

高粘度非牛顿模型材料流变性能的实验测定^①

曾佐勋 刘立林 黄定华 夏庆霖 黄绪桥

(中国地质大学,武汉)

摘要 本文介绍了一种高粘度非牛顿模型材料流变性能的实验测定原理和方法。此法不仅可以得到材料的表观剪应变速率和非牛顿剪应变速率,还可以得到流变指数、应力指数和表观粘度。采用夹心式流变仪对 M503 模型材料进行了试验测定。M503 是一种聚合物模型材料,由橡胶腻子 XM-50(一种黑色密封材料)与滑石粉按重量 1:1 混炼而成。实验结果表明:M503 是一种假塑性材料,当非牛顿剪应变速率控制在 $7.52-105.56 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 范围时,其应力指数 n 变化范围为 1.15—3.33,表观粘度变化范围为 $4.69-0.99 \times 10^7 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

关键词 非牛顿模型材料 夹心式流变仪 M503

0 引言

模拟实验作为一种研究手段,得到李四光教授的高度重视。随着岩石圈多层圈流变性的逐步揭示和地球科学朝定量化方向的发展,对模型材料的研究提出了新的要求。一方面,需要探索新的实验材料;另一方面,需要对模型材料的流变性能进行定量探讨。对此,国外学者已做了不少工作^[1-3],但国内尚有很大差距,需努力赶超世界先进水平。

本文作者进行了以橡胶腻子为主要成分的高分子流变模型材料的探索。由于这类材料具有高粘度非牛顿流变特征,采用一般的旋转式和毛细管式流变仪不容易对其进行流变性能测定,故参照国内外已有工作^②,设计制做了一台夹心式流变仪。本文主要介绍利用夹心式流变仪对高粘度非牛顿模型材料流变性能进行测定的方法和原理,并介绍 M503 模型材料流变性能测定结果。

1 夹心式流变仪的测试方法与原理

夹心式流变仪(图 1),在测试过程中两固定板(FP)保持平行且垂直于水平面;活动平板(MP)在载荷 P 作用下带动其两侧试料(SA)作垂直于水平面、平行于两固定板的垂向位

① 国家教委博士点基金资助项目成果。

② 刘舟,酚醛 SMC 的增稠技术及其流变性的研究。武汉工业大学,硕士论文,1994。

移。每侧试样长为 h , 宽为 b , 则模型内垂直于水平面的截面上的剪应力为

$$\tau = \frac{P}{2bh} \quad (1)$$

式中 P 的单位取 N, τ 的单位为 Pa, b 和 h 的单位为 m。

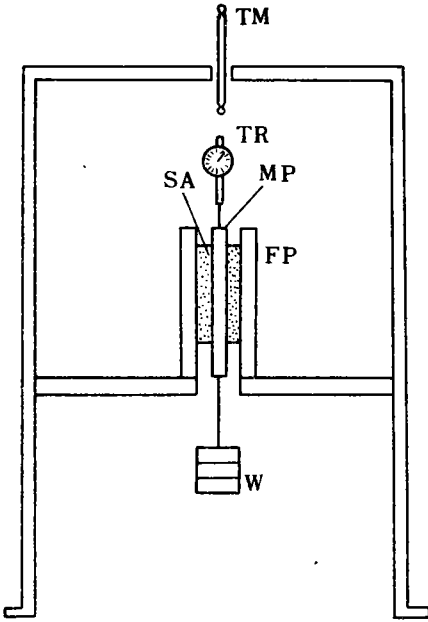


图 1 夹心式流变仪示意图

Fig. 1 Sketch showing the sandwich rheometer

Mp. 活动板; FP. 固定板; W. 砝码; SA. 试样;
TR. 百分表或位移传感器; TM. 温度计

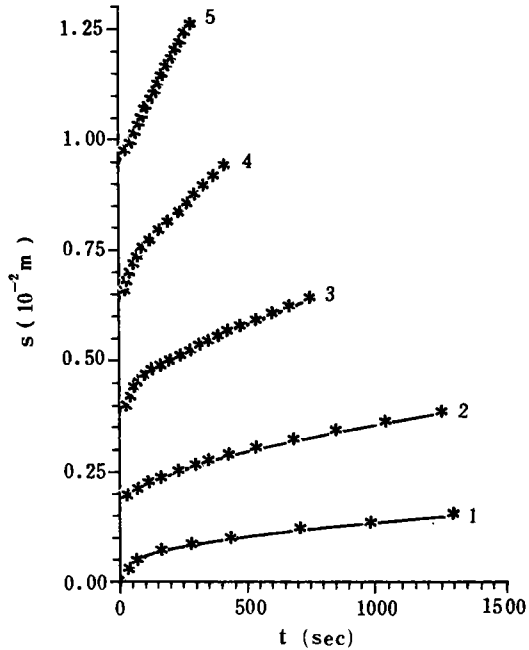


图 2 M503 5 个加载阶段的蠕变曲线

Fig. 2 Creep curves of M503 in five loading stages

在一个相对小的时间间隔 Δt (sec) 内, 若活动平板的位移量为 Δs (m), 则该时段内的平均位移速率为 v (m/sec)

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (2)$$

设模型厚度(即活动平板至每侧固定板之间的距离)为 a (m), 则每时段内表观剪应变速率(也称牛顿剪应变速率) $\dot{\gamma}'$ (s^{-1}) 为

$$\dot{\gamma}' = \frac{v}{a} \quad (3)$$

由于要考虑试料的非牛顿性(非线性)程度, 需要测定非线性指数 m , 并对剪应变速率进行校正, 其方法和计算公式介绍如下:

对同一模型, 保持温度恒定, 分阶段逐步加载, 每一加载阶段, 都应使蠕变曲线进入平稳蠕变阶段, 并保持一定的时间。将每一加载阶段开始进入平稳蠕变的表观剪应变速率 $\dot{\gamma}'$ 和相应剪应力 τ 标注在 $\lg \tau - \lg \dot{\gamma}'$ 。若标注点在一斜直线上, 表明是幂律非牛顿材料。该斜直线的斜率即为非牛顿指数 m (也称流变指数或流动指数), 有了 m 值, 即可直接用下面的 Rabinowitsch 公式对表观剪应变速率 $\dot{\gamma}'$ 进行校正, 得到非牛顿剪应变速率 $\dot{\gamma}$

$$\dot{\gamma}' = \frac{3m+1}{4m} \dot{\gamma}' \quad (4)$$

若在 $\lg\tau - \lg\dot{\gamma}'$ 图上作实验数据标绘, 则斜直线的斜率为应力指数 n (m 与 n 互为倒数), Rabinowitsch 校正公式变为

$$\dot{\gamma}' = \frac{3+n}{4} \dot{\gamma}' \quad (5)$$

有了 $\tau, \dot{\gamma}'$, 则可按下式求得模型材料的表观粘度

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}'} \quad (6)$$

当 $\lg\tau - \lg\dot{\gamma}'$ 图上的标注点在一曲线上, m 值不再为常数, 则应以曲线上一点的切线斜率来代表该点的 m 值, 利用 m 值从(4)、(6)两式求取该点的非牛顿剪应变变速率和表观粘度。

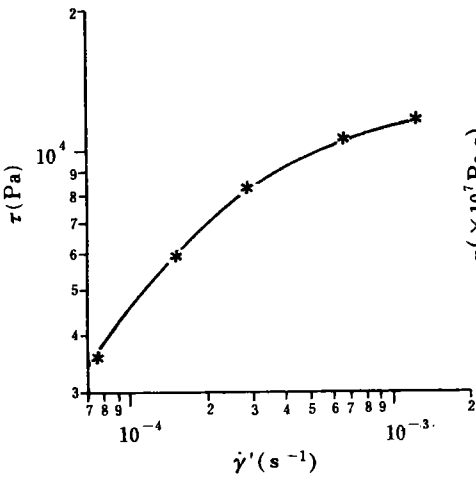


图3 剪应力与表观剪应变速率的关系

Fig. 3 Relationship between shear stresses and apparent shear strain rates

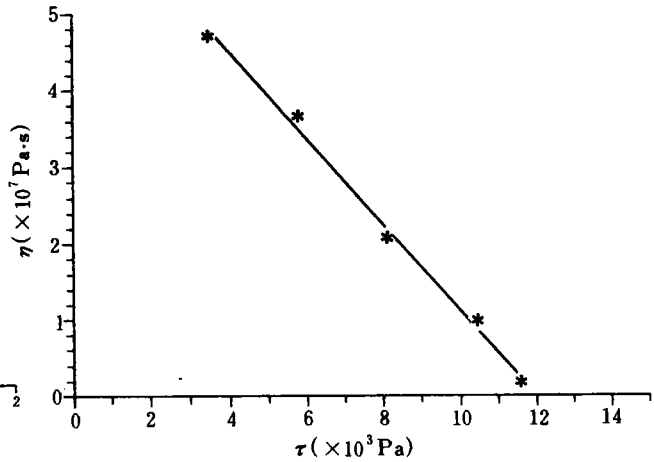


图4 M503 表观粘度与剪应力的关系

Fig. 4 Relationship between apparent viscosities of M503 and shear stresses

2 M503 模型材料的流变性能测定与结果分析

M503 模型材料由橡胶腻子 XM50 与滑石粉按重量 1 : 1 混炼而成, 前者是作为密封材料的商品, 其配方不清楚。

将模型材料做成两块尺寸为 $a \times b \times h = 0.01 \times 0.04 \times 0.1065 \text{m}^3$ 的试件, 用树脂胶分别粘在活动平板两侧, 再与固定板粘接起来, 从 4 个自由面将模型材料挤紧, 自然放置 24 小时。由于试件很薄, 四周为自由边界, 加上模型材料具有流动性, 故不必担心材料内部有压应力存在。各加载阶段情况如表 1 所示, 部分测试结果表示在表 1 和图 2—5 中。

表 1 M503 模型材料流变测试结果表

Table 1 Results of rheological tests of M503 model material

加载阶段	载荷 P N	剪切应力 τ Pa	剪切位移速率 v $m/s(\times 10^{-7})$	牛顿剪应变速率 $\dot{\gamma}$ $s^{-1}(\times 10^{-5})$	流变指数 m	应力指数 n	非牛顿剪应变速率 $\dot{\gamma}'$ $s(\times 10^{-5})$	表观粘度 η $Pa \cdot s(\times 10^7)$
1	30.07	3529.34	7.246	7.246	0.87	1.15	7.52	4.69
2	49.69	5832.16	14.42	14.42	0.73	1.37	15.75	3.70
3	69.31	8134.98	27.77	27.77	0.39	2.56	38.64	2.11
4	88.93	10437.79	66.67	66.67	0.30	3.33	105.56	0.99
5	98.74	11589.20	125	125	0.05	20.00	718.75	0.16

注:实验温度为 $5.5 \pm 1^\circ C$ 。

从图 2 所示 5 个加载阶段的蠕变曲线(2—5 号曲线都沿时间坐标轴方向进行了平移)可以看出,随着应力水平的不断提高,进入平稳蠕变所需时间越来越短。从图 3 和表 1 中看出,应变速率越高偏离牛顿体状态(即 n 或 m 与 1 之差)越远。故可以推想,在应变速率很低时可接近于牛顿体。

将开始进入平稳蠕变时的 $\dot{\gamma}'$ 和 τ 值标绘在 $\lg \tau - \lg \dot{\gamma}'$ 图上,得图 3 所示 $\lg \tau - \lg \dot{\gamma}'$ 曲线。由曲线上各点切线的斜率,得到 5 个观测点流变指数 m 值和应力指数 n 值(见表 1)。

图 4 和图 5 分别显示出表观粘度随剪应力、非牛顿剪应变速率增大而降低,因此 M503 属剪力变稀材料,也称假塑性材料。

0 结语

从表 1 所示试验结果可以看出,M503 这种聚合物模型材料具有高粘度特征。采用夹心式流变仪对其流变性能进行测定是合适的。从试验结果还能看出,M503 是一种剪力变稀材料,当非牛顿剪应变速率 $\dot{\gamma}'$ 在 $7.52 - 105.56 \times 10^5 s^{-1}$ 范围时,应力指数 n 变化范围在 1.15—3.33 之间,表观粘度在 $4.69 - 0.99 \times 10^7 Pa \cdot s$ 之间。在进行实际构造的物理模拟实

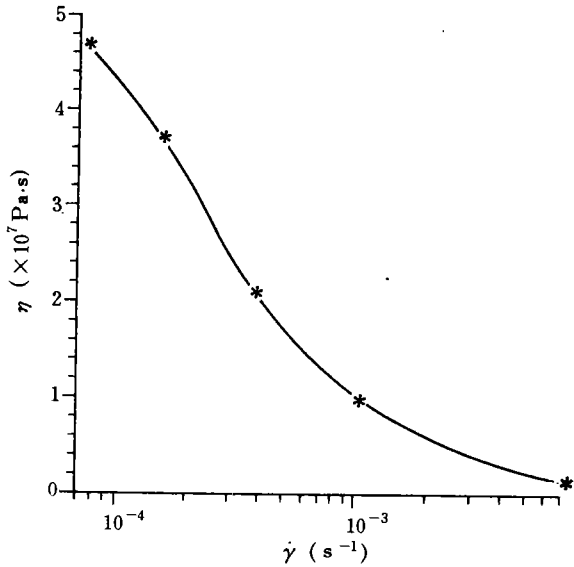


图 5 M503 表观粘度与剪应变速率的关系

Fig. 5 Relationship between apparent viscosities of M503 and shear strain rates

验时,可根据需要把剪应变速率控制在合适的范围。

1959年,安欧^[4]曾通过实验得到泥巴的拉伸应力—应变曲线和压缩应力—应变曲线,但后来这方面的工作似乎停滞下来。作者希望本文能对国内新一轮的模型材料及其流变性能的研究起到抛砖引玉的作用。

参 考 文 献

- 1 McClay K R, The rheology of plasticine, *Tectonophysics*, 1976, 33: 7—15.
- 2 Dixon J M and summers J M, Another word on the rheology of silicone putty: *Bingham, J. Struct. Geol.*, 1986, 8: 593—595.
- 3 Treagus S H and Sokoutis D, Laboratory modelling of strain variation across rheological boundaries, *J. Struct. Geol.*, 1992, 14: 405—424.
- 4 安欧, 岩石的应变和断裂与应力的基本关系及其实验证明。地质力学丛刊(1), 北京:地质出版社, 1959, 204—254.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF RHEOLOGICAL BEHAVIOUR OF HIGHLY VISCOUS MODEL MATERIALS

Zeng Zuoxun, Liu Lilin, Huang Dinghua, Xia Qinglin and Huang Xuqiao

(*China University of Geosciences, Wuhan*)

Abstract This paper introduces the principle and method for determining the rheological behaviour of highly viscous materials. Not only can the apparent shear strain rates, and non-newtonian shear strain rates of the materials be determined thereby but also the flow indexes, stress indexes and apparent viscosities. The rheological properties of a polymer model material “M503”, a mixture of half-and-half of XM-50 (a sealing material) and talc powder by weight are subjected to determination. The test results show that the M503 is a pseudoplastic material and that its stress indexes vary from 1.15 to 3.33 and the apparent viscosities range between 4.69×10^7 and $0.99 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ when the non-newtonian shear strain rates are between $7.52 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ and $105.56 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Key words non-newtonian model materials, sandwich rheometer, M503

第一作者简介

曾佐勋, 40岁, 教授, 主要从事地质力学的教学和科研。通讯地址: 武昌喻家山中国地质大学地球科学院。邮政编码: 430074。