



氧化沟的设计方法讨论

王凯军

(北京市环境保护科学研究院)

目前,我国氧化沟技术水平与国际先进水平相比差距很大。究其原因,是我国还未系统地研究氧化沟技术与设备,对国际上氧化沟技术跟踪也不够。故对氧化沟技术的掌握尚不够全面,在工程上还缺乏系统和科学的设计方法,对氧化沟新工艺、新池型、新配套设备了解甚少。我国现已引进数种氧化沟技术,应有条件来分析比较和吸收消化。

首先,氧化沟属延时曝气活性污泥工艺,其原理和参数已有大量文献报道。氧化沟设计中除了要考虑碳源污染物的去除,还要考虑污水硝化和污泥稳定化问题。去除不同的污染物,设计参数和方法是不同的。例如,考虑污泥稳定的氧化沟设计,其设计参数主要考虑污泥龄和内源呼吸速率,而不是传统活性污泥工艺中的污泥负荷,这时氧化沟的停留时间事实上是一个导出的参数。其次氧化沟最重要的特点之一是,专用的曝气设备需要同时满足池内充氧和推动水沿沟渠流动的要求。全面了解和掌握氧化沟的水力学特性尤为需要。有关设备的水力学特性,是厂家产品的特性。大部分设计单位恰恰掌握不够,致使在设计中由于设备型号和参数不准,常常导致设计没有达到预期效果。这也与大多数氧化沟工艺及其拥有的专利和设备密切相关。由于国外公司对专有技术保密,因此出现了氧化沟技术不断发展,可是用于了解基本工艺的公开技术资料未见增加的现象。由此就更需要加强创新性的研究,才能提高我国在氧化沟工艺上的技术水平。本文通过对国内外资料的综合分析,提出氧化沟一般的设计方法以供国内同行在设计中参考。

1 氧化沟的设计方法

1.1 BOD的去除

氧化沟中碳源基质去除动力学与活性污泥法动力学是完全一致的。对于完全混合系统在稳定状态下有以下公式^[1]:

$$\frac{1}{\theta_c} = \frac{YQ(S_0 - S)}{XV} - K_d$$

$$\frac{1}{\theta_c} = \mu_{\max} \left(\frac{S}{K_s + S} \right) - K_d$$

则上式可改写为:

$$(XV) = \frac{Y\theta_c Q(S_0 - S)}{1 + K_d\theta_c}$$

$$S = \frac{K_s(1/\theta_c + K_d)}{\mu_{\max} - (1/\theta_c + K_d)}$$

式中 (XV) -- 参与反应的污泥量

Q --- 处理污水量

V --- 参与反应的好氧区体积

S --- 出水基质BOD₅浓度

Y --- 污泥产率系数

X --- 污泥浓度

θ_c --- 污泥龄

S₀ --- 进水基质BOD₅浓度

K_s --- 半饱和常数

K_d --- 内源代谢常数

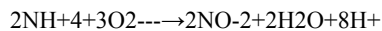
$\mu_{\max}$ --- 比基质利用率

1.2 硝化反应

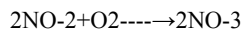
氨氮的硝化反应涉及到亚硝化毛杆菌和硝化杆菌两种不同的硝化细菌。

在水的作用下： $2\text{NH}_3\text{---}\rightarrow\text{NH}_4^+$

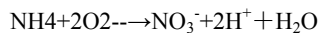
在亚硝化毛杆菌作用下：



在硝化杆菌作用下：



总的反应：



因此从化学计量学角度，1.0 kg氮需要 4.6 kg的氧，实际生产中的数据较小，为 3.9~4.3kgO₂/kgN。这是因为一部分氮用于细菌合成，并且硝化细菌可以从污水中二氧化碳和重碳酸盐获得一部分氧。由于上述反应产生氢离子，所以会消耗碱度，每氧化 1mg NH₃-N消耗 7.14 mg/L的碱度。另外从文献可知氧化 1 mg BOD产生 0.3 mg/L的碱度^[2]。

据报道硝化反应的温度范围是(5~45) °C,但是(25~32) °C是最佳温度范围。最佳的pH范围是 7.8~9.2。虽然硝化过程也可在低溶解氧的条件下发生，但是硝化菌的生长速率较低。为了避免氧的限制，反应池中的溶解氧最好控制在 3~4 mg/L。温度对生长速度的影响公式可以用阿伦缪斯公式表示，其中温度常数 $\theta=1.12(5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim20\text{ }^{\circ}\text{C})$ 。对于城市污水可以采用表 1 中污泥龄 θ_c [2]：

表 1 硝化工艺在不同温度下采用的污泥龄	
污水温度(°C)	完全硝化的 $\theta_c(\text{d})$
5	12
10	9.5
15	6.5
20	3.5

在冬季水温低于 10 °C，如果 $\theta_c<10\text{ d}$ ，硝化反应一般进行较差。若 $\theta_c>10\text{d}$ ，只要氧化沟的曝气能力可满足总的氧化需求，并且保持较高的溶解氧，即可取得很好的硝化率。在北欧国家，硝化负荷阶段一般选在 0.05~0.10 kgBOD₅/kgMLSS，硝化速率大约为 1.6 mgNH₃-N/(gVSS·d)(10°C)。

1.3 污泥稳定性

在氧化沟设计中考虑的第二个因素是污泥的稳定性问题。理论上讲氧化沟污泥龄的选取应该使得所有的挥发性固体通过内源呼吸全部被降解，无论是厌氧消化还是好氧消化。如果反应时间足够长，细胞降解过程中有 23%的残余物为不可生物降解。因为每天VSS 产量为 $YQ(S_0-S)$ ，其中可生物降解部分是 $0.77YQ(S_0-S)$ 。如果系统中可以生物降解部分的固体物质是 f_bX (f_b 为VSS可生物降解系数)，则在稳定状态：

$$0.77YQ(S_0-S)=K_d f_b(XV) \tag{5}$$

从而按照污泥龄的定义：

$$\theta_c=(XV)/(YQ(S_0-S))=0.77/K_d f_b \tag{6}$$

Adams和Eckenfelder给出了混合液VSS可以生物降解部分的比值 f_b 的计算公式^[3]：

$$f_b=[YQ(S_0-S)+K_d XV]/\{(2K_d XV)-\{[YQ(S_0-S)+K_d XV]^2-4K_d XV\} \times [0.77YQ(S_0-S)]\}^{0.5}/2K_d XV \tag{7}$$

也可推算出污泥负荷(F/M)的比值：

$$F/M=Q(S_0-S)/XV=K_d f_b/0.77Y \tag{8}$$

方程(6)和(8)是考虑污泥稳定性问题时污泥龄和有机负荷计算公式。无疑温度对于上述公式中参数Y、 K_d 的影响是十分重要的。对于延时曝气氧化沟温度常数($\theta=1.01\sim1.03$)数值较小，因此对温度的影响不大。污泥稳定化要求的有机负荷和污泥龄一般远远超过完全硝化所要求的数值。



1.4 脱氮反应

在没有溶解氧(缺氧)条件下,虽然在氧化沟的主体溶液中存在溶解氧,但缺氧条件事实上是指微生物生长的微环境(即生物絮体中或生物膜中)。除碳的异养微生物可以利用硝酸盐和亚硝酸盐作为电子受体,将其还原成氮。还原 1.0mg N₂产生 2.86 kgO₂。污水如需脱氮,需要去除的氮量ΔN(kg/d)为:

$$\Delta N = Q(N_0 - N) - \Delta X \times f_N \quad (9)$$

中 N₀、N——进、出水总氮浓度

ΔX——剩余污泥量

f_N——剩余污泥的含氮量,一般为 0.07kgN/kgMLVSS

脱氮需要考虑排放污泥中细胞的氮含量。按照细胞合成的碳氮磷的比例为C:N:P=106:16:1,即污泥中最多包含 12.3%的N和 2.6%的P。一般在内源呼吸阶段,不可生物降解部分仅仅包含 7%的N和 1%的P,剩余污泥中的其他N、P回到主体溶液中。因此污泥中的含氮量依赖于污泥龄(θ_c),污泥龄越长,污泥中的含氮量越小。由需要去除的氮量,确定反硝化的污泥量:

$$(VX)_{dn} = \Delta N / K_{dn} \quad (10)$$

式中 (VX)_{dn}——参与脱氮反应的污泥量, kg

K_{dn}——污泥脱氮负荷, kgNO₃⁻-N/kgMLSS·d

1.5 氧化沟的总污泥量

氧化沟的总污泥量(VX)_T和总容积计算如下:

$$(VX)_T = [(XV) + (VX)_{dn}] / f_n \quad (11)$$

$$V_T = (XV)_T / (f_x \cdot X) \quad (12)$$

对于不同类型的氧化沟,需要引入有效性系数f_a,其中带有体外沉淀池的氧化沟f_a=1.0,而其他类型的氧化沟f_a是不同的。以三沟式氧化沟为例,如果假设三沟是等体积的,则f_a如下计算:

$$f_a = \frac{X_{S1} t_{S1} + X_m t_m + X_{S2} t_{S2}}{X_{S1} t_S + X_m t_m + X_{S2} t_{S2}} \quad (13)$$

式中 X_{S1,2}--- 边沟MLSS浓度

X_m--- 中沟MLSS浓度

t_S --- 边沟一个周期的时间

t_{S1,2} --- 边沟一个周期内的工作时间

t_m --- 中沟在一个周期内的工作时间

假设污泥在氧化沟内分布均匀, t为三个沟一周总停留时间(包括沉淀)之和,则:

$$f_a = (t_{S1} + t_m + t_{S2}) / t \quad (14)$$

1.6 剩余污泥

虽然动力学设计能确定生物污泥产量,应考虑沉淀池的固体流失量和存在的惰性物质,可以采用下式计算:

$$\Delta X = Q \Delta S \left(\frac{Y}{1 + K_d \theta_c} \right) + X_i Q - X_e Q \quad (15)$$

式中 ΔS --- 去除BOD₅

X_i --- 进水悬浮固体中惰性部分

X_e --- 出水TSS

氧化沟以常规模式运行时,会产生不稳定的剩余污泥,应在处置前加以稳定,氧化沟以延时曝气模式



运行时，污泥量少且稳定。根据回流污泥量和剩余污泥量可以选择水泵和污泥处理系统。

1.7 氧化沟需氧量和曝气设备

在氧化沟系统，考虑以下几个过程的需氧量：总需氧量（D）=氧化有机物需氧+细胞内源呼吸需氧+硝化过程需氧-脱氮过程产氧

$$D=a' \cdot Q(S_0-S)+b' \cdot \Delta X \cdot f+4.6(N_0-N)-0.07\Delta X \cdot f-2.6\Delta NO_3^- \quad (16)$$

式中 f ——MLVSS/MLSS

ΔNO_3^- ——被还原的 NO_3^-

需氧量 D(AOR) 确定之后，并转化为标准状态需氧量(SOR)。在标准状态需氧量确定之后，根据不同设备厂家的表曝机样本和手册，计算出氧化沟系统的总能耗。总能耗一旦确定，就可以确定氧化沟曝气器的数目、氧化沟外形和分组情况。

$$SOR = \frac{AOR \cdot C_{s(20)}}{\alpha(\beta\rho C_{s(T)} - C)1.024^{(T-20)}} \quad (17)$$

式中 α --不同污水的氧转移速率参数，对生活污水取值 0.5~0.95

β --不同污水的饱和和溶解氧参数，对生活污水取值 0.90~0.97

ρ --大气压修正参数

C_s -- 温度T时饱和和溶解氧

2 设计结果和问题讨论

2.1 设计对比

为了说明氧化沟的设计过程，以邯郸三沟式氧化沟的数据为例，说明几个设计上的问题。根据下列数据设计处理生活污水的交替式氧化沟(三沟)：

进水：

BOD₅=130mg/L

NH₃-N=22mg/L(T=10℃)

TN=42 mg/L

SS=160mg/L

碱度=280mg/L(以CaCO₃计)

出水：

BOD₅<15 mg/L

NH₃-N< 2~3mg/L(T=10℃)

TN< 10~12mg/L(T=10℃)

TN=6~8mg/L(T=25℃)

SS< 20mg/L

最低温度=10℃（最高温度=25℃）

邯郸氧化沟是按三个系列，每个系列流量 $Q_1=33\ 000\ m^3/d$ ，主要设计结果见表 2。

2.2 原设计存在的问题

清华大学周律等人^[4, 5]对邯郸氧化沟进行了大量的现场测定工作，总结起来也是以下三个问题：

① 停留时间与反应时间问题：出水NH₃-N偏高，通过实验发现延长硝化停留时间，可以降低出水的

NH₃-N。这说明原设计的停留时间虽然对于BOD的去除充分，但对于脱氮其停留时间是不够的。上述问题可能也与污泥龄和运行方式有关。

② 污泥停留时间问题：通过污泥耗氧速率和悬浮物干重损失率等评价污泥稳定化实验方法，对其污泥进行测定的结果表明：经过处理的污泥尚未得到稳定。

③ 三沟式氧化沟的容积利用率问题：从前面的讨论可知三沟式氧化沟本身的容积利用率较低(58%)。在邯郸测得三沟中MLSS为 5.3 、2.0、5.0 kg/m³。f_a= 0.40 与上述的理想状态相差很大。三条沟的MLSS分布与设计的分布情况有较大差距，这是三沟式氧化沟运行及设计的一个主要问题。

表 2 三沟式氧化沟主要设计项目比较				
序号	项目	本例设计	邯郸丹麦 krüger 设计	备注
1	总池容(m ³)	3×27 440	3×20 000	
2	水深(m)	3.5	3.5	
3	污泥浓度(kgMLSS/m ³)	4.0	4.0	
4	水力停留时间(h)	20	14.5	问题 1
5	固体停留时间(d)	25(好氧)54(全沟)	12(好氧)26(全沟)	问题 2
6	动力效率 [kgO ₂ /(kW·h)]	2 0	1.64	
7	标准需氧量(kg/h)	2 436	-	
8	曝气转刷 1 m×9.0 m	共 27 台，32 kW	24(单速，45 kW)+18(双速，45/30 kW)	
9	剩余活性污泥(kgSS/d)	6100	6200	

2.3 讨论

通过设计计算的比较可见，邯郸污水处理厂的设计中存在两个问题：首先是停留时间上存在较大的差别；其次是按照三沟式氧化沟污泥龄的概念核算，其好氧部分的污泥龄偏低；另外前面的讨论可知三沟式氧化沟的实际容积利用率低也是一大问题。

- ① 本例设计水力停留时间为 20h，这可保证污水的完全硝化反应。
- ② 总的停留时间是 20h，但反应时间仅为 11.6h。带有二沉池的沉淀时间一般 2.0～3.0h，但需增加回流污泥和刮泥机等机械设备。这意味着运行操作方便、流程简化的结果是用较长的停留时间取得的。因此所谓三沟式氧化沟的优点也是有一定代价的，其经济性是需要仔细、全面考虑的。
- ③ 设计中可看出对于污泥稳定化，原设计的污泥龄明显不足。实验结果也充分证实了上述的分析。这也说明交替运行式氧化沟原设计的方法，在污泥龄的计算上是不正确的。从设计结果看，对于本例非常低的 BOD 浓度，根据稳定性要求的停留时间(20h)是相当长的，因此这种系统的经济性是需要探讨的。我国大部分氧化沟设计中不考虑硝化和污泥稳定化问题，今后设计标准中是否应考虑是需要讨论的问题。
- ④ 提高设备利用率的方法之一是采用 Gruger 公司的动态顺序沉淀(DSS)系统。笔者建议在三沟式氧化沟的设计中扩大中沟的比例，中沟的容积可占 50%～70%或更多(在边沟较小时，需要校核其沉淀功能可否满足)。中沟可采用一个沟或等体积两个沟。有效性系数计算可采用下面修正公式：

$$f_a = \frac{\sum_{i=1}^{n-2} V_{si} X_{si} f + \sum_{i=1}^n V_{mi} X_{mi}}{\sum_{i=1}^{n-2} V_{si} X_{si} + \sum_{i=1}^n V_{mi} X_{mi}} \tag{18}$$



式中 X_{mi} 、 $X_{Si,2}$ --- 中沟、边沟 1, 2 参与反应的 MLSS 浓度

f --- 边沟反应时间与一个周期时间比值

V_{mi} --- 中沟的体积

V_{si} --- 边沟的体积

采用上述数据, 则 f_a 分别为 0.69 和 0.80。设备的利用率和污泥分布均匀性均可提高, 从而提高三沟式氧化沟的容积利用率。

参考文献

- 1 许保玖. 当代给水与废水处理原理. 北京高等教育出版社, 1990
- 2 Mikkil G, Mandt, Bruce A Bell. Oxidation Ditches in Wastewater Treatment. 1982
- 3 Arceivala S J. Wastewater Treatment and Disposal. Marcel Dekker, Inc. USA: New York and Basel
- 4 周律, 钱易. 浅议三沟式氧化沟的设计. 给水排水, 1988; 24(1): 6~9
- 5 周律等. 三沟式氧化沟处理城市污水的效应. 中国给水排水, 1997; 13(5): 4~7