

## 成昆铁路北段粘性泥石流浆体 流变参数的时间效应

赵惠林

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所)

**提 要** 对成昆铁路北段一些粘性泥石流浆体所作的剪切试验结果表明,流变参数〔含:表观粘度  $\eta_a$  和屈服应力(极限静切力)  $\tau_0$ 〕随时间推移而变化。粘性泥石流浆体的流变参数具有时间依赖效应,随剪切时间推移而递增。粘性泥石流浆体呈现出反触变性的流变行为,随时间推移而变稠,就此越发变得不易流动。

**关键词** 粘性泥石流 浆体 流变参数 时间依赖效应

粘性泥石流浆体是一种浓稠的固-液混合体。它不仅浓度高,容重大,颗粒粒度分布宽,而且流变特性复杂。

成昆铁路北段若干粘性泥石流浆体样品的流变试验结果表明,流变参数都呈现有一定的时间依赖效应,即呈现有粘度—时间关系;表观粘度  $\eta_a$  和屈服应力  $\tau_0$  随剪切时间推移而变化<sup>〔1〕</sup>。对此进一步论述如下。此前先介绍一下流变测试用的仪器。

### 一、测 试 仪 器

剪切试验用的仪器是联邦德国制造的 RV 12 型旋转圆筒粘度计(后文简称 RV 12 型粘度计,图1)。

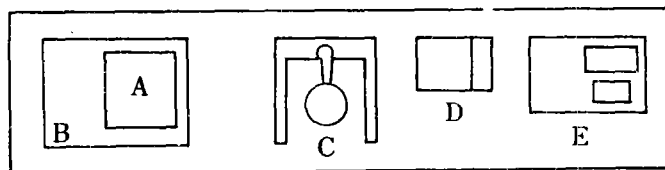


图1 RV 12 型粘度计的组成部分

Fig. 1 The constituent of viscometer RV 12

A. PG 142 型程序机; B. RV 12 型粘度计主机; C. 传感系统; D. 记录仪; E. 循环器

该粘度计有两套剪切速率系统,一套是有级调速的,另一套是无级调速的。粘度计的转速可作由低到高预置的周期性连续变化,以便测得不同材料的流变特性。

仪器的几个参数有如下关系。

剪切速率(秒<sup>-1</sup>)

$$D = M \cdot n, \quad (1)$$

式中  $M$  为仪器常数;  $n$  为转速(转/分)。

剪切应力(帕)

$$\tau = A \cdot S, \quad (2)$$

式中  $A$  为仪器常数;  $S$  为剪切应力测量值(无量纲)。

RV 12型粘度计的扭矩  $E$  有两种变化:若  $E=0.3$  者,  $S$  是实际测量值的 3 倍;若  $E=1.0$  者,  $S$  即为测量值。

## 二、表观粘度 $\eta_a$

表观粘度(帕·秒)

$$\eta_a = \tau/D = A \cdot S/M \cdot n. \quad (3)$$

$\eta_a$  值表征  $\tau$  与  $D$  间的关系。在一定条件下,它的变化反映出流体内部流动阻力的变化。

为此,对四川省凉山州蒋家沟粘性泥石流浆体作过周期性剪切试验(图 2)。样品的体积浓度  $C_v=0.4$ , 浆体颗粒粒径  $d<1.0$  毫米,  $E=0.3$ , 等待时间  $t_1=0$  分, 剪切时间  $t_2=3$  分, 达到最高转速 512 转/分时的持续剪切时间  $t_3=0$  分。

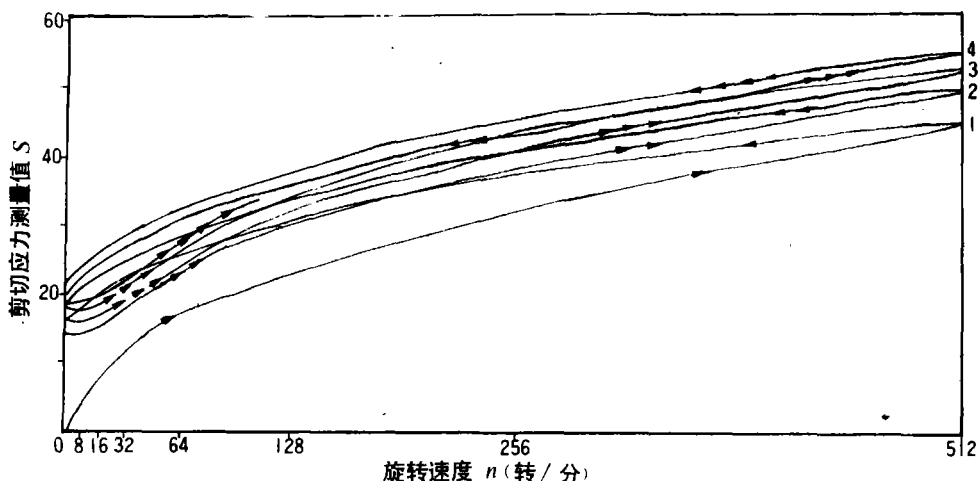


图 2 周期性剪切曲线(剪切环)

Fig. 2 Cyclic shear curve

曲线上的箭头示剪切曲线旋转方向;右侧纵坐标轴上的数字 1—4 示剪切环的编号

由图 2 可见,  $\eta_a$  随  $D$  递增而递减,但若  $D$  值不变,  $\eta_a$  又随剪切时间推移而递增。如就 1 号剪切环的下行曲线而言,  $n=1.8$  转/分者,  $\eta_a=12167$  毫帕·秒;  $n=256$  转/分者,  $\eta_a=203$  毫帕·秒;  $n=512$  转/分者,  $\eta_a=123$  毫帕·秒。这就是说,  $D$  值越大,  $\eta_a$  值越小。

但在  $D$  值由小变大再变小的周而复始过程中,随着剪切时间的推移,剪切曲线按逆时针方向呈螺旋形上升,离横坐标轴而去,结果是,浆体的  $\tau$  或  $\eta_a$  随剪切时间推移而递增。如  $n=256$  转/分者,在 4 个剪切环的下行曲线上,  $\tau$  值由 47.0 帕递增到 57.0 帕,增加

10.0 帕; $\eta_s$  值由 203 毫帕·秒递增到 247 毫帕·秒,增加 44 毫帕·秒。 $n = 512$  转/分者, $\tau$  值由 56.7 帕递增到 69.3 帕, $\eta_s$  值由 123 毫帕·秒递增到 150 毫帕·秒,经 18 分钟剪切后, $\tau$  值增加 12.6 帕, $\eta_s$  值增加 27 毫帕·秒。由上可见,粘性泥石流浆体随时间推移而变稠,就此越发变得不易流动。

不过用  $\eta_s$  描述材料的流变行为会受到许多因素制约,即  $\eta_s$  值与选用的测试参数及仪器有关<sup>(2)</sup>。这些制约因素是,浆体的浓度、颗粒的粒度大小、剪切时间长短、测试方法及测试系统的异同等。

看来, $\eta_s$  值不是一个完全由材料的物性所决定的量。但  $\eta_s$  可以用于任何一种流体流变性质的研究,尤其适用于研究材料的粘度—时间关系。此外, $\eta_s$  不依赖于流变模型,因而它是一个非常重要而又有用的流变参数。

### 三、屈服应力 $\tau_s$

$\tau_s$ (极限静切力)是剪切速率为零时的剪切应力  $\tau$ 。 $\tau > \tau_s$  者,流体才开始流动; $\tau \leq \tau_s$  者,流体则呈似刚体,受力后却没有形变,对外力作用有一定的承受能力。 $\tau_s$  与浆体的悬浮能力直接有关,故应予以重视。

$\tau_s$  是浆体具有结构的反映,表征了结构的强弱程度。反之,也可用浆体内部具细颗粒构成的絮团,并相互搭接成结构来解释  $\tau_s$  的物理意义。目前,浆体的结构虽然还不能用某个参数来表示,认识也不统一,但是通过剪切试验等手段来测量和研究  $\tau_s$ ,也是一种认识浆体结构的途径。

剪切试验利用了 RV 12 型粘度计具有  $D$  可连续变化的特点,使  $D$  在零与预置的高剪切速率之间连续变化,直接测出流变曲线与应力轴(纵坐标轴)的交点,得到  $\tau_s$  值。

为此,对成昆铁路普雄车站附近一条坡面泥石流的浆体作过剪切试验(图 3)。图 3 上所标绘的两个剪切环是同一个样品的剪切结果,不过两者的剪切速率变化过程不同;此外还分别标出了  $\tau_{s1}$  与  $\tau_{s2}$  的位置。样品的  $C_r = 0.4$ ,  $d < 1.0$  毫米,  $E = 0.3$ ,  $t_1 = 2$  分,  $t_2 = 3$  分,  $t_3 = 0.3$  分。

由图 3 可见,大环(上环)剪切从转速为零开始,接着转速连续增到最高转速为  $n = 512$  转/分,随即持续剪切 0.3 分钟,然后连续减速而又回到零。与  $n = 0 \sim 512$  转/分相应的,  $D = 0 \sim 460.8 \text{ 秒}^{-1}$ ,变化范围较宽,高剪切速率部分较高。

小环(下环)的最高转速为  $n = 5.12$  转/分(或  $D = 4.6 \text{ 秒}^{-1}$ ),也就是说,小环的剪切速率变化过程仅是大环剪切速率变化过程的一小部分。小环的剪切曲线是把横坐标轴的数值(如 0.16, ..., 5.12 转/分)放大 100 倍后标绘出的。于是可得到与 A、B 点对应的 A', B' 点,即实际小环的上行曲线终点 A 在 A' 点处。当  $D$  值很低时,浆体仍然有时间依赖效应,剪切环的形状极不规则,浆体流变行为复杂。

标绘图 3 时,记录仪的绘图笔是从坐标原点出发的,所以上行曲线从原点开始。

图 2 中,除 1 号剪切环的上行曲线外,其余的上下行曲线都有  $\tau_s$  值。这表明浆体内部已形成结构。

图3中,大环的上行曲线的实际轨迹大致应通过B',A'点,然后在虚线所示的位置附近上行。因此大环的屈服应力初值应近似于 $\tau_{y1} \approx 8.4$ 帕,约经12分钟剪切后,大环的下行曲线与应力轴(纵坐标轴)的交点上升为 $\tau_{y2} \approx 79.6$ 帕。这表明浆体的结构强度增加。

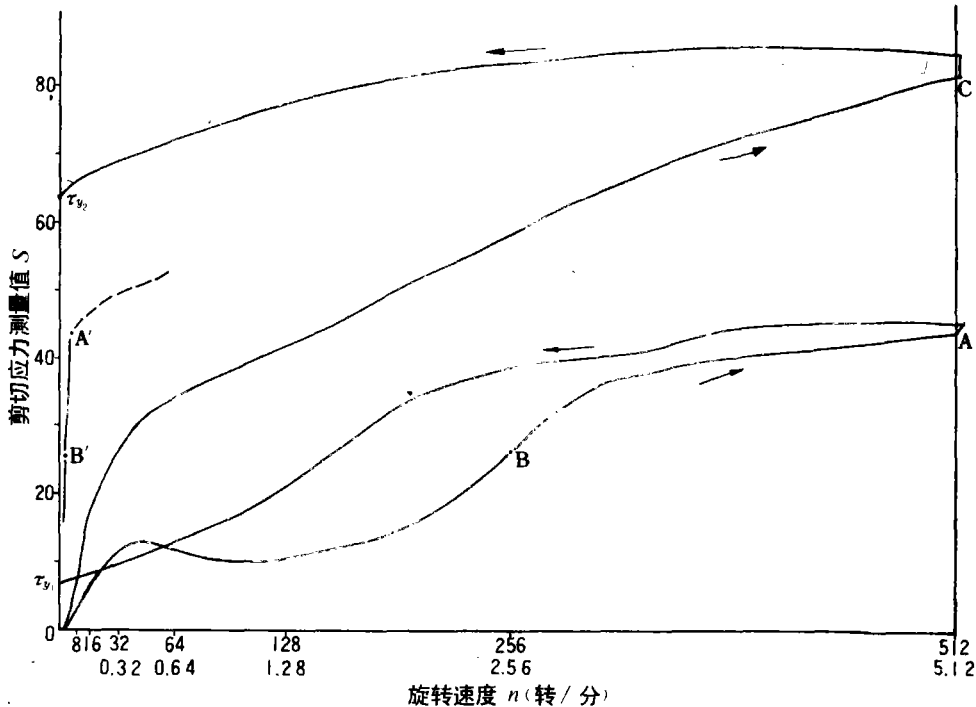


图3 剪切过程中屈服应力 $\tau_y$ 的变化

Fig. 3 The variation of yield stress  $\tau_y$

图2中,除1号剪切环的上行曲线外,每条上下行曲线作延长或反向延长后,都与应力轴(纵坐标轴)有个交点,即各自都有一个 $\tau_y$ 值。交点在剪切过程中沿着应力轴(纵坐标轴)逐个上升。也就是说, $\tau_y$ 值随时推移而不断增大。

剪切试验结果表明,同粘性泥石流浆体的 $\eta_0$ 一样,粘性泥石流浆体的 $\tau_y$ 也具有时间依赖效应,即 $\tau_y$ 值随时间推移而递增。 $\tau_y$ 的如此变化反映了浆体结构的时间依赖性,即结构随时间推移而增强。 $\tau_y$ 是时间的函数<sup>[2]</sup>。

综上所述,与时间有关的材料包括触变性材料和震凝性材料两大类。触变性材料比较多见,人们对它的认识也比较深入,而震凝性材料却比较少见,研究资料也少多了。

触变性材料的结构因剪切而受到破坏,停止剪切后又逐渐恢复;随着剪切时间的推移,触变性材料会变得更易流动。震凝性材料的结构因剪切而得到加强,停止剪切后有可能遭破坏或局部遭破坏;随着剪切时间的推移,震凝性材料越发变得不易流动<sup>[3]</sup>。震凝性描述了相反的触变现象,所以又被称为反触变性。

前述剪切试验结果表明,成昆铁路北段一些粘性泥石流浆体的流变参数具有时间依赖效应,即随剪切时间推移而递增。粘性泥石流浆体呈现出反触变性的流变行为,随时间推移而变稠,就此越发变得不易流动。

此外,由图 2 可见,剪切环的面积在剪切速率变化过程中递减,环与环之间的距离也在逐渐缩短。这说明粘性泥石流浆体的反触变性的流变行为有可能随时间推移而减弱,因而流变参数的递增有可能达到一个极限值。

### 参 考 文 献

- [1] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所编著,1989,泥石流研究与防治,四川科学技术出版社,第 177—192 页。
- [2] Cheng, D. C-H, 1987, Thixotropy. *International Journal of Cosmatic Science*, (9), 151—191.
- [3] Van Wazer, J. R., et al., 1963, *Viscosity and flow measurement*. Interscience, New York, 20—78.

## TIME EFFECT ON RHEOLOGIC PARAMETERS OF VISCOUS DEBRIS FLOW SLURRY AT THE NORTHERN SECTION OF CHENGDU—KUNMING RAILWAY

Zhao Huilin

(*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences  
& Ministry of Water Conservancy*)

### Abstract

Viscous debris flow slurry is a solid-liquid mixture with high concentration. It is of high concentration and unit weight, wide range of grain-size, as well as complex rheologic behaviour.

The shear test for viscous debris flow slurry at the northern section of Chengdu—Kunming Railway by the rotating cylinder viscometer RV 12 shows: the rheologic parameters ( apparent viscosity  $\eta_a$  and yield stress  $\tau_y$  ) present time-dependent effect, i. e. viscosity-time relations.

$\eta_a$  decreases with increase of shear rate, but it would increase with increase of shear time. As Fig. 2, while rotor speed  $n = 512r/min$ , shear stress  $\tau$  increases 12. 60pa and  $\eta_a$  27mpa·s in shear time of 18 minutes.

$\tau_y$  is the structure strength of slurry.  $\tau_y$  increases with increase of shear time. As Fig. 3, in the processes of shear rate variation,  $\tau_y$  rises from 8. 40pa to 79. 60pa. Therefore, the variation shows the time-dependent effect of slurry structure to time.

Viscous debris flow slurry is of the rheologic behaviour for negative-thixotropy. It thickens with increase of time. The rheologic parameter increases with increase of time, but time-dependent effect of slurry may weaken with increase of time.

**Key words** viscous debris flow, slurry, rheologic parameter, time-dependent effect