复合材料学报 第20卷 第1期 2月 2003年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 20 No. 1 February 2003

文章编号: 1000-3851(2003)01-0091-05

电场作用下电流变液的拉伸、压缩和剪切特性

田 煜, 孟永钢, 茅海荣, 温诗铸
(清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 对外加直流电场作用下电流变液的拉伸、压缩和剪切特性进行了实验研究。实验结果表明,在外电场作用下,电流变液的压缩强度比剪切强度约高一个数量级,压缩强度是拉伸强度的2～3倍。压缩弹性模量约与压缩过程中电场强度的三次方成正比。压缩应力与电流变液本身性能、外加电压大小和压缩应变都有密切关系。拉伸屈服应力为剪切屈服应力的拉伸屈服应力和剪切屈服应力的3～4倍,据此计算得到剪切屈服应变角度在15°～18.5°之间。

关键词: 电流变液; 拉伸屈服应力; 压缩应力; 剪切屈服应力
中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A

ELONGATION COMPRESSION AND SHEARING CHARACTERISTICS OF ER FLUIDS UNDER ELECTRIC FIELDS

TIAN Yu, MENG Yonggang, Mao Hairong, WEN Shizhu
(State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The elongation, compression and shearing characteristics of ER fluids under external electric fields are investigated. The compressive strength of ER fluids is found to be about one order higher than shear stress, and is 2～3 times of tensile strength. The compressive modulus is proportional to the square of electric field. The relationship between tensile yield stress and shear yield stress verified the credibility of the calculation model employing a yield angle shaped between particles. From the tested strength, the yield angle is found to be between 15°～18.5°, according with other reports well and verifying the validity of the calculation through particle shift in traditional theoretical analysis.

Key words: ER fluids; tensile yield stress; compressive stress; shear yield stress

在电流变液的应用研究中,大多数电流变器件都是利用电流变液的剪切屈服强度或者场致剪切应力[1]。在电流变器件的设计中,通常使用在某剪切速率下的场致剪切应力和电流变液零电场粘度的比值 f_E/Z_0 来衡量电流变液的性能好坏和确定电流变器件的力调控范围(f_E 为电流变液的剪切屈服应力,Z_0 为电流变液的零电场粘度)。另外也希望 f_E 足够大,从而可以减小电流变器件的体积,使之可以很方便地替换原有机械执行部件,甚至可以比原有部件更小,以减小整机的体积。据报道电流变液的前者的比值已达到 2.9×10^4,但是其电流变液的剪切屈服应力 f_E 在 4 kV/mm 直流电场作用下只有 5.08 kPa[2]。在最近的一些报道中,电流变液的剪切屈服强度比较高[3～5],但是诸如离合器、刹车和减震器的电流变器件的广泛应用还是没有实现,这说明电流变液材料还有不尽理想之处。于是一些研究小组在近年将注意力转向了电流变液的挤压应力的研究[6,7]。在这些研究中,通常对电流变液施加交变激振,测试其压应力,也设计了基于电流变液的挤压效应的减震器件,减振阻尼力确实有较大提高。

收稿日期: 2001-08-13; 收修改稿日期: 2001-10-25
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50202010)
作者介绍: 田 煜(1975-),男,工学博士,助理研究员,主要从事电流变机理及应用研究。
通讯作者: 田 煜, E-mail: tiany@pim.tsinghua.edu.cn

但是在这些对电流变液挤压的研究中,电流变液产生的阻尼力主要来自动压效应,剪切速率比较高。如果在准静态下,将电流变液当成固体来研究,则可以考察固体的晶格和拉压力学性能。前者对电流变来说就是电流变液的颗粒在电场作用下排列结构,对此 Tao 等人进行了大量的实验和理论研究,认为体心四方结构是电流变液中比较稳定的结构[8~10]。而对拉压力学性能,虽然 Lukkarinen 曾经进行过仿真计算,但是还是基于动压效应[11]。另外在拉伸状态下,电流变液一旦断裂就与极板脱离,而不具有可逆性,从而对电流变液的"智能"特性不能表征,所以对电场作用下的电流变液进行准静态的挤压和拉伸报道很少。将电流变液作为准固体这两个性质的揭示对电流变效应的理解和对电流变液的新的应用开发有可能会起到一定的方向性和指导性的作用。文中构建了测试电流变液拉伸和压缩性质的实验设备,对基于沸石和硅油的电流变液的准静态拉伸和挤压性能进行了实验研究,并与其剪切性能进行了比较。

1　实验设备及原理

笔者在一个计算机控制的精密运动工作台上进行电流变液拉伸和压缩实验,测试系统的结构示意图如图 1。运动轴的额定驱动力为 1000 N。电流变液的拉压在两个平行极板间进行。上极板尺寸为 32 mm×32 mm,它与一个应变式力传感器串联,然后连接在工作台的刚性横梁上,上极板接高压电源负极。下极板尺寸为 32 mm×70 mm,粘接固定在一个聚四氟乙烯制成的绝缘槽内,绝缘槽与运动轴工作平台刚性连接,由运动轴驱动进行拉伸和压缩,绝缘槽内装电流变液体,下极板接高压电源正极。力传感器的输出信号由一个动态应变测试仪器记录。

压缩实验中,两极板初始间隙为 2 mm,然后下极板向上进给 1.5 mm。拉伸实验中,两极板初始间隙为 1 mm,然后下极板向下进给 3 mm。实验步骤均为:在未加电场时,调整下极板到初始位置;在上下极板间加上电压;使下极板运动到终点位置并测试此过程中作用在上极板上的力;关掉电源,使下极板回到初始位置。下极板的进给速度为 0.4167 mm/s。力传感器的刚度为 0.01408 mm/N,量程为 ±49 N。

电流变液的剪切特性由标准流变仪 HAAKE RV20 测试。测试系统结构示意图如图 2,电流变液在两个相对旋转的平行圆板间被剪切,通过串联在旋转驱动轴上的扭矩传感器测试其剪切应力。

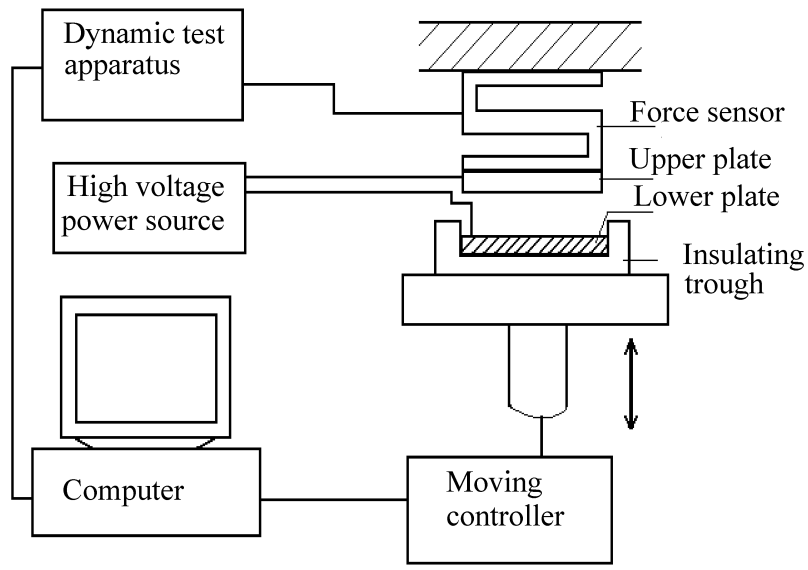

图 1　拉伸和压缩实验装置简图

Fig. 1　Sketch of elongation and compression test system

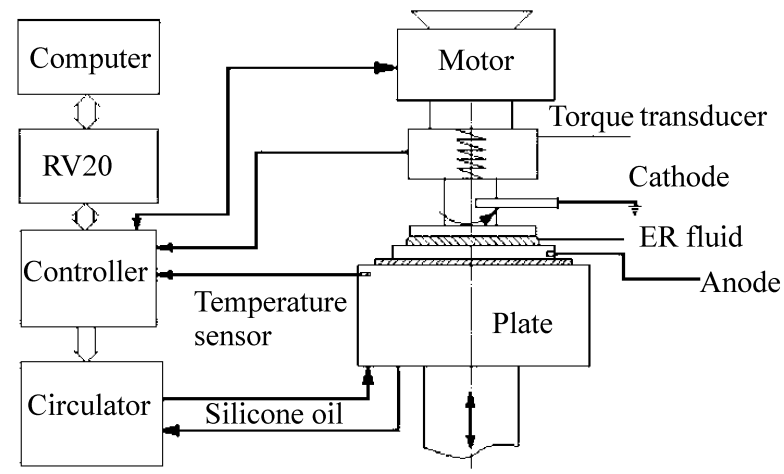

图 2　HAAKE RV20 流变仪测试系统简图

Fig. 2　Sketch of HAAKE RV20 rheometer

剪切测试中,剪切速率为 0～50 s^{-1},将剪切曲线用宾汉模型处理得到电流变液的剪切屈服应力。

在实验中使用的电流变液是用沸石和硅油配制的,配制方法和以前报道中相同[4]。在实验中使用的电流变液的重量浓度为 43%。

2　实验结果及讨论

2.1　拉伸实验结果

电场作用下电流变液的拉伸应力与时间的关系如图 3 所示,拉伸应力与拉伸应变的关系如图 4 所示。从两图可以看到,电流变液的拉伸可以分为三个阶段:在第一阶段,拉伸应力随着应变的微小变化线性急剧增加,拉伸应变值小于 0.05,发生的变形主要是力传感器的弹性变形;第二阶段,拉伸应力增加减缓,拉伸应变增加较快,并很快达到一个最大值(文中称为拉伸屈服应力值),这个阶段可以被称为电流变液的屈服阶段;第三阶段,拉伸应变继续增加,拉伸应力也缓慢降低到零。此阶段可以称为屈服后电流变液的粘连阶段。

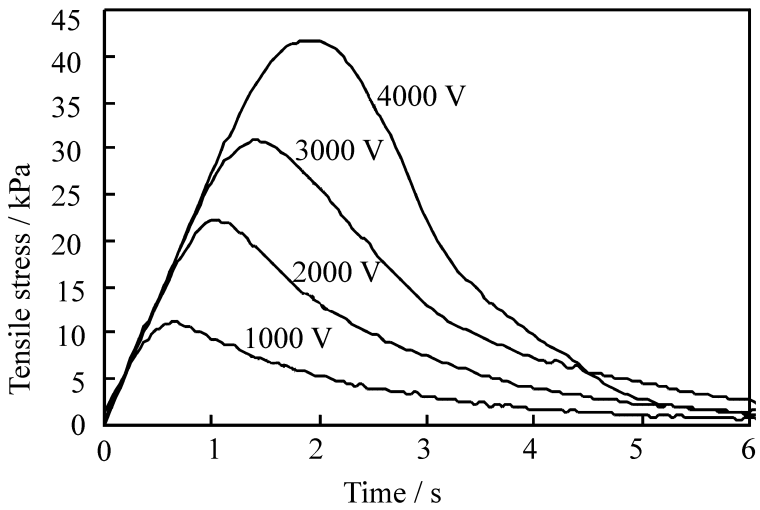

图 3　拉伸应力与时间的关系

Fig. 3　Tensile stress versus time

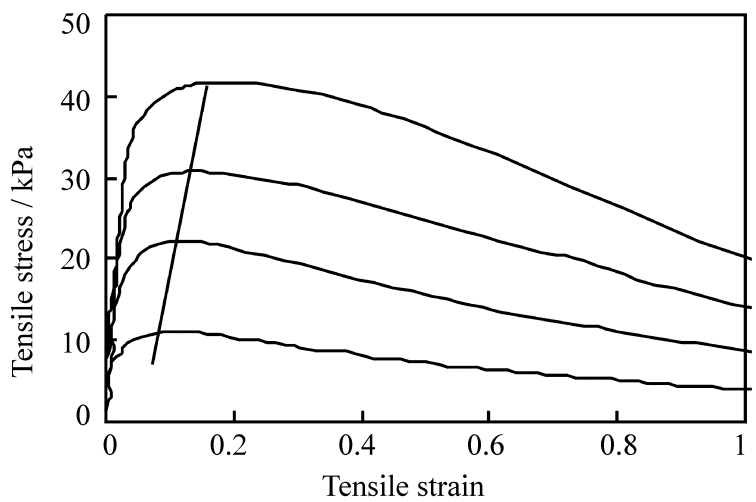

图 4　拉伸应力与拉伸应变的关系

Fig. 4　Tensile stress versus tensile strain

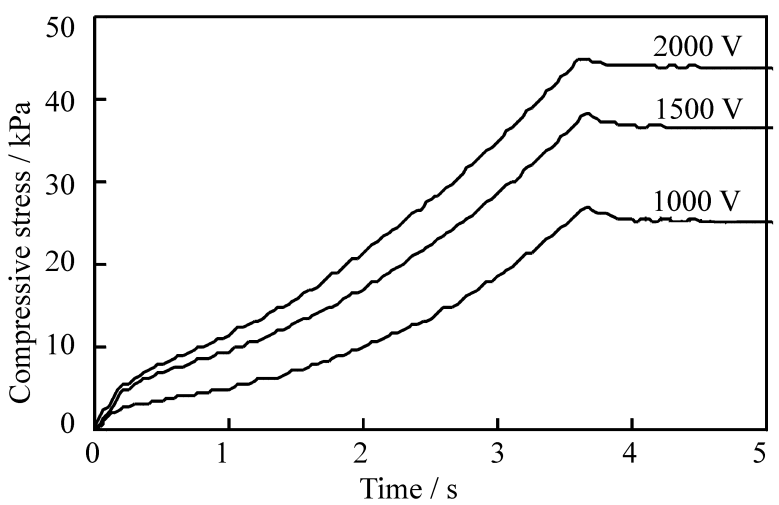

图 5　压应力与时间的关系

Fig. 5　Compressive stress versus time

2.2　压缩实验结果

外电场作用下的电流变液的压缩实验结果如图 5和图 6所示，图 5 为压应力与时间的关系，图 6 为压应力与压应变的关系。从图中可以看到压应力随着压应变的增加而增加，压应力的上升可以分为两个阶段，第一阶段，过程较短，随着下极板的运动，作用在上极板上的压应力增加较快，而且随着电压的升高，这个阶段越长。从应力应变曲线上看，即在

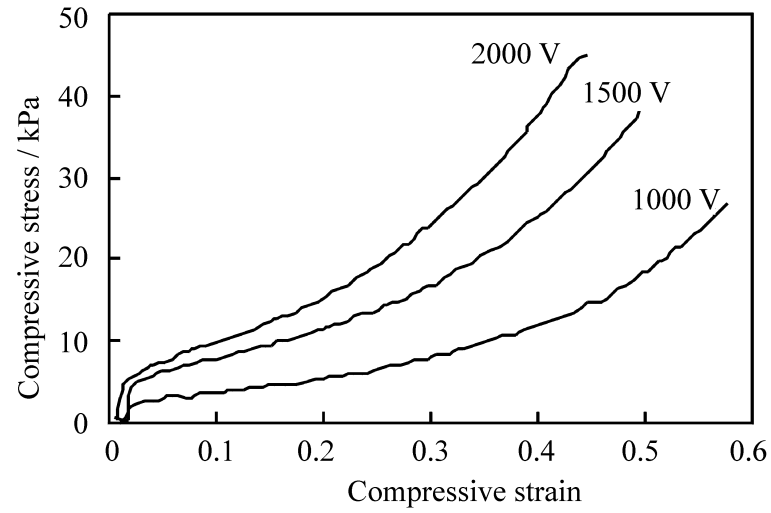

图 6　压应力与压应变的关系

Fig. 6　Compressive stress versus compressive strain

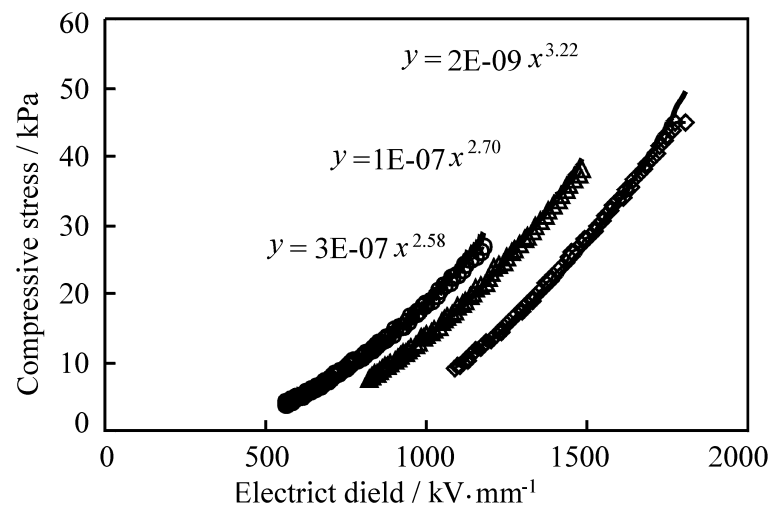

图 7　压应力与电场强度的关系

Fig. 7　Compressive stress versus electric field

这个阶段内，电流变液的应变基本不变，而测试的应力增加，表现为电流变液的固有的抗压强度。但是这个值比较小，而且随着外加电场的升高略有增加。第二阶段，随着压应变的增加，压应力也增加，而且压缩弹性模量、压缩应力应变曲线的斜率，也不断增加。

压缩过程中的压应力与电场大小的关系如图 7 所示。此图表明，对同一电流变液，压应力的大小不但与外电场强度有关，而且与已发生的压缩应变大小有关。同一电场下，压应变较大对应的压应力也较大，可以理解为压缩过程增加了实际的电流变液的浓度，使结构更加致密。以指数关系回归不同电压下的压应力与电场强度的曲线，得到指数随着外加电压的增大呈上升趋势。

压缩过程的压缩弹性模量与电场强度大小的关系如图 8 所示。随着电场的增加，压缩弹性模量也呈指数增加，而且都接近 3 次方。对多条压缩曲线进行处理有类似结果。

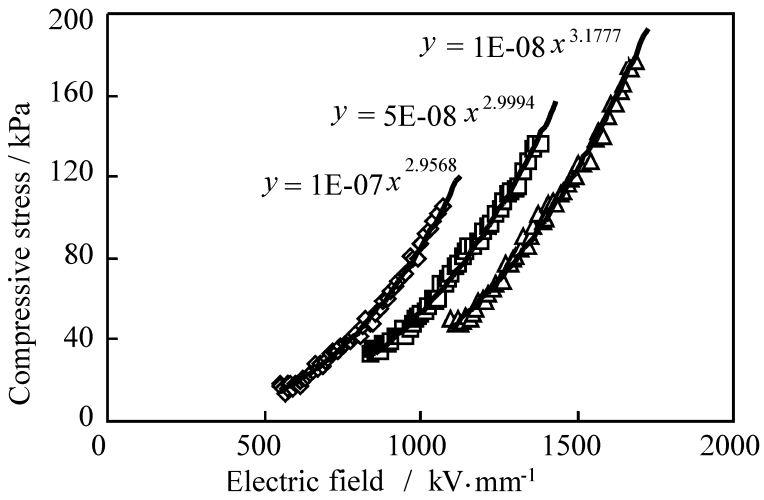

图 8　压缩弹性模量与电场强度的关系

Fig. 8　Compressive modulus versus electric field

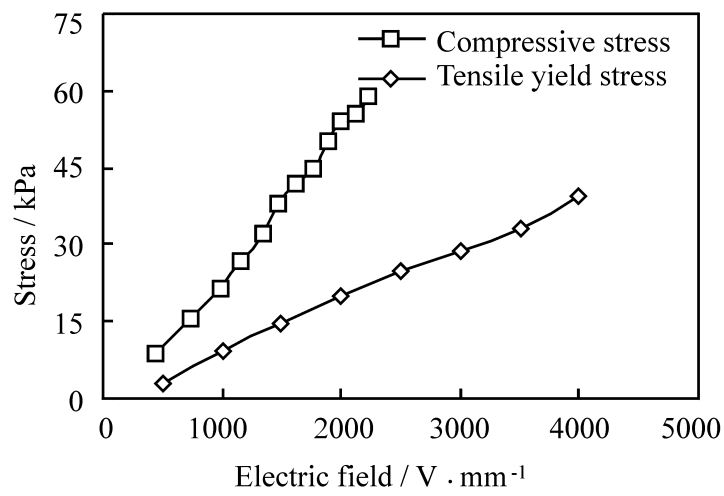

图 10　拉伸屈服应力与压应力

Fig. 10　Tensile yield stress and compressive stress

2.3　剪切实验结果

使用流变仪测试得到的各电场作用下的剪切屈服应力和电流密度如图 9 所示。剪切屈服应力与外加电场强度的 1.34 次方成正比。电流密度与电场强度的关系也如图 9 所示。经过曲线拟合，在测试电场范围内，电流密度约与电场强度的 2.5 次方成正比。

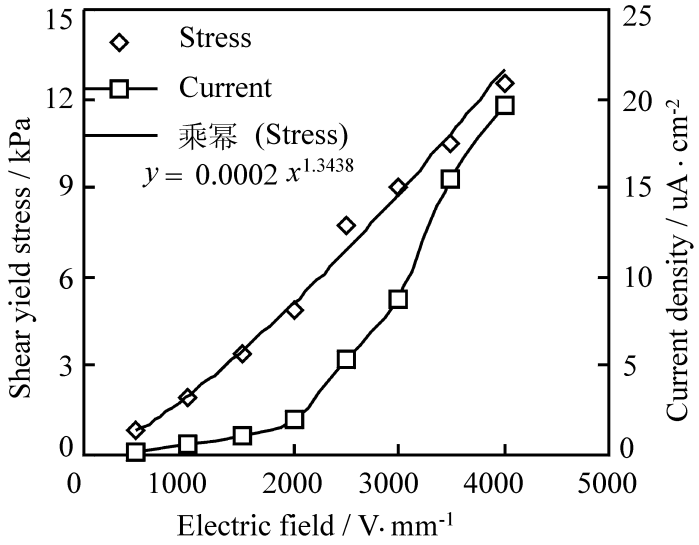

图 9　剪切实验结果

Fig. 9　Results of shearing test

2.4　三个实验结果比较及讨论

拉伸屈服应力和每个压缩过程最后的压应力与相应的电场强度如图 10 所示。经过拟合，两个应力都约与电场强度的 1.2 次方成正比。将各个电场强度下的压应力与拉伸屈服应力以及剪切屈服应力进行比较，其比例关系如图 11 所示。压应力约是相同电场作用下的剪切应力的 10 倍，是拉伸屈服应力的 2～3 倍。拉伸屈服应力是相同电场作用下的剪切屈服应力的 3～4 倍。

拉伸屈服应力体现了电流变液中的介电颗粒之间在电场方向上的相互作用力的宏观统计力学效应，剪切屈服应力体现了电流变液中的颗粒在垂直于电场方向(沿着剪切方向)的相互作用力的宏观统

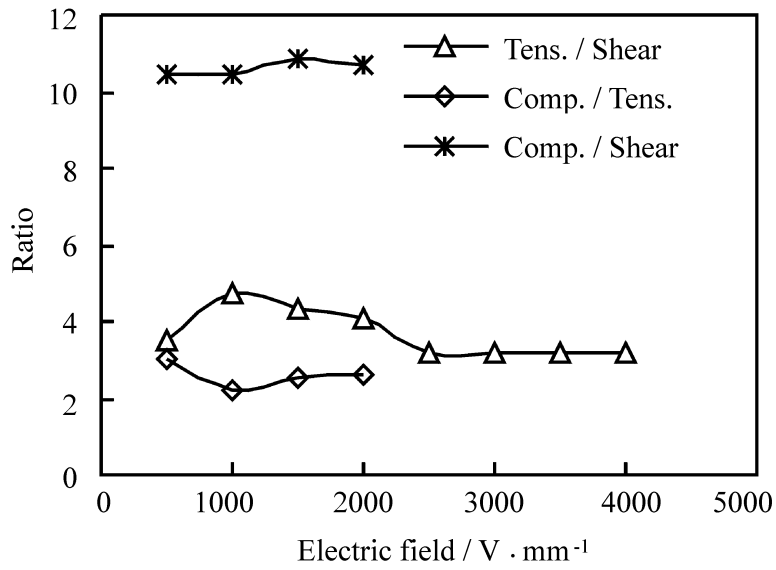

图 11　三种应力大小比较

Fig. 11　Comparison of the three stresses

计力学效应。考虑电流变效应的极化模型中对这两个力的描述，$f_E = f_{elg}\sin[$，其中 [为剪切屈服应变角，$[= \mathrm{arctg}V$，V 为剪切屈服应变。根据笔者测试得到的数据，计算得到 [在 15～18.5°之间。这一结论与 Conrad 等人测得 V= 0.3，[= 16.7 吻合很好[12]。这说明电流变液的拉伸屈服应力和剪切屈服应力有很好的对应关系。这样就以实验结果从宏观上验证了沿电场方向力和剪切方向上的力之间的关系，直接验证了基于极化模型的电流变液剪切应力的位错角度计算模型的正确性。

对材料的拉伸和剪切而言，通常金属材料的拉伸强度比剪切强度高 70% 左右，而各向异性的纤维复合材料的纤维轴向拉伸强度要高出剪切强度很多。相比之下，电流变液与纤维材料比较类似，在电场作用下会形成沿电场方向的链状、柱状结构，如上分析，电流变液中的颗粒沿电场方向上的作用力也要远强于垂直于电场方向上的作用力。

由于拉伸和剪切对电流变液的浓度没有发生改

变，而压缩此过程会使电流变液结构变致密，浓度增大。在对电流变液的屈服应力研究中，人们普遍发现电流变效应随着颗粒体积比率的增加而增强[13]。这样，电流变液的压缩过程与拉伸和剪切不好直接比较，不过根据电流变液的各种力相互之间数量级大小关系，可以用剪切屈服应力来估计电流变液的压应力。另外笔者研究的是电流变液在电场作用下的缓慢压缩，考虑的是其作为类固体材料的压缩力学性质，与一些理论分析仍将其作为流体进行研究有一定区别[14]。

另外根据实验结果，电流变液的剪切屈服应力远小于其压应力和拉伸屈服应力。将后两种较大的力应用到电流变器件中，电流变液的强度不够大的限制就会被削弱。压应力的应用人们已经注意到，并设计了利用电流变液压缩效应的电流变减振器。根据实验结果，利用电流变液的压应力和拉伸应力来详细设计新的电流变器件就更成为可能，这些新的电流变液的应用方式可能大大推动电流变研究和应用的发展。

3　结　论

实验结果表明，基于沸石和硅油的电流变液作为一种在电场作用下从液体向准固体转化的智能流变材料，在外电场作用下，其压应力约为剪切屈服应力的 10 倍，约为拉伸屈服应力的 2～3 倍。拉伸屈服应力约为剪切屈服应力的 3～4 倍，验证了极化模型对电流变液体剪切应力描述的合理性。实验得到的电流变液的剪切屈服应变也与其他研究人员的结果吻合。根据电流变液的这些性质，可以设计利用电流变液的压应力和拉伸屈服应力的新的电流变器件。

参考文献：

[1] Coulter J P, Weiss K D, Carlson J D. Engineering applications of electrorheological materials [J]. J Intel Mat Sys & Struc, 1993, 4: 248- 259.

[2] Kawakami T, Aizawa R. ER suspensions of sulfonated poly (styrene-co-divinylbenzene) particles [J]. Intel J Mod Phys B, 1999, 13: 1721- 1728.

[3] Ma Y, Zhang Y L, Lu K Q. Frequency and temperature dependence of complex strontium titanate electrorheological fluids under an alternating electric field [J]. J Appl Phys, 1998, 83: 5522- 5524.

[4] Tian Y, Meng Y G, Wen S Z. Electrorheology of a zeolite/silicone oil suspension under dc fields [J]. J Appl Phys, 2001, 90: 493- 496.

[5] Bollough W. In: The Proceeding of 5th International Conference of Electrorheological Fluids, Magnetic Suspensions and Related Technologies [C]. U K: Sheffield, 1995.

[6] Williams E W, Rigby S G, Sproston J L, et al. Electrorheological fluids applied to an automotive engine mount [J]. J Non-Newtonian Fluid Mech, 1993, 47: 221.

[7] Sproston J L, Rigby S G, Williams E W, et al. Numerical simulation of electrorheological fluids in oscillatory squeeze-flow [J]. J Phys D: Appl Phys, 1994, 27: 338.

[8] Tao R, Sun J M. Three-dimensional structure of induced electrorheological solid [J]. Phys Rev Lett, 1991, 67: 398- 401.

[9] Chen T J, Zitter R N, Tao R. Laser diffraction determination of the crystalline structure of an electrorheological fluid [J]. Phys Rev Lett, 1992, 16: 255- 258.

[10] Tao R, Jiang Q. Simulation of structure formation in an elelctrorheological fluid [J]. Phys Rev Lett, 1994, 73: 205- 208.

[11] Lukkarinen A, Kaski K. Simulation studies of electrorheological fluids under shear, compression and elongation loading [J]. J Appl Phys, 1998, 83: 1717- 1725.

[12] Wu C W, Chen Y. Conductivity and force between particles in a model eletrorheological fluid: Interaction force [J]. Intel J Mod Phys B, 1996, 10: 3327- 3334.

[13] 高向阳，赵晓鹏，郑长卿. 电流变液的动态屈服应力 [J]. 复合材料学报，2000, 17(1): 11- 14.

[14] 朱克勤，葛　荣，席葆树. 圆盘间的电流变液挤压流 [J]. 清华大学学报，1999, 39(8): 80- 83.