

# 基于 CCHE 模型的重力沉沙池水沙数值模拟

刘春山<sup>1</sup>, 牧振伟<sup>1</sup>, 贾亚非<sup>2</sup>

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;

2. 美国密西西比大学 国家水科学及工程计算中心, 美国)

**摘要:** 为了研究重力沉沙池流量、含沙量与水沙分离效率的关系, 借助 CCHE 软件, 建立 CCHE2D 水沙两相流数学模型, 采用混合掺长紊流模型, 对重力沉沙池进行数值模拟, 得到沉沙池内水流流态、悬移质输移规律以及沉沙池的水沙分离效率, 并在前人研究的基础上, 进一步对不同流量、含沙量情况下, 其流量和含沙量对沉沙池水沙分离效率的影响进行分析。结果表明: 当流量在 0.05 ~ 0.30 m<sup>3</sup>/s 时, 随着流量增大, 则流速增大, 水流挟沙力增大, 不利于泥沙沉降, 使沉沙池的水沙分离效率降低; 改变初始含沙量 (5 ~ 20 kg/m<sup>3</sup>), 随着初始含沙量的增大, 由于沉淀池尾部回流区存在, 使得部分泥沙直接被带入清水池, 使得沉沙池水沙分离效率降低。

**关键词:** CCHE 模型; 沉沙池; 悬移质; 数值模拟; 水沙分离效率

中图分类号: TV673<sup>+</sup>.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)01-0150-06

## Numerical simulation of water and sediment in gravity settling basin based on CCHE model

LIU Chunshan<sup>1</sup>, MU Zhenwei<sup>1</sup>, JIA Yafei<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Nation Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi, USA)

**Abstract:** In order to study the relationship between the flow and sediment concentration of the gravity settling basin and the water-sediment separation efficiency, this paper sets up a CCHE2D mathematical model for water sediment two phase flows with the aid of CCHE software and uses the mixed length turbulence model to numerically simulate the gravity settling basin so as to get the flow state of the settling basin, the transport law of suspended load and the water-sediment separation efficiency of the settling basin. In addition, based on the previous studies, this paper further analyzed the influence of flow and sediment concentration on water-sediment separation efficiency of the settling basin when flow and sediment concentration are different. The results showed that when the water flow is from 0.05 to 0.3 m<sup>3</sup>/s, as the flow increases, the flow rate quickens, and the sediment carrying capacity increases, which is not conducive to sediment deposition and will reduce the water-sediment separation efficiency of the settling basin and change the initial sediment content (5 to 20 kg/m<sup>3</sup>). As the initial sediment content increases, some sediments will be directly brought into the clean water basin because of the existence of tail reflux area of the sediment basin, which will reduce water-sediment separation efficiency of the settling basin.

**Key words:** CCHE (center for computation hydroscience and engineering model); settling basin; suspended load; numerical simulation; water-sediment separation efficiency

收稿日期: 2018-07-27; 修回日期: 2018-09-28

基金项目: 新疆维吾尔自治区高校科研计划创新团队项目 (XJEDU2017T004); 新疆维吾尔自治区高校科研计划技术推广项目 (XJEDU2017A002); 新疆维吾尔自治区国际科技合作计划项目 (20136021)

作者简介: 刘春山 (1992-), 男, 甘肃武威人, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河道生态治理。

通讯作者: 牧振伟 (1973-), 男, 河南镇平人, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事水力学及河流动力学研究。

## 1 研究背景

在水利工程中,采用沉沙池对含沙水流进行泥沙处理是一种有效的措施,且应用十分广泛,沉沙池的工作原理是,含沙水流进入沉沙池,水流流速降低,使得水流挟沙力降低,改变了原有泥沙的运动状态,从而达到沉沙的目的<sup>[1-3]</sup>。戚印鑫等<sup>[4]</sup>、刘亚丽等<sup>[5]</sup>通过物理模型试验对重力沉沙池中各部位水深、流速、含沙量、泥沙粒径等进行测试分析,得到了沉沙池中泥沙分布规律和除沙效率;易玉林等<sup>[6]</sup>、Jayanti 等<sup>[7]</sup>使用 FLUENT 软件模拟了沉沙池水流和沙粒的运动情况;得到了水流在沉沙池中的流速特性分布;杨红等<sup>[8]</sup>、田艳等<sup>[9]</sup>采用 FLUENT 软件中的  $k-\varepsilon$  模型对沉沙池流场进行了三维数值模拟,得到了沉沙池中流速的垂线分布和沿程分布规律;陶洪飞等<sup>[10-13]</sup>采用 FULENT 中的标准  $k-\varepsilon$  模型对沉沙池进行了三维数值模拟,得到了沉沙池内流速、含沙量沿程的分布规律;李园园等<sup>[14]</sup>、徐乐等<sup>[15-17]</sup>、吕科等<sup>[18]</sup>使用 CCHE 软件对不同水工建筑物进行泥沙模拟研究,结果表明 CCHE 软件模拟泥沙精度高,在模拟泥沙方面具有较大优势。上述研究对沉沙池内的水沙两相流流场进行了二维和三维数值模拟,并且得到了流场的分布规律。陶洪飞

等对影响重力沉沙池水沙分离效率的因素进行了分析对比,由于影响重力沉沙池水沙分离效率的因素不是单一的,为此,考虑多个影响因素对重力沉沙池水沙分离效率进行综合分析变得尤为重要。本文借助 CCHE 软件,主要研究不同流量、含沙量与沉沙池水沙分离效率的关系,通过模型试验验证数学模型的准确性,在此基础上模拟不同流量、含沙量下沉沙池的流场分布规律,得到池中流速、含沙量沿程分布规律以及该尺寸下沉沙池运行的最佳流量、含沙量的范围,为今后重力沉沙池在实际运用中提供参考依据。

## 2 重力沉沙池结构

重力沉沙池主要有沉淀池、溢流堰、清水池等部分构成,其平面图和剖面图见图 1。重力沉沙池的尺寸为:沉淀池长 25.00 m,池宽 1.50 m,溢流堰顶长 5.00 m,坡度 1%,清水池长 25 m,池宽 0.75 m。条形池进口设置调流板,顺水流方向为  $x$  方向,水深为  $z$  方向,宽度方向为  $y$  方向,右侧断面为  $y = 0.4$  m 位置,左侧断面为  $y = 1.1$  m 位置,设置其主要断面为  $x = 0 + 0.50, 0 + 6.25, 0 + 12.50, 0 + 18.75, 0 + 22.50, 0 + 24.50$  m 等断面进行计算分析。

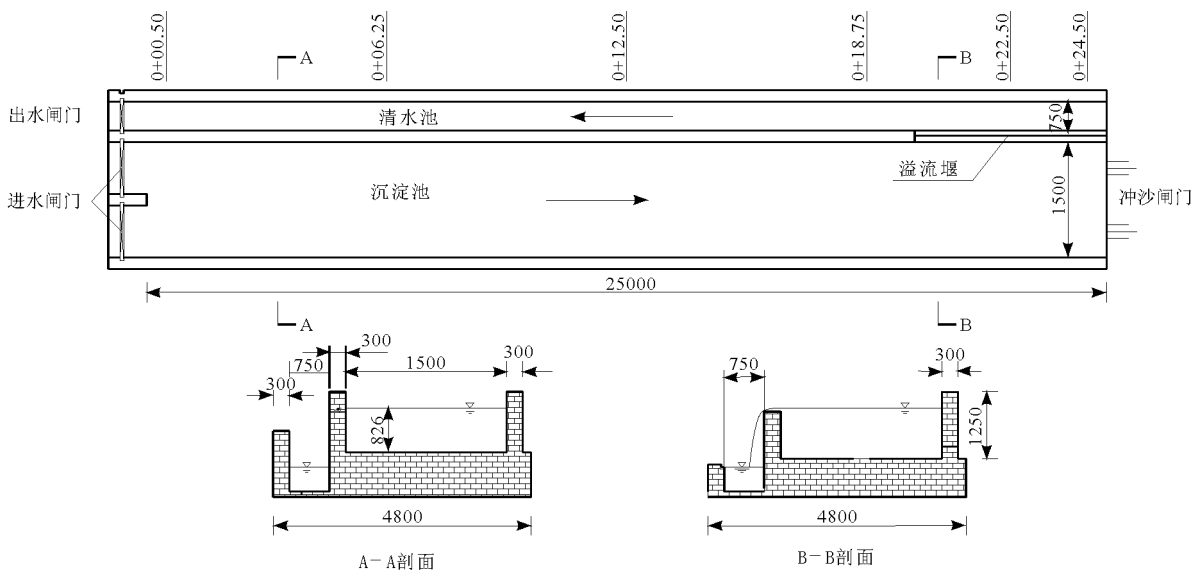


图 1 重力沉沙过滤池平面及断面图(桩号单位:m,标注单位:mm)

## 3 数学模型

### 3.1 CCHE2D 模型

CCHE2D 模型是一个以自由水面模拟分析的数学模型。该模型系统主要由 CCHE - GUI(图形界

面)和 CCHE - MESH(网格生成器)组成,该模型采用隐式的有效元素法进行求解连续方程,系统方程用速度校正法。

### 3.2 控制方程

CCHE2D 模型是一个二维水动力非恒定流泥沙

输移模型,模型主要求解以下垂线平均控制方程。

悬移质对流输移方程:

$$\frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VhC_k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ h \left( \varepsilon_s \frac{\partial C_k}{\partial x} + D_{sxk} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ h \left( \varepsilon_s \frac{\partial C_k}{\partial y} + D_{syk} \right) \right] + \alpha_d \omega_{sk} (C_{*k} - C_k) \quad (1)$$

式中:  $C_k$  为某粒径  $k$  在悬移质中的水深平均浓度;  $C_{*k}$  为悬移质中某一粒径  $k$  平衡条件下的水深平均浓度;  $\varepsilon_s$  为泥沙扩散系数;  $\alpha_d$  为悬移质的延散系数,  $D_{sxk}$ 、 $D_{syk}$  为非均匀流速与泥沙浓度在水深方向的消散通量;  $\omega_{sk}$  为泥沙粒径  $k$  的沉速。

河床变形程度由下式计算:

$$(1 - p'_m) \left( \frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k = \alpha \omega_{sk} (C_k - C_{*k}) + \frac{1}{L} (q_{bk} - q_{b* k}) \quad (2)$$

式中:  $p'_m$  为推移质孔隙率;  $(\partial z_b / \partial t)_k$  为某粒径的河床变形率。

### 3.3 网格划分及初始、边界条件

(1) 网格划分。数学模型采用 CCHE - MESH 网格生成器进行网格划分,在网格划分时,分别设定  $I$ 、 $J$  方向的节点,由于数学模型的形状比较规则,因此计算区域采用规则的矩形结构化网格,在 CCHE - MESH 中用两边界代数网格生成法,对于较复杂的边界进行网格加密处理。 $I$  方向为池宽方向, $J$  方向为池长方向,网格太粗导致达不到计算精度,太细则会增大计算量,耗时过大,为保证计算精度,最后确定网格数为 13 000 个(沉淀池  $200 \times 30$ ,溢流堰  $100 \times 40$ ,清水池  $15 \times 200$ ),网格生成器中自带的 RL 正交网格(带光滑函数)二次优化网格功能,可以提高网格的质量。

(2) 初始及边界条件。沉沙池进口设置为速度进口,出口设置为开边界,进口流量分别设置为  $0.05$ 、 $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ,进口含沙量设为  $5$ 、 $10$ 、 $20 \text{ kg/m}^3$ ,泥沙计算采用以悬移质为主的全沙模型,泥沙粒径为  $1.0$ 、 $0.5$ 、 $0.25$ 、 $0.1$ 、 $0.0719$ 、 $0.0534$ 、 $0.026$ 、 $0.0107$ 、 $0.0054$ 、 $0.0016 \text{ mm}$ 。泥沙密度为  $2700 \text{ kg/m}^3$ ,泥沙比重为  $2.70$ ,泥沙的恢复饱和系数为  $0.25$ ,泥沙空隙率为  $0.38$ ,泥沙水下休止角为  $32^\circ$ ,进行模拟计算。

(3) 由于试验时间的局限性,本文仅分析研究了 4 种流量和 3 种含沙量,共计 12 种工况,所得结果在这 12 种工况下成立,对于流量大于  $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、含沙量大于  $20 \text{ kg/m}^3$  的情况需进一步分析研究。

## 4 结果与分析

### 4.1 数学模型验证

为了研究流量、含沙量与沉沙池水沙分离效率的关系,应进行对数学模型的验证,根据物理试验模型所得结果,数学模型设置进水口流量为  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ,初始悬移质含沙量为  $1 \text{ kg/m}^3$ ,并对计算结果进行对比分析。

(1) 流速对比。沉沙池中物理试验与数值模拟流速结果如图 2 所示。①沉淀池右侧和左侧的物理试验结果与数值模拟结果误差在  $10\%$  左右,因此,CCHE 数学模型可以运用于模拟沉沙池水流流场分布规律。②从物理试验结果和数学计算结果可以看出,左侧流速和右侧流速沿程( $0+0.50 \sim 0+18.75 \text{ m}$ )逐渐减小,但是减小幅度不大,从基础理论可知,沉淀池有  $1\%$  坡度,当流量一定时,沉淀池池深沿程增加,断面面积增大,故而流速降低。③在  $0+18.75 \sim 0+24.5 \text{ m}$  处,由于  $5 \text{ m}$  侧向溢流堰的存在,水流受到侧堰和边界条件的影响,此时水流主流方向已经不是原来的方向,而是转向侧堰方向,因此在  $0+18.75 \sim 0+24.5 \text{ m}$  范围内流速迅速减小。

提取典型断面( $0+0.50$ 、 $0+6.25$ 、 $0+12.50$ 、 $0+18.75$ 、 $0+24.50 \text{ m}$ )的物理试验流速值,与数值模拟结果进行对比,对比结果见表 1。从表 1 中可以看出,物理试验与数学计算的相对误差在  $10\%$  以内,因此表明 CCHE 数学模型可以模拟沉沙池内的流速分布规律。

表 1 沉沙池中物理试验与数值模拟流速结果对比

断面位置/ m	物理试验/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	数值模拟/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	相对误差/ %
0+0.50	0.077	0.075	2.59
0+6.25	0.059	0.064	8.47
0+12.50	0.058	0.053	8.62
0+18.75	0.053	0.050	5.66
0+24.50	0.010	0.009	10.00

(2) 含沙量对比。物理试验初始进口平均含沙量为  $1 \text{ kg/m}^3$ ,经过沉沙池处理后含沙量为  $0.55 \text{ kg/m}^3$ ;数值模拟进口平均含沙量为  $1 \text{ kg/m}^3$ ,沉沙池处理后含沙量为  $0.48 \text{ kg/m}^3$ ;两种模型模拟结果比较吻合,相对误差小于  $12.7\%$ 。

综上所述,运用 CCHE 数学模型可以模拟沉沙池中水沙两相流流场分布规律。

4.2 数值模拟结果

4.2.1 不同流量下的沿程流速 图 3 表示在不同

流量下沉淀池沿程的流速结果对比。

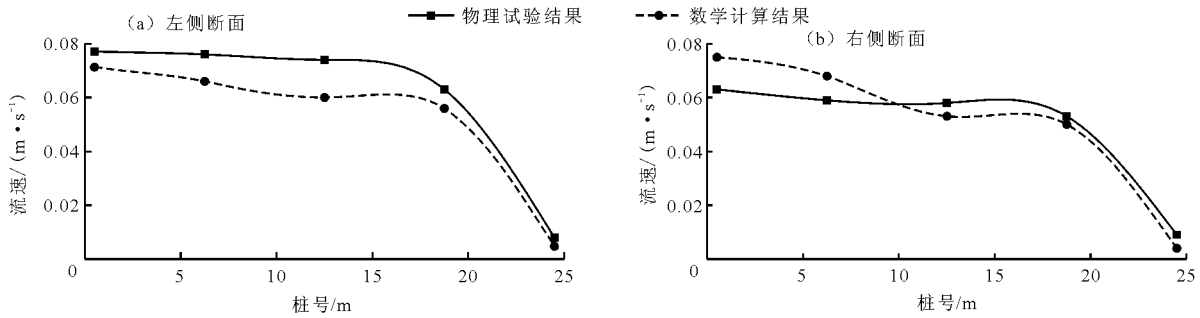


图 2 沉淀池中物理试验与数值模拟沿程流速对比

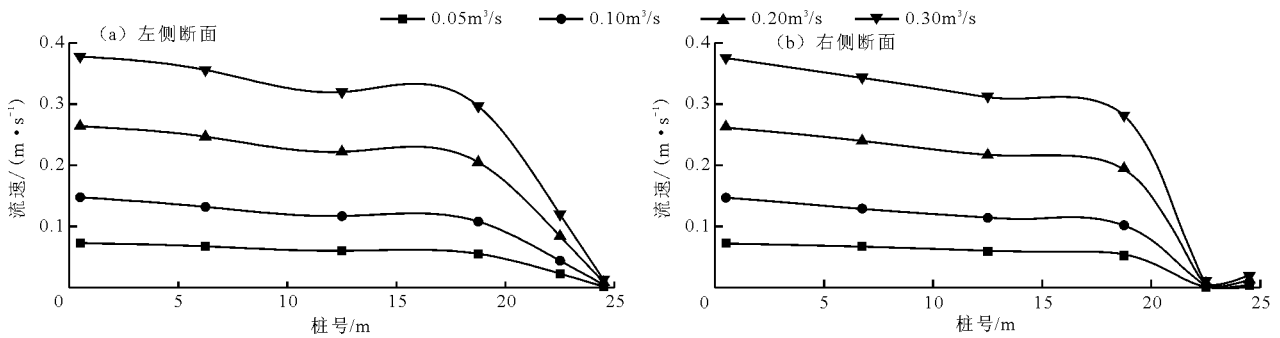


图 3 不同流量下沉淀池中沿程流速对比

由图 3 可以看出,在不同流量下,无论是左侧流速还是右侧流速,其流速均呈沿程减小,且左侧流速和右侧流速相差不大,并且流量越大,流速的增长速率也越快。在 0+0.50~0+18.75 m 处,流速沿程缓慢减小,由于沉淀池有 1% 的坡度,随着沉淀池沿程长度增加,沉淀池深度也在增加,即沉淀池水深在增加,故过水断面面积在增加,在流量不变的情况下,流速趋于减小。流速突变阶段(0+18.75~0+24.5 m),无论初始流量大小,流速迅速变小,因为在 0+18.75 至池尾有一个 5 m 长的侧向溢流堰,此处由于固壁和边界条件影响,水流方向发生转折,水流沿侧向溢流堰流向清水池,因此流速沿  $x$  方向迅速减小。

图 4、5 分别表示最小流量和最大流量下沉淀池中的流线分布情况。从沉淀池流线图可以看出,无论流量大小,在 0+0.50~0+18.75 m 范围内流场比较稳定,左池与右池流速比较接近,在断面 0+18.75~0+24.5 m 时,由于侧向溢流堰和固壁以及边界条件的影响,水流开始发生转折流向侧向溢流堰,故此断面位置流速降低,根据流线图可知,水流沿沉淀池流速迅速降低是正确的。而且在沉淀池末端有一个较大的回流区,由于这个回流区存在,故在 0+22.5 m 断面处右侧流速迅速降低,随流量

的增加此回流区面积在减小,但减小幅度并不大。

4.2.2 不同流量、不同初始含沙量下沉淀池沿程含沙量分布 初始流量设为 0.05、0.1、0.2、0.3  $\text{m}^3/\text{s}$ ,初始含沙量设为 5、10、20  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,共计 12 种工况组合进行数值模拟计算,数值模拟计算结果见图 6。

由图 6 可以看出在不同流量下,左侧断面和右侧断面含沙量沿程都是减小的,而且左侧和右侧断面含沙量相差不大,随着流量增加,沉淀池内流速增加,在 0+0.50~0+18.75 m 范围内,无论流量的大小,其含沙量沿程减小,在 0.05  $\text{m}^3/\text{s}$  工况下含沙量沿程减小比较明显,随着流量增加到 0.30  $\text{m}^3/\text{s}$  时含沙量沿程减小比较微弱。这是由于泥沙受到重力作用而下沉,在沿水流方向由于水流挟沙能力作用,使得泥沙在重力和水流挟沙力共同作用下进行运动,当流量在较小情况下,流量小导致流速小,那么水流挟沙力也相对较小,故而泥沙主要依靠重力进行沉降,当流量持续变大时,流速也在变大,水流挟沙能力变大,而此时泥沙则需要运动一段距离才能沉降。因此随着流量增加导致流速变大,使得水沙分离变得困难。

在 0+18.75~0+24.5 m 断面范围内含沙量迅速减小,由于侧向溢流堰和固壁以及边界条件的影响,水流发生转折流向侧堰,一部分泥沙被水流带入

清水池,由流线图可知,在沉淀池末端存在一个较大的回流区,无论流量的大小,这个回流区都是存在

的,而所取的断面测点恰好在该回流区内,回流区相当于一个死水区,故此处的含沙量迅速减小。



图4 0.05 m<sup>3</sup>/s 流量下沉淀池流线图



图5 0.30 m<sup>3</sup>/s 流量下沉淀池流线图

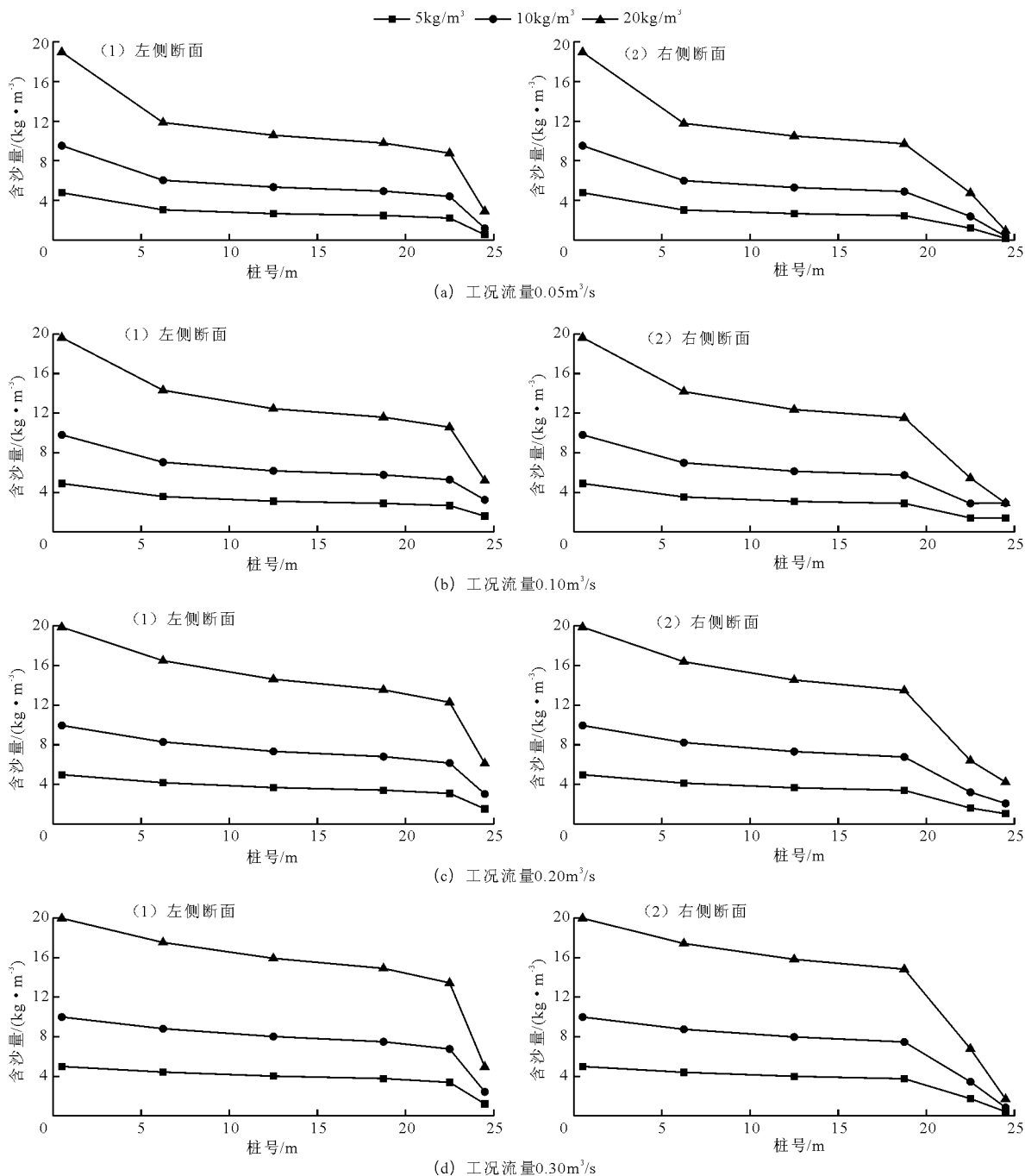


图6 不同流量、不同初始含沙量下沉淀池沿程含沙量变化情况

4.2.3 不同流量、含沙量下沉淀池的水沙分离效率

水沙分离效率<sup>[19]</sup>是评判沉淀池除沙能力的参数,水沙分离效率大说明除沙能力强,反之则除沙能力

弱,水沙分离效率的计算公式如下:

$$\mu = \frac{\delta - \delta_1}{\delta} \times 100\% \tag{3}$$

式中:  $\mu$  为水沙分离效率,%;  $\delta$  为进口初始平均含沙量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\delta_1$  为出口平均含沙量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

不同流量、含沙量下沉沙池的水沙分离效率如表 2 所示。从表 2 中可以看出,流量越小其水沙分离效率越高,不论是沉淀池还是清水池,随着流量增大其水沙分离效率逐渐降低,由于流速增加导致水流挟沙力增加,沉淀池长度不足以让部分泥沙沉降下去就被带入清水池的缘故,当流量一定时,初始含沙量从  $5 \text{ kg}/\text{m}^3$  增加至  $20 \text{ kg}/\text{m}^3$  时,沉沙池的水沙分离效率变化不大,故初始含沙量的大小对沉沙池水沙分离效率影响较小,因此沉沙池的水沙分离效率主要与沉沙池内水流流速大小有关,而进口含沙量 ( $0 \sim 20 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) 对沉沙池水沙分离效率影响较小。

表 2 流量、含沙量与沉沙池水沙分离效率的关系

流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	初始含沙量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	处理后含沙量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		水沙分离 效率/%		总水沙 分离效 率/%
		沉淀池	清水池	沉淀池	清水池	
0.05	5	2.38	1.35	52.40	43.27	73.00
	10	4.74	2.78	52.60	41.35	72.20
	20	9.31	6.09	53.45	52.80	69.55
0.10	5	2.79	1.77	44.20	36.55	64.60
	10	5.58	3.44	44.20	38.35	65.60
	20	11.19	7.61	44.05	31.99	61.95
0.20	5	3.27	2.21	34.60	32.40	55.80
	10	6.53	3.83	34.70	41.34	61.70
	20	13.05	9.81	34.75	24.82	50.95
0.30	5	3.66	2.91	26.80	20.49	41.80
	10	7.22	5.26	27.80	27.14	47.40
	20	14.42	10.51	27.90	27.11	47.45

## 5 结 论

(1) 本文借助 CCHE 软件,采用混合掺长紊流模型建立了沉沙池平面二维水沙两相流流场数学模型。经验证,证明 CCHE 软件可以运用于模拟沉沙池水沙两相流流场分布规律。

(2) 通过 CCHE 软件对沉沙池进行了数值模拟,得到在  $0+0.50 \sim 0+18.75 \text{ m}$  断面范围内,无论流量大小,其流速沿程总是缓慢减小;在  $0+18.75 \sim 0+24.5 \text{ m}$  断面处,由于侧堰影响,流速迅速减小。沉淀池末尾 ( $0+18.75 \sim 0+24.5 \text{ m}$ ) 有一个较大的回流区,随着流量增加,该回流区范围减小,但减小幅度不大。

(3) 通过 CCHE 软件对沉沙池在不同流量、含沙量的工况下进行数值模拟,得到了流量、含沙量与

沉沙池水沙分离效率的关系。流量在  $0.05 \sim 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  时,沉淀池内水流流态较稳定,流速较小,对沉淀池尾部回流区影响较小;当流量为  $0.2, 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  时,沉淀池内流速加大,水流流态较紊乱,而且流速对沉淀池尾部回流区影响较大,不利于水沙分离。因此该沉沙池运行的流量范围为  $0.05 \sim 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , 在该流量范围内,沉沙池总水沙分离效率不小于  $61.95\%$ 。

(4) 改变初始含沙量 ( $5 \sim 20 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), 流量在  $0.05 \sim 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$  时,沉沙池水沙分离效率会随着初始含沙量增加而减小,随着初始含沙量增大,由于沉淀池尾部回流区存在,水流将部分泥沙带入清水池,使沉沙池的水沙分离效率降低;流量在  $0.2 \sim 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$  时,由于流速增加,使得水流挟沙能力增大,沙粒更不易沉降,因此沉沙池水沙分离效率明显降低,故大流量不利于水沙分离。

## 参考文献:

- [1] 华根福,刘焕芳,汤 骅,等. 沉沙池中水流流态的数值模拟[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2009,27(4): 482-486.
- [2] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程沉沙池设计规范: SL269-2001[S]. 中国水利水电出版社,2001:22-34.
- [3] 徐长学. 沉淀池中异重流现象的理论分析[J]. 人民长江,2013,44(5):66-68.
- [4] 戚印鑫,耿凡坤,刘亚丽,等. 重力沉沙过滤池模型试验研究[J]. 泥沙研究, 2016,41(6):19-24.
- [5] 刘亚丽,赵 涛,戚印鑫,等. 河水滴灌重力沉沙过滤池物理试验研究[J]. 人民黄河,2018,40(5):148-152.
- [6] 易玉林. 旋流式沉沙池的数值模拟计算[J]. 环保科技, 2016,22(1):24-26+31.
- [7] JAYANTI S, NARAYANAN S. Computational study of particle-eddy interaction in sedimentation tanks[J]. Journal of Environmental Engineering, 2004,130(1):37-49.
- [8] 杨 红,潘光在. 沉沙池立面流场数值模拟研究[J]. 泥沙研究, 2000,25(2):55-59.
- [9] 田 艳,张根广,秦子鹏. 厢式沉沙池进口优化试验及流场三维数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2013(8):89-94.
- [10] 陶洪飞,马英杰,洪明,等. 初始浑水含沙量对沉淀池中流速分布的影响[J]. 水电能源科学, 2017,35(4):120-123+62.
- [11] 陶洪飞,杨海华,马英杰,等. 流量对河水滴灌重力沉沙过滤池内流速分布的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1):131-137.
- [12] 陶洪飞,杨海华,戚印鑫,等. 河水滴灌重力沉沙过滤池的清水流场模拟[J]. 水电能源科学, 2016,34(10): 114-117+99.

(下转第 163 页)

(2)受进流和出流不对称的影响,切向速度沿着径向分布不对称。悬板上方溢流区和锥体区具有相同的涡流特征,越靠近边壁切向流速越小;柱体区(进水涵洞底板以上至悬板)范围内具有相同的涡流特征,越靠近边壁切向流速越大。

(3)悬板坡度  $i = 0.259$  下泥沙较不易于悬浮到悬板上方,同时进入下游的可能性较低和淤积在悬板上的含量较少;悬板坡度  $i = 0.173$  下泥沙最不易于悬浮到悬板上方,同时进入下游的可能性最低和淤积在悬板上的含量最少。

(4)文章中悬板径向坡度为  $i = 0.173$  时的泥沙截除率,比悬板其他径向坡度的泥沙截除率要大。排沙漏斗截除率随着悬板坡度的增大而在一定范围内增高,并不是随着坡度的增大而无限增大,存在一临界悬板坡度使排沙漏斗的截除率达到最大值。

#### 参考文献:

- [1] 肖柏青,戎贵文. 排沙漏斗悬移质泥沙运动数值模拟[J]. 水利学报,2017,48(8):986-992.
- [2] 李琳. 排沙漏斗结构优化研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2005.
- [3] 谭冬初. 排沙漏斗的水力分析计算[J]. 水动力学研究与进展(A辑),1999,14(2):176-183.
- [4] 刘善均,张建民,曲景学,等. 排沙漏斗优化及输沙特性试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2003,35(4):6-9.
- [5] 吴洋锋,李琳. 排沙漏斗悬板径向坡度对流场影响的试验研究[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(3):162-168+174.
- [6] 肖柏青,周著,邱秀云,等. 排沙漏斗中的二次流及其影响[J]. 新疆农业大学学报,2007,30(1):71-74.
- [7] 赵彦彦,王英歌,齐海龙. 漏斗式全沙排沙技术研究与应用[J]. 河北水利,2005(9):35.
- [8] 周著,侯杰,邱秀云,等. 漏斗式全沙排沙技术研究与应用[J]. 中国三峡建设,2004,11(5):55-56.
- [9] 周著,邱秀云,侯杰,等. 漏斗式全沙排沙技术及其应用[J]. 新疆水利,2001,12(1):95-98.
- [10] 李琳,牧振伟,周著. 排沙漏斗截沙率计算[J]. 水利水电科技进展,2007,27(4):50-54.
- [11] 唐毅,吴持恭,周著. 排沙漏斗三维涡流水流结构[J]. 水利学报,1999,11(4):56-60.
- [12] 肖柏青,罗麟,周著,等. 排沙漏斗流场的大涡模拟[J]. 四川大学学报(工程科学版),2010,42(3):30-35.
- [13] CHAPOKPOUR J, GHASEMZADEH F, FARHOUDI J. The numerical investigation on vortex flow behavior using FLOW-3D[J]. Iranica Journal of Energy & Environment, 2012, 3(1): 88-96.
- [14] 邱秀云,侯杰,周著. 排沙漏斗的流场特性及输沙机理[J]. 中国农村水利水电,1999(4):5-8+48.
- [15] 肖柏青,戎贵文. 排沙漏斗流场特性与排沙机理研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2016,31(2):232-238.
- [16] 邓宏荣. 喀什一级电站排沙漏斗工程悬移质泥沙水文测验与分析[J]. 四川水利,2015,36(4):51-54.
- [17] 屈百平,刘进步. 泾惠渠排沙漏斗工程设计特点[J]. 陕西水利水电技术,2004(2):55-57+64.
- [18] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1):201-225.
- [19] 李琳,邱秀云,龚守远,等. 浑水水力分离清水装置弱旋流场特性研究[J]. 水动力学研究与进展,2007,22(4):520-528.
- [20] 黄思,邹文朗,周锦驹,等. 基于 DPM 模型的离心泵非定常固液两相流及磨损计算[J](英文). 机床与液压,2016,44(6):103-106.
- [21] YANG Haoming, ZHU D Z, LI Lin. Numerical modeling on sediment capture in catch basins. [J]. Water Science & Technology, 2018,775(5):wst2018009.

(上接第 155 页)

- [13] 陶洪飞,戚印鑫,杨海华,等. 河水滴灌重力沉沙过滤池中浑水流场分布规律[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(9):785-791.
- [14] 李园园,牧振伟,孙阳平,等. 基于 CCHE 模型的石门子渠首弯道水沙数值模拟[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(6):207-209+214.
- [15] 徐乐,牧振伟,李园园,等. 基于 CCHE 模型的乌斯满引水枢纽水流数值模拟[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(5):172-176.
- [16] 徐乐,牧振伟,李园园,等. 基于 CCHE 的塔什米里克引水枢纽二维水流数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(2):83-89.
- [17] 徐乐. 基于 CCHE 模型的多沙河引水枢纽水沙数值模拟[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.
- [18] 吕科,赵涛. 基于不同数学模型对某弯道式渠首水沙运动的数值模拟对比研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(2):150-155.
- [19] 李卫鹏,何照青,陶洪飞. 导片锥角和片数对悬锥装置水沙分离效率的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):77-79.