

## 第十二章习题与参考答案

12-1 试求一氧化碳混合气体的扩散系数。已知混合物的温度为 298K，总压为 2 个大气压，其内各组份的摩尔分数为  $y_{O_2} = 0.20$ ， $y_{N_2} = 0.70$ ， $y_{CO_2} = 0.10$ ，1atm，273K 时

$$D_{CO-O_2} = 0.185 \times 10^{-4} m^2 / s, 1atm \quad , \quad 288K \quad 时 \quad ,$$

$$D_{CO-N_2} = 0.192 \times 10^{-4} m^2 / s。$$

答：提示 
$$\frac{D_{AB\text{状态}1}}{D_{AB\text{状态}2}} = \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{2/3} \times \frac{P_2}{P_1}$$

$$D_{CO-O_2-N_2} = 0.102 \times 10^{-4} m^2 / s$$

12-2 空气被装在一个  $30m^3$  的容器里，其温度是 400K，压力为  $1.013 \times 10^5 Pa$ ，试确定空气的下列参数：

- (1) 氧的摩尔分数；
- (2) 氧的体积百分数；
- (3) 空气的重量；
- (4) 氧气的质量密度；
- (5) 氮气的质量密度；
- (6) 空气的质量密度；
- (7) 空气的摩尔密度；
- (8) 空气的平均分子量；
- (9) 氮气的分压。

答：(1) 0.21，(2) 0.21，(3) 26.35kg，(4)  $0.205kg/m^3$ ，(5)  $0.674kg/m^3$ ，(6)  $0.879kg/m^3$ ，(7)  $30.5mol/m^3$ ，(8) 28.84，(9)  $8.0 \times 10^4 Pa$

12-3 对于一个由 A、B 组成的二元混合物，试只用浓度、速度和通量的定义来证明质量分数  $\omega_A$  与摩尔分数  $x_A$  的关系是：

$$\omega_A = \frac{x_A M_A}{x_A M_A + x_B M_B}$$

12-4 一气体混合物系由氧气和二氧化碳构成的，其温度为 294K，总压力  $1.519 \times 10^5 \text{Pa}$ ，设氧气为气体A，二氧化碳为气体B。若混合物内的传质可视为一维的，而且  $x_A = 0.40$ ， $V_A = 0.08 \text{m/s}$ ,  $V_B = -0.02 \text{m/s}$ ，试只用浓度、速度和通量的定义，分别求出：

- (1)  $x_B$ ;
- (2) 混合气体的分子量, kg/mol;
- (3)  $\rho_{\text{混合}}, \rho_A, \rho_B, \text{kg/m}^3$ ;
- (4)  $C_{\text{混合}}, C_A, C_B, \text{mol/m}^3$ ;
- (5)  $\omega_A$ 和 $\omega_B$ ;
- (6)  $V_A - v$ 和 $V_B - v, \text{m/s}$
- (7)  $V_A - V$ 和 $V_B - V, \text{m/s}$ ;
- (8)  $N_A, N_B$ , 和 $N_A + N_B, \text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$ ;
- (9)  $n_A, n_B$ 和 $n_A + n_B, \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ;
- (10)  $j_B, \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ;
- (11)  $J_B, \text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$ 。

答：(1) 0.60, (2) 39.2, (3)  $2.44 \text{kg/m}^3, 0.80 \text{kg/m}^3, 1.64 \text{kg/m}^3$ , (4)  $63 \text{mol/m}^3, 25 \text{mol/m}^3, 38 \text{mol/m}^3$ , (5) 0.328, 0.672, (6)  $0.0672 \text{m/s}, -0.0328 \text{m/s}$ , (7)  $0.0603 \text{m/s}, -0.0397 \text{m/s}$ , (8)  $2.0 \text{mol/m}^2 \cdot \text{s}, -0.76 \text{mol/m}^2 \cdot \text{s}, 1.24 \text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$ , (9)  $0.064 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}, -0.0344 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}, 0.0306 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ , (10)  $-0.0538 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ , (11)  $-1.51 \text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$

12-5 E·M·拉尔逊 (Larson) 所测得的三氯甲烷在一个大气压, 25℃空气中的扩散系数为  $0.095 \text{cm}^2/\text{s}$ , 试用赫希菲尔德方程再计算它的扩散系数, 并与实验值进行比较。

答:  $0.084\text{cm}^2/\text{s}$

12-6 有一温度  $100^\circ\text{C}$ , 压力为 1.5 个大气压的气体混合物, 其组份为:  $\text{O}_2$  6%,  $\text{CO}$  11%,  $\text{CO}_2$  16%,  $\text{N}_2$  67%, 试求氮气在混合物中的扩散系数。

答:  $0.201\text{cm}^2/\text{s}$

12-7 将下面方程由直角坐标改置成圆柱坐标系:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \frac{\partial N_{A,x}}{\partial x} + \frac{\partial N_{A,y}}{\partial y} + \frac{\partial N_{A,z}}{\partial z} = R_A$$

$$\text{答: } \frac{\partial C_A}{\partial t} + \frac{1}{r} \left( \frac{\partial N_{A,r}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial N_{A,\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial N_{A,z}}{\partial z} = R_A$$

12-8 计算氧在静止的 $\text{CH}_4$ 和氢的混合气体中的扩散系数。已知气体的摩尔分数之比  $x_{\text{CH}_4} : x_{\text{H}_2} = 2 : 1$ ,  $D_{\text{O}_3-\text{CH}_4} = 0.184\text{cm}^2/\text{s}$ ,

$$D_{\text{O}_2-\text{H}_2} = 0.690\text{cm}^2/\text{s}。$$

$$\text{答: 提示 } D_{Am} = \frac{1}{x_B D_{AB} + x_C D_{AC} + \cdots + x_i D_{Ai}}$$

$$0.241\text{cm}^2/\text{s}$$

12-9 求算  $\text{CO}$  通过氧—氮混合物时的扩散系数。混合物各组分的摩尔分数为:  $x_{\text{O}_2} = 0.20$ ,  $x_{\text{N}_2} = 0.70$ ,  $x_{\text{CO}} = 0.10$  混合气体的温度为  $298\text{K}$ , 气体总压为  $202, 650\text{kPa}$ 。已知在  $101.325\text{kPa}$ ,  $273\text{K}$  时  $D_{\text{CO}-\text{O}_2} = 0.185\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $D_{\text{CO}-\text{N}_2} = 0.192\text{cm}^2/\text{s}$

答:  $0.110\text{cm}^2/\text{s}$

12-10 计算  $800\text{K}$ 时被还原的 $\text{FeO}$ 球团中 $\text{CO}-\text{CO}_2$ 的有效扩散系数。设球团的曲折度为 2.0, 空隙度为 0.25, 孔半径为  $0.005\text{cm}$ , 气体压力为  $101.325\text{kPa}$

答:  $0.96$  或  $0.12\text{cm}^2/\text{s}$

12-11 把一块 20<sup>#</sup>钢加热至 980°C，置于还原气氛中使之发生如下反应  $2\text{CO}-\text{CO}_2+\text{C}(\text{s})$  而渗碳，达到平衡时钢块表面碳的浓度为 1%。若固体内扩散为过程总速率的限速步骤，计算 1、3、10 小时后碳浓度的分布。已知  $D_c = 2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 / \text{s}$

$$\text{答: } \frac{C - C_s}{C_0 - C_s} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

12-12 用富勒公式计算在 700K, 101.325kPa 时  $\text{CO}_2-\text{O}_2$  混合气体的扩散系数。

$$\text{答: } 0.76 \text{ cm}^2/\text{s}$$

12-13 在 980°C 把碳含量为 0.15% (质量) 的钢板在能使其表面保持含量为 1% (质量) 的渗碳气氛中，求 8 小时后钢板表面层区域碳的浓度分布。已知  $D_c = 0.21e^{\frac{-E_D}{RT}}$ ,  $E_D = 141750 \text{ J}$

$$\text{答: } C_c = 1 - 0.85 \text{erf}\left(\frac{x}{0.170}\right)$$

12-14 在 980°C 把含碳为 0.8% (质量) 的钢板放在能使其表面保持 0.1% (质量) C 的气氛中，求由表面起深度为 1mm 处碳的浓度随时间变化曲线，已知  $D_c = 2.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 / \text{s}$

$$\text{答: } C_c = 0.1 + 0.7 \text{erf}\left(\frac{114}{\sqrt{t}}\right)$$

12-15 在 101.325kPa, 815°C  $\text{CO}$  气体以 15.24cm/s 的线速度流经直径为 1.27cm 的赤铁矿球团。在平衡时矿球表面气体成分是  $\text{CO}90\%$  (体积),  $\text{CO}_210\%$  (体积)。估算气—固间  $\text{CO}$  的传输速率。已知粘度  $\mu_{\text{CO}} = 0.044 \text{ CP}$ ,  $\mu_{\text{CO}_2} = 0.045 \text{ CP}$

$$\text{答: } 4.09 \times 10^{-6} \text{ mol/s}$$

12-16 炼钢熔池中钢液含氧量为 0.03% (质量)，因其表面与大气接触，故钢液表面层含氧量达到饱和，为 0.16% (质量)。求

氧从钢液表面向其内部的传质速率及钢液的有效边界层厚度。已知氧的传质系数为  $1.66 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，

$$D_{O_2} = 2.5 \times 10^{-5} \text{cm}^2 / \text{s}$$

答：  $1.55 \times 10^{-7} \text{g/cm} \cdot \text{s}, 1.5 \text{cm}$

12-17 在小型搅拌器中用  $25^\circ\text{C}$  水吸收纯氧，搅拌器转速为  $300 \text{r/min}$

时，  $k_d = 1.47 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ，转速为  $1000 \text{r/min}$  时，

$k_d = 3.03 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 。已知  $D_{H_2} = 6.3 \times 10^{-9} \text{cm}^2 / \text{s}$ ，求两种

情况下的表面更新率。

答：  $0.034 \text{s}^{-1}, 0.145 \text{s}^{-1}$

12-18 球团矿的反应速率处于外扩散控制范围内，实验数据符合如下准数方程

$$Sh = 2.0 + 0.16 Re^{2/3}$$

若球团直径  $d = 2 \text{mm}$ ，气流速度  $V = 50 \text{cm/s}$ ，气体的运动粘度  $\nu = 2 \text{cm}^2 / \text{s}$ ，扩散系数  $D = 2.1 \text{cm}^2 / \text{s}$ ，试求传质系数  $k_d$  和边界层厚度  $\delta$ 。

答：  $2.59 \text{cm/s}, 0.81 \text{cm}$

12-19 在  $1550^\circ\text{C}$  把纯石墨棒插入电弧炉内的钢液中，钢液含碳

$0.4\%$ （质量）。测得石墨的溶解线速度  $\frac{dx}{dt} = 3.5 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ，

求碳在钢液中的传质系数。已知

$\rho_{\text{石墨}} = 2.25 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ， $\rho_{\text{钢}} = 7.0 \text{kg/m}^3$ ，石墨表面钢液内碳

的饱和浓度可用下式计算

$$[\%C] = 1.34 + 2.54 \times 10^{-3} [t^\circ\text{C}]$$

答：  $2.3 \times 10^{-7} \text{m/s}$

12-20 在  $30 \text{t}$  氧气底吹转炉中通入氩气  $1 \text{min}$  以除去钢中的氧，测得通氩前后钢中氧含量如下表所示：

已知氩气流速为  $0.9 \text{m}^3 / \text{s}$ ，炉膛横截面积  $A$  为  $1.6 \times 10^6 \text{cm}^2$ ，钢液

密度  $\rho = 7.0 \text{ g/cm}^3$ ，求氧在液相边界层的传质系数  $k$ 。

炉次	1	2	3	4
[O] <sub>o</sub> /ppm	630	88	122	285
[O] <sub>i</sub> /ppm	240	22	85	174

答：  $k = 0.045 \text{ cm/s}$

12-21 1600°C 平炉沸腾期脱硅速率平均为 0.5%/小时，从熔池底部上升的 CO 气泡为球冠形，球冠形  $r=5\text{cm}$ ，假定表面更新论使用于描述脱碳过程，且熔池深度为 70cm，求传质系数  $k_{d[O]}$ ，

已知 CO 在钢液中的扩散系数  $D = 1.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$

答： 0.036cm/s

12-22 设平炉中钢渣界面与钢液内部的氧浓度差  $\Delta[O] = 0.04\%$ （质量），钢和渣的有效边界层厚度  $\delta$  均为 0.004cm，氧的扩散系数  $D_{[O]} = 2.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，根据以上数据求该平炉的脱碳速率

（以 C%/小时表示）。已知钢的密度  $\rho = 7.1 \text{ g/cm}^3$ ，熔池深度为 50cm。

答： 0.11%h<sup>-1</sup>