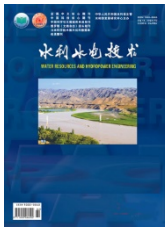


水利水电技术(中英文)
Water Resources and Hydropower Engineering
ISSN 1000-0860,CN 10-1746/TV

《水利水电技术(中英文)》网络首发论文

题目：用于城市景观水体悬浮物去除的菱形管沉淀结构模拟研究

作者：刘佳利，张晶，王琦，韩会玲，赵进勇，陈天鹏，朱洪涛

收稿日期：2024-12-04
网络首发日期：2025-04-16
引用格式：刘佳利，张晶，王琦，韩会玲，赵进勇，陈天鹏，朱洪涛．用于城市景观水体悬浮物去除的菱形管沉淀结构模拟研究[J/OL]．水利水电技术(中英文).
https://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20250415.1839.004

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2025-04-16 10:12:57　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/10.1746.TV.20250415.1839.004

用于城市景观水体悬浮物去除的菱形管沉淀结构模拟研究

刘佳利[1,2]，张 晶[2]，王 琦[2]，韩会玲[1]，赵进勇[2]，陈天鹏[2]，朱洪涛[3]

（1．河北农业大学 城乡建设学院，河北 保定 071000；2．中国水利水电科学研究院，北京 100038；
3．北京林业大学 环境科学与工程学院，北京 100091）

摘 要：【目的】菱形管沉淀结构已有效应用于水厂、水库的水污染治理，但其在悬浮物（SS）污染的城市景观水体原位治理中的利用效率并不明确。为探究菱形管沉淀结构应用在不同 SS 污染水体状况中的结构参数和效率的关系。【方法】选择菱形管的管径和管长 2 个结构参数，构建 9 种菱形管几何模型；设置 SS 浓度和 SS 粒径 2 个来水变量，组成 5 种污水情景，利用 CFD 软件开展固液两相流数值模拟，搭建现场试验进行模型求解参数率定，根据去除效率选择菱形管结构参数。【结果】结果显示：SS 浓度和 SS 粒径因素分别主导的水污染情景下，40 mm 管径和 2000 mm 管长的菱形管结构去除效率均最佳，平均去除率分别为 87.3%和 75.4%，去除效率随进水 SS 浓度及粒径的增大而提高；去除效率与管内速度场均匀性呈较强的正相关性，与管道堵塞呈中等负相关性。【结论】结果表明：在波动的进水水质状况下，40mm 管径和 2000mm 管长的菱形管结构对 SS 去除效率具有良好的稳定性，验证了菱形管沉淀结构在城市景观水体原位治理中的高效应用潜力。

关键词：数值模拟；城市景观水体；菱形管结构；悬浮物；去除效率

中图分类号：X52　　文献标志码：A　　OSID:

Simulation study of rhombic pipe sedimentation structures for removal of suspended solids in urban landscape water bodies

LIU Jiali[1,2]，ZHANG Jing[2]，WANG Qi[2]，HAN Huiling[1]，ZHAO Jinyong[2]，
CHEN Tianpeng[2]，ZHU Hongtao[3]

(1. College of Urban and Rural Construction，Hebei Agricultural University，Baoding 071000，Hebei，China；2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research，Beijing 100038，China；3. School of Environmental Science and Engineering，Beijing Forestry University，Beijing 100091，China)

Abstract: [Objective] Rhombic pipe sedimentation structures have been widely used for water pollution treatment in water plants and reservoirs. However, their utilization efficiency in the in-situ treatment of urban landscape water bodies polluted with suspended solids (SS) remains unclear. The aim is to explore the relationship between structural parameters and efficiency when rhombic pipe sedimentation structures are applied to water bodies with different levels of SS pollution. [Method] Two structural parameters of the rhombic pipes—pipe diameter and pipe length—

收稿日期：2024-12-04；**修回日期：**2024-12-11；**录用日期：2025-01-24**
基金项目：国家水体污染与治理科技重大专项(2018ZX07105-002)；中央部门预算项目（WE0161A042024）；水利部重大科技项目（No.SKS-2022071）
作者简介：刘佳利（1999—），女，硕士研究生，主要从事水利水电工程、农业水土工程研究。E-mail：1322289751@qq.com
通信作者：张晶（1981—），女，正高级工程师，博士，主要从事生态水工学、水生态修复理论与技术等方面研究。E-mail：zhangjing@iwhr.com.
韩会玲（1965—），女，教授，博士研究生导师，博士，主要从事水利水电工程、农业水土工程研究。E-mail: cjhhl@hebau.edu.cn

were selected, and 9 geometric models of rhombic pipes were established. Two inflow variables, SS concentration and SS particle size, were set to form five different wastewater scenarios. Computational Fluid Dynamics (CFD) software was used to conduct solid-liquid two-phase flow numerical simulations, and field tests were set up to calibrate the model-solving parameters. The rhombic pipe structural parameters were selected based on removal efficiency. [Results] The results showed that under water pollution scenarios dominated by SS concentration and SS particle size, the rhombic pipe structure with a 40 mm diameter and 2 000 mm length achieved the highest removal efficiency, with average removal rates of 87.3% and 75.4%, respectively. The removal efficiency increased with rising SS concentration and particle size in the influent. Additionally, removal efficiency exhibited a strong positive correlation with the uniformity of velocity field inside the pipes, and a moderate negative correlation with pipe clogging. [Conclusion] The results indicate that under fluctuating influent water quality conditions, the rhombic pipe structure with a 40 mm diameter and 2 000 mm length demonstrates strong stability in SS removal efficiency, validating its high potential for efficient application of rhombic pipe sedimentation structures in in-situ treatment of urban landscape water bodies.
Keywords：numerical simulation；urban landscape water bodies；rhombic pipe structure；suspended solids；removal efficiency

0 引 言

城市景观水体具有维持生态系统、美化环境、提供休闲娱乐场所和提升城市品位等功能，但往往存在缺乏自然水体交换、自净能力差和污染物负荷高的问题，悬浮物（Suspended Solids，简称 SS）是影响城市景观水体水质的常见因素，SS 包括不溶于水的泥沙、固形有机及无机污染物和微生物，一方面其影响水体透明度、降低了水生生态系统的光合作用，另一方面也易吸附磷、汞、重金属和疏水有机化合物等污染物[1]，采取措施削减水体 SS 含量对于城市景观水体水质提升至关重要。

目前，基于城市景观水体系统的空间特征，常用 SS 控制措施包括源头控制和过程削减，源头控制是通过建设海绵城市，采用透水铺装、下凹式绿地和雨水花园以减少携带 SS 的雨水径流进入；过程削减则是利用水处理技术进行水体中已有 SS 去除，其中传统的去除方法包括絮凝沉淀、过滤、活性污泥及生物膜反应器等[2]，随着技术的进步，各种新兴技术和改良方法也不断涌现，例如：传统芬顿技术与超滤膜过滤有机结合而产生的膜芬顿污水处理技术[3]、结合磁场与混凝沉淀原理的磁混凝技术[4-5]、生物膜与活性污泥协同作用的 AAMBBR 工艺[6]等。菱形管沉淀技术是基于沉淀法发展而来具有显著减少 SS 堵塞的一种新型技术[7]。利用其独特的几何特性形成高效“水走水道、泥走泥道”的分离机制，在一定程度上克服了传统沉淀池占地面积大、易出现短流等诸多弊端。菱形管沉淀技术搭配不同水处理技术，被应用于水厂、水库解决季节性低温低浊及季节性藻类暴发造成的水污染问题，都表现出良好的适应性[8-9]，尽管已有研究对菱形管沉淀技术的性能进行了初步探讨，可是菱形管沉淀技术用于解决城市景观水体水质原位治理的研究较少。

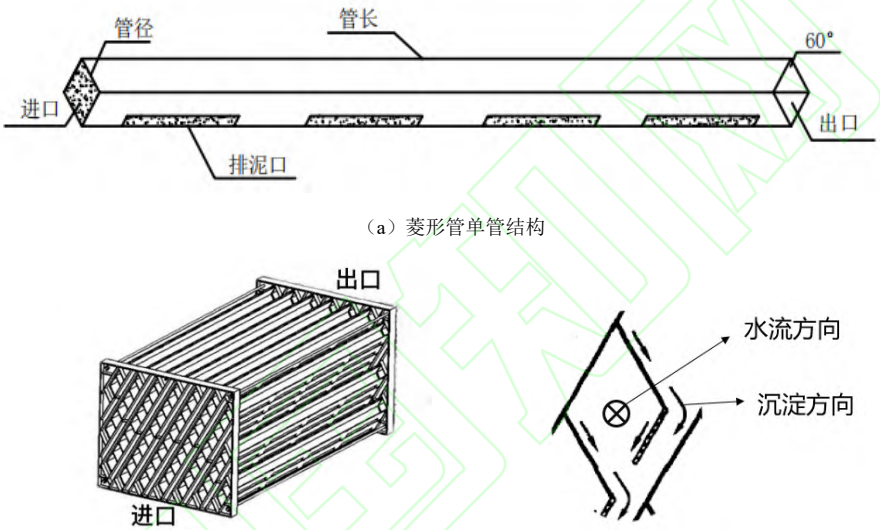
近年来，计算机技术的蓬勃发展，计算流体力学（Computational Fluid Dynamics，简称 CFD）的方法被广泛应用于水处理技术研究，既能用于模拟水中物质的输运、扩散过程，例如：牛子厚等[10]利用 CLSVOF 模型对长距离有压输水工程滞留气团迁移特性开展模拟研究；李浩辰等[11]将 RANS 湍流模型应用于稳态流澄清模拟研究。又能用于模拟颗粒物的沉淀过滤过程，分析颗粒运动轨迹及沉降特性，例如：雷明等[12]采用 CFD-DEM（计算流体力学 CFD，离散单元法 DEM）耦合模型，对不同边滩交错漂石结构下的输沙及河床响应过程进行模拟研究。还能用于模拟管道、水箱、池塘等结构中水体流动和混合过程，分析其中的动力学特性，例如：孛华江等[13]利用 CFD 对引水渠-前池系统的水力过渡过程三维流场进行了数值计算，得到了试验中不易获得的流场结构；AHMAD 等[14]基于水动力仿真模型和机器学习算法进行了沉淀池平均速度和挡板配置优化设计。CFD 用于优化水工建筑物结构参数等也同样适用，谢千陈等[15]构建了异型结构薄壁堰的物理模型与 CFD 数值模型，分析了溢流堰的流态与过流效率。马玉晨等[16]采用水工模型试验和三维数值模拟计算相结合的方法，研究了宽尾墩收缩比、始折点、收缩段长、堰面俯角和堰顶水头对流态的影响。

本研究基于 CFD 两相流仿真模拟技术，结合现场试验结果进行模型求解参数率定，建立不同结构参数（管长和管径）的菱形管，通过模拟不同来水污染情景（SS 浓度和 SS 粒径来水变量）下各个菱形管结构中的流动过程，获取各情景下 SS 去除率，分析 SS 去除效率最佳的菱形管沉淀结构参数，研究菱形管去除效率的影响因素。为水体中 SS 去除问题提供了理论参考，也为相关研究提供了可借鉴的研究框架和技术路径，有助于解决城市景观水体水质污染问题，帮助实现可持续发展的城市水环境治理目标。

1 研究方法

1.1 结构概况

用于城市景观水体SS去除的菱形管沉淀结构组件一般由多根菱形水平管搭建而成的规则六面体结构，单根管结构断面为菱形，其底部沿管长方向开设排泥口，颗粒由排泥口进入斜板分离区，而后滑入排泥斗，实现“水走水道，泥走泥道”具体结构如图 1 所示。



（a）菱形管单管结构

（b）菱形管结构单元　　（c）单管界面上泥水分离示意

图 1　菱形管沉淀结构示意

Fig.1　Schematic diagram of rhombic pipe sedimentation structure

1.2 CFD 数值模拟

1.2.1 模拟情景设计

探究不同 SS 污染状况下菱形管结构参数与去除效率的关系，设置 5 种水体污染情景，构建 9 种菱形管几何模型。其中主要参数设置如下。

（1）水体污染情景。基于雨水径流及景观水体中实测 SS 数据及相关研究成果[17-18]，设定来水中 SS 浓度有 100 mg/L、300 mg/L 和 500 mg/L，SS 粒径有 0.032 mm、0.063 mm 和 0.1 mm，分两组开展模拟，如表 1 所列。

表 1　水体污染情景模拟分组

Table 1　Grouping for water pollution scenario simulation

模拟过流时间/h	模拟 1		模拟 2	
	粒径/mm	浓度/mg·L^{-1}	浓度/mg·L^{-1}	粒径/mm
8	0.1	100	100	0.032
		300		0.063
		500		0.1

（2）菱形管几何模型。研究菱形管管径、管长与去除效率的关系，依据相关研究设置几何模型参数变量[19-20]，管径分别为 30 mm、40 mm 和 50 mm；管长分别为 1000 mm、1500 mm 和 2000 mm，两两组合，共 9 种菱形管模型，如表 2 所列。

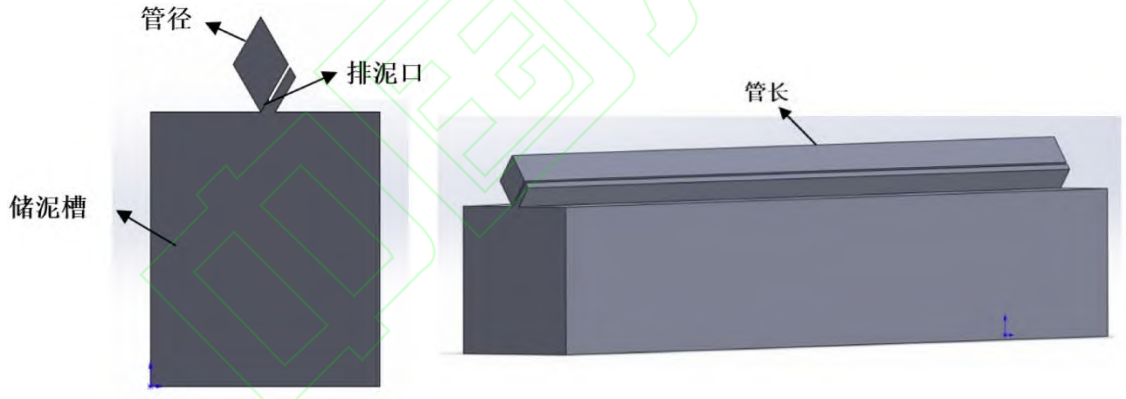
表 2　不同几何模型参数　　mm

Table 2　Parameters of different geometric models　　mm

尺寸	1	2	3	4	5	6	7	8	9
管长	1000	1000	1000	1500	1500	1500	2000	2000	2000
管径	30	40	50	30	40	50	30	40	50

1.2.2 几何模型建立与网格划分

菱形管沉淀结构中的水流及沉积物分别在沿管长方向及垂直于管长方向上进行流动和沉积，用三维模型对其沉淀过程进行描述，在计算机有限算力条件下对沉淀过程进行准确表达，本研究选择构建菱形管单管几何模型开展模拟研究。该模型由两部分组成：上半部分为菱形管结构，管的底部设置有排泥口，下半部分为储泥槽，SS 通过排泥口流入储泥槽中，如图 2 所示。



（a）断面　　（b）侧面

图 2　单管几何模型示意图

Fig.2　Schematic diagram of single-pipe geometric model

本研究选择四面体网格对菱形管几何模型进行结构网格划分。模拟计算前需应用GCI(Grid Convergence Index，网格收敛指数)分析法进行网格无关性验证，9 种几何模型加密网格对应的GCI值均低于 3%，遵从网格收敛指数准则[21]，满足网格质量要求。

1.2.3 湍流及多相流模型选择

（1）湍流模型。选择 RNG k-ε 湍流模型进行菱形管内部三维流场计算，RNG k-ε 模型作为 Standard k-ε 模型的改进，考虑了涡度对湍流的影响，能够捕捉小尺度的漩涡现象对沉淀的影响[22]，在预测湍流强度和流动特性时更为准确，被广泛用于污水处理厂中沉淀池的研究[23]，其基本方程如下

$$\rho\frac{dk}{dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)+\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_K+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \quad (1)$$

$$\rho\frac{d\varepsilon}{dt}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}\right]+D_{\varepsilon1}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+\mathrm{D}_{\varepsilon3}\mathrm{G}_b)-\mathrm{D}_{\varepsilon2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中，k为湍流动能；ε为湍流耗散率；μ_t为湍流粘度；G_b为浮力产生的湍流动能；G_K为平均速度产生的湍流动能；Y_M为可压缩湍流中波动量；$\mathrm{D}_{\varepsilon1}$、$\mathrm{D}_{\varepsilon2}$、$\mathrm{D}_{\varepsilon3}$为常数；$\sigma_k$和$\sigma_\varepsilon$分别为$k$和$\varepsilon$的湍流普朗特数(Turbulent Prandtl Numbers)。

（2）多相流模型。选取混合（Mixture）模型对菱形管沉淀结构进行两相流计算，混合模型适用于非稳态流动、热传递及化学反应等不同的流动条件中，灵活性与适应性较强，与更为复杂的模型（如：大涡模拟 LES 或直接数值模拟 DNS）相比，混合模型通常具有较低的计算成本，能够在合理的计算时间内提供较为准确的结果[24]，混合模型的相关方程如下

混合模型的连续方程

$$\frac{\partial(\rho_m)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_m\cdot\bar{v}_m)=\dot{m} \quad (3)$$

$$\bar{v}_m=\frac{\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\rho_k\bar{v}_k}{\rho_m} \quad (4)$$

$$\rho_m=\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\rho_k \quad (5)$$

式中，$\bar{v}_m$为质量平均速度；ρ_m为混合密度；$\dot{m}$为质量源的质量传递；α_k为第 k 相的体积分数；ρ_k为第 k 相的密度。

混合模型的动量方程

$$\frac{\partial(\rho_m\cdot v_m)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_m\cdot v_m v_m)=-\nabla\left[\mu_m\left(\nabla v_m+\nabla {v_m}^T\right)\right]+\rho_m g+F+\nabla\left(\sum_{k=1}^{n}\partial_k\rho_k v_{dr,k}v_{dr,k}\right) \quad (6)$$

$$\mu_m=\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\mu_k \quad (7)$$

$$v_{dr,k}=v_k-v_m \quad (8)$$

式中，n 为相数；F 为体积力；μ_m为混合粘度；$v_{dr,k}$为第二相 k 的漂移速度。

1.2.4 模型参数设置

为了确保模拟结果在实际应用中的可靠性与准确性，模型参数设置至关重要。本研究通过预模拟和现场试验相结合的方式，对比现场试验数据与预模拟数据的差异，对模型求解参数进行了精确调整。

预模拟选取了 40 mm 管径与 1000 mm 管长组合的菱形管对 5 种污染水体情景开展，模型参数根据本文设计的模拟情景及相关研究进行设置[25-26]，其中模型进口流速利用雷诺数对水流流态判定进行计算，当雷诺数大于 4000 时，管道内水流形成稳定湍流，以临界流速作为模型进口流速，计算得到 30 mm、40 mm 和 50 mm 管径对应模型进口流速为 0.15 m/s、0.11 m/s 和 0.09 m/s。计算公式如下

$$Re=\frac{\rho v d}{\mu} \quad (9)$$

$$d=\frac{4A}{X} \quad (10)$$

式中，ρ为流体密度（kg/m^3）；v为流体速度（m/s）；d为特征长度（m）；A 为横截面积（m^2）；X 为润湿周长（m）；μ为流体的动力粘度（kg/（m • s））。

现场试验地点位于北京市青龙湖上游，菱形管沉淀结构安置于河道内，结构底部是浆砌石建立的排泥斗，排泥斗为倒三角形，底部坡向储泥槽一侧倾斜，并通过 DN200 管道与储泥槽连通，结构顶部由 4 个尺寸为 530 mm 高，400 mm 宽，1000 mm 长的菱形管结构单元并排组成，现场试验布置如图 3 所示。开展现场试验，通过配水管将青龙湖再生水厂的中水引入现场，前池内水质状况通过人为调配 SS 浓度及粒径大小还原设计模拟的 5 种污染情景，随后注入前池（结构进口），控制前池内水流流速为 0.11 m/s，流量为

0.35 m^3/s。每种污染情景进行多组重复试验，每组试验在结构的进出口断面设置多点位取样，进行数据分析。

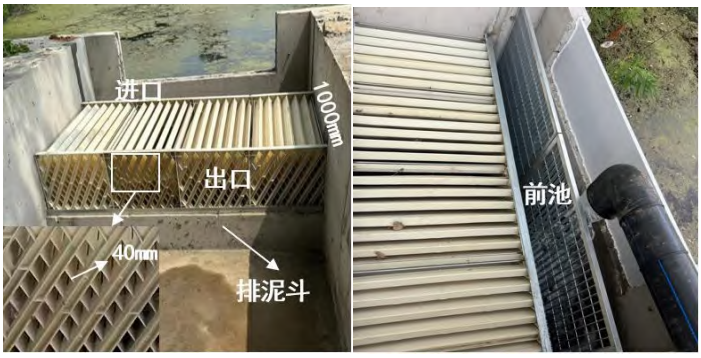


图 3　现场试验布置

Fig.3　Field experiment setup

对比分析模拟值和试验值的吻合度，进而调整模型部分求解参数。本文针对泥沙运动规律的研究选择均方根误差(Root Mean Square Error，简称$RMSE$)作为模拟值与试验值误差分析的评判标准[27]，$RMSE$ 的值越小，模拟值与试验值的吻合度越好。计算公式如下

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}(A_t - B_t)^2} \tag{11}$$

式中，$RMSE$为均方根误差；N 为样本数；A_t为实测值；B_t为模拟值。

以菱形管沉淀结构的 SS 去除率（具体介绍见 1.3 模型数据分析）为分析指标，通过调整模型部分求解参数后，模拟值和试验值的$RMSE$为 0.153，见表 3 所列。认定模型仿真结果与试验值吻合度较高[25]，参数设置合理，详细模型参数设置如表 4 所列。

表 3　模拟与试验的 SS 去除率对照

Table 3　Comparison of SS removal rates between simulation and experiments

现场试验编号	SS 粒径/mm	浓度/mg·L^{-1}	试验值/%	模拟值/%
1	0.032	100	58.881	58.871
2	0.063	100	65.970	65.883
3	0.100	100	67.533	67.839
4	0.100	300	81.032	81.132
5	0.100	500	86.044	86.122
RMSE	0.153			

表 4　模型参数设置

Table 4　Model parameter settings

参数	指标	设置
相及相间作用	主相（Water）	密度：998.2 kg/m³
		粘度：0.001003 kg/(m·s)
	次相（SS）	颗粒粘度：0.0002 kg/(m·s)
		填充极限：0.63
	相间作用	阻力系数设置：schiller-naumann
		滑移速度设置：manninen-et-al
边界条件	进口：速度进口（Velocity-Inlet）	0.15 m/s、0.11 m/s、0.09 m/s
	出口：压力出口（Pressure-Outlet）	表压：一个标准大气压
	壁面	静止壁面
		无滑移
求解	方案	PISO 算法
	空间离散	动量、湍动能、湍动能耗散率：Second Order Upwind
	控制（亚松驰因子）	动量：0.5；体积分数：0.4；湍流动能和湍流耗散率：0.6
	计算监控	残差值：0.001
		初始化：标准初始化
	计算设置	时间步数：240
		时间步长：120s
		最大迭代数：20

1.3 模拟数据分析

（1）利用 SS 去除率确定不同情景下菱形管结构。参数菱形管沉淀结构的工作效率主要体现为 SS 去除率，即固液混合液经过沉淀结构后 SS 的沉降程度，通过 SS 浓度表征的去除率作为结构去除效率的分析指标，用各个工况下多个时间节点的去除率及多个时间段的 SS 平均去除率来动态表征[31]，去除率η计算公式如下

$$C = P \times f_s \times 1000 \tag{12}$$

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \tag{13}$$

式中，C为水体中 SS 浓度；C_1和C_2分别为进、出水的 SS 浓度（mg/L）；P为 SS 的体积分数；f_s为 SS 的密度（kg/m^3）；η为 SS 去除率（%）。

（2）菱形管去除效率影响因素分析。管内速度场均匀性及堵塞状况是影响菱形管沉淀结构沉淀效率的主要因素，研究通过流场可视化技术实现对流体动力学行为的图形化呈现，同时结合数据统计与分析手段，详细的讨论其影响规律。

分析菱形管内部速度场均匀性对去除效率的影响，依托已有的经验与相关研究[26,28]文采用速度变异系数（Coefficient Of Variation，简称 CV）来表征菱形管内部速度场均匀性，CV 值的计算公式为

$$CV = \frac{S}{\bar{v}} \times 100\% \tag{14}$$

$$S = \left(\sum (V_i - \bar{V})^2 / (T-1)\right)^{1/2} \tag{15}$$

式中，S为标准偏差；V_i为第i个采样点的水平速度；$\bar{V}$为所有采样点的速度平均值；T 为采样点个数。

分析管道堵塞状况对去除效率的影响，以 SS 沉降速度小于菱形管整体 SS 沉降速度平均值的数据比例，代表当前工况下的堵塞率, 其计算公式如下

$$B = \frac{Q_s}{Q_a} \tag{16}$$

式中，B为菱形管堵塞率（%）；Q_s为沉降速度值小于菱形管整体沉降速度平均值的监测点数；Q_a为菱形管沉降速度总监测点数。

2 结果分析

2.1 不同悬浮物浓度情景下的结构参数分析

各 SS 浓度污染水体情景下菱形管沉淀结构对 SS 的去除状况如图 4 所示，低浓度状况下，30 mm 管径、2000 mm 管长的几何模型 SS 沉降量最高，在模拟结构运行 8 h 内沉降量为 2.7 kg，最小的管径与最长的管长实现了较高沉降水平。浓度增加到 300 mg/L 时，30 mm 及 40 mm 管径、2000 mm 管长几何模型沉降量较高，分别为 8.8 kg 和 9.4 kg。随着浓度的持续增加，40 mm 管径和 3 种管长的几何模型沉降水平凸显，沉降量在 15 kg 左右。40 mm 管径和 2000 mm 管长的结构在各个浓度水体中的 SS 平均去除率最高，达到 87.3%，有效的管径及管长配置对于提升去除效率至关重要。

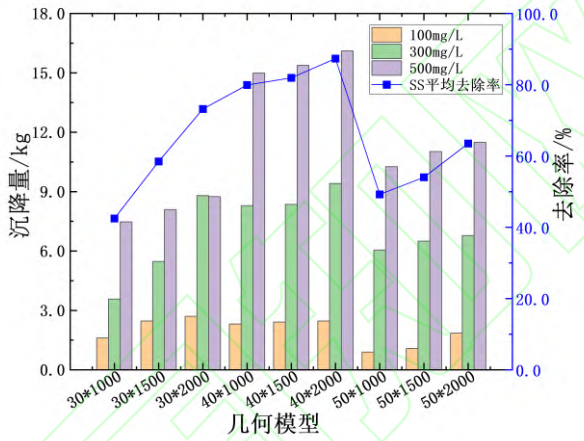
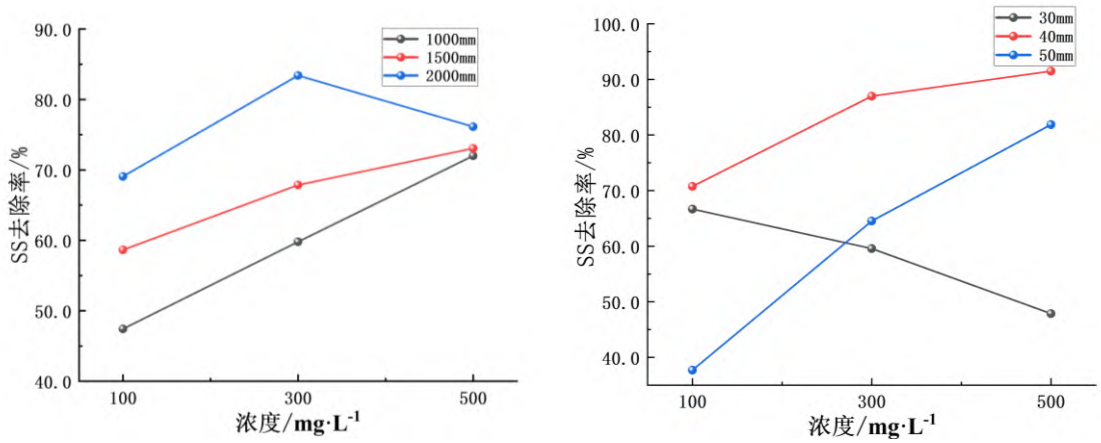


图 4　浓度情景下 9 种菱形管的 SS 沉降量及平均去除率

Fig.4　SS sedimentation and average removal rates of 9 rhombic pipes under concentration scenarios

为了探究在处理不同 SS 浓度污染水体时的菱形管管径、管长参数最佳选择，在各个浓度情景下分析不同管径、管长结构参数的菱形管对 SS 的去除率，如图 5 所示。对于菱形管管长参数，1000 mm 菱形管去除率随浓度的增大从 47.4%逐步增大到 72.0%，1500 mm 从 58.7%逐步增大到 73.1%；而 2000 mm 结构在进水浓度由 300 mg/L 提升至 500 mg/L 的过程中，去除率从 83.4%下降到 76.1%。这是因为随着浓度的增大，单位长度上的颗粒沉降量增加，颗粒混合现象加剧[29]，导致垂直方向上的沉降能力增强，虽然这在一定程度上会提高颗粒的沉降效率，但菱形管滑泥道开口处易引起流体分布不均，引发管内涡流现象，如图 6 所示，涡流现象造成局部水流速度的增加，这使得颗粒物在该区域沉积速度减慢，沉淀受阻的悬浮物会随水流继续流动，使得管道后方形成淤堵，这一现象在较长的菱形管中表现更显著。

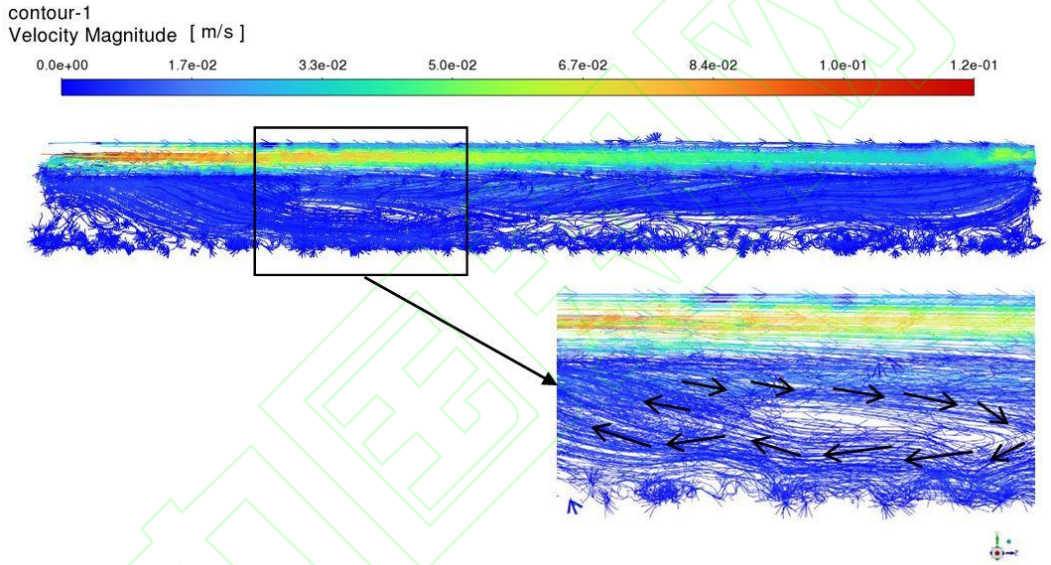
对于管径参数而言，有一个明显的趋势：随着浓度的增大，40 mm 和 50 mm 菱形管去除率逐步提高，提升最显著的是 50mm，去除率从 37.7%增大到了 81.9%。而 30 mm 管径下的去除率则从 66.7%下降到了 47.9%。这一现象的原因在于随着 SS 浓度的增加，尽管单位长度沉淀量增大，但管径较小的限制使得沉降空间不足，在高浓度情境下，底端的团状沉泥受到“托举”作用，先沉淀的颗粒物无法及时通过排泥道疏解，导致新进入的颗粒物无法沉淀，淤堵颗粒物上层随水流排出，沉降效率显著下降。



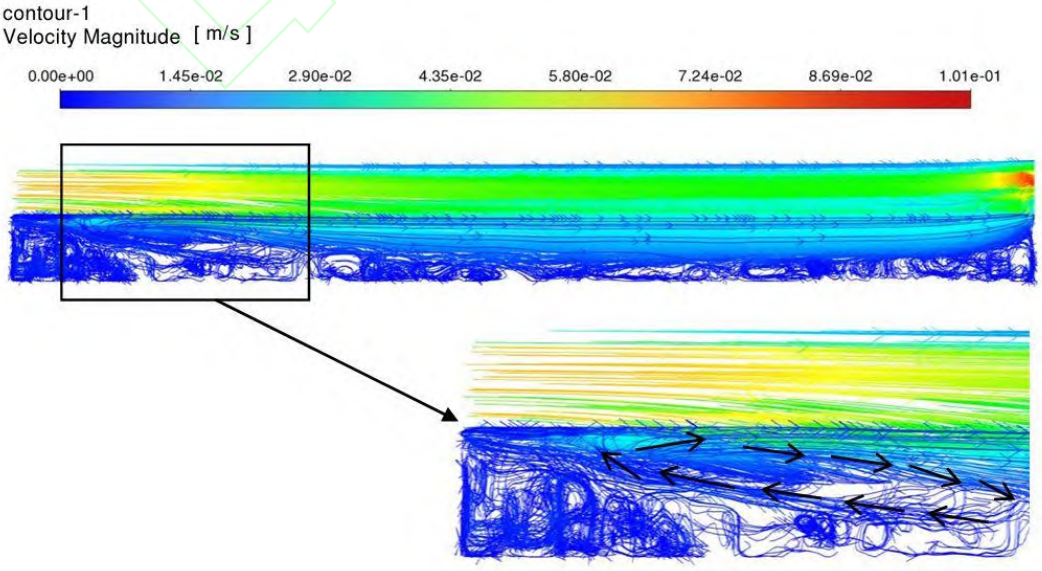
（a）管长　　（b）管径

图 5　各浓度情景下管长、管径结构参数去除效率状况

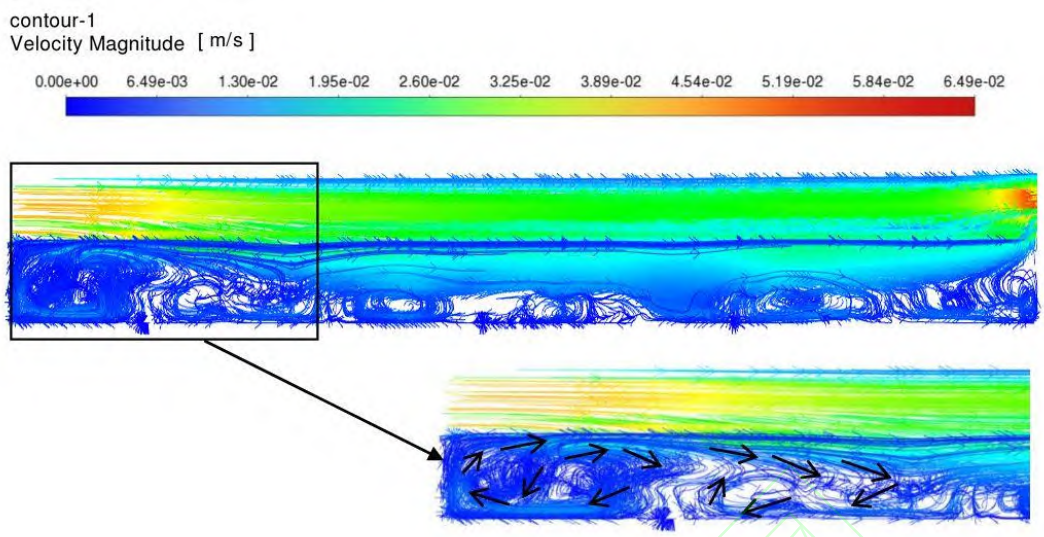
Fig.5　Removal efficiency of pipe length and diameter structural parameters under different concentration scenarios



（a）30mm 管径



（b）40mm 管径



（c）50mm 管径

图 6　管内涡流状况分布

Fig.6　Vortex distribution patterns inside pipes

2.2 不同悬浮物粒径情景下的结构参数分析

各 SS 粒径污染水体情景下菱形管沉淀结构对 SS 的去除状况如图 7 所示，污染水体中悬浮物粒径是分析沉降效率重要参考因素，细颗粒沉降时，40 mm 管径和 3 种管长下的沉降效率相近，SS 沉降量在 6.0 kg 左右，随着粒径逐步增大到 0.063 mm，30 mm 管径、2000 mm 管长沉降量增加显著，增加沉降量为 2.7 kg，当粒径达到模拟最大值 0.1 mm 时，40 mm 管径、2000 mm 管长下的沉降量赶追 30 mm 管径、2000 mm 管长，沉降效率最佳。在设置 SS 粒径范围内，30 mm、40 mm 管径和 2000 mm 管长的菱形管几何模型表现出了较强的适应性，其在不同粒径污染水体中的 SS 平均去除率分别为 71.7%和 75.4%。

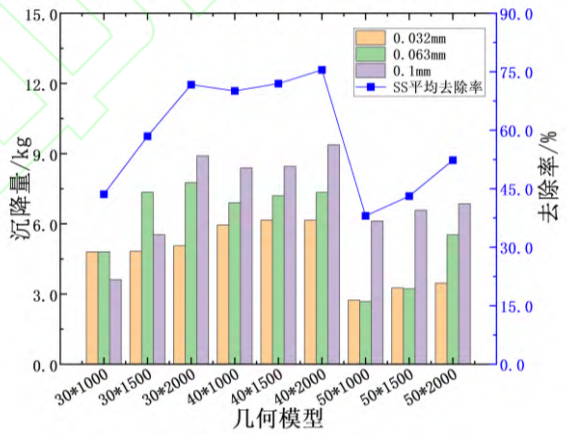
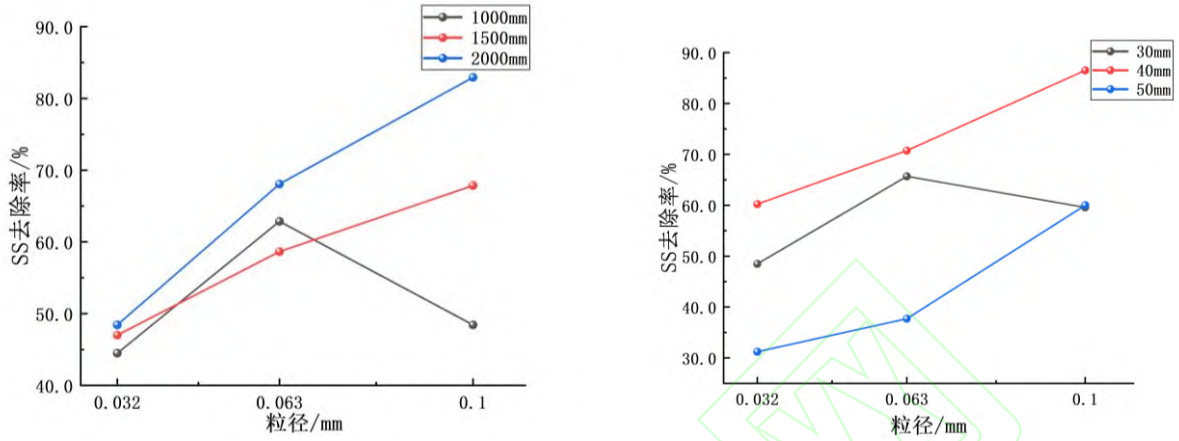


图 7　粒径情景下 9 种菱形管的 SS 沉降量及平均去除率示意

Fig.7　Schematic diagram of SS sedimentation and average removal rates of 9 rhombic pipes under different particle size scenarios

为了探究在处理不同 SS 粒径污染水体时的管径、管长参数最佳选择，在各个粒径情景下分析设置不同管径、管长结构参数的菱形管对 SS 的去除率，如图 8 所示。1500 mm 和 2000 mm 菱形管去除率随粒径增大逐步提高，其中 1500 mm 提高最显著，从 48.4%增大到 82.9%，而 1000 mm 则在粒径增大到 0.1 mm 时，去除率下降到了 48.4%。40 mm 和 50 mm 的菱形管去除率和处理粒径大小呈正相关，其中

40 mm 对 SS 的去除效果最明显，去除率在 60.2%到 86.5%之间，30 mm 管径参数则随粒径增大呈现波动式分布，最高去除率为处理 0.063 mm 粒径污水时的 65.7%。一般而言，较大颗粒的平均停留时间较短，因此它们更易于沉淀，而小颗粒则因其较小的惯性，容易随液流移动，从而增加停留时间，去除率降低[29]。而 1000 mm 管长和 30 mm 管径去除率下降的原因一方面是大粒径沉降速度过快，滑泥道动力不足，先进入滑泥道的颗粒无法排出，导致后续颗粒物在排泥口产生堵塞，另一方面，在堵塞之后，管内颗粒之间的运动和碰撞加剧，使得大量粒径仍悬浮在液体中，在短管中更易随水流排出[22]。



（a）管长　　（b）管径

图 8　各粒径情景下管长、管径结构参数去除效率状况

Fig.8　Removal efficiency of pipe length and diameter structural parameters under different particle size scenarios

综合上述分析，40 mm 管径、2000 mm 管长的菱形管沉淀结构不仅适用于处理一定浓度范围的水体，还能有效应对不同粒径的污染物，应用范围较广，面对波动的进水水质状况和变化的污染负荷，依然能够维持较高的去除效率。依据模拟结果进行回归分析，得到 40 mm 管径和 2000 mm 管长的菱形管沉淀结构去除效率与来水 SS 浓度及 SS 粒径满足下式的回归关系[30]

$$\eta = 0.03626C + 134.79135S_i + 62.97368 \quad (17)$$

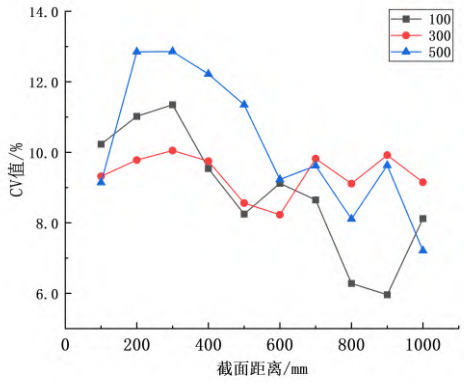
式中，η为 SS 去除率（%）；C为水体 SS 浓度（mg/L）；S_i为水体 SS 粒径（mm）。

回归方程式(17)的确定系数(R^2)为 0.99965，拟合效率较好。方程式中变量的回归系数说明 40 mm 管径和 2000 mm 管长的菱形管沉淀结构的去除效率随进水 SS 浓度及粒径的增大而增大。

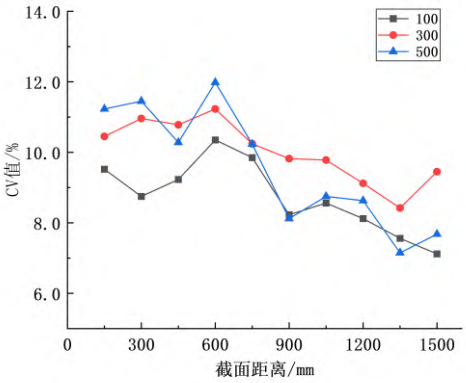
3 结果讨论

3.1 速度场均匀性对去除效率的影响

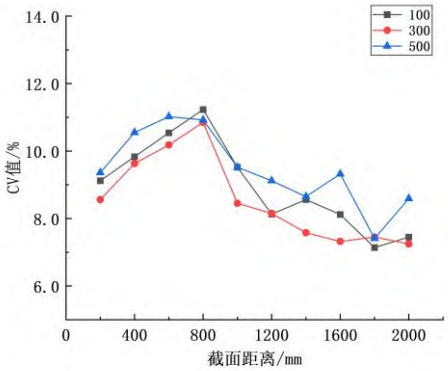
在每个菱形管的进口到出口之间，按照等距离原则设置了 10 个垂直截面，并在每个截面随机生成 50 个采样点，通过 CFD-POST 计算各截面的 *CV* 值，以评估速度场的均匀性。较小的速度 *CV* 值表示管道内速度场更均匀。如图 9 所示。在 SS 随水流进入菱形管的过程中，靠近进水口不远处涡流现象明显，引起速度波动。随着管长的增加，波动位置到进水口的距离逐渐增大，大致位于整个菱形管的 1/5 到 2/5 范围内，在此范围，SS 由于水流扰动导致部分悬浮于菱形管中，阻止了 SS 的沉淀运动，特别是处理高浓度情景时，*CV* 值波动较大，速度场均匀性较低，而离开波动范围，速度场均匀性逐渐趋于稳定。随着浓度的增加，小管径进口处流场容易受到流速变化的影响，对 SS 浓度变化的感知较敏感，影响整体去除效率；而较大管径则在进口处提供了更大的流通空间，使流体流动相对稳定。



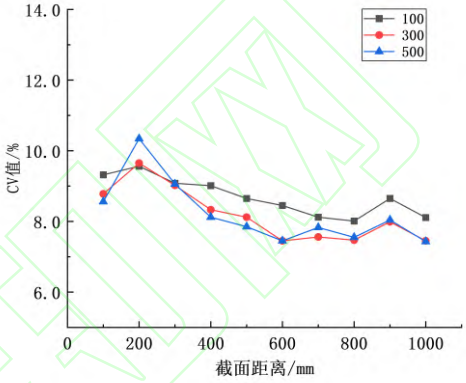
（a）30 mm 管径×1000 mm 管长



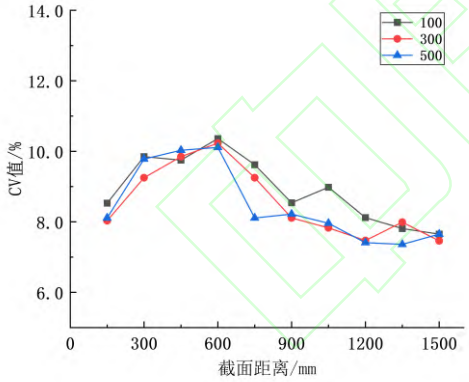
（b）30 mm 管径×1500 mm 管长



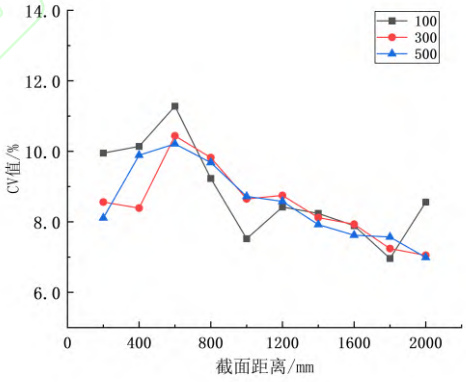
（c）30 mm 管径×2000 mm 管长



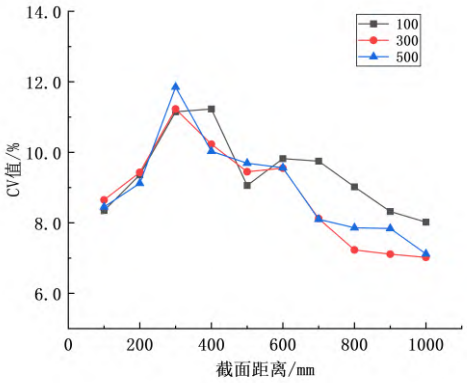
（d）40 mm 管径×1000 mm 管长



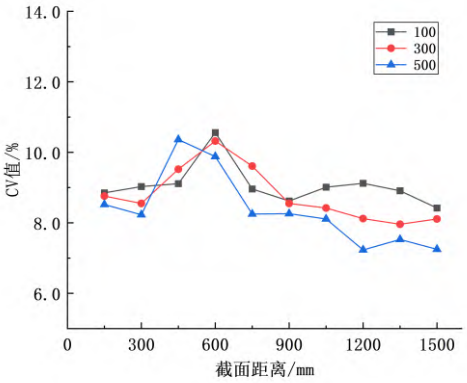
（e）40 mm 管径×1500 mm 管长



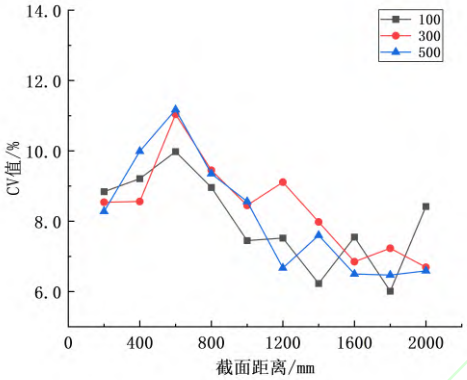
（f）40 mm 管径×2000 mm 管长



（g）50 mm 管径×1000 mm 管长



（h）50 mm 管径×1500 mm 管长



（i）50 mm 管径×2000 mm 管长

图 9　菱形管各截面的 *CV* 值分布

Fig.9　Distribution of *CV* values at each cross-section of rhombic pipes

对各工况菱形管对应的 SS 去除率和 *CV* 值进行相关性分析，计算其皮尔逊相关系数（Pearson Correlation Coefficient，通常表示为 *r*），线性拟合曲线如图 10 所示，结果 *r* 等于-0.77752，表明在模拟 SS 沉淀 8 小时过程中，SS 去除率和速度 *CV* 值呈较强负相关性，所以，SS 去除率与菱形管速度场均匀性则呈较强的正相关关系。SS 去除率随着 *CV* 值减小，速度场均匀性的增强，表现更佳。

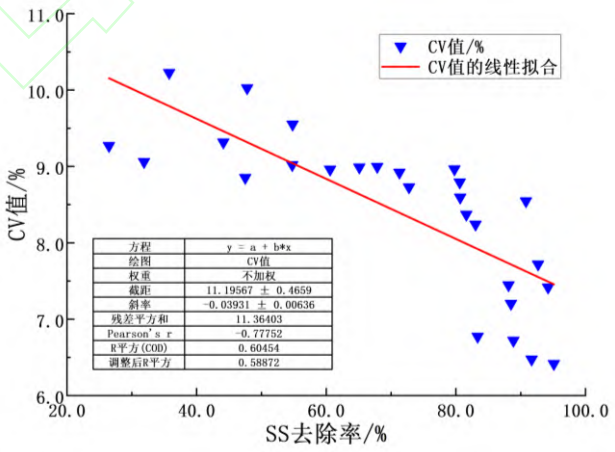
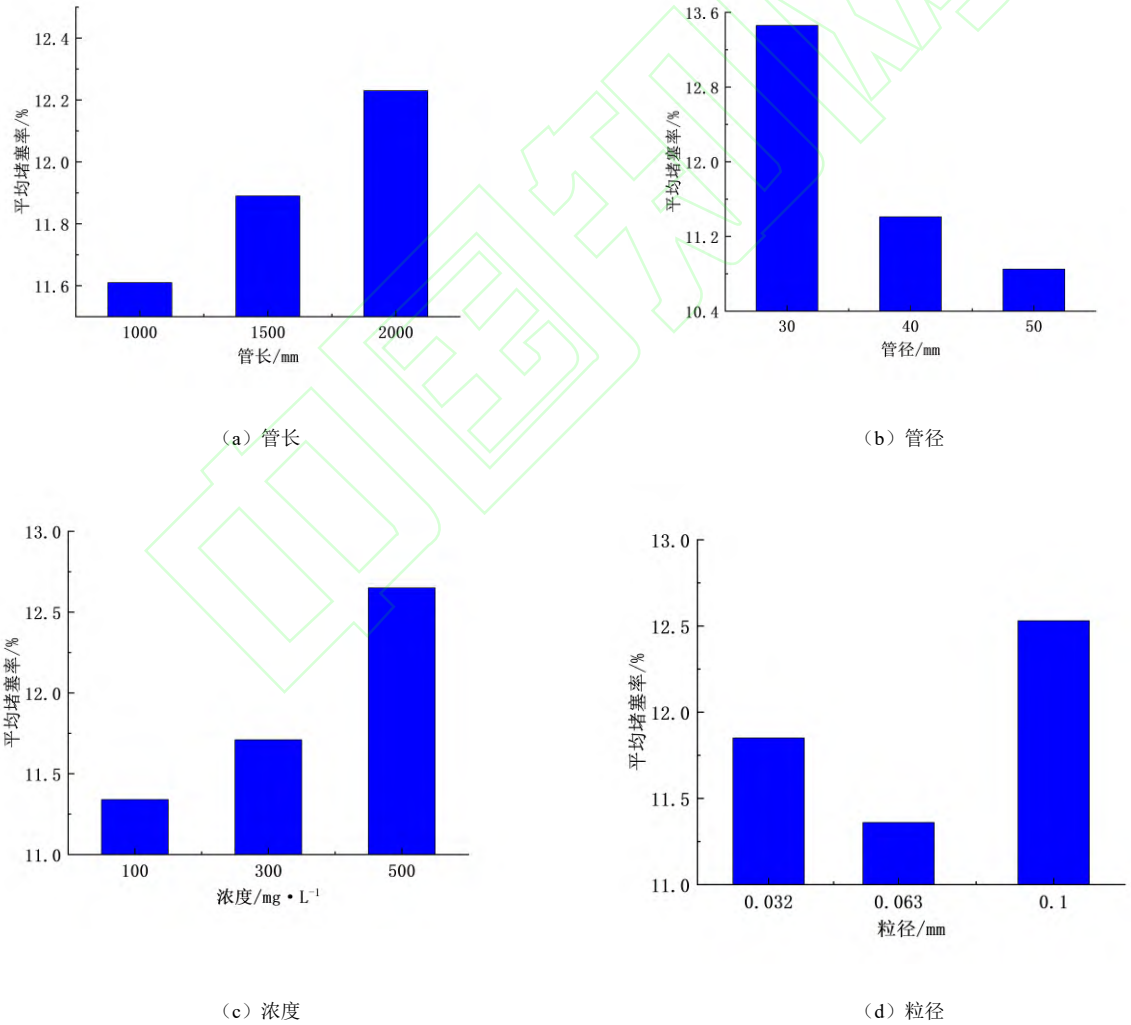


图 10　*CV* 值与去除率相关性分析

Fig.10　Correlation analysis between *CV* values and removal efficiency

3.2 管道堵塞状况对去除效率的影响

传输管道的堵塞状况直接影响其输送效率和能耗，通过提取各个工况下十个截面上采样点沿 Y 轴的沉降速度，对菱形管内部垂直流速进行分析，菱形管堵塞率影响规律分布图如图 11 所示，结合沉淀图判定堵塞状况，发现：堵塞率随处理 SS 浓度的增大逐渐增大，SS 浓度的增加可以显著提高单位长度上的颗粒沉降量，当沉降量超过管道排泥口单位时间排泥量，就会造成管道的堵塞，这一发现与 Iscan 和 Civan 的结论一致，他们指出在不利的流动条件下，高体积分数的颗粒可能导致孔隙的堵塞[31]；对各个菱形管处理单一粒径情景下的数据分析，0.063mm 堵塞率最低，大粒径沉降速度过快，滑泥道动力不足，先进入滑泥道的颗粒无法排出，导致后续颗粒物在排泥口产生堵塞。而小粒径范德华力相对增大，导致颗粒絮凝性增强，排泥口发生堵塞率增大[32]。堵塞率随管径减小及管长增长而增大，具体而言，较小的管径意味着其比表面积增大，导致悬浮物易黏附在管道底部壁面上，同时，较小管径的 SS 沉降距离缩短，受排泥口排泥效率的影响，其堵塞风险增大；而管长增长意味着 SS 的沉降时间延长，菱形管对于 SS 的去除量增大，但对于较长管内的显著涡流现象，会造成局部水流速度的增加，颗粒物沉积速度减慢，沉淀受阻的悬浮物会随水流继续流动，使得管道后方堵塞加剧。



（a）管长　　（b）管径

（c）浓度　　（d）粒径

图 11　菱形管堵塞率影响规律分布

Fig.11　Distribution patterns of clogging rates in rhombic pipes

堵塞率线性拟合曲线如图 12 所示，其结果 r 等于-0.44992，表明在模拟 SS 沉淀 8 小时过程中，SS

去除率和堵塞率表现中度的负相关关系，SS 去除率随着堵塞率增大表现变差。

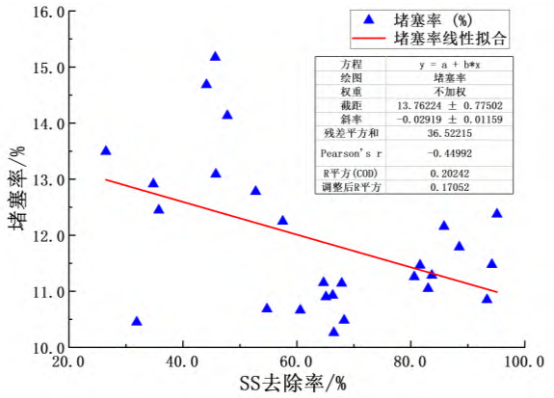


图 12　堵塞率与去除率相关性分析

Fig.12　Correlation analysis between clogging rate and removal efficiency

4 结　论

由于城市景观污染水体中 SS 浓度与污染物浓度密切相关，因此以去除 SS 为目标的菱形管沉淀结构可应用于城市景观水体 SS 削减，本文结合北京市景观水体现场试验，通过数值模拟研究了菱形管沉淀结构在不同污水情景下的去除效率，确定最佳结构参数，并分析了去除效率的影响因素。主要结论如下：

（1）在菱形管沉淀结构参数分析中，发现在波动的进水水质状况和变化的污染负荷下，40 mm 管径和 2000 mm 管长的菱形管对 SS 去除效率表现高效且稳定，处理 SS 浓度和 SS 粒径为主导因素的污染水体时，其平均去除率分别能够达到 87.3%和 75.4%，根据回归方程得到 40 mm 和 2000 mm 菱形管的去除效率随进水 SS 浓度及粒径的增大而增大。由此证明，选择合理的菱形管参数对提高 SS 去除效率至关重要，同时，也验证了菱形管沉淀结构在城市景观水体原位治理中的高效应用潜力。

（2）水流速度场的均匀性对 SS 去除效率具有显著影响，特别是在高浓度情境下，涡流现象导致速度波动，抑制了 SS 的沉淀运动。分析不同工况下菱形管的速度 *CV* 值，小管径在进口不远处流速变化明显，流场均匀性较差，较大管径在开口处就提供了更稳定的流通空间，有利于提高沉淀效率。相关性分析表明 SS 去除率与速度 *CV* 值呈较强负相关关系，皮尔逊相关系数为-0.77752，表明提高速度场的均匀性可有效增强 SS 的去除效率。

（3）传输管道的堵塞状况显著影响 SS 沉降效率，分析各工况下菱形管内部的沉降速度可以有效判断堵塞情况。研究结果显示，堵塞率会随着管径减小和管长增长而增大，相关性分析表明 SS 去除效率与堵塞率呈中度负相关关系，堵塞率的增加会导致去除效率的下降。

参考文献：

[1] PATEL N，RUPARELIA J，BARVE J．Prediction of total suspended solids present in effluent of primary clarifier of industrial common effluent treatment plant：Mechanistic and fuzzy approach[J]．Journal of Water Process Engineering，2020，34：101146．

[2] LATIF E F．Applying novel methods in conventional activated sludge plants to treat low-strength wastewater[J]．Environmental Monitoring and Assessment，2022，194：323．

[3] 刘建林，谢杰．膜芬顿技术在污水深度处理中的应用[J]．中国给水排水，2020，36(22)：145-151．
LIU J L，XIE J．Application of membrane fenton coupling technology in wastewater advanced treatment[J]．China Water & Wastewater，2020，36(22)：145-151．

[4] 余莉，周林超，马媛媛，等．磁混凝技术在处理煤化工气化废水中的应用研究[J/OL]．工业水处理，2024：1-13．
YU LI, ZHOU Linchao, MA Yuanyuan, et al. Application of magnetic coagulation technology in the treatment of gasification wastewater from coal chemical industry[J/OL]. Industrial Water Treatment, 2024: 1-13.

[5] 汪虎，左恒，陈超．磁化絮凝技术去除钒浸出液中固体悬浮物试验研究[J]．中国资源综合利用，2020，38(6)：20-22．

WANG H，ZUO H，CHEN C．Experimental study on removal of solid suspended matter in vanadium leachate by magnetic flocculation[J]．China Resources Comprehensive Utilization，2020，38(6)：20-22．
[6] 郜阔，杨红，赵庆良．AAMBBR 工艺生活污水处理效能及脱氮机制研究[J]．给水排水，2023，59(S2)：211-217．
GAO K，YANG H，ZHAO Q L．Study on domestic sewage treatment efficiency and nitrogen removal mechanism of AAMBBR process[J]．Water & Wastewater Engineering，2023，59(S2)：211-217．
[7] 中国工程建设标准化协会．水平管沉淀池工程技术规程：CECS 388—2014[S]．北京：中国计划出版社，2015．
China Engineering Construction Standardization Association. Horizontal pipe settling tank engineering Technical regulations：CECS 388—2014[S]．Beijing：China Planning Press，2015．
[8] 薛石龙，文玉坤，周密，等．水平管高效沉淀池在水厂扩建中的工程应用[J]．净水技术，2022，41(10)：154-160．
XUE S L，WEN Y K，ZHOU M，et al．Engineering application of horizontal tube high-efficiency sedimentation tank in the expansion of WTP[J]．Water Purification Technology，2022，41(10)：154-160．
[9] 宋学峰，吴越强，许成君，等．水平管沉淀池处理高藻水库水的应用研究[J]．中国给水排水，2021，37(15)：41-45．
SONG X F，WU Y Q，XU C J，et al．Application of horizontal tube sedimentation tank to treatment of reservoir water with high algae[J]．China Water & Wastewater，2021，37(15)：41-45．
[10] 牛子厚，陈文学，穆祥鹏，等．长距离有压输水工程滞留气团迁移特性模拟研究[J/OL]．水利水电技术(中英文)，2025：1-15．
NIU Zihou, CHEN Wenxue, MU Xiangpeng, et al. Simulating the migration characteristics of trapped air pockets in long-distance pressurized water conveyance systems[J/OL]. Water Resources And Hydropower Engineering, 2025: 1-15.
[11] LI H C，SANSALONE J．Benchmarking Reynolds-averaged navier‐stokes turbulence models for water clarification systems[J]．Journal of Environmental Engineering，2021，147(9). DOI：10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001889.
[12] 雷明，叶晨，王协康．边滩漂石河流水沙输移及河床响应数值分析[J]．工程科学与技术，2023，55(4)：110-118．
LEI M，YE C，WANG X K．Simulation study on the influence of boulders on flow-sediment transport and riverbed adjustment in a mountainous river[J]．Advanced Engineering Sciences，2023，55(4)：110-118．
[13] 孛华江，张法星，张恩宝，等．基于 CFD 的压力前池水力过渡过程流态特性分析[J]．四川水力发电，2022，41(4)：1-5，134．
BO H J，ZHANG F X，ZHANG E B，et al．CFD analysis of flow characteristics in hydraulic transient process in forebay[J]．Sichuan Hydro Power，2022，41(4)：1-5．
[14] FERDOWSI A，VALIKHAN-ANARAKI M，FARZIN S，et al．A new combination approach for optimal design of sedimentation tanks based on hydrodynamic simulation model and machine learning algorithms[J]．Physics and Chemistry of the Earth，Parts A/B/C，2022，127：103201．
[15] 谢千辰，唐明，吴宇泽，等．基于 CFD 仿真的异型薄壁堰水力特性与改造路径研究[J]．节水灌溉，2023(9)：57-63，70．
XIE Q C，TANG M，WU Y Z，et al．Research on the hydraulic characteristics of non-standard thin-plate weirs based on CFD three-dimensional numerical simulation and its renovation path[J]．Water Saving Irrigation，2023(9)：57-63．
[16] 马玉晨，张法星，喻泽，等. 高拱坝表孔宽尾墩收缩比对流态的影响研究[J/OL]. 水利水电技术(中英文)，2024：1-18. (2024-05-27)．http://kns．cnki．net/KCMS/detail/detail．aspx?filename=SJWJ20240521004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ．
MA Y C，ZHANG F X，YU Z，et al．Study on the influence of shrinkage ratio of wide tail pier on surface hole of high arch dam on flow pattern[J/OL] . China Industrial Economics , 2024 : 1-18 . (2024-05-27)．http://kns．cnki．net/KCMS/detail/detail．aspx?filename=SJWJ20240521004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ．
[17] 李建鸿，黄昌春，查勇，等．长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演[J]．环境科学，2021，42(11)：5239-5249．
LI Jianhong, HUANG Changchun, ZHA Yong, et al. Yangtze river main stream surface waters spatial variation characteristics of suspended solids and the remote sensing inversion[J]. Journal of Environmental Science, 2021, 42(11): 5239-5249.
[18] 郭心仪，张守红，王国庆．城市不同下垫面降雨径流水质监测及特征研究[J]．中国农村水利水电，2024(3)：128-136．
GUO X Y，ZHANG S H，WANG G Q．Monitoring experiment and characteristics analysis of rainfall-runoff-water quality of different urban underlying surfaces[J]．China Rural Water and Hydropower，2024(3)：128-136．
[19] 张建国，张良纯，刘玲云．水平管沉淀分离装置的开发研究[J]．中国给水排水，2008，24(9)：47-51．

ZHANG J G，ZHANG L C，LIU L Y．Development of horizontal tube sedimentation and separation device[J]．China Water & Wastewater，2008，24(9)：47-51．
[20] 陈淑芳，郭沛涌，颜成淋，等．V 型水平管沉淀池装置设计与性能试验研究[J]．给水排水，2014，50(7)：162-164．
CHEN S F，GUO P Y，YAN C L，et al．Design and performance test of V-shaped horizontal tube sedimentation tank[J]．Water & Wastewater Engineering，2014，50(7)：162-164．
[21] KHAYRULLINA A，VAN HOOFF T，BLOCKEN B，et al．Validation of steady RANS modelling of isothermal plane turbulent impinging jets at moderate Reynolds numbers[J]．European Journal of Mechanics - B/Fluids，2019，75：228-243．
[22] WU X，WEI J，SHEN L，et al．Investigation of the influence of operating parameters on the settling performance of a vertical sedimentation tank through computational fluid dynamics simulations[J]．Water，Air，& Soil Pollution，2024，235(5)：301．
[23] PATZIGER M，KISS K．Analysis of suspended solids transport processes in primary settling tanks[J]．Water Science and Technology，2015，72(1)：1-9．
[24] LIU Y，ZHANG P，WEI W．Simulation of effect of a baffle on the flow patterns and hydraulic efficiency in a sedimentation tank[J]．Desalination and Water Treatment，2016，57(54)：25950-25959．
[25] GAO J X， AN Z W， BAI X Z．A new representation method for probability distributions of multimodal and irregular data based on uniform mixture model[J]．Annals of Operations Research，2022，311(1)：81-97．
[26] 刘存．基于 CFD 的斜板沉淀池及配水渠的优化设计及运行研究[D]．重庆：重庆大学，2019．
LIU C．Optimal Design and Operation of Inclined Plate Sedimentation Tank and Distribution Channel Based on CFD[D]．Chongqing：Chongqing University，2019．
[27] 胡松可，王敬东，李文昊．曲线型沉沙池底面坡度的优化研究[J]．水利建设与管理，2023，43(3)：49-57．
HU S K，WANG J D，LI W H．Study on the optimization of the bottom slope of curvilinear desilting basin[J]．Water Conservancy Construction and Management，2023，43(3)：49-57．
[28] TIAN S，BARIGOU M．An improved vibration technique for enhancing temperature uniformity and heat transfer in viscous fluid flow[J]．Chemical Engineering Science，2015，123：609-619．
[29] MANCELL-EGALA W A S K，KINNEAR D J，JONES K L，et al．Limit of stokesian settling concentration characterizes sludge settling velocity[J]．Water Research，2016，90：100-110．
[30] 尚福强，蔡一，王硕，等．郓城南湖雨水径流悬浮物削减方案研究[J]．水资源与水工程学报，2021，32(2)：45-49．
SHANG F Q，CAI Y，WANG S，et al．Removal scheme of suspended solids in rainwater runoff of Nanhu Lake，Yuncheng County[J]．Journal of Water Resources and Water Engineering，2021，32(2)：45-49．
[31] ISCAN A G，CIVAN F．Correlation of criteria for perforation and pore plugging by particles[J]．Journal of Porous Media，2006，9(6)：541-558．
[32] GUERRINI A，ROMANO G，CAROSI L，et al．Cost savings in wastewater treatment processes：The role of environmental and operational drivers[J]．Water Resources Management，2017，31(8)：2465-2478．

（责任编辑 王 璐）