

# 带翼片侧向流斜板沉淀池内颗粒沉降过程的数值模拟

刘百仓<sup>1</sup> 马 军<sup>1</sup> 张素霞<sup>2</sup> 梁再辉<sup>2</sup> 马 刚<sup>2</sup> 谢小龙<sup>3</sup> 黄社华<sup>4</sup>

(1 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2 北京市自来水集团有限责任公司, 北京 100085;

3 中国科学院研究生院, 北京 100039; 4 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘要** 采用有限体积法研究了带翼片侧向流斜板沉淀池内水流流动的特性, 并计算了带翼片与不带翼片斜板内水流的雷诺数, 结果表明加入翼片可以明显降低水流的雷诺数, 其数值为不带翼片斜板雷诺数的 42%, 并采用层流模型计算了两种情况斜板内水流的三维流场分布情况。在此基础上考察了加入稀疏颗粒后, 颗粒物的运动轨迹, 采用 DPM 模型进行计算, 结果表明, 加入翼片后颗粒物沉降的路径缩短, 有利于固液分离; 随着水流速度的增大, 颗粒跟随性增强, 颗粒物密度(采用 1 100 kg/m<sup>3</sup> 和 1 400 kg/m<sup>3</sup> 进行分析)增大, 颗粒沉降性也增强。同时大颗粒粒径也有利于沉淀。

**关键词** 有限体积法 斜板沉淀池 稀疏颗粒 计算流体力学

## Numerical study of particles settling processes in lateral flow settling tank with inclined vane plates

Liu Baicang<sup>1</sup>, Ma Jun<sup>1</sup>, Zhang Suxia<sup>2</sup>, Liang Zaihui<sup>2</sup>,

Ma Gang<sup>2</sup>, Xie Xiaolong<sup>3</sup>, Huang Shehua<sup>4</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology,

Harbin 150090, China; 2. Beijing Water Works Group Co., Ltd., Beijing 100085, China;

3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 4. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The finite volume method is used to study the lateral flow in settling tank with inclined vane plates. Reynolds number is calculated in both cases with and without vanes. The calculated results show that Reynolds number is reduced dramatically to 42% in vanes case comparing with no vanes. The three-dimensional flow field was also calculated. The settling trace of solid particles is calculated using Discrete Particle Model (DPM). The results show that vanes can speed up the solid and liquid separating process, with the inlet velocity increasing, the inertial force is strengthened. The density of solid particles are 1 100 kg/m<sup>3</sup> and 1 400 kg/m<sup>3</sup> separately, with the density increasing, the settling ability is increased. The larger diameter of the solid particles, the better settling ability of the solid particles behaves.

**Keywords:** Finite volume method; Inclined plate settling tank; Discrete solid particles; Computational fluid dynamics

为了解决目前采用的波纹斜板沉淀效果不佳的问题, 提出了一种带翼片侧向流斜板沉淀池的方案, 并进行了中试研究, 试验装置如图 1 所示。为了研

究颗粒物在斜板内的沉降过程及带翼片侧向流斜板沉淀池的沉淀效率是否高于不带翼片侧向流斜板沉淀池, 本文采用了计算机数值模拟的方法加以验

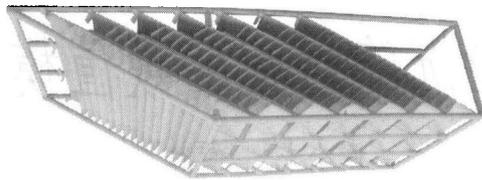


图1 带翼片侧向流斜板沉淀池示意

证<sup>[1]</sup>,并结合模型试验与实际工程设计,这对于节省沉淀池改造工程的投资及以后运行管理费用都有重大的经济意义。

### 1 数学模型

斜板与水平面成 $60^\circ$ 倾斜角放置,在每块斜板的下方引出一排翼片,与水平面仍成 $60^\circ$ 倾斜角。如图1所示,带翼片斜板沉淀池内斜板与一系列翼片形成水流流动通道,鉴于各通道尺寸相同,因此只需取其中一个单元进行研究。水流由布水穿孔墙至斜板入口处,由于水流分散不均会使入口水流速度大小不等<sup>[2]</sup>,而计算中只需改变入口边界的流速即可考察速度分布不均情形下单元体内的流动状况,故选择单元体进行研究具有代表性。本文中的单元体内水流流态为三维流动,如图2所示计算区域 $ABCDEF-GHIJKL$ 为棱柱体,其长度 $AG$ 为 $0.96\text{ m}$ ,一侧边长 $AC$ 为 $0.104\text{ m}$ ,另一侧边长 $CD$ 为 $0.058\text{ m}$ ,成 $120^\circ$ 角, $BCIH$ 、 $DEKJ$ 为两块翼片, $AGLF$ 、 $CIJD$ 为斜板。稳态层流不可压流体的控制方程如下。

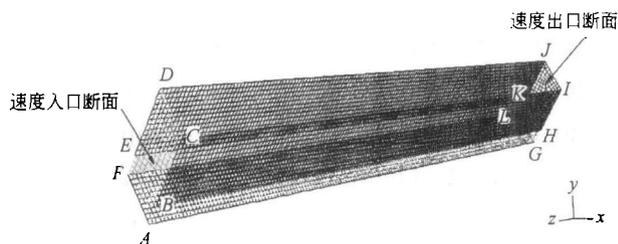


图2 计算单元体几何尺寸及网格

#### 1.1 连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, (i=1, 2, 3) \quad (1)$$

#### 1.2 动量方程

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}, (i, j=1, 2, 3) \quad (2)$$

其中,  $f_1 = f_3 = 0, f_2 = -g$

#### 1.3 边界条件

速度入口: 入口速度按均匀流假定  $z=0, u=$

$u_0, v=0, w=0$ 。

速度出口: 采用充分发展边界条件假定  $\frac{\partial u}{\partial x} = 0,$

$v=0, w=0$ 。

边壁, 无滑移边界条件假定  $u=v=w=0$ 。

#### 1.4 固体颗粒控制方程

$$\frac{du_{pi}}{dt} = F_D(u_i - u_{pi}) + \frac{g_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i, (i=1, 2, 3) \quad (3)$$

式中  $u$ ——流体相速度;

$u_p$ ——颗粒速度;

$\rho$ ——流体密度;

$\rho_p$ ——颗粒密度。

$F_D(u - u_p)$ 为单位质量颗粒受到的阻力。

虚拟质量力  $F_i = \frac{1}{2} \rho \frac{d}{dt}(u_i - u_{pi}), (i=1, 2, 3)$ 。

为了消除网格依赖性的影响,先进行了试算,最终确定计算采用网格数为 $29\ 302$ ,采用有限体积法求解控制方程及SIMPLE方法对速度场与压强场进行解耦。

### 2 计算结果与分析

#### 2.1 雷诺数比较

不带翼片的平行斜板间水流的长度以两斜板面 $AC$ 、 $DF$ 间距表示,其值为 $D_1 = 0.09\text{ m}$ ,取水温 $20^\circ\text{C}$ ,则水的运动粘性系数 $\nu = 1 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ ,  $u = Q/A = Q/(HB), u = 20/(2.9 \times 0.8) = 0.0024\text{ (m/s)}$ ,式中 $u$ 代表水流的平均流速, $Q$ 为流量, $A$ 为过水断面面积,  $R = L_1 D_1 / (2L_1) = D_1/2, Re = uR/\nu = 0.0024 \times 0.045 / 1 \times 10^{-6} = 108$ 。

带翼片的斜板间水流的特征长度以水力半径 $R$ 表示,  $R = A/\chi, A$ 为小单元过水断面面积,  $A = L_1 D_1, \chi$ 为小单元过水断面的湿周,  $\chi = 2L_1 + 2d_1, R = A/\chi = 0.058 \times 0.09 / (0.058 \times 2 + 0.08 \times 2), Re = uR/\nu = 0.0024 \times 0.0189 / (1.0 \times 10^{-6}) = 45.36$ ,可见雷诺数降低为原来的 $42\%$ ,明显增强了水流流动过程中的粘性力,有利于沉淀。

#### 2.2 速度场分布情况比较

图3a、b给出了带翼片与不带翼片斜板过 $DJ$ 垂直于 $x$ 轴切面的速度向量场,图3a速度场中,只有靠近上侧壁速度很小,而图3b速度场中,上下两侧速度均很小,两者在同样入口速度的情况下,根据

连续性方程,则 b 中主流的最大速度较 a 大,可见两者的速度场分布呈现较大的不同,也即水流的主体速度存在差异,b 与 a 相比部分流场区域速度减小了,部分流场区域速度增大了,而低速度有利于颗粒物沉淀,究竟哪部分占主要份额难以确定,但速度的改变会造成水中悬浮物携带能力的不同,从而造成去除率的不同。仅基于以上结果分析还不足以比较带翼片与不带翼片斜板沉淀池对悬浮颗粒的去除率。下面引入 DPM 模型进行计算分析。

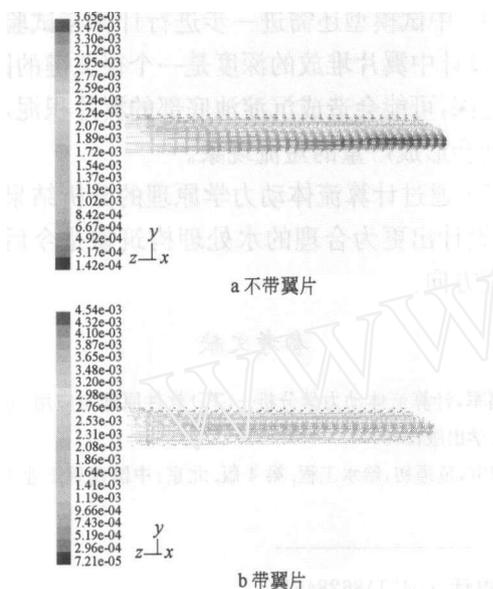


图3 侧向流斜板沉淀池过 DJ 垂直于 x 轴的切面处速度场

## 2.3 颗粒沉降轨迹比较

### 2.3.1 入口处速度影响

采用 DPM 模型,计算的单元体在速度入口断面处向水体中加入微小颗粒,假定微小颗粒的初始速度与入口处水流速度相同,考查微粒在不同水流中的去除情况,从而比较两种斜板对污染物的去除情况。在不同初始速度下带翼片与不带翼片时颗粒物质的运动轨迹是:随着速度的增加,不带翼片与带翼片斜板内颗粒物沿着水流方向运动的距离均加长,可见随着速度的增加,颗粒物随水流运动的跟随性增强。加入翼片后,沿翼片 BC1H 边的颗粒在很短距离内即可沉降到翼片表面,较不带翼片去除率高。

### 2.3.2 颗粒密度影响

由图 4a、b 比较可以看出当颗粒密度由  $1\ 100\ \text{kg/m}^3$  增大到  $1\ 400\ \text{kg/m}^3$  时,颗粒物沉降路径缩

短,密度大的颗粒有利于沉淀。

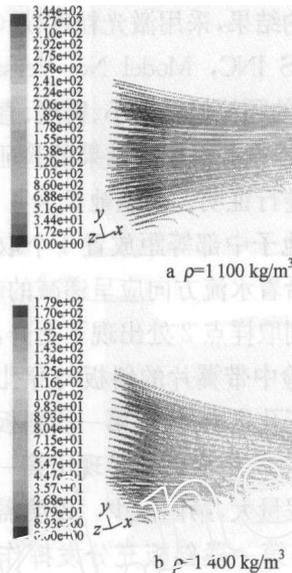


图4 侧向流斜板沉淀池内颗粒物沉降轨迹  
(颗粒直径  $5 \times 10^{-5}\ \text{m}$ , 初始速度  $0.002\ 4\ \text{m/s}$ )

### 2.3.3 颗粒直径影响

由图 5a、b 比较可以看出当颗粒直径由  $1 \times 10^{-5}\ \text{m}$  增大到  $5 \times 10^{-5}\ \text{m}$  时,其颗粒运动的轨迹呈现出较大的不同,即说明颗粒物直径大小也是影响沉淀效果好坏的一项非常重要的指标,颗粒物的大小与混凝阶段密切相关,混凝效果的好坏会影响到沉淀后出水的浊度。

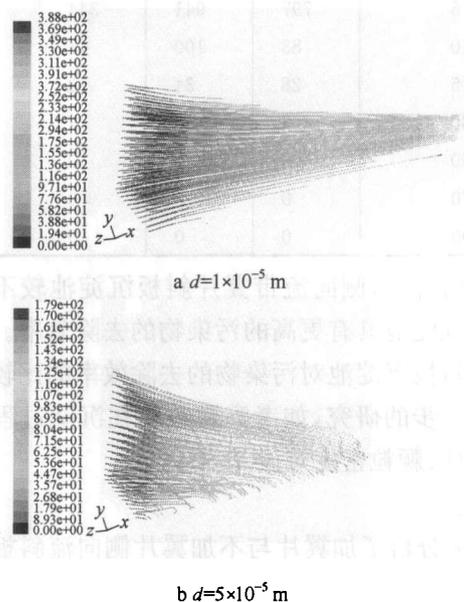


图5 侧向流斜板沉淀池内颗粒物沉降轨迹  
(初始速度  $0.002\ 4\ \text{m/s}$ , 密度  $1\ 400\ \text{kg/m}^3$ )

## 2.4 试验结果分析及模拟结果验证

鉴于以上计算的结果,采用激光粒度仪 (INTER BASIC RESOURCES INC, Model No. VersaCount) 进行试验,因为絮体的颗粒粒径大小、密度、直径均存在不确定的因素,所以试验对模拟结果的验证只能从颗粒去除的规律上进行证明。模型池长为 4.1 m,沿着池长水流方向在池子中部等距放置 4 个取样点并进行编号。颗粒数沿着水流方向应呈递减的趋势,而表 1 中由取样点 1 到取样点 2 处出现了上升,这可能是由于中试模型试验中带翼片的斜板与穿孔墙之间空隙过小及穿孔墙开孔集中,使得第一段斜板未充分发挥作用,试验观测沉淀池底泥也呈现出第一段出泥量少,第二、三段出泥量大,第四段少。说明需进一步改善水力条件,使得第一段斜板充分发挥作用。建议穿孔墙在整个斜板断面上布水,第一段斜板距穿孔墙留有一定的缓冲区,使得水流在整个过水断面均匀分布后再进入斜板。取样点 2、3、4 的规律性较好,颗粒粒径由  $2\ \mu\text{m}$  至  $30\ \mu\text{m}$  均呈现出沿程颗粒数降低的规律,与数值模拟的规律吻合。

表 1 沿带翼片新型斜板沉淀池颗粒粒度分布

取样点编号 颗粒粒径 / $\mu\text{m}$	1#	2#	3#	4#
2	4 271	5 011	2 013	1 561
5	797	941	344	259
10	83	100	41	29
15	28	34	13	9
30	2	2	1	1
50	0	0	0	0
70	0	0	0	0
100	0	0	0	0

总而言之,侧向流带翼片斜板沉淀池较不带翼片斜板沉淀池具有更高的污染物的去除效率。对于带翼片斜板沉淀池对污染物的去除效率的比较还有待于进一步的研究,如考察颗粒物在沉降过程中的聚集特性、颗粒密度等。

## 3 结论

(1) 分析了加翼片与不加翼片侧向流斜板沉淀池内水流流动的雷诺数,发现加入翼片可以显著降低水流流动的雷诺数,提出了对于具有翼片侧向流斜板沉淀池的数值模拟与分析方法,取单元体进行

研究的思路也可进一步用于分析斜管沉淀池。

(2) 给出了带翼片侧向流斜板沉淀池与不带翼片侧向流斜板沉淀池颗粒物的沉降轨迹,可以直观地分析斜板沉淀池内的沉淀规律,带翼片侧向流斜板沉淀池加快了颗粒物的沉降,缩短了沉降路径。

(3) 随着水流速度的增大,颗粒的跟随性增强,随颗粒物密度的增大其沉降性也增强。颗粒粒径大也有利于沉淀过程的实现,有待于对水中沉降颗粒的密度、聚合特性进一步的研究。

(4) 中试模型还需进一步进行计算与试验的考察,如设计中翼片堆放的深度是一个很关键的因素,如果过深,可能会造成沉淀池底部的翼片积泥,长期运行则会形成严重的短流现象。

(5) 通过计算流体动力学原理的分析结果指导实践,设计出更为合理的水处理构筑物是今后的重要研究方向。

## 参考文献

- 1 王福军,计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用. 北京:清华大学出版社,2004
- 2 严熙世,范瑾初,给水工程. 第 4 版. 北京:中国建筑工业出版社,1995

○电话:(0451)86284615

E-mail:baicangliu@yahoo.com.cn

收稿日期:2007-01-22

修回日期:2007-08-15

## 湖北将在 2009 年底前再建 79 座污水处理厂

目前湖北省共有城市污水处理厂 33 座,城市污水处理率为 52.35%,低于全国平均水平。其中武汉市城市污水处理率达到了 73.1%,高于全国平均水平。为此,湖北省计划 2009 年底前,再建 79 座污水处理厂。新建的 79 座污水处理厂主要分布在县市。2009 年全部建成后,全省城市污水处理率可达到 70% 以上。

为确保污水处理厂正常运转,湖北省政府要求各市州今年内将污水处理费提高到 0.8 元/ $\text{m}^3$ ,县市明年内提高到 0.8 元/ $\text{m}^3$ 。对城市污水处理设施建设严重滞后、不落实污水处理费收费政策、污水处理厂建成后一年内实际处理水量达不到设计能力 60% 的,以及已建成污水处理设施无故不运行的地区,将暂缓审批该地区项目环评,暂缓下达有关项目的建设资金。