

张鑫, 高信刚, 方萍, 等. 污水处理厂反硝化深床滤池跌水复氧控制措施的工程实践[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 120-126.

ZHANG X, GAO X G, FANG P, et al. Engineering practice of waterfall reoxygenation controll in deep-bed denitrification filter in WWTP [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 120-126.

污水处理厂反硝化深床滤池跌水复氧控制措施的工程实践

张 鑫^{1,*}, 高信刚¹, 方 萍², 米 松¹, 高 尧²

(1. 北京恩菲环保股份有限公司, 北京 100038; 2. 涿州中设环保有限公司, 河北涿州 072750)

摘要 反硝化深床滤池一般为露天池体, 污水在跌落过程中, 与大气充分接触, 会使滤池中溶解氧增加, 而溶解氧是导致反硝化深床滤池碳源利用率低的一个主因。选取大清河流域某污水厂为研究对象, 开展反硝化深床滤池跌水复氧控制的工程研究。通过检测反硝化深床滤池溶解氧、水温、碳源利用效率等变化情况, 发现反硝化深床滤池全年溶解氧均处于较高值, 且夏季溶解氧、碳源投加量均低于冬季。通过对反硝化深床滤池顶部加盖密封进行复氧控制的工程改造实践, 冬季运行结果表明, 密封良好的加盖措施能有效控制滤池跌水复氧, 滤池上层进水溶解氧由 8.90 mg/L 降至 4.80 mg/L, 且还具有一定的保温效果。污水厂在冬季运行时碳源投加量由 191 mg/L 减少至 170 mg/L, 平均每去除 1 mg/L 的总氮需投加碳源 23.68 mg/L, 碳源利用效率提高了约 10%。

关键词 跌水复氧 反硝化深床滤池 碳源消耗 复氧控制 反硝化能力

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)06-0120-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.014

Engineering Practice of Waterfall Reoxygenation Controll in Deep-Bed Denitrification Filter in WWTP

ZHANG Xin^{1,*}, GAO Xingang¹, FANG Ping², MI Song¹, GAO Yao²

(1. Beijing Enfei Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100038, China;

2. Zhuozhou Zhongshe Environmental Protection Co., Ltd., Zhuozhou 072750, China)

Abstract Deep-bed denitrification filters are generally open-air tanks. During the process of wastewater falling, full contact with the atmosphere could increase the dissolved oxygen in the filter, which is a major cause of low carbon source utilization in deep-bed denitrification filters. A wastewater treatment plant (WWTP) in the Daqing River was selected as the research object to carry out an engineering study on the control of waterfall reoxygenation in a deep-bed denitrification filter. By detecting changes in dissolved oxygen, water temperature, and carbon source utilization efficiency in deep-bed denitrification filters, it was found that dissolved oxygen in deep-bed denitrification filters was at a high value throughout the year, and the amount of dissolved oxygen and carbon source added in summer was lower than that in winter. Through the engineering transformation practice of capping and sealing the top of deep-bed denitrification filter to control reaeration, the winter operation results showed that the well sealed capping measures could effectively control the waterfall reoxygenation of the filter, and the dissolved oxygen in the upper influent of the filter was reduced from 8.90 mg/L to 4.80 mg/L, with a certain thermal insulation effect. During the winter operation of the WWTP, the carbon source dosage was reduced from 191 mg/L to 170 mg/L. On average, 23.68 mg/L of carbon source was required for every 1 mg/L of total nitrogen removed, and the carbon source utilization efficiency was improved by about 10%.

Keywords waterfall reoxygenation deep-bed denitrification filter (DBDF) carbon source consumption reoxygenation control denitrification capacity

[收稿日期] 2023-06-26

[通信作者] 张鑫(1988—), 男, 工程师, 研究方向为水污染防治理论与技术, E-mail: 2x1n@163.com。

某设计规模为 2 万 m³/d 的污水处理厂中的污水采用“预处理+水解酸化池+生物池+二沉池+深度处理”来确保达标排放。其中, 深度处理单元包括高效沉淀池和反硝化深床滤池, 可有效去除

污水中污染物,提高污水处理效果。反硝化深床滤池作为目前新型的深度处理工艺,同时具有去除悬浮物(SS)、脱氮和除磷的复合型功能,运行成本低,性能稳定^[1]。但根据现场实际情况,此工艺污水多次提升、跌水会产生复氧,导致污水中溶解氧(DO)浓度快速升高。进水中DO浓度如果过高,会造成部分碳源的无效投加,可能会影响反硝化效果并造成碳源的浪费^[2-3]。本文以大清河流

域某污水处理厂为研究对象,重点关注深度处理段跌水复氧问题,并提出了降低复氧、减少碳源消耗的可行性建议。

1 该污水厂工艺情况

1.1 该污水厂工艺流程

某污水处理厂工艺流程如图1所示,其深度处理单元包括高效沉淀池、反硝化深床滤池、臭氧接触消毒池。



图1 该污水厂工艺流程

Fig. 1 Process Flow of the WWTP

1.2 进出水水质

该污水厂全年进出水水质情况(表1)。

表1 全年进出水水质
Tab. 1 Annual Influent and Effluent Water Quality

月份	进水				出水			
	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	总氮(TN)/ (mg·L ⁻¹)	总磷(TP)/ (mg·L ⁻¹)	COD _{Cr} / (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	TN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)
1月	339.12	32.36	45.39	5.95	18.55	0.11	11.72	0.05
2月	250.43	31.67	46.25	5.89	17.77	0.12	11.34	0.07
3月	290.89	29.03	45.39	9.81	15.76	0.15	10.64	0.13
4月	288.63	27.07	42.94	8.44	17.25	0.10	8.42	0.07
5月	190.90	28.82	41.14	6.41	14.94	0.12	6.88	0.09
6月	164.03	29.59	38.43	5.95	15.33	0.15	4.57	0.07
7月	133.74	23.33	30.17	5.12	13.87	0.16	3.60	0.06
8月	156.30	18.46	24.31	3.84	13.20	0.09	3.86	0.07
9月	196.00	25.23	29.99	5.26	18.47	0.10	6.43	0.10
10月	255.65	27.16	32.49	9.52	18.94	0.17	6.85	0.10
11月	250.62	31.31	39.64	8.26	18.45	0.15	10.57	0.06
12月	268.25	31.27	41.74	10.62	16.25	0.25	11.84	0.09

1.3 设计参数

1.3.1 高效沉淀池设计参数

高效沉淀池1座,分2池,每池前端均设置机械混合池1格、机械絮凝池3格。中间水池单格尺寸为5.75 m×3.2 m×3.15 m;机械混合池单格尺寸为2.15 m×2.15 m×3.8 m,混合时间为102 s;机械絮凝池单格尺寸为3.2 m×3.2 m×5.0 m,絮凝时间为

15.0 min;高效沉淀池池径为10.4 m,斜管区上升流速为8.0 m/h(峰值)、5.0 m/h(均时),污泥回流比为3%。

1.3.2 反硝化深床滤池设计参数

反硝化深床滤池1座4池,单池净尺寸为12.20 m×2.90 m×5.85 m;平均流量时滤速为5.89 m/h;强制滤速为8.78 m/h;NO₃⁻-N负荷为0.76

kg/(m³·d)(温度为10℃)。滤料采用石英砂,粒径为2~3 mm,介质层高为1.85 m,承托层为鹅卵石,粒径为3~38 mm,高度为0.45 m。配套清水池和冲洗废水池各1座,反冲洗水泵2台(1用1备),流量为530 m³/h,扬程为12 m,功率为30 kW;废水排放泵2台(1用1备),流量为100 m³/h,扬程为10 m,功率为7.5 kW。

2 现状分析

2.1 冬季低水温影响反硝化速率

反硝化深床滤池全年月均水温变化如图2所示。

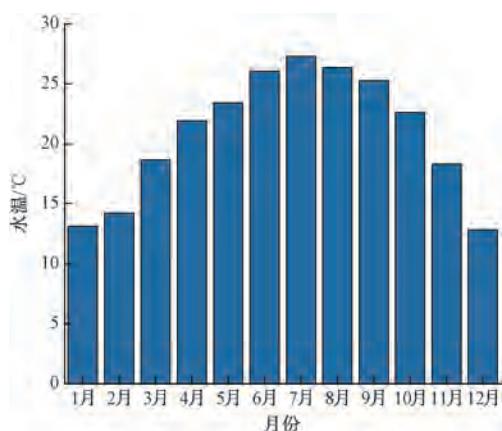


图2 反硝化深床滤池全年月均水温变化

Fig. 2 Annual Monthly Average Water Temperature Change of Deep-Bed Denitrification Filter

由图2可知,从1月—7月水温逐渐升高,9月—12月水温逐渐降低,呈现“中间高,两头低”的特点。其中6月、7月、8月反硝化深床滤池水温达到较高温度,均在15℃以上,12月、1月和2月滤池水温最低达到15℃以下。我国北方地区冬季水温通常低于20℃,温度低于15℃时会限制生物反硝化脱氮能力^[4],所以要尤其关注冬季运行下的温度对反硝化菌的影响。

2.2 进水DO较高消耗碳源

(1) 全年DO情况

结合该污水厂处理工艺的特点,DO监测点选择有较明显水力落差的点位,分别在生物池出水、二沉池中心、二沉池出水、高效沉淀池进水、反硝化深床滤池进水、反硝化深床滤池池面、反硝化深床滤池出水均设置监测点。

本试验全程均采用HACH便携式溶解氧仪,将探头放入水中(约水深为30 cm)位置,保持探头处

于平稳状态位置进行多点测量,取DO平均值,绘制全年沿程各检测点不同月份水温段下的DO日均值变化曲线(图3)。

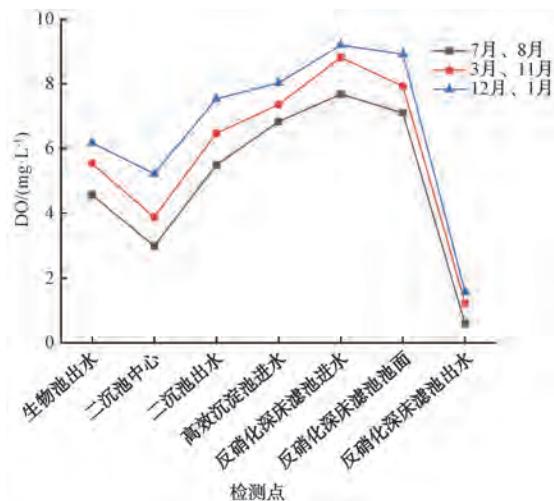


图3 不同温度下各个检测点位DO变化

Fig. 3 DO Change of Each Detection Point under Different Temperatures

7月、8月平均水温在20~30℃,3月、11月平均水温在15~20℃,12月、1月平均水温在10~15℃。由图3可知,水温与DO存在内在联系,随着水温降低,沿程各点位中的DO均呈现增大的趋势,且全年反硝化深床滤池DO均处于较高值。同时,在同一温度下,从二沉池至反硝化深床滤池进水这一工艺段的DO含量明显逐步增加。

(2) 跌水复氧的成因分析

反硝化深床滤池进水工艺流程为生化池→二沉池→高效沉淀池→反硝化深床滤池。根据现场实际情况,上述工艺均为露天池体。

以水温在20~30℃条件下为例,生物池跌水复氧发生1次,在生物池末端出口,DO平均值在4.56 mg/L;二沉池跌水复氧情况共发生2次,第1次发生在出水堰处,第2次发生在出水口处,2次都存在明显的跌水现象,二沉池中心DO较低,平均值为2.98 mg/L,经过溢流堰跌水后至出水口DO质量浓度增加至5.49 mg/L左右;污水从二沉池经二次提升到高效沉淀池有一个充氧过程,使得高效沉淀池DO平均值为6.83 mg/L,高效沉淀池跌水复氧1次,发生在出水口处,此处DO平均值为7.68 mg/L;反硝化深床滤池跌水复氧1次,污水在配水渠处跌落进入滤床,水头跌落造成DO升高,DO消耗碳源

占碳源总投加量的 26.2%^[5]。投加 25% 乙酸钠的碳源后,各格滤池 DO 略有下降,氧会与硝酸盐竞争电子供体,可能 DO 已开始与乙酸钠发生反应,此处的 DO 平均值为 7.10 mg/L。

2.3 碳源投加比较高

该污水处理厂碳源为 25% 乙酸钠,全年反硝化深床滤池碳源月均投加情况(表 2)。

表 2 全年反硝化深床滤池碳源月均投加

Tab. 2 Monthly Average Carbon Source Dosage of Deep-Bed Denitrification Filter during the Year

月份	碳源投加值/ (mg·L ⁻¹)	进水 TN/ (mg·L ⁻¹)	出水 TN/ (mg·L ⁻¹)	去除率
1月	192	15.36	9.30	39%
2月	187	16.12	9.67	40%
3月	178	14.21	8.48	40%
4月	171	14.66	8.29	43%
5月	159	13.48	7.10	47%
6月	120	12.54	5.90	53%
7月	108	11.48	4.68	59%
8月	111	11.26	4.60	59%
9月	127	11.48	4.98	57%
10月	165	11.24	5.74	49%
11月	183	14.30	8.27	42%
12月	218	14.15	8.24	42%

由表 2 可知,进入反硝化深床滤池的 TN 质量浓度为 11.24~16.12 mg/L,出水 TN 为 4.60~9.67 mg/L,TN 去除率为 39%~59%,能够稳定达到出水 TN 质量浓度<15 mg/L 的要求。但能明显看出冬季碳源的投加量较夏季多,去除率比夏季低。

3 改造措施

3.1 改造思路

在 DO 较高情况下,则以氧气为电子受体,有机碳源为电子供体进行呼吸作用,并没有起到应有的脱氮效果,进而造成碳源的浪费^[6]。如若滤池中的 DO 浓度越低,那么 TN 去除效果也就越好^[7]。如果 DO 太高,滤池内部都处于好氧环境,不利于反硝化反应的发生,而在运行时有效降低 DO 的浓度不仅可以提高脱氮效率,还可以降低碳源药耗^[8],从而减少经济的投入。

温度是影响细菌生长和代谢的重要环境条件。低温对酶的活性有强烈的抑制作用,进而影响微生物的生长和代谢。因此,冬季低温会降低微生物的

活性,让微生物反硝化脱氮能力受限。

在反硝化深床滤池改造的前期,采用降低提升泵池的提升水量、关小阀门、调小反硝化深床滤池气动阀门等方法,使得二沉池、高效沉淀池与反硝化深床滤池的跌水处保持高液位,以憋水方式减少跌水高度,来达到控制复氧的目的。主要通过在滤池顶部加盖密封,使得反硝化深床滤池形成一个封闭空间,减少污水在跌落过程中与大气充分接触,使污水与空气进行隔绝,减少空气流通,可同时降低温度与 DO。

3.2 改造内容

前期观察发现,该污水厂在冬季运行中存在反硝化深床滤池 DO 较高、水温较低以及碳源的投加量大,利用率低等问题。根据现场实际情况,针对以上问题进行技术改造,通过在反硝化深床滤池顶部加盖密封来进行复氧控制、提高水温、减少碳源投加量的工程性研究。本文中反硝化深床滤池仅 2 格滤池投入使用,每格滤池进行独立密闭加盖,改造工程量为 68 m²,材质为镀锌方钢与彩钢板,加盖为低盖形式,上附活动盖板,便于取样检测、观察。同时为验证加盖密闭对跌水复氧的抑制效果,每 2 h 对反硝化深床滤池检测 DO 含量。

反硝化深床滤池工程改造效果如图 4 所示。

4 运行效果分析

12月13日—12月18日,在反硝化深床滤池未加盖前对二沉池、高效沉淀池、反硝化深床滤池均采取提高运行水位,通过减少跌水高度的措施来控制复氧。在实际运行中发现,降低跌水高度可以控制复氧,各检测点位 DO 均有所降低,但是该运行方式存在运行风险。二沉池和高效沉淀池高液位运行不易操作,且容易造成溢水,反硝化滤池采取高液位运行,虽然可以降低布水渠道跌水高度减少复氧,但运行过程中会出现过水不畅,影响滤池反洗效果,出现滤料进入布水渠道等问题。反硝化深床滤池加盖的措施较高液位运行的措施来说,实施简单,运行方便,效果明显,所以通过以上两种复氧控制措施的比较,确定采用加盖措施进行控制反硝化滤池跌水复氧的实践研究。

4.1 温度

反硝化深床滤池加盖密封前后水温变化如图 5 所示。



图 4 反硝化深床滤池加盖密封前后现场改造

Fig. 4 Field Reconstruction of Deep-Bed Denitrification Filter before and after Capping and Sealing

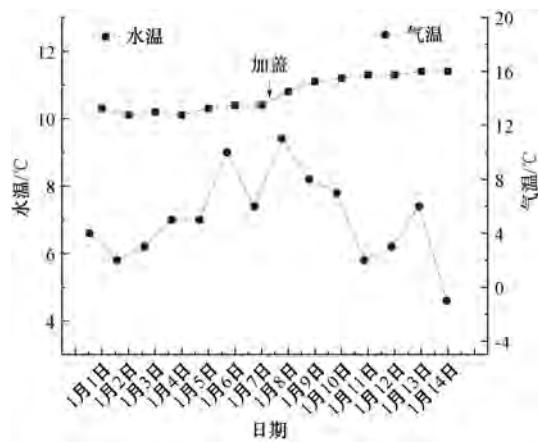


图 5 反硝化深床滤池加盖密封前后水温变化

Fig. 5 Water Temperature Changes before and after Capping and Sealing of Denitrification Deep-Bed Filter

1月7日反硝化深床滤池完成加盖,加盖前一周滤池平均水温为10.3℃,加盖后一周平均水温为11.2℃,比上一周温度提高了0.9℃。期间当地气温呈现先升高后降低的趋势,但滤池水温并未受到气温的影响,结果表明密封良好的加盖措施让滤池在冬季运行中有一定的保温效果。

4.2 DO

加盖后对反硝化深床滤池中DO浓度进行连续监测,每2 h一测,反硝化深床滤池加盖后DO变化情况(图6)。

由图6可知,在反硝化深床滤池水温为10~15℃条件下,反硝化深床滤池改造前滤池DO平均值为8.92 mg/L。滤池加盖改造后,最初28 h内为DO浓度快速下降段,滤池中的DO质量浓度由8.90 mg/L快速下降到5.62 mg/L,之后DO在40 h后下降到4.80 mg/L左右,达到平衡。

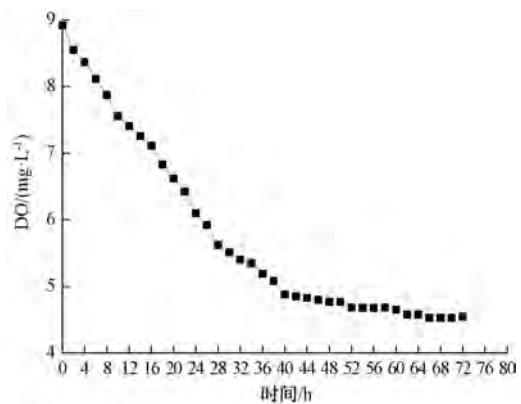


图 6 反硝化深床滤池加盖后 DO 变化

Fig. 6 Change of DO after Capping of Denitrification Deep-Bed Filter

反硝化深床滤池加盖前后日均DO的变化情况如图7所示。

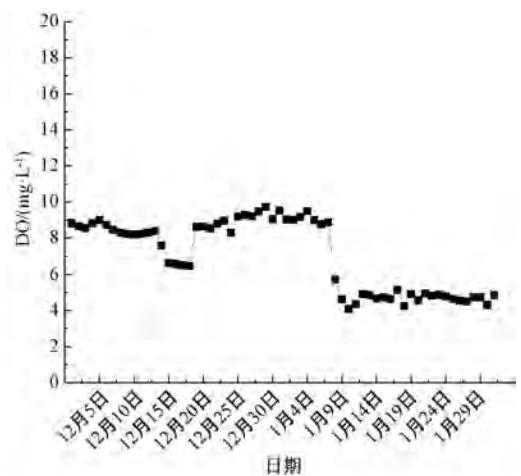


图 7 反硝化深床滤池加盖前后日均 DO 的变化

Fig. 7 Change in Daily of DO of Deep-Bed Denitrification Filter before and after Capping

在12月13日—12月18日,反硝化深床滤池水温基本稳定,采取高液位运行,期间DO质量浓度呈现下降趋势,由8.38 mg/L降至6.49 mg/L,说明提高运行水位,通过减少跌水高度的措施来控制复氧是有效果的。

1月7日反硝化深床滤池加盖后,池面DO较加盖前日均值明显降低,平均降低了4.66 mg/L,平均降幅为47%。可见,通过加盖密闭隔断的方法,可有效降低外界空气与内部空气的交流。滤池内部初期DO处于快速消耗状态,一段时间后,滤池池面内部达到平衡。

4.3 碳源

本试验还探究该污水厂冬季运行时,反硝化深床滤池加盖前后的进出水TN、碳源投加浓度的变化情况(图8)。

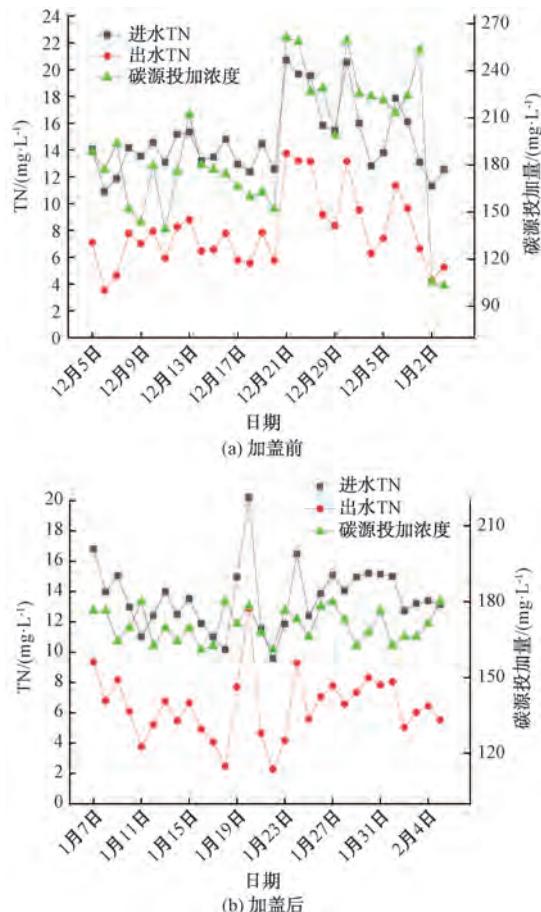


图8 反硝化深床滤池加盖前后的进水TN、出水TN、碳源投加浓度的变化

Fig. 8 Change of TN in Influent and Effluent and Carbon Source Dosing Concentration of Deep-Bed Denitrification Filter before and after Capping

在12月13日—12月18日,期间DO浓度呈现下降趋势,同时期反硝化滤池进出水TN无大幅度波动,碳源投加质量浓度呈下降的趋势,由212 mg/L降至160 mg/L,由此可见高液位运行措施,有效地降低了DO,从而减少了碳源的消耗量。

在12月5日—1月3日滤池未加盖前,反硝化深床滤池进水TN质量浓度在10.90~20.70 mg/L,平均值为14.73 mg/L;反硝化深床滤池出水TN质量浓度为3.52~13.74 mg/L,平均值为7.93 mg/L;25%乙酸钠碳源投加平均值为191 mg/L,平均每去除1 mg/L的TN需投加碳源26.34 mg/L,碳源投加浓度与TN去除量比值为26.34:1,平均TN去除率为48%。

1月7日—2月5日滤池加盖后,反硝化深床滤池进水TN平均值为13.61 mg/L;加盖后的一个月内滤池出水TN质量浓度为2.27~12.89 mg/L,平均值为6.41 mg/L;25%乙酸钠碳源投加平均值为170 mg/L,碳源投加浓度与TN去除量比值为23.68:1,平均TN去除率为54%。

试验发现,在冬季运行中,该污水厂反硝化深床滤池在加盖前后碳源的投加浓度从平均值191 mg/L减少至170 mg/L,外加碳源有一定幅度的降低,说明在未加盖前其滤池中的DO消耗掉一部分碳源,造成碳源的浪费。平均每去除1 mg/L的TN需投加碳源26.34 mg/L,加盖后只需投加碳源23.68 mg/L,碳源利用效率提高了约10%。通过对反硝化深床滤池在冬季运行加盖控制跌水复氧试验可以得出,反硝化深床滤池进水TN与碳源投加浓度呈正相关关系,低温时碳源消耗量大主要是受到DO的影响,通过加盖可以控制DO,且能够有效提高碳源利用效率和TN去除率,使污水厂在冬季运行中出水TN均能够稳定且达标排放。

5 结论及建议

(1)加盖后的反硝化深床滤池温度从10.3 °C提升到11.2 °C,提高了0.9 °C。密封良好的加盖措施让滤池在冬季运行中有一定的保温效果。

(2)对反硝化深床滤池区域顶部采用加盖密封的方式进行跌水复氧的控制,结果表明,经过加盖密封后,反硝化深床滤池中的DO质量浓度从8.90 mg/L快速下降到5.62 mg/L,之后DO缓慢下降到4.80 mg/L左右,最后达到平衡。因此,通过加盖密

封可以有效降低滤池中的 DO。

(3) 反硝化深床滤池进水 TN 与碳源投加浓度呈正相关关系。冬季运行时,通过对反硝化深床滤池加盖控制 DO,可使碳源投加质量浓度从 191 mg/L 减少至 170 mg/L,加盖后平均每去除 1 mg/L 的 TN 只需投加 25% 乙酸钠碳源 23.68 mg/L,碳源利用效率提高了约 10%。通过滤池加盖,可以有效减少 DO 对反硝化的影响,提高 TN 去除率和碳源利用效率,确保生产稳定运行。

(4) 从该工程改造可以看出,反硝化深床滤池控制复氧效果显著,以此类推,通过对污水处理厂各工艺段的跌水复氧点进行分析,结合该污水厂实际情况,建议可在反硝化深床滤池前端高效沉淀池、二沉池均加盖,来达到降低跌水复氧目的,适当提高反硝化滤池运行液位结合加盖措施,可以达到更好的 DO 控制效果,使得后续反硝化工艺运行更加经济高效。

参考文献

- [1] 张亮平. 深床反硝化滤池在市政污水深度处理中的应用 [J]. 净水技术, 2015(5): 109-111.
ZHANG L P. Application of deep bed filter of denitrification for advanced treatment of municipal wastewater [J]. Water Purification Technology, 2015(5):109-111.
- [2] 于跃, 李渊博. A²O 氧化沟-混凝沉淀-反硝化深床滤池工艺在大型经开区污水处理中的应用 [J]. 工业用水与废水, 2016, 47(3): 62-65, 69.
YU Y, LI Y B. Application of A²O oxidation ditch-coagulation sedimentation-deep bed denitrification filter process in treatment of wastewater from large economic-technological development area [J]. Industrial Water & Wastewater, 2016, 47 (3): 62-65, 69.
- [3] 刘毅. 西安市第六污水处理厂反硝化深床滤池工艺应用分析 [J]. 城市道桥与防洪, 2015(8): 98-100.
LIU Y. Application analysis of denitrification deep bed filter process in Xi'an sixth sewage treatment plant [J]. Urban Roads Bridges and Flood Control, 2015(8): 98-100.
- [4] 包海花. 高效反硝化细菌的筛选及在污水脱氮中的应用 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2022.
BAO H H. Screening of efficient denitrifying bacteria and their applications in wastewater denitrification process [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022.
- [5] 胡香, 张辉, 许光远, 等. 反硝化深床滤池深度脱氮效果研究 [J]. 中国给水排水, 2017, 33(21): 13-17, 24.
HU X, ZHANG H, XU G Y, et al. Performance of advanced denitrification in deep bed denitrification filter [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(21): 13-17, 24.
- [6] 于益群, 王庆, 卢仙林, 等. 抑制二沉池出水复氧的技术改造实践 [J]. 天津科技, 2021, 48(7): 102-104.
YU Y Q, WANG Q, LU X L, et al. Technical transformation practice of inhibiting reoxygenation of effluent from secondary sedimentation tank [J]. Tianjin Science & Technology, 2021, 48 (7): 102-104.
- [7] 陈亭微, 颜龟, 王海锋. 污泥龄和溶解氧对改良型 Bardenpho-MBR 工艺脱氮除磷效果的影响 [J]. 环境工程, 2023, 41(s1):196-200.
CHEN T W, YAN M, WANG H F. Effects of sludge retention time and dissolved oxygen on nitrogen and phosphorus removal by modified Bardenpho-MBR process [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(s1): 196-200.
- [8] 孙永利, 李鹏峰, 范波, 等. 污水处理厂预处理单元跌水复氧问题识别及控制技术研究 [J]. 给水排水, 2022, 58(10): 72-77.
SUN Y L, LI P F, FAN B, et al. Research on identification and control technology of water drop reoxygenation in pretreatment unit of wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(10): 72-77.

(上接第 94 页)

- [15] 黄俊亮, 刘成, 王胜涛, 等. 离子交换工艺对地表水中硝酸盐的去除效能及应用模式 [J]. 给水排水, 2021, 57(11): 12-18.
HUANG J L, LIU C, WANG S T, et al. Removal efficiency and application mode of nitrate in surface water by ion exchange process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(11): 12-18.
- [16] 张亚莉, 刘岩, 高宜. 反渗透工艺在给水厂硝酸盐控制中的应用 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 90-94.

ZHANG Y L, LIU Y, GAO Y. Application of reverse osmosis in nitrate control of water supply plant [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(18): 90-94.

- [17] 李洁. 超滤反渗透组合工艺在水厂硝酸盐深度处理中的工程应用 [J]. 净水技术, 2021, 40(10): 155-159.
LI J. Engineering application of advanced treatment for nitrate removal in ultrafiltration-reverse osmosis processes in WTP [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 155-159.