

# 废水生物处理过程设计

中国建筑工业出版社

# 废水生物处理过程设计

[美] 拉里·D·贝尼菲尔德 著  
克里福德·W·兰德尔

邢建 段宁 译

傅国伟 校

中国建筑工业出版社

本书既简要地阐明了生物处理的动力学理论基础,说明了底物(有机物)降解和微生物(活性污泥和生物膜)生长的规律及其数学表达式;又详细地介绍了各种生物处理过程的数学模型,阐明了它们的推导来由和使用条件,并介绍了这些数学模型有关的生化动力学常数的测定方法和估算值;还对广泛使用的各种生物处理,包括活性污泥法、处理塘、附着-增长生物处理法以及污泥消化等过程的定量设计,用实例介绍了模拟计算的详细步骤。这三部分内容在该书中得到比较有机的综合。

本书内容深入浅出,新颖实用,可供给水排水和环境工程方面的设计科研、规划管理工作人员以及大专院校师生参考。

## **Biological Process Design for Wastewater Treatment**

1980.

Larry D. Benefield  
Clifford W. Randall  
Prentice-Hall, Inc.

\* \* \*

### **废水生物处理过程设计**

邢建段宁译

傅国伟校

\*

**中国建筑工业出版社**出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

**中国建筑工业出版社印刷厂**印刷(北京阜外南礼士路)

\*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 16<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 字数: 437千字

1984年8月第一版 1984年8月第一次印刷

印数: 1—7,600册 定价: 2.60元

统一书号: 15040·4620

## 译校者的话

生物处理是废水处理系统中最重要的过程之一，它已有半个多世纪的历史，但过去废水生物处理多采用经验设计法，很大程度上依赖于工程技术人员经验。七十年代开始，在长期实践和理论研究的基础上开始出现一种新的工程设计法，它利用反应生物处理过程基本特性的定量关系式和实验测定参数进行废水处理过程系统的量化设计。这种方法显然比过去更为科学、更为合理。美国拉里·D·贝尼菲尔德和克里福德·W·兰德尔两人1980年编著出版的《废水生物处理过程设计》一书，对近二十年来美国在这方面所取得的进展，作了比较全面系统的总结。量化地进行废水生物过程的合理设计是贯穿该书的主线，也是该书最重要的特点。

本书的主要内容有：废水生物处理的基础理论、废水生物处理过程的数学模型与废水生物处理的过程设计。

书中首先简明地介绍了生物处理的动力学基础及废水特点。重点阐明了底物（有机物）降解和微生物（活性污泥和生物膜）生长的规律。说明了底物和微生物与各种有关因素之间的相互关系及其表达式。这些表达式正是各种废水生物处理过程数学模型的基本方程。

然后以大量的篇幅介绍了各种生物处理过程的数学模型；阐明了它们的推导来由；说明了它们的使用条件；介绍了这些数学模型中所涉及的有关生化动力学常数的实验测定方法和各种估算数值及其范围。这些数学模型可以为废水生物处理过程和水污染控制系统的规划设计及其最优化提供了重要的基础。

最后对应用面相当广泛的各类生物处理，包括形式多样

的活性污泥法、七种处理塘、多种附着-增长生物处理法以及污泥消化等过程的设计问题，用具体的实例说明其应用数学模型进行模拟设计的详细步骤。

以上三个部分在本书中得到了比较有机的系统化和综合，使本书的内容深入浅出、新颖而又实用。本书供从事给水排水和环境工程专业等方面的设计科研、规划管理工作的科技人员以及大专院校师生参考。

本书第一、二、三、七、八章由段宁翻译，第四、五、六章由邢建翻译。全书由傅国伟校核。

由于译校者的水平所限，译文中肯定会有错误和不妥之处，望读者批评指正。

译 校 者

1983年10月1日

## 原 序

作者通过多年的实践看到，生物处理的基本原理虽已建立多年，但是，实际投入运转的大多数废水生物处理过程并未利用这一原理进行设计。其结果是，许多设备运转不当，需要耗费大量时间和资金来检查设计中的问题，加以纠正后才能达到良好运转。我们认为，存在上述问题的主要原因，是因为对于设计工程师来说，在目前废水生物处理基本理论和设计方面的书籍中，缺少一本全面而又比较简明的、便于真正掌握有关基本原理的读物。如果工程师要想成为过程设计的决策者而不仅是公式的使用者，就必须学习这些基本原理。我们试图用这本书来填补现有资料中这一明显的空白。

虽然生物过程是大多数废水处理系统的基本组成部分，但是目前却尚无一本从理论和设计两个方面对生物过程详加讨论的教材。本书的目的，是把上述两方面综合在一本大学生和工程师都能使用的教材中。为达此目的，本书按下面的形式编排：（1）介绍处理过程的基本原理；（2）尽可能地用这些基本原理导出特定过程的设计关系式；（3）用例题说明使用这些关系式的设计步骤，所列例题，代表了各种过程应用中所需要的计算程序。（4）最后，每一章末尾都附有基本的参考资料。整个教材都十分强调过程设计的准则应当从实验室研究中得出。但是在许多情况下，实际工作者没有时间或手段进行实验室研究。为此，本书还介绍了某些具体处理场合下的设计参数。这些参数在构筑物规划阶段的方案比较中是十分有用的。

拉里·D·贝尼菲尔德

克里福德·W·兰德尔

# 目 录

## 原 序

|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>第一章 过程动力学基础</b> .....     | 1  |
| <b>第一节 反应速率</b> .....        | 1  |
| 零级反应 .....                   | 2  |
| 一级反应 .....                   | 3  |
| 二级反应 .....                   | 4  |
| 酶反应 .....                    | 6  |
| 温度对反应速率的影响 .....             | 10 |
| <b>第二节 反应器分析</b> .....       | 13 |
| 完全混合间歇反应器 .....              | 13 |
| 连续流搅拌池反应器 .....              | 14 |
| 推流反应器 .....                  | 18 |
| 有弥散的推流(任意流) .....            | 20 |
| 习题 .....                     | 21 |
| <b>第二章 微生物学基础</b> .....      | 24 |
| <b>第一节 营养需求</b> .....        | 24 |
| 微生物酶 .....                   | 25 |
| <b>第二节 环境对微生物增长的影响</b> ..... | 27 |
| 温度的影响 .....                  | 27 |
| 需氧量 .....                    | 28 |
| pH的影响 .....                  | 29 |
| <b>第三节 微生物的代谢</b> .....      | 30 |
| 异养菌的能量代谢 .....               | 31 |
| 能量的比较 .....                  | 39 |
| 自养菌的能量代谢 .....               | 39 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第四节 微生物学的动力学关系 .....      | 42  |
| 微生物体的增长速率 .....           | 44  |
| 增长产率 .....                | 46  |
| 微生物培养中的底物利用 .....         | 47  |
| 底物浓度对增长速率的影响 .....        | 48  |
| 能源和碳源的要求 .....            | 48  |
| 内源呼吸时的维持能 .....           | 52  |
| 第五节 动力学关系式在过程设计中的应用 ..... | 54  |
| 习题 .....                  | 57  |
| 第三章 废水特性和流量 .....         | 61  |
| 第一节 有机物质 .....            | 61  |
| 生化需氧量 .....               | 61  |
| 化学需氧量 .....               | 71  |
| 总有机碳(TOC) .....           | 73  |
| 第二节 无机物质 .....            | 75  |
| pH和碱度 .....               | 77  |
| 氮 .....                   | 86  |
| 磷 .....                   | 97  |
| 第三节 固体含量 .....            | 98  |
| 第四节 废水成分及流量 .....         | 102 |
| 第五节 废水流量的计量和废水采样 .....    | 111 |
| 数据分析 .....                | 113 |
| 习题 .....                  | 119 |
| 第四章 活性污泥法及其变型 .....       | 125 |
| 第一节 混合方式 .....            | 126 |
| 第二节 动力学模型的推导 .....        | 127 |
| 第三节 处理过程的变型 .....         | 149 |
| 传统活性污泥处理法 .....           | 150 |
| 渐减曝气法 .....               | 151 |
| 阶段曝气法 .....               | 151 |
| 高负荷活性污泥法 .....            | 157 |



|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 完全混合法 .....           | 157 |
| 延时曝气法 .....           | 158 |
| 吸附再生法(接触稳定法) .....    | 160 |
| 污泥再曝气法 .....          | 167 |
| 纯氧曝气法 .....           | 170 |
| 氧化渠 .....             | 177 |
| 处理过程的其它改革形式 .....     | 180 |
| 第四节 过程设计的依据 .....     | 180 |
| 负荷标准 .....            | 180 |
| 剩余污泥产量 .....          | 182 |
| 污泥中活性微生物测定方法的比较 ..... | 185 |
| 需氧量 .....             | 186 |
| 营养物的需要量 .....         | 191 |
| 温度的影响 .....           | 193 |
| 固-液分离 .....           | 197 |
| 出水质量 .....            | 206 |
| 第五节 生化动力学常数的估值 .....  | 207 |
| 第六节 硝化 .....          | 212 |
| 悬浮生长系统中的硝化 .....      | 218 |
| 第七节 生物脱氮 .....        | 245 |
| 脱氮过程中的微生物形态 .....     | 246 |
| 悬浮-增长系统中的脱氮 .....     | 247 |
| 第八节 厌气接触工艺 .....      | 253 |
| 基础微生物学 .....          | 254 |
| 过程动力学: 速度限制阶段分析 ..... | 256 |
| 气体产量 .....            | 259 |
| 环境因素 .....            | 261 |
| 过程设计依据 .....          | 265 |
| 习题 .....              | 269 |
| 第五章 曝气 .....          | 279 |
| 第一节 气体传递的基本理论 .....   | 279 |

|                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| 第二节 影响氧传递的因素 .....                | 282     |
| 氧的饱和 .....                        | 283     |
| 温度 .....                          | 284     |
| 废水特性 .....                        | 284     |
| 紊动 .....                          | 285     |
| 氧传递速率 .....                       | 286     |
| 第三节 $K_L a$ 和 $\alpha$ 值的确定 ..... | 287     |
| 第四节 曝气系统的设计 .....                 | 291     |
| 扩散曝气法 .....                       | 292     |
| 浸没式叶轮曝气法 .....                    | 305     |
| 表面曝气器 .....                       | 308     |
| 混合条件 .....                        | 314     |
| 习题 .....                          | 315     |
| <br>第六章 处理塘和曝气氧化塘 .....           | <br>318 |
| 第一节 好气塘 .....                     | 319     |
| 好气塘中的昼夜变化 .....                   | 319     |
| 设计关系式 .....                       | 320     |
| 设计依据 .....                        | 329     |
| 第二节 兼性塘 .....                     | 334     |
| 设计关系式 .....                       | 335     |
| 设计依据 .....                        | 342     |
| 流程形式 .....                        | 344     |
| 运行 .....                          | 347     |
| 第三节 厌气塘 .....                     | 350     |
| 第四节 精度处理塘 .....                   | 354     |
| 第五节 曝气氧化塘 .....                   | 356     |
| 第六节 好气性曝气氧化塘 .....                | 357     |
| 混合及曝气 .....                       | 358     |
| 设计关系式 .....                       | 362     |
| 温度的影响 .....                       | 365     |
| 设计依据 .....                        | 369     |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第七节 兼性曝气氧化塘 .....         | 378 |
| 设计依据 .....                | 378 |
| 习题 .....                  | 381 |
| <br>第七章 附着-增长生物处理过程 ..... | 387 |
| 第一节 生物滤池（滴滤池） .....       | 387 |
| 滤料 .....                  | 388 |
| 滤池类型 .....                | 389 |
| 通用设计方程 .....              | 390 |
| 生物滤池作为选择性处理方案 .....       | 404 |
| 第二节 生物转盘 .....            | 405 |
| 设计关系式 .....               | 408 |
| 第三节 活性生物滤池 .....          | 416 |
| 设计依据 .....                | 419 |
| 第四节 厌气滤池 .....            | 419 |
| 设计依据 .....                | 421 |
| 第五节 附着-增长系统（氮的）硝化作用 ..... | 423 |
| 生物滤池的硝化作用 .....           | 423 |
| 淹没滤池的硝化作用 .....           | 425 |
| 生物转盘的硝化作用 .....           | 430 |
| 活性生物滤池（ABF）的硝化作用 .....    | 436 |
| 第六节 附着-增长系统的脱氮作用 .....    | 436 |
| 淹没式生物转盘 .....             | 437 |
| 淹没式高孔隙率填料塔 .....          | 438 |
| 淹没式低孔隙率细滤料填料塔 .....       | 442 |
| 流化床脱氮塔 .....              | 444 |
| 习题 .....                  | 446 |
| <br>第八章 污泥消化 .....        | 451 |
| 第一节 厌气消化 .....            | 452 |
| 过程概述 .....                | 453 |

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 动力学关系 .....         | 456 |
| 气体产量与需热量 .....      | 458 |
| 污泥特性 .....          | 460 |
| 设计依据 .....          | 462 |
| 过程的模型化和控制 .....     | 469 |
| 第二节 好气消化 .....      | 471 |
| 动力学关系式 .....        | 474 |
| 温度的影响 .....         | 482 |
| 需氧量 .....           | 484 |
| 混合所需的能量 .....       | 486 |
| 设计依据 .....          | 487 |
| 实验室参数估值 .....       | 488 |
| 自供热高温好气消化 .....     | 499 |
| 污泥消化的能量比较 .....     | 499 |
| 习题 .....            | 500 |
| 附录一 英美制-公制换算表 ..... | 506 |
| 附录二 缩略语表 .....      | 508 |

# 第一章 过程动力学基础

所有废水生物处理过程都是在由特定边界限定的容积内发生的。通常称这种容积为反应器。废水在反应器中发生的物质成分和浓度的变化是废水处理中的重要因素。这些变化不仅是由于物质在水力输送作用下流入和流出反应器所引起的，而且也是由于反应器内部发生的反应所造成的。为了完整地定义反应器系统并设计相似的反应器，需要了解这些变化发生的速率和变化的程度。

设计生物过程的工程师通常感兴趣的，是从废水中去除各种成分（如有机物）的速率和反应器内生物体增长的速率。因为对于一定的处理程度，这些变化的速率直接影响所需反应器的大小，所以它们是十分重要的。

## 第一节 反应速率

化学反应可按下列方式之一分类：

1. 以生成反应产物而必须参加反应的分子数为基础分类。
2. 按反应级数为特征的动力学基础分类。

在描述大多数生物过程的动力学时，有用的是后一种分类法。

当反应以动力学为基础分类时，由于微生物、底物或者环境条件的变化，可能发生不同的反应级数。

反应速率  $R$ 、反应物浓度  $C$  和反应级数  $n$  之间的关系，由下式给出

$$R=C^n \quad (1-1)$$

或者对上式两侧同取对数：

$$\lg R = n \lg C \quad (1-2)$$

方程1-2可以用来整理实验结果，以确定反应的级数和速率。对于任何定常级的反应来说，如果把任一时刻反应物浓度瞬时变化率的对数作为同一时刻反应物浓度对数的函数作图，其结果将是一条直线。直线的斜率就是反应级数（见图1-1）。零级反应的结果是形成一条水平线，即反应速率与浓度无关，或者说在任何反应物浓度下，反应速率不变。一级反应的反应速率与反应物浓度成正比。由二级反应的方程可以看出，二级反应的速率与浓度的平方成正比。反应级数也可能为分数，特别是在混合介质的生物

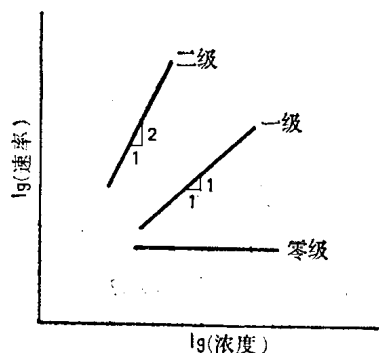
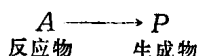


图 1-1 用对数标绘确定反应级数

培养过程中。但是为了使很多反应速率问题能够求解，往往取成整数值的反应级数。对于这种情况，如以反应所经历的时间为函数，则可更详细地评价整数级方程。

## 零 级 反 应

零级反应即反应速率与任何反应物浓度无关的反应。例如，考虑单一的反应物转变成单一的生成物：



如果这一反应遵守零级反应动力学，则 A 的衰减速率由下面的速率方程表示

$$-\frac{d[A]}{dt} = K[A]^0 = K$$

式中  $-\frac{d[A]}{dt}$  —— A 的衰减速率；

K —— 反应速率常数。

如果以 C 表示任意时刻 t 时 A 的浓度，那么，可将速率方程表达为

$$-\frac{dC}{dt} = K \quad (1-3)$$

式中  $-\frac{dC}{dt}$  —— A 的浓度随时间的变化速率, [质量]·[容积]<sup>-1</sup>·[时间]<sup>-1</sup> (负号表示 A 的浓度随时间减少; 如果给出的是正号, 则表示浓度随时间增加);  
 $K$  —— 反应速率常数, [质量]·[容积]<sup>-1</sup>·[时间]<sup>-1</sup>。

对方程 1-3 积分得到下式

$$C = -Kt + \text{积分常数} \quad (1-4)$$

令  $t=0$  时  $C=C_0$ , 可以得到积分常数, 即

$$C_0 = \text{积分常数}$$

故积分后的速率定律形式为

$$C - C_0 = -Kt \quad (1-5)$$

图 1-2 给出零级反应浓度与时间的关系。注意, 该图是在普通坐标纸上获得线性结果的。

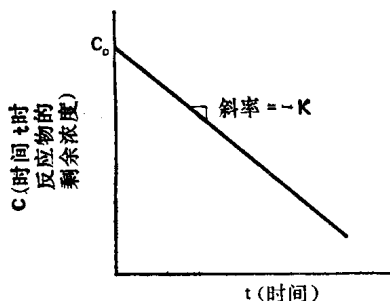


图 1-2 普通坐标纸上绘示的零级反应

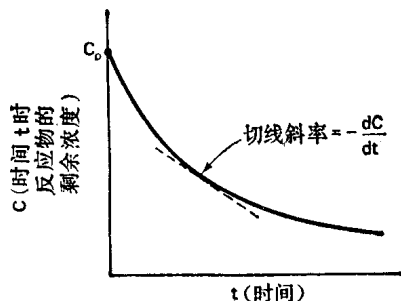
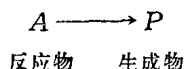


图 1-3 普通坐标纸上绘示的一级反应

## 一 级 反 应

一级反应即反应进行的速率与某一种反应物的浓度成正比。由于反应速率取决于反应物浓度, 而反应物浓度又随时间而变化, 所以与零级反应不同, 一级反应中反应物浓度随时间的变化在普通坐标图上得不到线性结果, 见图 1-3。

仍考虑单一的反应物转变成单一的生成物



如果上式遵守一级反应动力学, 则 A 的衰减速率由以下速率方程表示

$$-\frac{dC}{dt} = K(C)^1 = KC \quad (1-6)$$

式中  $-\frac{dC}{dt}$  —— A 的浓度随时间的变化速率, [质量]·[容积]<sup>-1</sup>·[时间]<sup>-1</sup>;

C —— A 在任意时间 t 的浓度, [质量]·[容积]<sup>-1</sup>;

K —— 反应速率常数, [时间]<sup>-1</sup>。

对方程 1-6 积分, 并令  $t = 0$  时  $C = C_0$ , 得到速率定律的积分形式

$$\ln\left(\frac{C_0}{C}\right) = Kt \quad (1-7)$$

或者写成更为熟悉的形式

$$\lg\left(\frac{C_0}{C}\right) = \frac{Kt}{2.3} \quad (1-8)$$

方程 1-8 表明, 在一级反应中如以  $\lg C$  对  $t$  作图得到的是线性关系, 如图 1-4 所示。

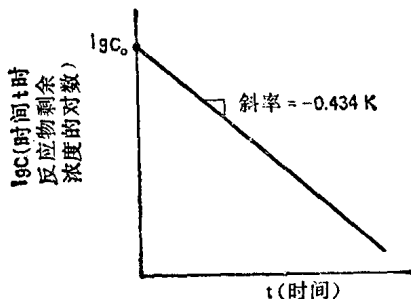


图 1-4 一级反应过程的半对数图①

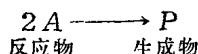
## 二 级 反 应

二级反应即反应进行的速率与单一反应物浓度的二次方成正

① 原图纵坐标上端误为  $C_0$ , 现改正为  $\lg C_0$  —— 译者注。



比。对于描述单一反应物转变成单一生成物的反应，有



二级反应中  $A$  的衰减速率由以下速率方程描述

$$-\frac{dC}{dt} = K(C)^2 \quad (1-9)$$

式中  $K$ ——反应速率常数， $[\text{质量}] \cdot [\text{容积}]^{-1} \cdot [\text{时间}]^{-1}$ 。

二级反应速率定律的积分形式为

$$\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0} = Kt \quad (1-10)$$

图1-5表明， $1/C$ 与 $t$ 在普通坐标纸上呈线性关系，其斜率给出 $K$ 值。

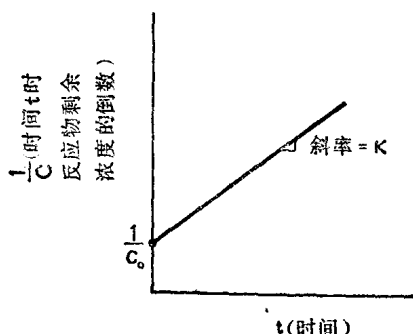


图 1-5 二级反应过程图

对于给定的一组  $C$  和  $t$  的实验数据，方程1-5、1-8和1-10可以用来判断某一特定反应的级数。为此，只需绘制相应的浓度对时间的曲线，并注意曲线与线性度的偏离量，就可以确定反应的级数了。

**【例 1-1】** 把葡萄糖加入间歇式的微生物培养器中，并随时测定葡萄糖的去除情况。获得的数据如表1-1。

试通过曲线拟合法确定去除过程的反应级数。

**【解】** 绘制各相应的浓度对时间的曲线，并且注意它们对线性度的偏离情况。

因为曲线 (b) 与实验数据拟合最好，所以可认为葡萄糖的去除过程遵守一级反应动力学。