

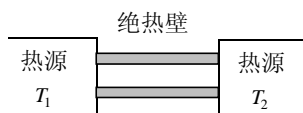
第6章 传递现象

习题解答

1. 18°C时在厚度为 1 cm 的惰性多孔平板两边, 放置扩散系数为 $1.19 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 的 NaCl 稀水溶液, 一边浓度为 $0.4 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$, 另一边为 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ 。由于溶液量大, 且一直在搅拌, 浓度不变, 扩散呈恒稳状态。试求溶质 NaCl 的物质通量, 并写出 NaCl 的浓度在板内分布的式子。

$$\begin{aligned}\text{解: } j_B &= -D \frac{(c_{B1} - c_{B0})}{l} \\ &= -1.19 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \times \frac{(0.2 - 0.4) \times 10^3 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-3}}{1 \times 10^{-2} \text{ m}} \\ &= 2.38 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ c_B &= c_{B0} + \frac{(c_{B1} - c_{B0})z}{l} = \left[0.4 + \frac{(0.2 - 0.4) \times z}{1 \text{ cm}} \right] \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \\ &= \left(0.4 - 0.2 \frac{z}{\text{cm}} \right) \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \quad (z \text{ 从 } 0 \rightarrow 1 \text{ cm})\end{aligned}$$

2. 如图 6-14 两个热源间距为 200 cm, 温度 T_1 、 T_2 分别为 375 K、325 K, 中间是截面积为 24 cm^2 的铁棒, 其热导率为 $80 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 若达到恒稳状态, 试计算 1 min 内流过铁棒的热量。



$$\text{解: } \frac{dT}{dz} = \frac{(325 - 375) \text{ K}}{200 \times 10^{-2} \text{ m}} = -25 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$q_z = -\lambda \frac{dT}{dz} = -80 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \times (-25 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1})$$

$$= 2.00 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\therefore Q = 2.00 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \times 24 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times (1 \times 60) \text{ s} = 288 \text{ J}$$

3. 298 K 时甘油处在间距为 0.1 mm 的两平行板间, 一板固定, 另一面积为 2 cm^2 的板以 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度移动。已知甘油的粘度为 $954 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 求移动板所受的内摩擦力。

$$\text{解: } \frac{dv_y}{dz} = \frac{0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{0.1 \times 10^{-3} \text{ m}} = 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

$$\tau_{zy} = \eta \cdot \frac{dv_y}{dz} = 954 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} \times 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1} = 1.91 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$\text{内摩擦力} = 1.91 \times 10^3 \text{ Pa} \times 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0.382 \text{ N}$$

4. 20℃时 Sb 向 Ag 扩散的扩散系数为 $1.0 \times 10^{-25} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 求均方位移达到 $(0.1 \text{ mm})^2$ 所需的时间。550℃时 Ni 向 Cu 扩散的扩散系数为 $1.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 问达到同样大小的均方位移需多少时间。

$$\text{解: } t = \frac{\langle z^2 \rangle}{2D} = \frac{(0.1 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{2 \times 1.0 \times 10^{-25} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}} = 5 \times 10^{16} \text{ s}$$

$$t = \frac{\langle z^2 \rangle}{2D} = \frac{(0.1 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{2 \times 1.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}} = 5 \times 10^4 \text{ s}$$

5. 25℃时蔗糖在稀水溶液中的扩散系数为 $5.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 试分别计算蔗糖分子经 1min、1h、1d 的均方位移。

$$\text{解: } t = 1 \text{ min} \quad \langle z^2 \rangle = 2Dt = 2 \times 5.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \times (1 \times 60 \text{ s})$$

$$= 6.2 \times 10^{-8} \text{ m}^2 = (2.5 \times 10^{-4} \text{ m})^2$$

$$= (0.25 \text{ mm})^2$$

$$t = 1 \text{ h} \quad \langle z^2 \rangle = 2 \times 5.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \times (1 \times 3600 \text{ s})$$

$$= 3.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = (1.9 \text{ mm})^2$$

$$t = 1 \text{ d} \quad \langle z^2 \rangle = 2 \times 5.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \times (1 \times 86400 \text{ s}) \\ = 90 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = (9.5 \text{ mm})^2$$

6. 体温下蛋白质在水中的扩散系数为 $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ，生物细胞的直径若为 $10 \mu\text{m}$ ，问蛋白质分子扩散经此距离需多少时间。

$$\text{解: } t = \frac{\langle z^2 \rangle}{2D} = \frac{(10 \times 10^{-6} \text{ m})^2}{2 \times 1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}} = 0.5 \text{ s}$$

7. 如图 6-10 (b)所示的实验装置中，充以 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}(\text{B})$ 与 $\text{H}_2\text{O}(\text{A})$ 的混合物， $x_{\text{A}} = 0.50$ ，上球温度为 60°C ，下球温度为 10°C 。达到恒稳态后，上球中 H_2O 的摩尔分数比下球中大 0.05。试求热扩散因子 α_T 及热扩散比 k_T 。

$$\text{解: } \Delta x_{\text{A}} = -\alpha_T x_{\text{A}} x_{\text{B}} \Delta T / T$$

$$\alpha_T = -\frac{T \Delta x_{\text{A}}}{x_{\text{A}} x_{\text{B}} \Delta T} = -\frac{\left[\frac{(273 + 60) + (273 + 10)}{2} \right] \text{K} \times 0.05}{0.50 \times 0.50 \times (60 - 10) \text{K}} = -1.23$$

$$k_T = \alpha_T x_{\text{A}} x_{\text{B}} = -1.23 \times 0.50 \times 0.50 = -0.31$$

8. 某液体在 25°C 流过内直径为 0.20 cm 、长度为 24 cm 的管子。当管子两端压力差为 4.27 kPa 时， 120 s 内流出的液体体积为 148 cm^3 ，求该液体在 25°C 时的粘度。

$$\text{解: } \eta = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2)}{8 l \dot{V}} = \frac{\pi \times \left(\frac{0.20}{2} \times 10^{-2} \text{ m} \right)^4 \times 4.27 \times 10^3 \text{ Pa}}{8 \times 24 \times 10^{-2} \text{ m} \times \frac{148 \times 10^{-6}}{120} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \\ = 5.7 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

9. 在体温下人的血液粘度是 $0.40 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，若主动脉直径为 2.5 cm ，从心脏流出经过主动脉的血液流量为 $5.0 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ，求沿主动脉的压力梯度。若主动脉直径降为 2.2 cm ，在同样的流量下，压力梯度增加的百分率是多少？

$$\begin{aligned}\text{解: } \frac{p_2 - p_1}{l} &= \frac{8\dot{V}\eta}{\pi r^4} \\ &= \frac{8 \times \frac{5.0 \times 10^{-3}}{60} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \times 0.40 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}}{\pi \times \left(\frac{2.5}{2} \times 10^{-2} \text{ m}\right)^4} = 3.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}\end{aligned}$$

$$\frac{p_2 - p_1}{l} = \frac{8 \times \frac{5.0 \times 10^{-3}}{60} \times 0.40 \times 10^{-3}}{\pi \times \left(\frac{2.2}{2} \times 10^{-2}\right)^4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1} = 5.8 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\therefore \frac{5.8 - 3.5}{3.5} = 0.66 = 66\%$$

10. 在斯托克斯膜池法（见图 6-12）实验中，已知两池容积均为 0.50 dm^3 ，膜面积为 75 cm^2 ，膜厚度为 2.0 mm ， 26°C 时测得实验前上下两池 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 的浓度分别为 $0.010 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ 、 $0.020 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ，5 h 后上下两池 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 的浓度为 $0.011 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ 、 $0.019 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ，试求 26°C 时 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 在稀水溶液中的扩散系数。

$$\begin{aligned}\text{解: } \beta &= \frac{A_s(V_{\text{下}}^{-1} + V_{\text{上}}^{-1})}{l} \\ &= \frac{75 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times \left(\frac{1}{0.50 \times 10^{-3}} + \frac{1}{0.50 \times 10^{-3}}\right) \text{ m}^{-3}}{2.0 \times 10^{-3} \text{ m}} = 15 \times 10^3 \text{ m}^{-2}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}D &= \frac{1}{\beta t} \ln \frac{(c_{\text{B下}} - c_{\text{B上}})_{t=0}}{(c_{\text{B下}} - c_{\text{B上}})_t} \\ &= \frac{1}{15 \times 10^3 \text{ m}^{-2} \times 5 \times 3600 \text{ s}} \ln \frac{(0.020 - 0.010)}{(0.019 - 0.011)} = 0.83 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\end{aligned}$$

11. 已知 N_2 在 20°C 时的粘度为 $1.75 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，试计算：(1) N_2 分

子的直径；(2) 25℃时 N_2 的热导率；(3) 20℃、0.1 MPa 时 N_2 的自扩散系数。已知 N_2 的摩尔质量为 $0.02801 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，25℃时 $C_{p,m} = 29.12 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

$$\begin{aligned} \text{解: (1) } d^2 &= \pi^{-3/2} \frac{\sqrt{MRT}}{\eta L} = \left[\frac{\pi^{-3/2} \sqrt{0.02801 \times 8.3145 \times 293.2}}{1.75 \times 10^{-5} \times 6.022 \times 10^{23}} \right] \text{m}^2 \\ &= 0.141 \times 10^{-18} \text{m}^2 \\ d &= 0.375 \times 10^{-9} \text{m} = 0.375 \text{nm} \end{aligned}$$

(2) 对理想气体

$$\begin{aligned} C_{V,m} &= C_{p,m} - R = (29.12 - 8.3145) \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \\ &= 20.81 \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \\ \lambda &= \pi^{-3/2} \sqrt{RT / M C_{V,m}} / L d^2 \\ &= \left[\frac{\pi^{-3/2} \sqrt{8.3145 \times 298.2 / 0.02801} \times 20.81}{6.022 \times 10^{23} \times 0.141 \times 10^{-18}} \right] \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \\ &= 1.31 \times 10^{-2} \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(3) } D &= \frac{\eta RT}{pM} = \left[\frac{1.75 \times 10^{-5} \times 8.3145 \times 293.2}{0.1 \times 10^6 \times 0.02801} \right] \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \\ &= 1.52 \times 10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

12. 查得 N_2 在 1000 K 的摩尔定压热容 $C_{p,m} = 32.70 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，利用上题的数据和结果计算 N_2 在 1000 K 的热导率。

解：由上题，298 K 时 $C_{V,m}(T_1) = 20.81 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

$$\lambda(T_1) = 1.31 \times 10^{-2} \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{1000K 时 } C_{V,m}(T_2) &= C_{p,m} - R = (32.70 - 8.3145) \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \\ &= 24.39 \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \end{aligned}$$

按

$$\lambda = \frac{\pi^{-3/2} \sqrt{RT / M C_{V,m}}}{L d^2}$$

$$\begin{aligned}
 \text{得} \quad \lambda(T_2) &= \lambda(T_1) \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \frac{C_{V,m}(T_2)}{C_{V,m}(T_1)} \\
 &= 1.31 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \times \sqrt{\frac{1000}{298}} \times \frac{24.39}{20.81} \\
 &= 2.81 \times 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}
 \end{aligned}$$

13. He 分子的直径为 0.225 nm，试计算 273 K、0.1 MPa 时气体 He 的粘度与自扩散系数。已知 He 的摩尔质量为 $4.00 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

$$\begin{aligned}
 \text{解: } \eta &= \frac{\pi^{-3/2} \sqrt{MRT}}{Ld^2} = \left[\frac{\pi^{-3/2} \sqrt{4.00 \times 10^{-3} \times 8.3145 \times 273}}{6.022 \times 10^{23} \times (0.225 \times 10^{-9})^2} \right] \text{ Pa} \cdot \text{s} \\
 &= 1.78 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \\
 D &= \frac{\eta RT}{pM} = \frac{1.78 \times 10^{-5} \times 8.3145 \times 273}{0.1 \times 10^6 \times 4.00 \times 10^{-3}} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} = 1.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}
 \end{aligned}$$