

微晶纤维素电流变液在挤压流中的粘弹性*

刘立伟^{1,2)} 王作维¹⁾ 周鲁卫¹⁾ 王治金²⁾ 高广君²⁾ 刘晓军²⁾

¹⁾ 复旦大学物理系, 上海 200433)

²⁾ 齐齐哈尔大学物理系, 齐齐哈尔 161006)

(1999 年 12 月 14 日收到 2000 年 4 月 2 日收到修改稿)

测量了微晶纤维素/蓖麻油悬浮体构成的电流变液在挤压流中的动态粘弹性. 给出了平行于电场方向的储能模量 G' 和损耗模量 G'' 对电场和应变幅度的依赖关系. 实验显示, 当电场超过临界电场后, 随着应变幅度增加, 电流变液的粘弹性从线性变到非线性, 电流变液出现了应变导致的“类固体”和流体之间的转变过程. 还研究了应变幅度和振荡频率对电流变液粘弹性非线性的影响.

关键词: 电流变液, 挤压流, 粘弹性

PACC: 8350, 8380, 6230

1 引 言

电流变液在施加的外电场超过临界值时, 它的结构和表观粘度出现急剧的变化. 在结构方面, 粒子首先形成“链”, 然后聚集成“柱”^[1]. 在表观粘度方面, 当电场达到 1 kV/mm 以上时电流变液在剪切下的表观粘度能出现提高一个数量级的变化^[2], 剪切力的增加甚至可以达到 10 kPa 以上^[3]. 电流变液可以实现由电来控制力的传递, 这一性质具有一系列的潜在应用. 过去, 人们的研究工作大多集中在剪切流方面, 但是近年来, 电流变液在挤压流模式下的应用也引起很多关注^[4-6]. 在挤压流中, 电流变液受到拉伸或压缩的力, 它能应用在工程机座和一些有限幅度振动的设备中. 理论和实验表明, 在这种模式下电流变液所提供的屈服力比剪切流高出一个量级^[7]. 研究挤压流中电流变液材料的固有性质和它的微观机制对于应用具有重要的意义. Sproston 等^[7]采用模型描述了挤压流中力的增加, 并解释来自粘性流动和屈服现象的压力梯度. 文献[8]用计算机模拟研究了电流变液在剪切、压缩和拉伸时的力学性质. 结果显示, 在压缩载荷下, 厚的体心四方 (BCT) 结构传递力的性能最好. 我们用自己搭建的实验设备测量了电流变液在挤压模式下的粘弹性. 电流变液在平行于电场方向上粘弹性的复模量

$G(i\omega)$ 定义为

$$G(i\omega) = G'(\omega) + i G''(\omega), \quad (1)$$

式中, $G'(\omega)$ 是储能模量, 与材料的弹性有关, $G''(\omega)$ 是损耗模量, 与材料在应力循环中能量损耗有关. 根据线性粘弹性理论^[9],

$$G(i\omega) = \sigma(\omega) / \gamma(\omega), \quad (2)$$

式中 $\sigma(\omega)$ 和 $\gamma(\omega)$ 分别是垂直方向上的应力 $\sigma(t)$ 和应变 $\gamma(t)$ 的傅里叶变换式. 显然 $G(i\omega)$ 仅依赖频率而不依赖于应力幅度、应变幅度, 它是表征材料在稳定振动中动态力学性质的材料函数.

2 实 验

实验所用的样品是将干燥后的微晶纤维素粉末浸在蓖麻油中, 配成体积分数为 25% 的悬浮液. 粉末的颗粒大小为微米量级. 电流变液样品放在两个直径为 60 mm 的同心圆形电极之间, 两电极间隙为 3 mm (见图 1). 带有压电力传感器的上电极固定不动; 下电极粘附在一个内径为 80 mm 的凹形圆柱腔里. 另一个相同的压电力传感器紧密地连接凹形圆柱腔和下面的电磁激振器. 电磁激振器能够提供频率从 5 Hz 到 5 kHz, 最大振幅为 5 mm 的正弦振动. 在实验中, 位移传感器用来测量下电极的振幅. SR785 双通道动态信号分析器能执行快速傅里叶变换 (FFT) 和正弦扫描 (Sweep-Sine) 等振动测量,

* 国家自然科学基金(批准号: 19834020 和 19774019)资助的课题.

同时提供一个正弦的源信号,经功率放大后控制电磁激振器.在我们的实验中,扫描器既可以测量激振力,又方便地转换成测量响应力.为保证系统工作在线性区内,将振动控制在非常小的范围内.

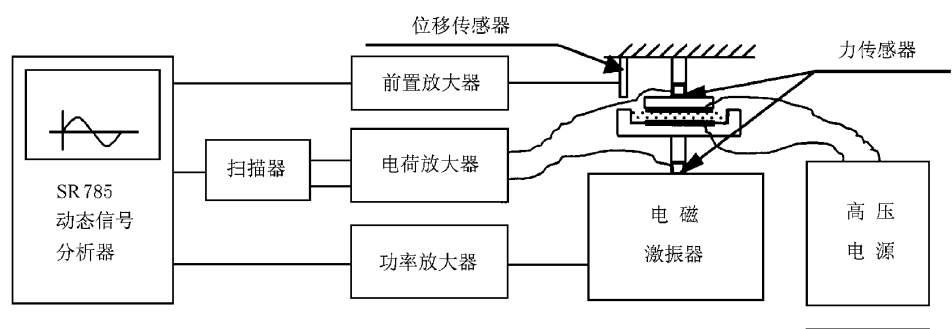


图 1 实验装置 (阴影部分为电流变液样品)

3 结果和讨论

图 2 给出电场为 0.67 kV/mm、振荡频率为 12 Hz,应力和应变随时间的变化关系.应力和应变均按照正弦方式变化,而且,应力和应变之间有一个位相差,它们到达峰值的时间是不同的.对于理想的粘性流体,是不存在弹性的;而对于理想的弹性材料,应力和应变之间变化关系是同相位的.

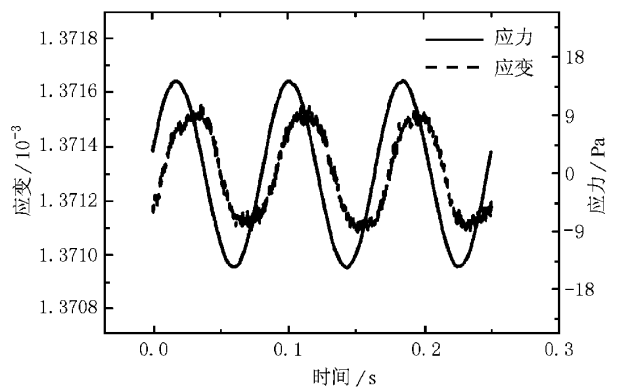


图 2 在时间域内的平行于电场方向的应力和应变

图 3 显示振荡频率在 12 Hz 时 G' 和 G'' 作为应变和电场强度的函数关系.当场强较大,曲线在应变小于 10^{-4} 时比较平坦,即 G' 不随应变变化,对应于粘弹性的线性区.这个结果强调了足够小的应变对于保证线性响应的重要性. G' 出现屈服时应变范围比较接近剪切流的情况^[9].在线性区域 G' 随电场增加而明显地增大.根据导致电流变响应的极化机制,电流变液的粘弹性对电场的依赖关系可以通过粒子间的相互作用来解释.这些相互作用包括静电力、流体力和短程排斥力等.外电场引起的静电相互

作用导致颗粒聚集成连接两极的柱状结构.弹性来自这些结构中粒子间的相互作用,随着电场强度的增加,颗粒形成更紧密的结构且颗粒间静电相互作用增大,相应的 G' 随电场而增大.当应变增加时,流体力的作用占主导, G' 迅速衰减,最后曲线聚集到趋近于零.同时,损耗项 G'' 略有增长并经历了一个

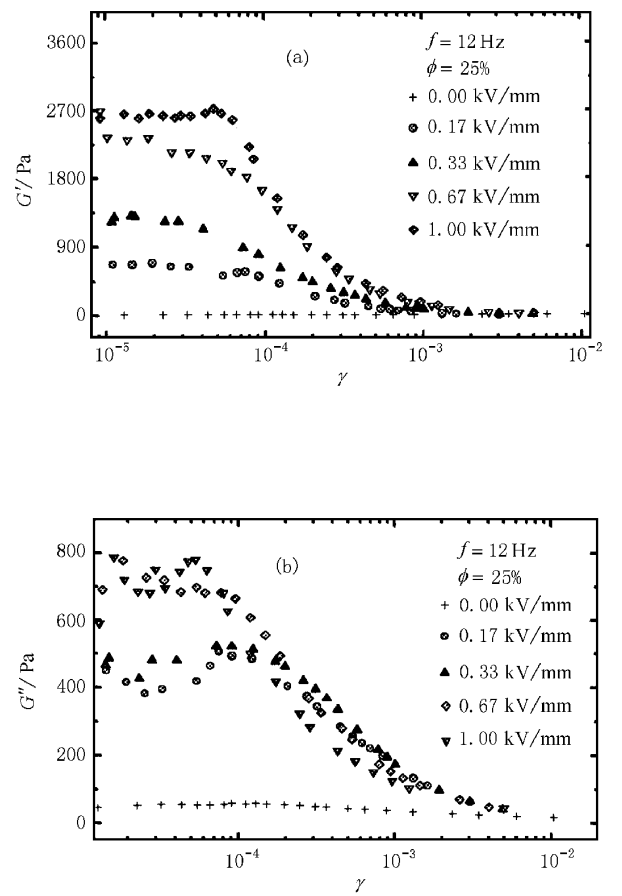


图 3 储能模量 G' 和损耗模量 G'' 与应变和电场之间的关系

极大值也迅速减小. 电流变液经历了一个由应变导致的由类固体向流体转变的弛豫过程. G' 随电场和应变的变化呈现出复杂的变化关系. 在线性区, 损耗项 G'' 随电场的增大而增加. 可以认为应变小时, 电场增加导致的更紧密的结构, 颗粒间的内磨擦也在增加. 在非线性区内, 电场从 0.17 kV/mm 改变为 0.33 kV/mm 时, G'' 仍然随电场增加. 但电场在 0.67 kV/mm 和 1.00 kV/mm 时, G'' 的值有时降得比 0.17 kV/mm 时的值还低. 可能是电流变液屈服后出现流动, 在较大电场下, 电流变液沿电场方向更规则的结构致使提供损耗的流阻降低. 于是 G'' 的增长出现反转.

图 4 是在应变为 2×10^{-5} 时 G' 与电场的变化关系曲线. 可以看出 G' 在电场较小时近似线性增长, 在电场强度达到 1.00 kV/mm 时增长出现减慢的趋势.

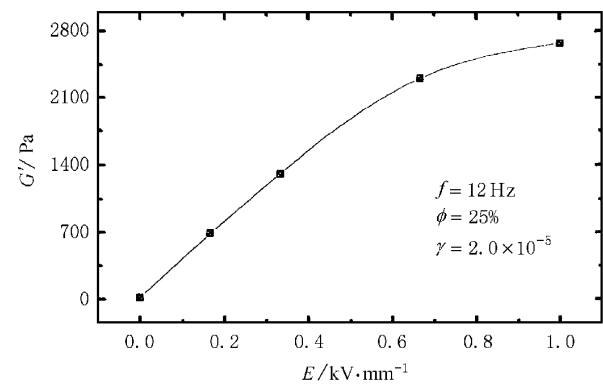


图 4 在较小应变情况下储能模量 G' 与电场强度的关系

图 5 给出电场在 0.67 kV/mm 、振荡频率 12 Hz 时的 G' 和 G'' 与应变之间的关系. 在应变小于 10^{-4} 时, G' 的数值大约是 G'' 的 4 倍. 在应变超过 10^{-4} 后, G' 的主导地位逐渐减弱. 损耗项的增加可能是

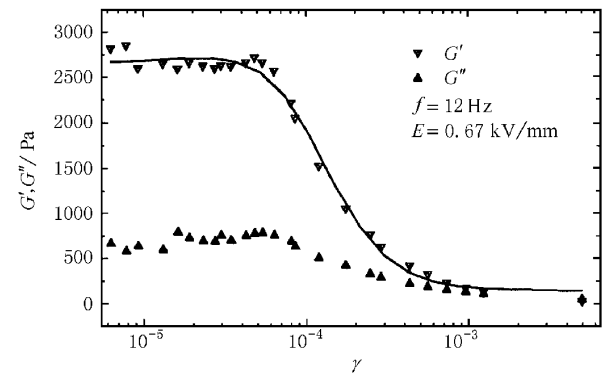


图 5 储能模量 G' 和损耗模量 G'' 与应变幅度之间的关系

由于幅度稍大时结构重组, 或者由于应变增加造成电流变液局部流动. 图中给出电场为 0.67 kV/mm 、频率为 12 Hz 时 G' 随应变衰减的 Lorentz 拟合曲线. 将曲线开始衰减处对应的应变称为临界应变, 这个量与电流变液结构稳定有关. 在该处, 电流变液出现屈服且结构开始不稳定, 然后经过一段弛豫又达到另一个稳定状态. 由图 3(a) 能够看出, 在我们实验范围内临界应变出现后, 它的值随电场增加而近似增大. 这说明电场大时电流变液的结构更类似固态, 而且在一定的应变范围内都比较稳定. 而电场小时, 类似固态的程度降低, 而且应变增大时结构容易“熔化”.

动态模量的傅里叶变换能够提供确定非线性范围的方法, 也能够提供确定粘弹性随不同参数从线性到非线性的方法. 当谐波量相对基频量变大时, 非线性响应增加. 图 6 给出在电场强度在 0.33 kV/mm

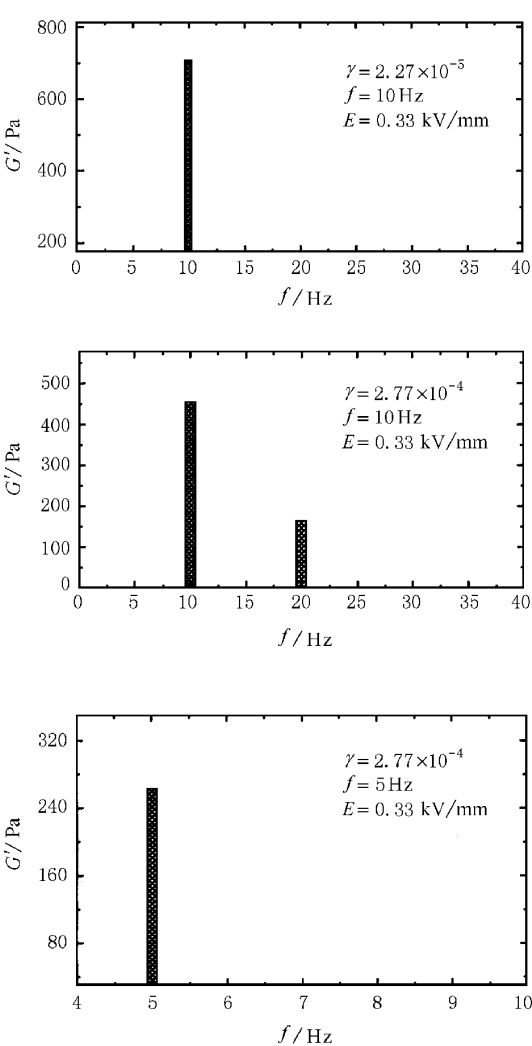


图 6 应变幅度和振荡频率对储能模量 G' 的影响

mm 的情况下, G' 随应变幅度和振荡频率变化的傅里叶变换. 当振荡频率固定为 10 Hz 时, 应变幅度从 2.27×10^{-5} 增加到 2.77×10^{-4} (超过临界应变的值), G' 的傅里叶变换的高次谐波成份增加, 反映粘弹性从线性到非线性的变化过程. 当应变 2.77×10^{-4} 不变而振荡频率减小时, 谐波成分减少. 这与剪切流情况下的 G' 与剪切频率依赖关系不一致^[10]. 实验结果说明临界应变也是周期性振荡频率的函数.

4 结 论

本文给出了电流变液在挤压流中的粘弹性的实验结果. 检查了电场和应变幅度对粘弹性的影响. 实验结果显示在挤压流储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随电场强度增加而增大. 随应变幅度增大而分别减小. 从粘弹性的非线性变化可以看出电流变液经历从类固体到流体转变的弛豫过程. 同时, 实验给出了应变幅度和振荡频率增大粘弹性的非线性成分增加的结果.

感谢北京理工大学张少华博士提供了实验样品.

- [1] T. J. Chen, R. N. Zitter, R. Tao, *Phys. Rev. Lett.*, **68** (1992), 2555.
- [2] M. Parthasarathy, D. J. Klingenberg, *Mat. Sci. Eng. R.*, **17** (1996), 57.
- [3] Y. L. Zhang, Y. Ma, Y. C. Lan *et al.*, *App. Phys. Lett.*, **73** (1998), 1326.
- [4] R. Stanway, J. L. Sproston, M. J. Prendergast *et al.*, *J. Electrostatics.*, **32** (1992), 253.
- [5] G. J. Monkman, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **28** (1995), 588.
- [6] E. W. Williams, S. G. Rigby, J. L. Sproston *et al.*, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **47** (1993), 221.
- [7] J. L. Sproston, S. G. Rigby, E. W. Williams *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **27** (1994), 338.
- [8] A. Lukarinen, K. Kaski, *J. Appl. Phys.*, **83** (1998), 1717.
- [9] R. M. Christensen, *Theory of Viscoelasticity* (Academic Press, New York, 1982), Ch. 1.
- [10] M. Parthasarathy, D. J. Klingenberg, *Rheol. Acta.*, **34** (1995), 430.

SQUEEZE FLOW VISCOELASTICITY OF ELECTORRHEOLOGICAL
FLUIDS BASED ON MICROCRYSTALLINE CELLULOSE *

LIU LI-WEI^{1,2)} WANG ZUO-WEI¹⁾ ZHOU LU-WEI¹⁾ WANG ZHI-JIN²⁾ GAO GUANG-JUN²⁾ LIU XIAO-JUN²⁾

¹⁾ (*Department of Physics , Fudan University , Shanghai 200433 , China*)

²⁾ (*Department of Physics , Qiqihar University , Qiqihar 161006 , China*)

(Received 14 December 1999 ; revised manuscript received 2 April 2000)

ABSTRACT

Dynamic viscoelasticity of electrorheological fluids based on microcrystalline cellulose/castor oil suspensions was experimentally investigated in squeeze flow. The dependence of storage modulus G' and loss modulus G'' parallel to external electric field on electric fields and strain amplitudes is presented. The experiments show that , when external electric field is higher than the critical field , the viscoelasticity of the ER fluids converts from linear to nonlinear , and the ER fluids transfer from solid-like state to fluid state with the growth of strain amplitude. The influences of strain amplitude and oscillatory frequency on the nonlinearity of viscoelasticity were also studied.

Keywords : electrorheological fluids , squeeze flow , viscoelasticity

PACC : 8350 , 8380 , 6230

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19834020 and 19774019).