

# 极板形貌修饰对电流变液/极板界面滑移抑制实验研究<sup>\*</sup>

张敏梁 田煜<sup>†</sup> 蒋继乐 孟永钢 温诗铸

(清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

(2009 年 1 月 12 日收到 2009 年 3 月 13 日收到修改稿)

被外电场极化而固化的电流变液容易在极板处产生剪切滑移而降低其力学性能. 使用抛光、激光打坑、覆盖尼龙网和光刻腐蚀四种方法对极板形貌进行了修饰, 并对电流变液的压缩力学性能进行了测试. 研究表明, 光滑极板和光刻腐蚀柱阵列极板易产生界面滑移而压缩强度较低, 粗糙坑阵列和覆盖尼龙网可抑制界面滑移而压缩强度高. 极板形貌增强极板附近局部电场强度, 强化了链末端与极板间的作用, 迫使链结构屈服位置远离链末端, 从而有效抑制了滑移. 研究结果对进一步认识电流变液的屈服强度, 提高电流变器件的力学性能有重要参考价值.

关键词: 电流变液, 滑移, 极板形貌修饰, 压缩应力

PACC: 4660H, 6210, 7730

## 1. 引言

电流变液作为一种流变特性可由外电场迅速调节的智能材料, 可广泛应用于离合器、阻尼器、减震器等机械装置. 其剪切流的相关规律及机理已有深入研究<sup>[1-3]</sup>. 有关提高电流变液的剪切强度的工作取得很大进展. 目前电流变液的静态剪切屈服强度已高于 100 kPa<sup>[4-6]</sup>. 但是其动态剪切屈服应力通常要远小于静态剪切屈服应力, 其原因一直没有得到很好定量解释. 另外人们在研究中还发现, 固化的电流变液和极板之间常常发生滑移会造成电流变液剪切强度明显降低. 由此一些学者提出使用有规则形貌的极板来抑制滑移以提高电流变液的剪切性能并取得一定效果<sup>[7-11]</sup>.

有关电流变液的研究大部分集中于剪切流. 近年来人们逐渐认识到其压缩强度远高于剪切强度, 所以对电流变挤压流的机理和应用研究更受关注. 研究表明, 电流变液的压缩特性有别于基于连续流体模型描述, 在不同初始间隙下进行的稳态压缩实验中发现链柱状结构的长径比对压缩性能产生很大影响, 表现出强烈的尺寸效应<sup>[12-14]</sup>. 虽然在剪切

流中经常发现滑移, 但是目前对压缩流中的界面滑移作者尚未见报道和讨论. 为了研究压缩流中的界面滑移现象及其抑制方法和机理, 本文用不同加工方法对极板进行了表面形貌修饰, 对电流变液的压缩力学特性及电流密度进行了测量, 证实了在压缩过程中确实存在滑移现象. 通过适当的极板形貌修饰可以增强靠近极板附近区域的局部电场强度和防止链末端在极板界面上屈服, 从而有效抑制压缩流中的滑移, 提高电流变液的压缩强度.

## 2. 实验

研究中使用了四种不同表面形貌修饰的对称极板来测试电流变液的压缩特性. 极板形貌如图 1 所示. 上下极板均为钢制圆盘, 直径为 20 mm. 准备极板时, 先将四套极板均做机械抛光至表面粗糙度  $R_a = 0.8 \mu\text{m}$ . 取其中一套光滑极板编号为 A, 其他三套极板分别采用激光打坑、覆盖尼龙网和光刻腐蚀的方法对表面形貌进行修饰. 激光打坑的极板编号为 B. 坑的直径为  $100 \mu\text{m}$ , 坑的圆心间距为  $250 \mu\text{m}$ , 坑的深度为  $28 \mu\text{m}$ . 打坑后表面粗糙度有极大提高; 覆盖尼龙网的极板编号为 C, 网格宽为  $70 \mu\text{m}$ , 线直

<sup>\*</sup> 全国优秀博士学位论文作者专项资金(批准号 200432)和国家自然科学基金(批准号 50875152)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: tianyu@mails.tsinghua.edu.cn

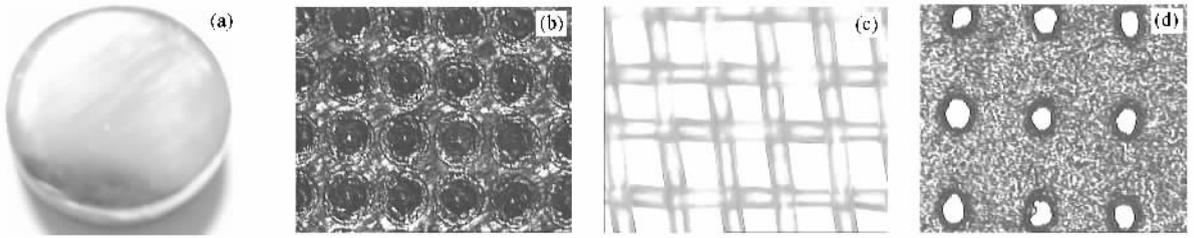


图1 实验中使用的四种极板 (a)机械抛光加工的光滑极板 (b)激光加工的坑阵列 (c)覆盖尼龙网的极板 (d)光刻腐蚀加工的柱阵列

径为  $50 \mu\text{m}$ , 网厚度为  $100 \mu\text{m}$ , 光刻腐蚀的柱阵列极板编号为 D, 圆柱的直径为  $100 \mu\text{m}$ , 圆心间距为  $400 \mu\text{m}$ , 圆柱高度为  $56 \mu\text{m}$ .

电流变液的压缩实验装置和本组以前研究中一样<sup>[14]</sup>. 实验中使用的电流变液是由沸石与硅油混合制备而成, 沸石颗粒体积分数约为 23%. 实验步骤如下: 调整极板初始间隙  $h_0$  为 1.5 mm, 并加入电流变液充满极板间隙; 在极板间施加直流电压约 10 s 后下极板以 0.1 mm/s 的速度上升 1 mm; 去掉外电压, 将下极板下降到初始位置; 外加恒定直流电压分别为 1.0, 1.3 和 1.6 kV. 更换不同表面形貌的极板重复上述过程.

压缩过程中作用在极板上的压力为  $F$ , 极板面积为  $S$ , 电流变液的压缩应力为

$$P = \frac{F}{S}. \quad (1)$$

在任一时刻  $t$ , 力传感器发生弹性变形为  $\Delta l = \frac{F}{K}$ , 其中  $K$  为力传感器的弹性系数. 下极板向上运动的位移为  $d = vt$ , 则上下极板在压缩过程中的实际间隙为

$$h = h_0 - vt + \frac{F}{K}. \quad (2)$$

压缩过程中保持外加电压  $U$  不变, 则任一时刻极板间的电场强度为

$$E = \frac{U}{h}. \quad (3)$$

### 3. 实验结果和讨论

使用不同表面形貌的极板, 对同种电流变液在不同外电压下压缩, 得到实验结果如图 2 所示. 结果表明, 使用极板 A 和极板 D 得到的压缩曲线相似. 外加电压为 1.0 和 1.3 kV 时, 压缩应力-电场强度曲线几乎重合, 压缩应力由电场强度决定, 该结果与我

们以前进行分步压缩实验中电场较小时的结果相似<sup>[13]</sup>. 当外加电压为 1.6 kV 时, 相同电场强度下的压缩应力要比低电压时小一些. 使用极板 B 和极板 C 得到的压缩应力在相同场强时要明显大于极板 A 和极板 D.

根据传统润滑理论, 当压缩速度很低时, 黏性力对压缩应力的贡献可以被忽略, 压缩应力可近似为<sup>[15]</sup>

$$P = \frac{D}{3h} \tau_0, \quad (4)$$

其中  $D$  是极板直径,  $h$  是极板间隙,  $\tau_0$  是名义剪切屈服应力. 本实验中名义压缩速度为 0.1 mm/s, 电流变液的零电场黏度约 0.6 Pas, 黏性力影响完全可以忽略. 由 (4) 式得到外加电压 1.0 和 1.6 kV 时四种极板对应的名义屈服应力随电场强度变化的曲线如图 3 所示. 图 3(a) 中极板 A 和极板 D 的名义屈服应力曲线接近, 拟合为  $\tau_0 = 6 \times 10^{-5} E^{1.42}$ . 极板 C 的实验结果对应  $\tau_0 = 4 \times 10^{-5} E^{1.51}$ , 极板 B 的结果对应  $\tau_0 = 8 \times 10^{-6} E^{1.83}$ . 需要指出的是, 在计算极板 C 对应的名义剪切屈服应力时, 极板间初始间隙应减去覆盖在极板表面的尼龙网的厚度取值 1.3 mm. 根据传统极化理论<sup>[2]</sup>, 剪切屈服应力和电场强度的平方成正比. 我们认为, 该平方关系对应了电流变液在极板上没有滑移的理想状态. 在我们以前的压缩实验中<sup>[14]</sup>, 当初始间隙为 4 mm 时得到的名义屈服应力与电场强度平方成正比. 当发生滑移时, 剪切屈服应力降低, 即实验得到的电流变液的剪切屈服应力并不一定反映材料自身的性质, 而可能是电流变液与极板表面之间的强度. 从而图 3(a) 中拟合名义屈服应力曲线得到的指数表征了压缩过程中的滑移程度, 同时也表明极板 B 对滑移抑制最有效. 有意思的是光滑极板 A 和极板 C、极板 D 在外加电压为 1.0 kV 时拟合得到的指数与其他很多采用光滑极板进行剪切测试得到的指数 (1.5) 相近<sup>[16]</sup>. 这一低于平方关系的指数关系, 以前用电导模型来解释, 即

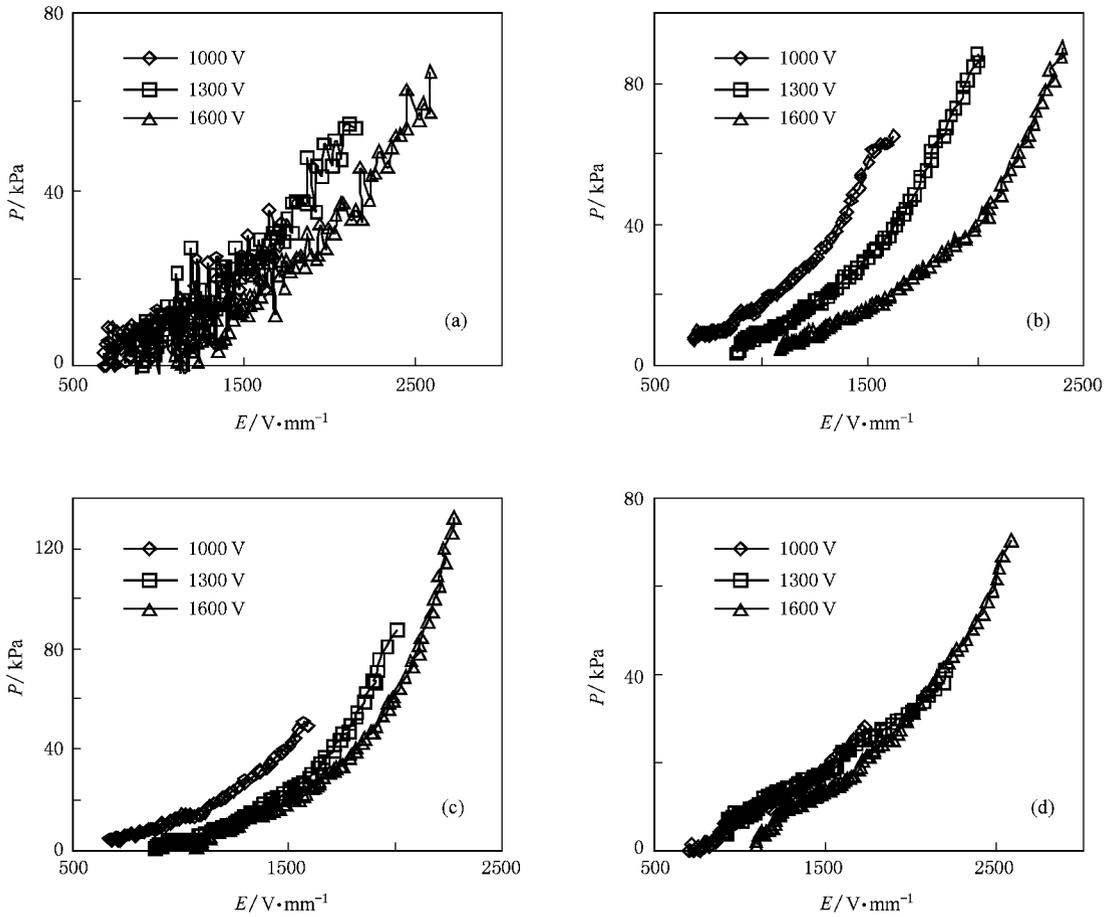


图 2 使用不同形貌极板得到的压缩应力-电场强度曲线 (a)极板 A (b)极板 B (c)极板 C (d)极板 D

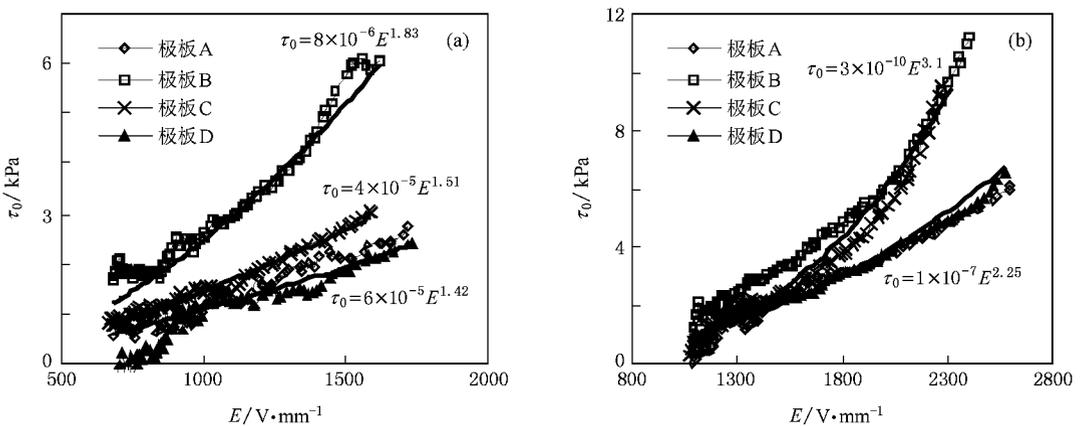


图 3 不同形貌极板的名义屈服应力-电场强度曲线 (a)1.0 kV (b)1.6 kV

由于绝缘油在高电场下的非线性电导,颗粒间局部电场饱和造成颗粒间作用力下降<sup>[17]</sup>.由于本实验中  $\tau_0 = 6 \times 10^{-5} E^{1.42}$  的指数关系明显是由于滑移造成的,从而可推测如果剪切测试中的滑移被有效抑制,其指数可能会趋近于平方关系.

图 3 (b)中外加电压为 1.6 kV 的名义屈服应力曲线显示,极板 A 和极板 D 的结果几乎一致,对应的指数为 2.25,而极板 B 和极板 C 的结果也几乎重合,拟合得到指数为 3.1,说明极板 B 和极板 C 能有效抑制滑移.极板 B 和极板 C 的指数大于 2 说明压

缩过程存在结构增强,与陶荣甲等<sup>[18]</sup>发现压缩可以促进链结构集聚为更粗大的颗粒链结构,从而大大提高电磁流变液的剪切屈服强度的研究结果一致。一方面,由于电流变液中的颗粒通常在微米量级,而极板间隙在毫米量级,高强度的电/磁流变液的颗粒体积分数通常比较高,所以很难在压缩过程中直接观测颗粒链结构的变化。另一方面,虽然在理论研究方面还没有一个对链结构与力学性能的定量描述,但是大量研究都定性表明链结构越粗壮电/磁流变液表现出的力学性能越强。

由于压缩是沿着电场和颗粒链排列的方向,压缩过程中颗粒之间的间隙有可能受压减小,按照传统极化模型,颗粒偶极子间作用会增强。对于同样的链排列结构,如偶极子作用势增强,其宏观力学特性无疑会增强,而电流变液的宏观电流密度则与颗粒间局部电场强度密切相关。在外电场作用下,通过电流变液的电流密度可以简化为  $J = \sigma_f(\bar{E})\bar{E}$ , 其中

$\bar{E}$  为颗粒之间的平均局部电场强度,  $\sigma_f(\bar{E})$  为平均局部电场  $\bar{E}$  作用下的基础液的电导率。如果局部电场强度接近时,其宏观电流密度应该一致。故而在本研究中同时对压缩力学性能和电学性能进行了测试。极板 A 和极板 D 在不同外加电压下的电流密度如图 4(a) 所示,图中的 6 条电流密度曲线重合得很好。这表明尽管外加电压不同,只要瞬时电场强度相同,颗粒间的极化程度和滑移程度相似,则电流密度与压缩应变产生的结构增强关系不大。不过从图 4(a) 中可以看到,极板 D 外加电压 1.3 kV 压缩快结束时,电流密度要明显小于其他测试结果,表明该处发生了一次明显界面滑移。这与图 2 中压缩应力的变化一致。图 4(b) 中极板 B 和极板 C 在不同外加电压下的电流密度曲线同样几乎完全重合。同样的外电场作用下其电流密度基本一致,说明压缩过程中颗粒间局部电场强度主要由外电场决定,而受压应变影响很小。

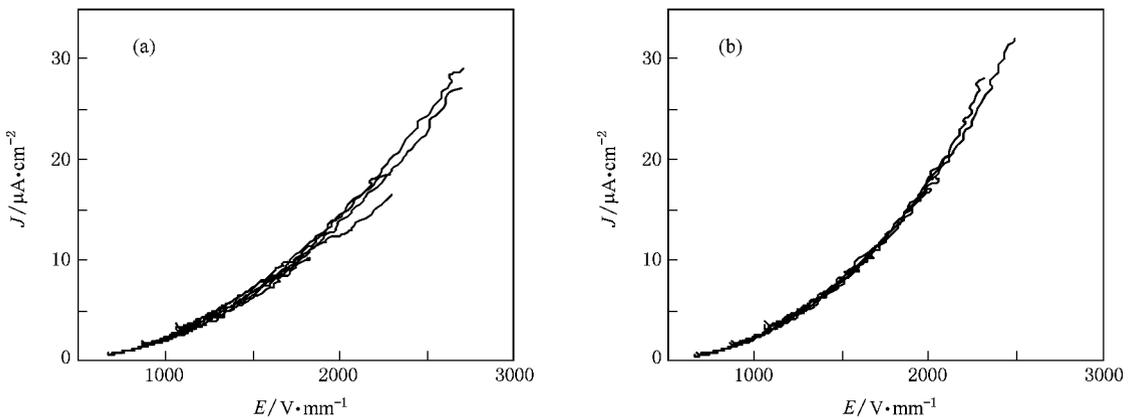


图 4 不同外加电压下的电流密度-电场强度曲线 (a) 极板 A 和极板 D (b) 极板 B 和极板 C

当电流变液在极板界面处发生滑移时,滑移位置的局部电场强度将小于其他未发生滑移的位置,宏观电流密度应略有降低。如图 5 所示,比较外加电压为 1.6 kV 时使用四种极板压缩的电流密度,极板 B 和极板 C 的电流密度要略大于极板 A 和极板 D,这与图 2 和图 3 中极板 B 和极板 C 滑移程度较轻,压缩强度更高的结论一致。图 4 和图 5 中的电流密度  $J = \frac{I}{S}$ , 其中  $I$  为压缩过程中记录的电流值,  $S$  为极板面积,如果在计算极板 A 和极板 D 的电流密度时,扣除发生滑移区域的面积,4 条电流密度曲线应该重合得更好。

为了消除电/磁流变效应中界面滑移现象,前人已做了不少工作。Lee 和 Jwo<sup>[8]</sup>加工了两种表面具有

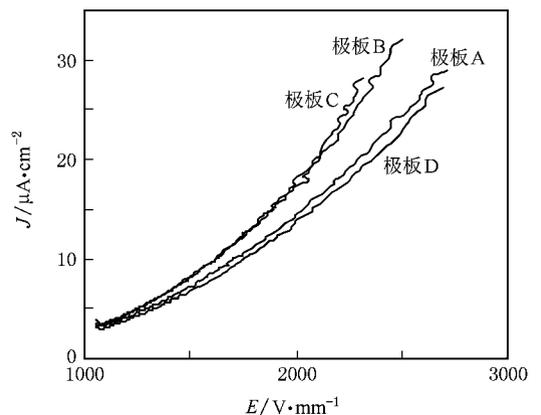


图 5 外加电压为 1.6 kV 时的电流密度-电场强度曲线

凹槽的极板,凹槽的间隔分别为 0.5 和 2 mm. 实验结果表明,当外加电场为 1.3 kV/mm 时,使用带凹槽结构的极板得到电流变液的剪切模量比光滑极板高了约 30%,同时电流密度也要大于光滑极板. Otsubo 和 Suda<sup>[9]</sup>采用蜂窝状的极板,研究了不同间隙下的剪切强度,认为是不均匀的电场分布增强了颗粒间的极化作用,从而提高了电流变效应. 在他们的研究中,极板形貌尺度在毫米量级,相对极板间隙而言,足以影响整个极板间电场的分布. 但在我们的实验中,形貌在高度方向小于 0.1 mm,而极板间隙大于 0.5 mm,所以改变的可能仅仅是靠近极板区域的电场分布. 文献[10]指出,在剪切过程中极性分子主导的电致流变液(polar molecular dominated electrorheological, PM-ER)和极板间存在严重的滑移,从而大大降低了 PM-ER 的剪切屈服强度<sup>[10]</sup>. 他们分别采用砂纸毛化、粘贴双面胶带、等离子喷涂氧化铝涂层和电镀金刚砂四种方式修饰极板表面形貌. 结果显示以上几种方式均能不同程度地提高 PM-ER 的静态剪切屈服应力. 而且记录了通过电流变液的电流值,发现砂纸毛化的极板电流密度要大于光滑极板. 这和我们的实验中滑移程度较轻时电流密度较大的结论一致. 有意思的是,使用双面胶、氧化铝和金刚砂涂层修饰的极板不仅能大幅提高电流变液的静态剪切屈服应力,而且还能大大降低电流密度. 其原因还需要进一步探讨.

以上研究都是基于电流变液与极板间的滑移会降低剪切强度的假设,希望通过改变极板形貌达到抑制滑移的目的. 一般认为电流变液链柱结构的断裂有两种,即链中间和链与极板间,断裂总是发生在强度较低的位置. 陶荣甲等<sup>[18]</sup>从理论和实验两方面指出,平板剪切时链断裂发生在链末端的两个颗粒之间. 在我们以前的研究中也观察到<sup>[19]</sup>,只有在浓度很低时才发生中间断裂,较高浓度的电流变液在管道流或剪切时,其链结构主要在极板附近发生屈

服和滑移. 比如在管道流中,颗粒链会整体沿着液体流动的方向移动. 这样电流变液的屈服强度就主要由颗粒链与极板的作用强度决定. 赵晓鹏等<sup>[20]</sup>在研究中也发现,在管道流中随着压差的增加电流变液链边缘与中间部分连接处最容易断裂. 朱克勤等<sup>[21]</sup>研究表明,圆盘间电流变液挤压流中存在屈服面,极板附近的电流变液在剪切作用下由于自身结构的破坏会产生滑移现象. 极板形貌修饰,一方面可以增大电流变液与极板间的摩擦作用;另一方面可以改变靠近极板区域的电场分布,提高电流变液与极板之间的作用强度,从而达到抑制滑移的效果.

电流变液与极板间的滑移现象最易发生高浓度电流变液中,这是由于高浓度电流变液在电场作用下固化后很难恢复. 本实验使用的电流变液的颗粒体积分数为 23%,实验结果表明电流变液与极板间发生了比较严重的滑移. 而对于颗粒体积分数较低的电流变液,在电场作用下其微结构以单链为主,电流变效应很弱,结构破坏后也容易恢复. 电流变液本身的强度要低于其与极板间的作用强度. 而本文中极板形貌修饰可提高电流变液与极板界面处作用强度,但对提高低浓度电流变液测试强度效果不明显.

## 4. 结 论

本研究表明,激光打坑和覆盖尼龙网的方法能有效抑制电流变液和极板之间的滑移,提高电流变液的压缩强度. 这是通过增强靠近极板表面区域的局部电场强度及尼龙网的机械阻碍作用改变链结构屈服位置实现的. 尽管在抑制滑移后压缩应力有明显增大,但是颗粒之间的极化程度和经过电流变液的电流密度几乎都相同. 这说明相同电场下颗粒的极化程度是一样的,而链结构对材料的结构强度起到非常大的作用. 另外,极板形貌修饰增强电流变液强度的技术对电流变液应用有重要意义.

[1] Winslow W M 1949 *J. Appl. Phys.* **20** 1137

[2] Parthasarathy M, Klingenberg D J 1996 *Mater. Sci. Eng.* **R17** 57

[3] Qiu Z Y, Pan S, Hu L, Liu X, Zhou L W 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 314 (in Chinese) [邱志勇、潘胜、胡林、刘湘、周鲁卫 1997 物理学报 **46** 314]

[4] Wen W J, Huang X X, Yang S H, Lu K Q, Sheng P 2003 *Nat. Mater.* **2** 727

[5] Lu K Q, Shen R, Wang X Z, Sun G, Wen W J, Liu J X 2006 *Chin. Phys.* **15** 2476

[6] Qiao Y P, Yin J B, Zhao X P 2007 *Smart Mater. Struct.* **16** 332

[7] Basim A J, Brunn P O 1996 *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **63** 45

[8] Lee C Y, Jwo K L 2001 *Mater. Design* **22** 277

[9] Otsubo Y, Suda Y J 2002 *Colloid Interface Sci.* **253** 224

- [ 10 ] Wang X Z , Shen R , Sun G , Wen W J , Lu K Q 2007 *Int. J. Mod. Phys. B* **21** 4940
- [ 11 ] Zhang J W , Gong X Q , Liu C , Wen W J , Sheng P 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 194503
- [ 12 ] Noresson V , Ohlson N G 2001 *Mater. Design* **22** 651
- [ 13 ] Tian Y , Meng Y G , Mao H R , Wen S Z 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 6875
- [ 14 ] Tian Y , Wen S Z , Meng Y G 2003 *Phys. Rev. E* **67** 051501
- [ 15 ] Gartling D K , Phan-Thien N 1984 *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **14** 347
- [ 16 ] Wu C W , Conrad H 1997 *Phys. Rev. E* **56** 5789
- [ 17 ] Foulle J , Felici N , Atten P 1992 *C. R. Acad. Sci. Ser. II* **314** 1279
- [ 18 ] Tao R , Lan Y C , Xu X 2002 *Inter. J. Mod. Phys. B* **16** 2622
- [ 19 ] Ye Z S , Tian Y , Meng Y G , Wen S Z 2005 *J. Tsinghua Univ.* **45** 622 ( in Chinese ) [ 叶子申、田煜、孟永钢、温诗铸 2005 清华大学学报 **45** 622 ]
- [ 20 ] Zhao X P , Gao X M , Gao D J , Zhong H F 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1017 ( in Chinese ) [ 赵晓鹏、高秀敏、郜丹军、钟鸿飞 2002 物理学报 **51** 1017 ]
- [ 21 ] Zhu K Q , Ge R , Xi B S 1999 *J. Tsinghua Univ.* **39** 80 ( in Chinese ) [ 朱克勤、葛蓉、席葆树 1999 清华大学学报 **39** 80 ]

## Enhancing compressive strength of electrorheological fluid by patterning the electrode \*

Zhang Min-Liang Tian Yu<sup>†</sup> Jiang Ji-Le Meng Yong-Gang Wen Shi-Zhu

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

( Received 12 January 2009 ; revised manuscript received 13 March 2009 )

### Abstract

Slip at the interface of solidified electrorheological ( ER ) fluid and electrodes is harmful for ER applications . Compression tests using four kinds of electrodes , namely the smooth , hole array patterned by laser pulse , nylon net covered , and acid etched column patterned electrodes , have been done , respectively . Results show that laser patterned and nylon net covered electrodes significantly enhanced the compressive stress of the ER fluid . The enhancement is ascribed to the increase of local electric field near electrodes after patterning , which increased the interfacial strength between ER fluid and electrodes , and effectively suppressed the slip of solidified ER fluid from electrode . The tests of current density during compression and the finite element analysis of the electric field distribution of patterned electrodes supported this slip suppression effect . The results raised a fundamental question of what is the real strength of ER fluids , since the slip of highly solidified ER fluid are usually not considered during various tests . This investigation also shows that patterning electrodes is a good way to improve mechanical performances of ER fluids .

**Keywords** : electrorheological fluid , slip , patterning electrode , compressive stress

**PACC** : 4660H , 6210 , 7730

\* Project supported by the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of China ( Grant No. 200432 ) and the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 50875152 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : tianyu@mail. tsinghua. edu. cn