

# 电流变液微波反射可控性<sup>\*</sup>

黄 敏 赵晓鹏<sup>†</sup> 王宝祥 尹剑波 曹昌年

(西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072)

(2003 年 6 月 24 日收到, 2003 年 8 月 27 日收到修改稿)

研究了纳米二氧化钛包覆高岭土和钇掺杂钛酸钡两种电流变液的微波反射行为. 实验发现, 在垂直于微波传播方向电场作用下, 两种电流变液微波反射系数均随电场强度的增大而增大, 钇掺杂钛酸钡电流变液微波反射系数变化幅度比二氧化钛包覆高岭土电流变液宽, 并且电场调节的能力随浓度的增加有减弱的趋势. 对钇掺杂钛酸钡电流变液存在一个临界浓度, 低于这个浓度, 电场的调控能力随电场强度的增加而增大, 高于这个浓度, 电场的调控能力随电场的增加先增大后减小. 另外, 二氧化钛包覆高岭土电流变液反射回波相位随电场强度的增大出现最大值后逐渐减小趋于平稳, 钇掺杂钛酸钡电流变液反射回波相位随电场强度增大而增大. 初步认为电场强度对反射回波的调幅调相能力与外电场作用下电流变液结构转变和分散相自身极化性质变化有关.

关键词: 电流变液, 微波反射, 相位

PACC: 4760, 4210, 4110, 3510D

## 1. 引 言

电磁波与介质相互作用广泛存在于自然界中, 其中包括波的透射、反射以及波的散射等问题. 介质与波相互作用的过程中将改变波的相位以及振幅, 这跟介质自身的性质有关. 这方面的原理在电磁兼容以及工程探测方面得到了应用. Lu 等研究了钇掺杂  $\text{LiNbO}_3$  的周期性铁电畴结构, 利用微波近场显微探针, 从微波能量的损失得到铁电畴畴界的运动情况<sup>[1]</sup>. Lu 等研究了在超晶格结构中由两种自发极化相反的铁电材料周期性排列而形成的离子光学晶体, 指出这种结构与电磁波相互作用可产生的各种奇异的光学性质, 例如微波的吸收、极化的加强, 以及各种奇异的介电性质<sup>[2]</sup>. 以上的研究主要是铁电畴的运动以及周期性结构与电磁波相互作用的性质, 并且研究的是电磁波与介质的直接相互作用, 相互作用过程中没有引入任何外加调控因素.

电流变液是由高介电常数的固体颗粒分散于低介电常数绝缘液体中的悬浮液. 作为一种智能材料, 其力学性能在外电场作用下可以调控, 因而引起科技界广泛的重视<sup>[3-9]</sup>. 在外加电场的作用下电流变

液内部结构可调控, 固体颗粒将形成链状结构, 而且这种结构的转变是快速可逆的. 近年来研究者对电流变液光学行为(如微波透射)的可调控性进行了研究<sup>[10-12]</sup>. 根据经典的电磁场理论, 介质的介电常数以及磁导率等参量对波的传播行为起着决定性作用. 例如铁电材料钛酸钡, 它是高介电常数物质, 而且它是一种典型的非线性介质, 常温下存在自发极化, 在外加电场作用下电畴方向将趋向于与外电场方向一致. 我们曾报道过钛酸钡电流变液微波衰减可控特征<sup>[13]</sup>. 本文对二氧化钛包覆高岭土和钇掺杂钛酸钡两种电流变液的微波反射特征进行了研究, 初步得到了电场对这两种材料反射回波的调幅与调相特征. 通过这些工作, 有望在电磁波屏蔽以及波阻抗器件调控方面开拓出新的应用.

## 2. 实 验

### 2.1. 原 料

实验选用甲基硅油作为电流变液的基液, 其密度为  $0.95\text{g/mL}$ , 介电常数为 2.6; 实验用二氧化钛与高岭土复合微粒由实验室自制, 颗粒直径平均为

<sup>\*</sup> 国家杰出青年科学基金(批准号: 50025207)和国家自然科学基金(批准号: 50272054)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: xpzha@nwpu.edu.cn; 电话: 029-88495950.

2μm,复合颗粒的原料采用钛酸四丁酯与高岭土,电流变液的重量百分比都是 33%。样品 1 的制备过程中高岭土与钛酸四丁酯量为 6g + 15mL,采用的方法为插层法。样品 2 和样品 3 制备过程中高岭土与钛酸四丁酯量是 6g + 12.5mL 和 6g + 10mL,采用的方法为包覆法<sup>[14]</sup>。钇掺杂钛酸钡采用溶胶凝胶法制成,用钇掺杂钛酸钡配置三种浓度电流变液,重量百分比分别为 37.5%、30%、25%。实验过程中电流变液容器采用有机玻璃制成,容器大小为 2.5cm × 2.3cm × 0.9cm,电极板材料为薄铜片,电极板间距为 0.25cm,微波在样品盒中穿透距离为 2.5cm,外加电场方向垂直微波传播方向。

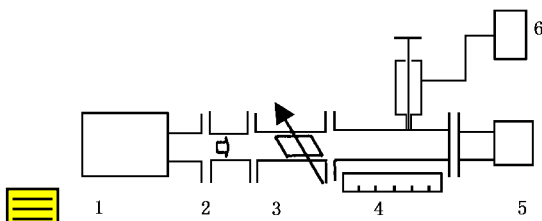


图 1 测量装置示意图 1 为微波振荡器,2 为隔离器,3 为可变衰减器,4 为测量线,5 为样品盒,6 为检流计

### 2.2. 实验装置及测试方法

本实验采用微波源为 XFL-2A 型厘米波小功率信号发生器,测试所用的频率为  $f = 9000\text{MHz}$ ,波长为  $\lambda = 3.33\text{cm}$ ,所用测试装置如图 1 所示。传输线上反射系数为反射波电压与入射波电压之比,表达式<sup>[15]</sup>为

$$\Gamma(Z) = |\Gamma| e^{j\Psi} = \frac{U_{il}\Gamma_L e^{-j\beta Z}}{U_{il} e^{j\beta Z}} = \Gamma_L e^{-j2\beta Z} = |\Gamma_L| e^{j(\Psi_L - 2\beta Z)}$$

将电源端作为原点,电源指向负载方向为正向,其中  $U_{il}$  为负载处入射波电压, $\Gamma(Z)$  为反射系数, $Z$  为传输线上任意点坐标, $\Psi_L$  为负载反射系数相角, $\beta$  为微波在波导管内的传播系数。由上式可知,驻波电压最大值在  $Z_{\max}$  处,即  $\Psi_L - 2\beta Z_{\max} = 2n\pi$  处,电压振幅最大值记作  $|U_{\max}|$ ;同理驻波电压最小值点在  $Z_{\min}$ ,即  $\Psi_L - 2\beta Z_{\max} = (n + 1)\pi$  处,此处电压振幅最小值记作  $|U_{\min}|$ ,由此可得电压驻波系数

$$\rho = \frac{|U_{\max}|}{|U_{\min}|}$$

反射系数与驻波系数的关系为  $|\Gamma| =$

$$\frac{\rho - 1}{\rho + 1}$$

实验过程中取刻度线上零刻度处作为相位参

考面,朝负载方向寻找第一个电压最大或最小值点来确定反射系数相角<sup>[15]</sup>。负载反射系数相角( $n = 0$ )可由下式求出:

$$\Psi_L = 2\beta Z_{\max} = \frac{4\pi}{\lambda_g} Z_{\max}$$

其中  $\lambda_g$  为  $\text{TE}_{10}$  模在波导管内的传播波长。实验过程中从检流计测量出驻波电压最大值 ( $|U_{\max}|$ ) 和最小值 ( $|U_{\min}|$ ),然后从标尺测量出上最大值 ( $Z_{\max}$ ) 或最小值点 ( $Z_{\min}$ ) 的读数。

### 3. 结果与讨论

首先测量了空样品盒以及样品盒中充满硅油在外加电场作用下反射系数的变化,实验发现两者的反射系数随电场增加没有发生变化,即反射回波不发生改变,反射系数的变化曲线如图 2 所示,从图 2 可以看出,空样品盒的反射系数为 0.057,充满硅油时为 0.657。

图 3 是二氧化钛与高岭土复合颗粒电流变液在电场作用下的反射系数变化曲线。由图 3 可以得知二氧化钛与高岭土复合颗粒电流变液反射系数在外加电场的作用下随电场的增加而增加,样品 1 的反射系数变化范围是 0.47—0.55,样品 2 是 0.39—0.46,样品 3 是在 0.25—0.33 之间。

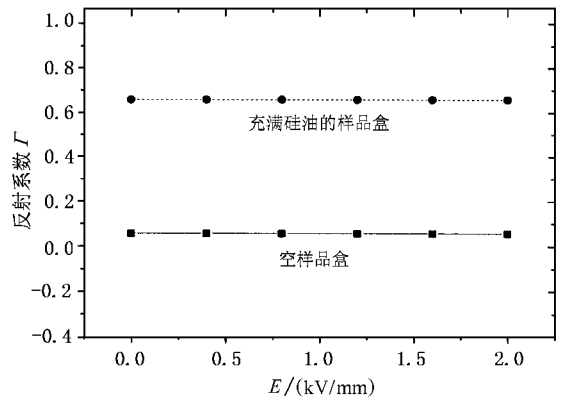


图 2 空样品盒和充满硅油样品盒的反射系数随电场强度变化曲线

图 4 是钇掺杂钛酸钡电流变液在外加电场作用下反射系数变化曲线。和二氧化钛包覆高岭土颗粒电流变液相比,钇掺杂钛酸钡电流变液对反射回波的调控能力明显增大,调控的反射系数范围达到了 0.17—0.657,并且调控的范围介于空盒与充满硅油之间。由图 4 可知,浓度为 25% 和 30% 的电流变液

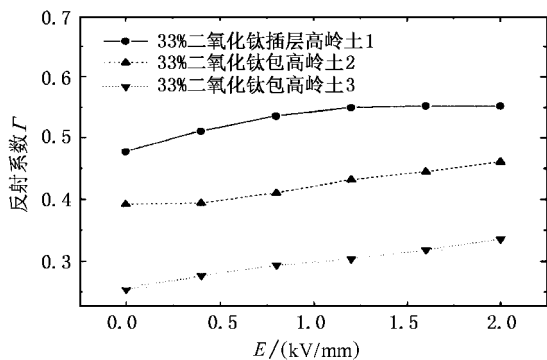


图3 二氧化钛包覆高岭土电流变液反射系数随电场强度变化曲线

的反射回波随电场的增加而增加.由图还可得知,浓度对调控能力有一定的影响,低浓度钇掺杂钛酸钡电流变液的调控能力要稍高;而且存在一个临界浓度,当浓度高于这个临界值时,在外电场作用下电流变液的反射回波增加后有减小趋势,并且调控过程是非线性过程.

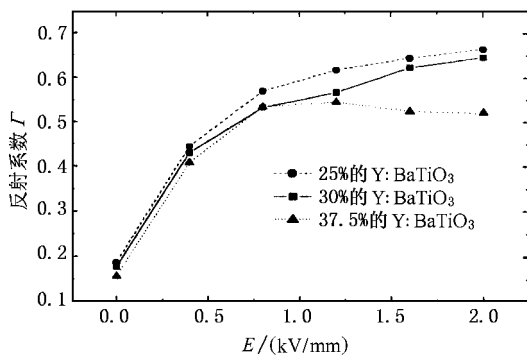


图4 钇掺杂钛酸钡电流变液反射系数随电场变化曲线

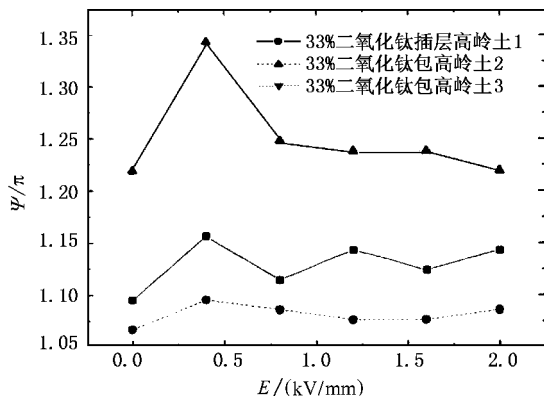


图5 二氧化钛包覆高岭土电流变液相位随电场强度变化曲线

图5是三种不同材料的二氧化钛与高岭土复合颗粒电流变液的相位调制曲线.由图可知相位增大

到最大值后逐渐减小至平稳.

图6是三种不同浓度的钇掺杂钛酸钡电流变液的相位调制曲线.与二氧化钛和高岭土复合颗粒电流变液的相位调制曲线相比,钇掺杂钛酸钡电流变液的相位调制能力较宽,在0.5—1.2π之间,而且相移随电场的增大而增大,在相同电场作用下,随着浓度的增大相位调节能力也有所增强.

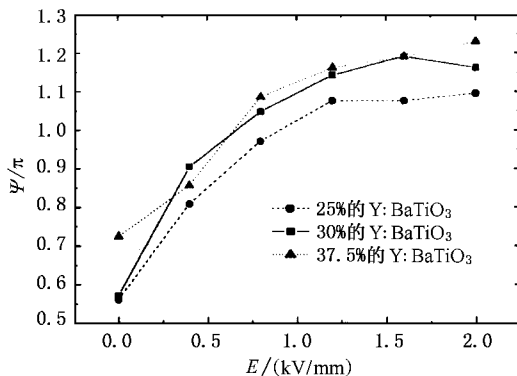


图6 钇掺杂钛酸钡电流变液相位随电场强度变化曲线

众所周知二氧化钛与钛酸钡都属于高介电常数的电介质材料.钛酸钡是典型的铁电体,在一定温度范围内具有自发极化性质,具有与磁滞回线相仿的电滞回线.钛酸钡晶体是钙钛矿结构,在晶胞顶角相连的三组 Ti-O<sub>6</sub> 八面体族中,由于八面体内离子的位移形成电偶极子,通过相互作用最后形成极化方向一致的若干小区域,即形成了电畴<sup>[16]</sup>.无外电场作用时,电畴排列无序而对外不表现极化特征.在外电场作用时,颗粒中电畴取向沿电场的方向排列,颗粒发生取向变化<sup>[17]</sup>.实验过程中观察了钇掺杂钛酸钡电流变液在外加电场作用下成链情况,与纯钛酸钡电流变液相比,成链后硅油中基本没有钇掺杂钛酸钡电泳颗粒,最后形成了二甲基硅油包钇掺杂钛酸钡链的有序空间结构.二氧化钛的介电常数比钛酸钡稍低,它不是铁电体,常温下不存在自发极化,所以常温下介电性能稳定;此外它与高岭土复合形成的颗粒具有一定的抗沉淀性.

我们认为电场作用下电流变液结构变化是电场能够调控反射回波振幅和相位的原因之一.加电场后颗粒由无序分布转变成沿电场方向排列,形成空间有序结构可以引起反射回波振幅和相位的变化.另外形成的硅油包围钇掺杂钛酸钡链空间有序结构,硅油介电常数低,链的介电常数高,从而形成了介电常数发生突变的阶梯结构,介电性质由各向同

性变为各向异性将影响电磁波的传播.关于电流变液在外场作用下系统介电常数的变化已有研究<sup>[18]</sup>.外电场作用下相位的移动进一步说明了这一点,因为在媒质中传播常数  $\beta$  是一个与介电常数有关的常量,在硅油包围钇掺杂钛酸钡链空间有序结构中,它跟介电常数的空间分布有关.再次,分散相颗粒所处的极化状态也是影响电流变液微波反射调控能力的一个因素,钇掺杂  $\text{BaTiO}_3$  颗粒在外加电场作用下自身介电性质的变化及与微波的相互作用可能导致电流变液微波调控能力改善.

## 4. 结 论

### 1. 外加电场可对电流变液微波反射回波的振

幅和相位进行调控.

2. 二氧化钛与高岭土复合颗粒电流变液和钇掺杂钛酸钡电流变液在外加电场的作用下反射系数均随电场强度增大而增大.对钇掺杂钛酸钡电流变液存在一个临界浓度,低于这个浓度,反射系数单调增加,高于这个浓度,反射系数先增加后减小.

3. 二氧化钛与高岭土复合颗粒电流变液反射回波相位随电场强度增加到一个最大值后逐渐减小到稳定值,钇掺杂钛酸钡电流变液反射回波相位随电场强度增大单调增大.

4. 外加电场作用下电流变液对微波反射的调幅调相能力与电流变液结构变化有关,并且调节能力大小与分散相自身介电性质有关.

- [ 1 ] Lu Y L , Wei T , D uewer Fred , Lu Y Q , Ming N B , Schultz P G and Xing X D 1997 *Science* **276** 2004
- [ 2 ] Lu Y Q , Zhu Y Y , Chen Y F , Zhu S N , Ming N B and Feng Y J 1999 *Science* **284** 1822
- [ 3 ] Block H and Kelly J P 1988 *J. Phys. D : Appl. Phys* **21** 1661
- [ 4 ] Ashour O , Rogers C A and Kordasky W 1996 *J. Intell Mat. Syst. Struct.* **7** 123
- [ 5 ] Block H and Rattray 1995 *Progress in Electrorheology* ,ed. Havelka K O and Flisko F E( New York :Plenam Press )p19
- [ 6 ] Halsey T C 1992 *Science* **258** 761
- [ 7 ] Dark O O 1988 *J. Rheology* **32** 511
- [ 8 ] Zhao X P ,Gao X M ,Gao X Y and Gao D J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 405( in Chinese ) 赵晓鹏、高秀敏、高向阳、郜丹军 2003 物理学报 **52** 405 ]
- [ 9 ] Zhao X P ,Gao X M ,Gao D J and Zhong H F 2002 *Acta Phys. sin.* **51** 1075( in Chinese ) 赵晓鹏、高秀敏、郜丹军、钟鸿飞 2002 物理学报 **51** 1075 ]
- [ 10 ] Adrioni P M 1988 *Phys. Fluids* **31** 2757
- [ 11 ] Otsubo Y 1996 *Science* 177 250
- [ 12 ] Zhao X P and Fan J J 2001 *Acta phys. Sin.* **50** 1302( in Chinese ) [ 赵晓鹏、范吉军 2001 物理学报 **50** 102 ]
- [ 13 ] Fan J J , Zhao X P ,Huang M ,Guan L T 2002 *Progress in Natural Science* 12 1070( in Chinese ) 范吉军、赵晓鹏、黄 敏、关丽涛 2002 自然科学进展 **10** 1070 ]
- [ 14 ] Zhao X P , Wang B X and Zuo Z Y 2003 Chinese patent 03114668.6 ( in Chinese ) 赵晓鹏、王宝祥、左朝阳 2003 中国发明专利 03114668.6 ]
- [ 15 ] Ying J Y ,Gu M Z and Zhan K Q 1994 *Technology of Microwave and Optical Guide*( Beijing :National defence industry press )p 34—38 ( in Chinese ) 应嘉年、顾茂章、张克潜 1994 微波与光波导技术(北京 :国防工业出版社 )第 34—38 页 ]
- [ 16 ] Li Y R 2001 *Introduction to Electrical Materials*( Beijing :Qinghua University press )p231—234( in Chinese ) 李言荣 2001 电子材料导论(北京 :清华大学出版社 )第 231—234 页 ]
- [ 17 ] Lan Y C ,Xu X Y ,Men S Q and Lu K Q 1999 *Phys. Rev. E* **60** 4336
- [ 18 ] Wen W J ,Men S Q and Lu K Q 1997 *Phys. Rev. E* **55** 3015

# Modulatory character of microwave reflection behavior in electrorheological fluids \*

Huang Min Zhao Xiao-Peng<sup>†</sup> Wang Bao-Xiang Yin Jian-Bo Cao Chang-Nian

( *Institute of Electrorheological Technology, Department of Applied Physics,*  
*Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China* )

( Received 24 June 2003 ; revised manuscript received 27 August 2003 )

## Abstract

The microwave reflection behavior of electrorheological ( ER ) fluids containing TiO<sub>2</sub>-coated Kaolinite and Y-doped BaTiO<sub>3</sub> was investigated in the case that the direction of the TE<sub>10</sub> module to the electrical field is vertical. We found that the reflection coefficient of TiO<sub>2</sub>-coated Kaolinite and Y-doped BaTiO<sub>3</sub> based ER fluids increased with the electrical field. However, the increase of reflection coefficient of Y-doped BaTiO<sub>3</sub> based ER fluid was more significant compared with that of TiO<sub>2</sub>-coated Kaolinite. At the same time, the reflection coefficient of Y-doped BaTiO<sub>3</sub> ER fluid showed strong dependence on particle volume fraction. There was a critical volume fraction. When the volume fraction was lower than this critical value, the reflection coefficient gradually increased, otherwise the reflection coefficient initially increased and then decreased with electrical field. It was also found that the reflection wave phase of TiO<sub>2</sub>-coated Kaolinite ER fluid initially increased and reached its maximum value, then declined to a constant. The reflection wave phase of Y-doped BaTiO<sub>3</sub> ER fluid, however, steadily increased with the electrical field. We considered that the modulatory character of microwave reflection behaviors was attributed to the change in structure, electric properties of ER fluids and dispersed phase under electric field.

**Keywords** : electrorheological fluids, reflection of microwave, phase

**PACC** : 4760, 4210, 4110, 3510D

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholar ( Grant No. 50025207 ) and the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 50272054 ).

<sup>†</sup> E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn ; Tel: 029-88495950.