

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0405

不同冲刷阀门对雨水管道沉积物清洁效率的数值模拟研究

冯昊飞, 杜升涛*

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 城市雨污混合制管道中的沉积物会导致管道腐蚀、排水效率降低, 甚至管道堵塞, 影响城市正常运转. 在各种清洁方法中, 使用产生冲刷波的冲刷装置已被广泛认为是一种有效和经济的解决方案. 本文使用 Flow-3D 软件进行了一系列数值模拟计算, 通过与文献中的实验进行水动力和泥沙冲刷对比, 验证了该软件中泥沙冲刷模型的正确性, 在此基础上利用该模型研究了 3 种简化的自动冲刷装置对管道沉积物的清淤效率. 结果表明, 半开口阀门高度对冲刷效率存在直接影响, 阀门相对高度设置为 0.2 时冲刷效率最高. 在 3 种阀门冲刷作用下, 沉积层形态各异, 冲刷效率也存在差异. 开口阀门、倾倒式阀门、半开口阀门在冲刷下沉积床形态分别呈现直线形、V 形和 U 形. 半开口阀门条件下, 清除全部沉积物所需的冲刷时间比开口阀门少 30%. 与开口阀门和倾倒式阀门相比, 半开口阀门可分别节约 75% 和 26% 的水.

关键词: 冲刷; 管道清淤; 自动冲刷装置; 沉积物侵蚀

中图分类号: TV142+.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 06-0085-08

下水道淤积已成为一个日益严重的管道问题, 该问题不仅会导致堵塞和水力容量降低, 而且会促使厌氧菌的滋生, 导致硫化氢等硫化物的产生, 腐蚀管道, 影响正常使用和人身健康^[1-3]. 近几十年来, 人们提出了许多去除沉积物的技术, 并在实际工程中展开应用. 其中, 自动冲刷装置被认为是一种具有较高性价比的技术^[4-5]. 当自动冲刷装置中储存的水达到一定高度时, 阀门开启, 产生冲刷波, 实现对管道沉积物的冲刷. 沉积物颗粒在冲刷过程中被冲到下水道下游或被收集在沉砂池、检查井等^[6].

近年来, 众多学者设计了大量用于下水道和水槽清洁的冲刷设备, 如倾倒桶、真空冲刷系统和冲刷鼓^[7], 并对冲刷设备的冲刷和清洁效率展开了研究. Guo 等^[8]对阀门冲淤装置和真空冲淤装置的除沙性能进行了测试, 发现二者的除沙效率相同, 冲刷效率基本不受冲刷阀门开口高度的影响. Bertrand-Krajewski 等^[9]监测并模拟了法国里昂装

有自动冲刷装置的下水道的沉积物积累, 发现泥沙床的几何重心随着冲水次数呈线性向下推移. Shahsavari 等^[10]提出, 斜率为 0.15% 的上游分支管道允许存储大量水, 冲刷后上游泥沙减少 21.4%, 出现粗化现象. Bong 等^[11]在自动冲刷装置阀门的基础上提出了更易于开启的倾倒式阀门, 在倾倒式阀门引起的冲刷作用下, 沉积床高度明显降低, 沉积物被冲至下游较远距离.

为提高冲刷效率, 前人通过大量实验对沉积物的冲刷机理及效率影响因素进行了研究, 以得出冲刷装置设计和设置的指导建议. 清洗效率已被证明与水力参数和沉积物性质有关, 如冲刷水流的速度和剪应力、沉积物颗粒的粒径、冲刷次数和沉积物高度^[12-13]. Campisano 等^[14]提出了基于冲刷时间、零量纲剪应力和水深的冲刷段长度公式, 为了提高清洗效率, 他们通过延长有效冲刷距离, 发现超过管径一半的储水高度更加有效. Schaffner 等^[15]对自动冲刷阀门冲刷过程进行现场观测, 对

收稿日期: 2023-04-08.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC3203200); 宁波市自然科学基金 (2021J096).

第一作者: 冯昊飞 (1998-), 男, 浙江嘉兴人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 管道沉积物冲刷. E-mail: fenghfcdd@163.com

*通信作者: 杜升涛 (1988-), 男, 山东临沂人, 博士/讲师, 主要研究方向: 城市水力学. E-mail: dushengtao@nbu.edu.cn

冲刷效率进行了探究,指出有效冲刷距离受坡度影响较大,呈线性上升趋势. Liu等^[16]研究发现,在冲刷开始时,下水道中段和末端的流量比前部低50%到88%,随后趋于一致.

近十年来,国内学者对管道沉积物冲刷开展了大量研究. 蒋隽睿^[17]发现对于管道沉积物堆积高度小于管径15%的排水管道,运行初期沉积物增长最快,随着管道使用时间增加,沉积物高度增长速率减小. 周敬钦等^[18]指出在冲刷中沉积物颗粒成为悬移质,部分在随水流迁移过程中再次沉积,使得悬移质颗粒的冲刷率从管道前段至中后段逐步降低,管道中的沉积以指数函数分布. 王建龙等^[19]指出管道过流能力削减与沉积物累积高度和管径存在直接关系,沉积物累积高度从管道直径的20%增至70%,过流能力削弱80%.

现有工作虽然对各种冲刷装置进行了大量的研究,但很少有研究集中在不同冲刷装置的性能比较和暴雨下管道系统的沉积物冲刷变化. 本文设计了简化的开口阀门、倾倒式阀门以及开口阀门不同阀门高度、水头高度,讨论了沉积床形态和冲刷效率,为冲刷装置的设计提供参考.

1 模型介绍

1.1 控制方程

Flow-3D 将基于多相流的连续性方程和完整的纳维-斯托克斯方程作为流体运动的控制方程求解得到流场信息,并采用VOF方法进行自由面运动的计算. Flow-3D 采用FAVOR的分数面积和体积障碍物表示方法,对复杂的几何区域进行建模. 该方法不仅可以用于处理计算流体内部的边界信息,同样可以计算网格内的泥沙等固体.

控制方程具体表示为

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{DIF}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + A_z \frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + A_z \frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y, \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + A_z \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z, \quad (4)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度分量; A_x 、 A_y 、 A_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的面积分数; V_F 为液体体积分数; ρ 为液体密度; R_{DIF} 为湍流扩散项; p 为动水压强; G_x 、 G_y 、 G_z 和 f_x 、 f_y 、 f_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的重力加速度和黏性加速度.

1.2 湍流模型

RNG k - ε 模型能够有效地模拟流体运动中流速分布和湍流动能变化,与双方程(k - ε)模型相比,通过显式推导修正了方程中的经验系数,故本文选择 RNG k - ε 模型,模型中 k 方程和 ε 方程分别为

$$\frac{\partial k_t}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial k_t}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_t}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k_t}{\partial z}) = P_T + D_{kT} - \varepsilon_T, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z}) = C_{DIS1} \frac{\varepsilon_T}{k_t} (P_T + C_{DIS3} G_T) + D_\varepsilon - C_{DIS2} \frac{\varepsilon_T^2}{k_t}, \quad (6)$$

式中: ε_T 为湍流能量的耗散率; P_T 为湍流动能; G_T 为浮力产生湍流动能; k_t 为湍流动能总和; D_{kT} 和 D_ε 分别为湍流扩散项和耗散项; C_{DIS1} 、 C_{DIS2} 和 C_{DIS3} 为不同的零量纲参数,取为1.44、1.92和0.2.

1.3 泥沙模型

基于研究目标和计算效率,沉积物运动通过欧拉法模拟. 在 Flow-3D 输沙模型中,沉积物被视为无黏颗粒,沉积物运输被分为推移质和悬移质. 沉积物颗粒的运动通过由经验公式确定的侵蚀、平流和沉积临界状态进行预测,判断标准是临界希尔兹数(θ_{cr})和希尔兹数(θ)相对关系,计算式为

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2 d_*} + 0.055[1 - \exp(-0.02 d_*)], \quad (7)$$

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho) g d}, \quad (8)$$

式中: $d_* = d[(\rho_s - \rho)g / \rho \nu_f^2]^{1/3}$ 为零量纲颗粒直径; d 为沉积物颗粒直径; ρ_s 为沉积物密度; g 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; ν_f 为流体运动黏度; τ 为剪切力.

该模型使用临界上升流速 $u_{lit}^{[20]}$ 和临界沉积速度 $u_{settling}^{[21]}$ 作为判断沉积物颗粒推移质和悬浮状态的标准,公式为

$$u_{\text{lift}} = \alpha_i d_*^{0.3} (\theta - \theta_{\text{cr}})^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho}}, \quad (9)$$

$$u_{\text{settling}} = \frac{v_f}{d} [(107.33 + 1.049 d_*^3)^{0.5} - 10.36], \quad (10)$$

式中: α_i 为夹带系数, 取 0.001 8.

一部分沉积物以悬移质的形式传输, 另一部分则以推移质的形式传输. 体积推移质输沙率(q_b)通过 Meyer-Peter 等^[22]提出的公式进行计算, 形式为

$$q_b = 8(\theta - \theta_{\text{cr}})^{1.5} [g(s-1)d^3]^{0.5}, \quad (11)$$

式中: $s = \rho_s / \rho$ 为比重.

2 边界条件和模拟设置

如图 1 所示, 沉积床位于阀门下游 1.0 m 处, 长 1.5 m, 宽 1.0 m, 高 0.12 m. 沉积床由直径为 0.005 m 的均匀无黏石英砂组成, 密度为 $2650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 沉积床颗粒孔隙率为 0.65, 临界希尔兹数为 0.030 4, 自然休止角为 37° . 模拟管段全长 6.0 m, 坐标原点取在蓄水池左下角. 上游 1.5 m 段为储水区, 下游 4.5 m 为冲刷段. 模型左侧为由水头高度控制的压力进水边界, 水头高度与蓄水池的初始水位保持一致; 右侧为自由出流边界; 模型上边界为固定压力边界, 压力大小与标准大气压一致, 取 101 kPa; 其余边界均为墙边界. 模型网格取 0.02 m 矩形网格, 共 750 000 个单元.

本文选取 3 种阀门进行对比, 在接近实际使用条件的前提下统一管道截面, 根据阀门实际尺寸在模拟中进行等比缩小. 图 2 所示是一个简化的开口阀门^[10]. 简化后的清洁装置中, 蓄水池与冲刷段由扇形阀门隔断. 蓄水池在初始阶段蓄水, 当蓄水高度到达指定高度后阀门瞬时打开. 阀门在开启状态时与管道底部齐平, 不影响水流冲刷(图 2(b)). 开启状态阀门位置截面与管道截面一致, 以减小开启状态下阀门对水流的阻碍. 阀门开启后, 水流持续冲击下游沉积床, 达到去除管道沉积物的目的.

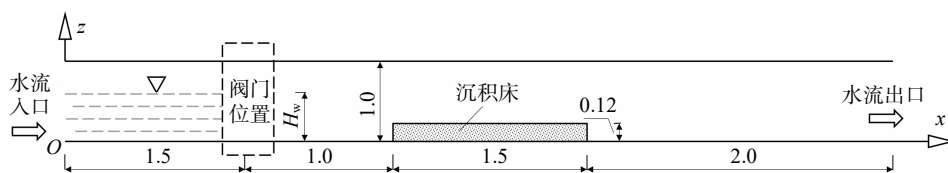


图1 模拟计算模型示意(单位: m)

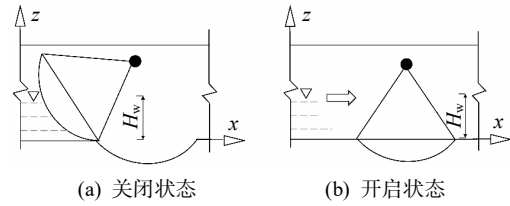


图2 开口阀门示意

Bong 等^[11]提出使用倾倒式阀门进行冲刷(图 3). 倾倒式冲水阀门由 Bertrand-Krajewski 等^[9]的自动冲刷阀门改进设计获得. 倾倒式阀门在水位到达一定高度后, 由于阀门上下力矩不平衡而绕铰链旋转, 自动开启形成水流冲刷. 阀门开口宽度设置较大, 以避免在阀门运作时造成管道的流量收缩, 导致污水渠溢流. 阀门高度与管道总高度之间留 0.2 m 的空间用于紧急溢流, 阀门最大开启角度为 30° . 阀门产生的水流在开口处与管道接触部分由于管壁粗糙度, 流速遭到削弱, 同时开口阀门易受到回水效应的影响, 阀门开口与管道底部设置一定高度差.

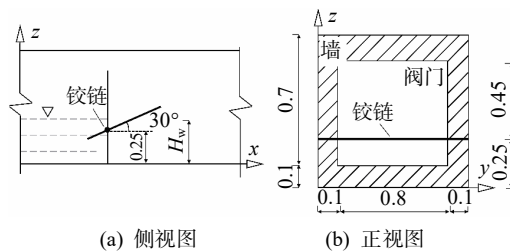


图3 倾倒式阀门示意(单位: m)

倾倒式阀门适用于开放管道, 在实际操作中, 铰链易被管道沉积物阻碍, 影响正常运行, 因此设置半开口阀门(图 4).

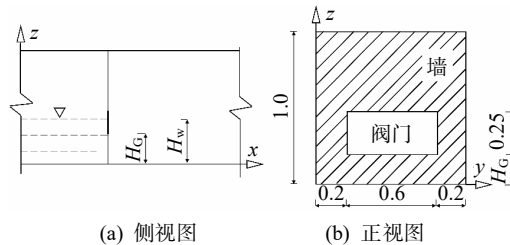


图4 半开口阀门示意(单位: m)

综合考虑暴雨情况、流量较小与水流初速度增长影响, 阀门开口设置为 $0.60\text{ m} \times 0.25\text{ m}$. 在初始阶段蓄水池蓄水高度达到阈值后, 阀门瞬间开启, 水从开口处流出, 对下游沉积床产生持续冲刷效应.

为了探究不同阀门形式以及阀门安装高度对沉积床冲刷的影响, 分别设置 GA1~GA3、GT1~GT3 和 G0~G3 共 10 个工况下 3 种不同初始相对水头高度(0.50、0.75、1.00)和 4 种不同相对阀门高度(0、0.2、0.3、0.4)进行模拟探究. 对 G1~G3 阀门设置一定高度, 防止阀门后水位高于进水口的水位线, 造成水流通过进水口向上游倒灌. 设置对照组 G0, 用于 G1~G3 实验对比. 在 GA1~GA3 和 GT1~GT3 的模拟中发现, 相对水头高度 0.75 更为高效且经济, 因此在 G0~G3 中, 初始相对水头高度取 0.75.

表 1 中, 参数 $Fr = U / \sqrt{gh}$ 为弗劳德数, 其中, U 为平均流速, h 为水深; $t_d^* = t_d \sqrt{g/L}$ 为沉积床完全冲刷所需要的无量纲时间, 其中, t_d 为沉积床完全冲刷所需时间, $L=1.0\text{ m}$ 为管道截面特征长度; 所需水量 $V = \sum V_i \Delta t$ 为沉积床被完全冲刷时间内通过沉积床位置处的水的体积, 其中 V_i 为单位时间内水的体积, $\Delta t=0.2\text{ s}$; H_w 和 H_G 分别为初始水头高度和阀门高度.

表 1 计算参数设置和结果

编号	阀门形式	变量	参数设置	Fr	t_d^*	V/m^3
GA1	开口	相对水头高度	0.50	0.34	141.7	22.47
GA2	阀门	$(H_w^* = H_w / L)$	0.75	0.42	75.2	23.25
GA2			1.00	0.87	61.4	28.79
GT1	倾倒式	相对水头高度	0.50	0.32	138.6	6.21
GT2	阀门		0.75	0.81	48.9	8.04
GT3			1.00	0.78	28.2	7.62
G0	半开口	相对阀门高度	0	0.47	50.8	5.11
G1	阀门	$(H_G^* = H_G / L)$	0.2	0.55	43.9	5.07
G2			0.3	0.52	50.2	5.12
G3			0.4	0.42	70.2	5.64

3 结果和分析

3.1 模型验证

由于 Campisano 等^[23]的实验设置与本文研究的装置相似, 均为矩形水槽中一定水位条件下对

下游沉积物的冲刷, 故本文在对泥沙冲淤模型进行校验时选择 Campisano 等^[23]的结果作为对比.

如图 5(a)所示, 在 $t=2\sim 4\text{ s}$ 模型中自由水面高度略低于实验测量结果, 这可能是因为水流到达 $x=2.0\text{ m}$ 处的时间在数值模型模拟中的结果与实验测量结果不完全一致, 模拟结果略慢于实验测量结果. 在图 5(b)中, 在 $x=1.5\text{ m}$ 段, 数值模型结果中沉积床高度略低于实验测量值, 最大误差小于 0.002 m . 为了进一步验证模型的准确性, 采用均方根误差(RMSE)量化模型结果和实验结果. 在图 5(a)和 5(b)中, RMSE 分别为 0.006 和 0.002 m. 综合以上分析可知, 数值模型能够较好地再现冲刷后水面线变化和沉积床变化.

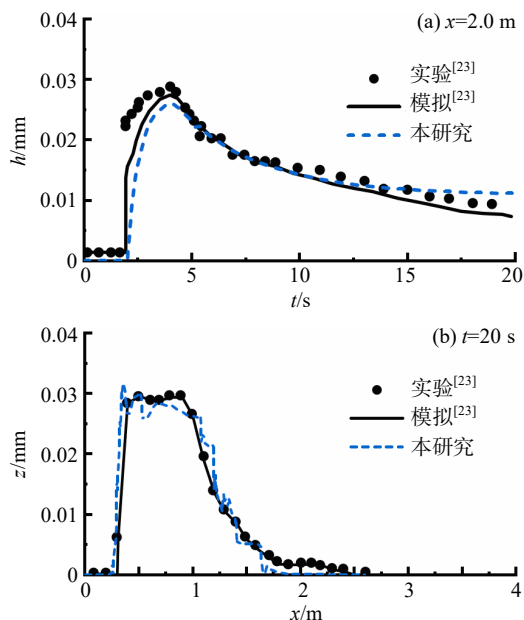


图 5 计算模型和实验结果对比

3.2 开口阀门

算例 GA2 沉积床高度分布如图 6 所示, 其中 $t^* = t \sqrt{g/L}$ 为零量纲冲刷时间.

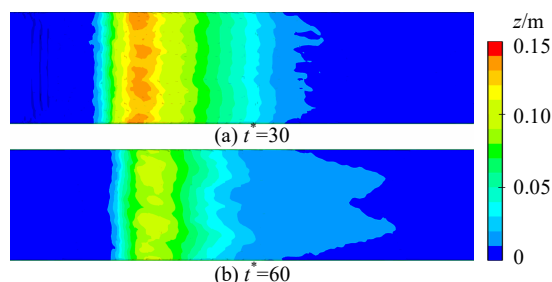


图 6 算例 GA2 沉积床高度分布

在水流冲刷下, 沉积床存在一个高峰, 最大高

度超过初始沉积床高度(0.12 m), 沉积床高度向下游均匀下降. 随着时间变化, 图 6(b)中沉积床整体高度减小, 沉积物逐渐向下游移动. 在 $t^*=30\sim60$ 内, 沉积床前端向下游移动 0.2 m, 尾部向下游延伸最大 1.2 m, 上游边沿呈现直线型.

如图 7 所示, 通过无量纲化, 将沉积床高度和横坐标分别表示为 $z^* = z/L$ 、 $x^* = x/L$. $t^*=15$ 时, 由于初始高速水流冲刷形成的沉积床高峰高度随着相对水头高度的增加逐渐增加, 相对水头高度从 0.5 增加到 1.0, 相对沉积床高度从 0.10 增加到 0.14. 随着持续冲刷时间的增加, 沉积床高峰高度逐渐下降, 并向下游移动. 在 GA1 中, 下游出现高度一致的沉积床, 随着冲刷继续进行, 高度不再发生变化. 在 $t^*=75$ 时, 沉积床高峰被完全冲刷, 沉积床继续向下游移动, 相对高度保持在 0.018 不变, 达到冲刷平衡^[24]. 在 GA2 中(图 7(b)), 沉积床在 $t^*=12\sim24$ 时存在高度为 0.012 的沉积床平台, 在 $t^*=75.2$ 时被完全冲刷, 不存在冲刷平衡阶段.

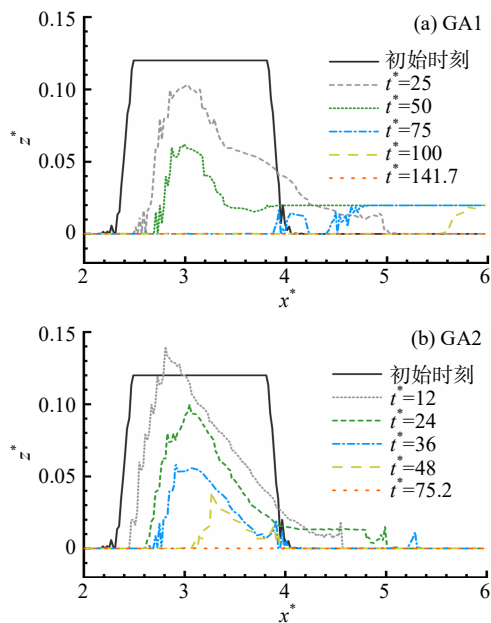


图7 不同时刻沉积床高度剖面

相对累计输沙率 $q^* = \sum qWL_s / V_s$ 表示一定时间内被水流携带至下游的沉积物的累积值, 其中 q 为输沙率, W 为管道宽度, 等于 1.0 m, V_s 是管道中沉积床的初始体积. 如图 8 所示, 在开口阀门中, q^* 在初始 $t^*=0\sim8$ 内增长较快, 随着冲刷时间的增加, 增长速度逐渐下降. 相对水头高度为 1.00 和 0.75 (GA2~GA3)时增长速度较为接近, 与相对水头高

度 0.50 相比拥有更高的冲刷效率.

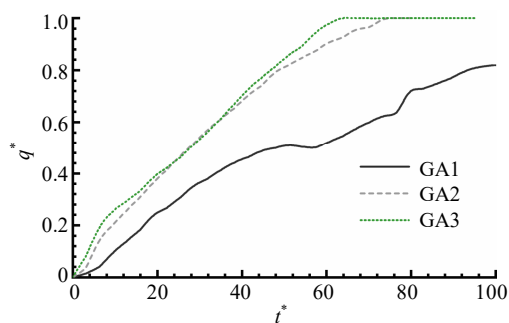


图8 算例 GA1~GA3 相对累计输沙率和 t^* 的关系

3.3 倾倒式阀门

在倾倒式阀门条件下, 上游沉积床在管壁处向后推移 0.3 m, 管道中心位置向后推移距离减少, 沉积物向中间集中出现沉积床高峰(图 9). 在 $t^*=30$ 时, 靠近管壁处沉积物被完全冲刷, 管道中间部分沉积床高度最高仍为 0.15 m (图 9(b)). 在倾倒式阀门中, 靠近管壁沉积物侵蚀严重, 向管道中心位置侵蚀逐渐减弱, 总体形状呈 V 形.

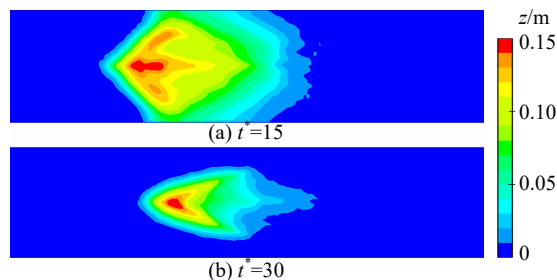


图9 算例 GT2 沉积床高度分布

如图 10 所示, 在 GT1 冲刷初期($t^*=0\sim75$), 沉积床主要表现为高度变化. 相对沉积床高度由 0.12 下降至 0.05; 下游出现平坦沉积床段, 相对高度约为 0.018, 与开口阀门平衡高度一致. 在冲刷后期($t^*=75\sim138.6$), 沉积床高度达到相对平衡高度 0.018, 沉积床主要表现为向下游推移.

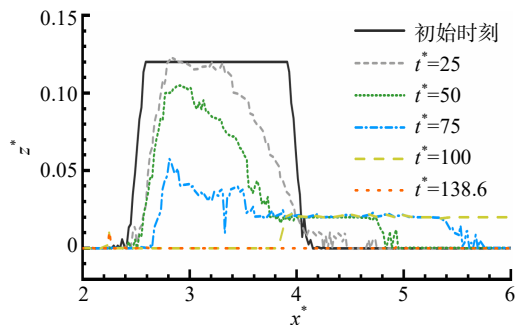


图10 不同时刻算例 GT1 沉积床高度剖面

在倾倒式阀门的冲刷中(图 11), GT3 在 $t^*=4\sim 12$ 段 q^* 增长减缓, GT2 在 $t^*=4\sim 16$ 段 q^* 负增长, 主要原因在于沉积物的起动和再沉积. 在沉积物的再沉积阶段, 水流中以悬移质形式存在的沉积物颗粒再次沉积, 导致沉积床体积增加, q^* 呈现负增长. 相对水头高度为 0.50 (GT1) 时冲刷时间最长, 为 138.6, q^* 随时间增长速率无明显变化. 相对水头高度由 0.50 增加到 0.75, 相对冲刷时间减少 89.7; 相对水头高度由 0.75 增加到 1.00, 相对冲刷时间减少 20.7. 储水区相对水头高度为 0.75 相对高效且经济.

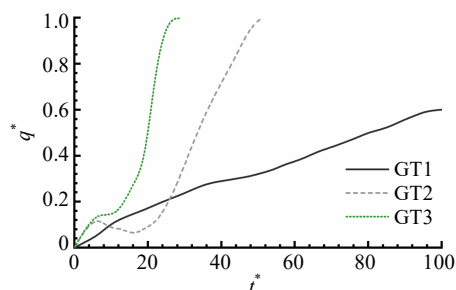


图 11 算例 GT1~GT3 相对累计输沙率和 t^* 的关系

3.4 半开口阀门

如图 12(a)所示, 在水流冲刷下, G1 沉积床最高 0.15 m, 开口阀门沉积床上下游边沿均呈现弧形. 沉积床靠近管壁部分侵蚀较慢, 随着向中轴线位置移动, 侵蚀逐渐加深. 在图 12(b)中, 沉积床上游呈现出两侧边沿向中间侵蚀逐渐加剧的趋势, 沉积床高度明显低于两边, 两侧沉积床高度仍在 0.15 m 左右, 中间部分高度为 0.07 m. 沉积床下游边沿靠近管壁处侵蚀较为严重. 沉积床侵蚀沿管壁向中间逐渐增加, 形状呈现 U 形.

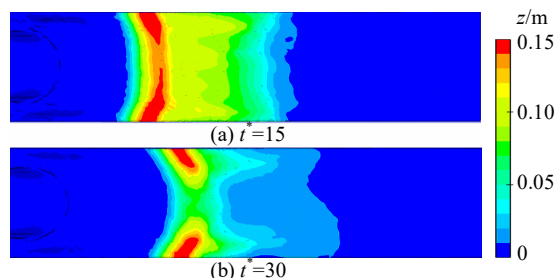


图 12 算例 G1 沉积床高度分布

如图 13 所示, 在不同阀门高度条件下, 沉积物向下游推移距离基本一致, $t^*=15$ 时 G0~G3 沉积物分别向前推移 0.41、0.39、0.40 和 0.38. 沉积床被水流冲刷侵蚀, G1~G3 高峰比初始沉积床初始高

度增加约 0.02, G0 中增加 0.04. 沉积床在水流冲刷下随时间向前推移的距离基本一致, 但是沉积床高度变化较为明显. G0~G3 在 $t^*=30$ 时剩余沉积物的体积分数分别为 24.2%、22.7%、29.3%、42.5%.

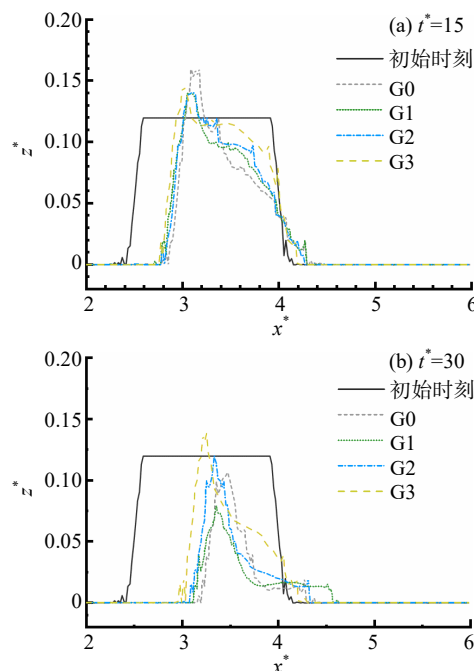


图 13 算例 G0~G3 沉积床高度剖面

如图 14 所示, 工况 G1 中沉积物被完全冲刷所需时间最短, 即清洗效率最高. 为了探究冲刷机理, 分别记录了 G0~G3 在 $t^*=15$ 时 $x^*=3$ 处的流速, 依次为 1.61、1.69、1.40 和 1.06 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. 阀门口处流速变化主要由压强水头和高度水头控制, 其中高度水头主要转化为水流竖向速度, 在与管道底部碰撞中大量消耗, 因此管道中流速主要由压强水头控制. 由此可见, 阀门高度越低, 压强水头越大, 流速越快. 但是当阀门高度较低时, 即 $H_G^*=0$ 条件下, 冲刷过程中形成水面雍高, 当水面高度高于阀门上边界高度时, 出流状态变为淹没出流, 出水速度降低, 导致冲刷效率减小.

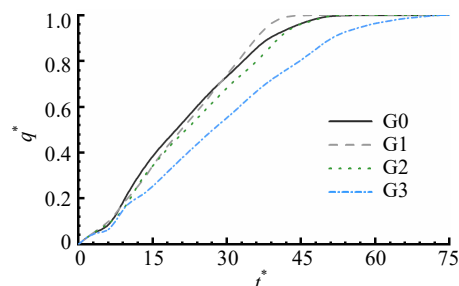


图 14 算例 G0~G3 相对累计输沙率和 t^* 的关系

3.5 阀门形式对比

为了进一步分析各个阀门下的冲刷效率, 对各阀门 $H_w^* = 0.75$ 的算例进行分析. 如图 15 所示, 在不同阀门引起的水流冲刷作用下, 沉积床剖面呈现明显的差异. GA2 中沉积床向下游推移距离略小, 下游存在平坦沉积段. GT2 中, 在水流冲刷下沉积床高度降低幅度较少, 沉积床前端高于初始沉积床高度. G1 中, 在半开口阀门引起的水流冲刷下, 在降低沉积床高度和使沉积床向下游推移上表现良好, 沉积床下游存在冲刷平衡段, 高度与 GA2 一致.

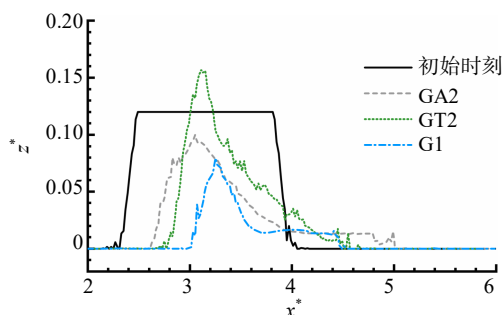


图 15 不同阀门在 $t^* = 3$ 时的沉积床剖面

如图 16 所示, 半开口阀门(G1)相对累计输沙率曲线与开口阀门(GA2)变化趋势相似, 但 G1 完成沉积物冲刷所需时间为 $t^* = 40$, GA2 的时间为 $t^* = 72$, G1 冲刷效率明显高于 GA2. 倾倒式阀门(GT2)的相对冲刷累计曲线与上述两种阀门变化趋势差别较大, 表现为先增长后减小, 然后在 $t^* = 16$ 时迅速增长, 直至 $t^* = 50$ 时沉积物被完成清除. 总体而言, 半开口阀门完全冲刷所需的时间少于开口阀门和倾倒式阀门, 半开口阀门冲刷效率更高.

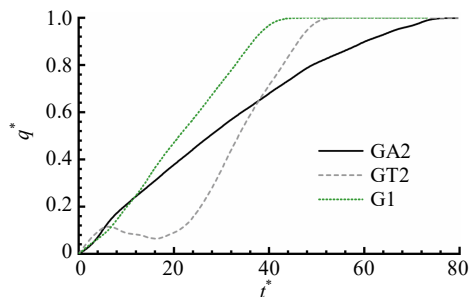


图 16 不同阀门相对累计输沙率和 t^* 的关系

4 结论

本文主要运用 Flow-3D 软件对开口阀门、倾倒式阀门不同初始水头高度以及半开口阀门不同阀

门高度下的算例进行沉积物冲刷模拟, 对泥沙床形态变化、泥沙去除效率进行了分析研究, 主要结论如下:

(1)不同阀门在水流冲刷下沉积床呈现不同的形态, 开口阀门、倾倒式阀门、半开口阀门分别呈现直线形、V 形和 U 形.

(2)对于半开口阀门, 阀门高度越低, 完全冲刷所需的时间越少, 冲刷效率越高, 但高度过低会产生相反的效果, 阀门相对高度设置为 0.2 最合适.

(3)半开口阀门冲刷效率更高、完全冲刷所需要的水体积更小. 相比半开口阀门, 开口阀门和倾倒式阀门沉积床被完全冲刷所需要的时间分别为 1.11 倍和 1.71 倍. 对于完全冲刷所需的水量, 半开口阀门分别为开口阀门和倾倒式阀门的 21.8% 和 63.7%.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 黄乃先, 齐一凡, 金伟. 排水管道沉积物控制的研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(3):507-513.
- [3] Chen Y X, Shi X, Jin X, et al. Characteristics of overflow pollution from combined sewer sediment: Formation, contribution and regulation[J]. Chemosphere, 2022, 298: 134254.
- [4] 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(2):1-3.
- [5] Safari M J S, Aksoy H. Experimental analysis for self-cleansing open channel design[J]. Journal of Hydraulic Research, 2021, 59(3):500-511.
- [6] 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.
- [7] Dettmar J, Rietsch B, Lorenz U. Performance and operation of flushing devices - Results of a field and laboratory study[M/OL]//Strecker E W, Huber W C. Global Solutions for Urban Drainage. [2023-01-10]. [https://doi.org/10.1061/40644\(2002\)291](https://doi.org/10.1061/40644(2002)291).
- [8] Guo Q Z, Fan C Y, Raghaven R, et al. Gate and vacuum flushing of sewer sediment: Laboratory testing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(5):463-466.
- [9] Bertrand-Krajewski J L, Bardin J P, Gibello C. Long term monitoring of sewer sediment accumulation and flushing experiments in a man-entry sewer[J]. Water Science and Technology, 2006, 54(6/7):109-117.

- [10] 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.
- [11] Bong C H J, Lau T L, Ab Ghani A. Potential of tipping flush gate for sedimentation management in open stormwater sewer[J]. *Urban Water Journal*, 2016, 13(5):486-498.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Campisano A, Modica C. Flow velocities and shear stresses during flushing operations in sewer collectors[J]. *Water Science and Technology*, 2003, 47(4):123-128.
- [15] 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, 2009.
- [16] Liu C Y, Lv W K, Liu Q, 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.
- [17] 蒋隽睿. 排水管道内沉积物沉积模拟与分析研究[J]. *中国市政工程*, 2014(2):35-37.
- [18] 周敬钦, 刘翠云, 周俊, 等. 排水管道内不同粒径沉积颗粒物冲刷率的分析与计算[J]. *环境化学*, 2021, 40(3): 896-903.
- [19] 王建龙, 王泽熙, 李晗, 等. 雨水管道沉积物累积对过流能力影响的模拟试验[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(3):732-737.
- [20] Mastbergen D R, Van Den Berg J H. Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons[J]. *Sedimentology*, 2003, 50(4):625-637.
- [21] Soulsby R. *Dynamics of Marine Sands*[M]. London: Thomas Telford Publications, 1997.
- [22] Meyer-Peter E, Müller R. Formulas for bed-load transport [C]//IAHSR 2nd Meeting, Appendix 2, Stockholm, 1948.
- [23] 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.
- [24] Tang Y B, Zhu D Z, Rajaratnam N, et al. Sediment depositions in a submerged storm sewer pipe[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, 146(10):04020118.

Numerical study of different flushing gates on sediment cleaning efficiency in stormwater pipes

FENG Haofei, DU Shengtao

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The sediment in urban rainwater and sewage pipes will lead to pipe erosion, reduce drainage efficiency and block the pipes, leading to the damage to the normal operation of the city. Among various cleaning methods, using self-cleaning devices that generate flushing waves to clean the sediment has been widely recognized as an effective and economical solution. In this paper, a series of numerical simulations were carried out using Flow-3D software. The model was verified by comparing the hydrodynamic and sediment erosion experiments in the literature. The flushing efficiency of three simplified automatic flushing devices for cleaning pipeline sediments was studied through simulation. The results showed that the height of half-open valve had direct influence on the scouring efficiency and the highest flushing efficiency was attained when relative height of the gate was 0.2. The sediment morphology and the scouring efficiency were different under the flush induced by three sluice types. The sediment bed morphology of open gate, tipping gate and half-open gate under scouring presented line shape, V shape and U shape, respectively. The flushed time of total sediment in half-open gate was 30% shorter than that in full-open gate. Compared with open gate and tipping gate, half-open gate can save 75% and 26% volume of water, respectively.

Key words: flushing; deposition; self-cleaning; erosion

(责任编辑 韩 超)