

引用格式:孔玲,潘华利,邓其娟,杨奉广,李炳志. 泥石流下泄泥舌动力过程的数值模拟研究[J]. 山地学报,2022,40(1):84-95.

KONG Ling, PAN Huali, DENG Qijuan, YANG Fengguang, LI Bingzhi. Numerical simulation of dynamic process of debris flow jet [J]. Mountain Research, 2022, 40(1):84-95.

泥石流泥舌动力过程的数值模拟研究

孔玲^{1,2}, 潘华利^{1*}, 邓其娟³, 杨奉广⁴, 李炳志^{1,2}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 四川建筑职业技术学院, 成都 610399. 4 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610044)

摘要: 泥石流下泄泥舌运动特征参数是制约下泄泥舌冲击特性和拦砂坝下游沟道冲刷研究的重要因素。大多数研究基于模型实验来研究泥石流过坝形成泥舌, 成果受到观测手段与研究条件等限制, 成果的实际应用意义不大。利用数值模拟方法研究清水或挟沙水流过坝现象, 反演泥石流在过坝过程中的流动规律和流动状态, 已经证明了数值模拟方法模拟泥石流运动特性的可行性, 然而少有学者利用数值模拟针对泥舌运动进行仿真研究。本文针对拦砂坝满库状态, 采用基于能有效追踪自由界面的 VOF 方法的 $k-\varepsilon$ 紊流模型, 模拟泥舌下泄运动过程, 利用室内模型实验中无法获得的较为详细的流场信息, 重点研究泥舌的纵向厚度、下游入射角以及流速分布的变化规律, 分析泥舌运动参数与水平抛射距离之间的变化关系, 探讨在不同泥石流容重和沟床条件下泥舌断面形态的沿程变化规律, 并与已有的室内水槽模型实验结果进行比较分析。结果表明: (1) 根据泥舌断面形态, 泥舌空中运动段可分为密实段、扩散段和破碎段三个阶段; (2) 泥舌的纵向厚度和下游入射角均随抛射距离的增大而增大, 同时随泥石流容重和沟床纵坡的变化而变化; (3) 泥舌的断面平均速度随抛射距离的增大而增大, 且射距越大, 流速分布越不均匀, 呈中间大、周围小的特点。模拟结果与实验结果吻合良好, 说明利用该数学模型模拟泥舌运动是可行的。本研究利用数值模拟对泥舌运动过程进行研究, 弥补了模型实验中无法直接测量空中泥舌的形态和流速分布的不足, 为准确认识泥舌水力特性提供了依据。

关键词: 泥石流; 泥舌; 水力特性; VOF 法; 数值模拟

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

为控制泥石流的流量、流速和沟床纵坡, 通常会在泥石流流通区修建拦砂坝^[1]。拦砂坝是泥石流防治中的主要工程措施之一, 可以有效拦截泥沙, 防止沟道下切, 具有良好的拦挡效果。当拦砂坝达到满库状态后, 泥石流流经溢流口形成泥舌, 其具有的能量会使拦砂坝下游受到冲刷, 冲刷坑的形状、深度的发展影响着拦砂坝的稳定性^[2-4]。拦砂坝的主要破坏形式包括冲毁、溢流口破坏、基础破坏等^[5], 根

据野外调查研究, 受泥石流冲刷导致的拦砂坝坝脚破坏占整体拦砂坝失事情形的 65%。在运动过程中, 泥舌的动力特征将直接受泥舌的容重、沿程的速度场以及空间形态等变化的影响。准确预测下泄泥舌的形态和动力特征变化过程, 有助于准确预测拦砂坝下游冲刷坑的位置及其极限形态, 对拦砂坝的安全设计具有重要意义。

目前, 少有学者以下泄泥舌为切入点研究其运

收稿日期 (Received date): 2021-09-10; **改回日期** (Accepted date): 2022-01-21

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划项目 (2019YFC1510702); 国家重点实验室开放基金 (SKHL1717); 国家自然科学基金 (42077275)。[National Key Research and Development Program of China (2019YFC1510702); State Key Laboratory Open Foundation (SKHL1717); National Natural Science Foundation of China (42077275)]

作者简介 (Biography): 孔玲 (1997-), 女, 四川遂宁人, 硕士研究生, 主要研究方向: 山地灾害及其动力过程。[KONG Ling (1997-), female, born in Suining, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on mountain disaster and its dynamic process] E-mail: kongling@imde.ac.cn

*** 通讯作者** (Corresponding author): 潘华利 (1982-), 女, 重庆人, 博士, 研究员, 主要研究方向: 山地灾害动力学机理。[PAN Huali (1982-), female, born in Chongqing, Ph. D., professor, research on dynamic mechanism of mountain disaster] E-mail: hlpn@imde.ac.cn

动过程,仅对泥石流过坝现象进行了讨论,探讨了泥舌动力特性和坝下冲刷坑深度与泥石流容重、颗粒级配、沟床纵坡与拦砂坝溢流口形态等因素的关系^[6]。有学者基于抛体运动理论对泥舌任一质点进行分析,提出了泥舌的运动轨迹、最大射距和下游入射角等参数的计算公式^[7-8],并根据泥石流颗粒粒径和颗粒浓度的组成特征,提出泥舌颗粒浓度分布往往呈现底部粗颗粒较多、上部细颗粒较多的现象,反映为泥舌容重下大上小的特点^[8]。泥石流淤满坝后,经过不同拦砂坝溢流口会有不同的下泄形式,当泥舌通过宽浅的矩形溢流口时,泥舌在流动方向拉伸不明显,当溢流口加强侧向收缩时,泥舌在流动方向有明显的拉伸作用^[7-9],同时,泥石流掺气后会对泥石流的容重和速度产生影响^[10]。虽然有学者通过水槽实验对泥石流过坝现象进行研究,得到关于泥舌厚度、入射角、射距等形态特征的变化规律,但由于受到观测手段的限制,未对泥舌的速度和容重分布等特征进行深入研究^[6]。目前针对泥石流过坝形成泥舌的研究,大多数研究成果是学者根据模型实验所得,耗费大量的人力、物力以及时间,常常受到观测手段、数据获取,研究经费等多种因素的限制,其应用条件受到了较大的限制。

水利工程上许多学者利用数值模拟的方法对清水或挟沙水流过坝现象进行研究,在对于与泥舌有相似运动形态的水舌水力特性方面取得了丰富的研究成果,例如水舌的横向、纵向扩散规律^[11]、沿程水面线和水舌入水角等形态特征^[12],以及水舌入水点、体积分数分布、沿程的流速分布,和计算区域的压强等参数的变化规律^[13-17],水舌的研究成果为泥舌研究提供了思路。

目前,虽然少有学者利用数值模拟专门针对泥舌运动进行研究,但在泥石流运动方面,有不少学者利用 Fluent 软件分别对泥沙体积浓度与泥沙运动变化的关系^[18]、泥石流坝前回淤坡度^[19]、泥石流颗粒启动^[20]以及溃坝后泥石流运动情况等^[21]进行了模拟,各学者的模拟结果与实验结果吻合良好,证明了数值模拟方法以及 Fluent 软件模拟泥石流运动特性的可行性。

虽然水舌的研究成果为泥舌的研究内容和研究方法提供了参考和思路,但由于泥石流内部固体物质组成复杂,颗粒粒径分布范围广,与水流性质有所不同,目前少有学者利用数值模拟的方法专门针对

泥舌运动进行研究。为研究泥舌水力特性沿程空间的变化特征,本研究在借鉴水舌研究方法的基础上,基于 VOF 模型,同时考虑泥石流的宾汉体性质,对泥舌从流出溢流口至拦砂坝下游过程进行了模拟,分析了空中泥舌断面形态的在运动方向上的变化特点,并用纵向厚度、下游入射角等参数反映其形态特征,同时探讨了泥舌速度分布的变化特征。

1 泥舌气液两相运动模型

为模拟得到泥舌液面与空气的交界面,进而确定泥舌的形态特征,本文采用能有效追踪自由液面的 VOF 方法进行计算,即两相流体共用一套控制方程,通过求解某一相体积分数的连续性方程来跟踪各相之间的界面。因此本文将泥石流视为由具有一定粘度的浆体与空气一同组成的气液两相流,并考虑泥石流的流变特性以区分清水或一般挟沙水流。

1.1 控制方程

从动力特征来看,泥舌内部存在复杂的相互作用力,层与层之间相互干扰,更加符合湍流流动特征。本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型,基于能有效追踪自由液面的 VOF 方法,将泥石流视为由具有一定粘度的浆体与空气一同组成的气液两相流进行模拟,两者共用一套控制方程,假设流体不可压缩且无热效应,根据 Fluent 中的基本模型,采用的连续方程、动量方程和 $k-\varepsilon$ 方程分别如下^[22]:

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

k 方程为:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \\ & C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

式(1)~(4)中, ρ 为体积分数的平均的流体密度(g/cm^3); μ 为体积分数的平均的黏性系数($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$); k 为湍动能(J); ε 为湍动耗散率; $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, μ_t 为紊流黏性系数, $\mu_t = \rho C_\mu k^2/\varepsilon$; G_k 为由平均流速梯度引起的湍动能产生项,可表示为:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

α_k 和 α_ε 分别为湍动能 k 和耗散率 ε 有效 Prandtl 数的倒数; $C_{1\varepsilon}$ 和 $C_{2\varepsilon}$ 为 ε 方程常数,各常数的取值如表 1 所示。

表 1 RNG $k-\varepsilon$ 模型中的常数值

Tab. 1 Constant value in the RNG $k-\varepsilon$ model

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}^*$	α_k	α_ε
0.08	1.42	1.68	1.39	1.39

采用 VOF 方法模拟两相流,将气相体积分记为 α_a ,液相体积分记为 α_w ,则在计算区域内各相的体积分满足 $\alpha_a + \alpha_w = 1$,且 ρ 和 μ 并非常数,而是体积分数的函数,可由下式表示:

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a; \quad (6)$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + (1 - \alpha_w) \mu_a$$

式中, ρ_w 和 ρ_a 分别是液相和气相的密度(g/cm^3); μ_w 和 μ_a 分别为液相和气相的分子黏性系数($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)。

由于泥石流体的性质近似于宾汉体,其受剪切变形时剪应力与切变率的关系可由下式表达:

$$\tau = \tau_b + \mu_w \frac{du}{dy} \quad (7)$$

式中, τ_b 为宾汉屈服应力,可由式(8)计算^[24]:

$$\tau_b = 0.098 \exp(8.45\varepsilon + 1.5) \quad (8)$$

对 Herschel - Bulkley 模型进行参数限定,可得到泥石流其他流变模型^[23]。当 $p=1$, $\tau_b > 0$,即为宾汉模型,模型如下:

$$\begin{cases} \mu = \frac{\tau_b}{\gamma} + k\gamma^{p-1} & \gamma > \gamma_c \\ \mu = \frac{\tau_b \left(2 - \frac{\gamma}{\gamma_c} \right)}{\gamma_c} + k\gamma_c^{p-1} \left[\left(2 - p \right) + \frac{(p-1)\gamma}{\gamma_c} \right] & \gamma < \gamma_c \end{cases} \quad (9)$$

式中, γ 和 γ_c 分别为剪切率和临界剪切率; p 为幂指数。

泥石流的粘性系数随剪切速率变化的变化规律如图 1 所示。

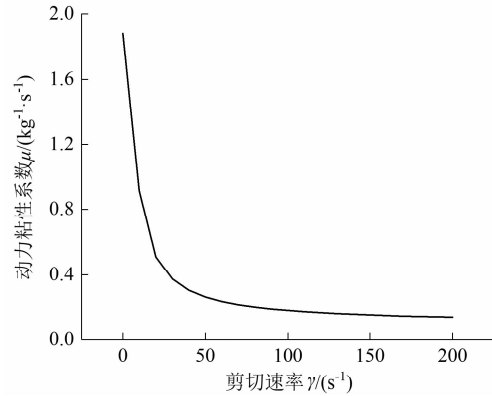


图 1 动力粘性系数随剪切速率变化

Fig. 1 Variation of dynamic viscosity coefficient with shear rate

1.2 数值求解

Fluent 软件的数值求解方法采用的是有限体积法,将守恒性控制方程在控制容积上做积分,从而导出离散方程。控制方程可用通用公式表示^[25],为得到离散方程,将式(10)在控制体积 P 以及 Δt 上积分,各项分别可由式(11)~(14)表示:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + S \quad (10)$$

(1) 瞬态项

$$\begin{aligned} \int_{\Delta t} \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV dt &= \int_{\Delta t} \left(\int_{\Delta t} \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) dV \\ &= \rho_P^0 (\phi_P - \phi_P^0) \Delta V \end{aligned} \quad (11)$$

(2) 对流项

$$\begin{aligned} \int_{\Delta t} \int_{\Delta V} \text{div}(\rho u\phi) dV dt &= \int_{\Delta t} [(\rho u\phi A)_e - \\ &(\rho u\phi A)_w + (\rho u\phi A)_n - (\rho u\phi A)_s + \\ &(\rho u\phi A)_t - (\rho u\phi A)_b] dt \end{aligned} \quad (12)$$

(3) 扩散项

$$\begin{aligned} \int_{\Delta t} \int_{\Delta V} \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) dV dt &= \int_{\Delta t} \left[\Gamma_e A_e \frac{\phi_E - \phi_P}{(\delta x)_e} - \right. \\ &\Gamma_w A_w \frac{\phi_P - \phi_W}{(\delta x)_w} + \Gamma_n A_n \frac{\phi_N - \phi_P}{(\delta x)_n} - \\ &\Gamma_s A_s \frac{\phi_P - \phi_S}{(\delta x)_s} + \Gamma_t A_t \frac{\phi_T - \phi_P}{(\delta x)_t} - \\ &\left. \Gamma_b A_b \frac{\phi_P - \phi_B}{(\delta x)_b} \right] dt \end{aligned} \quad (13)$$

(4) 源项

$$\int_{\Delta t} \int_{\Delta V} S dV dt = \int_{\Delta t} S \Delta V dt = \int_{\Delta t} (S_C + S_P \phi_P) \Delta V dt \quad (14)$$

得到各项的积分表达式后,利用一阶迎风格式进行隐式方案下的离散,则式(10)变为式(15),对所有节点均可列出对应的离散方程,最终得到一组代数方程,即可求解:

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + a_B \phi_B + a_T \phi_T + b \quad (15)$$

以上各式中,上标 0 为物理量在 t 时刻的值,没有上标的意为 $t + \Delta t$ 时刻的值,下标为节点值, N 、 W 、 S 、 E 、 T 、 B 为与 P 相邻的六个节点;六个界面分别由 n 、 w 、 s 、 e 、 t 、 b 表示; A 是控制体积的边界面积(m^2); $(\delta x)_e$ 、 $(\delta x)_w$ 、 $(\delta x)_n$ 、 $(\delta x)_s$ 、 $(\delta x)_t$ 、 $(\delta x)_b$ 分别为节点 P 到 E 、 W 、 S 、 N 、 T 、 B 的距离。

由于 k 方程和 ε 方程中的存在的源项对方程的解产生脉冲,加大计算收敛的难度,因此,为了提高求解的稳定性,对源项进行线性化处理, k 方程和 ε 方程的源项由式(16)表示,线性化处理后如式(17)所示,利用自定义函数导入 Fluent 进行求解。

$$S_k = G_k - \rho \varepsilon$$

$$S_\varepsilon = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (16)$$

$$\frac{dS_k}{dk} = 0$$

$$\frac{dS_\varepsilon}{d\varepsilon} = C_{1\varepsilon} \frac{1}{k} G_k - 2C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon}{k} \quad (17)$$

式中, S_k 和 S_ε 分别为 k 方程和 ε 方程中的源项。

1.3 几何模型的创建及计算条件

由于野外观测泥舌运动并测量其运动参数较为困难,因此利用郑志山^[8]等人已经完成的泥舌运动

模型实验数据对本文数值模拟结果进行验证。该实验的实验装置包括形成水槽、观测池和尾料池。其中,泥石流形成水槽长 300 cm、宽 20 cm、深 30 cm,观测池长 160 cm、宽 80 cm、高 160 cm。实验选取泥石流容重和沟床纵坡为控制变量,其中泥石流容重共有 6 组变化值,分别为 1.5、1.6、1.7、1.8、1.9、2.0 g/cm³,坡度共有 6 组变化值,分别为 5°、7°、9°、11°、13°、15°,实验完成后通过实验录像解译获得泥舌的纵向厚度和下游入射角等形态参数。本文采用泥舌的纵向厚度变化率和下游入射角变化率两个参数对模拟结果进行验证。

本文的几何模型按照文献^[8]所使用装置进行建模,由于拦砂坝在未达到满库状态时,其拦截泥沙的效果显著,难以形成泥舌。在达到满库状态后,泥石流以淤积后的坡度直接越过拦砂坝形成泥舌,此时溢流口的作用不明显,因此以拦砂坝满库状态且无溢流口的形式模拟泥舌运动。同时为减少计算时间,用水槽模拟泥石流淤积后的沟床表面,可以直接减少拦砂坝从空库状态变为满库状态这一过程的计算量。本研究利用 Gambit 前处理软件按照点、线、面、体的顺序来建立几何模型,坐标原点选在溢流口底部中心处, x 轴垂直于溢流口平面指向下游为正, y 轴沿溢流口平面竖直向上为正方向, z 轴垂直于 xy 平面指向水槽右侧为正,根据水槽实际尺寸按照等比例建立几何模型,如图 2 所示。

为了模拟不同工况条件下泥舌的运动情况,设置不同的沟床纵坡和泥石流容重条件,具体的模拟条件和泥石流参数如表 2 所示。

1.4 网格划分及边界条件

根据研究内容,选择泥石流运动段和泥舌空中

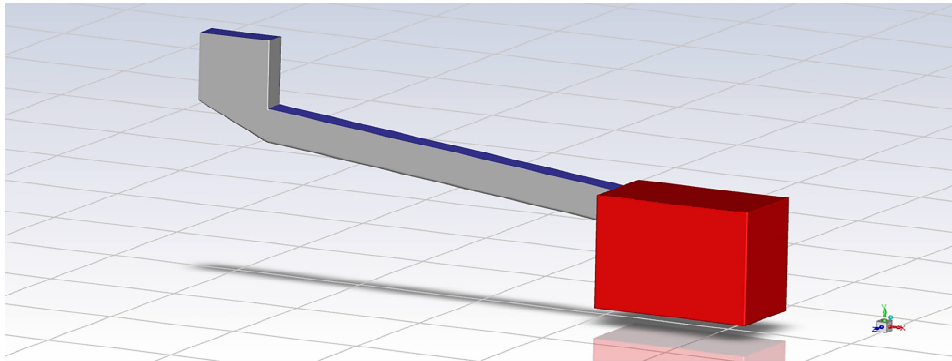


图 2 数值三维几何模型

Fig. 2 Diagram of numerical three - dimensional geometric model

表 2 数值模拟工况条件及泥石流参数

Tab.2 Numerical simulation conditions and parameters of debris flow

泥石流容重 $\gamma/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	不同容重对应的屈服应力 τ_b/Pa	沟床纵坡 $\alpha/(\text{^\circ})$	泥石流总量 V/m^3
1.30、1.40、1.50、1.60、1.70、 1.80、1.90、2.00、2.10	0.03、0.12、0.37、1.00、2.32、4.70、 8.10、11.70、13.80、16.80	5、7、9、11、13	0.08

段作为计算区域,整个计算区域的网格划分采用六面体结构化网格,在满足网格数量限制的前提下,尽量加密网格,最终的计算网格单元总数约为 47 万,节点数约为 49 万,最小网格质量为 0.88。对于边界条件,大气进口采用压力入口边界条件,空中运动段给定压力入口,出口采用压力出口边界,且无回流,压力为标准大气压,其余设为壁面边界,壁面边界采用粗糙壁面处理以及无滑移边界条件^[13]。并利用初始化在料斗相应位置设置泥石流体积分数为 1。

2 模拟结果分析

泥石流从溢流口流出形成下泄泥舌,以类似抛体运动的形式下泄,本文主要选取泥舌在运动方向上的断面形态、厚度、入射角以及泥舌内部速度分布等特征作为泥舌的水力特性评价参数。图 3 是泥舌下泄运动示意图。

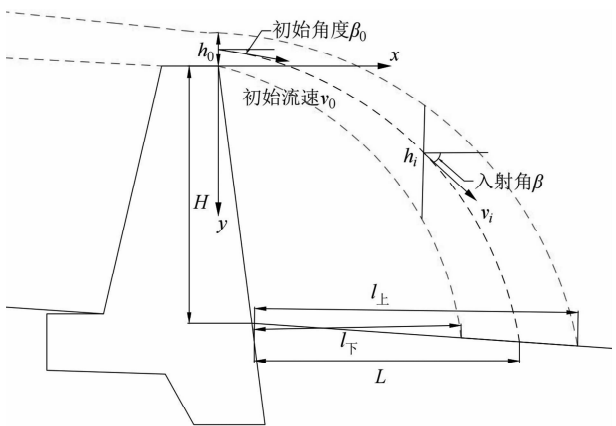
由于本文的几何模型相较于实际的拦砂坝模型尺寸更小,所形成的泥舌规模也更小,模拟所得的泥舌形态特征参数与实际均有所差别,包括泥舌的抛

射距离、厚度和入射角度,无法直接予以实际应用。而泥舌在溢流口初始断面处的形态参数在一定程度上体现了泥舌的运动规模,因此,通过泥舌在运动过程中的形态特征参数变化量与其初始断面对应参数的比值建立无量纲表达式,减小由于几何模型规模带来的对模拟结果应用的限制影响,即用纵向厚度变化率和下游入射角变化率分别表征泥舌的厚度和入射角的变化特征。

2.1 泥舌断面形态沿程变化特征分析

泥石流通过溢流口后,以抛体运动的形式向下游运动,形成类似舌形的下泄流态。图 4 是数值模拟所得的不同视角下的泥舌形态,从图中可以看出,泥舌的形态特征在下泄过程中不断变化,随着抛射距离的增加,入射角不断增大,泥舌的纵向厚度也逐渐增大,从正向上观察泥舌,可以看出泥舌中间的位置较两侧更为突出,且这种现象随着下泄高度的增加而愈明显。如图 4(b)所示,泥舌中间部分相较于两侧更为突出,这是由于泥舌边缘与空气掺混,受空气阻力的影响,泥舌在横向上呈现出中间流速较大、两侧流速较小的特点。

在物理模型实验中观测到的泥舌破碎和掺气现象更明显,但物理模型只能从表面观察其形态,而数



H :泥舌下泄高度; h_0 :溢流口流深; h_i :某断面处泥舌厚度;
 L :泥舌中心点的抛射距离; l_u :上边界的抛射距离; l_d :下
边界的抛射距离; β_0 :泥舌运动的初始角度; β :下游入射角

图 3 泥舌下泄运动示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the debris flow jet

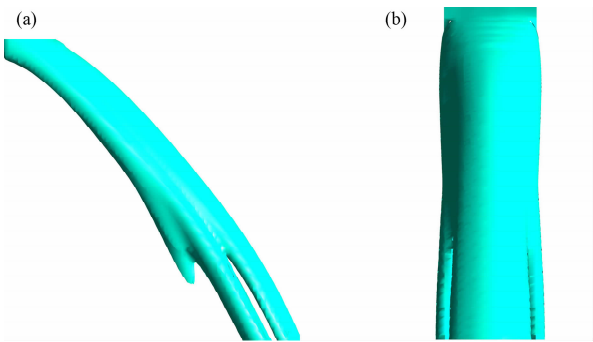


图 4 泥舌形态:

(a) 数值模拟的泥舌侧视; (b) 数值模拟的泥舌正视图

Fig. 4 Section shape of debris flow jet;

(a) Lateral view of debris flow jet numerical simulation;

(b) Elevation view of debris flow jet numerical simulation

值模拟可以通过截取不同断面位置的相关参数来分析泥舌沿程的水力参数特性,本文截取泥舌流出溢流口后的9个截面,对其沿程空间形态的变化进行分析。图5是从数值模拟结果中提取的泥舌特征断面形态,从图中可以看出,泥舌从溢流口流出运动至下游底床可以大致分为三个阶段,分别是密实段、扩散段和破碎段。断面1-1至3-3为密实段,一方面由于泥舌运动前期受到沟床和溢流口的约束作用,在流出溢流口一段距离内,泥舌受惯性作用,泥石流流体较为集中,形态上表现出紧密、无扩散的特点;另一方面,前期泥舌内部空气掺混较少,容重无较大变化,内部物质较为集中。断面3-3至6-6为扩散段,该阶段的溢流口约束作用减小,重力作用使得泥舌向下加速运动,与泥舌中心相比,泥舌周围受空气阻力影响更大,使得泥舌两侧的速度较中心处更小,因此泥舌的纵向厚度会变大,尤其是泥舌两侧的厚度增加更明显。断面6-6至9-9为破碎段,该阶段内,泥舌在纵向上进一步扩散,泥舌断面从两侧开始破碎,如果破碎状态持续发展,则泥舌会完全破碎成水滴状继续运动。

2.2 泥舌纵向厚度变化特征

2.2.1 泥舌纵向厚度变化率

泥舌在运动方向上的断面厚度变化利用泥舌断面厚度与泥舌初始断面流深之间的关系来表征,可用 $(h_i - h_0)/h_0$ 表示,其中 h_i 为某断面处泥舌纵向厚度(m), h_0 为泥舌出口断面泥深(m)。

图6和图7分别是在不同泥石流容重条件下和不同沟床纵坡条件下,泥舌厚度在水平方向上的变化规律。泥舌的纵向厚度沿程变化不均匀,但其变

化率大致呈现随水平射距的增加而增大的趋势,这是由于泥石流从溢流口流出后,在重力作用下纵向速度逐渐增大,导致泥舌内部紊动增强,使得泥舌扩散掺气甚至破碎,泥舌的厚度不断增加。

同时,从图6可以看出,在沟床纵坡一定的条件下,泥舌的纵向厚度变化率随着泥石流容重的增大而增大,泥舌的纵向厚度变化与泥舌的初始流速及其内部的紊乱程度有关,泥舌的初始速度越大,泥舌内部紊乱程度越大,根据模拟结果显示,泥石流运动至溢流口处的速度随着容重的增加而增大,如图8所示,进而导致泥舌的纵向厚度变化率越大。从图7可以看出,在泥石流容重一定的条件下,泥舌的纵向厚度变化率随着沟床纵坡的增大而减小,虽然泥舌的初始速度随沟床纵坡的增大而增大,同时其内部紊乱程度越大,纵向厚度也随之增大,但是由于本文的初始条件给定的是一定体积的泥石流流体,因此泥石流运动至溢流口处的流深会呈现先增大后减小的特点,文中以最大流深作为初始流深,其值随沟床纵坡的变化规律如图9所示,即初始流深随沟床纵坡的增大而增大,导致泥舌纵向厚度变化率反而越小。

2.2.2 纵向厚度变化率模拟结果与实验结果对比分析

图10是不同工况条件下泥舌各点的纵向厚度变化率的实验结果与模拟结果对比图。通过VOF模型得到的模拟结果与水槽模型实验结果较为吻合,两者的相对误差为18%,精度为82%。位于对比线下方的对比点较多,说明模拟值比实验值偏小,这是由于该VOF模型将泥石流视为整体,忽略了泥

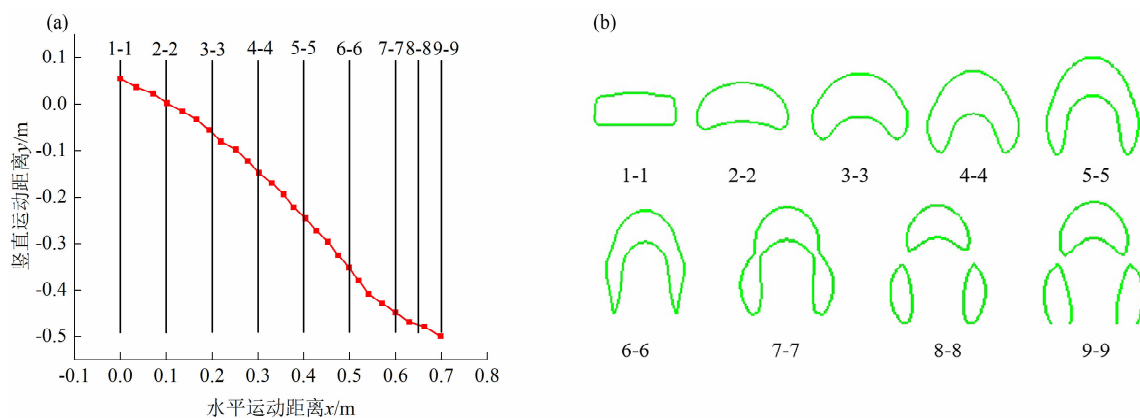


图5 泥舌沿程断面位置及形态:(a)断面位置;(b)断面形态

Fig. 5 Section position and shape of debris flow jet: (a) Section position; (b) Section shape

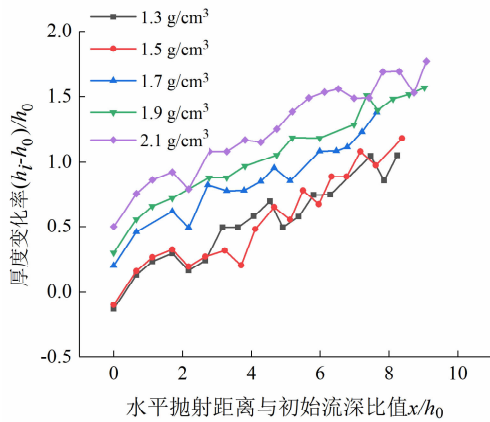


图 6 不同泥石流容重条件下泥舌厚度变化率与水平抛射距离的关系

Fig. 6 Relationship between the rate of the thickness variation of debris flow jet and the distance under different density conditions

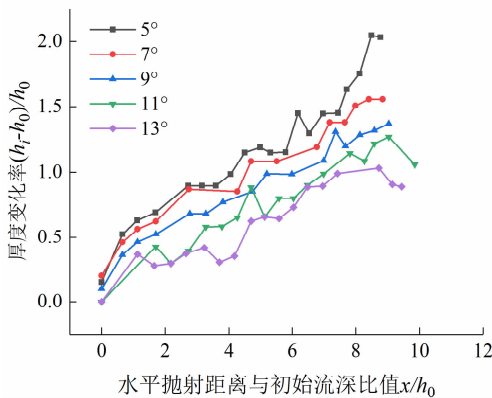


图 7 不同沟床纵坡条件下泥舌厚度变化率与水平抛射距离的关系

Fig. 7 Relationship between the rate of the thickness variation of debris flow jet and the distance under different gully bed longitudinal slope conditions

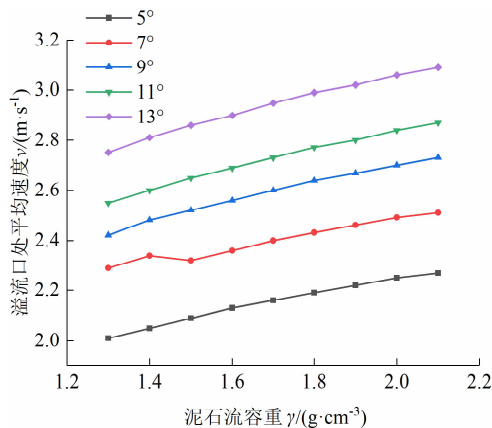


图 8 溢流口处速度与泥石流容重的关系

Fig. 8 Relationship between velocity at spillway and density of debris flow

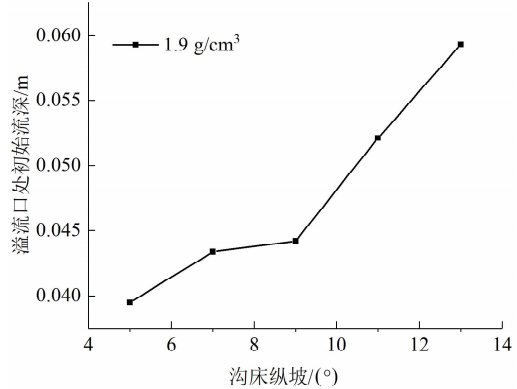


图 9 溢流口处初始流深与沟床纵坡的关系

Fig. 9 Relationship between initial depth of flow and longitudinal slope of gully bed

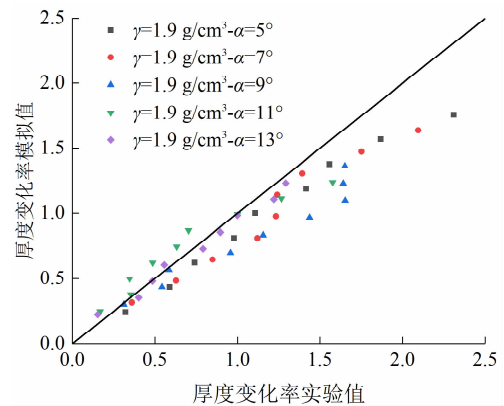


图 10 纵向厚度变化率实验与模拟结果对比图

Fig. 10 Comparison of experimental and simulated results of the rate of the thickness variation

石流内部固体物质的作用,导致空气在泥舌内部的扩散不充分,因此泥舌厚度的模拟结果偏小;另一方面,在泥舌运动的实验过程中,由于泥舌的扩散程度不断增加,甚至周围破碎成水滴状滴落,通过摄影机观测,将周围水滴视为泥舌形态的一部分,存在一定的误差,使得观测到的泥舌厚度略大于泥舌的真实厚度。因此泥舌的厚度变化率的模拟结果较实验结果偏小。

2.3 泥舌下游入射角变化特征

2.3.1 泥舌下游入射角变化率

泥舌在运动方向上的入射角变化,可利用泥舌断面速度和水平方向的夹角与泥舌流出溢流口时的初始角度之间的关系来表征,表示为 $(\beta - \beta_0) / \beta_0$ 。其中, β 为泥舌沿程的速度方向与水平方向的夹角 ($^\circ$); β_0 为泥舌流出溢流口时的初始角度 ($^\circ$), 可认

为与沟床纵坡相等。

图 11 和图 12 分别是同泥石流容重条件下和不同沟床纵坡条件下,泥舌下游入射角在水平方向上的变化规律。泥舌在水平方向上的运动距离越大,泥舌入射角越大,其原因是:泥舌从溢流口流出后,以抛体运动形式下泄,竖直方向的速度受重力作用逐渐增大,因此速度方向与水平方向的夹角逐渐增大。

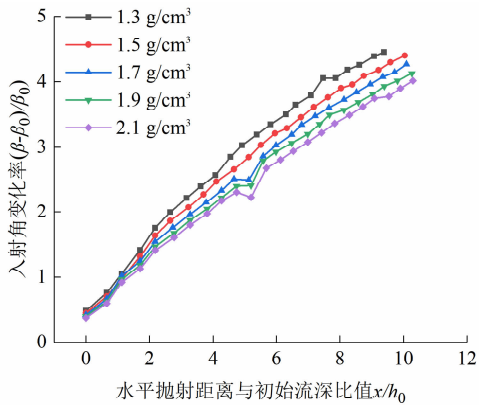


图 11 不同泥石流容重条件下泥舌入射角变化率与水平抛射距离的关系

Fig. 11 Relationship between the rate of the downstream incident angle variation of debris flow jet and the distance under different density conditions

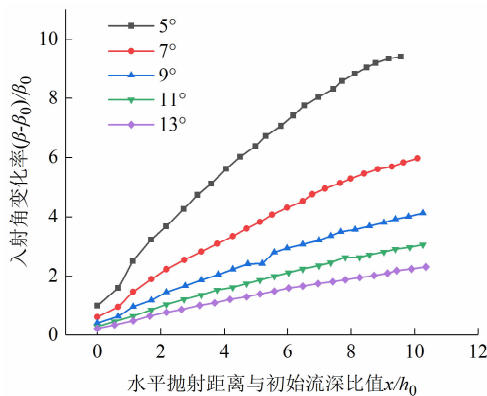


图 12 不同沟床纵坡条件下泥舌入射角变化率与水平抛射距离的关系

Fig. 12 Relationship between the rate of the downstream incident angle variation of debris flow jet and the distance under different gully bed longitudinal slope conditions

图 11 和图 12 显示,泥石流容重低和沟床纵坡小时所对应的泥舌下游入射角的变化率大,反之变化率小,即下游入射角变化率随着泥石流容重和沟床纵坡的增加而降低,这是由于泥舌流出溢流口时

的初始速度随着泥石流容重和沟床纵坡的增大而增大,初始流速越大,在下降相同高度情况下,水平方向上的运动距离越远,速度方向变化越小,且泥舌的初始角度与沟床纵坡一致,坡度越大,初始角度越大,因此泥舌入射角的变化率越小。

2.3.2 下游入射角变化率模拟结果与实验结果对比分析

图 13 是不同工况条件下泥舌各位置点的下游入射角变化率的实验结果与模拟结果对比图,从图中可以看出,通过 VOF 模型得到的模拟结果与水槽模型实验结果较为吻合,两者的相对误差为 18.5%,精度为 81.5%。模拟值比实验值偏小,这是由于该 VOF 模型将泥舌固液两相视为整体,忽略了泥石流内部固体物质间的相互作用以及固相和液相的相互作用,但泥舌在实际运动过程中由于内部固体物质的摩擦、碰撞以及固相与液相的相互作用会使得泥舌在水平方向的速度减小,因此入射角变化较大,即模拟结果较实验结果偏小。

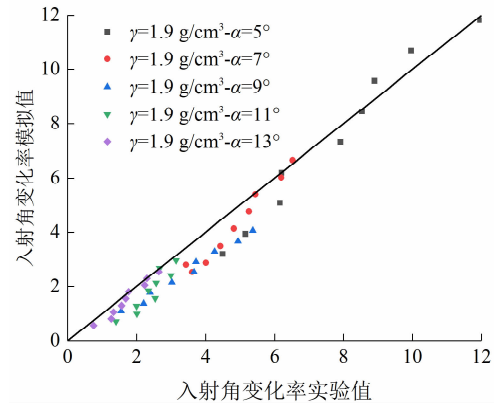


图 13 入射角变化率实验与模拟结果对比图

Fig. 13 Comparison of experimental and simulated results of the rate of the downstream incident angle variation

2.4 泥舌速度分布特征

物理模型可以测量泥舌在空中运动的运动轨迹,但是对于速度分布的测量较为困难,因此本文利用数值模拟结果分析泥舌的速度分布特征。图 14 是通过模拟得到的不同截面处泥舌的速度云图,可以看出随着射距的增大,泥舌断面的平均速度增大,且断面流速分布越来越不均匀,尤其是在泥舌纵向厚度方向上,不同位置的泥舌速度大小差异较大,靠近泥舌上缘处的流速大于泥舌下缘,在泥舌横向宽度方向上泥舌速度呈对称分布,泥舌断面的速度分

布总体呈现中间大、周围小的特点。这是由于泥舌流出溢流口后,在重力的作用下,泥舌平均速度会逐渐增大,而在运动过程中,由于泥舌运动受空气掺混的影响,在泥舌和空气的交界面上将产生漩涡,漩涡将向外扩散,泥舌的运动速度又受到漩涡扩散幅度的影响,使得泥舌周围速度小于泥舌中心速度。

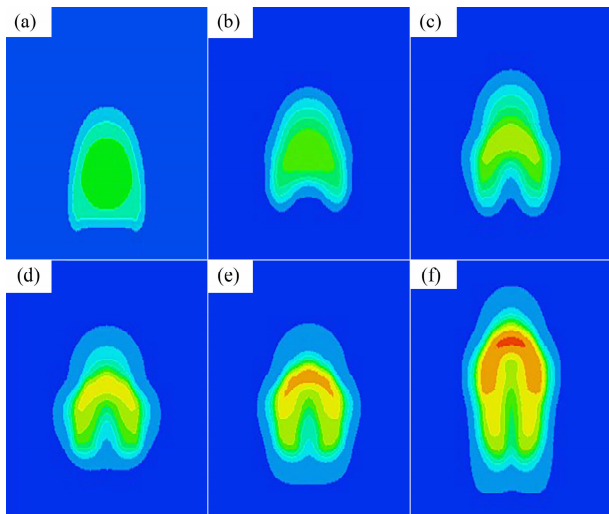


图 14 泥舌断面速度云图:(a) $x=0.1$ m;(b) $x=0.2$ m;
(c) $x=0.3$ m;(d) $x=0.4$ m;(e) $x=0.5$ m;(f) $x=0.65$ m

Fig. 14 Section velocity contours of debris flow jet;

(a) $x=0.1$ m;(b) $x=0.2$ m;(c) $x=0.3$ m;(d) $x=0.4$ m;
(e) $x=0.5$ m;(f) $x=0.65$ m

图 15 是根据图 5 所示截面选取的典型截面的沿宽度方向的平均速度分布。在宽度方向上,泥舌速度呈对称分布且中间大、两边小的特点,并且在重力作用下泥舌速度随着射距的增大而增大,在 2-2 截面至 4-4 截面之间,泥舌沿宽度方向的速度变化较大,在 5-5 截面至 8-8 截面之间泥舌速度沿宽度方向变化较小。其原因是,在泥舌流出溢流口时,泥舌处于紧密段,两侧受到空气阻力的影响比内部大,随着运动距离的增大,泥舌内部空气掺混程度增大,泥舌内部受空气影响的范围逐渐增大,因此泥舌两侧速度与泥舌中心速度的差值减小。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文将泥石流视为宾汉体,基于 VOF 模型和有限体积法的数值解法,采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型模拟泥舌运动,通过对泥舌下泄运动的数值模拟,分析

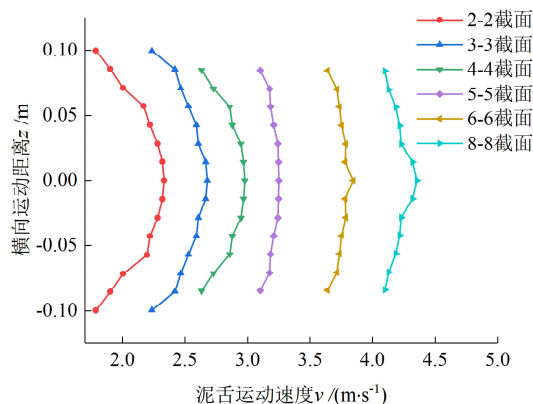


图 15 不同截面位置处沿宽度方向的速度分布

Fig. 15 Velocity distribution along the width direction
at different section positions

了泥舌在下泄过程中的形态、纵向厚度、下游入射角以及速度的变化特征,主要得出以下结论:

(1) 通过对比分析数值模拟结果和模型试验结果,发现泥舌纵向厚度和入射角变化率的实验值与模拟值的相对误差均小于 20%,表明该模型在合理规划计算区域以及网格的前提下,可以用于模拟泥石流下泄泥舌在空中运动的整个过程。

(2) 在紊动扩散、重力和空气阻力的作用下,泥舌的形态特征在下泄过程中不断变化,可将其演变过程分为三个阶段:紧密段、扩散段和破碎段。

(3) 反映泥舌断面形态特征参数包括纵向厚度变化率和下游入射角变化率,均与泥舌在水平方向上的运动距离呈线性相关,泥石流容重越大,纵向厚度变化率越大,下游入射角变化率越小,沟床纵坡越大,纵向厚度变化率和下游入射角变化率均越小。

(4) 泥舌断面的平均速度随射距的增加而增大,各断面的速度分布特征为中间大周围小,在纵向厚度方向上,速度分布偏向泥舌上缘,且随着射距的增大越来越不均匀,在横向宽度上,速度分布基本对称,随着射距的增大,泥舌中心速度与两侧速度差值逐渐减小。

3.2 讨论

泥石流越过拦砂坝形成的泥舌,会对拦砂坝下游沟床造成剧烈冲刷,形成冲刷坑,而泥舌的形态、速度等动力特征将影响冲刷坑的发展^[4]。有学者通过水槽实验对泥石流过坝现象进行研究,得到关于泥舌厚度、入射角、射距等形态特征的变化规律,发现泥舌纵向厚度和下游入射角均随着射距的增大

而增大^[6]。对比前人研究结果,本研究利用仿真软件,基于气液两相流,获得了关于泥舌运动过程的数值模拟结果以及系统性的结论。其中,泥舌形态变化规律与郑志山^[6]等相关结果较为一致,此外,本文得出了泥舌的内部速度分布呈现中间大、周围小的特征,且平均速度随射距的增加而增大的结论,可以对泥舌下游冲击力和拦砂坝局部冲刷的研究提供一定的参考依据。

考虑到泥舌运动的复杂性,且空气的掺混将直接影响泥舌的形态,本文对泥石流组成进行了简化,将其视为气液两相流来模拟泥舌运动,但对于实际的泥舌运动过程,其固体物质之间以及固相与液相之间的相互作用也会使得泥舌内部紊乱程度增强,因此在未来研究中需要完整考虑泥石流的物质组成,充分考虑泥石流三相之间的相互作用,尽量还原泥石流的真实特性。

参考文献 (References)

- [1] 张莉,游勇,柳金峰,等. 泥石流拦砂坝坝前沉积与坝基扬压力实验研究[J]. 山地学报, 2018, **36**(2): 271 – 279. [ZHANG Li, YOU Yong, LIU Jinfeng, et al. Experimental study on characteristics of debris flow deposition and the uplift pressure of a check dam [J]. Mountain Research, 2018, **36**(2): 271 – 279] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000322
- [2] 张卫旭,程霄,陈丛珊,等. 稀性泥石流水跃现象中能量耗散率研究[J]. 人民黄河, 2016, **38**(6): 76 – 80. [ZHANG Weixu, CHENG Xiao, CHEN Congshan, et al. Research on energy dissipation rate of hydraulic jump phenomena of dilute debris flow [J]. Yellow River, 2016, **38**(6): 76 – 80] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 1379.2016.06.020
- [3] PAN Huali, WANG Ren, HUANG Jiangcheng, et al. Study on the ultimate depth of scour pit downstream of debris flow sabo dam based on the energy method [J]. Engineering Geology, 2013, **160**: 103 – 109. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.03.026
- [4] 潘华利,欧国强. 泥石流坝后侵蚀坑纵剖面形态及最大深度实验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, **29**(6): 684 – 689. [PAN Huali, OU Guoqiang. Experimental study of the shape and the maximum depth of scour pit below debris flow sabo dam [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, **29**(6): 684 – 689] DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2009.06.004
- [5] 刘兴荣,周自强,董耀刚,等. 泥石流拦挡坝破坏分析及优化对策——以陇南市武都区为例[J]. 山地学报, 2020, **38**(3): 473 – 482. [LIU Xingrong, ZHOU Ziqiang, DONG Yaogang, et al. Investigation of the failure patterns of debris flow retaining dams and optimized engineering countermeasures—a case study at Wudu district of Longnan city, Gansu, China [J]. Mountain Research, 2020, **38**(3): 473 – 482] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000526
- [6] 郑志山,潘华利,安笑,等. 泥石流泥舌水力特性的沿程变化实验研究[J]. 自然灾害学报, 2019, **28**(6): 154 – 166. [ZHENG Zhishan, PAN Huali, AN Xiao, et al. Experimental study on spatial hydraulic characteristics of debris flow jet [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, **28**(6): 154 – 166] DOI: 10.13577/j.jnd.2019.0617
- [7] CHEN Huayong, CUI Peng, CHEN Jiangang, et al. Effects of spillway types on debris flow trajectory and scour behind a sabo dam [J]. Journal of Mountain Science, 2016, **13**(2): 203 – 212. DOI: 10.1007/s11629 – 015 – 3607 – 6
- [8] 郑志山. 泥石流过坝泥舌下泄形态及变化特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 1 – 116. [ZHENG Zhishan. Study on the morphology and change characteristics of debris flow jet through sabo dam [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 1 – 116]
- [9] 林雪平,游勇,柳金峰,等. 泥石流拦砂坝溢流口过流能力实验研究[J]. 自然灾害学报, 2015, **24**(1): 9 – 14. [LIN Xueping, YOU Yong, LIU Jinfeng, et al. Experimental study on discharge capacity of spillway of check dam for debris flow [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, **24**(1): 9 – 14] DOI: 10.13577/j.jnd.2015.0102
- [10] 韩文亮,王裕宜,詹钱登. 粘性泥石流掺气减阻作用初探——云南东川蒋家沟泥石流[J]. 泥沙研究, 2000(5): 1 – 5. [HAN Wenliang, WANG Yuyi, ZHAN Qiangdeng. A preliminary study on debris flow resistance reduction due to entrained air [J]. Journal of Sediment Research, 2000(5): 1 – 5] DOI: 10.16239/j.cnki.0468 – 155x.2000.05.001
- [11] 尹锐. 挑流消能数值模拟[J]. 中国水运, 2020, **20**(9): 58 – 59. [YIN Rui. Numerical simulation of energy dissipation in jet stream [J]. China Water Transport, 2020, **20**(9): 58 – 59]
- [12] WU Jianhua, LI Shufang, MA Fei. Energy dissipation of slot – type flip buckets [J]. Journal of Hydrodynamics, 2018, **30**(2): 365 – 368. DOI: 10.1007/s42241 – 018 – 0022 – 9
- [13] WU Jianhua, MA Fei, YAO Li. Hydraulic characteristics of slit – type energy dissipaters [J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, **24**(6): 883 – 887. DOI: 10.1016/S1001 – 6058(11)60316 – 8
- [14] 张挺,麦栋玲. 高扩散低收缩差动坎高坎空中挑射水舌运动特性[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2008, **36**(3): 450 – 454. [ZHANG Ting, MAI Dongling. Study on dynamic characteristics of water jet in hybrid type flip bucket [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science), 2008, **36**(3): 450 – 454] DOI: 10.3969/j.issn.1000 – 2243.2008.03.027
- [15] 张挺,麦栋玲. 差动式挑坎水力特性数值模拟研究[G]//《水动力学研究与进展》杂志社. 第二十届全国水动力学研讨会文集. 上海:《水动力学研究与进展》杂志社, 2007: 279 – 285. [ZHANG Ting, MAI Dongling. Numerical study on the hydraulic characteristics of hybrid type flip bucket [G]// Press of Journal of

- Hydrodynamics. Proceeding of the 20th National Symposium on hydrodynamics. Shanghai: Press of Journal of Hydrodynamics, 2007: 279 – 285]
- [16] 谢墨,刘超,胡中科. 空中水舌水力特性的数值模拟研究[J]. 人民黄河,2015,37(4):119 – 122. [XIE Zhao, LIU Chao, HU Zhongke. Hydraulic characteristics of jet flow numerical simulation research [J]. Yellow River, 2015,37(4):119 – 122] DOI: 10.3969/j. issn. 1000 – 1379. 2015. 04. 030
- [17] 陈华勇,许唯临,邓军,等. 窄缝消能工水力特性的数值模拟与试验研究[J]. 水利学报,2012,43(4):445 – 451. [CHEN Huayong, XU Weilin, DENG Jun, et al. Numerical simulation and experimental study on the characteristics of slit – type energy dissipater in high arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012,43(4):445 – 451] DOI: 10.13243/j. cnki. slxb. 2012. 04. 015
- [18] 李旭,王光进,李克钢. 尾矿坝溃坝泥沙运动特性及三维数值模拟研究[J]. 矿冶,2015,24(5):1 – 4 + 12. [LI Xu, WANG Guangjin, LI Kegang. Study on the flow characteristics of sand flow surging from tailings dam – break and its three dimensional numerical simulation [J]. Mining and Metallurgy, 2015,24(5):1 – 4 + 12] DOI: 10.3969 / j. issn. 1005 – 7854. 2015. 05. 001
- [19] 崔佳慧. 粘性泥石流拦砂坝后回淤坡度试验研究[D]. 绵阳: 西南科技大学,2018:1 – 72. [CUI Jiahui. Experimental study on deposition slope of viscous debris flow behind check-dam [D]. Mianyang: Southwest University of Science and technology, 2018: 1 – 72]
- [20] 汤碧辉,孙红月,胡杭辉,等. 黏性泥石流对球型大颗粒启动的临界条件分析[J]. 工程地质学报,2018,26(6):1631 – 1637. [TANG Bihui, SUN Hongyue, HU Hanghui, et al. Analysis on critical hydraulic condition for starting motion of large-sized particles in viscous debris flow [J]. Journal of Engineering Geology, 2018,26(6):1631 – 1637] DOI: 10.13544/j. cnki. jeg. 2017 – 507
- [21] 王孟来. 尾矿坝溃后流动过程及防护措施研究[D]. 重庆: 重庆大学,2011:1 – 79. [WANG Menglai. Study on the process of flowing from tailings dam-break and disaster prevention [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011:1 – 79]
- [22] Ansys Inc., Ansys Fluent Theory Guide (Release 16.0) [M]. Southpointe: ANSYS, Inc., 2015:48.
- [23] 杨红娟,韦方强,胡凯衡,等. 黏性泥石流流速垂向分布试验研究[J]. 泥沙研究,2018,43(2):61 – 66. [YANG Hongjuan, WEI Fangqiang, HU Kaiheng, et al. Experimental study on vertical velocity distribution of viscous debris flows [J]. Journal of Sediment Research, 2018,43(2):61 – 66] DOI: 10.16239/j. cnki. 0468 – 155x. 2018. 02. 010
- [24] 费祥俊,舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社,2004:49 – 65. [FEI Xiangjun, SHU Anping. Movement mechanism and disaster prevention of debris flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004:49 – 65]
- [25] 李人宪. 有限体积法基础[M]. 北京:国防工业出版社,2005: 1 – 67. [LI Renxian. Finite volume method [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005:1 – 67]

Numerical Simulation of Dynamic Process of Debris Flow Jet

KONG Ling^{1,2}, PAN Huali^{1*}, DENG Qijuan³, YANG Fengguang⁴, LI Bingzhi^{1,2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Sichuan College of Architectural Technology, Chengdu 610399, China;

4. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Chengdu 610044, China)

Abstract: As debris flow discharges from a check dam downstream, it forms a debris flow jet into the air, which embodies rich physical information for inversion of debris flow dynamics. The characteristic parameters of a debris flow jet matter a great deal to the research relevant to the impact effect of a speedy debris flow or the channel erosion incurred by debris flow striking at the base immediately downstream of a dam. Most studies into the behaviors of debris flow jet were conducted by model experiments, which aimed to replicate the processes of debris flow jet pouring out of check dams; However, the obtained observations were quite beyond research expectations, far from practicality. Poor availability in research means and conditions provided by in-door model experiments resulted that the shape and velocity distribution of debris flow jet into the air could not be directly measured. Numerical simulation is a necessary approach to reproduce the movement of clear water or sand-carrying water

running down through a check dam. And it is also applicable to simulate debris flow squeezing through a check dam. Regrettably, little effort was made to study debris flow jet by numerical simulation. In this study, the $k - \varepsilon$ turbulence model based on VOF method, which can effectively track free interface, was used to simulate the movement of discharging debris flow jet. The longitudinal thickness of the debris flow jet, the downstream angle of incidence and the flow velocity distribution were analyzed to determine the relationship between the movement parameters of the debris flow jet and the horizontal ejection distance of a debris flow jet. Then this study discussed the variation law of section feature of debris flow jet along travelling course under different debris flow bulk density and gully bed conditions, and later it compared the experimental results with the existing observation obtained by indoor flume model. We had the following findings: (1) According to the features of debris flow jet in the moving, it could be divided into three stages: dense section, diffusion section and crushing section; (2) The longitudinal thickness and downstream incidence angle of debris flow jet increased with the increase of ejection distance, and synchronously varied with the change of the bulk density of debris flows and the longitudinal slope of gully beds; (3) The average velocity of the debris flow jet at section increased with the increase of ejection distance. The velocity distribution was more uneven with the increase of ejection distance, featured in a pattern of large in the middle, small in the surrounding. The simulation results were in fine agreement with the experimental results, suggesting it was feasible to use proposed mathematical model to simulate the movement of debris flow jet. By this study, it proved that numerical simulation could make up for the deficiency in past research on dynamics of debris flow jet, which was conducted solely by in-door model experiment, and promisingly it could provide a basis for accurately understanding the hydraulic characteristics of debris flow jet.

Key words: debris flow; debris flow jet; hydraulic characteristics; VOF method; numerical simulation