

## 水源与饮用水保障

何盼盼, 聂小保, 徐超. 进口流量对水力旋流器分离性能及内部流场和浓度场的影响[J]. 净水技术, 2026, 45(5): 32-39.

He P P, Nie X B, Xu C. Influence of inflow rates on separation performance, internal flow field and concentration field of hydrocyclones[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(5): 32-39.

## 进口流量对水力旋流器分离性能及内部流场和浓度场的影响

何盼盼<sup>1,2</sup>, 聂小保<sup>2,\*</sup>, 徐超<sup>2,3</sup>

(1. 长沙市规划设计院有限责任公司, 湖南长沙 410000; 2. 长沙理工大学水利与海洋工程学院, 湖南长沙 410000; 3. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北武汉 430000)

**摘要** 【目的】 随着社会的快速发展和人口增长, 水厂所需处理的生产废水量也在急剧加大, 同时现有的生产废水处理技术与方法都存在一定问题。为此, 迫切需要开展水厂生产废水的水力旋流分离技术研究。【方法】 通过中试试验, 本文采用粒子图像测速(PIV)系统, 系统地探讨了进口流量对水力旋流器分离性能及内部流场和浓度场的影响。【结果】 随进口流量增大, 底流浓缩倍数呈先升高后下降趋势, 且在应用本试验装置时, 进口流量为 2.3 m<sup>3</sup>/h, 底流浓缩倍数达到最大值 2.57; 截面 I、II 上最大切向速度, 在应用本试验装置时, 进口流量为 2.6 m<sup>3</sup>/h, 分别达到最大值 2.589、1.337 m/s。【结论】 进口流量增加不利于细小颗粒的分离, 而对较大颗粒而言, 适当增加进口流量有利于其分离; 流体在水力旋流器内的切向速度随进口流量增大而增大, 而径向速度随进口流量变化规律不够明显, 进口流量对轴向速度与颗粒浓度而言, 随进口流量增加, 在轴心附近, 轴向速度有增加趋势, 颗粒浓度减小。

**关键词** 水厂生产废水 进口流量 水力旋流器 分离性能 内部流场 浓度场

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)05-0032-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.05.005

## Influence of Inflow Rates on Separation Performance, Internal Flow Field and Concentration Field of Hydrocyclones

He Panpan<sup>1,2</sup>, Nie Xiaobao<sup>2,\*</sup>, Xu Chao<sup>2,3</sup>

(1. Changsha Planning & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410000, China;

2. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410000, China;

3. Wuhan Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

**Abstract** [Objective] With the rapid development of society and population growth, the volume of process wastewater requiring treatment in water treatment plants (WTPs) has increased sharply. Meanwhile, existing treatment technologies and methods for this process wastewater present certain challenges. Therefore, there is an urgent need to conduct research on hydrocyclone separation technology for treating process wastewater from WTPs. [Methods] Through pilot-scale experiments, this paper utilized a particle image velocimetry (PIV) system to systematically investigate the influence of inflow rate on the separation performance, internal flow field, and concentration field of the hydrocyclone. [Results] As the inflow rate increased, the underflow concentration ratio initially rose and then declined. With the experimental setup used in this paper, the underflow concentration ratio reached a maximum value of 2.57 at an inflow rate of 2.3 m<sup>3</sup>/h. Meanwhile, the maximum tangential velocities at section I and section II attained peak values of 2.589 m/s and 1.337 m/s, respectively, when the inflow rate was 2.6 m<sup>3</sup>/h. [Conclusion] An increase in inflow rate adversely

[收稿日期] 2025-03-12

[基金项目] 国家自然科学基金(52570026); 湖南省重点研发计划(2015SK20033)

[作者简介] 何盼盼(1992—), 男, 工程师, 主要从事市政给排水工程设计研究等工作, E-mail: 798430177@qq.com。

[通信作者] 聂小保(1979—), 男, 教授, 主要研究方向为饮用水安全保障, E-mail: niexbslg@163.com。

affects the separation of fine particles, whereas appropriately increasing the inflow rate enhances the separation of larger particles. The tangential velocity of the fluid within the hydrocyclone increases with the inflow rate, while the radial velocity shows no clear correlation with changes in the inflow rate. Regarding axial velocity and particle concentration, as the inflow rate increases, the axial velocity tends to rise near the central axis, whereas the particle concentration decreases.

**Keywords** WTP process wastewater inflow rate hydrocyclone separation performance internal flow field concentration field

水厂生产废水(沉淀池排泥水和滤池反冲洗水,简称生产废水)中富含悬浮杂质,如泥砂、藻类、水生物及其虫卵等,为确保回用安全,往往需采用混沉、浓缩等工艺尽量去除上述悬浮杂质<sup>[1]</sup>,回用处理工艺较长、占地面积大、运行成本高。有水厂回用的实践<sup>[2]</sup>表明,生产废水中脱稳颗粒较多,直接回用可为原水提供更多凝聚核心,提高颗粒碰撞概率,改善混凝效果,降低混凝剂用量,这对于水厂节能降耗具有积极意义。为此,寻求具有短流程、高负荷特征,同时又能保留一定量脱稳颗粒的生产废水回用处理工艺,对水厂水质安全保障和节能降耗意义重大。

水力旋流分离是快速稳定的固液分离技术之一,具有结构简单、无运动部件、处理负荷高、固液分离效果稳定等优点<sup>[3]</sup>,广泛应用于石化行业的油污分离<sup>[4]</sup>、采矿行业的分级选矿作业<sup>[5]</sup>,以及环保领域污水处理、活性污泥泥沙分离<sup>[6-7]</sup>等。经水力旋流分离后,物料分为底流液和溢流液 2 个部分,底流液固相浓度大幅增加,溢流液固相浓度则明显降低。若将该技术用于生产废水处理,则底流过程相当于快速浓缩过程,同时溢流液中保留了一定的悬浮物量。基于此,水力旋流分离有望成为生产废水的理想处理技术:生产废水经水力旋流分离后,高浓度底流液进行脱水,含有一定量悬浮物的溢流液则与原水混合后直接回用。

进口流量是影响水力旋流器分离效果的主要运行参数之一<sup>[8-9]</sup>。进口流量变化会改变旋流器内速度场和浓度场,进而影响水力旋流分离性能。研究<sup>[10]</sup>表明,进口流量增加引起流场切向速率增加,更多颗粒将越过零轴向速率包络面(LZVV)向器壁运动,进入外旋流并从底流口排出;但同时旋流器内轴向速率也会增加,可能导致已经分离且沉积在底流口附近的颗粒被卷起向上从溢流口排出。因此,准确掌握水力旋流器内速度场和浓度场分布,是研究进口流量对分离性能影响规律的关键。由于水力旋流器密封带压运行,给速度场和浓度场直接测定带来困难,现有研究主要以数值模拟为主,其结果用于指导生产实际可能存在一定偏差。

本文尝试对生产废水采用水力旋流分离,研究进口流量对分离性能的影响;采用粒子图像测速(PIV)法和穿刺取样法,分别测定水力旋流器速度场和浓度场,探讨进口流量对分离性能影响规律,旨在为生产废水的水力旋流分离处理提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

生产废水取自长沙市某水厂,为沉淀池排泥水和滤池反冲洗水等体积混合而成,悬浮颗粒物质量浓度为 1 000~1 200 mg/L,颗粒物粒径分布的激光粒度仪分析结果如图 1 所示,颗粒物累积分布达到

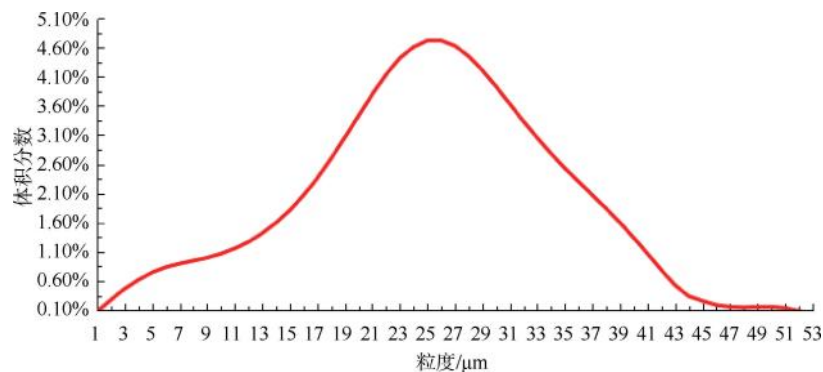


图 1 水厂生产废水颗粒粒径分布

Fig. 1 Particle Size Distribution of WTP Process Wastewater

90%时对应的粒径( $d_{90}$ )和颗粒物累积分布达到50%时对应的粒径( $d_{50}$ )分别为55  $\mu\text{m}$ 和11.64  $\mu\text{m}$ 。

### 1.2 试验装置

水力旋流分离中试系统图和水力旋流器结构示意图如图2所示。本次中试系统规模为40~65  $\text{m}^3/\text{d}$ 。生产废水投放于进料桶,经泥浆泵提升后一部分由回流阀门回流至进料桶,以保持生产废水混合均匀;另一部分经进口阀门和进料管进入水力旋流器内进行旋流分离。水力旋流器由透明有机玻璃制成。进料管采用单入口切向型圆

管,溢流盖与圆柱段、圆柱段与锥段,以及锥段与底流管间均采用法兰连接。圆柱段和圆锥段设置取样截面I和截面II,分别位于圆柱段和圆锥段1/4处(由上至下)。取样截面设置直径为10 mm取样口,采用直径为12 mm橡胶塞封堵。水力旋流器主要结构参数包括:进料管直径( $D_i$ )=18 mm、溢流管插入深度( $L$ )=50 mm、圆柱段长度( $H$ )=200 mm、圆柱段直径( $D_1$ )=100 mm、圆锥段下端直径( $D_2$ )=30 mm、溢流管直径( $D_o$ )=30 mm、底流管直径( $D_u$ )=4 mm、锥角( $\theta$ )=10°。

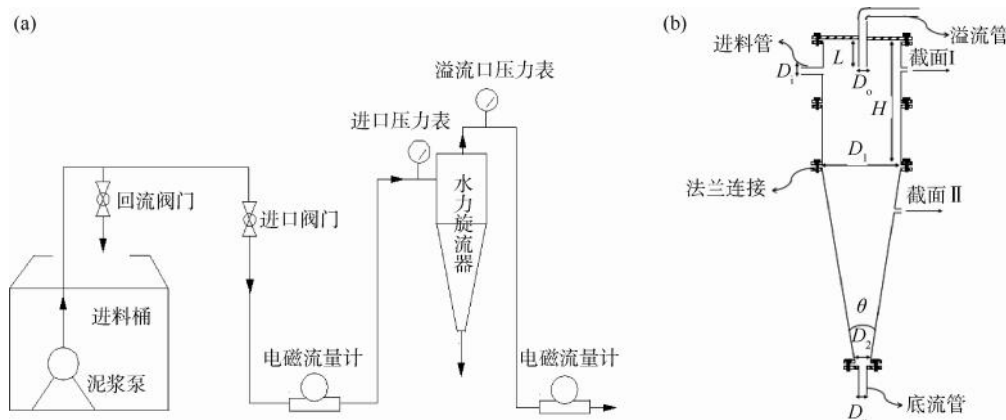


图2 (a)中试试验系统;(b)水力旋流器结构示意图

Fig. 2 Diagrams of (a) Pilot-Scale Experiment System; (b) Hydrocyclone Structure

PIV试验光路布置如图3所示。测定系统由电荷耦合器件(CCD)高速摄像机、激光发射装置、同步控制系统和计算机组成。其中激光发射器装置采用内循环冷却双脉冲激光器,功率为5 W、波长为532 nm、单脉冲能量为200 mJ;CCD高速摄像机为双曝光Andor相机,分辨率为2560 px×2160 px。为避免水力旋流器模型外表面对激光散射及折射的影响,在模型外设置光学补偿盒,采用透明有机玻璃

制成,尺寸为50 cm×50 cm×100 cm,并充满与水力旋流器内相同的液体,进行光路补偿减小试验误差。进料液为加入示踪粒子(密度为1.04  $\text{kg}/\text{m}^3$ 聚苯乙烯)的清水。

### 1.3 试验方法

水力旋流中试系统运行:关闭进口阀门并全开回流阀门,启动泥浆泵对生产废水强制回流,约5 min后取样50 mL测定颗粒物质量浓度;调节进

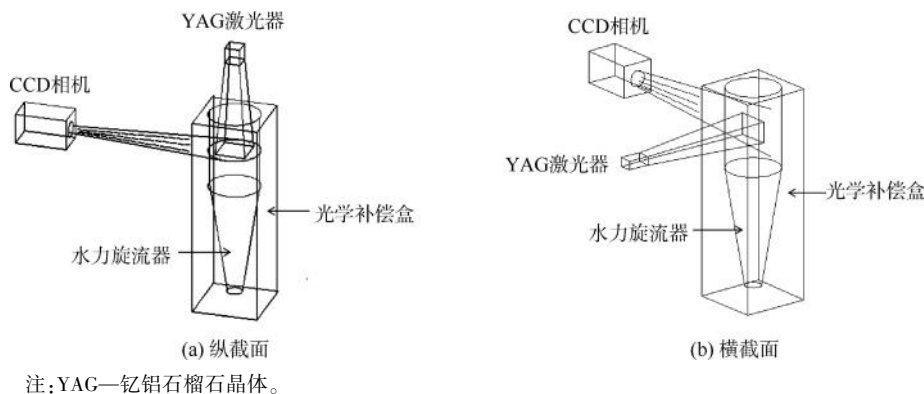


图3 PIV试验光路布置

Fig. 3 Layout of PIV Experimental Light Path

口阀门和回流阀门,控制水力旋流器进口流量分别为 1.7、2.0、2.3、2.6 m<sup>3</sup>/h,装置稳定运行 5 min,记录进口压力表、溢流口压力表和电磁流量计读数;在溢流液出口和底流液出口取样,测定颗粒物质量浓度和粒径体积分布,其中粒径体积分布采用 MS-2000 马尔文激光粒度仪。

速度场分布测定:采用 PIV 系统测定截面 I 和截面 II 的切向、轴向及径向速率,利用光学自相关法或互相关法处理 CCD 记录的图像,获得流场速度分布。图片采集后,利用 PIV Process 处理系统对数据进行计算,导出所获流场数据,导入至 Tecplot2010 软件,截取截面 I 和截面 II 上任一直径上的数据。

浓度场的测定:在截面 I、II 分别选择距轴心 0、10、20、30 mm 共 4 个采样点,当系统稳定运行 5 min 后,利用医用穿刺针刺破橡胶塞,到达水力旋流器内取样点位置取样,水样进行颗粒物质量浓度测定。

#### 1.4 分离性能指标及计算方法

浓缩倍数包括底流浓缩倍数  $K_u$  和溢流浓缩倍数  $K_o$ ,其计算如式(1)~式(2)。

$$K_u = \frac{C_u}{C_i} \quad (1)$$

$$K_o = \frac{C_o}{C_i} \quad (2)$$

其中: $C_u$ ——底流液颗粒物质量浓度,g/L;

$C_o$ ——溢流液颗粒物质量浓度,g/L;

$C_i$ ——进料液颗粒物质量浓度,g/L。

分流比  $F$  计算如式(3)。

$$F = \frac{Q_u}{Q_i} \times 100\% \quad (3)$$

其中: $Q_u$ ——底流口流量,m<sup>3</sup>/h;

$Q_i$ ——进口流量,m<sup>3</sup>/h。

溢流压力降  $\Delta P_o$  计算如式(4)。

$$\Delta P_o = P_i - P_o \quad (4)$$

其中: $P_i$ ——进口压力,MPa;

$P_o$ ——溢流口压力,MPa。

分级效率  $E_j$  计算如式(5)。

$$E_j = \frac{M_{oj}}{M_{ij}} \times 100\% = \frac{K_o \times F \times V_{oj}}{V_{ij}} \times 100\% \quad (5)$$

其中: $V_{oj}$ —— $j$  粒径颗粒在溢流液中的体积分数;

$V_{ij}$ —— $j$  粒径颗粒在进料液中的体积分数;

$M_{oj}$ —— $j$  粒径颗粒在溢流液中的质量,mg;

$M_{ij}$ —— $j$  粒径颗粒在进料液中的质量,mg。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同进口流量下水力旋流器内部流场分布

不同进口流量条件下,水力旋流器截面 I 和截面 II 的切向、轴向和径向速率分布如图 4 所示。

切向速率自器壁向轴心先增大后减小,并在轴心处趋向于 0[图 4(a)~图 4(b)],符合流体的组合涡运动模式<sup>[11]</sup>,说明生产废水在水力旋流器内的运动为半自由涡与强制涡运动组合,两者界面大致在截面 I 半径( $r$ )=25 mm 处。随着进口流量的增加,圆柱段截面 I 切向速率明显增大,但圆锥段截面 II 切向速率变化不大,只有当进口流量增加至 2.6 m<sup>3</sup>/h 时才有明显增大。由于圆柱段切向速率增加,颗粒的分离动力即离心力也随之增加,更多的颗粒向器壁运移,再通过外旋流最终由底流口排出<sup>[12]</sup>,这有利于底流浓缩倍数  $K_u$  的提高。对比图 4(a)和图 4(b),圆锥段切向速率要小于圆柱段,这是流体由圆柱段向圆锥段运动过程能量消耗引起的。由于圆柱段切向速率较大,故生产废水固液分离过程主要在圆柱段发生。

轴向速率决定了水力旋流器的分流比,同时对颗粒物在溢流和底流中的分配有重要影响<sup>[13]</sup>。图 4(c)和图 4(d)中  $y=0$  线与轴向速率曲线交点即为 LZVV 与该截面交点。可以看出该交点位置不随进口流量和截面位置的变化而变化,LZVV 大致为  $-15 \text{ mm} < r < 15 \text{ mm}$ 。在 LZVV 以内,轴向速率随进口流量的增加而增加,与相关学者<sup>[14]</sup>的研究结论一致。但轴向速率存在一定差异,如数模结果表明当进口流量为 2.7 m<sup>3</sup>/h 时,最大轴向速率可达 8.0 m/s<sup>[12]</sup>;多普勒激光测速结果发现<sup>[13]</sup>,当进口流量为 2.0 m<sup>3</sup>/h 时,最大轴向速率可达 0.5 m/s。本文当进口流量为 2.0 m<sup>3</sup>/h 和 2.6 m<sup>3</sup>/h 时,最大轴向速率分别为 0.42 m/s 和 0.69 m/s。这种差异可能与各自采用的水力旋流器结构参数不一致

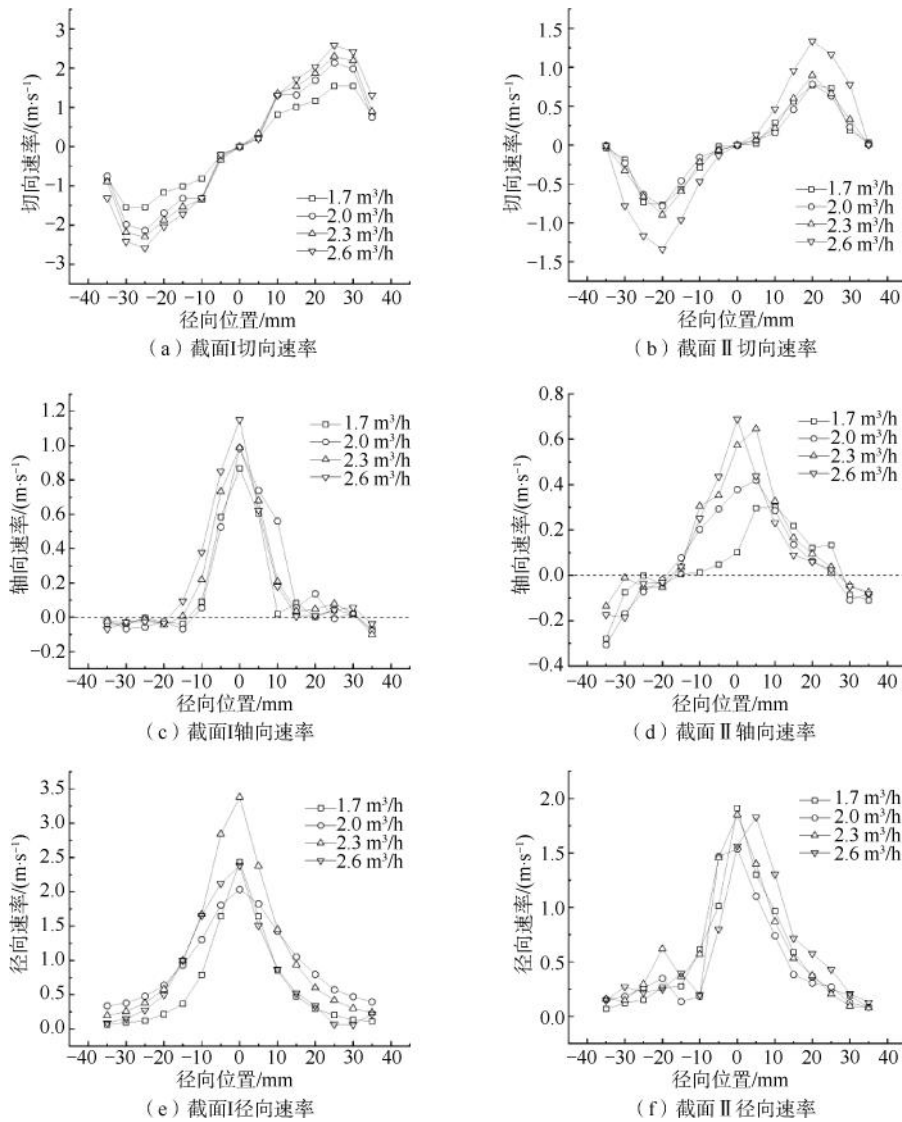


图4 进口流量对水力旋流器内部流场分布的影响

Fig. 4 Effect of Inflow Rates on Internal Flow Field Distribution in Hydrocyclone

有关。

径向速率会影响颗粒物在流场中运动趋势,特别是对于跟随性较好的小粒径颗粒物影响显著,是决定水力旋流器分离效果的重要因素。本文径向速率以指向轴心方向为正,由图4(e)和图4(f)可知,截面I和截面II径向速率均指向轴心方向,且分布呈对称倒V形。在 $r > 30$  mm时径向速率较小,稳定性较高,有利于小粒径颗粒的固液分离;越往轴心方向径向速率越大,跟随性较好的小粒径颗粒容易跨过LZVV出现在溢流液中。径向速率随着进口流量的增加大致呈增加趋势,因此,较高的进口流量容易导致小颗粒进入溢流液,降低其分离效率。

## 2.2 进口流量对水力旋流器分离性能的影响

图5给出了进口流量对 $K_u$ 、 $K_o$ 、 $F$ 、 $\Delta P$ 和 $E_j$ 的影响。随着进口流量的增加, $K_u$ 呈先增大后减小的趋势[图5(a)],对应 $K_o$ 呈先减小后增大趋势。最大 $K_u$ 和最小 $K_o$ 均出现在 $2.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,为 $3.6$ 和 $0.63$ 。进口流量的增加引起 $\Delta P$ 的持续提升和 $F$ 的持续降低[图5(b)]。综合图4(c)、图4(d)和图5(b)可知,当进口流量增加时,由于轴向速率的提高,相应水力旋流器 $F$ 增加、 $\Delta P$ 降低,这与相关研究者<sup>[14]</sup>的结论相一致。

总体而言,随着粒径的增大,生产废水中悬浮颗粒 $E_j$ 逐渐降低[图5(c)],相应分离效率将逐渐升高。粒径超过 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒,其 $E_j$ 随着进口流量的

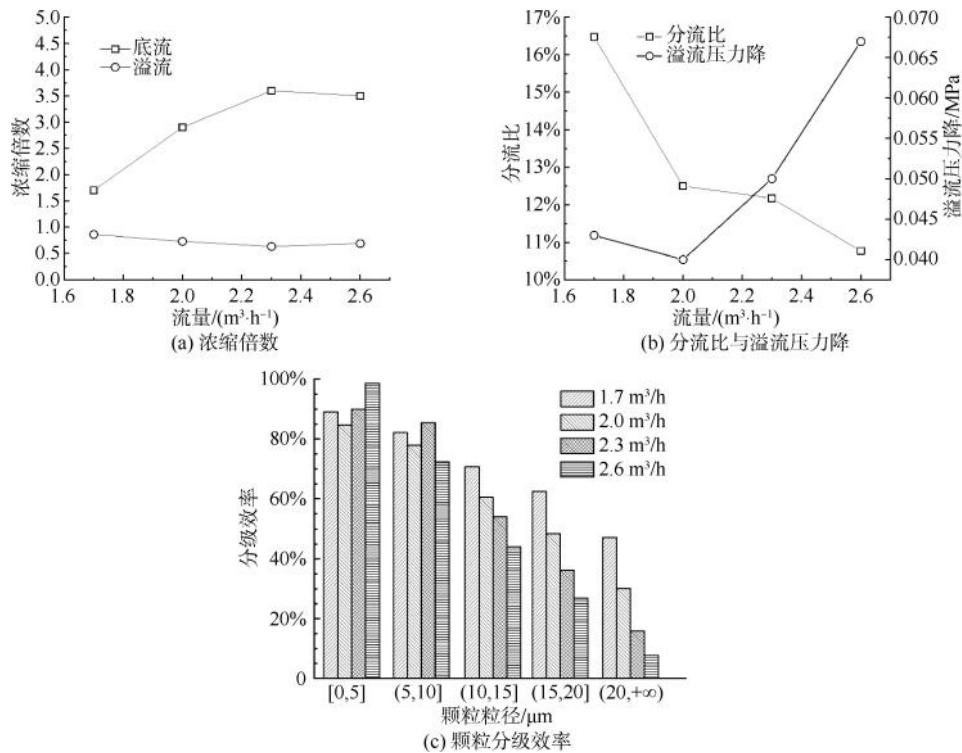


图5 进口流量对水力旋流器分离性能的影响

Fig. 5 Effect of Inflow Rates on Separation Performance of Hydrocyclone

增加而降低,对应分离效率随进口流量的增加而增加。当颗粒粒径为 $0\sim 5\ \mu\text{m}$ ,  $E_j$  随进口流量的增加首先降低,之后持续上升,进口流量为 $2.3\ \text{m}^3/\text{h}$ 时,  $E_j$  高达 $98.7\%$ ,对应分离效率仅为 $1.3\%$ 。粒径为 $6\sim 10\ \mu\text{m}$ 时的颗粒分级效率,随进口流量的变化规律不明显。上述结果与进口流量增加引起的流场变化有关。进口流量的增加将提高水力旋流器内切向速率[图4(a)、图4(b)],这会增大颗粒的分离动力,有助于分离效率和底流浓缩倍数的提升;但同时也会提高内部径向和轴向速率,降低颗粒分离效率。分离效率究竟是以增加还是降低为主,与颗粒粒径相关。由图4(e)和图4(f)可知,径向流均指向轴心,因此当颗粒粒径较大时( $\geq 10\ \mu\text{m}$ ),对径向流和轴向流抵御能力更强,但较易在切向流作用下脱离平衡运动轨道迁移至器壁,分离效率以增加为主;颗粒粒径较小时( $\leq 5\ \mu\text{m}$ ),由于对径向流和轴向流跟随性较高,轴心方向的颗粒更易迁移进入溢流液,分离效率以降低为主。

上述表明,水力旋流器对生产废水的分离效率除受进口流量影响外,还与其自身颗粒粒径分布相关。因此,调整进料颗粒粒径分布,特别是降低

$5\ \mu\text{m}$ 以下颗粒含量,有助于提高水力旋流器的分离效率。

### 2.3 进口流量对水力旋流器浓度场的影响

由图6可知,无论是圆柱段(截面I)还是圆锥段(截面II),颗粒物质质量浓度径向变化总体趋势均为由轴心向器壁逐渐增加,这是由于颗粒在离心力驱动作用下脱离平衡运动轨道向器壁迁移所致。但颗粒物质质量浓度在径向分布也有一定波动,如 $r=10\ \text{mm}$ 处浓度要高于 $r=20\ \text{mm}$ 处。类似的径向方向颗粒物质质量浓度波动,在数值模拟研究中也报道过,相关研究者<sup>[15]</sup>认为,这可能是由水力旋流器内的局部二次涡以及溢流顶板下的短路流引起的。

总体上看,在 $-30\ \text{mm} < r < 30\ \text{mm}$ 时,颗粒物质质量浓度随着进口流量的增加而降低,在图6(b)中尤为明显。颗粒物质质量浓度随进口流量的变化规律,为图5(a)中底流液和溢流液浓缩倍数随进口流量的变化提供了直接证据。一方面,由于轴心附近区域流体的颗粒物质质量浓度随进口流量增加而降低,这部分流体将形成内旋流以溢流液形式流出水力旋流器,因此溢流液浓缩倍数总体呈减小趋势;另一方面, $-30\ \text{mm} < r < 30\ \text{mm}$ 时流体的颗粒物质质量浓度随

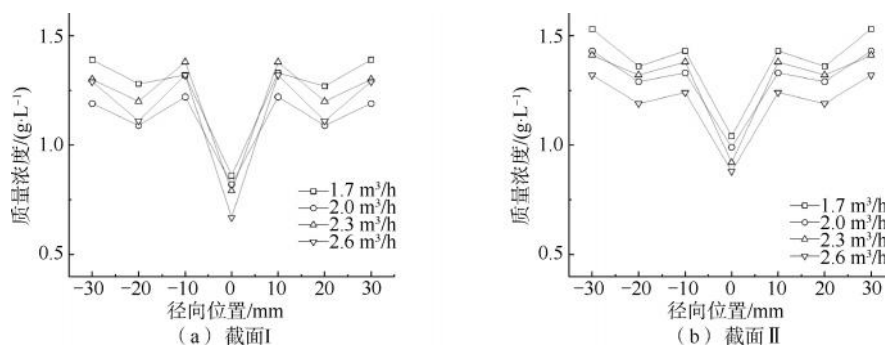


图6 进口流量对颗粒物质量浓度分布的影响

Fig. 6 Effect of Inflow Rates on Mass Concentration Distribution of Particles

进口流量增加而降低,也即意味着器壁附近( $r < -30$  mm 或  $r > 30$  mm)流体颗粒物质量浓度将随着进口流量增加而增加,这部分流体将形成外旋流以底流液形式排出水力旋流器,因此底流液浓缩倍数总体呈增大趋势。

此外,在轴心处截面 I 和截面 II 的颗粒物质量浓度分别为 670~860 mg/L 和 880~1 040 mg/L,说明随着深度的增加轴心处颗粒物质量浓度有增大的趋势。综合图 6、图 4(c) 和图 4(d),认为主要是由轴向速率减小所致。因为轴向速率减小,颗粒物在底流液和溢流液中的分配发生变化,更多的颗粒物将进入底流液,这有利于水力旋流器固液分离效果的稳定发挥。

### 3 结论

(1)沿器壁向轴心方向,流体在水力旋流器内的切向速度分布满足组合涡运动。沿器壁向 LZVV 方向,轴向速度有减小趋势,沿 LZVV 向轴心位置方向,轴向速度有增加趋势,且在轴心处轴向速度达到最大。以轴心位置为轴,径向速度分布具有明显对称性,且呈现倒 V 形。对颗粒浓度分布而言,器壁两侧要大于轴心附近。此外,在水力旋流器轴向上,切向、轴向、径向速度及颗粒浓度分布有梯度存在。

(2)进口流量对水力旋流器分离性能有重要影响。随进口流量增大,溢流浓缩倍数逐渐减小,底流浓缩倍数呈先升高后下降趋势,溢流压力降增加,分流比明显减小。进口流量增加不利于细小颗粒的分离,而对较大颗粒而言,适当增加进口流量有利于其分离。若以底流浓缩倍数为设计,2.3 m<sup>3</sup>/h 为最佳进口流量,此时底流浓缩倍数为 2.57。

(3)进口流量对水力旋流器内部流场和浓度场研究表明:随进口流量增加,切向速度增大,径向速

度无明显变化,其中截面 I、II 上最大切向速度,在应用本试验装置进口流量为 2.6 m<sup>3</sup>/h 时,分别达到最大值 2.589、1.337 m/s;进口流量对轴向速度与颗粒浓度而言,随进口流量增加,在轴心附近,轴向速度增加,颗粒浓度减小。

### 参考文献

- [1] Xu H, Ding M M, Shen K L, et al. Removal of aluminum from drinking water treatment sludge using vacuum electrokinetic technology [J]. *Chemosphere*, 2017, 173: 404–410. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.01.057.
- [2] 奚志成. 给水厂生产废水回流强化混凝试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.  
Xi Z C. Experimental study on reflux enhanced coagulation of production wastewater from water supply plants[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.
- [3] Mansour-Geoffrion M, Dold P L, Lamarre D, et al. Characterizing hydrocyclone performance for grit removal from wastewater treatment activated sludge plants [J]. *Minerals Engineering*, 2010, 23(4): 359–364.
- [4] 曾涛, 刘帅, 柳忠彬, 等. 水力旋流器在油田采出液应用的研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(24): 10190–10198.  
Zeng T, Liu S, Liu Z B, et al. Research progress of hydrocyclone application in oilfield produced fluid[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(24): 10190–10198.
- [5] 刘聪, 任建辉, 辉景欣, 等. 水力旋流器在中关铁矿尾砂充填中的应用[J]. *河北冶金*, 2024(5): 62–65.  
Liu C, Ren J H, Hui J X, et al. Application of hydrocyclone in tailings filling of Zhongguan iron mine[J]. *Hebei Metallurgy*, 2024(5): 62–65.
- [6] Bayo J, López-Castellanos J, Martínez-García R, et al. Hydrocyclone as a cleaning device for anaerobic sludge digesters in a wastewater treatment plant [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 550–557. DOI: 10.1016/j.jclepro.

2014. 10. 064.
- [ 7 ] Kim J O, Choi J, Lee S, et al. Evaluation of hydrocyclone and post-treatment technologies for remediation of contaminated dredged sediments[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166: 94–102. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.10.009.
- [ 8 ] 谢苗, 朱响, 张保国. 水力分级旋流器工艺参数匹配优化研究[J]. *机械科学与技术*, 2024, 43(6): 1006–1015.  
Xie M, Zhu Y, Zhang B G. Study on process parameter matching optimization of hydrocyclone [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2024, 43(6): 1006–1015.
- [ 9 ] 张保国. 水力分级旋流器分离性能及参数匹配研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.  
Zhang B G. Hydroclassification cyclone separation performance and parameter matching study [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [ 10 ] 郭广东, 邓松圣, 张福伦. 操作参数对固-液-液三相水力旋流器分离效率的影响[J]. *石油矿场机械*, 2010, 39(5): 17–19.  
Guo G D, Deng S S, Zhang F L. Effects of operating conditions on separation efficiency of three-phase solid-liquid-liquid hydrocyclones[J]. *Oil Field Equipment*, 2010, 39(5): 17–19.
- [ 11 ] 梁政. 固液分离水力旋流器流场理论研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.  
Liang Z. Theoretical study on flow field of solid-liquid separation hydrocyclone[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [ 12 ] Kim J O, Choi J, Lee S, et al. Evaluation of hydrocyclone and post-treatment technologies for remediation of contaminated dredged sediments[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166: 94–102. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.10.009.
- [ 13 ] 王伟. 水力旋流器固-液分离的 CFD 模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.  
Wang W. Simulation of solid-liquid separation in hydrocyclone by applying CFD[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [ 14 ] 崔宝玉. 水力旋流器流场及分离过程的数值试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.  
Cui B Y. Numerical study on flow field and separating process of hydrocyclone[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [ 15 ] 韩婕, 刘阿龙, 彭东辉, 等. 数值研究液-液水力旋流器内颗粒浓度分布特性[J]. *化工机械*, 2011, 38(6): 725–729.  
Han J, Liu A L, Peng D H, et al. Numerical simulation of particle concentration distribution in liquid-liquid hydrocyclones [J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2011, 38(6): 725–729.

(上接第 24 页)

- [ 39 ] Du R, Peng Y Z, Cao S B, et al. Advanced nitrogen removal from wastewater by combining Anammox with partial denitrification[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 179: 497–504. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.12.043.
- [ 40 ] Cao S B, Du R, Niu M, et al. Integrated anaerobic ammonium oxidization with partial denitrification process for advanced nitrogen removal from high-strength wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 221: 37–46. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.08.082.
- [ 41 ] Zhang H Y, Du R, Cao S B, et al. Mechanisms and characteristics of biofilm formation via novel DEAMOX system based on sequencing biofilm batch reactor [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2019, 127(2): 206–212.
- [ 42 ] 王胤, 吴嘉利, 陈一, 等. 主流厌氧氨氧化工艺的研究与应用进展[J]. *净水技术*, 2021, 40(11): 16–27.  
Wang Y, Wu J L, Chen Y, et al. Research and application progress of mainstream anammox process[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(11): 16–27.
- [ 43 ] 彭永臻, 范泽里, 杜睿, 等. 为耦合厌氧氨氧化产生  $\text{NO}_2^-$  的城市污水中试研究[J]. *北京工业大学学报*, 2020, 46(4): 329–337.  
Peng Y Z, Fan Z L, Du R, et al. Pilot-scale study on producing  $\text{NO}_2^-$  for Anammox with municipal wastewater [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2020, 46(4): 329–337.
- [ 44 ] 吴莉娜, 闫志斌, 李进, 等. 厌氧氨氧化在城市生活污水处理中的应用[J]. *北京工业大学学报*, 2020, 46(4): 421–430.  
Wu L N, Yan Z B, Li J, et al. Application of anaerobic ammonia oxidation in municipal domestic sewage treatment plants [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2020, 46(4): 421–430.
- [ 45 ] Du R, Cao S B, Zhang H Y, et al. Flexible nitrite supply alternative for mainstream anammox: Advances in enhancing process stability [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(10): 6353–6364.
- [ 46 ] Majtacz J, Al-Hazmi H E, Xu X B, et al. Removal of nitrogen from wastewater: Unsolved problems and possible solutions with partial denitrification/Anammox systems [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499: 156131. DOI:10.1016/j.cej.2024.156131.
- [ 47 ] Chen H, Tu Z, Wu S, et al. Recent advances in partial denitrification-anaerobic ammonium oxidation process for mainstream municipal wastewater treatment [J]. *Chemosphere*, 2021, 278: 130436. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130436.