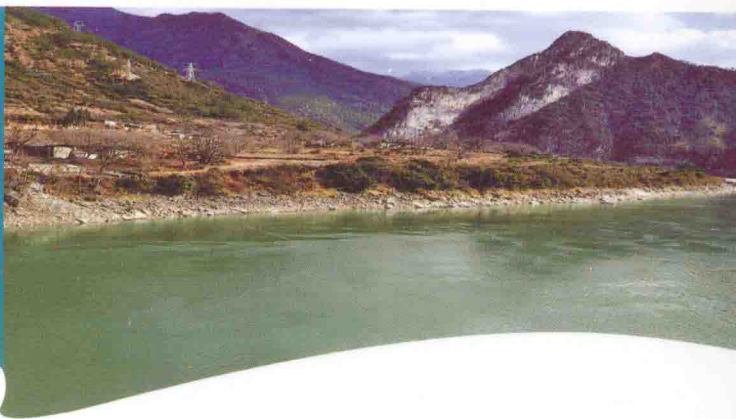


# 水处理工程 (下册)

王学刚 编  
王光辉



**WATER TREATMENT ENGINEERING**

中国环境出版社

普通高等教育规划教材

# 水 处 理 工 程

(下册)

王学刚 王光辉 编

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

水处理工程. 下/王学刚, 王光辉编. —北京: 中国环境出版社, 2015.1

普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5111-2197-4

I. ①水… II. ①王… ②王… III. ①水处理—高等学校—教材 IV. ①TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 309782 号

出版人 王新程  
责任编辑 黄晓燕  
文字编辑 赵楠婕  
责任校对 唐丽虹  
封面设计 宋 瑞

---

出版发行 中国环境出版社  
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)  
网 址: <http://www.cesp.com.cn>  
电子邮箱: [bjgl@cesp.com.cn](mailto:bjgl@cesp.com.cn)  
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)  
010-67112735 (环评与监察图书出版中心)  
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司  
经 销 各地新华书店  
版 次 2015 年 1 月第 1 版  
印 次 2015 年 1 月第 1 次印刷  
开 本 787×960 1/16  
印 张 21.75  
字 数 400 千字  
定 价 28.00 元

---

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

## 前 言

随着国民经济的迅猛发展、人民生活水平的逐步提高、工业化和城市化步伐的加快,用水量和污水排放量显著增加,淡水资源的短缺和水环境污染问题日益突出,全面深入地了解 and 掌握水处理技术,解决我国面临的水环境污染问题,已成为环境工程技术人员的重要历史使命。同时,水环境污染问题又促进了水处理工程技术的发展,特别是其他有关学科(如生物、材料、物理、化学、化工等)近年来的发展,为水处理工程技术的发展注入了新的活力,提供了丰富的素材,使水处理工程技术更多地体现出多学科交叉与集成的边缘性特点。

根据原水及污(废)水各自水质特征、使用目的与处理方法的差异,水处理工程学科已形成给水处理和排水处理两个分支,并在不断发展和完善之中。本书考虑水处理技术领域内的给水处理和排水处理在理论、方法等方面的共性,以处理水质为目标,以处理方法为主线,将长期使用的给水处理和排水处理两个体系的主要内容进行了有机整合。在保证基本概念、基本理论、基本技术方法和工艺要求的同时,充分注意吸收国内外水处理工程的新理论、新技术和新工艺,反映了现代水处理工程学科的发展趋势。

本书内容主要包括水的物理处理、化学处理、物化处理和生物处理等,在编写时基本上按照处理单元所采用方法的不同编排章节,且各章节具有相对独立性。全书重点反映各处理方法的基本概念、基本原理、设计计算以及实际应用等内容,使本书的体系具有结构合理、内容新颖、丰富完整等特点。为理论联系实际,便于学生深入理解书中的内容,除给出处理单元技术的应用实例之外,还给出了一定量的计算例题、习题和思考题,以培养学生的基本专业素质、工程的基本思维方法和分析解决实际问题能力。

本书是高等学校环境科学与工程专业本科生的教材,亦可供从事水污染治理

工程技术人员和有关管理人员使用, 还可供参加国家注册环保工程师职业资格考试的有关人员参考。

本教材分为上、下两册, 上册含 1~5 章, 下册含 6~12 章。各篇、章编写的具体分工是: 王光辉编写第一篇第 1 章、第 2 章; 第二篇第 3 章、第 4 章、第 5 章。王学刚编写第三篇第 6 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章、第 11 章、第 12 章。最后由王光辉统稿、定稿。

在编写过程参阅了大量近年来出版的水处理文献资料, 得到了有关专家的指导与支持, 许多专家对全书提出宝贵意见, 同时本书的出版还得到了江西省环境工程特色专业和水处理工程精品课程、水处理工程资源共享课程和环境工程专业综合改革试点等建设项目的资助, 在此一并表示感谢。

由于编者水平有限, 书中的不足之处在所难免, 敬请读者批评指正。

编者

2013 年 8 月 1 日

# 目 录

## 第三篇 生物处理理论与技术

第 6 章 废水生物处理基础.....	409
6.1 概述.....	409
6.2 有机污染物的生物降解性.....	413
6.3 废水生物处理中的微生物及生长环境.....	419
【习题与思考题】.....	428
第 7 章 活性污泥法.....	429
7.1 活性污泥法基本原理.....	429
7.2 活性污泥的性能指标及工艺参数.....	439
7.3 活性污泥反应动力学基础及应用.....	452
7.4 活性污泥法的运行方式及工艺参数.....	466
7.5 活性污泥法的新工艺.....	477
7.6 气体传递原理与曝气设备.....	496
7.7 活性污泥法的工艺设计.....	514
7.8 活性污泥法系统的运行管理.....	533
【习题与思考题】.....	541
第 8 章 生物膜法.....	544
8.1 基本原理.....	544
8.2 生物滤池.....	550
8.3 生物转盘法.....	571
8.4 生物接触氧化法.....	580
8.5 生物流化床.....	587
8.6 曝气生物滤池.....	593
【习题与思考题】.....	601

第9章 厌氧生物处理法.....	603
9.1 厌氧消化的机理及影响因素.....	604
9.2 厌氧生物处理工艺.....	609
9.3 厌氧生物处理法的设计.....	634
【习题与思考题】 .....	640
第10章 生物脱氮除磷技术.....	641
10.1 氮的去除 .....	642
10.2 磷的去除 .....	657
10.3 生物脱氮除磷工艺.....	663
【习题与思考题】 .....	668
第11章 污水生态工程处理技术.....	669
11.1 稳定塘.....	669
11.2 废水土地处理系统.....	684
11.3 人工湿地.....	691
【习题与思考题】 .....	700
第12章 污泥的处理与处置.....	701
12.1 污泥的来源、特性及数量.....	701
12.2 污泥的处理 .....	705
12.3 污泥的浓缩 .....	708
12.4 污泥的稳定 .....	716
12.5 污泥的调理 .....	723
12.6 污泥的脱水与干化.....	724
12.7 污泥的最终处置及综合利用.....	733
【习题与思考题】 .....	736
附 录 .....	738
参考文献 .....	744

## 第三篇

---

# 生物处理理论与技术

生物处理是废水处理方法中最重要的方法之一。根据微生物的代谢特性，可分为好氧微生物和厌氧微生物，生物化学处理法可相应地分为好氧生物处理和厌氧生物处理。学习本篇内容时，应首先了解环境微生物的生理特征及其生化规律，在此基础上理解和掌握好氧生物处理工艺和厌氧生物处理工艺净化污水的基本原理、基本工艺流程和必要的设计计算，从基本原理、污水处理设备、工艺条件、方法特点、污染物去除效率影响因素、经济效益等方面对各种净化方法进行比较，针对不同的水质特点设计合理的处理工艺和方案。





# 第 6 章 废水生物处理基础

## 6.1 概述

### 6.1.1 废水生物处理的分类

废水生物处理是 19 世纪末出现的治理污水的技术,发展至今已成为世界各国处理城市生活污水和工业废水的主要手段。目前,国内已有近万座污水生物处理厂(站)投入运行。

生物化学处理法简称生化法,是利用自然环境中的微生物,并通过微生物体内的生物化学作用来分解废水中的有机物和某些无机毒物(如氰化物、硫化物),使之转化为稳定、无害物质的一种水处理方法。

1916 年在英国出现了第一座人工处理的曝气池,利用人工培养的微生物来处理城市生活污水,开始了污水生化处理的新时代。由于生化法处理废水效率高、成本低、投资省、操作简单,因此在城市污水和工业废水的处理中都得到广泛的应用。生化法的缺点是运行不当时会产生污泥膨胀和上浮,影响处理效果;该法对要处理水的水质也有一定要求,如废水成分、pH、水温等,因而限制了它的使用范围,另外,生化法占地面积也较大。

生物处理法在城市污水的处理中使用得比较广泛。城市污水的处理分为三个级别,分别称为污水一级处理、污水二级处理和污水三级处理。污水一级处理就是使用物理处理方法,如格栅、沉淀池等去除水中不溶解的污染物。二级处理应用生物处理法,通过微生物的代谢作用进行物质的转化,将废水中的复杂有机物氧化降解为简单的物质。三级处理是用生物法、离子交换法等去除水中的氮和磷,并用臭氧氧化、活性炭吸附等去除难降解有机物,用反渗透法去除盐类物质,用氯化法对水进行消毒。我国目前正在努力普及二级处理,而二级处理中生物处理是最常采用的方法。

不同的细菌对氧的反应不同,一些细菌只能在有氧存在的环境中生长,称需氧细菌(或称好氧细菌),利用此类微生物的作用来处理废水称为好氧生物处理法。另一些细菌只能在无氧的环境中生长,叫厌氧细菌,相应的处理方法叫厌氧生物处理。介于两者之间的还有兼性微生物(在有氧或无氧的环境中均可生长),但它们在废水处理中不起主要作用。

按微生物的代谢形式,生化法可分为好氧法和厌氧法两大类;按微生物的生长方式可分为悬浮生物法和生物膜法,生物处理法分类如图 6-1 所示。

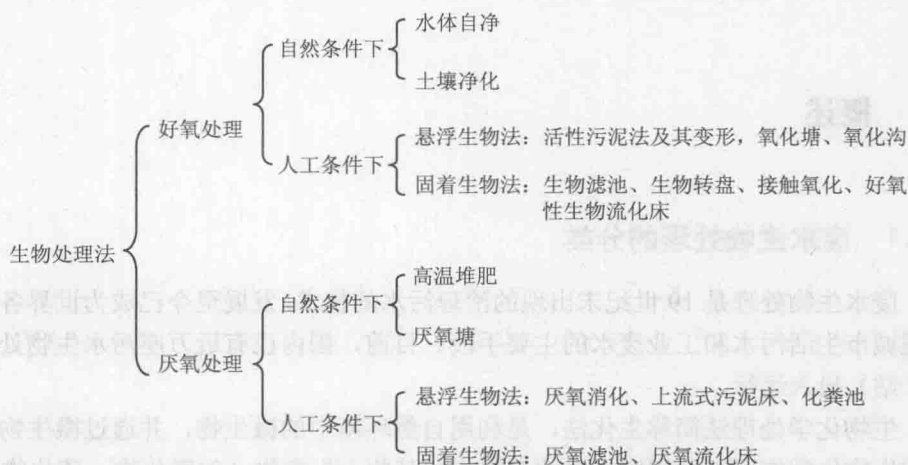


图 6-1 生物处理方法分类

### 6.1.2 废水的好氧生物处理

在充分供氧的条件下,利用好氧微生物的生命活动过程,将有机污染物氧化分解成较稳定的无机物的处理方法,在工程上称为废水的好氧生物处理。

微生物对有机污染物进行好氧分解的过程如下:溶解态的有机物可以直接透过细菌的细胞壁进入细胞内;固体或胶体的有机物先被细菌吸附,靠细菌所分泌的胞外酶作用,分解成溶解性的物质,然后,再渗入细菌细胞内,通过细菌自身的生命活动,在内酶的作用下,进行氧化、还原和合成过程。一部分被吸收的有机物氧化分解成简单的无机物,如有有机物中的碳被氧化成二氧化碳,氢与氧化合成水,氮被氧化成氨、亚硝酸盐和硝酸盐,磷被氧化成磷酸盐,硫被氧化成硫酸盐等。与此同时释放出能量,作为细菌自身生命活动的能源,并将另一部分有机物作为其生长繁殖所需要的构造物质,合成新的原生质。

好氧生物处理时,有机物的转化过程如图 6-2 所示。

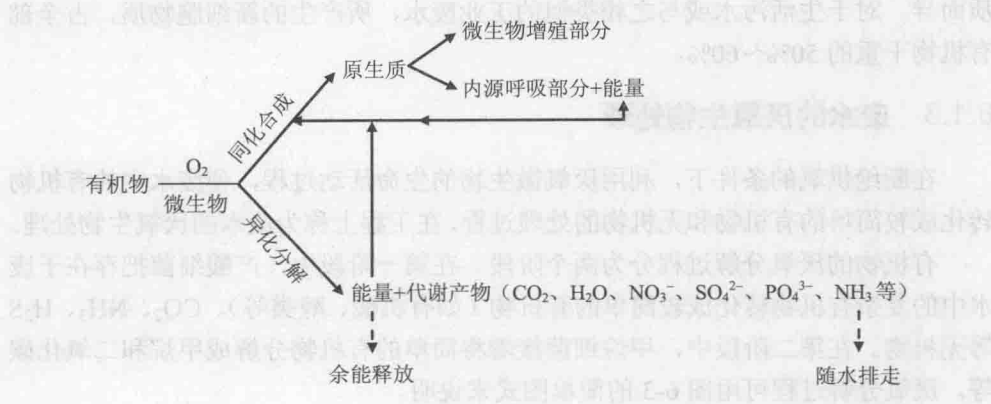
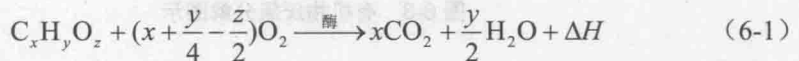


图 6-2 有机物的好氧分解图示

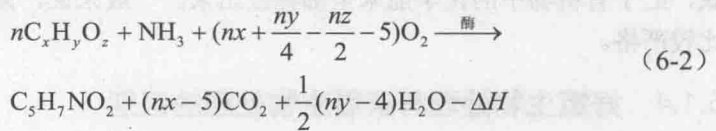
在废水好氧处理过程中，必须不间断地供给溶解氧。因为氧是有机物的最后氢受体，正是由于这种氢的转移，才使能量释放出来，成为细菌生命活动和合成新细胞物质的能源。

有机物的好氧合成过程，也可以用下列生化反应式表示：

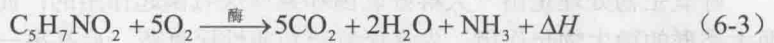
(1) 有机物的氧化分解（有氧呼吸）：



(2) 原生质的同化合成（以氨为氮源）：



(3) 原生质的氧化分解（内源呼吸）：



由此可以看出，当废水中营养物质充足，即微生物既能获得足够的能量，又能大量地合成新的原生质时，微生物就不断增长。当废水中营养物质缺乏时，微生物只得依靠细胞内贮藏的物质，甚至把原生质也作为营养物质利用，以获得生命活动所需的最低限度的能源，这种情况下，微生物无论重量还是数量都是不断减少的。可见，要保证废水处理的效果，首先必须有足够数量的微生物，同时，还必须有足够数量的营养物质。

在好氧生物处理过程中，有机物用于氧化与合成的比例，随废水中有机物性

质而异。对于生活污水或与之相类似的工业废水,所产生的新细胞物质,占全部有机物干重的 50%~60%。

### 6.1.3 废水的厌氧生物处理

在断绝供氧的条件下,利用厌氧微生物的生命活动过程,使废水中的有机物转化成较简单的有机物和无机物的处理过程,在工程上称为废水的厌氧生物处理。

有机物的厌氧分解过程分为两个阶段。在第一阶段中,产酸细菌把存在于废水中的复杂有机物转化成较简单的有机物(如有机酸、醇类等)、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 等无机物。在第二阶段中,甲烷细菌接着将简单的有机物分解成甲烷和二氧化碳等。厌氧分解过程可用图 6-3 的简单图式来说明。

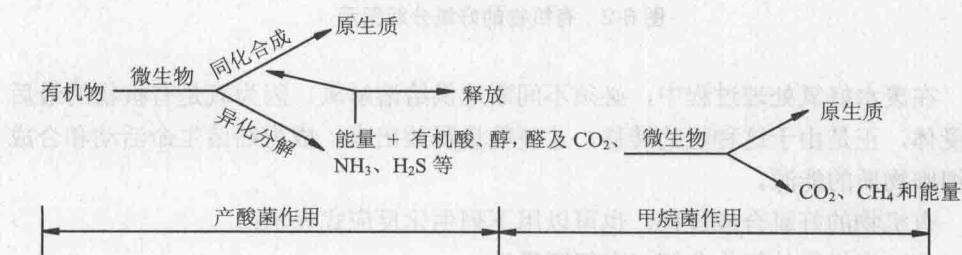


图 6-3 有机物厌氧分解图示

厌氧分解过程中,由于缺乏氧作为氢电子受体,所以,对有机物的分解不彻底,贮于有机物中的化学能未全部释放出来。一般来说,微生物的厌氧生长条件比较严格。

### 6.1.4 好氧生物处理与厌氧生物处理的区别

#### (1) 起作用的微生物群不同

好氧生物处理是由一大群好氧菌和兼性厌氧菌起作用的;而厌氧生物处理是两大类群的微生物起作用,先是厌氧菌和兼性厌氧菌,后是另一类厌氧菌。

#### (2) 产物不同

好氧生物处理中,有机物被转化成  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等,且最后基本无害。厌氧生物处理中,有机物先被转化成为数众多的中间有机物(如有机酸、醇、醛等)以及  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 等,其中有机酸、醇、醛等有机物又被另一群称为甲烷菌的厌氧菌继续分解。由于能量的限制,其终产物受到较少的氧化作用,如有机碳常形成  $\text{CH}_4$ ,而不是  $\text{CO}_2$ ;有机氮形成氨、胺化物或氮气,而不是亚硝酸盐或硝酸盐;硫形成  $\text{H}_2\text{S}$ ,而不是  $\text{SO}_2$ 或  $\text{SO}_4^{2-}$ 等。产物复杂,有异臭,一些产

物可作燃料。

### (3) 反应速率不同

好氧生物处理由于有氧作为氢受体, 有机物转化速率快, 需要时间短。可用较小的设备处理较多的废水; 厌氧生物处理反应速率慢, 需要时间长, 在有限的设备内, 仅能处理少量废水或污泥。

### (4) 对环境要求条件不同

好氧生物处理要求充分供氧, 对环境条件要求不太严格; 厌氧生物处理要求绝对厌氧的环境, 对环境条件(如 pH、温度)要求非常严格。

好氧生物处理与厌氧生物处理都能完成有机污染物的稳定化, 但在实际中究竟采用哪种方法, 要视具体情况而定。采用厌氧法处理废水, 除需要时间长外, 处理水发黑, 有臭味, 且 BOD 浓度仍然很高; 如果废水的 BOD<sub>5</sub> 浓度较低, 所需的处理设备将很庞大。所以, 一般废水中有机物浓度若超过 1% (约 10 000 mg/L), 才用厌氧生物处理。目前的厌氧生物处理多用于处理沉淀池的有机污泥和高浓度有机废水(如屠宰、酿造工业、食品工业等生产废水)。而好氧生物处理则多用于处理有机污染物浓度较低或适中的废水。

## 6.2 有机污染物的生物降解性

### 6.2.1 微生物与废水可生化性

迄今为止, 已知的环境污染物达数十万种之多, 其中大量的的是有机物。所有的有机污染物, 可根据微生物对它们的降解性, 分成可生物降解、难生物降解和不可生物降解三大类。

废水的生物处理就是利用微生物的新陈代谢作用处理废水的一种方法。微生物与其它生物一样, 为了进行自身的生理活动, 必须从周围环境中摄取营养物质并加以利用。这些营养物质在微生物体内, 通过一系列的生物化学反应, 使微生物获得需要的能量, 同时微生物本身也得到繁殖、数量得到增加。在废水中存在着各种有机物和无机物。这些物质大部分都可以被微生物作为营养物质而加以利用。废水的生物处理实质就是将废水中含有的污染物质作为微生物生长的营养物质被微生物代谢、利用、转化, 将原有的高分子有机物转化为简单有机物或无机物, 使得废水得到净化。

作为一个整体, 微生物分解有机物的能力是惊人的。可以说, 凡自然界存在的有机物, 几乎都能被微生物所分解。有些种类, 如葱头假单胞菌甚至能降解 90

种以上的有机物,它能利用其中任何一种作为唯一的碳源和能源进行代谢。有毒的氰(腈)化物、酚类化合物等,也能被不少微生物作为营养物质利用、分解。

半个多世纪以来,大量人工合成的有机物问世,如杀虫剂、除草剂、洗涤剂、增塑剂等,它们都是地球化学物质家族中的新成员。尤其是不少有机物的合成研制开发时的目的之一,就是要求它们具有化学稳定性。因此,微生物一接触这些陌生的物质,开始时难以降解也是不足为怪的。但由于微生物具有极其多样的代谢类型和很强的变异性,近年来的研究发现,许多微生物能降解人工合成的有机物,甚至原以为不可生物降解的合成有机物,也找到了能降解它们的微生物。因此,通过研究,有可能使不可降解的或难降解的污染物转变为能降解的,甚至能使它们迅速、高效地去除。

所谓的可生化性,即通过实验去判断某污水或某物质用生物处理的可能性,以允许投配水量或浓度来表示。它只研究可否用生物处理,而不研究分解成什么产物。事实上,生物处理并不要求将有机物全部分解成  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和硝酸盐,而只要求水中污染物去除达到环境所允许的程度。

可生化性研究的目的在于了解污染物的分子结构能否在生物作用下,分解成环境所允许的结构形式,以及是否有足够快的分解速度。

可生化性研究可以帮助确定工业废水局部处理的必要性以及应采取的预处理方法、处理的程度和污水处理工程的运行稳定性,可生化性研究将为污水处理工艺的制定提供科学依据。

## 6.2.2 化学结构与生物降解的相关性

化学结构与生物降解的相关性归纳起来主要有以下几点:

### (1) 烃类化合物

一般是链烃比环烃易分解,直链烃比支链烃易分解,不饱和烃比饱和烃易分解。

### (2) 主要分子链

主要分子链上的 C 被其他元素取代时,对生物氧化的阻抗就会增强,也就是说,主链上的其他原子常比碳原子的生物利用度低,其中氧的影响最显著(如醚类化合物较难生物降解),其次是 S 和 N。

### (3) 碳氢键

每个 C 原子上至少保持一个碳氢键的有机化合物,对生物氧化的阻抗较小,而当 C 原子上的 H 都被烷基或芳基所取代时,就会形成生物氧化的阻抗物质。

### (4) 官能团的性质及数量

官能团的性质及数量对有机物的可生化性影响很大。例如,苯环上的氢被羟



基或氨基取代,形成苯酚或苯胺时,它们的生物降解性将比原来的苯提高。卤代作用则使生物降解性降低,尤其是间位取代的苯环,其抗生物降解更明显。一级

醇( $-\text{CH}_2\text{OH}$ )、二级醇( $\text{>CHOH}$ )易被生物降解,三级醇( $\text{R}-\underset{\text{R}}{\overset{\text{R}}{\text{C}}}-\text{OH}$ )却

能抵抗生物降解。

(5) 分子量大小对生物降解性的影响很大

高分子化合物,由于微生物及其酶难以扩散到化合物内部,袭击其中最敏感的反应键,因此使生物可降解性降低。

由于废水中污染物的种类繁多,相互间的影响错综复杂,所以一般应通过实验来评价废水的可生化性,判断采用生化处理的可能性和合理性。

### 6.2.3 废水可生化性的评定方法

(1) 按水质指标进行评价

通常是运用对工业废水或化学物质(有时称基质)的  $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{TOD}$  的测定进行评价。

1)  $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$  比值法

$\text{BOD}_5$  和  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  是废水生物处理过程中常用的两个水质指标,用  $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$  值评价废水的可生化性是广泛采用的一种最为简易的方法。在一般情况下, $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$  值越大,说明废水可生物处理性越好。综合国内外的研究结果,可参照表 6-1 中所列数据评价废水的可生化性。

表 6-1 废水可生化性评价表

$\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Cr}}$	>0.45	0.3~0.45	0.2~0.3	<0.2
可生化	好	较好	较难	不宜

在使用这种方法时,应注意以下几个问题。

①某些废水中含有的悬浮性有机固体容易在  $\text{COD}$  的测定中被重铬酸钾氧化,并以  $\text{COD}$  的形式表现出来。但在  $\text{BOD}$  反应瓶中受物理形态限制, $\text{BOD}$  数值较低,致使  $\text{BOD}_5/\text{COD}$  值减小。而实际上悬浮有机固体可通过生物絮凝作用去除,继之可经胞外酶水解后进入细胞内被氧化,其  $\text{BOD}_5/\text{COD}$  值虽小,可生物处理性却不差。

② $\text{COD}$  测定值中包含了废水中某些无机还原性物质(如硫化物、亚硫酸盐、



亚硝酸盐、亚铁离子等)所消耗的氧量,  $BOD_5$  测定值中也包括硫化物、亚硫酸盐、亚铁离子所消耗的氧量。但由于 COD 与  $BOD_5$  测定方法不同, 这些无机还原性物质在测定时的终态浓度及状态都不尽相同, 亦在两种测定方法中所消耗的氧量不同, 从而直接影响  $BOD_5$  和 COD 的测定值及其比值。

③重铬酸钾在酸性条件下的氧化能力很强, 在大多数情况下, COD 值可近似代表废水中全部有机物的含量。但有些化合物如吡啶不被重铬酸钾氧化, 不能以 COD 的形式表现出需氧量, 但却可能在微生物作用下被氧化, 以  $BOD_5$  的形式表现出需氧量, 因此对  $BOD_5/COD_{Cr}$  值产生很大影响。

综上所述, 废水  $BOD_5/COD_{Cr}$  值不可能直接等于可生物降解的有机物占全部有机物的百分数, 所以, 用  $BOD_5/COD_{Cr}$  值来评价废水的生物处理可行性尽管方便, 但比较粗糙, 欲做出准确的结论, 还应辅以生物处理的模型实验。

## 2) $BOD_5/TOD$ 值法

对于同一废水或同种化合物, COD 值一般总是小于或等于 TOD 值, 不同化合物的 COD/TOD 值变化很大, 如吡啶为 2%, 甲苯为 45%, 甲醇为 100%, 因此, 以 TOD 代表废水中的总有机物含量要比 COD 准确, 即用  $BOD_5/TOD$  值来评价废水的可生化性能得到更好的相关性。

通常, 废水的 TOD 由两部分组成, 其一是可生物降解的 TOD (以  $TOD_B$  表示), 其二是不可生物降解的 TOD (以  $TOD_{NB}$  表示), 即

$$TOD = TOD_B + TOD_{NB}$$

在微生物的代谢作用下,  $TOD_B$  中的一部分氧化分解为  $CO_2$  和  $H_2O$ , 另一部分合成为新的细胞物质。合成的细胞物质将在内源呼吸过程中被分解, 并有一些细胞残骸最终要剩下来。采用  $BOD_5/TOD$  值评价废水可生化性时, 有些研究者推荐采用表 6-2 所列标准。

表 6-2 废水可生化性评价参考数据

$BOD_5/TOD$	>0.4	0.2~0.4	<0.2
可生化性	易生化	可生化	难生化

## (2) 测呼吸线 (瓦呼吸法)

该方法是根据有机物的生化呼吸线与内源呼吸线的比较来判断有机物的生物降解性能。

测呼吸线即测定基质的耗氧曲线, 并把活性污泥微生物对基质的生化呼吸线与其内源呼吸线相比较而作为基质可生化性的评价。