

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.14.016

# 深圳横岭污水厂提标中曝气生物滤池的升级及应用

石兰兰<sup>1,2</sup>, 张宝林<sup>1,2</sup>, 吴云生<sup>1,2</sup>, 王艳<sup>1,2</sup>, 黎学军<sup>3</sup>, 许隽<sup>3</sup>

(1. 北控水务集团有限公司 技术中心, 北京 100020; 2. 北京市再生水水质安全保障工程技术研究中心, 北京 100020; 3. 北控技术服务<广东>有限公司, 广东 广州 510000)

**摘要:** 深圳横岭污水厂二期( $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )工程原污水处理主工艺采用强化预处理加反硝化、硝化两级曝气生物滤池和紫外消毒工艺,原出水水质执行一级A排放标准。2018年应广东省环保厅要求,启动地表准IV类提标工程。同时,为改善现有系统预处理水力及固体负荷偏高,滤料破损、板结导致加大滤池水损及曝气不均等运行问题,提标工程设计采用新建滤池反冲洗水处理工艺以降低预处理负荷,主工艺流程为两级曝气滤池改造加新建反硝化滤池、新建高负荷混凝沉淀池工艺,实现深度脱氮及除磷要求。新建深度处理工段具有设计负荷高、节省占地、处理效果可靠、工艺先进的特点,适用于用地受限的提标工程。

**关键词:** 曝气生物滤池; 二级工艺改造; 深度处理

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)14-0104-05

## Upgrading and Application of Biological Aerated Filter in Upgrading of Shenzhen Hengling Wastewater Treatment Plant

SHI Lan-lan<sup>1,2</sup>, ZHANG Bao-lin<sup>1,2</sup>, WU Yun-sheng<sup>1,2</sup>, WANG Yan<sup>1,2</sup>, LI Xue-jun<sup>3</sup>, XU Jun<sup>3</sup>

(1. Technology Center, Beijing Enterprises Water Group Limited, Beijing 100020, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Reclaimed Water Quality Security Guarantee, Beijing 100020, China; 3. Beijing Enterprises Technology Service <Guangdong> Limited, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** The phase II project of Shenzhen Hengling wastewater treatment plant ( $400\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ ) adopted the enhanced pretreatment, denitrification, nitrification two-stage biological aerated filter and ultraviolet disinfection process, and the original effluent standard was required to reach the first level A. According to the request of Guangdong Provincial Environmental Protection Department, a quasi-IV standard upgrading project was conducted in 2018. In order to solve the operation problems of high hydraulic and solid loading of pretreatment, filter water loss due to breakage and hardening of filter material, and uneven aeration, the upgrading project adopted the new filter backwash water treatment process to decrease the load of pretreatment. The main process included the renovation of the two-stage aeration filter and the construction of a new denitrification filter and a new high load coagulation sedimentation tank to realize the deep nitrogen and phosphorus removal requirements. The new advanced treatment section had advantages of high design load, low occupation of land, reliable treatment

基金项目: 科技部国家重点研发计划课题(2016YFC0401103)

performance and advanced technology, which was suitable for land-restricted upgrading projects.

**Key words:** biological aerated filter; secondary technology transformation; advanced treatment

深圳横岭污水处理厂位于深圳市龙岗河南岸,污水收集面积约  $41.6 \text{ km}^2$ ,建设总规模为  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,其中二期工程设计规模为  $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,于2010年6月建成投产,工程占地为  $4.03 \text{ hm}^2$ ,采用曝气生物滤池工艺,原出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,尾水排入深圳龙岗河流域。

为进一步改善龙岗河流域水质,遵照广东省环保厅对深圳市治水提质的工作要求,横岭厂于2018年启动了二期出水达地表准Ⅳ类的提标工程,同时要求建设期间不可停水减产、不可降低原有出水标准,且不具备新增征地条件,需于厂站现有红线内实施,因此提标难度加大。

## 1 原有二期工程概况

二期工程投运9年,实际处理水量已达满负荷。工程近3年实际进水指标呈逐年上升趋势,按照90%的保证率统计,SS、TP指标已超出设计值,且进水可生化碳源不足,其他指标基本与设计值相符。实际出水可稳定达标(原一级A标准)。工程原设计进、出水及实际进水水质指标见表1。

表1 原设计进、出水水质及实际进水水质

Tab. 1 Original design influent and effluent quality and actual influent quality  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
设计进水水质	250	130	150	30	40	4.5
实际进水(90%值)	257	57	268	29	35	6.7
原设计出水标准	50	10	10	5	15	0.5

原采用粗格栅及进水泵房+中格栅及强化预处理池(曝气沉砂及斜管沉淀池)+细格栅+DN生物滤池+C/N生物滤池+紫外消毒处理工艺。受建设用地面积限制,二级主工艺采用节省占地的前置反硝化DN+后段C/N组合式曝气生物滤池工艺。

横岭二期现有滤池96格,分为4组,每组由12格DN池和12格C/N池组成。由两座配水井分别给两组生物滤池配水,进水由原水、内回流硝化液及反洗废水组成,出水经管道汇合后至末端紫外消毒渠,滤池反冲洗废水经反冲洗水池污水泵排至预处理细格栅返回系统。

滤池设计为上向流池型,进水区及滤板层位于

下方,清水及出水渠位于上方。单组DN与C/N池为一对一进水模式,单格过滤面积同为  $72 \text{ m}^2$ ,设计硝化液回流比为100%,滤池反冲洗废水回流量为  $6.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,考虑回流量后,设计滤速(平均时)达  $10.4 \text{ m/h}$ 。单组滤池现状平面布局见图1。

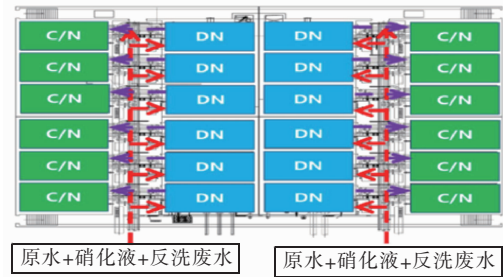


图1 单组生物滤池现状平面布局

Fig. 1 Original layout of single biological filter

## 2 现状滤池运行问题

二期工程实际进水水质波动较大,进水SS、TP常态超标,冲击负荷增大,加之滤池反洗水回流影响,导致斜管沉淀池运行负荷偏高,预处理单元除砂效率降低,加大了后续生物滤池的固体负荷。

工程实际进水碳源不足,  $\text{BOD}_5/\text{TN} < 2$ ,进水有机物经预处理及前置DN池削减后,C/N池碳氧化需求降低,硝化功能提升。根据《曝气生物滤池工程技术规程》(CECS 265:2009)<sup>[1]</sup>,硝化N池滤速取值范围为  $3 \sim 12 \text{ m/h}$ (含回流),硝化负荷一般为  $0.6 \sim 1.0 \text{ kgNH}_3 - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ;前置DN生物滤池滤速为  $8 \sim 10 \text{ m/h}$ (含回流),反硝化负荷为  $0.8 \sim 1.2 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。对比可知,现状生物滤池设计水力负荷偏高,不利于微生物挂膜,且导致滤池水损过大,反冲洗频繁,加之曝气系统均匀度不高,进一步降低滤池运行效果。此外,设计容积负荷均位于规范下限值,说明滤料容积和污染物去除负荷尚有压缩和提升空间。

对滤池配套系统的现状运行问题总结如下:

① 生物滤池配水系统高程不足,硝化液回流比无法加大至设计值,且因长期运行滤料堵塞板结后的水头增长差异,造成各单元配水不均,影响处理效果。

② 现状DN和C/N池设计为一对一配水,任

意一格池子冲洗,另一格需要停运,影响滤池的利用效率,降低了抗冲击负荷。

③ 滤池冲洗系统的快速降水及反冲洗气、水洗强度不足,加剧滤池堵塞。

④ 因前期多家滤料供货厂商产品差异,粒径均匀性不一,运行至今破碎板结现象较为严重,同时为确保 TP 达标,PAC 药剂投加进一步堵塞滤池。

上述问题限制了生物滤池的提升空间,为达到提标要求,除新建提标单元外,还应对现有预处理及生物滤池系统挖潜增效。

### 3 提标工程设计思路

二期提标工程执行地表准Ⅳ类水质标准,具体指标见表2。

表2 二期提标工程设计出水标准

Tab.2 Design effluent quality of the phase II upgrading project  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
准Ⅳ类出水标准	30	6	10	1.5	15	0.3

对比表1中数据,有机物、SS在实际进水接近或超过设计值时,出水可稳定满足准Ⅳ类指标,将不作为提升重点。总氮出水虽较原标准未降低,但因实际进水(90%概率值35 mg/L)尚低于设计值40 mg/L,而出水已接近达标临界值,故将其连同氨氮、总磷三项指标作为工程重点提升目标。

现有滤池因配水系统高程不足,导致C/N池硝化液回流比无法加大,造成二级生化系统总氮提升困难。而氨氮指标在已有C/N池系统通过更换老化曝气系统、增加运行曝气量、控制硝化液回流比以降低硝化滤池运行滤速、补充碱度、更换滤料改善旧滤料破碎及板结现象和强化反冲洗系统等措施即可满足提标工程指标要求。故提标方案通过改造现有生物滤池实现氨氮达标;而总氮指标由后段新建深度处理反硝化脱氮滤池工艺解决;总磷指标由末端高负荷混凝沉淀工艺解决,同时对出水SS指标加以保障。另针对现状预处理水力及固体负荷偏高问题,将设计新建反冲洗水处理工艺,将处理水回流至前置反硝化滤池进水端,不再经由预理工段,以缓解斜板沉淀池的处理压力。综上所述,二期工程提标工艺流程确定为:强化预处理+现有滤池改造+新建二级提升泵池+新建深度处理反硝化滤池(设计旁通率为50%,过水量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ) + 新建高负荷混凝沉淀池+紫外消毒,工艺流程见图2。

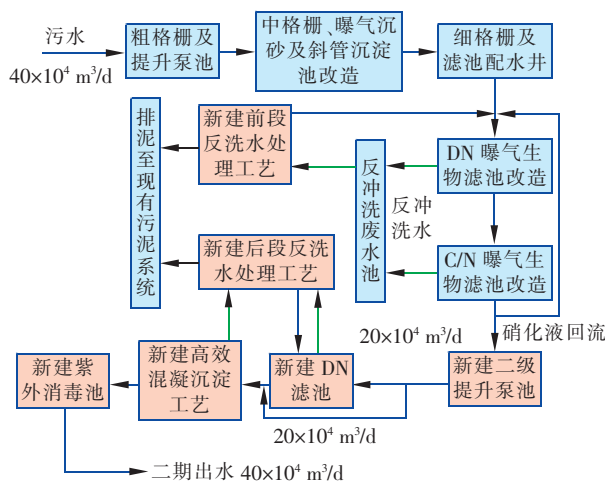


图2 二期提标工艺流程

Fig.2 Process flow chart of the phase II upgrading project

### 4 现有滤池升级方案

#### 4.1 现有C/N池工况分析及升级方案

好氧曝气生物滤池同时承担除碳和硝化的任务,因此在设计中需考虑残留BOD<sub>5</sub>对硝化效果的影响。因去除BOD<sub>5</sub>依靠异养菌,而进行硝化反应需要自养菌,异养菌繁殖速度较快,在反应过程中会优先利用氧气,抑制自养菌的繁殖。作为强化硝化反应的前提,必须设法降低污水中的有机物质,工程采用前置反硝化工艺(DN池)在进行脱氮反应的同时也降低了污水中的有机物质,为硝化反应创造了条件。二期工程进水设计BOD<sub>5</sub>值为130 mg/L,按强化预理工段40%的去除率计算,DN池设计进水BOD<sub>5</sub>值为78 mg/L。根据研究<sup>[2-3]</sup>,DN池对BOD<sub>5</sub>最大去除率不会超过60%,因此会有40%~50%的有机物进入硝化池,则C/N池进水BOD<sub>5</sub>值将小于40 mg/L。因硝化能力同进水BOD<sub>5</sub>浓度成反比,当进水BOD<sub>5</sub>>60 mg/L时,硝化负荷仅为0.3 kgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(m<sup>3</sup>·d),当进水BOD<sub>5</sub>在20~50 mg/L时,硝化负荷<0.7 kgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(m<sup>3</sup>·d),当进水BOD<sub>5</sub>在20 mg/L以下时,硝化负荷才能达到1 kgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(m<sup>3</sup>·d)以上。提标后氨氮出水指标由原标准的5 mg/L提升到1.5 mg/L,设计硝化去除容积负荷增大到0.54 kgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(m<sup>3</sup>·d),在C/N池设计及实际进水BOD<sub>5</sub>均处于低指标情况下,工程二级滤池硝化功能可具有设计保证性<sup>[4]</sup>。

具体C/N池改造方案为:

① 对现状不均匀、板结滤料进行更换并增大



粒径(2~4 mm→3~5 mm),提高曝气均匀性及挂膜效果;

② 更换老化破损的滤头及曝气系统;

③ C/N池进水管改造,由原一对一改造为多对多模式,避免DN反洗时C/N池负荷增大现象;

④ 控制硝化液回流比,降低滤速;

⑤ 增设大管径排水管,加大反洗前降水位冲洗速率,强化反洗效果;

⑥ 单体实际运行气水比为(1.5~2):1,提标工程提升气水比至3:1,充分硝化;

⑦ 取消原工程DN池出水渠的铁盐投加点,将除磷措施后移至新建高负荷混凝沉淀池,避免滤头堵塞及滤料板结;

⑧ 强化预处理工段截污效果以及新建反冲洗水单独处理工艺,减小滤床截污量,避免频繁反洗影响生物膜的培养;

⑨ 设置碱度投加系统,保证C/N池出水碱度>80 mg/L,辅助硝化效果。

#### 4.2 现有DN池工况分析及升级方案

工程所建前置反硝化滤池具有可利用原污水碳源,减少外加碳源投加量,同时保证C/N池硝化能力、使系统曝气量相对减少的优点。回流比是前置反硝化工艺中最重要的设计参数,TN处理能力主要取决于硝化效果,增大回流比,可供反硝化的硝酸盐增多,出水TN含量就会降低,但回流量的增大,意味着硝化池停留时间的减小,恐会造成出水氨氮升高,而过高的回流比,会造成DN池溶解氧浓度上升,降低TN的处理效率。滤池现状受限于配水系统的有限高程,更导致回流比无法加大至设计值,因此结合提标目标,确定合适的回流比显得至关重要,比值的确定以保证C/N池氨氮出水提标为准则,将TN指标分担至前置DN池和后端新建DN池共同处理。经核算,设计控制回流比为40%,设计滤速(含回流及反洗水)降低为7.4 m/h,令硝化池滤速趋于合理,在设计进水指标边界下,放宽前置DN池出水总氮控制指标为20~25 mg/L。除此之外,其他DN池改造方案为:①因反硝化容积负荷尚处下限值,可将DN池滤料高度由4 m降至3.5 m,以便减小滤料阻力,维持长期运行的回流比要求;②更换现状不均匀、板结滤料及破损滤头;③增设大管径排水管,加大反洗前降水位冲洗速率,强化反洗效果;④强化预处理工段截污效果以及新建反冲洗水单独处理工

艺,减小滤床截污量,避免频繁反洗影响生物膜的培养;⑤针对工程实际进水碳源不足问题,继续投加外加碳源。

生物滤池改造前、后工艺设计参数对比见表3。

表3 滤池改造前、后工艺设计参数对比

Tab.3 Comparison of process design parameters before and after filter renovation

项 目	改造前 96 格滤池		改造后 96 格滤池	
	DN 池	C/N 池	DN 池	C/N 池
处理水量/ ( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	40+6	40+6	40+6	40+6
回流比/%	100	100	40	40
回流后水量/ ( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	86	86	62	62
设计格数/格	48	48	48	48
滤料高度/m	4.0	4.5	3.5	4.5
空床停留时间/min	23	26	28.1	36.1
水力负荷(滤速)/ ( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )	10.4	10.4	7.4	7.4
进水指标/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN:40	$\text{NH}_3 - \text{N}$ : 30	TN:40	$\text{NH}_3 - \text{N}$ : 30
出水指标/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TN:15	$\text{NH}_3 - \text{N}$ : 5	TN: 20~25	$\text{NH}_3 - \text{N}$ : 1.5

此外,为达成改造期间不可停水减产、不可降低原有标准的实施要求,利用已建成一期工程处理余量分流少部分水量,并控制进水量峰值系数,同时滤池改造采用分批、分组实施的方式达成目标。

#### 5 新建后段反硝化DN滤池工艺

因横岭污水厂厂界内已无建设预留用地,为满足提标新建单体用地要求,设计将原有一、二期两座综合楼拆除后新建共用综合楼一座,利用有限置换用地建设深度处理后段反硝化DN滤池及高负荷混凝沉淀池。受用地条件限制,后段反硝化滤池必须采用高负荷、占地节省、配套系统简洁、反洗水量少以便控制配套反洗处理工艺占地,同时具有稳定处理效果的工艺。经技术经济性比较,最终采用上向流的轻质滤料DN生物滤池。

滤池采用密度 $<1 \text{ g/cm}^3$ 的轻质球型滤料,滤头在滤料层的上部,与出水接触不易堵塞且便于更换,利用上方出水渠出水进行重力反冲洗,无需设置反冲洗水泵,且反洗周期长。单体设计过流旁通率为50%,过水量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,设计进水总氮为25 mg/L,为满足混合后总出水总氮 $\leq 15 \text{ mg/L}$ ,滤池过水量的设计出水总氮为3 mg/L。系统设置为10

格,单格过滤面积为  $84 \text{ m}^2$ ,设计平均滤速为  $10.1 \text{ m/h}$ ,滤料厚度为  $3.5 \text{ m}$ ,空床停留时间为  $21 \text{ min}$ ,反硝化容积负荷为  $1.53 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 。

为避免后置 DN 滤池外加碳源穿透问题,在反硝化滤料底部另设置  $0.5 \text{ m}$  高 MBBR 填料,在消耗来自上游硝化滤池溶解氧的同时确保了上层的  $3.5 \text{ m}$  高的反硝化滤料处于完全缺氧的环境,在工艺上保证了实际有效的硝酸盐负荷与理论计算相符,避免了由于硝酸盐负荷过高而导致滤池 COD 穿透问题,而且滤池进水量计、进出水硝酸盐氮检测仪、碳源投加系统流量计等仪表也满足系统解决方案。

## 6 后置新建高负荷混凝沉淀工艺

为最大限度节省占地,尾端采用负荷极高的微砂沉淀池工艺以保障出水 SS、TP 达标。单体混合池停留时间为  $2 \text{ min}$ ,絮凝池停留时间为  $5 \text{ min}$ ,沉淀斜板区平均流量下表面负荷为  $32.3 \text{ m/h}$ 。单体分4格设计,投加絮凝药剂为 PAC、PAM 及微砂。

## 7 运行结果

横岭二期提标工程已于 2019 年 12 月底建成通水,各项出水指标稳定达标,出水  $\text{COD} < 30 \text{ mg/L}$ ,  $\text{BOD}_5 < 6 \text{ mg/L}$ ,  $\text{NH}_3 - \text{N} < 1.5 \text{ mg/L}$ ,  $\text{TN} < 15 \text{ mg/L}$ ,  $\text{SS} < 8 \text{ mg/L}$ ,  $\text{TP} < 0.3 \text{ mg/L}$ 。提标改造工程概算批复投资为 5.06 亿元,单位成本增加  $0.48 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

## 8 结论

① 对于二级处理采用曝气生物滤池的已建项目提标工程,结合实际水质数据及运行问题,通过更换受损材料及设备、调整不合理设计参数、优化运行工况等措施,优先对滤池系统进行挖潜增效。

② 当已有系统升级功能有限时,需结合既有系统改造难点,对提标指标进行合理分配。将较易提升指标分担在现有系统,难点指标由新建深度处理单元解决。横岭二期提标工程针对氨氮、总氮、总磷三项提标目标,氨氮指标通过改造现有生物滤池系统达成,总氮指标由后段新建深度处理反硝化脱氮滤池工艺解决,总磷指标由末端高负荷混凝沉淀工艺处理,同时对出水 SS 指标加以保障。

③ C/N 池硝化能力与进水  $\text{BOD}_5$  浓度成反比,进水  $\text{BOD}_5$  浓度影响工艺相应的硝化负荷取值,如原水碳源浓度较低,经前置 DN 滤池反硝化消耗碳源后,将提升后置 C/N 池硝化能力。

④ 前置反硝化 DN 滤池确定合适的回流比至关重要。低回流比无法满足脱氮需求,而回流比过

大,会导致硝化池停留时间的减小并增大运行滤速及配水阻力,且易造成 DN 池溶解氧浓度上升,限制对 TN 的处理效果。

⑤ 对设计出水  $\text{BOD}_5$  指标较低的工程,有必要考虑避免末端反硝化滤池外加碳源穿透的措施。

## 参考文献:

- [1] CECS 265:2009,曝气生物滤池工程技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2009.  
CECS 265:2009, Technical Specification for Biological Aerated Filter Engineering[S]. Beijing: China Planning Press,2009(in Chinese).
- [2] 王舜和,郭淑琴. 不同功能曝气生物滤池的设计要点[J]. 给水排水,2008,34(11):47-51.  
Wang Shunhe, Guo Shuqin. Key characteristics of biological aerated filters with different functions[J]. Water & Wastewater Engineering,2008,34(11):47-51(in Chinese).
- [3] Pujol R, Hamon M, Kandel X. Biofilters: flexible, reliable biological reactors[J]. Water Sci Technol,1994,29(10/11):33-38.
- [4] Chiou R J, Ouyang C F. The effect of recycle ratio on nitrogen removal in the combined pre-denitrification/nitrification biofilter system[J]. Chem Technol Biotechnol,2001,76(6):559-564.



作者简介:石兰兰(1981—),女,河北廊坊人,本科,高级工程师,负责公司传统水务项目的工艺技术管控工作,曾获“海河杯”天津市优秀勘察设计三等奖、中国市政工程华北设计研究总院优秀勘察设计二等奖。

E-mail: shilanlan@bewg.net.cn

收稿日期:2019-07-31