

分段进水 A/O 工艺流量分配方法与策略研究

王伟 彭永臻* 孙亚男 王淑莹

(北京工业大学环境与能源工程学院北京市水质科学与水环境恢复重点实验室,北京 100124)

摘要 分段进水缺氧/好氧(A/O)工艺是一种高效的污水生物脱氮工艺。但原水多点投配给该工艺带来诸多好处的同时,也为其优化运行带来一定困难。其中,可行的流量分配方法的建立是分段进水工艺发挥其优势并高效运行的瓶颈问题。提出3种不同的流量分配方法并进行相应的理论分析:(1)采用等负荷流量分配法,其遵循的原则是保证各段硝化菌负荷相同,以利于硝化菌生长,优先满足系统硝化,最大程度地降低出水氨氮浓度;(2)采用流量分配系数,原则是各缺氧段进水有机物质恰好可以为上段好氧区产生的硝酸盐氮反硝化提供充足的电子供体。利用该方法可以充分利用原水中碳源,发挥缺氧区反硝化潜力,并保证最后一段进水量最少,降低出水硝酸盐氮含量;(3)末端集中进水,用于暴雨等产生洪峰流量时,将进水点向系统末端移动,并加大末端进水量,以减小二沉池固体负荷,避免污泥冲刷流失。3种流量分配方法的提出,可以应对水厂不同的进水水质和出水要求,增强分段进水A/O生物脱氮工艺的实际可操作性,提高处理效率,为目前采用分段进水A/O工艺的污水厂的优化运行管理提供可靠的理论借鉴。

关键词 污水 生物脱氮 分段进水 A/O 流量分配

中图分类号 X703.1 **文献标识码** A **文章编号** 1673-9108(2009)01-0089-04

Study of influent flow distribution methods and strategies in step-feed A/O process

Wang Wei Peng Yongzhen Sun Yanan Wang Shuying

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering,
College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract Step-feed anoxic/oxic (A/O) process is an attractive biological nitrogen removal system for wastewater treatment. The feed pattern enhances the nitrogen removal performance; however, the facility of operation of this process could be negatively affected. The establishment of optimal distribution method for influent flow is a bottleneck problem of this process to promise the high performance and put the advantage into play. Three methods proposed in this paper for influent flow distribution include: (1) equilibrium loading to nitrifiers. It is a sensible method that the F/M ratio for nitrifiers is the same in the different aerobic tanks, which can favor the growth of nitrifiers and promise the nitrification; (2) the optimal coefficient of influent flow rate distribution. The main idea has been to let the influent organic in some of the anoxic zone be determined by the nitrate concentration produced by the former stage. The suggested method could fully use the influent carbon source and denitrification potential of anoxic zone and, consequently, reduce the influent flow of last stage and get a lower effluent nitrate concentration; (3) a voluminous influent flow in the end of system. To reduce the solids loading to the settler and prevent sludge from being washed out, the feeding point is moved away from the inlet of the system towards its end and the feeding flow in the last stage is increased accordingly during periods with hydraulic peak flows (caused e.g. by storm weather). Based on the different influent qualities and effluent standards, the suggested influent distribution methods, could improve the operation feasibility and enhance nitrogen removal, as well as providing the reliable theoretical reference of operation and management in step-feed A/O process.

Key words wastewater; biological nitrogen removal; step-feed; A/O; influent flow distribution

连续流分段进水A/O作为一种高效的污水生物脱氮工艺,目前已被广泛应用于新建和改、扩建污水处理厂^[1,2]。最初将分段进水应用于活性污泥反应系统是为了减少洪峰流量时二沉池固体负荷,减少污泥被冲刷的危险。之后,分段进水作为一种过程控制策略应用于A/O脱氮系统,经过发展而成为一种

基金项目:北京市教委科研基地——科技创新平台项目;高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060005002)

收稿日期:2008-05-14;修订日期:2008-07-02

作者简介:王伟(1979~),女,博士研究生,主要从事污水生物处理研究工作。E-mail: wang_wel2005@emails.bjut.edu.cn

*通讯联系人, E-mail: pyz@jpu.edu.cn

无内循环脱氮工艺。分段进水 A/O 脱氮工艺中,原水分多点进入反应器,同传统前置反硝化工艺相比,该工艺无需设置硝化液内回流设施,可以节省内循环所需能量;缺氧区进水,可充分利用原水中有机碳源进行反硝化,节省药剂费用;此外,原水分散进入反应器,可有效避免或降低洪峰流量时污泥被冲刷的危险^[3~6]。多点进水带来诸多好处的同时,也使得该工艺的运行变得相对复杂。进水流量分配作为分段进水 A/O 工艺最重要的影响因素,其方法的开发与优化一直都是一个难题。

在分段进水 A/O 工艺中,原水多点投配,使得各段好氧区硝化容量不同,分配比不同时,为缺氧区提供的反硝化供体不同,因此,流量分配比不仅直接影响系统各段硝化容量的充分利用,也必然影响着各段缺氧区反硝化效果。此外,污水处理系统的动态复杂性及硝化、反硝化在某些方面的相互矛盾性,使得很难通过一种流量分配方式来满足系统在任何时刻的流量分配均为最优。鉴于上述背景,本研究针对进水水质、水量及出水要求,提出分段进水 A/O 工艺的 3 种流量分配方法,一是等负荷流量分配法,根据系统各段硝化容量分配流量,优先保证硝化效果,用于高负荷时保证系统稳定运行有效方式;二是采用流量分配系数,根据进水 C/N 进行流量分配,目的是充分利用进水碳源,并保证最后一段进水

量最少,该方法是提高脱氮效率乃至深度脱氮的重要方式;三是流量分配方式——末端集中进水,降低二沉池的固体负荷,可避免污泥冲刷流失,尤其是合流制污水厂在暴雨产生洪峰流量时尤其适用。下面将分别对 3 种流量分配方法进行详述,并对其应用条件进行探讨,以期分段进水 A/O 工艺的实际应用提供指导。

1 流量分配方法分析

1.1 条件假设

分段进水 A/O 工艺的水量平衡图见图 1。图 1 是具有 n 段的分段进水 A/O 工艺,原水分别在各段缺氧区进入反应系统,缺氧区发生反硝化反应,进水为反硝化提供碳源,混合污水进入好氧段进行硝化反应,硝化后硝酸盐混合液再进入下一段的缺氧区进行反硝化反应,进水为其提供反硝化碳源。第 1 段的缺氧区主要对回流污泥中的硝酸盐进行反硝化。在对流量分配进行理论分析时,首先假设 (1) 原水无硝酸盐和亚硝酸盐; (2) 系统硝化、反硝化容量充足,无氨氮流入二沉池,出水只含有硝酸盐氮,无亚硝酸盐氮,回流污泥中无氨氮和可生物降解物质; (3) 忽略细胞同化作用消耗的氮; (4) 原水碱度充足; (5) 二沉池不发生反硝化反应。

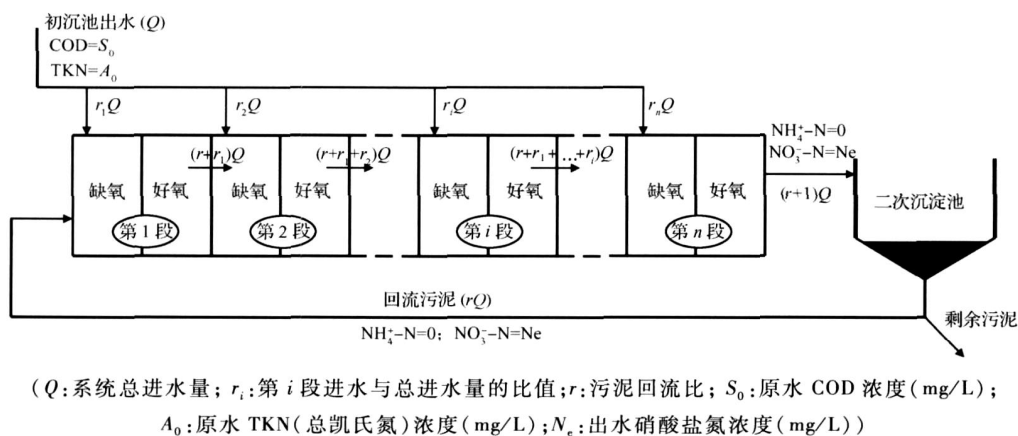


图 1 分段进水 A/O 工艺物料平衡示意图

Fig. 1 Mass balance diagram of step-feed A/O process

1.2 流量分配方法讨论

1.2.1 采用等负荷流量分配法——保证系统硝化

对于脱氮工艺,硝化是影响系统脱氮效果的重要因素。分段进水 A/O 系统中,由于原水分散进入反应系统,系统各段悬浮固体浓度 (MLSS) 呈梯度分布,不同进水流量比导致各段硝化菌的 F/M (氨氮/硝化菌数量) 值不同,且当后段好氧区硝化菌 F/M 值高于前段硝化菌 F/M 值时,系统硝化反应将受到

负面影响。在高负荷时,这种负面影响将变得更加明显。由于污泥浓度沿流程呈递减分布,为保证较好的硝化效果,进水流量通常呈递减分布。这里假设系统各段进水比 $Q_1 : Q_2 : \dots : Q_i : \dots : Q_n = r_1 : r_2 : \dots : r_i : \dots : r_n$, 各好氧段硝化菌数量为 $M_{N1}, M_{N2}, \dots, M_{Ni}, M_{Nn}$, 且各段好氧区体积相等,污泥回流比为 r (回流污泥量/系统总进水量),由系统物质平衡,可得第 n 段硝化菌数量与第 1 段的比值为:

$$r_{n1} = \frac{M_{Nn}}{M_{N1}} = \frac{(r + r_1)}{(r + r_1 + \cdots + r_i \cdots + r_n)} \quad (1)$$

一个简单可行的控制方式就是保持各段好氧区硝化菌的 F/M 值相等,因此,有方程 (2) 成立,

$$\frac{r_n}{r_1} = \frac{(r + r_1)}{(r + r_1 + \cdots + r_i \cdots + r_n)} \quad (i = 2, 3 \cdots n) \quad (2)$$

这样,有 $n - 1$ 个方程成立,

并有,

$$r_1 + \cdots + r_i \cdots + r_n = 1 \quad (3)$$

因 r 为已知,由方程 (2) 和 (3), 可以求出系统流量分配比,此流量分配比可以满足各段好氧区硝化菌 F/M 相同。采用等负荷流量分配法分配流量时,为降低系统出水硝酸盐氮浓度,可以提高第 1、2 段进水量,使第 1、2 段硝化菌的 F/M 增高,这样,即使第 1、2 段不能硝化完全,剩余的氨氮可以在后续好氧段硝化去除,不会影响系统整体硝化容量的充分利用。但是,这样分配的结果可能造成第 1、2 段缺氧区碳源浪费。若末段好氧区硝化菌 F/M 值高于第 1、2 段,虽然某些情况下可以更加充分地利用原水中的碳源,但当原水负荷较高时,会导致出水氨氮浓度增加。此外,低负荷时,若前段进水量较小,硝酸盐氮产生量不足,使得硝酸盐成为后段缺氧区反硝化的限制因素,提高后段进水流量也不再有意义。分段进水流量比显然影响着系统各段硝化、反硝化容量的充分利用。采用等负荷流量分配方法,可以优化系统硝化过程,但很难同时兼顾反硝化过程,若需对反硝化过程进行优化,还需考虑进水 C/N 和进水负荷等因素。

1.2.2 采用流量分配系数——充分利用原水碳源

设第 1 段缺氧区的 TKN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 COD 浓度分别为 A_1 、 N_1 和 S_1 ,由系统质量平衡,有下式成立:

$$A_1 = \frac{r_1 Q A_0}{(r_1 + r) Q} = \frac{r_1}{r_1 + r} A_0 \quad (4)$$

$$N_1 = \frac{r Q N_e}{(r_1 + r) Q} = \frac{r}{r_1 + r} N_e \quad (5)$$

$$S_1 = \frac{r_1 Q S_0}{(r_1 + r) Q} = \frac{r_1}{r_1 + 1} S_0 \quad (6)$$

第 1 段缺氧区恰好完全反硝化的条件可由下式描述:

$$S_1 = \alpha N_1 \quad (7)$$

方程 (7) 中 α 是常数,它表示单位 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 转化成氮气需要消耗的有机物质量,通常以 BOD_5 来表示^[7],但 BOD_5 的测定通常需要较长的时间。为便于将该分配方法应用于流量分配的实时控制,本文均以 COD 表示 ($\text{mg COD} / \text{mg NO}_3^- \text{-N}$)。这个比值可通过实验来确定,其与系统固体停留时间 (SRT)、内

源衰减系数及可生物降解生物体比例有关,并与进水水质有关。本研究在处理实际生活污水的实验中,得出 α 值为 $7 \text{ mg COD} / \text{mg NO}_3^- \text{-N}$ 。

将方程 (5) 和 (6) 中 N_1 和 S_1 表达式代入方程 (7),可以得到下式:

$$r_1 = \frac{\alpha}{S_0} r N_e \quad (8)$$

方程 (8) 定义的是原水投加到第 1 段缺氧区最小比例。按此比例分配进水使得该缺氧区进行完全反硝化,完全去除回流污泥携带来的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 。

在好氧区,原水中的 TKN 完全硝化变成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 。因此,第 1 段出水的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度与第 1 段进水的 TKN 浓度 (即 A_1) 相同。进入第 2 段缺氧区后,由于第 2 段进入的原水 ($r_2 Q$) 的稀释作用,第 2 段缺氧区 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度 (N_2) 可由如下物质平衡方程表示:

$$N_2 = \frac{A_1 (r_1 + r)}{r_1 + r_2 + r} = \frac{r_1}{r_1 + r_2 + r} A_0 \quad (9)$$

第 2 段缺氧区反硝化需要的电子供体由进入第 2 段缺氧区的原水来提供。由于第 2 段进水的稀释作用,第 2 段缺氧区首端的 COD 可以通过调整 S_0 来计算,则:

$$S_2 = \frac{r_2}{r_1 + r_2 + r} S_0 \quad (10)$$

第 2 段缺氧区恰好完全反硝化必须有下列式成立:

$$S_2 = \alpha N_2 \quad (11)$$

将方程 (9) 和 (10) 代入方程式 (11), 得到如下关系:

$$r_2 = \alpha \frac{A_0}{S_0} r_1 \quad (12)$$

方程 (12) 给出的流量比是满足第 2 段缺氧区反硝化完全所需要的最小流量比。以此类推,根据水量平衡,任意第 i 段的 COD 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度可以用原水的 S_0 和 A_0 来表示,如下式所示:

$$S_i = \frac{r_i}{r_1 + r_2 \cdots + r_i + r} S_0 \quad (13)$$

$$N_i = \frac{r_{i-1}}{r_1 + r_2 + \cdots + r_i + r} A_0 \quad (14)$$

第 i 段恰好完全反硝化所需的最小进水比可由下式表示:

$$r_i = \alpha \frac{A_0}{S_0} r_{i-1} \quad (i = 2, 3, \cdots n) \quad (15)$$

利用上式,可以满足各段进入的原水恰好可以提供充足的电子供体将上一段好氧区产生的硝酸盐氮反硝化,并使得最后一段进水最少,出水硝酸盐氮浓度最低。

此外,系统各段流量分配比满足方程(3)所述的关系,因此,由方程(15)和(3)可以组成方程组,进而解出各段流量分配比的数值。

对同一进水水质,当各段缺氧区进水提供的电子供体恰好可以将上一段产生的硝酸盐氮反硝化去

除时,这里 $\alpha \cdot \frac{A_0}{S_0}$ 为定值, $\frac{r_n}{r_{n-1}}$ 则为定值,此处定义

$\frac{r_n}{r_{n-1}} = \alpha \cdot \frac{A_0}{S_0} = \delta_{opt}$, 并称 δ_{opt} 为最优流量分配系数。

当进水 $COD/TKN \geq \alpha$, $\delta_{opt} \leq 1$, 流量沿系统流程递减分布;当 $COD/TKN < \alpha$ 时, $\delta_{opt} > 1$, 流量沿流程方向递增分布。

但由上述分析和关系式可以看出,计算所得的流量分配比却不能保证第1段进水将回流污泥中的硝酸盐氮完全反硝化,或者第1段的进水量最少。

由二沉池出水的 $NO_3^- - N$ 浓度 (N_e) 和进入最后一段(第 n 段)的 TKN 浓度相同,可得方程(16):

$$N_e = \frac{r_n}{1+r} A_0 \quad (16)$$

方程(16)代入方程(8)得到方程(17),

$$r_1 = \alpha \frac{A_0}{S_0} \frac{r}{1+r} r_n \quad (17)$$

方程(17)是第1段进水完全将回流污泥中携带的硝酸盐氮反硝化去除所需的最小流量比,实际运行时,可以参考方程(17)计算得到的第1段流量分配比数值来优化污泥回流比等控制参数。

1.2.3 末端集中进水——防止污泥冲刷流失

水厂的实际运行中,经常遇到暴雨等极端天气,对合流制排水系统,生物法污水处理厂会面临污泥冲刷流失的危险。分段进水工艺最初被提出来时,就是为了应对水厂突然增加的水力负荷,采用分流方式,降低二沉池固体负荷,防止污泥冲刷流失。当其逐渐演变成具有脱氮功能的处理工艺时,这一功能仍然很重要。因为脱氮工艺中的硝化菌是需长泥龄生长的菌种,其对系统脱氮起着至关重要的作用,若发生污泥冲刷流失,系统硝化功能会降低,且不易恢复。早在1984年,就有人提出多点进水工艺控制二沉池固体负荷的方法^[8],该方法需测定进入二沉池的污泥初始沉淀速率(ISV) (沉淀池容量可以定义为 $ISV(m/d) \times$ 沉淀池截面积),该方法手动调节进水点的位置,当沉淀池的额定容量小于进入沉淀池的实际固体量时,分段进水点的位置向系统末端移动一次,直到进水点移动到系统最末端,这种方法是基于对进水点位置的调整进行的。事实上,为了降低进入沉淀池的负荷,还可以通过测定进水量、污泥沉淀性能,或者通过污泥层高度来控制各段进水

流量比。当判定存在污泥流失危险时,可以加大系统末端进水量,并使进水点位置尽可能接近系统末端。

2 结 语

流量分配是分段进水生物脱氮工艺稳定、高效运行的关键。本研究提出3种流量分配方法,并对其理论探讨。其中等负荷流量分配方法,可以保证系统硝化效果,给硝化菌提供良好的生长环境,适用于高氨氮进水负荷,保证出水氨氮达标;而最优流量分配系数,可以优化对进水碳源的利用,尤其适用于高进水 C/N 的污水,其不仅可以充分利用原水中的碳源,还可以使得最后一段进水量最少,降低出水 TN 浓度;第3种方法是末端集中进水的方法,这种方法主要用于应对突然加大的水力负荷,防止污泥冲刷流失。此3种流量分配方法,可以作为分段进水 A/O 工艺设计、运行和实时控制的依据,以应对不同的进水水质,并保证系统连续满足出水要求。

参 考 文 献

- [1] Crawford G, Black S, Stafford D. The step biological nutrient removal process at Lethbridge over one full year of operation. Proceedings of 73rd Annual Conference and Exposition, Anaheim, California, USA, 2000
- [2] Fillos J, Ramalingam K, Caltiel A. Full-scale evaluation of step-feed BNR process at a New York City water pollution control plant. Proceedings of 75th Annual Technical Exhibition and Conference, McCormick Place, Chicago, Illinois, USA, 2002
- [3] Görg U E, Artan N, Orhon D, et al. Evaluation of nitrogen removal by step feeding in large treatment plants. Wat Sci Tech, 1996, 34(1~2): 253~260
- [4] Larrea L, Larrea A, Ayesa E, et al. Development and verification of design and operation criteria for the step feed process with nitrogen removal. Wat Sci Tech, 2001, 43(1): 261~268
- [5] deBarbadillo C, Carrio L, Mahoney K, et al. Practical considerations for design of a step-feed biological nutrient removal system. Florida Water Resources Journal, 2002, (1): 18~20
- [6] 邱慎初, 丁堂堂. 分段进水生物除磷脱氮工艺. 中国给水排水, 2003, 19(4): 32~36
- [7] Rittmann B. E, McCarty P. L. Environmental Biotechnology, Principles and Applications. New York: McGraw-Hill Companies, 2001
- [8] Olsson G, Nielsen M. K, Yuan Z, et al. Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Systems. London: W A Publishing, 2005