

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.02.011

多级速分工艺在高排放标准污水处理站的应用

杨金明, 林春晓, 董 军, 杨海斌, 杨玉军
(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 昆明市某河道治理配套污水处理站设计规模为 $7\,500\text{ m}^3/\text{d}$,采用初沉池—多级速分生化池—斜管沉淀池—气浮池—纤维转盘滤池组合处理工艺。经过几年运行,污水处理站出水各项指标均优于昆明市《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》(DB 5301/T 43—2020)B级标准,单位水量处理经营成本为 $1.63\text{ 元}/\text{m}^3$ 。采用“好氧—缺氧—好氧—缺氧—好氧”五级速分生化技术,占地面积小、启动快、处理效果好、污泥产量低、操作方便,可应用于小型高排放标准污水处理工程。

关键词: 速分生化工艺; 高排放标准; 污水处理站; 气浮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)02-0065-05

Application of Multi-stage Flow-separated Technology in Sewage Treatment Station with High Discharge Standard

YANG Jin-ming, LIN Chun-xiao, DONG Jun, YANG Hai-bin, YANG Yu-jun
(Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: The design scale of a sewage treatment station for river remediation in Kunming is $7\,500\text{ m}^3/\text{d}$, and its combined treatment process consists of primary sedimentation tank, multi-stage flow-separated biochemical tank, inclined tube sedimentation tank, air floating tank and fiber rotary disk filter. After several years of operation, the effluent indicators of the sewage treatment station are better than the level B limits specified in *Discharge Standard for Urban Sewage Treatment Plant* (DB 5301/T 43—2020) issued by Kunming, and the operational cost is $1.63\text{ yuan}/\text{m}^3$. The application of the five-stage “aerobic-anoxic-aerobic-anoxic-aerobic” flow-separated biochemical technology demonstrates the advantages of small footprint area, short startup time, good treatment performance, low sludge yield and easy operation, which can be applied in small sewage treatment projects with high-discharge standard.

Key words: flow-separated biochemical technology; high discharge standard; sewage treatment station; air floatation

1 项目概况

滇池位于云贵高原中部,是昆明赖以生存和发展的基础,滇池保护治理是昆明最大的生态工程。昆明市2018年2月出台了《滇池保护治理三年攻坚行动实施方案(2018—2020年)》,明确要求至2020年滇池外海和所有入湖河道及支流沟渠水质稳定达到地表水Ⅳ类及以上。滇池支流某河道水质常

年为地表水劣Ⅴ类,片区现状污水处理厂已满负荷运行,无法承接河道沿线截流污水以及雨季合流污水,导致大量污水直排河道,故采用分散式就地处理的截污治污方式,以排污口对应的纳污片区为单位,建设分散式污水处理站。考虑雨季合流污水,在重点合流口建设调蓄池,与污水处理站联动运行。

随着滇池治理进入新时期,对流域内污水处理排放标准提出了较高的要求,其中 $TN \leq 5 \text{ mg/L}$ 、 $TP \leq 0.05 \text{ mg/L}$,比近些年各地方(如北京市、浙江省、江苏省、河北省、天津市、安徽省等^[1])发布的地方标准更为严格,使得污水处理设计难度加大。该污水处理站设计之初,昆明市《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》(DB 5301/T 43—2020)尚未正式颁发,但本工程运行按照该标准执行相应排放限值。

该污水处理站设计规模为 $7\,500 \text{ m}^3/\text{d}$,占地面积 0.84 hm^2 ,厂区初步设计工程一类费用为 $5\,927.31$ 万元。该工程于2020年1月进行了分项验收,目前已经正式运行3年。

2 设计进、出水水质

该污水站主要处理某待拆迁城中村的生活污水,服务区域内排水体制为合流制,旱季污水通过截流管道进入污水处理站,通过实时监测旱季污水量约为 $3\,500 \text{ m}^3/\text{d}$,雨季片区内 15 mm 降雨量的合流污水先进入调蓄池,再错峰抽排至污水处理站,处理后尾水就近排入河道,作为河道生态补水。根据滇池治理要求,出水 TN 、 TP 需达到昆明市地标DB 5301/T 43—2020的A级限值要求($TN \leq 5 \text{ mg/L}$ 、 $TP \leq 0.05 \text{ mg/L}$),其他指标需达到B级标准。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	BOD_5	COD	NH_3-N	TP(以P计)	TN
进水	220	300	35	5	40
出水	≤ 6	≤ 30	≤ 1.5	≤ 0.05	≤ 5

3 工艺流程

针对实际情况,污水处理工艺的选择需考虑以下因素:①工程位于建成区,可利用土地面积紧张,需选择占地小的工艺及构筑物;②排水方式为合流制,旱、雨季来水水质及水量波动大;③出水 $TN \leq 5 \text{ mg/L}$ 、 $TP \leq 0.05 \text{ mg/L}$,在国内属于较高要求,仅靠传统处理工艺无法满足。

根据进、出水水质,污水处理的重点为 BOD_5 、COD,难点为 NH_3-N 、 TP 、 TN ,污水处理整体工艺采用预处理—生物处理—深度处理方案。预处理以物理方法为主,去除漂浮物及颗粒物质,对有机物等其他污染物有一定的去除作用;二级处理以生物

方法为主,通过多级好氧、缺氧环节的交替循环,以强化脱氮、去除有机物为主要目标,兼顾生物除磷;本次工程要求 $TP \leq 0.05 \text{ mg/L}$,采用传统沉淀、过滤除磷方式存在较大难度,深度处理需采用强化化学除磷及分离工艺才能达到设计要求。

结合昆明市污水处理工艺应用情况,核心二级生物处理推荐采用速分工艺。该工艺通过填充特殊结构的速分球作为生物膜载体,污水在球体外流速快,在球体内流速慢,污水中悬浮物、胶体及微生物在流速慢的地方产生流离现象,通过流离聚集和多项生物反应,完成固液分离、有机物降解和含氮污染物的去除^[2]。与传统生化工艺相比,速分技术流程简单、处理效果稳定、操作管理方便、污泥产量小、占地面积小^[3]。因此,速分技术可解决本项目用地紧张的问题,同时利用其启动快的特点可将速分池设置为多个模块,根据来水量调整运行模式,解决水量波动大的问题。沿速分池水流方向合理布置曝气系统,控制曝气量,在池内形成多级好氧、缺氧单元,并结合碳源投加,提高脱氮能力,使出水 $TN \leq 5 \text{ mg/L}$ 。结合相关中试研究^[4]和昆明市污水处理超极限除磷的实例,深度处理推荐采用气浮+过滤工艺,可使出水 $TP \leq 0.05 \text{ mg/L}$ 。

根据用地条件,从运行效果、管理技术、运行费用等方面分析,最终确定处理工艺为初沉池—多级速分生化池—斜管沉淀池—气浮池—纤维转盘滤池,采用紫外线消毒,污泥采用离心脱水至含水率为80%后外运处置。工艺流程见图1。

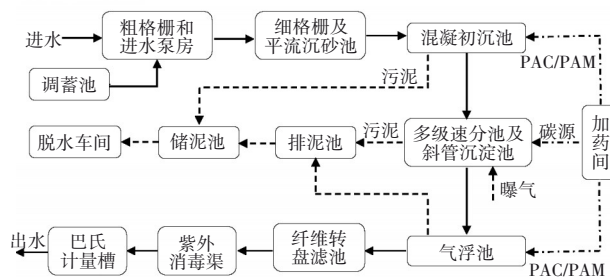


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of sewage treatment process

4 主要处理构筑物及设计参数

4.1 调蓄池

为满足滇池治理对雨季合流区域溢流控制的要求,杜绝雨季支流沟渠初期雨水翻闸翻坝溢流,本项目调蓄池的调蓄量按 15 mm 降雨量设计,有效

容积为13 300 m³,采用半地下式矩形布置,除必要的建筑物、通风孔、检修孔外,均采用绿化覆土。平面尺寸为60.0 m×44.9 m,有效水深为5.1 m,共分为8条冲洗廊道,廊道净宽度为5 m。排空时间为10 h,排空泵3用1备,单台设计流量为450 m³/h,调蓄池压力出水至污水站进水管。采用门式冲洗方式,根据运行水位自动控制,同时配合手动控制。

4.2 预处理单元

预处理单元主要包括粗格栅、进水提升泵房、细格栅、平流沉砂池、混凝初沉池。

粗格栅渠与进水泵房合建,粗格栅间隙为20 mm,提升泵采用大、小泵搭配,小泵1台,流量为80 m³/h;大泵3台,流量为170 m³/h。细格栅间隙为3 mm,沉砂池为2格,停留时间为58 s,设计流速为0.12 m/s。

本工程在生化池前设置混凝初沉池,一方面,污水中部分有机物在初沉池内沉降去除,可减轻后续速分生化池的处理负荷;另一方面,由于工程对出水TP要求非常严格,通过混凝沉淀去除部分悬浮物,强化除磷效果。混凝初沉池设1座3格,每格依

次为混合区、反应区和沉淀区,其中单格混合区有效容积为21.84 m³,混合时间为8.6 min;单格反应区有效容积为26.2 m³,反应时间为11.6 min;沉淀区采用竖流初沉池,单格平面尺寸为7.1 m×6.5 m,有效水深为2.5 m,沉淀时间为1.1 h,表面水力负荷为2.3 m³/(m²·h),四周设置集水槽和出水堰板,出口堰负荷为1.5 L/(m²·s)。设置污泥泵2台(冷备1台),单台流量为30 m³/h。

4.3 多级速分池及斜管沉淀池

速分生化池是工艺核心,本工程对出水TN要求较高,需要在生化段使TN和NH₃-N达标,经分析确定采用五级速分工艺,即“好氧—缺氧—好氧—缺氧—好氧”,停留时间分别为5、3、2、3、1 h。由于进水受季节性影响较大,将速分生化池分为4个模块,共8组,每组规模为39 m³/h,可根据来水量调整运行组数。

整座速分池平面尺寸为77.88 m×33.6 m,有效水深为4.37~4.70 m,单模块具体内部构造如图2所示(图中尺寸均以m计)。

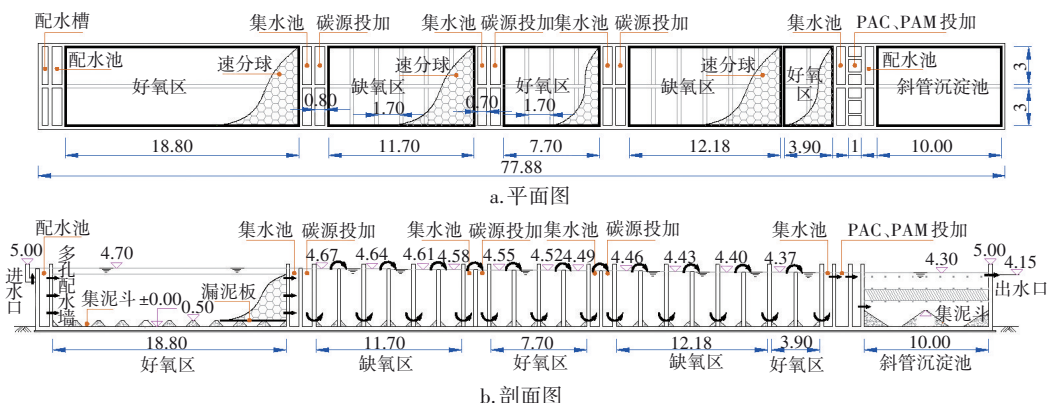


图2 单模块速分池示意

Fig.2 Schematic diagram of a group in flow-separated biochemical tank

为了提高速分池的布水均匀性,在每级速分池中间设置过渡水池进行水流再分配,进、出口采用多孔配水墙均匀配水,同时每一级速分池竖向水流方向呈折线形,保证配水均匀和流离均匀。速分池内填充好氧速分生化球和脱氮速分生化球,速分球直径为6~10 cm,球内填充1~2 cm改性聚氨酯块和配重砾石,使球体与水密度接近,从而流离于水中,好氧速分生化球共计2 790 m³,脱氮速分生化球共计2 355 m³。整个池底布满环状曝气管,设置6台三叶罗茨鼓风机,4用2备,每台风机对应1个模块,风量为16.6 m³/min,通过控制曝气量在水流方向形成

多级好氧—缺氧单元。设置2台碳源投加泵,1用1备,在中间3段速分池进水端投加碳源,流量为656 L/h,以达到良好的脱氮效果。在速分池内,沿水流方向会形成细菌、原生动物、后生动物完整的生物链,污泥龄较长,排泥量极低^[5],在每一个速分单元均设置了排泥阀。速分生化池通常不需要设置二沉池和污泥回流设施,也无需反冲洗,进水、曝气、污水净化、固液分离都在1组速分池中完成。

由于生化除磷效果有限,在速分池后设置斜管沉淀池,强化化学除磷,减小后端气浮负荷。斜管沉淀池与速分池合建,其平面尺寸为10.6 m×33.6

m,共8组,与速分池对应布置,上升流速为0.36 mm/s。

4.4 气浮设备

相比传统的混凝、沉淀、过滤单元,气浮具有处理负荷高、占地面积小的特点。相关研究^[4]表明,气浮工艺对悬浮态TP和磷酸盐的去除效果较好,合理控制运行参数可使出水TP≤0.05 mg/L。本工程气浮设备基础平面尺寸为15.0 m×15.0 m,设置3组(2用1备),每组设计规模为156 m³/h,功率为20 kW。气浮除磷效果与处理负荷、回流比、溶气压力及药剂投加量有关,本项目选取表面负荷为15.8 m³/(m²·h),回流比为10%,PAC投加量为60~150 mg/L,PAM投加量为0~0.5 mg/L。

4.5 纤维转盘滤池

超极限除磷对固液分离要求较高,气浮出水因含有微絮体,使得颗粒磷占比升高,而过滤单元可有效截留高负荷下气浮出水的残存微絮体^[4],因此气浮工艺需要与过滤工艺联用。由于该污水站规模小、用地紧张,因此过滤单元选择纤维转盘滤池。设钢混结构的滤池1座,平面尺寸为8.0 m×3.2 m,高为3.5 m。滤盘直径为2 m,数量为8个,滤速≤15 m/h,过滤网孔径≤5 μm,平面过滤介质抗拉强度≥600 N/cm,有效过滤面积为45.6 m²,单盘有效面积为5.7 m²。配套反冲洗系统1套,反冲洗水就近排入厂区污水管,统一收集到进水泵房。

4.6 紫外消毒渠及巴氏计量槽

紫外消毒渠平面尺寸为17.5 m×3.5 m,高为2.4 m,紫外线消毒剂量>15 mJ/cm²,配备6套机械自动清洗系统,单套清洗压力为0.25~0.4 MPa。巴氏计量槽平面尺寸为13.0 m×1.5 m,高为1.89 m,设计喉道宽度为0.25 m,计量流量为3.0~250 L/s。

4.7 加药间

加药单元主要包含初沉池、斜管沉淀池、气浮设备中的PAC和PAM投加,以及速分池的碳源投加。每个投药单元均配备对应的配药桶、储药桶和搅拌装置,共设置计量泵20台,10用10备。

4.8 污泥处理系统

排泥构筑物主要有初沉池、速分池、斜管沉淀池、气浮池,其中初沉池为污泥泵压力排泥至储泥池;速分池、斜管沉淀池、气浮池为先重力排泥至排泥池,再通过污泥泵排至储泥池。污泥脱水车间配套离心脱水机和污泥螺杆泵各2套,脱水后污泥暂

存于污泥堆棚,由运营单位统一外运处置。

5 处理效果及运行费用

5.1 处理效果

污水处理站自2020年1月运行以来均能稳定达标,选取了2022年2月1日—7月31日连续6个月的生产报表进行分析,污水处理效果见表2。

表2 实际运行进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality

mg·L⁻¹

项目		水质范围	平均值
COD	进水	79.42~249.98	146.60
	出水	11.48~27.92	22.65
NH ₃ -N	进水	8.01~32.19	16.89
	出水	0.02~1.01	0.22
TN	进水	15.39~47.96	29.00
	出水	0.53~4.17	2.30
TP	进水	0.71~4.56	1.99
	出水	0.01~0.04	0.02

根据2022年上半年运行数据可知,平均日处理污水量为5 304 m³/d,低于设计规模(7 500 m³/d)。由表2可知,本工程进水有机负荷不稳定,波动范围较大,但出水COD≤30 mg/L,平均去除率达到84.5%,能够稳定达标,说明所选工艺抗冲击负荷能力较强,特别是将速分池划分为8组,可根据来水量调整运行数量。生化池未设置碳源过量监测反馈仪表,但出水COD正常,说明投加的碳源在生化段被充分利用,若出现碳源过量,深度处理气浮设备对其仍有一定去除效果。本工程采用五级速分工艺,污水在每级速分池内重复多次发生厌氧、好氧、硝化、反硝化交替作用,脱氮环境良好;同时在缺氧段投加碳源,提高了大量附着于速分球上硝化菌和反硝化菌的脱氮能力,NH₃-N和TN平均去除率分别达到98.7%和92.1%。对TP的平均去除率高达99.0%,说明高效溶气气浮对絮凝后不溶性磷酸盐沉淀物的固液分离效果较好,过滤单元对气浮出水中微絮体实现了有效拦截。从实际处理效果分析,本工程采用的速分生化技术运行稳定,集生化反应、沉淀和过滤于一体,微生物生长快,启动时间短,产泥量低,结合气浮+过滤深度处理单元,实现了高效降碳、脱氮除磷的目标。综上,污水处理站出水COD可以稳定达到昆明市地标DB 5301/T 43—2020的B级标准,TN、TP已经达到A级限值,整体处

理效果优于设计标准。

5.2 运行成本

运行成本核算主要包含电耗、药耗及生产管理人员产生的费用,本工程单位水量处理经营成本为1.63元/m³,其中电费为0.41元/m³、药剂费(包括乙酸钠、PAC、PAM)为0.87元/m³、生产管理人员及维修管理费用为0.35元/m³。

6 结论

该工程解决了河道沿线污水无出路的问题,将现状直排河道污水、溢流进入河道的污水进行有效收集并就地处理,改善水质的同时增加了河道生态补水量,工程效益明显。随着治理力度加大,滇池流域新建的污水处理设施和现存的污水处理厂都将执行昆明地方污水排放标准。本工程采用初沉池—多级速分生化池—斜管沉淀池—气浮池—纤维转盘滤池组合处理工艺,从实际运行情况看,出水稳定达到昆明市地标《城镇污水处理厂主要水污染物排放限值》(DB 5301/T 43—2020)B级标准,其中TN和TP满足A级限值(TN≤5 mg/L、TP≤0.05 mg/L)的要求;除TN外,其余主要指标均已达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类标准,实际运行效果优于设计标准,且整套污水处理工艺运行费用合计1.63元/m³,有一定工程参考价值。

参考文献:

- [1] 蔡木林,卢延娜,刘琰,等.城镇污水处理厂出水排放限值分级及提标成本研究[J].环境科学研究,2021,34(7):1562-1568.
- CAI Mulin, LU Yanna, LIU Yan, *et al.* Classification of effluent discharge limits of municipal sewage treatment plant and cost of upgrading standard [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34 (7) : 1562-1568 (in Chinese).
- [2] 王帆,李军,边德军,等.流离球填料强化低温脱氮及

填充率优化[J].中国给水排水,2019,35(11):9-14.

WANG Fan, LI Jun, BIAN Dejun, *et al.* Flow-separated ball filler for enhanced nitrogen removal under low temperature and its internal filling rate optimization [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (11) : 9-14 (in Chinese).

- [3] 邓妍,刘兴静,杨迪,等.速分生化技术处理城市生活污水工程实例[J].中国给水排水,2019,35(2):92-96.

DENG Yan, LIU Xingjing, YANG Di, *et al.* Case study on urban domestic sewage treatment project by rapid separation biochemical technology [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2): 92-96 (in Chinese).

- [4] 崔朋,章诗璐,宋子明,等.溶气气浮极限除磷中试研究[J].给水排水,2020,46(11):33-37,44.

CUI Peng, ZHANG Shilu, SONG Ziming, *et al.* Pilot-plant study of dissolved air flotation for phosphorus removal to meet ultra-low phosphorus limits [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46 (11) : 33-37, 44 (in Chinese).

- [5] 李莉,沈彤,赵志伟,等.速分生化技术处理热带离岛海岛低C/N值生活污水[J].中国给水排水,2021,37(23):88-94.

LI Li, SHEN Tong, ZHAO Zhiwei, *et al.* Treatment of domestic sewage with low C/N ratio in tropical offshore islands by flow-separated biochemical technology [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (23) : 88-94 (in Chinese).

作者简介:杨金明(1990—),男,云南昆明人,硕士,工程师,从事给排水和水环境治理设计研究工作。

E-mail:yeungjimmy130@126.com

收稿日期:2022-12-30

修回日期:2023-03-13

(编辑:沈靖怡)