

生物除磷脱氮系统工程设计中的污泥龄*

许 劲¹, 孙俊贻²

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:在分析了污泥龄概念的基础上,指出生物除磷脱氮系统总污泥龄与好氧污泥龄的区别,并且该系统厌氧、缺氧与好氧各个反应阶段的污泥龄比系统总污泥龄更重要。在进行生物除磷脱氮系统的工程设计时,厌氧污泥龄和缺氧污泥龄一般为1~1.5 d和1~4 d,好氧污泥龄不宜盲目取大,可用满足硝化功能的最小污泥龄乘以适宜的安全系数求得,而系统总污泥龄以15 d左右为宜。

关键词:污泥龄;生物除磷脱氮系统;工程设计;好氧污泥龄;厌氧污泥龄;缺氧污泥龄;总污泥龄

中图分类号:X703.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2005)05-0083-04

Sludge Retention Time in Design of Biological Phosphorus and Nitrogen Removal System

XU Jin¹, SUN Jun-yi²

(1. Key Laboratory of the Ecological Environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstracts: Based on the concept of sludge retention time (SRT), the difference between general SRT and aerobic SRT is pointed out in this paper and it shows that the SRT of each reaction phase, such as anaerobic, anoxic and aerobic one, are more important than general SRT in biological phosphorus and nitrogen removal system (BPNRS). In design of BPNRS, the anaerobic SRT and anoxic SRT are usually taken as 1~1.5 d and 1~4 d respectively, the value of aerobic SRT can be taken as the lowest SRT satisfying the function of nitrification multiplied by a safety coefficient, instead of taking a higher value blindly, finally, the general SRT are preferable to be 15 d or so.

Keywords: sludge retention time; biological phosphorus and nitrogen removal system; engineering design; aerobic sludge age; anaerobic sludge age; anoxic sludge age; general sludge retention time

生物除磷脱氮系统是污水处理的活性污泥法系统中最复杂的生化操作之一,它是利用一种生物污泥通过多个带回流的串联 CSTR,顺序完成碳氧化、硝化、反硝化和除磷作用。在串联的 CSTR 中,有好氧段、缺氧段和厌氧段,或以时间顺序在同一 CSTR 内操作,而单级污泥系统的一个关键特点是反应器从下游到上游的内部回流,排泥的具体位置则集中在好氧段或与好氧段紧密联系的二沉池底部以及回流污泥管线上。我国现行的城市污水处理厂往往既要求除磷又要求脱氮,因此需要采用 A²/O 生物除磷脱氮工艺。由于目前生物除磷脱氮系统的设计方法在国内外尚不统一,而污泥龄对生物处理的能力和性能发挥着决定性的作用,故本文主要针对该系统工程设计中污泥龄的相关问题进行探讨。

* 收稿日期:2005-04-09

作者简介:许 劲(1968-),女,武汉人,副教授,在职博士生,主要从事水污染控制工程及其系统规划的研究。

1 污泥龄

污泥龄 (sludge age) 又称固体 (或污泥) 停留时间 (solids/sludge retention time, SRT) 或细菌平均停留时间 (mean cell residence time, MCRT), 在工程上一般以 SRT 表示。《环境科学大词典》(1993 年版) 中将污泥龄定义为曝气池中微生物细胞的平均停留时间, 对于有回流的活性污泥法, 污泥龄就是曝气池全池污泥平均更新一次所需的时间 (以天计); Mogens Henze^[1] 认为, 污泥龄就是处理系统的污泥 (生物量) 细胞平均停留时间, 活性污泥法回流的初衷就是增加污泥龄, 使之超过水力停留时间; 许保玖^[2] 先生认为, 污泥龄代表一个活细菌在反应器中的平均停留时间, 也就是它能充分增殖的时间, 其定义为:

$$\theta_c = \frac{\text{反应器中的活细菌总量}}{\text{每日从系统中流走的活细菌总量}} \quad (1)$$

总之, SRT 定义为系统中污泥总量除以单位时间污泥排放量, 是以整个系统为对象。而在串联的 CSTR 反应器中, 每一个反应器中限制生长的营养物质不同, 其中的微生物比增长速率各不相同。微生物比增长速率是单位时间生成的污泥量除以污泥总量。在稳定状态下, 污泥的排放量与污泥的净生成量相等, 所以, SRT 与系统微生物的平均净生长速率成反比, 故在串联的 CSTR 反应器中, SRT 可反映系统中微生物的平均净增长速率, 也就是说, 不同的 SRT 对应着不同的优势微生物。对生物除磷脱氮系统, SRT 的选择直接影响处理系统的硝化、反硝化和除磷能力, 以及剩余污泥的稳定程度, 因此有人认为 SRT 是活性污泥法生物除磷脱氮系统最重要的工艺参数。

2 好氧污泥龄

在生物除磷脱氮系统中, 各个反应阶段的 SRT 值比系统总 SRT 值更重要, 因为它们控制着各种反应的进行, 包括碳氧化、硝化、反硝化和除磷。对硝化工艺来说, 好氧污泥龄 $\theta_{c\text{好}}$ 至关重要, 它是指在好氧条件下, 污泥 (如硝化细菌) 在处理系统内的停留时间。它通常要比整个系统的总泥龄短, 其定义^[2] 与污泥龄类似:

$$\theta_{c\text{好}} = M_{\text{好}} / F_{SP} \quad (2)$$

式中: $M_{\text{好}}$ 为好氧污泥量, kg SS; F_{SP} 为剩余污泥量, kg SS/d。

好氧污泥龄是污泥龄中好氧曝气所占的比例, 它是设计硝化反硝化以及同时生物除磷脱氮系统的重要参数之一。由于硝化菌和聚磷菌 (PAOs) 只能在好氧条件下生长, 碳源去除也在好氧段, 所以在生物除磷脱氮系统中, 好氧污泥龄的选择相当重要。

在设计手册中, A^2/O 工艺好氧池的计算与 A/O 脱氮工艺相同, 其基本计算公式为:

$$V_{\text{好}} = \frac{24Q\theta_{c\text{好}}Y(L_j - L_{ch})}{1\ 000N_w} \quad (3)$$

式中: $V_{\text{好}}$ 为好氧池容积, m^3 ; Q 为好氧池设计流量, m^3/h ; Y 为污泥产率系数, kg SS/kg BOD₅; L_j 、 L_{ch} 为进、出水 BOD₅ 浓度, mg/L; N_w 为反应池混合液浓度 (MLSS), g/L。

好氧污泥龄需根据具体工艺形式及出水水质要求选定。由于在生物除磷脱氮系统的好氧段中, 硝化所需要的最小 SRT 大于 PAOs 的最小 SRT, 因此, 在实际运行中必须注意保证好氧段 SRT 足够长, 以满足硝化的需要。一般, 当 SRT 比较长时, 有机物代谢会更彻底, 可以提高脱氮效率, 但是会对除磷产生不利影响, 所以在生物除磷脱氮系统的工程设计中应防止 SRT 超过达到处理目标所需要的时间, 其好氧污泥龄满足硝化功能即可, 不宜盲目取大, 范围宜为 4 ~ 12 d^[3], 与温度有关, 应根据冬季运行条件确定。

同时应注意区分好氧污泥龄与 A^2/O 系统的总污泥龄^[4]:

$$\theta_{c\text{总}} = \theta_{c\text{好}} + \theta_{c\text{缺}} + \theta_{c\text{灰}} \quad (4)$$

准确地讲, 好氧污泥龄定义为好氧阶段在系统总污泥龄中所占的比例, 由于 SRT 是根据系统生物量定义的, 所以好氧段 SRT 在系统中所占的比例相当于好氧微生物在系统总生物量中所占的比例。任

何一个反应区中的 MLSS 浓度取决于污泥回流和混合液内回流的位置,一般 A/O 和 A²/O 系统中的 MLSS 浓度都可以看作是均匀分布,因此微生物在某种状态下所占的比例就等于该状态下的体积在系统中所占的比例,即:

$$\frac{MLSS \cdot V_{好}}{MLSS \cdot V_{总}} = \frac{\theta_{c好}}{\theta_{c总}} \quad \frac{MLSS \cdot V_{缺}}{MLSS \cdot V_{总}} = \frac{\theta_{c缺}}{\theta_{c总}} \quad \frac{MLSS \cdot V_{厌}}{MLSS \cdot V_{总}} = \frac{\theta_{c厌}}{\theta_{c总}} \quad (5)$$

整理可得:

$$\frac{\theta_{c总}}{V_{总}} = \frac{\theta_{c好}}{V_{好}} = \frac{\theta_{c缺}}{V_{缺}} = \frac{\theta_{c厌}}{V_{厌}} \quad (6)$$

一般,对于活性污泥法工艺系统的硝化过程,达到设计要求的出水水质所需要的好氧污泥龄 θ_{cr} 可用公式(7)计算。在工程设计时应注意,安全因子的乘积效应要能够保证所需的 SRT 足够长,从而使系统获得可靠的出水水质。

$$\theta_{cr} = \theta_{cmin} \cdot \zeta_U \cdot \zeta_{PL} \cdot \zeta_{DO} \quad (7)$$

式中: θ_{cmin} 为硝化过程的最小污泥龄,可根据图 1 选择。

温度为 15℃ 时,该值为 3.5 d。 ζ_U 为不确定性(包括动力学参数、进水性质、微生物群体的自然变动等)安全因子。当对污水特征有充分研究时,该值可设为 1.0。 ζ_{PL} 为峰值负荷安全因子,即污染物峰值负荷与平均负荷的比值,高浓度城市污水常有冲击负荷出现^[5]。 ζ_{DO} 为硝化过程的 DO 安全因子, $S_{DO} = (K_{O,A} + S_O)$,其中 $K_{O,A}$:硝化细菌的 DO 半饱和常数,0.75 mg/L; S_O :溶解氧浓度,一般为 2.0 mg/L。由此计算硝化的 DO 安全因子为 1.375。

根据公式(7),当温度为 15℃、峰值安全系数为 2.5 时,好氧污泥龄为:

$$\theta_{cr} = 3.5 \times 10 \times 2.5 \times 1.375 = 12.0 \text{ d}$$

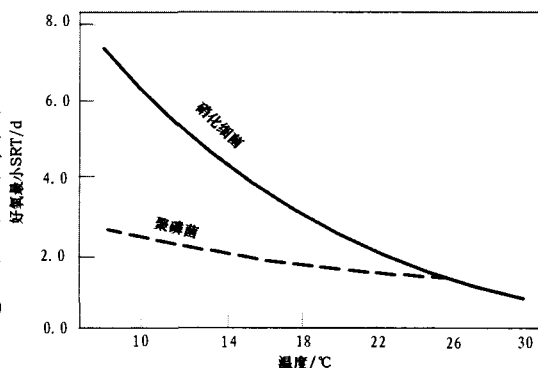


图1 温度对 PAOs 和硝化细菌所对应的最小 SRT 的影响^[3]

3 厌氧污泥龄与缺氧污泥龄

尽管厌氧区与缺氧区不直接排泥,但由于两段中都有活性污泥,其中均有大量的活性微生物如 PAOs 和反硝化菌,都要停留一定时间以满足生物处理的功能,而不同的 SRT 对应着不同的优势微生物,因此两段当然有与处理功能相适应的污泥龄。

在出水水质稳定达标的城市污水处理厂,A²/O 工艺的缺氧区 SRT 范围一般在 1~4 d 之间,厌氧区 SRT 一般为 1~1.5 d,具体数值与温度有关。增加缺氧区 SRT,可以增加缓慢生物降解有机物的代谢,提高脱氮能力,因此,当污水含有的易生物降解有机物较少、要求出水硝态氮较低时,就需要延长 SRT;而增加厌氧区 SRT,会增加可生物降解有机物在厌氧区的发酵,使低分子发酵产物(VFAs)生成量增加,从而提高除磷效率。通常,厌氧区与缺氧区的 SRT 之和至少为 2~3 d^[3],如果需要进行缓慢生物降解有机物的水解,则 SRT 值应取更大些。

如果 A²/O 工艺系统的厌氧区 SRT 为 1.0 d(可进行一定程度的发酵),缺氧区 SRT 选定为 1.5 d(以保证易生物降解有机物得到完全去除,同时有较好的污泥沉降性能),则该生物除磷脱氮系统的总污泥龄为:

$$\theta_{c总} = \theta_{c好} + \theta_{c缺} + \theta_{c厌} = 1.0 + 1.5 + 12.0 = 14.5 \text{ d}$$

当然,上述各阶段的污泥龄可以根据具体情况进行调整,包括好氧污泥龄的安全系数,关键是要详细分析实际进水的水质水量和处理后出水的排放标准。

4 总污泥龄及其系统设计

目前国内新建的城市污水处理厂,即使考虑一定程度的污泥稳定,生物除磷脱氮系统的总污泥龄仍以 15 d 左右为宜,与法国研究得出的 θ_c 公式^[6]基本一致,该公式为

$$\theta_c = \frac{KN_{TE} + 1.5}{KN_{TE}} \times \frac{1 + 1.094^{(45-T)}}{0.126} \quad (d) \quad (8)$$

式中: KN_{TE} 为出水中凯氏氮(KN)浓度, mg/L; T 为冬季污水温度, °C。

一般,生物除磷脱氮的活性污泥系统在温度最低也就是冬季运行时,硝化细菌的比增长速率降至最低值,需要 SRT 比较长,而衰减系数较低,使活性污泥总量 $MLSS \cdot V$ 最大,并且剩余污泥产生量也达到最大值,故确定系统尺寸和剩余污泥处理系统应以冬季为基础进行计算;在系统运行温度最高时,氧气需求量达到最大值,因此氧气传输系统需以夏季运行为基础进行设计。

在工程设计中,当 A^2/O 系统的总污泥龄和综合产率系数确定后,就可根据下式计算活性污泥总量:

$$MLSS \cdot V_{\text{总}} = \theta_{c\text{总}} \cdot Y \cdot Q(L_j - L_{ch}) \quad (9)$$

然后,根据好氧、缺氧、厌氧各工艺段的 SRT 值,用公式(5)可求得各段的活性污泥总量 $MLSS \cdot V_i$ 。由于常规 A^2/O 工艺各段的 $MLSS$ 浓度值基本相同,可取 2 000 mg/L ~ 4 000 mg/L,故可确定各段所需的容积(V_i)与尺寸。对于 UCT、VIP 等工艺,厌氧段的 $MLSS$ 浓度低于好氧段和缺氧段,则另当别论。

5 结论

由于生物除磷脱氮系统是污水处理的活性污泥系统中最复杂的生化操作之一,因此在该系统的工程设计中,应注意区分好氧污泥龄与总污泥龄,尤其要注重合理选取好氧段、缺氧段与厌氧段的 SRT 值;好氧污泥龄 θ_c 不宜盲目取大,可用满足硝化功能的最小污泥龄乘以适宜的安全系数求得;系统总污泥龄以 15 d 左右为宜。在工程设计时,应先以冬季为基础进行计算,然后选择适宜的 $MLSS$ 浓度值,再确定系统各工艺段的容积。

参考文献:

- [1] Henze, M. 污水生物与化学处理技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [2] 许保玖. 当代给水与废水处理原理讲义[M]. 北京:清华大学出版社,1983.
- [3] C. P. Leslie Grady, Jr. 废水生物处理(第二版,改编和扩充)[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [4] 许劲. 生物除磷脱氮系统工程设计值得探讨的几个问题[J]. 给水排水,2005,31(5):14-18.
- [5] 王涛. 山东禹城污水处理厂主体工艺调试试验与分析[J]. 重庆建筑大学学报,2004,26(2):129-133.
- [6] 娄金生. 生物脱氮除磷原理与应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2002.