

电流变液的微波透射调控行为^{*}

赵晓鹏[†] 范吉军 高秀敏 曹昌年

(西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072)

(2000 年 12 月 2 日收到 2001 年 1 月 21 日收到修改稿)

依据外电场作用下电流变液结构由各向同性转变为各向异性及介电性能改变的实验事实,建立了微波穿透电流变液样品的理论模型,导出了微波透射率的基本表达形式.理论模拟显示:当电流变液的介电常量小于所处环境的介电常量时,透射率随电场的增加而增加;反之则减小.实验研究表明:电流变液的微波衰减(透射率)的变化可以通过电场来调控.分析认为在外加电场作用下,电流变液结构转变和介电性能的变化是导致微波透射率可调控的主要原因.

关键词:电流变液,介电性能,微波透射率

PACC:4660H, 7720, 7730, 7870G

1 引 言

电流变液(ER fluid)作为一种智能材料,通常是由绝缘的基液和悬浮在其中的高介电常量的固体颗粒组成.未施加外电场时,电流变液呈现出牛顿流体的力学特性;当施加一定的电场后,固体颗粒极化而相互作用,形成平行于电场的链或柱状结构,导致电流变液的表观黏度明显增大,呈现出非牛顿流体的特性^[1].

近年来电流变液研究吸引了科技界的极大关注,但大多数研究工作主要集中在对其流变学性能及其转变机理等方面^[2,3].由于电流变液在外电场作用下,其内部结构发生独特的变化,不仅使其流变学性能随电场强度变化而可调控,也有可能使其光学性能发生变化.目前已有不少学者在此方面做了一些工作,并取得了开拓性的成果.80 年代末 Park, Adriani 和 Cast 从理论上预言了 ER 流体的光效应^[4,5],Otsubo 等人研究了直流电场下的 ER 流体的透光性^[6].Zhou 等人观察了 ER 流体的一个重要非线性光学特性——二次谐波的产生(SHG)^[7];作者之一及其合作者研究了电流变液磁流变液在直流电场下的光学性能^[8],发现在直流电场作用下,电流变液具有双折射及旋光与椭圆偏光现象,并且随外电场强度变化具有可调控性^[9,10],同时对近红外波段也

进行了研究^[11].在长波区域,Feinsteink 利用经典电磁理论研究了 ER 流体的微波散射和吸收后指出,对于给定波长的微波信号,存在一个特定的颗粒尺度及空间指向使吸收最大^[12],但相关的实验及深入研究未见报道.毫米与厘米波段电流变液的波穿透行为研究不仅对揭示微波场与电场共同作用下颗粒的极化与结构行为具有重要意义,同时在微波可控调谐及隐身技术等方面具有重要的应用前景.

本文首先对微波在电流变液中的传播行为进行了理论研究,建立相应的物理模型,探讨影响微波在电流变液中透射率的主要原因,随后配制了两种电流变液试样,在直流电场的作用下,对微波在电流变液中的透射行为进行了实验研究,以探讨微波在电流变液中传播的可控性.

2 理论推导

无外加电场时,电流变液内部颗粒均匀分布,可认为是一种准各向同性复合介质.施加一定的电场后,电流变液内颗粒发生极化排列成链或柱状结构,此时将其视为横向各向异性介质,如图 1 所示.在不考虑电流变液非连续性的情况下,提出如下模型:

1) 边界问题:认为微波在容器壁内及其与空气界面的透射率为常数.

2) 无外加电场时($E = 0$),流体的介电常量为 ϵ ;施加一定的电场后($E \neq 0$),介电常量是空间坐标和

^{*} 国家自然科学基金(批准号 59832090)和国家杰出青年基金(批准号 50025207)资助的课题.

[†] 通讯联系人.

电场的函数($\varepsilon(x,y,z,E)$).

微波是一种电磁波,在空间满足麦克斯韦方程.将电流变液视为非理想导体,故传导电流 $\alpha_f \approx 0$,则定态波独立的边界条件为

$$\begin{aligned}n \times (E_2 - E_1) &= 0, \\n \times (H_2 - H_1) &= 0.\end{aligned}\tag{1}$$

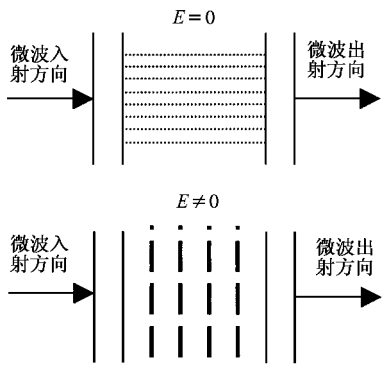


图1 电流变液样品加外电场前后结构变化模型图

2.1 无外电场的情况

1)微波在电流变液界面作用情况

微波在电流变液界面上发生反射和折射,由于电流变液电导率非常小,可以不考虑界面吸收,而只考虑电流变液对微波的吸收.界面情况如图2所示.当微波垂直入射电流变液时,可导出反射率为

$$R = \left(\frac{1 - \sqrt{\varepsilon_1/\varepsilon_2}}{1 + \sqrt{\varepsilon_1/\varepsilon_2}} \right)^2 = \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}} \right)^2, \tag{2}$$

式中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 分别为容器和电流变液的介电常量,则两个界面透射率分别为

$$T_I = T_{II} = 1 - \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}} \right)^2. \tag{3}$$

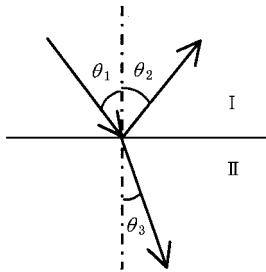


图2 微波在电流变液界面上的透射和反射情况示意图

2)电流变液对微波的透射及吸收

当电流变液的电导率不为零时,即 $J = \sigma E \neq 0$.波传播满足齐次亥姆霍兹方程,求出衰减系数为

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon_2}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_2} \right)^2} - 1 \right]}. \tag{4}$$

微波通过厚度为 d 的电流变液时,它的吸收率为 $k = e^{-2\alpha d}$,透射率为 $T_{in} = 1 - k = 1 - e^{-2\alpha d}$.

3)微波通过电流变液总的透射率

总的透射率为界面透射率与电流变液本身透射率的积:

$$\begin{aligned}T &= T_I \cdot T_{II} \cdot (1 - k) = T_I \cdot T_{II} \cdot T_{in} \\&= \left[1 - \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}} \right)^2 \right]^2 e^{-2\alpha d},\end{aligned}\tag{5}$$

式中 d 为微波在电流变液中的传播距离.

由于电流变液为低损耗媒质, $\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_2} \ll 1$,于是可将

(5)式简化为

$$T = \left[1 - \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}} \right)^2 \right]^2 e^{-d\sqrt{\mu\sigma\omega}}. \tag{6}$$

对上式分别取 ε_2 的一阶及二阶导数可得,当 $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$ 时,透射率随 ε_2 的增大而增大,而当 $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ 时,透射率随 ε_2 的增大而减小,且存在一个拐点 $\varepsilon_2 = \frac{9}{4}\varepsilon_1$.

2.2 加电场的情况

当所加电场强度超过阈值电场后,电流变液中颗粒排列成链状或柱状,可认为是横向各向异性介质.以下视电流变液在轴方向上为均匀介质,而在 xoy 平面上为非均匀介质,如图3所示.可以将平面微波电场振动矢量分解为与电场或链平行的分量 E_{oy}^o 和与之垂直的分量 $E_{\alpha x}^o$.在 αx 方向上介电常量为 ε_{2x} ,在 oy 方向上介电常量为 ε_{2y} ,相应的电导率分别为 σ_x 和 σ_y .

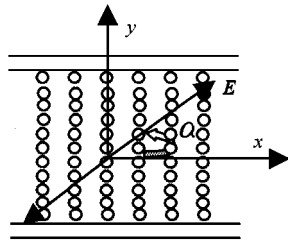


图3 微波振动矢量与颗粒链方向关系

1)微波在界面上的透射情况

由(3)式可直接给出微波在界面上的透射公式.在 x 轴和 y 轴方向上界面总透射率分别为

$$T_x = \left[1 - \left(\frac{\sqrt{\epsilon_{2x}} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_{2x}} + \sqrt{\epsilon_1}} \right)^2 \right]^2,$$
$$T_y = \left[1 - \left(\frac{\sqrt{\epsilon_{2y}} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_{2y}} + \sqrt{\epsilon_1}} \right)^2 \right]^2, \quad (7)$$

故两个界面的透射率为

$$T_I = T_x \cos^2 \alpha + T_y \sin^2 \alpha. \quad (8)$$

2)微波在电流变液内的透射情况

电场振动矢量在 x 轴和 y 轴方向上的衰减系数分别为

$$\alpha_x = \omega \sqrt{\frac{\mu_x \epsilon_{2x}}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_x}{\omega \epsilon_{2x}} \right)^2} - 1 \right]},$$
$$\alpha_y = \omega \sqrt{\frac{\mu_y \epsilon_{2y}}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_y}{\omega \epsilon_{2y}} \right)^2} - 1 \right]}, \quad (9)$$

振幅分别为

$$E_{ox} = E_{\alpha}^o e^{-\alpha_x z}, \quad E_{oy} = E_{\alpha}^o e^{-\alpha_y z}. \quad (10)$$

考虑电流变液为低损耗媒质, (9) 式简化为

$$\alpha_x = \frac{1}{2} \sqrt{\mu_x \sigma_x \omega}, \quad \alpha_y = \frac{1}{2} \sqrt{\mu_y \sigma_y \omega}, \quad (11)$$

因此得到微波在电流变液内的透射率为

$$T_{in} = \frac{E^2}{E_0^2} = \frac{E_{ox}^2 + E_{oy}^2}{E_{\alpha}^{o2} + E_{\alpha}^{o2}}$$
$$= (\cos \alpha e^{-\alpha_x z})^2 + (\sin \alpha e^{-\alpha_y z})^2. \quad (12)$$

3)微波总透射率

由(8)和(12)式可得微波的总透射率为

$$T = T_I \cdot T_{in} = \left\{ \left[1 - \left(\frac{\sqrt{\epsilon_{2x}} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_{2x}} + \sqrt{\epsilon_1}} \right)^2 \right]^2 \cos^2 \alpha \right.$$
$$+ \left. \left[1 - \left(\frac{\sqrt{\epsilon_{2y}} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_{2y}} + \sqrt{\epsilon_1}} \right)^2 \right]^2 \sin^2 \alpha \right\}$$
$$\cdot (\cos^2 \alpha e^{-d\sqrt{\mu_x \sigma_x \omega}} + \sin^2 \alpha e^{-d\sqrt{\mu_y \sigma_y \omega}}). \quad (13)$$

由(13)式可见微波总透射率不仅与介电常量和电导率等有关,还与入射波的振动平面和轴的夹角存在关系.

根据以上结果,可由计算机模拟出透射率与介电常量的变化曲线,如图 4 所示.由图 4 可见透射率与介电常量的关系曲线在有无外电场的情况下都非常相似,但其物理含义不同.无外电场时,每一个介电常量代表一种电流变液的浓度,即曲线代表随浓度的不同,微波透射率的变化情况.而对于施加外电场的曲线,电流变液的介电常量将发生变化,此时介电常量由流体浓度和外加电场的变化所共同决定.

另外由理论推导可知,加电场后电流变液的 ϵ_{2x} (ϵ_{2y}) 变化满足一定的分布,且随外电场的增大, ϵ_{2y} 有可能变大或变小;但相对而言, ϵ_{2x} 的变化并不

显著.在曲线的不同区域,随外电场的增大, ϵ_{2y} 的变化可引起透射率发生如图 4 中所示的变化.

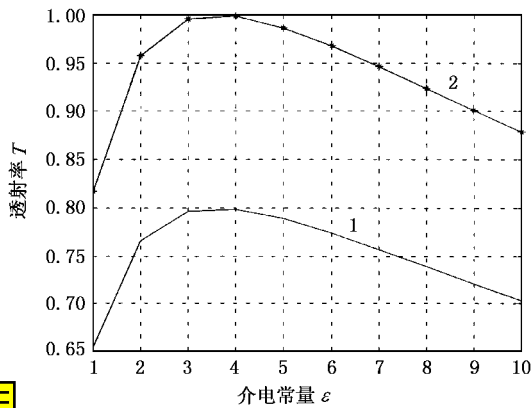


图 4 透射率随介电常量变化模拟曲线 曲线 1 为无外加电场时的曲线 ($\alpha = \exp[-d\sqrt{\mu\sigma\omega}]$), 曲线 2 为施加外电场时透射率与电流变液介电常量 ϵ_{2x} (ϵ_{2y}) 的关系曲线

3 实 验

3.1 原材料

选择甲基硅油作为电流变液的基液,其密度为 0.95 g/mL,介电常量为 2.6,淀粉和镍粉作为电流变液的颗粒相.分别制备了两种电流变液,试样 1 为硅油淀粉电流变液,试样 2 为在 25wt% 淀粉硅油的基础上再添加一定量镍粉所制备的双分散相电流变液,每种试样各取三种浓度.

3.2 介电常量的测量

对两种试样的各种浓度分别测定了它们的介电常量,测试仪器为 LCR Meter 4225,测量结果如表 1 所示.

表 1 试样介电常量的测量

频率/Hz		10 ²	10 ³	10 ⁴
浓度/wt%	4	2.70	2.68	2.67
	10	2.90	2.86	2.83
	25	4.00	3.63	3.47
2# 镍粉	1	4.30	3.87	3.68
	2	4.35	3.94	3.73
	5	4.50	4.06	3.88
有机玻璃		3.29	3.23	3.11

3.3 实验装置

实验装置如图 5 所示,微波源为 XFL-2A 型厘米波小功率信号发生器,工作频率为 8600—9600MHz,相应的波长为 3.12—3.48 cm. 本实验采用频率为 9000MHz.

本实验所用的 ERF 容器壳体材料为有机玻璃,要求容器的大小能与波导很好地符合,容器壁的厚度要尽可能薄,同时还要做到电极与波导间的绝缘.微波透过电流变液样品厚度为 12 mm. 实验中所用高压电源为自行设计,该电源最大输出电压为 8000 V.

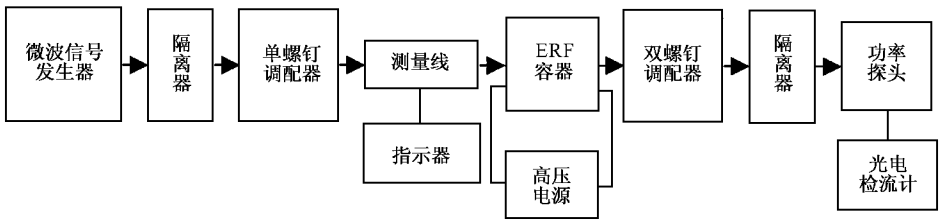


图 5 实验装置图

3.4 测试方法

本实验采用功率比法,重点考察在施加外电场的过程中,微波透过电流变液的衰减(或透射率)变化情况,即研究在容器及电流变液自身所造成微波衰减的基础上由于外加电场的变化所导致的衰减变化情况.本实验与传统意义上衰减(或透射率)测量有所不同,对实验中衰减 A 和透射率 $\Delta I/I_0$ 分别定义如下:

$$A = 10\lg \frac{P_0}{P(E)} = 10\lg \left(\frac{I_0}{I(E)} \right)^2, \tag{14}$$

$$\Delta I/I_0 = \frac{I(E) - I_0}{I_0}, \tag{15}$$

式中 P_0, I_0 分别为零电场时微波透过电流变液功率计所检测到的功率和检波器所检测到的电流, $P(E), I(E)$ 分别为电场强度为 E 时所检测到的功率和电流,衰减的单位为分贝(dB).

首先按装置图所示将装有电流变液的容器接入测试系统中,然后将微波信号源和功率探头的驻波系数调配到 1.05 以下,测得此时的电流 I_0 (或功率 P_0),之后每加一次电场,测得相应的电流 $I(E)$ (或功率 $P(E)$). 功率比法测量误差主要来源于功率测量的误差和测试系统的失配误差.

图 6 为对空样品盒的测试结果,可以看出只有空气时,在外电场作用下,微波透射强度没有变化.

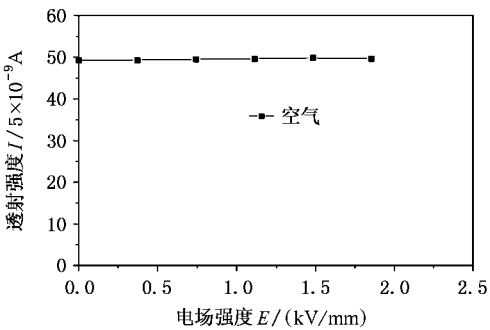


图 6 外电场作用下空样品盒透射强度变化曲线

相互作用,并沿电场方向排列成链状或柱状结构,此时电流变液宏观结构由准各向同性转变为横向各向异性,同时其介电性质将发生改变,且随电场的增加,其介电常量也增加^[13].

图 7(a)和(b)分别为试样 1 的微波透射率及衰减的变化情况随外加电场强度的变化曲线.可以看出当淀粉浓度较低时(4wt%),随电场的增加,微波透射率是向正向单调增大,相应的衰减则是向负向单调增加;而当浓度较高时(10wt%, 25wt%),微波透射率及衰减的变化情况则相反.这说明在外加电场作用下,电流变液对微波吸收的情况不同,且随浓度的变化也不同(假设反射率不变的情况下),即浓度将影响其变化方向.

试样 2 的测试结果如图 8(a)和(b)所示,微波透射率随电场增加而向负向单调增大,即透射量是递减的,而衰减的变化情况是正向单调增加.与试样 1 中浓度为 25wt% 的纯淀粉硅油电流变液相比,其对微波的透射率及衰减变化情况的调控能力更强,

4 实验结果及分析

施加电场后电流变液体系中的固体颗粒极化而

说明少量镍粉的加入有利于电流变液对微波吸收情况的调节. 本实验中所取三种镍粉浓度对微波透射率及衰减变化情况的调控相当.

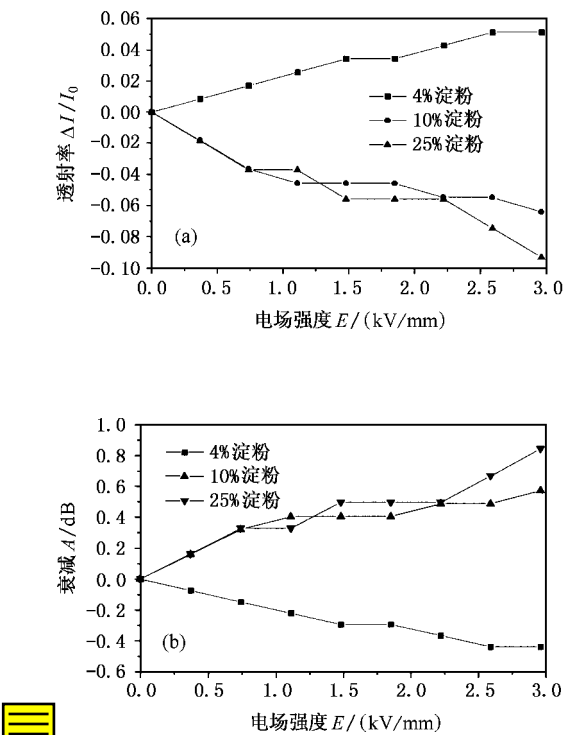


图7 淀粉 ER 流体透射率与衰减随电场强度变化曲线

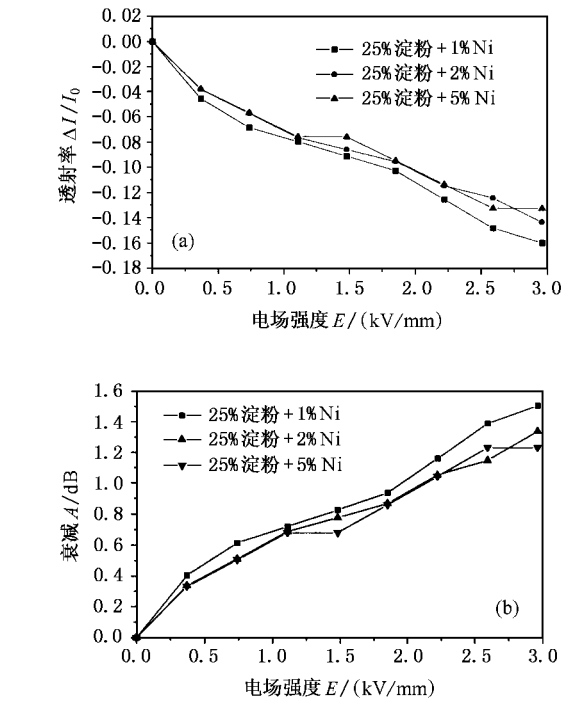


图8 淀粉/镍 ER 流体透射率与衰减随电场强度变化曲线

图 9 为两种试样的各种浓度在测量中对应所加最大电场时的透射率与体系介电常量(或浓度)的关系. 可以看出随介电常量增大,微波透射量先是朝正向增大,后转向负向增大. 说明电流变液介电常量是引起变化的重要原因. 根据表 1 中介电常量测量结果,可以看出实验结果与由理论推导出的微波透射率和电流变液介电常量的关系符合较好.

实验过程中还发现随电流变液浓度的变化,微波透射强度随外电场变化可逆性不同. 在较低浓度下,有可逆变化,但是在浓度较高,尤其是含有镍粉的电流变液,几乎没有可逆性变化. 另外即使是低浓度的电流变液,其可逆性的变化也不是即时的,而是随外电场的变化有滞后性,且随浓度的增加,滞后时间也在延长. 在外电场作用下,微波透射强度变化的滞后性,也说明电流变液体系内部结构的变化是导致其介电行为变化的原因之一.

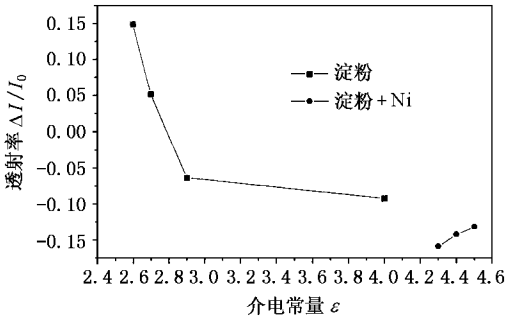


图9 电流变液微波透射率随体系介电常量变化曲线

5 结 论

1. 对各向同性($E = 0$)和各向异性($E \neq 0$)电流变液体系微波穿透的理论模拟表明,当体系介电常量小于其所处环境(即容器)时,随介电常量的增大,微波透射率增大,反之则减小. 无外电场时,穿透率仅与浓度有关,而施加电场后,穿透率由浓度和电场引起介电常量的变化共同决定,且比无外电场时要高.
2. 对淀粉硅油及淀粉镍粉双分散相电流变液的实验研究表明,当电流变液浓度较低,即其介电常量小于环境时,随外电场的增大,微波透射量增大(透射率是正向增大);而当浓度较高,即其介电常量大于环境(即容器)的介电常量时,随外电场的增大,微波透射量减小(透射率是负向增大).
3. 电流变液的浓度影响微波透射率或衰减的变

化方向,而电场强度的变化可调控这种变化的幅度.

4. 实验表明,随外电场的变化,微波透射量变化

具有一定的可逆性及延时性,可作为结构改变导致

穿透率可调的起因之一.

[1] T. Halsey, *Science*, **258**(1992), 761.

[2] J. P. Coulter, K. D. Weiss, J. D. Carlson, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **4**(1993), 248.

[3] J. S. Leng, Y. J. Liu *et al.*, *Applied Composite Materials*, **2**(1995), 59.

[4] O. O. Park, *J. Rheology*, **32**(1988), 511.

[5] P. M. Adriani *et al.*, *Phys. Fluids*, **31**(1988), 2757.

[6] Y. Otsubo, K. Edazuya, K. Akashi, *J. Colloid and Interface Science*, **177**(1996), 250.

[7] J. Y. Wu, L. K. Shen, L. W. Zhou, Nonlinear Optical Study of ER Fluids, the 5th International Conference on Electrorheological Fluids, Magnetorheological Suspensions and Associated Technology, (1995), p. 698.

[8] X. P. Zhao, C. R. Luo, Z. D. Zhang, *Opt. Eng.*, **37**(1998), 1589.

[9] X. P. Zhao, Y. Ma, C. Z. Qu, *Acta Photonica Sinica*, **28**(1999), 846(in Chinese) [赵晓鹏、马云、渠长振, *光子学报*, **28**(1999), 846].

[10] X. P. Zhao, Q. Y. Zhang, C. Z. Qu, *Acta Photonica Sinica*, **28**(1999), 1071(in Chinese) [赵晓鹏、张秋艳、渠长振, *光子学报*, **28**(1999), 1071].

[11] X. J. Qin, X. P. Zhao, *Infrared Technology*, **18**(1996), 34 (in Chinese) [秦晓君、赵晓鹏, *红外技术*, **18**(1996), 34].

[12] M. R. Feinsteink, JHL/APL Report FIB 2, 1991, p. 910—912.

[13] K. M. Blackwood *et al.*, *Electrorheological Fluids*, ed. by R. Tao, G. D. Roy (World Scientific, Singapore, 1994), p. 3.

THE ADJUSTABLE CHARACTER OF MICROWAVE

TRANSMITTANCE IN ER FLUID^{*}

ZHAO XIAO-PENG FAN JI-JUN GAO XIU-MIN CAO CHANG-NIAN

(*Institute of Electrorheological Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

(Received 2 December 2000 ; revised manuscript received 21 January 2001)

ABSTRACT

According to the experimental facts that the structure and the dielectric property of electro-rheology (ER) fluid change under the external electric field, a model of microwave transmittance in ER fluid was established, and the formula of transmittance was given also. Theoretical simulation shows that the transmittance of microwave increases with increasing electric field, if the dielectric constant of ER fluid is greater than that of its container. On the contrary, it decreases with the electric field. Our experiment results revealed that the microwave attenuation in ER fluid could be adjusted by changing the external electric field. We think the change of the structure and dielectric property of ER fluid are the main cause of the fact that the transmittance could be adjusted under the external electric field.

Keywords : ER fluid, dielectric property, microwave transmittance

PACC : 4660H, 7720, 7730, 7870G

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 59832090), and the Special Foundation for Young Scientists of China (Grant No. 50025207).