

当代给水与废水处理原理讲义

许保玖 编著

清华大学出版社

86.637
8303274
2

当代给水与废水处理原理讲义

许保玖 编著

内 容 简 介

本书是以作者在清华大学环境工程专业为研究生的水处理讲课材料为基础编写的。内容要点如下。一、重视水处理的学科理论。书中反应器及生物化学工程基础两章重点反映了作者的学科观点。另外，还提出一些有关学科的看法。二、强调基本概念及基本理论，分析问题的深度及应用数学的水平都较同类书籍略深。三、对于重点难点内容都充分地加以展开论述，以便于自学参考。四、每章末附有习题，起巩固学习本章内容的作用。本书可作环境工程专业研究生的水处理教材，大学本科高年级水处理选修课的用书，以及一般从事水处理工作人员的水处理高级参考读物。

当代给水与废水处理原理讲义

许保玖 编著

清华大学出版社出版

北京 清华园

岳各庄印刷厂印刷

北京 丰台

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787/1092 1/16 印张：17.25字数：441千字

1983年8月第一版 1983年8月第一次印刷

印数：1—40000

统一书号：15235·70 定价：2.15元

序

这是一本为环境工程专业研究生水处理课程编写的教材，也可以作为本科高年级选修课的用书，以及一般读者提高水处理理论的参考书。1978年，作者为清华大学环境工程专业研究生的水处理新课准备教材的时候，发现 Schroeder 的《给水与废水处理》一书的内容颇为接近自己的想法。于是以这本书为主要参考书，以笔记形式讲授，参加听课的还有一些校外同志，讲授效果尚好。1980年又以原来讲稿为基础，写成油印讲义，为教研组部分同志讲了一次。本书是以这本讲义的内容为基础，重新编写的。

书中的取材和写法可结合书名来说明。

在取材方面，以理论为主，特别重视那些足以反映七十年代以来的水处理理论发展特点的内容，书名冠以当代二字，以示强调。因此，本书并不对水处理的现代理论进行全面的介绍。作者认为，水处理理论的当代发展特点应该由两个方面来表征，一个方面是分析问题的深度和微观尺度，另一个方面是定量表达的数学水平。因此，本书的写法显然不同于，目前在水处理的实际工作和研究工作中所存在的，过于强调宏观现象，轻视高等数学，甚至认为无用的那些意见。

书名缀以讲义一词有下列三方面的含义。一是为了较自由地取舍材料和选用表达形式。这样既便于贯彻上述写书的原则，又便于根据读者的需要来写。例如第七章比较全面地介绍了 Atkinson 的滴滤池模型，用了较多的数学，是为了反映当代理论的发展特点。第四章中沉淀试验一节，用了 5000 字来介绍离散颗粒及絮凝颗粒的问题，是鉴于一般教材语焉不详读者不易通其理的缘故。二是为了便于提出一些看法。这也是多方面的。有些是较大的问题，例如关于单元操作、单元过程及反应器等概念的看法，书中比较强调反应器概念的作用，对于单元操作及单元过程两条术语，并不认为能起重要作用。另外，第五章中对生物化学工程的提法，可能也是一个有争议的较大问题，值得大家讨论。书中提的一些小问题如曝字的正确读音以及 trickling filter 的译名等。三是指书中直接引用了其它著作的一些具体材料，最多的是 Schroeder 的著作。但是，这些引用的材料，都是在辨伪取精之后，再由作者进行演义的。（附带指出，Schroeder 著作中的错处较多，请读者参考时注意。）

为我国读者写一本水处理理论的专著，一直是作者五十年代争取回国的愿望之一。本书虽然谈不上是著作，但可聊表对读者的多年心意。书中舛误之处，以及有关水处理的学科观点，并希读者不吝指正。

清华大学土木与环境工程系

许保玖

1981年11月

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	(2)
第一章 反应器	(7)
1-1 引言	(7)
化学反应动力学	(8)
1-2 反应速率与反应级数	(8)
1-3 简单的基元反应	(11)
1. 单一组分的零级反应	(11)
2. 单一组分的一级反应	(12)
3. 两种反应物的二级反应	(13)
4. 两种反应物的伪一级反应	(14)
5. 三级和更高级的反应	(14)
6. 求反应的级数	(15)
1-4 较复杂的反应	(15)
1. 平行反应	(16)
2. 可逆反应	(17)
3. 连串反应	(18)
4. 准稳态反应	(21)
1-5 速率常数 k 与温度的关系	(24)
1-6 非基元反应的动力学模型	(25)
物料衡算方程与 Fick 第一扩散定律	(27)
1-7 物料衡算方程	(27)
1-8 浓度与扩散速度	(28)
1-9 Fick 第一扩散定律	(30)
1. Fick 第一扩散定律	(30)
2. 扩散系数 \mathcal{D}_{AB}	(32)
多相反应与均相反应	(34)
1-10 氧气在水膜内的扩散和反应	(34)
1. 多相反应模型	(34)
2. 均相反应模型	(36)
3. 讨论	(37)
1-11 多孔丸模型	(38)
1. 多孔丸的数学模型	(38)
2. 有效系数 E 的概念	(40)

1-12 BOD试验	(41)
连续均相反应器	(43)
1-13 连续搅拌反应器	(43)
1. 一般方程式	(43)
2. 一级反应的解	(43)
3. 平行反应的稳态解	(44)
4. 连串反应的稳态解	(45)
1-14 阶式 CSTR	(45)
1. 一级反应的稳态解	(46)
2. $r=0$ 时的非稳态解	(47)
1-15 活塞流反应器	(49)
1-16 停留时间分布的分析	(50)
1. 停留时间函数	(50)
2. 脉冲信号的应用	(53)
3. 阶梯信号的应用	(56)
4. 一般反应器	(57)
5. 反应过程与液龄分布函数	(59)
1-17 离散模型	(60)
1-18 混合作用	(63)
1-19 各种反应器的容积比较	(65)
1. 间歇反应器与活塞流反应器的比较	(65)
2. CSTR 与活塞流反应器的比较	(66)
3. 阶式 CSTR 与活塞流反应器比较	(68)
习题	(68)
第二章 活性炭吸附 膜滤方法	(73)
活性炭吸附	(73)
2-1 活性炭的性能	(73)
2-2 吸附等温线	(75)
2-3 Langmuir 公式的推导	(77)
2-4 吸附公式的应用	(79)
1. 求吸附公式中的常数	(79)
2. 吸附公式的应用	(80)
3. 逆流吸附	(82)
2-5 吸附柱的设计	(84)
1. 求活性炭的容量传质系数	(84)
2. 吸附柱的泄漏和耗竭过程	(85)
3. 吸附柱的设计	(87)
膜滤方法	(92)
2-6 引言	(92)
2-7 反渗透	(94)

1. 渗透压	(94)
2. 反渗透通量	(96)
2-8 超过滤	(97)
习题	(100)
第三章 气体传递	(102)
3-1 气-液传质模型	(102)
1. 亨利定律	(103)
2. 双膜理论	(104)
3. 浅渗理论	(106)
4. 表面更换理论	(108)
3-2 相似现象与相似准数	(111)
1. 无量纲化	(111)
2. 相似现象与相似准数	(113)
3. 颗粒物或气泡在流体中的沉降或浮升	(115)
4. 扩散过程的相似	(118)
3-3 充氧设备的传质能力	(119)
3-4 鼓泡曝气	(122)
1. Eckenfelder 的相关公式	(122)
2. 供给生化反应所需的氧气量	(124)
3. 保持活性污泥絮体在悬浮状态所需的空气量	(124)
3-5 机械曝气	(126)
1. 表面曝气器	(126)
2. 淹没式曝气器	(127)
3-6 水膜的传质性能	(129)
1. 水膜的厚度	(129)
2. 沿光滑板下落的水膜的传质系数 k_L	(130)
3-7 吹脱塔的设计	(132)
1. NH_3 的解吸特性	(132)
2. 吹脱塔的设计	(133)
附 录	(135)
3-8 $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ 的解	(135)
习题	(137)
第四章 凝聚与絮凝 沉淀试验 浓缩池	(139)
凝聚与絮凝	(139)
4-1 基本概念	(139)
4-2 凝聚的动力学	(144)
1. 异向凝聚	(144)
2. 同向凝聚	(145)
4-3 水处理中的凝聚与絮凝	(149)

1. 水处理中的凝聚特点	(149)
2. 铝盐和铁盐的凝聚性质	(151)
沉淀试验	(154)
4-4 离散颗粒的沉淀试验	(154)
4-5 絮凝颗粒的沉淀试验	(158)
4-6 浓悬浮液的沉淀试验	(160)
1. 浓悬浮液的沉淀特点	(160)
2. 固体通量曲线	(162)
4-7 Kynch 的沉淀理论	(162)
1. Kynch 的沉淀理论	(162)
2. Kynch 理论的应用	(166)
浓缩池面积	(168)
4-8 利用 Kynch 理论确定浓缩池的面积	(169)
4-9 利用固体通量曲线确定浓缩池的面积	(171)
习题	(173)
第五章 生物化学工程基础	(176)
5-1 废水处理的微生物	(176)
5-2 生物处理与生物化学工程	(178)
1. 废水的生物处理	(178)
2. 生物化学工程	(179)
5-3 细菌的生理	(180)
1. 细菌的成分	(180)
2. 细菌的生长环境	(182)
3. 细菌的代谢作用	(183)
5-4 单个细菌的模型	(186)
5-5 细菌的增殖	(188)
1. 分批培养物	(188)
2. 连续培养物	(191)
5-6 BOD 与 T_bOD	(194)
1. 生化需氧量(BOD)与 BOD 试验	(194)
2. T_bOD 试验	(197)
5-7 微生物集团的模型	(201)
1. 微生物膜的微分方程式	(201)
2. 基本方程的解	(202)
3. 微生物絮体的解	(205)
习题	(207)
第六章 活性污泥法	(209)
6-1 活性污泥法的基本概念	(209)
1. 活性污泥法	(209)
2. 生物动力学参数	(211)

3. 反应过程的控制	(214)
4. 有关“微生物”术语的问题	(215)
6-2 CSTR 型活性污泥法	(215)
1. 基本方程式	(216)
2. 细菌的平均停留时间与增殖率	(217)
3. 有机物的去除速率 R_0	(219)
4. 产率因数 Y 与污泥龄 θ_c	(219)
5. 反应器中有机物浓度 C 及细菌浓度 X	(219)
6. 讨论	(220)
6-3 CSTR 型活性污泥法的设计	(221)
6-4 反应器的活塞流模型	(228)
1. 基本方程式	(228)
2. 平均细菌停留时间 MCRT	(229)
3. MLSS 浓度 X 的表达式	(231)
4. 有机物的表达式	(232)
5. CSTR 模型与活塞流模型比较	(232)
6-5 硝化	(233)
附 录	(235)
6-6 一些较完全的式子	(235)
1. 污泥龄 θ_c 的完全表达式	(235)
2. 单位去除底物量所废弃的固体量	(237)
3. MLVSS 的分数	(238)
4. 存活力	(239)
5. 废弃污泥量计算	(239)
习题	(242)
第七章 生物膜法	(246)
7-1 滴滤池法	(246)
7-2 Atkinson 的滴滤池数学模型	(247)
1. 基本方程式	(248)
2. 基本方程式的解	(249)
7-3 滴滤池的设计	(254)
1. 滴滤池的简化模型	(254)
2. Eckenfelder 公式	(257)
7-4 生物转盘	(258)
附 录	(259)
7-5 (7-8) 式的解	(259)
习题	(263)
主要引用书刊	(265)

绪 论

0-1 水处理的学科方法学

给水与废水处理也简称水处理。五十年代起,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。七十年代,又引入了反应器(reactor)的理论。这就是本节所指的学科方法学的涵义。为了更好地理解这些新内容对于水处理学科理论所起的作用,最好从它们的原始涵义讲起。本节先讨论有关单元操作与单元过程的问题,在第一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,则称为单元操作,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;传热过程也可能产生物理变化,也可能无物理变化;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年以后的四十年中,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三十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,就不易象单元操作那样,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。五十年代以后,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两氏的《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1979两版)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(读pù,见6-1)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了起了重大的贡献，不象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，这将从下一章起看出来。

0-2 给水与废水处理

五十年代以前，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的用水。水的再用(reuse)以及再生(renovation)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

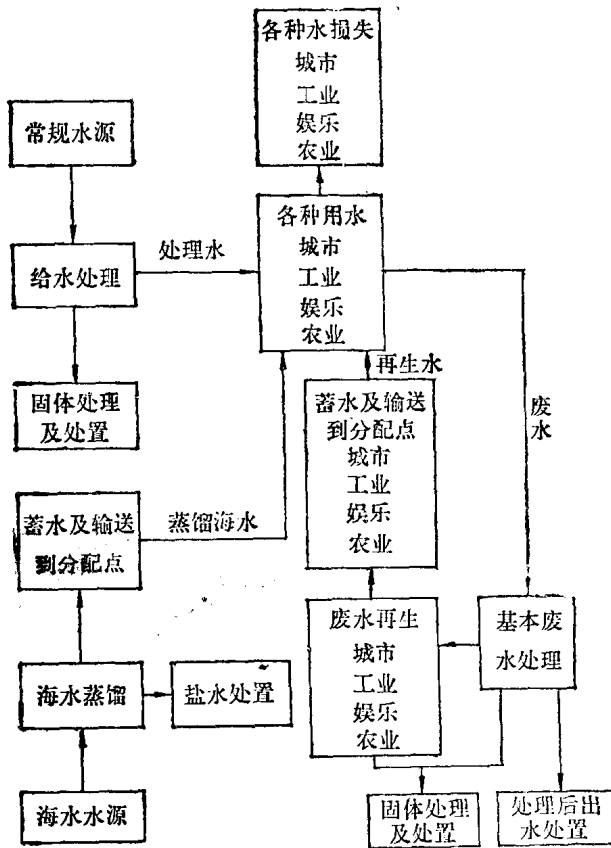


图 0-1 水的使用、处理和处置系统

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。

水的处理的目的不外三种：(1) 去除水中的影响使用水质的杂质以及污泥的处置，这是最主要的内容；(2) 为了满足用水的要求，在水中加入新的成分以改变水的化学性质，如食用水中加氟以防止龋齿病，循环冷却水中加缓蚀剂及缓垢剂以控制腐蚀及结垢等；(3) 改变

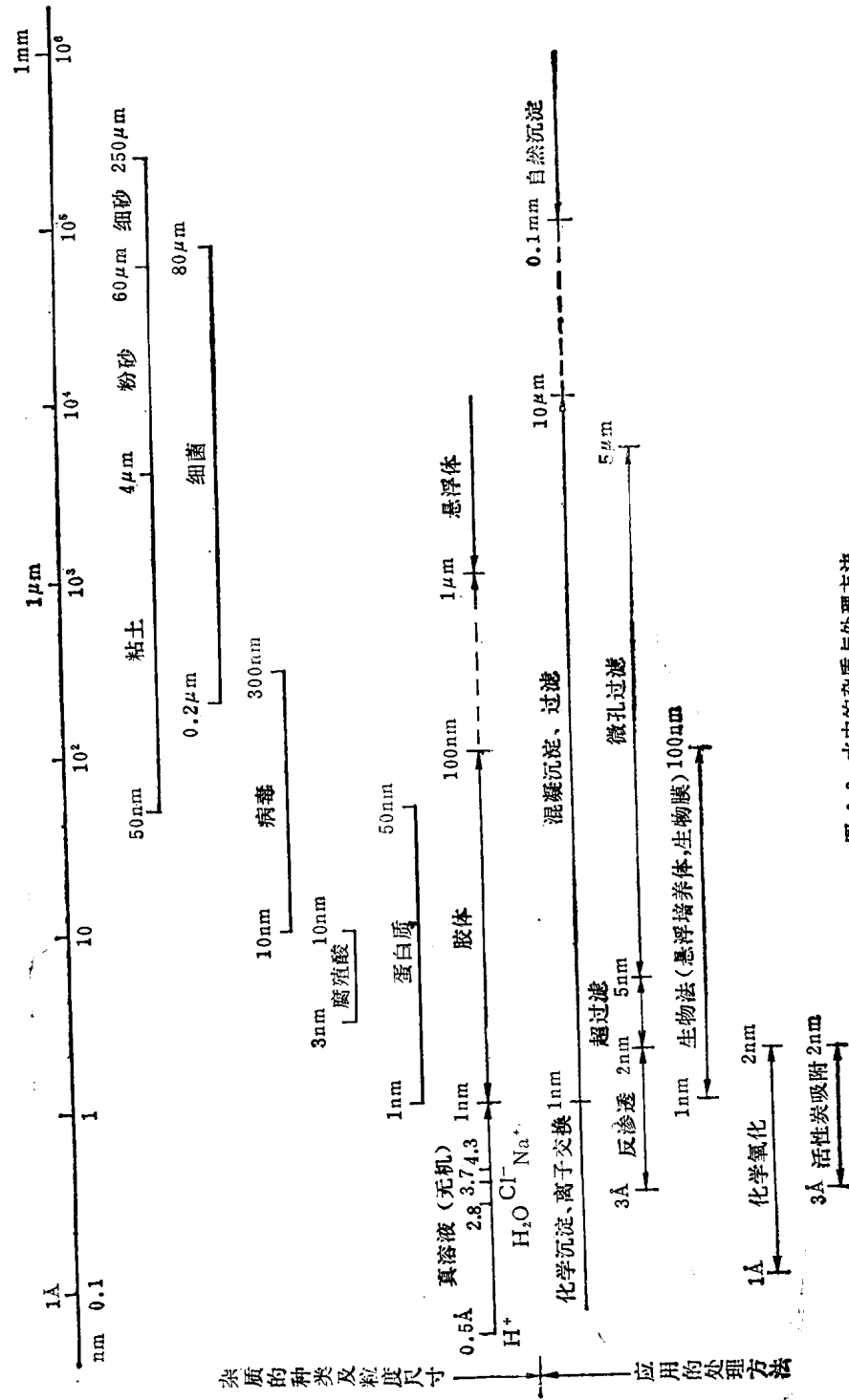


图 0-2 水中的杂质与处理方法

水的物理性质的处理，如水的冷却，降低水的粘滞度等。本书只讨论去除水中杂质的方法。

去除水中杂质的方法属于化工中分离过程(separation process)的范畴。分离方法和杂质的性质与粒度有密切的关系，这由图 0-2 表示出来。图 0-2 中只给出一些常见的水处理方法，另外一些水处理方法可参看下面的图 0-3，这些方法可以分成生物法和物理化学法两大类。本节将对水处理方法进行简要的介绍。

生物法也称生化法，主要是通过微生物的生命过程把废水中的有机物转化为新的微生物细胞以及简单形式的无机物，从而达到去除有机物的目的。应用的微生物主要是细菌。生物处理法可分成悬浮培养体(suspended culture)及生物膜(film flow)两类。悬浮培养体法以活性污泥法为典型代表，它的特征是：起水处理作用的细菌培养体呈处于悬浮状态的絮体。生物膜法以滴滤池为典型代表，它的特征是：起水处理作用的细菌培养体呈一层膜固定在填料表面上。采用这两条术语的好处在于它们具有较广泛的概括性。如活性污泥法、曝气塘都属于悬浮培养体法，而生物膜法可包括滴滤池及生物转盘等方法。

主要利用藻类的水处理方法有兼性塘(facultative pond)、需氧塘(aerated pond)及净化塘(maturation pond)三种。兼性塘一般深 1—2.5 米，它实际上只是一个储存废水的池子，其大小足以让其中自然生长的藻类群体产生满意的氧气浓度。藻类在水面附近生长，并通过光合作用向上层水提供氧气。进水中的废水固体以及藻类、细菌、植物等死后所产生的有机固体则下沉到塘底，由厌氧细菌分解。介于水面与塘底间的中间层，氧的供应较紧张，其中溶解的及胶体的有机物则被细菌氧化。这种废水塘的设计要点是使有机物分解需氧的速度不超过藻类产生氧气的速度，否则废水塘就会完全变成厌氧的，因而产生臭气。需氧塘的水深小于 1 米，由藻类的光合作用提供足够的氧气，故使厌氧区微不足道。但是由于这种塘的出水带有大量的藻类，所以很罕用。净化塘用于处理经过生物法处理后的出水，它藉藻类的光合作用以及再曝气作用供给氧气，也称精处理塘(polishing pond)。(另外，用于废水处理的塘还有厌氧塘(anaerobic pond)。厌氧塘实际是一种原始的厌氧消化池，最适宜于处理肉类加工的废水。这种废水中所含的高浓度脂肪，在塘的水面处形成厚约 2 厘米以上的一层浮渣，起保温以及防止大量的硫化物的还原化合物逸出的作用。)

接近二十年的观点，可以把废水的生物处理包括在生物化学工程的学科范围内，本书即按这种观点编写的。在第五章中将对生物化学工程的基础较详细地加以介绍。在第六章及第七章则分别讨论活性污泥法及滴滤池法。

水处理的物理化学方法包括下列三种情况：(1) 在处理过程中只发生物理变化；(2) 在处理过程中只发生化学变化；(3) 在处理过程中同时发生物理及化学变化。物理化学法很多，图 0-2 及 0-3 不能完全列出，例如：利用离心力作用的旋风分离、离心沉淀，利用磁力作用的磁化处理及高梯度磁力处理，等等，都是一些物理化学方法，但没有在图中列出来。下面就图 0-2 中所列的方法略加说明。

从图 0-2 可以看出，除图中第三行所示属于生物法外，其它的处理方法均属于物理化学方法，在图中第二行所示的处理方法中，反渗透用以去除水中的溶解无机离子以及小分子，超过滤用以去除水中的大分子，前者完全是一种物理化学过程，后者在低浓度时为筛除作用，属于物理过程，但在高浓度时则属于物理化学过程，两者将在第二章的膜滤方法中介绍。微孔过滤完全是利用筛除的物理作用。

图 0-2 最后两行所示的处理方法中，化学氧化指通过化学的氧化反应过程来去除水中杂质。化学氧化可以用于有机物及无机物。用于有机物的氧化剂包括过锰酸钾、氯及臭氧等。

化学氧化可以氧化水中产生臭及味的有机物，以及部分分解难于降解的有机物质，如酚类化合物等。从图 0-2 可以看出，化学氧化与活性炭吸附所适用的粒度范围基本一致。活性炭吸附主要用于去除水中的有机物质。因此，有机物的化学氧化及有机物的活性炭吸附往往作为比较方法来选择。无机物的化学氧化典型例子为使 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ， Mn^{2+} 氧化为 Mn^{4+} ，这是除铁及除锰的基本反应。

在物理化学方法中，化学沉淀、离子交换、反渗透、化学氧化以及活性炭吸附等是用于去除水中溶解物质的方法，混凝沉淀及过滤则为去除胶体以及较大颗粒的方法，这可以由图 0-2 中的粒度尺寸看出来。本书对去除溶解物质的方法只讨论活性炭吸附及膜滤方法，见第二章；对去除胶体颗粒的方法只介绍凝聚与絮凝、沉淀试验与浓缩池三个内容，见第四章。

图 0-3 进一步按去除杂质的种类列出了废水处理过程中可能采用的各种方法，这些方法实际上基本代表了水处理可能采用的全部方法，而其中大部分方法，一般情况下并不采用。图 0-3 也可以看作是一个水处理流程，其中的去除粗粒固体、去除悬浮固体、去除溶解的有机物及消毒四步连起来即组成了常规的废水生化处理流程；如果对沉淀加上凝聚，连同过滤、消毒几步即组成了一个常规的给水处理流程。

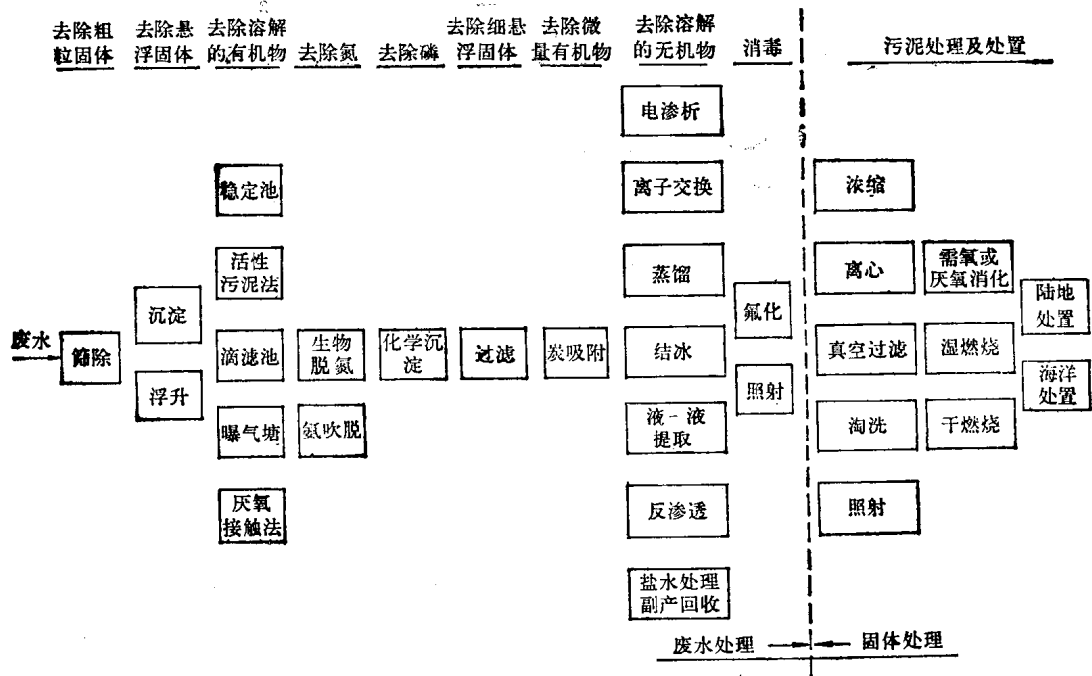


图0-3 废水处理及固体处理的各种方法

六十年代以后，由于为了满足废水再用的水质要求或排放的标准，出现了对于常规废水处理后的出水进一步处理的过程，称为废水的高级处理 (advanced wastewater treatment)。高级处理虽然可以包括很广泛的处理内容，但一般则具体指去除氮与磷的处理，与废水的三级处理 (tertiary treatment) 为同义语。同时又出现一级处理 (primary treatment) 与二级处理 (secondary treatment) 这两条新术语。一级处理指去除大部分悬浮固体的过程，采用的方法为沉淀与浮升。二级处理指去除废水中有机物并进一步降低悬浮固体含量的处理过程。由于这一处理通常是藉生物法来完成的，所以往往把生物处理与二级处理看作同义语。但应该指出，近年来已开始用物理化学方法来去除溶解的及胶体的有机物，主要用凝聚、过滤及活性炭吸附，在特殊的情况，还可采用反渗透、超过滤、真空过滤、离心以及蒸馏等方法。

废水经三级处理后的水质变化见表 0-1。

表 0-1 废水经二级处理及高级处理后的水质

二级处理	二级处理后面的处理	典 型 水 质							
		悬浮固体 (毫克/升)	BOD (毫克/升)	COD (毫克/升)	总氮 (毫克/升)	PO ₄ (以 P 计 毫克/升)	油度 (毫克/升)	色度单位	
活性污泥法	无	20—30	15—25	40—80	20—60	6—15	5—15	15—80	
	粒状介质过滤	<5—10	<5—10	30—70	15—35	4—12	0.3—5	15—60	
	过滤、活性炭吸附	<3	<1	5—15	15—30	4—12	0.3—3	5	
	凝聚及沉淀	<5	<5—10	40—70	15—30	1—2	<10	10—30	
	凝聚及沉淀、过滤	<1	<5	30—60	15—30	0.1—1.0	0.1—1.0	10—30	
	凝聚、沉淀、过滤	<1	<5	30—60	2—10	0.1—1.0	0.1—1.0	10—30	
	氨吹脱 凝聚、沉淀、过滤 氨吹脱、炭吸附	<1	<1	1—15	2—10	0.1—1.0	0.1—1.0	<5	
陆地处理	灌溉	<1	<2	—	3	0.3			
	快渗透	2	2	—	10	3			
	漫地水流	10	10	—	3	2			
滴滤池或 生物转盘	无	20—40	15—35	40—100	20—60	6—15	5—15	15—80	
	粒状介质过滤	10—20	10—20	30—70	15—35	6—15	<10	15—60	
	曝气、沉淀、过滤	<5—10	<5—10	30—60	15—35	4—12	0.5—5	15—60	

注：1. 本表录自 Metcalf and Eddy, Inc. 2. 灌溉、快渗透 (rapid filtration) 及漫地水流 (overland flow) 为陆地处理的三个主要方法。

最后提一下废水经适当的处理后能否作为食用水的问题。用废水作为正规的水源，经处理后用作食用水的，目前只有南非的 Windhoek 城。废水的再生厂以常规的生化处理厂的出水为水源，先经过串连的九个净化塘，总停留时间达 14 天，最后经藻类浮升、泡沫分离（原理与浮升一样，用气泡把杂质带到水面以去除掉，但泡沫分离指去除溶解的物质，浮升则指去除较大的颗粒物）、快滤、消毒与活性炭吸附等处理过程。产水量为 4500 米³/天。在处理过程中的水质变化见表 0-2。再生的废水与另一以地表水为水源的常规给水处理厂的出水混合后，再经氯化处理（自由性余氯为 0.2 毫克/升）即直接作为城市生活供水。这个废水再生后作为生活饮用水的例子虽然是成功的，但只是一个特殊的情况。废水作为水源以供食用水，目前所存在的可能不是处理的技术问题，而是在于下列三方面的原因：经济方面的、水质标准方面的（目前生活饮用水标准是以水质只受少量污染的天然水作水源制定的，不应该用于废水水源）以及心理障碍方面的。

表 0-2 Windhoek 废水再生厂的水质变化

项目	沉淀池出水	滴滤池出水	净化塘出水	藻类浮升池出水	泡沫分离池出水	快滤池出水	炭吸附柱出水
pH	7.8	8.0	9.1	7.0	7.7	7.8	7.8
TDS	800	790	650	770	770	780	780
PO ₄	18.4	10.7	6.5	1.0	0.9	0.5	0.2
NH ₃ -N	48.5	6.8	0.4	0.4	0.4	<0.1	<0.1
NO ₃ -N	0.2	26.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0
ABS	16.2	8.0	5.0	3.5	1.1	1.0	0.1
COD	260	80	190	60	55	45	<20
E.coli/ 100毫升	3 × 10 ⁶	70000	<50	<30	<30	0	0

注：本表录自 Handbook of Environmental Control, vol. IV.

第一章 反应器

1-1 引言

在化工生产过程中，都有一个发生化学反应的生产核心部分，发生化学反应的容器称为反应器。研究反应器有关问题的学科称为化学反应工程。反应器的设计涉及了流体力学、传热、传质，特别是化学动力学的知识。因此，化学反应工程可以说是使化学工程有别于其它工程学的一门特征学科。

现在，在开发新的化工制造过程中，首先研究的是新工艺中反应器的性能。反应器决定了从原材料所能提供的最大产率，而制造过程中的其它操作都是从属于这个生产核心部分的。这也反映了 50 年代以后化学反应工程这门课程得到了迅速的发展。而在这以前，化学工程的课程主要是包括蒸馏、吸收、提取、流体流动及热交换等的单元操作。可以说，过去主要是对反应器产物的分离和净化，而现在却转到反应器的设计问题了。

化学反应器可以分为均相反应器 (homogeneous reactor) 及多相反应器 (heterogeneous reactor) 两个主要类型。均相反应器的特点是，反应只在一个相内进行，通常在一种气体或液体内进行。当反应器内必需有两相以上才能进行反应时，则称为多相反应器。例如在生产聚乙烯的反应器中，催化剂三氯化钛颗粒以固相悬浮在汽油中，另一催化剂一氯二乙基铝溶解在液相汽油中，而不断进入的原料乙烯则为气相，在这三者所组成的体系内才能发生乙烯的聚合反应，所以是一个多相反应器。至于在多相反应器内，反应究竟发生在哪一相内，是否发生在两相的界面上，反应物及产物在各相间如何分布，都是无关紧要的。在均相反应中，反应物之间是直接接触的，不存在传质过程的问题。在多相反应中，反应物可能是在不同相内，因而存在一个彼此之间如何接近以产生反应的问题，也就是存在传质过程的问题。传质过程有时控制整个反应过程，这将在以后加以讨论。

按反应器的运行方式，可以分成间歇式反应器 (batch reactor) 及连续流式反应器 (continuous flow reactor) 两大类。间歇反应器是按反应物“一罐一罐地”进行反应操作的，反应完成卸料后，再进料进行下一批的生产，一般用于均质的液相反应，特别是用于吞吐量不大的情况。间歇反应器是在非稳态条件下操作的，其成分随时间而变化，但是反应器内的成分却永远是均匀的。当进料与出料都是连续不断地进行时，这类反应器则称连续反应器。连续反应器是一种稳定流的反应器。

连续反应器有两种完全对立的理想类型，分别称为活塞流反应器 (plug flow reactor) 及恒流搅拌反应器 (CFSTR constant flow stirred tank reactor)，分述如下。

活塞流反应器通常用管段构成，所以也称管式反应器 (tubular reactor)，其特征是流体是以列队形式通过反应器，流体元素在流动的方向决无混合现象（但在垂直流动的方向上可能有混合）。构成活塞流反应器的必要且充分的条件是：反应器中每一流体元素的停留时间都是相等的。由于管内水流较接近于这种理想状态，所以常用管子构成这种反应器。

恒流搅拌反应器也称为连续搅拌罐反应器 (CSTR continuous stirred tank reactor)，有

时也称返混反应器 (backmix reactor)。这种反应器的特点是，其中的内含物受到了极好的搅拌，因此是完全均匀的。这种反应器必然要设置搅拌器，当反应物进入后，立即被均匀分散到整个反应器容积内，从反应器连续流出的产物流，其成分必然与反应器内的成分一样。从理论上说，由于在某一时刻进到反应器内的反应物立即被分散到整个反应器内，其中一部分反应物应该立即流出来，这部分反应物的停留时间理论上为零。余下的部分则具有不同的停留时间，其最长的停留时间理论上可达无穷大。这样就产生了一个突出现象：某些后来进入反应器内的成分必然要与先进入反应器内的成分混合，这就是所谓的返混作用 (backmixing)。理想的活塞流反应器内绝对不存在返混作用，而 CSTR 的特点则为具有返混作用，所以称为返混反应器。

为了有利于反应，反应器还具有其它的操作类型，例如称为流化床反应器，滴洒床反应器之类。但是最典型而又常用的则为上述两种类型。

从 70 年代初起，在水处理工程的著作中，也引入了反应器理论。1972 年出版的 Weber 主编的《水质控制的物理化学方法》，Metcalf 及 Eddy 公司编辑的《废水工程》两书，对于反应器理论，都设有专章叙述，《水质控制的物理化学方法》一书列为第一章的内容，可见著者的重视程度。但是这里出现一个如何定义“反应器”的问题。《废水工程》沿用化工的概念，以发生化学反应或生物化学反应的池子称为反应器。Weber 的书没有给出很明确的定义，但大致也是沿用化工中的概念的。但是，Schroeder 的著作《给水与废水处理》则明确地把水处理中进行处理过程的一切池子和设备都称为反应器，这不仅包括发生生物化学反应的曝气池及滴滤池等设备，也包括了发生物理过程的沉淀池，甚至冷却塔等设备。本书也采用这一观点，并补充下列两点理由：

第一，在化工中，反应器理论发展的时候，其它单元操作设备的理论已经相当成熟，反应器的工作条件如压力、温度等也较其它设备特殊，反应器只作为进行化学反应的设备来单独进行研究和发展的，是很自然的。水处理设备的理论一般都还很粗糙，一般都同样在常温常压下操作，这就没有必要把发生化学反应的设备和其它设备加以区别。引用化工中反应器理论的目的在于把这些理论用来普遍地提高水处理设备的理论，所以不必墨守化工的观点。

第二，化工制造过程中的产品或原料的量，比起水处理过程中的水量来，一般都小得多，因此所使用的反应器或者其它单元操作设备，尺寸也都小得多，水处理工程必须结合这些特点来发展本身的反应器理论。

为了更好地理解反应器的理论，必须对物理化学中的反应动力学具有一定的基础知识，本章因此先加以介绍。

化学 反 应 动 力 学

1-2 反应速率与反应级数

化学反应动力学的工作包括两部分，第一是通过试验求出化学反应的反应速率表达式，第二是提出反应过程的机理。

1. 反应速率

在反应过程中，反应物的量总是不断减少的，而产物的量却是不断增长的。任一反应物