

文章编号: 1008 - 2786 - (2006)5 - 555 - 07

粘性泥石流流体的应力应变特征和应力本构关系的研究

王裕宜

(1. 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; 2. 中国科学院东川泥石流观测研究站, 四川 成都 610041)

摘 要: 通过粘性泥石流流体阵性流的野外观测和最新研制的泥石流流变仪应用, 含有砾石的粘性泥石流流体具有明显的应力过冲、触变能量、剪切稀化和双屈服应力等流变特征被得到研究。粘性泥石流应力应变的自组织临界特性分析表明, 泥石流的规模与频率间存在着幂定律关系。粘性泥石流流体在低速率区启动初始段, 其应力本构关系可用剪切稀化的幂定理方程来描述。粘性泥石流流体在剪切速率区流动剪切段的应力本构关系, 应包含滑动摩擦作用的零次项和反映惯性碰撞的平方项, 具有屈服应力和剪切膨胀的流变特征。

关键词: 粘性泥石流; 应力应变; 规模与频率关系; 应力本构关系

中图分类号: P 642. 23

文献标识码: A

泥石流是山区介于挟沙水流和滑坡之间的土、水、气混合流体。它往往突然暴发, 来势凶猛, 破坏力强, 对山区的经济建设和人民的生命财产构成严重威胁, 成为山区主要自然灾害之一。泥石流发生、运动和堆积的机理的分析研究, 能为有效地治理泥石流和减轻泥石流灾害的损失提供理论根据。根据对云南蒋家沟泥石流的多年观测, 粘性泥石流流体的运动通常以间歇性的阵性流形式出现, 每一阵都有明显的头部、身部和尾部(通常称为龙头, 龙身和龙尾), 阵与阵之间有断流现象, 在流量过程线上呈独立的峰值型。在一场泥石流活动过程中, 可能出现十几阵至几十阵, 甚至上百阵的阵性流。阵性流迎面高陡(实测最高达 4 m, 一般为 2 m 左右), 几乎垂直于河床面, 龙头就像一堵咆哮而来的海潮。其后续部分骤然低落, 逐渐向龙身和龙尾平缓降低, 除头部外, 整个流面平顺, 近似层流状态。迄今为止, 无

论是由水、石组成的颗粒流碰撞理论^[1,2], 还是由泥、沙组成的宾汉粘塑性理论^[3,4], 都难以完满地解释阵性流的形成机理。因此泥石流流体流变特征的测试和应力本构关系的认识, 则是研究泥石流内在机理的重要基础。自 1978 年 Takahashi^[5] 首次应用 Bagnold^[1] 的颗粒流理论解释水泥石流的剪切机理以来, 随着国际减灾活动的加强, 泥石流流体流变特征的测试和应力本构关系的研究已经成为泥石流研究领域的热点之一。国内外许多泥石流专家利用旋转式 (O'Brien and Julien, 1988^[4]; Major and Pierson, 1990^[6])、锥盘式 (Phillips and Davies, 1989^[7]; 沈和魏, 1998^[1]) 和直立式²⁾ (詹和陈, 1997) 等多种结构的流变仪来研究泥石流流体的流变行为, 但都因受仪器自身结构的限制, 无法对含有粗颗粒砾石的粘性泥石流流体进行测试。因此以往粘性泥石流流体应力本构关系的研究受到仪器自身测试数据的限制。本文

收稿日期 (Received date): 2006 - 07 - 14。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (4007110) 和中科院山地所创新基金 Y106005 [Funded by NSFC (4007110) and The innovation foundation by IMHE, CAS & MWC (Y106005)]

作者简介 (Biography): 王裕宜 (1944 -), 研究员, 从事于泥石流应力应变特性和泥石流预测预报的观测研究 [Wang Yuyi (1944 -), Researcher (Prof.), Specialized in observational research on rheological characters and forecast predication of debris flow]

1) Shen Shouchang, Wei Hong. The stress constitutive relation of debris flow [A]. In: Researches on Mountain Disasters and Environmental Protection across Tainwan Strait [C]. 1998. 114 ~ 121 [沈寿长, 魏鸿. 泥石流应力本构关系的试验研究 [A]. 见: 海峡两岸山地灾害与环境保育研究 [C]. 1998. 114 ~ 121]

2) Jan Chyandeng, Chen Suchin. Preliminary experimental research on flow phenomenon of debris flows in flume with vertical rotate [A]. Proceeding of deliberate workshop of the first debris flow [C]. 179 ~ 190 [詹钱登, 陈哲琪. 土石流体在直立旋转式水槽内流动现象之初步实验研究 [A]. 第一届土石流研讨会论文集 [C]. 179 ~ 190]

采用作者最新研制的泥石流流变仪,对含有粗颗粒砾石的粘性泥石流体的流变特性进行了测试,发现含有砾石的粘性泥石流体比其泥浆体具有更明显的应力过冲、触变能量等特征^[8]和泥石流的规模与频率间存在着幂定律关系,并结合野外观测到的自然界泥石流体的剪切速率很少超过20/s的特征,分别研究了粘性泥石流体在启动初始段的($du/dy < 10/s$)和在流动剪切段($10/s < du/dy < 20/s$)的应力本构关系。

1 平板旋转式泥石流流变仪

泥石流体流变试验在技术上的困难主要是泥石流体原样含有粗颗粒(砾石),而且还要求能同时测定正压力(法向应力)。我们研制的这台大型平板旋转式泥石流流变仪,其主要特点是泥石流试样在仪器测试室中的受剪状态,与野外泥石流体的流动状态基本相似。该流变仪的上盘(测量盘)直径为500 mm,它与正压力传感器和扭矩传感器相连接;下盘(转盘)的直径(内径)为590 mm,它被设计成可放置泥石流试样,并且连接无级可调速率传感器。这台流变仪与标准规格的通用流变仪还进行了标样的校正,以验证该仪器的稳定性、精度和可靠性。标定是通过两种平行测试进行的,一组平行测试是将该流变仪与美国的数字旋转式粘度计(LVTD230)同步分别进行牛顿体流变标样参数测定,该流变仪的牛顿体标样理论值与标样测试修正值的平均误差为0.009(n_1 为32个测点, $\sigma_{n1} - 1 = 4.4976 \times 10^{-5}$)。另一组平行测试是将该流变仪(the DFR)与前东德的圆筒旋转式粘度计(the RV2),同步分别进行泥石流泥浆体流变参数的测定(一种非牛顿体),该流变仪非牛顿体修正值与标样测试值(RV2)的平均误差为-0.0033(n_2 为16个测点, $\sigma_{n2} = 1.2894 \times 10^{-4}$)。这两种平行测试的标定结果表明,该仪器的是可以进行泥石流流变实验的测试。

样品的测定是在中科院东川泥石流观测研究站进行的。将现场采集的泥石流体样品,筛除颗粒>20 mm的砾石后的似泥石流体,立即放入仪器测试室进行测定,筛除的>20 mm的砾石约占样品砾石颗粒粒度含量频率的5%。实验由上盘的扭矩传感器和正压力传感器通过AD卡与计算机连接输出测试结果。

2 粘性泥石流体启动的应力过冲特征和阵性流形成机理

迄今为止,所谓泥石流体的流变测试都是以泥浆或以模拟砂、粘粒的材料($d_{max} \leq 2$ mm)为试样进行的(这种浆体的固体颗粒总重量仅占自然界粘性泥石流体固体物质总重量的40%),将测得的结果再扩展到含粗颗粒砾石的两相流体——泥石流体,并根据测得的流变曲线,确定为宾汉模型。而针对含粗颗粒砾石似泥石流体的应力应变特征的实际测试还未见报道,这除了因仪器结构上的缺陷和样品制备上的困难外,还因为多数人对流变测试结果的分析,忽视了泥石流体低速率时的应力应变特征。尽管有些人^[4,6]已注意和观测到自然界泥石流体的剪切速率很少>20 s⁻¹(一般都<10 s⁻¹),但也因缺乏测试手段而难以开展这方面的研究工作。

2.1 粘性泥石流体启动的应力过冲特征

粘性泥石流体应力应变上行曲线,在低速率区初始段出现较高的始屈服应力(或称应力过冲)的现象说明,停积在沟床中的粘性泥石流体具有一定屈服应力(或称终屈服应力,图1中 τ_{y1})。只有当粘性泥石流体具备较高始屈服应力(图1中 τ_{y2} 和 τ_{y3})时,才能克服静止状态下的结构力(τ_{y1})而重新启动^[11]。这除了与浆体介质的触变性和高粘性介质的剪切稀化特性有关外,还与高浓度粗颗粒(砾石)的挤压摩擦力有关。受剪初期粗颗粒相互作用的挤压摩擦力,经历了较明显地形变破坏和最终剪破的二个阶段,即初始屈服应力和极限屈服应力阶段(图1中 τ_{y2} 和 τ_{y3})。初剪时,由于初始孔隙率大,易于压缩变形。当孔隙压缩到一定程度,足以使粗颗粒骨架开始承剪时,粗颗粒间的接触越来越多,浆体介质承受压力不再增加,而是从砾石骨架间隙中挤

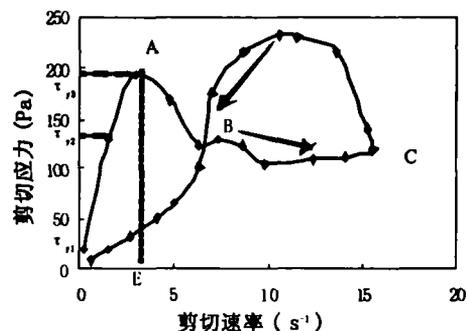


图1 粘性泥石流体的流变曲线

Fig. 1 Rheological curve of debris flow sample

出并触变稀化^[9]。当颗粒间的接触面最大而趋向稀化滑动时,应力达到最大,使得颗粒间挤压摩擦的骨架结构最终被剪破。其挤压摩擦的最大应力,也可称为极限屈服应力(图1中的 τ_{y3})。泥石流流体一旦触变启动后,如果 τ_{y3} 或 τ_{y2} 很大时,随着流体的内摩擦力和动摩擦系数(沟床剪切力)的变化,流速加大,阵性流加速扩展。反之,阵性流流速逐渐减小,最终阵性流消失,停积或者转变为连续流。

2.2 阵性流形成机理和阵性流龙头非确定参数的演算^[12]

粘性泥石流流体任意剪切面上的极限剪切力(τ_m)必定大于或等于泥石流流体的抗剪强度(τ_s),而抗剪强度与泥石流流体的密度(ρ_c)、液相粘性介质的粘结力(τ_c)、固体颗粒的有效重量($H_0 \cdot \rho_c \cdot g - du/dy(N)$)以及泥膜化颗粒的准静摩擦系数($\tan\varphi_s$)有关。经变换后,得到粘性泥石流流体启动时的龙头高度(或称泥深)为

$$H_m \geq \frac{\tau_c + [H_0 \cdot \rho_c \cdot g - \frac{du}{dy}(N)] \tan \varphi_s'}{\rho_c \cdot g \cdot \tan \varphi_d \cdot \cos \theta \cdot C_w \left[\frac{\rho_s - \rho_0}{\gamma_c} \right]} \quad (1)$$

式中 ρ_s 为泥沙比重, C_w 为体积浓度, g 为重力加速度, N 为正压力 $\tan\varphi_d$ 为流体动摩擦系数, $\cos\theta$ 为河床倾角,除了 C_w 、 ρ_s 、 ρ_0 、 τ_c 等为可确定参数外, $(du/dy)(N)$ 、 $\tan\varphi_s$ 和 $\tan\varphi_d$ 为非确定参数。在泥石流运动理论的研究中,以连续介质力学的方法导出的本构关系,对于描述实际物质性质的非确定参数 $(du/dy)(N)$ 、 $\tan\varphi_s$ 和 $\tan\varphi_d$ 而言,主要是靠与实验的比较,也就是将本构关系导出的物料函数与实验的测定值作比较,从而对这些参数进行修正和确定。在演绎中,通常认为静摩擦系数($\tan\varphi_s$, static friction coefficient)和准静摩擦系数($\tan\varphi_s'$, quasi-static friction coefficient)不一样,沟床动摩擦系数($\tan\theta$, bed dynamic friction coefficient)和流体动摩擦系数($\tan\varphi_d$)不一样^[12]。但在实际应用中,由于受到实验仪器结构装置的限制,很难测定准静摩擦系数($\tan\varphi_s$)和动摩擦系数($\tan\varphi_d$),所以一直沿用 $\tan\varphi_s$ 代替 $\tan\varphi_s'$, $\tan\theta$ 代 $\tan\varphi_d$ ^[10]。粘性泥石流流体由于颗粒级配组成的不均一性和千变万化的流变响应,而使其静摩擦系数比均一性较好的纯固体颗粒的静摩擦系数更为复杂。本文利用自己研制的大型平板旋转式泥石流流变仪,能够测定粘性泥石流流体的准静摩擦系数。

根据蒋家沟粘性泥石流流体($\gamma_c = 2.096 \text{ t/m}^3$)在

流变仪上测定的极限屈服应力,计算得到粘性泥石流流体启动时的准静摩擦角为 8° , 该值远小于大型直剪仪(剪切盘直径 30 cm)所测定的蒋家沟粘性泥石流土体(级配相似)的内摩擦角 $\varphi_s = 18^\circ \sim 24^\circ$ (当样品土体含水量接近饱和时, φ_s 的最小极值约为 14°)。并根据流变仪所测定的样品正压力 $[(du/dy)N]$, 以及泥石流流体受剪时的瞬时附加压力 $(du/dy)Pe = F(C_w, h_0)$, 可以确定动摩擦系数。设泥石流流体中土体的密度($\rho_c = 2096 \text{ kg/m}^3$), 泥石流浆体的屈服应力(粘结力 τ_c)为 32.7 Pa, 当准泥石流流体的泥深为 0.98 m 时, 根据正压力值(含附加孔隙压力)可以计算得到它的有效应力, 将以上各数值计算得到该泥石流流体的抗剪强度为 1592.32 Pa。取蒋家沟上游支流汇口处的沟床倾角 $\theta = 9^\circ$, $\rho_H = 2.7 \text{ g/cm}^3$, $\rho_f = 1.65 \text{ g/cm}^3$, $\gamma_c = 2.096 \text{ g/cm}^3$, 可以计算该粘性泥石流流体($C_w = 0.645$)某一剪切面上启动时所需的坡度。将以上两组数值分别代入(1)式, 可以获得粘性泥石流流体启动时应力过冲所需的泥深(或称高度)为 2.04 m。粘性泥石流流阵性流流量过程线上呈现的独立峰型, 以及阵与阵之间的断流现象, 是与粘性泥石流流体启动时的应力过冲机理有关(图1中 T_{y2} , T_{y3} 或称极限屈服应力)。本次实验样品的流体性质与验证对比观测样本的泥石流流体性质基本一致, 观测样本的泥石流流体浓度平均值为 2.208 t/m^3 与实验样品的原样浓度 2.206 t/m^3 ($2.096 \text{ t/m}^3 \div 95\%$) 基本一致。观测样本的流速递度平均值为 3.9/s, 泥石流流体的泥深平均值为 2.04 m。若将实验泥石流流体的流速递度为 3.9/s 时的滑动摩擦系数($\tan\varphi_d = 0.056$)视为蒋家沟泥石流流通区的坡度($j = 0.052 \sim 0.06$), 获得各泥石流流体的启动流速, 其计算值与观测数值相比基本相似。泥石流流体启动后其流速的加大或减小主要受泥石流流体动摩擦系数的控制和影响。通过对粘性泥石流流体(原样)应力应变特征的测定, 以及启动高度的演算与观测数据的对比, 初步揭示粘性泥石流流体阵性流的形成机理, 为进一步深入进行粘性泥石流流体的模型研究奠定了基础。

3 粘性泥石流流应力应变的自组织临界特性

通过对粘性泥石流流体临界屈服应力和泥石流流体启动高度的演算, 并与粘性泥石流流体阵性流观测资料进行对比可知^[11], 粘性泥石流流体的 τ_{y3} (或 τ_{y2}) 还

控制着阵性流龙头的高度和龙身的长度。现场粘性泥石流流体应力应变特征实验表明,泥石流流体的临界屈服应力(τ_{y3})与泥石流流体体积浓度的高低(C_w)和流体中砾石的大小(d_{50})有关

$$\tau_{y3} = 679.5d_{50}^{-0.81} \exp(16d_{50}^{-0.91}) \ln C_w \quad (2)$$

粘性泥石流流体应力应变特征表明,停积在沟床中的粘性泥石流流体如果受到扰动后,不同规模阵性流的大小事件都可能发生,发生后泥石流流体应力应变系统又自然地演化成临界状态。所以,在一场泥石流应力应变的阵性流自组织观测研究表明,泥石流暴发初期(铺床过程完成之前)粘性泥石流流体进入沟道后,若泥石流流体的动能无法克服粗糙沟床的阻力和泥石流流体自身的终屈服应力(图1中 τ_{y1})时,流体便停积在沟床中。当前期泥石流流体铺床过程完成之后,一阵又一阵的阵性流就像一堵咆哮奔腾的海潮一样,形成规模大小不等的粘性泥石流阵性流,大规模阵性流少,小规模阵性流多,以 R 为尺度的事件发生的频率(N)与 $1/f$ 相似^[12]。这就是象自然界中地震活动那样的时间序列等许多自然现象出现 $1/f$ 噪声的一样机理, $1/f$ 实际上都是来自具有自组织临界性的随机事件的无规叠加^[12]。Johnson P. A. 等人^[13]研究表明,泥石流规模和频率存在着幂律关系。作者^[10]根据1987~1990年和1997~2001年这9a的88场阵性泥石流详细记录观测资料进行分析,泥石流暴发的规模(平均流量 \bar{Q} (m^3/s)、最大流量 Q_{max} (m^3/s)、总径流量 Q_t (m^3))和暴发频率(N 是根据规模大小进行暴发次数统计)相关性如式(3),它们的 b 值分别为 $1.62(N \propto \bar{Q})$ 、 $1.21(N \propto Q_{max})$ 和 $1.29(N \propto Q_t)$,相关系数分别为 -0.9639 、 -0.8809 、 -0.9293 ,都达到显著($t_{0.05}$)和极显著($t_{0.01}$)水平,95%置信区间为 $-0.7205 < \rho < -0.9965$ 。

$$N \propto Q^{-b} \quad (3)$$

泥石流暴发最大流量与频率的 b 值,与地震上的古登—里克特经验公式^[14,15]具有一定的相似性,古登堡公式中 Q 代表地震释放能量,且 $0.8 \leq b \leq 1.1$,二者相似性源于泥石流流体应力应变系统本身的自组织临界性。

4 粘性泥石流流体在低速率区启动初始段应力本构关系和触变能量

观测试验表明,粘性泥石流阵性流的形成与泥石流流体的浓度和粘性介质直接相关,而泥石流流体内

的高浓度粘性介质作为中性悬浮质($d < 2 \text{ mm}$)是相对稳定不变的(为 $520 \text{ kg/m}^3 \pm 35 \text{ kg/m}^3$)^[10],泥石流流体浓度的增加是依靠砾石含量的增加来实现的。因此,为了进一步研究砾石含量对粘性泥石流流体颗粒间的滑动摩擦、接触挤压和触变性的影响,我们设计了相同的粘性介质(浆体)三组不同粒径的砾石(d 为 $10 \sim 15 \text{ mm}$; $5 \sim 10 \text{ mm}$; $2 \sim 5 \text{ mm}$)随浓度变化的平行实验。将现场采集到的泥石流流体泥浆样品($C_w = 0.4518$, $d < 1.2 \text{ mm}$)作为试验泥石流流体的粘性介质,浆体的 $\eta_p = 0.227 \text{ Pa} \cdot s$, $\tau_y = 22.81 \text{ Pa}$ 。在这三组实验中,泥石流流体的体积浓度(C_w)分别是 0.4888 到 0.7388 ,砾石的体积浓度从 0.037 到 0.287 。通过一系列转换后得到每组试样各种不同浓度下的剪切应力随剪切速率变化的应力应变曲线,三组试验的结果基本一致。图2是粒径为 $10 \sim 15 \text{ mm}$ 组的四种不同浓度的应力应变曲线。

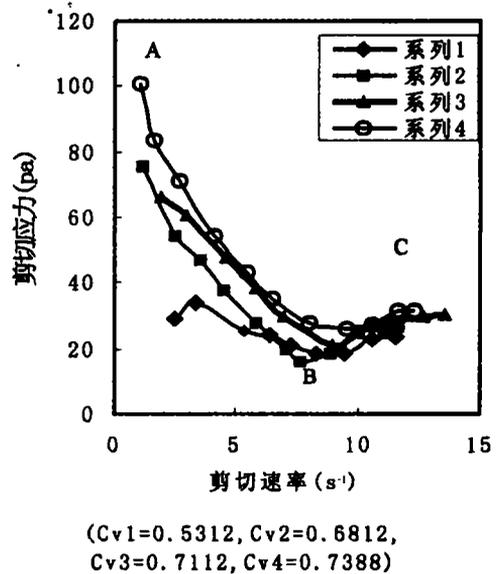


图2 各种不同浓度粘性泥石流的流变曲线

Fig. 2 Rheological curves of various densities debris flows

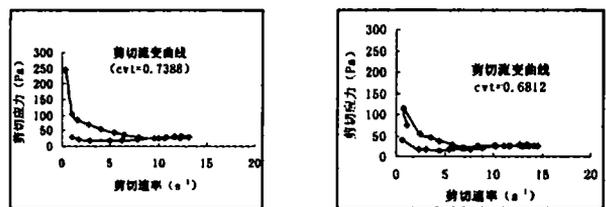


图3 两种不同浓度的泥石流体的剪切应力应变(上行速率与下行速率)曲线

Fig. 3 Rheological curves between different densities of debris flows (up and shear rate)

4.1 粘性泥石流流体启动初始段的应力本构关系

根据测定的泥石流应力应变曲线和流体内部颗粒间的作用机理分析,粘性泥石流流体在低速率区启动初始段(AB段)和在剪切速率区流动剪切段(BC段),具有完全不同的变化规律和应力本构关系。粘性泥石流流体在低速率区启动初始段($du/dy < 10/s$)的应力本构关系,是为颗粒间的作用以接触挤压和滑动摩擦为主幂定理应力本构关系。将各种不同浓度粘性泥石流的幂定理各项系数的值与颗粒的中值粒径(d_{50})进行2次回归,可以获得粘性泥石流流体在低速率区启动初始段的剪切稀化应力本构综合表达式(4)。粘性泥石流流体应力应变曲线在低速率部位体现的剪切稀化特征,它除了与浆体介质受剪初期粘度稀化^[9]和应力松弛^[16]特性有关外,还与粗颗粒间挤压摩擦力和滑动摩擦力有关。在剪切场中高粘性泥石流浆体剪切稀化的流变行为使其内部阻力由剪切初期($du/dy = 0.273/s$)的5.5 Ps减少到1.02 Ps($du/dy = 20/s$),阻力减少近82%

$$\tau = (518.99d_{50}^{-0.69})C_w^{6.77d_{50}^{-0.37}} \exp[-(0.31d_{50}^{-0.37})C_w^{(0.1d_{50}^{1.04})}] \ln \frac{du}{dy} \quad (4)$$

4.2 粘性泥石流流体启动初始段的触变能量^[17]

图1和图3用曲线的方式描述了泥石流的触变现象:在流动曲线中剪切速率“上行曲线”与“下行曲线”并不重叠,两条曲线环绕形成一个面积为“S”的延迟区域(图3中的阴影部分)。它是由上行曲线方程的定积分面积减去下行曲线方程的定积分面积构成(式5)。上行曲线方程为式(x)或者粘性泥石流流体在低速率区启动初始段剪切稀化方程($F(\tau_1), du/dy < du/dy_b$)。下行曲线方程为泥石流流体减速时的流变方程($F(\tau_2), du/dy < du/dy_b$)。其S的表达式为

$$S = \int_{du/dy_b}^{du/dy_0} F(\tau_1) d\tau - \int_{du/dy_b}^{du/dy_0} F(\tau_2) d\tau \quad (5)$$

“S”的面积就是触变性的量度,该区域定量地给出与受剪切样品体积量有关的能量大小^[17]。“S”的面积就是触变性的量度表示破坏单位体积的触变结构所需要的能量,它由剪切应力(τ)与剪切速率(du/dy)量纲(功/剪切时间·1/体积)转换成触变性的量度单位(能量/体积)

$$S = \tau \cdot \left(\frac{du}{dy}\right) \left(\frac{N}{m^2} \cdot \frac{1}{s}\right) \text{ or } \left(\frac{N \cdot M}{s} \cdot \frac{1}{m^3}\right) \quad (6)$$

表1显示了各种不同浓度粘性泥石流流体的触变能量,随三组不同粒径的砾石(d_{50} 分别为12.5 mm;

7.5 mm;3.5 mm)变化的幂律关系($S = Ad_{50}^B$),它们的相关系数都>0.8593。而且其幂律参数A、B又随着粘性泥石流的浓度增加而呈规律的变化[式7(a、b)]。将式(7)代入触变能量与粒径的幂律关系式,则式(8)反映了泥石流流体的触变能量(S)不仅与泥石流流体的浓度有关(如图4),而且还和泥石流流体中的颗粒大小(d_{50})有关

$$A = 7364.2(C_w)^{11.64} \quad (7a)$$

$$B = 0.6548(C_w)^{-1.52} \quad (7b)$$

$$S = 7364.2(C_w)^{11.64}(d_{50})^{0.66(C_w)^{-1.52}} \quad (8)$$

研究粘性泥石流流体触变能量可以探讨粘性泥石流流体启动机理和粘性泥石流流体运动特征。根据以上实验的粘性泥石流流体浓度范围和触变能量的计算,随机地选择了2002年相似的粘性泥石流流体浓度,取其相对应的阵性流运动要素的观测资料与粘性泥石流流体触变能量进行对比,以此来探讨它们之间的相关性,如式(9)。其中式(9)的(9b),即触变能量与流速的对应关系为最好,相关系数(R^2)为0.9983(图4),其他的相关系数分别为0.9028和0.9501(图5)。它说明泥石流的触变能量对泥石流的触变液化和运动起着重要作用,在一定程度上控制着泥石流的流量(Q)、运动速度(V)和输沙(W)的能力

$$Q = 4.01S^{1.08} \dots R^2 = 0.9028 \dots (9a)$$

$$V = 6.01S^{2.65} \dots R^2 = 0.9983 \dots (9b)$$

$$W = 15.92S^{0.6} \dots R^2 = 0.9501 \dots (9c)$$

5 粘性泥石流流体在剪切速率区流动剪切段的应力本构关系^[18]

粘性泥石流流体在剪切速率区流动剪切段(图1的BC段)的应力本构关系,应包括滑动摩擦的零次项和反映惯性碰撞的平方项,具有屈服应力和剪切

表1 各种不同浓度粘性泥石流流体的触变能量幂律($S = Ad_{50}^B$)变化表

Table 1 Power changes of thixotropy energy for various densities of debris flows

C_w	S_1 [$N/(m^2 \cdot s)$]	S_2 ($m^2 \cdot s$)	S_3 ($m^2 \cdot s$)	A	B	Y
0.4888	326.25	42.94	33.44	3.057	1.676	0.8593
0.6212	981.38	390.32	84.55	7.637	1.932	0.9996
0.6812	1541.02	1182.31	354.46	87.23	1.18	0.9713
0.7211	2022.5	51743.35	592.17	185.28	1	0.9556
0.7388	3354.87	3245.29	1127.85	407.62	0.898	0.9274

膨胀的特征(表2)。同理,在对三组不同粒径砾石(d_{50} 分别为12.5 mm;7.5 mm;3.5 mm)的碰撞应力本构方程的两项系数(τ_b, η),与颗粒的中值粒径(d_{50})进行2次回归之后,可以获得粘性泥石流流体在剪切速率区流动剪切段的应力本构关系综合表达式:

$$\tau = 0.15d_{50}^{2.34} C_w^{(0.01d_{50}^{2.37})} + (0.53d_{50}^{-0.63}) C_w^b \left(\frac{du}{dy}\right)^2 \quad (10)$$

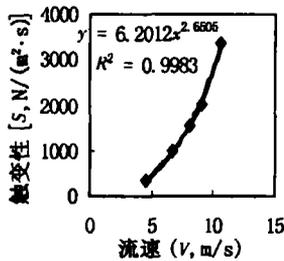


图4 泥石流体的流速(V)与触变性(S)的相关图

Fig. 4 Relationship thixotropy and velocities of debris flows

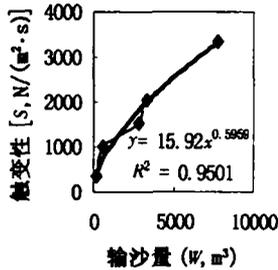


图5 泥石流的输沙量(W)与触变性(S)的相关图

Fig. 5 Relationship thixotropy and runoff sediment of debris flows

表2 各种不同浓度粘性泥石流流体在剪切速率区流动剪切段应力本构关系($d_{50} = 12.5\text{mm}$)

Table 2 Stress constitute relation in the flow section at shear rate for various debris flows

样本	泥石流颗粒体积浓度(C_w)	剪切应力(τ)随剪切速率(du/dy)变化的具有屈服应力碰撞应力本构方程 $\tau = \tau_b + \eta \left(\frac{du}{dy}\right)^2$	相关系数(R^2)
1	0.488 8	$\tau = 13.44 + 0.0637 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$	0.991 9
2	0.531 2	$\tau = 11.60 + 0.0912 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$	0.878 5
3	0.681 2	$\tau = 8.20 + 0.1447 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$	0.909 2
4	0.711 2	$\tau = 15.87 + 0.0846 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$	0.842 3
5	0.738 8	$\tau = 16.47 + 0.1027 \left(\frac{du}{dy}\right)^2$	0.886 3

根据实验,式(10)中的 b 值在 1.0 ~ 1.06。高浓度粘性泥石流在流动过程中,其颗粒在高粘性介质中的动量交换作用,一方面是因颗粒碰撞所产生的碰撞力;另一方面颗粒间的滑动摩擦亦在动量转换中扮演着重要的角色。因此,粘性泥石流流体在剪切速率区流动剪切段的应力本构关系可用具有屈服应力的碰撞应力本构方程来描述。这应力本构方程与通常泥浆的宾汉模型是不一致的,具有屈服应力的碰撞应力本构关系可解释粘性泥石流流体阵性流龙头紊动、石块在龙头集结的现象,以及探讨高浓度粘性泥石流流体(通常 $C_w > 0.5$, 最高的 C_w 可达 0.807 6)能在较小的坡度下($j = 0.05 \sim 0.06$) 高速度($V = 10 \sim 15 \text{ m/s}$)运动的机理奠定了理论基础。

参考文献 (References)

- [1] Baguold R A. Experiments on gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear[J]. *Proc. of the Royal Soc. of London*, 1954, 125: 49 ~ 53
- [2] Tailashi T. Mechanical characteristics of debris flow[J]. *J Hyd. Div, Proc. ASCE*. 1978, 104(8): 1153 ~ 1169
- [3] Savage S B and Hutter K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline [J]. *J Fluid Mech.*, 1989, 199: 177 ~ 215
- [4] Obrien J. S., Julien P. X. laboratory analysis of mudflow properties [J]. *J. of Hyd. Eng.*, 1988, 114(8): 877 ~ 887
- [5] Takahashi T. Mechanical characteristics of debris flow[J]. *J. Hyd. Div, Proc. ASCE*, 1978, 104(8): 1153 ~ 1169
- [6] Major J J, Pierson T C. Rheological analysis of fine-grained natural debris-flow material[A]. In: *Proc. of Intel. Sym. , Hy & IR ASCE. Reprinter from Hyd/Hydrology of arid [C].* 1990. 225 ~ 230
- [7] Phillips C J. Davies R S. Debris flow material rheology direct measurement[A]. In: *Proc. of Inter. Sym. on Erosion and Volcanic Debris Flow Fechnology [C].* Indonesia, 1989. 21 ~ 28
- [8] Wang Yuyi, Jan Chyandeng, Yan Biyu. Debris flow structure and rheology[M]. Changsha: Hunan Sciences Technology Press, 2001. 6 ~ 166 [王裕宜, 詹钱登, 严璧玉, 等. 泥石流流体结构和流变特性 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2001. 6 ~ 166]
- [9] Wang Yuyi. Study on abrupt occurrence and stress dilute[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1997, 6(1): 36 ~ 43 [王裕宜. 泥石流突发性流动和剪切稀化的研究[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(1): 36 ~ 43]
- [10] Wang Yuyi, Jan Chyandeng, Zou Renyuan, et al. A study on forming mechanism of viscous debris flow surges[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2002, 11(2): 46 ~ 50 [王裕宜, 詹钱登, 邹仁元, 等. 粘性泥石流流体阵性流形成机理研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2): 46 ~ 50]
- [11] Wang Yuyi, Jan Chyandeng, Chen Xiaoqing, et al. Self-organization criticality of debris flow rheology. *Chinese Sciences Bulletin [J].* 2003, 48(9): 976 ~ 980 [王裕宜, 詹钱登, 陈晓清, 等. 泥石流流体

- 的应力应变自组织临界特性[J]. 科学通报, 2003, 48(9): 976 ~ 980]
- [12] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 59(3): 381 ~ 384
- [13] Johuson P A, Richard H M, Tenadore V. Magnitude and frequency of debris flow[J]. *J. Hydro*, 1991, 123: 69
- [14] Yao Lingkan, Fang Duo. Self-organized criticality and its application of heterogeneous sediment[J]. *Hydraulic Transaction*, 1997, (3): 23 ~ 31 [姚令侃, 方铎. 非均匀沙自组织临界性及其应用研究[J]. 水利学报, 1997, (3): 23 ~ 31]
- [15] Jiang Zhongxin, Yao Lingkan, Ai Nanshan, et al. New Technique of Railway Debris Flow Nonlinear Study & Prevention[M]. Chengdu: Sichuan Science & Technique Publishing House, 1999. 177 ~ 178 [蒋忠信, 姚令侃, 艾南山, 等. 铁路泥石流非线性研究与防治新技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1999. 177 ~ 178]
- [16] Hong Yong. Stress flaccid model of fine slurry[J]. *Journal of Sediment Research*, 1991, 3: 89 ~ 91 [韩文亮. 细颗粒浆体应力松弛模型[J]. 泥沙研究, 1991(3): 89 ~ 91]
- [17] Wang Yuyi, Jan Chyandeng, Han Wenliang, et al. Experimental research on the stress constitute relation of viscous debris flow[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(3): 33 ~ 38 [王裕宜, 詹钱登, 韩文亮, 等. 粘性泥石流流体触变应力本构关系的试验研究[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(3): 33 ~ 38]
- [18] Wang Yuyi, Jan Chyandeng, Han Wenliang, et al. Experimental research on the thixotropy stress constitute of viscous debris flow[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(2): 64 ~ 70 [王裕宜, 詹钱登, 韩文亮, 等. 粘性泥石流流体应力本构关系的试验研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 64 ~ 70]

An Approach to Rheological Characters of Viscous Debris Flow and the Stress Constitute

WANG Yuyi^{1,2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;
2. Dongchuang Debris Flow Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: By using the latest rheometer specially designed and observation of surges in viscous debris flows, the rheological characters of viscous debris flow with gravel have such as over stress, thixotropy energy, stress dilution and yield stress were been researched. Analysis of stress & strain self-organization criticality of debris flow mass show that power relation between magnitude and frequency of debris flows. The stress constitute relation is described by power formula with stress dilution in the initial section ($du/dy < 10/s$) at low shear rate. The stress constitute relation in flow section ($10/s < du/dy < 20/s$) of shear rate is consisted by term of zero order at shear rate for smooth friction and quadratic term at shear rate for inertia collision stress, they have rheological characters of the yield stress and shear dispersion.

Key words: viscous debris flow; rheology; relation between magnitude and frequency; stress constitute relation