装订线 答题时不要超过此线

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。$\delta w = pdV$

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 $dS = \frac{\delta Q_{可逆}}{T}$ 。对孤立系有 $dS_{iso} \geq 0$，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。

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

φ 越小 $\rightarrow 0$，空气越干燥，吸湿能力越强。

φ 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

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

（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：

$$\frac{v}{T} = -\frac{1}{3}\frac{a}{T^3} + f(p)$$

$$v = -\frac{1}{3}\frac{a}{T^2} + Tf(p)$$

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

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

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

又由范德瓦尔方程式得

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

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

代入积分式，则可得

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

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

三、 计算题 （每小题 15 分，共 45 分）

1．燃气轮机的进口参数为 $p_1 = 0.5MPa$， $T_1 = 410K$， $c_1 = 120m/s$，出口参数为 $p_2 = 0.12MPa$， $T_2 = 300K$， $c_2 = 70m/s$，当地大气环境参数 $p_0 = 0.1MPa$， $T_0 = 290K$。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 $kJ/(kg{\cdot}K)$, 气体常数 $R_g = 287.13J/(kg \cdot K)$。

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

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

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

（2）理论上最大的技术功和轴功

$$w_{t,\max} = e_{x1} - e_{x2} = \left(h_1 - h_2\right) + T_0\left(s_2 - s_1\right) = (h_1 - h_2) + T_0(c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R_g \ln\frac{p_2}{p_1})$$

$$= 111.1 + 290\times\left(1.01\ln\frac{300}{410} - 287.13\times 10^{-3}\ln\frac{0.12}{0.5}\right) = 138.44kJ/kg$$

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

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 $t_1 = 27$℃，喷管外的环境压力 $p_b = 0.1MPa$ 。设空气的物性同上题，求当压力 p_1 分别为 $0.15MPa$ ，$0.1894MPa$ ，$0.25MPa$ 时，喷管出口截面上空气的压力及流速。

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

气体在喷管内可实现完全膨胀， $p_2 = p_b = 0.1MPa$

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

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

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

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） $p_1 = 0.1894MPa$ 时， $\frac{p_b}{p_1} = \frac{0.1}{0.1894} = 0.528 = \nu_{cr}$

气体在喷管内也可实现完全膨胀， $p_2 = p_b = 0.1MPa$

出口截面上的流速等于临界流速

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

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

对于渐缩喷管，其最大的膨胀能力 $\nu_2 = \nu_{cr}$，即 $\frac{p_2}{p_1} = 0.528$

故 $p_2 = 0.528 p_1 = 0.528\times 0.25 = 0.132MPa$

而 $p_b = 0.1MPa$，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

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

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*MPa*，-141.75℃，以 25℃的海水作为热源来汽化天然气，供给用户时的状态为 1*MPa*，20℃。假定：液化天然气由纯甲烷组成，其状态参数如下：

$p_1 = 0.4MPa$，$t_1 = -141.75$ ℃时：$h_1 = -840.11kJ/kg$，$s_1 = -6.1004kJ/kg.K$；

$p_2 = 1MPa$，$t_2 = 20$ ℃时：$h_2 = -20.97kJ/kg$，$s_2 = -1.2485kJ/kg.K$。

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）由开口温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：

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

（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) 利用中间介质的朗肯循环，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。