

论述与研究

Highsludge[®] 高浓度活性污泥脱氮工艺中试

周克钊¹, 段余杰², 邬甘霖³, 熊易华¹, 罗万申¹, 李堂发¹, 张学兵¹,
张明杰¹, 万志健³, 程 鹏¹, 何 俊⁴

(1 中国市政工程西南设计研究院, 四川 成都 610081; 2 深圳市水污染治理指挥部, 广东 深圳 518036; 3 深圳市罗芳污水处理厂, 广东 深圳 518003; 4 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610064)

摘 要: Highsludge[®] 工艺采用兼氧、好氧组合流程, 最显著的特点是活性污泥浓度高、好氧段的溶解氧浓度低。在深圳市的罗芳污水处理厂进行了 Highsludge[®] 工艺处理城市污水的中试研究 (规模为 300 m³/d), 在进水 COD、BOD₅、SS、TN 分别为 (431 ~ 484)、(167 ~ 192)、(504 ~ 611)、(37.12 ~ 47.85) mg/L 的条件下, 其出水浓度分别为 (15.7 ~ 18.3)、(2.7 ~ 3.3)、(6 ~ 7)、(6.13 ~ 8.51) mg/L。该工艺的同步硝化反硝化效果显著, 其去除的总氮约占总去除量的 40%。同步硝化反硝化主要发生在好氧池的前段, 其去除的总氮量为 3.03 mg/L。由于活性污泥浓度高, 该工艺可以在较短的水力停留时间下获得较佳的除污效果, 且剩余污泥量较少。

关键词: Highsludge[®] 工艺; 城市污水; 高浓度 MLSS; 脱氮

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4602(2009)03 - 0001 - 06

Pilot Research on Highsludge[®] Process with High MLSS for Nitrogen Removal

ZHOU Ke-zhao¹, DUAN Yu-jie², WU Gan-lin³, XDNG Yi-hua¹, LUO Wan-shen¹,
LI Tang-fa¹, ZHANG Xue-bing¹, ZHANG Ming-jie¹, WAN Zhi-jian³, CHENG Peng¹,
HE Jun⁴

(1 Southwest Municipal Engineering Design and Research Institute of China, Chengdu 610081, China; 2 Shenzhen Water Pollution Control Headquarter, Shenzhen 518036, China; 3 Shenzhen Luofang Wastewater Treatment Plant, Shenzhen 518003, China; 4 College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Highsludge[®] process is integrated with facultative anaerobic stage and aerobic stage, and characterized by high MLSS and low DO. Pilot-scale experiment with capacity of 300 m³/d was carried out to treat municipal wastewater in Luofang Wastewater Treatment Plant of Shenzhen. When the influent COD, BOD₅, SS, TN are 431 to 484 mg/L, 167 to 192 mg/L, 504 to 611 mg/L and 37.12 to 47.85 mg/L respectively, the effluent concentrations are 15.7 to 18.3 mg/L, 2.7 to 3.3 mg/L, 6 to 7 mg/L and 6.13 to 8.51 mg/L respectively. This process has better SND effect, and TN removal by SND is up to 40% in the total removal. SND happens mainly in the first zone of aerobic tank with the TN removal of 3.03 mg/L. Due to high MLSS, this process can effectively remove TN and other pollutants at short HRT with less sludge yield.

Key words: Highsludge[®] process; urban wastewater; high MLSS; nitrogen removal

Highsludge[®] 城市污水高浓度活性污泥低溶解氧短时深度脱氮工艺,是中国市政工程西南设计研究院的发明专利技术,它在兼氧、好氧组合的 MLE 流程基础上,采用高浓度活性污泥和低溶解氧的技术手段,确保了同步硝化反硝化(SND)的稳定发生,在相当短的水力停留时间下达到了较高的总氮去除率,同时相当有效地去除氨氮、总磷等污染物,且剩余污泥量较少、运行成本低。

笔者结合深圳市罗芳污水处理厂的深度处理及回用工程进行了现场中试研究,并于 2008 年 2 月 25 日—4 月 29 日进行了两次高浓度活性污泥试验(简称试验 1、2),作为对比,还进行了一次常规浓度活性污泥试验(简称常规试验)。试验 1:MLSS 在 8 73 g/L 左右,HRT 约为 8 32 h,好氧前段的 DO 在 0.9 mg/L 左右,出水 TN 稳定在 6 13 mg/L 左右;试验 2:MLSS 约为 9 56 g/L,缩短 HRT 到 6 48 h 左右,好氧前段的 DO 约为 1.0 mg/L,出水 TN 稳定在 8 51 mg/L 左右。

1 试验概况

1.1 工艺流程

中试流程如图 1 所示。

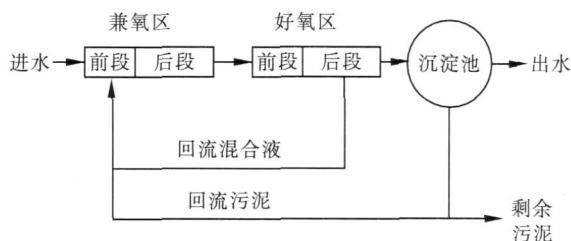


图 1 中试工艺流程

Fig 1 Flow chart of pilot-scale experiment

中试流程模拟一期工程现有工艺,但为了强化脱氮效果,不再采用 A²/O 或 MUCT 流程,而将最前面的厌氧区改为兼氧区,成为兼氧、好氧组合的 MLE 流程。中试规模为 300 m³/d(共 2 组),装置的布置见图 2。兼氧区和好氧区皆分为前后两段,分别占生化池总容积的 15%、31%、27%、27%,其中兼氧池共占 46%,好氧池共占 54%。

中试的曝气池部分属于生物处理试验,不存在适当的模型相似律。为了将中试结果移植到生产实践,采用了“生物过程相似”,即:

生化池各段的划分及其水力停留时间与污水厂现有曝气池相同,做到微生物生长环境相似;

菌种由现有曝气池接种,做到微生物种群相似;

生化池进水从现有曝气池进水渠分流,做到待处理水质(亦即微生物养分)相似;

运行参数相似,但预留适当调整的可能性。

中试的沉淀池部分属于水和污泥两相流动试验,同样不存在适当的模型相似律。为了将中试结果应用到生产实践,采用“沉淀过程相似”,即保持表面水力负荷相近。

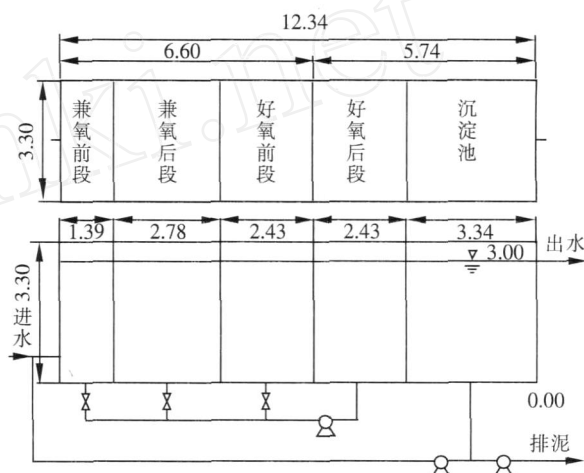


图 2 装置的布置

Fig 2 Schematic diagram of set-up

1.2 测定项目与方法

取样与检测由罗芳污水处理厂承担,按照国家相关标准,与污水厂的日常检测化验工作一并进行。现场测定各池的水温、DO,频率为 1 次/d;于每天的 8:00—20:00 取样(频率为 1 次/h),混合后测定 pH、COD、BOD₅、SS、TN、NH₃-N、TP;取好氧池混合液和回流污泥,测定 MLSS、MLVSS、SV,频率为 1 次/d。

1.3 运行参数

试验期间装置的主要运行参数见表 1。

由表 1 可见,高污泥浓度试验阶段的 MLSS 均相当高,分别为 8 73、9 56 g/L,常规试验的 MLSS 则要低得多,平均为 4 98 g/L;各阶段的 MLVSS 所占比例均较低,平均为 0.33~0.41。试验 1 的 HRT 居中,平均为 8 32 h;试验 2 的 HRT 最短,平均为

6.48 h; 常规试验的 HRT 最长, 平均为 11.83 h。

表 1 主要运行参数

Tab 1 Operation parameters of pilot-scale equipment

运行参数		试验 1	常规试验	试验 2
污泥浓度	MLSS/(mg·L ⁻¹)	8 727	4 976	9 560
	MLVSS/(mg·L ⁻¹)	3 556	1 910	3 145
	MLVSS/MLSS	0.41	0.38	0.33
HRT/h		8.32	11.83	6.48
水温/		22.1	25.9	27.1
碳氮比	COD/TN	10.09	11.21	11.46
	BOD ₅ /TN	3.96	4.54	4.49
回流比	污泥	2.25	3.01	1.82
	混合液	1.60	2.16	0.70
	总和	3.85	5.17	2.53
气水比		8.48	7.93	6.66
溶解氧/(mg·L ⁻¹)	兼氧前段	0.2	0.2	0.3
	兼氧后段	0.1	0.1	0.2
	好氧前段	0.9	0.9	1.0
	好氧后段	1.9	1.6	2.4
污泥负荷/(kg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)	TN	0.017	0.020	0.014
	NH ₃ -N	0.009	0.010	0.008
	BOD ₅	0.065	0.087	0.060
泥龄/d		7.03	3.87	5.02
沉淀池	沉淀时间/h	3.05	4.33	2.37
	表面负荷/(m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹)	0.99	0.69	1.26
	堰口负荷/(m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹)	0.91	0.64	1.16

试验期间水温逐渐升高, 各阶段的碳氮比变化不大, COD/TN > 8, BOD₅/TN > 4, 说明碳源充足。试验 1 的总回流比居中 (平均为 3.85), 常规试验的最高 (平均为 3.97), 试验 2 的最低 (平均为 2.53)。气水比逐渐降低, 溶解氧总体控制得较低, 试验 1 的溶解氧居中, 各区的溶解氧浓度依次为 0.2、0.1、0.9、1.9 mg/L; 常规试验的溶解氧略低, 各区的溶解氧值分别为 0.2、0.1、0.9、1.6 mg/L; 试验 2 的溶解氧略高, 各区依次为 0.3、0.2、1.0、2.4 mg/L。

试验期间 TN 负荷总体控制得相当低, 为 0.014 ~ 0.020 kg/(kgMLSS·d); 泥龄也普遍偏低 (3.87 ~ 7.03 d), 这是由于进水 SS 较高、HRT 较短所致。试验 1 的沉淀池表面水力负荷居中, 平均为 0.99 m³/(m²·h); 常规试验的最低, 平均为 0.69 m³/(m²·h); 试验 2 的最高, 平均为 1.26 m³/(m²·h)。

2 处理效果

试验期间的进、出水水质见表 2。

表 2 进、出水水质

Tab 2 Quality of influent and effluent

项 目		试验 1	常规试验	试验 2
pH	进水	7.73	7.77	7.75
	出水	7.59	7.66	7.67
COD/(mg·L ⁻¹)	进水	484	467	431
	出水	18.3	15.7	16.2
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	进水	192	187	167
	出水	3.1	2.7	3.3
SS/(mg·L ⁻¹)	进水	504	603	611
	出水	6	6	7
TN/(mg·L ⁻¹)	进水	47.85	42.38	37.12
	出水	6.13	10.96	8.51
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	进水	26.32	23.26	20.01
	出水	0.85	0.35	1.21
TP/(mg·L ⁻¹)	进水	6.85	6.90	6.04
	出水	0.47	0.32	0.51

由表 2 可见, 进水呈弱碱性, 有利于生物硝化反应, 出水 pH 值也非常稳定, 下降幅度非常小, 仍呈弱碱性, 说明处理过程中反硝化充分, 使碱度得以恢复; 进水 COD 在 431 ~ 484 mg/L 之间, 出水稳定在 15.7 ~ 18.3 mg/L; 进水 BOD₅ 较高, 平均为 167 ~ 192 mg/L, 出水则稳定在 2.7 ~ 3.3 mg/L; 进水 SS 为 504 ~ 611 mg/L, 出水 SS 为 6 ~ 7 mg/L; 进水 TN 为 37.12 ~ 47.85 mg/L, 试验 1 的出水 TN 最低, 试验 2 的居中, 常规试验的最高; 进水 NH₃-N 为 20.01 ~ 26.32 mg/L, 出水为 0.35 ~ 1.21 mg/L; 进水 TP 为 6.04 ~ 6.90 mg/L, 出水 TP 为 0.32 ~ 0.51 mg/L。

总体来说, 试验 1 的进水污染物浓度最高, 常规试验和试验 2 的依次略有降低; 试验 1 对 TN 的去除效果最好, 然后依次为试验 2 和常规试验, 对于其他指标则各阶段的除污效果差别不大。

3 讨论

3.1 脱氮效果

Highsludge® 工艺的除污效果好, 特别是脱氮效果极佳, 优于污水厂现有工艺 (见图 3)。

由表 1、2 可知, 尽管高浓度活性污泥工艺在试验期间的 HRT 比常规试验的短很多, 但出水 pH、COD、BOD₅、SS、NH₃-N、TP 相差不大, 均达到了一级 A 排放标准。值得注意的是, 两个高浓度活性污泥试验对 TN 的去除效果极佳, 在 HRT 为 8.32 和 6.48 h 的条件下, 出水 TN 只有 6.13 和 8.51 mg/L, 远优于用作对比的常规活性污泥试验。

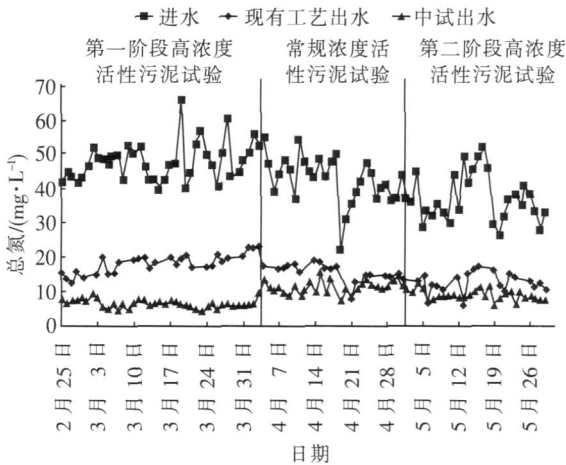


图 3 中试装置与污水厂现有工艺去除 TN 的效果比较
Fig 3 Comparison of TN removal between pilot-scale equipment and Luofang WWTP

两个高浓度活性污泥试验均取得了极佳的 TN 去除效果,最根本的原因是采用了高浓度的活性污泥。在同样的污泥负荷下,增加活性污泥浓度能够提高系统的处理能力。而在污染物负荷相同时,高污泥浓度能够降低系统的负荷,可以得到更好的处理效果。该原理显而易见,唯一担心的是沉淀池的承受能力。但是,整个试验期间的出水 SS 良好,MLSS 可以维持在 10 g/L 左右,并未观察到任何对沉淀池正常运行不利的现象,证明普通沉淀池可以承受高浓度活性污泥。

按照《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)的规定,宜使二沉池的固体负荷 $\leq 150 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。而高浓度活性污泥试验中二沉池的固体负荷分别为 676、818 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,作为对比的常规浓度活性污泥试验的固体负荷也达到了 330 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,虽均大大超出规范的限度,但仍能正常运行,说明规范中关于固体负荷的规定可以修正。

3.2 同步硝化反硝化的控制条件

3.2.1 同步硝化反硝化的确认

试验期间对 TN 的去除率见图 4。

试验 1 对 TN 的去除率为 82.24% ~ 93.05%,平均为 86.99%;试验 2 对 TN 的去除率为 63.88% ~ 83.62%,平均为 76.60%;常规试验对 TN 的去除率最低,在 62.31% ~ 83.92% 之间,平均为 73.52%。

由图 4 可知,高 MLSS 试验的实际 TN 去除率比理论去除率分别高约 8%、5%,而常规 MLSS 试验的实际 TN 去除率比理论去除率低约 10%。由于理论

去除率建立在理想的完全硝化和完全反硝化假定之上,系统的实际 TN 去除率一般应低于理论去除率。高 MLSS 试验的实际 TN 去除率超过理论去除率,表明其中不仅发生了一般的硝化、反硝化过程,而且发生了同步硝化反硝化(SND)过程。

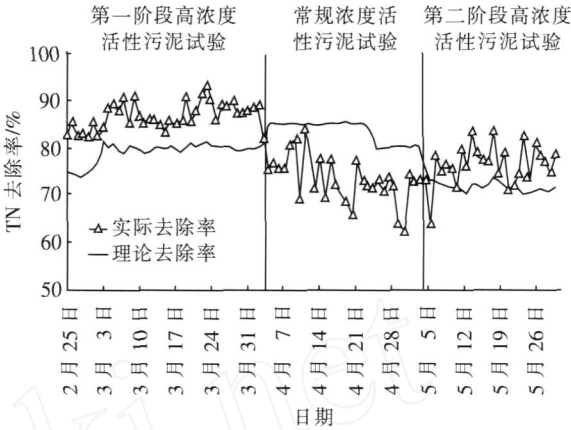


图 4 对 TN 的实际去除率和理论去除率
Fig 4 TN removal by Highsludge®

通过分析高 MLSS 试验中氮的沿程转化情况,发现 SND 主要发生在好氧区的前段。进水被回流混合液和回流污泥稀释后,平均 TN 浓度从 46.60 mg/L 降到 13.83 mg/L,再经过兼氧前段、兼氧后段、好氧前段、好氧后段处理后,依次降至 10.33、9.00、5.97、5.78 mg/L。兼氧前段的反硝化效果显著,使 TN 降低了 3.50 mg/L,兼氧后段的反硝化效果差些,仅降低 1.33 mg/L;在好氧前段 SND 使 TN 降低了 3.03 mg/L,好氧后段又使其降低了 0.19 mg/L。可见,反硝化和 SND 分别使 TN 减少了 4.83、3.22 mg/L,同步硝化反硝化效果非常显著。

3.2.2 发生同步硝化反硝化的条件

高 MLSS 是发生 SND 最重要的条件,其次是较低的 DO 水平,只有二者同时满足才能确保 SND 的稳定发生。试验期间,MLSS 与超额 TN 去除率(实际去除率 - 理论去除率)的关系见图 5。

由图 5 可见,超额 TN 去除率随 MLSS 的增加而增加。当 MLSS 为 7.3 g/L 时,超额 TN 去除率为零;当 $\text{MLSS} > 7.3 \text{ g/L}$ 时,超额 TN 去除率 > 0 ,表明有 SND 发生。因此,确保 SND 发生的临界 MLSS 浓度是 7.3 g/L。

试验 1、2 的 DO 较低,表明较低的 DO 水平也是发生 SND 的重要条件^[1-5],但并非充分条件,因为常规试验的 DO 也较低,却并未发生 SND。

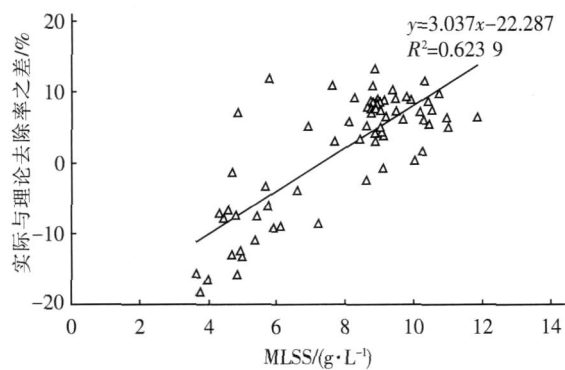


图 5 MLSS 与超额 TN 去除率的关系

Fig 5 Relation between MLSS and extra TN removal rate

将整个系统的 DO 控制在较低水平,有利于反硝化菌的生长,并提高其活性。其中最重要的是将好氧前段的 DO 控制在较低水平 (0.9~1.0 mg/L),因为 SND 可能在这里发生。

3.3 剩余污泥量

许多研究者认为,污水中的污染物是由不同粒径的非溶解性组分和溶解性组分构成的^[6,7]。在好氧生物处理中,粒径>0.1 μm 的颗粒基本未被降解;在厌氧生物处理中,粒径<1 μm 的颗粒可被降解,粒径>100 μm 的颗粒基本未被降解。粒径为 0.1 μm 是污水中污染物可生物处理性能的重要界限,占总量 30%左右的粒径<0.1 μm 的有机污染物是溶解性的,易于生物降解;粒径>1 μm 的有机污染物是非溶解性的,难于生物处理。

生物处理过程中固体的降解量和产生量均相对较少,而且可以部分抵消,排出的剩余污泥其实主要是进水带入的 SS,剩余污泥量应该接近于进水带入的 SS 量。整个试验期间排出的剩余污泥量平均为 115.32 kg/d,进水带入的 SS 量平均为 103.53 kg/d,二者仅相差 10%,说明情况的确如此。

若剩余污泥量大于进水带入的 SS 量,则说明生物处理过程中固体的产生量大于降解量;若二者相等,则产生量等于降解量,污泥量不变;若前者小于后者,则产生量小于降解量,污泥净降解。

试验期间的比排泥量(排泥量/进水量)和进水 SS 见表 3。

由表 3 可见,两个高 MLSS 试验的比排泥量均小于常规试验的,说明高浓度活性污泥工艺的剩余污泥量较少。而且,其比排泥量均明显小于进水 SS,表明处理过程中污泥发生了净降解。而常规试

验的比排泥量略大于进水 SS,表明处理过程中污泥为略微净产生。在高浓度活性污泥工艺中剩余污泥量较少的原因,应该是在处理过程中污泥被微生物消化较多,而在常规浓度活性污泥的处理中则消化得较少。

表 3 比排泥量和进水 SS

Tab 3 Specific discharged sludge and influent SS
mg·L⁻¹

项 目	试验 1	常规试验	试验 2
进水 SS	507	603	611
比排泥量	415	621	502

3.4 泥龄

如果进水 SS 较高,则由进水带入的 SS 总量大,固体的降解量和产生量可以忽略,则剩余污泥量等于输入的 SS 量,泥龄可近似表示为:

$$\theta \approx \frac{MLSS}{SS} HRT$$
 (1)

显然,泥龄受到 MLSS、HRT 和进水 SS 的直接影响,MLSS、HRT 越大则泥龄越长,进水 SS 越大则泥龄越短,泥龄其实无法独立控制。试验期间按阶段平均排泥量计算的泥龄和按式(1)估算的泥龄见表 4。

表 4 按排泥量计算的泥龄与公式估算结果的比较

Tab 4 Comparison of sludge age between different calculation methods

项 目	试验 1	常规试验	试验 2
按阶段平均排泥量计算	7.03	3.87	5.02
阶段平均值按公式估计	5.95 (-15%)	3.85 (-1%)	4.20 (-16%)
每日公式估计的平均值	6.45 (-8%)	4.26 (+10%)	5.26 (+5%)

注: 括号内为按公式估算的结果与按阶段平均排泥量计算结果的偏差。

由表 4 可见,按公式估算的泥龄与按阶段平均排泥量计算得到的泥龄接近,误差在 16% 以内。一般认为泥龄对于处理效果相当重要,短泥龄对世代时间长的细菌生长不利。试验期间,系统在相当短的泥龄下也能取得很好的处理效果,笔者认为原因是进水带入了大量细菌,其中包括世代时间长的细菌,故泥龄的影响并不显著。

4 与有关工艺的比较

国内外现有的活性污泥法的污泥浓度 (MLSS) 一般在 3.5 g/L 左右。《室外排水设计规范》(GB

50014—2006)推荐的活性污泥工艺的 MLSS 均在 6 g/L 以下,其中 MLE 脱氮工艺和 A^2/O 法的 MLSS 均为 2.5~4.5 g/L,比本工艺的 MLSS 值低很多。

近年出现的膜生物反应器,用膜分离设备代替了沉淀池,其 MLSS 也可以达到 6 g/L 以上。但是,膜生物反应器不采用普通沉淀池,是活性污泥处理与膜处理相结合的技术,已不属于单纯的活性污泥法,与本工艺不属于同一类型。

《室外排水设计规范》推荐 MLE 法的水力停留时间为 8~16 h, A^2/O 法的为 7~14 h,显然,如果要求深度脱氮,则水力停留时间只能分别取其上限,大大超过本工艺。

在水环境联合会、美国土木工程师协会出版的《城市污水处理厂设计》中,介绍了典型的生物营养去除系统(如 OrbalTM Bionutre、改进型 Bardenpho、UCT、PhoStripTM等)的设计参数,其中 MLSS 为 2~6 g/L,水力停留时间为 8.5~24 h,如果要求深度脱氮,则水力停留时间同样只能分别取其上限,大大超过本工艺。

国内外现有活性污泥法的好氧区的溶解氧一般在 3 mg/L 左右,《室外排水设计规范》规定好氧区的溶解氧一般应不小于 2 mg/L,高于本工艺。

综上所述,国内外现有的城市污水活性污泥处理工艺的 MLSS 值均低于本工艺,故其处理污水的微生物数量不及本工艺,处理效率也不如本工艺。而且高 MLSS 使得部分污泥易被好氧消化,污泥产量会有所下降。同时,现有深度脱氮工艺的水力停留时间均大大超过本工艺,故其生化池的容积和投资较大。此外,其好氧区的溶解氧也高于本工艺,不利于反硝化微生物的生长,故其处理效果不如本工艺,处理能耗和成本也必然高于本工艺。

5 结论

在深圳市罗芳污水处理厂对 Highsludge[®] 工艺进行了规模为 300 m³/d 的中试研究,在较低的溶解氧下实现了深度脱氮。在进水 COD、BOD₅、SS、TN 分别为 (431~484)、(167~192)、(504~611)、

(37.12~47.85) mg/L 的条件下,出水浓度分别为 (15.7~18.3)、(2.7~3.3)、(6~7)、(6.13~8.51) mg/L。

Highsludge[®] 工艺的同步硝化反硝化效果显著,其去除的总氮约占总去除量的 40%。

同步硝化反硝化主要发生在好氧池的前段,其去除的总氮量为 3.03 mg/L。

参考文献:

- [1] United States Environmental Protection Agency Office of Water Biological Nutrient Removal Processes and Costs [M]. Washington, DC: EPA, 2007.
- [2] 彭赵旭,彭永臻,吴昌永,等.曝气量对 SBR 工艺同步脱氮除磷的影响研究[J].中国给水排水,2008,24(3):13-16.
- [3] 邹联沛,张立秋,王宝贞,等. MBR 中 DO 对同步硝化反硝化的影响[J].中国给水排水,2001,17(6):10-14.
- [4] Collivignarelli C, Bertanza G. Simultaneous nitrification - denitrification process in activated sludge plants: Performance and applicability[J]. Water Sci Technol, 1999, 40(4-5):187-194.
- [5] 王振江,武鹏崑,毕学军.倒置 A^2/O 生物脱氮除磷工艺的生产性试验[J].中国给水排水,2006,22(19):36-38.
- [6] Ericsson B. Activated sludge characteristics in a phosphorus depleted environment[J]. Water Res, 1988, 22(2):151-162.
- [7] 周克钊.生物/化学(BC)法处理城市污水研究[J].中国给水排水,2000,16(10):13-17.

作者简介:周克钊(1948-),男,四川成都人,教授级高工,主要从事给排水设计和环境水力学研究。

电话:13980019981

E-mail:zhoukezhao@126.com

通讯地址:518003 深圳市深南东路 1110 号福德花园 B 座 3 楼

收稿日期:2008-09-10