

高等学校試用教科書

化工过程及設備

下 册

华东化工学院等編



中国工业出版社

下册目录

第三篇 傳质(扩散)过程

章 傳质过程导論385

一 节 基本概念385

1 均相物系分离方法的分类385

2 均相物系分离方法的选择386

二 节 扩散原理387

3 流体中的分子扩散387

4 气相中的稳定分子扩散388

5 液相中的稳定分子扩散389

6 扩散系数390

7 对流扩散393

8 扩散相似395

三 节 相际物质傳遞396

9 相组成的表示方法396

10 相际平衡397

11 傳质方程式399

章 气体的吸收402

一 节 基本概念402

1 气体吸收的基本概念402

二 节 气体在液体中的平衡溶解度402

2 气体在液体中的平衡溶解度402

三 节 吸收过程的机理403

3 吸收过程的机理403

四 节 吸收速率方程式405

4 吸收速率方程式405

五 节 填料吸收塔的计算411

5 填料411

6 物料衡算413

7 吸收剂的单位耗用量414

8 填料塔的直径415

9 填料层的高度417

10 填料塔的流体阻力426

六 节 傳质理論的进展428

11 双膜理論的局限性428

12 溶质渗透理論430

13 表面更新理論430

14 滞流边界层理論431

10-15 界面动力状态理論431

第七节 吸收系数的数据433

10-16 吸收系数的数据433

第八节 吸收剂蒸气压的影响435

10-17 吸收剂蒸气压的影响435

第九节 不等温吸收435

10-18 不等温吸收435

第十节 有化学反应的吸收435

10-19 有化学反应的吸收435

第十一节 泡罩塔板数的确定436

10-20 泡罩吸收塔板数的确定436

第十二节 脱吸(提餾)437

10-21 脱吸(提餾)过程437

第十三节 吸收设备的分类与构造438

10-22 吸收设备的分类438

10-23 具有固定相界面的吸收设备439

10-24 在气液两相流动过程中形成相界面的吸收设备441

10-25 具有外部能量引入的吸收设备451

10-26 各式吸收设备的比較453

第十四节 吸收设备流程455

10-27 吸收设备流程455

第十一章 液体的蒸餾459

第一节 基本概念459

11-1 组分完全互溶液体混合物的相平衡459

11-2 挥发度与相对挥发度464

第二节 精餾465

11-3 精餾原理465

11-4 間歇精餾与連續精餾流程467

第三节 双组分混合液精餾塔操作的分析468

11-5 基本假設468

11-6 精餾段操作綫方程式469

11-7 提餾段操作綫方程式470

11-8 进料情况对操作綫的影响470

11-9 操作綫的作法与应用471

第四节 分离双组分混合液的連續精餾塔的计算	473
11-10 理論塔板数、塔板效率及实际塔板数	473
11-11 回流比、塔板数与加热蒸汽消耗量之間的关系	477
11-12 連續精餾塔的热量衡算	479
11-13 用热图計算精餾塔	481
第五节 間歇蒸餾	483
11-14 簡單蒸餾的原理及其計算	483
11-15 間歇精餾的計算	485
第六节 特殊方法蒸餾	487
11-16 蒸汽蒸餾	488
11-17 萃取蒸餾与恒沸蒸餾	490
11-18 分子蒸餾	491
第七节 多組分混合液的精餾	492
11-19 多組份混合液的精餾的基本概念	492
11-20 多組份系統精餾的計算	493
第八节 蒸餾与精餾设备及其計算	497
11-21 蒸餾釜	498
11-22 泡罩塔	498
第十二章 溶剂萃取	507
12-1 概述	507
甲 液-液萃取	507
第一节 液-液萃取操作的基本原理	507
12-2 相平衡	508
12-3 萃取过程在三元相图上的表达	510
12-4 萃取剂的选择	511
12-5 萃取操作流程簡述	512
第二节 液-液萃取设备及其計算	514
12-6 基本概念	514
12-7 设备的分类	514
12-8 液-液萃取设备簡介	517
12-9 萃取设备的計算	520
12-10 塔式萃取设备的計算	525
乙 固-液萃取	528
第三节 固-液萃取设备及其計算	528
12-11 固-液萃取设备与操作	528
12-12 固-液萃取设备的計算	531
12-13 固-液萃取的三元相图計算法	535
第十三章 吸附及离子交换	539
甲 吸附	539
第一节 吸附的基本概念	539
13-1 总說	539
第二节 吸附理論	540
13-2 两相間的平衡关系	540
13-3 吸附速率	542
13-4 吸附剂的脫吸	543
第三节 吸附设备及流程	543
13-5 接触式吸附器	543
13-6 固定填充床吸附器	544
13-7 流动填充床吸附器(超吸附)	546
乙 离子交换	547
第四节 离子交换的基本概念	547
13-8 总說	547
13-9 离子交换树脂的种类	548
第五节 离子交换理論	549
13-10 离子交换的平衡关系	549
13-11 离子交换速率	551
第十四章 固体的干燥(附气体的增湿与减湿)	553
第一节 概論	553
14-1 去湿方法和干燥方式	553
14-2 干燥过程的靜力学和动力学	553
第二节 水蒸汽-空气混合物的性质及 $I-x$ 图	554
14-3 水蒸汽-空气混合物的性质	554
14-4 空气湿含量或湿度的測定	557
14-5 湿空气的 $I-x$ 图	557
14-6 $I-x$ 图的用法	561
第三节 干燥靜力学	562
14-7 空气干燥器的操作原理	562
14-8 空气干燥器的物料衡算	562
14-9 空气干燥器的热量衡算	563
14-10 干燥过程的分析	566
14-11 理論干燥过程与实际干燥过程的图解法	567
14-12 空气干燥器的其他操作方式	569
第四节 干燥动力学	571
14-13 物料中所含水份的性质	571
14-14 結合水份与非結合水份	572
14-15 固体物料干燥的机理	572
14-16 干燥速度	573
14-17 影响干燥速度的因素	574
14-18 干燥曲綫和干燥速度曲綫	575
14-19 干燥速度曲綫的分析	576
14-20 干燥介质湿含量不变时干燥速度的計算	580
第五节 干燥设备	584
14-21 干燥器的分类	584
14-22 箱式干燥器	586
14-23 間歇式或压干燥器	586
14-24 洞道式干燥器	588

14-25 多带式干燥器.....	589	15-1 流体速度变化时床层的三个阶段	616
14-26 回转式干燥器.....	591	15-2 狭义流态化与广义流态化	619
14-27 常压滚筒式干燥器.....	593	第二节 流化床的流体力学	619
14-28 圆筒式干燥器.....	595	15-3 流体阻力	619
14-29 气流式干燥器.....	595	15-4 流体的临界速度	620
14-30 喷雾式干燥器.....	596	15-5 床层的空隙度与速度的关系	621
14-31 干燥器的比较与选择.....	597	15-6 流体的最大速度	622
14-32 某些新的干燥方法.....	598	15-7 流化床的均匀性	622
第六节 干燥器的计算	601	15-8 床内固体颗粒及流体的运动	623
14-33 干燥器的计算的一般方法.....	601	第三节 流化床中的传热	624
14-34 以传热系数进行计算.....	601	15-9 流化床中的传热	624
14-35 以传热系数进行计算.....	605	15-10 流化床与器壁之间的热交换.....	625
14-36 以传递单元数及传递单元高度进行计算.....	607	15-11 流体与流态化固体粒子之间的热交换.....	625
14-37 以干燥强度进行计算.....	608	第四节 流化床中的传质	626
附: 气体的增湿与减湿	610	15-12 流化床中的传质.....	626
第七节 增湿与减湿理论	610	第五节 流化床的结构	627
14-38 增湿与减湿过程中的物质传递.....	610	15-13 流化床壳体.....	627
14-39 增湿和减湿过程的机理.....	610	15-14 床内的分布板.....	628
第八节 增湿器与减湿器	612	15-15 加料器与卸料器.....	628
14-40 增湿器.....	612	15-16 多层流化床.....	628
14-41 减湿器.....	613	第六节 固体流态化技术的优缺点及其在工业上的应用	630
14-42 凉水塔.....	613	15-17 固体流态化技术的优缺点.....	630
第十五章 固体流态化技术	616	15-18 固体流态化技术在工业上的应用.....	630
第一节 流态化过程的基本概念	616		

第四篇 冷冻过程

第十六章 冷冻	633	16-14 用冷冻机加热	649
第一节 基本概念	633	第十七章 深度冷冻	651
16-1 冷冻操作的物理基础	633	第一节 深度冷冻的物理基础	651
16-2 冷冻系数	634	17-1 获得深度冷冻的方法	651
第二节 冷冻机与冷冻剂	635	17-2 节流膨胀	653
16-3 冷冻机的分类	635	17-3 蒸发温度	656
16-4 冷冻能力	638	17-4 积分节流效应	657
16-5 冷冻剂	639	17-5 作外功的绝热膨胀	657
16-6 载冷体	640	17-6 热力学图表	658
第三节 压缩蒸气冷冻机	640	17-7 循环的冷冻能力	659
16-7 理想压缩蒸气冷冻机	640	17-8 气体液化的最小功和实际功	661
16-8 实际压缩蒸气冷冻机	640	第二节 深度冷冻循环	662
16-9 温焓图 ($T-S$ 图) 和压焓图 ($P-I$ 图).....	643	17-9 简单林德循环	662
16-10 冷冻操作所需功率.....	644	17-10 中压林德循环.....	665
16-11 双级或多级压缩冷冻机.....	646	17-11 氨预冷的林德循环.....	667
16-12 压缩冷冻机的组成部分.....	647	17-12 克劳德循环.....	670
第四节 利用冷冻方法的气体液化及其他	649	17-13 海兰德循环.....	672
16-13 气体的液化.....	649	17-14 卡皮查循环.....	673
		17-15 各种深度冷冻循环的比较.....	673

第三节 气体混合物的分离方法	674
17-16 部分冷凝	674
17-17 精馏	675

第四节 深度冷冻装置的组成部分	676
17-18 压缩机和膨胀机	676
17-19 热交换器和蓄热器	677

第五篇 机械操作

第十八章 固体的粉碎、筛析与加料法 ...679

第一节 粉碎的原理与方法	679
18-1 基本概念	679
18-2 粉碎的方法	680
18-3 动能消耗量	680
18-4 粉碎规程	683
第二节 粉碎设备	684
18-5 粉碎机的分类	684
18-6 颚式压碎机	684
18-7 锥形轧碎机	686
18-8 滚碎机(滚筒轧碎机)	687
18-9 离心锤击式粉碎机	690
18-10 盘磨	690
18-11 球磨与棒磨	692
18-12 环滚研磨机	694

18-13 胶体磨	695
18-14 粉碎流程	695
第三节 筛析	697
18-15 筛与筛析	697
18-16 筛析后平均颗粒大小的计算	699
18-17 筛的构造	700
第四节 固体的加料法	702
18-18 加料器	702

附录

1. 某些二元物系在 $p=1$ [绝对大气压] 时的 气—液平衡组成	706
2. 弦栅填料特性(木质板条)	706
3. 冷冻剂的物理性质	707
4. 冷冻盐水氯化钙和氯化钠的物理性质	708
5. 范德华方程式中常数 a 和 b 之值	708

下册目录

第三篇 傳质(扩散)过程

章 傳质过程导論385

一 节 基本概念385

1 均相物系分离方法的分类385

2 均相物系分离方法的选择386

二 节 扩散原理387

3 流体中的分子扩散387

4 气相中的稳定分子扩散388

5 液相中的稳定分子扩散389

6 扩散系数390

7 对流扩散393

8 扩散相似395

三 节 相际物质傳遞396

9 相组成的表示方法396

10 相际平衡397

11 傳质方程式399

章 气体的吸收402

一 节 基本概念402

1 气体吸收的基本概念402

二 节 气体在液体中的平衡溶解度402

2 气体在液体中的平衡溶解度402

三 节 吸收过程的机理403

3 吸收过程的机理403

四 节 吸收速率方程式405

4 吸收速率方程式405

五 节 填料吸收塔的计算411

5 填料411

6 物料衡算413

7 吸收剂的单位耗用量414

8 填料塔的直径415

9 填料层的高度417

10 填料塔的流体阻力426

六 节 傳质理論的进展428

11 双膜理論的局限性428

12 溶质渗透理論430

13 表面更新理論430

14 滞流边界层理論431

10-15 界面动力状态理論431

第七节 吸收系数的数据433

10-16 吸收系数的数据433

第八节 吸收剂蒸气压的影响435

10-17 吸收剂蒸气压的影响435

第九节 不等温吸收435

10-18 不等温吸收435

第十节 有化学反应的吸收435

10-19 有化学反应的吸收435

第十一节 泡罩塔塔板数的确定436

10-20 泡罩吸收塔塔板数的确定436

第十二节 脱吸(提餾)437

10-21 脱吸(提餾)过程437

第十三节 吸收设备的分类与构造438

10-22 吸收设备的分类438

10-23 具有固定相界面的吸收设备439

10-24 在气液两相流动过程中形成相界面的吸收设备441

10-25 具有外部能量引入的吸收设备451

10-26 各式吸收设备的比較453

第十四节 吸收设备流程455

10-27 吸收设备流程455

第十一章 液体的蒸餾459

第一节 基本概念459

11-1 组分完全互溶液体混合物的相平衡459

11-2 挥发度与相对挥发度464

第二节 精餾465

11-3 精餾原理465

11-4 間歇精餾与連續精餾流程467

第三节 双组分混合液精餾塔操作的分析468

11-5 基本假設468

11-6 精餾段操作綫方程式469

11-7 提餾段操作綫方程式470

11-8 进料情况对操作綫的影响470

11-9 操作綫的作法与应用471

第四节 分离双组分混合液的連續精餾塔的计算	473
11-10 理論塔板数、塔板效率及实际塔板数	473
11-11 回流比、塔板数与加热蒸汽消耗量之間的关系	477
11-12 連續精餾塔的热量衡算	479
11-13 用热图計算精餾塔	481
第五节 間歇蒸餾	483
11-14 簡單蒸餾的原理及其計算	483
11-15 間歇精餾的計算	485
第六节 特殊方法蒸餾	487
11-16 蒸汽蒸餾	488
11-17 萃取蒸餾与恒沸蒸餾	490
11-18 分子蒸餾	491
第七节 多組分混合液的精餾	492
11-19 多組份混合液的精餾的基本概念	492
11-20 多組份系統精餾的計算	493
第八节 蒸餾与精餾设备及其計算	497
11-21 蒸餾釜	498
11-22 泡罩塔	498
第十二章 溶剂萃取	507
12-1 概述	507
甲 液-液萃取	507
第一节 液-液萃取操作的基本原理	507
12-2 相平衡	508
12-3 萃取过程在三元相图上的表达	510
12-4 萃取剂的选择	511
12-5 萃取操作流程簡述	512
第二节 液-液萃取设备及其計算	514
12-6 基本概念	514
12-7 设备的分类	514
12-8 液-液萃取设备簡介	517
12-9 萃取设备的計算	520
12-10 塔式萃取设备的計算	525
乙 固-液萃取	528
第三节 固-液萃取设备及其計算	528
12-11 固-液萃取设备与操作	528
12-12 固-液萃取设备的計算	531
12-13 固-液萃取的三元相图計算法	535
第十三章 吸附及离子交换	539
甲 吸附	539
第一节 吸附的基本概念	539
13-1 总說	539
第二节 吸附理論	540
13-2 两相間的平衡关系	540
13-3 吸附速率	542
13-4 吸附剂的脫吸	543
第三节 吸附设备及流程	543
13-5 接触式吸附器	543
13-6 固定填充床吸附器	544
13-7 流动填充床吸附器(超吸附)	546
乙 离子交换	547
第四节 离子交换的基本概念	547
13-8 总說	547
13-9 离子交换树脂的种类	548
第五节 离子交换理論	549
13-10 离子交换的平衡关系	549
13-11 离子交换速率	551
第十四章 固体的干燥(附气体的增湿与减湿)	553
第一节 概論	553
14-1 去湿方法和干燥方式	553
14-2 干燥过程的靜力学和动力学	553
第二节 水蒸汽-空气混合物的性质及 $I-x$ 图	554
14-3 水蒸汽-空气混合物的性质	554
14-4 空气湿含量或湿度的測定	557
14-5 湿空气的 $I-x$ 图	557
14-6 $I-x$ 图的用法	561
第三节 干燥靜力学	562
14-7 空气干燥器的操作原理	562
14-8 空气干燥器的物料衡算	562
14-9 空气干燥器的热量衡算	563
14-10 干燥过程的分析	566
14-11 理論干燥过程与实际干燥过程的图解法	567
14-12 空气干燥器的其他操作方式	569
第四节 干燥动力学	571
14-13 物料中所含水份的性质	571
14-14 結合水份与非結合水份	572
14-15 固体物料干燥的机理	572
14-16 干燥速度	573
14-17 影响干燥速度的因素	574
14-18 干燥曲綫和干燥速度曲綫	575
14-19 干燥速度曲綫的分析	576
14-20 干燥介质湿含量不变时干燥速度的計算	580
第五节 干燥设备	584
14-21 干燥器的分类	584
14-22 厢式干燥器	586
14-23 間歇式或压干燥器	586
14-24 洞道式干燥器	588

14-25 多带式干燥器.....	589	15-1 流体速度变化时床层的三个阶段	616
14-26 回转式干燥器.....	591	15-2 狭义流态化与广义流态化	619
14-27 常压滚筒式干燥器.....	593	第二节 流化床的流体力学	619
14-28 圆筒式干燥器.....	595	15-3 流体阻力	619
14-29 气流式干燥器.....	595	15-4 流体的临界速度	620
14-30 喷雾式干燥器.....	596	15-5 床层的空隙度与速度的关系	621
14-31 干燥器的比较与选择.....	597	15-6 流体的最大速度	622
14-32 某些新的干燥方法.....	598	15-7 流化床的均匀性	622
第六节 干燥器的计算	601	15-8 床内固体颗粒及流体的运动	623
14-33 干燥器的计算的一般方法.....	601	第三节 流化床中的传热	624
14-34 以传热系数进行计算.....	601	15-9 流化床中的传热	624
14-35 以传热系数进行计算.....	605	15-10 流化床与器壁之间的热交换.....	625
14-36 以传递单元数及传递单元高度进行计算.....	607	15-11 流体与流态化固体粒子之间的热交换.....	625
14-37 以干燥强度进行计算.....	608	第四节 流化床中的传质	626
附: 气体的增湿与减湿	610	15-12 流化床中的传质.....	626
第七节 增湿与减湿理论	610	第五节 流化床的结构	627
14-38 增湿与减湿过程中的物质传递.....	610	15-13 流化床壳体.....	627
14-39 增湿和减湿过程的机理.....	610	15-14 床内的分布板.....	628
第八节 增湿器与减湿器	612	15-15 加料器与卸料器.....	628
14-40 增湿器.....	612	15-16 多层流化床.....	628
14-41 减湿器.....	613	第六节 固体流态化技术的优缺点及其在工业	
14-42 凉水塔.....	613	上的应用	630
第十五章 固体流态化技术	616	15-17 固体流态化技术的优缺点.....	630
第一节 流态化过程的基本概念	616	15-18 固体流态化技术在工业上的应用.....	630

第四篇 冷冻过程

第十六章 冷冻	633	16-14 用冷冻机加热	649
第一节 基本概念	633	第十七章 深度冷冻	651
16-1 冷冻操作的物理基础	633	第一节 深度冷冻的物理基础	651
16-2 冷冻系数	634	17-1 获得深度冷冻的方法	651
第二节 冷冻机与冷冻剂	635	17-2 节流膨胀	653
16-3 冷冻机的分类	635	17-3 蒸发温度	656
16-4 冷冻能力	638	17-4 积分节流效应	657
16-5 冷冻剂	639	17-5 作外功的绝热膨胀	657
16-6 载冷体	640	17-6 热力学图表	658
第三节 压缩蒸气冷冻机	640	17-7 循环的冷冻能力	659
16-7 理想压缩蒸气冷冻机	640	17-8 气体液化的最小功和实际功	661
16-8 实际压缩蒸气冷冻机	640	第二节 深度冷冻循环	662
16-9 温焓图 ($T-S$ 图) 和压焓图 ($P-I$ 图)	643	17-9 简单林德循环	662
16-10 冷冻操作所需功率.....	644	17-10 中压林德循环.....	665
16-11 双级或多级压缩冷冻机.....	646	17-11 氨预冷的林德循环.....	667
16-12 压缩冷冻机的组成部分.....	647	17-12 克劳德循环.....	670
第四节 利用冷冻方法的气体液化及其他	649	17-13 海兰德循环.....	672
16-13 气体的液化.....	649	17-14 卡皮查循环.....	673
		17-15 各种深度冷冻循环的比较.....	673

第三节	气体混合物的分离方法	674
17-16	部分冷凝	674
17-17	精馏	675

第四节	深度冷冻装置的組成部分	676
17-18	压缩机和膨胀机	676
17-19	热交换器和蓄热器	677

第五篇 机械操作

第十八章 固体的粉碎、筛析与加料法 679

第一节	粉碎的原理与方法	679
18-1	基本概念	679
18-2	粉碎的方法	680
18-3	动能消耗量	680
18-4	粉碎规程	683
第二节	粉碎设备	684
18-5	粉碎机的分类	684
18-6	顎式破碎机	684
18-7	錐形軋碎机	686
18-8	滾碎机(滾筒軋碎机)	687
18-9	离心錘击式粉碎机	690
18-10	盘磨	690
18-11	球磨与棒磨	691
18-12	环滾研磨机	694

18-13	胶体磨	695
18-14	粉碎流程	695
第三节	筛析	697
18-15	筛与筛析	697
18-16	筛析后平均顆粒大小的計算	699
18-17	筛的构造	700
第四节	固体的加料法	702
18-18	加料器	702

附录 706

1. 某些二元物系在 $p=1$ [绝对大气压] 时的 气—液平衡組成	706
2. 弦栅填料的特性(木质板条)	706
3. 冷冻剂的物理性质	707
4. 冷冻盐水氯化鈣和氯化鈉的物理性质	708
5. 范德华方程式中常数 a 和 b 之值	708

第三篇 傳质(扩散)过程

第九章 傳质过程导論

在化学工业生产中,經常遇到物质从一相轉移到另一相的过程,例如用水吸收气态的氯化氢制盐酸时氯化氢由气相轉移至液相(水)中,这种过程称为物质傳遞过程,簡称傳质过程,其他如液体的蒸餾、固体的干燥、溶剂萃取等等也都是傳质过程。由于物质的傳遞过程系借扩散作用从一相轉移到另一相的过程,故通常又称为扩散过程。从本书第二篇已經明确了傳热之所以发生是由于物系中所存在的温度梯度。类似地,在两相或两相以上的物系中,傳质之所以产生,是由于某一組分或几种組分的濃度梯度,就是物系中的組分有了濃梯度之后,才会引起組分向低濃度的方向迁移,而产生物质傳遞。如同傳热,許多傳质过程是在流体中进行,因此傳质速率亦如同傳热速率一样,又必須决定于流体的物理性质和流动情况等因素。必須明确,許多傳质过程中(如蒸餾)牽涉到加热和冷却,故傳质过程的速率,又必与傳热具有重要关联。这样不仅說明了流体动力过程、傳热过程和傳质过程有相似之处,同时也說明了三者之間还有內在的联系。

上述的相际傳质过程的进行,其极限都应达到相际的平衡。但相际的平衡只在两相經過极長時間的接触后才能建立。在实际操作中,相际的接触時間一般是有限的,故由一相傳遞到另一相的物质之量,乃决定于傳质过程的速度。因此,在物质傳遞过程的处理上,一般都牽涉到两个主要的問題,即(1)相际的平衡,决定物质傳遞过程进行的极限;及(2)傳遞的速率,决定在一定的相际接触時間內所能傳遞的物质之量。前者决定于其中一相的組成,温度及压力,并与处理剂(如在气体吸收的情况为吸收剂,萃取的情况为萃取剂)及組分的性质有关。后者則系視扩散系数距平衡状态的偏离程度,处理剂、組分和載体的性质,以及两相的接触方法,亦即設備的机械构造而定。为此,在处理傳质过程时,必須将相际的平衡与傳质速率两者統一起来考虑才能正确地指出强化生产的途徑。

第一节 基本概念

9-1 均相物系分离方法的分类

同一种物质,可以具有三种不同的状态:固态、液态和气态。随着外界温度和压强的变化,物质可从某一态轉变为另一态。不同的几种物质,又可組成不同的系統,均相系統和非均相系統。非均相系(例如悬浮液)的分离,是基于不同微小粒子具有不同的体积和重量的特性;而均相系的分离,是基于不同物质具有不同蒸气压、溶解度或选择性的吸着作用等特征。液体的蒸餾与固体的干燥都是利用蒸气压不同的分离操作。气体的吸收与溶剂萃取都是利用溶解度不同的分离操作。吸附和离子交換都是属于选择性吸着作用的分离过程。

均相物系的主要特征为系统中任何部分的物理性质和化学性质都相同,整个系统内部没有界面存在。均相物系可以由一种物质组成,也可以由几种物质组成。在非均相系统中包含有若干相,相与相之间有界面分开,系统中各组分的物理和化学性质并不相同。

在工业生产中,经常遇到的均相物系很多,主要的几种有如表 9-1 所列出的。

表 9-1 常见的均相物系

常见的均相物系	实际例子	分离方法举例
由两种或多种气体或蒸气所组成	如干空气,湿空气,焦炉气,天然气,蒸馏塔顶部逸出的蒸气	冷凝法中焦炉气提取氨,精馏法分离干空气中氮和氧,吸附法除去湿空气中水分,用气油吸收煤气中苯、萘
气体溶解在液体中所组成的	氨或氯化氢的水溶液,正戊烷在油中的溶液	直接通入蒸汽或间接加热脱吸
由互溶的两种或几种液体所组成的	水和酒精的混合液,苯和甲苯的混合液,煤低温干馏工厂中的污水,萃取后的萃取液以及残液等	苯和甲苯的精馏,汽油和甲苯系统的萃取蒸馏,恒沸蒸馏水和酒精混合物以制造无水酒精,用丁基醋酸酯萃取酚水,用活性炭吸附法或用阴离子交换法分离酚
固体溶解在液体中所组成的	无机盐类及水溶液	一般用蒸发和结晶的方法进行分离
气体分散在固体中所组成的 ^①	经过吸附操作后的吸附剂	用于高温度和使惰性气体吹过表面的方法进行脱吸
液体分散在固体中所组成的 ^②	潮湿的木材,粘土或其它物料,进行糖脱色操作后的活性炭等	干燥,脱吸

①, ② 严格地讲,这两类物系不是均相,由于属于传质过程,故附记在本表中。

从表 9-1 所举的分离方法中,归纳起来在化学工业中普遍应用的为下列一些传质过程:

1. 气体或蒸气的吸收或吸附;
2. 气体或蒸气从液体或固体吸收剂中的解吸;
3. 溶剂萃取(包括固-液萃取和液-液萃取);
4. 液体的蒸馏和精馏;
5. 固体的干燥;
6. 气体的增湿与减湿;
7. 离子交换。

9-2 均相物系分离方法的选择

均相物系的分离为工业生产过程中的重要环节。随着生产技术和科学研究的不断进展,分离方法也在不断地革新,可在下列几方面加以讨论:

(一)应用新的分离方法和设备 表 9-1 中所提出的分离方法仅仅反映出目前在工业中所引用的,但并不意味着没有新的途径可寻了。关于设备方面,也是这样。例如,文丘里管

原来只用于流速测量計，但近年来已用作吸收器，效果很好，在工业中已發揮一定作用。

(二)原有分离方法和设备的强化 这就是要寻求原有设备的最适宜操作条件而充分发挥其潜力。苏联和我国在这方面已作出相当努力而获得一些成功。例如苏联学者П·Е·波任在研究筛板塔的最适宜操作条件时創造了泡沫塔，特别适用于易溶解的气体。与此相似，填料塔若在气体速度足够大的情况下操作，可以大大提高生产能力，这就是乳化塔。

(三)均相物系分离方法的选择 均相物系的分离方法往往不是唯一的，如何根据具体条件选择适当的分离方法是实际工作者的一项重要任务。在进行这项选择时，应考虑下面这些问题：

(1) 系统和系统内部各物质的性质 这就是說首先应该了解所需分离的系统是那一种均一系统，系统中各物质的溶解度、沸点、浓度以及它們和某些物质的化学亲和力如何等等。

例如，对于由惰性气体和易溶气体所组成的气相均一系统，可以采用吸收的方法；对于由浓度很低又易于吸附的气体 and 惰性气体所组成的气相均一系统，可以采用吸附的方法；对于沸点高而易于分解的液相均一系统，可采用水汽蒸餾的方法；对于沸点相差很小的液相均一系统，可采用萃取方法等。

(2) 经济程度 所謂经济程度即指设备費用、操作費用，动力消耗等。对于所选择的设备，应该了解它的能量消耗主要在什么地方。例如蒸餾塔的能量消耗在于加热器中热能的供給和冷凝器中的热能的取出；吸收器中能量消耗在克服流体輸送的阻力；萃取器中能量主要消耗在溶剂的回收上等等。掌握了这些特点，就能根据地区和工厂的具体条件进行选择。

(3) 分离要求和产品质量 这就是說仅仅需要一般的分离，还是要提純，产品中究竟允許多少杂质存在等等。根据不同要求进行选择，才能做到最经济、最合理。例如潤滑油的脱色，一般要求不高，用吸附分离已經可以了，就不必用蒸餾。有时，由于某些特殊要求，而选用某一种分离方法。例如香精油的提取，如果取用精餾，往往会损失其中某些組成，而使产品质量变坏。用萃取法就能大大减少这种损失，所以常常选用萃取法。

上面所讲的一些选择原則，决不是一成不变的，应该灵活掌握和积极地創造性地运用。尤其应该注意到一些可变因素。原料成份是可变的，气温是可变的，处理物状态是可变的，吸收剂的选择是可变的，设备也是可变的。正确地运用这些可变因素，就能够有效地促进生产和技术的发展。

第二节 扩散原理

9-3 流体中的分子扩散

在靜止的或对垂直于浓度梯度的方向作滯流流动的流体中，质量傳遞的机理为分子扩散，亦即由于分子运动的结果。在湍流流体中，則其机理除分子扩散外，主要为渦流扩散。在两者共同的作用下，合算为对流扩散。

首先討論气相中的分子扩散。对于二元系混合气体的分子扩散机理，可作出如下的分析：

設有一容器(图 9-1)，中間有板隔开，两边分装两种气体 A 和 B。当板抽掉后，A 分子

便向 B 处扩散, B 分子也向 A 处扩散。可假定 A 扩散所遇之总阻力与下列因素有关:

- (1) 气体 A 和 B 的分子浓度 C_A 、 C_B ;
- (2) 在扩散方向上 A 和 B 的速度差 $(u_A - u_B)$;
- (3) 沿扩散方向的扩散距离 dZ 。

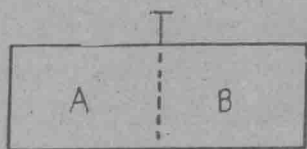


图 9-1 扩散机理图

令 A 和 B 的扩散速率分别为 N_A 和 N_B , 则:

$$N_A = C_A u_A, \quad N_B = C_B u_B \quad (9-2)$$

又根据 $p = CRT$ 得到:

$$C_A = \frac{p_A}{RT}, \quad C_B = \frac{p_B}{RT}$$

代入式 (9-1) 并整理后得到:

$$-\frac{dp_A}{dZ} = \frac{\alpha}{RT} (N_A p_B - N_B p_A)$$

由于 $p_A + p_B = P$ 或 $p_B = P - p_A$, 于是,

$$-\frac{dp_A}{dZ} = \frac{\alpha}{RT} [N_A P - (N_A + N_B) p_A]$$

整理后得:

$$N_A = (N_A + N_B) \frac{p_A}{P} - \frac{RT}{\alpha P} \frac{dp_A}{dZ} = (N_A + N_B) \frac{p_A}{P} - \frac{(RT)^2}{\alpha P} \frac{dC_A}{dZ}$$

令 $\frac{(RT)^2}{\alpha P} = D$, D 为扩散系数, 则得到扩散一般式:

$$N_A = (N_A + N_B) \frac{p_A}{P} - D \frac{dC_A}{dZ} \quad (9-3)$$

式 (9-3) 称为分子扩散的一般微分式。

9-4 气相中的稳定分子扩散

式 (9-3) 在实际应用中, 必须确定边界条件后而加以积分。在稳定分子扩散时, 可分下列两种情况讨论。

(一) 两组分作等分子相反方向扩散 例如在精馏时, 若两组分的气化潜热相近, 低沸点组成的分子和高沸点组成的分子可视作等分子相反方向扩散。是时, $N_A = -N_B$, 于是式 (9-3) 就可简化成:

$$N_A = -D \frac{dC_A}{dZ} = -\frac{D}{RT} \cdot \frac{dp_A}{dZ} \quad (9-4)$$

上式称为费克定律, 与传热中的傅立叶定律具有类似形式。 $-\frac{dC_A}{dZ}$ 一项可算为浓度梯度降, D 为分子扩散系数。

若边界条件为:

$$p_A = p_{A_1} \quad Z = 0$$

$$p_A = p_{A_2} \quad Z = Z$$

积分式(9-4),得

$$N_A = \frac{D}{RTZ} (p_{A1} - p_{A2}) \quad (9-5)$$

上式称为费克定律的积分式。

(二) 一气体 A 通过另一静止气体 B 的稳定扩散 例如吸收操作。此时 $N_B = 0$, 于是扩散方程式变为:

$$N_A = N_A \frac{p_A}{P} - D \frac{d c_A}{dZ} = N_A \frac{p_A}{P} - \frac{D}{RT} \cdot \frac{dp_A}{dZ}$$

于是

$$N_A \left(1 - \frac{p_A}{P}\right) = -\frac{D}{RT} \cdot \frac{dp_A}{dZ}$$

因

$$dp_B = d(P - p_A) = -dp_A$$

代入得:

$$N_A \frac{p_B}{P} = -\frac{D}{RT} \left(-\frac{dp_B}{dZ}\right) = \frac{D}{RT} \cdot \frac{dp_B}{dZ}$$

即

$$\frac{dp_B}{p_B} = \frac{N_A RT}{PD} dZ$$

在

$$p_B = p_{B1} \quad Z = 0$$

$$p_B = p_{B2} \quad Z = Z$$

时将上式积分得:

$$\ln \frac{p_{B2}}{p_{B1}} = \frac{N_A RT}{PD} \cdot Z \quad \text{或} \quad N_A = \frac{PD}{RTZ} \cdot \ln \frac{p_{B1}}{p_{B2}}$$

令

$$p_{Bm} = \frac{p_{B2} - p_{B1}}{\ln \frac{p_{B2}}{p_{B1}}}$$

代入上式

$$N_A = \frac{PD}{RTZ} \cdot \frac{p_{B2} - p_{B1}}{p_{Bm}}$$

故

$$P = p_{B1} + p_{A1} = p_{B2} + p_{A2}$$

$$p_{B2} - p_{B1} = p_{A2} - p_{A1}$$

将此关系代入,得到式(9-6)

$$N_A = \frac{PD}{RTZ p_{Bm}} \cdot (p_{A1} - p_{A2}) \quad (9-6)$$

上式称为斯蒂芬定律。

9-5. 液相中的稳定分子扩散

物质在液相中的扩散比在气相中缓慢得多。主要原因在于液相中扩散阻力要比气相中大,或者说物质在液相中的扩散系数要比在气体中小。

进一步的分析指出:

$$D \approx \lambda U$$

式中: λ ——自由路径长度;

U ——分子运动的均方根速度。

很明显,在气体中分子平均自由路径远较液体中为大,因而气体中扩散系数比液体中扩

散系数大得多。

尽管如此,可认为物质在气相中的扩散与在液相中的扩散完全类似。所以在液相中的扩散,可以用和气相扩散相当的方程式:

$$-dC_A = \beta(C_A u_A C_B - C_A u_B C_B) dZ = \beta(N_A C_B - N_B C_A) dZ \quad (9-7)$$

上式中 β 为液相中扩散阻力系数。

在液相中进行稳定状态等分子反方向扩散时, N_A 和 N_B 为常数, 则 $N_A = -N_B$, 于是

$$-dC_A = \beta N_A (C_A + C_B) dZ \quad (9-7a)$$

令液体中的扩散系数 D' 为:

$$D' = \frac{1}{\beta(C_A + C_B)}$$

如假定 β 和 $C_A + C_B$ 都为常数, 则式(9-7a)可积分成:

$$N_A = -\frac{D'}{2} (C_{A1} - C_{A2}) \quad (9-8)$$

对于溶质 A 通过静止溶质 B 的稳定扩散, 则 $N_A = \text{常数}$, $N_B = 0$, 故式(9-7)可积分为:

$$N_A = -\frac{D'}{Z} \frac{C_A + C_B}{C_{Bm}} (C_{A1} - C_{A2}) \quad (9-9)$$

式中: C_{Bm} —— B 在点 1 及 2 两处浓度的对数平均值。

9-6 扩散系数

扩散系数是物质的物理特性, 表示物质的扩散能力。对于符合费克定律的扩散, 扩散系数可以理解为沿扩散方向, 在单位时间内, 物质的浓度降为一单位时, 通过单位面积的传递量。扩散系数取决于扩散物质和扩散介质的温度, 而与压强和浓度的关系较小。

扩散系数的确实数值, 应该由实验的方法求得。这里介绍一种求一些蒸气在空气中的扩散系数的实验方法(图 9-2)。实验时将一种液体(如甲苯)放在直立的玻璃管中, 玻璃管置于恒温槽内。管顶上方, 让一般不含该蒸气的气流迅速通过。气流速度要快到几乎使气体中蒸气分压为零。

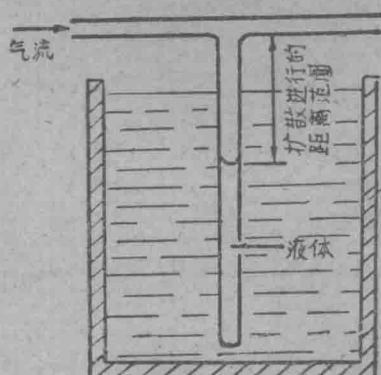


图 9-2 扩散系数的测定

设 p_{Ag} —— A 的蒸气在气流中的分压;

p_{Ai} —— A 的蒸气在气液界面上的分压。

由于立直管中不含有涡流, 所以公式(9-6)可以应用, 即:

$$N_A = \frac{DP}{RTzP_{Bm}} (p_{Ai} - p_{Ag})$$

$$p_{Ag} \ll p_{Ai}$$

$$p_{Ai} - p_{Ag} = p_{Ai}$$

由式(9-2)知:

$$N_A = C_A u_A = -\frac{\gamma_A}{M_A} \cdot \frac{dz}{d\tau}$$

将上面两式联立后得到:

$$\frac{DP}{RTzP_{Bm}} p_{Ai} = -\frac{\gamma_A}{M_A} \frac{dz}{d\tau}$$

$$\begin{cases} \tau=0, & z=z_1 \\ \tau=\tau, & z=z_2 \end{cases}$$

在

间积分, 使得

$$\frac{1}{2}(z_2^2 - z_1^2) = \frac{DP}{RTp_{Bm}} \frac{M_A}{\gamma_A} p_{A1} \cdot \tau$$

上式中除 D 以外,其他各数可从有关表中查得或从实验中测得,因而可从中求出扩散系数 D 。
在无可靠实验数据时,可用一些经验公式估算,或者查表。为了计算方便,这里也介绍一些公式:
(1) 气体 A 在气体 B 中的扩散,可用吉利兰-马克斯威尔经验公式:

$$D = \frac{0.00155 T^{\frac{3}{2}}}{P (V_A^{\frac{1}{3}} + V_B^{\frac{1}{3}})^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} \tag{9-10}$$

式中: D ——扩散系数, [米²/小时];
 P ——为气体总压, [绝对大气压];
 T ——绝对温度, [°K];

V_A 和 V_B ——气体 A 和 B 的分子体积,分子体积是 1 克分子物料在它的沸点下呈液态时的体积,以 [厘米³] 计。分子体积可用柯普相加定律,将表 9-2 中原子体积相加求得。

气体 A 扩散于气体 B 中的扩散系数,与气体 B 扩散于气体 A 中的相同。事实上,扩散系数与气体的浓度无关,而由式 (9-11) 可见,系随温度的上升及压力的下降而加大。若已知在绝对温度 T_0 和压力 P_0 的扩散系数 D_0 ,可按式算出它在温度 T 及压强 P 时之值:

$$D = D_0 \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{5}{2}} \tag{9-11}$$

表 9-3 中列举了一些蒸气和气体在空气中的扩散系数。

表 9-2 原子 体 积

空 气	29.9	氧 双 键 的	7.4
锑	24.2	与其他两种元素相偶合的:	
砷	30.5	在醛与酮中	7.4
铋	43.0	在甲酯中	9.1
溴	27.0	在乙酯中	9.9
碳	14.0	在较高级的酯中及醚中	11.0
氯 在一端的,如在 R—Cl 中	21.6	在 酸 中	12.0
居中的,如在 R—ClHCl—R 中	26.6	与 S, P, N 相連	8.3
铬	27.4	磷	27.0
氩	8.7	碱	32.0
锆	34.5	硫	25.6
氢	3.7	锡	42.3
氮 在伯胺中	10.5	钛	35.7
在仲胺中	12.0	钒	32.0
		锌	20.4

注: 对于二节环,如在环氧乙烷中减去 6.0;
 对于四节环,如在丁烷中减去 8.5;
 对于五节环,如在氯杂茂中,减去 11.5;
 对于六节环,如在苯、氮杂茂中,减去 15.0;
 对于萘环,减去 47.5。

表 9-3 25°C, 1 大气压下蒸气与气体在空气中的扩散系数

物 质	D , [厘米 ² /秒]	$\mu/\rho D$	物 质	D , [厘米 ² /秒]	$\mu/\rho D$
氨	0.236	0.66	戊 酸	0.067	2.31
二氧化碳	0.164	0.94	异 己 酸	0.060	2.58
氫	0.410	0.22	二 乙 胺	0.105	1.47
氧	0.206	0.75	丁 胺	0.101	1.58
水	0.256	0.60	苯 胺	0.072	2.14
二硫化碳	0.107	1.45	氯 苯	0.073	2.12
乙 醚	0.093	1.66	氯 甲 苯	0.065	2.38
甲 醇	0.159	0.97	溴 丙 烷	0.105	1.47
乙 醇	0.119	1.30	碘 丙 烷	0.096	1.61
丙 醇	0.100	1.55	苯	0.088	1.76
丁 醇	0.090	1.72	甲 苯	0.084	1.84
戊 醇	0.070	2.21	二 甲 苯	0.071	2.18
己 醇	0.059	2.60	乙 苯	0.077	2.01
蟻 酸	0.169	0.97	丙 苯	0.059	2.62
醋 酸	0.133	1.16	联 苯	0.068	2.28
丙 酸	0.099	1.56	正 辛 烷	0.060	2.58
异 丁 酸	0.081	1.91	均三甲苯	0.067	2.31

注：上表中的 $(\mu/\rho D)$ 数群大部分是由空气组成的混合物求出的。

(2) 物质在液体中的扩散系数,可用下式近似估算:

$$D' = \frac{7.7 \times 10^{-10} T}{\mu (V^{\frac{1}{3}} - V_0^{\frac{1}{3}})} \quad (9-12)$$

式中: D' ——物质在液体中扩散系数, [厘米²/秒];

T ——绝对温度, [°K];

μ ——液体粘度, [泊];

V ——分子体积,意义同(9-10)式;

V_0 ——常数,用于水、甲醇、苯三者稀溶液时,分别为 8.0, 1.49, 22.88。

表 9-4 20°C 时扩散入液体中的扩散系数

溶 质	溶 剂	D [厘米 ² /秒] $\times 10^5$	$\mu/\rho \cdot D$
O ₂	水	1.80	558
CO ₂	水	1.50	670
N ₂ O	水	1.51	665
NH ₃	水	1.76	570
Cl ₂	水	1.22	824
Br ₂	水	1.24	840
H ₂	水	5.13	196
N ₂	水	1.64	613
HCl	水	2.64	381
H ₂ S	水	1.41	712
H ₂ SO ₄	水	1.73	580
HNO ₃	水	2.6	380
乙 炔	水	1.56	645
醋 酸	水	0.88	1140
甲 醇	水	1.28	785