

水处理工程系列教材

水与废水物化处理的 原理与工艺

张晓健 黄霞 编著

清华大学出版社



内容简介

水处理工程系列教材

水与废水物化处理的 原理与工艺

张晓健 黄霞 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本教材系统论述了水处理的各种物理方法和化学方法的原理、基本计算、处理工艺和技术发展。在课程内容体系上,该教材以技术原理为主线,打破按处理对象(给水、废水)划分的传统课程体系,便于教学,避免重复。教材突出基本理论、技术原理和工艺发展,充分反映了水处理的新技术、新工艺,与当前我国水污染控制任务和技术发展紧密结合。该教材是清华大学建设国家级精品课程《水处理工程》系列课程的重要教学成果,是一本高质量的环境工程和给水排水工程专业本科生专业课程教材。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

水与废水物化处理的原理与工艺/张晓健,黄霞编著. —北京:清华大学出版社, 2011.3

(水处理工程系列教材)

ISBN 978-7-302-24675-6

I. ①水… II. ①张… ②黄… III. ①废水处理:物理化学处理—教材
IV. ①X703.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 014828 号

责任编辑:柳 萍

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投 稿 与 读 者 服 务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:170×230

印 张:29.25

字 数:570 千字

版 次:2011 年 3 月第 1 版

印 次:2011 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:42.00 元

产品编号:041112-01

前 言

自然界中的水在太阳的照射和地心引力的影响下不停地流动和转化,通过降水、径流、渗透、蒸发等方式循环不止,构成了水的自然循环。人类活动与水密切相关,人类的生活、工业生产和农业灌溉等都需要水。随着社会生产的发展,特别是人类社会的城市化和工业化的进程,形成了由对水的开采、处理、使用和排放等构成的水的社会循环。

水的社会循环的组成部分包括:

- 给水工程——包括取水工程、给水处理工程、输配水管道工程、给水泵站等;
- 用户——包括居民生活和工业用户;
- 排水工程——包括废水处理工程、排水管道工程、排水泵站等。

图 0-1 表示了水的社会循环的总体情况。在水的社会循环中,还存在着许多小的水循环利用的子系统,例如工厂内部的工业用水循环系统、废水处理与再利用系统等。

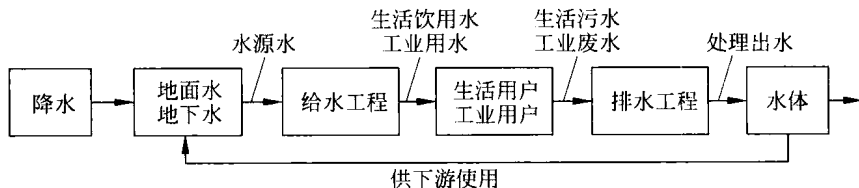


图 0-1 水的社会循环示意图

给水处理和废水处理在水的社会循环中起着极为重要的作用,是保障用水水质和环境水质的重要环节。给水处理的目的是对水源水进行适当的水质处理,去除水源水中的有害杂质,使之满足不同用户对其用水的水质要求。给水处理按不同用户要求主要分为生活饮用水处理和工业给水处理。废水处理的目的是对用户所产生的废水在排入水体之前进行处理,去除水中的污染物质,满足保护环境的要求。废水处理按原废水性质主要分为城市污水处理和工业废水处理。

水处理的基本方法按照其工艺原理划分,可分为物理处理方法、化学处理方法、生物处理方法:

- 物理处理方法——利用物理作用分离去除水中杂质和污染物的方法,包括筛滤、沉淀、气浮、过滤、吸附、萃取、吹脱、膜分离等方法。
- 化学处理方法——利用化学反应,分离、去除或回收水中杂质和污染物的方法,包括混凝、中和、化学沉淀、氧化还原、离子交换、消毒、水质稳定处理等方法。
- 生物处理方法——利用微生物的代谢作用去除水中污染物的方法,去处对象主要是溶解状和胶体状的有机污染物和氮、磷营养物质。生物处理方法可分为利用好氧微生物的好氧生物处理法、利用厌氧微生物的厌氧生物处理法和利用与强化自然环境对污染物质净化能力的自然生物处理法(如稳定塘、土地处理系统等)。

在水处理的理论和教学中,一般把物理处理方法和化学处理方法归为一大类处理方法来论述,把生物处理方法归为另一大类方法论述。本书《水与废水物化处理的原理与工艺》主要论述水的物理、化学处理方法。水的生物处理方法见本系列教材的另一册《废水生物处理的原理与工艺》。

本书共14章,其中第1~3、8、9、12~14章由张晓健编写,第4~7、10、11章由黄霞编写。书中论述了水处理的各种物理化学方法的原理、基本计算、处理工艺、工程应用和技术发展,并归纳介绍了有关的水质标准和对处理的要求。通过对本书的学习,可以掌握有关的水处理基本理论与技术,为从事相关的设计、运行、管理、研究等工作打下坚实的基础。

目 录

第 1 章 水质与水质标准	1
1.1 水质指标	1
1.1.1 物理指标	1
1.1.2 化学指标	3
1.2 天然水源水和废水的性质	5
1.2.1 天然水源水的性质	5
1.2.2 废水水质	6
1.3 水质标准	10
1.3.1 生活饮用水水质标准	10
1.3.2 工业用水水质标准	17
1.3.3 水环境质量标准	17
1.3.4 水污染物排放标准	20
习题	30
第 2 章 水处理的基本方法与工艺	32
2.1 水处理的基本方法	32
2.2 水处理的基本工艺	33
2.2.1 给水处理工艺	33
2.2.2 废水处理工艺	37
习题	41
第 3 章 初步处理	43
3.1 格栅	43
3.1.1 格栅分类	43
3.1.2 格栅设置	50
3.1.3 栅渣	52
3.2 筛网	52

3.2.1	作用与设置	52
3.2.2	筛网设备	53
3.3	沉砂	56
3.3.1	概述	56
3.3.2	沉砂池	57
3.4	均化	59
3.4.1	分类	60
3.4.2	设置位置	60
3.4.3	调节池容积计算	61
	习题	61
第 4 章	混凝	63
4.1	胶体的特性与结构	63
4.1.1	胶体的特性	63
4.1.2	胶体的结构	64
4.1.3	胶体的稳定性	67
4.1.4	胶体的凝聚	68
4.2	水的混凝机理与过程	69
4.2.1	铝盐在水中的化学反应	69
4.2.2	水的混凝机理	70
4.3	混凝剂与助凝剂	76
4.3.1	混凝剂	76
4.3.2	助凝剂	80
4.4	混凝动力学	81
4.4.1	碰撞速率与混凝速率	81
4.4.2	速度梯度的计算	83
4.4.3	混凝控制指标	85
4.5	混凝影响因素	86
4.5.1	水温	86
4.5.2	水的 pH 值和碱度	86
4.5.3	水中杂质的成分、性质和浓度	87
4.5.4	混凝试验	88
4.6	混凝设备	88
4.6.1	混凝剂的配制与投配	88
4.6.2	混合设备	90

4.6.3	絮凝反应设备	91
4.7	混凝的应用	97
4.7.1	给水处理	97
4.7.2	废水处理	98
	习题	99
第5章	沉淀与澄清	102
5.1	沉淀原理与分类	102
5.2	颗粒的沉淀特性	103
5.2.1	自由沉淀	103
5.2.2	絮凝沉淀	108
5.2.3	拥挤沉淀	110
5.3	沉淀池的颗粒去除特性	113
5.3.1	理想沉淀池工作模型	113
5.3.2	影响沉淀池沉淀效果的因素	114
5.4	沉淀池	116
5.4.1	平流式沉淀池	116
5.4.2	竖流式沉淀池	124
5.4.3	辐流式沉淀池	128
5.4.4	斜板(管)沉淀池	130
5.5	隔油池	136
5.5.1	隔油池分离对象	136
5.5.2	隔油池的形式与构造	137
5.6	澄清池	138
5.6.1	澄清池的特点与类型	138
5.6.2	澄清池的构造与运行	139
	习题	141
第6章	气浮	144
6.1	气浮的理论基础	144
6.1.1	气浮过程与去除对象	144
6.1.2	悬浮物与气泡的附着条件	144
6.1.3	气泡的分散度和稳定性	146
6.1.4	乳化现象与脱乳	147
6.2	加压溶气气浮法	148

6.2.1	加压溶气气浮法的工艺组成及特点	148
6.2.2	加压溶气气浮法的主要设备构成	150
6.2.3	加压溶气气浮法的工艺计算	155
6.3	其他气浮法	158
6.3.1	电解气浮法	158
6.3.2	散气气浮法	159
6.4	气浮法的应用	160
6.4.1	气浮法在废水处理中的应用	160
6.4.2	气浮法在给水处理中的应用	161
	习题	162
第7章	过滤	164
7.1	过滤的基本概念	164
7.1.1	过滤概述	164
7.1.2	快速过滤的机理	164
7.1.3	过滤在水处理中的应用	166
7.2	快滤池的结构与工作过程	166
7.2.1	普通快滤池的结构	166
7.2.2	快滤池的工作过程与周期	167
7.2.3	滤池的水头损失	168
7.2.4	滤池的过滤方式	171
7.2.5	滤层内杂质分布情况	173
7.3	滤料及承托层	174
7.3.1	滤料	174
7.3.2	承托层	178
7.4	配水系统与滤池冲洗	179
7.4.1	滤池配水系统	179
7.4.2	滤池的冲洗方式	184
7.4.3	影响滤池冲洗的有关因素	185
7.4.4	滤池冲洗水的排除与供给	189
7.5	普通快滤池设计计算	192
7.5.1	滤速选择与滤池总面积计算	192
7.5.2	单池面积和滤池深度	193
7.5.3	管廊布置	194
7.6	其他过滤设备	195

7.6.1	虹吸滤池	195
7.6.2	重力式无阀滤池	198
7.6.3	移动罩滤池	199
7.6.4	V型滤池	202
7.6.5	压力滤池	204
	习题	204
第8章	消毒	207
8.1	消毒概论	207
8.1.1	消毒目的	207
8.1.2	消毒方法	207
8.1.3	消毒剂投加点	209
8.1.4	消毒机理	210
8.1.5	消毒影响因素	211
8.2	氯消毒	217
8.2.1	氯消毒的化学反应	217
8.2.2	加氯量	219
8.2.3	氯消毒工艺	221
8.2.4	加氯设备	223
8.3	二氧化氯消毒	226
8.3.1	二氧化氯消毒要求	226
8.3.2	二氧化氯制备	227
8.3.3	二氧化氯的投加	229
8.4	紫外线消毒	229
8.4.1	紫外线消毒原理	230
8.4.2	紫外线消毒装置	231
8.4.3	紫外线消毒设计	233
8.5	消毒副产物	237
8.5.1	消毒副产物的种类和控制标准	237
8.5.2	消毒副产物的控制措施	239
8.6	管网水二次污染控制	240
8.6.1	饮用水生物稳定性的概念	240
8.6.2	生物稳定性的评价指标及方法	241
8.6.3	细菌再生长的影响因素和控制对策	241
	习题	242

第 9 章 离子交换	245
9.1 软化与除盐概述	245
9.1.1 软化与除盐的目的与基本处理方法	245
9.1.2 水中常见溶解离子与软化除盐浓度表示方法	245
9.2 离子交换剂与离子交换原理	249
9.2.1 离子交换树脂	249
9.2.2 离子交换反应特性	252
9.2.3 离子交换软化除盐基本原理	254
9.3 离子交换法软化除盐工艺	256
9.3.1 软化工艺流程	256
9.3.2 除盐工艺流程	258
9.4 离子交换法软化除盐设备	260
9.4.1 离子交换器	260
9.4.2 再生液系统	263
9.4.3 除二氧化碳器	265
9.5 离子交换法处理工业废水	266
9.5.1 离子交换法处理工业废水的特点	266
9.5.2 离子交换法处理工业废水的应用	267
习题	268
第 10 章 膜分离	271
10.1 概述	271
10.1.1 膜的定义和分类	271
10.1.2 膜分离过程的定义和分类	271
10.1.3 膜分离特点	273
10.1.4 膜分离的表征参数	273
10.1.5 膜组件型式	274
10.2 电渗析	275
10.2.1 电渗析的原理与过程	275
10.2.2 离子交换膜及其作用机理	277
10.2.3 电渗析器的构造与组装	279
10.2.4 浓差极化与极限电流密度	282
10.2.5 电渗析器工艺设计与计算	283
10.2.6 电渗析的应用	286

10.3	扩散渗析	287
10.3.1	扩散渗析的原理	287
10.3.2	扩散渗析的应用	288
10.4	反渗透与纳滤	289
10.4.1	渗透压和反渗透原理	289
10.4.2	反渗透膜与膜组件	292
10.4.3	反渗透工艺设计与计算	295
10.4.4	反渗透膜污染及其防治	297
10.4.5	反渗透和纳滤膜的应用	299
10.5	超滤与微滤	304
10.5.1	超滤与微滤分离原理	304
10.5.2	超滤与微滤膜	304
10.5.3	超滤与微滤膜的操作工艺	305
10.5.4	超滤与微滤膜的应用	309
	习题	311
第 11 章	氧化还原	313
11.1	概述	313
11.1.1	氧化还原基础	313
11.1.2	氧化还原法分类	317
11.2	空气氧化	317
11.2.1	空气氧化的特点	317
11.2.2	空气氧化除铁和锰	318
11.2.3	空气氧化除硫	319
11.3	氯氧化	320
11.3.1	氯氧化的特点	320
11.3.2	含氰废水处理	321
11.3.3	含硫废水处理	323
11.3.4	含酚废水处理	323
11.4	臭氧氧化	323
11.4.1	臭氧的理化性质	323
11.4.2	臭氧制备	324
11.4.3	臭氧接触反应器	327
11.4.4	臭氧在水处理中的应用	329
11.5	光化学氧化与光化学催化氧化	331
11.5.1	概述	331

11.5.2	光化学氧化	331
11.5.3	均相光催化氧化	337
11.5.4	非均相光催化氧化	338
11.6	湿式氧化与催化湿式氧化	342
11.6.1	概述	342
11.6.2	湿式氧化法	343
11.6.3	催化湿式氧化	347
11.6.4	超临界水氧化法	348
11.7	化学还原	353
11.7.1	还原法除铬	353
11.7.2	还原法除汞	355
11.7.3	还原法除铜	356
11.8	电解	357
11.8.1	概述	357
11.8.2	电解槽构造	359
11.8.3	电解法在水处理中的应用	360
	习题	363
第 12 章	活性炭吸附	364
12.1	活性炭吸附原理	364
12.1.1	活性炭的制造与规格	364
12.1.2	可以被活性炭吸附的物质	366
12.1.3	活性炭吸附的影响因素	366
12.1.4	吸附容量与吸附等温线	367
12.2	粉末活性炭预处理与应急处理	370
12.2.1	应用工艺	370
12.2.2	投加点与投加量	370
12.2.3	投加设备	371
12.3	颗粒活性炭处理	371
12.3.1	应用工艺	371
12.3.2	处理设备	373
12.3.3	活性炭再生	375
	习题	377
第 13 章	其他物化处理方法	379
13.1	离心分离	379

13.1.1	原理	379
13.1.2	悬浮颗粒离心分离径向运动速度	380
13.1.3	设备	381
13.2	中和	384
13.2.1	酸性废水与碱性废水	384
13.2.2	酸性废水中和方法	384
13.2.3	碱性废水中和方法	386
13.3	吹脱	386
13.3.1	原理	386
13.3.2	吹脱设备	387
13.3.3	影响因素	388
13.3.4	吹脱尾气的最终处置	389
13.4	化学沉淀	389
13.4.1	基本原理	389
13.4.2	化学沉淀方法	391
13.5	其他	395
13.5.1	萃取	395
13.5.2	磁分离技术	397
13.5.3	超声波技术	398
	习题	399
第 14 章	循环水的冷却与处理	401
14.1	水的冷却	401
14.1.1	冷却构筑物类型	401
14.1.2	湿式冷却塔的工作原理及构造	404
14.1.3	干式冷却塔的工作原理及构造	414
14.1.4	水冷却的原理及冷却塔热力计算的基本方法	416
14.1.5	循环冷却水系统的设计	431
14.2	循环冷却水水质处理	435
14.2.1	循环冷却水水质特点和处理要求	435
14.2.2	循环冷却水水质处理	439
14.2.3	循环冷却水的水量损失与补充	447
	习题	451
	参考文献	452

第1章

水质与水质标准

1.1 水质指标

水质是指水与水中杂质或污染物共同表现的综合特性。水质指标表示水中特定杂质或污染物的种类和数量,是判断水质好坏、污染程度的具体衡量尺度。为了满足水的特定目的或用途,对水中所含杂质或污染物的种类与浓度的限制和要求即为水质标准。

水质指标及其测定方法在环境监测或水质监测类的课程中已有详细论述,本书中仅对常用的水质指标及其分类、主要项目和含义做简要阐述。

1.1.1 物理指标

水的物理指标主要有水温、浑浊度、悬浮物、臭和味、色度、电导率等。其中,前五项可以归于水的感观性状类指标。

对于水处理与水污染控制,物理指标中较为重要的是以下指标。

1. 水温

温度是水的一个重要指标,水的许多物理性质、水中进行的化学反应和生物反应等都与温度有密切关系,例如水中饱和溶解氧的含量、水的粘度、水中碳酸盐的平衡、化学反应与生物反应的速度等。

对于水温过高的含热工业废水,直接排放将可能产生水环境的热污染问题,对水体生态环境产生不利影响,应采取适当的热污染防治措施,例如提高热能利用率,改进冷却方式以提高冷却效果,充分利用余热等。水温过高的工业污水对污水生物处理也有不利影响,应在处理前采取冷却降温措施,把水温降至适宜的温度范围内。

2. 浑浊度

浑浊度简称浊度,表示水中含有胶体状态和悬浮状态(较小颗粒的悬浮物)的杂质引起水的浑浊的程度。浊度测定方法有散射比浊法、分光光度法和目视比浊法等。目前在饮用水测定中主要采用散射比浊法,单位为散射浊度单位(NTU)。原来的透射光法和浊度单位“度”在饮用水测定中已不再采用。

浊度是饮用水的一项重要水质指标。如果饮用水中含有较高的浊度,表示除了含有较多的直接产生浊度的无机胶体(粘土胶体)颗粒外,还有可能含有较多的吸附在胶体颗粒上的有机污染物(如腐殖酸、富里酸、其他有机污染物等)和直接产生浊度的高分子有机污染物。更重要的是,包埋在胶体颗粒内部的病原微生物,由于颗粒物质的保护能够增强这些微生物抵御消毒剂的能力,使饮用水消毒的效果难以保证,产生较高的微生物学风险。因此,控制饮用水的浊度,不仅对于水的感观性状,而且在毒理学和微生物学上都有重要的意义。

对于污水处理,一般不使用浊度作为水质控制指标。

3. 悬浮物

悬浮物在水质指标中又称为悬浮固体,符号为SS,其确切含义是总不可滤残渣,为水样中 $0.45\mu\text{m}$ 滤膜截留物质的质量(105°C 烘干)。

需要注意的是,在水质测定中,水中固体分为溶解固体和悬浮固体两部分, $0.45\mu\text{m}$ 滤膜截留的部分为悬浮固体,通过 $0.45\mu\text{m}$ 滤膜的水经烘干称重的部分为溶解固体,在溶解固体中包括了水中溶解离子和粒径小于 $0.45\mu\text{m}$ 的胶体颗粒。

对于污水,悬浮物主要用于表示水中非溶解性污染物的含量,是污水水质和污水处理的一项重要指标。

在给水处理中,悬浮物项目一般只用于高浊度水源水中泥砂含量的测定。对于给水处理,由于水源水和处理后的饮用水中的颗粒物的质量较低,特别是处理后的饮用水,一般都只用浊度表示,不使用悬浮物指标。对于一般性质的水源水和给水处理过程中的水,悬浮物与浊度的关系大致上是1NTU的浊度对应于 1mg/L 的悬浮物。注:按浊度的原始定义, 1mg/L 的纯 SiO_2 (可用高岭土或漂白土代表)所产生的浊度为1度。

4. 臭和味

臭和味指用鼻子嗅到的气味和用口尝到的味道。这里“臭”的发音为xiù,指气味,与“嗅”字的发音相同。清洁的水应是无臭无味的。水中存在异臭异味表示水质已受到污染,含有一定的污染物质。

臭(发音xiù)的气味类型可以有很多种,如臭(发音chòu)味、霉味、草味、氯味、农药味、芳香味等多种。由于汉字“臭”存在不同用法(专指与“香”相反难闻气味的chòu和泛指气味的xiù),为避免引起歧义,在专业文献中,水的指标“臭”也被写作“嗅”,例如,对于饮用水存在气味和味道的“臭(发音xiù)味问题”,一般写作“嗅味问题”。

饮用水标准中相关的项目是“臭和味”,我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)对“臭和味”项目的要求是“无异臭、异味”。根据《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006),采用嗅气和尝味的方法检测,对原水样和煮沸

水样(稍冷后)分别进行嗅气味和尝味道的判别,用适当语句描述,并按六级记录其强度;0级——强度“无”,无任何臭和味;1级——强度“微弱”,一般饮用者甚难察觉,但臭、味敏感者可以发觉;2级——强度“弱”,一般饮用者刚能察觉;3级——强度“明显”,已能明显察觉;4级——强度“强”,已有很显著的臭或味;5级——强度“很强”,有强烈的恶臭或异味。我国生活饮用水水质标准要求饮用水“不得有异臭、异味”,此表述为定性描述,未采用上述六级强度的定量控制指标。

对于废水则只有臭的指标,一般以嗅阈值为单位,即用把水样稀释到不能闻出气味时的最低稀释倍数来表示。

饮用水中的异臭异味是由水源水、水处理或输水过程中的化学污染和微生物污染所引起的。水中的某些无机成分会产生一定的臭和味,如硫化氢,过量的铁、锰等。但是大多数饮用水中的异臭异味是由水源水中的污染物所造成的。水源水中的异臭异味可以分为两类:一类是由水中藻类引起的,如蓝藻、硅藻、放线菌、霉菌等微生物的生长产生的污染物质,已查明的有2-甲基异茨醇、土臭素等十余种,是地表水中异臭异味的主要来源;另一类是由工业废水和生活污水中的污染物直接产生的臭味。对于此种由于水源被污染(直接污染或间接污染,如水体富营养化)所造成的含有一定异臭异味的饮用水,应当给予充分重视,这种水不仅感观性状不佳,同时给出了水中可能含有较多污染物的信号。饮用水处理消毒中投加的消毒剂,如氯,本身会产生一定的氯味,并可以同水中的一些污染物质(例如酚)反应,产生致臭物质(例如氯酚)。

地表水和污水的水质标准中目前未包括臭和味的项目。

1.1.2 化学指标

1. 杂质或污染物质的单项指标

水中化学物质的指标,如各种无机离子、有机物的含量等,多以所含这些物质的各单项质量浓度为指标,单位多采用 mg/L,如铁、锰、硫酸盐、氯化物、砷、镉、铬(六价)、挥发酚、四氯化碳、苯、六六六等。除了使用单项物质指标外,还需要使用一些综合性指标。

2. 无机特性的综合指标

反映水的无机特性的一些常用指标有 pH、碱度、酸度、硬度、总含盐量、氧化还原电势等。

3. 有机污染物的综合指标

反映水中有机物含量的综合性指标有高锰酸盐指数(又称耗氧量,符号 COD_{Mn} 或 OC)、化学需氧量(COD)、生化需氧量(常用5天20℃的生化需氧量,符号 BOD_5)、总有机碳(TOC)等,前三个项目以 O_2 计,最后一个以 C 计,单位均