



“十二五”国家重点图书  
水处理新技术丛书

# 水处理 原理与设计

——水处理技术（一）

（原著第三版）

MWH'S WATER TREATMENT:  
PRINCIPLES AND DESIGN

（Third Edition）

[美] John C. Crittenden 等著 刘百仓 等译



华东理工大学出版社  
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS



“十二五”国家重点图书  
水处理新技术丛书

# 水处理原理与设计

——水处理技术(一)

(原著第三版)

Water MWH's Treatment: Principles and Design (Third Edition)

[美] John C. Crittenden 等 著

刘百仓 等 译



华东理工大学出版社  
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

水处理原理与设计: 原著第三版. 水处理技术. 一/  
(美) 科瑞谭登(Crittenden, J. C.)等著; 刘百仓 等译.  
—上海: 华东理工大学出版社, 2016. 5

(水处理新技术丛书)

书名原文: MWH's Water Treatment: Principles  
and Design, Third Edition

ISBN 978-7-5628-4593-5

I. ①水… II. ①科… ②刘… III. ①水处理 IV.  
①TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 063584 号

MWH's Water Treatment: Principles and Design. - 3rd ed. / John C. Crittenden, et al.  
原著 ISBN: 978-0-470-40539-0  
Copyright © 2012 by John Wiley & Sons, Inc.  
All Rights Reserved. This translation published under license.  
著作权合同登记号: 图字 09-2013-913 号

---

项目统筹 / 焦婧茹

责任编辑 / 焦婧茹

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电话: 021-64250306

网址: [press.ecust.edu.cn](http://press.ecust.edu.cn)

邮箱: [zongbianban@ecustpress.cn](mailto:zongbianban@ecustpress.cn)

印 刷 / 山东鸿君杰文化发展有限公司

开 本 / 710 mm × 1000 mm 1/16

印 张 / 29.25

字 数 / 537 千字

版 次 / 2016 年 5 月第 1 版

印 次 / 2016 年 5 月第 1 次

定 价 / 98.00 元

---

版权所有 侵权必究

# 目 录

第7章 传质原理 .....	1
7-1 传质介绍 .....	4
7-1-1 通量的概念 .....	4
7-1-2 传质基本方程 .....	5
7-2 分子扩散 .....	5
7-2-1 布朗运动 .....	6
7-2-2 菲克第一定律 .....	7
7-2-3 流体流动中的扩散 .....	7
7-2-4 固定和相对参照系中的扩散 .....	8
7-2-5 菲克第二定律 .....	9
7-2-6 斯托克斯-爱因斯坦方程 .....	10
7-3 扩散系数来源 .....	13
7-3-1 大分子和颗粒的液相扩散系数 .....	14
7-3-2 小中性分子的液相扩散系数 .....	15
7-3-3 电解质的液相扩散系数 .....	18
7-3-4 氧气的液相扩散系数 .....	20
7-3-5 气相扩散系数 .....	20
7-4 界面传质模型 .....	23
7-4-1 有效传质表面积 .....	24
7-4-2 薄膜模型 .....	25
7-4-3 渗透和表面更新模型 .....	25
7-4-4 边界层模型 .....	26
7-5 界面传质系数的相关性 .....	29
7-5-1 常见的传质相关性 .....	29
7-5-2 扩散物质种类和传质系数的关系 .....	34
7-6 受控于传质过程的处理系统的设计 .....	36
7-7 使用工作曲线评估浓度梯度 .....	38

7-7-1	接触模式	38
7-7-2	工作图表的开发	39
7-7-3	工作图表的分析	40
7-8	气-液界面传质	42
7-8-1	本体溶液条件	43
7-8-2	界面上的条件	44
7-8-3	总体传质关系	45
7-8-4	确定控制传质的相	46
7-8-5	双膜模型的应用	46
7-8-6	总传质系数和扩散物质之间的关系	47
7-9	在界面上通过化学反应强化传质	50
	问题和讨论	53
	参考文献	56
<b>第8章</b>	<b>化学氧化和还原</b>	<b>59</b>
8-1	氧化反应在水处理中的应用简介	62
8-1-1	常用的氧化剂	62
8-1-2	传统氧化剂在水处理中的应用	63
8-2	化学氧化与还原的理论基础	66
8-2-1	氧化还原反应简介	67
8-2-2	标准电极电位和氧化还原平衡反应	70
8-2-3	$E_H$ -pH 优势区图: 定义和以氯为例	81
8-2-4	氧化还原反应速率	87
8-3	常规化学氧化剂	88
8-3-1	氧气( $O_2$ )	89
8-3-2	氯气( $Cl_2$ )	93
8-3-3	二氧化氯( $ClO_2$ )	96
8-3-4	过氧化氢( $H_2O_2$ )	97
8-3-5	臭氧( $O_3$ )	98
8-3-6	高锰酸盐( $MnO_4^-$ )	100
8-4	光解	103
8-4-1	光解所需能量和光的波长	104
8-4-2	估算单溶质吸收的光解	106

8-4-3	多吸光物质中的光解 .....	112
8-4-4	多波长情形 .....	115
8-4-5	水处理中光解的应用 .....	116
	问题和讨论 .....	124
	参考文献 .....	127
<b>第9章</b>	<b>混凝和絮凝 .....</b>	<b>131</b>
9-1	水处理中混凝和絮凝工艺的作用 .....	134
9-1-1	混凝过程 .....	134
9-1-2	絮凝过程 .....	135
9-1-3	实际设计问题 .....	135
9-2	水中颗粒的稳定性 .....	135
9-2-1	颗粒与溶液的相互作用 .....	135
9-2-2	颗粒的电学性质 .....	136
9-2-3	颗粒的稳定性 .....	141
9-2-4	压缩双电层 .....	143
9-3	混凝理论 .....	145
9-3-1	吸附和电中和 .....	146
9-3-2	吸附和颗粒间架桥 .....	146
9-3-3	沉淀和网捕 .....	148
9-4	混凝的实际应用 .....	149
9-4-1	无机金属混凝剂 .....	149
9-4-2	预水解金属盐 .....	159
9-4-3	有机聚合物 .....	160
9-4-4	助凝剂 .....	163
9-4-5	混凝剂评估的烧杯试验 .....	163
9-4-6	减少混凝剂剂量的可选技术 .....	166
9-5	溶解性组分的混凝 .....	167
9-5-1	NOM 对浊度去除过程中混凝的影响 .....	167
9-5-2	强化混凝 .....	168
9-5-3	确定去除 DOC 的混凝剂剂量 .....	169
9-5-4	溶解性无机物的去除 .....	173
9-6	絮凝理论 .....	173

9-6-1	絮凝机理 .....	173
9-6-2	颗粒碰撞 .....	174
9-6-3	球状颗粒的絮凝 .....	176
9-6-4	分形絮凝模型 .....	183
9-6-5	絮体破碎 .....	187
9-6-6	利用球状颗粒模型的反应器设计 .....	189
9-7	絮凝的实际应用 .....	190
9-7-1	絮凝方法的选择 .....	190
9-7-2	竖向涡轮絮凝器 .....	193
9-7-3	水平轴桨轮絮凝器 .....	200
9-7-4	水力絮凝 .....	204
9-7-5	絮凝重要的设计特征 .....	208
	问题和讨论 .....	210
	参考文献 .....	212
<b>第 10 章</b>	<b>重力分离 .....</b>	<b>217</b>
10-1	颗粒沉淀的分类 .....	220
10-2	离散颗粒沉淀(I型)的原理 .....	220
10-2-1	离散颗粒的沉淀速率 .....	221
10-2-2	布朗运动 .....	226
10-3	在理想沉淀池中的离散颗粒沉淀 .....	227
10-3-1	矩形沉淀池 .....	228
10-3-2	圆形沉淀池 .....	231
10-4	絮凝沉淀(II型)的原理 .....	232
10-4-1	絮凝沉淀的优势 .....	232
10-4-2	絮凝沉淀分析 .....	233
10-5	分层沉淀(III型)的原理 .....	233
10-5-1	固体通量分析 .....	233
10-5-2	极限固体通量 .....	235
10-5-3	固体浓缩所需的面积 .....	236
10-6	传统沉淀池的设计 .....	237
10-6-1	预沉淀设施 .....	237
10-6-2	矩形沉淀池 .....	240

10-6-3	圆形沉淀池(上向流式澄清池)	248
10-6-4	方形沉淀池	250
10-7	高效沉淀过程	251
10-7-1	管状和薄板净化器	251
10-7-2	固体接触净化器	257
10-7-3	载体嵌合沉淀	262
10-8	影响沉淀的物理因素	263
10-8-1	密度流	263
10-8-2	温度差	264
10-8-3	固体浓度的影响	265
10-8-4	风的影响	267
10-8-5	入口能量耗散	267
10-8-6	出口回流	267
10-8-7	设备移动	268
10-9	溶气气浮	268
10-9-1	工艺描述	268
10-9-2	溶气气浮的应用	270
10-9-3	溶气气浮性能的影响因素	270
10-9-4	DAF 系统设计时需考虑的因素	278
	问题和讨论	286
	参考文献	288
<b>第 11 章</b>	<b>颗粒过滤</b>	<b>291</b>
11-1	过滤的历史简述	294
11-2	快速过滤的主要特征	296
11-2-1	过滤介质的均匀性	296
11-2-2	混凝预处理	296
11-2-3	过滤基本过程	296
11-2-4	过滤阶段中的过滤效果	297
11-2-5	快速过滤系统的分类	299
11-3	颗粒过滤介质的特性	301
11-3-1	快速过滤介质的材料	301
11-3-2	有效粒径及均匀系数	301



11-3-3	颗粒形状	302
11-3-4	材料密度	304
11-3-5	材料硬度	304
11-3-6	颗粒滤床的孔隙率	305
11-3-7	颗粒滤床的特殊表面积	305
11-4	流经颗粒介质的水力学	305
11-4-1	洁净颗粒滤器中的水头损失	306
11-4-2	反冲洗水力学	310
11-5	快速过滤中颗粒物的去除	318
11-5-1	截留	319
11-5-2	深度过滤	319
11-5-3	深度过滤理论的基础	320
11-5-4	Yao 过滤模型	320
11-5-5	迁移机理	322
11-5-6	改进的基础过滤模型	324
11-5-7	黏附效率	328
11-5-8	滤池性能的预测	328
11-5-9	现象深度过滤模型	329
11-5-10	颗粒物脱附	337
11-6	快速滤池的设计	338
11-6-1	性能标准	338
11-6-2	过程设计标准	340
11-6-3	试验测试	342
11-6-4	水流控制	343
11-6-5	反冲洗系统	345
11-6-6	滤池系统的组成	347
11-6-7	滤床中的负压	349
11-6-8	残留液的管理	350
11-7	快速过滤池的设计实例	350
11-8	其他过滤技术和选择	354
11-8-1	压力过滤	354
11-8-2	生物活性过滤	354
11-8-3	慢砂过滤	358

11-8-4 湿砂过滤 .....	360
11-8-5 硅藻土过滤 .....	361
11-8-6 袋式和筒式过滤 .....	362
问题和讨论 .....	362
参考文献 .....	366
<b>第 12 章 膜过滤 .....</b>	<b>373</b>
12-1 膜分离过程的分类 .....	376
12-1-1 膜过滤 .....	377
12-1-2 反渗透 .....	377
12-1-3 膜分离过程的比较 .....	377
12-2 膜过滤在水处理中的应用历史 .....	379
12-2-1 饮用水处理的应用 .....	379
12-2-2 膜过滤去除原生动物的效能 .....	379
12-3 膜过滤设备与运行的主要特征 .....	380
12-3-1 膜组件构型 .....	383
12-3-2 中空纤维膜中的水流方向 .....	386
12-3-3 错流过滤和死端过滤流态 .....	388
12-3-4 与快速颗粒过滤的比较 .....	389
12-4 膜材料的性质 .....	390
12-4-1 材料属性 .....	390
12-4-2 材料化学 .....	392
12-4-3 膜结构 .....	393
12-5 膜过滤中的颗粒捕获 .....	394
12-5-1 过滤精度 .....	394
12-5-2 截留率和对数去除率 .....	396
12-5-3 过滤机理 .....	397
12-5-4 微生物的去除 .....	398
12-5-5 挑战试验 .....	399
12-6 膜过滤的流动水力学 .....	400
12-6-1 达西定律 .....	400
12-6-2 温度与压力的影响 .....	402
12-7 膜污染 .....	404

12-7-1	膜污染的机理	404
12-7-2	膜污染的可逆性	405
12-7-3	串联阻力模型	406
12-7-4	颗粒导致的膜污染	408
12-7-5	生物污染	410
12-7-6	天然有机物污染	410
12-7-7	膜污染的堵塞过滤定律	411
12-7-8	膜污染指数	414
12-7-9	膜污染的小试研究评估	419
12-8	工艺设计	420
12-8-1	性能标准	421
12-8-2	与其他处理工艺的集成	422
12-8-3	系统组成	424
12-8-4	完整性测试及监测	425
12-8-5	基于中试的设计准则发展	429
12-8-6	残留液处理要求	433
	问题和讨论	435
	参考文献	439

## 第 7 章 传质原理

---



## 传质术语

术 语	定 义
吸收	溶质从一个主介质相中均匀的传输扩散到另一个主介质相中的过程(而不是在介质相界面处收集,见吸附)
吸附剂	吸附过程中被溶质所累积的固体相
吸附	溶质从一个主介质相转移和积累到另一个相的表面(如固体表面),导致固相表面附近的分子浓度增加的过程(与吸收相对照)
空气吹脱	挥发性组分从水相向气相中的转移
批次系统	传质过程中无质量进入或者流出的系统,即两相混合后,传质过程发生一直到平衡状态,两相最终被分离
布朗运动	溶质分子或者颗粒物与溶剂分子碰撞而产生的无规则运动
同向流	两相(如液相和水相、水相和粉末活性炭)接触时其质量传递方向相同的过程
连续接触操作	两相在系统进出口两端之间彼此不断接触,致使各自相的浓度随位置函数持续改变的过程(如填充吸附剂的柱子、逆流填充塔等)
逆向流	在间断或者连续流接触中,两相(如水和空气)流向彼此相反的过程
错流	两相(如水和空气)接触中流向彼此相对并垂直进入对方的过程
脱附	涉及吸附质从吸附剂表面去除的传质过程
扩散	布朗运动导致的溶质分子或小的颗粒物从高浓度区域向低浓度区域传输的传质过程
扩散系数	涉及溶质在与某一溶剂中的通量及浓度梯度比例关系的参数,常用同义词扩散率
扩散率	扩散系数的同义词
提取相	水处理中物质被转移进入的相(比如气相萃取、液相吸收、固相吸附或者离子交换)
过流式系统	在传质操作中一相或者两相连续流过的系统
双液法	一种流体与另一种流体接触时的传质过程(比如气提塔中的空气和水)
液固法	一种流体与一种固相(如填料)固定床或流化床接触时的传质过程
传质	物质(如分子、颗粒物等)由一个位置向另一个位置的传输(通常是从一相向另一相的传输)
阶段式操作	不连续接触的两相之间的传质,尤为典型的是,在每个阶段两相之间进行了充分的接触后,在进入下一个步骤之前被分离再混合(两个接触相经常朝不同的方向移动)
溶质	被溶解的物质

续表

术 语	定 义
溶剂	一种用于溶解其他物质(溶质)的液体
吸附	在吸附和吸收作用的本质未明确或不确定时对这类现象的统称
吹脱	通过由一相向另一相传输而达到的物质在相内的去除(比如空气吹脱,见上)

一些水处理过程涉及物质从一相向另一相的传质(比如从水相到气相,或由液相到固相)。曝气和空气吹脱(第 14 章)、吸附(第 15 章)、离子交换(第 16 章)和反渗透(第 17 章)都是涉及相间传质的过程。在这些过程中,污染物的去除效率、分离的速度和设备的尺寸都被传质速率所控制。

广义来说,传质是物质从一处到另一处的运动,其发生的速率是处理过程中的控制因素。污染物的去除过程要依靠介质表面发生的瞬时反应。鉴于这些反应是瞬时发生的,这些位置发生的污染物的降解并非受控于反应的速率,而是这些反应物被传输到介质表面的速率。这样的一个过程就被称为传质控制过程。

传质是一个复杂的课题。许多书都提到了其相关内容,许多大学的化学工程课程包含了完整的传质这一科目。本章关注于环境工程及水处理过程中所涉及的传质过程的主要原理。本章讨论的内容包括传质介绍、分子扩散及扩散系数、模型和传质系数的相关性、工作曲线和在气液界面发生的包含和不包含化学反应的传质过程。

## 7-1 传质介绍

为了介绍传质这一主题,本节对传质所涉及的通量的概念和基本方程进行了介绍。

### 7-1-1 通量的概念

在传质过程中,物质的运动以通量来衡量。质量通量被定义为单位时间通过单位面积的物质的数量:

$$J_A = \frac{m}{At} \quad (7-1)$$

式中, $J_A$ 为溶质 A 在界面的质量通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $m$  为溶质 A 的质量, $\text{mg}$ ;  $A$  为垂直于流动方向的面积, $\text{m}^2$ ;  $t$  为时间, $\text{s}$ 。

因为通量被定义为单位面积,表示强度性质(例如浓度或温度,强度性质不

依赖于系统的大小)。因此,对于两个具有相同质量通量的系统,面积更大的系统会有更多的传质。质量流量是通量和面积的乘积:

$$M_A = J_A A \quad (7-2)$$

其中  $M_A$  为溶质 A 的质量流量, mg/s。

通过增加表面积来提高传质速率是一个关键的方法(因此,提高分离过程的效率依赖于传质),将会在本章后面介绍。

在某些情况下(主要是膜过程),通过界面的物质是以体积而不是质量来衡量,相应的通量被称为体积通量而不是质量流量。一个体积通量单位的例子是  $L/(m^2 \cdot s)$ 。其他情况最好用摩尔单位描述,摩尔通量的单位为  $mol/(m^2 \cdot s)$ 。摩尔通量可以转化成质量通量乘以相对分子质量。

### 7-1-2 传质基本方程

质量传递的发生响应于驱动力。可以移动物质的驱动力包括重力、磁力、电势力、压力等。在每种情况下,物质的通量与驱动力成正比。

环境工程中所关心的推动力是浓度梯度,或者用更一般的术语来说,是化学势梯度或吉布斯自由能。当浓度梯度存在于相互接触的两个相之间或在一个相中的两个位置,物质会以一定速率从浓度较高的区域流向浓度较低的区域,该速率与两个浓度之差成正比,可由以下方程表示:

$$J_A = k_f \Delta c_A \quad (7-3)$$

式中,  $J_A$  为组分 A 的质量通量,  $g/(m^2 \cdot s)$ ;  $k_f$  为传质系数,  $m/s$ ;  $\Delta c_A$  为组分 A 的浓度差,  $mg/L$ 。

方程式(7-3)只有两个参数,即传质系数和浓度梯度,虽然这个方程似乎很简单,但它对许多处理过程具有深奥的含义。本章其余部分的大部分致力于考察该方程的变化。接下来的4节致力于开发传质系数和描述传质模型。接下来,7-6节将探索如何使用工作曲线描述浓度梯度,最后两节描述在气-液界面的传质。

## 7-2 分子扩散

在前面的小节中,我们可以看出质量通量是传质系数和驱动力的乘积[见式(7-3)]。分子扩散是传质的一个特例,溶质分子或颗粒从一个高浓度区域流向低浓度区域完全归因于溶液分子的动能,即扩散时不存在外力导致的流体运动。分子扩散是许多传质问题中涉及的一个基本概念。尽管传质系数通常使用经验公式确定,这种相关性是基于传质模型,进而在一定程度上取决于分



子扩散,扩散系数是一个必需的参数。因此,了解分子扩散是理解传质的一个必要的部分。分子扩散相关的几个重要概念,包括布朗运动,菲克第一、第二定律和斯托克斯-爱因斯坦方程,将在这一节中得到描述。

### 7-2-1 布朗运动

布朗运动是由于液体分子的内能造成的颗粒物或溶质分子的随机运动。由于这个内部热能,所有的分子都在不断地运动。由于周围的气体或液体分子的运动,悬浮在气体或液体相内的溶质分子或小颗粒将剧烈地向着四周各方向运动。随机碰撞导致力的不平等,使溶质分子向随机方向运动。这些碰撞引起的随机运动叫作布朗运动,由罗伯特·布朗在1827年所描述的(Brown,1827)。

在完全静止的流体中,布朗运动引起的分子扩散将导致物质从高浓度区域流向低浓度区域。如果布朗运动是严格随机的,它是怎样导致物质的运动朝向一个由浓度梯度控制的特定方向呢?这个问题可以用与分子组群运动相关的概率来回答。设想将一滴蓝色染料加入一个装水的烧杯中。水分子和染料分子都将随机朝向四面八方运动。在一个带有假想边界的溶液中,其一侧的染料分子的浓度比另一侧的更大,如图7-1所示。为了响应完全随机的运动,染料分子在每个方向上越过边界的速度与染料分子数量成正比,即哪里的染料分子越多,就能越多地从哪个方向随机穿越边界。最终的结果是大部分的分子从浓度较高区域向浓度较低区域移动。当两侧的浓度相同时,染料分子在任何特定的界面净流动停止。通过这种方式,染料均匀分布在烧杯时分子扩散停止(尽管布朗运动仍在继续),即各处浓度是相同的。当各处浓度相同时,烧杯中的溶液达到平衡。

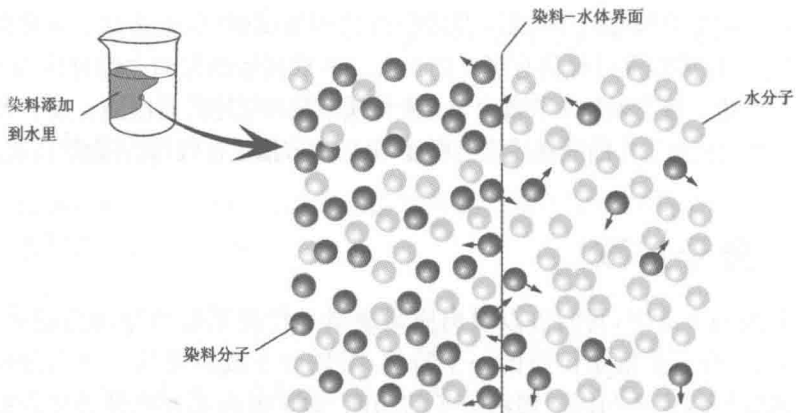


图7-1 布朗运动导致扩散的机理(左边有4倍的染料分子,因此与在另一个方向的传递相比,约以4倍的数量从左到右通过界面)