

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0406

利用物理与数值模型对旋流式水砂分离器性能的评估

翁哲馨¹, 钱宇^{1*}, 高豆豆², 杨丽芳², 袁倩雯²

(1. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波市市政工程建设集团股份有限公司, 浙江 宁波 315012)

摘要: 在市政环境工程领域, 旋流式水砂分离器(以下简称分离器)主要用于控制雨水排放过程中的总悬浮固体(TSS)浓度, 以减轻排放对自然水体潜在的负面影响. 为此研究一种特殊设计的分离器, 其主要特征为入口与出口切向连接产生旋流, 可增强颗粒的沉降和分离. 利用实验模型和数值模拟对该分离器效能进行综合分析, 探究其不同流量条件下对不同粒径颗粒物的去除率, 以及分离器尺寸大小对颗粒物去除率的影响. 结果表明: 在流量为 $5\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上时, 对粒径小于 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物, 去除率下降显著; 对粒径大于 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物, 由于其受水流作用较弱, 沉降速度较快, 去除率相对较高. 此外, 流量的增加导致流速增大, 水停留时间缩短, 进而降低了颗粒物的去除率. 研究发现, 当分离器直径增大至原设计的 1.5 倍时, 颗粒物的去除率最大可提升 28%. 同时, 引入 Péclet 数评估方法, 作为衡量颗粒物去除率的关键指标. 该研究结果可为分离器设计和优化提供参考, 有助于提高分离器在实际应用中的性能.

关键词: 计算流体动力学; 旋流式水砂分离器; 颗粒物去除效率; 物理模型; 数值模拟

中图分类号: TU823.6; X52

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 06-0043-08

随着我国城市化进程的推进, 作为重要基础设施的市政排水系统建设及改造持续加速. 据统计^[1], 截至 2022 年我国现有排水管网总长超过 90 万 km. 在降雨过程中, 初期地表径流和合流制溢流污水若未经处理直接排入城市水体, 会造成严重污染^[2-3]. 对雨水系统, 降雨初期地表径流带有大量颗粒物^[4], 可以吸附大量污染物, 如碳氢化合物、磷酸盐、氮、磷等, 并随雨水进入排水系统, 最终通过排口流入自然水体^[5-6]. 因此, 地表径流未经处理排放可能导致水体富营养化、黑臭、浊度增加以及生物多样性下降^[7-8]. 《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)^[9]强调了排放水质合格的重要性. 西方法律法规要求排水系统在设计 and 运行时应采取最佳的管理方案, 以减少固体颗粒的排放^[10].

分离器通过独特结构设计能够促进颗粒物在腔室中沉降^[11], 其通常包含一个或多个集水池, 且

无需外加能源^[12-13]. 相较于旋流沉砂技术, 水砂分离器结构简单、能耗低、处理效率高、使用寿命长、维护方便, 更符合绿色环保的要求, 因此日益受到重视^[14-15], 已成为城市处理雨水首选^[16-17]. 由于污水处理目标通常包括有机物的降解、氮磷的去除等, 而雨水处理则侧重于悬浮固体的去除和初期雨水的净化. 国内外对旋流沉砂技术的研究及应用多集中在污水处理, 在雨水处理领域的研究较少, 且对重质颗粒物污染控制技术研究相对不足^[18-19]. 目前, 我国对分离器内部颗粒物运动规律的认识尚不充分, 现有设计多依赖于经验, 导致设备效率不达预期. 尽管已有多种分离器原型, 但是在性能评估方面的研究仍显不足, 缺乏对分离器性能的系统评估方法^[20-21].

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)作为一种研究方法, 能使研究者在多样化的

收稿日期: 2024-04-03.

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

基金项目: 浙江省重点研发计划(2020C03082).

第一作者: 翁哲馨, 硕士研究生, 主要研究方向: 城市排水. E-mail: 2111087071@nbu.edu.cn

*通信作者: 钱宇, 副研究员, 主要研究方向: 城市排水. E-mail: qianyu@nbu.edu.cn

流量框架下,对分离器内部不同粒径颗粒物的去除效率进行定量分析,并评估设计参数对分离效能的具体影响^[22]. CFD 的优势在于能揭示颗粒层面的精细动态,为流动模式的全面解构及系统设计参数优化提供方法,特别是面对物理原型开发成本过高或实际操作受限的情况,CFD 显示出特有的价值^[23]. 通过高精度的数值模拟,可促进对复杂流动现象的深入理解,为工程设计与优化提供数据支持^[24].

本文针对一种特殊分离器(入流管道和出流管道与分离器切向连接,水流自发形成旋流,无移动部件、水流无阻碍、运行维护成本相对较低)用实验和数值仿真方法研究其尺寸变化对颗粒物去除率的影响,揭示该分离器内部颗粒物的运动规律,评估其除砂率.同时,引入 Péclet 数,对实验和模拟结果进行比较分析,系统评价不同结构分离器的除砂率^[25-26],以期为提高市政水处理提供参考.

1 研究方法对象

1.1 物理实验和 CFD 模型设置

实验在宁波大学水力学实验室进行,实验装置如图 1 所示.分离器由直径为 500 mm 的有机玻璃材料制成,配备直径为 150 mm 的入口管和出口管,长度分别为 3 000 mm 和 1 000 mm.为在腔室中产生旋流,2 个管道与分离器切向相连,入口和出口管道的中心线偏移量为 350 mm.此外,入口和出口管道底部与分离器底部的高度差为 350 mm,加砂口直径为 50 mm,位于分离器入口管道末端上游 150 mm 处.颗粒物的注入通过螺旋给料器实现,通过调整输入电压,可以确保以 $4 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 的均匀质量流率将颗粒物通过加砂口稳定地输送到实验系统.

为避免颗粒物在实验过程中二次循环,在分离器的出口处安装了颗粒物捕获系统.

使用由 Nortek AS 公司生产的 Nortek-Vectrino 声学多普勒测速仪(ADV)测量流场,量程为 $\pm 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,精度为 $\pm 0.5\%$.在出口处用烧杯(800 mL)手动采集水-砂混合物.收集的混合物在由上海一恒科学仪器有限公司生产的 DHG9240A 烘箱干燥,并用由 Sartorius 公司生产的 QUITIX35-1CN 电子秤称重.

实验步骤为:(1)启动泵并运行 10 min,以稳定流场,同时采用桶接法测量流速;(2)启动螺旋给料器,将颗粒物均匀添加到水流中;(3)持续运行水泵 2.5 min,每隔 10 s 在出口处用烧杯收集一次混合物,共收集 12 000 mL;(4)将混合物在烘箱中干燥,使用电子秤称重.

在 CFD 模拟中,采用 SpaceClaim 软件构建几何模型(图 2),物理模型按 1:1 尺寸建立.采用 Fluent Meshing 软件对模型进行网格化处理,生成适用于流体动力学分析的数值网格.模拟采用 VOF(Volume of Fluid)模型捕捉流体界面,用雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)方程描述湍流流动,由此获得流体流动的统计特性.为了精确模拟粒子在流体中的动态行为,引入离散相模型(DPM),该模型融合了欧拉和拉格朗日方法,实现对粒子在流体中输运和相互作用的模拟.VOF 模型和 RANS 方程的定义为:

$$\partial \alpha_q / \partial t + \nabla \cdot (\alpha_q \mathbf{U}) = 0, \quad (1)$$

式中: α_q 表示在计算单元体积中第 q 相所占的体积比例; t 表示时间; $\mathbf{U}$ 表示速度场; ∇ 表示散度算子.

$$\frac{\partial \mathbf{U}_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{U}}_i \bar{\mathbf{U}}_j) =$$

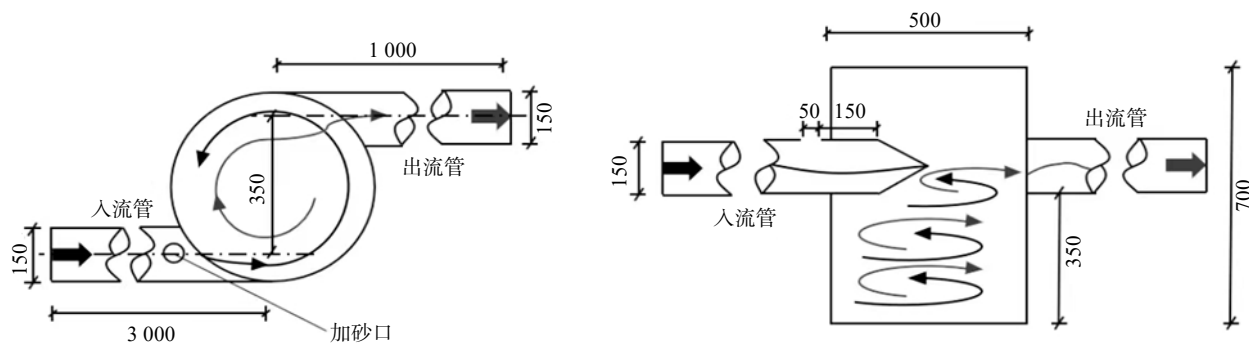


图 1 实验装置示意图(单位: mm)

$$-\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \bar{P} + \nu \nabla^2 \bar{U}_i + \bar{F}_{ij}, \quad (2)$$

式中: U_i 表示时间平均速度分量; $\bar{U}_i$ 和 $\bar{U}_j$ 表示平均速度分量; ρ 表示流体密度; $\bar{P}$ 表示时间平均压强场; ν 表示运动黏性系数; ∇^2 表示拉普拉斯算子; $\bar{F}_{ij}$ 是湍流雷诺应力。



图2 CFD模型示意图

采用压力耦合方程组的半隐式方法(SIMPLE)处理压力和速度场耦合,时间步长设为0.05 s。颗粒物通过 Rosin-Rammler 分布建模,以 $4 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 注入,加砂模拟持续64 s后进行84 s模拟,观察颗粒物在处理器中的运动情况。计算在高性能服务器(64 GB RAM、25 核 Intel Xeon Gold 6230R CPU)上进行,每次模拟时间约1 d。

模型实验和 CFD 模拟各工况参数见表1。

表1 实验参数

工况	颗粒粒径/ μm	$Q/(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	H/m	D/m
0	颗粒物为0	10	0.70	0.50
A	75	3、5、7	0.70	0.50
B	100~200			
C	200~500			
D	400~800			
E	500~1 000			
M1	<75、100~200、200~500	3、5、7	0.84	0.50
N1	400~800、500~1 000		1.05	0.50
M2	<75、100~200、200~500		0.70	0.60
N2	400~800、500~1 000		0.70	0.75

注: Q 为流量, H 为分离器高度, D 为分离器直径。

表1中工况0的流量为 $10 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$,用于比较测量流场与 CFD 模型测量流场,不添加颗粒物。工况 A~E 用于评估现场实验中颗粒物的去除效率。基于实验模型,利用数值模拟对分离器进行改进,以寻求提高颗粒物去除效率的方法。其中工况 M1 和 N1 分别是将分离器的高度增加至原设计的1.2倍和1.5倍,工况 M2 和 N2 分别是将分离器的直径增加至原设计的1.2倍和1.5倍。参考文献[27],初期雨水的悬浮固体含量在 $154 \sim 1\,367 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。为了使实验入口处的颗粒物浓度尽可能接近实际

情况,选择添加总量为250 g的颗粒物,控制质量流率为 $4 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$,持续时间为64 s,对应的颗粒物含量为 $571 \sim 1\,333 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与原型系统中的实际颗粒物含量接近。每次实验分离器中和出口处被捕获的颗粒物质量相加约为250 g。

1.2 CFD模型网格独立性测试和验证

在流量为 $10 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 下进行网格独立性测试(工况0),以评估模拟结果和网格尺寸对结果的影响。采用4个渐进网格级别,节点数分别为358 245、513 389、790 546、1 228 467个,监测点位于分离器底部中心位置上方100 mm,用于测量速度和静压。不同网格级别之间的结果见表2。从表2可知,随着节点数量的增加,两个连续网格级别之间的相对速度差分别为4.02%、0.53%、0.26%,相应的压差分别为2.03%、0.70%、0.34%,随着网格数量的增加,流速和压力之间的差异逐渐减小,进一步增加节点数不会显著改变流速和压力的分布。

表2 网格独立性验证结果

节点数/个	流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	压力/Pa
358 245	0.236 6	3 899
513 389	0.227 1	3 820
790 546	0.228 3	3 846
1 228 467	0.227 7	3 859

基于网格独立性分析,选择节点数为790 546个模型进行进一步仿真计算。用 Richardson 法计算得到一般精度等级约为1.60^[28],表明 CFD 模型具有较高的精度和可信度。

1.3 Péclet 数和去除效率函数的定义

Péclet 数可用于表示不同流量、颗粒物大小、颗粒物密度和水流黏度的颗粒物去除效率,其计算公式为^[29]:

$$P_e = \frac{v_s DH}{Q}, \quad (3)$$

式中: P_e 为 Péclet 数; v_s 为颗粒的沉降速度,可以通过计算得到。

$$v_s = \frac{v}{d} \left(\sqrt{25 + \left(d \left(\frac{g v^2 (\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \right)^{1/3} \right)^2} - 5 \right)^{1.5}, \quad (4)$$

式中: ν 为水的运动黏度; g 为重力加速度; d 为颗粒

粒径; ρ_s 和 ρ_w 分别为颗粒物和水的密度.

由实验数据得出, 不同颗粒物的平均颗粒沉降速度在 $0.0035 \sim 0.088 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间.

2 结果分析

2.1 颗粒物的去除率

观察工况 A~E, 每个工况 5 种粒径级配、3 种流量共 15 组, 实验出口处混合物含砂量随时间变化的结果如图 3 所示.

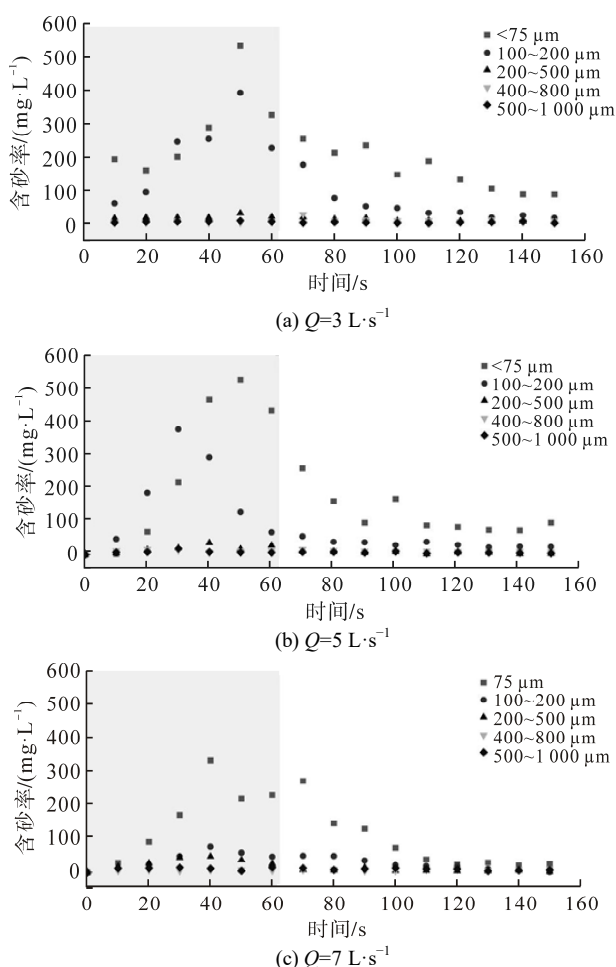


图 3 不同粒径颗粒在不同流量时含砂率的变化

图 3 中灰色阴影区域表示颗粒物添加的时间区间. 实验发现, 高流速条件下颗粒物在出口处的收集量显著增加, 而低流速时小颗粒物更容易沉降和分离. 从含砂量曲线的高峰值可见, 对于较小粒径颗粒物, 其分布范围更窄, 这意味着含砂量变化速率更高. 具体而言, 对粒径小于 $75 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 出口处颗粒物含量在添加初期上升, 在不同流量 ($3, 5, 7 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$) 下分别在 50、50、40 s 时达到峰

值, 峰值出现在颗粒物添加停止前约 10~20 s. 之后, 颗粒物含量在 110~130 s 内降至稳态值 (约 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 对于粒径为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 其变化规律与粒径小于 $75 \mu\text{m}$ 颗粒物相似, 但是颗粒物含量最大值和出现时间有所不同. 粒径大于 $200 \mu\text{m}$ 的颗粒物在不同流量下出口含量稳定, 原因可能是大粒径颗粒物因其质量和惯性大, 不易受水流剪切力和涡流的影响, 更容易被分离器有效收集.

在工况 A~E 条件下, 收集并对沉积在分离器底部的颗粒物称重. 通过分离器中收集的颗粒物质量除以总颗粒物质量得到分离器的去除率, 结果如图 4 所示.

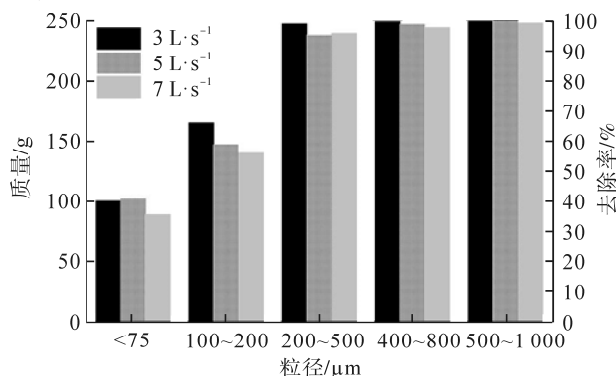


图 4 不同粒径颗粒在不同流量时去除率的变化

实验发现, 在流速为 $3 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 分离器底部不同粒径颗粒物的沉积物质量分别为 99.7、164.5、246.5、248.3、248.5 g, 对应的去除率分别为 39.88%、65.80%、98.60%、99.32%、99.40%. 在流量为 $5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 沉积在分离器底部的颗粒质量分别为 101.5、146.5、237.3、246.2、249.5 g, 对应的去除率为 40.60%、58.60%、94.92%、98.48%、99.80%. 这些数据反映了流速对颗粒去除效率的影响, 以及不同粒径颗粒在分离过程中的行为差异.

2.2 流场分析

分离器的设计和操作依赖于其内部复杂的三维流动特性, 这些特性在很大程度上决定了分离器的效率和性能. 图 5 为流量为 $7 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, CFD 模型模拟分离器内部的流速分布.

从图 5 可见, 分离器流场中的总速度在 $0 \sim 0.50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间. 分离器在不同截面上的切向速度分布曲线揭示了速度分布的空间变化特性. 在距底部大于 0.25 m 高度处, 分离器内部的切向速度

在壁附近达到最高值, 约为 $0.45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 接近入口速度. 在较低高度处, 速度分布显示低速区域逐渐向进水口方向移动. 这种速度分布对于固体颗粒与水分离至关重要, 有助于颗粒物向分离器中心移动, 最终在底部沉积.

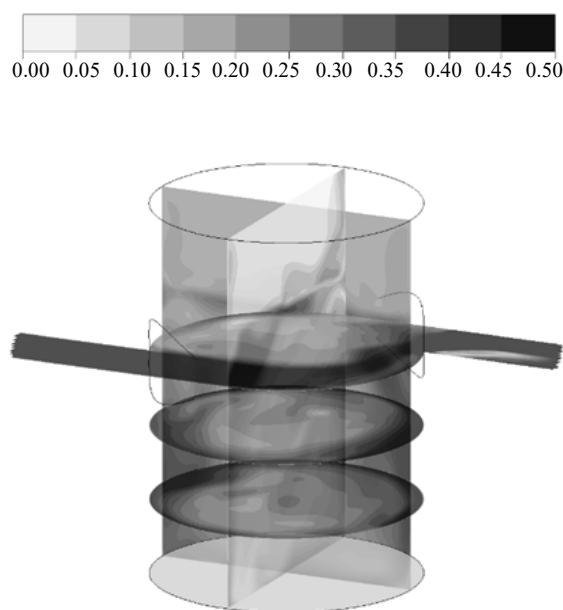


图5 流量为 $7 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 时分离器中流速云图(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

2.3 分离器优化

通过 CFD 模型对分离器尺寸进行优化并分析其工作效率(工况 M 与 N), 结果如图 6 所示. 从图 6 可见, 在颗粒物粒径和流量相同的条件下, 经过尺寸优化的分离器的颗粒物去除率均高于原始尺寸分离器的去除率, 且分离器直径增大比高度增高对去除率提高更为明显, 尤其对粒径小于 $200 \mu\text{m}$ 的颗粒物. 对粒径大于 $200 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 分离器高度和直径增加, 其去除率均能达到 100%. 但是对粒径小于 $200 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 当分离器高度增加 1.2 倍时, 其去除率相较原始尺寸只有略微提升(流量分别为 3、5、 $7 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粒径小于 $200 \mu\text{m}$ 的颗粒物平均去除率提升 3%、3%、7%). 而当分离器直径增加 1.2 倍, 对应流量分别为 3、5、 $7 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粒径小于 $200 \mu\text{m}$ 颗粒物的平均相对去除率分别增加了 17%、13%、15%. 当分离器高度增加 1.5 倍, 对应流量分别为 3、5、 $7 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粒径小于 $200 \mu\text{m}$ 颗粒物的平均去除率分别提升了 6%、6%、9%; 当分离器直径增加 1.5 倍, 对应流量分别为 3、5、 $7 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 粒径小于 $200 \mu\text{m}$ 颗粒物的平均去除

率分别提高了 28%、20%、23%.

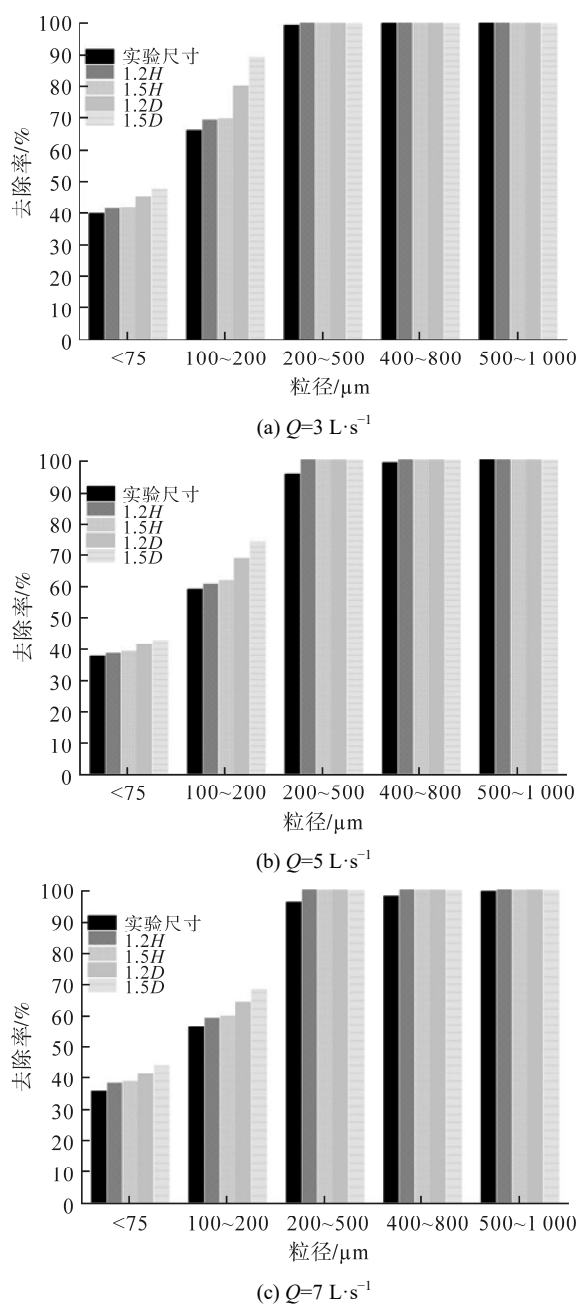


图6 改进尺寸后分离器除砂率比较

2.4 效率比较

通过 Péclet 数绘制颗粒物去除率, 可以得到特定分离器的去除率函数为:

$$\eta = \left(\frac{1}{R^b} + \frac{1}{(aP_e)^b} \right)^{-(1/b)} \quad (5)$$

式中: R 、 a 和 b 为拟合参数, R 表示 Péclet 数接近无穷大时颗粒物的去除率, a 表示 $P_e=0$ 时曲线的初始斜率, b 表示 $P_e=R/a$ 时函数曲率.

表3列出了方程5在本研究各工况及文献[30]中的拟合参数。

表3 不同分离器设置的拟合参数

分离器尺寸	R	a	b
原始	0.99	3.24	1.07
1.2D	1.00	2.78	1.30
1.5D	1.00	2.36	1.40
1.2H	1.00	1.98	1.18
1.5H	1.00	1.57	1.22
文献[30]	0.97	0.58	5.74

从表3可见,原始分离器模型的颗粒物去除率介于改进模型与文献[30]模型之间,参数值分别为 $R=0.99$ 、 $a=3.24$ 和 $b=1.07$ 。相较于改进模型,原始模型具有较大的 a 值和较小的 b 值,即初始斜率较大,但曲率较小,模拟的颗粒物去除率属于中等水平。分离器直径增大1.2倍和1.5倍后, a 值减小至2.0~3.0, b 值增加至1.3~1.4,表明颗粒物去除率随Péclet数的增大快速增加。而分离器高度增高1.2倍和1.5倍后,尽管 R 值与其他模型相差不大,但是 a 值减小至1.5~2.0, b 值增加至1.1~1.3,对应的颗粒物去除率也介于原始模型和分离器直径增大设计之间。Yang等^[30]提出的模型采用了一种典型的雨水井设计,其中入流口与出口为直线对齐,这种设计代表了最传统的雨水井结构,为评估本研究提出的分离器性能提供了一个理想的基准。文献[30]模型的参数为 $R=0.97$, $a=0.58$, $b=5.74$,颗粒物去除率最低,原因可能是初始斜率偏低,尽管曲率较大,但是仍会导致颗粒物去除率下降。由此表明,改进模型的去除效率优于原始模型。

图7为结合实验、模拟数据以及文献[30]的研究结果,展示颗粒物去除率与Péclet数之间的关系。从图7可见,对所有实验数据,Péclet数均在0.1~10范围内,涵盖了整个测试范围,对应颗粒物去除率从35%升至100%。从数据分布趋势看,颗粒物去除率与Péclet数呈现正相关,其去除率的变化速度为先增后减,表明在流速、沉降速度和出口直径非常低或非常高的情况下,颗粒物去除率保持相对稳定。然而,在这些极值之间的转换过程中,颗粒物去除率会经历快速变化。例如当Péclet数在0.1~1之间时,颗粒物去除率迅速上升,且在Péclet

数达到1后,颗粒物去除率在95%~100%范围内缓慢增长。

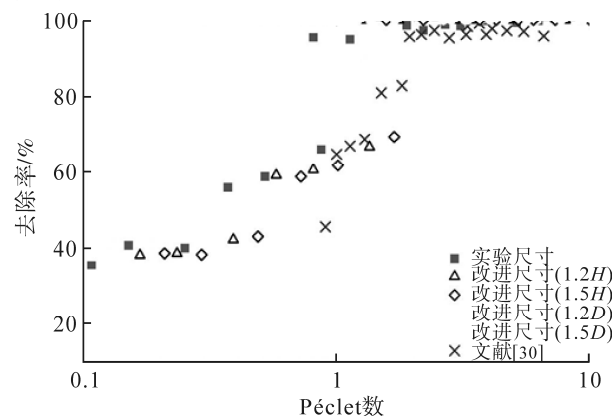


图7 Péclet数与颗粒物去除率的关系

3 讨论

实验结果发现,粒径大于 $200\mu\text{m}$ 的颗粒物由于其质量和惯性较大,在水流剪切力和涡流作用下相对稳定,进入分离器后迅速沉降,从而被有效收集。这一现象在不同流量条件下均得到了验证,表明大颗粒的去除效率并未随流量减少而显著变化。对于粒径小于 $200\mu\text{m}$ 的颗粒物,流量提升导致分离器内水流速度增加,液体剪切力和涡流强度增强,这对粒径较小颗粒物的去除率产生负面影响。粒径较小的颗粒物在强涡流扰动和湍流剪切力作用下,难以沉积,从而导致颗粒物的去除率下降。

CFD模型模拟结果表明,增大分离器的直径可以显著提高颗粒物的去除率,而增加分离器的高度对提高颗粒物去除率的作用较小。颗粒物随水流进入分离器后,在直径较大的分离器中其流动路径增加,颗粒物需要运动更长的距离到达出口,增加了颗粒物沉积的可能性,从而提升了分离效率。从流场分析可知,分离器内部水流通过切向入口结构设计形成旋流,流速增加导致水流的剪切力和涡流强度增加,从而显著影响颗粒物的去除率。粒径较小的颗粒物更易受水流运动的影响,进而随水流流入下游管道,因此沉积效率较低;而粒径较大的颗粒物由于其质量和惯性较大,能够在涡流中保持稳定轨迹,因此更容易在分离器底部沉积,因而去除率较高。

通过Péclet数比较和分析可以发现,本研究原

始分离器尺寸实验中分离器除砂率高于文献[30]模型的除砂率,而改进尺寸分离器的除砂率与模拟结果相符,且高于原始分离器模型的除砂率.这进一步验证了颗粒物去除率与Péclet数之间具有正相关性.

本研究基于模型尺寸分离器的除砂率分析及其优化策略评估,尚未对实际工程中分离器尺寸进行研究.由于水-砂多相流尺度效应,实际工程中不同分离器尺寸的除砂率可能需要在现有基础上进行修正.此外,如何在常规检查井中改造产生旋流,并评估其颗粒物分离效率,也是未来研究的重要方向^[31].

4 结论

(1)随着流量的增加,分离器底部沉积的颗粒物质质量呈现下降趋势,且粒径较大颗粒物更容易被分离器去除,而粒径较小颗粒物去除率相对较低.

(2)颗粒物的去除率与流量和分离器尺寸密切相关.与增加分离器高度相比,增大分离器直径对颗粒物去除率的影响更为显著.

(3)Péclet数是预测颗粒物去除率的重要参数,应用该参数对新设计的不同尺寸分离器进行预评估高效且准确.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2022 年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. [2024-02-11]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/index.html>.
- [2] 周传庭,王梦玉,幸韵欣,等. 城市初期雨水污染及处理措施的研究进展[J]. 净水技术, 2022, 41(7):17-26.
- [3] 刘燕,尹澄清,车伍,等. 合流制溢流污水污染控制技术的研究进展[J]. 给水排水, 2009, 35(增刊 1):282-287.
- [4] 李继轩. 一种绿地雨水收集处理装置的研发[D]. 扬州:扬州大学, 2020.
- [5] SAZAKLI E, ALEXOPOULOS A, LEOTSINIDIS M. Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece[J]. Water Research, 2007, 41(9):2039-2047.
- [6] HELMREICH B, HORN H. Opportunities in rainwater harvesting[J]. Desalination, 2009, 248(1/2/3):118-124.
- [7] ANGRILL S, PETIT-BOIX A, MORALES-PINZÓN T, et al. Urban rainwater runoff quantity and quality: a potential endogenous resource in cities?[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 189:14-21.
- [8] BAPTISTA I, RITSEMA C, QUERIDO A, et al. Improving rainwater-use in Cabo Verde drylands by reducing runoff and erosion[J]. Geoderma, 2015, 237/238:283-297.
- [9] GB 50014—2021. 室外排水设计标准[S].
- [10] US EPA. Compendium of ms4 permitting approaches, part 1: six minimum control measures[EB/OL]. [2024-02-11]. <https://mostcenter.umd.edu/compendium-ms4-permitting-approaches-part-1-six-minimum-control-measures>.
- [11] 李枫,赵嵘广,邢雷,等. 水力旋流器内固相颗粒运动行为分析[J]. 化学工程, 2023, 51(7):55-60.
- [12] 汪家权,蒋文韬,王淦. 新型高效旋流沉砂池除砂效果研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(15):98-100.
- [13] 王晓玲,周莎莎,郎建,等. 旋流沉砂池除砂废水流场与结构参数优化模拟[J]. 工程力学, 2012, 29(6):300-307.
- [14] 徐冉云. 雨水旋流处理器的改进优化[J]. 中国给水排水, 2016, 32(24):44-48.
- [15] 马倩倩,蔡欣,丁怡斐. 旋流分离器在合流制溢流污染控制中的应用进展[J]. 绿色科技, 2016(2):68-70.
- [16] FAN C Y, FIELD R, LAI F H. Sewer-sediment control: overview of an environmental protection agency wet-weather flow research program[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(4):253-259.
- [17] MAMOON A A, JAHAN S, HE X L, et al. First flush analysis using a rainfall simulator on a micro catchment in an arid climate[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 693:133552.
- [18] 邱峰,汪家权,王淦. 新型旋流沉砂池除砂和有机物分离效率的研究[J]. 工业用水与废水, 2008, 39(3):84-87.
- [19] 邵林广. 圆形涡流式沉砂池除砂效率的探讨[J]. 给水排水, 1998, 24(12):38-40.
- [20] 高郑娟,孙朝霞,贾海峰. 旋流分离技术在雨水径流和合流制溢流污染控制中的应用进展[J]. 建设科技, 2019(3):96-100.
- [21] 周赛军,任伯帆,邓仁健. 蓄水绿化屋面对雨水径流中污染物的去除效果[J]. 中国给水排水, 2010, 26(5):38-41.
- [22] RODI W. Turbulence modeling and simulation in hydraulics: a historical review[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(5):03117001.
- [23] SANSALONE J J, PATHAPATI S S. Particle dynamics in a hydrodynamic separator subject to transient rainfall-runoff[J]. Water Resources Research, 2009, 45:W09408.
- [24] GANJARE A V, PATWARDHAN A W. CFD study of effect of particles on flow patterns and separation in

- settling tank[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 149(1):04022032.
- [25] Andoh B. Computer simulation saves in design of hydrodynamic vortex separator[J]. *Industrial Water World*, 2005, 6(3):18-19.
- [26] PATHAPATI S S, SANSALONE J J. CFD modeling of a storm-water hydrodynamic separator[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, 135(4):191-202.
- [27] GB 3838—2002. 地表水环境质量标准[S].
- [28] FERZIGER J H, PERIĆ M, STREET R L. *Computational methods for fluid dynamics*[M]. 4th ed. New York: Springer Publishing Company, 2019.
- [29] WILSON M A, MOHSENI O, GULLIVER J S, et al. Assessment of hydrodynamic separators for storm-water treatment[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 135(5):383-392.
- [30] YANG Y Z, HUANG B, ZHU D Z. Experimental study of sediment washout from stormwater sumps[J]. *Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2022, 86(9): 2454-2464.
- [31] VIALLE C, BUSSET G, TANFIN L, et al. Environmental analysis of a domestic rainwater harvesting system: a case study in France[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 102:178-184.

Performance evaluation of swirling hydrodynamic separators using physical and numerical models

WENG Zhixin¹, QIAN Yu¹, GAO Doudou², YANG Lifang², YUAN Qianwen²

(1.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Municipal Engineering Construction Group Co., Ltd., Ningbo 315012, China)

Abstract: In the field of municipal environmental engineering, hydrodynamic separators are primarily used to control the concentration of Total Suspended Solids (TSS) in stormwater discharge to mitigate its potential negative impact on natural water bodies. This paper studies a specially designed hydrodynamic separator, whose core feature is the tangential connection of the inlet and outlet to generate a vortex, which can enhance the sedimentation and separation of particles in stormwater. Both experimental models and numerical simulations are used to analyze the separator's performance comprehensively, by exploring its removal efficiency for particles of different sizes under various flow conditions, as well as the impact of the separator's size on the particle removal rate. The results show that, when the flow rate is above $5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, the removal efficiency decreases significantly for particles smaller than $200 \mu\text{m}$; while for particles larger than $200 \mu\text{m}$, it would have a faster sedimentation rate and relatively higher removal rate due to weaker water flow effects. Additionally, an increase in flow rate shall lead to an increase in flow velocity thus a reduction in water retention time, and consequently a decrease in particle removal rate. The study also found that, when the diameter of the hydrodynamic separator is increased to 1.5 times that of the original design, the particle removal rate shall be increased by up to 28%. During study, the Péclet number assessment method is introduced as a key indicator for measuring the removal efficiency of particles. The research results can provide a reference for the design and optimization of hydrodynamic separators, thus help improve their performance in practical applications.

Key words: computational fluid dynamics; swirling hydrodynamic separators; particle removal efficiency; physical model; numerical simulation

(责任编辑 史小丽)