

深度处理技术用于北京某污水处理厂升级改造

何 翔

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘 要: 北京市某污水处理厂升级改造的主要目标是深度去除有机物、悬浮物、氮和磷等并消毒,并在保证出水水质达标的前提下尽量利用现状设施,减少土建和运行费用。升级改造采用SBR池挖潜改造+两级生物滤池+滤布滤池+臭氧接触氧化+次氯酸钠消毒工艺,改造SBR池以提高其生物脱氮除磷能力,减少后续深度处理部分反硝化滤池的处理负荷及加药量,延长滤池运行周期;新建两级生物滤池进一步去除COD、BOD₅、TN及拦截部分SS;新建滤布滤池进一步去除SS及浊度;投加臭氧及次氯酸钠去除水中色度及细菌。该升级改造工程建成运行后,达到了设计预期目的。

关键词: 污水处理厂; 升级改造; 深度处理; SBR池; 生物滤池

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)08-0080-05

Application of Advanced Treatment Technology in the Upgrading Project of an Existing Wastewater Treatment Plant in Beijing

HE Xiang

(Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: The main targets of a wastewater treatment plant upgrading project in Beijing were for further removal of organics, SS, nitrogen, phosphorus and other pollutants as well as disinfection. The existing facilities should be fully utilized with minimum construction and operation costs, on the premise of qualified effluent. According to the sewage treatment plant process, water quality status and problems, this project adopts the combined process of modified SBR/two stage biological filter/cloth filter/ozone contact oxidation/sodium hypochlorite disinfection. The SBR was modified to improve its biological nitrogen and phosphorus removal capability, so that the subsequent load and the dosage of further denitrification filter were reduced and the filter cycle was extended. A two-stage biofilter was newly built to remove more COD, BOD₅, TN and to intercept part of SS. A new cloth filter was built for further removal of SS and turbidity. Ozone and sodium hypochlorite were added for removal of chromaticity and bacteria. The original targets of the upgrading project were achieved after construction and operation.

Key words: wastewater treatment plant; upgrading and reconstruction; advanced treatment; SBR; biofilter

1 工程概况

北京市某污水处理厂拟进行升级改造,以现状污水处理厂二级处理出水为水源进行深度处理,作为周边环境用水。该工程建设规模为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,是北京市污水处理和资源化的重要工程

项目。

该工程处理出水主要用作景观环境用水,出水水质达到《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)要求,部分水质指标满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类水

质要求,其中总氮要求参照“集中式生活饮用水地表水源地”的有关标准制定。设计进、出水水质见表 1。

表 1 设计进、出水水质

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

项 目	原设计进水	设计进水	原设计二级处理出水	出水
BOD ₅	220	220	≤20	≤6
COD	430	430	≤60	≤30
SS	270	270	≤20	—
TN	45	78	—	≤15
NH ₄ ⁺ - N	—	50	≤8	≤1.5
TP	5.5	7.0	≤1	≤0.3

注: 总大肠杆菌执行城市杂用水标准(3 个/L),粪大肠杆菌执行回用景观水体标准(500 个/L)。系统出水标准色度≤15 倍,浊度≤5 NTU。

2 污水厂现状分析

2.1 工艺流程

现状污水处理厂设计规模为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用 SBR 工艺。SBR 池为生物处理核心构筑物,其进水与回流污泥混合后进入选择区(厌氧),选择区设置折返式隔墙及曝气管,经过选择区后污水进入反应区逐步进行曝气、静沉及撇水操作。该工艺系统的特点是只设厌氧好氧阶段,以生物除碳、除磷为主,并在不设缺氧混合阶段的条件下进行硝化和反硝化,去除部分总氮。

SBR 池分 4 系列、8 格,整体连续进水、连续出水;单格间断进水、间断出水,每天运行 6 个周期,单个周期 4 h,包括进水并曝气 2 h、沉淀 1 h、撇水 1 h。

工艺流程见图 1。

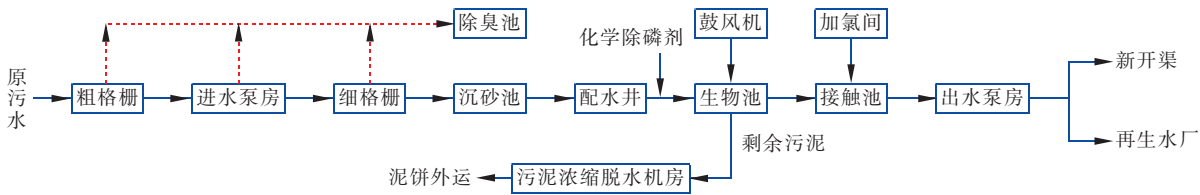


图 1 现状污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of current sewage treatment process

2.2 实际进、出水水质

现状污水厂 2015 年—2016 年进、出水水质见

表 2。实际进水水质峰值与设计值接近,平均值偏低,主要出水指标均不满足新标准。

表 2 实际进、出水水质

Tab. 2 Actual influent and effluent quality

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

时间	BOD ₅		COD		SS		TKN	TN	NH ₄ ⁺ - N	TP	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	出水	进水	出水
2015 年 1 月	145	10.5	290	46.8	178	12.5	70.1	31.8	2.45	5.99	3.61
2015 年 2 月	143	9.2	288	40.2	161	11.1	46.6	27.4	0.53	5.44	3.00
2015 年 3 月	189	10.5	381	45.1	225	11.3	69.1	29.6	0.64	6.78	3.92
2015 年 4 月	184	8.9	369	36.8	221	9.06	62.5	33.6	0.43	7.95	4.18
2015 年 5 月	163	8.5	325	37.0	192	9.01	51.9	25.4	0.43	6.44	3.75
2015 年 6 月	118	8.9	233	39.3	167	8.8	45.6	25.3	0.47	6.21	3.47
2015 年 7 月	167	6.9	334	35.7	196	10.9	46.0	25.1	0.39	6.12	2.54
2015 年 8 月	119	6.7	231	34.0	139	11.2	41.4	24.7	0.38	5.37	2.21
2015 年 9 月	209	8.3	417	39.7	306	12	54.3	31.2	3.42	7.35	2.28
2015 年 10 月	222	8.8	464	43.2	317	11.9	69.5	32.8	2.95	9.15	3.81
2015 年 11 月	149	8.9	316	40.9	150	12.4	68.9	38.7	0.76	6.05	4.18
2015 年 12 月	172	9.8	364	46.0	194	11.8	69.8	34.9	0.50	6.46	4.26
2016 年 1 月	194	11.2	409	48.7	225	13.3	76.4	35.1	8.10	6.90	4.00
2016 年 2 月	196	10.8	401	49.1	211	13.5	74.7	37.2	8.80	7.20	4.30
2016 年 3 月	183	12.0	388	51.1	227	15.9	75.3	31.4	8.80	6.90	4.10
2016 年 4 月	240	11.9	497	48.8	304	14.2	84.6	22.5	9.60	8.40	2.70

续表2 (Continued)

时间	BOD ₅		COD		SS		TKN	TN	NH ₄ ⁺ - N	TP	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	出水	进水	出水
2016年5月	183	10.6	380	46.9	296	13.7	68.4	22.5	0.80	9.10	3.40
2016年6月	152	10.1	319	45.5	184	12.8	63.1	20.5	2.80	5.52	2.53
2016年7月	116	13.1	248	53.9	152	11.7	61.9	27.6	5.70	4.09	2.42
2016年8月	146	8.8	318	44.4	186	10.2	64.6	20.3	1.40	5.03	1.96
2016年9月	171	6.7	370	55.5	192	12.0	71.9	31.8	0.99	5.52	1.68
2016年10月	184	6.7	399	34.8	262	13.4	73.9	41.3	2.12	7.01	0.81
2016年11月	191	7.7	422	37.6	241	14.8	75.6	45.3	1.40	6.17	0.82
2016年12月	212	8.0	460	33.7	252	14.9	78.7	45.7	0.94	7.04	0.59
两年均值	173	9.3	359	43.1	216	12.2	65.2	30.9	2.70	6.60	2.90

2.3 现状污水厂出水水质分析及方案思路

根据设计与现状进、出水水质分析对比,需要深度去除有机物、悬浮物、氮和磷等污染物。主要通过两方面的措施来达到目标:一是改造现状 SBR 池,对 SBR 池处理能力深度挖潜,在实现较高硝化效果的前提下,尽量充分利用污水碳源完成强化反硝化,减轻后续构筑物处理负荷;二是新增深度处理建(构)筑物,强化对有机物、悬浮物、氮和磷等污染物的去除,重点实现氨氮、总氮的最终去除,确保各项出水指标稳定达标。

① 本工程对出水 BOD₅、COD 有更高的要求,从实际进、出水水质来看,污水厂进水有机污染物(以 BOD₅、COD、SS 表示)含量不高,可生化性差;污水厂二级出水 BOD₅ 为 10 mg/L 左右,COD 约为 35~50 mg/L,仍可通过微生物分解进一步降解,最终达标需要通过物理截留方式解决。

② 根据运行数据显示,污水厂现状出水氨氮 < 5 mg/L, SBR 池硝化效果相对较好,但是与本工程出水氨氮的新要求(< 1.5 mg/L)还有较大差距。经核算, SBR 池停留时间大概 17 h,反应时间为 8 h,对于实际进水水质来说,低水温季节的好氧反应时间不足,不能满足出水氨氮的要求,因此在后续生物处理(深度处理)需具有一定硝化功能。

③ 本工程新增对出水 TN 的要求。进水 TKN 主要包括有机氮(NH₄⁺ - N)和氨氮,其降解主要依靠生物处理来完成,其原理是有机氮和氨氮(NH₄⁺ - N)依靠自养菌在好氧条件下通过硝化过程氧化为硝酸盐,硝酸盐氮(NO₃⁻ - N)再依靠非好氧的异养菌在缺氧条件下利用有机碳源通过反硝化过程分解为 N₂,使 TN 得以去除。反硝化过程所需的碳源由进水中的有机物提供,近几年污水厂进水平均

BOD₅/TN 为 2.48,通常城市污水生物除磷脱氮比较彻底的工艺要求 BOD₅/TN > 3.5,进水中碳源不能同时满足生物脱氮的要求,需外加碳源,如甲醇、乙酸等。

污水厂原出水指标对 TN 没有要求,设计中未设置反硝化段,本次工程对 SBR 池进行改造,考虑到硝化时间不足,所以 SBR 池的挖潜改造没有去追求 NH₄⁺ - N 去除的最大化,而是在现有池容的前提下追求氨氮去除和 TN 去除的平衡点,增加强化反硝化反应的缺氧段,尽量利用污水中碳源去除 TN,这样可以减轻后续生物处理的 TN 负荷,减少外加碳源费用。

SBR 改造后,出水中仍剩余一定量的 NH₄⁺ - N(暂定 5~8 mg/L),后续深度处理需具有一定的硝化功能,将 NH₄⁺ - N 转化为 NO₃⁻ - N,再进行反硝化过程,将 NO₃⁻ - N 转化为 N₂,最终出水 TN < 15 mg/L。由于 SBR 池及后续硝化过程已将碳源消耗殆尽,反硝化过程需外加碳源。

④ TP 可由微生物的同化作用进入生物颗粒得以部分去除,但出水总磷浓度要低于 0.3 mg/L,必须采用化学除磷的方法,投加铁、铝化学药剂形成磷酸盐沉淀,再通过物理截留的方式去除磷酸盐沉淀和有机颗粒物质,最终出水总磷达到排放标准。

⑤ 总大肠杆菌群主要是在城市杂用水的用途中要求较高(≤ 3 个/L),排入再生水管网部分的出水需严格控制。总大肠杆菌群在经过膜过滤(微滤、超滤)后可降低到 1 × 10⁴ 个/L 以下,经过砂滤后仍在 1 × 10⁵ 个/L 以上,如要达标必须采用有效的物理、化学消毒方式,如氯氧化、紫外消毒等。

⑥ 通过采用膜滤、砂滤、滤布滤池等,再生水的浊度可以有效降低,达到出水要求。

⑦ 参照现有污水处理厂再生水工程的运行经验,采用臭氧对再生水的出水进行脱色处理,感官效果很好。其他处理方法不太适合,如采用活性炭吸附,饱和周期过短,采用氯氧化脱色效果不太好且环境风险较大。

3 工艺流程确定

根据目前国内外的再生水处理厂工程建设项目的工程实践和运行效果比较,并考虑到进水水质特点和出水水质要求,结合污水厂的运行工况确定工艺路线如下:SBR池改造+两级生物滤池+滤布滤池+臭氧接触氧化+次氯酸钠消毒。

3.1 SBR池改造

SBR池挖潜改造主要目标包括:强化SBR池内反硝化过程,使出水 $TN < 35 \text{ mg/L}$,减少后续深度处理部分外加碳源用量;提高SBR池的除磷能力,使出水 $TP < 1 \text{ mg/L}$,降低后续滤池的SS负荷。主要措施如下:

① 将选择区搅拌方式改为机械搅拌,解决因曝气和跌水造成溶解氧过高的问题,使选择区形成缺氧、厌氧状态,提高脱氮效果。

② 内回流比由20%提高到50%,并在运行周期不变的条件下,在曝气阶段后增加非曝气搅拌时段(见图2),充分利用进水碳源强化反硝化效果。

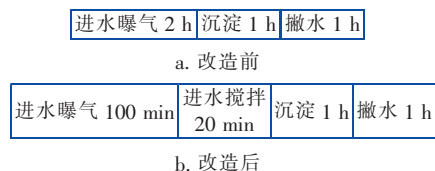


图2 改造前、后的运行时序

Fig. 2 Time sequence before and after upgrading

③ 鉴于污水厂进水 BOD_5/TN 不满足生物脱氮除磷的要求,增加碳源投加设施,尽可能降低SBR池出水 TN ,减轻后续生物滤池的负担。

④ 根据运行情况,启用现状的化学除磷设施,提高SBR池污泥的沉降性能和除磷效果,为后续深度处理设施减轻负担。

主要设计参数^[1]:设计水量为 $80\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,变化系数为1.3;4组模块,共8座水池;单座SBR尺寸为 $53 \text{ m} \times 28 \text{ m} \times 6 \text{ m}$,最大水深为5.5 m,最低水深为4.0 m,污泥浓度(高位)为 $4\,000 \text{ mg/L}$,碳化污泥负荷为 $0.198 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,硝化污泥负荷为 $0.057 \text{ kgNH}_4^+ - \text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$,反硝化污

泥负荷为 $0.063 \text{ kgNO}_3^- - \text{N}/(\text{kgMLVSS} \cdot \text{d})$,运行周期为4 h。

3.2 生物滤池

考虑到SBR池出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 仍会较高,生物滤池处理过程应同时具有硝化和反硝化功能,本工程考虑采用两级生物滤池,第一级为曝气硝化生物滤池(N池),硝化细菌在好氧条件下将剩余 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,同时进一步降解残留的 BOD_5 、 COD ;第二级为反硝化生物滤池(DN),滤料中附着的微生物(主要为异养菌)利用水中残留有机物及外加碳源,降解硝酸盐氮,释放氮气。由于微生物的同化作用,会吸收进水中部分磷,同时通过投加化学除磷药剂(PAC),可去除水中大部分磷。因此,经过生物滤池,水中的氨氮、硝酸盐氮、磷及有机物等污染物可得到较好的去除。由于DN池生物膜生长较快,将DN池放在第二级还可有效地防止外来杂物和生物膜的污堵效应叠加。

由于SBR池已将大部分有机物分解,生物滤池进水中碳源不能同时满足生物脱氮除磷的要求。生物滤池需投加碳源强化生物脱氮除磷工艺。

主要设计参数:N池10座,DN池5座,单池平面尺寸为 $10.8 \text{ m} \times 7.2 \text{ m}$,滤料高度为3.0 m,N池滤料粒径为3~5 mm,DN池滤料粒径为4~6 mm,N池、DN池滤速分别为4.3、8.6 m/h,N池、DN池强制滤速分别为4.78、10.75 m/h, $\text{NH}_3 - \text{N}$ 容积负荷为 $0.22 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 容积负荷为 $2.06 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,过滤周期为12 h,单独气冲5 min,气水联合冲洗5~10 min,单独水冲15~20 min,水反冲强度为 $21.6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,气反冲强度为 $54 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,滤头密度为 $44.4 \text{ 个}/\text{m}^2$ 。

3.3 滤布滤池

为保证生物滤池滤层的纳污量,生物滤池采用较大粒径滤料,出水SS不能保证,所以在生物滤池后增加滤布滤池以进一步去除SS和浊度。

主要设计参数:平均滤速为6.09 m/h,峰值滤速为7.9 m/h,过滤周期为120~180 min。

3.4 臭氧脱色及次氯酸钠消毒

臭氧投加分为3级,每级均布置微气泡曝气系统,三级的投加比例为50%、25%和25%。接触池内设置混凝土隔墙,使水形成折流,以利于臭氧与水的混合和接触,提高臭氧转化率。

加氯接触池前端设置混凝土隔墙,使水形成折

流,以利于次氯酸钠与水的混合和接触。

设计参数:臭氧接触池停留时间为 16.2 min,氯接触池停留时间为 30 min,臭氧投配比为 5 mg/L,次氯酸钠投配比为 15 mg/L。

本工程最终工艺流程见图 3。

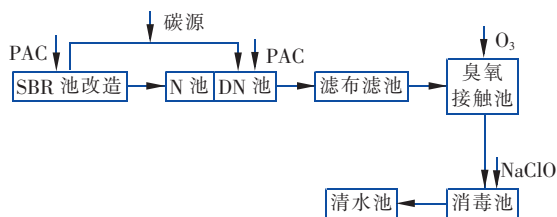


图3 改造后工艺流程

Fig.3 Flow chart of treatment process after upgrading

4 运行效果

采用 SBR 池挖潜改造 + 两级生物滤池 + 滤布滤池 + 臭氧接触氧化 + 次氯酸钠消毒的升级改造路线,该污水厂改造后的实际运行出水水质达到了设计要求。改造后 2017 年出水水质见表 3。

表3 改造后出水水质

Tab.3 Effluent quality after upgrading $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	BOD ₅	COD	氨氮	TN	TP
1月	2.35	13.77	0.24	10.42	0.12
2月	2.48	14.52	0.42	10.45	0.12
3月	2.20	16.45	0.25	9.84	0.18
4月	2.24	15.64	0.29	9.58	0.17
5月	2.85	15.61	0.31	9.09	0.19
6月	2.00	14.80	0.28	11.01	0.18
7月	2.04	14.81	0.23	8.73	0.16
8月	1.94	16.00	0.12	9.30	0.18
9月	2.00	14.70	0.14	10.84	0.17
10月	2.00	11.90	0.15	12.20	0.08

注: 1月—10月 SBR 出水 SS 平均值为 9~12 mg/L,氨氮平均值为 1~2 mg/L,TN 平均值为 15~20 mg/L,TP 平均值为 0.2~0.3 mg/L,系统出水 SS 为 5 mg/L。

其中 SBR 改造有效地强化了脱氮除磷效果, SBR 出水 TN 从改造前的 30 mg/L 左右降至 15(夏季)~20 mg/L 左右,再经过生物滤池后降至 10 mg/L 左右;出水 TN 达到设计指标,生物滤池甲醇投配率在 20~30 mg/L;SBR 出水 TP 在投加除磷药剂情

况下达到 0.2~0.3 mg/L,经过生物滤池及滤布滤池过滤后降至 0.2 mg/L 以下,经 SBR 池、生物滤池及滤布滤池处理后,总出水 COD 降至 17 mg/L 以下,BOD₅ 降至 3 mg/L 以下,均达到了设计要求。出水再经臭氧接触池、加氯接触池处理后,浊度、色度及卫生学指标均达到设计要求。

5 结论

鉴于该污水处理厂的升级改造对 TN、TP、COD、BOD₅ 等更高的去除要求,本工程从两个方面出发:一是对现有 SBR 池挖潜改造,充分利用污水中碳源,既可减少外加碳源费用,又可减少后续生物滤池的处理负荷,延长运行周期;二是针对工程目标新增部分处理构筑物,保证各项出水水质达标。建成后污水厂各项出水水质均达到设计要求,取得了很好的效果。

参考文献:

- [1] GB 50014—2006, 室外排水设计规范(2016 年版) [S]. 北京:中国计划出版社,2016.
GB 50014—2006, Code for Design of Outdoor Wastewater Engineering(2016 ed) [S]. Beijing: China Planning Press, 2016(in Chinese).



作者简介:何翔(1977—),男,湖南郴州人,大学本科,高级工程师,主要从事给排水工程设计工作。

E-mail:hxmail2316@sina.com

收稿日期:2017-12-05