

草酸钛钙正负电流变液在电场下的宏观对比

孙新淇 王晨阳 周昱萱 齐尉序 魏 华

(重庆大学物理学院, 重庆 401331)

摘 要 本文主要从草酸钛钙正负电流变液的宏观表现出发,通过设计光学成像对比实验,拍摄到了正负电流变液各自在直流电场下内部结构的变化过程。得到的观测结果直观地验证了电流变液的内部结构变化,也间接地验证了对应的流变液理论。实验观测一方面解释了正负电流变液的某些光学性质,另一方面探究了相应的正负电流变液样品的形成机理。我们也同时拍摄到了负流变液独特的树枝状结构以及形成过程,并且发现结构形状与电场方向有关,我们尝试对这些现象给出了推测和解释。

关键词 正电流变液;负电流变液;草酸钛钙;链状结构;树枝状结构

MACROSCOPIC CONTRAST OF POSITIVE AND NEGATIVE ELECTORRHEOLOGICAL FLUIDS BASED ON CALCIUM TITANUM OXALATE

SUN Xinqi WANG Chenyang ZHOU Yuxuan QI Weixu WEI Hua

(College of Physics, Chongqing University, Chongqing 401331)

Abstract In this paper, based on the macro performance of calcium titanium oxalate positive and negative electrorheological fluids, through the design of optical imaging contrast experiment, the change process of internal structure of positive and negative electrorheological fluids under direct current electric field was observed directly, which intuitively verified the principle of chain formation of positive electrorheological fluid. On the one hand, the experimental observations explain some optical properties of positive and negative electrorheological fluids, on the other hand, the formation mechanism of corresponding positive and negative electrorheological fluid samples is explored. In the meanwhile, an unique dendritic structure and formation process of negative rheological fluid was photographed. It was found that the structure shape was related to the direction of electric field. At the end, some possible explanations for these phenomena are given.

Key words positive electrorheological fluid; negative electrorheological fluid; calcium titanium oxalate; chain structure; dendritic structure

电流变液是一种新型的可调控的智能液体。将相应的电介质颗粒均匀悬浮于油液中,外加电场后,电流变液会变得更黏稠,趋向于固态的性质,并且此过程可逆^[1,2]。人们利用电流变液对外

电场的响应特性实现了很多智能可控的机械装置。而负电流变液性质与正电流变液恰好相反,负电流变液在外加电场后会变得更稀薄,更趋向于液态的性质,此过程同样可逆。但工程上的应

收稿日期: 2021-05-10; 修回日期: 2021-07-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11974067); 重庆市自然科学基金项目(cstc2019jcyj-msxmX0145); 重庆市大学生创新训练项目。

通讯作者: 魏华,男,副教授,研究领域为微纳光学与流变液,huawei.hw@cqu.edu.cn。

引文格式: 孙新淇,王晨阳,周昱萱,等. 草酸钛钙正负电流变液在电场下的宏观对比[J]. 物理与工程, 2022, 32(3): 79-82.

Cite this article: SUN X Q, WANG C Y, ZHOU Y X, et al. Macroscopic contrast of positive and negative electrorheological fluids based on calcium titanium oxalate[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(3): 79-82. (in Chinese)

用大多是针对正电流变液而设计的,对负电流变液的应用比较欠缺。

近年已经有人对正电流变液的微观原理做出了很好的解释:介质颗粒在电场下聚合成链状^[1,4]。也有人对正电流变液的光学性质进行了研究,发现正电流变液在电场下有类似光栅的衍射现象^[5],且不同波段透光率的变化与电场强度有关^[6]。对于负电流变液,有研究表明海藻酸钙悬浮液在直流电场下表现出负电流变效应,相分离导致粒子向两极迁移,中央出现低浓度区^[7]。

本文主要通过降低样品浓度的方法,将微观表现转化为了可宏观记录的结果。实验观察拍摄到了正电流变液的链状结构,用同样的方法拍摄到了负流变液的树枝状结构,并且讨论了两者的不同之处。我们的研究提供了一个用以研究电流变液的更简单直观的实验方法。

1 实验

1.1 试剂与仪器

正电流变液和负电流变液均由课题组自己制备,制备的试剂有:钛酸丁酯、无水乙醇、二水草酸、氯化钙、超纯水、四甲基硅油。设备有静电高压电箱、近焦 CCD 镜头。

1.2 电流变液的制备

将 11.6ml 钛酸丁酯加入 100ml 无水乙醇得到 A 液;12.68g 草酸加入 100ml 超纯水得到 B 液;3.92g 氯化钙加入 180ml 无水乙醇再加 20ml 超纯水得到 C 液。之后将 A 液加入到 B 液中得到 D 液,将 D 液滴加到 C 液中,搅拌后过夜放置。然后将得到的溶液依次用水和酒精洗涤,离心^[8]。真空干燥 12 小时后得到草酸钛钙粉末。最后将粉末与硅油混合成浓度为 30% 的正电流变液样品溶液。

负电流变液样品的制备与正电流变液制备过程类似,同样是草酸钛钙作为溶质,不同的是其粉末的干燥过程稍有不同。最后将粉末与硅油混合成浓度为 30% 的负电流变液样品溶液。

1.3 实验装置与原理

电流变液的微观结构难以直接观察的主要原因是形成的结构纵向重叠,使得在纵向观察时难以分辨。为了使得微观现象能够在宏观表现出来且便于观察,我们主要通过两种方法:①样品必须

尽量的纤薄,使得链状结构透光性良好,容易观察;②降低样品浓度。

我们将铜箔制作在载玻片的两侧作为电极,连接上静电高压,利用铜箔的厚度,在两个铜箔中间形成高压电场,将适当稀释后的样品液滴在电极之间,形成很薄的一层样品膜,最后用近焦 CCD 镜头拍摄图样,示意图见图 1。

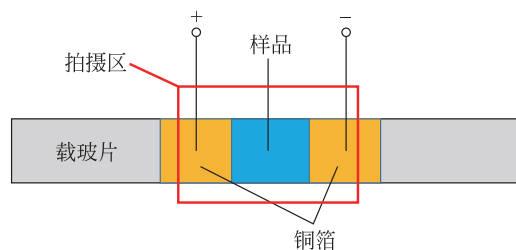


图 1 实验装置示意图

2 实验结果

2.1 正电流变液

利用实验装置加电后得到在电场 $E=1\text{kV/mm}$ 情况下正电流变液随时间变化形成链状结构过程,如图 2 所示。我们可以看到,在外加电场的情况下,一开始混合均匀的电流变液逐渐形成了链状结构。

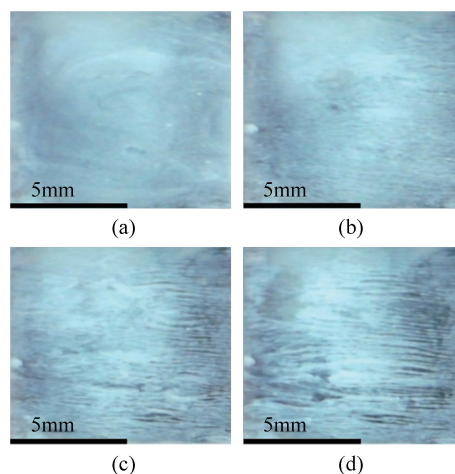


图 2 电场强度 $E=1\text{kV/mm}$ 下正电流变液的链状结构变化过程

(a) $t=0\text{s}$; (b) $t=8\text{s}$; (c) $t=16\text{s}$; (d) $t=24\text{s}$

2.2 负电流变液

对于负流变液的独特性质,我们采用了改变样品浓度,改变电场大小以及改变电场方向三种方式进行了研究。

(1) 改变样品浓度。通过不断的减小样品浓度,

我们发现样品在 $E=1\text{kV/mm}$ 下形成的结构越发清晰。与正电流变液的链状结构不同,负电流变液形成类似于树枝状单向延展的结构,如图 3 所示。

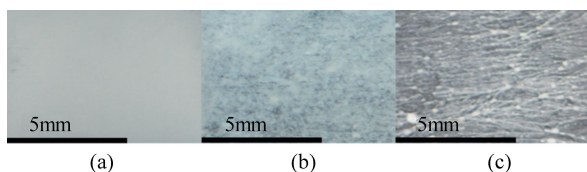


图 3 浓度逐渐减小的负电流变液在 $E=1\text{kV/mm}$ 下的结构

(2) 改变电场强度。在不同电场强度下得到的负流变液树枝状结构如图 4 所示。与正电流变液直接在两个电极之间形成链状结构不同,随着电场强度的增加,负电流变液先在局部形成不同方向的短链,然后再同其他地方的短链连接起来,最后在正负极之间形成整体的树枝状结构。

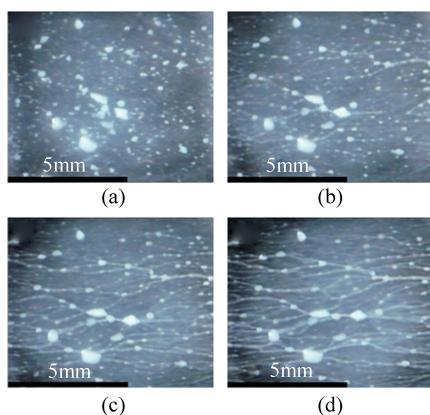


图 4 不同电场强度下的草酸钛钙负电流变液结构变化
(a) $E=0$; (b) $E=0.1\text{kV/mm}$; (c) $E=0.5\text{kV/mm}$;
(d) $E=1.0\text{kV/mm}$

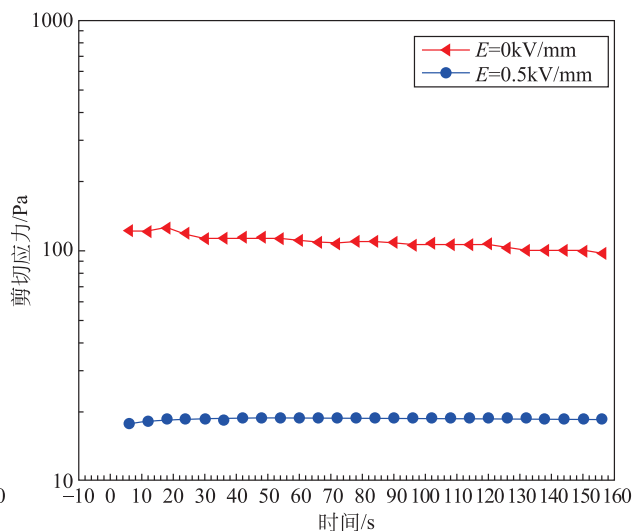
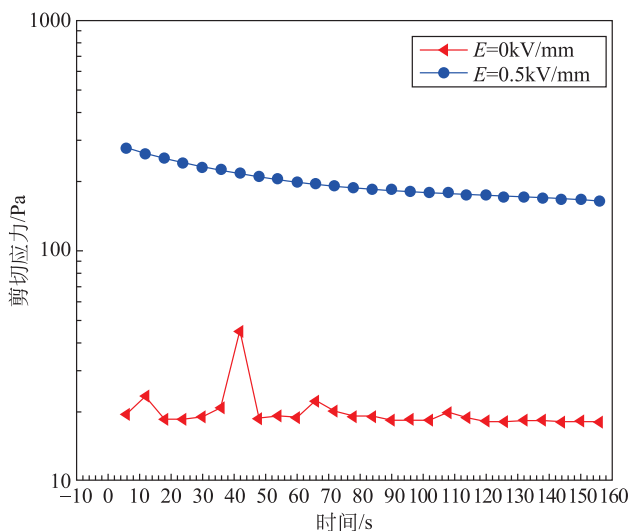


图 6 正负电流变液在电场下剪切应力随时间的变化

(3) 改变电场方向。通过观察可以看到负流变液的树枝状结构不是对称的,且与电场的方向有关。我们交换正负电极的位置,改变了电场的方向,得到不同的树枝状结构,如图 5 所示。可以看到负电流变液中的树枝状结构是从负极向正极延展,逐渐分叉出更多细小的枝状结构,也就是正极附近的枝状结构会更细、更密;负极附近的枝状结构会更粗、更稀疏。

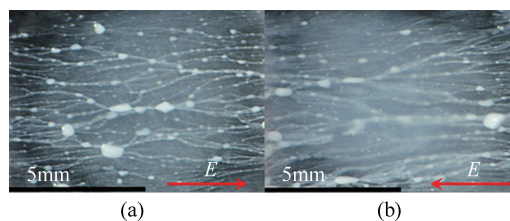


图 5 草酸钛钙负电流变液在相反电场方向下的结构区别 ($E=1\text{kV/mm}$)

最后我们利用流变仪给出了正负电流变液在不同电场下的剪切应力,如图 6 所示。我们可以看到正电流变液在外加电场 $E=0.5\text{kV/mm}$ 时,剪切应力明显高于未加电场 $E=0\text{kV/mm}$ 的情况,同样负电流变液的剪切应力变化情况与前者相反。我们得到的正负流变液内部结构的差异应该是其剪切性质不同的根本原因。

3 结果分析

(1) 对于正电流变液我们不难发现宏观链状结构的形成过程与电流变液的微观解释符合很

好,颗粒在电场的作用下极化,随后首尾相连,形成单个柱状态^[3,4],然后再是多个相邻的柱状结构靠拢、合并成一个大的链状结构。

我们还能从图2中明显地看到光栅结构,通过调节激光光斑大小^[9]可以观测到类似于光栅的衍射特性^[5]。同样由于这种链状结构的形成,在链与链之间形成低浓度区,很直观的揭示了电流变液在直流电场下透光率增加的现象^[6]。

(2) 负电流变液主要有相分离^[10]和昆克旋转^[11]两种表现。其中相分离已被实验发现,表现为颗粒迁移向两端电极移动、并且吸附在电极上出现分层。在电场下吸附在电极上的颗粒虽然形成纤维状,但是两级的纤维并未连在一起,电极中央形成颗粒“真空区”,由于电迁移的作用使得电流变液的切向应力随着电场增大而减小^[7]。

对于草酸钛钙负电流变液实验出现的树枝状结构,其形成是昆克旋转和相分离共同作用导致的。从结构形成过程分析,图4可以观察到样品在电场下先在两电极附近形成短链,且两电极处的短链未连在一起,这与相分离的实验现象相似^[7],但由于粒子在电场下的极化,短链最终和附近的短链相连接,这一点与柱状结构的形成方式相似。而从最后形成的枝状结构分析,可能是由于溶液中粒子可以近似为长椭球体,对于长椭球体,出于稳定性分析,粒子大多会长轴与电场方向平行,颗粒绕长轴进行昆克旋转有利^[12]。但是仍然存在少量粒子处于非稳定状态,出现颗粒绕短轴的昆克旋转,在翻滚和摆动的过程中与附近的其他极化粒子相接,于是产生了树枝状结构。同时,昆克旋转直接与电场方向有关,正如我们从图5可以观察到,反转电场方向,则形成的网状结构也同样对称反转,结构从负极向正极延展,逐渐分叉出更多细小的枝条状结构,这与昆克旋转理论也是符合的。

4 结论

本文基于草酸钛钙制备了正负电流变液,并通过降低浓度和样品厚度的方法,拍摄到了其流变微观表现。在宏观上观察到了正电流变液的链状结构,以及负电流变液独特的树枝状结构的形成过程。并进一步通过改变样品浓度,改变电场大小以及改变电场方向三种方式研究了负电流变液特性。分析了样品的宏观表现与微观结构的联

系后,实验结果是与相关的理论分析相吻合的。我们的研究也为电流变液研究提供了一个更简单直观的实验方法。

参 考 文 献

- [1] 陆坤权,刘寄星. 软物质物理-物理学的新学科[J]. 物理, 2009, 38(7):453-461.
LU K Q, LIU J X. Soft matter physics-a new field of physics[J]. Physics, 2009, 38(7): 453-461. (in Chinese)
- [2] 巫金波,温维佳. 场诱导软物质智能材料研究进展[J]. 物理学报, 2016, 65(18):112-124.
WU J B, WEN W J. Research progress of field-induced soft smart materials[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(18): 112-124. (in Chinese)
- [3] MARTINJE, ODINEKJ, HALSEY T C. Evolution of structure in a quiescent electrorheological fluid[J]. Phys Rev Lett, 1992, 69(10): 1524-1527.
- [4] CHEN T J, ZITTER R N, TAO R. Laser diffraction determination of the crystalline structure of an electrorheological fluid[J]. Phys Rev Lett, 1992, 68(16):2555-2558.
- [5] 罗春荣,张兆东,赵晓鹏. 电流变液与电磁流变液的衍射特性[J]. 光子学报, 1997, 26(12): 1119-1122.
LUO C R, ZHANG Z D, ZHAO X P. The diffraction character of ER fluid and EMR fluid[J]. Acta Phot Sin, 1997, 26(12): 1119-1122. (in Chinese)
- [6] 秦晓君,赵晓鹏. 电流变液的近红外特性研究[J]. 红外技术, 1996, 18(1): 34-37.
QIN X J, ZHAO X P. Study on infrared characteristics of electrorheological fluid[J]. Infrared Technology, 1996, 18(1): 34-37. (in Chinese)
- [7] KO Y G, LEE H J, CHUN Y J, et al. Positive and negative electrorheological response of alginate salts dispersed suspensions under electric field[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2013, 5:1122-1130.
- [8] WU J, SONG Z, LIU F, et al. Giant electrorheological fluids with ultrahigh electrorheological efficiency based on a micro/nano hybrid calcium titanyl oxalate composite[J]. NGP Asia Mater, 2016, 8: e322.
- [9] 张国宇,魏华. 微纳尺度下激光聚焦的探究[J]. 物理与工程, 2020, 30(2): 98-102.
ZHANG G Y, WEI H. Study on optical focusing of laser at micro-nano scale[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(2): 98-102. (in Chinese)
- [10] OTSUBO Y, WATANABE K. Electrorheological behavior of barium titanate suspensions[J]. J. Rheol, 1990, 18:111-116.
- [11] QUINCKE G. Ueber rotationen im constanten electrischen felde[J]. Ann. Phys, 1896, 295:417-486.
- [12] BROSSEAU Q, HICKEY G, VLAHOVSKA P M. Electrohydrodynamic Quincke rotation of a prolate ellipsoid [J]. Phys. Rev. Fluids, 2017, 2, 014101.