

文章编号:0559-9350(2013)11-1338-09

## 泥石流浆体流变参数的计算方法及其扩展性研究

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

(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)

**摘要:** 利用云南东川蒋家沟泥石流的浆体流变实验数据, 对现有流变参数计算公式进行优选, 并分析了优选出的浆体流变参数计算式扩展到全粒径泥石流体的可行性。结果表明, Mooney公式和Krieger-Dougherty公式计算泥石流浆体的刚度系数精度较高, 费祥俊公式和指数公式计算泥石流浆体的屈服应力精度较高; 将这些公式应用于泥石流流体时, 对于密度较高的泥石流流体不同公式的计算结果差异很大, 总体而言费祥俊公式计算的屈服应力较为合理, 对于黏性泥石流, 利用浆体刚度系数并通过Krieger-Dougherty公式考虑粗颗粒影响的方法得到的刚度系数比较合理。本文的研究结果可以为泥石流流体力学计算和防治工程设计提供参考。

**关键词:** 泥石流; 浆体; 宾汉模型; 流变参数; 蒋家沟

**中图分类号:** P642.23

**文献标识码:** A

## 1 研究背景

泥石流流变参数的确定是泥石流流体力学研究的重要内容, 它关系着泥石流流速、流量、冲击力等动力学参数的计算, 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。

泥石流中的颗粒小至黏粒大至巨石, 常规流变仪容许的最大测量粒径不超过2mm, 无法得到全粒径泥石流体的流变曲线。因此泥石流流变参数研究的主要方法是通过流变试验和理论推导研究细颗粒浆体流变参数的变化规律后, 将之应用于泥石流流体。如Bagnold<sup>[1]</sup>在牛顿流体中加入均匀球形颗粒配置中性悬浮液, 确定了悬浮液处于黏性区和惯性区的判别条件及应力应变关系; 费祥俊<sup>[2]</sup>通过对黄河中下游含沙水流流变数据的分析建立了黏滞系数和屈服应力的计算式; Segun等<sup>[3]</sup>、沈寿长等<sup>[4]</sup>分析了液体中掺入固体颗粒后的受剪变形情况, 得到黏滞系数的表达式; Ancey<sup>[5]</sup>研究了不同粗-细颗粒比例下高浓度悬浮液的流变特性; 一些学者<sup>[6-7]</sup>还研究了有屈服应力的流体中加入固体颗粒后屈服应力和弹性模量与颗粒浓度的关系。为了将泥石流中的粗颗粒包含到流变测量中, 一些研究者自行研制大型流变仪开展泥石流流变测试, 如Phillips等<sup>[8]</sup>利用大型椎板流变仪测试了最大粒径为35mm的泥石流流体; Coussot等<sup>[9]</sup>利用大型同心圆筒流变仪测试了最大粒径为20mm的泥石流流体; 王裕宜等<sup>[10]</sup>利用大型平板流变仪测试了最大粒径为15mm的泥石流流体, 这些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, 测量结果重复性较差。泥石流的流变参数也可通过现场观测的泥石流运动资料反算, Genevois等<sup>[11]</sup>在意大利Aquabona流域开展泥石流观测, 根据解析的表面流速分布和泥深资料研究了泥石流体的性质和流变参数随时间的变化。

本文以云南东川蒋家沟的泥石流观测资料为基础, 先分析泥石流浆体的流变特性, 对比研究现有流变参数计算方法的适用性, 最后讨论将这些方法扩展到泥石流原体的可行性。

收稿日期: 2012-12-23

资助项目: 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-2010-01)

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

## 2 泥石流浆体的流变曲线

本文的分析数据为中国科学院东川泥石流观测研究站2004—2007年的野外泥石流浆体流变数据和含沙水流的流变数据及颗分数据，其中泥石流浆体是指泥石流流体中去掉直径大于1.2mm的粗颗粒后剩下的物质。流变测量仪器为德国HAAKE公司生产的RS600，采用其同心圆筒系统，外筒直径43.4mm，内筒直径31.44mm，测量温度为25℃，剪切速率的变化范围为0.1~290s<sup>-1</sup>；颗分试验中对粒径>0.25mm的部分进行筛分，<0.25mm的部分利用Mastersizer2000测量，共有100组测量数据。

图1是几个不同密度样品的流变曲线，可以看出浆体密度较高时曲线分为两段：低剪切速率段和中高剪切速率段，其中低剪切速率段内样品尚未达到完全剪切并且存在触变性，应力应变关系的代表性较差；中高剪切速率段样品达到完全剪切，其应力应变关系代表了样品的流变特性。浆体密度较低时中高剪切速率段又进一步分为中剪切速率段和高剪切速率段，前者剪应力随剪切速率增加的速度较缓慢，后者增加迅速，表明浆体由层流向紊流过渡。

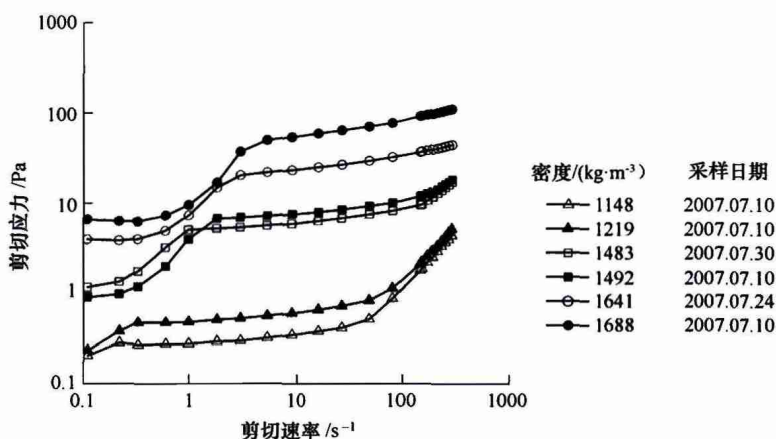


图1 几个泥石流浆体的流变曲线

取中高剪切速率段的数据( $\dot{\gamma} > 9\text{s}^{-1}$ )，采用适用范围较广的Herschel-Bulkley模型对各组数据进行拟合：

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^m \quad (1)$$

式中： $\tau_y$ 为屈服应力； $K$ 为流体稠度指标， $K$ 越高代表流体黏滞性越大； $m$ 为流体流动指标， $m=1$ 时流体为宾汉体， $m<1$ 时为伪塑性体， $m>1$ 时为膨胀体。

通过拟合得到各样品的流动指标 $m$ ，其与浆体密度 $\rho_f$ 的关系如图2所示， $\rho_f < 1500\text{kg/m}^3$ 时， $m$ 保持稳定，为1.5左右； $\rho_f > 1500\text{kg/m}^3$ 时， $m$ 随 $\rho_f$ 增加而减小，从1.5左右下降到0.4左右。图3显示了各样品对应的泥石流密度 $\rho_c$ 与 $m$ 的关系， $\rho_c < 1600\text{kg/m}^3$ 时， $m$ 为1.5左右； $\rho_c = 1600\sim 1850\text{kg/m}^3$ 时， $m$ 从1.5左右减小到0.4左右； $\rho_c > 1850\text{kg/m}^3$ 时， $m$ 为0.4左右。根据康志成等<sup>[12]</sup>对蒋家沟泥石流的分类， $\rho_c < 1400\text{kg/m}^3$ 为含沙水流， $\rho_c = 1400\sim 1700\text{kg/m}^3$ 为稀性泥石流， $\rho_c = 1700\sim 1950\text{kg/m}^3$ 为亚黏性泥石流， $\rho_c > 1950\text{kg/m}^3$ 为黏性泥石流。对比得知，含沙水流和稀性泥石流的浆体在流变测试中易进入紊动状态，表现为膨胀体，亚黏性泥石流和黏性泥石流的浆体在流变测试中一般为层流，表现为伪塑性体。

## 3 宾汉模型流变参数的计算

虽然Herschel-Bulkley模型是适用范围较广的模型，但在实际应用中多采用较为简单的宾汉模型。宾汉模型流动指标为1.0，只有屈服应力和刚度系数两个未知参数。本文取剪应力与剪切速率线性关系较强的区间的泥石流浆体数据( $\dot{\gamma} = 27\sim 150\text{s}^{-1}$ )利用宾汉模型进行拟合：

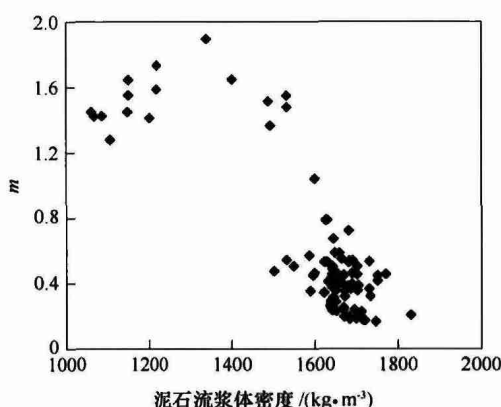


图2 泥石流浆体流动指标  $m$  随浆体密度的变化

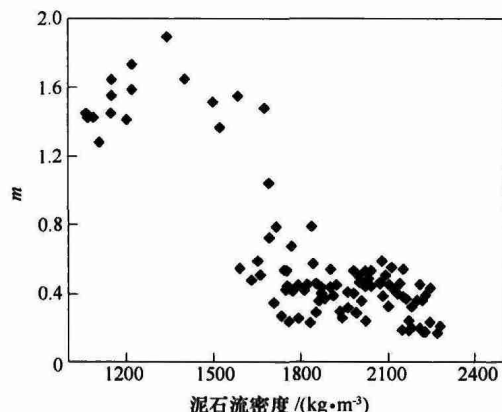


图3 泥石流浆体流动指标  $m$  随泥石流密度的变化

$$\tau = \tau_y + \eta\dot{\gamma} \quad (2)$$

式中： $\eta$ 为刚度系数。

**3.1 刚度系数的计算** 泥石流浆体刚度系数变化规律的关键是刚度系数与固体颗粒浓度(又称固体颗粒体积比)的关系。许多学者对牛顿体中加入固体颗粒后悬浮液的黏滞系数与颗粒浓度的关系进行了研究,并将悬浮液黏滞系数与牛顿体黏滞系数的比值称为相对黏滞系数,所得经验公式列于表1。公式中 $\mu_r$ 为相对黏滞系数; $\phi$ 为固体颗粒体积浓度; $\phi_m$ 为极限体积浓度; $[\eta]$ 为特征黏度,对于非黏性均匀球形颗粒 $[\eta]=2.5$ ;公式中其他参数( $a, n, k$ )均通过拟合得到。这些公式一般满足几个特殊情况:① $\phi=0, \mu_r=1.0$ ;② $\phi=\phi_m, \mu_r=+\infty$ ;③ $\phi \ll 1$ 且颗粒为非黏性均匀球形颗粒, $\mu_r$ 与爱因斯坦公式一致,即 $\mu_r=1+2.5\phi$ 。

刚度系数对应宾汉模型中的黏性项,因此与黏滞系数具有同样的变化规律。表1中的计算公式大多根据牛顿体中加入非黏性颗粒的实验结果建立,而泥石流浆体中含有黏性颗粒,为提高公式的适用性,将原始公式普遍乘上缩放系数 $c$ ,并且将式子中常数幂指数改为变量 $n$ ,修订后的公式列于表1。Liu公式可改写为 $\mu_r = a^{-n}(\phi_m - \phi)^{-n}$ , $a^{-n}$ 为缩放系数,因此该式不需要修订。

表1 相对黏滞系数的计算公式

来源	原始公式	修订公式	公式编号
费祥俊 <sup>[2]</sup>	$\mu_r = \left(1 - k \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2.5}$ $k = 1 + 2.0 \left(\frac{\phi}{\phi_m}\right)^{0.3} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^4$	$\mu_r = c \left(1 - k \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-n}$ $k = 1 + 2.0 \left(\frac{\phi}{\phi_m}\right)^{0.3} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^4$	(3)
Liu <sup>[13]</sup>	$\mu_r = \left[a(\phi_m - \phi)\right]^{-n}$	$\mu_r = \left[a(\phi - \phi_m)\right]^{-n}$	(4)
Dabak 等 <sup>[14]</sup>	$\mu_r = \left(1 + \frac{[\eta]\phi\phi_m}{n(\phi_m - \phi)}\right)^n$	$\mu_r = c \left(1 + \frac{[\eta]\phi\phi_m}{n(\phi_m - \phi)}\right)^n$	(5)
Krieger&Dougherty <sup>[15]</sup>	$\mu_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m}$	$\mu_r = c \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m}$	(6)
Mooney <sup>[16]</sup>	$\mu_r = \exp\left(\frac{[\eta]\phi}{1 - k\phi}\right)$	$\mu_r = c \cdot \exp\left(\frac{[\eta]\phi}{1 - k\phi}\right)$	(7)
Chong 等 <sup>[17]</sup>	$\mu_r = \left(1 + \frac{0.75\phi/\phi_m}{1 - \phi/\phi_m}\right)^2$	$\mu_r = c \left(1 + \frac{0.75\phi/\phi_m}{1 - \phi/\phi_m}\right)^n$	(8)

大多数公式都需要输入极限体积浓度 $\phi_m$ ,该参数代表 $\mu_r=+\infty$ 时的颗粒体积浓度。利用同一固体颗粒样品配置不同浓度的悬浮液开展流变试验,根据试验结果可以拟合得到 $\phi_m$ 。 $\phi_m$ 也可通过经验公式计算得到,费祥俊<sup>[2]</sup>利用河流泥沙样品的粒径级配数据及根据流变试验数据拟合得到的极限体积浓度

表2 相对黏滞系数计算公式的拟合结果

计算公式	拟合结果(利用 $\phi_{m1}$ )	拟合结果(利用 $\phi_{m2}$ )
费祥俊-式(3)	$n=1.946; c=4.968$ $R^2=0.811; RMSE=0.505$	$n=2.254; c=3.498$ $R^2=0.774; RMSE=0.552$
Liu-式(4)	$n=1.932; a=0.899$ $R^2=0.808; RMSE=0.509$	$n=2.253; a=1.223$ $R^2=0.560; RMSE=0.772$
Dabak-式(5)	$[\eta]=21.534; n=1.189; c=1.885$ $R^2=0.865; RMSE=0.427$	$[\eta]=13.514; n=1.406; c=2.250$ $R^2=0.857; RMSE=0.439$
Krieger-Dougherty-式(6)	$[\eta]=3.822; c=6.460$ $R^2=0.822; RMSE=0.491$	$[\eta]=4.245; c=5.262$ $R^2=0.851; RMSE=0.449$
Mooney-式(7)	$[\eta]=6.814; K=0.830; c=3.220$ $R^2=0.884; RMSE=0.396$	
Chong-式(8)	$n=2.019; c=7.086$ $R^2=0.808; RMSE=0.510$	$n=2.312; c=5.510$ $R^2=0.777; RMSE=0.549$

建立如下经验关系:

$$\phi_m = 0.92 - 0.2 \lg \sum \frac{\Delta p_i}{d_i} \quad (9)$$

式中:  $d_i$ 和 $\Delta p_i$ 分别为颗粒级配曲线中某一粒径组的平均粒径及相应这一级颗粒占全部颗粒的百分比。

此外, 康志成等<sup>[12]</sup>利用蒋家沟的泥石流样品开展沉降试验, 取24h内固体物质的沉降深度不再变化时的浓度为沉积稳定浓度, 并认为该浓度可代表极限浓度, 其与泥石流密度 $\rho_c$ 存在如下关系:

$$\phi_m = 0.000476\rho_c - 0.2739 \quad (10)$$

式(10)适用于蒋家沟泥石流, 同一密度对应的泥石流流体和泥石流浆体的颗粒级配不同, 因此该式不宜直接应用于泥石流浆体。为推算泥石流浆体的极限浓度, 以本文所用2004—2007年间100个泥石流样品的数据为基础, 建立式(10)计算的泥石流极限体积浓度 $\phi_m$ 与泥石流颗粒级配曲线的关系:

$$\phi_m = 0.9129 \exp\left(-0.003727 \sum \frac{\Delta p_i}{d_i}\right), R^2 = 0.939 \quad (11)$$

式(11)考虑了颗粒级配, 可以尝试应用于泥石流浆体。

25℃的清水黏滞系数为0.000839Pa·s, 与泥石流浆体的刚度系数联合可得到相对黏滞系数 $\mu_r$ 。分别利用式(9)、式(11)计算 $\phi_m$ (分别记为 $\phi_{m1}$ 和 $\phi_{m2}$ ), 将各样品对应 $\mu_r$ 、 $\phi_m$ 、 $\phi$ 代入表1中各修订式, 拟合得到的参数值、确定性系数 $R^2$ 以及 $\ln(\mu_r)$ 的均方根误差如表2所示。可以看出, 除Krieger-Dougherty公式外, 利用 $\phi_{m1}$ 的拟合误差均小于利用 $\phi_{m2}$ 的拟合误差, 表明 $\phi_{m1}$ 更能代表泥石流浆体的极限体积浓度。Dabak公式和Mooney公式中有3个待定参数, 其他公式均有两个待定参数, 前者的拟合误差普遍小于后者。三参数拟合公式中, Mooney公式的拟合结果最好,  $\ln(\mu_r)$ 的均方根误差为0.396,  $\mu_r$ 的平均相对误差为34.5%; 两参数拟合公式中, Krieger-Dougherty公式的拟合结果最好, 利用 $\phi_{m1}$ 和 $\phi_{m2}$ 拟合的 $\ln(\mu_r)$ 的均方根误差分别为0.491和0.449,  $\mu_r$ 的相对误差平均值分别为45.6%和39.8%。

**3.2 屈服应力的计算** 同刚度系数一样, 泥石流浆体的屈服应力与颗粒体积浓度也呈正相关关系。当前研究中指数函数被广泛采用<sup>[18-20]</sup>:

$$\tau_y = A \cdot \exp(B\phi) \quad (12)$$

式中:  $A$ 、 $B$ 为参数, 通过拟合得到。

费祥俊<sup>[2]</sup>分析黄河泥沙悬浮液的流变试验结果, 发现上述关系式中的参数随泥沙颗粒级配变化, 同时悬浮液达到一定浓度时才具有屈服应力, 进而提出如下经验公式:

$$\tau_y = A \cdot \exp\left(B \frac{\phi - \phi_0}{\phi_m}\right) \quad (13)$$

式中： $\phi_0 = 1.26\phi_m^{3.2}$ 为悬浮液由牛顿体转变为非牛顿体的临界浓度。

熊刚等<sup>[21]</sup>根据絮凝理论推导的屈服应力表达式为：

$$\tau_y = A\phi\lambda^2 \cdot \sum \frac{\Delta p_i}{d_i^3} \quad (14)$$

式中： $\lambda$ 为线性浓度，通过下式计算：

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\phi_m}{\phi} \right)^{1/3} - 1 \right]^{-1} \quad (15)$$

钱宁等<sup>[22]</sup>考虑黏性颗粒含量的影响，提出如下经验公式：

$$\tau_y = Ap_{0.01}^{n_1} \phi^{n_2} \quad (16)$$

式中： $n_1$ 、 $n_2$ 为经验系数，建议取值为 $n_1=2$ ， $n_2=4$ ， $p_{0.01}$ 为固体颗粒中粒径小于0.01mm的部分所占比例。

上述公式中只有费祥俊公式需要输入极限浓度 $\phi_m$ 。将各泥石流浆体对应的 $\phi$ 、 $\phi_m$ 、宾汉模型拟合的 $\tau_y$ 代入上述公式，参数拟合结果、 $R^2$ 以及 $\ln(\tau_y)$ 的均方根误差如表3所示。熊刚公式的拟合误差较大，其他公式的拟合误差与相对黏滞系数的拟合误差在同一水平。其中取 $\phi_{m1}$ 的费祥俊公式拟合误差最小， $\ln(\tau_y)$ 的均方根误差为0.388， $\tau_y$ 的平均相对误差为32.3%。在不需要 $\phi_m$ 作为输入的3个公式中，指数公式的拟合误差最小， $\ln(\tau_y)$ 的均方根误差为0.413， $\tau_y$ 的平均相对误差为35.2%。

表3 屈服应力计算式的拟合结果

计算公式	拟合结果(利用 $\phi_{m1}$ )	拟合结果(利用 $\phi_{m2}$ )
指数公式-式(12)	A=0.0612; B=15.887 $R^2=0.933$ ; RMSE=0.413	
费祥俊-式(13)	A=0.212; B=8.571 $R^2=0.941$ ; RMSE=0.388	A=0.0704; B=10.788 $R^2=0.737$ ; RMSE=0.822
熊刚等-式(14)	A=0.0208; $R^2=0.918$ RMSE=0.756	
钱宁等-式(16)	A=625.00; $n_1=0.223$ ; $n_2=3.056$ $R^2=0.904$ ; RMSE=0.496	

## 4 泥石流体的流变参数计算

**4.1 刚度系数的计算** 若将泥石流视为伪一相流，泥石流流体力学计算中则需要输入泥石流体的流变参数。将泥石流浆体的流变测试结果向泥石流流体扩展有2种途径：(1)将适用于泥石流浆体的流变参数计算公式直接应用于泥石流流体；(2)以泥石流浆体的流变参数为基础考虑粗颗粒的影响计算泥石流体的流变参数。

分别采用三参数公式 Mooney 公式和两参数公式 Krieger-Dougherty 公式结合表2中的参数计算泥石流体的刚度系数。式(9)通过泥沙样品的试验数据获取，在应用于含有较多粗颗粒的泥石流样品时计算的 $\phi_m$ 小于 $\phi$ ，使得 Krieger-Dougherty 公式无法运算，因此利用式(10)计算泥石流体的 $\phi_m$ ，即 $\phi_{m2}$ ，进而输入 Krieger-Dougherty 公式计算相对黏滞系数。两公式计算的刚度系数随泥石流样品密度的变化如图4所示。

同时利用浆体的刚度系数和粗颗粒的体积浓度计算泥石流体的刚度系数<sup>[23]</sup>。根据 Krieger-Dougherty 公式的另一表达形式

$$\mu_r = \left( 1 - \frac{\phi_c}{\phi_{cm}} \right)^{-n} \quad (17)$$

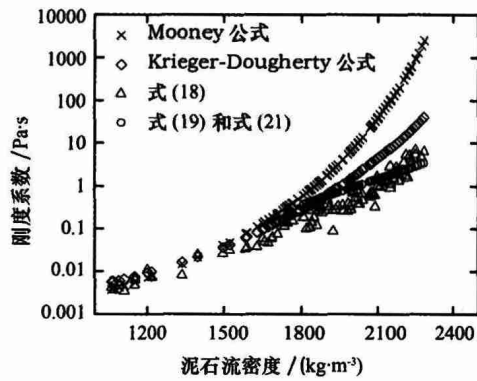


图4 不同方法计算的泥石流流体的刚度系数

可以得到泥石流流体的刚度系数为：

$$\eta = \eta_f \left( 1 - \frac{\phi_c}{\phi_{cm}} \right)^{-n} \quad (18)$$

式中： $\eta_f$ 为浆体的刚度系数； $\phi_c$ 为粗颗粒的体积浓度； $\phi_{cm}$ 为粗颗粒的极限体积浓度。

吴积善等<sup>[23]</sup>取 $n=2.5$ ，Krieger<sup>[24]</sup>的拟合结果为 $n=1.82$ 。本文第3节计算的 $\phi_{m1}$ 的平均值为0.468， $\phi_{m2}$ 的平均值为0.461，相应 $n$ 值( $n=[\eta]\phi_m$ )分别为1.79和1.96，与1.82更为接近，因此本文取 $n=1.82$ 。关于 $\phi_{cm}$ 的取值，吴积善等<sup>[23]</sup>建议取蒋家沟黏性泥石流的极限体积浓度(0.80~0.82)，由于泥石流同时包含浆体和粗颗粒，将泥石流体的极限体积浓度直接赋给粗颗粒误差较大。若取黏性泥石流浆体平均密度 $\rho_f=1677\text{kg/m}^3$ ，极限体积浓度为0.81的泥石流对应的粗颗粒体积浓度则为0.684，因此本文取 $\phi_{cm}=0.684$ ，代入式(18)，得到的刚度系数如图4所示。

图4显示，当泥石流密度小于 $1600\text{kg/m}^3$ 时，Mooney公式、Krieger-Dougherty公式和式(18)的计算结果接近，之后随泥石流密度增加，计算结果差异增大，泥石流密度为 $2200\text{kg/m}^3$ 时差异达数倍到数十倍，其中Mooney公式计算值最大，其次为Krieger-Dougherty公式，式(18)的计算结果最小。

**4.2 屈服应力的计算** 分别利用费祥俊公式和指数公式计算泥石流流体的屈服应力，尽管式(9)计算的 $\phi_m$ 小于 $\phi$ ，但是费祥俊的屈服应力公式(式(13))仍然可以运算，两式的计算结果如图5所示。与刚度系数的变化类似，当泥石流密度小于 $1600\text{kg/m}^3$ 时，两式的计算结果吻合很好，随着泥石流密度增加，计算结果的差异迅速增大，密度为 $2200\text{kg/m}^3$ 时二者相差9倍。

一些研究者<sup>[6,25]</sup>对有屈服应力的流体中加入粗颗粒后屈服应力的变化进行了研究，但是没有得出一致结论，因此本文不再通过泥石流浆体并考虑粗颗粒影响的方法计算泥石流流体的屈服应力。

吴积善等<sup>[26]</sup>利用泥石流通过沟道后的黏附层厚度计算了蒋家沟亚黏性泥石流和黏性泥石流的屈服应力，建立其与泥石流密度的关系：

$$\tau_y = 0.0181 \exp(0.004634\rho_c) \quad (19)$$

利用式(19)计算的屈服应力如图5所示。由于该式利用亚黏性泥石流和黏性泥石流的测量值得到，当泥石流密度较小时，其计算结果大于费祥俊公式和指数公式；当泥石流密度较大时，其计算结果与费祥俊公式接近。

对于呈层流运动的黏性泥石流，屈服应力使泥石流表面形成一个无剪切层，即流核，厚度 $h'$ 为：

$$h' = \frac{\tau_y}{\rho_c g J} \quad (20)$$

式中： $J$ 为沟床坡降； $g$ 为重力加速度。

分别利用费祥俊公式、指数公式和经验公式(19)确定的屈服应力计算流核厚度，其与测量的泥深构成的散点如图6所示。除极个别点外，费祥俊公式和式(19)对应的流核厚度均不大于泥深，表明屈服应力计算结果较合理，指数公式计算的流核厚度通常大于泥深，表明屈服应力计算值偏大。

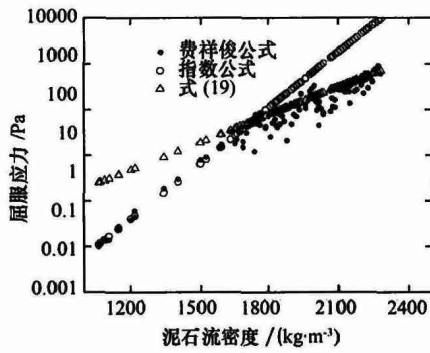


图5 不同方法计算的泥石流体的屈服应力

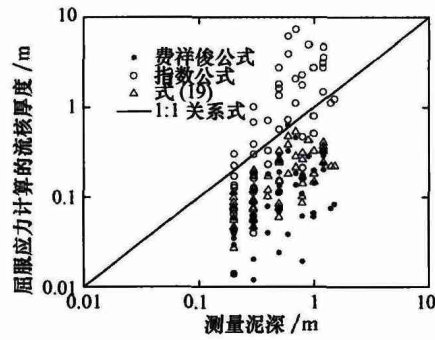


图6 黏性泥石流的泥深与根据屈服应力计算的流核厚度的对比

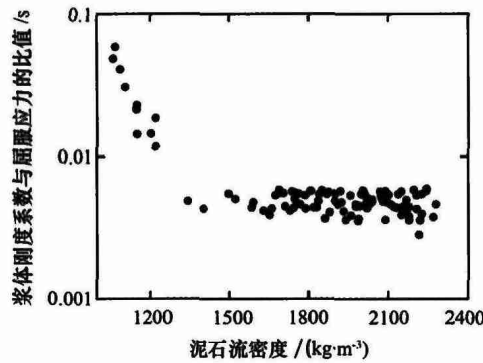


图7 泥石流浆体的刚度系数和屈服应力的比值

**4.3 刚度系数与屈服应力的关系** Coussot 等<sup>[27]</sup>研究发现, 取泥石流流体中不同上限粒径的部分构成浆体, 测试其流变曲线, 利用 Herschel-Bulkley 模型拟合的稠度指标  $K$  和屈服应力  $\tau_y$  的比值保持稳定。本研究所用的 100 个泥石流样品的浆体刚度系数与屈服应力之比与泥石流密度有关, 如图 7 所示。当泥石流密度小于  $1300\text{kg/m}^3$  时, 二者的比值随泥石流密度增加而减小, 之后保持稳定, 平均值为  $0.0048\text{s}$ , 即:

$$\eta = 0.0048\tau_y \quad (21)$$

假设式(21)对全粒径泥石流流体依然有效, 那么可以根据式(21)和蒋家沟亚黏性泥石流和黏性泥石流的屈服应力经验式(式(19))估算不同密度泥石流体的刚度系数, 作为评价其它刚度系数计算式的参考值, 结果如图 4 所示。由于式(19)根据  $\rho_c > 1800\text{kg/m}^3$  的泥石流流体建立, 因此图 4 中只显示了  $\rho_c > 1800\text{kg/m}^3$  的部分。可以看出, 对于黏性泥石流 ( $\rho_c > 1950\text{kg/m}^3$ ), 式(18)的计算结果与参考值最为接近。

## 5 结论

本文分析了云南东川蒋家沟泥石流浆体的流变特性, 对现有流变参数计算公式的适用性进行对比研究, 并尝试将这些公式扩展到全粒径的泥石流流体。通过研究得出如下结论: (1)利用 Herschel-Bulkley 模型拟合泥石流浆体的流变试验数据, 结果表明流体流动指标  $m$  与泥石流性质有关, 稀性泥石流的浆体表现为膨胀体, 亚黏性泥石流和黏性泥石流的浆体则表现为伪塑性体; (2)对泥石流浆体宾汉模型流变参数计算公式的对比分析表明, Mooney 公式和 Krieger-Dougherty 公式计算刚度系数的精度较高, 费祥俊公式和指数公式计算屈服应力的精度较高; (3)将泥石流浆体流变参数计算式扩展到全粒径泥石流流体, 泥石流密度越大不同公式的计算结果差异越大, 费祥俊公式计算的屈服应力比较合理, 对于黏性泥石流, 利用浆体刚度系数并考虑粗颗粒影响的方法得到的刚度系数比较合理;

(4)极限体积浓度是流变参数计算式中的重要参数,本研究在浆体流变参数拟合中对比了两个极限浓度计算式,结果表明多数情况下费祥俊的极限体积浓度估算式精度更高,但是该式在应用于含有粗颗粒的泥石流流体时计算结果偏小,因此极限浓度的计算方法仍需进一步研究。

致谢: 本文所用数据由中国科学院东川泥石流观测研究站提供。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Bagnold R A . Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear [J] . Proc . Roy . Soc . , 1954, 225: 49-63 .
- [ 2 ] 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 .
- [ 3 ] Sengun M Z, Probst R F . Bimodal model of slurry viscosity with application to coal-slurries . Part 2 . High shear limit behavior[J] . Rheol . Acta . , 1989, 28: 394-401 .
- [ 4 ] 沈寿长, 谭炳炎 . 泥石流防治理论与实践[C]//铁道部科学研究院西南研究所论文集 . 第2集, 成都: 西南交通大学出版社, 1991 .
- [ 5 ] Ancey C . Role of lubricated contacts in concentrated polydisperse suspensions[J] . Journal of Rheology, 2001, 45 (6): 1421-1439 .
- [ 6 ] 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 .
- [ 7 ] Vu T S, Ovarlez G, Chateau X . Macroscopic behavior of bidisperse suspensions of noncolloidal particles in yield stress fluids[J] . Journal of Rheology, 2010, 54(4): 815-833 .
- [ 8 ] Phillips C J, Davies T R H . Determining rheological parameters of debris flow material [J] . Geomorphology, 1991, 4: 101-110 .
- [ 9 ] Coussot P, 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 .
- [ 10 ] 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 .
- [ 11 ] Genevois R, Galgano A, Tecca P R . Image analysis for debris flow properties estimation[J] . Phys . Chem . Earth (C), 2001, 26(9): 623-631 .
- [ 12 ] 康志成, 李焯芬, 马嵩乃, 等 . 中国泥石流研究[M] . 北京: 科学出版社, 2004 .
- [ 13 ] Liu D M . Particle packing and rheological property of highly-concentrated ceramic suspensions:  $\phi_m$  determination and viscosity prediction[J] . Journal of Materials Science, 2000, 35: 5503-5507 .
- [ 14 ] Dabak T, Yucel O . Shear Viscosity behaviour of highly concentrated suspensions at low and high shear rates [J] . Rheologica Acta, 1986, 25: 527-533 .
- [ 15 ] Krieger I M, Dougherty T J . A Mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres [J] . Trans . Soc . Rheol . , 1959, 3: 137-148 .
- [ 16 ] Mooney M . The viscosity of concentrated suspension of spherical particles [J] . Journal of Colloid Science, 1951, 6: 162-170 .
- [ 17 ] Chong J S, Christiansen E B, Baer A D . Rheology of concentrated Suspensions [J] . Journal of Applied Polymer Science, 1971, 15: 2007-2021 .
- [ 18 ] Coussot P, Piau J-M . On the behavior of fine mud suspensions [J] . Rheol . Acta . , 1994, 33: 175-184 .
- [ 19 ] 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 .
- [ 20 ] 余斌 . 不同容重的泥石流淤积厚度计算方法研究 [J] . 防灾减灾工程学报, 2010, 30(2): 207-211 .
- [ 21 ] 熊刚, 费祥俊 . 泥石流浆体屈服应力的计算方法 [J] . 泥沙研究, 1996(1): 56-66 .
- [ 22 ] 钱宁, 王兆印 . 泥石流运动机理的初步探讨 [J] . 地理学报, 1984, 39(1): 33-43 .
- [ 23 ] 吴积善, 田连权, 康志成, 等 . 泥石流及其综合治理 [M] . 北京: 科学出版社, 1993 .
- [ 24 ] Krieger I M . Rheology of monodisperse lattices [J] . Advances in Colloid and Interface Science, 1972, 3(2): 111-136 .
- [ 25 ] Ancey C, Jorrot H . Yield stress for particle suspensions within a clay dispersion [J] . Journal of Rheology, 2001,



45(2): 297-319.

- [ 26 ] 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.
- [ 27 ] Coussot P, Laigle D, Arattano M, et al. Direct determination of rheological characteristics of debris flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124: 865-868.

### Methods for computing rheological parameters of debris-flow slurry and their extensibilities

YANG Hong-juan<sup>1, 2</sup>, HU Kai-heng<sup>2</sup>, WEI Fang-qiang<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:** Rheological experimental data of debris-flow slurries composed of water and fine particles, and sampled from Jiangjia Gully of Yunnan Province, China, are analyzed in this paper. Then the data are employed to test empirical formulas for rheological parameter estimation. Finally, the selected formulas that perform well for the slurries are attempted to be applied to the whole debris-flow material, which consists of both slurry and coarser particles. The results show that Mooney's formula and Krieger-Dougherty formula are the best for computing Bingham viscosity of debris-flow slurry, while Fei's formula and the exponential formula are the best for yield stress. When these formulas are used to compute rheological parameters of the whole debris-flow material, the values of highly concentrated debris flow differ greatly. On the whole, yield stress values given by Fei's formula are reasonable, while Bingham viscosity of viscous debris flows can be estimated with Bingham viscosity of the slurry united with the Krieger-Dougherty formula to take into account the effect of coarse particles. Results of this paper can provide reference for dynamics computation and mitigation engineering design of debris flow.

**Key words:** debris flow; slurry; Bingham model; rheological parameter; Jiangjia Gully

(责任编辑: 李琳)

---

(上接第 1337 页)

### Analysis on the deposition processes and characteristics of non-homogeneous debris flow

SHU An-ping<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, TANG Chuan<sup>2</sup>, PAN Hua-li<sup>3</sup>

(1. Key Lab. of Water and Sediment Sciences of MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Key State Lab. of Geological hazards and Environmental protection, Chengdu University of Technology,

Chengdu 610000, China; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Basic conditions of debris flow formation generally include steep slope, loose solid particle and heavy rain, which are influenced on the deposition of non-homogeneous debris flow. A series of deposition simulation experiments for non-homogeneous debris flow were carried out in lab. By means of the changing of hydraulic gradient and specific weight gravity, the influences of gradients on the deposition of non-homogeneous debris flow were studied. Furthermore, the meaning relations between the deposition and gradients were established. The results above are significant for predicting deposition scales and disasters control project for debris flow.

**Key words:** non-homogeneous debris flow; hydraulic gradient; specific weight gravity; deposition

(责任编辑: 李福田)