

电流变液在平行平板剪切下的动态响应^{*}

田煜^{**}, 孟永钢, 温诗铸

(摩擦学国家重点实验室, 清华大学, 北京 100084)

摘要: 建立了用于测试电流变液在两平行平板间剪切时对外加高压阶跃电场的剪切应力响应的实验测试系统。此系统对剪切应力变化的时间分辨率可以达到 $10 \mu\text{s}$ 量级。利用此系统对基于沸石和硅油的电流变液的极化和退化过程, 电流变液在不同外加电场强度和不同剪切速率条件下的剪切应力上升和撤去电场时剪切应力的下降过程进行了研究。研究发现电流变液的剪切速率越高, 其响应时间越短, 随着外加电场的升高, 响应时间略有增加。此实验结果与其他现有相关研究结果比较吻合。

关键词: 电流变液; 极化; 剪切应力; 响应时间常数

中图分类号: O373 文献标识码: A

1 引言

电流变液作为一种智能流变材料, 其场致剪切应力通常比磁流变液低一个数量级, 但是它以其毫秒量级的快速响应速度而继续受到研究人员的关注^[1-3]。电流变液的这种电控、可逆、快速响应的性质所预示的广阔应用前景激励着广大的科研工作者和工程技术人员投入到电流变液的机理和应用研究中。

关于电流变液的机理, 在对电流变液进行研究以来, 人们提出了极化模型、电导模型和双电层模型等, 这些理论模型对不同的电流变现象的不同方面都有各自合理的解释, 但是都不能完全解释电流变效应中的现象。对电流变液的动态响应过程的研究涉及电流变液的极化时间、颗粒之间相互作用强度、电场作用下的颗粒结构、剪切应力对外电场的响应时间以及电流变液在撤去电场时的恢复过程, 这些过程均在不同方面反映了电流变的作用机理。动态相应性质的研究对电流变器件的设计也具有重要意义。Peel 等人研究过电流变液阀门对阶跃电场的响应^[4], Ginder 进行了静止状态下的颗粒结构变化的分析和观测^[5], Peng 等人分析了同心圆筒间电流变液的流速分布^[6], Tanaka 测试过平行平板间的剪切应力^[7], Wang 进行过电流变响应的仿真^[8], 研究中得出了一些基本规律, 提出了极化 - 结构/力的响应过程。但是目前为止国内没有对电流变动态响应的实验研究报道, 本文构建了对在平行平板间剪切的电流变液的动态响应进行测试的系统, 进行了实验研究并进行了讨论。

2 实验装置

本文构建实验工作台的结构如图 1 所示, 系统由直线运动单元、上下两块极板、电源加载

^{*} 国家自然科学基金资助项目(19834020)

^{**} 通讯联系人, Email: tiany@post.pim.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2001 - 08 - 14; 修回日期: 2001 - 08 - 25。

系统和测试系统组成。直线运动单元由电机、滚珠丝杠和直线导轨组成,运动副之间刚性连接。剪切的上极板固定在基座上,下极板由滚珠导轨支撑,极板间隙 0.4 mm 。直线运动单元带动下极板左右往复运动,从左向右运动时驱动力由预紧件提供,从右向左运动的力由动态力传感器提供(图中 Ampl. 所连接的部件)。动态力传感器型号为 PCB209B02,上升时间 $5\text{ }\mu\text{s}$,响应频率 300 kHz ,其特点是会将施加一个恒定力的输入电压信号衰减为零,衰减时间常数为 10 s 。为电流变液提供阶跃高压电场的电路系统由一个高压直流电源(010 kV 直流电源,最大电流 5 mA)和一个快速开关电路(开关时间小于 $10\text{ }\mu\text{s}$,最高开关电压 1.5 kV)组成,开关控制信号由计算机提供。两个电阻 $10\text{ M}\Omega$ 和 $10\text{ k}\Omega$ 串联后与电流变液并联,取 $10\text{ k}\Omega$ 电阻上的分压得到电流变液的实时外加电压,电流信号通过 $1\text{ k}\Omega$ 与电流变液串联得到。信号采集由计算机采集卡。

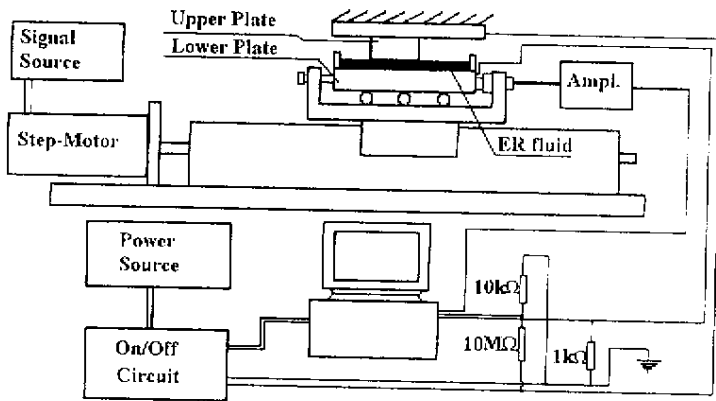


图1 实验系统简图

Fig.1 Sketch of the experimental system

实验中,当下极板由右向左运动时,由动态力传感器推动极板,外加阶跃高压电场,下极板所受力的变化直接传递到力传感器上,采集作用在压力传感器上的力信号、电压电流信号完成对动态过程的实验。

3 实验结果及讨论

3.1 电流变液的极化和退极化过程

电流变液在电场作用下被极化,其在高压直流电场作用下的充电电流如图2所示。可以看到,极化过程有两个过程,一部分很快,在 0.1 ms 左右就完成,而另一个过程慢些,时间常数约为 0.3 ms 。放电过程与之类似。从极化和退极化的整个过程的时间在 0.1 ms 左右,与界面弛豫极化的时间尺度基本吻合。

颗粒极化之后,在各电场强度作用下,通过电流变液体的稳态电流随着电压的升高,电流急剧增加。电流变液表现出很强的非欧姆电导,反映基础油在高电场作用下的非欧姆电导特性。

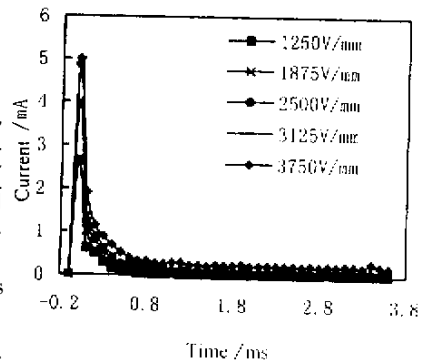


图2 电流变液的极化电流曲线

Fig.2 Curves of the polarization current of ER fluid

3.2 在不同电场作用下的剪切动态响应

在不同电场作用下,电流变液在剪切过程中剪切应力的响应曲线如图3所示。有图表数据点标记曲线的为剪切应力随时间的变化曲线,没有数据点标记的曲线为外加电压随时间的变化曲线。从图中可以看到,电流变液的剪切应力在外加阶跃电场下,随时间的关系基本满足指数上升关系。

$$\tau(t) = \tau_E \left(1 - \exp \frac{t_0 - t}{T} \right) \quad (1)$$

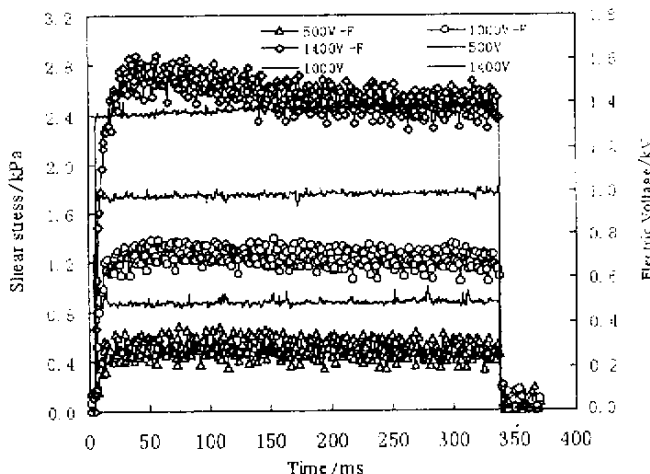


图3 不同电场作用下电流变液体的剪切动态响应

Fig.3 Dynamic response of ER fluid under different electric fields

图中剪切应力上升曲线也表明,电流变液在平板剪切状态下的动态响应时间常数受外加电场强度的影响较小。根据公式(1)处理数据得到响应时间常数发现,在剪切速率 2.6 s^{-1} 时,

时间常数与电场强度的0.28次方成正比,在剪切速率为 5.2 s^{-1} 时,时间常数与电场强度的0.24次方成正比。

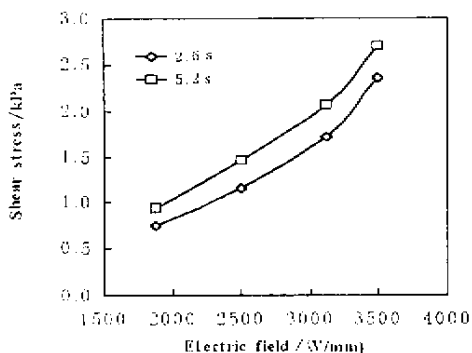


图4 电流变液的场致剪切应力

Fig.4 Field induced shear stress of ER fluid

从曲线中获取电流变液在不同电场强度和剪切速率下的稳态场致剪切应力如图4所示。这个场致剪切应力,与通常用宾汉模型对剪切应力/剪切速率曲线进行回归,得到零剪切速率的剪切应力与剪切屈服应力所指的概念一致。根据实验结果,剪切屈服应力与电场强度的1.6次方左右成正比,与一些学者的研究中预测的1.41.6次方比较接近^[9]。另外在 5.2 s^{-1} 的剪切速率下,剪切应力比 2.6 s^{-1} 略高,可能是由平板剪切中颗粒向极

板中间集聚引起。

3.3 在不同剪切速率下的剪切动态响应

根据前面的对电流变液的剪切应力动态响应公式和测试曲线得到在不同电压和不同剪切

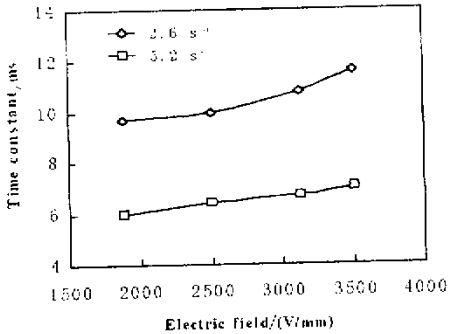


图5 不同剪切速率下电流变液体的响应时间曲线
Fig.5 Response time constant of ER fluid under different shear rates and different electric fields

速率下的响应时间常数如图5中所示。本文的平行平板剪切做了剪切速率分别为2.6和5.2 s⁻¹的电流变液的动态响应实验。实验结果表明剪切速率越高,剪切应力上升越快。根据电流变液中颗粒间相互作用,在外加电场作用下,固体颗粒被极化,在极板的带动下,固体颗粒排列与外加电场的方向形成一定的角度,被极化颗粒之间产生的局部电场使颗粒之间产生相互作用,在垂直于外加电场方向上的力分量就表现为沿剪切方向上的剪切应力(剪切方向与外加电场方向垂直)。当剪切应变达到屈服应变值,剪切应力达到最大值,颗粒之间的横向作用达到最强,剪切中颗粒就会形成一个相对平衡的链结构的破坏和形成过程。当剪切速率越高,达到这种平衡过程也越快,从而电

流变液的剪切应力随着剪切速率的增高其升高也越快。实验结果与这种基本物理模型吻合较好。

系统测试的电流变液的剪切应力的下降从图3可以看到,实验结果表明场致剪切应力都在2 ms内从一个高的剪切应力值一下就下降到近似于零。可以看到电流变响应的下降时间常数的总的时间远小于其上升响应时间。

3.4 本实验结果与其他结果的对比

从本实验研究的内容来看,本文自行配制的基于沸石和硅油的电流变液的极化和退极化过程的时间常数约为0.3 ms,及电流变液在1 ms内可以被外电场极化以及退极化完成。对平行平板间剪切的电流变液的剪切应力对外加电场的响应时间研究表明,剪切速率越高,电流变液的响应时间越快,而且随着电场的增加,响应时间常数与电场强度的0.20.3次方成正比。这个研究结果还表明,电流变液中确实存在类似屈服应变的参量,当电流变液的剪切应变达到它时,电流变液的剪切应力就达到稳态值。另外当外加电场撤去时,电流变液的回复过程远快于上升时间,在2 ms内电流变液回复其零电场流体性质。

在剪切速率5.2 s⁻¹时的响应时间常数约为6 ms,与我们进行的同心圆筒间剪切的电流变液的剪切应力对外加电场的响应时间7 ms(剪切速率7 s⁻¹)比较接近,说明两种剪切方式之间差别不大。另外本文得到的实验规律与在类似对电流变液的动态响应的实验研究中得到的实验结果规律基本吻合^[7]。

4 结论

从本文的对电流变液的动态测试结果分析,这种基于沸石和硅油的电流变液具有明显的电流变效应,电流变液在小于毫秒的时间量级上被外电场极化,剪切应力随时间呈指数上升。实验结果表明电压对电流变液的响应时间影响不大,而剪切速率对剪切应力上升时间影响比较大,随着剪切速率的增加,电流变液的响应时间减小。电场撤去时,电流变液在2 ms内回复零电场流体状态,远快于上升响应时间。这说明电流变液对外表现出来的场致剪切应力与电流变颗粒的相互结构关系密切。

参 考 文 献

- [1] Weiss K D , Carlson J D , Coulter J P. *J. Intelligent Material Systems and Structures* ,1993 , **4** : 13
- [2] Gulley G L , Tao R. *Phys. Rev. E* , 1997 , **56** : 4328
- [3] Coulter J P , Keith D Weiss , David Carlson J. *J. Intelligent Material Systems and Structures* , 1993 , **4** : 248
- [4] Peel D J , Bullough W A. *J. Intelligent Material Systems and Structures* , 1993 , **4** : 54
- [5] Ginder J M , Ceccio S L. *J. Rheol.* , 1995 , **39** : 211
- [6] Peng J , Zhu K , Xi B. *Chin. Phys. Lett.* , 2000 , **17** : 298
- [7] Tanaka K , Sahashi A , Akiyama R , Koyama K. *Phys. Rev. E* , 1995 , **52** : 3325
- [8] Wang Z , Lin Z , Fang H. *J. Appl. Phys.* , 1998 , **83** : 1125
- [9] Wu C W , Conrad H. *Phys. Rev. E* , 1997 , **56** : 5789

Research on the Response of ER Fluids Sheared between Two Parallel Plates^{*}

Tian Yu^{**} , Meng Yonggang , Wen Shizhu

(State Key Laboratory of Tribology , Tsinghua University , Beijing 100084)

Abstract A system testing the shear stress response of ER fluid sheared between two parallel plates to stepwise electric field was constructed. The system has a quick response in 10 μ s scale. Experiments on the polarization and de - polarization process of ER fluids based on zeolite and silicone oil have been done. Also the rising and decaying process of shear stress were investigated. A higher shear rate induced a quicker response of ER fluid to external electric field. The increase of electric field will increase the response time slightly. The decaying process is found to be finished in 2ms , much quicker than the rising process. Further , the experimental results were compared with the existed theories and experimental results.

Key words ER fluids , Polarization , Shear stress , Response time constant

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(19834020).

** To whom correspondence should be addressed , Email : tiany@post.pim.tsinghua.edu.cn