

科学版习题精解系列

化工原理

(下册)

习题精解

何潮洪 南碎飞 安 越 编
陈欢林 詹晓力 叶向群



科学出版社

www.sciencep.com

科学版习题精解系列

化工原理习题精解

(下册)

何潮洪 南碎飞 安 越 编
陈欢林 詹晓力 叶向群

内 容 简 介

本书是《科学版习题精解系列》之一。

本书以例题和习题的形式,再现了《化工原理》、《化工原理实验》教材的相关内容。为使读者加深对化工原理课程中的基本概念、原理和工程处理方法的理解,例题解答特别强调有关的分析与总结。每章包括基本内容、重点与难点、精选题及解答、习题4部分。

全书分上、下两册。上册覆盖流体流动与传热部分,包括流体力学基础、流体输送机械、机械分离与固体流态化、热量传递基础、传热过程与换热器、蒸发、流体流动与传热实验;下册覆盖传质部分,包括质量传递基础、气体吸收、蒸馏、液液萃取、干燥、膜分离、传质实验,此外,下册还收录了浙江大学近五年来的化工原理研究生入学考试试题,并给出相应解答。

本书可作为化学工程与工艺专业本科生教学参考用书以及研究生入学考试辅导用书,也可作为化学、化工专业的教师、研究生和从事相关工作的工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理习题精解(下册)/何潮洪等编. —北京:科学出版社,2003
(科学版习题精解系列)

ISBN 7-03-009540-5

I. 化… II. 何… III. 化工原理-高等学校-解题 IV. TQ02-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 106799 号

责任编辑:刘俊来 杨 震 / 责任校对:包志虹

责任印制:安春生 / 封面设计:槐寿明

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年7月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2003年7月第一次印刷 印张:16 3/4

印数:1—4 000 字数:316 000

定价:22.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

出版说明

演练习题是学习中的重要环节,是课堂和课本所学知识的初步应用和实践,通过演算和思考,不仅能考察对知识理解和运用的程度,巩固书本知识,而且能培养科学的思维和解题能力。我社在充分调查研究的基础上,组织出版了《科学版习题精解系列》(化工类)。

化工类专业的专业基础课主要包括化工原理、化工热力学和化学反应工程等。许多学生反映在学习专业课程时,未能及时消化所学内容。教师也反映不可能将更多精力投入到学生的课外习题指导中去。对专业基础课的掌握扎实与否直接影响到今后实际工作的能力。本套丛书因此应运而生,目的在于在所学课本之外,能够起到真正的辅导教师的作用。

从教与学的角度看,理论需要联系实际,所学即为所用,通过习题检验课堂上的学习效果是一条通途之道。演练习题作为一个桥梁,起到了衔接课本知识和实际运用的作用。学的人常通过对习题的解答而对课本的基本概念、基本原理有更深刻的认识和记忆,或起到温故而知新之用,或起到使人茅塞顿开之用。教的人虽有倾尽所学以告之的想法,也会因课时所限不能有更多时间辅导学生,故选择一本优秀的参考资料既可以辅助教学,又可以减轻教学负担,同时还可以开拓学生的视野。

本套丛书在内容编排上一般包括4部分:基本内容、重点与难点、精选题和精选题解答。基本内容,阐述基本概念、基本原理和经典公式;重点与难点,力求突出重要知识点;精选题和精选题解答,集萃习题以培养学生演算习题、解决问题的能力。

本套丛书的许多资料从未在正式出版物中出版,很多习题是长期活跃在教学第一线,从事教学工作的优秀教师不断累积、不断创新的结晶,第一次从讲义转化为正式出版物。丛书的内容体系主要延承浙江大学、天津大学等校化工原理、化工热力学和化学反应工程主讲教材的体系。在图书内容的选择上,保留经典,精选具有代表性的习题,不片面追求习题的数量,而力求所选习题皆为上品。在丛书的编写过程中,很多中青年教师也充分发挥了思维灵活的特点,借鉴了一些国内外的经典教学参考资料,力求生动而有新意。

参与本套丛书编写的一些教师曾主编或参编了“面向21世纪课程教材”,他们对教学改革的方向有较为深刻的理解,积累了丰富的教学 and 实践经验,为编写《科学版习题精解系列》(化工类)付出了辛勤的劳动。在此,谨对参与本套丛书编写工

作的各位教师表示诚挚的感谢!

最后,希望本套丛书的出版,能够对化工及相关专业的学生专业课程的学习、对日趋激烈的研究生考试有所帮助,也有助于从事化工行业的技术人员不断提高自身水平,同时,对培养我国优秀的化工类人才做出贡献。

科学出版社高等教育分社

前 言

化工原理是化学工程与工艺及其相近专业的一门主干课,主要内容为化工单元操作的基本原理、典型设备的构造及工艺计算和设备选型。这门课工程性强,内容多,教与学很有讲究,其中做习题是学生掌握本门课程的基本理论、基本思想及基本方法的重要环节。为此,编者根据化工原理课程的教学要求,结合多年教学实践的经验,编写了《化工原理习题精解》。

本书主要按科学出版社 2001 年版的《化工原理》教材(何潮洪、冯霄主编)进行配套编写。全书分为上、下两册。上册覆盖流体流动与传热部分,包括流体力学基础(第 1 章)、流体输送机械(第 2 章)、机械分离与固体流态化(第 3 章)、热量传递基础(第 4 章)、传热过程与换热器(第 5 章)、蒸发(第 6 章)、流体流动与传热实验(第 7 章);下册覆盖传质部分,包括质量传递基础(第 8 章)、气体吸收(第 9 章)、蒸馏(第 10 章)、液液萃取(第 11 章)、干燥(第 12 章)、膜分离(第 13 章)、传质实验(第 14 章)、化工原理研究生入学考试典型试题。

本书由浙江大学有关教师编写,执笔分工如下:第 1~3 章(窦梅),第 4~6 章(朱明乔),第 7 章(叶向群),第 8 章(詹晓力),第 9 章(安越),第 10、11 章(南碎飞),第 12 章(安越)、第 13 章(陈欢林、程丽华)、第 14 章(叶向群)、研究生入学考试试题及解答(何潮洪、南碎飞)。全书由何潮洪统稿。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 8 章 质量传递基础	1
基本内容	1
重点与难点	3
精选题及解答	3
本章主要符号说明	12
参考文献	13
习题	13
第 9 章 气体吸收	15
基本内容	15
重点与难点	19
精选题及解答	19
本章主要符号说明	44
参考文献	45
习题	46
第 10 章 蒸馏	51
基本内容	51
重点与难点	59
精选题及解答	60
本章主要符号说明	100
参考文献	101
习题	101
第 11 章 液液萃取	107
基本内容	107
重点与难点	110
精选题及解答	111
本章主要符号说明	132
参考文献	132
习题	133
第 12 章 干燥	137
基本内容	137

重点与难点	140
精选题及解答	140
本章主要符号说明	156
参考文献	157
习题	157
第 13 章 膜分离	161
基本内容	161
重点与难点	169
精选题及解答	169
本章主要符号说明	192
参考文献	193
习题	194
第 14 章 传质实验	198
基本内容	198
精选题及解答	198
本章主要符号说明	210
参考文献	211
习题参考答案	212
浙江大学研究生入学考试试题及解答(化工原理)	217
1999 年试题及解答	217
2000 年试题及解答	225
2001 年试题及解答	235
2002 年试题及解答	242
2003 年试题及解答	251

第 8 章 质量传递基础^[1~4]

基本内容

质量传递的方式有分子传质(分子扩散)和对流传质(对流扩散)两种。分子传质是在单一相内存在组分的化学位梯度(往往源于浓度差)时,由分子运动而引起的质量传递;对流传质是伴随流体质点或微团的宏观运动而产生的传质。分子传质与对流传质的差别与热量传递中导热和对流传热的差别类似。这两种传递方式可同时存在。本章主要针对一维稳定分子传质。

8.1 分子传质

1. 扩散通量 $J_{A,z}$ (费克定律)

如果扩散沿 z 方向进行,则

$$J_{A,z} = -CD_{AB} \frac{dx_A}{dz} \quad (8-1a)$$

当 C 是常数时,式(8-1a)为

$$J_{A,z} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (8-1b)$$

式(8-1a)、(8-1b)中的扩散系数决定于物系、温度 T 和压力 P 。对给定物系,压力不很高时通常有

$$D_{AB} \propto \frac{T^{1.75}}{P} \quad (\text{气体}) \quad (8-2a)$$

$$D_{AB} \propto \frac{T}{\mu} \quad (\text{液体}) \quad (8-2b)$$

2. 传质通量 N_A (总通量)

$$N_A = J_A + \frac{c_A}{C}(N_A + N_B) = J_A + x_A(N_A + N_B) \quad (8-3)$$

$$\text{或} \quad N_A = -CD_{AB} \frac{dx_A}{dz} + x_A(N_A + N_B) \quad (8-4)$$

$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$
A 的总通量	A 的扩散通量	A 的主体流动通量
(相对于静止坐标)	(相对于平均速度)	(相对于静止坐标)

对气体混合物,组分的摩尔分率习惯上用 y 表示,则式(8-4)变为

$$N_A = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A(N_A + N_B) \quad (8-5)$$

根据式(8-4)或(8-5),可得各种一维稳定分子扩散情况下的传质通量。比较典型的如下。

(1) 无化学反应时通过恒定截面积的等摩尔反向扩散

$$N_A = \frac{D_{AB}}{z_2 - z_1} (c_{A1} - c_{A2}) \quad (8-6)$$

对于理想气体, $c_A = p_A/RT$, 有

$$N_A = \frac{D_{AB}}{RT(z_2 - z_1)} (p_{A1} - p_{A2}) \quad (8-7)$$

(2) 无化学反应时通过恒定截面积的单向扩散

所谓单向扩散是指组分 A 通过停滞(或不扩散)组分 B 的扩散。此时

$$N_A = \frac{D_{AB}}{z_2 - z_1} \cdot \frac{C}{c_{Bm}} (c_{A1} - c_{A2}) \quad (8-8)$$

对理想气体,有

$$N_A = \frac{D_{AB}}{RT(z_2 - z_1)} \cdot \frac{P}{p_{Bm}} (p_{A1} - p_{A2}) \quad (8-9)$$

或

$$N_A = \frac{CD_{AB}}{z_2 - z_1} \frac{y_{A1} - y_{A2}}{y_{Bm}} \quad (8-10)$$

其中, c_{Bm} 、 p_{Bm} 、 y_{Bm} 分别为截面 1、2 上 c_B 、 p_B 、 y_B 的对数平均值。以 y_B 为例,有

$$y_{Bm} = \frac{y_{B2} - y_{B1}}{\ln(y_{B2}/y_{B1})} = \frac{y_{A1} - y_{A2}}{\ln(y_{B2}/y_{B1})}$$

8.2 对流传质

1. 涡流扩散通量 J_{AE} 和总扩散通量 J_{AT}

$$J_{AE} = -D_E \frac{dc_A}{dz} \quad (8-11)$$

式中, D_E ——涡流扩散系数, m^2/s 。为方便计,略去了下标 AB(下同)。

$$J_{AT} = -(D + D_E) \frac{dc_A}{dz} \quad (8-12)$$

两种扩散的相对重要性在不同区域将不一样:在湍流主体区, $D_E \gg D$, 分子扩散几乎可以忽略;在贴壁的层流底层中, D_E 为零;在过渡区,则 D 与 D_E 的数量级相当,都不能忽略。

2. 膜模型

$$N_A = k_G(p_{A1} - p_{A2}) \quad (\text{气相}) \quad (8-13)$$

$$N_A = k_L(c_{A1} - c_{A2}) \quad (\text{液相}) \quad (8-14)$$

式中, k_G ——气相对流传质系数(以分压差为推动力), $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$;

k_L ——液相对流传质系数(以浓度差为推动力), $\text{kmol}/[\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{kmol}/\text{m}^3)]$ 或 m/s 。

若为单向扩散, 则

$$k_G = \frac{D_G}{RT\delta_G} \cdot \frac{P}{p_{\text{bm}}} \quad (8-15)$$

$$k_L = \frac{D_L}{\delta_L} \cdot \frac{C}{c_{\text{bm}}} \quad (8-16)$$

式中, δ_G 、 δ_L ——气膜、液膜的当量厚度。

3. 对流传质系数的关联式

$$\text{强制对流传质:} \quad Sh = f(Re, Sc) \quad (8-17)$$

$$\text{自然对流传质:} \quad Sh = f(Gr_{AB}, Sc) \quad (8-18)$$

显然准数的具体方程式需通过实验确定。例如, 对于气体流过单个球的传质, 在 $Sc=0.6 \sim 2.7$, $Re=1 \sim 4800$ 的范围内, 有

$$Sh = 2 + 0.552Re^{0.53}Sc^{1/3} \quad (8-19)$$

重点与难点

本章的重点为

- (1) 理解各种因素对扩散系数的影响;
- (2) 一维稳定条件下扩散通量与传质通量的计算;
- (3) 膜模型的理解。

本章难点是各种条件下传质通量的计算, 即式(8-3)或(8-4)的灵活应用。

精选题及解答

【例 8-1】 氨气(A)与氮气(B)在一等径管两端相互扩散, 管子通过恒定截面积的等摩尔反向扩散
各处的温度均为 298K、总压均为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。在端点 1 处, 氨气的摩尔分率 $y_{A1} = 0.15$; 在端点 2 处, $y_{A2} = 0.06$, 点 1、2 间的距离为 1m。已知此时扩散系数 $D_{AB} = 2.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。试求 A 组分的传质通量, 并求出 A 组分的浓度分布。

若总压增大一倍, 但端点 1、2 处氨气的摩尔分率不变, 则 A 组分的传质通量将如何变化?

【解】 由于管中各处温度、压力均匀,因此若有 1mol A 从点 1 扩散到 2,则必有 1mol B 从点 2 扩散到 1,否则就不能维持总压恒定。即该题属于等摩尔反向扩散。

根据式(8-7),得

$$N_A = \frac{D_{AB}(p_{A1} - p_{A2})}{RT(z_2 - z_1)} = \frac{D_{AB}P(y_{A1} - y_{A2})}{RT(z_2 - z_1)} \quad (1)$$

$$N_A = \frac{2.3 \times 10^{-5} \times 1.013 \times 10^5 (0.15 - 0.06)}{8314 \times 298 \times (1 - 0)}$$

$$= 8.46 \times 10^{-8} \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

现在来求 A 组分的浓度分布。根据式(8-5),得

$$N_A = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A(N_A + N_B)$$

由于 $N_A = -N_B$,故

$$N_A = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} \quad (2)$$

对于等截面稳定扩散过程, N_A 为常数,对式(2)微分,得

$$\frac{d^2 y_A}{dz^2} = 0$$

浓度分布呈线性

从而

$$y_A = C_1 z + C_2$$

其中, C_1 、 C_2 为积分常数。

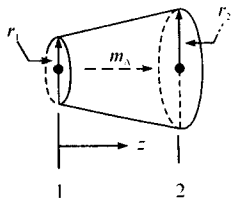
根据边界条件, $z=0$, $y_A=0.15$; $z=1$, $y_A=0.06$, 得 A 组分浓度分布为

$$y_A = -0.09z + 0.15$$

注意:总压增大将使扩散系数下降。

若总压增大一倍,则气体扩散系数要变小。根据 $D_{AB} \propto (T^{1.75}/P)$, 由于温度 T 不变,从而总压增大一倍后, $D_{AB}P$ 仍基本不变,又 y_{A1} 、 y_{A2} 不变,根据式(1),可知 A 组分的传质通量将基本不变。

通过变截面积的等摩尔反向扩散



注意: N_A 要变化

图 8-1 通过非等径管
(圆锥台形状)的等摩尔扩散

【例 8-2】 题 8-1 中,若扩散在一非等径管进行,其他条件相同,则端点 1 处的传质通量为多少? 已知该非等径管的形状为圆锥台,如图 8-1 所示,其中 $r_1=0.03\text{m}$, $r_2=0.06\text{m}$ 。

【解】 本题与例 8-1 不同的是,由于扩散的截面积不一样,因此传质通量 N_A 不是一个常数,而与位置有关,但

质量流量 m_A 仍不变, 其中 $m_A = N_A \cdot A = \pi r^2 N_A$ 。

根据式(8-5)及 $N_A = -N_B$ 得

$$N_A = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A(N_A + N_B) = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz}$$

即
$$\frac{m_A}{\pi r^2} dz = -CD_{AB} dy_A \quad (1)$$

根据几何关系, r 与位置 z 之间的关系为

$$r = \left(\frac{r_2 - r_1}{z_2 - z_1} \right) (z - z_1) + r_1 \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 并结合边界条件有

$$\frac{m_A}{\pi} \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{\left[\left(\frac{r_2 - r_1}{z_2 - z_1} \right) (z - z_1) + r_1 \right]^2} = -CD_{AB} \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} dy_A$$

积分得

$$m_A = \pi r_1 r_2 \cdot \frac{CD_{AB}(y_{A1} - y_{A2})}{z_2 - z_1} \quad (3) \quad \text{质量流量 } m_A \text{ 不变}$$

从而

$$\begin{aligned} N_A = \frac{m_A}{\pi r^2} &= \frac{r_1 r_2}{r^2} \cdot \frac{CD_{AB}(y_{A1} - y_{A2})}{z_2 - z_1} & N_A \text{ 与位置有关} \\ &= \frac{r_1 r_2}{r^2} \cdot \frac{D_{AB}P(y_{A1} - y_{A2})}{RT(z_2 - z_1)} & (4) \end{aligned}$$

端点 1 处($r=r_1$)的传质通量 N_{A1} 为

$$\begin{aligned} N_{A1} &= \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{D_{AB}P(y_{A1} - y_{A2})}{RT(z_2 - z_1)} \\ &= \frac{0.06}{0.03} \times \frac{2.3 \times 10^{-5} \times 1.013 \times 10^5 (0.15 - 0.06)}{8314 \times 298 \times (1 - 0)} \\ &= 1.69 \times 10^{-7} \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

【讨论】 本题结果也可用于等截面的情形, 此时 $r=r_1=r_2$, 式(4)还原为式(8-7)。

【例 8-3】 在温度 25°C 、总压 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 下, 用水吸收空气中的氨(A)。气相主体含氨 10% (摩尔分率, 下同)。由于水中氨的浓度很低, 其平衡分压可取为零。若氨在气相中的扩散阻力相当于 2mm 厚的停滞气层, 求吸收的传质通量 N_A 。若吸收在 35°C 下进行, 其余不变, 则结果如何? 已知 25°C 时扩散系数 $D=2.28 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

【解】 本题属等截面单向扩散, 可直接应用式(8-9)。 25°C 时,

通过恒定截面积的
单向扩散

$$z_2 - z_1 = 0.002 \text{ m}, D = 2.28 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, T = 298 \text{ K}, P = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_{A1} = 0.10 \times 1.013 \times 10^5 = 0.1013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_{B1} = (1 - 0.10) \times 1.013 \times 10^5 = 0.9117 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_{A2} = 0 \quad p_{B2} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_{Bm} = \frac{p_{B2} - p_{B1}}{\ln(p_{B2}/p_{B1})} = \frac{1.013 \times 10^5 - 0.9117 \times 10^5}{\ln(1.013/0.9117)} \\ = 0.9615 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{漂流因子} \frac{P}{p_{Bm}} = \frac{1.013 \times 10^5}{0.9615 \times 10^5} = 1.054$$

漂流因子的影响

$$N_A = \frac{D}{RT(z_2 - z_1)} \cdot \frac{P}{p_{Bm}} (p_{A1} - p_{A2}) \quad (1)$$

$$N_A = \frac{2.28 \times 10^{-5}}{8314 \times 298 \times 0.002} \times 1.054 \times (0.1013 \times 10^5 - 0) \\ = 4.91 \times 10^{-5} \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

扩散系数随温度变化

若吸收在 35°C 下进行, 由于 $D_{AB} \propto (T^{1.75}/P)$, 从而根据式 (1) 得 $N_A \propto T^{0.75}$, 所以

$$N'_A = N_A \cdot (T'/T)^{0.75} = 4.91 \times 10^{-5} \times (308/298)^{0.75} \\ = 5.03 \times 10^{-5} \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

【讨论】 本题中由于气相氨浓度较高, 故漂流因子较大, 总体流动的影响要予以考虑。通常当浓度较低时, 漂流因子接近于 1, 总体流动的影响就可忽略。请读者自行考察氨浓度分别为 5%、1% 时的情形。

通过变截面的稳定
单向扩散

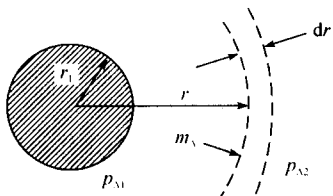


图 8-2 从球体向周围介质的扩散

【例 8-4】 一直径 20mm 的球形萘粒置于压力 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、温度 318K 的大范围的静止空气中。已知 318K 下萘的蒸气压力为 74Pa, 萘在空气中的扩散系数为 $6.92 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。试求萘球表面上萘的气化速率。

N_A 要变, m_A 不变。

【解】 稳定扩散时其径向质量流量 m_A 不变, 但由于扩散截面积 $4\pi r^2$ 随 r (距球心的距离) 而变, 所以 N_A 不是常数, $N_A = \frac{m_A}{4\pi r^2}$ 。

由于B是停滞组分,所以 $N_B=0$,根据式(8-5)得

注意: $J_B \neq 0$

$$N_A = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dr} + y_A N_A$$

或

$$N_A = -\frac{CD_{AB}}{1-y_A} \frac{dy_A}{dr}$$

即

$$N_A = \frac{m_A}{4\pi r^2} = -\frac{CD_{AB}}{1-y_A} \frac{dy_A}{dr}$$

分离变量

$$\frac{m_A}{4\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r^2} dr = -CD_{AB} \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dy_A}{1-y_A}$$

积分得

$$\frac{m_A}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = CD_{AB} \ln \frac{1-y_{A2}}{1-y_{A1}} = CD_{AB} \ln \frac{y_{B2}}{y_{B1}}$$

因为 $r_2 \gg r_1$, $1/r_2 \approx 0$ 。再引入对数平均值 y_{Bm} 及 $m_A = 4\pi r_1^2 N_A$, 有

$$N_A = \frac{CD_{AB}}{r^2/r_1} \cdot \frac{y_{A1} - y_{A2}}{y_{Bm}}$$

从而,球表面 $r=r_1$ 处的扩散通量 N_{A1} 为

$$N_{A1} = \frac{CD_{AB}}{r_1} \cdot \frac{y_{A1} - y_{A2}}{y_{Bm}} = \frac{D_{AB}P}{RT r_1} \cdot \frac{p_{A1} - p_{A2}}{p_{Bm}} \quad (1)$$

据题, $D_{AB} = 6.92 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $r_1 = 0.02/2 = 0.01 \text{ m}$, $p_{A1} = 74 \text{ Pa}$, $p_{A2} = 0$, $p_{B1} = 1.013 \times 10^5 - 74 = 1.012 \times 10^5 \text{ Pa}$, $p_{B2} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, 由于 p_{B1} 近似等于 p_{B2} , 故

$$p_{Bm} = \frac{p_{B1} + p_{B2}}{2} = \frac{(1.012 + 1.013) \times 10^5}{2} = 1.0125 \times 10^5 \text{ Pa}$$

代入式(1),得

$$\begin{aligned} N_{A1} &= \frac{D_{AB}P}{RT r_1} \cdot \frac{p_{A1} - p_{A2}}{p_{Bm}} \\ &= \frac{6.92 \times 10^{-6} \times 1.013 \times 10^5}{8314 \times 318 \times 0.01} \times \frac{74 - 0}{1.0125 \times 10^5} \\ &= 1.94 \times 10^{-8} \text{ kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

【讨论】若把 N_A 写成传质系数的形式,即

$$N_A = k(c_{A1} - c_{A2}) = \frac{k}{RT}(p_{A1} - p_{A2}) \quad (2)$$

将式(2)与式(1)比较,得

对本题, $Sh = 2$ 。

$$k = \frac{D_{AB}P}{r_1 p_{lm}} = \frac{2D_{AB}P}{d_1 p_{lm}}$$

当气相中溶质浓度不大时, 漂流因子 $P/p_{lm} \approx 1$, 从而 $k \approx 2D_{AB}/d_1$, 即 $Sh \approx 2$, 与式(8-19)的结果($Re=0$)一致。

拟稳定扩散过程

【例 8-5】 接题 8-4, 试推导半径为 $r_0 = 20\text{mm}$ 的萘球全部升华完所需的时间。已知萘的摩尔质量 $M_A = 128.2\text{kg/kmol}$, 其密度 $\rho_A = 1145\text{kg/m}^3$ 。

【解】 随着萘的升华, 萘球的半径逐渐缩小, 传质速率也发生变化, 因此这是一个不稳定的扩散过程。但由于萘的传质速率很小, 故在不长的时间内, 萘球的半径可认为不变, 其扩散近似为一个稳定过程, 通常把此种过程称为拟稳定扩散过程。此时例 8-4 的结果可加以直接利用。

根据例 8-4 式(1), 半径 r 的萘(A)球其表面升华的传质通

传质通量随 r 的减小而增大, 但萘升华的质量流量随 r 的减小而下降。

$$N_{Ar} = \frac{D_{AB}P}{RT} \cdot \frac{p_{A1} - p_{A2}}{p_{lm}} \quad \text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

从而半径 r 的萘球其表面升华的传质速率为

$$m_{Ar} = 4\pi r^2 N_{Ar} = \frac{4\pi r D_{AB}P}{RT} \cdot \frac{p_{A1} - p_{A2}}{p_{lm}} \quad \text{kmol/s}$$

设在 dt 时间内萘球的半径减小了 dr , 则根据物料衡算得

$$m_{Ar} M_A dt = -4\pi r^2 \rho_A dr$$

代入 m_{Ar} 的表达式, 化简得

$$\frac{D_{AB}P}{RT} \cdot \frac{p_{A1} - p_{A2}}{p_{lm}} \cdot M_A dt = -\rho_A r dr$$

将上式在 $t=0$, $r=r_0$ (萘球初始半径) 和 $t=t_F$, $r=0$ 之间积分, 有

$$\frac{D_{AB}P}{RT} \cdot \frac{p_{A1} - p_{A2}}{p_{lm}} \cdot M_A \int_0^{t_F} dt = -\rho_A \int_{r_0}^0 r dr$$

得萘球全部升华完所需的时间 t_F 为

$$t_F = \frac{\rho_A r_0^2 RT p_{lm}}{2M_A D_{AB} P (p_{A1} - p_{A2})}$$

代入相关数据, 得

$$\begin{aligned} t_F &= \frac{1145 \times 0.02^2 \times 8314 \times 318 \times 1.0125 \times 10^5}{2 \times 128.2 \times 6.92 \times 10^{-6} \times 1.013 \times 10^5 (74 - 0)} \\ &= 9.22 \times 10^6 \text{s} = 2560 \text{h} \end{aligned}$$

【例 8-6】 如图 8-3, 气体 A 由气相主体扩散到催化剂表面, 并在催化剂的作用下, 发生一级化学反应 $2A \longrightarrow 3B$, 生成的气体 B 再由催化剂表面向气相主体扩散。已知 $z = z_1$ 时, $y_A = y_{A1}$ 。试求稳定情形下 A 的传质通量。分以下两种情形考察: (1) 反应为瞬时反应; (2) 反应很慢, 在催化剂表面, 其非均相一级化学反应速率常数为 k' 。

伴有非均相化学反应的等截面稳定扩散过程

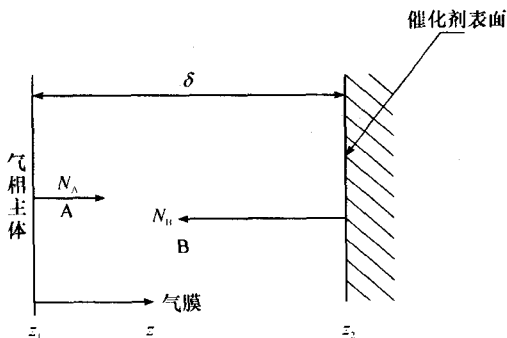


图 8-3 在催化剂表面上进行的非均相反应及扩散

【解】 由于反应只在催化剂表面进行, 即气相中并无反应, 因此根据质量守恒定律可知, 稳定情形下气相中 A、B 的传质通量均为常数。

A、B 的传质通量均为常数。

对于反应 $2A \longrightarrow 3B$, 1mol A 将在催化剂表面上生成 1.5mol B, 从而

$$N_B = -1.5N_A = \text{常数}$$

A、B 的传质方向相反

$$\text{又} \quad N_A = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A(N_A + N_B)$$

$$\text{得} \quad N_A = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} - 0.5y_A N_A \quad (1)$$

边界条件为

$$z = z_1 \quad y_A = y_{A1}$$

$$z = z_2 \quad y_A = y_{A2}$$

y_{A2} 待定

将式(1)分离变量, 积分

$$N_A \int_{z_1}^{z_2} dz = -CD_{AB} \int_{y_{A1}}^{y_{A2}} \frac{dy_A}{1 + 0.5y_A}$$

得

$$N_A = \frac{2CD_{AB}}{z_2 - z_1} \ln \frac{1 + 0.5y_{A1}}{1 + 0.5y_{A2}} = \frac{2CD_{AB}}{\delta} \ln \frac{1 + 0.5y_{A1}}{1 + 0.5y_{A2}} \quad (2)$$