

反硝化除磷工艺效能与运行控制

王春英¹, 隋 军²

(1. 嘉应学院化学系, 广东 梅州 514015; 2. 广州市市政工程设计研究院, 广东 广州 510060)

摘 要: 采用反硝化除磷工艺进行生产性试验处理城市污水, 结果表明: 该工艺处理城市污水可以达到 GB18918—2002 一级标准, DPB 污泥沉降性能良好, 污泥浓度控制在 4500 ~ 5500 mg/L 时确定的污泥回流比为 20 ~ 35%, 最佳水力停留时间为: 厌氧段 0.5 ~ 1h, 缺氧段 1.5 ~ 2h; 缺氧段后面的再曝气段有利于污泥沉降并可保证除磷效果。

关键词: 反硝化除磷; 除磷脱氮; 工艺参数; 运行控制

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673 - 9655 (2009) 03 - 0084 - 03

《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918 - 2002) 的颁布和实施, 要求大部分污水处理厂具备脱氮除磷的功能。现在城市污水的 COD 呈不断下降趋势, 如何有效利用污水中有限的碳源达到污水除磷脱氮的目的成为污水处理研究的热点。反硝化除磷工艺利用反硝化聚磷菌达到同时脱氮除磷的目的, 即一碳二用——需要利用有机物的反硝化与吸磷两个阶段在同一个过程中完成。目前大部分研究以反硝化除磷机理、影响因素等为主^[1~7], 所用试验用水多为模拟污水或自配水, 未见应用于实际污水。模拟污水和人工配水中人为控制多种条件, 无法再现实际污水处理中微生物组成的生态系统与实际污水间错综复杂的关系, 经常出现与实际生产中观测不符的情况^[8]。本研究以反硝化除磷工艺进行生产性试验, 连续进出水处理城市污水, 旨在为该工艺应用于生产实践提供有价值的工艺运行参数。

1 试验装置与材料

1.1 试验装置

试验装置自制, 工艺流程如图 1 所示。

厌氧区采用机械搅拌, 容积 4.1 m³; 快沉池面积 1.8 m²; 硝化池采用膜法, 投加悬浮生物填料, 设微孔曝气头, 鼓风机曝气, 容积 7.6 m³; 反硝化区采用机械搅拌, 容积 7.6 m³; 小曝气区设微孔曝气头, 鼓风机曝气, 容积 0.8 m³; 二沉池面积 3.2 m²。

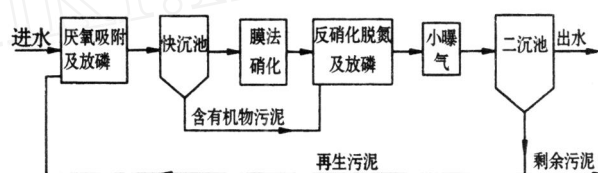


图 1 反硝化除磷工艺流程图

1.2 流程说明

反硝化除磷工艺中存在反硝化聚磷污泥、硝化污泥二个菌群系统, 它们各自独立存在。反硝化聚磷污泥主要去除有机物、磷并负责进行反硝化脱氮, 硝化污泥系统主要进行硝化, 把氨态氮转化成硝酸盐氮。

在厌氧区, 含反硝化聚磷菌的活性污泥利用聚磷水解及细胞内糖酵解获得能量, 用于吸收污水中的有机碳源 (COD) 以 PHA 形式储存, 同时释放 PO_4^{3-} ; 然后在快沉池中进行泥水快速分离; 已降低有机物含量的上清液在膜法硝化池进行好氧硝化; 硝化后含硝酸盐的污水与前述吸附了有机物的反硝化聚磷菌活性污泥混合, 以硝酸态的氧作氧化剂 (电子受体)、以吸附的有机物作碳源进行反硝化, 同时吸收溶液中的磷酸盐; 也可以说利用硝化产生的硝态氧完成除磷脱氮及污泥再生过程。反硝化吸磷后的泥水混合液再经 5 ~ 15 min 曝气吹脱氮气后沉淀出水达标排放, 污泥则回流至厌氧区, 富磷剩余污泥排放。这样氮转变成氮气从污水中去除, 磷通过富磷污泥的排放从系统中去除, COD 则主要通过厌氧 - 缺氧循环去除。

1.3 实验用水与活性污泥

试验用水采用城区城市污水, 污水水质如表 1 所示。试验所用污泥利用污水中携带的细菌进行筛

收稿日期: 2008 - 10 - 23

作者简介: 王春英, 女, 哈尔滨工业大学环境工程专业研究生毕业, 硕士学位。现为工程师, 在嘉应学院化学系工作, 从事污水脱氮除磷及其他水处理技术的研究。

选培养，即创造特定的生存环境（厌氧、好氧或缺氧），进行自然选择，通过适者生存来培养每个反应器中的优势菌群。试验启动 3 个月后，硝化段具备硝化功能，反硝化聚磷菌逐渐在活性污泥中成为优势菌群。

表 1 污水水质 (mg/L)		
水质指标	数值	平均值
pH	7.2 ~ 7.6	7.4
COD	40 ~ 226	127
BOD	13 ~ 89	48
NO ₃ ⁻ - N	0.21 ~ 1.45	0.71
NH ₄ ⁺ - N	9.51 ~ 22.40	16.07
TN	11.90 ~ 25.52	19.04
PO ₄ ³⁻ - P	1.12 ~ 2.33	1.82
TP	0.96 ~ 2.26	2.11

1.4 测试指标及方法

表 2 测试指标及方法			
测试指标	分析方法	测试指标	分析方法
BOD	BOD测定法	COD	重铬酸钾法
TP	紫外分光光度法	TN	紫外分光光度法
PO ₄ ³⁻ - p	钼蓝分光光度法	NH ₄ ⁺ - N	纳氏试剂法
NO ₃ ⁻ - N	分光光度法	pH	pH计
T	温度计	DO	溶解氧分析仪

2 结果与讨论

2.1 反硝化除磷工艺处理城市污水的效果

在系统稳定运行时，进水 COD 为 89 ~ 173mg/L，总氮为 20.5 ~ 21.3mg/L，氨氮为 18.2 ~ 20.6mg/L，总磷为 1.68 ~ 2.51mg/L 时，出水各项指标分别为 COD ≤ 22mg/L，总氮 ≤ 5.22mg/L，氨氮 ≤ 3.97mg/L，总磷 ≤ 0.2mg/L。氨氮平均去除率达到 73%，总磷去除率达到 95%。处理出水水质达到了国家一级 A 类标准。

雨天时（合流制排水系统），系统的处理水磷超标。例如 8 月 17 日进水 COD 为 40mg/L、氨氮为 9.35mg/L、总磷为 0.95mg/L 时，出水 COD 为 16mg/L，氨氮为 2.93mg/L，总磷为 0.99mg/L。由于雨水的汇入，污水 COD 严重偏低，硝化系统为生物膜法，独立运行，可以正常进行硝化，出水氨氮可以达标排放；但因碳源缺乏不能保证正常的反硝化聚磷导致出水磷超标，甚至出现磷的释放使出水磷浓度略高于进水磷浓度。

试验表明反硝化除磷工艺处理低碳城市污水可以达标排放，但合流制污水系统在雨天时出水磷浓度超标。建议在新建城市或市区应尽量采用分流制，避免雨水汇入导致污水厂处理水不达标；对于已建污水厂可以考虑设置备用化学除磷设施或雨天对污水投加人工碳源。

2.2 水力停留时间

水力停留时间（HRT）不但直接影响污水厂的占地规模和基建费用，还影响到各种污染物的去除效果，合理地确定停留时间十分必要。

对于反硝化除磷工艺，好氧硝化段的 HRT 只要保证充分硝化即可，可参考传统脱氮工艺，本试验膜法硝化池中 HRT 为 1.5 ~ 2h；厌氧段反硝化聚磷菌吸附转化 COD 的同时充分释放磷为下一步吸磷作准备，在缺氧段则要有足够的吸磷时间，以保证出水磷浓度足够低达到排放标准，但缺氧段时间过长会导致磷的二次释放。试验确定的最佳 HRT 为：厌氧段 0.5 ~ 1h，缺氧段 1.5 ~ 2h。

2.3 污泥浓度的控制

活性污泥是反应的主体，污泥浓度（MLSS）对于运行控制和设计等有很大影响。较高的 MLSS 可以提高反应速率、减小处理构筑物的容积，但污泥沉淀分离困难；较低的 MLSS 易于沉淀分离，但反应速率低、增加处理构筑物容积。在本试验中，硝化段采用生物膜法不必控制污泥浓度，厌氧—缺氧系统则要合理控制污泥浓度。

在试验中，笔者发现反硝化聚磷污泥（DPB 污泥）具有良好的沉降性能，测定其容积指数 SVI 为 34 ~ 43。Kuba（1993）进行 A₂ SBR 与 A/O SBR 对比时测得 A₂ SBR 的 SVI 为 50%，与笔者的结果接近；他同期测得的 A/O SBR 的 SVI 为 100%^[9]。可见 DPB 污泥与传统工艺的活性污泥相比具有良好的沉降性能，因此试验中把污泥浓度控制在较高范围 4400 ~ 5800mg/L，在此污泥浓度范围内快沉池和二沉池都能很好地进行泥水分离，同时测得的污泥 30min 沉降比 SV（%）为 18 ~ 23，沉降性能良好。由此可见反硝化除磷工艺中 DPB 污泥可以控制在较高的污泥浓度：4500 ~ 5500mg/L，这对于减小污水处理构筑物的容积十分有利。

2.4 回流比的影响

在污水的生物处理系统中，只要有活性污泥参与处理，除 SBR、Unitank 等少数工艺外都要考虑污泥回流，这就涉及到回流比的问题。一般情况下，回流比的确定不仅要满足污泥回流量的要求，而且要考虑其它的作用（稀释等）。对除磷系统还要保证最终沉淀池较短的污泥停留时间，防止磷的二次释放影响出水水质。

在反硝化除磷系统运行中，笔者发现内回流比（初沉池回流到缺氧反硝化段）对出水氨氮有很大的影响。在系统启动运行中曾有一异常的现象：硝

化池中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 由 24.72mg/L 降至 5.54mg/L, 硝化率达到 78%, 但出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 仍高达 15.6mg/L。经 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平衡分析发现, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的升高是由内回流夹带大量原污水中未经硝化的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 引起的, 后来减小内回流出水氨氮才达到低浓度。

由于反硝化聚磷污泥具有良好的沉降性能, 回流比可以控制得较小。笔者试验确定的内回流比为 20 ~ 25%, 外回流 (二沉池回流到厌氧段) 为 30 ~ 35%。外回流在 20 ~ 25% 时也能保证正常的污泥浓度, 确定的外回流比大是考虑增大相对进水量来减少内回流携带原水中氨氮对出水水质的影响。初沉池出水有机物浓度高于硝化段出水, 因此当出水氨氮能够维持在较低浓度时, 可以视情况增大内回流为缺氧反硝化吸磷提供较多有机物。污泥内外回流比的确定应该根据具体情况实际调控。

2.5 小曝气的作用

反硝化除磷工艺系统的小曝气池是指介于反硝化池与二沉池之间的曝气, 本试验中其容积仅为 0.8m³, 污水水力停留时间为 5 ~ 15min。Kuba (1993) 曾指出 Wanner 的新工艺中的再曝气段不是必须具备的, 在 1996 年提出反硝化除磷系统时同样省去了再曝气段^[9,10]。不过笔者在试验中发现再曝气段对于反硝化除磷工艺达到完全脱氮除磷及去除 COD 是不可缺少的。

首先, 吹脱曝气可吹脱反硝化产生并附着于活性污泥上的氮气, 利于污泥沉降。当污水与污泥混合液的硝酸盐量达到一定浓度后, 反硝化产生的氮气附着在污泥上引起污泥漂浮, 不易沉降, 恶化出水水质。未经曝气吹脱的混合液静沉后泥水界面凹凸不平, 污泥上浮常出现量筒中上部、下部均有泥, 用 100ml 量筒测定 SV 时, 0ml ~ 25ml 刻度线之间、75ml ~ 100ml 刻度线之间均有污泥 (75 ~ 100ml 间的污泥因附着氮气上浮), 中间是澄清液, 泥水不能正常分离。经吹脱后污泥沉淀性能明显改善, SV 为 20 ~ 25%。

其次, 笔者实验中发现, 当硝化段硝化能力下降或污水氮磷比例偏低时, 曝气可保证除磷效果免受硝酸盐浓度影响。DPB 污泥可利用 O₂ 及 NO₃⁻ 作电子受体, 在硝化不好或原水氨氮偏低造成

NO₃⁻ 不足引起磷吸收不完全时, 曝气能提供 O₂ 作为二级电子受体保证磷的完全吸收。

3 结论与建议

(1) 反硝化除磷工艺可有效去除低碳城市污水中的 COD、氮和磷等污染物质, 处理后出水水质达到国家一级排放标准。该工艺的污泥回流比可以控制在 20 ~ 35%, 与传统脱氮除磷工艺的大规模回流相比, 节省能耗。

(2) DPB 污泥具有良好的沉降性能, 可以控制在较高的污泥浓度 4500 ~ 5500mg/L, 在此浓度范围确定的最佳 HRT 为: 厌氧段 0.5 ~ 1h, 缺氧段 1.5 ~ 2h。

(3) 反硝化除磷工艺中的小曝气的作用有: 吹脱反硝化吸磷过程中产生的氮气; 在 NO₃⁻ - N 不足时, 提供氧气作为二级电子受体保证出水总磷达标。在工程应用中应考虑它提供二级电子受体的作用, 采用 PO₄³⁻ 在线监测适时增减曝气量。

参考文献:

- [1] 王春丽, 马放, 刘慧, 等. 泥龄对反硝化除磷效能的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2007, 38 (5) .
- [2] 张小玲. 硝酸盐浓度对反硝化聚磷菌诱导的影响 [J]. 中国给水排水, 2006, 26 (13) .
- [3] 王春英, 隋军. 反硝化聚磷机理试验 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3 (6) .
- [4] 侯金良, 康勇. 城市污水生物脱氮除磷技术的研究进展 [J]. 化工进展, 2007, 26 (3) .
- [5] 张晓洁, 周少奇, 丁进军, 等. 不同电子受体影响下的反硝化除磷过程 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2007, 35 (6) .
- [6] 荣宏伟, 彭永臻, 张朝升. 低碳城市污水反硝化除磷试验 [J]. 环境工程, 2008, 26 (1) .
- [7] 隋军. 反硝化聚磷除磷脱氮新工艺研究 [A]. 中国水污染防治技术装备论文集 [C]. 2005.
- [8] Jenkine D, Tandoi V. The applied microbiology of enhanced biological phosphate removal accomplishments and needs [J]. Wat. Res., 1996, 25 (12) .
- [9] Kuba T., van Loosdrecht M.C.M., Heijnen J.J. Biological Phosphorus removal from wastewater by anaerobic anoxic sequencing batch reactor [J]. Wat. Sci. Tech., 1993, 27 (5-6) .
- [10] Kuba T., van Loosdrecht M.C.M., Heijnen J.J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of nitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system [J]. Wat. Res., 1996, 30 (7) .

(下转第 92 页)

表 2 3种评价方法的评价结果比较

年份	熵权多目标决策法	物元分析法 ^[5]	属性识别理论方法	模糊隶属函数法
1998	富营养	极富营养	极富营养	极富营养
1999	富营养	中富营养	富营养	富营养
2000	富营养	中富营养	富营养	富营养
2001	中富营养	中富营养	中富营养	中富营养
2002	中富营养	中富营养	中富营养	中富营养

(1) 通过表 2 可知，熵权多目标决策模型在 1998 年的评价结果与物元分析法、属性识别理论方法、模糊隶属函数法的评价结果有点差异，对此应做具体分析。总体而言，熵权多目标决策模型的评价结果是令人满意的。

(2) 本方法使用简便，评价结果直观、准确可靠。对于多指标多质量等级的评价问题，可直接

引用本法编程序上机进行处理，可克服计算繁琐的不足。本方法为环境质量评价提供了一种重要手段，是值得推广使用的。

参考文献：

[1] 吴智诚，张江山，陈盛．TOPSIS法在水环境质量综合评价中的应用 [J]．水资源保护，2007，23（2）．
[2] 许丽忠，张江山，王菲凤．熵权多目标决策环境监测优化布点模型及应用 [J]．环境工程，2007，25（1）．
[3] 邱宛华．管理决策与应用熵学 [M]．北京：机械工业出版社，2002．
[4] 孔健健，张江山．属性识别理论模型在湖泊水质富营养化评价中的应用 [J]．环境工程，2004，22（5）．
[5] 饶清华，张江山．熵权物元分析模型在湖泊富营养化评价中的应用 [J]．环境工程，2006，24（6）．

Application of Multiobject Decision Model Based on Entropy Weight to Evaluate the Water Environmental Quality

Q IAN Qi - suo¹， RAO Qing - hua²

(1. Yunnan New Century Institute of Environmental Protection, Kunming Yunnan 650032 China)

Abstract: The concepts and characters of entropy and entropy weight are introduced. The multiobject decision model based on entropy weights is established by combining the entropy weight and multiobject decision model. The model is used to evaluate the water environmental quality. The assessment results are compared to that from matter element model and the attribute identify model and the fuzzy administering function. Using the multiobject decision model based on entropy weight to evaluate the water environmental quality is feasible.

Key words: entropy; entropy weight; multiobject decision; evaluation method

(上接第 86 页)

Study on Effectiveness and Control of Denitrifying Phosphorus Removal Process

WANG Chun - ying¹， SU IJun²

(1. Department of Chemistry, Jiaying University, Meizhou Guangdong 514015 China)

Abstract: Study on denitrifying phosphorus removal process used to treat municipal wastewater in a full - scale experimental system is conducted. The results show that the effluent quality can reach the first class discharge standard of GB18918 - 2002, and the DPB sludge has good capabilities in settling. When the concentration of sludge varied from 4500mg/L to 5500mg/L, the reflux ratio was controlled from 20% to 30%, and the optimum HRT is 0.5 to 1h for aerobic process and 1.5 to 2h for anoxic process. The second aeration process is propitious to precipitate the sludge and it could guarantee phosphorus removing effectiveness.

Key words: denitrifying phosphorus removal; nitrogen and phosphorus removal; technological parameter; operational control