

水处理工程 理论与应用

中国建筑工业出版社

143368

X520.5
13

水 处 理 工 程

理论与应用

〔日〕 井出哲夫 等编著

张自杰 刘馨远 李圭白

马中汉 赵洪宾 金 锥

译

全 浩 总校

SX03/24



143368

中国建筑工业出版社

本书主要论述水处理的基本原理、理论和应用技术。全书共十二章，包括沉降分离、气浮分离、澄清过滤、污泥脱水、活性污泥法、生物过滤法、氧化塘处理法、厌氧消化法、活性炭吸附、离子交换、电渗析法和反渗透法等。详细介绍了水处理领域通用的各种技术和单元操作以及设备、装置的构造，设计方法、程序，试验方法，设计计算例题等。可供环境工程、给水排水等专业技术人员参考。

水 处 理 工 学

理 论 と 応 用

井出哲夫 编著

技報堂出版株式会社

(1978年)

水 处 理 工 程

理 论 与 应 用

张自杰 刘馨远 李圭白 译

马中汉 赵洪宾 金 锋

全 浩 总校

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 35 字数: 849 千字

1986年10月第一版 1986年10月第一次印刷

印数: 1—6,000册 定价5.90元

统一书号: 15040·4973

译 者 的 话

《水处理工程——理论与应用》一书由日本荏原-英菲尔科株式会社中央研究所的十几位水处理专家共同编写，并由该所所长井出哲夫博士任主编。

全书共十二章，包括固液分离、污泥脱水、生物处理、吸附、离子交换以及膜分离等水处理（给水处理、废水处理）领域通用的各种技术和单元操作。内容较全面，是七十年代日本有关水处理技术书籍的代表著作。

本书的特点是在叙述上不分给水与废水，适应当前水处理技术的迅速发展，从沉淀分离、生物处理到澄清过滤、活性炭吸附、离子交换、反渗透等高级处理技术，很难严格区分哪种单元只用于给水处理，哪种单元只用于废水处理。

本书理论与应用并重，对理论问题的论述，比较全面、深入，对各家学派的学说，也分别地作了介绍。在应用上，对各种技术的设备、装置的构造，设计方法、程序，试验方法等各方面都作了较详细的阐述，并列举大量实例。在每章末都附有设计计算例题与相应的解答，便于读者加深理解。

本书内容丰富，可供高等院校给水、排水及环境工程专业高年级学生和研究生参考，也可供从事水处理技术工作的工程技术人员使用。

参加本书翻译工作的是哈尔滨建筑工程学院给水排水教研室李圭白（第1、3章）、马中汉（第2、4章）、张自杰（第5、6、7、8章）、赵洪宾（第9章）、金锥（第10章）、刘馨远（第11、12章），并由张自杰、刘馨远任分章校对。

北京市环境保护监测中心全浩同志对本书做了全面校对。

由于译者水平所限，译文中错误与不妥之处在所难免，热忱欢迎读者批评、指正。

译者 1984.5

原 书 序

由已故广濑孝六郎先生为主编，并由技报堂出版有限公司发行的《工厂废水及其处理》一书，是在一九六三年出版的。我也是该书的编著者之一，近几年来，很多人多次向我提出建议，出版该书的修订本。但近十多年来，社会在发展，技术也在进步，对原书只作部分修订已不能满足时代的要求。在这种情况下，我们改变了原来的设想，决定全部重新编写。这就是本书产生的背景。

今天的水处理技术相当发达，即使是工业废水处理也必然会涉及到沉淀分离、活性污泥法，直到砂滤、活性炭吸附、离子交换等一系列高级处理技术，这样，给水排水工程、污水处理和工业用水处理技术是很难严格区分的。

在这本《水处理工程》中，主要阐述了固液分离、生物处理等在水处理技术中普遍采用的重要的单元操作和基本方法。对这样一种内容的书，称之为《水处理工程》，可能令人不解，但我们找不出更为恰当的书名。

为使本书内容协调一致，当然全书由一个人来统一编写是最好的，但在技术日新月异的今天，一位生物处理专家很难同时又是离子交换技术的专家，因此，本书不得不采取共同编写的形式。

所幸，本书得到了我任职单位的各位同事的协助而得以完成。执笔的各位先生都是目前工作在第一线的专家，他们不仅有很好的理论修养，而且具有丰富的经验。从我和各位执笔者在同一单位工作这一点来说，便于联系，而且在某种程度上还可能避免多数人共同编写时容易产生的记述不统一和重复的现象。但在另一方面，却又存在着内容偏重于某一特定技术和商品（设备）的可能性。对此，我们曾予以十分注意，并力求避免。

近年来，公害已成为重大的问题，各大学都相继开设了有关公害的课程，但缺乏合适教科书的呼声很高。本书在一定程度上也有满足这一要求的意图。为此，在每章末都附有习题及其解答，以期加深理解。这对在现场工作的技术人员来说，也是有所帮助的。

在编写本书的过程中，虽然非常慎重，但错误仍在所难免。敬请广大读者提出批评意见，以便今后修正、增补。

井出哲夫

一九七六年五月

习用工程单位制单位与法定计量单位的换算关系表 (示例)

量的名称	非 国 际 单 位 制 单 位		国际单位制单位		换 算 关 系	备 注
	名 称	符 号	名 称	符 号		
力 力矩 力偶矩、转矩 重力密度	千克力		牛	N	1 kgf = 9.806 65 N	力的单位一般采用 kN, 如 1000 kgf = 10 kN
	千克力米		牛·米	N·m	1 kgf·m = 9.806 65 N·m	其中力的单位一般采用 kN
	千克力二次方米		牛·米 ²	N·m ²	1 kgf·m ² = 9.806 65 N·m ²	其中力的单位一般采用 kN
	千克力每立方米		牛/米 ³	N/m ³	1 kgf/m ³ = 9.806 65 N/m ³	其中力的单位一般采用 kN
压 强	千克力每平方米		帕斯卡	Pa	1 kgf/m ² = 9.806 65 Pa	压强的单位一般采用 kPa, 如 150 kgf/m ² = 1.5 kPa
	工程大气压		帕斯卡	Pa	1 at = 9.806 65 × 10 ⁴ Pa	
	巴		帕斯卡	Pa	1 bar = 10 ⁵ Pa	
	毫米水柱		帕斯卡	Pa	1 mmH ₂ O = 9.806 65 Pa	
	毫米汞柱		帕斯卡	Pa	1 mmHg = 133.322 Pa	
应力、强度	千克力每平方厘米		帕斯卡	Pa	1 kgf/cm ² = 9.806 65 × 10 ⁴ Pa	应力、强度的单位一般采用 MPa, 如 300 kgf/cm ² ≈ 30 MPa
	千克力每平方毫米		帕斯卡	Pa	1 kgf/mm ² = 9.806 65 × 10 ⁶ Pa	24 kgf/mm ² ≈ 240 MPa
弹性模量、剪切模量 [动力]粘度 能量、功率	千克力每平方厘米		帕斯卡	Pa	1 kgf/cm ² = 9.806 65 × 10 ⁴ Pa	弹性模量的单位一般采用 MPa, 如 2.1 × 10 ⁶ kgf/cm ² ≈ 2.1 × 10 ⁵ MPa
	泊		帕斯卡秒	Pa·s	1 P = 0.1 Pa·s	
	千克力米		焦耳	J	1 kgf·m = 9.806 65 J	
	千克力米每秒		瓦特	W	1 kgf·m/s = 9.806 65 W	
	[米制]马力		瓦特	W	1 [米制]马力 = 735.499 W	
热、热量 导热系数 传热系数 比热容、比焓 比内能	国际蒸汽表卡		焦耳	J	1 cal = 4.1868 J	
	国际蒸汽表卡每秒厘米开尔文		瓦特每米开尔文	W/m·K	1 cal/s·cm·K = 4.1868 × 10 ² W/m·K	
	国际蒸汽表卡每平方厘米开尔文		瓦特每平方米开尔文	W/m ² ·K	1 cal/s·cm ² ·K = 4.1868 × 10 ⁴ W/m ² ·K	
	国际蒸汽表卡每克开尔文		焦耳每千克开尔文	J/kg·K	1 cal/g·K = 4.1868 × 10 ³ J/kg·K	
	国际蒸汽表卡每克		焦耳每千克	J/kg	1 cal/g = 4.1868 × 10 ³ J/kg	

注: 习用非国际单位制单位与国际单位制单位相同者, 本表未列出。

目 录

第一章 沉降分离

(执笔人 井出哲夫 角田省吾

游佐美津雄).....1

1.1 颗粒的沉降速度.....1	
1.1.1 单独颗粒的沉降速度.....1	
1.1.2 群体颗粒的沉降速度.....2	
1.2 沉淀池的分离效率.....4	
1.2.1 理想沉淀池.....4	
1.2.2 短路流的影响.....6	
1.2.3 紊动的影响.....7	
1.3 装置.....8	
1.3.1 平流式沉淀池.....8	
1.3.2 圆形沉淀池.....9	
1.4 实验方法.....9	
1.4.1 用沉降筒——吸管法测定沉降速度分布.....9	
1.4.2 絮凝性颗粒的沉降速度分布的测定方法.....11	
1.5 设计方法.....12	
1.5.1 进水和集水部分的构造.....12	
1.5.2 沉淀池的形状.....13	
1.5.3 沉淀池面积的计算方法.....13	
设计举例.....14	
1.6 斜板的沉降促进作用.....18	
1.6.1 理论.....18	
1.6.2 斜板沉淀池的构造.....20	
1.6.3 设计方法.....22	
设计举例.....23	
1.7 沉淀浓缩.....24	
1.7.1 泥浆的静水沉降特性.....24	
1.7.2 静水沉降曲线的各种关系式.....25	
1.7.3 装置.....28	
1.7.4 实验方法.....28	
1.7.5 设计方法.....30	
设计举例.....33	
1.8 凝聚分离.....35	
1.8.1 凝聚理论.....35	
1.8.2 凝聚剂.....46	
1.8.3 凝聚沉淀装置.....48	
1.8.4 凝聚试验.....52	

1.8.5 设计方法.....55	
-------------------	--

设计举例.....59	
-------------	--

第二章 气浮分离

(执笔人 角田省吾).....63

2.1 加压气浮法的原理.....63	
2.1.1 气-固-液系的润湿.....63	
2.1.2 固-气比与上浮力.....63	
2.2 油水分离装置.....64	
2.2.1 API型油水分离池.....64	
2.2.2 PPI型油水分离池.....64	
2.2.3 CPI型油水分离池.....65	
2.3 加压气浮分离装置.....66	
2.3.1 竖流式加压气浮分离装置.....66	
2.3.2 平流式加压气浮分离装置.....67	
2.3.3 多层气浮分离装置.....67	
2.3.4 加压气浮分离流程.....68	
2.4 试验方法.....68	
2.4.1 气浮速度的测定.....69	
2.4.2 溶解空气量的测定.....70	
2.4.3 试验中的几个问题.....71	
2.5 设计方法.....71	
2.5.1 油水分离装置的设计程序.....71	
2.5.2 加压气浮分离装置的设计程序.....72	
设计举例.....74	

第三章 澄清过滤

(执笔人 藤田贤二).....76

3.1 概论.....76	
3.2 澄清理论.....76	
3.2.1 捕集悬浮颗粒的机理.....76	
3.2.2 过滤方程式.....77	
3.3 快滤池的构造.....80	
3.3.1 普通快滤池的构造.....80	
3.3.2 上向流过滤和双向流过滤.....82	
3.3.3 多层过滤.....83	
3.3.4 平向流过滤.....83	
3.3.5 移动床过滤.....84	
3.4 各种参数选定和各部件设计.....85	
3.4.1 过滤速度.....85	
3.4.2 过滤阻力.....85	
3.4.3 流量调节方法.....88	

3.4.4 滤料粒径和滤层厚度	90	4.3.5 实用举例	147
3.4.5 反冲洗的强度、压力和时间	92	设计举例	147
3.4.6 表面冲洗	95	4.4 滚压脱水	150
3.4.7 集水装置和承托砾石	97	4.4.1 原理	150
3.4.8 排水槽	99	4.4.2 装置	154
3.5 特殊过滤法	101	4.4.3 试验方法	156
3.5.1 微絮凝过滤	101	设计举例	157
3.5.2 加药过滤	102	第五章 活性污泥法	
3.5.3 接触过滤	103	(执笔人 小笠原光彦 远矢	
3.6 滤池的自动运行	103	泰典)	159
3.6.1 普通滤池的运行	103	5.1 活性污泥法的适用范围和处理	
3.6.2 自动运行滤池	104	程度	159
3.7 滤池应用举例	107	5.2 活性污泥法的原理	161
3.7.1 给水	107	5.2.1 微生物在净化过程中的变移	162
3.7.2 工业用水和工厂用水	108	5.2.2 絮凝体的形成与吸附	165
3.7.3 污水高级处理	108	5.2.3 微生物在各增殖期对污水的氧化与	
3.7.4 工业废水处理	109	同化作用	167
3.7.5 海水精制	110	5.2.4 凝聚、吸附及氧化的平衡	168
3.8 设计计算举例	111	5.3 活性污泥法的污水净化机理	168
3.8.1 关于整体设计的计算举例	111	5.3.1 一相说的净化理论	169
3.8.2 关于滤料的计算举例	111	5.3.2 二相说的净化理论	172
3.8.3 关于过滤阻力的计算举例	113	5.3.3 BOD去除与污泥增殖	174
3.8.4 关于反冲洗的计算举例	114	5.3.4 BOD去除与需氧	176
3.8.5 关于多层滤池的计算举例	116	5.4 活性污泥系统的设计、运行与	
第四章 污泥脱水		操作因素	181
(执笔人 铃木英友 角田省		5.4.1 BOD负荷	181
吾)	117	5.4.2 活性污泥的泥龄	183
4.1 真空脱水	117	5.4.3 活性污泥的凝聚沉淀性与	
4.1.1 理论	117	浓缩性	184
4.1.2 装置	119	5.4.4 水温的影响	186
4.1.3 试验方法	122	5.4.5 营养平衡	188
4.1.4 设计方法	125	5.4.6 有毒物质	189
设计举例	126	5.5 曝气	193
4.2 压滤脱水	129	5.5.1 概要	193
4.2.1 装置	129	5.5.2 曝气理论	193
4.2.2 试验方法	133	5.5.3 各种类型的曝气装置	195
4.2.3 设计方法	135	5.5.4 曝气装置设计的主要参数	
设计举例	137	设计举例	208
4.3 离心脱水	138	5.5.5 纯氧曝气装置	209
4.3.1 理论	139	5.5.6 深水曝气装置	211
4.3.2 装置	141	5.6 活性污泥法的各种改进法	212
4.3.3 试验方法	144	5.6.1 曝气池的反应型式	213
4.3.4 设计方法	146	5.6.2 阶段曝气法	214

5.6.3 接触稳定法	216	7.4 藻类的去除	279
5.6.4 完全氧化法(延时曝气法)	217	7.5 厌氧塘	280
5.6.5 高速率法	217	7.6 曝气氧化塘	281
5.6.6 其它处理法	220	7.6.1 曝气氧化塘的净化机理与特征	281
5.6.7 纯氧曝气法	221	7.6.2 曝气氧化塘的设计	282
5.7 试验方法	225	设计举例	284
5.7.1 活性污泥法的各项设计参数	225	第八章 厌氧消化法	286
5.7.2 间歇式处理试验	225	8.1 厌氧消化机理	287
5.7.3 连续式处理试验	228	8.2 厌氧消化的影响因素	290
设计举例	229	8.2.1 消化温度	290
5.8 脱氮活性污泥法(生物脱氮法)	232	8.2.2 有机物负荷	293
5.8.1 脱氮活性污泥法的原理	232	8.2.3 搅拌和混合	294
5.8.2 脱氮活性污泥法的各种改进法	238	8.2.4 废水的C/N比	295
5.8.3 脱氮活性污泥法的设计法	242	8.2.5 抑制消化的物质	297
设计举例	243	8.3 厌氧消化的管理指标	299
第六章 生物过滤法		8.3.1 pH、碱度、缓冲能力	299
(执笔人 远矢泰典)	246	8.3.2 低级脂肪酸的浓度及其种类	300
6.1 净化机理	246	8.3.3 产气量及其组成	302
6.2 生物过滤法的处理方式	249	8.4 厌氧污泥的增殖	305
6.3 生物滤池的负荷	250	8.5 厌氧消化处理装置	306
6.4 BOD的去除及其影响因素	251	8.6 消化池的设计法(容积决定法)	309
6.4.1 接触(停留)时间	251	8.7 试验方法	310
6.4.2 水温	253	设计举例	311
6.4.3 处理水的回流	253	8.8 实际使用举例	314
6.4.4 氧的供给(滤池的通风)	256	第九章 活性炭吸附	
6.4.5 滤料	258	(执笔人 势渡岩)	316
6.5 生物滤池的构造	259	9.1 活性炭处理	316
6.6 特种生物膜法处理技术	260	9.2 活性炭的物理、化学性质与吸附	317
6.6.1 使用塑料滤料的塔式生物滤池	261	9.2.1 物理吸附和化学吸附	317
6.6.2 接触氧化滤池(浸没滤池)	253	9.2.2 细孔构造与吸附	318
6.6.3 生物转盘	265	9.2.3 活性炭表面的化学性质及界面电	
6.7 试验方法	270	动现象	319
设计举例	271	9.2.4 吉布斯(Gibbs)吸附理论	321
第七章 氧化塘处理法		9.3 吸附质的性质和活性炭的吸附能力	321
(执笔人 松尾吉高)	274	9.3.1 分子结构和表面张力	322
7.1 氧化塘的特征	274	9.3.2 溶解度	324
7.2 好氧塘和兼性塘	275	9.3.3 电离和极性	325
7.2.1 好氧塘和兼性塘的特点	275	9.3.4 分子的大小	325
7.2.2 氧化塘内的微生物反应	275	9.3.5 pH	325
7.2.3 设计参数及其标准	276	9.3.6 浓度	326
7.3 氧化塘构造上的注意点	278	9.3.7 温度和共存物质	326

9.4 吸附等温线.....326	9.9.2 吸附速度试验.....373
9.4.1 亨利型.....327	9.9.3 炭柱试验.....373
9.4.2 弗兰德利希型.....327	9.9.4 再生试验.....373
9.4.3 朗格缪尔型.....327	9.9.5 活性炭的试验方法.....374
9.4.4 B.E.T型.....328	设计举例.....374
9.4.5 多成分体系的吸附等温式.....329	第十章 离子交换
9.5 吸附速度.....331	(执笔人 势波岩).....379
9.5.1 影响吸附速度的因素.....331	10.1 离子交换处理.....379
9.5.2 液相界膜上的物质移动速度.....331	10.2 离子交换剂的种类和性质.....379
9.5.3 固相界膜上的物质移动速度.....333	10.2.1 无机离子交换剂.....380
9.5.4 总物质移动系数.....333	10.2.2 有机合成离子交换剂.....381
9.5.5 细孔扩散速度.....334	10.3 离子交换反应.....387
9.5.6 表面扩散速度.....334	10.3.1 离子交换容量.....387
9.5.7 细孔扩散和表面扩散同时影响吸 附速度时的扩散速度.....335	10.3.2 离子交换平衡与选择系数.....388
9.5.8 颗粒内有效扩散系数的计算方法335	10.3.3 离子交换速度.....391
9.6 吸附装置的设计.....338	10.4 离子交换装置的设计.....394
9.6.1 搅拌池吸附装置.....339	10.4.1 固定床离子交换装置.....395
9.6.2 固定床吸附装置.....341	10.4.2 逆流式离子交换装置.....400
9.6.3 移动床吸附装置.....349	10.4.3 连续式离子交换装置.....402
9.6.4 流动床吸附装置.....350	10.5 高含盐量水的部分除盐.....405
9.7 再生方法.....351	10.5.1 强酸性阳离子交换树脂与弱碱性阴 离子交换树脂的组合.....405
9.7.1 干式加热法.....352	10.5.2 硫酸型树脂法.....407
9.7.2 湿式氧化法.....358	10.5.3 脱盐法(德塞尔过程).....408
9.7.3 电化学再生法.....359	10.5.4 希劳塞姆法.....408
9.7.4 药剂再生法.....359	10.5.5 沉淀法.....409
9.7.5 生物再生法.....359	10.6 用离子交换法处理废水.....411
9.7.6 其它再生方法.....360	10.6.1 含铬废水的处理.....411
9.8 活性炭在给水和污水处理中的 应用.....361	10.6.2 汞的去除.....411
9.8.1 除臭.....361	10.6.3 铜、镍、镉的去除.....412
9.8.2 脱氯.....362	10.6.4 氰和氰络合离子的去除.....412
9.8.3 烷基苯磺酸盐(ABS)的去除.....363	10.6.5 氨的去除.....413
9.8.4 纸浆废水处理.....363	10.6.6 磷酸的去除.....414
9.8.5 石油化学废水处理.....365	10.6.7 硝酸根离子的去除.....414
9.8.6 纺织印染废水处理.....366	10.7 离子交换装置的性能降低及其 对策.....415
9.8.7 污水的三级处理.....367	10.7.1 离子交换树脂性能的降低.....415
9.8.8 污水的物理化学处理.....369	10.7.2 树脂的补充.....417
9.8.9 酿酒废水处理.....370	10.7.3 污染树脂的再生法.....417
9.8.10 无机物质的吸附.....370	10.8 试验方法.....418
9.9 试验方法.....372	10.8.1 树脂的调整法.....418
9.9.1 吸附等温线的求法.....372	10.8.2 穿透容量和再生条件.....419
	10.8.3 平衡曲线和选择系数.....419

10.8.4 离子交换树脂的总交换容量·····420	11.7.3 所需膜面积的计算·····448
设计举例·····421	设计举例·····452
第十一章 电渗析法	第十二章 反渗透法
(执笔人 松元宽郎)·····424	(执笔人 塚本辉嘉)·····455
11.1 原理·····424	12.1 前言·····455
11.2 离子交换膜·····425	12.2 反渗透法的基础知识·····457
11.2.1 膜应具有的性质·····425	12.2.1 膜透过理论·····457
11.2.2 膜的种类·····425	12.2.2 膜的制作方法与保存·····460
11.3 膜附近的各种现象·····428	12.2.3 膜的构造与特性·····462
11.3.1 浓度极化与极限电流密度·····428	12.2.4 膜的种类·····472
11.3.2 通过膜的物质迁移·····429	12.2.5 膜的污染与洗净·····474
11.4 电渗析装置·····430	12.2.6 防止膜受污染的方法·····477
11.4.1 电渗析装置的概要·····430	12.3 反渗透膜装置·····478
11.4.2 电渗析槽应具备的条件·····430	12.3.1 板框式构造型·····479
11.4.3 电渗析槽的构成及其种类·····433	12.3.2 管型·····480
11.4.4 除盐装置·····436	12.3.3 中空纤维型·····482
11.4.5 浓缩装置·····437	12.3.4 螺旋卷型·····483
11.5 为电渗析装置的设计与运转而	12.4 试验方法·····484
进行的预备性试验·····439	12.4.1 用平板膜进行的试验·····484
11.5.1 极限电流密度的测定·····439	12.4.2 膜组件试验·····487
11.5.2 工作电流密度的确定·····440	12.5 反渗透的流程·····488
11.5.3 电流效率的测定·····441	12.5.1 预处理过程·····488
11.5.4 原液组成与除盐率·····441	12.5.2 膜分离过程·····489
11.6 设备计划·····442	12.5.3 膜分离过程的设计·····492
11.6.1 经济设计的原则·····442	12.6 反渗透法的应用·····493
11.6.2 处理方式·····445	12.6.1 海水、咸水的除盐·····493
11.7 电渗析槽的容量计算·····447	12.6.2 生活污水处理·····504
11.7.1 确定容量时的注意事项·····447	12.6.3 工业废水处理·····516
11.7.2 工作电流密度的确定·····447	12.6.4 在食品工业中的应用·····545

第一章 沉 降 分 离

重力作用下的固液分离操作,按照悬浮在液体中的悬浮颗粒密度大于液体密度或小于液体密度可分为两类。前者称为沉降分离操作,后者称为上浮分离操作。

沉降分离操作又可分为以获得澄清的处理水为主要目的的澄清分离操作和以获得高浓度污泥为主要目的的沉淀浓缩操作两种。现在应用得较多的是在沉降分离区安装斜板或斜管的装置,它是沉降分离操作的一种改良形式,而且也只不过是澄清分离装置的一种改进方法。但在本文中把它作为独立的一节予以叙述。

单纯依靠重力进行沉降,有时需要的时间过长从而使沉降分离不够经济。为了更经济地对胶体状的悬浮物质进行沉降分离,向水中加注药剂,使污浊物质凝聚成粗大的颗粒再进行沉降分离的方法,称为凝聚沉淀操作。

所谓加压浮选分离操作系指用强制的方法使微细气泡附着在比水轻或比水重的颗粒上,使之成为比水轻的颗粒之后进行分离的操作。

1.1 颗粒的沉降速度

1.1.1 单独颗粒的沉降速度

单独颗粒的沉降速度取决于颗粒的大小、形状、密度以及液体的密度和粘度。在水处理领域里会接触到各种各样的悬浮颗粒,因而求出其准确的沉降速度是困难的。为了简化起见,首先研究一下球形颗粒的沉降速度。

球形颗粒在液体中沉降时的运动方程式,可以下式表示:

$$\left(-\frac{\pi}{6}\right) D_p^3 \rho_s \left(\frac{dv}{dt}\right) = \left(-\frac{\pi}{6}\right) D_p^3 (\rho_s - \rho_L) g - C \left(\frac{\pi}{4}\right) D_p^2 \rho_L \left(\frac{v^2}{g}\right) \quad (1.1)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(\rho_s - \rho_L) g}{\rho_s} - \frac{3}{4} C \left(\frac{v^2}{D_p}\right) \left(\frac{\rho_L}{\rho_s}\right) \quad (1.2)$$

式中 v ——颗粒的沉降速度(米/秒);

t ——沉降时间(秒);

g ——重力加速度(米/秒²);

ρ_s, ρ_L ——颗粒和液体的密度(公斤/米³);

D_p ——颗粒直径(米);

C ——液体的阻力系数。

液体中的球形颗粒是按式(1.2)所示方式进行加速运动。但由于式右侧第1项与沉降速度 v 无关而为一定值,第2项则与 v 的平方成正比,因此必然存在着第1项与第2项相等的点,即 (dv/dt) 为零的点。在此以后颗粒便以等速沉降。当颗粒所受的重力作用与运动阻力相等时,颗粒的沉降速度称为最终沉降速度 v_t ,它是沉降速度计算的基础。

由式(1.2)可知, 当 $dv/dt=0$ 时, 最终沉降速度 v_t (米/秒)为

$$v_t = \sqrt{\frac{4gD_p(\rho_s - \rho_L)}{3\rho_L C}} \quad (1.3)$$

颗粒的阻力系数 C 是雷诺数 Re 的函数, 而且 C 与 Re 的关系如图1.1。如把这个曲线分三段并用近似式表示, 则变成如下的形式。

$$Re \leq 2 \quad C = \frac{24}{Re} \quad (1.4)$$

$$2 < Re \leq 500 \quad C = \frac{10}{\sqrt{Re}} \quad (1.5)$$

$$500 < Re \leq 10^5 \quad C = 0.44 \quad (1.6)$$

式中, $Re = (D_p v_t \rho_L / \mu)$; μ ——动力粘滞性系数(公斤/米·秒)。在上述 Re 值的范围内, 最终沉降速度式分别用下式表示。

[斯托克斯定律(Stokes's Law)]

$$Re \leq 2 \quad v_t = \frac{g(\rho_s - \rho_L)D_p^2}{18\mu} \quad (1.7)$$

[艾伦定律(Allen's Law)]

$$2 < Re \leq 500 \quad v_t = \left[\left(\frac{4}{225} \right) \frac{(\rho_s - \rho_L)^2 g^2}{\mu \rho_L} \right]^{1/3} D_p \quad (1.8)$$

[牛顿定律(Newton's Law)]

$$500 < Re \leq 10^5 \quad v_t = \sqrt{\frac{3g(\rho_s - \rho_L)D_p}{\rho_L}} \quad (1.9)$$

因此, 利用式(1.7)~(1.9)可以计算出最终沉降速度。

下面就求出最终沉降速度和颗粒直径的简易方法作些说明。

由式(1.3), 球形颗粒的阻力系数 C 为

$$C = \frac{4gD_p(\rho_s - \rho_L)}{3\rho_L v_t^2} \quad (1.10)$$

由式(1.10)中可以推导出消去 v_t 或 D_p 的如下公式。

$$CRe^2 = \frac{4gD_p^3 \rho_L (\rho_s - \rho_L)}{3\mu^2} \quad (1.11)$$

$$C/Re = \frac{4g\mu(\rho_s - \rho_L)}{3\rho_L^2 v_t^2} \quad (1.12)$$

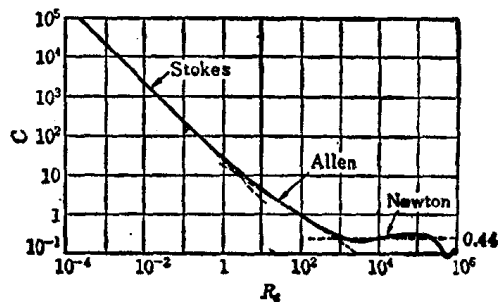


图 1.1 球形颗粒的阻力系数 C 与 Re 的关系

因此, 利用 CRe^2 和 C/Re 与 Re 的关系图可以求出 v_t 和 D_p 。此关系图见图1.2。

(1) 当已知 D_p 值而求最终沉降速度时:

由式(1.11)计算出 CRe^2 , 并按 CRe^2 - Re 关系图(图1.2)求出 Re , 然后再计算 v_t 。

(2) 当已知 v_t 值而求颗粒直径时:

由式(1.12)计算出 C/Re , 并按 C/Re - Re 关系图(图1.2)求出 Re , 然后再计算 D_p 。

1.1.2 群体颗粒的沉降速度

现在研究一下在理想状态下球形群体颗粒的沉降速度。如式(1.1)所表示的那样, 考虑到作用于群体颗粒的阻力 R , 和群体颗粒本身在水中的重力 F_g , 先求出群体颗粒在稳定

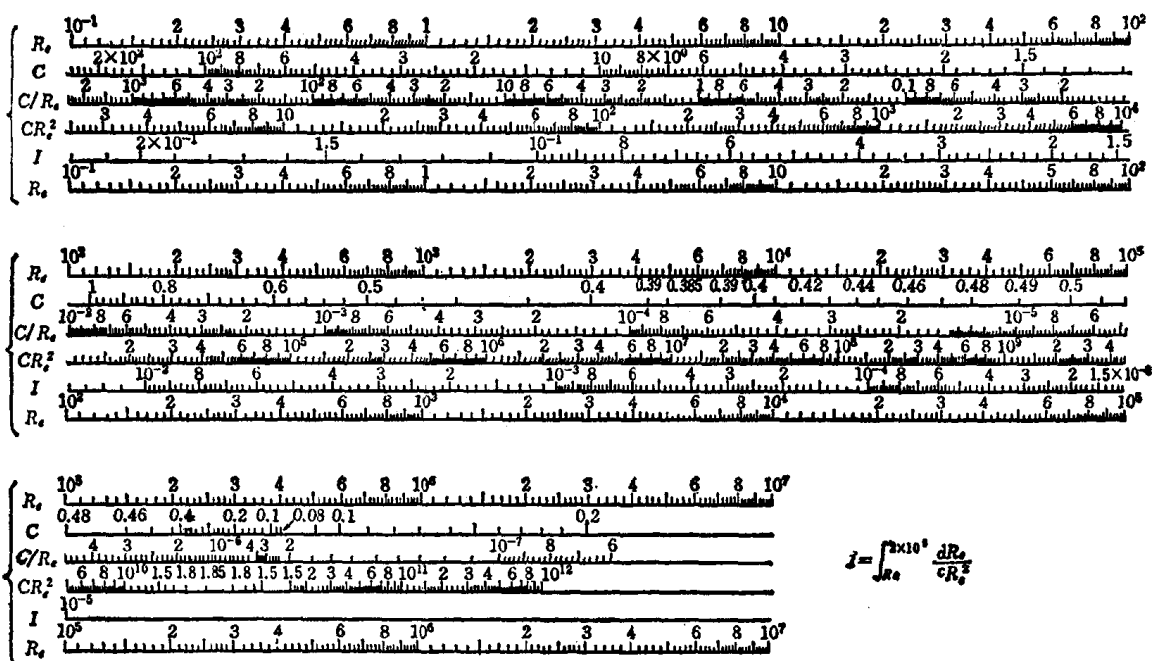


图 1.2 球形颗粒的阻力系数及其函数与雷诺数的关系

状态下, 即 $F_p = R_p$ 时, 群体颗粒的沉降速度 v_s 。

$$F_p = \frac{(1-\varepsilon)(\rho_s - \rho_{sL})g}{g_0}$$

式中, ε ——群体颗粒的孔隙率;

g_0 ——重力换算系数 (公斤·米/公斤力·秒²)。

假设群体颗粒与液体组成的混合液的平均密度为 ρ_{sL} , 那么

$$\rho_{sL} = (1-\varepsilon)\rho_s + \varepsilon\rho_L$$

而且,

$$F_p = \frac{(1-\varepsilon)\varepsilon(\rho_s - \rho_L)g}{g_0} \quad (1.13)$$

另外, 考虑到群体颗粒浓度的修正系数 $f(\varepsilon)$, 作用于群体颗粒的阻力 R_p 为

$$R_p = C A_p \left(\frac{\rho_L v_r^2}{2g_0} \right) f_1(\varepsilon) \quad (1.14)$$

式中, v_r ——群体颗粒群与液体的相对运动速度。孔隙度 ε 在颗粒群中有如下关系:

$$v_r = \frac{v}{\varepsilon} \quad (1.15)$$

若单位容积中颗粒数为 N , 则 $N = (1-\varepsilon)/(\pi/6)D_p^3$, 所以群体颗粒的全投影面积 A_p (米²) 为

$$A_p = \frac{\pi}{4} D_p^2 N = \frac{3(1-\varepsilon)}{2D_p} \quad (1.16)$$

将式 (1.15) 和式 (1.16) 代入到式 (1.14) 中, 得

$$R_p = \frac{3}{2} C \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{D_p} \left(\frac{\rho_L v^2}{2g_0 \varepsilon^2} \right) f_1(\varepsilon) \quad (1.17)$$

若 $R_p = F_p$, 则

$$C = \frac{4D_p(\rho_s - \rho_L)g}{3\rho_L v^2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{f_1(\varepsilon)} \quad (1.18)$$

在层流状态下, 由于雷诺数 $Re \propto v_r/\mu$ ●, 所以阻力系数 $C \propto \mu/v_r$ 。若用一般式表示, 则

$$C = \frac{k}{Re} = \frac{k\mu}{\rho_L D_p v_r} \quad (1.19)$$

式中, k 为比例常数。将式 (1.19) 代入到式 (1.18) 中, 并加以整理, 得

$$v = \frac{D_p^2(\rho_s - \rho_L)g}{18\mu} \cdot \varepsilon^2 f(\varepsilon) \quad (1.20)$$

在此,

$$f(\varepsilon) = \frac{24}{f_1(\varepsilon)k}$$

斯坦诺 (Steinour) 提出了以下经验关系式

$$f(\varepsilon) = 10^{-1.82(1-\varepsilon)} \quad (1.21)$$

从而,

$$v = \frac{D_p^2(\rho_s - \rho_L)g}{18\mu} \cdot \varepsilon^2 10^{-1.82(1-\varepsilon)} \quad (1.22)$$

1.2 沉淀池的分离效率

1.2.1 理想沉淀池

首先观察一下如图1.3所示的水流沿高度方向均匀地流入宽为 W (米)、深为 H (米)、长为 L (米)的沉淀池内, 并形成均匀流速分布的坎普 (Camp) 式理想沉淀池。在此, 假定流入的悬浮颗粒在沉淀池的流入断面上是均匀分布的, 颗粒到达沉淀池底部时即被去除, 而且一旦沉淀下来的颗粒就不再重新浮起。

为了完全分离去除最终沉降速度为 v_i (米/秒)的颗粒, 就必须使由沉淀池最上端流入的颗粒在池内运动 L 距离后, 到达池底。

这种颗粒的完全分离条件为

$$\frac{H}{v_i} \leq \frac{L}{V} \quad (1.23)$$

这时的分离效率 η 为1。

设处理水量为 Q (米³/秒), 分离面积为 $A = WL$ (米²), 则有下列关系式成立,

$$v_i \geq \bar{V} \cdot \frac{H}{L} = \frac{Q}{WL} = \frac{Q}{A} = u \quad (1.24)$$

式中, $Q/A = u$ 为处理水量与分离面积的比值, 称为过流率或上升流速●。

其次, 我们来看一下沉降速度小于 v_i (即 $v < v_i$)●的颗粒。由式 (1.24) 可知, 在 $h = v(L/V)$ 以下流入的颗粒将完全沉淀下来, 所以, 这时的分离效率为:

$$\eta = \frac{h}{H} = v \cdot \frac{L}{VH} = \frac{v}{(Q/A)} = \frac{v}{u} \quad (1.25)$$

● 原文误为“抵抗力 $R_p \propto v_r/\mu$ ”, 特更正——译者注。

● 这两个名称在我国都用的不普遍, 在我国使用比较普遍的名称是表面负荷。

● 原文误为“ $v < v_i$ ”, 特更正——译者注。

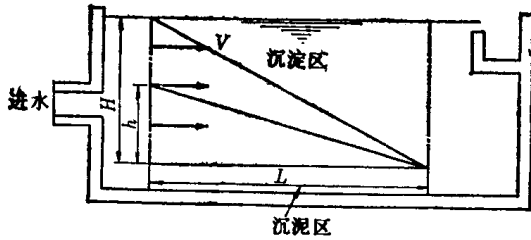


图 1.3 在理想沉淀池中的沉降分离

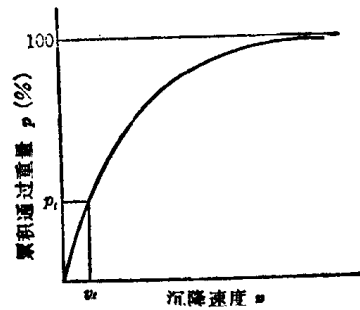


图 1.4 沉降速度分布曲线

这就说明颗粒的分离效率只取决于过流率 \$u\$ 和颗粒沉降速度 \$v\$，而与停留时间无关。

当已知悬浮颗粒的沉降速度分布（或粒径分布）时，则颗粒的去除率 \$F\$ (%) 可按下列式计算。

$$F = (100 - p_i) + \frac{100}{u} \int_0^{p_i} v dp \quad (1.26)$$

上式说明，通过实验可得到如图1.4所示的沉降速度 \$v\$ 及累积通过重量百分率 \$p\$ 的关系，并按此关系图进行 \$\int_0^{p_i} v dp\$ 的近似积分，即可计算出去除率 \$F\$。

现在，再来看一下圆形沉淀池。如图1.5所示，在池半径为 \$R\$ (米)，中心布水筒半径为 \$r_1\$ (米)，澄清区深度为 \$H\$ (米) 的圆形沉淀池内，求出在半径为 \$r\$ 的任意点上沉降速度为 \$v_i\$ 的颗粒的轨迹，

$$dr = V dt$$

$$dH = v_i dt$$

完全分离条件如下式：

$$\int_0^H \frac{dH}{v_i} \leq \int_{r_1}^R \frac{dr}{V} \quad (1.27)$$

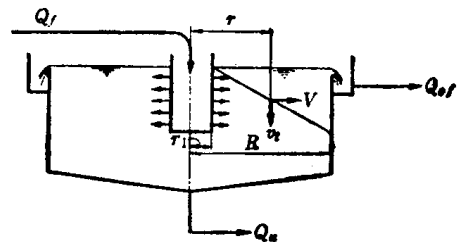


图 1.5 圆形沉淀池的沉降分离

将 \$V = Q/(2\pi r H)\$ 代入之后进行积分并加以整理，则得出与式 (1.24) 完全相同的关式，

$$v_i \geq \frac{Q}{\pi(R^2 - r_1^2)} = \frac{Q}{A} = u$$

在竖流式沉淀池中，则

$$v_i \geq u = \frac{Q}{A} \quad (1.28)$$

若沉降速度小于 \$v_i\$ 的颗粒的百分率为 \$p_i\$ (%)，则去除率 \$F\$ 为

$$F = (100 - p_i) \quad (1.29)$$

从此可以看出，它与平流式沉淀池比较，去除率减少了 \$(100/u) \int_0^{p_i} v dp\$。

1.2.2 短路流的影响

前面已讨论了水平流速均等的理想沉淀池。在下面讨论一下速度分布不均匀的沉淀池的分离效率问题。

假定如图1.6所示, 速度只沿高度 h 方向分布。

$$V=f(h) \quad (1.30)$$

沉降速度为 v_i 的颗粒的沉降轨迹是,

$$dl = V dt$$

$$dh = v_i dt$$

由此二式可得,

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_i} \int_0^h V dh &\leq \int_0^L dl \\ v_i &\geq \frac{1}{L} \int_0^h V dh = \frac{H}{L} \left(\frac{1}{H} \int_0^h V dh \right) = \frac{H}{L} V \end{aligned} \quad (1.31)$$

$v < v_i$ 的颗粒的分离效率 η 为由高度 h 以下流入的颗粒所占比率,

$$\begin{aligned} vL &= \int_0^h V dh \\ \eta &= \frac{\int_0^h V dh}{\int_0^H V dh} = \frac{vL}{v_i L} = \frac{v}{(Q/A)} \end{aligned} \quad (1.32)$$

由上式可见, 即使在深度方向上速度分布不均, 但其分离效率与速度分布均匀的分离效率完全相同。

现再来看一下, 沿深度方向的速度分布均匀, 只在沿宽度方向的速度分布不均匀的情况。如图1.7所示, 我们可以把介于 $y=y$ 和 $y=y+dy$ 区间的微分断面上的速度认为是均匀的, 而且, $A=Ldy$, $Q=HVdy$, 所以, 沉降速度为 v_i 的颗粒的分离效率 η_y 可用下式表示。

$$\eta_y = v_i \frac{Ldy}{HVdy} = \frac{v_i L}{HV} (\eta \leq 1) \quad (1.33)$$

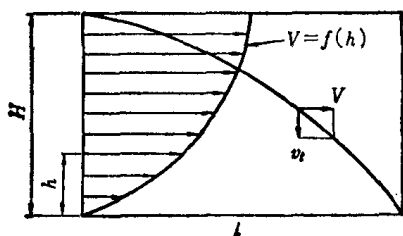


图 1.6 速度沿高度方向分布不均匀

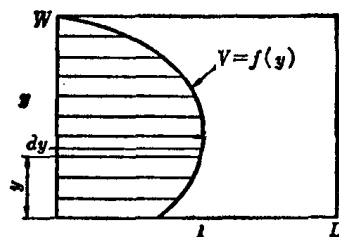


图 1.7 速度沿水平方向分布不均匀