

工程传质

〔挪威〕A·L·莱德森 著



Mass Transfer in
Engineering Practice

工 程 传 质

〔挪威〕A.L.莱德森 著

沈复 汤渭龙 徐孝民 译

烃加工出版社

内 容 提 要

本书较系统地介绍了工业上重要的单元过程，从各个单元操作达到节能高效、提高产品质量、降低生产成本出发，详细阐述了操作原理和工程计算，并附有实际应用的示例和习题。本书的特点在于基础理论与工程实用相结合，在内容上也体现了新技术，许多参考文献是八十年代的。

本书适用于从事石油化工生产、科研、设计的科技工作者阅读，也可供高等院校师生参考。

Mass Transfer in Engineering Practice

Aksel L. Lydersen

JOHN WILEY & SONS 1983

工程传质

〔挪威〕A. L. 莱德森 著

沈复 汤渭龙 徐孝民 译

烃加工出版社出版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米 32开本 12¹/₄ 印张 204千字 印1—2500

1988年12月北京第1版 1989年2月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-008-1/TQ·006 定价4.35元

译 者 的 话

本书包括了各种重要和通用的传质单元操作，着重于实际应用，阐述有关原理和计算公式，在各章中均附有工程应用示例，可作为化学工程大学教材，亦可作为在职工程技术人员知识更新的实用简明教程，或教学和科技人员参考用书。全书采用国际单位(SI)制。

本书由华东石油学院北京研究生部沈复、汤渭龙、徐孝民翻译。对原书中的个别错误，已作了订正。最后由沈复校审。

序

二十世纪前半叶化学工业即已发展到不可能由个别人全面掌握其细节知识的程度了。然而,工业过程是由若干单元操作所组成,故可分别予以研究和论述而不必考虑具体的过程。因此,不论吸收单元操作是用于脱除烟气中的可溶组分、或是作为化肥生产过程中的一个步骤,其原理是一致的。

单元操作已被确认为工业过程的基本模块,这一事实从根本上改变了对工业化学的研究。理所当然地导致了化学工程发展成为一个学科,先是在美国大学中,尔后在欧洲。

到了二十世纪的后半叶,由于高速数字式计算机的发展,经验数据的更多积累以及单元操作数目的增加,已不可能有精通所有单元操作的专家了,即使要跟踪其中少数单元操作的发展亦属困难。

为此本书试图为从事各项较通用的单元操作的职业工程人员提供一本简短的知识更新教程;重点介绍基本的方程式,实用的经验数据,以及适当的文献资料作为了解细节而查阅之需;还收集了一些工程应用实例,其中对可能被尚无经验的工程人员易于忽视的重要方面予以强调。

本书以浓缩的形式阐述了重要的基础原理和示例,期望兼受职业工程人员和化学工程大学生的欢迎。在用作教材时,建议由第二章开始而将第一章与第三章相连接。

作者另编有“流体流动与传热”●一书,试图兼顾职业工程人员和大学生的需要,是针对化学工程中传热和机械加工单元操作的。而本书则试图对涉及传质的单元操作领域作同样的处理。本书精心地保持精干,其示例的大部分则直接取材于工业应用。关于

●A. L. Lydersen, *Fluid Flow and Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Chichester, 1979.

设备细节的描述以及专门性的计算方法已有许多其他书籍可供参阅。R. H. Perry和C. H. Chilton的“化学工程师手册”尤宜常置案头，而P. A. Schweitzer的“化学工程师分离技术手册”则可作为新的补充资料。

一些单元操作是按阶梯式过程进行的。无论是吸收、汽提、蒸馏或液体萃取，其计算方法在原理上是一样的。本宜分列一章多级过程，但本书未予安排。理由有二，其一是因为对某些单元操作而言多级过程的基本原理极为重要，故让大学生多次重复它更为有利；其二是对于职业工程人员来说，他们喜欢的知识更新教程应是可以不必首先阅读前面的各章而可以直接把注意力集中到他有兴趣的那一章。

教科书中常将一些过时的和不常用的方法或设备型式包括进去。例如，蒸馏计算的邦晶-萨洼里特（Ponchon-Savarit）法和糖-甜菜的多级扩散池设备，在美国于1971年已将最后两个设备关闭。本书则力求避免类似的弊病。

生产效益是工业上化学工程师追求的目标，这决定于最终产品的质量 and 价格。故在选择具体的单元操作时必须依靠有关效率和价格的知识。这就进而需要有关设备尺寸的信息，而在某些情况下仅能通过中试装置的研究而获得。本书重点介绍设备主要尺寸的计算，并相当注意能耗。至于强度计算和设计细节的确定则一般来说是机械工程师的任务了。

工程师还应节约自己的时间。应该使用那些在最短时间内给出所需精度的方法。例如，在设计填料吸收塔时，考虑到液相分布，可能还有相平衡和热焓数据的把握性不够，最好在填料高度计算值的基础上增加30~35%。一个职业工程人员可能很有体会，为了少数百分比而花费大量时间去改善其计算是很不值得的。

对于多组分混合物的多级精馏装置的设计而言，只要相平衡及热焓数据具有足够的精度，则可以用数字式计算机进行更为精确而严格的计算，是花得来的。在本书中只介绍多元系精馏的简

捷算法。这在巨型优化计算研究中是有用的，可以快速、便宜地确定出优化指标。然后再用严格法进行精确研究，从而大量节约机时。

常识判断法的运用，包括检验计算结果的习惯，是颇为明智的。一个好的猜算就可能代替为了查出计算中一个错误的全部工作。

Aksel L. Lydersen

1982年12月

前 言

工业传质单元操作都是利用混合物中一个或数个组分自一相向另一相的传递作用。可按相状态，气、液或固相，将不同过程加以分类。（见表1）

表 1 过 程 分 类

相	过 程
气-液	吸收-汽提 蒸馏 增湿-干燥
液-液	萃取
气-固	吸附-脱附 干燥
液-固	浸取 吸附-解附 结晶-溶解

扩散作用在一些其他过程中亦属重要，诸如非均相反应中，以及用多孔膜或半透膜分隔的互混相中的扩散。

传质推动力是浓度差或浓度梯度。其差值或梯度需用相平衡数据计算。

相律用于区别平衡。该律给出了自由度，即独立变量数：

$$F = C - P + 2 \quad (0.1)$$

式中：F——自由度；

C ——组分数；

P ——相的数目。

以二元（A和B）混合物的蒸馏为例：有两个组分（ $C=2$ ），一个液相、一个汽相（ $P=2$ ），故 $F=2$ 。共有四个变量——压力、温度、A在液相中的分率及在汽相中的分率。若某一变量，例如压力，已被固定，则只有一个变量可被独立改变，如A在液相中的分率，而温度和A在汽相中的分率随之而定（B的分率为1减去A的分率）。

目 录

序.....	(I)
前言.....	(i)
第一章 扩散原理.....	(1)
一、菲克 (Fick) 定律.....	(1)
二、主体存在流动时的扩散.....	(2)
三、组分 A 通过静止组分B的扩散.....	(3)
四、多元混合物.....	(5)
五、变化截面的情况.....	(6)
六、涡流扩散.....	(6)
七、液体中的分子扩散.....	(7)
八、固体内的分子扩散.....	(8)
九、非稳态扩散.....	(10)
十、膜的概念.....	(11)
十一、传质系数.....	(12)
十二、控制速率的阻力.....	(18)
十三、扩散系数.....	(18)
十四、例题.....	(22)
十五、习题.....	(31)
十六、符号.....	(32)
十七、参考文献.....	(34)
第二章 精馏.....	(37)
一、汽-液平衡.....	(37)
二、平衡图.....	(41)
三、二元混合物的精馏.....	(43)
四、三元混合物的精馏.....	(59)
五、多元混合物的精馏.....	(62)
六、蒸馏塔.....	(65)
七、例题.....	(88)

八、习题	(113)
九、符号	(117)
十、参考文献	(119)
第三章 气体吸收和解吸	(124)
一、气-液平衡	(124)
二、吸收	(125)
三、伴有化学反应的吸收	(146)
四、计算步骤总结	(150)
五、解吸	(151)
六、气体吸收设备	(152)
七、吸收设备的设计	(154)
八、例题	(156)
九、习题	(175)
十、符号	(178)
十一、参考文献	(180)
第四章 液-液萃取和浸取	(184)
一、液-液萃取	(184)
二、两液相不互溶	(184)
三、相图	(186)
四、热力学因素	(190)
五、溶剂的选择	(192)
六、单级平衡萃取	(193)
七、连续多级逆流萃取	(194)
八、简克 (Janecke) 图	(198)
九、连续逆流接触的萃取操作	(202)
十、有回流的逆流萃取	(204)
十一、液-液萃取设备	(209)
十二、浸取	(217)
十三、浸取速率	(217)
十四、理想板和平衡板	(219)
十五、分析解	(220)

十六、逐板计算.....	(221)
十七、图解法.....	(221)
十八、操作方法.....	(222)
十九、浸取设备.....	(223)
二十、例题.....	(232)
二十一、习题.....	(241)
二十二、符号.....	(242)
二十三、参考文献.....	(244)
第五章 增湿	(248)
一、定义.....	(248)
二、湿度图.....	(253)
三、湿度的测量.....	(253)
四、空气调节.....	(255)
五、水的蒸发冷却.....	(255)
六、冷却塔.....	(261)
七、例题.....	(266)
八、习题.....	(274)
九、符号.....	(275)
十、参考文献.....	(277)
十一、附录.....	(278)
第六章 固体干燥	(279)
一、定义.....	(279)
二、传热和传质.....	(280)
三、干燥过程.....	(280)
四、干燥设备.....	(288)
五、例题.....	(311)
六、习题.....	(316)
七、符号.....	(317)
八、参考文献.....	(320)
第七章 吸附和离子交换	(322)
一、吸附.....	(322)

二、吸附剂.....	(322)
三、相平衡和吸附等温线.....	(324)
四、传质区 (MTE)	(326)
五、穿透(Breakthrough).....	(328)
六、再生.....	(330)
七、离子交换.....	(332)
八、离子交换装备.....	(336)
九、例题.....	(339)
十、习题.....	(345)
十一、符号.....	(346)
十二、参考文献.....	(348)
第八章 结晶	(351)
一、结晶质量.....	(352)
二、结晶组成.....	(355)
三、结晶动力学.....	(357)
四、焓平衡.....	(359)
五、结晶设备.....	(359)
六、例题.....	(365)
七、习题.....	(369)
八、符号.....	(370)
九、参考文献.....	(371)
附录1 低压下气体的 PD_{AB}	(373)
附录2 在低浓度水中的 D_{AB}^0	(376)
附录3 无限稀释下在有机溶剂中的 D_{AB}^0	(376)
附录4 气体和液体的物理性质.....	(377)

第一章 扩散原理

图1-1表示一个充满组分A与B混合物的匣子，其压力为 P 、温度为 T ，在匣子的左半部中A分子的摩尔分率较高。

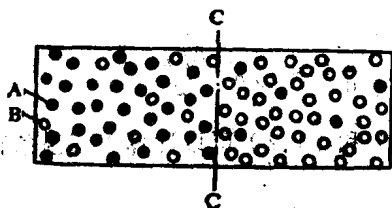


图 1-1 在恒温恒压匣子内的A与B分子

匣内分子可在所有方向作随机运动，但由于大部分A分子在中心线CC的左侧，故由左向右穿过CC线的A分子数目必大于以反方向穿过该线的A分子数。这就形成了A沿浓度降低方向的分子扩散现象。与此同时在反方向存在着B的净扩散。上述扩散可以进行到浓度达到完全均匀为止。

一、菲克 (Fick) 定律

组分A在A与B的混合物中沿 z 轴方向的分子扩散通量可用菲克定律表示：

$$J_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (1.1)$$

式中： J_A ——分子扩散速率， $\text{kmol}/(\text{m}^2\text{s})$ ；

D_{AB} ——组分A在A、B混合物中的扩散系数， m^2/s ；

$\frac{dc_A}{dz}$ ——组分A的浓度梯度， $\text{kmol}/(\text{m}^3\text{m})$ 。

浓度梯度表示推动力，类似于用傅里叶（Fourier）定律计算导热通量时所用的温度梯度。

对于气体，菲克定律用组分A的分压 p_A 表示比较方便。由理想气体定律，

$$p_A v = n_A RT$$

由上式可得A的浓度计算式

$$c_A = n_A / v = p_A / RT$$

求导得：

$$\frac{dc_A}{dz} = \frac{1}{RT} \frac{dp_A}{dz} \quad (1.2)$$

利用式（1.1）和（1.2）可以计算在等温条件下组分A沿 z 方向的摩尔通量。

$$J_A = -\frac{D_{AB}}{RT} \cdot \frac{dp_A}{dz} \quad (1.3)$$

理想气体混合物在恒压下扩散到图1-1右侧部分的A摩尔数必等于扩散到左边部分的B摩尔数。

$$J_A = -J_B = -\frac{D_{AB}}{RT} \frac{dp_A}{dz} = \frac{D_{BA}}{RT} \frac{dp_B}{dz} \quad (1.4)$$

由于总压 $P = p_A + p_B = \text{常数}$

$$\frac{dp_A}{dz} = -\frac{dp_B}{dz}$$

故得： $D_{AB} = D_{BA}$ (1.5)

上式表明，对于二元理想气体混合物，A在B中的扩散系数与B在A中的扩散系数相等。

二、主体存在流动时的扩散

图1-2表示一个充有A与B二元混合物的管道，如果A的浓度均匀，则对某静止的观察者来说，A的摩尔通量为 $c_A V$ 。但如存

在浓度梯度 dc_A/dz ，则由于分子扩散将另外增加通量 J_A ，因此A的总摩尔通量为

$$N_A = J_A + c_A V \quad (1.6)$$

A与B的总摩尔通量为：

$$N = N_A + N_B = cV$$

或

$$V = \frac{N_A + N_B}{c} \quad (1.7)$$

式中： c ——总摩尔浓度， kmol/m^3 。

由式(1.1)、(1.6)和(1.7)可得

$$N_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} + \frac{c_A}{c} (N_A + N_B) \quad (1.8)$$

同样，B的总摩尔通量为

$$N_B = -D_{BA} \frac{dc_B}{dz} + \frac{c_B}{c} (N_A + N_B) \quad (1.9)$$



图 1-2 A和B的混合物以主体速度 $V \text{ m/s}$ 流动，在流动方向存在A组分的浓度梯度

上面两式适用于气体、液体和固体。通量 N_A 和 N_B 是相对于具有固定坐标的参考面而言的。式中浓度比 c_A/c 和 c_B/c 可用摩尔分率 x_A 和 x_B 代替，即浓度 c_A 和 c_B 分别等于 $x_A c$ 和 $x_B c$ 。

三、组分A通过静止组分B的扩散〔斯忒芬 (Stefan) 扩散定律〕

图1-3所示为一制备含少量有机溶剂的空气装置；供检验防

毒面具之用。点1处的A分压 p_{A1} 即A在恒温浴温度下的蒸汽压，点2处A分压 p_{A2} 接近于零。在稳定状态下，管内空气处于静止， $N_A=0$ ，故式(1.8)成为

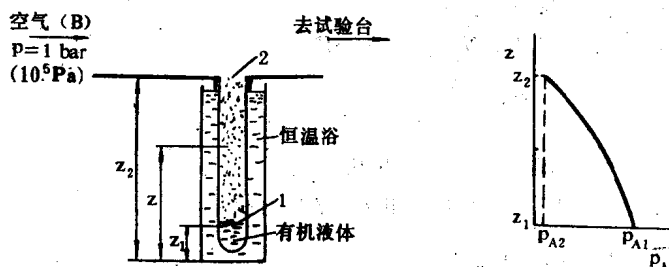


图 1-3 将少量有机溶剂蒸气定量地配入空气流的装置

(右图表示溶剂A的分压变化关系 $p_A=f(z)$)

$$N_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} + \frac{c_A}{c} N_A \quad (1.10)$$

将式(1.2)的 dc_A/dz 和理想气体的 $c_A/c = p_A/P$ 关系式代入上式得

$$N_A = -\frac{D_{AB}}{RT} \frac{dp_A}{dz} + \frac{p_A}{P} N_A \quad (1.11)$$

或

$$N_A \int_{z=z_1}^{z=z_2} dz = \frac{-D_{AB}P}{RT} \int_{p_{A1}}^{p_{A2}} \frac{dp_A}{P-p_A} \quad (1.12)$$

积分：

$$N_A = \frac{D_{AB}P}{RT(z_2-z_1)} \ln \frac{P-p_{A2}}{P-p_{A1}} \quad (1.13)$$

上式即为计算A通过静止B之净通量公式。有时可写成

$$N_A = \frac{D_{AB}P}{RT(z_2-z_1)} \ln \frac{p_{B2}}{p_{B1}} \quad (1.14)$$

式中 p_B 为静止惰性组分的分压。该式的另一写法是