

# 水沙流体流变特性的测试与资料综合分析

铁道部科学院西南研究所 谢慎良

## 一、前 言

泥石流和高含沙水流为粘性矿物成份含量较高的水、沙两种流体。其流体性质与流动特性已完全不同于清水、也不同于一般挟沙的水流。它们特有的粘滞性和极限剪切应力作用,使水沙流体有时会出现“阵流”“浆河”“揭底冲刷”以及悬浮巨石运动产生巨大破坏力。

为了掌握泥石流与高含沙水流的运动力学机理,以便科学地利用水沙资源,兴利除害,及进行泥石流防治工程设计和开展科学研究。对水沙流体的流变特性进行试验及特性参数的分析计算是很重要的一环。

我国于四十年代首先开始了含沙浑水的粘度试验研究。随着生产建设发展的需要,及科学技术进步的要求,水沙流体流变学方面的研究在泥石流,高含沙水流,石油钻井及管道水力输送等众多的领域内逐渐发展起来。

本文就水沙流体流变特性测试常用仪器,测量方法,资料计算等方面进行了综述。并通过实验资料分析提出利用综合因素推求特性参数的方法。

## 二、水沙流体流变特性的测试

国内在泥石流与高含沙水流试验研究中,测定水沙流体流变特性应用较多的仪器,主要有同轴圆筒旋转式粘度计和压力管式粘度计两种类型。这两种型式粘度计,从仪器结构设计上,确定了可以较方便的推算试样受剪切时相对应的剪切应力与剪切速率。

### (一) 同轴圆筒旋转式粘度计(简称转式计)

1. 转式计测量基本原理。测量系统的转筒(内筒或外筒)以一定角速度旋转,环形缝隙内的液体受剪切分层流动。而液体的粘滞性作用于转筒表面,对转筒施加一个阻止转动的力矩。液体粘性大小同这一转动力矩成正比。

通过测定转筒的扭力矩与旋转角速度来推算液体的剪切应力与剪切速率。然后由若干个不同量值下的相对应的剪切应力和剪切速率确定流变特性。

### 2. 试验资料计算方法

转式计的计算面取在内筒外壁或外筒内壁处,多数以内筒作转筒。

(1) 剪切应力 ( $\tau_b$ ) 计算。由施加于内筒壁上的扭矩求得。即

$$\tau_b = \frac{M}{2\pi R_b^2 b h} \quad (1)$$

式中:  $M$  为扭矩;  $R_b$ 、 $h$  分别为内筒半径和内筒有效高度。式(1)可适用于牛顿流体与非牛顿流体。

(2) 剪切速率  $\left(\frac{dv}{d\gamma}\right)_b$  计算。

转式计的环形缝隙中不同半径处的流层上受到的作用力是不同, 从内向外逐渐减小的。由此受剪不均匀性使剪切速率计算复杂化。只有当缝隙相当小, 即  $R_c - R_b/R_c \rightarrow 0$  时, 才可能近似地用平均剪切速率。即

$$\left(\frac{dv}{d\gamma}\right)_{\text{mean}} = 2\Omega R_c R_b / (R_c^2 - R_b^2) \quad (4)$$

对水沙流体而言, 测量系统缝隙不可能达到相当小。而且剪切速率在缝隙中的变化随液体流变特性而异。

为了方便与统一, 可采用一个可适用于任何流型的剪切速率计算公式。即

$$\left(\frac{dv}{d\gamma}\right)_b = \frac{\Omega}{\ln \varepsilon} \left[ 1 - \frac{\ln \varepsilon}{\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{d \ln \tau_b} + \frac{(\ln \varepsilon)^2}{3\Omega} \cdot \frac{d^2 \Omega}{d (\ln \tau_b)^2} \dots \dots \right] \quad (3)$$

式中  $\varepsilon = R_c/R_b$ ;  $R_b$ 、 $R_c$ ——分别为内外筒半径;  $\Omega$ ——为转动角速度。

式中右边第二、三项中的导数值。可用图解法或数解法求得, 当右边方括弧中第二项值小于 0.2 时, 计算可只取到第二项, 其误差只有 1%。否则应取到第三项。

(二) 压力管式粘度计 (简称管式计)。

1. 管式计测量基本原理。在一定压力下, 在已知尺寸的测管中, 通过已知流速条件下, 测量流体层流态下的粘滞阻力。

通过测定测管两端的压力差和过流量来推算剪切应力和剪切速率。然后由若干个不同量值下的相对应的剪切应力与剪切速率确定流变特性。

2. 试验资料计算方法

管式计计算面取在测管壁处。

(1) 剪切应力 ( $\tau_w$ ) 计算。根据摩阻损失压力和管壁面积计算。即

$$\tau_w = \frac{\Delta P D}{4 L} \quad (4)$$

式中:  $\Delta P$  为测管两端压力差;  $D$  与  $L$  分别为测管的直径与长度。式(4)同样适用于牛顿流体和非牛顿流体。

(2) 剪切速率  $\left(\frac{dv}{dr}\right)_w$  计算。

剪切速率与流体的特性密切相关。对水沙流体多数认为近似宾汉体, 其关系为:

$$-\frac{dv}{dr} = (\tau - \tau_b) / \eta$$

上式经过推导简化得到如下关系:

$$\tau_w = \frac{4}{3}\tau_B + \eta\left(\frac{8V}{D}\right) = \tau_{w0} + \eta\left(\frac{8V}{D}\right) \quad (5)$$

式中:  $V$ 为测管内平均流速;  $\tau_B$ 、 $\eta$ 为宾汉切应力与塑性粘度。

应用试验资料( $\tau_w$ 和 $\frac{8V}{D}$ )点绘式(5)关系是一条直线, 据此求得 $\tau_B$ 与 $\eta$ 值。但是式(5)并不代表流体的真实的流变方程, 故称为虚流变曲线方程。由它推求特性参数比较简单。

对流体特性不符合宾汉体时, 可应用已有的表达式。即

$$\left(-\frac{dv}{dr}\right)_w = \frac{3}{4}\left(\frac{8V}{D}\right) + \frac{1}{4}\left(\frac{8V}{D}\right)\left[\frac{d_n \lg\left(\frac{8V}{D}\right)}{d \lg \tau_w}\right] \quad (6)$$

式中右边第二项的导数可以数解, 或由 $\tau_w - \frac{8V}{D}$ 关系线的斜率用图解法求得。

### 三、流变特性试验资料综合分析

从已有的试验研究表明, 当水沙流体中细颗粒泥沙含量达到一定数量后, 流体特性为非牛顿流体, 且多数近似宾汉体, 其流变特性方程为

$$\tau = \tau_B + \eta \frac{dv}{dr} \quad (7)$$

用试验资料计算分析, 以便确定式(7)中的特性参数值。

参数 $\eta$ 、 $\tau_B$ 受含沙量, 泥沙颗粒组成, 矿物成份以及温度等因素影响。

从我们的试验结果反映出, 以粘粒为主的比粉粒以上土粒组成的水沙流体粘度要大一个数量级以上。宾汉切应力要大2~3个数量级左右。别的学者也得到同样结果。

现有的参数计算公式, 大都根据自己试验资料分析得出。它们中一部份公式只考虑了含沙体积浓度作为综合因素指标, 所建立的关系式应用性差。有部分公式考虑了含沙颗粒组成特性, 增加了能反映含沙颗粒成份的非均匀性及组成特性影响的固体极限体积浓度指标, 按此建立的关系式, 适应性就较好。

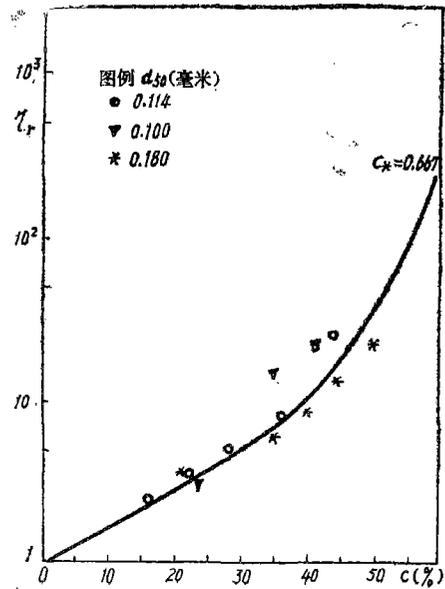
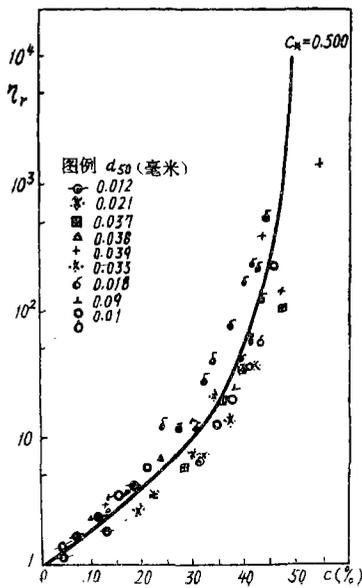
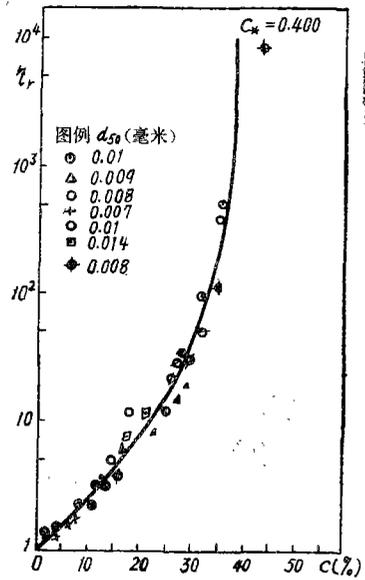
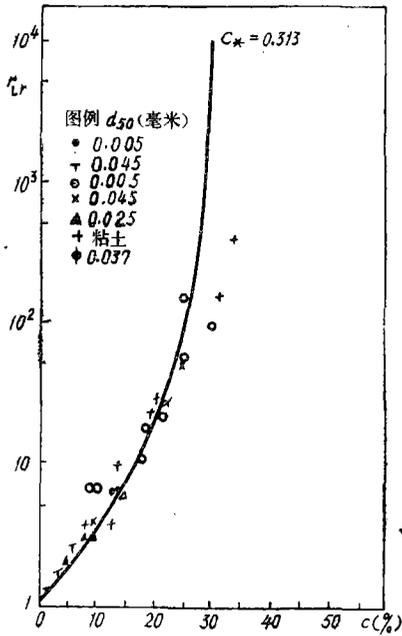
这次资料搜集范围, 包括华北地区、黄河中下游、西北黄土地区土样试验资料, 及部分西南泥石流地区资料, 另有少数蒙脱土、高岭土资料等。粘度资料约30组次160多个数据, 宾汉切应力资料约20组130多个数据。

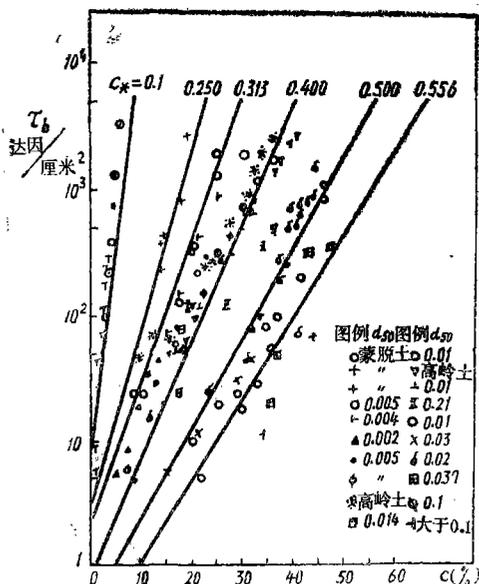
资料来源, 一部分是我们试验成果, 一部分是一些学者所发表的成果。

首先进行不同含沙体积浓度的粘度与宾汉切应力试验资料统计, 用半对数坐标点绘相对粘滞系数 $\eta_r$ 和宾汉切应力 $\tau_B$ 与体积浓度 $C$ 的关系。从点据分布显示出参数不仅是随体积

浓度变化，同时与颗粒组成和矿物成份等因素关系密切。

为此取用级配特征之一的中值粒径 ( $d_{50}$ ) 和细颗粒 ( $d < 0.01$ 毫米) 所占重量百分比作为分析因素，对各试样进行统计。得出参数  $\eta_r$  与  $\tau_B$  的变化规律，见图 1—5。





对各试样的含砂极限体积浓度与颗粒组成特征进行统计，得到表1结果。

含砂极限体积浓度与颗粒组成关系

表1

级组	中值粒径d50 (毫米)	细颗粒 (d < 0.01毫米) 重量比 (%)	含砂极限体积浓度C。(小数计)
1	小于0.005	大于70	0.333以下
2	0.005—0.01	70—50	0.350—0.500
3	0.01—0.1	50—10	0.460—0.560
4	小于0.1	小于10	0.560以上

应用表中C\*值进行参数分析，得出：

$$\eta_r = (1 - KC)^{-2.5} \tag{8}$$

$$\tau_B = E \times P^{A+B}$$

式(8)中K值为：

$$\text{当 } 8.00 \leq C \leq 27\% \quad K = \frac{1}{C^*} + 0.001C^{-2} \tag{9}$$

$$8.00 > C > 27\% \quad K = \frac{1}{C^*}$$

$$\text{式(9)中 } A = 8.45 \left( \frac{C}{C^*} - 1.26C^{*2.2} \right) \quad B = 1.5$$

根据表1，应用式(8)、(9)进行试算，取用与实测值符合较好的计算值，点绘于图1—5上，得到 $\eta_r \sim C \sim C^*$ 和 $\tau_B \sim C \sim C^*$ 一组关系曲线。结果是较满意的。

通过以上综合分析,提出主要参数的相应关系,见表2、表3。

这样只要具有含沙颗粒级配特征资料,应用表2、表3成果,代入式(8)、(9),便可求得不同体积浓度水沙流体的参数值。

推算相对粘性系数( $\eta_r$ )值的各要素值

表2

分 级	1	2	3	4
中值粒径(d <sub>50</sub> )(毫米)	≤0.005	0.005—0.01	0.01—0.1	>0.1
细颗粒(d<0.01毫米)占重量比(%)	≤70	70—50	50—10	>10
含砂极限体积浓度(C.) (小数计)	0.313	0.400	0.500	0.667

推算宾汉剪切应力( $\tau_B$ )值的各要素值

表3

分 级	蒙脱土	1	2	3	4
中值粒径(d <sub>50</sub> )(毫米)		≤0.005	0.005—0.01	0.01—0.1	>0.1
细颗粒(d<0.01毫米)占重量比(%)		≥70	70—50	50—10	<10
含砂极限体积浓度(C.) (小数计)	0.250以下	0.313	0.313—0.400	0.400—0.500	0.556以上

(参考文献略)