

# 电流变液体性能的试验研究\*

陈淑梅

(福州大学机械工程系 福州 350002)

魏宸官

(北京理工大学)

摘要: 以 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 合成粒子为分散颗粒, 通过试验研究分析颗粒的体积分数、不同的分散介质和添加剂对基于 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 合成粒子的电流变液体性能的影响。试验结果表明: 蓖麻油作为分散介质与 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 粒子组成的电流变液体其电流变性能良好。通过回归分析得出基于 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 合成材料为粒子的电流变液体在上述条件下的屈服切应力与电场强度的关系表达式。研究结果将为同类电流变液体的工程应用提供理论依据。

关键词: SrTiO<sub>3</sub>/PANI 合成粒子 分散介质 电流变液体特性

中图分类号: TB381 TB383 O373

## 0 前言

电流变液体在电场作用下, 流体性能将发生可控的变化现象, 称为“电流变效应”。基于“电流变效应”这一特性所设计和研制出来的电流变元件(如: 控制阀和阻尼器等)具有响应速度快、结构简单和能耗低等一系列优点, 在工业上具有广泛的应用前景。从而引起了理论界和工程界学者们的关注。“电流变效应”的主要评价参数是流体的表观粘度和屈服切应力, 然而不同电流变液体材料的“电流变效应”强依赖于电流变液体材料本身的特性, 因此对“电流变效应”的研究必须通过大量的试验从中得出性能的比较。复合粒子作为电流变液分散相, 对电流变液体性能起着关键的作用, 因此关于复合粒子组合及复合粒子与“电流变效应”的关系研究近年来成为电流变材料性能研究的一个热点。

## 1 理论基础

对于两/三相悬浮液的电流变液体主要由如下 3 个部分组成。

(1) 固体粒子: 在电流变液体中固体颗粒起分散作用, 它是电流变液体产生电流变效应的核心。

(2) 基础液: 即分散介质, 其作用是将固体颗粒均匀地分散在其中, 这种分散作用能保证在零电场作用时, 使电流变液体仍然保持有牛顿流体的特性, 而在有电场作用时, 使粒子在其中形成链化的结构, 产生屈服切应力, 并使电流变液体呈现粘弹

(Bingham)特性。

(3) 添加剂: 添加剂是为了改善电流变液体的性能。

描述电流变液体流变效应的本构方程一般采用 Bingham 流体的本构方程表示<sup>[1]</sup>

$$\tau = \tau_s + \eta_0 \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中  $\tau$  —— 电场作用下电流变液体的切应力

$\eta_0$  —— 在零电场时, 电流变液体的表观粘度  
(mPa · s)

$\dot{\gamma}$  —— 液体流动时的切应变速率(s<sup>-1</sup>)

$\tau_s$  —— 屈服切应力, 本文称为静态屈服切应力  
(Pa)

$$\tau_s = kE^\alpha \quad (2)$$

式中  $k, \alpha$  —— 与电流变液体材料有关的参数

$E$  —— 电场强度(MV/m)

从式(1)可以看出在电场作用下电流变液体的切应力由两部分组成, 即静态屈服切应力  $\tau_s$  和粘性切应力<sup>[2]</sup>  $\tau_v = \eta_0 \dot{\gamma}$ 。如图 1 所示, 在屈服点处将曲线向  $y$  轴延伸并与  $y$  轴的交点到  $y$  轴  $O$  点的距离为静态屈服切应力  $\tau_s$  (下文简称屈服切应力)。屈服点以上的曲线值为电流变液体的粘性切应力

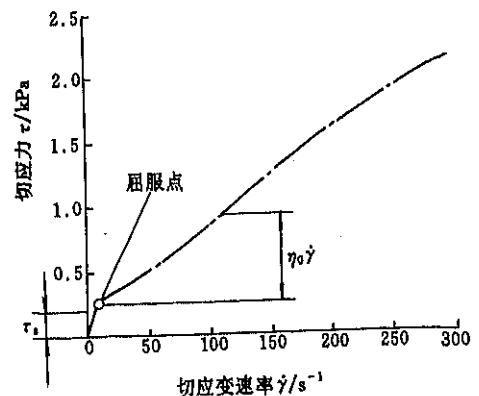


图 1 电流变液体在电场作用下的切应力随切应变速率的变化趋势

\* 国家自然科学基金资助项目(59872005)。20011203 收到初稿, 20020320 收到修改稿

$\tau_v = \eta_0 \dot{\gamma}$ , 一般情况下静态屈服切应力  $\tau_s$  值越高, 表明电流变液体的抗剪强度越好, 这是评价电流变液体力学性能的重要参数。

因此可以通过试验得出各种材料在不同电场强度下的屈服切应力  $\tau_s$ , 并且通过回归分析得出各种不同材料的式(2)中的  $k$  和  $\alpha$  值, 从而可以从式(2)中估计出各种不同材料的屈服切应力  $\tau_s$ 。

## 2 材料与试验方法

### 2.1 试验材料

(1) 粒子材料: SrTiO<sub>3</sub>/PANI 合成粒子。

(2) 分散介质: 0.3 Pa·s 硅油、0.1 Pa·s 硅油、0.05 Pa·s 硅油、25 号变压器油、蓖麻油、液体石蜡和氯化石蜡。

(3) 添加剂: Span80、MOA3、 $\sigma\pi$ -10、KH550。

### 2.2 试验设备

试验设备采用 HAAKE(德国)电流变仪, 选择固定转子外径 14 mm; 旋转圆筒内径 15 mm, 其中间隙为 0.5 mm。电场施加在固定的转子和旋转的圆筒之间, 方向与液体的剪切流动方向垂直。

### 2.3 试验方案

(1) 将 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 合成粒子(其粒子粒径为 190 目), 与 0.1 Pa·s 硅油制成电流变液体, 根据粒子的在其中所含的浓度不同, 分别配制成浓度为 10%、15%、20%、25%、30% 的电流变液体, 该方案的试验研究目的是研究 5 种不同的 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 合成粒子体积分数(浓度)对其电流变性能, 即屈服切应力的影响, 详见表 1 所示。

(2) 将浓度为 20% 的 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 粒子(其粒子粒径为 190 目), 分别与上述 6 种分散介质组成 6 种电流变液体, 其试验研究目的是研究上述 6 种分散介质对电流变性能, 即屈服切应力的影响, 详见表 2 所示。

(3) 将 20% SrTiO<sub>3</sub>/PANI 合成粒子与 0.1 Pa·s 硅油组成的电流变液体, 并在其中添加 1% 的不同添加剂, 其目的是研究不同添加剂对电流变液体流变性能, 即屈服切应力的影响, 详见表 3 所示。

(4) 将表 1、表 2、和表 3 中的各类电流变液体分别在改变电场强度  $E$  (1~4 MV/m) 的条件下进行试验, 其目的是为了得出式(2)中的系数  $k$  与  $\alpha$  值。

表 1 不同体积分数(浓度)SrTiO<sub>3</sub>/PANI 合成粒子的电流变液体

电流变液体		粘性切应力 $\tau_s$ 的估计公式	$\tau_s$ 的估计公式中的参数		
分散介质	SrTiO <sub>3</sub> /PANI 粒子的体积分数 $\phi$ /%		$K$	$\alpha$	置信系数
0.1 Pa·s 硅油	10	$\tau_s = 2.338E^{1.302}$	2.338	1.302	0.985
	15	$\tau_s = 2.077E^{1.972}$	2.077	1.972	0.997
	20	$\tau_s = 12.020E^{0.996}$	12.020	0.996	0.961
	25	$\tau_s = 45.700E^{0.787}$	45.700	0.787	0.967
	30	$\tau_s = 177.830E^{0.666}$	177.830	0.666	0.978

表 2 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 合成粒子分别与不同分散介质组成的电流变液体

电流变液体		屈服切应力 $\tau_s$ 的估计公式	$\tau_s$ 的估计公式中的参数		
粒子材料	分散介质		$k$	$\alpha$	置信系数
SrTiO <sub>3</sub> /PANI 粒子(20%)	0.3 Pa·s 硅油	$\tau_s = 24.170E^{1.197}$	24.170	1.197	0.988
	0.05 Pa·s 硅油	$\tau_s = 7.736E^{1.591}$	7.736	1.591	0.995
SrTiO <sub>3</sub> /PANI 粒子(20%)	25# 变压器油	$\tau_s = 1.076E^{1.695}$	1.076	1.695	0.954
	蓖麻油	$\tau_s = 94.120E^{0.709}$	94.120	0.709	0.973
	液体石蜡	$\tau_s = 5.443E^{1.361}$	5.443	1.361	0.968
	氯化石蜡	$\tau_s = 57.230E^{0.799}$	57.230	0.799	0.980

表3 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 合成粒子分别与不同添加剂组成的电流变液体

电流变液体		屈服切应力 $\tau_s$ 的拟合公式	$\tau_s$ 的拟合公式中的参数		
颗粒+分散介质	添加剂		$k$	$\alpha$	置信系数
SrTiO <sub>3</sub> /PANI 粒子(20%)	Span80 (1%)	$\tau_s = 13.067E^{0.756}$	13.067	0.756	0.961
	MOA3 (1%)	$\tau_s = 5.505E^{1.360}$	5.506	1.360	0.978
0.1 Pa·s 硅油	$\sigma\pi-10$ (1%)	$\tau_s = 12.510E^{1.089}$	12.510	1.089	0.992
	KH550 (1%)	$\tau_s = 18.260E^{0.989}$	18.260	0.989	0.954

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 体积分数对电流变效应的影响

根据试验方案(1), 在室温, 电场强度  $E=4$  MV/m 下得到表 1 所示的不同体积分数(浓度)的电流变液体的切应力  $\tau$  随切应变速率  $\dot{\gamma}$  的变化趋势, 见图 2 所示。

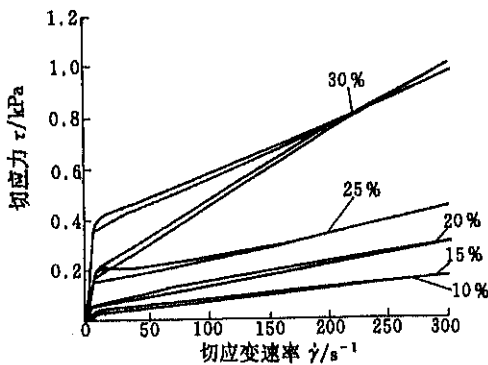


图2 不同体积分数(浓度)对电流变液性能的影响

从图 2 可以看出颗粒的体积分数(浓度)对电流变液体性能的影响较大, 体积分数越大(30%), 则切应力在相同的切应变速率下越高, 即电流变效应越显著。

#### 3.2 分散介质对电流变效应的影响

根据试验方案(2), 试验条件: 室温, 电场强度  $E=4$  MV/m 下得到表 2 所示的分散介质不同所组成的电流变液体切应力  $\tau$  随切应变速率  $\dot{\gamma}$  的变化趋势, 见图 3 所示。

从图 3 可以看出这 6 种分散介质中蓖麻油作为分散介质与 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 粒子组成的电流变液体的电流变效应最好, 其切应力最高可达到 2.3 kPa。

#### 3.3 添加剂对电流变效应的影响

根据试验方案(3), 在室温, 电场强度  $E=4$  MV/m 下, 得到表 3 所示的不同添加剂与 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 粒子组成的电流变液体切应力  $\tau$  随切应变速率  $\dot{\gamma}$  的变化趋势, 见图 4 所示。

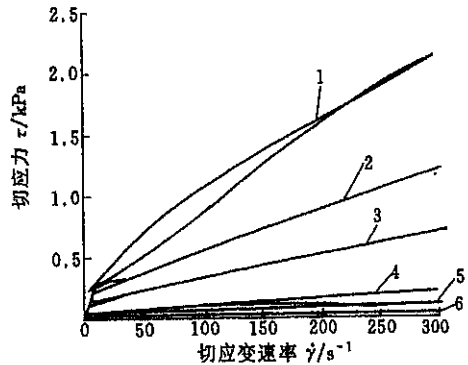


图3 分散介质对电流变液体性能的影响

- 1. 蓖麻油
- 2. 氯化石蜡
- 3. 0.3 Pa.s 硅油
- 4. 0.5 Pa.s 硅油
- 5. 液体石蜡
- 6. 25#变压器油

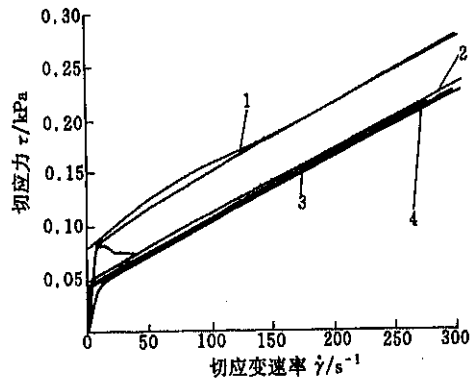


图4 添加剂对电流变液体性能的影响

- 1.  $\sigma\pi-10$
- 2. KH550
- 3. MOA3
- 4. Span80

从图 4 可以看出, 同样是 20% 的 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 粒子 + 0.1 Pa.s 硅油分别与不同的添加剂组成的电流变液体的切应力随切应变速率  $\dot{\gamma}$  的变化趋势, 比较图 2(20% 的 SrTiO<sub>3</sub>/PANI 粒子 + 0.1 Pa.s 硅油)和图 4 曲线可以看出这 4 种添加剂对电流变液性能的影响。

#### 3.4 电场强度对电流变液体性能的影响

试验表明: 电场强度对电流变液体性能有较大的影响, 具体表现在一定的切应变速率下, 切应力随电场强度的提高而增大, 见图 5 所示。

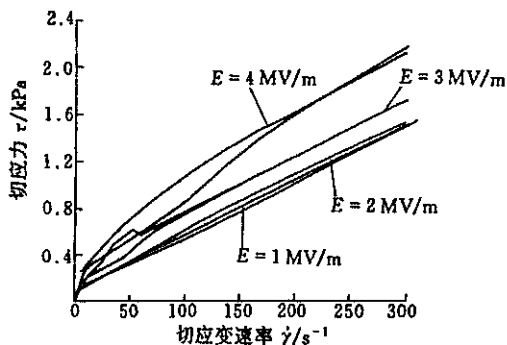


图 5 电场强度对电流变液体性能的影响

### 3.5 式(2)中系数的估计

根据式(2)屈服切应力  $\tau_s$  的公式, 通过改变电场强度  $E$  从 1~4 MV/m 变化, 分别测出在各种电场强度下的切应力随切应变速率的变化趋势, 并从各相应的试验曲线图得出相应的屈服切应力值, 再通过回归分析计算得出不同材料式(2)中的系数  $k$ 、和  $a$  值。试验并回归计算的结果见表 1~3 所示。从表 1~3 可以看出系数  $k$  值随电流变液体材料的不同而显著变化, 表明系数  $k$  值强依赖于电流变液体的材料本身的性质, 而  $a$  值随材料的不同而变化的范围并不显著, 在 0.6~2.0 之间, 详见表 1~3 所示。

## 4 结论

(1) 电流变颗粒的体积分数(浓度)对电流变效应的影响较大, 随着体积分数的增加, 电流变效应增强。

(2) 分散介质对电流变效应也有较大的影响, 通过试验研究表明: 以蓖麻油作为分散介质对基于  $\text{SrTiO}_3/\text{PANI}$  合成材料为粒子的电流液体显示出较好的电流变特性。

(3) 电场强度对电流变液体的性能有显著影响, 同样的电流变液体, 其电流变效应随电场强度的提高而增加。

(4) 通过对 4 种添加剂(Span80、MOA3、 $\sigma\pi$ -10 和 KH550)的研究表明: 这 4 种添加剂对基于  $\text{SrTiO}_3/\text{PANI}$  合成材料为粒子的电流液体的电流变效应具有一定的影响。

(5) 通过回归分析计算表明: 屈服切应力公式(见式(2))中的系数  $k$  强依赖于电流变液体的本身性质, 不同电流变液体  $k$  值的变化较大; 而系数  $a$  随

不同的电流液体材料而不同, 但是, 变化范围不大, 在 0.6~2.0 之间, 见表 1~3 所示。

(6) 通过回归分析得出基于  $\text{SrTiO}_3/\text{PANI}$  合成材料为粒子如表 1~3 所示的各种电流变液体的屈服应力与电场强度关系的试验表达式, 这些试验(经验)表达式可以作为工程应用的理论基础。

## 参 考 文 献

- 1 Sakurai R, See H, Saito T, et al, Effect of matrix viscoelasticity on the electrorheological properties of particle suspensions. *J.Non-Newtonian Fluid Mech.*, 1999(81): 235~250
- 2 魏宸官. 电流变技术——机理·材料·工程应用. 北京: 北京理工大学出版社, 2000

## EXPERIMENTAL STUDY ON ELECTORRHEOLOGICAL SUSPENSIONS PERFORMANCE

Chen Shumei

(Fuzhou University)

Wei Chenguan

(Beijing Institute of Technology)

**Abstract:** Electrorheological suspensions performance basing on  $\text{SrTiO}_3/\text{PANI}$  electrorheological particles under different volume of particles, different dispersing medium (silicon oil/transformer oil/castor oil/liquid-paraffin/chlorination-paraffin) and different additive are presented. These electrorheologic regress analyse are obtained by the experiment, and the result has showed that the electrorheological effect of electrorheological suspensions of composing  $\text{SrTiO}_3/\text{PANI}$  particles with castor oil are more greater than those of others in their electrorheological performance. The expressions of shear stress vs electric field have been obtained in different conditions by the experiment and regress analyse, which is the theory foundation of application for engineering.

**Key words:**  $\text{SrTiO}_3/\text{PANI}$  particles Dispersing medium

Electrorheological suspensions performances

作者简介: 陈淑梅, 女, 1960 年出生, 教授, 在职博士生。主要研究方向为流体传动与控制、电流变技术及应用、工业噪声与控制。