

倒置 AAO 工艺中物料及能量流向的研究

朱五星 汪诚文 施汉昌

(清华大学环境科学与工程系,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084)

摘 要 通过对北京某城市污水厂的曝气池各单元及二沉池营养物质变化进行跟踪试验,分析该污水厂的活性污泥单元倒置 AAO 工艺部分碳、氮、磷的物料流向,并且基于物料平衡分析了工艺中的能量流向。

关键词 倒置 AAO 工艺 物料流向 能量流向

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2007)03-0050-05

Material and energy flow of activated sludge in anoxic-anaerobic-aerobic system

Zhu Wuxing Wang Chengwen Shi Hanchang

(State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Department of
Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In this study the material flow of carbon, nitrogen and phosphorus in the activated sludge system of anoxic-anaerobic-aerobic was analyzed in a full-scale wastewater treatment plant, and the result shows low COD balance (75.8%), high P and N balance. Moreover the energy flow based on material balance was analyzed in this system

Key words anoxic-anaerobic-aerobic system; material flow; energy flow

对碳(COD)、氮、磷进行物料平衡分析是评价城市污水处理厂运行状况的有效方法^[1],物料流反应了整个污水处理厂的运行效率,处理效率,基于物料流对该工艺二级生物处理进行能量平衡分析,从而得出输入能量在经过倒置 AAO 工艺后的能量流向,能量流向反应了污水处理过程的能量利用率,为在污水达标排放的前提下节能降耗的有效途径提供思路。

本研究对北京某城市污水处理厂的生物处理各反应段及二沉池单元出水的一个序列 COD、N-NH₄、N-NO_x、TP、P-PO₄、SS、碱度、TN 和 DO 等指标进行跟踪监测试验,在试验时间内污水厂基本处于稳态运行,基于试验结果和简化假设,通过物料衡算对物料流向及能量流向进行分析。

1 材料与方法

1.1 倒置 AAO 工艺

该污水厂采用缺氧 厌氧 好氧工艺,日处理量 20 万 t,污水用配水器通过钢管分配进入曝气池^[1],曝气池分为 4 个系列,每系列由 3 个长 156 m 的廊道组成,其中缺氧区位于第 1 廊道,长 51 m,紧接着

是厌氧区,长 85.9 m,然后是好氧区,长 331.1 m,每系列日处理流量 5 万 t/d,平均停留时间 13.5 h,二沉池为平流式,停留时间 5.5 h。该厂在实际运行过程中没有内回流,为非典型的倒置 AAO 工艺,二沉池回流污泥回流至缺氧段。

1.2 分析方法

在本研究中采样点设在曝气沉砂池出水即倒置 AAO 工艺进水,缺氧区、厌氧区 and 好氧区末端以及二沉池出水处,除 N-NO₃ 用离子色谱测定外其他各种物质含量的测定均采用标准方法。

2 结果与讨论

2.1 污水处理单元物流平衡分析的方法

碳的平衡一般用 COD 的平衡来描述,对碳平衡的准确掌握有助于掌握污泥负荷、所需供氧量等重要工艺控制参数,COD 的平衡可用图 1 表示。

在活性污泥系统中,降解碳物质不仅发生在有氧条件下,有时硝酸盐也会作为电子受体,硝酸盐呼

收稿日期:2004-04-13; 修订日期:2005-05-24

作者简介:朱五星(1978~),男,硕士研究生,主要从事水处理技术研究工作。E-mail: zhu_wx_g4@smedi.com

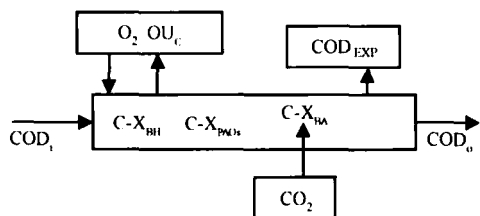


图 1 活性污泥处理单元 COD 平衡示意图

Fig 1 COD balance in activated sludge unit

OU_C 表示有机底物转化为 CO_2 的 COD; COD_o 表示出水 COD;

COD_i 表示进水 COD; COD_{EXP} 表示剩余污泥 COD

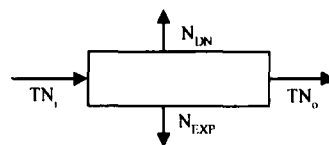


图 2 活性污泥处理单元 N 平衡示意图

Fig 2 Nitrogen balance in activated sludge unit

N_{DN} 表示被反硝化的氮; TN_o 表示出水总氮;

TN_i 表示进水总氮; N_{EXP} 表示剩余污泥中的氮

吸可以通过反硝化的量计算出来。所以:

$$OU_C = OU_{C,O_2} + OU_{C,ND} \quad (1)$$

$$OU_{C,ND} = 2.86 M_{dent,T} \quad (2)$$

$$OU_{C,O_2} = O_{OU} \times Vaer \times 24 - 4.57 \times O_{NO_3} \quad (3)$$

式中:

OU_C , $OU_{C,ND}$, OU_{C,O_2} , 分别为有机底物转化为 CO_2 的 COD、电子受体为硝酸盐时有机底物转化为 CO_2 的 COD 和以氧为电子受体时有机底物转化为 CO_2 的 COD (kg COD/d);

$M_{dent,T}$ 为反硝化的氮总量 (kg N/d);

O_{OU} , $Vaer$, O_{NO_3} 分别为好氧池内耗氧速率 (O_2 mg/L · h)、好氧池体积 (m^3) 和氨氮被硝化的量 (kg N/d), 所以在稳态条件下 COD 的平衡式为 (COD_{in} 、 COD_{out} 分别为进入、离开系统的 COD 量):

$$COD_{out} = COD_o + COD_{XEP} + OU_C \quad (kg/d) \quad (4)$$

$$COD_o = Q_o \times S_{COD_i} \quad (kg/d) \quad (5)$$

式中: $COD_{XEP} = q \times X_V \times f_{CV}$

f_{CV} 为活性污泥中含 COD 的化学计量系数;

q , X_V 分别为剩余污泥体积 (m^3), 剩余污泥 VSS (g/m^3);

Q_o , S_{COD_i} 分别为单元出流流量 (m^3), 出流 COD 浓度 (g/m^3);

$$COD_{in} = COD_i + COD_{BA} \quad (kg/d) \quad (6)$$

式中: COD_i 表示进水中的 COD (kg/d); COD_{EXP} 表示剩余污泥排放的 COD (kg/d); COD_{BA} 表示自养硝化菌在污水处理单元中的生长量 (kg/d)。

在活性污泥单元中 N 的平衡可以用图 2 表示。

反硝化计算: 在存在缺氧与厌氧的单元中, 为了进行 COD、N 的平衡必须通过硝酸盐的平衡来确定在这些单元中被反硝化的量

$$M_{dent,T} = M_{dent,anox} + M_{dent,anaer} \quad (kg/d) \quad (7)$$

式 (4) 中 $M_{dent,anox}$ 表示缺氧池反硝化的量 (kg/d), $M_{dent,anaer}$ 表示厌氧池反硝化的量 (kg/d) 所以 N 的平衡式为 (N_{in} 、 N_{out} 分别为进入、离开系统的 N 的量):

$$N_{in} = S_{in,TN} \times Q_{in} \quad (kg/d) \quad (8)$$

$$N_{out} = M_{N,TN} + M_{N,EXP} + M_{dent,T} \quad (kg/d) \quad (9)$$

$$M_{N,EXP} = q \times X_V \times f_{NV} \quad (kg/d) \quad (10)$$

式中: f_{NV} 表示活性污泥中含 N 的化学计量系数 (kg N/kg VSS); $M_{N,TN}$ 表示出水中总氮的量 (kg/d); $M_{N,EXP}$ 表示剩余污泥中排出氮的量 (kg/d)。

不同于 C 与 N, 在污水处理系统中 P 不存在气态化合物或单质, 因而在开放系统中, 磷只能从剩余污泥中排除。这样, 在活性污泥系统中, 进入系统的磷的量应该等于出水中的磷以及剩余污泥中的磷之和, P 的平衡方程可用图 3 表示。

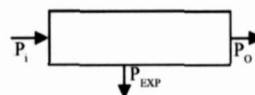


图 3 活性污泥处理单元 P 平衡示意图

Fig 3 Phosphorus balance in activated sludge unit

P_o 表示出水含磷; P_i 表示进水含磷;

P_{EXP} 表示剩余污泥含磷

P 的平衡式为:

$$M_{in,TP} = S_{P_i} \times Q_{in} \quad (kg/d) \quad (11)$$

$$M_{out,TP} = S_{P_o} \times Q_o + P_{EXP} \quad (kg/d) \quad (12)$$

式中:

$M_{in,TP}$, Q_{in} , S_{P_o} 分别为进入单元 P 的量 (kg/d); 单元入流流量 (m^3/d); 入流 P 浓度 (g/d)。

$M_{out,TP}$, Q_o , S_{P_o} 分别为排出单元 P 的量 (kg/d); 单元出流流量 (m^3/d); 出流 P 浓度 (g/m^3)。

2 2 有机物、N、P的物料平衡及物流图

所需运行数据及工艺条件如表 1所示。

对该倒置 AAO 工艺进行 N、COD、P物料平衡

表 1 活性污泥系统运行试验数据

Table 1 Operational and experimental data of activated sludge system

(数据为曝气池 4组平行系列之中一组 2003年 11月份的平均值)

(Average value in Nov. 2003 of one of the four parallel activated sludge serials)

缺氧池 V_1 (m^3)	3060	进水流量 Q ($1000 m^3$)	50
厌氧池 V_2 (m^3)	5034	回流比 r	0.57
好氧池 V_3 (m^3)	19 866	排泥量 q ($1000m^3$)	2.45
回流污泥浓度 (mg/L)	4111.3	停留时间 t (h)	13
好氧池 OU ($O_2mg/L \cdot h$)	28.3	水平流速 (m/s)	0.06

各项参数	进水	缺氧末端	厌氧末端	好氧末端	二沉池出水
COD (mg/L)	406 (滤前)	69.1	57.5	42.96	40.4
$N-NH_4^+$ (mg/L)	42.7	32.38	30.11	1.72	4.03
$N-NO_3$ (mg/L)	1.476	2.01	1.33	23.7	25.2
TP (mg/L)	6.5	13.61	13.67	14.63	0.43
PO_4 (mg/L)	3.45	9.198	10.20	0.19	0.36
SS (mg/L)	268.8	1820.4	1878	2155	31.8

2 2 1 关于 COD平衡的计算

每天排除的剩余污泥中含有大量的 COD,在污泥龄和污水特性一定的范围内挥发性悬浮固体与 COD 的化学计量系数 $f_{cv} = 1.48 \text{ mg COD/mg VSS}^{[2]}$,通过试验结果可知,本工艺挥发性悬浮固体与悬浮性固体的比值 $f = VSS \text{ mg/SS mg} = 0.68$,则每天剩余污泥排出 COD 的量为:

$$COD_{EXP} = f \times q \times X_V \times f_{cv} = 0.68 \times 2450 \times 4111 \times 1.48 = 1\,0136.4 \text{ kg COD/d}$$

(13)

二沉池出水中 COD 的量为:

$$COD_o = (Q - q) \times S_{Te} = (50\,000 - 2450) \times 40.4 = 1921.01 \text{ kg COD/d}$$

(14)

根据式 (1)有机底物转化为 CO_2 的 COD:

$$OU_C = OU_{C,O_2} + OU_{C,ND} = 5469.8 \text{ kg COD/d}$$

根据式 (4)从系统中排出的 COD 为:

$$COD_{out} = COD_o + COD_{EXP} + OU_C = 15\,608 \text{ kg COD/d}$$

(15)

根据式 (3)进入系统的 COD 为:

$$COD_{in} = COD_i + COD_{BA} = 20\,349 + 245.8 = 20\,594.8 \text{ kg COD/d}$$

(16)

其中 COD_{BA} 可由可以通过 NO_3-N 变化的量计算自养菌的增长得到。

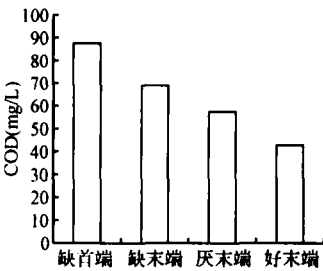


图 4 沿程溶解性 COD变化

Fig. 4 Resolvable COD plot in activated sludge system

COD的平衡率 η_{COD} 为:

$\eta_{COD} = COD_{out} / COD_{in} = 12\,820 / 20\,594.8 = 75.8\%$,可以看出在本倒置 AAO 工艺中有 24.2%的 COD平衡损失,损失的原因可能是在厌氧缺氧发酵阶段产生了气态的发酵产物挥发到空气中(如甲醇、乙酸和其他挥发性酸),加拿大 Dold进行小试的结果表明,AAO 工艺 COD的平衡率在 60% ~ 70%之间^[3]。

悬浮性 COD在各反应单元中吸附在活性污泥上^[4],不利于测定,可以通过观察溶解性 COD在本试验各个单元中的变化来考察 COD的降解情况,从图 4可知,在缺氧、厌氧、好氧池中 0.45 μ 滤后 COD 分别下降 18.5、11.6和 14.5 mg/L,在厌氧过程中溶解性 COD下降的量占整个工艺溶解性 COD下降量的 35%。COD的平衡损失在厌氧过程占很大比

重,在传统的工艺设计中往往没有考虑厌氧阶段 COD 的平衡损失,导致好氧池体积和曝气量的设计偏大,如果考虑 COD 在厌氧阶段的损失就可能很大程度降低好氧池的建设费用与运行费用。

2.2.2 关于 N 平衡的计算

首先进行反硝化运算,在缺氧池中被反硝化的硝态氮为:

$$M_{\text{denitr, anox}} = (Q \times S_{\text{in, NO}_3^-} + r \times Q \times S_{\text{aerobic, NO}_3^-}) - (1+r) \times Q \times S_{\text{anoxic, NO}_3^-}$$

$$= 50\,000 \times 1.476 + 0.57 \times 50\,000 \times 25.2 - 1.57 \times 50\,000 \times 2.01 = 63\,4215 \text{ g N/d} \quad (17)$$

式 (14) 中:

$S_{\text{in, NO}_3^-}$, $S_{\text{aerobic, NO}_3^-}$, $S_{\text{anoxic, NO}_3^-}$ 分别表示进水,好氧池末端,缺氧池末端硝态氮的含量在厌氧池中除去的硝态氮为:

$$M_{\text{denitr, anaer}} = (1+r) \times Q \times S_{\text{anoxic, NO}_3^-} - (1+r) \times Q \times S_{\text{anaerobic, NO}_3^-} = 1.57 \times 50\,000 \times 2.01 - 1.57 \times 50\,000 \times 1.33 = 53\,380 \text{ g N/d} \quad (18)$$

式中: $S_{\text{anoxic, NO}_3^-}$, $S_{\text{anaerobic, NO}_3^-}$ 分别表示缺氧池末端,厌氧池末端硝态氮的含量。

在本研究的倒置 AAO 工艺系统中被反硝化的硝态氮 (包括厌氧池与缺氧池) 的总和:

$$M_{\text{denit, T}} = M_{\text{denit, anox}} + M_{\text{denit, anaer}} = 687.631 \text{ kg N/d} \quad (19)$$

出水中的总氮为:

$$M_{\text{N, TN}} = (50\,000 - 2450) \times 32 = 1521.6 \text{ kg N/d} \quad (20)$$

试验表明,在一定的活性污泥龄范围内污泥中含 N 的比例化学计量系数为 $f_{\text{NV}} = 0.1 \text{ mg N/mg VSS}^{[5]}$, 则本工艺中剩余污泥排放 N 的量为:

$$M_{\text{N, EXP}} = f \times q \times X_V \times f_{\text{NV}} = 0.68 \times 4111 \times 2450 \times 0.1 = 684.9 \text{ kg N/d} \quad (21)$$

从系统中排出 N 的总量为:

$$N_{\text{out}} = M_{\text{N, TN}} + M_{\text{N, EXP}} + M_{\text{denit, T}} = 1521.6 + 684.9 + 687.631 = 2894.1 \text{ kg N/d} \quad (22)$$

进入系统中 N 的总量为: $50\,000 \times 59.1 = 2955 \text{ kg N/d}$, 因而 N 在本工艺中的平衡百分比为:

$$\eta_{\text{N}} = 2894.1 / 2955 = 97.9\%$$

结果表明, N 在该工艺中能很好的平衡, 可以从图 5 可知氮在经过生物反应后的物料流向, 其中反硝化后排到空气中 N_2 占 23.8%。

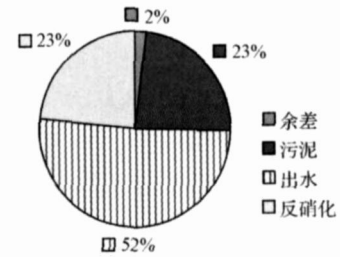


图 5 氮的流向分配

Fig. 5 Nitrogen distribution

2.2.3 关于 P 平衡的计算

每天进水带入系统 TP 量为:

$$M_{\text{in, TP}} = 50\,000 \times 6.5 = 325 \text{ kg TP/d} \quad (23)$$

在城市污水生物除磷系统中剩余污泥中 TP 磷的含量 f_p 约占污泥总重的 3%^[5], 则根据式 (9) 排出系统的 TP 为:

$$M_{\text{out, TP}} = S_{\text{P}_0} \times Q_0 + P_{\text{EXP}} = (50\,000 - 2450) \times 0.43 + 2450 \times 4113 \times 3\% = 322.8 \text{ kg TP/d} \quad (24)$$

因而 P 在本工艺中的平衡百分比为: $\eta_p = 322.8 / 325 = 99.3\%$, P 应该在稳定系统中得到很好的平衡结果, 本研究中可能是因为剩余污泥 TP 含量取的是经验数据的结果而导致平衡不能完全闭合。

进入系统的 TP 经过活性污泥单元反应后, 具体流向的分配可见图 6。从图中可知 P 的除去主要依赖于剩余污泥排放, 占到总量的 91%。

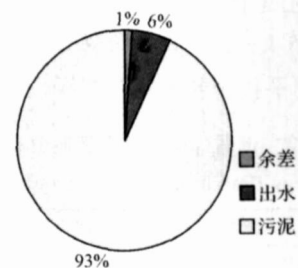


图 6 P 的流向分配

Fig. 6 Phosphorus distribution

2.3 倒置 AAO 工艺中能量流向分析

污水生物处理中微生物利用污水中的有机物或营养底物, 有机污染物一部分与以分子氧或硝酸盐为电子受体结合释放出能量, 这些能量提供微生物的同化作用耗能与维持微生物体生存耗能, 有机底物的另一部分则同化为生物体。

城市污水中的有机物非常复杂, 有的有机物结构和组成还是未知的, 有的现有的检测手段还难以

测出,所以不能通过找出所有有机物的分子式来计算污水中所含的化学能。在进行能源计算时将输入电能转化为一次能源 (12059 kJ/kW · h),有机污染物能量采用 BOD 或 COD 转化,对于污水的化学能量 13.9 kJ/g COD,细菌细胞的化学能量势为 14.8 kJ/g COD^[6]。

对于该倒置 AAO 工艺,11 月份曝气沉砂池出水即工艺进水的平均 COD 为 406 mg/L,根据式 (16)可知,进入系统 COD 为 2 0594.8 kg COD /d,二沉池出水为 40.4 mg/L,根据式 (15)可知,从二沉池出水排出的 COD 为 1921.01 kg COD /d;根据式 (13)可知剩余污泥产量为 10 136.4 kg COD /d。

在倒置 AAO 工艺 (包括二沉池)二级生物处理系统中外部能量的输入可以通过该系统中所包括的电机总功率计算,该工艺中的主要耗能电机如表 2 所示。

表 2 倒置 AAO 工艺中的主要耗能设备表
Table 2 Energy demand of equipments
in anoxic-anaerobic-aerobic system

设备名称	规格及装机功率	数 量
离心鼓风机	KA22S-GL225, Q =24 100 m ³ /h, N =630 kW	3用 2备
剩余污泥泵	NP3127, Q =159 m ³ /h, H =12 m, N =5 9 kW	2用 2备
回流污泥泵	LL3301, Q =1428 m ³ /h, H =5 7m, N =37 kW	2用 2备

由表 2 可知,该生物处理工艺中装机总功率为 1975.8 kW,则四平行系列之一的研究系列的输入功率为 493.95 kW,按连续运转考虑,倒置 AAO 工艺部分的能量平衡分析如表 3 所示。

表 3 倒置 AAO 能量流向分析表

Table 3 Energy flow in anoxic-anaerobic-aerobic system

项 目	能量输入 (kJ/d) 比例 (%)	能量输出 (kJ/d)比例 (%)
污水中有机物内能	286.26 ×10 ⁶	67
设备输入能量	142.96 ×10 ⁶	33
出水中有机物内能		26.70 ×10 ⁶ 6
剩余污泥细胞内能		150.02 ×10 ⁶ 35
散耗的功和热		252.51 ×10 ⁶ 59
总 计	429.22 100	429.22 100

由表 3 可以看出,该倒置 AAO 工艺中,生物反应散耗功和热占工艺能量输入的 59%,剩余污泥也

带出大量的微生物细胞内能,若能实现剩余污泥的减量化,不仅能减少后续污泥处理工艺消减这些内能所消耗的能量,而且可能将这些能量更多地用于生物反应,从而利于有机污染物的去除。

3 结 论

(1)对该工艺进行各反应区跟踪试验研究表明,倒置 AAO 工艺在厌氧段存在着 COD 的消耗损失,本工艺 COD 平衡达到 24.2%的 COD 平衡余差,这意味着该工艺的曝气池体积及曝气量与传统活性污泥法比可以降低,在倒置 AAO 工艺设计中可以考虑厌氧段 COD 的损失,从而减少曝气池好氧段的体积同时减少曝气量。N 与 P 的物料平衡都能很好地闭合,达到 96%以上,因为本工艺没有内回流,不是典型的倒置 AAO 工艺,N 的去除率不高,反硝化仅占总氮的 23.8%,P 的去除全部依靠剩余污泥的排放,从该途径排出的 P 占流入总磷的 91%。

(2)基于物料分析的能量平衡分析表明,在本倒置 AAO 工艺中,输入总内能的能量流向为:出水有机物内能占 6%,剩余污泥细胞内能占 35%,而由于生物反应等所需散耗的功和热占 59%。

参 考 文 献

[1] Nowak O., et al Parameter estimation for activated sludge models with the help of mass balances Wat Sci Tech, 1999, 39(4): 113 ~ 120

[2] Shun-Hsing Chang, et al The biomass fractions of heterotrophs and phosphate-accumulating organisms in a nitrogen and phosphorus removal system. Wat Res, 2000, 34(8): 2283 ~ 2290

[3] Barker P. S., et al COD and nitrogen mass balance in activated sludge systems Wat Res, 1995, 29(2): 633 ~ 643

[4] Ewa Lie, et al Carbon and phosphorus transformations in a full-scale enhanced biological phosphorus removal process Wat Res, 1997, 31(11): 2689 ~ 2693

[5] 汉斯 (Henze M.). 污水生物与化学处理技术. 北京:中国建筑工程出版社, 2001

[6] Owen W. F. 著,章北平,车武译. 污水处理能耗与能效. 北京:能源出版社, 1989