

电流变体链组的剪切力学性质 *

郭杏林 吴承伟

Hans Conrad

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室) (美国北卡州立大学)

摘 要 研究了直流电场中微小玻璃球 (直径约为 $220\mu\text{m}$) 以矩形或立方结构在硅油中形成的“链组”的剪切力学行为, 观察了链及链组的形成、剪切、屈服和断裂过程. 发现链组的剪切强度随组成链组的链数和电场强度的增加而增加, 链组的剪切模量与组成链组的链数几乎无关, 仅随电场强度的增加而增加.

关键词 电流变 链组 剪切 电场

分类号 TB39

MECHANICAL PROPERTY OF SHEARED CLUSTERS IN ELECTORRHEOLOGY

GUO Xinglin** WU Chengwei

(State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116023)

Hans Conrad

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

ABSTRACT The mechanical behavior of sheared cluster formed in silicone oil with a rectangular or cubic lattice is studied under DC electrical field. The cluster consists of small humidity glass spheres (diameter is about $220\mu\text{m}$). The processes of formation, shearing, yield and fracture of the cluster were observed. It is found that the shearing strength of a cluster increases with the chain number in the cluster and the electrical field strength. The shear modulus is almost independent of the chain number in a cluster, but increases with applied electric field.

KEY WORDS electrorheology, cluster, shear, electrical field

电流变体的最基本组成单元是横跨电场两极的链^[1], 这些链再结合为链组, 电流变体的电学与力学性质就是由这些链组决定的. 大量的理论研究^[2~6]都是以单链为研究对象, 这些理论预报与实验结果^[7~9]基本吻合. 但真实电流变体中链的电学与力学性质并不是单一的, 关于链组的理论研究^[10~12]表明当单链结合成链组以后, 剪切力学性质不同于单链. 目前关于链组的理论研究^[10~12]都是以线性极化理论为基础, 即假设材料的介电率和导电率均为常数.

* 国家自然科学基金资助项目 19472015 和辽宁省科学基金资助项目 931004.

1998 年 1 月 4 日收到初稿; 1999 年 4 月 22 日收到修改稿.

本文联系人: 郭杏林, 副教授, 大连市 116023, 大连理工大学工程力学系

** To whom correspondence should be addressed

电学性质及抗剪切强度是电流变体的两个主要性质. 这两个因素常常相互影响有时又相互矛盾, 例如当载流体选定以后, 在直流电场下固体颗粒的电导率越大电流变体的剪切强度越大, 但相应的电流密度也随之急剧增大^[5~9]. 线性极化模型认为电流变体链组的屈服剪应力与电场强度 E 的平方成正比^[2~4,10~12]; 非线性导电模型认为电流变体的屈服剪应力与电场强度 E 的 1~2 次方成正比^[5,6], 低电场时幂指数趋于 1, 高电场时幂指数趋于 2. 而电流密度随电场强度的 1~5 次幂比例增加^[1,5~9,13]. 由于链组结构的复杂性, 理论分析必须做一些简化, 导致不同的理论可能给出不同的结论^[10,12]. 本文测量了简单立方结构排列的链组在不同直流电场下的剪切量和剪切屈服应力.

1 实验方法

实验载流体为硅油, 由美国 Dow Corning 公司生产, 在室温下 (25 °C) 运动粘度为 50mPa·s, 比重为 0.973, 介电常数为 2.5. 所用固体颗粒为美国 Potter 工业公司生产的玻璃球, 直径约为 220 μ m, 比重为 2.5, 介电常数 (1MHz, 20 °C) 为 7.2. 玻璃球的化学成份、表面处理方法及电学性质参见文献 [8].

测试装置的工作原理见文献 [9]. 硅油盛在透明的玻璃槽内, 槽内底面镶有一块铜片作为电场正极, 铜摆底面为电场负极. 铜摆和玻璃槽均可在上下、左右和前后三个方向移动. 当链组在两极间形成后, 移动玻璃槽可使链组受剪. 其剪应变 γ 可由链组的上下端的水平相对位移 δ 求出, $\gamma = \delta/h$, 链组的剪力 F_s 为:

$$F_s = F \sin \varphi = (W + F_e) \tan \alpha / (1 - \tan \alpha / \gamma) \quad (1)$$

式中 W 为摆在硅油中的重力, F_e 是介质为硅油时两电极间的引力, F 为链的轴向拉力, α 为摆线的偏移角. 之所以采用这种方法测量链或链组的剪力是因为其剪力太小, 只有 10^{-5} N 量级, 采用常规的测量方法难以保证精度. 实验中缓慢水平移动下极板 (玻璃槽), 通过光学显微镜可以直接观察摆的水平微小位移 Δ 和链两端的水平相对位移 δ , 可求出 $\tan \alpha = \Delta/L$, $\gamma = \tan \varphi = \delta/h$, 并由式 (1) 求出链组的剪力. 用贴有应变计的悬壁梁将铜摆吊起, 由悬壁梁上的应变计测出两极板间硅油为介质时的引力 F_e .

本文研究的链均由三个球组成.

2 结果与讨论

图 1, 图 2 给出了单链、双链和三链链组的剪应力随剪应变的变化. 剪应力先随剪应变近似线性增加, 达到某一应力水平 (剪切屈服应力) 后又开始下降 (图 1, 2), 剪应变则继续增加直至链组断裂.

实测剪切屈服应力与外加电场的 1.3 至 1.5 次幂成正比, 如图 3 所示. 图 3 中实线为单链 ($N=1$) 的理论计算值^[6], 虚线为实验点的幂指数拟合曲线.

图 4 表明剪切屈服应力随链组链数 N 的增大而略有增加.

剪切强度增强因子 K_r 定义为链组的剪切屈服应力与单链的剪切屈服应力之比. 实验表明剪切强度增强因子 K_r 与电场强度有关, 图 5 是链组的剪切强度增强因子 K_r 随组成链组的链数的变化, 与 Bossis 等^[12] 的理论预报有别. 这是由于 Bossis 等的理论预报假设油的电导率为

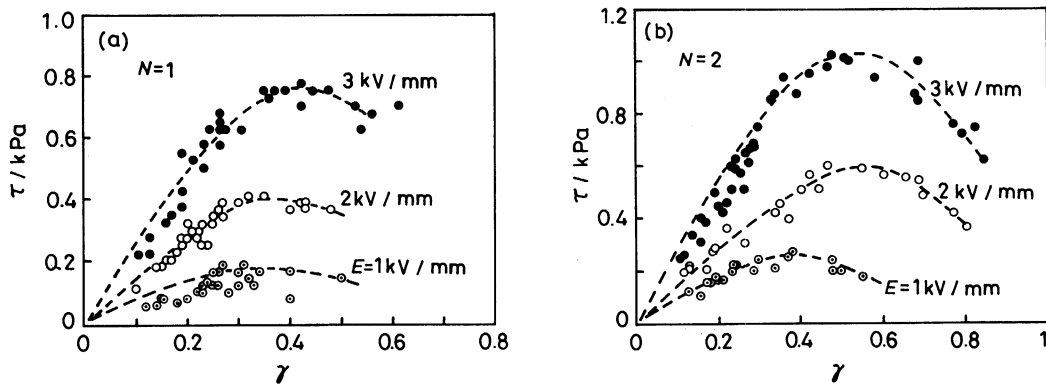


图 1 单链 (a) 和双链链组 (b) 的剪应力随剪应变的变化 (E 为电场强度)

Fig.1 Variation of shearing stress of single chain (a) and dual-chain cluster (b) with shearing strain (E is the strength of electric field)

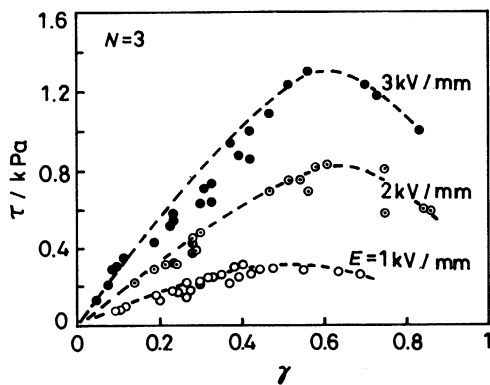


图 2 三链链组的剪应力随剪应变的变化 (E 为电场强度)

Fig.2 Variation of shearing stress of three-chain cluster with shearing strain (E is the strength of electric field)

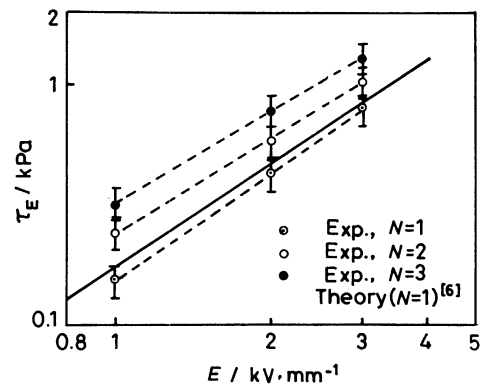


图 3 链组的剪切屈服应力随外加电场的变化

Fig.3 Variation of shearing yield stress of cluster with electric field (N is the chain number)

常量, 而实测油的电导率是电场的非线性函数^[7]. 当 $N=3$, $E=2$ kV/mm 时, 剪切强度增强因子 K_τ 约为 1.8, 在量级上与 Bossis 等^[12] 的理论预报一致.

链组的剪切模量与组成链组的链数 N 几乎无关, 图 6 给出了链组的剪切模量 ($G = \tau/\gamma$) 随组成链组的链数 N 的变化, 与 Bossis 等^[12] 的预报有别, 但与 Gulley 和 Tao^[10] 的分析相吻合. 图 7 给出了链组的剪切模量 ($G = \tau/\gamma$) 随电场强度的变化, 链组的实测剪切模量随电场强度的 1.12 次幂比例增加, 与 Wu 和 Conrad^[6] 的非线性电导率模型对单链的预报结果基本吻合 (1.24 次幂). 但并不是象线性极化模型 (油的电导率为常量, 电流密度与电导率成正比) 预报^[10~12] 的那样与电场强度的平方成正比.

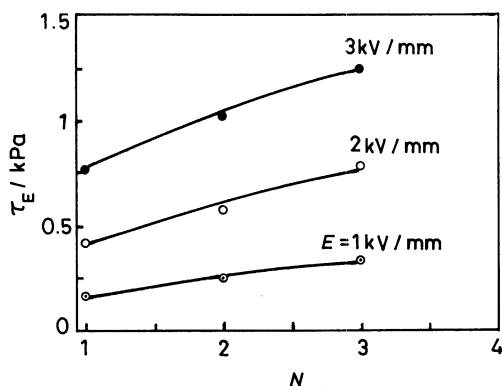


图 4 链组的剪切屈服应力随组成链组的链数 N 的变化

Fig.4 Variation of shearing yield stress of cluster with chain number N in cluster

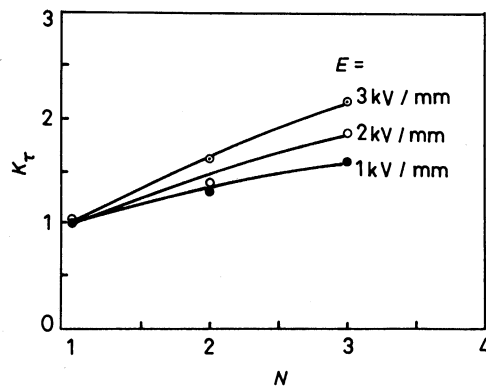


图 5 链组的剪切强度增强因子随组成链组的链数 N 的变化

Fig.5 Variation of shearing strength enhanced factor of cluster with chain number N in cluster

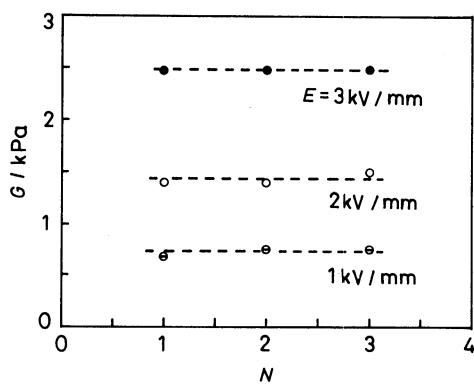


图 6 链组的剪切模量随组成链组的链数 N 的变化 ($\gamma=0.2$)

Fig.6 Variation of shearing modulus of cluster with chain number N in cluster ($\gamma=0.2$)

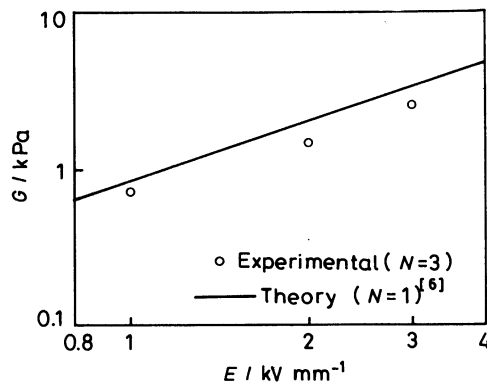


图 7 链组的剪切模量随电场强度的变化 (N 为链数, $\gamma=0.2$)

Fig.7 Variation of shearing yield modulus of cluster with strength of electric field (N is the chain number, $\gamma=0.2$)

3 结 论

链组的剪应力首先随剪应变近似线性增加, 当达到屈服点以后又开始下降. 链组的剪切强度随组成链组的链数 (1~3 个) 和电场强度 (1~3kV/mm) 的增加而增加, 在实验的电场 (1~3kV/mm) 范围内, 链组的屈服剪应力与外加电场的 1.3~1.5 次幂成正比, 幂指数随组成链组的链数 N 的增加而略有减小. 单链时幂指数为 1.5, 与理论预报^[6,13]吻合. 链组的剪切模量与组成链组的链数几乎无关, 仅随电场强度的增加而增加.

参 考 文 献

- 1 H.Conrad, A.F.Sprecher, J. Statistical Phys., **64**, 1073(1991)
- 2 R.T.Bonnecaze, J.F.Bradt, *Proc. 2nd Int. Conf. ER Fluids*, edited by J.D.Carlson, A.F.Sprecher and H.Conrad (Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, USA, 1990) p.27
- 3 D.J.Klingenberg, C.F.Zukoski, *Langmuir*, **6**, 15(1990)
- 4 Y.Chen, Ph.D.Dissertation, North Carolina State University, USA(1992)
- 5 X.Tang, C.W.Wu, H.Conrad, J. Rheol., **39**(5), 1059(1995)
- 6 C.W.Wu, H.Conrad, J. Phys. D, **29**, 3147(1996)
- 7 C.W.Wu, Y.Chen, X.Tang, H.Conrad, *Int J Modern Phys B*, **10**(23-24), 3315(1996)
- 8 吴承伟, 郭杏林, H.Conrad, *物理学报*, **46**(8), 1500(1997)
- 9 郭杏林, 吴承伟, H.Conrad, *大连理工大学学报*, **38**(2), 129(1998)
- 10 G.L.Gulley, R.Tao, in *Proc. 4th Int. Conf. ER Fluids*, edited by R Tao and G D Roy (World Scientific Press, Singapore, 1994) p.139
- 11 Y.H.Shih, H.Conrad, *Int J Modern Phys. B*, **8**(20-21), 2877(1994)
- 12 G.Bossis, H.Clercx, Y.Grasseli, E.Lemaire, in *Proc. 4th Int. Conf. ER Fluids*, edited by R Tao and G D Roy(World Scientific Press, Singapore, 1994) p.171
- 13 L.C.Davis, J.M.Ginder, in *Progress in Electrorheology*, edited by K O Havelka and F E Filisko (Plenum Press, New York, 1995) p.107