

# 温度对电流变流体流变行为的影响

## The Effects of Temperature on Rheological Properties of Electrorheological Fluids

范志康, 宋忠孝, 梁淑华 (西安理工大学材料科学与工程学院, 西安 710048)

FAN Zhi-kang, SONG Zhong-xiao, LIANG Shu-hua

(School of Materials Science and Engineering,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**摘要:** 研究了温度对硅铝酸盐、沸石、高分子、钛酸钡悬浮相电流变流体 (ERF) 抗剪强度及表观粘度的影响规律, 结果表明, 温度的作用规律主要受外加电场强度和悬浮相数量的影响, 与剪切速率的大小无明显关系。温度升高, 在高的外加场强下, 硅铝酸盐系 ERF 和沸石系 ERF 的抗剪强度有明显峰值出现; 高分子材料悬浮相 ERF 也有峰值现象; BaTiO<sub>3</sub> 悬浮相 ERF 的抗剪强度则单调下降。

**关键词:** 电流变流体 (ERF); 流变行为; 温度

中图分类号: TM215.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 01-0022-04

**Abstract:** The effects of temperature on shear stress and apparent viscosity of electrorheological (ER) fluids with aluminosilicate, zeolite and BaTiO<sub>3</sub> suspensions have been studied. The results show that the effect of temperature has relationship with applied electrical field and the amount of suspension in the ER fluid, but has no relationship with shear rate. With increase in temperature, there are shear stress peaks on the shear stress-shear rate curves of the ER fluids with aluminosilicate, zeolite or polymer suspension at strong electrical field. However, shear stress of the ER fluid with BaTiO<sub>3</sub> suspension is singly decreased.

**Key words:** electrorheological (ER) fluids; rheological property; temperature

应用 ERF 首先应考虑其本身所能适用的工作温度范围, 早期的含水系 ERF 之所以不能得到应用就是因其工作温度在 70 ~ 80 °C 时漏电电流过大, 同时随温度升高, 水份挥发, 导致电流变效应明显减弱, ERF 的性能不稳定<sup>[1,2]</sup>, 直到 80 年代, 开发出无水系的 ERF, 温度使用范围扩大, 对 ERF 的应用研究重新受到重视<sup>[3,4]</sup>。目前研制出的 ERF 工作温度范围宽, 既使在 100 °C 以上, 漏电电流也很小<sup>[5~9]</sup>, 但 ERF 在温度变化时, 性能并不稳定, 且不同 ERF 的性能对温度的敏感程度不同, 影响规律也不同, 反应出温度对 ERF 性能影响的复杂性, 诸如 ERF 悬浮相的介电常数、导电率以及 ERF 本身的粘度都会受温度的影响<sup>[10,11]</sup>, 因而研究温度对 ERF 性能的影响显得尤为重要。

### 1 试验条件及方法

用甲基硅油作为 ERF 的连续相, 其粘度为 10Pa·s, 密度 0.97g/cm<sup>3</sup>, 介电常数 2.6~2.8, 悬浮相有硅铝酸盐、沸石、高分子材料和钛酸钡, 平均粒径为

60μm。

在配制 ERF 时, 一个关键问题是消除悬浮相粒子的聚集, 为此把配好的 ERF 加热到 80 °C, 保温 30min, 取出后经过一段时间的搅拌, 聚集的悬浮相颗粒就会消失, 经加热搅拌后的 ERF 冷却至室温后即可供试验用。

实验测量在改造后的旋转式粘度计中进行, 由于测试温度要超过 100 °C, 选用油浴加热, 为此自行设计了一套加热装置, 应用上海医用仪表厂生产的型号为 WM2K-01 型控温仪, 控温精度为 ±3 °C, 试验时的温度为 20~120 °C。

### 2 试验结果

#### 2.1 温度对硅铝酸盐系 ERF 力学性能的影响

试验配制了两种不同悬浮相体积分数的 ERF, 一种悬浮相体积分数为 8%, 另一种为 15%, 场强每次增加 0.4kV/mm, 每组数据测量两次, 方法是第一次测试后断电, 取出料筒搅拌, 再装上料筒重新测试。

图 1a 和图 1b 分别表示悬浮相体积分数为 8% 和

15% 的 ERF 在相同剪切速率不同外加场强下的抗剪强度与温度的关系曲线。由图可以看出, 外加场强低时, 如外加场强  $E = 0.4 \text{ kV/mm}$ , 两种体积分数的 ERF 的抗剪强度都随温度升高而单调下降, 无峰值出现; 随外加场强的增加, 出现峰值, 且不同悬浮相体积分数的 ERF 出现峰值的温度不同; 随着悬浮相体积分数的增加, 外加场强很高时, ERF 的抗剪强度甚至出现两个峰值。

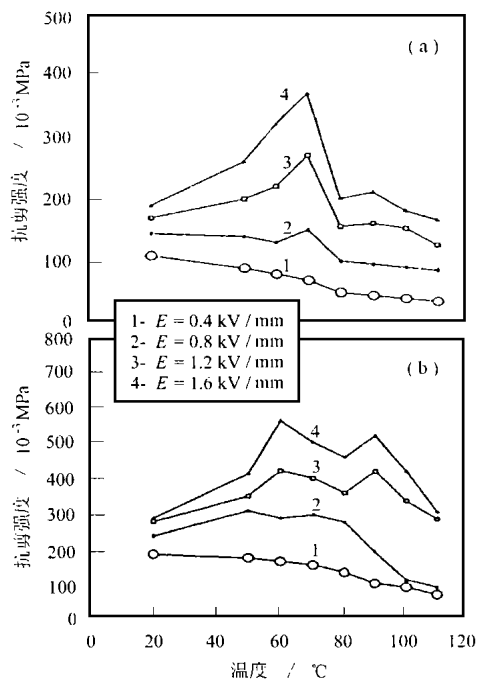


图 1 温度与 ERF 抗剪强度的关系

硅铝酸盐悬浮相体积分数: (a) 8%; (b) 15%

Fig. 1 Shear stress vs temperature of ER fluids with aluminosilicate suspension of 8 vol% (a) and 15 vol% (b)

剪切速率对各个温度下 ERF 抗剪强度的影响相似, 换句话说, 剪切速率与抗剪强度的关系在不同温度下的变化规律是相似的(图 2)。从图 2 可以看出, 抗剪强度出现峰值的情况, 完全不受剪切速率的影响, 两个剪切速率下, 峰值的特征和对应温度也都相近。

ERF 另一个重要性能参数是表观粘度, 与悬浮相体积分数, 外加场强和剪切速率有密切关系, 温度升高时, 低外加场强下, 表观粘度在下降过程中出现的峰值不明显, 外加场强升高后, 表观粘度出现明显峰值, 且外加场强愈高, 出现的峰值愈明显, 比如外加场强  $1.6 \text{ kV/mm}$  时, 表观粘度的峰值高出近一倍。

若作表观粘度与剪切速率曲线, 在各个固定温度情况下, 剪切速率与表观粘度的变化趋势相同(图 3), 但若固定外加场强, 如外加场强为零时, 表观粘度随温度升高依次减小(图 4), 但在外加场强为  $1.6 \text{ kV/mm}$

mm 时, 表观粘度随温度升高并不依次降低, 而是中间温度对应的表观粘度值大, 这与前面结果吻合。

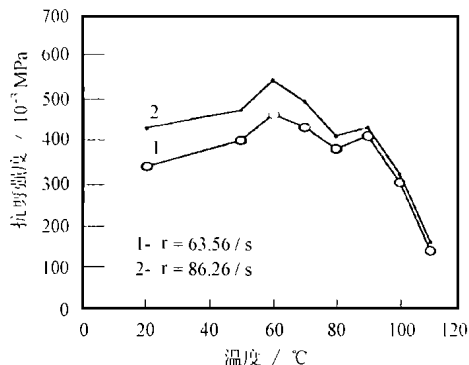


图 2 不同剪切速率下 ERF 的抗剪强度与温度的关系悬浮相硅铝酸盐体积分数 15%

Fig. 2 Shear stress vs temperature of ER fluids at different shear rates aluminosilicate suspension 15vol%

## 2.2 温度对沸石系 ERF 流变性能的影响

沸石系 ERF 中悬浮相体积分数为 25%, 试验最高温度为  $110^\circ\text{C}$ , 不同外加场强下 ERF 的抗剪强度与温度的关系示于图 5a, 可见, 低外加场强下, 抗剪强度随温度升高而单调降低, 高外加场强下, 抗剪强度出现先升高后减小的峰值现象。这种现象不受剪切速率的影响于示图 5b, 图中的剪切速率分别为  $63.56/\text{s}$  和  $86.26/\text{s}$ 。

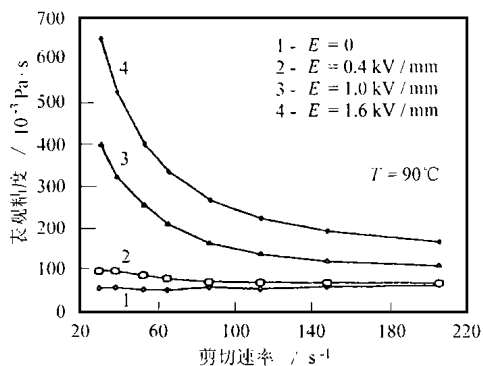


图 3 不同场强下悬浮相硅铝酸盐体积分数 8% 时 ERF 表观粘度与剪切速率的关系

Fig. 3 Apparent viscosity vs shear rate of ER fluids with aluminosilicate suspension at 8%

温度对表观粘度的影响与外加场强有关, 零电场时, 表观粘度随温度升高依次降低, 在外加场强达到  $2 \text{ kV/mm}$  时, 沸石系 ERF 在温度升高过程中, 表观粘度并不按温度升高的次序依次减小, 温度  $60 \sim 70^\circ\text{C}$  时, 表观粘度反而高些(图 6)。

## 2.3 温度对高分子悬浮相 ERF 流变性能的影响

试验所用高分子悬浮相的体积分数为 30%，升温

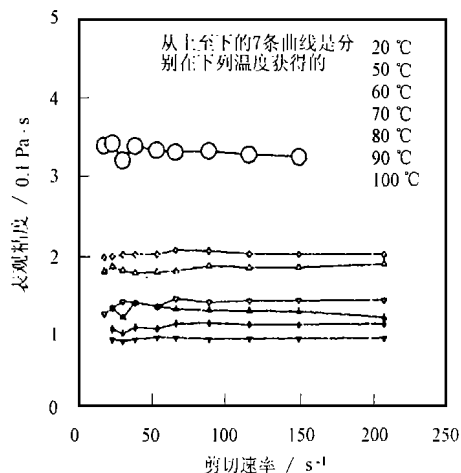


图 4 不同温度下硅铝酸盐悬浮相体积分数 15% 时 ERF 表观粘度与剪切速率的关系,

Fig. 4 Apparent viscosity vs shear rate of ER fluid With aluminosilicate suspension at 15vol% at varied temperature

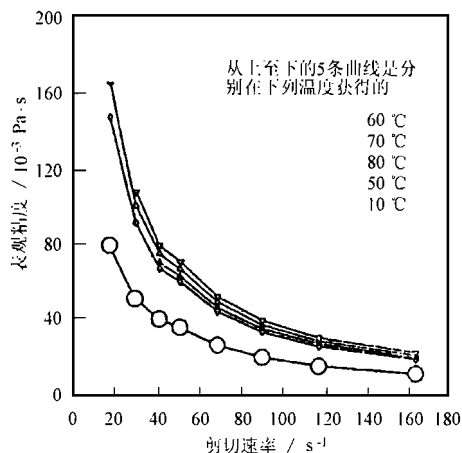


图 6 不同温度下 ERF 表观粘度与剪切速率的关系, 沸石悬浮相体积分数 30%  
Fig. 6 Apparent viscosity vs shear rate of ER fluids with zeolite suspension 30vol1%

度与抗剪强度的关系示于图 8, 可见, 随温度升高, 各场强下 ERF 的抗剪强度均单调下降, 无峰值出现。

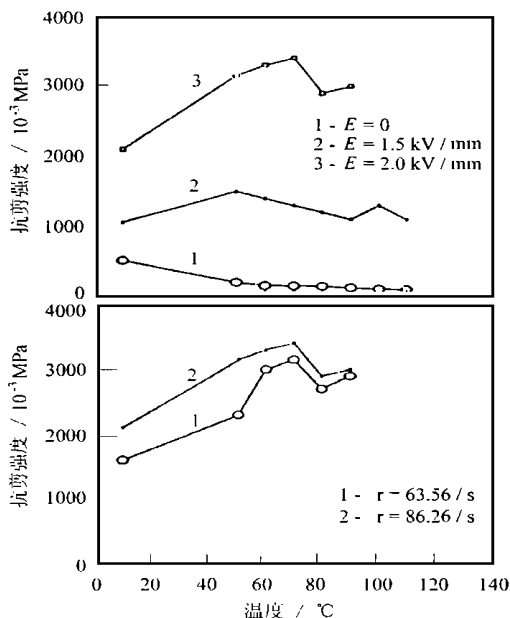


图 5 沸石系 ERF 抗剪强度与温度的关系

Fig. 5 Shear stress vs temperature of ER fluids with zeolite suspension at different applied fields

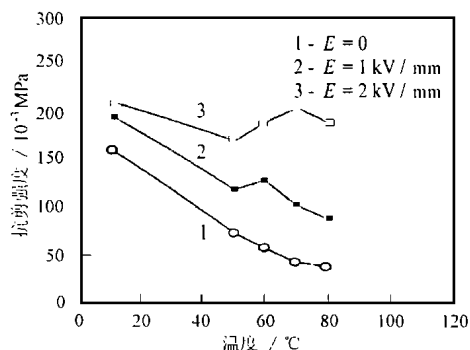


图 7 高分子悬浮相 ERF 的抗剪强度与温度的关系  
Fig. 7 Shear stress vs temperature of ER fluids with polymer suspension

### 3 分析和讨论

早就有研究者<sup>[12]</sup>认为 ERF 抗剪强度的决定因素是 ERF 中悬浮相的介电常数  $\epsilon_p$  和连续相的介电常数  $\epsilon_c$  的比值  $\epsilon_p/\epsilon_c$  的大小, 并一度得到认可。但该假设不能解释具有极高介电常数的  $\text{BaTiO}_3$  悬浮相 ERF 的电流变效应特征, 近有研究者<sup>[13]</sup>提出, 能否产生电流变效应由悬浮相的介质损耗决定, 而悬浮相与连续相介电常数的比值  $\epsilon_p/\epsilon_c$  决定电流变效应的强弱。介电损耗存在最佳值, 低于此值时, 电流变效应不明显; 高于此值, 电流变效应也不显著, 介电损耗在最佳值附近时, 电流变效应最明显。

至 80 , 发现抗剪强度有峰值出现, 但峰值不大, 未超过常温时的抗剪强度 (图 7), 且峰值也只在外加场强高时出现。说明峰值的出现确与外加场强有关。

#### 2.4 温度对 $\text{BaTiO}_3$ 系 ERF 抗剪强度的影响

$\text{BaTiO}_3$  的介电常数相当高, 达 3000 以上, 试验时选择  $\text{BaTiO}_3$  体积分数为 30%, 升温至 90 , 其温

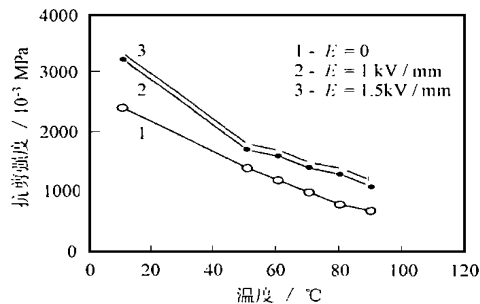
图8 BaTiO<sub>3</sub>悬浮相 ERF 的抗剪强度与温度的关系

Fig. 8 Shear stress vs temperature of ER fluid with BaTiO<sub>3</sub> suspension

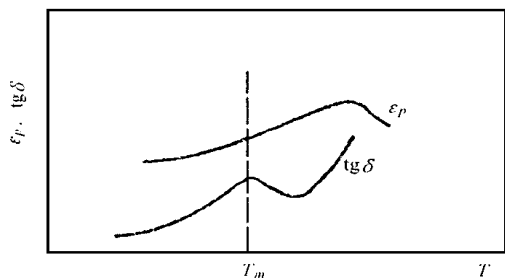


图9 介电常数、损耗角与温度的关系

Fig. 9 The effects of temperature on dielectric constant and loss angle of ER fluid suspension

由于介质损耗由电导引起,故介质损耗与极化过程有关,考虑到松弛极化需要  $10^{-2}$  s 或更长时间,因而即使施加直流电场,在施加电场的开始瞬间,松弛极化就存在<sup>[14]</sup>。文献[10]指出 ERF 的电导率和介质损耗对电流变效应的影响不同,电导率大,不一定能增强电流变效应,介质损耗大,才能强化电流变效应。

实验中在一定外加场强下,硅铝酸盐悬浮相 ERF 的抗剪强度与表观粘度均随温度升高出现极大值,且最大值明显高于常温下的抗剪强度值;而高分子悬浮相 ERF 的抗剪强度随温度升高虽也出现峰值现象,但峰值对应的抗剪强度不高于常温时的值;BaTiO<sub>3</sub> 悬浮相 ERF 的抗剪强度,随温度升高而单调下降。分析原因,主要是由于硅铝酸盐和沸石随温度升高,其松弛极化出现极大值,产生的松弛极化损耗大,因而随温度升高,电流变效应也对应出现增大的现象。高分子材料的松弛极化不大,电流变效应无明显增强;BaTiO<sub>3</sub> 在试验温度范围内无松弛现象,其介电常数的变化是由自发极化引起,因而电流变效应不随温度升高而增强。

对试验中硅铝酸盐悬浮相电流变流体抗剪强度在不同温度下出现两个峰值的现象可用图 10 解释,由于松弛损耗可用  $\epsilon_r \cdot \text{tg} \delta$  表示,其中  $\epsilon_r$  为介电常数,  $\epsilon$

为损耗角,令松弛损耗与抗剪强度的变化趋势相同,由图 9 中  $\epsilon_r$  和  $\text{tg} \delta$  的峰值特性知,硅铝酸盐系 ERF 的抗剪强度应有两个峰值。

根据以上分析可以认为,要产生电流变效应,首先必须有足够大的松弛损耗,松弛损耗大,才能产生明显的电流变效应,由松弛极化引起的极化力是维持电流变效应的内在因素,此力越大,电流变效应愈明显,而温度对 ERF 流变行为的影响则包括了对松弛损耗,极化力及热运动的综合作用。

## 4 结论

(1) 温度对不同 ERF 抗剪强度的影响不同,硅铝酸盐系 ERF 和沸石系 ERF 的抗剪强度随温度变化有明显峰值出现,高分子悬浮相 ERF 也有峰值出现,BaTiO<sub>3</sub> 悬浮相 ERF 则是单调降低。

(2) 剪切速率对温度与抗剪强度、温度与表观粘度的关系曲线没有影响。

(3) 悬浮相及其体积分数和外加场强对温度与抗剪强度、温度与表观粘度的关系有影响,体积分数和外加场强愈大,对应温度下曲线峰值愈明显,这是由于松弛极化等造成的。

## 参考文献

- [1] Klass D L and Martinek T K. J Appl Phys, 1967, 38 (1): 67-74.
- [2] Uejima H. Jap J Appl Phys, 1972, 11 (3): 319-326.
- [3] Block H and Kelly J P. US Pat, 4687587, 1987.
- [4] Filisko F E, Armstrong W E. US Pat, 4744914, 1988.
- [5] Filisko F E, Armstrong W E. US Pat, 4879056, 1989.
- [6] Davis L C. J Appl Phys, 1993, 73 (2): 680-683.
- [7] Ivanescu M and Stoian V. Proc-IEEE Inter Conf on Robotics and Automation, Part2, 1995, IEEE, Piscataway, NJ, USA.
- [8] Konishi M, Nagashima T and Asako Y. Proc 6th ERM R 97 Inter Conf, Japan, 1997, ed. by M Nakano and K Koyama. World Scientific Publishing Co. Ltd., Singapore, 308-313.
- [9] Fan Z K, Liang S H, Xue X and Wang G. ibid, 263-270.
- [10] Tian H. Appl Phys Lett, 1997, 70 (15): 1956-1958.
- [11] Tian H. J Colloid and Interface Science, 1997, 190: 334-340.
- [12] Foulc J N, Atten P and Felli N. J Electrostatics, 1994, 23: 103-112.
- [13] Pyo S, Howard S and Tasuku S. J Rheol, 1996, 40 (3): 395-403.
- [14] 吴振辉, 张大中, 焦金生. 无机材料物理性能 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.

收稿日期: 2000-07-14

作者简介: 范志康 (1959-), 男, 博士, 教授。联系地址: 西安市西安理工大学材料科学与工程学院 (邮编 710048)。

本文编辑: 全宏声