

# 小城镇污水处理技术研究——利用沟渠处理污水

高光智, 陈辅利

(大连水产学院环境与生物工程研究所, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 通过室内试验和实际模型试验, 对利用沟渠处理污水的工艺、效率、抗冲刷能力等进行了试验和理论研究, 建立了 COD 和溶解氧变化过程数学模式。

**关键词:** 小城镇; 污水; 沟渠; 模式

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0267(2001)02-0104-04

## Studies on Treatment Technology of Town Sewage

GAO Guang-zhi, CHEN Fu-li

(Environment and Biology Engineering Institute of Dalian Fisheries College, Dalian 116023 China)

**Abstract:** Towns and villages are characterized by fast development, small scale, and low capacity of investment, low displacement and shortage of qualified personnel. Innovation of developing new technology for sewage treatment to suit these characteristics of towns would be vary important and of realistically significance. With laboratory tests and practical model tests, the technology, efficiency, scouring resistance of using canal to treat sewage were theoretically discussed and a mathematical pattern of the changing process of COD and DO was set up in this paper.

**Keywords:** town; sewage; canals; pattern

小城镇具有发展快、规模小、投资能力低、水量少、专业人才缺乏等特点, 开发适合小城镇特点的污水处理技术具有非常重大的现实意义。利用排水沟渠处理污水技术是在排水干沟渠顺流方向设置固定微生物载体, 载体上形成生物膜, 污水在微生物载体间流动过程中得到净化。据美国国家环保局的报告, 利用下水道处理污水是可能的, 提高其效率的主要因素是足够的生物量、充足的溶解氧和充分的时间<sup>[1]</sup>。国内外也有利用排水渠道和沟渠处理污水的成功实例<sup>[2,3]</sup>。我国小城镇排水体制一般均以合流制为主, 利用天然沟渠排水较为普遍。利用现有的排水设施和天然排水沟渠处理污水, 可以降低基建投资和降低运行成本 2/3, 大大减少管理人员。资金是改善环境的重要限制因素, 利用排水沟渠处理污水, 对改善小城镇环境具有非常重大的意义。

## 1 试验装置

试验包括室内试验、干渠实际模型试验和干渠实测。室内试验装置包括沟渠模拟槽、高位水箱、低

位水箱、水泵、空气系统、计量仪表。沟渠模拟槽长 3.6 m, 宽 30 cm, 放置特制载体两条, 水深 8 cm, 设 9 个取样口。干渠实际模型设在大连市黑石礁干渠。黑石礁干渠宽 8 m, 水深 6—10 cm, 流量  $16\ 800\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。模型安装在干渠中心, 长 36 m, 宽 25 cm, 放置特制载体两条, 模型内水深 8 cm, 模型前设跌水坝, 跌水高度 6 cm。实测干渠为大连市尖山街干渠, 为钢混矩形明渠, 监测段长 76 m, 宽 5 m, 水深 6 cm, 流量  $6\ 900\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , 直线, 无排放口, 底板生物膜厚 0.5—1 mm。

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 处理效果

室内试验菌种源取自于大连开发区净水厂, 原水取自黑石礁干渠。试验分 5 组进行, 停留时间 120—35 min。每组稳定后测定 9 个点的 COD 和浊度。试验结果见表 1。试验随时进行生物相镜检, 各组生物相基本相似, 主要有线虫、轮虫、节足动物、豆形虫, 未发现有两柄虫。

当停留时间  $> 35\ \text{min}$ , 出水  $< 40\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 最低达到  $20\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下; COD 去除率  $> 80\%$ , 最高达到 90% 以上; 负荷率  $> 3\ 072\ \text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , 最高达到  $3\ 552\ \text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$  以上, 各项指标均达到一般生物接

收稿日期: 2000-05-22

作者简介: 高光智(1956—), 女, 黑龙江富锦人, 硕士, 大连水产学院副教授。

触氧化法的效果。80—90 min 时出现最小值, 最小值之后, 水中 COD 有所回升, 其原因后面详细探讨。

表 1 室内试验结果(平均)

Table 1 Results obtained in laboratory tests (mean values)

时间 /min	COD /mg · L <sup>-1</sup>	去除率 /%	时间 /min	COD /mg · L <sup>-1</sup>	去除率 /%
0	168.21		35	38.86	76.9
5	116.40	36.7	40	33.72	80.0
7	93.39	44.5	45	32.46	80.7
9	85.94	48.9	49	29.21	82.6
12	76.62	54.4	60	25.87	84.6
15	68.72	59.1	70	24.90	85.2
18	62.04	63.1	74	24.47	85.5
20	57.70	65.7	80	21.36	87.3
22	55.15	67.2	90	21.79	87.0
24	54.06	67.9	105	24.08	85.7
26	48.98	70.9	120	34.73	79.4
30	42.87	74.5			

实际模型试验完全按实际情况进行。平均进水 COD 浓度 204.89 mg · L<sup>-1</sup>, 平均出水 COD 浓度 154.25 mg · L<sup>-1</sup>, 平均负荷率 16 204 g · m<sup>-3</sup> · d<sup>-1</sup>, COD 平均去除速度 1.41 mg · L<sup>-1</sup> · m<sup>-1</sup>。实际模型的负荷率比室内试验高, 这是因为实际模型停留时间较短, 微生物处于对数增长期, 降解速度较快。为了具有可比性, 可以只比较增长期。室内模型前 9 min COD 时间平均去除速度 9.14 mg · L<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>, 实际模型 COD 时间平均去除速度 11.25 mg · L<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>, 两者比较接近, 说明室内模拟试验可以代表实际模型的基本规律。

## 2.2 雨流冲刷

雨流时保持生物量是利用沟渠处理污水的重要因素。室内冲刷试验结果示于图 1。停止冲刷之后的

图 1 室内冲刷试验过程曲线

Figure 1 Curve of eroding process in laboratory test

初始阶段, 出水浓度直线上升, 这是由于系统中自来水逐渐减少所致。停止冲刷 3 h 出水浓度达到最大, 此时自来水已经完全排出系统。此后, 出水浓度逐渐降低, 到 7 h 后出水恢复正常, 时间间隔 4 h。可以认为冲刷停止后 4—6 h 系统恢复正常功能。1999 年 10 月 1 日上午大连市下了一场大雨, 有关监测结果示于表

2。雨流时有机物浓度比平时高, 可能是冲刷地面污物所致, 随着降雨历时的增加会降低。开始时处理能力提高, 有机物降低速度大大高于旱流, 其原因可能由于冲刷导致生物膜活性增加所致, 随着时间的推移, 可能逐渐降低。雨流时溶解氧复氧能力增加, 主要是流速增加所致。雨后 4 h 基本恢复正常功能, 与室内试验结果一致。

表 2 实际模型雨流现象

Table 2 Practical model with rain - flow phenomenon

项目	进口	出口	降低速度	降低率	
	/mg · L <sup>-1</sup>	/mg · L <sup>-1</sup>	/mg · L <sup>-1</sup> · 10 m <sup>-1</sup>	/%	
大雨刚停	COD	277.11	218.01	16.42	21.3
	DO	1.889	1.217	0.187	35.6
雨停 4 h	COD	180.44	167.13	3.70	7.4
	DO	1.679	1.070	0.169	36.3
晴天平均	COD	185.52	165.41	5.59	10.8
	DO	1.261	0.798	0.129	36.7

## 2.3 降解过程理论分析及其数学模拟

从试验结果可以看出, 停留时间 80—90 min 时 COD 存在最小值, 最小值之后, COD 有所上升。停留时间 ≥ 60 min 的 3 组试验均存在这种现象。在第一组(停留时间 120 min) 试验中, 还可以看到最小值之后, 浊度先上升然后又重新下降。这些现象与一般的生物接触氧化法 COD 降解过程存在着很大的差别。

利用沟渠处理污水过程是完全推流式。在前部, 微生物处在增长期, 主要是利用水中溶解态和部分胶体态基质。在后部, 微生物处在内源呼吸期, 水中的溶解态基质不足以供微生物生长之用, 生物膜上菌胶团的糖膜被水解, 变成溶解态; 生物膜上的菌胶团逐渐变成游离菌, 游离菌部分被溶解, 一部分变成溶解态溶解于水中, 溶解态有机物进一步被微生物呼吸降解。水中有机物的变化可以认为是由这两方面作用引起的: 一方面作用是输入系统的有机物被生物体吸附、降解; 另一方面作用是被生物体吸附的有机物水解、生物体部分溶解, 可称为水解溶解过程。水中有机

图 2 溪流式接触氧化法有机物变化过程曲线

Figure 2 Curve of change for organic matters using rivulet - tangent oxidizing method

物变化过程如图2所示。

为了构筑简单的有机物变化过程模式,用McKinney模式<sup>[4]</sup>描述有机物降解过程。水解溶解过程由于其作用机理复杂,采用黑箱方法描述。有机物变化过程为两者之和,称之为有机物变化过程灰箱复合模式,其表达式为:

$$S = S_0 \exp(-Kmt) + F(t)$$

其中 $F(t)$ 是表示水解溶解过程的黑箱数学表达式,应具有如下特征: $F(0) = 0$ ;  $F(tq)$ 最大;  $t < tq$ 时,  $F(t)$ 为增函数;  $t > tq$ 时,  $F(t)$ 为减函数;  $t$ 足够大时,  $F(t) \rightarrow 0$ 。根据以上要求,我们提出: $F(t) = bt - at^c$ 。有机物变化过程灰箱复合模式可以表示为:

$$S = f(t) + F(t) = S_0 \exp(-Kmt) + bt - at^c$$

式中: $Km$ ——耗氧系数,  $1/d$ 或 $1/h$ ;  $abc$ ——水解溶解特征系数。 $f(t) = S_0 \exp(-Kmt)$ 叫做降解方程,  $F(t) = bt - at^c$ 叫做水解溶解方程。

用最速下降法求各项系数。令: $f(Km, a, b, c) = \sum(Li - Si)^2 \rightarrow \min$

把试验数据代入,经计算机计算结果为: $Km = 3.25/h$ ,  $b = 433/h$ ,  $a = 415/h$ ,  $c = 1.02$ 。统计学参数:样本空间111,均方差19.76,相关系数0.76。 $F(t)$ 的特征参数为:水解溶解最大值出现的时间 $tq = 3.1h$ ,水解溶解最大值 $F(tq) = 26.36 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

针对本试验COD变化过程的灰箱复合模式可以表述为:

$$S = S_0 \exp(-3.25t) + 433t - 415t^{1.02}$$

McKinney模式模拟试验过程的均方差为24.54, Monod模式模拟试验过程的均方差为22.54。灰箱复合模式分别比McKinney和Monod模式提高精度24.2%和14.1%。

## 2.4 复氧与溶解氧变化过程数学模拟

实际模型试验结果示于表2。从试验结果可以看出利用沟渠处理污水时的天然复氧能力很强,不需要

曝气复氧,其原因在于水深很浅,流速较大。

为了描述溶解氧的变化规律,我们将其分为前期和中后期两个阶段。在前期,有机物耗氧规律可以用McKinney模式表示<sup>[4]</sup>:

$$dS/dt = -KmS$$

溶解氧的变化过程可用复氧和耗氧之和表示:

$$-dD/dt = -K_1S + K_{La}D$$

$$D = D_0 \exp(-K_{La}t) + KmS_0 [\exp(-Kmt) - \exp(-K_{La}t)] / (K_{La} - Km)$$

我们把上述模式叫做增长期溶解氧模式。该模式与河流溶解氧模式(S-P模式)相比,结构上是一样的。其主要区别在于该模式只适用于前期情况,一般不出现溶解氧上升段。

在中后期,被吸附有机物水解和细胞溶解导致水中有机物增加,这部分有机物降解耗氧必须考虑。为更好地反映溶解氧变化过程,取该过程的某微小时段 $\delta t$ ,并假设:

1) 在 $\delta t$ 内,水解和溶解在 $t_{n-1}$ 时刻一次完成,其总量为 $S_i$ ;

2)  $t_{n-1}$ 时刻有机物为残留有机物与水解溶解有机物之和: $S_{n-1} = S_d + S_i$

3) 在 $\delta t$ 内,有机物降解仍符合McKinney模式: $S_n = S_{n-1} \exp(-Km\delta t)$ ,或 $S_{n-1} = S_n \exp(Km\delta t)$ 。

$\delta t$ 内耗氧过程如图3所示。 $\delta t$ 内溶解氧变化过程为:

$$-dD/dt = -KmS + K_{La}D$$

在 $t_{n-1} - t_n$ 区间积分:

$$D_n = D_{n-1} \exp(-K_{La}\delta t) + KmS_{n-1} [\exp(-Km\delta t) - \exp(-K_{La}\delta t)] / (K_{La} - Km)$$

其中: $S_{n-1} = S_n \exp(Km\delta t)$

$$S_n = S_0 \exp(Kmt_n) + bt_n - at_n^c$$

式中: $\delta t$ ——微小时段,  $\delta t = t_n - t_{n-1}$ ,  $h$ ;  $t_{n-1}t_n$ ——第 $n$ 时段起止时间,  $h$ ;  $S_{n-1}$ ——第 $n$ 时段虚拟有机物

图3  $\delta t$ 时段耗氧过程分解图

Figure 3 Decomposition of consumption of

oxygen at  $\delta t$  period

图4 干渠模拟比较

Figure 4 Comparison of drying canal modeling

浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  $S_n$ ——实际有机物浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;  
 $D_{n-1} - D_n$ —— $t_{n-1} - t_n$  时刻亏氧量,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

我们把上述模式叫做溶解氧递推模式。实际上, 该模式也适用于前期, 溶解氧全过程变化都可以应用该模式。计算时, 令  $n = 1, 2, 3, \dots$ , 递推计算出各时刻的溶解氧浓度。

尖山街排水干渠底板长有 0.5—1 mm 的微生物膜, 生物量虽然达不到反应器的要求, 但其规律与之类似。我们选择了黑石礁干渠中一段 76 m 长的无新源排放、无障碍的直线渠段, 设 3 个断面, 取断面混合样测定 COD 和 DO。根据实测数据通过最速下降法分别计算出 S-P 模式和溶解氧递推模式的参数。根据模式计算值描绘的曲线和监测结果示于图 4。S-P 模式计算值与实测值的均方差为  $0.148 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 溶解氧递推模式计算值与实测值的均方差为  $0.096 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 比 S-P 模式提高精度 35%。从曲线形状看 S-P 模式曲线明显回升, 与实际情况不符。

### 3 工艺与经济分析

利用沟渠处理污水的工艺流程为:

污水 → 分流沉沙池 → 沟渠接触氧化段 → 沉淀段 → 排放

沟渠接触氧化段顺流加设特制生物载体, 是主体设施。利用沟渠处理污水停留时间长, 产泥量很少, 可以利用沟渠经整修后作为沉淀段, 要求低时也可以不设沉淀段。

分流沉沙池的作用主要是沉沙, 以保证沟渠接触氧化段功能的正常发挥。洪水携带有大块沙砾甚至石块, 造成排泥排渣困难。对此, 我们专门设计了具有水力分选结构的分流沉沙池, 其形式如图 5 所示。旱流时, 污水经过沉淀池格栅进入沉淀池, 沉淀池工作, 沉沙池不工作。洪水时, 洪水越过旱流堰进入沉沙池, 这时沉淀池和沉沙池同时工作。沙砾和石块由于比重大, 惯性也大, 直接冲入沉沙池, 在沉沙池中被分离; 进入沉淀池的污水经过一段转折倒流与格栅, 只能携带较小颗粒的泥沙, 从而保证了沉淀池的正常排泥。

利用沟渠处理污水工艺非常简单。分流沉沙池主

图 5 分流沉沙池示意图

Figure 5 Diagram of diffluent settlement pond

要作用是沉沙, 其结构比一般沉沙池复杂, 停留时间也较长, 按  $1\,000 - 10\,000 \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  计算, 综合造价  $110 \text{元} \cdot \text{m}^{-3}$ 。沟渠接触氧化段的费用主要是沟渠整修和载体及其安装, 综合造价  $280 \text{元} \cdot \text{m}^{-3}$ 。沉淀池利用沟渠修整进行, 综合造价  $80 \text{元} \cdot \text{m}^{-3}$  左右。利用沟渠处理污水综合总造价  $470 \text{元} \cdot \text{m}^{-3}$ 。与一般污水厂综合造价  $1\,300 \text{元} \cdot \text{m}^{-3}$  相比, 可节约投资 64%。

运行费用主要是清运污泥沉沙和维修, 费用很低, 低于  $0.15 \text{元} \cdot \text{m}^{-3}$ , 与一般污水厂  $0.6 \text{元} \cdot \text{m}^{-3}$  相比, 可节约运行费用 75% 以上。

### 4 结论

- 4.1 利用沟渠处理污水效率高、占地少、工艺简单、管理方便、投资省、运行费用低, 非常适于小城镇污水处理。
- 4.2 利用沟渠处理污水, COD 去除效率可以达到 80% 以上, 相当于一般二级处理。
- 4.3 利用沟渠处理污水, COD 变化过程可以用灰箱复合模式描述。
- 4.4 利用沟渠处理污水, 溶解氧变化过程可以用溶解氧递推模式描述。

#### 参考文献:

- [1] Pomeroy R D, Lofy R J, Feasibility study on in-sewer treatment methods, Repot No.: EPA/600/2-77/192(U.S.A).
- [2] 卞 涛. 一种高浓度有机污水处理新方法[P]. 专利号 96103295.2.
- [3] Anon. Modified Ditch Produces under Spec Effluents with Ease [J]. *Water/Engineering and Management*, 1986, 9(133): 26-28.
- [4] 顾夏声. 废水生物处理数学模式[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.