

文章编号:0559-9350(2016)07-0884-07

## 不同上限粒径泥石流浆体的流变参数变化规律

杨红娟<sup>1,2</sup>, 韦方强<sup>2</sup>, 胡凯衡<sup>2</sup>, 吕娟<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点试验室, 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)

**摘要:** 根据云南东川蒋家沟黏性泥石流原样颗分资料, 利用泥石流堆积物配置4个黏性泥石流原样对应的上限粒径分别为0.25、1、2、5和10 mm的浆体, 通过球系统开展流变试验, 利用Herschel-Bulkley模型拟合流变曲线, 研究较粗的颗粒加入细颗粒浆体后流变参数的变化规律。结果表明各样品均表现为剪切稀化流体, 粗颗粒加入细颗粒浆体后浆体屈服应力增加, 剪切稀化程度减弱; 同样颗粒级配下, 浆体的屈服应力随固体体积浓度指数增加。由于流动性指数的变化, 粗颗粒加入后浆体稠度指数的变化没有明显规律, 但是表观黏度增加, 增幅略小于屈服应力的增幅。粗颗粒浆体与细颗粒浆体的相对黏度和相对屈服应力之间存在显著的线性关系, 可根据该关系式对泥石流原样的表观黏度进行估算。

**关键词:** 泥石流; 浆体; 流变参数; Herschel-Bulkley模型; 蒋家沟; 球系统

**中图分类号:** P642.23

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20150931

## 1 研究背景

泥石流流变参数的确定是泥流动力学研究的重要内容, 它关系着泥石流流速、流量、冲击力等动力学参量的计算, 进而对泥石流防治工程设计和泥石流沟危险区划分具有重要意义。但由于泥石流中多含有粗颗粒, 导致其流变参数确定较为困难, 常见的方法有两种: (1)利用现场观测的运动资料反算; (2)通过流变试验获取。

利用现场观测运动资料反算方法包括: (1)根据泥石流残留层厚度估算泥石流屈服应力<sup>[1]</sup>; (2)根据表面流速、流量等数据反算泥流体的流变参数<sup>[2]</sup>; (3)根据泥深和表面流速分布计算流变参数<sup>[3]</sup>。但是大部分泥石流流域缺乏流速等观测资料, 无法通过反算获取泥石流的流变参数。

利用流变试验获取流变参数最大的问题是因泥石流中含有粗大颗粒而难以用常规流变仪进行试验。为此, 一些研究者自行研制大型流变仪开展流变试验<sup>[4-6]</sup>。这些测量结果显示黏粒含量对流体性质影响很大, 黏粒含量高的流体其流变曲线可以用Herschel-Bulkley模型描述, 黏粒含量低的流体表现为膨胀体。大型流变仪的测量结果加深了对泥石流宏观流变特性的认识, 但由于测量过程中的沉降、不均匀剪切等因素的影响, 测量结果的重复性较差。对泥石流流变参数的另一种研究思路是以细颗粒浆体为基础, 研究粗颗粒加入后流变参数的变化规律。在这一研究中, 流变界关于牛顿体或有屈服应力的流体中加入非黏性颗粒后流变参数随颗粒体积分数的变化建立的大量经验半经验计算式<sup>[7-10]</sup>具有借鉴意义。关于黏性颗粒悬浮液中加砂的研究<sup>[11-13]</sup>表明砂的体积浓度超过20%后悬浮液的流变参数会显著增加; Coussot等<sup>[14]</sup>取泥石流中小于0.4 mm的部分分别测量上限粒径为0.04、0.125、0.2和0.4 mm的部分的流变曲线, 利用Herschel-Bulkley模型描述, 发现屈服应力和稠度指数的比值

收稿日期: 2015-09-01

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05-01); 国家自然科学基金项目(41201011); 中科院山地所“青年百人团队”项目(SDSQB-2013-01)

作者简介: 杨红娟(1982-), 女, 河南襄城人, 博士, 副研究员, 主要从事泥石流运动力学研究。E-mail: yanghj@imde.ac.cn

保持稳定，并建议根据这一特性估算泥石流流体的流变参数；Sosio等<sup>[15]</sup>测量了黏土和粉砂悬浮液中加入不同浓度、不同粒径的砂(<0.425 mm)后流变曲线的变化，发现悬浮液从剪切稀化流体变为剪切稠化流体。但是，这些研究因流变仪测量范围的限制而所用颗粒较细(<2 mm)，对于浆体中加入更粗颗粒后流变曲线和流变参数的变化规律尚不明确。球系统是近些年发展起来的一种流变测量系统<sup>[16-17]</sup>，其最大测量粒径可达10 mm，为研究更大颗粒加入泥石流浆体后的流变规律提供了条件。本文借助球系统这一工具，以云南东川蒋家沟黏性泥石流为研究对象，分别取上限粒径为0.25、1、2、5和10 mm的部分配置样品，开展流变试验，研究粗颗粒加入泥石流浆体后流变参数的变化，并探讨通过浆体流变参数估算泥石流原样流变参数的可行性。

## 2 试验材料与试验方法

**2.1 试验材料** 蒋家沟位于云南省昆明市，是金沙江支流小江流域的一条典型泥石流沟，泥石流爆发频繁。流域内建有中国科学院东川泥石流观测研究站，对源区降雨及泥石流运动要素进行了50多年的观测。根据已有研究<sup>[18]</sup>，该流域的泥石流密度高于2 000 kg/m<sup>3</sup>时为黏性，多呈阵性运动，龙头强烈紊动，其后流面光滑平顺，为伪一相流。根据2004年14阵黏性泥石流的取样分析资料，得到泥石流原样的平均颗粒级配，分别取上限粒径为0.25、1、2、5和10 mm，则各部分颗粒级配曲线如图1所示。

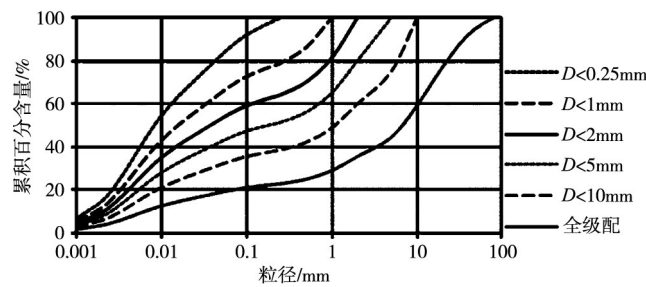


图1 试验材料的颗粒级配曲线

在沟道内采集泥石流堆积物，根据图1中所示各上限粒径的颗粒级配准备土样。首先利用上限粒径为10 mm的土样加水搅拌，以确定颗粒可以悬浮的密度范围，结果表明流体密度高于1 985 kg/m<sup>3</sup>时静止状态下颗粒不会发生明显沉降，与此相应的泥石流原样密度为2 200 kg/m<sup>3</sup>。据此，取4个泥石流原样密度(表1)，各上限粒径泥石流浆体的固体体积浓度 $C_{vf}$ 及密度 $\rho_f$ 可通过下式计算：

$$C_{vf} = \frac{\rho_f C_{vc}}{\rho_f C_{vc} + 1 - C_{vc}} \quad (1)$$

$$\rho_f = \rho_w + C_{vf} (\rho_s - \rho_w) \quad (2)$$

$$C_{vc} = \frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \quad (3)$$

式中： $C_{vc}$ 为泥石流原样的固体体积浓度； $\rho_f$ 为小于该上限粒径的颗粒在所有泥石流颗粒中的质量含量； $\rho_w$ 为水的密度，kg/m<sup>3</sup>； $\rho_c$ 为泥石流原样的密度，kg/m<sup>3</sup>； $\rho_s$ 为固体颗粒的密度，kg/m<sup>3</sup>。

计算结果列于表1。

表1 各样品的固体体积浓度和密度 (单位：kg/m<sup>3</sup>)

组次	泥石流原样密度	D<0.25mm		D<1mm		D<2mm		D<5mm		D<10mm	
		$C_{vf}$	$\rho_f$	$C_{vf}$	$\rho_f$	$C_{vf}$	$\rho_f$	$C_{vf}$	$\rho_f$	$C_{vf}$	$\rho_f$
I	2250	0.361	1631	0.417	1729	0.468	1819	0.524	1917	0.595	2042
II	2275	0.377	1659	0.435	1761	0.486	1850	0.542	1949	0.612	2071
III	2300	0.395	1691	0.453	1793	0.504	1882	0.560	1980	0.629	2101
IV	2327	0.415	1726	0.473	1828	0.525	1919	0.580	2015	0.648	2135

**2.2 试验方法** 根据表1中的数据取一定量的土样和纯净水配置样品,为了使样品充分饱和,样品配置结束后静置24 h,然后搅拌5 min开始流变试验。试验所用仪器为奥地利Anton Paar公司生产的MCR301高级旋转流变仪,该仪器可控制剪切速率测量剪切应力,也可控制剪切应力测量剪切速率。测量系统为球系统(图2),球体直径 $D_B=12\text{ mm}$ ,测量容器半径 $r_c=57.5\text{ mm}$ ,深 $H_c=48\text{ mm}$ ,球心距离容器边壁23 mm,距离容器底部22 mm,距离转轴34.5 mm。

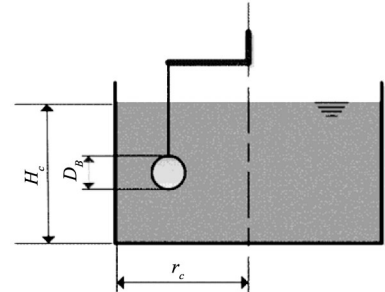


图2 测量系统

试验流程为:(1)取500 ml样品放入测量容器;(2)将转子下降到测量位置;(3)静止2 min,用以释放因转子进入而产生的应力;(4)在设定的剪切速率下,转子在样品中旋转一周,测量该剪切速率下的剪切应力;(5)搅拌样品,重复步骤(2)一(4),测量下一个剪切速率对应的剪切应力。试验中共设定12个剪切速率,每个剪切速率下采集40个数据,取其平均值进行分析。试验过程中控制样品温度为 $22\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 3 试验结果与分析

流变试验中对个别样品进行了重复测量,结果表明最大粒径不超过5 mm的样品测量重复性在15 %以内,最大粒径为10 mm的样品测量重复性在30 %以内,因此前者测量一次,后者测量两次,取两次平均值进行分析。

**3.1 剪切速率与剪切应力** 各样品的流变曲线如图3所示,剪切速率小于 $1\text{ s}^{-1}$ 时,剪切应力比较稳定,剪切速率超过 $1\text{ s}^{-1}$ 时,剪切应力随剪切速率增加而增加,表明样品具有屈服应力。对于同一组样品,上限粒径越大,剪切应力水平越高,表明浆体中加入粗颗粒后运动阻力增加。此外,泥石流原样密度越大,同一上限粒径的浆体剪切应力也越大。

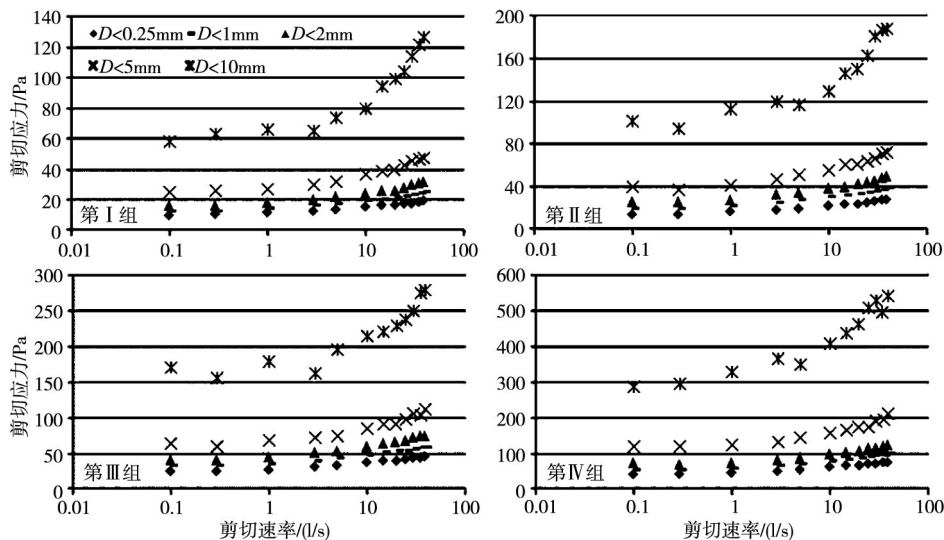


图3 剪切应力随剪切速率的变化

**3.2 流变参数** 泥浆体的流变曲线可以用宾汉模型或Herschel-Bulkley模型描述,宾汉模型可以视为Herschel-Bulkley模型的一种特殊形式,因此本文采用Herschel-Bulkley模型:

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n \quad (4)$$

式中 $\tau$ 为剪切应力, Pa;  $\dot{\gamma}$ 为剪切速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\tau_y$ 为屈服应力, Pa;  $K$ 为稠度指数,  $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-n}$ ;  $n$ 为流动性指数,  $n=1$ 时流体为宾汉体,  $n<1$ 时为剪切稀化流体,  $n>1$ 时为剪切稠化流体。

利用Herschel-Bulkley模型对图3中各组数据进行拟合,结果列于表2。每组样品中,浆体屈服应

力  $\tau_y$  均随上限粒径增加而增加；对于同一上限粒径的样品， $\tau_y$  随泥石流原样密度增加而增加。同一上限粒径的样品，固体颗粒级配相同，已有研究<sup>[15,19-20]</sup>表明  $\tau_y$  随固体颗粒体积浓度  $C_{vf}$  指数增加，本研究中也呈现出这一关系(图4)，即：

$$\tau_y = A \exp(BC_{vf}) \quad (5)$$

且拟合所得各上限粒径浆体的系数  $B$  接近，为 26.5 ~ 28.9。 $\tau_y$  随  $C_{vf}$  均呈指数增加表明准静止状态下，各样品的内部阻力来源没有发生本质变化，即由黏性颗粒与水组成的网络结构引起。粗颗粒的加入增加了固体颗粒的体积浓度，减小了颗粒间距，但是由于粗颗粒处于悬浮状态，颗粒之间不直接接触，摩擦不起主导作用<sup>[21]</sup>。但是，粗颗粒加入后浆体的网络结构强度增加，从而会表现出更高的屈服应力<sup>[9,20]</sup>。

表2 利用 Herschel-Bulkley 模型拟合的各样品的流变参数

组次	上限粒径/mm	$\tau_y$ /Pa	$K/Pas^{-n}$	$n$	组次	上限粒径/mm	$\tau_y$ /Pa	$K/Pas^{-n}$	$n$
I	0.25	7.81	3.27	0.33	III	0.25	19.39	7.58	0.32
	1	10.05	3.74	0.36		1	25.63	9.94	0.33
	2	14.27	3.60	0.42		2	35.33	10.06	0.38
	5	23.69	3.74	0.50		5	60.16	6.39	0.56
	10	59.63	3.83	0.78		10	163.13	7.49	0.74
II	0.25	11.36	4.12	0.37	IV	0.25	33.05	11.22	0.35
	1	15.49	6.23	0.35		1	45.05	12.62	0.39
	2	22.74	5.56	0.42		2	64.35	11.27	0.45
	5	33.97	8.16	0.41		5	115.68	9.03	0.62
	10	99.33	6.26	0.73		10	273.58	46.34	0.48

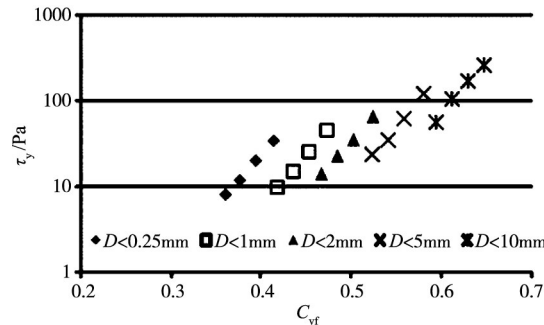


图4 屈服应力  $\tau_y$  随固体体积浓度  $C_{vf}$  的变化

表2显示，浆体上限粒径不超过1mm时，流动性指数  $n$  比较稳定，为0.3~0.4；超过1mm后， $n$  随上限粒径增加总体呈增加趋势，上限粒径为10mm时增加到0.7~0.8。第IV组上限粒径为10mm的浆体的  $n$  值为0.48，远小于其他3组的值，也小于该组上限粒径为5mm的浆体的  $n$  值，这可能由测量误差引起。泥石流原样密度相同时，由于  $n$  值不稳定，稠度指数  $K$  随上限粒径的增加没有明显的变化规律；同一上限粒径的浆体， $n$  值比较接近， $K$  随  $C_{vf}$  增加呈增加趋势。

本研究结果与 Coussot 等<sup>[14]</sup>有所不同，Coussot 等<sup>[14]</sup>分别测量了泥石流中上限粒径为0.04、0.125、0.2和0.4mm的浆体的流变曲线，各浆体的  $n$  值接近，为0.33。Coussot 等<sup>[14]</sup>拟合的  $n$  值没有增加，可能原因是其所测浆体的固体体积含量较小，为0.299~0.435。本研究中  $C_{vf}$  不超过0.435的浆体的  $n$  值也稳定在0.32~0.37，从这个角度看，两个研究结果一致。Ancy 等<sup>[21]</sup>研究了不同浓度的高岭土悬浮液中加入大量直径为0.8mm的砂后流变曲线的变化(砂的体积浓度为0.45~0.61)，表明当高岭土悬浮液浓度较高从而使砂处于悬浮状态时，砂加入后悬浮液仍然为剪切稀化流体，但  $n$  从0.35增加到0.62；Sosio 等<sup>[15]</sup>测量了黏土和粉砂悬浮液中加入不同浓度、不同粒径的砂(<0.425mm)后流变曲线的变化，表明  $n$  从0.75~0.92最高增加到1.35。 $n$  的增加反映了固体颗粒的影响，可能与颗粒碰撞有

关。碰撞应力与颗粒粒径、体积浓度及剪切速率均呈正相关关系，碰撞作用主导时剪切应力与剪切速率的2次方成正比<sup>[7]</sup>。

**3.3 相对黏度**  $n$ 值的变化使得 $K$ 值随上限粒径的变化缺乏规律性，因此尝试通过相对黏度研究粗颗粒加入后流变参数的变化。剪切应力与剪切速率的比值为流体的表观黏度，记为 $\mu_a$ ，即：

$$\mu_a = \tau/\dot{\gamma} \quad (6)$$

牛顿体的表观黏度等于实际黏度，不随剪切速率变化。本研究中各样品均有屈服应力，表观黏度均随剪切速率增加而减小。尽管如此，泥石流原样密度相同时，同一剪切速率对应的上限粒径超过0.25 mm的浆体的表观黏度与上限粒径为0.25 mm的浆体的表观黏度的比值(即相对黏度 $\mu_r$ )随剪切速率的波动较小，如图5所示。

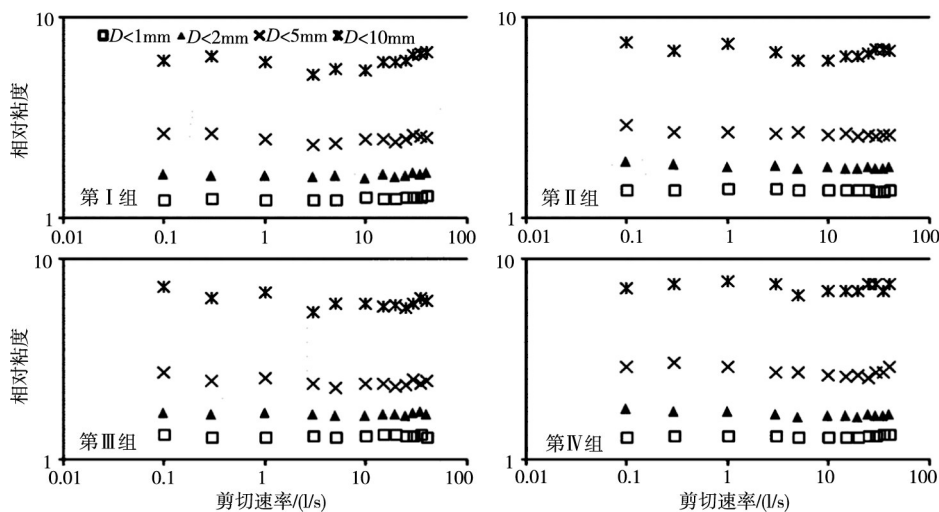


图5 各样品与本组上限粒径为0.25mm的浆体的相对黏度

对各样品计算不同剪切速率对应的相对黏度的平均值，同时根据表2计算相对屈服应力 $\tau_{yr}$ ，结果如表3所示。相对黏度小于相对屈服应力，二者之间的差异随上限粒径增加而增加，上限粒径为1 mm时二者之间的差异小于4%，上限粒径为10 mm时二者之间的差异为12%~27%。尽管如此，图6显示二者之间存在显著的线性关系：

$$\mu_r = 0.76\tau_{yr} + 0.26 \quad R^2 = 0.990 \quad (7)$$

根据Coussot等<sup>[14]</sup>所列数据，计算各上限粒径浆体与上限粒径为0.04 mm浆体的相对屈服应力和相对稠度指数，结果点绘于图6中，这些点也位于式(7)所示关系线附近，表明式(7)具有一定代表性。正如Coussot等<sup>[14]</sup>指出的，这种关系的存在为估算泥石流原样的表观黏度提供了一条途径，即通过测量泥石流的堆积厚度估算其屈服应力，测量其细颗粒浆体(如0.25 mm以下部分)的流变曲线并得到其屈服应力，然后根据泥石流原样与浆体的相对屈服应力估算泥石流原样的相对黏度。估算泥石流原样黏度的另一思路是利用黏度-固体体积浓度经验关系式计算，不同式子的计算结果差异可以高达数十倍<sup>[22]</sup>。与这种方法相比，式(7)考虑了泥石流原样的屈服应力，估算结果会更为可靠。

图5 各样品与本组上限粒径为0.25mm的浆体的相对黏度

上限粒径/mm	第I组		第II组		第III组		第IV组	
	$\mu_r$	$\tau_{yr}$	$\mu_r$	$\tau_{yr}$	$\mu_r$	$\tau_{yr}$	$\mu_r$	$\tau_{yr}$
0.25	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1	1.27	1.29	1.39	1.36	1.32	1.32	1.32	1.36
2	1.63	1.83	1.80	2.00	1.69	1.82	1.68	1.95
5	2.50	3.03	2.65	2.99	2.45	3.10	2.76	3.50
10	6.06	7.63	6.74	8.74	6.17	8.42	7.25	8.28

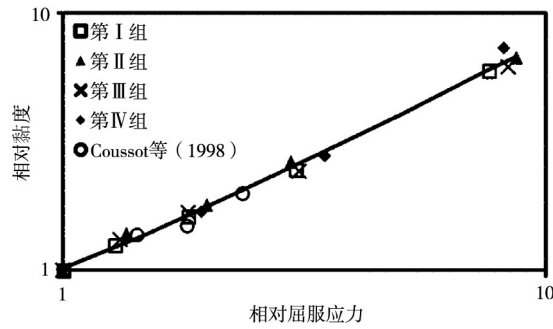


图6 各样品与本组上限粒径为0.25mm的浆体的相对黏度 $\mu_r$ 随相对屈服应力 $\tau_{r0}$ 的变化

#### 4 结论

根据云南东川蒋家沟黏性泥石流原样的颗粒级配,利用沟道泥石流堆积物配置4组上限粒径分别为0.25、1、2、5和10 mm的泥石流浆体,开展流变试验,初步得到如下结论:(1)浆体的流变曲线可以用Herschel-Bulkley模型描述,各样品均表现为剪切稀化流体,粗颗粒加入细颗粒浆体后,屈服应力增加,剪切稀化程度减弱;(2)同样颗粒级配下,浆体的屈服应力随固体体积浓度指数增加;(3)浆体的表观黏度随剪切速率增加而减小,但是泥石流原样密度相同时,上限粒径较大的浆体的表观黏度与上限粒径为0.25 mm的浆体的表观黏度的比值随剪切速率的波动较小;(4)浆体的相对黏度小于相对屈服应力,二者之间存在显著的线性关系,可以根据该关系式对泥石流原样的表观黏度进行估算。

本文所得相对黏度与相对屈服应力的经验关系只和文献中的数据进行了对比,还需要更多试验资料的验证。

#### 参 考 文 献:

- [ 1 ] 吴积善,张军,程尊兰,等.粘性泥石流的泥深与残留层关系及其确定[J].泥沙研究,2003,(6):7-12.
- [ 2 ] Parsons J D, Whipple K X, Simoni A. Experimental study of the grain-flow, fluid-mud transition in debris flows [J]. The Journal of Geology, 2001, 109(4): 427-447.
- [ 3 ] Genevois R, Galgaro A, Tecca P R. Image analysis for debris flow properties estimation[J]. Physics and Chemistry of the Earth: C, 2001, 26(9): 623-631.
- [ 4 ] Phillips C J, Davies T R H. Determining rheological parameters of debris flow material[J]. Geomorphology, 1991, 4(2): 101-110.
- [ 5 ] Coussot P and Piau J -M. A large-scale field coaxial cylinder rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions[J]. Journal of Rheology, 1995, 39(1): 105-124.
- [ 6 ] 王裕宜,詹钱登,李昌志,等.粘性泥石流应力应变特征的初步试验研究[J].山地学报,2002,20(1): 42-46.
- [ 7 ] Bagnold R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear [J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1954, 225(1160): 49-63.
- [ 8 ] Krieger I M, Dougherty T J. A Mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres[J]. Transactions of the Society of Rheology, 1959, 3(1): 137-148.
- [ 9 ] Mahaut F, Chateau X, Coussot P, et al. Yield stress and elastic modulus of suspensions of noncolloidal particles in yield stress fluids[J]. Journal of Rheology, 2008, 52(1): 287-313.
- [ 10 ] Boyer F, Guazzelli E, Pouliquen O. Unifying suspension and granular rheology[J]. Physical Review Letters, 2011, 107(18): 188-301.

- [ 11 ] O'Brien J S, Julien P Y . Laboratory analysis of mudflow properties[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(8): 877-887 .
- [ 12 ] Major J J, Pierson T C . Debris flow rheology: experimental analysis of fine-grained slurries[J] . Water Resources Research, 1992, 28(3): 841-857 .
- [ 13 ] Ancey C, Jorrot H . Yield stress for particle suspensions within a clay dispersion[J] . Journal of Rheology, 2001, 45(2): 297-319 .
- [ 14 ] Coussot P, Laigle D, Arattano M, et al . Direct determination of rheological characteristics of debris flow[J] . Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(8): 865-868 .
- [ 15 ] Sosio R, Crosta G B . Rheology of concentrated granular suspensions and possible implications for debris flow modeling[J] . Water Resources Research, 2009, 45(3): W03412 .
- [ 16 ] Müller M, Tyrach J, Brunn P O . Rheological characterization of machine-applied plasters[J] . ZKG International, 1999, 52(5): 252-258 .
- [ 17 ] Schatzmann M, Bezzola G R, Minor H-E, et al . Rheometry for large-particulated fluids: analysis of the ball measuring system and comparison to debris flow rheometry[J] . Rheologica Acta, 48(7): 715-733 .
- [ 18 ] Zhang S . A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flows in China[J] . Natural Hazards, 1993, 7(1): 1-23 .
- [ 19 ] 费祥俊 . 黄河中下游含沙水流粘度的计算模型[J] . 泥沙研究, 1991(2): 1-13 .
- [ 20 ] Coussot P, Piau J-M . The effects of an addition of force-free particles on the rheological properties of fine suspensions[J] . Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(2): 263-270 .
- [ 21 ] Ancey C . Role of lubricated contacts in concentrated polydisperse suspensions[J] . Journal of Rheology, 2001, 45(6): 1421-1439 .
- [ 22 ] 杨红娟, 胡凯衡, 韦方强 . 泥石流浆体流变参数的计算方法及其扩展性研究[J] . 水利学报, 2013, 44(10): 133-141 .

## Rheological parameters of debris flow slurries with different maximum grain sizes

YANG Hongjuan<sup>1, 2</sup>, WEI Fangqiang<sup>2</sup>, HU Kaiheng<sup>2</sup>, LÜ Juan<sup>2</sup>

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

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** According to the grain size distribution of viscous debris flows in Jiangjia Gully of Yunnan Province of China, four groups of debris flow slurries with different maximum grain sizes (0.25, 1, 2, 5 and 10mm) were prepared. Each group corresponds to a specific density of debris flow. Rheological tests were performed with ball measuring system, and rheological parameters were then determined using the Herschel-Bulkley model to study how these parameters vary as coarser grains were added to a finer-grained slurry. The results show that all slurry samples behave as shear-thinning fluids, whereas they become less shear-thinning and exhibit higher yield stress when coarser grains were added. For slurries with the same maximum grain size, yield stress increases exponentially with volumetric solid concentration. There is no distinct relationship between the consistency index and the maximum grain size because of the variation in fluidity index. However, the apparent viscosity increases when coarser grains were added, and the increasing amplitude is a little less than that of the yield stress. A good linear relationship exists between the relative viscosity and the relative yield stress of coarser-grained slurries to fine-grained slurries, which can be used to estimate the apparent viscosity of debris flow.

**Key words:** debris flow; slurry; rheological parameter; Herschel-Bulkley model; Jiangjia Gully; ball measuring system

(责任编辑: 祁 伟)