

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.24.020

# 污泥焚烧工程调试经验对设计优化的启示

生 骏, 张帅领

(上海市市政工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092)

**摘 要:** 以上海市石洞口污泥处理二期工程为例,通过分析工程调试经验,探讨污泥焚烧工程的设计优化措施。为应对入炉污泥热值及含水率波动,稳定焚烧炉运行工况,可调整半干污泥及脱水污泥的入炉量配比,并在炉前污泥接收设施中增加均质功能。为进一步提高工程运行的灵活性和稳定性,降低生产线逻辑控制难度,可在干化和焚烧环节之间设置集中的半干污泥储存设施。污泥输送系统应尽可能简化输送环节,输送设备的能力余量不宜过大,且需考虑炉前干湿泥返混后污泥性状改变的工况。

**关键词:** 污泥焚烧工程; 调试; 设计优化

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)24-0113-06

## Enlightenment of Sludge Incineration Project Commissioning Experience on Design Optimization

SHENG Jun, ZHANG Shuai-ling

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This paper discusses the design optimization measures of the sludge incineration project by analyzing the commissioning experience based on the second phase project of Shanghai Shidongkou sludge treatment plant. The ratio between semi-dry sludge and dewatered sludge can be adjusted according to the fluctuations of sludge calorific value and moisture content, and a homogenizing function can be added in the sludge receiving facility before furnace, so as to stabilize the operation conditions of the incinerator. A centralized storage facility for semi-dry sludge can be set up between drying and incineration processes to improve the flexibility and stability of project operation, also reduce the difficulty of logical control for the production line. The sludge conveying system should be simplified as much as possible. The capacity allowance of the sludge conveying system should not be too large. Moreover, it is necessary to consider the working condition caused by sludge property change after the backmixing of dry and wet sludge before furnace.

**Key words:** sludge incineration project; commissioning; design optimization

污泥焚烧是污水厂污泥处理处置的主要方式之一。由于其对污泥的减量化程度最高,随着城市土地资源的稀缺性增强,污泥焚烧得到了重视及推

广<sup>[1-4]</sup>。而在水务行业中,污泥焚烧工程相对案例较少,运行较为复杂,需要通过不断优化来进一步提高工程运行的稳定性和可靠度。工程调试工作是检

基金项目: 上海市国际科技合作基金项目(19230730900)

验设计质量的重要环节,一方面通过调试可验证工程的设计理念 and 措施是否有效可行;另一方面调试过程中的经验教训也为后续类似工程的设计优化提供了依据。以上海市石洞口污水处理厂污泥处理二期工程<sup>[5]</sup>为例,通过分析工程实际调试的数据及经验,提出优化思路,可为其他工程提供借鉴。

## 1 工程设计

石洞口污水处理厂污泥处理二期工程设计规模为 128 tDS/d,处理对象包括泰和污水厂含水率 40% 以下的半干污泥(设计规模 108 tDS/d)及石洞口污水厂含水率 98%~99.2% 的稀污泥(设计规模 20 tDS/d)。主体工艺流程如图 1 所示。

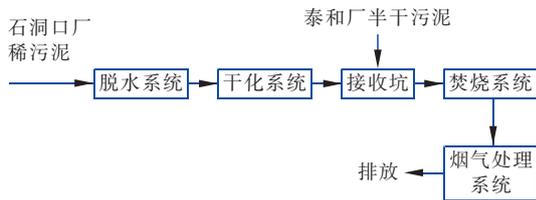


图1 污泥处理工艺流程

Fig. 1 Flow chart of sludge treatment process

石洞口污水厂稀污泥经脱水及干化后,含水率降至 30% 以下,卸入半干污泥接收坑,与泰和厂卡车运来的半干污泥一起入炉焚烧。焚烧产生的烟气经处理后达标排放,灰渣则外运填埋或资源化利用。

焚烧系统共设置 3 条生产线(无备用),单线配备鼓泡流化床焚烧炉 1 台,一般工况下单线处理量为 42.7 tDS/d。考虑焚烧炉全年正常停炉检修等因素,单台焚烧炉的实际污泥处理规模为 57 tDS/d。考虑不同污水厂、不同季节污泥热值波动,设计污泥干燥基高位热值为 10.8~19.9 MJ/kg,一般典型值约 13.5 MJ/kg。

## 2 工程调试

为缓解上海市污泥处理处置压力,石洞口污泥二期工程作为石洞口片区污泥处理的兜底工程亟需尽快投产使用,根据总体安排,脱水系统、干化系统及一条焚烧生产线率先完成了调试及 168 h 满负荷性能考核,考核期间各指标均达到或优于考核值。

### 2.1 调试工作

本工程调试工作分成单机调试→分系统调试→联动调试→负荷调试→性能考核五个阶段;按功能单元分为污泥接收储运、污泥脱水、污泥干化、污泥输送、污泥焚烧、烟气处理、配套公辅除臭及电气仪

表共七大系统。对于核心的污泥干化及污泥焚烧系统,负荷调试是从低负荷适应运行开始,分阶段逐渐提升至满负荷,最终确认系统处理量可稳定达到满负荷的过程。负荷调试期间,对各系统设备的运行状态按照调试情况不断进行参数修正及故障排除,总结产生的问题,并及时解决,确保设备可持续稳定地满负荷运行。

污泥干化系统的负荷调试步骤:蒸汽管道暖管,启动干化系统配套冷却循环水、载气风机、启动干化机并进行暖机操作,确认干化机疏水排气状态,并记录干化机内温度变化;暖机结束后,主蒸汽管道通蒸汽且干化机内温度达到进泥温度后,通过低负荷投泥进行适应运行,并确认适应运行的设备状态;按 20%、50%、80%、100% 的顺序逐渐增加负荷,直至满负荷。每提高一次负荷前,需确认上次负荷的出泥状态及设备电流、干化机机内温度、载气量、干化机负压等参数稳定后方可进行;提升至满负荷,出泥状态稳定后,持续运行 24 h 以上,以确认干化系统可稳定运行;对负荷运行过程中出现的问题及故障及时解决和排除。

污泥焚烧系统的负荷调试步骤:向炉内投砂,调整炉内负压,点燃启动燃烧器,调整燃烧状态,先后通过启动燃烧器、辅助燃烧器对焚烧炉进行升温,升温过程严格遵守焚烧炉升温曲线;升温至 850 °C 后,通过低负荷投泥进行适应运行,确认适应运行时的焚烧状态;按 20%、60%、80%、100% 的顺序逐渐增加负荷,直到达到满负荷。每次提高负荷前,需确认上次负荷的运行状态稳定后方可进行;负荷提升至满负荷,运行状态稳定后,需持续运行 24 h 以上,以确认焚烧系统可稳定运行;对负荷运行过程中出现的问题及故障及时解决和排除。

### 2.2 性能考核工作

在完成负荷调试工作后,按要求进行了 168 h 的性能考核。性能考核要求见表 1。性能考核期间,各系统实际污泥处理量见图 2。其中脱水系统处理量为 20.14~22.58 tDS/d,平均处理量为 21.22 tDS/d;干化系统处理量为 20.01~27.93 tDS/d,平均处理量为 23.48 tDS/d;焚烧系统处理量为 70.34~75.87 tDS/d,平均处理量为 72.99 tDS/d,均优于考核值。由于性能考核期间入炉污泥实际热值为 11.8 MJ/kg 左右,低于设计值 13.5 MJ/kg,导致在热容量一定的情况下实际焚烧污泥量与考核值

相比有较大提高。

表 1 性能考核要求

Tab. 1 Requirements for performance assessment

考核项目	考核要求
脱水系统污泥处理量/ (tDS · d <sup>-1</sup> )	≥ 20
干化系统污泥处理量/ (tDS · d <sup>-1</sup> )	≥ 20
焚烧生产线污泥处理量/ (tDS · d <sup>-1</sup> )	≥ 57
烟气	《生活垃圾焚烧大气污染物排放标准》(DB 31/768—2013)
臭气	《城镇污水处理厂大气污染物排放标准》(DB 31/982—2016)
噪声	《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348—2008)3类

表 2 考核期间烟气指标

Tab. 2 Smoke index during performance assessment

项 目	要求值		保证值		考核办法
	日平均	小时平均	日平均	小时平均	
颗粒物/(mg · m <sup>-3</sup> )	20		0.4 ~ 0.7		在线仪表实测
HCl/(mg · m <sup>-3</sup> )	10	50	0.31 ~ 0.79	0.5 ~ 3.9	在线仪表实测
SO <sub>2</sub> /(mg · m <sup>-3</sup> )	50	100	0.19 ~ 2.76	6.5 ~ 49	在线仪表实测
NO <sub>x</sub> /(mg · m <sup>-3</sup> )	200	250	39.87 ~ 54.92	65 ~ 89.8	在线仪表实测
CO/(mg · m <sup>-3</sup> )	50	100	0.01 ~ 1.58	0.1 ~ 23.2	在线仪表实测
Cd + Tl/(mg · m <sup>-3</sup> )	0.05		< 0.000 03		第三方环保检测(取样期平均值)
Hg/(mg · m <sup>-3</sup> )	0.05		< 0.002 5		第三方环保检测(取样期平均值)
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V/(mg · m <sup>-3</sup> )	0.5		< 0.059		第三方环保检测(取样期平均值)
二噁英/(ngTE · m <sup>-3</sup> )	0.1		< 0.005		第三方环保检测(取样期平均值)

考核期间的臭气及噪声经第三方单位检测,均达到排放标准。

### 3 调试经验对设计优化的启示

#### 3.1 应对污泥热值与含水率波动的设计优化

为稳定焚烧炉运行工况,确保处理效果及焚烧产物的达标排放,入炉污泥的热值及含水率应尽可能保持稳定。但实际情况受客观条件限制,接收污泥的热值及含水率存在较大波动。工程调试(含性能考核)期间大部分来泥的含水率为 29% ~ 45%,更有少部分污泥含水率为 25% ~ 29% 或 45% ~ 57%,污泥热值为 11.1 ~ 13.1 MJ/kg。为此,工程设计时考虑应对污泥热值及含水率波动的措施十分必要。

工程设计时,为应对污泥热值和含水率较大波动的客观条件,同时保证污泥焚烧自持燃烧的最佳工况,考虑含水率 40% 以下的半干污泥、脱水后含

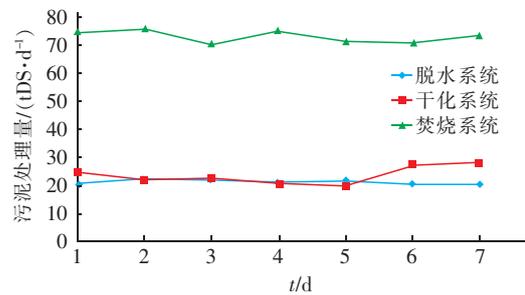


图 2 考核期间污泥处理量

Fig. 2 Sludge treatment capacity during performance assessment

性能考核期间,在线监测系统及第三方环保检测单位检测的烟气指标情况如表 2 所示,均达到排放限值要求。

水率 80% 的脱水污泥及脱水前含水率 98% ~ 99.2% 的稀污泥均可入炉焚烧。通过调整三种污泥的入炉量来应对污泥热值及含水率的波动,以保证污泥焚烧达到炉温 850 °C 以上自持燃烧的最佳工况。设计工况点的污泥特性参数如表 3 所示。

表 3 设计工况污泥特性参数

Tab. 3 Sludge characteristic parameters under design conditions

项目	污泥种类	干基高位热值/(MJ · kg <sup>-1</sup> )	含水率/%	污泥入炉量
设计工况	半干污泥	13.5	40	半干污泥与脱水污泥入炉量比例为 1.7 : 1
	脱水污泥	13.5	80	
	稀污泥	13.5	98	用于降温时投加,并保留参与焚烧炉正常运行的可能性

实际调试期间,不同阶段的炉温变化曲线如图

3 所示。

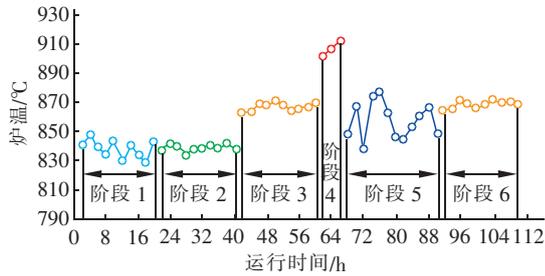


图 3 不同调试阶段的炉温曲线

Fig. 3 Furnace temperature curve at different commissioning stages

阶段 1: 干湿污泥配比为原设计值, 即半干污泥: 脱水污泥(指湿质量, 下同) = 1.7 : 1, 炉温波动明显, 且未达到 850 °C。

阶段 2: 基于半干污泥因车运批次及装卸条件等导致来泥含水率波动较大的情况, 利用半干污泥接收坑对来泥进行均质翻堆处理, 均质后的半干污泥再入炉焚烧, 干湿污泥入炉配比维持在 1.7 : 1。炉温波动减轻, 但仍未达到 850 °C。

阶段 3: 根据均质后半干污泥的实测热值及含水率(见表 4 工况 1), 调整干湿污泥入炉配比为 2.3 : 1。干湿污泥配比调整后, 炉温达到 850 °C 以上, 且较为稳定。

表 4 调试工况污泥特性参数

Tab. 4 Sludge characteristic parameters under commissioning conditions

项目	污泥种类	干基高位热值/(MJ · kg <sup>-1</sup> )	含水率/%	炉温在 850 °C 以上自持燃烧, 半干污泥与脱水污泥入炉量比例
工况 1	半干污泥	12.78	36.8	2.3 : 1
	脱水污泥	13.1	79.7	
工况 2	半干污泥	11.8	31.2	1.5 : 1
	脱水污泥	12.98	79.5	

阶段 4: 发现炉温升高, 偏离理想炉温范围, 计划投加稀污泥, 测试稀污泥参与焚烧炉正常运行的可能性。

阶段 5: 投加稀污泥, 炉温波动剧烈, 停止稀污泥投加试验。

阶段 6: 根据污泥热值及含水率的变化(见表 4 工况 2), 再次调整干湿污泥入炉配比为 1.5 : 1, 炉温波动减轻, 且重新回到 850 °C 以上理想范围内。

对比阶段 2 和阶段 3 两个调试阶段, 可以发现阶段 2 调试时污泥热值(调试前期取样检测污泥热

值为 12.78 MJ/kg) 比设计工况(污泥高位热值为 13.5 MJ/kg) 低, 在不调整设计阶段入炉干湿污泥配比(1.7 : 1) 的情况下, 入炉热负荷偏低, 导致炉温不能维持在 850 °C 以上。因此在阶段 3 增加半干污泥投配比, 提高入炉热负荷, 使炉温维持在 850 °C 以上; 而阶段 6 调试时, 虽然污泥热值比设计值低, 但入炉半干污泥的实际含水率也远低于设计值(由 40% 降至 31.2%), 总体入炉热负荷偏高, 因此调整入炉干湿污泥配比至 1.5 : 1, 使得炉温保持在 850 °C 以上。

综上, 从实际调试情况来看, 调整半干污泥及脱水污泥的入炉量, 进而稳定焚烧炉工况的措施是有效的。但稀污泥入炉后会造炉膛局部温度显著下降, 反而影响焚烧炉工况的稳定性, 因此, 稀污泥入炉不宜参与焚烧炉正常运行。

此外, 在实际调试及性能考核过程中, 为应对来泥含水率波动, 利用半干污泥接收坑对来泥进行均质翻堆处理, 达到了较好的效果。

因此, 对于接收外厂污泥, 特别是有多个厂污泥送至一处集中焚烧的工程而言, 在接收设施处设计均质措施是必要的。

### 3.2 干化焚烧之间设集中储存单元的设计优化

污泥干化焚烧工程如配备多台污泥干化机及焚烧炉, 一般将固定干化机与固定焚烧炉形成对应关系, 串联成多条生产线, 如图 4 所示。

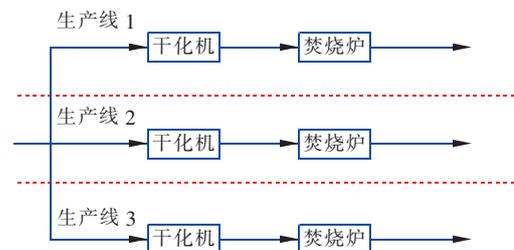


图 4 干化焚烧设施对应关系图 A

Fig. 4 Relationship A between drying and incineration facilities

单个干化机或焚烧炉发生故障会导致生产线上的关联设备被迫停机。而本工程为接收泰和厂污泥而设置的半干污泥接收坑, 无形中在污泥干化单元与焚烧单元之间设置了集中储存环节, 切断了干化机与焚烧炉之间的固定对应关系, 如图 5 所示。

从工程实际调试情况来看, 上述设计使得污泥干化及焚烧模块化并各自成系统, 避免了互相影响, 且降低了生产线运行联锁逻辑控制的难度, 显著提

高了运行的灵活性及稳定度。因此,在工程条件允许的情况下,建议在干化和焚烧环节之间考虑设置集中的储存环节。

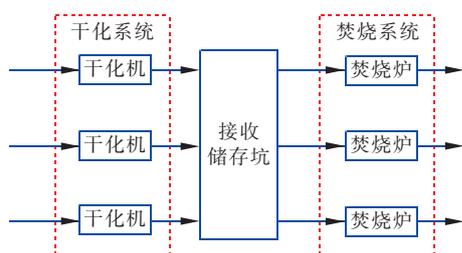


图 5 干化焚烧设施对应关系图 B

Fig. 5 Relationship B between drying and incineration facilities

### 3.3 污泥输送系统的设计优化

半干污泥输送采用抓斗提升 + 螺旋输送的方式,如图 6 所示。

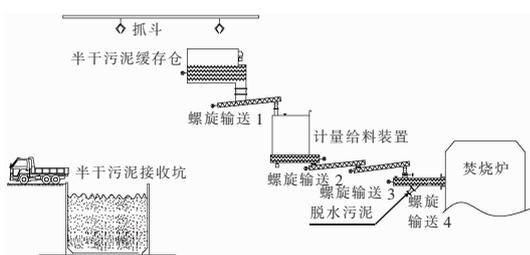


图 6 污泥输送系统

Fig. 6 Schematic diagram of sludge conveying system

表 5 污泥输送螺旋运行情况

Tab. 5 Operation of sludge conveying screw

项目	理论计算螺旋输送设备输送量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	螺旋输送设备选型输送量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	螺旋输送电机频率/Hz	实际运行情况
设计工况	1.7	6.0	5	设备选型过大,实际运行过程中运行频率过低,造成螺旋输送设备功率不足,螺旋卡顿堵塞
改造后工况	1.7	3.7	20	通过增加减速机,增大电机和螺旋输送设备之间的减速比,降低设备额定输送量后,螺旋输送设备运行恢复正常

从实际经验来看,设备能力采用理论设计值的 2 ~ 2.5 倍较为适宜。

③ 输送设施应考虑干湿污泥返混后性状改变的问题。通过调整干湿污泥的入炉量,可应对污泥热值及含水率波动。因此,设计入炉前的最后一螺旋可接收脱水污泥,与半干污泥一起入炉焚烧。但干湿污泥炉前返混也会造成污泥性状改变,影响螺旋输送的稳定性。调试期间发生返混后污泥黏滞在螺旋上,导致螺旋卡死停机的情况。为应对上述问题,调整干湿泥入炉配比时,应尽可能避开污泥的

通过抓斗,将半干污泥从接收坑内提升至半干污泥缓冲仓。结合平面及高程布置,通过四级螺旋送入焚烧炉焚烧,中间设有入炉计量给料装置。计量给料装置出料螺旋电机设置变频,用于控制调整入炉污泥量。

从实际调试情况来看,输送系统可做如下设计优化:

① 除必要的缓冲、计量设施外,纯粹用于输送污泥的输送机应尽可能少,尽量降低设备故障导致生产线停止的概率,并缩短变频设备启动到实际污泥入炉量变化的时间。这就要求精细化设计缓冲仓、计量给料装置与焚烧炉之间的布置,尽可能缩短设备之间的平面距离,并充分利用设备间的高差。

② 输送设施的能力余量必须适度。为应对泥质波动而导致的污泥处理量波动并考虑应急工况,输送设施的输送能力应留有一定的余量,但余量过大也会造成问题。本工程设计工况下,螺旋输送机的输送量为  $1.7 \text{ m}^3/\text{h}$ ,而实际配置的设备能力达到  $6 \text{ m}^3/\text{h}$  以上,是理论设计值的 3.5 倍。在调试期间,特别是调试初期低负荷运行情况下,只能变频至 5 Hz 左右,强制维持超低频率运行,导致偏离正常工况过多引发停机故障。之后通过增设减速机,降低设备额定输送量后,恢复正常运行。

污泥输送螺旋运行情况见表 5。

黏滞区,同时炉前返混螺旋应在电机功率配置及机械结构设计上考虑返混黏滞工况。另外,部分厂商的焚烧炉可实现干湿泥分别入炉,在炉内返混,也是解决上述问题的一种方式。

## 4 结语

① 石洞口污泥处理二期工程处理对象包括含水率 40% 以下的半干污泥及含水率 98% ~ 99.2% 的稀污泥。半干污泥直接入炉焚烧,稀污泥经脱水干化后入炉焚烧。目前,工程已完成脱水、干化及一条焚烧线的调试和性能考核工作。各项指标实测值

均达到或优于考核值。

② 从调试情况来看,通过调整半干污泥及脱水污泥的入炉量配比来应对污泥泥质(如热值及含水率)波动是有效的,结合实际调试情况,工况1建议干湿污泥配比2.3:1,工况2建议干湿污泥配比1.5:1,当污泥参数有变化时,通过调节干湿污泥入炉配比进行调节。稀污泥入炉不宜参与焚烧炉正常运行,而作为焚烧炉超温后应急降温保险措施的长期影响有待进一步验证。

③ 在污泥干化和焚烧之间设置集中的储存设施,可显著提高运行的灵活性和稳定度,降低运行连锁控制的难度,同时,污泥接收储存设施考虑增加均质功能,能有效稳定焚烧炉运行工况。在条件允许的情况下建议考虑设置。

④ 对于污泥输送系统(特别是半干污泥输送),应尽量减少纯粹用于污泥输送的环节。螺旋输送设施的能力余量应适度,一般为理论设计值的2~2.5倍。同时螺旋输送设施应在电机功率配置及机械结构设计上考虑干湿污泥炉前返混黏滞的工况。

#### 参考文献:

- [1] 周骅. 基于上海市污泥干化焚烧运行研究的若干建议[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16): 17-21.  
ZHOU Hua. Some suggestions on the research of sludge drying and incineration operation in Shanghai[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 17-21 (in Chinese).
- [2] 李文兴, 郑秋鹃, 廖建胜, 等. 温州市污泥干化焚烧处理工程技术改造[J]. 中国给水排水, 2017, 33(2):

90-95.

LI Wenxing, ZHENG Qiujuan, LIAO Jiansheng, et al. Technical transformation of sludge drying and incineration treatment project in Wenzhou City[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(2): 90-95 (in Chinese).

- [3] 任向锋, 鲁巍. 深圳市上洋污泥处理工程工艺选择及运行工况探讨[J]. 给水排水, 2010, 36(10): 23-26.  
REN Xiangfeng, LU Wei. Discussion on process selection and operating conditions for Shenzhen Shangyang sludge treatment project[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(10): 23-26 (in Chinese).
- [4] 林莉峰, 王丽花. 上海市竹园污泥干化焚烧工程设计及试运行总结[J]. 给水排水, 2017, 43(1): 15-21.  
LIN Lifeng, WANG Lihua. Summary on sludge drying and incineration treatment project design and test-run for Shanghai Zhuyuan [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(1): 15-21 (in Chinese).
- [5] 胡维杰, 周友飞, 陈汝超, 等. 石洞口污水处理厂污泥干化焚烧二期工程工艺要点解析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(16): 41-47.  
HU Weijie, ZHOU Youfei, CHEN Ruchao, et al. Analysis of process design of the sludge drying and incineration project phase II in Shidongkou WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(16): 41-47 (in Chinese).

作者简介: 生骏(1981-), 男, 上海人, 硕士, 高级工程师, 注册设备(给水排水)工程师, 注册环保工程师, 注册咨询工程师, 研究方向为污水及污泥处理等。

E-mail: shengjun@smedi.com

收稿日期: 2020-08-06

修回日期: 2021-03-11

(编辑: 衣春敏)

为了幸福家园, 请节约身边水资源