

直流电场中电流变体单链的 电学行为及剪切强度^{*}

吴承伟 郭杏林

(大连理工大学工程力学研究所, 大连 116024)

HANS CONRAD

(Department of Materials Science and Engineering, North Carolina State University,

Raleigh, NC 27695-7907, USA)

(1996 年 7 月 1 日收到; 1997 年 1 月 29 日收到修改稿)

研究了由微小的潮湿玻璃球(直径为 200—220 μm)在硅油中加直流电场后形成的单“链”的电学行为及剪切强度. 发现流过静态(无剪切)单链的电流随外加电场强度的增加而增加, 受剪单链的剪切屈服应力与外加电场强度约 1.4 次幂成正比, 这个电流和剪切屈服应力与组成链的玻璃球数(3—5 个)几乎无关. 实测单链的平均电流密度和剪切屈服应力随电场强度的变化与理论预言符合良好.

PACC: 4660; 0660; 0630L; 0630M

1 引 言

电流变体(electrorheological fluid)是由易受电场极化的细小颗粒均匀悬浮于导电性很弱的流体中所形成. 在电场作用下, 这些小颗粒会立即(毫秒量级)被极化并在两极板间形成许多链^[1], 一个链是由许多小颗粒连续排列组成的. 撤去电场后链会立即消失. 这些链的电学性质及抗剪切强度决定了电流变体的主要性质. 早期有关电流变体的理论研究^[2,3]认为载流体的电导率为零, 从而得出结论电流变体的剪切强度与极化率 $\beta = (\epsilon_p - \epsilon_f) / (\epsilon_p + 2\epsilon_f)$ 及电场强度 E 的平方成正比, 并且只有 $\beta > 0$ 时才有电流变效应. 这里 ϵ_p 和 ϵ_f 分别为固体颗粒和载流体的电容率. 但是实验表明, 电流变体的屈服切应力并不与电场强度的平方成正比(特别是在直流电场下)^[4], 同时又发现通过电流变体的电流密度又相当可观^[1,5,6]. 并且电流密度随电场强度的 1—5 次幂增加. 因而人们又开始研究颗粒及载流体的电导率对电流变体的电学行为和力学行为的影响^[5,6]. 在直流电场下, 极化率 $\beta = (\sigma_p - \sigma_f) / (\sigma_p + 2\sigma_f)$, 这里 σ_p 和 σ_f 分别为颗粒和载流体的电导率(以前认为是常量). 在交流电场下极化率应用复极化率 $\beta^* = (\epsilon_p^* - \epsilon_f^*) / (\epsilon_p^* + 2\epsilon_f^*)$ 代替, 其中 $\epsilon^* = \epsilon + \sigma/i\omega$, 下标 p 和 f 分别表示颗粒 (particle) 和载流体 (fluid), ω 为电场的圆频率, $i = (-1)^{1/2}$. 但是这些分析仍然不能很好地解释实验结果. 近来的研究表明载流体的电导

^{*} 国家自然科学基金和高等学校博士学科点专项科研基金资助的课题.

率并不是常量^[7,8],而是电场强度的非线性函数,可以用下式近似表示:

$$\sigma_f(E) = j/E = \sigma_f(0)[1 - K + K \exp(E/E_c)^{1/2}], \quad (1)$$

式中 j 为电流密度, $\sigma_f(0)$ 是流体在低电场时的电导率, K 为一常数, E_c 为临界电场. 在此基础上,对电流变体在直流电场下的剪切强度和电流密度的理论预言与实验结果相当一致^[9-11].

本文以电流变体工作时最基本的组成单元——链为研究对象,实验观察了在直流电场下链的形成与受剪断裂过程,测出了单链的电流密度随电场强度及切应变的变化以及单链的切应力随电场强度及切应变的变化. 实测结果与非线性导电模型的理论计算符合良好.

2 实验材料与测试方法

2.1 实验材料

载流体为硅油,由美国 Dow Corning 公司生产,在室温下(25℃)运动粘度为 50 mPa·s,相对密度为 0.973,电容率为 2.5. 所用固体颗粒为美国 Potter 工业公司生产的玻璃球,直径为 200—220 μm,相对密度为 2.5,电容率(1 MHz, 20℃)为 7.2. 其主要成分如下: 72.5% SiO₂, 13.7% Na₂O, 9.8% CaO, 3.3% MgO, 0.4% Al₂O₃, 0.1% K₂O, 0.2% 的 FeO 和 Fe₂O₃. 该材料的电导率在 10 kV/mm 以下为常量, $\sigma_p = 4 \times 10^{-13}$ S/m^[11]. 显然 $\sigma_p < \sigma_f$, 用纯玻璃球为电流变粒将没有电流变效应^[5]. 为了增加颗粒的电导率,在使用前将玻璃球放在含有 1:4 氯化锂(LiCl)水溶液的密封容器中保持 2 d 以后使其表面充分吸水. 这样处理后的玻璃球表面的吸水膜厚度为 22—30 nm^[11]. 全部实验在室温条件下完成(T=22℃,相对湿度 RH=(51—53)%).

2.2 测试方法

测试装置的原理图如图 1(a)所示,通过光学显微镜可以直接观察到单链的形成及受剪情况. 硅油盛在 35mm×9mm×30 mm 的透明玻璃槽内,槽的底面镶有一块铜片作为电场的正极,阴极是铜摆的底面,其面积为 $A = 0.2375$ cm². 铜摆和玻璃槽均可在上下、左右、前后三个方向上调整. 当链在两极间形成以后,移动玻璃槽可使链受剪. 当链受剪时链的几何变形和铜摆的受力如图 1(b)所示,链的切应变可由链的上下端的水平相对位移 δ 求出 $\gamma = \delta/h$, 链的剪力 F_s 可由对摆的受力分析由下式求出:

$$F_s = (W + F_e) \tan \alpha / (1 - \tan \alpha / \gamma), \quad (2)$$

式中 W 为摆在硅油中的重力(1.1×10^{-2} N), F_e 是介质为硅油时两电极间的引力, F 为链的轴向拉力, T 为摆线的拉力, α 为摆线的偏移角. 之所以采用这种方法测量链的剪力是因为链的剪力太小,只有 10^{-5} N 数量级,采用常规的办法难以测量. 实验中缓慢水平移动下极板,通过显微镜可以直接观察到摆的水平微小位移 Δ 和链两端的水平相对位移 δ , 即可求出 $\tan \alpha = \Delta/L$, $\gamma = \delta/h$, 并进而由(2)式求出链的剪力. (2)式中 F_e 必需预先测

出,本文中是采用贴有应变片的悬臂梁将铜摆吊起,测出两极板间当硅油为介质时的引力.

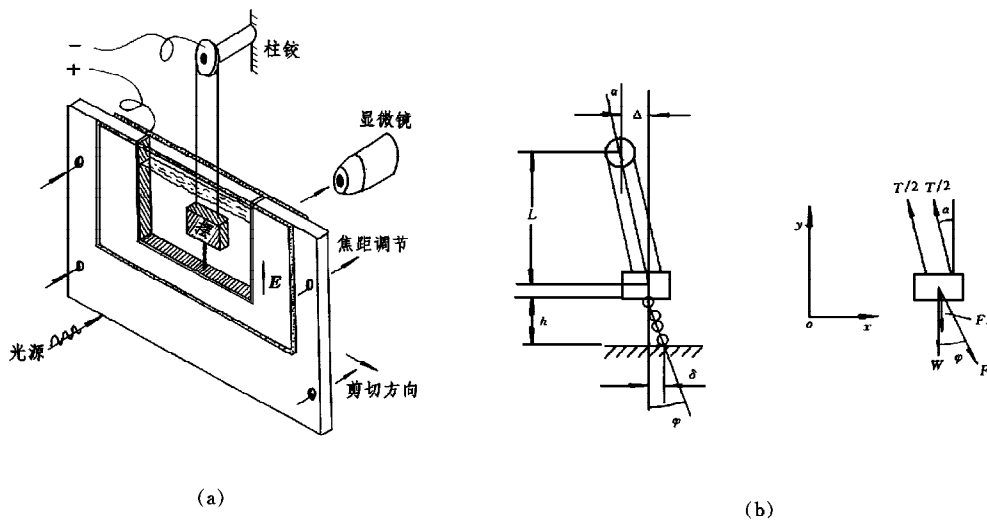
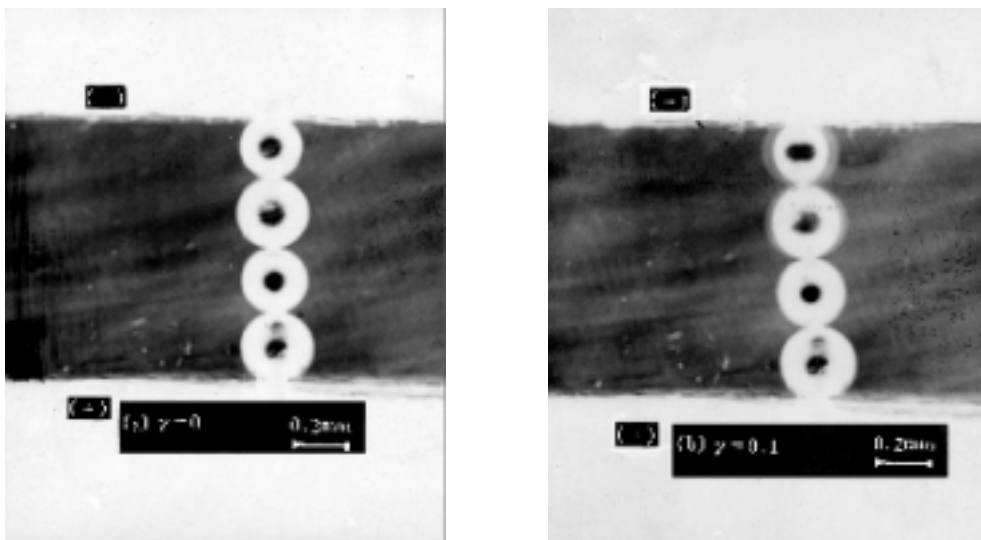


图 1 测试装置及测试原理简图

链的全部形成及剪切破坏过程可以通过电视屏幕观察,并用录像机录下全过程以备



(a) 切应变 $\gamma=0$

(b) $\gamma=0.1$

图 2 两个典型的单链 ($E=0.6 \text{ kV/mm}$)

数据整理.在两极之间形成单链需要相当高的技巧和非常仔细的操作.图 2 是两个典型的单链,图 2(b)中最上面的两球沿链的轴线跳动,因而照片中有虚影.

3 测试结果与理论计算的比较

通过两极板间的电流由两部分组成:通过链的电流和通过硅油的电流.首先测出了纯硅油的电流密度 j .用(1)式对所测的数据进行最小二乘法拟合可得该硅油的三个非线性电导率参数为 $\sigma_f(0) = 2.4 \times 10^{-12} \text{ S/m}$, $K = 0.007$, $E_c = 0.21 \text{ kV/mm}$.

图3是通过硅油和一个静态单链($\gamma = 0$)的总平均电流密度 J_t (总电流被铜摆的底面积除之)随电场的变化,通过单链的平均电流密度可由下式求出:

$$J = A(J_t - j)/(\pi r^2), \quad (3)$$

式中 $r = 105 \mu\text{m}$ 为玻璃球的平均半径.由于通过单链和硅油的总电流要比通过纯硅油的电流大一个数量级,总电流主要由通过链的电流所决定.图4给出了通过单链的平均电流密度 J .显然,通过单链的电流密度随电场强度的增加而增加,与组成链的玻璃球数几乎无关.

所用玻璃球材料的电导率为 $4 \times 10^{-13} \text{ S/m}^{[12]}$,表面吸附水膜的电导率为 $1.5 \times 10^{-4} \text{ S/m}^{[13]}$,若水膜厚度为 22 nm ,则玻璃球的复合电导率为 $\sigma_p = 8 \times 10^{-8} \text{ S/m}^{[14]}$.使用上面给出的硅油的三个非线性电导率参数和(1)式,实测静态单链的电流密度与文献[10]的电流变导电模型及文献[11]对水膜导电行为的计算结果符合良好(见图4).链的电流密度与电场强度的1.3—1.4次幂成正比,与组成链的玻璃球数无关.

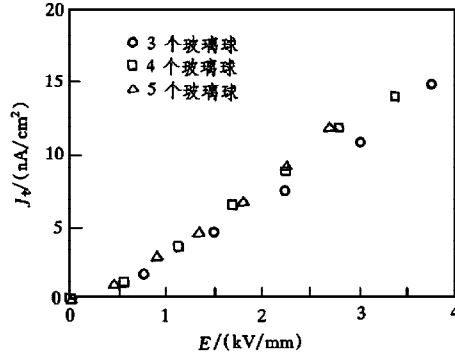


图3 通过硅油和静态链的总电流密度 J_t 随电场的变化

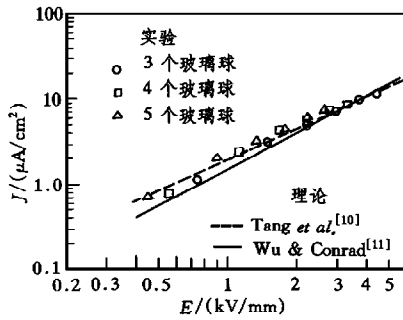


图4 静态单链的电流密度 J 随电场变化的实验与理论计算^[10,11]的比较

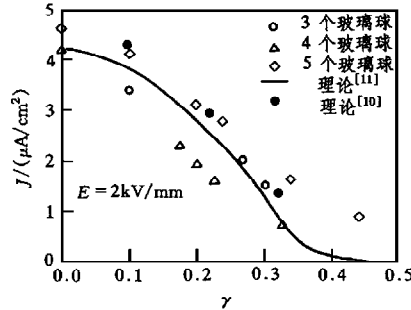


图5 受剪单链的电流密度 J 随切应变变化的实验与理论计算^[10,11]的比较

图5给出了电场为 2 kV/mm 时链的电流密度随切应变的变化,链的电流密度随切应变的增大而减小.当链受剪以后,玻璃球间的间距逐渐增大,其中一个或两个球会沿链的轴线上下跳动,跳动的频率随电场强度的增加而增大,以至于肉眼很难辨别及用普通照

相机难以拍摄. 因此所测得的电流是由传导电流和电荷交换两部分组成.

但是实测的受剪链的电流密度当切应变大于 0.35 以后比理论预言的高. 这是因为实测电流包括两部分: 传导电流和电荷交换. 当切应变较小时, 以传导电流为主; 当切应变较大时以电荷交换为主. 而理论计算只考虑了静态传导电流. 关于电流变颗粒跳动引起电荷交换的动态电流过程只有当颗粒尺寸较大时才容易观察到, 在文献[15]中有较详细的报道(颗粒直径为 2 mm).

图 6 至图 8 分别是由 3, 4 和 5 个玻璃球组成的链的切应力随切应变的变化, 链的切应力是用玻璃球的最大截面积(πr^2)除以剪力而得到. 首先链的切应力随切应变的增加而近似线性增加, 当达到最大值(屈服切应力)以后切应力随切应变的增加而减小, 直至最后断裂. 链的剪切屈服应力和剪切模量与组成链的玻璃球数几乎无关.

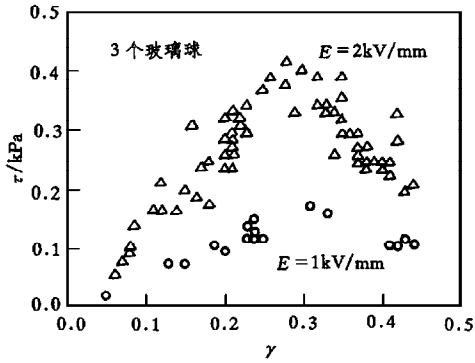


图 6 3 个玻璃球组成的链的切应力-应变关系

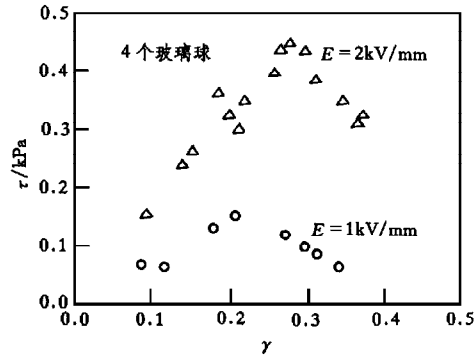


图 7 4 个玻璃球组成的链的切应力-应变关系

实验中发现, 当切应变较大使切应力超过屈服极限后, 跳动的玻璃球变成沿以链的轴线方向为长轴的椭圆轨迹运动, 直至跳向某一个电极使链断裂.

图 9 给出了实测与理论计算单链的剪切屈服应力, 在 Wu 和 Conrad^[10]的非线性导电

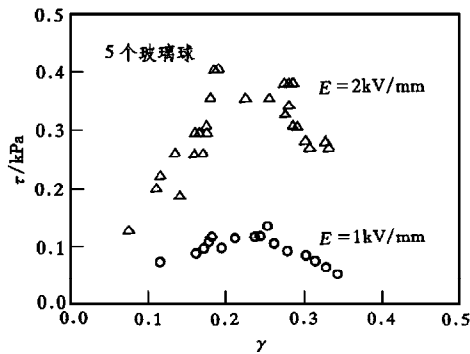


图 8 5 个玻璃球组成的链的切应力-应变关系

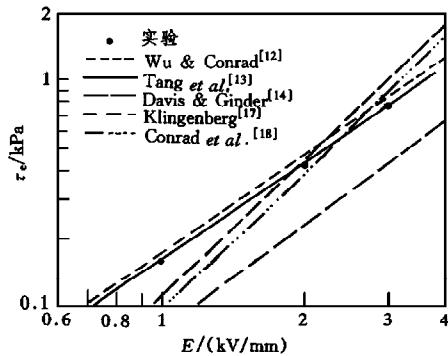


图 9 实测链的剪切屈服应力与理论计算的比较

模型中, 我们使用本文给出的硅油和玻璃球的电导率参数进行了计算, 结果表明剪切屈服应

力与电场强度的 1.4 次幂成正比,与实验结果符合良好.Klingenberg^[16]和 Conrad 等^[14]的线性极化模型预期剪切屈服应力与电场强度的平方成正比,与实验结果误差较大。

4 讨 论

关于含水电流变体的工作机理 Stangroom^[17]曾提出了“水桥模型”假设.他认为在外加电场作用下固体颗粒形成链以后,在颗粒之间有连结两颗粒的“水桥”形成,当链受剪时水桥的表面张力决定了链的剪切强度.这个假设近年来逐渐被导电模型和极化模型对实验结果的良好预言所否定.首先若“水桥模型”假设成立,则链的导电性质和剪切强度将由“水桥”的导电性质决定,从而链的电流密度应比实验结果高几个数量级,并与电场强度成正比;其次,若“水桥模型”假设成立,当受剪链分离使“水桥”断裂时,链的受拉强度和电流密度会突然下降,实验中没有发现这种现象;再者,“水桥模型”假设无法解释球在链中的跳动现象,因为若表面张力决定链的剪切强度,则链中的某两球分离后张力消失,球不会再跳回来.更重要的是,我们对链在受剪过程中的显微镜观察没有发现水桥的形成.因此,从本文的实验结果来看,表面张力至少不是含水电流变体工作的主要机理.

表面水膜的主要作用是提高玻璃球的电导率,从而降低在玻璃球上的电场而增加在玻璃球之间的油的电场,使玻璃球之间的引力增大^[9-11].

5 结 论

通过上述实验研究与理论预言比较,可得出如下几点结论:

1. 硅油的电导率是电场的非线性函数,即: $\sigma_f(E) = j/E = \sigma_f(0) [1 - K + K \exp(E/E_c)^{1/2}]$, 室温下三个非线性电导率参数为 $\sigma_f(0) = 2.4 \times 10^{-12} \text{ S/m}$, $K = 0.007$, $E_c = 0.21 \text{ kV/mm}$.
2. 静态单链的电流密度是电场的非线性函数,与电场强度的 1.3—1.4 次幂成正比.实测与理论计算符合良好.实验结果表明“水桥模型”不能解释含水电流变体的导电机理.
3. 单链的电流密度随剪切应变的增加而减小,直至链被剪断为止.受剪链的实测电流包括两部分:传导电流和电荷交换.当切应变较小时,以传导电流为主;当切应变较大时以电荷交换为主.而理论计算只考虑了静态传导电流,因而当切应变较高时,实测电流比理论预言的高.
4. 组成链的玻璃球数对链的电流密度没有影响,与理论预言一致.
5. 当链在小切应变作用下,至少有一个以上玻璃球沿链的轴线跳动,电场越大跳动的频率越快.但是当切应变较大使切应力超过屈服极限后,跳动的玻璃球变成沿以链的轴线方向为长轴的椭圆轨迹运动,直至跳向某一个电极使链断裂为止.
6. 在较小的切应变下,剪力随切应变的增加而近似线性增加,剪力达到最大值(屈服点)以后又开始随切应变的增大而减小,直至链断裂为止,与非线性导电模型的理论预言一致.
7. 受剪单链的剪切屈服应力与外加电场强度的 1.4 次幂成正比,剪切屈服应力与组

成链的玻璃球的数量(3—5个)无关. 实测单链的剪切屈服应力随电场强度的变化与非线性导电模型的理论预言符合良好.

本文实验工作是在美国北卡州立大学材料科学与工程系先进材料实验室完成, 特此致谢.

- [1] H. Conrad and A. F. Sprecher, *J. Statistical Phys.*, **64** (1991), 1073.
- [2] R. T. Bonnecaze and J. F. Brady, Proc. 2nd Int. Conf. ER Fluids, ed. by J. D. Carlson, A. F. Sprecher and H. Conrad (Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, USA, 1990), p. 27.
- [3] D. J. Klingenberg and C. F. Zukoski, *Langmuir*, **6**(1990), 15.
- [4] A. F. Sprecher, J. D. Carlson and H. Conrad, *Materials Sci. Eng.*, **95**(1987), 187.
- [5] L. C. Davis, *J. Appl. Phys.*, **72**(1992), 1334.
- [6] H. Conrad and Y. Chen, Progress in Electrorheology, ed. K. O. Havelka and F. E. Filisko(Plenum Press, New York, 1995), p. 55.
- [7] N. Felici, J. N. Foulc and P. Atten, Proc. 4th Int. Conf. ER Fluids, ed. R. Tao and G. D. Roy(World Scientific Press, Singapore, 1994), p. 139.
- [8] C. W. Wu, Y. Chen, X. Tang and H. Conrad, *Inter. J. Mod. Phys.*, **B10**(1996), 3315.
- [9] X. Tang, C. W. Wu and H. Conrad, *J. Rheol.*, **39**(1995), 1059.
- [10] C. W. Wu and H. Conrad, *J. Phys.*, **D29**(1996), 3147.
- [11] X. Tang, C. W. Wu and H. Conrad, *J. Appl. Phys.*, **78**(1995), 4183.
- [12] Y. Chen, Ph. D. Thesis(North Carolina State University, USA, 1992).
- [13] J. Vermeer, *Physica*, **XXII**(1956), 1257.
- [14] L. Holland, The Properties of Glass Surfaces(Wiley, New York, 1964).
- [15] Z. P. Shulman and A. D. Matsepuro, Proc. 2nd Int. Conf. ER Fluids, ed. J. D. Carlson, A. F. Sprecher and H. Conrad (Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, USA, 1990), p. 207.
- [16] D. J. Klingenberg, Master Thesis(University of Illinois at Urbana Champaign, USA, 1989).
- [17] J. E. Stangroom, *Phys. Technol.*, **14**(1983), 290.

ELECTRICAL PROPERTY AND SHEAR STRENGTH OF A SINGLE CHAIN IN ELECTORHEOLOGY UNDER DC ELECTRICAL FIELD

WU CHENG-WEI GUO XING-LIN

(*Research Institute of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024*)

HANS CONRAD

(*Advanced Materials Technology Laboratory Department of Materials Science and Engineering,*

North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-7907, USA)

(Received 1 July 1996; revised manuscript received 29 January 1997)

ABSTRACT

The electrical property and shear strength of a single chain formed in silicone oil is studied under dc electrical field, which consists of small humidited glass spheres (diameter is 200—220 μm). It is found that the current flowing through a static (no shear) single chain increases with the increase in electrical field strength. The current and the yield shear stress is almost independent of the number (3—5) of the glass spheres to form the chain. The measured average current density and yield shear stress of a single chain versus the field strength is fairly agreement with that predicted theoretically.

PACC: 4660; 0660; 0630L; 0630M