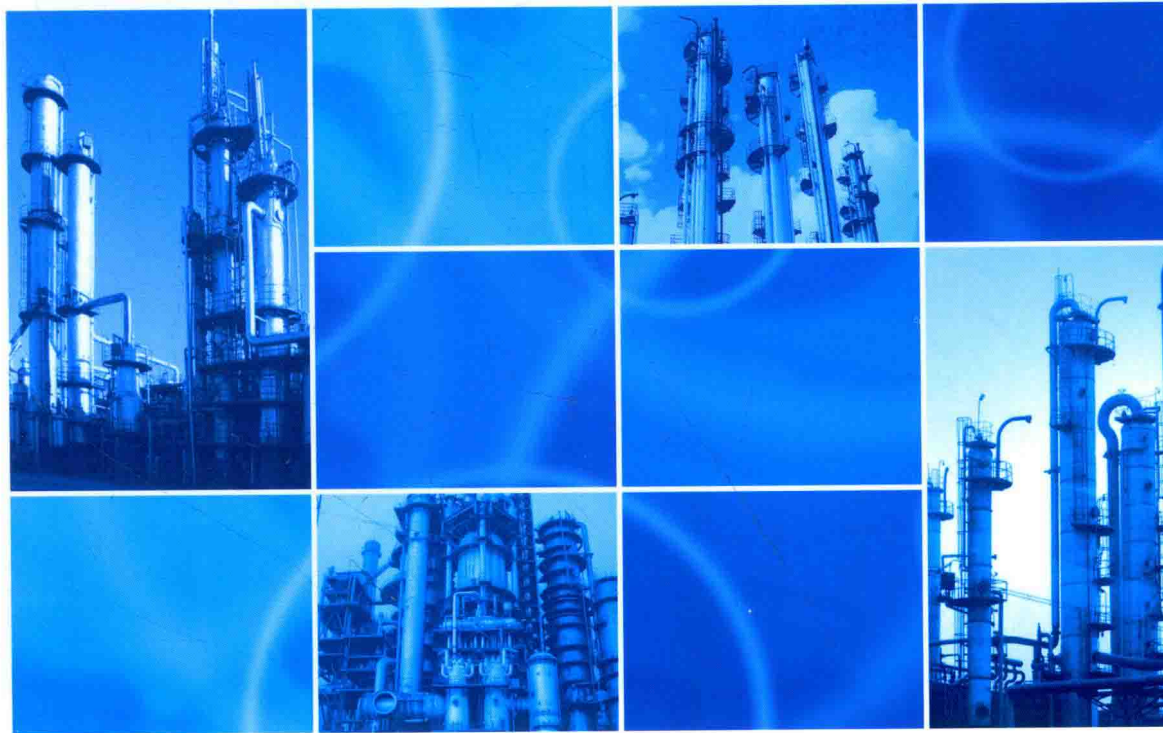


传质分离理论与 现代塔器技术

李群生 编著



CHUANZHI FENLI LILUN YU
XIANDAI TAQI JISHU



化学工业出版社



传质分离理论与 现代塔器技术

李群生 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

传质分离是化学工程中最重要学科之一。本书将理论与实际相结合,主要介绍了化工生产中常用的传质分离单元操作的原理及塔器技术在其中的应用。全书内容包括绪论,精馏,精馏过程计算机模拟,现代板式塔的流体力学与传质性能,现代板式塔的原理、设计及工业应用,现代填料塔的流体力学与传质性能,现代填料塔的原理、设计及工业应用,特殊精馏过程及工业应用,吸收传质过程及工业应用,萃取过程及工业应用,结晶过程及工业应用,超临界萃取技术及工业应用,膜分离过程及工业应用,其他现代传质分离技术共 14 章。

本书可作为高等学校化工类教材,也可供有关生产设计科研部门的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

传质分离理论与现代塔器技术/李群生编著. —北京: 化学工业出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-122-25713-0

I. ①传… II. ①李… III. ①传质-化工过程②分离-化工过程③塔器-技术 IV. ①TQ021. 4②TQ028③TQ053. 5

—中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 282254 号

责任编辑: 徐雅妮 胡晓丹

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 王素芹

装帧设计: 关 飞

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: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 28 $\frac{3}{4}$ 字数 658 千字 2016 年 4 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: 88.00 元

版权所有 违者必究



序

传质分离在化工生产中具有十分重要的地位。对于每一个化工生产过程，从原料的净化到中间产物的分离，从产品的精制到三废的处理，处处需要传质分离过程和设备。它们对生产过程的技术经济指标，对企业的绿色、低碳发展具有重要的作用。近年来，在气液相平衡、气液两相传质机理、热泵精馏、多效精馏、计算机辅助设计(CAD)和计算流体力学(CFD)的研究和应用等方面都取得了很大的进展。新型塔板和新型填料的发展层出不穷，人们对其结构、性能和放大设计进行了较为系统的实验研究，积累了大量基础数据，为新型塔器的工业应用打下了基础，塔器的技术改造取得了显著的效果和经济效益。

随着技术进步，人们对塔器内部两相流体力学、传热及传质过程的复杂性也有了进一步的理解。应该指出，目前一些大型、复杂塔器的设计在很大程度上还处于半经验水平。多组分复杂体系传质系数及等板高度的确定、自由界面两相流体力学参数的计算等都还需要进一步加强研究，非平衡级模型和计算传质学的研究与应用也在不断发展。随着塔器应用范围的扩展、节能减排要求的进一步提高和特大型分离过程的需求等，急需在深入理解传质分离理论的基础上，对塔器技术进行更深入的研究。

本书编著者长期从事传质与分离工程领域的研究和工业应用工作，包括精馏、吸收、超临界流体萃取、连续结晶等研究方向，在聚氯乙烯工业、聚乙烯醇工业、多晶硅和太阳能产业、化肥甲醇及其下游产品工业等领域有深入的研究，获得国家及省部级多项奖励。本书是编著者近30年工作经验的结晶，也是编著者长期从事教学工作的经验总结。本书的编写十分注重理论与实际相结合，书中基本包括了化工生产中传质分离常用的单元操作，在阐述精馏、液-液萃取、结晶、吸收与离子交换等分离过程传质原理的基础上，每一章都用大量的工业实例对其进行说明，以期使学生和读者更好地理解、掌握和应用。编著者在编写过程中也努力遵循“信、雅、达”的原则，内容翔实、观点准确、逻辑清晰、实例充分，有很高的参考价值。

我很荣幸地向相关领域的学生和技术人员推荐本书，也希望它的出版能进一步推动传质分离理论和技术的研究与应用。

费维扬



前言

传质分离过程是研究以质量传递为主要理论基础、用于各种混合物分离提纯的一门工程学科。传质、分离在化工产业及应用化工技术领域起着举足轻重的作用。化工反应原材料的获得、最终产品的提纯、未反应物与反应物的分离、三废的处理等都涉及分离过程。可以说没有传质与分离，化工生产过程将寸步难行。塔器是化工生产中重要的传质分离设备，它的性能对于整个生产过程的能耗、收率及产品的质量、三废排放等多方面均有着重要影响。虽然一些新兴的分离技术，如膜分离等，有着广泛的发展前景，但是由于某些技术上的限制，在工业上仍然不能代替塔器的主导地位。

传质分离过程中精馏、吸收、萃取等一些成熟的单元操作已被广泛应用，人们对其进行过大量的研究，积累了丰富的操作经验。但在进一步深入研究这些过程的机理和传质规律，开发高效的传质设备，研究和掌握它们的放大规律，改进设备的设计计算方法等方面，仍需做许多深入细致的工作。并且随着日益严重的能源、环境危机，如何降低传质分离过程的能耗，实现节能减排，成为愈发关注的问题。本书在编写过程中注重理论联系实际，密切结合工程实际问题。本书章节较多，基本上包括了化工生产中主要的传质分离单元操作。每一章节在内容上都突出传质分离过程的基础理论，并有相关的工业实例进行支撑，内容完善、充实。在编著过程中笔者本着“理论扎实、拓宽思路、联系实际、便于自学”的原则，以适应不同专业读者的需要。

全书分为 14 章，第 1 章为绪论，第 2 章为精馏，第 3 章为精馏过程计算机模拟，第 4 章为现代板式塔的流体力学与传质性能，第 5 章为现代板式塔的原理、设计及工业应用，第 6 章为现代填料塔的流体力学与传质性能，第 7 章为现代填料塔的原理、设计及工业应用，第 8 章为特殊精馏过程及工业应用，第 9 章为吸收传质过程及工业应用，第 10 章为萃取过程及工业应用，第 11 章为结晶过程及工业应用，第 12 章为超临界萃取技术及工业应用，第 13 章为膜分离过程及工业应用，第 14 章为其他现代传质分离技术。

本书可作为高等学校化工类教材，也可供有关生产设计科研部门的工程技术人员参考。

笔者长期从事传质与分离工程研究和应用，讲授研究生课程“传质理论

与现代塔器技术”十几年，并在此基础上结合近 30 年发表的论文及多次获得科技进步奖的技术报告，结合本领域的科技发展，编著成本书。笔者指导的研究生于丹、张武龙、杜庆浩、王亚茹、王韬、李玥、张双、李金焕、蒋子龙、翟佳秀、张羽昕、郭凡、崔侨、赵洪康、张玉强协助整理文字、检索文献、处理图表，为本书的出版做了很大贡献。已毕业的研究生宋春颖、毛明华、王爱军、常秋连、张满霞、章慧芳也为本书的完成做出了积极的贡献，在此一并致谢。

限于笔者水平，书中不足之处在所难免，敬请使用本书的师生和读者批评指正。

编著者

2015 年 9 月于北京



目 录

第1章 绪 论 / 1

1.1 传质与扩散	1
1.2 传质过程的重要性	2
1.3 传质过程分类	5
1.4 传质理论模型	10
1.4.1 双膜理论	10
1.4.2 溶质渗透理论	11
1.4.3 表面更新理论	11
1.5 强化流体界面传质的方法	12
本章主要符号说明	13
参考文献	13

第2章 精 馏 / 14

2.1 概述	14
2.2 精馏过程的汽液相平衡	14
2.2.1 汽液相平衡关系式	15
2.2.2 活度系数模型	16
2.2.3 热力学一致性检验	18
2.3 连续精馏	19
2.3.1 原理及工艺流程	19
2.3.2 连续精馏的计算	20
2.4 间歇精馏	25
2.4.1 原理及工艺流程	25
2.4.2 间歇精馏的计算	27
2.5 精馏主要附属设备——冷凝器与再沸器	31
2.5.1 管壳式冷凝器	31

2.5.2 热虹吸式再沸器	36
2.6 精馏过程的节能减排与工业应用	42
2.6.1 操作参数的优化	43
2.6.2 热泵精馏	47
2.6.3 多效精馏	50
2.6.4 蒸汽闪蒸节能技术	54
2.6.5 间歇精馏的工业应用	56
本章主要符号说明	59
参考文献	61

第 3 章 精馏过程计算机模拟 / 62

3.1 概述	62
3.1.1 化工流程模拟	63
3.1.2 Aspen Plus 软件介绍	64
3.1.3 物性方法选择	64
3.2 精馏过程模拟实例	67
3.2.1 醋酸乙烯精馏四塔实例	67
3.2.2 燃料乙醇工业精馏模拟实例	77
3.2.3 炼油厂气分分离实例	79
3.2.4 聚乙烯醇聚合四塔甲醇水精馏模拟实例	85
参考文献	89

第 4 章 现代板式塔的流体力学与传质性能 / 90

4.1 概述	90
4.2 板式塔气液两相接触状态	91
4.2.1 两相接触状态分类	91
4.2.2 影响接触状态转变的因素	92
4.2.3 流态的转换机制	93
4.3 板式塔的流体力学性能	95
4.3.1 塔板压降	95
4.3.2 塔板持液量	99
4.3.3 气液在空间上的不均匀流动	99
4.3.4 夹带现象	104
4.3.5 塔板漏液	106
4.3.6 液泛现象	108
4.4 板式塔的传质性能	110
4.4.1 点效率	110

4.4.2	单板效率	111
4.4.3	全塔效率	112
4.4.4	影响传质的因素	112
4.5	CFD 在板式塔流体力学与传质中的模拟研究	114
4.5.1	板式塔 CFD 模型研究与发展	116
4.5.2	板式塔的 CFD 模拟研究	119
4.5.3	CFD 技术应用展望	127
	本章主要符号说明	127
	参考文献	129

第 5 章 现代板式塔的原理、设计及工业应用 / 130

5.1	概述	130
5.2	板式塔的发展现状	130
5.2.1	泡罩型塔板	131
5.2.2	筛孔型塔板	134
5.2.3	浮阀型塔板	137
5.2.4	特殊结构塔板	140
5.2.5	复合塔板	143
5.3	板式塔的设计计算	144
5.3.1	塔设计的主要内容	144
5.3.2	塔径和塔高的确定	144
5.3.3	塔板的设计	148
5.3.4	接管管径的设计	155
5.3.5	板式塔的校核	156
5.3.6	浮阀塔的设计实例	160
5.4	板式塔的安装与运行	166
5.4.1	板式塔的安装	166
5.4.2	板式塔的运行	166
5.5	板式塔的工业应用实例	167
5.5.1	聚氯乙烯 (PVC) 高沸塔、低沸塔中的应用	167
5.5.2	聚乙烯醇 (PVA) 聚合一塔中的应用	170
5.5.3	PVA 聚合三塔中的应用	171
5.5.4	PVA 回收一塔中的应用	172
5.5.5	碳五分离中的应用	172
5.5.6	食用酒精生产中的应用	173
5.5.7	丙烯酸酯塔中的应用	174
	本章主要符号说明	174
	参考文献	175

6.1	填料塔的流体力学性能	177
6.1.1	填料塔气液流动过程分析	177
6.1.2	填料层压降及泛点气速的计算	179
6.1.3	填料塔持液量的计算	183
6.1.4	BH 型规整填料的流体力学性能	186
6.2	填料塔内传质过程	188
6.2.1	传质基本方程	188
6.2.2	传质系数的计算	190
6.2.3	填料层高度的计算	193
6.2.4	BH 型规整填料的传质性能研究	201
6.3	填料塔流体分布的模型化研究	203
6.3.1	扩散模型	203
6.3.2	静态混合器模型	203
6.3.3	节点网络模型	204
6.3.4	单元网络模型	204
6.3.5	渗流器模型	204
6.3.6	新型板波纹填料混合模型	205
6.4	填料塔的 CFD 模拟研究	211
6.4.1	整体平均 CFD 模型	212
6.4.2	单元综合 CFD 模型	212
6.4.3	多尺度 CFD 模型	213
6.4.4	填料塔 CFD 模拟研究的展望	219
	本章主要符号说明	220
	参考文献	220

7.1	概述	222
7.1.1	填料塔概况	222
7.1.2	填料塔的研究进展	224
7.2	填料塔的结构与特点	224
7.2.1	填料塔的结构	224
7.2.2	填料塔的特点	225
7.3	填料及填料塔塔内件	226
7.3.1	现代塔填料的特性	226
7.3.2	现代塔填料的结构	227
7.3.3	填料塔的内件	234

7.4 现代填料塔的设计	237
7.4.1 设计方案的确 定	237
7.4.2 填料的选择	239
7.4.3 填料塔尺寸的计算	240
7.5 现代填料塔的工业应用	243
7.5.1 聚氯乙烯 (PVC) 生产中乙炔精制	243
7.5.2 降低废液中氨氮含量	246
7.5.3 电子级甲醇的生产	249
7.5.4 降低尾气中有机物的排放	250
7.5.5 丙炔醇生产	250
7.5.6 降低皮革工业废液中有害气体的排放	250
7.5.7 含氨尾气回收处理	251
7.5.8 制药厂溶剂回收	251
7.5.9 高纯度硅源的生产	251
7.5.10 异丁烯精制系统的扩产改造	252
7.5.11 合成氨系统中脱碳装置的改造	252
7.5.12 特级酒精脱甲醇塔的优化设计	252
7.5.13 己烷溶剂油的分离	252
7.5.14 制溴工业中的应用	253
7.5.15 糠醛精制转盘塔的技术改造	253
7.5.16 氨水精馏工艺的改造设计	253
本章主要符号说明	254
参考文献	254

第 8 章 特殊精馏过程及工业应用 / 256

8.1 概述	256
8.2 萃取精馏	256
8.2.1 萃取精馏原理	257
8.2.2 溶剂的选择	258
8.2.3 离子液体萃取精馏	259
8.2.4 萃取精馏计算	267
8.2.5 萃取精馏工业应用	269
8.3 共沸精馏	270
8.3.1 共沸精馏分离原理	271
8.3.2 共沸精馏中共沸剂的选择	272
8.3.3 共沸精馏过程的计算	272
8.3.4 共沸精馏工业应用	273
8.3.5 共沸精馏与萃取精馏的比较	275

8.4	加盐精馏	275
8.4.1	加盐精馏原理	276
8.4.2	盐类的选择	277
8.4.3	含盐体系汽液平衡数据的关联和预测	277
8.4.4	加盐精馏过程	278
	本章主要符号说明	280
	参考文献	281

第9章 吸收传质过程及工业应用 / 283

9.1	概述	283
9.1.1	吸收塔设备	283
9.1.2	吸收剂的选择	284
9.1.3	气体吸收工业应用	285
9.2	吸收过程的相平衡	285
9.2.1	气体在液体中的溶解度	285
9.2.2	亨利定律	286
9.2.3	相平衡与吸收操作的关系	288
9.2.4	吸收过程的物料衡算	289
9.2.5	吸收塔的操作线方程与操作线	290
9.2.6	吸收剂的用量	290
9.3	吸收传质机理	292
9.3.1	分子扩散	292
9.3.2	涡流扩散	292
9.3.3	相际传质	293
9.4	吸收塔的工业应用实例	295
9.4.1	浓硫酸乙炔清净中的应用	295
9.4.2	淡酒回收中的应用	297
9.4.3	烟气除油中的应用	299
9.5	解吸	302
9.6	聚氯乙烯电石渣浆中的应用	303
9.6.1	技术原理及特点	303
9.6.2	工艺流程	304
9.6.3	主要设备	304
9.6.4	技术经济分析	305
9.7	其他吸收	305
9.7.1	化学吸收	305
9.7.2	不等温吸收	306
	本章主要符号说明	306

参考文献	307
------------	-----

第 10 章 萃取过程及工业应用 / 308

10.1 概述	308
10.1.1 液液萃取过程机理	308
10.1.2 液液萃取操作特点	309
10.1.3 萃取剂的选择	309
10.2 液液萃取平衡	310
10.2.1 萃取平衡的基本参数	310
10.2.2 液液相平衡与杠杆定律	311
10.2.3 萃取平衡的影响因素	315
10.3 液液萃取过程的计算	317
10.3.1 单级萃取计算	317
10.3.2 多级错流萃取的计算	318
10.3.3 多级逆流萃取的计算	321
10.4 液液萃取设备	324
10.4.1 液液萃取设备的分类和主要类型	325
10.4.2 液液萃取设备的选择	329
10.5 液液萃取技术的工业应用	330
10.5.1 有机品生产中的应用	330
10.5.2 化纤行业中的应用	331
10.5.3 煤化工中的应用	332
10.5.4 在检测技术中的应用	334
10.6 其他萃取技术	335
10.6.1 络合萃取技术	335
10.6.2 双水相萃取技术	335
10.6.3 反胶团萃取技术	336
10.6.4 膜萃取技术	336
10.6.5 凝胶萃取技术	336
本章主要符号说明	337
参考文献	337

第 11 章 结晶过程及工业应用 / 339

11.1 概述	339
11.2 溶液结晶过程的相平衡	340
11.2.1 相平衡与溶解度	340
11.2.2 溶液的过饱和与介稳区	343

11.3	溶液结晶机理与动力学	344
11.3.1	晶核生成与晶体成长	344
11.3.2	结晶生长速率	345
11.3.3	影响结晶速率的因素	345
11.4	结晶过程计算	346
11.4.1	物料衡算	346
11.4.2	热量衡算	347
11.5	溶液结晶过程及设备	348
11.5.1	溶液结晶过程的分类及特点	348
11.5.2	常见溶液结晶设备	350
11.6	熔融结晶过程及设备	352
11.6.1	熔融结晶的基本操作模式	352
11.6.2	连续多级逆流分步结晶机理与特点	353
11.6.3	连续多级逆流分步结晶数学模型	355
11.6.4	连续多级逆流分步结晶设备	358
11.7	结晶过程的应用	361
11.7.1	结晶在分离有机混合物中的应用	361
11.7.2	结晶在制药中的应用	363
11.7.3	结晶在有机及高分子化合物生产中的应用	363
	本章主要符号说明	364
	参考文献	365

第 12 章 超临界萃取技术及工业应用 / 366

12.1	概述	366
12.2	超临界萃取的基本原理及特点	367
12.2.1	超临界流体	367
12.2.2	超临界萃取的基本原理	367
12.2.3	超临界萃取的基本流程	369
12.2.4	超临界萃取的特点	371
12.2.5	夹带剂对超临界萃取的影响	372
12.2.6	影响超临界萃取的其他因素	373
12.2.7	超临界流体萃取的主要设备	375
12.3	超临界 CO ₂ 萃取的热力学分析	376
12.3.1	压缩气体模型	376
12.3.2	膨胀液体模型	378
12.3.3	经验关联	379
12.3.4	化学缔合模型	379
12.4	超临界技术的应用	381

12.4.1	超临界萃取技术的应用	381
12.4.2	超临界技术在环境保护方面的应用	385
12.4.3	超临界技术在纳米材料制备方面的应用	386
12.5	超临界技术的展望	387
	本章主要符号说明	387
	参考文献	388

第 13 章 膜分离过程及工业应用 / 390

13.1	概述	390
13.1.1	膜的分类及其制备方法	391
13.1.2	膜分离过程及其特点	391
13.1.3	膜组件	392
13.1.4	膜性能表示方法	394
13.2	电渗析	395
13.3	反渗透	396
13.3.1	基本原理与过程简述	396
13.3.2	影响渗透通量的操作因素	397
13.4	纳滤	397
13.4.1	基本原理与过程简述	397
13.4.2	影响纳滤膜分离性能的因素	398
13.5	渗透汽化和蒸汽渗透	399
13.6	膜蒸馏	400
13.6.1	基本原理与过程简述	400
13.6.2	跨膜传质模型	401
13.7	渗透蒸馏	402
13.8	膜分离在海水淡化中的应用	405
13.8.1	正渗透海水淡化原理	405
13.8.2	正渗透海水淡化机理模型	407
13.9	膜分离在污水处理中的应用	407
13.9.1	正渗透污水处理工艺过程	408
13.9.2	正渗透过程的浓差极化	408
	本章主要符号说明	409
	参考文献	410

第 14 章 其他现代传质分离技术 / 411

14.1	吸附	411
14.1.1	吸附剂	411

14.1.2	吸附剂的制备	412
14.1.3	吸附平衡	414
14.1.4	吸附分离的技术原理与工艺方法	417
14.1.5	吸附分离设备	418
14.1.6	吸附的工业应用	419
14.2	离子交换分离	424
14.2.1	离子交换树脂	424
14.2.2	基本原理	426
14.2.3	离子交换工艺过程与设备	427
14.2.4	离子交换过程的工业应用	428
14.3	分子蒸馏	430
14.3.1	分子蒸馏原理	431
14.3.2	分子蒸馏装置	433
14.3.3	分子蒸馏技术的特点	434
14.3.4	分子蒸馏技术的应用	436
14.4	泡沫分离	437
14.4.1	概述	437
14.4.2	泡沫分离的基本原理	437
14.4.3	泡沫分离的工艺过程	438
14.5	色谱分离	440
14.5.1	概述	440
14.5.2	基本原理与过程	440
14.5.3	色谱分离的理论模型	441
	本章主要符号说明	442
	参考文献	443

第1章

绪论

在化学工业中，质量传递是“三传一反”中最具化工特色的传递过程。任何化工分离操作均离不开传质过程。因此，传质过程的平衡与速率成为了研究传质分离过程的重要视角和切入点。如何采用合适的传质分离方法，提高传质分离效率，强化传质分离效果是化学工业的发展方向和研究重点。

1.1 传质与扩散

自然界中两个组成不同的相直接接触时，可能有一个或几个组分从一个相自发地转移到另一个相中，这个现象就称为相间质量传递，简称传质。在传质过程中质量总是从高浓度区传递到低浓度区，这就是实现传质过程的物理基础。如果使两相无限接触下去，或者接触相当长的时间，就可达到相际平衡状态，之后相与相间就没有净的传质效果，因此相平衡即是传质过程的极限。在大部分的传质操作中，接触的两个相通常是部分互溶的，在达到平衡后，两相依然存在，彼此间容易分开。在适当的条件下，两相之间反复接触与分离，无限循环操作就有可能实现组分之间的完全分离。

例如，日常生活中衣物的洗涤就是一个简单的传质与分离过程。利用不同溶剂将污渍从衣物上吸收去除，实现了污渍在两相中的传质。洗干净的衣物在空气中晾干，水分从衣物扩散到空气中，这也是一个传质的过程。在洗涤过程中，人们常常关心污渍从衣服上的脱离速度，衣服晾干所需要的时间，这就涉及传质速率的问题。有时会通过外力如搓揉、捶打、洗衣机的旋转来改变传质速率。因此，传质和传热一样，是一个速率过程。根据速率的概念，可以写出

$$\text{传质速率} = \text{传质推动力} / \text{传质阻力} \quad (1-1)$$

严格来讲，传质的推动力是化学位差，包括浓度差、温度差、压力差等，但最常见的传质过程都是由于浓度差产生的。在化工计算中，常常将传质阻力看作传递系数的倒数，故式(1-1)可以改写为