



TSINGHUA UNIVERSITY

废水生物处理数学模式

第二版

顾夏声 编著

清华大学出版社

废水生物处理数学模式

(第二版)

顾夏声 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书扼要地介绍了废水生物处理过程中的数学模式,主要包括:曝气与氧的转移;生物增长动力学及其在活性污泥法和生物膜法中的应用;反应动力学在厌氧生物处理中的应用以及生物脱氮除磷等。

本书的一些理论、公式和数据对于城市废水和工业有机废水的处理均有实践和理论的指导意义,可作为环境工程和给水排水工程专业研究生学习废水生物处理的教材,也可供从事水污染控制工程的科技人员参考。

(京)新登字 158 号

废水生物处理数学模式

(第二版)

顾夏声 编著

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京昌平环球印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本:850×1168 1/32 印张:7.75 字数:199千字

1993年7月第2版 1997年12月第2次印刷

印数:1801~2800

ISBN 7-302-01197-4/X·17

定价:8.00元

前 言

本书第一版于1982年出版后,被从事环境工程、给水排水专业的科技工作者和有关专业的研究生广泛用作参考书和教材。有些读者并提出了一些宝贵意见和鼓励编者进行修订再版。这次修订基本上仍保持了原来各部分的标题及顺序,但对其内容则大部分作了重写和补充,特别增添了废水生物脱氮除磷技术、近年来国内外水处理方面的一些科研成果,等等,使新版能成为更实用的教学用书和参考书。

由于编者水平有限,仍不免有错误、不妥之处,望广大读者批评指正。

编 者

1992年3月

光华基金会为支持学术专著和研究生教材的出版,给予我社资助,本书即为由光华基金会资助出版的研究生教材之一。

目 录

前言	V
一、引言	1
二、废水水质有机污染指标	2
(一) 概述	2
(二) 理论需氧量	3
(三) 化学需氧量	4
(四) 生化需氧量	6
(五) 总需氧量	20
(六) 理论有机碳	20
(七) 总有机碳	21
(八) 化学需氧量与生化需氧量的比较	21
(九) 生化需氧量和化学需氧量之间的关系	22
(十) BOD、COD 和其它一些指标的关系	24
(十一) 工业废水调研数据的统计分析	25
三、气体的转移	28
(一) 概述	28
(二) 转移理论	28
(三) 水中氧的转移	34
(四) 活性污泥法曝气池混合液中氧的转移	39
四、生物处理反应动力学	42
(一) 概述	42
(二) 生物处理数学模式	43
(三) Eckenfelder 模式	45

(四) Grau 模式	54
(五) Lawrence-McCarty 模式	54
(六) McKinney 模式	77
(七) 基质降解与生物增长量之间的关系	81
(八) 基质降解与需氧量之间的关系	83
(九) 对中和的需要	86
(十) 对营养的要求	86
(十一) 温度的影响	88
五、生物处理系统污泥最佳沉降条件	92
(一) 概述	92
(二) 表示活性污泥沉降性能的主要参数	92
(三) 污泥的最佳沉降条件	96
六、活性污泥法	98
(一) 概述	98
(二) 传统活性污泥法	99
(三) 完全混合活性污泥法	100
(四) 多点进水法	114
(五) 吸附再生(生物吸附或接触稳定)法	119
(六) 延时曝气法	125
(七) 纯氧曝气法	128
(八) 深层曝气(塔式曝气)法	129
(九) 二次沉淀池	130
七、稳定塘	137
(一) 概述	137
(二) 曝气塘	138
八、生物膜法	146
(一) 概述	146
(二) 生物滤池	147

(三) 生物转盘	152
(四) 生物接触氧化法	158
九、厌氧生物处理	164
(一) 概述	164
(二) 厌氧消化过程阶段的划分	165
(三) 影响厌氧处理运行的主要因素	168
(四) 厌氧生物处理动力学	170
十、生物脱氮除磷	192
(一) 概述	192
(二) 生物脱氮	192
(三) 生物除磷	209
十一、水体的生化自净	220
(一) 水体的自净	220
(二) 生物氧化或生化自净	221
主要参考书刊	234

一、引言

在废水生物处理系统的功能设计中,往往采用经验或半经验的方法。这些方法未能反映出生化反应过程中各种变量之间的相互关系。因此用这些方法进行设计带有一定的盲目性,难以经济合理地设计处理系统,也难以预测和指导当系统发生变化时的运行管理。50年代以来,国外一些学者把反映生化机理的微生物生长动力学引入废水处理领域,使废水生物处理的设计和运行更加理论化和系统化,提高了人们对废水生物处理机理的认识,进一步促进了生物处理设计理论的发展。

近年来已有不少数学模式在废水生物处理工程中得到应用,使处理系统的设计和运行更加合理。本书将介绍一些常用的模式及其应用方法。

二、废水水质有机污染指标

(一) 概 述

有机物质、有毒物质、悬浮物、pH 值、颜色等都是表示水质污染情况的重要指标。由于生物处理法主要是用来除去废水中胶体的和溶解的有机物质,所以这里着重讨论水质的有机污染指标。

有机物的组成比较复杂,要想分别测定各种有机物的含量比较困难。一般采用一些综合指标来表示有机物的浓度。如果水中的有机物含有毒性,就须分别测定这些有毒物质的含量。

表示有机物的综合指标可分为两大类:

1. 以氧(O_2)表示的指标

- (1) 理论需氧量
- (2) 化学需氧量
- (3) 生化需氧量
- (4) 总需氧量

2. 以碳(C)表示的指标

- (1) 理论有机碳
- (2) 总有机碳

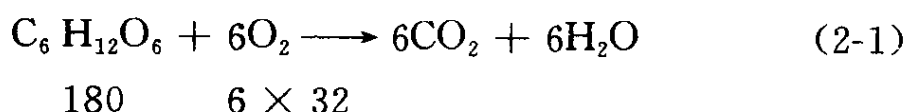
单位常以 mg/l 表示。

为什么要测定水中的有机物?有机物进入水体后,将在微生物的作用下进行氧化分解,使水中的溶解氧(DO)逐渐减少。当水中有机物较多,氧化作用进行得太快而水体不能及时从大气中吸收

充足的氧来补充消耗时,水中的氧就可能降得很低,当低于 3—4mg/l 时就会影响鱼类的生活。当水中溶解氧耗尽后,有机物便开始腐化,发出臭气,影响环境卫生。有机物又是很多微生物(其中包括可引起传染疾病的细菌)生长繁殖的良好食料;有毒有机物更将直接危害人体健康和动植物的生长。因此,废水中有机物的浓度是一个十分重要的水质指标。

(二) 理论需氧量

理论需氧量(ThOD)是根据化学方程式计算求得的有机物被全部氧化所需的氧量。例如,含有 300mg/l 葡萄糖溶液的理论需氧量可计算如下:

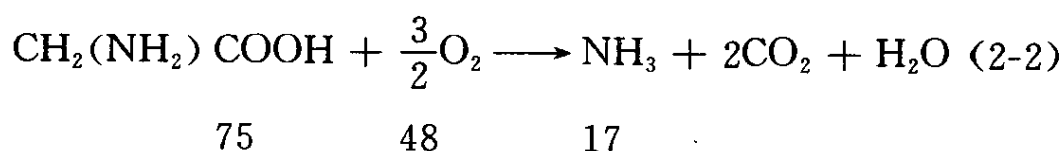


$$\frac{180}{300} = \frac{6 \times 32}{\text{ThOD}}$$

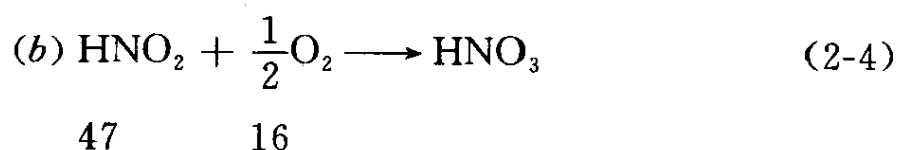
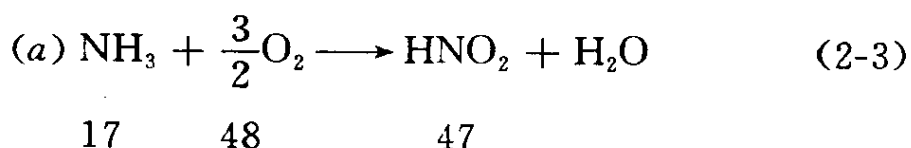
$$\therefore \quad \text{ThOD} = 320\text{mg/l (以氧表示)}$$

又如欲计算氨基乙酸的理论需氧量,可利用下列化学方程式:

(1) 碳化需氧量



(2) 硝化需氧量



如氨基乙酸溶液的浓度为300mg/l,则由式(2-2)得其碳化需氧量为:

$$\frac{300 \times 48}{75} = 192\text{mg/l(以氧计)}$$

所产生的 NH_3 为:

$$\frac{300 \times 17}{75} = 68\text{mg/l}$$

硝化需氧量可计算如下:

由式(2-3),得 NH_3 转化成 HNO_2 所需的氧量为:

$$\frac{68 \times 48}{17} = 192\text{mg/l(以氧计)}$$

所产生的 HNO_2 为:

$$\frac{68 \times 47}{17} = 188\text{mg/l}$$

由式(2-4),得 HNO_2 转化为 HNO_3 所需的氧量为:

$$\frac{188 \times 16}{47} = 64\text{mg/l(以氧计)}$$

总的硝化需氧量为:

$$192 + 64 = 256\text{mg/l(以氧计)}$$

∴ 300mg/l 氨基乙酸溶液的 ThOD 为:

$$192 + 256 = 448\text{mg/l(以氧计)}$$

上述氨基乙酸溶液的 ThOD 也可求得如下:

$$\begin{aligned}\text{ThOD} &= \left(\frac{3}{2} + \frac{3}{2} + \frac{1}{2} \right) \text{mol O}_2 / \text{mol 氨基乙酸} \\ &= 112 \text{ g O}_2 / \text{mol 氨基乙酸}\end{aligned}$$

即
$$\text{ThOD} = \frac{112}{75} \times 300 = 448\text{mg/l(以氧计)}$$

(三) 化学需氧量

化学需氧量或耗氧量是指在一定严格条件下水中有机物与强

氧化剂(如重铬酸钾、高锰酸钾)作用所消耗的氧量。当用重铬酸钾作为氧化剂,硫酸银作为催化剂时,水中有机物几乎可以全部(约90%—95%左右)被氧化。这时所测得的耗氧量称为重铬酸钾耗氧量或称化学需氧量,以 COD_{cr} 或 COD 表示。在测定过程中无机性还原物质也会被氧化。所以一般测得的 COD 包括可生物降解和不可生物降解两部分,即化学需氧量区别不出可生物降解和不可生物降解的物质。

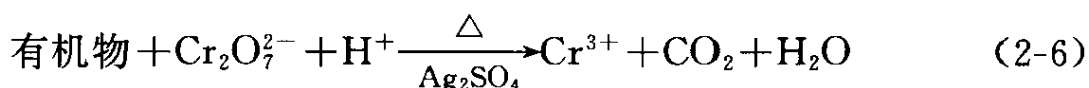
$$COD = COD_B + COD_{NB} \quad (2-5)$$

式中 COD_B ——可生物降解的 COD ;

COD_{NB} ——不可生物降解的 COD 。

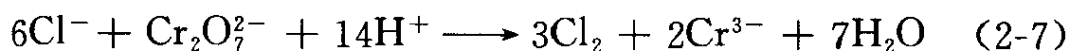
此外, COD 不包括硝化所需的氧量。

下式表示重铬酸钾与有机物的化学反应:

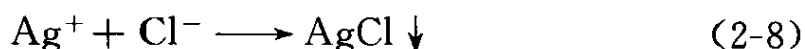


Ag_2SO_4 用作催化剂。

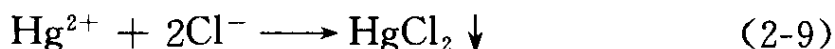
水中 Cl^- 多于 $30mg/l$ 将明显干扰测定,因为:



且当用 Ag_2SO_4 作催化剂时,部分 Ag_2SO_4 将消耗于与 Cl^- 所起的化学反应



加 $HgSO_4$, 可以防止干扰。



$HgSO_4$ 应比 Ag_2SO_4 先加。

由此可见,此法测定手续比较复杂。

如用高锰酸钾作为氧化剂,则所测得的耗氧量常称为耗氧量,以 OC 或 COD_{Mn} 表示,有时也以 PV (Permanganate value) 或 OA (Oxygen absorbed) 表示。此法的优点是测定比较快速。在一般情况下,不含氮有机物易被氧化,而含氮有机物较难分解,而且也不

能区分可生物降解和不可生物降解的物质。实际上,在测定条件下OC 仅表示出一部分易氧化的物质。在美国的《水和废水标准检验法》中1965年后此指标即为重铬酸钾耗氧量替代。但是,由于其测定比较简便快速,有些国家还用它作为衡量有机物的指标。测定OC 按其加热和加热的时间有三种方法:(1) 在水浴上煮沸30min,(2) 直接煮沸10min,(3) 在27℃温度下保存4h。一般说,第(1)种方法的测定结果最高,而第(3)种方法的测定结果最低,所以测定结果应注明在什么条件下取得的。

(四) 生化需氧量

1. 定义

在有氧的情况下,由于微生物(主要是细菌)的活动,可降解有机物稳定化所需的氧量,称为生化需氧量,常以 BOD 表示。图2-1示有机物氧化和微生物细胞合成的关系。在图中可以看出,在好氧情况下,异养细菌通过自身的生命活动——氧化、还原、合成等过程,把一部分被吸入的有机物^①氧化成简单的无机物(如 CO_2 、 NH_3 等),并放出其生长、活动所需要的能量,而把另一部分有机物及其某些分解产物转化为生物体所必需的营养物质,组成新的细胞物质。 O_a 就是细菌氧化被吸收的有机物的一部分所消耗的氧量。在细菌的生长过程中,除吸收入菌体内的一部分有机物被氧化,放出能量外,组成细菌的细胞物质也在进行氧化,同时放出能量。这种细胞物质的氧化称为内源呼吸^②。 O_b 表示这部分氧化所消耗的氧量。有机物氧化分解所产生的氨在硝化细菌(一种自养菌)的作用

① 可生物降解的有机物。

② 在混合培养液中内源呼吸的概念已扩大了,微生物之间的代谢也往往归入内源呼吸的范畴。

下能被氧化成 NO_2^- 和 NO_3^- ，同时放出能量和组成新的细胞。 O_c 和 O_d 表示在这个过程中所消耗的氧量。

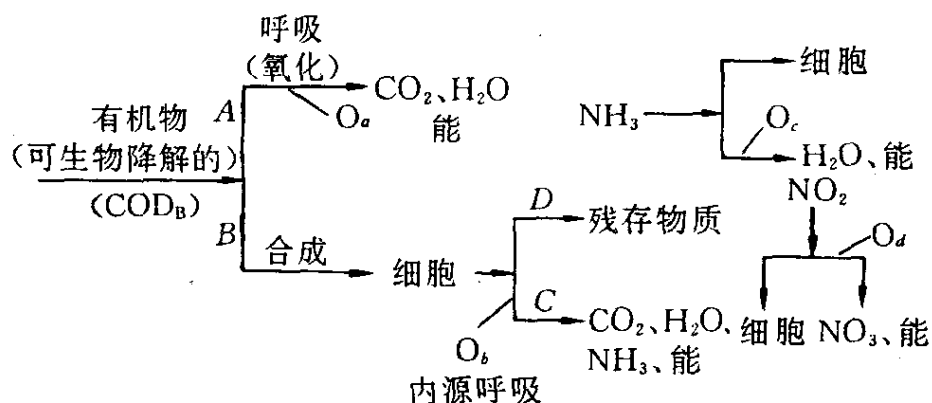


图 2-1 好氧生物降解

注：(1) 假定图中有机物仅含 C、H、O、N 几种元素，因 P、S 等极少，未予考虑。

(2) 未考虑细菌内源呼吸产生的氨的氧化和硝化菌内源呼吸消耗的氧。

显然，在有氧的条件下，废水中有机物的分解一般可分两个阶段。第一阶段（亦称碳氧化阶段），主要是不含氮有机物的氧化，但也包括含氮有机物的氨化及氨化后生成的不含氮有机物的继续氧化，这也就是有机物中碳氧化为二氧化碳的过程。碳氧化阶段所消耗的氧称为碳化需氧量或碳化 BOD，一般即称 BOD。 O_a 和 O_b 之和即表示这部分生化需氧量。总的碳化需氧量常称为第一阶段生化需氧量（因为碳氧化总是首先发生），也称完全或总的生化需氧量，常以 L_a 或 BOD_u 表示。由于硝化作用所消耗的氧量称为硝化需氧量或硝化 BOD，可以 NOD 表示。 O_c 和 O_d 之和表示这部分生化需氧量（忽略细菌内源呼吸产生的氨进一步氧化所消耗的氧）。总的硝化需氧量称为第二阶段生化需氧量可以 L_N 或 NOD_u 表示。

在污染水（如生活污水或被生活污水污染的河水）中一般也含有一些硝化细菌。实际上，在生物氧化的初期就会发生硝化作用。

但是这个过程常要在5—7d 甚至10d 以后才能显著展开,因而在氧化的开始阶段往往觉察不出硝化的干扰。因为氨已经是无机物,所以作为有机物的污染指标只采用碳化需氧量。再者,当废水排入河川后,不一定全部的氨被氧化成 NO_3^- ,并且在缺氧条件下反硝化细菌可利用 NO_2^- 和 NO_3^- 作为氧源。所以对于控制水体污染来说,可以认为碳化需氧量才是氧的真正消耗量。

生化需氧量的反应速度在很大程度上取决于微生物的种类、数目及温度,而在测定过程中溶解氧又是逐渐消耗的。所以测定生化需氧量就须保持一定的温度,同时也需要规定一定的时间。通常是在20℃温度下培养5d 检查溶解氧的损失,用 BOD_5 表示,单位以 $\text{O}_2 \text{ mg/l}$ 计。测定温度用20℃是因为这个温度比较接近温带地区一般河水的平均温度。在20℃温度下,一般有机物的全部分解需时百日以上。这就是说,如欲求完全的生化需氧量需时100d 以上,这样在实用上是不可能采用的。实际观察表明,在20d 以后第一阶段生化反应已进行得非常缓慢。故20℃、20d 的生化需氧量(BOD_{20})可作为第一阶段的生化需氧量(L_a)。求定20d 的生化需氧量仍嫌时过长,而且又考虑到,好氧分解速度一般在开始时最快,在20℃时,生活污水和多种工业废水的 BOD_5 已约为其 L_a 的70%—80%左右,此外,硝化过程在5—7d 以后才有显著影响,故常以20℃、5d 生化需氧量(BOD_5)作为衡量污染水有机浓度的指标(最初采用5d 作为标准时间的原因,实际上是由于BOD测定起源于英国,而英国大多河川的水流从其上游流至海口最长不超过5d;当时测定温度采用18.3℃,因为这是英国河水夏季的平均温度)。

对于含有硝化细菌较多的废水,例如废水生物处理构筑物的出水,在5d 培养时间内可能会消耗较多的氧以致大大影响碳化需氧量的测定。在这种情况下,可以在测定BOD时投加化学药剂以抑制硝化作用。据报道,某生物处理厂出水未加硝化抑制剂所测得的 BOD_5 竟约3倍于加抑制剂后所测得的 BOD_5 。

生化需氧量测定是一种生物学的测定方法,能在尽可能和天然条件相似的情况下,确定有机生物利用废水中的有机物所消耗的氧量,从而间接表示出有机物的含量。所以在1933年即被列入美国《水和废水标准检验法》中,并作为水污染控制工作的最广泛采用的测定方法之一。

2. 反应动力学

图2-2所示是一典型的 BOD 曲线。前已述及,在污染水中一般含有一些硝化细菌,所以生物氧化初期就会有硝化作用发生,但这时它的影响不大,往往觉察不出,而在5—7d 后硝化过程才较为明显。图中曲线(b)是在未投加硝化抑制剂的情况下耗氧实测的结果,可称为碳化加硝化需氧曲线。

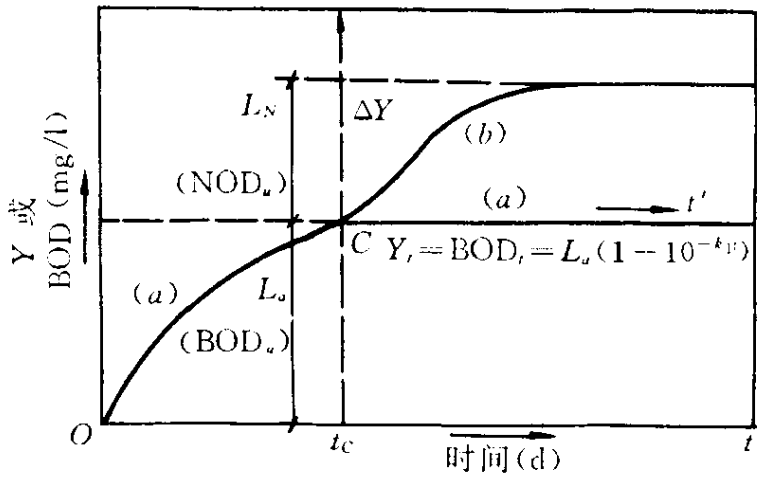


图 2-2 BOD 曲线

- (a) 碳化需氧曲线(在硝化被抑制条件下测得)
- (b) 碳化加硝化需氧曲线或合并需氧曲线(未加硝化抑制剂情况下测得)

(1) 第一阶段反应动力学

生化需氧量反应动力学的研究表明,对第一阶段 BOD 的变化,可认为具有一级反应性质。这是因为有机物为微生物分解的作用虽可被认为是双分子反应[见式(2-10)],但在这个反应中当反