

## 第六章 实际气体的性质和热力学一般关系

## 习 题

6-1 试推导范德瓦耳气体在定温膨胀时所作功的计算式。

提示和答案： 将范德瓦耳气体状态方程可写成  $p = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2}$ ，代入  $W = \int_1^2 p dV$

积分，在等温过程中， $T = \text{常数}$ ，得： $W = RT \ln \frac{V_{m,1} - b}{V_{m,2} - b} + a \left( \frac{1}{V_{m,2}} - \frac{1}{V_{m,1}} \right)$ 。

6-2  $\text{NH}_3$  气体的压力  $p = 10.13 \text{ MPa}$ ，温度  $T = 633 \text{ K}$ 。试根据通用压缩因子图求其密度，并和由理想气体状态方程计算的密度加以比较。

提示和答案： 由附录表查得  $\text{NH}_3$  临界参数计算  $p_r$  和  $T_r$ ，查通用压缩因子图得  $Z$ 。得  $\rho = 34.9 \text{ kg/m}^3$ ，若按理想气体计算  $\rho_{\text{id}} = 32.8 \text{ kg/m}^3$ ， $\rho / \rho_{\text{id}} = 1.064$ 。

6-3 一容积为  $3 \text{ m}^3$  的容器中储有状态为  $p = 4 \text{ MPa}$ ， $t = -113^\circ\text{C}$  的氧气，试求容器内氧气的质量，(1) 用理想气体状态方程；(2) 用压缩因子图。

提示和答案： 同题 6-2。按理想气体状态方程  $m = 288.4 \text{ kg}$ ，查通用压缩因子图得  $Z$  后算得  $m = 900 \text{ kg}$ 。

6-4 容积为  $0.425 \text{ m}^3$  的容器内充满氮气，压力为  $16.21 \text{ MPa}$ ，温度为  $189 \text{ K}$ ，计算容器中氮气的质量。利用 (1) 理想气体状态方程；(2) 范德瓦耳方程；(3) 通用压缩因子图；(4) R-K 方程。

提示和答案：(1) 利用理想气体状态方程  $m = 122.80 \text{ kg}$ ；(2) 范德瓦耳方程中氮气的范德瓦耳常数可查表 6-1，将  $a$ ， $b$  值代入范德瓦耳方程，可解得  $m = 147.0 \text{ kg}$ ；(3) 查通用压缩因子图  $Z = 0.84$ ， $m = 146.2 \text{ kg}$ ；(4) 用临界参数求取 R-K 方程中常数  $a$  和  $b$ ，代入 R-K 方程迭代后解得  $m = 148.84 \text{ kg}$ 。(本例中，因范氏方程常数采用实验数据拟合值，故计算  $\text{O}_2$  质量误差较小。)

6-5 试用下述方法求压力为  $5 \text{ MPa}$ ，温度为  $450^\circ\text{C}$  的水蒸气的比体积。(1) 理想气体状态方程；(2) 压缩因子图。已知此状态时水蒸气的比体积是  $0.063291 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，以此比较上

述计算结果的误差。

提示和答案：(1) 利用理想气体状态方程  $v_{id} = 0.066733 \text{ m}^3/\text{kg}$  ,

$$\frac{|v - v_{id}|}{v} \times 100\% = 5.44\% ; (2) \text{利用通用压缩因子图, 查得 } Z = 0.95, \text{ 故 } v' = 0.063340 \text{ m}^3/\text{kg} ,$$

$$\frac{|v - v_{id}|}{v} \times 100\% = 0.11\%$$

6-6\* 在一容积为  $3.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3$  的球形钢罐中储有  $0.5 \text{ kg}$  甲烷 ( $\text{CH}_4$ ) , 若甲烷由  $25^\circ\text{C}$  上升到  $33^\circ\text{C}$  , 用R-K方程求其压力变化。

提示和答案: 用临界参数求取 R-K 方程中常数  $a$  和  $b$  , 代入 R-K 方程求得  $\Delta p = 0.071 \text{ MPa}$ 。

6-7\* 迭特里希状态方程为  $p = \frac{nRT}{V - nb} \exp\left(-\frac{na}{RTV}\right)$  , 式中  $V$  为体积,  $p$  为压力,  $n$  为物

质的量,  $a$ 、 $b$  为物性常数。试说明符合迭特里希状态方程的气体的临界参数分别为

$$p_{cr} = \frac{a}{4n^2b^2}, \quad V_{cr} = 2nb, \quad T_{cr} = \frac{a}{4Rb} \text{ 并将此状态方程改写成对比态方程。}$$

提示和答案: 对迭特里希状态方程求导, 据临界等温线特征, 在临界点令  $\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T = 0$

$$\text{及 } \left(\frac{\partial^2 p}{\partial V^2}\right)_T = 0 \text{ 得, } \frac{na}{RT_{cr}V_{cr}^2} - \frac{1}{V_{cr} - nb} = 0 \text{ 和}$$

$$\frac{2nRT_{cr}}{(V_{cr} - nb)^3} - \frac{n^2a}{(V_{cr} - nb)^2V_{cr}^2} - \left[ \frac{n^2a(3V_{cr} - 2nb)V_{cr}}{(V_{cr} - nb)^2V_{cr}^4} - \frac{n^3a^2}{(V_{cr} - nb)RT_{cr}V_{cr}^4} \right] = 0$$

联立求解得  $V_{cr} = 2nb$ 、 $T_{cr} = \frac{a}{4Rb}$  , 代入迭特里希状态方程, 得  $p_{cr} = \frac{a}{4n^2b^2}$  。代回原方程

$$\text{整理后可得 } p_r = \frac{n^2T_r}{2V_r - 1} \exp\left(-\frac{2}{T_rV_r}\right)。$$

6-8  $29^\circ\text{C}$ 、 $15 \text{ atm}$  的某种理想气体从  $1 \text{ m}^3$  等温可逆膨胀到  $10 \text{ m}^3$  , 求过程能得到的最大功。

提示和答案: 可逆等温过程中, 其自由能的减少量等于所得到的最大功, 因等温

$dF = dU - TdS$  。据第一定律, 可逆过程,  $dU = TdS - pdV$  , 所以  $dF = -pdV$  。于是

$$W_{\max} = F_1 - F_2 = \int_1^2 p dV = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = 3\,499\,692 \text{ J}。 \text{注意气体的摩尔数不等于 1。}$$

**6-9** 试证明理想气体的体积膨胀系数  $\alpha_v = \frac{1}{T}$ 。

提示：对理想气体的状态方程  $pv=R_gT$  求导，代入体积膨胀系数定义  $\alpha_v = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ ，即

可证。

**6-10** 试证在  $h-s$  图上定温线的斜率  $\left( \frac{\partial h}{\partial s} \right)_T = T - \frac{1}{\alpha_v}$

提示：  $dh = Tds + vdp$ ，  $\left( \frac{\partial h}{\partial s} \right)_T = T + v \left( \frac{\partial p}{\partial s} \right)_T = T + v \frac{1}{(\partial s / \partial p)_T}$ ，利用麦克斯韦关系，

用  $(\partial v / \partial T)_p$  置换  $(\partial s / \partial p)_T$  即可得  $\left( \frac{\partial h}{\partial s} \right)_T = T - \frac{1}{\alpha_v}$

**6-11** 刚性容器中充满 0.1MPa 的饱和水，温度为 99.634℃。将其加热到 120℃，求其压力。已知：在 100℃ 到 120℃ 内，水的平均  $\alpha_v = 80.8 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$ ；0.1MPa，120℃ 时水的  $\kappa_T$  值为  $4.93 \times 10^{-4} \text{ 1/MPa}$ ，假设其不随压力而变。

提示和答案：  $dv = \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T dp$ ，据热系数定义可求得  $\frac{dv}{v} = \alpha_v dT - \kappa_T dp$ 。

积分得  $\ln \frac{v_2}{v_1} = \int_1^2 \alpha_v dT - \int_1^2 \kappa_T dp = 0$ ，因在积分区间内  $\alpha_v$  和  $\kappa_T$  都是常数，所以

$$\alpha_v (T_2 - T_1) = \kappa_T (p_2 - p_1)， \text{解得 } p_2 = 33.4 \text{ MPa}。$$

虽然水的温度仅升高 20℃，但容器内的压力是初态压力的 334 倍，因此进行定容过程相对于定压过程困难得多。

**6-12** 试证状态方程为  $p(v-b) = R_g T$ （其中  $b$  为常数）的气体（1）热力学能  $du = c_v dT$ ；

（2）焓  $dh = c_p dT + b dp$ ；（3）  $c_p - c_v$  为常数；（4）其可逆绝热过程的过程方程为

$$p(v-b)^\kappa = \text{常数}。$$

提示：对  $p(v-b) = R_g T$  求导，分别代入热力学能的一般关系式和焓的一般关系式

$$du = c_v dT + \left[ T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p \right] dv, \quad dh = c_p dT + \left[ v - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dp \quad \text{即得} \quad du = c_v dT,$$

$$dh = c_p dT + b dp; \text{代入 } c_p - c_v = T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v, \text{可得 } c_p - c_v = R_g; \text{对 } p(v-b) = R_g T$$

$$\text{取对数后求导 } \frac{dp}{p} + \frac{dv}{v-b} = \frac{dT}{T}, \text{代入 } ds = \frac{du}{T} + \frac{pdv}{T} = 0, \text{移项整理得 } \frac{dp}{p} = -\kappa \frac{d(v-b)}{v-b}.$$

取  $\kappa$  为定值, 积分得  $p(v-b)^\kappa = \text{常数}$ 。

**6-13** 证明下列等式

$$(1) \quad \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_v = \frac{c_v}{T}, \quad \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p = \frac{c_p}{T}$$

$$(2) \quad \frac{\partial^2 u}{\partial T \partial v} = T \frac{\partial^2 s}{\partial T \partial v}, \quad \frac{\partial^2 u}{\partial T \partial p} = T \frac{\partial^2 s}{\partial T \partial p}$$

$$\text{提示: (1) } ds = \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_v dT + \left( \frac{\partial s}{\partial v} \right)_T dv, \text{对照第一 } ds \text{ 方程式 } ds = \frac{c_v}{T} dT + \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv,$$

$$\text{即得 } \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_v = \frac{c_v}{T}; \text{取 } s = s(p, T), \quad ds = \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial s}{\partial p} \right)_T dp, \text{对照第二 } ds \text{ 方程式}$$

$$ds = \frac{c_p}{T} dT - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp, \text{得 } \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p = \frac{c_p}{T}. (2) \text{由 } du = T ds - p dv, \quad \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = T \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_v \text{故}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial T \partial v} = \frac{\partial}{\partial v} \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \frac{\partial}{\partial v} \left[ T \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_v \right] = T \frac{\partial^2 s}{\partial v \partial T} = T \frac{\partial^2 s}{\partial T \partial v}; \text{同理, 由 } dh = T ds + v dp,$$

$$\left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = T \left( \frac{\partial s}{\partial T} \right)_p \text{得 } \frac{\partial^2 h}{\partial T \partial p} = T \frac{\partial^2 s}{\partial T \partial p}.$$

**6-14** 试证范德瓦耳气体

$$(1) \quad du = c_v dT + \frac{a}{v^2} dv; \quad (2) \quad c_p - c_v = \frac{R_g}{1 - \frac{2a(v-b)^2}{R_g T v^3}};$$

$$(3) \quad \text{定温过程焓差为 } (h_2 - h_1)_T = p_2 v_2 - p_1 v_1 + a \left( \frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right);$$

$$(4) \quad \text{定温过程熵差为 } (s_2 - s_1)_T = R_g \ln \frac{v_2 - b}{v_1 - b}$$

提示: (1) 由范氏方程得  $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R_g}{v-b}$ 、 $T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p = \frac{R_g T}{v-b} - \left(\frac{R_g T}{v-b} - \frac{a}{v^2}\right) = \frac{a}{v^2}$  代

入  $du$  第一关系式  $du = c_v dT + \left[T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p\right]dv$ ，即得  $du = c_v dT + \frac{a}{v^2} dv$ ；代入

$$c_p - c_v = T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \text{ 并利用循环关系式转化 } \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \text{ 得 } \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = -\frac{\frac{R_g}{v-b}}{\frac{-R_g T}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3}}, \text{ 解}$$

$$\text{得 } c_p - c_v = \frac{R_g}{1 - \frac{2a(v-b)^2}{R_g T v^3}}; (3) \text{ 由 (1) 已得 } du = c_v dT + \frac{a}{v^2} dv \text{ 考虑等温过程 } dT=0, \text{ 所以,}$$

$$(h_2 - h_1)_T = (u_2 - u_1)_T + p_2 v_2 - p_1 v_1 = a\left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2}\right) + p_2 v_2 - p_1 v_1; (4) \text{ 由第一 } ds \text{ 方程式}$$

$$ds = \frac{c_v}{T} dT + \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dv, \text{ 所以, 范德瓦耳气体经历等温过程 } ds = \frac{R_g}{v-b} dv, \text{ 积分}$$

$$(s_2 - s_1)_T = R_g \ln \frac{v_2 - b}{v_1 - b}。$$

**\*6-15** 利用通用焓图求甲烷 ( $\text{CH}_4$ ) 由  $6.5\text{MPa}$ 、 $70^\circ\text{C}$  定压冷却到  $-6^\circ\text{C}$  时放出的热量。

已知甲烷在理想气体状态下的摩尔定压热容为  $\left\{C_{pm}^*\right\}_{\text{J/(mol}\cdot\text{K)}} = 18.9 + 0.055\{T\}_{\text{K}}$ 。

提示和答案: 查得甲烷  $p_{\text{cr}}$ 、 $T_{\text{cr}}$  计算得  $p_{r1} = p_{r2} = 1.40$ 、 $T_{r1} = 1.80$ 、 $T_{r2} = 1.40$ 。分

别查通用焓图, 有  $\frac{(H_m^* - H_m)_1}{RT_{\text{cr}}} = 0.39$ ,  $\frac{(H_m^* - H_m)_2}{RT_{\text{cr}}} = 0.80$ , 即得

$$H_{m,2} - H_{m1} = RT_{\text{cr}} \left[ \frac{(H_m^* - H_m)_1}{RT_{\text{cr}}} - \frac{(H_m^* - H_m)_2}{RT_{\text{cr}}} \right] + \int_1^2 C_{p,m}^* dT = -2069.2\text{J/mol}。$$

**\*6-16**  $8\text{MPa}$ 、 $150\text{K}$  的氮节流到  $0.5\text{MPa}$  后流经一短管, 测得温度为  $125\text{K}$ , 利用通用图求换热量及过程熵变。

提示和答案: 查得氮  $p_{\text{cr}}$  和  $T_{\text{cr}}$ , 计算  $p_{r1}$ 、 $p_{r2}$  和  $T_{r1}$ 、 $T_{r2}$ 。取节流阀及短管为系统, 列能量方程

$$Q = H_{m2} - H_{m1} = (H_{m1}^* - H_{m1}) + (H_{m2}^* - H_{m1}^*) - (H_{m2}^* - H_{m2})$$

其中：  $H_{m2}^* - H_{m1}^* = C_{pm}(T_2 - T_1) = -727.5\text{J/mol}$ ；查通用焓图，  $\left(\frac{H_m^* - H_m}{RT_{cr}}\right)_1 = 2.42$ 、

$$\left(\frac{H_m^* - H_m}{RT_{cr}}\right)_2 = 0.20, \text{ 于是}$$

$$(H_m^* - H_m)_1 = 2.42RT_{cr} = 2535.3\text{J/mol}; (H_m^* - H_m)_2 = 0.20RT_{cr} = 209.5\text{J/mol}$$

$$Q = 2535.3\text{J/mol} - 727.5\text{J/mol} - 209.5\text{J/mol} = 1598.3\text{J/mol}$$

熵变：  $S_{m2} - S_{m1} = (S_{m1}^* - S_{m1}) + (S_{m2}^* - S_{m1}^*) - (S_{m2}^* - S_{m2})$

利用对比压力 and 对比温度，查通用熵图  $\frac{S_{m1}^* - S_{m1}}{R} = 1.44$ 、  $\frac{S_{m2}^* - S_{m2}}{R} = 0.146$

$$S_{m1}^* - S_{m1} = 11.973\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K}); S_{m2}^* - S_{m2} = 1.214\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K});$$

$$S_{m2}^* - S_{m1}^* = C_{pm} \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = 17.75\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

$$S_{m2} - S_{m1} = 28.494\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

**6-17** 某理想气体的变化过程中比热容  $c_n$  为常数，试证其过程方程为  $pv^n = \text{常数}$ 。式中，

$$n = \frac{c_x - c_p}{c_x - c_v}, \quad p \text{ 为压力, } c_p、c_v \text{ 为比定压热容和比定容热容, 取定值。}$$

提示：将理想气体  $du = c_v dT$ ； $dT = d(pv/R_g)$  代入  $\delta q = du + pdv$ ； $\delta q = c_x dT$ ，

移项可得  $(c_v - c_x)dT + pdv = 0$ ，即导得  $(c_v - c_x + R_g)pdv + (c_v - c_x)vdp = 0$ ，因

$R_g = c_p - c_v$ ，所以  $(c_p - c_x)pdv + (c_v - c_x)vdp = 0$ ，比热容取常数，积分得

$$pv^{\frac{c_p - c_x}{c_v - c_x}} = \text{常数, 即 } pv^n = \text{常数。}$$

**6-18** 某一气体的体积膨胀系数和等温压缩率分别为

$$\alpha_v = \frac{nR}{pV}, \quad \kappa_T = \frac{1}{p} + \frac{a}{V}$$

式中， $a$  为常数， $n$  为物质的量， $R$  为通用气体常数。试求此气体的状态方程。

提示和答案：取  $V = V(T, p)$ ，则

$$dV = \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T dp = \alpha_v V dT - \kappa_T V dp = \frac{nR}{pV} V dT - \left( \frac{1}{p} + \frac{a}{V} \right) V dp \quad (a)$$

整理后积分得  $pV = -\frac{a}{2} p^2 + nRT + C$ ，当  $p=0$  时气体应服从理想气体方程  $pV = nRT$ ，

所以积分常数  $C=0$ ，因此状态方程为  $pV = -\frac{a}{2} p^2 + nRT$ 。

**6-19** 气体的体积膨胀系数和定容压力温度系数分别为

$$\alpha_v = \frac{R}{pV_m}, \quad \alpha = \frac{1}{T}$$

试求此气体的状态方程。（ $R$  为通用气体常数）

提示和答案：据  $\left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left( \frac{\partial T}{\partial v} \right)_p = -1$ ， $\left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = -\frac{\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p}{\left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v} = -\frac{\alpha_v v}{p\alpha} = -\frac{R_g T}{p^2}$ ，

积分， $v = \frac{R_g T}{p} + \varphi(T)$ ，当  $p \rightarrow 0$  时气体趋近于理想气体，服从  $v = \frac{R_g T}{p}$ ，故  $\varphi(T) = 0$ ，

因此状态方程为  $pV_m = RT$ 。

**\*6-20** 水的三相点温度  $T = 273.16 \text{ K}$ ，压力  $p = 611.2 \text{ Pa}$ ，汽化潜热  $\gamma = 2501.3 \text{ kJ/kg}$ 。按蒸气压力方程计算  $t_2 = 10^\circ \text{C}$  时饱和蒸汽压（假定在本题范围内水的汽化潜热近似为常数）。

提示和答案：将三相点汽化潜热代入饱和蒸汽压力方程： $\ln p_s = -\frac{\gamma}{R_g T_s} + A$ ，解得

$p_{s,10^\circ \text{C}} = 1231 \text{ Pa}$ ，蒸汽表提供的  $10^\circ \text{C}$  的  $p_s = 1227.9 \text{ Pa}$ 。

**\*6-21** 在二氧化碳的三相点状态， $T_{\text{tp}} = 216.55 \text{ K}$ ， $p_{\text{tp}} = 0.518 \text{ MPa}$ ，固态、液态和气态比体积分别为  $v_s = 0.661 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ， $v_l = 0.894 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ， $v_g = 722 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，升华潜热  $\gamma_{\text{sg}} = 542.76 \text{ kJ/kg}$ ，汽化潜热  $\gamma_{\text{lg}} = 347.85 \text{ kJ/kg}$ 。计算：（1）在三相点上升华线，熔解线和气化线的斜率各为多少；（2）按蒸气压方程计算  $t_2 = -80^\circ \text{C}$  时饱和蒸汽压力（查表数据为  $0.0602 \text{ MPa}$ ）。

提示和答案：（1）据状态参数特性及相变潜热为焓差， $\gamma_{\text{sl}} = \gamma_{\text{sg}} - \gamma_{\text{lg}} = 194.91 \text{ kJ/kg}$ ，

代入  $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_s = \frac{\gamma}{T_s(v^\beta - v^\alpha)}$  即可得汽化线斜率  $\left.\frac{dp}{dT}\right|_{\text{汽化}} = \frac{\gamma_{\text{lg}}}{T_s(v'' - v')} = 2.23 \times 10^3 \text{ Pa/K}$ 、熔解

线斜率  $\left.\frac{dp}{dT}\right|_{\text{熔解}} = 4787.6 \times 10^3 \text{ Pa/K}$ ；升华线斜率、 $\left.\frac{dp}{dT}\right|_{\text{升华}} = 3.47 \times 10^3 \text{ Pa/K}$ ；(2) 三相点

时  $\ln p_s = -\frac{\gamma_{\text{lg}}}{R_g T_s} + A$ ，代入现有数据， $A = 21.66$ 。所以  $-80^\circ\text{C}$  时饱和蒸汽压

$$p_{s, -80^\circ\text{C}} = \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{lg}}}{R_g T_s} + A\right) = 184915 \text{ Pa}。$$

**6-22** 利用水蒸气下述数据计算  $200^\circ\text{C}$  时水的气化潜热。

$t / ^\circ\text{C}$	$p_s / \text{kPa}$	$v'' / \text{m}^3/\text{kg}$	$v' / \text{m}^3/\text{kg}$	$h'' / \text{kJ/kg}$	$h' / \text{kJ/kg}$
190	1254.2	0.1565	0.0011	2785.8	807.6
195	1397.6	0.1410	0.0011	2789.4	829.9
200	1551.6	0.1273	0.0012	2792.5	854.0
205	1722.9	0.1152	0.0012	2795.3	875.0
210	1906.2	0.1044	0.0012	2797.7	897.7

提示和答案：据克拉贝隆-克劳修斯方程  $\left.\frac{dp}{dT}\right|_{\text{sat}} = \frac{h'' - h'}{T_s(v'' - v')}$ ，

$$h'' - h' = T_s(v'' - v') \left.\frac{dp}{dT}\right|_{\text{sat}} \cong T_s(v'' - v') \frac{\Delta p}{\Delta T} = 1940.3 \text{ kJ}。同表数据显示$$

$$h'' - h' = 1938.5 \text{ kJ/kg}。$$

**6-23** 制冷剂 R134a 在  $20^\circ\text{C}$  时饱和压力和气化潜热分别是  $571.6 \text{ kPa}$  和  $182.4 \text{ kJ/kg}$ ，仅利用这些数据估算 R134a 在  $0^\circ\text{C}$  时的饱和压力。

提示和答案：据克拉贝隆方程  $\left.\frac{dp}{dT}\right|_{\text{sat}} = \frac{h'' - h'}{T_s(v'' - v')}$ ，分离变量，假定  $v'' \gg v'$ 、R134a

蒸气近似服从理想气体规律，且由于温度变化范围不大，气化潜热为常数，积分得

$$p_2 = 326.5 \text{ kPa}。$$