

TRANSPORT PROCESSES
AND UNIT OPERATIONS

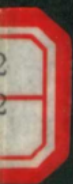
传递过程 与单元操作

(下册)

陈维桓 主编

浙江大学出版社

TRANSPORT
PROCESSES
AND UNIT
OPERATIONS



传递过程与单元操作

(下 册)

陈维柟 主编

浙江大学出版社

传递过程与单元操作

(下 册)

陈维柟 主编

浙江大学出版社

(浙)新登字 10 号

内容提要

本书是在浙江大学化工系近年来使用的“传过过程与单元操作”讲义基础上修改补充写成的。全书分上、下两册,上册包括绪论、流体流动、流体输送机械、流体通过颗粒层的流动、颗粒与流体之间的相对运动、热量传递、蒸发等章;下册包括质量传递、吸收、蒸馏、气液传质设备、萃取、干燥等章。本书可作为化工类有关专业的教学用书,也可供其他专业师生和化学工程技术人员参考。

传递过程与单元操作

(下 册)

陈维壬 主编

责任编辑 徐宝澍

*

浙江大学出版社出版

浙江大学出版社计算机中心排版

杭州京江纸业印务公司印刷

浙江省新华书店发行

*

开本 787×1092 1/16 印张 23.75 插页 1 字数 608 000

1994 年 8 月第 1 版 1994 年 8 月第 1 次印刷

印数 0001—1500

ISBN 7-308-01184-4/O·139 定价:13.65 元

前 言

化工单元操作和动量、热量、质量传递过程属于化学工程中的两个分支学科,在大学的化工系里,多作为两门独立的技术基础课设置,考虑到这两门学科的发展历程和相互依赖关系,为了加深对单元操作中传递机理的了解,也为使传递理论能更好地联系实际,多年来,我们把原来的“化工原理”和“传递过程”两门课程合并开设,并定名为“传递过程与单元操作”。本书便是该课程教学用讲义基础上编写的。在编写中力求阐述清楚基本概念、基本理论和方法,以期获得举一反三的功效;力求不削弱单元操作的设计计算和操作分析能力的培养。在传递原理部分尽可能引用单元操作实例,以增强应用原理解决实际问题的能力。

本教材所需学时数(不包括课程设计和实验)约为 150 学时,经适当删减传递内容,也可用于学时较少的专业。

本书第 2、9、10 章由黄有慧执笔,第 3、4 章由曾跃先执笔,第 7、8 章由叶可粮执笔,第 11、12 章由蒋斐执笔,其余由陈维柎执笔,并为全书定稿。曾跃先编写了原讲义的第 1 章,周金汉编写了原讲义的第 5、6 章,谭式人、吴嘉等浙江大学传递工程教研室的同志对本书原稿提出不少宝贵意见,南碎飞对本书部分习题作了校订工作,在此对他们表示谢意。

由于我们学识有限,难免有错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

1993 年 5 月

目 录

第三篇 质量传递

7 质量传递

7.1 分子传质与对流传质	5
7.1.1 分子传质	5
7.1.2 对流传质	15
7.2 传质微分方程	16
7.2.1 传质微分方程的推导	16
7.2.2 传质微分方程在特定情况下的表达式	18
7.2.3 扩散方程的一般边界条件	19
7.3 一维稳态分子扩散	20
7.3.1 双组分混合物中一维无化学反应的稳态分子扩散	20
7.3.2 多组分气体混合物中无化学反应的分子扩散	25
7.3.3 固体中的扩散	27
7.3.4 具有化学反应的一维扩散体系	31
7.4 非稳态分子扩散	36
7.5 对流传质	40
7.5.1 对流传质系数	40
7.5.2 对流传质中的重要准数	42
7.5.3 浓度边界层的概念及沿平板的层流浓度边界层的精确解	43
7.5.4 流体流经平板时的浓度边界层的积分方程	45
7.5.5 动量、热量和质量传递的类比	47
7.5.6 传质理论	50
7.5.7 对流传质系数的关联式	53
习 题	55
主要符号说明	56
主要参考读物	57

8 气体吸收

8.1 相间传质	61
8.1.1 气体在液体中的溶解度	61
8.1.2 双膜模型在吸收过程分析中的应用	65
8.1.3 传质速率方程	66

8.2 吸收塔的计算	72
8.2.1 吸收塔的物料衡算和操作线方程	72
8.2.2 溶剂用量的决定	74
8.2.3 填料层高度	76
8.2.4 塔板数	88
8.2.5 解吸(脱吸)	90
8.3 其他类型吸收过程	93
8.3.1 多组分吸收	93
8.3.2 化学吸收	94
8.3.3 非等温吸收	95
8.4 传质系数	96
8.4.1 吸收传质系数关联式	96
习 题	99
主要符号说明	101
主要参考读物	102

9 蒸馏

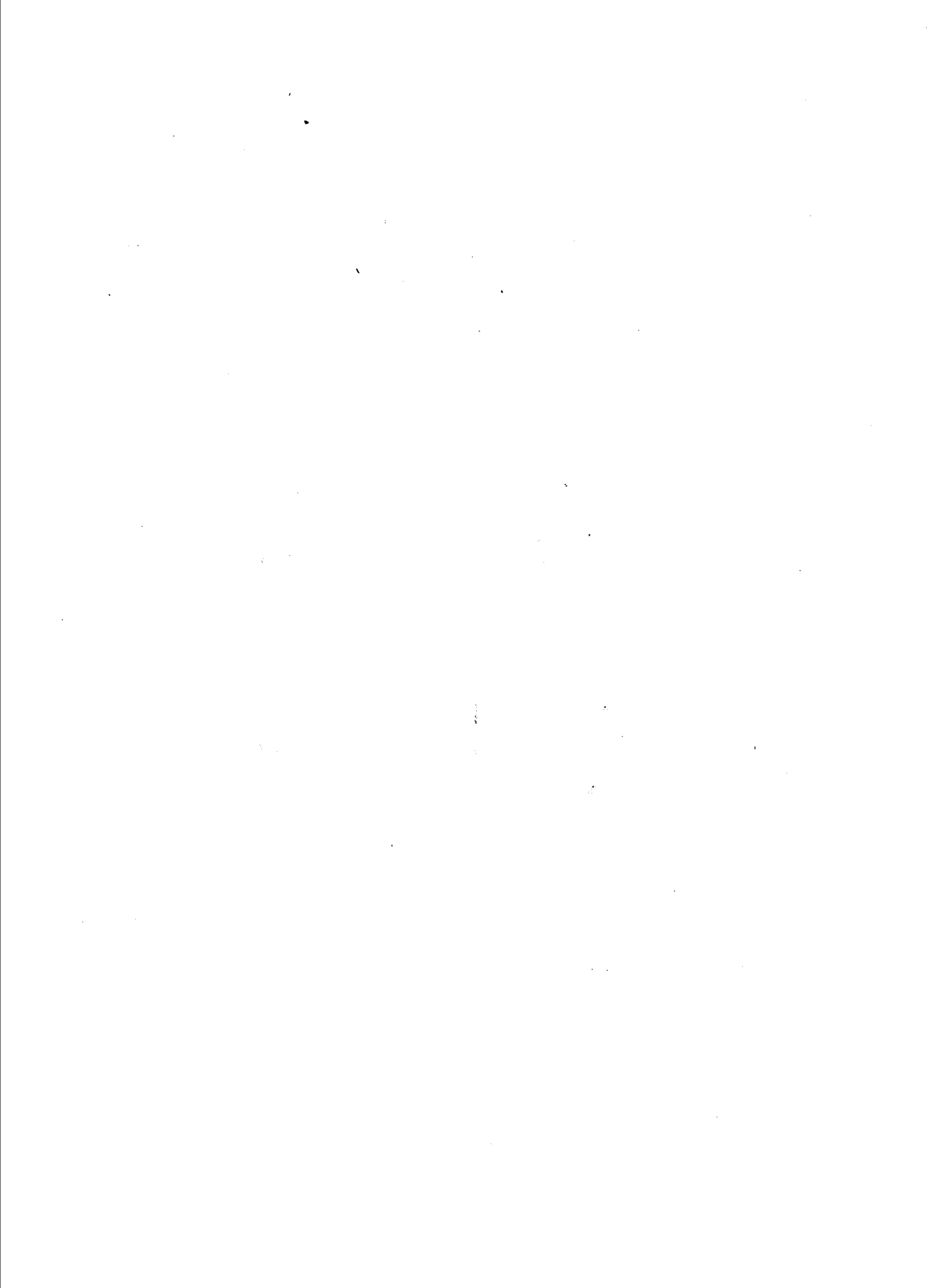
9.1 双组分物系的汽液相平衡	103
9.1.1 双组分物系的汽液平衡相图	104
9.1.2 双组分理想物系的汽液平衡关联式	107
9.1.3 非理想物系的汽-液平衡关联式	110
9.2 蒸馏方式	112
9.2.1 简单蒸馏	112
9.2.2 平衡蒸馏	114
9.2.3 接触级蒸馏和精馏原理	116
9.3 双组分连续精馏过程的分析 and 计算	119
9.3.1 精馏过程理论分析的简化假设	119
9.3.2 全塔物料衡算	120
9.3.3 精馏段的物料衡算	121
9.3.4 提馏段的物料衡算	122
9.3.5 进料热状况对提馏段物料衡算的影响	123
9.3.6 理论板数的求取	127
9.3.7 回流比的选定	131
9.3.8 理论板数的捷算法	136
9.3.9 实际塔板数和填料层高度的求取	137
9.3.10 连续精馏装置的热量衡算	139
9.3.11 连续精馏塔的操作分析与计算	141
9.3.12 连续精馏塔的其他流程	145
9.4 其他蒸馏方式	151
9.4.1 水蒸气蒸馏	151
9.4.2 间歇精馏	154
9.4.3 恒沸精馏与萃取精馏	158
9.5 多组分精馏	161

9.5.1	多组分混合液精馏的特点	161
9.5.2	多组分物系的汽液相平衡	163
9.5.3	多组分精馏的全塔物料衡算	166
9.5.4	多组分精馏理论板数的求取	171
习 题		175
主要符号说明		179
主要参考读物		180
10 气液传质设备		
10.1	板式塔	182
10.1.1	塔板类型	182
10.1.2	板式塔气液流动状况的分析	186
10.1.3	塔板结构及其主要参数的设定	188
10.1.4	塔板流体力学性能的计算	195
10.1.5	板式塔的传质性能——塔板效率	206
10.2	填料塔	211
10.2.1	概述	212
10.2.2	填料层的特性和填料类型	213
10.2.3	填料塔的流体力学性能	216
10.2.4	填料塔的传质性能	219
10.2.5	填料塔的设计程序	220
10.3	板式塔与填料塔的选用	221
习 题		222
主要符号说明		222
主要参考读物		225
11 液-液萃取		
11.1	概述	226
11.1.1	液-液萃取原理	226
11.1.2	萃取过程的工业应用	227
11.1.3	萃取设备	228
11.2	萃取过程的相平衡	228
11.2.1	三元相图	229
11.2.2	分配定律和萃取平衡	233
11.2.3	温度对相平衡的影响	236
11.2.4	活度系数法关联液-液相平衡数据	236
11.2.5	萃取剂的选择	237
11.3	萃取操作的理论级的计算	239
11.3.1	单级萃取	240
11.3.2	多级错流萃取	242
11.3.3	多级逆流萃取	244
11.3.4	原溶剂与萃取剂完全不互溶时萃取理论级的计算	251

11.3.5 回流萃取	256
11.4 连续微分式逆流萃取及其计算	259
11.4.1 连续逆流萃取过程	259
11.5 液-液萃取设备	261
11.5.1 萃取设备的分类	261
11.5.2 无搅拌的萃取塔	262
11.5.3 具有搅拌装置的萃取设备	263
11.5.4 脉冲式萃取塔	266
11.5.5 离心式萃取器	267
11.5.6 萃取装置的选型	268
11.6 萃取过程的动力学特性	269
11.6.1 萃取过程的流体力学特性	270
11.6.2 传质模型和传质系数	274
11.6.3 轴向混合及其影响	276
11.7 萃取设备计算示例	278
11.7.1 筛板萃取塔计算	278
习 题	283
主要符号说明	285
主要参考读物	286
12 物料的干燥	
12.1 概述	287
12.1.1 物料的干燥	287
12.1.2 气体的增、减湿	288
12.1.3 热、质同时传质过程	289
12.2 汽-液平衡和湿气体的性质	290
12.2.1 气体的湿度及其表示方法	290
12.2.2 气体的绝热饱和温度	293
12.2.3 湿球温度	294
12.2.4 刘易斯关系和热质比	295
12.2.5 湿度图	298
12.3 湿度图的应用	303
12.3.1 空气的增湿冷却	303
12.3.2 湿空气的减湿	304
12.3.3 不同温度、湿度的气流的混合	305
12.3.4 湿球温度和绝热饱和温度的区别	306
12.4 物料干燥过程的相平衡	307
12.4.1 物料中湿分含量的表示方法	307
12.4.2 物料的平衡湿含量	307
12.4.3 结合水分和非结合水分	308
12.5 干燥过程的物料衡算和热量衡算	310
12.5.1 干燥过程的物料衡算和热量衡算	310
12.5.2 干燥过程在湿度图上的表示	314

12.5.3	干燥过程的热效率	317
12.6	干燥速率和干燥时间	318
12.6.1	干燥速率曲线	318
12.6.2	恒干燥条件下的干燥时间的计算	322
12.6.3	变干燥条件下的干燥速度	328
12.7	常用干燥器型式及其选用	334
12.7.1	厢式干燥器与洞道式干燥器	334
12.7.2	回转圆筒干燥器	335
12.7.3	气流干燥器	337
12.7.4	沸腾干燥器	340
12.7.5	喷雾干燥器	343
12.7.6	其他干燥器	346
12.7.7	干燥器的选型	348
12.8	气体的增、减湿操作	350
12.8.1	气体增、减湿常用装置	350
12.8.2	气液间热、质传递机理	352
12.8.3	气-液直接接触的热量、质量传递基本方程式	354
12.8.4	以焓差为推动力的近似计算法	355
12.8.5	空气的绝热增湿	359
12.8.6	热、质传递系数	361
12.8.7	气体主流温度与湿度的关系	362
习 题	363
主要符号说明	365
主要参考读物	367

第三篇
质量传递



7

质量传递

在化学加工中,常常涉及不同物质之间进行混合和分离的质量传递过程。不同物质相混时,经充分搅拌并经历足够长的时间,容易做到均匀混合。对于混合物的分离,则需要对其做功或消耗能量。质量传递篇的主要议题便是研究混合物分离过程中的传质问题。

混合物中一类是非均相的,如含尘气体、悬浮液、乳浊液、泥浆等,这类物系常用机械方法分离,如过滤、离心分离、沉降、旋风或旋液分离、电除尘等,质量传递篇不讨论这类物系的分离。

另一类混合物是均相的,如气体混合物、液体混合物、含有溶质或水分的固体混合物等,这类混合物的分离是质量传递篇的主要议题。针对这类物系可有多种分离方法。一种是加入被称为分离剂的物质的方法,所加入的分离剂要求与被分离的物系不相溶或组成不同的相,分离剂对被分离物系的组分有不同的溶解度,分离剂的加入造成了相与相之间组分的平衡浓度差,因而发生物质在相与相之间的传递。相际的物质传递以相际的平衡作为传质能否进行的判据。简言之,这一类是靠加入分离剂并以相际平衡为准则的分离方法,如吸收、萃取都属于这一类。另一种分离方法是靠加入能量以产生新相的方法,加入的能量也可称是一种以能量形式来表示的分离剂,例如在液体混合物中加入热能,使其发生部分气化,因气相组成有别于液相组成,从而使组分获得部分分离,这种分离方法仍然遵循气、液间的相际平衡关系。简言之,这一类是靠加入能量分离剂并以相际平衡为准则的分离方法,如蒸馏是这类方法的典型。再一类是在被分离的物系上施加一种能对组分产生分离作用的场,如浓度场、压力场、温度场、电场等。组成混合物的各组分,在有关场的作用下具有不同的运动速度,从而使混合物得到分离,其过程受在场作用下的组分的运动速率控制,因其有别于上述的受相平衡控制的分离方法,特别称它为受速率控制的分离方法,如膜分离、超滤、热扩散、反渗透、电渗析,电泳等都属于这一类。

通过任一种分离方法使混合物获得分离的程度,用分离因子 α_i 来衡量。一个混合物经分离后将获得两个产物,第一个是从混合物中分离出的产物,以角标 1 表示;另一个是经分离出第一产物后留下的混合物,以角标 2 表示。如以 i 和 j 分别代表产物中的 i 组分和 j 组分,以 x 表示组分的摩尔分率,则

$$\alpha'_{ij} = \frac{x_{i1}/x_{j1}}{x_{i2}/x_{j2}} \quad (7.0-1)$$

式 7.0-1 表示了第一产物中组分 i 和 j 的摩尔分率之比对于第二产物中组分 i 和 j 的摩尔分率之比的比值。如果以质量分率 a 代替摩尔分率 x ，分离因子的数值不会改变。一个分离过程能够获得的分离程度，视分离因子的值是否偏离 1 和偏离 1 有多远来判别。如果 $\alpha'_{ij} = 1$ ，表示两个产物的组成比相同，没有分离作用；如 $\alpha'_{ij} > 1$ ，表示第一产物中组分 i 得到了富集；如 $\alpha'_{ij} < 1$ ，表示组分 j 在第一产物中得到了富集。

上述分离因子 α'_{ij} 中，包括了分离过程中多种因素影响的结果，其中包括相平衡组成的差别，或物系所固有的传递速率的差别。例如在热扩散分离技术中的热扩散系数的差别，其中也包括了分离设备的结构特点和设备内流体流向安排的影响。为了便于对物系的分离性能作比较，现定义一种固有的分离因子，以 α_{ij} 表示。在固有的分离因子内，对于由相平衡所控制的分离过程，只决定于相平衡关系，对于由速率所控制的分离过程，只决定于确定速率大小的一些物性常数，而把设备结构的影响和设备内流体流向的影响除外。例如，对于服从拉乌尔定律和道尔顿分压定律的理想溶液的汽-液平衡系统，固有的分离因子 α_{ij} 等于组分 i 和 j 在同温下的蒸气压 P° 之比，即 $\alpha_{ij} = P^{\circ}_i/P^{\circ}_j$ 。

在各种形式的分离方法中，以浓度差作为传质推动力的分离方法用得最为普遍。在这些方法中，被分离的组分在浓度梯度的作用下，以分子扩散和湍流扩散的方式，在一个相内和相与相之间进行传递。因为这种传递借助于扩散，所以又称为扩散过程。

扩散传质过程可以在气相、液相和固相中进行，也可在两相之间进行。可以采用加入一种分离剂的方法，也可采用加入能量的方法，或两者兼而有之。现将生产上最常用、或最经典的扩散传质过程作简介如下。

一、加入分离剂实行分离的方法

吸收 —— 这是指混合气体中可溶组分由气相传递到液相分离剂中的过程，溶质气体在分离剂（又称溶剂）中的溶解平衡是吸收过程的极限。吸收的逆过程是脱吸。

液-液萃取 —— 简称为萃取。这是在混合液体中加入另一不相溶的液相分离剂，使组分在两液相中重新分配进行传质的过程，溶质在两液相中的平衡分配是萃取过程进行的极限。萃取的逆过程也是萃取，或称反萃取。

固-液萃取 —— 简称浸渍或浸取。这是在固体混合物中加入一液体分离剂，使可溶组分溶解于液相的过程，液-固平衡是过程进行的极限。

吸附 —— 这是气体或液体混合物与作为分离剂的固体吸附剂相接触，使气体或液体吸附质吸附于吸附剂上的过程，吸附平衡是过程进行的极限。

二、加入能量实行分离的方法

精馏 —— 这是在液体混合物中加入热能，使液体部分气化，气体和液体组成间存在的差别，就表示分离的程度，气-液间建立平衡是精馏分离的极限。

结晶 —— 这是在溶液中加入热量，使液体溶剂气化，溶质达到饱和而析出晶体的过程，也可采用使溶液降低温度析出晶体的方法。

有一些过程既有加入或取出能量，又伴有分离剂的存在，如：

干燥 —— 使湿物料与惰性气流相接触，气流起分离剂的作用，它既作为提供热量的媒介，又起带走水分的作用。干燥过程的极限是物料中水的蒸汽压与空气中的水汽分压呈平衡，且温度相等。

凉水塔和气体的增、减湿 —— 工厂的循环热水经与不饱和的冷空气接触,水向空气汽化,同时自水中吸取汽化热量,并使水降温,空气起载热和载湿的双重作用,在过程中空气得到了增湿。当空气与冷水相接触,空气将热量传给水,自身得到冷却,到达饱和温度后,就发生空气中水蒸气的冷凝减湿过程。

以上这些典型的单元操作中,传质过程有的发生在气、液相之间,有的在液、液相之间,有的在液、固相之间,也有的在气、固相之间。有些过程的发生单纯地由于传质,有些过程则伴有传热。从质量传递来考察,这些过程得以进行的推动力是组分的浓度差。以吸收为例,溶质先以气相主体与气-液界面间存在的浓度差为推动力,从气相向气-液界面传质,继而穿过界面,再以气-液界面与液相主体间组分的液相浓度差为推动力,由界面向液相主体传质。这一过程与换热器中两流体通过间壁的传热颇为类似,在分析和处理这两类问题时,也常采用类似的方法。但传质比传热要复杂些,首先在于过程最终的平衡状态的衡量,参与传热的两流体间,最终的热平衡是温度相等,但相间传质最终的相际平衡却一般不是两相的浓度数值相等。因此,为了研究两相间的传质,表达其推动力,必须了解两相间的平衡关系。其次,衡量传热的推动力和平衡时温度的单位颇为单纯,而衡量传质推动力和平衡时浓度或组成的常用单位却多种多样。

7.1 分子传质与对流传质

质量传递有两种不同的方式。一种是在静止介质中或呈层流运动的流体中,以传质组分的浓度梯度作为推动力,靠分子的运动所发生的传质,称为分子传质或分子扩散;另一种是随同流体作整体运动(区别于流体的分子运动)时所发生的传质,称为对流传质。分子传质和对流传质与热量传递中的导热和对流传热相似。在流体中两种不同的传质方式往往同时存在,根据不同的具体情况,所占的比重会有所不同。

7.1.1 分子传质

分子传质(扩散)是指在单相介质中,不存在如机械原因和对流的情况下,物质的净的传递。压差、温差、外加力场和浓度差的作用,都可发生扩散。此处,只讨论在浓度差作用下的扩散。

与在气相、液相、固相中发生导热一样,分子扩散也可在气相、液相及固相中发生。例如,用碱性溶液处理含有二氧化硫的烟气时,组分二氧化硫会通过混合气体层向液相扩散。在固-液萃取过程中,固体中的可溶性物质首先在固体表面处溶解,然后向溶液中扩散;又如,木材在干燥过程中,水分先由固体内部扩散到表面,然后在表面上汽化并向周围介质扩散。

对于气体混合物,可用气体分子运动论来说明分子扩散过程。在给定温度下,气体分子都具有一定的平均能量,并处于不停的运动状态。运动中,气体分子相互碰撞,发生能量和动量交换,形成无规则运动,使分子向各个方向运动的机率相等。 A 分子在周围存在 B 分子的情况下作随机运动,并且 A 分子向各个方向运动的概率相等。如果混合物中各处 A 的浓度均匀,则某一数目的 A 分子沿着一定方向运动,必然有相同数目的 A 分子沿着相反方向运动,其结果并未发生传质作用。如果气体混合物存在着浓度梯度,则由于分子运动的结果,高浓区的 A 分子向低浓区扩散,即产生 A 分子净的流动,从而发生传质作用,直到气体混合物达到组成均匀为止。

对于双组分混合物中的分子扩散,可用费克定律(Fick's law)来描述。该定律表示了:在定温、定压条件下,在 A 、 B 双组分扩散体系中,组分 A 沿 Z 方向的扩散通量为

$$J_{A,z} = -D_{AB}(dC_A/dz) \quad (7.1-1)$$

式中: $J_{A,z}$ 为在 z 方向上组分 A 的摩尔扩散通量, 即单位时间内, 组分 A 通过与其浓度梯度相垂直的单位面积上的摩尔数, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; C_A 为组分 A 的摩尔浓度, kmol/m^3 ; z 为扩散方向上的距离, m ; D_{AB} 为组分 A 在组分 B 中的扩散系数, m^2/s , D_{AB} 值不因浓度 C_A 的单位而异。

式 7.1-1 表示出在总浓度 C 不变的情况下, 由于 A 的浓度梯度 dC_A/dz 所引起的分子传质通量。负号表示扩散方向与浓度梯度方向相反, 即分子扩散朝着浓度降低的方向进行。若扩散的同时还存在着物流的总体流动, 则物质传递的通量中除扩散通量外, 还要考虑由总体流动所提供的通量。

一、扩散速度与平均速度

在多组分系统中, 在分子扩散的同时, 各组分可能还存在着宏观运动, 并且各组分运动的速度大小和方向可能是不同的, 这就形成了各组分间的相对运动。为了分析此种现象, 可考察垂直于扩散方向上的一个给定平面, 观察者会看到各组分以不同的宏观运动速度通过此平面, 有的快, 有的慢, 有同向的, 也有反向的。因此, 计算多组分混合物中某一组分相对于此混合物的运动速度时, 须要先考察多组分系统的平均速度。

1. 多组分混合物的质量平均速度, 由下式定义:

$$v = \left(\sum_{i=1}^n \rho_i v_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n \rho_i \right) = \left(\sum_{i=1}^n \rho_i v_i \right) / \rho$$

式中: v_i 为组分 i 对于给定坐标轴的绝对速度, m/s ; ρ_i 为组分 i 的质量浓度, kg/m^3 ; ρ 为混合物的质量浓度, 即密度, kg/m^3 。

现考察由组分 A 和 B 所组成的双组分混合物, 设组分 A 和组分 B 通过静止平面的运动速度分别为 v_A 和 v_B , m/s , 则相应的质量通量为 $\rho_A v_A$ 和 $\rho_B v_B$, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 于是通过静止平面的总质量通量为 $(\rho_A v_A + \rho_B v_B)$ 。又由于混合物的总密度为 $\rho = \rho_A + \rho_B$, 设混合物以平均速度 v (m/s) 通过此静止平面, 其总质量通量应为 ρv , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。则

$$\begin{aligned} \rho v &= \rho_A v_A + \rho_B v_B \quad \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \\ v &= (1/\rho)(\rho_A v_A + \rho_B v_B) \quad \text{m/s} \end{aligned} \quad (7.1-2)$$

式中: v , v_A 和 v_B 皆为矢量。 v 即为上述双组分混合物的质量平均速度。

2. 多组分混合物的摩尔平均速度, 由下式定义:

$$v_M = \left(\sum_{i=1}^n C_i v_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n C_i \right) = \left(\sum_{i=1}^n C_i v_i \right) / C$$

式中: C_i 为组分 i 的摩尔浓度, kmol/m^3 ; C 为混合物的摩尔浓度, kmol/m^3 。

现仍以双组分混合物为例, 说明通过上述静止平面的摩尔通量表达式。设组分 A , B 通过静止平面的速度仍为 v_A , v_B , m/s , 其摩尔浓度为 C_A , C_B , kmol/m^3 , 则组分 A , B 通过静止平面的摩尔通量分别为 $C_A v_A$ 和 $C_B v_B$, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 总摩尔通量为 $(C_A v_A + C_B v_B)$ 。由于混合物的总浓度为 $C = C_A + C_B$, 又设混合物以平均速度 v_M (m/s) 通过此静止平面, 则通过静止平面的总摩尔通量应为 $C v_M$, 故得:

$$\begin{aligned} C v_M &= C_A v_A + C_B v_B \quad \text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \\ \text{或} \quad v_M &= (1/C)(C_A v_A + C_B v_B) \end{aligned} \quad (7.1-3)$$

式中: v_M 即为此双组分混合物的摩尔平均速度, m/s 。

在式 7.1-2 和 7.1-3 中, v_A 和 v_B 为组分 A 和 B 相对于静止坐标的速度, v 为混合物相对于静止坐标的质量平均速度, 此速度可用毕托管实际测量而得, v_M 为混合物相对于静止坐标的摩

尔平均速度。由于 v 和 v_M 是以不同通量基准来定义的,故两者在数值上并不相等,切勿混用。

3. 扩散速度

一个组分在混合物中的扩散是指该组分对于混合物的相对运动,组分 i 的扩散速度应是该组分对于混合物的质量平均速度或摩尔平均速度的相对速度。即

$(v_i - v)$ —— 组分 i 相对于质量平均速度 v 的扩散速度;

$(v_i - v_M)$ —— 组分 i 相对于摩尔平均速度 v_M 的扩散速度。

只有组分 i 在混合物中存在浓度梯度时,才可能产生扩散速度。

二、扩散通量与主体流动通量

已知费克定律表达式为

$$J_{A,z} = -D_{AB}(dC_A/dz) \quad (7.1-1)$$

式中的 $J_{A,z}$ 表示在总浓度 c 保持恒定的双组分混合物中,组分 A 在 z 方向上以扩散速度 $(v_A - v_M)$ 进行分子扩散时的摩尔通量, $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

式 7.1-1 的费克定律表达式也可用质量通量来表示,其形式为

$$j_{A,z} = -D_{AB}(d\rho_A/dz) \quad (7.1-4)$$

式中的 $j_{A,z}$ 为组分 A 在 z 方向上以扩散速度 $(v_A - v)$ 进行分子扩散时的质量通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $d\rho_A/dz$ 为质量浓度梯度。

对于不受等温、等压条件限制的更为一般的情况,式 7.1-1 和式 7.1-4 可改写为

$$J_{A,z} = -CD_{AB}(dx_A/dz) \quad (7.1-5)$$

$$j_{A,z} = -\rho D_{AB}(da_A/dz) \quad (7.1-6)$$

式中: C 为混合物总摩尔浓度, kmol/m^3 ; x_A 为组分 A 的摩尔分率,对气体混合物采用 y_A 表示 A 的摩尔分率; ρ 为混合物的总密度, kg/m^3 ; a_A 为组分 A 的质量分率。

在双组分混合物中,如扩散方向上的质量平均速度 v 或摩尔平均速度 v_M 恒定,组分 A 的扩散通量亦可采用浓度与相应扩散速度的乘积来表示。

摩尔扩散通量可表示为

$$J_{A,z} = C_A(v_{A,z} - v_{M,z}) \quad (7.1-7)$$

质量扩散通量可表示为

$$j_A = \rho_A(v_{A,z} - v_z) \quad (7.1-8)$$

由式 7.1-7 和 7.1-5 可得

$$J_{A,z} = C_A(v_{A,z} - v_{M,z}) = -CD_{AB}(dx_A/dz)$$

或写成

$$C_A v_{A,z} = -CD_{AB}(dx_A/dz) + C_A v_{M,z}$$

将式 7.1-3 两侧乘以 C_A 得

$$\begin{aligned} C_A v_{M,z} &= (C_A/C)(C_A v_{A,z} + C_B v_{B,z}) \\ &= x_A(C_A v_{A,z} + C_B v_{B,z}) \end{aligned}$$

由以上两式可得

$$C_A v_{A,z} = -CD_{AB}(dx_A/dz) + x_A(C_A v_{A,z} + C_B v_{B,z}) \quad (7.1-9)$$

由扩散速度的含义可知, $J_{A,z}$ 和 $j_{A,z}$ 是以摩尔平均速度 $v_{M,z}$ 或质量平均速度 v_z 为基准的扩散通量。但工程实际中,常常需应用相对于静止坐标的通量。例如流体通过容器时,在壁面上进行传质时,就应以器壁为基准来考虑传质通量,而不能以流体流动速度为基准来考虑通量。由于 $v_{A,z}$ 和 $v_{B,z}$ 为组分 A, B 相对于静止坐标的速度,故相对于静止坐标的摩尔通量 $N_{A,z}$ 和 $N_{B,z}$ 应定义为

$$N_{A,z} = C_A v_{A,z} \quad (7.1-10)$$