

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

当代给水与废水处理原理

*Contemporary Principles of Water
and Wastewater Treatment*

(第二版)

许保玖 龙腾锐

高等教育出版社

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

当代给水与废水处理原理

Contemporary Principles of Water
and Wastewater Treatment

(第二版)

许保珠 赵腾锐

高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

当代给水与废水处理原理/许保玖,龙腾锐.
2版.—北京:高等教育出版社,2000(2001重印)
ISBN 7-04-008301-9

I. 当… II. ①许… ②龙… III. ①给水处理
②废水处理 IV. TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 64962 号

当代给水与废水处理原理
许保玖 龙腾锐

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 邮政编码 100009
电 话 010-64054588 传 真 010-64014048
网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16 版 次 1991 年 4 月第 1 版
印 张 36 2000 年 9 月第 2 版
字 数 630 000 印 次 2001 年 6 月第 2 次印刷
定 价 55.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

内 容 提 要

本书是一部风格独特的、高层次的水处理理论著作。它的独特风格在于用反应器的观点贯穿全书始终,以生物化学工程的概念贯穿废水的生化处理;对于水处理方法的逻辑基础作了较全面的阐述;注重理论和概念表达的严格性,重视微观分析和数学表达的水平;所用资料新颖独到。

全书包括绪论和化学动力学,反应器,活性炭吸附,传质及曝气,常规分离过程与膜分离,生物化学工程基础——应用微生物生物化学,废水生物化学处理基础,活性污泥法,生物膜法,厌氧生物处理法,废水的脱氮与脱磷等十一章。附录中介绍了某些公式的解。

本书可作为市政工程、环境工程研究生的教材,也可供从事以上两学科科研与工程技术的人员学习参考。

第二版序

本书自 1991 年出版以来,一直作为各高等院校有关专业的研究生参考教材。近 10 年来学科的发展迅速,因此编者有意进行修订再版。承原主编著者许保玖教授委托,由原第二编者龙腾锐全权进行本书的修订。参加本次修订的还有郭劲松副教授(第五章)和何强副教授(第六章)。原第五章编者王志石先生、原第六章编者孟宪庭先生分别因联系不便和健康原因,未参加本次修订工作。

从教学上讲,为改进和加强研究生培养工作,改革教学内容和教学方法,充实高层次人才培养基本条件和手段,促进研究生教育整体水平的提高,教育部研究生工作办公室于 1998 年首批遴选了 12 部适用面广、教学效果较显著、特色鲜明、质量上乘的教材,作为研究生教学用书出版。本书有幸被列入首批出版的书单中,对于我们编者是莫大的鼓励和鞭策,下决心尽全力编好,以感谢评审推荐的专家和学者,以及不辜负将要学习本书的莘莘学子。

从学科发展上讲,首先,由于水科学问题日益为人们所重视,出现了一些新的概念,如“水质灾害”、“水工业”、“水质科学与工程”等等。这些新概念和新提法,主要源于水在社会循环中的核心是水质问题,因为水作为一种资源不同于其它诸如石油、煤等资源,经人们使用之后并不改变其化学结构,所以只要能将水中的污染物去除,水就在理论上可无限期使用下去。这些思路在本次修订的绪论中有所阐述。其次是原有的给水与废水处理工艺,在近 10 年的实践中已有了许多新的成果与经验,加之水中污染物类别日益增多,因此出现了一些为去除这些新污染物的新工艺与新技术。这方面的内容在涉及到一些具体工艺过程的修编中都有所体现。一些工艺的运行、设计参数都按最新资料进行了修订;在第五章中加编或加重编写了新型无机高分子混凝剂、膜生物法等;在第十一章中加编了目前生产上脱氮与脱磷效果良好的间歇循环延时曝气系统(ICEAS)等。第三,随着信息科学的发展和计算机应用的普及,在本学科出现了一些新的技术和手段。有鉴于此,本次修订时加编了目前相对成熟的有关内容,例如在第八章中较详细地介绍了国际水质协会(IAWQ)最新开发的活性污泥法模型 ASM No1 和 ASM No2 等。

在本书修订过程中参考了众多国内外的杂志与书籍,每章末都列出了主要的参考资料,编者谨向本书取材引用过的文献作者致以谢意。同时,本次修订受到“研究生教学用书建设专项经费”的资助,在此一并致谢。

龙腾锐

1999年12月于重庆建筑大学

第一版序

为中国读者编一本具有独特风格的水处理高层次理论读物是作者多年的愿望。近年来,由于受到国内广大读者多种形式的支持与鞭策,促使作者完成了本书的编写。

本书与同类书籍不同之处大致有下列几点。第一,以反应器的概念贯穿全书,以生物化学工程的概念贯穿废水的生化处理,这是作者关于建立水处理学科理论体系的观点;第二,揭示水处理方法的逻辑基础(相当于英语 rationale);第三,重视理论和概念表达的严格性,重视微观分析和数学表达的水平;第四,选用独具匠心的内容,罕见的甚至在水处理书中尚未出现过的内容。这几点的具体含义将在下面各章内容介绍的过程中反映出来。这些含义也就是作者所谓的独特风格,并在书名中冠以当代一词以示强调的原因。

全书包括绪论和十一章,由许保玖编著。龙腾锐(重庆建筑工程学院)、孟宪庭(北京工业大学)和王志石(清华大学)三位中年老师参与了第五章到第十一章部分内容的编写工作。绪论和各章的内容特点大致如下。

绪论中提出了水处理学科发展的观点,水质处理的整体概念,介绍了废水回用于生活饮用水的情况,讨论了有关饮用水水质的问题。

第一章化学动力学。本章介绍了有关化学动力学的基本知识,为本书的后面章节以及阅读现代水处理文献所涉及的动力学问题做准备。本章还专设一节论述水处理中的氧化和沉淀两者有关的动力学问题。

第二章反应器。这是代表本书特色的主要章。本章以较多的篇幅对现代有关反应器的理论进行了有分量的介绍。有关停留时间函数、混合与反应三者间的讨论是本章的重点部分。读者可从这部分内容中体会出水处理反应器中尚未解决的根本性问题以及进行研究的方法。本章中专设一节论述无量纲化,这个水处理书中尚未出现过的题目实际是很重要的。

第三章活性炭吸附。重点内容是在活性炭性能的烧杯搅拌试验结果与吸附柱的生产运行结果间找出逻辑基础。

第四章传质及曝气。本章首先对亨利定律进行了展开的论述,收集

了一些水处理实用的而又在文献中难以找到的亨利常数。气-液传质过程中的液膜与气膜的阻力问题也有较详细的讨论。关于相似准数的内容属于本章的重点。书中以相似准数贯穿有关传质过程的内容,并结合现代水处理文献中所涉及的相似准数,进行了独特的讨论。章末的吹脱塔有关内容介绍了设计的基础知识,这也是现代给水处理所需的内容。

第五章常规分离过程与膜分离,由许保玖与王志石合编。常规分离过程指混凝、沉淀(包括浓缩)与过滤。本章的重点是对现代混凝与过滤的理论进行足够深刻的阐述,这部分是由王志石编写的。Kynch的沉淀理论反映了巧妙的思维过程,本章也给以较详细的讨论。

第六章生物化学工程基础的应用微生物生物化学部分,孟宪庭与许保玖合编,主要工作是孟宪庭完成的。这是代表本书特色的另一主要章。本章为废水处理的生化处理提供基础理论。作者认为,没有微生物和微生物有关的生物化学的基本知识,就无法从微观的水平来理解生化处理过程和分析有关的现象,因此不惜用较大的篇幅来写这一章。本章按水处理中的微生物、细菌生理和生物处理与代谢作用三个大标题来叙述内容。本章为从事生化处理而又无机会专门学习生物化学的读者提供了适合的教材。

第七章到第九章均为许保玖与龙腾锐合编。

第七章为生物化学工程基础的废水生物化学处理部分。把废水的生物处理归入生物化学工程学科是本书的一个独特观点,这一提法在水处理的书中尚未出现过。本章的重点内容是介绍生物化学工程中,如何建立单个细菌以及生物膜或生物絮体的数学模型,为后面各章做准备。

第八章活性污泥法。本章先建立活性污泥法有关 MLSS 增长速率与 BOD_L 减少速率两个基本公式的逻辑基础,然后分别论述 CSTR 型与活塞流型活性污泥法。逻辑基础沟通了微生物基础理论与工程实际间的关系,也是本书的一个内容特点。本章在书后的附录中设了一节介绍活性污泥法动力学的公式,更细致地表达各种因素间的相互关系,可供读者更深一步的参考。

第九章生物膜法。本章以较详细的方式介绍了 Atkinson 的滴滤池数学模型,是为了生物化学工程在生化处理中的应用列举典型的例子。这一模型也反映了现代的水处理方法中,分析问题所达的微观尺度和定量表达的数学水平。本章还设一节介绍生物流化床,这是生物膜法的新发展。

第十章为厌氧生物处理法,第十一章为废水的脱氮与脱磷,均由龙腾

锐编。这两章对废水的厌氧处理与脱氮脱磷进行了较系统的论述,比较完整地反映了近年来的研究和实践成果。

本书的取材,得力于许多西方著作。在每章末已列出了一些取材的主要文献,但在每章正文中只对所直接引用的图、数据表和例题等的来源注出文献号。对此,特向书中取材引用过的文献的作者致以谢意。

许保玖

1990年4月于北京清华大学

目 录

绪论	1
§ 0-1 水处理的学科方法学	1
§ 0-2 给水与废水处理	3
§ 0-3 废水的再生与饮用水水质	8
参考文献	14
第一章 化学动力学	15
§ 1-1 反应速率与反应级数	15
§ 1-2 简单的基元反应	18
§ 1-3 较复杂的反应	25
§ 1-4 速率常数 k 与温度的关系	35
§ 1-5 非基元反应的动力学模型	39
§ 1-6 水处理中有关的动力学问题	43
习题	46
参考文献	48
第二章 反应器	49
物料衡算方程与 Fick 第一扩散定律	51
§ 2-1 物料衡算方程	51
§ 2-2 浓度与扩散速率	52
§ 2-3 Fick 第一扩散定律	55
多相反应与均相反应	59
§ 2-4 氧气在水膜内的扩散和反应	60
§ 2-5 多孔丸模型	65
连续均相反应器	69
§ 2-6 活塞流反应器	69
§ 2-7 连续搅拌反应器	71
§ 2-8 阶式 CSTR	74
停留时间函数、混合与反应	78
§ 2-9 停留时间函数	78
§ 2-10 实验方法	83
§ 2-11 $E(t)$ 函数的组合	90
§ 2-12 液龄分布函数的统计参数	94
§ 2-13 $E(t)$ 、混合与反应动力学	95

分散模型	102
§ 2-14 无量纲化	102
§ 2-15 分散模型	105
反应器的容积	111
§ 2-16 反应器的设计	111
§ 2-17 各种反应器容积的比较	115
习题	118
参考文献	120
第三章 活性炭吸附	122
§ 3-1 活性炭的性能	122
§ 3-2 吸附等温线	126
§ 3-3 Langmuir 公式的推导	129
§ 3-4 吸附公式的应用	131
§ 3-5 吸附柱的设计	136
习题	147
参考文献	149
第四章 传质及曝气	150
§ 4-1 亨利定律	151
§ 4-2 气-液传质模型	154
§ 4-3 相似现象与相似准数	165
§ 4-4 曝气设备的充氧能力	175
§ 4-5 气泡的传质性能	178
§ 4-6 鼓风曝气	185
§ 4-7 机械曝气	188
§ 4-8 水膜的传质性能	193
§ 4-9 吹脱塔	196
习题	201
参考文献	202
第五章 常规分离过程与膜分离	203
凝聚与絮凝	203
§ 5-1 基本概念	203
§ 5-2 胶体颗粒的基本性质	204
§ 5-3 絮凝动力学	216
§ 5-4 水处理中的凝聚与絮凝	224
沉淀试验	236
§ 5-5 离散颗粒的沉淀试验	236
§ 5-6 絮凝颗粒的沉淀试验	240

§ 5-7 浓悬浮液的沉淀试验	243
§ 5-8 Kynch 的沉淀理论	247
浓缩池	254
§ 5-9 利用 Kynch 理论确定浓缩池面积	255
§ 5-10 利用固体通量曲线确定浓缩池面积	258
滤床过滤	261
§ 5-11 滤床过滤的流体力学	262
§ 5-12 水处理中的滤床过滤	266
膜分离	272
§ 5-13 膜分离法概述	272
§ 5-14 反渗透	274
§ 5-15 超滤	281
§ 5-16 膜生物反应器	285
习题	290
参考文献	293
第六章 生物化学工程基础——应用微生物生物化学	295
水处理中的微生物	295
§ 6-1 原核细胞微生物	295
§ 6-2 真核细胞微生物	301
§ 6-3 病毒	305
细菌的生理	308
§ 6-4 细菌的成分	308
§ 6-5 细菌的营养与生长环境	324
§ 6-6 细菌的生物催化剂——酶	332
§ 6-7 分批培养物的生长规律	339
§ 6-8 细菌的呼吸与生物氧化	343
微生物的代谢与合成	358
§ 6-9 需氧代谢	358
§ 6-10 厌氧代谢	377
§ 6-11 微生物的生物合成	384
习题	392
参考文献	392
第七章 废水生物化学处理基础	394
§ 7-1 单个细菌的模型	395
§ 7-2 细菌的连续增殖	398
§ 7-3 细菌增殖速率与底物消耗速率关系式	402
§ 7-4 BOD 与 T_bOD	404

§ 7-5 微生物集团的模型	414
§ 7-6 微生物膜的阻力和厚度	422
习题	425
参考文献	426
第八章 活性污泥法	427
§ 8-1 活性污泥法的基本概念	427
§ 8-2 CSTR 型活性污泥法	438
§ 8-3 CSTR 型活性污泥法的设计	445
§ 8-4 活塞流型活性污泥法	453
§ 8-5 硝化	459
§ 8-6 污泥需氧消化反应器	462
§ 8-7 活性污泥数学模型	465
习题	470
参考文献	474
第九章 生物膜法	476
§ 9-1 生物膜法的基本概念	476
§ 9-2 滴滤池法	477
§ 9-3 Atkinson 的滴滤池数学模型	479
§ 9-4 滴滤池的设计	487
§ 9-5 生物转盘	493
§ 9-6 生物流化床	494
习题	500
参考文献	500
第十章 厌氧生物处理法	502
§ 10-1 厌氧生物处理法的基本原理和流程	502
§ 10-2 厌氧过程动力学	509
§ 10-3 厌氧活性污泥法	511
§ 10-4 厌氧生物膜法	521
§ 10-5 厌氧处理法的运行与管理	527
习题	528
参考文献	528
第十一章 废水的脱氮与脱磷	530
§ 11-1 生物脱氮和脱磷的基本原理	531
§ 11-2 生物脱氮和脱磷的影响因素	535
§ 11-3 生物脱氮系统	538
§ 11-4 生物脱磷系统	547
习题	549

参考文献	549
附录一 $\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$ 的解	551
附录二 式(9-8)的解	554

绪 论

§ 0-1 水处理的学科方法学

给水与废水处理简称水处理。20 世纪 50 年代起,一些学者为了建立各种水处理方法间的理论联系,提高学科的理论水平,先引用了化学工程中单元操作(unit operation)及单元过程(unit process)的概念。70 年代,又引入了反应器(reactor)的理论。为了更好地理解这些内容对于水处理学科理论所起的作用,本节先讨论有关单元操作与单元过程的问题,在第二章中再讨论反应器的问题。

任何化工生产过程都可以分解为许多步对物料所采取的行动,每一步行动产生一种独特的效果。当这种行动不包含产生任何化学反应时,称为单元操作,当这种行动产生了化学反应时,则称为单元过程。单元操作往往带有物理变化,但是也有不产生物理变化的单元操作。早期的化工生产过程主要是由一些单元操作组成的。例如食盐的生产过程只包括下列几种单元操作:固体和液体的输送、传热、蒸发、结晶、干燥及筛选。在这些单元操作中,蒸发及结晶都产生了物理变化;传热过程可能产生物理变化,也可能不产生物理变化。但固体及液体的输送、干燥及筛选则完全没有物理变化。水处理中用的一些方法,如混合、沉淀、浮升、浓缩、过滤,也是化工中的一些单元操作。

单元操作的概念是 1915 年出现的。这一概念把各种化工生产中基于同样的理论设计出来的、具有同样功能的设备抽象出来,进行统一的研究,使各种不同的化工生产间出现了共性。单元操作这一学科的出现使化学工程足以成为一门独立的工程分支。在 1915 年以后的 40 年中,单元操作一直是化学工程有别于其它工程学的特征学科。后来由于化学反应工程学科的出现,才取代了单元操作的这种特殊地位。

单元过程这一概念是在 20 世纪 30 年代类比于单元操作的概念提出来的。聚合、氧化、水解、硝化都是一些单元过程。水处理中,化学沉淀、

离子交换、消毒、脱氯等也应归入单元过程之中。单元过程由于包含了化学反应,就不易像单元操作那样,定义得很清楚,同时也难于完全脱离物料来论述。单元操作一直是化学工程的基本课程,教材和专著很多,单元过程则未具有类似的情况,原因可能就在这里。20世纪50年代以后,由于发展了化学反应工程这一新学科,把化学反应与有关的其它过程结合起来研究,这无疑又降低了单元过程这一概念原来所起的作用。

水处理著作中,首先引入单元操作这一概念的,可能是1954年出版的Fair与Geyer两人的《给水与废水处置》(Water Supply and Wastewater Disposal)一书。但这本书把包含化学反应的单元过程也包括在单元操作这一概念内。这本书后来由Okun参加编写,分两卷出版,在第二卷《给水净化与废水处理》(Water Purification and Wastewater Treatment)中,仍然采用原来的术语。因此,在这些著作中,单元操作的涵义可以理解为单元方法。

Rich分别于1961年及1963年发表了《卫生工程的单元操作》(Unit Operations of Sanitary Engineering)及《卫生工程的单元过程》(Unit Processes of Sanitary Engineering)两本书,按化工的观点来引用单元过程这一术语。Metcalf与Eddy公司编写的《废水工程》(Wastewater Engineering, 1972及1979年版)又把单元过程区分为化学单元过程(包含化学反应)及生物单元过程(包含生化反应)两条术语,单元操作则称为物理单元操作。

Rich等人的著作虽然都引用了单元操作及单元过程等概念,但实际上并没有把水处理过程完全按单元操作及单元过程的体系来论述,这些概念只是作为把传统的水处理方法分成两大类(Rich)或三大类(Metcalf与Eddy)的大致依据。这样做是为了便于论述和理解。例如曝气池包括了气和水的输送(单元操作)、气体传递(单元操作)及生物氧化(单元过程)等内容,它与二次沉淀池(单元操作)组成了活性污泥法。Rich及Metcalf与Eddy都是把活性污泥法作为一完整的处理方法来论述的,这和一般的废水处理著作的做法并无差别,只是分别把这一方法归入单元过程(Rich)或生物单元过程(Metcalf与Eddy)一类而已。

因此,单元操作与单元过程等两个概念的引入,对于水处理的学科理论并没有重大的贡献,不像单元操作这一概念对于化学工程所起过的那种突出贡献。原因可能是,化工生产包括了许多的完全不同的工业,单元操作这个概念使这些完全不同的工业之间产生了联系,在理论上有了突破。但是,水处理只是生产水的一种工业,单元操作与单元过程的那种概念特点便不存在了。

应该说,引入反应器的理论对于提高水处理的学科理论是有较大的

贡献的,而且大有发展的前景,这将从第二章起看出来。

§ 0-2 给水与废水处理

20世纪50年代以前,给水处理与废水处理涵义的划分是很清楚的。从天然水源取水,为供生活或工业的使用(特别是生活使用)而进行的处理,称为给水处理。为了排除的目的,对于使用过的水所进行的处理,称为废水处理。自从水的污染日益严重,水源逐渐紧张以来,给水处理与废水处理间的界限也就逐渐模糊起来。现在,废水可以作为水源,经处理后以供工业用水甚至生活用水。水的再用(reuse)以及再生(revonation)这类术语的出现就反映了这种情况。为了废水的再生或再用所进行的处理,就其水质说是废水处理,就其处理的目的来说则为给水处理。在这种新形势下,使用水处理或水质控制这样的术语,不再划分给水与废水,可能较为方便;而水源、水处理与用水三者之间应作为一个整体来看待,如图0-1所示。在天然水源逐渐紧张、水质逐渐恶化的今天,这种对于水的全面观点尤其重要。

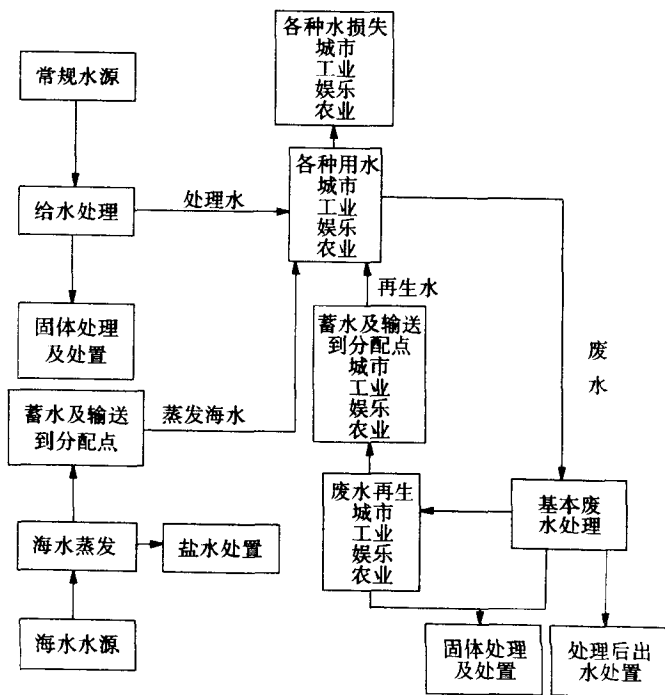


图 0-1 水的使用、处理和处置系统