

不同鳃片间距下的分离鳃内部流场三维数值模拟*

陶洪飞 邱秀云 李巧 谭义海 王苗

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为研究鳃片间距对分离鳃的速度场及泥沙分布特性的影响,采用 Fluent 软件中的层流模型和欧拉模型,运用 Phase Coupled SIMPLE(PC-SIMPLE)算法,对不同鳃片间距下分离鳃的水沙两相流流场进行了静水沉降的三维数值模拟。根据数值计算结果,对速度场和含沙量分布特性进行了对比与分析。结果表明:不同鳃片间距下,分离鳃内部的速度场分布规律有所不同,鳃片间距越大,速度流场受到来自泥沙通道中的泥沙流与清水通道中的清水流影响就越大;鳃片间距越小,分离鳃的沉淀效果越好。以泥沙平均速度和清水平均速度作为考核指标,同时考虑分离鳃内部的流场特性、水沙分离效果与制作分离鳃的成本,则最佳鳃片间距为 5 cm。

关键词: 分离鳃 鳃片间距 数值模拟 速度场 平均含沙量

中图分类号: TV14; TQ028.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)06-0183-07

引言

微灌技术是当前最有效的节水灌溉技术,且易于机械化集成配套,自动化控制;随着我国经济的快速发展,该技术已经广泛地应用于农田灌溉与城镇绿化中。但西北地区的河流水含沙量高且泥沙颗粒细,直接用于灌溉常引起微灌系统的瘫痪,因此对引用河水中的泥沙进行有效处理和过滤是推广节水灌溉技术的重要前提^[1]。现阶段,国内外的主要水沙过滤设备有沉淀池、砂过滤器、滤网过滤器、旋流水沙分离器、叠片式过滤器及盘状过滤器等^[2]。采用大型沉淀池或过滤器作为灌区首部泥沙处理的设备,其投资大、处理浑水周期长;若处理含沙量较大且泥沙颗粒细的浑水,往往过滤后的水流含沙量和粒径大小达不到规范要求,从而造成滴灌头不能正常工作^[3]。因此,研究一种具有水沙分离效率高、运行能耗率低、便于管理和工程造价低等特点的新装置对微灌技术的推广应用具有重要的实用价值和经济价值。

分离鳃是一种新型的水力分离水沙两相流装置,其无需加外动力和絮凝剂,仅利用物理作用使水沙产生相对运动,从而快速地从浑水中取出清水^[4]。影响分离鳃水沙分离效果的因素有多种,其中鳃片间距对其沉淀效果的影响不容忽视。随着计

算机技术和计算流体力学的发展,数值模拟手段逐渐成熟,目前应用流体软件模拟固液两相流的流场及对固液分离装置进行结构优化越来越普遍^[5-14]。因此采用流体软件模拟静水中不同鳃片间距下分离鳃内部的水沙两相流流场,探求鳃片间距对分离鳃水沙分离效果的影响,并找出应用于实际工程的最优鳃片间距,是一种有效的方法。笔者已通过 Fluent 软件模拟了分离鳃内的水沙两相流流场,并用粒子图像测速(Particle image velocimetry, PIV)技术的实测资料对数值模拟结果进行了验证^[15]。本文进一步采用验证后的数值模型来研究鳃片间距对分离鳃水沙两相流流场及沉淀效果的影响。

1 分离鳃结构及工作原理

分离鳃是水沙分离装置,由鳃片与鳃管构成(图 1)。泥沙颗粒在静水条件沉降时,该装置的最上端为开口状,且有自由表面,最下端呈封闭状,不排沙;而在动水沉降时,把多个分离鳃布置在沉淀池中,此时分离鳃上下端均为开口状,以便清水上升和泥沙排出且在分离鳃长度方向的侧壁布置小孔,以便分离鳃内外的浑水交换。分离鳃的主要结构参数包括鳃片间距 d 、鳃片与鳃管长度方向的两侧壁构成的倾斜角 α 、鳃片与鳃管宽度方向的侧壁构成的倾斜角 β 、清水流上升通道宽度 e 及泥沙流下降通

收稿日期: 2013-08-07 修回日期: 2013-09-09

* 国家自然科学基金资助项目(50969009)、国家星火计划资助项目(2012GA890002)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070758003)和新疆水利水电工程重点学科基金资助项目(xjsgczdxk20101202)

作者简介: 陶洪飞,博士生,主要从事计算水力学及河流泥沙工程研究,E-mail: 304276290@qq.com

通讯作者: 邱秀云,教授,博士生导师,主要从事水力学及河流动力学研究,E-mail: wlmqxy@sina.com

道宽度 f 。利用 Fluent 软件模拟不同鳃片间距的分离鳃在静水条件下的水沙两相流场,鳃管内布置有不同数量的鳃片。令鳃管长 $a = 17.5\text{ cm}$,宽 $b = 4\text{ cm}$,高 $c = 100\text{ cm}$,鳃片间距 d 分别取 3、5、10、15、20、25 cm,采用前期物理模型优化后的角度: $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 45^\circ$,鳃片与宽度方向的两侧壁之间各留 1 cm 宽的通道,即 $e = f = 1\text{ cm}$,坐标中心位于 O 点处。

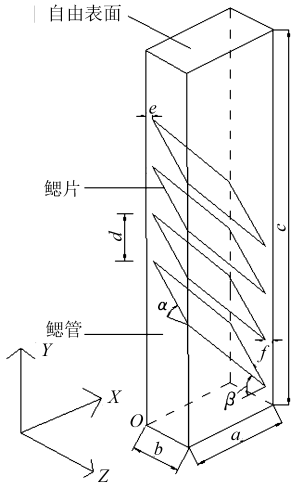


图 1 分离鳃示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gill-piece separation device

图 2 为分离鳃的工作原理概化图。从图 2 中可知,泥沙颗粒在重力作用下先自由沉降,当沉降至鳃片后便汇集成泥沙流,沿着鳃片上表面的高端流动至低端,再涌入三角形泥沙通道中垂直向下运动;而清水流则沿着鳃片的下表面由低端流动至高端,再流入三角形清水通道中垂直向上运动,从而达到水沙分离的目的。分离鳃处理含有粘性细颗粒泥沙的浑水时,在不添加任何化学药剂情况下将水沙分离,其分离速度是泥沙在静态下沉降速度的 1.9 ~ 3.7 倍,且用该方法得到的清水与排出的泥沙不会对周边环境造成污染,是一种经济、绿色环保的水沙分离装置。

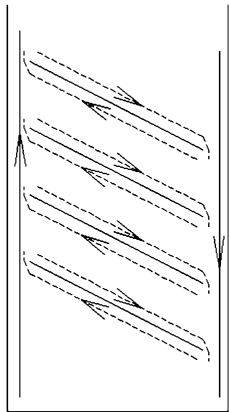


图 2 工作原理概化图

Fig. 2 Principle of the generalized diagram

2 数学模型及边界条件

2.1 数学模型

在前期研究中,通过 Fluent 软件采用了 2 种耦合模型(层流模型与欧拉模型,层流模型与混合模型)对分离鳃内部流场进行了计算,并利用 PIV 技术测试了宽度方向(Z 方向)与长度方向(X 方向)不同断面在同一时刻或不同时刻的图像,采用 Insight 数据处理软件及 Tecplot 后处理软件对图像和数据进行了处理,最终得到了 PIV 测试下的分离鳃内部流场。通过对宽度方向与长度方向的速度矢量分布图对比,发现这 2 种耦合模型的速度矢量分布规律与 PIV 的测试结果相一致,即分离鳃中存在水沙绕装置边壁的垂向异重流及水沙绕鳃片的横向异重流;但通过对宽度方向与长度方向的速度云图对比,发现采用层流模型与欧拉模型计算的泥沙及清水速度与 PIV 测试结果相接近,相对误差为 10% 以下,而层流模型与混合模型的计算结果与 PIV 测试结果相对误差高达 36.36%。从而定量地说明层流模型与欧拉模型的计算结果是可靠和有效的。

层流模型与欧拉模型的求解方程参照文献[16]。分离鳃的计算区域和基本控制方程的离散均采用有限体积法,离散后的线性代数方程组采用 Phase Coupled SIMPLE (PC - SIMPLE) 算法进行计算,各方程的计算精度均为 1×10^{-3} ,流相的离散格式采用具有良好迁移特性和较好稳定性的一阶迎风格式。采用四面体非结构性网格对不同鳃片间距的分离鳃进行网格划分。

2.2 边界条件

分离鳃边界条件的设置包括 2 个:自由表面边界与壁面(wall)边界。分离鳃内为水沙混合物,无进、出流边界,故泥沙在作静水沉降运动时,其内部水头大小不变。因此,分离鳃最上端的自由水面为一水平面,流速沿 Y 方向及其他各个变量沿 Y 方向的梯度都为零,可采用刚盖假定。在自由表面上采用对称(Symmetry)边界条件处理。分离鳃中的固体边壁(鳃片、鳃管底部和外围边壁)按固壁定律处理,其边界条件采用无滑移边界条件。分离鳃中包括水和沙两种介质。将水定义为主相,密度 $\rho_w = 998.2\text{ kg/m}^3$;泥沙颗粒定义为第 2 相,假定颗粒为球形,平均粒径为 0.019 mm,密度 $\rho_s = 2\,650\text{ kg/m}^3$,考虑重力作用。初始化时,假定分离鳃与普通装置内水沙混合均匀,含沙量 $S = 20\text{ kg/m}^3$ 。

3 计算结果与分析

限于篇幅,本文只给出鳃片间距 d 取 5、15、

25 cm下部分鳃片上下表面和宽度方向的速度矢量分布图,同时给出不同鳃片间距下宽度方向的平均速度对比及分离鳃高度方向(Y 方向)的泥沙分布特性。通过对比分析确定鳃片间距对分离鳃内部流场及水沙分离效果的影响。因分离鳃高度 $c = 100\text{ cm}$,在利用 Tecplot 绘图软件处理宽度方向的速度矢量分布图时,发现不能够清晰地看到速度场的分布规律,故采用速度流场局部放大的方法处理。

3.1 宽度方向的速度矢量分布对比

图 3 表示计算沉降时间为 200 s 时,不同鳃片间距下 Z 断面的速度矢量分布图。从图 3 可知 $d = 5\text{ cm}$ 时宽度方向速度分布规律与 $d = 15\text{ cm}$ 及 $d = 25\text{ cm}$ 有所不同。

从图 3a 可知, $Z = 0.5\text{ cm}$ 这个断面的流动主要为清水流运动,即各鳃片下表面的清水沿着各自鳃片下表面向上运动,运动至鳃片最高端时汇入清水通道,再一同向上运动,而泥沙通道中下降的泥沙流对该断面右侧鳃片上表面的低端局部有影响,但影响范围较小; $Z = 3.5\text{ cm}$ 这个断面的流动主要为泥沙流运动,各鳃片上表面的泥沙沿着各自鳃片上表面向下滑动,滑动至鳃片最低端时汇入泥沙通道,再一同向下运动,清水通道中上升的清水流对断面左侧鳃片下表面的高端局部有影响,且影响范围较小。这同室内物理试验观察到的现象一致^[4],即在鳃片上下表面形成了泥沙流向下水流向上的横向

异重流现象,在整个系统中形成了水沙沿分离鳃边壁的垂向异重流现象,这也在 $Z = 2.0\text{ cm}$ 断面上得到了完整的体现,并且可看出相邻鳃片间的流动是一个不封闭的横向环流,这是因为清水通道中上升的清水流对鳃片下表面的高端、泥沙通道中下降的泥沙流对鳃片上表面的低端及鳃片这个边界条件约束的影响造成的;鳃片间距 $d = 5\text{ cm}$ 时,鳃片数共计 14 个,则存在 13 个横向环流,图 3a 中给出了部分的横向环流。要保证水沙快速地从分离鳃中分离,需鳃片上表面的泥沙流、鳃片下表面的清水流、泥沙通道中的泥沙流及清水通道中的清水流的速度场相互干扰较少,各自按着相应的运动轨迹流动,经以上分析 $d = 5\text{ cm}$ 下分离鳃内部的速度流场满足该条件。

从图 3b、3c 可知, $Z = 0.5\text{ cm}$ 这个断面的流动主要为清水流运动,即各鳃片下表面的清水沿着各自鳃片下表面向上运动,当将要运动至鳃片最高端时,清水通道中上升的清水流与其相遇,因两者存在速度差,故该断面的左侧鳃片下表面的高端速度分布规律会受到影响,且鳃片间距越大,受到的影响就越大;同时泥沙通道中下降的泥沙流对断面右侧鳃片上表面的低端局部速度分布影响很大,可以看出鳃片间右侧速度呈钩形分布,且鳃片间距越大,该分布特性就越明显;同样在 $Z = 3.5\text{ cm}$ 这个断面的流动主要为泥沙流运动,各鳃片上表面的泥沙沿着各

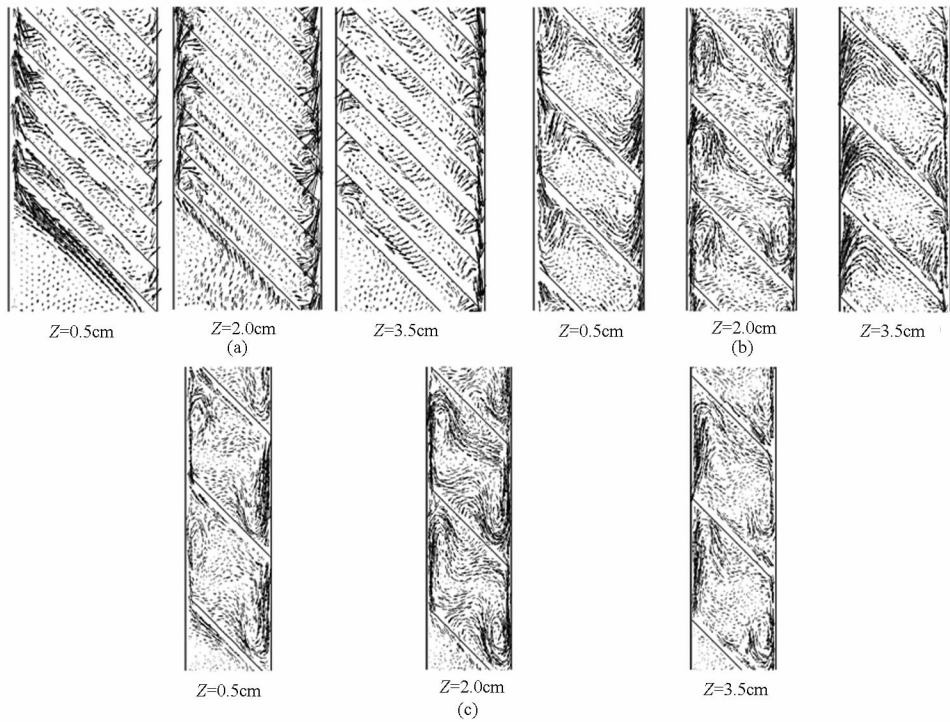


图 3 不同鳃片间距下 Z 断面的速度矢量分布图
Fig. 3 Distribution of the velocity vectors in the Z section under different gill-piece spacing
(a) $d = 5\text{ cm}$ (b) $d = 15\text{ cm}$ (c) $d = 25\text{ cm}$

自鳃片上表面向下滑动,当将要滑动至鳃片最低端时,泥沙通道中下降的泥沙流与其相遇,因两者存在速度差,故该断面的右侧鳃片上表面的低端速度分布规律会受到影响,且鳃片间距越大,受到的影响就越大;同时清水通道中上升的清水流对断面左侧鳃片下表面的高端局部速度分布影响很大,可以看出鳃片间左侧速度呈倒钩形分布,且鳃片间距越大,该分布特性就越明显。这在 $Z = 2.0\text{ cm}$ 断面上得到了完整的体现,并且可看出相邻鳃片间的流动是一个不封闭的横向环流,且鳃片间距不同(鳃片数量不同),横向环流个数也不相同, $d = 15\text{ cm}$ 时存在 5 个横向环流,而 $d = 25\text{ cm}$ 时存在 3 个横向环流。经分析 $d = 15\text{ cm}$ 及 $d = 25\text{ cm}$ 时分离鳃内部的速度流场相互之间受到一定程度的干扰,则不能保证水沙快速地从分离鳃中分离。

3.2 不同鳃片间距下宽度方向的平均速度对比

泥沙下降速度反映了泥沙从浑水中分离出来的快慢,速度越大,说明泥沙从浑水中脱离得越快,水沙分离效果越佳,反之效果越差;另外清水向上运动,其速度大小代表清水从浑水中分离出来的快慢,速度越大越好,说明从该分离鳃中可获得大量分离后的清水,反之不能获得。进行数值计算前,在 Fluent 软件中建立 2 个标准面: $Z = 0.5\text{ cm}$ (主要是清水流运动)与 $Z = 3.5\text{ cm}$ (主要是泥沙流运动)。监测 $Z = 0.5\text{ cm}$ 这个面上的清水平均速度随时间变化关系,以及 $Z = 3.5\text{ cm}$ 这个面上的泥沙平均速度与时间的关系,选静水沉降中期时间 $t = 4\,000\text{ s}$ 时 2 个断面下鳃片间距与平均速度的关系,如图 4 所示,分析鳃片间距对泥沙平均速度或清水平均速度的影响。据此,分离鳃的最佳鳃片间距以泥沙颗粒平均速度和清水平均速度作为考核指标,同时考虑制作分离鳃的经济性。

从图 4 可知, $Z = 3.5\text{ cm}$ 断面的泥沙平均速度与 $Z = 0.5\text{ cm}$ 断面的清水平均速度随鳃片间距的增大而减小,且泥沙平均速度大于清水平均速度。由浅层沉淀理论可知,沉淀效率(处理浑水的能力)与装置的沉淀面积呈正比,沉淀面积越大,沉淀效率就越高^[17]。表 1 为不同间距的分离鳃面积对比,从表中可知鳃片间距越小,鳃片数量就越多,则分离鳃沉淀的面积就越大,沉淀效率就越高,则表现为泥沙平均速度与清水平均速度就越大,如 $d = 5\text{ cm}$ 、 $Z = 3.5\text{ cm}$ 断面的泥沙平均速度为 5 cm/s ,而 $d = 25\text{ cm}$ 时仅为 1.8 cm/s 。泥沙平均速度大于清水平均速度的原因是 $Z = 0.5\text{ cm}$ 断面上既有清水向上运动又有泥沙沉降运动,二者相互叠加后清水的平均速度会减小。

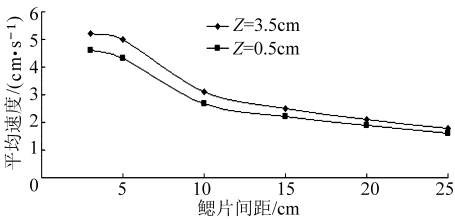


图 4 不同 Z 断面下鳃片间距与平均速度的关系
Fig. 4 Relationship between gill-piece spacing and average velocity under different Z section

表 1 不同鳃片间距下分离鳃的面积对比
Tab. 1 Area comparison of gill-piece separation device under different gill-piece spacing

鳃片间距 d/cm	鳃片个数	分离鳃沉淀 面积/ cm^2	鳃片实际 面积/ cm^2
3	25	1 720	3 689. 45
5	14	994	2 066. 12
10	8	598	1 180. 64
15	6	466	885. 48
20	5	400	737. 90
25	4	334	590. 32

从图 4 还可看出,鳃片间距为 $3 \sim 5\text{ cm}$ 时,平均速度随鳃片间距的增大变化不大,且不符合浅层沉淀理论。鳃片间泥沙流与清水流的夹层,称为混合层(图 5),其流体力学性质介于主相水与第 2 相泥沙性质之间。混合层与鳃片间距有关,鳃片间距过小则混合层厚度也会过小,从而势必恶化静水沉降过程,因鳃片间存在沿鳃片长边下滑的泥沙流与向上的清水流运动,在两者剪切作用下,会造成鳃片间本身按着各自运动轨迹流动的泥沙流与清水流混合,从而泥沙平均速度与清水平均速度减小,泥沙不能快速地沉降至分离鳃底部,而清水不能快速地上升至分离鳃的顶部。因此,并非鳃片间距越小越好,必定存在一个最佳鳃片间距值,既对分离鳃内部的泥沙流与清水流流场影响较小,又可以保证较高的沉淀效率及经济可行。图 6 为 $Z = 2.0\text{ cm}$ 断面下不同鳃片间距的局部放大速度矢量分布图,从图 6 可知, $d = 3\text{ cm}$ 时的泥沙流与清

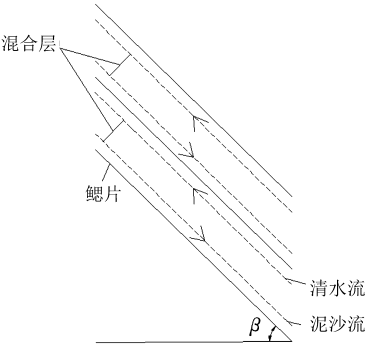


图 5 鳃片间混合层示意图
Fig. 5 Schematic of mixed layer between gill-piece

水流互相混合,而 $d = 5\text{ cm}$ 时的泥沙流与清水流则沿着各自的轨迹运动,相互之间影响很小,另外从经济的角度考虑, $d = 3\text{ cm}$ 的鳃片实际面积远大于 $d = 5\text{ cm}$,但平均速度与 $d = 5\text{ cm}$ 相差不大,故应选 $d = 5\text{ cm}$ 作为应用于实际工程的最佳鳃片距离。鳃片间距为 $5 \sim 10\text{ cm}$ 时,随着间距的增大平均速度迅速减小,可知该鳃片范围内分离鳃的沉淀面积最大相差 396 cm^2 ,故平均速度变化也较大,符合浅层沉淀理论。鳃片间距 $10 \sim 25\text{ cm}$ 时,随着间距的增大平均速度缓慢减小,可知该鳃片范围内分离鳃的沉淀面积相差不大,最大相差 264 cm^2 ,也符合浅层沉淀理论。

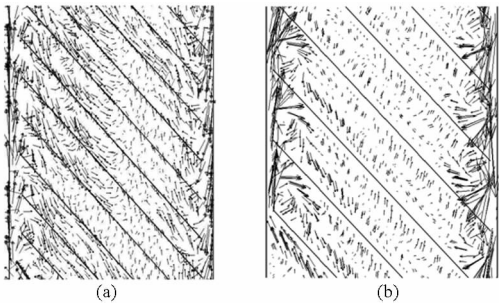


图 6 $Z = 2.0\text{ cm}$ 断面下的不同间距速度矢量分布图
Fig. 6 Distribution of the velocity vectors under different gill-piece spacing in the $Z = 2.0\text{ cm}$ section
(a) $d = 3\text{ cm}$ (b) $d = 5\text{ cm}$

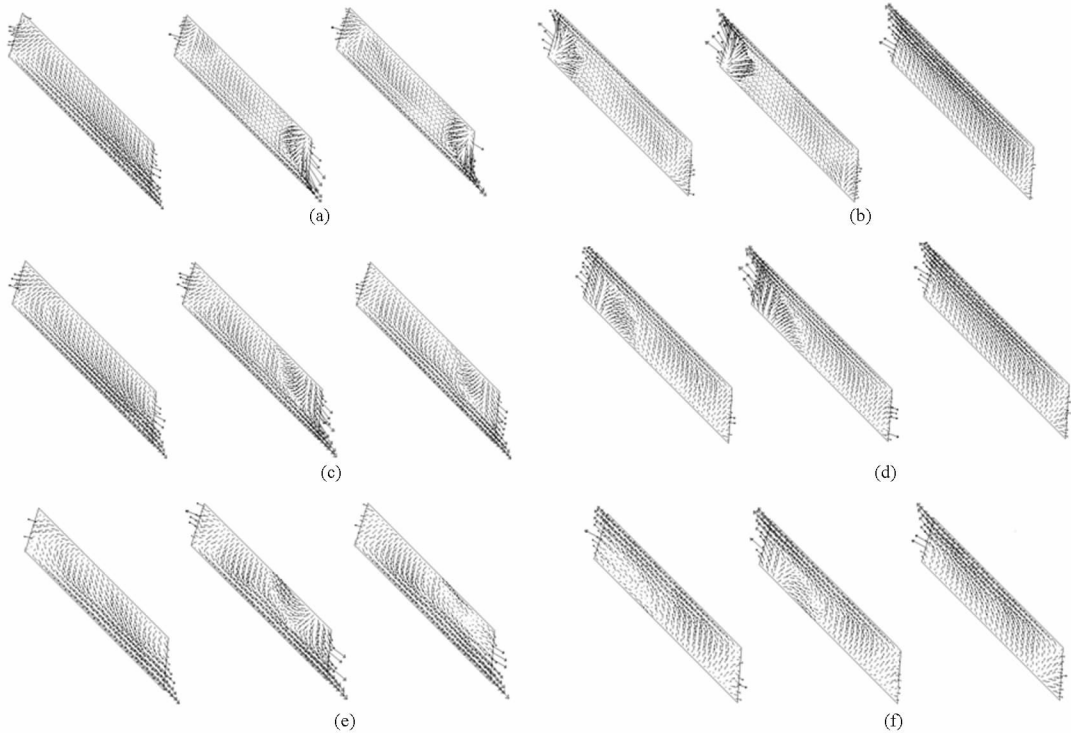


图 7 不同鳃片间距下鳃片上下表面的速度矢量分布图

Fig. 7 Distribution of the velocity vectors in the gill-pieces under different gill-piece spacing
(a) $d = 5\text{ cm}$ (从左至右为鳃片 1、8 与 14 的上表面) (b) $d = 5\text{ cm}$ (从左至右为鳃片 1、8 与 14 的下表面)
(c) $d = 15\text{ cm}$ (从左至右为鳃片 1、4 与 6 的上表面) (d) $d = 15\text{ cm}$ (从左至右为鳃片 1、4 与 6 的下表面)
(e) $d = 25\text{ cm}$ (从左至右为鳃片 1、3 与 4 的上表面) (f) $d = 25\text{ cm}$ (从左至右为鳃片 1、3 与 4 的下表面)

3.3 鳃片上、下表面的速度场

图 7 为时间 200 s 时,不同鳃片间距下部分鳃片上、下表面的速度矢量分布图,为表征分离鳃中不同位置下的鳃片速度分布规律,在分离鳃中取了 3 个不同位置(依次为最靠近分离鳃顶端、中间、最靠近分离鳃底部)的鳃片,鳃片个数从分离鳃顶端算起。

从图 7a、7c 及 7e 可知,不同鳃片间距下最靠近分离鳃顶端的鳃片上表面速度分布规律一致,即鳃片上表面的流动主要为泥沙流,泥沙在自身重力作用下沉降到鳃片上,先以倾斜角 α 在鳃片短边上向下滑动,当滑至鳃片长边时同其他泥沙一起沿倾斜角 β 向下运动;不同鳃片间距下中间与最靠近分离鳃底部的鳃片上表面速度分布规律相同于最靠近分离鳃顶端的鳃片,但因这些鳃片上表面的泥沙流不仅受到倾斜角 α 与倾斜角 β 的影响,还受到各自鳃片上泥沙通道中沉降的泥沙流影响,使得这些鳃片上表面右上角的速度呈向内放射状,且鳃片越大,鳃片上表面右上角受到的影响范围就越大。

从图 7b、7d 及 7f 可知,不同鳃片间距下最靠近分离鳃底部的鳃片下表面速度分布规律一致,即鳃片下表面的流动主要为清水流,清水先以倾斜角 α 在鳃片短边向上流动,当流至鳃片长边时同其他清水沿倾斜角 β 一起向上流动;不同鳃片间距下中间

与最靠近分离鳃顶端的鳃片下表面速度分布规律相同于最靠近分离鳃底部的鳃片,但因这些鳃片下表面的清水流不仅受到倾斜角 α 与倾斜角 β 的影响,还受到各自鳃片下清水通道中上升的清水流影响,使得这些鳃片下表面左下角的速度呈向内放射状,且鳃片越大,鳃片下表面左下角受到的影响范围就越大。

3.4 不同鳃片间距下高度方向的泥沙分布特性

数值计算结果中只能提取出泥沙的平均体积百分比 S_v ,为形象地表达不同位置的平均含沙量,将 S_v 用混合表达式 S 进行表示,两者关系为 $S = \rho_s S_v$ 。为得到不同鳃片间距下分离鳃 Y 方向的泥沙分布特征,在数值计算过程中监测 Y 方向各截面的平均含沙量与时间变化的关系,以便进行分析和对比。

图 8 表示时间 4 000 s 时不同鳃片间距下 Y 截面上的平均含沙量,从图中可知不同鳃片间距下在 Y 方向上的含沙量分布特性表现为上疏下浓,即分离鳃顶端的平均含沙量小于初始含沙量 20 kg/m^3 ,而在分离鳃底部则平均含沙量远远大于初始含沙量 20 kg/m^3 ,这符合泥沙在重力作用下沉降的分布特性。但不同鳃片间距下分离鳃在同一 Y 截面的平均含沙量则不同,在 $Y = 45\text{ cm}$ 以上的截面,表现为鳃片间距越小,平均含沙量就越小,而在 $Y = 45\text{ cm}$ 以下的截面,表现为鳃片间距越小,平均含沙量就越

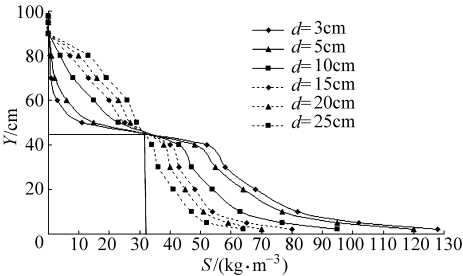


图 8 不同鳃片间距下 Y 截面上的平均含沙量
Fig.8 Average sediment concentration of Y section under different gill-piece spacing

大,这说明鳃片间距越小,分离鳃的沉淀效果越好,在鳃管中加入多个鳃片后极大改善了水流运动的水力条件并缩短了泥沙沉降及清水上升时间,从而加速泥沙下降至分离鳃底部,而清水上升至分离鳃的顶端;但鳃片间距 $d = 3\text{ cm}$ 与 $d = 5\text{ cm}$ 的各 Y 截面上的平均含沙量相差不大,从 3.2 节的分析可知, $d = 5\text{ cm}$ 更优,故实际工程中分离鳃的鳃片间距选择 $d = 5\text{ cm}$ 。

4 结 论

(1)不同鳃片间距下,分离鳃宽度方向的速度分布规律有所不同,鳃片间距越大,速度流场受到泥沙通道下降的泥沙流与清水通道上升的清水流影响就越大;都存在横向异重流与垂向异重流现象,但横向环流个数不一样,若分离鳃内部有鳃片 n 个,则横向环流个数为 $n - 1$ 个。

(2)不同鳃片间距下,鳃片上表面的流动主要为三维的泥沙流,最靠近分离鳃顶端的鳃片上表面速度分布规律一致,但其它鳃片上表面右上角的速度分布规律与最靠近分离鳃顶端的鳃片有所不同,表现为速度呈向内放射状,且鳃片越大,向内放射状的范围就越大;鳃片下表面的流动主要为三维的清水流,最靠近分离鳃底部的鳃片下表面速度分布规律一致,但其它鳃片下表面左下角的速度分布规律与最靠近分离鳃底部的鳃片下表面有所不同,表现为速度呈向内放射状,且鳃片越大,向内放射状的范围就越大。

(3)不同鳃片间距下在 Y 方向上的含沙量分布特性表现为上疏下浓,且鳃片间距越小,分离鳃的沉淀效果越好。

(4)以泥沙颗粒平均速度和清水平均速度作为考核指标,同时考虑分离鳃内部的流场特性、含沙量分布特性与制作分离鳃的成本,最终选择鳃片间距 $d = 5\text{ cm}$ 作为分离鳃应用于实际工程的理论设计值。

参 考 文 献

1 杨海华,李琳,靳晟,等.梭锥管内泥沙沉降特性及运动轨迹研究[J].水力发电学报,2013,32(2):184-189.
Yang Haihua, Li Lin, Jin Sheng, et al. Study on sediment settling characteristics and movement path in shuttle-conical tube [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 184-189. (in Chinese)

2 韩丙芳,田军仓.微灌用高含沙水处理技术研究综述[J].宁夏农学院学报,2001,22(2):63-69.
Han Bingfang, Tian Juncang. General introduction on the technology of purifying water for micro-irrigation with high-silt content water [J]. Journal of Ningxia Agricultural College, 2001, 22(2):63-69. (in Chinese)

3 李琳,邱秀云,聂境,等.基于滴灌浑水水力分离装置的水沙分离试验研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(6):37-40.
Li Lin, Qiu Xiuyun, Nie Jing, et al. Experiment on the water-sediment separation by turbid water hydraulic separation device based on drip irrigation [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(6):37-40. (in Chinese)

4 邱秀云,龚守远,严跃成,等.一种新型水沙分离装置的研究[J].新疆农业大学学报,2007,30(1):68-70.
Qiu Xiuyun, Gong Shouyuan, Yan Yuecheng, et al. The research on a new separator device for water-sediment [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2007, 30(1):68-70. (in Chinese)

- 5 王文娥,王福军,严海军. 迷宫滴头 CFD 分析方法研究[J]. 农业机械学报,2006,37(10):70-73.
Wang Wen'e, Wang Fujun, Yan Haijun. Study on CFD method for flow simulation in labyrinth emitter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10):70-73. (in Chinese)
- 6 Zhou S, McCourquodale J A. Modeling of rectangular settling tanks[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992,118(10):1391-1395.
- 7 周大庆,米紫昊,茅媛婷. 基于欧拉固液两相流模型的泵站进水侧流场三维模拟[J]. 农业机械学报,2013,44(1):48-52.
Zhou Daqing, Mi Zihao, Mao Yuanting. 3-D numerical simulation of inlet structure flow in pumping station based on Eulerian solid-liquid two-phase flow model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):48-52. (in Chinese)
- 8 Krebs P, Armhruster M, Rodi W. Laboratory experiments of buoyancy-influenced flow in clarifiers [J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36(5):831-835.
- 9 成立,刘超,周济人,等. 水泵站底坎二维绕流湍流数值模拟[J]. 农业机械学报,2005,36(3):37-39.
Cheng Li, Liu Chao, Zhou Jiren, et al. Numerical simulation of turbulent flow around sill with RNG $k-\varepsilon$ turbulent model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(3):37-39. (in Chinese)
- 10 Krebs P, Stamou A I, Carcia Heras. Influence of inlet and outlet configuration on the flow secondary clarifiers[J]. Water Science and Technology, 1996, 34(5-6):1-6.
- 11 魏正英,唐一平,温聚英,等. 灌水器微细流道水沙两相流分析和微 PIV 及抗堵实验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(6):1-9.
Wei Zhengying, Tang Yiping, Wen Juying, et al. Two-phase flow analysis and experimental investigation of micro-PIV and anti-clogging for micro-channels of emitter[J]. Transactions of CSAE, 2008,24(6):1-9. (in Chinese)
- 12 Chen L Y, Duan Y F. CFD simulation of coal water slurry flowing in horizontal pipelines [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2009, 26(4):1144-1154.
- 13 Wang Liyang, Zheng Zhichu, Wu Yingxiang, et al. Numerical and experimental study on liquid-solid flow in a hydrocyclones [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2009,21(3):408-414.
- 14 Takacs I, Patry G, Nlasco D. A dynamic model of the clarification thickening process [J]. Water Research, 1991, 25(10):1263-1267.
- 15 陶洪飞,邱秀云,赵丽娜,等. 水沙分离鳃内部流场数值模拟与验证[J]. 农业工程学报,2013,29(17):38-46.
Tao Hongfei, Qiu Xiuyun, Zhao Li'na, et al. Numerical simulation and PIV display of internal flow field in gill-piece separation device [J]. Transactions of CSAE, 2013,29(17):38-46. (in Chinese)
- 16 江帆,黄鹏. FLUENT 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社,2010:140-184.
- 17 Bandrowski J, Hehlmann J, Merta H, et al. Studies of sedimentation in settlers with packing [J]. Chemical Engineering and Process, 1997, 36(3):219-229.

3D Numerical Simulation of Internal Flow Field in Gill-piece Separation Device under Different Gill-piece Spacing

Tao Hongfei Qiu Xiuyun Li Qiao Tan Yihai Wang Miao

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: To study the effect of gill-piece spacing on velocity field and sediment distribution in gill-piece separation device, 3D numerical simulation based on laminar model, Eulerian model and Phase Coupled SIMPLE algorithm provided by Fluent software was conducted in simulating water-sediment flow field of different gill-piece spacing under hydrostatic condition. The velocity field and the distribution of sediment concentration were compared and analyzed according to the numerical results. It indicated that the velocity distribution was different under different gill-piece spacing. The effect on velocity flow field from sediment flow in the sediment channel and clear water flow in water channel would get greater as the gill-piece spacing became greater. When the gill-piece spacing was smaller, the precipitation effect would be better in gill-piece separation device. Taking the average velocity of sediment and clear water as the examination index and considering the characteristics of flow field, effect of water-sediment separation, and cost of making gill-piece separation device, the best gill-piece spacing was proposed as $d = 5$ cm.

Key words: Gill-piece separation device Gill-piece spacing Numerical simulation Velocity field
Average sediment concentration