DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.04.26

# 不同进流浓度梭锥管水沙两相流场三维数值模拟

王苗',李琳<sup>2</sup>,安昶<sup>1</sup>,纪媛媛<sup>1</sup>

(1、新疆农业职业技术学院工程分院,昌吉 831100;2. 疆农业大学水利与土木工程学院,乌鲁木齐 830052)

摘 要:为了获得全面详细的梭锥管内部流动特性,本文探讨进流浓度对梭锥管内水沙分离效果的影响,据此来揭示梭锥管水力分离水沙的机理。本文采用重整化 RNG (renormalization group)紊流模型与简化的多相流 Mixture 模型在泥沙浓度为5和15kg/m<sup>3</sup>时对梭锥管内水沙两相流场进行了三维的数值模拟计算。并将计算结果与 PIV 测量结果进行对比,计算结果与 PIV 测试结果一致。结果表明:在进流量相同时随着进流浓度的增加,在上锥管边壁清水上升通道内速度增加,水流挟沙力增强,随水流溢出的泥沙量增多,并且随着进流浓度的增加梭锥管各个断面泥沙体积浓度及紊动强度值也随之增加,上锥管得到的清水面积也随之减小,不利于梭锥管内水沙分离。 关键词:水沙分离; Mixture 模型; PIV; 数值模拟

中图分类号:TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)04-0136-07

# Three-dimension simulation on two phase flow field for water sediment in shuttle cone tube of different inflow concentration

WANG Miao<sup>1</sup>, LI Lin<sup>2</sup>, AN Chang<sup>1</sup>, JI Yuanyuan<sup>1</sup>

(1. Engineering Branch, Xinjiang Agricultural Vocational and Technical College, Changji 831100, China;
2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to get the comprehensive and detailed flow characteristics of shuttle cone tube, the paper investigated the effect of concentrations on the separation of water and sediment and revealed the mechanism of water-sediment separating in Shuttle-conical tube. The paper used renormalization RNG turbulence model (renormalization group) and simplified mixture model to carried out 3D numerical simulation when the sediment concentrations 5 and 15kg/m<sup>3</sup>. It compared the calculated results with the PIV measurement results and the calculation results agreed well with the measured data. The results show that with the increase of inflow concentration, the speed increase inside the rising water channel of the cone tube side wall when the inlet flow is the same. The sediment transport capacity enhances with the increase of sediment along water overflow. With the increase of inflow concentration sediment volume concentration, the turbulence intensity value also increase in Shuttle-conical tube of each section, and the water area on taper pipe decrease, which is not conducive to water and sediment separation in shuttle cone tube. **Key words**: water-sediment separation; mixture model; PIV; tree-dimension simulation

## 1 研究背景

梭锥管混浊流体分离装置(以下简称"梭锥管")是一种新型的(无需添加任何化学药剂和施加 外力作用)含极细沙(包括粘粒)的水沙两相流分离 装置(专利号:ZL200720146643.2)。该技术具有水 沙分离效率高、排沙耗水率低、无能耗、无化学污染 的特点,尤其是突破了以往水沙分离技术的壁垒 (排沙量越高所需耗水率和能量越高)。梭锥管组 成见图1所示。水沙混合物自进流管进入环状布水 管,由上、下布水孔流入梭锥管内,部分水流挟带泥 沙从泥沙出口排出,而经梭锥管分离后的清水自清 水出口流出。目前关于梭锥管的研究<sup>[1-7]</sup>主要是在 不改变其内部流动特征和水沙分离效果的前提下,

收稿日期:2015-03-27; 修回日期:2015-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51009117);新疆水利水电工程重点学科基金(xjzdxk - 2002 - 10 - 05) 作者简介:王 苗(1988-),女,陕西延安人,硕士,研究方向为水力学及河流动力学。

制作了 1/4 的梭锥管模型,并利用 PIV 对其相互垂 直的两测试面进行了测试,系统分析了浑水含沙浓 度不同时梭锥管内部流场特征。但是受到测试手段 限制和梭锥管结构本身具有的独特性,想要全面掌 握梭锥管内部的水沙两相流场特征仅应用理论分析 和实验是不行的。例如,PIV 流场测试是通过 CCD 相机把示踪粒子通过照亮脉冲激光片光拍摄在两次 曝光中位置的变化来对流速进行测量。而由上、下 锥管构成的梭锥管外形,对片光容易造成反射使得 进入装置准备拍摄区域的光源受到减弱,CCD 相机 经过锥管后拍摄图片无法正确反映实际流速。

从而试验只选取 1/4 梭锥管模型的两个相互垂 直的平面(如图 2 所示)来代替圆锥曲面作为流场 测试面,并根据测试面的测试结果分析整个梭锥管 内部的流场特性,未免有失偏颇;其次锥圈为透明有 机玻璃制成,相邻锥圈间距较小,锥圈壁对光产生折 射,使得靠近锥圈壁面区流速值均为假值,不能正确 反映实验观察到的贴壁流现象;再者,在梭锥管内下 锥管与4号锥圈之间布置的环形布水管,当激光投 射到此时光线已比较弱,并且圆形结构造成激光的 发散,无法测到布水管周围的流场分布。而由理论 分析可知,布水管周围流场对于泥沙向上紊动扩散 和沉降快慢均起至关重要的作用。因此笔者拟通过 数值模拟的方法在不同进流浓度下对梭锥管内水沙 两相流动进行三维数值计算。



1. 上锥管; 2. 下锥管; 3. 锥圈; 4. 浑水进流环状水管
 5. 转轴; 6. 浑水进流管; 7. 排沙软管; 8. 清水出口

#### 图1 梭锥管模型示意图

目前主要有双流体模型、欧拉 - 拉格朗日模型和 混合物模型(Mixture 模型)<sup>[8-10]</sup>,这 3 类数学模型来 模拟流体 - 颗粒固液两相流动。本文作者对适用于 模拟梭锥管内水沙两相流动的不同模型进行了比选 和讨论,根据其研究成果,考虑到梭锥管在正常运行 工况下 雷诺数较大,流态为紊流,故采用重整化 RNG $\kappa - \varepsilon$  (renormalization group)紊流模型与 Mixture 模型耦合的数值模拟方法在不同进流浓度下(即泥沙浓度 $S_{10}$  =5 和 15 kg/m<sup>3</sup> 时)对梭锥管内水沙两相流场进行三维动水沉降的数值模拟研究(参见文献[6 – 7])。根据模拟结果,获得全面详细的梭锥管内部流动特性,并据此揭示梭锥管水力分离水沙的机理。在文献[6 – 7]中对相同条件下的梭锥管数值模拟结果与 PIV 测试结果进行了详细对比,得到应用欧拉多相流混合物模型模拟出的梭锥管内的速度分布规律与 PIV 测试结果一致,在这里不再赘述。



图 2 PIV 试验测试面的分区

# 2 基本方程

Mixture 模型的连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \left( \rho_m U_m \right) = 0 \tag{1}$$

式中: $U_m$ 是混合相的平均速度, $U_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k U_k}{\rho_m}$ ;

 $\rho_m$  是混合相的密度, $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$ ;  $\alpha_k$  是第 *k* 相的体积分数。

Mixture 模型动量方程可以通过对所有相各自的动量方程求和来获得。它表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m U_m) + \nabla (\rho_m U_m U_m)$$

$$= - \nabla p + \nabla [\mu_m (\nabla U_m + \nabla U_m^{\mathrm{T}})] + \rho_m g +$$

$$F + \nabla [\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k U_{dr.k} U_{dr.k}]$$
(2)

式中:n 是相数(n = 2); F 是体积力; g 是重力加速 度;  $\mu_m$  是混合黏性,  $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$ ;  $U_{dr.k}$  是第二相 k的漂移速度,  $U_{dr.k} = U_k - U_m$ 。把滑移速度定义为第二 相(p) 的速度相对于主相(q) 的速度: $U_{qp} = U_p - U_q$ 

漂移速度与滑移速度的关系通过式(3)表示:

$$U_{dr.k} = U_{qp} - \sum_{k=1}^{n} \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} U_{qk}$$
(3)

第 *p* 相的体积分数方程为:  

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla(\alpha_p \rho_p U_m) = - \nabla(\alpha_p \rho_p U_{dr.k})$$
(4)

其中曳力系数  $C_p$  与颗粒 Reynolds 数  $Re_p$  有关系。本文针对梭锥管内流场特性,采用文献[11] 给出的  $C_p$  和  $Re_p$  的关系表达式(5) 来表达固相与液相之间的曳力系数。

$$C_{p} = \begin{cases} 24/Re_{p} & (Re_{p} < 1) \\ 24[1 + 0.15(Re_{p})^{0.687}]/Re_{p}, (1 < Re_{p} \le 1000) \\ 0.44 & (Re_{p} > 1000) \end{cases}$$

$$Re_{p} = \frac{\mid U_{p} - U_{q} \mid d_{p}}{\nu}$$
(5)

RNG  $k - \varepsilon$ (renormalization group) 模型的 k 方 程和  $\varepsilon$  方程见(6) 和(7)。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (ku_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \alpha_k (\nu + \nu_i) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \varepsilon$$
(6)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \Big[ \alpha_{\varepsilon} (\nu + \nu_i) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \Big] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$
(7)

式中:  $\nu_{\iota} = C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}$ ;  $C_{\mu} = 0.0845$ ;  $\alpha_k = \alpha_{\varepsilon} = 1.39$ ;  $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}$ ;  $C_{1\varepsilon} = 1.42$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1.68$ ;  $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$ ;  $E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ;  $\eta_0 = 4.377$ ;  $\beta = 0.012_{\circ}$ 

## 3 计算方法及边界条件

本节针对梭锥管内的水沙二相流动水沉降过程的数值模拟采用三维数值模拟。控制方程的离散采用了控制容积积分法,对流项的离散格式采用二阶迎风格式。离散后的线性代数方程组采用 Simple 算法进行求解。计算介质为水和沙,主相是水,密度为998.2 kg/m<sup>3</sup>;次相是沙,平均粒径为0.045 mm,密度为2650 kg/m<sup>3</sup>。具体模型边界条件见图3所示。模型试验观测发现当进流量不变或变化不大时,梭锥管顶部的水头大小基本不变,故按照刚盖假定处理自由表面。对壁面近区粘性底层内的流动速度进行修正<sup>[12]</sup>采用固壁函数法。对进口边界采用速度进口,其大小根据进口流量及进口断面面积来确定。泥沙速度等于其自由沉降速度,方向与 γ 轴

负向一致,即 $V_p = -\omega_o$ 由斯托克斯定律,用公式<sup>[13]</sup>  $\omega = \frac{1}{18} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g \frac{d^2}{\nu}$ 计算泥沙的沉降速度。式中 $\gamma_s$ 为泥 沙容重, $\gamma$  为清水容重, $\nu$  为泥沙的动力粘滞系数,其 值为0.02001 kg/(m·s), d 为泥沙粒径。梭锥管 的出口分别是上锥管顶部侧面清水出口和锥底的泥 沙出口。"清水"从清水出口溢出,泥沙流从锥底泥 沙出口泄流。将清水出口和泥沙出口均设置为压力 出口,相对压强为0。

为研究不同进流浓度时梭锥管内泥沙浓度规 律,沿梭锥管的 y 方向选取 8 个不同断面,如图 4 所 示,图中 y/H 为相应断面 y 值与梭锥管总高度 H 的 比值。



自由表面; 2. 固壁边界; 3. 进口边界; 4、5. 出口边界
 图 3 模型边界条件图



图 4 梭锥管三维模型结构示意图

# 4 数值模拟结果及分析

#### 4.1 速度场对比

图 5 所示为泥沙浓度  $S_{10} = 5 \text{ kg/m}^3 \pi S_{10} = 15$ kg/m<sup>3</sup> 时梭锥管内不同区域在计算时间相同时 x = 0 平面内 z 方向速度  $w_m$  与 y 方向速度  $v_m$  的合速度,  $v = \sqrt{w_m^2 + v_m^2}$  的分布规律及速度矢量云图。图中 带箭头线段表示水沙混合物沿 z 方向和 y 方向的速

度的合速度,箭头指向为速度方向,图中右侧标示栏 中数字为合速度大小,单位为 cm/s。





由图 5(a)可知,在上锥管内,不同进流浓度下, 梭锥管内流场分布规律基本一致。分离后的清水沿 上锥管边壁向上流动,从梭锥管清水出口流出,而一 部分含沙浓度较高的浑水在梭锥管顶部形成回流, 沿重力方向向下再次进入梭锥管内部进行水沙分 离。由图 5(a)还可知,在上锥管中心轴区域(泥沙 通道),进流浓度  $S_{10}$  = 15 kg/m<sup>3</sup> 的混合物速度值明 显大于进流浓度  $S_{10}$  = 5 kg/m<sup>3</sup> 的混合物速度值,这 是由于进流流量不变、进流含沙浓度增大,水沙混合 物的动能增加,泥沙在重力作用下以沉降运动为主 而速度矢量方向为竖直向下,泥沙与水流速度方向 相同,二者正向叠加使合速度较大。随着进流浓度 的增加清水上升通道内合速度值也有所增加,水流 挟沙力增强,不利于清水出口获得高质量的清水。 由图5(b)可知,进流浓度的变化对锥圈之间的速度 分布规律影响较小,相邻锥圈间速度值随着进流浓 度的增大略有增大。而进流浓度的增大使泥沙下沉 通道内的流动速度有所增大。由图(c)可知,进流 浓度对布水管周围的流速分布规律基本一致。受布 水管顶部和底部设置的布水孔影响,布水管顶部和 底部有较大的向上和向下的速度矢量,浑水通过上



下布水孔流进上、下锥管。在布水管内侧,在锥圈下 表面沿着锥圈母线方向向上的水流,到达布水管近 壁时,分成两股,一部分泥沙浓度较小的继续沿着锥 圈边壁紧贴布水管壁继续向上运动,另一部分含沙 浓度较高的浑水受底部布水孔出流的阻挡在布水管 壁形成回流,沿着下锥管壁面向下再次进入梭锥管 内进行水沙分离。在布水管外侧,受重力作用的影 响水流贴近布水管壁向下运动。

#### 4.2 浓度分布对比

图 6 为梭锥管内不同进流浓度条件下各截面上 泥沙体积浓度沿径向的分布规律。



图 6 不同进流浓度时梭锥管内泥沙体积浓度沿径向分布

纵坐标代表各点的泥沙体积浓度值  $S_v = \frac{(\rho_m - \rho)\rho_s}{\rho_s - \rho}$ ,式中 $\rho$ 为水的密度; $\rho_m$ 为混合物的密度; $\rho_s$ 为泥沙密度,泥沙浓度浓度单位为 kg/m<sup>3</sup>。横

坐标代表相应点在径向位置 r 和对应平面的半径 R 的比值。

由图 6(a)可知,在上锥管区域,不同进流浓度在同一断面处泥沙浓度沿径向的分布规律基本一致呈

"梯形"分布。愈靠近上锥管边壁(|r/R| > 0.8),浓 度越小,愈靠近中心泥沙浓度越大。对比图(a)、(b) 可知,下锥管和上锥管的泥沙浓度沿径向分布规律明 显不同,靠近锥圈(即y/H > 0.05)断面,泥沙体积浓 度沿径向基本呈"倒梯形"分布。即靠近边壁泥沙体 积浓度值大于中心轴附近浓度值。分析整个图 6 可 得,当进流浓度 $S_{10}$ 不同时相应的泥沙体积浓度 $S_V$ 沿 轴向的变化规律基本—致。沿着高度方向自上而下, 愈靠近清水出口,泥沙体积浓度值愈小,愈向下泥沙 浓度值呈增大趋势。并且位于同—高度处随着进流 浓度的增大每点泥沙体积浓度值增大。以上泥沙浓 度特性与物理模型实验得出的分布规律—致。

4.3 紊动强度对比

图 7 为进流浓度 S<sub>10</sub> = 5 和 15 kg/m<sup>3</sup> 时相同进



流量下梭锥管内水沙两相流场的紊动强度分析断 面。计算结果如图8所示。





由图 8(a)可知,在锥圈之间,紊动强度随着进 流浓度的增大而增大,在两相邻锥圈之间紊动强度 值在两锥圈壁处较大向中心其值逐渐减小,大约在 二分之一两锥圈间距处达到极小值。这是因为在相 邻锥圈之间锥圈壁面"泥沙"流和"清水"流处的速 度值比中间区域大。而在 1 号锥圈内(-0.2 < r/R <0.2)紊动强度值在梭锥管中心轴(r/R = 0) 处达到极大值,沿径向递减。这是因为在整个梭锥 管内泥沙通道处速度值最大。由图(b)、(c)可知, 在上锥管无锥圈区,紊动强度在中心处较大,沿径向 逐渐减小,在壁面处达到最大值。由图(d)可知,在 靠近清水出口的断面,进流浓度对紊动强度基本没 影响,二者基本重合,这是由于在此断面处含沙量很

低,含沙浓度对其基本没有影响,紊动强度基本就是 由水单相产生的。在近壁区紊动强度值变化较大, 这主要受到两侧出口边界条件的影响。对比锥圈区 和无锥圈区的紊动强度值发现,位于锥圈区的紊动 强度值都小于无锥圈区域的,说明锥圈的存在有效 的抑制了水流的紊动扩散,削弱了水流的紊动强度, 有利于悬浮泥沙的沉降。因此在上锥管增加一些锥 圈可提高梭锥管内水沙分离效果。

### 5 结 语

本文采用重整化 RNG k - ε (renormalization group)紊流模型与简化的多相流 Mixture 模型对梭 锥管内水沙两相流在不同进流浓度下进行动水沉降

的三维数值模拟,并将计算结果与 PIV 测量结果进 行对比。结果表明,计算结果与 PIV 测试结果一致。 在进流量相同时,随着进流浓度的增加,在上锥管边 壁清水上升通道内速度增加,水流挟沙力增强,随水 流溢出的泥沙量增多,并且随着进流浓度的增加梭 锥管各个断面泥沙体积浓度及紊动强度值也随之增 加,上锥管得到的清水面积也随之减小,不利于梭锥 管内水沙分离。

### 参考文献:

- [1] 谭义海,李琳,邱秀云. 梭锥管浑浊流体分离装置水沙 分离实验研究 J. 新疆农业大学学报,2010,33(6):521 -526.
- [2] 谭义海. 梭锥管混浊流体分离装置内水力特性试验研 究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2011.
- [3] 李琳,杨海华,王苗,等. 梭锥管混浊流体分离装置流场 PIV 测试及分析[J]. 水利学报,2013,44(9):1064-1070.
- [4] 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.
- [5] 杨海华. 梭锥管水力分离水沙机理试验研究[D]. 乌鲁 木齐:新疆农业大学,2013.

- [6] 王 苗,李琳,杨海华,等. 梭锥管混浊流体分离装置水沙 两相流场数值模拟[J].水动力学研究与进展(A 辑), 2013,28(3):5:291-298.
- [7] 王 苗,李琳,杨海华等. 梭锥管与普通装置内水沙两相 流场特性数值模拟[J]. 中国农村水利水电,2014(1):
   111-117.
- [8] 张 政,谢灼利. 流体 固体两相流的数值模拟[J]. 化工 学报,2001,52(1):1-12.
- [9] 屈强,马鲁铭,王红武. 辐流式二沉池固液两相流数值 模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版),2006,34(9): 1212-1216.
- [10] 倪晋仁,曲轶众.固液两相流中固体颗粒的垂直分选模型[J].水动力学研究与进展(A辑),2003,18(3):349-354.
- [11] 李广年,张 军,陆林章,等. PIV,LDV 在螺旋桨尾流测 试中的对比应用[J]. 航空动力学报,2010,25(9): 2083-2090.
- [12] 李云开,杨培岭,任树梅,等. 圆柱型灌水器迷宫式流道 内部流体流动分析与数值模拟[J].水动力学研究与进 展(A辑),2005,20(6):736-743.
- [13] 钱 宁,万兆慧. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社, 2003.

(上接第135页)

### 参考文献:

- He Daming, Zhao Wenjuan, Feng Yan. Research progress of international rivers in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2004, 14(1): 21 - 28.
- [2]何大明,吴绍洪,彭华,等.纵向岭谷区生态系统变化及 西南跨境生态安全研究[J].地球科学进展,2005,20
   (3):338-344.
- [3] 樊辉,何大明. 怒江流域气候特征及其变化趋势[J]. 地 理学报,2012,67(5):621-630.
- [4] 尤卫红,郭志荣,何大明.纵向岭谷作用下的怒江跨境径 流量变化及其与夏季风的关系[J].科学通报,2007,52 (Z2):128-134.
- [5]周长海,吴绍洪,戴尔阜,等. 纵向岭谷区水汽通道作用及植被生产力响应[J]. 科学通报,2006,51(Z2):81 89.
- [6] 刘新有,何大明. 怒江流域悬移质输沙时空分布特征及 变化趋势[J]. 地理学报,2013,68(3):365-371.
- [7] Feng Yan, He Daming, Li Yungang. Ecological changes and the drivers in the Nu River basin (upper Salween)

[J]. Water International, 2010, 35(6): 786-799.

- [8] 邹秀萍,齐清文,徐增让,等. 怒江流域土地利用/覆被变 化及其景观生态效应分析[J].水土保持学报,2005,19 (5):147-151.
- [9] 陆永军, 左利钦, 季荣耀, 等. 水沙调节后三峡工程变动 回水区泥沙冲淤变化[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 318-324.
- [10] 李胜男, 王根绪, 邓伟, 等. 水沙变化对黄河三角洲湿 地景观格局演变的影响 [J]. 水科学进展, 2009, 20 (3): 325-331.
- [11] 涂新军,陈晓宏,张强,等.东江径流年内分配特征及影响因素贡献分解[J].水科学进展,2012,23(4):493-501.
- [12] 刘贤赵,李嘉竹,宿 庆,等. 基于集中度与集中期的径 流年内分配研究[J]. 地理科学,2007,27(6):791 795.
- [13] 傅开道,何大明,陈武,等.电站建设对澜沧江 湄公 河泥沙年内分配的影响[J].地理学报,2007,62(1): 14-21.