

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.04.011

管道自清淤水流流场及清淤特性数值模拟分析

李桐¹, 张欣², 陈昱霖², 董磊², 陈曜辉¹, 宁凯扬¹, 钱尚拓¹, 冯建刚¹, 徐辉¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 为解决城市排水管道的泥沙淤积问题, 设计了一种闸门配合流槽的管道水力自清淤结构, 并对不同坡度和初始进流水位的清淤过程水力特性进行了数值模拟。结果表明: 开始清淤时管道进口的流槽切应力和垂线平均流速分别可达清淤结束时的 16 倍和 1.55 倍; 当冲刷波运动至管道末端, 管道进口的流槽切应力和垂线平均流速最大可达管道末端的 5 倍和 2 倍, 管道上游的清淤效果更强; 清淤过程中, 流槽内水流的最大切应力和最大垂线平均流速分别可达平台上的 104 倍和 1.45 倍, 流槽清淤效果明显优于平台; 管道坡度越大、初始进流水位越高, 冲刷波切应力、垂线平均流速越大, 最大分别可达 156 Pa 和 3.6 m/s, 管道清淤效果越好; 清淤过程冲刷波流速和切应力显著大于泥沙的理论扬动流速和临界切应力, 证明了该水力自清淤结构清淤效果良好。

关键词: 城市排水管道; 水力自清淤; 切应力; 垂线平均流速; 扬动流速

中图分类号: TV673

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)04-0089-10

Numerical simulation analysis of flow field and dredging characteristics of pipeline self-cleaning

LI Tong¹, ZHANG Xin², CHEN Yulin², DONG Lei², CHEN Yaohui¹, NING Kaiyang¹, QIAN Shangtuo¹, FENG Jiangang¹, XU Hui¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

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

Abstract: To alleviate sediment deposition in urban drainage pipelines, a hydraulic self-cleaning structure for pipelines was designed, incorporating a gate and flume. Numerical simulation methods were conducted to analyze the hydraulic characteristics of the dredging process under different slopes and initial inflow levels. The results show that at the initial stage of dredging, the flume shear stress and vertical mean velocity at the inlet of the pipeline can reach 16 and 1.55 times those at the end of the process, respectively. As the flushing wave moves to the end of the pipeline, the maximum flume shear stress and the maximum vertical mean velocity at the inlet of the pipeline can reach 5 and 2 times those at the end of the pipeline, indicating a stronger dredging effect in the upstream section. During dredging, the maximum shear stress of the flow in the flume and the maximum vertical mean velocity can reach 104 and 1.45 times those on the platform, respectively, indicating that the dredging efficiency in the flume is significantly superior to that on the platform. Specifically, the increased slope of the pipeline and higher initial inflow levels result in greater flushing wave shear stress and vertical mean velocity, with maximum recorded values of 156 Pa and 3.6 m/s, respectively, reflecting a better pipeline cleaning effect. During dredging, the flushing wave velocity and shear stress generated are significantly higher than the theoretical uplift flow velocity and critical shear stress of the sediment, which proves that the dredging effect of the hydraulic self-cleaning structure is good.

Key words: urban drainage pipeline; hydraulic self-cleaning; shear stress; vertical mean velocity; uplift flow velocity

城市排水系统是市政工程的关键组成部分, 负责收集、处理和排放雨污水, 对防治内涝、保护水生态环境和保障居民安全至关重要^[1-2]。随着我国土地资源开发利用强度增大, 地表冲刷、水土流失等问题愈发严重, 城市污水中的砂粒含量显著增大^[3]。地表垃圾和泥沙随水流进入管道后易沉积, 导致管道过流面积减小、输水能力下降甚至堵塞^[4-7]。排水管道淤积会导致管道腐蚀, 降低管道使用寿命, 甚至导致城市内涝、水环境

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52279063)

作者简介: 李桐(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事泵站水力学研究。E-mail: 211310010024@hhu.edu.cn

通信作者: 陈曜辉(1995—), 男, 讲师, 博士, 主要从事管道瞬变流研究。E-mail: yaohuihu@163.com

引用本文: 李桐, 张欣, 陈昱霖, 等. 管道自清淤水流流场及清淤特性数值模拟分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 89-98.

LI Tong, ZHANG Xin, CHEN Yulin, et al. Numerical simulation analysis of flow field and dredging characteristics of pipeline self-cleaning[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(4): 89-98.

污染,并对城市公共卫生构成威胁^[8-10]。

清淤工作是维持排水系统正常运行的重要环节,对缓解排水管道泥沙淤积状况、减小溢流风险、保证排水系统正常运行、保护城市水环境安全具有重要意义。目前,清淤方法主要包括绞车清淤、高压水射流清淤和水力自清淤。绞车清淤不仅花费大量人力和时间,同时存在安全隐患^[11]。高压水射流清淤法需要消耗大量水资源,不仅成本较高,且技术要求高。水力自清淤通过蓄水和瞬时排水形成冲刷波进行清淤,具有成本低、易维护的优势^[12-13]。但是,水力自清淤技术起步较晚,成熟度较低,国内应用有限^[14]。为提升维护效率、降低运行成本并保障排水安全,亟须加强水力自清淤技术的设计与应用研究。

为探究水力自清淤效果及其影响因素,国内外学者通过物理模型和数值模拟开展了广泛研究,主要集中在冲刷波特性、设计参数优化及沉积物特性影响等方面。Feng 等^[15]通过数值模拟发现,蓄水开闸产生的冲刷波对泥沙具有良好的清淤效果,是水力自清淤的有效手段。Yang 等^[16]通过数值模拟研究进一步指出,冲刷波前端流速最大,底部切应力最强,多数情况下冲刷波能够产生足够的切应力,可以有效冲刷弱固结沉积物,但对固结沉积物的清淤效果受流槽糙率、坡度和下游水深影响显著。Schaffner 等^[17]通过现场观测指出,管道坡度对清淤效果影响显著。Goormans 等^[18]的研究表明,清淤效果与水力参数(冲刷波速度、切应力)和沉积物特性(粒径、孔隙度、厚度)密切相关,强调清淤设施设计需确保在最小坡度下仍能产生足够的切应力。刘翠云等^[19]通过试验模拟排水管道内沉积物的清淤过程,发现较大流量和管道坡度下,管道内水流动能大,清淤效果更好。Shirazi 等^[20-23]通过数值模拟研究了闸门水力自清淤系统的设计参数,给出了基于清淤时间、无量纲切应力和水深的清淤长度公式,发现坡度增大、沉积物孔隙度增大及粒径减小均有助于提升清淤效果。Liu 等^[24]研究发现清淤效果受沉积物粒径、沉积物厚度、管道坡度和水流速度影响,随着管道坡度增大,管道末端清淤效果提升显著。Guo 等^[25]在流槽中的试验结果表明,初始进流水位增高,清淤效果提升。以上研究均是在圆管(或方形水槽)中进行的。Aksoy 等^[26]通过在梯形、矩形、圆形、U 形和 V 形底 5 种不同断面的水槽中进行试验,发现矩形底流槽中初始沉积速度最小,V 形底流槽中的初始沉积速度最大。Schaffner^[27]以带有半圆形流槽的管道为研究对象,通过数值模拟计算冲刷波切应力,发现蓄水位越高、蓄水量越大清淤效果越好。

综上,针对水力自清淤装置水力特性的研究主要集中在闸门开度、管道坡度设计对常规断面形状管道(如圆管)的水流流速和切应力的影响。流槽具有增大局部流速、适应流量变化大等优势,在排水渠道中被广泛应用,本文将其引入城市排水管道的设计,研究带流槽管道的清淤过程水力特性,采用数值模拟结合物理模型试验的方法对提出的闸门配合底部流槽的管道水力自清淤过程进行研究,分析非恒定冲刷波的流态演变、冲刷波流速和切应力,并根据相关水力参数评估冲刷波的清淤和携颗粒能力。通过对比流槽内水流切应力和垂线平均流速与泥沙运动临界切应力和扬动流速之间的关系,分析自清淤结构在不同管道坡度和初始进流水位下的水力自清淤效果,以期对排水管道水力自清淤系统的结构设计和运行提供科学依据。

1 研究方法

1.1 控制方程

清淤过程中,管道内冲刷波为明流,水面上方为空气,建立水气两相流模型,基本流动控制方程为

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_i \tag{2}$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; x_i 为位置分量; u_i 为速度分量; p 为压强; μ 为动力黏度; S_i 为广义源项。

湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型,湍动能 k 和湍动能耗散率 ε 的输运方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon + S_k \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon - R_\varepsilon \tag{4}$$

其中
$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad \mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

式中： μ_{eff} 为有效混合黏度； μ_t 为涡黏系数； G_k 为由黏性力导致的湍动能产生项； α_k 、 α_ε 分别为 k 和 ε 对应的普朗特数， $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$ ； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 为经验常数， $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ， $C_\mu = 0.085$ ； S_k 、 S_ε 为用户自定义源项； R_ε 为 ε 方程附加项。

采用 VOF 模型处理水气交界面，分别定义 α_w 和 α_a 为计算管道内水和气体所占的体积分数，则
$$\alpha_a = 1 - \alpha_w \tag{5}$$
 $\alpha_w = 0$ 表明该网格内全是空气， $0 < \alpha_w < 1$ 表明该网格内既有液体也有空气，即存在自由液面，水气混合物的密度和动力黏度分别为：

$$\rho_h = \alpha_w \rho + (1 - \alpha_w) \rho_a \tag{6}$$

$$\mu_h = \alpha_w \mu + (1 - \alpha_w) \mu_a \tag{7}$$

式中： ρ_a 为空气的密度； μ_a 为空气的动力黏度。

1.2 管道自清淤系统模型构建

图 1 为管道自清淤系统结构示意图，主要包括集水竖井、冲淤闸门及排水管道 3 个部分。其中集水竖井长、宽、高分别为 1.0、0.8、2.0 m，初始进流水位即竖井初始水位为 H_0 ；排水管道总长 25.0 m，如图 1(a) 所示。管道断面为弓形管道与 V 形流槽的组合，具体形状及尺寸如图 1(b) 所示，流槽底部距离竖井底部 0.5 m。考虑城市排水管道管径为 5 m，该模型可认为是 1：12.5 水力模型，本文管道运行工况为明流，采用 Froude 相似准则，流速比尺 $\lambda_v = (\lambda_L)^{1/2} = 3.54$ ，流量比尺 $\lambda_Q = (\lambda_L)^{5/2} = 552.43$ ，时间比尺 $\lambda_t = (\lambda_L)^{1/2} = 3.54$ 。正常运行工况，管道闸门全开，为全断面进流。水力自清淤工况，保持断面弓形封堵，打开流槽冲淤闸门，使流槽内形成冲刷水流沿管道冲淤。

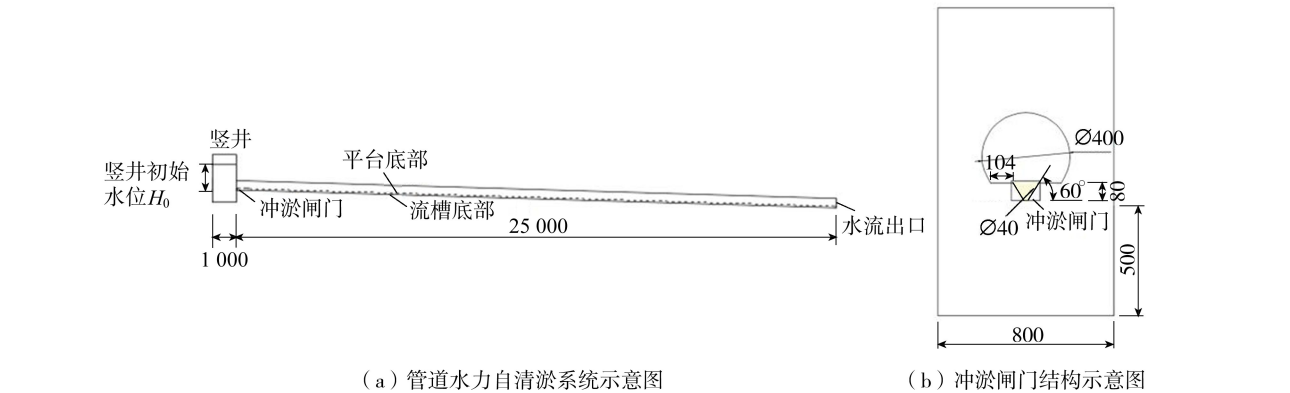


图 1 管道自清淤系统结构示意图(单位:mm)
Fig.1 Structure of pipeline self-cleaning system (unit: mm)

表 1 为管道自清淤系统模拟工况，主要包括 3 种初始进流水位 ($H_0 = 1.09$ 、 0.81 、 0.61 m)，2 种管道坡度 (0.0150、0.0005)，用以分析不同管道坡度和初始进流水位对清淤效果的影响。管道水力自清淤计算模型的定解条件：在集水竖井内设置初始水体，集水竖井底部及四周均是墙体，顶部与大气连通，集水竖井水面与外界接触的界面设置为标准大气压的开敞式边界；长距离管道输水系统，水流可以自由流出计算域，故计算域出流边界设置在管道 25 m 末端，设置为自由出流边界条件；壁面为无滑移固体壁面条件。图 2 为最终网格划分示意图。网格质量直接影响数值模拟的精度与收敛速度，本文使用结构化网格对计算区域进行划分，管道采用 O 型网格剖分方式对计算域作结构化网格处理，同时对管道进口段及流槽底部进行了加密处理。

图 3 为网格无关性验证结果，选择管道进口断面平均流速及平均压强作为评价指标，共测试了 158 万、264 万、368 万、420 万网格数量的 4 套网格，结果表明当网格数量超过 368 万时，管道进口断面平均流速及平均压强的误差均不超过 $\pm 4\%$ 。综合考虑计算精度与计算效率，本文选择的计算网格为 420 万。

表 1 模拟工况		
Table 1 Simulation conditions		
工况编号	管道坡度	H_0/m
1	0.0150	1.09
2	0.0150	0.81
3	0.0150	0.61
4	0.0005	1.09
5	0.0005	0.61

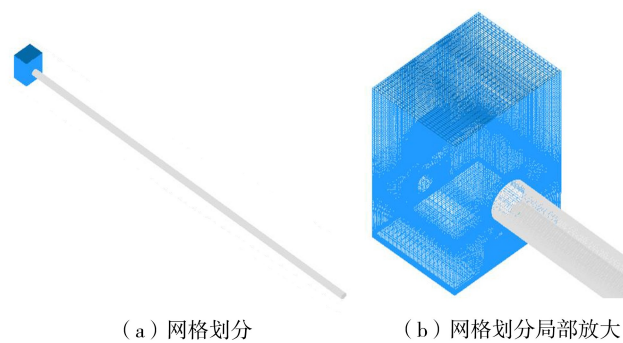


图2 网格划分示意图
Fig.2 Grid division

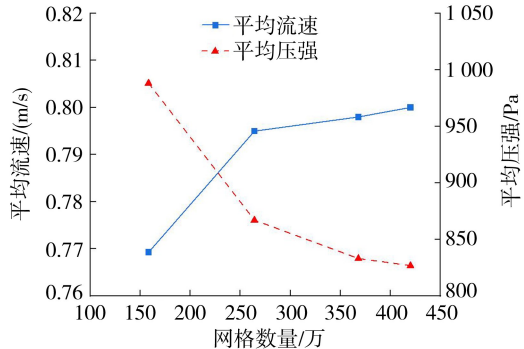


图3 网格无关性验证结果
Fig.3 Grid independence verification

1.3 模型验证

为了验证本文数值模型的合理性,在河海大学水流试验大厅搭建了如图4所示的物理模型。通过对比数值模拟和物理模型试验得到的冲刷波位置水深和管道流量,验证数值模拟结果的可靠性。图5为工况1, $t=2\text{ s}$ 闸门下游侧2.5~4.5 m处的冲刷波水深示意图,数值模拟结果与物理模型试验结果吻合。图6为清淤过程闸门进流流量(Q)随时间变化,物理模型试验与数值模拟结果误差小于10%,表明本文采用的数值模型及其计算结果可靠。



图4 物理试验模型
Fig.4 Physical experiment model

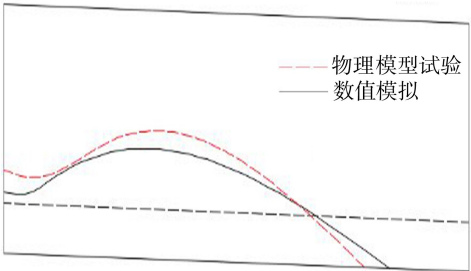


图5 冲刷波水深剖面示意图
Fig.5 Flushing wave depth profile

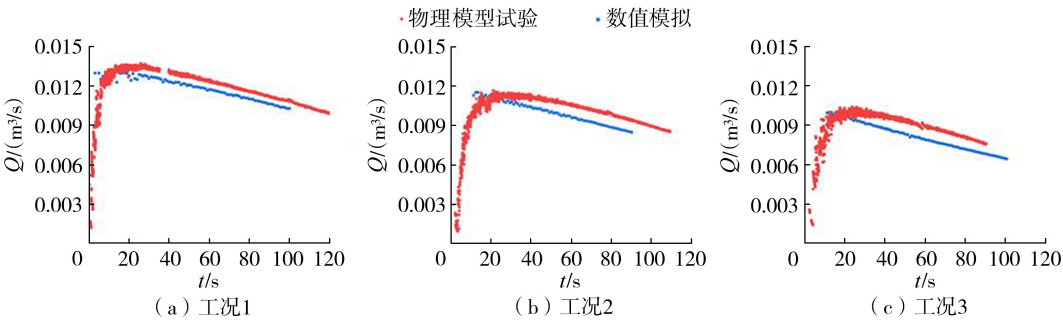


图6 闸门进口流量随时间变化
Fig.6 Variations of flow rate at gate inlet with time

2 结果与分析

2.1 自清淤流态

图7为工况1清淤过程冲刷波流态。闸门开启后,水流涌入管道,产生较大的动能和流速,在流槽内形成冲刷波。流槽内冲刷波流速沿程逐渐减小,管道上游流槽内冲刷波流速较大,冲刷波在流动过程中不断与管道内壁摩擦,造成能量耗散,逐渐失去动能,从而流速减小。平台上冲刷波流速始终较小,并向下游推移,运动至管道末端时流速接近0 m/s。 $t=5\text{ s}$ 时,管道典型断面流速最大值为4.15 m/s; $t=10\text{ s}$ 时,流槽上部水流流速较大, $t=10\text{ s}$ 后冲刷波运动至管道末端,流槽内冲刷波逐渐趋于稳定; $t=30\text{ s}$ 和 $t=90\text{ s}$ 中,集水竖井

水位不断降低,管道内最大流速分别为 3.74、2.37 m/s,流槽内冲刷波流速逐渐减小。图 8 为工况 1、 $t=11\text{ s}$ 管道沿程断面流速及水深变化,断面距离进口的水平距离(l)通过管径(D)无量纲化。高流速区集中在流槽中心位置,水流流速沿程减小而水深沿程增大,在约 $l/D=25$ 位置平台上出现水流,流速较小。

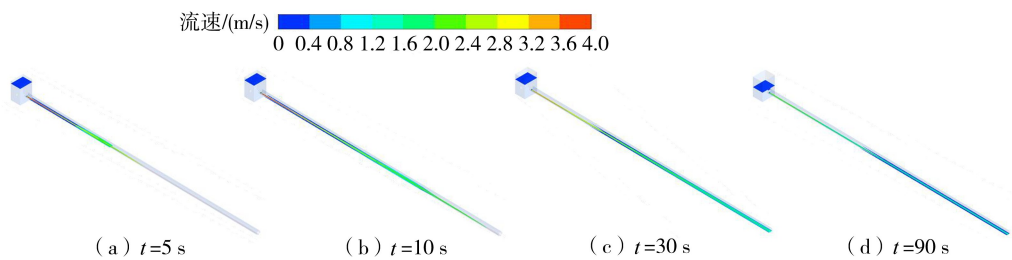


图 7 管道自清淤冲刷波流态(工况 1)
Fig. 7 Flow regimes of flushing wave during pipeline self-cleaning (Condition 1)

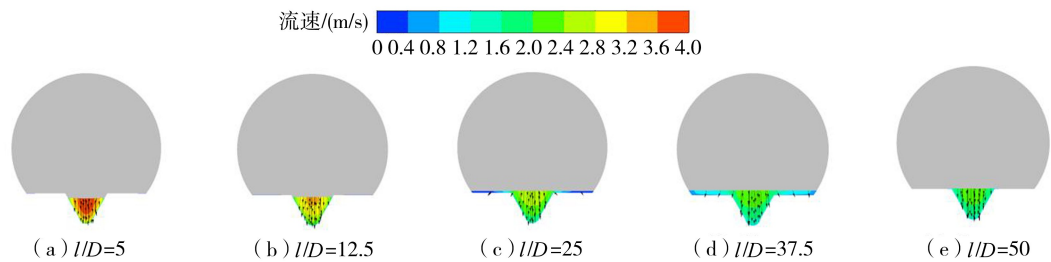


图 8 冲刷波断面(工况 1)
Fig. 8 Cross-section of flushing wave (Condition 1)

图 9 为不同工况清淤过程管道沿程水深变化,其中水深(h)通过管径(D)无量纲化。清淤过程中,管道沿程水深随冲刷波进入明显升高,所有工况下冲刷波均可以冲刷流槽与平台。随初始进流水位升高,冲刷波运动速度更快、沿程水深更大。随管道坡度变化沿程水深呈现出不同的特点:陡坡(坡度为 0.0150)时,同一管道位置随时间推移水深不断下降,管道沿程最大水深不断减小;缓坡(坡度为 0.0005)时,冲刷波流速减缓,管道下游水深随时间逐渐增加,管道沿程最大水深不断增大。

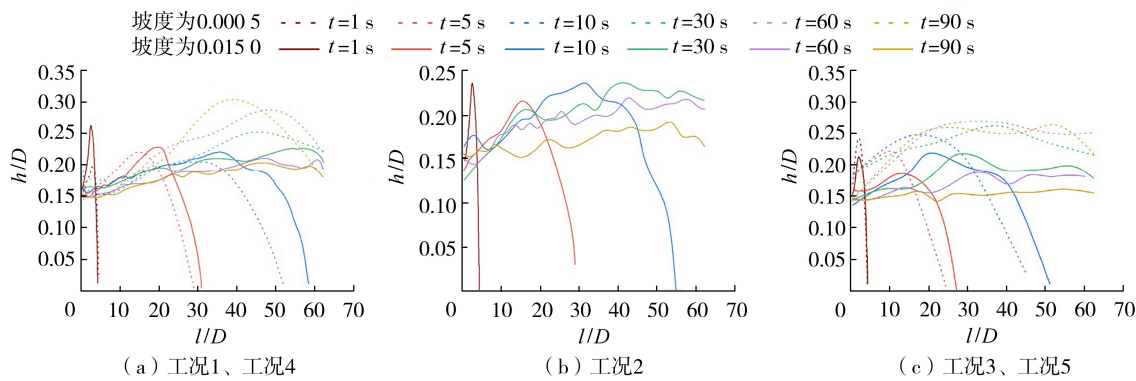


图 9 管道沿程水深分布
Fig. 9 Distribution of water depth along pipeline

2.2 冲刷波切应力

切应力(τ)大小直接影响水流对沉积物的冲刷和运移能力,切应力越大冲刷波清淤能力越强。切应力大小与湍流动能密切相关,计算公式参见文献[15,28]。

由图 10 可知,不同初始进流水位下,流槽内均能产生较大的切应力,最大值可达 156 Pa。当 $l < 5.0\text{ m}$ 时,流槽底部冲刷波切应力沿程迅速下降; $l > 5.0\text{ m}$ 后切应力的数值较小,沿程变化较小。选取流槽底部切应力最大的工况 1 作为代表进行分析,开始清淤($t=1\text{ s}$)管道进口位置流槽切应力可达清淤结束时($t=90\text{ s}$)的 16 倍。冲刷波运动至管道末端后,管道进口位置($l=1.0\text{ m}$)流槽切应力可达管道末端($l=24.0\text{ m}$)的 5 倍。初始进流水位越大,管道坡度越陡,冲刷波产生的切应力越大。不同初始进流水位、不同管道坡度产

生的切应力差异会随时间推移逐渐减小。

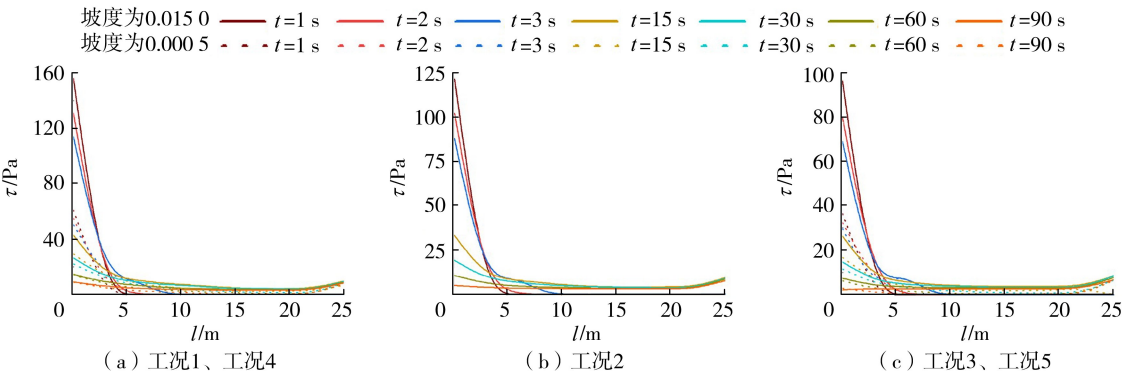


图 10 流槽底部切应力沿程分布

Fig. 10 Distribution of shear stress along flume bottom

清淤过程中冲刷波流态和水深结果表明,开启闸门进行流槽清淤时,平台上也存在一定水深的清淤水流,有必要对平台的清淤效果进行分析。图 11 为平台底部切应力沿程分布,与流槽底部切应力相比,各工况平台上切应力整体较小。随时间推移,平台上切应力的峰值向管道下游移动。初始进流水位对平台上切应力影响较大,初始进流水位越高,平台上切应力越大。对比图 11(a)(c)相同水位不同坡度的结果可知,管道坡度对平台上切应力影响较小,初始进流水位越低,影响越不显著。对比工况 1,管道进口位置 $t=1\text{ s}$ 的切应力,流槽最大切应力可达平台上最大值的 104 倍。

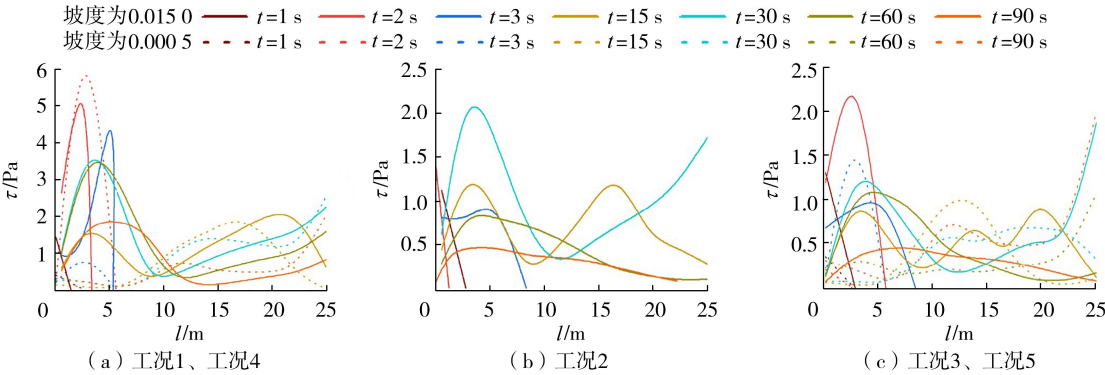


图 11 平台切应力沿程分布

Fig. 11 Distribution of shear stress along platform

由图 12 可知,初始进流水位越高,同一时刻的最大切应力 ($\tau_{\max}$) 越大。随竖井水位下降, $\tau_{\max}$ 逐渐减小,变化速度也逐渐减小。管道坡度对清淤效果的影响在管道自清淤的初始阶段尤为突出。初始阶段,缓坡(坡度为 0.000 5)较陡坡(坡度为 0.015 0)的 $\tau_{\max}$ 减小近 50%; $t > 40\text{ s}$,不同管道坡度的 $\tau_{\max}$ 趋于一致。缓坡的清淤效果稍弱于陡坡,但根据流槽底部 $\tau_{\max}$ 可知,其仍具有较好的清淤效果。

2.3 垂线平均流速

冲刷波的垂线平均流速(v)是决定泥沙能否被水流携带的关键因素。当冲刷波的垂线平均流速达到或超过泥沙的扬动流速,泥沙颗粒将被冲刷波携带并沿管道运输。由图 13 可知,流槽中线垂线平均流速先下降后上升,冲刷波头部位置垂线平均流速最大,高水位($H_0=1.09\text{ m}$)工况下可以达到 3.6 m/s 。随着竖井水位降低,冲刷波波速逐渐降低,导致流槽中线垂线平均流速逐渐减小,清淤效果逐渐减弱。以工况 1 为例,开始清淤($t=1\text{ s}$)管道进口位置流槽垂线平均流速可达清淤结束时($t=90\text{ s}$)的 1.55 倍; $t=15\text{ s}$,管道进口位置($l=1.0\text{ m}$)流槽垂线平均流速可达管道末端($l=24.0\text{ m}$)的 2 倍。由图 13(a)

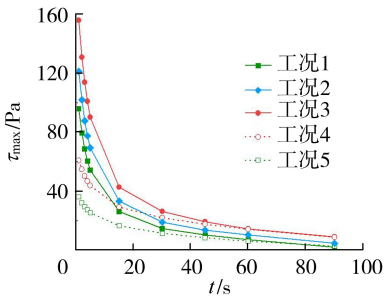


图 12 流槽底部切应力最大值随时间变化

Fig. 12 Variation of maximum shear stress along flume bottom with time

(c)可知,当 $t > 15$ s 管道坡度的影响随时间推移逐渐增强,在 $l > 15$ m 管道范围陡坡工况下的垂线平均流速约为缓坡的 2 倍。这是因为陡坡工况重力分量作用更强,冲刷波在沿管道下游方向产生加速,使冲刷波流速增大。冲刷波到达管道末端后,竖井水位下降,冲刷波流速逐渐减小,冲刷波的重力势能转化为动能的效率相对较低,管道坡度成为影响冲刷波能量转换效率的主导因素。

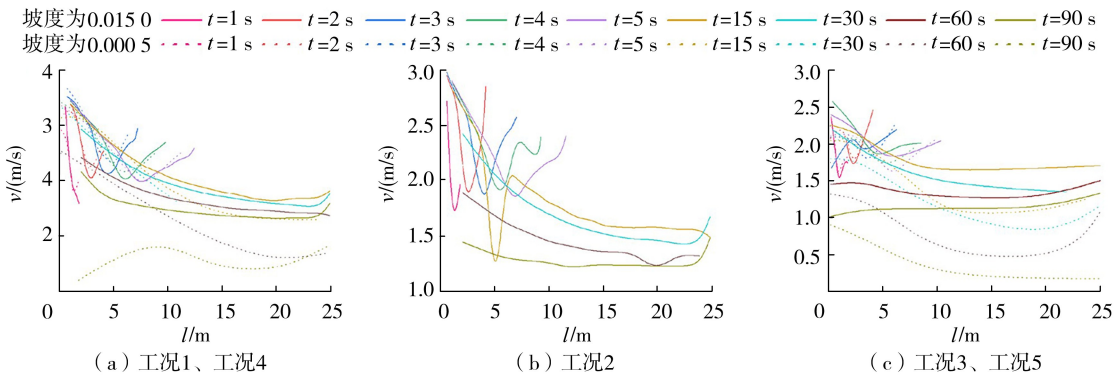


图 13 流槽垂线平均流速

Fig. 13 Vertical mean velocity along flume

由图 14 可知,平台上冲刷波向管道下游推移过程中($t < 15$ s),平台垂线平均流速最大值保持在冲刷波前端。当 $t > 15$ s,冲刷波运动至管道末端后,平台上垂线平均速度的最大值位于管道下游($l > 12.5$ m),同一时刻平台沿程垂线平均流速变化不显著,并随时间推移整体缓慢下降,最终趋近于 0。平台垂线平均流速随初始进流水位下降整体减小。由图 14(a)(c)可知,同一时刻管道坡度对平台上垂线平均流速的大小影响较小。管道坡度越缓,同一时刻平台上冲刷波的位置越靠近管道上游,平台上垂线平均流速越大。与流槽相比,平台上垂线平均流速较小,流槽最大垂线平均流速可达平台上最大值的 1.45 倍。

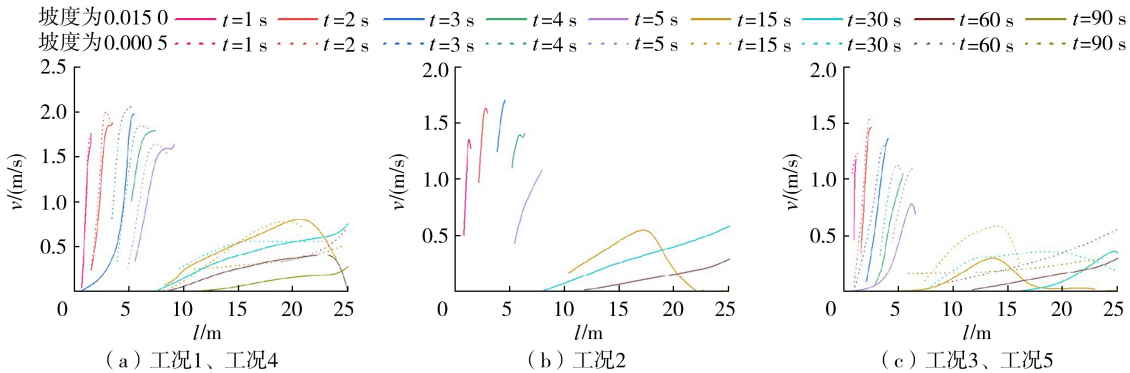


图 14 平台垂线平均流速

Fig. 14 Vertical mean velocity along platform

2.4 冲刷和携颗粒能力

泥沙在管道中的输运形式包括推移质输运、悬移质输运以及混合输运。推移质输运主要发生在水流切应力较大,能够克服泥沙颗粒的静止摩擦力时。悬移质输运是指泥沙颗粒悬浮在水中随水流运动,主要发生在水流流速较大,垂线平均流速达到泥沙的扬动流速时。临界切应力是判断泥沙能否起动的关键因素,是使沉积物开始移动所需的最小切应力。基于切应力和垂线平均流速分析推移质泥沙输运的输沙率和悬移质泥沙输运的扬动流速,评估水力自清淤系统的清淤效果。

Yang 等^[16]指出管道淤积物临界切应力存在 2 个典型范围,分别对应于不同沉积物的侵蚀条件:未充分固结沉积物的临界切应力大小为 2~3 Pa,充分固结沉积物的临界切应力为 6~7 Pa。根据图 10, $t < 30$ s 管道上游流槽底部切应力远大于固结沉积物临界切应力,能够对流槽内的固结沉积物起到较好的清淤效果。随时间推移,流槽底部切应力逐渐减小。各工况平台上切应力均难以达到固结沉积物的临界切应力,难以对固结沉积物起到冲刷效果。高水位工况($H_0 = 1.09$ m)下,管道上游流槽内的固结沉积物的有效冲刷时间超过 90 s。低水位工况下,平台上对弱固结沉积物的清淤效果有限。因此,该排水管道系统能够实现较好的清淤

效果,流槽内冲刷波能产生较大切应力,清淤作用时间较长,平台上清淤效果弱于流槽,考虑到本文闸门开度为与平台高度平齐,实际使用时可制定不同闸门开度的组合清淤方案。

Meyer-Peter 等^[29] 基于量纲分析及水槽试验数据,建立了推移质输沙率(q_b)公式。根据流态结果,本文系统清淤过程水流流态为明流,因此 q_b 通过 Meyer-Peter 等^[29] 提出的公式进行计算。根据上海市污水管道淤积物现场采样结果,选择真密度为 2.65 g/cm^3 、中值粒径为 0.49 mm 的典型泥沙进行分析,对应的临界希尔兹数为 0.28 ,相应临界切应力为 2.20 Pa 。实际切应力与临界切应力的相对关系可作为泥沙是否起动的判断依据。根据图 10,在陡坡(坡度为 0.0150)工况下, $t < 90\text{ s}$ 流槽切应力均大于临界切应力,泥沙均可以起动,作推移运动。根据图 11,以工况 5($H_0=0.61\text{ m}$,坡度为 0.0005)为例,除管道末端, $l > 7.0\text{ m}$ 平台切应力均小于临界切应力;以工况 4($H_0=1.09\text{ m}$,坡度为 0.0005)为例, $t > 30\text{ s}$,除管道末端, $l > 16.7\text{ m}$ 平台切应力均小于临界切应力。在管道上游起动的部分泥沙,运动至管道中下游后会再次回落。陡坡管道系统的流槽清淤效果较缓坡管道清淤效果更好。

由图 15 可知,清淤过程中管道上游侧 q_b 显著大于下游侧,管道位置 $l > 5.0\text{ m}$ 的 q_b 显著降低,趋近于 0 ,与图 10 和图 13 的切应力和流速分布相符。初始进流水位与管道坡度对输沙率影响显著,管道坡度越大、初始进流水位越高同一时刻、同一管道位置的 q_b 越大,清淤效果越好。清淤过程中,随时间推移,竖井水位下降,流槽的 q_b 逐渐减小,直至趋近于 0 ,表明随竖井水位下降,流槽的清淤效果逐渐减弱。

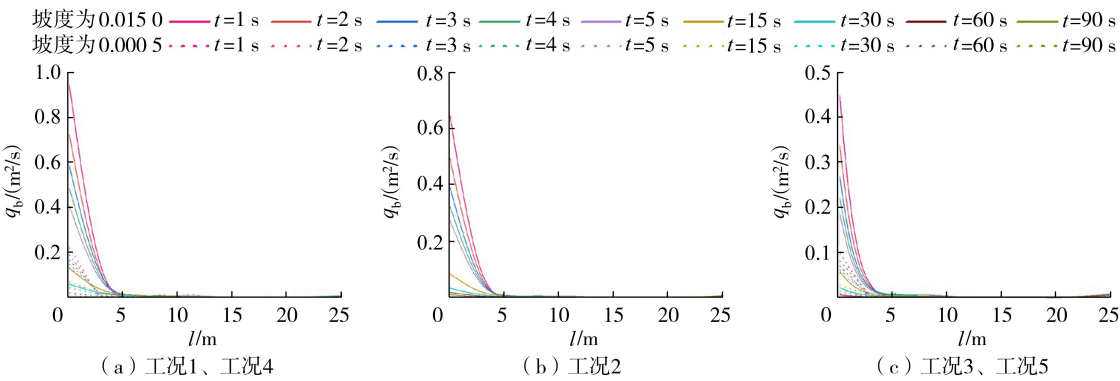


图 15 流槽输沙率
Fig. 15 Sediment transport rate along flume

沙玉清^[30]认为泥沙扬动流速的影响因素有粒径、沉速、泥沙容重和水流容重等,假定泥沙扬动力系数与静水沉降的阻力系数成指数关系,根据试验资料得到泥沙扬动流速公式。为了评估本文管道水力自清淤系统的清淤效果,基于上海市污水管道淤积物现场采样结果,采用沙玉清^[30-31]提出的扬动流速公式计算典型泥沙的扬动流速为 0.44 m/s 。结合图 13 和图 14 可知,对于陡坡管道在任何进口水位条件下流槽内水流流速均大于泥沙扬动流速,表明试验中全管道范围有效冲刷时间可达 90 s 以上。平台上水流流速大于扬动流速的范围基本在 $t < 5\text{ s}$ 、 $l < 10\text{ m}$ 内,表明平台清淤效果相比流槽有限;通过增大进口水位可以提高平台清淤效果。对于缓坡管道,在工况 5($H_0=0.61\text{ m}$) $t=90\text{ s}$ 流槽内出现垂线平均流速小于泥沙扬动流速的情况,此工况下流槽全管道范围的有效冲刷时间相比陡坡管道缩短约 30% ;平台上水深相比陡坡管道略微增大,部分位置的垂线平均速度可以达到泥沙的扬动流速,表明缓坡管道可以一定程度上清理平台上的泥沙。

3 结 论

- a. 相比常规圆形断面管道,在管道底部设计清淤流槽,能够产生较大的切应力和垂线流速,有更好的清淤效果。
- b. 水力自清淤开始时管道进口的流槽切应力和垂线平均流速分别可达清淤结束时的 16 倍和 1.55 倍。当冲刷波运动至管道末端后,管道进口位置($l=1.0\text{ m}$)流槽切应力和垂线平均流速最大可达管道末端($l=24.0\text{ m}$)的 5 倍和 2 倍,管道上游的清淤效果更强。清淤过程中,流槽内水流的最大切应力和垂线平均流速分别可达平台上的 104 倍和 1.45 倍,流槽清淤效果明显优于平台。表明通过流槽闸门开启对平台的清淤效果相对较小,在实际运行中可以根据管道运行条件和泥沙淤积位置具体设计清淤工况和制定日常清淤维护

方案制定不同闸门开度的组合清淤方案。

c. 流槽内水流切应力和垂线平均流速与泥沙运动临界切应力和扬动流速间的关系表明,本文设计的水力自清淤结构的清淤效果较好。管道坡度越大、初始进流水位越高,冲刷波切应力、垂线平均流速越大,最大分别可达 156 Pa 和 3.6 m/s,表明管道清淤效果越好。

参考文献:

[1] 张睿,何琪,徐旭,等. 调蓄池水力自清系统放空冲洗特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):47-53. (ZHANG Rui,HE Qi,XU Xu,et al. Characteristics of venting flushing in hydraulic self-cleaning systems for storage tanks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(2):47-53. (in Chinese))

[2] 卢兴超,徐宗学,施奇妙,等. 城市道路排水系统应对降雨的能力阈值及提升策略研究[J]. 水利水电科技进展,2025,45(2):46-53. (LU Xingchao,XU Zongxue,SHI Qimiao,et al. Research on capacity threshold and its improvement strategies for urban road drainage systems in response to rainfall[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(2):46-53. (in Chinese))

[3] 张睿,江扬阳,谢锋,等. 旋流沉砂池除砂特性分析及优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(6):53-59. (ZHANG Rui,JIANG Yangyang,XIE Feng,et al. Analysis and optimization of sand removal characteristics of vortex-type grit chamber[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(6):53-59. (in Chinese))

[4] 杨丽华. 城市排水体制中存在的问题及对策[J]. 山西建筑,2003,29(16):68-69. (YANG Lihua. Problems in urban drainage system and counter measures thereof[J]. Shanxi Architecture,2003,29(16):68-69. (in Chinese))

[5] 王淑芝,马秀凤,曲秀贤. 城市排水管道堵塞的原因与防治措施[J]. 森林工程,2000,16(2):58-59. (WANG Shuzhi,MA Xiufeng,QU Xiuxian. Reasons of causing the blocks of drainage pipelines in cities and the measures to prevent the blocks[J]. Forest Engineering,2000,16(2):58-59. (in Chinese))

[6] 肖俊斌. 论排水管道工程施工存在的问题及对策[J]. 企业技术开发,2008,27(2):19-20. (XIAO Junbin. Discussion on the question existing on the drainage channel project construction and its countermeasure [J]. Technological Development of Enterprise,2008,27(2):19-20. (in Chinese))

[7] 杨立园,黄标,刘甲春,等. 基于 SWMM-贝叶斯耦合方法的排水管网污染溯源[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):20-29. (YANG Liyuan,HUANG Biao,LIU Jiachun,et al. Pollution source tracing in sewer networks based on a Bayesian-SWMM coupled approach[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(5):20-29. (in Chinese))

[8] 赵红雷. 市政排水管道淤积物特性分析及清除方式探讨[J]. 工程建设与设计,2023(7):120-122. (ZHAO Honglei. Characteristic analysis of silt in municipal drainage pipeline and discussion on cleaning methods[J]. Construction & Design for Project,2023(7):120-122. (in Chinese))

[9] 黄鑫妮,康瑞鹏,朱敏. 排水管网沉积物的特征、危害及控制措施[J]. 清洗世界,2022,38(11):182-184. (HUANG Xinni,KANG Ruipeng,ZHU Min. Characteristics,hazards,and control measures of sediment in drainage networks[J]. Cleaning World,2022,38(11):182-184. (in Chinese))

[10] 秦雅凝. 排水管道淤积物特性分析及清除措施[J]. 科技资讯,2024,22(3):128-130. (QIN Yaning. Analysis of the characteristics of sediment in drainage pipelines and dredging measures[J]. Science & Technology Information,2024,22(3):128-130. (in Chinese))

[11] 王天宇. 非开挖管道修复用 ECC 材料研究[D]. 武汉:中国地质大学,2022.

[12] BANASIAK R,VERHOEVEN R,DE SUTTER R,et al. The erosion behaviour of biologically active sewer sediment deposits: observations from a laboratory study[J]. Water Research,2005,39(20):5221-5231.

[13] 王健,刘嘉,宋鸽. 城市排水管道沉积物新型清除方法[J]. 水科学与工程,2009(6):46-48. (WANG Jian,LIU Jia,SONG Ge. The new removal method of the urban sewer sediment[J]. Water Sciences and Engineering Technology,2009(6):46-48. (in Chinese))

[14] 刘振华,李怀正,董梦珂. 排水管道沉积物水力冲刷技术[J]. 科技创新与应用,2015,5(2):1-3. (LIU Zhenhua,LI Huaizheng,DONG Mengke. Hydraulic erosion technology for sediment in drainage pipelines[J]. Technology Innovation and Application,2015,5(2):1-3. (in Chinese))

[15] FENG Haofei,DU Shengtao,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 and Technology,2023,88(3):542-555.

[16] YANG Haoming,ZHU D Z,ZHANG Yiping,et al. Numerical investigation on bottom shear stress induced by flushing gate for sewer cleaning[J]. Water Science and Technology,2019,80(2):290-299.

[17] SCHAFFNER J,STEINHARDT J. Numerical investigations of sewer flushing sunk waves-analysis of hydraulic boundary conditions and cleaning effectiveness[C]//8th International Conference on Urban Drainage Modelling. Tokyo:University of Tokyo,2009.

[18] GOORMANS T,ENGELEN D,BOUTELIGIER R,et al. Design of self-cleansing sanitary sewer systems with the use of flushing devices[J]. Water Science and Technology,2009,60(4):901-908.

[19] 刘翠云,张效华,杨钰婷,等. 雨水管道沉积物冲刷特性[J]. 安全与环境学报,2019,19(2):635-642. (LIU Cuiyun,ZHANG Xiaohua,YANG Yuting,et al. Analysis of scouring features of sedimental left-over elements in rainwater pipes[J]. Journal of Safety and Environment,2019,19(2):635-642. (in Chinese))

[20] SHIRAZI R H S M,CAMPISANO A,MODICA C,et al. Modelling the erosive effects of sewer flushing using different sediment transport formulae[J]. Water Science and Technology,2014,69(6):1198-1204.

[21] CAMPISANO A,CREACO E,MODICA C. Experimental and numerical analysis of the scouring effects of flushing waves on sediment deposits[J]. Journal of Hydrology,2004,299(3/4):324-334.

[22] CAMPISANO A,CREACO E,MODICA C. Dimensionless approach for the design of flushing gates in sewer channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,133(8):964-972.

[23] CAMPISANO A,CREACO E,MODICA C. Laboratory investigation on the effects of flushes on cohesive sediment beds[J]. Urban Water Journal,2008,5(1):3-14.

[24] LIU Cuiyun,LYU Wenke,LIU Qi,et al. Analysis and calculation of sediment scouring rate at different locations of storm sewer[J]. Water Science and Technology,2021,84(6):1340-1353.

[25] GUO Qizhong,FAN Chiyuan,RAGHAVEN R,et al. Gate and vacuum flushing of sewer sediment;laboratory testing[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,130(5):463-466.

[26] AKSOY H,SAFARI M J S,UNAL N E,et al. Velocity-based analysis of sediment incipient deposition in rigid boundary open channels[J]. Water Science and Technology,2017,76(9):2535-2543.

[27] SCHAFFNER J. Numerical investigations on the function of flush waves in a reservoir sewer[D]. Darmstadt:Technische Universität Darmstadt,2008.

[28] RODI W. Turbulence models and their application in hydraulics[M]. Boca Raton:CRC Press,1993:20-21.

[29] MEYER-PETER E,MULLER R. Formulas for bed-load transport[C]//IAHSR 2nd Meeting. Stockholm:IAHR,1948.

[30] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京:中国工业出版社,1965:170-172.

[31] 沙玉清. 泥沙运动的基本规律(一):物体的沉速[J]. 西北农学院学报,1956(3):1-15. (SHA Yuqing. Basic laws of sediment transport(1):sedimentation velocity of objects[J]. Journal of Northwest Agricultural University,1956(3):1-15. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 12 - 24 编辑:刘晓艳)

+++++

(上接第 55 页)

[37] ZHANG Kuo,LYU Liting,YAO Sai,et al. Effects of vibration on anammox-enriched biofilm in a high-loaded upflow reactor[J]. Science of the Total Environment,2019,685:1284-1293.

[38] LI Cai,JI Hongbing. Chemical weathering and the role of sulfuric and nitric acids in carbonate weathering: isotopes (^{13}C , ^{15}N , ^{34}S , and ^{18}O) and chemical constraints[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016, 121(5): 1288-1305.

[39] ROY M K,ROY P C,REZA A H M S,et al. Water quality studies of the Kapadak River Basin, South-Western Bangladesh with special emphasis on environmental degradation[J]. Journal of the Geological Society of India,2019,94(6):624-634.

[40] CONTOSTA A R,ARNDT K A,CAMPBELL E E,et al. Management intensive grazing on New England dairy farms enhances soil nitrogen stocks and elevates soil nitrous oxide emissions without increasing soil carbon[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2021,317:107471.

[41] HEJAZY M,NOROUZI R,ABDI F,et al. The impact of aquaculture activities on nitrogenous and phosphorous pollution of water resources in northern Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences,2023,16(4):255.

[42] SHU Lielin,CHEN Wenli,LIU Yinli,et al. Riverine nitrate source identification combining $\delta^{15}\text{N}/\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ with $\delta^{17}\text{O}\text{-NO}_3^-$ and a nitrification ^{15}N -enrichment factor in a drinking water source region[J]. Science of the Total Environment,2024,918:170617.

(收稿日期:2024 - 07 - 22 编辑:刘晓艳)