

Mass Transfer in Multicomponent Mixtures

多组分混合物中的 质量传递



【荷】 J. A. 卫斯里荷 (J. A. Wesselingh)
R. 克里斯纳 (R. Krishna) 著
刘 辉 译



这两杯液体有何不同？

显然，一杯是水，而另一杯是酒（水和乙醇）。它们外观不同，味道也不同。此外，液体还会挥发，这又引出另一点不同：在第一杯中，水在空气中挥发；而在第二杯中，水和乙醇在空气中同时传递。三组分质量传递比二组分质量传递具有更多的自由度……

放眼静观自然，运动无处不在。植物和泥土的芬芳与空气中的组分相混；云中的水滴和冰晶夹带着灰尘落下；露水在绿草上凝结；植物和动物也通过肌体中的管道和膜输送着养分……

传质无处不在，组分多元并存！



化学工业出版社

**Mass Transfer
in Multicomponent Mixtures**
**多组分混合物中的
质量传递**

【荷】 J. A. 卫斯里荷 (J. A. Wesselingh) 著
R. 克里斯纳 (R. Krishna)

刘 辉 译



化学工业出版社

·北 京·

图书在版编目(CIP)数据

多组分混合物中的质量传递/[荷]卫斯里荷(Wesselingh, J. A.), 克里斯纳(Krishna, R.)著;刘辉译. —北京:化学工业出版社, 2006. 9
书名原文: Mass Transfer in Multicomponent Mixtures
ISBN 978-7-5025-8760-4

I. 多… II. ①卫…②克…③刘… III. 多组分体系-传质 IV. TQ021.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 114355 号

Authorized translation from the English language edition, entitled Mass Transfer in Multicomponent Mixtures, ISBN 90-407-2071-1, by J.A. Wesselingh, R. Krishna, published by Delft University Press, Copyright©2000 by VSSD. All rights reserved.

本书中文简体字版由 VSSD 授权化学工业出版社独家出版发行。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2006-3434

责任编辑: 徐雅妮
责任校对: 王素芹

文字编辑: 陈 雨
装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市延风装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张 18½ 字数 343 千字 2007 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

中文版序

写本序时我不禁忆及童年，思绪万千。我于 1937 年出生在广州。其时，我父亲作为一个荷兰土木工程师，正在黄埔港建设港口。当时，正值第二次世界大战爆发。我去世多年的母亲告诉我，我出生那天，由于热带风暴（台风 Willie）日本人没有轰炸这座城市。从我母亲的日记以及我父亲所写的工程报告的复写本中，我可以想象中国那时内战频仍、外敌入侵的混乱景况。奇怪的是，身处于那种危险和无常之中，人们会觉得如处荒谬和冒险之中。后来，我的少年时代大部分是在香港度过的，从 1950 年父母送我回欧洲接受教育以后，我就再也没有到过中国。

我从听闻中知道中国现在已发生很大变化。中国正在崛起并回复往昔的辉煌，如她在三四个世纪以前那样。中国的工业（包括化学工业）也正在迅速发展。这就需要大批训练有素的工程师，去建造大型的现代化学化工企业。对于中国，这正是科技上除旧图新的良机，这也正是 Krishna 和我乐于看到本书对中国读者有益的原因。

质量传递（传质）是工程中许多学科的一个分支，与化学组分在相间的传递有关，如水自人体的皮肤向空气的蒸发即属此例。传质理论在日常生活、生物以及更为重要的工业中有大量应用。它可用来解释并定量描述化学及生化工业中的分离过程以及反应器的性能，也可以定量描述制药、涂料以及材料领域中复杂结构产品的性能。

目前，质量传递理论在很大程度上仍以熟知的 Fick 定律为基础，实际上，所有的教学都是由此开始的。但不幸的是，对于现代产品和过程工程而言，尤其是在涉及多组分或存在多种驱动力的情形下，Fick 定律是有缺陷的，这一点在过去的十年中已变得愈加明显。

本书从对混合物中各组分的动量平衡考虑开始，给出比 Fick 定律更适合的方法。这种方法源于 19 世纪 Maxwell 和 Stefan 关于气体动理论的工作，也包括 20 世纪不可逆过程热力学的部分内容。这种方法的基础比 Fick 定律更加清晰，即使对初学者而言也易于理解。略显繁复的是，这种方法需要已经学过传质的读者再复习先前掌握的内容，并且，复习也是一个渐进的缓慢过程。希望多数中文读者能从那些基本方程开始，并从中发现本书讲述的方法不仅能够描述经典教科书中所举的所有情形，而且远不止于此。

我乐于看到学生超过老师。过去，欧洲和美洲曾直接或间接地从中国学到许多东西；后来的情形有些不同。Krishna 和我希望中国学生能够迎接挑战，改进我们的工作，这样我们也能再次从他们那里获益。

最后，感谢刘辉教授翻译本书，这也是我们做不到的！

Groningen, The Netherlands, May 2006
J.A. Wesselingh

原 著 序

事情始于 20 年前,我离开壳牌 Amsterdam 研究院设备工程部,在 Delft 大学从事乏味的工作——至少在那时我是这么认为的。先前在壳牌的研究部门,我们与催化裂解器、聚合反应器打交道,并从事油罐清洗及其它有趣的开发工作,我觉得做这些实在有些忙不过来。但在大学里,我的工作拿着较低的薪水教二年级学生分离过程,用我在壳牌时百分之一的经费维持本科生实验室的运转。那时我写了一本关于分离过程的小书,并将其送给在 Amsterdam 的朋友。

我们在壳牌 Amsterdam 研究院的设备之一是世界上最大的精馏实验塔(其后亦然),其直径为 2.5m,高约 20m。该塔太大以致我们只能在夏天做实验(再沸器就占据了锅炉房的全部空间)。塔的操作压力可在真空到 15 个标准大气压间变动。测试各种各样塔板和填料的性能真是一段美妙时光。那时,我们不仅研究二组分精馏,而且也研究多组分混合物的精馏。我们开始测取数据并加以解读。但说实在的,我们对看到的多数现象并不能完全理解。逐渐地我们意识到,我们所用的二组分传质理论是不适宜的,我们需要尝试其它理论。其时,在 Manchester(大学),一个年轻的研究生正拣拾起被人荒疏的概念做他的博士论文,他的名字叫 Krishna,就在他到壳牌的时候我离开了那里。

一天, Krishna 来我家探访。他已经读了我的书并且礼貌地告诉我,我处理质量传递的方法不是很好。我有些不快,因为我是教授而他不是;另外,我的想法也是来自于著名的教科书。即便如此,我还是努力倾听。三周以后,我去他那里寻求更多的解释。所谈的都与多组分质量传递有关,又与热力学相关,这些都是我闻所未闻的。我有些难于跟上他谈话的思路,我还记得他说:“Hans,如果你真想理解这些,我们应该一同开一门课。”这就是本书的起缘。

现在,20 年过去了,与本书相关已有 15 位博士毕业、23 次课程讲授以及一千多听课者。这门课也不断改进,变成了此书。目前,书中的例子涉及膜技术、反应工程、吸附过程、生物技术等方面;包括气体和液体混合物,以及多孔介质和聚合物。书中的基础并没有改变,几乎与 1866 年 Clerk Maxwell 提出它时以及 1872 年 Josef Stefan 更为清晰的表述一样(Maxwell 是电磁场理论的奠基人之一,Stefan 与 Boltzman 的名字有关系)。当翻阅大约 1900 年版的《大不列颠百科全书》(Encyclopaedia Britannica)时,我感到有点脸红的是,那时人们对扩散的理解已是多么深刻。对我来说,事情好像是过了 100 多年后,我又拣拾起两位早已作古的科学家那些杰出但简单的想法。Krishna 和我希望本书有助于你快一点理解这些基础知识。

Hans Wesselingh
Groningen, May 2000

目 录

■ 第 1 章 引言	1
1.1 谁应该读本书	1
1.2 本书涵盖哪些内容	2
1.3 本书的结构	3
1.4 读者指南	3
1.5 教师指南	5
1.6 符号表	5
1.7 约定	7
■ 第 2 章 问题的提出	10
2.1 起点	10
2.2 三种气体	12
2.3 两种阳离子	13
2.4 两种气体及多孔活塞	14
小结	15
进一步阅读资料	15
习题	16

第一部分 气体和液体中的传质

■ 第 3 章 驱动力	19
3.1 势、力和动量	19
3.2 组分的动量(力)平衡	21
3.3 以势梯度表示的驱动力	23
3.4 Maxwell-Stefan 方程	24
3.5 数学简化	24
3.6 膜模型	25
3.7 驱动力的差分形式	26
小结	28
进一步阅读资料	28
习题	28
■ 第 4 章 摩擦力	30
4.1 摩擦系数和扩散系数	30
4.2 速度及附加关系	32
4.3 速度和通量	33
4.4 差分方程	34
4.5 传质系数	35
小结	36
进一步阅读资料	36
习题	37
■ 第 5 章 二组分混合物	38
5.1 抽提	38
5.2 极化	39
5.3 蒸发	40
5.4 炭颗粒的气化	41
5.5 二组分精馏	41
小结	42
进一步阅读资料	43
习题	43

第 6 章 三组分混合物	45
6.1 由二组分到三组分	45
6.2 冷凝器	46
6.3 三组分精馏	47
6.4 三组分反应	49
6.5 三组分物系的二组分近似	50
小结	51
进一步阅读资料	52
习题	52
第 7 章 质量和热量同时传递	54
7.1 温度梯度	54
7.2 焓	55
7.3 传质关系	57
7.4 能量传递关系	57
7.5 惰性气体中的冷凝	58
7.6 非均相反应系统	59
7.7 氨吸收器	60
小结	60
进一步阅读资料	61
习题	61
第 8 章 非理想性	63
8.1 化学势与活度	63
8.2 非理想二组分精馏	63
8.3 非理想性的简单模型	64
8.4 强非理想性: 分相	65
8.5 Maxwell-Stefan 方程与 Fick 方程的比较	66
8.6 何时可以忽略非理想性	68
8.7 液-液萃取中的传质	68
小结	70
进一步阅读资料	70
习题	70
第 9 章 扩散系数	73
9.1 气体中的扩散系数	73
9.2 液体中的扩散系数	75
9.3 如何测量扩散系数	78
小结	79
进一步阅读资料	80
习题	80
第 10 章 传递系数	83
10.1 引言	83
10.2 无量纲参数	84
10.3 管流及固定床	85
10.4 气-液填料塔	87
10.5 单颗粒、单气泡和单液滴	87
10.6 对群体采用单体近似	
计算传质系数	92
10.7 对多组分采用二组分数据	
计算传质系数	93
小结	93
进一步阅读资料	94
习题	95
第 11 章 电场力和电解质	96
11.1 电解质	96
11.2 电中性关系	97
11.3 电场力	98
11.4 传递关系	98
11.5 盐酸的扩散	99
11.6 加痕量氯化钠后的情形	100
11.7 蛋白质的扩散	101
11.8 离子间的传导和摩擦	102
11.9 电解质溶液中的扩散系数	104

小结	106	习题	107
进一步阅读资料	106		
第 12 章 离心力和压力	110		
12.1 体积性质	110	12.7 Maxwell-Stefan 方程	
12.2 压强梯度	111	回顾	114
12.3 重力	111	小结	115
12.4 离心力	112	进一步阅读资料	115
12.5 气体及蛋白质离心分离	113	习题	116
12.6 压强力的差分方程	114		
第 13 章 采用 MS 方程的理由	118		
13.1 三种方法	118	13.5 Maxwell-Stefan 方法	123
13.2 三种气体的混合物	119	13.6 单位制	124
13.3 Fick 方法	120	进一步阅读资料	124
13.4 不可逆过程热力学	123	习题	124

第二部分 固体基体中的传质

第 14 章 固体基体	129		
14.1 应用领域	129	14.6 基体对传质的影响	134
14.2 膜过程	129	14.7 基体中的浓度	135
14.3 吸附和色谱	131	14.8 接下来讨论什么	136
14.4 非均相催化	133	进一步阅读资料	137
14.5 结构化和非结构化基体	133	习题	137
第 15 章 聚合物的性质	139		
15.1 聚合物简介	139	进一步阅读资料	148
15.2 聚合物混合物热力学	143	习题	148
小结	147		
第 16 章 聚合物中的扩散	150		
16.1 扩散系数的变化	150	进一步阅读资料	157
16.2 自由体积理论	152	习题	158
小结	157		
第 17 章 透析和气体分离	159		
17.1 透析	159	进一步阅读资料	165
17.2 气体分离	162	习题	165
小结	164		

	第 18 章 全蒸发和反渗透	167
18.1	全蒸发	167
18.2	反渗透	171
	小结	174
	进一步阅读资料	174
	习题	175
	第 19 章 电解和电渗析	177
19.1	引言	177
19.2	电解中的极化	178
19.3	电渗析	180
	小结	184
	进一步阅读资料	185
	习题	185
	第 20 章 离子交换	187
20.1	固定床过程	187
20.2	离子交换平衡	188
20.3	线性驱动力模型	190
20.4	膜控制下的离子交换	191
20.5	颗粒控制下的离子交换	192
	小结	193
	进一步阅读资料	193
	习题	194
	第 21 章 气体渗透	196
21.1	柱状孔中的传递	196
21.2	扩散系数	197
21.3	再谈扩散	198
21.4	球填充床中的传递	199
21.5	尘-气模型	201
	小结	202
	进一步阅读资料	202
	习题	203
	第 22 章 多孔催化剂中的传递	205
22.1	引言	205
22.2	粒内压强梯度	206
22.3	组分的传递方程	207
22.4	单变量压强和速率 表达式	208
22.5	薄片解	210
	小结	211
	进一步阅读资料	212
	习题	212
	第 23 章 多孔吸附剂中的传递	214
23.1	吸附	214
23.2	平衡关系: Langmuir 吸附 等温线	215
23.3	Maxwell-Stefan 扩散系数 和 Fick 扩散系数	217
23.4	大孔扩散	219
23.5	传递方程	219
23.6	二组分的动态吸附	220
23.7	膜的应用	221
	小结	222
	进一步阅读资料	222
	习题	223
	第 24 章 超滤	225
24.1	组件	225
24.2	膜和通透物	226
24.3	无离子和电荷时的 渗透压	227
24.4	体积排除效应	228
24.5	极化	229

24.6 传递方程	229	小结	236
24.7 膜中的情形	232	进一步阅读资料	236
24.8 电效应	234	习题	237
第 25 章 总结			238
25.1 回顾	238	25.6 附加关系	243
25.2 热力学模型——势	239	25.7 多种变量	243
25.3 驱动力	240	25.8 结语	244
25.4 摩擦力	240	进一步阅读资料	245
25.5 摩擦系数	241	习题	245
致谢			247
附录 1 Mathcad 简介			250
附录 2 单位制			254
A2-1 摩尔基	254	A2-6 摩尔基和质量基驱动力	258
A2-2 质量基	255	A2-7 摩尔基和体积基驱动力	259
A2-3 体积基	255	A2-8 膜的差分方程	259
A2-4 摩尔基和质量基扩散 系数	256	A2-9 摩尔基差分方程	260
A2-5 摩尔基和体积基扩散 系数	257	A2-10 质量基差分方程	260
		A2-11 体积基差分方程	261
		小结	261
附录 3 孔连孔			262
A3-1 引言	262	A3-5 两类模型的比较	267
A3-2 系统	263	小结	270
A3-3 力和速度	263	进一步阅读资料	270
A3-4 两种传递方程	266	习题	271
习题答案			273
索引			281
《多组分混合物中的质量传递》一书中 CD-ROM 的使用方法			285

第 1 章

引 言

1.1 谁应该读本书

本书讲述扩散和质量传递过程。这是非常重要的问题，但在多数教科书中如下的相关过程常被忽视：

- 存在三种或三种以上的多组分混合物的情形；
- 有一种以上驱动力（包括电场或压力梯度）的情形；
- 有固体介质（如聚合物或多孔介质）的情形。

如果你想更多地了解这些课题，但又发现通过现有教科书了解过于困难，那么这本书就非常适合你。如果你已经掌握了多组分质量传递的难解之处，那么你也会在本书中惊喜地发现，利用一些简单的方法可以对事物有多么深入的理解。

假定你对工艺或产品感兴趣，问题可能来自于学术的或工业应用背景，诸如化学品、水处理、食品、生物技术、制药等，例子不胜枚举。本书还设定你具备如下基础知识：

- 热力学和相平衡：化学势、焓、活度系数、偏摩尔体积及分配系数；
- 传递现象：简单质量平衡、二组分扩散及传质系数；
- 流体流动，尤其是颗粒绕流以及多孔介质中的流动。

如果你对以上这些不甚了解，不必灰心。我们将以轻松的方式重复所有重要的概念。但是，本书不完全是关于质量传递的入门书，因此你必须听说过以上概念。由于要引入许多新的概念，我们将尽力避免数学上的复杂。就本书的大部分内容而言，所需的数学运算不会比用三个线性方程求解三个未知量更多。你甚至用一支铅笔、一张纸和一个计算器就能解决许多问题。当然对于大的问题，你需要有一台计算机，但对于问题的初步解答这不是必需的。

1.2 本书涵盖哪些内容

本书考虑混合物中每一组分受作用力控制下的运动。有两种作用力：

- 驱动力：源于组分的势梯度；
- 摩擦力：源于不同组分间的速度差。

Maxwell 和 Stefan 在一个世纪前就采用了这种方法。这种力学观较常规作为扩散理论基础的 Fick 定律要普适得多。这种方法之所以未被采纳可能是由于人们认为它在数学处理上困难。现在这已经不是问题所在，原因在于：

- 有关的扩散方程存在近似解；
- 计算机和数值技术现在更容易给出精确的计算。

应用势梯度方法可以计及不同的驱动力，包括：

- 浓度梯度（或更精确地说是活度梯度）；
- 电场势梯度；
- 压强梯度；
- 离心场梯度及其它梯度。

以摩擦力计及不同组分间的相互作用就可以对任意数目组分作统一处理。力平衡方法易于将质量传递问题与其它学科联系起来。如此一来，热力学和传递过程就成为相关学科，平衡就是驱动力不存在时的情形。采用作用于混合物组分上的力这样的观点也符合工程师的思维方式，其实它就是单组分子学的推广。至于摩擦系数，我们可以采用颗粒或多孔介质流体力学中的众多关系。这表明，扩散和流动是同一问题的两面。

以此为起点，我们几乎可以描述任何质量传递过程。本书包括的示例有：

- 多组分蒸馏、吸附和萃取；
- 多组分蒸发和冷凝；
- 沉降和超离心；
- 透析和气体分离；
- 全蒸发和反渗透；
- 电解和电渗析；
- 离子交换和吸收；
- 非均相催化；
- 超滤。

以上示例中处理气体、液体、电解质溶液、溶胀聚合物以及多孔介质中的扩散。本书也给出多组分扩散系数以及传质系数的计算方法。

本书所举示例的主要局限是大多仅涉及传递阻力，并非包括单元设备的方方面面。虽然如此，传递阻力也是模拟分离塔、膜组件或化学反应器的基本模块。读者必须能够将书中的公式整合到自己的模拟中去，但所做的近似必须满足多数工程应用的精度要求。

我们希望你喜欢应用本书的多组分传质方程。但是，我们并不刻意推导这

些方程。如果你感兴趣并有心求索，可以参考我们所提供文献中的基础部分。

1.3 本书的结构

本书共分 25 章，范围广泛。你会发现讨论的问题各式各样，但有共性，而且主题是围绕 Maxwell-Stefan 方程展开的。

本书分两个大的部分：第一部分是关于气体和液体中的传质（第 3 章～第 13 章）；第二部分是关于固体基体中的传质（第 14 章～第 24 章）。

第 3 章和第 4 章介绍 Maxwell-Stefan 方程的两个方面：质量传递的驱动力以及不同运动组分间的摩擦力。第 5 章和第 6 章是上述方程在简单二组分和三组分体系中的应用。第 8 章、第 11 章和第 12 章完成了对驱动力的描述，其中涉及混合物中的非理想性（第 8 章）、电场力（第 11 章）以及离心力和压力（第 12 章）。第 9 章和第 10 章讨论摩擦力项中的参数，即扩散系数和传质系数。第 13 章讨论 Maxwell-Stefan 方程和其它描述质量传递方法间的关系。

你可能会问，第 7 章是什么内容？这一章引入了温度梯度效应，这有点离题。因此，该章放在书中任何一处都可以。

本书的第二部分讨论固体基体中的质量传递。第 14 章给出了这部分的概述并讨论了两类基体：

- 聚合物基体（第 15 章～第 20 章）；
- 有序孔结构（第 21 章～第 24 章）。

第 15 章和第 16 章概述了聚合物以及聚合物中扩散系数的性质。这两章的辅助材料为进一步的讨论提供基本概念。接续的章节为不同驱动力的示例，包括：浓度梯度（第 17 章）、压强梯度（第 17 章和第 18 章）以及电场力梯度（第 19 章和第 20 章）。

在有关多孔介质的章节里，主要讨论 MS 方程中涉及的摩擦项。第 21 章讲述非吸附气体的传递并介绍黏性流效应。第 22 章讲述在有化学反应发生时如何应用 MS 方程。第 23 章考虑吸附组分（如在微孔吸附剂中）的扩散。在第 24 章中讨论了黏性流效应非常显著的超滤的例子。

最后，在第 25 章中我们从不同角度回顾了 MS 方程的诸多方面。

1.4 读者指南

本书可作为一整周多组分质量传递课程的幻灯片的辅助材料。多数幻灯片已体现在本书的图中，这些图并不仅仅用于演示，也有实质性的内容，图中包含所

有的公式及其它信息。

并非本书中所有章节都同等重要。至少，我们建议通读第 3 章～第 6 章、第 14 章、第 17 章及第 21 章。这些内容将在两天中使你建立起有关多组分质量传递的基本概念。其它建议如下。

- 如果你对质量传递已经熟悉，可以读第 2 章，其中或许有引人入胜之处。
- 第 7 章、第 8 章及第 12 章中的问题虽然重要，但在第一次阅读时可以略去。
- 第 9 章～第 11 章（后半部分）、第 15 章及第 16 章与物性以及传递参数（如扩散系数及传质系数）的估算有关。在第一次阅读时可以略去。
- 如果你对离子、电解质以及电场不感兴趣，可以略去第 11 章、第 19 章、第 20 章以及第 24 章的部分内容（但值得提醒的是，电场要比多数化学工程师所想象的更重要）。
- 如果你从不与高分子打交道，则不必读第 15 章～第 20 章。
- 如果多孔介质与你无关，可以略去第 21 章～第 24 章。

总之，读哪些章节由你自己掌握。

第 2 章～第 6 章中有许多问题和小计算。我们建议你不妨一试，答案暗含在文中或图中。每一章后是一系列习题，用以帮助你在阅读正文之外更全面地掌握内容。这都是一些小问题、讨论以及对正文的进一步补充。答案在本书的最后给出。

从第 5 章开始有应用 Mathcad（一种易于掌握的编程语言）的作业。作业分两类：短的你可以自己编程；长的是较复杂问题的示例。我们的学生对第一类非常喜欢。这类作业均标有*符号，我们希望你做完其中的绝大部分。第二类文件供你解决自己的问题、浏览、赏玩、修改或品评。你可以自行决定。很多这类文件解答了文中给出的问题。在 CD-ROM 的文件夹 Exercises/Questions 中可以找到 Mathcad 作业。已完成的 Mathcad 文件在 CD-ROM 的文件夹 Exercises/Answers 中。你可以先阅读这些文件，然后利用免费程序 Mathcad Explorer 变动其中的参数。在 CD-ROM 的文件夹 Mathcad/Explorer 中有 Mathcad Explorer 的自释放文件。本书附录 1 有 Mathcad 的介绍，这足以使你读懂这些文件。你可以利用 Mathcad Explorer 中的指南进一步改进你的 Mathcad 编程技巧。为了充分利用 Mathcad 练习题，你需要学生版的 Mathcad 7.0 或更高版本。在课程开始之前，我们先让学生在短时间内自学 Mathcad，这可以在文件夹 Mathcad/Tutor7 中找到，其中包括 8 个 Mathcad 文件，这可以使你在不到半天的时间内就具有使用 Mathcad 的基础。

本书正式内容自第 2 章开始。但是，你必须先浏览本章最后的符号表以及符号约定。初次阅读你可能不会记住所有的细节，但必须知道出处以便回头翻看。

1.5 教师指南

本书是自 1982 年以来我们在不同大学的 23 次课程讲授的基础上形成的。学生主要是博士生和硕士生，但是也有许多人是来自工业界的，还有我们的同事，加起来约有 900 人次。他们大多来自化学工程专业，也有数学、化学、物理、机械工程以及少量制药和生物专业的学生。

由于听众来自不同的专业，我们的课程在多数情况下是连续讲授 5 天。课程中有 36 小时是用于讲授和上机作业。我们大体将这 36 小时划分为 16 小时讲授，20 小时上机；学生为两组。除了第 1 章和第 25 章不占讲授时间、第 2 章和第 14 章需不到半小时外，其余各章各需约 1 小时。这意味着需要从余下的 21 章[●]中选出 15 章。在前述读者指南中的说明有助于作出选择。

作为一门课程，我们建议最低要求应包括第 3 章～第 6 章、第 14 章、第 17 章及第 21 章。如此，可在约 2 天的时间里向学生传授多组分质量传递的基本内容。

本书所附 CD-ROM 光盘包含用于本课程讲授的所有彩色幻灯片的 PowerPoint 7.0 文件。这可在文件夹 Transparencies 中找到。你可以随意使用、编辑这些文件用于教学，但绝不可用于商业目的。这些是作者的财产！

谈到评估学生的学习效果，可以按常规进行，我们也有好的经验：给学生一些有关传质的文章并要求学生构造新的 Mathcad 示例。学生虽感困难但受益匪浅。

1.6 符号表

对仅出现一两次的符号在文中说明，此处不再赘述。

$\mathcal{A}$	Avogadro 常数, mol^{-1}	D	Maxwell-Stefan 扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
A	非理想参数, 无量纲	E	能量通量, $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
a	活度, 无量纲	E	活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
c	摩尔浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$	F	力每摩尔, $\text{N} \cdot \text{mol}^{-1}$
C_p	摩尔定压热容, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$	F	Faraday 常数, $\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}$
D	Fick 扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	g	重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
d	直径, m	H	焓, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ OR

● 原书此处为 19 章。——译者注

h	传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
I	电流密度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
J	混合物基通量, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
k	传质系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
K	平衡常数, 无量纲
M	摩尔质量, $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$
m	质量, kg
N	界面基通量, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
n	物质的量, mol
p	压强, $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
R	气体常数, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
R	持留率, 无量纲
r	半径, m
r	反应速率, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
T	温度, K
t	时间, s
T_g	玻璃相变温度, K
u	扩散速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v	黏性流速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
V	摩尔体积, $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
w	总速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
x	摩尔分数, 无量纲
y	摩尔分数, 无量纲
z	距离(位置), m
z	电荷数, 无量纲

希腊字母

α	黏性流选择性, 无量纲
Δ	增量, 无量纲
ε	体积(空隙)率, 无量纲
ϕ	电势, V
γ	活度系数, 无量纲
η	黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
λ	热导率, $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
μ	化学势, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$

ν	化学计量系数, 无量纲
π	渗透压, $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
ρ	密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
σ	界面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
τ	应力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
τ	曲径因子, 无量纲
v	扩散体积, $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$
ω	角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
ξ	摩擦系数(结构化), $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
ψ	组分的势, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
ζ	摩擦系数(非结构化), $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

上标

$\bar{x}$	x 的膜内平均
p_1^*	纯组分 1 的压强(蒸汽压)
V_1^*	纯组分 1 的体积
$D_{1,2}^0$	0 为自由空间
$D_{1,2}^d$	d 为分散相
p_1^b	沸点压强
$D_{1,2}^{x_1=1}$	$x_1 = 1$ 时的 $D_{1,2}$
p_1^{eq}	反应平衡时组分 1 的压强
T_{ref}	参比温度
v^T	热运动速度
$\bar{u}_1$	平均浓度下组分 1 的速度
x', x''	两个不同相中的 x

下标

c_w	水的浓度
d_p	颗粒或孔的直径
$D_{1,\text{eff}}$	组分 1 的有效(Fick)扩散系数
V_f	自由体积
$\zeta_{1,M}$	组分 1 与基体的摩擦系数

V_C	一个链单元的摩尔体积		速度
$x_{1\alpha}, x_{1\beta}$	不同位置 α 、 β 、 γ 、 δ 处组分 1 的 x	ζ_v	黏性摩擦系数
T_{ref}	参比温度	缩写	
u_1, u_2	组分 1 和组分 2 的速度	ED	电渗析
$u_{1\bullet}$	性质与组分 1 等同的痕量组分的速度	FH	Flory-Huggins
		MS	Maxwell-Stefan
u_i	所讨论的组分 i 的速度	RO	反渗透
u_j	所讨论组分之外的 j 组分的	UF	超滤

1.7 约定

以下是本书中所采用的一些约定的注解。当阅读本书时，你可能会时常查看以下条例，但不要寄希望于读一遍就能理解其中每个细节。

- ① 在各种图中，正方向由左及右。沿此方向的速度和通量均为正。
- ② 力的方向指向势梯度降低的方向，例如

$$F_1 = -\frac{d\mu_1}{dz} \quad \text{或} \quad F_i = -Fz_i \frac{\Delta\phi}{\Delta z}$$

这一约定对微分和差分方程均适用。

- ③ 做差分运算时，选初值在正向位置的端点（右端），然后减去左端值

$$\Delta x_2 = x_{2\beta} - x_{2\alpha}$$

- ④ 在示例中会讨论不同位置处的浓度，其中位置以下标的希腊字母表示。如果考虑不同的相，则位置以加撇号区别，如图 1.1 所示。

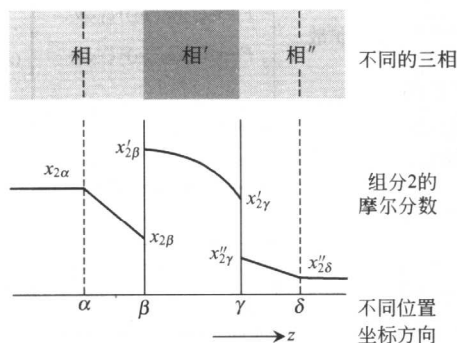


图 1.1 三种不同的相