

# 用能量代谢方程求解泥龄研究\*

王 涛, 全晓泉, 楼少华, 杨 斌, 王海涛

(重庆大学 城市建设与环境工程学院 400045)

**摘 要:**从本质上说,污水生物处理的过程就是微生物能量代谢的过程,从能量的角度出发,在质量守恒与能量守恒的基础上建立了能量代谢方程,同时通过模型试验求解出其中的参数。该方程从微观的角度解释了活性污泥系统中泥龄选择的理由,可运用该方程优化低负荷下活性污泥工艺的系统泥龄,从而优化活性污泥系统的能量配置,达到节能降耗的目的。

**关键词:**活性污泥法,泥龄,能量代谢方程

中图分类号: X051 文献标志码: A 文章编号: 1006-7329(2007)05-0126-04

## The Research of Using Energy Metabolism Equation to Calculate the Sludge Retained Time

WANG Tao, QUAN Xiao-quan, LOU Shao-hua, YANG Bin, WANG Hai-tao

(College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045)

**Abstract:** Substantially, the process of biological treatment for wastewater is the process of bacterial energy metabolism. In this paper, from the viewpoint of energy and based on the conservation of mass and energy, an energy metabolism equation is constructed. Through the experimentation, the parameters in equation are measured. Through this equation the reason for SRT choice of activated sludge system is explained from the viewpoint of microcosmic. This equation is adaptable to optimizing the SRT of activated sludge system in the condition of low-organic load thereby to optimizing the energy distribution of activated sludge system for energy saving.

**Keywords:** activated sludge process, SRT, energy metabolism equation

泥龄是活性污泥工艺中重要的控制参数,在工艺设计中,常根据经验选取或用下式推算泥龄:

$$\frac{1}{\theta_c} = YN_s - K_d \quad (1)$$

式中  $\theta_c$ ——泥龄(d);  $Y$ ——产率系数(kgVSS/kg-BOD);  $N_s$ ——污泥负荷(kgBOD/kgMLVSS·d);  $K_d$ ——活性污泥自身氧化率(d<sup>-1</sup>)。

式中  $Y$  与  $K_d$  的值一般是根据试验结果来确定,对于生活污水, $Y$  的取值范围为 0.4~0.8 kgVSS/kg-BOD,典型值为 0.6 kgVSS/kgBOD, $K_d$  的取值范围为 0.06~0.15 d<sup>-1</sup>,典型值为 0.10 d<sup>-1</sup>。<sup>[1]</sup>

表面上看,对于某个确定的  $N_s$  值,我们都可以利用上式指导或校核与之相应的活性污泥系统  $\theta_c$  的选择。但是,在实际应用中我们发现,当系统负荷较低

时,在以上经验值的范围内, $\theta_c$  的计算值出现了负值,这与实际情况是完全不相符的。

污泥负荷源于有机物量( $F$ )与微生物量( $M$ )的比值  $\frac{F}{M}$ ,而  $\frac{F}{M}$  代表的是活性污泥的能含量。<sup>[2]</sup> 低负荷的状态即是能量受限的状态,而微生物的一切活动又都是由能量驱动的,我们可以从能量的角度对上述情况加以分析。格雷迪指出,基质降解时产生的微生物增长是能量守恒和能量利用相对效率的结果。能量产生率( $r_E$ )等于用于合成的能量利用率( $r_a$ )和用于维持的能量利用率( $r_b$ )之合。由于考虑内源代谢在哪些环境下能否继续进行在建立数学模型宏观能量平衡方面意义不大,故常假设内源代谢是时刻存在的,维持能的要求是恒定的,即  $r_b$  为常数。然而  $r_a$  与生长情况有关,当

\* 收稿日期:2007-04-10

基金项目:教育部博士基金资助(20020611025)

作者简介:王涛(1964-),男,河北沧县人,副教授,博士,主要从事水污染控制研究。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

细胞允许无约束地生长时,  $r_a$  可达到最大值, 此时  $r_b$  与之比较可以忽略不计, 生长量为最大值。如果能量供给受限, 生长率低到一定程度,  $r_E$  是很小的,  $r_b$  在其中的比重就十分显著, 从而减少了生长量。当  $r_b$  超过  $r_a$  时, 生长量就变成了负值<sup>[3]</sup>。正因为生长量受如此多变化因素的影响, 用它做为设计参数价值不大, 所以我们选择产率系数(Y)来表达基质消耗和生长量产生之间量的关系。Y 被定义为在没有用于维持的能量要求时利用单位基质所形成的细胞物质的量, 它通过观测生长量资料的归纳而得到, 只有在不受约束的快速生长期观测的生长量才接近于 Y。由此可见, 式(1)仅从质量的角度阐述泥龄与其它参数的关系, 当能量成为限制性因素时, 它的使用就存在一定的局限性, 而且, 仅从质量的角度无法对泥龄  $\theta_c$  的计算值与实际情况之间的矛盾情况作出合理的解释, 所以, 我们有必要从能量的角度考虑泥龄的选择。

## 1 能量代谢方程的建立

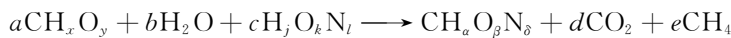
### 1.1 能量代谢概述

微生物能量的转变是通过生物化学反应来实现的, 既有放能反应也有吸能反应。有机物的分解过程, 总的来说是属于放能反应。有机物的合成过程则属于



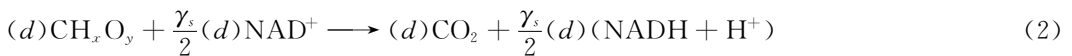
其中,  $\text{CH}_x\text{O}_y$  代表污染物的分子式,  $\text{H}_j\text{O}_k\text{N}_l$  代表氮源或者硝酸盐作为氮源,  $\text{CH}_\alpha\text{O}_\beta\text{N}_\delta$  代表污泥的平均成分。

#### (2) 有机物厌氧降解过程

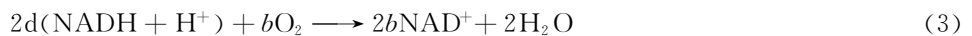


#### 2) 能量的产生

污染物在降解过程中直接释放能量, 称为基质磷酸化:



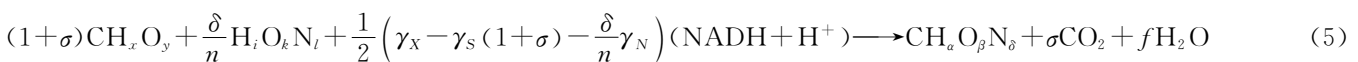
污染物降解过程的能量通过电子传递系统进入氧化磷酸化过程, 产生能量。



因此, 能量产生速率可以表示为:

$$\left(\frac{d\text{NADH}}{dt}\right)_{\text{产能}} = \left(-\frac{dS}{dt}\right)\frac{\gamma_s}{2}(d) \quad (4)$$

其中,  $\gamma_s$  是被降解污染物质的还原势。还原势代表一个分子氧化过程中理论上所能够释放的电子数。



因此, 细胞质合成所消耗能量的速率为:

$$\left(\frac{d\text{NADH}}{dt}\right)_{\text{生长}} = \left(\frac{dX}{dt}\right)\frac{1}{2}\left[\gamma_X - \gamma_s(1+\sigma) - \frac{\delta}{n}\gamma_N\right] \quad (6)$$

其中,  $\gamma_X$  和  $\gamma_N$  分别代表微生物和氮的还原势,  $\sigma$  是细胞合成中释放的  $\text{CO}_2$  摩尔数。

(2) 细胞功能维护 细胞功能维护, 亦即内源呼吸, 需要不断地消耗能量, 如下式所示:

吸能反应。然而, 放能反应释放出来的能量并不能直接用于吸能反应, 其中必须将能量转变成高能键化合物贮存起来。直接参与吸能反应的最主要的高能键化合物是三磷酸腺苷(ATP), ATP 数量决定分解单位基质所形成的细胞物质数量, 可以考虑用基质所产生单位 ATP 所形成的细胞质量来表示生长量。但是, 在好氧反应中, 生成 ATP 的磷酸化反应有两种: 基质水平磷酸化和电子传递磷酸化; 在基质水平磷酸化中, ATP 在分解代谢途径中直接通过耦合反应而生成。只有少量 ATP 是以这种方式产生的。大量 ATP 在电子传递磷酸化过程中产生。可见, 计算好氧情况下所形成的 ATP 的量是困难的, 以 ATP 产生为基础的生长量工程价值不大。由于 ATP 数量依赖于基质中有效电子数量, 而好氧反应中转移出的电子是由 NADH 携带通过电子传递链(或最终呼吸链)传递给最终电子受体, 所以系统的能量水平可以通过 NADH 的量体现, 因此, 可以考虑建立通过 NADH 的量体现微生物生长量的能量代谢方程。

### 1.2 能量代谢中的能量守恒

#### 1) 物料衡算

##### (1) 有机物好氧降解过程

#### 3) 能量的消耗

能量代谢产生的能量用于两个方面: 细胞合成和细胞功能维护。

##### (1) 细胞合成 新细胞质的合成方程式为:



##### 因此, 内源呼吸消耗能量的速率为:

$$\left(\frac{d\text{NADH}}{dt}\right)_{\text{维护}} = m_{\text{NADH}}X \quad (7)$$

其中,  $m_{\text{NADH}}$  代表基于 NADH 的维持系数。在污染物浓度比较低时, 与细胞生长速率是相对独立的; 在污染物浓度相对比较充足时, 受细胞生长速率影响比较显著。

#### 4) 能量守恒

设定细胞内部 NADH 处于稳态水平, 没有积累, 根据能量守恒原理, 则:

$$\left(\frac{d\text{NADH}}{dt}\right)_{\text{产能}} = \left(\frac{dE}{dt}\right) = r_E = \left(\frac{dX}{dt}\right) \frac{1}{2} \left[ \gamma_X - \gamma_S(1 + \sigma) - \frac{\delta}{n} \gamma_N \right] + m_{\text{NADH}} X \quad (9)$$

简化上式, 有:

$$r_E = \left(\frac{dX}{dt}\right) A + m_{\text{NADH}} X \quad (10)$$

$$\text{式中: } A = \frac{1}{2} \left[ \gamma_X - \gamma_S(1 + \sigma) - \frac{\delta}{n} \gamma_N \right]$$

A 值的意义在于 A 值是细胞和基质的还原势的综合体现, 对于不同的水质组成, 不同的微生物生长状态, A 可能不同。但是对于城市污水来讲, 其成分大都相似, 如果根据水质情况调整活性污泥在良好的状态, 那么, 就城市污水来讲, A 值应该处于一个相对固定的范围。

对上式变形, 两边同除以 X, 有:

$$\frac{r_E}{X} = \frac{\left[\frac{dX}{dt}\right]}{X} A + m_{\text{NADH}} \quad (11)$$

根据污泥龄的定义, 有:

$$\theta_c = \frac{VX}{\Delta X} = \frac{X}{\left[\frac{dX}{dt}\right]} \quad (12)$$

将上式变形后带入式(10)有:

$$q_E = \frac{1}{\theta_c} \times A + m_{\text{NADH}} \quad (13)$$

$q_E$  为比能量利用速率。

## 2 能量代谢方程参数的求解

### 2.1 能量代谢方程中参数的测定方法

$$\left(\frac{d\text{NADH}}{dt}\right)_{\text{产能}} = \left(\frac{d\text{NADH}}{dt}\right)_{\text{生长}} + \left(\frac{d\text{NADH}}{dt}\right)_{\text{维护}} \quad (8)$$

### 1.3 能量代谢方程

在稳定状态下, 微生物产能将全部用于合成细胞和维持细胞生命活动, 定义  $r_E$  为能量利用速率, 将式(5)、(6)、(7)代入式(8)可得:

根据式(13), 测定不同泥龄下的对应的  $q_E$  值, 然后对  $q_E \sim \theta_c$  作图即可得到 A、 $m_{\text{NADH}}$  值。对于  $q_E$  的值, 在确定了去除 COD 的量后, 根据麦金尼提出的活性污泥系统中, 可降解有机物的 1/3 为微生物氧化分解释放出能量, 可得到用于产能部分的 COD 的量, 根据 COD 与电子之间的关系求得电子消耗速率(当 1 mol 碳源完全氧化时, 所需要氧的摩尔数的 4 倍称为该基质的有效电子数。照此计算,  $-8 \text{ gCOD} = 8 \text{ gO}_2$ ,  $8/32 = 0.25 \text{ molO}_2$ ,  $0.25 \times 4 = 1$  个有效电子, 或 1 个电子当量。即是说 1 个电子当量 = 8 gCOD。), 再根据每个 NADH 携带 2 个电子, 可以转换为 NADH 消耗速率, 即  $q_E$ 。

### 2.2 试验安排及结果

试验安排在 5 套相同的模型上进行, 污泥取自某厂氧化沟好氧段, 试验条件控制在连续流稳态下, 通过控制排泥量得到 5 个不同的泥龄。取每个泥龄下数据统计平均值。分析项目有 COD、MLVSS、电子当量  $e$ 、NADH 消耗速率  $q_E$ 。表中  $\Delta S$  为降解的 COD 中用于产能的量;  $\Delta E_0$  为根据  $\Delta S$  而得到的当量电子摩尔浓度变化,  $\Delta E_0 = \Delta S/8000$ ;  $\Delta E_1$  为根据  $\Delta E_0$  而得到的当量 NADH 摩尔浓度变化,  $\Delta E_1 = \Delta E_0/2$ ;  $q_E$  为基于 NADH 的比能量利用速率,  $q_E = \Delta E_1/(X_V \times t)$ ; 具体情况及试验结果见表 1。

表 1 能量代谢方程参数测定试验结果

$\Delta S/$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	MLVSS/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	HRT/ h	$\theta_c/$ h	$\Delta E_0/$ $\text{mol}(e \cdot \text{L})^{-1}$	$\Delta E_1/$ $\text{mol}(\text{NADH} \cdot \text{L})^{-1}$	$1/\theta_c/$ $(\text{h}^{-1})$	$q_E/$ $\text{molNADH} \cdot (\text{kgVSS} \cdot \text{h})^{-1}$
57.40	1 030	6.48	810.6	0.007 2	0.003 6	0.001 233	0.538
53.40	1 230	5.54	930.2	0.006 7	0.003 3	0.001 075	0.490
55.11	1 680	6.42	1 344.3	0.006 9	0.003 4	0.000 744	0.319
58.12	2 000	6.21	2 359.7	0.007 3	0.003 6	0.000 424	0.293
60.08	2 807	6.93	1 005.2	0.007 5	0.003 8	0.000 246	0.193

得到能量代谢方程:

$$q_E = 335.71 \times \frac{1}{\theta_c} + 0.116 7 \quad (14)$$

由上表和式(13),对  $q_E \sim 1/\theta_c$  作图(见图 1)并进行回归分析可得,  $A = 335.71 \text{ h}^{-1}$ ,  $m_{\text{NADH}} = 0.1167$  ( $\text{molNADH}/\text{kgVSS} \cdot \text{h}$ )。

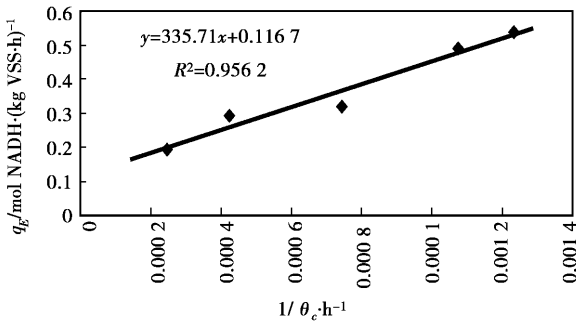


图 1 能量参数  $A$ 、 $m_{\text{NADH}}$  的求解

### 3 能量代谢方程的意义和讨论

在活性污泥系统中,污泥的增长是微生物生命活动的宏观表现,一切生命活动离不开能量的驱动,而现有的理论与能量之间缺乏有机的联系,就必然出现理论与实际情况矛盾的情况。在实际的污水处理实践中,当系统负荷较低时,能量成为微生物生长的限制性因素,微生物增殖缓慢,为了保证系统稳定的生物量,必须延长系统的泥龄,必要的时候,采取不排泥的方式来保证其生物量的稳定。从能量代谢方程所反应的能量比利用速率与控制参数泥龄  $\theta_c$  的关系来看,泥龄越长,能量的比利用速率越小,反之越大。在极限的情况下,当所有的能量都用于满足维持的需要时,泥龄趋于无穷大。这就从理论上解释了泥龄选择的理由,对现有理论与实际情况的矛盾之处做出一定的解释;同时,能量代谢方程式将活性污泥系统的微观反应本质溶入宏观表现中,更有助于我们深入理解现有理论。式中  $A$  值的提出表明了降解基质所产生的能量大小与基质所具有的还原势密切相关,即针对不同水质条件,活性污泥系统处理效果是不同的,这也是传统的方程不能

表达的。在实际应用上,可以利用能量代谢方程,根据进水水质对系统泥龄的选取进行指导和优化,从而优化处理过程。 $q_{E,\text{NADH}}$  与电子当量有关,这就与做为电子受体的  $\text{O}_2$  联系起来,关系到系统的供氧量,从而可以利用能量代谢方程优化系统的能量配置,降低处理成本。由此可见,无论在理论上还是在实践上,能量代谢方程都有重要的意义。

活性污泥处理系统的能量分析是多门学科的综合与交叉,本文只是对现有理论与能量之间的关系进行了初步的研究和探索,仅从有机物的代谢方面阐述了泥龄选择的依据,同时,受测试条件的限制,NADH 的量不是实测值,而是由一系列的转化计算所得,有可能造成参数  $A$ 、 $m_{\text{NADH}}$  值误差较大。总之,在污水处理的能量领域,从能量处理微观本质到对系统能量水平的测试手段等多方面的研究还需要不断的完善。

### 参考文献:

- [1] Metcalf & Eddy Inc, 等. 废水工程(第四版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 张自杰, 等. 排水工程下册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [3] C. P. Leslie Grady, 等. 废水生物处理理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [4] 罗志腾等. 水污染控制工程微生物学[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1988.
- [5] 贾士儒. 生物反应工程原理(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] 张显龙, 等. 活性污泥法处理污水两个重要参数的理论探讨[J]. 辽宁化工, 2004, 33(8): 464-466.
- [7] 王志盈, 等. 活性污泥动力学公式中几个参数含义的探讨与分析[J]. 中国给水排水, 1990, 6(4): 35-39.
- [8] 彭永臻. 对活性污泥法动力学公式及几个参数的探讨[J]. 中国给水排水, 1992, 8(4): 24-26.

(编辑 胡 玲)

(上接第 122 页)

### 参考文献:

- [1] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 陈衡治, 谢旭. 预应力混凝土箱梁桥的温度场和应力场[J]. 浙江大学学报, 2005, 39(12): 1 885-1 890.
- [3] 张元海, 李乔. 桥梁结构日照温差二次力及温度应力计算方法研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 49-52.
- [4] 贾素红. 预应力混凝土箱形梁的温度变形分析[J]. 工程结构, 2003, 23(6): 61-63.

- [5] 张元海, 李乔. 预应力混凝土连续箱梁桥的温度应力分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 98-102.
- [6] 郝超. 大跨度钢斜拉桥施工阶段非线性温度影响研究[J]. 公路交通科技, 2003, 20(2): 63-66.
- [7] JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [8] JTG D60-2004, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [9] BS 5400 Part2. Specification for loads[M]. British Standard Institute 1978.

(编辑 陈 蓉)