第 49 卷第 2 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 2
2021 年 2 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　February，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200344

使用同轴双圆柱流变仪获取 Bingham 流体流变参数

韩建国[1]，毕　耀[2]，阎培渝[1]，黎梦圆[1]，刘　宇[1]
(1. 清华大学土木工程系，北京 100084；2. 中建材料技术研究成都有限公司，四川 梅州 620866)

摘　要：分析了使用同轴双圆柱流变仪测试 Bingham 流体流变参数(屈服应力和塑性黏度)时，非剪切区对转速–扭矩曲线的非线性和连续性的影响，以及非剪切区对 Bingham 流体剪切应变速率的影响。对使用转速–扭矩曲线的线性段来获取 Bingham 流体流变参数的可行性进行了分析，提出了使用同轴双圆柱流变仪，在考虑非剪切区存在与否的情况下，利用剪切应力–剪切应变速率曲线获取 Bingham 流体流变参数的方法。同时，提出了剪切应力–剪切应变速率计算过程中的去噪声方法，实现了剪切应力–剪切应变速率曲线的高精度获取。

关键词：水泥基材料；流变；Bingham 流体；屈服应力；塑性黏度
中图分类号：　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)02–0323–08
网络出版时间：2021–01–06



The measurement of Bingham fluid rheological parameters by Couette rheometer

HAN Jianguo[1], *BI Yao*[2], *YAN Peiyu*[1], *LI Menyuan*[1], *LI Yu*[1]
(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Research Institute of Building Materials, China Construction Co. Ltd, Meizhou 620866, Sichuan, China)

Abstract: Influence of plug flow on the nonlinearity and continuity of angular velocity-torque curve obtained in a Couette rhometer during the measurement of Bingham fluid was analyzed. The feasibility of linear regression on angular velocity-torque curve to obtain the Bingham parameters was discussed, showing the error caused by ignoring the influence of plug flow in the annulus of Couette rheometer. A method to obtain the Bingham fluid parameters based on linear regression of shear stress-shear rate curve with respect to the effect of plug flow was proposed. The denoise method of the angular velocity-torque data was recommended for guaranteeing the precision of the angular velocity-torque curve.

Keywords: cement-based material; rheology; Bingham fluid; yield stress; plastic viscosity

水泥基材料流变性能的测试与分析，对于新拌浆体工作性调控、高程泵送、浇注方式和施工质量均具有重要的指导作用[1–2]。当前，水泥基材料流变性能测试已成为实验室和工程现场新拌混凝土品质表征和评价的重要手段[3–5]。

一般认为，水泥基材料的流变性能服从 Bingham 模型，因此，基于流变仪测得的剪切应力–剪切应变速率曲线、或转速–扭矩曲线的线性段，可求得 Bingham 流体的流变参数(屈服应力和塑性黏度)[6]。然而，在使用同轴双圆柱流变仪进行流变性能测试的过程中，由于低转速下流体中非剪切区的存在，以及高转速下流体与转子或容器内壁的相对滑移、或转子离心力作用导致的流体径向流动[7]，会使得测试所得的转速–扭矩曲线出现本征的非线性(非剪切区的存在所致)或虚假的非线性(流体与转子或容器内壁的相对滑移或径向流动所致)。这些非线性因素会对剪切应力–剪切应变速率曲线、转速–扭矩曲线的线性区域范围或线性度产生影响，导致 Bingham 流体流变参数的测试误差。

本工作分析了使用同轴双圆柱流变仪来获取水泥基材料 Bingham 流体流变参数的方法和误差来源，并给出了使用同轴双圆柱流变仪和 Bingham 模型来获取水泥基材料 Bingham 流变参数的适宜方法。

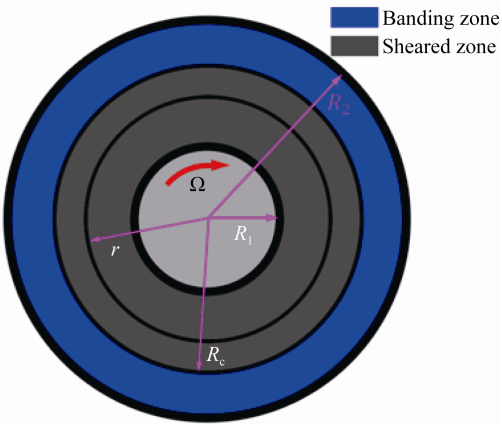
收稿日期：2020–05–06。　修订日期：2020–06–17。
基金项目：国家自然科学基金(51678343)。
第一作者：韩建国(1974—)，男，博士，高级工程师。

Received date: 2020–05–06.　**Revised date:** 2020–06–17.
First author: HAN Jianguo (1974–), male, Ph.D., Senior Engineer.
E-mail: hanjg@tsinghua.edu.cn

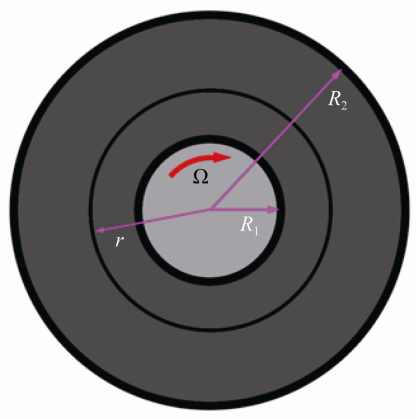
1 同轴双圆柱流变仪工作原理

同轴双圆柱流变仪的结构如 1 所示，由同轴的 2 个圆柱组成(内部圆柱的半径为 R_1，外部圆柱的半径为 R_2)，测试流体处于 2 个圆柱之间[8]。

根据被测试的 Bingham 流体的剪切状态，可将同轴双圆柱流变仪中 Bingham 流体的运动形态分为部分剪切(有非剪切区，见图 1a)和全部剪切(没有非剪切区，见图 1b) 2 种状态。因此，在进行 Bingham 流体流变参数求解时，应考虑非剪切区的影响。



(a) Partial shear



(b) Full shear

图 1 同轴双圆柱流变仪结构示意图(俯视剖面图)
Fig. 1 Illustration of Couette rheometer (Vertical view)

当内部的圆筒(转子)转动时，距离转子轴线某一距离 r 处，对应的剪切应变速率 $\dot{\gamma}$ 如式(1)所示，其中的负号表示距离 r 的增大方向与转速 ω 的增大方向相反。

$$\dot{\gamma} = -r\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}r} \tag{1}$$

忽略转子的端部效应，根据力平衡关系，可得出距离转子轴线某一距离 r 处的剪切应力 τ，如式(2)所示。

$$\tau = \frac{\mathrm{T}}{2\pi h r^2} \tag{2}$$

其中：h 为转子高度，m；T 为扭矩，N·m。

对于 Bingham 流体，其剪切应力 τ 和剪切应变速率 $\dot{\gamma}$ 之间的关系，如式(3)所示。

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \tag{3}$$

其中：τ_0 为 Bingham 流体的屈服应力，Pa；η 为 Bingham 流体的塑性黏度，Pa·s。

可将 Bingham 流体中的剪切应变速率 $\dot{\gamma}$，表达为剪切应力 τ 的函数，如式(4)所示。

$$\dot{\gamma} = f(\tau) = \frac{\tau - \tau_0}{\eta} \tag{4}$$

对式 2 求得 dτ–dr 关系，然后将其和式(1)代入式(4)，并对转速和扭矩进行积分，如式(5)所示。

$$\int_0^{\Omega}\mathrm{d}\omega = \frac{1}{2}\int_{\tau_x}^{\tau_1}\frac{\tau-\tau_0}{\eta}\frac{1}{\tau}\mathrm{d}\tau \tag{5}$$

其中：对于图 1a，τ_x 对应于 R_c 处的剪切应力(此处的剪切应力等于屈服应力)；对于图 1b，τ_x 对应于 R_2 处的剪切应力。

将式(5)进行积分，可求得部分剪切和全部剪切 2 种状态下，转子表面处的转速(Ω)–扭矩(T)关系，分别如式(6)和式(7)所示。

部分剪切：$$\Omega = \frac{T}{4\pi h\eta R_1^2} - \frac{\tau_0}{2\eta}\left[1+\ln\left(\frac{T}{2\pi h\tau_0 R_1^2}\right)\right] \tag{6}$$

全部剪切：$$\Omega = \frac{T}{4\pi h\eta}\left(\frac{1}{R_1^2}-\frac{1}{R_2^2}\right) + \frac{\tau_0}{\eta}\ln\frac{R_1}{R_2} \tag{7}$$

由式(6)和式(7)可见：部分剪切状态下，转速–扭矩之间为非线性关系；全部剪切状态下，转速–扭矩之间为线性关系。

需要说明的是，无论是部分剪切状况下的转速–扭矩关系[式(6)]，还是全部剪切状况下的转速–扭矩关系[式(7)]，均包含了相同的 Bingham 流体的流变参数(τ_0 和 η)，即，承认 τ_0 和 η 是 Bingham 流体的本征参数。

2 使用同轴双圆柱流变仪获取 Bingham 流变参数的方法

2.1 Newton 流体的剪切应变速率

一些商用的同轴双圆柱流变仪，在流变测试过程中，除了给出转子的转速和扭矩数值外，还可给出转子表面处的剪切应力和剪切应变速率。

需要注意的是，商用的同轴双圆柱流变仪，默认是以 Newton 流体为分析对象，按照式(8)给出转子表面处的剪切应变速率 $\dot{\gamma}_N$ [9]。

$$\dot{\gamma}_N = \frac{2\Omega R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \tag{8}$$

其中：R_1 和 R_2 分别为转子和容器的半径，m。

因此，如果被测试的流体为 Bingham 流体，商用的同轴双圆柱流变仪所给出的剪切应变速率中，浆体的屈服特性以及非剪切区的影响均未被考虑，故不能给出正确的剪切应变速率数据。

2.2 Bingham 流体的剪切应变速率

同轴双圆柱流变仪中，Bingham 流体剪切应变速率的表征，应根据被测试流体中是否存在非剪切区，分为部分剪切和全部剪切 2 种情况进行分析。

首先，将式(6)和式(7)的两侧分别对扭矩进行微分，得到式(9)和式(10)。

部分剪切：$$\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}T} = \frac{1}{4\pi h\eta R_1^2} - \frac{\tau_0}{2\eta T} \tag{9}$$

全部剪切：$$\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}T} = \frac{1}{4\pi h\eta}\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}\right) \tag{10}$$

将式(2) (令其中的 r=R_1)和式(9)代入式(4)，可得到部分剪切状态下，Bingham 流体在转子表面处的剪切应变速率，见式(11)。

将式(2) (令其中的 r=R_1)、式(7)和式(10)代入式(4)，可得到全部剪切状态下，Bingham 流体在转子表面处的剪切应变速率，见式(12)。

部分剪切：$$\dot{\gamma}_\mathrm{P} = 2T\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}T} \tag{11}$$

全部剪切：$$\dot{\gamma}_\mathrm{F} = \frac{2T\dfrac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}T}}{\left(1-\dfrac{R_1^2}{R_2^2}\right)} + \frac{T\dfrac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}T} - \Omega}{\ln\left(\dfrac{R_1}{R_2}\right)} \tag{12}$$

虽然同轴双圆柱流变仪的剪切应力表达式[式(2)]与流体的类型无关。对比式(8)、式(11)和式(12)可见，剪切应变速率的表达式是依赖于流体类型的；对于 Bingham 流体，还会涉及非剪切区的影响。因此，不能使用商用同轴双圆柱流变仪默认给出的剪切应力–剪切应变速率关系，来获取 Bingham 流体的流变参数。

利用同轴双圆柱流变仪的转速–扭矩数据，利用式(11)和式(12)可分别求得部分剪切和全部剪切 2 种状态下的剪切应变速率 $\dot{\gamma}_\mathrm{P}$ 和 $\dot{\gamma}_\mathrm{F}$。对应于某一扭矩值，$\dot{\gamma}_\mathrm{P}$ 和 $\dot{\gamma}_\mathrm{F}$ 的选择方法是取其中的较大值，如式(13)所示，该选择方法对应于转子转动的最小能量消耗[10]。

$$\dot{\gamma} = \max(\dot{\gamma}_\mathrm{P}, \dot{\gamma}_\mathrm{F}) \tag{13}$$

2.3 转速–扭矩曲线的连续性

在进行 Bingham 流体流变参数的求解方法讨论之前，先分析 Bingham 流体的转速–扭矩曲线，在部分剪切和全部剪切 2 种状态下的连续性。

部分剪切状态下，其转速–扭矩曲线中，扭矩的有效范围是：

(1) 下限，转子开始转动，转子表面处的剪切应力等于屈服应力：$T_{\min} = 2\pi h\tau_0 R_1^2$

(2) 上限，非剪切区消失，容器内壁处的剪切应力等于屈服应力：$T_{\max} = 2\pi h\tau_0 R_2^2$

全部剪切状态下，其转速–扭矩曲线中，扭矩的下限对应于容器内壁处的剪切应力等于屈服应力。因此，$T_{\max}$ 是部分剪切和全部剪切 2 种状态下，扭矩值的叠合点。

将 $T_{\max}$ 代入式(6)和式(7)，均得到相同的转速值，如式(14)所示。

$$\Omega_{T_{\max}} = \frac{\tau_0}{2\eta}\left(\frac{R_2^2}{R_1^2} - 1\right) + \frac{\tau_0}{\eta}\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \tag{14}$$

同时，将式(6)和式(7)的两侧对扭矩求导(见式(9)和式(10))，并将 $T_{\max}$ 代入，均得到相同的微分值，如式(15)所示。

$$\left(\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}T}\right)_{T_{\max}} = \frac{1}{4\pi h\eta}\left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2}\right) \tag{15}$$

联合式(14)和式(15)，证明了部分剪切和全部剪切 2 种状态下，转速–扭矩曲线的连续性。即，部分剪切状态转速和扭矩的上限点($\Omega_{T_{\max}}$，$T_{\max}$)和全部剪切状态转速和扭矩的下限点($\Omega_{T_{\max}}$，$T_{\max}$)重合，且 2 种剪切状态的转速–扭矩曲线的斜率在该点也相等。

对式(6)进行转速对扭矩的二阶导数求解，如式(16)所示；由于式(16)的右侧恒大于零，可知部分剪切状态下的转速–扭矩曲线是上凹的。同时，对式(6)进行转速对扭矩的一阶导数求解，如式(17)所示，并令式(17)的左侧等于零，可求得对应的扭矩值为 $2\pi h\tau_0 R_1^2$。由此可知，$T_{\min}$ 是部分剪切状态下转速–扭矩曲线的最低点。

$$\frac{\mathrm{d}^2\Omega}{\mathrm{d}T^2} = \frac{\tau_0}{2\eta T^2} \tag{16}$$

$$\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}T} = \frac{1}{4\pi h\eta R_1^2} - \frac{\tau_0}{2\eta T} \tag{17}$$

下面给出一个例子，以更好地说明部分剪切和

全部剪切 2 种状态的连续性，以及这 2 种剪切状态下，各自的有效转速–扭矩数据范围。

设同轴双圆柱流变仪的转子半径为 20 mm，高度为 80 mm，容器半径为 40 mm，高度为 130 mm。Bingham 流体的屈服应力为 57.3 Pa，塑性黏度为 2.48 Pa·s。在扭矩为 0 至 0.06 N·m 的范围内，依据式(6)和式(7)由扭矩值进行转速值的计算，并分别绘制部分剪切和全部剪切 2 种状态下的转速–扭矩曲线，如图 2 中的红色实线和蓝色虚线所示。

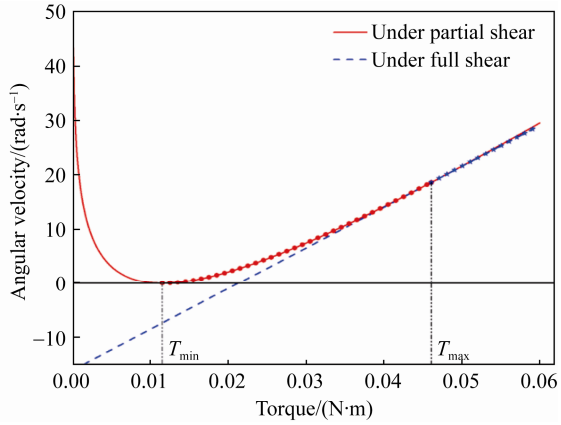


图 2 转速–扭矩曲线(部分剪切和全部剪切状态下)

Fig. 2 Angular velocity–torque curve (Under partial shear and full shear)

对应于部分剪切状态下扭矩的下限 T_{min} 和上限 T_{max}，部分剪切状态下，有效的转速–扭矩数据范围如图 2 中的红色圆点所示。对应于全部剪切状态下扭矩的下限 T_{max}，全部剪切状态下，有效的转速–扭矩数据范围如图 2 中的蓝色星号所示。

由图 2 可见，部分剪切和全部剪切两种状态，在 T_{max} 处是连续的。转速–扭矩曲线只在全部剪切状态下，具有恒定的斜率和截距；在部分剪切状态下，转速–扭矩曲线的斜率是变化的。

因此，如果忽略部分剪切状态下，转速–扭矩曲线的非线性，而对转速–扭矩数据进行线性拟合，则会低估 Bingham 流体的屈服应力并高估其塑性黏度。

2.4 Bingham 流变参数获取方法分析

2.4.1 基于主观的线性拟合法

图 3 为使用同轴双圆柱流变仪测得的水泥净浆(水胶比为 0.35)的转速–扭矩曲线。如果对图 3 中转速–扭矩曲线主观选择的区域进行线性拟合，如图 4 所示，可根据拟合所得直线的斜率和截距，利用式(7)求得 Bingham 流变参数(τ_0=44.2 Pa，η=3.46 Pa·s)。

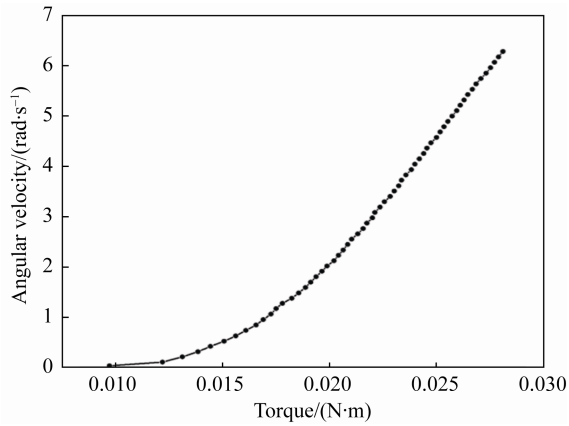


图 3 水泥净浆的转速–扭矩曲线

Fig. 3 Angular velocity–torque curve of cement paste

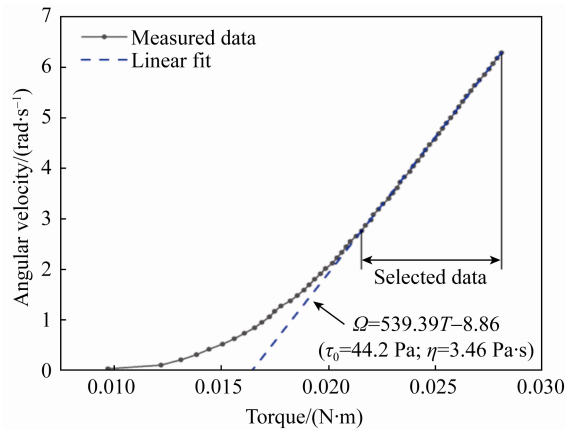


图 4 转速–扭矩曲线的线性拟合

Fig. 4 Linear fit of angular velocity–torque curve

基于主观判定的转速–扭矩曲线的线性段，通过线性拟合来获得 Bingham 流体的流变参数；虽看似可行，但其不足是未事先判定该线性段是否在全部剪切状态下获得。例如，图 4 中，线性拟合后得到的屈服应力为 44.2 Pa，该屈服应力对应的 T_{max} 为 0.036 N·m，该数值已经超越了图 4 中转速–扭矩曲线的上限扭矩值；这说明，图 4 中的转速–扭矩数据是在部分剪切状态下获得的，因此，应使用式(6)而不是式(7)来获得水泥净浆的 Bingham 流变参数。

因此，基于同轴双圆柱流变仪测试所得转速–扭矩曲线，分析获取 Bingham 流体流变参数的过程中，判断转速–扭矩曲线获取时流体的剪切状态是十分必要的。

2.4.2 剪切应力–剪切应变速率法

理论上，基于转速–扭矩数据，利用式(2) (令其中的 r=R_1)计算出剪切应力，利用式(11)和式(12)计算出剪切应变速率[并依据式(13)进行比较和选择]，然后，对剪切应力–剪切应变速率进行线性拟

合，可求得 Bingham 流体的流变参数。

例如，将图 2 中部分剪切状态下的转速–扭矩数据(红色圆点标识出的数据)和全部剪切状态下的转速–扭矩数据(蓝色星号标识出的数据)进行组合后，利用式(2) (令其中的 $r=R_1$)计算出剪切应力，利用式(11)和式(12)计算出剪切应变速率，所得剪切应力–剪切应变速率曲线如图 5 所示。

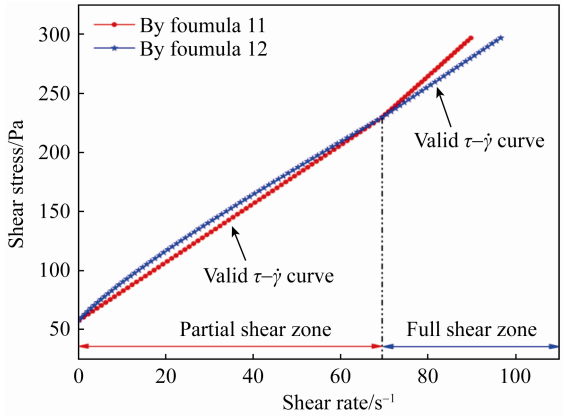


图 5　由转速–扭矩数据计算所得剪切应力–剪切应变速率曲线

Fig. 5　Calculated shear stress-shear rate based on angular velocity–torque data

依据式(13)来提取图 5 中部分剪切和全部剪切 2 种状态下的有效 $\tau-\dot{\gamma}$ 数据，进行组合后再进行线性拟合，如图 6 所示。可见，2 种状态下，有效 $\tau-\dot{\gamma}$ 数据的组合有很好的线性关系，且线性拟合结果(τ_0=57.5 Pa，η=2.48 Pa·s)与理论值(τ_0=57.3 Pa，η=2.48 Pa·s)高度一致。

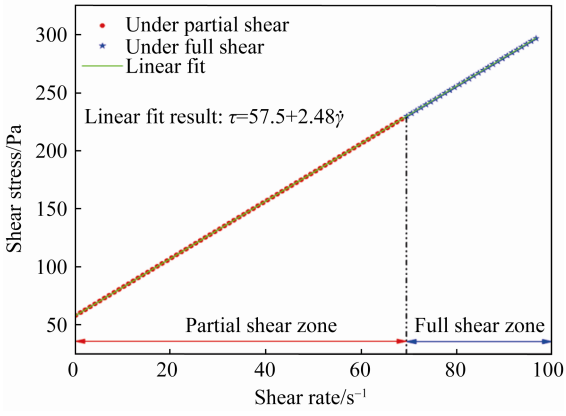


图 6　剪切应力–剪切应变速率组合及线性拟合

Fig. 6　Combination of shear stress–shear rate curve and linear fit

然而，利用同轴双圆柱流变仪实际测得的转速–扭矩数据(如图 3 所示的转速–扭矩数据)，使用式(2) (令其中的 $r=R_1$)计算出剪切应力，使用式(11)和式(12)计算出剪切应变速率，并不能得出平滑性良好的剪切应力–剪切应变速率曲线，如图 7 所示。这是由于流变测试过程中少许的噪声(如，转子转动过程中的微震荡，浆体在微观程度上的不匀质性)对转速–扭矩测试数据的干扰，会对式(11)和式(12)中转速对扭矩的微分值产生显著的影响，从而导致剪切应力和剪切应变速率计算结果的波动。

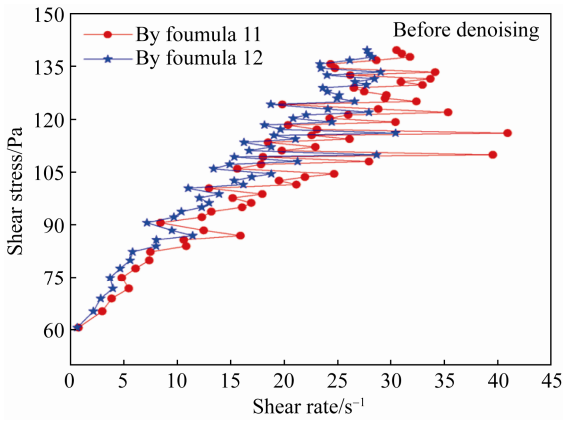


图 7　噪声对剪切应力–剪切应变速率曲线平滑性的影响

Fig. 7　Influence of noise on the smoothness of shear stress–shear rate curves

因此，流变测试所得转速–扭矩数据，在进行剪切应力和剪切应变速率的计算之前，应进行去噪声处理。试验数据的去噪声处理有很多种方法，如，低通滤波、高通滤波、中值滤波、Fourier 变换、小波分析等。但针对同轴双圆柱流变仪转速–扭矩数据的去噪声处理，作者经过大量的测试分析，构建了式(18)和式(19)所示的 2 种剪切状态下的转速–扭矩关系模型，并基于该模型对测试所得转速–扭矩数据分别进行非线性(部分剪切)和线性(全部剪切)拟合，从而在测试所得的转速–扭矩数据中提取出本质规律，达到去噪声目的。

$$\text{部分剪切：}\Omega = A\,T + B\ln(T) + C \tag{18}$$

$$\text{全部剪切：}\Omega = DT + E \tag{19}$$

其中，A、B、C、D、E 为待通过优化拟合得出的系数。

使用所提出的去噪声处理方法，对图 3 中的转速–扭矩数据进行去噪声处理，然后进行剪切应力–剪切应变速率的计算和曲线绘制，结果如图 8 所示。对比图 7 和图 8，可见所提出的去噪声处理方法的有效性。

由图 8 可见，图 3 中的转速–扭矩曲线是在部分剪切状态下获得的[见式(13)]。因为相同的扭矩时，式(11) (部分剪切)的计算结果始终大于式(12) (全部剪切)的计算结果。

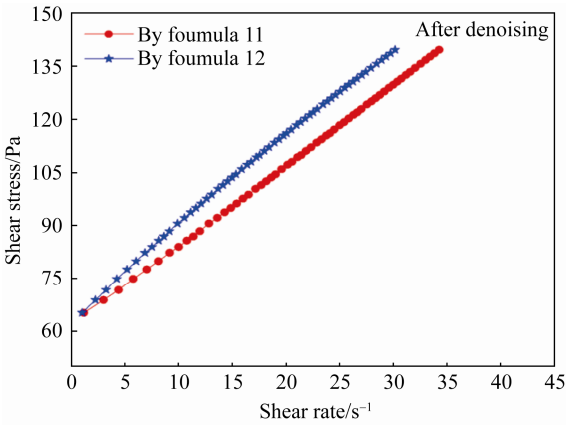


图 8　去噪声后所得剪切应力–剪切应变速率曲线

Fig. 8　Shear stress–shear rate curves after denoising

对图 8 中的红色圆点区域进行线性拟合，可得到被测试水泥净浆的 Bingham 流变参数(τ_0=61.5 Pa，η=2.28 Pa·s)，见图 9；同时，利用该 Bingham 流体的屈服应力和塑性黏度，可计算得到部分剪切状态上限所对应的剪切应力和剪切应变速率[分别利用式(2) (取 $r=R_2$，$T=T_{max}$)和式(4)]，如图 9 中的紫色五边形所示。

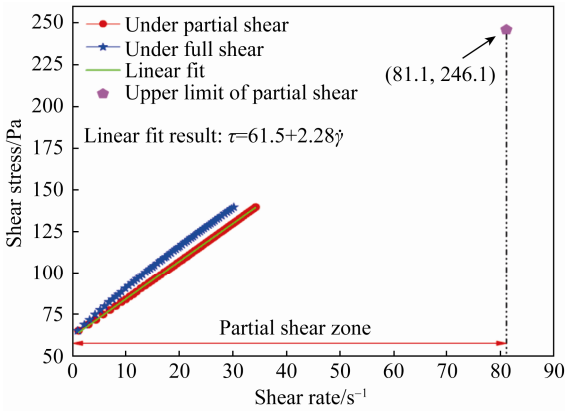


图 9　去噪声处理后 Bingham 流体流变参数的获取

Fig. 9　Obtained Bingham parameters based on denoised shear stress–shear rate curve

使用图 9 线性拟合所得 Bingham 流体的屈服应力和塑性黏度，依据式(2) (取 $r=R_2$，$\tau=\tau_0$)和式(14)，可得到部分剪切状态上限所对应的扭矩值和转速值，见图 10 中紫色五边形标记。同时，根据式(7)可计算全部剪切状态下，测试数据中转速所对应的扭矩值，如图 10 中的蓝色实线所示。对比图 10 中的蓝色虚线和蓝色实线可见，对同轴双圆柱流变仪在部分剪切状态下所获得的转速–扭矩曲线进行线性拟合，会低估 Bingham 流体的屈服应力并高估其塑性黏度。

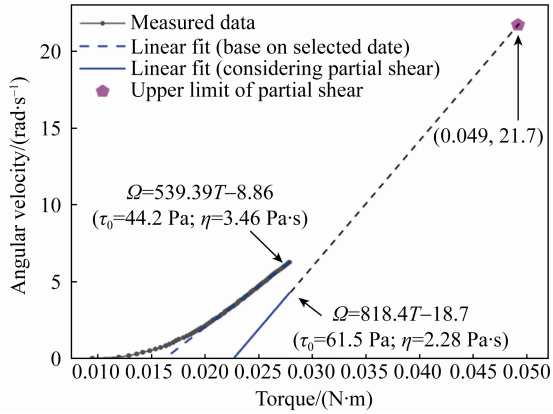


图 10　主观线性拟合和考虑非剪切区的线性拟合结果对比

Fig. 10　Comparison of linear fit results with or without considering partial shear

2.5　Bingham 流变参数获取方法讨论

对比式(8)所示的 Newton 流体剪切应变速率求解方法，以及式(11)和式(12)所示的 Bingham 流体在部分剪切和全部剪切 2 种状态下剪切应变速率的求解方法，可见，直接使用同轴双圆柱流变仪默认的、基于牛顿流体的剪切应力–剪切应变速率数据，来求解 Bingham 流体的流变参数是不适宜的。

不考虑非剪切区的影响，使用同轴双圆柱流变仪测试所得转速–扭矩数据，通过主观选定的(看似线性的)数据区域进行线性拟合，来获取 Bingham 流变参数，有低估其屈服应力并高估其塑性黏度的风险。

在考虑非剪切区存在与否的前提下，首先进行转速–扭矩曲线的去噪声处理，然后计算剪切应力–剪切应变速率数据，并使用剪切应力–剪切应变速率曲线的有效区域进行线性拟合，是获取 Bingham 流体流变参数的适宜方法。

由于 Bingham 流体的流变参数(屈服应力和塑性黏度)是材料的本征参数；理论上，在考虑了非剪切区对转速–扭矩曲线、剪切应力–剪切应变速率曲线的影响后，无论是使用部分剪切状态下剪切应力–剪切应变速率曲线的线性拟合结果，还是使用全部剪切状态下剪切应力–剪切应变速率曲线的线性拟合结果，均可获得相同的 Bingham 流体流变参数。但是，实际的流变测试过程中，非剪切区消失后，高转速下浆体与转子表面或容器内壁的侧滑，或转子在高转速下产生的离心力对流体层流状态的扰动，会导致转速–扭矩数据产生误差并影响 Bingham 流体流变参数的分析精度。

因此，宜在非剪切区存在(部分剪切状态下)且转子表面处流体的剪切应变速率可类比工程状况

(对于水泥基材料，搅拌-运输-泵送-浇注等环节中，产生的剪切应变速率在 10~60 转/s^{-1} 之间)的条件下，进行具有 Bingham 特性的水泥基材料流变性能的测试。

2.6　Bingham 流变参数获取方法验证

使用同轴双圆柱流变仪，以及所提出的剪切应力–剪切应变速率线性拟合法，分析了水胶比(γ)为 0.32 至 0.42 (步进 0.02)水泥净浆的 Bingham 流变参数。

所用同轴双圆柱流变仪为 Brookfield RST-SST 型流变仪(最大扭矩为 100 mN·m，最高转速为 1 300 r/s)，四叶片型桨式转子(直径 40 mm，高度 80 mm)。盛放水泥浆体的容器直径为 80 mm，高度为 130 mm，装入浆体并浸入转子后，转子的底部距离容器底部的距离为 30 mm。

水泥净浆制备所用原材料包括：基准水泥和自来水；水泥浆体制备前 2 种物料的温度均为 28 ℃。水泥净浆的制备使用净浆搅拌机，低速模式下搅拌 1 min，高速模式下搅拌 2 min。流变性能测试时，采用的流变测试制度为：转子转速从 0 开始，以 1 转/s^2 的加速度匀加速至 60 转/s，再从该最高速以负 1 转/s^2 的加速度匀减速至 0。6 种水泥净浆的流变测试过程中，浆体的剪切状态良好，未出现涡流或滑移现象。利用流变测试制度中，降速段所获得的转速–扭矩数据来逐步获得 Bingham 流变参数，具体描述如下：

6 种水泥净浆的转速–扭矩曲线如图 11 所示。可见，随着水胶比的增大，浆体的转速–扭矩曲线逐渐变得陡峭且密集。

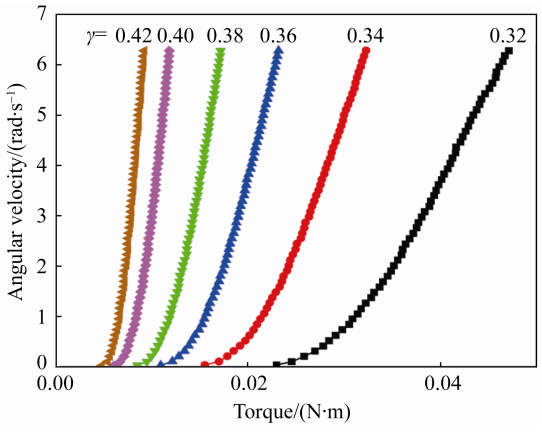


图 11　不同水胶比水泥净浆的转速–扭矩曲线

Fig. 11　Angular velocity–torque curves of cement paste with different water to binder ratio

由试验所得转速–扭矩数据，逐步求得剪切应力–剪切应变速率曲线，并对剪切应力–剪切应变速率曲线进行线性拟合，求得不同水胶比水泥净浆的 Bingham 流变参数，如图 12 所示。

图 12 中，虚线的左侧为由试验数据(转速–扭矩)所求得的剪切应力–剪切应变速率曲线及其线性拟合结果；虚线右侧的数据点为依据剪切应力–剪切应变速率曲线的线性拟合所求得的 Bingham 流变参数、转子和容器尺寸所求得的部分剪切状态上限值。

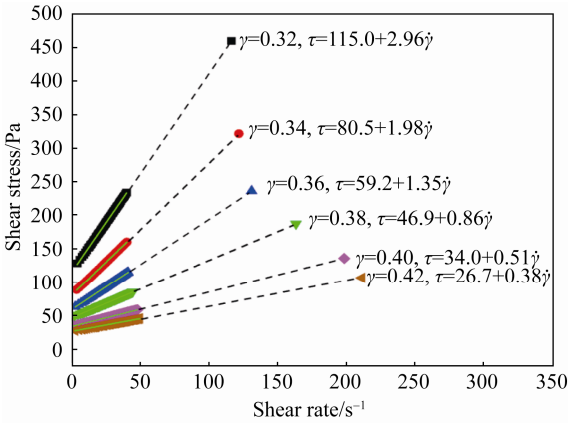


图 12　剪切应力–剪切应变速率曲线及线性拟合结果

Fig. 12　Shear stress–shear rate curves and linearization

由图 12 中 Bingham 流变参数求解结果可见：6 种水泥净浆在测试过程中，均处于部分剪切状态；随着水泥净浆水胶比的增大，其剪切应力降低、塑性黏度减小；随着水胶比的增大，部分剪切状态的上限剪切应力降低、上限剪切应变速率增大。同时可见，利用所提出的基于剪切应力–剪切应变速率线性拟合法的 Bingham 流体流变参数获取方法，可很好地实现使用同轴双圆柱流变仪进行 Bingham 流体流变参数的求解。

3　结论

1) 使用同轴双圆柱流变仪对 Bingham 流体的流变性能进行测试，非剪切区的存在会使得转速–扭矩曲线出现非线性；随着转速的上升，由部分剪切状态向全部剪切状态的过渡是连续的；对转速–扭矩曲线进行线性拟合，用斜率和扭矩来求解 Bingham 流体的屈服应力和塑性黏度，仅适用于全部剪切状态。

2) 提出了同轴双圆柱流变仪测试数据去噪声处理的转速–扭矩模型，通过基于该模型的优化拟合，可实现测试数据中转速–扭矩本质规律的提取，很好地达到去噪声的目的。

3) 基于剪切应力–剪切应变速率曲线的线性拟

合，实现了 Bingham 流体流变参数(屈服应力和塑性黏度的)求解。

4) 宜在非剪切区存在(部分剪切状态下)且转子表面处流体的剪切应变速率可类比工程状况的条件下，进行具有 Bingham 特性的水泥基材料流变性能的测试和参数求解。

5) 使用 Bingham 流体流变参数求解方法，可在考虑同轴双圆柱流变仪中浆体所经历的剪切状态(部分剪切或全部剪切)的条件下，顺利实现 Bingham 流体流变参数的求解。

参考文献:

[1] 刘宇, 黎梦圆, 阎培渝. 矿物掺合料对胶凝材料浆体流变性能和触变性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5): 594–601.
LIU Yu, LI Mengyuan, YAN Peiyu. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(5): 594–601.

[2] WALLEVIK O H, WALLEVIK J E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes[J]. Cem Concr Res, 2011, 41(12): 1279–1288.

[3] 阎培渝, 黎梦圆, 韩建国, 等. 新拌混凝土可泵性的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(2): 239–246.
YAN Peiyu, LI Mengyuan, HAN Jianguo, et al. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(2): 239–246.

[4] 赵晓, 黎梦圆, 韩建国, 等. 混凝土可泵性的室内与现场评价[J]. 工业建筑, 2018, 48(5): 134–138.
ZHAO Xiao, LI Mengyuan, HAN Jianguo, et al. Ind Constr (in Chinese), 2018, 48(5): 134–138.

[5] 赵筠. 混凝土泵送性能的影响因素与试验评价方法[J]. 江西建材, 2014, 12: 6–32.
ZHAO Jun. Jiangxi Build Mater (in Chinese), 2014, 12: 6–32.

[6] BANFILL P F G. The rheology of fresh cement and concrete-a review[C]//Proceedings of the 11th International Cement Chemistry Congress, 2003, 1: 50–62.

[7] MARCHESINI F H, NACCACHE M F, ABDU A, et al. Rheological characterization of yield-stress materials: Flow pattern and apparent wall slip[J]. Appl Rheol, 2015, 25(5): 32–41.

[8] BARNES H A, NGUYEN Q D. Rotating vane rheometry—A review[J]. J Non-Newton Fluid Mech, 2001, 98(1): 1–14.

[9] FEYS, D, CEPURITIS R, JACOBSEN S, et al. Measuring rheological properties of cement pastes: most common techniques, procedures and challenges[J]. RILEM Tech Lett, 2018: 129–135.

[10] ESTELLÉ P, LANOS C, PERROT A. Processing the Couette viscometry data using a Bingham approximation in shear rate calculation[J]. J Non-Newton Fluid Mech, 2008, 154.1: 31–38.