

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.009



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 合流制排水系统中超声清淤技术的可行性及参数优化实验研究

唐蓁蓁, 孟岱宗, 许浩廉, 祝瑞麟, 李怀正

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 210092)

**摘要:**城市排水系统中沉积物的大量存在会导致管道堵塞和雨天溢流污染。超声波作为一种清洁的物理处理方法可能破坏沉积物的稳定性,从而在旱季去除沉积物,以维护下水道功能。为探寻超声技术用于实际清淤的可行性和最佳处理工况,设计正交实验探究超声清淤效果以及5个关键因素对超声清淤的影响。结果表明,超声处理后管道淤积大大改善,处理后沉积物的抗剪切力降低至对照组的26.4%~91.5%,管道沉积物中具有黏附作用的胞外聚合物(EPS)大量分解。相关性分析表明,EPS破坏是沉积物抗冲刷性能降低的重要原因。5个关键因素对超声清淤的影响程度排序为:超声电功率>探头距泥面距离>作用时间>沉积物厚度>超声频率。超声清淤的最优工况为:功率220 W、频率50 kHz、处理时间200 s、距离泥面3 cm。探究了清淤效果随沉积物厚度的变化情况,发现超声清淤对厚度不大于7 cm的沉积物有良好作用效果,超出该范围后明显衰减,并在此基础上进一步探究了超声作用后沉积物沿深度方向的性质变化情况。

**关键词:**管道沉积物;超声清淤技术;正交实验;抗冲刷性;胞外聚合物

**中图分类号:**TU992.4    **文献标志码:**A    **文章编号:**2096-6717(2025)04-0219-07

## Experimental study on feasibility and parameter optimization of ultrasonic dredging technology in combined drainage systems

TANG Zhenzhen, MENG Daizong, XU Haolian, ZHU Ruilin, LI Huaizheng

(School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 210092, P. R. China)

**Abstract:** The presence of large quantities of sediments in urban drainage systems can lead to pipeline blockage and overflow contamination on rainy days. Ultrasound, as a clean physical treatment method, can destabilize sediment aggregates, and thus remove sediment during the dry season to maintain sewer function. To investigate the feasibility and optimal treatment conditions of ultrasonic technology for actual dredging, orthogonal experiments were designed to explore the effectiveness of ultrasonic dredging and the impact of five key factors on ultrasonic dredging. The results showed that the ultrasonic treatment exhibited good effects on improving the pipe siltation, with the shear resistance of sediments (EPS) reduced to 26.4%-91.5% of the

收稿日期:2023-10-18

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3200703)

作者简介:唐蓁蓁(1996-),女,博士生,主要从事排水管道沉积物控制技术研究,E-mail:tangzz@tongji.edu.cn。

李怀正(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:lihztg@yeah.net。

**Received:** 2023-10-18

**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFC3200703)

**Author brief:** TANG Zhenzhen (1996-), PhD candidate, main research interest: sewer sediment control technology, E-mail: tangzz@tongji.edu.cn.

LI Huaizheng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: lihztg@yeah.net.

control group after ultrasonic action, and a large number of EPS associated with adhesion were decomposed in the pipe sediments. Correlation analysis showed that the damage of EPS was an important reason for the decrease in the scour resistance of the sediments. The order of the impact of five key factors on ultrasonic dredging is: ultrasonic power > probe distance from mud surface > action time > sediment thickness > ultrasonic frequency. The optimal working conditions of ultrasonic dredging are: power 220 W, frequency 50 kHz, processing time 200 s, distance from the sediment surface of 3 cm. Explored the variation of dredging effect with sediment thickness, and found that ultrasonic dredging has a good effect on sediment with a thickness of  $\leq 7$  cm, and obviously decayed beyond this range. Based on this, further exploration was conducted on the changes in the properties of sediment along the depth direction after ultrasonic action.

**Keywords:** sewer sediment; ultrasonic dredging technology; orthogonal experiment; erosion resistance; extracellular polymers

合流制排水系统是城市的核心基础设施,在收集和输送雨水以及家庭和工业废水方面发挥着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。然而,下水道通常会遇到不利的水力条件,如缓坡、低流速和间歇性流动,导致城市污水和降雨径流中携带的颗粒物沉淀,并在下水道系统的长期运行下形成沉积物<sup>[2-3]</sup>。研究发现,合流制排水系统中形成的管道沉积物是溢流污染的主要来源,且沉积物的大量形成会导致管道堵塞和腐蚀<sup>[4-5]</sup>。因此,有效管理和清除管道沉积物对于确保排水系统的功能和环境可持续性至关重要。

在干燥天气,降低沉积物抗冲刷能力并去除管道沉积物能降低管道堵塞和溢流污染等风险。现有的沉积物处理方法可分为机械疏浚和水力冲洗技术两类<sup>[6]</sup>。然而,上述清淤方式在实际应用中暴露出明显的缺陷和劣势,集中表现在效率低、故障多、养护水平落后和对交通环境影响大等方面。例如,机械疏浚中普遍的绞车清淤法需要工人下井完成竹片的下穿,而污水管道井下的恶劣环境和有毒有害气体可能危害操作员健康甚至生命,增加安全事故风险。此外,水力冲洗技术仅适用于小管径管道,且需水量大,成本较高<sup>[7]</sup>。因此,在目前情况下,提高清通效率、降低养护成本无疑是摆在城市管理者面前的一大难题。已有研究发现,超声产生的机械作用可以在短时间内破坏沉积物团聚体的聚集结构,并能分解沉积物颗粒间产生黏附作用的关键物质细胞外聚合物(EPS),此研究结论为超声清淤技术的实际应用提供了理论基础<sup>[8]</sup>。然而,超声技术用于实际清淤的可行性以及多个实际限制因素仍需考虑。

笔者通过设计正交实验探究超声清淤的可行性,并分析沉积物厚度、探头距泥面距离、超声作用时间、超声装置工作频率、超声电功率5个实际制约因素对超声清淤的影响,选择水平范围内的最佳工况,并考察超声作用对不同层沉积物抗剪切力和胞

外聚合物的影响,为管道清淤技术提供新的思路和理论支撑。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

2018年上海市政府报告称,虹口区排水系统堵塞问题严重。因此,采样点设置在上海市虹口区同心路一条合流下水道(DN 600)内。在采样前,首先排掉下水道中的水。然后,在距离上游管口20 cm处使用由蠕动泵和聚乙烯管组成的抽吸装置进行管道沉积物收集。采集后,将样品储存在聚丙烯容器中的冰上,以控制温度在-4 °C以下,直到样品被运送至实验室。将采集的样品过5目(2 mm)筛网,以清除石块、玻璃、塑料袋等碎屑,并均匀混合。将均匀混合的管道沉积物按实验所需厚度加入250 mL烧杯中,然后向烧杯中缓慢注入100 mL污水。参考Zhang等<sup>[6]</sup>和Regueiro-Picallo等<sup>[9]</sup>的研究,完全混合的下水道沉积物在20 d稳定期后表现出稳定的抗冲刷性。因此,沉积物静置稳定期设置为30 d,使管道沉积物抗冲刷性运行至稳定状态,稳定后的管道沉积物性质如表1所示,其中EPS、蛋白质和多糖含量以沉积物中单位质量挥发性悬浮物所含的相应物质质量表示,单位为mg/g。

表1 原始管道沉积物性质

Table 1 Properties of raw sediment in the pipeline

EPS/(mg/g)	蛋白质/(mg/g)	多糖/(mg/g)	剪切力/(N/m <sup>2</sup> )
33.9	26.5	6.1	1.78

### 1.2 实验方案及测试方法

#### 1.2.1 实验方案

正交实验:选取不同沉积物厚度、探头距水面距离、超声作用时间、超声装置工作频率、超声电功率条件5个因素,设计5因素4水平正交实验,如表2所示,共设计16组实验,每组实验重复设置3组平

表2 正交分析超声对沉积物抗剪切力和EPS的影响

Table 2 Orthogonal analysis of the effect of ultrasound on the critical erosion shear stress and EPS of sediments

实验组编号	泥厚/cm	频率/kHz	功率/W	探头距泥面	作用时间/min	EPS/(mg/g)	蛋白质/(mg/g)	多糖/(mg/g)	抗剪切力/(N/m <sup>2</sup> )
				距离/cm					
1	6	20	100	3	1	28.3	22.1	6.2	1.44
2	6	30	140	5	2	19.8	15.6	3.6	0.98
3	6	40	180	7	3	16.1	12.5	2.9	0.93
4	6	50	220	9	4	13.5	10.4	2.43	0.86
5	10	20	140	7	4	27.5	21.5	4.9	1.49
6	10	30	100	9	3	30.1	23.5	5.4	1.54
7	10	40	220	3	2	11.9	9.3	2.1	0.71
8	10	50	180	5	1	22.4	22.4	1.12	1.12
9	14	20	180	9	2	27.4	17.4	4.1	1.41
10	14	30	220	7	1	26.9	21.0	4.8	1.35
11	14	40	100	5	4	24.8	19.3	4.5	1.23
12	14	50	140	3	3	12.6	9.8	2.3	0.80
13	18	20	220	5	3	9.6	9.6	0.64	0.64
14	18	30	180	3	4	12.1	9.4	2.2	0.74
15	18	40	140	7	1	31.2	24.3	5.6	1.60
16	18	50	100	9	2	30.9	24.1	5.6	1.61

行实验。实验结束后,检测不同工况作用后的沉积物抗冲刷能力、EPS、蛋白质和多糖指标,并对不同条件下的沉积物抗冲刷能力变化进行正交分析,根据实验和正交分析结果筛选出最优工况。

超声清淤最优处理时间探究实验:通过正交实验得出最佳工况后,进一步缩小超声处理时间作用范围为150、160、170、180、190、200、210、220、230、240 s十个超声处理时间水平进行实验,并测定相关指标,确定最优超声处理时间。

沉积物厚度对超声清淤的影响实验:在实际应用中,管道内待清淤的沉积物厚度不固定,超声清淤技术的作用效果可能有所差异。因此,采用经过超声处理时间最优参数探究实验中所得出的最优工况(超声功率220 W、超声频率50 kHz、处理时间200 s、探头距泥3 cm)进行实验,并设置2、3、4、5、6、7、8、9、10 cm九种厚度的沉积物,探究超声处理对不同厚度沉积物的处理效果。以10 cm厚度沉积物为例,探究超声作用后沉积物不同层的性质变化,通过拟合确定超声作用后EPS和抗剪切力沿深度的分布模型。

### 1.2.2 测试方法

沉积物临界抗冲刷剪切力使用英国Partrac公司的黏结力仪(cohesive strength meter MKIV,简称CSM)进行检测<sup>[10]</sup>。EPS采用甲醛加氢氧化钠法提取<sup>[11]</sup>;蛋白质采用Lowry法的BCA蛋白试剂盒(C503051)进行检测;多糖采用苯酚-浓硫酸法检测<sup>[12]</sup>。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 超声处理对沉积物抗冲刷性能的影响

沉积物的抗剪切力是评价下水道沉积物抗冲刷能力的重要指标之一,代表沉积物被水流完全分散时的临界侵蚀剪应力,沉积物抗剪切力越大,代表沉积物抗冲刷能力越强<sup>[13]</sup>。近年来的研究发现<sup>[14]</sup>,在管道中丰富的营养环境下,沉积物中微生物分泌的黏性EPS(其主要成分为蛋白质和多糖)会对沉积物抗冲刷性产生重要影响。因此,实验测试了不同工况下沉积物抗剪切力以及EPS、蛋白质和多糖含量变化。对照组沉积物抗剪切力为1.79 N/m<sup>2</sup>,EPS含量为33.6 mg/g,蛋白质含量为26.3 mg/g,多糖含量为6.1 mg/g。EPS能将小颗粒团聚,从而将微生物细胞、有机物质和无机颗粒结合在一起,形成下水道沉积物<sup>[6]</sup>。此外,沉积物表面附着的以EPS为主要基质的生物膜会增强管道沉积物的抗冲刷能力<sup>[15]</sup>。因此,原始沉积物中黏性EPS的存在导致其具有较强的抗冲刷性,在管道底部淤积。经过各工况下的超声波作用后,沉积物的抗剪切力降低至0.64~1.61 N/m<sup>2</sup>,EPS含量降低至9.6~31.2 mg/g,分别为对照组的26.4%~91.5%和28.6%~92.9%。这是由于超声波能在水中产生多种形式的物理/机械效应,例如,强烈冲击波、高剪切力、液体微射流和共振以及与强氧化物质(如羟基自由基)的化学效应<sup>[16~18]</sup>能破坏下水道沉积物聚集体结构和EPS,从而降低管道沉积物的抗冲刷能力。实验结果证实了超声波对管道沉积物抗冲刷性能的

破坏作用。

如图 1 所示,将正交实验中不同工况下沉积物的抗剪切力和 EPS 含量做线性相关分析,结果显示,实验中沉积物抗冲刷能力与 EPS 含量呈良好的正相关性( $R^2=0.98$ ),表明 EPS 结构破坏是沉积物抗冲刷性能降低的重要原因。之前的研究发现,微生物群落的丰度和多样性对下水道沉积物的抗冲刷能力有积极影响,微生物群落分泌的 EPS、蛋白质和多糖是微生物影响沉积物抗冲刷性的主要调节物质<sup>[11, 19-20]</sup>。具体来说,具有疏水性的复杂螺旋结构蛋白质分子是维持黏性沉积物结构和 EPS 凝胶状的功能性物质,在增强沉积物抗冲刷方面发挥着至关重要的作用<sup>[14]</sup>。此外,中性碳水化合物能巩固 EPS 的结构,疏水性碳水化合物能提高 EPS 的吸附能力<sup>[20-21]</sup>。在超声作用下, EPS 中的蛋白质和多糖加速降解,使得 EPS 水溶性提高,同时,包裹在 EPS 内部的物质进入溶液<sup>[22]</sup>。因此,随着超声波作用对管道沉积物中 EPS 的破坏,沉积物团聚体间的黏附力逐渐降低,这可能导致沉积物结构更加松散、聚集性减弱,从而实现沉积物抵抗水流剪切能力的降低。

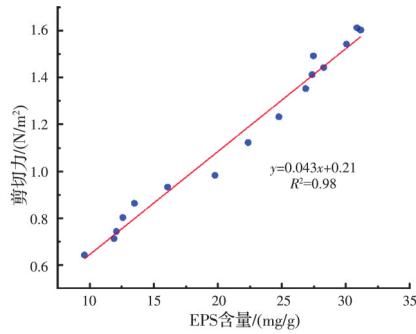


图 1 EPS 和管道沉积物抗冲刷能力相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of EPS and sewer sediments erosion resistance

目前,管道清淤常用的技术主要包括水力冲洗技术和机械清淤<sup>[23-24]</sup>。然而,这些传统的技术无法分解黏性 EPS,沉积物的黏附特性通常会影响冲洗设备的效率,从而增加能耗<sup>[25]</sup>。此外,被冲刷的沉积物仍可能在下游重新沉积。由此可见,超声处理技术从降低管道沉积物黏附作用的角度进行沉积物去除,为管道清淤技术提供了新思路,并在降低管道沉积物抗冲刷性能方面表现出良好的作用效果。

## 2.2 正交分析多因素对超声清淤的影响

为确定超声清淤过程中 5 个关键因素对超声波作用效果的影响,对实验结果进行正交分析。如表 3 所示,结果表明,超声清淤实验中 5 因素对沉积物临界剪切力影响程度大小排序为:功率>探头距泥面距离>作用时间>泥厚>频率。正交实验条件

下最佳实验水平为功率 220 W、频率 50 kHz、处理时间 3 min、沉积物厚度 6 cm、距泥面 3 cm。由于实际管道内待清淤的沉积物厚度不固定,沉积物厚度只是影响效果的主要因素,不能作为工况条件。经分析,正交实验中确定的最优工况为:功率 220 W、频率 50 kHz、处理时间 3 min、距泥面 3 cm,这一结果为超声清淤技术的实际应用提供了理论依据。进一步分析数据变化规律可以发现,不同参数的变化对沉积物抗冲刷能力的影响有差异:1)超声功率的增加对管道沉积物抗冲刷能力的降低具有显著效果,这可能是由于高超声功率产生更多的羟基自由基和更强的机械效应,加速氧化了 EPS 中的蛋白质和多糖<sup>[26]</sup>,并对沉积物聚集体结构造成破坏;2)超声作用效果随着探头离泥面距离的增加进一步减弱;3)随着作用时间的增加,管道沉积物 EPS 含量及抗剪切力下降,在 3 min 作用时间下作用效果最佳;4)随着沉积物厚度的增加,超声作用效果减弱,特别是在厚度大于 10 cm 后,减弱明显;5)超声作用对沉积物抗冲刷性能的减弱效果与频率正相关,但作用效果随频率变化幅度低于其他因素,这与正交分析所得结果一致。

表 3 沉积物抗剪切力正交分析表

Table 3 Orthogonal analysis table of sediment shear resistance

参数	泥厚/cm	频率/kHz	功率/W	探头距泥面距离/cm	作用时间/min
$K_1$	4.21	4.98	5.82	3.69	5.51
$K_2$	4.86	4.61	4.87	3.97	4.71
$K_3$	4.79	4.47	4.20	5.37	3.91
$K_4$	4.98	4.39	3.56	5.42	4.32
$k_1$	1.05	1.25	1.46	0.92	1.38
$k_2$	1.22	1.15	1.22	0.99	1.16
$k_3$	1.2	1.12	1.05	1.34	0.97
$k_4$	1.25	1.10	0.89	1.36	1.09
极差 R	0.2	0.15	0.57	0.44	0.41

## 2.3 超声处理时间对超声清淤的影响

由于正交实验中处理时间间隔较大,为了尽可能控制能耗和成本,应进一步确定超声清淤的最优处理时间。在正交实验确定最佳实验水平(功率 220 W、频率 50 kHz、处理时间 3 min、沉积物厚度 6 cm、距泥面 3 cm)的基础上,缩小超声处理时间作用范围至 150~240 s 进行实验。如图 2 所示,随着超声作用时间从 150 s 延长至 200 s,沉积物抗剪切力表现出明显的下降趋势,并在 200 s 时达到最低点,为 0.94 N/m<sup>2</sup>,与对照组相比降低了 47.5%。作用时间超过 200 s 后,各指标数值变化趋于平缓,沉积物抗剪切力在 0.93~0.95 N/m<sup>2</sup> 范围内波动。随

着超声波作用时间从150 s增加至200 s,超声波作用对黏性EPS分子的主要成分蛋白质和多糖的分解作用逐渐增强,加上机械作用对沉积物稳定结构的破坏,管道沉积物抗冲刷性能降低。然而,随着超声作用时间的进一步增强, EPS中难降解物质和小分子物质似乎难以被超声进一步分解,蛋白质和多糖含量趋于稳定,沉积物EPS含量和抗剪切力不再下降。因此,实验结果表明,过长的超声作用时间并不能进一步增强超声清淤效果,相比正交实验中得出的结论(3 min为最佳处理时间),200 s为更优工况。

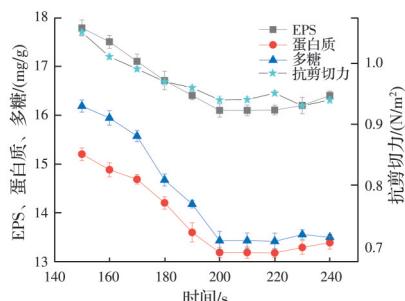


图2 经不同时间超声处理后沉积物抗剪切力、EPS、多糖和蛋白质变化

Fig. 2 Changes in shear strength, EPS, polysaccharides, and proteins of sediment after ultrasonic treatment at different times

此外,对该部分实验结果进行主成分分析发现(图3),EPS、蛋白质、多糖与沉积物抗剪切力有较强的正相关性,其中多糖与抗剪切力相关性最明显。这表明实验中多糖的分解与沉积物抗冲刷能力降低有着密不可分的关系。

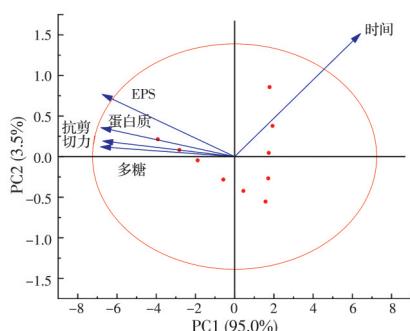


图3 抗剪切力、EPS、多糖和蛋白质变化的主成分分析

Fig. 3 Principal component analysis of changes in shear resistance, EPS, polysaccharides, and proteins

#### 2.4 沉积物厚度对超声清淤的影响

在实际排水管道中,沉积物厚度并不固定,这会影响超声清淤的作用效果,因此,有必要探究清淤效果随沉积物厚度的变化情况。采用之前实验所得出的最优工况,即功率220 W、频率50 kHz、处理时间200 s、超声设备距泥面3 cm对不同厚度沉

积物进行处理。如图4所示,相比原始沉积物,2~10 cm厚度沉积物的EPS逐渐在超声作用下分解,且聚集强度整体均减弱。更厚的沉积物在超声处理后表现出更强的抗剪切力,这表明沉积物厚度的增加会影响超声清淤的效果。值得注意的是,在实验过程中观察到,当沉积物厚度为2~7 cm时,沉积物整体被超声松动,抗剪切力降低至1 N/m<sup>2</sup>以下。然而,当沉积物为8~10 cm时,超声作用后沉积物流动性出现差异明显的两层,即表层沉积物和深层沉积物,而各层抗剪切力和EPS含量也存在明显差异。如图4所示,实线和虚线分别代表上层和下层沉积物性质,当沉积物厚度为8~10 cm时,超声处理后下层沉积物抗冲刷能力、蛋白质含量明显高于上层。该现象表明,超声对7 cm以内(含7 cm)深度沉积物抗冲刷特性的降低效果较好,超出7 cm后,超声波对沉积物抗剪切力和EPS的影响衰减很快,对深层沉积物的抗冲刷能力的减弱作用有限。这一结果在正交实验结果的基础上进一步确定了超声的最佳处理深度范围,即最佳工况下超声最佳处理深度范围为0~7 cm。

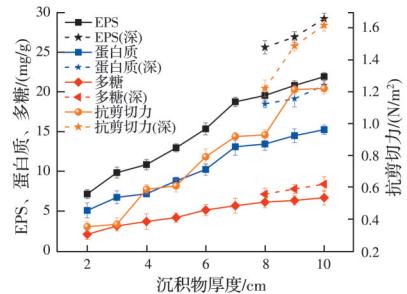


图4 不同厚度沉积物经超声处理后的抗剪切力及EPS含量

Fig. 4 Shear strength and EPS content of sediment with different thicknesses after ultrasonic treatment

在实际应用中,对于厚度在7 cm以内(含7 cm)的沉积物,超声清淤技术能整体降低管道沉积物的抗冲刷性。对于厚度大于7 cm的沉积物,可根据实际情况多次采用超声处理,对沉积物进行分步去除。值得注意的是,是否需要在超声作用的基础上采用水力冲洗技术或机械清淤技术,取决于管道污水流剪切力和处理后沉积物的临界剪切力大小。若管道中污水流剪切力能达到超声处理后沉积物的临界剪切力值,则不需要采用其他辅助手段,超声处理后的沉积物能在污水流冲刷下直接去除;若管道中污水流剪切力小于超声处理后沉积物临界剪切力值,则可以采用水力冲洗技术和机械清淤技术等进行辅助去除。

相比传统清淤技术,超声清淤技术表现出独特的优势。目前常用的机械疏浚和水力冲洗技术在

实际应用中暴露出效率低、故障多、养护水平落后和对交通环境影响大等缺陷。超声清淤技术则可以在短时间内破坏沉积物团聚体的聚集结构,分解沉积物颗粒间产生黏附作用的关键物质 EPS,从而大大提高管道清淤效率。此外,由于超声处理后团聚体结构的解体,管道沉积物被水流冲刷卷起所需的临界剪切力明显减小,因此,利用超声技术进行前处理可为水力冲洗提供更有利的条件,并大大减少水力冲洗清淤所需水量。总的来说,超声清淤技术不仅为管道清淤提供了新的思路,还有望与其他传统清淤方式相结合,从而增强管道清淤技术在各种场景下应用的可行性。

利用超声波对不同厚度沉积物进行处理的效果具有差异,可以合理推测,超声波能量可能随着沉积物深度的增加而逐渐衰减,从而对不同深度沉积物产生不同的作用效果。为探究超声处理后不同深度沉积物的性质变化,采用实验得出的最佳处理工况对 10 cm 厚淤泥进行超声处理,并对各层沉积物进行取样测试。图 5 所示为超声处理 10 cm 厚度沉积物后的各层性质,其中 1~5 层分别为距离沉积物表层 1~2 cm、3~4 cm、5~6 cm、7~8 cm、9~10 cm 的沉积物样品。结果显示,超声处理导致沉积物 1~3 层抗剪切力和 EPS 含量明显降低。随着沉积物深度的增加,第 4 层和第 5 层沉积物抗剪切力大幅度增加,蛋白质含量水平仍然较高,表明超声作用效果大大减弱。以上结果证实了之前的推测,即随着沉积物深度的增加,超声波对沉积物抗冲刷性能的破坏逐渐衰减。

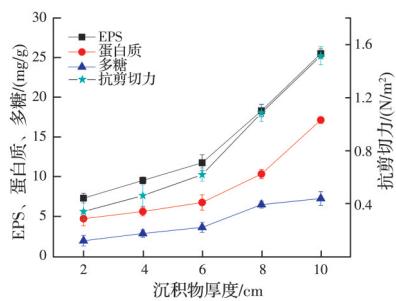


图 5 超声处理后各层沉积物性质

Fig. 5 Sediment properties of layers after ultrasonic treatment

### 3 结论

1) 超声处理对改善管道淤积表现出良好效果,经过各工况下的超声波作用后,沉积物的抗剪切力降低至对照组的 26.4%~91.5%,EPS 结构破坏是沉积物抗冲刷性能降低的重要原因。

2) 通过正交分析得出 5 个关键因素对超声清淤效果影响程度大小排序为:超声电功率、探头距泥

面距离、超声作用时间、沉积物厚度、超声装置工作频率。超声清淤的最优工况为:功率 220 W、频率 50 kHz、处理时间 200 s、距离泥面 3 cm。

3) 超声清淤对于 7 cm 厚度以内(含 7 cm)的沉积物具有较好的清淤效果,在超出该范围后,超声作用对沉积物剪切力的影响衰减很快,对深层沉积物抗冲刷能力的减弱作用有限。

4) 对 10 cm 厚度沉积物进行超声处理和分层取样,结果表明,距离沉积物表层 1~7 cm 沉积物样品抗剪切力和 EPS 含量明显降低,而 7~10 cm 深度沉积物抗剪切力和蛋白质含量较高。进一步证实了超声波作用效果随沉积物深度增加而衰减。

### 参考文献

- [1] 赵磊, 杨逢乐, 王俊松, 等. 合流制排水系统降雨径流污染物的特性及来源[J]. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1561-1570.  
ZHAO L, YANG F L, WANG J S, et al. Characterization of storm-water pollutant sources in a combined sewer network [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28 (8): 1561-1570. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] 汤霞, 陈卫兵, 李怀正. 城市排水系统沉积物特性及清淤方式研究进展[J]. 城市道桥与防洪, 2013(3): 106-110, 216.  
TANG X, CHEN W B, LI H Z. Study on characteristics of sediments in urban sewer system and its desilting mode [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013 (3): 106-110, 216. (in Chinese)
- [4] KAESEBERG T, SCHUBERT S, OERTEL R, et al. Hot spots of antibiotic tolerant and resistant bacterial subpopulations in natural freshwater biofilm communities due to inevitable urban drainage system overflows [J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 164-170.
- [5] 许小冰, 王怡, 王社平, 等. 城市排水管道中有害气体控制的国内外研究现状[J]. 中国给水排水, 2012, 28 (14): 9-12.  
XU X B, WANG Y, WANG S P, et al. National and international research on control of harmful gases in municipal drainage pipeline [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(14): 9-12. (in Chinese)
- [6] 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.

- [7] 李晓峰, 赵敏. 浅谈排水管道清淤施工技术[J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(8): 75-76.
- LI X F, ZHAO M. Discussion on construction technology of drainage pipeline dredging [J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion, 2023, 52(8): 75-76. (in Chinese)
- [8] MENG D Z, JIN W, CHEN K L, et al. Cohesive strength changes of sewer sediments during and after ultrasonic treatment: The significance of bound extracellular polymeric substance and microbial community [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 723: 138029.
- [9] REGUEIRO-PICALLO M, SUÁREZ J, SANUDO E, et al. New insights to study the accumulation and erosion processes of fine-grained organic sediments in combined sewer systems from a laboratory scale model [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 716: 136923.
- [10] WAQAS A, NEUMEIER U, ROCHON A. Seasonal changes in sediment erodibility associated with biostabilization in a subarctic intertidal environment, St. Lawrence Estuary, Canada [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2020, 245: 106935.
- [11] MENG D Z, WU J, CHEN K L, et al. Effects of extracellular polymeric substances and microbial community on the anti-scorbility of sewer sediment [J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 494-504.
- [12] CHEN X Y, LI D Y, ZHOU C H, et al. Predation preference for extracellular polysaccharides by paramecia and rotifers may have accelerated the decline of membrane biofilm hydraulic resistance [J]. Science of the Total Environment, 2023, 889: 164090.
- [13] 张子庚. 高铁酸盐对排水管道沉积物侵蚀抗性影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- ZHANG Z G. Effect of ferrate on the erosion resistance of sewer pipeline sediments [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022. (in Chinese)
- [14] PANG H L, LI X W, YUAN H W, et al. Sewer sediment adhesion reduction and hydraulic floating promotion by alkaline treatment [J]. Science of the Total Environment, 2023, 893: 164896.
- [15] CAMPISANO A, CATANIA F V, MODICA C. Evaluating the SWMM LID Editor rain barrel option for the estimation of retention potential of rainwater harvesting systems [J]. Urban Water Journal, 2017, 14(8): 876-881.
- [16] DAILIANIS S, TSARPALI V, MELAS K, et al. Aqueous phenanthrene toxicity after high-frequency ultrasound degradation [J]. Aquatic Toxicology, 2014, 147: 32-40.
- [17] WANG D B, HUANG Y X, XU Q X, et al. Free ammonia aids ultrasound pretreatment to enhance short-chain fatty acids production from waste activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2019, 275: 163-171.
- [18] HUANG Y R, LI L, LUAN X M, et al. Ultrasound-enhanced coagulation for cyanobacterial removal: Effects of ultrasound frequency and energy density on coagulation performance, leakage of intracellular organic matters and toxicity [J]. Water Research, 2021, 201: 117348.
- [19] ZHOU Y C, YAO X Y, GU Y Q, et al. Biological effects on incipient motion behavior of sediments with different organic matter content [J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(1): 627-640.
- [20] ZHANG Y J, ZHANG J, ZHU D Z, et al. Experimental study on pollution release and sediment scouring of sewage sediment in a drainage pipe considering incubation time [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(19): 54945-54960.
- [21] ADAV S S, LEE D J, TAY J H. Extracellular polymeric substances and structural stability of aerobic granule [J]. Water Research, 2008, 42(6/7): 1644-1650.
- [22] BONG C H J, LAU T L, GHANI A AB. Potential of tipping flush gate for sedimentation management in open stormwater sewer [J]. Urban Water Journal, 2016, 13 (5): 486-498.
- [23] LIU J X, CAO Z X, LI X C. Coupled modelling of flow and non-capacity sediment transport in sewer flushing channel [J]. Water Research, 2022, 219: 118557.
- [24] FENG H F, DU S T, ZHU D Z. Numerical study of effects of flushing gate height and sediment bed properties on cleaning efficiency in a simplified self-cleaning device [J]. Water Science & Technology, 2023, 88(3): 542-555.
- [25] SHAHSAVARI G, ARNAUD-FASSETTA G, CAMPISANO A. A field experiment to evaluate the cleaning performance of sewer flushing on non-uniform sediment deposits [J]. Water Research, 2017, 118: 59-69.
- [26] XU H L, TANG Z Z, LIANG Z X, et al. Neglected methane production and toxicity risk in low-frequency ultrasound for controlling harmful algal blooms [J]. Environmental Research, 2023, 232: 116422.

(编辑 王秀玲)