

深床滤池在污水厂地表Ⅳ类水提标改造中的应用

杜 创¹, 雷 振², 张铁源³

(1. 合肥市地下管网建设管理办公室, 安徽 合肥 230031; 2. 赛莱默<中国>有限公司, 上海 200051; 3. 赛莱默水处理<齐利诺普尔>有限公司, 美国)

摘 要: 合肥市某污水处理厂设计排放主要指标需达到地表水环境质量Ⅳ类标准。该项目深度处理单元采用 Leopold elimi-NITE[®]反硝化深床滤池工艺, 兼顾了过滤、反硝化脱氮及除磷功能, 使污水厂出水稳定达到 $TN < 5 \text{ mg/L}$ 、 $TP < 0.3 \text{ mg/L}$ 、 $SS < 10 \text{ mg/L}$ 的目标。深床滤池设计采用弧形堰、恒液位控制及“前馈+后馈”精确碳源投加控制方式, 力求最经济的碳源投加量。

关键词: 地表Ⅳ类水; 深床滤池; 碳源投加控制

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)08-0099-05

Application of Deep Bed Filter in WWTP Upgrading Project to Meet Class IV Standard of Surface Water

DU Chuang¹, LEI Zhen², ZHANG Tie-yuan³

(1. Hefei City Underground Pipe Network Construction Administration Office, Hefei 230031, China; 2. Xylem <China> Co. Ltd., Shanghai 200051, China; 3. Xylem Water Solutions Zelienople LLC, USA)

Abstract: The effluent qualities of a wastewater treatment plant (WWTP) in Hefei City was required to meet the surface water environment quality class IV standard ($TN \leq 5 \text{ mg/L}$). The Leopold elimi-NITE[®] denitrification deep-bed filter, which is a combination of filtration, denitrification and dephosphorization processes, was applied in the WWTP. This technology could ensure the effluent quality as follows: $SS < 10 \text{ mg/L}$, $TN < 5 \text{ mg/L}$ and $TP < 0.3 \text{ mg/L}$. The curve weir and constant level control for better filter operation was installed in the deep bed filter. In addition, an advanced carbon dose control system with forward & backward was used to achieve efficient carbon usage.

Key words: surface water class IV standard; deep-bed filter; carbon source dosage control

合肥市某污水厂已建成污水处理规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (每期规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), 现阶段执行一级 A 排放标准, 近期将对一期、二期工程进行提标改造, 将污水排放标准提高到主要指标达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 的Ⅳ类标准。污水处理厂三期工程设计规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 出水设计值在达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准的基础上, 要求总磷、总氮、氨氮、COD 4 项主要指标浓度值分别不高于 0.3、5、1.5、30 mg/L, 主要指标达到地表水环

境质量Ⅳ类标准(总氮 $\leq 5 \text{ mg/L}$)。

1 设计概况

该污水厂三期工程深度处理单元采用 Leopold elimi-NITE[®]反硝化深床滤池工艺, 具有过滤去除悬浮物、微絮凝过滤除磷以及生物反硝化脱氮三种功能。反硝化深床滤池作为深度处理单元既可以作为二级生化脱氮除磷工艺的强化补充, 也可以在进水 C/N 不足、冬季水温低、生化池容积受限等不利情况下, 确保出水氮、磷含量达标, 大大提高了污水厂整体工艺运行的稳定性及灵活性。本项目作为地

表水类Ⅳ类水排放标准项目, $TN \leq 5 \text{ mg/L}$ 的要求已经超出传统二级生化处理工艺的能力范围, 在深度处理单元必须考虑脱氮功能, 经过多种深度处理工艺的比选、论证, 选择了深床滤池工艺作为深度处理的核心工艺。

污水厂主要工艺流程: 污水→粗格栅→提升泵站→细格栅→曝气沉砂池→AAO 氧化沟→二沉池→混凝反应斜板沉淀池→反硝化深床滤池→接触消毒池→达标排放。在 AAO 氧化沟, 优先利用污水中的 BOD_5 进行生物脱氮除磷, 并确保 COD 、 BOD_5 、 $NH_3 - N$ 指标达标, 深度处理单元进一步确保 SS 、 TN 、 TP 达标。

项目设计处理规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 峰值系数为 1.30。深床滤池设计 8 格, 单格尺寸为 $6.1 \text{ m} \times 18.3 \text{ m}$, 滤料层深度为 1.83 m, 反冲洗水洗强度为 $15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 气洗强度为 $91 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 设计反冲洗周期为 24~48 h, 氮气释放周期为 3~6 h, 碳源采用甲醇。深床滤池设计进、出水水质见表 1。

表 1 深床滤池设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality of deep-bed filter

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	SS	TN	TP	$NH_3 - N$	COD	BOD_5
污水厂进水	280	50	6	35	380	180
深床滤池进水	20	20	0.5	1.5	30	10
深床滤池出水	10	5	0.3	1.5	30	10

2 深床滤池工艺特征

2.1 功能特性

深床滤池为下向流重力式滤池, 采用较深的石英砂滤床, 出水 SS 可达到 5 mg/L , 较高的 SS 去除率可确保絮凝沉淀及过滤后达到 $TP \leq 0.3 \text{ mg/L}$ 的目标。滤池运行过程中二级处理出水中的微生物不断地被截留或附着在滤料间隙或表面, 为滤床提供大量的微生物菌群, 其中含有大量反硝化过程所需兼性、异养菌群, 为深床滤池进行反硝化过程提供了微生物基础, 因此反硝化深床滤池具有运行灵活、反硝化功能启动快的特点, 即使在水温较低的季节, 不需要漫长的滤料挂膜周期, 通过合理的运营管理方式可在 1~3 d 达到稳定的反硝化效果。本项目出水要求 $TN \leq 5 \text{ mg/L}$, 在深床滤池运行过程中硝态氮浓度可达到 1 mg/L 以下。

2.2 深床滤池的设计负荷

传统滤池以滤速和容积负荷作为主要设计依

据。深床滤池则需综合考虑反硝化反应速率、滤料层的截污容量、滤料层的气体截留容量等因素, 最终决定滤池的过滤面积和滤速。关键设计考量因素: ①反硝化反应速率从微生物反应动力学上计算反硝化需要的停留时间。反应速率除与水温、滤层中的反硝化细菌活性有关外, 还与反应基质(出水硝酸盐)浓度有关。在硝酸盐去除量相同的情况下, 出水硝酸盐浓度要求越低, 反应速率越慢, 所需的空床停留时间越长。由于本项目要求出水 $TN \leq 5 \text{ mg/L}$, 相对于一级 A 排放标准要求的 $TN \leq 15 \text{ mg/L}$, 深床滤池硝态氮的生物还原速率要慢很多。②为避免滤池出水波动过大, 深床滤池设计运行周期通常应大于 24 h。滤池运行周期通过滤层的截污容量与运行总固体负荷来计算, 而滤池总固体负荷又包括过滤去除悬浮物的量、除磷产生的化学污泥量、投加碳源生产的泥量。③反硝化过程中硝酸盐还原成氮气积累在滤料层中。为避免不必要的滤料水头损失, 降低反冲洗频率与能耗, 反硝化滤池需要定期进行氮气释放。该释放周期应在滤池设计过程中通过滤料层气体截留容量来计算。

2.3 配水配气系统

深床滤池不仅包含物理过滤, 也包括活性微生物的脱氮除磷过程。有效的反冲洗不仅要去除滤料层中保留的污泥, 还要保留滤料表面的活性微生物, 这对滤池的反冲洗气水分配系统提出更高的要求, 要求配备均匀无盲区的气水分配系统。Leopold elimi-NITE®反硝化深床滤池采用专利的 Type S 滤砖见图 1。

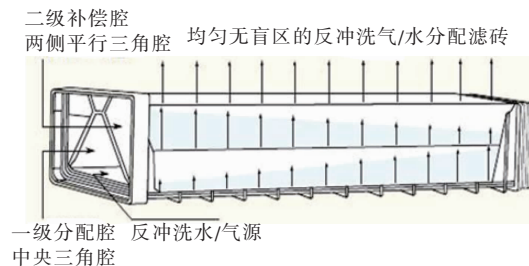


图 1 Leopold 双层两段式气水分配滤砖

Fig. 1 Leopold dual parallel lateral Type S underdrain

滤砖为双层两段式配水配气系统: 一级分配腔, 二级补偿腔。在反冲洗过程中, 在一级分配腔内反冲洗气、水压力平衡后形成气水界面, 反冲洗水通过气水界面以下隔板的配水孔进入两侧的补偿腔, 反冲洗气通过气水界面以上隔板的配气孔进入两侧

的补偿腔。通过一级分配腔后的反冲洗水在二级补偿腔内根据压力差产生逆向补偿,从而使得整个滤池过滤面积上最终的整体反冲洗水、气压力、流量均匀。Leopold 特有的二次配水设计滤砖确保反冲洗水和气体在整格过滤区域内均匀分布,反冲洗无死区,避免了滤料板结、污堵以及局部过度冲洗。滤砖采用整体 HDPE(高密度聚乙烯)材质,具有较高荷载能力。

2.4 碳源投加

本项目采用甲醇作为外加碳源,甲醇投加计算公式: $M = 2.47(\text{NO}_3^- - \text{N}) + 1.53(\text{NO}_2^- - \text{N}) + 0.87\text{DO}^{[1]}$ 。Leopold elimi - NITE[®]反硝化深床滤池采用拥有专利的“前馈 + 后馈”闭环回路碳源投加控制方式,实际运行甲醇投加量可以控制在计算值的 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 范围以内,实现经济、安全、稳定的碳源投加控制方式。通过碳源投加计算公式可知,滤池进水 DO 会消耗额外的甲醇,因此有效控制滤池进水 DO 可作为节省碳源投加费用的有效方式。

2.5 液位及溶解氧控制

深床滤池可以采用恒液位或者变液位控制方式,对于需要反硝化运行的项目,建议采用恒液位控制方式。本项目 Leopold elimi - NITE[®]反硝化深床滤池采用“弧形堰板 + 恒液位”控制方式,有效避免滤池进水因跌水带入的 DO。本项目深床滤池进水 DO 浓度在 5 ~ 6 mg/L 之间,根据 Leopold 类似项目的研究经验^[2],滤池进水中 5 ~ 6 mg/L 的 DO 在滤料表层 10 英寸(254 mm)处即降到 1 mg/L 以内,这部分滤料层内兼性微生物主要进行好氧呼吸并消耗碳源。在 50 ~ 70 英寸(1 270 ~ 1 778 mm)深度滤料层内 DO 逐步回升至 1 mg/L,这一部分 DO 主要是反硝化脱氮产氧产生的。

由此可见,深床滤池进水 DO 在合理的设计工况下对反硝化的效果及出水水质不会有大的影响,但从节省碳源投加费用的角度出发,控制整个深度处理工艺流程内额外 DO 的产生非常有意义。合理的液位控制能将滤池进水 DO 控制在 3 mg/L 左右,通过项目实测,变液位运行方式滤料层上方水中的 DO 高达 9.5 mg/L。Leopold elimi - NITE[®]反硝化深床滤池恒液位及 DO 控制方式可将滤池实际进水 DO 控制在 3 ~ 5 mg/L,有效降低滤池进水 DO 4.5 ~ 6.5 mg/L,能有效节约 20% ~ 30% 的碳源投加费用。

3 运行数据

该污水处理厂三期工程于 2015 年 12 月通过环保验收,深床滤池出水稳定达到 $\text{TN} \leq 5 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.3 \text{ mg/L}$ 、 $\text{SS} \leq 10 \text{ mg/L}$ 的设计目标。本项目设计去除 10 mg/L 硝态氮,深床滤池具有良好的抗冲击负荷,在进水硝态氮超设计值 30% 的情况下,出水硝态氮依旧能稳定达标。碳源投加控制能基于出水水质要求灵活调整,用户可以在达到环境保护要求的情况下,在人机界面设计相关参数,适当降低碳源投加量,达到环境效益与运行经济效应的最大化。深床滤池运行中进、出水硝态氮浓度见图 2,出水硝态氮浓度可低于 0.5 mg/L。

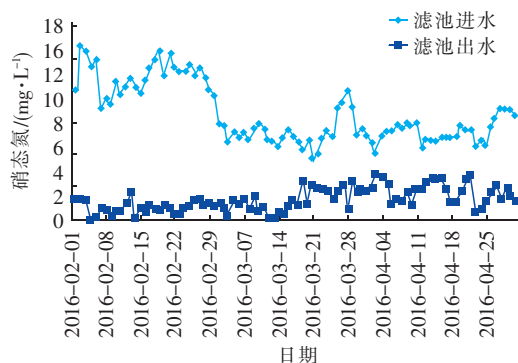


图 2 深床滤池进、出水硝态氮

Fig. 2 The influent and effluent nitrate of deep-bed filter

深床滤池运行出水总氮及氨氮浓度见图 3。

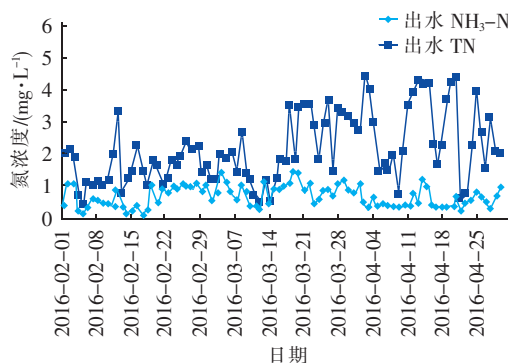


图 3 深床滤池出水总氮及氨氮

Fig. 3 The effluent TN and ammonia nitrogen of deep-bed filter

在二级生化处理 AAO 工艺单元出水 $\text{NH}_3 - \text{N} \leq 1.5 \text{ mg/L}$,深床滤池进水 TN 约 10 ~ 20 mg/L 的情况下,Leopold elimi - NITE[®]出水 TN 可稳定达到 5 mg/L 以内,同时具备 $\text{TN} \leq 3 \text{ mg/L}$ 的能力,为用户系统的灵活控制留有充分的空间。

深床滤池采用较深的固定滤床,过滤效果好,出

水 SS 可达 7 mg/L, 在前端混凝沉淀池运行良好的情况下, $SS \leq 5$ mg/L。通过过滤去除混凝阶段形成的含磷悬浮物, 在保障 $SS \leq 5$ mg/L 的前提下, 深床滤池可保证 $TP \leq 0.3$ mg/L。本项目深床滤池设计出水 $SS \leq 10$ mg/L, 实际运行 SS 约 4 ~ 7 mg/L, TP 出水稳定小于 0.3 mg/L。深床滤池出水 SS 及 TP 浓度见图 4。

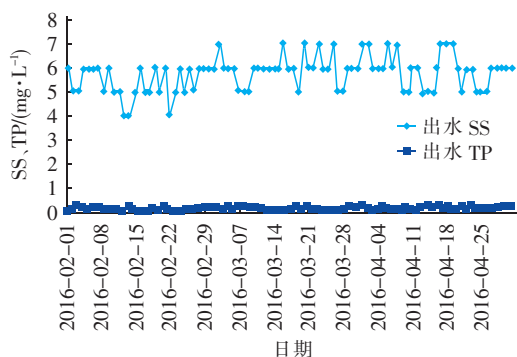


图4 深床滤池出水 SS 及 TP

Fig. 4 The effluent SS and TP of deep-bed filter

深床滤池出水 COD 及 BOD_5 浓度见图 5。

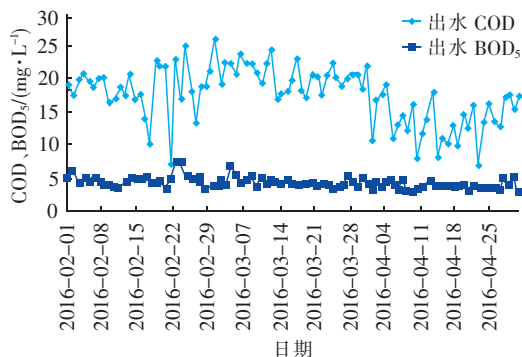


图5 深床滤池出水 COD 及 BOD_5

Fig. 5 The effluent COD and BOD_5 of deep-bed filter

本项目设计出水 $COD \leq 30$ mg/L、 $BOD_5 \leq 10$ mg/L。滤池进水 COD 约为 30 mg/L, 投加甲醇量相当于 20 ~ 50 mg/L 的 COD。通过图 5 可见, 出水 COD 均低于 30 mg/L, 证明投加甲醇均被滤层内反硝化兼性菌群所消耗。相对于一级 A 排放标准要求的 $TN \leq 15$ mg/L, 本项目 $TN \leq 5$ mg/L 对碳源投加系统要求更严格: 前者碳源过量投加时, 反硝化细菌会继续消耗碳源, 所以出水 COD 超标的风险较低。而由于本项目出水硝态氮已经很低, 属于完全反硝化反应, 长期过量投加碳源有较高出水 COD、 BOD_5 超标的风险。通过项目验证, Leopold elimi - NITE® 通过“前馈 + 后馈”闭环回路精确碳源投加控

制方式是稳定可靠的。未来用户可以通过后反馈修正碳源投加量, 结合具体出水水质要求做到最经济节省的碳源投加量。

4 项目重点难点分析

4.1 仪表的稳定性

本项目属于污水厂出水主要指标达到 IV 类水排放标准项目, 出水 COD、 BOD_5 及 TN 排放要求均很严格。作为后置式反硝化滤池, 深床滤池属于末端处理工艺, 对系统的精确控制提出了更高的要求。Leopold elimi - NITE® 反硝化深床滤池碳源投加控制系统的可靠性在本项目中得到验证。精确的碳源投加控制需要依靠比较准确的仪表测量值, 本项目初期采用的离子电极法硝态氮分析仪数据可靠性很差, 后更换为 UV 法硝态氮分析仪测量数据较可靠、稳定。硝态氮作为主要出水与系统控制指标, 其分析仪选型尤为重要, 品牌、测量原理、量程、安装方式、安装位置的选择都会影响到仪表测量的稳定性和可靠性。同时因滤池进水投加了碳源, 在仪表探头上比较容易附着生物膜, 影响测量值, 建议仪表探头配置超声波和压缩空气单元。为了提高碳源投加的可靠性和经济性, 建议定期清洗、校正仪表探头。

4.2 节省碳源投加量

在污水厂总进水 C/N 不足时, 为了提高二级生化处理系统的脱氮效率, 需要向缺氧池投加碳源, 在深度处理采用反硝化深床滤池之后, 污水厂运行灵活性提高, 除了 AAO 工艺具有脱氮除磷功能以外, 深床滤池可以进一步脱氮除磷, 在末端进行反硝化, 将碳源投加点放在滤池进水。

碳源投加费用是深床滤池反硝化最主要的运行费用, 本项目碳源投加控制系统在仪表可靠的前提下, 能做到碳源精确投加, 但碳源的消耗包括两部分: 一是硝态氮反硝化所需碳源, 另一部分是滤池进水溶解氧所消耗的碳源。通过前面介绍 Leopold elimi - NITE® 反硝化深床滤池采用“弧形堰板 + 恒液位控制”的方式降低了因进水 DO 造成的运行碳源投加量, 本项目实际滤池进水 DO 约 5 ~ 6 mg/L, 二沉池上方出水 DO 约 0.5 mg/L, 从二沉池出水到滤池进水 DO 还有控制的空间, 可以进一步降低深床滤池的碳源投加量。经过本项目实测及论证, 二次提升泵房采用稳定、合理的运行液位, 二次提升泵采用淹没式出流方式, 滤池进水 DO 有望控制在 3 mg/L 左右。相对于不采取任何控制, 滤池进水 DO 约

9.5 mg/L 的运行方式,同样去除 5 mg/L 的硝态氮,所需的甲醇量分别约为 15 mg/L 和 21 mg/L,由此可见,合理的液位及 DO 控制措施可节省 20% ~ 30% 的碳源投加费用。

5 结论

① 基于该项目的连续运行经验,反硝化深床滤池作为污水厂深度处理工艺,可确保污水厂出水稳定达到 $TN < 5 \text{ mg/L}$ 、 $TP < 0.3 \text{ mg/L}$ 、 $SS < 10 \text{ mg/L}$,可为当前国内水环境敏感流域污水处理厂提标改造提供借鉴。

② 基于当前的仪表及自动化控制水平,可以较精确地实现污水厂后置反硝化滤池碳源投加的控制,做到滤池进、出水 COD、 BOD_5 不升高,当然对仪表的选型经验及运行维护管理水平有较高要求。

③ 从深度处理系统流程上的液位及 DO 控制能有效降低滤池进水 DO,良好的工艺控制水平可节省 20% ~ 30% 碳源投加量,从而降低深床滤池的运行费用。

参考文献:

[1] EPA/625/R-93/010, Manual Nitrogen Control[S]. USA;

EPA,1993.

- [2] Zhu I, Sen D, Vegso E, *et al.* Full scale denitrification filtration and process modeling using a steady state mathematical framework[J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2011, (10): 5354 - 5371.



作者简介:杜创(1978 -), 男, 安徽萧县人, 本科, 给排水高级工程师, 从事市政排水和地下管网建设管理工作。

E-mail: rick. li@ xyleminc. com

收稿日期: 2016 - 10 - 28

(上接第 98 页)

- [5] 姚玉英, 黄凤廉, 陈常规, 等. 化工原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 2003.
- [6] Lattemann S, Höpner T. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination[J]. Desalination, 2008, 220(1/3): 1 - 15.
- [7] Dvornikov V. Seawater multi-effect distillation energized by a combustion turbine[J]. Desalination, 2000, 127(3): 261 - 269.
- [8] Khawaji A D, Kutubkhanah I K, Wie J M. Advances in seawater desalination technologies[J]. Desalination, 2008, 221: 47 - 69.
- [9] Slesarenko V. Seawater desalination in thin film plants[J]. Desalination, 1991, 81(1/3): 407 - 417.
- [10] Al-Shammiri M, Safar M. Multi-effect distillation plant: state of the art[J]. Desalination, 1999, 126(1/3): 45 - 59.



作者简介:苗超(1982 -), 男, 河北泊头人, 硕士, 工程师, 目前主要从事海水淡化节能技术研究。

E-mail: miao-chao@ hotmail. com

收稿日期: 2016 - 09 - 21