

# 电流变液的平板剪切实验

项旭堃 08300190024

## 摘要:

In the plate-shearing experiment about the yield stress fluid, the fluidization of the YSF could be observed after a long time, during which the YSF exhibit shear banding before finally reaches a steady state.

**关键词:** 电流变液 流化 平板剪切 剪切应力

## 引言

电流变液(Electrorheological Fluids) 简称 EF, 发展历史已经有近 50 年了。电流变液也被称为智能材料, 是由于它具有受控变化的品质, 其屈服应力、弹性模量能够通过控制外加电场来进行调节。早期的 EF 性能较差, 上世纪八十年代末 EF 材料的研究得到突破, 使它有可能逐渐获得广泛的应用。

本实验通过观察平板剪切实验观测电流变液的基本现象, 研究平板剪切状态下样品长时间的流化过程及其现象。

## 理论原理

### 1. 电流变液

电流变液颗粒是介电小颗粒和油液的混和体。在外加电场超过临界电场时, 在毫秒的响应时间内能够实现液相到固相的转变, 并且这种变化是可逆的。

电场为零时, 颗粒在油液中随机分布 (a); 随着电场强度的逐渐增加, 电流变液中的固体微粒的极化强度逐渐增强; 不处于剪切状态下或处于微弱剪切状况下的电流变液, 在电场的作用下, 固体颗粒极化后可以排成“链”(b), 进一步加大电场又会使链之间的相互作用加强, 而使“链”聚集成“柱”(c)。

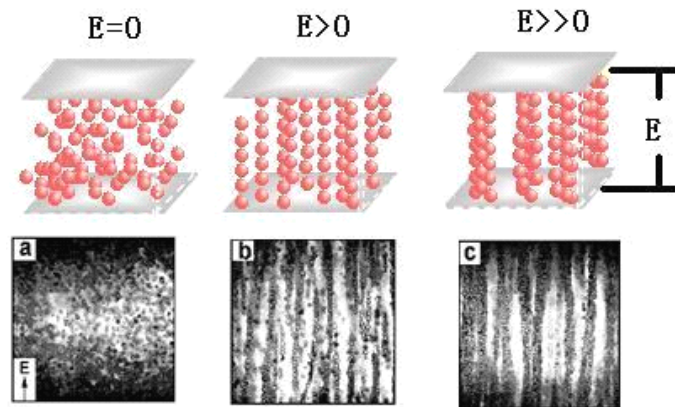


图 1. 电流变液的结构<sup>[1]</sup>

电流变液中的颗粒在外电场作用下被极化为强电偶极子后, 会相互作用, 形成一定的微观结构, 对外加剪切变形等产生阻力。研究形成微观结构过程及微观结构本身对理解电流变效应机理及实现对电流变液稳态和动态力学性能的准确描述, 从而对相关应用进行指导具有重要意义。

### 2. 颗粒在基础液中受到的作用力

电流变液中的介电颗粒在基础液中的运动主要由电场力、粘性力、热运动力、体积力等决定。

**电场力:** 颗粒间的静电力主要受外电场强度, 颗粒和基础液的介电常数、电导、颗粒尺度等因素影响, 可根据各种极化模型进行计算。

**粘性力:** 颗粒在基础液中运动时, 受到的粘性阻力主要受基础液粘度、颗粒尺度、温度等因素影响。

热运动力：基础液分子的布朗运动会影响颗粒的运动，主要受基础液粘度和温度的影响。

体积力：颗粒受到的体积力包括重力、浮力、离心力、惯性力等，和颗粒的质量、尺度，在基础液中的运动状态密切相关。对于体积力的研究还很少，往往被忽略。比如在零电场时，颗粒受到的重力会导致沉淀。但是加上电场后，由于体积力相对电场力要小的多往往就被忽略了。

颗粒在电场力、粘性力、热运动力等作用下形成颗粒链结构。可以认为颗粒链结构由各个力的比值决定。

### 3. 电流变液的剪切力学特性

利用双粘度模型中，我们可以讲剪切应力表示为

$$\begin{cases} \tau = \eta_r \dot{\gamma} & (|\tau| < \tau_1) \\ \tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} & (|\tau| \geq \tau_1) \end{cases}$$

其中  $\tau_1$  是剪切屈服应力，可以表示为电场强度  $E$  的函数  $\tau_1(E) = kE^\alpha$ ， $k$  和  $\alpha$  是取决于电流变液性质的两个参数。零电场时屈服应力为零，电流变液呈牛顿流体特性；施加电场后，在剪切力大于  $\tau_1$  的流场空间，流体以粘度  $\eta$  流动；而在剪切力小于  $\tau_1$  的流场空间，则以粘度  $\eta_r$  做非常缓慢的流动。

## 实验装置及实验样品

### 1. 实验装置

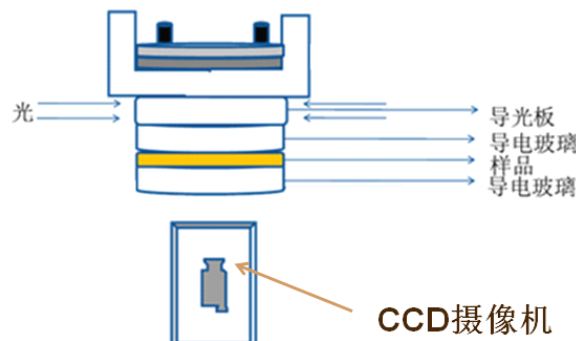


图 2. 实验装置简图<sup>[2]</sup>

上下两 ITO 导电玻璃板之间夹 1mm 厚的样品，上平板进行转动，下平板保持静止，由此产生剪切场。从底部用 CCD 摄像机对整个样品的变化情况进行观测。

实验中发现 ITO 玻璃的使用寿命相对比较有限，因此在实验之前必须先测量 ITO 玻璃的导电状态，确认 ITO 玻璃本身以及与极板之间的导通，以避免不必要的浪费时间；实验后也需要检查 ITO 玻璃及其与极板之间的导电性，以确保实验的可靠性。

### 2. 实验样品

电流变液材料一般由介电颗粒和基础液混合而成，本实验所用的介电颗粒为 1,4 丁内酯包裹的  $\text{TiO}_2$  粉末，基础液为纯硅油。本实验使用的样品为 1.5g 介电颗粒粉末与 1.6ml 纯硅油的混合样品。

实验过程中，原有的 3g/1.6ml 的样品浓度配方下，可以看到明显的环状剪切带结构，但是由于缺乏明显可代表环运动的特征点，无法准确读出圆环的精确转速，推测原因是介电颗粒浓度过高，影响了实验图像的衬比度。因此，将介电颗粒的浓度减半，改为 1.5g 颗粒配 1.6ml 硅油，改进效果较为明显。

## 实验结果与讨论

### 电流变液样品的流化情况

取实验条件为 1.5kV/mm, 300rpm, 观察时间为 3600s。得到如图 3 所示的整个平板的剪切应力变化曲线, 以及特定时间点沿半径的样品速度分布。

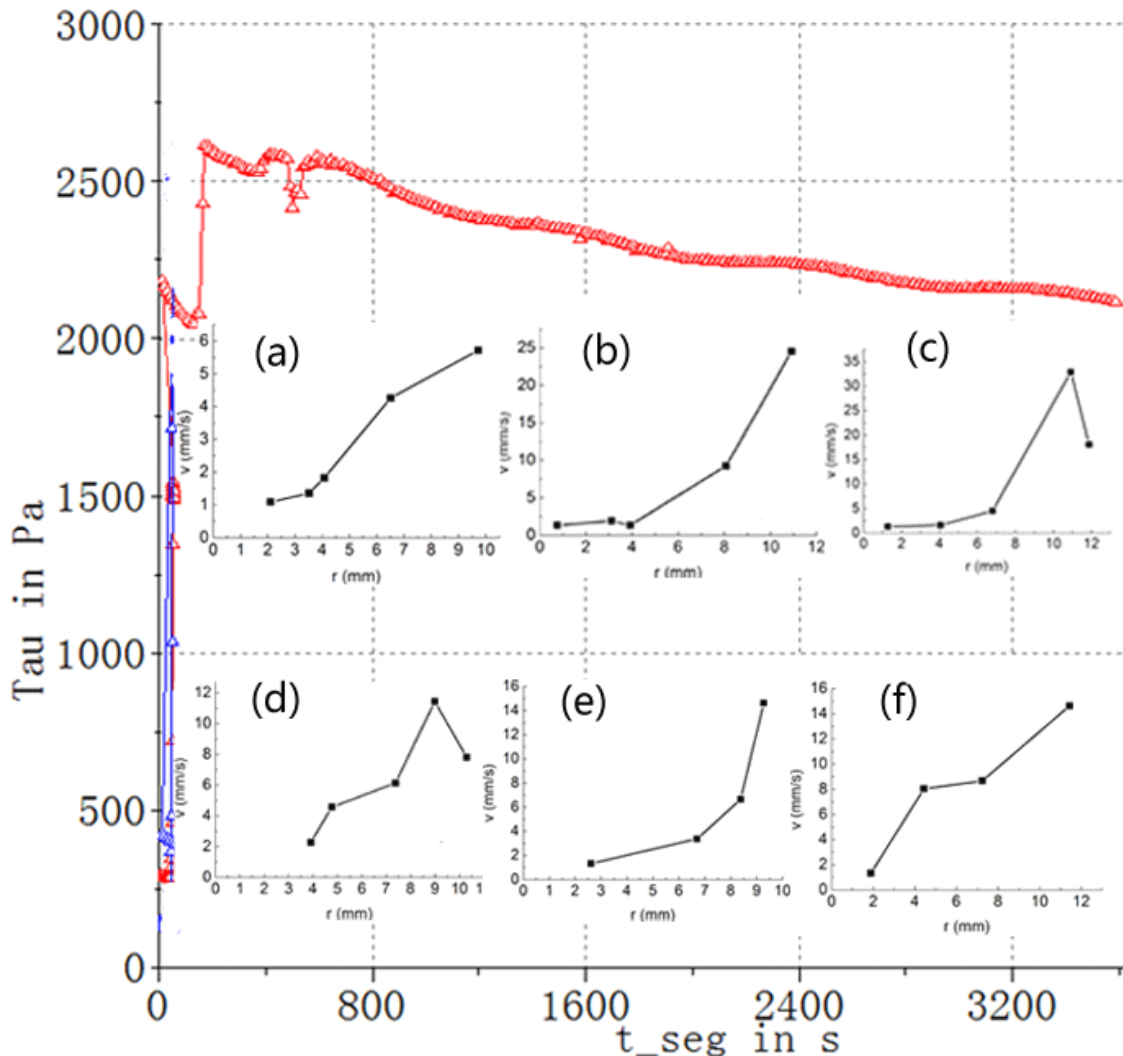


图 3. 剪切应力随时间变化曲线

其中小图对应的是特定时间的速度分布: [(a),300s];[(b),600s];[(c),900s];[(d),1200s];[(e),1440s];[(f),2100s];

从实验所得的图像中, 可以比较明显的看出在(a)300s 时, 剪切带隐约可见, 但还不很明显; (b)(c)(d)(e)所代表的从 600s 到 1500s 的实验过程中, 剪切带都非常明显, 而到了(f)2100s 之后, 观测到样品速度与所处的半径基本保持线性关系不变, 表明剪切带消失, 样品趋于稳定状态, 完成流化过程。

从上图 3 中可知, 整个实验过程中, 圆盘的整体剪切应力是一个逐渐变小的过程, 最后剪切带消失, 剪切应力趋于一个最小值。

关于剪切应力最后的最小值不为零, 由于测量剪切应力的原理是通过测量维持转子特定转速所消耗的功率来求得的, 而实验软件本身无法设置剪切应力的零点, 因此推测剪切应力最小值不为零可能是由于转子本身的转动惯量所致, 需要进一步的实验加以验证。

## 结论

使用 1.5g 介电颗粒粉末/1.6ml 硅油的样品，实验条件为  $E=2\text{kV/mm}$ , 300rpm。实验过程中可以看到明显的环状剪切带；加上电场后约 5 分钟出现明显的环状剪切带结构；约 30 分钟左右，剪切带结构基本消失；此后样品各处的线速度与半径基本接近线性关系，样品出现流化。

电流变液剪切带的相关实验此前没有人做过，更没有人做过剪切带长时间的演变及其和剪切应力的关系，尚无可靠理论进行解释，具体机理也还不清楚。

本实验提供了这方面的初步结果，后续仍需要通过进一步的理论和实验研究来理解其机制。

## 致谢

感谢周鲁卫老师对于整个实验的悉心指导。

感谢郑杰学长在实验全过程中提供的支持和帮助。

## 参考文献

[1]. X. Tang, W. H. Li, X. J. Wang, P. Q. Zhang, Intern. J. Mod. Phys. B. 13, 1806 (1999)

[2]. 极化分子电流变液动态层状结构和剪切应力关系的研究. 刘大康. 复旦大学硕士学位论文.