

泥石流内部流速分布规律试验研究

陈华勇^{1,2} 胡凯衡^{1,2*} 崔鹏^{1,2,3} 周公旦^{1,2}

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘要: 泥石流内部速度是泥石流动力学分析与防治工程设计中最重要的参数之一。以黏度较高的丙烯酸树脂与乙酸乙酯混合液模拟泥石流的黏性, 以粒径均匀的玻璃微珠作为两相流的固相颗粒, 利用 PIV 流场测量系统, 研究了含砂水流与泥石流中颗粒运动过程、垂向流速的分布规律; 借助高桥堡水石流固体颗粒流速分布模型, 计算了不同颗粒粒径条件下泥石流垂向流速分布, 并与前人研究成果进行比较。结果表明: 流体黏性较高条件下, 颗粒在整个过流断面上分布更均匀, 试验中垂向流速测量结果与高桥堡模型计算值吻合良好 ($u/u_s > 0.3$), 而与含砂水流条件下的测量结果差异明显; 两相流中固体颗粒垂线流速分布是否存在反“S”曲线分布, 主要与流体的黏性及颗粒在液相中分布的均匀程度有关。

关键词: 泥石流; 含砂水流; 流速分布; PIV

中图分类号: TV14

文献标志码: A

Experimental Investigation on the Inner Distribution of Debris Flow Velocity

CHEN Huayong^{1,2} HU Kaiheng^{1,2*} CUI Peng^{1,2,3} ZHOU Gongdan^{1,2}

(1. Key Lab. of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Inst. of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

3. Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sci., Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Velocity in debris flow is one of the most important parameters for dynamic analysis and design of debris flow control works. In order to investigate the velocity profile along flow depth for particle phase and liquid phase in debris flows, the mixture of two organic liquids of Acrylic acid Polymers and ethyl acetate was used to monitor the high viscosity of debris flow. The glass beads with uniform particle size were used as solid phase in debris flows. Both particle and liquid velocity components were investigated by particle image velocimetry (PIV) measurement system under the condition of sediment flows and debris flows respectively. The Takahashi model for the particle velocity distribution in debris flows was employed to calibrate the experimental results obtained by former researchers and measured by PIV measurement system in the experiments. The results indicated that the mixture liquid with higher viscosity produces a more uniform distribution of the particles along the flow depth. The experimental data measured by PIV system are in good agreement with the ones calculated by Takahashi model in debris flows ($u/u_s > 0.3$). However, the data did not match the formers' ones in sediment flows, which indicated that the shape of particle velocity profile along flow depth is mainly determined by the fluid viscosity and the uniformity of particles distributed in the flows.

Key words: debris flow; sediment flow; velocity distribution; PIV

泥石流有别于一般的含沙水流, 固体颗粒浓度含量高、颗粒级配宽(含大量粗颗粒和漂石), 泥石流流速的准确计算是泥石流研究中的重点和难点问题。

已有的流速计算公式大多是根据野外观测结果建立的适用于当地区域条件的经验公式, 如云南东川蒋家沟黏性泥石流估算公式、云南东川大白泥沟

收稿日期: 2015-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51209195; 41190084); 中国科学院重点部署项目资助(KZZD-EW-05-01)

作者简介: 陈华勇(1982—), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向: 泥石流机理与工程防治。E-mail: hychen@imde.ac.cn

* 通信联系人 E-mail: khhu@imde.ac.cn

http://jsuese.scu.edu.cn

黏性泥石流经验公式、西藏波密古乡沟黏性估算公式^[1],但这些流速经验公式的普适性不强,且计算结果均为平均流速,不能体现泥石流内部固液两相流速分布情况。为进一步揭示泥石流内部固液相互作用机制,许多专家和学者通过理论分析或试验手段,研究泥石流内部流速分布规律。高桥堡以 Bag-nold 提出的离散切力为基础,获得了水石流颗粒流速垂向分布公式^[2]。杨美卿等^[3]将泥石流中固体颗粒运动视为层移运动,结合泥沙层移运动模型、颗粒浓度分布模型公式和离散力模型,得到了颗粒速度分布公式,但泥石流中液相速度分布如何考虑,作者未进行说明。陈洪凯等^[4]将泥石流简化为具有相同粒径的固相和具有相同力学性质的液相,基于泥石流为沿流动方向的 1 维两相流体,运用两相流理论建立了适用于稀性泥石流和黏性泥石流的分相流速计算方法;该方法可以获得泥石流分相的平均速度,没有考虑分相速度沿泥石流深度方向的变化。Yang 等^[5]以泥石流表面动压力与表面流速实测数据,率定泥石流体内速度与动压力间的关系,从而通过泥石流内部动压力反算泥石流内部流速的垂向分布,主要分析了沿水深方向不连续点上的平均速度变化,尚未考虑固液分相沿垂向的变化规律,且由于压力传感器与泥石流直接接触,对流场的干扰较大,影响测量结果的准确性。

随着量测技术的不断发展,粒子图像测速技术(PIV)作为一种先进的全流场、瞬态、无接触测量技术,不仅运用于气液、气固两相流研究中^{[6]~[10]},且在固液两相流中也得到广泛应用^[11]。金文等^[12]应用激光测量仪器 PIV 对长江口水库泥沙水样在沉降筒中进行沉降速度场测量,得到了平均泥沙沉速,并分析了含沙量、絮凝等因素对泥沙沉降的影响。张金凤等^[13]利用 PIV 测定了球体颗粒在静水中的沉降速度和颗粒周围流场。江涵等^[14]采用粒子图像测速和分析技术,研究了不同固体颗粒浓度条件下固-液方槽体系中液相湍流特性。杨敏官等^[15]利用 PIV 和 PTV 技术测量了离心泵叶轮内部伴有盐析的液、固两相流场,得到液、固两相的速度场。Unadkat 等^[16]在斜叶涡轮桨的固-液悬浮搅拌试验中,对比固体颗粒加入前后液相的均方根速度、湍流动能和耗散率等的变化。代钦等^[17]通过对大悬浮颗粒和示踪粒子共存的两相流场图像进行相分离,并对悬浮相图像和连续相图像分别进行 PTV 和 PIV 运算,得到了两相流中固液分相速度场。虽然粒子图像测速技术在两相流研究中取得了一定的研究成

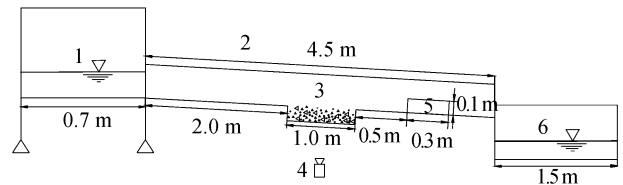
果,但是对固液两相,特别是高黏性条件下,固液分相流速分布、脉动特性及脉动相关性等问题都没有取得满意或者明确的答案。

作者采用黏度较高的丙烯酸树脂与乙酸乙酯混合液模拟泥石流的黏性,基于 PIV 粒子图像测速仪数据分析结果,研究了不同性质流体条件下液相和固体颗粒相断面流速分布规律,分析了不同条件下液相流速沿垂线方向的变化规律,为进一步揭示泥石流固液两相流速脉动相关性、固液两相能量传递等提供依据。

1 试验设计

1.1 试验模型

试验模型主要由上游料斗、水槽、动床段、尾水池等部分组成。上游料斗放置一定量的混合溶液,闸门控制上游溶液的释放速度;动床段通过能量传递和动量交换以实现溶液与动床物质相互作用,形成泥石流。模拟水槽长 4.5 m,宽 0.2 m,高 0.3 m,水槽坡度 10°。在距离水槽起始端 2.0 m 处设置 1.0 m × 0.2 m × 0.2 m(长 × 高 × 宽)的动床,动床物质分别考虑粒径 0.5 ~ 1.0、1.0 ~ 2.0、2.0 ~ 5.0 mm 的石英砂,模型尺寸如图 1 所示。



1. 料斗; 2. 水槽; 3. 动床段; 4. 摄像机; 5. PIV 测量区; 6. 尾水池。

图 1 试验模型布置图

Fig. 1 Experimental setup

1.2 PIV 测量流场基本原理

PIV 测量系统的主要由同步器、激光发生器(光源)、CCD 相机及电脑等部分组成(图 2(a))^[18-19]。测试时,同步器激发激光器发出激光脉冲,激光脉冲经过 1 组透镜展开形成片光源照亮所测流场,高速 CCD 相机捕捉 2 个激光脉冲照亮流场的 2 幅示踪粒子运动图像,得到的图像由接口板传输到计算机系统内存。在分析示踪粒子流速时,假定流场中某一示踪粒子在 2 维(x, y)平面上运动,2 次脉动时间间隔 Δt 已知,通过比对 2 帧图像中示踪粒子的位移,即可得到 2 维流场分布^[20]:

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} \approx \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2(t_2) - x_1(t_1)}{t_2 - t_1} = \bar{V}_x, \\ v_y = \frac{dy}{dt} \approx \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{y_2(t_2) - y_1(t_1)}{t_2 - t_1} = \bar{V}_y \end{cases} \quad (1)$$

其中, v_x, v_y 为 2 维流场中示踪粒子在 x 和 y 方向上的瞬间速度 $x_1(t_1), y_1(t_1)$ 为 t_1 时刻示踪粒子在 2 维平面中的位置 $x_2(t_2), y_2(t_2)$ 为 t_2 时刻的空间位置 Δx 为时间间隔 Δt 内示踪粒子在 x 方向上的位移 Δy 为时间间隔 Δt 内示踪粒子在 y 方向上的位移 \bar{V}_x, \bar{V}_y 为 2 维流场中示踪粒子在 x 和 y 方向上的平均速度(图 2(b))。

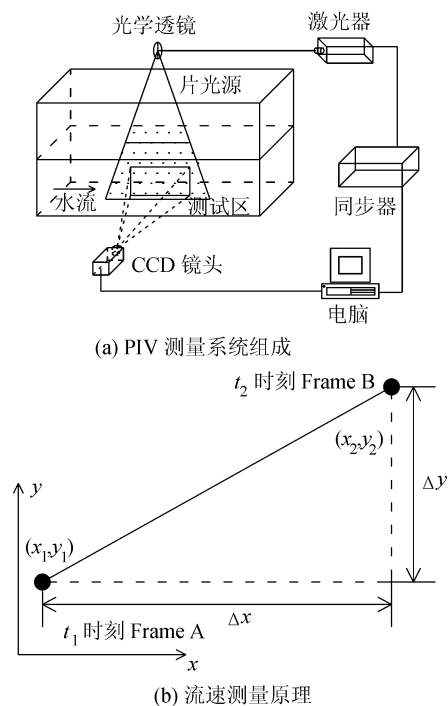


图 2 PIV 流场测量系统组成与原理

Fig.2 Composition and principle of PIV system

1.3 试验流体基本特性

通过混合液与动床物质的相互作用, 形成几乎透明、具有较高黏性的固液两相混合流体来模拟泥石流。当黏性液体与动床固体颗粒充分掺和后, 在下游顺直断面通过 PIV 系统测量泥石流断面流速分布。由于丙烯酸树脂乳液的黏度较大(达到 $5.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$), 为模拟较高流速下泥石流的运动过程, 需要对其进行稀释, 稀释溶剂仍选用无色、透明液体(乙酸乙酯), 通过 2 种液体不同体积比, 得到混合液所需要的黏度, 如图 3 所示。

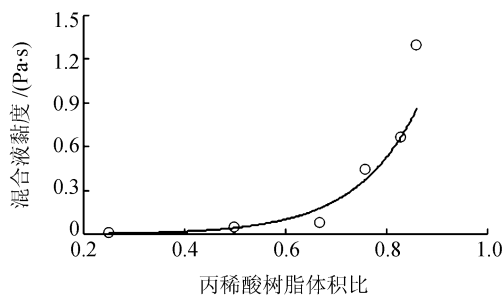


图 3 不同体积比下混合液黏度变化

Fig.3 Variation of fluid viscosity for different volume ratios

稀性泥石流的黏度一般小于 $0.30 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 为了模拟稀性泥石流的运动过程, 采用丙烯酸树脂与乙酸乙酯按体积比 1:3 混合, 即丙烯酸树脂为 25%, 通过流变仪测得其黏度系数为 $0.01 (20 \text{ }^\circ\text{C})$, 约为清水的 10 倍。

2 试验结果与分析

2.1 不同条件下颗粒的运动过程

由于泥石流具有较高的黏滞度, 固体颗粒在泥石流中的沉降速度较小, 所以与含沙水流相比, 固体颗粒在混合液中的分布更均匀, 更接近真实情况下泥石流的运动过程。对于直径为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 的颗粒, 在清水条件下部分颗粒能够远离床面, 从推移质变成跃移质, 而在泥石流条件下, 更多的颗粒进入中上层液中, 固液掺混更加充分, 固体颗粒在整个断面上的分布更加均匀; 对于直径为 $1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ 的颗粒, 在清水条件下出现明显分层现象, 仅部分较小的颗粒随机地进入到水流的中、上部, 而泥石流中仍能看到部分固体颗粒处于跃移状态, 分布于整个流体断面; 对于直径为 $2.0 \sim 5.0 \text{ mm}$ 的颗粒, 在该水力条件下, 固体颗粒在流体中的运动规律与直径为 $1.0 \sim 2.0 \text{ mm}$ 条件下的运动规律相似, 在混合液中仍有部分颗粒能够进入流体的中、上部。从颗粒在混合液中的运动情况看, 采用黏性混合液模拟泥石流可行, 不同条件下固体颗粒的分布情况如图 4 所示。

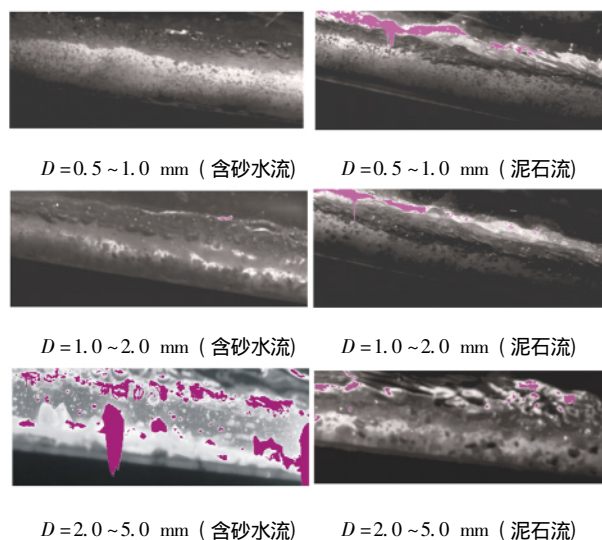


图 4 颗粒在清水和泥石流中的分布规律

Fig.4 Particle distribution in the fluid with different viscosity

2.2 液相流速分布

清水条件下, 固体颗粒沿垂向上浓度变化较大,

虽然部分较小的颗粒能够到达液体的中、上部,但是大部分颗粒还是沿床面以推移质的形式运动,所以液相流速在底部均存在低速区(蓝色部分)。泥石流条件下,颗粒浓度沿垂向分布较含砂水流更均匀,但仍有部分颗粒沿床面以推移质的形式运动,床面附近存在明显的低速区。从断面流场分布看,含沙水流流层中、上部流场方向较泥石流变化小,主要是

含砂水流中固体颗粒浓度较低,颗粒间的碰撞机会少,颗粒均跟随着流体一起运动,所以中、上部流场方向较为一致;而泥石流中由于固体颗粒浓度较高,颗粒间碰撞机会增加,颗粒间存在动量交换与能量传递,固体颗粒对液相的扰动较大,所以局部区域流体速度变化大,如图 5 所示。

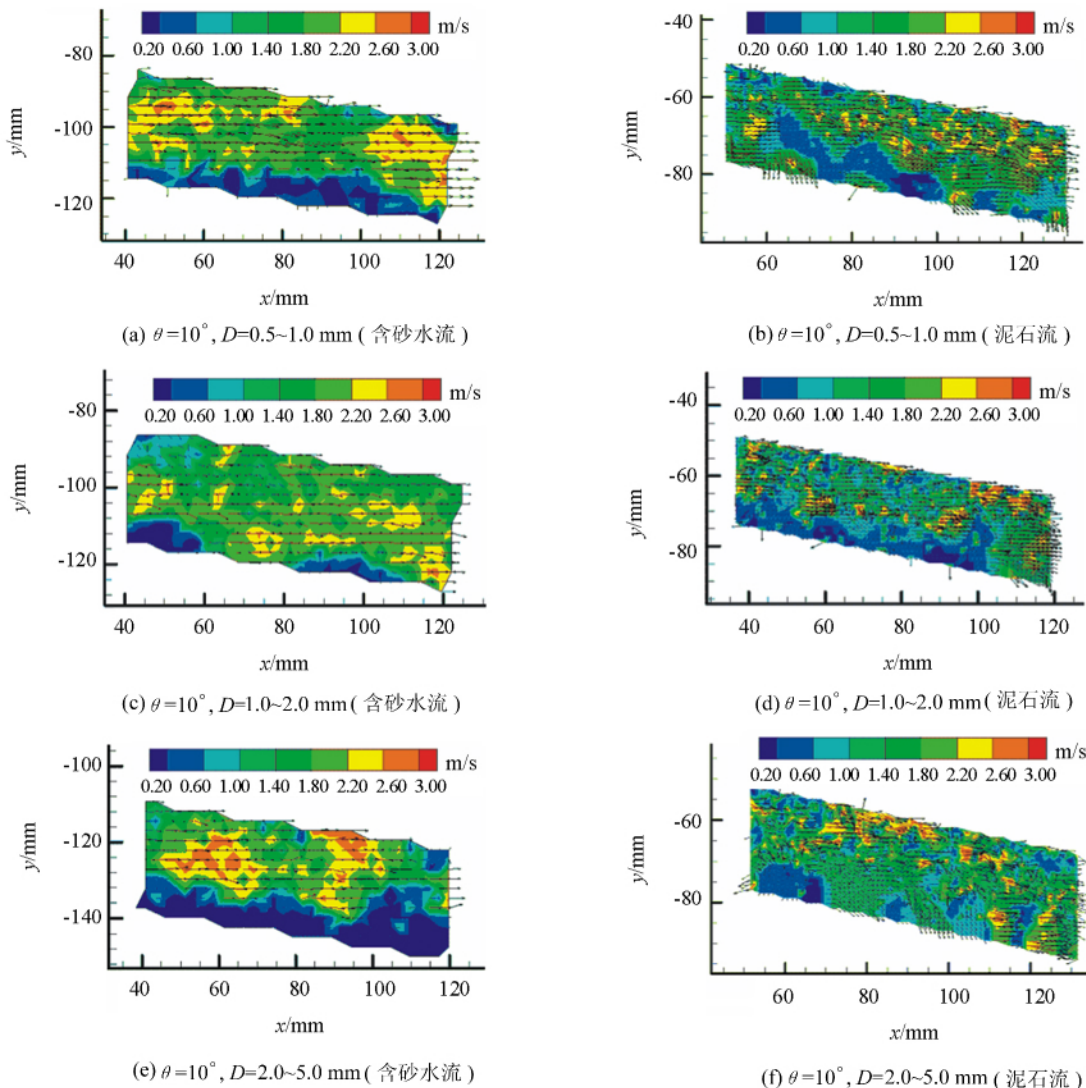


图 5 不同工况下断面速度分布特性(液相流速)

Fig.5 Characteristics of velocity distribution with different fluid viscosity

2.3 液相流速垂线分布

水流在紊流状态下,水体内部质点间存在着相互的碰撞、混掺、摩擦等作用,因此,水体内部质点存在动量交换和能量传递。断面流速由底部到水面并非存在线性增加,其分布存在着边壁处流速梯度大,越靠近水面,流速梯度变化越小的关系。对明渠紊流流速分布的研究,大都基于 Prandtl 理论,根据假设混掺长度 l 的不同表达形式,分别有对数和指数 2 种流速分布规律的表示方式。在 2 元明渠流速垂线

分布的研究中,通常采用的对数分布形式为^[21]:

$$u = u_{max} - \frac{u_*}{k} \ln \frac{h}{y} \quad (2)$$

其中: u 为距底边 y 的流速; u_{max} 为最大流速; u_* 为摩阻流速; k 为 Karman 常数 $k = 0.4$; h 为渠道水深。

当颗粒粒径较小时($D = 0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$),粒子对水流的扰动作用不显著,固液两相流基本上以“流体挟沙”的形式运动,无论是水-砂两相流还是黏性混合液-砂的两相流,断面上液相流速分布规

律基本接近于纯水流速分布,三者差别不大,如图 6 (a) 所示;随着颗粒直径的增加,固体颗粒对水流的扰动作用增强,两相流流速分布逐渐偏离单相清水的速度分布,且泥石流偏离程度大于含砂水流,主要由于受流体黏性的影响,前者速度沿水深方向的增长速度小于后者的增长速度;当固体颗粒大到一定程度后,含砂水流中出现明显的分层现象,一部分颗粒以推移质方式沿床面移动,所以床面附近流速增长速度很慢,只有达到一定高度时(3~5 倍颗粒直径以上),液相流速才迅速增加。泥石流中颗粒浓度分布相对均匀,固体颗粒能够到达流层的中、上部位,颗粒对水流的干扰作用明显,且具有很强的随机性,所以反映到液相流速分布具有一定的波动性,流速沿垂向分布较为分散,如图 6 (b) ~ (c) 所示。

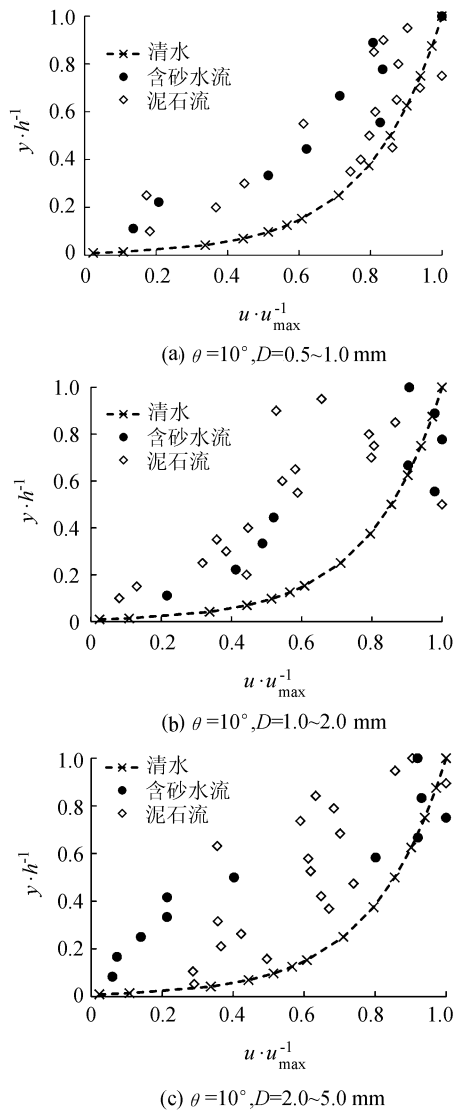


图 6 液相垂线流速分布规律

Fig. 6 Distribution of fluid velocity along water depth

2.4 颗粒流速分布规律

在泥石流中,由于颗粒浓度大于一般含沙水流,因此泥石流中颗粒运动规律较含沙水流更复杂。从断面流场分布来看,颗粒速度大小分布散乱,断面中上部有的地方速度很小(偏蓝色部分),床面附近局部区域也可能有较大的流速(偏红色部分);颗粒速度分布不仅在数值上差异大,而且颗粒运动方向较液相更加杂乱无章。这主要是由于颗粒在运动过程中彼此间存在相互的随机碰撞、摩擦、挤压等过程,动量交换作用明显,使得颗粒流速在大小和方向上变化大,如图 7 所示。

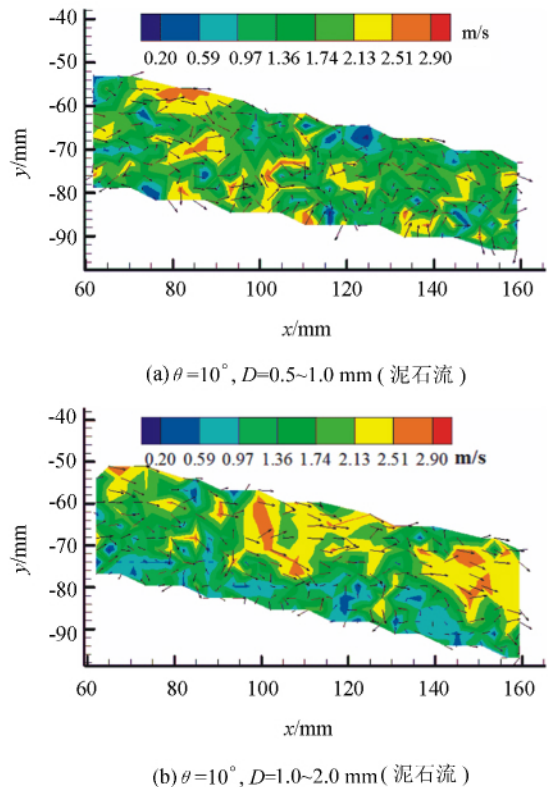


图 7 颗粒平均流速分布规律

Fig. 7 Distribution of particle velocity at a certain cross-section

在颗粒分布较为均匀的条件下,颗粒垂向流速分布可通过理论进行计算,Bagnold 应用同心转筒试验得到颗粒相互碰撞交换动量时剪应力与切变率之间的关系^[22]:

$$\tau = k_1 \rho_s (\lambda d)^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (3)$$

其中, $k_1 = 0.013 \rho_s$ 为颗粒容重, λ 为线性浓度, d 为颗粒直径。

对于 2 维均匀稳定流,水流剪切应力有^[2]:

$$\tau = [S_v(\gamma_s - \gamma) + \gamma](h - y) \sin \theta \quad (4)$$

其中, S_v 为颗粒浓度, γ_s 为颗粒容重, γ 为水容重, h

为水深 θ 为河道与水平面夹角。

假定 2 维均匀稳定流, 离散剪应力(3) 与水流剪应力(4) 相等的情况下, 高桥堡得到的水石流颗粒流速垂向分布为^[21]:

$$u = \frac{2}{3\lambda d} \sqrt{\frac{\rho_m g \sin \theta}{k_1 \rho_s}} (h^{1.5} - (h-y)^{1.5}) \quad (5)$$

当 $y = h$ 时, 得到表面流速 u_s , 通过无量纲化可得^[23]:

$$\frac{u}{u_s} = 1 - \left(1 - \frac{y}{h}\right)^{3/2} \quad (6)$$

由式(6) 得到不同条件下 $y/h \sim u/u_s$ 之间的关系曲线(图 8), 从图 8 可以看出: 高桥堡、沈寿长及杨美卿的试验结果^[23] 较高桥堡颗粒速度分布模型计算值偏大, 实测断面流速分布与高桥堡公式计算结果吻合较好。主要原因是已有试验结果均在清水条件下测得的, 由于水的黏性低, 颗粒在重力作用下下沉速度快, 垂向浓度分布不均匀, 表层颗粒浓度较低, 颗粒间以惯性碰撞作用为主 ($u/u_s > 0.7$); 而在中、底层颗粒浓度高, 彼此之间以接触、摩擦为主 ($u/u_s \leq 0.7$), 颗粒浓度分布的不均匀使得速度垂向分布与均匀假设条件下的高桥堡模型计算结果差异大。而文中试验采用黏度较高的丙烯酸-混合液代替清水, 固体颗粒在液相中的分布更均匀, 更接近计算公式的假定条件(颗粒浓度在垂向上均匀分布)。这可能是导致测量结果中垂向流速分布反“S”曲线规律不明显的原因。

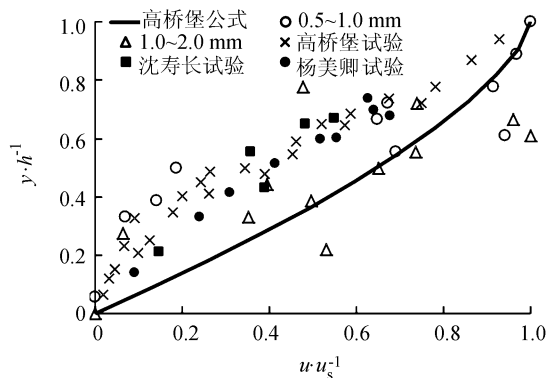


图 8 颗粒垂线流速分布规律

Fig. 8 Distribution of particle velocity along water depth

3 结 论

试验针对目前泥石流流速研究中无法测量流体内部流场的不足, 采用黏度较高的丙烯酸树脂与乙酸乙酯混合液模拟泥石流的黏性, 利用 PIV 粒子图像测速系统测量泥石流内部固体颗粒与液相的流速

分布规律, 得到以下结论:

1) 试验对比了不同颗粒粒径条件下, 颗粒在清水和泥石流中的分布规律。随着颗粒粒径的增加, 含砂水流中出现明显的分层现象; 而黏性混合液条件下, 颗粒能够较为均匀地分布于整个过流断面, 较为真实地反映天然状态下泥石流中固体颗粒的分布规律。

2) 固液两相流中, 固相和液相流速差异显著。从总体上看, 固液分相的速度随着深度的增加而增大, 液相速度方向与泥石流整体运动方向基本一致; 而固相颗粒运动方向杂乱无章, 这主要由于颗粒之间存在强烈的碰撞、摩擦等过程, 动量交换作用明显。

3) 两相流中固体颗粒垂线流速分布是否存在反“S”曲线分布, 主要与两相流的性质及颗粒在液相中分布的均匀程度有关。前人以含砂水流为研究对象, 固体颗粒浓度分布很不均匀, 垂向流速分布呈反“S”曲线分布; 试验采用黏性混合液-砂为研究对象, 结果表明泥石流垂向流速分布接近于高桥堡模型计算结果 ($u/u_s > 0.3$), 与含砂水流流速分布差异显著。

通过 PIV 流速量测技术获得了流体黏性较高情况下, 固液两相流中液相流速分布, 对比分析了不同黏性条件下颗粒流速垂线分布规律, 弥补了现有试验中只能测量泥石流表面或者边壁流速的不足。但是由于泥石流固液两相之间相互作用的复杂性, 目前对固液两相流速分布规律、固液两相脉动相关性、固液两相间的动量传递等问题的研究仍不深入, 尚需要开展大量的研究工作, 以期进一步揭示泥石流内部固液两相之间的作用规律, 更好地了解泥石流运动特征, 更好地为山区泥石流防灾减灾工作服务。

参考文献:

- [1] Zhu Xinghua, Cui Peng, Tang Jinbo et al. Calculation of viscous debris flow velocity [J]. Journal of Sediment Research, 2013(3): 59-64. [朱兴华, 崔鹏, 唐金波, 等. 黏性泥石流流速计算方法 [J]. 泥沙研究, 2013(3): 59-64.]
- [2] Takahashi T. Mechanical characteristics of debris flow [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1978, 104(8): 1153-1169.
- [3] Yang Meiqing, Wang Lixin. A laminated load model of debris flow and its experimental investigation [J]. Journal of Sediment Research, 1992(3): 21-29. [杨美卿, 王立新. 泥石流运动的层移质模型及其试验研究 [J]. 泥沙研究, 1992(3): 21-29.]
- [4] Chen Hongkai, Tang Hongmei, Chen Yeying. Research on method to calculate velocities of solid phase and liquid phase in debris flow [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(3): 357-364. [陈洪凯, 唐红梅, 陈野]

- 鹰. 泥石流固液分相流速计算方法研究[J]. 应用数学和力学 2006 27(3): 357-364.]
- [5] Yang H J, Wei F Q, Hu K H, et al. Measuring the internal velocity of debris flows using impact pressure detecting in the flume experiment [J]. Journal of Mountain Science 2011 8(2): 109-116.
- [6] Steingart D A, Evans J W. Measurements of granular flows in two-dimensional hoppers by particle image velocimetry. Part I: Experimental method and results [J]. Chemical Engineering Science 2005 60(4): 1043-1051.
- [7] Slominski C, Niedostatkiewicz M, Tejchman J. Application of particle image velocimetry (PIV) for deformation measurement during granular silo flow [J]. Powder Technology 2007 173(1): 1-18.
- [8] Yilmaz N, Lucero R E, Donaldson A B, et al. Flow characterization of diffusion flame oscillations using particle image velocimetry [J]. Experiments in Fluids, 2009, 46(4): 737-746.
- [9] Chen Huai, Zhong Qiang, Wang Xingkui, et al. Characteristics of cavity flows at different Reynolds numbers [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition 2013 45(Supp 2): 14-19. [陈槐, 钟强, 王兴奎, 等. 不同雷诺数下空腔流的流动特性[J]. 四川大学学报: 工程科学版 2013 45(增刊2): 14-19.]
- [10] Li Naiwen, Li Longguo, Zhuang Wenhua, et al. Hydraulic characteristics of the wall-jet region in a pool with an oblique submerged jet [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition 2015 47(3): 14-20. [李乃稳, 李龙国, 庄文化, 等. 水垫塘冲击射流附壁区的水力特性[J]. 四川大学学报: 工程科学版 2015 47(3): 14-20.]
- [11] Wan Liguang, Ren Qingkai, Tian Xi, et al. PIV technique and its application in two-phase flow measurement [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(12F): 463-467. [万立国, 任庆凯, 田曦, 等. PIV 技术及其在两相流测量中的应用 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12F): 463-467.]
- [12] Jin Wen, Wang Daozeng. Direct settling velocity detection of sediment using PIV [J]. Journal of Hydrodynamics, 2005 20(1): 19-23. [金文, 王道增. PIV 直接测量泥沙沉速试验研究 [J]. 水动力学研究与进展 2005 20(1): 19-23.]
- [13] Zhang Jinfeng, Zhang Qinghe, Lu Zhao. Direct settling velocity detection of sediment using PIV [J]. Advances in Water Science 2009 20(4): 480-484. [张金凤, 张庆河, 卢昭. 颗粒沉降的格子 Boltzmann 模拟与 PIV 实验验证 [J]. 水科学进展 2009 20(4): 480-484.]
- [14] Jiang Han, Liu Xinhong, Huang Xiongbin. Investigation on turbulent flow characteristics in a solid-liquid square stirred tank using 2D-PIV method [J]. The Chinese Journal of Process Engineering 2010 10(1): 1-9. [江涵, 刘心洪, 黄雄斌. 用 2D-PIV 方法研究固-液方形搅拌槽内液相湍流 [J]. 过程工程学报 2010 10(1): 1-9.]
- [15] Yang Minguan, Liu Dong, Gu Haifei, et al. Using the PIV technology to measure the liquid-solid flow with salt coagulation [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition 2007 28(4): 324-327. [杨敏官, 刘栋, 顾海飞, 等. 盐析液固两相流场的 PIV 测量方法 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版 2007 28(4): 324-327.]
- [16] Unadkat H, Rielly C D, Hargrave G K, et al. Application of fluorescent PIV and digital image analysis to measure turbulence properties of solid-liquid stirred suspensions [J]. Chemical Engineering Research & Design, 2009, 87(4): 573-586.
- [17] Dai Qin, Kang Wen. PIV/PTV two-phase flow measurement technique based on image separation [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008, 22(2): 88-94. [代钦, 康文. 基于图像分割的两相流 PIV/PTV 测量技术 [J]. 实验流体力学 2008 22(2): 88-94.]
- [18] Shi Huixian, Wang Qinhui, Luo Zhongyang, et al. The application of PIV in gas-solid multiphase flow [J]. Power Engineering 2002 22(1): 1589-1593. [石惠娴, 王勤辉, 骆仲决, 等. PIV 应用于气固多相流的研究现状 [J]. 动力工程 2002 22(1): 1589-1593.]
- [19] Chen Zhao, Guo Yongcai, Gao Chao. Principle and technology of three-dimensional PIV [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006 20(4): 77-84. [陈钊, 郭永彩, 高潮. 三维 PIV 原理及其实现方法 [J]. 实验流体力学 2006 20(4): 77-84.]
- [20] Luo Wei, Zhou Xiaode, Cheng Wen, et al. Research advances of PIV in gas-liquid phase flow [J]. Transducer and Microsystem Technologies 2006 25(2): 1-6. [罗玮, 周孝德, 程文, 等. PIV 应用于气液两相流的研究现状 [J]. 传感器与微系统 2006 25(2): 1-6.]
- [21] Sun Dongpo, Wang Erping, Dong Zhihui, et al. Discussion and application of velocity profile in open channel with rectangular cross-section [J]. Journal of Hydrodynamics, 2004 19(2): 144-152. [孙东坡, 王二平, 董志慧, 等. 矩形断面明渠流速分布的研究及应用 [J]. 水动力学研究与进展 2004 19(2): 144-152.]
- [22] Bagnold R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear [C]// Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. London: The Royal Society, 1954 225(1160): 49-63.
- [23] 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. (编辑 李轶楠)