

设计经验

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.04.012

# FCR工艺在辽宁某城镇污水处理工程中的应用

曹 猛

(大连市市政设计研究院有限责任公司, 辽宁 大连 116011)

**摘 要:** 辽宁某高新园区污水处理厂工程设计规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,在原废弃污水处理厂厂址内进行改造建设,其中生物池、沉淀池及深度处理间等构筑物均在厂内原生物池基础上进行改造设计。本项目对水质、气体、噪声、景观、二次污染、占地面积等方面要求较高,因此经过工艺比选,最终确定选用FCR(食物链反应器)处理工艺。实际运行结果表明,出水水质稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准。

**关键词:** FCR工艺; 城镇污水处理; 一级A标准

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)04-0071-05

## Application of Food Chain Reactor in an Urban Wastewater Treatment Project in Liaoning

CAO Meng

(Dalian Municipal Design & Research Institute Co. Ltd., Dalian 116011, China)

**Abstract:** The design scale of a wastewater treatment plant in a high-tech industrial park, Liaoning is  $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ . A reconstruction project was carried out in the former abandoned wastewater treatment plant, in which the biological tank, sedimentation tank, advanced treatment room and other structures were reconstructed on the basis of the original biological tank in the plant. The project has high requirements on water quality, gas, noise, landscape, secondary pollution control, footprint area, etc. Therefore, the food chain reactor (FCR) treatment process was eventually selected after process comparison. The actual operational results showed that the effluent quality stably met the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002).

**Key words:** FCR process; urban wastewater treatment; the first level A criteria

辽宁某高新区污水处理厂原计划于2012年开工建设,建设规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,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B标准,经过半年建设,已经完成粗细格栅池、生物池等构筑物土建部分,后因厂区占地性质及资金问题项目终止。随着近几年高新区经济不断发展,人口逐渐增长,该高新区污水处理厂规模已经不能满足需要,因此原计划建设的污水处理厂于

2017年重新提上日程。

本项目对水质、气体、噪声、景观、二次污染、占地面积等方面要求较高,因此经过比选最终确定采用FCR(Food Chain Reactor,食物链反应器)处理工艺。该工程于2018年2月开工建设,2019年4月竣工通水,处理规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,总投资为5 088.77万元,其中工程费用4 177.82万元,单位处理成本为1.28元/ $\text{m}^3$ ,单位经营成本为0.72元/ $\text{m}^3$ 。

## 1 工程概况

### 1.1 设计进、出水水质

本工程规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,进水水质参照邻近污水处理厂实际运行水质数据90%保证率确定,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。具体设计进、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	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
进水	400	200	240	30	50	3
出水	50	10	10	5	15	0.5

### 1.2 水质特点分析

由污水处理厂设计进水水质可知,本工程 $\text{BOD}_5/\text{COD}=0.50$ ,属易生化处理范围。一般来说, $\text{BOD}_5/\text{TN}>3 \sim 5$ ,即可认为污水有足够的碳源供反硝化菌利用,本工程 $\text{BOD}_5/\text{TN}=4.0$ ,在不投加外部碳源情况下,进水有足够的碳源供给反硝化菌利用。本工程 $\text{BOD}_5/\text{TP}=66.7$ ,可以采用生物除磷工艺,但是考虑到出水TP要求较高,去除率高达83.3%,因此需辅助化学除磷工艺。

### 1.3 构筑物现状

本工程现有红线范围占地面积 $7\,544 \text{ m}^2$ ,其中原已建成生物池占地面积 $2\,283 \text{ m}^2$ ,一级处理间占地面积 $195 \text{ m}^2$ ,综合楼占地面积 $483 \text{ m}^2$ ,无沉淀池、无深度处理间。因此生化处理部分、泥水分离部分、深度处理部分均需在原有生物池体上改造,要求采用占地面积较小的生物处理工艺。

### 1.4 工艺流程的选择

本工程要求所选工艺技术合理先进、安全可靠、低能耗、低投入、少占地和操作管理方便等,按上述选择原则,对比分析了三种工艺方案:方案1为改良 $\text{A}^2/\text{O}$ +深度处理;方案2为FCR+深度处理;方案3为改良CAST+深度处理。其中食物链反应器FCR工艺是一个高度集约的生态系统,是IFAS(固定生物膜活性污泥法)的先进代表,以独特的食物链反应池为基础,以特殊材料和植物根系为生物载体,通过构建高度多样化的生态系统,利用各次级生态系统中的各种微生物、水生植物、水生动物等的新陈代谢作用,增强对水体中污染物的降解功

能<sup>[1-2]</sup>。其工艺示意如图1所示。三种工艺技术经济对比分析见表2。

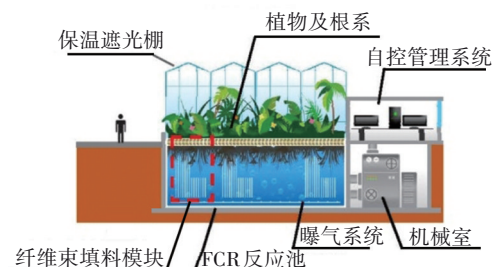


图1 FCR工艺示意

Fig.1 Schematic diagram of FCR process

表2 三种工艺比较

Tab.2 Comparison of three processes

项目	方案1	方案2	方案3
工艺先进性	成熟经典	新型先进	成熟经典
耐水质冲击	强	强	一般
耐水量冲击	强	强	强
灵活性	强	较强	中
污泥膨胀控制	强	强	强
构筑物数量、占地	较多、较大	较少、少	较多、较少
剩余污泥量	较多	少	较多
景观美观性	较差	好	较差
设备利用率	高	高	一般
自动化程度	较高	高	较高
反应池容积/ $\text{m}^3$	11 962	6 500	13 272
单位处理成本/ (元· $\text{m}^{-3}$ )	1.40	1.28	1.48

经综合比较,方案2技术可靠、节省成本,因此最终本工程选择FCR工艺。具体工艺流程如图2所示。

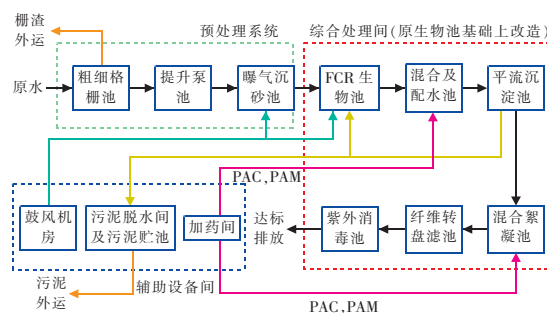


图2 污水处理工艺流程

Fig.2 Flow chart of wastewater treatment process

## 2 综合处理间工艺设计

### 2.1 FCR生化池

本工程共设2组FCR生化池,每组由6段串联

的反应单元组成。由于采用固定膜生物技术,每段反应单元能保持一个稳定的生态系统。反应池前2段为缺氧反应单元,采用潜水搅拌机促进进水的均匀混合,防止了固体物质在反应池内的沉积,并保持池体内的 ORP 条件以确保缺氧状态进行反硝化反应。为实现良好的总氮去除率,反应池末端富含硝酸盐的混合液被回流至反应池缺氧反应段的进水端,与进水一起进入缺氧反应段。利用进水中较高的有机物浓度,使反硝化速率保持在一个较高的水平。缺氧反应器单元的反硝化脱氮能力占整个

反应器反硝化脱氮能力的 70%~75% 左右。

反应池缺氧反应单元之后的 4 段均为好氧反应单元,以精准曝气的方式控制每个反应单元的溶解氧浓度,保持好氧状态。好氧反应单元主要进行碳化及硝化反应。

同时,由于 FCR 生物膜的独特结构,反硝化反应也能在好氧反应单元的生物膜中发生。好氧反应器单元的反硝化脱氮能力占整个反应器反硝化脱氮能力的 25%~30% 左右。具体的设计参数如表 3 所示。

表3 FCR 生化池主要设计参数  
Tab.3 Main design parameters of FCR

项 目	数值	项 目	数值	项 目	数值
设计水温/℃	10	硝化液回流比/%	200	单组缺氧段/段	2
溶解氧/(mg·L <sup>-1</sup> )	2	污泥外回流比/%	150	单组好氧段/段	4
泥龄/d	50	FCR 污泥浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	8 300	水力停留时间/h	15.56
产泥率/( kgDS·kg <sup>-1</sup> BOD <sub>5</sub> ·d <sup>-1</sup> )	0.75	生物模块表面积/m <sup>2</sup>	36 496	生化池曝气量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	49.1
污泥负荷/( kgBOD <sub>5</sub> ·kg <sup>-1</sup> MLSS·d <sup>-1</sup> )	0.05	生化池总容积/m <sup>3</sup>	6 500	气水比	7.07:1

单组 FCR 生化池池体有效水深 6.5 m, 超高 0.5 m; 单池总平面尺寸: 37.2 m×15.0 m; 缺氧反应段水力停留时间 3.46 h, 采用 4 台 5.5 kW 潜水搅拌机进行混合搅拌; 好氧反应段水力停留时间 8.06 h, 每组反应池内回流(硝化液回流)配备混合液回流泵 1 台,  $Q=416\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=7.5\text{ kPa}$ , 功率 2.5 kW。空气管道系统的供气管线均采用 304 不锈钢材质。生化池采用盘式曝气器, 每个曝气器的曝气能力为 0.8~8.5 m<sup>3</sup>/h, 同时利用溶解氧检测仪控制溶解氧量。2 组 FCR 生化池共选用 994 个盘式曝气器。生化池曝气气源采用空气悬浮鼓风机供给, 鼓风机设置在鼓风机房内。

2.2 平流沉淀池

本工程采用平流沉淀池进行固液分离。平流沉淀池与 FCR 生化池合建, 在原有生物池基础上进行改造。每组平流沉淀池对应一组 FCR 生化反应池。FCR 生化反应池出水直接进入平流沉淀池进行固液分离。在平流沉淀池之前投加混凝剂进行化学混凝反应, 以增强固液分离效果, 同时起到化学除磷的作用。在平流沉淀池之前设置混合池, 采用机械搅拌混凝反应池, 能够提供较好的搅拌动力, 适应水量的波动变化。混凝反应药剂选用 PAC 和 PAM, 可起到化学除磷的作用。

平流沉淀池单组尺寸为 7.2 m×37.2 m×4.7 m,

单池有效容积 870 m<sup>3</sup>, 设计流量 0.09 m<sup>3</sup>/s, 表面负荷 1.0 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h); 单组池内设置一套非金属链条刮泥机, 运行功率为 0.55 kW, 平流沉淀池末端分别设置 2 台污泥回流泵和 2 台剩余污泥泵, 均为 1 用 1 备。回流泵流量为 557.9 m<sup>3</sup>/h, 扬程 30 kPa, 功率 9 kW; 剩余污泥泵流量 19.2 m<sup>3</sup>/h, 扬程 50 kPa, 功率 1.2 kW。

2.3 深度处理间

沉淀池出水经综合配水池配水后进入深度处理间。深度处理间包括混合、絮凝、纤维转盘过滤等单元, 功能是去除水中残存的 SS、TP 及微生物, 最终使出水水质满足排放标准。由于生物池后端的混合池及平流沉淀池对 SS 及一部分 TP 起到了主要的去除作用, 本段的混凝段起到微絮凝作用<sup>[3]</sup>, 保证纤维转盘滤池进水 SS 不大于 20 mg/L。紫外消毒系统的功能是杀菌。

本工程将深度处理间与 FCR 生化池合建, 在原有生物池土建基础上进行改造。合建池体分为两组, 并联运行, 单组尺寸为 30 m×6.8 m×6.7 m。混凝池内部等分为两格, 分别主要进行凝聚反应和絮凝反应。其中混凝池分为两组, 单组混凝池净尺寸为 3.25 m×7.05 m×5.70 m, 有效水深 5.06 m, 每组有效容积 116 m<sup>3</sup>, 混合池反应时间 19.2 min。混合池内设置 2 台搅拌机, 功率为 4 kW, 絮凝池设置 2 台



搅拌机,功率为0.37 kW。

混凝池后设置两组纤维转盘滤池,单组尺寸为3.9 m×2.6 m×4.0 m。转盘过滤器单组设计流量0.09 m³/s,反冲洗水量占比3%,过滤精度10 μm,单组过滤器设置10个盘片,直径为2.4 m。紫外线消毒渠设置单条渠道,渠道宽度为475 mm,有效水深0.61 m,紫外线透光率不小于65%,模块数为8个,灯管数为64根;灯管采用低压高强紫外灯管,清洗方式为在线自动清洗。

### 3 运行效果分析

#### 3.1 整体处理效果分析

本工程于2019年4月竣工通水,在满负荷情况下,出水水质稳定达到一级A标准。2020年12月平均进、出水水质如表4所示。可见,对COD、BOD<sub>5</sub>、SS、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP的实际去除率均高于设计去除率。

表4 实际进、出水水质

Tab.4 Actual influent and effluent quality

项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	氨氮	TN	TP
设计进水/(mg·L <sup>-1</sup> )	400	200	240	30	50	3
实际进水/(mg·L <sup>-1</sup> )	365	178	215	36.30	51.20	3.25
设计出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	50	10	10	5	15	0.50
实际出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	18.00	5.22	2.25	0.20	9.20	0.24
设计去除率/%	87.50	95.00	95.83	83.33	70.00	83.33
实际去除率/%	95.07	97.07	98.95	99.45	82.03	92.62

#### 3.2 FCR系统的硝化及反硝化效果

2020年12月FCR系统(含沉淀池)出水NH<sub>3</sub>-N稳定在0.16~1.31 mg/L,去除率为95.84%~99.61%,出水指标稳定达到一级A标准,最低去除率高于设计平均去除率(95.83%)。从进出水数据可计算出FCR生物池内硝化污泥负荷为0.008 6 kgNH<sub>3</sub>-N/(kgMLSS·d)。FCR系统能够有如此好的硝化效果,主要源于FCR系统内植物根系及纤维束填料模块共同构成的生态体系。其单组填料单元由多达数万根纤维束填料垂直铺列而成,纤维束上下端编织成镂空形状的特定结构,单根纤维束由40~70股纤维丝构成。填料模块间隙种植菖蒲、铁线蕨、垂草、泽生苔草、灰毛柳等水生植物,植物的根系形成了理想的生物膜载体。由植物根系及纤维束填料构成的载体表面积远远大于单独人造载体的表面积<sup>[4]</sup>,由植物根系及纤维束填料构成的生

物膜载体为硝化菌提供了较好的生存环境,保证了较高的微生物活性,确保了较好的硝化效果。

FCR系统(含沉淀池)进出水TN运行数据见图3。可见,经过FCR反硝化硝化去除后,出水TN稳定在8.00~14.80 mg/L,去除率为68.58%~82.80%,出水指标稳定达到一级A标准,平均去除率基本维持在设计去除率水平以上,但是个别数据去除效果低于设计值,10日、13日及21日出水总氮更是接近一级A标准(15 mg/L)。这主要是因为实际进水碳氮比为3.4左右,低于设计值4.0,进水碳源略有不足,另外进水TN值超出设计值,造成出水TN接近于设计值。但总体上水质波动较小,实际反硝化效果基本达到理想的状态。从进出水数据可以推算出FCR生物池内反硝化脱氮速率约为0.016 kgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(kgMLSS·d),由填料表面积可以算出平均反硝化表面负荷为0.013 kgNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/(m²·d),均属于较理想参数。由FCR实际运行数据、相关设计参数以及特定的填料结构形式分析可知,FCR系统具有泥龄较长、生物相丰富、比表面积大等特性,使得生物脱氮时,世代时间较长的硝化细菌能达到较好的硝化效果。因此整体上FCR系统脱氮效果较好,基本达到理想状态。

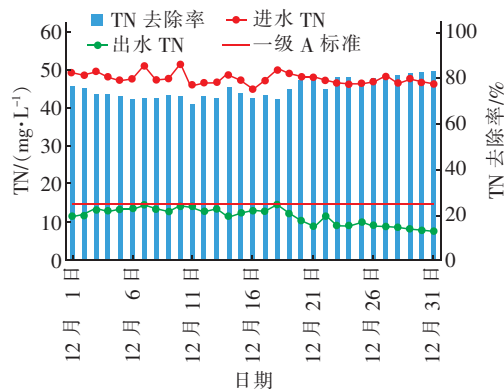


图3 TN去除效果

Fig.3 TN removal effect

#### 3.3 FCR系统对SS及TP的去除效果

由FCR系统(含沉淀池)进出水SS运行数据可见,经过粗细格栅、曝气沉砂池等一级处理后,生化池进水SS基本处于55~160 mg/L之间,波动范围较大源于原水中悬浮物的波动大及一级处理间对悬浮物的去除不稳定,机械格栅清理不及时会造成格栅堵塞,降低一级处理系统对SS的去除率。经过FCR生化池、混合池、平流沉淀池后,出水SS基本稳

定在 2.00~8.10 mg/L 范围内,达到一级 A 标准,但是个别数据接近一级 A 标准限值,为了保证出水 SS 稳定达标,在平流沉淀池末端增加了深度处理系统,由混凝-纤维转盘滤池进一步去除 SS。

FCR 系统(含沉淀池)进出水 TP 运行数据见图 4。可见,进水 TP 处于 3.25~4.54 mg/L 之间,高于设计值(3 mg/L),沉淀池出水 TP 稳定在 0.12~0.50 mg/L 范围内,基本达到了一级 A 标准,但是本次分析数据仅为 12 月数据,夏秋季高峰期进水 TP 有可能远高于设计值,因此难以保证出水 TP 稳定达到一级 A 标准。为此,本工程平流池末端的混凝-纤维转盘构成的微絮凝系统能够进一步处理 TP,确保系统出水 TP 稳定达到一级 A 标准。

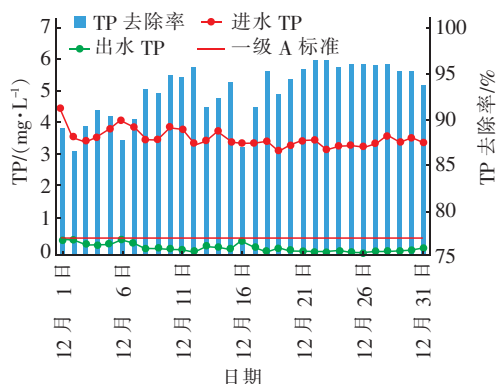


图 4 TP 去除效果

Fig.4 TP removal effect

#### 4 结语

① FCR 工艺纤维束填料和植物根系构成良好的生物膜系统,比表面积大、生物相丰富、污泥停留时间长,为硝化菌等微生物提供了良好的生存环境,系统具备较好的硝化、反硝化效果。

② 实际运行结果表明,城镇污水经过 FCR 工艺-深度处理系统处理后,出水水质可稳定达到一

级 A 标准。

#### 参考文献:

- [1] 杨欣,谭周权. FCR 技术在工业园污水处理工程中的应用[J]. 中国给水排水,2017,33(8):82-85.  
YANG Xin, TAN Zhouquan. Industrial park wastewater treatment with FCR technology [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8):82-85(in Chinese).
- [2] 张显忠. FCR 工艺用于城镇污水处理厂提标改造工程[J]. 中国给水排水,2016,32(4):35-39.  
ZHANG Xianzhong. Application of FCR process in upgrading and reconstruction project of urban sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(4):35-39(in Chinese).
- [3] 王慧莉,归谈纯,顾海玲,等. 微絮凝/盘式过滤器用于雨水回用处理的研究[J]. 给水排水,2015,41(1):84-88.  
WANG Huili, GUI Tanchun, GU Hailing, et al. Study of micro-flocculation/disc filter for rainwater reuse system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(1):84-88(in Chinese).
- [4] 张显忠. FCR 工艺机理探讨及其技术应用展望[J]. 中国市政工程,2017(5):36-39.  
ZHANG Xianzhong. Discussion on FCR process mechanism and its application prospect [J]. China Municipal Engineering, 2017(5):36-39(in Chinese).

作者简介:曹猛(1986- ),男,满族,辽宁辽阳人,硕士,高级工程师,高级项目经理,注册公用设备工程师(给排水),从事水污染控制、餐厨垃圾处理研究和项目管理工作。

E-mail:longzhaomeng@126.com

收稿日期:2021-01-20

修回日期:2021-05-17

(编辑:孔红春)

借自然之力,护绿水青山