

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.22.017

# 反硝化滤池污水处理工艺应用调研及设计要点

栗文明<sup>1,2</sup>, 高敏<sup>3</sup>, 周军<sup>1,2</sup>, 孙蓉<sup>4</sup>

(1. 江苏省环境科学研究院 江苏省环境工程重点实验室, 江苏 南京 210036; 2. 江苏省环科院环境科技有限责任公司, 江苏 南京 210036; 3. 乌海市城市建设投资集团有限责任公司, 内蒙古 乌海 016000; 4. 江苏东华市政工程设计有限公司, 江苏 南京 210019)

**摘要:** 反硝化滤池可直接应用于污水二级生化处理,也可应用于二沉池后作为深度处理单元,分为下向流和上向流两种池型。下向流滤池采用滤砖进行布水布气,出水浊度稳定;上向流滤池滤速高,处理效果优。通过调研发现下向流反硝化深床滤池中 Denite 滤池应用较多,处理规模较大;上向流反硝化滤池中生物陶粒滤料设备投资较低,而轻质滤料滤池运行费用较低。下向流反硝化深床滤池适用于二沉池出水 TN 不达标,后续需要进一步脱氮的情况;而上向流反硝化滤池可应用于二级生化处理,也可应用于二沉池后作为深度处理单元。工程设计时需结合地质条件、水质要求、运行管理等因素合理选择池型结构,并指出上向流陶粒反硝化滤池可作为今后设计选型时的一种优选工艺。

**关键词:** 反硝化滤池; 上向流; 下向流; 上向流陶粒反硝化滤池; 下向流反硝化深床滤池

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)22-0100-06

## Application Survey and Design Points of the Denitrification Filter in Wastewater Treatment Process

LI Wen-ming<sup>1,2</sup>, GAO Min<sup>3</sup>, ZHOU Jun<sup>1,2</sup>, SUN Rong<sup>4</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Engineering, Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China; 2. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science Co. Ltd., Nanjing 210036, China; 3. Wuhai City Construction Investment Group Co. Ltd., Wuhai 016000, China; 4. Townwater Municipal Engineering Design Co. Ltd., Nanjing 210019, China)

**Abstract:** The denitrification filter can be directly applied to the secondary biochemical treatment of wastewater, and can also be used as the advanced treatment unit after the secondary sedimentation tank. The denitrification filter includes down-flow and up-flow types. The down-flow filter uses blocks for influent and air distribution, and the effluent turbidity is stable. The up-flow filter has the characteristics of high filtering velocity and treatment efficiency. The survey showed that the Denite filter is widely used in down-flow denitrification deep bed filter, and the treatment scale is large. The investment of the up-flow ceramsite filter is low, and the operating cost of the light filtering material is relatively low. The

down-flow denitrification deep bed filter can be used in the process following the secondary sedimentation when the TN couldnot meet the effluent standards and further denitrification is needed. The up-flow denitrification filter can be used both in the secondary biochemical treatment and the advanced treatment after the secondary sedimentation tank. The geological conditions, the water quality requirement, operation, etc., need to be considered in the design of the filter. It is considered that the up-flow ceramsite denitrification filter can be the optimization type in the future.

**Key words:** denitrification filter; up-flow; down-flow; up-flow ceramsite denitrification filter; down-flow denitrification deep bed filter

随着污水处理行业的迅速发展及整体水环境提升的需要,各地相应颁布了污水处理的高排放标准,对污水厂出水水质的要求大大提高,尤其是TN出水要求更严格。反硝化滤池可直接应用于二级生化处理,也可应用于二沉池后作为深度处理单元,可保证出水TN、TP、SS等满足高排放标准要求<sup>[1]</sup>,近年来工程应用案例也较多。

笔者结合多年设计经验和典型工程案例,对反硝化滤池的池型应用情况、池型选择、设计要点等进行总结归纳研究,以期今后的设计应用提供技术参考。

## 1 反硝化滤池分类及应用调研

### 1.1 池型分类

反硝化滤池分为下向流和上向流两种池型。下向流池型与给水中V型滤池类似,每格上部进水,经过滤料层、承托层、布水布气系统后自底部出水,经出水阀后汇总至出水总渠。下向流反硝化滤池以美国水环纯(STS)Denite深床滤池、Xylem公司

Leopold滤池为代表,通常以石英砂(1.5~3.5 mm)为滤料、采用特殊的滤砖作为布水布气系统。滤砖直接安装于池底,施工简便快速,平整度易控制,可满足均匀布水布气要求。以上两种滤池主要区别在于滤砖结构不同<sup>[2]</sup>,其余设计参数类似。

上向流池型自底部进水,经过布水布气系统、承托层、滤料层、上部出水槽后排至出水总渠。主要有两种:①滤料为生物陶粒(密度1.4~1.8 g/cm<sup>3</sup>),底部设置长柄滤头、滤板布水布气。正常过滤运行与反冲洗时,水均是由下往上流。目前该种滤池应用广泛,滤料已国产化,有大量工程案例可供借鉴。②以威立雅公司的Biostyr为代表,采用聚苯乙烯小球轻质滤料(密度<1.0 g/cm<sup>3</sup>),底部有配水渠及穿孔布气管,上部安装滤板、滤头,防止滤料流失。单格滤池反洗时,水由滤池上部清水区靠重力流向滤池下部,实现反向冲洗,冲洗较彻底。

下向流和上向流两种池型各有自身的优势与劣势,分析对比见表1。

表1 下向流和上向流反硝化滤池池型对比

Tab.1 Comparison of down-flow and up-flow denitrification filter

项 目	下向流反硝化滤池	上向流反硝化滤池
滤料	石英砂,1.5~3.5 mm	生物陶粒,3~6 mm;轻质滤料,3~6 mm
滤层厚度/m	1.8~2.4	2.5~4
空床滤速/(m·h <sup>-1</sup> )	3~8	5~20
氮气驱散系统	反硝化产生氮气,需设置氮气驱散系统	无
优点	①与上向流相比,滤层厚度小,池体埋深浅,适合于岩层或浅层地下水地区; ②池体构造简单,无滤梁,采用滤砖进行布水布气,安装过程快,工期短,适合于各种滤池改造项目; ③过滤与氮气流向相反,出水浊度稳定	①滤速大,可以促进滤料与水充分接触,微生物菌落分布均匀,比下向流滤池处理效果优; ②水头损失小,滤料厚度大,占地面积小; ③容积负荷高,单位容积滤料去除TN量高; ④陶粒滤料采用粉煤灰、污泥等高温烧制而成,价格低廉,可实现废物二次利用
缺点	①滤砖为专利产品,设备投资较高; ②截污量较小,水头损失增长快,应及时反冲洗,避免上层滤料堵塞; ③与上向流相比,空床滤速低,占地面积稍大	①陶粒滤料滤池截污位于滤池下部,需特殊的反洗程序才可冲洗彻底; ②陶粒滤料滤池前段宜设置超细格栅; ③轻质滤料需进口,价格高

## 1.2 应用调研

通过实地考察、设计院咨询等手段,对国内反硝化滤池的设计应用情况进行了调研,总结归纳其池型构造、进出水水质、冲洗强度等参数,以便为今后的设计提供参考。调研结果如表2所示。

由表2调研结果可知,下向流反硝化深床滤池中 Denite 滤池应用较多,处理规模也较大,相比于 Leopold 滤池,Denite 滤池的长宽比较大。上向流反硝化滤池中生物陶粒、轻质滤料滤池均应用较多,且陶粒滤料已国产化,设备投资较低;相比于陶粒滤

池,轻质滤料滤池气洗强度低,水反洗强度较高,但反洗水依靠重力流经滤料层,无需消耗电能,运行费用较低。

另外,上向流反硝化活性砂滤池在安徽<sup>[3]</sup>、佛山<sup>[4]</sup>、清远<sup>[5]</sup>等地有应用,该池型构造简单且无需驱氮系统<sup>[6]</sup>,但工程案例较少。

从调研结果可知,各种池型均得到了广泛应用,工程设计时需根据各滤池优缺点选择出适合该工程的池型,参考上述案例的设计参数取值,并进一步优化以提高滤池的运行处理效果。

表2 国内下向流和上向流反硝化滤池设计参数调研结果

Tab.2 Survey of design parameters of down-flow and up-flow denitrification filter in China

项目	污水厂名称	规模/ ( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	池型 结构	滤池尺寸/ (m × m)	滤料厚 度/m	TN/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		反冲洗强度/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	
						进水	出水	气洗	水洗
下向流	杭州七格污水厂三期	60	Denite	3.56 × 30.48, 30格	2.44	20	10	110	14.7 (有表冲)
	上海竹园污水厂某期	24	Denite	4.88 × 22.75, 30格	2	18	10	92	15
	海宁丁桥污水厂	15	Denite	3.56 × 32.11, 9格	2.44	25	15	110	14.7
	丹阳石城污水厂	10	Denite	3.56 × 22.8, 10格	2	15	8	90	15
	西安第六污水厂	10	Denite	3.56 × 19.4, 10格	2.13	23	15	101	15
	天津经开区第一污水厂	10	Denite	3.75 × 24.8, 8格	1.37	35	20	92	15
	溧阳花园污水厂	8	Denite	3.56 × 19.92, 8格	1.83	20	15	91	14.7
	乌海市污水处理厂	6	Denite	3.0 × 25.3, 6格	2	20	15	90	15
	无锡芦村污水厂四期	5.0	Denite	3.56 × 26.8, 4格	1.83	20	15	92	15
	河南卫辉县污水厂	5.0	Denite	2.9 × 18.3, 6格	1.83	20	15	92	15
	新沂城市污水厂	4.0	Denite	4.88 × 13.56, 4格	1.83	20	15	92	15
	河北香河三强污水厂	2	Denite	2.9 × 12.2, 4格	1.83	20	15	90	15
	浙江嘉善污水厂	2.0	Denite	2.9 × 14.63, 4格	1.8	20	15	92	15
	合肥经开区污水厂	10	Leopold	6.1 × 18.3, 8格	1.83	15	5	91	15
	上海嘉定新城污水厂	10	Leopold	5.9 × 15.8, 8格	1.83	30	15	92	15
靖江城市污水厂	4	Leopold	5.9 × 12.2, 8格	1.83	20	15	101	16	

续表2 (Continued)

项目	污水厂名称	规模/ ( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	池型 结构	滤池尺寸/ (m × m)	滤料厚 度/m	TN/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		反冲洗强度/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	
						进水	出水	气洗	水洗
上向流	深圳横岭污水厂二期	40	生物陶粒 4~6 mm	6 × 12, 48 格	3.5	40	15	90	30
	厦门筭筭污水厂	30	生物陶粒 3~5 mm	7.95 × 10.88, 14 格	3	35	20	100	30
	北海红坎污水厂	20	生物陶粒 4~8 mm	6 × 10.5, 10 格	3	20	15	90	30
	深圳横岗污水厂	10	石英砂 2~4 mm	6 × 12, 8 格	3	20	15	50	33
	淮安第二污水厂	10	生物陶粒 3~5 mm	7.2 × 12, 5 格	3.5	15	10	75	18
	合肥王小郢污水厂	10	生物陶粒 3~5 mm	7.2 × 10.8, 8 格	3.5	18	5	75	18
	四川眉山城市污水厂	4	生物陶粒 3~5 mm	7.8 × 9.35, 2 格	4.5	30	15	87	33
	新沂经开区污水厂	1	生物陶粒 3~5 mm	5 × 5.86, 4 格	3	20	15	72	18
	石家庄桥东污水厂	50	Biostyr 轻质 滤料:4.5 mm	13.8 × 16.7, 24 格	2.5	20	15	12	70
	乌鲁木齐河东污水厂	10	Biostyr 轻质 滤料:4.5 mm	10.4 × 16.7, 4 格	2.5	20	15	12	70
	南京城东污水厂	10	Biostyr 轻质 滤料:4.5 mm	10.4 × 12.5, 2 格	3	20	15	12	70
	邯郸东郊污水厂	5	Biostyr 轻质 滤料:4 mm	10.4 × 16.7, 2 格	3	20	15	12	65
深圳西丽再生水厂	2.4	Biostyr 轻质 滤料:4.5 mm	6.1 × 13.8, 2 格	2	20	15	12	70	

## 2 池型适用性及设计要点总结

### 2.1 池型适用性

下向流反硝化深床滤池的滤砖为专利产品,通常应用于深度处理工艺中,适用于二沉池出水 TN 不达标,后续需要进一步脱氮的情况<sup>[7]</sup>。出水可保证 TN 和 SS 达标,需精确投加碳源以防止出水 COD 超标。上向流生物陶粒反硝化滤池应用于二级生物处理时,前段宜设置除油设施、高效沉淀池、超细格栅(1~3 mm)等预处理单元,并采用较粗粒径的陶粒滤料(4~6 mm),以防止滤池堵塞或被油珠包裹,导致滤池无法运行;当应用于深度处理工艺中时,上升水流及反硝化产生的  $\text{N}_2$  有可能夹带脱落的生物膜,因此滤料层厚度宜取高值(3~4 m),上层滤料层可采用较细粒径的陶粒滤料(2~3 mm),以确保出水 SS 稳定达标。当污水厂执行高排放标准时,其后宜设置砂滤池或滤布滤池等过滤单元。Biostyr 滤

池为专利产品,与陶粒滤料滤池适用性类似,需依据威立雅的设计导图设计。

目前各种池型在工程中都应用较多,存在多种池型并存的局面,给工程设计、建设管理等都带来诸多不便。池型选择受进出水水质、运行管理要求、占地条件等的影响,还要结合工程地质、滤料供应等情况,经综合技术经济比选得出适合本工程的池型,以降低工程造价、缩短工程周期。

### 2.2 设计要点

无论是何种池型,对于反硝化滤池的设计需要关注以下几点问题。

#### ① 进水 DO 控制

反硝化滤池的进水 DO 值宜控制在 1~2 mg/L,可保证反硝化反应的顺利进行。根据商佳吉等<sup>[8]</sup>的实际检测,滤池前进水 DO 较高,不仅消耗额外碳源,增加运行成本,而且抑制了反硝化菌的生长。工

程设计时,应全流程考虑溶解氧的变化,采用淹没进、出水方式以避免各处理构筑物间较大的水头跌落产生的充氧效应,或滤池采用恒水位控制方式运行以降低进水 DO 值。

### ② 碳源选择及投加控制

反硝化反应的可利用碳源分为快速碳源、慢速碳源和细胞物质,快速碳源的反硝化速率最快,作为外加碳源较多。常用的快速碳源包括甲醇、乙酸和乙酸钠等。理论投加量分别为 2.47 g 甲醇/gNO<sub>3</sub><sup>-</sup>、3.30 g 乙酸/gNO<sub>3</sub><sup>-</sup>、4.51 g 乙酸钠/gNO<sub>3</sub><sup>-</sup>,实际投加时需考虑亚硝酸盐、进水 DO 和安全系数。投加甲醇的运行成本最低,但由于甲醇易燃、易爆,安全管理要求高,近年来选择乙酸、乙酸钠碳源较多。投加乙酸钠的运行成本最高,乙酸作为一种快速易降解的有机物,具有较强的反硝化效能,污泥产率较低,而且投加成本低,工程设计时可作为一种优选外加碳源。但乙酸俗称“冰醋酸”,无水乙酸凝固点为 16.6 ℃,常温下为黏稠状,必须加温或者采用不凝固的改性醋酸方可采用加药泵形式投加。当反硝化滤池后置用于深度处理工艺时,需采用自动控制系统,根据需去除的硝态氮负荷量做到精确投加碳源,确保出水 COD 和 TN 都稳定达标。

### ③ 水头损失的确定

根据实际检测,以石英砂层厚 1.83 ~ 2.44 m 计,空床滤速为 3.6 ~ 6.3 m/h 时,计入滤砖、管路等损失,下向流反硝化深床滤池单位石英砂滤层的过滤水头可取 0.75 ~ 1.10 m/m。下向流反硝化滤池运行时,滤层内会集聚大量 N<sub>2</sub> 气泡,为防止水头损失增长过快,应增设氮气驱除系统,开启反洗水泵运行 1 ~ 2 min 即可<sup>[9]</sup>,驱氮周期约 4 h,可调节。上向流反硝化陶粒滤池空床滤速为 4 ~ 10 m/h 时,以滤料层厚 3.0 m 计,单位滤层的过滤水头可取 0.5 ~ 0.7 m/m(含滤头滤板、承托层、管路等损失)。

### ④ 反洗强度的设置与调节

反硝化滤池依次按照气洗、气水联合反洗、单独水洗的方式进行反洗。下向流石英砂深床滤池的气冲洗强度稍大,通常取 90 ~ 110 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),上向流陶粒滤池取 70 ~ 100 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)。因陶粒滤池床层深度大,水洗强度较大,故宜采用 18 ~ 30 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),下向流石英砂深床滤池水洗强度取 15 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)。Biostyr 滤池因采用特殊的悬浮轻质滤料,通常采用大流量的水重力反洗,辅以小强度

气洗即可满足要求。反硝化滤池的反洗水泵和风机宜采用变频调节方式,或在反洗干管上设置自动控制的可调节阀,在滤池调试挂膜初期或生物膜生长欠佳等条件下,便于调节反洗强度,保证反硝化菌的最佳生长条件。

## 3 结语

反硝化滤池设计过程中需结合地质条件、进出水要求、运行管理等方面合理选择工艺流程和池型结构,通过相关试验或类似项目的运行经验获得合理的设计参数,并关注滤池的细节优化设计及自动控制,可确保出水水质稳定达标及操作便利性。对比其他池型,陶粒滤池的生物陶粒滤料易挂膜、价格低,可利用粉煤灰等实现废物利用,池体采用整浇式滤板及防堵滤头,工艺成熟且运行稳定,可保证上向流反硝化滤池均匀配水配气,可作为反硝化滤池的一种优选工艺。

## 参考文献:

- [1] Husband J A, Slattery L, Garrett J, et al. Full-scale operating experience of deep bed denitrification filter achieving <3 mg/l total nitrogen and <0.18 mg/l total phosphorus [J]. Water Sci Technol, 2012, 65 (3): 519 - 524.
- [2] 葛玫,许新灵. 污水处理厂反硝化深床滤池的比较与应用[J]. 浙江化工,2017,48(6):36 - 38.  
Ge Mei, Xu Xinling. Comparison and application of denitrification deep-bed filter in sewage treatment plant [J]. Zhejiang Chemical Industry, 2017, 48 (6): 36 - 38 (in Chinese).
- [3] 严欣茹,李佳林,马天添,等. 反硝化生物滤池系统和活性砂滤池系统运行效果对比[J]. 生物化工,2016,2(2):26 - 28.  
Yan Xinru, Li Jialin, Ma Tiantian, et al. Operating results contrast denitrification biofilter system and active sand filter system [J]. Biological Chemical Engineering, 2016, 2(2): 26 - 28 (in Chinese).
- [4] 杨胜鑫. 佛山市三家污水处理厂提标改造工程设计方案[J]. 净水技术,2019,38(6):35 - 40.  
Yang Shengxin. Design proposals of upgrading and reconstruction projects for three wastewater treatment plants in Foshan City [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(6): 35 - 40 (in Chinese).
- [5] 龚蕾蕾. 反硝化连续砂滤池与反硝化深床滤池的工艺

比选[J]. 中国科技纵横,2019,4(7):11-12.

Gong Leilei. Contrast and selection of denitrification active sand filter and deep bed filter[J]. China Science & Technology Overview, 2019, 4(7): 11-12 (in Chinese).

- [6] Debarbadillo C, Lambert M, Parker D, *et al.* Denitrification filters: A comparison of manufacturers and review of performance, patent and bidding issues [J]. Proc Water Environ Fed, 2004, (10): 435-457.
- [7] Zheng X, Zhang S, Zhang J, *et al.* Advanced nitrogen removal from municipal wastewater treatment plant secondary effluent using a deep bed denitrification filter [J]. Water Sci Technol, 2018, 77(11): 2723-2732.
- [8] 商佳吉,洪超,吕劲衢,等. 反硝化滤池用于城镇污水处理厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2019, 35(6): 93-98.  
Shang Jiaji, Hong Chao, Lü Jinheng, *et al.* Application of denitrification filter in upgrading and reconstruction of an urban wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6): 93-98 (in Chinese).
- [9] GB/T 37528—2019, 脱氮生物滤池通用技术规范[S].

北京:中国标准出版社,2019.

GB/T 37528 - 2019, General Technical Specification for Biological Filter for Nitrogen Removal [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019 (in Chinese).



**作者简介:**栗文明(1983- ),男,山西绛县人,硕士,高级工程师,研究方向为给水及废水处理技术。

**E-mail:** ubaf@qq.com

**收稿日期:** 2020-01-14

(上接第99页)

能量,同时产生多余的热量。设计过程中与制冰工艺协调设计,利用制冰余热融冰,达到节能的效果。

#### 4 结论

在某冰上运动比赛训练馆工程给水排水设计中,充分考虑建筑功能、造型等因素,因地制宜地对给水排水各个系统进行比选,采用了经济、合理、实用、节能环保的设计方案。

#### 参考文献:

- [1] GB 50084—2017, 自动喷水灭火系统设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2017.  
GB 50084 - 2017, Code for Design of Sprinkler Systems [S]. Beijing: China Planning Press, 2017 (in Chinese).
- [2] GB 50555—2010, 民用建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.  
GB 50555 - 2010, Standard for Water Saving Design in Civil Building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese).



**作者简介:**王官胜(1986- ),男,江西南昌人,硕士,高级工程师,注册公用设备工程师,副所长,主要从事建筑给水排水设计及研究工作,已完成大型工程项目70余项,同时参与完成十余项课题研究及多项规范编制工作,曾获2019年“水业杰出青年”等称号。

**E-mail:** 409970292@qq.com

**收稿日期:** 2019-10-18