

传质学基础

CHUANZHIXUEJICHU

李汝辉 编著

北京航空學院出版社

传质学基础

李汝辉 编著

北京航空学院出版社

内 容 简 介

本书共十章，系统阐述了分子扩散和对流传质理论。除了着重论述气相传质外，并介绍了液相传质、固相传质和相际传质的基本知识。为了便于基本内容的深入理解和应用，编入相当数量的例题和习题，并备有各种物性数据表。

本书可作为高等学校热能动力、工程热物理、能源工程、环境工程、航空航天、建筑、化工等专业的教师、本科生和研究生的教学参考书，也可供从事与传质技术有关的研究设计人员参考。

传 质 学 基 础

李汝辉 编著

责任编辑 陶金福

北京航空学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京航空学院印刷厂印装

850×1168 1/32

印张：12.5 字数：321千字

1987年9月第一版 1987年9月第一次印刷 印数：3500册

ISBN 7-81012-006-9

定价：2.40元

TB·001

主要符号表

a	无因次常数, $a = \sqrt{k'H^2/D_{AB}}$ 热扩散系数, $a = \lambda/(\rho c_p)$ 表面积/容积
C_D	阻力系数
C_p	定压摩尔比热
c	摩尔浓度
c_A	A组元摩尔浓度
$\bar{c}_A$	A组元平均摩尔浓度
c_p	定压比热
D	直径 扩散系数
D^0	稀薄溶液扩散系数
D_A	A组元在固体中的扩散系数
D_{AA}^*	自扩散系数
D_{AB}	二元扩散系数
D_{AB}^0	1atm和273K 条件下的气体二元扩散系数 稀薄溶质A在溶剂B中的扩散系数
D_{Am}	A组元在多元混合物中的有效扩散系数
D_{Am}^0	稀薄溶质A在多元混合溶液中的扩散系数
D_{Aw}^0	稀薄溶质A在水中的扩散系数
D_{Aeff}	有效扩散系数, $D_{Aeff} = \epsilon D_{AB}/k_i$
D_{ij}	二元扩散系数
D_{KA}	努森扩散系数
D_p	颗粒直径
D_t	旋涡扩散系数

d_A	A 组元的分子直径
E	活化能
e	相对于固定坐标的能通量
F	无因次速度, $F = u/u_0$
f	范宁摩擦因子, 无因次 无因次流函数
f_D	式(3-10)中的修正系数
G	质量流, $G = v\rho$
G_M	摩尔流, $G_M = v\rho/M$
Gr	格拉晓夫数, 无因次
g	重力加速度
g_c	常数, $g_c = 980 \text{ gm} \cdot \text{cm}/(\text{gf} \cdot \text{s}^2)$
H	距离
H_i	i 组元的摩尔焓
ΔH	流体压降
h	传热系数
J_A	A 组元相对于质量平均速度的摩尔通量
J_A^*	A 组元相对于摩尔平均速度的摩尔通量
J_D	传质 J 因子, 无因次
J_H	传热 J 因子, 无因次
j_A	A 组元相对于质量平均速度的质量通量
j_A^*	A 组元相对于摩尔平均速度的质量通量
Kn	努森数, 无因次
K'_x, K'_y	式(10-25)定义的总传质系数
k	波尔茨曼常数
k_1	均匀化学反应系统一级反应速度常数, $1/\text{s}$
k'_1	非均匀化学反应系统一级反应速度常数, cm/s
k_s	表面一级反应速度常数, cm/s
k_t	曲折度, 无因次

L	距离
	摩尔汽化潜热
Le	路易斯数, 无因次
M	分子量
M_A	A 组元的分子量
m	分子质量
N	阿伏加德罗常数
N_A	A 组元相对于固定坐标的净摩尔通量
N_{Ar}	通量比, $N_{Ar} = N_A / (N_A + N_B)$ A 组元在半径为 r 的球面上的净摩尔通量
$N_{i,r}$	通量比, $N_{i,r} = N_i / \sum_i N_i$
Nu	努赛尔数, 无因次
n	分子浓度, 即单位容积内的分子数 式(3-48)中的温度指数
n_A	A 组元相对于固定坐标的净质量通量
Pe	贝克列数, 无因次
P_M	渗透率, 1mm 厚的固体膜片两边压差为 1cmHg 条件下, 每秒通过 1cm ² 截面扩散的气体标准容积(cm ³)
P'_M	渗透率, 1cm厚的固体板两边压差为 1atm 条件下, 每秒通过1cm ² 截面扩散的气体标准容积 (cm ³)
Pr	普朗特数, 无因次
p	总压力
p_A	A 组元的分压力
p_{BM}	p_{B1} 和 p_{B2} 的对数平均值
p_c	临界压力
p_i	i 组元的分压力
p_{iM}	p_{i1} 和 p_{i2} 的对数平均值
p_r	对比压力, $p_r = p / p_c$

$\dot{Q}$	热通量, kJ/s
q	热通量, kJ/(s·m ²)
R	通用气体常数
R_A	A 组元的摩尔生成率
Re	雷诺数, 无因次
r	半径
r_A	A 组元的质量生成率 A 组元的分子半径
S	截面积 溶解度, 即一大气压力下1cm ³ 固体中溶质的标准 cm ³ 数
Sc	斯密特数, 无因次
Sh	舍伍德数, 无因次
St	斯坦顿数, 无因次
T	系统温度
T^*	$T^* = kT/\epsilon_{AB}$
T_b	常沸点
T_c	临界温度
T_r	对比温度, $T_r = T/T_c$
t	时间 温度, °C
U	内能
u	速度
V	容积 容积流量
V_b	常沸点下液体的摩尔容积
V_c	临界摩尔容积
V_p	催化剂颗粒容积
v	速度

质量平均速度

式 (3-43) 中的原子和结构扩散容积增量

v^* 摩尔平均速度

v_A A 组元相对于固定坐标的速度

$\sum v$ 分子扩散容积

x_A A 组元摩尔分数, 无因次

x_{BM} x_{B1} 和 x_{B2} 的对数平均值

y_A A 组元摩尔分数, 无因次

y_{BM} y_{B1} 和 y_{B2} 的对数平均值

希腊字母

α_{AB} 二元扩散系统中 A 组元扩散阻力系数

β 式 (3-36) 定义的常数
式 (5-18) 中的容器常数

流参数, $\beta = \frac{v_w}{u_0} \sqrt{\text{Re}_x}$

β_{AB} 溶质 A 在溶剂 B 中的扩散阻力系数

Γ 单位宽度液膜的质量流量

Δ 增量

δ 距离

边界层厚度

ϵ 空隙分数

式 (6-42) 定义的有效性因子

ϵ_A A 分子的势常数

ϵ_{AB} A 、 B 分子作用能

η 无因次坐标, $\eta = y\sqrt{u_0/(\nu x)}$

θ 时间

无因次温度, $\theta = (t_w - t)/(t_w - t_0)$

Λ 通用准则

λ	分子平均自由程
	导热系数
μ	粘度
	化学势
μ_p	偶极矩
ν	动量扩散系数, $\nu = \mu / \rho$
Π	通用无因次参数
π	无因次量
ρ	质量密度
ρ_c	临界质量密度
ρ_r	对比密度, $\rho_r = \rho / \rho_c$
σ_A	A组元分子碰撞直径
σ_{AB}	A-B 分子对的碰撞直径
τ	时间
	剪切力
φ_A	A组元无因次浓度, $\varphi_A = (\rho_{Aw} - \rho) / (\rho_{Aw} - \rho_{A0})$
φ_{AB}	势能函数
φ_i	i 组元分子通量与净通量之比, $\varphi_i = J_i^* / N_A$
φ_N	对流修正因子
ψ	流函数
Ω_D	基于林纳德-琼斯势的碰撞积分
ω_A	A组元质量分数

下标

A	A组元
air	空气
av	平均
B	B组元
C	C组元

D	D 组元 传质
eff	有效值
exp	实验值
G	气体
H	传热
I	呆滞组元
i	i 组元 界面
j	j 组元
L, l	液体
LM, lm	对数平均值
m	混合物
max	最大
min	最小
n	数 n 组元
r	对比
t	旋涡
w	水 壁面
x, y, z	x, y, z 方向
0	起始 表面 主流
1, 2	扩散途径上的 1, 2 位置
∞	无穷

目 录

主要符号表

绪 论

第一章 流体中的分子扩散

- 一、费克 (Fick) 定律 (11)
- 二、伴随主体运动时的分子扩散 (13)
- 三、二元扩散系的通量和各种通量间的关系 (16)
- 四、其他型式的扩散 热扩散 (18)

第二章 二元稳态扩散

- 一、分子扩散通量积分式 (22)
- 二、净通量一般积分式 (23)
- 三、 A 组元通过呆滞组元 B 扩散 (24)
- 四、等摩尔逆向扩散 (30)
- 五、伴随化学反应的稳态扩散 (36)

第三章 气体扩散系数

- 一、扩散系数的理论公式 (47)
- 二、扩散系数的测定 (57)
- 三、扩散系数的经验公式 (63)
- 四、温度和压力对扩散系数的影响 (68)

第四章 多元扩散

- 一、斯蒂芬-马克斯韦耳方程 (77)

二、斯图尔特 (Stewart) 方程	(81)
三、某组元通过多种呆滞组元的扩散	(84)
四、多组元同时通过某种呆滞组元的扩散	(87)
五、多元等摩尔扩散	(91)
六、在催化表面上进行化学反应时的多元气体扩散 ..	(94)
七、多元扩散通量的近似计算公式	(98)

第五章 液体中的质量传递

一、液体扩散方程	(104)
二、液体扩散系数的测定	(108)
三、二元溶液扩散系数的计算公式	(110)
四、多元溶液的扩散	(123)
五、伴随化学反应的液体扩散	(125)

第六章 固体中的质量传递

一、固体的稳态传质方程	(133)
二、与结构有关的多孔材料中的扩散	(139)
三、固体中的扩散和化学反应	(156)
四、二维稳态扩散	(158)
五、固体扩散系数的确定	(161)

第七章 守恒方程

一、组元质量守恒方程的一般形式	(170)
二、组元质量守恒方程的特定形式	(173)
三、组元质量守恒方程在不同坐标系的表述	(175)
四、求解组元质量守恒方程常用的边界条件	(176)
五、组元质量守恒方程应用举例	(179)
六、多元扩散系统的能量守恒方程	(185)

第八章 对流传质

一、用传质系数表示的通量方程·····	(195)
二、各种传质系数的定义·····	(196)
三、对流传质分析中常用的无因次量·····	(203)
四、层流传质系数·····	(207)
五、湍流传质系数·····	(215)
六、对流传热传质问题·····	(251)

第九章 层流边界层的解

一、二维层流边界层微分方程组·····	(269)
二、层流边界层微分方程组的解·····	(272)
三、多元混合物层流边界层微分方程组·····	(295)
四、伴随化学反应时层流边界层的解·····	(296)
五、湍流边界层简介·····	(305)

第十章 相际传质

一、概述·····	(311)
二、相际平衡·····	(312)
三、两相间的传质·····	(322)

附 录

I 部分物质的物性数据表·····	(343)
I 扩散系数数据表·····	(370)
II 由粘度数据确定的伦纳德-琼斯势参数 σ 和 ϵ/k ·····	(380)
IV 据伦纳德-琼斯势函数确定的碰撞积分 Ω_D 值·····	(383)
V 误差函数 $\text{erf } \phi$ ·····	(384)

绪 论

在由两种以上的组元构成的混合物系中，如果其中处处浓度不同，则必发生旨在减少浓度不均匀性的过程，各组元将由浓度大的地方向浓度小的地方迁移，此即质量传递现象，简称传质。

传质现象时时处处可见。例如食糖在水中溶化，水的蒸发，燃烧，烟在大气中弥散，空调，宇宙飞行器再入大气时的烧蚀热防护，金属热处理，污水处理，……，举不胜举。传质现象不但涉及人类生活的方方面面，而且涉及能源、动力、机械加工、化工、航空航天、农业、生物、冶金、环境保护等等各项工程的发展。

伯德 (Bird)^① 曾把传质现象总结为八种型式，即

- 1 浓度梯度引起的分子（普通）扩散
- 2 温度梯度引起的热扩散
- 3 压力梯度引起的压力扩散
- 4 除重力以外的其他外力引起的强迫扩散
- 5 强迫对流传质
- 6 自然对流传质
- 7 湍流传质
- 8 相际传质

从传质机理上，上述八种传质现象可以归纳为两类：前四种为分子传质，后四种为对流传质。本书前六章将集中介绍分子传质，后四章主要介绍对流传质。

分子传质的最基本的机理是分子扩散现象。在静止流体或层流流体中，由于存在浓度梯度，流体中各组元分子自发地由浓度

^① R·B·Bird, Theory of Diffusion, Advan. Chem. Eng., 1:170 1956.

大的地方向浓度小的地方迁移，从而形成分子扩散。浓度梯度是分子扩散的驱动力。

在有机械搅拌的流体或湍流流体中，由于流体内部大量旋涡的出现，卷携各组元分子迅猛地流向流体各处弥散，大大增强了传质。我们称旋涡引起的质量迁移为旋涡扩散。

旋涡扩散比分子扩散强烈得多，可以举例说明。往直径为1.5米的圆筒内注入0.75米深的食盐溶液，若以某种方式在盐水上注入0.75米深的纯水而不使下面的盐水受到扰动。由于上、下层食盐浓度梯度，从而发生分子扩散。在一定状态下，根据估算：当顶部液面食盐浓度为平衡浓度的87.5%时，需要等十年；当顶部液面浓度为平衡浓度的99.9%时，要等28年之久！然而，如果将一搅拌器置于容器中，只要搅拌数十秒钟就可使容器中液体的浓度均匀一致。

在实际工程中，分子扩散和旋涡扩散往往同时发生。例如当湍流流体流过壁面，并与壁面之间发生传质时，由于紧挨壁面的一薄层流体为层流，在此层中的传质由分子扩散控制，而远离壁面的湍流区中的传质，由旋涡扩散控制。

在任何单相(包括气相、液相和固相)中都可以发生传质；在不同相之间(诸如气-液、液-液、气-固、液-固、固-固)也可发生传质。

在介绍基本内容之前，首先复习和介绍几个最基本的定义和公式。

1. 浓度

单位容积中物质的质量称为浓度。由于常用的质量单位有“kg”和“kmol”，故有两种浓度定义：一为质量浓度 ρ ，其单位为 kg/m^3 或 g/cm^3 ；一为摩尔浓度 c ，其单位为 kmol/m^3 或 gmol/cm^3 。若混合物由 n 种组元构成，则混合物的质量浓度为

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i \quad (0-1)$$

式中 ρ_i 表示*i*组元的质量浓度。混合物的摩尔浓度为

$$c = \sum_{i=1}^n c_i \quad (0-2)$$

式中 c_i 表示*i*组元的摩尔浓度。质量浓度和摩尔浓度的关系为

$$c = \rho / M \quad (0-3)$$

及
$$c_i = \rho_i / M_i \quad (0-4)$$

上二式中

M ——混合物的平均分子量；

M_i ——*i*组元的分子量。

对于完全气体，

$$c = \frac{p}{RT} \quad (0-5)$$

及
$$c_i = \frac{p_i}{RT} \quad (0-6)$$

上二式中

p ——混合气体的总压力；

p_i ——*i*组元的分压力；

T ——系统的绝对温度；K

R ——通用气体常数， $R = 8314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$

2. 成分表示法

(1) 质量分数 ω_i *i*组元的质量浓度与混合物的总质量浓度之比，称为该组元的质量分数 ω_i 。即

$$\omega_i = \rho_i / \rho \quad (0-7)$$

混合物中所有组元的质量分数之和等于1，即

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (0-8)$$

(2) 摩尔分数 y_i *i*组元的摩尔浓度与混合物的总摩尔浓度之比，称为该组元的摩尔分数。习惯上，气体的摩尔分数用 y_i 表

示；液体的摩尔分数用 x_i 表示。故

$$y_i \text{ (或 } x_i) = c_i / c \quad (0-9)$$

对于完全气体

$$y_i = \frac{c_i}{c} = \frac{p_i / (RT)}{p / (RT)} = \frac{p_i}{p} \quad (0-10)$$

混合物中所有组元摩尔分数之和等于 1，即

$$\sum_{i=1}^n y_i \text{ (或 } \sum_{i=1}^n x_i) = 1 \quad (0-11)$$

ω_i 和 y_i (或 x_i) 都反映 i 组元的浓度大小。

3. 速度

在多组元传质体系中，各组元通常是以不同的速度运动。因此，流体混合物的速度要由各组元速度的平均方法来确定，从而得混合物的平均速度。有两种常用平均速度；

(1) 质量平均速度 其定义式为

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i v_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i v_i}{\rho} \quad (0-12)$$

式中 v_i —— i 组元相对于固定坐标的绝对速度；

v —— 流体混合物相对于固定坐标的质量平均速度。可以用皮托管测定。

(2) 摩尔平均速度 其定义式为

$$v^* = \frac{\sum_{i=1}^n c_i v_i}{\sum_{i=1}^n c_i} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i v_i}{c} \quad (0-13)$$

式中 v^* —— 流体混合物相对于固定坐标的摩尔平均速度。

各组元相对于质量平均速度或摩尔平均速度的速度叫做该组元的扩散速度。扩散速度是由于体系内存在浓度梯度引起分子扩散而形成的。 $v_i - v$ 表示 i 组元相对于质量平均速度的扩散速度； $v_i - v^*$ 表示 i 组元相对于摩尔平均速度的扩散速度。对于均匀流体混合物，由于体系中没有浓度梯度，故没有分子扩散，所以扩散速