 0.527$$

(2) 循环净功量

$$\text{空气质量 } m = \frac{p_1 V_1}{R_g T_1} = \frac{1.01 \times 10^5 \times 0.014}{287 \times 288} = 0.0171kg$$

$$\text{循环吸热量 } Q_1 = mc_v(T_3 - T_2) = 0.0171 \times 0.717 \times (1054 - 548) = 6.2kJ$$

$$\text{循环净功量 } W = \eta_t Q_1 = 0.527 \times 6.2 = 3.27kJ$$

(3) 同温度范围卡诺循环热效率

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{288}{1054} = 0.727$$

# 2016年工程热力学试卷及答案

## 一、简答题：

(1) 何谓热力系统？主要分为哪几类？依据什么？

答：人为分离出的热力学研究对象。根据其与外界的质量与能量的交换情况，分为闭口系、开口系和孤立系。

(2) 热力过程不可逆现象的本质是什么？

答：过程的不可逆在于有功损失。

(3) 什么叫饱和状态？

答：物质液气两相平衡的状态。

(4) 临界点与三相点之于工质的意义何在？

答：三相点与临界点分别规定了工质液气两相平衡共存区的上下界。

(5) 天气预报中的湿度指的是什么？

答：相对湿度，即大气中的水蒸气压与其同温下的饱和水蒸气压的比 / 用百分比表示。因绝对湿度不能反映空气的潮湿程度。相对湿度反映了降雨、有雾的可能性。在炎热的天气之下，高的相对湿度会让人类（和其他动物）感到更热，因为这妨碍了汗水的挥发。人类可以从而制定出酷热指数。

(6) 压气机采用多级压缩中间冷却的目的何在？

答：使之尽可能趋于定温压缩，以增大散热量，减小耗功、压缩终温和终体积。

(7) 为提高热效率通常采用什么措施来改变热力循环的结构？它们起什么作用？

答：回热与再热。有助于提高吸热平均温度、降低放热平均温度，从而使热效率上升。

(8) 各种动力、制冷（热泵）循环都是由哪几个基本过程组成？请说明理由。

答：都是由吸热、放热、压缩、膨胀过程组成。因不管是动力循环还是制冷（热泵）循环，都是热-功相互转换的循环，视目的不同，都需要将工质压缩到某一个相对高的温度、压力去吸热或放热，以及将工质膨胀到某一个相对低的温度、压力以做功或制冷，故必然都有吸（放）热、膨胀（压缩）过程。

## 二、计算题：

1. 某小型运动气手枪，射击前枪管内空气的压力为  $250\text{kPa}$ 、温度为  $27^\circ\text{C}$ ，体积为  $1\text{cm}^3$ ，被扳机锁住的子弹像活塞封住该压缩空气。击发时，扣动扳机，子弹被释放，由于过程迅速，可认为空气作绝热膨胀。若子弹离开枪管时枪管内空气压力为  $100\text{kPa}$ 、温度为  $235\text{K}$ ，求此时空气的体积、击发过程中空气做的功及熵产。已知空气的  $R_g = 0.287\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $c_p = 1.005\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

解：由于过程中质量不变，，所以

$$m = \frac{p_1 V_1}{R_g T_1} = \frac{250 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6}}{0.287 \times 10^3 (273.15 + 27)} = 2.90 \times 10^{-6} \text{kg} \quad ; \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad ,$$

$$V_2 = V_1 \frac{p_1}{p_2} \frac{T_2}{T_1} = 1\text{cm}^3 \frac{250}{100} \frac{235}{(273.15 + 27)} = 1.96\text{cm}^3$$

因过程绝热，有

$$\begin{aligned} W = Q - \Delta U = -\Delta U &= m(c_p - R_g)(T_1 - T_2) \\ &= 2.9 \times 10^{-6} (1.005 - 0.287) \times 10^3 \times (273.15 + 27 - 235) = 0.135\text{J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_g = \Delta S &= m\Delta s = m \left( c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} \right) \\ &= 2.90 \times 10^{-6} \left( 1.005 \times 10^3 \ln \frac{235}{300.15} - 0.287 \times 10^3 \ln \frac{100}{250} \right) = 4.95 \times 10^{-5} \text{J/K} \end{aligned}$$

2. 某柴油机排气温度  $557^\circ\text{C}$ ，排气压力为  $0.1\text{MPa}$ 。废气性质可近似当作空气处理，比热容取定值， $c_p = 1.005\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。若环境压力为  $0.1\text{MPa}$ ，环境温度为  $17^\circ\text{C}$ ，试问从  $1\text{kg}$  废气中最多能回收多少功？

解

$$\begin{aligned} w_{\max} = e_x &= (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \\ &= c_p (T - T_0) - T_0 \left( c_p \ln \frac{T}{T_0} - R_g \ln \frac{p}{p_0} \right) = c_p (T - T_0) - T_0 c_p \ln \frac{T}{T_0} \\ &= 1.005(557 - 17) - (273.15 + 17) \left( 1.005 \ln \frac{557 + 273.15}{17 + 273.15} \right) = 236.17\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

3. 一大型储气罐盛有温度  $100^{\circ}\text{C}$ 、压力  $4.90\text{MPa}$  的氢气。氢气经装设于罐壁上的渐缩喷

管流入背压  $p_b = 3.9\text{MPa}$  的外界，设喷管的出口截面积  $A_2 = 20\text{mm}^2$ ，已知氢气

$R_g = 4.124\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $c_p = 14.32\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，试求：放气开始时，

(1) 氢气外射的速度及流量；

(2) 其他条件不变，氢气直接外射入压力为  $0.1\text{MPa}$  大气时的速度及流量。

解：(1) 先确定出口压力  $p_2$ 。气体在喷管的进口状态近于其在罐内的滞止状态。

$$\text{因 } p_{cr} = v_{cr} p_0 = 0.528 \times 4.9\text{MPa} = 2.587\text{MPa} < p_b, \quad p_2 = p_b = 3.9\text{MPa},$$

$$\text{于是 } T_2 = T_0 \left( \frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (100 + 273.15) \times \left( \frac{3.9}{4.9} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 349.6\text{K}$$

$$c_{f2} = \sqrt{2(h_0 - h_2)} = \sqrt{2c_p(T_0 - T_2)} = \sqrt{2 \times 14.32 \times 10^3 (373.15 - 349.6)} = 821.4\text{m/s}$$

$$v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = \frac{4.124 \times 10^3 \times 349.6}{3.9 \times 10^6} = 0.370\text{m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{m} = \frac{A_2 c_{f2}}{v_2} = \frac{20 \times 10^{-6} \times 821.4}{0.370} = 0.044\text{kg/s}$$

(2) 因此时  $p_b = 0.1\text{MPa} < p_{cr}$ ， $p_2 = p_{cr} = 2.587\text{MPa}$ ，于是，

$$T_2 = T_0 \left( \frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = (100 + 273.15) \times 0.528^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 310.9\text{K}$$

$$c_{f2} = \sqrt{2c_p(T_0 - T_2)} = \sqrt{2 \times 14.32 \times 10^3 (373.15 - 310.9)} = 1335.2\text{m/s}$$

$$v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = \frac{4.124 \times 10^3 \times 310.9}{2.587 \times 10^6} = 0.496\text{m}^3/\text{kg}$$

$$\dot{m} = \frac{A_2 c_{f2}}{v_2} = \frac{20 \times 10^{-6} \times 1335.2}{0.496} = 0.054\text{kg/s}$$

4. 一冷暖两用空调，输入功率为  $1.8\text{ kW}$ ，制冷系数为 3，供暖系数为 4。若欲使室内的温度全年保持在  $20^\circ\text{C}$ ，而室内外温度每相差  $1^\circ\text{C}$  的换热率为  $0.5\text{ kW}$ ，则允许的室外温度范围应是多少？假如空调为理想的可逆机，输入功率不变，则允许的室外温度范围又是多少？

解：

1. 实际

$$(a) \text{ 夏天, 空调制冷运行时, 制冷系数 } \varepsilon = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{W}} = \frac{0.5(t_a - 20)}{1.8} = 3, \quad t_a = 30.8^\circ\text{C}$$

$$(b) \text{ 冬天, 空调热泵运行时, 供暖系数 } \varepsilon' = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{W}} = \frac{0.5(20 - t_a)}{1.8} = 4, \quad t_a = 5.6^\circ\text{C}$$

故允许的室外温度范围应  $5.6^\circ\text{C} < t_a < 30.8^\circ\text{C}$ 。

2. 理想

$$(a) \text{ 夏天, 空调制冷运行时, 制冷系数 } \varepsilon = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{W}} = \frac{0.5(t_a - 20)}{1.8} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{273.15 + 20}{t_a - 20}$$

$$t_a = 52.5^\circ\text{C}$$

$$(b) \text{ 冬天, 空调热泵运行时, 供暖系数 } \varepsilon' = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{W}} = \frac{0.5(20 - t_a)}{1.8} = \frac{T_H}{T_H - T_L} = \frac{273.15 + 20}{20 - t_a},$$

$$t_a = -12.5^\circ\text{C}$$

故允许的室外温度范围应  $-12.5^\circ\text{C} < t_a < 52.5^\circ\text{C}$ 。