

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.20.004

通沟污泥处理工艺及其资源化利用研究

王继行¹, 卢伟¹, 朱敏¹, 徐晓军², 魏艳平², 康瑞鹏¹

(1. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081; 2. 汉斯琥珀环保技术
<上海>有限公司, 上海 201106)

摘要: 对排水管道沉积物的清捞会产生大量通沟污泥,并引起一系列管网维护与环境问题。因此,通沟污泥的处理处置逐渐被纳入各城市规划中。介绍了通沟污泥的性质和危害,分析了通沟污泥处理处置技术。通沟污泥处理技术一般包括水力淘洗和湿式多级分离两种,由于后者资源化利用程度高,用水量相对较小,逐步取代前者成为主流处理技术。然而第一代通沟污泥处理工艺因尾水中超细砂沉积而易导致下游工段不能正常运行。为此第二代通沟污泥处理工艺增加精细格栅对有机浮渣进行去除,再通过旋流+砂分离对超细砂进行分离,有效解决了超细砂沉积问题,保障了下游工段的正常运行。为了减少冲洗水用量,第三代通沟污泥处理工艺引入高效沉砂池,结合高效沉砂池和气浮的特点,可实现约100%冲洗水全回用,并提高了超细砂的提取率;同时可设计成移动式处理站,方便现场处理处置。最后,详细探讨了砂的资源化利用问题,旨在为需求方提供一套可行的处理处置方案。

关键词: 通沟污泥; 污泥处理; 资源化利用; 超细砂; 全回用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)20-0020-07

Research on Sewer Sludge Treatment Process and Its Resource Utilization

WANG Ji-hang¹, LU Wei¹, ZHU Min¹, XU Xiao-jun², WEI Yan-ping²,
KANG Rui-peng¹

(1. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081,
China; 2. Hans Huber Environmental Technology <Shanghai> Co. Ltd., Shanghai 201106,
China)

Abstract: The removal of sediment from drainage pipelines will produce a large amount of sewer sludge, and cause a series of pipe network maintenance and environmental problems. Therefore, the treatment and disposal of sewer sludge has been gradually incorporated into the urban planning. The nature and harm of sewer sludge was introduced, and the treatment and disposal technology of sewer sludge was analyzed. Hydraulic elutriation and wet multi-stage separation are the generally used technologies in sewer sludge treatment. Wet multi-stage separation has gradually replaced hydraulic elutriation as the mainstream treatment technology due to its high degree of resource utilization and relatively small water consumption. However, the primary sewer sludge treatment process will lead to the failure of the downstream section to operate normally due to the deposition of ultra-fine grit in the effluent. So, the fine drum screen was added in the second sewer sludge treatment process to remove the organic scum, and then the ultra-fine grit was separated through hydro cyclone + grit separation, which effectively reduced ultra-fine grit deposition and ensured the regular operation of the downstream section. In order to

reduce the amount of washing water, a high-efficiency grit trap was introduced into the third-generation sewer sludge treatment process which combined the characteristics of high-efficiency grit trap and air flotation equipment, and could realize the full reuse of about 100% flushing water, and improve the extraction rate of the ultra-fine grit. At the same time, it could be designed as a mobile processing station to facilitate on-site processing and disposal. Finally, the resource utilization of grit was discussed in detail to provide a feasible treatment and disposal scheme for the demander.

Key words: sewer sludge; sludge treatment; resource utilization; ultra-fine grit; full reuse

随着我国政府对排水管理工作的重视,城镇排水管网通沟污泥的处理处置工作也逐步被纳入各地政府的规划中。上海、北京、苏州、深圳等多个城市率先实施了通沟污泥的减量化、无害化、资源化处理工程,在此过程中积累了大量经验。为此,对通沟污泥的来源、产量、危害、处理工艺和资源化等方面的资料进行整理,以期为后续开展通沟污泥处理处置的相关人员提供参考。

1 通沟污泥的性质和危害

1.1 通沟污泥的来源与产量

在管道养护、清淤过程中清捞出来的管道沉积物又被称作通沟污泥,其来源为生活污水、工业废水进入排水管路系统的颗粒物和杂质,以及进入排水管网的大件垃圾、建筑垃圾、建筑工地泥浆等,其产生具有点多、面广、分散、不定时及量小的特点^[1]。排水管网中管道沉积物普遍存在,可根据《城镇排水管路污泥处理技术规程》(T/CECS 700—2020)对通沟污泥量进行估算,具体算式如下:

$$M_a = L \times Q \times N \quad (1)$$

式中: M_a 为通沟污泥年产量,t/a; L 为管网长度,km; Q 为单位长度管网每次清掏量,t/(km·次); N 为管网养护频率,次/a。

从式(1)可以看出,通沟污泥的产量与管网长度、管道养护频率以及单位管道长度的产泥量密切相关。通常相关养护管理部门会收集片区内5~10年的排水设施量、养护量及污泥产量等基础数据,对近远期通沟污泥量进行预测。随着我国城市化进程的不断加快,排水系统基础设施建设也同步高速发展,通沟污泥产量也逐年攀升。不同地区单位长度通沟污泥产量的差异主要与污泥含水率、管道养护频率等因素直接相关,同时受到地下水位等因素的影响。此外,随着管道日常维护、清淤工作的加强以及排水管网的逐步完善,排水管网维护清理

的制度化和规范化不断加强,通沟污泥的产生量还会不断加大^[2]。

1.2 通沟污泥的理化性质

由于通沟污泥来源复杂,成分随城市、用地类型和管道类型不同而有较大的波动,因此,有必要提高对通沟污泥性质的认识,以便为其处理处置提供合适的技术路径与方案。

根据T/CECS 700—2020要求,对通沟污泥的检测指标至少应包括含水率、有机物含量和不同粒径分布。其他参考检测指标也可包括通沟污泥pH、重金属、总氮、总磷、挥发酚、矿物油、粪大肠菌群值等^[3]。当检测难以进行时,可对通沟污泥性质进行估计。采用机械作业清淤时,排水管网污泥含水率为80%~90%;采用人工清淤时,排水管网污泥含水率为50%~60%。除此以外,天气条件对通沟污泥含水率的影响也很大,雨季时高含水率(>70%)的情况较为多见,而低含水率(<30%)的情况多出现在旱季或者过渡季节^[4]。通沟污泥的pH为6.5~8.5,整体偏中性,有机物占比为3%~35%。

通沟污泥的理化性质会对其后续的处理处置工艺造成影响,一般在项目实施前应对通沟污泥进行必要的检测。与市政污水厂的污泥相比,通沟污泥中的有机质含量相对较低,其无机质部分主要由无活性的、含量可达58%的 SiO_2 组成^[1]。因此通沟污泥的密度一般为 $1.10 \sim 2.76 \text{ g/cm}^3$,高于一般污水厂活性污泥的密度($0.5 \sim 1.1 \text{ g/cm}^3$)^[3,5]。

通沟污泥中不同粒径颗粒占比会影响后续处理设备的选择以及分离物的资源化利用方式。根据《建设用砂》(GB/T 14684—2011)和《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011)中的规定,对砂的粒径定义范围是 $0.075 \sim 4.75 \text{ mm}$,而对碎石的粒径定义范围是 4.75 mm 以上。从资源化角度来看,砂、石的可利用场合最多,因此提取污泥中的砂、石具有较高

的经济价值。调研发现,各地通沟污泥中的无机颗粒物以砂砾的占比最高,上海大多数通沟污泥的砂砾尺寸都小于1 mm,粒径在0.2 mm以下的颗粒占50%以上^[3]。因此,从资源回收的角度考虑,通沟污泥处理工艺的设计应实现对粒径为0.075 mm以上的颗粒进行有效分离和回收。

不同管网类型的通沟污泥性质也存在较大差别。分流制雨水管网的通沟污泥含有较多泥、砂、石等无机物质,污水管网或合流制管网的通沟污泥往往含有较高比例的有机物甚至生活垃圾^[6],分流制污水管道中的污泥较合流制的污泥可能具有更高的含水率,COD和臭气浓度也较高。

不同用地类型也会影响通沟污泥的性质。城市主干道附近的污泥通常砂石较多,居民区的污泥通常有机质含量较高、生活垃圾等较多。而在餐饮密集的商业区则污泥有机质含量高,对砂砾的清洗以及有机物的去除要求较高。

通沟污泥在管道溢流时会对接纳水体造成污染,因此,所含污染物的种类和浓度也应引起重视。除了碳、氮、磷等污染物含量外,通沟污泥中重金属含量也不容忽视。除了重金属可能造成的环境污染外,往往对通沟污泥处置产物或资源化利用产品中的重金属含量也有严格要求。通沟污泥中的重金属含量同样与管网类型有密切关系。合流制管网或居民区、工业区管网的通沟污泥中重金属含量较高,更确切地说是和人类活动密切相关。

1.3 通沟污泥的危害

城市排水管网系统是城市基础设施的重要组成部分,在雨水和污水输送过程中,水中易沉降物质会发生沉积并逐渐累积^[5]。这些沉积物会减小管道排水断面、增加水力摩擦,降低管道的排水能力,甚至会堵塞管道,影响输送效率^[7]。管道沉积物还对整个排水系统构成许多其他威胁,如增加CH₄、N₂O等温室气体的排放量,产生挥发性有机化合物(VOCs),消耗污水中的BOD₅等^[7]。管道沉积物累积还是导致排水系统过载和无计划污水排放的常见原因之一,是雨季溢流导致的面源污染的主要来源^[8]。

此外,排水管网中管道沉积物生物膜已被证明是携带抗生素耐药基因(ARG)的细菌和病原体增殖的潜在“窝点”^[9]。如具有ARG的耐药菌株和致病菌经废水进入自然界,会给人类健康造成威胁。

1.4 解决措施

针对以上管道沉积物导致的问题,可采用技术手段进行控制或改善。

水力冲洗被广泛用于冲刷管道中的沉积物,并将其输送至下游具备充分自洁条件的管段^[10]。冲洗效率主要与颗粒的大小和直径有关^[7],同时由于冲刷的水力条件不会直接影响沉积物中的微生物胞外聚合物,水力冲洗无法完全降低下水道沉积物的黏结强度,导致冲洗效率不高^[7]。另外,水力冲洗的初始能量较高,在闸门段下游的管道中观察到了侵蚀效应。而且冲刷后的沉积物中特细砂极易在中途泵站集水池、污水处理厂中沉积,加剧设备的磨损,增加运维费用^[11]。因此一般认为管道清淤是维护排水管网的一种更经济、有效的补充方法^[4]。其好处不仅在于减小管网堵塞的风险,还可以有效控制管道沉积物带来的污染和负面环境影响。

清淤后的排水管网可大幅降低温室气体CH₄排放量,而H₂S和VOCs排放、污水碳源消耗和管道污水承载力的损失等问题也会得到缓解^[12]。因此,在城市排水管网系统的综合运营新愿景下,管理目标应向更强的可持续性和更少的碳足迹迈进,进而迫切需要一种更主动、更高效的方法来管理管网沉积物,而不是在管网系统出现问题后再进行维护。

2 通沟污泥的处理处置技术

2.1 通沟污泥处理处置工艺分析

近年来国家密集出台了多部与城市污泥和固体废物处理处置相关的政策与规范,其核心是实现污泥的减量化、资源化和无害化。通沟污泥有机质含量低、灰分高、低位热值低、营养物含量不稳定,不适于农用、土壤改良、园林绿化和焚烧,可经过一定处理后作为建材利用。因此,在通沟污泥最终处置前需要进行相匹配的处理。

通沟污泥的处理技术主要有自然干化、重力脱水和综合处理。自然干化适用于有机质含量低的通沟污泥(如雨水管通沟污泥),且气候比较干燥、降雨时间少、占地不紧张以及环境卫生条件允许的地区。重力脱水适用于含水率较高的通沟污泥(如95%的含水率),经过24 h沉积后含水率可减少到70%左右,有利于污泥运输,可作为通沟污泥中转站的污泥减量化工艺。目前一般通沟污泥站都设计污泥储存池,容积按照不小于2 d的处理量设计。

综合处理工艺包括储泥、预处理、粗料分离、砂分离、细料分离和泥处理等环节,一般有水力淘洗和湿式多级分离技术。水力淘洗可以实现大块砖石、轻质浮渣和沉砂的分离,但是对颗粒物的粒径分级程度不够高、耗水量较大、资源化利用程度较低,且设备磨损率较高。湿式多级分离采用水力旋筛+砂石分离工艺,于2013年在北京清河作为全国示范工程成功投入运转,上海市排水管理处在经过对比后主推此工艺,并将其用于浦东区、杨浦区、闵行区、崇明区、金山区的通沟污处理。近几年,该工艺在苏州、深圳和常州等地也陆续得到建设应用。因此,着重探讨该工艺在通沟污泥处理上的发展,以期从事该行业的设计人员提供设计思路。

2.2 可持续的通沟污泥处理技术发展历程

2.2.1 第一代工艺

理想的通沟污泥处理与处置技术需要具备高效和可持续性的特点。北京清河通沟污泥处理工艺(第一代工艺)流程^[13]见图1。

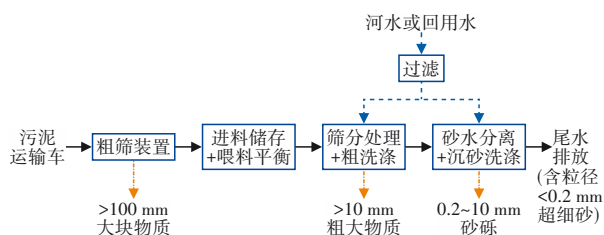


图1 初代通沟污泥处理工艺

Fig.1 Primary sewer sludge treatment process

该技术采用德国 HUBER 洗砂器,对 0.2~10 mm 砂砾的筛分率可以达到 95% 以上,故障率低,运行维护方便。淘洗后有机物含量<3%,可以长期存放并作为低档建筑材料或者路基材料^[13]。由于粒径<0.2 mm 的超细砂随尾水排放时极易在泵站、管网中沉淀,严重影响有关设备、设施的正常运行,增加维护费用^[14],所以,在原有工艺基础上,于砂水分离装置后再设置细筛分离装置对有机浮渣进行去除,然后通过旋流+砂分离的处理手段对超细砂进行分离。改进工艺有效减缓了超细砂的沉积问题^[13],极大减缓了下游管网和污水泵站集水池的高风险运行状况。目前改进工艺已在上海、苏州昆山、北京等地得到了较多应用^[15],但是仍存在通沟污泥中油含量高影响超细砂沉积、超细砂由于没有经过洗涤不能直接资源化利用等问题。因此在该改进工艺基础上,HUBER 推出第二代通沟污泥处理

工艺^[13]。

2.2.2 第二代工艺

第二代通沟污泥处理工艺(见图2)利用高效沉砂池(HUBER GritWolf®,简称砂狼)取代旋流+砂分离,以提高超细砂的资源利用率。由于沉砂池的重力沉降以及撇渣作用,使得该池出水可以作为对水质要求不高的洗涤转鼓用水,以节约大部分的冲洗用水量。

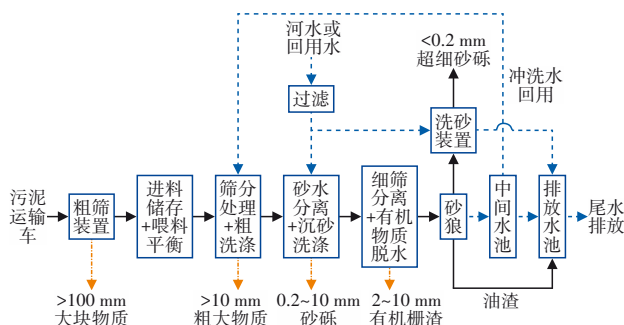


图2 第二代通沟污泥处理工艺流程

Fig.2 The second-generation process of sewer sludge treatment

虽然第二代通沟污泥处理工艺可以将约 70% 以上的冲洗水回用,但是针对洗砂装置和精细格栅装置,仍需提供外来水源,该部分用水量约为 16~41 m³/h (该数值受到通沟污泥处理量和处理工艺的影响)。因此,对于某些缺水地区,通沟污泥的处理需要考虑冲洗水全回用的工艺。另外,我国通沟污泥中粒径<0.075 mm 的粉砂占比较高,有些地方甚至达到 50% 以上,这些粉砂对管网输送过程的影响虽然比 0.075 mm 以上砂粒小很多,但会导致尾水悬浮物浓度较高;再加上尾水中较高的 COD 浓度(1 500~4 500 mg/L),对下游小型污水处理厂造成了不小的冲击负荷,提高尾水水质也势在必行。因此,对于水环境敏感地区要考虑通沟污泥冲洗水的全回收利用。再者,通沟污泥大部分都是通过污泥运输车送到集中站点进行处理,运输成本较高,且污泥量较少,通沟污泥疏浚点分散度高,因此移动式通沟污泥处理一体化设备十分必要^[16]。

2.2.3 第三代工艺

对于移动式通沟污泥处理站,需要统筹考虑其冲洗水来源、尾水排放、筛分物处理、占地等因素。针对上述考虑,HUBER 推出一种紧凑式的冲洗水全回用的通沟污泥处理工艺,即第三代通沟污泥处理工艺,其流程见图3,相关设备见图4。

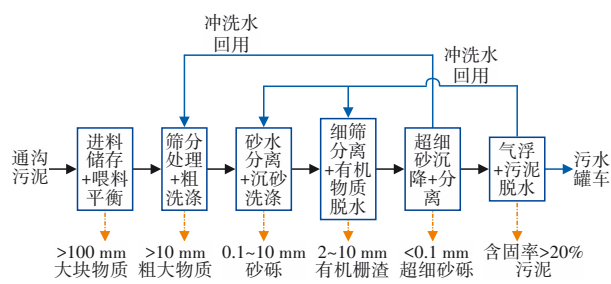
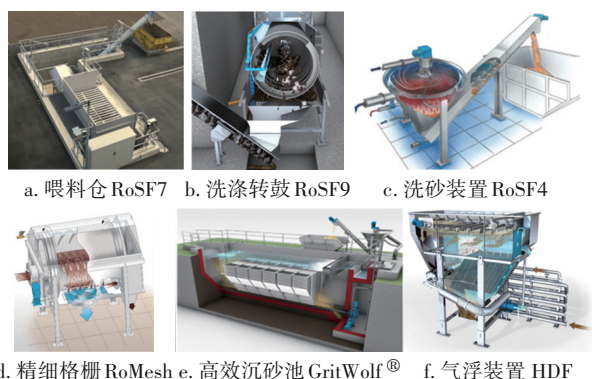


图3 第三代通沟污泥处理工艺流程

Fig.3 The third-generation process of sewer sludge treatment



d. 精细格栅 RoMesh e. 高效沉砂池 GritWolf® f. 气浮装置 HDF

图4 HUBER关于通沟污泥相关处理设备

Fig.4 Pictures of HUBER devices for sewer sludge treatment

第三代通沟污泥处理工艺特点在于：①该设备占地小，可根据需要设计成移动车载式通沟污泥处理站（见图5）或固定通沟污泥处理站。②可迅速实现通沟污泥最大程度的筛分，将通沟污泥中的生活垃圾、建筑垃圾、生物垃圾有效筛分成粒径 $>10\text{ mm}$ 的粗大垃圾、 $0.1\sim 10\text{ mm}$ 的细砂、 $2\sim 10\text{ mm}$ 的有机栅渣、粒径 $<0.1\text{ mm}$ 的超细砂、含固率 $>20\%$ 的污泥等，且得到的筛分物卫生条件良好，方便后续资源化利用。③可实现设备冲洗水约100%回用，极大节约水资源，减少尾水排放量和污染物浓度。

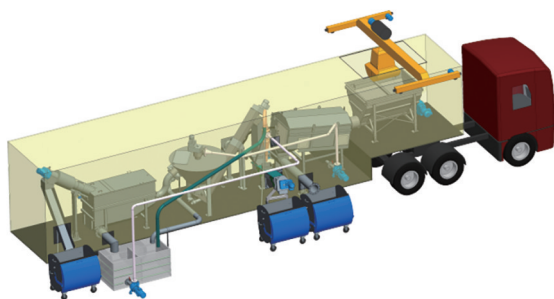


图5 车载式移动通沟污泥处理站

Fig.5 Vehicle mounted mobile sewer sludge treatment station

该全回用水工艺已应用于德国 Hammerer

Kanalservice项目，处理量为 10 t/h ，建于2021年。具体工艺布置形式见图6。

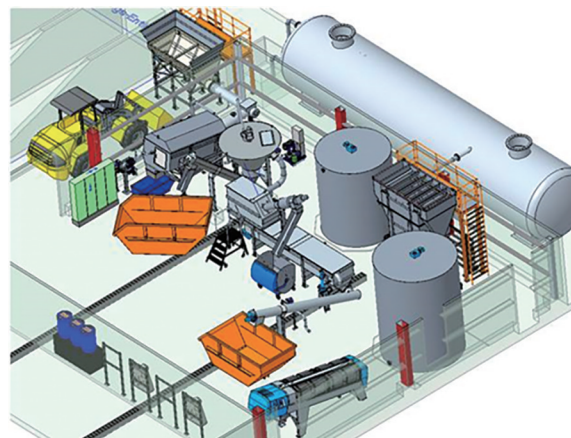


图6 德国冲洗水全回用通沟污泥项目

Fig.6 German flushing water fully reuse sewer sludge treatment project

3 通沟污泥处理渣料资源化利用技术

通沟污泥经处理后产生的各种渣料的资源化利用是整个通沟污泥处置过程中实现碳减排和可持续性的关键步骤。

① 对于粒径 $>10\text{ mm}$ 的粗大物质，其成分复杂，含有生活垃圾（树叶、树枝、塑料袋、塑料瓶、卫生巾、湿纸巾、玻璃瓶等）和建筑垃圾（石块和木块），经过洗涤后卫生条件较好，可根据后续需要将石块分选出来，作为建筑材料使用^[16]；其他物质可作为生活垃圾进入环卫系统处理。

② 对于粒径为 $0.1\sim 10\text{ mm}$ 的细砂，出料占比为 $5.4\%\sim 14.9\%$ ，有机烧失率 $<3\%$ ，含水率为 $9\%\sim 40\%$ 。由于其具有较低的有机质含量，可以直接作为低档建材回收利用，如烧结砖、免烧结砖、透水砖以及陶粒的制作，或者用作硅酸盐制品的骨料，以及用于管道基槽和沟槽回填。当细砂用于制备烧结砖时，其掺比不高于 10% ，pH应为 $5\sim 10$ ，含水率 $<40\%$ ，有机质含量 $<50\%$ 。当细砂用于免烧结砖和透水砖的制作时，对其性质并没有统一要求，但是产品品质须符合相关质量标准。而当细砂用于陶粒制作时，根据其粒径大小可以分为细集料（粒径 $<4.75\text{ mm}$ ）或者粗集料。相关规范还对细砂的细度模数、堆积密度、筒压强度、吸水率、软化系数、有害物质含量（其中有机质含量须小于 3% ）等指标有进一步要求。当用细砂制备免烧结陶粒时，可辅以添加粉煤灰、胶结材料和激发剂等，一般细砂的占比

可以达到80%。如果将细砂作为硅酸盐制品的骨料,应关注所含氧化物的种类和含量,其中 SiO_2 含量至少要在65%以上,不足的部分应掺入其他材料以满足制备要求^[4]。一些硅酸盐产品对细砂的粒径也有要求,须在2.36 mm以下。洗净后的细砂成分与粉煤灰中的化学成分高度相似,且符合粉煤灰对有机烧失率的要求,故可以作为路基材料。除了以上介绍的资源化利用途径外,细砂还可用作土壤渗透性改良材料,如雨水花园中的填料,以提高径流水质和削减径流量^[17]。

③ 对于粒径<0.1 mm的超细砂,出料占比为5%~15%,有机烧失率<20%,含水率为9%~40%。该部分物质可用于制备三渣混合材料。王志新等^[17]将粒径<0.2 mm的超细砂作为细集料,制成各项路用性能完全符合要求的三渣混合材料,其早期强度和耐久性明显好于普通三渣,且可有效控制污泥中的重金属渗漏,实现了通沟污泥变废为宝、综合利用的目的。该部分超细砂也可协同0.1~10 mm的细砂制陶粒。

④ 粒径为2~10 mm的有机栅渣占比为2.1%~6.4%,含水率为60%~70%,由于含有较高的有机物,可以进行好氧堆肥、太阳能干化后焚烧或者协同干化后的污泥一起焚烧。

⑤ 脱水污泥出料占比为0.1%~3%,含水率<80%。该部分物质为粉粒或黏粒级别矿物质和有机物的混合物,协同粒径<0.1 mm的超细砂可考虑利用水热固化技术制砖。但是该制砖技术需要将污泥干化至含水率10%左右,且对来料有机质含量有一定的要求,并需选取其他无机固废协同处置,以保证产品强度^[18]。对于通沟污泥分离的污泥和超细砂,有机物和无机物的配比接近该技术的需求,且处理量不大,可建立固定式处理站,污泥干化后与超细砂进行水热固化反应制砖。

4 结语

① 城市排水管网中的沉积物会造成管道堵塞、温室气体排放、管道腐蚀、臭味和溢流污染等一系列运行与环境问题。在碳中和与可持续发展的背景下,需要对排水管网中的沉积物采取更加高效、主动的管理措施来减少其带来的各种负面问题。同时随着城市化发展与城市管网系统的逐步拓展与完善,亟需对管道沉积物清理出来的越来越

多的通沟污泥进行合理处置。

② 不同城市通沟污泥的性质差别很大,同时污泥性质还受到管网类型与用地类型的影响。湿式多级分离处理工艺对通沟污泥性质变化适应性强,还可兼顾污泥的资源化利用。鉴于“节水即治污”的理念,坚持节水优先的政策,对于水资源敏感地区,可采用冲洗水全回用的通沟污泥处理工艺。该工艺可实现约100%冲洗水回用,有利于大幅降低尾水排放量,提高通沟污泥资源化利用率。该工艺可采用移动式通沟污泥处理站形式,解决通沟污泥处理点分散的问题。

③ 通沟污泥处理工艺分离得到的筛分物有较好的资源化利用潜力,可根据具体的通沟污泥性质选择合适的资源化利用技术。未来通沟污泥处理工艺的发展应向更大程度的碳减排,以及无人值守的工业4.0方向发展,以进一步提高处理工艺的社会经济效益,减少工艺运行维护成本。

参考文献:

- [1] 杨笛音. 通沟污泥处理处置技术方案选择——以上海市浦东新区为例[J]. 四川环境, 2020, 39(3): 125-131.
YANG Diyin. Selection of technical scheme for treatment and disposal of sediment in sewer system—taking the Shanghai Pudong New District as an example [J]. Sichuan Environment, 2020, 39(3): 125-131 (in Chinese).
- [2] 朱师杰, 秦福军, 孔松, 等. 某市中心城区通沟污泥处置工艺运行现状及建议[J]. 中国给水排水, 2020, 36(8): 119-122.
ZHU Shijie, QIN Fujun, KONG Song, et al. Status quo and suggestion on sewer sludge disposal process operation in a downtown area [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(8): 119-122 (in Chinese).
- [3] 张强, 张杰, 庄敏捷, 等. 上海市通沟污泥污染物指标检测和分析[J]. 给水排水, 2018, 44(8): 42-47.
ZHANG Qiang, ZHANG Jie, ZHUANG Minjie, et al. Pollutant indicators detection and data analysis of sewage sludge in Shanghai City [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(8): 42-47 (in Chinese).
- [4] PEÑA-GUZMÁN C, CÁRDENAS J, PÉREZ A, et al. Characterization and analysis of sediments in stormwater drainage for reuse [J]. Journal of Applied Water Engineering and Research, 2021, 9(3): 230-240.

- [5] LUO Y P, BAO S X, YANG S Y, *et al.* Characterization, spatial variation and management strategy of sewer sediments collected from combined sewer system: a case study in Longgang District, Shenzhen [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021. DOI: 10.3390/ijerph18147687.
- [6] ZHOU Y C, ZHANG P, ZHANG Y P, *et al.* Total and settling velocity-fractionated pollution potential of sewer sediments in Jiaying, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(29): 23133–23143.
- [7] ZHANG Z G, LU J S, ZHANG Z Q, *et al.* Effect of potassium ferrate treatment on adhesive gelatinous biopolymer structure and erosion resistance of sewer sediments: promotion or inhibition? [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431:134025.
- [8] CHANG S Y, TANG Y Q, DONG L X, *et al.* Impacts of sewer deposits on the urban river sediment after rainy season and bioremediation of polluted sediment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(13): 12588–12599.
- [9] MEDINA W R M, ERAMO A, TU M, *et al.* Sewer biofilm microbiome and antibiotic resistance genes as function of pipe material, source of microbes, and disinfection: field and laboratory studies [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2020, 6(8): 2122–2137.
- [10] CAMPISANO A, MODICA C, CREACO E, *et al.* A model for non-uniform sediment transport induced by flushing in sewer channels [J]. *Water Research*, 2019, 163: 114903.
- [11] 戴晓虎, 赵玉欣, 沙超, 等. 我国污水处理厂污泥含砂特征及成因调研 [J]. *给水排水*, 2014, 40(S1): 75–79.
- DAI Xiaohu, ZHAO Yuxin, SHA Chao, *et al.* Investigation on the status and causes of sludge sand content of wastewater treatment plants in China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014, 40(S1): 75–79 (in Chinese).
- [12] REN D H, ZUO Z Q, XING Y X, *et al.* Simultaneous control of sulfide and methane in sewers achieved by a physical approach targeting dominant active zone in sediments [J]. *Water Research*, 2022, 211: 118010.
- [13] 徐晓军, 韦韬, 魏艳平. 通沟污泥处理技术的发展 [J]. *环境生态学*, 2020, 2(8): 82–88.
- XU Xiaojun, WEI Tao, WEI Yanping. Development of sewer sludge treatment technology [J]. *Environmental Ecology*, 2020, 2(8): 82–88 (in Chinese).
- [14] 黄慧, 孟飞琴, 朱峥, 等. 通沟污泥处置特细砂沉积问题探讨及对应措施 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(18): 32–35.
- HUANG Hui, MENG Feiqin, ZHU Zheng, *et al.* Discussion on deposition of superfine sand in dredging sludge disposal and corresponding measures [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(18): 32–35 (in Chinese).
- [15] 阎铁婧. 通沟污泥多级分离处理工艺改进及工程设计 [J]. *中国给水排水*, 2018, 34(16): 45–49.
- YAN Yijing. Improvement and design of multistage separation treatment for sewer sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(16): 45–49 (in Chinese).
- [16] 石稳民, 黄文海, 罗金学, 等. 通沟污泥处理处置技术研究进展 [J]. *工业用水与废水*, 2020, 51(3): 6–11.
- SHI Wenmin, HUANG Wenhai, LUO Jinxue, *et al.* Research progress on treatment and disposal technology of sewer sludge [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2020, 51(3): 6–11 (in Chinese).
- [17] 王志新, 孙家瑛, 王兆鹏, 等. 城市通沟污泥无害化处理及其制备路基材料的研究 [J]. *粉煤灰*, 2013, 25(2): 8–11.
- WANG Zhixin, SUN Jiaying, WANG Zhaopeng, *et al.* Study of innocent treatment of urban sludge and its preparation as pavement course material [J]. *Coal Ash*, 2013, 25(2): 8–11 (in Chinese).
- [18] JING Z Z, FAN X W, ZHOU L, *et al.* Hydrothermal solidification behavior of municipal solid waste incineration bottom ash without any additives [J]. *Waste Management*, 2013, 33(5): 1182–1189.

作者简介:王继行(1988–),男,河南信阳人,硕士,高级工程师,主要从事给水排水、污泥处理处置设计研究工作。

E-mail:541314778@qq.com

收稿日期:2022-06-10

修回日期:2022-07-07

(编辑:丁彩娟)